

## DNAPL Pool의 용해실험에 의한 분산계수 산정

정경영\* · 배열호\*\* · 최상일\*\*\*

\* 대한주택공사 주택연구소

\*\* 시설안전기술공단 기술지원단

\*\*\* 광운대학교 신기술연구소

## Calculation of the Dispersion Coefficient by the Dissolution Experiment of DNAPL Pool

Gyoung-Young Jung\* · Yael-Ho Bae\*\* · Sang-Il Choi\*\*\*

\* Korea National Housing Corporation

\*\* Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

\*\*\* Kwangwoon University

### ABSTRACT

Nonaqueous phase liquids(NAPL) not readily dissolved in water exist as a separate fluid phase. Groundwater contamination by NAPL such as organic solvents and petroleum hydrocarbons becomes major public concerns because of their long-term persistence in the subsurface and their ability to contaminate large volumes of water. Denser-than-water NAPL(DNAPL) spilled into the subsurface penetrate through the saturated zone and ultimately form DNAPL pools on the bottom of the aquifer. The dissolution of DNAPL from these pools depends on the molecular diffusion coefficient, the vertical dispersivity, the groundwater velocity, the solubility, and the pool length.

In this study, the vertical transverse dispersion coefficients for simulating the dissolution of DNAPL from such pools were obtained from the dissolution experiment. Under the experimental conditions used, the vertical transverse dispersion coefficients calculated were  $1.86\text{cm}^2/\text{day}$ ,  $2.90\text{cm}^2/\text{day}$  and  $4.51\text{cm}^2/\text{day}$  for seepage velocities of  $59.2\text{cm}/\text{day}$ ,  $94.3\text{cm}/\text{day}$  and  $158.0\text{cm}/\text{day}$ , respectively. And the vertical transverse dispersivity was  $0.03024\text{cm}$ .

**Key word** : NAPL, DNAPL Pool, dissolution experiment, dispersion coefficient, dispersivity

## 요 약 문

물에 쉽게 용해되지 않고 분리된 유체면을 갖는 액체를 NAPL(nonaqueous phase liquids)이라 한다. 유기용제와 석유탄화수소와 같은 NAPL에 의한 지하수 오염은 지하에서의 장기간의 지속성 및 다량의 지하수를 오염시키는 능력 때문에 주요 관심 대상물질이다. 누출된 DNAPL(denser-than-water NAPL)은 궁극적으로 포화 대수층을 통과하여 바닥에 DNAPL pool을 이루게 된다. 이러한 pool로부터의 용해는 분자확산계수, 연직분산도, 지하수유속, 용해도 및 pool의 길이에 지배된다. 본 연구에서는 이러한 DNAPL pool의 용해를 모사하기 위해 DNAPL 용해실험을 하여 연직 횡분산계수를 산정하였다. 본 연구에서 사용된 실험조건하에서 수행한 실험결과 산정된 연직 횡분산계수는 침투유속이 59.2cm/day, 94.3cm/day 및 158.0cm/day인 경우 각각 1.86cm<sup>2</sup>/day, 2.90cm<sup>2</sup>/day 및 4.51cm<sup>2</sup>/day 이었고, 연직 횡분산도는 0.03024cm 이었다.

**주제어** : NAPL, DNAPL Pool, 용해실험, 분산계수, 분산도

## 1. 서 론

지하수계의 오염은 쓰레기 매립지의 침출수, 공장 폐수의 지하침투, 지하저장탱크의 기름누출 등으로 발생된다. 이들 지역에서 검출되는 물질들중 석유부산물이나 유기용제와 같은 NAPL (nonaqueous phase liquids)은 물에 극소량만 용해되며, 점성은 물보다 작아서 분리된 별도의 액체상의 형태로 이동되며, 일단 지표나 지하에 누출되면 토양 및 대수층에서의 이동은 유체의 포텐셜과 그들의 물리적 특성-주로 경계면 장력, 밀도, 점성 등에 의해 달라지므로 용해되는 물질들과는 아주 다른 거동 특성을 갖는다. 따라서 NAPL에 의해 오염된 지역을 정화하는데 있어서 실제적이고 해석적인 어려움이 따르게 된다.

Fried et al.은 톨루엔과 이소옥탄의 혼합물로 오염된 모래기둥의 길이를 변화시켜 가며 용해실험을 한 결과, 통상적인 유속에서 평형상태의 용질농도를 얻는데 10cm의 접촉거리로 충분하였으며 두 유체사이의 평형상태는 급속도로 도달한다고 하였고,<sup>1)</sup> Johnson and Pankow는 밀도가 큰 염소용제가 수백kg에서 수천kg 포함된 pool이 완전히 용해되는데 수십년에서 수백년이 소요되며, 화학적·생물학적 분해가 없다면 LNAPL(lighter-than-water NAPL)도 거의 유사한 기간이 소요된다고 하였다.<sup>2)</sup> Pearce et al.은 DNAPL (denser-than-water NAPL)인 TCE(trichloroethylene)와 TCA(1,1,1-trichloroethane)에 대해 용해실험을 한 결

과 TCE와 TCA의 용해도가 극히 낮음을 알게 되었으며,<sup>3)</sup> 그외에도 Miller et al., Powers et al., Anderson et al., Seagren et al. 등이 NAPL 잔류대를 통해 흐르는 지하수에서의 용해에 관한 연구를 하였다.<sup>4),5),6),7)</sup>

본 연구에서는 NAPL의 거동을 해석함으로써, 오염된 지하수의 정화를 위한 기초자료로 활용키 위해, DNAPL중 TCE를 사용하여 지하대수층 하부에 pool이 형성되도록 용해실험을 실시함으로써 DNAPL에 의한 지하수오염을 모사하는데 필수적인 분산계수를 산정하고자 하였다.

## 2. DNAPL Pool의 용해

DNAPL이 물에 용해될 때 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 DNAPL의 토양 공극내 포화도와 물에 대한 용해도 등이 있으며, 그외에도 지하수 침투유속 및 공극율 등이 용해에 영향을 미친다. DNAPL pool이 용해되는데 소요되는 시간은 일반적으로 상당히 길기 때문에 오염물질 용해과정은 이류분산방정식의 정상상태 형식을 이용하여 모사할수 있으며, pool의 폭이 횡적 혼합과정에 비하여 일반적으로 크기 때문에 식 (1)과 같이 2차원 형태로 표시할수 있으며,<sup>8)</sup> DNAPL pool의 용해개념도는 Fig. 1과 같다.

$$V \frac{\partial C}{\partial X} = D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $V$  : 흐름방향의 평균침투유속 [L/T]

$D_z$  : 연직방향의 횡분산계수 [ $L^2/T$ ]

$x$  : 흐름방향의 직교좌표계 [L]

$z$  : 흐름방향에 연직인 직교좌표계 [L]

식 (1)의 경계조건은 다음과 같다.

$$C(0 < x \leq L, z = 0) = C_s$$

$$C(x, z = \infty) = 0$$

$$C(x = 0, z) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $L$  : pool의 흐름방향 길이 [L]

$C_s$  : 물에 대한 DNAPL의 포화용해도 [ $M/L^3$ ]

Pool의 면적 및 크기가 시간에 따라 변하지 않는다고 가정하면 해석하는 다음과 같다.<sup>8)</sup>

$$C(L, z) = C_s \operatorname{erfc} \left[ \frac{z}{2(D_z L V)^{1/2}} \right] \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$

$$= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\tau^2) d\tau$$

식 (3)에서 볼 수 있듯이 용해과정은 pool로부터 용해되는 물질의 연직 횡분산계수에 의해 영향을 받으며, 연직 횡분산계수는 분자확산과 역학적분산의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_z = D_e + V\alpha_z \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $D_e$  : 대수층 매체에서 혼합면 유효 분자 확산 계수 [ $L^2/T$ ]

$V$  : 지하수 평균 침투유속 [L/T]

$\alpha_z$  : 연직방향의 횡분산도 [L]

### 3. 실험장치 및 재료

#### 3.1 실험장치

실험장치의 본체는 길이 160cm, 폭 36cm, 높이 60cm이며 본체의 골조는 강재이고 벽체는 아크릴판(T-15mm)으로 되어 있으며 내부벽체에 TCE의 흡착을 방지하기 위해 유리를 부착하였다. 실험장치의 본체 내부는 DNAPL pool이 형성되는 대수층 시료구간과 유입·유출부 구간을 구분하기 위한 목적으로 80메쉬(196 $\mu$ m) 스테인레스 스크린망을 설치하였으며, 특히 유입부의 벽체와 스크린망 사이에는 스테인레스로 된 정류판을 설치하여 유입되는 지하수흐름이 고

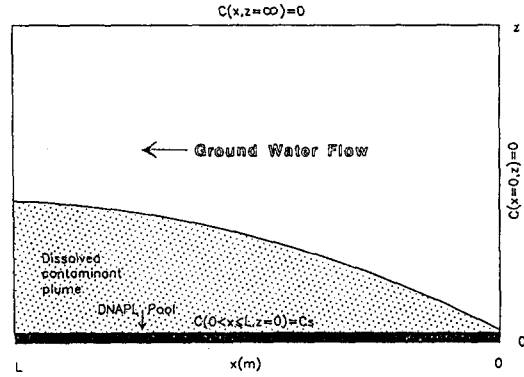


Fig. 1. Schematic diagram showing dissolution of DNAPL pool and boundary conditions.

르게 분포되도록 하였고, 유출구의 PVC관은 상·하부에 일정한 간격으로 구멍을 뚫어 용해된 TCE가 정체되지 않고 유출되도록 하였다. 또한 실험장치내 대수층 수위를 조절하기 위하여 실험장치의 유입구와 유출구에 저류조를 각기 설치하였다. 용해실험을 위한 실험장치의 구조는 Fig.2와 같다.

시료채취 장치는 시료채취 포트가 들어갈 수 있도록 15cm 간격으로 구멍을 뚫은 강판을 실험장치의 본체 상부 중앙에 고정시키고 구멍에 시료채취 포트를 끼울 수 있도록 하였으며, 시료채취 포트는 내경 3mm인 스테인레스관을 사용하였으며 시료채취는 폭방향으로는 항상 중앙에서 하도록 하였고 연직높이는 원하는 위치 어느 곳에서나 할 수 있도록 하였다. 시료채취 포트는 끝을 L자로 꺾어 TCE pool 표면과 평행이 되도록 설치함으로써 시료채취시 오염물질이 흡입에 의해 직접적으로 끌려 올라오지 못하도록 하였으며, 농도분석용 시료채취는 스테인레스관 상단에서 실리콘관을 연결하여 주사기로 실시하였다.

#### 3.2 대수층 조성시료 및 오염물질

대수층 조성시료는 실험의 재현성을 위하여 상수도용 여과사를 사용하였다. 사용된 여과사의 토질특성치는 표면건조 포화상태의 습윤밀도 1.447ton/m<sup>3</sup>, 비중 2.62, 공극율 44.8%이었고, 시료의 입도는 Table 1과 같았으며, 투수계수는 0.0848cm/sec이었다.

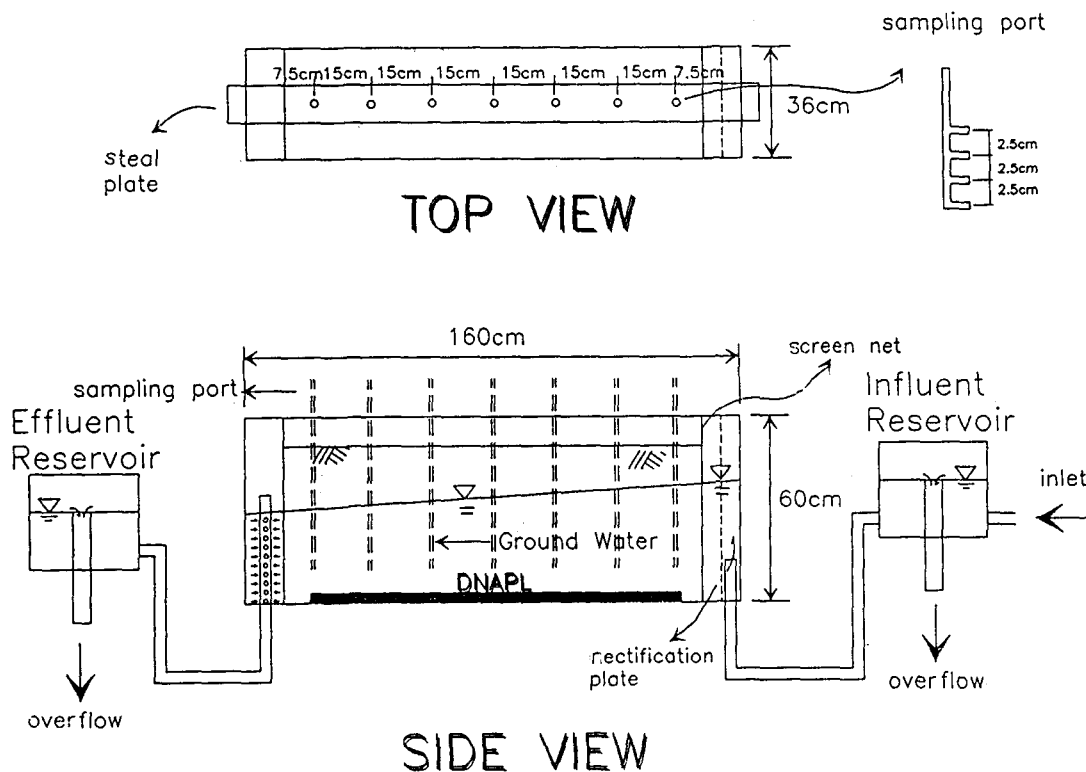


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus and aquifer assembly.

Table 1. Particle-Size Distribution of Sand

세 번 호	체구멍 직경(μm)	남은양(%)
NO.10	2000	0.2
NO.20	840	27.8
NO.30	590	40.9
NO.40	420	24.8
NO.50	300	4.8
NO.60	250	0.8
NO.80	177	0.1
팬		0.1
합 계		100.0

본 실험에서 사용한 DNAPL 오염물질로는 물보다 밀도가 크고 물에 거의 녹지 않는 염소계 유기화합물이며 20~25℃에서 용해도가 1,100mg/l, 밀도가 1.460g/cm<sup>3</sup>로 휘발성물질인 TCE를 사용하였다. TCE의 분석은 가스크로마토 그래피(Hewlett Packard 5890 SERIES II)를 이용하였으며 분석조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Analytical Conditions of TCE by Gas Chromatography

구 분	조 건
Column	Capillary HP-5
Injection Mode	Splitless
Injection Temperature	150℃
Detector Temperature	310℃
Column Temperature	40℃ → 75℃ (5℃/min ↑)
Carrier Gas	N <sub>2</sub> (99.999%)
Flow Rate	10ml/min
Detector	ECD
Sample Injection Volume	1μl

### 3.3 DNAPL 용해실험 방법

DNAPL pool의 조성은 TCE 원액 1.452 l 을 이용하여 pool의 수평길이 90cm, 폭 36cm, 두께 1cm로 하였으며, pool 상부로 부터 연직높이 3.5cm에서 수평길이 15cm, 30cm, 45cm, 60cm, 75cm, 90cm인 지점과

수평길이 60cm인 지점에서 연직높이 3.5cm, 6.0cm, 8.5cm, 11.0cm인 지점에서 TCE의 농도측정을 위한 시료를 채취하였다. 처음에는 물을 통과시키면서 유입부 및 유출부의 저류조를 이용하여 대수층의 수위를 조정, 침투유속이 59.2cm/day이 되도록 한 후 48시간후 부터 24시간 간격으로 오염농도를 측정하여 일정상태의 오염농도에 도달하였는지 확인하였다. 일정상태의 오염농도에 도달하였으면 그 시점으로부터 24시간 간격으로 오염농도를 3회 측정한 후 침투유속을 94.3cm/day 및 158.0cm/day로 증가시켜 동일 방법으로 오염농도를 측정하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 수평길이에 따른 오염농도

수평길이에 따른 오염농도는 59.2cm/day인 경우는 60cm지점을 제외하고 오염농도가 급격하게 증가하였으나, 90cm지점에서는 75cm지점보다 오히려 오염농도가 감소하였다. 94.3cm/day인 경우에는 60cm지점까지 오염농도가 급격하게 증가하였고, 60cm와 75cm지점에서의 오염농도는 완만하게 증가하였으나 90cm지점에서는 75cm지점보다 오히려 오염농도가 감소하였다. 또한 158.0cm/day인 경우는 60cm지점까지 오염농도가 급격하게 증가하였고 60cm와 75cm지점에서의 오염농도는 거의 비슷한 수준을 보이고 있으나, 90cm지점에서는 75cm지점보다 오히려 오염농도가 감소하였다.

모든 침투유속에서의 오염농도가 90cm 지점에서 감소하게 되는 이유는 pool이 끝나는 경계지점 이후에서는 오염원을 계속 공급받지 못하는 반면 유출지점의 실험장치 벽체와 정류벽사이에 있는 물에 의한 역혼합(back mixing)으로 오염농도가 영향을 받는 것으로 사료된다. 3회씩 측정된 실험치간 오차는 수평길이 45cm까지는 거의 없었으며, 그 이후에서는 45cm 이전보다는 다소간 차이를 보였다. 이는 pool 조성, 대수층 조성, 시료채취 및 분석 과정상의 오차에 기인한 것으로 판단되며 오차가 크게 우려할 만큼 크지 않으므로 일정한 상태의 오염농도에 도달한 것으로 간주하였다. 침투유속이 59.2cm/day, 94.3cm/day 및 158.0cm/day일때 연직높이

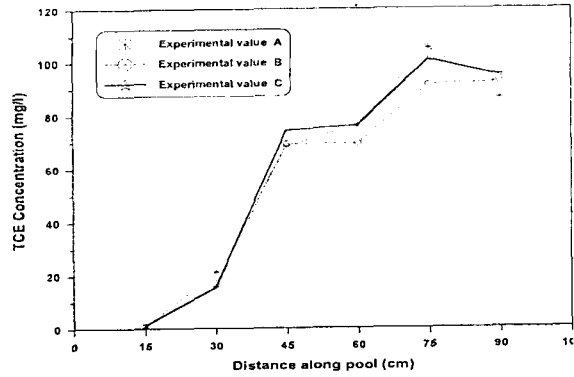


Fig. 3. TCE concentrations measured along longitudinal distance of the pool at 59.2cm/day velocity and 3.5cm vertical height.

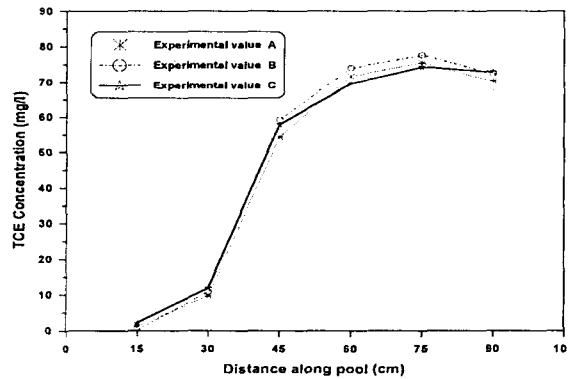


Fig. 4. TCE concentrations measured along longitudinal distance of the pool at 94.3cm/day velocity and 3.5cm vertical height.

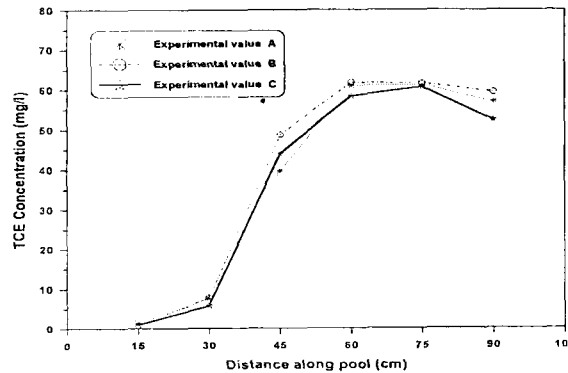


Fig. 5. TCE concentrations measured along longitudinal distance of the pool at 158.0cm/day velocity and 3.5cm vertical height.

3.5cm에서의 수평길이에 따른 실험치는 각각 Fig.3, Fig.4 및 Fig.5와 같다.

#### 4.2 연직높이에 따른 오염농도

수평길이 60cm인 지점에서의 연직높이에 따른 오염농도는 모든 침투유속에서 연직높이가 높아짐에 따라 오염농도가 급격하게 감소하며, 연직높이 11.0cm에서는 오염농도가 거의 0에 가깝게 된다. 이는 모든 침투유속에서 오염농도는 연직높이에 대단히 민감하며 분산되는 농도의 한계는 대략 11.0cm가 됨을 알 수 있었다.

3회 측정된 실험치간 차이는 침투유속이 59.2cm/day인 경우 연직높이 6.0cm와 8.5cm 그리고 11.0cm에서 일정한 농도를 보이고 있으나 연직높이 3.5cm지점에서 농도가 다소 차이가 났으며, 침투유속이 94.3cm/day인 경우 연직높이 8.5cm와 11.0cm에서 일정한 농도를 보이고 있으나 연직높이 3.5cm 및 6.0cm에서는 농도가 다소 차이가 났으며, 침투유속이 158.0cm/day인 경우 모든 연직높이에서 실험치 A와 B는 일정상태의 농도를 보이고 있으나 실험치 C는 실험치 A 및 B와 다소 차이가 났다.

이러한 3회 측정된 실험치간 차이는 pool 조성, 대수층 조성, 시료채취 및 분석 과정상의 오차에 기인한 것으로 판단되며 오차가 크게 우려할 만큼 크지 않으므로 앞서 언급한 바와 같이 일정한 상태의 오염농도에 도달한 것으로 간주하였다. 침투유속이 59.2cm/day, 94.3cm/day 및 158.0cm/day일때 수평길이 60cm에서의 연직높이에 따른 측정된 실험치는 각각 Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8과 같다.

#### 4.3 연직 횡분산계수 산정

DNAPL pool의 용해를 모사하기 위한 이류분산방정식에서 침투유속이 각각 59.2cm/day, 94.3cm/day 및 158.0cm/day일 경우 연직 횡분산계수 값을 변화시키면서 구한 해석해와 수평길이 및 연직높이에 따른 실험결과치를 비교 분석함으로써 최적으로 부합되는 연직 횡분산계수를 산정하였다. 본 연구에서는 3회 측정된 오염농도 값을 평균하여 실험결과치로 사용하였으며 pool의 마지막 지점(90cm)에서의 측정

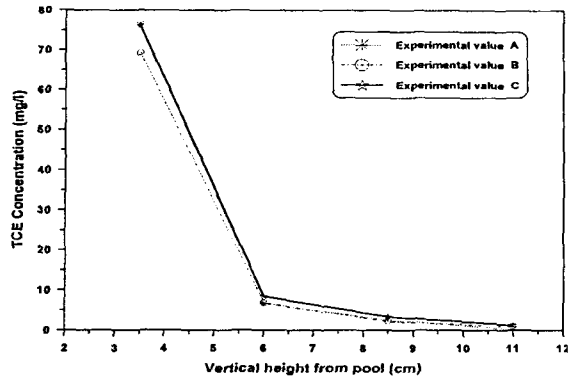


Fig. 6. TCE concentrations measured along vertical distance at 59.2cm/day velocity and 60cm longitudinal distance of the pool.

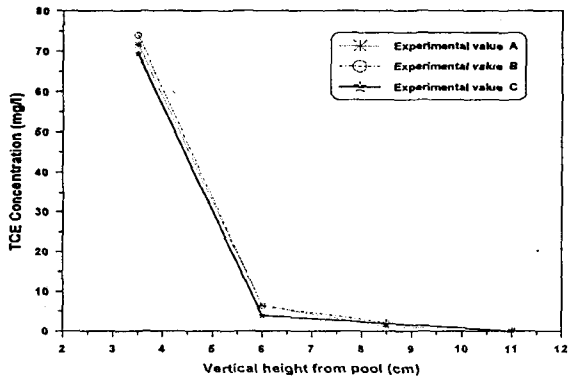


Fig. 7. TCE concentrations measured along vertical distance at 94.3cm/day velocity and 60cm longitudinal distance of the pool.

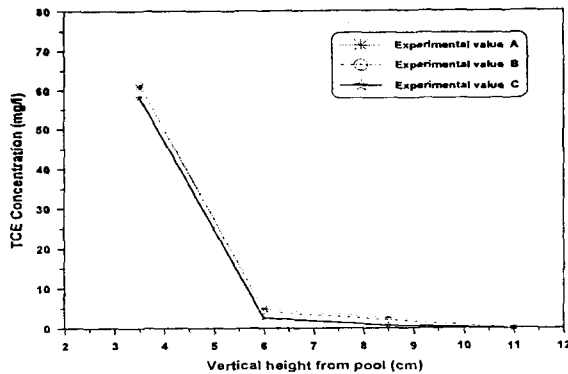


Fig. 8. TCE concentrations measured along vertical distance at 158.0cm/day velocity and 60cm longitudinal distance of the pool.

치는 앞서 언급한 이유로 인하여 제외시켰다.

침투유속이 59.2cm/day인 경우 수평길이와 연직 높이에 따른 실험결과치에 최적으로 부합되는 해석해의 연직 횡분산계수는 Fig.9와 Fig.10에서와 같이 1.86cm<sup>2</sup>/day으로 산정하였다. 횡분산계수를 1.86cm<sup>2</sup>/day으로 사용한 경우 Fig. 9에서는 수평길이 45cm 지점을 빼고는 실험결과치가 해석해에 비교적 양호하게 부합되는 결과를 보이고 있으며, Fig.10에서는 모든 실험결과치가 해석해와 잘 부합되고 있음을 알 수 있다.

침투유속이 94.3cm/day(Fig.11과 Fig.12) 및 158.0cm/day (Fig.13과 Fig.14)인 경우에도 앞서와 마찬가지로 연직 횡분산계수를 산정한 결과, 각각 2.90cm<sup>2</sup>/day와 4.51cm<sup>2</sup>/day로 산정되었다. 이 경우 수평길이에 대한 실험결과치가 경우에 따라 다소 왜곡된 결과를 보이고 있으나 연직높이에 따른 실험결과치가 해석해에 잘 적합하므로 연직 횡분산계수 산정에는 그다지 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

#### 4.4 연직 횡분산도 산정

대수층의 특성을 나타내는 연직 횡분산도는 식 (4)에서  $\alpha_z = (Dz - De)/V$  로 산정된다. TCE의 De는 20℃에서 2.7x10<sup>-10</sup>m<sup>2</sup>/sec로 하였으며,<sup>8)</sup> Dz는 용해실험에 의해 구한 각각의 침투유속에 따른 연직 횡분산계수를 사용하였다. 침투유속이 59.2cm/day, 94.3cm/day 및 158.0cm/day인 경우 산정된 연직 횡분산도는 각각 0.03142cm, 0.03075cm 및 0.02854cm로 각 침투유속에 따른 연직 횡분산도의 평균치는 0.03024cm이었다. 연직 횡분산도는 대수층의 특성이기 때문에 원칙적으로 침투유속에 따라 변화하지 않고 일정해야 하나, 본 연구에서 구한 연직 횡분산도가 침투유속별로 약간의 차이를 보이는 것은 실험과정상의 오차 및 오염물질 pool의 용해를 모사하는 이류분산방정식에서의 이상적인 가정조건하에서의 해석해로 연직 횡분산계수를 산정함으로써 발생하는 것으로 판단되며, 본 연구에서 산정된 연직 횡분산도 값의 미세한 오차로 미루어 볼때 연직 횡분산계수를 산정하기 위한 DNAPL pool의 용해실험은 적절하게 수행되었음을 역으로 확인할 수 있었다. 따라

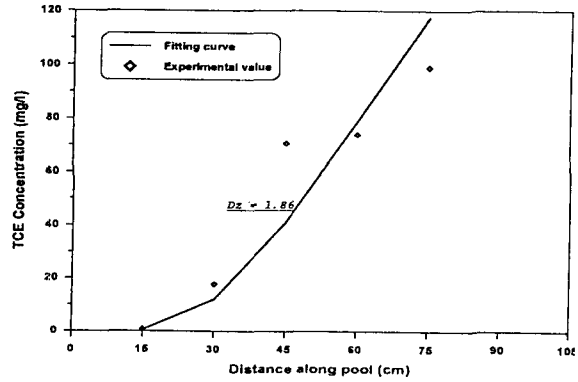


Fig. 9. The best fitting curve of the vertical transverse dispersion coefficient along longitudinal distance of the pool at 59.2cm/day velocity.

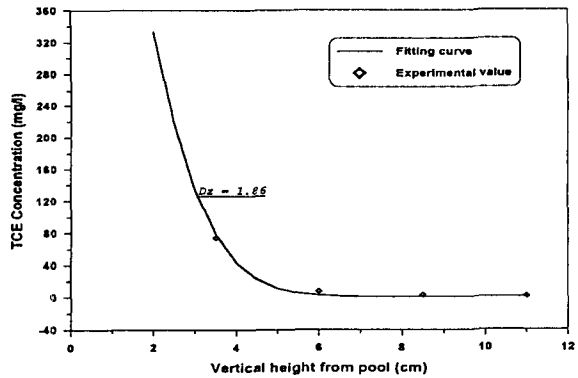


Fig. 10. The best fitting curve of the vertical transverse dispersion coefficient along vertical distance at 59.2cm/day velocity.

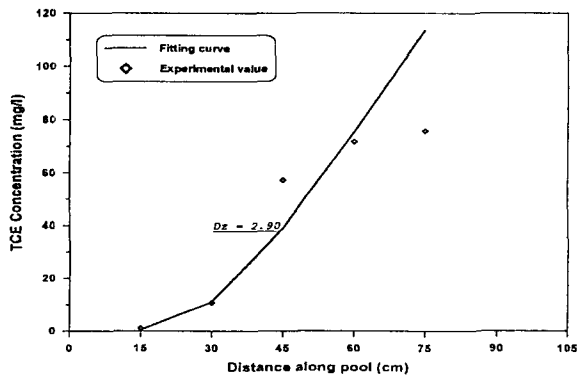


Fig. 11. The best fitting curve of the vertical transverse dispersion coefficient along longitudinal distance of the pool at 94.3cm/day velocity.

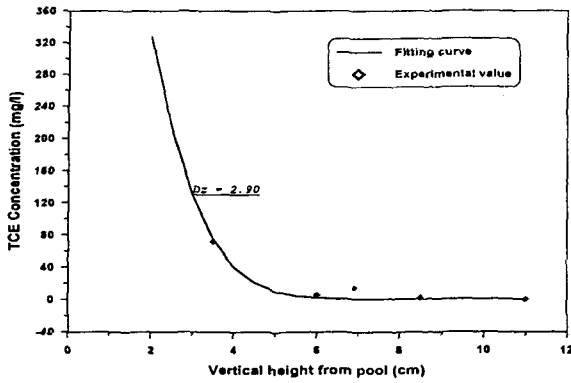


Fig. 12. The best fitting curve of the vertical transverse dispersion coefficient along vertical distance at 94.3cm/day velocity.

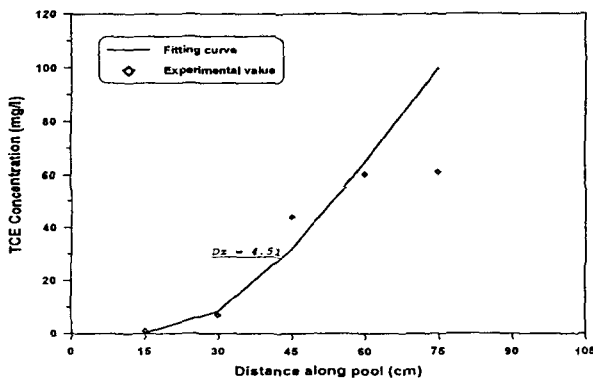


Fig. 13. The best fitting curve of the vertical transverse dispersion coefficient along longitudinal distance of the pool at 158.0cm/day velocity.

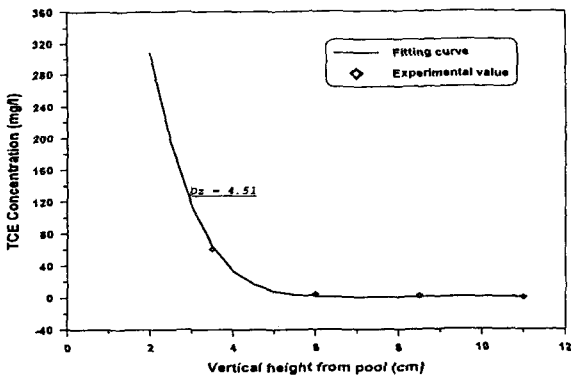


Fig. 14. The best fitting curve of the vertical transverse dispersion coefficient along vertical distance at 158.0cm/day velocity.

서 본 연구에서는 실험 대수층의 연직 횡분산도를 0.03024cm로 결정하였다.

### 5. 결론

NAPL에 의한 지하수오염의 이동을 해석하고 지하수를 정화하기 위한 기초자료로서 활용키 위해 DNAPL이 지하대수층 하부에 오염물질 pool을 형성하는 경우에 대하여 이러한 pool의 용해를 모의하기 위한 연직 횡분산계수의 산정을 위해 용해실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 용해실험 결과 모든 침투유속에서 연직높이가 높아짐에 따라 오염농도는 급격하게 감소하였으며, 분산되는 농도의 한계는 약 11cm로 측정되었다.
- (2) 용해실험 결과 연직 횡분산계수는 침투유속이 59.2cm/day, 94.3cm/day 및 158.0cm/day인 경우 각각 1.86cm<sup>2</sup>/day, 2.90cm<sup>2</sup>/day 및 4.51cm<sup>2</sup>/day로 산정되었다.
- (3) 연직 횡분산도는 침투유속이 59.2cm/day, 94.3cm/day 및 158.0cm/day인 경우 각각 0.03142cm, 0.03075cm 및 0.02854cm이었으며, 평균치인 0.03024cm를 실험대수층의 연직 횡분산도의 값으로 결정하였다.



## 참고문헌

1. Fried, J.J., Muntzer, P., and Zillox, L. "Groundwater Pollution by Transfer of Oil Hydrocarbons," *groundwater*, 17, pp.586~594 (1979).
2. Johnson, R.L., and Pankow, J.F. "Dissolution of Dense Chlorinated Solvents into Groundwater. 2. Source Functions for Pools of Solvents," *Environmental Science and Technology*, 26, pp.896~901 (1992).
3. Pearce, A.E., Voudrias, E.A., and Whelan, M. P. "Dissolution of TCE and TCA Pools in Saturated Subsurface Systems," *J. of Environmental Engineering*, ASCE, In press. (1993).
4. Miller, C.T., Poirier-McNeil, M.M., and Mayer, A.S. "Dissolution of Traced Nonaqueous Phase Liquids : Mass Transfer Characteristics," *Water Resources Research*, 26(11), pp.2783~2796 (1990).
5. Powers. S.E., Loureiro. C.O., Abriola. L.M., and W.J. Weber, Kr. "Theoretical Study of the Significance of Nonequilibrium Dissolution of Nonaqueous Phase Liquids in Subsurface Systems," *Water Resources Research*, 27(4), pp.436~477 (1991).
6. Anderson, M.R., Johnson, R.L., and Pankow, J.F. "Dissolution of Dense Chlorinated Solvents into Groundwater : 1. Dissolution from a Well-Defined Residual Source," *groundwater*, 30, pp.250~256 (1992a).
7. Seagren, E.A., Rittmann, B.E., and Valocchi, A.J. "Quantitative Evaluation of Flushing and Biodegradation for Enhancing In-Situ Dissolution of Nonaqueous Phase Liquids," *J. of Contaminant Hydrology*, 12, pp.103~132 (1993).
8. Hunt, J.R., Sitar, N., and Udell, K.S. "Nonaqueous Phase Liquid Transport and Cleanup, 1. Analysis and Mechanisms," *Water Resources Research*, 24, pp.1247~1258 (1988a).