

녹색성장연구 2009-14

기후변화 연동 4대강 유역 지하수 함양 및 이용가능량 산정 기법 개발

이정호 | 전성우 | 이명진 | 홍현정

🔥 연구진

연구책임자 이정호(한국환경정책·평가연구원 연구위원)
참여연구원 전성우(한국환경정책·평가연구원 연구위원)
이명진(한국환경정책·평가연구원 연구위원)
홍현정(한국환경정책·평가연구원 연구위원)

🔥 산학연정 연구자문위원

김태희(한국지질자원연구원 선임연구원)
문유리(한국환경정책·평가연구원 책임연구원)
백운석(환경부 토양지하수와 과장)
신경희(한국환경정책·평가연구원 책임연구원)
원중선(연세대학교 지구시스템과학과 교수)
최상일(광운대학교 사회환경시스템공학과 교수)
함세영(부산대학교 지질환경과학과 교수)
황상일(한국환경정책·평가연구원 연구위원)

© 2009 한국환경정책·평가연구원

발행인	박태주
발행처	한국환경정책·평가연구원 서울특별시 은평구 진흥로 290 전화 02)380-7777 팩스 02)380-7799 http://www.kei.re.kr
인쇄	2009년 12월 26일
발행	2009년 12월 31일
출판등록	제17-254호
ISBN	978-89-8464-420-5

값 15,000원

서 언

2009년 12월 덴마크 코펜하겐에서 개최된 제15차 유엔기후변화협약 당사국 총회에서는 세계 각 국가별 구체적인 온실가스 배출 감축에 대해 수많은 논쟁과 토론이 벌어졌습니다. 결국 2년 전 체결되었던 발리협약의 이행은 실패하였으나, 기후변화의 심각성 및 책임성을 이전보다 가일층 배가시키는 계기가 되었음은 분명합니다. 이는 곧 기후변화가 비단 지구환경의 변화에 국한되지 않은, 향후 세계의 정치, 경제, 사회, 산업 등 전 분야에 걸쳐 구조적인 변혁을 조속히 실시해야 한다는 우려를 전세계가 모두 공감하게 되었다는 데 의의가 있습니다. 지구온난화로 대표되는 기후 변화는 극대홍수 및 극대가뭄의 빈번한 발생으로 인한 인류사회의 효과적 대응 및 적응을 실시하지 않으면 안되는 상황을 초래하였고, 이에 가장 빠른 대응책을 마련해야 하는 분야로 '수자원 및 이수'를 지적하는 데는 논란의 여지가 있을 수 없습니다.

우리나라도 이러한 여건 변화에 부응하여 국가 차원의 수자원관리 패러다임을 전반적으로 개편할 필요가 있습니다. 즉, 미래 우리나라의 기후사상 변화 예측 결과를 중-장기적 수자원 이용 및 관리에 관한 국가 제반 계획에 명확히 반영해야 하며, 이에 지하수 수자원도 포함됩니다. 현재 우리나라의 연간 지하수 사용량은 약 37억 톤으로서, 전체 수자원 사용량의 10% 정도에 불과하나, 국내 전체 지하수 이용 가능량의 35%를 상회하고 있으며, 지역적 이용량의 차이가 큰 특징이 있습니다. 따라서, 기후변화에 따른 강우 사상이 변할 경우, 계절적 또는 지역적으로 지하수 수자원이 적절한 이용이 난이할 수 있으며, 이는 2009년 초 동절기 가뭄에서 그 폐해를 충분히 겪었는 바, 기후변화 예측 결과를 정확히 반영한 지하수 수자원 함양의 계절적-지역적 예측은 수자원의 부가적 확보 차원을 벗어나, 미래 기후변화 적응 측면에서도 시급히 수행하여야 할 과제입니다.

본 연구원에서는 이러한 상황을 충분히 감안, 녹색성장정책연구 물안보 분야 5대 과제 중 지하수 잠재량 추정에 대한 연구 과제를 포함하였으며, 향후 2100년까지의 기후 사상 변화 양상 및 그에

따른 지하수 함양량 변화를 시-공간적으로 산정할 수 있는 기법 개발 연구를 집중적으로 실시하였습니다. 본 연구결과는 향후 지하수 수자원 이용 및 관리에 관한 국가 차원의 계획수립 등에 선도적인 자료로 이용될 것으로 예상되며, 군 단위 이하 기초자치단체에서의 효율적 지하수 이용량 산정 및 효과적 관리방안 마련에 있어서도 중요한 연구자료로 활용될 것으로 기대합니다.

끝으로, 폭주하는 업무 속에서도 금번 녹색성장정책연구 및 연구보고서 집필에 최선을 다해주신 국가기후변화적응센터 이정호 연구위원, 전성우 연구위원, 이명진 연구원, 환경전략연구본부 물순환 연구실 홍현정 연구원과 본 연구의 내용에 대한 아낌없는 조언을 보내주신 내·외부 연구자문위원 여러분께 심심한 감사를 드립니다.

2009년 12월

한국환경정책·평가연구원

원장 박 태 주

국문요약

전지구적으로 발생하는 기후변화는 강수, 함양 및 유출, 저장, 증발산으로 연결되는 물순환 평형의 균형을 파괴하고 있으며, IPCC (2007)는 미래 기후변화로 인한 인간 환경의 영향 중 가장 취약한 부문으로 기후시스템 변화로 인한 강수 패턴의 변화와 그로 인한 가용 수자원의 부족을 최우선으로 선정하고 있다. 수자원의 큰 축을 차지하는 지하수는 하천과 호소 같은 지표수 수자원과 직접적인 상호작용을 통해 기후변화와 관련성을 가지며, 강수의 함양 과정을 통해 간접적인 영향을 받는다. 따라서, 기후변화가 지하수 수자원에 미치는 영향을 정량화하기 위해서는 신뢰성이 충분한 주요 기후 변수 변화 예측뿐만 아니라 강수의 지하 함양에 대한 정확한 예측이 동시에 수반되어야 한다.

이에 본 연구에서는 한반도 기후변화 예측 결과를 연동한 강수의 지하 함양량 산정 기법을 개발하여, 기존 지하수 함양량 산정 기법과의 차이 및 미래 우리나라 기후 사상의 변화에 따른 지하수 함양 양상을 예측, 국내 중 · 장기적 지하수 수자원 이용 계획 및 정책에 반영할 수 있는 도구를 제시하고자, 선행연구 분석, 기후모델 연동 지하수 함양 및 이용가능량 산정 방법론 개발, Pilot Test Site 적용 및 결과 검증을 거쳐 다음과 같은 결과 및 결론을 도출하였다.

첫째, 기후변화 시나리오의 종류와 현황, IPCC에서 제공하고 있는 배출 시나리오의 특징 등을 종합적으로 분석하고, 기후변화 예측 결과와 지하수 함양량 및 이용량 산정을 함께 고려한 선진 사례를 분석하여, 기후변화에 대응한 미 계측지역, 즉 광역 지역에 대한 지하수 함양량 산정기법의 개발 필요성을 도출하였다.

둘째, 기후변화 모델의 구동을 통한 국내 미래 기후변화 예측 결과를 바탕으로 하여, 이를 연동할 수 있는 지하수 함양 및 이용가능량 산정 방법론은 설정하였다. 기후변화 시나리오는 일관성, 타당성, 대표성 등의 사항을 고려하여 지역기후모델을 기반으로 한 SRES(Special

Report on Emission Scenario)의 A1B 시나리오에 따른 한반도 기후변화 시나리오를 선택, 연구 지역에 최적화될 수 있도록 통계적 다운스케일링을 실시하여 미래 기후변화 예측을 실시하였으며, 지하수 함양량 산정을 위한 구동 모델은 오랜 검증을 통해 토양층 내를 강우의 침투기작을 물리적으로 잘 반영하고 있는 HELP3를 선정하였다. HELP3 모델을 근간으로 지리정보와 완전 연계가 가능하도록 모델의 요구에 맞게 기후, 토양특성, 토지피복, 유출곡선지수 등의 물리적 입력 DB를 공간화하여 구축하도록 방법론을 설정하였다.

셋째, 개발된 지하수 함양량 방법론을 실제로 적용하기 위해 칠곡, 구미, 대구의 일부 유역을 대상으로 pilot test를 실시하였다. 먼저, 연구지역의 기온 및 강수량은 1970년부터 2000년까지의 평균온도 11.69℃, 누적강수 1,018.04mm, 2001년부터 2030년까지 평균온도 12.59℃, 누적강수 981.04mm, 2031년부터 2050까지 평균온도 13.79℃, 누적강수 1,222.49mm, 2051에서 2100년까지 평균온도 15.51℃, 누적강수 1,192.03mm로 추정되었다. 지하수 함양량 모델링 결과, 기후변화에 따른 연구대상 지역의 지하수 함양률의 시간적 변화는 1970-2000년은 26.19%, 2001-2030년은 25.87%, 2031-2050년은 27.33%, 2051-2100년은 25.45%로 산정되었다. 본 수치는 국가지하수 관측망 계측치로 추정된 최대 지하수 함양률보다 4~5% 가량 높은 값으로, 연구 지역의 토지 피복 양태와 침투율이 매우 높은 고투수성 토양 분포가 주된 원인으로 판단된다. 전반적으로 지하수 함양률은 강수량의 변화에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 유출곡선지수의 변동에 의한 영향은 크지 않은 것으로 판단되나, 지수값의 증가에 따라 함양률이 점차적으로 감소하다가 시가화 지역에 가까운 불투수 지역에서는 함양률이 급격히 감소하는 양상을 나타내었다. 연구 지역의 토지이용 형태와 종류, 식생분포, 토양의 수리학적 특성을 모두 결합한 공간지리정보 조합도를 작성, 기후변화에 따른 연구지역 지하수 함양률 변화의 공간분포를 살펴본 결과, 유출곡선지수가 큰 시가화 지역에서의 지하수 함양은 강수량 변화에 상관없이 매우 낮으며, 기후 사상이 변화하는 2031년 이후에는 함양률이 저하되는 면적이 현재에 비해 다소 증가되는 양상을 나타내었다.

본 연구는 주로 기후변화 예측치를 연동한 지하수 함양량 산정 방법론 및 모델 개발에 중점을

두었으며, 모델을 적용한 시범 지역 역시 유역 전체를 대표할 수 없기 때문에, 국내 지하수 수자원 관리에 관한 구체적인 방안을 수립하기는 어려우나, 지하수 함양량 정보를 지역에 상관없이 시-공간적으로 제공할 수 있는 근간을 마련하였기 때문에, 본 연구결과를 토대로 국내 전 유역의 지하수 이용 및 개발 가능량에 대한 근미래 및 장기적 목표설정이 용이할 것으로 판단된다. 차년도의 지속적인 연구를 통해 소규모 행정구역 단위에 있어서도 지하수 개발·사용량 목표 설정 및 제한, 가뭄 등 용수 부족 발생시 적정 지하수 개발 위치 선정 등 지하수 수자원 이용과 관리에 대한 행정 목표를 자체적으로 수립할 수 있는 기본적 도구를 제공할 수 있으며 지하수 수문 미계측 유역에서 대규모 개발사업에 따른 지하수 이용 가능량 예측에 필수적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.



제1장 서론	1
1. 연구의 배경과 목적	2
2. 연구의 내용과 범위	2
3. 연구의 내용 및 방법	4
제2장 선행 연구 분석	7
1. IPCC 기후변화 시나리오 모델 변천	8
가. 기후변화 시나리오 개요	8
나. IPCC 기후변화 시나리오 변천	16
2. 기후변화 고려 지하수 함양량 산정 관련 국외 연구동향	29
3. 기후변화 고려 지하수 함양량 산정 관련 국내 연구동향	31
제3장 기후모델 연동 지하수 함양 및 이용가능량 산정방법론 개발	33
1. 적정 기후모델의 선정 및 검증	34
가. 과거 기상통계, GCM 및 RCM의 종류에 따른 시나리오 추출	34
나. 기후변화 시나리오에 따른 예측결과의 신뢰수준	50
다. 기후변화 대응 지하수 함양 및 이용 가능량 산정을 위한 적정 기후모델의 선정	53
2. 적정 지하수 수문 모델의 선정	54
가. 지하수 함양 영향 요소	54
나. 기존 수문 모델의 총괄적 장단점 및 입력인자 비교	57
다. 지하수 유동 모델링과 GIS 연계 방법론	68
라. 지리정보 연계성 검토	69
마. 모델 우선순위 선정	71
3. 연동 방법론 개발	74
가. 물리적 입력자료 구축	74
나. 산정 기법 개발	79



다. 모델 흐름도 작성	81
제4장 Pilot Test Site 적용 및 결과 검증	83
1. Pilot test 시범지역 적용	84
가. 소유역 선정 및 공간지리정보 확보	84
나. 관측자료 및 공간지리정보 구축	98
2. 기후변화 연동 지하수 함양량 산정	103
가. 장래 물수지 분석	103
나. 기후변화에 따른 물수지 변화 예측	105
다. Combination Map 구성을 통한 유출곡선지수(Curve Number) 분류	110
라. 지하수 함양률 변화 분석	114
마. 실제 계측치와의 비교	118
제5장 결 론	121
1. 요약 및 결론	122
가. 지하수 함양률 산정	122
나. 모델 한계점	123
다. 정책적 적용 방향	124
2. 차년도 연구계획	126
가. 개발 방법론 및 모델 튜닝	126
나. 연구지역 확장 및 공간지리정보의 충분한 확보 및 분석	127
다. 연구지역 확대에 따른 및 지하수 함양량 재산정	127
참고문헌	129
Abstract	135



표 2-1. 기후시나리오 작성에 필요한 영향분야별 기상요소	9
표 2-2. 과거 사례 유추에 의한 시나리오 작성사례	12
표 2-3. 감도분석적 방법에 의한 시나리오 작성사례	13
표 2-4. 기후모형의 결과에 기초한 시나리오 작성사례	14
표 2-5. 다양한 기후시나리오 연구방법의 장단점	15
표 2-6. IPCC Scenarios 1992 요약	18
표 2-7. SRES의 정량화 개요	26
표 2-8. SRES에 있어서 정량화에 대한 개요	29
표 3-1. 현재 기후자료의 형태 및 출처	35
표 3-2. IPCC 4차 평가보고서에 수록된 대기-해양 대순환모형 목록	42
표 3-3. 현재와 비교한 21세기말의 지구표면 온도 차이와 해수면 차이	48
표 3-4. 기후시나리오의 종류와 장단점	49
표 3-5. MOHISE 모델의 구성 및 주요 기능	67
표 3-6. 지하수 모델링을 위한 자료 및 단계	71
표 3-7. 지하수 함양량 산정에 있어서 SWAT 모형과 HELP 모형의 비교	73
표 3-8. HELP와 SWAT 모형을 이용한 연구동향	74
표 4-1. 연구지역 현황분석 자료	84
표 4-2. 연구지역 임상도 경급 분포	86
표 4-3. 연구지역 임상도 영급 분포	86
표 4-4. 연구지역 임상도 소밀도 분석	86
표 4-5. 연구지역 임상도 수종 분포	87
표 4-6. 연구지역 지질도 분석	89
표 4-7. 분류항목별 토지피복 면적 및 비율	93
표 4-8. LAI와 식생지수간 관계식	95



표 4-9. 토지피복 분류별 식생지수 분포	97
표 4-10. 토지피복 분류별 식생지수 분포	98
표 4-11. 기후변화에 따른 기온 및 강수량 변화	99
표 4-12. 기후변화에 따른 실제 증발산량 변화	106
표 4-13. 기후변화에 따른 표면 유출량 변화	106
표 4-14. 기후변화에 따른 잠재 증발산량 변화	106
표 4-15. 기후변화에 따른 전체 유출량 변화	107
표 4-16. 기후변화에 따른 평균 토양수분 변화	107
표 4-17. 수문학적 토양분류	110
표 4-18. 수문학적 토양분류별 특성	111
표 4-19. 피복분류항목에 대한 CN값	113
표 4-20. 시기별 강우량, 함양률, 함양량 및 이용가능량	115
표 4-21. 기후변화 및 CN값에 따른 지하수 함양률 분석(%)	116
표 4-22. 국가지하수 관측망 지하수 함양률 결과	119



그림 2-1. SRES 개념도	20
그림 2-2. 표준화된 40개 SRES CO ₂ 시나리오	24
그림 2-3. 표준화된 40개 SRES SO _x 시나리오	26
그림 2-4. 시나리오별 지표면 온난화 경향	28
그림 3-1. 기후변화 영향연구를 위한 고해상도 모델링의 타당성 검토 방법	37
그림 3-2. IPCC에서 제공하는 대표적 관측자료인 CRU Global Climate Data Set	38
그림 3-3. CCSR-NIES GCM A2 시나리오의 2005년 08월 평균기온	40
그림 3-4. 대기해양결합모델에 의한 지표면 기온의 예측	41
그림 3-5. SRES를 반영한 다양한 기후모형	41
그림 3-7. 20세기 지표온도의 변화	51
그림 3-8. SWAT 모형도	60
그림 3-9. MOHISE 모델 구조	66
그림 3-10. GIS와 지하수 모델과의 통합	69
그림 3-11. 지하수 모델링	70
그림 3-12. 토양조직 분류에 따른 토양수분보유 변수들과의 관계	77
그림 3-13. 산정기법 개발 흐름도	81
그림 3-14. 모델 흐름도	82
그림 4-1. 연구지역	85
그림 4-2. 임상도 등급	88
그림 4-3. 임상도 영급	88
그림 4-4. 임상도 소밀도	88
그림 4-5. 임상도 임상구분	88
그림 4-6. 지질도	90
그림 4-7. 토양도	90



그림 4-8. 도시개발에 따른 불투수면 증가에 의한 유출계수 변화	91
그림 4-9. 불투수지표면	93
그림 4-10. 토지피복도	93
그림 4-11. 식생지수	96
그림 4-12. LAI	97
그림 4-13. 기후변화에 따른 온도 변화	100
그림 4-14. 기후변화에 따른 강수량 변화	100
그림 4-15. 1970-2000년 기온분포	101
그림 4-16. 2001-2030년 기온분포	101
그림 4-17. 2031-2050년 기온분포	101
그림 4-18. 2051-2100년 기온분포	101
그림 4-19. 1970-2000년 강수량분포	102
그림 4-20. 2001-2030년 강수량분포	102
그림 4-21. 2031-2050년 강수량분포	102
그림 4-22. 2051-2100년 강수량분포	102
그림 4-23. BROOK90 모형에 기반한 일단위 물수지 모형의 개념도	103
그림 4-24. 물수지 모형의 개념도	104
그림 4-25. 실제 증발산량 변화 그래프	107
그림 4-26. 유출량 변화 그래프	108
그림 4-27. 잠재 증발산량 변화 그래프	108
그림 4-28. 전체 유출량 변화 그래프	109
그림 4-29. 평균 토양수분 변화 그래프	109
그림 4-30. 수문학적 토양 분류	112
그림 4-31. CN	112
그림 4-32. 지하수 함양률(%) 분석	115
그림 4-33. 1970-2000년 지하수 함양률	117
그림 4-34. 2001-2030년 지하수 함양률	117
그림 4-35. 2031-2050년 지하수 함양률	117



그림 4-36. 2051-2100년 지하수 함양률	117
그림 4-37. 2004년 낙동강 유역 국가지하수 관측망 위치도	119



제1장

서론

1. 연구의 배경과 목적

본 연구의 목적은 한반도 기후변화 예측 결과를 연동한 강수의 지하 함양량(recharge) 산정 기법을 개발하여, 기존 지하수 함양량 산정기법과의 차이 및 미래 우리나라 기후 사상의 변화에 따른 지하수 함양 양상을 예측, 국내 중·장기적 지하수 수자원 이용 계획 및 정책에 반영할 수 있는 도구를 제시하는 데 있다.

2. 연구의 배경 및 필요성

지구의 담수 수자원은 강수(precipitation), 함양 및 유출(recharge & discharge), 저장(reservoir), 증발산(evapotranspiration)으로 연결되는 물순환 평형에 의거하여 그 양이 결정되며, 인류는 물순환에 의한 결과물인 하천수, 호수수, 지하수 등의 담수를 이용하여 생활을 영위한다. 물순환계의 유지에 필요한 다양한 구성요소 및 영향요소 간 상호작용을 정확하게 이해하는 것은 안전하고 청정한 수자원의 질적 우수성 및 지속가능성을 보장하고 최적의 수자원 유역관리에 대한 본질임을 인식할 필요가 있다. 그동안 물순환계 내에서 지표수와 지하수 시스템은 물 흐름에 대한 물리적 이질성 및 통합적 고려시 필요한 전산 해석의 난이함 증가로 인해 서로 별개의 시스템으로 간주되어 왔으나, 두 시스템은 함양과 유출이라는 과정을 통해 상호간 내재적으로 연결되어 있으며, 지표수-지하수 간의 상호작용은 수문학적 순환의 근본을 구성한다.

전자구적으로 동시다발적인 경제발전은 산업의 각 부문, 특히 농업, 공업, 가정, 위락 부문에서 물 사용의 급격한 증가를 초래하였으며, 이로 인해 청정하고 안전한 자연 음용수 수원의 확보는 점차 어려워지고 있는 실정이다. 특히 도시지역의 면적 및 인구 증가는 기존 물 공급체계의 능력과 지속가능성에 위협이 되고 있을 뿐만 아니라 향후 오염에 대한 가능성도 매우 높다. 더욱이, 산업화와 관련된 인류의 모든 활동이 기후변화로 인해 전지구적 수자원에 지대한 영향을 끼치는 것은 주지의 사실이다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007)는 미래 기후변화로 인한 인간 환경의 영향 중 가장 취약한 부문으로 '기후시스템 변화로 인한 강수 패턴의

변화와 그로 인한 가용 수자원의 부족'을 최우선으로 선정하고 있다. 즉, 온실가스와 에어로졸의 대기중 농도 증가, 산림 남벌 및 도시화 수준의 증가는 지구의 기후 상태에 지속적인 악영향을 끼치게 되며, 미래에는 육상 물순환계의 평형 유지에도 문제가 야기될 수 있음을 내포하고 있다. 국내의 경우, 지난 100년간 주요 6대 도시의 기온은 평균 약 1.7℃ 정도 증가하였으며, 이로 인한 동절기 기간의 감소 및 집중호우 강도 증가가 원인이 되어 최근 10년 사이에 약 19% 정도 증가한 것으로 확인되었다(국립기상연구소, 2009; 박선기 등, 2008). 또한 기후변화로 인한 극한 기후 현상 중 온난화와 관련된 기후지수(예: 온난야, 여름일수 등) 발생빈도는 증가하고, 한랭화 관련 기후지수(예: 한랭야, 한파일수, 서리일 등)의 발생은 감소하고 있다. 특히 여름철의 경우, 극한 고온일수와 극한 강수량이 증가하여 점차 집중호우와 고온현상이 반복되는 등 기후변화로 인한 한반도 일대 물순환계의 변화는 이미 진행 중에 있는 것으로 판단할 수 있다. 지하수 수자원의 이수적 측면에서 기후변화와의 연관성 여부에 대한 발표도 최근 들어 이루어지기 시작했다. 김규범(2009)과 고정석(2009)은 금강 및 낙동강 수계의 갈수기 유지 유량의 약 30~40%가 지하수 기저유출에 의한 것임을 밝혀내었고, 가뭄 등 극한 기후 사상 일수가 증가할수록 기저 유출의 증가 및 그에 따른 지하수 이용에의 영향이 나타날 것으로 예견하였으며, 김규범(2008)은 전국적 국가지하수관측망의 지난 10년간 지하수위 감소 추세로 볼 때, 향후 20년간 약 0.58m의 지하수위 감소가 예측되며 이에 대한 이유로 과다 지하수 채수 및 기후변화로 인한 함양량 감소임을 정성적으로 추측하였다.

기후변화에 따른 주요 기후변수(예: 온도, 강수, 증발산 등)의 변화는 지표수 수자원의 형상 및 이용에 가시적인 영향을 미치며, 그 영향의 정도에 따라 적절한 대응책을 마련할 수 있는 반면, 기후 변수의 변화와 지하수 수자원간의 관계는 보다 복잡하며 거의 알려진 바 없다. 전술하였 다시피 지하수 수자원은 하천과 호소 같은 지표수 수자원과 '직접적인'상호작용을 통해 기후변화와 관련성을 가지며, 강수의 함양 과정을 통해 간접적인 영향을 받는다. 따라서, 기후변화가 지하수 수자원에 미치는 영향을 정량화하기 위해서는 신뢰성이 충분한 주요 기후 변수 변화 예측뿐만 아니라 강수의 지하 함양에 대한 정확한 예측이 동시에 수반되어야 한다. 현재 우리나라에서

사용되고 있는 강수의 지하 함양량 산정에 대한 공인자료는 국토해양부의 지하수관리기본계획(2007)상에 명시된 유역별 지하 함양률 자료가 유일하다. 당해 계획의 지하수 함양률은 우리나라의 대수층 및 유역 수자원의 물리적 조건과 국내·외적으로 범용성이 큰 지하수 함양률 계산방법을 충분히 반영하여 산정한 것으로서, 이전 계획시 산정한 함양률에 비해 정확성은 향상된 것으로 평가받고 있으나, 월별 강수의 차이, 소유역별 함양 조건의 다양성 및 미래 기후변화에 따른 지하 함양률의 변화 등을 반영하지 못하고 있다.

현재까지의 상황으로 볼 때, 기후변화에 대한 수자원의 취약성 인식 및 정책적 접근이 점진적으로 증가하는 데 반해 우리나라에서 기후변화에 따른 수자원에서의 영향에 대한 정책적, 과학적 연구, 특히 지하수에 대한 연구는 거의 전무하다고 볼 수 있다. 기후변화에 대한 우리나라 물순환계의 전반적 변화는 이미 예견되어 있는 상황이며, 물순환계의 한 축을 구성하고 있는 지하수 수자원이 과연 변화된 물순환계에 어떤 식으로 적응하여야 하며, 향후 지하수 수자원의 이용 정책에 어떤 식으로 반영하여야 하는 문제를 단계적으로 해결하기 위해서는 미래 우리나라의 기후조건 변화를 예측하고 이의 결과를 반영하여 지하수 함양량 및 그에 따른 이용 가능량을 재산정하는 것이 최우선 과제라 할 수 있으며, 이는 우리나라의 전반적인 물관리 및 물안보 체제 구축의 한 축을 차지할 수 있다는 점에서 그 중요성 및 연구의 시급성이 요구된다.

3. 연구의 내용 및 방법

본 연구에서는 아래와 같이 크게 세 가지 세부 내용을 포함하고 있다.

첫째, 그동안 국내·외에서 작성되어 사용되었던 기후변화 시나리오의 종류와 현황, IPCC에서 제공하고 있는 배출 시나리오의 특징 등을 종합적으로 분석하고, 기후변화 예측 결과와 지하수 함양량 및 이용량 산정을 함께 고려한 국내·외 관련 연구결과를 분석하여 기후변화 예측과 지하수 함양과의 전반적 상관관계 및 최신 연구 동향을 살펴보도록 한다.

둘째, 기후변화 모델의 구동을 통한 국내 미래 기후변화 예측 결과를 바탕으로 하여, 이를 연동할 수 있는 지하수 함양 및 이용가능량 산정 방법론을 설정한다. 이를 위해서, 과거 기상통계,

아시아 국가 일원에 적절한 GCM 및 RCM 종류에 따른 기후변화 시나리오를 추출하고, 분포형 수문모델 위주의 적정 지하수 수문 모델을 객관적인 기준 및 국내 가용자료의 입력 실정에 알맞게 결정하고, 주로 공간지리정보 연동을 중심으로 한 기후변화 예측 결과 연계 지하수 함양량 산정방법 흐름도 및 데이터 구축 방안, 자료의 무결성 확보 및 불연속성 최소화를 위한 기법을 도출한다.

셋째, 개발된 지하수 함양량 방법론을 실제로 적용하기 위한 pilot test를 실시한다. 방법론 적용을 위한 시범 지역은 연구의 주제에 알맞도록 국내 4대강 중권역 이하 유역을 선정하되, 가용 공간지리정보가 충분하게 확보되어 있는 지점을 선정한다. 지역 선정 이후 유역의 개황관측 자료 및 공간지리정보를 확보하고 방법론에 의거하여 미래 기후변화 예측 결과를 반영한 시범지역 내 지하수 함양률 변화를 시공간적으로 산정하고, 기존 산정 결과와의 비교를 통해, 향후 기후변화를 고려한 국내 지하수 수자원의 관리 방안 수립을 위한 방향을 제시하도록 한다.



제2장

선행 연구 분석

1. IPCC 기후변화 시나리오 모델 변천

가. 기후변화 시나리오 개요

기후변화의 영향을 평가하기 위해서는 영향 예측의 목적에 적합한 모형을 구축하고, 적절한 방법으로 장래의 기후시나리오를 설계하여 기후변화에 따른 영향평가를 실시하게 된다. 기후시나리오의 작성을 위해서 여러 가지 기후 시나리오의 현황, 기후모형에 의한 기후변화 예측현황 등을 정리하고, 시나리오 작성 시의 문제와 현재 상황에서 고려 가능한 시나리오의 검토가 필요하다.

기후변화로 인한 영향을 예측하고 평가하기 위해서는 장래 기후조건에 관한 합리적 예측과 각 영향평가 항목에 대한 모형의 설계 및 통합적인 영향평가 과정이 요구된다. 기후변화 영향 연구에 주로 이용되는 기후예측 방법으로는 첫째, GCM이나 RCM 등 기후모형의 결과를 이용하는 방법과 둘째, 감도분석적 방법 셋째, 유사법에 의한 방법이 있다.

현재 IPCC의 Data Distribution Center에서는 기후변화에 의한 일관된 영향연구를 위해 SRES에 의한 수개의 GCM 결과들을 제공하고 있다. 기후모형에 의한 GCM의 결과들은 장기간에 걸친 월단위의 다양한 기후요소들을 제공하나 공간해상도가 커 한국과 같은 지역연구에 충분한 공간정보를 제공하지 못하고 있다. 따라서 한국의 기후변화 영향 예측연구에서는 공간해상도가 향상된 RCM의 연구결과와 통계적인 방법에 의해 해상도가 향상된 GCM의 결과를 이용하거나 감도분석적인 방법을 이용한 연구 방법이 제안될 수 있다. <표 2-1>은 영향분야별 기후시나리오 작성에 필요한 기상요소를 정리한 것이다.

표 2-1. 기후시나리오 작성에 필요한 영향분야별 기상요소

분야	영향 항목	예상 영향	영향평가에 필요한 기상 요소					기타	요구시간 해상도	공간 해상도
			강수	기온	습도	일사	풍속			
수자원	물공급	댐의 저류량 변화	○	○	○	○	○	적설량	10일 · 월 · 년	20×20km
		토양 등의 저류량 변화	○	○	○	○	○	적설량		
	물수요	농업용수 수요량의 변화	○	○	○	○	○	-		
		도시용수 수요량의 변화	○	○	○	○	○	-		
	기타	호소 · 하천 등의 수질변화	○	○	-	-	-	-		
		수온 변화	○	○	-	○	-	-		
삼림	식립수종	재목의 성장 변화	○	○	-	-	-	-	년	지역별
		재질의 변화	○	○	-	-	-	-	년	
산업 · 에너지	상수도	물의 수요 변화, 물의 공급량 변화	○	○	○	○	○	적설	10일 · 월 · 년	
	하수도배수	바다나 하구의 배수효율 저하	-	-	-	-	-	해수면	월 · 년	
	전력선 · 통신선	강풍에 의한 절단	-	-	-	-	○	강풍과 같은 극단적 현상	시간	
	에너지 공급	에너지 수요변화 발전소의 효율저하 발전소 · 석유정 제시설의 침수	○	○	○	○	-	해수온도	시간 · 일 · 월 · 년	

표 2-1. 기후시나리오 작성에 필요한 영향분야별 기상요소(계속)

분야	영향 항목	예상 영향	영향평가에 필요한 기상 요소						요구시간 해상도	공간 해상도
			강수	기온	습도	일사	풍속	기타		
건강·시민생활	사망률		-	○	-	-	-	-	년	지역별
	심혈관계질환	발병률의 변화	-	○	-	-	-	-	년	
	흉혈관계질환	발병률의 변화	-	○	-	-	-	-	년	
	호흡기계질환	발병률의 변화	-	○	-	-	-	-	년	
	열중병	발병률의 변화	-	○	-	-	-	-	년	
	수매개성 감염병	콜레라 발병률의 변화	-	○	-	-	-	-	년	
	식물매개성 감염병	말라리아 발병률의 변화	○	○	-	-	-	-	년	
생태계	고산생태계	고산식물의 분포종에 대한 변화	-	○	-	-	-	-	계절	20×20km
	삼림생태계	식물·동물·곤충종의 변화	○	○	-	-	-	-	계절	
	자연초원, 습지	식물·동물·곤충종의 변화	○	○	-	-	-	-	계절	
	생물다양성		○	○	-	-	-	-	계절	
	생태계	산림 식생대이동 및 구조와 기능 변화	○	○	○	○	-	적설량	계절	20×20km
	산호초	산호초의 멸종	-	-	-	-	-	해수온도, 해수면	계절	

표 2-1. 기후시나리오 작성에 필요한 영향분야별 기상요소(계속)

분야	영향 항목	예상 영향	영향평가에 필요한 기상 요소						요구시간 해상도	공간 해상도
			강수	기온	습도	일사	풍속	기타		
방재·국토보전	수해	홍수	○	-	-	-	-	집중호우와 같은 극단적인 현상	분·시간	
		융설홍수	○	○	-	○	-		시간·일	
	교통시설(항만)	파랑·고조(高潮)·침수의 증대	-	-	-	-	-	해수면, 태풍 등 기상재해	시간·일·월·년	
	교통시설(도로·철도·공항)	연안입지시설의 침수	-	-	-	-	-	해수면	년	
	해안보전	파랑·고조(高潮)·침수의 증대	-	-	-	-	-	해수면, 태풍 등 기상재해	시간·일·월·년	
	치산(治山)치수(治水)	하천범람, 토사재해의 증대	○	-	-	-	-	태풍 등 기상재해	시간·일	
식료	토양환경	토양유기물의 분해 부족	-	○	-	-	-	-	월·년	20×20km
		토양침식량의 증가	○	-	-	-	-	강수강도	월·년	
		농지의 수몰, 지하수 상승, 염수화	-	-	-	-	-	해수면	월·년	
	수경재배	생산량의 변화	○	○	○	○	○	태풍 등 기상재해,	일·월·년	
	수경이외의 농작물	생산량의 변화	○	○	○	○	○	저온발생물, 이산화탄소농도	일·월·년	
	기타	해충의 분포, 발생종류의 변화	-	○	-	-	-	-	월·년	
잡초의 변화		○	○	-	-	-	-	월·년		

기후시나리오를 구축하는 여러 가지 방법이 있으며, 이러한 방법들은 <표 2-5>에 요약하여 각 방법의 장단점을 정리하였다. 우리나라의 경우 기후변화를 예측하는 시나리오가 작성되어 있지 않아 주로 외국의 사례를 정리하였다.

1) 유사법에 의한 시나리오

유사법에 의한 시나리오 작성방법은 장래의 기후와 유사하다고 판단되는 것과 관련짓는 방법이다. 이 시나리오의 작성방법으로는 공간적 유사법과 시간적 유사법이 있다.

공간적 유사법은 연구대상지역의 장래 예상되는 기후와 유사한 기후를 현재 가지는 지역과 연관짓는 방법이다. 예를 들어, 아이슬란드의 장래 예상되는 기후로 잉글랜드 북부를 대응하는 연구와 뉴욕의 장래 열사에 의한 사망률을 애틀랜타에 대응한 연구 등이 있다. 이 방법에서 평가 대상지역과 대응시키는 지역은 여러 가지 조건에서 공통성이 있다는 것을 전제로 하므로 제약이 큰 방법이다.

시간적 유사법은 장래에 발생할 기후변화를 과거의 기후 정보로부터 유추하는 것으로 고기후 유사법과 계측에 근거한 유사법의 두 가지 종류가 있다. 고기후 유사법은 장래 예상되는 기후와

■ 표 2-2. 과거 사례 유추에 의한 시나리오 작성사례

시나리오 작성방법	작성사례	내용
온난기와 냉한기의 비교에 의한 유추	건설성 관동지방건설국 (1993)	온난기(1955-1964)와 냉한기(1901-1910)의 강수량과 기온을 사용하여 기온 1℃ 상승기의 지역별 수자원 부족량을 추정
	건설성 토목연구소 댐부 수공수자원연구실 (1997)	온난기(1978-1987)와 냉한기(1904-1913)를 비교하여 평균기온 및 연평균 강수량의 차(온난기-냉한기)가 점차적으로 +1℃, 7.4% 낮아지는 것으로 나타났다. 이 두시기의 기온과 강수량의 실측치를 사용하여 기온차가 댐운용에 미치는 영향을 조사
과거의 고온사례에 의한 유추	Mori(1998) 森(2000)	1994년 여름 일본의 평균기온은 평년치보다도 1.8-2.0℃, 일조시간은 최대 평균치보다도 30-40% 길었다. 이 예를 온난화 때의 기후로 생각하고 수자원 부족량에 미치는 영향 등을 추정

유사성이 있다고 생각되는 과거의 기후를 관련짓는 방법이다. 이 방법을 사용할 경우 특히 주목받는 시대는 완신세 중기(약 5~6천년 전)와 최종간빙기(약 12~13만년전)이다. 이러한 시대는 지구의 평균기온은 현재와 비슷하거나 현재보다 높아 21세기에 예상되는 기온과 유사하다고 생각되고 있다. 그러나 과거 기후변화의 원인은 온실가스 증감에 의한 것과는 다르다. 이 때문에 과거 기후변화의 지역적·계절적 분포패턴이 반드시 미래의 변화와 부합된다고 말할 수 없는 한계를 가지고 있다.

2) 감도분석 목적의 점증시나리오(감도분석적 시나리오)

감도분석적 시나리오는 특정 기후요소의 값을 발생 가능한 범위 내에서 임의로 증가시키는 방법이다.¹⁾ 이 시나리오는 많은 연구에서 기후변화가 연간 일정한 것으로 작성되고 있다. 감도분석적 시나리오의 설계와 적용이 용이한 반면, 현실적인 변화를 적절하게 반영하지 못할 가능성이 높다.

표 2-3. 감도분석적 방법에 의한 시나리오 작성사례

작성사례	내용
益倉 · 吉谷 (1992)	5년간의 일단위 강수유출을 계산 온도변화 ΔT : 1, 2, 3.5 $^{\circ}\text{C}$ 강수량변화 ΔP : -5, 0, +5, +10 (연간표준 시나리오 및 기상청 GCM에 기초한 월변화 시나리오에 의한 평형실험)
丹羽 외 (1993)	10년간의 일단위 강수유출 및 댐의 운용계산 온도변화 ΔT : 1, 2, 3 $^{\circ}\text{C}$ 강수량변화 ΔP : -10, 0, +10 (연간표준 시나리오에 의한 평형실험)
安藤 (1994)	11년간의 일단위 강수유출의 계산 온도변화 ΔT : 0, 3, 5 $^{\circ}\text{C}$ 강수량변화 ΔP : -10, 0, +10 (연간표준 시나리오 및 기상청 GCM에 기초한 월변화시나리오에 의한 평형실험)

1) 예를 들어 기온의 변화를 1, 2, 3 $^{\circ}\text{C}$ 씩 상승시키며 이로 인한 변화를 모의

3) 기후모형의 결과에 기초해 작성한 시나리오(GCM, RCM)

기후모형은 기후시나리오 작성시 가장 중요한 정보를 제공한다. 기후모형은 GCM 과 대기해양 대순환모형(Atmosphere-Ocean General Circulation Model, 이후 AOGCM)이 이용 가능하다. AOGCM을 이용한 장래 기후변화 예측은 최근까지 활발하게 수행되고 있으나 다음과 같은 문제점을 가진다. 첫째, 대규모의 전산장비를 요구하며, 둘째, 공간해상도가 너무 크며, 셋째, 인간 활동에 의한 기후변화 원인과 모형상의 자연변동에 원인이 분리되어 있고, 넷째, 여러 모형 간의 기후감도가 다르다.

■ 표 2-4. 기후모형의 결과에 기초한 시나리오 작성사례

작성사례	내용
건설성 토목연구소 하천부 수문연구실 (1996)	대기-강수과정 60km격자모형과 강수-수문 20km격자모형을 사용하여 온난화에 따라 발생하는 수분특성의 변화를 계산. 여기에서 현재와 CO ₂ 배증시의 GCM의 계산결과를 60km격자모형의 초기조건·경계조건으로 한다. 1년간의 기온, 상대 온도, 풍속, 강수량, 지표면수분량의 각월평균, 연평균을 계산.
농환연뉴스 (1997)	기상연구소의 AOGCM에 의한 CO ₂ 1% 점증수치실험결과를 갖고 「국지기후시나리오」를 작성. 공간해상도는 약10km격자로 100년후까지의 기온변화, 강수량변화, 일조량변화 등을 10년 것으로 시나리오화.
농환연	IPCC DDC에 의해 공개된 전지구 AOGCM의 계산결과상 4가지 모형(CSIRO, DKRZ, CCC, CCSR)의 결과를 사용하여 10km의 「국지기후시나리오」를 작성. 약 10km격자로 월평균기온, 월평균최고기온, 월평균최저기온, 월강수량, 월평균 일조량을 2000~2099년까지 10년간의 월별 평균으로 작성.
井上 외(1998)	일본의 강설심, 최심적설, 설질의 변동을 100년 후까지 10년 평균값으로 추정. 입력데이터로서 10km격자의 「국지기후시나리오」를 사용. 이것은 기상연구소의 모형에 의한 CO ₂ 1% 점증수치실험결과를 갖고 농업환경기술연구소에서 작성한 데이터.
高橋 외(2000)	2050-2059년의 표면유출량을 추산. 장래 기후시나리오로서 캐나다 기후센터, Max Frank연구소, 동경대 기후시스템센터/환경연구소의 GCM의 출력(1% 점증 실험)을 사용. 0.5° × 0.5° 공간해상도.

4) 시나리오 연구방법 비교 분석

상기와 같이 시나리오 작성 방법은 유사법에 의한 방법, 감도분석 목적의 점증방법, 기후모형의 결과에 입각한 방법 등 세 가지로 구분할 수 있으며, 장단점은 다음과 같다.

■ 표 2-5. 다양한 기후시나리오 연구방법의 장단점

종류		개요/이용법	장 점	단 점
유사법에 의한 기후시나리오	고기후 유사 시나리오	· 과거의 온난한 기간을 묘사	· 2100년까지 예상되는 동일 규모의 변화에서 과거에 실제 발생하고 물리적으로 일어날 수 있는 기후변동	· 시공간적 해상도가 낮음 · 온실가스의 증가와 연관 없음
	Instrumental	· 취약성 및 적응 능력을 조사	· 물리적으로 실현가능한 변화 · 해상도가 높아 내부정합성이 있어 변수의 조합이 가능 · 자료를 직접 취득 가능함	· 온실가스 증가와 반드시 관련이 없음 · 기후변화의 규모가 일반적으로 비상적으로 낮음 · 최근의 유사사례를 획득하지 못할 가능성이 있음
	공간적 유사 시나리오	· 기후/생태계의 관계를 외삽	· 고해상도 변수를 풍부하게 조합하는 것이 가능함	· 온실가스 증가와 관련이 없음 · 물리적으로 획득하지 못할 장소가 많음 · 적절한 유사사례를 갖지 못할 경우가 있음
점증시나리오 (감도분석적 시나리오)		· 시스템의 감도 테스트 · 주요한 기후 임계치의 지점	· 설계, 적용이 용이	· 비현실적인 시나리오의 가능성 · 온실가스의 증가와 직접적 연관 없음
AOGCM 결과의 직접이용		· 많은 기후 시나리오의 출발점 · 인위적 강제에 대한 대규모의 응답	· 최신의 포괄적인 물리법칙에 근거 · 장기간의 결과 · 자료의 직접이용가능 · 다양한 요소의 정보이용가능	· 공간해상도가 낮음 · 비상식적으로 큰 값을 나타내는 지역을 제거 · 복수의 시나리오 작성시 계산 부하가 큼 · 특정지역은 기존 실험의 큰 편차가 문제가 됨

표 2-5. 다양한 기후시나리오 연구방법의 장단점(계속)

종류	개요/이용법	장 점	단 점	
기후모형 결과에 기초한 기후시나리오	고해상도 GCM	<ul style="list-style-type: none"> 지구/대륙규모의 고해상도 정보 제공 	<ul style="list-style-type: none"> 고해상도의 정보제공 물리법칙에 기초한 모형에 의해 획득된 정보 다양한 요소의 정보이용가능 	<ul style="list-style-type: none"> 복수의 시나리오 작성시 계산기 부하가 높음 고해상도는 AOGCM의 SST와 해빙의 범위에 의존 AOGCM의 결과에 의존
	지역기후모형	<ul style="list-style-type: none"> 시공간적인 고해상도 정보 제공 	<ul style="list-style-type: none"> 시공간적인 고해상도의 정보 제공 물리법칙에 기초한 모형에 의해 획득된 정보 다양한 요소의 정보 이용가능 극단적인 기상현상에 관한 GCM 상의 표현력이 높음 	<ul style="list-style-type: none"> 계산기 부하가 높아, 많은 시나리오를 작성하지 못함 AOGCM의 결과에 의존
	통계적 다운스케일링	<ul style="list-style-type: none"> 지점에 있어 공간적으로 높은 해상도의 정보 제공 	<ul style="list-style-type: none"> 고해상도 혹은 균질하지 않은 지역에 관한 정보를 생성 출력하는 것이 가능 다양한 변수를 취급하는 능력이 있음 변수는 내부 정합성이 있음 계산기 부하가 비교적 낮음 복수의 GCM에 적용가능 	<ul style="list-style-type: none"> 과거의 경험적 연관성을 장래에 이용 변동이 날의 지상 또는 상층의 관측 데이터가 필요 AOGCM의 결과에 의존

나. IPCC 기후변화 시나리오 변천

1) SA90 시나리오

지구대기 조성변화에 따른 기후변화예측은 IPCC를 중심으로 이루어졌다. 1990년 IPCC의 Working group III에서 개발한 Global baseline emissions scenarios(SA90)는 COP1에서 기후변화를 논의하기 위해서 사용되었다.

배출 시나리오는 인구, 경제 성장을 위한 기술 변화, 토지이용 경향 또는 배출량 조절 정책과 같은

중요 결정요소에 대한 특정한 가정을 기반으로 미래 배출량을 예측하는 시나리오다. 기준 배출 시나리오는 온실가스를 줄이기 위한 미래의 기후정책에 대하여 어떠한 가정도 하지 않은 상태를 말한다. SA90 시나리오에서는 에너지 공급은 석탄 집약적이고 에너지 수요는 효율성이 증대되는 것으로 가정하였다. CO₂의 역제가 낮게 이루어진다면, 열대림이 소멸될 때까지 산림의 황폐화가 지속될 것으로 예상하였으며, 농업에서의 메탄가스와 아산화질소는 제어하지 않았다(Convery et al., 2003).

SA90 시나리오는 전지구 평균기온이 0.3°C/10yr의 비율로 증가하여, 2025년에는 현재보다 약 1°C 증가하고, 21세기 말에는 3°C 증가할 것으로 예상하였다. Scenario B에서는 0.2°C/10yr, Scenario C에서는 0.1°C/yr 이상, Scenario D에서는 약 0.1°C/10yr의 비율로 가정하였다(IPCC, 1990a).

2) IS92 시나리오

IPCC는 1992년에 6개의 표준이 되는 배출 시나리오(IS92a-f)를 제시하였고, 기준 시나리오인 IS92a에 따르면, 기준년도인 1990년도의 CO₂ 농도는 약 350ppmv이고 100년 후인 2090년에는 약 670ppmv가 될 것으로 추정하였다. IS92a 시나리오에 따른 기후변화 예측결과, 향후 100년 동안에 전 지구의 평균온도는 2.5°C 상승할 가능성이 가장 높으며, 1.5-4.5°C 범위에서 상승할 것으로 예상하였다(IPCC, 1992). 에어로졸 효과를 고려하면, 2.0°C 상승 가능성이 가장 높게 나타났다. 이들 시나리오의 산출에 사용된 주요 내용은 <표 2-6>에 정리하였다.

그러나 6개의 IS92 시나리오에 반영되어 있는 에너지에 대한 CO₂ 강도(단위 에너지당 CO₂ 배출량)가 제한되어 있다는 것과 한 세기가 지났음에도 선진국과 개발도상국간의 수입격차에 중요한 중지부를 짓는 어떠한 시나리오도 없다는 등 많은 결점들도 발견되었다(Parikh, 1992).

예를 들어, 1994년 IS92 시나리오에 대한 평가(Alcamo et al., 1995)에서는 경제협력개발기구(OECD) 가입국들에서 나온 배출량이 미국에서의 대기조약(Clean Air Act) 개정안이나 2차 유럽유황규약(Second European Sulfur Protocol)과 같은 법적 변화를 반영하지 못한 점을 한계로 지적하였다. 구소련의 신생독립국 및 중·동부 유럽들에 있어서의 체제개편 또한 IS92

표 2-6. IPCC Scenarios 1992 요약

시나리오	2100년 세계인구	경제 성장률	에너지공급	기타	CFCs
IS92a	세계은행 (1991) 113억	1990-2025: 2.9% 2025-2100: 2.3%	석유 12,000EJ 천연가스 13,000EJ 태양에너지비용은 0.75\$/Kwh로 하며, 연당 191EJ의 바이오매스연료는 70\$/배럴(=6GJ)로 산정	SOx, NOx, NMVOC의 배출 규제가 입법화되고, 국제적인 합의가 이루어지며, 개발도상국의 SOx, NOx, CO 배출감소노력이 다음세기 중반까지 이루어짐	몬트리올 의정서의 부분적 준수, 기술이전의 결과 비협약국도 2075년까지 CFC를 단계적으로 전폐함
IS92b	세계은행 (1991) 113억	1990-2025: 2.9% 2025-2100: 2.3%	IS92a와 동일	IS92a와 함께 많은 OECD 국가들이 이산화탄소감소 또는 안정화	범지구적으로 몬트리올 의정서의 일정 준수
IS92c	UN (1991) 중저경우 64억	1990-2025: 2.0% 2025-2100: 1.2%	석유 8000EJ 천연가스 7300EJ 원자력비용은 연간 0.4% 감소	IS92a와 동일	IS92a와 동일
IS92d	UN (1991) 중저경우 64억	1990-2025: 2.7% 2025-2100: 2.0%	석유와 천연가스는 IS92c와 같으며, 태양에너지비용은 0.065\$/Kwh, 바이오매스연료는 50\$/배럴	CO, COx, NMVOC와 SOx에 대한 배출규제가 전 세계적으로 확산 삼림벌채 멈춤	공업국은 1997년까지 CFC생산을 전폐하고 HCFC도 전폐
IS92e	세계은행 (1991) 113억	1990-2025: 3.5% 2025-2100: 3.0%	석유 18,400EJ, 천연가스는 IS92a와 같으며, 원자력은 2075년까지 전폐	화석에너지비용을 30%증가시키는 배출규제	IS92d와 동일
IS92f	UN (1991) 중고경우 176억	1990-2025: 2.9% 2025-2100: 2.3%	석유와 천연가스는 IS92e와 같으며, 태양에너지비용은 0.75\$/Kwh, 원자력비용은 0.09\$/Kwh로 증가	IS92a와 동일	IS92a와 동일

IPCC. 1992. Climate Change 1992 : The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment. J. T. Houghton, B. A. Callander and S. K. Varney, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp.331~339.

시나리오들이 예상하지 못했던 CO₂ 감축과 경제활동에 막강한 영향력을 끼치고 있다. 또한, 온실가스와 SO₂ 배출량의 추진력과 기후변화에 의해 예상되는 영향간의 양방향 상호작용을 설명하는 통합평가(IA) 모델의 도입은 에너지 사용, 경제, 토지이용 변화의 상호작용을 연관지어 고려할 수 있도록 하는 내부적으로 견실한 배출 시나리오를 가능하게 하였다. 여러 부문들에서 기술적 변화속도와 같은 시나리오 특성간 일관성을 반영하는 등의 진보가 이루어졌다.

이러한 발전에 기인하여 1994년 IS92 시나리오들에 대한 IPCC의 검토보고서는 만약 새로운 시나리오가 개발된다면 아래와 같은 점들을 포함시켜야 할 것이라고 결론지었다.

- 배출기준선 및 향후 non-CO₂ 배출량(특히 토지이용에서 배출되는)의 예측
- 전 세계에 걸쳐 이루어지고 있는 경제개편에 대한 최신정보 통합
- 개발도상국가와 산업국가들 간의 수입격차를 좁히는 일을 포함하여 경제개발의 선로범위를 확장
- 기술변화 속도 및 다양한 기술동향 검토
- 무역 및 시장자유화, 민영화에 따른 예상결과 평가
- UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change 1997)와 연계된 현행 배출량에 대한 책임 반영

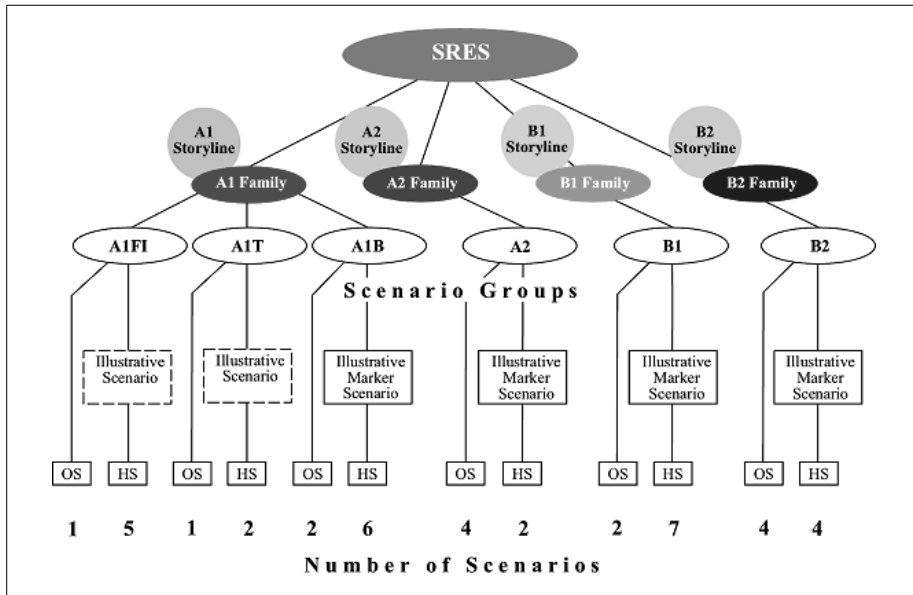
3) SRES

1992년에 작성된 IS92 시나리오는 1985년도 데이터를 기초하여 작성되었기 때문에 급변하는 현실을 제대로 반영하지 못하였다. 1990년대에 접어들어서 세계의 온실효과 가스와 유황산화물 배출량이 크게 증가하였으며, 전 세계에서 이루어지고 있는 최신 정보의 통합과 기술변화 속도 및 다양한 기술동향의 검토를 통한 유엔기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)과 연계된 현행 배출량에 대한 책임 등을 반영하는 시나리오의 필요성이 제기되었다. 이와 같은 문제점은 1994년의 IPCC 특별 보고서(Alcamo et al., 1994)에

의해 검토되고, 새로운 온실효과가스 등의 배출 시나리오의 작성이 권고되었다.

따라서 IPCC에서는 1996년부터 특별한 프로젝트 팀을 조직하여 새로운 배출 시나리오의 작성 작업을 진행시켜 왔다. IPCC는 본래, 이미 발표된 학술논문의 과학적 검토를 행하는 기관이므로 이와 같은 독자의 연구 프로젝트를 조직하는 것은 예외적이었다. 그러나 배출 시나리오는 지구온난화 문제를 과학적으로 해명하기 위한 기본정보로 이 기본 정보의 제공이 IPCC에 요구됨에 따라 거기에 적합한 프로젝트였다. 이 프로젝트는 3년 동안 진행되었으며, IPCC의 작업으로는 예외적으로 장기 프로젝트였다. 특히, 경제 모델을 포함시켰던 대규모 컴퓨터 모델에 의한 시뮬레이션작업에 많은 시간이 소비되었다.

그리고 일련의 성과를 「배출 시나리오에 관한 특별 보고서」로 정리하여 2001년 3월에 각국의 승인을 얻어, 2002년 여름에 정식의 IPCC 보고서로 간행되었다. 이 보고서의 영문명은 “Special Report on Emission Scenario”이며, 이것에 기초하여 새로운 배출시나리오를 「SRES」라고 하였다.



■ 그림 2-1. SRES 개념도

SRES는 기존의 배출시나리오의 검토, 서술적 시나리오 작성, 정량적 시나리오 작성, 인터넷에 의한 공표와 의견 청취, 정량적 시나리오의 개량 등 5개 과정을 통해 작성되었다. 우선, 기존의 연구에 의해 배출시나리오 검토는 일본 국립환경연구소에서 데이터베이스를 작성하는 것으로부터 시작하였다(Morita and Lee, 1997). 약 170개의 출처에서 400개 이상의 배출 시나리오를 수집하여, 이 중 2100년까지 추계기간으로 한 190개의 시나리오를 분석하였다. 이들 다양한 가정과 큰 추계폭은 다음의 SRES 작성과정에 반영되어 이와 같은 폭을 망라하는 시나리오의 작성이 시도되었다.

다음 과정으로는 장래사회 발전에 대해 서술적(Storyline) 시나리오를 작성했다. 이것은 시나리오의 일관성을 갖는 인구통계적, 사회적, 경제적, 기술적, 환경적, 정치적 미래를 질적으로 기술한 것이다. 정량적 시나리오 작성 앞에 이와 같은 서술적 시나리오를 작성한 이유는 첫째, 연구 프로젝트의 각 멤버가 복잡한 전제조건을 일관성을 갖고 생각하기 쉽게 하기 위한 것이며, 둘째, 시나리오를 다양한 사용자들에게 설명하기 쉽도록 하고, 셋째, 향후 분석이나 기후변화의 영향분석에 다양하게 가정을 추가하는데 지침이 되기 때문이다.

이렇게 작성한 서술적 시나리오는 뒤에 설명하는 것과 같이 4개이다. 각각 구체적인 사회적, 경제적, 기술적, 환경적 패러다임을 전개한 것으로 장래의 발전 가능성을 전부 포함하는 것은 불가능하나 넓은 범위를 포함하였으며, 모델에서는 정량화가 어렵고, 발생 가능성이 극단적으로 낮게 평가되는 「서프라이즈」시나리오, 「대참사」시나리오는 제외했다. 1998년에 접어들어 4개의 서술적 시나리오의 정량화가 시작되었다. 이 작업은 일본 국립환경연구소의 아시아태평양통합모델(AIM)팀, 미국 ICF Consulting의 대기안정화모델(ASF)팀, 네덜란드 MVM의 온실효과가 스영향평가통합모델(IMAGE)팀, 일본 동경 이과대학의 다지역자원산업배분모델(MARIA)팀, 오스트리아 IIASA의 에너지공급전략·환경영향모델(MESSAGE)팀, 미국 PNNL의 간략기후평가모델(MiniCAM)팀에서 실시하였다.

각 팀이 각각 다른 모델을 사용해 여러 서술적 시나리오를 작성했다. 이들은 4개의 서술적 시나리오에 대응하여, 「Marker 시나리오」라고 불리는 배출 시나리오를 선정하였다. Marker

시나리오는 정량화의 초기 단계에서 서술적 시나리오를 가장 잘 반영하고 있었던 것으로 4개의 서술적 시나리오마다 각각 다른 모델로 추계된 것이 선정되었다. 이러한 시나리오는 다른 시나리오에 비해 보다 중심적이라고 할 수 없으며 단지 보다 많은 체크를 받는 데 지나지 않는다. 다른 시나리오에서는 Marker 시나리오의 인구, GDP, 최종 에너지량과 조화되도록 각각의 시나리오를 작성하였다.

4개의 Marker 시나리오 샘플 버전은 1998년 6월 홈페이지에 게재하고, 많은 의견을 수렴하여 일부가 개정되었다. 4개의 시나리오에서 각각에 대해 추가 시나리오가 모델팀에 의해 작성되었고 결과 고쳐진 4개의 Marker 시나리오와 다른 36개의 대체 시나리오를 합해 40개의 배출 시나리오가 작성되었다.

4개의 서술적 시나리오는 어느 것이나 지구온난화 저감을 위한 정책을 포함하지 않는다. 4개의 다른 발전 방향을 가리키고, 지금보다 일반적으로 풍요로운 장래세계를 그린 것이다. 이러한 시나리오는, A1, A2, B1, B2라는 기호로 불린다. 각 시나리오의 개요는 다음과 같다.

우선, A1 시나리오는 『고성장 사회 시나리오』라고 하는 이미지와 유사하다. 시장의 이점을 활용하고, 전세계가 경제성장을 이루고 교육, 기술, 그리고 사회제도에 큰 혁신이 생기는 시나리오이다. 과거 100년간 평균 경제성장률 약 3%가 향후 100년간 계속한다고 가정하며, 2050년의 일인당 소득은 세계 평균에서 2만 달러를 초월한다. 개발도상국의 성장이 눈부시고, 남북의 격차가 급속하게 줄어든다. 따라서 개발도상국의 출생비율은 낮아지고, 세계 인구는 2050년의 90억명에서 2100년에는 70억명으로 낮아진다. 평균수명은 향상되고 핵가족화가 진행된다. 급속한 경제의 확대는 대량의 에너지 자원을 필요로 하고, 자원개발이나 신에너지 개발에의 투자가 가속된다. 개발도상국의 식생활이 육식 기호로 급속하게 바뀌며 집약적 농업으로 이행한다.

선진국에서 개발도상국에의 기술 이전도 진행되며, 개발도상국의 기술혁신이나 자동차 보유가 높아진다. 환경문제의 해결은 시장에 의해 크게 영향을 받아 환경 보전의 관점보다 환경관리나 창조적 관점에서 이루어진다.

이 A1 시나리오는 에너지·시스템에서의 기술혁신의 선택이 다른 4개의 그룹에 의해 더욱더

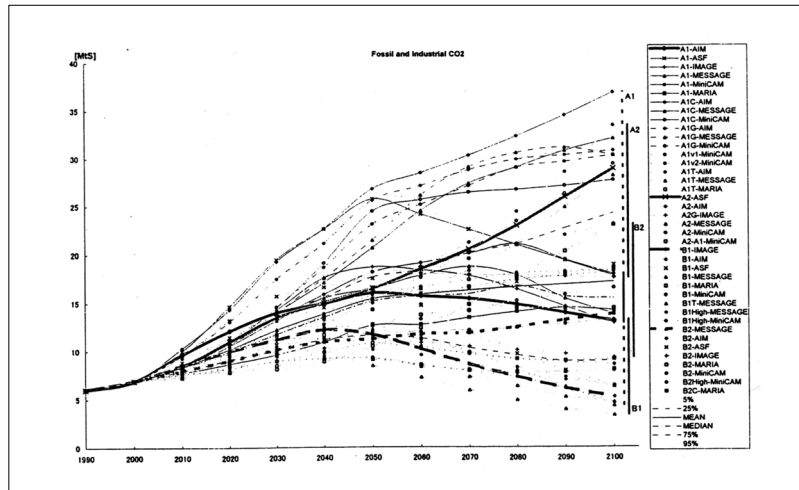
갈라진다. 석탄의 클린 이용 기술의 대폭적인 혁신을 가정한 시나리오(A1C), 석유와 천연가스 관련 기술혁신이 현저한 시나리오(A1G), 신에너지의 대폭적인 기술혁신을 기대한 시나리오(A1T), 그리고 기술혁신이 균형 있게 도입되는 시나리오(A1B)이다. A1에 이러한 다양한 시나리오를 작성한 이유는 높은 경제성장의 시나리오에서는 기술혁신의 정도도 크게 기대되고, 기술혁신의 몇몇 방향이 온실효과가스 등의 배출에 미치는 영향이 감도를 분석하는 것에 적합하기 때문이다. 또한, 통상 A1 시나리오라고 불리는 경우는 마지막 A1B를 나타내고 있다.

다음으로 A2 시나리오는 「다원화 사회 시나리오」로 부를 수 있는 것이다. 세계의 각 지역의 고유의 문화를 존중하고, 다양한 사회구조나 정치구조를 구축해 나가는 것에 따라 세계의 경제나 정치가 Block화해 나가는 것을 가정하고 있다. 이와 같은 사회에서는 나라나 지역의 사이에 항상 긴장 관계가 생기고, 국제적인 무역이나 사람의 이동, 기술의 이전이 제한된다. 따라서 경제발전의 지연, 일인당 소득도 2050년에 7천달러에 불과하다. 세계 인구는 개발도상국의 출생률이 낮아지지 않아 2100년에는 150억명에 달한다. 지역 간의 자연 자원이나 자산의 격차는 지역 간의 소득격차를 더욱 더 확대시킨다. 자원이 적은 지역에서는 기술개발에의 투자가 가속되지만, 경제성장이 낮기 때문에 일반적으로 기술혁신은 지연된다. 환경에의 관심은 상대적으로 낮고, 지역적인 환경문제의 심각화만이 환경대책 동기가 된다.

B1은 「지속 발전형 사회 시나리오」라고 부를 수 있다. 환경이나 사회에의 높은 관심에 따라 지구공공재로서의 환경의 보전과 경제의 발전을 지구규모에서 양립하고 균형 잡힌 경제발전을 꾀하는 시나리오이다. 자원이용 효율화(탈물질화) 사회제도, 환경보호에 집중적으로 투자가 일어난다. 자원이용 효율화는 자원의 공급 측면을 중시하는 고성장 사회시나리오와 다르며 자원의 수요면에 집중한다. 또한 폐기물의 감량화나 리사이클이 발달되고, 자원이용 효율화나 리사이클의 활성화에 의해 환경산업의 시장이 급속하게 확대되고, 이것이 경제성장에 지속적으로 공헌한다. 경제성장률은 고성장 시나리오보다는 낮지만, 2050년의 일인당 평균소득은 13,000 US \$에 달한다. 개발도상국에서는 선진국에서의 첨단기술의 이전이 진행되고, 클린기술이 보급되며 이것에 의해 교육이나 능력도 크게 진전한다. 공공교통 시스템이 정비되고, 도시 구조는 콤팩트화하고,

저투입, 저부하형 농업이 보급된다. 자연보호를 추진하는 것에 의해 농산물 가격은 상대적으로 비싸지만, 육식으로 식생활 패턴이 바뀌는 것은 억제된다.

마지막으로 B2는 「지역 공존형 사회 시나리오」라고 부를 수 있다. 환경이나 사회에의 높은 관심에 기초하지만, 지구규모 문제에서의 관심이나 국제적인 문제해결이라고 하는 방향이 아닌 지역의 문제와 공정성을 중시하고, 하부에 기초를 둔 상향식 발전을 꾀하는 시나리오이다. 시장에 맡기지 않고 지방정부의 정책이 발전을 견인한다. 교육과 복지 향상 정책에 의해 개발도상국의 사망률, 출생률이 낮아지기 때문에, 세계 인구는 2100년에 100억명 정도가 된다. 국제시장보다는 지역의 공존을 중시하기 때문에, 경제성장은 약간 낮게 되고 2050년에 일인당 소득이 12,000 US \$가 된다. 개개인 및 남북 간의 소득격차는 축소된다. 기술이전 등의 개발도상국 지원은 국제적인 통일된 방식이 아니라 두 나라 간에 진행된다. 지역적인 독립성이 높아지고 지역마다의 경제권이나 정치 시스템이 발달해 나간다. 이것에 의해 에너지, 식량, 환경 등의 문제는 각 지역 안에서 주체적으로 해결한다.



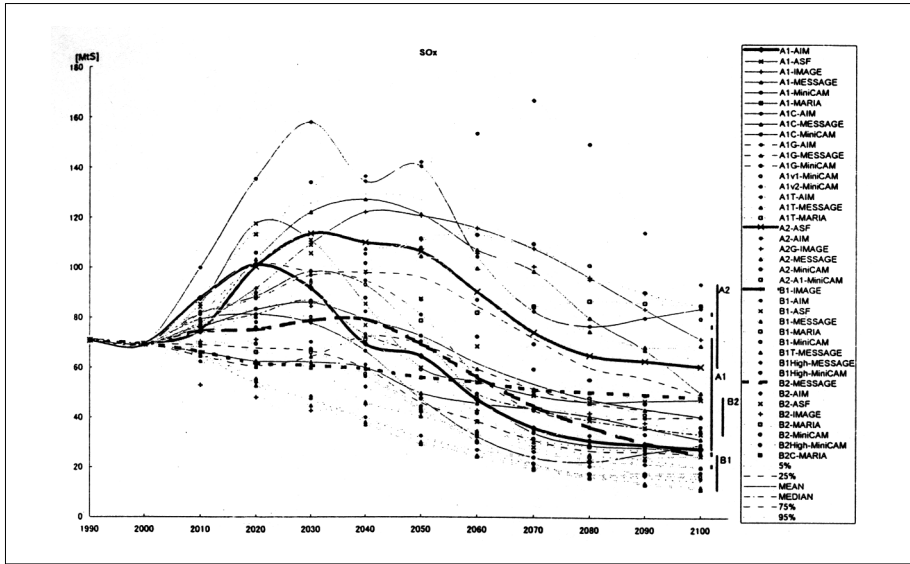
- 주 : 1. 마크시나리오는 굵은 선으로 기타 36개 시나리오는 가는 선으로 표시
2. 마크가 없는 가는 선은 백분율, 평균치, 중앙치를 표시

■ 그림 2-2. 표준화된 40개 SRES CO₂ 시나리오

4개의 시나리오를 전제로 온실효과 가스 예측의 정량화를 세계의 6개 팀이 시행하였다. 어느 것이나 세계 경제모델을 중심으로 하고 에너지 모델이나 토지이용 모델을 편성하여 앞에서 말한 4개의 서술적 시나리오를 전제로 에너지 이용이나 토지이용변화 또한 공업의 장래를 시뮬레이션 하여 배출되는 이산화탄소, 메탄가스, 이산화질소, 이산화황을 종합적으로 추계했다. 아래의 그림은 에너지 및 공업 기원의 이산화탄소 배출 시나리오에 계산된 40개 전부의 시나리오와 각 시나리오군의 Marker가 나타나 있다.

예상대로, 환경을 중시했던 B1시나리오가 CO₂ 배출량이 가장 적다. 이와 같은 사회를 만들면 특별한 온난화 대책을 하지 않아도 온난화는 억제할 수 있다. 전통적인 환경보호론자의 이상향에 가까운 B2 시나리오는 경제발전 지상주의에 가까운 A1 시나리오와 비교해 보면 2100년의 CO₂ 배출량은 거의 같게 된다. 지역을 중시해 환경문제를 해결하는 방향의 요인과, 경제 발전에 의해 기술효율이 향상하는 요인이, CO₂의 배출 억제에 있어서 같은 의미의 효과를 발휘했다. 가장 온난화 대책에 어울리지 않는 사회는 A1 시나리오가 아닌 「다원화 사회」를 지향했던 A2 시나리오였다. 이와 같은 사회로 발전해 가면 온난화 대책에는 믿어지지 않을 정도로 비용이 소요될 가능성을 시사하고 있다.

이 새로운 시나리오 작성을 통하여 다른 하나가 명백하게 되었다. 이산화황 산화물(SO_x)의 배출 시뮬레이션에 관계된 것으로 이전에 IPCC가 작성했던 IS92a 등 지금까지의 많은 SO_x 배출 시나리오는 다음 세기의 배출량이 느는 것이 계속된다는 것이지만, 이번의 시나리오 시뮬레이션에서는 일본을 비롯한 선진국의 공해대책 역사를 감안해 이러한 경험을 모델 속에 넣은 결과 모든 시나리오에 SO_x 배출량이 크게 감소하는 결과가 얻어졌다. 개발도상국의 경제발전에도 동반하여 일인당 GDP가 3천달러에서 5천달러에 달하면, 공해 피해에의 인식이 높아져 단숨에 공해대책이 진행된다고 하는 역사적 사실이 모델에 반영된 결과이다. 이것에 의해 SO_x 배출량은 감소하는 것이 계속되는지, 혹은 역U자의 형태로 다음 세기에 들어가 감소하는 지의 어느 쪽이 된다. 이 SO_x 배출량의 감소는 대기 중 황산 에어로졸을 감소시키고, 황산 에어로졸이 갖는 「냉각효과」를 낮추어, 지구 온난화를 가속시키는 것으로 추정된다.



주 : 1. 마크시나리오는 굵은 선으로 기타 36개 시나리오는 가는 선으로 표시
 2. 마크가 없는 가는 선은 백분율, 평균치, 중앙치를 표시

그림 2-3. 표준화된 40개 SRES SOx 시나리오

〈표 2-7〉에 모든 가스의 배출 시나리오에 관한 정량화 결과를 Marker와 전 시나리오의 추계폭을 정리하였다. 이러한 SRES는 앞에 나타낸 최근의 문헌에서 보아도 배출 시나리오 폭의 대부분을 커버하는 것이 된다.

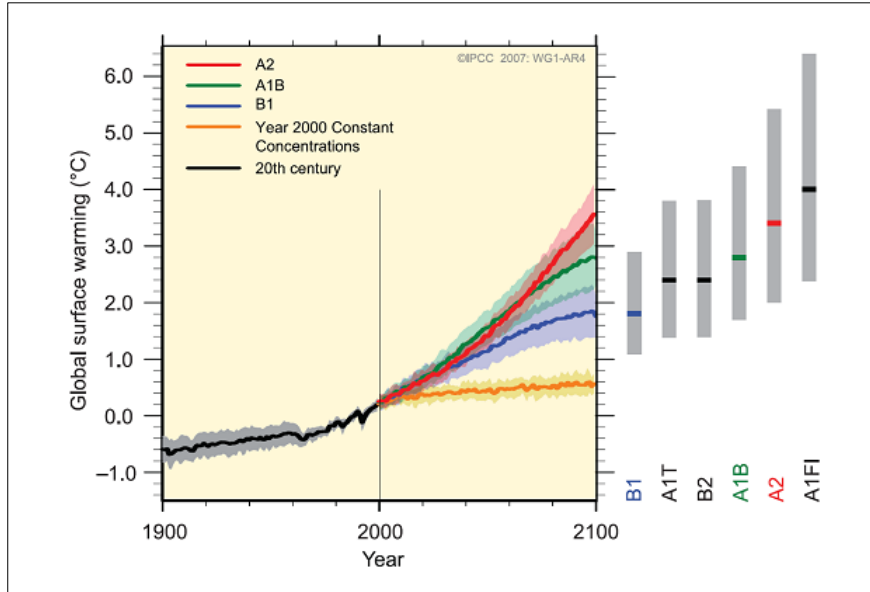
표 2-7. SRES의 정량화 개요

	A1			A2	B1	B2	
	A1C	A1G	A1T				
CO2 (GtC)	Median 13.5 (13.5-17.9) by2100	High (25.9-36.7)	High (28.2-30.8)	Low (4.3-9.1)	High 29.1 (19.6-34.5) by2100	Low 4.2 (2.7-10.4) by2100	Median 13.3 (10.8-21.8) by 2100

표 2-7. SRES의 정량화 개요(계속)

	A1				A2	B1	B2
		A1C	A1G	A1T			
CH ₄ (MtCH ₄)	Low 289 (289-640) by2100	Median (392-693)	Median (289-735)	Low (274-291)	High 889 (549-1069) by2100	Low 236 (236-579) by2100	Median 597 (465-613) by2100
N ₂ O (MtN)	7.0 (5.8-17.2) by2100	(6.1-16.2)	(5.9-16.6)	Low (4.8-5.4)	16.5 (8.1-19.3) by2100	5.7 (5.3-20.2) by2100	6.9 (6.9-18.1) by2100
HFC (MtC equiv.)	Median Total of 824 by 2100	A1과 동일	A1과 동일	A1과 동일	High Total of 1096 by2100	Low Total of 386 by2100	Moderate high Total of 839 by2100
CO (MtCO)	Median 1663(1080-2 532) by 2100	High (2298- 3766)	High (3260- 3666)	Median (1520- 2077)	High 2325(776- 2646)	Low 363(363- 1871)	Median 2002(661- 2002) by 2100
NMVO ₃ (Mt)	Median 193(133- 552) by 2100	Median (163-373)	Median (192-484)	Median (114-128)	Median 342(169- 342) by 2100	Low 87(58-349) by 2100	Median 170(130- 304) by 2100
NO _x (MtN)	Median 40.2(40.2-7 7.0) by2100	High (63.3- 151.4)	High (39.9- 132.7)	Low (28.1- 39.9)	Very High 109.2(70.9- 110.0) by2100	Low 18.7(16.0- 35.0) by 2100	High 61.2(34.5- 76.5) by 2100
SO _x (MtS)	Low 27.6(27.6-7 1.2)by 2100	High (26.9-83.3)	Low (27.4-40.5)	Very Low (20.2-27.4)	High 60.3(60.3-9 2.9) by 2100	Very Low 24.9(11.4-2 4.9) by 2100	Low- Median 47.9(33.3-4 7.9)

주: Maker 시나리오와 전 시나리오의 추계폭



자료 : IPCC, 2007

■ 그림 2-4. 시나리오별 지표면 온난화 경향

한편 SRES를 사용한 새로운 연구도 시작되고 있다. SRES는 어디까지나 온난화 저감을 위한 대책을 포함하지 않는 시나리오이지만, IPCC의 3차 평가보고서(TAR)에 있어서는 SRES를 기반으로 한 대책 시나리오의 장이 만들어져, 이를 위한 분석작업이 진행되고 있다. 이 대책 시나리오는 『Post SRES』라고 불리며 세계 9개의 모델링팀이 참가하고 있다. 이 중에서 SRES에 그려진 장래의 발전방향을 전제로 온실효과가스의 대기중 농도를 목표레벨로 유지하기 위한 배출 저감을 시뮬레이션하며, 대책차원에서 필요로 하는 기술혁신은 어떠한 차이가 있는지를 분석하고 있다. 그리고 어떠한 발전 방향으로 진행시켜도 의미가 있는 대책이나 기술혁신이란 무엇인가를 명백히 하는 것이 온난화대책연구에 있어서 중요한 연구영역이 되고 있다.

SRES는 IPCC에 의해 준비된 새로운 배출시나리오일 뿐 아니라, 많은 과학적 혹은 정책적인 시사점을 주고 있다. 이 시나리오가 시사하는 것은 인류의 장래 발전 방향은 다양하고, 이러한 발전 방향에 의해 온난화의 정도나 온난화 대책 의미는 크게 다르다는 것이다. 지금 세계의 온난화

대책 논의에서 가장 부족한 점은“세계가 향하고 있는 방향이 어떠한 사회인 것인가?”라는 것으로, 이를 우선 논의할 필요가 있다.

표 2-8. SRES에 있어서 정량화에 대한 개요

	A1				A2	B1	B2
	AIB	AIC (석탄)	AIC (석유)	AIT			
인구증가	낮음	낮음	낮음	낮음	높음	낮음	중간
경제성장	매우 높음	매우 높음	매우 높음	높음	중간	높음	중간
에너지 수요	낮음~중간	낮음~중간	낮음	낮음	높음	낮음	중간
토지이용 변화	높음	높음	중간	중간	중/소	높음	중간
기술변화 속도	빠름	빠름	빠름	빠름	늦음	중간	중간
기술 변화의 방향성	석탄	석유 및 가스	균형	비화석연료	지역적	효율성 및 탈물질	보통의 Dynamic

2. 기후변화 고려 지하수 함양량 산정 관련 국외 연구동향

기후변화로 인한 지하수 수자원의 영향에 관한 연구는 20세기 말부터 북미 일부 국가 및 EU 일부 국가에서 주로 유역 단위의 대수층에 대하여 실시되었다. Vaccaro(1992)는 미국 북서부 워싱턴주의 Columbia Plateau 유역 일대의 지하수 함양 변동과 기후변화와의 연관성을 추정하기 위해 심부침투모델(deep percolation model, DPM)을 사용하였으며, 연구 지역의 기후 기록 및 미래 기후 예측은 기상자료 합성 모델인 WGEN(Richardson and Wright, 1984)과 3개의

GCM을 사용, 서로 다른 두가지의 토지이용 조건에 대하여 지하수 함양량 산정을 실시하였다. 연구결과, 연간 지하수 함양량의 변화는 과거 기후 기록이 GCM 조건에 따른 해석 결과보다 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

Bouraoui 등(1999)은 거대 규모 GCM 구동 결과를 수문 모델 적용에 알맞도록 분해하는 방법론을 개발하였으며, 유출 모델과 퇴적물이동모델(ANSWER)과 연계하여 프랑스 내 하천 유역에서 이산화탄소 배출 증가에 따른 지하수 함양 영향을 조사하였다. 연구결과, 프랑스 내 하천 유역의 지하수 함양은 대기중 이산화탄소 배출 증가로 인해 감소하는 것으로 나타났다. Rosenberg 등(1999)은 GIS 기반의 토양-퇴적물 수분함량추정모델인 HUMUS와 수문모델인 SWAT를 사용하여 미국 중부 Ogallala 대수층의 지하수 함양과 채수, 기후변화에 의한 영향을 연구하였다. 이 연구에서는 3종류의 GCM을 사용하여 이산화탄소 농도와 기온변화에 따른 미래 기후변화를 예측하였으며, 연구결과 3종류의 기후변화 시나리오에 대해 함양량이 감소하였으며 모의 조건에 따라 최대 77%까지 함양량이 감소하는 것으로 나타났다.

미국 지질조사소(USGS)에서 개발한 지하수 유동수치해석 프로그램인 MODFLOW는 주로 지하수 양수에 따른 대수층 내 지하수 흐름 변화를 정량적으로 예측하는 데 범용적으로 사용되고 있는 모델이나, 기후변화로 인한 지하수 이용 및 개발에의 영향을 예측하는 데에도 자주 사용된다. Kirshen(2002)은 미국 북부 매사추세츠주의 고투수성 대수층에 대한 지구온난화 영향을 연구하였다. 이 연구에서는 강수, 기온 및 잠재적 증발산량을 기초로 하여, 통합수문모델인 HSPF를 사용하여 하천 유량 계산을 실시하였으며, 지하수 함양량은 이와 별도의 모델을 설정하여 추정하였다. 기후변화의 영향에 대한 대수층 시스템의 민감도는 HSPF 모델 및 지하수함양모델 출력결과를 MODFLOW를 구동하여 모의하였다. 연구결과, 연구지역의 대수층은 사용된 기후 시나리오의 종류에 따라 함양률 및 수위가 민감하게 변하는 것으로 나타났다.

Allen 등(2004)과 Scibek 등(2007)은 MODFLOW를 사용하여 캐나다 British Columbia 남부 Grand Forks 대수층에서 기후변화로 인한 지하수유동 특성변화 및 지하수-지표수 상호작용을 기후변화 시나리오를 근거로 하여 정량화하였다. 이 연구에서는 다운스케일 방법을 조정된 Canadian Coupled Global Model 1(CGCM1)을 기후 모델로 사용하였고, 지하수 함양 모델은

HELP3 및 BRANCH 모델을, 지하수 유동 변화는 MODFLOW를 이용하여 모의하였다. 연구 결과, 전반적인 hydrograph의 형태는 현재나 미래나 변화는 없으나, 하천의 침투 흐름은 기후변화 시나리오 결과에 의해 미래로 가면 갈수록 침투 발현시기가 이동함을 밝혀내었고, 지하수위도 하천 인근으로 갈수록 현재보다 그 차이가 커짐을 밝혀내었다.

Jyrkama 등(2007)과 Risser(2009)등은 각각 캐나다 온타리오주의 Grand River Watershed와 미국 펜실베이니아주 중동부 WE-38 Watershed에서의 지하수 함양량 변화를 한정된 기후변화 시나리오를 통해 산정하였다. 두 연구에서는 공히 HELP3가 주요 수문 모델 및 기후 사상 예측, 지하수 함양 연동 계산에 사용되었고, 토지이용도, 정밀토양도 등 다양한 공간지리정보를 기본자료로 이용하여 지하수 함양량 산정에 이용하였다. 연구결과, 지하수 함양 변화는 기온이나 증발산보다 강수 및 지표 유출에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 융설로 인한 지하 함양을 배제하더라도, 연구지역의 2040년 지하수 함양량은 2004년에 비해 최대 53%까지 증가하는 것으로 나타났다.

3. 기후변화 고려 지하수 함양량 산정 관련 국내 연구동향

국내의 경우, 1990년대 이후 지하수 함양률에 대한 지속적인 연구가 이루어져 왔다. 그동안 수행된 함양률 산정방법은 지표수의 수문곡선을 이용한 기저유출분리법, 물수지 분석법, SCS-CN법, 온도에 의한 방법, 염소이온농도에 의한 방법, 지하수위 변동법 및 지하수위 강하곡선법 등이 주를 이루고 있다.

지하수 함양량은 과거 통상적으로 수자원 이용현황에서 하천유출량을 제외한 손실량(강수량 대비 45%)의 40%를 함양량으로 간주하여 약 18%를 사용하였다. 이 때 사용한 함양률산정법은 지하수위 변동법(지하수위 강하곡선법 포함), 기저유출분리법, SCS-CN법 및 물수지법이 대부분이었다.

기저유출분리법은 하천유출에서 기저유출 부분과 직접 유출부분을 분리하는 방법으로서 기저유출감수곡선법과 곡선접합법이 해당되며(Rorabough, 1963), 본 방법을 적용한 국내 사례로는

이동률(1995), 건설교통부·한국수자원공사(1995, 1996) 등 다수가 있다. 본 방법은 대규모 댐 하류의 유량이 댐 운영에 의하여 영향을 받기 때문에 수문곡선으로부터 분리된 기저유출량에 대한 신뢰성에 한계를 보이는 문제점이 있다.

물수지분석법은 증발산량 산정방법에 의하여 지하수함양이 크게 영향을 받기 때문에 연구자의 주관에 따라 오차를 발생할 수 있으므로, 타 방법과 함께 비교 사용하는 것이 바람직하며, 국내 연구사례로는 한국수자원공사(1993a, 1993b, 1994) 등이 있다.

기타 방법의 적용사례로서, SCS-CN 방법은 최병수·안중기(1998) 및 박재성 등(1999), 온도에 의한 방법은 구민호 등(2001), 염소이온농도에 의한 방법은 제주도·한국수자원공사(2003), 지하수위 변동법은 건설교통부·한국수자원공사(1999), 구민호 등(2002) 및 지하수위 강하곡선법은 건설교통부(2002), 김규범 등(2004) 등이 있다.

그동안 국내에서 수행된 지하수 함양률 산정방법은 대부분 외국에서 개발된 기법으로서 국내의 다양한 기상 수문조건, 지질조건, 지형조건 및 지표피복 특성 등이 충분히 반영되지 못하는 한계점을 갖고 있다.

국내 실정에 적합한 함양률산정기법을 개발하는 것이 용이하지 않다. 즉, 최적의 지하수 함양률 산정기법의 개발을 위해서는 입력 인자의 국내 취득 가능성 및 신뢰성이 높은 입력자료의 취득 가능성 등을 고려하여야 보다 적용성 높은 기법이 개발될 수 있다. 지하수 함양률이란 여러 방향으로 지하의 대수층에 도달하는 물의 양의 비율로 정의되며, 지하수 함양률이란 일반적으로 물의 하향 움직임으로서 지하수에 도달하는 양을 말한다. 광역적인 지하수 함양이란 넓은 지역에서 균일하게 발생하는 강수나 관개에서 유래된 함양을 말하며, 지역적인 함양이란 하천, 호수, 저지대와 같은 지표면 하강 지형으로부터 집중되는 함양을 의미한다.

현재 우리나라에는 1995년부터 구축 운영 중인 전국 320개 지하수 관측소의 총 478개 관측점으로부터 일 4회 지하수위가 관측되고 있으며, 이들 자료를 활용한 지하수 함양률 추정기법들이 시도되어 왔다. 그러나 지하수위 관측자료를 활용하여 추정하는 지하수 함양률은 관측지점 인근에 국한되기 때문에 각종 개발 및 관리 정책에 사용하기 위해서는 미 계측지역, 즉 광역지역에 대한 지하수 함양률 산정이 요구된다.



제3장

기후모델 연동 지하수 함양 및
이용가능량 산정방법론 개발

1. 적정 기후모델의 선정 및 검증

가. 과거 기상통계, GCM 및 RCM의 종류에 따른 시나리오 추출

1) 기상통계

기후변화에 의한 미래의 영향을 연구하는 데 있어서 기후의 정량적인 자료가 필요하다. 특히 기준자료와 시나리오가 미래의 기후에 영향을 미치기 때문에, 미래의 자료보다도 현재의 자료가 더욱 중요하다.

한 지역의 현재 또는 최근 기후의 특성을 파악하기 위하여, 기준기간의 양질의 기상관측자료가 필요하다. 공통적으로 사용되는 변수로는 지상관측지점에서 측정된 기온과 강수량 자료이며, 그 밖에 태양복사, 습도, 풍속, 토양온도 등도 많이 활용되고 있다. 시간적인 해상도는 연간자료, 계절별 자료, 월별자료, 일별자료, 시간별 자료 등 다양한 분야에서 여러 가지 시간단위의 자료가 이용된다.

기준년도의 선정기준은 다음과 같다.

- 연구대상 지역의 현재 또는 최근의 기후를 나타낼 수 있어야 하고,
- 기상현상의 유의한 편차를 포함하는 기후변화 정도의 범위가 충분한 기간 동안 지속되어야 하며,
- 연구기간에 해당하는 모든 종류의 기후변수들이 분석에 부족하지 않고 연구에 바로 사용이 가능할 만큼 충분히 확보되어야 하고, 연구지역 전체에 골고루 분포되어 있어야 한다.

세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에 의해 정의된 평년기후는 30년을 주로 사용하고 있으며, 현재의 평년기준은 1961년부터 1990년까지이다.

IPCC의 1~3차 보고서의 기후학적 또는 비기후학적 예측값에 사용된 자료들이 1990년까지 공통적으로 사용됐으며, 현재의 인간 활동이나 자연생태계를 잘 나타내고 있고, 대부분의 나라에서 관측된 일별 형태의 기상자료를 활용할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

표 3-1. 현재 기후자료의 형태 및 출처

기준자료의 형태	출처
Various Types	<ul style="list-style-type: none"> ▪ World Data Center - A, Meteorology
Observed Climate	<ul style="list-style-type: none"> ▪ The CRU Global Climate Data set (IPCC Data Distribution Centre) ▪ Global Historic Climatology Network (GHCN) ▪ International Research Institute for Climate Prediction /Lamont-Doherty ▪ Earth Observation at University of Columbia British Atmospheric Data Centre (BADC) ▪ Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) ▪ National Centre for Atmospheric Research(NCAR) Data Support System ▪ Climatic Research Unit (CRU) data ▪ Climate Diagnostics Centre at NOAA ▪ Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS) at NOAA
Reanalysis Sata	<ul style="list-style-type: none"> ▪ NCEP Re-analysis Data ▪ ECMWF
GCM Control Simulations	<ul style="list-style-type: none"> ▪ IPCC Data Distribution Centre
Weather Generators	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LARS Weather generator ▪ ClimGen Climatic Data Generator

자료: IPCC-TGICA, 2007

그러나 다음의 아래와 같은 이유 때문에 1961년부터 1990년까지 30년 동안의 평년기준을 적용하기 힘든 경우도 있다.

- 일부 국가에서는 1951~1980년 또는 1931~1960년과 같이 WMO 기준보다 빠른 평년기준 자료의 활용이 수월한 경우가 있고,

- 온실가스에 의해서 이미 유의한 온난화 경향이 나타나는 경우도 발생하고 있다. 전지구적으로 1990년대가 가장 더웠는데, 특히 1998년이 1862년 이래로 가장 더웠다고 관측되었다.
- 1961~1990년은 이미 새로운 평년기준인 1971~2000년 자료에 의해서 대체되기 시작하였고, 몇몇 국가의 기상관련 기관에서는 통계자료로 발간하기도 하였다. 그러나 1990년대와 2000년대 기후자료들은 많은 영향평가 모형의 테스트와 측정이 필요하다. 1년에서 5년 정도의 차이는 전 세계적으로 폭넓게 융통성을 적용하여 활용이 가능하며, 특히 1971~2000년은 아직까지 WMO의 공식 평년기준으로 인정받지 않았다. WMO의 차기 공식 평년기준은 1991~2020년이 될 것이다.
- 30년이라는 기간이 자연적 기후변동성을 측정하기에는 충분하지 못하다는 견해도 있다.

기후변화 영향평가 연구에서 평년기준 자료를 활용하는 방법은 국가별 기상관련 기관, 국제 관련 기관, 기후모형의 결과물, Weather Generator 등이 주로 활용되고 있다.

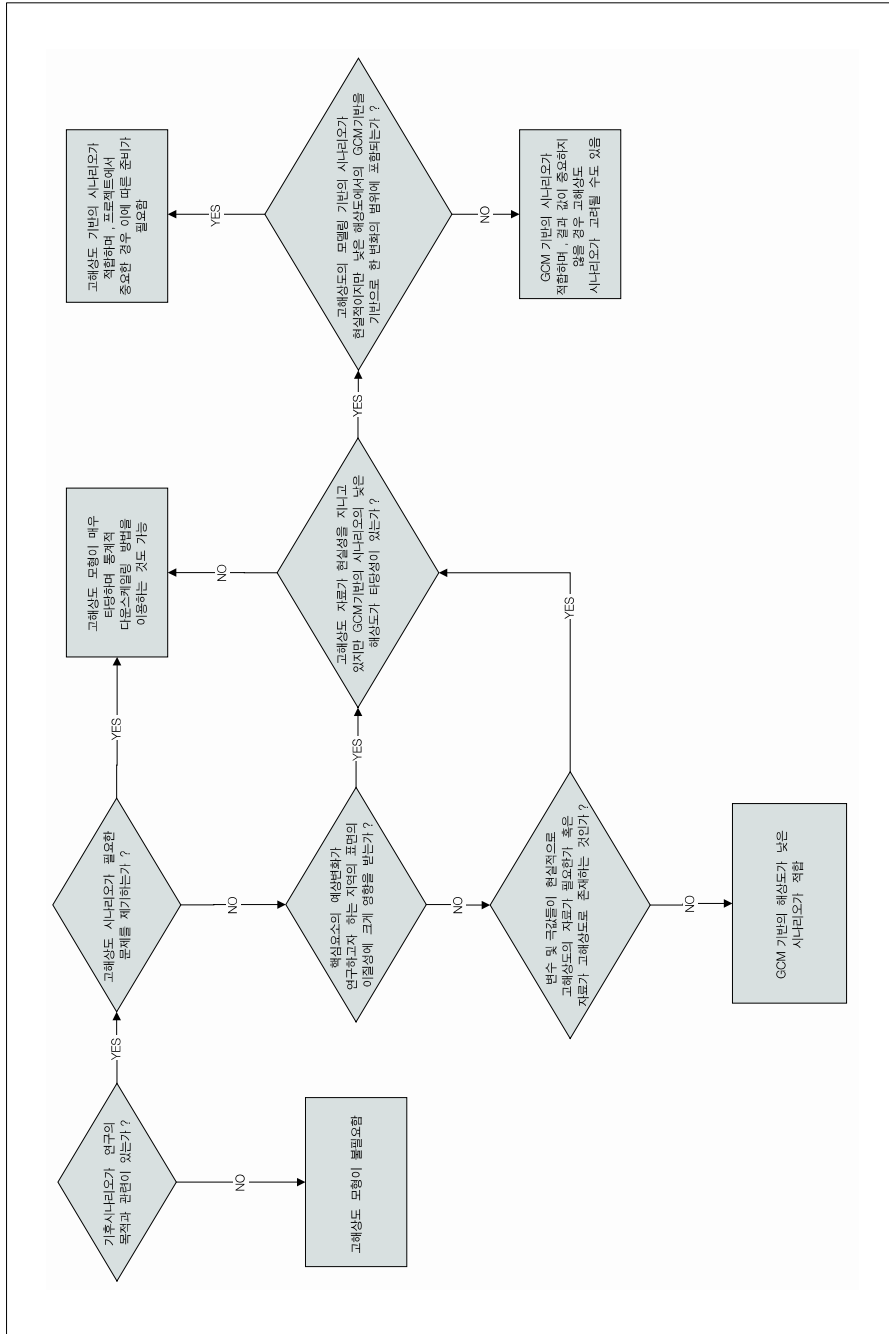
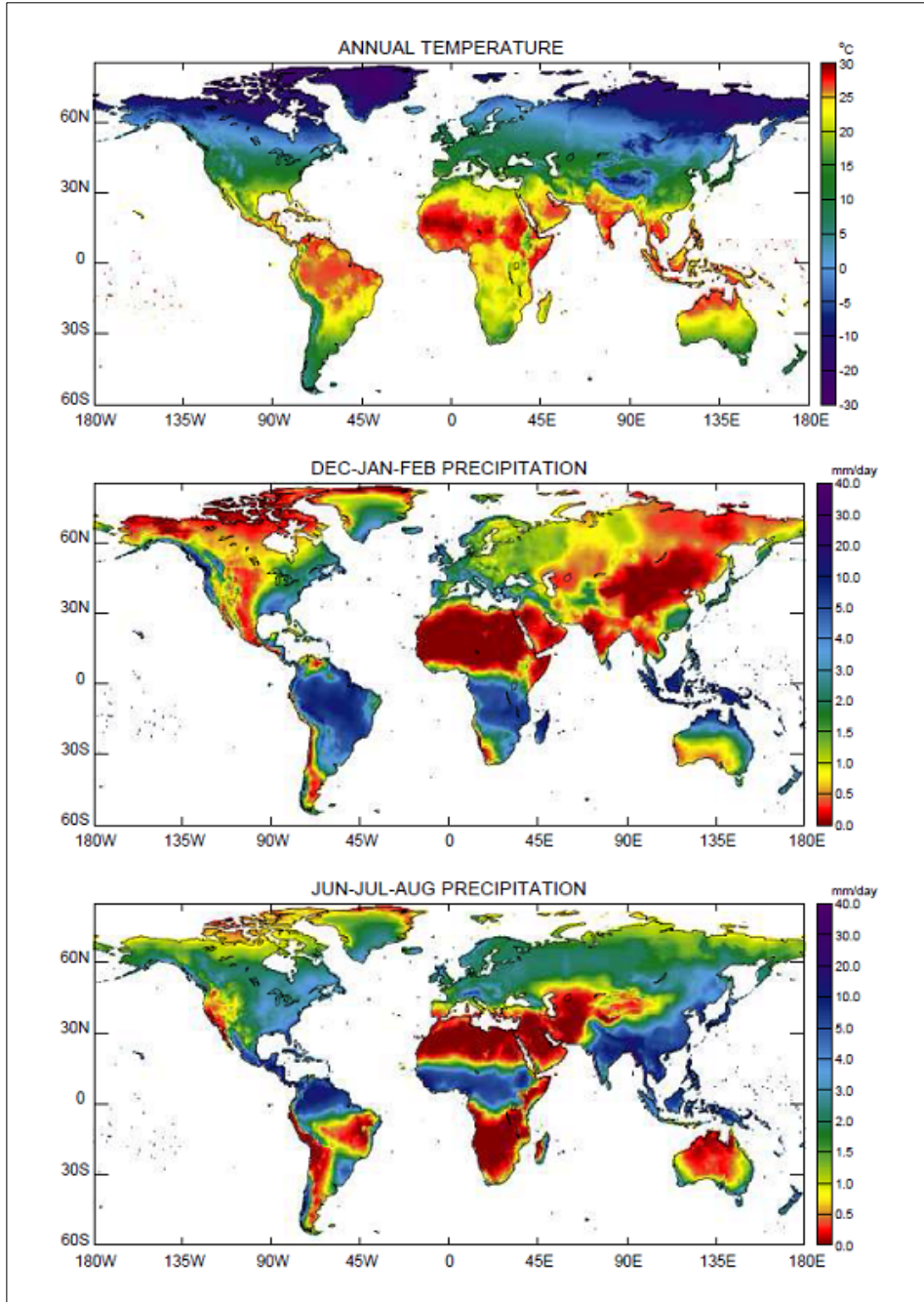


그림 3-1. 기후변화 영향연구를 위한 고해상도 모델링의 타당성 검토 방법



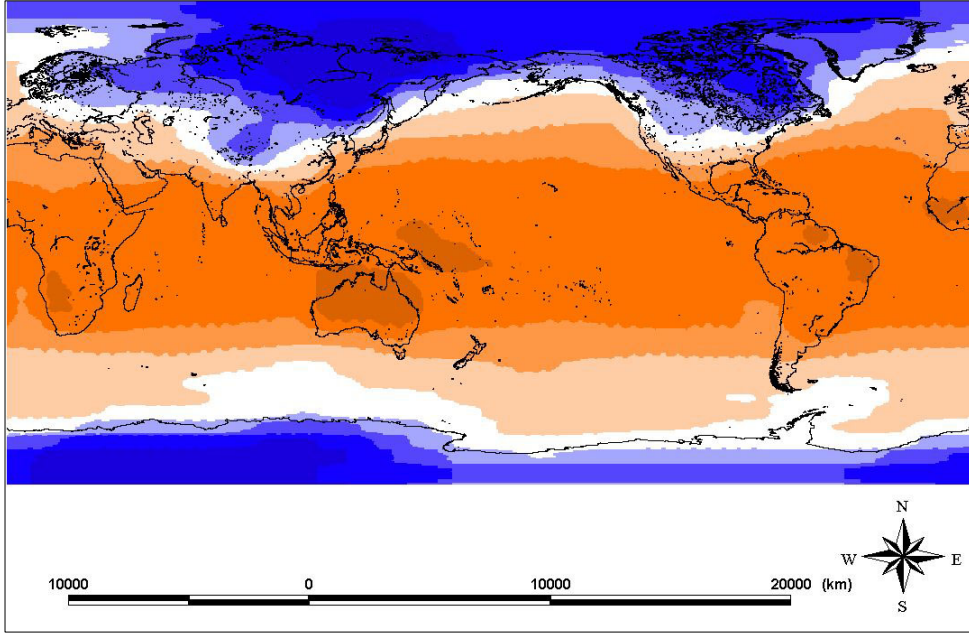
■ 그림 3-2. IPCC에서 제공하는 대표적 관측자료인 CRU Global Climate Data Set

2) 대순환모형

미래에 나타날 기후를 예측하는 일은 매우 힘든 일이다. 실제로 관측된 기후자료로 과거로부터의 변화경향을 분석하여 미래를 예측할 수도 있다. 그러나 과거의 변화는 물질순환에 의한 안정적인 변화인데 반해, 최근에는 산업화에 따른 화석연료의 사용 증가로 인해 급속한 변화 양상을 보이고 있다. 따라서 과거의 자료를 이용하여 미래를 예측한다는 것은 많은 한계가 있다. 이런 한계를 극복하기 위해서 다양한 시나리오를 바탕으로 미래기후를 예측한 기후모형을 이용하여 연구가 많이 이루어지고 있다.

기후변화 예측에 관한 연구는 주로 과거와 현재의 기상 및 기후상태로 미래의 가상현실을 예측하는 수치모형을 주로 이용하여 왔다. 1970년대를 전후해서 대기대순환모형(Atmospheric General Circulation Model)과 해양대순환모형(Oceanic General Circulation Model)이 주로 사용되었고, 최근에는 두 모형을 결합한 대기-해양대순환모형(Atmosphere-Ocean Coupled General Circulation Model, AOGCM)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 GCM은 지구대기를 3차원의 불연속 격자(discrete grid) 체계로 구성하고 각 격자점에서 대기의 상태를 지배하는 유체방정식들(운동, 열역학, 연속, 정역학, 상태 방정식 등)을 시간 적분하여 지구대기 상태를 재현 또는 예측하고 있다. GCM은 수평격자크기가 250km 내외이며, 연직격자크기는 1km 정도인 3차원 역학수치모형이다.

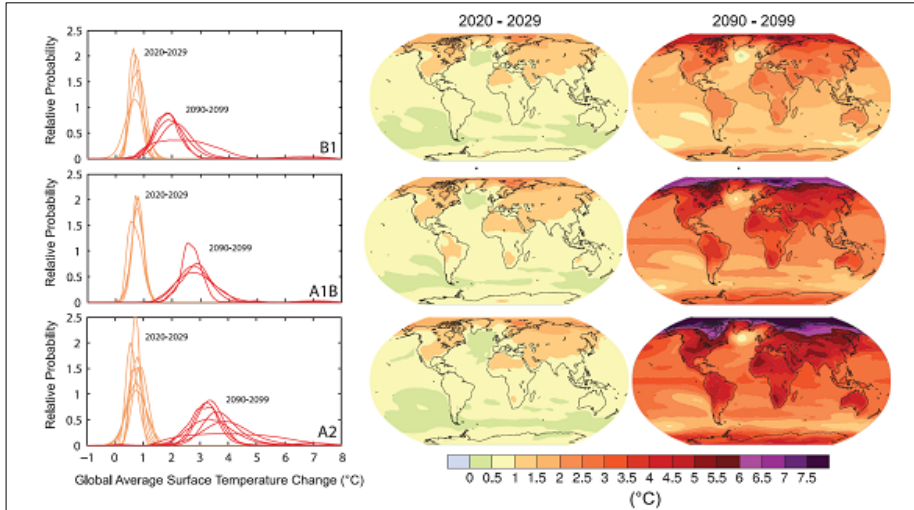
국내 GCM에 관한 연구는 하경자와 김정우(1993)가 일본 기상연구소의 GCM을 이용한 60일 장기예보실험이 시초라 할 수 있다. 강인식(1994)은 4종류의 GCM을 이용하여 한반도 지역평균 기온변화 시나리오를 작성하였다. 그 결과, CO₂가 두 배로 증가하면 한반도 기온은 1.0~4.0°C 범위 내에서 증가하고, CO₂의 증가율이 연평균 1% 증가한다고 가정하였을 경우, 10년에 0.15~0.5°C의 증가경향을 나타낼 것으로 예상하였다. 오재호 등(1994)은 GCM을 이용한 강수량 변화 예측 시나리오에 대한 연구를 실시하였는데, CO₂ 배증으로 인하여 여름철의 경우 강수량이 25% 가량 증가하고, 겨울철에는 7% 정도 감소하는 것으로 나타났다.



자료 : http://www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_TAR/index.html

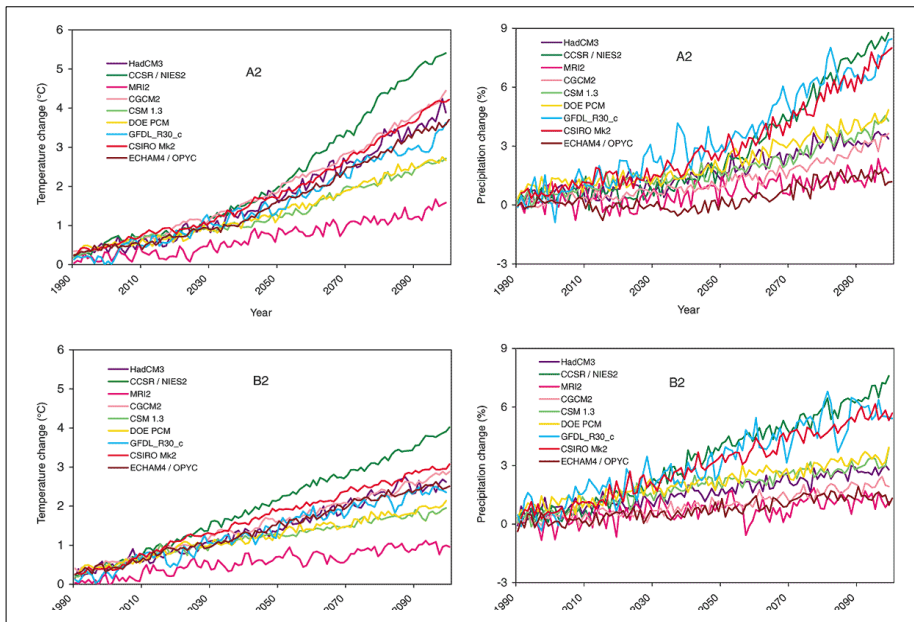
■ 그림 3-3. CCSR-NIES GCM A2 시나리오의 2005년 08월 평균기온

1990년대 초에는 외국의 GCM을 이용한 연구가 주류를 이루고 있었다면, 1990년대 후반에 접어들어서는 기후 관련기관과 단체, 학교 등을 중심으로 국내에 적합한 GCM의 개발 및 적용 등 다양한 연구가 이루어졌다. 국내에서 개발된 YONU AGCM Tr7은 일본 기상연구소 AGCM의 역학체계 및 미국 Illinois대학 AGCM의 물리체계를 모체로 하여 개발된 대기대순환모형과 미국의 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory의 MOM을 바탕으로 개발된 해양대순환모형인 YONU OGCM W12, 두 모형이 결합된 YONU CGCM Tr7W12로 구성되어 있다. YONU CGCM Tr7W12은 대기/해양 집합 GCM 상호비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project)의 검증을 통해 타모형과 학술적 교류 및 모형개량이 이루어지고 있다(안중배 등, 1997a; 1997b; 조민수 등, 1997; 안중배와 김정우, 1998; 박지업 등, 2000; 김정우, 2002; 정일웅 등, 2003).



(IPCC, 2007)

그림 3-4. 대기해양결합모델에 의한 지표면 기온의 예측



자료 : http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/fig9-6.htm

그림 3-5. SRES를 반영한 다양한 기후모형

표 3-2. IPCC 4차 평가보고서에 수록된 대기-해양 대순환모형 목록

Model ID, Vintage	Sponsor(s), Country	Atmosphere Top Resolution References	Ocean Resolution Z Coord., Top BC References
1: BCC-CM1, 2005	Beijing Climate Center, China	top = 25 hPa T63 ($1.9^\circ \times 1.9^\circ$) L16 Dong et al., 2000; CSMD, 2005; Xu et al., 2005	$1.9^\circ \times 1.9^\circ$ L30 depth, free surface Jin et al., 1999
2: BCCR-BCM2.0, 2005	Bjerknes Centre for Climate Research, Norway	top = 10 hPa T63 ($1.9^\circ \times 1.9^\circ$) L31 Deque et al., 1994	$0.5^\circ \sim 1.5^\circ \times 1.5^\circ$ L35 density, free surface Bleck et al., 1992
3: CCSM3, 2005	National Center for Atmospheric Research, USA	top = 2.2 hPa T85 ($1.4^\circ \times 1.4^\circ$) L26 Collins et al., 2004	$0.3^\circ \sim 1^\circ \times 1^\circ$ L40 depth, free surface Smith and Gent, 2002
4: CGCM3.1(T47), 2005	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	top = 1 hPa T47 ($\sim 2.8^\circ \times 2.8^\circ$) L31 McFarlane et al., 1992; Flato, 2005	$1.9^\circ \times 1.9^\circ$ L29 depth, rigid lid Pacanowski et al., 1993
5: CGCM3.1(T63), 2005		top = 1 hPa T63 ($\sim 1.9^\circ \times 1.9^\circ$) L31 McFarlane et al., 1992; Flato 2005	$0.9^\circ \times 1.4^\circ$ L29 depth, rigid lid Flato and Boer, 2001; Kim et al., 2002
6: CNRM-CM3, 2004	Meteo-France/Centre National de Recherches Meteorologiques, France	top = 0.05 hPa T63 ($\sim 1.9^\circ \times 1.9^\circ$) L45 Deque et al., 1994	$0.5^\circ \sim 2^\circ \times 2^\circ$ L31 depth, rigid lid Madec et al., 1998
7: CSIRO-MK3.0, 2001	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research, Australia	top = 4.5 hPa T63 ($\sim 1.9^\circ \times 1.9^\circ$) L18 Gordon et al., 2002	$0.8^\circ \times 1.9^\circ$ L31 depth, rigid lid Gordon et al., 2002

■ 표 3-2. IPCC 4차 평가보고서에 수록된 대기-해양 대순환모형 목록(계속)

Model ID, Vintage	Sponsor(s), Country	Atmosphere Top Resolution References	Ocean Resolution Z Coord., Top BC References
8: ECHAM5/MPI-OM, 2005	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	top = 10 hPa T63 (~1.9° × 1.9°) L31 Roeckner et al., 2003	1.5° × 1.5° L40 depth, free surface Marsland et al., 2003
9: ECHO-G, 1999	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of the Korea Meteorological Administration (KMA), and Model and Data Group, Germany/Korea	top = 10 hPa T30 (~3.9° × 3.9°) L19 Roeckner et al., 1996	0.5°~2.8° × 2.8° L20 depth, free surface Wolff et al., 1997
10: FGOALS-g1.0, 2004	National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG)/Institute of Atmospheric Physics, China	top = 2.2 hPa T42 (~2.8° × 2.8°) L26 Wang et al., 2004	1.0° × 1.0° L16 eta, free surface Jin et al., 1999; Liu et al., 2004
11: GFDL-CM2.0, 2005	U.S. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration	top = 3 hPa 2.0° × 2.5° L24 GFDL GAMDT, 2004	0.3°~1.0° × 1.0° depth, free surface Gnanadesikan et al., 2004
12: GFDL-CM2.1, 2005	(NOAA)/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA	top = 3 hPa 2.0° × 2.5° L24 GFDL GAMDT, 2004 with semi-Lagrangian transports	0.3°~1.0° × 1.0° depth, free surface Gnanadesikan et al., 2004

표 3-2. IPCC 4차 평가보고서에 수록된 대기-해양 대순환모형 목록(계속)

Model ID, Vintage	Sponsor(s), Country	Atmosphere Top Resolution References	Ocean Resolution Z Coord., Top BC References
13: GISS-AOM, 2004	National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Goddard Institute for Space Studies (GISS), USA	top = 10 hPa 3° × 4° L12 Russell et al., 1995; Russell, 2005	3° × 4° L16 mass/area, free surface Russell et al., 1995; Russell, 2005
14: GISS-EH, 2004		top = 0,1 hPa 4° × 5° L20 Schmidt et al., 2006	2° × 2° L16 density, free surface Bleck, 2002
15: GISS-ER, 2004	NASA/GISS, USA	top = 0,1 hPa 4° × 5° L20 Schmidt et al., 2006	4° × 5° L13 mass/area, free surface Russell et al., 1995
16: INM-CM3.0, 2004	Institute for Numerical Mathematics, Russia	top = 10 hPa 4° × 5° L21 Alekshev et al., 1998; Galim et al., 2003	2° × 2,5° L33 sigma, rigid lid Diansky et al., 2002
17: IPSL-CM4, 2005	Institut Pierre Simon Laplace, France	top = 4 hPa 2,5° × 3,75° L19 Hourdin et al., 2006	2° × 2° L31 depth, free surface Madec et al., 1998
18: MIROC3.2(hires), 2004	Center for Climate System Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan	top = 40 km T106 (~1,1° × 1,1°) L56 K-1 Developers, 2004	0,2° × 0,3° L47 sigma/depth, free surface K-1 Developers, 2004
19: MIROC3.2(medres), 2004		top = 30 km T42 (~2,8° × 2,8°) L20 K-1 Developers, 2004	0,5°~1,4° × 1,4° L43 sigma/depth, free surface K-1 Developers, 2004

■ 표 3-2. IPCC 4차 평가보고서에 수록된 대기-해양 대순환모형 목록(계속)

Model ID, Vintage	Sponsor(s), Country	Atmosphere Top Resolution References	Ocean Resolution Z Coord., Top BC References
20: MRI -CGCM2.3.2, 2003	Meteorological Research Institute, Japan	top = 0.4 hPa T42 (~2.8°×2.8°) L30 Shibata et al., 1999	0.5°~2.0°×2.5° L23 depth, rigid lid Yukimoto et al., 2001
21: PCM, 1998	National Center for Atmospheric Research, USA	top = 2.2 hPa T42 (~2.8°×2.8°) L26 Kiehl et al., 1998	0.5°~0.7°×1.1° L40 depth, free surface Maltrud et al., 1998
22: UKMO -HadCM3, 1997	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, UK	top = 5 hPa 2.5°×3.75° L19 Pope et al., 2000	1.25°×1.25° L20 depth, rigid lid Gordon et al., 2000
23: UKMO -HadGEM1, 2004		top = 39.2 km ~1.3°×1.9° L38 Martin et al., 2004	0.3°~1.0°×1.0° L40 depth, free surface Roberts, 2004

(IPCC, 2007)

3) 지역기후모형

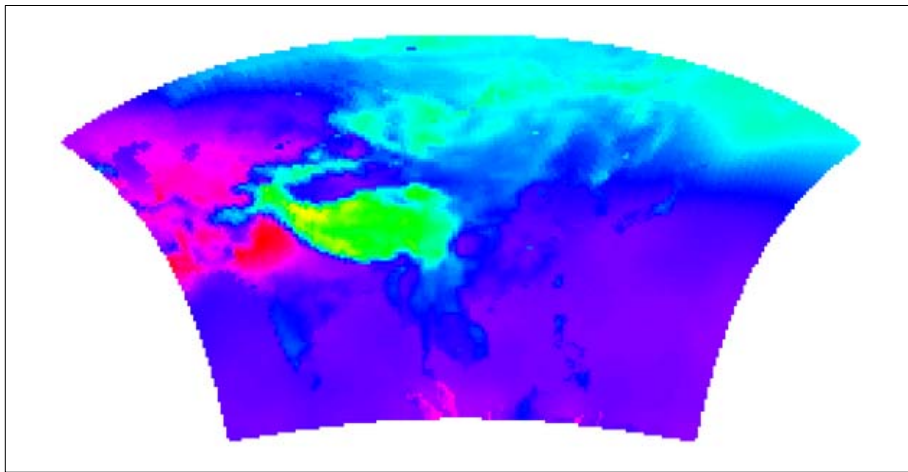
대순환모형이 제시하고 있는 많은 유용한 정보에도 불구하고, 대부분의 모형이 공간 분해능과 물리과정의 한계를 가지고 있어 1990년대 초부터 RCM을 개발하기 위한 노력이 병행되어 왔다. 대순환모형에 지역기후모형을 등지화(nesting)하여 역학적 다운스케일링을 실시할 경우, 대순환 모형과 지역기후모형의 물리과정이 동일해야 비현실적인 요소를 제거할 수 있다.

일본은 Colorado State University에서 개발된 3차원 비정수계압축모형(RAMS : Regional Atmospheric Modeling System(Pielke et al., 1992))을 기반으로 CCSR/NIES AGCM(Numaguti et al., 1997)의 물리과정을 도입한 NIES-RAMS 지역기후모형을 개발했다(Emori et al., 2001).

RAMS 에 도입된 물리 과정으로는 Arakawa-Schubert 적운대류과정(Arakawa and Schubert, 1974), 대규모 응결과정, 복사과정(Nakajima et al., 2000), 연직확산(Mellor and Yamada, 1974; 1982), 육상과정 모형(MATSIRO : minimal advanced treatments of surface interaction and runoff(Takata et al., 2003)이 있다.

대순환모형을 경계조건으로 지역기후모형 실험을 실시하면, 대순환모형의 편향을 지역기후모형이 계승하거나 지역적 편향을 보다 강하게 할 가능성이 있기 때문에, 유럽중기예보센터(ECMWF)의 15년 재해석치(ERA15)를 경계조건으로서 NIES-RAMS 에 의한 현재기후재현 실험을 실시했다.

수평해상도 T42(약 2.8°격자)의 CCSR/NIES AGCM 의 실험결과(6시간 간격)를 경계조건으로서 NIES-RAMS 에 의한 기준연도(1981년~1990년)와 목표연도(2041년~2050년)의 지역 기후실험을 실시했다.



자료: 일본 국립환경연구소

■ 그림 3-6. NIES-RAMS RCM A2 시나리오의 2050년 08월 평균기온

NIES-RAMS의 수치실험의 계산영역은 약 9,600×7,100km 의 영역에서 60km 의 수평해상도

이다. 현재기후 실험의 해면수온(SST)과 해빙분포는 UKMO의 GISST (Rayner et al., 1996)를 이용하였다. 미래기후에서는 T21의 대기해양결합모형(CGCM) 실험으로부터 얻을 수 있던 계절변화를 가지는 온난화 패턴을 GISST에 가세한 것을 이용하였다.

강수의 관측치도, 데이터 세트에 의해 격차를 볼 수 있지만, 세 종류의 현재기후 관측자료와 비교시 모형은 열대지역 강수를 과대평가하는 경향이 나타났다. 또 중국의 동부에 대해서도 비교적 강한 강수가 생기고 있는데, 이것은 NIES-RAMS의 편향으로 볼 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 지구기후모형에 지역기후모형을 등치화하여 역학적 다운스케일링(downscaling)을 실시하는 경우, 물리과정의 오차에 따라 발생하는 비현실적인 현상을 피하기 위해서 개발된 지역기후모형에 신규도입·개발된 매개변화 물리과정을 도입시켜 지역기후모형을 개량하는 것이 필요하다.

Xuejie et al.(2003)은 CSIRO R21L9 AOGCM에서 one-way nesting 방법으로 유도한 RegCM2 RCM를 이용하여 중국에서 기후영향에 의한 토지이용의 변화에 대하여 연구를 실시하였다. RegCM2는 실측값과의 상관관계 시 기온에서는 0.94, 강수량에서는 0.80의 높은 상관성을 나타내면서 중국의 토지이용과 잠재식생피복을 도출하였다. Bell et al.(2004)은 지역기후모형을 이용한 미래의 기후변화 실험을 통하여 기온과 강수량의 변화를 설명하면서, 종합적인 결과와 강수량의 변화는 지리적인 위치에 의해 많이 좌우된다는 결론을 얻었다.

우리나라의 RCM 연구는 GCM을 바탕으로 하여 다운스케일링을 적용시킨 지역기후모형에 대한 연구와 우리나라에서 개발한 RCM 등 크게 두 가지 부분으로 나눌 수 있다. 김맹기와 강인식(1997), 김맹기 등(2002)은 대기대순환모형과 지역기후 변수사이에 밀접한 통계적 연관성을 직교함수분석(Empirical Orthogonal Function), 고유치분리법(Singular Value Decomposition) 등을 이용하여 증명함으로써 지역기후모형의 필요성을 강조하였다.

먼저 다운스케일링을 적용한 연구를 살펴보면, 박수희와 김정우(2001)는 미국의 국립대기연구센터(National Center for Atmospheric Research NCAR)에서 중규모 수치 모형인 MM4를 기반으로 개발한 RegCM을 대규모 자료인 NCEP²⁾/NCAR 재분석 자료와 비교한 결과, 동아시아

아의 지역 기후를 적절하게 모사하는 것으로 나타났다. 김태국 등(2002)은 NCAR에서 nesting method를 적용하여 개발한 MM5 모형으로 동아시아 지역을 모의한 결과 지형, 호수, 해안선 등과 같은 상세한 지역적 모습을 잘 반영하였다. 기상연구소(2002)와 민영미 등(2003)은 한반도 및 동아시아의 장기 미래기후변화를 예측하기 위해 독일의 Max Planck Institute에서 개발한 400km 격자의 대기대순환모형인 ECHAM4 GCM과 해양대순환모형인 HOPE-G GCM을 역학적 다운스케일링기법을 이용하여 30km 이하로 해상도를 높이는 연구를 수행하였다. 그 연구결과를 PSU³⁾/NCAR에서 개발한 MM5 모형과 기상연구소와 미국의 Lawrence Berkeley National Laboratory가 함께 연구한 METRI-meso 모형, 영국의 Climate Research Unit에서 제작한 0.5°간격의 1931년부터 1960년까지 30년 평균 계절별 기온 및 강수량 자료와 비교·분석하였다.

표 3-3. 현재와 비교한 21세기말의 지구표면 온도 차이와 해수면 차이

Scenarios	1980~1999년과 비교한 2090~2099년의 기온 차이(°C)		1980~1999년과 비교한 2090~2099년의 해수면 차이(m)
	최적추정치 (Best estimate)	가능범위 (Likely range)	모델에 의한 범위
2000년 농도유지	0.6	0.3~0.9	-
B1	1.8	1.1~2.9	0.18~0.38
A1T	2.4	1.4~3.8	0.20~0.45
B2	2.4	1.4~3.8	0.20~0.43
A1B	2.8	1.7~4.4	0.21~0.48
A2	3.4	2.0~5.4	0.23~0.51
A1FI	4.0	2.4~6.4	0.26~0.59

(IPCC, 2007)

2) NECP : National Centers for Environmental Prediction(미국)

3) PSU : Pennsylvania State University

표 3-4. 기후시나리오의 종류와 장단점

종류	특징/이용법	장점	단점
기후모형 기반: AOGCM의 직접 결과	<ul style="list-style-type: none"> · 대부분의 기후시나리오의 시작점 · 큰 스케일에서의 인위개변적인 압력에 대응 	<ul style="list-style-type: none"> · 잠재적으로 많은 변수의 정보가 이용가능 · 자료의 즉시 획득이 가능 · 장기적인 통합이 가능 · 물리적이고 통합적인 기반으로 한 모형에서의 정보 획득 	<ul style="list-style-type: none"> · 공간적으로 분석이 어려움 · 큰 지역을 빠고는 일상적으로 현실적이지 않을 수도 있음 · 다양한 시나리오를 작성하기 위해서는 컴퓨터 사용이 비쌌 · 특정지역에 한정 지을 경우 오차가 심하게 나타날 수도 있음
고해상도/확장 (Stretched) 격자(AGCM)	<ul style="list-style-type: none"> · 국제적, 대륙적 스케일에서의 고해상도 정보의 제공 	<ul style="list-style-type: none"> · 높은 분석력을 가지는 정보제공 · 물리기반의 모형으로부터 정보가 제공됨 · 다양한 변수들이 사용 가능 · 세계적으로 동일하며 Feedback이 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> · 다양한 시나리오를 적용하기 위해서는 비용이 많이 필요함 · 스케일에 따라 실용적인 인자들을 유지하는 것이 어려움 · 고해상도의 자료를 생성하기 위해서는 AOGCM에 의존하게 됨
지역모형	<ul style="list-style-type: none"> · 공간적, 시간적으로 높은 해상도의 정보를 제공 	<ul style="list-style-type: none"> · 시공간적으로 고해상도의 정보를 제공 · 물리적 기반의 모형을 바탕으로 정보를 획득 · 많은 변수들을 사용할 수 있음 · GCM보다 일부 지역에서는 몇몇 기후 현상의 경우 정확하게 설명 	<ul style="list-style-type: none"> · 컴퓨터를 이용하는 것이 어려우며 많은 시나리오의 종류가 적음 · AOGCM의 입력값에 의존하게 됨 · 두 개 이상의 비교가 불가능하여 완결성에 의문을 가지게 될 수도 있음
통계적 다운 스케일링	<ul style="list-style-type: none"> · 공간적, 지점적으로 높은 해상도의 정보를 제공 	<ul style="list-style-type: none"> · 통합되지 않는 지역에서 높은 해상도의 정보를 생성가능 · 다양한 범위에서 몇몇 방법들을 실험해 볼 수 있음 · 변화가 내부적으로 일관됨 · 계산의 방법이 저렴함 · 컴퓨터를 사용할 수 있는 비용이 제한되어 있을 경우 용이함 · 다양한 GCM의 이용이 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> · 경험적인 결과가 미래에도 계속 될 것이라 가정하고 있음 · 관측결과에 따라서 다양성의 범위가 결정됨 · 많은 변수들이 필요하지 않은 경우가 있음 · AOGCM의 결과에 의존하게 됨

(Mearns et al., 2003)

우리나라에서 개발된 SNU/RCM은 비정역학적 중규모 수치예보 모형인 PSU/NCAR MM5와 동아시아 지역의 식생, 토양 종류에 따라 한 격자점 내에서 지면의 비균질성을 효과적으로 고려한 지표모형인 NCAR/LSM⁴⁾을 접합하여 개발되었다. SNU/RCM은 RegCM2와 비교연구를 통하여 지역기후모형 상호비교 프로젝트(Regional Climate Model Intercomparison Project)에 참여함으로써 RCM의 성능을 객관적으로 평가받고 단점을 보완하기 위한 연구를 수행하였다(김춘지 등, 2002; 이동규, 2002; 차동현 등, 2003).

나. 기후변화 시나리오에 따른 예측결과의 신뢰수준

기후모델은 미래의 기후변화에 대해 대략 및 그 이상 범위에서 신뢰할만한 정량적 추정치를 제공하고 있다. 이러한 확신은 모델들이 공인된 물리 원칙을 토대로 하고 현재 및 과거의 기후변화에서 관측된 특징들을 재현할 능력이 있다는 데서 나온다. 기후변수 중에는 모델 추정치에 대한 확신이 다른 변수들(예: 강수)에 비해 높은 것(예: 기온)이 있다. 몇 십년간의 개발과정에서 모델들은 온실가스 증가에 반응하여 일어난 상당한 기후 온난화에 대해 확실하고 분명한 그림을 일관되게 제공하였다.

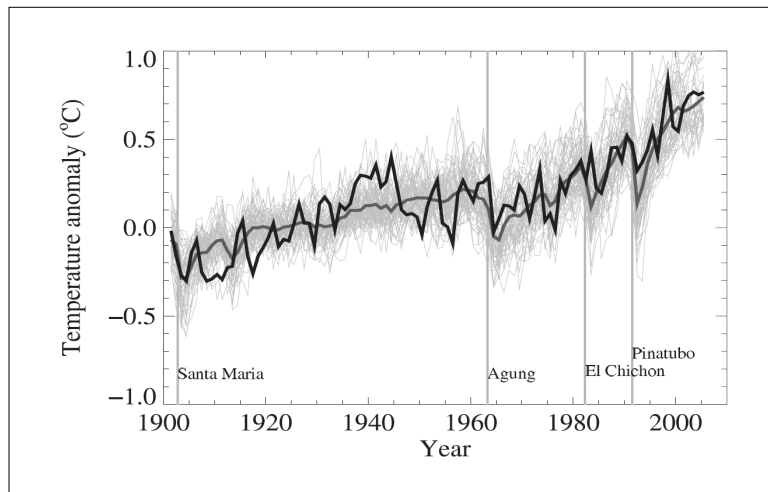
기후모델은 기후계를 수학적으로 나타낸 것으로, 컴퓨터 코드로 표현되고 강력한 컴퓨터에서 구동된다. 모델에 대한 확신은 우선은 모델이 풍부한 관측치와 질량보존, 에너지, 모멘텀 등 확립된 물리적 법칙을 토대로 하고 있다는 데서 기인한다.

확신의 두 번째 근거는 모델들이 현재 기후의 중요한 특징들을 시뮬레이션할 능력이 있다는 데서 기인한다. 모델은 시뮬레이션 결과를 대기, 해양, 빙권 및 육지표면에 대한 관측치와 비교함으로써 일상적으로 광범위하게 평가된다. 지난 10년간 유기적 다중모델 '상호비교' 형태로 전례 없는 수준의 평가가 이루어졌다. 모델들은 넓은 범위의 대기 온도, 강수, 복사, 바람, 해수온도, 해류, 해양빙 범위 등의 분포 같은 많은 중요한 평균 기후특징을 표현하는 데서 중요한, 점차 향상된 기술을 보여주고 있다. 또한 다양한 시간범위로 관측된 많은 기후변동성 패턴의 중요한

4) LSM : Land Surface Model

측면들, 이를테면 주요 문순 시스템의 발달과 퇴각, 기온의 계절적 변화, 폭풍 경로, 강우벨트, 아열대 표면기압의 반구 규모의 시소현상 등을 시뮬레이션해낼 수 있다. 일부 기후모델이나 밀접하게 관련된 변종 모델들도 기상예측이나 계절예보에 사용되어 시험되었다. 이 모델들은 그런 예보 기술을 입증해내면서 짧은 시간범위의 대순환 뿐 아니라 계절적 연간 변동성의 중요한 특징들을 표현해 낼 수 있다는 것은 모델들이 모래 기후변화의 시뮬레이션에 중요한 근본적물리 과정들을 표현해낸다는 확신을 높여준다.

확신의 세 번째 근거는 모델이 과거 기후 및 기후변화의 특징을 재현할 능력이 있다는데서 나온다. 모델들을 사용해서 6,000년 전의 따뜻한 홀로세 중기나 최대 21,000년 전의 마지막 빙하기 같은 고대 기후가 시뮬레이션되었다. 모델들은 마지막 빙하기 동안의 해양 냉각의 정도 및 대범위에 걸친 패턴 같은 많은 특징들을 재현할 수 있다. 모델들은 기기측정이 시작된 이래 관측된 기후변화의 특징들도 시뮬레이션할 수 있다. 예를 들면, 기후에 영향을 주는 자연적 인자와 인위적 인자 둘 다 사용하면 지난 세기의 전지구적 기온을 훌륭하게 모델링할 수 있다.



(IPCC, 2007)

■ 그림 3-7. 20세기 지표온도의 변화

위의 그림에서 검은색 선은 관측치, 노란색 선은 자연적 기후영향인자와 인위적 기후영향인자를 사용한 14개 기후모형, 58개의 시뮬레이션 결과이다. 빨간색 선은 모든 모델의 평균값을 의미한다. 기온차이의 기준은 1901~1950년 평균에 대한 차이를 의미한다. 회색 세로선은 중요한 화산폭발을 나타낸다.

모델들은 또한 다른 관측된 변화들, 낮 기온보다 밤 기온의 더 빠른 상승, 북극에서 정도가 더 높은 온난화, 1991년의 피나투보 화산폭발 같은 중요한 화산폭발 후에 일어난 약간의 단기적 전지구적 냉각(및 그 후의 회복)도 재현해낼 수 있다. 지난 20년 동안 도출된 지구 기온 전망 역시 그 기간의 관측치와 전반적으로 일치하였다.

그래도 모델들은 아직은 상당한 오차를 보인다. 일반적으로 작은 범위를 다룰수록 더 큰 오차를 보이지만 넓은 범위에 관한 문제도 남아 있다. 예를 들면, 엘니뇨-남방진동, 메이든-줄리안 진동의 시뮬레이션은 아직 부족한 점이 있다. 이러한 오차가 생기는 궁극적 원인은 많은 중요한 소범위 과정들은 모델로 명확히 파악할 수 없기 때문에 대범위적 특징들과 상호작용하는 점을 이용해 대략적 형태로 포함시켜야 한다는 데 있다. 이것은 부분적으로는 컴퓨터 연산능력의 한계 때문이지만 과학적 이해정도의 한계 혹은 일부 물리 과정의 상세한 관측치의 가용성 한계로 인한 결과이기도 하다. 구름에 관련한 불확실성은 상당히 커서 결과적으로 기후변화에 대한 구름 반응에도 큰 불확실성이 남아 있다. 결국 모델들은 구체적 온실가스 복사력에 대응한 실질적 범위의 지구 기온 변화를 보여준다. 그러나 그런 불확실성에도 불구하고 모델들은 온실가스가 증가하는 상황의 실질적 기후온난화에 대해 서로 일치하는 전망을 내놓으며, 그 전망된 온난화의 정도는 기후변화 관측치나 과거의 기후 재구성 같은 다른 출처에서 나온 개별 추정치와 일치한다.

지구 모델로 전망된 변화에 대한 확신은 소범위일수록 감소하기 때문에 지역적, 국지적 범위의 기후변화를 연구하기 위해 지역적 기후모델 사용이나 규모축소 같은 다른 기법이 개발되었다. 그러나 지구모델은 계속 발전하고 있고 해상능도 계속 향상하고 있기 때문에 극단적 기상현상의 변화 같은 중요한 소범위 특징들을 연구하는 데 점차 유용해지고 있으며, 컴퓨터 연산능력의 증가와 함께 지역 범위의 표현도 향상될 것으로 예상된다. 모델들은 기후계를 점점 더 포괄적으로 다루어가고 있고, 기후변화에 잠재적으로 중요하다고 간주되는 물리적, 생물리적 과정 및 상호작용

용에 대한 긴 시간범위의 표현도 점차 명확해지고 있다. 근래에 일부 지구 기후 모델에 식물 반응, 해양의 생물학적, 화학적 상호작용, 방상 역학 등이 포함된 것이 그 예이다.

요약하자면, 모델에 대한 확신은 그것들의 물리적 편향과 관측된 기후 및 과거 기후변화를 표현해 내는 기술에서 기인한다. 모델들은 기후를 시뮬레이션하고 이해하는 데 극히 중요한 도구인 것으로 판명되었고, 넓은 범위의 미래 기후변화에 대한 신뢰할만한 정량적 추정치를 제공할 수 있다는 높은 확신을 주었다. 예측된 기후변화의 크기와 시기 및 지역적 세부사항에 불확실성을 낳길 수 있는 구름을 표현하는데 여전히 상당한 한계가 있지만 몇 십년간의 발달과정에서 모델들은 온실가스 증가에 대응한 중요한 기후온난화에 대해 확실하고 분명한 그림을 일관되게 제공하고 있다.

다. 기후변화 대응 지하수 함양 및 이용 가능량 산정을 위한 적정 기후모델의 선정
기후변화 영향평가 연구와 정책입안자들이 기후시나리오를 선정하는 데 있어 다음과 같은 5가지 기준을 고려해야 한다.

첫째, 전 지구적인 예측이 일관적인 시나리오인지 살펴보아야 한다. 기후 시나리오는 온실가스의 증가에 의하여 2100년도에 기온이 1.4~5.8°C 증가하거나 대기 중 CO₂의 농도가 2배가 되었을 때 1.5~4.5°C 증가할 것으로 예상되는데, 전 지구적으로 일반적인 예상치를 벗어나는 모순된 값이 없는 시나리오를 선정해야 한다.

둘째, 과학적으로 타당한 시나리오인가 검토해야 한다. 자연법칙을 무시하지 않고 지역 또는 전 지구적으로 객관적 타당성을 유지해야 하며, 다른 변수들의 변화와 조화를 이루어야 한다.

셋째, 기후변화 영향평가 연구에 적용하기 위하여 시공간적으로 다양한 자료의 제공이 가능한 시나리오인지 검토해야 한다. 예를 들어, 강수량, 태양복사, 온도, 습도, 풍속 등의 입력변수들이 공간적인 범위는 전 지구에서 관심 지역까지의 제공되는지 검토하고, 시간적인 범위에서는 연평균에서 일별 또는 시간별 자료를 제공할 수 있는지 고려해야 한다.

넷째, 미래에 발생하는 지역기후의 잠재적 변화를 대표할 수 있는 시나리오인가 확인해야 한다.

마지막으로, 기후변화 영향평가를 위하여 시나리오를 획득하고, 해석하고 적용하기 손쉬운 시나리오인지 검토해야 한다.

그러므로 본 연구에서는 SRES(Special Report on Emission Scenario)의 A1B 시나리오에 따른 한반도 기후변화 시나리오를 선택하였다. A1B는 시나리오는 고도 경제성장이 계속되며, 세계 인구는 21세기 중반에 정점에 달한 후 감소하고, 신규 에너지의 개발 및 에너지 관련 신기술 또는 고효율화 기술이 급속히 도입되는 미래 사회를 가장한 시나리오이며, 이에 따른 기후변화를 예측하였다.

2. 적정 지하수 수문 모델의 선정

가. 지하수 함양 영향 요소

1) 강수(Precipitation)

강수는 지하수 함양 과정에서 가장 중요한 요소인 동시에 전지구적 물순환계를 지배하는 원동력 및 지구 내 담수의 주공급원 역할을 주도한다. 강수는 바람 및 온도와 같은 기상 요소에 의해 상당한 영향을 받으며 시-공간적 변화율이 매우 심하기 때문에, 특정 지역에서의 강수량 및 강수 비율을 추정하는 것은 대단히 어렵다. 실제로, 하천 유역의 수문곡선을 분석하여 보면, 강수에 의한 변화율 및 시간적 침투 흐름에 영향을 주는 것은 지속적인 강우보다 강우강도가 훨씬 높은 태풍 등의 극단적인 현상이 더 큰 것으로 나타나는데, 이는 증발산현상의 정도 여부가 또 다른 요소로 작용하는 것으로 알려졌다 (Lerner et al., 1990)

강수량의 정확한 측정 또한 매우 어렵다. 강수량은 보통 특정장소에 설치된 관측소에서 표준유량계를 사용하여 축적강수량 형태로 측정하는데, 측정 오차가 크고 유역 전체의 공간적 강우 분포 추정이 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 GIS 환경에서 Thiessen 격자망 및 크리깅과 같은 점형자료의 공간적 외삽을 실시하여 강우의 공간분포를 분석하고자

하는 시도가 있었으며(Ball and Luk, 1998), 이러한 외삽방법은 과거 기상 기록을 기반으로 하여 추계학적 분석을 통해 강우의 공간분포를 생성하는 합성 기상자료 생성기 개발의 주요 이론적 배경이 되었고, 가용 기상관측 자료가 거의 존재하지 않는 지역에서의 강우분포 추정을 가능하게 하였다.

대부분의 지하수 모델링 수행시, 강우와 관련된 자료는 공간적으로 일정하거나 월별 또는 연도 별로 평균값을 계산하여 적용하는 것이 보통이며 폭풍과 같은 이벤트성 기상 현상은 고려하지 않는다. 이러한 가정은 개별적 폭풍 현상에 비해 함양속도가 느린 불포화대에서 단기간의 함양량 산정에는 합리적일 수 있으나, 좁은 지역 내에서 변화율이 대단히 큰 강우의 특성상 거대 규모의 모델링시에는 강우의 공간적 변화는 무시할 수 없는 변수로 작용한다.

2) 식생

식생은 대기 중 강우가 지하수면까지 도달하는 경로를 직접적으로 차단하여 지하수 함양을 감소시키는 역할을 한다. 강우시 식생 임관은 강우의 일부를 중간에서 차단하고, 증발산을 통해 대기 중으로 발산되거나 식생줄기를 따라 흘러서 지면과 직접적으로 접하게 된다. 식생에 의한 지하수 함양 영향은 증발 및 증산작용에 의해 가장 크게 발현되며, 습윤기후지역에서는 연간 강우량의 40~60%를 차지할 정도로 물수지에 있어서 중요한 부분을 차지하기도 한다. 증발산량의 추정은 1950년대 이전부터 여러 방법이 개발되어 적용되어 왔으며, 최근에는 토양수분수지와 증발 모델을 결합한 Penman-Grindley 모델을 사용하여 강우의 지하함양을 간접적으로 추정하기도 한다.

식물 뿌리 또한 지하수 함양 과정에서 중요한 역할을 한다. 식물 뿌리는 불포화대 심부까지 성장하여 불포화대 내 토양수를 흡수, 궁극적으로 지하수면에 도달할 수 있는 토양 수분의 감소를 야기할 수 있는 반면, 식물 뿌리와 불포화대 사이에 발달한 간극을 통해 침투한 우수가 빠르게 지하수면에 도달할 수 있게 한다. 또한 불포화대 내 지하수 분포가 불균형할 때, 식물 뿌리는 자체의 생리적 특성을 발휘하여 수분이 적은 지역보다 과포화된 지역에서 차별적으로 물을 흡수하

는 일종의 '수리적 재분배' 역할을 함으로써 지하수 함양에 공헌할 수 있다.

공간지리정보적 측면에서 엽면적지수, 즉 식생의 엽면적 대비 토지피복의 비율 역시 지하수 함양에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 엽면적이 크면 잎에 의한 강수의 중간 차단율이 커짐과 동시에 증발산율이 증가하게 되어 궁극적으로 지하수 함양률이 감소한다. 엽면적지수는 Landsat 과 같은 위성영상을 통해서 공간적인 분포와 함께 산출할 수 있으나, 계절적인 변화가 큰 지역에서는 측정지역의 식생 및 식물의 성장 여부에 따라 지수 변화가 심하므로, 지하수 함양률산정시 이를 고려할 필요가 있다.

3) 토지이용 및 피복

강수는 토지의 이용상태 및 피복 종류에 따라 지하침투 속도가 달라지기 때문에 궁극적으로 지하수 함양에 영향을 받을 수 있다. 일례로, 호주에서는 자연식생을 제거한 토지에 단년생 작물 및 목초를 재배한 결과 과도한 지하수 함양으로 인해 토지가 습지처럼 침수되고 염분이 증가하는 악영향을 초래하였다(Walker et al., 2002). 도시지역에서는 불투수층 면적 증가가 지하수 함양을 가름하는 중요한 요인이 되나, 지하수 함양의 양적 증감보다는 함양된 지하수의 질적 저하가 더 큰 문제로 작용한다.

토지이용 및 피복 정도의 변화에 따른 지하수 함양은 기후 조건에 따라 달라질 수 있다. 습윤기후 지역에서는 연중 강수량이 계절에 상관없이 고르기 때문에, 토지이용 및 피복의 종류에 따른 지하수 함양 패턴이 바뀔 수는 있으나 유역 전체에서의 함양 영향은 없는 것이 일반적이다. 그러나, 연중 강수량이 월별 차이가 심한 반건조 기후 지역에서는 산불 및 벌목 등으로 토지가 황폐화되고 그에 따른 토지피복이 변함에 따라 지표유출 및 지하수 함양에 지대한 영향을 미친다. 즉, 반건조 기후 지역에서는 식생 형태의 토지 피복은 지하 대수층의 직접적 함양을 방해하는 요소로 작용하기 때문에 궁극적으로 가용용수 확보에 부정적인 영향을 가져오게 된다. 토지이용 형태 및 토지 피복의 분포는 공간지리정보 분석을 통해 구할 수 있으며, 지하수 함양량 산정에 있어서도 유용한 도구로 사용될 수 있다.

4) 도시화

도시화에 의한 특정 지역의 물순환 평형에의 영향은 매우 크며, 함양률의 변화뿐만 아니라 도시지역 전체의 기후조건도 변화된다. 도시지역 내 불투수층 면적의 증가로 인해 지표면 유출량은 급격하게 증가하는 반면 강수에 의한 직접적인 지하수 함양량은 감소하는 패턴이 일반적이다. 그러나 대부분의 도시 중심지역은 도시 외곽으로부터 이용 가능한 물을 인입하기 때문에 끝어들임으로 도심에서의 물 양은 많아지는 아이러니가 발생한다. 이러한 인입용수의 일부는 정화조나 하수누수, 용수 배관망, 정원 등의 공급 등을 통해 지하로 다시 환원되고, 이러한 인간 활동에 의한 간접적인 함양은 불투수층을 따라 지표수 유출로 야기된 강수의 손실을 보충하는 역할을 한다.

5) 토양 특성

불포화대에서 토양의 수리학적 특성은 토양수분함량과 압력 수두에 매우 민감하게 반응한다. 불포화대 내 수분의 체적이 조금만 변하여도 수리전도도가 100배 이상 변할 수 있기 때문이다. 게다가, 불포화대는 층형 사질토, 실트, 점토 등 다양한 토양으로 구성되는 경우가 대부분이어서 수리적으로 비균질성이 높고 수분의 분포도 일정하지 않다. 이러한 수리학적 불안정성은 수분의 선택적 흐름을 야기하며, 입자 크기가 큰 층형 건조토양에서 더욱 크게 가속화된다.

불포화대 대부분의 선택적 흐름은 식물 뿌리, 간극 및 열극, 일부 균질한 토양층의 존재 여부로 인해 예측이 매우 힘들며 수리학적 특성을 더욱 복잡하게 만든다. 지하수 함양은 균질한 토양에서도 그 변화가 심할 수 있는데, 이는 지형적 특성과 그로 인한 함양이 특정지역 집중화에 기인한다.

나. 기존 수문 모델의 총괄적 장단점 및 입력인자 비교

1) SWAT

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold 등에 의해 개발된 유역모형으로 대규모의 복잡한

유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리방법의 영향을 예측하기 위하여 개발되었다.

SWAT은 한 유역에서 다양한 물리적 과정을 모의할 수 있다. 유역은 수문에 영향을 주는 토지이용이나 토양의 상이성을 고려하여 수개의 소유역으로 구분할 수 있다. 각 소유역에 대한 입력정보는 그룹화되거나, 기후, 수문반응단위(HRU), 저류지/습지, 지하수 그리고 주하천 또는 하도나 배수로 등으로 분류된다. 수문반응단위는 소유역내 의 집중화된 토지지역이며, 동일한 토지피복과 토양 및 관리 등의 조합으로 구성된다. SWAT의 주요 기능은 다음과 같다.

○ 차단저류(Canopy storage)

식생피복은 침투, 지표면 유출, 증발산에 중요한 영향을 주며 강우 발생시 강우의 침식에너지를 감소시키고, 강우 일정부분을 저류시킨다. 차단저류는 식물의 표면에 의해 차단된 물인데 증발된다. SWAT은 사용자가 토지피복에 대한 최대엽면적지수와 식생에 저장될 수 있는 최대값을 입력하도록 하고 있다. 이 값과 엽면적지수는 모형에 의해 토지피복/작물의 성장 사이클의 임의 기간에 대해서 최대 저류값을 계산하는 데 사용된다. 증발이 계산될 때, 물은 차단저류에서 제일 먼저 없어진다.

○ 지표면 유출(Surface runoff)과 침투(Infiltration)

지표면 유출은 경사진 지표면을 따라 발생하는 흐름이고, 침투는 토양표면에서 토양층으로 물이 들어가는 것을 말한다. SWAT은 SCS CN 방법과 Green-Ampt 방식에 의해 지표면 유출과 침투량을 분리할 수 있는데, SCS CN 방법은 일단위의 지표면 유출을 계산하는 데 사용되기 때문에, 침투를 직접적으로 모형화할 수 없다. 토양층에 유입된 침투량은 총강수량과 지표면 유출량의 차이로부터 계산된다. Green-Ampt 침투모형은 침투를 직접 모형화하지만, 세분화된 시간의 강수량이 필요하다.

○ 중간유출(Subsurface flow or lateral flow)

중간유출은 표층의 수리전도가 높거나, 얇은 깊이에서 불투수 또는 투수가 잘 되지 않는 토층을 가지는 지역에서 중요하다. 이 경우 강우에 의한 침투는 불투수층을 만날 때까지 수직으로 이루어지며, 불투수층 위에 포화지대를 형성한다. 이 포화지대에서 물이 유출(중간유출)되어 하천수에 기여한다. SWAT에서 중간유출은 토양층(지표로부터 2m 내외)에서 이루어지며 운동과 저류모형을 이용하여 구현된다.

○ 지하수(Groundwater)

SWAT은 지하수를 유역 내 하천에 지하수가 유출되는 얇은 비피압대수층(shallow aquifer)과 유역외 하천으로 지하수가 유출되는 깊은 피압대수층(deep aquifer)으로 구분한다. 얇은 대수층에 저장된 물은 지하수 유출 외에 매우 건조한 조건에서 토양층의 수분을 보충할 수 있으며, 식물에 의하여 바로 소진될 수 있다. 또한 얇거나 깊은 대수층의 물은 양수에 의해 소진될 수 있다.

○ 증발산(Evapotranspiration)

잠재증발산(potential evapotranspiration)은 무제한적으로 토양수분이 공급가능하고, 성장하는 식생에 의해 완전히 균일하게 덮인 넓은 지역으로부터 발생하는 증발산량이다. 이 양은 이류(advection)나 열저류 효과와 같은 미세 기상과정에 의해 영향을 받지 않는다고 가정한다. SWAT에서 잠재증발산량을 산정하기 위하여 세 가지 방법을 제공하고 있다.

증발산은 지구표면에서 액체 또는 고체상의 물이 대기중에 수증기로 변환하는 모든 과정에 대한 종합적인 용어이다. 증발산은 하천, 호수, 나지, 식물 표면으로부터의 증발과 식물 잎으로부터의 증발(증산), 얼음 및 눈의 표면으로부터 승화 등을 포함한다. SWAT에서 실제 증발산량은 우선 식생피복에 의해 차단되어 저류된 양을 증발시킨다. 잠재 토양수분증발은 잠재증발산과 옆면적지수의 함수에 의해 추정되고, 실제 토양수분증발은 토양 심도와 수분량의 지수함수에 의해 산정된다. 식물이 증산은 잠재증발산과 옆면적지수의 선형함수에 의해 모의된다.

상기의 주요 기능 이외에 SWAT에는 토지피복/식물성장, 침식, 영양물질 및 살충제의 거동, 영농관리의 영향, 주하천 및 하도, 저수지 추적 등이 포함되어 있다.

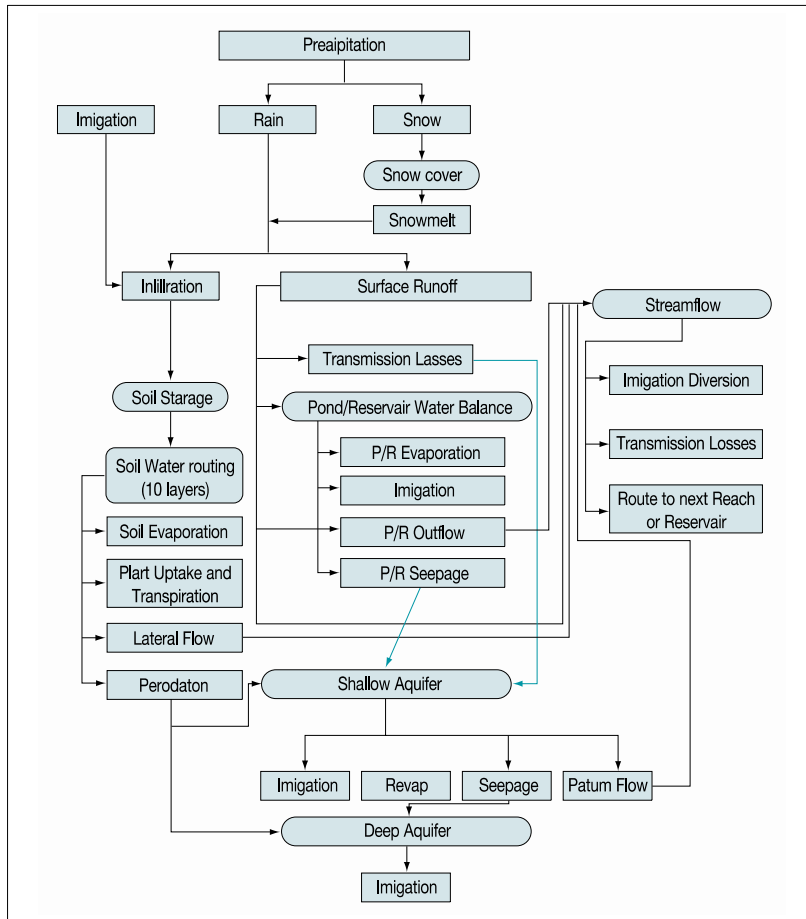


그림 3-8. SWAT 모형도

2) MODFLOW

현재 가장 범용적으로 사용되는 지하수 유동수치모형인 MODFLOW(A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model)는 지하수유동을 3차원으로

해석할 수 있는 모형으로 1983년 USGS의 McDonald와 Harbough에 의해 개발된 후 지속적으로 기능이 향상되고 있다.

MODFLOW는 다공질 포화매체 내에서 지하수 흐름을 모의하기 위해서 개발된 프로그램으로 이들 다공질 매체 내에서 유동하는 유체는 온도와 밀도가 항상 일정한 것으로 가정하고 있다. 따라서 해안지역에서 지하수의 과잉채수로 인한 염수의 침입현상으로 모의하는 밀도류 해석이나 오염된 지하수와 같은 다상유동체, 불연속성이 큰 파쇄매체 및 방향성이 일정하지 않은 이방성의 조건에서는 MODFLOW를 적용하기 어렵다. 그러나 파쇄매체일지라도 이를 등가다공성매체(equivalent porous media)로 대체가능한 경우에는 MODFLOW를 이용할 수 있다. MODFLOW는 비슷한 기능의 프로그램을 함께 묶어놓은 모듈화 구조를 갖고 있으며, 특정계산 및 수리학적인 옵션을 서로 독립적으로 사용할 수 있는 기능을 가지고 있다. 즉, 어떤 수리체계에 있어서 원하는 부분만을 모의할 수 있으며, 프로그램의 모듈화로 인하여 수리체계의 여러 성분을 독립적으로 모의할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 기능을 기존 프로그램의 수정 없이 새로운 패키지를 기존의 프로그램에 추가함으로써 사용자가 요구하는 계산이 가능하도록 유연성을 부여한다. 입력자료는 외부파일에 저장할 수 있으며, 출력형태는 일반화되어 있어서 사용자가 편리하게 출력처리할 수 있도록 해준다.

MODFLOW의 주요 기능은 패키지 형태로 구분된다. 패키지는 크게 유동성분 패키지와 해법(solver) 패키지로 구성되어 있고, 다시 유동성분 패키지는 스트레스 패키지와 소분류가 있다. 유동성분 패키지는 각 셀의 유한차분식 성분을 계산하는데, 여기에는 내부유동항을 수식화하는 블록중심 유동패키지(black centered flow package)가 포함돼 있다. 각 스트레스 패키지는 특별한 외부 및 경계흐름을 서술하는 상수를 수식화한다. 유동성분 패키지는 BAS(basic), BCF(black-centered flow), 우물(well), 함양(recharge), 강(river), 배수(drain), 증발산(evapotranspiration) 패키지로 구성되어 있으며, 각각의 상세 설명은 다음과 같다.

○ Basic Package(BAS)

BAS는 MODFLOW 모델의 일반적인 임무를 수행하는 가장 기본이 되는 패키지이다. BAS패키지는 사용할 주입선과 이들 옵션의 입력자료와 관련된 위치를 행, 열, 층 및 스트레스기간의 수에 관한 자료를 읽고, 모델 배열에 필요한 모사시간을 이산시킨 자료를 읽고 수행한다. 또한 각 시간단계에서 지정한 대로 모델결과의 출력을 조절한다.

○ Black Centered Package(BCF)

BCF 패키지는 주변 셀 사이의 지하수 유동률을 결정하기 위해 유한차분의 전도계수(conductance)를 계산하며, 또한 원래 포화대 내에 저유되어 있던 지하수의 유 · 출입률(유동률)을 결정하는 항을 계산한다. 이러한 계산을 수행하기 위해서는 1개 절점은 항상 셀의 중심점에 위치하고 있는 것으로 가정하기 때문에 셀 중심 유동 또는 흐름이란 술어를 사용한다.

○ Recharge Package

함양패키지는 대수층의 면적함양(areal recharge)을 모사하기 위해 고안된 것이다. 따라서 대부분의 경우 면적함양은 지하수계로 침투(percolate)되는 강수에 의해 발생한다. 자연 상태에서 강수의 지하함양은 대수층의 지표노출면(최상위 구간)에서 발생하기 때문에 동일한 수직열의 여러 심도에서 함양이 동시에 일어나지 않는다. 가장 간단한 예로 자후수계의 최상단면은 모델의 제1층이다. 또한 함양패키지는 강수에 의한 함양 이외에 다른 공급원으로부터 함양을 모사할 때도 사용할 수 있다.

○ Well Package

우물 패키지는 1개 스트레스 기간 동안 특정비율로 대수층으로부터 지하수를 채수 및 주입하는 우물 또는 기타 채수시설의 형태를 모사하기 위해 고안된 것으로, 이 때 주입 및 채수율은 셀 면적이나 셀 내의 수두와는 무관하다.

○ Stream flow routing package

하천유수추적 패키지는 강 패키지를 수정한 것으로 하천과 대수층계 사이의 누출(leakage) 계산은 물론 1개 이상의 하천, 강, 운하 및 배수로로 통한 흐름을 추적하기 위해 고안된 패키지이다. 대수층 위에 발달되어 있는 하천을 분할부분(segment)과 하천구간(reach)으로 구분한다. 여기서 하천의 분할부분의 종점에서는 유수량을 빼주는 1개 하천이나 분수지점(division)을 의미한다. 하천구간은 대수층에서 지하수 흐름을 모사하기 위해 사용한 유한차분망의 1개 셀에 해당하는 한 개 분할부분의 1개 구간이다. 따라서 분할부분은 1개 이상의 하천구간(reach)으로 구성되어 있다. 분할부분은 최상류 쪽으로부터 하류 쪽으로 내려오면서 순차적으로 번호를 부여하고, 각 분할부분 내에 소재하는 하천구간은 위와 동일한 방법으로 번호를 부여한다.

하천흐름을 추적하기 위한 개념화에 분할부분을 사용함으로써 분할부분이 서로 합류하여 1개의 하천으로 되거나 1개 분할부분이 여러 개의 하천으로 분수되어 유출량이 분산되는 현상을 프로그램이 쉽게 처리할 수 있도록 했다. 따라서 본 패키지의 지표수와 지하수 사이에서 발생하는 누출(leakage)계산의 기초단위는 하천구간이다. 하천유수추적 패키지는 하류구간에 대한 시간함수가 포함되어 있지 않다. 여기서 사용하는 계산방법은 모델영역으로 유입되는 하천유수의 모델 모사시 지정한 기간에 하류하천구간에서 즉시 사용가능한 것으로 가정하였다.

3) HELP3

HELP(Hydrological Evaluation of Landfill Performance) Program은 미국 EPA에서 80년대 초에 개발하여 매립지내·외의 물의 이동현상 파악을 위한 모델로서 매립장 설계 및 재검증에 이용되고 있다. HELP 모델은 기상조건과 매립층의 초기 함수조건에 의한 매립지 내의 유출 및 침투특성과 토질특성을 기초로 매립지 내에서 이루어지는 수리학적 과정을 분석, 평가하는 물수지 예측모델이다.

모델식의 기본 가정 및 조건은 우선 매립지 내 물의 흐름은 Darcy, s Law에 의해 정의하고, 매립지 외부에서 물의 유입은 고려치 아니하며, 폐기물 분해시 발생가스에 의한 물수지 변화

역시 고려치 않는다. 또한 매립층은 공간적으로 균질하고, 형태가 일정한 것으로 하며, 마지막으로 인공차수막은 영구히 기능이 유지된다.

HELP3 모델은 매립지의 침출수 발생량을 매립지 설계인자로부터 해석토록 되어 있는데, 강우, 표면 저류량, 침투 및 증발산량, 토양수분 저장능력, 극면배수 등을 통해 유출되는 각각의 수량을 예측할 수 있는 준 2차원 모형이다. 본 모델로 기상, 토양, 매립지의 구조 및 설계인자 등에 관한 데이터와 관계식을 이용하여 표면 유출량, 침투량, 증발산량, 토양수분보유량, 측면배수량을 계산한다. HELP3의 주요 역할은 다음과 같다.

HELP3에서는 수분함량을 부피기준으로 계산한다. 총공극율이란 토양이나 폐기물층의 공극이 차지하는 총 부피를 말하며, field capacity란 토양이 0.33bar의 진공흡입압력일 때의 수분함량 또는 추가적인 수분공급 없이 중력배수 상태에서 장시간 지난 후에 토양 내에 남아있는 수분함량을 말한다.

HELP3 프로그램에서는 모든 비차수층에 대해 수분함량을 명시할 수 있다. 점토차수층의 경우 항상 포화상태로 있는 것으로 간주한다. 만약 초직 수분함량이 명시되지 않으면 프로그램은 정상상태 부근의 값을 가정하고, 정상상태에 가까운 수분함량으로 초기화하여 대체된다.

모델을 구현하기 위한 입력 자료는 크게 3가지로 구분된다. 첫째, 지형 및 지표식생 관련 입력 자료이다. 세부 구분으로는 SCS Runoff Curve Number, Potential Runoff Fraction, Leaf Area Index, Evaporative Zone Depth, 바닥경사 및 배수로 간격이 있다.

SCS Runoff Curve Number는 매립지 표면으로의 직접 유출량을 의미하며, Potential Runoff Fraction은 매립이 진행중인 지역에서의 SCS CN값에 의한 실제 표면유출가능 비율이다. Leaf Area Index은 식생시 증산작용이 이루어지는 식물잎 면적비이다. Evaporative Zone Depth은 일사량에 의한 지표면 증발 가능 깊이이다. 바닥경사는 배수층 설치에 따른 집배수층의 집수효율로 결정된다. 마지막으로 배수로 간격은 배수층 설치에 따른 집배수층의 집수효율로 결정된다.

둘째, 기상 관련 입력자료는 매립지의 기후특성을 나타내는 것으로 기상상태는 침출수 발생량에

가장 큰 영향을 미친다. 매립지에서 침출수 발생량에 영향을 미치는 기후인자는 강우량, 강우형태, 증발산, 계절별 온도 등이며, 가장 중요한 인자는 강우량과 강우형태이다. 우리나라에서 강우는 풍수기에 년 강우량의 60% 이상 내리며 강우형태도 단시간에 집중되는 형태를 보인다. 연 중 50mm/일 이상을 기록하는 빈도수가 5일 정도로 전체 강우량의 38% 이상을 점유하므로 매립지의 침출수 발생량을 증가시키는 중요한 요인으로 작용한다. 일반적으로 강우강도가 커지면 유출량이 증가하여 지하로 침투하는 양과 매립지의 폐기물층으로 침투하는 침투량이 감소된다. 그러나 매립 작업구역에 내리는 우수는 임시복토층 상부에 집중되어 이것이 폐기물과 접촉되므로 침출수에 혼입되어 침출수화되므로 침출수 발생량은 우수량에 의해 증가된다.

HELP 모델링에 사용한 강우자료는 대부분 연구지역의 기상자료 중 침출수 발생량에 영향이 큰 강수량 자료를 분석하여 강우 추이가 비슷한 해의 기상자료를 적용하였다. 기타 기상자료는 기온, 일사량, 식생기간 등으로 강우량 및 강우강도에 비하여 침출수 발생량에 미치는 영향이 적다고 판단되며 해당년의 자료를 입력할 수 있다.

마지막으로 토양관련 입력자료는 Initial Soil Water Content, 배수층, 복토층 및 원지반층으로 구분된다.

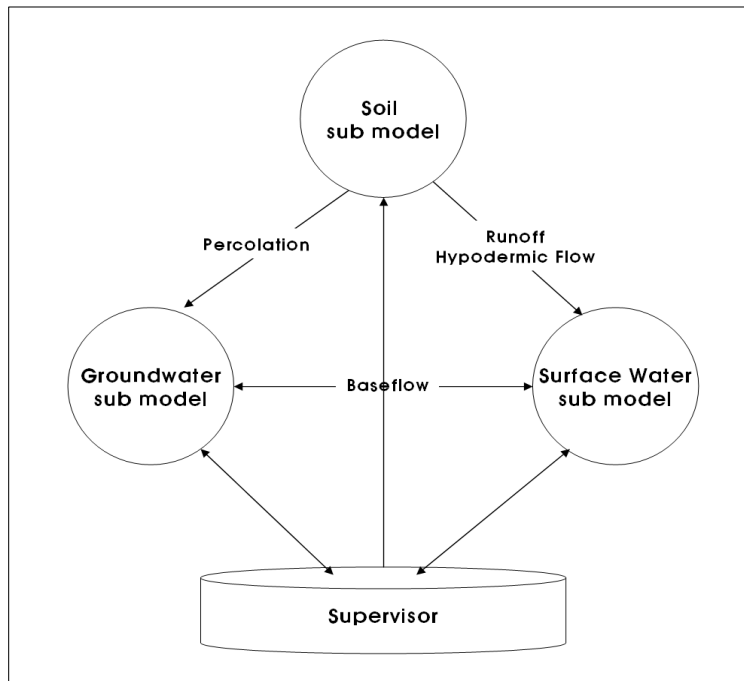
Initial Soil Water Content(초기 토양 함수비 Vol/Vol)는 단별매립으로 각 단별 침출수량 산정을 위한 초기 토양 함수율(Vol/Vol)로 최상부층(복토층+폐기물층)의 경우 반입시의 함수비를 적용하며, 하부층(전단계 복토 및 폐기물층)은 단별 매립경과년수를 고려 전단계 각층별 수분 저류량(Vol/Vol)을 적용하는 것이다. 배수층, 복토층은 배수층 및 복토층 초기함수율(Vol/Vol)은 포장용 수량을 적용하였고 매립 진행에 따른 함수율 변화는 HELP 모델링 결과를 적용한다. 마지막으로 원지반층은 원지반(차단)층의 경우 초기부터 포화상태로 가정하였고, 매립 진행에 따라서 침출수의 유입이 없는 것으로 판단하여 함수율 변화가 없는 것으로 하였다. 또한 압밀진행에 따른 간극수유입량을 매립경과에 따라 산정하여 총 침출수량 예측시에 고려한다.

4) MOHISE

MOHISE('Modele Hydrologique Integre pour la Simulation du Cycle de l'Eau')는 벨기에(Belgian Federal Science Policy Dpt, University of Liege)에서 개발된 수문통합 모델로, 수문 체계의 정확도를 향상시키고자 기존의 다양한 모델 및 수치해석방법론 등을 통합하여 사용자에게 제공하며, 수량 등을 포함한 전반적인 수계 관리가 가능하도록 한다.

본 모델은 시나리오 설정이 가능하여 유역 단위의 수자원 장기(30년 이상) 계획 수립, 기후변화 시나리오에 따른 수자원 영향분석 등 기후변화로 인한 유역 차원의 물순환(Hydrological Cycle) 영향 분석시 유용하게 활용될 수 있다.

MOHISE는 토양, 지하수, 지표수 모델과 이를 연계시키는 통합모델로 구성되며, 각 모델의 주요기능은 아래와 같다.



■ 그림 3-9. MOHISE 모델 구조

그러나 본 모델은 수위가 낮은 시기, 즉 가뭄과 같은 갈수기 동안의 토양-지하수-지표수 간 시뮬레이션 결과는 우수하나, 홍수기간 동안의 시뮬레이션 결과 정확도는 떨어진다. 본 모델은 입력자료의 정확도에 따라 시뮬레이션 결과가 달라진다. 특히 강우의 시공간 분포, 토양 및 지질의 특성에 따라 결과가 상이해지므로 이에 대한 신중한 고려가 필요하다.

표 3-5. MOHISE 모델의 구성 및 주요기능

구성	모델	주요 기능
토양	EPIC-GRID	<ul style="list-style-type: none"> · 기후, 수문, 작물생육, 경작, 침식, 영양순환, 토양온도, 작물관리, 경제 Module로 구성 - 증발산량 - 수분함양량 변동 - 지표수 유출 변동 - 지하수 유출, 지하 유수, 지하수면으로의 여과 - 토양 수분량, 토양 및 작물 증발산량, 해빙, 경작피복
지하수	SUFT3D	<ul style="list-style-type: none"> · Saturated Unsaturated Flow and Transport in 3D · 투수층과 불투수층 지대의 모델링 · 지역적 지리특성을 반영한 Mesh Refinements 기능 제공
	MODFLOW	<ul style="list-style-type: none"> · 투수층 지대의 모델링(유량방정식)
지표수	RIVER	<ul style="list-style-type: none"> · 하천망(River Network) 상의 동적인 유동 모의 · 하천 유수, 수위, 평균유속, 횡단깊이 산출
감독	MASTER	<ul style="list-style-type: none"> · 세 모델간의 연계 · 지표수와 지하수 간의 유수도 산출

5) GMS

GMS(Groundwater Modelling System)는 지하수 모델링 환경에 적합하도록 개발된 패키지 소프트웨어로, 지역의 특성화부터 모델 개발, 후처리, 검증 및 시각화까지, 전반에 걸친 모든 과정의 지하수 시뮬레이션이 가능하다.

GMS는 Map, GIS, TIN, Solid, 2D/3D Grid, 2D/3D Mesh, 2D/3D Scatter Point 모듈로

구성되어 있다. 9가지 인터페이스 모듈을 통해 개념모델의 구축, 수치모델링 및 지표모델링, 모델링 자료의 공간화, GIS DB와의 호환, 3차원 모델의 생성, 단면 분석, Cartesian 격자의 생성, 유한요소 격자망 생성 및 편집, 보간 등의 작업이 이루어진다.

GMS의 주요 기능은 다음과 같다. GMS는 3차원 지하수 흐름 모형인 MODFLOW 모델을 GMS 내에 탑재하고 있어, 격자공간의 선택, 수리·지질학적 특성인자 입력, 경계조건 정의가 가능하다. 또한 주어진 시간동안 정상류 혹은 부정류에서 입자의 궤적 및 유속장 내의 입자 운동 등의 모의가 가능한 모델(MODPATH)을 활용하여 우물 포획 지구나 수원보호 연구 등이 가능하며, 3차원 다중 오염원 이송 모형(MT3DMS) 및 지하수 내 물질의 3차원 이송모형(RT3D), 3차원 유한 요소 모델(FEMWATER)이 탑재되어 있어 지하수 흐름계에 용해 혹은 흡착된 성분 및 오염원들의 이송, 확산, 혼합, 화학반응 등의 모의가 가능하다. UTEXAS 모델을 통해 파괴 표면과 안전요소에 대한 댐, 제방, 경사를 해석하며, 댐이나 제방의 단면침투계산모형(SEEP2D)을 통해 포화 및 불포화 흐름 모의 및 지하수위의 결정이 가능하며 기타 호기성 또는 혐기성 미생물 분해가 진행되는 지하수 내 용질의 이송 모의가 가능하다.

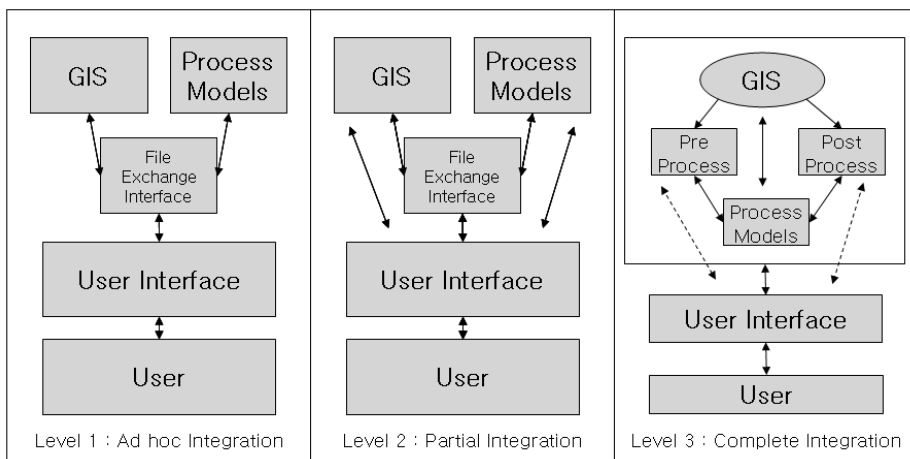
GMS의 특징 중 하나는 지하공간 특성치 입력 모듈을 갖추고 있다는 것이다. 지하공간 특성치 입력모듈을 통해 TIN, 입체모형, 보링공 자료 생성을 통해 복잡한 지층의 표현이 가능하며, 이로 인한 지하수 모델링 결과의 정확도를 높일 수 있다.

그러나 GMS는 본 연구에서 수행하고자 하는 지하수의 함양량보다는 지하수 흐름과 운반 모델링 과정 부분 및 가시화에 중점을 두고 있어 지하수 함양량 산정을 위한 모델로 사용하기에는 부족한 점이 있다.

다. 지하수 유동 모델링과 GIS 연계 방법론

지하수 유동 모델링과 GIS 연계에는 세가지 단계가 있다. 이 연계형태의 세가지 단계는 첫째, 임시연계, 둘째는 부분적 연계, 셋째는 완전한 연계이다. 첫 번째 단계인 임시 통합 단계에서는 GIS 데이터베이스와 지하수 유동 모델링이 따로 활용되는 상황이다. 자료는 GIS로부터 추출되고,

모형은 따로 실행되고 결과는 사용자 재량에 따라 분석된다. 두 번째 단계에서는 모델링에서 GIS가 좀더 통합된 역할을 한다. GIS는 자료를 제공하고 다음에 모델링 결과를 선처리 및 결과 표현을 위해 받아들인다. 대부분의 경우가 여기에 속한다. 세 번째 단계는 GIS 소프트웨어 안에서 완전한 모형개발로 이루어진다. 사용자는 하나의 운영체제 환경에서 GIS에 저장된 자료는 모형의 요구에 맞게 이루어져 있고 모형도 GIS에 맞게 이루어져 있다.



■ 그림 3-10. GIS와 지하수 모델과의 통합

라. 지리정보 연계성 검토

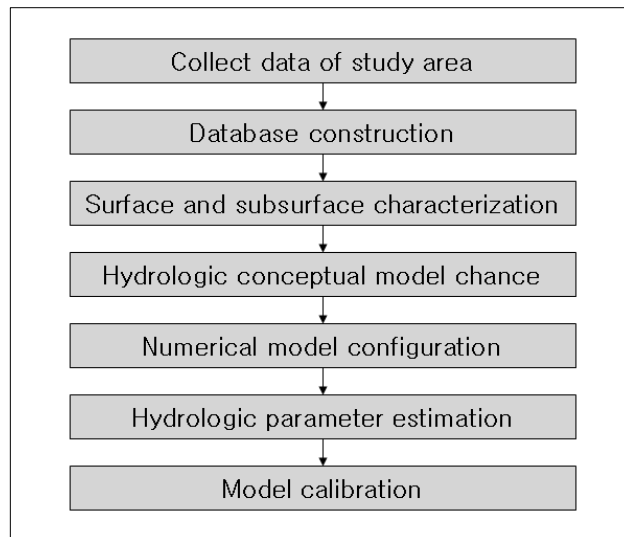
지하수 유동 모델링은 자료의 형식과 처리 방법론의 차이가 있지만, 기본적으로 공간자료를 처리하여 분석한다. 지하수 유동 모델링을 활용하여 효율적으로 분석하기 위해서는 자연현상을 가능하면 정밀하고 정확하게 수치화하는 과정이 반드시 필요하며, 이 과정에서 GIS 자료는 우수한 도구가 된다.

이러한 GIS와 지하수 모델링의 연계는 <그림 3-10>과 같으며, 이 과정들은 서로 연결되어 있고 어떤 부분은 반복적으로 행해진다. 방법은 먼저 연구대상지의 문헌조사가 실시된다. 연구대상 지역의 보고서, 지도 및 인터넷 자료를 활용하여 GIS 데이터베이스가 구축된다. 이러한 데이터

베이스 구축은 전체 연구에서 시간이 많이 소비된다.

데이터베이스 구축 동안에 입력자료의 해석이 필요하다. 즉, 토양, 토지이용, 지질 및 기후와 같은 입력자료는 수치모델링의 입력 파라미터로서 사용하기 위해서 해석이 필요하고 필요에 추정 및 일반화를 해야 한다.

다음으로 지표와 지하조건을 특성화(characterize)해야 하는데 연구보고서나 야외조사 자료가 수집되고 분석되어야 한다. 이런 자료들에는 지형(표고, 경사, 경사방위), 기후, 지질(암상과 구조), 토지이용, 식생지수, 토양 및 배사 등이 있다. 이런 기본자료와 해석된 자료는 수리지질학적 지하수 유동 모델링 구조의 개념적 모형에 적정한지 고려하여야 한다. GIS로 구축된 다양한 공간자료는 이 자료의 분포를 통하여 공간조절능력 추정에 대한 정확도를 높일 수 있다.



■ 그림 3-11. 지하수 모델링

■ 표 3-6. 지하수 모델링을 위한 자료 및 단계

Database Construction	Surface and subsurface characterization	Hydrologic conceptual model chance	Numerical model configuration
<ul style="list-style-type: none"> - Geology - Major structure - Landuse - LAI - Soil - Topography - Surface hydrology 	<ul style="list-style-type: none"> - Geological Structure Setting - Hydrogeology - Vegetation & Soil - Surface hydrology - Topography 	<ul style="list-style-type: none"> - Hydrogeologic Framework - Conceptuation - Pattern and Distribution of Discharge - Pattern and Distribution of Recharge 	<ul style="list-style-type: none"> - Boundary Condition Setting - Hydrologic Parameter Estimation

마. 모델 우선순위 선정

진술한 모형선정기준 중 모형을 실제 유역에 적용해봐야 알 수 있는 사항을 제외한다면, 모형의 선정기준은 첫째, 사용가능성 또는 개발가능성이다. 대부분의 장기 지하수 유동모델들은 이 조건에 충족하는 것으로 판단된다. 둘째, 목적에 부합하는 것이다. 본 연구의 주요 목적이 기후변화에 따른 지하수 함양량의 변화를 유추하는 것이다. 이 목적에 부합하는 모형은 개념적인 모형이 아닌 분포형 또는 준분포형 모형이다. 셋째, 유역특성, 시·공간 규모 문제 등 모형의 제한점에 대한 것이다. 즉 모형은 다양한 유역조건과 규모에 대해서 적용 가능해야 하고, 계산 시간간격도 사용자가 적절히 조정할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 기후변화를 주대상으로 하며 고려 입력 자료에서도 기상 및 기온 자료가 포함된다. 이를 고려한 모형 선택이 필수적이다. 넷째, 입력자료의 구축에 관련된 사항이다. 국내의 경우 분포형 모형을 이용하여 유출모의를 수행하는 것은 입력자료의 구축 측면에서 많은 제약이 있다. 즉, 지표수계에 관련된 자료는 어느 정도 구축이 가능하지만, 지하수계의 자료는 국내 대부분의 지역에서 수집이 불가능한 실정이므로 분포형 모형임에도 불구하고 개념적 모형과 유사하게 이용되는 경우가 많다. 상기 4가지 조건을 충족하는 모형은 분포형 모형인 SWAT이나 HELP3가 적당하다.

HELP 모형은 매립지에서의 물수지법을 보완한 모형으로 매립지를 통과하는 강우의 수리학적 거동을 예측하기 위해 미국 EPA와 공병단에 의해 1983년 개발된 준2차원 (quasi-2D) 컴퓨터 모형으로 물수지법을 기초이론으로 하고 있다. SWAT 모형은 미국 농무성의 농업연구소 (USDA, Agricultural Research Service ARS)에서 개발된 유역모델로서, 대상유역의 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형이다.

두 모형이 물수지법을 기초로 하고 있지만, 물이 토양층을 침투하 것을 모의하는 데에는 HELP 모형은 Darcy법칙에 근거하고 있고, SWAT모형에서는 물수지법을 이용하고 있다는 점에서 차이가 있다고 하겠다. 따라서 토양층 내를 침투하는 기작을 HELP 모형이 SWAT 모형보다 더 물리적 현상을 반영한다고 볼 수 있다. 그러나 불포화수리상수들이 대부분 경험식에 의존하고 있고, 실제로 현장이나 실험실에서도 쉽게 구하여질 수 있는 값들이 아니기 때문에 사용에 한계가 있을 수 있다. <표 3-7>은 SWAT 모형과 HELP 모형의 장단점을 정리한 것이다.

■ 표 3-7. 지하수 함양량 산정에 있어서 SWAT 모형과 HELP 모형의 비교

구분	HELP 모형	SWAT 모형
장점	<ul style="list-style-type: none"> 모형구조 및 입력자료가 SWAT 모형에 비해 간단함. 미계측 유역에 적용가능함(중간유출 손실계수 지역화를 위한 연구필요). 함양량의 다양한 시공간적 분포특성 파악과 토지이용 변동특성의 반영이 가능함. 토양수리특성치를 고려할 수 있고, 토양층을 침투하는 물리적 현상을 반영함. 	<ul style="list-style-type: none"> 함양량과 수문성분 사이의 관계파악 및 함양량과 유출량의 동시 해석이 가능함. 매개변수 지역화를 통하여 미계측 유역에 적용이 가능함. 함양량의 다양한 시공간적 분포특성 파악이 가능함. 함양량 산정에 토지이용 변동특성의 반영이 가능함.
문제점	<ul style="list-style-type: none"> 함양량과 수문성분 사이의 관계파악이 어려움. 지하수위 변동에 따른 함양량 영향을 고려하기 어려움. 	<ul style="list-style-type: none"> 모형의 구조가 복잡하고, 많은 수의 매개변수가 포함되어 있어서 매개변수 추정이 어려움. 지하수위 변동에 따른 함양량 영향을 고려하기 어려움. 토양수리특성치를 고려할 수 없으므로, 불포화대 토양층내부흐름이 상세화되지 않음.

HELP 모형은 국내에서 주로 매립장 평가부분의 침출수량을 계산하기 위하여 사용되었는데, 몇몇 연구자들은 이 모형을 지하수 함양량 산정에 활용하기도 했다(표 3-8).

국외의 경우에는 HELP 모형은 오랫동안 검증이 이루어졌고, 사용하기가 간편한 이유 때문에 기후변화와 관련한 연구에 활용이 되는 것을 알 수 있다. 특히 날씨(기상) 발생기를 차용하고 있는 장점이 기후변화와 관련한 지하수 함양량 변화를 평가하는데, 유용한 도구가 되고 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 특히 HELP3는 본 연구의 목적인 기후자료와 연동이 가능하며, 지하수 함양량 산정도 가능하다. 위 두 가지 기능을 연계하여 기후변화에 따른 지하수 함양량산정이 가능할 것이다.

표 3-8. HELP와 SWAT 모형을 이용한 연구동향

저자 및 출처	제목	비고
구태훈, 조원철 (2001)지하수 토양환경 6(3), 107-117	집중호우시 발생하는 난지도 매립지 내의 지하수 거동	HELP
건설교통부; 한국건설교통기술평가원 (2007)	우리나라 지역특성에 맞는 최적 지하수 함양량 산정기법 개발	SWAT, HELP
배상근 (2005), 산업기술연구소 논문보고집 28-1, pp73-84	지하수 함양량 산정기법 비교연구	HELP, SWAT
장연수, 김영우, 신동준 (1999) 한국지하수토양환경학회 춘계 발표회	HELP 모델을 이용한 복토재와 쓰레기의 다짐도에 따른 침출수위 분석	HELP
강동희 (2001) 중앙대 석사학위논문	부정류 상태에서 난지도 매립지 침출수 거동 예측	HELP (침출수 발생량 모의)
임은진, 이재영, 최상일 (2004) 한국지하수토양환경학회, 9(2), pp.48-53	폐기물 매립지의 최종 복토구조에 따른 침출계수 변화에 관한 연구	HELP (침출수 발생량 모의)
M. Toews (on going) Simon Fraser University (http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/)	Modeling the effects of climate change on groundwater	HELP (기후변화에 대한 지하수 영향 모의)
J.Sibek, and D.M.Allen (2005), Proceedings of the 2005 Puget Sound Georgia Basin Research Conference	Modeled climate change impacts in the Abbotsford-Sumas aquifer, central Fraser lowland of BC, Canada and Washington State, US	HELP (기후변화에 대한 지하수 영향 모의)

3. 연동 방법론 개발

가. 물리적 입력자료 구축

HELP 모형을 구동하기 위해서는 잠재증발산량을 구하기 위한 기후자료, 토양특성자료가 필요하다.

필요한 일반적인 기후자료에는 성장기, 연평균 바람속력, 3개월 평균(quarterly annual) 습도, 평년 월평균기온, 최대옆면지수(leaf area index), 증발 토양깊이 및 위도 등을 포함하고 있다.

필요한 토양특성자료에는 공극률(porosity), 포장용수량(field capacity), 위조점(wilting point), 포화수리전도도(saturated hydraulic conductivity), 초기함수 저류량(initial moisture storage), 선행함수조건 II에 대한 SCS 유출곡선지수(CN) 등이 있다. HELP 모형에서는 42개의 기본 물성치가 제공되고 있어, 실측치가 없는 경우 활용될 수 있다. 토양특성자료 중 공극률, 포장용수량, 위조점과 포화수리전도도는 토양수분 증발계수(soil water evaporation coefficient)와 Brooks-Corey의 토양수분보유곡선 변수를 추정하기 위해 사용된다.

1) 기후자료

HELP 모형은 일 강수량, 일 평균기온, 태양복사에너지를 생성하는 루틴(routine)이 있다. 루틴은 USDA ARS(Agricultural Research Service)에 의해 개발된 것으로 Richardson (1981) 방법에 근거하고 있다. HELP 모형에는 기본 기후자료 또는 사용자가 지정하는 과거 자료를 사용할 수도 있고, 일 강수량을 합성할 수도 있다. 마찬가지로 일 평균기온과 태양복사에너지도 과거자료 또는 합성자료를 이용할 수 있다.

본 연구에서는 기후변화 대응 지하수 함양량 산출을 위한 선작업으로, 한국 전반에 걸친 현재 기후 DB의 구축을 위해 남한 84개 기상청 기후관측소와 북한 27개 기상관측소의 일 기상자료를 이용하여 현재 기후 입력 자료를 구축하도록 한다. 현재 기후시기인 1971년에서 2000년까지의 최대·최소기온, 이슬점 온도, 운량, 풍속을 Krigging방법을 이용하여 보간하며, 강수량은 IDSW (Inverse distance squared weighting) 방법을 이용하여 자료를 제작한다.

본 연구에 활용될 기후자료 중에서 1970년부터 2000년까지는 기상청에서 실제 관측된 자료를 활용, 2001년부터 2100년도까지의 미래 기상자료는 2002년 IPCC에 의하여 보고서로 발간된 SRES의 A1B를 선택한다. A1B는 시나리오는 고도경제성장이 계속되며, 세계 인구는 21세기 중반에 정점에 달한 후 감소하고, 신규 에너지의 개발 및 에너지 관련 신기술 또는 고효율화

기술이 급속히 도입되는 미래 사회를 가장한 시나리오이며, 이에 따른 기후변화를 예측하였다.

SRES A1B 시나리오에 의한 한반도 기후변화자료는 한반도를 중심으로 한 북위 32.968°N에서 43.426°N까지, 동경 122.935°E에서 131.447°E까지의 범위에 대한 공간해상도 약 27km의 최대·최소기온, 강수량, 상대습도 자료이다(국립기상연구소, 2005; 2006; 2007). 람베르트 원추투영법에 의한 자료는 좌표변환을 통해 경위도 자료로 변경되며, 공간 보간을 통해 해상도를 확률적 방법인 Bilinear Interpolation을 이용하여 다운스케일하도록 한다.

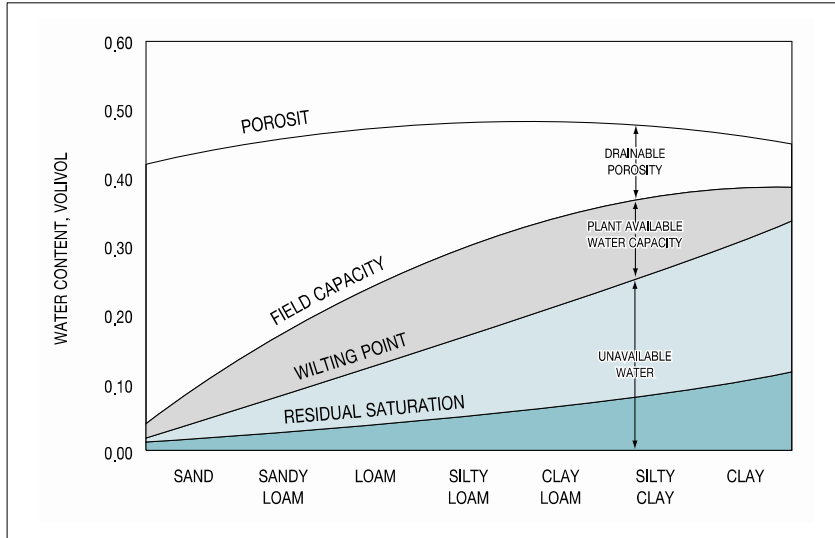
2) 토양특성 자료

HELP 모형은 라이너가 아닌 토양 등 매질에 대하여는 총공극률, 포장용수량, 위조점과 포화수리전도도값이 필요하다. 또한 라이너에 대하여는 포화수리전도도값이 필요하다. 이러한 변수들에 대하여는 HELP 프로그램이 기본적으로 제공하고 있는 리스트로부터 선택하거나 또는 사용자가 직접 입력하게 되어 있다. 토양수분보유량, 불포화 수직수리전도도, 라이너에서의 수두, 토양수분 증발량을 계산하기 위해 이러한 값들이 사용된다.

(1) 토양수분 보유곡선 변수

HELP 프로그램에서 사용되는 토양수분함량은 용적단위로서 전체 토양시료 중 물이 차지하고 있는 공간비율인 용적토양수분함량($\theta = V_w/V_t$)을 사용한다. 총공극률은 토양이 물로 포화되었을 때 물이 차지하고 있는 공간으로 정의된다. 포장용수량(field capacity)은 0.33bar의 흡인력(suction)을 주었을 때, 토양이 보유할 수 있는 수분함량, 또는 중력배수에 의하여 오랫동안 토양을 배수시켰을 때 남아있는 토양수분함량을 의미한다.

위조점(wilting point)은 식물이 토양에서 물을 빨아들일 수 있는 최소의 토양수분으로서 15bar의 흡인력으로 토양에서 물을 배수시켰을 때, 토양에 남아있는 물의 양을 의미한다. 위조점은 0보다 커야 되지만 포장용수량보다 적어야 되고, 포장용수량은 위조점보다는 크고, 총공극률보다는 작아야 한다. 토양조직 분류에 따른 토양 수분함량과 포장용수량 위조점 사이의 관계는 다음 <그림 3-12>에 잘 나타나 있다.



■ 그림 3-12. 토양조직 분류에 따른 토양수분보유 변수들과의 관계

(2) 수리전도도(hydraulic conductivity)

다공질 매질에서 흐름을 지배하는 방정식, Darcy 법칙에서 비례상수는 수리전도도(hydraulic conductivity)라고 불린다. 포화수리전도도는 입자크기(pore size), 공극비(void ratio), 토립자 구성(composition), 포화도(saturation)와 같은 매질 특성과 매질을 통과하는 동점성계수(kinematic viscosity)와 같은 유체의 특성을 동시에 반영하는 상수이다. HELP 프로그램은 수평배수량, 수평배수량, 토양 라이너 침투량을 계산하기 위하여 토양과 라이너의 포화수리전도도, 또는 불포화수리전도도를 필요로 한다. 지오 멤브레인의 증기확산계수(vapor diffusivity)는 증기확산에 의한 지오 멤브레인을 통과하는 누수량을 계산하기 위하여 포화수리전도도 값을 지정하게 되어 있다.

증발계수는 물이 토양이나 폐기물층으로부터 얼마나 쉽게 공기 중으로 증발될 수 있는가를 나타내는 상수이다. Ritchie(1972)는 증발계수(mm/day^{0.5})가 0.1bar의 모세관압에서 불포화수리전도도와 관련이 있다는 것을 발표하였다. 이와 관련하여 HELP 프로그램에서는 다음의 Ritchie 방정식을 이용하여 증발계수를 계산하게 된다.

$$\text{CON} = \begin{cases} 3.30 & (\text{Ku})0.1\text{bar} \leq 0.05 \text{ cm/day} \\ 2.44 + 17.19 (\text{Ku})0.1\text{bar} & 0.05 \text{ cm/day} < (\text{Ku})0.1\text{bar} \leq 0.178 \text{ cm/day} \\ 5.50 & (\text{Ku})0.1\text{bar} \geq 0.178 \text{ cm/day} \end{cases}$$

CON : 증발계수 (mm/day0.5)

(Ku)0.1bar : 0.1bar의 모세관압 하에서의 불포화수리전도도 (cm/sec)

HELP 프로그램은 증발계수의 상한과 하한을 두어 Knisel(1980)이 보고한 토양에서 외부로 빠져나가는 모세관 플럭스를 벗어나지 않도록 하고 있다. 증발계수가 3.30 아래로 계산되면 3.30으로 지정되고, 5.50보다 커지게 되면 5.50으로 지정되게 된다. 사용자는 독립적으로 증발계수를 입력할 수 없다.

위 식은 토양매질에 대하여 개발되었기 때문에, HELP 프로그램에서는 각 토양층과 폐기물층 내의 상대 포장용수량(relative field capacity)과 포화수리전도도에 따라 증발계수를 추가적으로 점검을 한다. 상대 포장용수량은 다음의 방정식에 의하여 계산된다.

$$\text{FC}_{\text{rel}} = \frac{\text{FC} - \theta_r}{\phi - \theta_r}$$

FCrel : 상대 포장용수량 (무차원)

상대 포장용수량이 0.20(모래에서는 전형적인 값임) 이하이면, 증발계수는 3.30으로 지정된다. 포화수리전도도가 5×10^{-6} cm/sec (다짐 점토층에 해당) 이하이면 증발계수는 3.30으로 지정되게 된다.

토양과 폐기물층의 총밀도는 단위용적 매질에 대한 고형물질과 물입자의 중량으로 정의된다. 총밀도는 고형물질의 밀도, 공극의 크기, 각 층에 함유되어 있는 물의 양에 의존한다. 총공극물은 공극의 크기를 나타내고 있기 때문에 토양과 폐기물 층의 밀도를 표현하는 데 용이하다.

토양과 폐기물층의 밀도는 다짐(compaction), 정적하중(static load)이나 배수(drain)가 진행되면서 증가하게 된다. 다짐은 역학적 에너지를 가함으로써 밀도를 증가시키고, 정적하중은 토양이나 방벽, 폐기물층의 추가적인 하중이 가해짐으로써 밀도를 증가시킨다. 배수는 층 내부의 물을 제거하여 공극압을 감소시킴으로써 밀도를 증가시키게 된다. 배수는 수평/수직적인 배수층, 트렌치, 우물을 설치하거나, 전류를 가함으로써 일으킬 수 있다.

HELP 프로그램은 토양과 폐기물, 기타 합성물질(synthetic material)별 총공극률, 포장용수량, 위조점 및 포화수리전도도의 기본값들을 제공하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 1:25,000 축척의 정밀 토양도에서 토양통, 토심 및 기타 물성자료를 추출하고, 각 토양통에 따른 총공극률, 포장용수량, 위조점 및 포화수리전도도의 해당값을 적용하도록 한다. 단 이 때 CN은 토양통의 수리학적 특성에 따라 수문학적 그룹으로 분류하고, 이에 근거하여 토지피복별 CN을 산출하도록 한다.

나. 산정기법 개발

본 연구에서의 지하수 함양량 산정기법 개발은 기후변화와 연동된 방식 및 지리정보를 활용하는 방식을 고려하였으며, 기후변화와 연동되는 기법개발을 우선순위로 하였다(〈그림 3-13〉 참조). 연구지역의 선정은 지역적 특성 및 가용 지리정보 자료의 정밀성 현황, 기후자료 획득을 위하여 현지 기상실측 자료가 확보되어 있는 지점이 있는 지역을 우선적으로 선정하였다. 또한 연구지역의 공간해상도를 선택하여 입력 자료 및 전처리자료의 기준을 선정한다.

기상자료는 상기에서 기 언급하였듯이 과거부터 현재까지의 기상실측자료 수집과 A1B SRES를 기반으로 한 지역기후모델 다운스케일링을 통한 미래 기상자료 예측값으로부터 획득하였다. 또한 기상자료는 면적 자료가 아니며 기상관측 위치에 해당되는 자료만을 가지고 있는 특성이 있다. 따라서, 이를 연구지역 면적 전체에 해당되는 자료로 변화하여, 미리 선정된 공간해상도와 동일하게 만드는 전처리작업을 필수적으로 수행하였다.

현재 전세계적으로 사용되고 있는 모든 지하수 함양량 모델은 토양의 특성을 반영하는 것을

중요한 모델 수행 절차로 인식하고 있다. 토양특성자료의 정밀도는 지하수 함양량 산정 정확도에 직접적인 영향이 있으며 대축척 및 공신력 있는 기관의 자료를 사용하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 국립농업과학원에서 제공하고 있는 정밀 토양도(1:25,000 축척)를 활용하였다.

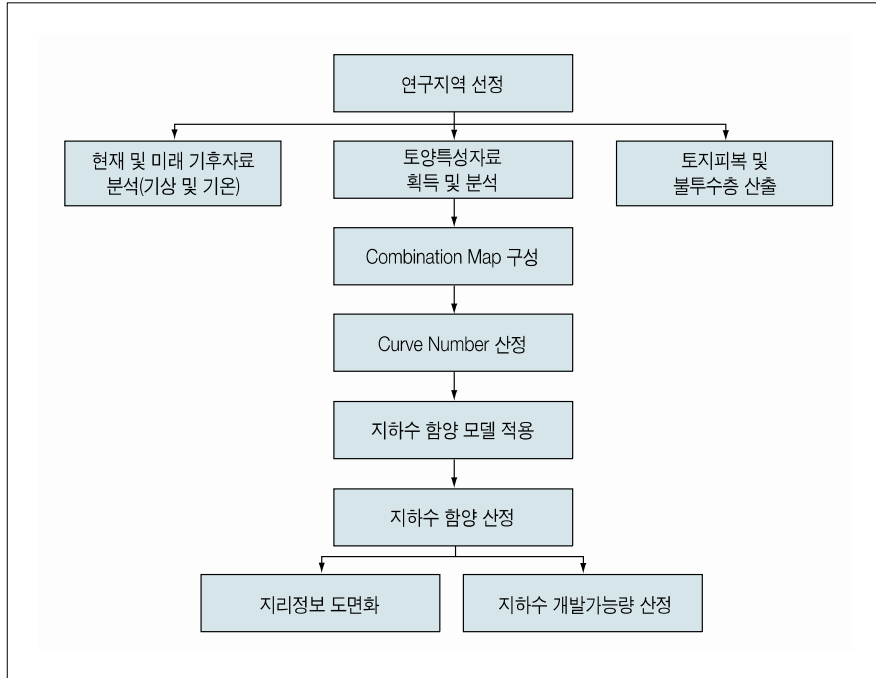
지하수 함양은 토지피복의 현상과 직간접적인 영향이 있으며, 이를 파악하기 위하여 토지피복에 따른 불투수층 분포 및 특성을 분석하여야 한다. 토지이용 현황에 따라서 불투수층의 면적은 지역별로 차이가 있으며 이는 정밀 토양도의 지목별 현황과 연계하여 고려하였다.

토양 특성자료 및 불투수층의 자료를 바탕으로 공간적인 교집합을 산정하며, 연구 지역 내 임상 및 엽면적지수 분포 등의 지리정보를 부가적으로 활용하여 Combination Map을 제작하였다. 공간자료 중 속성자료는 토지이용현황에 분류, 불투수층 분류 및 각 토지이용, 불투수층 공간분포에 따른 토양의 특성 등으로 구성되어 있다.

유출곡선지수(Curve Number)는 Combination Map을 바탕으로 토양의 수문학적 그룹을 재분류하는 방식을 적용하였으며, 공간적 분포를 나타내도록 수행하였다. 토양의 수문학적 그룹 분류는 국립농업과학원 및 한국건설기술연구원에서 제공하고 있는 수문학적 토양 분류법에 근거하여 실시하였으며, 정밀토양도의 Soil Code를 활용하여 분류하였다. 분류별 토양특성은 침투율, 토양배서 투수율 및 토성으로 세분류된다.

본 연구에서 선정된 지하수 함양량 산정 모델은 기후자료 및 유출곡선지수를 기본 입력자료로 수용하였으며, 최소 공간해상도별 유출곡선지수 및 기후변화자료를 연동하여 입력하는 방식으로 수행하였다. 선택된 지하수 함양량 모델은 HELP3이며, 이 모델의 구동 결과는 지하수 함양량을 최종적으로 나타낸다. 최종 결과물은 시기별, 각 유출곡선지수의 최소 공간해상도별 및 기후변화별 결과를 산출해 낸다.

산정된 지하수 함양량을 바탕으로 지리정보시스템을 활용해 도면화하여 직관력을 높이는 작업을 수행한다. 또한 강수량 및 지하수 함양량을 바탕으로 지하수 이용가능량을 산정하였다.



■ 그림 3-13. 산정 기법 개발 흐름도

다. 모델 흐름도 작성

본 연구를 위한 지하수 함양 모델은 다양한 활용성 및 연구 목적의 적정성을 고려하여 HELP3로 선정하였으며, 방법론 적용을 위한 모델 흐름도는 아래와 같다.

모델 구현 및 지하수 함양량 산정을 위한 자료처리는 크게 3가지로 구분된다. 첫째, Combination Map을 구성하고 이를 통한 CN(Curve Number) 값을 추출한다. 이를 위해 GIS를 활용하여 토지피복지도, 불투수층 및 토양도에 대한 전처리작업을 수행하며, 위성영상 및 토지피복지도를 활용하여 Leaf Area Index를 추출한다.

둘째, 기상자료는 HELP3 구동에 있어서 중요한 역할을 수행하며, 강수량, 온도 및 Solar Radiation 자료를 요구한다. 과거의 강수량 및 기온 자료는 기상청 실측자료를 활용하며, 미래 기상자료는 SRES A1B 시나리오에 의한 자료를 활용한다.

셋째, HELP3 적용에서는 토양도가 기본이 되는 자료이므로, 1:25,000 축척의 정밀 토양도에서 대상지역의 토양 특성을 분석하여 토심 및 기타 물성자료를 추출하여 모델을 구현한다.

본 단계를 거쳐 산출된 지하수 함양률 및 함양량은 GIS SW를 활용하여 공간적으로 분포시킨다.

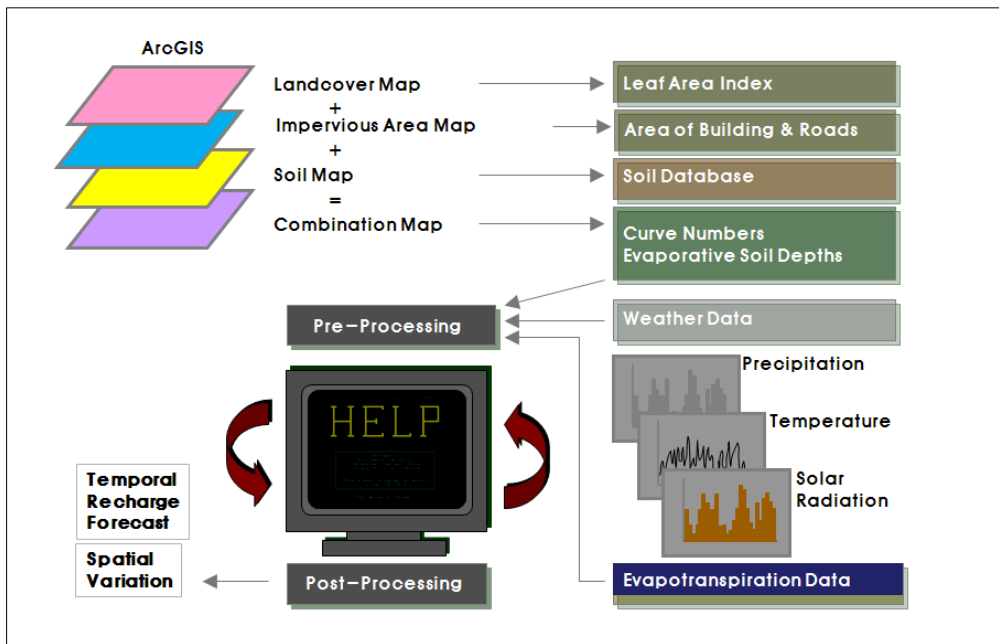


그림 3-14. 모델 흐름도



제4장

Pilot Test Site 적용 및 결과 검증

1. Pilot test 시범지역 적용

가. 소유역 선정 및 공간지리정보 확보

연구대상지역은 경상북도 칠곡군, 구미시 일부 및 대구시 북구 일부를 포함하며, 달성군, 성주군, 김천시 및 군위군과 인접한 지역이다. 낙동강 본류가 연구지역의 일부를 관통하고 있으며 전체 면적은 500.75km²이다.

연구지역의 현황파악을 위하여 임상도, 지질도, 토양도, LAI(Leaf Area Index), 토지피복도, 불투수층을 분석하였다. 활용자료는 6개이며, 분석자료는 총 9개 항목이다. 자료 중 LAI는 Landsat ETM을 이용하여 자체 제작하였으며, 불투수층은 토지피복지도를 활용하여 자체 제작하였다.

표 4-1. 연구지역 현황분석 자료

자료명	분석자료	형태
임상도	경급	Vector, Shp
	영급	
	소밀도	
	임상종류	
지질도	지질현황	Vector, Coverage
토양도	토양현황	
LAI	식생현황	Raster
토지피복도	토지이용현황	Vector, Shp
불투수층도	불투수층현황	



■ 그림 4-1. 연구지역

1) 임상도 분석

임상도는 항공사진을 관독하여 임상·주요수종·경급·영급·소밀도 등 임상자료를 임지에 대한 소관별, 임종별로 지형도(1/25,000)에 도화 작성한 도면으로 산림관련 도면 중 가장 많이 활용되는 도면이다. 주된 활용분야는 임업 분야에서 산림사업의 계획 수립, 임업경영, 연구, 기타 임업관련 업무에 활용하고 연관 분야는 국토이용계획, 환경영향평가, 각종 확인 업무, 군사목적, 지형도 제작 등에 사용된다.

연구지역에 대한 임상도의 분석결과(〈표4-2~5〉 참조)는 경급에서는 소경목 80.57%이다. 영급에서는 3영급 62.86%, 2영급 17.84%이다. 또한 임상의 경우는 참활혼효림이 61.68%의 비율로 높게 나타난다. 이러한 결과를 고려한 연구지역의 임상은 대체로 식생한지 수년 지난 지역으로 추론할 수 있다.

표 4-2. 연구지역 임상도 경급분포

분류	면적(km ²)	비율(%)
No Data	10.57	3.32
치수	10.84	3.41
소경목	256.26	80.57
중경목	39.65	12.47
대경목	0.72	0.23
전체	318.05	100.00

표 4-3. 연구지역 임상도 영급분포

분류	면적(km ²)	비율(%)
No Data	10.57	3.32
1영급	10.84	3.41
2영급	56.74	17.84
3영급	199.93	62.86
4영급	36.51	11.48
5영급	3.12	0.98
6영급	0.33	0.10
전체	318.05	100.00

표 4-4. 연구지역 임상도 소밀도 분석

분류	면적(km ²)	비율(%)
No Data	21.41	6.73
소	3.90	1.22
중	104.43	32.84
밀	188.31	59.21
전체	318.05	100.00

표 4-5. 연구지역 임상도 수종 분포

분류	면적(km ²)	비율(%)
소나무림(D)	56.62	17.80
활엽수림(H)	38.77	12.19
경작지(L)	4.32	1.36
낙엽송림(LP)	0.18	0.06
참활혼효림(M)	196.18	61.68
미림목지(O)	0.14	0.04
포푸라림(PH)	0.18	0.06
갯나무림(PK)	5.21	1.64
낙엽송림(PL)	2.00	0.63
포푸라림Po	0.08	0.02
참나무인공림(PQ)	0.03	0.01
리기다소나무림(PR)	8.33	2.62
참나무림(Q)	0.08	0.02
제지(R)	5.85	1.84
하천(W)	0.08	0.02
전체	318.05	100.00

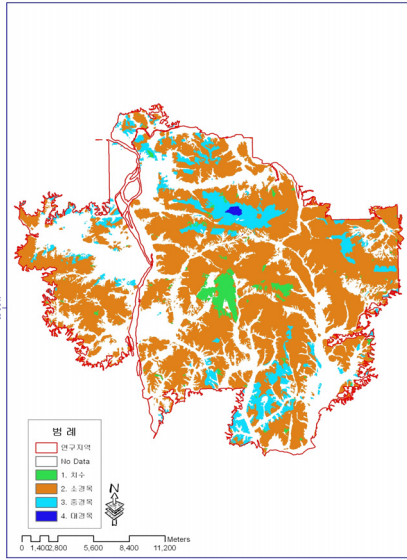


그림 4-2. 침상도 경급

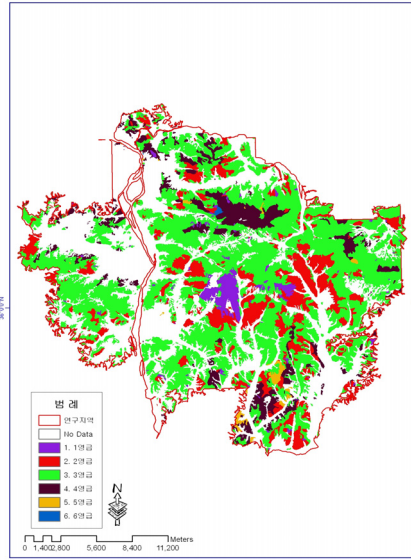


그림 4-3. 침상도 영급

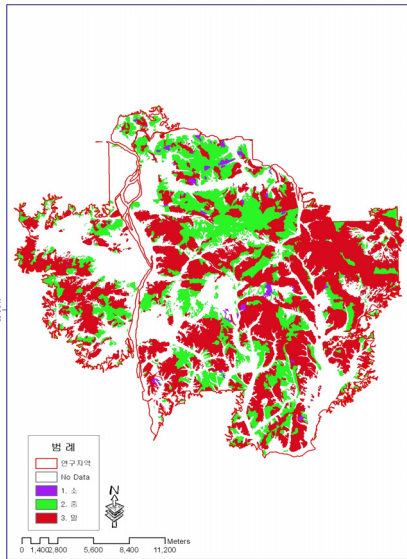


그림 4-4. 침상도 소밀도

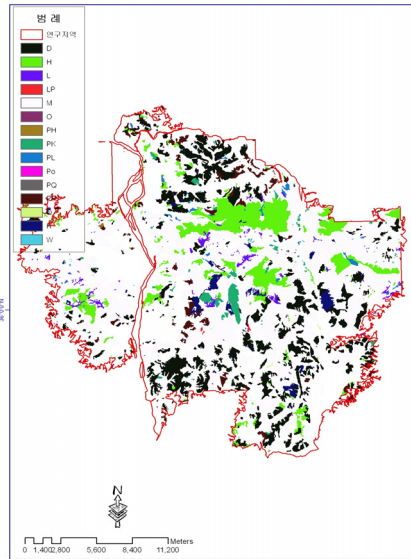


그림 4-5. 침상도 침상구분

2) 지질도 분석

지질도는 지각을 구성하는 각 지층을 그 종류·연대·암상 등에 따라 구분하여 그 분포상태와 정합·부정합 등의 상호관계, 습곡·단층 등의 지질구조 등을 표시한 지질 현상도를 말한다. 일반적으로 지질도에는 지질주상도와 지질단면도가 붙어 있다. 지질주상도는 어떤 지역의 지층의 층서(層序)·두께·암상·함유화석 등을 주상으로 표시한 것이다. 주상도의 높이는 각 지층의 두께와 비슷하게 작도된다. 지층이 경사진 경우는 진후도(眞厚度)로 고쳐 표시한다. 이것은 지층의 대비(對比), 화석의 산출층준(層準) 등을 표시하는 데 사용된다. 지질단면도는 지표지질의 조사자료에 따라 지하의 암석분포, 각종 암석의 상호관계, 지질구조 등을 표시한 단면도이다. 정확한 것은 시추(試錐)와 물리탐사 자료 등을 참고하여 작성된다.

지질도의 분석결과(표 4-6), 퇴적암 52.59%로 높게 나타났으며 각설석 화강암 및 화강암이 각각 13.91%와 12.06%로 나타났다.

표 4-6. 연구지역 지질도 분석

분류	면적(km ²)	비율(%)
퇴적암	263.33	52.59
화강암	60.40	12.06
각섬석화강암	69.68	13.91
수류지역	3.37	0.67
흙모래자갈	49.39	9.86
중성 및 염기성화산암	20.10	4.01
신라역암	1.69	0.34
화강편마암	32.78	6.55
합계	500.74	100.00

3) 토양도분석

토양도는 항공사진과 현지 토양조사(土壤調査) 결과로부터 토양을 분류하여 작성한다. 본 연구에서는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하고 있는 1:25,000 축척의 정밀토양도를 활용하였다. 토양도에는 토양통(土壤統)이 표시되어 있고, 토양통의 이화학적(理化學的) 성질, 토양 등급 등이 수록되어 있으며, 주된 활용은 토양 사용계획 · 관리 · 대책 및 환경관리, 오염, 지하수 모델링 등에 사용된다.

정밀토양도는 1,285개의 항목으로 토양을 구분하며, 연구지역은 154개의 토양으로 구분된다. 연구지역은 토양통 : 낙산, 배수 정도 : 약간 양호, 토양 종류 : 사양질, 토심 : 얇음, 토양명 : 적황색토, 토지이용 : 밭, 임야가 가장 많은 구성을 나타내고 있다.

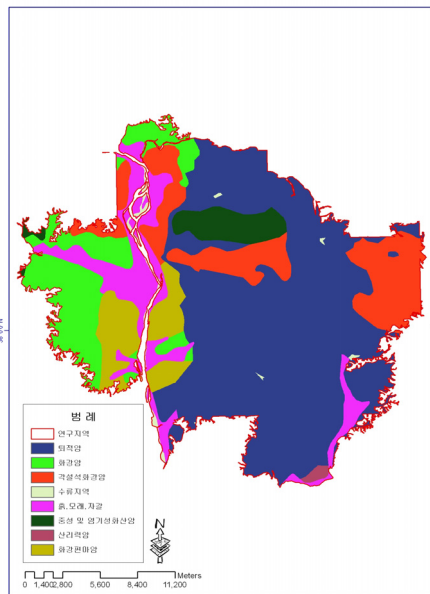


그림 4-6. 지질도

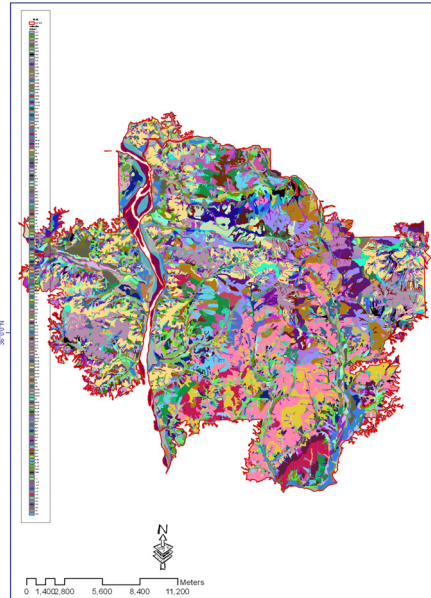


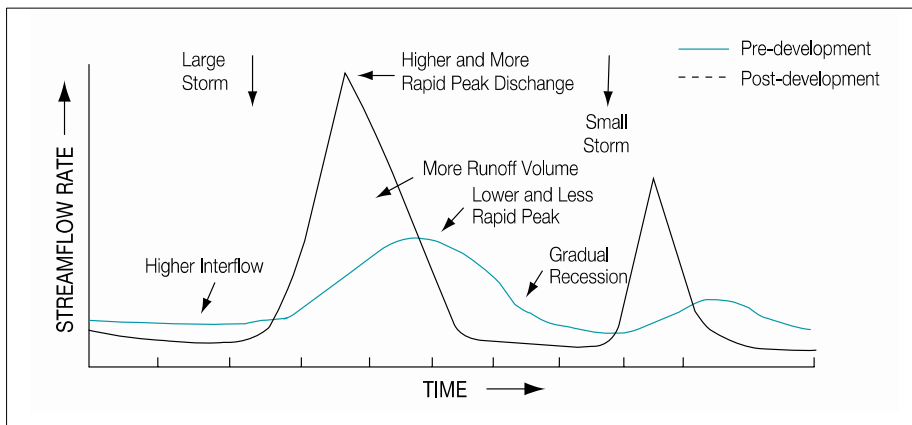
그림 4-7. 토양도

4) 불투수층도 및 토지피복지도 분석

불투수지표면은 토양이 건물과 불투수포장으로 덮여 있는 지대로, 강우시 빗물이 토양표면에 스며들지 않아 지하로 침투되지 못한 채 방류수계로 배출되는 토지의 형태이다.

불투수지표면은 자연환경에 대한 인간의 토지개발의 대표적인 형태로 그 기능적인 측면에서 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 건물체계와 이동 교통체계로 이루어져 있다(Schueler, 1994).

인구의 증가는 산업의 발달과 함께 도시화 현상을 심화시키게 되고, 도시화의 진행은 불투수지표면을 확대시켜 지하수 수위를 하강시킨다. 국내의 경우, 1970년대 경제성과 효율성의 극대화에 초점을 맞춘 국토계획 및 토지이용으로 산림, 초지, 전, 답 등이 불투수지표면으로 변화하였다. 도시개발에 따라 토지표면이 불투수면이 되면서 이는 결국 자연적 배수기능을 담당하는 토지면적의 감소로 이어져 지하수 함양량이 감소하게 된다. 아래의 그림은 도시개발에 따른 불투수면 증가에 의한 유출계수의 변화를 보여준다.



■ 그림 4-8. 도시개발에 따른 불투수면 증가에 의한 유출계수 변화

현재의 도시는 불투수 블록이 지표면을 차단하고 있어, 본래 빗물의 50%가 침투하고 40%가 증발산을 통해 대기로 올라가야 하는 자연의 흐름에 역행하고 있다. 현재는 10%남짓의 빗물만이 지중으로 침투하고 있으며 나머지 40%는 하천으로 유출되어버린다. 이는 지하수 고갈의 원인이

되기도 하지만 집중호우시 하천으로 유입되는 빗물의 양이 많아져서 하천이 범람하고 도시가 홍수피해를 입게 되는 원인이 되기도 한다.

상기에 기술한 바와 같이 불투수지표면은 지하수 함양량에 큰 영향을 미친다. 그러므로 불투수 지표면을 도식화, 계량화하는 작업이 필요하다. 이와 관련된 기존 연구들을 고찰한 결과, 현장 조사, 토지이용, 도로밀도, 인구밀도 등을 이용하여 계량화하였으나, 불투수지표면은 지표면의 유형에 따라 달라지므로, 이러한 정보를 담고 있는 토지피복도를 활용하여 불투수지표면을 구축하였다.

시가화지역은 빗물이 용이하게 배수되도록 우수, 하수체계 등을 설계되어 있어 시가지의 토지피복 상태는 대부분이 불투수면으로 되어 있다고 해도 과언이 아니다. 그러나 주거지역, 공업지역, 상업지역, 위락시설지역, 교통지역, 공공시설지역을 포함하는 시가화 지역과 달리 농경지, 산림지, 초지, 습지, 나지, 수역은 대지나 아스팔트 도로, 콘크리트 건물이 거의 존재하지 않으므로 불투수 지표면에서 제외하였다. 2007년 환경부 중분류 토지피복도를 활용하여 추출한 연구지역의 불투수 지표면의 면적은 57.33km²로, 연구지역의 11.45%에 해당한다.

인간 활동과 토지지표면의 현황은 하천유역의 수문학적 주기 및 수자원을 변화시킨다. 토지피복도는 지표면의 물리적 현황 즉, 지표면의 상태를 나타내는 자료로 자연환경 및 인간활동 정도를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 대분류 항목을 세분화한 주거지역, 공업지역, 상업지역, 위락시설지역, 교통지역 등 23개 분류항목으로 구성된 지상해상도 5m급의 환경부 중분류 토지피복지도를 활용하였다. 2007년 연구지역의 토지피복 현황은 <그림 4-9, 10>와 같다.

연구지역의 토지피복별 면적은 다음의 표와 같다. 연구지역의 60% 이상이 산림으로 구성되어 있으며, 농경지는 전체 면적의 20.22%를, 시가화건조지역은 11.45%를 차지하고 있다.

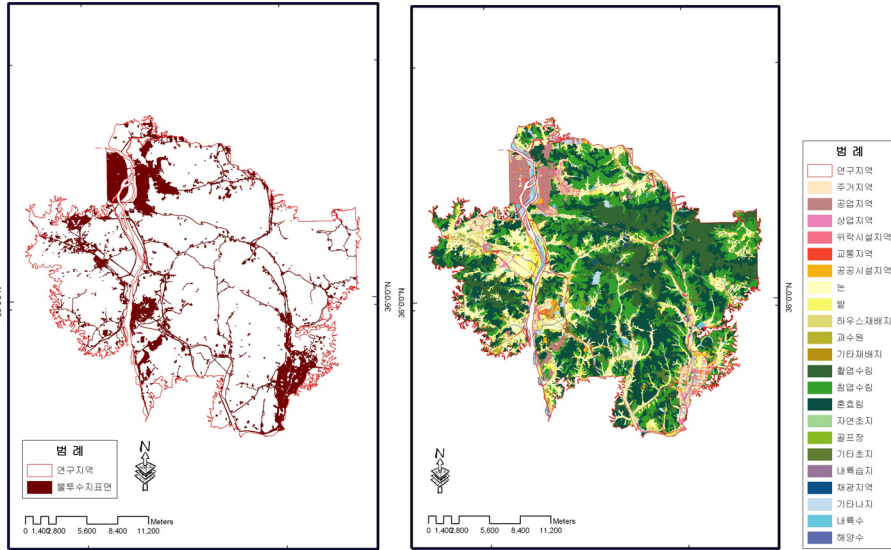


그림 4-9. 불투수지표면

그림 4-10. 토지피복도

표 4-7. 분류항목별 토지피복 면적 및 비율

분류항목		면적(km ²)	비율(%)	분류항목		면적(km ²)	비율(%)
시가화 건조지역	주거지역	19.74	3.94	산림지역	침엽수림	111.45	22.26
	공업지역	16.15	3.23		혼효림	130.11	25.98
	상업지역	3.44	0.69	초지	자연초지	0.47	0.09
	위락시설지역	0.19	0.04		골프장	0.37	0.07
	교통지역	13.57	2.71		기타초지	9.53	1.90
		공공시설지역	4.24	0.85	습지	내륙습지	2.86
농업지역	논	55.65	11.11	연안습지		0.00	0.00
	밭	34.84	6.96	나지	채광지역	0.40	0.08
	하우스재배지	2.40	0.48		기타나지	12.71	2.54
	과수원	6.85	1.37	수역	내륙수	7.41	1.48
	기타재배지	1.49	0.30		해양수	0.00	0.00
산림지역	활엽수림	66.87	13.35	합계	500.75	100.00	

5) LAI(Leaf Area Index) 분석

식물의 잎은 태양에너지와 실질적으로 접촉하는 표면인 동시에 원격탐사 신호의 많은 부분을 만들어내며, 대기 중 탄소의 흡수와 교환이 이루어지는 표면이다(Chen 등: 1992). 단위지표면적에 자라고 있는 모든 잎들의 면적의 합을 지표면적으로 나눈 비율, 즉 단위면적당 모든 잎층의 축적된 잎의 전체밀도를 나타내는 LAI는 이러한 잎의 특성을 가장 잘 반영하고 있는 지수로, 현장측정 및 위성영상을 활용하여 산출 가능하다. 현장 조사에 의한 측정법은 결과치의 신뢰도가 가장 높으나, 많은 인력, 시간, 비용이 소요된다. 그러나 위성영상은 한 번의 촬영으로 광범위한 지역의 자료를 획득할 수 있으며, 현실적으로 접근이 불가능한 지역의 정보수집이 가능하여 LAI 산출시 널리 활용되고 있다.

위성영상을 활용한 엽면적지수 추정기법은 위성영상에서 얻어진 식생지수와 현장측정을 통해 획득한 LAI 간의 상관관계를 분석하여 LAI를 추정한다(Gardner: 1986). 여기서 식생지수란 단위가 없는 복사값으로서 녹색식물의 상대적 분포량과 활동성, 엽면적지수, 엽록소함량, 엽량 및 광합성 흡수복사량 등과 관련된 지표로 사용된다. 현재까지 약 20여 종류의 식생지수가 사용되고 있으며, 이러한 식생지수는 위성영상의 밴드 조합을 통해 산출 가능하다. 본 연구에서는 LAI 추정을 위해 최초의 식생지수인 단순 식생지수(SR)과 범용적으로 사용되고 있는 정규화식생지수(NDVI)를 활용하려 한다. 각 식생지수와 산출변환식은 아래와 같다.

$$SR(Simple Ratio) = \frac{NIR}{Red}$$

$$NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) = \frac{NIR - red}{NIR + red}$$

식생지수와 LAI 관계에 대하여 국외에서는 많은 연구들이 수행되고 있으나, 국내 연구는 아직 미미한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 Yujie Wang(2002)이 연구한 LAI와 식생지수 간 관계식을 참조하여 상관계수가 가장 높게 산출된 회귀식을 적용하려 한다.

표 4-8. LAI와 식생지수간 관계식

식생지수	LAI 현장관측법	변환식	R ²
NDVI	Allometric Method	$NDVI=0.5724+0.0989LAI-0.0114LAI^2+0.0004LAI^3$	0.74
SR	Allometric Method	$SR=2.2282+2.5376LAI-0.1573LAI^2$	0.59
NDVI	Allometric Method	$NDVI=0.0377LAI+0.607$	0.72
SR	Allometric Method	$SR=0.9357LAI+3.552$	0.71
SR	Allometric Method	$SR=1.92LAI^{0.583}$	0.91
SR	Allometric Method	$SR=1.92+0.532LAI$	0.83
NDVI	LAI-2000, RAC	$NDVI=0.032LAI+0.635$	0.42
SR	LAI-2000, TRAC	$SR=1.041LAI+3.637$	0.49
SR	LAI-2000, TRAC	$SR=1.153LAI+2.56$	0.66
SR	Ceptometer	$SR=3.1196+4.857\log(LAI)$	0.97
NDVI	LAI-2000	$NDVI=1.2383/(1/LAI+0.09061)-0.3348$	0.87
SR	LAI-2000	$SR=0.96/(1/LAI-0.066)+0.987$	0.88
NDVI	Allometric Method	$LAI=33.99NDVI-14.21$	0.75
SR	Allometric Method	$SR=0.614LAI+1.23$	0.82
NDVI	Allometric Method	$NDVI=0.03LAI+0.6$	0.32

LAI 추정을 위해 Landsat TM 영상을 활용하였다. 미국지질조사소(U.S. Geological Survey, USGS)에서 제공하는 2008년 8월 5일 촬영 Path No.115, Row No. 35의 Landsat5 TM 영상으로부터 연구지역을 추출하여 TM 중부원점으로 좌표변환을 하였다. 이로부터 Band 조합을 통해 식생의 광합성 정도를 나타내는 식생지수 SR 및 NDVI를 아래의 그림과 같이 산출하였다.

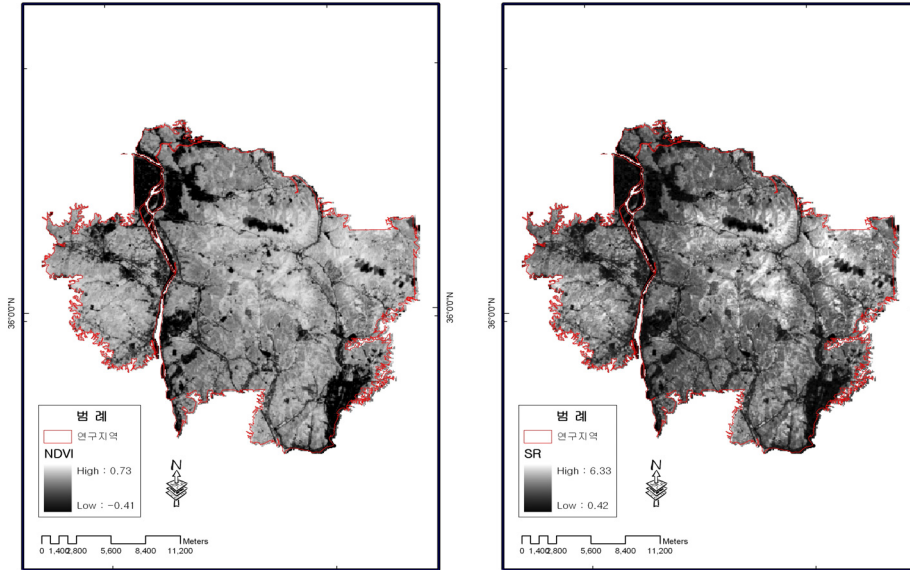


그림 4-11. 식생지수

식생지수 영상에서 어두운 지대는 물, 눈, 암석, 토양 등으로 구성된 비식생지대를, 밝은 지대는 수목이 존재하여 광합성이 발생하는 지대를 의미하며, 색상의 강도가 진할수록 식생의 광합성 상태가 양호하다. 토지피복별 SR 및 NDVI의 평균은 다음과 같다. 식생지수는 산림, 농경지, 초지, 습지, 나지, 시가지, 수역 순으로 높게 나타났으며, 산림지대 중 특히 활엽수지대에서 높게 나타났다.

앞서 기술한 회귀식을 본 연구에 적용할 시, 지역적 특색에 따라 기존 자료와 오차가 발생되리라 예상되지만, 본 연구에서는 이를 감안하기로 한다. LAI는 물리학적으로 음수값이 존재하지 않으며, 광역적으로 LAI는 0~6의 값을 보이므로 시뮬레이션을 통해 이러한 조건을 만족시키며, 상관관계수가 가장 높은 10번 회귀식을 적용하여 SR로부터 LAI를 산출하였다.

표 4-9. 토지피복 분류별 식생지수 분포

분류 \ 식생지수	SR			NDVI		
	최소값	최대값	평균	최소값	최대값	평균
시가지	0.59	5.55	1.57	-0.26	0.69	0.19
농경지	0.53	6.33	3.07	-0.33	0.73	0.48
산림	0.51	6.29	3.52	-0.32	0.73	0.54
초지	0.50	6.19	2.80	-0.33	0.72	0.44
습지	0.43	4.93	2.07	-0.40	0.66	0.31
나지	0.42	5.27	1.72	-0.41	0.68	0.20
수역	0.42	5.18	1.44	-0.41	0.68	0.08

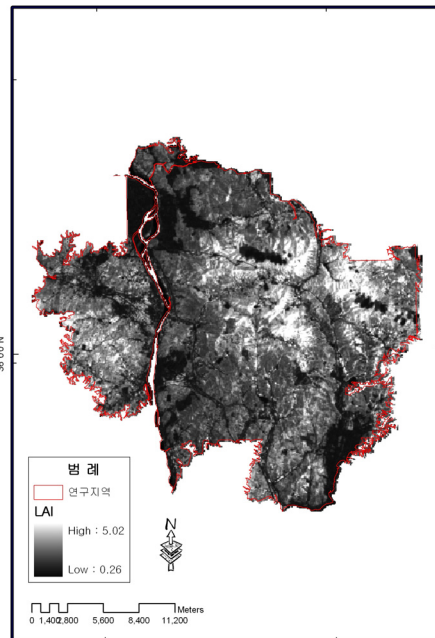


그림 4-12. LAI

토지피복별 LAI 평균은 다음과 같다. SR로부터 산정한 LAI 역시 산림, 농경지, 초지, 습지, 나지, 시가지, 수역순으로 높게 나타났으며, 산림지대 중 특히 활엽수 지대에서 높게 나타났다.

표 4-10. 토지피복 분류별 식생지수 분포

분류	식생지수	LAI		
		최소값	최대값	평균
시가지		0.28	3.38	0.48
농경지		0.27	5.02	1.08
산림		0.27	4.90	1.31
초지		0.27	4.68	0.93
습지		0.26	2.48	0.63
나지		0.26	2.94	0.56
수역		0.26	2.82	0.48

나. 관측자료 및 공간지리정보 구축

본 연구에서는 1970년에서 2100년까지의 기상자료(강우 및 기온)를 활용하였다. 1970년부터 2000년까지는 기상청의 실제 관측자료를 활용하였으며, 2001년부터 2100까지는 위에 언급된 SRES A1B 시나리오를 통하여 얻어진 기상자료를 활용하였다. 측정 및 예측된 기상자료는 30년 자료의 방대한 양의 처리과정 및 처리시간 효율성을 위하여 30년 평균을 산정하여 활용하였다.

연구지역의 1970년부터 2000년까지의 평균온도 11.69℃, 누적강수 1,018.04mm, 2001년부터 2030년까지 평균온도 12.59℃, 누적강수 981.04mm, 2031년부터 2050까지 평균온도 13.79℃, 누적강수 1,222.49mm, 2051에서 2100년까지 평균온도 15.511℃, 누적강수 1,192.03mm로 추정되었다(표 4-11, 그림 4-13, 14).

표 4-11. 기후변화에 따른 기온 및 강수량 변화

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
기온 변화 (°C)													평균
1970-2000	-2.09	-0.02	5.20	11.96	16.94	21.03	24.12	24.38	19.25	13.09	6.21	0.19	11.69
2001-2030	-2.68	0.47	5.30	12.96	18.04	22.33	25.09	25.90	20.61	14.14	7.32	1.67	12.59
2031-2050	-0.77	1.09	7.49	14.06	19.04	23.22	26.73	26.85	21.74	15.73	7.81	2.54	13.79
2051-2100	2.02	3.68	8.29	15.08	19.95	25.44	27.81	29.06	23.55	16.60	10.43	4.17	15.51
강수량 변화 (mm)													전체
1970-2000	19.78	26.71	48.25	75.14	71.91	135.88	212.87	205.07	128.83	41.72	36.38	15.49	1018.04
2001-2030	8.42	34.57	51.31	73.41	58.26	151.40	213.83	140.63	160.99	44.59	28.20	15.57	981.20
2031-2050	8.94	18.79	52.96	104.90	55.74	116.98	324.72	266.77	132.58	81.11	41.30	17.70	1222.49
2051-2100	20.46	23.91	65.65	88.41	56.30	143.48	178.34	279.08	237.45	45.14	31.53	22.29	1192.03

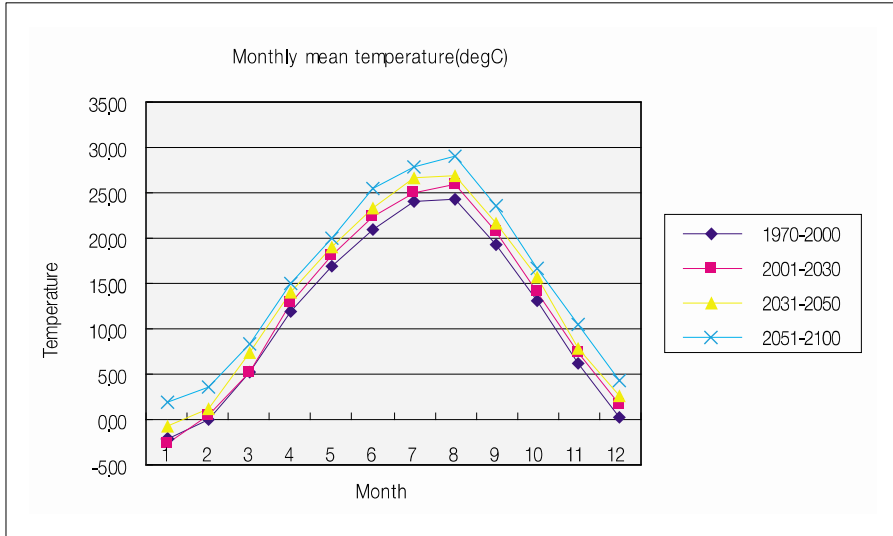


그림 4-13. 기후변화에 따른 온도 변화

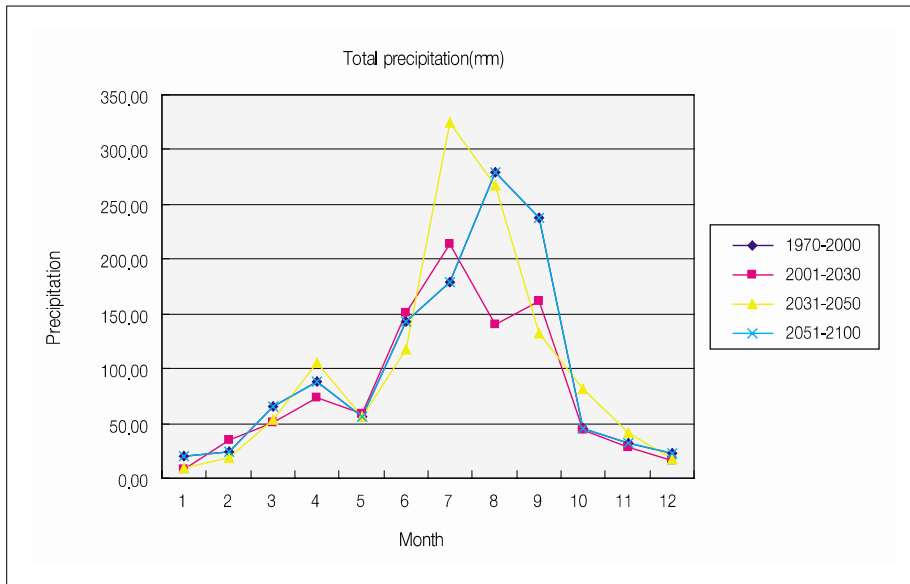


그림 4-14. 기후변화에 따른 강수량 변화

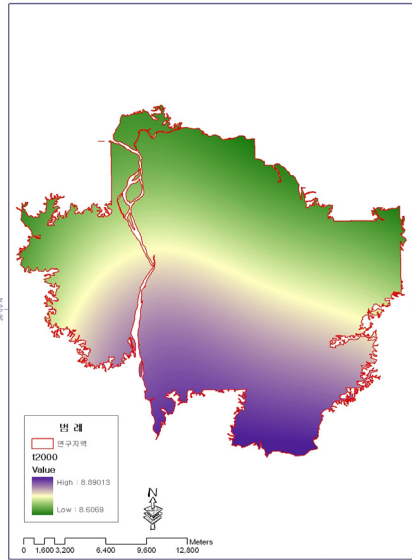


그림 4-15. 1970-2000년 기온분포

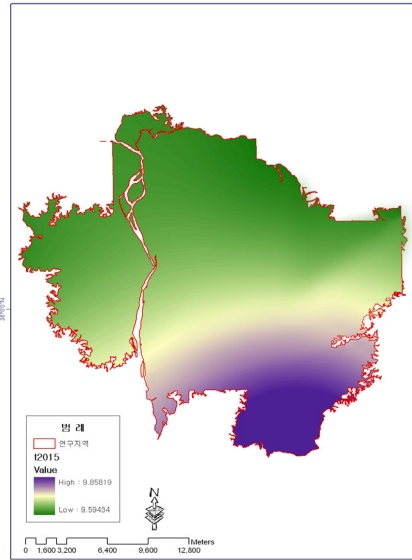


그림 4-16. 2001-2030년 기온분포

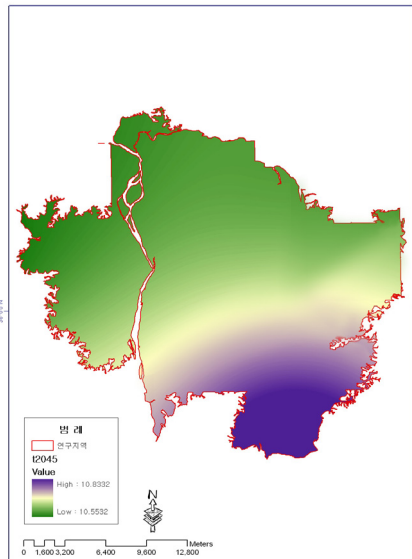


그림 4-17. 2031-2050년 기온분포

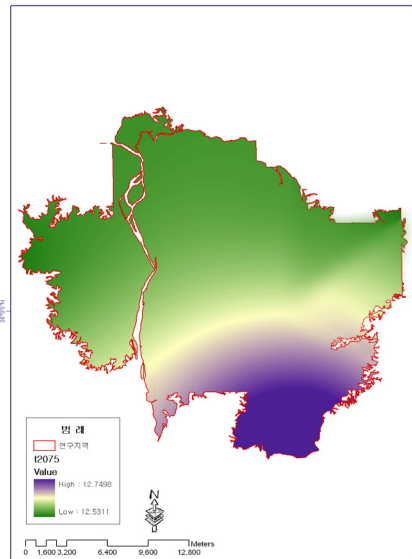


그림 4-18. 2051-2100년 기온분포

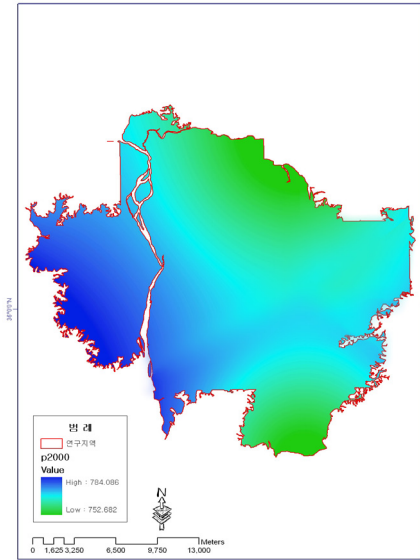


그림 4-19. 1970-2000년 강수량분포

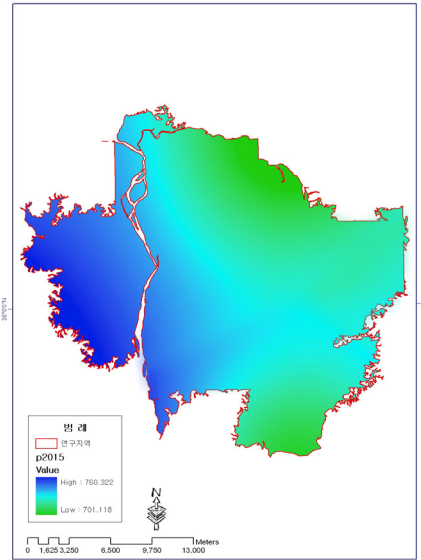


그림 4-20. 2001-2030년 강수량분포

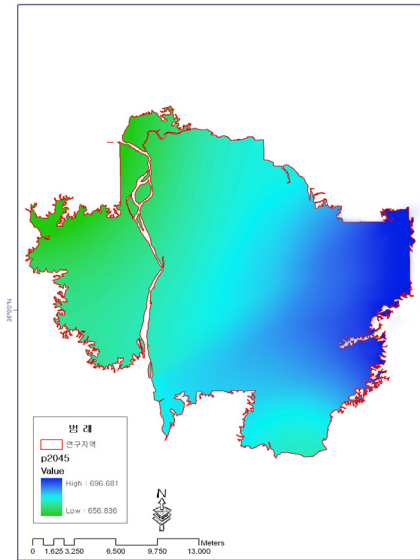


그림 4-21. 2031-2050년 강수량분포

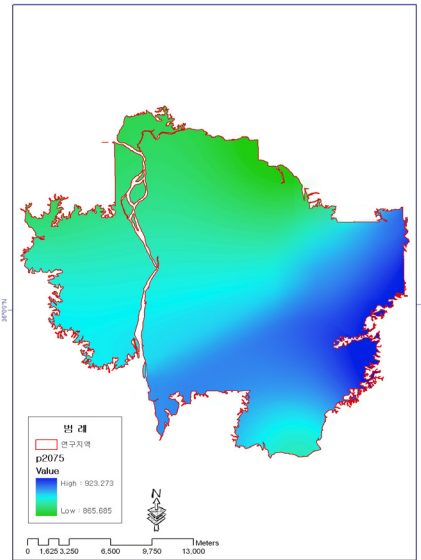
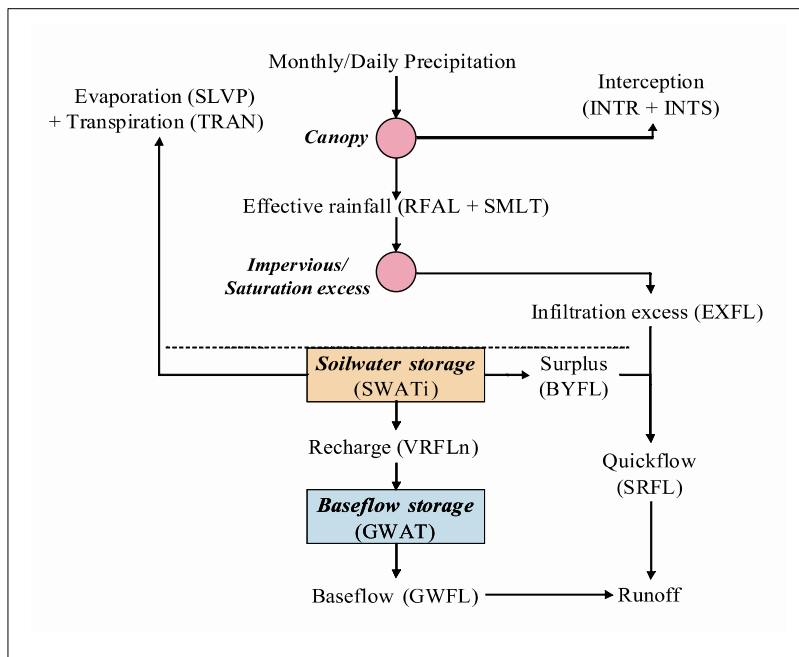


그림 4-22. 2051-2100년 강수량분포

2. 기후변화 연동 지하수 함양량 산정

가. 장래 물수지 분석

Federer(2003)는 소규모 산림유역의 수문현상을 모의하기 위해, 프로세스 기반의 총괄형 (lumped) 수문모형인 BROOK90 모형(이하 B90)을 개발하였다. B90 모형은 각각 하나의 수관, 적설 및 융설, 지하수 저류 탱크와 다층의 토양층으로 저류탱크를 가지며, 산림유역의 증발산과 토양수분 거동에 주목한 모형이다. 증발산량 계산은 수관에서 차단된 강수의 증발과, 토양과 겨울철 적설층의 증발, 다층의 토양에서의 증산으로 이루어진다. 각각의 증발산 계산 과정은 Penman-Montieth 방법의 개선된 형태인 Shuttleworth and Wallace(SW) 방법을 이용하여 이루어지며(Shuttleworth and Wallace, 1985), 계산과정에 요구되는 변수의 추정은 Shuttleworth and Gurney (1990)에 의해 제안된 방법을 이용한다.



■ 그림 4-23. BROOK90 모형에 기반한 일단위 물수지 모형의 개념도

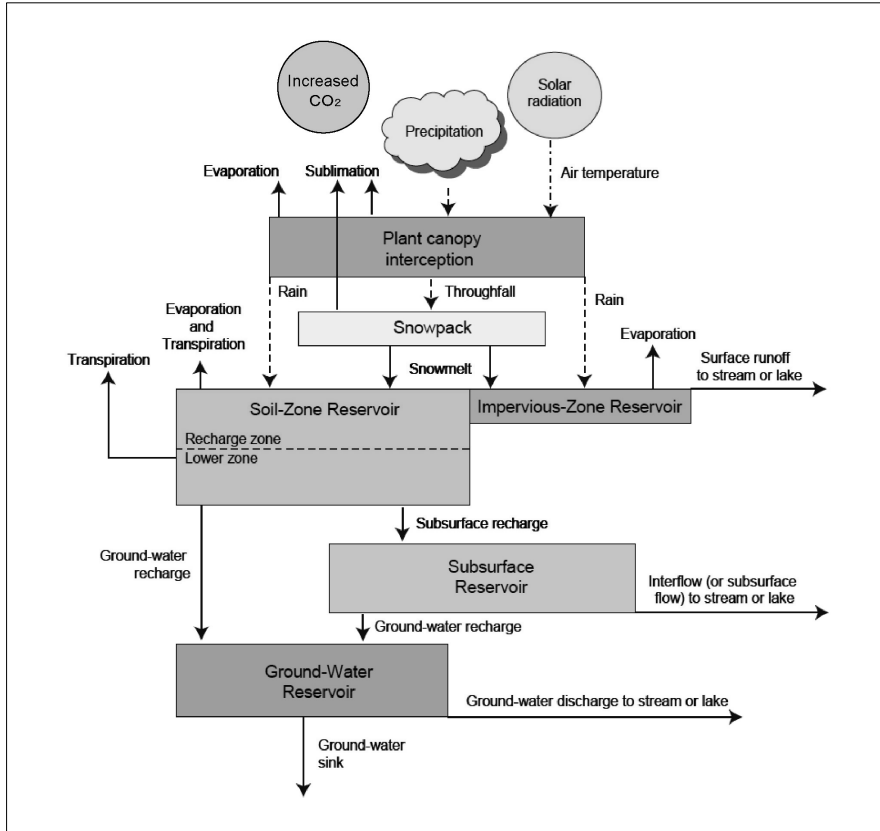


그림 4-24. 물수지 모형의 개념도

하나에서 25개층으로 이루어진 토양층의 수분변화는 각 층의 두께, 식생의 뿌리깊이와 밀도, 토양의 수문학적 특성을 고려한 Darcy-Richards 공식에 의해 결정된다. 표면 유출의 계산은 가변 유출구간 (variable source area) 개념을 이용하여 추정하며, 토양층을 통한 증산과 유출 손실을 제외한 나머지 수량은 지하수층의 저류량을 증가시키며, 선형함수를 통해 지하수 유출을 결정한다. 용설과 적설량은 간단한 degree-day 방법을 통해 계산되며, 기온과 관련한 에너지에 의해 액체와 고체 상태의 상태 변화를 모의한다. B90 모형은 일 단위 물수지 계산을 위해 일 단위의 강수량, 최대/최소 기온을 필수적으로 요구하고, 선택적으로 태양복사에너지, 습도, 풍속의 기상입력자료를 필요로 한다.

물수지의 계산은 공간지리정보를 기반으로 한 BROOK90 모형을 이용하여 분석되었으며, 통계적 방법과 월별기후입력자료를 이용하여 일별 기후를 생성하고, 일별 물수지를 월 평균으로 산정하였다. 기저유출은 토양층 하부 최대 2m까지로 산정하였다. 최종 분석항목은 실제 증발산량, 잠재증발산량, 평균 토양수분, 전체 유출량 및 표면 유출량 이다.

나. 기후변화에 따른 물수지 변화예측

실제 증발산량의 월평균 변화는 1970-2000년 42.38mm, 2001-2030년 43.54mm, 2031-2050년 45.63mm 및 2051-2100년 47.49mm의 양상을 나타낸다(표 4-12, 그림 4-25). 증발산량은 시간 및 기후변화에 영향에서도 지속적으로 증가한다.

유출량의 월평균 변화는 1970-2000년 39.34mm, 2001-2030년 35.82mm, 2031-2050년 46.25mm 및 2051-2100년 44.99mm의 양상을 나타낸다(표 4-13, 그림 4-26). 유출량의 경우는 시간의 경과에 따라서 기본적으로 지속적인 증가를 나타내지만, 2001-2030년에는 35.82mm로 증가세가 하락하는 현상이 나타난다. 이 결과는 강수량 변화 중 2001-2030년에 가장 낮은 강수량 981.20mm와 같은 양상을 나타낸다.

잠재 증발산량의 월 평균 변화는 1970-2000년 53.43mm, 2001-2030년 55.58mm, 2031-2050년 57.14mm 및 2051-2100년 58.07mm의 양상을 나타낸다(표 4-14, 그림 4-27). 평균값의 변화는 기온 변화와 동일한 양상을 나타내는 시간에 따른 지속적인 증가이다.

전체 유출량의 월 평균 변화는 1970-2000년 42.25mm, 2001-2030년 38.52mm, 2031-2050년 52.96mm 및 2051-2100년 51.99mm의 양상을 나타낸다(표 4-15, 그림 4-28). 평균값의 변화 중 2031-2050년은 52.96mm로 가장 높은 값을 나타내며, 기후변화에 따른 강수량 중 가장 높은 시기가 일치한다.

평균 토양수분의 월 평균 변화는 1970-2000년 319.94mm, 2001-2030년 316.43mm, 2031-2050년 318.81mm 및 2051-2100년 319.29mm의 양상을 나타낸다(표 4-16, 그림 4-29). 평균값의 변화 중 2001-2030년은 316.43mm로 가장 높은 값을 나타내며, 기후변화에 따른 강수량 중 가장 낮은 시기가 일치한다.

표 4-12. 기후변화에 따른 실제 증발산량 변화

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	평균
1970-2000	19.33	19.78	27.44	40.25	58.95	65.65	77.85	64.78	46.22	42.42	25.93	19.96	42.38
2001-2030	16.44	21.30	29.04	42.66	58.31	66.02	80.28	65.65	48.47	45.59	26.85	21.83	43.54
2031-2050	18.29	20.54	30.20	46.29	61.22	64.23	85.59	73.70	49.74	46.90	27.70	23.17	45.63
2051-2100	23.10	23.87	33.04	47.46	61.56	68.86	81.50	74.63	55.99	48.74	28.05	23.12	47.49

표 4-13. 기후변화에 따른 표면 유출량 변화

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	평균
1970-2000	18.42	10.71	13.57	17.08	25.89	38.09	98.01	93.73	99.39	44.55	6.56	6.09	39.34
2001-2030	17.11	8.52	13.48	18.13	22.28	33.75	96.33	67.87	90.94	50.46	6.49	4.52	35.82
2031-2050	18.53	7.75	8.94	21.71	30.04	22.20	139.05	137.77	111.57	45.09	6.22	6.17	46.25
2051-2100	21.01	9.93	13.33	22.87	26.13	29.20	71.07	115.67	159.60	59.64	6.53	4.91	44.99

표 4-14. 기후변화에 따른 잠재 증발산량 변화

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	평균
1970-2000	44.25	34.09	39.16	44.38	69.94	79.55	90.75	71.81	47.62	47.44	35.95	36.23	53.43
2001-2030	34.08	33.25	39.74	51.67	74.72	87.39	97.46	75.48	50.86	54.54	35.94	31.87	55.58
2031-2050	34.80	33.52	38.13	53.13	77.91	86.36	101.13	81.74	52.08	57.21	37.49	32.21	57.14
2051-2100	41.42	31.08	40.84	54.28	78.62	91.16	96.42	79.99	58.76	59.67	35.21	29.36	58.07

표 4-15. 기후변화에 따른 전체 유출량 변화

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	평균
1970-2000	18.44	10.72	13.60	17.15	26.02	48.00	107.03	104.68	104.14	44.61	6.57	6.09	42.25
2001-2030	17.11	8.53	13.51	18.20	22.34	45.40	105.26	70.64	99.71	50.53	6.49	4.52	38.52
2031-2050	18.54	7.75	8.95	22.27	30.12	29.60	173.87	165.42	121.36	45.30	6.23	6.17	52.96
2051-2100	21.03	9.94	13.36	23.08	26.20	39.58	75.17	143.52	200.86	59.70	6.54	4.91	51.99

표 4-16. 기후변화에 따른 평균 토양수분 변화

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	평균
1970-2000	314.42	303.44	308.95	313.52	320.27	326.23	353.01	354.15	354.70	320.01	282.94	287.63	319.94
2001-2030	311.04	299.05	308.95	314.90	313.83	321.53	351.90	343.34	352.66	321.50	279.82	278.66	316.43
2031-2050	312.41	294.05	299.17	318.79	319.06	313.95	360.47	365.60	355.10	319.62	279.96	287.51	318.81
2051-2100	316.53	300.0	308.48	320.06	316.14	318.44	343.72	359.64	364.29	323.50	279.71	280.92	319.29

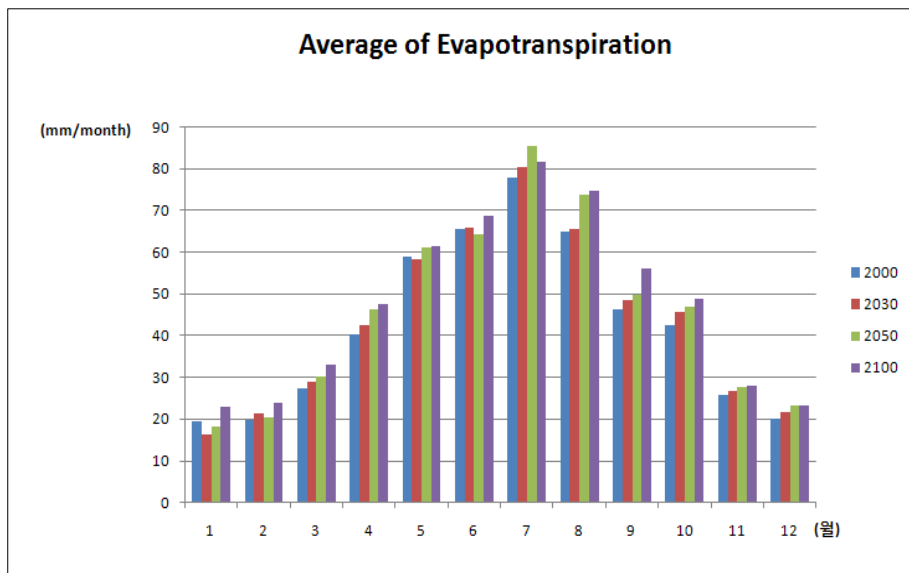


그림 4-25. 실제 증발산량 변화 그래프

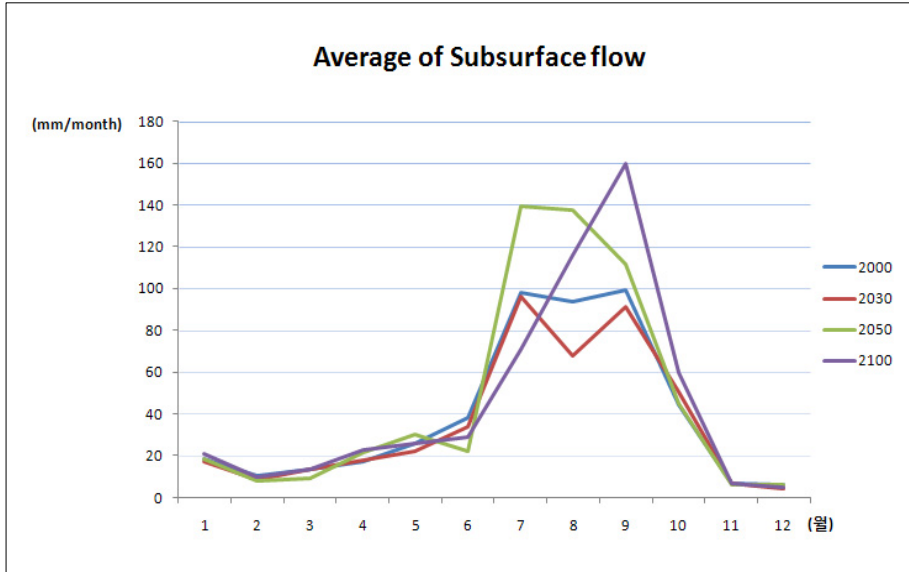


그림 4-26. 유출량 변화 그래프

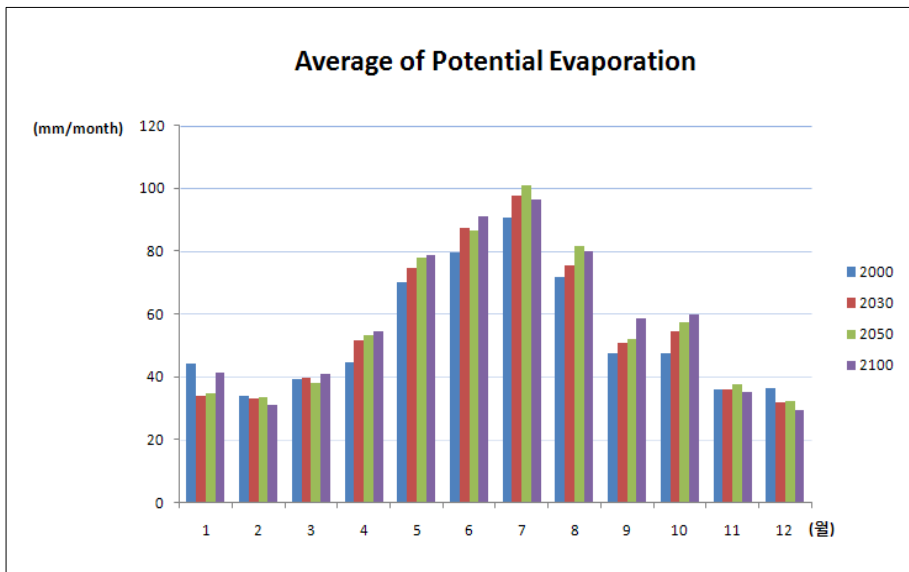


그림 4-27. 잠재 증발산량 변화 그래프

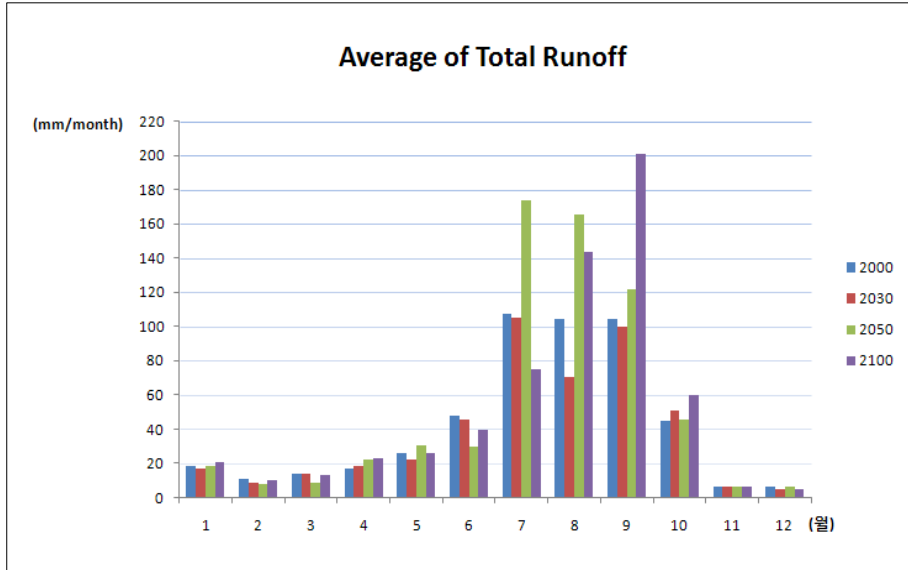


그림 4-28. 전체 유출량 변화 그래프

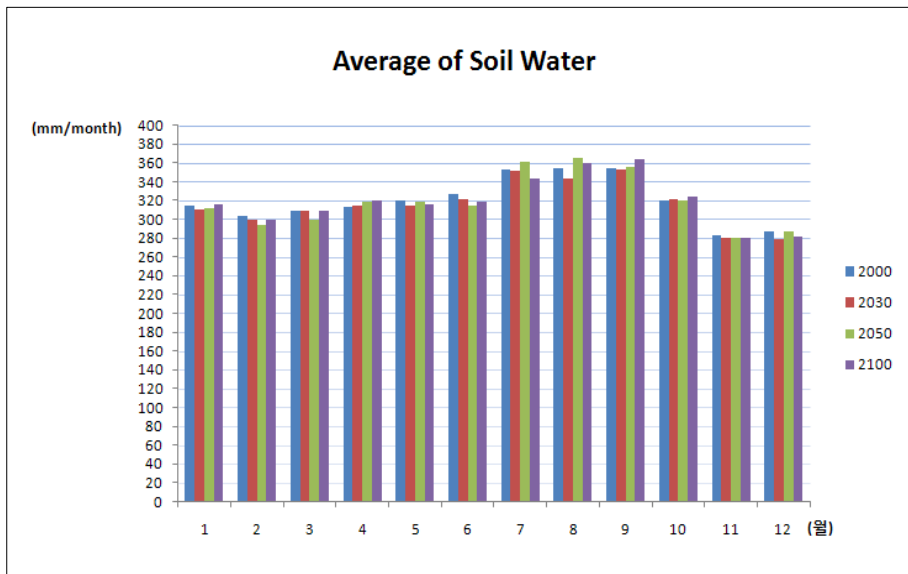


그림 4-29. 평균 토양수분 변화 그래프

다. Combination Map 구성을 통한 유출곡선지수(Curve Number) 분류

1) 토양의 수문학적 그룹 분류

수자원 함양량 산정, 토양유실 산정, 재해영향평가 등 수자원 및 환경 분야 전반에 걸쳐 유출곡선 지수법 또는 수문모형이 광범위하게 사용되고 있으며, 이러한 수문학적 분석을 위해 토양유형구분 작업이 전제되어 있어야 한다. 일반적으로 토양은 수문학적 특성에 따라 아래와 같이 4가지 그룹(A, B, C, D)으로 분류할 수 있다.

토양의 침투속도나 유출량에 따라 개념적으로 토양그룹을 분류할 수 있으나, 정작 실제로 토양통에 따른 수문학적 토양유형에 대한 명확한 기준은 전무하였다. 토양도를 제작·관리하고 있는 농업과학기술원에서 그동안 수문학적 토양유형 분류에 관해 공식적으로 규정한 바 없어, 일반적으로 국외기관에서 발표한 수문학적 토양분류 기준을 적용하거나 일부 변형하여 사용하고 있다. 그러나 이러한 수문학적 토양유형은 국내 환경 및 여건에 적합하지 않으며, 토양의 수리특성이 아닌 기타 물리적 특성을 이용하여 추정된 경우가 대부분이어서 분류상의 오류가 발생한다.

■ 표 4-17. 수문학적 토양분류

수문학적 그룹	특 성
A	침투속도가 매우 높아 유출량이 적은 토양
B	침투속도가 다소 높아 유출량이 다소 적은 토양
C	침투속도가 다소 낮아 커서 유출량이 다소 많은 토양
D	침투속도가 매우 낮아 유출량이 많은 토양

이에 농업과학기술원에서는 미국 자연자원보전국의 수문학적 토양유형 분류기준에 근거하여 국내 토양통을 대상으로 현장측정 및 입자특성을 활용한 추정식을 개발·적용하여 토양통별 침투 및 투수속도를 평가하여 유출곡선지수(CN)법의 적용을 위한 합리적인 수문학적 토양유형을 분류하였다.

표 4-18. 수문학적 토양분류별 특성

수문학적 토양군	침투율	토양 배수	투수율	토 성	비 고
A	높음	매우 양호	높음	사질이거나 역질	· 유출량이 적음
B	보통	양호	보통	약간 세립질이거나 약간 조립질	
C	느림	-	느림	약간 세립질이거나 세립질	· 수직침투방해층 있음
D	매우 느림	-	매우 느림	경반층이거나 점토층을 갖는 토양	· 유출량이 많음 · 지하수위가 높음 · 불투수층이 있음

본 연구에서는 1 : 25,000 축척의 토양도의 Soil Code를 바탕으로 농업과학기술원에서 발표한 수문학적 토양유형에 따라 해당 그룹을 할당하였다. 연구지역의 수문학적 토양유형 분류결과, 그룹 A와 D가 전체 면적의 55.13%(276.04km²), 38.27%(191.66km²)을 차지하였다.

2) 수문학적 그룹 및 토지피복에 따른 CN 산출

CN은 유효우량 산정시 토양통 및 지표면의 상태에 따라 정하는 계수로, 유역의 수문학적 토양형, 토지이용과 처리상태 및 선행토양함수조건의 함수이며, 한 유역의 유출능력을 나타내는 무차원수로서 총우량에 대한 직접유출량의 잠재력을 나타낸다. CN값은 1에서 100의 범위의 값을 가지며, 유출량과 비례한다. 이러한 CN은 토양형, 토지이용 혹은 토지피복, 수문조건, 농업관리방법, 선행수문조건, 초기감소와 기후, 강우강도와 지속시간 및 혼탁도에 영향을 받는다. 유출해석에 있어 미 토양보전국(SCS)에서 수문학적 토양 그룹 및 토지피복 항목에 따라 CN값을 제공하고 있으나, SCS에서 제공하는 토지피복 항목과 환경부에서 제공하고 있는 토지피복 간 항목의 불일치로 적정 CN값을 부여하는데 어려움이 따른다. 이에 수자원의 지속적 확보기술개발사업단은 피복분류 통계적 접근법을 사용하여, 수문학적 토양군에 따라 환경부에서 제공하는 토지피복 항목별 CN을 산정하였다. 농업과학기술원의 수문학적 토양분류방법에 근거하여 제작된 자료에

본 방법론을 환경부 중분류 2차 토지피복도에 적용시켜 CN 값을 산정하였다.

이 때, 토지항목별 CN값 산정시 제외시킨 위락시설, 공공시설 지역은 상업지역과 공업지역으로, 하우스재배지는 기타 재배지로, 채광지역은 기타 나지로 재분류하여 이와 동일한 값을 부여하였다. Combination Map 제작 결과, 본 연구지역은 산림지역 중 토양의 수문학적 그룹이 A에 해당하는 지역이 넓게 분포하고 있는 것으로 분석되었다. 본 주제도는 HELP3의 구동을 위한 물리적 입력자료 및 공간적 기본단위도로 활용될 것이다.

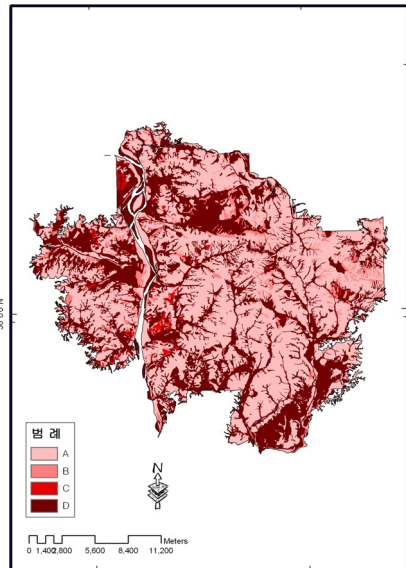


그림 4-30. 수문학적 토양 분류

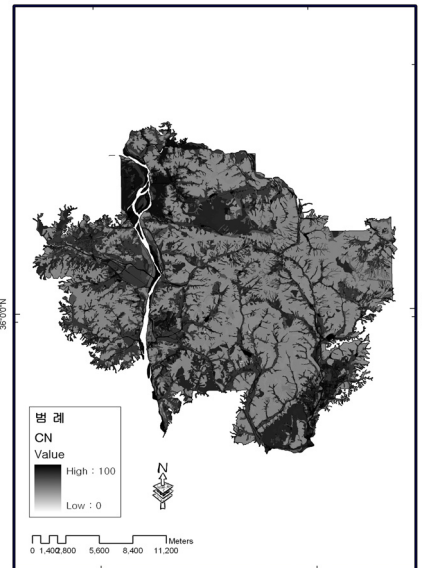


그림 4-31. CN

표 4-19. 피복분류항목에 대한 CN값

대분류					중분류					세분류									
피복항목	A	B	C	D	피복항목	A	B	C	D	피복항목	A	B	C	D					
시가화 건조지역	79	86	90	92	주거지역	58	73	82	86	단독주택	70	80	87	90					
										연립주택	56	71	81	86					
										아파트	48	67	78	83					
					상업지역	95	96	97	97	공업지역	81	88	91	93	공업지역	81	88	91	93
															상업/업무지역	89	92	94	95
															주유소/ 가스충전소	98	98	98	98
															도로	87	91	93	94
농업지역	63	74	82	85	논	78	78	78	78	경지정리된 논	78	78	78	78					
										경지정리 안된 논	78	78	78	78					
					밭	64	75	82	86	밭	64	75	82	86	밭	63	78	85	89
															산간지방 밭	62	73	80	83
															과수원	44	66	77	83
					기타채배지	59	74	82	86	과수원	44	66	77	83	과수원	44	66	77	83
															농장/농원/ 목장/방목장	59	74	82	86
산림지역	47	68	79	86											활엽수림	47	67	78	85
															자연활엽수림	47	67	78	85
초지	50	69	79	84	침엽수림	46	68	79	86	자연침엽수림	46	68	79	86					
										혼효림	47	68	79	86					
										자연초지	30	58	71	78					
습지	98	98	98	98	내륙습지	98	98	98	98	자연초지	30	58	71	78					
										자연초지	30	58	71	78					
										골프장	52	70	80	85					
										공원묘지	52	70	80	85					
습지	98	98	98	98	연안습지	98	98	98	98	기타초지	52	70	80	85					
										기타초지	52	70	80	85					
습지	98	98	98	98	내륙습지	98	98	98	98	내륙습지	98	98	98	98					
										갯벌	98	98	98	98					
습지	98	98	98	98	연안습지	98	98	98	98	연안습지	98	98	98	98					
										연전	98	98	98	98					
나지	77	86	91	94	기타나지	77	86	91	94	기타나지	77	86	91	94					
수역	100	100	100	100	내륙수	100	100	100	100	하천	100	100	100	100					
										호소	100	100	100	100					
										해양수	100	100	100	100					
수역	100	100	100	100	내륙수	100	100	100	100	해양수	100	100	100	100					
										해양수	100	100	100	100					

라. 지하수 함양률 변화분석

HELP3 모델을 이용한 연구지역의 지하수 함양률 산정은 CN값에 의한 공간적 분류를 바탕으로 CN 값에 해당하는 토양의 종류를 추출하고, 해당 토양통의 물리적 특성을 입력하는 방식으로 진행되었다. 각 토양에 해당하는 물리적 및 수리지질학적 특성은 USGS(U.S Geological Survey) 및 EPA(U.S Environmental Protection Agency)에서 제공되는 자료를 활용하였다. CN별 함양률 산정의 최소 공간적 범위는 10m×10m로 설정하였다. <표 4-19> 및 <그림 4-32>는 CN별 공간적 분포의 대표 함양률을 나타낸 것이며, CN 값이 높은 것은 불투수층이 많다는 것으로 함양률이 상대적으로 낮다는 것이다.

기후변화에 따른 지하수 함양률의 시간적 변화는 1970-2000년 26.19%, 2001-2030년 25.87%, 2031-2050년 27.33% 및 2051-2100년 25.45%로 산정되었다. 전반적으로 함양률은 강수량 변화에 민감하게 반응하는 것으로 분석되었으며, 2015-2100년 시기의 경우, 강수량 대비 지하수 함양률 증가가 크지 않은 것으로 산정되어 이에 대한 정밀한 재검토가 요구된다. 또한, 유출곡선지수(CN)에 따른 함양률 변화는 크게 영향을 받지 않으나, 지수값이 불투수층에 가까운 지역일수록 함양률이 급격히 감소됨을 알 수 있었다.

위에서 언급된 강우량을 기준으로 함양률을 적용하여 함양량 및 이용가능량을 산정하였다. 이용가능량은 전체 지하수 함양량의 70%로 설정하였으며, 이는 국가지하수관리계획(국토해양부, 2007)에서 명시하고 있는 적정개발가능량 비율을 적용하였다. 시기별 강수량 대비 지하수 함양률 및 함양량, 이용가능량을 <표 4-20>에 정리하였다. 함양량 및 이용가능량은 2001-2030년도에 강우량과 함께 감소하지만 2031년부터 2050년까지 증가하는 것을 나타내고 있다. 이는 전체적인 미래예측 기후변화와 동일한 흐름을 나타내는 것으로 사료된다.

표 4-20. 시기별 강우량, 함양률, 함양량 및 이용가능량

	1970-2000년	2001-2030년	2031-2050년	2051-2100년
강우량(mm)	1018.04	981.20	1222.49	1192.03
함양률(%)	26.19	25.87	27.33	25.45
함양량(m ³ /년)	1.423×10 ⁸	1.409×10 ⁸	1.504×10 ⁸	1.422×10 ⁸
이용가능량(m ³ /년)	9.961×10 ⁷	9.860×10 ⁷	1.053×10 ⁸	9.953×10 ⁷

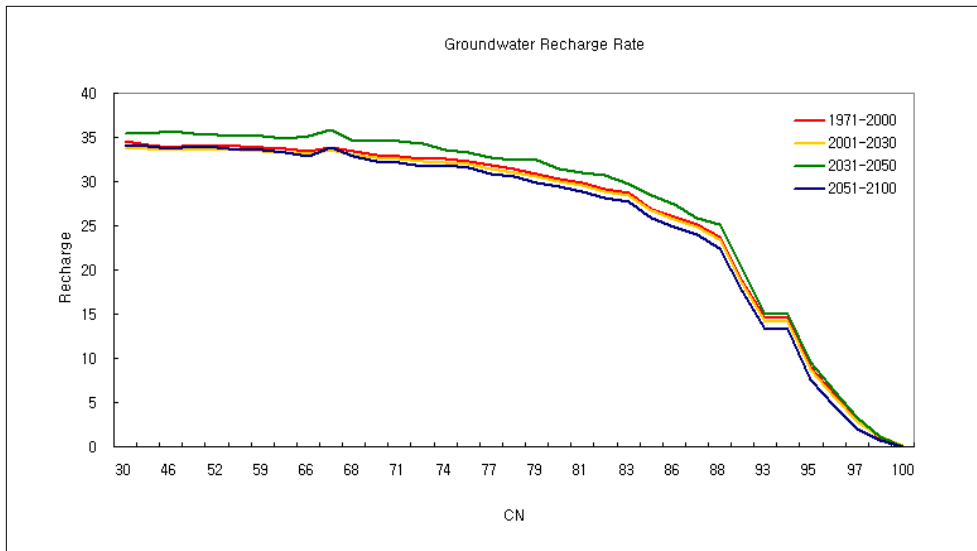


그림 4-32. 지하수 함양률(%) 분석

표 4-21. 기후변화 및 CN값에 따른 지하수 함양률 분석(%)

CN	1970-2000년	2001-2030년	2031-2050년	2051-2100년
30	34,5639	33,6600	35,4291	34,0715
44	34,0780	33,6600	35,4159	34,0003
46	33,8684	33,5165	35,7406	33,7437
47	34,0739	33,6307	35,3765	33,9512
52	34,0194	33,6316	35,3275	33,8473
58	33,9502	33,5354	35,1757	33,6273
59	33,9165	33,4931	35,1726	33,5744
64	33,7235	33,3467	34,9199	33,2248
66	33,3803	33,0906	35,2010	32,8380
67	33,8739	33,5498	35,8319	33,8499
68	33,4699	33,0435	34,6012	32,8354
70	33,0083	32,6969	34,7044	32,3154
71	32,8841	32,6237	34,6108	32,1802
73	32,5335	32,2798	34,2458	31,7696
74	32,5307	32,1817	33,5954	31,7929
75	32,3383	31,9672	33,3322	31,5388
77	31,7960	31,4540	32,7564	30,8922
78	31,4522	31,0692	32,3814	30,5232
79	30,8439	30,5815	32,4344	29,9058
80	30,3300	30,0648	31,4342	29,4657
81	29,8637	29,5991	30,9297	28,9061
82	29,0797	28,8877	30,7512	28,0997
83	28,6782	28,3861	29,6591	27,6480
85	26,9235	26,7428	28,4702	25,8277
86	25,9830	25,7465	27,4874	24,8222
87	25,1707	24,7942	25,8957	23,9290
88	23,6879	23,4168	25,1152	22,4232
91	18,7508	18,4487	20,1828	17,5873
93	14,5185	14,0923	15,0499	13,2871
94	14,5185	14,0923	15,0499	13,2871
95	8,9620	8,6565	9,5937	7,6190
96	5,8720	5,5341	6,3445	4,5254
97	2,9854	2,9178	3,2224	1,9967
98	0,9475	1,0875	1,1587	0,6745
100	0,0930	0,0912	0,0693	0,0197
전체	26,1906	25,8734	27,3333	25,4457

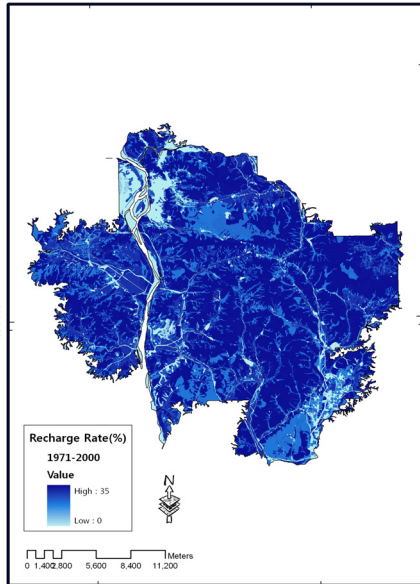


그림 4-33. 1970-2000년 지하수 함양률

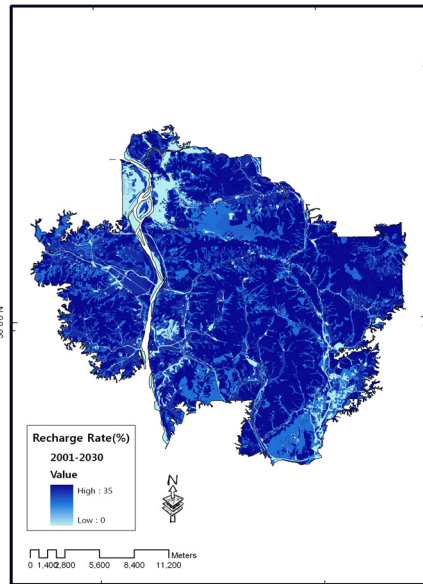


그림 4-34. 2001-2030년 지하수 함양률

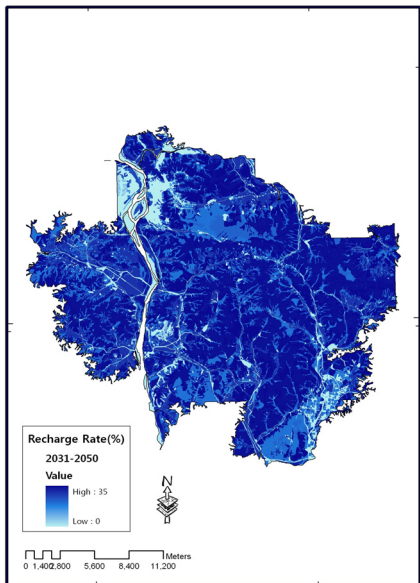


그림 4-35. 2031-2050년 지하수 함양률

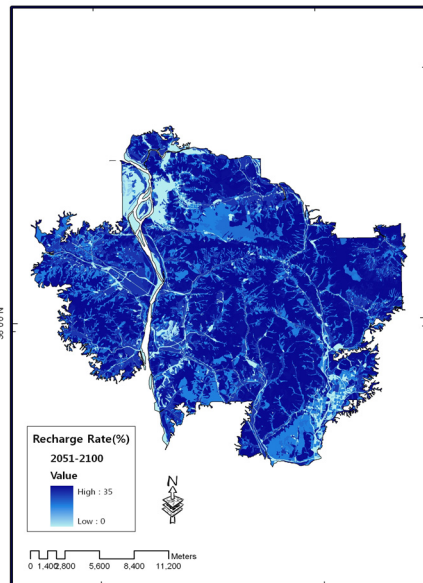


그림 4-36. 2051-2100년 지하수 함양률

마. 실제 계측치와의 비교

본 연구의 결과 검증은 국가지하수정보센터(<http://www.gims.go.kr>)에서 제공하고 있는 국가지하수관측망의 지하수위 및 함양률 변화를 활용하였다. 국가지하수관측망은 전국을 대상으로 지역 또는 유역별 대표지점에 지하수의 수위 및 수질의 변동 상황을 지속적으로 관측하기 위한 지하수 관측소를 설치 운영함으로써 국내 지하수자원의 보전 관리를 위한 기반을 구축한 것이다. 2005년까지 전국에 320개의 지하수 관측지점이 설치되어 있으며, 연구지역에 해당되는 경상북도 지역에는 43개의 관측망이 있다. 관측자료 분석에는 등치선도, 함양률 분석 및 수질경향성 분석이 있다. 본 연구지역인 경상북도 칠곡군 일원에는 총 2개소의 국가지하수 관측망이 운영중에 있으며, 지하수위 및 함양률 자료 중 활용가능한 2002년~2004년까지의 자료를 확보하였다.

2004년 칠곡 왜관 관측망의 자료에 의하면, 표준편차 0.005~0.010의 범위에서 지하수 함양률의 변화폭이 10.5%~12.1%에 해당된다. 또한 2004년 칠곡 가산 관측망의 경우, 표준편차 0.005~0.010까지의 경우에 함양률이 약 18.6%에서 21.6%에 해당된다. 즉, 동일한 관측점에서 오차 범위 및 초기 조건을 어떻게 할당하느냐에 따라 2~3% 가량의 함양률 차이를 보인다.

본 연구의 결과는 기상자료가 1970년부터 2000년까지는 실측자료이며, 2001-2030년, 2031-2050년, 2051-2100년까지는 기후변화예측자료를 활용하였다. 따라서, 연구결과의 실제 계측치와의 비교는 1970-2000년까지의 지하수 함양률 및 국가지하수 관측망의 측정기간이 포함되는 2001-2030년까지의 두 자료를 이용하여 실시하였다. 두 시기의 함양률은 각각 26.19% 및 25.87%로 국가지하수 관측망에서 추정된 연구지역의 최대 지하수 함양률인 21.6%보다 높게 산정되었음을 알 수 있다. 이는 연구지역 대부분이 비교적 투수성이 우수한 수문학적 토양군(A 및 B)에 속하며, 강우 함양이 발생하는 불포화대의 두께 역시 2m 미만으로 얇기 때문에, 강우의 지하침투가 예상보다 빨리 진행되고 있음을 시사하고 있다. 토양 투수성이 극단적으로 높은 제주도의 경우 토성은 다르나 수리학적 토양 특성의 분포는 연구지역과 유사하며, 지하수 함양률이 46%에 달한다(한국수자원공사, 2003). 또한, 육상과 불포화대 분포가 크게 다르지 않은 서남해안 일대 도서지역의 경우, 강우의 지하 함양률이 20~30%의 범위를 보이는 바(문유리, 2009), 본 연구에서 산정된 지하수 함양률 분포가 과다하게 수득된 것은 아닌 것으로 판단된다.

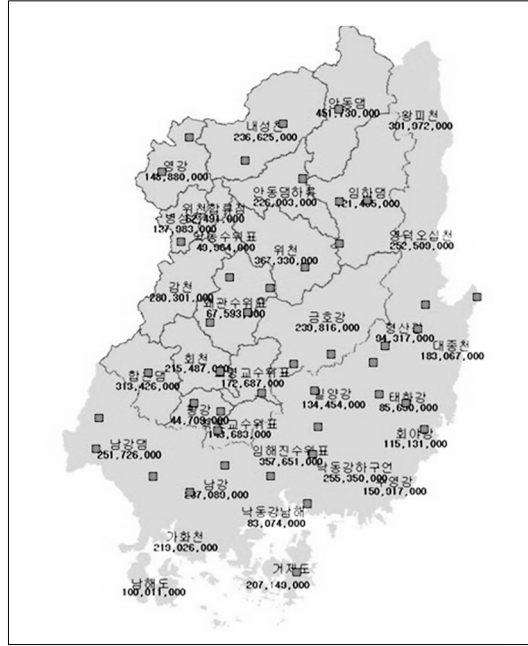


그림 4-37. 2004년 낙동강 유역 국가지하수 관측망 위치도

표 4-22. 국가지하수 관측망 지하수 함양률 결과

관측 연도	관측 소명	최고 수위 (m)	최저 수위 (m)	최고-최저 (m)	최적화 직선(Y)	결정 계수 (r^2)	30일후 수위강하	함양률(a) ($\delta=0.005$)	함양률(a) ($\delta=0.006$)	함양률(a) ($\delta=0.007$)	함양률(a) ($\delta=0.008$)	함양률(a) ($\delta=0.009$)	함양률(a) ($\delta=0.010$)
2004년	칠곡 왜관	28.69	26.77	1.92	1.920e-0270t	0.998366	1.066	0.105	0.109	0.112	0.115	0.118	0.121
	칠곡 가산	110.16	107.24	2.92	2.920e-1470t	0.985892	2.885	0.186	0.193	0.199	0.205	0.21	0.215
2003년	칠곡 가산	110.321	107.424	2.897	2.897e-1560t	0.989993	2.87	0.187	0.194	0.2	0.205	0.21	0.215
	칠곡 왜관	28.893	27.65	1.243	1.243e-0320t	0.999029	0.767	0.116	0.121	0.124	0.128	0.131	0.134
2002년	칠곡 가산	108.769	107.369	1.4	1.400e-1920t	0.990125	1.396	0.188	0.195	0.201	0.206	0.212	0.216



제5장

결론 및 제언

1. 요약 및 결론

가. 지하수 함양률 산정

전지구적으로 발생하는 기후변화는 강수 → 함양 및 유출 → 저장 → 증발산으로 연결되는 물순환 평형의 균형을 파괴하고 있으며, IPCC (2007)는 미래 기후변화로 인한 인간환경의 영향 중 가장 취약한 부문으로 '기후시스템 변화로 인한 강수 패턴의 변화와 그로 인한 가용 수자원의 부족을 최우선으로 선정하고 있다. 수자원의 큰 축을 차지하는 지하수는 하천과 호소 같은 지표수 수자원과 '직접적인' 상호작용을 통해 기후변화와 관련성을 가지며, 강수의 함양 과정을 통해 간접적인 영향을 받는다. 따라서, 기후변화가 지하수 수자원에 미치는 영향을 정량화하기 위해서는 신뢰성이 충분한 주요 기후 변수 변화예측뿐만 아니라 강수의 지하 함양에 대한 정확한 예측이 동시에 수반되어야 한다.

본 연구의 기상자료는 1970년부터 2000년까지는 기상청의 실제 관측 자료를 활용하였으며, 2001년부터 2100년 까지는 IPCC의 SRES A1B 시나리오를 통하여 얻어진 기상자료를 활용하였다. 미래 기상자료 수득을 위해 지역기후모델의 다운스케일링을 연구 지역을 대상으로 선행하였으며, 측정 및 예측된 기상자료는 30년 자료의 방대한 양의 처리 과정 및 처리시간 효율성을 위하여 30년 평균을 산정하여 활용하였다.

기온 및 강수량 자료, 토양 및 토지이용자료를 활용하여 연구지역의 지하수 함양량을 시기별로 추정하였고, 이를 지리정보시스템으로 구현하였다. CN값을 추출하기 위하여 정밀 토양도를 활용하였다. 토양의 물성 특성은 USGS 및 EPA에서 제공하는 자료를 활용하였다. 지하수 함양량을 추출하기 위하여 사용한 모델은 Visual HELP3이며, 활용된 자료는 기상, 기온 및 토양층의 물리적 특성이다.

연구지역의 1970년부터 2000년까지의 평균온도 11.69℃, 누적강수 1018.04mm, 2001년부터 2030년까지 평균 온도 12.59℃, 누적 강수 981.04mm, 2031년부터 2050까지 평균온도 13.79℃, 누적강수 1222.49mm, 2051에서 2100년까지 평균온도 15.511℃, 누적강수 1192.03mm로 추정되었다.

기후변화에 따른 지하수 함양률의 시간적 변화는 1970-2000년 26.19%, 2001-2030년 25.87%, 2031-2050년 27.33% 및 2051-2100년 25.45%로 산정되었다. 이는 연구 지역의 국가지하수 관측망 계측치로 추정된 최대 지하수 함양률보다 4~5% 가량 높은 값으로, 연구 지역의 토지피복양태와 침투율이 매우 높은 고투수성 토양분포가 주된 원인으로 판단된다. 전반적으로 지하수 함양률은 강수량의 변화에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 유출곡선지수의 변동에 의한 영향은 크지 않은 것으로 판단되나, 지수값의 증가에 따라서 함양률이 점차적으로 감소하다가 시가지지역에 가까운 불투수 지역에서는 함양률이 급격히 감소하는 양상을 나타내었다.

또한 본 연구에서는 연구 지역의 토지 이용 형태와 종류, 식생분포, 토양의 수리학적 특성을 모두 결합한 공간지리정보 조합도(combination map)를 작성, 기후변화에 따른 연구지역 지하수 함양률 변화의 공간분포를 시도하였다. 분포결과, 유출곡선지수가 큰 시가지 지역에서의 지하수 함양은 강수량 변화에 상관없이 매우 낮으며, 기후 사상이 변화하는 2031년 이후에는 함양률이 저하되는 면적이 현재에 비해 다소 증가되는 양상을 나타내었다.

나. 모델 한계점

지하수 함양률을 정확하게 산정·예측하기 위해서는 대상지역의 기후인자(강수량, 증발산량 등) 및 지형/지질인자(토질, 지표수량 변동, 지하수위 변동 등) 등 다양한 영향 요소 및 변수들을 측정하고 분석해야 하므로 많은 시간과 비용이 소요된다. 기본적으로 모델을 이용하여 자연현상을 추정하는 것은 다양한 인자를 고려할 수 있고, 실제 측정을 통한 분석보다 단순화된 과정을 통하여 정량화된 결과를 얻을 수 있으며, 시간과 비용을 절약할 수 있다는 경제적인 장점도 존재한다.

본 연구에서는 지하수 함양률 산정 모델인 HELP3를 이용하였다. HELP 모형은 Darcy법칙에 근거하고 있으며, 매립지에서의 물수지법을 보완한 모형으로 매립지 토양을 통과하는 강우의 수리학적 거동을 예측하는 모델이다. 따라서, 토양층 내를 침투하는 기작을 HELP 모형이 물리적 현상을 잘 반영한다고 볼 수 있다. 또한 국외의 경우에는 HELP 모형은 오랫동안 검증이 이루어졌고, 사용하기가 간편한 이유 때문에 기후변화와 관련한 연구에 활용이 되는 것을 알 수 있다.

특히 날씨(기상) 발생기를 차용하고 있는 장점이 기후변화와 관련한 지하수 함양량변화를 평가하는데, 유용한 도구가 되고 있는 것을 알 수 있다.

그러나 HELP3 모델의 단점은 모형구조 및 입력자료에서 기존 지하수위에 대한 자료가 입력되지 않으며, 지하수위 변동에 따른 함양량 영향을 고려하기 어려움이 따른다는 것이다. 또한 각 토양통에 대한 물성자료가 분석에 중요한 역할을 하며, 이에 대한 실측 또는 자료의 확보가 중요한 부분을 차지한다. 이러한 자료가 미흡하다면 함양량과 수문성분 사이의 관계과악이 어려움이 있다.

다. 정책적 적용 방향

본 연구는 주로 기후변화 예측치를 연동한 지하수 함양량 산정 방법론 및 모델 개발에 중점을 두었으며, 모델을 적용한 시범지역 역시 유역 전체를 대표할 수 없기 때문에, 국내 지하수 수자원 관리에 관한 구체적인 방안을 수립하기는 어려우나, 연구결과를 토대로 향후 국내 지하수 수자원의 양적 관리에 관한 다음과 같은 정책 방향을 제시할 수 있을 것으로 본다.

- 본 연구에서는 과거 기상자료 조건 및 미래 한반도 기후변화 예측 추이를 지하수 함양 모델과 연동하여 향후 2100년까지 지하수 함양률 및 함양량, 이용가능량을 시·공간적으로 산정하였으며, 국내에서 처음으로 시도되었다는 점에서 큰 의의를 둘 수 있다. 또한, 지하수 함양량 및 이용가능량은 국가적 차원에서 수립 또는 갱신되는 수자원이용관련계획(예. 수자원장기종합계획, 지하수관리기본계획 등)에서 장래 국내 가용 수자원량 예측시 필수적으로 산정되어야 하는 항목인 바, 본 연구에서도 산정된 지하수 함양량 및 이용 가능량 결과를 충분히 활용할 경우 국내 전 유역의 지하수 이용 및 개발 가능량에 대한 근미래 및 장기적 목표설정이 용이할 것으로 판단된다.
- 기존의 지하수 함양률은 중권역 유역당 1개의 상수로 주어진다. 일례로, 연구 지역이 속해 있는 낙동강 구미 및 왜관 유역의 지하수 함양률은 각각 11.64% 및 13.94%로 산정되어

있으며(국토해양부, 2007), 이는 유역 전체 지역에 동일하게 적용된다. 또한, 연구지역 내 운영되고 있는 국가지하수 관측망 2개소의 지하수위 변동폭에 따른 지하수 함양률은 10.5~21.5%의 범위에 속하며, 별도의 계측치가 없는 한 연구지역 전체 지하수 함양률을 대표한다고 할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 지하수 함양률 및 함양량을 지역의 토지이용 및 형태, 토양 수리 특성 등의 공간지리정보를 이용하여 공간적 세분화를 시도하였고, 중권역 유역보다 작은 면적에서의 지하수 함양량을 산정 및 예측할 수 있다는 점에서 큰 의의가 있다. 이는 향후, 군 단위 기초자치단체 이하에 해당되는 소규모 행정구역 단위에 있어서도 지하수 개발·사용량 목표 설정 및 제한, 가뭄 등 용수부족 발생시 적정 지하수 개발 위치 선정 등 지하수 수자원 이용과 관리에 대한 행정목표를 자체적으로 수립할 수 있는 기본적인 도구를 제공할 수 있다.

- 광역 또는 지방단위 상수도에 의한 관광 네트워크가 설치되지 않은 산간 및 도서 지역에서는 여전히 지하수가 주 용수원으로 사용되고 있다. 이러한 지역에서 마을상수도 개발사업, 관광 등 위락-레저시설 건설 및 체육시설 건설사업 등 대규모 용수 사용이 요구되는 사업이 계획될 경우, 해당지역의 기후변화에 따른 강수패턴 변화, 토지이용 및 토양의 수리적 특성 등에 따라 함양되는 지하수의 양 및 그에 따른 적정 개발량을 재산정하여야 하나, 지역에 따라 지하수 수문 관련 계측 자료가 존재하지 않는 경우가 많아 정확한 함양량 예측이 난이할 수 있다. 본 연구를 통해 산정된 지하수 함양률 및 함양량의 공간분포 자료는 자료도엽 상의 세부 격자별 지하수 함양에 관한 속성정보를 모두 포함하고 있으며, 1971년부터 2100년까지의 지하수 함양량 정보를 지역에 상관없이 시-공간적으로 제공할 수 있기 때문에, 지하수 수문 미계측 유역에서 대규모 개발사업에 따른 지하수 이용 가능량 예측에 필수적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 본다.

2. 차년도 연구계획

본 연구는 2년간 연차적으로 수행될 계획이다. 1차년도인 2009년에는 기후변화 예측 모델과 지하수 함양량 예측 모델을 연동하여, 기후변화에 따른 지하수 함양량 변화 예측을 시공간적으로 구현할 수 있는 방법론 및 모델 개발에 역점을 두었다. 1차년도 연구결과를 바탕으로 차년도에는 다음과 같은 연구가 수행될 예정이다.

가. 개발 방법론 및 모델 튜닝

개발 방법론 및 모델의 기초가 되는 기후변화 예측 부문에서, 본 연구에서 사용된 지역기후모델 다운스케일링 방법의 보정을 수행, 모델영역 확대시 정확성을 보장할 수 있도록 보정작업을 실시할 필요가 있다. 이를 위해 2009년도 연구지역보다 면적이 크고 과거 및 현재 기상관측자료를 충분히 보유하고 있는 유역을 선택하여 본 연구에서 적용된 기후예측 모델링을 실시하고, 그 결과를 2009년도 연구결과와 비교하도록 한다.

2009년도 연구에서 사용된 지하수 함양 모델 HELP3는 사용자 편의성을 배가한 GUI를 탑재하여, 모델 수행 및 결과 표시에 있어서 시각적 효과를 증대시켰다는 큰 장점이 있는 반면, 공간지리 정보조합을 통해서 구한 연도별-토양 수리특성별 입력자료(약 10,000건)를 일일이 하나씩 수작업으로 입력해야 하는 어려움이 있었다. 따라서, 차년도 연구시 기후변화 예측 모델에 의한 기상자료, 각종 공간지리정보 분석을 통해 수득된 지역 수리특성 자료를 HELP3로 모델링 실시할 때, 입력 편의성을 고려한 입-출력 일괄처리 모듈을 개발할 필요가 있다.

또한, 2009년도에 개발된 방법론 및 모델 과정의 검증을 위해 여러 종류의 지표수 유출량 산정 모델을 검토하고, 본 연구의 목적 및 방법론과 부합하는 모델을 선정하여 지하수 함양 모델과 병행 처리를 실시할 예정이다.

나. 연구지역 확장 및 공간지리정보의 충분한 확보 및 분석

2009년도 연구에서는 개발된 방법론 및 모델의 적용 차원에서 중권역 규모의 시범 지역에 한정하여 지하수 함양량을 산정하였다. 차년도에는 개발된 방법론 및 모델을 확대 적용을 위해 지역을 국내 주요 4대 하천 유역 전체로 설정하고 상기 지역에 대한 지하수 함양량 및 이용 가능량을 기후변화 예측치와 연동하여 산정할 예정이다. 이를 위해서 4대 하천유역 전체의 토지피복 및 식생, 불투수층 면적, 토양 수리특성 등의 공간지리정보를 최대한 조속히 확보, 연구 목적에 알맞게 조정 및 분석을 실시할 예정이다. 특히, 토양 수리특성 파악에 기본이 되는 정벌 토양도의 경우 식생이 밀집된 지역이나 암반 위주의 산 정상부 지역은 자료 입력이 완료되지 않아 속성 정보가 부재한 사례가 존재하는 바, 유역 전역으로 확대시 이와 같은 속성 정보 부재 지역에 대한 보간 또는 평균 가중치 적용기법 등의 도구를 이용, 분석 오류를 최소화할 예정이다.

다. 연구지역 확대에 따른 및 지하수 함양량 재산정

확대된 연구 지역에서의 지하수 함양량은 2009년도에 개발된 방법론 및 모델을 그대로 준용하여 산정할 예정이다. 우선 4대 하천유역 전체의 미래 기후변화 모델 구동을 통한 기상자료를 지역기후모델에 근거한 A1B SRES에 의거하여 확보하여야 하며, 지하수 함양 특성을 보유한 각종 공간지리정보의 combination map을 작성할 예정이다. 또한, 유역 전체의 국가지하수 관측망 및 함양률 분포자료를 분석하여, 본 연구에서 수득된 지하수 함양량 산정 결과와 지속적으로 비교, 검토를 실시할 예정이다.



- 강인식. 1994. “지구온난화와 동반된 한반도 기온변화의 시나리오 연구(I)” 『한국기상학회지』 30(2) : pp.247-260.
- 건설교통부, 한국수자원공사. 1995. 『지하수관리조사보고서, 지하수자원기본조사(3차)』
- 구민호, 김형수, 안경환. 2000. “지하수 수위 및 수온의 장기 측정자료 분석” 『대한지질공학회 2000년 정기총회 및 학술발표회』
- 국립기상연구소. 2002. 『한반도 및 동아시아지역 기후변화 시나리오기법 개발』
- 국토해양부. 2007. 『지하수관리기본계획』
- 고경석. 2009. “기후변화에 따른 국내 지하수자원 취약성” 『제14차 지하수 정보협력 포럼』 120p.
- 김규범. 2008. 『미국의 기후변화에 대비한 지하수 조사·이용 및 관리』 한국수자원공사
- 김규범. 2009. “기후변화와 지하수 양수에 따른 지표수 영향”, 『제14차 지하수 정보협력 포럼』 120p.
- 김규범, 김기영. 2008. “미계측지역 지하수 함양량 추정을 위한 통계적 접근” 『한국지반환경공학회 논문집』 9(7) : pp.73-85.
- 김규범 외. 2004. “수위강하곡선을 이용한 함양량 추정기법의 국가지하수관측소 지하수위 자료에의 적용성 평가” 『지질공학』 14(3) : pp.313-323.
- 김맹기, 강인식. 1997. “광역 기후 변수와 지역 기후 변수 사이의 통계적 연관성 : 한반도의 온난화와 연관된 북반구 해면 기압 패턴” 『한국기상학회지』 33(2) : pp.261-271.
- 김맹기 외. 2002. “동아시아 대기순환과 한반도 기후변동간의 결합변동서 조사” 『대기』 12(3) : pp.238-239.
- 김재욱. 2005. 『지역기후모형을 이용한 산림식생의 취약성 평가에 관한 연구』 서울대학교 석사학위논문.
- 김정우. 2002. 『대기대순환 모델에 의한 기후변화 예측기술 개발』 환경부. 606p.
- 김춘지 외. 2002. “SNU/RCM 과 RegCM2 의 동아시아 기후 모의 성능 비교” 『대기』 12(1) : pp.442-444.
- 김태국 외. 2002. “역학적 다운스케일링 기법을 이용한 동아시아 지역기후의 수치모의” 『대기』 12(1) : pp.475-480.
- 문유리. 2009. 『도서지역 용수공급체계에 관한 고찰』 한국환경정책·평가연구원.
- 민영미, 김태국, 오재호. 2003. “ECHAM4/HOPE 온난화 시나리오에 따른 한반도 및 동아시아 지역 기후 시나리오 산출에 관한 연구” 『대기』 12(3) : pp.606-609.

- 박선기. 2008. 『수자원/수질부문 기후변화 영향평가 및 적응대책 인벤토리 발굴 연구(I)』 국립환경과학원
- 박수희, 김정우. 2001. "지역 기후 모형을 이용한 동아시아 기후의 모사" 『대기』 11(3): pp.136-139.
- 박지업 외. 2000. "CO₂ 배증 시기 지구 온난화의 예측을 위한 점증 실험" 『한국기상학회 2000년도 정기총회 및 가을 학술발표회 초록집』, pp. 122-126.
- 안중배, 김정우. 1998. "이산화탄소 점증에 따른 CGCM Tr7W6 의 장기반응 실험 : I. 기후 변수들의 연평균 변화" 『한국기상학회지』 34(2): pp.263-271.
- 안중배, 박혜선, 김정우. 1997. "CGCM Tr7W6 에 나타난 계절안 진동분석" 『한국기상학회지』 33(4): pp.709-723.
- 안중배 외. 1997. "대기 및 해양 대순환 모형에 나타난 기후 표류에 관한 연구" 『한국기상학회지』 33(3): pp.509-520.
- 오재호 외. 1994. "CO₂ 배증이 한반도 기후 변화에 미치는 영향(강수량 변화 예측 시나리오)" 『한국기상학회지』 30(3): pp.335-362.
- 이동규. 2002. 『지역기후모형의 개발』 환경부. 463p.
- 이동근, 김재욱, 정희철. 2006. "기후변화의 영향평가를 위한 대순환모형과 지역기후모형의 비교 연구" 『환경영향평가』 15(4) : pp.249-257.
- 이동률. 1995. 『지하수 감수곡선을 이용한 지하수함양량 추정과 장기 갈수량 예측』 고려대학교 토목환경공학과 박사학위논문.
- 전성우 외. 2002. 『기후변화에 따른 생태계 영향평가 및 대응방안 연구 III - 삼림부분을 중심으로』 한국환경정책·평가연구원.
- 정일웅 외. 2003. "YONU AGCM 에서 수평 해상도에 대한 현 기후 모사의 민감도" 『한국기상학회지』 39(2): pp.221-237.
- 조민수, 정일웅, 김정우. 1997. "CO₂ 배증에 의한 기후대 변화의 GCM 모사" 『한국기상학회 1997년도 가을 학술발표회 초록집』: pp.76-79.
- 조재경. 2007. "지하수 함양량 산정법의 구분과 적용성 검토" 『농어촌과 환경』 94: pp.153-161.
- 차동현, 강현석, 이동규. 2003. "SNURCM 을 이용한 10년 아시아지역 기후 모의" 『대기』 13(1): pp.324-327.
- 최병수, 안중기. 1998. "지역단위 지하수 자연함양량 산정방법 연구" 『지하수환경』 5(2): pp.57-65.
- 하경자, 김정우. 1993 "장기예보의 실험적 연구 : 1. 월평균의 예보" 『한국기상학회지』 29(1): pp.37-52.

- Alcamo, J. (Ed). 1994. *Image 2.0: Integrated Modelling of Global Climate Change*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands
- Alcamo, J. et al. 1995. "An evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios" In Houghton, J.T. et al. (eds.) *Climate Change 1994, Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, pp.233-304.
- Allen, D. M., D. C. Mackie, and M. Wei. 2004. "Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada" *Hydrogeology Journal* 12: pp.270-290.
- Arakawa, A. and W. H. Schubert. 1974. "Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment, Part I" *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(3): pp.674-701.
- Ball, J. E. and K. C. Luk. 1998. "Modeling spatial variability of rainfall over a catchment" *Journal of Hydrologic Engineering* 3: pp.122-130.
- Bell, J. L., L. C. Sloan and M. A. Snyder. 2004. "Regional Change in Extreme Climate Events : A Future Climate Scenario" *Journal of Climate* 17(1): pp.81-87.
- Bourouai, F. et al. 1999. "Three-dimensional hydrogeological modelling application to the Alvera mudside (Cortina d'Ampezzo, Italy)" *Geomorphology* 30: pp.189-199
- Convery, F. J. et al. 2003. *Achieving Behavioural Change-Policy Instruments and the Management of Climate Change*. Department of Environmental Studies, University of Dublin, Dublin: Clonskeagh.
- Emori, S. et al. 2001. "Importance of Cumulus Parameterization for Precipitation Simulation over East Asia in June" *Journal of the Meteorological Society of Japan* 79(4): pp.939-947.
- Federer, C. A., C. Vörösmarty and B. Fekete. 2003. "Sensitivity of Annual Evaporation to Soil and Root Properties in Two Models of Contrasting Complexity" *Journal of Hydrometeorology* 4(6): pp.1276-1290.
- Houghton, J. T., B. A. Callander and S. K. Varney. 1992. *Climate Change 1992 : The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment*, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Houghton, J. T., G. T. Jenkins and J. J. Ephraums (Eds.). 1990a. *Climate Change-The IPCC*

- Scientific Assessment*. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- IPCC-TGICA. 2007. *General Guidelines on the use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*. Version 2. 66p.
- Jyrkama, M. I., J. F. Sykes and S. D. Normani. 2002. "Recharge estimation for transient ground water modeling" *Ground Water* 40: pp.638-648.
- Jyrkama, M. I. and J. F. Sykes. 2007. "The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River Watershed(Ontario)" *Journal of Hydrology* 338: pp.237-250.
- Kirshen, P. H. 2002. "Potential impacts of global warming on groundwater in eastern Massachusetts" *Journal of Water Resources Planning and Management* 128: pp.216-226.
- Lerner, D., A. S. Issar and I. Simmers (eds.). 1990. *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge*. Heise. Hannover.
- Mearns, L. O. et al. 2003. *Guidelines for use of climate scenarios developed from Regional Climate Model experiments*, Data Distribution Centre, IPCC. 38p.
- Mellor, G. L. and T. Yamada. 1974. "A Hierarchy of Turbulence closure model for geophysical Boundary Layers" *Journal of the Atmospheric Sciences* 31(7): pp.1791-1806.
- _____. 1982. "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems" *Reviews of Geophysics* 20(4): pp.851-875.
- Nakajima, T. et al. 2000. "Modelling of the radiative process in an atmospheric general circulation model" *Applied Optics* 39(27): pp.4869-4878.
- Numaguti, A. et al. 1997. "Description of CCSR/NIES Atmospheric General Circulation Model, Study on the climate system and mass transport by a climate model" *CGER's Supercomputer Monograph Report, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies*, 3: pp.1-48.
- Pielke, R. A. et al. 1992. "A comprehensive meteorological modeling system - RAMS" *Meteorology and Atmospheric Physics*, 49(1): pp.69-91.
- Rayner, N. A. et al. 1996. *Version 2.2 of the global sea ice and sea surface temperature data set, 1903-1994*. *Climate Research Technical Note 74*. Hadley Centre for Climate Prediction and Research.
- Richardson, C. W. and D. A. Wright. 1984. *WGEN: A model for generating daily weather variables*.

- ARS-8. Agricultural Research Service. US Department of Agriculture.
- Risser, D. W. 2008. *Spatial distribution of ground-water recharge estimated with a water-budget method for the Jordan Creek watershed, Kehigh County, Pennsylvania*. Scientific Investigations Report 2008-5041, U.S. Geological Survey.
- Risser, D. W., W. J. Gburek and G. J. Folmar. 2009. "Comparison of recharge estimates at a small watershed in east-central Pennsylvania, USA" *Hydrogeology Journal* 17: pp.287-298.
- Rosenberg, N. J. et al. 1999. "Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala Aquifer Region" *Climatic Change* 42: pp.677-692.
- Scibek, J. et al. 2007. "Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model" *Journal of Hydrology* 333: pp.165-181.
- Solomon, S. et al. (eds.). 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996p.
- Shuttleworth W. J., and R. J. Gurney. 1990. "The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops" *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 116: pp.497-519.
- Shuttleworth, W. J. and J. S. Wallace. 1985. "Evaporation from sparse crops—An energy combination theory" *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 111: pp.839 - 855.
- Takata, K., S. Emori and T. Watanabe. 2003. "Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff" *Global and Planetary Change* 38: pp.209-222.
- Vaccaro, J. J. 1992. "Sensitivity of groundwater recharge estimates to climate variability and change, Columbia Plateau, Washington" *Journal of Geophysical Research* 97: pp.2821-2833.
- Walker, G. R. et al. 2002. "Estimating impacts of changed land use on recharge: review of modelling and other approaches appropriate for management of dryland salinity" *Hydrogeology Journal* 10: pp.68-90.
- Xuejie, G. et al. 2003. "Simulation of Effects of Land Use Change on Climate in China by a Regional Climate Model" *Advances in atmospheric sciences* 20(4) : pp.583-592.



Abstract

Coupled Model Development between Groundwater Recharge Quantity and Climate Change in River Watershed

Global climate change is destroying the water circulation balance by changing rates of precipitation, recharge and discharge, and evapotranspiration. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) makes “changes in rainfall pattern due to climate system changes and consequent shortage of available water resource” a high priority as the weakest part among the effects of human environment caused by future climate changes. Groundwater, which occupies a considerable portion of the world's water resources, is related to climate change via surface water such as rivers, lakes, and marshes, and “direct” interactions, being indirectly affected through recharge. Therefore, in order to quantify the effects of climate change on groundwater resources, it is necessary to not only predict the main variables of climate change but to also accurately predict the underground rainfall recharge quantity.

In this study, the authors selected a relevant climate change scenario, In this context, the authors selected A1B from the Special Report on Emission Scenario (SRES) which is distributed at Korea Meteorological Administration. Weather data for rainfall and temperature with the period between 1971 and 2100 was used in this study. Actual observation data from the Korea Meteorological Administration from 1970 to 2000 was used and the weather data obtained from the SRES A1B scenario was used for the data between 2001 and 2100. The 30-year observation and prediction averages were used in order to promote efficiency in processing the enormous amount data. and extracted future temperature and rainfall changes. By using data on temperature, rainfall, soil, and land use, the groundwater recharge

rate for the research area was estimated by period and embodied as geographic information system (GIS).

With regard to the study area, average temperature and accumulated rainfall were calculated as 11.69°C and 1,018.04mm between 1970 and 2000, 12.59°C and 981.04mm between 2001 and 2030, 13.79°C and 1,222.49mm, between 2031 and 2050, and 15.51°C and 1,192.03mm between 2051 and 2100, respectively.

With regard to the groundwater recharge quantity, the climate data obtained from the above-mentioned process was used as input data, and the soil map organized for calculation of CN values was used, and the data provided by USGS and EPA was used for the material properties of the soil. In order to calculate the groundwater recharge quantity, Visual HELP3 was used as main model for groundwater recharge, and the physical properties of weather, temperature, and soil layers were used as main input data.

The temporal variation of the groundwater recharge quantity of the study area between 1971 and 2100 was calculated to correspond with the data for climate change at percentage : 26.19% between 1971 and 2000, 25.87% between 2001 and 2030, 27.33% between 2031 and 2050, and 25.45% between 2051 and 2100, respectively. Also, the spatial variation of the groundwater recharge showed that in the period between 2051 and 2100, the quantitative differences between high and low recharge region are more severe than the period between 1971 and 2000.

General changes to water circulation due to climate change have already been predicted. In order to systematically solve problems associated with how the groundwater resource circulation system should be reflected in future policies pertaining to groundwater resources, it may be urgent to recalculate the groundwater recharge quantity and consequent quantity for using via prediction of climate change in Korea in the future and then reflection of the results.

The space-time calculation of changes to the groundwater recharge quantity in the study area may serve as a foundation to present additional measures for the improved management of domestic groundwater resources.



기본연구

2005년

- RE-01 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 I (한화진 외)
- RE-02 Greenhouse Gas Emissions Trading Schemes - Recent Development and Policy Recommendations for Korea (김용건, Erik F. Haites)
- RE-03 지속가능한 하구역 관리방안(II) (이창희 외)
- RE-04 농촌의 경관가치평가와 관리 방안 (김광임 외)
- RE-05 신재생에너지전력 시장활성화 방안 연구 (이창훈 외)
- RE-06 에너지부문의 환경세 도입이 환경 및 경제에 미치는 영향 (강만옥 외)
- RE-07 The Impact Analysis of Urban Growth on Environment Using the Econometric Regional Impact Model (여준호 외)
- RE-08 도시토지이용의 생태 효율 제고방안 연구 (박창석 외)
- RE-09 지방단위 지속가능발전지표 연구 (정희성 외)
- RE-10 총량관리체계 하에서의 지역환경관리 (문현주, 황석준)
- RE-11 배출허가체계 개선 방안 연구 (이병국 외)
- RE-12 Pharmaceuticals in the Environment and Management Approaches in Korea (박정임)
- RE-13 멸종위기 야생동·식물종의 선정 평가기법 연구 (방상원, 안선영)
- RE-14 GIS-based Wildlife Habitat Management Strategies in Korea (노백호 외)
- RE-15 녹지의 대기환경영향에 관한 연구 - 도심지역에서의 녹지와 국지적 대기환경영향과의 상관관계를 중심으로 (주현수 외)
- RE-16 An Econometric Analysis on the Costs of Carbon Sequestration in Korea (안소은)
- RE-17 동북아 환경협력체계 효율화 방안 연구 (추장민 외)
- RE-18 보호대상 식물종에 대한 환경영향평가기법 개선방안 연구 (이현우 외)
- RE-19 환경영향평가지 대기확산모델의 적용에 관한 연구 (문난경 외)
- RE-20 터널로 인한 지하수 영향 저감방안 연구 (이정호 외)
- RE-21 해양매립사업으로 인한 환경영향의 효율적인 저감방안에 관한 연구 (맹준호 외)
- RE-22 지형·지질을 고려한 개발사업의 입지선정에 관한 연구 - 골프장 및 석산개발 입지에 관하여 (김지영 외)

2006년

- RE-01 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 II (한화진 외)
- RE-02 지속가능한 하구역 관리방안 III (노백호 외)
- RE-03 통합적 환경관리체계 구축을 위한 정책방안 연구 I (정희성 외)
- RE-04 도시지역에서의 바람길과 대기질 영향에 관한 연구 (주현수 외)
- RE-05 An Approach for Developing Aquatic Environmental Risk Assessment Framework for Pharmaceuticals in Korea (박정임 외)
- RE-06 지속가능한 물질관리를 위한 자원순환정책 방안 (김광임 외)
- RE-07 Job Creation and Environment (황욱 외)

- RE-08 An Application of Benefit Transfer to Outdoor Recreation Values in Korea (안소은 외)
- RE-09 Estimating Climate Change Damage Using PAGE Model (채여라 외)
- RE-10 A Study on the Endogenous Process of Implementing International Environmental Standards (황욱 외)
- RE-11 Air Quality Modeling System I - Development of Emissions Preparation System with the CAPSS (문난경 외)
- RE-12 수생태계 복원을 위한 제도정비 방안과 추진전략 (이병국, 노태호)
- RE-13 습지보전을 위한 정책방안 연구 - 습지은행제도(Wetland Banking)를 중심으로 (방상원 외)
- RE-14 Improving Coherence between Soil and Groundwater Quality Standards (황상일 외)
- RE-15 유해화학물질 함유 제품의 소비자노출기법 적용 방안 (신용승 외)
- RE-16 지방자치단체 환경예산제도의 발전방향 연구 (이창훈, 김영미)
- RE-17 산업 클러스터 구축정책과 환경관리 (최진석)
- RE-18 환경평가에 있어 생물다양성 항목의 도입 방안 (권영한 외)
- RE-19 항공기소음의 영향예측기법 개선방안 (선효성, 박영민)
- RE-20 고압송전선로 전자파에 대한 노출범위 설정 방안 (전인수, 김한나)
- RE-21 해안개발사업에 따른 해안침식영향 저감방안 연구 (조광우 외)
- RE-22 대기업과 중소기업의 환경관리 양극화 현황과 정책과제 (이창훈, 이윤미)

2007년

- RE-01 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 III (한화진 외)
- RE-02 도시지역 저소득계층 보호를 위한 환경정책연구 (추장민 외)
- RE-03 에너지·전력부문 보조금의 환경친화적 개편방안과 파급효과 연구 I (강만옥 외)
- RE-04 통합적 환경관리체계 구축을 위한 방안 연구 II - 「배출시설규제에관한법률(가칭)」 제정안을 중심으로 (한상운 외)
- RE-05 도시생태네트워크 구축을 위한 토지이용계획 연구 (박창석, 오규식)
- RE-06 Environmental Risk Assessment of Pharmaceuticals - Model Application for Estimating Pharmaceutical Exposures in the Han River Basin (박정임 외)
- RE-07 축차 동태형 환경경제 통합 모형 연구 (강상인, 김재준)
- RE-08 환경평가와 지속가능발전지표 연계운용방안에 관한 연구 (김호석 외)
- RE-09 제품군별 대기 및 수질 오염물질 배출량 추정 (공성용 외)
- RE-10 환경자원의 가치평가체계 구축 I - 조건부 가치 평가법의 가상편의 검증 및 개선 방안 (이진권, 임영아)
- RE-11 수생태계 보호를 위한 토사 관리 방안 (김익재 외)
- RE-12 Risk Management of Hazardous Chemicals Considering Interaction between Indoor and Outdoor Sources (신용승 외)
- RE-13 해안지역 지하수 수자원 통합관리방안 연구 I (이정호 외)
- RE-14 Development of a Methodology Assessing Rice Production Vulnerability to Climate Change (유가영, 김정은)
- RE-15 Estimation of Costs and Impacts for Various Options of Post-Kyoto Climate Regime (채여라 외)
- RE-16 지하수자원의 합리적 이용·관리를 위한 정책방향 (문현주)
- RE-17 생태축 분석을 위한 경관생태학적 방법론 연구 (이상범)

- RE-18 갯벌매립사업 환경평가 개선방안에 관한 연구 (맹준호 외)
- RE-19 Air Quality Modeling System II (문난경 외)
- RE-20 자연친화적인 자연재난완화정책(Hazard Mitigation Policy)에 관한 연구 - 토지이용계획 및 관리를 통한 홍수피해완화 방안 (정주철 외)

2008년

- RE-01 도시지역 저소득계층 보호를 위한 환경정책연구 II (추장민 외)
- RE-02 통합적 환경관리체계 구축을 위한 정책방안 연구 III (한상운 외)
- RE-03 지속가능한 생태문화도시의 방향설정 및 추진방안 (진중현 외)
- RE-04 기후변화 대응 온실가스 감축을 위한 국가할당방안 연구 (이상엽, 이정인)
- RE-05 기후변화 취약성 평가 지표의 개발 및 도입방안 (유가영, 김인애)
- RE-06 에너지·전력부문 보조금의 환경친화적 개편방안과 파급효과 연구 II (강만옥, 이상용)
- RE-07 국토연안생태네트워크 구축과 계획적 관리방안 (박창석 외)
- RE-08 수질오염총량관리를 위한 배출권거래제 도입방안 (문현주)
- RE-09 수생태계 보호를 위한 소하천 관리 방안 (김익재, 한대호)
- RE-10 해안지역 지하수 수자원 통합관리방안 연구 II (문유리 외)
- RE-11 국제 온실가스 배출권 거래제도의 파급효과 분석 (김용건, 장기복)
- RE-12 환경평가제도 30년의 성과분석과 발전방향 (조공장 외)
- RE-13 도시개발사업에서 환경생태계획의 체계적 도입방안 (최희선 외)
- RE-14 한국의 지질유산 정보구축과 관리방안 (이수재 외)
- RE-15 동북아 생태네트워크 추진체계 구축을 위한 연구 (전성우 외)
- RE-16 북한의 자연재해 취약지 추정 및 남북협력 방안 연구 (명수정 외)

2009년

- 2009-01 도시지역 저소득계층 보호를 위한 환경정책연구 III (추장민 외)
- 2009-02 해양 유류유출사고의 중장기적 영향분석 및 제도개선 방안 (신용승 외)
- 2009-03 환경가치를 고려한 통합정책평가 연구 I (안소은)
- 2009-04 수질오염총량관리를 위한 배출권거래제 적용방안 연구 (문현주)
- 2009-05 하천 건전성 평가모델 LOCOPEM을 적용한 환경평가 예측기법 (노태호 외)
- 2009-06 환경평가를 활용한 토지이용계획 수립방안에 관한 연구 - 도시 및 택지개발을 중심으로 (정주철 외)
- 2009-07 관광개발 다양화에 따른 친환경적 계획수립 및 평가방안에 관한 연구 (사공희 외)
- 2009-08 Noise map을 활용한 환경소음의 관리방안 마련 (선호성 외)
- 2009-09 제품분류에 따른 대기오염물질 직·간접 배출량 추정과 변화요인 분석 (공성용 외)
- 2009-10 기후변화 대응 온실가스 감축을 위한 국가할당방안 연구 II (이상엽 외)
- 2009-11 식생과 토양의 역할을 고려한 저탄소 토지이용계획 수립방안 I (황상일 외)
- 2009-12 북한의 가뭄재해 취약지 분석 및 대응에 관한 연구 (명수정 외)
- 2009-13 기후변화 대응을 위한 물환경 관리 전략 및 정책방향 I (김익재 외)
- 2009-14 지구온난화에 따른 지역규모 대기질 영향평가 I (문난경 외)
- 2009-15 미래 녹색도시 구현을 위한 복합기능 도시습지의 복원 및 조성 방안 연구 I (방상원 외)
- 2009-16 국토연안생태네트워크 구축과 계획적 관리방안 II (박창석 외)
- 2009-17 환경시장의 구조 변화와 정책 과제 (김중호 외)
- 2009-18 그린화학제도 활성화 및 산업체 지원방안 (박정규)

수시연구

2005년

- WO-01 Joint Pilot Studies between Korea and Mongolia on Assessment of Environmental Management System in Gold Mining Industry of Mongolia II (Jeongho LEE 외)
- WO-02 유역관리를 통한 다목적댐 저수지의 효율적인 탁수관리방안 (최지용 외)
- WO-03 휴·폐금속광산지역의 토양오염관리방안 (박용하, 서경원)
- WO-04 녹색구매 대상제품의 화학적 안전성 제고를 위한 정책연구 (신용승, 김효정)
- WO-05 A Study on the Integrated Product Policy of EU and Corresponding Tasks (공성용, 최형진)
- WO-06 Korea Environmental Policy Bulletin III (이병국, 송영일)

2006년

- WO-01 Joint research between Korea and Mongolia on water quality and contamination of transboundary watershed in Northern Mongolia (이영준 외)
- WO-02 A National CGE modeling for Resource Circular Economy (강상인 외)
- WO-03 OECD의 환경유해보조금 개혁 논의동향과 국내 정책과제 (강만옥, 이상용)
- WO-04 산지를 활용한 친환경적 골프장 조성에 관한 연구 (권영한, 김지영)
- WO-05 Leaf Area Index (LAI) Analysis of Landsat Satellite Images for Monitoring of the Future CDM Afforestation/Reforestation Project in North Korea (이상범, 홍현정)
- WO-06 주요 지질별 지하수개발이용 특성 및 수질관리실태 비교연구 (문유리, 유은혜)
- WO-07 다목적 댐 저수지의 비점오염실태 및 친환경적 관리방안 연구 (최지용 외)
- WO-08 Korea Environmental Policy Bulletin IV (이병국)
- WO-09 누적영향평가를 위한 평가범위 산정에 대한 연구 - 생활환경분야 (이영수, 김영하)
- WO-10 수자원 계획 관련 거버넌스와 환경갈등관리 방안 (정희성 외)
- WO-11 국방·군사시설에 대한 환경영향평가 개선 방향 - 군사훈련장 사업을 중심으로 (최준규, 강재구)
- WO-14 소수력발전소 개발사업의 환경적 고찰 (권영한, 김지영)

2007년

- WO-01 지역커뮤니티의 지속가능한 발전을 위한 환경평가 방법론 연구 - 주민참여의 개선방안을 중심으로 (조공장)
- WO-02 연구효율성 향상을 위한 원시자료 공유체계 구축 - KEI 연구보고서를 중심으로 (전성우, 하종식)
- WO-03 지하수 수질기준 및 정확기준 재설정에 대한 정책방향 (이정호, 김훈미)
- WO-04 편익이전 방법을 이용한 습지가치 추정: 메타회귀분석을 중심으로 (안소은, 노백호)
- WO-05 골프장 조성사업의 합리적 환경평가 방안 (황상일 외)
- WO-06 저수지 비점오염원 저감을 위한 인공습지의 설치효과 및 개선방안 (최지용, 반양진)
- WO-07 Comparative Study on Environmental Impact Assessment between Korea and China (유현석)

2008년

- WO-01 부처별 비점오염원 관리사업의 효율적 추진 방안 (최지용)
- WO-02 환경성을 고려한 태양광, 풍력발전소 입지선정 가이드라인 (권영한 외)
- WO-03 허베이 스피리트호 원유유출사고의 정책적 진단 및 향후과제 (신용승, 임혜숙)

- WO-04 다목적댐 상류 소유역 관리 방안 연구 (최지용, 박인상)
- WO-05 상하수도 부문 전략적 재정계획 - 한국의 사례 (문현주)
- WO-06 해양 유류유출사고 방제중요기준 설정 방안 (황상일, 신용승)

2009년

- 2009-01 저탄소·자원순환형 사회 구축을 위한 환경정책 (장기복 외)
- 2009-02 Integrated Water Management Model on the Selenge River Basin II (추장민 외)
- 2009-03 합리적인 수리권 및 수자원에의 기여와 보상체계 연구 (문현주)
- 2009-04 지속가능발전 관점에서의 녹색성장 의미와 평가방안에 관한 연구 (김호석 외)
- 2009-05 남·북한 공유하천의 관리 현황과 물안보 확보방향 (김익재 외)
- 2009-06 미세먼지의 농도 변화를 이용한 다중 이용시설의 흡연으로 인한 실내공기질 관리 정책 평가 (김성렬 외)
- 2009-07 유네스코 지질공원의 특성과 시사점 연구 (이수재 외)
- 2009-08 4대강 살리기 사업을 위한 필요 전문기술인력 추정 (안종호 외)

기초연구

2007년

- 2007-01 교통소음의 건강영향에 대한 환경적 고찰 (선효성)
- 2007-02 국토개발사업의 지속가능성 평가 - 평가체계 정립과 녹지총량관점에서의 실험 평가 (이현우, 이관규)
- 2007-03 남북한의 환경법제에 관한 비교 연구 (한상운 외)
- 2007-04 2008년도 기본연구사업 추진을 위한 기획 연구 (이병국, 이현우)
- 2007-05 식물사회학적 이론에 의한 생태모델숲 조성기법 (정흥락 외)
- 2007-06 기후변화협약 신축성 메커니즘의 경제적 파급효과 비교 연구 (황욱)

2008년

- 2008-01 도시기본계획의 환경부문 계획수립 실태 및 개선방안에 관한 연구 (최준규, 주용준)
- 2008-02 지방자치단체의 환경분야 자주재원 확충방안 연구 - 지방환경세 도입을 중심으로 (이창훈 외)
- 2008-03 지하수관리 관점에서의 노로바이러스 질병 발생에 관한 고찰 (방상원, 조미경)
- 2008-04 환경 친화적인 노동조합 활동 동향과 정책적 시사점 연구 (황욱, 이상용)
- 2008-05 사업단계 전략환경평가를 위한 환경가치 활용방안 (안소은)
- 2008-06 식생분석을 위한 고분광영상(Hyperspectral Image) 활용방안 (이상범)
- 2008-07 환경정책연구사업 추진 5개년('08-'12) 계획 (노태호 외)

2009년

- 2009-01 다목적댐 상류 폐광산 등 비점오염원 관리방안 (최지용 외)
- 2009-02 도서지역 용수공급체계에 관한 고찰 (문유리 외)
- 2009-03 폐기물 재활용 규제 선진화 방안 - 포장 및 가전폐기물을 중심으로 (김광임)
- 2009-04 유해물질 관리를 위한 SFA(물질흐름분석) 방법론 적용 연구 (주현수)
- 2009-05 녹색화(Green Remediation) 최적관리기법 도입을 위한 기초연구 (황상일, 조한나)
- 2009-06 물환경 기준의 통합적 관리방안에 관한 연구 (한대호, 최지용)

- 2009-07 기후변화가 생태계에 미치는 영향 고찰 - 습지식물상을 중심으로 (권영한, 최홍근)
- 2009-08 도시지역의 기후변화 적응을 위한 열섬효과 완화방안 연구 (명수정)
- 2009-09 4대강 관련 법률 및 제도의 현황분석과 효율적 개선방안 (김태형 외)
- 2009-10 지역단위 하수재이용 활성화를 위한 기초연구 (조을생)
- 2009-11 기후변화 관련 환경보건 통합 데이터베이스 구축 (김성렬)
- 2009-12 환경책임과 환경피해보험제도의 제도화방안에 관한 기초 연구 (한상운)
- 2009-13 실시간 수질 모니터링 및 모델링 체계에 관한 고찰 (정유진)
- 2009-14 수질보전을 위한 새만금호 배수갑문 운영 대안에 관한 연구 (이진희)
- 2009-15 식물생태계가 대기 중 오존농도에 미치는 영향 - 기후변화와 관련하여 (심창섭)
- 2009-16 풍력발전시설에서 발생하는 환경소음 및 저주파음의 영향 (박영민, 정태량)
- 2009-17 신도시의 물순환 건전화를 위한 그린인프라 조성 기준에 대한 연구 (장수환)
- 2009-18 저탄소 생태관광지표 개발 및 평가 (배민기, 박창석)
- 2009-19 기후변화에 따른 연안역의 해역-육역 통합 범람 예측 방안에 관한 기초 연구
- 해석 모형 비교 · 분석을 중심으로 (김경준 외)
- 2009-20 기업 환경보호지출과 오염배출량의 상관관계 분석 - 대기분야를 중심으로 (하중식 외)

녹색성장연구

- | | |
|-------|---|
| 2009년 | <ul style="list-style-type: none"> 2009-01 국내 대기오염규제의 온실가스 저감효과 제고방안 (김호석 외) 2009-02 환경정보와 가이드라인 제공에 의한 자율적 환경평가 지원 (이영준 외) 2009-03 환경정보체계에 기반한 공간환경계획 수립 가이드라인 마련 (최희선 외) 2009-04 환경평가 절차 효율화를 위한 스크리닝의 단계별 도입방안 (신경희 외) 2009-05 환경가치 DB 구축 및 원단위 추정 I (안소은 외) 2009-06 국토자연자원의 현명한 이용전략 수립 I (박창석 외) 2009-07 온실가스 감축의무 협상동향 및 대응방향 연구 I (김용건 외) 2009-08 온실가스 저감잠재성 분석 및 감축정책 연구 - 수송 및 건물부문 (강만옥 외) 2009-09 재생에너지의 환경성 평가 및 환경친화적 개발 I - 태양광 및 풍력에너지를 중심으로 (이희선 외) 2009-10 기후변화 적응 강화를 위한 사회기반시설의 취약성 분석 및 대응방안 연구 I (명수정 외) 2009-11 물관리 취약성과 물안보 전략 I (안중호 외) 2009-12 해수면 상승에 따른 취약성 분석 및 효과적인 대응정책 수립 I - 해안침식 영향평가 (조광우 외) 2009-13 기후변화 대응을 위한 적정 하천공간 확보방안 연구 (정주철 외) 2009-14 기후변화 연동 4대강 유역 지하수 함양 및 이용가능량 산정 기법 개발 I (이정호 외) |
|-------|---|

※ KEI 설립 이후 현재까지의 보고서 원문은 KEI 홈페이지(www.kei.re.kr)에서 보실 수 있습니다.