

## MP 시스템을 이용한 지하수체계의 장기 모니터링

김경수 \* · 고용권 · 김천수 · 배대석 (한국원자력연구소)  
조성일 (충남대학교), 이은용 (원자력환경기술원)

### 1. 서 론

암반에 부존해 있는 지하수체는 지하매질에 가해지는 인위적인 행위들에 의해 변화하게 된다. 지하수체계 자체가 시설의 안전성을 지배하는 요소이거나, 반대로 시설의 운영으로 인한 지하수체계의 변화가 주변 환경에 위해요소로 작용하게 되는 경우 모두 지하수체계의 장기적 감시가 요구된다.

지하수체계의 변화는 비교적 균질한 매질로 표현되는 암반의 경우 수리지질 단위층, 그리고 단열암반의 경우에는 투수성단열의 수리특성에 따라 변화하게 된다. 예를 들면, 지하수 오염물질이 깊고 넓게 퍼져있을 때 오염물질의 이동을 감시하고 그 거동을 파악하고자 하거나, 시설 주변 암반에서의 공간적인 지하수압을 감시하기 위해서는 감시정의 3차원적 배치가 필요하다. 따라서 지하수체계에 대한 자료는 수평적으로는 적정한 여러 지점에서 얻어야 하고, 동시에 각 지점에서는 다양한 심도에서 채취되어야 한다. 결과적으로 수 개의 감시정과 관련 계측장비가 요구된다.

본 연구는 단열계 분포특성 정량화 및 단열암반에서의 지하수유동(김경수외, 1999a, 1999b; 김경수, 2000)에 대한 후속 연구로서, 저투수성 암반에 지하공동이 설치될 경우 초래되는 지하수체계의 변화를 장기적으로 감시하고, 이 결과를 수치모델에서 계산된 수두분포 및 입력자료 중의 하나인 함양률의 교정자료로 활용함에 그 목적이 있다. 이를 위하여 1999년 6월 말에 국내 최초로 두 개의 감시공(K-1, K-2)에 MP(Multi-Packer) 시스템(캐나다 Westbay Co.)을 설치하였는 바, 본 논문에서는 이들 감시공에서의 각종 시험 및 현재까지의 계측결과 만을 언급하고자 한다. 이와 별도로 금년 중에는 MP 시스템의 격리구간에서 정밀한 수리시험( $\sim 10^{-12}$  m/s)을 실시하여 기존의 수압시험장비를 시험결과와 비교

할 계획이다.

본 논문에서 MP 시스템 설치를 위해 수행된 코아기재, 텔레뷰어 검층 및 수리시험 해석 자료는 조성일 외(2000) 및 한국원자력연구소(2000) 문헌에서 발췌되었다.

## 2. MP 시스템 개요

MP 시스템은 지하수체계에 대한 감시체계를 적정한 비용으로 신속하게 구축할 수 있도록 해 준다. 하나의 지점에서 기존의 standpipes 방식으로 감시정을 설치하게 되면 감시정의 심도와 감시구간이 증가할수록 시추비용이 차지하는 비중이 막대해지게 된다. MP 시스템은 단일 공에서 감시하고자 하는 다수의 구간을 완벽하게 장기간(최대 50년) 유지해준다(Fig. 1).

단일 감시정에 소요되는 설치비용만을 비교하면 standpipes 방식에 비하여 MP 시스템이 더 비싸지만, 다수의 감시정을 계획할 경우 총액면에서 훨씬 경제적으로 양질의 자료를 얻을 수 있고 설치에 소요되는 시간도 훨씬 단축될 수 있다. 감시정의 수, 시추심도, 시추단가 등의 요소가 경제성 분석에 영향을 주게 되는데, 일반적으로 시추심도가 30~60 m 이상이고, 격리구간이 3~5 개 이상일 때는 MP 시스템이 더 경제적인 것으로 소개되어 있다.

MP 시스템은 수압으로 팽창되는 패커를 사용하는데, 압반에서 밀봉구간은 약 1.5 m이다. 격리구간에는 측정구(measurement port)가 연결되고, 선택적으로 취수구(pumping port)를 연결할 수 있다(Fig. 2). 구간별 지하수압과 수온을 계측하거나 지하수 시료를 채취하기 위해서는 계측기와 연결된 sampler probe가 이용된다. 패커로서 격리된 각 구간에서 수행할 수 있는 기능은 다음과 같다.

- ① 지하수압 및 온도 계측
- ② 지하수 시료 채취
- ③ 수리시험 (rising head, falling head, tracer test)

## 3. 시추조사 및 공내 시험

연구지역은 여수반도의 북동단 해안에 접하는 응회암의 독립 암체로서, 주변에는 원유비

축기지가 입지하고 있으며, 향후 추가 비축기지 건설이 예정된 곳이다(Fig. 3). 해발 340 m 고지를 정점으로 동서방향의 산계가 발달하며, 서측 사면은 급격한 경사를 갖는 악지 지형이고, 상대적으로 동측은 완만한 경사를 이루고 있다.

#### 가. 시추조사

시추위치는 제석산 동측 계곡부의 사면을 따라 EL. 50 ~ 61m에 위치하며, 북쪽 방향으로 4개 공(총연장 400 m)이 설치되었다(Fig. 3; Fig. 4; Table 1). 시추코아의 기재는 투수성 단열로 추측되는 단열, 즉, 철 산화물이 피복되었거나 점토광물이 존재하는 유형의 단열과, 열수충전광물질로 충전된 불투수성 단열 두 가지로 구분하여 조사하였다.

#### 나. 공내시경 및 텔레뷰어 검층

시추공 내시경 검층은 시추코아의 육안관찰 및 텔레뷰어 검층 결과와의 대비에 이용되었다. 초음파 텔레뷰어는 단열의 교차빈도, 방향성, 간격, 틈의 크기, 개·폐 여부의 조사에 적용되었다.

투수성 단열의 분류기준은 텔레뷰어 주시이미지에 단열의 흔적이 나타나고, 공내시경 검층에서도 열린 상태로 확인되며, 또한 코아기재에서도 개구상인 유형의 단열에 대하여는 Type 1(open fracture), 텔레뷰어 주시이미지에는 일부만 나타나고, 진폭이미지에서 현저하게 낮은 진폭치를 갖는 유형에 대하여는 Type 2(semi-open fracture), 진폭이미지에만 나타나고 높은 진폭값을 가지면 Type 3(closed fracture)인 것으로 정하였다.

K-1과 K-2공에 대한 MP 시스템 설치를 위하여 투수성 단열이 결정되었다(Fig. 5). 이들 공은 공허 지표하 약 10 m 까지만 파쇄 정도가 심할 뿐이며, 공저까지 투수성 단열의 빈도는 약 10여 개로 극히 드문 편이다.

#### 다. 수리시험

수리시험은 이중 패커를 이용한 5 m 일정구간별 단기 주입/강하시험 방법으로 시행되었다. 주입단계(injection phase)에서는  $5 \text{ kg/cm}^2$ 와  $7 \text{ kg/cm}^2$ 의 정압으로 정률상태에 이르기까지 약 10분씩, 압력강하 단계(fall-off phase)에서는 10~30분간 시행하였으며, 압력과 수량 변화를 측정하였다. 해석된 구간별 수리전도도는 매질의 유효수리전도도 결정과 투수성

단열과의 상관관계 분석에 이용되었다.

구간별 수압시험 결과, 정상류상태의 수리전도도는 Moye 등(Ziegler, 1976)에 의한 해석법, 부정류상태의 수리전도도는 Horner 도시법(Horner, 1951)으로 계산되었다. 정상류 및 부정류 해석에 의한 수리전도도값 모두는 대수정규분포를 보였으며, 각각의 평균값은  $1.37 \times 10^{-8}$  m/sec,  $1.06 \times 10^{-8}$  m/sec으로 유사한 값을 갖는다(Table 2). 시험법의 차이에 의한 수리전도도값은 일반적으로 정상류에 의한 값이 부정류 해석법에 의한 값보다 3~10배 가량 더 큰 것으로 보고(Almen et al., 1986 ; Andersson and Persson, 1985)되었는데 본 시험 결과에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 수직적으로는 투수성 단열 분포구간을 제외하고는 전체적으로 암반의 background 투수성(약  $10^{-9}$  m/s)을 보여준다(Fig. 5 참조).

#### 라. 지하수질 계측

지하수질에 대한 수직적인 분포특성을 조사하기 위하여 Hydrolab을 이용하였다. 주요 계측 항목은 심도별 온도, 용존산소량, 전기전도도, 수소이온농도, 산화-환원준위 등으로서 지하수위부터 5 m 등간격으로 계측하였다.

그러나, 수직적인 지하수질 검층이 지표수를 이용한 공내 청소 후 2 주일 이내에 이루어졌기 때문에 지하수질을 대표하지 못하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 수소이온농도가 일반적인 지하수질보다 훨씬 높게 측정되었다.

## 4. MP 시스템 설치 및 계측결과

#### 가. MP 시스템 설치

본 연구에서 적용한 MP 시스템은 고도의 안전성이 요구되는 방사성폐기물처분시설 주변(스웨덴 SKB, 영국 NIREX, 일본 PNC, 캐나다 AECL 등)에서의 지하수체계 감시, 일반산업폐기물처분장에서의 환경감시 등에 적용되고 있다(www.westbay.com, 2000).

패커 설치구간은 K-1과 K-2번 공에 대하여 코아 기재, 텔레뷰어 해석결과와 수리시험 결과를 종합적으로 분석하여 도출된 투수성 단열 분포구간을 중심으로 관측구간을 선정하였다(Fig. 7).

#### 나. 지하수압 계측결과

현재까지 MP-38 시스템을 이용하여 K-1번 공의 7개 구간에 대하여 5회, K-2번 공의 5개 구간에 대하여 3회의 지하수압을 계측하였다(Fig. 8).

본 지역은 연속체 개념에 의하면, 지하수 배출지역으로 하부 지하수위가 상부보다 높을 것으로 예상하였다. 계측결과, EL.-80m 지점에서 지하수압이 급격히 감소하였으며, 해당 구간에는 작은 규모의 개구성 단열이 수개 분포하고 있었다. 이는 하부 암반에서 상부와 다른 지하수유동 특성을 갖고 있는 것으로 해석된다.

K-1 공의 상부 구간은 K-2 공과 수리적으로 연결되어 있어 유사한 지하수압 분포를 나타내고 있으며 배출지역 특성이 미미하게 나타나며 주로 horizontal flow가 우세하다. 또한 상부 지하수체계는 강수에 민감하게 반응하며, 시간에 따른 변화는 적게 나타났다. 강우에 의한 상부 지하수위의 변동 폭은 약 2 m이내이고, 하부 지하수두는 이보다 상대적으로 미미하게 변동한다.

수직적인 지하수두의 변화는 지하수 배출지역이라도 단열대에 의하여 지하수두 분포가 결정된다는 것을 확인하였으며, 이는 주변 계곡부에 위치한 수리지질구조의 낮은 수위 특성을 대변하는 것으로 사료된다. 시추공에서 직접적으로 구조대와 관통이 되어 있지는 않으나, 소규모 단열에 의하여 수리적으로 연결되어 있는 것으로 판단된다. 이는 본 K-1 공 상부구역에서 관찰된 것과 같이 작은 단열대이지만 주변부가 같은 지하수압을 유지하고 있는 현상에 비추어 알 수 있는 것이다. 따라서 암반지하수는 단열대의 특성에 영향을 받으나, 수리적 특성은 단열대 분포와 일치하지 않는 경우가 있는 것으로 사료된다.

#### 다. 지하수질 분석결과

지하수화학 분포특성은 광역적이고 지질학적 기간 동안에 형성된 지하수 진화과정을 나타내며, 지하수유동체계 해석에 기본적인 자료를 제공한다. 지하수압 계측에서 나타난 하부 지하수의 특성은 지하수화학적 특성으로도 확인되었다(Fig. 9).

금번 지하수질 조사는 시추 직후 단기간 내에 이루어졌기 때문에 시추수의 영향을 받았을 가능성을 배제할 수 없다. 즉, 현재의 화학분석 결과가 구간별 지하수의 화학적 특성을 대표한다고 하기에는 무리가 있다. 그러나, 분석결과에서 보는 바와 같이 K-1 공의 6번째 구간은 타 구간에 비하여 상이한 화학조성을 보이고 있다(Fig. 9; Fig. 10). 기타 구간의 화학조

성은 100mg/L의 낮은 총용존고체(TDS) 함량을 보이는 반면, 6번째 구간에서는 높은 Ca, Cl, SO<sub>4</sub> 함량을 갖는 특성을 보이고 있다. 암반에서의 지하수 주 유동로는 투수성 단열(대) 입을 고려할 때 이 구간의 투수성 단열을 통하여 높은 이온함량을 갖는 지하수가 유입되고 있는 것으로 사료된다. 유입되는 지하수의 기원으로서 높은 Cl 함량으로 미루어 해수성분을 고려할 수 있으나, 해수와는 달리 Na보다는 Ca가 높은 함량을 보이고 있어 현재로서는 이를 명확하게 해석할 수 없다. 이를 위해서는 장기적인 모니터링과 더불어 동위원소 등 추가적인 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

한편, K-1공 주변에 위치한 양수정(AW-2)의 경우, EL.-80m에서 채취한 지하수는 높은 pH(11.0)와 특이한 화학조성을 보이고 있다(Fig. 10). 높은 pH는 양수정 시추시 주입된 그라우팅재의 영향을 받은 것으로 추측되며, 높은 Na와 Cl 함량으로는 해수침투 가능성을 보여주나, 이 역시 추가적인 연구가 필요하다.

현재까지 자료에 의하면 분석자료는 해수침투와 인위적인 행위, 물-암석 상호반응 등의 복합적 과정으로 형성된 것으로 사료된다. 이를 위하여 해수침투 가능성, 공동건설시 그라우팅 영향, 단열대의 물-암석 상호반응 과정 등에 대한 지속적인 정밀 분석이 요구된다. 그리고 현재 진행 중인 동위원소 분석 결과에 의하여 지하수화학 특성에 대한 종합 분석이 이루어질 예정이다.

## 5. 결 론

지하공동의 건설에 의한 지하수체계의 변화를 장기적으로 감시하고, 계측결과를 이용하여 수치모델에서 계산된 수두분포 및 입력자료 중의 하나인 함양률의 교정자료로 활용하기 위하여 시험적으로 2개 시추공에 대하여 MP 시스템을 설치하여 모니터링을 수행하였다. 현재까지의 계측결과 지하수압의 경우, 상부 지하수체계는 강수에 민감하게 반응하며, 하부 지하수는 강수에 대하여 민감하지 않으며, 시간에 따른 지하수압 감소가 진행되었다. 따라서, 하부 암반은 상부와 다른 수리특성을 갖고 있는 것으로 해석된다.

지하수질의 경우, K-1 공의 하부 지하수는 전기전도도가 높게 측정되며, 증가된 주요 이온들은 Na, Ca, SO<sub>4</sub>, Cl로 다른 구간에 비해 상대적으로 높게 나타난다. 전체적으로 하부 지하수 중 단열대에서 수질이 뚜렷하게 구분되어, 단열대가 지하수유동에 중요한 인자인 것

을 확인할 수 있었다.

향후 공동 건설단계까지 구간별 지하수압 계측과 수질분석이 정기적으로 진행될 예정이며, 금년에는 MP 시스템을 이용하여 구간별 정밀 수리시험을 실시할 계획이다.

## 참 고 문 헌

- 김경수, 이은용, 김천수, 1999a, 여수반도 북동부지역의 선상구조와 단열계 분포특성, 대한지질공학회지, 제9권 제1호, p.31-43.
- 김경수, 이은용, 김천수, 배대석, 정지곤, 1999b, 여수반도 북동부지역의 지표 및 지하 단열계 분포특성, 1999년도 대한지하수환경학회·한국토양환경학회 춘계공동학술발표회논문집, p.16-17.
- 김경수, 2000, 수치모델링을 이용한 지하원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구, 충남대학교대학원 박사학위논문, 214p.
- 조성일, 송무영, 김경수, 이은용, 1999, 여수 북부지역 화산암의 단열특성과 수리전도도와의 관계, 대한지질공학회지, 제9권 제3호, p.227-241.
- 한국원자력연구소, 2000, 저준위방사물처분장 수리모델 구성기법 연구(Ⅱ), 원자력환경기술원, 318p.
- Horner, D. R., 1951, Pressure buildup in wells, Proc. 3rd World Pet., The Hague, Sec. II, p.503-523.
- www.westbay.com, 2000, Worldwide web site of the Westbay Instruments Inc.
- Ziegler, T., 1976, Determination of rock mass permeability, US Army Engineers Waterways Experiments Station, Technical Report S-76-2, Vicksburg, Mississippi, 88p.

---

김경수 · 고용권 · 김천수 · 배대석

한국원자력연구소 심부지질환경특성연구분야

대전광역시 유성구 덕진동 150 (우: 305-353)

TEL : (042) 868-2365, 8159, 2063, 2030

FAX : (042) 868-2063

e-mail : nkskim1@kaeri.re.kr, nykkoh@kaeri.re.kr, ncskim1@kaeri.re.kr, ndsbae@kaeri.re.kr

조성일

충남대학교 자연과학대학 지질학과

대전광역시 유성구 궁동 220 (우: 305-764)

TEL : (042) 868-2063

이은용

원자력환경기술원

대전광역시 유성구 덕진동 150 (우: 305-353)

TEL : (042) 870-0363



Table 1. Borehole specifications.

Borehole No.	K-1	K-2	K-3	K-4
Elevation(m)	61	59	57	50
Depth(GL.-m)	194.6	69.06	50.08	90.85
Orientation	vertical			138/80
Water Table	2.2	0.	7.7	14
Bit Size	NX			
Casing Depth(GL.-m)	2.12	2.14	1.0	6.56

Table 2. Hydraulic conductivities based on the steady-state and transient flow.

	K(steady-state)	K(transient)
Logarithmic Mean $\pm$ SD(m/sec)	$-7.86 \pm 0.93$	$-7.97 \pm 0.66$
Minimum(m/sec)	$6.12 \times 10^{-10}$	$6.28 \times 10^{-10}$
$e^{\text{Mean}}$ (m/sec)	$1.372 \times 10^{-8}$	$1.058 \times 10^{-8}$
Maximum(m/sec)	$2.20 \times 10^{-6}$	$2.53 \times 10^{-6}$

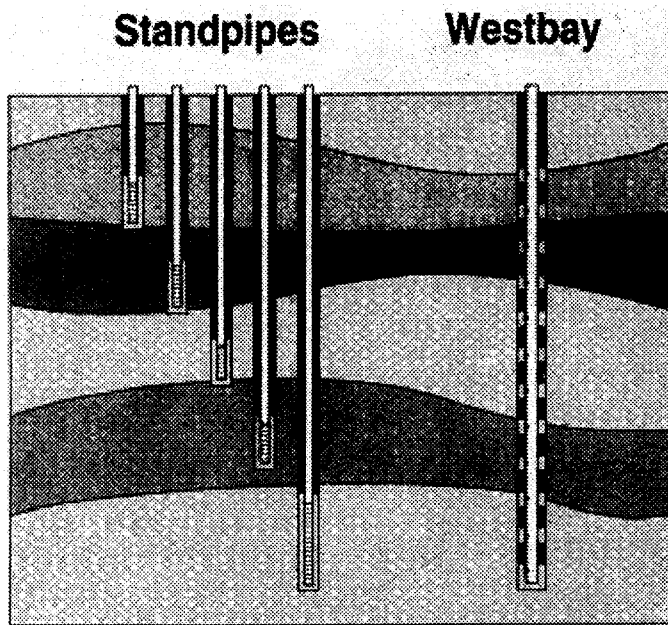


Fig. 1. Comparison of multi-level methods.

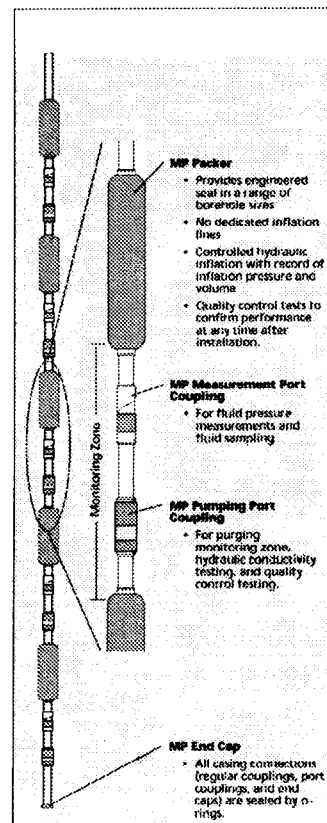


Fig. 2. Schematic view of multi-level well completions.

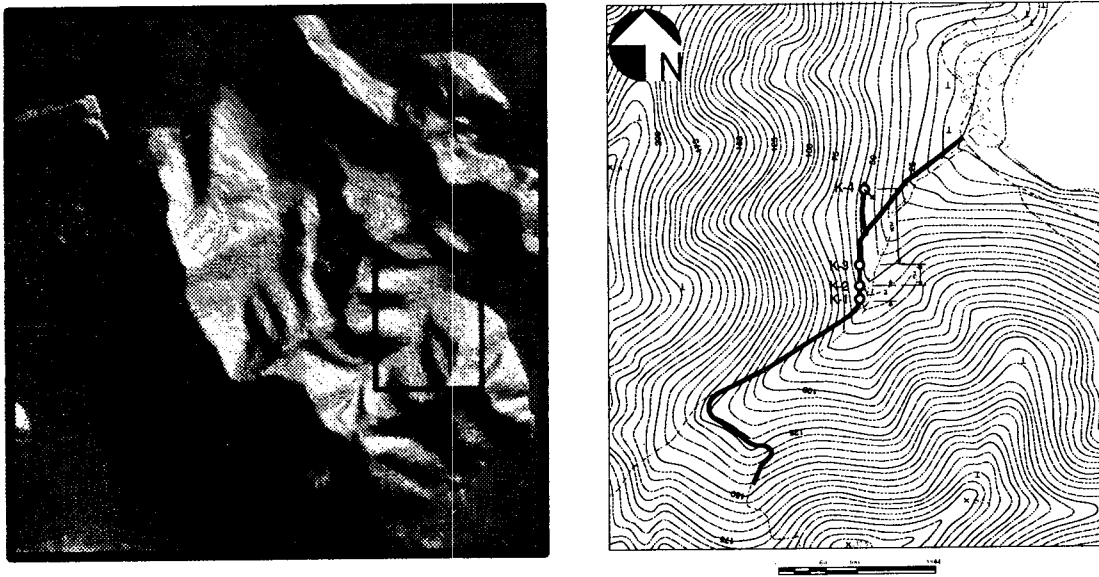


Fig. 3. Topography and borehole location in study site.

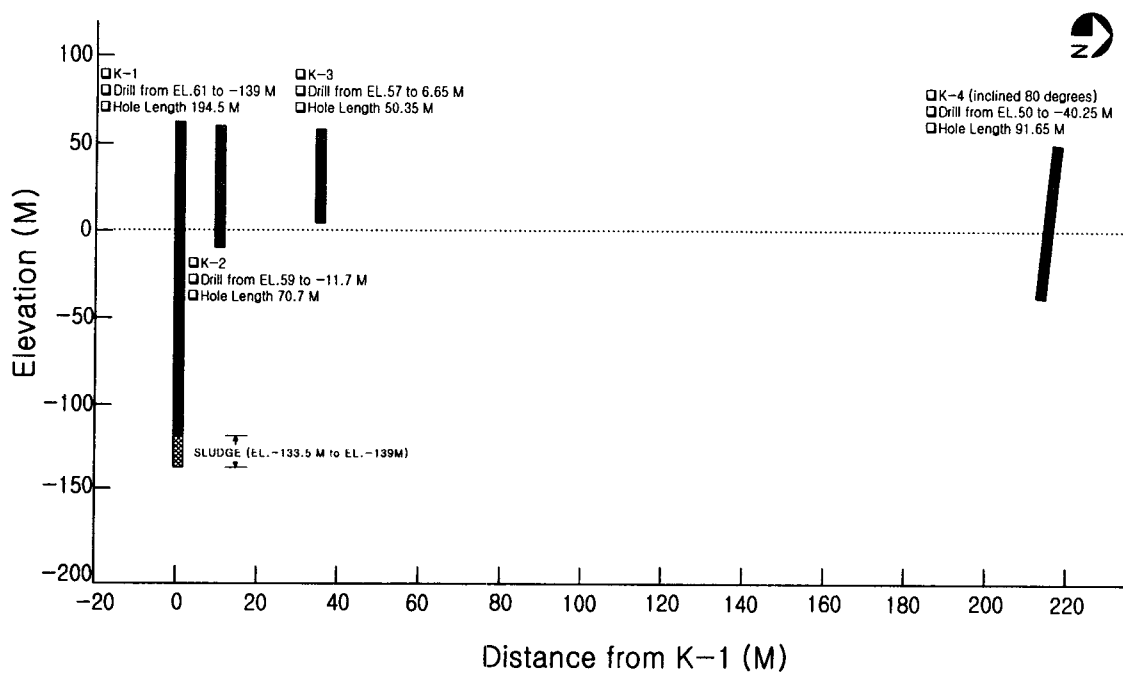


Fig. 4. Section view of the boreholes.

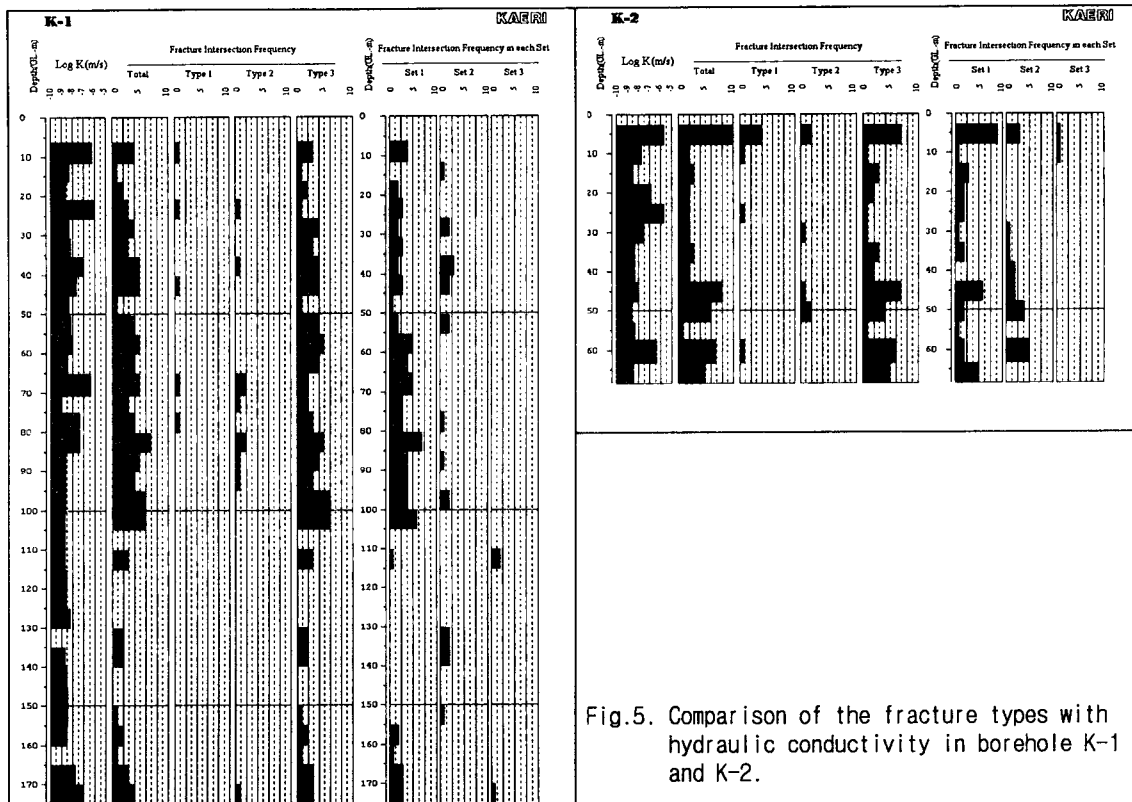
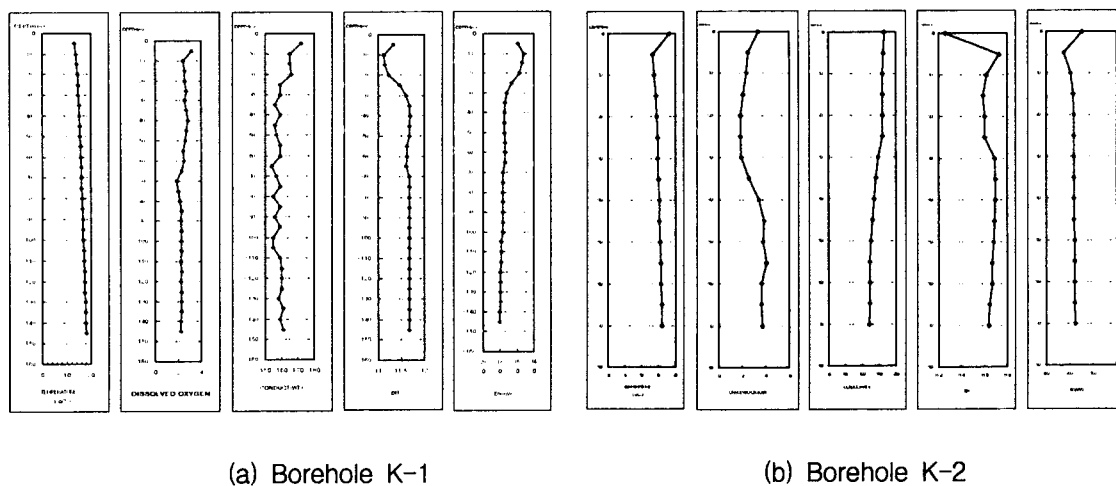


Fig. 5. Comparison of the fracture types with hydraulic conductivity in borehole K-1 and K-2.



(a) Borehole K-1

(b) Borehole K-2

Fig. 6. Groundwater quality profiles in borehole K-1 and K-2 before MP system installation.

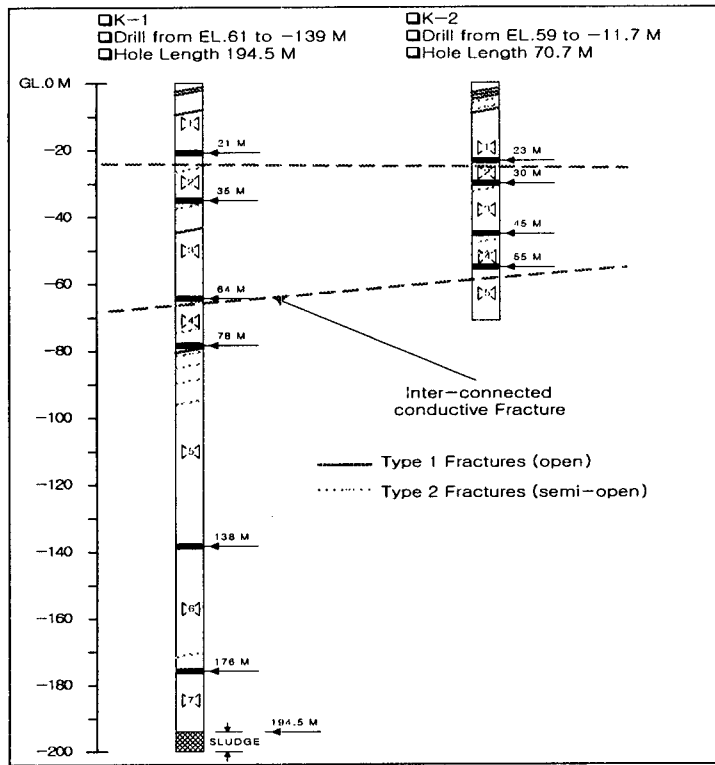
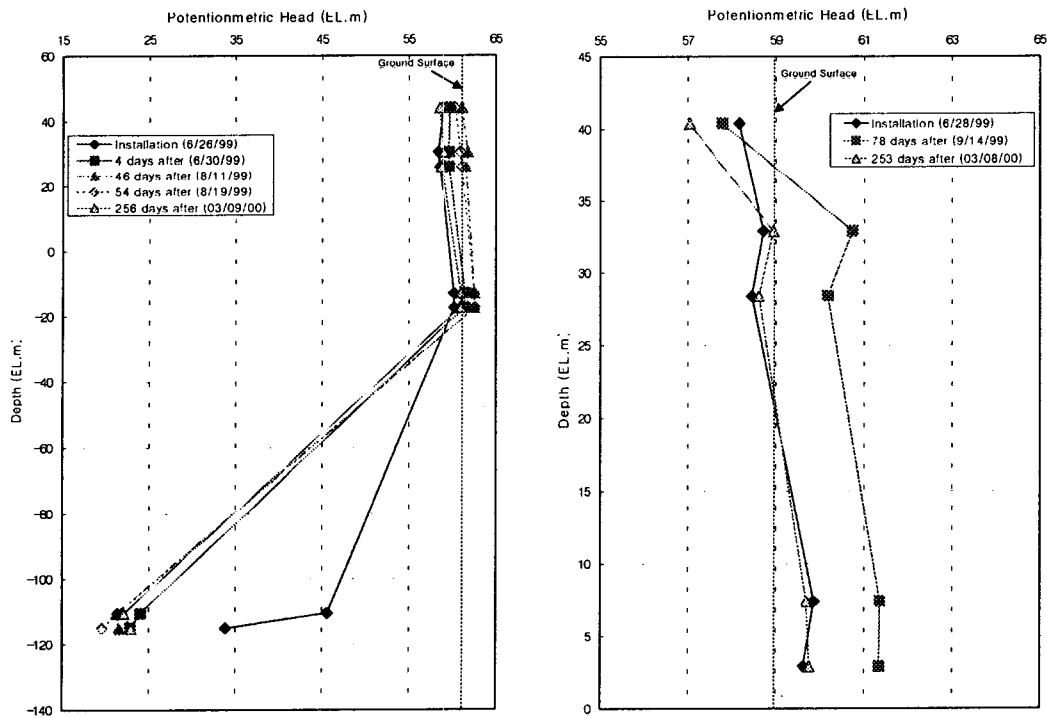


Fig. 7. Inflatable packer intervals in borehole K-1 and K-2.



(a) Borehole K-1

(b) Borehole K-2

Fig. 8. Potentiometric head profiles in borehole K-1 and K-2.

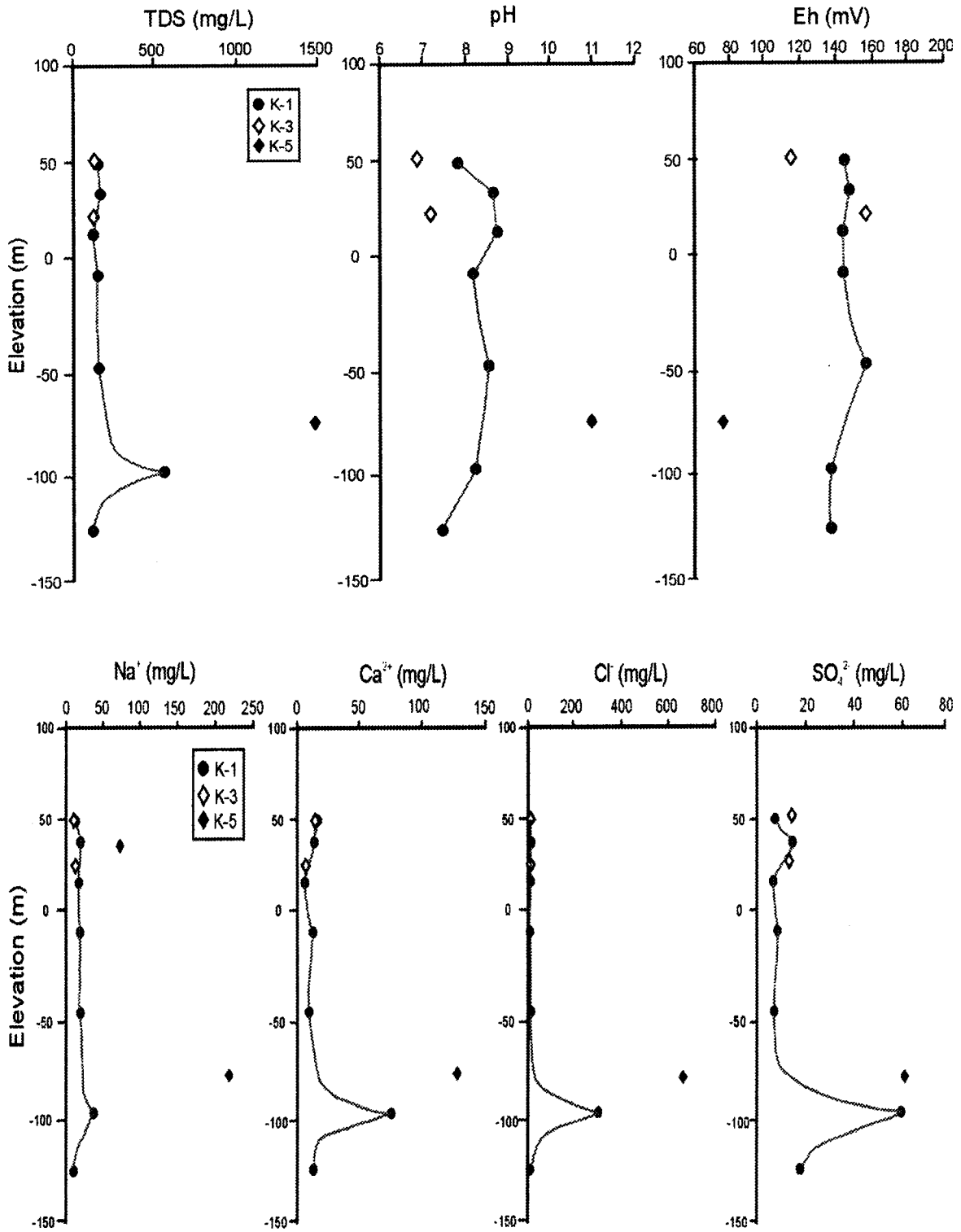


Fig. 9. Groundwater chemical components with depth (◆=AW-2)

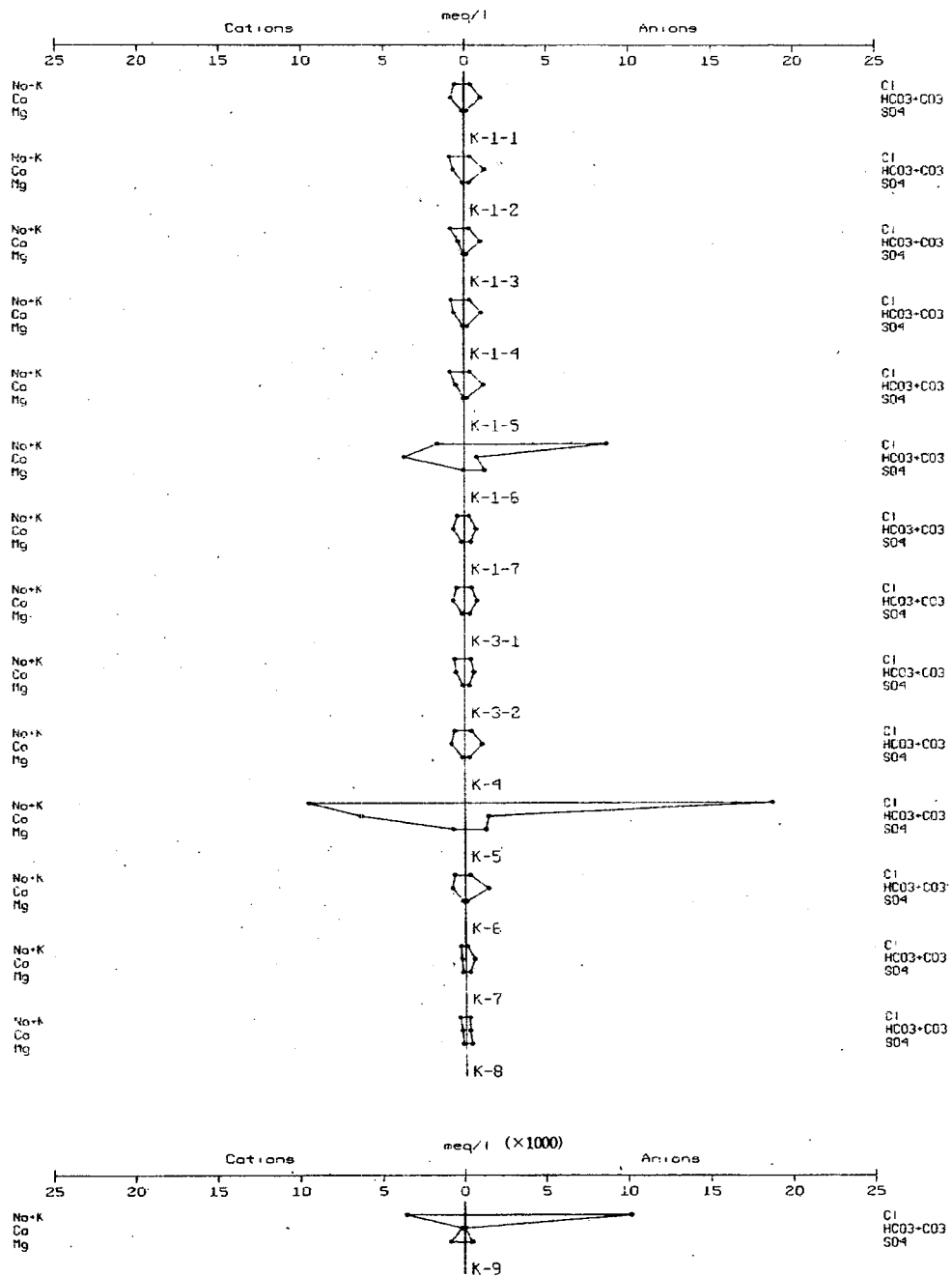


Fig. 10. Stiff diagram for groundwater samples in the observation holes  
 (K-5=AW-2, K-6=AO-7, K-7=AO-5 surface water, K-8=MP surface water,  
 K-9=seawater)