

순간충격시험에 의한 화강암지역의 수리적 매개변수 산출

Hydraulic Parameter Estimation of a Granite Area Using Slug Tests

함 세 영 (Se Yeong Hamm)	부산대학교 지질학과
김 문 수 (Moon Soo Kim)	부산대학교 지질학과
성 익 환 (Ig Hwan Sung)	한국지질자원연구원 환경지질연구부
이 병 대 (Byong Dae Lee)	한국지질자원연구원 환경지질연구부
김 광 성 (Kwang Seong Kim)	부산대학교 지질학과

요약 / ABSTRACT

본 연구에서는 금정산 불국사화강암지역의 19개 시추공(직경 3" 6개공과 직경 6" 13개공)에서 순간충격 시험을 실시하고, 세 가지 순간충격시험방법(Cooper-Bredehoeft-Papadopulos법, Hvorslev법, Bouwer & Rice법)으로 수리적 매개변수들을 결정하였다. 각 시험공의 수리적 특성은 시추코어자료와 연계하여 평가하였다. 연구지역을 네 개의 소구역으로 나누어 각 구역에 대한 수리적 매개변수의 차이도 비교하였다. 또한, 세 가지 순간충격시험분석으로 구해진 수리상수들간의 관련성을 검토하였다. 슬러그의 주입과 회수에 의해서 발생하는 수리전도도의 차이는 시험공 주변의 투수성 균열의 분포와 슬러그의 압력변화에서 발생하는 세립질 물질의 교란 및 침전에서 유래하는 것으로 판단된다. 세 가지 순간충격시험분석으로 구한 수리전도도값은 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ m/sec의 범위를 보이며, 평균값은 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ m/sec의 범위를 보인다. 또한, 투수량계수는 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ m²/sec의 범위를 보인다. Cooper-Bredehoeft-Papadopulos(C-B-P)법, Hvorslev법, Bouwer & Rice법으로 구한 평균 수리전도도를 서로 비교하면, Hvorslev법으로 구한 수리전도도가 가장 크고, 다음으로는 Bouwer & Rice법, C-B-P법으로 나타난다.

주요어 : 불국사화강암류, 결정질 기반암, 금정산, 수리적 특성, 순간충격시험, Cooper-Bredehoeft-Papadopulos법, Hvorslev법, Bouwer & Rice법

This study is aimed for estimating hydraulic parameters using the Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, the Hvorslev, and the Bouwer & Rice methods at nineteen test holes in Mt. Geumjeong area composed of Bulguksa granites, and for characterizing hydraulic properties at the test holes with relation to drill

core data. The relation among hydraulic parameters obtained by the three methods is also considered. The study area is divided into four sub-areas to consider the hydraulic characteristics. The difference of hydraulic conductivity estimates between the injection and the withdrawal slug test may be due to permeable fracture distributions around the test hole and/or the disturbance of fine materials in the fractures induced by the pressure variation due to different mechanisms of test initiation. The hydraulic conductivity estimates determined by the Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, the Hvorslev and the Bouwer & Rice methods ranges from 10^{-8} to 10^{-5} m/sec, and the ranges of average values are from 10^{-7} to 10^{-6} m/sec. Also, the transmissivity ranges from 10^{-7} to 10^{-5} m²/sec. Comparing average hydraulic conductivity by the Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, the Hvorslev and the Bouwer & Rice methods, by the Hvorslev method has the highest values, then the Bouwer & Rice method, and the Cooper-Bredehoeft-Papadopulos method has the lowest.

Key Words : Bulguksa granites, Crystalline bedrock, Mt. Geumjeong, Hydraulic characteristics, Slug test, Cooper-Bredehoeft-Papadopulos method, Hvorslev method, Bouwer & Rice method

서 론

결정질 기반암의 수리지질학적 특성은 지질구조대(균열대, 파쇄대, 단층대 등)에 의해서 크게 지배를 받는다. 이는 대부분의 지하수흐름이 주요 지질구조대를 따라서 일어나기 때문이다. 결정질 기반암이 원자력발전소와 같은 구조물 건설의 기초지반으로 활용될 때는 매우 높은 안정성을 요구하고, 따라서 결정질 암반의 지질공학적, 수리지질학적 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 그리고, 지하구조물(유류비축기지, 핵폐기물 저장시설, 식품저장시설, 터널 등) 건설 시에는 사전에 수리지질학적인 요인을 충분히 검토하여야만 구조물의 건설경비를 절감하고 안정성을 확보함과 아울러 주변지역의 지하수 영향을 최소화할 수 있다. 지하구조물이 중요한 균열대, 파쇄대, 단층대 등을 통과하는 경우에는 구조물 내로 지하수 유입이 일어나고 지하수 유동통로가 변경되어 주변지역의 지하수유동 체계가 교란될 수 있으며, 주변지역의 지하수가 고갈되거나 지하수 수질이 나빠질 수도 있다. 이렇게 되면, 민원의 소지도 생기게 된다.

충적층대수층 뿐만 아니라 결정질 기반암의 수리적 성질을 파악하기 위해서는 양수시험을 수행하는 경우가 많다. 그러나, 양수시험은 양수정이나 관측정의 설치, 그리고 비용이나 시간적인 면에서 볼 때 수행하기에 어려운 경우가 있다. 이에 비해 순간충격시험은 경제적이고 간편하게 대수층의 수리

적 성질을 평가하는 방법으로 오랫동안 사용되어 왔다. 또한 양수시험을 하기에 곤란한 오염지역 혹은 수리전도도가 매우 낮은 지역에서 주변환경에 영향을 미치지 않고 실행할 수 있기 때문에 널리 이용되는 실험이다. 특히, 순간충격시험은 양수된 지하수의 처리가 바람직하지 않은 오염된 대수층의 수리적 성질을 알아내는데 10년 내지 15년 전부터 많이 사용되어 왔다(Weight and Wittman, 1999). 또한, 구경이 작은 관측정에서도 시험이 가능하다. 그러나, 시험공 주변의 수리상수만을 구할 수 있다는 것이 이 시험의 한계이다. 순간충격시험은 슬러그(체적을 알고 있는 물체)를 순간적으로 주입/회수한 시각부터 수위가 수동역학적 평형상태에 도달할 때까지 경과시간별로 수위 변화를 측정하는 방법이다. 이때 수리상수는 시험정에 유입되거나 빠져나가는 물의 양에 의해서 변화되는 시험정의 수위와 관련된다. 순간충격시험에 의해서 수리상수를 구하는 이론에는 Cooper-Bredehoeft-Papadopulos 법(Cooper et al., 1967; Papadopulos et al., 1973), Hvorslev법(Hvorslev, 1951), Bouwer & Rice법(Bouwer and Rice, 1976; Bouwer, 1989), Nguyen & Pinder법(Nguyen and Pinder, 1984)이 있다.

Cooper-Bredehoeft-Papadopulos법(이하에서는 C-B-P법이라 칭함)은 피압대수층 내에 완전히 관통·개방된 또는 스크린된 시추공에 적용할 수 있다. Hvorslev법은 피조미터, 오거 시추공과 같이 대부분의 경우에 대수층을 부분 관통하고 있는 시추

공에 대해서 적용한다. Bouwer & Rice법은 완전 관통 또는 부분 관통된 시추공이나 스크린된 우물에 적용될 수 있다. Nguyen & Pinder법은 피압대 수층내에 부분관통하고 있는 우물에 적용할 수 있지만 C-B-P법, Hvorslev법, Bouwer & Rice법보다는 잘 쓰이지 않는다. 그 이유는 Nguyen & Pinder법이 수리상수 분석 해법상에 한가지 오류가 있기 때문이다(Butler and Hyder, 1994). Zlotnik(1994)는 Bouwer & Rice법에 이방성을 결합시킨 해석 방법을 제안하였다 그러나, 이 방법은 먼저 이방성을 알고 있어야 한다는 조건이 필요하다.

본 연구지역(Fig. 1)은 부산의 동부와 서부를 갈라놓으면서 북북동-남남서 방향으로 발달된 분수령인 금정산(해발고도 799.5m)이다. 금정산 지역의 서쪽에는 양산단층이 산출기와 비슷한 방향으로 형성되어 있으며, 동쪽에는 동래단층이 역시 비슷한 방향으로 발달되어 있다. 또한, 금정산과 동래단층의 사이 지역인 동래구 온천동 지역에는 동래온천이 위치하고 있다. 이와 같이 금정산지역은 동래온천과도 관련을 가지는 특수한 지질환경 속에 있다.

금정산지역 및 그 주변지역에 대해서는 함세영 외(1999, 2000)의 금정산-백양산 일대에서 산출하는 지하수 및 용천수에 관한 수리지화학적 연구가 있으며, 한석중 외(1999)에 의한 동래온천 지열수와 금정산동편 및 동래지역의 냉 지하수의 수리지화학적 특성에 관한 연구가 있다. 성익환 외(1999)는 금정산지역에 굴착된 시험공(Fig. 2)에 대한 양수시험 및 수압시험을 수행하여 이 지역 불국사화강암의 수리적 성질을 평가하였으며, 금정터널 굴착 예정지에 대한 지하수 유동체계 분석 및 동래온천지역에 미칠 영향을 분석하였다.

본 연구는 순간충격시험자료를 이용하여 금정산 지역의 대부분을 차지하고 있는 백악기 불국사 화강암류의 수리적 성질을 파악하기 위한 것이다. 이를 위하여 연구지역 내에 분포하는 19개 시험시추공(3" 시추공 6개공과 6" 시추공 13개공; Fig. 2)을 대상으로 순간충격시험을 실시하였으며, 이 시험자료를 C-B-P법, Hvorslev법, Bouwer & Rice법에 적용하여 수리적 매개변수(수리전도도, 투수량계수, 저류계수)를 구하였다. 시험공은 모두 금정산성내에

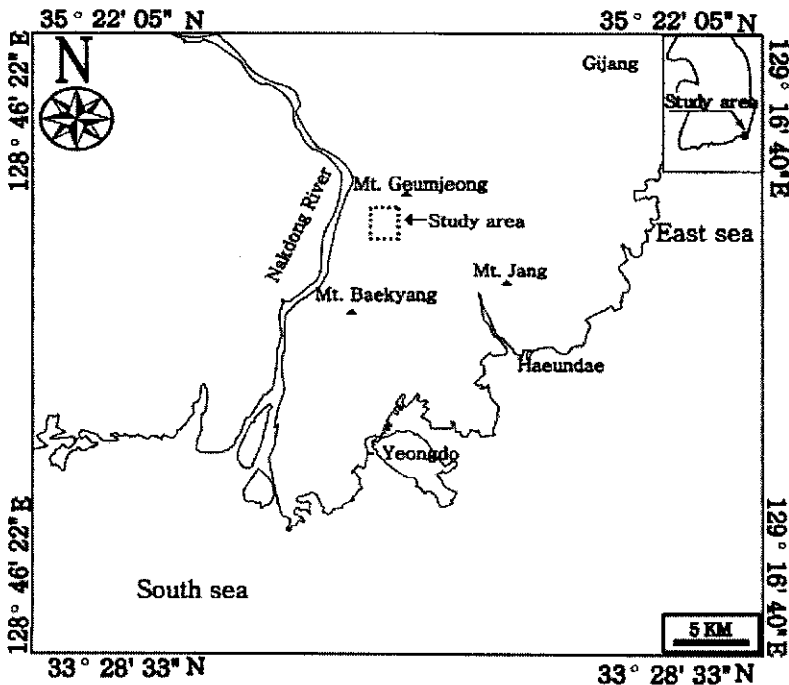


Fig. 1. Location of the study area.

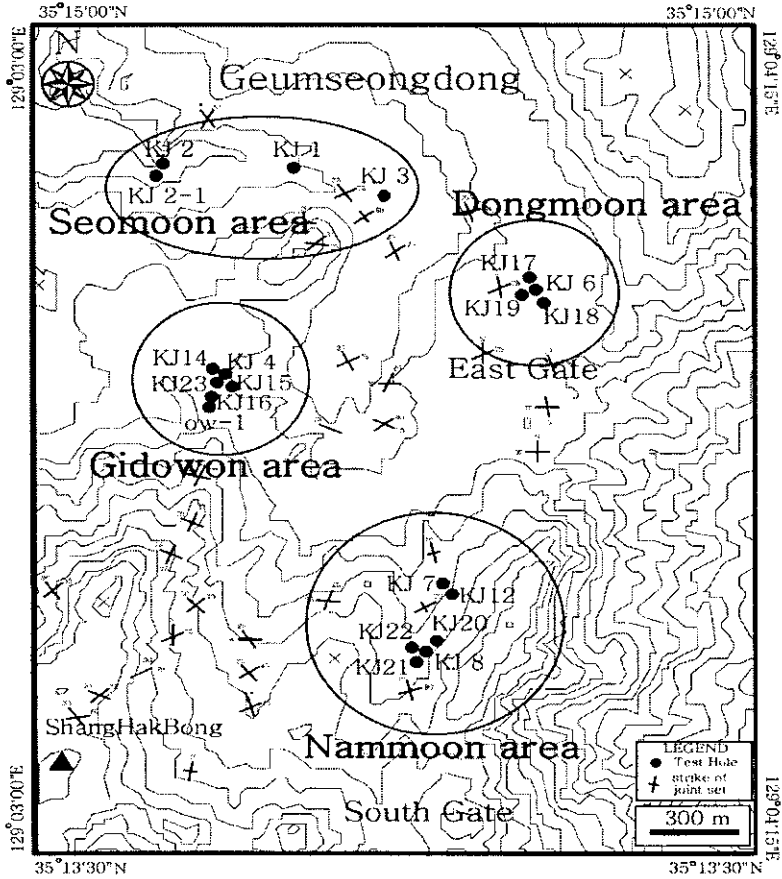


Fig. 2. Location of the test boreholes in the study area.

위치하고 있으며, 연구지역은 다시 동문지역(KJ6, KJ17, KJ18, KJ19호공), 서문지역(KJ1, KJ2, KJ2-1, KJ3호공), 남문지역(KJ7, KJ8, KJ12, KJ20, KJ21, KJ22호공), 기도원지역(KJ4, KJ14, KJ15, KJ16, KJ23호공)으로 구분하였다(Fig. 2).

지질 및 수리지질

금정산의 지질은 중생대 백악기 경상누층군 유천층군에 속하는 안산암질암류, 불국사화강암류에 속하는 화강섬록암, 각섬석화강암, 토날라이트, 아다멜라이트로 이루어져 있다(Fig. 3). 안산암질암류는 금정산 남부의 서남단과 북동단에 분포하며, 암록색 내지 흑회색을 띠며, 비현정질 내지 반정질 조직을 갖는다. 반정은 장석, 휘석 및 각섬석이며

신선한 면에서보다 풍화면에서 더욱 잘 보인다.

화강섬록암은 금정산 남부의 동남단에 소규모로 분포하며, 아다멜라이트에 의하여 관입되어 있다. 주로 석영, 사장석, 정장석, 흑운모 등으로 구성되어 있으며, 부성분광물로는 각섬석, 녹니석, 자철석, 자류철석, 스피, 인회석 등이 들어있다.

각섬석화강암은 금정산체를 이루면서 북서쪽으로 넓게 분포하고 있으며, 본 암의 남동측에 분포하는 아다멜라이트에 의하여 관입당하고 있다. 본 암은 매우 균질하며, 중립질이고 홍색의 장석이 다량 함유되어 있는 것이 특징이다. 주성분광물로는 석영, 정장석, 사장석, 각섬석 및 흑운모 등이며, 부성분광물로는 스피, 인회석, 저어콘, 녹니석, 백운모 및 자철석 등이 들어있다.

토날라이트는 금정산 남부의 중심부와 북서부에

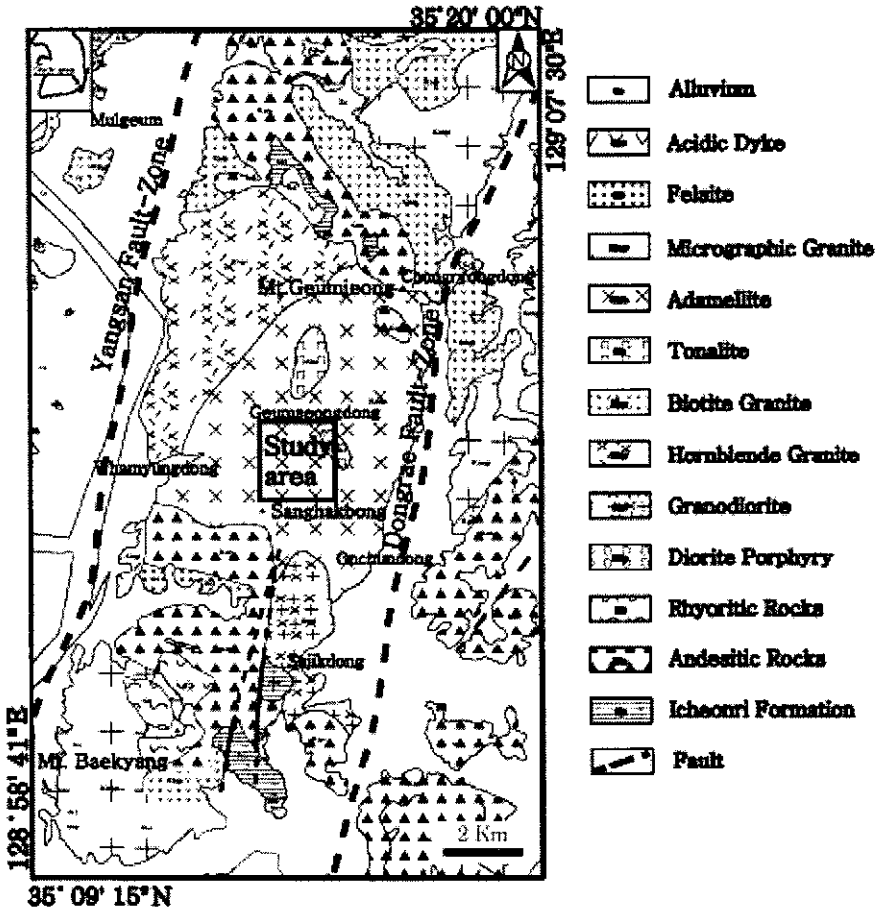


Fig. 3. Geology of the study area(Son et al., 1978).

소규모 암체로 분포하고 있다. 본 암은 세립질이고 침상의 각섬석 또는 흑운모를 함유하고 있는 것이 특징이다. 본 암은 주로 사장석, 석영 및 각섬석으로 되어 있고, 녹니석, 흑운모, 스피넬, 티탄철석, 자철석 및 저어콘 등이 들어있다.

아다멜라이트는 금정산 남부의 대부분을 이루고 있다. 중립질 또는 세립질이며 홍색의 장석과 백색의 장석이 대등한 비율로 함유되어 있음을 볼 수 있다. 주로 석영, 정장석, 사장석 및 흑운모 등으로 구성되어 있으며, 부성분광물로서는 백운모, 녹니석, 각섬석, 자철석, 적철석 및 저어콘 등이 들어있다.

금정산의 절리군 중 가장 우세한 방향은 NS~N20W인 남북계이며, 그 다음에 N40~60E 및 N60 0~70W이며 EW방향은 미약하다(차문성, 1976). 금

정산일대 기반암 지하수는 주로 N60~80E방향의 절리(최재우, 1984)를 따라서 동래구 및 금정구의 저지대쪽으로 흐른다. 화강암과 안산암질암에는 소규모 단층파쇄대와 단열대가 발달하고 있으며, 이들 소규모 단층파쇄대와 단열대는 양산단층 및 동래단층과 관련된다(손치무 외, 1978). 동래단층과 금정산 사이에 위치하는 동래온천에서는 지하수 km의 심부순환을 거친 지열수가 산출되고 있으며, 동래온천 지열수의 주요 상승 통로는 양산단층과 사교하는 북동-남서방향의 2차 신장단열대인 것으로 보고되고 있다(성익환 외, 1999). 따라서, 양산단층과 동래단층 그리고 이 두 단층과 수반되는 소규모 단층파쇄대 및 절리대는 금정산지역의 지하수 유동 및 지열수 순환을 규제하는 것으로 판단된다.

순간충격시험분석의 적용

분석 방법

순간충격시험은 2000년 1월 22일부터 1월 30일 까지 직경 3"의 시추공 6공(KJ4, KJ14, KJ17, KJ18, KJ21, KJ22)과 직경 6"의 시추공 13공(KJ1, KJ2, KJ2-1, K3, KJ6, KJ7, KJ8, KJ12, KJ15, KJ16, KJ19, KJ20, KJ23)에 대해서 실시되었다 (Table 1). 순간충격시험을 위해서는 슬러그(체적을 알고 있는 폐쇄된 쇠파이프)를 순간적으로 주입하여 상승된 수위가 하강하기 시작하여 원래의 자연 수위에 도달할 때까지 경과시간별로 수위하강을 측정하였다. 이때 시간에 따른 수위변화는 자동수위 측정기(미국 Telog사의 WLS-2102e)를 사용하여 1 초 단위로 자동 계측하였다. 시험시간은 대부분 1-3시간이 소요되었으나, KJ14번 공에서는 5시간이 경과해도 수위가 최초의 평형상태에 도달하지 않아 최초 자연수위에 99.8%정도 도달하였을 때 시험을 종료하였다. 그리고 KJ2-1, KJ6, KJ19, KJ23호공에 대해서는, 최초 자연수위에 도달하였을 때, 슬러그를 물 속에서 순간적으로 들어올려서 하강된 수위가 원래의 자연수위로 회복될 때까지 역시 data logger를 사용하여 1초 단위로 수위변화를 자동 계측하였다.

순간충격시험자료는 C-B-P법, Hvorslev법,

Bouwer & Rice법을 이용하여 분석하였으며, 분석을 위해서는 AQTESOLV(Version 2.51) 소프트웨어를 이용하였다. 순간충격시험분석 결과는 직경 3"의 시추공에서 회수된 시추코어검층자료와 연관하여 해석하였다. 시추코어검층에서는 심도에 따른 암상변화, 색깔, 풍화도, 균열대와 단층대의 발달 상태 및 단열면의 상태, 침전광물 등을 기재하였으며, 암종구분과 색깔은 암석의 야외명과 일반적인 색상명을 사용하였다(성익환 외, 1999).

C-B-P법에 의한 수리상수 분석

이 방법은 완전피압대수층의 상위에 반경 r_c 의 케이싱이 설치되어 있고, 대수층에는 반경 r_s 의 스크린이 설치되거나 나공상태의 우물에 대해서 순간충격시험을 실시한 경우에 적용된다. Cooper et al.(1967)식은

$$H(t)/H_0 = F(\eta, \mu) \quad (1)$$

과 같다. 여기서, $\eta = Tt/r_c^2$, $\mu = r_s^2 S/r_c^2$ 이다. H_0 는 우물에 어떤 분량의 물을 순간적으로 주입시켰을 때 자연수위보다 상승한 수위이고, $H(t)$ 는 시간 t 의 수위와 자연수위의 차이이다. $F(\eta, \mu)$ 는

$$F(\eta, \mu) = \frac{8\eta}{\pi^2} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\mu u^2}{\eta}\right) \frac{1}{u \Delta(u)} du \quad (2)$$

Table 1. Description of the test boreholes.

Area	Seomoon				Gidowon					Dongmoon				Nammoon							
Hole No.	KJ1	KJ2	KJ2-1	KJ3	KJ4	KJ14	KJ15	KJ16	KJ23	KJ6	KJ17	KJ18	KJ19	KJ7	KJ8	KJ12	KJ20	KJ21	KJ22		
Elevation (m)	296	273	273	315	374	376	370	374	370	383	378	385	380	433	455	438	455	455	450		
Depth (m)	94	93	93	102	70	70	82	82	102	142	70	70	102	167	180	110	70	75	80		
Well radius (cm)	15.24	15.24	15.24	15.24	7.62	7.62	15.24	15.24	15.24	15.24	7.62	7.62	15.24	15.24	15.24	7.62	15.24	7.62	7.62		
Casing (m)	14	9	9	11	8	18	15	12	12	11	4	6	11	10	10	10	11	13	7		
Alluvium (m)	8	1	1	4	7	21	3	1.5	1.5	2.5	3	2.2	2	2	4	2.5	4	7.3	4.5		
Weathered zone (m)	1	4	4	3	7.7	24.5	7	6.5	6.5	3.5	5.1	3.5	5	5	3.5	4	5	14.6	4.7		
Bedrock	Granite				Granite					Granite				Granite							
Water bearing zone (m)	18, 23		20, 94		13, 20, 30					33, 64, 98				20, 30, 94				130, 13, 36, 34, 37			
Depth to water (m) in Sep. 1999	4.58	1.59		8.46	6.07	1.94	7.41	6.21	6.50	1.44	9.45	8.75	1.80	1.10	1.31	flowing	flowing	1.52	4.02		
Depth to water (m) in Jan. 2000	4.98	2.83	2.89	11.39	7.12	3.72	7.41	6.48	7.11	1.98	1.27	1.22	2.29	1.39	3.62	0.36	1.38	4.88	5.22		

와 같다. C-B-P법에 의하면 투수량계수와 저류계수 그리고 수리전도도를 구할 수 있다.

전체 시험공에 대한 수리상수 산출결과를 보면, 투수량계수 $7.71 \times 10^{-6} \sim 9.91 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{sec}$, 저류계수 $1 \times 10^{-10} \sim 0.1$, 그리고 수리전도도는 $1.24 \times 10^{-7} \sim 1.55 \times 10^{-5} \text{m}/\text{sec}$ 범위이며, 평균 투수량계수는 $1.87 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{sec}$, 저류계수는 0.055, 그리고 수리전도도는 $2.16 \times 10^{-6} \text{m}/\text{sec}$ 이다(Table 2). 투수량계수가 가장 높게 나타난 공은 동문지역에 위치하고 있는 KJ18호공이다(Fig. 4). 시추자료에 의하면, KJ18호공은 풍화토 구간이 0~2.2m로서 얇으며 그 하부부터 67.5m까지 화강암이 발달하고 있으며, 67.5~70m(시추공저)까지 염기성암맥 1매가 관입하고 있다. 전체적으로 화강암의 풍화정도는 중간 내지 높게 나타나 풍화가 상당히 진전된 것으로 나타난다. 파쇄등급은 절리간 간격 1m이하의 등급이 주를 이룬다. 따라서, 높은 투수량계수와 수리전도도는 시추자료와 잘 일치하고 있다. 한편 저류계수는 비교적 낮으며(5.26×10^{-7}), 이는 보통 투수성이 크면 저류성이 낮다는 사실과 일치한다.

한편, 투수량계수가 가장 낮은 공은 남문지역에 위치하고 있는 KJ21호공이다(Fig. 4). 시추자료에 의하면, 이 공의 풍화토층 깊이는 7.3m로서 다소 깊은 편이고, 그 하부에는 화강암이 공저(75.0m)까지 발달하고 있으나, 염기성 암맥이 41.6~51.0m구간과 69.9~75.0m구간에서 관입하고 있는데, 이는 연구지역의 시추공들 중에서는 가장 두꺼운 것이다. 풍화도를 보면, 54.9~66.6m구간의 약한 내지 중간 정도의 풍화도를 제외하고는 대부분의 구간에서 중간 내지 높은 풍화도를 보여주고 있다. 따라서, 낮은 투수량계수와 수리전도도는 풍화산물 및 불투수성 염기성 암맥에 의한 낮은 투수성을 지시하고 있는 시추자료와 잘 일치하고 있다. 한편, 이 공의 저류계수는 1.57×10^{-7} 로서 비교적 낮게 나타나고 있다.

순간충격시험에서 구한 저류계수는 투수량계수나 수리전도도보다는 신뢰성이 낮다. 그 이유는 순간충격시험자료는 저류계수보다는 투수량계수에 훨씬 더 민감하기 때문이다(McElwee et al., 1995a). 또한 유효 스크린 반경(스크린 자체의 반경, 자갈층 전대까지의 반경 또는 시추로 인해서 확장된 파쇄대까지의 반경)의 불확실성이 투수량계수보다는 저

류계수 산출값에 훨씬 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 이와 같은 저류계수의 불확실성은 순간충격시험에 관측공을 이용할 수 있다면 크게 개선될 수 있다(McElwee et al., 1995b). 또한 유효 스크린 반경의 불확실성도 관측공자료를 이용하면 상당히 줄일 수 있다(Butler et al., 1996). 그러나, 이 경우에 관측공이 시험공과 상당히 가까운 거리(약 10m이내)에 위치하여야 하며, 스크린도 시험공과 거의 같은 심도에 위치하여야 한다(McElwee et al., 1995a).

Hvorslev법

많은 피조미터와 오거 시추공의 경우에는, 대수층을 완전히 관통하고 있지 않은 경우가 많으며, 이때 대수층의 수리전도도를 구하는 방법으로 Hvorslev법이 이용된다(Hvorslev, 1951). 따라서, Hvorslev법은 비교적 천부의 모래층 또는 점토층에 대해서 적용되며, 지하수면 아래 부분에 적용된다. Hvorslev법에 의한 수리전도도는 다음과 같은 식으로부터 구해진다.

$$K = \frac{A}{F(t_1 - t_2)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3)$$

여기서, K는 수리전도도, A는 시추공의 단면적, F는 형상계수로서 시추공의 스크린 구간의 직경, 길이 그리고 모양에 좌우된다. h_1 과 h_2 는 각각 시간 t_1 , t_2 의 수위이다.

만약 $L_e/R > 8$ 이면, 다음 식을 적용한다:

$$K = \frac{r_c^2 \ln(L_e/R)}{2L_e} \frac{\ln(h_1/h_2)}{(t_1 - t_2)} \quad (4)$$

여기서, R은 우물스크린의 반경, r_c 는 우물 케이싱의 반경, L_e 는 우물스크린의 길이이다. 위 식은

$$K = \frac{r_c^2 \ln(L_e/R)}{2L_e T_0} \quad (5)$$

과 같다. 여기서, T_0 는 최초상승이나 최초하강의 37%에 해당하는 수위에 도달하는데 걸린 시간으로서 원래의 유량을 유지하면서 수위가 평형상태로 되는데 걸리는 시간이다. 이 식은 Hvorslev법의 여러 가지 조건들 중 한가지 식이지만, 상당히 유용한 식으로서 우물스크린의 반경(R)에 대해서 시험구간이 상당히 큰 경우의 자유면 대수층에 적용이 가능하다. 그러나, 그 밖의 조건들에 대해서는

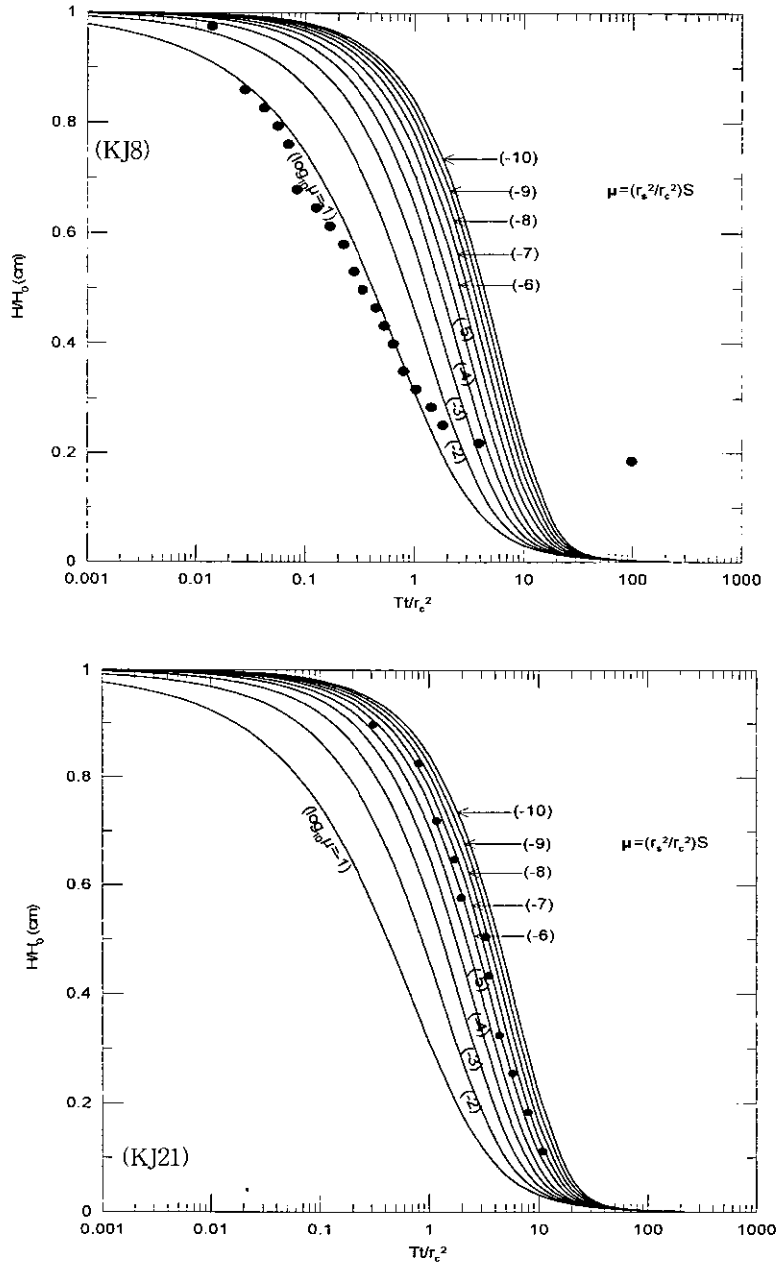


Fig. 4. Slug test analysis by the C-B-P method at KJ18 and KJ21 wells.

Hvorslev법의 다른 식을 적용하여야 한다.

Hvorslev법에 의하여 전체 시험공에 대한 수리전도도를 산출해 보면, $9.23 \times 10^{-8} \sim 2.30 \times 10^{-5}$ m/sec이며, 평균값은 3.95×10^{-6} m/sec이다(Table 2). 수리전도도가 가장 높게 나타난 공은 KJ1호공이다(Fig. 5). KJ1호공은 대구경(6인치) 공이므로 시추코어 자료는 없고, 시추 당시의 자료만 있다. KJ1호공의 시추당시 자료에 의하면, 풍화도는 8m까지이고,

18m 부근과 23m 부근의 비교적 천부에서 대수층을 만났다(성익환 외, 1999). 따라서, Hvorslev법에서 산출된 높은 수리전도도는 이와 같이, 비교적 두꺼운 풍화토층과 천부대수층의 발달상태를 반영하기 때문으로 판단된다. 한편, 가장 낮은 수리전도도는 KJ21호공에서 나타나는데 이것은 C-B-P법에서 얻어진 결과와 같다.

KJ1호공에서 시간에 따른 정규화된 수위하강곡선이 위로 오목한 모양을 가지는 경우(Fig. 5)는 저류성이 상당히 크다는 증거가 되며(Chirlin, 1989), C-B-P법으로 구한 저류계수(0.1)가 크게 나타나는 것과 일치한다.

Bouwer & Rice법

Bower & Rice 방법은 원래 자유면대수층에 적용되도록 개발된 방법이지만 스크린의 최상부가 상부가압층으로부터 어느 정도 아래에 위치한다면 피압대수층에도 적용될 수 있다. Bower & Rice의 식은

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_e/R)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H_t}{H_0}\right) \quad (6)$$

과 같다. 여기서, K는 수리전도도, R_e 는 유효반경, R은 우물 스크린 또는 나공 구간의 반경, r_c 는 우물 케이싱의 반경, L_e 는 우물스크린 또는 나공구간으로서 물이 주입되는 구간이다. 그리고, H_0 는 시간 0 일 때의 수위강하, H_t 는 H_0 이후의 경과시간 t일 때의 수위강하이다.

Bouwer & Rice법에 의하여 전체 시험공에 대한 수리전도도를 산출해 보면, $7.82 \times 10^{-8} \sim 1.90 \times 10^{-5}$ m/sec이며, 평균값은 3.13×10^{-6} m/sec이다(Table 2). 이 방법에서도 Hvorslev법과 마찬가지로 수리전도도가 가장 높게 나타난 공은 KJ1호공이다. 한편, 가장 낮은 수리전도도는 KJ21호공에서 나타나는데 이것은 Hvorslev법과 C-B-P법에서 얻어진 결과와 같다. Bouwer & Rice법에 의한 수리전도도값과 Hvorslev법에 의한 수리전도도값은 전체적으로 비슷하며 이는 두 방법이 서로 비슷한 이론적 배경을 가지기 때문으로 판단된다.

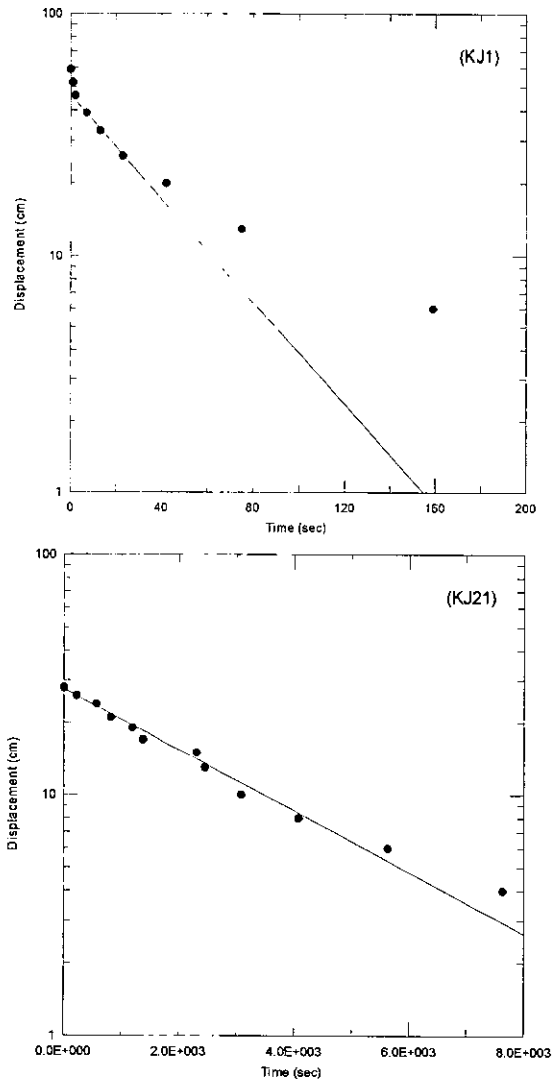


Fig. 5. Slug test analysis by the Hvorslev method at KJ1 and KJ21 wells.

Table 2. Hydraulic parameters obtained by slug test analyses.

Area	Well Number	Initial Displacement(cm)	K(m/sec) by B.R	K(m/sec) by H	T(m ² /sec) by C-B-P	K(m/sec) by C-B-P	S by C-B-P
Seomoon	KJ1	59	1.90E-05	2.30E-05	5.39E-04	6.74E-06	1.00E-01
	KJ2	26	1.85E-06	2.15E-06	4.22E-05	5.02E-07	1.00E-01
	KJ2-1 *	34	1.23E-06	2.46E-06	4.24E-05	5.05E-07	1.00E-01
	KJ2-1 **	26	1.44E-06	6.00E-06	1.81E-04	2.15E-06	1.00E-01
	KJ3	41	1.46E-06	1.67E-06	5.31E-05	5.36E-07	1.00E-01
Gidowon	KJ4	111	2.22E-06	2.65E-06	7.10E-05	1.15E-06	1.11E-02
	KJ14	186	1.04E-07	1.22E-07	8.75E-06	1.68E-07	1.70E-07
	KJ15	60	2.32E-06	2.83E-06	6.54E-05	9.76E-07	6.08E-02
	KJ16	58	2.05E-06	2.57E-06	7.71E-05	1.10E-06	9.54E-02
	KJ23 *	39	5.94E-06	7.17E-06	1.40E-04	1.56E-06	1.00E-10
	KJ23 **	72	1.58E-06	1.83E-06	3.93E-05	4.37E-07	1.00E-01
Dongmoon	KJ6 *	50	3.62E-06	4.11E-06	3.88E-04	2.96E-06	1.00E-01
	KJ6 **	50	8.23E-06	1.08E-05	8.68E-04	6.63E-06	1.00E-01
	KJ17	79	1.50E-06	1.78E-06	2.24E-04	3.39E-06	1.00E-10
	KJ18	57	1.09E-05	1.29E-05	9.91E-04	1.55E-05	5.26E-07
	KJ19 *	62	5.20E-07	6.26E-07	1.13E-04	1.24E-06	1.00E-10
	KJ19 **	63	5.09E-07	6.13E-07	8.80E-05	9.67E-07	3.21E-08
Nammoon	KJ7	66	2.17E-07	2.55E-07	2.99E-05	1.90E-07	2.48E-04
	KJ8	70	4.60E-06	4.99E-06	1.99E-04	1.17E-06	1.00E-01
	KJ12	24	5.23E-07	6.04E-07	1.78E-05	1.78E-07	9.00E-02
	KJ20	46	1.65E-07	2.01E-07	2.45E-05	4.15E-07	1.00E-10
	KJ21	28	7.82E-08	9.23E-08	7.71E-06	1.24E-07	1.57E-07
	KJ22	15	1.24E-06	1.41E-06	8.24E-05	1.14E-06	1.00E-01
	Max.		1.90E-05	2.30E-05	9.91E-04	1.55E-05	1.00E-01
	Min.		7.82E-08	9.23E-08	7.71E-06	1.24E-07	1.00E-10
	Arithmetic mean		3.10E-06	3.95E-06	1.87E-04	2.16E-06	5.47E-02
	Geometric mean		1.35E-06	1.73E-06	8.43E-05	9.91E-07	1.79E-04
	Median		1.50E-06	2.15E-06	7.71E-05	1.10E-06	9.00E-02

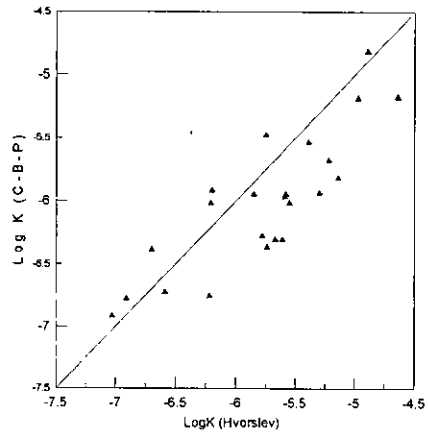
* : injection, ** : withdrawal

여러 가지 순간충격시험들에 의한 수리전도도 비교

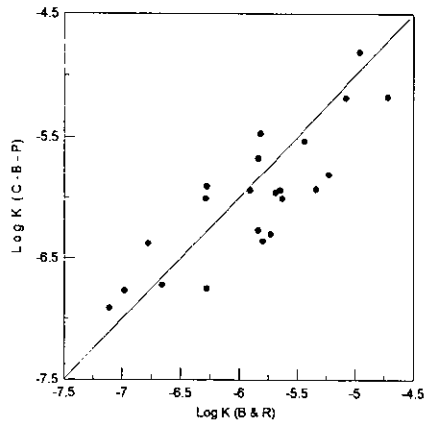
C-B-P법과 Hvorslev법의 수리전도도를 비교하면(Fig. 6a), Hvorslev법으로 구한 수리전도도가 C-B-P법 보다 대체로 크게 나타난다. 이는 Hvorslev법과 C-B-P법의 이론적인 배경이 다르기 때문으로 해석된다. 즉, Hvorslev법은 기본적으로 자유면대수층에 적용되며, C-B-P법은 피압대수층에 적용되기 때문이다. 아울러서, C-B-P법에서는 투수량계수를 수리전도도로 환산하는 과정에서 대수층의 두께가 과대 평가되었을 가능성도 있다. C-B-P법과 Hvorslev법에 의한 수리전도도의 상관계수는 0.7294이다(Fig. 7a).

한편, C-B-P법과 Bouwer & Rice법의 수리전도도를 비교하면(Fig. 6b), 역시 Bouwer & Rice법으로 구한 수리전도도가 C-B-P법 보다 대체로 크게 나타난다. 이는 Bouwer & Rice법이 원칙적으로 자유면대수층에 적용하는 방법인 반면에 C-B-P법은 피압대수층에 적용하는 것으로, 그 이론적인 배경이 틀리기 때문이다. 또한 투수성이 큰 매질에서 C-B-P법으로 구한 수리전도도는 Bouwer & Rice법에 의한 수리전도도보다 높게 나타나고, 투수성이 낮은 매질에서 C-B-P법으로 구한 수리전도도는 Bouwer & Rice법에 의한 수리전도도보다 낮게 나타나는 것으로 보고되고 있다(Mas-Pla et al., 1997). 본 지역은 화강암으로 이루어져 있으며 전체적으로 투수성이 낮으므로 C-B-P법에 의한 수리전도도가 Bouwer & Rice법에 의한 것보다 낮은 것으로 해석된다. C-B-P법과 Bouwer & Rice법에 의한 수리전도도의 상관계수는 0.7314로서(Fig. 7b), C-B-P법과 Hvorslev법에 의한 수리전도도의 상관계수와 비슷한 값을 나타낸다.

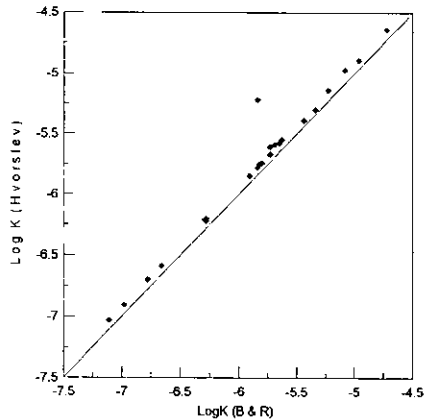
마지막으로 Hvorslev법과 Bouwer & Rice법의 관계를 보면(Fig. 6c), Hvorslev법으로 구한 수리전도도가 Bouwer & Rice법보다 약간 크지만 거의 같은 값을 보여준다. 둘 간의 상관계수는 0.9850로서, C-B-P법과 Hvorslev법이나 C-B-P법과 Bouwer & Rice법간의 상관계수보다 높다(Fig. 7c). 이는 Hvorslev법과 Bouwer & Rice법이 거의 같은 이론식이기 때문이다(식 (4)와 (6) 참조).



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Comparison of K values obtained by the C-B-P, the Hvorslev and the Bouwer & Rice methods.

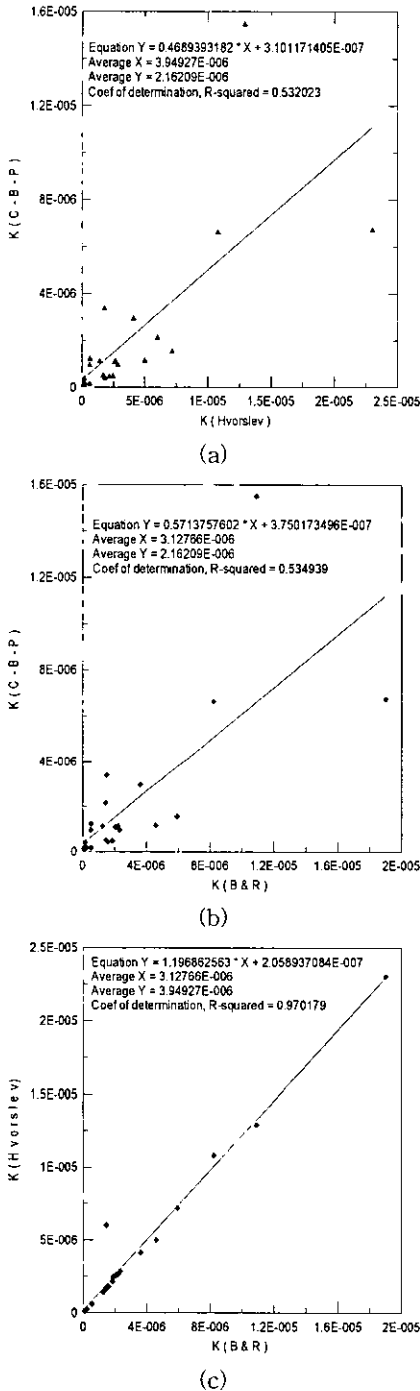


Fig. 7. Relation of hydraulic conductivity estimates among the C-B-P, the Hvorslev and the Bouwer & Rice methods.

슬러그의 주입과 회수의 효과

이론적으로는 슬러그의 주입과 회수에 관계없이 수리전도도는 같은 값을 보여 주어야 하지만 실제로는 그렇지 않은 경우가 많다. 국내의 원주지역에서 실시한 순간충격시험에서도 슬러그 주입 때가 회수 때보다 더 빠른 수위 회복을 보여 주었다(Lee and Lee, 1999). 앞에서 언급한 바와 같이, KJ2-1, KJ6, KJ19, KJ23호공에 대해서는, 슬러그를 주입한 후 자연수위까지 수위가 하강했을 때, 슬러그를 다시 회수하여 수위회복을 관찰하였다(Fig. 8). 그 결과, KJ19호공에서는 슬러그의 주입과 회수에 의한 시간에 따른 수위변화가 거의 동일하며, 슬러그 주입시의 수리전도도가 회수시의 수리전도도보다 약간 더 크게 나타나지만 슬러그 주입시나 회수시의 수리전도도에 큰 차이를 보이지는 않는다. 따라서, KJ19호공에서 슬러그 주입 및 회수시의 순간충격 시험은 일반적인 이론과 대체로 잘 들어맞는다. 그러나, KJ23호공에서는 슬러그 주입시의 수리전도도가 회수시의 수리전도도보다 더 크다. 반대로, KJ2-1호공과 KJ6호공에서는 슬러그 주입시의 수리전도도가 회수시의 수리전도도보다 더 작다(Fig. 8).

슬러그 주입시와 회수시의 수리전도도가 다르게 나타나는 현상은 여러 가지 원인으로 해석할 수 있을 것이다. 즉, 슬러그가 움직이는 영향권내의 시험 공벽 및 공벽부근의 스킨에 의해서 그런 현상이 일어날 수 있을 것이다. 스킨에는 케이싱의 설치상태, 케이싱과 공벽간의 충전재 유무, 공벽에 점토물질의 침전 또는 투수성 균열의 발달상태 등이다. 그리고, 슬러그 주입과 회수시의 압력의 차이도 생각할 수 있을 것이다. Dax(1987)는 슬러그의 압력에 의해서 제거되었던 세립질 물질이 슬러그를 회수하면서 스크린의 구멍을 막거나 시험공 내에 쌓인다고 하였으며, Butler et al.(1996)은 슬러그의 압력에 의해서 이동된 세립질 물질이 슬러그를 회수하면 시험공 주위의 균열 즉 지하수 통로에 침전된다고 하였다. Dax(1987)과 Butler et al.(1996)의 예는 주입시의 수리전도도가 회수시의 수리전도도보다 높은 경우이다.

KJ23호공의 경우에는 큰 규모의 대수층을 만나지는 않았으며(시추당시 자료에 의하면), 지표에서부터 7.0m까지 풍화토로 이루어져 있으며 7.0m 에

순간충격시험에 의한 화강암지역의 수리적 매개변수 산출

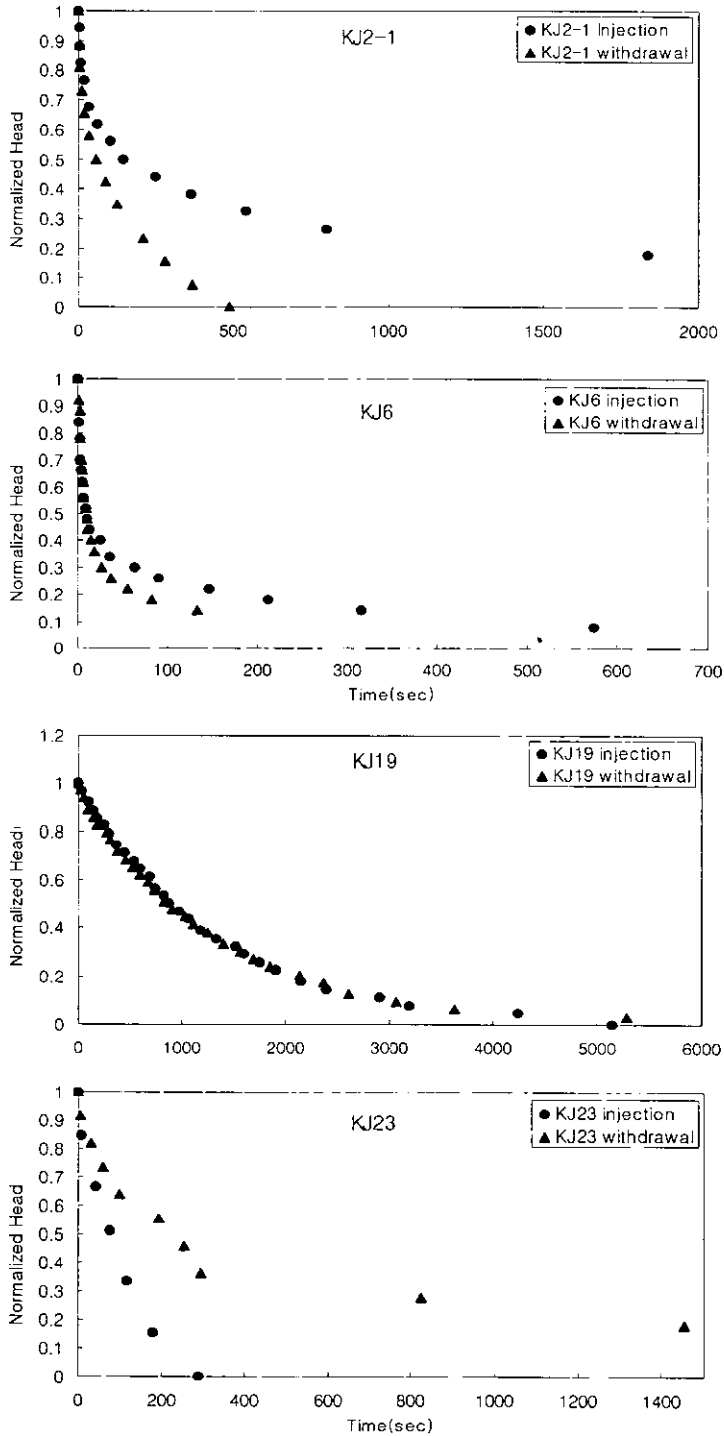


Fig. 8. Normalized head (H/H_0) versus time for a series of coupled injection and withdrawal slug tests at the wells KJ2-1, KJ6, KJ19 and KJ23.

서부터 공저(102.0m)까지는 화강암으로 이루어져 있다(KJ23호공에 대한 시추코어자료가 없으므로, 근처에 위치하고 있는 KJ4호공의 시추코어 자료를 가지고 KJ23호공의 지하지질을 유추함). 화강암내에 관입하고 있는 염기성 암맥은 28.9m~41.1m 구간에서 작게는 0.1m, 크게는 2.0m 정도의 폭으로 5매가 나타나고 있으며, 65.1m~67.2m구간과 68.0~69.1m구간에서도 나타나고 있다. 풍화정도를 보면, 42.7m를 기준으로 상부구간에서는 약한 내지 중간 정도의 풍화도를 보이고 있으나, 그 보다 심부구간에서는 주로 신선하거나 낮은 풍화도를 보이고 있다. 따라서, KJ23호공의 경우에 자연적인 균열의 발달상태와 연관지어 슬러그 주입시와 회수시의 수리상수값의 차이를 해석한다면, 투수성 균열대(몇 개의 투수성 균열이 비교적 천부(약 40m미만)에 존재하고 있음)에 의해서 슬러그 주입시의 수리전도도가 회수시보다 더 큰 것으로 해석된다.

수리적 성질의 지역적 분포특성

시험공의 수리적 특성을 동문지역(KJ6, KJ17, KJ18, KJ19호공), 남문지역(KJ7, KJ8, KJ12, KJ20, KJ21, KJ22호공), 기도원지역(KJ4, KJ14, KJ15, KJ16, KJ23호공) 그리고 서문지역(KJ1, KJ2, KJ2-1, KJ3호공)으로 구분하여 살펴보았다. 먼저, 동문지역을 보면, C-B-P법, Hvorslev법 그리고 Bouwer & Rice법에 의한 수리전도도의 산술평균값은 $4.21 \times 10^{-6} \sim 5.14 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 이다. 기하평균값도 $2.25 \times 10^{-6} \sim 3.28 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 로서 산술평균값보다 작으나 그 차이는 크지 않다. 이는 수리전도도의 범위가 넓지 않기 때문이다. 그러나, 저류계수의 산술평균값은 3.33×10^{-2} 인 반면에 기하평균값은 1.09×10^{-6} 로서 큰 차이를 보인다. 이는 시험공에 따른 저류계수값의 차이가 크기 때문이며, 저류계수값의 불확실성을 지시한다. 동문지역에 위치하는 KJ17호공의 시추코어자료를 보면, 풍화도가 3.0m까지이고, 그 밑에는 공저(70.0m)까지 화강암이 분포하고 있다(성익환 외, 1999). 그리고, 염기성 암맥이 13.4~14.1m, 14.3~15.5m, 15.9~16.4m, 16.9~17.2m, 43.15~43.5m, 57.2~57.8m, 62.2~63.2m, 65.8~65.9m 구간의 총 8매가 관입하고 있다. 풍화도는 대부분의 심도에서 낮은 또는 중간정도이고, 53.0~62.6m 구간에서만 중간 내지 높은 풍화도를 나타낸

다. 또한, 12.4m지점, 19.5~21.2m구간 그리고 33.7m지점에 단층이 나타나며 단층점토 또한 발달되어 있다. 이와 같이, KJ17호공에서는 풍화도가 비교적 낮고, 불투수성 단층이 나타나며, 염기성 암맥의 관입이 많으므로, KJ18호공(동문지역에서 가장 높은 수리전도도와 투수량계수를 가짐, 3.1항 참조)과는 달리 수리전도도가 상대적으로 낮다.

남문지역을 보면, C-B-P법, Hvorslev법 그리고 Bouwer & Rice법에 의한 수리전도도의 산술평균값은 $5.37 \times 10^{-7} \sim 1.14 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 로서 동문지역과는 큰 차이를 보인다. 그러나, 기하평균값은 $3.64 \times 10^{-6} \sim 5.21 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 로서 비슷하게 나타난다. 이는 수리전도도값의 범위가 동문지역보다 넓기 때문이다. 저류계수의 산술평균값은 4.84×10^{-2} 인 반면에 기하평균값은 1.23×10^{-4} 로서 큰 차이를 보인다. 이는 시험공에 따른 저류계수값의 차이가 크기 때문이며, 저류계수값의 불확실성을 지시한다. 남문지역에서 가장 낮은 수리전도도와 투수량계수를 가지는 공은 KJ21호공이며, 이것은 풍화산물 및 불투수성 염기성 암맥에 의한 낮은 투수성을 지시하고 있는 시추자료와 잘 일치하고 있다.

기도원지역에서 수리전도도의 산술평균값은 $8.97 \times 10^{-7} \sim 2.37 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 로서 남문지역과 비슷한 범위를 보이고, 기하평균값은 $7.21 \times 10^{-7} \sim 1.77 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 로서 산술평균값보다 약간 낮게 나타난다. 저류계수의 산술평균값은 4.46×10^{-2} 인 반면에 기하평균값은 2.19×10^{-4} 로서 큰 차이를 보인다. 기도원지역에서 가장 낮은 수리전도도를 보이는 KJ14호공은 지표에서부터 21.0m까지 풍화토로 이루어져 있으며, 21.0m에서부터 시추공저(70m)까지는 화강암으로 이루어져 있다. 화강암내에 35.1~41.1m과 68.9~69.4m구간에 염기성암맥이 관입하고 있다. 풍화도는 대부분의 심도에서 중간 또는 높게 나타나며, 60.7~65.1m구간이 신선하거나 낮은 풍화도를 보인다(성익환 외, 1999). 따라서, 풍화산물 및 불투수성 염기성 암맥에 의해서 투수성이 낮은 것으로 보인다.

서문지역에서는 수리전도도의 산술평균값이 $2.09 \times 10^{-6} \sim 7.06 \times 10^{-6} \text{m/sec}$, 기하평균값은 $1.15 \times 10^{-6} \sim 4.14 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 로서 기하평균이 산술평균보다 약간 낮다. 이는 동문지역과 마찬가지로 수리전도도의 범위가 넓지 않기 때문이다. 한편, 저류계수의 산술

순간충격시험에 의한 화강암지역의 수리적 매개변수 산출

평균값과 기하평균값은 0.1로서 똑같이 나타난다. 이는 시험공들 주변의 저류계수값이 균일함을 지시한다.

네 지역의 수리전도도를 서로 비교하면, 동문지역과 서문지역이 비교적 크게 나타나고, 기도원지역과 남문지역은 상대적으로 낮은 값을 보인다. 이는 기도원지역과 남문지역에서는 천부에 투수성 균열대의 발달이 미약하거나 풍화산물, 불투수성 염기성 암맥 등 불투수성 매질로 인해서 낮은 투수성을 가지기 때문으로 판단된다.

결론 및 토의

부산 금정산 화강암지역의 19개 시추공에서 행한 순간충격시험으로부터 C-B-P법, Hvorslev법, Bouwer & Rice법을 이용하여 수리적 매개변수를 산출하였다. C-B-P법, Hvorslev법, Bouwer & Rice법에 의해서 구한 수리전도도값은 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ m/sec의 범위를 보이며, 평균값은 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ m/sec의 범위를 보인다. 또한, 투수량계수는 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ m²/sec의 범위를 보인다. C-B-P법에 의해서 순간충격시험을 분석한 결과, 투수성 균열대가 잘 발달되어 있으면, 투수량계수와 수리전도도가 높게 나타나며, 풍화산물 및 불투수성 염기성 암맥이 존재하면 투수량계수와 수리전도도가 낮게 나타난다. 저류계수값은 유효 스크린 반경(스크린 자체의 반경, 자갈충진대까지의 반경 또는 시추로 인해서 확장된 파쇄대까지의 반경)의 불확실성으로 인하여 신뢰성이 떨어진다. Hvorslev법과 Bouwer & Rice법에서 수리전도도는 풍화토층과 천부대수층의 발달상태를 반영하므로, 풍화토층과 천부대수층의 두께가 두꺼우면 수리전도도가 높게 나타난다.

C-B-P법, Hvorslev법, Bouwer & Rice법으로 구한 수리전도도를 서로 비교하면, Hvorslev법으로 구한 평균 수리전도도가 가장 크고, 다음으로는 Bouwer & Rice법, C-B-P법으로 나타난다. Hvorslev법과 Bouwer & Rice법에 의한 수리전도도의 상관계수는 0.9850로서, C-B-P법과 Hvorslev법에 의한 수리전도도의 상관계수(0.7294)나 C-B-P법과 Bouwer & Rice법에 의한 상관계수(0.7314)보다 높다. 이것은 Hvorslev법과 Bouwer & Rice법은 서로 비슷한 이론적인 배경을 가지고 있기 때문

이다.

이론적으로는 슬러그의 주입과 회수에 관계없이 수리전도도는 같은 값을 보여 주어야 하지만 실제로는 그렇지 않은 경우가 많다(Lee and Lee, 1999). KJ2-1, KJ6, KJ19, KJ23호공에 대해서 슬러그 주입과 회수의 효과를 보면, KJ19호공에서는 슬러그의 주입과 회수에 의한 시간에 따른 수위변화가 거의 동일하며, 일반적인 이론과 대체로 잘 들어맞는다. 그러나, KJ23호공에서는 슬러그 주입시의 수리전도도가 회수시의 수리전도도보다 더 크다. 반대로, KJ2-1호공과 KJ6호공에서는 슬러그 주입시의 수리전도도가 회수시의 수리전도도보다 더 작다. 이와 같이 슬러그 주입시와 회수시의 수리전도도가 다르게 나타나는 현상은 슬러그가 움직이는 영향권 내의 시험공벽 및 공벽부근의 스킨에 의해서 일어날 수 있을 것이다. 스킨에는 케이싱의 설치상태, 케이싱과 공벽간의 충전재 유무, 공벽에 점토물질의 침전 또는 투수성 균열의 발달상태 등이다. 그리고, 슬러그 주입과 회수시의 압력의 차이도 생각할 수 있을 것이다.

동문, 남문, 기도원, 서문지역의 수리전도도를 서로 비교하면, 동문지역과 서문지역이 비교적 크게 나타나고, 기도원지역과 남문지역은 상대적으로 낮은 값을 보인다. 이는 기도원 지역과 남문지역이 천부에 투수성 균열대의 발달이 미약하거나 풍화산물 또는 불투수성 염기성 암맥 등의 불투수성 매질로 인해서 낮은 투수성을 가지기 때문으로 판단된다.

보다 자세한 순간충격시험자료 해석을 위해서는 시추공내에서 슬러그의 움직임에 영향을 받는 범위 내에 있는 절리의 발달상태에 대해서 파악하고, 심도별 절리간격, 절리간극 그리고 간극내 충전물의 여부 등을 알 필요성이 있으나, 본 연구에서는 자료의 부족 등으로 절리와 순간충격시험 분석치간에 정량적인 파악이 이루어지지 못하였다. 본 연구는 단지 순간충격시험 결과만으로 금정산지역 화강암의 수리적 매개변수를 산출한 것으로서, 앞으로 순간충격시험과 절리의 발달상태, 양수시험 그리고 수압시험과의 관련성에 대해서 깊이 있게 연구함으로써 보다 명확하게 이 지역의 수리적 성질을 밝힐 수 있을 것이며, 이에 대한 연구는 현재 진행 중이다.

사 사

본 연구는 부산대학교 학술연구조성비(4년과제: 1996.10.1~2000.9.30) 지원으로 수행되었으며, 연구를 지원해주신 학교 당국에 감사드린다. 아울러서, 본 논문을 위하여 유익한 조언을 하여 주신 심사위원께 감사드린다.

참 고 문 헌

- 성익환, 이병대, 조병욱, 류충렬, 김정수, 이춘오, 이봉주, 임현철, 이병태, 지세정, 김용욱, 성기성, 박덕원, 이대하, 김중렬, 현혜자, 김유성, 함세영, 윤선, 김학준, 1999, 금정터널지하수 유동체계 분석 및 동래온천지역 영향평가, 한국자원연구소, 443.
- 손치무, 이상만, 김명기, 김상욱, 김형식, 1978, 동래·월내도폭(1:50000) 및 설명서, 자원개발연구소, 27.
- 차문성, 1976, 부산지역의 불국사산성화강암류의 암석학적 연구, 광산지질, 9(2), 85-106.
- 최재우, 1984, 부산 금정산 남부지역에 분포하는 화강암체의 절리면에 대한 지반 역학적 연구, 부산대학교 지질학과 석사학위 논문, 3-16.
- 한석중, 함세영, 성익환, 이병대, 조명희, 조병욱, 1999, 동래온천지역의 지열수와 지하수의 지화학적 특성, 지질공학, 9(3), 207-225.
- 함세영, 조명희, 성익환, 김정숙, 이병대, 조병욱, 한석중, 1999, 부산 북서부 화강암지역 지하수의 화학적 특성, 수처리기술, 7(2), 57-68.
- 함세영, 조명희, 황진연, 김진섭, 성익환, 이병대, 2000, 부산 금정산-백양산 일대 용천수, 지하수 및 지열수의 지화학적 특성, 한국환경과학회지, 9(3), 229-239.
- Bouwer, H. and R.C. Rice, 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, Water Resour. Res., 12(3), 423-428.
- Bouwer, H., The Bouwer and Rice, 1989, Slug test—an update, Ground Water, 27(3), 304-309.
- Butler, J.J. Jr. and Z. Hyder, 1994, An assessment of the Nguyen and Pinder method for slug test analysis, Ground Water Monitoring and Remediation, 14(4), 124-131.
- Butler, J.J., Jr., C.D. McElwee, and W. Liu, 1996, Improving the quality of parameter estimates obtained from slug tests, Ground Water, 34(3), 480-490.
- Butler, J.J., Jr., 1996, Slug tests: Some practical considerations, Kansas Geological Survey Open-File Rept. 94-16.
- Chirlin, G.R., 1989, A critique of the Hvorslev method for slug test analysis: The fully penetrating well, Ground Water Monitoring Review, 9(2), 130-138.
- Cooper, H.H., Jr., J.D. Bredehoeft, and I.S. Papadopoulos, 1967, Response to a finite diameter well to an instantaneous charge of water. Water Resour. Res., 3, 263-269.
- Dax, A., 1987, A note on the analysis of slug tests, Jour. Hydr., Vol.91, 153-177.
- Hvorslev, M.J., 1951, Time lag and soil permeability in ground water observations, U. S. Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, Bulletin 36.
- Lee, J.-Y. and K.-K. Lee, 1999, Analysis of the quality of parameter estimates from repeated pumping and slug tests in a fractured porous aquifer system in Wonju, Korea. Ground Water 37(5), 692-700.
- Mas-Pla, J., T.-C.J. Yeh, T.M. Williams, and J.F. McCarthy, 1997, Analyses of slug tests and hydraulic conductivity variations in the near field of a two-well tracer experiment site, Ground Water 35(3), 492-501.
- McElwee, C.D., G.C. Bohling, and J.J. Butler, Jr., 1995a, Sensitivity analysis of slug tests. Part 1. The slugged well, Jour. Hydr., 164, 53-67.
- McElwee, C.D., G.C. Bohling, and J.J. Butler, Jr., 1995b, Sensitivity analysis of slug tests. Part 2. Observation wells. Jour. Hydr., 164, 69-87.
- Nguyen, V. and G.F. Pinder, 1984, Direct calculation of aquifer parameters in slug test

- analysis, In Groundwater Hydraulics, J. Rosenshein and G. D. Bennett (eds.), American Geophysical Union Water Resour. Monogr. 9, 222-239.
- Papadopulos, I.S., J.D. Bredehoeft, and H.H. Cooper, Jr., 1973, On the analysis of "slug test" data. Water Resour. Res., 9, 1087-1089.
- Weight W.D. and Wittman, G.P., 1999, Oscillatory slug-test data sets: a comparison of two methods, Ground Water, 37(6), 827-835.
- Zlotnik, V., 1994, Interpretation of slug and packer tests in anisotropic aquifers, Ground Water, 32(5), 761-767.

함세영

부산대학교 지질학과

609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Tel: 051-510-2252

e-mail : hsy@hyowon.pusan.ac.kr

김분수

부산대학교 지질학과

609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Tel: 051-510-3451

e-mail : hyd009@hyowon.pusan.ac.kr

성익환

한국지질자원연구원 환경지질연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30번지

Tel: 042-868-3082

e-mail : sih@rock25t.kigam.re.kr

이병대

한국지질자원연구원 환경지질연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30번지

Tel: 042-868-3088

e-mail : blee@rock25t.kigam.re.kr

김광성

부산대학교 지질학과

609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Tel: 051-510-3451

e-mail : kksung21@hanmail.net