

BTEX 혼합물질과 액상 간 분배성 추적자의 분배계수 예측

이성수¹ · 조상연¹ · 오명학² · 박준범^{1*}

¹서울대학교 공과대학 건설환경공학부, ²한국해양연구원 연안개발연구본부

Estimating Partition Coefficients of Partitioning Tracers between Water and BTEX Mixtures

Sungsu Rhee¹ · Sangyoun Cho¹ · Myounghak Oh² · Junbom Park^{1*}

¹School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

²Coastal Engineering Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute

ABSTRACT

The partitioning tracer method has been studied as an alternative method for detecting and characterizing the distribution of nonaqueous phase liquids (NAPLs) contaminants in subsurface. The reliability of the partitioning tracer method depends on accurate measurements of partition coefficients of the partitioning tracers between water and NAPLs. In this study, partition coefficients of several alcohol tracers between water and benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, and BTEX mixtures are estimated using the modified approach of equivalent alkane carbon number (EACN). Agreements between the measured and estimated partition coefficients were generally observed in experiments. Based on these results, it is confirmed that the partition coefficients of tracers are readily obtained without experiments if the EACN values for the tracers and LNAPLs are known.

Key words : NAPL Monitoring, Partitioning tracer test, Partition coefficient, BTEX contamination, EACN

요 약 문

분배성 추적자 시험은 NAPLs(Nonaqueous Phase Liquids)로 오염된 대수층 및 토양 내 오염물질의 양을 예측하는 새로운 모니터링 방법으로 최근 많이 연구되고 있다. 분배성 추적자 시험은 액상과 NAPL 간에 분배되는 분배성 추적자의 분배계수를 정확히 구해야 높은 신뢰도를 가진 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 등가 알칸 탄소수(Equivalent Alkane Carbon Number; EACN) 접근법을 이용하여 액상과 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 그리고 BTEX 혼합물질간에 분배되는 알코올 계열 추적자의 분배계수를 예측해보았다. 이 예측식을 이용한 예측값과 실험값은 BTEX 뿐만 아니라 BTEX 혼합물에서도 비교적 잘 일치하였으며, 이를 통해 추적자와 오염물질의 EACN 값을 알고 있을 경우 직접적인 분배계수 실험을 하지 않고도 간단하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

주제어 : NAPL 오염도 조사, 분배성 추적자 시험법, 분배계수, BTEX, 등가알칸탄소수

1. 서 론

석유화학공업의 발달로 유류물질은 현재 다양한 산업분야에서 널리 이용되고 있고 지중 유류 저장 시설의 개수도 증가하고 있다. 이와 더불어 저장 시설의 누유 등에

의한 환경문제의 발생 빈도도 점점 증가하고 있다. 유류물질의 주요 구성 물질인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌(BTEX) 등은 발암성 물질로 토양에 누출되었을 경우 토양뿐만 아니라 지하수를 오염시켜 환경과 인체에 큰 피해를 유발시킬 수 있는 가능성이 높다. 따라서 유류물질이

*Corresponding author : junbpark@snu.ac.kr

원고접수일 : 2006. 11. 28 게재승인일 : 2007. 4. 17

질의 및 토의 : 2007. 6. 30 까지

유류 저장고의 누유나 공정상의 실수로 인해 지반 내로 유출되었을 경우, 즉시 지반 내로 유출된 양과 오염도를 조사하여 정확도를 높이는 것이 필요하다(Bachman et al., 2001).

유류물질은 그 특성상 물리, 화학적 특성이 서로 상이한 여러 가지 물질들의 복합체로 구성되어 있고, 유류가 토양 내로 유입될 때 토양의 공극률(porosity), 저류 능력(retention capacity), 지하수위(ground water level), 흡입자의 흡착(sorption) 능력, 지반의 균열상태 등에 따라 토양 내에서 불균질한 분포를 이루며, 그 오염량 또한 지역적으로 상이하게 존재한다. 따라서 기존에 주로 사용된 유류 오염 조사법인 시추 조사법들(Analysis of soil sampling, core sampling, monitor-well sampling, etc.)은 많은 비용을 들여 여러 개의 시추공을 뚫지 않는 한 전체 오염 지역의 유류 분포와 유류 오염량의 정확한 조사가 어렵다.

분배성 추적자 시험(partitioning tracer method)은 기존 조사방법의 단점을 해결할 수 있는 대안으로 최근 연구되고 있다. 분배성 추적자 시험의 가장 큰 장점은 상대적으로 넓은 오염 지역을 점원조사가 아닌 연속적인 공간적 측정이 가능하여 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다는 점이다(Jin et al., 1995; Dwarakanath et al., 1999). 분배성 추적자 시험의 기본적인 순서는 다음과 같다. 오염 물질에 대해 서로 다른 분배 정도를 가진 여러 종류의 추적자 물질들은 주입정(injection well)에 주입한 후, 대상 오염지역을 통과하게 되고 추출정(extraction well)에서 검출되는 추적자 물질들의 농도를 분석한다. 이렇게 NAPL로 오염된 지반 내로 주입된 추적자 물질들 중 분배계수가 큰 분배성 추적자 물질은 가역적 분배(reversible partitioning) 현상에 의해 오염지반 내에서 지연되고 크로마토그래피 원리로 비분배성 추적자 물질에 비해 그 이동속도가 지연된다. 분배성 추적자와 비분배성 추적자가 서로 분리된 양상을 분석하여 식 (1)을 통해 오염된 포화대에서 NAPL의 양을 정량적으로 예측할 수 있다(Jin et al., 1995).

$$S_N = \frac{\bar{t}_2 - \bar{t}_1}{(K_{N,w}^2 - 1)\bar{t}_1 - (K_{N,w}^1 - 1)\bar{t}_2} \quad (1)$$

여기서, \bar{t}_1 과 \bar{t}_2 는 각각 추출정에서 측정된 추적자 1과 2의 대표유출시간이고, $K_{N,w}^1$ 과 $K_{N,w}^2$ 는 각각 추적자 1과 2의 물과 NAPL 사이에 분배되는 분배계수이다.

분배성 추적자 시험 시 추적자의 분배계수(K)는 NAPL에 대한 추적자의 반응성 정도를 나타내는 계수로 분배성 추적자가 지연되는 정도를 결정하는 중요한 인자이며 일

반적으로 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$K = \frac{C_N}{C_w} \quad (2)$$

여기서, C_N 은 NAPL상에 분배되어 존재하는 추적자의 농도이고, C_w 은 액상(물)에 존재하는 추적자의 농도이다. 추적자의 분배계수가 클수록, 추적자는 NAPL에 더 많이 분배되고, 이는 분배성 추적자 시험법 시 높은 분배계수를 가지는 추적자가 낮은 분배계수를 가지는 추적자에 비해 더 지연됨을 뜻한다.

분배성 추적자 시험에서 NAPL의 정량적인 분석에 대한 오차를 최소화하기 위해서는 분배계수를 정확히 측정하는 것이 중요하다. 그러나 실험을 통해 여러 추적자의 분배계수를 구하는 과정은 많은 시간이 걸리며, 또한 대상 NAPL의 시료양이 적거나 채취하기가 곤란한 경우에는 회분식 실험 자체가 불가능할 수도 있다. 따라서 분배계수를 예측하는 방법에 대한 연구가 진행되었고, Dwarakanath와 Pope (1998)는 등가 알칸 탄소수(Equivalent Alkane Carbon Number; EACN) 개념을 이용하여 NAPL과 액상간의 분배계수를 예측하는 방법을 제안하였다.

현재까지의 EACN을 이용한 분배계수 예측에 관한 연구들은 주로 DNAPL에 분배되는 추적자의 분배계수 예측에 초점을 맞추어 연구되었고, 복합 오염물질에 대한 분배성 추적자의 분배계수 예측보다는 단일 오염물질에 대한 분배계수 예측부분에 중점을 두었다. 그러나, 가솔린 등과 같은 유류물질은 LNAPL이며, 유류물질 자체가 일반적으로 단일 물질 상태가 아닌 복합물질로서 지중에 존재하므로 복합물질의 분배계수 예측에 대한 적용성 검증이 필수적이라 판단된다.

따라서 본 연구에서는 유류오염물질로 대표적 유류물질인 가솔린의 주요 구성성분인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌(BTEX)을 선정하여 BTEX와 그 혼합물에 대한 분배 실험을 실시하고, EACN 개념을 이용하여 예측한 분배계수 값들을 실험값들과 비교함으로써 EACN 개념을 이용하여 분배성 추적자의 BTEX 혼합물과 액상 간의 분배계수 예측에 대한 적용성을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 실험에서는 가솔린의 주요 구성성분인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌(BTEX)을 대상 오염물질로 선정하였고 그 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of BTEX

BTEX	Chemical formula	Molecular weight (g/mol)	Density (g/mL)	Solubility (mg/L)	Manufacturer	Purity (%)
Benzene	C ₆ H ₆	78.11	0.88	1780	JUNSEI	99.5
Toluene	C ₆ H ₅ -C-H ₃	92.14	0.87	500	Aldrich	99.5
Ethylbenzene	C-H ₃ -C-H ₂ -C ₆ -H ₅	106.17	0.86	140	Aldrich	98.0
Xylene	C ₆ -H ₄ -(CH ₃) ₂	106.17	0.87	170	Aldrich	83

Table 2. Mixing ratios for BTEX mixtures

Sample	BTEX mixture ratio							
	Mole ratio				Weight ratio			
	Benzene	Toluene	Ethylbenz-ene	Xylene	Benzene	Toluene	Ethylbenz-ene	Xylene
Mixture A	1	1	1	1	1	1.18	1.36	1.36
Mixture B	2	1	1	1	1	0.59	0.68	0.68
Mixture C	1	2	1	1	1	2.35	1.36	1.36
Mixture D	1	1	2	1	1	1.18	2.72	1.36
Mixture E	1	13.18	3.96	17.01	1	15.55	5.39	23.12

Table 3. Properties of selected alcohol tracers

Tracers	Chemical formula	Molecular weight (g/mol)	Density (g/mL)	Manufacturer	Purity (%)
1-Butanol	C ₄ -H ₉ -O-H	74.12	0.810	Aldrich	99.9
1-Pentanol	C ₄ -H ₉ -C-H ₂ -O-H	88.15	0.811	Aldrich	99+
Hexanol	C ₆ -H ₁₄ -O	102.18	0.814	Aldrich	99+
2-Ethyl-1-butanol	(C ₂ -H ₅) ₂ -C-H-C-H ₂ -O-H	102.18	0.833	Aldrich	98
4-Methyl-2-pentanol	(C-H ₃)-C-H-C-H ₂ -C-H-(O-H)-C-H ₃	102.18	0.808	Aldrich	99

BTEX 혼합물들은 Table 2와 같이 5가지 조합의 몰분율로 혼합하여 사용하였다. 혼합물 A는 BTEX가 각각 동일 비율로 혼합된 혼합물질을 대표하기 위해, 혼합물 B~D는 BTEX 중 한 가지 성분이 많을 때를 대표하기 위해 제조하였다. 또한, 혼합물 E는 박현미 등(2000)이 연구한 주유소 주변 유류로 오염된 흙의 BTEX 성분비 중 하나를 선택하여 실제 유류로 오염된 흙의 BTEX 성분비를 모사하기 위해 제조하였다. BTEX ‘혼합비 1:1:1:2’는 ‘혼합비 1:1:2:1’과 이론상 같은 결과가 나오게 되므로 본 실험에서 제외하였는데 이에 대해서는 결과 및 토의 부분에 그 내용을 언급하였다.

본 실험에 사용한 추적자 물질들은 일반적으로 많이 쓰이는 알코올 계열의 물질들로 그 종류와 특성은 Table 3과 같다.

2.2. 실험방법

분배계수는 총 5종류의 알코올 계열 추적자들과 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 5종류의 BTEX 혼합물들을 이용하여 측정되었다. 먼저 추적자 물질을 각각 100, 200, 400, 600 mg/L의 농도로 제조한 후, 20 mL 규격의 유

리병에 추적자 용액과 BTEX를 각각 10 mL씩 주입하고 테프론 재질의 마개로 빈 공간을 최소화하여 밀봉하였다. 이후 소용돌이식 교반기로 30초간 교반시키고 회전식 교반기로 24시간 교반하여 BTEX와 추적자가 충분히 반응할 수 있게 하였다. 교반이 끝난 후, 1 시간가량 안정화시키고, 5분 동안의 원심분리를 통해 NAPL 상과 액상이 완전히 분리되게 하였다. 이렇게 분리된 두 상 중에서 액상 부분을 피펫을 이용하여 GC분석용 2 mL 바이알에 담고 GC-FID를 이용하여 액상에 존재하는 추적자의 농도(C_w)를 구하였다. NAPL상에 존재하는 추적자의 농도(C_N)는 측정된 C_w 을 바탕으로 반응 전후의 추적자의 농도 차이만큼 NAPL상으로 분배되었다고 가정하여 구하였다. 또한 실험적 오차를 고려하여 모든 시료는 각각 두 개씩 동일한 조건에서 제작하여 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 분배계수 실험 결과

Hexanol에 대한 BTEX와 BTEX 혼합물의 분배계수 실험결과를 Fig. 1에 도시하였다. 액상에 존재하는 추적자의

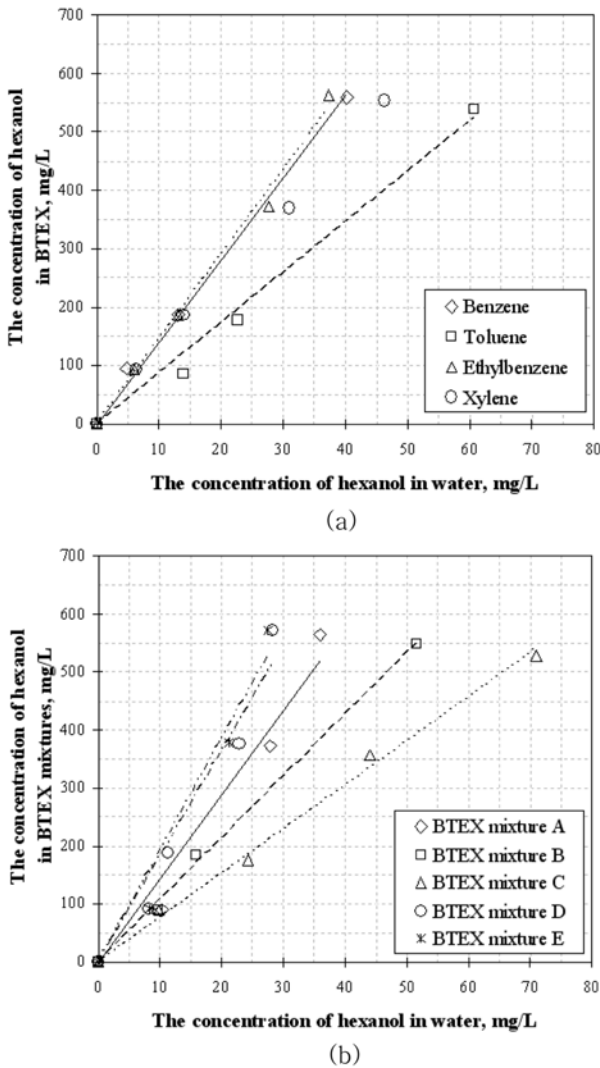


Fig. 1. Partitioning of hexanol between BTEX and water: (a) BTEX, (b) BTEX mixtures.

농도와 BTEX에 존재하는 추적자의 농도는 각각 선형 관계임을 알 수 있다. 그리고 다른 4종류의 추적자들(1-butanol, 1-pentanol, 4-methyl-2-pentanol, 2-ethyl-1-butanol) 역시 선형관계임을 확인하였다. 그리고 식 (2)를 바탕으로 각 그래프의 추세선의 기울기들이 해당 추적자들의 분배 계수임을 알 수 있다. 알코올 추적자가 hexanol인 경우 분배계수의 크기는 에틸벤젠이 가장 크고, 톨루엔이 가장 낮게 나왔다. BTEX 혼합물인 경우도 에틸벤젠이 많이 포함된 Mixture D가 크게, 톨루엔이 많이 포함된 Mixture C가 가장 낮게 나온 것으로 보아 혼합물질의 분배계수는 혼합물 내 높은 함유량을 가지는 물질의 분배계수에 크게 영향을 받는 경향성을 확인할 수 있었다.

추적자들 각각의 실험적 분배계수 값은 Table 4에 나타

나 있다. Table 4를 보면 분배계수의 결정계수(coefficient of determination, R^2)값이 대부분 0.95 이상으로 실험적으로 구해진 분배계수 값을 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 그리고 추적자의 종류에 따라 BTEX 각각의 분배계수의 값이 다르지만 대체적으로 벤젠의 분배계수가 가장 크게 나오는 것을 확인하였다.

3.2. 분배계수 예측 정확도 분석

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌의 EACN 값들은 각각 0, 1, 2, 2이며(Cayias et al., 1976; Baran et al., 1994), 여기서 에틸벤젠과 자일렌은 분자식이 C_8H_{10} 으로 동일하여 각각의 EACN 값은 동일하다. 따라서 BTEX 혼합물질의 제조 시 '1:1:1:2'의 혼합비는 제외하였다. 알코올 계열 추적자의 EACN 값들은 노말 알코올의 EACN 값이 화합물 내의 탄소원자 개수임을 감안하여 butanol, pentanol, hexanol이 각각 4, 5, 6이다.

추적자 물질과 유류물질의 EACN 값을 이용하여 분배 계수를 예측하기 위하여 추적자의 EACN 값에 따른 분배 계수의 값과 유류물질의 EACN 값에 따른 분배계수의 값을 각각 정리하였다. 3개의 인자(분배계수, 추적자의 EACN, 그리고 유류물질의 EACN)를 포함한 식을 구하고자 다중회귀분석을 수행하였고, 그 결과 식 (3)과 같은 쌍일차 회귀 방정식을 도출하였다.

$$\log K_{ij} = -2.765 + 0.653A_j - 0.118N_i \quad (3)$$

여기서, A_j 는 추적자의 EACN 값이고 N_i 는 NAPL의 EACN 값이며, 다중상관계수(multiple correlation coefficient, γ)는 0.97, 결정계수(coefficient of determination, R^2) 0.94, 표준오차(standard error, n)는 13.3%로 계산되었다. 도출된 쌍일차 회귀방정식과 다중회귀분석에 사용된 원자료를 비교한 결과(Fig. 2), 3차원 공간에 평면으로 표현되는 식 (3)에 원자료들이 근접하여 분포함을 확인하였다.

3.2.1. BTEX 단일물질의 분배계수 예측

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌에 대한 알코올 추적자의 분배계수를 분배실험을 통해 구한 결과와 EACN 방법으로 예측한 값을 Table 5와 Fig. 3에 각각 비교하였다.

실험에 사용된 데이터 수와 실험적 오차를 감안할 때, 분배계수의 실험값과 예측값은 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서 사용된 알코올 추적자들의 EACN 범위에서 액상(물)과 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 사이에 각각 분배되는 알코올 추적자의 분배계수들은 알코올 추적자의 EACN 값을 알고 있을 경우 식 (3)을

Table 4. Measured partitioning coefficients (K) of tracers between water and BTEX

Tracers	Contaminants	K	R ²	Contaminants	K	R ²
Butanol	Benzene	1.47	1.000	Mixture A	1.99	0.975
	Toluene	0.60	0.978	Mixture B	1.10	0.996
	Ethylbenzene	0.62	0.999	Mixture C	0.76	0.998
	Xylene	0.88	0.943	Mixture D	0.96	0.972
				Mixture E	0.42	0.998
Pentanol	Benzene	2.68	0.979	Mixture A	2.36	0.992
	Toluene	1.98	0.992	Mixture B	2.49	0.999
	Ethylbenzene	2.20	0.992	Mixture C	2.31	0.999
	Xylene	1.68	0.999	Mixture D	2.37	0.991
				Mixture E	2.88	0.948
Hexanol	Benzene	14.00	0.995	Mixture A	14.48	0.968
	Toluene	8.65	0.990	Mixture B	10.67	0.998
	Ethylbenzene	14.51	0.993	Mixture C	7.62	0.995
	Xylene	12.06	0.996	Mixture D	18.23	0.958
				Mixture E	19.29	0.964
2-Ethyl-1-butanol	Benzene	12.59	0.989	Mixture A	6.97	1.000
	Toluene	6.86	0.990	Mixture B	6.74	0.988
	Ethylbenzene	5.71	1.000	Mixture C	8.07	0.985
	Xylene	5.95	1.000	Mixture D	6.56	0.992
				Mixture E	5.74	0.999
4-Methyl-2-pentanol	Benzene	7.44	0.988	Mixture A	4.57	1.000
	Toluene	3.70	0.999	Mixture B	4.60	0.998
	Ethylbenzene	2.83	0.990	Mixture C	6.15	0.975
	Xylene	3.48	0.995	Mixture D	4.55	0.988
				Mixture E	9.18	0.949

K: Partitioning coefficient
 R²: Determination coefficient

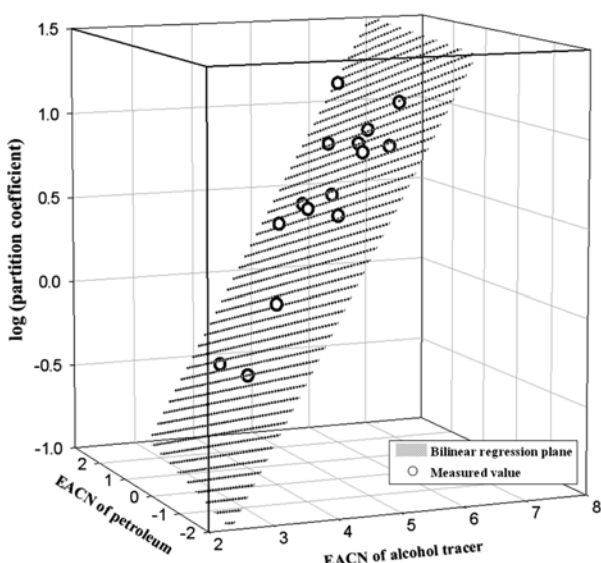


Fig. 2. Comparison of bilinear regression equation and measured results from partitioning batch experiments.

통해 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다. 그러나, 본 실험에 사용된 EACN 범위를 벗어난 알코올 추적자들의 분배계수 예측을 위한 식 (3)의 적용은 추가 실험과 보완이 필요하다.

3.2.2 BTEX 혼합물질의 분배계수 예측

Table 2와 같은 비율로 제조된 BTEX 혼합물질에 대한 알코올 계열 추적자의 분배계수를 예측하기 위해 우선 BTEX 혼합물질의 EACN값을 식 (4)를 이용하여 계산하였다. BTEX 혼합물의 EACN값은 BTEX 각 단일 물질의 EACN값을 알고 있고, 혼합물질의 성분비를 알고 있으므로 Cayias et al.(1976)이 제안한 다음 식을 이용할 수 있다.

$$N_{mixture} = \sum_{i=1}^n x_i N_i \tag{4}$$

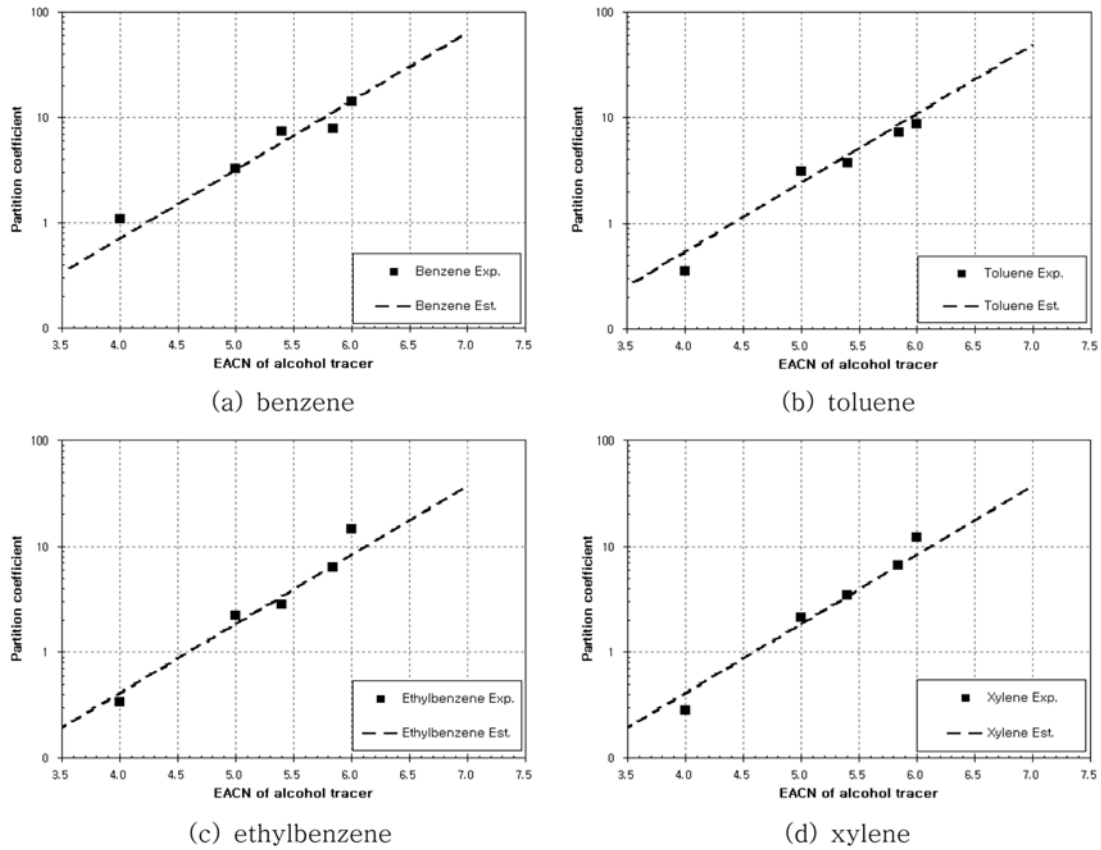


Fig. 3. Comparison of predicted and measured partition coefficients of various alcohol tracers with BTEX (EACN values of tracers: butanol = 4, pentanol = 5, 4-methyl-2-pentanol = 5.4, 2-ethyl-1-butanol = 5.84, hexanol = 6).

Table 5. Comparison of experimental and estimated partition coefficients (log K) of BTEX

Alcohol tracers	Benzene		Toluene		Ethylbenzene		Xylene	
	Exp.	Est.	Exp.	Est.	Exp.	Est.	Exp.	Est.
Butanol	0.04	-0.15	-0.46	-0.28	-0.47	-0.40	-0.55	-0.40
4-Methyl-2-pentanol	0.87	0.76	0.57	0.64	0.45	0.53	0.54	0.53
2-Ethyl-1-butanol	0.90	1.05	0.86	0.93	0.80	0.81	0.82	0.81
Pentanol	0.52	0.50	0.49	0.38	0.34	0.26	0.32	0.26
Hexanol	1.15	1.15	0.94	1.04	1.16	0.92	1.08	0.92

Exp.: Experimental value
 Est.: Estimated value

여기서, x_i 는 각 성분의 몰분율을 나타낸다.

식 (3)과 식 (4)를 이용한 BTEX 혼합물질들(mixture A~E)의 분배계수 예측값들과 실험으로 직접 측정한 실험값들을 BTEX 단일물질의 예측치 비교와 동일한 방법으로 Table 6과 Fig. 4에 각각 비교하였다.

Butanol의 경우, 분배계수 예측값이 실험값과 큰 오차를 띠는데 이는 butanol이 BTEX에 거의 분배되지 않아 실

험으로 구한 평균 분배계수는 0에 가까워 조그만 실험적 오차에도 예측값과 실험값이 큰 오차를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 BTEX 혼합물에 대한 분배계수의 예측 결과도 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌에 대한 예측 결과와 유사하게 분배계수의 실험값과 예측값은 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

Table 6. Comparison of measured and estimated partition coefficients (log K) of BTEX mixture

Alcohol tracers	Mixture A		Mixture B		Mixture C		Mixture D		Mixture E	
	Exp.	Est.	Exp.	Est.	Exp.	Est.	Exp.	Est.	Exp.	Est.
Butanol	0.30	-0.31	0.04	-0.28	-0.12	-0.30	-0.02	-0.33	-0.38	-0.36
4M2P	0.66	0.60	0.66	0.63	0.79	0.61	0.66	0.59	0.96	0.57
2E1B	0.84	0.89	0.83	0.92	0.91	0.90	0.82	0.87	0.76	0.85
Pentanol	0.37	0.34	0.40	0.37	0.36	0.35	0.37	0.32	0.46	0.31
Hexanol	1.16	0.99	1.03	1.02	0.88	1.00	1.26	0.98	1.29	0.96

Exp.: Experimental value
 Est.: Estimated value
 4M2P: 4-Methyl-2-pentanol
 2E1B: 2-Ethyl-1-butanol

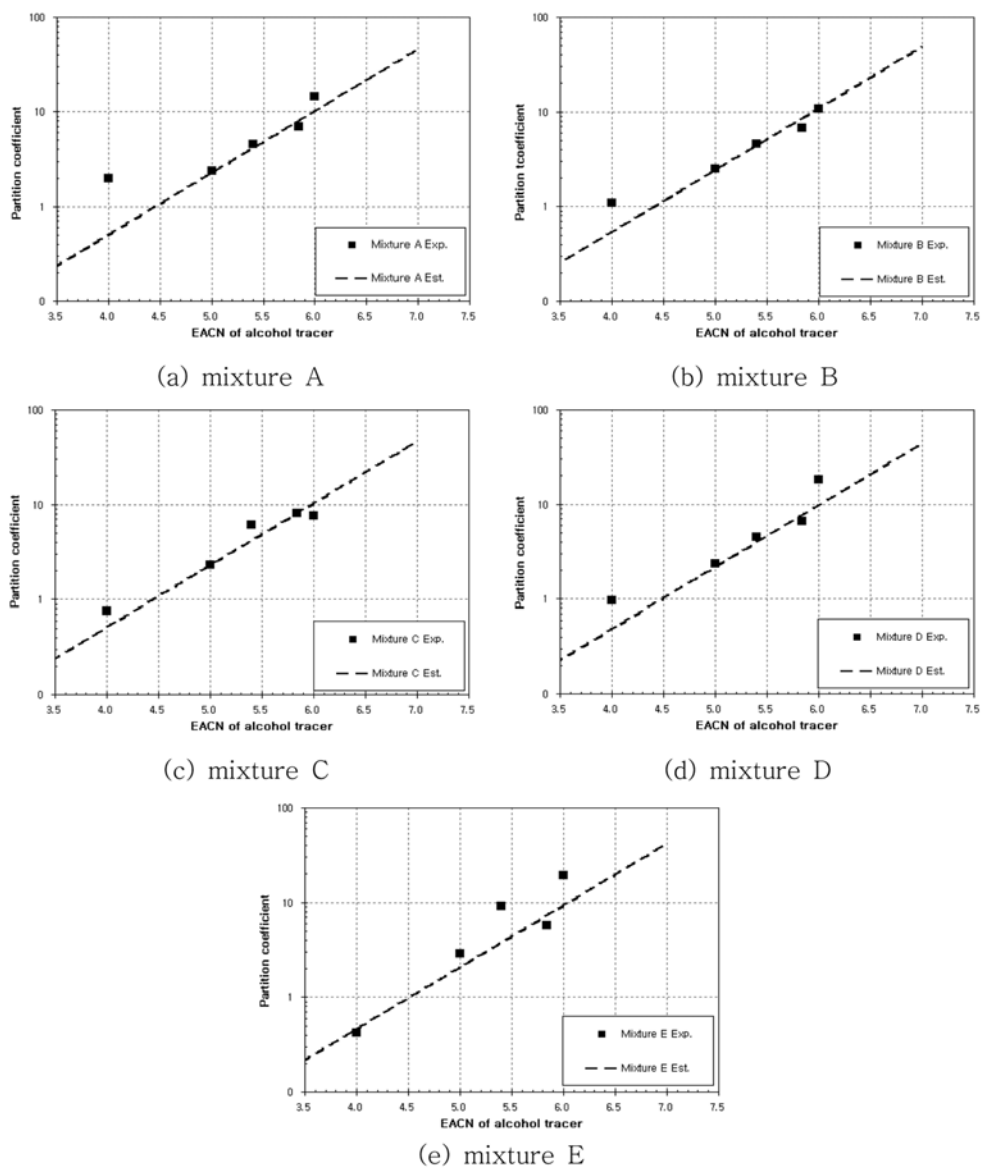


Fig. 4. Comparison of predicted and measured partition coefficients of various alcohol tracers with BTEX mixtures (EACN values of tracers: butanol = 4, pentanol = 5, 4-methyl-2-pentanol = 5.4, 2-ethyl-1-butanol = 5.84, hexanol = 6).

4. 결 론

본 연구에서는 유류 오염물질의 주요 성분인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 BTEX 혼합물을 제조하여 알코올 계열 추적자의 분배 특성을 파악하였고, 분배계수를 예측하기 위해 실험적으로 구한 분배계수 값과 예측된 분배계수 값을 비교해 본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 회분식 규모의 분배계수 실험 결과, 본 실험에 사용된 알코올 추적자와 BTEX 오염물질의 경우, 액상(물)에 존재하는 추적자의 농도와 BTEX에 존재하는 추적자 물질의 농도는 서로 비례하며 커지는 선형관계임을 확인할 수 있었고, 그 회귀선의 기울기들이 추적자의 분배계수가 됨을 기존의 연구와 마찬가지로 확인하였다.

두 번째, 4~6 사이의 EACN 값을 가진 알코올 추적자의 경우, 알코올 추적자의 EACN 값 및 BTEX의 EACN 값과 분배계수 값과의 상관관계를 이용하여 세 인자들을 포함한 쌍일차 회귀 방정식을 도출할 수 있었다.

세 번째, 도출된 쌍일차 회귀 방정식을 이용하여 예측한 분배계수 값과 실험을 통해 얻은 분배계수 값을 비교한 결과, 4~6사이의 EACN 값을 가진 알코올 추적자를 이용하여 BTEX 류 오염물질의 분배계수를 예측할 때 분배계수를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

따라서 현재까지의 연구결과를 바탕으로 EACN을 이용한 분배계수 예측법을 현장에 바로 적용하기는 어려우나, 파일럿 규모의 현장 실험을 통해 그 적용성이 검증된다면 직접적인 분배계수 실험을 거치지 않고도 본 논문에서 도출된 쌍일차 회귀 방정식을 통해 분배계수를 간단하게 예측할 수 있으리라 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 2006년도 차세대 핵심환경기술개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 박현미, 김지현, 김용판, 이강봉, 2000, 국내 주유소 주변 토양의 BTEX 오염도, 한국환경분석학회지, 3(4), 223-227.
- Bachman, J., Kanan, S.M., and Patterson, H.H., 2001, Monitoring laboratory-scale bioventing using synchronous scan fluorescence spectroscopy : analysis of vapor phase, *Environmental pollution*, 113, 155-162.
- Brusseau, M.L., Nelson, N.T., and Cain, R.B., 1999, The partitioning tracer method for In-situ detection and quantification of immiscible liquids in the subsurface, *ACS symposium series* 725.
- Dwarakanath, V. and Pope, G.A., 1998, New approach for estimating alcohol partition coefficients between Nonaqueous Phase Liquids and water, *Environ. Sci. Technol.*, 32, 1662-1666.
- Cayias, J.L., Schechter, R.S., and Wade, W.H. 1976, Modeling crude oils for low interfacial tension, *Journal of Society of Petroleum Engineers*, 351-357.
- Baran, J. R. Jr., Pope, G.A., Wade, W.H., Weerasooriya, V., and Yapa, A. 1994, Microemulsion formation with mixed chlorinated hydrocarbon liquids, *Journal of Colloid and Interface Science*, 4, 223-227.
- Jin, M., Delshad, M., Dwarakanath, V., McKinney, D.C., Pope, G.A., Sepehrnoori, K., and Tilburg, C.E., 1995, Partitioning tracer test for detection, estimation, and remediation performance assessment of subsurface nonaqueous phase liquids, *Water Resources Research*, 31(5), 1201-1211.
- Jin, M., Jackson, R.E., and Pope, G.A. 2000, The interpretation and error analysis of PITT data, *The Second International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compound*, Monterey, CA, 22-25.
- Schade, W. and Bublitz, J., 1996, On-site laser probe for the detection of petroleum products in water and soil, *Environ. Sci. Technol.*, 30(5), 1451-1458.
- Wu, B. and Sabatini, D.A., 2000, Using partitioning alcohol tracers to estimate hydrophobicity of high molecular weight LNAPLs, *Environ. Sci. Technol.*, 34, 4701-4707.