

## 지하 하수터널 주변의 오염물 거동 해석

정일문, 한일영, 차성수

SK건설(주) 연구소(e-mail: imchung@skec.co.kr)

### 요약문

In this study, analyses of contaminant transport are performed to evaluate the diffusion effect of A sewage tunnel. First, Crank's analytical method is used to measure the concentration change of contaminant with time and space. Two dimensional numerical analysis is performed to measure concentration distribution of contaminant. Both methods show that the diffusion effect is little even after 500 years. This means that when flow converges into the tunnel, the environmental effect of contaminant in tunnel is not serious because there is no advection occurs.

**Key Words** : sewage tunnel, contaminant transport, diffusion, advection

### 1. 서론

스웨덴을 비롯한 북유럽국가에서 시공되고 있는 지하터널형 하수처리장의 생물반응조는 터널 내벽이 무복공식 암반이므로, 시공중 주변 지하수가 터널내로 유입되며, 운영중에도 반응조내의 수위가 주변 지하수위 보다 낮게 유지되므로써 Water Curatin의 설치 등 추가적인 시설이 없이도 반응조내의 하수가 터널밖으로 유출될 위험은 없는 것으로 평가되어 오고 있다. 이러한 결과는 지하수 오염의 주된 기작(mechanism)이라고 할 수 있는 이송(移送, advection)이나 분산(分散, dispersion)의 영향이 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 그러나 반응조내의 하수의 농도는 주변지하수의 농도보다 높으므로, 지하수 흐름에 의한 오염원의 거동은 발생하지 않더라도, 농도차이에 의한 분자확산(molecular diffusion)의 영향은 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 A하수터널의 오염물 확산영향을 검토하기 위한 해석을 두 가지로 수행하였다. 첫번째, 해석적 방법에 의한 시간별-거리별 오염원의 확산을 수행하였고, 두번째, 실제 단면에 대한 2차원 오염물 이동해석을 통해 장기간의 운영으로 인한 오염원 확산의 가시적인 영향범위를 추정하였다.

1차원 해석을 위해서 Crank(1956)의 해석해를 이용하였으며, 2차원 해석을 위해서는 GEO-SLOPE international사의 유한요소 프로그램인 CTRAN/W Version 2(1992)를 이용하였다.

### 2. 본론

A하수처리장의 생물반응조는 무복공 암반내에 위치하며, 암반은 신선한 퇴적암으로 투수계수는  $5 \times 10^{-9}$  m/sec이며, 주변 지하수두가 반응조의 하수 수위보다 높게 유지되므로 흐름은 하수쪽으로 유입된다. 따라서, 오염물을 이동시키는 공극유속의 영향이 없다고 판단되어, 순수한 농도경사에 의한 확산만을 고려하였다. 해석해는 Crank(1956)에 의해 제시되었으며 다음 식(1)과 같다.

$$C_i(x, t) = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2(D^*t)^{0.5}} \quad (1)$$

☞  $C_i$  : 확산이 시작된 후 시간  $t$ , 거리  $x$ 에서의 오염원의 농도

$C_0$  : 오염원의 초기 농도

$\operatorname{erfc}$  : complementary error function

분자확산계수인  $D^*$ 는 다공성 매질에 대한 실험에서 얻어진  $\omega$ 값 (Freeze and Cherry, 1979)중 최대값인 0.5를 적용하여  $5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 결정하였다. 모의기간은 50년, 100년, 200년, 300년, 400년, 500년으로 정하였다. Crank(1956)의 해석해를 이용한 모델링의 결과는 표 1에 나타내었다. 표 1에서 볼 수 있듯이 유효 확산계수  $D^*$ 를  $5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 정하였을 때, 100년이 지난 후 5m 위치에서 상대농도( $C/C_0$ )값은 약 0.005, 초기농도의 0.5%를 나타냈다. 이와같이 반응조 주변 암반내에서의 확산은 실제적으로 매우 서서히 일어남을 알 수 있다. 환경적인 안정성 면에서도 500년에 걸쳐 확산이 이루어졌을 때 10m 떨어진 지점에서 초기농도의 1.17%만이 분포하는 것을 감안하면, 생물반응조의 농도(BOD기준)를 최대 140ppm으로 보아도 약 1.65ppm의 농도가 되므로 지하수 환경에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

표 1. The Predicted BOD Concentration by Analytical Modeling (unit: ppm)

거리 (m)	BOD (50년후)	BOD (100년후)	BOD (200년후)	BOD (300년후)	BOD (400년후)	BOD (500년후)
0.5	96.66	108.95	117.90	121.92	124.32	125.97
1.0	59.61	80.26	96.66	104.31	108.95	112.16
1.5	32.51	55.76	77.04	87.60	94.18	98.78
2.0	15.57	36.40	59.61	72.17	80.26	86.02
2.5	6.50	22.28	44.73	58.28	67.40	74.05
3.0	2.36	12.76	32.51	46.11	55.76	62.99
3.5	7.44E-01	6.82	22.87	35.72	45.41	52.93
4.0	2.02E-01	3.40	15.57	27.08	36.40	43.92
4.5	4.74E-02	1.57	10.24	20.08	28.72	35.99
5.0	9.60E-03	6.81E-01	6.50	14.56	22.28	29.11
5.5	0.00E+00	2.73E-01	3.99	10.32	17.00	23.24
6.0	0.00E+00	1.01E-01	2.36	7.15	12.76	18.31
6.5	0.00E+00	3.53E-02	1.35	4.84	9.41	14.23
7.0	0.00E+00	1.13E-02	7.44E-01	3.20	6.82	10.91
7.5	0.00E+00	3.39E-03	3.95E-01	2.06	4.85	8.24
8.0	0.00E+00	0.00E+00	2.02E-01	1.30	3.40	6.15
8.5	0.00E+00	0.00E+00	9.98E-02	8.00E-01	2.33	4.52
9.0	0.00E+00	0.00E+00	4.74E-02	4.80E-01	1.57	3.27
9.5	0.00E+00	0.00E+00	2.17E-02	2.81E-01	1.04	2.34
10.0	0.00E+00	0.00E+00	9.60E-03	1.60E-01	6.81E-01	1.65

실제 생물반응조 단면에 대한 오염물 이동해석을 위해 GEO-SLOPE International사의 CTRAN/W를 이용하였다. 이 프로그램은 암반이나 토양과 같은 다공성 매질을 통과하는 오염물질의 이동을 해석하기 위한 2차원 유한요소 모형으로 단순한 입자추적으로부터 확산, 분산, 흡착, 방사성 붕괴 등의 복잡한 현상까지도 해석이 가능하다. CTRAN/W은 SEEP/W에서 구한 유속계산 결과를 이용하여 매질내의 용존 오염물의 거동을 계산한다. CTRAN/W를 구동하기 위해 필요한 매개변수는 크게 확산계수, 종분산지수, 횡분산지수이며, 입력값은 다음 표 1과 같다.

수치모의기간은 총 500년으로 정하였고, 50년, 250년, 500년이 지난 후 초기농도의 분포양상을 검토하였다. SEEP/W에 의한 운영중의 지하수 유동해석 결과는 그림 1과 같다.

표 1. Input parameters for analysis by CTRAN/W

항목	입력값	비고
종분산지수( $\alpha_L$ )	0.02 m	고결사암: $10^{-4} \sim 10^{-2}$ m (한정상, 1999)
횡분산지수( $\alpha_T$ )	0.002 m	종분산지수 $\times 0.1$
확산계수( $D^*$ )	$5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$	Freeze and Cherry(1979)

정류상태에 도달한 지하수위는 MODFLOW에 의한 해석결과이다. 그림 1에서 보는 것처럼 서쪽 반단면에서의 지하수위는 반응조 서쪽에서 최대 El. +8m를 나타내며, 최대값을 기준으로 양쪽으로 흐름이 진행되어, 반응조 방향으로 유입되는 형상을 나타내었고, 반대편으로는 바다로 유입되는 양상을 보였다. 그림 2는 동쪽 반단면으로 흐름이 거의 이루어지지 않고 있으며, 그림 3은 오염물 이동해석을 위해 4개의 반응조 단면하부를 경계조건으로 정한 것이다.

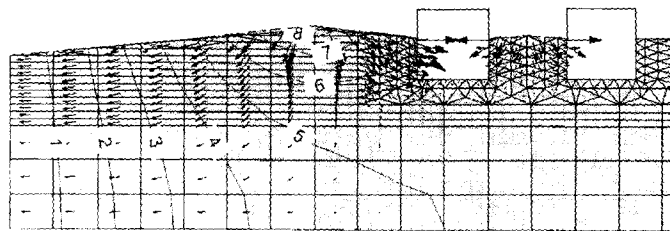


그림 1 The flow modeling result by SEEP/W (West half of cross section)

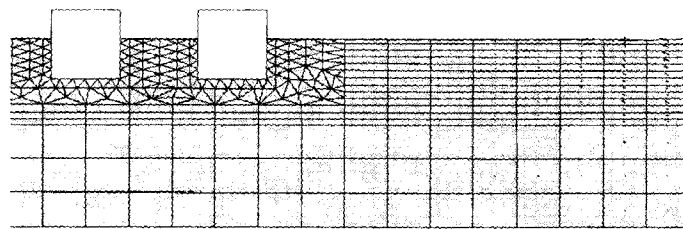


그림 2 The flow modeling result by SEEP/W (East half of cross section)

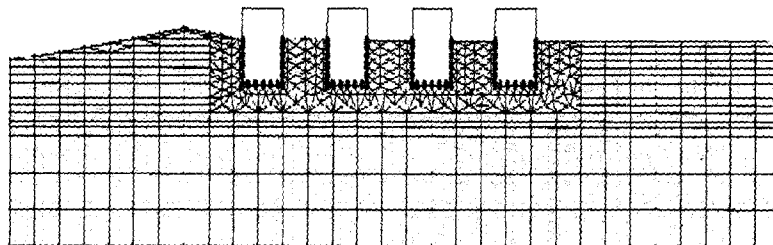


그림 3 The finite element meshes for contaminant transport analysis

그림 4는 50년이 지난 후 반응조 터널 주변의 오염원의 상대농도분포를 확대해서 나타낸 것

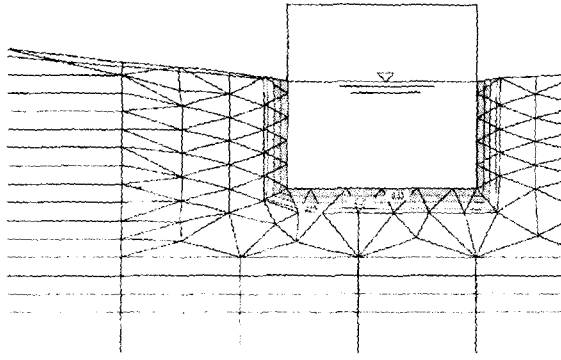


그림 4 Details of distribution of concentration

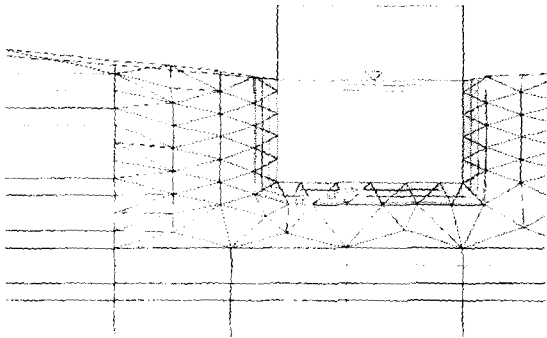


그림 5 Details of distribution of concentration (after 250 years).

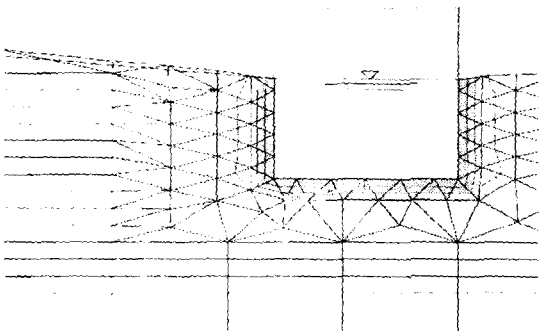


그림 6 Details of distribution of concentration (after 500 years).

으로 터널 벽면 2m 안쪽에서 5%의 상대농도분포를 보였다.

그림 5는 250년이 지난 후 반응조 터널 주변의 오염원의 상대농도분포를 나타낸 것으로 50년의 경우보다 확산이 더 진행되어 터널 벽면에서 2m 지점에서 5%의 상대농도분포를 보이고 있다.

그림 6은 500년이 지난 후 반응조 터널 주변의 오염원의 상대농도분포를 나타낸 것으로 50년의 경우보다 확산이 더 진행되어 터널 벽면에서 3.5m 지점에서 5%의 상대농도분포를 보이고 있다.

### 3. 결 론

1) 해석적 모델링 결과 오염원의 확산거동은 500년이 지난 후 약 10m 이격거리에서 1%의 상대농도를 나타내어 이를 운영중의 BOD농도로 환산하면, 1.65ppm정도로 그 영향이 매우 적은 것으로 나타났다.

2) 수치모델링 결과, 500년이 지난 후 3.5m 이격거리에서 5%의 농도를 나타내어 이를 BOD농도로 환산하면, 약 7ppm으로 해석적 결과와 마찬가지로 그 영향은 미미할 것으로 예상된다.

3) 결과를 종합해보면, 무복공 암반에 하수터널을 건설하는 경우 주변 지하수가 터널내로 유입되는 수렴흐름의 경우 확산에 의한 주변지하수의 오염범위는 적은 영역으로 제한됨을 알 수 있다.

### 참고문헌

- 1) Crank, J. (1956) **The Mathematics of Diffusion**. New York: Oxford University Press.
- 2) Fetter, C. W. (1988) **Applied Hydrogeology**, 2d ed., Macmillan Publishing Company.
- 3) Freeze R. A. and Cherry, J. A. (1979) **Groundwater**, Prentice Hall.
- 4) GEO-SLOPE International Ltd. (1992) **CTRAN/W** for finite element contaminant transport analysis version 2.
- 5) GEO-SLOPE International Ltd. (1994) **SEEP/W** for finite element seepage analysis ver. 3.