

유류 오염 물질 MTBE에 대한 연구동향

(Reviews on the Studies of MTBE Contaminants in Groundwater)

이지훈(Ji-Hoon Lee)* · 이진용(Jin-Yong Lee)* · 천정용(Jeong-Yong Cheon)* ·
이강근(Kang-Kun Lee)*

요 약: 휘발유의 첨가제인 Methyl Tertiary-Butyl Ether (MTBE)는 1970년대 이후 옥탄 향상제로 쓰이기 시작했다. 이후 자동차 연료 연소를 도와 도시 대기에 일산화탄소(CO)와 오존(O₃)을 줄인다는 이유로 1990년대에 그 사용이 급속도로 증가했다. 그러나 이 물질은 지하저장탱크 등으로부터 누출(leakage)로 인해 지하수를 오염시킴으로서 문제의 물질로 대두되기 시작했다. 이런 MTBE에 대해 국외에서는 그 유해성 즉, 발암가능성 및 돌연변이 유도성 연구가 많이 진행되었으며, 어느 정도 인간에 대한 유해성이 밝혀졌다. 이 물질로 오염된 실제 현장에서의 실험, 실내 실험 등에 의해서 분해 및 오염 저감 가능성, 특히 생분해(biodegradation)에 대해 연구가 활발히 이루어지고 있고 여러 가지 오염 저감 기술도 연구되고 있다. 그리고 오염원으로서 대기의 영향에 대한 연구, 미국 National Ground Water Association (NGWA), the United States Geological Survey (USGS), the United States Environmental Protection Agency (USEPA)의 최근 활동 등 다각도에서 이 물질이 지하수나 음용수에 미치는 영향이 연구되고 있다. 실제 국내에서도 이 MTBE에 의한 지하수 오염 가능성을 배제할 수 없고, 우리 생활 가까이 다가와 있는 문제일 수 있다. 이런 문제임에도 불구하고, 국내에서는 이 오염물질에 대한 규제와 연구가 미흡한 형편이다. 그 자체로는 정정제로 사용되지만 이제는 오염물질로서 우리가 사용하는 지하수에서 검출될 수 있는 MTBE에 대한 전반적인 이해가 필요하고 그 유해성에 대한 국내 지하수 환경 연구자들의 더 많은 노력이 요구된다.

Abstract: Methyl tertiary butyl ether (MTBE) is a gasoline additive that boosts the oxygen content in fuel (an oxygenate), resulting in less air-polluting carbon monoxide being released from vehicle exhaust systems. Then, groundwater contamination problems have been developed in areas where the chemical is used. Common sources of water contamination by MTBE include leaking underground gasoline storage tanks and leaks and spills from above ground fuel storage tanks, etc.. Studies on the chemical and these problems are going on abroad vigorously. These studies should be performed in our country as well more actively. This paper reviews on articles on these studies and focuses on the identification of the chemical as a groundwater contamination source.

개 요

MTBE는 무연 휘발유의 첨가제(additive)로서 옥탄가를 높이고 산소 함량을 증가시킨다(USEPA, 1997). 처음에는 옥탄가를 향상시켜 연료의 폭발력을 높이기 위해 사용되었다. 이러한 목적에서 사용되기 시작한 이 물질은 메탄올과 이소부텐의 결합체로서, 알코올에 섞여 있는 높은 산소 함유량 때문에 휘발유에 섞어 쓸 경우, 산소 첨가제(oxygenates)의 역할을 해서 휘발유의 불완전 연소를 줄이게 되었다(USEPA, 1997). 이로서 자동차 배기 가스 중의 일산화탄소를 감소시켜 결과적으로 대기 오염도를 줄이는 효과를 낼 수 있다(USEPA, 1999). 이와 같은 환경 친화적인 효과 때문에 그 사용과 생산이 급속도로 증가했다. 미국에서는 1979년부터 MTBE가 휘발유의 옥탄가 향상제(octane enhancer) 및 산소 첨가제(oxygenates)로 사용되기 시작했다(USEPA, 1997). 우리 나라에서도 1984년부터 쓰

이기 시작했으며, 생산량은 계속 증가해서 현재까지 계속 사용되고 있다. 1993년에는 환경보전법에 의하여 MTBE의 휘발유 배합이 의무화되었으며, 상당량이 휘발유에 첨가되었다.

국내에서 소비되는 휘발유내 MTBE 함량은 6~8% 정도이며, 우리 나라의 유류 및 유기 물질 저장 탱크는 주로 지하에 설치되어 있다. 특히 전국적으로 주유소가 많이 분포하는데, 대부분의 주유소에서는 지하 저장 탱크에 유류를 저장하고 있다. 그래서 생활하는 가까운 곳에서 휘발유 누출로 인해 토양과 지하수가 MTBE로 오염될 가능성이 있다.

위와 같이 MTBE로 인해 상당한 토양 및 지하수의 오염이 진행되었다고 추정할 수 있다. 이런 지하수 섭취로 인한 인체 유해성에 대해, 동물을 대상으로 실험을 한 결과 MTBE에 다량 노출되었을 경우 중앙 신경계, 혈청, 간, 신장 등에 역효과를 나타냈고, 인간에 대해서는 발암 가능성 물질로 분류가 되었다(USEPA, 1997).

이렇게 유류에 의한 토양 및 지하수의 오염이 그 심각성을 드러내고 있어, 그 오염물종의 하나인 MTBE에 대한 연구 정도와 진행 상황들을 고찰해 봄으로써 연구 방향을 설정하는데 도움이 되고자 한다.

* 서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부(School of Earth & Environmental Sciences, Seoul National University)
전화: 02-873-3647, 전송: 02-874-7277

화학 물질로서의 MTBE 특성과 유독성

MTBE는 Methyl Tertiary-Butyl Ether의 약자로서, 화학적 구조를 보면 에테르(-O-)의 한쪽에 메틸(CH₃)과 다른 쪽에 t-부틸(tertiary-butyl)이 결합되어 있는 구조이다(CH₃-O-C(CH₃)₃). 이 화합물은 주로 메탄올과 이소부텐의 결합으로서 합성되는데, 산소와 t-부틸의 결합이 상대적으로 약해서 이것이 끊어지면 휘발유의 부드러운 연소를 돕는 작용기를 형성하는 것이다.

MTBE의 유독성(toxicity)에 관해서 연구된 내용을 살펴보면, Amberg 등(1999)은 MTBE 4 ppm과 40 ppm을 4시간 동안 사람 6명(지원자)과 쥐 10마리에게 노출해 실험을 했다. 그 결과 소변과 혈액에서 MTBE와 그 변성물들(metabolites)이 검출되었다. MTBE 40 ppm을 호흡기로 흡입한 후의 혈액 속 MTBE 농도가 사람은 6.7±1.6 μM, 쥐는 5.9±1.8 μM이었고, 4 ppm 흡입 후 혈액 속 MTBE 농도는 사람 1.9±0.4 μM, 쥐 2.3±1.0 μM이었다. MTBE는 혈액에서 사람은 2.6±0.9시간, 쥐는 0.5±0.2시간의 반감기를 가지고 빠르게 제거되었다. 변성물 중 t-부탄올 40 ppm에 노출 후 사람은 21.8±3.7 μM, 쥐는 36.7±10.8 μM 그리고 4 ppm에 노출 후에는 사람이 2.6±0.3 μM, 쥐가 2.9±0.5 μM이 혈액에서 각각 검출되었다. 사람에게서 t-부탄올은 5.3±2.1시간의 반감기로 제거되었다. 소변에서도 MTBE 변성물들이 검출되었는데, 사람은 7.8±17.0시간, 쥐는 2.9±5.0시간의 반감기를 가지고 빠르게 체내에서 제거되었다. 이를 보면 MTBE의 체내에서의 변형(biotransformation)은 쥐나 사람에게서 비슷하고, MTBE와 그 변성물들은 빠르게 체내에서 제거 및 배출된다. 그리고 혈액과 소변에서 MTBE 자체보다도 t-부탄올(tertiary-butyl alcohol: TBA)이 생물학적인 노출 지표로서 더 적당하다(Nihlen *et al.*, 1998).

MTBE의 발암성에 대해, MTBE를 쥐에게 만성적인 호흡기 흡입을 시켰더니 콩팥에 암(ranal tubular cell neoplasms)과 간장에 종양(hepatocellular adenomas)이 발생했고, 구강 섭취를 시키니 수 생식기에 관련된 Leydig 세포에 종양이 발생했고 입과선암, 백혈병이 발생했다. 또한 MTBE의 이차 변성물인 포름알데히드(formaldehyde)는 기형을 유발하는 물질이기도 하다(Mennear, 1997). 그러나 냄새와 맛이 강해서 호흡기 흡입이나 구강 섭취가 사람에게 쉽게 일어나지는 않을 것으로 보았다(Mennear, 1997). 또 한 연구에서 MTBE는 설치류(쥐, 토끼)의 간과 콩팥에 종양을 발생시켰고, MTBE와 그 변성물들(formaldehyde, TBA)은 DNA 근간(bases)과 변형되지 않은 재활계(intact repair system)를 산화시켜 돌연변이 과정을 유도했다(Williams-Hill *et al.*, 1999). 이 저자는 자신의 연구 결과가 대기 오염을 줄이는 효과로 인해 MTBE가 환경 친화적인 제품이라는 것에 대한 의미 깊은 반론이 된다고 지적했다.

음용수에서의 MTBE에 대한 연구로서, Stern 등(1997)은 사람에게 위험롭지 않을 정도의 수돗물의 최대 MTBE 함량을 700~14,000 μg/L 정도로 규정을 하고, 수돗물내의 MTBE에 만성적인 노출로 인해서 인체 위험성이 클 것 같지는 않으며, 오염원과 바로 연결되어 농도가 높은 MTBE에 노출되는 것도 기간이 길지는 않을 것이라고 한다. 또한, Hartley 등(1999)에 의하면 미국의 일반적인 음용수의 MTBE 농도는 10 μg/L 이하

이다. 발암 가능성 때문에 음용수로서의 최대 허용 기준을 100 μg/L으로서 제시를 했으며, 관측 자료에 의해 천층 지하수(shallow groundwater)를 오염시키는 MTBE는 그 오염원이 산재되어 있다고(nonpoint source) 보고했다. 그리고 MTBE는 유동적이고 지속성의 오염물이기 때문에 공공의 음용수원으로 이동할 수 있다고 했다. USEPA에서는 MTBE를 임시로 인체 발암 가능 물질로 분류하고 있으나 음용수 규정(법)에는 아직 포함시키지 않았다. 그러나 1997년 처음으로 맛과 냄새를 기준으로 해서 20-40 μg/L의 음용수 권고량을 발표했다(USEPA, 1997).

지하수 오염원으로서의 MTBE에 대한 연구 동향

MTBE가 지하수의 오염물질로 부각되어 이 부분에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Squillace *et al.*, 1997). 휘발유에 의해 지하수가 오염되면 휘발유의 주성분인 BTEX로 인한 오염이 크다. Benzene은 발암성 물질이기도 하며, TEX도 음용수에 들어가게 되면 음용수 섭취가 불가능하게 된다. 그러나 BTEX는 MTBE보다는 흡착 및 자연 생분해에 의해 저감이 잘 일어나고, 수용해성도 상대적으로 높지 않아 단기간에 광범위한 지역을 오염시키지는 않는다(Schirmer *et al.*, 1999). 또한 BTEX에 대해서는 국내에서도 많은 연구가 이루어져 왔다.

Borden 등(1997)은 BTEX와 MTBE의 비교 연구를 통해 생분해(biodegradation) 경향을 나타내는 유효 일차 붕괴 계수(effective first-order decay coefficient, λ)를 MTBE 0~0.0010/d, benzene 0.0006~0.0014/d, toluene 0.0005~0.0063/d, ethylbenzene 0.0008~0.0058/d, m-, p-xylene 0.0012~0.0035/d, o-xylene 0.0007~0.0017/d 으로 제시하여 MTBE가 BTEX보다 생분해 경향이 적음을 확인했다. 그리고 오염현장 조사에 의해 MTBE가 오염원 근처에서는 붕괴 양상을 보이지만, 대수층 하류에서는 붕괴의 증거가 없으며, 실험실내 미생물에 의한 연구에 의해 호기성 조건에서 MTBE의 생분해를 확인했다. Schirmer 등(1999)은 캐나다 보든 지역(Borden site)에서 MTBE와 벤젠을 비교 분석한 결과 MTBE가 자연 미생물에 의해 생분해 가능하고, 주로 생분해에 의해 농도가 저감되었지만, BTEX와는 달리 생분해가 매우 느리게 일어나서 대수층을 보호하기에 충분할 정도는 아니라고 보고했다. MTBE의 수용해도는 MTBE가 10%인 휘발유에 대해 25°C에서 약 5,000 mg/L이다. 그러나 산소첨가제가 포함되지 않은 휘발유에 대해서는 총 탄화수소 수용해도가 통상 약 120 mg/L이다. 그리고 MTBE는 지하수 물질에 거의 흡착이 일어나지 않아, 지하수에 의한 MTBE 유동이 흡착에 의해서 지연되기는 어렵다(Squillace *et al.*, 1997). 벤젠과 MTBE의 화학적 특성은, 증발 경향을 나타내는 증기압(vapor pressure, benzene 76 mm Hg, MTBE 245 mm Hg)과 헨리 법칙 상수(Henry's law constant, benzene 0.23, MTBE 0.022), 용해도(solubility, benzene 1,800 mg/L, MTBE 51,000 mg/L), 토양 매질내의 유기 탄소에 흡착하는 경향인 지연효과(retardation, benzene Koc=98, MTBE Koc=11) 그리고 생화학적 붕괴(degradation, benzene 0.1-1.0%/d, MTBE decay rate<<0.1%/d under natural conditions) 등에서 상당한 차이가

난다(Small *et al.*, 1999).

산소 첨가제에 대한 생분해 연구(Mormile *et al.*, 1994)를 보면 혐기성 환경에서의 MTBE의 생분해(biodegradation) 속도가 황산염 환원(sulfate reducing) 조건에서는 $0.04 \pm 0.19 \mu\text{M}$ of SO_4/d 이고, 질산염 환원(nitrate reducing) 조건에서는 $1.7 \pm 0.3 \mu\text{M}$ of NO_3/d 이다. 그리고 Steffan 등(1997)에 의하면, 프로판을 산화시키는 미생물에 의한 MTBE의 분해 속도가 $3.9 \sim 9.2 \text{ nM/min/mg}$ of cell protein이고, MTBE의 산화물인 t-부탄올은 $1.8 \sim 2.4 \text{ nM/min/mg}$ of cell protein이다. 이렇게 미생물학적인 접근에 의한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. Hanson 등(1999)은 PM1이라는 박테리아가 MTBE로 오염된 환경, 즉 오염된 지하수에서 MTBE를 생분해시킬 수 있다는 연구 결과(박테리아 2×10^6 cells/mL 에 의해 MTBE 5, 50, 500 $\mu\text{g/mL}$ 의 농도가 각각 0.07, 1.17, 3.56 $\mu\text{g/mL/h}$ 의 속도로 분해되었다)를 얻었고, Mo K. 등(1997)은 MTBE를 분해하는 세 종류의 박테리아(Methylobacterium Rhodococcus, Arthrobacter에 속한다)를 확인했다(60 mg/L의 MTBE를 인큐베이션 안에서 1~2주 동안에 분해했다). 또 Salanitro 등(1994)도 MTBE를 분해시키는 박테리아 혼합종(BC-1)을 분리해 냈다(120 mg/L 의 MTBE를 34 mg/g of cells/h 의 속도로 분해함).

지하수의 MTBE 오염을 저감시키는 방법에 대한 연구로서 Yeh와 Novak (1995)은 오염된 대수층이나 토양에 과산화수소수(hydrogen peroxide, H_2O_2)를 넣으면 그 속의 미생물에 의해 MTBE와 Ethyl Tertiary-Butyl Ether (ETBE)가 산화되어 t-부탄올과 아세톤으로 된다는 분해 방법을 제시했다. Thomson 등(1999)은 MTBE로 오염된 지하수를 복원하는 방법으로, 투수벽(permeable barrier)을 실제 현장에 적용해 실험을 했다. 그 결과 설치된 트렌치(trench-based air stripping/biodegradation barrier)에 이른 MTBE 거의 대부분이(approximately 100%) 제거되었다. 그리고 총 설치비용도 저렴해 지하수 오염에 대한 투수벽 개념의 기준으로 제시되었다. 또 Johnson (1998)은 오염된 대수층에 깨끗한 공기를 주입시켜 오염물을 처리하는 방법인 현장 공기 주입법(in situ air sparging)이 MTBE 처리 용해도가 높고, 느리게 분해되는 λ : $0 \sim 0.0010/\text{d}$; Borden *et al.*, 1997) 오염물을 저감시키기에 효과적이라고 보고했다(이 방법은 비용융상태보다 용해된 상태의 오염물에 더 잘 적용된다).

또 다른 면에서 지하수 오염원으로서의 MTBE에 대한 접근은, 얇은 지하수에서 전반적으로 낮은 농도의 MTBE가 검출되는데 이는 대기의 영향이라는 것이다. Baehr 등(1999)에 의하면 지하수에서의 MTBE는 대기중의 농도와 평형을 이루며 낮은 농도로 유지되고, Pankow 등(1997)은 얇은 도시 지하수에서 낮은 ppb ($\mu\text{g/L}$) 수준의 MTBE가 검출되는데, 이는 비점원(non point source)으로서의 도시 대기의 영향(partitioning from air into water)이라고 한다. 대기에서의 MTBE 반감기는 약 3 일 정도로서 짧고, 대기로부터 지하수나 지표수에 유입(precipitation)되는 농도는 약 3 $\mu\text{g/L}$ 정도라고 한다(Squillace *et al.*, 1997).

1999년 11월 미국 텍사스 휴스턴에서 NGWA와 American Petroleum Institute (API)는 공동으로 '유류 오염물질과 유기화합물질'이라는 제목으로 강연회를 개최하였다. 이 강연회에서

발표된 연구 논문들의 주요 주제는 i) MTBE, 자연 저감 및 생물학적 처리벽(barrier)에 대한 주제와 ii) MTBE로 오염된 지역에 대한 상세한 특성화 및 정화 방안 등이었다. 또한 NGWA에서는 최근에(2000년 1월 16일) 캘리포니아 등의 MTBE에 의한 음용수 및 지하수 오염에 관련된 문제에 초점을 맞추어 60분의 공중파 방송(CBS TV)을 했고, 'Assessment and management of MTBE Impacted Sites'란 주제로 강연회(2000. 2. 15~16, Atlanta)를 개최해서, 지하저장탱크의 누출에 의해 MTBE로 오염된 지역을 관리하는 실제적이고 경험에 바탕을 둔 접근과 MTBE 오염운(plume) 조사를 위한 현장 개념들을 다루었다. 그래서 MTBE로 오염된 지역을 관리하는 전략과 조사 계획을 세우고 오염 저감 방법을 결정하는 방법을 제시하고, 이런 결정에서 중요한 MTBE의 유동 양상과 특성도 포함했다. NGWA의 입장도 MTBE에 의한 지하수 오염의 일반적인 원인은 지하저장 탱크의 누출, 휘발유 분배 시스템, 지상 연료 저장 탱크로부터의 누출 등이라고 밝히고 있다. USGS에서는 '국가 수질 평가(National Water-Quality Assessment)' 계획의 일환으로 1993-98년에 걸쳐 지하수내의 MTBE 수준을 관측했다(Squillace, 1999). 그 결과 MTBE를 휘발유에 첨가해 사용하는 지역의 480개 관정 중 21%가 0.2 $\mu\text{g/L}$ 의 보고 수준 이상으로 검출되었으며, 이는 BTEX(4%)보다 훨씬 많은 빈도로 검출되었다. 대부분은 EPA 음용수 권고 기준보다 적었지만, 5 $\mu\text{g/L}$ 이상의 농도와 권고량의 하한인 20 $\mu\text{g/L}$ 보다 높은 농도의 MTBE 검출이 휘발유에 MTBE를 첨가해 사용하지 않는 지역의 약 10배가 높았다(Squillace, 1999). EPA Region 9에서는 산타모니카시의 음용수원인 'Charnok Wellfield'가 지하저장탱크 누출에 의해 MTBE로 오염이 된 (600 ppb 이상 검출) 문제를 'Charnok MTBE Project'란 이름으로 연구를 진행중에 있다(USEPA, 1999). 이렇게 MTBE에 의한 지하수 및 음용수 오염에 관한 문제에 대해서 여러 면으로의 관심이 이루어지고 연구되고 있다.

결 론

1970년대 후반에 휘발유의 옥탄가 향상제로 쓰이기 시작해서, 도시 대기에 일산화탄소(CO)와 오존(O_3)을 줄일 목적으로 1990년대에 그 사용이 급속도로 증가한 MTBE에 대한 연구가 국내에서는 아직 미흡한 편이다. 그 자체로는 청정제로 사용되지만 인체에는 발암 가능 물질이기도 하다. MTBE는 지하 및 지상 저장탱크로부터의 누출, 대기로 증발된 양이 다시 강우에 의한 침전으로 토양 및 지하수에 유입되는 등으로 오염물질로서 우리가 사용하는 지하수 및 음용수에서 검출될 수 있다. 미국 캘리포니아 주에서는 가솔린 첨가제로서의 MTBE 사용에 대한 전면적인 금지를 고려할 정도의 관심을 보이고 있다. 국내에서도 MTBE에 의한 지하수 오염 문제에 대한 전반적인 이해가 필요하고, 그 위험성에 대한 재고 차원에서라도 더 많은 연구가 되어야 할 것이다.

또한 지하수 내에서의 MTBE의 자연 생분해성을 연구해서 실제 오염 지역에서 자연 생분해에 의해 이 오염물질의 저감이 가능한지, 또는 약간의 인위적인 공정을 더해서 현장 생분

해를 가능하게 할 수 있는지 등에 대해서도 다각도의 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- Amberg, A., Rosner, E. and Dekant, W., 1999, Biotransformation and kinetics of excretion of methyl-tert-butyl ether in rats and humans, *Toxicol. Sci.*, 51(1), p. 1-8.
- Baehr, A. L., Stackelberg, P. E. and Baker, R. J., 1999, Evaluation of the atmosphere as a source of volatile organic compounds in shallow groundwater, *Water Resour. Res.*, 35(1), p. 127-136.
- Borden, R. C., Daniel, R. A., LeBrun, IV, L. E. and Davis, C. W., 1997, Intrinsic biodegradation of MTBE and BTEX in a gasoline contaminated aquifer, *Water Resour. Res.*, 33(5), p. 1105-1115.
- Hanson, J. R., Ackerman, C. E. and Scow, K. M., 1999, Biodegradation of MTBE by a bacterial pure culture, *Appl. and Environ. Microbiol.*, 65(11), p. 4788-4792.
- Hartley, W. R., Englande, Jr., A. J. and Harrington, D. J., 1999, Health risk assessment of groundwater contaminated with methyl tertiary butyl ether (MTBE), *Wat. Sci. Tech.*, 39(10-11), p. 305-310.
- Johnson, P. C., 1998, Assessment of the contributions of volatilization and biodegradation to in situ air sparging performance, *Environ. Sci. Technol.*, 32(2), p. 276-281.
- Mennear, J. H., 1997, Carcinogenicity studies on MTBE: Critical review and interpretation, *Risk Analysis*, 17(6), p. 673-681.
- Mo, K., Lora, C. O., Wanken, A. E., Javanmardian, M., Yang, X. and Kulpa, C. F., 1997, Biodegradation of MTBE by pure bacterial cultures, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 47(1), p. 69-72.
- Mormile, M. R., Liu, S. and Suflita, J. M., 1994, Anaerobic biodegradation of gasoline oxygenates: Extrapolation of information to multiple sites and redox conditions, *Environ. Sci. Technol.*, 28(9), p. 1727-1732.
- Nihlen, A., Lof, A. and Johanson, G., 1998, Experimental exposure to methyl tertiary-butyl ether. I. Toxicokinetics in humans, *Toxicol. and Appl. Pharmacol.*, 148(2), p. 274-280.
- Pankow, J. F., Thomson, N. R., Johnson, R. L., Baehr, A. L. and Zogorski, J. S., 1997, Urban atmosphere as a nonpoint source for the transport of MTBE and other VOCs to shallow groundwater, *Environ. Sci. Technol.*, 31(10), p. 2821-2828.
- Salanitro, J. P., Diaz, L. A., Williams, M. P. and Wisniewski, H. L., 1994, Isolation of a bacterial culture that degrades methyl t-butyl ether, *Appl. and Environ. Microbiol.*, 60(7), p. 2593-2596.
- Schirmer, M., Butler, B. J., Barker, J. F., Church, C. D. and Schirmer, K., 1999, Evaluation of biodegradation and dispersion as natural attenuation processes of MTBE and benzene et the Borden Field site, *Phys. Chem. Earth*, 24(6), p. 557-560.
- Small, M. C. and Weaver, J., 1999, An updated conceptual model for subsurface fate and transport of MTBE and benzene, *Proceedings Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water*, API/NGWA, Houston, Texas, p. 209-220.
- 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), p. 1836-1844.
- Squillace, P. J., 1999, MTBE in the nantion's ground water, *National Water-Quality Assessment (NAWQA) Program Results*, U. S. Geological Survey, URL: <http://sd.water.usgs.gov/nawqa/vocns/>.
- Steffan, R. J., McClay, K., Vainberg, S., Condee, C. W. and Zhang D., 1997, Biodegradation of oxygenates MTBE, ETBE, and TAME by propan-oxidizing bacteria, *Appl. Environ. Microbiol.*, 63(11), p. 4216-4222.
- Stern, B. R. and Tardiff, R. G., 1997, Risk characterization of methyl tertiary butyl ether (MTBE) in tap water, *Risk Analysis*, 17(6), p. 727-743.
- Thomson, B. M., Finfrock, D. J. and McHaley, C. P., 1999, Development of permeable barriers for groundwater remediation: Air stripping of methyl tertiary-butyl ether (MTBE), *J. Environ. Sci. Health*, 34(2), p. 263-287.
- USEPA, 1999, Charnock MTBE Project, U. S. Environmental Protection Agency, Region 9, URL: <http://www.epa.gov/region09/mtbe/charnock/>.
- USEPA, 1997, Drinking Water Advisory: Consumer Acceptability Advice and Health Effects Analysis on Methyl Teriary-Butyl Ether, U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, EPA-882-F-97-009.
- Williams-Hill, D., Spears, C. P., Prakash, S., Olah, G. A., Shamma, T., Moin, T., Kim L. Y. and Hill, C. K., 1999, Mutagenicity studies of methyl-tert-butyl ether using the Ames tester strain TA102, *Mutation Res.*, 446, p. 15-21.
- Yeh, C. K. and Novak, J. T., 1995, Effect of hydrogen peroxide on degradation of MTBE and ETBE in soils, *Water Environ. Res.*, 67(5), p. 828-834.