

포항 지역 해안 투기 매립장의 수리 특성에 관한 연구

Hydraulic Properties of a Coastal Waste Dump in Pohang, Southeastern Korea

김윤영(Yoon-Young Kim)* · 강동근(Dong-Keun Kang)** · 이강근(Kang-Kun Lee)*

요 약 : 해양 투기 매립장은 바다를 메워서 만들었으므로 그 속에서의 지하수 수리 특성은 대수층이나 일반 육상 매립지안의 지하수 수리 특성과 크게 다르다. 포항 지역의 해양 투기 매립지에서 양수 시험이나 순간수위 변화 시험으로 수리 특성을 파악하기 어려워서 조석 현상과 지하수위 변화로부터 수리 특성을 추정하였다. 투기 매립지의 지하수위는 인근 해수면보다 약 40 cm 높게 관측되었고, 그 이유를 추정하였다. 매립지내 지하수와 해수와의 상관 관계는 매립지내 지하수 수질의 수직적 분포로도 설명된다.

Abstract : Coastal waste dump in Pohang is composed of slags and sludge of POSCO. Hydraulic parameters in the coastal waste dump are very different from those in municipal landfills and general unconsolidated or fractured aquifers. In the waste dump pumping or slug tests are not adequate for the estimation of hydraulic parameters. Time-lag and amplitude of the tidal fluctuation of groundwater table are used to determine the hydraulic parameters. Groundwater table at the groundwater observation wells is about 40 cm higher than the sea level. The contributing factors of the groundwater-rise are estimated. Vertical profile of some chemical constituents in groundwater indicates the gradual transition of the fresh groundwater at the uppermost position to the sea water at the bottom.

서 론

POSCO의 철강생산이 증가함에 따라 slag와 sludge 등의 폐기물도 비례해서 증가하게 되었다. 육상 매립지 확보가 어렵기 때문에 영일만 연안에 매립을 하였다. 이러한 해양 매립지는 매립지의 중요한 설계 요소 가운데 하나인 침출수의 배수 및 차수 시설을 특별히 설치하지 않고 침출수 누출 방지 문제에 있어서 매립지 바닥의 silt로 구성된 퇴적물에 의존하고 있다. 매립지에서 침출수가 발생하였을 경우 조석 현상의 영향 때문에 침출수는 수직적 흐름보다는 수평적 흐름이 지배적이다. 이러한 해양 매립지에서는 인접한 바다의 조수위 변화에 의해 상당한 영향을 받는다.

이 연구는 경북 영일만의 해양 투기 매립지를 대상으로 실시되었다(Figure 1). 해양 투기 매립지에서의 수리 특성을 조사하기 위해 감시정을 설치 하였다. 한 개의 양수정과 양수정을 기점으로 관측정을 후방 2 m, 대각선 전방 5 m, 전방 10 m에 각각 한개씩 설치 하였다. 양수 시험을 하기 위해 양수정과 관측정의 거리를 가깝게 하였다(Figure 1). 이 연구에서는 해양 투기 매립장 관측공의 심도별 침출수 수질을 분석하고 오염물질의 수직적 농도분포 특성을 파악하고 조석 현상에 의한 지하수위의 변동을 조사하여 해양 매립장의 수리 특성을 분석하고자 한다.

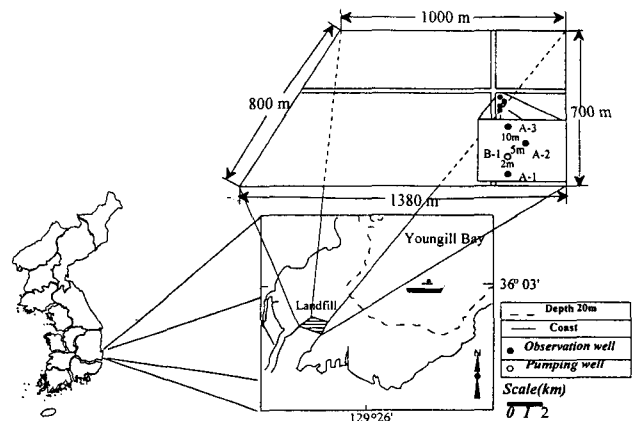


Figure 1. Location map of the waste dump site in Pohang, Southeast Korea.

수리 지질 조사

관측정의 설치

매립지에서 4개의 관정을 설치하였다. 매립지에서 발생하는 침출수가 어느 정도의 오염도를 갖고 있는지를 깊이별 지하수 시료 채취와 분석을 통해 파악하고 양수 시험 및 조수위의 변화에 따른 수위 측정을 통하여 수리 특성을 규명하고 이를 바탕으로 침출수 전체의 흐름을 계산하기 위해 다목적 관정을 4개 지점에 설치하였다(Figure 1). 시추 작업 시 매립장의 slag로 인해

*서울대학교 지질학과(Department of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

**포항산업과학연구소(RIST, P.O.Box 135, San 32, Hyojja-Dong, Pohang-Shi, Kyungbuk 790-600, Korea)

Table 1. Vertical geologic logs of 4 well bores.

Well name	Depth(m)	slag(m)	sludge(m)	slag(m)	Sum(m)	Alluvium(m)	Total depth(m)
A-1	20	10	5	4	19	1	20
A-2	20	9	5	2	16	4	20
A-3	20	7	4	5	16	4	20
B-1	35	12	3	4	19	16	35

기존의 시추기로는 굴착이 매우 어려워 고압 공기 압축기(750 CFM/250 PSI) 및 TBM(1000유압기)착정장비를 사용하여 시추하였다. 시추공에는 스크린 처리한 PVC 파이프를 삽입하였다. 깊이는 A-1, A-2, A-3는 20 m, B-1은 원지반의 지질을 조사하기 위하여 35 m 까지 시추하였고 제 3투기 매립장의 수직적인 매질 분포는 Table 1과 같다.

매립층은 해저에서 16~19 m의 두께로 분포되어 있고 대부분이 slag이고 이들 사이에 sludge가 협재되어 있다. slag는 암회색이고 크기는 지름이 2~15 cm로 다양하게 구성되어 있다. 매립층 아래에는 해성 퇴적층이 비교적 두껍게 분포하고 있고 주로 silt로 되어 있다.

양수 시험에 의한 투수량 계수 산정

대상지역은 영일만에 위치한 해양 투기 매립지로서 매립장내 양수정(B-1)에서 12 m³/hour 로 양수하면서 관측정에서의 지하수위 변화를 측정하였고, 양수 시험이 완료된 후 회복되는 수위를 측정하는 회복 수위 시험도 병행하여 실시하였다. 양수 시험 결과는 특이하게 양수를 하는 동안에 수위가 상승하는 현상이 발생하였다. 매립층의 수리 전도도가 자연적인 매질이 가질 수 있는 수리 전도도 범위 중 가장 높은 범위의 값, 즉 모래와 자갈로 이루어진 대수층의 수리 전도도 값을 상회하기 때문에 관측정의 수위는 양수에 의한 영향보다는 조수위 변화에 더 영향을 받음을 보여준다. 그렇기 때문에 양수 시험과 수위회복시험의 결과로는 수리 특성을 규명하기가 어려웠다. 수리상수를 분석하기 위해 하루 동안의 자연수위 변화와 해안에서의 수위 변화와 대기압의 변화 등을 조사 하였다.

대기압의 변화와 지하수위 변동

대기압의 변화는 특히 피압 대수층의 지하수위에 많은 변동을 일으킨다. 시험정의 수위는 대기와 접촉하기 때문에, 그것은 대수층에서의 정수두압과 대기압과의 균형을 나타낸다. 대기압의 변화와 수위의 변화는 서로 반비례의 관계에 있다. 매립장의 대기압 효율은 수위 변화와 압력 변화의 비를 나타낸다(Jacob, 1940). 즉, 대기압의 효율은

$$B = \frac{\gamma \Delta h}{\Delta P_a}$$

로 나타낼 수 있다. Δh 는 수위면의 변화폭이고, ΔP_a 는 대기압의 변화폭이다.

Figure 2는 측정된 대기압과 지하수위의 변화를 보여준다. 해수보다는 40 cm 정도 높게 나타난다. 이중에서 대기압의 효율은 대수층의 형태에 따라 달라지는데, 대개 20~80%의 값을 보인다

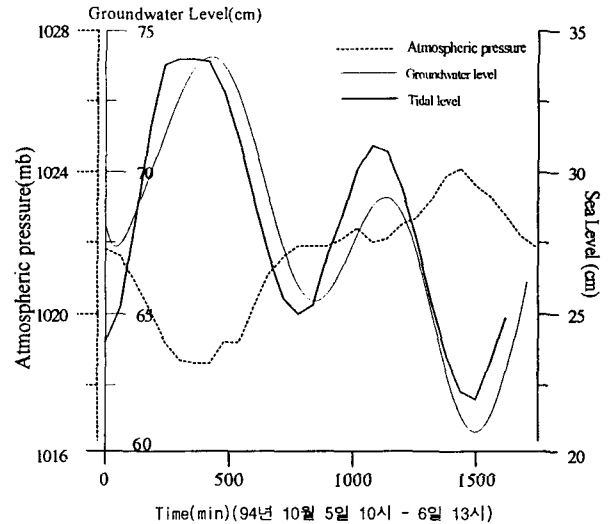


Figure 2. Groundwater-level fluctuation and the change in atmospheric pressure. The regular fluctuations which occur at 12-hour intervals are caused by the tide. Therefore, The record of water levels shows the effect of barometric fluctuations and tidal movement.

(Brassington, 1988). 대기압이 변함에 따라서 피압 대수층에서는 거의 80%에 가깝게 효율을 가진다. 난지도 매립지에 설치된 MLMW(Multi Level Monitoring Well)의 가장 깊은 관정이 위치한 대수층은 대기압 효율이 74.5%의 값을 보이는 피압 대수층이고, 매립층 하부의 충적층에서는 49%를 보인다(Kim, 1996). 이 연구의 대상인 해안매립지는 자유면 대수층이므로 대기압의 효율이 20~40% 정도 될 것으로 것으로 추측된다. 이렇게 보면 5 mb기압 변화에 영향을 받는 수위의 변화는 약 1~2 cm 정도가 되어야 한다. 그러나, Figure 2에서 보는 수위 변화는 약 12 cm 정도로 대기압 효율로 설명할 수 없는 큰 변화를 보인다. 약 10~11 cm에 해당하는 수위의 변화는 어디에서 왔는지 의문을 가지게 된다. 또 매립지내의 지하수위의 최고점과 대기압의 최고점이 시간적으로 정확히 일치하지 않음을 보여 주기 때문에 대기압의 변화 이외에 요인이 지하수위 변화에 영향을 미침을 짐작할 수 있다.

조석 현상을 이용한 투수량 계수 산정

해양 매립장에서 조수위 영향을 조사하기 위해 1994년 10월 5일에서 6일까지 관측정의 수위를 측정하고 이를 같은 시간대의 조수위와 비교, 검토하였다. 각 관측정에서 측정된 수위 변화와 항만청에서 제공받은 해수면 자료를 이용하여 조수위 변화와 지하수위 변화를 분석하였다. Figure 2에서 보는 바와 같이 관측정의 수위의 변화폭은 조수위 변동에 따른 뚜렷한 영향

Table 2. Fluctuation of groundwater level by tidal effect.

수 위(1994년 10월)				조 수 위 변 화				지 연 시 간	
최고수위		최저수위		고조수위		저조수위		고조최고지하수위	저조최고지하수위
5일	17:00	5일	24:30	5일	15:00	5일	23:00	17:10-15:00=110분	24:30-23:00=90분
6일	5:30	6일	12:20	6일	4:00	6일	11:00	5:30- 4:00= 90분	12:20-11:10=70분

을 보이고 있다. 해수면의 변동 범위는 약 10~12 cm이다. B-1 양수정에서 조수위 변동의 정점과 지하수위 변동의 정점간의 시간 차이는 지연시간으로 평균 90분이다. 본 매립지와 같이 바다에 인접한 매립지의 경우에는 조석 현상에 의한 영향을 크게 받으므로 지연 시간을 이용하여 수리전도도를 구할 수 있다.

고조-최고 수위 일 때의 지연 시간은 평균 100분, 저조-최저 수위일 때의 지연 시간은 80분으로 추정하여 평균지연시간을 90분으로 잡았다. 즉, 지하수 유동 방정식을 투수량 계수(T)와 저수 계수(S)를 포함한 식으로 나타내면 조석 현상에 의한 매립층내 지하수위의 변화는 다음과 같은 방정식의 해를 구함으로써 구할 수 있다(Carlsaw and Jaeger, 1959). 아래식은 원칙적으로 피압 대수층에 대해 적용되지만, 자유면 대수층에서도 대수층의 두께와 수위 변화폭의 비가 낮을 경우 적용할 수 있다.

$$T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - S \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \tag{1}$$

다음과 같이 (1)의 해가 주어진다고 가정한다.

$$h = H(x)e^{i(wt-\epsilon)} \tag{2}$$

(1)에 (2)를 대입하면

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = \frac{i w}{\alpha} H \tag{3}$$

(3)식의 해를 구하기 위해서 다음과 같은 경계조건을 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} H(x=0) &= H_0 \\ H(x \rightarrow \infty) &= 0 \end{aligned} \tag{4}$$

따라서, (3)의 해는 다음과 같다.

$$H(x) = H_0 e^{-x \sqrt{\frac{i w}{\alpha}}} = H_0 e^{-x \sqrt{\frac{w}{\alpha}}(1+i)} \tag{5}$$

(5)을 (2)에 대입하면

$$\begin{aligned} h(x,t) &= H_0 e^{-x \sqrt{\frac{w}{\alpha}}(1+i)} \cdot e^{i(wt-\epsilon)} \\ &= H_0 e^{-x \sqrt{\frac{w}{2\alpha}} x} \cdot e^{i \left(wt - \sqrt{\frac{w}{2\alpha}} x - \epsilon \right)} \end{aligned} \tag{6a}$$

여기서, $\sqrt{\frac{w}{2\alpha}} = k$ 라고 하면, $h(x,t)$ 는 다음과 같다.

$$h(x,t) = H_0 e^{-kx} \cdot e^{i(wt-kxe)} \tag{6b}$$

이렇게 구해진 해를 이용해서 투수량 계수(T)를 구하기 위해서 두

가지 방법을 이용할 수 있다. 첫째, 해수면의 변동폭과 지하 수위 변동폭을 알고 있고, 또 x 만큼 떨어진 곳에서의 지하 수위 변동폭을 안다면 (6b)로 부터 지하수위 변동폭은 $H_0 e^{-kx}$ 이므로,

$$\sqrt{\frac{w}{2\alpha}} = k \text{를 구할 수 있고, 따라서 } \frac{1}{\alpha} = \frac{S}{T} \text{를 구할 수 있다.}$$

그러나, 여기서는 해수면의 변화는 9 cm 인데 반해서 해수면에서 300 m 떨어진 양수정에서의 변화는 9.6 cm 이므로 대기압 등의 다른 자연적인 영향을 모두 고려해야 한다. 이 경우, 해수면 변화의 폭이 부정확 하거나 지하수위의 변화가 조수위 변화의 영향으로만 설명하기 어렵기 때문에 이 방법으로 투수량 계수를 구하기 어렵다. 두번째로, 비교적 정확한 조수위와 지하수 수위변화 시간으로 부터 투수량 계수를 구할 수 있다. 지연 시간(x지점에서와 연안에서의 최고 지하수위의 최고 조수위 사이의 시간간격, Time lag)를 아는 경우, (6b)로 부터 지연시간을 구하면

$$\text{Time lag}(t_1) = \frac{kx}{w} = \frac{1}{w} \cdot \sqrt{\frac{w}{2\alpha}} x = \sqrt{\frac{1}{2\alpha w}} x = \sqrt{\frac{1}{2w}} \sqrt{\frac{S}{T}} x$$

따라서, 지연시간과 거리(x), 주기를 안다면 $\frac{1}{\alpha} = \frac{S}{T}$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{S}{T}\right)^{1/2} &= \frac{t_1}{x} \sqrt{2w} \\ \left(\frac{S}{T}\right) &= \left(0.0625 \text{ day} \div 300 \text{ m} \times 4.877 \frac{1}{\sqrt{\text{day}}}\right)^2 \approx 1.03 \times 10^{-6} \text{ day/m}^2 \end{aligned}$$

자유면 대수층에서의 저수 계수는 피압 대수층보다 비교적 더 높고 일반적인 범위는 0.1~0.3 정도이다(Freeze and Cherry, 1979). 본 매립지에서 저수계수가 0.1~0.3의 분포일 때 투수량 계수는 $T=9.7 \times 10^4 \sim 2.9 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{day}$ 이고, slag 매립지에서는 저수계수가 더 높을 수 있으므로 실제 투수량 계수도 이보다 더 높을 수 있다.

지하수 유동 분석

깊이별 지하수 오염 농도 특성 : 매립층 침출수의 수질을 분석하기 위해 A-1, A-3 관측정에서 심도를 달리하여 시료를 1994년 10월 25일, 11월 21일, 29일, 12월 02일에 각 한번씩 총 4회에 걸쳐 채취하고 분석하였다. 수소이온 농도는 pH meter, COD는 과망간산칼륨 산화법, 중금속은 ICP, 음이온은 IC 분석법으로 각각 분석하였다. 수직적인 농도분포 특성을 조사하여 수직적인 용존 물질 농도의 경향성을 파악하였다.

침출수 수질 분석에서는 Table 3(a)에서 보는 바와 같이 pH 값이 상당히 높게 나타 났는데 이는 매립물의 대부분이 slag이

Table 3(a). pH, COD distribution in groundwater with depth at monitoring wells.

A-1 well, 1차(1994년 10월 25일)			A-3 well, 1차(1994년 10월 25일)		
Depth(m)	pH	COD	Depth(m)	pH	COD
0	11.56	31.2	0	11.41	31.8
3	11.72	66	3	11.41	35.8
6	9.64	34	6	11.45	26.8
9	9.53	33	9	11.2	33.6
12	9.54	23.8	12	10.89	40.4
15	9.7	28	17	9.81	27.4
17	9.54	34.6			
A-1 well, 2차(1994년 11월 21일)			A-3 well, 2차(1994년 11월 21일)		
Depth(m)	pH	COD	Depth(m)	pH	COD
0	11.41	30.0	0	11.55	30.6
3	11.47	34.2	3	11.54	34.4
6	11.24	35.6	6	11.57	32.8
9	9.55	24.7	9	10.39	38.2
12	9.63	28.6	12	10.03	29.6
15	7.81	12.6	15	10.64	24.5
17	9.34	15.4	17	9.55	29.8
A-1 well, 3차(1994년 11월 29일)			A-3 well, 3차(1994년 11월 29일)		
Depth(m)	pH	COD	Depth(m)	pH	COD
0	11.14	33	0	11.13	35.2
3	11.47	43	3	11.22	51.2
6	10.05	37.2	6	10.56	40.6
9	10.01	23.2	9	8.86	26.8
12	8.91	19.2	12	8.35	17.4
15	7.9	6	15	8.02	14.4
17	8.23	16.8	17	7.95	5.4
A-1 well, 4차(1994년 12월 02일)			A-3 well, 4차(1994년 12월 02일)		
Depth(m)	pH	COD	Depth(m)	pH	COD
0	11.2	26.8	0	11.4	30.6
3	11.43	45.8	3	11.45	41.6
6	10.02	47.2	6	11.09	29.2
9	9.75	23.2	9	9.66	20.8
12	8.68	9.4	12	8.49	9.2
15	8.26	15.8	15	8.14	6.4
17	8.08	11.2	17	8.15	4.4

units:COD mg/l

Table 3(b). Concentration of heavy metals of leachate in groundwater at monitoring wells(unit:mg/l)

A-1 Well, 1차 (1994년 10월 25일)															
Depth	Zu	Cd	Mn	Cr	Al	Cu	Pb	Ni	Si	Fe	Ca	Mg	K	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
0 m	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	2.08	Tr	0.33	0.14	0.15	1881	169.5
3 m	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	1.16	Tr	0.82	Tr	0.37	6990	240.63
6 m	Tr	Tr	Tr	0.14	Tr	Tr	Tr	Tr	1.24	Tr	0.87	0.3	0.39	12935	1206
9 m	Tr	Tr	Tr	0.24	Tr	Tr	Tr	Tr	1.06	0.07	0.86	0.54	0.39	15410	1584
12 m	Tr	Tr	Tr	0.18	0.18	Tr	0.12	Tr	1.06	Tr	0.62	0.37	0.31	10750	1149
15 m	Tr	Tr	Tr	0.14	0.14	Tr	0.06	Tr	1.3	Tr	0.48	0.21	0.21	8450	913.75
17 m	0.04	Tr	Tr	0.16	0.2	Tr	0.08	Tr	1.26	0.06	0.54	0.3	0.3	9325	997.5
A-3 Well, 1차 (1994년 10월 25일)															
Depth	Zu	Cd	Mn	Cr	Al	Cu	Pb	Ni	Si	Fe	Ca	Mg	K	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
0 m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.62	Tr	Tr	Tr	2.56	Tr	0.26	Tr	0.23	1507	108.13
3 m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.5	Tr	Tr	Tr	2.82	Tr	0.31	Tr	0.23	1635	129.35
6 m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.68	Tr	Tr	Tr	3.02	Tr	0.27	Tr	0.23	1572	123.5
9 m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.34	Tr	Tr	Tr	3.6	0.12	0.51	Tr	0.27	4810	441
12 m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.24	Tr	Tr	Tr	3.68	0.18	0.58	1.36	0.28	6090	594.5
17 m	Tr	Tr	Tr	0.08		Tr		Tr	1.32	0.06	0.54	0.12	0.31	7235	857

Table 3(c). Concentration of heavy metals of leachate in groundwater at monitoring wells(unit:mg/l)

A-1 Well, 2차 (1994년 11월 21일)															
Depth	Zu	Cd	Mn	Cr	Al	Cu	Pb	Ni	Si	Fe	Ca	Mg	K	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
0m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.4	Tr	Tr	Tr	5.46	Tr	0.27	0.14	0.22	2131	182.25
3m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.14	Tr	Tr	Tr	1.96	Tr	0.57	Tr	0.28	3894.2	121
6m	Tr	Tr	Tr	0.14	0.12	Tr	Tr	Tr	1.92	Tr	0.1	81.4	0.39	13595	1052
9m	Tr	Tr	Tr	0.24	0.08	Tr	Tr	Tr	2.74	0.07	0.85	0.4	0.37	15149	1457
12m	0.1	Tr	Tr	0.18	0.07	Tr	Tr	Tr	2.24	Tr	0.83	0.36	0.37	14411	1379
15m	0.12	Tr	0.08	0.3	0.12	Tr	Tr	Tr	5.16	Tr	0.64	0.74	0.36	16940	1778
17m	Tr	Tr	Tr	0.28	0.12	Tr	Tr	Tr	3.36	0.06	0.73	0.61	0.37	16298	1665

A-3 Well, 2차 (1994년 11월 21일)															
Depth	Zu	Cd	Mn	Cr	Al	Cu	Pb	Ni	Si	Fe	Ca	Mg	K	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
0m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.6	Tr	Tr	Tr	5.36	Tr	0.2	0.12	0.22	1962.2	103.75
3m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.24	Tr	Tr	Tr	2.9	Tr	0.44	Tr	0.28	3408.7	84.25
6m	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	5.28	Tr	1.42	0.11	0.4	14197	1093
9m	0.22	Tr	Tr	0.08	Tr	Tr	Tr	Tr	2.74	Tr	1.25	173	0.37	15438	1532
12m	Tr	Tr	Tr	0.26	0.08	Tr	Tr	Tr	3.6	Tr	0.74	0.54	0.36	15291	1613
15m	0.07	Tr	Tr	0.36	0.5	Tr	0.31	01	5.84	Tr	0.63	0.65	0.35	15771	1710
17m	Tr	Tr	0.08	0.36	0.16	Tr	0.12	Tr	6.38	0.12	0.54	0.77	0.35	16873	1887

Table 3(d). Concentration of heavy metals of leachate in groundwater at monitoring wells(unit:mg/l)

A-1 Well, 3차 (1994년 10월 29일)															
Depth	Zu	Cd	Mn	Cr	Al	Cu	Pb	Ni	Si	Fe	Ca	Mg	K	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
0m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.31	Tr	Tr	Tr	4.1	Tr	0.18	0.34	0.22	1965.2	168
3m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.08	Tr	Tr	Tr	1.46	Tr	0.45	Tr	0.29	4289.5	161
6m	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	1.1	Tr	1.1	6.48	0.4	13528	1052
9m	Tr	Tr	Tr	0.32	0.08	Tr	0.07	Tr	3.8	0.07	0.6	0.77	0.36	17265	1801
12m	Tr	Tr	0.08	0.34	Tr	Tr	Tr	Tr	4.1	0.09	0.54	0.8	0.35	17059	1831
15m	Tr	Tr	Tr	0.34	0.16	Tr	Tr	Tr	4.66	0.08	0.51	0.8	0.36	16746	1749
17m	Tr	Tr	Tr	0.36	0.14	Tr	0.08	Tr	6.14	0.06	0.36	0.9	0.34	15925	1734

A-3 Well, 3차 (1994년 10월 29일)															
Depth	Zu	Cd	Mn	Cr	Al	Cu	Pb	Ni	Si	Fe	Ca	Mg	K	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
0m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.09	Tr	Tr	Tr	2.2	Tr	0.16	0.16	0.21	1639.7	121
3m	Tr	Tr	Tr	Tr	0.27	Tr	Tr	Tr	1.92	Tr	0.29	Tr	0.24	2425	115.15
6m	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	1.9	Tr	1.32	0.12	0.39	13468	1136
9m	0.22	Tr	Tr	0.06	Tr	Tr	Tr	Tr	0.98	Tr	1.27	118	0.38	14705	1445
12m	Tr	Tr	Tr	0.3	Tr	Tr	Tr	Tr	5.12	0.08	0.65	0.71	0.37	15870	1743
15m	0.07	Tr	0.11	0.37	Tr	Tr	Tr	Tr	6.9	0.08	0.49	0.94	0.36	17356	1989
17m	Tr	Tr	0.12	0.36	Tr	Tr	Tr	Tr	7.06	0.08	0.49	0.96	0.36	16853	1951

기 때문인 것으로 보인다. COD 값은 대부분 20~35 mg/l 값을 보이고 있다. 중금속의 경우 대부분이 검출되지 않거나 검출되더라도 수질환경보전법의 기준치 이내인 것으로 나타났다 (Table 3(b),(c),(d)).

심도별 농도를 살펴보면 매립층의 깊이가 깊을수록 Figure 3에서 보는 바와 같이 COD와 pH 값이 낮아지는 경향을 보이고 있다. Cl⁻이온은 바닷물인 경우 19,000~20,000 mg/l 사이에 있는데 매립층 상부인 깊이 0m는 1,900~2,000 mg/l, 깊이 3 m에서 3,500~4,500 mg/l 정도이고 아래로 내려갈수록 해수의 Cl⁻ 농도와 가까워 지는 것을 볼 수 있다. 여기서는 매립층의 수질성분 분포로부터 침출수와 해수의 경계가 점이적으로

변해 가는 전이대(Transition zone)가 형성되어 있다는 것을 알 수 있다.

매립지에서 해수와 담수의 관계 : 매립지내 지하수를 심도별로 채취하여 분석한 결과 구성 성분상으로 보면 매립지내 지하수의 상층부에서 하층부로 가면서 담수성분에서 해수성분으로 점이적으로 변해 가는 것을 알 수 있다. 따라서 매립지내에 해수와 담수의 뚜렷한 경계면이라고는 보이지 않는다. 화학성분의 수직적인 변화 경향은 매립지의 수리 전도도가 아주 큰 값을 가짐으로써 나타나는 현상과 일치된다. 즉 매립층의 수리 전도도가 아주 크므로 조석 현상의 영향을 아주 짧은 시간 지연 후

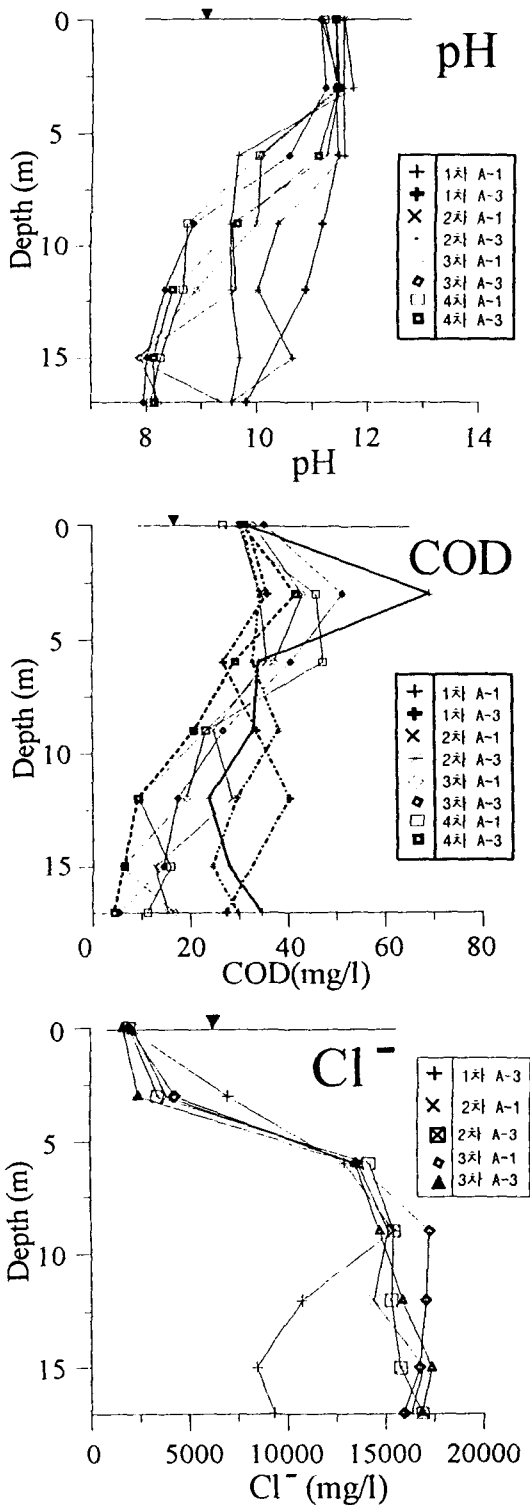


Figure 3. The vertical structure of pH, COD, and Cl⁻ distribution in groundwater at monitoring wells.

에 즉각적으로 받으며 조석 현상으로 인한 해수면의 상승에 따라 해수가 매립층 기저부를 따라 매립지 내로 밀려들어 왔다가 해수면이 하강하면서 매립층 기저부의 해수성 지하수가 바다쪽으로 유출된다. 이 과정에서 매립지로 유출, 유입 되는 해수 또

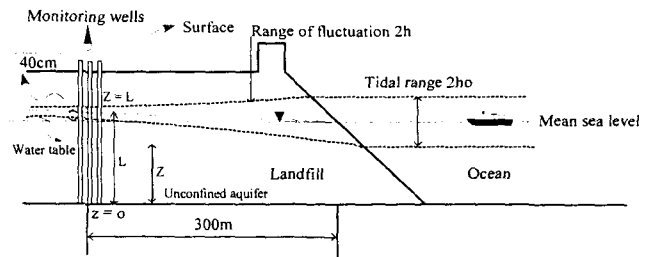


Figure 4. Cross-section of the landfill and groundwater fluctuation zone.

는 해수성 지하수는 매립지 상층부의 담수성 지하수와 섞이게 되며 뚜렷한 해수-담수의 경계는 나타나기 어렵고 전이대의 폭이 넓게 존재 할 것이다.

밀도 변화에 의한 수위상승 효과

Figure 4에서와 같이 매립지층내의 지하수의 밀도가 담수의 밀도에서 해수의 밀도로 점이적으로 변할 때 매립층내 지하수의 밀도는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\rho = \rho_f + \left(\frac{L-Z}{L} \right) (\rho_{sea} - \rho_f) \quad (7)$$

$$\rho = \rho_f (Z=L) : \text{담수의 밀도}$$

$$\rho = \rho_{sea} (Z=L) : \text{해수의 밀도}$$

해수와 매립층내의 지하수의 hydraulic potential이 정수역학적 평형을 유지하려면 매립지내 지하수와 해수의 수두가 같아야 한다.

매립층내 지하수의 압력 potential은

$$\begin{aligned} \phi_{land} &= \int_0^L \rho_z g dZ = \int_0^L g \left(\rho_f + \left(\frac{L-Z}{L} \right) (\rho_{sea} - \rho_f) \right) dZ \\ &= \frac{1}{2} (\rho_{sea} + \rho_f) Lg \end{aligned}$$

수면의 높이를 1568 cm(매립지 바닥에서 지하수면까지)라고 보면

$$\phi_{land} = 1587.6 \text{ cm} \cdot g \text{ 이 된다.}$$

해수의 압력 Potential은

$\phi_{sea} = \rho_{sea} g d_0 = 1566.2 \text{ cm} \cdot g$ 이다. 따라서 밀도에 의한 수위상승 효과는

$$\therefore \frac{\phi_{land} - \phi_{sea}}{g} = 1587.6 - 1566.2 = 21.4 \text{ cm}$$

로 계산된다.

즉, 매립장의 지하수는 해수와의 밀도차 효과에 의해 평균해수면 보다 약 21.4cm의 수위상승 효과가 있다.

매립층 상부를 통한 지하수 함양과 수위상승 효과

매립장 상부를 통한 지하수 함양이 매립장내 지하수위에 미

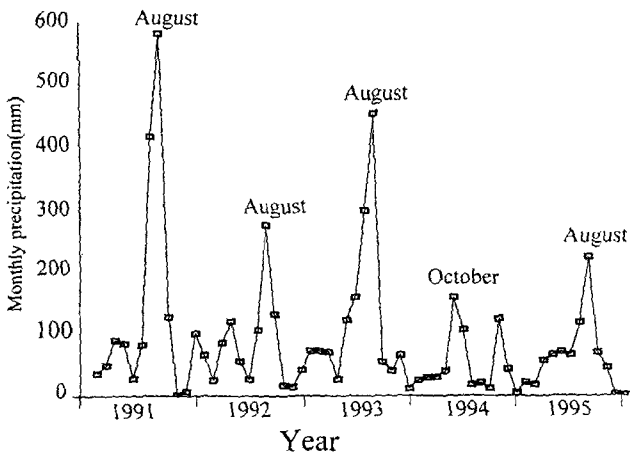


Figure 5. Monthly precipitation from 1991 to 1995 in pohang area.

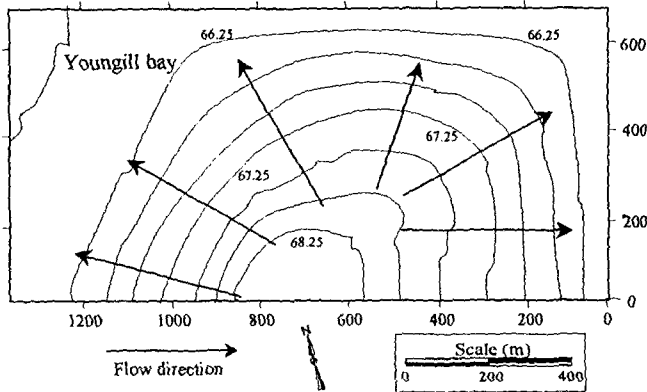


Figure 6. Hypothetical head field when only infiltration determines the flow field (Contour interval: 0.33cm).

치는 영향을 파악하기 위해 지하수 유동 모델 MODFLOW를 사용하였다.

투기 매립장에 대한 전산 모델링은 매립지와 주변지역을 포함한 800×1380 m의 전체면적에 대하여 격자의 수를 X,Y 방향으로 각각 35, 50개로 나누어 사용하였다. Figure 5은 포항지역의 1991년부터 1995년 까지의 월강수량을 나타낸 그래프이다. 여름(8월)에 강수량이 집중 되어 있다. 조석현상으로 계산한 수리지질학적 특성과 강수량 자료 등을 입력하여 계산한 결과로는 지하수위 관측지점에 약 2 cm의 수위상승 효과가 있는 것으로 계산 되었다(Figure 6).

결과적으로 매립지 지하수위가 평균 해수면에 대해 갖고 있는 40 cm의 수위상승 효과 중 2-6절에서 계산된 수위상승 효과 21.4 cm와 매립지 상층부를 통한 지하수 함양에 의해 약 2.0 cm의 수위 상승효과가 있다. 나머지 약 16 cm의 수위상승은 또 다른 요인이나, 언급된 요인들이 복합적으로 작용하기 때문일 것이며, 대수층의 구조와 해수-지하수의 관계 설정이 정확히 안된 상태의 분석이기 때문에 오차의 범위도 클 것이다. 다만 현 상태에서 추정할 수 있는 수위상승을 일으키는 또 다른 요인으로는 매립지 주변으로 부터 매립지를 통과하여 바다 쪽으로의 기저 지하수 흐름일 것으로 추정된다.

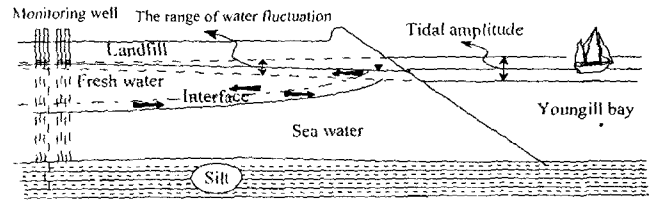


Figure 7. Cross section of the sea water intrusion and mixing with the fresh wa

매립지내 침출수의 유출

매립층을 이루고 있는 slag의 일부 성분이 침출되어 성분이 크게 바뀐 지하수의 수질 특성을 pH, COD, Cl의 수직분포에서 알 수 있다. 매립지내 지하수의 상층부에서 하층부로 가면서 담수 성분에서 해수 성분으로 점이적으로 변한다. 하루 주기의 흐름 특성을 살펴보면 매립층의 수리 전도도가 아주 크기 때문에 조석 현상의 영향을 빠른 시간내에 받아들여 해수가 기저부로 유출, 유입 되는 것으로 해석된다. 조석 현상으로 해수면의 상승에 따라 해수가 매립층 기저부를 따라 매립지내로 밀려들어 왔다가 해수면이 하강하면서 매립층 기저부의 해수가 바다로 밀려간다(Figure 7). 따라서 년 중 바다로 유입되는 침출수 양은 조석 현상으로 출입하는 해수성 지하수를 제외하고 추정하면, 매립지내 지하수가 일년 단위로 평형상태를 유지하고 있다고 볼 때 매립지 상부를 통해 유입된 강우의 일부와 매립지의 먼지 발생을 억제하기 위해 인공으로 뿌리는 물(살수), 그리고 매립지와 연결된 대수층에서 매립지로 들어오는 지하수의 양이 결국 매립지를 통해 바다로 유입되게 된다.

결론 및 토의

POSCO 제 3투기 매립장을 시추한 결과 slag가 대부분이고 부분적으로 sludge가 협제한다. 매립장 지하수내 중금속 대부분이 수질환경보전법 기준치 이내이다. 그러나 pH(9-11), COD(20-35mg/l)는 높게 나타났다. 해안에 인접한 매립지의 지하수위는 조수위 변화에 직접적인 영향을 받고 있으며 투수량 계수가 너무 크기 때문에 일반적인 양수 시험으로는 수리 특성을 구하기가 매우 어려웠다.

조석 간만시 고조와 저조 수위 발생시간과 관측정에서의 최고 및 최저 수위 발생시간의 차이인 지연 시간을 이용하여 투수량 계수를 계산한 결과 $T=9.7 \times 10^4 \sim 2.9 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{day}$ 의 범위로 산정되었으며 이는 조수간만 시 큰 시간적인 지연 없이 해수가 기저부로 유출, 유입함을 의미한다.

매립지내 관측정 위치인 해안으로 부터 300 m 떨어진 곳에서의 수위는 해수면보다 평균 약 40 cm 높게 나타났는데, 이 현상을 해수와 담수 사이의 밀도차에 의한 수위 상승효과와 강수량 및 광역적인 지하수 흐름에 의해 설명하려고 하였다. 그러나, 대수층의 구조와 해수-지하수와의 관계에 대한 정확한 자료가 있다면 수위상승 효과에 대한 분석이 더 효율적으로 이루어 질 수 있겠다.

이 연구는 제한된 개수의 양수정 및 관측정에만 의존하여 수리지질 조사를 수행했기 때문에 매립지와 그 주변의 광역적 지하수계를 다 파악할 수 없었다. 이 연구를 위해 설치된 관측정

은 대수층 시험을 위해 설치한 것으로 최대 간격이 12 m로 좁은 간격을 가진 지역에 집중되어 있는데, 매립지내에서 정확한 지하수 유동 현상과 침출수의 발생 및 이동 현상을 파악하기 위해서는 매립지를 잘 대표할 수 있는 체계적 관측망이 필요하다.

참고문헌

- Brassington, R., 1988, *Field Hydrogeology*, Geological Society of London Professional Handbook.
- Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959, *Conduction of Heat in solids*, Oxford, 510p.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 604p.
- Jacob, C. E., 1940, On the flow of water in an elastic artesian aquifer, *American Geophysical Union*, 22, p574-586.
- Kim, Y. Y., 1996, Construction and analysis of hydrogeological data base for the Nanjido Landfill, M.S. Thesis, Dept. of Geological Sci, Seoul Nat. Univ., 97p.