

# MTBE에 의한 지하수 오염실태조사

김경태, 이정자, 문승탁, 김오목, 이병욱, 정유진, 최춘석, 김용희  
수질보전과

## 요약문

주유소 및 주변 지하수 MTBE를 조사한 결과, 120개 지점 중 EPA 먹는 물 허용권고치  $20\mu\text{g/L}$ 를 초과한 곳은 13개소(10.8%),  $1\sim 20\mu\text{g/L}$ 인 곳은 34개소(28.3%), 불검출은 73개소(60.8%)로 나타났다. 이 중 미국 지하수 정화기준  $720\mu\text{g/L}$ 를 초과한 곳은 4개소(3.3%)로 오염정화가 필요한 것으로 나타났다. 그리고 주유소 주변 지하수에서는 모두 불검출되어 오염이 확산되지 않은 것으로 나타났다.

MTBE 농도변화 추이는 1차 검출지점에서 2차 재검출 되었고, 검출농도변화도 5% 미만이 73.7%이었다. 이것은 MTBE가 토양에 흡착이 잘 안되며 생분해성이 낮아 장기 잔류하는 성질 때문인 것으로 유추할 수 있다.

BTEX 검사결과, Benzene은 전체의 93.3%가 불검출, 나머지는  $1.01\sim 2.70\mu\text{g/L}$ , Toluene은 89.2%가 불검출, 나머지는  $1.29\sim 32.48\mu\text{g/L}$ , Ethylbenzene은 1개소에서만  $3.37\mu\text{g/L}$  검출, Xylene도 1개소에서만  $8.53\mu\text{g/L}$  검출되어 모두 먹는 물 수질기준 이하였다. MTBE와 BTEX 농도에 상관성은 낮았는데, 이것은 토양과 물에 대한 물리화학적 성질 차이 때문인 것으로 사료된다.

지하수 측정망에 대한 조사결과, MTBE는 상반기에는 41개소에서 불검출, 9개소에서 검출되었고, 최고  $12.73\mu\text{g/L}$ , 평균  $0.793\mu\text{g/L}$ 으로 나타났다. 하반기에는 42개소에서 불검출, 8개소에서 검출되었고, 최고  $6.68\mu\text{g/L}$ , 평균  $0.698\mu\text{g/L}$ 이었다. 모두 EPA 먹는 물 허용권고치  $20\mu\text{g/L}$  이하로 나타났다. BTEX는 상하반기 전 지점에서 불검출 되었다. 하반기보다 상반기에 MTBE가 약 13.6% 높았고, 동일지점 재검출은 적었으나, 검출지점 주변에서 재검출이 되어 지하수맥을 통하여 오염 확산가능성도 예측할 수 있다. 오염지점에 대한 체계적인 모니터링을 통해 오염확산상황을 파악하여 방지대책을 세워야 할 것이다. 본 조사로 인천의 지하수도 MTBE 오염에 노출되어 있음을 확인할 수 있었다.

MTBE의 위해성 여부, 지하수에서 검출결과, 외국의 정책동향을 종합적으로 고려할 때, 사용규제보다 인체 안정성이 확인되지 않은 MTBE의 잠재적인 위해성과 환경유출을 줄이는 방향의 관리가 적절할 것이다.

우리나라도 제도적인 면에서 토양환경보전법과 먹는 물 관리법, 지하수법 등에 MTBE를 등재하여 관리하는 것이 바람직할 것이다. 향후 MTBE의 관리정책수립 자료로 활용하기 위하여 토양 및 지하수의 MTBE 오염현황에 대한 철저한 조사가 필요할 것이다. 그리고 MTBE의 환경누출을 막기 위해 MTBE 저장탱크 관리를 강화하며, 토양과 지하수자원 확보를 위해 MTBE 오염지역에 대한 복원이 이루어져야 할 것이다.

## 목 차

<b>I. 서론</b>	<b>1</b>
1. 연구배경 및 목적	1
2. 선진국 및 국내의 MTBE 오염현황	2
<b>II. 문헌고찰</b>	<b>4</b>
1. MTBE의 물리·화학적 특성	4
2. MTBE에 의한 수환경 오염	5
3. MTBE의 위해성	6
4. 먹는 물에 대한 환경기준	7
5. 선진국의 MTBE 관리현황	8
(1) 유럽의 MTBE 관리현황	8
(2) 미국의 MTBE 관리현황	12
(3) EPA의 수중 MTBE 관리방향	13
<b>III. 연구 내용 및 방법</b>	<b>16</b>
1. 연구 내용	16
2. 연구대상 및 기간	16
3. 시료채취 및 분석방법	17
<b>IV. 결과 및 고찰</b>	<b>20</b>
1. 주유소 및 주변 지하수에 대한 MTBE 조사결과	20
(1) MTBE 농도분포	20
(2) MTBE 농도변화 추이	21
(3) BTEX 조사결과	22
(4) 측정값 사이의 상관성 조사	22
2. 지하수 수질 측정망에 대한 MTBE 조사결과	23
<b>V. 결론</b>	<b>24</b>
1. 선진국의 MTBE 관리현황	24
2. MTBE 조사결과	25
(1) 주유소 및 주변 지하수	25
(2) 지하수 수질 측정망	25
3. MTBE 관리방안에 대한 결론	26
<b>VI. 참고문헌</b>	<b>27</b>

## I. 서론

### 1. 연구배경 및 목적

MTBE는 1990년대 초반 이후 자동차 휘발유의 옥탄가 향상 및 산소함량 증가를 위해사용하고 있다. 그러나 MTBE가 갖는 잠재적인 위해성, 물에 극소량으로 존재하더라도 유발할 수 있는 불쾌한 맛과 냄새, 토양 및 지하수에서의 높은 확산성, 그리고 낮은 생분해성으로 인하여 문제점이 광범위하게 논의되고 있다. 미국에서는 MTBE에 의한 지하수 오염이 문제가 되어 MTBE의 사용을 단계적으로 금지하고 있으며, 현재 연방정부 차원에서 MTBE의 규제에 대해 검토하고 있다. 유럽과 일본에서도 MTBE에 대한 논의는 이루어지지만 국가적 차원에서 구체적인 규제는 하지 않고 있다.

우리나라에서도 1993년 무연휘발유 공급의 의무화에 따른 MTBE 사용이 본격화에 됨에 따라 국내 토양과 지하수에서도 MTBE가 검출되고 있다. 외국에서의 MTBE의 위해성 및 지하수 오염결과가 발표되면서 국내에서도 규제 필요성이 대두되었고 가솔린 오염에 취약한 장소를 중심으로 MTBE 오염 가능성이 제기되었다. 특히 MTBE의 강한 수용성과 휘발성에 반해 생물학적 분해는 비교적 느리므로 지하수에서 문제점이 클 것으로 예상되지만, 국내에서 MTBE의 오염도 조사나 오염방지 대책 및 관리방안에 대한 제도적인 정책수립이 부족하다.

또한, 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.

본 연구에서는 유류오염물질 중에 가솔린 첨가제로 사용되는 MTBE의 특성과 토양 및 지하에서의 이동현상, 인체의 유해성 및 선진국의 MTBE 관리현황에 대해 알아보았다. 그리고 인천시에 있는 유류 오염원 주변의 지하수를 선정하여 MTBE 오염실태를 파악하였다. 이를 바탕으로 지하수 등에서 MTBE 오염관리방안을 검토해 보고, 한편으로 MTBE 오염정화 방안을 마련하기 위한 기초 자료를 마련하고자 하였다.

## 2. 선진국 및 국내의 MTBE 오염 현황

경제발전과 소득수준이 향상됨에 따라 에너지 소비량, 대기 및 수질오염 부하량 증가로 토양 및 지하수 오염이 심해지고 있다. 또한, 자동차의 증가로 유류 사용량이 증가하고 주유소를 비롯한 유류저장 시설의 수도 1980년대 중반이후 급격히 증가하였다. 근래에 들어 유류를 보관하고 있는 주유소와 유해화학물질을 저장하고 있는 산업시설에서의 지하저장탱크에서 NAPLs(Non Aqueous Phase Liquids)라고 불리는 유류 및 유해화학물질의 유출 가능성에 대한 인식이 고조되었다.

특히 주유소 지하저장탱크에서 NAPLs의 유출로 인한 오염은 토양 생태계를 파괴하고 지하수를 오염시킬 가능성이 매우 높아 심각한 환경문제로 대두되고 있는 실정이다. 현재 우리나라 지하저장탱크 중 5년 이상이 지난 지하저장탱크가 상당한 부분을 차지하고 있으며 유출이 예상되는 탱크 수도 상당할 것으로 추정된다.

또한 대부분의 주유소에 유류저장탱크가 지하에 설치되어 있으며 NAPLs의 누유가 발생하는 것으로 추정되는 탱크도 상당하여 토양과 지하수의 오염을 가속화하고 있다. 그리고 주유소 지하 매립용 유류탱크에 관한 법이 소방법에 의존하고 있어, 이에 따라 건설된 주유소의 경우 대부분 외부에 모래나 콘크리트 박스를 갖추고 있지 않아 부식에 의한 기름누출이 심각하다. 지하저장탱크에 저장되어 있는 기름을 비롯한 유기화학물질은 대부분 인체 및 생물에 유해하므로 이들로 오염된 지역을 처리하는 것은 매우 중요하다. 그러나 국내에서는 토양보전법이 1996년에야 제정되고 아직까지 투자가 부족하여 유류누출로 인한 토양 및 지하수 오염에 대한 조사가 부족한 실정이다.

특히 최근에는 휘발유의 옥탄가 향상 및 산소함량 증가용 첨가제로 많이 이용되는 MTBE에 의한 지하수오염 문제가 대두되고 있는데 국내외를 막론하고 MTBE를 포함한 휘발유의 사용이 많은 곳에서는 대기, 물, 토양 및 지하수가 MTBE에 의하여 광범위하게 오염된 것으로 추정하고 있다.

MTBE는 DDT, 혹은 PCBs와 같은 심각한 독성은 없으나, 발암성에 관해 논란이 되어 많은 연구가 되고 있으며, 미국에서는 MTBE가 단일 화합물로는 2번째로 많이 생산, 소비되는 물질로 이 과정에서 누출된 MTBE에 의한 환경오염이 점차 가중되고 있다. 특히 식수원의 50%를 차지하는 지하수의 오염이 문제가 되어, 24개 주에서 지하수 수질기준으로 규제되고 있다. 최근 오염실태조사 결과, 도시 부근의 지하수 중 27%에서 MTBE가 검출된 것으로 보고되었고, MTBE에 의한 대기오염 저감 혜택을 가장 많이 받고 있는

캘리포니아주에서도 MTBE가 인체에 무해한 것으로 밝혀질 때까지 생산 및 사용을 금지하는 법안의 제정이 추진되고 있다.

1979년부터 MTBE는 무연휘발유의 옥탄가 향상제로 사용되었으나, 1990년 휘발유내 산소함량을 최소 2.7%(중량비)로 유지하게 한 미국의 Clean Air Act 수정안에서 일산화탄소 오염이 심각한 지역에 대해 휘발유의 완전산화를 보조하는 산소첨가제(Oxygenates)로 사용되기 시작하였다. 현재 미국에서 산소첨가휘발유(Oxyfuels)의 MTBE의 평균 부피비는 3.4%로 지역별 및 계절별로 함량이 조금씩 변화하며, 한대지역에서는 부피비로는 최고 15%까지 첨가되고 있다. 이외에도, 1994년부터는 오존을 유발하는 물질인 벤젠, Butadien, Formaldehyde, Acetaldehyde 등과 같은 유독한 휘발성 유기물질(VOCs)을 제어하기 위한 재합성 휘발유(Reformulated Gasoline) 프로그램이 시작되어 평시에도 휘발유에 MTBE를 11%까지 첨가하게 되었다.

우리나라에서는 MTBE를 1984년부터 사용하기 시작하였는데, 휘발유의 옥탄가 향상제에서 대기오염방지, 특히 자동차 배기가스중의 일산화탄소를 감소시키기 위한 산소첨가제 및 독성물질 저감제로 사용됨에 따라 국내에서도 MTBE 생산량이 매년 급증하고 있다. 우리나라에서는 1993년 환경보전법에 의하여 MTBE의 휘발유 배합이 의무화 되었으며, 상당량이 휘발유에 첨가되고 있다. 국내 휘발유의 MTBE 함량은 6~8%정도이며, 약 20%의 지하유류 저장시설에서 유류가 누출된다고 보고되고 있기 때문에 상당한 오염이 진행되었다고 추정할 수 있다.

## II. 문헌고찰

### 1. MTBE의 물리화학적 특성

MTBE(methyl tertiary butyl ether)는 산소와의 결합을 통해 다른 탄화수소보다 극성이 커서 수용성이 강하다. 물에 대한 용해도는 휘발유내에 포함된 다른 유독물질보다 30배 정도 높고, 유류 중에 BTEX보다 20배 정도 높다. 또한 MTBE는 토양 중의 유기물질이나 토양 입자에 잘 흡착이 되지 않으며, 지하 미생물에 의해 잘 분해되지 않는다.

끓는점은 약 55.2℃로 상온에서 휘발성이 있는 무색액체이고, 점도가 낮고, 가연성이며 공기와 혼합하여 폭발성을 나타낸다. 물에서 15 ~ 40 µg/L의 농도로 냄새가 감지되는 냄새강도가 높은 물질이다. 이 화합물은 옥탄가가 높아 무연휘발유의 옥탄가 조절을 위한 첨가제로 사용되고 있다. Table 1에 MTBE의 물리·화학적 성질을 나타내었다.

Table 1. Physicochemical Characteristics of MTBE

Parameters		Characteristics
성상		무색의 액상
분자식		$C_4H_9OCH_3$
분자량		88.14g/mol
녹는점		-109℃
끓는점		55.2℃
수용해도		51g/L at 25℃
인화점		-28℃
Koc		12.3; 11.0 (estimated)
log Kow		1.24
증기압 (Vapor pressure)		245 mmHg at 25℃
발열량 (J/kg)		$3.52 \times 10^7$
비중		0.740
비열 (J/kg)		2.13
Henry 상수		0.02 at 25℃
냄새 강도 (Odor threshold)		15-40µg/L
맛 강도 (Taste threshold)		40-140µg/L
가솔린 중 함량		약 15%
가솔린으로 수용해도		약 5,100 mg/L
유기용매 용해도		Hydrocarbons, Ethers, Alcohols에 잘 용해
옥탄가	Research Octan Number	118
	Motor Octan Number	101

## 2. MTBE에 의한 수환경 오염

MTBE는 휘발유의 불완전 연소를 감소시켜 대기오염을 줄이지만, 지하수를 오염시킨다 즉, 높은 수용성과 토양표면에 대한 낮은 흡착력 때문에 이동성이 높고 잘 분해되지 않으며, 지하수를 오염시킬 가능성이 높다. 이 때문에 MTBE의 유해성에 관한 논쟁이 심화되고 있다.

미국에서도 전역에 걸쳐 식수원을 포함한 지하수에서 MTBE가 검출되었다는 보고서가 증가하고 있다. 그런데, MTBE는 낮은 농도에서도 자극적인 맛과 냄새를 일으켜 식수로 마실 수 없게 한다.

휘발유가 저장된 곳이면 어디든지 그리고 휘발유가 운반될 때면 언제든지 MTBE가 환경으로 유출되어 결국 잠재적으로는 먹는 물 공급원에 도달할 수 있다. MTBE의 오염원으로는 지상과 지하에 위치한 연료 저장 탱크의 누출, 운반 수송관에서 누출, 자동차 사고로 인한 누출, 오래된 선박에서 누출 등이 있으며, 또한 강우에 의해 대기 중의 MTBE가 지표수로 유입될 수도 있다.

MTBE는 물에 잘 용해되고 토양에 잘 흡착되지 않는다. 이런 특성 때문에 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene) 등의 다른 가솔린계 화합물에 비하여 지하에서 더 빠르게 멀리까지 이동한다. 따라서 오염원의 크기는 오염원으로부터 수 킬로미터까지 확장될 수 있기 때문에 쉽게 지하수를 오염시킨다.

지하수에서 MTBE의 이동을 조절하는 것은 MTBE의 배출시기, MTBE의 농도, 지하수의 이동속도, 희석, 분해 등이며, 이에 따라 오염원의 크기가 결정된다. 또한 MTBE는 다른 가솔린계 화합물 보다 자연 생분해가 잘 되지 않는다. 따라서 다른 유류화합물에 비하여 지하수 내에서의 잔류시간이 길다.

한편, 저수지 같은 지표수에서는 빠르게 휘발된다. 그러나 이와는 대조적으로 몇 모니터링 관정에서는 몇 년 동안이나 MTBE 농도 감소가 거의 없는 경우가 관찰되어, MTBE는 지하수 내에서 지속성이 강함을 알 수 있었다(US EPA).

### 3. MTBE의 위해성

MTBE는 호흡, 섭취, 피부접촉 등을 통해 체내로 흡수된다. 오늘날까지 사람의 건강에 관한 MTBE의 연구는 호흡기에 의한 영향에 집중되었다. 동물이 고농도의 MTBE를 흡입했을 경우 어떤 동물은 암으로 발전하였고 어떤 동물은 암이 아닌 다른 건강영향을 경험하였다. 동물실험 결과, 호흡기를 통해 흡수된 MTBE는 혈액을 따라 이동하여 간, 신장, 뇌에 분포하는 것으로 나타났다.(Savolainen et al., 1995; Bioresarch, 1990a, b)

MTBE는 또한 t-부탄올(TBA; Tertiary Butyl Alcohol), 포름알데히드, 이소부텐 등의 화학물질로 대사된다. 간에서 MTBE는 주로 TBA와 포름알데히드로 대사되었다. MTBE와 TBA의 혈액 내 반감기는 각각 1시간, 10시간이었으며, 이에 TBA는 사람에 대한 MTBE의 노출지표로 주로 이용되고 있다.(Johanson et al., 1995; NSTC, 1997)

지금까지 MTBE 흡입으로 인한 건강 위해성을 평가한 결과 MTBE 연료첨가제가 인체의 건강에 분명한 위험을 준다는 결론을 내리지는 못했다. 그러나 사람에게 MTBE가 흡수될 경우 건강영향에 대해서는 조심스러운 태도를 취하고 있다. EPA는 현재의 데이터로는 식수 중의 낮은 농도수준의 MTBE가 건강에 미치는 영향을 추정하기에는 부적절하지만, 흡수량이 높을 경우 잠재적인 발암물질임을 밝혔다. EPA 및 타 연구자들에 의한 최근의 연구결과는 식수 중 MTBE에 의한 건강영향을 보다 정확히 판정하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

EPA는 1997년 발표한 식수 권장지침에서 MTBE에 관한 모든 건강영향정보를 검토하고, 건강위험에 대한 양적 지표를 설정하기에는 자료가 부족하다는 결론을 내려 건강권장기준을 설정하지 않았다. 식수 권장문서에서는 음용수에서 MTBE 농도가  $20 \sim 40 \mu\text{g/L}$  또는 그 이하에서는 건강에 위해하지 않다고 밝히고 있다.

동물에 대한 MTBE의 발암 가능성은 확인되었지만, 사람에 대한 MTBE의 발암성 자료는 아직 미흡하다. IARC(International Agency for Research on Cancer)의 분류체계에서는 MTBE를 Group 3(인체발암물질로서 분류할 수 없는 물질; Not classifiable as a human carcinogen)로 제안하고 있다.(Table 2)



Table 2 Classification of Carcinogenicity by IARC

Category	Definition	Chemicals
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

#### 4. 먹는 물에 대한 MTBE 환경기준

미국의 일부 주정부에서는 자체적으로 MTBE의 환경기준을 설정하고 있다. 그러나 EPA는 여전히 MTBE에 대한 국가기준을 설정하지 않고 있다.

1997년 12월 EPA에서는 인간의 냄새와 맛에 대한 민감성이 크게 차이가 나는 것을 인정하여 “20 ~ 40 $\mu$ g/L 또는 그 이하의 MTBE 농도는 대부분의 사람에 있어서 불쾌한 냄새와 맛을 내지는 않을 것”이라는 식수권장사항을 발표하였다. 이 권장사항은 농도를 그 범위 이하로 유지하도록 권장하는 지침문서이다. EPA에서는 1997년에 MTBE의 건강영향에 대한 모든 정보를 검토하였으며 “식수에서 20 ~ 40 $\mu$ g/L의 MTBE는 부정적인 건강영향을 미칠 가능성이 희박하다”라고 발표한 바 있다. 그렇지만, EPA에서는 MTBE의 잠재적인 위해성에 대하여 연구를 계속하고 있다.

## 5. 선진국의 MTBE 관리 현황

### (1) 유럽의 MTBE 관리 현황

#### － 관리 현황

유럽에서는 오일쇼크를 계기로 1973년부터 MTBE를 휘발유에 첨가하기 시작하였으며 현재도 널리 사용되고 있다.

1985년 유럽경제공동체(EEC; European Economic Community)에서는 각 나라에 대하여 MTBE 등 산소첨가제의 혼합 상한치 설정에 대한 지침을 정하였다. 즉, 혼합비 10 vol% 이하는 각 나라에서 자유롭게 사용 가능하며, 각 나라가 선언을 하면 15 vol%까지도 사용 가능토록 하였다. 이에 따라, 프랑스, 영국 등은 MTBE 10 vol%까지를 상한치로 정하고 있으며, 네덜란드, 독일, 벨기에, 룩셈부르크 등은 15 vol %까지를 상한으로 정하고 있다. 그렇지만, 유럽에서는 산소첨가제의 휘발유 혼입에 대한 원칙적 허용량 외에도, 연료성상을 고려하여 휘발유 엔진에 악영향을 미치지 않는 범위 안에서 각 나라의 상황에 따라 그 이상으로 배합하는 것도 인정하고 있다.

미국에서의 MTBE에 대한 대책 움직임에 영향을 받은 유럽에서도 MTBE에 의한 지하수오염 문제가 관심의 대상이 되었다. 유럽위원회는 미국 Arthur D. Little 사에 유럽에서의 MTBE 대책 필요성에 관하여 조사를 의뢰하였는데, 검토 결과 유럽에서는 미국과 같이 MTBE가 문제화되지는 않는다는 결론이 나왔다. 이에 유럽 위원회는 2001년 5월 'MTBE와 관련하여서는 지하탱크의 관리가 중요하며 MTBE의 규제에 대한 제한은 하지 않는다.'고 발표하였다.

#### － 대기, 수질, 토양 등의 MTBE 농도 조사 및 기준 검토

수 환경으로 배출된 많은 양의 MTBE는 대기로 들어간다. 대기 중에서는 광화학 분해로 말미암아 MTBE의 반감기는 3~6일이 된다. EU의 위험분석 보고서에서는 미국의 MTBE 배경농도 수준은 대기 중 0.7에서 2.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  사이라고 언급하였다. 많은 지역에서의 대기와 지하수 중 MTBE 배경농도는 거의 유사한 수준인 것으로 판단되지만, 주유소에 가까운 지역에서는 일반적인 배경 농도보다 거의 50배에 달하는 것으로 평가된다.

클링거(Klinger) 등이 공저한 보고서에서는 독일 일부 지역 식수원에서의 MTBE 농도에 대한 자료가 제시되었다. 시골 지역 91%, 도심지역의 51%에서는 MTBE 농도가 검출 하한선인 0.05 $\mu\text{g}/\text{L}$ 보다도 낮았으며, 도심지역 지하수에서의 평균 농도는 0.17 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이었다. 2000년 독일연방 환경부(UBA)에서는 “독일 및 서부 유럽에서의 연료 첨가제 MTBE 사용이 환경에 미칠 수

있는 영향(Possible Impacts on the Environment Caused by the Use of MTBE as a Fuel Additive in Germany and Western Europe)"이라는 보고서를 출간하였는데, 극소수의 지하수에서만 수백  $\mu\text{g/L}$ 에 이르는 농도가 측정되었다는 것이 언급되어 있다. 지표수 및 지하수에서의 MTBE 농도는 미국에 비해 낮았다. 이러한 결과에 따라, '독일의 대수층의 MTBE 오염은 매우 낮으며, 따라서 위협적인 영향을 끼칠 것으로 예상되지는 않는다.'는 결론을 내렸다.

2001년 네덜란드 국립공중보건환경연구소 (National Institute for Public Health and the Environment; RIVM)에서는 수자원협회 (Netherlands Waterworks Association; VEWIN)와 공동으로 식수와 그에 상응하는 수자원에서의 MTBE 농도를 측정하였다. 두 번에 걸친 조사 결과, 일반적으로 낮은 농도의 MTBE가 검출되었다. 검사 위치는 집수지역의 취약성에 근거하여 선정하였다. 6,7월에 실시된 검사에서는 22개 원수 (raw water) 시료에서 0.01  $\mu\text{g/L}$  이하의 농도가 검출되었고, 평균 농도는 0.07  $\mu\text{g/L}$ , 최대 농도는 0.42  $\mu\text{g/L}$ 이었다. 9/10월의 검사 결과에서는 평균 농도는 0.09  $\mu\text{g/L}$ 이었고 최대 농도는 2.9  $\mu\text{g/L}$ 이었다. 특히, 이 기간 중 두 번째로 높은 MTBE 농도가 0.14  $\mu\text{g/L}$ 이었던 점을 감안하면, 보고된 최대 농도는 정상적이지 못한 것으로 판단되었다. 반면, 원수(지하수 및 지표수)에서 기록된 농도는 0.5  $\mu\text{g/L}$  이하였고, 지표수에서의 최대 농도는 3.2  $\mu\text{g/L}$ 이었다. 그러나 상대적으로 높은 농도(11.9  $\mu\text{g/L}$ )가 하나의 지하수관정에서 측정되었는데, 이 경우는 지역적인 특성 탓으로 해석되었다. 이 조사 결과로부터 내려진 주요 결론은 '식수에서 MTBE 농도는 일반적으로 매우 낮으며(0.14 $\mu\text{g/L}$  이하) 최대 농도가 2.9 $\mu\text{g/L}$  이긴 하지만 위생에 영향을 미칠 것으로 예상되는 결과는 발견되지 않았다.'는 것이다. 하지만, 오염 이력이 있는 토양이나 오염된 지역의 지하수에서는 MTBE를 차단할 것을 제안하였다.

한편 토양 질 기준으로 유럽 국가 중 스웨덴은 6ppm을 제시하고 있으며, 덴마크는 500ppm을 만성 독성관점에서 제시하고 있다(환경부, 2003).

## - MTBE의 인체 영향에 대한 견해

MTBE 사용과 관련된 건강상 위험을 연구하는 유럽의 한 과학자 실무팀은 "EU Directive"에서 '위험물 기준에 근거하면 MTBE는 발암물질이 아니다'라고 결론을 내렸다. 유럽 생태 및 화학독성센터 (ECETOC; European Center for Eco-toxicology and Toxicology of Chemicals)에서도 '현재 점유율과 소비자에게 노출된 정도로 볼 때 인간 건강에 문제가 되지 않는다.'라

는 결론을 내렸다.

한편, EU는 MTBE에 대하여 건강 및 환경 위해성 평가 (risk assessment)를 수행하였다. 1997년 유럽위원회(EC)의 위원회규제 (Council Regulation) 793/93에서는 물질 평가 및 관리의 일환으로 MTBE를 3차 우선 순위 물질로 선정하였다. 핀란드가 EC를 대신하여 MTBE에 대한 위해성 평가를 책임질 대리국가로 선정되었다. 이 조사과정에서는 한 물질을 사용함으로써 발생할 수 있는 모든 가능성을 평가하기 위하여 잠재 노출의 위험성을 포함해 모든 건강 및 영향 환경 평가가 이루어졌으며, 이 물질에 대한 적절한 분류 및 식별에 대한 조사가 포함되었다. MTBE에 대한 EU 위험 평가는 2001년 11월에 종료되었는데, 유럽위원회 공식저널 (Official Journal of the European Communities)의 2001년 11월 4일 판에 그 결과가 발표되었다. 그 결과를 요약하면 'MTBE에 노출되는 것은 인간 건강, 대기 또는 환경에 어떠한 위해성을 끼치지 않은 것으로 보인다. 하지만 지하수 수질을 보호하기 위해서, 특히 저장 시설에 대해서는 MTBE 사용에 대한 유럽 최소 표준을 적용해 위해성 감소 조치를 취할 필요가 있다'는 것이었다. 2002년 위해성 평가보고서에서는 '표층수에 대하여 유출과 관련하여 수질 환경에 끼칠 수 있는 위험의 특성을 분석할 추가적인 정보가 필요하다'고 언급되었다. 그 이후에 MTBE로 인한 물고기의 오염 및 MTBE 포함 물을 물고기가 회피하는 지에 대한 실험들이 이루어졌는데, 그 결과 추가적인 위해성 평가보고서가 2004년에 발표되었다. 이 보고서에는 '15  $\mu\text{g/L}$ 의 농도에서 물고기의 오염이나 회피 행동이 발견되지 않는다.'고 결론지었다. 참고로, 이 농도는 표층수에서의 일반적인 MTBE 농도보다 훨씬 높은 것이다.

## — 미국과 차이점

미국의 상황은 고유한 것이기 때문에 미국에서 있었던 지하수 문제가 동일하게 유럽에서 반복되리라고 예상할 수 없다. 즉, 경제 구조, 기술 장비 및 대수층에서의 본질적 차이가 존재하기 때문에 미국과 유럽의 상황을 직접적으로 비교한다는 것은 부당하다. 주요 차이점은 다음과 같다.

미국에서의 측정 허용값에서는 하루 한 주유소 저장탱크에서 5 갤론 (18.9 리터/탱크/일)이 누출되어도 된다. 그러나 유럽에서는 그 정도 양이 누출되는 것은 허용되지 않는다.

미국에서는 유류의 많은 양은 저장 탱크에서 배송 지역으로 펌프 압력에 의해 전송된다. 하지만, 유럽에서는 휘발유는 일반적으로 저장탱크 쪽에서 직접 흡입하며, 전체 송유 시스템에 압력이 가해지지 않기 때문에 대규모 유

출이 적다.

미국에서는 휘발유가 훨씬 싼데, 이는 본질적으로 낮은 세금 때문이다. 유럽에서는 EU가 휘발유에 부과하는 세율이 높기 때문에 환경에 대한 관심뿐만 아니라 유출을 막아야 한다는 강력한 경제적 동기를 가진다.

미국에서는 옥탄가를 높이는 대체물질이 가지는 높은 경제적 이익 때문에 MTBE 등 휘발유 첨가제를 추방하려는 노력이 저지되고 있다.

또한, 미국에서의 휘발유 첨가제 오염 위험성을 유럽 상황과 비교하는 데에는 몇 가지 차이점이 존재한다. 우선, 유럽의 휘발유에 포함된 휘발유 첨가제는 평균 2-3 %로서 캘리포니아의 12 %에 비해 현저히 낮다. 따라서 캘리포니아에서 휘발유 첨가제로 인하여 식수가 오염될 가능성은 유럽의 상황과는 매우 다르다. 유럽 EU Directive에서는 휘발유 첨가제 사용을 5 %까지 허용하고 있지만, 일반적으로 유럽과 영구에서의 휘발유 첨가제 농도는 각각 최대 1.6 %와 1% 이하로 매우 낮다(UKPIA). 또한, 높은 안전기준 때문에 송유관과 주유소에서 누출의 위험성이 적어 대부분의 유럽 정부에서는 휘발유 첨가제로 인해 발생할 수 있는 잠재적 위험들에 대해 그렇게 깊은 관심을 기울이지 않는다. 휘발유 첨가제 금지가 토의되기도 했으나, 핀란드의 사례를 들어 공중 보건에 위험이 되지 않는다고 이야기되었다. 즉, EU 전체에 걸쳐 휘발유 첨가제는 위험하지 않은 것으로 분류되고 있다. 결론적으로, 미국에서와 같은 광범위한 오염이 발생할 가능성은 희박하다는 것이다. 유럽에서는 휘발유에 특별세를 부과해서 미국과 비교하여 높은 수준의 휘발유 가격을 책정하고 있으며 대중교통 수단을 많이 이용토록 장려하고 있다. 독일에서는 '환경세의 일환으로 휘발유 가격에 추가적으로 10%의 세금을 부과하고 있어 약 2배 정도에 이르는 휘발유 가격을 부담하고 있는데, 독일 정부는 향후 수 년 동안 지속적으로 휘발유 가격을 올리기로 결정했다. 나아가, 캘리포니아 대수층의 지질학적 특징은 영국과는 사뭇 다르다. 캘리포니아에서는 물은 상대적으로 천부지하수에서 얻고 있지만, 영국 등에서는 시골의 심부대수층에서 얻는다. 또한 영국의 지하수는 많은 경우 저투수성 점토나 기타 경계층들에 의해 오염으로부터 보호를 받는다. 캘리포니아의 사례를 고려해서, 정유 회사들은 환경위원회에 대하여 어떤 지역이 휘발유 첨가제로 인한 식수 오염이 높은지를 조사하도록 후원했다. 그 결과, 영국은 현재 수준에서 휘발유 첨가제를 사용하는 경우 식수에 아무런 심각한 위험이 없다고 결론 내렸다. 결론적으로, 유럽에서는 아직까지 MTBE에 대하여 미국에서와 같은 규제와 관리 조치를 취하고 있지는 않은 것으로 보여 진다.

## (2) 미국의 MTBE 관리현황

미국에서는 기본적으로 지하유류탱크규제프로그램 (UST Regulatory Program)을 이용하여 지하저장탱크에서 누출되는 유류 및 MTBE를 규제하고 있다. 그 결과, 1998년에 이르러 지하저장탱크의 80 % 이상이 개선되었다. 1998년 11월에는 Blue Ribbon Panel을 구성하여, 대기오염으로부터 향상된 대기의 상태를 유지하면서 동시에 MTBE로 인한 오염을 규제하고자 하였다.

한편, EPA는 지하저장탱크의 누출과 MTBE 오염을 예방하는 UST 프로그램을 강화하고, 동시에 먹는 물 보호프로그램 (Drinking Water Protection Program)을 강화하였다.

1998년 2월, MTBE가 EPA의 오염물질후보군목록(CCL; Contaminant Candidate List)에 포함되었다. CCL에 포함된 항목들은 EPA 먹는 물 프로그램(Drinking Water Program)에 의해 지속적인 조사를 받게 된다. 그리고 SAB(Science Advisory Board)와 NDWAC(National Drinking Water Priority Category)의 분류 체계로 이루어져 있다. CCL에 포함된 MTBE는 처리, 정화, 그리고 인체의 유해성 등에 대하여 EPA의 조사를 받고 있다.

MTBE의 먹는 물 내 기준치에 대해서 EPA는 국가 먹는 물 기준(National Drinking Water Standard)을 규정해놓고 있지는 않지만, 1997년 맛과 냄새를 기준으로 20 ~ 40ppb로 먹는 물 권고기준을 발표했다.

### - MTBE와 기타 산화제에 관한 미국 연방정부의 환경기준

2003년 미국의 42개 주에서 MTBE에 대한 대책기준 (action levels), 정화기준(cleanup levels), 혹은 먹는 물 기준 (drinking water standards)을 마련하고 있다. 38개 주(states)가 2000년도에 마련한 MTBE 기준의 범위를 종합 정리하였다. 많은 주에서 삼 년 사이에 산화제 농도 기준이 변하고는 있으나 변동이 크지는 않다. MTBE 기준의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

23개 주(2000년에는 20개 주)에서 0.005에서 60mg/kg 사이의 토양대책기준(soil action levels)을 보유하고 있으며, 그 평균치는 약 0.3mg/kg이다.

27개 주에서 0.005에서 319,000mg/kg 사이의 토양정화기준(soil cleanup levels)을 보유하고 있으며, 그 평균치는 약 0.3mg/kg이다. 이 기준은 변화가 심하고 지역별로 특징을 보이며, 위험성과 관련한 조건에 따라 차이를 보인다.

31개 주에서는 12에서 202,000 $\mu$ g/L 사이의 지하수대책기준(groundwater action levels)을 보유하고 있으며, 그 최대 빈도는 20에서 70 $\mu$ g/L이다. 이 기

준의 결정에 있어서는 위해성이 가장 큰 요인으로 작용하였다. 예컨대, 하와이의  $202,000\mu\text{g/L}$ 은 하와이의 식수가 ‘위험수준이 아니라는 것’을 말해주는 반면,  $20\mu\text{g/L}$ 은 식수가 ‘위험 수준’이라는 의미이다.

34개 주에서 10에서  $51,000,000\mu\text{g/L}$  사이의 지하수정화기준(groundwater cleanup levels)을 보유하고 있으며, 그 최대 빈도는 20에서  $70\mu\text{g/L}$ 이다. 많은 주에서, 이 수치 역시 위해성에 상당히 의존하고 있다. 예를 들어, 오레곤 주의 수치는  $20-51,000,000\mu\text{g/L}$ 인데, 이에 대하여 ‘특정 장소에 적용하는 위해성 기준 농도는 노출경로에 근거한다.’라고 설명한다.

20개 주에서 10에서  $240\mu\text{g/L}$ 의 1차 먹는 물 기준(primary drinking water standards)을 보유하고 있고, 6개 주는 5에서  $400\mu\text{g/L}$ 의 2차 먹는 물 기준(secondary Drinking Water Standards)을 보유하고 있다.

11개 주는 먹는 물 기준으로 EPA가 권고하고 있는 기준( $20\sim 40\mu\text{g/L}$ )을 사용하고, 13개 주는 몇 가지 종류의 주별 ‘건강권고기준(health advisory)’을 보유하고 있는데, 그 범위는 20에서  $200\mu\text{g/L}$ 이다.

미국의 여러 주들은 TBA, Ethanol, TAME, ETBE, DIPE, Methanol 등 기타 휘발유 첨가산화제(oxygenates)에 대한 환경기준을 갖고 있다.

### (3) EPA의 수중 MTBE 관리 방향

#### - 먹는 물 안전법 (Safe Drinking Water Act)에 의한 관리

미국에서는 아직 MTBE를 SDWA로 규제하지 않고 있다. 그러나 지하수 및 식수 공급장에서의 MTBE 검출로 제기된 문제를 다루기 위하여, EPA는 몇 가지 중요한 대책을 강구하였다. 1997년 12월, EPA는 소비자의 수용 가능성 (맛 및 냄새에 대한)을 근거로 MTBE에 대한 식수권장기준을 발표하였다. 이는 SDWA의 규제를 받지 않고 있는 먹는 물 오염물질들에 대한 정보를 제공하기 위한 것이었다. 권장 기준은 강제적인 것은 아니나 식수 공급자나 다른 관련 당사자에게 잠정적인 건강 영향 또는 소비자의 수용성에 대한 지침을 제공한다. MTBE 권장기준은 건강 영향을 근거로 한 것은 아니지만, EPA는 소비자의 수용성을 이유로 ‘ $20-40\mu\text{g/L}$  범위에서 MTBE를 유지 관리하는 것이 건강에 나쁜 영향을 주지 않는 안전성을 제공할 것’이라 지적하였다. EPA는 구체적으로 권장 기준 설정에 대한 이유를 다음과 같이 밝혔다: “ $20-40\mu\text{g/L}$  범위의 농도는 쥐 시험 결과 발암성 또는 비발암성 영향이 관찰된 노출 수준에 비해  $20,000-100,000$ 배나 낮은 수치이다. 이러한 노출안전율은 연방 안전식수법에 의한 1등급 먹는 물 수질기준에서 발암성에 대처하기 위해 특별히 고려한 노출안전율의 범위 이내에 있다. 이러한 안전율은

비발암성 영향에 대처하기 위하여 특별히 제공된 기준보다도 크다. 그러므로 불쾌한 맛과 냄새로부터 원수를 보호하는 것은 소비자를 잠재적인 건강 영향으로부터 충분히 보호하는 것이다.

추가하여, EPA는 MTBE에 대하여 점차 강제적인 먹는 물 수질기준으로 발전시킬 단계들을 취하였다. 1998년 2월 안전 식수법의 규제를 받는 잠정오염물질후보목록(CCL)에 MTBE를 포함시켰다. 오염물질후보목록에 속하는 물질은 규제 우선 고려 대상, 연구 우선 대상, 산출특성 이해 우선 대상으로 분류된다. MTBE의 경우, 건강 영향과 산출 특성 간의 데이터의 차이로 말미암아 데이터 수집과 건강 영향에 대한 연구가 우선시 되어야 하는 연구 우선 대상 오염물질로 분류하였다. 이에 따라 EPA에서는 향후 규제 대상에 포함시키기 위하여 기존 데이터의 갭을 채워 줄 연구를 우선적으로 추구하고 있다.

한편, SDWA는 EPA에 대하여 '1999년 8월까지 공공 용수 시스템에 대하여 규제 대상 오염물질들에 대한 모니터링을 실시토록 요구할 것'을 지시하였다. 이에 따라, EPA는 MTBE를 이 규정에 포함시키고, '대형 공공 용수 시스템에 대하여 2001년 1월부터 MTBE 모니터링을 시작할 것'을 지시하였다. 규제대상오염물질 모니터링 규정에 의하여 모아질 MTBE 산출 특성 자료는 향후 건강 영향에 대한 연구 결과와 결합되어 규제 여부를 결정하는데 필요한 정보를 제공할 것으로 보고 있다. SDWA에 근거하여 MTBE의 규제 결정에 대한 차기 회의는 2006년에 실시된다. EPA에서는 먹는 물 규제사항을 발표하기 위하여 보통 3년 반의 기간을 요청하고 있으므로, MTBE에 대한 강제 규제가 발표되는 것은 2010년이 될 것으로 예상된다.

## － 행정 규제

휘발유 첨가 산화제에 대한 기준은 주마다 다르다. EPA의 조사 결과, 15개 주에서는 자신들의 MTBE 및 산화제에 대한 지하수 수질기준이 강제력이 있다고 보고하고 있다. 10개 주에서는 권고안대로 기준을 사용하고 있으며 강제력은 없다고 하고 있다. 다른 주에서는 강제력을 모든 절차에 포함시키고 있다고 하였다.

12개 주에서는 최근에 연료산화제에 대한 기준을 바꾸었으며, 15개 주에서는 변경을 고려 중이라고 하였다. 연료산화제에 대한 기준을 변경하는 일에 대한 EPA의 지원 여부에 대하여, 27개 주에서 긍정의 입장을, 6개 주에서는 부정의 입장을 밝혔고 7개 주는 '모르겠다'고 답하였다. EPA에 바라는 지원 항목에 대하여 21개 주에서는 산화제에 대한 최대허용기준(MCL) 마련을 원



한다고 하였고, 9개 주는 기술 지원을, 2개 주는 건강 관련 권고를, 4개 주는 독성 데이터 제공을 원한다고 하였다.

#### － 지하저장탱크(UST) 및 인근 지하수 오염 모니터링

EPA에 의한 지하유류저장탱크(UST, underground storage tank)에 대한 규제는 MTBE와 다른 유류 물질에 의한 토양과 지하수의 오염을 감소시키는데 크게 기여하였다. EPA는 1998년 12월 22일, 흘림(spill)과 넘침(overflow)에 관한 필요조건을 만족시키지 못하고 부식 방지 조건을 갖추지 못한 기준 이하의 UST에 대해서 개선을 하거나 폐기를 하였다.

규제된 탱크와 배수관은 모두 누출 탐지를 해야만 한다. 그래서 UST 부지로부터 오염이 퍼져나가기 전에 신속히 누출을 감지할 수 있어야 한다.

MTBE는 환경에 누출되었을 때 석유 탄화수소와 다르게 거동하기 때문에, MTBE 오염 지역의 특성을 정확하게 파악하기 위해서는 정화를 위한 조사가 수정되어질 필요가 있다. UST 프로그램의 많은 규제자들은 MTBE는 높은 용해도로 인해 지하수에 잘 용해되어 지하수에서의 농도 변화가 급격하게 일어나는 간헐적 형태로 타나난다는 것을 관찰했다. 이러한 pulse는 빗물의 침투 또는 지하수위의 상승에 의해 발생한다. 실제적인 MTBE의 농도와 그리고 지하수가 다른 아래의 지역으로 흘러갔을 때의 위험지수(levels of risk to down-gradient receptors)를 알기 위해서는 여러 번의 지하수 시료 채취가 필요하다. 지하수 시료 채취 빈도는 지하수의 속도와 모니터링 관정의 수를 고려하여 결정되어진다. 그리고 정확한 장기간의 시료채취 자료는 지하수 정화 방법을 선택하는데 있어 중요한 자료이다. 지하수의 정화 방법에는 Pump-And-Treat, Air Sparging, Bioremediation, Point-Of-Use Treatment 등의 방법이 있다.

### Ⅲ. 연구 내용 및 방법

#### 1. 연구 내용

본 연구는 다음과 같이 4가지 주요 내용을 포함한다.

첫째, 인천시내 군구별 지하수 개발·사용현황을 조사하여 이 자료를 기초로 MTBE 오염원인 주유소의 지하수 및 주변 지하수를 선정하여 1차 MTBE 오염도를 조사한다. MTBE와 함께 BTEX 조사를 병행하여 상관성을 검토한다.

둘째, 1차 조사결과를 토대로 오염이 확인된 지점 중 오염농도가 높은 지점을 선택하여 2차 조사를 실시하여 MTBE 오염변화 추이를 알아본다.

셋째, 선진국의 MTBE 관리제도 현황을 조사한다

넷째, MTBE 지하수 오염 실태조사 결과 및 선진국 관리제도를 토대로 MTBE의 관리방안을 검토한다.

#### 2. 연구 대상 및 기간

1차 지하수오염 실태조사는 인천시내 주유소 및 주유소 주변 지하수 120개소를 선정하였는데, 그 중 MTBE 오염원인 주유소 내 지하수는 97개소, 주유소 주변(약 150~500m 거리) 지하수 23개소였다. 2차 조사에서는 1차 조사결과 오염이 확인된 지점 중 19개소를 선정하였다.

조사 대상 지점 선정은 각 군구 건설과의 협조로 관내 지하수 개발 및 이용현황을 조사하고, 인천시내 주유소 현황 및 주유소내 지하수 이용현황을 자료조사, 전화문의 및 현지방문을 통해 조사하여 최종적으로 조사지점 120개소를 선정하였다. 한편 지하수 수질 측정망은 군구에서 의뢰되는 지하수 50개소를 선정하였다.

주유소 및 주변 지하수에 대한 조사는 120개소에 1회 조사를 실시하고, 1차 조사에서 MTBE가 검출된 지점 중 19개소를 선정하여 2개월 이상 간격을 두고 2차 조사를 실시하였다. 지하수 수질 측정망에 대한 조사는 측정망 50개소에 대해 상하반기로 구분하여 2회씩 조사하였다.

주유소 및 주변 지하수에 대한 조사는 1차 조사를 2006년 6월에서 8월까지, 2차 조사를 2006년 10월에 수행하였다. 측정 분석 및 자료 수집, 조사결과 정리 등은 2006년 3월에서 12월까지 수행하였다.

지하수 수질 측정망에 대한 조사는 상반기에 2006년 5월에서 7월, 하반기에 9월에서 11월에 걸쳐 수행하였다.

### 3. 시료채취 및 분석 방법

조사지점에서 지하수 시료채취는 “지하수 수질측정망 설치·운영계획” 시료채취방법에 준하여 채취하였다. 주유소 및 주변 지하수는 현장을 직접 방문하여 채수 및 조사를 하였고, 지하수 수질 측정망은 군구의 담당 공무원이 채수하여 정기검사 의뢰한 시료를 사용하였다.

측정분석은 US EPA Method 5030에 근거, Purge & Trap 전처리를 하여 GC/FID로 분석하였다.

분석법에 대한 정도관리로 검출한계(Method Detection Limit)는 0.1 $\mu$ g/L, 상관계수(Correlation coefficient)는 0.9999로 나타났다.

#### - 분석 기기 및 분석 조건

분석항목은 MTBE와 BTEX로 하고, 측정분석 자료를 이용한 오염특성 평가는 MTBE와 BTEX의 상관성 조사, MTBE 오염농도 변화 추이 분석, GC 분석법과 GC/MS법 사이의 검출 농도차이 비교 등을 수행하였다.

MTBE 및 BTEX의 분석에 사용된 분석기기 및 분석조건은 다음과 같다.

지하수 중에 함유되어 있는 MTBE 및 벤젠·톨루엔·에틸벤젠·크실렌(BTEX)를 동시 측정하였다.

Purge & Trap 장치는 Tekmar DOHRMANN로, GC는 Verian CP-3800으로 분석하였다. 분석조건은 Table 3과 같다.

Table 3. The Analysis conditions of MTBE & BTEX using GC

<b>○ Purge &amp; Trap</b> - Purge Time - Desorb Preheat Temp. - Desorb Time - Desorb Temp.	10min 220℃ 4min 225℃
<b>○ Gas Chromatography</b> - Detector Temp. - Injector Temp. - Oven Temp. program - Carrier gas flow - Column - Detector	250℃ 220℃ 50℃(6min) → 10℃/min → 120℃ N <sub>2</sub> at 1.0 mL/min CP-Sil 8CB (50m×0.32mm×1.5 $\mu$ m) Detector : FID

## － 시약 및 표준용액

가) 정제수 : 시약용 정제수를 사용하거나, 증류수를 15분간 끓인 후 90 ℃를 유지하면서 불활성가스로 1시간 퍼지 하여 휘발성 유기물질을 제거하고 병 구멍이 작은 유리병에 넣은 다음 마개를 한다. 공시험을 수행할 때 표준물질의 피이크 부근에 불순물 피이크가 없는 것을 사용한다.

나) 묽은 염산(1+1) : 염산과 정제수를 같은 양으로 혼합한다. 공 시험할 때 표준물질의 피이크 부근에 불순물 피이크가 없는 것을 사용한다.

다) 인산

라) 염화나트륨 (NaCl)

마) 표준용액

① MTBE, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, o-크실렌, m-크실렌 및 p-크실렌은 표준시약 또는 특급이상을 사용하며, 표준물질의 순도가 96 %이상이면 농도는 보정하지 아니한다.

② 표준원액은 미리 희석하여 판매되는 표준원액(0.1 ~ 1 mg/mL)을 사용하거나 각 물질별 표준원액을 다음과 같이 조제한다.

㉠ 10mL 메스플라스크에 메탄올 9.8 mL를 넣고 마개를 연 상태에서 메스플라스크의 표면에 묽은 알코올이 마를 때까지 약 10분간 방치한 다음 0.1 mg단위까지 무게를 잰다.

㉡ 각각의 메스플라스크에 위의 표준물질을 취하여 플라스크의 내벽에 닿지 아니하도록 조심하면서 직접 2~3 방울을 넣는다.

㉢ 다시 무게를 잰다. 이어서 메탄올로 표선까지 채운 다음 마개를 하고 플라스크를 흔들어서 혼합한다.

㉣ 각각의 표준물질의 첨가량을 구하여 표준원액의 농도( $\mu\text{g/mL}$ )를 구한다. 이 용액은 될 수 있는 대로 여러 개의 바이알에 공기층이 남지 아니하도록 나누어 넣은 다음 밀봉하여 냉장고(4 ℃이하)에서 보존하고, 4주일 이내에 사용한다.

## － 시료채취 및 관리

시료는 인산 (1+10) 또는 황산 (1+5)을 10mL에 1 방울 가한 갈색 유리병에 가득 채워 총 25mL 이상 채취하고 공기가 들어가지 않도록 주의하여 밀봉한다. 시험관에 채취된 시료를 즉시 실험할 수 없는 경우에는 0~4 ℃ 냉암소에서 보존하고 14일 이내 분석에 사용하여야 한다.

## － 분석

시료 5mL를 auto sampler를 이용하여 실린지로 스파저에 주입한다. 상온에서 벤젠·톨루엔·에틸벤젠·크실렌(BTEX) 및 MTBE를 퍼지시켜 트랩에서 포집한 다음 신속히 가열 탈착시켜 GC 또는 GC/MS로 분석한다. GC/MS의 경우 선택이온 또는 이온질량수의 정량이온에 대한 크로마토그램을 작성하고, 벤젠·톨루엔·에틸벤젠·크실렌(BTEX) 및 MTBE의 retention time에 해당하는 위치의 피크로부터 피크 면적을 측정하고, 미리 작성한 검량선으로부터 각각의 양을 구하여 시료중의 농도를 산출한다.

## － 검량선 작성 및 결과 계산

가스크로마토그래프용 메탄올 약 80mL를 넣은 100mL 용량플라스크에 휘발성 유기화합물 혼합표준액 0.5 ~ 10 mL를 단계적으로 취하여 넣고 가스크로마토그래프용 메탄올을 넣어 표선까지 채운다.

실린지에 정제수 5mL를 취하고, 제조된 정량용 표준액 2  $\mu$ L를 마이크로실린지를 이용하여 주입한 다음 P&T 전 처리하여 GC 및 GC/MS로 분석한다. GC/MS는 질량 크로마토그램으로부터 MTBE에 해당되는 피크의 면적을 측정하고 표준액 농도와의 관계선을 작성한다.

시료의 면적이 검량선의 상한값을 초과할 경우에는 시료 일정량을 취하여 적당한 농도로 정확히 희석한 다음 다시 실험한다. 각 물질별 retention time에 해당되는 피크의 면적을 측정하여 검량선으로부터 농도를 계산한다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 주유소 및 주변 지하수에 대한 MTBE 조사결과

#### (1) MTBE 농도 분포

인천시 지하수 중에 MTBE 오염원인 주유소 및 주변의 지하수를 중심으로 총 120개를 선정하여 MTBE 오염실태조사를 한 결과는 다음과 같다.

총 120개 지점 중 EPA 먹는 물 허용 권고치인  $20\mu\text{g/L}$ 를 초과한 지점은 13개소(10.8%),  $1 \sim 20\mu\text{g/L}$  이하인 지점은 34개소(28.3%), 불검출은 73개소(60.8%)로 나타났다. 이 중에 미국의 지하수 정화기준인  $720\mu\text{g/L}$ 를 초과한 지점은 4개소(3.3%)로, 오염정화가 필요한 것으로 나타났다.

주유소 내 지하수와 주변 지하수 오염도를 비교해 보면, 주유소 지하수 97개소 중 47개소(48.5%)에서 MTBE가 검출되었고, 주유소에서 약 150~500m 가량 떨어진 지점의 지하수 23개소에서는 모두 검출되지 않아 오염이 확산되지 않은 것으로 나타났다.

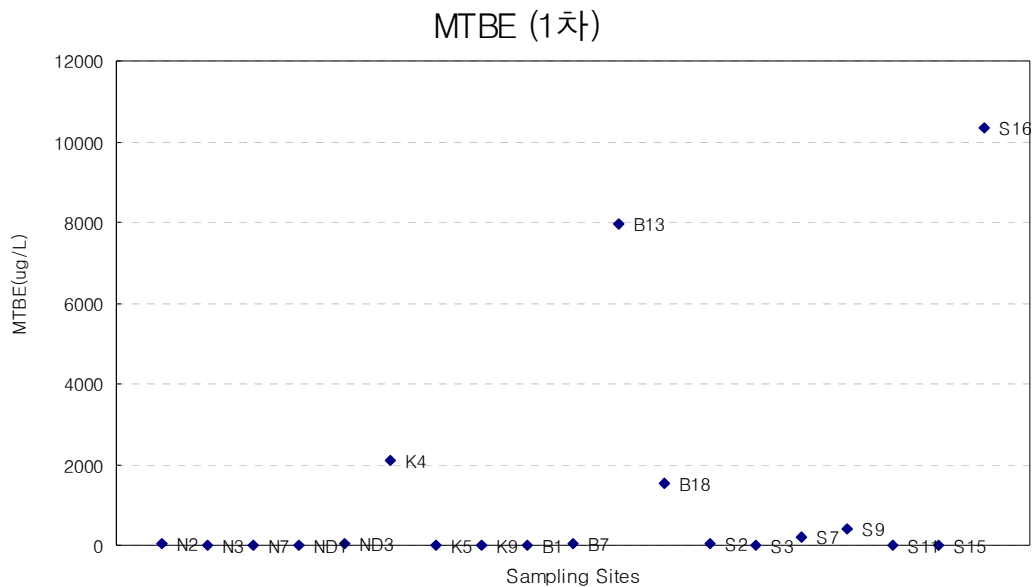


Fig. 1 MTBE Conc. at sites (1st survey)

Fig. 1에 MTBE 검출지점 중  $4\mu\text{g/L}$  이상인 지점에 대해 농도별 분포를 나타내었다.  $720\mu\text{g/L}$ 를 초과한 4지점 외에는  $50\mu\text{g/L}$ 이하의 농도범위를 나타내었다. 한편, MTBE와 BTEX 오염도의 상관성을 알아보기 위해 각 시료에 대해서 BTEX 분석을 하였다. 그 결과 MTBE와 BTEX 농도 사이에는 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

## (2) MTBE 농도변화 추이

1차 조사결과 MTBE가 약  $4\mu\text{g/L}$  이상 검출된 지점 중에서 19개 지점을 선정하여 2차 조사를 실시하였다. 농도변화 추이를 보기 위해 2차 조사는 1차 조사 후 2개월 이상 경과 후에 실시하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

1개 지점을 제외하고 다시 검출되었으며 농도변화 추이는 감소한 쪽이 57.9%, 증가한 쪽이 42.1%였다. 이 중에 73.7%는 5% 미만의 소폭 변화를 하여 변화가 적은 것으로 나타났다. 농도가 감소한 원인은 MTBE 오염의 감소, 지하수위 변동, 오염 확산 등 다양한 영향으로 판단할 수 있다.

전반적으로 오염농도의 변화가 적었으며, 특히, 미국의 지하수 정화기준인  $720\mu\text{g/L}$ 를 초과한 지점 4개소에서는 1차 조사와 2차 조사의 검출농도 차이가 0.080~0.45%로 유사한 결과를 나타내었다. 이것은 MTBE가 토양 내 흡착이 잘 안되며, 생분해성이 낮아 장기 잔류하는 성질과 관련이 있기 때문으로 유추할 수 있다.

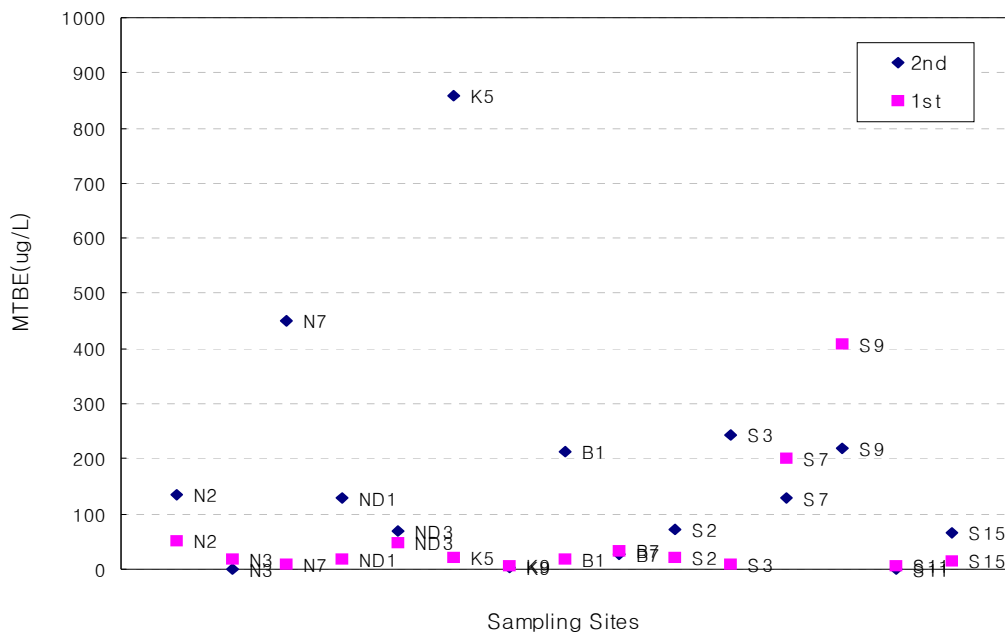


Fig. 3 Comparison of MTBE Conc. at 1st and 2nd Analysis

주유소 내 지하수와 주변 지하수의 오염도를 비교해 보면, 주유소 지하수 97개소 중 47개소(48.5%)에서 MTBE가 검출되었고, 주유소에서 약 150 ~ 500m 가량 떨어진 지점의 지하수 23개소에서는 모두 검출되지 않아 오염이 확산되지 않은 것으로 나타났으며, 검출지점 중에 먹는 물로 사용하고 있는 곳은 없었다.

지하수의 용도별 분포는 직접 또는 정수 후 먹는 물로 사용하는 경우는 2개 지점(1.6%), 생활용수로는 113개 지점(94.2%), 공업용수·기타 5개 지점(4.2%)이었다. 먹는 물로 사용하고 있는 2개 지점에서는 모두 검출되지 않았다.

### (3) BTEX 조사 결과

1차 조사시료 120개 지점의 지하수 관정에서 BTEX 오염실태조사를 실시한 결과, 조사대상 지하수 중에 총 BTEX가 120개 지점에서 0.00~32.48 $\mu$ g/L 범위의 농도로 검출되었다.

Benzene은 총 120개 지점 중 93.3%인 112개 지점에서 불검출로 나타났고, 8개 검출지점의 농도는 1.01 ~ 2.70 $\mu$ g/L의 농도분포를 보였다. 8개 지점 모두 먹는 물 수질기준 10.0 $\mu$ g/L보다 낮은 농도를 보였다.

Toluene은 120개 지점 107개(89.2%) 지점에서 불검출로 나타났고, 13개 검출지점의 농도는 1.29 ~ 32.48 $\mu$ g/L의 농도분포를 보여 먹는 물 수질기준 700.0 $\mu$ g/L보다 훨씬 낮은 농도를 보였다.

Ethylbenzene은 조사대상 지하수 중에 1개 지점에서만 검출되었고, 검출농도는 3.37 $\mu$ g/L으로 먹는 물 수질기준 300.0 $\mu$ g/L보다 훨씬 낮은 농도를 보였다. 나타났다.

Xylene도 120개 지점 중 1개 지점에서만 8.53 $\mu$ g/L으로 검출되어, 먹는 물 수질기준 500.0 $\mu$ g/L보다 훨씬 낮은 농도를 보였다.

BTEX 검사결과 먹는 물 수질기준을 초과하는 곳은 없었으며, MTBE 농도와 상관성은 나타나지 않았다.

### (4) 측정값 사이의 상관성 조사

조사대상 지하수에서 측정값들 사이에 상관성을 조사하였다.

MTBE와 BTEX 농도사이에 상관성은 매우 낮았다. 이는 MTBE와 BTEX가 토양 및 물에 대한 물리적 화학적 성질의 차이 때문인 것으로 판단된다.

군·구별로 비교를 해 보면, 서구와 부평구, 계양구에서 높게 나타났고, 중구, 남구, 동구, 연수구, 강화군에서 MTBE 농도 값이 비교적 낮은 농도분포



를 보였다. 농촌보다 도심과 인구밀집지역에서 전체적으로 높은 분포를 보여 MTBE 오염이 심각한 것으로 나타났다.

MTBE 오염유발시설인 유류 저장탱크의 설치 년수와 MTBE 농도사이에는 상관성이 적었는데, 이것은 국립환경연구원의 연구결과와 유사했다. 따라서, MTBE 주요 오염원인은 탱크로부터 누유(漏油)보다는 탱크의 넘침, 흘림 등 부주의가 원인인 것으로 추측된다.

## 2. 지하수 수질 측정망에 대한 MTBE 조사결과

지하수 수질 측정망에 대한 수질조사는 전국적인 지하수 수질 현황과 수질변화 추세를 정기적으로 파악하여 지하수 수질보전정책 수립을 위한 기초자료로 활용하기 위해 실시되고 있다.

조사대상은 인천시 각 군·구별로 5개 지점씩 총 50개 지점을 선정하여 상하반기 년 2회 실시한다.

조사지점 선정기준은 도시지역, 농림지역, 자연환경보전지역으로 구분하여 현재 음용으로 이용하고 있거나 이용할 가능성이 높은 지점으로 주변에 특정 오염원이 없으며, 관정상태가 양호하여 장기간 관측정으로 이용 가능한 곳을 선정한다. 공공관정을 우선 대상으로 하고, 관측정의 제원(심도, 구경 등)이 확실하며 향후 관정 폐쇄 계획이 없고 우기동안에도 침수 등 재해의 우려가 없는 지역을 선정한다.

조사항목은 특정유해물질 15개 항목(카드뮴, 비소, 시안, 수은, 유기인, 페놀, 납, 6가 크롬, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 1,1,1-트리클로로에탄, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌)과 일반오염물질 5개 항목(수소이온농도, 대장균군수, 질산성질소, 염소이온, 일반세균)이다.

사용용도별로 구분해 보면, 총 50개 지점 중 먹는 물로 사용하는 곳이 17개 지점, 음용 이외에 생활용수로 사용하는 곳이 31개 지점이며, 농업용으로 사용하는 곳이 2개 지점이다.

MTBE 수질조사는 군구의 담당 공무원이 채수해 온 시료를 정기 수질검사와 병행하여 실시하였다.

### - 상반기 지하수 측정망에 대한 수질검사결과

상반기 지하수 측정망에 대한 수질검사결과 50개 지점 중 9개소에서 MTBE가 검출되었고, 41개소에서는 검출되지 않았다. MTBE 최고 검출농도는  $12.73\mu\text{g/L}$ , 평균 농도는  $0.793\mu\text{g/L}$ 로 모두 EPA 먹는 물 허용 권고치인  $20\mu\text{g/L}$  이하의 농도로 나타났다. 한편 BTEX는 50개 지점 전체에서 검출되지 않았다.

## － 하반기 지하수 측정망에 대한 수질검사결과

하반기 지하수 측정망에 대한 수질검사결과 50개 지점 중 8개소에서 MTBE가 검출되었고, 42개소에서는 검출되지 않았다. MTBE 최고 검출농도는  $6.68\mu\text{g/L}$ , 평균 농도는  $0.698\mu\text{g/L}$ 로 모두 EPA 먹는 물 허용 권고치인  $20\mu\text{g/L}$  이하의 농도로 나타났다. BTEX는 상반기와 마찬가지로 50개 지점 전체에서 검출되지 않았다.

상반기와 하반기를 비교하면 상반기(5.1 ~ 7.11)에 하반기(9.20 ~ 11.17)보다 MTBE 평균 농도가 약 13.6% 높은 결과를 나타내었고, 상반기 최고 농도  $12.73\mu\text{g/L}$ 를 나타낸 D-4-c 지점과 D-6-b 지점에서는 하반기에도 MTBE가 검출되었으나, 그 외 지점에서는 상하반기 동일 지점에서 반복 검출되지 않았다. 그러나, 검출지점 주변 측정망에서 다시 검출이 되는 것으로 나타나, 지하 수맥을 통하여 오염 확산이 되었을 가능성도 예측 할 수 있다. 오염이 확인된 지점 주변에 대한 지속적이고 체계적인 모니터링을 통해 오염확산 진행 상황을 파악하여 오염방지 대책을 세워야 할 것이다.

## V. 결론

### 1. 선진국의 MTBE 관리현황

선진국에서의 MTBE 관리현황은 다음과 같다.

- － 동물실험 결과 MTBE의 발암성과 위해성이 확인되었으나 실험방법의 타당성에 대한 논쟁으로, 인체 위해성은 정립되지 않았다.
- － 미국 등 선진국에서는 MTBE를 국가적 차원의 수질기준으로 설정 및 관리하지는 않고 있으며, 장기적 조사와 연구를 통한 관리정책을 갖고 있다.
- － 미국은 맛과 냄새에 근거한  $20-40\mu\text{g/L}$ 의 먹는 물 허용권고치를 제시하고 있는데, 향후(2010년경)에 수질기준으로 확대시킬지 판단하기 위하여 오염실태조사와 위해성에 대해 지속적으로 연구하고 있다.
- － 미국의 경우 MTBE에 대하여 지하수, 토양, 먹는 물의 환경기준을 주별로 다르게 수립하여 시행하고 있다. 또한 오염원인 지하유류저장탱크(UST)의 관리를 우선 시행하고 있는데, 일부 주에서는 이 프로그램에 MTBE 관리도 포함시키고 있다.
- － 네덜란드, 독일, 스위스 등 유럽의 일부 국가에서는 미국보다 다소 소극적으로 MTBE를 관리하고 있다. 그 이유는 MTBE 사용량이 적고, 지하저장탱크를 보다 엄격하게 관리해서 지하수 중 MTBE의 오염 빈도가 낮고, 지하수 부존의 지질특성이 상이하기 때문이다. 현재 이들 국가는 MTBE의 오염특성 파악을 위해 장기적인 실태조사를 하고 있다.

## 2. MTBE 조사결과

### (1) 주유소 및 주변 지하수

－ 조사대상 120개 지점에서 MTBE가 EPA 먹는 물 허용 권고치  $20\mu\text{g/L}$ 를 초과한 지점은 13개소(10.8%),  $1\sim 20\mu\text{g/L}$  지점은 34개소(28.3%), 불검출은 73개소(60.8%)로 나타났다. 이 중에 미국의 지하수 정화기준  $720\mu\text{g/L}$ 를 초과한 지점은 4개소(3.3%)로 오염정화가 필요한 것으로 나타났다.

주유소 내와 주변 지하수의 오염도를 비교해 보면, 주유소 지하수 97개소 중 47개소(48.5%)에서 MTBE가 검출되었고, 주변 지하수(150~500m 거리) 23개소에서는 모두 검출되지 않아 오염이 확산되지 않은 것으로 나타났다.

－ MTBE 농도변화 추이를 관찰한 결과, 1차 조사에서 검출된 지점에서 2차 조사에서 재검출 (1개 지점 제외) 되었고, 검출농도는 5% 미만의 소폭변화를 보인 곳이 73.7%였다. 이것은 MTBE가 토양 내 흡착이 잘 안되며, 생분해성이 낮아 장기 잔류하는 성질 때문인 것으로 유추할 수 있다.

－ BTEX 검사결과, Benzene은 전 지점 중 93.3%가 불검출, 나머지는  $1.01\sim 2.70\mu\text{g/L}$ , Toluene은 89.2% 지점에서 불검출, 나머지는  $1.29\sim 32.48\mu\text{g/L}$ , Ethylbenzene은 1개 지점에서만  $3.37\mu\text{g/L}$  검출, Xylene도 1개 지점에서만  $8.53\mu\text{g/L}$  검출되었다. BTEX 검사결과 먹는 물 수질기준을 초과하는 곳은 없었으며, MTBE 농도와의 상관성은 나타나지 않았다.

－ 측정값 사이의 상관성을 조사한 결과, MTBE와 BTEX 농도사이에 상관성이 낮았는데, 이것은 MTBE와 BTEX가 토양 및 물에 대한 물리화학적 성질 차이 때문인 것으로 사료된다.

### (2) 지하수 수질 측정망

－ MTBE는 상반기 50개 지점 중 41개소에서 불검출, 9개소에서 검출되었는데 최고 농도는  $12.73\mu\text{g/L}$ , 평균 농도는  $0.793\mu\text{g/L}$ 으로 나타났다. 하반기에는 42개소에서 불검출, 8개소에서 MTBE가 검출되었고, 최고 농도는  $6.68\mu\text{g/L}$ , 평균 농도는  $0.698\mu\text{g/L}$ 이었다. 상하반기 모두 EPA 먹는 물 허용 권고치인  $20\mu\text{g/L}$  이하로 나타났다.

－ BTEX는 상하반기 모두 전 지점에서 검출되지 않았다.

－ 하반기보다 상반기에 MTBE 농도가 약 13.6% 높았고, 두 지점 외에는 재검출이 되지는 않았으나, 검출지점 주변에서 재검출이 되는 것으로 나타나, 지하수맥을 통하여 오염 확산가능성을 추측 할 수 있다. 오염이 확인된 지점 주변에 대한 지속적이고 체계적인 모니터링을 통해 오염 확산 진행상황을 파악하여 오염방지 대책을 세워야 할 것이다.

### 3. MTBE 관리대책방안에 대한 결론

MTBE의 위해성 여부, 지하수에서의 MTBE 검출결과, 외국의 정책동향을 종합적으로 고려할 때, MTBE의 사용을 금지하는 것은 성급한 결정일수 있는 것 같다. 그것은 아직 MTBE의 위해성에 대한 확실한 결론이 내려지지 않았고, MTBE에 의한 대기오염도 저감 효과, 국내의 전반적인 토양 및 지하수에서의 MTBE 확산 정도 및 영향이 파악되지 않았기 때문이다.

MTBE에 의한 토양 및 지하수 오염문제는 MTBE 자체보다는 MTBE를 적절하게 관리 하지 못하고 있기 때문에 발생하는 문제일 수 있다. 따라서 MTBE 사용 자체의 규제보다는 인체에 대한 안정성이 확인되지 않은 MTBE의 잠재적인 위해성과 MTBE의 환경으로의 유출을 줄이는 방향의 관리가 적절할 것이다.

우리나라에서도 MTBE 관리대책으로 제도적인 면에서 토양환경보전법과 먹는 물 관리법, 지하수법 등에 MTBE를 등재하여 관리하는 것이 바람직할 것이다. 이것은, MTBE 사용을 금지시킴으로써 발생하는 손실을 막고, 토양 및 지하수에 MTBE 오염을 예방하고 최소화하는데 기여할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 인천에서 휘발유 오염우려지역 및 비 오염지역의 지하수에서의 MTBE 오염현황을 조사하였다. 이번 조사로 인천의 지하수도 MTBE 오염의 위협에 노출되어 있음을 확인할 수 있었다.

향후 MTBE의 관리정책방향의 수립에 기초조사로 활용하기 위하여 토양 및 지하수의 MTBE오염 현황에 대한 철저한 조사가 필요할 것이다. 그리고, MTBE의 환경으로의 누출을 최소화하기 위해 MTBE 저장탱크에 대한 관리를 강화하며, 토양과 지하수 자원을 확보하기 위해 MTBE 오염지역에 대한 복원이 이루어져야 할 것이다. 또한, MTBE 대체물질 및 대체연료의 개발이 이루어져야 할 것이다.

## VI. 참고문헌

1. 공주대학교, "연료첨가제 MTBE 오염실태조사(1차년도)", 국립환경과학원 (2006. 3)
2. 박용하, 조종수 외 4, "연료첨가제 MTBE의 위해성 및 관리필요성에 관한 연구", KEI 2002 정책과제 연구보고서 (2002. 10)
3. 박정규, "MTBE의 환경위해성 평가", 환경정책연구 (2002)
4. 이지훈 외 4, "유류오염물질 MTBE에 대한 연구동향", J. of KSGE, vol 7, 1 (2000. 3)
5. 먹는물의 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙, 환경부령 제 95호, 환경부
6. 안승구 외 2명, 해설 먹는 물의 수질관리, 동화기술
7. 조종수, "MTBE에 의한 지하수 오염", 한국지하수토양학회 추계학술대회 (2001. 9)
8. 박용하 외 5, "토양오염지역의 관리 및 복원방안 I", KEI 2002 정책과제 연구보고서 (2002. 12)
9. 정영희, "미규제 미량유기오염물질 분석기법 개발에 관한 연구", 국립환경연구원 보, 22권 (2000)
10. API, "Gasoline vapor exposure assessment at service stations" (1993)
11. Ho-Jin Chung, Soo-Uook Song, "A study on the characteristic properties of flocculation factors", J. of KTSWT, 8(1), pp.9 ~ 18 (2000)
12. API, American Petroleum Institute, <http://www.api.org>
13. EEA, European Environment Agency, <http://www.eea.europa.eu>
14. EFOA, European Fuel Oxygenate as Association, <http://www.efoa.org>
15. EPA, Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov>
16. 日本衛生學會, 衛生試驗法 註解, 金原出版社, 東京 (1995)
17. Davis, J. M., "Human Health risk issues related to MTBE in drinking water", National Ground water Association, National Ground water Association conference (2002)
18. Fernandez, L., A. A. Keller, "Cost-benefit analysis of methyl tert butyl ether and alternative gasoline formation", Environmental Science & Technology & Policy 3 (2002)
19. Hartley, W. R., A. J. England Jr., and D. J. Harrington, "Health risk assessment of groundwater contaminated with methyl tertiary butyl ether", Water Science & Technology 39 (1999)
20. Safe Drinking Water Committee, "Drinking Water and Health", National Academy Press Washington D.C. 3 (1980)