| KEI | 2002 | WO-04 | 정책과제 연구보고서

연료첨가제 MTBE의 위해성 및 관리필요성에 관한 연구

2002. 10

박 용 하
조 종 수
김 미 정
공 성 호
박 정 규
정 충 섭

한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

序 言

21세기는 삶의 질을 우선하는 사회로 국가의 중요 정책은 환경보전정책과 복지정책이 될 것입니다. 특히 자연환경은 우리의 생존에 필요로 하는 다양한 기능과 물질을 제공하고 있을 뿐 아니라 정신적·문화적 자원의 보고로 인류의 영속에 절대적으로 필요한 생명의 근원입니다. 따라서 자연환경의 보전이 국민의 삶의 질 향상에 직접적으로 기여한다는 데에는 이견이 없을 것입니다.

우리는 20세기 후반 이후 선의의 목적으로 개발되고 사용되어 온 화학물질이 인류의 건강한 생활을 흔들 수 있는 여러 사례를 보아왔습니다. 농업 생산성을 높이기 위해 사용된 DDT, 절연체로 사용되어 온 PCB, 냉매로 사용해 온 CFC 등은 한동안 인류의 편리한 생활을 추구하는 유용한 물질로 사용되어 왔습니다. 그러나 금시 이러한 물질은 인류의 생존을 위협하는 물질로 그 사용이 엄격하게 제한되고 있습니다. 어제는 참으로 이롭게만 여겨졌던 물질이 내일은 잠재적인 유해물질이라는 꼬리표를 달고 있는 것입니다. 안전한 것으로 확인된 물질만을 사용한다면, 이러한 시행착오는 줄일 수 있겠으나 철저한 사전 안전성의 검증이 어려운 것이 현실입니다.

금번 연구과제에서 다루고 있는 MTBE는 1990년대 초반 이후 자동차 휘발유의 고옥탄 기재로 사용하고 있는 물질입니다. 그러나 이 물질이 갖는 잠재적인 위해성, 물에 극소량으로 존재하더라도 유발할 수 있는 불쾌한 맛과 냄새, 토양 및 지하수에서의 높은 확산성, 그리고 낮은 생분해성으로 인하여 이 물질의 사용시 문제점이 세계적으로 광범위하게 논의되고 있습니다. 이미 미국의 14개州에서는 MTBE에 의한 지하수 오염이 문제되어 MTBE의 사용을 단계적으로 금지하고 있으며, 현재 MTBE의 규제에 대해 연방정부 차원에서 검토하고 있습니다. 반면에 유럽과 일본에서도 MTBE에 대한 논의가 이루어졌으나 국가차원에서 구체적인 규제는 하지 않고 있습니다. 국내에서도 1993년 무연휘발유 공급의 의무화에 따른 MTBE 사용이 본격화에 됨에 따라 국내 토양과 지하수에서도 MTBE가 검출되고 있습니다. 그럼에도 불구하고,

우리나라에서는 MTBE에 대한 정책방향이 수립되지 않았을 뿐 아니라 전문가들 간에도 이에 대한 충분한 논의가 이루어지지 않고 있습니다.

금번 연구과제에서는 MTBE의 국내 관리 필요성을 논의하였습니다. 연구의 목적을 달성하기 위해서 세미나를 개최하여 MTBE의 유용성과 잠재적인 위해성 등에 대해서 국내 전문가의 다양한 의견을 수렴하였으며, 국내 토양 및 지하수에서의 MTBE 검출 결과, 외국의 정책동향을 종합적으로 고려하였습니다. 본 연구 결과를 얻기까지 본 과제를 수행한 연구진, 자문진, 자문회의 및 세미나에 참가해 주신 전문가, 환경부를 포함한 관련 정부 부서의 담당자들 모두에게 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

마지막으로 본 연구에서 제시하고 있는 MTBE의 관리방향은 연구의 접근방법 등에 따라 상이한 결론이 도출될 수 있으며, 이에 대해서는 향후 지속적인 연구가 이루어져야 할 것입니다. 본 연구보고서는 한국환경정책·평가연구원과 (주)EN3의 공동연구로 이루어진 결과로 본 연구의 내용은 본 연구원의 공식견해가 아닌 연구자 개인의 의견임을 밝혀드립니다.

韓國環境政策·評價硏究院

院 長 尹 瑞 成

국 문 요 약

선진 외국에서 토양 및 지하수 보전에 관한 주요 논제인 MTBE(Methyl Tertiary Butyl Ether)의 국내에서의 규제 필요성 여부에 관한 연구를 수행하였다. 금번 연구는 i) MTBE의 기능, 위해성, 미국 및 유럽 국가의 정책동향에 관한 기존 관련자료의 분석, ii)「MTBE의 위해성 고찰」,「국내 토양 및 지하수에서의 MTBE 분포」,「자동차용 휘발유 기재로서의 MTBE 활용실태 및 향후전망」,「미국 및 유럽의 MTBE 등 함산소재 관련 정책」에 대한 전문가의 원고 투고 및 세미나 발표자료의 분석, iii) 세미나 참석자의 의견 분석을 통해 이루어졌다. 특히,「국내토양 및 지하수에서의 MTBE 분포」는 본 연구의 목적 달성을 위해 국내 토양 및 지하수의 시료를 분석한 결과를 포함한 것이다.

1990년대 초반 이후 자동차 휘발유의 고옥탄 기재로 사용하고 있는 MTBE에 관한 세계적 논란의 핵심은 MTBE의 위해성, 물에 극소량으로 존재하더라도 유발할 수 있는 불쾌한 맛과 냄새, 토양 및 지하수에서의 높은 확산성, 낮은 생분해성에 있다. MTBE의 인체에 대한 위해성 여부는 현재 연구 중이나, 동물에서 확인된 결과를 볼 때, 인체에 대한 발암성, 생식독성, 그리고 내분비계 장애물질로 의심될 만한 여러 징후가 있다. 그리고 MTBE는 수용해도가 높고 토양에 잘 흡착하지 않아서 일단 토양에 유출되면 다른 휘발유 성분보다 단시간에 광범위한 지역에 걸쳐 지하수에 확산된다. 또한 낮은 생분해성은 MTBE로 오염된 지하수의 복원을 어렵게 만든다.

MTBE에 관한 규제는 국가별로 다르게 나타나고 있다. 음용수의 50% 이상을 지하수로 공급하고 있는 미국에서는 캘리포니아주, 뉴욕주를 포함한 14개 주에서 MTBE 단계적 사용금지를 공포한 바 있다. 또한 US EPA는 1999년 MTBE를 Contaminant Candidate List에 포함시켜 인체 위해성 및 출현빈도를 조사하고 있으며, 그 결과에 따라 연방정부의 규제 기준을 설정할 계획이다. 반면, 유럽과 일본에서도 미국의 영향을 받아 MTBE 사용 여부에 대한 검토를 하였으나 오염물질로서 MTBE를 규제 하지

않고 있다.

국내에서는 1993년 무연휘발유 공급의 의무화에 따라 MTBE의 사용이 본격화되어 MTBE의 환경배출이 가속화되고 있다. 2001년도 현재 6.6−11.6vol%의 비율로 휘발유에 혼합되어 대기오염 저감에 MTBE가 기여하고 있는 것으로 추정된다. 반면에, MTBE의 사용에 따른 부작용으로 국내의 토양 및 지하수에서 MTBE가 발견되고 있다. 유류저장탱크 및 배관의 부식으로 인하여 휘발유로 오염된 5곳의 국내 토양과 지하수 내에서 심각한 수준의 MTBE가 검출되었으며, 지하수에서 검출된 MTBE 농도는 미국의 음용수 권고치보다 100−1,000배정도 더 높은 것으로 나타났다.

국내 전문가 및 세미나 참석자의 의견, MTBE의 위해성 여부, 국내 토양 및 지하수에서의 MTBE 검출결과, 외국의 정책동향을 종합적으로 고려할 때, 현시점에서 MTBE의 사용을 금지하는 것은 성급한 결론일 것으로 사료된다. 현재까지 MTBE의 위해성에 대한 확실한 결론이 내려지지 않았으며, MTBE에 의한 대기오염도 저감 효과, 국내의 전반적인 토양 및 지하수에서의 MTBE 확산 정도 및 그 영향이 파악되지 않은 상태이기 때문이다. 한편, MTBE에 관해서 논란이 되고 있는, MTBE에 의한 토양 및 지하수 오염문제는, MTBE 물질 자체보다는 적절한 관리의 부재에 기인한다고 볼 수도 있다. 따라서 MTBE 사용 자체의 규제보다는 인체에 대한 안정성이 확인되지 않은 MTBE의 잠재적인 위해성과 MTBE의 환경으로의 유출을 줄이는 방향의 관리가 적절할 것이다.

현 시점에서는 토양환경보전법과 먹는물관리법 또는 지하수법에 MTBE를 등재하여 관리하는 것이 바람직하리라 사료된다. 이러한 방향의 관리는, MTBE를 당장 금지시킴으로써 발생되는 손실을 막고, 토양 및 지하수의 MTBE에의 노출을 예방하고 최소화하는데 기여할 것이다.

향후 과제로서는 다음과 같은 사항이 포함될 수 있을 것이다. 첫째, 국내 토양 및 지하수의 MTBE오염 현황 조사이다. 둘째, MTBE의 환경으로의 누출을 최소화하기 위한 MTBE저장탱크 관리강화이다. 셋째, 토양과 지하수 유용 자원을 확보하기 위한 MTBE 확산지역의 복원이다. 넷째, 장기적으로는, MTBE 대체물질 및 대체연료의 개발이다.

차 례

제1장 서론 ····· 1
1. 연구의 배경 및 필요성 ····· 1
2. 연구의 목적 및 범위 ····· 3
3. 연구 방법 ····· 3
제2장 MTBE의 특성과 이용 ····· 5
1. MTBE의 특성과 역할 ····· 5
2. 도입배경 ····· 11
3. 수요현황 ····· 16
제3장 MTBE의 위해성 ····· 21
1. 인체에 대한 영향 ····· 22
2. 생태계에 대한 영향 ····· 26
3. MTBE의 위해성 평가 ····· 28
제4장 국내 토양 및 지하수에서의 MTBE 분포 ····· 33
1. 오염물질로서의 MTBE에 대한 연구동향 ····· 33
2. MTBE 오염도 분석의 의의 ····· 35
3. 실험 및 분석 ····· 35
4. 결과 ····· 38
제5장 국가별 MTBE 관리 동향 ····· 43
1. 미국 ····· 43
2. 유럽 ····· 58
3. 일본 ····· 60
4. 국내 ····· 60
제6장 MTBE의 국내관리 필요성 검토 ····· 61
제7장 결론 ····· 67

참고문헌 ····· 71
Abstract ····· 81
집필자 약력 ····· 85

표 차 례

<표 2-1> MTBE의 물리화학적 성질 ····· 6
<표 2-2> 서울지역의 연도별 대기중 일산화탄소의 농도 변화 ····· 11
<표 2-3> 미국에서의 MTBE 도입일지 ····· 13
<표 2-4> 유럽에서의 MTBE 도입일지 ····· 14
<표 2-5> 우리나라에서의 MTBE 도입일지 ····· 15
<표 2-6> 일본에서의 MTBE 도입일지 ····· 15
<표 2-7> 세계 MTBE 수급 추이 ····· 16
<표 2-8> 국내 수급현황 ····· 18
<표 2-9> 생산기업 현황 ····· 19
<표 2-10> 정유사별 연간 MTBE 평균 함량 ····· 20
<표 2-11> 대기환경보전법 자동차연료 제조기준 변천 ····· 20
<표 3-1> MTBE에 대한 맛과 냄새 연구결과 ····· 23
<표 3-2> IARC 발암성분류 ····· 25
<표 3-3> MTBE 대사산물의 독성영향 ····· 26
<표 3-4> MTBE의 어독성자료 ····· 27
<표 4-1> 샘플링 현장 자료 ····· 38
<표 4-2> 국내 휘발유 오염 지역의 BTEX 및 MTBE 농도 분석 ····· 39
<표 5-1> 미국내 RFG 사용지역 ····· 45
<표 5-2> Contaminant Candidate List(CCL) ····· 51
<표 5-3> UCMR 오염물질 ····· 52
<표 5-4> 연방 정부의 MTBE 사용 금지에 대한 움직임의 역사 ····· 53
<표 5-5> 주정부의 MTBE 관리 현황 ····· 55
<표 5-6> MTBE 금지 행정명령 ····· 56
<표 5-7> 미국의 MTBE 사용금지 예정 지역 ····· 57

<표 5-8> 주 정부별 MTBE 사용 금지 동향 ····· 58
<표 5-9> 유럽의 함산소 화합물 규제 ····· 59
<표 6-1> 설문조사 결과 ····· 65

그 림 차 례

<그림 2-1> MTBE 제조 반응식 ····· 6
<그림 2-2> MTBE의 자동차 배출가스 영향 ····· 9
<그림 2-3> 함산소화합물의 오염물질 저감효과 ····· 10
<그림 2-4> MTBE의 미세입자 저감효과 ····· 10
<그림 2-5> 자동차용 휘발유 성분의 오존 생성 ····· 11
<그림 4-1> 국내 휘발유 오염 토양 내 MTBE 분석 ····· 40
<그림 4-2> 국내 휘발유 오염 지하수 내 MTBE 분석 ····· 42

제1장 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

자동차용 휘발유는 비교적 분자량이 적은 200여종 이상의 탄화수소(탄소수 4~12 정도)로 구성되어 있다. 이들을 화학적 구조로 대별하면 파라핀계, 나프텐계, 올레핀계, 방향족계로 분류할 수 있다. 이들 다종 탄화수소의 혼합비율이 정제공정에서 벤젠, 올레핀, 방향족 등의 환경규제 성분과 연료로서 요구되는 성능에 맞춰 조정되고 있다. 요구성능 중 특히 자동차용 휘발유에서 가장 중요시되고 있는 항목이 주행시의 이상폭발을 일으키게 하지 않는 안티녹크성(Antiknock property)이다.

안티녹크성은 통상 옥탄가로 나타낸다. 일반적으로 옥탄가는 방향족계가 가장 높으며, 올레핀계, 나프텐계, 파라핀계 순이다. 옥탄가를 향상시키기 위해서는 탄화수소의 혼합비율을 고려한 정제방식에 의존할 수 있다. 그러나 생산원가의 상승과 수율의 감소를 피할 수 없고 환경규제 항목인 방향족과 올레핀 사용이 제한되기 때문에 탄화수소의 조성비율만으로 옥탄가를 만족시키기 곤란하다. 따라서, 자동차에서 요구되는 옥탄가를 충족시키기 위해서는 탄화수소 이외의 옥탄가 향상제가 필요하다. 4에틸납(TEL, Tetra Ethyl Lead)은 미량의 혼입으로 자동차용휘발유의 성상은 거의 변화시키지 않고 옥탄가만을 효과적으로 상승시키는 첨가제로서 90년대 초반까지 주로 사용되어 왔다. 그러나, 납은 인체에 유해한 중금속인 한편 배출가스 저감을 위한 차량 촉매에 악영향을 끼치는 것으로 밝혀져 납이 첨가되지 않은 무연 휘발유가 요구되었으며, 지금까지 미국과 대부분의 유럽국가 및 한국, 일본, 홍콩, 말레이시아, 싱가포르, 태국, 뉴질랜드 등에서 휘발유의 완전 무연화가 이루어졌다.

이러한 무연화가 진행되면서 TEL을 대체할 수 있는 고옥탄 기재로서 MTBE(Methyl Tertiary Butyl Ether)가 도입되었다. 미국에서 1992년부터 일산화탄소 기준 미달성 지역 41개 도시에 함산소 기재를 산소함량으로 2.7vol% 이상을 혼입하도

록 하는 내용으로 대기정화법(CAA, Clean Air Act)이 개정되어 MTBE가 본격적으로 사용되기 시작하였으며, 유럽 및 일본 등에서도 영향을 받아 고옥탄 기재로서 자동차용 휘발유에의 MTBE 혼입이 급속히 확산되었다. MTBE는 광화학반응성이 낮아 대기오염을 초래하지 않으며, 자동차 배출가스에서의 일산화탄소와 HC(Hydrocarbon)를 저감시킴으로 해서 환경 친화적인 자동차용 휘발유 기재로서 성능을 발휘하였다.

그러나 자동차용 휘발유에 함산소기재 혼입을 최초로 의무화하였던 미국에서 1995년 Santa Monica의 식수원에 MTBE가 검출된 것을 시작으로 MTBE의 유해성에 대한 논란이 촉발되었다. 이 물질에 의한 지하수 및 지표수 오염은 미국 전역의 1 만여 지역에서 발견되어 MTBE에 의한 음용수원의 오염이 심각한 문제로 대두되었다. 1997년 North Carolina 주의 연방 법원은 두 군데의 mobile home park에서 거주하는 주민들이 제기한 음용수의 MTBE 오염에 대한 재판에서 950만 달러와 공개되지 않은 액수의 금액을 피해 보상으로 지불하라는 승소 판결을 내렸다. MTBE 사용금지에 대한 많은 논쟁 속에 결국 캘리포니아주는 MTBE 사용을 2002년 12월 31일 이후에는 금지시키는 행정명령을 공포하기에 이르렀으며, 기타 뉴욕주 등 13개 주에서 시기는 다소 차이가 있으나 MTBE 사용금지를 결정하게 되었다.

한편, 유럽과 일본에서도 미국의 영향을 받아 MTBE 사용 여부에 대한 검토를 착수하였다. 그러나 미국과는 달리 지하수 오염상황, 저장탱크 누출정도 및 식수원의 차이로 MTBE 오염은 문제가 되지 않는 것으로 판명되었으며, 지하저장탱크의 관리 중요성을 제안하고 MTBE 규제는 하지 않는다고 발표하였다.

국내에서도 1993년 무연휘발유 공급이 의무화되면서 MTBE 사용이 본격화되어 2001년도 현재 6.6-11.6vol%의 비율로 휘발유에 혼합되고 있다. MTBE의 도입은, 매년 증가하는 자동차수에도 불구하고 대기중의 일산화탄소를 오히려 감소시키는 등 대기오염의 저감에 공헌하고 있다. 그러나 국내에도 지하유류저장 탱크의 누유에 의한 토양 및 지하수 오염이 가속화되고 있어 MTBE에 의한 오염이 우려되는 실정이다. 최근 국내에서도 MTBE의 수질오염에 의한 인체 유해성에 대한 문제점이 일부에서 제기되어 이에 대한 본격적인 논의가 예상되고 있지만 MTBE에 대한 인식과 연구가 국내에서는 미흡한 실정이다. 국외의 동향을 비추어 보면 국내에서도 MTBE 문제를

더 이상 간과할 수 없으며 MTBE 사용과 관련한 전반적인 검토와 논의가 필요한 시점이다.

2. 연구의 목적 및 범위

본 연구는 MTBE와 관련된 제반사항을 검토하고 현시점에서 국내에서 MTBE를 오염물질로서 관리하는 것이 필요한가에 대한 논의를 하고자 한다. MTBE에 대한 정책방향은 자동차 배출가스에 의한 대기질, 자동차용휘발유 가격과 물가, 정유·석유화학산업, 국내 에너지·환경 정책 등 여러 분야에 광범위하게 영향을 끼친다. 그러므로 MTBE의 관리에 관한 논의는 여러 각도에서 바라보는 폭넓은 이해와 의견교환이 요구된다고 하겠다.

본 연구에서는 먼저 자동차용 휘발유의 기재로서 MTBE의 역할 및 대기환경에 대한 순기능을 반추하고, 현재 많은 논란이 되고 있는 MTBE의 인체건강 및 환경에 미치는 영향에 대한 연구결과와 각 노출경로에 따른 위해성평가 결과를 조명하고자 하였다. 그리고 미국을 비롯하여 유럽, 일본의 규제동향을 검토하고 국내에서의 MTBE 오염 현황 등을 조사하였다. 마지막으로, 앞서 고찰한 내용과 세미나의 토론 내용 등을 참고하여 현 시점에서 국내에서 MTBE를 오염물질로서 관리하는 것이 필요한 것인지에 대해 판단하고자 하였다.

3. 연구 방법

본 연구는 「연료첨가제 MTBE의 위해성 및 관리 필요성에 관한 세미나」에서 발표된 주제발표와 토론 내용, 그리고 세미나 참석자들에게 실시된 설문결과를 토대로 하였다. 주제발표는 MTBE의 위해성평가, 국내토양 및 지하수에서의 MTBE 분포, 자동차용 휘발유의 기재로서 MTBE의 활용실태 및 향후전망, 미국 및 유럽의 MTBE 등 함산소제 관련 정책 등 4개의 주제에 관하여 이루어졌으며 주제발표가 끝난 후에 토

론자들이 의견을 피력하는 기회를 가졌다. 향후 우리나라의 MTBE에 관한 정책에 관한 설문조사에 응한 인원은 25명이었다.

제2장 MTBE의 특성과 이용

1980년대 후반부터 미국과 유럽에서 대기환경 개선과 인체건강을 위하여 자동차용 휘발유의 무연화를 추진하면서 휘발유의 옥탄가를 유지할 수 있는 대체 기재 도입이 시급한 문제로 부상하였다. 이 과정에서 옥탄가가 높고, 물리화학적 성상이 자동차용 휘발유와 유사한 점에 착안하여 에테르계 함산소화합물인 MTBE를 주목하게 되었으며, 1992년 미국 대기정화법(CAA) 개정에 의해[1] 본격적으로 사용하기 시작하였다. 이후 자동차용 휘발유의 무연화를 배경으로 유럽, 일본 및 우리나라에 도입되었으며, 현재 자동차용 휘발유의 무연화를 시행하고 있는 대부분의 나라에서 MTBE를 사용하고 있다.

1. MTBE의 특성과 역할

가. 특성

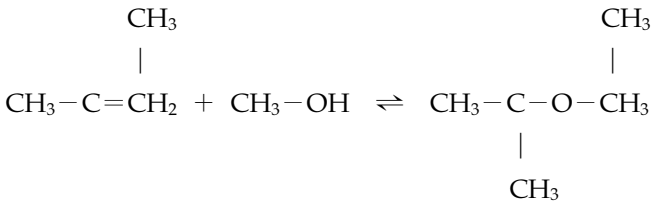
일반적으로 생산되는 MTBE는 비교적 온화한 운전조건에서 강산성의 양이온 교환수지 등의 산촉매하에서 Iso-butylene과 메탄올을 반응시켜 제조한다<그림 2-1>. 원료인 Iso-butylene은 주로 납사 분해공정 또는 중질유 분해공정에서 부생되며, Butane의 이성화, TBA의 탈수화에 의해 제조되기도 한다(Konishi, 1992).

MTBE는 산소의 결합에 의해 일반적인 탄화수소보다 극성이 다소 크고, 실온에서 휘발성의 무색액체로 점도가 낮고, 가연성이며, 공기와 폭발성의 혼합물을 형성할 수 있다. 물에 대한 높은 용해도는 휘발유에 포함된 다른 유독성 물질보다 30배정도 높다. 다른 탄화수소, 에테르 및 알코올에 대한 용해도가 매우 높아서 알코올 연료의 가장 큰 단점인 수분 흡수 및 물에 의한 상분리 문제가 없으며, 옥탄가가 높고 석유류

1) 일산화탄소 기준 미달성 도시에 산소함유량 2.7wt%이상의 자동차용 휘발유 판매 의무화

제품과의 혼합성이 좋아 함산소화합물 중 자동차용 휘발유 기재로서는 가장 적절한 것으로 알려져 있다<표 2-1>.

Iso-butylene **MeOH** **MTBE**



<그림 2-1> MTBE 제조 반응식

<표 2-1> MTBE의 물리화학적 성질

물리적 상태		내 용
분자식		$CH_3OC(CH_3)_3$
분자량		88
색상		무색
비중		0.740
발열량 (J/kg)		3.52×10^7
비열 (J/kg)		2.13
비점 (℃)		53.6-55.2 (55.2)
인화점 (℃)		-28
점화온도 (℃)		224
옥탄가	RON	118
	MON	101
증기압 (Pa at 25℃)		32,659-33,545

주 : RON(Research Octan Number), MON(Motor Octan Number)

<표 2-1> MTBE의 물리화학적 성질(계속)

물리적 상태	내 용
수용해도(g/kg at 20℃)	48
유기용매 용해도	Hydrocarbon, Ethers, Alcohols에 잘 용해

자료 : Konishi (1992)

나. 역할

MTBE는 그 자체의 물리화학적 특성으로 인하여 옥탄가가 높아 차량의 주행성능을 양호하게 하고, 산소를 함유하고 있어 완전연소에 도움이 되며, 증기압이 낮아 자동차용 휘발유의 휘발성 유기 화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds) 배출 저감에 도움이 된다. 또한 유해물질인 방향족이나 올레핀 및 황성분을 함유하지 않아서 MTBE를 자동차용 휘발유에 혼입하게 되면 이들 유해물질의 함유량도 상대적으로 저감된다. 따라서 MTBE는 이들 유해물질에 의한 차량 연소실 침전물 생성과 배기가스 후처리장치 부식을 완화시킬 수 있어 전체 차량 오염물질 배출량의 감소에 간접적으로 기여하게 된다.

한편, 대기환경 보호차원에서 옥탄가가 높은 방향족 화합물과 벤젠의 함량이 제한되면서, 옥탄가를 보완하기 위한 대응책으로 MTBE가 더욱 주목받고 있다. 휘발유 중에 존재하는 MTBE는 산화촉매인 제2구리 이온에 대하여 금속 불활성제로 작용하여 연료의 산화안정성을 연장시키는 효과도 있는 것으로 일부 연구결과에서 밝혀진 바 있다(일본석유학회지, 1985).

MTBE에 대한 연구는 미국을 중심으로 유럽, 일본 등에서 여러 가지 각도에서 다양하게 수행된 바 있다. 연료품질과 자동차에의 영향과 주행성능에는 큰 영향이 없는 것으로 밝혀졌으며, 특히 옥탄가와 배출가스에 대해서는 대부분의 연구에서 공통적으로 긍정적인 영향을 끼치는 것으로 밝혀졌다.

1) 옥탄가(Octane Number) 향상

옥탄가는 저속시의 옥탄가를 RON(Research Octane Number)으로, 고속시의 옥탄가를 MON(Motor Octane Number)으로 나타내는데, MTBE의 혼합에 의해 RON, MON 모두 증가함에 따라 저속 및 고속시의 운전성 악화를 개선시킨다(Taniguchi, 1979). 특히 접촉개질유를 다량 배합한 휘발유의 경우 경질분의 옥탄가가 중질분의 옥탄가에 비하여 상대적으로 매우 낮은 옥탄가 편중현상을 발생시키는데, MTBE는 경질유분이면서 고옥탄 유분이기 때문에 이러한 옥탄가 편중을 해결하는데에 적합한 것으로 알려져 있다.

2) 배기가스 개선

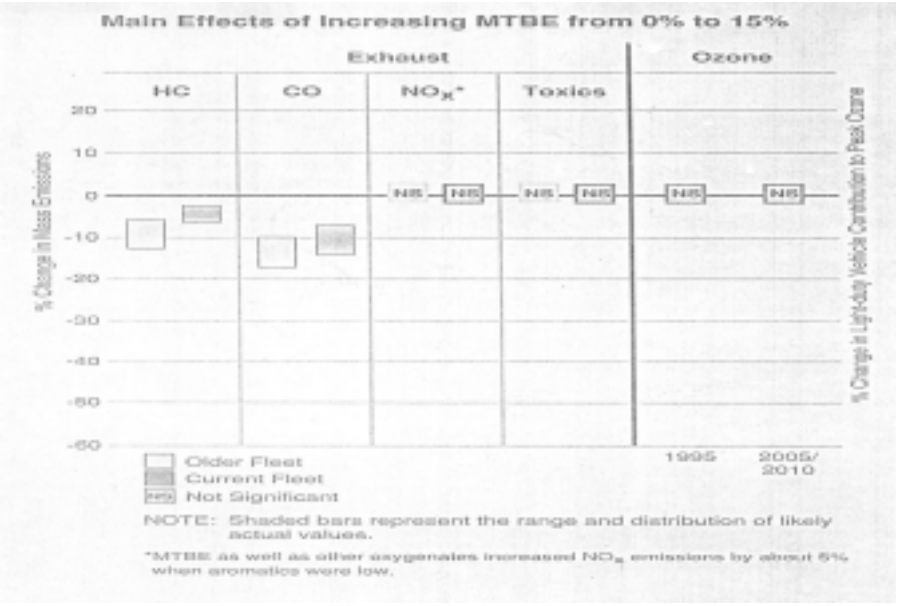
자동차에서의 배기가스 배출은 차량의 종류 및 MTBE 혼입량에 따라 배출경향이 다소 다르게 나타난다. 미국의 Auto-Oil 프로그램에 의하여 MTBE를 산소함량으로 2.7wt% 첨가 시 탄화수소 배출은 5-9% 감소시키며 일산화탄소 배출은 11-14% 감소시키는 것으로 밝혀졌다. 질소산화물 배출은 거의 영향을 받지 않은 것으로 밝혀졌으나, 낮은 방향족 함량 연료에서는 약 5% 증가한다<그림 2-2>.

MTBE 사용시 자동차 배출가스의 유해물질 및 미세입자의 배출도 저감시킨다. MTBE 등 함산소화합물을 산소함량으로 2.1wt% 혼입한 개질휘발유(RFG, Reformulated Gasoline)을 사용할 때 자동차 배출가스 중의 유해물질은 18%, 일산화탄소는 12% 감소시킨다<그림 2-3>. MTBE를 11vol% 함유한 자동차용 휘발유를 사용할 때 미세입자의 배출을 42% 저감시킨다<그림 2-4>.

함산소 화합물과 자동차용 휘발유 중의 주요성분들이 대기 중에 배출되었을 때의 오존 생성 경향에 대한 실험 결과에서는, MTBE는 오존생성과는 거의 무관한 것으로 나타났다<그림 2-5>. 비교적 경질의 올레핀과 중질의 방향족 성분이 오존생성에 크게 기여하며, 함산소화합물과 파라핀탄화수소는 오존생성 경향이 극히 작다.

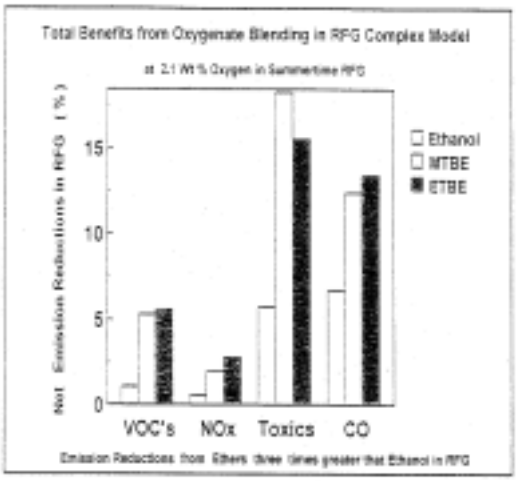
MTBE의 사용이 대기질 개선에 공헌하는 것은 실례에서도 나타난다. 미국 EPA 조사결과에 의하면 MTBE 혼입 개질휘발유 사용으로 1995년 이후의 스모그 발생빈도가 15% 감소되어 차량 7만대를 없애는 효과를 본 것으로 나타났다(University of

California, 1999). 우리나라 일산화탄소 오염도의 경우에도 자동차 사용대수의 급속한 증가에도 불구하고 매년 감소 추세에 있다<표 2-2>. MTBE를 사용하지 않았던 1992년도 서울의 일산화탄소 농도가 1.9ppm에서 의무적으로 사용하기 시작하였던 1993년도에는 오염도가 1.5ppm으로서 0.4ppm이나 대폭적으로 감소된 점은 주목할 만하다. 서울은 오염물질 배출에 있어 자동차에 의한 오염원이 85%를 점유하고 있고, 특히 우리나라 일산화탄소의 배출은 자동차의 기여도가 90%를 상회하기 때문에 MTBE에 의한 대도시 일산화탄소 배출의 대폭적인 저감효과는 통계적으로 볼때 상당한 근거가 있는 것으로 판단된다.



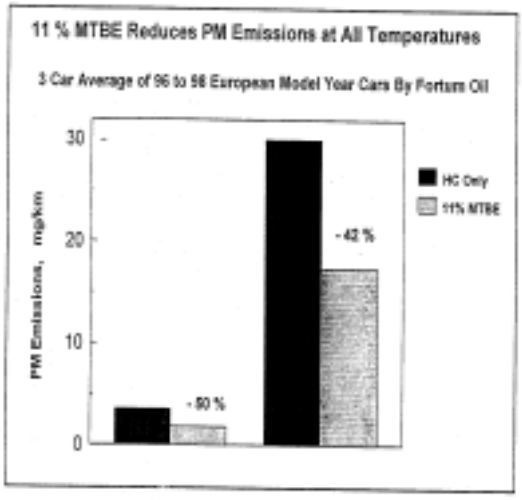
<그림 2-2> MTBE의 자동차 배출가스 영향

자료 : AQIRP (1997)



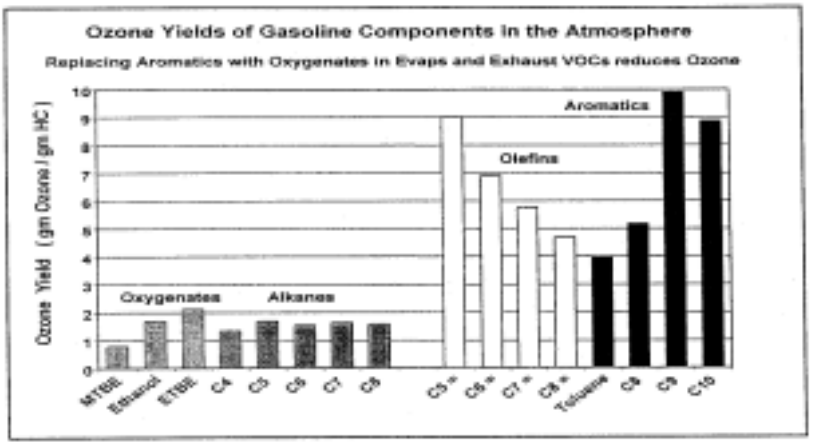
<그림 2-3> 함산소화합물의 오염물질 저감효과

자료 : Piel (2002)



<그림 2-4> MTBE의 미세입자 저감효과

자료 : Piel (2002)



<그림 2-5> 자동차용 휘발유 성분의 오존 생성

자료 : Piel (2002)

<표 2-2> 서울지역의 연도별 대기중 일산화탄소의 농도 변화

년도	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00
농도 (ppm)	1.9	1.5	1.5	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0

자료 : 대기환경연보 (2001)

2. 도입배경

가. 미국

MTBE가 자동차용 휘발유의 옥탄가 향상제로서 주목되기 시작한 시점은 1951년의 제3회 세계석유회의에서 발표된 것이 최초이다. 상업장치로서는 한참 뒤인 1973년에 이탈리아의 ANIC사가 최초이다. 그 후 1976년에 서독의 Huels사가 기업화하였다.

미국에서는 1979년에 ARCO Chemical사가 MTBE가 7vol% 혼입된 휘발유의 사용을 미국 환경보호청(US EPA, U. S. Environmental Protection Agency)으로부터 최초로 허가를 받은 이래로 동사와 Phillips사가 본격적인 상업장치를 개발하였다. 당시 저연화에 따른 옥탄가 향상 기재로서 볼 때 알코올과 에테르 중 제조면에서 알코올측이 유리하였다. 그러나 알코올이 친수성으로서 수분의 혼입에 의한 상분리 문제가 대두됨에 따라 취급상의 우위로 MTBE를 포함한 에테르류가 각광을 받게 되었다.

1981년 MTBE를 포함한 에테르류를 TBA(Tertiary Butyl Alcohol)와 동류로 간주하여, 사용이 허가된 TBA 7vol% 혼합휘발유의 함산소량 2wt%에 상당하는 MTBE 11vol%를 자동차용 휘발유에 혼합할 수 있도록 EPA가 허가하였다. MTBE는 종래의 자동차용 휘발유 기재와 동일한 취급이 가능하여 자동차용 휘발유의 대체물질로서, 동시에 자동차용휘발유의 무연화 요구에 대응한 옥탄가 향상 기재로서 본격적인 생산이 시작되었다. 특히 일산화탄소의 배출량에 큰 영향을 갖는 것으로 주목되는 방향족 성분의 엄격한 규제가 가해짐에 따라 MTBE는 중요한 옥탄가 향상성분으로서 더욱 주목받게 되었다. 1988년에 EPA는 Sun Refining & Marketing사가 수행한 실험결과를 검토하여 MTBE가 15vol% 혼입된 휘발유의 사용을 허가하기에 이르렀다.

90년대에 들어서면서 MTBE의 수요는 급증하게 된다. 1990년 11월, 대기정화법(CAA)이 13년만에 개정되어 1992년 11월부터 일산화탄소 기준 미달성의 41개 도시에서 동절기 4개월간은 산소함유량 2.7wt%(MTBE 환산 15vol%) 이상의 자동차용 휘발유의 판매가 의무화되었다. 1995년부터는 오존 농도기준 미달성 9개 도시에서 산소농도 2wt% 이상의 개질휘발유(RFG)의 판매가 의무화되었다<표 2-3>.

<표 2-3> 미국에서의 MTBE 도입일지

년 도	내 용
1979	ARCO Chemical사에서 EPA로부터 무연휘발유에의 MTBE 7vol%까지의 사용 허가를 획득
1981	EPA에서 MTBE를 포함한 에테르나 알코올을 TBA와 동류로 간주하여 사용을 허가함에 따라, TBA 7vol% 혼합휘발유의 함산소량 2wt%에 상당하는 MTBE 11vol%를 휘발유에 혼입할 수 있게 됨.
1986	납의 첨가제한(납첨가량 0.1g/gal)에 의해 MTBE 사용이 본격화됨.
1988	EPA에서 MTBE 15vol%(함산소량 2.7wt%)의 사용을 허가
1990	대기정화법 개정에 의해 1992년부터 일산화탄소기준 미달성 41개 도시에서 함산소연료의 사용을 의무화함
1995	1995년부터 오존농도기준 미달성 9개 도시에서 산소함량 2wt%이상의 개질휘발유의 판매를 의무화함

나. 유럽

유럽에서는 오일쇼크를 계기로 1973년부터 자동차용 휘발유에 MTBE의 혼입이 시작되었고, 그후 저연화에 따라 알킬납에 대신하여 옥탄가 향상 기재로서 서서히 혼합비율이 증가하여 왔다. 이 때문에 EEC(European Economic Community)는 1985년 각국에 MTBE 등의 함산소연료의 혼입상한치 설정에 대한 지침을 내려, 10vol% 이하는 각국에서 자유로이 사용가능하며 각국이 선언을 하면 15vol%까지 사용 가능토록 하였다. 이에 따라 영국, 프랑스 등은 MTBE 10vol%까지를 상한치로, 독일, 벨기에 덴마크, 룩셈브르크, 네덜란드 등의 국가에서는 15vol%를 상한으로 하고 있다<표 2-4>.

<표 2-4> 유럽에서의 MTBE 도입일지

년 도	내 용
1973	자동차용 휘발유에 MTBE 및 메탄올 혼입을 시작하여 70년대 중반부터 저연화에 따른 옥탄가 향상기재로서 수요 확대
1985	EEC 지침에 의해 함산소연료의 혼입 상한치 확정 (영국, 프랑스, 그리이스, 스페인은 MTBE 상한 10vol%, 서독, 벨기에, 덴마크, 룩셈브르크, 네덜란드는 MTBE 상한 15vol%)

다. 아시아

우리나라의 무연휘발유는 1986년 11월 석유사업법의 자동차용 휘발유의 품질기준에 무연휘발유가 포함되면서 도입되었다. 완전무연화는 1991년 2월 공포된 대기환경보전법 상의 「자동차연료 또는 첨가제의 제조기준」에 의하여 1993년 1월 1일부터 무연휘발유만을 공급하도록 의무화되면서부터이다. 이때 자동차용휘발유의 산소함량도 0.5wt% 이상 혼입하도록 동시에 규정되었으며, 1996년 1월부터 0.75wt% 이상, 1999년 4월부터 1.0wt%이상으로 제조기준이 개정되어 점차 사용량이 확대되었다. MTBE의 유해성 문제가 미국에서 제기되고 있는 것에 영향을 받아 2000년 1월부터 1.3－2.3wt%로서 최초로 상한치가 설정되었으며, 2002년 1월부터는 1.0－2.3wt%로 재개정되었다<표 2-5>.

일본의 경우는 개질휘발유나 FCC휘발유를 위주로 한 고옥탄가 휘발유를 기재로 하여 1983년에 자동차용 휘발유의 완전무연화가 달성되었기 때문에, 미국과 유럽에서 유연휘발유의 대체휘발유 기재로서 MTBE를 도입한 경위와는 다소 다르다. 세계최대 MTBE 제조사인 미국의 ARCO Chemical사에서 일본에 MTBE 도입을 강력히 주장하고 MTBE 도입을 승인하지 않는 것은 비관세 장벽이라고 주장함에 따라 일본의 자원에너지청이 이를 검토하게 되었던 것이다. 자원에너지청은 자국의 정제회사로부터 MTBE 도입에 대한 의견을 수렴한 다음, 1990년에 에너지총합공학연구소에 MTBE 도입에 관한 기술적 조사를 위탁하는 한편, MTBE도입에 관한 조사위원회를

설치하여 기술적, 경제적 사항 등을 종합 검토하였다. 1991년 조사위원회가 MTBE 상한7vol%를 책정하여 사용함이 타당하다는 결론을 도출함에 따라 7vol% 이하의 MTBE 혼합휘발유가 사용되기 시작하였다<표 2-6>.

<표 2-5> 우리나라에서의 MTBE 도입일지

년 도	내 용
1991	대기환경보전법 개정에 의해 1993년 1월 1일부터 완전무연화가 시행되고, 이에 따라 산소함량 0.5wt%이상의 함산소 연료의 사용이 의무화되어 1993년 1월 1일부터 도입
1995	1996년 1월 1일부터 산소함량 0.75wt%이상의 함산소 연료의 사용을 의무화함으로써 MTBE 사용량 증가
1997	당초, 1998년 4월 1일부터 산소함량을 1.0wt% 이상 사용토록 품질기준을 설정하였으나, 1999년 3월 31일까지 유예하였음.
1999	2000년 1월 1일부터 1.3-2.3wt%로서 상한치를 설정하여 최초로 MTBE 사용량을 제한
2001	2002년 1월 1일부터 1.0-2.3wt%로 하한치를 내려 MTBE 사용량 감소를 유도

<표 2-6> 일본에서의 MTBE 도입일지

년 도	내 용
1990	일본 자원에너지청에서 MTBE도입에 관한 조사위원회를 설치하여 종합 검토
1991	1991년 6월 조사위원회의 최종보고서에서 MTBE를 상한 7vol%로 사용함이 적절하다는 결론이 도출됨. 동년 8월 자원에너지청 석유부장의 통달(通達)에 의해 동년 11월 1일부터 7vol% 이하의 MTBE 혼합휘발유 인정

3. 수요현황

가. 세계 수요

세계 MTBE 수요는 1970년대 후반부터 옥탄가 향상제로 사용되기 시작하여 1992년부터 미국에서 자동차용휘발유에 함산소 연료의 혼합을 의무화함에 따라 급격히 증가하였다. 세계의 MTBE 수요는 1997년부터 연평균 8.2%로 성장하여 2000년 수요는 2,250만톤으로 증가되었는데, 이중 미국이 세계 MTBE 수요의 약 60%를 차지하고 있고, 뒤를 이어 유럽이 약 20%를 점유하고 있다<표 2-7>.

미국은 MTBE 수요량의 약 70% 정도만 생산하고 나머지 30%를 수입에 의존하고 있기 때문에 세계 최대 수입국으로 자리 매김하고 있다. 그러나 캘리포니아주가 2003년 1월부터 자동차용휘발유에 MTBE의 사용을 금지할 것으로 예상됨에 따라 미국 다수의 MTBE 제조설비들이 가동을 중지할 것으로 전망되며, 이에 따라 미국의 MTBE 수입은 대폭 줄어들 것으로 예상된다.

반면, 유럽은 2005년부터 자동차용휘발유의 방향족 함량을 현재의 42vol% 이하에서 35vol% 이하로 대폭 저감시킬 예정이다. 방향족 함량 감소에 따른 옥탄가의 하락을 방지하기 위하여 옥탄가 향상제인 MTBE 사용이 대안으로 선택될 것으로 예상되므로 MTBE 수요는 급증할 것으로 전망된다. Oxeno사는 2002년 중 가동목표로 벨기에 Antwerp에서 20만톤의 신규설비를 건설하고 있다.

<표 2-7> 세계 MTBE 수급 추이

(단위 : 천톤/년)

		1997	2002	AAGR (1997-2002)
북 미 지 역	생산능력	11,891	11,936	0.1%
	생 산	9,218	9,900	1.4%
	수 요	11,965	12,640	1.1%
	Balance	-2,747	-2,740	

<표 2-7> 세계 MTBE 수급 추이(계속)

(단위 : 천톤/년)

		1997	2002	AAGR (1997-2002)
남 미 지 역	생산능력	1,283	1,957	8.8%
	생 산	773	1,107	7.4%
	수 요	460	564	4.2%
	Balance	313	543	
서 유 럽	생산능력	3,523	3,563	0.2%
	생 산	2,453	2,320	-1.1%
	수 요	2,454	2,761	2.4%
	Balance	1	-441	
동 유 럽	생산능력	1,588	1,653	0.8%
	생 산	330	463	7.0%
	수 요	380	497	5.5%
	Balance	-50	-34	
중 동 및 아프리카	생산능력	3,552	5,709	10.0%
	생 산	2,409	3,800	9.5%
	수 요	77	136	12.0%
	Balance	2,332	3,664	
아 시 아	생산능력	2,249	2,617	3.1%
	생 산	1,619	1,930	3.6%
	수 요	2,409	3,320	6.6%
	Balance	-790	-1,390	
세 계 계	생산능력	24,086	27,435	2.6%
	생 산	16,802	19,520	3.0%
	수 요	17,745	19,918	2.3%
	Balance	-943	-398	

자료 : 석유화학(2002a)

나. 국내 수요

MTBE 국내수요는 2000년에 75만2천톤으로 최대 규모를 기록하였다. 이는 대기환

경보전법에 따른 자동차용휘발유의 산소함량이 1999년까지는 1.0%이상이었던 것이 2000년부터 0.5% 이상, 2.3% 이하로 정해져 시행된 것이 주 요인으로 작용한 것으로 보인다. 2001년 국내수요는 전년대비 14%의 감소를 보였는데 이는 2000년 하반기부터 MTBE 가격의 강세와 자동차용휘발유의 수출량 감소가 주요인으로 작용한 것으로 추정된다<표 2-8>. 2002년도의 수요도 산소함량의 최대치 규제와 MTBE 가격 강세 지속으로 인하여 증가를 기대하기에는 어려운 실정이다.

<표 2-8> 국내 수급현황

(단위 : 천톤/년)

	생 산	수 입	수 출	국내수요
1997	554	110	80	584
1998	620	130	150	600
1999	710	18	175	553
2000	791	52	91	752
2001	763	-	115	648

자료 : 석유화학(2002b)

국내 MTBE 공급은 1989년 SK의 여천설비 가동으로 시작되었으며, 현재는 5개 기업이 생산에 참여함으로써 총 71만톤/년의 공급능력을 갖추게 되었다. 국내 최대 MTBE 생산기업은 SK로 20만톤/년의 생산능력을 보유하고 있는데, SK는 생산량의 98%를 자가소비하고 있다<표 2-9>. LG-Caltex정유도 전량 자가소비하고 있으며 일부 부족분을 여천NCC와 LG MMA로부터 공급받고 있다. S-Oil의 경우 부족분을 수입 조달과 국내제품 구매로 충당하였으나, 2001년에는 수입 없이 국내 조달만으로 공급 부족을 해결한 것으로 알려졌다. LG MMA는 생산의 약 70%는 MMA 생산에 자가소비하고, 나머지는 LG-Caltex정유에 공급하고 있다. 2001년 국내 MTBE 생산은 76만3천톤으로 전년대비 4%의 감소를 보였는데, 2002년에도 여천 NCC와 S-Oil 등의 기업이 정기보수를 실시할 계획으로 당분간 생산증가를 기대하기는 어렵다.

<표 2-9> 생산기업 현황

(단위 : 천톤/년)

회 사 명	생 산 능 력	비 중
여 천 N C C	150	19%
S - O I L	60	7%
SK	200	25%
LG MMA	100	25%
LG-Caltex정유	100	12%
현대석유화학	100	12%
계	710	100%

자료 : 석유화학(2002b)

한편, 국내 MTBE 수출은 여천 NCC와 현대석유화학이 대부분 하고 있다. 2001년 기준 국가별 수출 비중을 보면 미국이 총 수출의 약 83%를 차지하고, 다음으로 일본이 6%, 태국과 싱가포르가 각각 4%를 점유하고 있다.

MTBE 사용량은, 무연휘발유 사용이 의무화되었던 1993년도에 3.3－6.6vol%에서 2001년도에 6.6－11.6vol%으로 1993년도와 비교하여 사용량이 배로 증가되었다<표 2-10>. 이는 품질기준이 1993년도 산소 함량 0.5wt%, 1996년도 0.75wt%, 1999년도 1.0wt% 이상으로 점차 사용량을 확대하는 방향으로 개정된 이유도 있지만, 무엇보다도 옥탄가가 높은 방향족 함량이 엄격하게 제한됨에 따라 옥탄가 저하에 대한 대응으로 MTBE 혼입량이 늘어난 것으로 판단된다. 연도별 대기환경보전법 자동차용휘발유 제조기준의 방향족화합물, 벤젠함량에 대한 기준강화 및 산소함량 기준 변경 내용은 <표 2-11>에 나타나 있다.

<표 2-10> 정유사별 연간 MTBE 평균 함량

(단위 : wt%, ( ) : 산소함량)

년 도	품질 기준 (산소함량)	A	B	C	D	E
1993	0.5 이상	6.6 (1.2)	4.4 (0.8)	3.3 (0.6)	3.9 (0.7)	5.5 (1.0)
1994	0.5 이상	6.1 (1.1)	5.5 (1.0)	3.9 (0.7)	7.2 (1.3)	7.2 (1.3)
1995	0.5 이상	7.7 (1.4)	5.0 (0.9)	4.4 (0.8)	15.4 (2.8)	6.1 (1.1)
1996	0.75 이상	7.0 (1.3)	6.2 (1.1)	7.3 (1.3)	13.4 (2.4)	5.8 (1.1)
1997	0.75 이상	7.8 (1.4)	5.6 (1.0)	8.2 (1.5)	7.3 (1.3)	7.5 (1.4)
1998	0.75 이상	6.2 (1.1)	5.3 (1.0)	7.3 (1.3)	5.7 (1.0)	6.1 (1.1)
1999	1.0 이상	7.4 (1.3)	6.6 (1.2)	9.6 (1.8)	6.7 (1.2)	6.2 (1.1)
2000	0.5~2.3[1)]	8.9 (1.6)	7.6 (1.4)	8.4 (1.5)	9.6 (1.7)	7.8 (1.4)
2001	0.5~2.3[1)]	8.8 (1.6)	6.6 (1.2)	6.6 (1.2)	11.6 (2.1)	7.2 (1.3)

주: 1)겨울용은 MTBE함량이 1.3-2.3 wt%

자료 : 「내부자료」, 한국석유품질검사소

<표 2-11> 대기환경보전법 자동차연료 제조기준 변천

항목 \ 적용연도	'93. 1. 1	'96. 1. 1	'99. 4. 1	'00. 1. 1	'02. 1. 1
산소함량(wt%)	0.5이상	0.75이상	1.0이상	1.3~2.3	1.0~2.3
방향족화합물 함량(vol%)	55이하	50이하	45이하	35이하	35(30)이하
벤젠함량(vol%)	6이하	5이하	4이하	2이하	1.5이하

주: ( )는 올레핀 함량을 23vol%이하로 제조하였을 경우에 해당

제3장 MTBE의 위해성

MTBE의 맛과 냄새는 일반 시민들이 MTBE 오염에 대해 가장 민감하게 반응하는 요소로서 MTBE로 오염된 물 수질을 확인하는 주요 인자 중 하나이다. MTBE에 오염된 물의 맛과 냄새는「불쾌한」,「쓴」,「용매같은」,「구토를 유발하는」등 다양한 맛을 유발하고 있으며, 이와 같은 맛과 냄새의 인식한계(역치값)는 대략 2㎍/l이다. 그러나 맛과 냄새는 개인차가 매우 큰 요소이며, 대상집단, 물의 염소화 정도, 물의 온도 등에 따라 민감한 정도의 차이가 커 MTBE의 맛과 냄새의 인식한계값은 보통 2.5－680㎍/l로 광범위하게 추정되고 있다(Prah et al., 1994; Young et al., 1996; Shen et al., 1997)<표 3-1>. 이에 미국 캘리포니아주는 MTBE의 SMCL[2]을 5ppb로 정하고 있다. SMCL은 사람의 건강에 해를 끼치지 않는 안전한 농도를 의미하는 것이 아니라, 사람들이 MTBE에 오염된 물을 마시거나 음식조리시 사용할 수 있다는 신뢰를 표현하는 수치이다.

MTBE가 체내에 들어오는 경로는 섭취나 피부접촉, 호흡을 통해서이다. MTBE는 노출에 따라 대사산물, 연소 또는 산화작용에 의한 부산물 등 다양한 화학물질로 전환된다. MTBE의 주요 대사산물로는 포름알데하이드(Formaldehyde), TBA(Tertiary Butyl Alcohol), 이소부틴(Isobutene) 등이 있다.

호흡을 통한 MTBE의 체내 이동경로는 다음과 같다. 동물실험 결과, 호흡을 통해 들어온 MTBE는 혈액을 따라 이동하여 주로 간, 신장, 뇌에 분포하게 된다(Savolainen et al., 1995; Bioresearch, 1990a, b). 대사는 주로 간에서 일어나, MTBE는 TBA와 포름알데히드로 대사된다. MTBE의 혈액내 반감기는 1시간(사람 및 동물 모두)인데 비해, 대사산물인 TBA의 반감기는 10시간(사람)으로 비교적 길어 사람에 대한 MTBE의 노출지표로 TBA가 주로 활용된다(Johanson et al., 1995). 대사작용을 거친 MTBE는 소변이나 호흡을 통해 체외로 배출되는데, 사람은 주로 호흡으로, 동물은 주로 소변으로

2) Secondary Maximum Contamination Level, 2차 최대오염수준

배출되는 양이 많다.

호흡으로 체내로 들어오는 MTBE의 체내 이동경로는 비교적 많이 밝혀져 있는데 비해, 섭취나 피부접촉으로 인한 MTBE의 체내 이동경로에 대해서는 알려진 바가 매우 적다. 그러나 일부 동물실험결과 이들 경로로 유입된 MTBE는 간, 신장, 및 뇌 이외에 근육이나 정소(精巢)에도 분포됨이 확인되었다. 특히 동물 수컷의 정소에 MTBE가 분포하는 것은 내분비계 장애물질(일명 환경호르몬)로 의심되는 증후 중 하나이므로, 향후 이에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

1. 인체에 대한 영향

가. 급성독성

MTBE의 급성독성에 관한 여러 연구결과 두통, 메스꺼움/구토, 눈과 입에 타는 듯한 통증, 기침, 어지러움, 방향감각 상실 등 다양한 급성독성 증상이 관찰된다(McCoy et al., 1995; Mehlman 1998). 그러나 대부분의 급성독성 증상이 비특이적이며, 연구 및 조사방법에 따라 그 증상이 매우 다양하며 일관성 있는 증상이 나타나지 않고 있다. 향후 급성독성 연구결과의 신뢰도를 높이기 위해 실험방법의 보완과 함께 비교할 만한 연구결과 생산이 요구된다.

일부 급성독성 연구에서는 공기의 MTBE 농도가 약 75ppm일 경우 동물의 점막이 손상됨이 확인되었다. 이는 MTBE가 사람의 폐점막에 손상을 주어 천식 등 호흡기 질환을 유발할 수 있다는 가능성을 확인시켜 주고 있으나 아직 천식 등 호흡기 질환과 MTBE의 상관관계를 밝힐만한 연구자료가 매우 부족한 실정이다. 한편 1.4－75ppm 범위의 MTBE 농도 흡입 챔버에서 성인들을 대상으로 실시한 실험에서는 주관적 증상보고나 자극의 객관적 지표 혹은 2시간 동안 50ppm에 이르기까지 어떠한 영향에 대한 증거가 없는 것으로 나타나고 있다(USEPA, 1997).

<표 3-1> MTBE에 대한 맛과 냄새 연구결과

영향	인식한계(ppb)	참고자료
냄새	680	Gilbert & Calabrese(1992)
	180	Prah *et al.*(1994)
	55(인식)	API(1993)
	45(검출)	API(1993)
	43-71	Dale *et al.*(1998)
	22	OFA(1998)
	21(검출)	Dale *et al.*(1998)
	15(40℃에서)	Young *et al.*(1996)
	5-15	Mckinnon & Dyksen(1984)
	2.5-45.4	Shen *et al.*(1997)
	1.4-132	OFA(1998)
	테르펜냄새	Gilbert & Calabrese(1992)
	용매냄새(달콤한 냄새)	Dale et al.(1998)
	용매냄새(쓴 냄새)	API(1993)
맛	39-134	Young *et al.*(1996)
	39-134	API(1993)
	24-58	Dale *et al.*(1998)
	2	Dale *et al.*(1998)
	용매맛(달콤한 맛)	Dale *et al.*(1998)
	용매맛	US EPA(1997)
	알콜맛	API(1993)

나. 만성독성

1) 신경독성

MTBE는 두통, 어지러움, 구토, 방향감각 상실 등 중추신경계에 영향을 미친다.

Hakkola등(1997)은 핀란드의 유조차 운전수 101명(모두 남성)을 대상으로 작업장노출을 조사한 바 있는데, 이때 유조차의 연료로 사용된 휘발유의 MTBE 함량은 10%이었다. 조사대상자 대부분이 운전중 피로를 호소하였으며, 유조차 운전경력이 높은 운전자일수록 호소하는 피로의 강도가 증가하였다. 조사대상자의 약 20%는 두통, 구토, 침 분비 증가, 어지러움, 호흡곤란의 증상을 겪는 것으로 확인되었다. 이 연구가 현재까지 MTBE가 인체 신경계에 미치는 영향을 조사한 유일한 연구이다.

동물실험에서 역시 MTBE가 진정효과(우울증)를 포함하여 신경계에 영향을 미친다는 사실이 확인되었다. 특히 8,000ppm의 높은 농도에서 급성 중추신경계 작용억제효과가 나타나나 이 작용은 가역적이며 일시적이었다. 그 외 MTBE의 신경독성 연구는 매우 미진한 상황으로, 관련자료가 거의 없는 실정이다.

2) 생식 및 발생독성

사람에 대한 MTBE의 생식 및 발생독성은 아직 연구된 바 없다. 실험실내에서 실시된 동물실험 연구결과 임신중에 극히 높은 농도(>2,500ppm/6시간/일)로 MTBE를 노출시키면 산모와 태아에 심각한 영향을 미친다(Conaway et al., 1985). 산모의 체중감소와 사지(四肢)의 기능저하가 일어나고, 태아의 체중감소와 사망률이 높아지며 특히 실험동물중 쥐(mouse)에서는 구개열 파괴현상이 관찰된다. 최근 연구에서는 설치류의 고환에서 MTBE 및 TBA가 내분비계 장애물질로 작용함이 일부 확인되어, 이에 대한 추후 연구결과가 주목된다(Moser et al., 1998; Day et al., 1998).

3) 발암성

사람에 대한 MTBE의 발암성 자료는 아직 없다. 그러나 쥐(rat와 mouse)에 MTBE를 장기간 경구 또는 흡입으로 노출시 암이 유발됨이 확인되었다. 쥐(Sprague-Dawley rat)에 MTBE를 경구투여시 암컷에서 림프암이 발생되었으며, 수컷의 고환에서 LCTs(Leydig interstitial Cell Tumors)가 발생되었다(Belpoggi et al., 1995; Belpoggi et al., 1998). 또한 흡입실험에서 수컷 쥐(Fisher rat)에서만 신장에 암(악성 및 양성)이 발생되었다. 또 다른 실험에서는 실험동물(CD-1 mice)에 MTBE를 흡입시

켰을 때 8,000ppm의 고농도에서 간암이 발견되었다. 이때 수컷에서는 carcinomas가, 암컷에서는 adenomas가 각각 발견되었다(Bird et al., 1997). 이와 같은 실험동물에서의 발암성자료를 근거로 미국 EPA는 MTBE의 발암가능성을 B2[3]로 분류하고 있다.

한편, WHO에 의해 운영되고 있는 IARC(International Agency for Research on Cancer)의 분류체계에서는 MTBE를 Group 3(인체발암물질로서 분류할 수 없는 물질; Not classifiable as a human carcinogen)으로 분류하고 있다<표 3-2>. MTBE의 대사물질인 포름알데히드는 IARC에 의해 2A(인체발암가능성이 높은 물질, Probable carcinogenic to human)로 분류되고 있으나, TBA는 발암가능성이 확인되지 않고 있다. 그 외 MTBE의 주요 대사산물의 독성영향은 다음 <표 3-3>와 같다.

<표 3-2> IARC 발암성분류

범주	정 의	화합물
Group 1	인체발암물질	Benzene
Group 2A	인체발암가능성이 높은 물질	1,3-butadiene, Formaldehyde
Group 2B	인체발암가능성이 있는 물질	Gasoline, Acetaldehyde, Gasoline engine exhaust
Group 3	인체발암물질로서 분류할 수 없는 물질	Toluene, Xylene, MTBE

3) 인체발암가능성이 높은 물질(Probable human carcinogen), 동물에서는 발암에 대한 충분한 증거가 있으나, 인간에게는 부적절한 증거 또는 증거가 없음을 나타냄

<표 3-3> MTBE 대사산물의 독성영향

화학물질	독성영향	인식한계	CAS 번호
Ter-butyl formate	No data available	-	762-75-4
Formaldehyde	e, m, s, sp	0.06mg/m^3	50-00-0
Methyl acetate	e, m, sp, s	10,000mg/m^3	79-20-9
Acetone	e, r, m, s	476.67mg/m^3	67-64-1
2-methoxy-2-methyl propanol	No data available	-	-
Methanol	em, s, r	22,875mg/m^3	67-56-1
Isobutene	No data available	-	115-11-7
Tert-butanol	e, s, m, sp	-	75-65-0

주: e=eye irritant, m=mucous membrane, s=skin, r=respiratory, sp=severe pulmonary

2. 생태계에 대한 영향

MTBE의 생태독성은 주로 수서생태계에서 조사되었다. MTBE 급성독성은 생물종에 따라 그 범위가 136－1,000mg/l로 매우 크며, 독성이 높지 않은 것으로 나타났다<표 3-4>. 한편 어류에 대한 MTBE의 만성영향을 살펴보면 fathead minnow에 대한 NOAEL(No Observed Adverse Effects Level, 무관찰영향농도)는 288mg/l, 무지개송어의 NOAEL은 880-1,240mg/l로 낮게 나타났다(Mancini & Stubblefield, 1997). 또한 동물성플랑크톤에 대한 NOAEL 역시 200mg/l로 낮아, 현재 지표수의 MTBE농도인 10－100㎍/l(미국 캘리포니아 기준)에서는 수서생태계에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

그 외 수서생물에 대한 생식독성, 발암성 등 만성독성을 조사한 결과, MTBE의 만성독성 역시 매우 낮은 것으로 확인되었다. 한편 MTBE를 함유한 물을 자외선 또는 과산화수소를 처리할 경우 수서생물에 대한 독성이 크게 증가됨이 일부 연구에서 확인되었으므로, 이에 대한 추후 상세한 연구가 요구되고 있다.

<표 3-4> MTBE의 어독성자료

	생물종	생태영향	농도	참고자료
박테리아	*Salmpnella typhimurium*	세포수감소 (48hrs)	7.4mg/l	Kado *et al.*(1998)
	Photobacterium phosphoreum	빛방출감소 (15min.)	41.8mg/l	Gupta & Lin (1995)
조류(algae)	*Selenastrum capricornutum*	성장저하 (5days)	4,800mg/l	Rousch & Sommerfeld (1998)
	Selenastrum capricornutum	EC50	184mg/l	BenKinney *et al.* (1997)
	Navicula pelliculosa	성장저하 (5days)	2,400mg/l	Rousch & Sommerfeld (1998)
	Synechococcus leopoliensis	성장저하 (3days)	2,400mg/l	Rousch & Sommerfeld (1998)
무척추동물	*Brachionus calyciflorus*	LC50(24hrs)	960mg/l	Werner & Hinton(1998)
	Nitocra spinipes	LC50(96hrs)	>1,000mg/l	Bengtsson & Tarkpea(1983)
	Daphnia magna	LC50(96hrs)	681mg/l	BenKinney *et al.* (1997)
	Daphnia magna	LC50(96hrs)	542mg/l	Hockett & Russell(1997)
	Ceriodaphnia dubia	생존율(5days)	LOEC:580mg/l NOEC:342mg/l	ENSR(1997)
	Ceriodaphnia dubia	생식(5days)	LOEC:342mg/l NOEC:202mg/l	ENSR(1997)
	Neomysis mercedis	LC50(96hrs)	236mg/l	Werner & Hinton(1998)
	Mysidopsis bahia	LC50(96hrs)	136mg/l	BenKinney *et al.* (1997)

<표 3-4> MTBE의 어독성자료(계속)

	생물종	생태영향	농도	참고자료
양서류	*Rana temporaris*	LC50	2,500mg/l	Paulov(1987)
어류	*Pimephales promelas*	LC50(96hrs)	672mg/l	Geiger *et al.* (1981)
	Pimephales promelas	LC50(96hrs)	706mg/l	Veith *et al.* (1983)
	Pimephales promelas	성장저하 (7days)	LOEC:388mg/l NOEC:234mg/l	ENSR(1997)
	Pimephales promelas	LC50(96hrs)	929mg/l	BenKinney *et al.* (1997)
	Menidia beryllina	LC50(96hrs)	574mg/l	BenKinney *et al.* (1997)
	Alburnus alburnus	LC50(96hrs)	>1,000mg/l	Bengtsson & Tarkpea(1983)
	Onchorhynchus mykiss	LC50	887mg/l	Hockett & Russell(1997)

자료 : Werner and Hinton (1998)

3. MTBE의 위해성 평가

MTBE에 대한 동물실험 및 인체건강에 대한 연구결과 자료는 다른 유해화학물질에 비해 매우 부족한 실정이라, MTBE의 위해성에 대한 제대로 된 평가를 위해서는 기초자료 확보가 가장 시급한 문제이다. 특히 인체에 대한 영향자료는 거의 없는 실정이며, 장기간에 걸친 노출로 발생될 만성독성에 대한 연구는 전무한 실정이다. 최근 MTBE의 위해성에 대한 논란이 가중되자, 미국, 캐나다 및 핀란드에서 현재까지의 연구자료를 바탕으로 위해성 평가를 실시하였다. 위해성평가는 주요 노출경로인 대기, 지표수 및 지하수로 구분하여 실시되었으며, 인체건강 및 생태위해성평가가 모두 실시되었다. 인체에 대한 노출경로는 그 외에도 MTBE로 오염된 토양을 직접 섭취 또는

오염된 작물을 섭취할 수도 있으나, 토양에 대한 MTBE의 낮은 흡착력으로 인해 이와 같은 경로로 사람에게 노출될 가능성은 매우 희박하므로 제외되었다.

가. MTBE의 발생원 및 환경거동

1) 대기

대기중의 MTBE는 주로 MTBE의 생산, 운송, 주유 및 자동차 운전시 배출된다. 연료보급소와 같은 배출원 인근의 대기에서 MTBE 농도는 약 1,800㎍/m^3 정도였으며, 일반 대기중의 농도는 1−20㎍/m^3로 조사되었다(HEI, 1996).

2) 지표수

지표수의 MTBE 발생원은 강우로 인한 침전, 유거수(runoff), 지하수 유입, 사고로 인한 방출, 수상보트로부터의 배출 등이다. 우선 강우시 지표수로 침전되는 양은, 대기중 MTBE의 반감기가 3일[4]에 불과하여 2−4㎍/l으로 적게 추정된다(Smith et al., 1991). USGS(U. S. Geological Survey)의 조사결과에 의하면 미국내 도시 지역의 유거수에 포함된 MTBE는 1991−1995년간 약 0.2−8.7㎍/l(중간값은 1.5㎍/l)이었다. 또한 MTBE로 오염된 지하수가 지상으로 퍼올려져 다시 호수나 하천 등 지표수로 유입되는 경우가 있다. 그 외 사고로 인해 MTBE가 직접 지표수로 유입되는 경우가 발생되기도 하는데, 1997년 미국 캘리포니아주 시에라네바다 산맥에 위치한 연료수송 파이프라인의 파손으로 인해 인근 호수로 MTBE가 방출된 바 있다. 지표수 MTBE의 가장 큰 오염원은 호수 등에서의 수상보트의 운전이다. 휴가기간인 여름동안 호수 MTBE 농도는 타계절에 비해 월등히 높았다. 한 조사에 의하면 수상보트의 운전시 환경중으로 배출되는 휘발유(MTBE 포함)의 약 40%는 물로, 나머지 60%는 대기중으로 방출되는 것으로 밝혀졌다. 한편 MTBE의 수중에서의 반감기는 개울과 하천에서는 각각 2.5시간과 9.5시간, 호수에서는 137일로 보고되며, 주로 휘발에 의해 지표수에서 제거되는 것으로 추정된다.

---

4) 대기중의 MTBE 반감기는 오염된 대기에서는 3일, 청정대기에서는 6.1일로 조사됨

3) 지하수

지하수내 MTBE의 이동은 지하수 이동속도, MTBE의 농도, 배출기간, 확산 등에 따라 매우 다양하게 나타난다. 벤젠과 같은 다른 유류화합물과는 달리 MTBE는 물에 대한 용해도가 매우 높고(48g/1kg water), 토양중의 유기물질이나 토양입자에 쉽게 흡착되지 않아(K_{oc}=11.0－12.3) 지하수내에서 매우 빠른 속도로 확산된다. 또한 일반 토양에서는 미생물에 의해 분해되나, 지하수에서는 거의 생분해되지 않아 지하수에 오래 잔류된다. Zogorski등(1996)은 지하수의 MTBE 농도가 6,000,000mg/l이상의 높은 농도로 존재할 수 있음을 보고하고 있다.

나. 인체건강 노출평가

1) 대기

대기를 통해 사람에게 MTBE가 노출되는 경우는 운전중, 주유시, 또는 MTBE로 오염된 물로 샤워할 때이다. 이와 같은 노출경로를 고려할 때 미국 캘리포니아주에 거주하는 사람의 하루 대기중 MTBE 노출농도는 2.8㎍/kg(시골지역)－5.2㎍/kg(도심지역)으로 추정된다. 특히 주유소 인근에 사는 주민들은 하루 대기중 MTBE 노출농도보다 약 1.2배내지 4배정도 높은 MTBE 농도에 노출될 것으로 예상된다. 한편 직업적으로 MTBE를 다루는 유조차 운전사의 경우 170㎍/kg/일, 주유소 근로자는 100㎍/kg/일의 MTBE에 노출되는 것으로 추정된다.

2) 수질

물을 통한 MTBE의 노출은 주로 오염된 물을 마시거나 요리를 할 때 발생된다. 그 외 오염된 물로 샤워할 때 피부노출이 발생하거나 호흡으로 들이마실 수는 있으나, 이와 같은 노출경로를 통해 인체에 들어오는 MTBE양은 무시할만한 수준이다. 한 연구에서는 우리 체내의 MTBE 유입이 호흡으로 71%, 섭취로 29%, 피부접촉으로 1%가 각각 이루어진다고 밝히고 있다(Mckone, 1987).

이와 같은 인체의 노출경로를 고려하여 미국 EPA(CAL-EPA)는 MTBE의 공중보건

목표(PHG, Public Health Goal)를 14㎍/l로 제시하고 있다. 이는 MTBE로 인해 백만 명 중에 하나가 암에 걸릴 확률로서, PBPK 모델과 CalTox 시뮬레이션을 이용하여 계산된 농도이다. 만약 섭취로 50% 이상 노출된다고 가정하면 $6.8X10^{-4}$mg/kg/일, 호흡으로 50% 노출된다고 가정하면 10.1㎍/l로 추정되어, 모든 경우에도 공중보건목표(PHG) 이하인 것으로 확인되었다.

다. 생태위해성평가

MTBE는 수서생물에 대한 급성독성이 높지 않고, 생체내에서 쉽게 축적되지 않아 주로 소변이나 아가미로 배설된다. 따라서 생태위해성은 그리 높지 않아 유해계수[5]가 1이하로 나타났다. MTBE의 다른 대사산물의 유해계수를 QSAR[6]로 추정한 결과 MTBE보다는 2−6배 높게 나타났으나, 역시 1이하로 확인되었다.

---

5) Hazard Quotient로 Toxicity reference value를 ecological receptor에 대한 노출기대치로 나눈 수임

6) Quantitative Structure Activity Relationship

제4장 국내 토양 및 지하수에서의 MTBE 분포

1. 오염물질로서의 MTBE에 대한 연구 동향

휘발유가 지하수에 유입되는 경우, MTBE는 휘발유의 주성분인 BTEX와 달리 단기간에 광범위한 지역의 지하수를 오염시킨다. Benzene은 발암성 물질이기도 하며, TEX도 음용수에 들어가게 되면 음용수 섭취가 불가능하게 되므로 BTEX에 의한 지하수 오염도 크다. 그러나 BTEX는 MTBE보다는 흡착 및 자연 생분해에 의해 저감이 잘 일어나고, 수용해성도 상대적으로 높지 않아 단기간에 광범위한 지역을 오염시키지는 않는다(Schirmer, 1999).

Borden(1997)은 BTEX와 MTBE의 비교 연구를 통해 생분해(biodegradation) 경향을 나타내는 유효 일차 붕괴 계수(effective first-order decay coefficient, λ)를 MTBE 0－3.0010/일, Benzene 0.0006－0.0014/일, Toluene 0.0005－0.0063/일, Ethylbenzene 0.0008－0.0058/일, m-, p-Xylene 0.0012－0.0035/일, o-Xylene 0.0007－0.0017/일 으로 제시하여 MTBE가 BTEX보다 생분해 경향이 적음을 확인했다. Schirmer (1999)은 캐나다 보든 지역에서 MTBE와 벤젠을 비교 분석한 결과 MTBE가 자연 미생물에 의해 생분해가 가능하고 주로 생분해에 의해 농도가 저감되었지만, BTEX와는 달리 생분해가 매우 느리게 일어나서 대수층을 보호하기에 충분할 정도는 아니라고 보고하였다. MTBE가 wt10%로 혼입된 휘발유의 경우 MTBE의 수용해도는 25℃에서 약 5,000 mg/l이며, MTBE는 지하 물질에 거의 흡착이 일어나지 않아, 지하수에 의한 MTBE 유동이 흡착에 의해서 지연되기는 어렵다(Squillace et al., 1997).

국외의 경우 MTBE에 의한 지하수 및 음용수 오염에 대해서 여러 면으로의 연구가 수행되고 있다(Squillace et al., 1997; 이지훈외, 2000). MTBE에 의한 지하수 오염실태 조사를 실시하고 있으며, 오염지역 관리 및 정화 방법에 대한 연구가 진행 중이다.

USGS에서는 National Water Quality Assessment Program의 일환으로 1993－

1998년에 걸쳐 지하수내의 MTBE 수준을 관측하였다(Squillace, 1999). 그 결과 MTBE를 휘발유에 첨가해 사용하는 지역의 480개 관정 중 21%가 0.2㎍/l의 보고 수준 이상으로 검출되었으며, 이는 BTEX(4%)보다 훨씬 높은 빈도로 검출되었다. 대부분은 EPA 음용수 권고 기준보다 적었지만, 5㎍/l 이상의 농도와 권고량의 하한인 20㎍/l보다 높은 농도의 MTBE 검출이, 휘발유에 MTBE를 첨가해 사용하지 않는 지역보다 약 10배가 높았다(Squillace, 1999). EPA에서는 Santa Monica시의 음용수원인 Charnock Wellfield가 지하저장탱크 누출에 의해 MTBE로 오염된(600ppb 이상 검출) 문제를 Charnock MTBE Project란 이름으로 연구를 진행 중에 있다(US EPA, 1997).

1999년 11월 National Ground Water Association(NGWA)과 American Petroleum Institute (API) 공동으로 개최한 「유류 오염물질과 유기화학물질」이라는 강연회에서는, MTBE의 자연 저감 및 생물학적 처리벽(barrier) 방법, MTBE로 오염된 지역에 대한 상세한 특성화 및 정화 방안 등에 관련한 논문들이 발표되었다. NGWA에서는 캘리포니아 등의 MTBE에 의한 음용수 및 지하수 오염에 관련된 문제에 초점을 맞추어 60분의 공중파 방송(CBS TV)을 하였고, 「Assessment and Management of MTBE Impacted Sites」란 주제로 강연회를 개최하였다. 강연회에서는 지하저장탱크의 누출에 의해 MTBE로 오염된 지역을 관리하는 실제적이고 경험적인 접근과 MTBE 오염원 조사를 위한 현장 개념들을 다루었다. MTBE로 오염된 지역을 관리하는 전략적 조사 계획을 세우고 오염 저감 방법을 결정하는 방법이 제시되었으며, 이런 결정에서 중요한 MTBE의 유동 양상과 특성이 다루어졌다. NGWA는, MTBE에 의한 지하수 오염의 일반적인 원인은 지하저장 탱크의 누출, 휘발유 분배 시스템, 지상 연료 저장탱크로부터의 누출 등이라고 밝히고 있다.

국내의 경우 MTBE에 의한 오염은 일부 연구자에 의해 실시된 오염조사에서 보고되고 있을 뿐이며, 물리 화학적 처리 및 생물학적 처리가 최근 들어서 연구되고 있는 실정이다. 오존/초음파 조사(강준원외, 2001), Fenton 산화 공정에 의한 MTBE 제거(박석환외, 1998)와 부탄 분해 미생물을 이용한 MTBE 분해(장순웅외, 2001), TiO_2 광촉매를 이용한 MTBE 분해(이상수외, 2000), 유류 분해 균에 의한 BTEX 및 MTBE 동시분해 특성연구(김태현외, 1999), Fenton-oxidation에 의한 MTBE 처리시의 영향인자

에 관한 연구(박석환외, 1998) 등 아직은 연구 진행이 초기 단계에 있다.

2. MTBE 오염도 분석의 의의

미국, 영국 등에서는 MTBE가 토양 및 지하수 오염물질로 부각되어 오염현황조사가 이루어지고 그 처리 기술과 방법 등 연구가 활발히 진행되고 있다. 우리나라에서는 MTBE에 의한 토양 및 지하수 오염문제가 학술차원에서만 보고되고 있을 뿐 실제 토양 및 지하수에서의 MTBE 조사는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 대구시내의, 오염원이 확인되지 않은 특정 지하수 시료에서 MTBE가 11ppm에 달하는 농도로 검출된 사례가 보고되고 있다(서울대, 2002). 본 연구에서는 국내 휘발유 오염지역의 몇 곳의 토양 및 지하수에서의 MTBE 오염현황을 최초로 조사하였다. 향후 MTBE의 관리정책방향의 수립에 기초조사로 활용하기 위하여 광범위한 오염현황조사가 이루어져야 하겠으나, 이번 조사로 국내의 지하수도 MTBE오염의 위협에 노출되어 있음을 확인할 수 있었다.

3. 실험 및 분석

MTBE 분석 방법은 EPA에서 규정한 EPA Method 8020A/21B 및 8260에 의한 방법 및 US EPA Method에 근거한 ASTM Method D4815 규정이 있다. 또한 수용액 상태의 MTBE 검출은 EPA Method 6232에 의거한 Purge and Trap 분석방법도 이용되고 있다(EPA Method; ASTM Method; Achten and Puttmann, 2001).

가. EPA Method 8020A/21B

Photo Ionization Detector(PID)를 이용하여 할로겐화 화합물을 제외한 화합물의 정량, 정성 분석을 하는 방법이다. PID는 일반적인 검출기로서, 다른 물질들이나 조건들의 방해(interference)를 줄여야만 좋은 data를 얻을 수 있다. 보통의 PID 램프

(10eV)는 보통의 포화상태(saturated)의 탄화수소계 물질(예를 들어 MTBE)에 충분한 에너지를 주어 이온화 상태를 만드는데, 불포화 상태(unsaturated)의 화합물은 이 에너지에 더 강한 반응을 보이므로 향후 방해요소가 될 수 있다. 또한 높은 농도의 탄화수소 화합물들도 방해 요소로 작용한다.

나. EPA Method 8260

기존의 검출기보다 명확한 데이터값을 얻을 수 있으며, mass spectrometer의 이용이 가능하다. 분석물을 electron의 충격으로 붕괴시켜 고유한 질량 파편(unique mass fragment)으로 만들어 이를 검출해내는 분석 방법이며 보다 정확한 검출 결과를 얻을 수 있다. Method 8020A나 8021B와 같이 BTEX 성분 및 TPH가 높은 농도의 샘플에서도 MTBE 분석에 매우 효과적이라는 장점을 가지고 있어서, NAPL(Non Aqueous Phase Liquid)에서의 함산소제(oxygenates)의 분석에 적합한 방법이다.

다. US EPA Methods 8020A/21B과 8260에 의거한 ASTM Method D4815

Methanol, Ethanol, 그리고 Ether-base의 oxygenates의 모니터링을 위한 분석 방법이다. 샘플은 주입된 후 switching valve를 통해 두개의 서로 다른 방향의 flow를 만들어 각각의 column을 흐르게 된다. Primary column은 극성의 성격을 가지고 있으므로 극성인 oxygenates 화합물들을 column 안에 체류시키며, 친유성 성분의 화합물들은 날려보낸다(vent off). Secondary column에서는 primary column에서 통과된 비극성 화합물들이 역류하게 되어 이를 Flame Ionization Detector(FID)를 통해 정량, 정성 분석하게 된다.

라. 본 연구에서 이용한 분석방법

본 연구에서는 앞의 EPA Method 및 ASTM Method D4815에 의거하여 토양 및

지하수의 녹아있는 BTEX, TPH, MTBE를 검출하였고, 분석기기로는 GC-FID를 이용하였다.

1) 실험재료

BTEX 추출제로 이용된 Methanol은 JUNSEI 사 99.8% 특급시약, MTBE 추출제로 이용된 Toluene은 CARLO ERBA사 99.5%를 이용하였다.

2) 실험 및 분석방법

MTBE분석은 오염된 지역의 토양 및 지하수의 샘플을 이용하여 여러 가지 용매(Hexane, Methanol, Methylene chloride, Acetone, Toluene)로 추출한 후 각 용매의 추출율을 평가하고 가장 추출율이 높은 Toluene을 추출 용매로 선택하였다(Lefkowitz, 2002; Lefkowitz et al., 2002). 토양의 추출방법은 Toluene 15ml에 토양 5g, 지하수는 Toluene 15ml에 지하수 5ml을 주입하여 vortex mixer를 이용하여 10분 동안 추출한 뒤 sonication을 1시간 동안 유지시켰다. BTEX 및 MTBE 추출은 EPA Method 3500B(Organic extraction and sample preparation)를 이용하였으며 오염 농도 계산은 EPA Method(Determination of gasoline range organics)를 이용하였다.

오염 샘플 농도 분석은 아래 식과 같다.

$$C_s(mg/kg) = \frac{A_x}{W} \times \frac{V_t}{V_i} \times CF \times D$$

C_s : Concentration of organics A_x : Units in area

CF : Calibration factor, units=mg/area D : Dilution factor

V_t : Volume of total extract(㎕)

V_i : Volume of extract added for purging(㎕)

W : Weight of sample tracked(kg)

분석기기는 FID 검출기를 장착한 6850-GC(0.53m(i.d.)×30m capillary columm)를 이용하여 분석하였으며 분석 조건은 Column : HP-5, Oven temperature : 40℃－270℃(10℃/min), Injection port temperature : 250℃, Detection temperature : 300℃로

하였다. 또한 전체 샘플은 duplicate로 만들어 결과의 평균값을 취하였다.

3) 현장 토양 및 지하수 샘플링

유류저장탱크 및 배관의 파손으로 오염된 주유소 5곳의 토양 및 지하수 샘플을 토양복원 업체를 통하여 구입한 후 A, B, C, D, E 5곳의 토양 및 A, B, C 3곳의 지하수의 BTEX 및 MTBE 오염 농도를 분석하였다<표 4-1>.

<표 4-1> 샘플링 현장 자료

주유소	설치 년도	오염원인	오염원	샘플링 위치		주변 현황
				토양	지하수	
A	1975	탱크파손	G+D	배관근처 2.5m 깊이 탱크근처 5.5m깊이	지하수위6m	산
B	1983	배관파손	G	배관근처 2.5m깊이	지하수위3.5m	산
C	1983	탱크 및 배관파손	G	배관근처 2.0m깊이 탱크근처 5.5m깊이	지하수위6.5m	아파트, 산
E	1981	탱크 및 배관파손	G	배관근처 2.0m깊이	·	산
D	1977	탱크 및 배관파손	G+D	배관근처 1.5m깊이 탱크근처 5.5m깊이	·	마을

주: 1) G=Gasoline(휘발유), D=Diesel
2) 토양과 지하수 샘플링에는 각각 지하수 채취장비(Bailer)와 토양탐사 전용장비(Geoprobe soil probing system)를 사용함

4. 결과

GC 분석결과 MTBE는 retention time 2.05－2.07분에서 검출되었고<그림 4-2, 4-3>, BTE[X]는 각각 retention time 2.80－2.90, 4.35－4.36, 6.0－6.1, [6.14－6.15, 6.58－6.59]

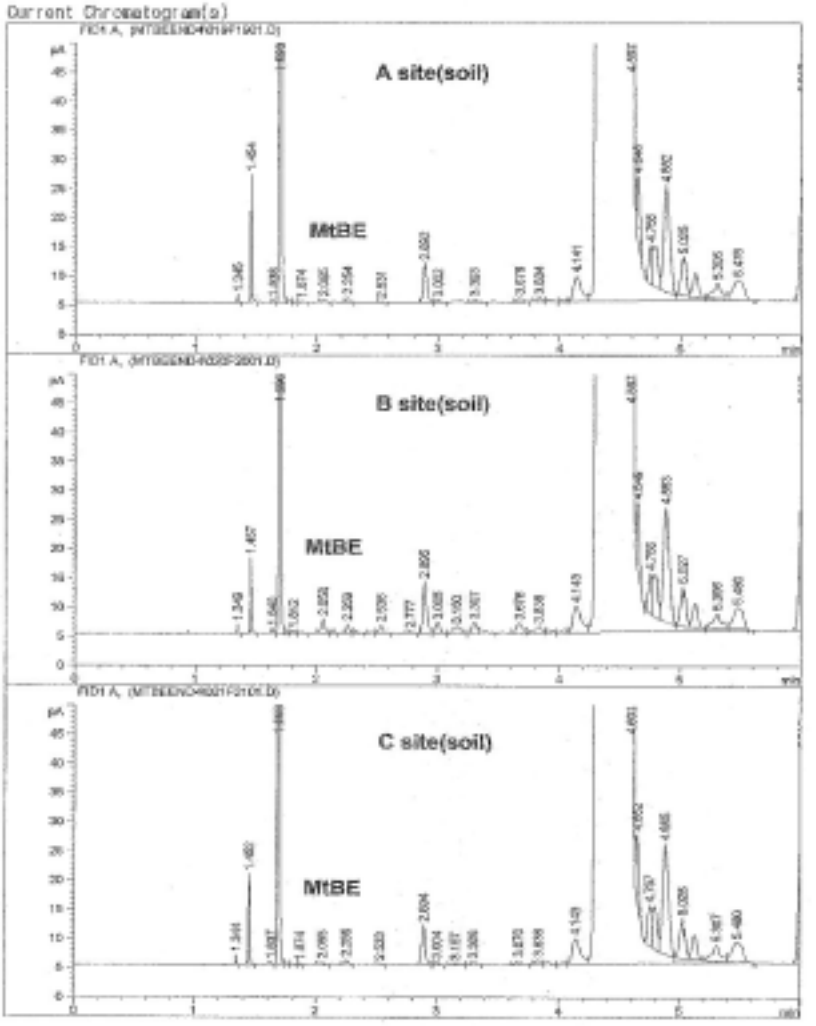
분에서 검출되었다. <그림 4-2>와 <그림 4-3>에서 가로축은 retention time을 나타내며, 세로축은 검출물질의 농도에 비례하여 나타나는 detector signal intensity(단위는 pico-ampere)를 나타낸다. 검출하고자 하는 물질의 농도는 해당 retention time에 나타나는 peak의 면적을 환산하여 얻는다. 참고로, retention time 4－5분에 나타나는 큰 peak은 추출액으로 사용하였던 Toluene에 의한 것이다.

실제 오염 토양의 BTEX 농도는 A, B, C, D, E site별로 107.24, 374.2, 89.34, 30.96, 233.68ppm으로 나타났고 MTBE 농도는 1.24, 6.65, 1.5, 1.26, 4.14ppm으로 나타났다. 또한 지하수의 경우는 MTBE의 농도가 3.34, 11.74, 6.9ppm으로 조사되었다. 이 결과에 의하면 현재 휘발유로 오염된 지역의 MTBE 농도는 BTEX 농도 검출량에 대하여 약 1%정도였으며, 같은 지역의 지하수 MTBE 농도는 약 4%로 토양에서 보다 지하수에서의 오염이 더 심각하였다<표 4-2>. 이는 MTBE의 용해도가 20℃에서 4.8%로 상당히 높기 때문에 휘발유 오염지역의 지하수의 MTBE 농도가 토양에서 보다 더 높게 검출되었다고 판단된다. 실제 오염된 A, B, C site의 토양 및 지하수의 MTBE 농도는 미국 규제치로 미루어 볼 때 상당히 오염이 심각한 지역으로 평가할 수 있으며 동일 지하수를 음용수 기준으로 보면 site에 따라서 100－1,000배정도 더 오염됨을 확인 할 수 있다.

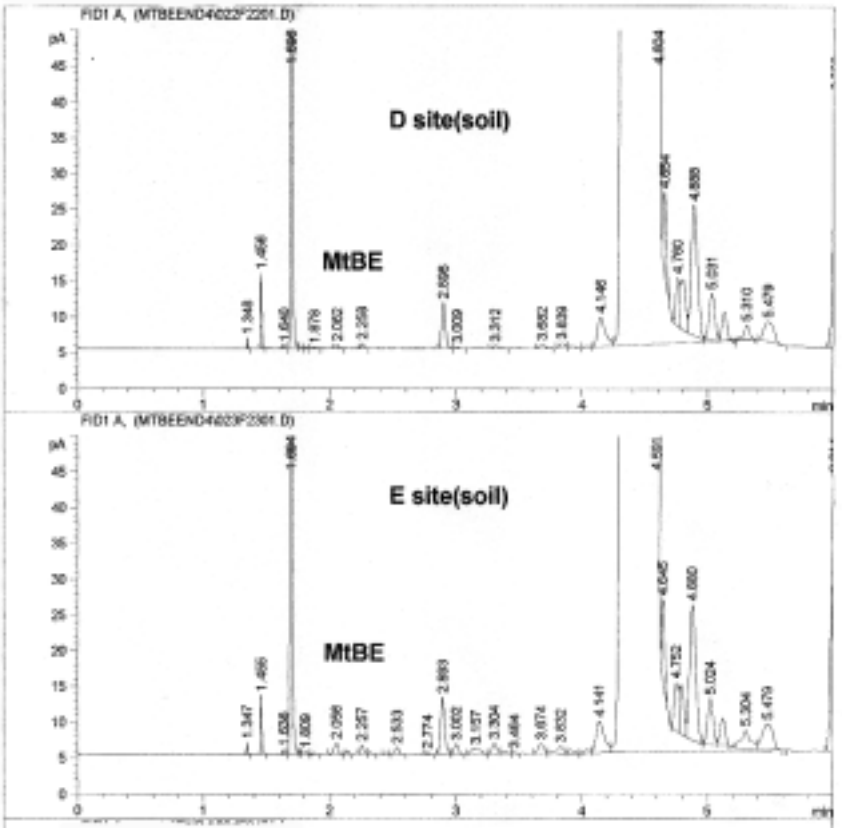
<표 4-2> 국내 휘발유 오염 지역의 BTEX 및 MTBE 농도 분석

분석항목 / site	Soil(ppm)						Groundwater(ppm)
	B	T	E	X	BTEX	MTBE	MTBE
A	1.82	67.14	2.96	35.32	107.24	1.24	3.45
B	14.69	117.53	30.99	210.99	374.2	6.65	11.74
C	2.07	44.02	4.02	39.23	89.34	1.5	6.9
D	0.79	21.23	0.89	8.05	30.96	1.26	·
E	13.5	83.7	29.8	106.68	233.68	4.14	·

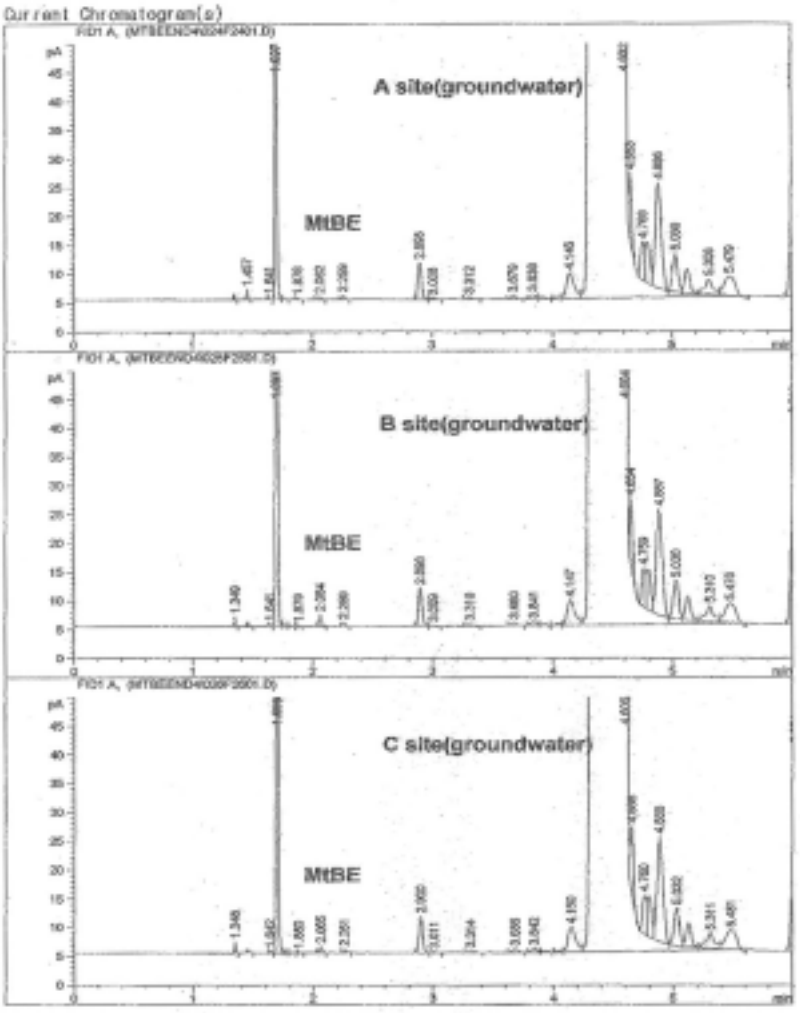
주: 국내 주유소내 휘발유 오염지역에서의 오염조사 결과임



<그림 4-1> 국내 휘발유 오염 토양 내 MTBE 분석



<그림 4-1> 국내 휘발유 오염 토양 내 MTBE 분석(계속)



<그림 4-2> 국내 휘발유 오염 지하수 내 MTBE 분석

제5장 국가별 MTBE 관리 동향

1. 미국

1990년 대기정화법(CAA, Clean Air Act)의 개정과 1995년 개질휘발유(RFG, Reformulated Gasoline) 프로그램 도입으로 자동차용 휘발유 함산소화합물로서 MTBE 사용이 대폭적으로 증가하게 되었다. 그 후 MTBE에 의한 지하수의 오염이 드러나면서 MTBE의 인체 유해성 및 사용여부 등에 대한 논란이 확산되었다. 이에 미국 연방정부는 1999년 여러 분야의 전문가들로 구성된 자문위원회 Blue Ribbon Panel을 구성하여 MTBE를 비롯한 함산소제의 사용에 관한 권고사항을 제공하도록 하였다. 한편, 1998년에 MTBE를 Contaminant Candidate List에 포함시키고 규제물질로 규정 여부에 필요한 조사 및 연구를 진행 중에 있다. 주정부들의 규제를 보면, 38개 주가 나름대로 규제를 하고 있으며, 2002년 5월 현재 시카고와 14개 주가 향후 함산소첨가제로서 MTBE 사용을 금지한 상태이다.

미국의 MTBE 관리 동향을 이해하기 위해서 다음 사항들을 살펴보고자 한다. 먼저, MTBE의 사용을 본격화시켰던 RFG 프로그램과, 미국의 연방정부 및 주정부들의 MTBE의 정책변화를 초래했던 음용수의 MTBE오염 실태에 관한 것이다. 다음, Blue Ribbon Panel의 MTBE 사용에 관한 권고사항의 내용을 알아보고, 미국의 음용수 수질 기준 정립의 절차 및 연방정부의 MTBE의 음용수 수질 기준 정립을 위한 노력을 살펴본다. 마지막으로 연방정부와 주정부의 MTBE 규제 내용을 살펴보고자 한다.

가. 개질휘발유(RFG) 프로그램

1990년 미 의회는 대기정화법을 통과시킴으로서, 대기오염의 주된 요인으로 작용하는 자동차의 배출가스의 유독성을 줄이기 위하여 여러 가지 프로그램을 도입할 수

있었다. 이러한 프로그램들은 유독한 대기환경으로부터 국민의 건강을 보호하는데 매우 성공적이었다. 이러한 프로그램들은 공기질의 향상을 가져왔을 뿐만 아니라 함산소제(oxygenate)와 같은 물질의 첨가를 통하여 휘발유 공급을 늘리는 등 미국 내 에너지 수급의 안정성을 증가시켰다. 즉, 일정량의 첨가제를 휘발유에 첨가함으로써 제한된 양의 휘발유를 더 많은 지역에 보급할 수 있었으며, 따라서 에너지의 해외 의존도를 감소시킬 수 있었다.

이러한 프로그램 중 하나가 RFG 프로그램이다. 이 프로그램은 스모그로 인한 심각한 피해를 입고 있는 로스엔젤레스, 시카고 등 9개 도시에서 대기중의 스모그 수준을 줄이기 위하여 1995년 1월에 처음 도입되었다. 이 프로그램은 두 단계로 구성되어 있었으며 첫 단계인 1999년까지는 스모그를 일으키는 오존 및 벤젠과 같은 독성물질의 양을 감소시키는 것이 주요 목적이었다. 두 번째 단계인 2000년부터는 휘발성 유기화합물(VOCs)과 질소산화물(NOx, Nitrogen Oxides) 및 그 외 전반적인 독성물질의 양을 줄이는 것을 목적으로 하고 있다. 1995년 RFG 프로그램이 시작된 이래로 VOCs와 NOx는 연간 최소 105,000톤, 이외 유독 물질은 연간 최소 24,000톤 감소되었다. 이는 1,600만대의 자동차를 줄이는 효과에 버금가는 결과였다. 특히 시카고의 경우 VOCs와 NOx는 연간 8,000톤, 그 외 유독 물질은 약 2,000톤의 감소효과를 나타내었다고 EPA는 추정하였다(Holmstead, 2001).

1990년의 CAA에서는 RFG에 포함되는 함산소제에 포함된 산소의 양을 무게비율 최소 2%로 규정하고 있다. 그 외 함산소제의 종류는 규정하고 있지 않다. CAA나 EPA에서 함산소제의 종류를 규정한 것은 아니지만, 일반적으로 MTBE 또는 에탄올이 함산소 첨가제로 사용되고 있다. 특히 MTBE의 경우 비교적 싼값으로 손쉽게 제조할 수 있는 장점으로 인하여 RFG에 사용되는 함산소제의 약 87%를 차지하고 있다. RFG 프로그램은 켄터키, 텍사스, 미주리와 같은 지역에도 도입되어 현재 17개 주에서 MTBE를 사용하고 있다<표 5-1>. 이 지역들의 휘발유 소비의 약 35%를 MTBE가 차지하고 있다. 캘리포니아의 경우 1991년 California Air Resource Board(ARB)가 California Reformulated Gasoline (CaRFG2)를 도입하기로 결정하여 1996년부터 CaRFG2가 사용되었다. 당시 지역의 정제업자들이 함산소 첨가제로서 경제적인 생산

비용과 높은 옥탄가 그리고 휘발유와 잘 혼합되는 장점을 지닌 MTBE를 선택함으로써 후일 지하수와 같은 음용수를 오염시키는 결과를 초래하였다.

현재 MTBE는 연간 1억 배럴(하루 275,000 배럴)이 사용되고 있다. 1990년 CAA 개정 이후 3배 가량 증가한 양이다. 그 외 시카고나 밀워키와 같이 에탄올 생산 기점(Ethanol Production Center)이 가까운 일부 도시에서는 함산소 첨가제로서 에탄올을 사용하고 있다.

<표 5-1> 미국내 RFG 사용지역

RFG 사용 의무화 지역
Los Angeles(CA), San Diego(CA), Hartford(CT), New York City (NY-CT-NJ), Greater Philadelphia(PA-NJ-DE-MD), Chicago (IL-WI-IN), Baltimore(MD), Houston(TX), Milwaukee(WI), Sacramento(CA)
자발적으로 RFG를 사용한 지역
The State of Connecticut (that portion not part of NYC) The State of Delaware (that portion not part of Phil.) The District of Columbia Kentucky portion of Cincinnati Metro Area Louisville(KY) Maryland - DC suburbs and two other nearby counties The State of Massachusetts St. Louis(MO) New Hampshire Portion of Greater Boston The State of New Jersey (that portion not part of NYC and Phil.) New York counties near NYC The State of Rhode Island Texas - Dallas - Fort Worth area Virginia - DC suburbs, Richmond, Norfofolk - Virginia Beach - Newport News

자료 : USEPA (2000a)

나. MTBE에 의한 음용수 오염

RFG에 혼합되어 공기질 개선에 탁월한 효과를 보여주는 함산소제 MTBE는 친수성(hydrophilic) 물질이다. MTBE는 휘발유에 포함된 다른 유독성 물질보다 30배정도 높은 용해도를 가지고 있어 토양에 유출되었을 때 토양에 흡착되어 있기보다는 빠르게 이동하여 지하수를 오염시키는 경향이 있다. 이러한 높은 이동성과 잘 분해되지 않는 성질 때문에 MTBE에 의하여 발생하는 음용수 오염에 대한 우려가 높아지고 있다.

MTBE에 의한 음용수원의 오염은 조사를 통하여 확인되고 있다. 1993년과 1994년 사이에 USGS는 Natural Water Quality Assessment Program을 통하여 RFG 프로그램을 도입했던 지역의 지하수질을 조사하였다. 조사 결과 지하수 관정 중 3%가 20ppb이상으로 MTBE에 의하여 오염된 것으로 나타났다. USGS가 1996년에 실시한 조사에서는 도시 빗물에서 발견되는 VOCs 중 MTBE가 7번째로 자주 나타나는 것으로 나타났다. EPA에서 조사한 결과에 따르면 캘리포니아, 뉴잉글랜드 등 7개 주의 상수원 51개 지역에서 MTBE가 발견되었다. 이 조사는 각 지역마다 아직 진행중이다. 캘리포니아의 경우 1997년부터 1998년까지 California Department of Health Service에서 지하수 및 지표수의 음용수 공급원에 대한 수질조사를 실시하였다. 그 결과 캘리포니아의 음용수원 중 약 24% (11,000 음용수원 중 2,638지역)가 MTBE에 의하여 오염된 것으로 나타났다. 이 중 36%가 캘리포니아주에서 제안하는 Secondary Drinking Water Standard인 5ppb를 초과하는 농도를 나타내었다.

MTBE에 의하여 오염된 지하수의 오염농도는 지하저장탱크 주변 지역에서는 고농도로 발견된다. Santa Ana Regional Water Quality Control Board에 따르면 그 관할권 안에 있는 탱크 누유 지역 중 68%가 200ppb 이상, 24%가 10,000ppb 이상으로 오염되었음이 조사되었다. Santa Clara Valley Water District의 보고에 따르면 그 지역 안의 지하저장탱크 주변 지하수의 70%가 MTBE에 의하여 오염되었음이 발견되었다. 이는 MTBE에 의한 토양 및 지하수 오염의 주원인이 지하저장탱크와 배관시스템에서의 RFG 및 MTBE의 누출임을 보여주고 있으며, 따라서 지하저장탱크에서의 누유를 방지하는 것이 MTBE의 오염을 막기 위해 선행되어야 함을 제시하고 있다.

EPA및 각 주에서는 지하저장탱크(UST, Underground Storage Tank) Regulatory Program을 통하여 유류 및 유기용제 뿐 만 아니라 MTBE의 누출 또한 차단하려는 노력을 하였다. 또한 연방정부 및 각 주의 법률에 따라 1998년 12월까지 누출위험이 있거나 누출이 확인된 지하저장탱크를 개선하거나 폐기 또는 교환할 것을 요구하였다. 1998년까지 지하저장탱크의 80%이상이 개선되거나 폐기 또는 대치되었으며, 현재까지도 EPA 및 각 주는 지하저장탱크의 개선을 진행하고 있다.

다. Blue Ribbon Panel

EPA는 Charter from the Clean Air Act Advisory Committee (CAAAC)에 의하여, 공공 의료진 및 과학자들, 수자원업, 환경단체, 산업계, 주정부의 전문가들로 구성된 Blue Ribbon Panel을 1998년 11월에 구성하였다. 이 위원회는 현재 RFG 프로그램을 통하여 개선된 대기질을 유지할 뿐만 아니라 MTBE에 의한 음용수의 오염을 방지하기 위하여 MTBE를 비롯한 함산소제의 사용에 관한 권고사항 및 추천사항을 US EPA에 제공하는 것이 목적이었다. Blue Ribbon Panel은 현재 대기질의 유지와 MTBE에 의한 음용수 오염 방지 그리고 연료 공급 안정성 및 경제적 비용을 고려하였다. 또한, 공기질의 향상을 위하여 MTBE를 대체할 수 있는 다른 첨가제의 사용을 심각하게 고려하여, 1999년 말 CAAAC에 MTBE 사용에 대한 다음과 같은 조사결과를 전달하였다.

- RFG program은 자동차 배기가스에 포함된 VOCs, NOx 및 다른 독성물질의 양을 감소시킴으로서 대기질 향상에 기여하였음.
- 그러나 함산소첨가제로서 MTBE의 사용은 지하수 및 지표수의 오염을 유발하였으며, MTBE를 많이 사용하였던 지역에서는 먹는물 공급원의 5−10%가 MTBE에 의하여 오염되었음을 확인함.
- RFG의 사용으로 인한 오염은 기존의 휘발유를 사용한 지역에서의 오염 빈도보다 5배나 높게 나타났고, 기본적으로 혐오성 냄새와 맛을 초래하며, 미 환경청 및 각 주정부의 규정치를 초과한 오염지역도 적지만 관측할 수 있었음.

· MTBE의 지속성과 이동성에 대하여 언급하였고, 따라서 휘발유의 다른 성분들보다 쉽게 지하수와 지표수를 오염시킬 수 있음을 강조함.

이러한 조사결과를 바탕으로 위원단은 다음과 같은 사항을 추천하였다.

· 수원보호와 모니터링을 강화시킬 것
· 현재의 UST 프로그램의 강화를 통하여 지하저장탱크에서의 MTBE의 누출을 방지할 것
· 현재 MTBE로 인하여 오염된 지역을 정화할 것
· RFG에 포함된 산소의 양이 무게비율로 2%이상이어야 한다는 CAA의 조항을 개정할 것
· RFG 프로그램을 통하여 향상된 현재의 대기질을 유지할 것
· MTBE의 사용을 줄일 것
· MTBE와 그 대체물질에 대한 연구를 가속화 할 것

EPA는 위 위원회의 추천사항을 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다. 첫째, RFG 프로그램을 통하여 개선된 대기질을 유지하면서 휘발유에 사용되고 있는 MTBE를 가능한 한 빨리 줄이거나 금지해야 한다. 둘째, 지하저장탱크의 누유방지와 MTBE에 의하여 오염된 지역의 복원 프로그램의 강화가 필요하다. 셋째, 현재 시행되고 있는 법률하에서 각 주가 자발적으로 MTBE를 줄이고 다른 첨가제의 사용을 유도하기 위하여 법률적 유동성을 주어야 한다 등이다. EPA는 가능한 많은 지역의 행정당국에 위의 추천사항을 건의하여 UST 프로그램과 음용수 보호 프로그램(Drinking Water Protection Program)을 강화시켰으며, 주정부와 정제사업자가 MTBE의 사용을 줄이는 방향으로 전환할 수 있도록 유동성을 제공하였다.

라. MTBE의 음용수 수질 기준의 정립

1) 음용수 수질 기준

미국의 음용수 수질기준은 크게 두 가지 부분으로 구성되어 있다. 첫째는 National Primary Drinking Water Regulations(NPDWRs or primary standards)으로서 이는 음용수로 공급하기 위하여 반드시 준수해야 하는 기준이다. 이는 음용수를 섭취하는 소비자의 건강을 보호하기 위해 초과되어서는 안될 오염물질 최대허용량(MCL, Maximum Contaminant Level)을 말한다. 둘째는 National Secondary Drinking Water Regulations(NSDWRs or secondary standards)으로 법적으로 강제성을 가진 기준은 아니지만 냄새 및 맛 등 심미적으로 불쾌감을 유발할 수 있는 농도이다. 보다 많은 시민이 불쾌감 없이 음용수를 이용할 수 있도록 하기 위하여 EPA에서는 일반적으로 secondary standards를 권장하고 있다.

음용수 수질기준(Drinking Water Standard) 및 오염물질 최대허용량(MCL)을 수립하는 과정은 여러 단계로 구성되어 있다. 음용수 수질 기준은 EPA가 범 국가적으로 먹는 물 속에 포함된 오염물질의 양의 규제할 수 있는 법적 규제치이다. 오염물질 최대허용량(MCL)은 공공의 건강을 보호할 수 있는 오염물질의 수준에서 결정된다. The Safe Drinking Water Act(SDWA)는 오염물질 최대허용량(MCL)을 결정하는데 있어서 영향을 미치는 여러 가지 인자들을 규정하고 있다. 대표적인 인자는 인체에 미칠 수 있는 위해성, 오염물질을 제어할 수 있는 기술의 수준, 오염제어에 소요되는 경제적인 비용 등이다. 일반적으로 MCL을 규정하는 데는 시작에서부터 끝까지 약 10년 정도가 걸리며, 그 이상 걸리기도 한다.

규제치를 결정하기 위한 첫째 단계는, 음용수 오염에 관하여 인지하고 이 오염의 심각성을 발견하는 것이다. 현재 미국의 음용수 수질에 영향을 미치는 오염물질은 수천 가지가 존재하며 이 중 연방정부 및 주 정부에서 이 오염물질에 의하여 일어날 수 있는 음용수 수질오염 방지에 비용을 소요하는 것이 적당한지를 알아보기 위해 primary contaminant를 선정하고 있다. 이러한 물질 중 인체에 심각한 위해를 줄 수 있는 물질이 EPA를 통하여 결정되면 이 물질은 EPA의 Contaminant Candidate

List(CCL)에 포함된다. CCL은 1996년 SDWA의 개정을 통하여 1998년 처음 만들어졌으며, 50개의 화학물질(chemical contaminants)과 10개의 미생물학적인 오염물질(microbiological contaminants)로 구성되어 있다. 한번 CCL에 포함되면 EPA의 Drinking Water Program을 통하여 수년동안 계속적인 조사를 받으며, 또한 EPA는 CCL에 포함된 오염물질에 대하여 Science Advisory Board(SAB), National Drinking Water Advisory Council(NDWAC)등의 과학적 자문기관 및 여론을 통하여 자문을 받는다.

CCL에 포함된 오염물질은 크게 세 가지로 분류된다. 첫째, 모든 연구가 완료되어 규제치의 결정을 요하는 오염물질(Regulation Priority Category)이다. 둘째, 오염물질로 확정되었으나 인체 위해성 등 부가적인 연구가 필요한 오염물질(Research Priority Category)이다. 셋째, 오염가능성에 대한 조사가 더 필요한 오염물질(Occurrence Priority Category)이다.

오염물질이 CCL에 포함된 후 위 세 가지로 분류되면, SDWA를 바탕으로 EPA에서는 5가지 이상의 오염물질을 선택하여 규제치를 정립할 지를 결정한다. 결정된 규제치를 확정하는데 3년 반정도가 걸린다. 일반적으로 CCL로부터 규제치가 결정되는 과정은 5년 주기로 이루어지며, 규제치를 결정하는데 연구정보가 충분치 않다면, 이 오염물질은 연구 또는 Occurrence Category에 다시 포함되어 조사 및 연구가 이루어진다.

MTBE의 경우 1998년 2월에 CCL에 포함되었다<표 5-2>. 이는 규제치가 결정되기 전에 건강에 대한 영향, 출현빈도, 처리기술에 대항 정보에 대한 심도 깊은 연구 및 조사가 필요하다는 것을 의미한다. MTBE가 CCL에 포함된 이후로 EPA에 의하여 적합한 처리방법 선정에 대한 조사는 충분히 이루어진 바 있으나, 건강에 대한 영향과 출현빈도에 대한 정보는 아직 조사중이다.

<표 5-2> Contaminant Candidate List(CCL)

Microbiological contaminants	
Acanthamoeba	Adenoviruses
Aeromonas hydrophila	Caliciviruses
Coxsackieviruses	Cyanobacteria(blue green algae), other freshwater algae and their toxin
Echoviruses	Helicobacter pylori
Microsporidia	Microbacterium avium intracellulare (MAC)
Chemical contaminants	
1,1,2,2-tetrachloroethane	1,2,4-trimetylbenzene
1,1-dichloroethane	1,1-dichloropropene
1,2-diphenylhydrazine	1,3-dichloropropane
1,3-dichloropropene	2,4,6-trichlorophenol
2,2-dichloropropane	2,4-dichlorophenol
2,4-dinitrophenol	2,4-dinitrotloene
2,6-dinitrotoluene	2-methyl-phenol(o-cresol)
Acetochlor	Alachlor ESA & other Acetanilide pesticide degradation products
Aldrin	Aluminum
Boron	Bromobenzene
DCPA mono-acid degradate	DCPA di-acid degradate
DDE	Diazinon
Dieldrin	Disulfoton
Diuron	EPTC (s-ethyl-dipropylthiocarbamate)
Fonofos	Hexachlorobutadiene
p-Isopropyltoluene(p-cymene)	Linuron
Manganese	Methyl bromide
Methyl-t-butyl-ether(MTBE)	Metolachlor
Metribuzin	Molinate
Naphthalene	Nitrobenzene

<표 5-2> Contaminant Candidate List(CCL) (계속)

Chemical contaminants	
Organotins	Perchlorate
Prometon	RDX
Sodium	Sulfate
Terbacil	Turbufos
Triazines & degradation products of Triazine	Vanadium

자료 : Federal Register (1998)

EPA에서는 MTBE의 출현빈도에 관한 정보를 Unregulated Contaminant Monitoring Rule(UCMR)을 통하여 2001년부터 조사할 예정에 있으며, 인체 위해성에 관한 연구 또한 진행중이다. UCMR은 1996년 SDWA을 바탕으로 1999년에 수정되어 현재 법적으로 규제되지 않고 있는 수질오염물질을 관측하는데 목적이 있다. UCMR에 의하여 만들어진 법적 규제 대상 제외 오염물질(Unregulated Contaminants) 명단은 CCL에 포함된 오염물질을 조사하는데 이용된다. MTBE 또한 법적 규제 대상 제외 오염물질 명단에 포함되어 있다<표 5-3>. 만약 조사를 통하여 MTBE에 관한 위의 정보가 충분히 마련되어 MTBE가 2005년까지 규제 물질 명단에 포함된다면 MTBE의 규제치는 2010년쯤 정립되어질 것이다(Sakada, 1999).

<표 5-3> UCMR 오염물질

2,4-dinitrotoluene	2,6-dinitrotoluene
Acetochlor	DCPA mono acid; DCPA di acid
4,4′-DDE	EPTC
Molinate	MTBE
Nitobenzene	Perchlorate
Terbacil	

자료 : USEPA (2001a,b)

1) 음용수 기준 권고치

미국 EPA는 MTBE에 대한 National Drinking Water Standard는 규정해 놓고 있지 않다. 그러나 Health Advisory Program을 통하여 1997년 12월 음용수 중의 MTBE 농도를 20−40ppb로 규정하는 Drinking Water Advisory (USEPA, 1997)를 발표한 바 있다. 이는 혐오성, 냄새와 맛, 그리고 독성으로부터 공공의 건강을 보호하기 위한 권고치에 해당한다. 아울러 수 개 주에서는 주별로 독자적인 한계치를 규정하고 있다.

마. MTBE 사용 규제

1) 연방정부의 규제

현재 미의회에서도 향상된 공기질의 유지와 MTBE 사용의 감소, 에탄올과 같은 재생 가능한 연료의 중요한 역할을 강조하는 법적인 조치를 마련하기 위하여 노력중이다. 2000년 EPA는 Toxic Substances Control Act(TSCA)를 근거로 하여 휘발유에 MTBE의 첨가를 금하거나 또는 줄일 수 있는 내용을 포함하며, 이에 대한 의견 수렴을 요구하는 Advanced Notice of Proposed Rule Making (USEPA, 2000b, c)을 발표하였다. EPA는 TSCA가 MTBE의 사용을 금하거나 줄일 수 있는 법적 도구역할을 할 수 있으리라 믿고 있으며, 따라서 국민의 건강과 환경을 보호할 수 있으리라 예상하고 있다(Holmstead, 2001). 연방정부의 MTBE 사용 금지에 대한 움직임의 역사는 <표 5-4>와 같이 요약된다.

<표 5-4> 연방 정부의 MTBE 사용 금지에 대한 움직임의 역사

2000년 3월 20일	EPA에서 휘발유에서 MTBE를 제거하려는 규제 활동을 취함. 환경청장 Carol Browner는 'backstop measure'라 부르고 규제 과정을 완료하는데 3년이 걸릴 것이라 함.
2000년 9월 7일	미 상원 환경 위원회는 발효 후 4년 이내에 휘발유에 함산소제 MTBE의 사용을 금하는 법안 승인

<표 5-4> 연방 정부의 MTBE 사용 금지에 대한 움직임의 역사(계속)

2001년 2월 6일	일리노이주 출신 공화당 상원의원 Peter Fitzgerld는 MTBE의 사용을 금지하고 MTBE에 의해 오염된 물의 정화를 마련하는 법률안 제출
2001년 2월 14일	하원의 공화당의원 Greg Ganske와 John Shimkus가 휘발류 첨가제 MTBE를 금하는 법안 제출
2001년 3월 30일	상원의 민주당 Tom Daschle의원이 미국내 휘발류에서 MTBE를 금지하고 에탄올의 사용과 생산을 촉진하는 청정 대기 법안의 개정요구안 제출
2001년 5월 15일	상원의 민주당 출신 Tom Harkin의원이 휘발유 첨가제 MTBE를 금하고 청정 대기 법안 중의 RFG 프로그램을 강화하고 바이오디젤과 에탄올의 판매를 촉진하는 법안 제출
2001년 5월 24일	상원 의원 Bob Smith와 Harry Reid는 휘발유 첨가제 MTBE를 금하는 법안을 제출. 이 법안은 또한 주지사가 지역 오염도가 엄격한 기준을 만족시키는 한도에서 함산소제 함유를 요구하는 조건을 예외로 적용할 수 있도록 함.
2001년 9월 25일	미 상원 환경 위원회는 2004년까지 RFG에서 MTBE의 사용을 금지하기로한 법안 통과. 개정안은 상원 본원에 완전히 상정될 때까지 보류함. 본원 상정일은 아직 확정되지 않음.
2001년 12월 5일	민주당은 상원에 발효후 4년이내에 전국적으로 휘발유 첨가제 MTBE를 금하는 에너지법안 제출. 미의회는 2002년 초반에 에너지법안에 투표할 예정임. 공화당과 민주당이 각각 다른 법안 제출

자료 : Platts (2002)

2) 주정부들의 규제

New England Interstate Water Pollution Control Commission(NEIWPCC)에서 50개 주를 대상으로 한 설문조사를 통하여 각 주의 MTBE에 대한 규제 및 관리에 대하여 조사한 결과 50개의 주중 38개의 주가 Action Levels, Cleanup Levels, 또는 Drinking Water Standard를 통하여 MTBE를 규제하고 있는 것으로 나타났다<표

5-5>. 위 38개 주중 플로리다를 비롯한 20개 주가 Soil Action Level, 뉴욕을 비롯한 28개 주가 Soil Cleanup Level, 로스엔젤레스를 포함하여 26개 주가 Groundwater Action Level, 뉴저지를 비롯한 32개 주가 Groundwater Cleanup Level을 가지고 있다. 또한 캘리포니아를 비롯한 8개 주가 Primary Drinking Water Standard, 텍사스를 비롯한 5개 주가 Secondary Drinking Water Standard, 미주리를 비롯한 8개주가 EPA Drinking Water Advisory, 와이오밍을 비롯한 12개 주가 State Advisory를 사용하고 있다.

<표 5-5> 주정부의 MTBE 관리 현황

Soil Action Level	5－20,000 (ppb)
Soil Cleanup Level	5－280,000 (ppb)
Groundwater Action Level	12－520 (ppb)
Groundwater Cleanup Level	20－5,000 (ppb)
Primary Drinking Water Standards	13－240 (ppb)
Secondary Drinking Water Standards	5－70 (ppb)
8개의 주는 EPA의 Drinking Water Advisory range(20－40ppb)를 Drinking Water Standard로 사용	
1개주는 Health Advisory range(20－200ppb)를 Drinking Water Standard로 사용	

자료 : NEIWPCC (2000)

50개 주 중 12개주는 아직 위와 같은 규제치를 두고 있지 않다. 이중 일리노이주는 standard를 규정하는 과정에 있다. 규제치를 두고 있는 15개 주중 약 8개 주는 법적인 효력을 띠고 있으나 나머지는 그렇지 않다. 15개 이외의 나머지 주는 상황에 따라서 다양한 결정을 내리고 있다. 또한 규제치를 가지고 있는 대부분의 주는 규제치를 낮추는 방향으로 규제치의 개정을 진행하고 있다. 이들 중 수 개 주는 RBCA(Risk Based Corrective Action) program의 주요한 오염물질 list에 MTBE를 포함시켰다. 규제치를

가지고 있지 않은 주도 규제치를 규정하고자 하는 움직임을 보이고 있다.

자동차용 휘발유에의 MTBE 사용을 금지하는 행정명령의 최초 공포는 1997년 미국의 캘리포니아주에서 이루어졌다. 이는 1995년 캘리포니아주의 Santa Monica의 몇 개의 수원으로부터 MTBE가 검출된 후 캘리포니아주에서는 수 차례의 공청회를 개최하고 MTBE 사용 여부에 대한 찬반양론이 팽팽하게 전개되는 상황에서였다. 행정명령의 내용 중 일부는 <표 5-6>와 같다(Nishina, 2001).

<표 5-6> MTBE 금지 행정명령

① MTBE는 자동차용 휘발유에 혼합하여 사용함으로써 대기정화에 기여하였지만 역으로 지하수 등에는 환경상의 위협을 주고 있다. 종합적으로 판단할 때 자동차용 휘발유의 기재로서 사용을 계속하는 것은 환경상 중대한 위험을 초래한다.
② CARB(California Air Resource Board)는 EPA에 Federal RFG의 산소함량 규제를 캘리포니아주는 적용하지 않도록 요청한다.
③ MTBE 사용금지 시기는 2002년 12월 31일 이전으로 한다.

캘리포니아주의 행정명령 공포 후, Federal RFG의 산소함량 사용 규정의 캘리포니아주에서의 제외요청을 EPA에서 인정하여 줄 것인가가 전체 미국의 관심사항이었다. 요청 후 2년 이상 경과한 2001년 6월 12일 EPA는 캘리포니아주의 요청을 기각한다고 발표하였다. 결국 캘리포니아주에서는 행정명령 공포로 인하여 2003년부터 주내에서 MTBE를 사용할 수 없음에도 불구하고, EPA에서 규정하고 있는 함산소화합물을 일정량 이상 의무적으로 사용하여야 하기 때문에 또 하나의 함산소화합물인 에탄올을 사용하지 않으면 안될 상황으로 전개되고 있다.

그러나 MTBE 대신 에탄올을 사용하게 되면, 증기압이 높아 VOCs 배출을 증가시키고 수분을 흡수하는 성질이 있기 때문에 에탄올을 혼합한 자동차용 휘발유는 파이프라인으로 수송할 수 없는 단점이 있다. 또한, 에탄올은 수분흡수에 의한 문제를 최소화하기 위하여 최종 출하과정에서 탱크로리 적재시에 혼합하여야 하는데 캘리포니

아주는 이러한 설비를 갖추지 않고 있다. 한편 에탄올 생산지는 주로 미국의 중서부에 있어 캘리포니아주로부터 원거리에 있기 때문에 공급과 가격 상승 문제도 심각한 것으로 보여진다(Nishina, 2000).

이러한 상황에서 최근 캘리포니아 주정부는 캘리포니아 에너지위원회(CEC, California Energy Commission)의 위탁용역 연구결과에 따라 MTBE의 사용금지안을 연기할 수도 있다는 의사를 표명하였다. CEC도 2005년 9월까지 MTBE 사용 금지안을 연기할 것을 제안하였다(Lorenzetti, 2002).

그러나, 에탄올 공급업자 등 에탄올 생산과 관련한 업계 및 단체에서는 MTBE 사용금지안을 연기할 필요가 없다는 주장을 강력히 제기하고 있다. 이들의 정치력은 매우 큰 것으로 알려져 있으며 MTBE 사용금지 이면에는 과학적인 근거에 기초한 것이 아니라 일부의 매스컴 보도에 의한 시민의 과잉반응을 배경으로 이 들의 에탄올 수요 확대를 위한 로비가 주효하였다는 설도 제기되고 있다(PEC, 2000).

캘리포니아주 이외의 다른 주에서도 MTBE 사용 금지의 경향을 보이고 있다. 뉴욕주에서는 주지사가 2000년 5월 MTBE를 함유한 자동차용 휘발유의 사용, 판매 및 수입을 2004년부터 금지하는 법안에 서명하였다. 2002년 5월 현재 시카고와 14개 주가 가까운 장래에 MTBE 사용을 금지하는 것으로 결정하고 있다<표 5-7>. MTBE의 사용이 감소함에 따라 에탄올이 MTBE의 대체물질로 대두되어 시카고와 밀워키에서는 벌써 사용중이기도 하다.

여러 주정부들의 사용 금지 규제 역사는 <표 5-8>과 같다.

<표 5-7> 미국의 MTBE 사용금지 예정 지역

애리조나, 캘리포니아, 콜로라도, 코네티컷, 아이오와, 미시간, 미네소타, 네브래스카, 뉴욕, 워싱턴, 사우스다코타, 일리노이, 캔사스, 인디애나 주 시카고시

<표 5-8> 주 정부들의 MTBE 사용 금지에 대한 움직임

1999년 3월 25일	캘리포니아 주지사 Gray Davis 2003년 1월 1일 까지 휘발류 내에 MTBE 사용을 금하는 행정 명령에 서명 (Davis, 1999)
1999년 6월 28일	캘리포니아 Energy 위원회는 2002년 12월 31일 이후에 휘발류에서 MTBE의 제거를 표결함
2000년 5월 24일	뉴욕 주지사 George Pataki는 RFG에서 MTBE 함산소재의 사용을 금하는 법안에 서명
2000년 7월 1일	코네티컷주는 2003년 10월 1일부터 금하는 법안 채택. 그러나 2005년 까지 미루는 것을 고려중
2001년 6월 12일	캘리포니아주에서 RFG에서의 산소 함유량에 대한 예외를 신청했으나 미 EPA에서 거부
2001년 7월 18일	미 하원 panel은 캘리포니아주의 신청을 부결함
2002년 3월 15일	캘리포니아 주지사 Gray Davis는 계획했던 MTBE의 사용 금지 시작 시한을 2004년까지 1년 연장하는 행정 명령에 서명 (Davis, 2002)

2. 유럽

스웨덴, 네덜란드, 스위스, 덴마크, 핀란드 등과 같은 유럽에서도 함산소화합물로서 가장 널리 사용되는 것이 MTBE이다. MTBE는 1970년대부터 휘발유 기재로서 사용되기 시작하였으며 1982년경에 원유가격이 급등하여 메탄올이 비교적 저렴했을때 메탄올을 최대 3vol% 혼합한 휘발유가 판매되었으나 1986년에 원유가격이 하락한 후에 다시 널리 사용되게 되었다. 유럽에서는 산소화합물의 휘발유 혼입에 대하여 원칙적인 허용량 외에, 연료성상, 휘발유 엔진에 악영향을 미치지 않는 범위 내에서 각국의 상황에 따라서 그 이상 배합하는 것이 인정되어 있다<표 5-9>. 또한, 각각의 연료 성

상에 맞추어 엔진을 개량한 것에 대해서는, 고농도로 함산소 기재를 혼합한 휘발유도 인정되고 있다.

<표 5-9> 유럽의 함산소 화합물 규제

함산소 화합물	최대허용량 (체적%)	
	원칙적인 허용량	상황에 의해 사용 가능
메탄올 1)	3%	3%
에탄올 2)	5%	5%
TBA	7%	7%
에테르 3)	10%	15%
기타 4)	7%	10%
산소함유량 5)	2.5%	3.7%

주: 1) 상용제 혼합 요망
2) 상용제는 필요에 따라서 사용
3) MTBE, TAME, ETBE 및 탄소수가 5 또는 그 이상의 다른 에테르류에서 그의 비점이 휘발유의 종점 이하인 것
4) 비점이 종점이하인 단일 알코올
5) 휘발유 기재중에 포함된 산소량, 아세톤은 함산소 화합물 제조상의 부산물 0.8wt%까지 가능

미국에서의 MTBE 사용금지 움직임에 영향을 받아 유럽에서도 MTBE에 의한 지하수 오염문제가 부상하였다. 유럽위원회는 미국의 연구회사인 Arthur D. Little사에 유럽에서의 MTBE 대책 필요성에 관하여 조사를 의뢰하였고, 지하저장탱크의 상황, MTBE의 사용현황 및 자동차용 휘발유 소비량의 차이 등에 대하여 검토한 결과 유럽에서는 미국과 같이 MTBE가 문제화되지는 않는다고 결론지었다. 이에 따라 유럽위원회는 2001년 5월 MTBE와 관련하여서는 지하탱크의 관리가 중요하며 MTBE의 규제에 대한 제안은 하지 않는다고 발표하였다.

3. 일본

2001년 일본의 환경성은 휘발유 저장탱크의 누출로 인한 지하수 오염을 염려하여 오염실태조사를 실시하였다. 자동차용 휘발유 성분 중 MTBE, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌의 5개물질을 대상으로 196개소의 주유소 주변 민가와 공공시설의 우물에서 지하수를 채취하여 민간분석기관에 위탁하였다. 조사결과 MTBE는 36개소에서 0.01－1.5㎍/l이 검출되었다. 이 조사에서 검출된 MTBE는 이미 지침수치가 결정되어 있는 톨루엔의 0.6mg/l, 유해성이 큰 클로로포름의 0.06mg/l와 비교하여 극히 미량의 수치에 머무르고 있고, 미국의 음료수 중 권고농도인 20－40㎍/l보다 훨씬 못 미치는 수치로 평가되었다. 따라서, 일본에서는 MTBE를 수질오탁방지법(水質汚濁防止法)에 의거한 요감시항목으로 추가하지 않을 방침이며, 자동차용 휘발유의 MTBE 사용여부에 대한 특별한 조치도 내리지는 않을 것으로 예상되고 있다(일간연료유지신문(日刊燃料油脂新聞), 2001).

4. 국내

1993년 1월 1일부터 무연휘발유만을 공급하도록 의무화되면서 자동차용휘발유의 산소함량도 0.5wt% 이상 혼입하도록 동시에 규정되어 MTBE를 본격적으로사용하기 시작하였다. 1996년 1월부터 0.75wt% 이상, 1999년 4월부터 1.0wt%이상으로 제조기준이 개정되어 점차 사용량을 확대하였다. MTBE의 유해성 문제가 미국에서 제기되어 이에 영향을 받아 2000년 1월부터 1.3－2.3wt%로서 최초로 상한치가 설정되었으며, 2002년 1월부터는 1.0－2.3wt%로 재개정되었다. 그러나, 국내에서는 MTBE의 규제관리에 관한 논의는 물론이고 그 필요성의 인식조차 미흡한 실정이다.

제6장 MTBE의 국내관리 필요성 검토

현재 국내에서는, 휘발유의 함산소제로서 MTBE가 대기오염 저감에 크게 공헌한다는 순기능만이 부각되어 있다. 이 물질이 일단 토양에 유출되면 휘발유의 주성분인 BTEX보다 훨씬 심각하게 지하수를 오염시킬 수 있다라는 사실은 인식되지 못하고 있는 실정이다. MTBE는 우리나라 뿐만 아니라 선진외국을 포함하여 전 세계적으로도 널리 사용되고 있는 물질이지만 인체건강과 생태계에 안전한 것으로 확인된 물질은 아니다. 국외에서는 MTBE 사용에 대한 열띤 논의와 조사 및 연구를 하고 있으며, 미국 일부 주의 경우는 MTBE의 사용을 금지하고있다. MTBE의 관리방향을 정하는데 있어서 가장 중요한 사항이라 할 수 있는 것은 MTBE의 위해성이라 할 수 있다. 만약 MTBE가 인체에 발암을 확실히 유발하는 물질로 검증되는 등 위해성이 심각하다면, 대기오염저감에의 순기능에도 불구하고 조속히 사용금지가 이루어져야 한다. 반대로 인체에 위해성이 없거나 우려할 수준이 아닐 경우 MTBE의 관리에 관한 논의는 더 이상 필요가 없을 것이기 때문이다. 그러나, MTBE의 위해성은 주로 동물에서만 확인되었으며 인체 영향에 대한 연구자료는 매우 부족한 실정이라 현재로서는 MTBE의 위해성에 관해서 결론을 내릴 수 없는 실정이다. 이러한 점 때문에, MTBE의 규제에 관한 논의에서 MTBE 사용 금지를 주장하는 그룹과 계속적 사용을 주장하는 그룹간의 팽팽한 대립이 있는 것이다.

MTBE에 관한 잠재적인 위해성 여부를 고려하여 MTBE 사용을 지속할 경우와 금지할 경우 두가지 시나리오를 가정할 수 있다. 첫째, 국내에서 아무런 조치없이 현재의 MTBE사용을 지속하는 경우이다. 혹자는 미국에서 MTBE에 의한 지하수 오염문제가 제기된 후 서둘러 몇개 주에서 MTBE의 사용 금지 조치를 취하고 있는 것을 음용수원의 지하수 의존도가 높은 미국의 특수한 상황에 기인한 것으로만 해석할 수도 있다. 그리고 우리나라에서 MTBE의 규제는 필요 없다고 주장할 수 있다. 그러나 우리나라의 경우 도시 및 산업지역에서 공식적으로 음용하는 지하수의 비율은 극히 낮

지만 음용과 생활용으로 이용하는 지하수가 혼재하고 있는 것이 현실이다. 따라서 우리나라는 상대적으로 MTBE의 오염으로 인한 피해의 가능성이 미국보다 낮다고 할 수 있지만 완전히 자유로울 수 없다. 현재 우리나라의 경우 5,000여개소의 지하 유류저장탱크와 3,000여개 정도의 주유소에 있는 유류저장탱크에서 누유가 발생되는 것으로 추정되고 있어, MTBE에 의한 지하수 오염이 심히 우려되는 상황이다. 또한 최근의 기상 이변에서 경험한 바와 같이 가뭄이나 홍수시 지하수의 이용이 급증하고 이러한 경향이 향후 증가할 수 있으므로, MTBE에 의한 지하수 오염은 더욱 심각한 문제로 떠오를 수 있다. 최악의 경우, MTBE가 동물의 실험결과와 같이 인체에서도 발암성 물질로 확인된다면 우리나라의 토양과 지하수 보전 및 관리정책은 치명적인 타격을 입게될 것이다.

둘째, MTBE의 사용을 금지하는 경우이다. 무연화에 따른 옥탄가 향상과 청정연료 생산 요구에 의해 MTBE를 1993년부터 사용하기 시작함에 따라, '90년대 초반부터 MTBE의 생산설비를 신·증설하여 2002년 현재 71만톤/년의 생산능력을 갖추게 되었고, 연간 수요는 64만8천톤에 이르고 있다. 따라서, 자동차용 휘발유에 MTBE 사용을 금지하게 된다면, 우리는 MTBE에 의한 토양 및 지하수 오염으로부터 자유로울 수는 있다. 그러나 이들 생산설비에 투자하였던 막대한 비용 손실과 에탄올 등 새로운 기재를 생산할 수 있는 설비의 신설을 위한 투자비용에 대한 손실을 부담할 수밖에 없을 것이다.

한편, 우리나라에서는 MTBE를 대체하기 위한 방안도 확보되어 있지 않은 실정이다. 함산소재 기능을 하고 있는 MTBE 대신 에탄올, ETBE, TAME을 사용하거나, Alkylation/Isomerization 등의 공정에 의한 MTBE의 옥탄가 향상 기능의 대체 등을 생각할 수 있으나, 일부 주장에 의하면 이러한 대안에도 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.

첫째, 함산소화합물 중 현실적으로 유일한 대안인 에탄올을 사용할 경우, 수분 흡수에 의한 상분리가 문제이며 이를 최소화하기 위해서는 파이프라인 수송이 아닌 탱크로리 수송이 필요하고 최종 출하과정에서 브랜딩해야 한다. 이러한 작업을 위해서는 물류비용손실이 동반되며, 탱크로리 차량 대수의 확대 및 통행량 증가로 인한 차

량 오염물질 배출량이 증가될 수 있다. 또한 현재 국내 에탄올 잉여물량이 없으므로 에탄올 생산설비의 증설이 필요하거나 전량 수입할 수밖에 없으므로 휘발유 생산단가는 상승하게될 것이다. 또한 자동차용 연료로서 에탄올을 사용할 경우 발생될 수 있는 토양 및 수질오염, 연소·산화·분해 등에 의한 이차독성물질 생성 등 악영향에 대한 검증도 우선적으로 필요하다고 할 수 있다.

둘째, Alkylation/Isomerization 등의 공정에 의한 MTBE의 옥탄가향상 기능을 대체할 수 있는 방법을 선택할 경우, 새로운 공정 신설에 수천억원 규모의 투자가 발생하게 된다. 기존의 MTBE 공정의 Revamp를 통하여 Indirect Alkylation 공정으로의 전환도 고려하여 볼 수 있다. 그러나 생산량의 감소는 물론 옥탄가를 유지할 수 없어 이 또한 대폭적인 경제적인 손실을 초래하며, 함산소화합물의 장점인 차량 배출가스 저감을 충족시키지 못할 것으로 예상되기 때문이다.

셋째, ETBE, TAME와 같은 함산소화합물을 사용하는 방안의 경우, 이들의 공급능력에 문제가 있고, 이들 또한 MTBE와 유사한 함산소화합물이기 때문에 MTBE와 동일한 문제가 발생될 것으로 평가되고 있어 확실한 대안이 될 수 없다.

MTBE의 사용시와 금지시의 각 시나리오에는 문제점이 있다. MTBE의 위해성에 대한 확실한 결론이 내려지지 않은 상황이므로, 현재 MTBE관리정책은 국가별로 차이를 보인다. 미국, 유럽, 일본의 사례를 검토해 볼 때, 각국에서의 MTBE 사용현황, MTBE에 대한 의존도, MTBE 대체물질의 유무 및 대체물질 도입시 경제성, MTBE에 의한 토양 및 지하수 오염의 가능성과 심각성의 정도, 저장탱크 관리 현황 등 제반사항들을 고려하여 각 국에 적합한 정책을 도출하고 있는 것으로 보여진다.

우리나라의 경우, 현 시점에서는 MTBE 사용을 당장 금지시켜야 한다거나 MTBE를 향후 전혀 규제할 필요가 없다라는 식의 결론을 내리는 것은 어렵다. MTBE의 인체건강에 대한 영향이 아직 확실히 밝혀지지 않았을 뿐 만 아니라, 국내의 토양 및 지하수의 MTBE에 의한 오염현황파악도 거의 전무한 실정이기 때문이다. 즉, 환경적 측면에서 MTBE의 순기능과 역기능을 정확히 저울질 할 수 있는 여건이 갖추어져 있지 않기 때문이다. 이러한 여건하에서 본 연구의 일환으로 개최되었던 「연료첨가제 MTBE의 위해성 및 관리 필요성에 관한 세미나」에서의 토론자들의 의견과 참석자들의 설문

조사 결과를 정리하면 다음과 같다.

세미나 토론에 참여한 토론자들의 공통적 견해는, MTBE를 당장 금지하는 것은 시기상조이며 좀 더 신중을 기해야 하지만 향후 대비를 위해서 사전준비는 반드시 필요하다는 것이었다. 이 외에 아래와 같은 의견들이 제시되었다.

- MTBE의 순기능에 대해서는 이견이 없으나, 위해성 및 역기능에 관한 논의는 참고할 만한 기초자료가 거의 없는 실정이므로 현 시점에서는 MTBE 사용에 있어서 규제 여부를 결정하는 것은 불가능하다.
- 지하저장탱크 주변을 비롯한 오염우려지역 및 지하수 관정의 MTBE 오염현황 조사의 실시가 필요하다. 특히 식수원에 대한 MTBE오염도 조사가 우선 실시되어야 할 것이다.
- MTBE 뿐만 아니라 기타유해물질도 규제나 분석이 이루어지지 않고 있는 실정이므로 특정물질의 규제를 떠나서 오염문제를 효율적으로 검출하는 시스템이 먼저 구축되어야 한다. 지하저장탱크의 관리와 모니터링 시스템을 갖추어 오염문제를 감소시키는 방향으로 추진한다.
- MTBE는 아직 관리되고 있지 않지만, MTBE로 오염된 지역의 복원은 반드시 이루어져야 한다.
- MTBE의 위해성에 대한 결론은 아직 불확실하지만, 취급시 주의사항등 대중에 대한 홍보는 필요하다.
- MTBE 관련 연구결과 및 국외의 정책변화 등을 파악하기 위하여 MTBE 에 관한 계속적인 논의가 필요하다.

세미나 참석자들의 향후 MTBE 관리방향에 대한 의견을 조사하기 위해 설문조사를 실시한 결과 대다수가 같은 의견을 가지고 있는 것으로 나타났다<표 6-1>. “향후 우리나라에서 MTBE에 관한 정책은 어떠한 방향에서 접근하는 것이 필요하다고 생각하십니까?” 라는 질문에 향후 MTBE의 관리는 MTBE의 순기능과 산업적인 측면을 고려한 단계적인 MTBE 관리정책방향이 필요하다는 의견에 대다수 84%가 응답하였다.

<표 6-1> 설문조사 결과

구 분	응답자 (명)
계	25
①MTBE의 순기능을 고려하지 않는 오염물질로서의 관리정책	1
②MTBE의 순기능과 산업적인 측면을 고려한 단계적인 MTBE 관리정책	21
③MTBE의 관리정책이 필요하지 않다	2
④잘 모르겠다	1

세미나에서 발표되고 논의된 의견과 참석자들의 의견을 종합하면, 절대다수가 MTBE가 오염물질이라는 인식은 하고 있으나 당장 MTBE 사용을 금지하는 식의 규제는 이르다고 생각하고 있다. MTBE의 대기환경 개선에의 기여측면을 중요하게 생각하고 있으며, MTBE 정책방향이 대기질, 자동차용휘발유 가격과 물가, 정유·석유화학산업, 국내 에너지·환경 정책 등 여러 분야에 광범위한 영향을 끼친다는 점을 인식하는 것으로 여겨진다. 한편, 인체에 대한 안전성이 확인되지 않은 MTBE의 가능한 위해성으로부터 국민의 건강과 환경을 사전에 보호하는 노력은 필요하다는 생각에 공감하고 있음을 알 수 있었다.

제7장 결론

자동차용 휘발유 함산소제 MTBE는 대기질 향상에 공헌하는 반면 토양에 유출시 단시간에 광범위한 지역의 지하수에 확산되는 특성을 가지고 있어, 국외에서는 MTBE의 사용에 대한 논란이 이미 시작되었다. 미국, 유럽, 일본 등에서는 이러한 문제점을 인식하여 관리 및 대책의 필요성에 대한 검토를 하였거나 진행중이다.

현재 MTBE 관리정책은 국가별로 차이를 보인다. 미국의 경우 10여개 주에서 이미 가까운 장래에 MTBE 사용을 금지할 것을 결정하였거나, 또는 MTBE 사용 금지를 고려하고 있다. US EPA에서는 1999년 MTBE를 Contaminant Candidate List에 포함시켜 인체 위해성을 비롯하여 여러 사항에 대하여 연구 조사를 하고 있다. 반면, 유럽과 일본에서는 MTBE 사용의 규제를 하지 않는 것으로 결정하였다. 이러한 정책의 차이는 MTBE의 위해성이 확실히 밝혀지지 않은 상황이므로 각국이 처한 상황에 따라 정책이 도출되기 때문으로 해석된다.

국내에서는 광범위하고 체계적인 현황조사가 실시되지는 않았으나, 토양과 지하수에서 MTBE가 발견되고 있다. 주유소내 휘발유로 오염된 5곳의 토양과 지하수 내의 MTBE 농도를 조사한 결과, 토양과 지하수에서의 MTBE 확산을 확인 할 수 있었다. 토양과 지하수에서의 각 MTBE 농도는 토양에서의 BTEX 농도 검출량의 약 1%와 4%인 것으로 조사되어, 토양에서보다 지하수에서의 확산이 더 심각함을 보여주었다. 더욱이, 이 지역의 지하수에서 검출된 MTBE 농도(3.45－11.74ppm)를 미국의 음용수 권고치와 비교할 때 조사지역의 지하수에서의 MTBE 농도가 권고치보다 약 100－1,000배 정도 더 높은 것으로 나타났다. 이는 국내 휘발유 오염 지역 지하수내의 MTBE 처리가 필요할 것임을 시사한다. 수천개의 유류저장탱크에서 누유가 발생하는 것으로 추정하고 있으므로 MTBE에 의한 지하수 오염은 우려할 수준일 것으로 추측된다.

MTBE의 위해성은 주로 동물에서만 확인되었으며, 인체 영향에 대한 연구는 현재 진행중이다. MTBE가 본격적으로 사용된 10여년이란 시간은 화학물질의 만성영향이

발생하기에 충분한 시간일 수도 있으나, 다른 한편으로는 매우 짧은 기간이기도 하다. 최근 가장 유해한 물질 중 하나로 국제적으로 사용이 제한되고 있는 PCBs나 DDT 등 많은 유해화학물질들이 과거에는 안전하다고 평가되었던 물질이었음을 상기해 볼 때, "MTBE를 안심하고 사용할 수 있는가?"라는 질문에 명확한 답을 내리기는 어렵다.

국내 전문가 및 세미나 참석자의 의견, MTBE의 위해성 여부, 국내 토양 및 지하수에서의 MTBE 검출결과, 외국의 정책동향을 종합적으로 고려할 때, 현시점에서 MTBE의 사용을 금지하는 것은 성급한 결론일 것이다. 현재까지 MTBE의 위해성에 대한 확실한 결론이 내려지지 않았으며, MTBE에 의한 대기오염도 저감 효과, 국내의 전반적인 토양 및 지하수에서의 MTBE 확산 정도 및 그 영향이 파악되지 않은 상태이기 때문이다. 한편, MTBE에 관해서 논란이 되고 있는, MTBE에 의한 토양 및 지하수 오염문제는, MTBE 물질 자체보다는 적절한 관리의 부재에 기인한다고 볼 수 있다. 따라서 MTBE 사용 자체의 금지보다는, 인체에 대한 안정성이 확인되지 않은 MTBE의 잠재적인 위해성과, 환경의 MTBE에의 노출을 줄이는 방향의 관리가 적절할 것이다.

현 시점에서는, 토양환경보전법과 먹는물관리법 또는 지하수법에 MTBE를 등재하여 오염물질로서 관리하는 것이 바람직하리라 사료된다. MTBE의 순기능을 살리는 이러한 방향의 관리는, MTBE를 당장 금지시킴으로써 발생되는 경제적, 대기환경적 손실을 막고, 토양 및 지하수의 MTBE 오염에의 노출을 예방하고 최소화하는데 기여할 것이다. MTBE 오염의 잠재적 원인자로 하여금 자발적이고 적극적인 MTBE 관리를 유도 할 수 있을 것이다.

향후 과제로서는 다음과 같은 사항을 포함할 수 있을 것이다. 첫째, 국내 토양 및 지하수의 MTBE에 의한 오염 현황 조사이다. 도시, 산업, 유류오염 지역 등에 대한 표본조사를 실시하는데, 특히 식수원에 대한 오염조사는 우선 실시하여 식수원의 오염실태를 파악하도록 한다. 둘째, 환경의 MTBE에의 노출을 최소화하기 위해서 MTBE를 저장하는 지하 및 지상저장탱크 관리를 강화한다. 셋째, 토양과 지하수 유용자원을 확보하기 위한 MTBE 확산지역의 복원이다. 넷째, 장기적으로는, 석유가 유한

하며 지구온난화 및 대기오염을 유발한다는 관점에서, 대체연료의 개발, 이용에 대한 관심을 높여야 할 것이다. 유럽에서는, RME (채종유 메틸에스테르)가 프랑스, 독일, 이태리, 스웨덴 등에서 실용화되어 있으며, 알코올 연료는 프랑스, 스웨덴에서 실용화되어 있음을 고려할 수 있다.

어제는 참으로 이롭게만 여겨졌던 물질이 내일은 잠재적인 유해물질이라는 꼬리표를 달 수 있다. 안전한 것으로 확인된 물질만을 사용한다면, 이러한 시행착오는 줄일 수 있겠으나, 철저한 사전 안전성의 검증이 어려운 것이 현실이다. 따라서 인체건강 및 환경에의 심각한 위협의 가능성을 최소화하기 위한 관리가 중요하다고 생각된다. MTBE의 특성으로 인하여 토양 및 지하수에서의 MTBE 확산은 다른 휘발유 성분들에 의한 것보다 훨씬 심각할 수 있다. 그러나 MTBE의 문제도 토양 및 지하수 보전 및 관리 문제의 범주에서 벗어나지 않는다. 모든 지하수가 언젠가는 사용될 수자원이라는 인식을 가지고 지하수를 보호하려는 노력을 할 때, MTBE뿐 만 아니라 다른 유해물질이 주는 건강위협으로부터 국민은 자유로울 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

강준원, M.R. Hoffmann. 2001. 「오존/초음파 조사에 의한 MTBE제거 특성에 관한 연구」. 연세대학교 산업환경학과.

김태현, 김성한, 이시진, 장순웅, 라현주. 1999. “유류분해균에 의한 BTEX 및 MTBE 동시분해 특성연구”. 「대한환경공학회 추계학술 연구발표회」.

대기환경연보. 2001. 환경부.

박석환, 전은미, 정문식. 1998. “Fenton-oxidation에 의한 MTBE 처리시의 영향인자에 관한 연구”. *Kor. J. Hlth. Soc.* 24(3): 63-69.

서울대학교. 2002. 21세기 프론티어 연구개발사업 ’수자원의 지속적 확보기술 개발사업 과제’ 연차실적자료집「지하수 활용을 위한 오염예방 및 저감기술개발」

석유화학. 2002a. "국내 MTBE 수요, 완만한 감소세 전망". 「석유화학」. 2002. 2: 38-40.

———— . 2002b. "MTBE 수급여건 변화와 전망". 「석유화학」. 2002. 3: 42-45.

이상수, 이태규, 설용건, 김현종, 주현규. 2000. “TiO_2 광촉매를 이용한 MTBE 분해”. 「한국공업화학회 연구논문초록 21회」.

이지훈, 이진용, 촌종용, 이강근. 2000. “유류 오염 물질 MTBE에 대한 연구동향”. *Journal of Korean Society of GW Environ.* 7(1): 55-58.

장순웅, 백승식, 이시진. 2001. “부탄 분해 미생물에 의한 가솔린 첨가제(MTBE) 분해”. *Journal of KoSSGE.* 6(3): 31-41.

日刊燃料油脂新聞. 2001. 10. 15

日本石油學會誌. 1985. 「MTBE混合ガソリンの實用性能」28(1): 47-53.

Nishina, T. 2000."自動車用燃料の動向". 自動車技術. 54(5): 5-10.

————. 2001. "歐美における自動車燃料の動向". *Petrotech*. 24(7): 549-553.

PEC. 2000. "美國における燃料油を巡る政策動向に關する調査報告書". *Petrotech*. 23(10): 88-89.

Achten, C., and Puttmann, W. 2001. "Method for determination of methyl tert-butyl ether in gasoline by gas chromatography". *Journal of Chromatography. A*. 910(2): 377-383.

API. 1993. *Gasoline vapor exposure assessment at service stations*. API#4553 Washington D.C. API.

AQIRP. 1997. *Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program Report*

ASTM Method D4815. available: http://www.astm.org

Belpoggi, F., Soffritti, M., and Maltoni, C. 1995. "Methyl tertiary-butyl ether (MTBE)-a gasoline additive-causes testicular and lymphohaematopoietic cancers in rats". *Toxicol. Ind. health* 11:119-149.

———————————————————. 1998. "Pathological characterization of testicular tumours and lymphomas leukemias, and of their precursors observed in Sprague-Dawley rats exposed to methyl-teriary-butyl-ether (MTBE)". *Eur. J. Oncol*. 3(3): 201-206.

Bengtsson, B. E., and M. Tarkpea. 1983. "The Acute aquatic Toxicity of Some

Substances Carried by Ships". *Marine Pollution Bulletin* 14(6): 213-214.

BenKinney, M. T., J. F. Barbieri, J. S. Gross, and P. A. Naro. 1997. "Acute Toxicity of Methyl-Tertiary-Butyl Ether to aquatic Organisms". Stonybrook Laboratories Inc., Parinceton, NJ ; abstract, 15th Annual SETAC Meeting, 30 October-3 November 1994.

Bioresearch Laboratories. 1990a. *Mass balance of radioactivity and metabolism of methyl tert-butyl ether(MtBE) in male and female Fischer-344 rats after administration of 14C MtBE by intravenous, oral, and dermal routes*. Report #38843. Senneville, Quebec, Canada: Bioresearch Laboratories.

———————— . 1990b. *Pharmacokinetics of methyl tert-butyl ether(MtBE) and tert-butyl alcohol(TBA) in male and female Fischer-344 rats after single and repeat inhalation nose-only exposure to 14C-MtBE*. Report#38844. Senneville, Quebec, Canada: Bioresearch Laboratories.

Bird, M. G., Burleigh-Flayer, H. D., Chun, J. S., Douglas, J. F., Kneiss, J. J., and Andrews, L. S. 1997. "Oncogenicity studies of inhaled methyl tertiary-butyl ether(MTBE) in CD-1 mice and F-344 rats". *J. Appl. Toxicol*. 17(S1): S45-S55.

Blue Ribbon Panel. 1999. *The Blue Ribbon Panel on Oxygenates in Gasoline*. Washington, DC, USA.

Borden, R. C. 1997. "Intrinsic biodegradation of MTBE and BTEX in a gasoline contaminated aquifer". *Water Resour. Res.* 33(5): 1105-1115.

Conaway, C. C., Schroeder, R. E., and Snyder, N. K. 1985. "Teratology evaluation of methyl tertiary butyl ether in rats and mice". *J. Toxicol. Environ. Health* 16: 797-809.

Dale, M. S., Moylan, M. S., Koch, B., Davis, M. K. 1998. "MTBE: Taste and odor threshold determinations using the flavor profile method". *Presented at the Water Quality Technology Conference.* November 9-13 Denver, Colorado. American Water Works Association(AWWA).

Davis, G. 1999. *The Governor of the State of California, Executive OrderD-5-99.* 1999, Sacramento, CA, USA.

————. 2002. *The Governor of the State of California, New Executive Order.* Sacramento, CA, USA.

Day, K. J., De Peyster, A., Allgaier, B. S., Luong, A., and MacGregor, J. A. 1998. "Methyl t-Butyl Ether(MtBE) Effects on the Male Rat Reproductive Endocrine Axis"(Abstrct#861). Society of Toxicology, Abstracts of the 37th Annual Meeting 42, 174.

ENSR. 1997. *Short-Term Sub-chronic Toxicity of MTBE to Ceriodaphnia dubia Under Static-Renewal Test Conditions*. Final Report, for Atlantic Richfield Corporation (ARCO), Study Number : 048-378-004-001, Study Director : J. Russell Hockett. Fort Collins Environmental Toxicology Laboratory.

——— . 1997. *Short-Term sub-Chronic Toxicity of MTBE to the Fathead Minnow (Pimephales promelas) Under static-Renewal Test Conditions*. Final Report, for Atlantic Richfield Corporation, Study Number : 0480-378-005-001, Study Director : J. Russell Hockett. Fort Collins Environmental Toxicology Laboratory.

EPA Method 8020A/21B, 826. available: http://www.epa.gov

Federal Register. 1998. *Announcement of the Drinking Water Contaminant Candidate List.* 63(40): 10273-10278.

Geiger, D. L., D. J. Call, and L. T. Brooke. 1981. *Acute Toxicities of Organic Chemicals to Fathead Minnows (Pimephales promelas).* Vol. IV, University of Wisconsin-Superior.

Gilbert, C. E., and Calabrese, E. J. 1992. "Developing a standard for methyl tertiary butyl ether in drinking water". in Gilbert, C. E. and Calabrese, E. J., eds., *Regulating drinking water quality:Ann Arbor, Mich.*, Lewis Publishers, Inc., pp. 231-252.

Gupta, G. and Y. J. Lin. 1995. "Toxicity of Methyl Tertiary Butyl Ether to Daphnia magna and Photobacterium phosphoreum". Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 55: 618-620.

Hakkola, M., Honkasalo, M. L., and Pulkkinen, P. 1997. "Changes in neuropsychological symptoms and moods among tanker drivers exposed to gasoline during a work week". *Occupational Medicine* 47(6): 344-348.

HEI. 1996. Health Effects Institute. *The Potential health effects of oxygenates added to gasoline, a review of the current literature*. A special report of the institute's oxygenates evaluation committee.

Hockett, and Russell. 1997. Werner and Hinton(1998)에 의해 인용.

Holmstead, J. 2001. *Issues Concerning the Use of MTBE in Reformulated Gasoline: An Update, Prepared Witness Testimony, Subcommittee on Oversight and Investigations.* The Committee on Energy and Commerce, The House of Representatives, Washington, DC, USA.

Johanson, G., Hihlen, A., and Lof, A. 1995. "Toxicokinetics and acute effects of MTBE and ETBE in male volunteers", *Toxicol. Lett.* 82/83: 713-718.

Kado, N. Y., Kuzmicky, P. A., Loarca-Pina, G, and Mumtaz, M. M. 1998.

"Genotoxicity testing of methyl tertiary-butyl ether (MTBE) in the Salmonella microsuspension assay and mouse bone marrow micronucleus test". *Mutation Res*. 412: 131-138.

Konishi, H. 1992. "MTBE Production Technologies for Reformulated Gasoline". *AROMATICS* 44(7): 36-45.

Lefkowitz, D. 2002. "Development of a method for extraction of methyl tert-butyl(MTBE) form soil". *Journal of Environmental Science and Health* 37: 17-25.

Lefkowitz, D., Zambrowski, M., and Uchrin, C. 2002. "Development of a method for extraction of methyl tert-butyl (MTBE) from soil samples". *Journal of Environmental Science and Health. Part A.* Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering 37(1): 17-27.

Lorenzetti, M. 2002. "California deadline on MTBE ban set for next month". *Oil&Gas Journal* 100(9): 25-30.

Mancini, E. R., and W. Stubblefield. 1997. "Physicochemical and ecotoxicological properties of gasoline oxygenates". *Presented at the Annual Meeting of the Society for Risk Analysis*. December 6-9, 1997, Washington, D.C.

McCoy, M., Abernethy, J., and Johnson, T. 1995. *Anecdotal and health-related complaint data pertaining to possible exposures to methyl tertiary butyl ether(MTBE): 1993 and 1994 follow-up survey(1984-1994)*. American Petroleum Institute, Washington.

McKinnon, R. J., and Dyksen, J. E. 1984. "Removing organics from groundwater through aeration plus GAC". *J. Am. Water Works Association* 76: 42-47.

McKone, T. E. 1987. "Human exposure to volatile organic compounds in household

tap water: the indoor inhalation pathway". *Environmental Science and Technology* 21: 1194-1201.

Mehlman, M. A. 1998. "Dangerous and cancer-causing properties of products and chemicals in the oilrefining and petrochemical industries. part-XXV: Neurotoxic, allergic, and respiratory effects in humans form water and air contaminated by MTBE in gasoline". *J. Clean Technol. Environ. Toxicol. and Occup. Med.* 7(1): 65-84.

Moser, G. J., Wolf, D. C., Sar, M., Gaido, K. W., Janszen, D., and Goldsworthy, T. L. 1998. "Methyl tertiary butyl ether-induced endocrine alterations in mice are not mediated through the estrogen receptor". *Toxicol. Sci.* 41: 77-87.

NEIWPCC. 2000. *A Survey of State Experiences with MTBE Contamination at LUST Sites.* New England Interstate Water Pollution Control Commission.

OFA(Oxygenated Fuels Association). 1998. *Taste and odor properties of methyl tertiary-butyl ether and implications for setting secondary maximum contaminant level.* Arlington, VA., Oxygenated Fuels Association

Paulov, S. 1987. "Action of the Anti-Detonation Preparation Methyl tert-Butyl Ether on the Model Species Rana temporaria". *Biologia* 42: 185-189.

Piel, W. J. 2002. "MTBE Use in Reformulated Gasoline". Hart World Fuel Conference, August 2002.

Platts. 2002. *History of move to ban MTBE in the US.* A Division of McGraw-Hill Company.

Prah, J. D., Goldstein, G. M., Devlin, R., Otto, D., Ashley, D., House, D., Cohen, K. L., and Gerrity, T. 1994. "Sensory, inflammatory, and ocular responses to and

the metabolism of methyl tertiary butyl ether in a controlled human exposure experiment". *Inhalation Toxicology* 6: 521-538.

Rousch, J. M., and Sommerfeld, M. R. 1998. "Liquid-Gas Partitioning of the Gasoline Oxygenate MTBE under Laboratory Conditions and its Effect on the Growth of SelectedAlgae". *Archives of Envieonmental Contamination and Toxicology* 34: 6-11.

Sakada, R. 1999. *A Drinking Water Standard for MTBE?* LUST Line, Bulletin 33.

Savolainen H, Pfaffli P, Elovaara E. 1995. "Biochemical effects of methyl tertiary-butyl ether(MTBE)in extended vapor exposure in rats". *Arch. Toxicol.* 57(4): 285-288.

Schirmer, M. 1999. "Evaluation of biodegradation and dispersion as natural attenuation processes of MTBE and benzene et the Borden Field site", *Phys. Chem. Earth* 24(6): 557-560.

Shen, Y. F., Yoo, L. Y., Fitzsimmons, S. R., Yamamoto, M. K. 1997. "Threshold odor concentrations of MTBE and other fuel oxygenates". Paper ENVR 216. In: *Proceedings of the 213th American Chemical Society National Meeting, Division of Environmental Chemistry, Environmental Fate and Effects of Gasoline Oxygenates.* April 13 - 17. San Francisco, California. 37(1): 407-409.

Smith, D. F., Kleindiest, T. E., Hudgens, E. E., McIver, C. D. 1991. "The Photooxidation of Methyl tertiary Butyl Ether". *International Journal of Chemical Kinetics* 23: 907-924.

Squillace, P. J., Pankow, J. F., Korte, N. E. and Zogorski, J. S. 1997. "Review of the environmental behavior and fate of methyl tert-butyl ether", *Environ. Toxicol. and*

Chem. 16(9): 1836~1844.

Squillace, P. J. 1999. *MTBE in the nations ground water, National Water-Quality Assessment(NAWQA) Program Results.* U. S. Geological Survey. available: http://sd.water.usgs.gov/nawqa/vocns

Taniguchi, B. 1979. "MTBE for octane improvement". *CHEMTECH.* p.502-510.

University of California. *Preliminary Analysis of University of California's Over-view of MTBE.* available: http://www.ofa.net

USEPA. 1997. Fact Sheet, *Drinking Water Advisory: Consumer Acceptability Advice and Health Effects Analysis on Methyl Tertiary-Butyl Ether (MtBE), EPA-822-F-97-009.* Office of Water, Washington, DC, USA.

———. 2000a. *Control of MTBE in Gasoline, EPA 420-F-00-010.* Office of Transportation and Air Quality, Washington, DC, USA.

——— . 2000b. Press Conference, EPA Administrator Carol M. Browner Remarks as Prepared for Delivery, Washington, DC, USA.

———. 2000c. *Advance Notice of Proposed Rulemaking to Control MTBE in Gasoline, Regulatory Announcement, EPA 420-F-00-012*. Office of Transportation and Air Quality, Washington, DC, USA.

———. 2001a. *Unregulated Contaminant Monitoring Regulation: Monitoring for List 1 Contaminants by Selected Small Public Water Systems, EPA 815-F-01-004.* Office of Water, Washington, DC, USA.

———. 2001b. *Unregulated Contaminant Monitoring Regulation: Monitoring for List 1 Contaminants by Large Public Water Systems, EPA 815-F-01-003.* Office of Water,

Washington, DC, USA.

Veith, G. D., Call, D. J., and Brooke, L. T. 1983. "Estimating the Acute Toxicity of Narcotic Industrial Chemicals to Fathead Minnows". *Aquatic Toxicity and Hazard Assessment: 6th Symposium.* ASTM STP 802, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.90-97.

Werner, I., and Hinton, D. E. 1998. *Toxicity of MTBE to Freshwater Organisms, in Health and Environmental Assessment of MTBE, Vol. 4*. UC Toxics Research and Teaching Program, UC Davis. available: http://www.tsrtp.ucdavis.edu/mtberpt/vol3_3.pdf

Young, W. F., Horth, H., Crane, R., Ogden, T. and Arnott, M. 1996. "Taste and Odor Threshold Concentrations of Potential Potable Water Contaminants". *Water Research* 30(2): 331.

Zogorski, J. S., Morduchowitz, A., Baehr, A. L., Bauman, B. J., Conrad, D. L., Drew, R. T., Korte, N. E., Lapham, W. W., Pankow, J. F., and Washington, E. R. 1996. *Fuel Oxygenates and Water Quality, Interagency Assessment of Oxygenated Fuels.* Washington DC. Office of Science and Techmology Policy, Executive Office of the President.

Abstract

This study aims to investigate whether it is necessary to regulate MTBE in Korea. MTBE, a gasoline additive, has been a controversial compound worldwide due to contamination of soil and groundwater. In this study, the following materials and information were used: i) available information on MTBE, ii) four articles presented at a seminar held as part of this study (i.e., A study on MTBE risk, MTBE contamination in the soil and groundwater in Korea, Current state and prospect of MTBE use as an additive in gasoline, and Regulations on oxygenates such as MTBE in the U.S. and European countries), and iii) the opinions of the seminar attendants.

The use of MTBE has become a worldwide issue due to its potential risk, unpleasant odor and ability to negatively affect the taste of water even at extremely low concentrations, high mobility in soil and groundwater, and low biodegradability. Although the risk of MTBE to human health has not yet been confirmed, some health risk analyses conducted for animals have shown evidence of carcinogenicity, reproductive toxicity, and endocrine disrupting activity of MTBE. Since MTBE dissolves easily in water and does not cling to soil well, it migrates faster and farther in the subsurface than other gasoline components. Remediation of soil and groundwater contaminated with MTBE is a challenge due to its very low biodegradability.

Countries have adopted different actions to manage MTBE. In the U.S., where more than 50% of drinking water is supplied from groundwater, MTBE will be banned in 14 states including California and New York. The US EPA placed MTBE on the Contaminant Candidate List in 1999; since then they have continued to investigate the potential health risks and occurrence of MTBE in the U.S.. Based on the results obtained during this investigation, the US EPA is supposed to set federal health standards for MTBE around

2010. On the other hand, MTBE has not been regulated in Europe or Japan, although its use has also been a controversial issue in these countries.

In Korea, MTBE has been in continuous demand since the use of unleaded gasoline became mandatory. MTBE is added to gasoline by 6.6-11.6 vol% as of 2001 and is believed to contribute to the abatement of air pollution. However, there has been evidence of MTBE contamination in Korean soil and groundwater. Very high concentrations of MTBE have been observed in the soil and groundwater at five gasoline-contaminated sites in Korea, probably due to the corrosion of underground storage tanks (USTs) and pipelines. The MTBE concentrations of the groundwater were 100 to 1000 times higher than the U. S. drinking water standard.

Discussing a ban on MTBE use in Korea seems to be premature at this point, considering the following: i) the incomplete data on the risk of MTBE to human health, ii) various perspectives on MTBE management in different countries, iii) the limited data on MTBE contamination of the soil and groundwater in Korea, and iv) the opinions suggested by experts and the seminar attendants. A risk of MTBE has not been clearly defined, and the effect of the MTBE addition to gasoline on the air quality has not been elucidated, either. Furthermore, the nature, extent, and environmental impacts of MTBE contamination in the soil and groundwater in Korea have not been delineated. Therefore, it would be appropriate at this point to make an effort to reduce the release and potential risk of MTBE to the environment, rather than to ban MTBE use.

At present, placing MTBE on the contaminants list under the soil environment protection law and safe drinking water law of Korea is recommended. Future considerations on MTBE are described below. First, investigations on the nature and extent of the soil and groundwater contamination by MTBE should be performed. Second, USTs need to be properly operated and maintained, to reduce the potential risks of MTBE to human health and the environment. Third, sites contaminated with MTBE

need to be cleaned up in order to protect soil and groundwater resources. Fourth, efforts should be made to develop alternatives to MTBE or gasoline.

집 필 자 약 력

박용하

고려대 농학 학사 (1982)
고려대 식물병리학 석사 (1984)
미국 Colorado 주립대 식물병리학 석사 (1987)
미국 Texas A&M University 농학 박사 (1991)
한국환경정책·평가연구원 환경대응 및 복원부장

조종수

서울대 공업화학 학사 (1979)
University of Arkansas 화학공학 석사 (1983)
Oregon State University 화학공학 박사 (1987)
(주)EN3 대표이사

김미정

서울대 천문학 학사 (1988)
서울대 천문학 석사 (1991)
미국 Texas A&M University 환경공학 박사 (1999)
한국환경정책·평가연구원 초빙연구원

공성호

한양대 화학공학 학사 (1984)
미국 Washington 주립대 환경공학 석사 (1988)
미국 Washington 주립대 환경공학 박사 (1988)
한양대 화학공학과 부교수

박정규

서울대 농생물학 학사 (1987)
서울대 환경독성학 석사 (1989)
미국 Oregon State University 환경독성화학 박사 (1996)
한국환경정책·평가연구원 연구위원

정충섭

전남대 화학공학 학사 (1988)
경원대 화학공학 석사 (2000)
한국 석유 품질 검사소 연구개발팀장