

MTBE의 환경위해성평가

Environmental Risk Assessment of MTBE

박 정 규

한국환경정책·평가연구원

Jeong - gue Park

Korea Environment Institute

Abstract

Methyl tertiary-butyl ether(MTBE) is used as an octane enhancer in gasoline. MTBE can enter the environment at any stage in the production, storage, and transport of undiluted MTBE or MTBE-blended gasoline. Although data on concentrations of MTBE in the environment are not available, modelling of fate of MTBE has provided predictions for concentrations of MTBE in the various media to which humans and other organisms may be exposed.

Many individuals do not taste or smell MTBE at the $5\mu\text{g/L}$ level, and thus may be exposed to higher concentrations for a significant amount of time. MTBE exposure through inhalation is likely to be below health-threatening levels, except for occupational workers such as gasoline station attendants and auto mechanics. It should be stressed, however, that there are important data gaps in our understanding of the acute and chronic toxicity of MTBE. Little or no research concern including being conducted that directly addresses these issues.

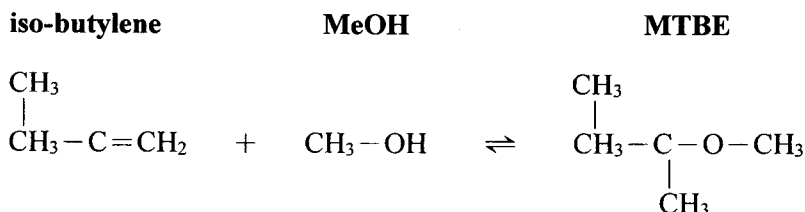
Rather than any immediate ban on MTBE, I recommend consideration of phasing out MTBE in USA and other countries. During the transition phase, a number of policies are suggested to reduce the risk of using MTBE. One of these policies is that the state should invest in a research program. Such research should, for example, examine effective alternatives for motor vehicle fuels, and detect concentrations of MTBE in ambient air, water, and other environmental media.

Keywords : MTBE, 위해성평가, 발암물질

I. 서론

산업화된 현대 사회에서 화학물질은 다양한 유용성으로 인해 현대인의 삶을 영위하는데 필수적인 요소로 작용하고 있다. 따라서 화학물질이 없는 일상생활을 상상하기 어려울 정도로 우리는 많은 화학물질에 둘러싸여 있다. 그러나 일부 화학물질은 탁월한 유용성에도 불구하고 사람의 건강이나 환경에 미치는 부작용이 커서 사용이 금지 또는 제한되기도 한다.

MTBE(Methyl Tertiary Butyl Ether) 역시 가솔린 첨가제로 사용되어 대기오염을 저감하는데 많은 공헌을 하였으나, 최근 그 위해성이 의심되어 국제적으로 관심이 집중되고 있는 유해화학물질이다. 전 세계적으로 5억대 이상의 자동차들이 내뿜는 배기가스로 인해 지구의 대기오염은 갈수록 심각해지고 있으며, 자동차의 약 3/4에 해당하는 승용차는 대부분 연료로 가솔린류를 사용하고 있다. 가솔린의 불완전연소로 인해 대기오염이 심각해지자, 대기오염 저감정책의 일환으로 미국 등 많은 국가에서는 산화제를 가솔린에 포함하도록 의무화하였다. 미국의 경우 1990년 대기청정법(Clean Air Act)에서 대기오염이 상대적으로 심한 9개 도시¹⁾는 반드시 연료에 산화제를 포함하도록 하였다. 대표적인 산화제로는 에탄올, MTBE 등이 있으며, 보통 연료에 3-5% 정도 첨가되어 있다.²⁾ 특히 MTBE는 고효율 저비용으로 인해 가장 많이 사용되는 산화제로, 연료에 첨가되어 엔진기능을 개선하고 일산화탄소와 벤젠같은 대기오염물질의 발생을 효과적으로 감소시키고 있다. 이와 같은 MTBE는 주로 다음 <그림 1>과 같이 비교적 온화한 운전조건에서 강산성의 양이온 교환수지 등의 산촉매 하에서 iso-butylene과 메탄올을 반응시켜 제조한다. 원료인 iso-butylene은 주로 납사 분해공정 또는 중질유 분해공정에서 부가적으로 생성되며, butane의 이성화, TBA의 탈수화에 의해 제조되기도 한다.



<그림 1> MTBE 제조 반응식

1) LA, 샌디에고, 시카고, 휴스턴, 밀워키, 볼티모어, 필라델피아, 뉴욕, 하트포트
 2) 국내 휘발유의 MTBE 함량은 6-8%임

중요한 대기오염 저감물질인 MTBE는 다른 한편으로는 심각한 수질오염을 야기시키는 유해화학물질이다. MTBE의 주요 오염경로는 지하 휘발유 저장탱크의 누출로 인해 MTBE를 포함한 휘발유가 인근 토양 및 지하수로 확산되는 것이다. 지하수로 유입된 MTBE는 특유의 냄새와 맛으로 인해 식수원으로서의 지하수 사용을 억제시키며, 쉽게 분해되지 않고 지하수 내에서 빠른 속도로 수평 및 수직 확산하여 심층의 지하수까지 오염시킨다. 또 다른 오염경로는 호수 등 지표수에서 수상스포츠를 즐길 때 보트 등에서 유출되는 유류이다. 미국 캘리포니아주에 위치한 호수(예, 타호호수 등)에서 조사한 연구결과에 따르면, 수상보트시즌이 아닌 봄('98)에는 50 파운드에 불과하였던 MTBE 양이 여름에는('98, 7월)에는 무려 815 파운드로 16배 이상 증가하였다.

최근에는 이와 같이 MTBE로 오염된 물을 섭취하거나 오염된 공기를 흡입할 때 암이 유발될 가능성이 제기되고 있다. 이는 실험실 연구결과에서 MTBE가 동물의 암을 유발하는 발암성 물질로 확인되자, 인체건강에 미치는 위해성에 대한 우려가 갈수록 증가하였고 MTBE 사용이 제한되는 등 그 규제의 강도가 높아지고 있다.

이에 본 원고에서는 많은 논란이 되고 있는 MTBE의 인체건강 및 환경에 미치는 영향에 대한 연구결과를 조명하고 각 노출경로에 따른 위해성 평가결과를 분석하여, 향후 국내 MTBE 위해성 연구의 추진방향 및 국내 위해성 관리정책 방안을 제안하고자 한다.

II. MTBE의 인체건강영향

가솔린에 포함된 MTBE는 노출에 따라 대사산물, 연소 또는 산화작용에 의한 부산물 등 다양한 화학물질로 전환된다. 따라서 MTBE의 영향은 단순히 MTBE만의 영향이 아닌 이들 부산물 및 대사산물의 영향까지 모두 고려하여야 한다. MTBE의 주요 대사산물로는 포름알데하이드(formaldehyde), TBA(tertiary butyl alcohol), 이소부탄(isobutene) 등이며, 이들 화학물질이 인체건강에 미치는 영향은 다음과 같다.

1. 맛과 냄새

맛과 냄새는 MTBE로 오염된 수질을 확인하는 주요 요인 중 하나이며, 일반 시민들이 MTBE 오염에 대해 가장 민감하게 반응하는 영향이다. MTBE에 오염된 물의 맛과 냄새는 「불쾌한」, 「쓴」, 「용매같은」, 「구토를 유발하는」 등 다양한 맛을 유발하고 있으며, 이와 같은 맛과 냄새의 인식한계(역치값)는 대략 $2\mu\text{g}/\ell$ 였다. 그러나 맛과 냄새는 개인차가 때

우 큰 요소이며 대상집단, 물의 염소화 정도, 물의 온도 등에 따라 민감한 정도의 차이가 커 MTBE의 맛과 냄새의 인식 한계값은 보통 $2.5 - 680 \mu\text{g}/\ell$ 로 광범위하게 추정되고 있다(Prah et al., 1994 ; Young et al., 1996 ; Shen et al., 1997)(<표 1> 참조). 이에 미국 캘리포니아주는 MTBE의 SMCL³⁾을 5ppb로 정하고 있다. 이 때 SMCL은 사람의 건강에 해를 끼치지 않는 안전한 농도를 의미하는 것이 아니라, 사람들이 MTBE에 오염된 물을 마시거나 음식 조리시 사용할 수 있다는 신뢰를 표현하는 수치이다.

2. 체내이동경로(Toxicokinetics)

MTBE가 체내에 들어오는 경로는 섭취나 피부접촉, 호흡을 통해서이다. 이중 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 포름알데하이드로 대사된다. MTBE의 혈액내 반감기는 1시간(사람 및 동물 모두)인데 비해, 대사산물인 TBA의 반감기는 10시간(사람)으로 비교적 길어 사람에게 대한 MTBE의 노출지표로 TBA가 주로 활용되고 있다(Johanson et al., 1995). 대사작용을 거친 MTBE는 소변이나 호흡을 통해 체외로 배출되는데, 사람은 주로 호흡으로, 동물은 주로 소변으로 배출되는 양이 많다.

호흡으로 체내로 들어오는 MTBE의 체내 이동경로는 비교적 많이 밝혀져 있는데 비해, 섭취나 피부접촉으로 인한 MTBE의 체내 이동경로에 대해서는 지금까지 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 진행되어야 하겠다.

3. 급성독성

MTBE의 급성독성에 관한 여러 연구결과 두통, 메스꺼움/구토, 눈과 입에 타는 듯한 통증, 기침, 어지러움, 방향감각 상실 등 다양한 급성독성 증상이 관찰되었다(McCoy et al., 1995 ; Mehlman 1998). 그러나 대부분의 급성독성 증상이 비특이적이며, 연구 및 조사방법에 따라 그 증상이 매우 다양하며 일관성 있는 증상이 생산되지 않고 있다. 향후 급성독성 연구결과

3) Secondary Maximum Contamination Level, 2차 최대오염수준

의 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 있다. 그러나 아직 천식 등 호흡기 질환과 MTBE의 상관관계를 밝힐 만한 연구자료가 매우 부족한 실정이다.

〈표 1〉 MTBE에 대한 맛과 냄새 연구결과

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

4. 만성독성

MTBE의 만성독성은 크게 신경독성, 생식 및 발생독성, 발암성 등으로 구분할 수 있으며 각 독성작용은 다음과 같다.

1) 신경독성

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

등은 핀란드의 유조차 운전자 101명(모두 남성)을 대상으로 작업장노출을 조사한 바 있는데, 이 때 유조차의 연료로 사용된 가솔린의 MTBE 함량은 10%이었다(1997). 조사대상자 대부분이 운전중 피로를 호소하였으며, 유조차 운전경력이 높은 운전자일수록 호소하는 피로의 강도가 높아졌다. 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 포함한 신경계에 영향을 미친다는 사실이 확인되었는데, 특히 8,000ppm의 높은 농도에서 급성 중추신경계 작용억제효과가 나타나 이 작용은 가역적이며 일시적이었다.

그 외 MTBE의 신경독성 연구는 매우 미진한 상황으로 관련 자료가 거의 없는 실정이다.

2) 생식 및 발생독성

사람에 대한 MTBE의 생식 및 발생독성은 아직 연구된 바 없다. 실험실 내에서 실시된 동물실험 연구결과 임신중에 극히 높은 농도(>2500 ppm/6hrs/day)로 MTBE를 노출시키면 산모와 태아에 심각한 영향을 미쳤다(Conaway et al., 1985 ; Beven et al., 1997). 즉, 산모의 체중감소와 사지(四肢)의 기능저하가 일어나고, 태아의 체중감소와 사망률이 높아지며 특히 실험동물 중 쥐(mouse)에서는 구개열 파괴현상이 관찰되었다. 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.

우선 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 쥐(Fisher rat)의 신장에 암(악성 및 양성)이 발생되었으나, 암컷은 정상이었으며 수컷에서만 암이 발견되었다. 또 다른 실험에서는 실험동물(CD-1 mice)에 MTBE를 흡입시켰을 때 8000ppm의 고농도에서 간암이 발견되었으며, 수컷에서는 carcinomas가, 암컷에서는 adenomas가 각각 발견되었다(Bird et al., 1997). 이와 같은

실험동물에서의 발암성자료를 근거로 미국 EPA는 MTBE의 발암가능성을 B2⁴⁾로 분류하고 있다.

MTBE의 대사물질인 포름알데하이드는 IARC⁵⁾에 의해 2A(인체발암가능성물질, Probable carcinogenic to human)로 분류되고 있으나, TBA는 발암가능성이 확인되지 않고 있다. 그 외 MTBE의 주요 대사산물의 독성영향은 다음 <표 2>와 같다.

<표 2> MTBE 대사산물의 독성영향

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

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

III. MTBE의 생태영향

MTBE의 생태독성은 주로 수서생태계에서 조사되었으며, 수서생물에 대한 급성독성은 다음 <표 3>에서와 같다. MTBE 급성독성은 136mg/l에서 >1000mg/l로 생물종에 따라 그 범위가 매우 크며, 독성이 높지 않은 것으로 나타났다. 한편 어류에 대한 MTBE의 만성영향을 살펴보면 fathead minnow에 대한 NOAEL(No Observed Adverse Effects Level, 무관찰영향 농도)는 288mg/l, 무지개송어의 NOAEL은 880 - 1240mg/l로 낮게 나타났다(Mancini & Stubblefield, 1997). 또한 동물성플랑크톤에 대한 NOAEL 역시 200mg/l로 낮아, 현재 지표수의 MTBE농도인 10 - 100µg/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

4) 인체발암가능성물질(Probable human carcinogen), 동물에서는 발암에 대한 충분한 증거가 있으나, 인간에게는 부적절한 증거 또는 증거가 없음을 나타냄.

5) International Agency for Research on Cancer

처리할 경우 수서생물에 대한 독성이 크게 증가됨이 일부 연구에서 확인되었으므로 이에 대한 추후 상세한 연구가 요구된다.

<표 3> MTBE의 어독성자료

	생물종	생태영향	농도	참고자료
박테리아	<i>Salmonella typhimurium</i>	세포수감소 (48hrs)	7.4 mg/ℓ	Kado et al.(1997)
	<i>Photobacterium phosphoreum</i>	빛방출감소 (15min.)	41.8μg/ℓ	Gupta & Lin (1995)
조류 (algae)	<i>Selenastrum capricornutum</i>	성장저하(5days)	4,800 μg/ℓ	Rousch & Sommerfeld (1998)
	<i>Selenastrum capricornutum</i>	EC50	184 mg/ℓ	BenKinney et al. (1994)
	<i>Navicula pelliculosa</i>	성장저하(5days)	2,400 mg/ℓ	Rousch & Sommerfeld (1998)
	<i>Synechococcus leopoliensis</i>	성장저하(3days)	2,400 mg/ℓ	Rousch & Sommerfeld (1998)
무척추 동물	<i>Brachionus calyciflorus</i>	LC50(24hrs)	960 mg/ℓ	UC Davis(1998)
	<i>Nitocra spinipes</i>	LC50(96hrs)	>1000 mg/ℓ	Bengtsson & Tarkpea (1983)
	<i>Daphnia magna</i>	LC50(96hrs)	681 mg/ℓ	BenKinney et al. (1997)
	<i>Daphnia magna</i>	LC50(96hrs)	542 mg/ℓ	Hockett & Russell (1997)
	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	생존율(5days)	LOEC : 580 mg/ℓ NOEC : 342 mg/ℓ	ENSR(1997)
	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	생식(5days)	LOEC : 342 mg/ℓ NOEC : 202 mg/ℓ	ENSR(1997)
	<i>Neomysis mercedis</i>	LC50(96hrs)	236 mg/ℓ	UC Davis(1998)
	<i>Mysidopsis bahia</i>	LC50(96hrs)	136 mg/ℓ	BenKinney et al. (1997)
양서류	<i>Rana temporaris</i>	LC50	2,500 mg/ℓ	Paulov(1987)
	<i>Pimephales promelas</i>	LC50(96hrs)	672 mg/ℓ	Geiger et al. (1981)
	<i>Pimephales promelas</i>	LC50(96hrs)	70 mg/ℓ	Veith et al. (1983)
어류	<i>Pimephales promelas</i>	성장저하(7days)	LOEC : 388 mg/ℓ NOEC : 234 mg/ℓ	ENSR(1997)
	<i>Pimephales promelas</i>	LC50(96hrs)	929 mg/ℓ	BenKinney et al. (1997)
	<i>Menidia beryllina</i>	LC50(96hrs)	574 mg/ℓ	BenKinney et al. (1997)
	<i>Alburnus alburnus</i>	LC50(96hrs)	>1000 mg/ℓ	Bengtsson & Tarkpea (1983)
	<i>Onchorhynchus mykiss</i>	LC50	887 mg/ℓ	Hockett & Russell (1997)

인용자료 : <http://www.ucdavis.edu>, Werner I., and Hinton D.E. 『Toxicity of MTBE to Freshwater Organisms』, UC Davis

IV. MTBE의 위해성평가

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 위해성평가를 실시하였으며, 본 원고에서 그 결과를 다음과 같이 정리하였다.

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.

1) MTBE의 발생원 및 환경거동

① 대기 : 대기 중의 MTBE는 주로 MTBE의 생산, 운송, 주유 및 자동차 운전시 배출된다. 연료보급소와 같은 배출원 인근의 대기에서 MTBE 농도는 약 $1800\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도였으며, 일반 대기중의 농도는 $1 - 20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다(HEI, 1996).

② 지표수 : 지표수의 MTBE 발생원은 강우로 인한 침전, 유거수(runoff), 지하수 유입, 사고로 인한 직업방출, 수상보트로부터의 배출 등이다. 우선 강우로 인한 침전은 대기중 MTBE의 반감기는 3일⁶⁾에 불과하여 강우시 지표수로 침전되는 $2 - 4\mu\text{g}/\ell$ 로 적은 양으로 추정된다(Smith et al., 1992). 한편 US GS(Geological Survey)의 조사결과에 의하면 1991 - 1995년 간 미국내 도시 지역의 유거수에 포함된 MTBE는 약 $0.2 - 8.7\mu\text{g}/\ell$ (중간값은 $1.5\mu\text{g}/\ell$)였다. 또한 MTBE로 오염된 지하수가 지상으로 퍼올려 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. 또한 지표수 MTBE의 가장 큰 오염원은 호수 등에서의 수상보트의 운전이다. 앞서 언급한 바와 같이 레저기간인 여름 동안 호수 MTBE 농도는 타 계절에 비해 월등히 높았다. 한 조사에 의하면 수상보트의 운전시 환경중으로 배출되는 가솔린(MTBE 포함)의 약 40%는 물로, 나머지 60%는 대기 중으로 방출되

6) 대기 중의 MTBE 반감기는 오염된 대기에서는 3일, 청정대기에서는 6.1일로 조사됨

는 것으로 밝혀졌다.

한편 MTBE의 수중에서의 반감기는 개울과 하천에서는 각각 2.5시간과 9.5시간, 호수에서는 137일로 보고되었으며, 주로 휘발에 의해 지표수에서 제거되는 것으로 추정된다.

③ 지하수 : 지하수내 MTBE의 이동은 지하수 이동속도, MTBE의 농도, 배출기간, 확산 등에 의해 매우 다양하게 나타난다. 벤젠과 같은 다른 유류 화합물과는 달리 MTBE는 물에 대한 용해도가 매우 높고(48g/100g water), 토양중의 유기물질이나 토양입자에 쉽게 흡착되지 않아($K_{oc} = 11.0 \sim 12.3$) 지하수 내에서 매우 빠른 속도로 확산된다. 또한 일반 토양에서는 미생물에 의해 분해되나, 지하수에서는 거의 생분해되지 않아 환경 중에 오래 잔류된다. 따라서 Zogorski 등의 연구결과에서는 지하수의 MTBE 농도가 6,000,000mg/l 이상의 높은 농도로 존재할 수 있음이 확인되었다(1996).

2) 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 $2.8\mu\text{g}/\text{kg}$ (시골지역) - $5.2\mu\text{g}/\text{kg}$ (도심지역)으로 추정된다. 특히 주유소 인근에 사는 주민들은 MTBE 노출농도보다 약 1.2배 내지 4배 정도 높은 MTBE에 노출될 것으로 예상된다. 한편 직업적으로 MTBE를 다루는 유조차 운전사의 경우 $170\mu\text{g}/\text{kg}/\text{일}$, 주유소 근로자는 $100\mu\text{g}/\text{kg}/\text{일}$ 의 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 무시할 만한 수준이다. 한 연구에서는 우리 체내의 MTBE 유입이 호흡으로 71%, 섭취로 29%, 피부접촉으로 1%가 각각 이루어진다고 밝혔다(Mckone, 1987).

이와 같은 인체의 노출경로를 고려하여 미국 EPA(CAL-EPA)는 MTBE의 공중보건 목표(PHG, Public Health Goal)를 $14\mu\text{g}/\text{l}$ 로 제시했다. 이는 MTBE로 인해 백만명 중에 하나가 암에 걸릴 확률로서 PBPK 모델과 CalTox 시뮬레이션을 이용하여 계산된 농도이다.

만약 사람이 MTBE에 섭취로 50% 이상 노출된다고 가정하면 $6.8 \times 10^4 \text{mg}/\text{kg}/\text{일}$, 호흡으로 50% 노출된다고 가정하면 $10.1\mu\text{g}/\text{l}$ 로 추정되어, 모든 경우에도 공중보건목표(PHG) 이하인 것으로 확인되었다.

3) 생태위해성평가

MTBE는 수서생물에 대한 급성독성이 높지 않고, 생체 내에서 쉽게 축적되지 않아 주로 소변이나 아가미로 배설된다. 따라서 생태위해성은 그리 높지 않아 유해계수⁷⁾가 1 이하로 나타났다. MTBE의 다른 대사산물의 유해계수를 QSAR⁸⁾로 추정된 결과 MTBE보다는 2 - 6배 높게 나타났으나, 역시 1이하로 확인되었다.

V. 결론

지금까지 살펴본 바와 같이 MTBE의 위해성은 주로 동물에서만 확인되었으며 인체에 대한 연구자료는 매우 부족하여 MTBE의 위해성을 정량화하기에는 아직 많은 연구가 필요하다. 현재까지 밝혀진 연구결과를 보면 특히 동물실험 결과 발암성이 확인되었으며, 일부 연구에서는 MTBE가 생식독성을 일으키고 내분비계 장애물질로 의심될 만한 여러 징후가 포착되었다(Moser et al., 1998 ; Day et al., 1998). 이는 대부분의 내분비계 장애물질이 오랜 기간 노출된 이후에 피해가 발생된다는 사실과 비교해 볼 때, MTBE의 위해성에 대해 매우 우려되는 부분이다.

MTBE가 본격적으로 가솔린 산화제로 사용된 지 10여 년이 지나가고 있다. 10여 년이란 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, 앞으로 진행될 연구결과에서 MTBE의 또 다른 만성적인 위해성이 확인될 가능성이 매우 높다.

이와 같은 이유로 미국은 위해성에 대한 충분한 검증이 되지 않았음에도 불구하고 MTBE의 규제를 서두르고 있다. 우선 2000년 미국 상원 환경위원회는 발효 후 4년 이내에 휘발유의 MTBE 사용을 금지시킬 수 있는 법안을 승인한 바 있으며, 현재 캘리포니아주를 위시한 미국내 12개 주에서 MTBE 사용을 금지하고 있다. 또한 1998년 11월 MTBE를 포함한 가솔린 첨가제의 안전성을 조사하기 위한 Blue Ribbon Panel이 구성되어 다음 사항을 미국 EPA에 건의한 바 있다 첫째, 미국내 MTBE 사용지역에서 식수공급원의 5 - 10%가 MTBE에 오염되었다. 둘째, MTBE의 높은 환경잔류성과 빠른 이동성으로 쉽게 지하수와 지표수를 오염시

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

8) Quantitative Structure Activity Relationship

킨다. 셋째, MTBE의 오염방지 및 위해저감을 위해 기존의 수자원보호 프로그램과 모니터링을 강화시켜야 한다. 넷째, 현재의 지하저장탱크 안전관리프로그램을 강화하여 지하저장탱크에서의 MTBE 누출을 최소화하여야 한다. 다섯째, MTBE 사용을 저감하고, 오염된 지역을 신속히 정화하여야 한다. 여섯째, MTBE의 위해성연구 및 대체물질개발에 많은 노력을 기울여야 한다.

따라서 미국 등 선진국과 같이, MTBE의 안전성이 확실히 확인되기 전에는 우선 그 사용을 가급적 자제하는 것이 MTBE의 위해로부터 국민의 건강과 환경을 사전에 보호하는 길이다. 그러나 우리 나라는 아직 MTBE 위해성에 대한 낮은 관심으로 인해 관련 연구가 거의 이루어지지 않고 있으며, 환경에 얼마나 오염되어 있는지조차 확인되지 않고 있다. 사용 및 오염에 대한 조사자료도 매우 부족한 현 시점에서 미국 등과 같이 MTBE의 강력한 규제정책을 실시하기에는 현실적으로 많은 어려움이 있다. 이에 우선 MTBE의 국내 오염원, 오염경로 및 오염정도에 대한 기초연구 조사가 시급히 요구되며, 이들 국내 현황자료와 선진국에서 진행중인 MTBE의 위해성 자료 및 평가결과를 참조하여 국내 현실에 적합한 관리방향 및 정책이 수립되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- API. 1993. Gasoline vapor exposure assessment at service stations. API#4553 Washington D. C. API
- 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
- Belpoggi F., Soffritti M. and Maltoni C. 1998. "Pathological characterization of testicular tumors and lymphomas leukemias, and of their precursors observed in Sprague-Dawley rats exposed to methyl-tertiary-butyl-ether(MTBE)". *Eur J Oncol* 3(3) : 201-206
- Bengtsson B.E. and Tarkpea M. 1983. "The Acute Aquatic Toxicity of Some Substances Carried by Ships", *Marine Pollution Bulletin*. 14(6) : 213-214
- BenKinney, M. T., Barbieri J. E, Gross J. S. and Naro P. A. 1997. Acute Toxicity of Methyl-Tertiary-Butyl Ether to Aquatic Organisms, Stonybrook Laboratories Inc., Princeton, NJ ; abstract, *15th Annual SETAC Meeting*, 30 October-3 November 1994.
- Bevan, C., Tyl, R. W., Neepser-Bradley, T. L., Fisher, L. C., Panson, R. D., Douglas, J. F., and Andrews, L. S. 1997. Developmental toxicity evaluation of methyl tertiary-butyl ether(MTBE) by inhalation in mice and rabbits. *J Appl Toxicol Suppl* 1 : 21-29.
- 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. : Bioresearch Laboratories
- 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. : 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
- 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

- ale M. S., Moylan M. S., Koch B. and Davis M. K. 1998. MTBE : Taste and odor threshold determinations using the flavor profile method. *Presented at the Water Quality Technology Conference*. Denver, Colorado. (November 9-13), American Water Works Association(AWWA)
- 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
- ENSR. 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
- Geiger D. L., Call D. J. and Brooke L. T. 1981. Acute toxicities of organic chemicals to fathead minnows (*Pimephales promelas*), Volume 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, Ce. E. and Calabrese, E. J., eds., *Regulating drinking water quality* : Ann Arbor, Mich., Lewis Publishers, Inc., pp. 231-252
- Gupta G. and Lin Y. J. 1995. Toxicity of Methyl Tertiary Butyl Ether to *Daphnia magna* and *Photobacterium phosphoreum*, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 55 : 618-620
- Health and Ecological Criteria Division, Office of Science and Technology, Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. : U.S. EPA. Available at <http://www.epa.gov/oust/MTBE/index.htm>
- 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.

- Hoffmann M. R. 2001. Ozone/Ultrasound Irradiation Process for MTBE destruction. 연세대학교
- 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
- Mancini, E. R., and Stubblefield W. 1997. Physicochemical and ecotoxicological properties of gasoline oxygenates. Presented at the Annual Meeting of the Society for Risk Analysis. Washington, D.C.(December 6-9, 1997).
- 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
- McKone, T.E. and Bogen K. T. 1992. Uncertainties in health-risk assessment : an integrated case study based on tetrachloroethylene in California groundwater. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 15 : 86-103
- 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 from 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
- 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

- Prah, J. D., Goldstein, G. M., Devlin, R., Otto, D., Ashley, D., House, D., Cohen, K. D., 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
- Savolainen H., Pfaffli P. and Elovaara E. 1995. Biochemical effects of methyl tertiary-butyl ether(MTBE) in extended vapor exposure in rats. *Arch. Toxicol* 57(4) : 285-288
- Shen Y. F., Yoo L. Y., Fitzsimmons S. R., and 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. San Francisco. (April 13-17). California 37(1) : 407-409
- Shen, Y. F., Yoo, L. J., Fitzsimmons, S. R. and Yamamoto, M. K. 1997. Orange County Water District. Threshold Odor Concentrations of MTBE and Other Fuel Oxygenates
- Smith, D. F., Kleindiest, T. E., Hudgens, E. E. and McIver, C.D. 1991. The Photooxidation of Methyl tertiary Butyl Ether. *International Journal of Chemical Kinetics* 23 : 907-924
- Smith, D. and McIver, C. 1995. Kinetics and mechanism of the atmospheric oxidation of tertiary amyl methyl ether. *International Journal of Chemical Kinetics* 27 : 453-472
- Smith LE 1965. Inhalation of the photochemical smog compound PAN. *American Journal of Public Health* 55 : 1460-1468
- Smith, R. S., Doty, R. L., Burlingame, G. K. and McKewon, D. A. 1994. Smell and taste function in the visually impaired. *Perception and Psychophysics* 54(5) : 649-55
- US EPA 1997. Drinking Water Advisory : Consumer Acceptability Advanced Health Effects Analysis on Methyl Tertiary-Butyl Ether(MTBE). December. Fact Sheet 4 pp. and Advisory 42 pp. EPA-822-f-97-009. ODW 4304.
- Werner I. and Hinton D.E. Toxicity of MTBE to Freshwater Organisms, UC Davis (<http://www.ucdavis.edu>)
- 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