

H 연구지역의 수리지질-수리분산특성과 지하수 오염가능성 평가연구

한 정 상*

A Study on Hydrogeologic, Hydrodispersive Characterization and Groundwater Contamination Assessment of an H-site

Jeongsang Hahn*

ABSTRACT: A comprehensive in-situ tests are performed to define the hydrogeologic and hydrodispersive characteristics such as hydraulic conductivities, longitudinal dispersivity, and average linear velocities as well as conducting flow-net analysis at the study area. The results show that the study area is very heterogeneous so that hydraulic conductivities range from 6.45×10^{-7} to 1.15×10^{-5} m/s with average linear velocities of 0.34~0.62 m/day. Whole groundwater in upper-most aquifer is discharging into the sea with specific discharge rate of 7.2×10^{-3} to 1.3×10^{-2} m/day. The longitudinal dispersivity of the aquifer is estimated about 4.8m through In-situ injection phase test. The area is highly vulnerable to potential contaminant sources due to it's high value of DRASTIC index ranging from 139 to 155 and also under water table condition with very shallow groundwater level. To delineate contaminant plumes of toxic NaOH and carcinogenic benzene when these substances are assumed to be leaked through existing TSDF at the study area by unexpected accidents or spill, Aquifer Simulation Model (ASM) including Flow and Transport Model is used. The simulated results reveal that the size of NaOH plume after 5 years continuous leak is about 250×100 m and benzene after 10 years, 490×100 m. When the groundwater is abstracted about 50 days, which is maximum continuously sustained no-precipitation period during 30 years, with pumping rate of $100 \text{ m}^3/\text{day}$, THWELL program shows that the groundwater is adversely affected by sea water intrusion.

조사지 및 인근지역의 기상

연구지역의 1983년부터 1992년까지의 10년간 월평균 온도중에서 1월의 월평균 기온은 -2.1°C 이고 8월의 월평균 기온은 25.8°C 인 반면 년평균 기온은 16.8°C 이다. 또한 년평균 상대습도는 82.3%이고 년평균 강수량은 1475.6 m/m이며 강수량이 가장 적게 발생한 12월의 월평균 강수량은 18.2 m/m이다. 이에 반해 강수량이 가장 크게 발생한 5~7월의 평균 강수량은 274.4 m/m이다. 대체적으로 본역의 6, 7, 8월 3개월간 발생된 강수량은 년평균 강수량의 52.7%에 해당하며 풍수기인 6, 7, 8 및 9월의 4개월간 내린 강수량은 년평균 강수량의 65.5%에 이른다. 10년간 강수량 자료를 검토한 바 최대갈수지속일수는 50 일이며 평균계기증발량은 1287.8 m/m이다.

광역지질과 수역별 세부지질

광역지질

연구지역은 광양만에 인접한 해안가에 위치하며 지형 표고는 해발 5.0~90 m 범위의 완만한 경사를 이루고 있으나 부지남쪽은 영취산 (439.0 m), 전봉산 (379.3 m)을 잇는 험준한 산세가 발달되어 있으며 동부는 제석산 (336.4 m)을 정점으로 100~200 m 내의 소구릉의 산세가 발달되어 있다. 수계는 상적재에서 북류한 소하천이 연구지역을 통과하여 남해로 유입되며 하천의 유로연장은 2.1 km 정도이고 하상구배는 0.033이다. 이 지역은 지형윤회상 장년기말-노년기초의 지형을 이루고 있다. 연구지역의 지질은 중생대백악기의 경상계에 속하는 웅방산 안산암류 (andesite)와 신성리층이 본역 남측에 넓게 분포되어 있으며 이들을 불국사화강암류인 알카리장석화강암 (alkali feldspar granite)과 산성암맥에 의해 관입되어 있다 (박희인, 1989). 또한 이들 기반암은 제 4 기의 미고결 퇴적층에 의해 부정합으로 피복되어 있다 (Fig. 1).

* (주)한서엔지니어링 (HANS Engineering Co., Ltd, Seoul 135-080, Korea)

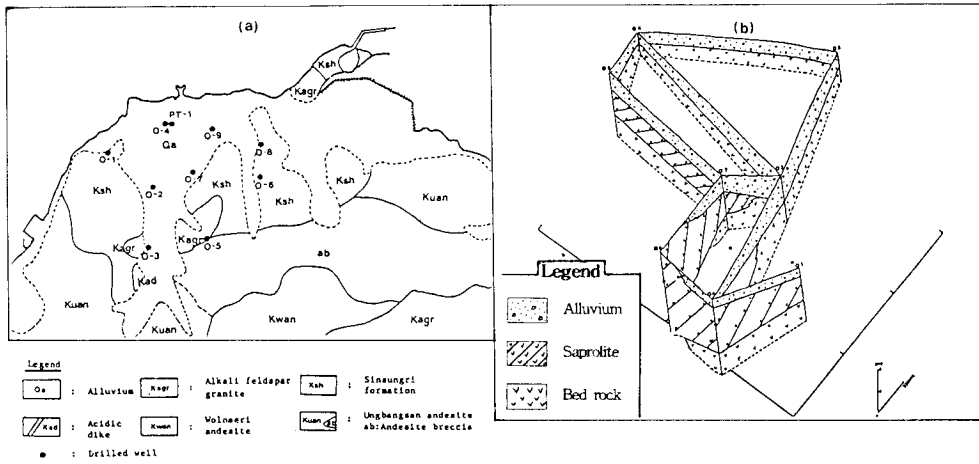


Fig. 1. Map showing (a), geologic section (b), and monitoring well locations.

옹방산 안산암류

이암류는 연구지역 남단부에 발달된 산능선부를 중심으로 넓게 분포되어 있으며 암상은 대부분 자색을 띠며 백색의 장석반정과 휘석류의 반정이 관찰된다. 이층은 신성리층에 의해 피복되어 있으며 알카리장석 화강암과 산성암맥에 의해 관입되어 있다 (박희인, 1989).

신성리층

이층은 연구지역의 소구릉지역에 분포되어 있으며 옹방산 안산암을 피복하고 있다. 암상은 응회질사암 (Tuffaceous sandstone), 적색사암 (Reddish shale), 적색역암 (Reddish conglomerate), shale, siltstone, 안산암질 응회암 (Andesitic tuff)과 안산암 (Andesite) 등 다양하다. 이층 응회암질암의 주된 구성광물은 석영, 사장석, 배운모 등이며 방해석, 녹니석, 견운모 등이 변질광물로 함유되어 있다. 안산암은 안데신성분의 사장석 반정이 lath상, 세립 사장석 석기를 이루고 이밖에 녹니석, 방해석, 철산화물이 함유되어 있다.

알카리장석 화강암 (Alkali feldspar granite)

연구지역 남동부 월내국교 부근에 분포하며 암상은 마산암과 동일하다. 전체적으로 홍색을 띠고 중립 내지 세립질암으로 장석반정을 갖은 반상조질을 보이기도 한다. 이암은 신성리층을 관입하고 있으며 주된 구성광물은 석영, 정장석, 사장석 등이며 그외에 각섬석, 흑운모가 소량 함유되어 있다.

제 4기 미고결층 (Unconsolidated deposit)

이 층은 연구지역의 저지대에 넓게 분포되어 있으며

상기 옹방산 안산암, 신성리층 및 알카리장석 화강암들을 부정합으로 피복하고 있다. 이층은 상기 모암들이 풍화되어 생성된 렉, 사, 점토 등으로 이루어진 표토와 인공 매립층으로 이루어져 있다.

수역별 지하지질

수역별 지하지질분포

연구지역의 지하지질 분포상태와 수리지질학적 특성을 규명하기 위하여 총 9개공의 다목적 관측정과 1개소의 다목적 시험정을 설치하였다. 편의상 연구부지를 A와 B 수역으로 구분하였으며 이중 A수역은 주 생산시설이 소재한 연구지역의 서쪽 소유역이며, B수역은 주로 저유탱크가 설치되어 있는 연구지역 동쪽의 소유역이다 (Fig. 3). 각 수역별로 지하지질 분포상태를 세론하면 다음과 같다.

A수역의 수리지질

A수역의 유역면적은 약 3.6 km²이며 Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이 O-1, O-2, O-3, O-4, O-5, O-7, O-9 및 PT-10 다목적 시험정과 관측정이 설치되어 있는 곳이다. 최상위층은 매립토로 구성되어 있고 그 두께는 0~4.8 m에 이르며 평균두께는 2.16 m이다. 매립층하부는 화강암과 안산암질 응회암의 풍화토로 이루어져 있으며 그 두께는 0~15 m이고 평균두께는 5.28 m이다. 대체적으로 미고결암의 두께는 1.6~15 m에 이르며 그 평균두께는 약 7.44 m이다. 특히 하류구배간의 미고결암 두께는 상류구배에 비해 훨씬 두텁고, O-9 관측공인 경우 풍화대 두께는 약 15 m에 이른다. 풍화토 하부는 주로 신성리층과 알카리장석 화강암이 기반암을 이루고 있다. 대체적으로 본 수

Table 1. Subsurface geological condition.

water shed	hole No.	EL(m)	S.W.L (B.G.L.m)			Lithology(m)			Total
			Fill	Saprolite	Sub Total	Rock			
A	O-1	14.30	3.74	1.60	4.40	6.00	4.00	10.00	
	O-2	16.10	4.80	4.80	-	4.80	3.70	8.50	
	O-3	26.90	3.58	2.60	-	2.60	2.90	5.50	
	O-4	4.80	0.94	1.60	8.40	10.00	4.00	14.00	
	O-5	51.00	0.90	1.60	-	1.60	2.90	4.50	
	O-7	13.50	5.14	3.50	4.20	7.70	2.80	10.50	
	O-9	5.60	1.02	-	15.00	15.00	0.00	15.00	
	PT-1	4.86	1.05	1.60	10.20	11.80	10.20	22.00	
	Range (1)	4.8~51	0.94~5.14	0~4.8	0~15.0	1.6~15	2.8~10.2	4.5~22	
Average (1)	-	2.65	2.16	5.28	7.44	3.81	11.25		
B	O-6	27.70	2.74	2.00	-	2.00	2.20	4.20	
	O-8	26.60	5.67	3.80	4.50	8.30	4.20	12.50	
	Range (2)	26.6~27.7	2.74~5.67	2.0~3.8	4.50	2.0~8.3	2.2~4.2	4.2~12.5	
	Average (2)	-	4.21	2.90	4.50	5.15	3.20	8.35	
	Range(total)	4.86~51	0.9~5.67	1.6~4.8	4.2~15	1.6~15	2.2~10.2	4.2~22	
Average(total)	-	2.96	2.31	4.67	6.98	3.69	10.67		

S.W.L; Static water level, B.G.L; Below ground level

역의 초기 지하수위는 해발표고에 따라 큰 차이를 보이는데 대개 그 범위는 지표하 0.94 m에서 5.14 m에 분포되어 있다 (Table 1).

B수역의 수리지질

B수역의 유역면적은 약 2.25 km²이며 O-6과 O-8 2개공의 다목적 관측정을 설치하였다. 2개공의 자료에 의하면 최상위층은 매립층으로 구성되어 있고 그 두께는 2~3.8 m 정도이며 평균두께는 2.9 m 정도이다. 매립토 하부에는 본역 기반암의 풍화대에 속하는 풍화토가 O-6공에서는 전혀 발달되어 있지 않고 O-8공에서는 약 4.5 m 정도 분포되어 있다. 따라서 미고결암의 두께는 2~8.3 m 정도이며 평균두께는 5.13 m이다. 풍화대 하부는 신성리층이 기반암을 이루고 있다. 이 수역에 설치한 2개공의 초기 지하수위는 지표면하 2.74~5.67 m 사이에 분포되어 있다 (Table 1).

수리지질특성과 유선망분석

대수성수리특성

장기대수성시험 (Long term test)

연구지역의 지하지질 분포상태와 대수층의 수리특성을 정량적으로 규명키 위하여 대수성수리특성이 비교적 양호한 것으로 판명된 지점에 O-4 관측정을 NX size로 지하 14 m까지 굴진하고 50 m/m PVC유공관을 공저까지 설치한 후 대수성시험시 관측정으로 이용하였다. 또한 O-4

관측정에서 2 m 떨어진 지점에 PT-1 시험정을 설치하여 대수성시험시 채수정으로 이용하였으며 수리분산시험시 이를 관측정으로 사용하였다.

PT-1 시험정은 지표로부터 미고결암 분포심도인 지하 10 m까지 350 m/m Three wing bit로 굴진하여 350 m/m 무공관과 유공관을 설치하였고 굴착경과 정호자재 사이에는 충진력을 부설하였다. 총 10 m의 정호자재중 상부 구간 6 m는 무공관을 그하부 4 m 구간은 slot No. 20번 (opening 2 m/m)의 유공관을 설치하였다. 공내에 정호자재를 설치한 후에는 외경 150 m/m button bit를 사용하여 지표하 22 m까지 down hole drilling공법으로 시험정을 설치하였다.

PT-1 시험정에서 장기대수성시험을 실시하기 위하여 3 HP/24단형 수중모터펌프 (60 m Head/240 m³/일)를 공내 18 m 지점에 설치하였으며 지하수채수에 따른 시험정과 관측정에서 발생한 수위강하량은 Hermit-2000의 data logger를 이용하여 측정하였고 동시에 지하수의 수온과 수비전도도를 측정하여 이들의 경과시간별 변화상태를 측정하였다.

1993년 10월 22일에서 10월 23일의 2일 동안 PT-1 시험정을 양수정으로, O-4공을 관측정으로 장기대수성시험을 실시하였다. 대수성시험 개시이전의 자연수위는 PT-1 시험정이 지표하 1.05 m였고, O-4 관측정은 지표하 0.94 m였다 (Table 1). PT-1 시험정과 O-4 관측정에서 측정된 시간-수위변화 자료는 AQTESOLV 전산 program중 자유면대수층의 부정류 흐름 해석법과 자유면대수층에서 지연중력 배수현상 (delayed gravity)이 발생할 때 적용가

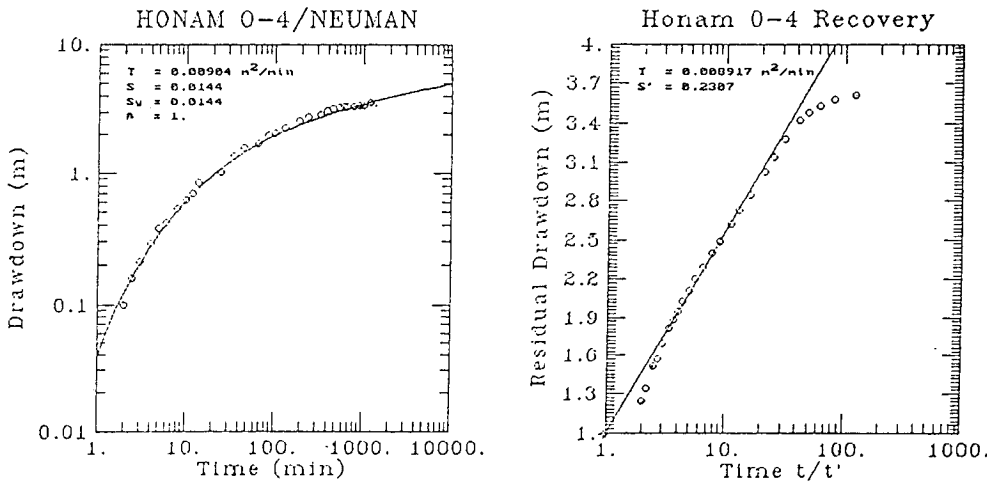


Fig. 2. Long term aquifer test results evaluated by AQTESOLV code.

능한 Neuman 해석법과 Honor법을 이용하여 합성분석을 실시하였다 (Duffield et al., 1990; 한정상, 1988). 전산해 결과에 의하면 PT-1 시험정 인근 수리지질계의 투수량계수는 $1.12 \times 10^{-4} \sim 1.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 였으며 평균투수량계수는 $1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 이고 평균저유계수는 0.021이다. 따라서 PT-1 시험정은 대수성시험 당시 포화대 두께가 20.95 m였기 때문에 본 지점의 평균 수리전도도는 $5.4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 이다 (Bradbury et al., 1993).

O-4 관측정 인근 수리지질환경의 투수량계수는 $1.49 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \sim 1.80 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 였으며 평균투수량계수는 $1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 이고 평균저유계수는 0.018이며, 평균수리전도도는 $1.22 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 로써 PT-1 시험정과 대동소이한 값을 나타내고 있다. 따라서 PT-1 시험정과 O-4 관측정을 포함한 그 주변 대수층의 평균투수량계수는 $1.37 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 이며, 평균저유계수는 0.02이고 평균 수리전도도는 $8.8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 이다 (Fig. 2).

순간충격시험 (Slug test)

연구지역에 분포된 풍화대 (saprolite, saturated zone)는 그 최상위 구간에 압층 (confining bed)이 전혀 발달되어 있지 않아 자유면 대수층 (unconfined aquifer)이다. 따라서 순간충격시험 결과치는 Bower-Rice법을 이용하여 AQTESOLV 전산 프로그램으로 분석하였으며 그 분석결과는 Table 2와 같다. 장기대수성시험시 O-4 관측정에서 구한 평균 수리전도도와 Slug test시 구한 값은 각각 $1.22 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 와 $1.15 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 로 거의 동일한 값을 보였다. A수역에 설치한 총 8개공의 시험, 관측정에서 시행한 현장 대수성시험 결과를 전산처리하여 구한 수리전도도는 최소가 $6.45 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 에서 최대 $1.15 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 였으며 A

수역의 평균 수리전도도는 $5.86 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 이다. 또한 B수역에 설치한 O-6 과 O-8 관측정에서 실시한 순간충격 시험 결과를 전산처리하여 구한 수리전도도는 각각 $9.98 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 와 $3.71 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 로써 2개공의 평균 수리전도도는 A수역과 비슷한 $5.18 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 이다. 연구지역 내에 설치한 총 10개공의 시험, 관측정 주변의 대수성 수리상수층 수평수리전도도가 가장 적은 곳은 O-6 관측정으로써 그 값은 $6.45 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 이고 수평 수리전도도가 가장 큰 곳은 O-4 관측정으로써 $1.15 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 이다. 이러한 사실은 연구지역 내에 분포된 대수층이 구역별로 상당히 불균질 (heterogeneous)한 지질매체임을 암시한다.

단계대수성시험 (step drawdown test)

PT-1 시험정의 대수층 수두손실 (aquifer loss)과 우물 수두손실 (well loss)을 규명하기 위하여 단계대수성시험을 실시하였다. 단계대수성시험은 4단계로 실시하였으며 각 단계별로 채수율과 수위강하율 및 역비양수량 (reverse specific capacity)을 이용하여 구한 우물수두손실계수 (well loss constant)는 $10^{-4} \text{ d}^2/\text{m}^3$ 이고 대수층수두손실계수 (aquifer loss constant)는 $4.55 \times 10^{-2} \text{ d}/\text{m}^2$ 이다. 따라서 PT-1 시험정의 우물효율은 약 67%로써 시험정의 효율은 비교적 양호한 상태이다 (한정상, 1978).

유선망 분석

지하수의 흐름특성과 유선망

연구지역내에 설치한 총 10개소의 관측정 및 시험정과 정전현황조사시 확인한 연구지역 인근에 기 설치되어 있는 기존정과 용천자료 12개를 합한 22개소를 이용하여 지하

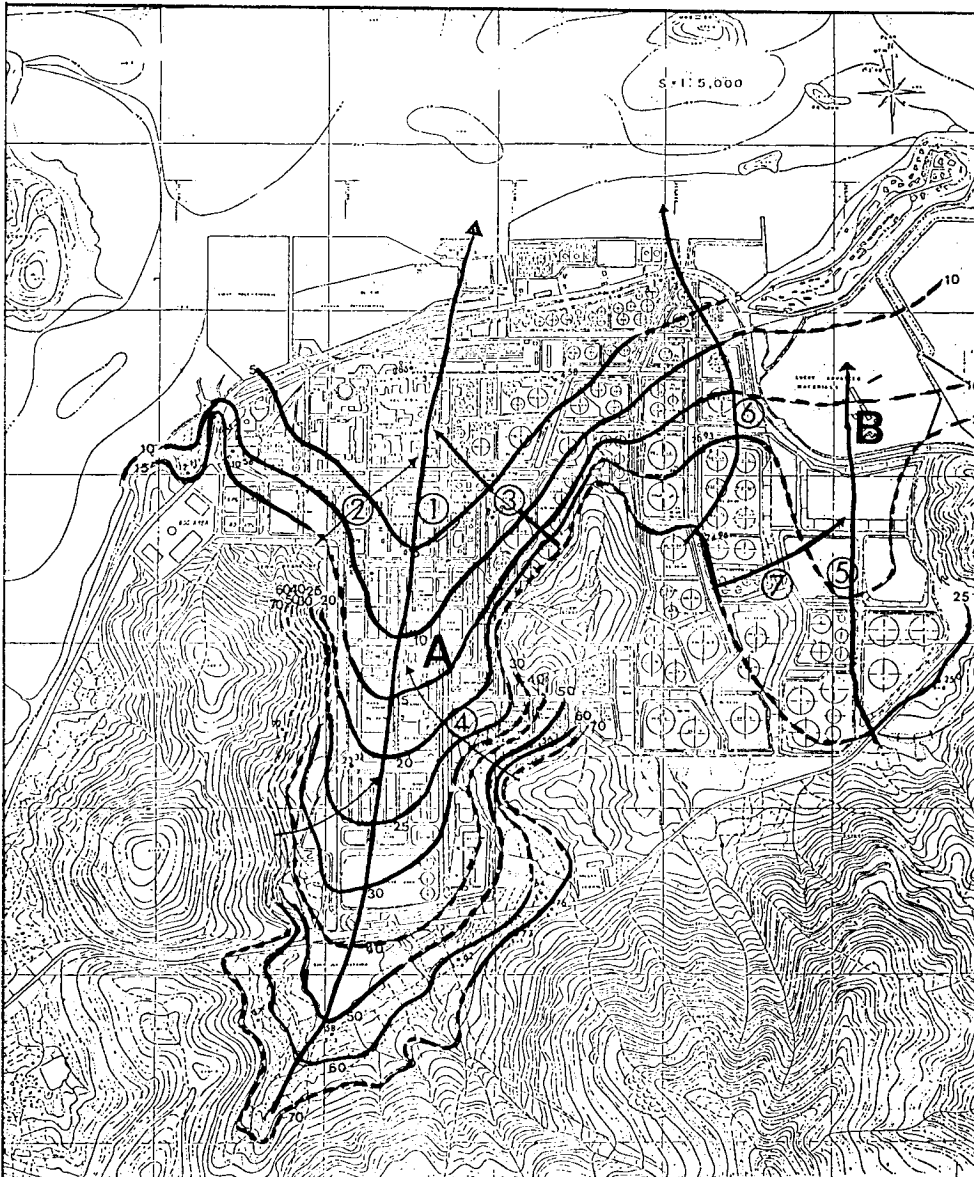


Fig. 3. Potentiometric surface map and main pathway of the site(1993. 10. 20).

수위관리망을 설정하였다. 조사기간동안 지하수위관리망 구성 관측정에 대해 3회씩 지하수위를 측정하였으며 각 측정지점에 대해 표고측량을 실시하였다. 조사기간 동안에 각 관측지점에서 측정된 수위자료중 93년 10월 20일에 측정된 지하수위자료를 이용하여 본 지역의 최상위 대수층 지하수의 potentiometric surface map (이하 PM map이라 함)을 작성하였는데 그 결과는 Fig.3과 같다. PM map에 의하면 연구 지역중 A수역에서 지하수의 주흐름방향은 수역중심부가 대체적으로 북향인데 반해 수역 서측구간

에서는 동~북북동향이고 수역의 동측에서는 북북서향이 주종을 이루고 있다. B수역에서 지하수의 주흐름방향은 중심부가 A수역과 동일하게 북향이나 좌, 우안에서 지하수의 흐름방향은 A수역과 비슷한 북북동향이다. 상기 PM map에서와 같이 본역에 부존된 지하수의 주 배출지역은 연구지역 북쪽에 소재한 해안선이다.

지하수의 평균선형유속과 Darcian flux

A수역내 좌우안에 부존된 지하수는 각각 북북동 및

Table 2. Slug test results calculated by AQTESOLV code.

OB well	content Water shed	d (m)	S.W.L (B.G.L.,m)	b (m)	Kh (m/sec)	Remark
O-1	A	10.00	3.74	6.26	1.69E-06	
O-2	A	8.50	5.48	3.02	1.12E-06	
O-3	A	5.50	3.58	1.92	2.17E-05	
O-4	A	14.00	0.94	13.06	1.15E-05	Long term test K=1.22E-5
O-5	A	4.50	0.90	3.40	6.45E-07	
O-7	A	10.50	5.14	5.36	4.58E-06	
O-9	A	15.00	1.02	13.98	2.4E-07	
PT-1	A	22.0	1.05	20.95	5.4E-06	Long term test result
Range(1)		4.5-22.0	0.9-5.48	1.92-20.95	6.45E-7~1.15E-5	
Average(1)		4.5-22.0	2.73	8.49	5.86E-06	
O-6	B	15.00	2.74	1.46	9.98E-06	
O-8	B	22.0	5.67	6.83	3.71E-06	
Range(2)		4.5-22.0	2.74-5.67	1.46-6.83	3.71E-7~9.98E-6	
Average(2)		4.5-22.0	4.21	8.49	5.18E-06	
Range(Total)		4.2-12.5	0.9-5.67	1.46-20.95	6.45E-7~1.15E-5	
Average(Total)		4.2-12.5	3.03	7.62	5.52E-06	

d; total depth, S.W.L; static water level, b; saturated thickness, Kh; hydraulic conductivity

북북서향으로 흘러 본역 중심부로 이동하여 주흐름경로(main pathway)인 북향을 따라 해안선으로 유출된다. 즉, A수역의 주 지하수흐름방 향인 ①번 유선의 상류구배구간에서 평균동수구배는 0.038 정도이고 하류구배구간은 0.009 정도이며 그 평균동수구배는 0.0257인데 반해 좌우 측 지역의 동수구배는 0.07~0.1로 매우 급하다.

또한 B수역의 주흐름방향인 ⑤번 유선의 평균동수구배는 A수역의 ①번 유선에 비해 비교적 완만한 0.016 정도인데 반해 ⑥, ⑦번 유선의 평균동수구배는 0.03~0.02 정도이다. 연구지역 일대에서 시행한 제반 대수성시험결과 자료와 각 수역별 지하수의 주흐름방향별 동수구배를 이용하여 A 및 B수역에 부존된 지하수의 주흐름방향별 선형유속(average linear velocity)를 구한 바 그 결과는 다음과 같다.

즉, A수역의 평균수리전도도는 5.86×10^{-6} m/sec이고 지하수의 주흐름방향의 평균동수구배가 0.0257이며 평균 유효공극율이 0.021이므로 ①번 유선방향으로 흐르는 지하수의 평균선형유속은 0.62 m/일 정도이다(Fig. 3). 이에 반해 B수역의 ⑤번 유선방향의 평균선형유속은 A수역보다 느린 약 0.34 m/일이다. 또한 A수역의 해안선을 따라 배출되는 지하수의 비배출량인 Darcian flux는 $0.013 \text{ m}^3/\text{일}/\text{m}^2$ 이고 B수역에서는 $7.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{일}/\text{m}^2$ 정도이다.

지하수환경의 수리분산특성

연구지역 일대에 분포된 지하지질매체의 수리분산 특성을 파악하기 위하여 현장에서 비반응 용질(Cl⁻)을 사

용하여 단정추적자(single well tracer)시험을 주입상(injection phase)과 채수상(withdrawal phase)으로 구분하여 실시하였다(한정상, 1988; 한서엔지니어링, 1993b,c).

주입상시험과 해석

시험은 O-4 관측정을 주입정으로 사용하였고, 관측정은 PT-1 시험정을 이용하였으며 주입정과 관측정사이의 공간거리는 2m이다. 주입상 시험시 관측정(PT-1)내에서 농도변화 측정지점은 시험개시 이전에 시추주상도와 공내검층자료를 면밀히 분석하여 비교적 투수성이 양호한 지표하 11m, 12m 지점으로 선정하였다. 주입상시험 개시 이전에 3.0 m³ 크기의 추적자 혼합용액(tracer labelled solution) 탱크를 준비하고 초기농도가 2,313 mg/l인 Cl⁻ 이온을 추적자로 사용하였다.

추적자혼합탱크의 추적자농도는 potable TDS tester로 측정 조절하였으며 관측정(PT-1)내에서 시간경과별 추적자 농도이력은 potable conductivity meter(HI 8033 PCM ITALY)를 이용하여 먼저 수비전도도를 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 단위로 읽고, 이를 다시 Cl⁻의 농도로 환산하였다. 사용기기의 정밀도는 $\pm 1\%$ full scale이고, 작동온도는 0°C에서 50°C 까지이며 수비전도도의 측정범위는 0.1~19,900 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이다.

시험기간 동안 추적자혼합용액의 mixing tank내에서 초기농도(C₀)의 변화상태를 확인하기 위하여 시험기간 동안 총 6회의 추적자혼합용액을 채취하여 그 농도를 측정할 때 Cl⁻의 농도변화 폭은 $\pm 0.19\%$ (2308~2317 mg/l)

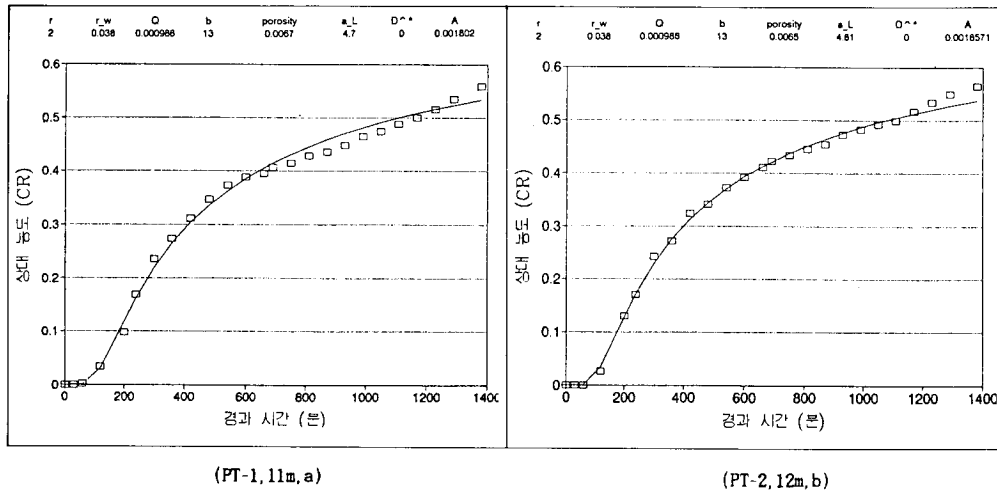


Fig. 4. Break-through curves of in-situ hydrodispersion test.

Table 3. Tracer test conditions.

Parameters	Condition	Remarks
A. Injection phase		
1. Tracer:	Cl ⁻	13 kg×0.88=11.44 kg
Solute	2313 mg/l	Cl/NaCl=0.067
Co		11.44×0.607=6.94 kg 6.94 kg/3 m ³ =2313
2. Radius of Injection well	0.038 m(1.5 inch)	
3. Distance between O4-PT1	2.0 m	
4. Detection depth	11.0 m 12.0 m	
5. Injection rate	0.986 l/min≒0.99 l/min	
6. Duration	1330 min(23 hr)	
7. Total Inj. volume	1.3615 m ³	
B. Withdrawl phase		
1. Solute and Co	same with injection phase	
2. Radius of abstract well	0.075 m	
3. Distance	2.0 m	
4. Detection depth	full thickness	
5. Withdrawal rate	76.09 l/min	
6. Duration	100 min	
7. Total pumped volume	7.61 m ³	

로 비교적 일정하였다. 현장수리분산시험시 O-4 주입정을 통해 주입한 추적자혼합용액의 주입율은 주입관에 부착된 유량계와 slice valve로 측정 조절하였으며 누적주입량과 누적주입율을 동시에 측정하였다. 총 주입량은 1,380분 동안 1.3615 m³이었으며 주입율은 0.99 l/min (9.9×10⁻⁴ m³/분)이었다. 추적자혼합용액의 초기 Cl⁻ 이온농도는 2313 mg/l인데 반해 관측정 O-4 인근에 부존된 지하수의 초기 배경농도는 (Cl⁻ 이온의 농도) 105.26 mg/l이었다 (추적자혼합용액의 4.55% 정도).

따라서 농도이력곡선 작성시 이를 감안하였다. 단정주입상 결과 각 측정지점에서 측정한 농도-이력치 (concentration history)를 이용하여 작성한 BT curve는 Fig. 4와 같다.

Gelhar & Collins (한정상, 1988)는 분자확산에 의한 영향을 고려한 방사수리분산 (radial advection dispersion) 식의 해를 유도한 바 있으며 이들의 해는 Hoopes & Harleman의 해에서 초기조건 제한을 제거하여 층서대수층으로 용질혼합수를 주입할때 i층에서 농도 C에 대한 해를 다음 (1)식으로 표현하였다.

$$C/C_0 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{r^2 - rw^2}{16\alpha_L \sqrt{\frac{r_1^3 - rw^3}{2} + \frac{D^*}{\alpha_L \cdot Ai} \frac{r_1^4 - rw^4}{4}}} \right] \quad (1)$$

여기서 Ai ≡ (Q/b)i/2 m이고, rw는 주입정이 반경 (0.038 m)이며, n는 시간 t일 때 평균 방사전위지점 (radial frontal position)이고, A는 (Qt/π/nb)^{0.5}이며, b는 대수층의 시험구간 (m)이고, n은 공극율, α_L은 종분산지수 (longitu-

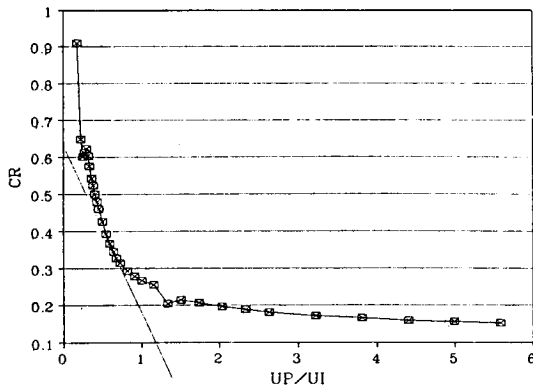


Fig. 5. Break-through curve of withdrawal phase.

dinal dispersivity)이다.

Gelhar & Collins의 방사연속주입 지배식을 전산 code화한 HANS-GC (한서엔지니어링, 1992:1993a)를 현장에서 취득한 BT curve와 임의의 α_L 과 n 을 입력하여 trial and error방법으로 반복작업을 실시하면서 현장 실측치와 이론치가 가장 잘 일치할 때 각 측정지점에서 구한 종분산지수는 11 m 지점이 4.7 m이고, 12 m 지점이 4.81 m였다 (Fig. 4a 및 4b).

추적자의 이론적 방사전위 위치 (Frontal position of tracer)

시험대상 수리지질매체가 균질등방이라고 가정하고 연결공극 (transport porosity)이 수리분산시험시 구한 ne 와 동일하다고 가정한다면 Gelhar & Collins (한정상, 1988)의 (2)식을 이용하여 0-4 관측정의 각 심도별 (11 m, 12 m) 추적자의 시험종료시 방사전위 위치를 구할 수 있다.

$$R = \left[\frac{q \cdot t}{\pi \cdot b \cdot ne} \right]^{1/2} \tag{2}$$

(2)식에서 q : 주입율 ($9.9 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{분}$), b : 13 m, t : 주입시간 (1,380분), ne : 0.0067이다. 주입시험시 0-4 주입정을 통해 Cl^- 추적자혼합용액을 $9.9 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{분}$ 의 유로 1,380분 동안 주입했으므로 1,380분 경과후의 Cl^- 추적자의 $0.5C_0$ 가 돌출되는 방사전위 위치 (frontal face distance)는 약 2.23 m 정도이다 [$r = [9.9 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{분} \times 1380 / (\pi \times 13 \text{ m} \times 0.0067)]^{1/2}$].

실제 0-4 주입정과 PT-1 관측정사이의 거리는 2 m이다. 따라서 주입정과 2 m 상거해 있는 PT-1 관측정의 관측 지점 11 m 지점에서는 주입후 1,170분 후에, 12 m 지점에서는 주입후 약 1,110분 이후에 $0.5C_0$ 가 돌출되었다. 따라서 본 시험분석 결과는 현장수리분산시험 결과와 매우

Table 4. Major different chemical components between up and down gradient area.

component	area	Up-gradient	Down-gradient
pH		6.77±0.44	6.45'0.95
NH ₃		ND	ND
NO ₃		ND	ND
Cl ⁻		4.26±0.71	60.88±55.91
KMnO ₄		3.26±0.85	8.67±5.87
Cr ⁺⁶		TR	TR-0.205
SO ₄ ⁻		195±5	94.8±85.2
Hardnes		43±7	152±51.5
T. Residue		152.5±51.5	6706.5±6541.5
Phenol		TR	TR
CN		TR	TR
Fe		TR	TR
Cd		TR	TR

ND; Not Detected, TR; Trace Amount

잘 일치한다.

단정-채수상시험과 해석

이 시험은 주입상시험 종료시 PT-1 시험정 내에 3HP의 모터펌프를 공내 8 m 지점에 설치하고 주입상시험시 인근 지하수환경으로 주입한 추적자혼합용액을 공외로 채수하면서 채수시간 경과별 Cl^- 추적자의 농도변화를 펌프토출구에서 HI 8033 PCM으로 직접 측정하였다.

채수시 초기 24분까지는 62.4 l/분 정도로 추적자혼합용액과 주변 지하수를 채수했으나 시간이 경과해도 지하수위가 크게 하강치 않아 24분 이후에는 채수율을 80.4 l/min로 증가시켰다. 총 채수시험 기간은 100분이었으며 이때 채수된 총량은 7,608 l이었다. Table 3의 하단부는 채수상시험시 제반 시험조건을 도표화 한 것이다. 채수상시험시 현장에서 취득한 경과시간별 농도이력치를 이용하여 전구간 분산지수를 다음 (3)식과 같은 해석학적 방법으로 구할 수 있다 (Mercado 식).

$$\alpha_{\text{eff}} = 3\sqrt{UI} \cdot \left[\Delta \frac{UP}{UI} \right]^2 / 32\pi^{3/2} \sqrt{b\theta} \tag{3}$$

여기서 U 는 총 주입량
 U_0 는 총 채수량이며
 b 는 포화대의 두께이고 Q 는 주입율이다.

채수상시험시 시간경과별 농도이력곡선을 작성한 바 그 결과는 Fig. 5와 같다. 상기 농도이력곡선을 이용하여 주입정과 관측정사이의 전구간 분산지수를 구하기 위해 Mercado (한정상, 1988)의 (3)식을 이용하여 해석학적인 Gra-

phic 분석기법으로 전구간 분산지수를 구하였다.

Fig. 5에서 채수상시험 이전에 주입된 추적자혼합용액의 총량 (UI)은 1.36 m³이었고 농도이력곡선에서 질량중심점이 나타나는 지점에서 ΔUP/UI는 약 2.5 정도이다. 따라서 본 채수상시험으로 부터 구한 전구간 분산지수 (α_{full})는

$$\alpha_{full} = \frac{3\sqrt{1.36} (2.5)^2}{32\pi^{1.5}\sqrt{13 \times 0.0067}} = 0.42 \text{ m 정도이다.}$$

따라서 주입상시험시 구한 종분산지수에 비해 전구간

분산지수는 α_{full} ≃ 8.74 × 10⁻²¹ α_L의 상관관계를 나타내며 뚜렷한 규모종속 (scale dependent)관계를 보여주고 있다 (한정상 등, 1991).

수리분산특성 종합

금번에 연구지역 내 A수역의 하류구배구간에 기 설치된 다목적 시험, 관측정을 이용하여 단정-주입상과 단정-채수상 현장수리분산시험을 실시한 결과 주입상시험시 지

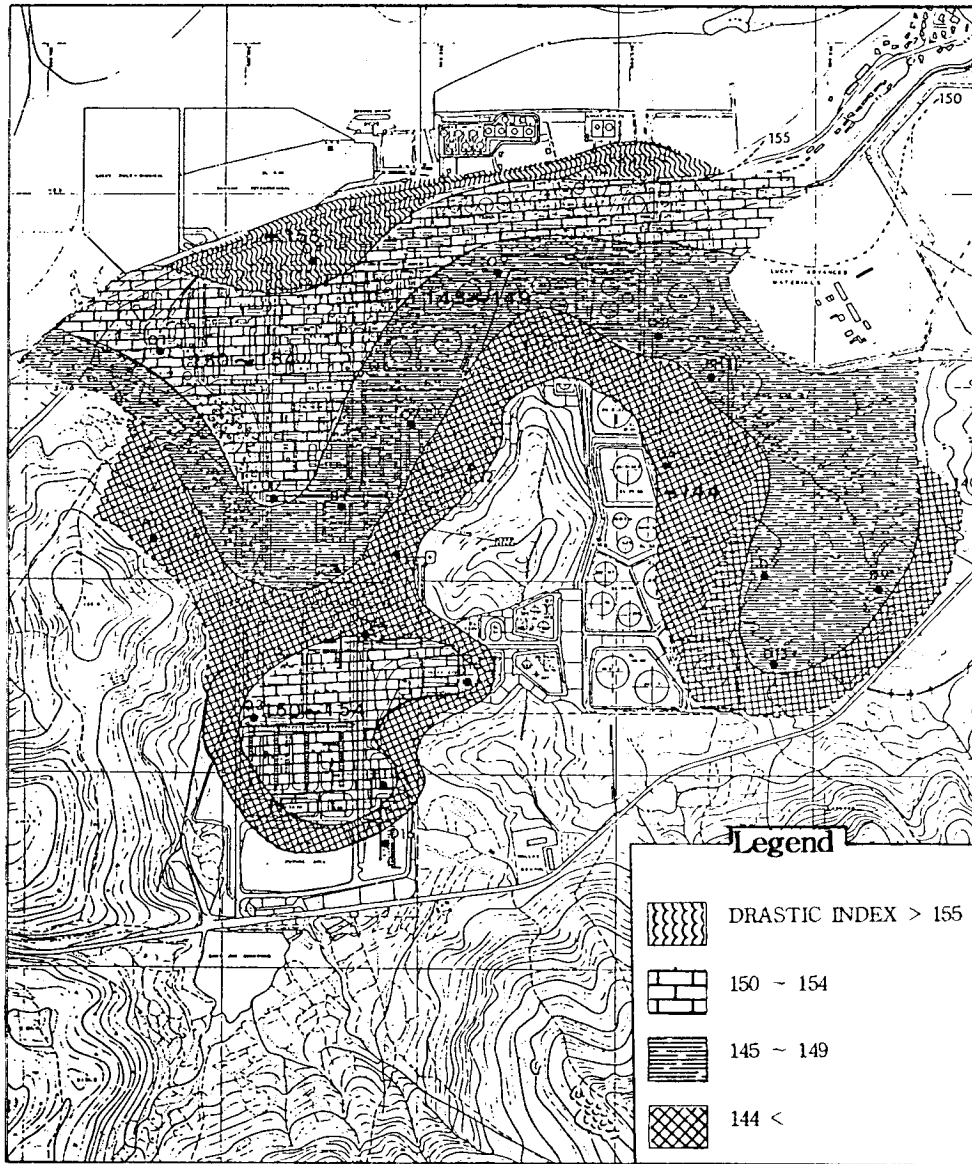


Fig. 6. Groundwater pollution potential map (DRASTIC) of the study area.

표하 11 및 12 m 구간에서 비반응용질의 종분산지수 (α_L) 은 약 4.8 m 정도이며, 채수상시험시 구한 전구간 분산지수 (α_{total})는 0.42 m로써 이들 두값은 규모종속관계를 뚜렷히 나타내고 있다. 따라서 A수역 하류구배구간의 대표적인 종분산지수는 4.8 m이다 (Boutwell et al. 1986).

지하수의 수질특성

배경수질

연구지역과 그 인근지에 부존된 지하수의 배경수질을 규명하기 위하여 A수역의 상류구배구간에 소재한 S-2와 S-5 수굴정호의 물시료를 채취하여 수질분석을 실시하였다. 시험결과 pH는 6.33~7.2였으며 $\text{NH}_3\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 불검출이었고, Cr^{++} , CN , Fe , Cd 및 phenol은 trace amount 정도이며 대장균은 불검출이었다. Cl^- 이온의 농도는 3.55~4.97 mg/l로써 강수의 Cl^- 함량과 비슷하며 경도는 36~50 mg/l로 비교적 연성이다.

하류구배구간의 지하수의 수질

연구지역 내에 부존된 하류구배구간 지하수의 수질특성을 규명하기 위하여 A수역과 B수역 내의 하류구배구간에 위치한 관측정 O-1, O-3, O-5, O-8, O-9, O-11, O-12, O-13, O-14, O-15, O-16, O-17, O-18, S-11, S-12 및 PT-1 시험정에서의 지하수시료를 채취하여 성분분석을 실시하였다. 하류구배구간의 지하수 수질과 배경수질을 서로 비교하기 위하여 주요 성분만 도표로 작성한 바 그 결과는 Table 4와 같다. 즉 하류구배구간에 속하는 연구부지 내에 부존된 지하수의 pH는 5.5~7.4 정도이고, NH_3 , $\text{NO}_3\text{-N}$, CN , Fe , phenol, Cd 및 Pb 는 모두 불검출이다. 그러나 Cl^- 의 농도는 최대 116.79 mg/l (O-9) 정도이며, KMnO_4 소비량은 208~14.54 mg/l로 비교적 높고, Cr^{+6} 은 O-3 관측정에서 0.205 mg/l까지 검출되었다. 특이한 현상은 SO_4 의 함량이 배경수질보다 낮은 9.6~180 mg/l이고, 경도는 45~259 mg/l이며, 증발잔유물이 164~13.249 (O-5)로 높은 것이 특징이다. 금번에 시행한 수질분석 결과 탄화수소계열의 BTEX나 TPC, TOX 및 TOC 등이 분석되지 않아 연구지역의 주 공정에서 취급하고 있는 각종 독성 유기화합물질이 연구지역 내 지하수환경을 오염시켰는지 여부는 규명할 수 없었다. 그러나 전반적으로 상류구배구간에 부존된 지하수의 배경수질에 비해 연구부지 내에 부존된 지하수의 증발잔유물, 경도 및 KMnO_4 소비량이 높고, Cr^{+6} 가 일부 관측정에서 검출되는 현상으로

보아 연구부지 내 지하수는 상당히 저질화된 상태이다 (Table 4).

지하수환경의 오염가능성 평가

간접평가기법에 의한 평가

지하수자원의 오염가능성은 제반 허가과정에서 중요한 고려사항이 되고 있을 뿐만아니라 오염원이나 오염가능성이 농후한 오염원에 대해 계획된 조사평가를 철저히 요구하고 있다. 그러나 광범위한 감시체계를 설정, 운영키 위해서는 막대한 비용이 소요되므로 지하수자원오염에 대한 수리지질학적인 취약성조사 (vulnerability study) 평가방법에 대해 관심을 두게 되었다. 그래서 지하수자원 오염원 평가와 그 우선순위를 결정하고 유해물질 취급 TSDF의 입지선정을 하거나 감시계획과 허가서 발부에 널리 이용되고 있는 기법중의 하나가 바로 간접적인 평가방법 (Empirical assessment methodologies)이다. 지하수수질관리 측면에서 볼 때 간접적인 평가법은 인간활동에 의해 발생하는 지하수오염가능성을 분류하거나 수치적인 지표를 개발할 수 있는 접근법이다. 지하수오염가능성은 오염물질의 특성과 지하수계의 오염취약성 또는 상기 두 인자의 상호관계에 따라 달라진다.

지금까지 개발이용되어 온 여러가지의 간접평가기법중 미국 EPA에서 현재 널리 이용하고 있는 DRASTIC 기법 (일명 지하수오염가능성 및 취약성 평가기법)을 이용하여 본 연구부지 내에 부존된 지하수의 오염취약성도 (groundwater vulnerability map)를 작성하였다 (Lehr et al., 1987). 상기 지하수오염취약성도를 작성하려면 많은 수의 수리지질 자료를 이용해야 한다. 연구부지 내에서 과거에 시행한 시추조사 자료들이 상당수 있으나 DRASTIC map작성에 응용가능한 것은 소수에 불과하였다. 따라서 금번 연구시 굴착한 시험시추공 (관측정)과 과거에 연구부지 내에서 시행했던 시험시추 자료중 사용가능한 자료만을 선별하여 연구지역에 대한 DRASTIC map을 작성한 바 그 결과는 Fig. 6과 같다.

연구지역의 DRASTIC 지수는 최소 139에서 최대 155이며 평균지수는 146으로 상당히 오염취약성이 큰 수리지질로 구성되어 있다. 연구지역 내에서 가장 지하수오염취약성이 큰 구간은 부지 북쪽의 해안변쪽으로 DRASTIC 지수는 155점 이상이며 그 다음으로 오염취약성이 큰 구간은 A, B수역의 하류구배구간과 A수역의 상류구배구간으로써 DRASTIC 지수는 150~155에 이른다. 이러한 지역은 각종 TSDF로부터 오염물질이 예기치 않은 사고나

부주의한 취급으로 인해 누출 또는 유출 (spill)될 시 그 하부토양은 물론 지하수환경에 가장 민감하게 악영향 (adverse effect)을 미칠 수 있는 오염민감지역 (sensitive area)이다.

지하수환경의 Flow와 Transport model simulation

금번에 연구지역 내에서 1차 조사시 시행한 제반 수리 특성 및 분산인자를 이용하여 ASM (aquifer simulation model) program (Kinzelbach, 1992)과 THWELL program (Heizde, 1992)을 사용하여 연구지역의 지하수환경 내에서 예기치 않은 사고로 인하여 독성물질중 비교적 비반응물질인 NaOH 용액과 반응물질인 Benzene이 지하로 누출 되었을 시 그 분산현상과 오염범위 (contaminant plume)를 예측하였다.

독성물질인 NaOH 용액이 누출되었을시 모사

ASM model (aquifer simulation model)은 1991년 2월에 독일/Gesamthochschule Kassel 대학의 Wolfgang Kinzelbach 교수팀에 의해 개발된 2차원 지하수의 Flow 및 Transport model이다. 이 model은 각종 위해물질 저장시설로부터 주변 지하수환경으로 누출된 특정 오염물질의 지하수계 (system) 내에서 거동현상을 Random-Walk법으로 simulation을 할 수 있으며, 자유면, 피압 및 누수피압 상태하의 정류 (st-st)와 부정류 (transient) 흐름을 모두 처리할 수 있다. 또한 이 model은 고려대상 주변 지하수계가 이방 (anisotropoc)이거나 불균질 (heterogeneous)인 경우도 취급할 수 있고, 오염물질이 연속적이거나 순간 누출상태인 경우나, 강수에 의해 지하함량이 일어나고 있는 복잡한 지하수환경 내에서도 오염물질의 이류 (advection)나 분산 (dispersion) 현상을 처리할 수 있는 program이다. 최악의 경우 (the worst case)를 가사하여 본 지역에서 비반응 독성물질인 액상의 NaOH가 주변 지하수환경으로 누출되었다고 가정하고 그 거동현상을 본 model을 이용하여 예측하였다.

Model grid 설정과 초기 지하수위는 1993년 10월의 연구지역 주변의 PM map을 이용하였으며, A, B수역의 고려대상 지점의 grid 간격은 50 m, 그 외지역은 100 m로 설정하였다 (Fig. 3 및 4). 특히 모델링 대상지역중 상류 구배구간의 no flow boundary는 지하수의 분수령 (GW divide)으로, 하류구배구간 해수면은 constant head로 처리하였다. 특히 부지 내 하부대수층의 불균질성을 고려하여 상부대수층의 이질성을 대수성시험 결과 자료를 이용하여 구역화 (zoning)를 한 후 지하수환경 내에서 오염

물질의 거동을 예측하였다. 본 model의 입력자료를 요약하면 Table 5와 같다.

이상과 같이 본 model의 입력자료는 금번에 현장 수리지질 및 수리분산시험을 시행하여 취득한 실측치를 이용하였다. 상기 조사결과 전지역의 수리지질학적 특성이 매우 다르기 때문에 전체 대상지역을 Fig. 7과 같이 이방성의 불균질성 대수층 (anisotropic, heterogenous model)로 취급하여 simulation을 시행하였다. Fig. 8의 (a)와 (b)는 1993년 10월 21일과 100일 이후인 1994년 1월 30일의 지하수위를 Table 5의 flow parameter를 입력자료로 이용하여 ASM으로 전산처리하여 구한 PM map들이다. Table 5의 입력자료를 이용하여 지금 A수역에 위치한 Nodal point: (11, 13)에서 농도 1%의 NaOH용액-100 l이 예기치 않은 사고로 인하여 그 주변 대수층으로 연속적으로 누출되었을 시의 시나리오를 가사하여 transport model simulation을 시행해 보았다.

Fig. 9는 동일조건 하에서 가상누출지점 (nodal point 11, 13)에서 NaOH가 연속적으로 하루 100 l씩 누출될시 5년 이후의 NaOH 오염운의 형태를 ASM model로 예측한 결과이다. 5년 이후의 오염운의 크기는 250×100 m 규모이며 그 방향은 연구지역 지하수의 주 흐름방향과 동일한 북서-북향이고, Nodal point (11, 13)과 약 250 m 상거한 nodal point (8, 10)의 중심부까지 도달한 상태이다. Fig. 10은 NaOH 누출 후 5년 동안 각 관측지점에서 예측한 NaOH의 농도이력곡선이다.

가상누출지점에서 5년 이후의 하부지하수계 내에서 NaOH의 농도는 약 48 mg/l 정도이며, 이로 부터 서측으로 100 m 상거해 있는 (9, 13) nodal point에서는 그 농도가 1.18 mg/l인데 반해 역학적인 분산이 발생하고 있는 오염운 중심부에 위치한 (9, 12), (9, 11) 및 (9, 10) 지점에서 NaOH의 농도는 각각 118 (141 m 지점)mg/l, 58 (201 m 지점)mg/l, 7.21 (223 m 지점)mg/l이다. 또한 nodal point (9, 12)에서 오염운이 도달되는 시간은 약 1년 7개월 정도 소요되는데 반해 nodal point (9, 11) 지점에서는 약 3년 이후로 예측된다.

Fig. 10에서 예측된 바와 같이 누출된 NaOH는 종방향 (주 지하수 흐름방향)으로 약 250 m 하류구배구간까지 분산 이동되었으며 횡방향으로는 종방향의 약 1/4에 해당하는 100 m 정도 분산되는 것으로 나타났다.

발암물질인 벤젠이 누출시 모사

금번 연구시 benzene이 지하로 누출되었을 시 그 거동과 운명을 지배하는 각종 저감인자 (foc, 물성시험, 분배계수, 지연계수 및 반감계수)에 대한 현장조사를 실시하지 않

았다. 그러나 외국에서 시행해 온 benzene의 제반 수리 분산 및 저감특성인자와 연구지역의 수리지질특성인자를 이용하여 A수역의 상류구배구간에 위치한 nodal point (7, 23) (저장탱크)에서 농도 1%의 Benzene 100 l/일이 지하로 누출되고 있다고 가정할 때 그 주변 지하수환경에 미치는 약영향을 모의해 보았다.

Benzene의 일반적인 물리화학적 특성중 Henry 상수는 $240 \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{water}\cdot\text{m}^2\cdot\text{air}$ 이며 $\log.k_{ow}$ 는 2.12이고, $\log.k_{oc}$ 는 1.19~1.98이며, 수용성은 20°C 에서 1,780 mg/l 정도이고, 흡착능은 80 mg/l, 비중은 0.88로써 LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid)이다. Benzene의 저감능 (attenuation capacity)은 대상 수리지질계의 구성물질이나 foc나 지하수환경 내에서 생분해 정도에 따라 달라진다 (Table 6).

일반적으로 국내의 해안면에 소재한 매립장 인근에 분

포된 해성점토의 foc가 0.19~0.28% 정도이고 (한서엔지니어링, 1993a), 지하수계 내에서 benzene의 k_{oc} 가 87.1 ml/g 정도이므로 상기자료를 이용하여 benzene의 분배계수를 구해보면 약 0.17 ml/g이다. 따라서 benzene이 연구지역 내 인근 지하수환경으로 누출되었을시 개략적인 최소 지연계수는 약 2.1 ($1.8/0.3 \times 0.0174$) 정도이다. 상기 자료를 이용하여 연구지역 내에 소재한 benzene 저장탱크에서 농도 1%의 benzene이 100 l/일 (0.88 kg/일)의 율로 연속적으로 지하로 누출될 경우 10년 이후의 benzene plume (오염운)을 ASM transport model로 예측해 본 결과는 Fig. 11과 같다.상기 simulation에 의하면 benzene이 불의의 사고로 지하로 누출될 시 10년 이후 연구지역 내에서 benzene이 거동한 종분산거리는 하류구배 구간 방향으로 약 490 m까지 분산 거동되며 이에 반해 횡분산거리는 약 100여m 정도이다. 또한 예상 누출지점

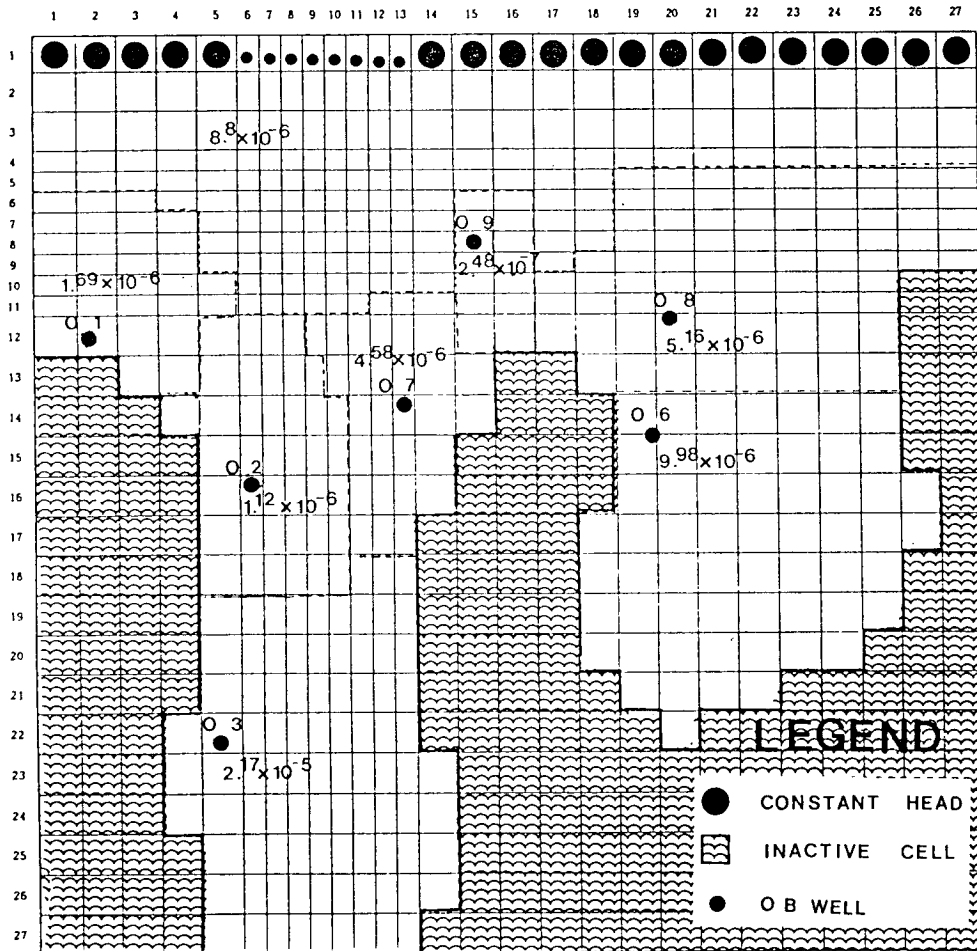


Fig. 7. Zoning and grid system of model area.

Table 5. Summary of Input data of ASM modeling.

Water shed	Input data	Remarks
A	1. Kh: Variable Kh determined at the tested wells	aulic conductivity
	2. Initial head: Variable heads at each cell which was derived from PM map of 1993/10/30	Fig. 3
	3. Specific yield: 0.02	Aquifer test
	4. Bottom of aquifer: Variable values obtained from drilled boreholes	Table 1
	5. Recharge rate: $1.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}^2$	based on Darcian flux $360 \text{ m}^3/\text{day}$
	6. Boundary conditions *Coast line: constant head *Groundwater divide line: no flow boundary	Fig. 3
	7. $\alpha_L=4.8 \text{ m}$, $\alpha_T=1.6 \text{ m}$ ($1/3 \alpha_L$)	Fig. 4
B	1. Kh: Variable Kh determined at the tested wells	Table 2
	2. Initial head: Variable heads at each cell which was derived from PM map of 1993/10/30	Fig. 3
	3. Specific yield: 0.02	Aquifer test
	4. Bottom of aquifer: Variable values obtained from drilled boreholes	Table 1
	5. Recharge rate: $6.58 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}^2$ $100 \times 100 \text{ m}$ cell: $1.94 \text{ m}/\text{d}$	Fig. 3
	6. Boundary conditions *Coast line: constant head *Groundwater divide line: no flow boundary	Fig. 3

(nodal point 7, 23)에서 하류구배구간에 위치한 제 1 관측지점 (7, 22)과 200 m 상거한 제 2 관측지점 (7, 21) 및 400 m 상거한 제 3 관측지점 (7, 19)에서 시간경과별 농도이력곡선 (BT curve)은 Fig. 12와 같이 모의되었다. 즉 제 1 관측지점인 nodal point (7, 22)지점은 benzene 누출 후 6년째부터 약 $500 \text{ mg}/\text{l}$ 로 일정하게 나타나며 제 2 관측지점인 nodal point (7, 21) 지점은 누출 후 3년 되어서야 겨우 benzene이 들출되기 시작하여 점차 증가하다가 10년째에는 그 농도가 $143.5 \text{ mg}/\text{l}$ 정도로 증가된다. 이에 반해 400 m 하류구배구간에 위치한 nodal point (7, 19)는 누출 후 6년 경과 후부터 benzene이 나타나기 시작하며 10년 이후에 benzene농도는 $48.9 \text{ mg}/\text{l}$ 정도로 예측되었다.

장기 지하수채수로 인한 악영향 예측

전술한 바와 같이 연구지역의 강우결핍 지속일수는 약 50일 간이다. 이기간 동안 지하수의 함량이 전혀 발생하지 않는다는 조건하에서 PT-1 시험정에서 1일 100 m^3 규모로 50일간 지하수를 장기채수시 그 영향권을 THWELL 전산 program으로 예측한 바 그 결과는 Fig. 13과 같다. 즉 영향반경중 수위강하가 0.5 m까지 발생하는 영향권은 PT-1 시험정에서 약 210 m 정도이며 이때 PT-1 시험정에서 실 수위강하율은 13 m이다 (Fig. 13).

PT-1 시험정은 해안선에서 약 300 m 상류구배구간에

위치한다. 따라서 강우에 의한 함량이 전혀 발생되지 않는 상태에서 PT-1 시험정에서 1일 100 m^3 규모로 50일 이상 지하수를 장기간 채수 이용하면 해안선에서 실 수위강하량은 약 2.8 cm로 예상된다. 환원하면 50일 이상 지하수를 장기적으로 채수할때 A수역의 대수층 내로 해수가 침입 (salt water encroachment)하여 부지내 담수대에 심각한 악영향을 미치게 된다.

Soil gas sensing 결과와 하부지하수의 오염예측

일반적으로 경유나 휘발유의 구성성분은 그 등급과 출하시기 등 제품생산자에 따라서 다르며 특히 지표면하에서는 휘발과 용해작용 등과 같은 풍화정도 (weathering process)에 따라서 달라진다. 대체적으로 gasoline은 지하수환경 내에서 풍화가 되면 그 휘발성과 용해될 수 있는 성분이 감소되는 특징을 지니고 있다. 따라서 비포화대의 air filled void 내에 함유되어 있는 NAPL (Devitt et al., 1987) 함량으로부터 그 하부 지하수계의 포화공극 내에 함유된 NAPL의 함량을 유추할 때에는 대수층 자체의 이질성 (heterogeneity)과 상술한 성분변화의 불확실성을 인지할 필요가 있다.

일반적으로 신선한 휘발유 내에 함유된 Benzene, Toluene, Ethylbenzene과 Xylene (o.m.p)와 같은 비교적

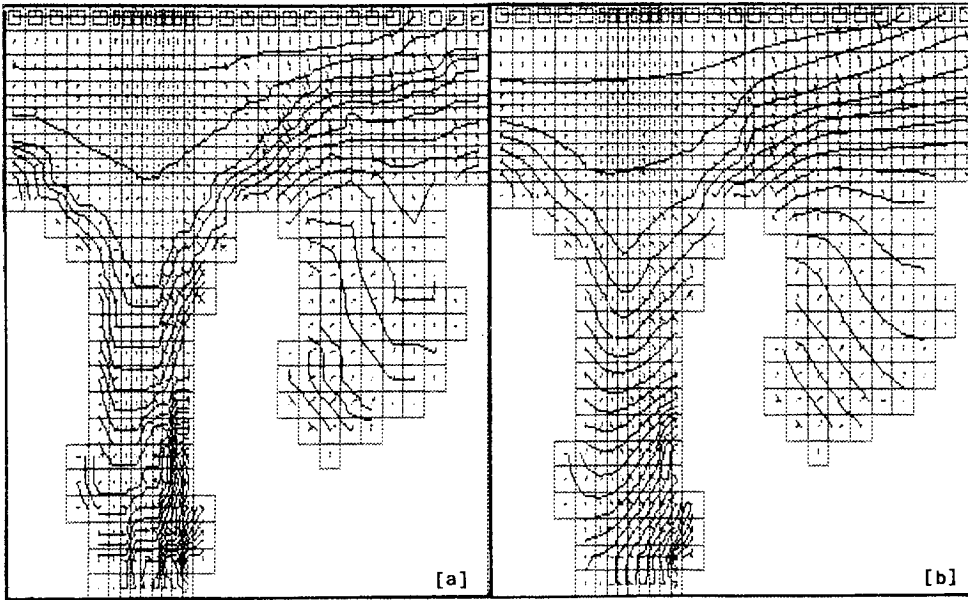


Fig. 8. Simulation PM map at the time of 1993. 10. 22 (a) and 1994. 1. 30(b, 100days after).

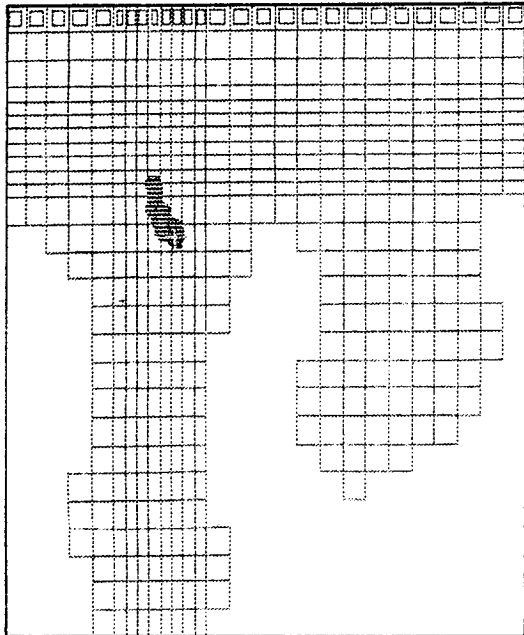


Fig. 9. Simiurated contaminant plume after 5 years.

수용이 있는 HOC (Hydrophobic organic carbons)류의 함량은 각각 2, 15, 2 및 10% 정도로 알려져 있다. 따라서 BTEX의 mole fraction은 중량백분율로 계산할 수 있다. BTEX의 제반성격을 도표화 하면 Table 6과 같다. Henry's constant는 조사목적에 따라 그 단위가 atm-m³/mole이나

kpa-m³/mole로 표시되기도 하나 soil gas sensing과 지하수계 내의 오염도 분석시에는 무차원상수 (dimensionless constant)로 표기하여 사용된다 (Weston Inc., 1988).

[참고]

Benzene의 Henry's constant 계산예

$$H_{cc} = \frac{C_{av}}{C_w} = \frac{P}{Co} = \frac{\frac{P}{RT}}{\frac{M}{78.11}} = \frac{12.7}{\frac{8.2 \times 10^{-3} (273 + 25)}}{\frac{1780}{78.11}} = \frac{5.2}{22.78} = 0.228 \approx 0.23$$

연구지역 내 1개 시추공에서 시행한 시험시추자료와 지표하 5 m 지점에서 채취한 시료의 토성은 다음과 같다. 즉 rd=1.41 mg/cm³, e=0.922, n=0.48, nw=0.33 (함수비), na=0.15 (air filled void)이다.

일반적으로 누출된 휘발유가 일단 지하수계내에 도달하면 일부는 지하수에 용해되어 mixer의 형태로 지하수계내에서 분산거동되고 일부는 NAPL 형태로 대수층 최상위층에 floater상태로 부유하면서 휘발한다 (Knox et al., 1993). 휘발된 성분 (VOC)중 일부는 비포화대내의 air filled void (n_a)내에서 기체상태로 거동하며, 일부는 토양내에 흡착된 상태로 존재하기도 하며 (주로 non-polar-hydrocarbon은 토양내의 foc와 결합), 일부는 토양수 (n_w)에

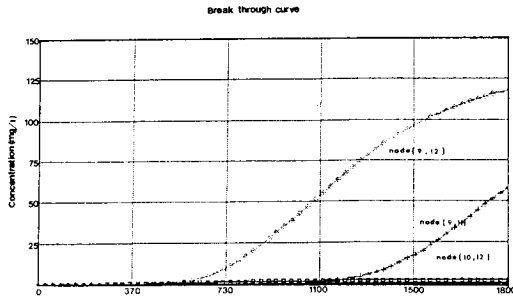


Fig. 10. Break-through curve of down-gradient nodal point.

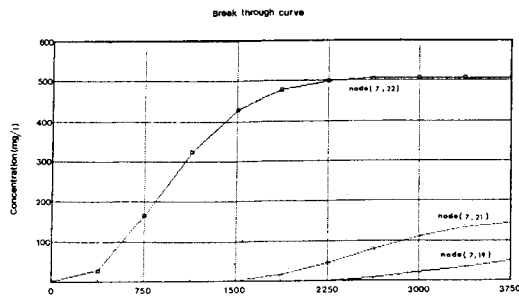


Fig. 12. BT curve of benzene at each nodal point.

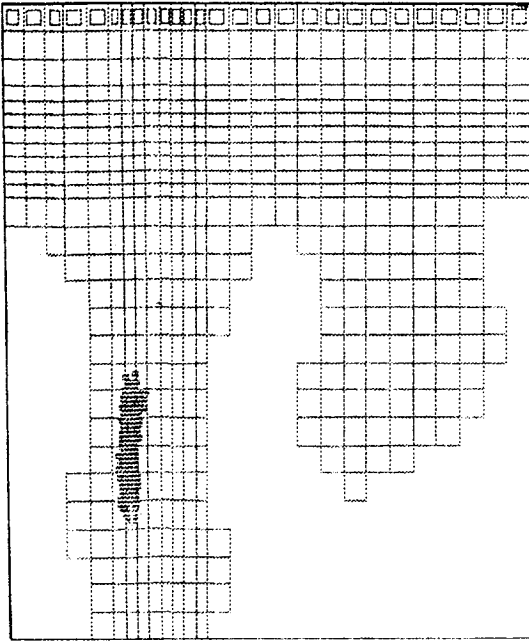


Fig. 11. Contaminant plume of benzene after 10 years.

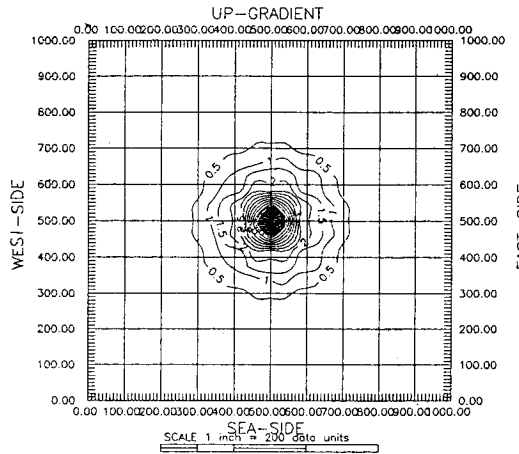


Fig. 13. ZOI of PT-1 test well (100 m³/d, 50 day).

$$(n_a H \cdot Cw = 61.8 \therefore Cw = \frac{61.8}{0.15 \times 0.23} = 1.791 \mu\text{g/l})$$

결론 및 제언

용해되어 존재한다. 따라서 비포화대내에서 총 VOC의 농도 Ct는 $(Koc \times foc \times rd + H_{na})Cw/rd$ 로 표시할 수 있다 (Hern et al., 1987).

금번에 1개 지점에서 soil gas sensing을 실시한 결과 benzene, ethylbenzene 및 xylene의 함량은 각각 61.8, 46.2 및 21.1 $\mu\text{g/l}$ 로 측정되었다. 따라서 pore water내에 용해되어 있는 benzene, ethylbenzene 및 xylene의 함량을 각각 1,790, 855 및 586 $\mu\text{g/l}$ 정도로 추산되며, 이는 유효용해도 (effective solubility)의 수 백배에 이를뿐만 아니라 상당량이 또한 토양내에 흡착되어 있어 하부 지하수계의 오염은 필연적인 것으로 판단된다 (Schwendeman et al., 1987).

1. 연구지역중 상부표토와 매립토와 풍화대를 포함한 미고결암의 평균심도는 A수역이 7.21 m이며, B수역은 6.85 m 정도이고 C수역은 3.13 m이다. 이들 미고결암 최상위 층에 압층 (confining bed)이 발달되어 있지 않아 본 역에 발달된 포화대는 자유면 대수층이다.

2. A수역에 설치한 총8개공의 평균 수리전도도는 5.86×10^{-6} m/s이고 B수역 (2개공)은 5.18×10^{-6} m/s로써 연구지역의 평균 수리전도도는 5.52×10^{-6} m/s 정도이다.

3. 유선망 분석결과 A 및 B수역은 공히 지하수의 주 흐름 방향 (main pathway)이 북향이며 지하수의 최종 배출지역은 연구지역 북쪽에 위치한 해안선이다. 지하수의 주 흐름방향을 따라 그 평균 선형유속은 A수역이 0.53 m/일이고, B수역은 0.36 m/일이며, 비배출량은 A수역이

Table 6. General characteristics of BTEX.

characteristic component	Molecular weight (g/mole)	Vapor pressure (kpa)	Solubility (g/m ³)	Henry's constnat		Log. koc	Effective solubility (mg/l)	Specific gravity
				kpa-m ³ /mole	DC			
Benzene	78.11	12.7	1740~1869	0.55±0.025	0.23	1.94	36/1800	0.88
Toluene	92.13	3.8	515~627	0.67±0.35	0.28	2.18	87/580	0.87
O-xylene	106.2	0.882	170.5~204	0.5 ± 0.06	0.2	2.11	20/220	0.88
M-xylene	106.2	1.10	134~196	0.7 ± 0.1	0.28	3.2	20/220	0.864
P-xylene	106.2	1.17	157~200	0.71±0.08	0.24	2.31	20/220	0.861
Ethly benzene	106.2	1.27	152~208	0.8 ± 0.07	0.36	2.2	3.8/190	0.87

DC; Dimensionless Constant (Boy, B.Evans, EPA/USA)

0.013 m³/일/m²인데 반해 B수역은 7.2×10⁻³ m³/일/m²이다.

4. PT-1 시험정 인공 지하수환경에 대해 현장 수리분산시험 (in-situ hydrodispersion test)을 실시한 결과 연구지역 포화대의 종분산지수 (longitudinal dispersivity)는 4.8 m 정도이다.

5. 본 역에 분포된 지하수의 배경수질은 SO₄²⁻ 함량이 약간 높긴하나 연성인 음용가능한 지하수인데 반해 연구지역내에 부존된 지하수는 배경수질에 비해 상당히 저질화 (deterioration)된 상태이다.

6. 연구부지에 대한 간접적인 지하수오염도 평가를 실시하기 위하여 지하수오염취약성도를 작성한 바 DRAS-TIC 지수의 범위는 최소 139에서 최대 155 정도이며 그 평균치는 146이다. 이러한 사실은 본 역에 분포된 수리지질환경이 외부오염원에 의해 오염취약성이 비교적 큼을 의미한다. 연구지역 내에서 오염취약이 가장 큰 구간은 연구지역 북부구간이며 A수역의 일부 중상류구배구간이다.

7. 본 지역에서 실시하여 취득한 제반 수리지질 및 수리분산특성 인자와 ASM의 flow 및 transport model을 이용하여 NaOH와 benzene이 A수역내에서 예기치 않은 사고로 인하여 연속 누출되었을 시를 가정하여 이들 독성물질이 그 주변 지하수환경에 미치는 악영향을 simulation한 바 그 결과는 다음과 같다.

가) 오염물질은 A, B수역의 주 지하수흐름 경로를 따라 거동하면서 횡방향으로 분산된다.

나) 비교적 흡착성이 적은 NaOH는 누출 5년후에 누출지점에서 약 250 m 지점까지 종방향으로 분산되는데 반해 횡방향으로는 약 100 m 정도 분산되는 오염운을 형성한다. 이때 누출지점에서 141 m 하류구배구간에 위치한 (9.12)지점에서 NaOH 함량은 118 mg/l였고, 201 m 하류구배구간 지점 (9.11)에서의 함량은 58 mg/l 정도로 예측되었다.

다) A수역 상류구배구간에서 반응용질인 benzene이

지하대수층으로 누출되었다고 가정시 누출후 10년 이후에 형성된 benzene의 오염운은 490×100 m 규모이다. 누출 지점에서 하류구배구간 방향으로 100 m 지점에서 6년후의 benzene농도는 50 mg/l에 달하고, 400 m 지점에 위치한 오염운 marginal zone에서 benzene 농도는 48.9 mg/l로 예측되었다.

8) THWELLS program을 이용하여 연구지역에서 최대 갈수지속일수인 50일간 지하수 함량이 전혀 발생하지 않는 상태에서 지하수를 장기 채수 이용시 (100 m³/일) 그 영향권은 해안선까지 도달하여 해수가 담수대내로 침입된다. 따라서 연구지역 내에 심정을 설치하여 1일 100 m³ 규모 이상의 지하수를 채수하면 염수침입의 악영향을 받을 수 있다.

참고문헌

- 박희인, 박용만, 정지곤 (1989) 광양도폭 지질보고서 (1:50,000). 한국동력자원연구소, p. 2-13.
- 한서엔지니어링 (1992) 난지도 매립지 수리지질조사 보고서. p. 10-30.
- 한서엔지니어링 (1993) 화성사업소 기존매립장 조사용역 보고서. p. 1-167.
- 한서엔지니어링 (1993) 열극암반에서의 수리간섭시험 기술보고서. 한국원자력연구소, p. 5-57.
- 한서엔지니어링 (1993) 중저준위 방사성폐기물 처분장 관련 지하매질의 지질학적 특성과 지하수흐름 분포와의 상관관계 연구. 한국원자력안전기술원, p. 44-98.
- 한정상 (1978) 국내 천정의 정호수두손실에 관한 연구. 지질학회지, v. 14, p. 1-4.
- 한정상 (1988) 환경수리지질학. 신우사.
- 한정상, 장호완, 한규상, 고정석, 이영동, 유대효 (1991) 울산 공업단지 지하수오염 예측을 위한 정량적 수리분산연구. 대한지질학회, v. 27, p. 98-116.
- Boutwell, S. H., Brown, S. M., Roberts, B. R., Atwood, D. F. (1986) Modeling remedial action at uncontrolled hazardous waste sites. Noyes pub., p. 1-431.
- Bradbury, K. R. and Rothschild, E. R. (1993) A program to correct SPC data for partial penetration and well loss and to estimate T and K. IGWMC, p. 240-246.
- Devitt, O. A., Evans, R. B. and Jurry, W. A. (1987) Soil gas

- sensing for detection and mapping of volateorganics. NWWA, p. 19-65.
- Duffeld, M. and Rumbough III, J. O. (1990) AQTESOLV, Aquifer test solver. G. M. Inc., p. 1-133.
- Hern, S. C. and Melacon, S. M. (1987) Vadose zone modeling of organic pollutants. Lewis publishers, p. 135-190.
- Heizelbach, W. (1992) Aquifer simulation model (ASM). IG-WMC, p. 1-55.
- Knox, R. C., Sabatini, D. A. and Canger, L. W. (1983) Subsurface transport and fate process. Lewis publisher, p. 140-181.
- Lehr, J. H., Aller, L. and Benett, T. (1987) A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting (DRASTIC). NWWA/EPA, p. 1-83.
- Weston Roy, F. Inc. (1988) Remedial technologies for leaking underground storage tanks. Lewis publisher, p. 44-50.
- Schwendeman and Wilcox, H. K. (1987) Underground storage system. Lewis publisher, p. 57-104.

1994년 5월 25일 원고접수