

결정질암체에서 수리전도도에 대한 규모종속에 관한 분석 Analysis on Scale Effects to Hydraulic Conductivities in Crystalline Rock

박동극(Park, Dong Keuk)

한국원자력안전기술원

요약/Abstract

파쇄대를 포함하고 있는 결정질암체의 수리전도도(K)는 현장시험조사에 의해서 기초자료가 얻어지고 해석학적 방법에 의해서 규명된다. 이러한 현장조사 방법 및 절차는 조사목적 및 현장여건 그리고 결정암체의 특성에 따라서 결정된다. 파쇄대나 절리등의 불연속면을 포함하고 있는 결정질암체에서의 수리전도도는 주로 패커시험(Packer test)과 스러그시험(Slug test)으로 결정한다.

동일 시험공에서 패커시험의 시험간격을 좁게 할수록 정상류 해석법에 의한 수리전도도가 커지는 경향을 나타내며 Hvorslev의 이론에 부합되는 증거로서, 동일 시험공내에서도 주입구간의 간격에 따라서 수리전도도는 규모종속(scale effect)을 나타낸다고 할 수 있다. 또한 시험순서에 따라서도 수리전도도의 변화를 나타낸다고 할 수 있다. 수리지질학적으로 주요 불연속면이 포함된 패커시험구간에서 수리전도도의 수직분포를 볼때, 패커시험간격을 달리한다고 하더라도, 이러한 불연속면을 포함한 구간에서는 수리전도도의 상대적인 이상대를 나타낸다. 스러그시험과 패커시험으로 구한 시험정의 전구간 평균수리전도도를 비교해 볼때, 일반적으로 상당히 부합되는 값을 나타낸다.

Hydrogeologic characteristics of crystalline rock including discontinuities is defined by the hydraulic data from the in situ test and by analytical method. Methodology and procedure of the in situ test are used in accordance with test purpose, site condition and characteristics of host rock. Hydraulic conductivities in crystalline rock including discontinuities such as fractured zone and joint, are defined by packer test and slug test.

The results indicate Hvorslev's theory of ground water flow in NX borehole, that the shorter

of test interval is, the higher hydraulic conductivity is. This is an indication of the fact that the hydraulic measured were governed by scale effect of test interval, even at same borehole. According to the result of packer tests in two boreholes, it is understood that hydraulic conductivities show variations according to the effect of as order of tests. In the comparison of hydraulic conductivities from both of open borehole tests, the results are relatively well correlated in values. The hydraulic conductivity in the test intervals including hydrogeologically significant discontinuity shows relatively higher value of hydraulic conductivity in vertical distribution of full depth.

서 언

방사성 폐기물 처분장에 의한 자연방벽의 역할은 방사성 핵종이 지층내에서 자연계로와의 누출을 장시간 저지시키기 위해서, 방사성 핵종의 붕괴소멸시간을 충분히 확보할 수 있도록 하는 것이며 이것은 방사성 핵종을 운반하는 지하수의 흐름이 가장 낮은, 즉 투수율이 낮은 암체(Host Rock)를 선정하는 것이다. 이러한 열극암체에서 지하수의 흐름과 오염물질의 확산은 암체의 1차 공극률이 낮고, 서로 연결성이 미약하기 때문에 2차 공극인 단층대 및 절리등, 주로 불연속면인 파쇄대에 의해 지배되고 있다. 대부분의 모암(Host Rock)들은 지각변동에 의하여 많은 불연속면을 갖고 있으며, 지하수의 흐름등 수리지질학적 특성은 2차 공극인 불연속면에 의하여 지배를 받게 된다. 따라서 열극암체의 불연속면에 대한 조사, 분석과 수리지질학적 현장시험을 수행하고 불연속면과 수리지질특성과의 상관관계를 규명하여 열극암체의 수리지질학적 특성을 규명하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이러한 분석은 수리지질학적 현장 시험 결과의 신뢰도에서도 절대적으로 좌우될 수 있음을 인지하지 아니할 수 없다.

본 연구는 이러한 수리지질학적 현장시험의

방법 및 절차 그리고 기초자료의 통계적 분석등이 열극암체의 수리지질 특성규명과 상관관계에 어떻게 영향을 미치는지를 현장 시험을 통하여 규명하고 시험에 대한 신뢰도를 제고할 수 있도록 하기 위함이다. 국내에 분포하고 있는 결정질암류 중에서 경기편마암 복합체가 분포하는 지역중 1개소를 선정하여 2개의 시험정을 설치하고, 현장수리시험을 통해 2차 공극에 대한 모암의 수리지질특성을 정량화 하였다.

현장수리특성시험 결과에 대한 대표값의 신뢰도 분석을 위하여 조사방법 및 절차를 다양하게 하여 수행하고 그 결과의 해석을 위한 비교 분석방법도 다양하게 하므로써 현장조사 방법 및 절차와 현장조사자료의 해석 방법이 수리특성에 미치는 영향 등을 분석하였다.

패커시험(Packer Test)에 의한 수리특성

현장에서 수리전도도를 구하는 시험방법 및 절차는 여러가지가 있으나 현장 여건에 따라 결정한다. 본 시험에서는 전구간 수리전도도를 구하기 위하여 단일패커시험(single packer test)을 수행하였고 구간별 수리전도

도를 구하기 위하여는 이중패커시험(double packer test)를 실시하였다. 전구간 시험과 구간별 시험에 대한 패커시험장치의 단면도는 그림-1과 같으며, 시험절차 및 방법은 다음과 같다. 단일 패커시험의 절차는 먼저 시험공 상부 5m 구간에 단일패커를 설치하여 시험공의 전구간에 대한 수리전도도를 구하였고, 이중패커시험의 절차는 시험정내에 2m와 6m간격으로 상하 2 개의 패커를 설치하여 각각의 구간별 수리전도도를 구하였다. 이때 주입수의 압력은 1,3,5,7,5,3,1kg/cm² 또는 2,4,6, 8,6,4,2 kg/cm²의 7단계로 증감 조정했으며, 주입수내에 실트나 점토등과 같은 세립질 이물질이 함유되어 파쇄구간내에 공매현상을

유발시키지 않도록 청수를 사용하고, 각 주입압력별 시간은 5분간으로 주입된 수량을 측정하였다. 구간별 수리전도도를 구하는데 이용된 지배식은 아래(1)식의 Thiem 평형방정식에서 유도된 것을 이용하였고, 여기서 주입구간(L)은 시험공 직경(2r)의 5 배 이상으로 하였다.(Attenwell, et al.1980)

$$K = \frac{Q}{2\pi LH} \ln\left(\frac{L}{r}\right) \dots\dots\dots (1)$$

- K : 구간별 수리전도도(cm/sec)
- L : 주입구간(cm)
- H : 압력수두(압력 + 자연수위 + gage높이 : cm)
- r : 시험공 반경(cm)
- Q : 주입율(cm³/sec)

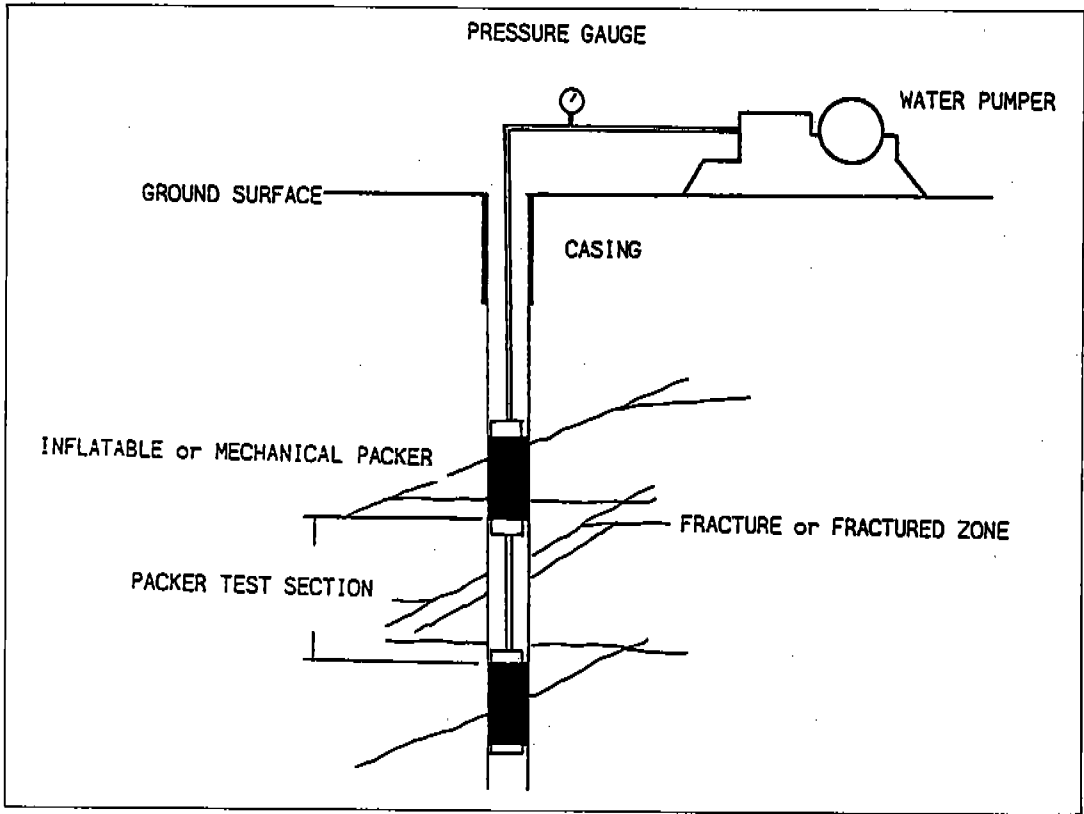


Fig.1 Schematic of downhole set-up testing using the double-packer system.

표-1(a,b)는 AW-1공 및 AW-2공에서 시험한 결과치를 근거로 각 공에 대한 시험 구간별 수리전도도를 나타낸 것이며, 또한 각각에 대한 투수량계수(T)도 구하여 함께 비교하였다.

AW-2 시험공에서 2m 간격으로 시험한 결과는 4m부터 6m까지 구간에서 최고치인 4.37×10^{-4} cm/sec를 나타내며, 44m부터 46m까지 구간에서 최소치인 1.68×10^{-5} cm/sec를 나타낸다. 6m 간격으로 시험한 결과는 2m부

Table 1(a). Packer test sheet for borehole of AW-2.

Depth(m)	2m Interval		6m Interval		Full Distance		T' / $\sum T$ (=K'/K ave.)	
	K	T	K ave.	K'	T'	K''		T''
0.3-2.0	4.75	9.50						
2.0-4.0	2.94	5.88						
4.0-6.0	43.68	87.36	16.46	10.08	0.48	2.12	95.40	
6.0-8.0	2.76	5.52						
8.0-10.0	3.79	7.58						
10.0-12.0	4.85	9.70	3.94	1.89	11.34			
12.0-14.0	3.17	6.34						
14.0-16.0	3.56	7.12						
16.0-18.0	3.17	6.34	3.22	2.21	13.26			
18.0-20.0	2.93	5.86						
20.0-22.0	3.98	5.96						
22.0-24.0	2.72	5.44	2.98	2.26	13.56			
24.0-26.0	3.24	6.48						
26.0-28.0	3.79	7.58						
28.0-30.0	4.04	8.08	3.84	1.45	8.70			
30.0-32.0	3.67	7.34						
32.0-34.0	4.49	8.98						
34.0-36.0	4.22	8.44	4.14	2.29	13.74			
36.0-38.0	3.72	7.44						
38.0-40.0	3.81	7.62						
40.0-42.0	2.76	5.52	2.85	1.85	11.04			
42.0-44.0	1.98	3.96						
44.0-46.0	1.68	3.36						
46.0-48.0	2.05	4.10	2.03	1.56	9.36			
48.0-50.0	2.36	4.72						
Total Ave.	4.93	9.86	4.93	2.95	17.69	2.12	95.40	0.61

UNITS : K(K', K'') = 10^{-5} cm/sec

T(T', T'') = 10^{-5} cm/sec

* K Ave. : arithmetic average

Table 1(b). Packer test sheet for borehole of AW-1.

Depth(m)	Cont.	2m Interval		6m Interval		Full Distance		T' / ΣT (=K'/K ave.)			
		K	T	K ave.	K'	T'	K''		T''		
1.5-2.0											
2.0-4.0		176.00	352.00	69.82	39.45	236.70	4.56	205.20	0.56		
4.0-6.0		30.00	60.00								
6.0-8.0		3.46	6.92								
8.0-10.0		2.49	4.98	1.83	1.94	11.64			1.06		
10.0-12.0		1.71	3.42								
12.0-14.0		1.29	2.58								
14.0-16.0		2.90	5.80	2.43	15.53	93.18			6.40		
16.0-18.0		2.44	4.88								
18.0-20.0		1.94	3.88								
20.0-22.0		2.87	5.74	1.91	5.81	34.86			3.04		
22.0-24.0		1.59	3.18								
24.0-26.0		1.27	2.54								
26.0-28.0		1.21	2.42	2.59	7.89	47.34			3.05		
28.0-30.0		3.75	7.50								
30.0-32.0		2.81	5.62								
32.0-34.0		2.00	4.00	3.79	14.77	88.62			3.89		
34.0-36.0		4.85	9.70								
36.0-38.0		4.53	9.06								
38.0-40.0		51.70	103.40	47.03	20.04	120.24			0.43		
40.0-42.0		41.10	82.20								
42.0-44.0		48.30	96.70								
44.0-46.0		59.20	118.40	22.54	5.94	35.64			0.26		
46.0-48.0		3.67	7.34								
48.0-50.0		4.76	9.52								
Total Ave.		18.99	37.98	18.99	13.92	58.87			4.56	205.20	2.33

UNITS : K(K', K'')=10⁻⁵cm/sec

T(T', T'')=10⁻⁵cm/sec

* K Ave. : arithmetic average

터 8m까지 의 구간에서 최고치인 1.01×10⁻⁴ cm/sec를 나타내며, 26m부터 32m까지 구간에서 최소치인 1.45×10⁻⁵cm/sec를 나타낸다. 전구간에 대한 수리전도도는 2.12×10⁻⁵cm/sec를 나타낸다. 2 m간격으로 시험한 수리전

도도의 산술평균은 4.93×10⁻⁵cm/sec이고 6m 간격으로 시험한 수리전도도의 산술평균은 2.95×10⁻⁵cm/sec로써 전 구간 수리시험결과인 2.12×10⁻⁵cm/sec와 대비 된다.

AW-1 시험공에서 2m간격으로 시험한 결

과는 2m부터 4m까지 구간에서 최고치인 $1.76 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 를 나타내며, 26m부터 28m까지 구간에서 최소치인 $1.21 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 를 나타낸다. 그러나 12m부터 14m구간 및 24m부터 26m 구간에서도 상대적으로 낮은 값이다. 6m간격으로 시험한 결과는 2m부터 8m까지 구간에서 최고치인 $3.95 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 를 나타내며, 8m부터 14m까지 구간에서 최소치인 $1.94 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 를 나타낸다. 전 구간에 대한 수리전도도는 $4.56 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 를 나타낸다. 2m간격으로 시험한 수리전도도의 산술평균은 $1.90 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 이고 6m간격으로 시험한 수리전도도의 산술평균은 $1.39 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 로써 전 구간의 수리전도도인 $4.56 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 와 대비 된다.

스러그시험(Slug Test)에 의한 수리특성

스러그 시험방법은 그림-2와 같이, 시추공에서 일정 수량을 순간적으로 제거하거나 주입하여 그결과로 일어나는 수위의 회복및 강하에 따른 전구간에 대한 수리전도도를 구하는 것이다. 패커시험을 실시한지 약 3개월이 지난후에, 2 개 시험공에 대해서 자유대수층에 설치한 완전 관통공으로 가정하고 나공구간 주위의 수리전도도를 구하기 위해 개발된 시험방법인 Bouwer-Rice법을 이용하여 스러그시험을 실시하였다. 본 시험방법은 상승법과 하강법으로써, 체적을 알고 있는 부표(dummy)를 시험공내에 삽입하고 이때

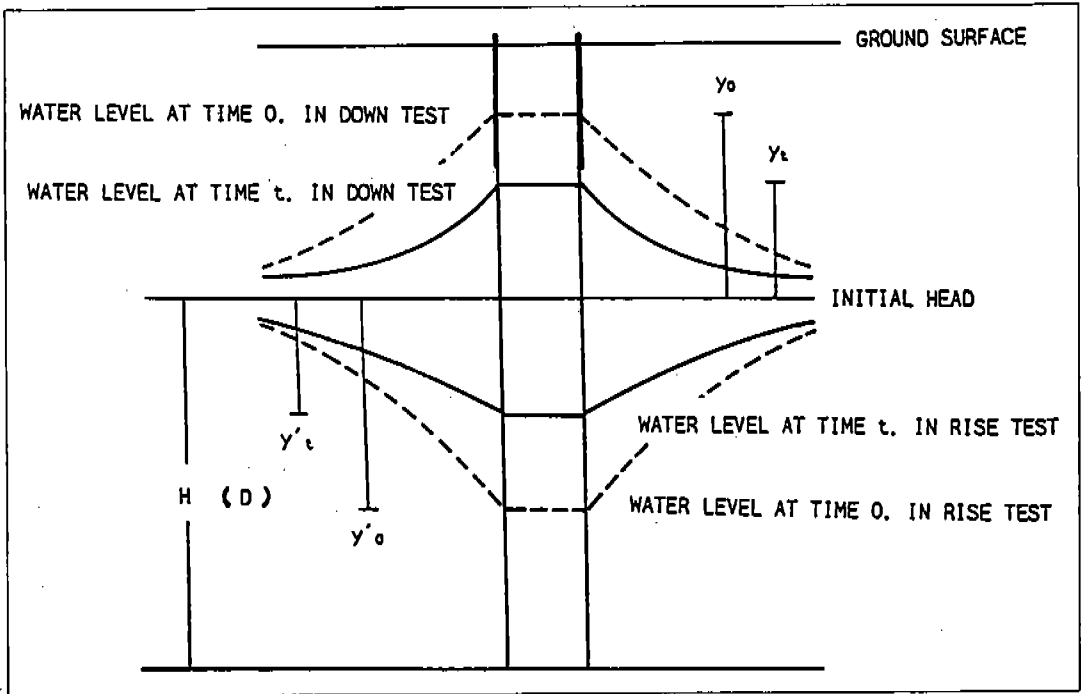


Fig. 2 Schematic of Groundwater level's changes in Down and Rise Slug Test Systems.

상승 또는 하강된 수위의 강하율을 경과시간별로 측정하여 Thiem의 지배식인 다음의 (2)식으로 구한다(Bouwer & Rice, 1979).

$$K = \frac{r_c^2 \ln(Re/r_w^2)}{2L} \cdot \left(\frac{1}{t}\right) \ln \frac{y_0}{y_t} \dots\dots (2)$$

- r_c^2 : casing의 반경(0.025 m)
- r_w^2 : 시추공의 반경(0.025 m)
- L: 나공구간
- t: 시험시간
- y_0 : dummy를 공내에 설치했을시 초기상승 및 하강수위
- y_t : 안정수위
- Re: 효율반경

여기서 $\ln \frac{Re}{r_w}$ 는 시험공설치에 따른 기하학적인 형태에 따라 변하는 값으로써, 완전 관통공(D=H)인 경우;

$$\ln \frac{Re}{r_w} = \left(\frac{1.1}{\ln(H/r_w)} + \frac{C}{L/r_w}\right)^{-1} \dots\dots (3)$$

- D: 지하수위 함수구간(m)
- H: 지하수위부터 시험공의 최저면까지의 거리(m)

(3)식에서 C는 시험공과 대수층의 기하학적 형태에 따른 상수이다. (2)식에서 구한 수리전도도(K)는 시험공주위 효율반경(Re)이내에 분포된 열극암체의 대표치이다.

표-2(a,b,c,d)는 AW-1 및 AW-2 시험공에서 실시한 스러그시험 결과치이며 상기 시험자료를 전산코드화한 Thiem식을 이용하여 그림-3(a,b,c,d)와 같이 시간-수위변화곡선도를 나타내고, 이에 근거하여 구한 AW-1 및 AW-2 시험공의 평균수리전도도는 표-3과 같다.

표-3에서 AW-1 시험공의 상승법에 의한 전구간 수리전도도는 $3.17 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 이며,

특히 AW-1 시험공에서의 하강법은 짧은 시간내에 안정수위가 되어 더 이상의 시험은 할 수 없었으며, 해석결과, 전구간의 수리전도도는 $3.17 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로써 상승법과 큰 차이를 보이지 않는다. 또한 AW-2, 시험공의 전구간 수리전도도는 $3 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로써 상승법과 하강법에 의한 해석결과는 차이가

Table 2(a). Slug test(rise) for hole No.AW-1.

RISE		
Elapsed time(min.)	Water level below MP	Displacement(m)
0.5	4.76	0.18
0.5	4.76	0.18
0.55	4.72	0.14
1	4.70	0.12
0.25	4.69	0.11
1.5	4.68	0.10
2	4.67	0.09
3	4.67	0.09
6	4.65	0.08
8	4.645	0.065
10	4.64	0.06
25	4.63	0.05
40	4.63	0.05

S.W.L : 4.43 below ground level

MP : 0.15 above ground level

MP : measuring point

Table 2(b). Slug test(down) for hole No.AW-1.

DOWN		
Elapsed time(min.)	Water level below MP	Displacement(m)
0	4.45	0
0.5	4.50	0.05
1	4.58	0.08
2	4.58	0
3	4.58	0

S.W.L : 4.43 below ground level

MP : 0.15 above ground level

Table 2(c). Slug test(rise) for hole No.AW-2.

RISE		
Elapsed time(min.)	Water level below MP	Displacement(m)
0.5	4.76	0.18
0.25	5.04	0.14
0.75	5.98	0.10
1	4.98	0.08
1.5	4.97	0.07
2	4.96	0.06
3	4.95	0.05
4	4.94	0.04
5	4.93	0.03
7	4.92	0.02
10	4.91	0.01
12	4.905	0.005
15	4.905	0.005
20	4.9	0
25	4.9	0

S.W.L : 4.84 below ground level
 MP : 0.06 above ground level

Table 2(d). Slug test(down) for hole No.AW-2.

DOWN		
Elapsed time(min.)	Water level below MP	Displacement(m)
0	4.7	0.2
0.5	4.75	0.15
1	4.79	0.11
2	4.82	0.08
3	4.85	0.07
4	4.86	0.04
6	4.87	0.03
8	4.88	0.02
10	4.89	0.01
13	4.90	0
16	4.90	0

S.W.L : 4.84 below ground level
 MP : 0.06 above ground level

없다. 따라서 4.6m 상거한 2 개 시험정의 수리성은 거의 동일하게 분석되었다고 할 수 있다.

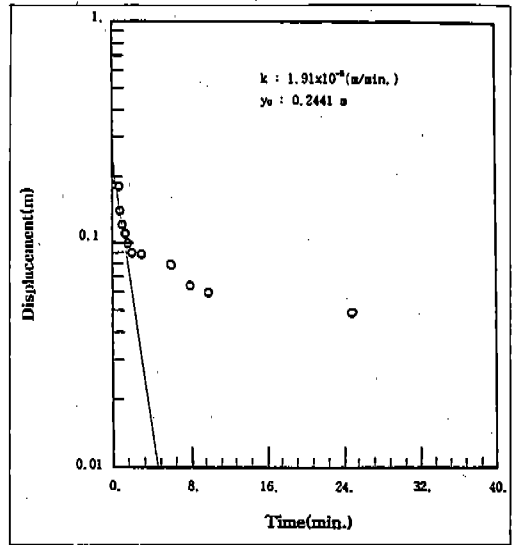


Fig. 3(a) The relation curves of time-water level change in rising slug test of AW-1.

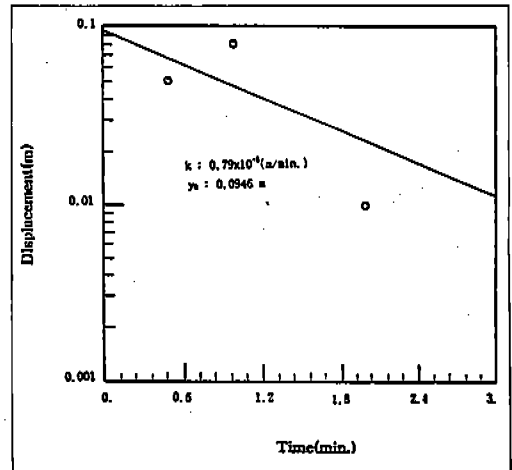


Fig. 3(b) The relation curves of time-water level change in down slug test of AW-1.

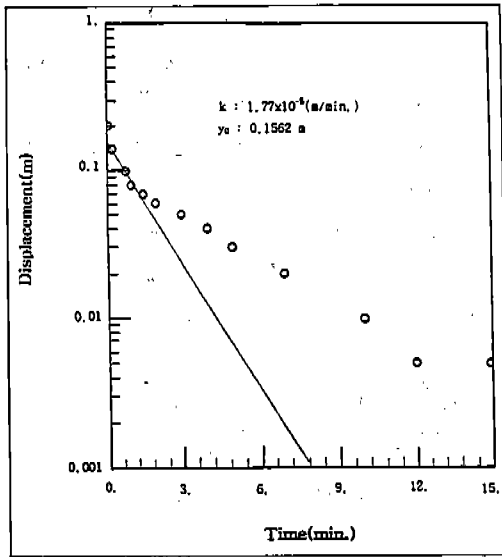


Fig. 3(c) The relation curves of time-water level change in rising slug test of AW-2.

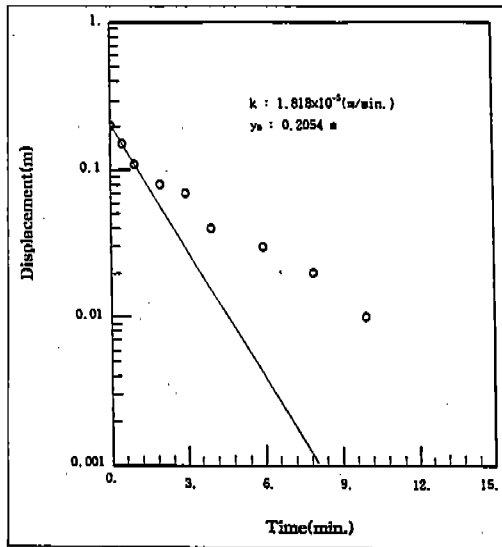


Fig. 3(d) The relation curves of time-water level change in down slug test of AW-2.

Table 3. Hydraulic conductivities of each borehole by slug test.

Hole No.	Methods	Depth	Initial Head, s Change.	Rw	Rc	K
						cm/sec
AW-1	RISE	45.57m	0.24m	0.038	0.025	3.17×10^{-5}
	DOWN	"	0.05m	0.038	0.025	4.58×10^{-5}
AW-2	RISE	45.16m	0.20m	0.038	0.025	3.03×10^{-5}
	DOWN	"	0.15m	0.038	0.025	2.95×10^{-5}

불연속면의 수직분포와 수리전도도와와의 관계

그림-4(a,b)는 불연속면의 수직분포와 수리전도도와와의 관계를 나타낸 것이다. AW-2 및 AW-1시험공을 심도에 따른 시험구간별로 대비해보면, 2m간격의 시험결과에서 AW-2공의 심도 10m미만의 풍화대(4m에서 6m)에서 높은 값을 나타내는 것을 제외하고는 불연속면에 의한 수리전도도 정도의 차이는 무시할 정도이다. AW-1시험공에서도 AW-2시험공에서와 마찬가지로 풍화대(2m에서 6m)에서 높은 값을 나타내고 또한 4m에서 6m구간 및 38m에서 46m구간에서 상대적으로 매우 높은값을 나타내는 것을 제외하고는 정도의 차이를 무시할 정도이다. 따라서 AW-1 시험공에서의 2m간격 수리전도도값은 AW-2 시험공보다 10의 승수규모(Order of Magnitude)의 차이를 나타낸다.

6m간격의 시험결과에서 AW-2공의 풍화대를 포함하는 심도 10m미만에서 높은 값을 나타내는 것을 제외하고는 거의 일정한 값을 나타낸다. AW-1시험공에서는 AW-2 시험공과는 달리, 풍화대를 포함한 10m심도 구간에서 높은 값을 나타내고, 정도의 차이는

있지만 다른 구간에서도 이와 상응하는 높은 수리전도도값을 나타낸다. AW-2시험공 및 AW-1시험공에서의 6m간격 수리전도도값은 10의 승수규모(Order of Magnitude)의 차이를 나타내며 이는 두 공에서의 2m구간 수리전도도값에서 10의 승수규모(Order of Magnitude)의 차이를 나타내는 것과 대비되는 값이다. 전 구간 시험결과 AW-2 및 AW-1시험공에서의 수리전도도값은 같은 승수규모(Order of Magnitude)를 보여주고 있다. 2m간격으로 실시한 수리전도도의 최대치를 나타내는 구간은 4m부터 6m구간까지 이다. 또한 6m간격으로 실시한 수리전도도의 최대값을 나타내는 구간은 2m부터 8m까지이다. 2m간격으로 실시한 최대 수리전도도치를 나타내는 4m부터 6m구간을 포함하고 있다. 2m간격으로 실시한 수리전도도의 최소치를 나타내는 구간은 44m 부터 46m 구간까지 이다. 또한 6m 간격으로 실시한 수리전도도의 최대값을 나타내는 구간은 26m부터 32m까지의 구간과 44m부터 50m까지의 구간으로써, 2m 간격으로 실시한 최소 수리전도도치를 나타내는 44m부터 46m구간을 포함하고 있다.

어떤 특정구역의 불연속면이 포함된 2m간격에서 실시한 수리전도도의 상대적으로 높은 값은 그 구역을 포함하고 있는 6m간격에서 실시한 수리전도도값에서도 동일한 경향을 나타낸다고 할 수 있다. 그림-4(a, b)에서 두 시험공에서 이러한 결과를 불연속면의 수직 분포와 수리전도도와의 관계를 비교해 보면, 이러한 구역은 상대적으로 수리지질학적으로 상당히 의미 있는 불연속면이 발달되어 있다.

이러한 경향에 대해서 시험구간의 파쇄대의 특성과 연관지워 볼때, 표-4(a,b) 와 같이 최대값을 나타내는 2m부터 8m구간에서 최

대의 파쇄구간을 나타내고 RQD는 최소치를 나타낸다. 최소값을 나타내는 44m 부터 50m 구간는 비록 낮은 RQD를 나타내고 많은 열극을 보여 주지만 밀착되고 암반의 confining pressure가 작용한다고 본다면 결정질암체의 파쇄대의 역할과 수리전도도의 관계가 상당히 부합된다고 할 수 있다(Seeburger & Zoback, 1982)

동일 시험공에서 주입구간의 간격에 따른 규모종속영향 (Scale effect)

현장시험조건은 AW-2 시험공을 먼저 시추한후, 1 차로 전구간에 대한 주입시험을 실시하고 2,4,6,8,6,4,2kg/cm²의 주입압으로한 2 차 주입시험을 2m간격으로 이중패커(Double Packer)를 공내에 설치하면서 50m 전구간에 대해서 시험을 종료하였다. 다시 이중패커를 6m간격으로 공내에 설치하면서 50m 전구간에 대해서 시험을 실시하였다. 연후에 AW-1 시험공을 굴착하고, 1,3,5,7,5,3,1,kg/cm²의 주입압으로한 주입시험을 AW-2 시험공에서 실시한 순서에 따라서 실시하였다.

표-4에서와 같이, AW-2 시험공에서 2m간격으로 실시한 시험결과 구간별 평균 수리전도도는 4.93×10^{-5} cm/sec이고 6m구간별로 수행한 구간별 평균 수리전도도는 2.95×10^{-5} cm/sec이다. 또한 전구간으로 한 수리전도도는 2.12×10^{-5} cm/sec이다. 패커의 간격을 2m간격으로 설정하여 구한 평균 수리전도도가 6m간격으로 설정하여 구한 평균 수리전도도보다 크며 6m간격으로 설정하여 구한 평균 수리전도도가 전구간으로 설정하여 구한 평균 수리전도도보다 크다. 즉, 투수량계수로 비교

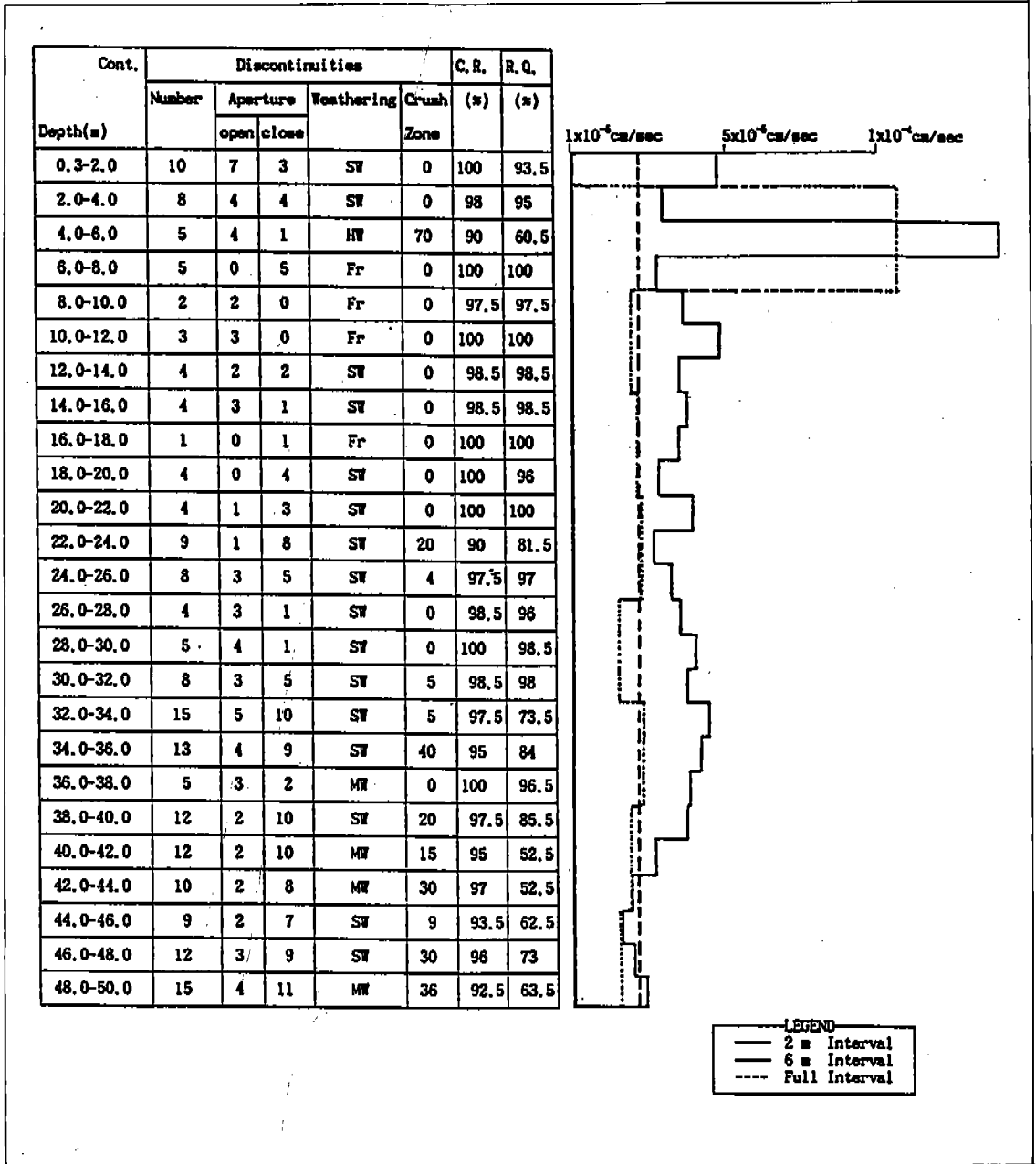


Fig. 4(a) Vertical Distribution of Hydraulic Conductivities for different test Intervals in AW-2 Borehole

Cont. Depth(m)	Discontinuities				C.R. Zone	C.R. (%)	R.Q.D (%)
	Number	Aperture		Weathering			
		open	close				
1.5-2.0	3	1	2	SW	0	100	80
2.0-4.0	13	7	6	HW	78	87.5	61
4.0-6.0	11	5	6	MW	83	67.5	31
6.0-8.0	4	2	2	SW	0	100	95.5
8.0-10.0	6	3	3	SW	0	100	97.5
10.0-12.0	10	2	8	SW	12	92.5	70.5
12.0-14.0	10	1	9	SW	6	95	90
14.0-16.0	9	5	4	MW	45	95	59.5
16.0-18.0	12	5	7	SW	0	100	93
18.0-20.0	12	0	12	MW	33	87.5	75.5
20.0-22.0	12	7	5	HW	10	95	80
22.0-24.0	6	4	2	SW	9	95	90
24.0-26.0	9	1	8	SW	4	97.5	92.5
26.0-28.0	17	3	14	SW	11	95	85
28.0-30.0	17	8	9	MW	19	97.5	51
30.0-32.0	14	4	10	SW	0	100	72.5
32.0-34.0	9	4	5	MW	46	80	76
34.0-36.0	20	8	12	MW	0	92.5	35
36.0-38.0	13	6	7	MW	55	95	64
38.0-40.0	13	7	6	MW	43	80	58.55
40.0-42.0	16	5	11	SW	8	95	72.5
42.0-44.0	13	5	8	HW	71	62.5	25.5
44.0-46.0	9	6	3	SW	18	93.5	85
46.0-48.0	10	2	8	SW	0	100	95
48.0-50.0	7	5	2	SW	0	100	100

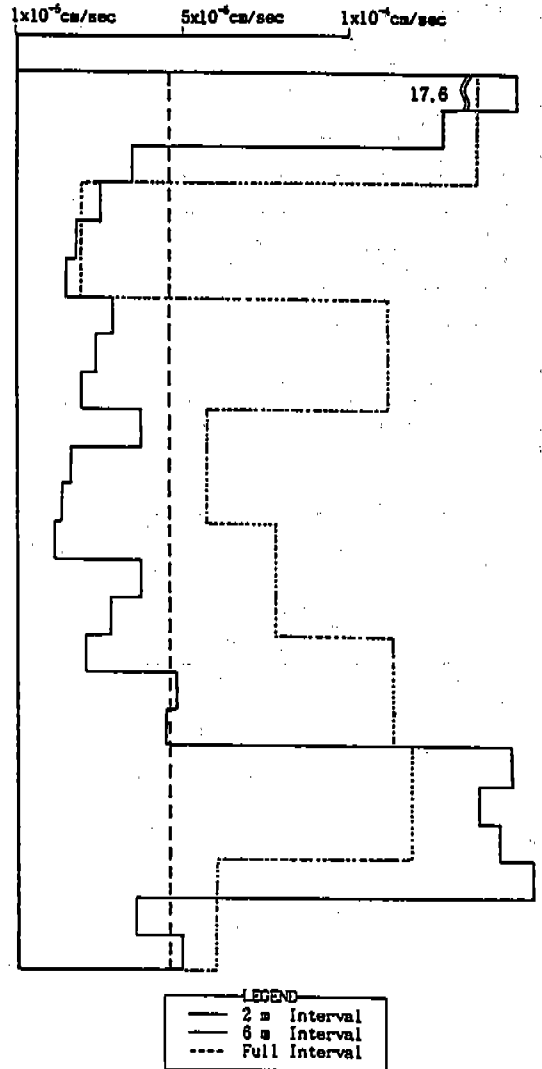


Fig. 4(b) Vertical Distribution of Hydraulic Conductivities for different test Intervals in AW-1 Borehole

Table 4. Hydraulic conductivities of 2m interval, 6m interval and full distance for each borehole and their relationship each other.

Hole No.	Intervals	K ave.(10^{-5} cm/s)	Relation
AW-2	2 m	4.93	-
	6 m	2.95	$T_6=0.60T_2$
	Full Dis.	2.12	$T_1=0.43T_2$
AW-1	2 m	18.99	-
	6 m	13.92	$T_6=0.73T_2$
	Full Dis.	4.56	$T_1=0.24T_2$

해 볼때, 6m간격으로 구한 구간별 평균 투수량계수는 2m간격으로 구한 투수량계수의 약 60%에 해당하며, 전구간 시험으로 구한 전구간 투수량계수(T_1)는 2m간격으로 실시하여 구한 평균 투수량계수(T_2)의 약 43%에 해당된다.

AW-1시험공에서 2m구간별 평균 수리전도도는 1.90×10^{-4} cm/sec이고 6m구간별 평균 수리전도도는 1.39×10^{-4} cm/sec이다. 또한 전구간으로 한 수리전도도는 4.56×10^{-5} cm/sec이다. 2m간격으로 설정하여 구한 평균 수리전도도가 6m간격으로 설정하여 구한 평균 수리전도도보다 크며 6m간격으로 설정하여 구한 평균 수리전도도가 전구간으로 설정하여 구한 평균 수리전도도보다 크다. 즉, 투수량계수로 비교해 볼때, 6m간격으로 구한 구간별 평균 투수량계수는 2m간격으로 구한 투수량계수의 약 73%에 해당하며, 전구간 시험으로 구한 전구간 투수량계수(T_1)는 2m간격으로 실시하여 구한 평균 투수량계수(T_2)의 약 24%에 해당된다.

각 시험공에서 2m와 6m간격으로 시행한 결과로부터 계산된 각 구간별 수리전도도는 패커시험구간의 간격이 좁을수록 수리전도도

와 평균투수량계수가 커진다(Grisak, et al., 1986). 이러한 사실은 NX시험공에서 수행된 주입시험분석에서, 방사호름이 시험공의 주변에서 일어나고 시험공으로 부터 $l/2$ 거리에서 시험영역에 관한 구면이 된다고 가정했을때, Hvorslev의 이론대로 수리전도도는 $\ln(l/r_0)$ 와 직접관계가 있으며 l/r_0 가 증가하면 수리전도도값은 감소하게 된다. 동일 시험공에서 이중패커의 간격은 좁게 설정하여 주입시험을 실시하면 구형흐름(spherical flow)에 따른 주입량이 간격을 넓게 설정하여 실시할 때보다 상대적으로 많이 발생한다(zeigler, 1976).

시험공의 공간거리에 따른 규모종속영향(Scale effect)

AW-2시험공을 먼저 시추한후, 주입시험을 실시하고 난 연후에 AW-2시험공으로부터 4.6m 상거한 거리에서 AW-1시험공을 시추하고, AW-2시험공에서의 주입시험을 실시한 순서에 따라서 주입시험을 실시하였다.

표-5에서와 같이, 먼저 시험을 착수한 AW-2시험공에서 2m간격, 6m간격 및 전구간으로 실시한 시험결과는 나중에 각 구간별로 실시한 AW-1시험공에서 구한 각각의 구간별 평균 수리전도도보다 모두 적게 나타난다. 즉, AW-2시험공을 먼저 굴착한후, AW-1시험공에 대해 패커시험을 실시하므로 인하여 4.6m 상거한 AW-1시험공 인근의 수리지질환경이 상당한 외적인 영향을 받아 그 불연속면이 교란되어 원래의 투수성이 증대되는 변화가 되었고, AW-1시험정의 평균수리전도도가 AW-2시험공의 평균수리전

도도 보다 약 2-4배 크게 나타나고 있다고 하겠다. 이러한 현상은 AW-2 및 AW-1 시험공의 공간거리가 4.6m 정도밖에 되지 않기 때문에 AW-1 시험공 주변의 수리지질 환경중 기본 불연속면내에 협제되어 있던 이 물질이 세척되어 나갔거나 사공극(dead end porosity) 형태로 발달되어 있던 매우 미소한 이차 고립공극이 AW-2 시험공에서 주입한 주입수의 압력으로 인하여 이들이 서로 연결된 공극(through porosity)으로 전환되었기 때문인 것으로 판단된다. 즉, AW-1 시험공 주변의 수리지질환경이 AW-2 시험공의 주입시험으로 영향을 받았기 때문으로 사료된다. 즉 4.6m 상거하여 설치한 2개 시험공에서 6m 간격으로 수행한 주입시험결과에 의하면 AW-1 시험공의 동일심도의 각 구간별 산술평균 수리전도도는 AW-2 시험공의 산술평균 수리전도도보다 모두 크게 나타났다. 이러한 사실들로 미루어 보아 동일 시험정에서 주입시험을 실시할때 주입거리구간의 거리에 따라서 수리전도도는 현저한 차이를 보이고, 조사대상지역내에 설치한 시험정과 시험정의 거리에 따라서도 규모종속영향(scale effect)의 관계를 나타내고 있음을 암시해 준다. (Sterrett & Nelson, 1985).

시험방법의 차이(Packer Test, Slug Test)에 의한 수리전도도의 관계

패커시험이 완료되고 약 3개월이 지난후, 전구간의 수리전도도를 구하기 위하여 스러그시험을 실시하였다. AW-1 및 AW-2 시험정의 평균수리전도도가 표-5에서와 같이 거의 동일하게 분석되었다고 할 수 있으나

나중에 실시한 AW-1 시험공에서의 수리전도도가 AW-2 시험공보다 모두 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 3개월전에 AW-2 시험공의 주입압으로 인해 발생한 AW-1 시험공 인근의 탄성체인 결정질암체에서의 불연속면의 변위(displacement)가 거의 안정상태에 도달했음을 암시한다.

AW-2 시험공을 먼저 굴착하고, AW-2 시험공에 대해 패커시험을 실시하므로써 AW-2 시험공 주변의 수리지질환경이 외적인 영향을 받지 않은 상태에서 수행되었다고 보면 스러그시험에 의한 전구간 수리전도도는 상당히 상응하는 값이다.

Table 5. Hydraulic conductivities of each borehole from by Packer test and Slug Test, and their relationship each other.

Test	Slug Test (1×10^{-5} cm/sec.)		Packer Test (1×10^{-5} cm/sec.)		
	Rise	Down	* 2m Int.	* 6m Int.	full Dis.
AW-2	3.07	2.95	4.93	2.95	2.12
AW-1	3.17	4.58	18.99	13.92	4.56

* Arithmetic Average in 2m and 6m intervals

토의 및 결론

결정질암체의 현장에서 수리전도도를 구하기 위하여 일반적으로 상용되는 수리특성시험인 패커시험과 스러그시험으로 구분하여 실시하고 그 결과를 상호 비교하였다.

패커시험에서 어떤 특정구역이 포함된 2m 간격에서 실시한 수리전도도의 이상치는 그 특정구역을 포함하고 있는 6m간격에서 실시한 수리전도도값에서도 동일한 경향을 나타낸다. 이러한 경향에 대해서 시험구간의 파쇄대의 특성과 연관지워 볼때, 불연속면의 특성에 따라서 결정질암체의 파쇄대의 역할과

수리전도도의 관계가 상당히 부합된다고 할 수 있다.

패커시험구간의 간격이 좁을수록 수리전도도와 평균투수량계수가 커진다. 이러한 사실은 NX시험공에서 수행된 주입시험분석에서, 방사호름이 시험공의 주변에서 일어나고 시험공으로부터 1/2거리에서의 시험영역에 관한 구면이 된다고 가정을 했을때, Hvorslev의 이론대로 수리전도도는 $\ln(l/r_0)$ 와 직접관계가 있으며 l/r_0 가 증가하면 수리전도도값은 감소하게 되고 따라서 동일 시험공에서 이중패커의 간격은 좁게 설정하여 주입시험을 실시하면 주입량이 간격을 넓게 설정하여 실시할 때보다 상대적으로 크게 나타내는 이유는 주입구간 주변에서 구형호름의 영향 효과로 추정된다. AW-1 시험공의 수리전도도값은 먼저 시험을 실시한 AW-2 시험공의 값보다 2배 이상 크게 나타내고 있다. 이러한 사실은 AW-2 시험공과 4.6m 상거하여 설치한 AW-1 시험공의 패커시험결과에 의하면, 시험순서에 따라서 수리전도도의 변화를 나타낸다고 할 수 있다.

이러한 현상은 AW-2 시험공과 AW-1 시험공의 공간거리가 4.6m 정도밖에 되지 않기 때문에 AW-1 시험공 주변의 수리지질 환경중 기본 불연속면내에 협재되어 있던 이 물질이 세척되어 나갔거나 사공극(dead end porosity)형태로 발달되어 있던 매우 미소한 이차 고립공극이 AW-2 시험공에서 주입한 주입수의 압력으로 인하여 이들이 서로 연결된 공극(Through porosity)로 전환되었기 때문인 것으로 사료된다.

스러그시험의 상승법과 하강법을 동시에 실시하여 구한 AW-1 및 AW-2 시험공의 평균 수리전도도는 매우 일정한 값을 가진다.

이들을 패커시험에 의한 전구간과 비교해 볼때, 상당히 부합되는 값이라 할 수 있다. 패커시험이 완료되고, 약 3개월의 시간이 지난후에 실시한 스러그시험에 의하면 AW-1 시험공의 평균 수리전도도는 AW-2 시험공의 평균 수리전도도와 거의 동일하게 분석되었는데 이는 3개월전에 AW-2 시험공의 주입압으로 인해 발생한 AW-1 시험공 인근 불연속면의 변위(displacement)가 거의 안정상태에 도달했음을 암시한다. 결론적으로 현장에서의 결정질암체의 수리특성을 규명코자 할때는 한 시험공 주변의 수리지질환경이 다른 시험공의 시험시에 그 영향권에 있는지는 확인하는 절차가 필요하며, 가능한 다양한 시험방법과 절차를 이용하여 조사목적에 부합하는 자료를 얻도록 하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구에 필요한 현장조사자료의 제공과 지도를 해 주신 한서엔지니어링의 한정상 박사님 그리고 고려대학교 전략광물자원센터의 지원에 감사를 드립니다. 또한 한국원자력연구소 김천수박사님의 조언과 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- P. B. Attenwell, I. W. Farmer, 1975, Principle of Engineering Geology, p 585.
- 尹志善, 1991, 岩石.岩盤의 調査와 試驗, 歐美書館, p 30.
- H. Bouwer, R. C. Rice, 1976, A Slug test for Determing Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers with Completely or Par-

- tially Penetrating Wells, Vol.12, No.3, Water Resources Research, p 423.
- J. D. Bredehoeft, S. S. Papadopoulos, 1980, A Method for Determining the Hydraulic Properties of Tight Formations, Vol.16, No. 1, Water Resources Research, p 233
- H. H. Cooper JR., J. D. Bredehoeft, I. S. Papadopoulos, 1967, Response of Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water, Vol.3, No.1, Water Resources Research, p 263.
- D. A. Seeburger, M. D. Zoback, 1982, The Distribution of Natural Fractures and Joints at depth in crystalline rock, Journal of Geophysical Research, vol.87, No.B7, p 5517.
- G. E. Grisak, J. F. Pickens, J. D. Avis, D. W. Belanger, 1985, Principles of Hydrogeologic Investigations at Depth in Crystalline Rock, International Association of Hydrogeologists, Vol.1, Part 1 Proceedings, p 52.
- T. W. Zeigler, 1976, Determination of rock mass permeability, US Army Engineer waterway.
- R. J. Sterrett, R. A. Nelson, 1985, Impact of Borehole Deformation on Hydrogeologic Testing in Salt, Vol.1, International Association of Hydrogeologist, p 169.
- Moench, A.F., Hsieh, P. A., 1985, Analysis of Slug Test Data in a well with Finite Thickness Skin, International Association of Hydrogeologists, Vol.1, Part 1 Proceedings, p 17.
- Neuzil, C. E., 1982, On Conducting the Modified 'Slug' Test in Tight Formations, Water Resources Research, Vol.18, No. 2, p 439-441.
- John A. Barker, John H. Black, 1983, Slug Tests in Fissured Aquifers, Water Resources Research, Vol.19, No. 6, p 1558-1564.

박동극 :

한국원자력안전기술원

대전시 유성구 유성우체국사서함 114호

305-600

TEL : (042)868-8265

FAX : (042)868-1700