

- # 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련

The Study for Development of Climate Change Caused Urban Geological Hazards  
Risk Assessment System

이명진, 이정호

-

---

## 연구진

연구책임자 이명진 (한국환경정책·평가연구원 전문연구원)

참여연구진 이정호 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)

---

## 산학연정 연구자문위원

이사로 (한국지질자원연구원 책임연구원)

정형섭 (서울시립대학교 공간정보학과 교수)

© 2013 한국환경정책·평가연구원

---

**발행인** 이병욱

**발행처** 한국환경정책·평가연구원

서울특별시 은평구 진흥로 215 (우편번호) 122-706

전화 02)380-7777 팩스 02)380-7799

<http://www.kei.re.kr>

**인쇄** 2013년 9월 25일

**발행** 2013년 9월 30일

**출판등록** 제17-254호

**ISBN** 978-89-8464-734-3 93530

---

# 서 언

최근 기후변화 영향으로 인해 도시의 환경이 점차 변화하고 있습니다. 특히, 도심지역의 지질재해 발생이 증가하면서 인명 및 재산피해가 커지는 추세입니다. 이러한 연유로 기후변화와 지질재해에 따른 도심지역의 안정성을 확대하기 위한 노력이 필요한 시점입니다.

기후변화는 미래를 논의하지만, 과거의 발생한 영향 및 경향의 상관관계를 가지고 있습니다. 그러나 아직까지 국·내외적으로 과거 기후현상과 지질재해 상관관계 분석 및 기후변화에 따른 지질재해 발생 예측 연구는 초기 단계입니다.

본 연구는 지난 20년간의 강우량 변화와 지질재해의 상관관계를 분석하고, 이를 반영한 도심지역 지질재해 발생과 관련된 항목 도출 및 평가방법을 개선하기 위한 기초기반을 마련하고자 시행된 선행연구입니다. 이 연구를 바탕으로 향후 관련 연구가 활발히 진행되고 국내 도심 특성에 맞는 지질재해와 기후요소 평가기법이 마련되어, 도심지역 지질재해 관리 계획 수립과정에서 기후변화에 미치는 영향을 사전에 파악하고 이를 개선함으로써 기후변화 시대에 대응하는 도심 지질재해 리스크 체계가 마련되길 기대해봅니다.

본 연구의 책임을 맡아 수행해주신 이명진 박사를 비롯하여 연구진으로 참여한 이정호 박사의 노고에 감사를 표합니다. 아울러 외부 자문위원으로서 연구의 질 향상에 도움을 주신 서울시립대학교 정형섭 교수 및 한국지질자원연구원 이사로 박사께도 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

2013년 9월

한국환경정책·평가연구원

원 장 이 병 옥



# 국문 요약

본 연구는 도심지역 지질재해 중 산사태 발생을 중심으로 발생원인, 평가 요소 및 평가방법을 분석하고, 이를 바탕으로 국내 강우량과 산사태 발생의 정량적 관계를 분석하였다. 또한 향후 지질재해 리스크 체계 마련을 위한 시사점을 제시하기 위해 수행되었다.

이를 위해 우선 기후변화에 의하여 발생하는 도심지역 지질재해 중 최근 발생한 우면산 사태와 같이 인명 및 물질적 피해를 크게 발생시키는 산사태를 선정하여 이를 바탕으로 연구동향, 발생원인 및 분석 기법을 분석하였다. 연구동향으로는 기후변화 시나리오 상세화 기법의 연구가 주류를 이루고 있으며, 더불어 확률통계 모델 기반의 공간통계학적 분석 기법이 각각 따로 연구되고 있는 실정이다. 이를 연계하여 미래 기후변화 시나리오를 반영한 지질재해 취약성, 가능성 및 위험성 평가는 초기 단계로 분석되었다.

본 연구에서는 기존의 국내의 강우량 발생에 따른 지질재해 중 산사태 발생과의 상관관계를 정량적으로 분석하기 위하여 2000년대 강우량 자료와 지질재해 중 산사태 발생 자료를 분석하여 당일 강우량, 누적 강우량 및 최대시간당 강우강도와와의 상관관계를 정량적으로 계산하였다. 당일강우량 기준으로 지질재해 중 산사태 발생과의 관계는 시기적으로 7월 중순부터 7월 말까지와 8월 중순부터 8월 말까지 집중되어 있다. 또한 일 최대강우량 164.5mm 이상의 경우 전국적으로 산사태 위험으로 분류된다. 더불어 누적강우량에서는 3일 누적이 다른 장기간의 누적강우량보다 산사태 발생에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 최종적으로 2000년대 우리나라의 산사태의 경우 3일 누적 강우량이 영향을 보다 많이 미치는 것으로 분석되었다. 최대시간당 강우강도는 2002년, 2003년 및 2006년에 영향이 높은 것으로 분석되었으며, 이 기간은 실제 우리나라의 태풍에 의한 피해가 많은 시기와 동일하다. 마지막으로 강우강도와 지질재해 반응지수

분석을 보면, Caine이 제시한 강우량과 지질재해 중 산사태 발생 임계치를 넘는 경우는 우리나라의 2000년대 산사태에서는 2004년을 제외한 전 기간에 해당한다. 이는 우리나라의 강우형태가 산사태 발생과 매우 밀접한 관계임을 나타낸다.

이러한 연구결과를 바탕으로, 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 중 산사태 리스크 체계 마련을 위한 시사점을 ① 평가요소 측면, ② 평가방법 측면, ③ 평가를 위한 기반자료 측면으로 구분하여 제안하였다. 평가요소 측면에서는 평가요소의 자료 형태 및 축척을 논의하였고 도심지역의 특성을 고려한 대축척 자료의 활용이 효율적일 것으로 제안하였다. 또한 기상자료와 같은 자료의 특성이 기존의 타 자료와 다르기 때문에 이를 고려한 자료처리 방법의 필요성 및 방법론을 재정립하였다. 평가방법 측면에서는 기존의 전문가 설문 바탕의 영향 및 취약성평가를 개선하기 위하여 GCI 방법을 제시하고, 본 방법론의 활용방안에 대하여 논의하였다. 평가를 위한 기반 자료 측면에서는 기후변화의 한계점인 불확실성을 논의하고, 다양한 기후변화 시나리오를 활용하는 방법 및 특정 기상현상을 예측하는 방법을 연계하여 기후변화의 불확실성을 줄이는 방안을 제시하였다.

주제어: 기후변화, 도심지역, 지질재해, 리스크, 산사태

# 차 례

<b>제1장 서론</b> .....	1
1. 연구 배경 및 목적 .....	1
2. 연구 내용 및 구성 .....	3
<b>제2장 도심지역 지질재해 발생원인 및 분석 방법</b> .....	5
1. 지질재해 발생 원인 .....	5
가. 발생원인 .....	5
나. 연구동향 .....	9
2. 분석 기법 및 단계 .....	12
가. 평가기법 및 활용정보 .....	12
나. 평가방법 및 단계 .....	14
<b>제3장 강우량과 지질재해 발생 상관관계 분석</b> .....	15
1. 강우량과 지질재해 관련 Database 구축 .....	15
2. 강우량과 지질재해 발생관계 분석 .....	16
가. 당일 강우량에 의한 발생관계 .....	16
나. 누적 강우량에 의한 발생관계 .....	20
3. 강우강도와 지질재해 발생관계 분석 .....	23
가. 최대시간강우강도와 누적 강우량 관계 분석 .....	23
나. 강우강도 및 지질재해 반응지수 분석 .....	30
<b>제4장 국내 기후변화를 고려한 도심 지질재해 리스크 체계 마련을 위한 시사점</b> .....	33

1. 평가요소 측면 .....	33
2. 평가방법 측면 .....	35
3. 평가를 위한 기반자료 측면 .....	37
<b>제5장 결 론</b> .....	<b>39</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>42</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>44</b>
<b>붙임</b> .....	<b>46</b>

## 표 차례

<표 2-1> 산사태 취약성도 작성을 위한 기술 및 스케일 .....	12
<표 2-2> 지리정보 기반의 산사태 취약성도 활용 가능 정보 .....	13
<표 3-1> Caine의 산사태 연관성 분석 .....	31

## 그림 차례

---

<그림 1-1> 연구의 체계 .....	4
<그림 2-1> 산사태 발생 모식도 .....	6
<그림 2-2> 산사태 발생 관련 항목 .....	6
<그림 3-1> 산사태 발생 당일의 강우량 .....	19
<그림 3-2> 1일 누적 강우량과 산사태 발생관계 .....	21
<그림 3-3> 3일 누적 강우량과 산사태 발생관계 .....	21
<그림 3-4> 5일 누적 강우량과 산사태 발생관계 .....	22
<그림 3-5> 연도별 최대강우강도 및 3일 누적 강우량 .....	29
<그림 3-6> Caine의 산사태 발생기준과 연도별 강우강도 비교 .....	32
<그림 4-1> GCI 개념도 및 프로세스 흐름도 .....	36

# 제1장 서론

## 1. 연구 배경 및 목적

지질재해는 집중호우, 태풍 또는 지진 등의 급격한 자연환경 변화에 의하여 일시에 사면의 일부가 무너져 내려오는 현상 등과 같이 지표면의 일부가 물리적으로 변형 또는 변화하는 것을 의미한다. 우리나라는 매년 6월과 9월 사이에 집중호우가 발생하는데, 우리나라는 주로 이 시기에 지질재해가 일어나며, 이로 인한 인명 및 재산피해도 날로 증가하고 있는 실정이다. 최근에는 기후변화에 의하여 수백 mm의 국지성 폭우가 내리는 극단적 기후사상이 잦아지고 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 2007년 발간된 “제4차 기후변화 평가 보고서” 및 “극단적 기후사상에 대한 기후변화 적응 특별 보고서(2012, IPCC)”는 온실가스 배출감축과 같은 노력으로 기후변화 현상을 완화시켜도 기후변화는 기존 배출된 온실가스에 의하여 앞으로 수세기 이상 계속 진행될 것으로 예측하였다. 이러한 기후변화로 인한 이상기후 및 극단적 기후사상은 지속적인 지질재해 발생을 유발할 것이다. 기후변화를 고려하여 향후 발생이 증가할 것으로 예상되는 지질지해에 대한 다각적이고 종합적인 원인 분석이 필요하다. 또한 도심지역은 지질재해가 발생하였을 때 다른 지역적 특성에 비하여 물리적, 경제적 피해가 크게 발생하는 곳으로 지질재해 발생 가능성 및 위험성 평가는 지질재해 발생 피해를 최소한으로 줄일 수 있을 것이다.

기후변화에 의한 도심지역 지질재해로 인한 인명 및 재산피해를 예방하고 줄이기 위하여 기후변화와 연관된 지질재해의 과학적인 상관관계 분석이 필요하다. 이를 위하여 과거 및 현재의 강우와 지질재해와의 상관관계를 파악하여 강우

## 2 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련

변화에 따른 지질재해 발생의 현상을 예측하는 것이 중요하다. 또한 기후변화에 따른 강우 변화를 정량적으로 예측하는 방법론 개발도 중요하다. 더불어 광역적 지역 및 접근이 어려운 지역의 지질재해 발생 위치를 파악하는 방법의 고도화가 필요하며, 기후변화와 연계된 지질재해 분석 및 검증 방법론 이 개발 되어야 한다.

미래 기후변화에 대한 불확실성을 줄이고 안정적인 기상 변화를 예측하기 위해서는 방대한 시계열 기상자료의 입력 및 분석이 있어야 한다. 이를 바탕으로 월별, 연별 미래 기후변화 양상을 예측할 수 있다. 또한 도심지역 지질재해를 분석하기 위해 필요한 각종 공간정보를 현장조사를 통하여 획득하기 위해서는 많은 시간과 인력, 비용을 소비하여야 한다. 또한 지리정보시스템(GIS)을 이용하여 기후변화 및 지질재해 관련 방대한 공간정보 데이터베이스를 계속적으로 수집, 관리 및 분석할 수 있다. 기후변화 연동 도심지역 지질재해 영향 및 취약성 평가기법을 적용하여 지질재해 발생 원인을 분석할 수 있다. 이를 바탕으로 미래 지질재해 발생 위험도를 예측할 수 있기 때문에 앞으로 발생할 수 있는 도심지역 지질재해에 의한 피해 예방과 관리가 가능해진다.

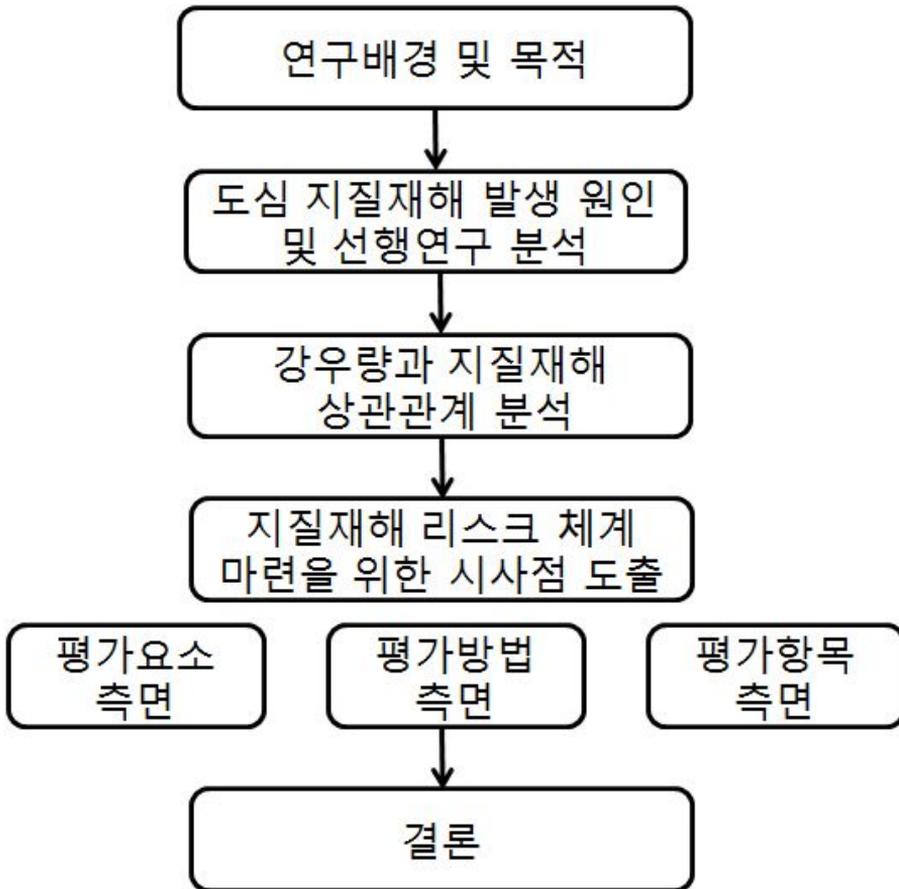
기후변화 연구에 있어서 가장 중요한 부분은 기후변화가 발생하는 문제의 영향을 정량적으로 분석하는 것이다. 기후변화에 의하여 미래 자연환경 및 사회 환경이 변화한다는 당위성에는 이견의 여지가 없다. 그러나 자연환경의 특정 부분의 변화예측에 대한 정량적 또는 과학적 근거와 상관관계 분석은 부족한 실정이다. 즉 기후변화에 의한 영향 분석이 선행되어 분석되어야 이에 따른 취약한 지역 및 인자들에 대한 취약성평가도 정확해질 수 있다. 본 연구에서는 기후변화에 의하여 향후 증가할 것으로 예측되는 강우량과 지질재해 발생의 상관관계를 분석하고자 한다. 또한 지질재해가 발생할 경우 가장 큰 물리적 피해의 위험이 있는 도심지역의 지질재해 관련 발생 원인에 상관관계가 있는 인자를 분석해보고자 한다.

## 2. 연구 내용 및 구성

본 연구에서는 기후변화에 따른 강우량 증가의 영향으로 발생하는 지질재해와의 관계를 정량적으로 분석하기 위하여 2000년대 강우량 변화에 따른 지질재해 발생의 상관관계를 분석하였다. 강우와 관련된 대표적인 지질재해는, 침하, 썩크홀, 침수 및 산사태 등이 있다. 특히 도심지역에서는 지하수 이용과 관련된 침하 및 썩크홀 등이 발생하지만, 강우량의 증가에 따른 영향으로는 침수와 산사태가 대표적이다. 우리나라의 경우 2010년 및 2011년 서울의 강남역 및 광화문 침수가 있었고, 특히 2011년 7월 26일부터 29일까지 4일간의 집중호우 및 일 최고 강우량 301.5mm에 의하여 발생한 우면산 산사태는 도심지역의 대표적인 지질재해라고 할 수 있다. 지난 20년간(1991년부터 2010년까지)의 강우량과 산사태 발생을 분석하면, 전체 178곳의 발생 지역 중 행정구역으로 ‘시’에 해당하는 지역이 74곳으로 약 42%를 차지하고 있다. 이는 우리나라 국토의 70%가 산악지역임을 감안한다면, 산사태 발생의 피해가 산악지역보다 주거환경이 인접한 도심지역에서 빈번하게 발생하는 것으로 유추할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 강우량 변화에 따른 지질재해 중 산사태 발생을 중심으로 강우와의 상관관계를 분석하는 데 우선적인 초점을 맞추었다. 더불어 도심지역에 지질재해가 발생하는 경우 직·간접적인 원인이 되는 항목을 도출하고자 하였다. 이를 통하여 향후 기후변화에 의한 지질재해 영향 및 취약성평가 적정 항목 도출을 수행하였고, 마지막으로 도출된 항목에 대해 도심 지질재해 영향을 관리할 수 있는 관리 항목으로의 시사점을 제안하였다.

4 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련



<그림 1-1> 연구의 체계

## 제2장 도심지역 지질재해 발생원인 및 분석 방법

### 1. 지질재해 발생 원인

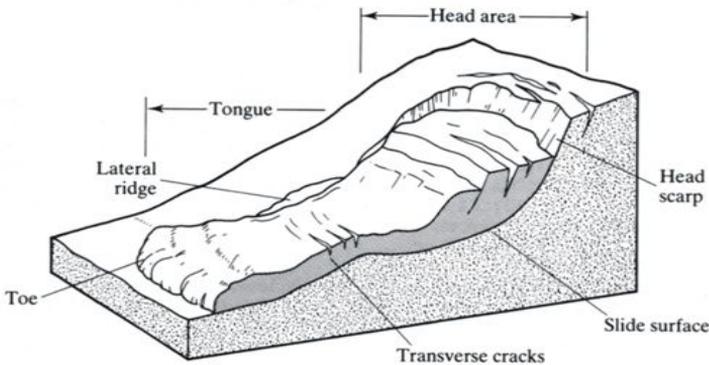
#### 가. 발생원인

도심지역 지질재해 중 최근에 많은 논의가 되고 있는 산사태의 발생원인은 우선 산사태 발생의 근본적인 특징과 연관지어 생각하여야 한다. 산사태의 정의는 암석이나 흙 또는 이들의 혼합물이 중력에 의해 사면 아래로 천천히 포행하거나, 빠르게 떨어지는 현상, 또는 파괴면을 따라 미끄러지는 상태를 말한다(그림 2-1 참조). 일반적으로 기존의 지질재해 관련 선행연구는 산림지역을 대상으로 한정되었다. 그러나 기본적인 산사태 발생원인은 대부분 지형적으로 구릉지역과 산지 등에서 일어나며, 대부분의 지각운동으로 인한 파쇄대가 많은 지역에서 집중호우나 폭설 등에 의해 빈번히 일어난다.

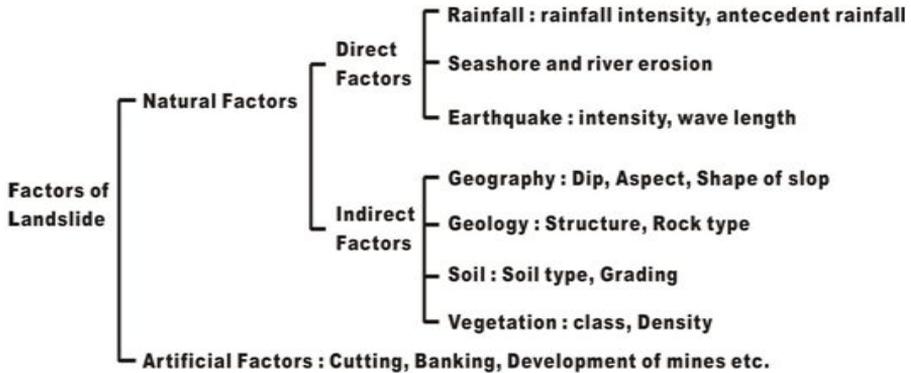
도심의 경우 도심 지표의 대부분을 불투수층이 분포하기 때문에 집중호우 발생 시 국지적인 투수층 지역에서 지중침투수에 의한 간극수압의 상승, 표면유수에 의한 침식, 흙의 포화로 인한 활동토층의 단위중력 증가 등에 의해 사면을 붕괴시키려는 활동력은 증가되고 사면 붕괴에 저항하려는 저항력은 감소되어 사면의 안정성이 극도로 저하된다. 이와 같이 집중호우가 산사태의 중요한 외적요인이 되고 있지만 강우강도, 강우지속시간 및 누적강우량이 산사태에 어떻게 관련되어 있는가는 아직 확실히 규명되어 있지 못하다. 과거에는 강우와 산사태의 관계에 있어 선행강우량 개념의 해석이 지배적이었으나, 요즘에는 강우강도에 따른 해석이 우세하다. 그러나 강우 특성 및 지형 지질과 관련된 조건은

6 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련

지역마다 다른 특성을 가지고 있으며 연구지역을 선정하여 그 특성을 도출하고 분석하는 작업이 선행되어야 한다. 더불어 기후변화에 의하여 지속적으로 집중 호우가 증가하고 있으며 이는 도심 지질재해 발생의 직접적인 원인이 되는 것으로 사료된다.



<그림 2-1> 산사태 발생 모식도(Varnes, 1978)



<그림 2-2> 산사태 발생 관련 항목(Bromhead, 1992)

지질재해 중 산사태는 주로 움직이는 토양 혹은 암석의 경계를 따라 나타나는 전단파괴의 결과이다. 이론적으로 붕괴라는 것은 미끄러지는 면을 따라 존재하는 평균 전단응력이 실측 지역 혹은 실험실에서 측정된 토양과 암석의 전단강도와 같을 때 발생한다. 그러나 실제 현장에서는 지속적인 강우 등의 환경요인에 의한 점진적인 붕괴에 의하여, 산사태는 실험실에서 측정된 토양 혹은 암석의 최고 강도보다 상당히 작은 전단응력에서도 발생한다(Baeza, 2011).

산사태에 영향을 미치는 요인은 <그림 2-2>와 같이 지형, 암질, 토질, 지질구조, 식생, 강우, 지하수, 침식, 지진과 같은 자연 환경적 요인과 토지이용, 절토, 성토 등과 같은 인위적 요인으로 포괄적으로 분류될 수 있다(이명진, 2003).

본 연구에서 산사태로 대변되는 지질재해 발생 요인은 자연적 요인과 인위적 요인으로 크게 구분할 수 있다. 자연적 요인 중 직접요인은 집중호우에 의한 사면하중의 증가, 하천에 의한 사면하부의 침식, 파도 등에 의한 해안침식, 지진에 의한 진동, 균열의 발생 등이 있다(Qiuming, Cheng, 1998). 특히 집중호우는 우리나라 도심지역의 경우 산사태의 중요한 발생 요인으로 볼 수 있으며 지하수위를 상승시켜 간극수압의 상승, 지표수 유출, 흙의 포화로 인한 단위중량 증가 등의 원인에 의해 저항력이 감소되어 산사태를 유발한다. 강우에 의한 장마철 집중호우지 사면 붕괴의 특성을 토양별로 구분하면, 사질토에서 짧은 시간에 발생하는 경우가 많으며, 점토질 사면에서는 장기간의 지속적인 강우로 인해 사면 토층 내의 지하수위가 상승되어 산사태가 유발된다. 하천 및 해안의 경우 침식작용으로 급한 사면이 형성되거나(Terzaghi, 1950), 집중호우에 의한 계곡부 침식과 같은 사면하부의 침식은 사면 불안정성을 가중시킨다. 하천, 해안의 침식에 의한 사면 붕괴는 표토층 붕괴가 일반적으로는 대부분에 해당되지만 때로는 사면 붕괴로 발전하는 경우도 있다. 한편, 지진의 경우에는 토양의 응집력이 이동과 마찰 등에 의하여 줄어들기 때문에 산사태가 유발될 수 있으며

(Beven, 1987), 자연사면과 인공사면 모두에 포함되는 급경사지 붕괴, 표토층 붕괴, 낙석 등이 지진에 의해 발생하는 사면붕괴의 대표적인 형태이다.

자연적 요인 중 간접요인은 직접 요인과 달리 그 자체로서 산사태를 유발하는 것은 아니라 다른 요인과 결합하여 사면의 불안정성을 유발한다는 것이 직접적인 요인과는 다르다. 대표적인 요인으로 지형, 지질, 토질, 임상과 같은 요인이 있다.

지형은 기본적으로 지하수의 집중, 분산, 이동 등에 큰 영향을 주기 때문에 유수의 집배수 능력과 산사태 발생에 깊은 관련성이 있다. 사면 방위는 암반사면에서 절리, 엽리, 편리 등의 지질구조와 주향, 경사 등의 관계가 산사태 발생 여부와 발생 유형을 결정하는 중요한 요인이 된다. 사면 경사는 사면상에 물질의 추진력을 크게 만드는 역할을 한다. 그러므로 다른 모든 상황이 같으면 산사태는 경사도가 큰 사면에서 더 잘 일어난다. 암질은 기본적으로 강도가 약하거나 함수율이 클수록 산사태가 일어나기 쉽다. 지질구조선에 따른 파쇄대, 단층들도 산사태에 많은 영향을 준다. 단층작용에 의한 파쇄대는 암석의 강도가 급격히 감소되어 풍화가 빨리 진행되고 연약대를 형성하여 지하수로의 역할을 함으로써 산사태 발생이 보다 쉽게 일어날 수 있다. 사면에 있어서 절리의 발생은 암석의 생성기원과 외부작용에 의하여 영향을 받게 되는데 절리의 경사 방향이 사면의 경사 방향과 같은 경우 사면의 안정도가 감소하게 되고, 절리면의 경사각이 사면의 경사각보다 클 경우에는 중력 작용에 의하여 사면파괴가 쉽게 일어난다. 또한 일반적으로 토층은 암반층보다 산사태의 빈도가 훨씬 큰 편이다. 토질의 경우도 강도가 약하거나 함수율이 클수록 산사태는 일어나기 쉽다. 토질은 크게 모암에서 풍화된 잔류토층과 운반되어 퇴적되는 붕적층으로 구분된다. 잔류토층의 역학적 특성은 모암의 풍화정도, 구성물질, 모암의 방향성, 모암의 변성정도 등에 의하여 구분되는 특성이 달라진다. 붕적층은 풍화된 암석의 잔류

물이 중력에 의해 하부로 이동되면서 사면하부에 퇴적되어 쌓인 토층이 된다. 산사태는 붕적층과 기반암과의 경계면에서 발생한다. 기반암이 불투수층 또는 세일일 경우 물의 침투로 인한 전단강도의 저하가 산사태 발생의 직접적인 원인이 된다. 식생은 사면 위에 떨어지는 비의 영향을 완충하는 역할을 하여 표면 위의 침식을 막으며, 비를 흡수하고, 식생의 뿌리는 토양의 전단강도를 증가시켜 사면의 안정성을 높여준다(Beven, 1979). 따라서 식생의 분포도와 밀도는 사면 안정에 영향을 미치는 중요한 요인이 된다.

인위적 요인은 인간 활동에 의한 것이 대부분이며, 도심 지질재해의 경우 인위적 요인이 자연적 요인보다 크게 작용한다. 도시화의 일환으로 구축되는 수로의 변경 및 개설, 유락시설 개발, 주택지와 산업지 조성, 도로건설 등의 각종 토목, 건축 공사에서 절성토 등의 자연사면을 변형시켜 토양이나 암석의 저항력을 감소시키고, 사면 내의 응력을 변화시켜 사면의 불안정성을 높게 하여 산사태를 유발하게 한다. 터널공사 등과 댐 공사 이후 담수는 지하수위를 상승시키고 산사태의 발생에도 영향을 미치게 된다. 절토사면의 경우 매우 단단한 암석이라 하여도 절토 시 장시간의 결친 외부환경의 노출은 계절변화 등 기후변화에 의한 암석의 풍화가 빨리 진전되어 산사태가 쉽게 발생할 수 있다. 또한 시가화 지역의 특징은 불투수층이 많이 분포하며, 집중호우가 하수관거를 통하여 이동한다. 이는 강우량의 투수를 방해하며, 투수층에 산사태 발생이 집중되는 원인이 된다.

#### 나. 연구동향

산사태 발생 요인으로는 내적 요인과 외적 원인으로 크게 구분할 수 있다. 내적 요인으로는 지질구조, 지형, 토질, 임상 등의 자연적 요인을 들 수 있으며 외적 원인으로는 강우, 하천 및 해안의 침식, 지진 등과 같은 자연적 요인과

절성토, 벌목, 단지 조성, 채석 개발 등의 인위적 요인을 들 수 있다. 즉 내적 약조건을 지니고 있는 사면에 외적요인이 부가될 때 산사태가 발생되기 쉽다. 우리나라의 경우는 집중호우가 발생하는 6~8월에 산사태가 집중적으로 발생하며, 이 시기에 집중강우에 의하여 산사태가 빈번히 발생한다. Maurizio Polemio(1999)는 Avigliano의 도심지역을 중심으로 집중호우에 의한 산사태 형태 및 발생 빈도를 연구하였다. Lisa, Borgatti(2010)은 경관 및 산림 분포를 포함하는 지형과 강우의 관계를 분석하여 산사태 발생 빈도를 미국의 행정수도인 Washington을 대상으로 연구하였다. Ram L Ray(2010)은 토양의 수분 함량 분포를 바탕으로 산사태 취약성을 분석하였다.

최근 몇 년간 기후변화로 인해 앞으로 인류가 겪게 될 소위 재앙(Catastrophe)에 대한 많은 보고 및 논의가 있었다. 기후변화에 있어서 온실가스 배출 감축과 같은 기후변화 대응에 대한 노력으로 기후변화 현상을 완화시키는 것만큼 이미 변화된 기후 및 기존 배출된 온실가스에 의하여 변화할 기후 변화에 적응하는 것이 중요한 현실이다. 기후변화에 의한 강우를 정량적 분석하기 위하여 Karl과 Knight(1998)은 미국의 집중호우의 증가를 규명하기 위한 장기간의 걸친 월 최대 일 강우량 자료의 합을 활용한 확률강우량을 분석하였다. S. Yue와 M. Hashino(2003)은 일본의 월 및 연 강우량의 장기적 경향을 확률강우량을 통하여 분석하였다. 또한 기후변화 시나리오를 활용하여 미래 기상 변화를 예측하는 연구는 1990년대 후반부터 지속적으로 진행되었다(Ian A Nalder, 1998). 이 GCM(Global Climate Model)에 대한 시공간 자료를 활용하여 기온 감율에 따른 기후변화 시나리오 연구 방법론을 제시하였다. G. Sanchez(2010)의 경우 GCM 자료 중 월간 자료를 활용하여 통계적 분석 방법을 활용하여 Alberta 지역에 활용 가능한 RCM(Regional Climate Model) 수준의 미래 기후변화 시나리오를 구축하였으며, 이를 통하여 Alberta 지역 기후 사상 변화를 예측하

였다.

기후변화와 산사태의 연계를 통한 미래 산사태 발생에 대한 연구는 국지적 산사태 발생과 기후변화의 상관관계를 분석하는 연구를 중심으로 진행되고 있으며, Baeza, CI(2001)은 GIS를 활용하여 기후변화에 따른 산사태 발생 빈도를 분석하였다. 과거 기상 현상에 따른 산사태 발생을 분석하고, 이에 따른 앞으로 미래 산사태 발생 관계를 유추하였다. Matthias Jakob(2009)는 영국 Columbia 지역의 실제 산사태를 바탕으로 강우와 산사태의 관계를 파악하고, 캐나다 기후 변화 센터에서 제공하는 향후 미래 기상 예측을 바탕으로 동일 연구지역의 산사태 발생을 추정하였다.

이와 같이, 기후변화와 지질재해 중 산사태 발생 상관관계에 따른 연구는 개별 분야별로 지속적으로 진행되고 있다. 두 분야의 연계를 통한 미래 기후변화에 따른 산사태 위험도 분석은 국내외적으로 초기 진행 상태이다. 본 연구는 기후변화에 따른 강우량의 변화를 직접적으로 산사태 위험도에 적용하는 최초의 시도이다. 기후변화 지속적인 영향을 고려한다면 향후 산사태 발생의 빈도는 증가할 것이며, 특히 도심지역에서 발생하는 경우 직접적인 인명피해 및 재산상의 피해가 크게 발생할 것이다. 도심지역의 지질재해 위험을 감소하기 위하여 과거 강우량 변화에 따른 산사태 발생의 상관관계를 분석하고, 이 결과를 바탕으로 미래 강우량 변화와 미래 산사태 발생의 관계를 분석하고자 한다.

## 2. 분석 기법 및 단계

### 가. 평가기법 및 활용정보

산사태의 분석에는 산사태의 취약성분석, 가능성 분석 및 위험성 분석이 있다. 이러한 분석 기법들은 연구의 목적 및 실제 관리 및 피해 저감 정책 수립의 단계별 필요성에 의하여 대축척, 중축척, 소축척 등으로 나누어 적용된다. 산사태 취약성은 집중호우나 지진과 같은 충격을 받았을 때 산사태가 일어날 수 있는 상대적인 가능성을 의미한다. 이러한 산사태 취약성 분석에는 여러 가지 방법이 있으며 입력 자료의 축척별로 분류되었는데 그 이유는 산사태 분석 기법이 축척에 따라서 다르기 때문이다. 소축척은 1:500,000 이상의 입력 자료를 사용하여 분석하며, 중축척은 1:25,000~1:50,000의 자료를 사용하고, 대축척은 1:5,000 이상의 자료를 사용하여 분석한다. 이러한 축척에 의한 산사태 취약성 분석 기법은 <표 2-1>과 같다.

<표 2-1> 산사태 취약성도 작성을 위한 기술 및 스케일(Bromhead, 1992)

Technique	Characteristics	Scale
Landslide distribution analysis	Analyze distribution and classification of landslide	r,m,l
Landslide activity analysis	Analyze temporal changes in landslide pattern	m,l
Landslide density analysis	Calculate landslide density in terrain units or as isopleth map	r
Geomorphologic analysis	Use in-field expert opinion in zonation	r,m,l
Qualitative map combination	Use expert-based weight values of parameter maps	r,m
Bivariate statistical analysis	Calculate importance of contributing factor	m
Multivariate statistical analysis	Calculate prediction formula from data matrix	m
Safety factor analysis	Apply slope stability model	l
Score method	Apply score table	l

주: r: regional scale, m: medium scale, l: large scale

소축척에서는 지도 중첩 방법이 사용된다. 이 방법은 전문가의 의견과 판단에 의하여 각각 요소의 가중치를 정하고(Analytic Hierachy Process, AHP) 이를 바탕으로 산사태 취약성도를 작성한다. 중축척에서는 확률방법이 사용된다. 산사태와 관련되는 각각의 요인과 산사태와의 관계가 확률적으로 분석하게 되고, 그 결과를 이용하여 산사태 취약성도가 작성 된다. 확률적으로 분석에 필요한 각각의 요인들은 DEM(Digital Elevation Model)으로부터 추출한 경사, 경사 방향, 곡률과 토양도에서 추출한 토질, 배서, 지형, 모재, 유효토심이 있으며, 임상도로부터 추출한 임상, 경급, 영급, 밀도가 있고, 지질도로부터 추출한 암상과 위성영상 등에서 추출하는 선구조 와 토지이용도, 지형도에서 추출한 수계 등이 있다(표 2-2 참조). 이러한 각각의 요인들은 취약성 분석을 위해 ascii 등의 다른 형식으로 변환하여 계산되었어도 최종적으로는 GIS 데이터베이스의 형태로 구축되어야 한다.

〈표 2-2〉 지리정보 기반의 산사태 취약성도 활용 가능 정보(Lee S, 2001)

Type	Layer	Attribute items	Data source
Landslide	Landslide	Date, type, activity, depth, dimension	Field survey
Geomorphology	Geomorphological units	Geomorphological description	Topographic, Soil map
	Altitude	Altitude	Topographic map
	Slope angle	Slope angel	
	Slope direction	Slope direction	
	Slope length	Slope length	
Curvature	Concavity/convexity		
Engineering Geology	Lithology	Lithology, rock strength, discontinuity spacing	Geological map
	Soil	Material types, depth, USCS, classification,	Soil map
		Parent material, soil drainage	
	Structural geology	Fault type, length, dip, dip direction, fold axis, lineament length, direction, density	Geological map, Airphoto, Satellite image, Field survey
Seismic accelerations	Maximum seismic acceleration	Observation data	
Forest	Forest	Wood type, age, diameter, density	Forest map
Land Use	Land use map	Land use and cover type	Topographic map Satellite image
Hydrology	Meterological station Drainage, Basin Groundwater table maps	Rainfall, temperature, evapotranspiration Type, order, length, Order, size Depth of groundwater table Water drainage Lineament	Report Topographic map AWS(Automated Weather Station)

## 나. 평가방법 및 단계

산사태 분석 단계에서의 취약성(Vulnerability)은 집중호우, 강우, 지진 등 산사태를 직접적으로 유발시키는 요인이 생겼을 때 그 지역이 얼마나 산사태 발생에 취약한가를 분석하는 것이다. 산사태 가능성(Hazard)은 어떤 지역이 산사태 취약성이 높은 경우, 미래 강우량 변화 및 지진 등의 산사태 유발요인의 발생 가능성을 더해 그 지역에서 산사태가 얼마나 잘 일어날 수 있는가를 분석하는 것이다. 그리고 산사태 위험성(Risk)은 산사태 취약성 혹은 가능성에 인명, 시설물 등 피해요소를 같이 고려한 것으로 산사태로 인한 인명 및 시설물의 피해 가능성이 얼마인가를 분석하는 것이다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다. 이러한 3단계의 분석 과정 중 본 연구에서는 산사태의 취약성 및 위험성에 대하여 논의한다(Lee S, 2001; 이명진, 2003; Robin Fell et al, 2008; Lee MJ, 2012). <식 2-1>의 Landslide는 산사태 발생 지역이며, Landslide Related factors는 산사태 발생과 관련된 항목이다. <식 2-2>의 Impact factors는 산사태 발생에 직접적인 영향을 주는 요소이다. <식 2-3>의 Damageable object는 산사태 발생으로 피해를 입는 요소이다.

$$\text{Vulnerability} = f(\text{Landslide, Landslide Related factors}) \quad \text{<식 2-1>}$$

$$\text{Hazard} = f(\text{Vulnerability, Impact factors}) \quad \text{<식 2-2>}$$

$$\text{Risk} = f(\text{Hazard, Damageable object}) \quad \text{<식 2-3>}$$

# 제3장 강우량과 지질재해 발생 상관관계 분석

## 1. 강우량과 지질재해 관련 Database 구축

과거 강우량과 산사태 발생의 상관관계 분석을 위하여 2000년대를 중심으로 발생한 강우량과 산사태의 Database를 수집 및 분석하였다. 자료 수집 기간은 1991년 7월부터 2010년 12월까지의 19년간이다. 산사태 발생 지역 및 발생 일자 는 중앙 언론매체 기사 및 방송, 지방 언론매체 기사 및 방송과 한국지질자원연구원, 한국건설기술연구원 등의 보고서를 검토하였다. 2000년대 산사태 발생자료의 경우 다양한 자료 출처를 통하여 정리된 양이 많지만, 1990년대의 경우 산사태 발생 자체를 정리한 자료에 한계가 있어, 일부 관련 논문 및 중앙 언론매체를 통하여 정리하였다. 분석된 자료는 산사태 발생 지역, 발생일자, 인근지역 기상관측지점 및 AWS 기상자료(발생 전·후 5일)이다. 이를 통하여 산사태 발생 지역의 위치(인근 지역 포함) 및 날짜를 정리하였다. 또한 발생 지역의 가장 인접한 기상관측소 및 AWS를 선정하였다. 선정된 지역의 기상자료는 인터넷 기상청 홈페이지 및 기상청의 자료 협조를 요청하여 획득하였다.

산사태 발생 일자를 중심으로 산사태 발생 5일 전부터 발생 5일 후까지의 일별 강우 자료를 정리하였다. 전체 정리된 자료는 178곳의 산사태 발생 장소 및 일별 강우 자료이다. 산사태 발생 178곳은 산사태가 발생한 한 곳만을 의미하는 것이 아니며 산사태가 집단을 발생한 지역이다. 누적 강우량은 일별 강우량을 누적 일자에 합하여 생성하였다. 또한 강우강도를 파악하기 위하여 1일, 3일 및 5일 누적 강우량과 발생일의 시간별 강우량을 분석하였다.

산사태 발생과 강우강도의 관계를 분석하는 방법은 크게 네 가지로 수행하였

다. 첫째, 연도별 산사태 발생 당일 강우량을 정리하였다. 이를 통하여 2000년대 산사태 발생 당일의 강우량 간의 상관관계를 분석하였다. 둘째, 산사태 발생 당일의 강우량과 산사태 발생 이전 1일간 누적 강우량, 3일간 누적 강우량 및 5일간 누적 강우량을 비교 분석하였다. 셋째, 산사태가 많이 발생한 지역을 선정하여 최대시간강우강도와 누적 강우량의 관계를 분석하였다. 넷째, Caine(1980)의 강우강도 및 산사태 반응지수를 이용하여 강우별 산사태 발생의 관계를 정량적으로 분석하였다.

## 2. 강우량과 지질재해 발생관계 분석

### 가. 당일 강우량에 의한 발생관계

2000년대의 산사태 발생과 강우특성과 관련지어 본 결과를 대표적인 유형별로 도식하면 <그림 3-1>과 같다. 가로축은 강우 기간을 나타내고 있으며 세로축은 강우다발 기간인 해당 연도별 발생 기간을 나타내고 있다. <그림 3-1> 중 강우량은 산사태가 발생한 지역에 속하는 AWS의 강우기록을 산정하였다.

2000년대 산사태의 대표적인 유형은 <그림 3-1>과 같다(붙임 1 참조). 2000년대 전체 산사태 발생과 당일 강우량과의 관계를 분석하면 높은 강우량은 2002년 8월 31일 전북 무주군 일원에서 573mm, 강원도 강릉시 481mm, 2005년 9월 6일 경북 포항시 남구 일원 438mm, 402.5mm, 경북 경주시 양북면 일원 368.5mm 및 2009년 7월 8일 부산시 남구 우암동 일원 368.5mm이다. 낮은 강우량은 2004년 8월 17일 강원도 강릉시 강릉면 일원 41.5mm, 2002년 9월 16일 경상북도 성주군 금수면 일원 42.5mm, 2004년 강원도 삼척시 하장면 일원 43.5mm, 2006년 강원도 인제군 북면 일원 44.5mm 및 2009년 7월 16일 경남 김해시 부원동 일원 45.5mm이다. 평균적으로 일 최대 강우량이 164.5mm 이상이면 산사태의 위험이 전국적으로 존재하는 것으로 사료된다. 즉 일일 최대강우

량 164.5mm 이상의 경우 전국적으로 산사태 발생의 위험이 존재한다고 사료된다.

연도별로 분석해보면, 1990년대 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 1996년 7월 26일 224.7mm를 기록한 강원도 철원군 일원이다. 가장 적은 강우량에 의한 산사태는 1998년 7월 26일 경상북도 포항시 일원 90mm 이다. 1998년 8월 6일 경기도 의정부시 장흥면 일원과 경상북도 상주시 일원에서도 각각 208.5mm와 114mm의 강우에 의하여 산사태가 발생하였다.

2000년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2000년 7월 22일 326mm를 기록한 경기도 화성시 향남면 일원이다. 가장 적은 강우량에 의한 산사태는 2000년 8월 25일 85mm를 기록한 강원도 춘천시 사북면 일원이다. 산사태의 특징은 발생 시기별로 구분할 수 있으며 7월 14·15일, 7월 22·23일, 8월 25·26일, 9월 13일 및 9월 16일에 집중적으로 발생한 것을 알 수 있다.

2001년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2001년 7월 31일 183.5mm를 기록한 경남 사천시 향촌동 일원이다. 가장 적은 강우량에 의한 산사태는 2001년 7월 23일 54mm에 의한 강원도 인제군 남면 일원이다. 발생 시기별로는 6월 24일, 7월 23일 및 7월 31일경에 집중적으로 발생한 것을 알 수 있다.

2002년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2002년 8월 31일 573mm를 기록한 전북 무주군 무풍면 일원이다. 가장 적은 강우량에 의한 산사태는 2002년 9월 16일 42.5mm를 기록한 경북 성주군 금수면 일원이다. 발생 시기별로는 7월 5일, 8월 5·6·8일, 8월 10일·31일 및 9월 16일이다.

2003년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2003년 9월 12일 333.4mm를 기록한 전남 여주시 안산동 일원이다. 가장 적은 강우량에 의한 산사태는 2003년 9월 13일 36.5mm에 의한 경북 양양군 양양읍 일원이다.

발생 시기별로는 5월 7일, 7월 5일·11일·22일·25일, 8월 19일·23일, 9월 12일·13일이다.

2004년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2004년 6월 20일 201mm를 기록한 강원도 평창군 평창읍 일원이다. 가장 적은 강우량에 의한 산사태는 2004년 6월 19일 41.5mm 강원도 강릉시 안인진리 일원이다. 발생 시기별로는 6월 19·20일, 7월 4일·13일·16일 및 8월 17·18일이다.

2005년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2005년 9월 6일 438mm를 기록한 경북 포항시 남구 일원이다. 가장 적은 강우량에 의한 산사태는 2005년 6월 27일 71mm 강원도 화천군 상서면 일원이다. 발생 시기별로는 6월 27일, 7월 1일·2일, 8월 3일·8일, 9월 6일·17일이다.

2006년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2006년 7월 10일 272mm 경남 남해군 일원이다. 가장 적은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2006년 7월 19일 35.5mm 경남 함양군 일원이다. 발생 시기별로는 4월 11일, 7월 1일·9일·10일·12일·15일·18일·19일·27일·28일·29일 및 8월 30일이다.

2007년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2007년 8월 10일 244.5mm의 강원도 양구군 동면 일원이다. 가장 적은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2007년 8월 4일 52.5mm의 충남 천안시 병천면이다. 발생 시기별로는 8월 4일·5일·6일·8일·10일, 9월 6일·16일·17일이다.

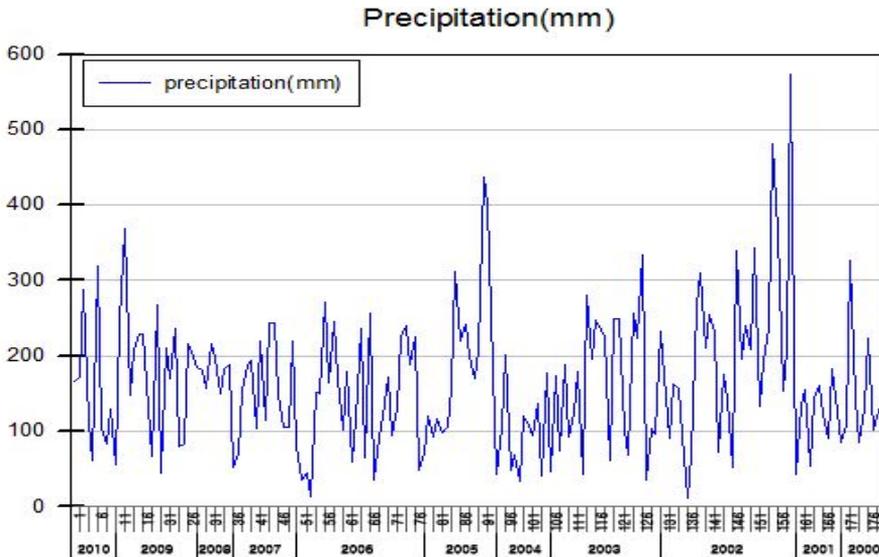
2008년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2008년 7월 25일 215.5mm의 강원도 양구군 남면 일원이다. 가장 적은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2008년 7월 25일 149mm의 충북 제천시 수사면 일원이다. 발생 시기별로는 7월 20일, 발생 시기별로는 7월 20일·25일·26일이다.

2009년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2009년

7월 17일 368.5mm의 부산광역시 남구 우암동 일원이다. 가장 적은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2009년 7월 17일 경남 김해시 부원동 일원이다. 발생 시기별로는 7월 8일·10일·13일·15일·16일 17일이다.

2010년 발생한 산사태 중 가장 많은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2010년 7월 23일 319.5mm의 충남 서천군 마서면 일원이다. 가장 적은 강우량에 의해 발생한 산사태는 2010년 8월 14일 55mm의 경북 안동시 일직면 일원이다. 발생 시기별로는 7월 16일·17일·18일·23일·24일 및 8월 14일이다.

2000년대 당일 강우량과 산사태 발생의 상관관계를 분석해 보면, 우리나라의 경우 7월 중순부터 7월 말까지 및 8월 중순부터 8월 말까지 집중하여 강우량이 증가하고 산사태 발생이 높았던 것을 알 수 있다.

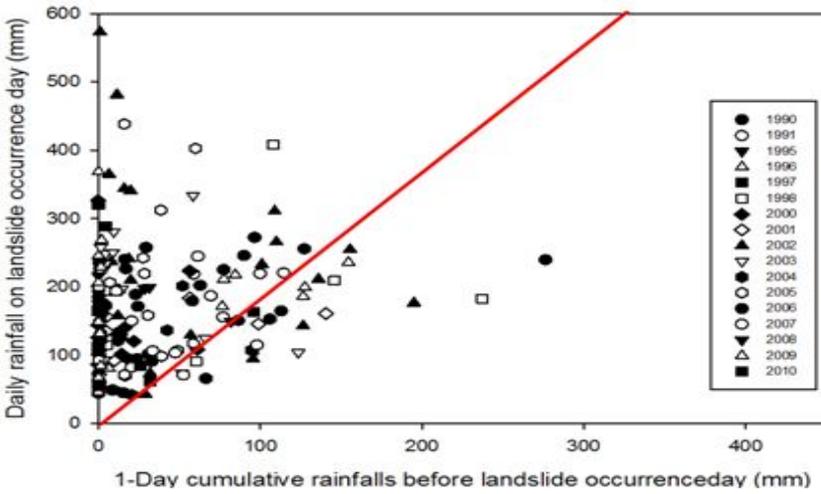


〈그림 3-1〉 산사태 발생 당일의 강우량

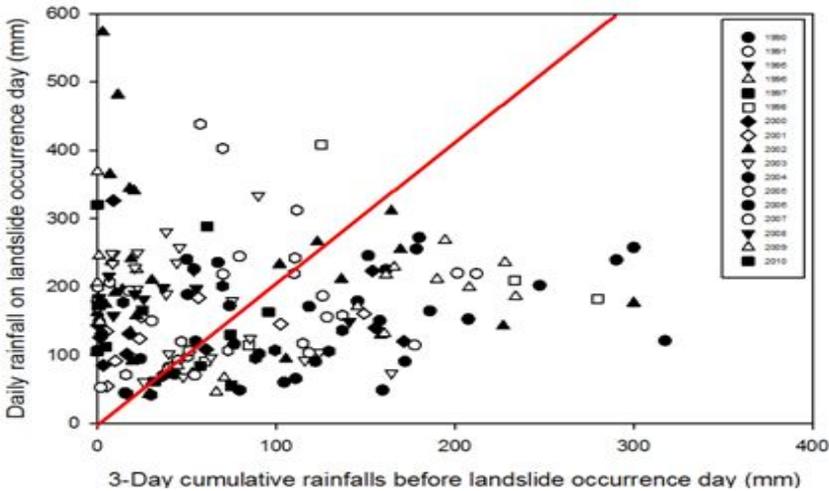
### 나. 누적 강우량에 의한 발생관계

산사태 발생 이전 누적 강우량과 발생 당일 강우량의 비교는 산사태 발생의 원인이 당일 강우량과 누적 강우량과의 관계를 분석하기 위하여 수행하였다. <그림 3-2, 3-3, 3-4>는 연도별로 산사태발 생일 이전의 누적 강우량(1일, 3일 5일)과 발생 당일의 강우량을 대비하여 나타낸 것이다. 가로축에는 산사태 발생일로 추정된 날의 강우량을 그리고 세로축에는 선행 누적 강우량이 산사태 발생당일의 강우량은 포함하지 않고 그 이전 1일간, 3일간, 5일간의 누적 강우량을 의미한다. <그림 3-2, 3-3, 3-4>는 이들 세 경우의 누적 강우량들을 나타낸 것이다. 구축된 자료에 45° 중앙경계선을 기준으로 상부영역에 점시되면 당일 강우량에 영향을 받아 산사태가 발생된 것으로 보았으며, 반대로 하부영역에 점시되면 누적 강우량에 의한 것으로 보았다. 이러한 판단을 기준으로 2000년대 산사태를 분석해보면 산사태 발생 당일 강우량과 발생 1일 전의 누적 강우량을 도식한 <그림 3-2>의 경우 45° 중앙경계선을 기준으로 상부와 하부에 도식되는 산사태가 명백히 구분된다. 산사태 발생은 당일 강우에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다. 산사태 발생 당일 강우량과 발생 3일 전의 누적 강우량을 도식한 <그림 3-3>의 경우 45° 중앙경계선을 기준으로 상부와 하부에 균등하게 분포하는 양상을 나타내고 있다. 산사태 발생이 당일 강우량과 3일 누적 강우량과 균등한 영향을 받은 것으로 사료된다. 산사태 발생 당일 강우량과 5일 이상의 누적 강우량을 비교한 <그림 3-4>를 보면 45° 중앙경계선을 기준으로 상부 보다는 하부 쪽에 더 많은 산사태 발생이 분포하는 것을 알 수 있다. 이는 5일 누적 강우에 의한 영향을 당일 강우에 의한 영향보다 많이 받는다는 것으로 판단된다. 따라서 산사태에 미치는 영향이 당일 강우량에 의하는가 누적 강우량에 의하는가를 구별하는 위해서는 누적 강우량을 3일 이내로 함이 바람직하다. <그림 3-2, 3-3, 3-4>를 보는 바와 같이 2000년대 발생한 산사태는 전반적으로

누적강우 3일과 밀접한 연관이 있다. 따라서 2000년대 산사태 발생은 당일 강우량보다는 누적강우량에 영향을 많이 받은 것으로 사료되며, 이 중 3일 누적강우량에 의한 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다.

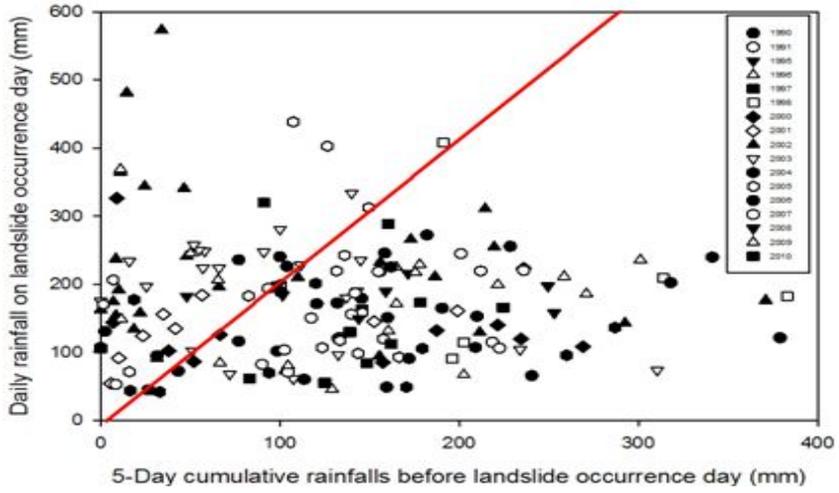


〈그림 3-2〉 1일 누적 강우량과 산사태 발생관계



〈그림 3-3〉 3일 누적 강우량과 산사태 발생관계

22 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련



<그림 3-4> 5일 누적 강우량과 산사태 발생관계

### 3. 강우강도와 지질재해 발생관계 분석

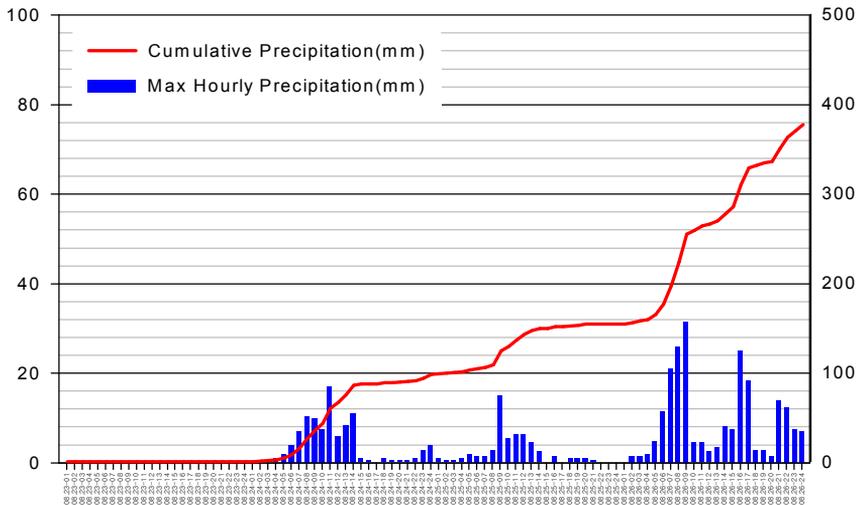
#### 가. 최대시간강우강도와 누적 강우량 관계 분석

강우강도는 산사태발생에서 산사태 발생 전 선행누적강우량의 개념 못지않게 중요할 것이다. 따라서 지난 19년간의 강우자료와 산사태 자료 중 산사태가 많이 발생한 지역 및 산사태 발생 3일 전 누적 강우와 당일 강우량과의 비율이 50%인 지역을 선별하여 최대시간강우강도와 누적 강우량의 개념을 동시에 도입하였다. 각 지역별로 그 특성을 판단해보면 <그림 3-5, 3-6, 3-7, 3-8, 3-9, 3-10, 3-11, 3-12, 3-13, 3-14 및 3-15>와 같다(그림에서 지역별 특성 없음. 연구내용에 없음). 조사된 문헌 및 방송 등의 자료에는 산사태 관련 정보로는 정확한 파괴시간을 알 수 없으므로 파괴된 날을 기준으로 검토하였다. 2000년대의 경우 강우강도와 산사태의 상관관계를 조사해 보면 <그림 3-5, 3-6, 3-7, 3-8, 3-9, 3-10, 3-11, 3-12, 3-13, 3-14 및 3-15>와 같다. 그림 중 세로축의 좌측은 최대시간강우강도로서 막대그래프로 표시하였고, 세로축의 우측은 누적 강우량으로 실선으로 표시하였다. 산사태 발생일을 중심으로 누적 3일간의 강우량과 발생일의 강우량을 최대시간강우강도와 누적 강우량으로 표시하였다.

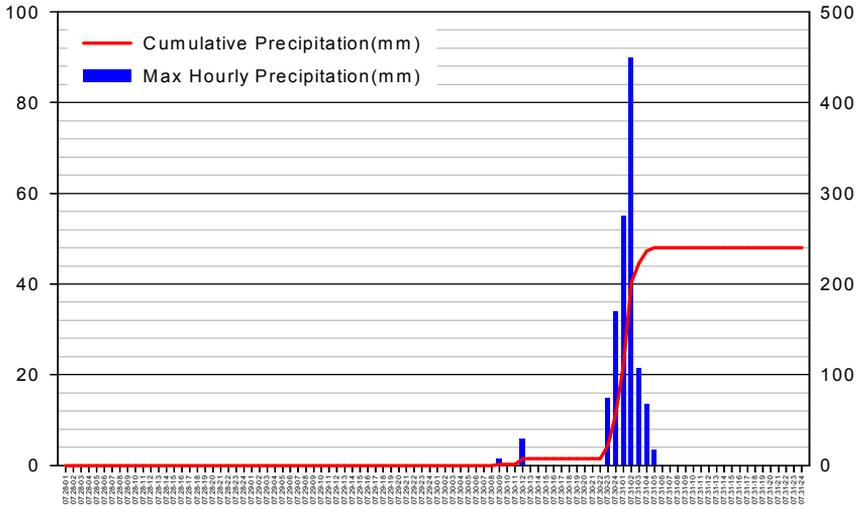
강우강도는 단위시간에 내리는 강우량(mm/hr)의 척도이며 지속기간은 강우가 계속되는 시간장경이다. 강우강도-지속기간 관계를 도회지역의 우수거 설계 라든지, 고속도로를 횡단하는 암거의 설계, 비행장의 배수설계 등을 위한 설계유량의 결정에 대단히 유효하게 사용된다. 강우강도는 T시간 동안의 평균 강우강도 t를 나타내는 것이다

$$t = \frac{RT}{T} \quad \text{<식 3-1>}$$

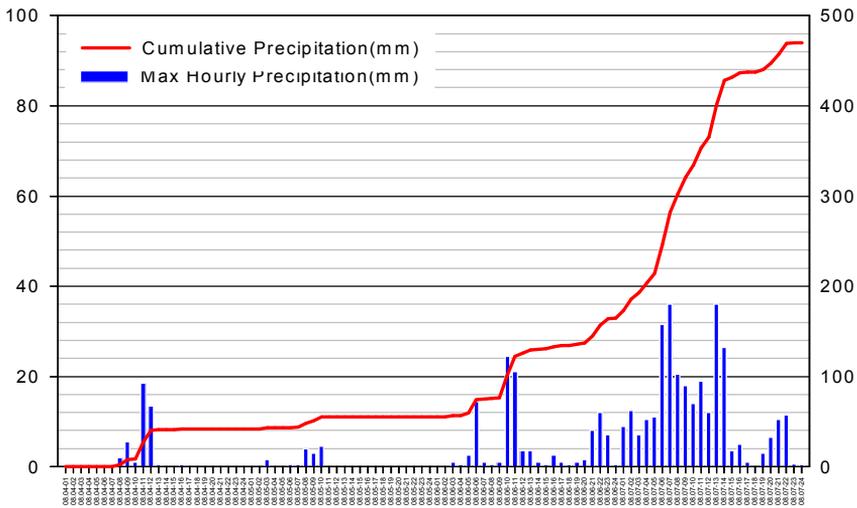
전술된 <식 3-1>을 적용하여 2000년의 최대시간강우강도는 31.5mm, 3일 최대누적강우량은 376.5mm이다. 2001년의 경우 최대시간강우강도는 21.5mm, 3일 최대누적강우량은 240mm이다. 2002년은 36mm 및 470.5mm이다. 2003년은 58mm 및 303.5mm이다. 2004년은 33.5mm 및 271mm이다. 2005년은 43.5mm 및 302.5mm이다. 2006년은 27.5mm 및 402mm이다. 2007년은 36.5mm 및 324mm이다. 2008년은 41.5mm 및 208mm이다. 2009년은 33.5mm 및 344.5mm이다. 2010년은 17.5mm 및 189mm이다. 2000년대 산사태 발생과 강우와의 관계에 있어서 전술된 두 가지 경우를 비교함으로써 최대시간강우강도와 누적최대강우량의 관계를 알 수 있다. 선행누적강우량이 산사태에 영향을 많이 미치며 선행최대시간 강우강도 역시 산사태 발생에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. 결과적으로 강우량에 의한 산사태 피해가 집중되었던 2002년, 203년 및 2006년의 경우 누적 강우량이 높은 것으로 파악되었다.



A. 2000년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량

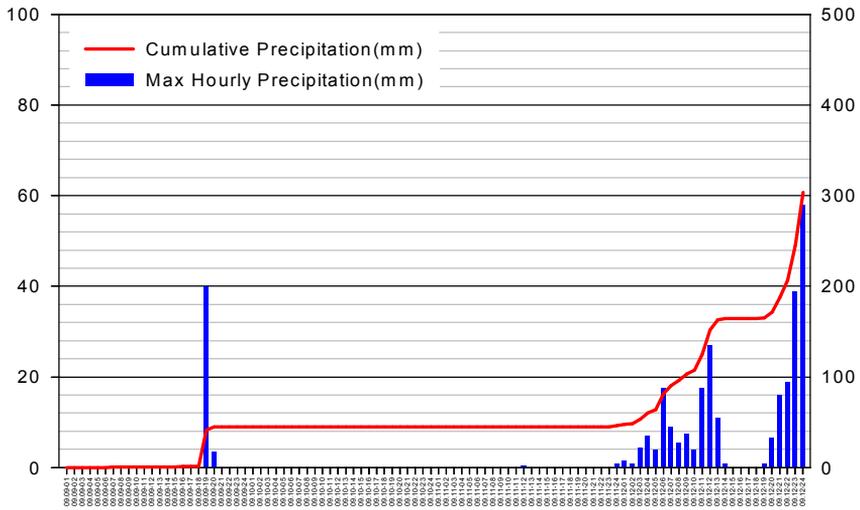


B. 2001년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량

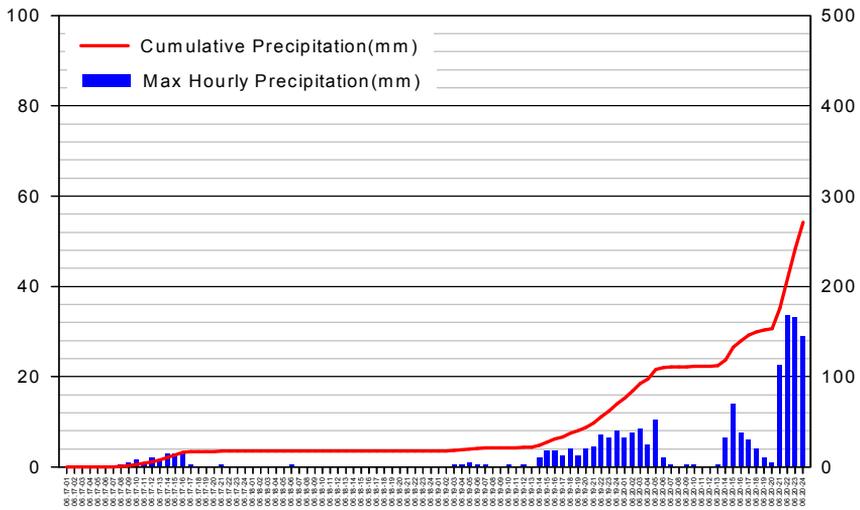


C. 2002년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량

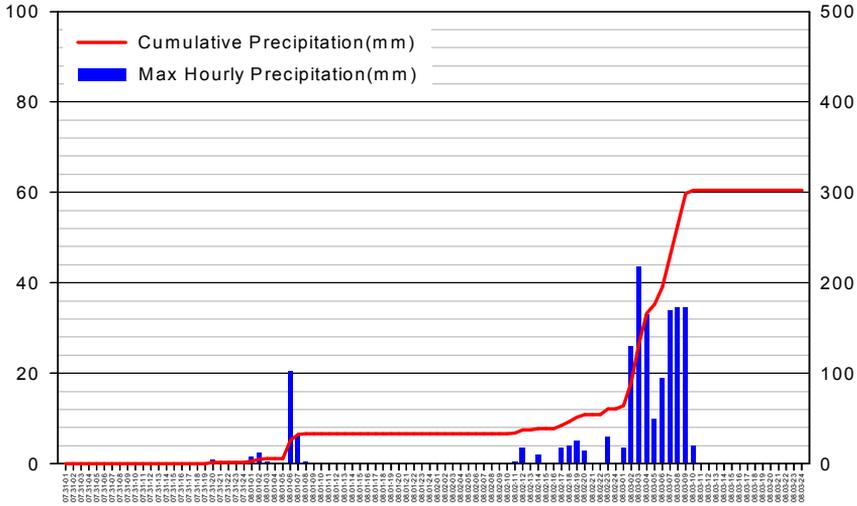
26 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련



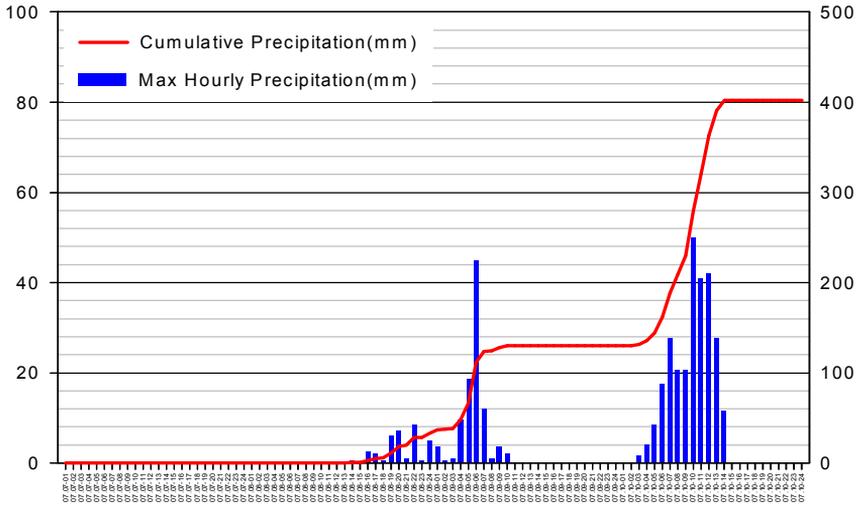
D. 2003년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량



E. 2004년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량

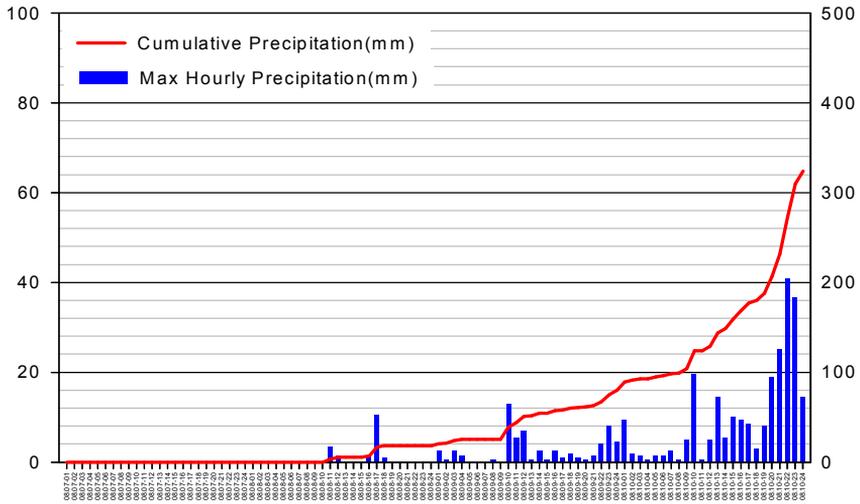


F. 2005년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량

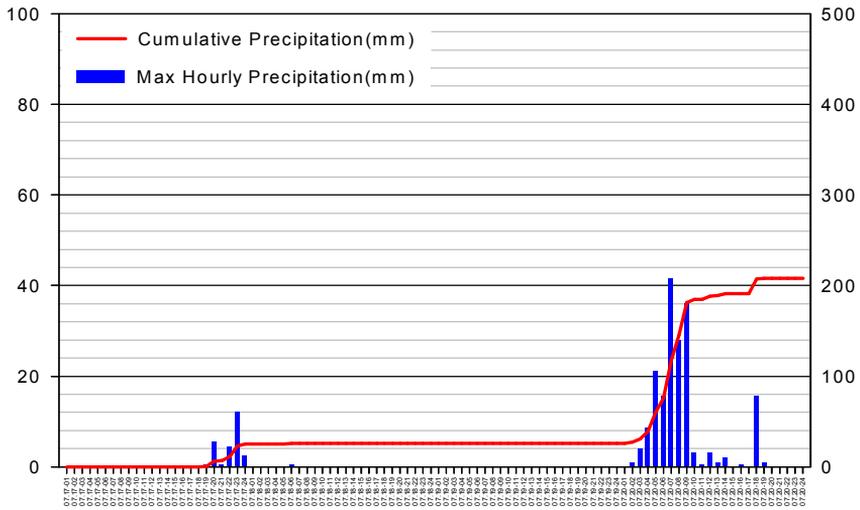


G. 2006년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량

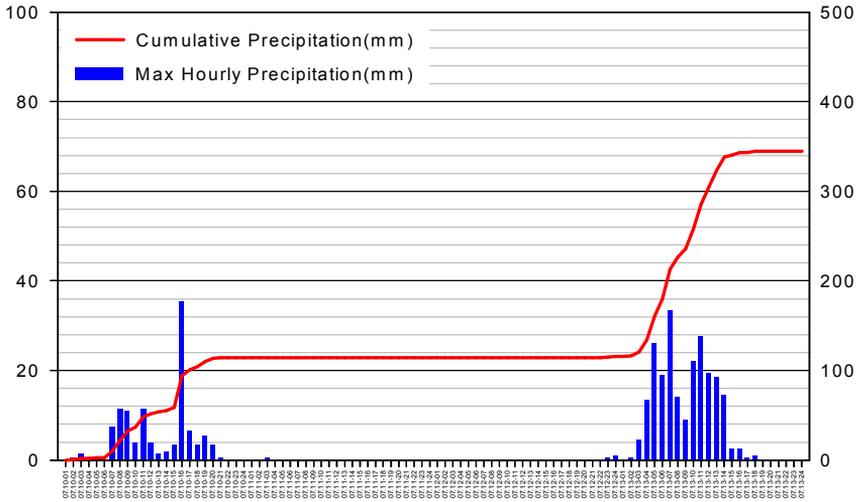
28 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련



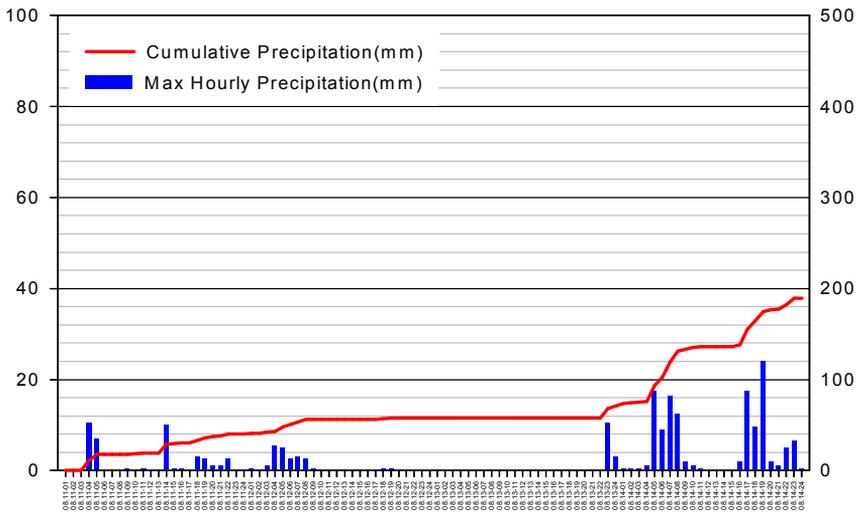
H. 2007년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량



I. 2008년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량



J. 2009년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량



K. 2010년 최대강우강도 및 3일 누적 강우량

<그림 3-5> 연도별 최대강우강도 및 3일 누적 강우량

## 나. 강우강도 및 지질재해 반응지수 분석

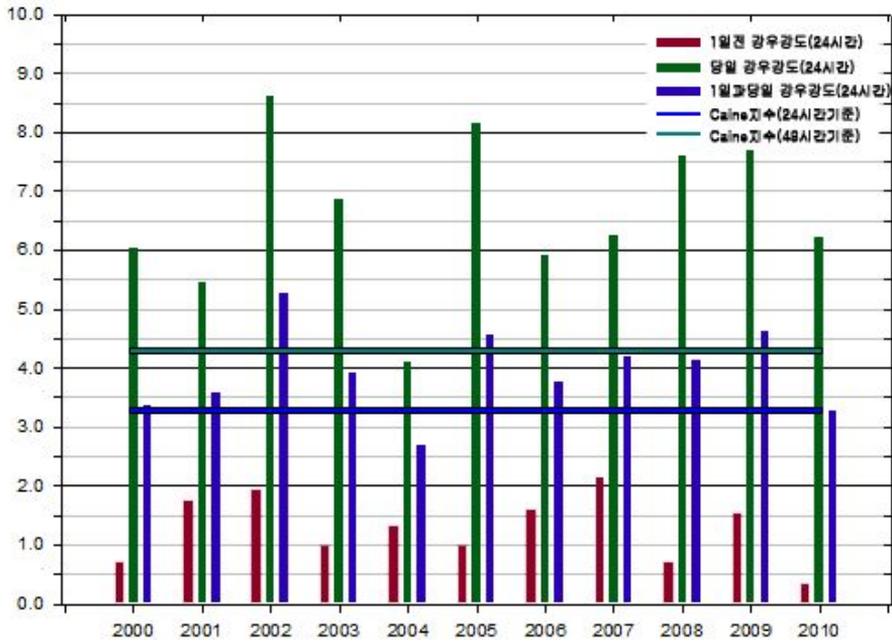
강우량과 산사태 발생의 연관성은 Caine(1980)이 강우강도와 누적 강우 간의 관련성을 제시한 이후 이에 관련된 많은 연구가 진행되었고, 그러나 우리나라에서도 최근 20년 동안의 강우와 산사태 발생 간의 연관성 규명을 위한 연구들이 진행되지 못하였다. Caine(1980)은 73개의 천층 슬라이드(shallow slide)와 토석류 산사태(debris flow)를 대상으로 강우기간과 강우강도가 산사태 발생에 미치는 영향을 분석하였다. 산사태 발생하기 위한 강우기간과 강우강도의 관계는 <식 3-2>와 같으며 일정시간 내에 강우강도가 이를 상회하는 단계에서 산사태가 발생한다고 하였다. 여기서 I는 강우강도(Rainfall Intensity: mm/hour), D는 강우기간(Rainfall duration: hour)이다.

<표 3-1> 및 <그림 3-16>은 24시간, 즉 1일과 72시간, 즉 3일의 강우 기간 동안 연도별 평균 강우강도가 Caine의 산사태 발생기준(threshold)를 넘는지를 보여주는 본 연구 결과이다. Caine은 1일 강우강도에 의한 산사태 발생 기준 4.29 및 3일 누적 3.27로 제시하였다. 이를 모식화하면 <그림 3-16>이며 24시간을 기준으로 할 때 Caine은 4.29이다. 2000년대 1일 전 강우강도는 Caine의 발생기준(24시간)보다 못하다. 그러나 산사태 발생당일 강우강도는 2004년을 제외하고는 모든 연도가 Caine의 발생기준을 초과한다. 또한 발생 1일전과 당일 강우강도는 2004년을 제외하고는 모든 연도가 Caine의 발생기준(72시간)보다 초과한다. Caine의 강우강도-강우기간의 관계식에 의하면 3일간 최소한 129mm의 강우량이 필요하며 그보다 강우량이 적더라도 강우강도가 높으면 산사태가 발생한다고 설명하였다.

$$I = 14.82 \times D^{-0.39} \quad \text{<식 3-2>}$$

〈표 3-1〉 Caine의 산사태 연관성 분석

연도	1) 산사태 발생 2일 전 평균강우	2) 산사태 발생 당일 평균강우	1+2	1일전 강우강도 (24시간)	당일 강우강도 (24시간)	1일과 당일 강우강도 (72시간)	Caine지수 (24시간기준)	Caine지수 (72시간기준)
2010	7.65	149.20	156.85	0.32	6.22	3.27		
2009	36.72	184.42	221.14	1.53	7.68	4.61		
2008	16.71	182.14	198.86	0.70	7.59	4.14		
2007	51.17	149.90	201.07	2.13	6.25	4.19		
2006	38.26	142.13	180.39	1.59	5.92	3.76		
2005	23.16	195.84	219.00	0.96	8.16	4.56	4.29	3.27
2004	31.58	98.25	129.83	1.32	4.09	2.70		
2003	23.42	164.88	188.30	0.98	6.87	3.92		
2002	46.35	206.40	252.75	1.93	8.60	5.27		
2001	41.25	131.06	172.31	1.72	5.46	3.59		
2000	16.68	144.50	161.18	0.70	6.02	3.36		



<그림 3-6> Caine의 산사태 발생기준과 연도별 강우강도 비교

## 제4장 국내 기후변화를 고려한 도심 지질재해 리스크 체계 마련을 위한 시사점

앞 장에서 도심 지질재해 중 산사태 발생원인 및 지질재해 분석의 범용적 방법론을 살펴보았으며, 19년간의 강우량 자료 및 지질재해 중 산사태 발생과의 상관관계를 정량적으로 분석하였다. 이를 바탕으로 도심지역 지질재해 발생 및 관리의 리스크 체계 마련을 위한 시사점을 평가요소, 평가방법 및 평가에 필요한 기반자료의 측면에서 논의하고자 한다.

### 1. 평가요소 측면

도심지역 지질재해에 대한 리스크 관리 체계 구축을 위해서는 선행되어 수행 되어야 하는 연구로는 취약성도 작성을 포함한 취약성 평가이다. 과학적·효율적 리스크 관리 체계 구축을 위해서는 공간적으로 기후변화에 의하여 영향 및 취약성을 받는 지역이 공간적으로 명확히 구분되어야 한다. 본 연구에서는 지질재해 중 산사태 취약성도 작성을 위한 스케일 및 지리정보 기반의 취약성도 활용 가능 정보에 관하여 논의하였다.

도심지역의 특성을 고려한 지질재해 취약성 분석의 스케일(표 2-1 참조)은 공간적으로 정밀할수록 유리하다. 일반적으로 공간적 정밀함, 즉 공간적으로 많은 정보를 가지고 있는 것이 유리하다고 생각할 수 있지만, 지역의 특성과 분석 공간의 특성에 따라서 달라질 수 있다. 예를 들어 전 세계 및 동북아 정도의 공간적 스케일 분석에서는 공간적으로 정밀한 대축척 자료보다는 경향성을 정

확히 반영하는 소축척 자료의 활용이 더 효율적이다. 본 연구에서는 연구대상 지역을 도심지역으로 한정하였으며, 도심지역은 해당공간이 크기 않다는 특징도 있지만 도심의 물리적·내용적 구성이 다양하다는 특징이 있다. 그렇기 때문에 공간적 크기의 문제가 아니라, 내용적 구성의 다양성을 고려하여 대축척 자료, 즉 다양한 정보를 내포하는 축척을 활용하는 것이 효율적 리스크 체계 마련의 좋은 방안으로 사료된다. 예를 들어 국내 도심지역의 경우 1:5,000 축척의 자료를 활용하는 것도 가능하다. 그러나 1:5,000 축척의 정보는 현재 전국을 대상으로 구축되지 못하였다는 점을 고려해야 한다.

도심지역 지질재해 리스크 관리를 위한 지리정보 기반의 취약성도 활용 가능 정보는 전술된 <표 2-2>와 같다. 그러한 전술된 모든 정보를 획득하는 것은 어려울 수 있다. 국내에서 활용되는 대부분의 지리정보는 해당 업무의 전문성을 가지는 국가 기관 또는 공공기관에서 구축한다. 이러한 정보의 특징은 전문성 및 정보의 신뢰도가 높다는 특징이 있다. 그러나 정보 구축 기관은 기관의 정보 구축 목적에 맞도록 구축한 것으로 그 목적에는 구축된 정보가 부합될 수 있지만 도심지역 지질재해 리스크 관리를 위해서는 부족할 수 있다. 그렇기 때문에 본 연구와 같은 특정 목적을 위한 연구를 위해서 개별 연구자가 기존의 구축정보를 재가공하고 변환하는 작업이 선행되어야 한다. 또한 기후변화를 고려한 지리정보 기반의 정보 활용에서 반드시 고려되어야 하는 정보로는 강우량과 같은 기상정보의 처리 및 가중치이다. 전술된 다른 다양한 정보는 대부분 2차원으로 구축되었다. 그러한 기상정보는 1차원 Point 형태로 관측된 정보이다. 이를 다른 정보들과 같은 형태를 가지도록 가공하여야 한다. 그러나 이 과정에서 1차원 관측값을 관측값이 없는 곳에 보간(Interpolation)하는 과정에서 현실을 왜곡할 수 있다는 문제가 있을 수 있다. 그렇기 때문에 자료의 특성을 고려한 보간법을 통하여 2차원으로 구축하고 검증하는 단계를 거쳐야 한다.

## 2. 평가방법 측면

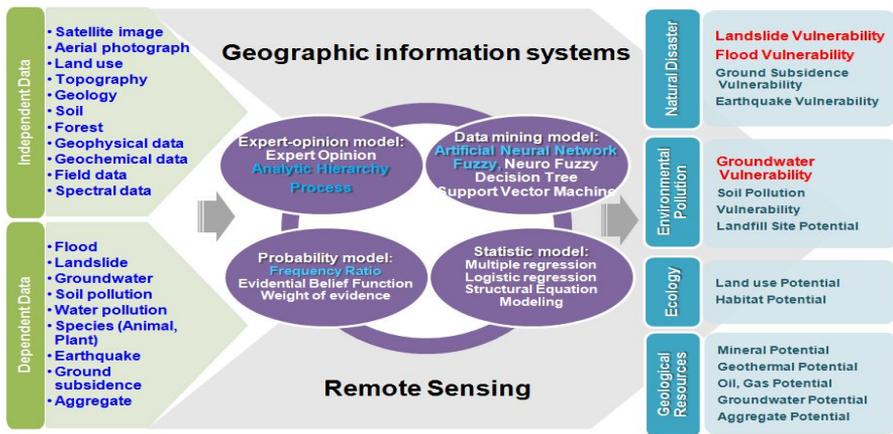
기후변화의 영향은 불특정 시기에 발생하지만, 빈번하게 발생하고 발생 빈도가 증가하고 있다는 특징이 있다. 이러한 비시계열적 문제를 해결하기 위하여 선행되어야 하는 방법이 과학적·정량적으로 리스크 분석을 고도화하는 것이다. 본 연구에서는 <식 2-1>, <식 2-2> 및 <식 2-3>을 통하여 기후변화를 고려한 취약성, 가능성 및 위험성을 논의하였다. 전술된 방법은 기존의 취약성 평가에서 영향인자로 기후변화를 반영하고 이를 평가하는 방법이다. 보다 구체적인 방법론은 선행연구를 통하여 전술한 방법과 같은 공간 통계적 방법론들이다. 국내의 경우 기후변화에 의한 취약성 평가 방법을 Analytic Hierarchy Process(AHP)와 같은 방법을 통하여 산정된 지수를 활용하는 방법이다. 국내에서 현재 많이 활용되는 지수화 방법론은 지역의 특징을 지수로 변환하여 반영한다는 면에서 지역적 특징 및 특성을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 지수 방법은 지수를 산정하는 전문가의 주관적인 면이 부각될 수 있다는 단점이 있다.

현재 국내·외적으로 영향 및 취약성 평가에 활용되며, 향후 리스크 평가의 고도화 방안의 대안으로 제시되는 방법론은 공간 통계학적 방법론이다. 기후변화 취약성 평가에서의 공간적 분석의 중요성은 전술하였다. 공간 통계학적 방법론은 공간 정보를 기반으로 유의한 통계적 특성을 파악하고 이를 다시 공간적으로 구축하여 도면화하는 것으로 통계적 방법론 및 데이터 마이닝 등도 함께 활용된다. <그림 4-1>은 이러한 공간통계학 기반의 분석방법을 정리한 것으로 공간정보 간의 상관관계를 정량적으로 산정하고(지수, 통계 및 데이터 마이닝 등) 최종적으로 통합하여 취약성도를 작성한다.

전술된 내용을 반영하고 최근의 지질재해를 포함하는 자연재해 및 환경문제의 특징은 크게 두 가지이다. 첫째, 발생하는 지역이 공간적으로 확대되고 있다는 것이다. 둘째, 발생하는 분야(자연재해, 지질재해, 환경오염, 동·식물 분포

및 생태계 등)가 확대되고 있다는 것이다. 이러한 문제를 해결하는 다양한 방법 중에서 Geospatial Correlative Integration(GCI)는 GIS(Geographic information system) 및 원격탐사(Remote Sensing)를 바탕으로 통계 및 데이터 마이닝 방법론을 적용한 것으로 발생 문제의 공간적 및 다양한 분야로 확대를 분석하는 방법으로 공간통계학의 개념을 보다 정리하고 정립한 것이다.

GCI 분석에서 환경 및 자연재해와 같은 발생하는 문제는 종속 데이터(Dependent Data)로 구분하며, 발생하는 문제에 영향을 미치는 개별 항목들은 독립 데이터(Independent Data)로 구분한다. 이렇게 선정된 개별 독립 데이터는 기존의 Statistic model(Logistic Regression 및 Structural Equation Modeling 등), Probabilit model(Frequency Ratio, Weight of evidence 등), Data mining model(Artificial Neural Network, Fuzzy, Neuro Fuzzy 및 Decision Tree 등), Expert-opinion model(Analytic Hierarchy Process) 등을 통하여 종속 데이터와의 상관관계 및 가중치를 계산한다. 개별 항목의 가중치와 상관관계를 분야별로 연계하여 최종적으로 분야별 취약성도를 작성한다(그림 4-1 참조).



<그림 4-1> GCI 개념도 및 프로세스 흐름도

### 3. 평가를 위한 기반자료 측면

국내의 경우 <표 2-2>와 같은 정보들은 다양한 기관에서 공간정보 형태로 구축하고 있다. 이러한 공간정보들이 존재하기 때문에 도심지역에 발생하는 지질재해 및 다른 환경문제들에 대한 리스크 관리체계가 수립될 수 있다. 그러나 기후변화를 고려한 리스크 체계 마련을 위해서는 보다 다양한 기반자료 구축이 필요하다.

기후변화 관련 정보는 IPCC의 DDC(Data Distribution Center) 및 기상청에서 제공하는 미래 기후변화 시나리오를 공간적 상세화(Downscaling)를 통하여 활용한다. 기본적으로 미래를 예측한다는 것에는 불확실성이 내포되는 한계가 있으며 기후변화 시나리오도 이에 해당된다. IPCC에서는 5년마다 보고서를 작성하고 있으며, 현재 5차 보고서를 발간할 예정이다. 또한 발간 보고서를 바탕으로 기후변화 시나리오를 작성하여 국제적으로 배포한다. 국내는 기상청에서 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) A1B 시나리오 및 RCP(Representative Concentration. Pathway) 4.5와 8.5를 제공하고 있다. 그러한 이러한 다양한 시나리오의 활용에도 불구하고 미래를 예측한다는 것은 시나리오 구축 과정의 정보 한계에 의하여 미래 기후변화의 불확실성이 분명히 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 다양한 기후변화 시나리오를 활용하여 불확실성을 줄이는 연구가 진행되고 있다. 더불어 과거 기상자료 중 연구 목적에 맞는 정보만으로 획득하고 이를 통하여 특정 기상변화만을 예측하는 연구도 병행하여 진행 중이다.

본 연구에서는 향후 기후변화를 반영한 도심지역 지질재해 연구 등과 같은 취약성을 기반으로 하는 연구에서 기후변화 시나리오 이외에 확률 강우량과 같은 특정 기후사상을 예측하는 방법을 함께 고려하는 것을 제안한다. 특히 본 연구가 대상으로 하는 지질재해 중 산사태의 경우, 기존의 산사태 발생 양상

보다는 현재 및 기후변화가 고려되는 미래의 산사태에서 강우량의 증가가 직접적인 원인이기 때문이다. 그렇기 때문에 확률강우량과 같은 특정 기후사상의 미래 예측을 수행하는 것이 필요하다. 최종적으로 보다 과학적·정량적인 리스크 체계 마련을 위하여 기후변화 시나리오 및 특정 기후사상으로 예측하는 방법론의 결과를 병행하여 적용하고 이를 통하여 불확실성을 줄이는 연구가 진행되어야 한다.

## 제5장 결 론

본 연구는 도심지역 지질재해 중 산사태 발생을 중심으로 발생원인, 평가 요소 및 평가방법을 분석하고, 이를 바탕으로 국내 강우량과 지질재해 중 산사태 발생의 정량적 관계를 분석하였다. 또한 향후 지질재해 리스크 체계 마련을 위한 시사점을 제시하였다.

이를 위해 우선 기후변화에 의하여 발생하는 도심지역 산사태 관련 연구동향, 발생원인 및 분석 기법을 분석하였다. 연구동향으로는 기후변화 시나리오를 상세화 기법의 연구가 주류를 이루고 있으며, 더불어 확률통계를 모델 기반의 공간통계학적 분석 기법이 각각 따로 연구되고 있는 실정이다. 이를 연계하여 미래 기후변화 시나리오를 반영한 지질재해 취약성, 가능성 및 위험성 평가는 초기 단계로 분석되었다.

본 연구에서는 기존의 국내의 강우량 발생에 따른 산사태 발생과의 상관관계를 정량적으로 분석하기 위하여 2000년대 강우량 자료와 산사태 발생 자료를 분석하여, 당일 강우량 누적 강우량 및 최대시간당 강우강도와와의 상관관계를 정량적으로 계산하였다. 당일 강우량 기준으로 산사태 발생과의 관계는 시기적으로 7월 중순부터 7월 말까지와 8월 중순부터 8월 말까지 집중되어 있다. 또한 일최대강우량 164.5mm 이상의 경우 전국적으로 산사태 위험으로 분류된다. 더불어 누적 강우량에서는 3일 누적이 다른 장기간의 누적 강우량보다 산사태 발생에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 최종적으로 2000년대 우리나라의 산사태의 경우 3일 누적 강우량이 영향을 더 많이 미치는 것으로 분석되었다. 최대시간당 강우강도는 2002년, 2003년 및 2006년에 영향이 높은 것으로 분석 되었으며, 이 기간은 실제 우리나라의 태풍에 의한 피해가 많은 시기와 동일하

다. 마지막으로 강우강도와 지질재해 반응지수 분석에서는 Caine이 제시한 강우량과 산사태 발생 임계치를 넘는 경우는 우리나라의 2000년대 산사태에서는 2004년을 제외한 전 기간에 해당한다. 이는 우리나라의 강우형태가 산사태 발생에 매우 유리한 형태임을 나타낸다.

이러한 연구결과를 바탕으로, 기후변화에 따른 도심지역 산사태 리스크 체계 마련을 위한 시사점을 ① 평가요소 측면, ② 평가방법 측면, ③ 평가를 위한 기반자료 측면으로 구분하여 제안하였다. 우선, 평가요소 측면에서는 평가요소의 자료 형태 및 축척을 논의하였다. 도심지역의 특성을 고려한 대축척 자료의 활용이 효율적일 것으로 제안하였다. 또한 기상자료와 같은 자료의 특성이 기존의 타 자료와 다르기 때문에 이를 고려한 자료처리 방법의 필요성 및 방법론을 재정립하였다. 평가방법 측면에서는 기존의 전문가 설문 바탕의 영향 및 취약성 평가를 개선하기 위하여 GCI 방법을 제시하고, 본 방법론의 활용방안에 대하여 논의하였다. 평가를 위한 기반 자료 측면에서는 기후변화의 한계점인 불확실성을 논의하고, 다양한 기후변화 시나리오를 활용하는 방법 및 특정 기상현상을 예측하는 방법을 연계하여 기후변화의 불확실성을 줄이는 방안을 제시하였다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련을 위하여 2000년대 강우량과 지질재해 중 산사태 발생의 상관관계를 정량적으로 분석하였다. 더불어 현재 기후변화 및 지질재해 관련 취약성 분석 방법의 경향 및 개선방안을 도출하였다. 하지만, 미래 기후변화에 안전한 지질재해 리스크 구축의 실제 적용을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

첫째, 본 연구에서 지질재해 중 산사태를 대상으로 수행한 것과 같이 실제적인 도심지역에 적용한 사례 연구가 필요하다. 서울특별시와 같은 대도심 지역에 산사태 발생은 전술한 내용과 같이 막대한 물리적·인적 피해가 발생하며 이를 대비하는 노력이 절실하다. 따라서 본 연구에서 제시한 GCI 기법을 실제 사례지

역에 적용하여 활용정보, 분석방법, 분석결과 및 정책 수립을 통한 리스크 체계를 하나의 과정으로 수립하는 연구가 필요하다.

둘째, 실제 사례 중심의 다양한 미래를 예측하는 방법들을 적용하여 기후변화의 불확실성을 줄이는 연구가 필요하다. 전술한 내용과 같이 GCI 기법과 다양한 미래 기후변화 시나리오 및 확률 강우량 등을 적용한 다차원적 분석을 수행하여 불확실성이 최소화된 리스크 체계 마련의 실질 사례 연구가 필요하다. 이러한 향후 연구 발전을 바탕으로 보다 효율적이며 활용성 높은 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련이 수립될 것이다.

셋째, 궁극적으로 기후변화에 적응하기 위한 도심지역 지질재해의 관리 항목의 우선순위를 도출할 뿐만 아니라 항목 관리를 통한 다양한 계획 측면에서의 리스크 관리 체계가 수립되어야 한다. 예를 들어, ‘국가 기후변화 적응대책’ 및 ‘기후변화 적응 세부시행계획’ 등에서 지질재해 관련 항목이 산사태 및 침수로 예시되어 있지만 발생과 관련된 직접적인 항목의 분석은 제시되지 않았다. 더불어 발생 항목을 집중 관리하는 체계에 대한 부분도 부재한 실정이다. 그러므로 다양한 리스크 체계 마련 과정에서 기후변화를 고려한 도심 지질재해가 고려될 수 있는 방안을 종합적으로 연구해야 할 것이다.

## 참고문헌

### <국문 자료>

이명진. 2003. 「원격탐사, 지리정보시스템(GIS) 및 인공신경망을 이용한 강릉지역 산사태 취약성 분석 및 검증」. 연세대학교 석사 학위 논문. p.42-43.

### <영문 자료>

Baeza Cl. Corominas, J. 2001. "Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques". *Earth Surf Proc Land*, 26: 1251-1263.

Beven. K J. Kirkby. M J. 1979, "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology". *Hydrological Sciences Bulletin*, 24: 43-69.

Bromhead. 1992. *The Stability of Slopes, 2nd Ed*, Taylor & Francis. 78-79.

G. Sanchez. Y. Rolland. M. Corsini. R. Braucher. D. Bourlès. M. Arnold. G. Aumaître. 2010. "Relationships between tectonics, slope instability and climate change: Cosmic ray exposure dating of active faults, landslides and glacial surfaces in the SW Alps". *Geomorphology*, 27(26): 1251-1263.

Ian A. Nalder. 1998. "Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest:". *Agricultural and Forest Meteorology*, 92: 211-225.

Karl, Thomas R., Richard W. Knight. 1998. "Secular Trends of Precipitation Amount, Frequency, and Intensity in the United States". *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 79: 231-241.

Maurizio Polemio. 1999. "The role of rainfall in the landslide hazard: the case of the Avigliano urban area (Southern Apennines, Italy)". *Engineering Geology*, 53: 297-309.

Matthias Jakob. 2009. "Climate change effects on landslides along the southwest

- coast of British Columbia”. *Geomorphology*, 107: 275-284.
- Lee, MJ. 2012. 「Landslide Hazard Analysis Considering Climate Change」. The Graduate School Yonsei University Doctoral Degree, p.86-87.
- Lee, S. Min. K. 2001. “Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea”. *Environmental Geology*, 40: 1095-1113.
- Lisa, Borgatti. Mauro. Soldati. 2010. “Landslides as a geomorphological proxy for climate change: A record from the Dolomites (northern Italy)”. *Geomorphology*, 120: 56-64.
- Nel Caine. 1980. “The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler*”. *Series A, Physical Geography*. 62: 23-27.
- Ram L. Ray. 2010. *Landslide susceptibility mapping using downscaled AMSR-E soil moisture: A case study from Cleveland Corral*. California, US, p.11-12
- Robin. Fell. Jordi, Corominas. Christophe, Bonnard. Leonardo, Cascini. Eric Leroi. William Z. 2008. “Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning”. *Engineering Geology*, 102: 99-111.
- S. Yue. M. Hashino. 2003. “Temperature trends in Japan: 1900-1996”. *Theoretical and Applied Climatology*. 75: 15-27.
- TERZAGHI K. 1950. *Mechanisms of landslides*. Geological Society of America, Berkey 2: 83-123.
- Varnes, D. J. 1978. *Slope movement types and processes*. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. Washington D. C., 11-33.

# Abstract

## **The Study on the Development of Risk Assessment System for Urban Geological Hazards Caused by Climate Change**

This study analyzes the quantitative relationship between the volume of domestic rainfall and landslide vulnerability based on the analysis of causes of urban geologic hazards with a particular focus on landslides. It also analyzes factors and measures for risk assessment while aiming to present suggestions for the development of a future geological risk assessment system.

To accomplish this goal, the study selected the Umyeon-san case, a recent climate change induced urban landslide which resulted in casualties and material damages. Using this case, the study examines recent research trends, analysis methods as well as causes of the landslide. The result indicates that a great share of research has been conducted on climate change scenario downscaling in recent days. However, spatial statistical analyses based on probability statistics models have been done separately from climate change scenario downscaling, which implies that the assessment of risk and geological vulnerability factoring in future climate change scenarios is at an early stage.

In this study, for a quantitative analysis of correlation between rainfall and landslides occurrence, data on rainfall and landslides in Korea in the 2000s was analyzed to calculate numerical values of correlation between the occurrence of landslides and rainfall volume (daily and accumulated) and maximum hourly intensity of rainfall. Cases of landslide were concentrated in mid to end of July and that of August when daily precipitation volume was very high. Daily rainfall exceeding 164.5mm is categorized as high risk for landslide. Rainfall that continued for three days was found to affect the occurrence of landslide in Korea

in the 2000s more than any other number of days during which precipitation lasted. The correlation between the intensity of hourly rainfall and landslide occurrence was most apparent in 2002, 2003 and 2006 which were the same years when Korea had significant damages from typhoons. Finally, the analysis of rainfall intensity and landslides in Korea in the 2000s together with the rainfall threshold for landslide initiation presented by Caine shows that the landslide cases in the period corresponded to rainfall intensity exceeding the threshold, except in 2004. This implies that the rainfall pattern is highly correlated with landslide initiation in Korea.

Based on the analyses, this study presents suggestions for landslide risk assessment system by examining assessment factors, assessment methods and base data for assessment. In terms of assessment factors, data forms and scales have been discussed and the use of large-scale data is recommended that can meet the needs of analysis on city areas. As for assessment methods, the GCI method has been suggested, and its possible applications examined, as a way to improve the existing impact and vulnerability assessment based on expert surveys. Lastly, the study discusses uncertainty involved in base data for assessment which arises because of the nature of climate change itself and suggests the use of various climate scenarios and forecasting methods to reduce the uncertainty.

Keywords : Climate Change, Urban Climate, Geological Hazards, Landslide

붙임 1. 2000년대 강우량과 지적재해 중 산사태 발생 지역 정리

연도	지역	일자	Station	5일전	4일전	3일전	2일전	1일전	당일
2010	경상남도 진주시 명석면 오미리	2010-7-16	192	148.0	1.5	25.0	0.0	0.0	165.5
	경상남도 함천군 미승리	2010-7-16	285	127.0	0.0	1.0	0.0	0.5	172.5
	전라남도 여수시 덕충동	2010-7-16	168	47.5	1.5	57.0	0.0	4.5	288.0
	경상북도 고령군 운수면 화암리	2010-7-17	812	106.5	1.0	4.5	0.0	0.0	112.0
	경상북도 칠곡군 지천면 신리	2010-7-18	825	1.0	0.0	0.0	0.0	32.0	61.0
	충청남도 서천군 마서면 송내리	2010-7-23	614	41.0	0.0	0.0	0.0	0.0	319.5
	충청남도 부여군 은산면 장벌리	2010-7-24	236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	105.0
	전라북도 익산시 여산면 천호리	2010-08-14	763	0.5	40.5	8.5	23.0	26.0	84.0
	전라북도 전주시 완주군 비봉면 이진리	2010-08-14	734	14.5	0.0	39.5	21.5	13.5	129.5
	경상북도 안동시 일직면 광연리	2010-08-14	820	0.0	0.0	43.0	32.0	0.0	55.0
2009	전라남도 광양시 다압면	2009-07-08	932	0.5	18.5	0.5	0.5	0	245
	부산시 남구 우암동	2009-07-0	942	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	368.5
	전라남도 담양군 마곡리	2009-07-0	706	0.0	0.0	1.0	0.5	0	148.5
	강원도 춘천시 신동면 혈동리	2009-07-10	588	0.5	15.0	0.0	0.0	0.0	206.0
	강원도 원주 문막읍 반계3리	2009-07-13	877	12.0	0.0	114.0	0.5	1.5	228.5
	강원도 원주시 지정면 가곡2리	2009-07-13	877	12.0	0.0	114.0	0.5	1.5	228.5
	강원도 인제군 덕적리	2009-07-14	211	0.0	0.0	150.0	0.5	1.0	129.0
	강원도 강릉시 왕산면 대기리	2009-07-31	497	0.0	0.0	109.5	0.0	1.0	131.5
	경상북도 봉화군 재산면 현동리	2009-07-13	801	81.5	0.0	71.0	0.0	0.0	66.5
	경기도 남양주시 화도읍 구암리	2009-07-15	484	250.0	0.0	1.5	141.0	2.0	268.0
경상남도 김해시 부원동	2009-07-16	253	0.5	12.0	15.5	51.0	0.0	45.5	
경상남도 마산시 구산면 심리	2009-07-17	926	11.5	7.0	101.0	11.5	77.5	211.0	

연도	지역	일자	Station	5일전	4일전	3일전	2일전	1일전	당일
2008	경상남도 창원 옹남동 귀산지역	2009-7-17	255	12.5	7.0	17.5	1.5	76.5	171.0
	경상남도 하동군 회천면 구학마을	2009-7-17	932	0.0	23.0	62.0	11.5	154.5	235.5
	부산시 동구 수정동	2009-7-16	938	6.0	9.5	4.0	28.5	6.5	80.0
	부산시 북구 만덕3동	2009-7-16	941	4.5	7	8	35.5	1.5	84
	부산시 사하구 장립2동	2009-7-17	160	10	4	23.5	3.5	84.5	217
	부산시 연제구 연산6동	2009-7-17	940	7	6.5	27	3.5	127.5	199
	전라남도 광양시 옥룡면	2009-7-17	713	27.5	9.5	47	10.5	126.5	185.5
	충청남도 공주시 연기군 서면	2008-7-20	632	0.0	2.0	25.5	0.5	0.0	182.0
	경기도 의왕시 오진동	2008-7-25	445	93.5	100.5	6.5	0.0	2.5	157.5
	강원도 양구군 남면 적리	2008-7-25	556	14.0	101.0	3.0	3.5	0.0	215.5
	경상북도 봉화군 춘양면 서벽리	2008-7-26	55	6.0	6.0	4.0	1.5	31.5	198.5
	충청북도 제천시 수산면 계란리	2008-7-26	639	2.5	0.5	7.0	2.0	82.0	149.0
	강원도 강릉시 교동	2008-7-25	105	38.0	12.5	0.0	0.0	1.0	183.5
	강원도 철원군 서면 와수3리	2008-7-25	695	12.0	76.0	16.0	5.0	0.0	189.0
2007	충청남도 천안시 병천면	2007-8-4	617	6.5	0.0	0.0	2.0	0.0	52.5
	충청남도 천안시 목천읍 지산리	2007-8-5	617	0.0	0.0	2.0	0.0	52.5	70.5
	강원도 영월군 영월읍 영흥13리	2007-8-6	121	0.0	11.5	0.0	1.5	77.0	155.5
	충청북도 제천시 송학면 입석리	2007-8-6	221	0.0	16.0	0.0	6.5	69.5	186.5
	경상남도 의령군 정곡면	2007-8-8	936	0.0	25.5	0.0	7.0	11.0	193.5
	강원도 인제읍 가리산리	2007-8-10	211	33.5	0.5	0.0	21.0	47.5	103.0
	강원도 화천군 하남면 원천2리	2007-8-10	555	34.5	0.0	0.0	37.0	114.5	220.0
	강원도 춘천시 신동면 혈동리	2007-8-10	588	40.5	0.5	0.0	29.5	98.0	114.5
	강원도 양구군 남면 가오작리	2007-8-10	556	71.5	0.0	0.0	18.0	61.5	244.5
	강원도 양구군 동면 팔랑리	2007-8-10	556	71.5	0.0	0.0	18.0	61.5	244.5

연도	지역	일자	Station	5일진	4일진	3일진	2일진	1일진	당일
2006	강원도 고성군 간성읍 진부리	2007-8-10	595	37.0	0.0	0.0	10.0	20.5	150.0
	경상남도 산청군 삼장면 평촌마을	2007-9-6	948	2.0	119.0	12.5	5.5	33.5	106.0
	진라남도 장흥 대덕면 용암리	2007-9-16	777	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	106.5
	진라남도 보성군 별교읍 척령리	2007-9-17	748	0.0	0.0	0.0	62.0	100.0	219.0
	경상북도 포항시 흥해읍	2007-9-17	804	0.0	0.0	0.0	19.5	20.5	82.0
	강원도 인제군 북면	2006-7-1	211	10.5	0.5	0.0	0.0	15.5	44.5
	경상남도 진해시 죽곡동	2006-7-10	908	2.5	0.0	0.0	51.5	106.0	152.5
	경상남도 양산시 어곡동	2006-7-10	922	2.0	0.0	0.0	21.5	86.5	150.5
	경상남도 남해군 고현리	2006-7-10	933	2.0	0.0	0.0	33.5	96.5	272.0
	경상남도 함안군 대신면 용암리	2006-7-10	903	4.0	0.5	0.0	23.0	113.0	164.5
	경상남도 함진군 봉산면	2006-7-10	945	5.5	1.5	0.5	11.0	90.0	245.5
	진라남도 고흥군 금산면 신금리	2006-7-10	749	2.0	0.0	0.0	44.0	24.5	171.0
	진라남도 곡성군 목성읍 월봉리	2006-7-10	768	6.5	1.5	0.0	9.5	31.0	101.5
	진라남도 여수시 화양면 화양리	2006-7-10	750	0.0	0.0	0.0	37.5	58.0	179.0
	강원도 강릉시 왕산면 대기3리	2006-7-12	497	8.0	1.0	8.5	45.0	1.0	60.0
	강원도 철원군 원남면	2006-7-12	323	0.5	0.0	9.5	17.0	0.0	116.0
	서울 성북구 정릉4동	2006-7-12	414	9.5	0.0	2.0	15.0	0.5	235.5
	강원도 고성군 간성읍 신안3리	2006-7-15	320	78.5	1.0	40.5	4.0	66.5	65.5
	강원도 평창군 용평면 속사리	2006-7-15	525	32.5	9.5	158.0	112.5	29.5	257.5
	경상남도 함양군 수동면 함양리	2006-7-19	912	0.0	0.0	23.0	66.0	33.0	90.5
경상남도 함양군 수동면 거창리	2006-7-18	912	0.0	0.0	23.0	66.0	33.0	90.5	
강원도 춘천 남산면 강촌리	2006-7-14	588	10.0	1.5	181.5	134.5	1.5	121.0	
강원도 인제군 덕적리 및 가리산리	2006-7-14	211	18.0	2.5	176.5	8.0	63.0	202.0	
충청북도 진천군 진천읍 사석리	2006-7-16	602	5.5	52.5	17.5	2.0	4.5	172.0	

연도	지역	일자	Station	5일전	4일전	3일전	2일전	1일전	당일
2005	강원도 평창군 봉평면 진조리	2006-7-27	660	7.5	0.0	0.0	0.0	24.0	94.5
	강원도 양구군 석현리	2006-7-27	556	0.0	0.0	1.0	0.0	1.5	130.5
	충청북도 진천군 이월면 노원리	2006-7-28	602	0.0	0.0	2.5	34.5	17.0	226.0
	충청북도 충주시 신니면 광월리	2006-7-28	619	0.0	0.0	2.0	31.5	16.5	240.0
	충청북도 충주시 소태면 양촌리	2006-7-28	620	0.0	0.0	1.0	26.5	23.0	188.5
	충청북도 단양군 영춘면 하의리	2006-7-29	638	0.0	0.5	23.0	11.0	77.5	225.0
	전라남도 강진군 작천면	2006-8-30	745	0.0	0.0	101.0	0.0	8.5	48.5
	강원도 화천군 상서면 파포리	2005-6-27	322	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	71.0
	경상북도 봉화군 석포면 대현리	2005-7-1	831	31.0	29.5	13.5	33.5	0.0	119.5
	경상북도 봉화군 상운면 구천리	2005-7-1	835	52.0	19.5	2.0	43.0	0.0	92.5
	전라북도 무주군/장수군 안성면	2005-7-2	701	3.5	15.0	6.5	0.0	58.5	117.0
	경상남도 거창군 고제면 하수리	2005-8-3	946	43.0	0.0	0.0	11.5	39.0	98.0
	전라북도 완주군 소양면 울곡마을	2005-8-3	734	0.5	0.0	1.5	22.5	49.0	106.5
	전라북도 김제시 금산면 중원마을	2005-8-3	317	9.0	0.0	26.0	30.5	30.5	158.0
	전라북도 무주군 안성면 죽장리	2005-8-3	314	38.0	0.0	0.0	23.0	38.5	312.0
	전라북도 진안군 진안읍 오천리	2005-8-3	703	21.5	0.0	0.0	31.5	28.5	219.0
	전라북도 장수군 계북면 농소리	2005-8-3	758	25.5	0.0	1.0	32.0	27.5	242.0
경상남도 사천시 곤양면	2005-8-8	917	50.5	0.0	0.0	0.0	0.0	199.0	
경상남도 고성군 상리면 고봉마을	2005-8-8	918	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	170.0	
경상남도 부산 금정구 반영리	2005-9-6	939	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	206.0	
경상북도 포항시 남구 동해면 석리	2005-9-6	816	0.0	0.0	25.5	16.0	16.0	438.0	
경상북도 경주시 양북면 장항1리	2005-9-6	859	0.0	6.5	1.5	8.5	60.0	402.5	
충청남도 천안시 입장면 양대리	2005-9-17	617	0.0	32.0	0.5	0.0	0.0	182.5	

연도	지역	일자	Station	5일 전	4일 전	3일 전	2일 전	1일 전	당일
2004	강원도 삼척시 하장면 갈전리	2004-6-19	579	0.0	0.0	0.0	16.5	0.0	43.5
	경상북도 청송군 파천면 용전리	2004-6-20	803	0.0	0.0	33.5	0.5	95.5	105.5
	강원도 평창군 평창읍 하2리	2004-6-20	526	0.0	0.0	17.5	0.5	52.0	201.0
	경상남도 창원시 북면 내곡리	2004-7-4	904	0.0	41.0	9.0	61.0	9.5	48.5
	강원도 홍천군 두촌면 칠정리	2004-7-13	522	7.5	0.0	15.0	5.0	16.5	69.5
	경상북도 상주시 공성면 우하리	2004-7-16	821	6.5	21.0	0.5	42.5	12.0	120.5
	경기도 안성시 금광면 옥정리	2004-7-16	516	18.0	41.5	1.5	3.5	94.5	107.0
	강원도도 홍천군 화촌면 주읍치리	2004-7-16	522	5.0	116.5	69.5	1.5	17.5	95.5
	강원도 홍천군 남면 유목정리	2004-7-16	573	5.5	94.5	87.5	7	42.5	136
	강원도 강릉시 강릉면 안인진리	2004-8-17	580	0.0	3.0	9.5	0.0	20.5	41.5
	전라남도 보성군 문덕면	2004-8-18	732	0.0	4.0	1.5	11.0	2.0	177.0
	경상남도 울산시 동구 염포동	2003-7-5	949	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	174.5
	전라남도 영광군 홍농읍 상하리	2003-7-11	705	79.5	16.5	7.0	106.0	51.5	73.5
	충청남도 공주시 연기군 서면	2003-7-22	612	5.5	49.0	2.0	36.5	0.0	189.0
충청북도 제천시 백운면 모정리	2003-7-25	325	0.5	0.0	98.5	14.0	3.5	92.0	
2003	전라북도 남원시 대강면	2003-8-19	729	0.0	0.0	16.5	3.0	66.0	124.5
	강원도 철원군 근남면 사곡2리	2003-8-23	323	0.0	11.5	73.0	2.5	0.0	180.0
	경상북도 밀양시 청도면 청도리	2003-9-12	813	0.0	11.5	29.0	0.0	9.5	280.5
	경상북도 경주시 양북면 봉길리	2003-9-12	859	2.0	1.5	7.5	0.0	14.5	196.5
	경상북도 김천시 대덕면 종산리	2003-9-12	809	15.5	16.5	5.0	0.0	4.0	247.0
	경상북도 울진군 원남면 덕신1리	2003-9-12	817	8.0	42.5	42.5	1.0	1.0	235.0
	경상남도 함창군 용주면 장천리	2003-9-12	945	37.0	3.5	17.0	0.0	4.0	227.5
	충청북도 단양군 단정면 북하리	2003-9-12	639	21.5	10.0	26.0	0.0	0.0	60.5
	전라남도 구례군 광의면 성삼리	2003-9-12	315	1.5	18.5	3.5	0.0	4.5	248.5

연도	지역	일자	Station	5일 전	4일 전	3일 전	2일 전	1일 전	당일
2002	전라남도 광양시 진상면	2003-9-12	932	0.0	2.5	13.5	0.0	9.0	250.0
	경상북도 안동시 임동면 갈진리	2003-9-12	819	4.5	6.5	39.0	0.0	1.0	102.0
	경상북도 영주시 평은면 강동2리	2003-9-12	837	18.0	6.0	46.5	0.5	1.0	68.0
	경상북도 청송군 안덕면 신성리	2003-9-12	836	1.5	4.5	44.5	0.0	1.5	257.5
	경상북도 영양군 토계2리	2003-9-12	801	9.0	3.0	53.0	0.0	1.0	223.5
	전라남도 여수시 안산동	2003-9-12	786	0.0	0.0	31.5	0.0	58.5	333.5
	경상북도 영양군 영양읍 무창리	2003-9-13	801	0.0	3.0	53.0	0.0	1.0	223.5
	강원도 평창군 도암면 차항2리	2003-9-13	318	36.0	24.0	0.0	0.5	123.5	103.5
	강원도 속초시 청호동	2003-9-12	625	5.5	13.5	61.5	1.0	1.0	96.5
	경상남도 거창군 북상면	2003-9-12	311	0.0	7.5	3.0	1.0	4.5	233.5
	경상남도 거창군 북상면 월성리	2002-7-5	946	2.0	0.5	0.0	4.5	0.0	174.0
	경상남도 밀양시 산내면 남명리	2002-7-5	927	11.0	1.0	19.5	0.0	0.0	91.0
	강원도 속초시 대포동	2002-7-5	520	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	162.0
	강원도 화천군 사내면	2002-8-5	519	0.0	0.0	0.0	10.0	12.0	157.5
	강원도 춘천시 북산면 추곡2리	2002-8-6	586	0.0	0.0	9.5	0.5	95.5	94.0
	강원도 정선군 정선읍 덕우리	2002-8-7	527	0.0	0.0	2.0	11.0	110.0	265.5
	경기도 여주군 대신면 친서리	2002-8-7	574	0.0	0.0	41.5	14.0	109.0	310.5
	전라북도 남원시 인월면	2002-8-7	759	0.0	0.0	0.0	0.5	136.0	211.0
	강원도 정선군 남면 무릉리	2002-8-7	563	0.0	0.0	0.5	13.5	155.5	254.5
	충청북도 충주시 가금면 하구암리	2002-8-7	630	0.0	4.0	0.0	1.0	101.0	232.5
경상남도 양산시 교동	2002-8-8	922	0.0	0.0	0.0	21.0	32.0	73.0	
경상남도 양산시 원동면 염포리	2002-8-10	922	0.0	21.0	32.0	73.0	195.0	176.0	
경상남도 창원시 북면 용강리	2002-8-10	904	0.0	15.5	36.0	64.5	126.5	142.5	
부산시 기장군 탑산면 달음리	2002-8-10	923	0.0	3.0	75.5	26.0	57.0	129.0	

연도	지역	일자	Station	5일전	4일전	3일전	2일전	1일전	당일
2001	강원도 양양군 서면 수상리	2002-8-31	593	0.0	26.0	0.0	0.5	20.0	340.5
	경상남도 산청군 산청리	2002-8-31	916	0.0	52.0	1.5	0.0	12.5	196.0
	경상남도 진주시 가좌동	2002-8-31	929	0.0	29.0	0.0	0.0	19.0	240.5
	경상남도 산청군 생초면	2002-8-31	912	0.0	29.5	10.5	0.0	20.0	209.5
	경상북도 김천시 지례면 신평리	2002-8-31	809	1.5	5.0	2.0	0.0	16.0	343.5
	경상북도 영천시대창면	2002-8-31	840	0.0	0.0	4.5	0.0	14.0	133.5
	경상북도 경주시 외동읍 문산리	2002-8-31	829	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	191.5
	전라남도 여수시 돌산읍 금성리	2002-8-31	786	0.0	0.5	0.0	0.0	8.0	237.0
	강원도 강릉시 사기막리	2002-8-31	524	0.0	3.0	0.0	0.0	11.5	481.0
	강원도 강릉시 주문읍	2002-8-31	523	0.0	4.0	0.0	0.5	6.5	364.5
	강원도도 속초시 청호	2002-8-31	625	0.0	7.5	0.0	0.0	1.0	154.0
	경상남도 함양군 북상면	2002-8-31	912	0.0	29.5	10.5	0.0	20.0	209.5
	전라북도 무주군 무풍면 금평리	2002-8-31	735	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	573.0
	경상북도 성주군 금수면 봉두리	2002-9-16	810	0.0	0.0	0.0	0.0	29.0	42.5
경상남도 함안군 군북면 명관리	2001-6-24	936	36.5	0.0	0.0	0.0	5.0	134.5	
전라북도 남원시 대강면 사석리	2001-6-24	768	10.5	0.0	19.0	0.5	5.0	155.5	
강원도 인제군 남면 어룡리	2001-7-23	585	0.0	0.0	1.0	4.0	0.5	54.0	
강원도 인제군 장남면 상남리	2001-7-23	557	0.0	0.0	0.5	3.0	99.0	145.0	
강원도 홍천군 화천면 풍천리	2001-7-23	522	0.0	0.0	4.0	4.5	140.5	160.5	
강원도 횡성군 공근면 초원리	2001-7-23	536	0.0	0.0	6.5	3.5	13.5	124.0	
경상남도 사천시 사남면 계양리	2001-7-31	917	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	91.5	
경상남도 사천시 향촌동 이치마을	2001-7-31	907	0.0	0.0	0.0	0.0	56.5	183.5	
전라남도 여수시 돌산읍 군내리	2000-7-14	786	0.0	65.0	1.5	0.0	0.0	125.5	
경상남도 김해시 생림면 나전리	2000-7-14	925	0.0	9.0	43.0	0.0	0.0	86.0	

연도	지역	일자	Station	5일진	4일진	3일진	2일진	1일진	당일	
1998	전라남도 구례군 토지면 외곡리	2000-7-15	791	137.5	20.5	0.0	0.0	61.0	108.0	
	경기도 화성시 향남면 장검리	2000-7-22	515	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	326.0	
	경상북도 성주군 수륜면 보월1리	2000-7-23	812	0.0	6.5	0.5	0.0	0.0	143.5	
	강원도도 춘천시 사북면 교탄리	2000-8-25	519	92.0	12.0	0.5	1.0	2.0	85.0	
	인천시 남동구 만수2동	2000-8-25	511	97.5	22	0.0	7	11.0	131.5	
	충청남도 서천군 문산면 금북리	2000-8-26	635	32	0.0	0.0	97.5	56.5	223.0	
	경상남도 산청군 생초면 어서리	2000-9-13	912	20.0	1.5	0.0	2.0	14.5	101.5	
	경상남도 고성군 마암면	2000-9-16	929	5.0	8.0	96.5	53.0	22.0	119.5	
	경상남도 함안군 산인면 모곡리	2000-9-16	920	2.0	14.0	96.5	42.5	16.5	140.0	
	충청북도 보은읍 죽전리, 교사리	1998-8-12	보은	2.5	13.0	11.0	6.5	108.0	407.5	
	경상북도 상주시 화서면	1998-8-11	문경	58.0	10.0	65.0	14.5	5.0	114.5	
	경기도 의정부시 장흥면	1998-8-6	동두천	30.4	0.0	14.7	72.7	146.0	208.5	
	강원도 화천군 화천읍 동촌2리	1999-8-2	춘천	45.5	7.8	11.3	31.2	237.2	182.2	
	경상북도 포항시 남구 대송면	1998-7-26	138	77.0	9.0	0.0	0.0	60.3	90.0	
	1997	전라남도 여천군 화양면 장동리	1997-6-27	여수	0.0	0.0	0.0	0.0	95.8	163.0
	1996	강원도 철원 동송읍 대마리	1996-7-26	95	71.4	21.4	0.0	21.3	0.8	224.7
1995	충청남도 공주시 중학동	1995-8-25	부여	144.0	0.0	0.0	27.0	28.5	197.0	
1991	경기도 용인군 원삼면 죽룡4리	1991-7-23	549	0.7	34.7	7.2	4.3	58.8	218.2	
	경기 수원 장안구 연무동	1991-7-22	수원	34.7	0.0	7.2	4.3	58.8	218.2	
1990	충청북도 단양군 매포읍 평동5리	1990-7-14	제천	0.0	0.0	34.8	8.5	0.0	72.0	
	경기도 인천 송림동	1990-9-11	인천	0.0	0.0	4.8	46.4	127.3	255.3	
	경기 수원시 장안구 화서동	1990-9-11	수원	0.9	0.0	0.0	14.0	276.3	239.3	

## | KEI Working Paper 목록 | 2012~2013

- 2013년**
- 2013-01 토양자원 유실 최소화를 위한 국내외 환경영향평가 사례 연구(신경희)
  - 2013-02 PM-2.5 환경영향평가 방안 연구(이영수)
  - 2013-03 지자체 적응대책 수립지원을 위한 기후변화 시나리오 자료 활용 방안(정휘철)
  - 2013-04 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련(이명진)
  - 2013-05 비전통가스 개발의 환경영향평가 가이드라인 마련을 위한 기초연구(조하나)
  - 2013-06 모니터링을 통한 친환경 계획기법의 적절성 검증 기초연구 - 도시공간에서의 stepping stone을 중심으로(최희선)
  - 2013-07 국가와 지자체의 기후변화 적응대책 실효성 제고를 위한 연계강화 방안(임영신)
  - 2013-08 KEI 환경정보체계 발전방안(전성우)
  - 2013-09 도시하천 유역의 환경평가 방법 마련을 위한 기초 연구(홍현정)
  - 2013-10 제조업 환경비용의 국제비교(조일현)
  - 2013-11 바이오가스의 재생연료의무혼합제도에 관한 해외사례 분석(조지혜)
  - 2013-12 자연경관심의제도의 현황분석 및 제도 개선방안(주용준)
  - 2013-13 층간소음 관리를 위한 기초연구(박영민)
  - 2013-14 지속가능성 관점에서의 산업구조 변화 분석(이미숙)
  - 2013-15 KEI 중국환경 중장기 연구계획 수립을 위한 기획연구(추장민)
  - 2013-16 기후변화 적응관련 취약계층 지원대책 현황조사 및 분석 연구(신지영)
  - 2013-17 한국 ODA사업의 환경평가 모니터링 현황과 해외사례 비교 연구 - 사업 종료 후 모니터링 사례를 중심으로(김태형)
  - 2013-18 국내 전략환경평가의 사회경제성 부문 기능 확립을 위한 기초연구(이상윤)
  - 2013-19 환경영향평가시의 시설별 유해대기오염물질 배출량 산정을 위한 기초연구(주현수)
  - 2013-20 지형장애물 분석을 통한 환경현황자료 작성방안(김지영)
  - 2013-21 상수원보호구역 상하류의 수변지역 관리방안 연구 - 잠실상수원 보호구역과 팔당 상수원 보호구역 구간 중심으로(김태윤)
  - 2013-22 2013 국민환경의식조사 연구(이미숙)
- 2012년**
- 2012-01 기후변화를 고려한 농업 가뭄지수 활용 및 적용 기초 연구 (이진영)
  - 2012-02 산림경영 기반시설의 주요 환경영향 - 선형사업(임도) 중심으로 (천영진 외)
  - 2012-03 방조제 건설에 따른 연안환경의 중장기 변화 평가 연구 - 아산만 수질모델링 중심으로 (김태윤)
  - 2012-04 지속가능한 지하수자원 확보를 위한 지하수보전구역 지정 연구 - 외국의 지하수 보전구역 사례 분석 (현윤정)
  - 2012-05 공공부문의 지역별 환경보호지출 및 수입통계(EPER) 추계 (조일현, 김종호)
  - 2012-06 누적영향평가 적용의 사례 분석 및 시사점 연구 (김진오)
  - 2012-07 유해성에 따른 「폐기물 종료기준」의 해외 현황 및 정책적 시사점 (조지혜 외)

- 2012-08 도시 지하공간 조성에 따른 환경영향 관리 방향 연구 (김윤승)
- 2012-09 폐기물 처리관련 업종의 여건변화가 여타 산업에 미치는 영향 분석 (신상철)
- 2012-10 미래 건강부담 추정의 영향요인 고찰- 기후변화에 따른 폭염 증가를 중심으로  
(하종식, 신용승)
- 2012-11 세일가스 국내 도입에 따른 에너지·환경 정책 수립을 위한 기초연구  
(주현수, 조한나)

※ KEI 설립 이후 현재까지의 보고서 원문은 KEI 홈페이지([www.kei.re.kr](http://www.kei.re.kr))에서 보실 수 있습니다.