

부산 도심지역 미고결층과 기반암의 수리지질 특성

함세영^{*1)} · 차용훈¹⁾ · 정재열¹⁾

¹⁾부산대학교 지질학과

Hydrogeological Properties of Unconsolidated Formations and Bedrocks in the Central Area of Busan Metropolitan City

Se-Yeong Hamm^{*1)} · Yong-Hoon Cha¹⁾ · Jae-Yeol Cheong¹⁾

¹⁾Department of Geology, Pusan National University

본 연구는 부산광역시 도심지역 중 부산진구 양정동부터 동구 수정동까지 지역에 대한 수리지질 특성을 파악하였다. 이를 위하여 양정동의 암반대수층과 부산진구 부산진역 부근의 미고결층에서 양수시험을 실시하였다. 특히 양정동의 암반대수층은 동래단층대와 만나는 지역으로서 동래단층의 수리지질 특성을 파악하는데 중점을 두었고, 부산진구 부산진역 부근의 미고결층에서 행한 양수시험에서는 해안매립지와 해안퇴적층(미고결층)의 수리지질 특성을 파악하였다. 양정동의 암반대수층에 대해서는 Moench의 구상체 이중공극모델이 적합한 것으로 나타났으며, 부산진역 부근의 미고결층에 대해서는 Neuman의 자유면대수층 모델이 적당한 것으로 나타났다. 암반대수층의 평균 투수량계수는 $2.75 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 평균 저류계수는 6.41×10^{-5} 이고, 미고결층의 투수량계수는 $8.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, 저류계수는 3.70×10^{-3} 이다. 한편 순간충격시험에 의한 평균 투수량계수와 평균 저류계수는 각각 $9.84 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 와 1.21×10^{-2} 이다.

주요어 : 기반암 대수층, 미고결 대수층, 구상체 이중공극모델, 자유면 대수층 모델, 부산광역시

This study aims to investigate hydrogeological properties of the central area from Yangjeong-Dong to Sujeong-Dong in Busan Metropolitan City. For this study, pumping tests were carried out in the bedrock aquifer of Yangjeong-Dong and the unconsolidated aquifer near Busanjin railway station. The pumping test in the bedrock aquifer containing the Dongrae fault revealed specific hydraulic characteristics with respect to the fault. The pumping test in the unconsolidated aquifer revealed the hydrogeologic properties of both coastal landfill and fine sediments. It was found that the Moench's sphere-shaped dual-porosity model fits the bedrock aquifer, whereas the Neuman's unconfined aquifer model accords with the unconsolidated aquifer. The average transmissivity and storage coefficient of the bedrock aquifer are $2.75 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ and 6.41×10^{-5} and those of the unconsolidated aquifer are $8.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ and 3.70×10^{-3} , respectively. On the other hand, slug tests gave average transmissivity and storage coefficient values of $9.84 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ and 1.21×10^{-2} , respectively.

Key words : bedrock aquifer, unconsolidated aquifer, sphere-shaped dual-porosity model, unconfined aquifer model, Busan Metropolitan City

* Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

서 언

우리나라 대부분의 도시지역에는 지속적인 개발과 함께 대규모 지상 건축물, 지하 공간을 활용한 지하철, 터널, 지하주차장, 기타 지하시설 등이 건설되고 있다. 이와 같은 대규모 건축물의 축조로 인한 지하지질과 수리지질 상태 파악이 크게 요구되고 있으나, 도심지역에는 이미 구조물이 들어서 있거나 아스팔트, 시멘트 등으로 지상이 피복되어 있어서 이를 파악하기가 용이하지 않다. 더구나 각종 토목공사시에 발생하는 굴착공 자료도 체계적으로 관리되지 않고 있어서 추후의 지하지질 및 수리지질 상태 파악에 별 도움을 주지 못하고 있다.

부산광역시시는 지형적으로 산지가 도시의 중심을 남북으로 관통하고 있어서 다수의 도로터널, 지하철, 고속철도 터널이 이미 건설되었거나 건설 중에 있다. 만덕고개를 지나는 만덕 1터널과 만덕 2터널이 이미 건설되어 있으며, 지하철 3호선 만덕터널이 완공 되었다. 또한 금정산 지역에는 장전동과 화명동을 잇는 산성터널이 계획되어 있다. 한편 고속철도 터널이 금정산 줄기를 관통하여 도심지로 들어와 부산진역 부근까지 계획되어 있다. 예정되어 있는 고속철도 터널은 기존의 부산 지하철 1호선, 2호선과 교차되게 되어 있다.

부산지역에 대해서는 지하수 유동과 수질에 관한 다수의 논문들이 발표되었다. 정상용 외(1997)는 부산 석대쓰레기매립장의 침출수를 연구하였다. 성익환 외(1999a)는 금정산지역의 시험공에 대한 양수시험, 수압시험을 수행하여 이 지역 불국사화강암의 수리적 성질을 평가하였으며, 금정터널 굴착 예정지에 대한 지하수 유동체계 분석 및 동래온천지역에 미칠 영향을 분석하였다. 성익환 외(1999b)와 조병욱(2001)은 부산지역 전체에 대해서 지하수 유동과 수질 특성을 연구하였으나, 무기성분에 대해서만 연구하였으며, 토지이용도에 따른 수질 특성에 대해서는 언급하지 않았다. 함세영 외(1999) 및 김정숙(1999)은 부산 금정지역 지하수의 수리지화학적 특성을 연구하였다. 함세영 외(1999)는 부산 북서부지역 화강암 지하수의 지화학적 특성 및 오염 가능성 연구로부터 지하수의 pH는 5.33~7.54이며, 대부분이 음용수 기준치 범위 (5.8~8.5)내에 있으며, 지하수유형은 거의 대부분이 Ca-HCO₃형과 Na-HCO₃형에 속하는 것으로 보고하였다. 조명희(1999)는 부산 남부지역 안산암질암 지하수와 북서부지역 화강암 지하수의 지화학적 특성을 연구하였다. Han et al.(1999)은 동래온천지역의 온천공과 주변의 지하수공으로부터 시료를 채취분석하고, 주성분분석, 지화화온도계를 이용하여 동래온천 지열수와 금정

산동편 및 동래지역 지하수의 수리지화학적 특성을 연구하였다. 함세영 외(2000)는 금정산-백양산 지역 및 주변 지역의 용천수, 지하수 그리고 지열수의 수질 특성을 비교, 분석하였다. 심병완(2003)은 지하수공 장기모니터링, 지구물리 탐사, 지구통계학적 기법, 수리동역학적 모델링을 이용하여 부산광역시 해안지역의 수리동역학적 해수침투 특성을 연구하였다.

본 연구는 터널 등 지하시설물이 다른 대도시 지역 보다 많은 부산광역시 도심지역의 수리지질 특성을 파악함으로써 앞으로의 지상 및 지하구조물과 터널 건설에 따른 지하수 영향을 평가하는데 도움을 주고자 한다. 본 연구에서는 부산진구 양정동과 동구 수정동까지 부산의 도심지역(Fig. 1)의 기반암과 미고결층에서 현장수리시험을 실시하였다. 특히 동래단층대와 만나는 양정동의 기반암지역의 양수시험으로부터 동래단층대의 수리지질 특성을 파악하고자 하였고, 부산진구 부산진역 부근의 미고결층에서 행한 양수시험과 순간충격시험으로부터는 미고결층(해안매립층과 해안퇴적층)의 수리지질 특성을 파악하고자 하였다.

양수시험분석 이론

양수시험분석은 기본적으로는 대수층의 수리상수를 산출하기 위해서 수행되며, 그외에도 대수층의 수직적, 수평적인 규모와 대수층의 형태에 관한 정보를 제공해준다. 그러나 지질학적인 정보가 부족한 상태에서 양수시험분석을 실시할 때는 어떤 모델이 실제 현장조건에 가장 적합한지를 결정하기가 어렵다. 균열암반대수층에서 지하수 유동을 지배하는 중요한 인자는 불연속면(단층, 균열)의 연장, 빈도, 연결성, 교차성, 방향성, 경사, 간극의 변화 정도, 거칠기, 충전물질과 같은 불연속면의 성질 등이다. 따라서 균열암반내의 지하수 흐름은 어떤 방향성의 균열이나 단층의 발달 상태에 지배를 받기 때문에 2차원 방사상 모델인 Theis 식과 잘 맞지 않는 경우가 많다. 그러므로 지질구조 정보를 상세히 알수록 현장 조건에 적합한 모델을 선정하기가 쉬우며, 현장조건에 적합한 수리상수를 계산할 수 있다.

균열암반내 지하수 흐름에 대한 접근방법에는 균열암반을 연속체로 보는 경우와 불연속체로 보는 경우가 있다. 균열암반을 연속체로 보는 경우에는 암반을 수리지질학적으로 균등하면서 다공질로 해석한다. 그러나 균열암반을 불연속체로 보면 지하수 흐름은 균열들의 연장, 방향성, 경사, 빈도, 균열면의 성질, 균열과 균열간의 연결성과 교차성에 좌우될 것이다. 기존

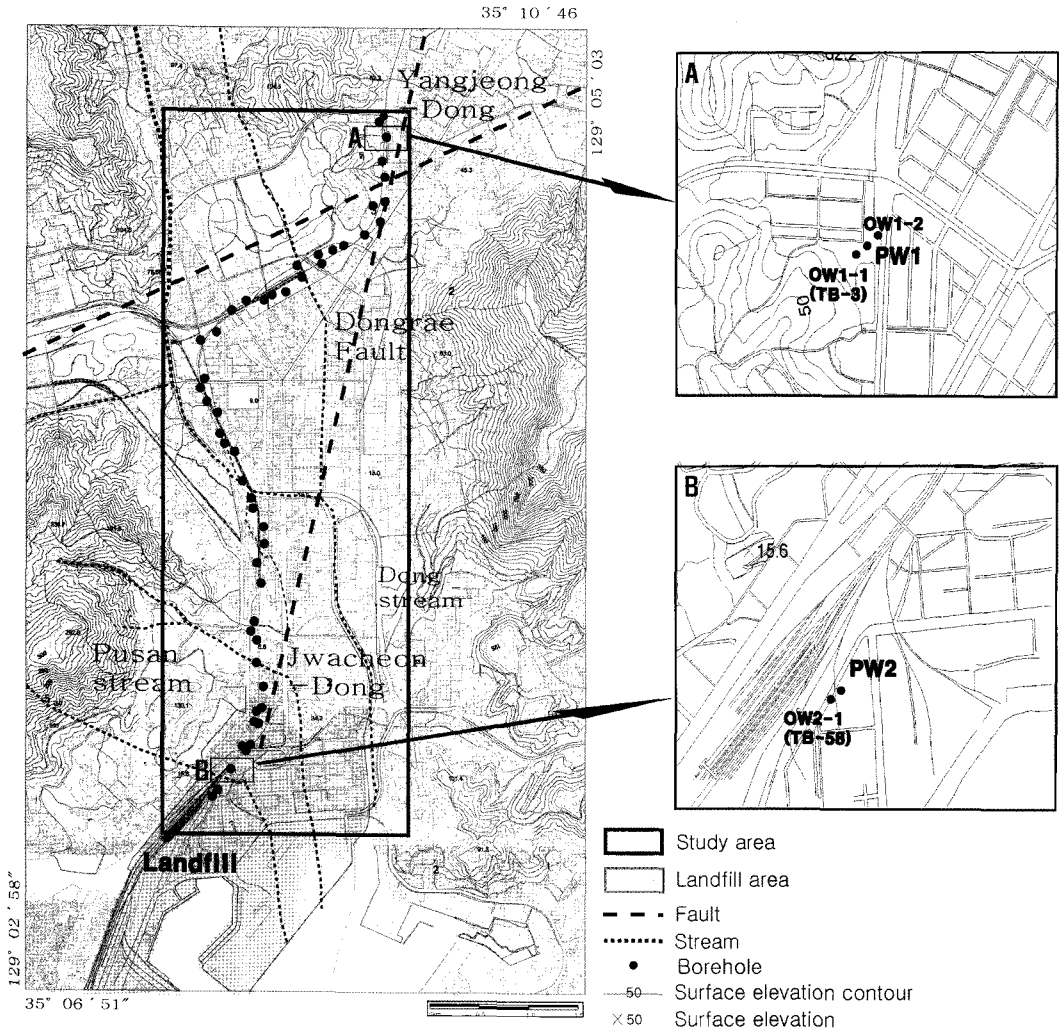


Fig. 1. Study area.

의 양수시험분석모델은 모두 연속체 모델로서 해석학적 모델이다. 일반적으로 양수시험분석에 이용되는 식에는 Theis(1935), Papadopulos-Cooper(1967), Hantush(1960), Hantush-Jacob(1955), Moench(1984), Neuman(1975), Neuman-Witherspoon(1969), Gringarten-Witherspoon(1972), Gringarten-Ramey(1974) 식 등이 있다.

본 연구지역의 암반대수층의 양수시험분석에서는 부정류의 구상체 이중공극모델(Moench, 1984)이 가장 적당한 것으로 나타났다(다음 절 설명 참고). 따라서 Moench의 구상체 이중공극모델의 이론적인 배경에 대해서 보다 자세히 설명하고자 한다. 이중공극모델

은 대수층을 수리전도도가 낮고 저유율이 높은 일차공극 부분(공극성 블록 또는 준대수층)과 수리전도도가 높고 비저유율이 낮은 이차공극부분(균열대 또는 대수층)으로 구분하여 모식화하는 것이다(Barenblatt et al., 1960; Warren and Root, 1963; Boulton and Streltsova, 1977; Kazemi, 1969; 함세영, 1999). 함세영(1999)은 분할유동차원에 대한 구상체 이중공극모델을 제시하였다. 부정류의 구상체 이중공극모델(Moench, 1984)은 기반암내 균열대와 공극성 매체가 구상형으로 발달하는 경우로서, 높은 투수율과 낮은 비저유율을 가지는 균열과 낮은 투수율과 높은 비저유율을 가지는 공극성 구상체들로 이루어진 대수층을

대상으로 한다(Fig. 2). 실제로는 구상체 이중공극모델은 수직과 수평의 균열대와 입방체의 블록들로 이루어진 암반대수층을 단순화시켜 해석하기 위한 것이다.

Moench(1984)의 구상체 이중공극모델은 우물저장 효과와 미소한 두께의 우물손실효과를 고려하고, 균열대와 블록 사이에 존재하는 균열스킨의 영향도 포함한다. 균열스킨은 블록과 균열대 사이에 점도광물과 같은 2차광물이 충전되어 있어서 블록과 균열대간의 지하수 유동이 원활하지 못한 경우를 고려하기 위한 것이다. 분할유동차원의 구상체 이중공극 대수층(균열대)내 수위하강식(함세영, 1999)의 2차원 형태는

$$\frac{K}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left(r \frac{\partial s_1}{\partial r} \right) = S_s \frac{\partial s_1}{\partial t} + v \quad (1)$$

과 같다. 여기서, K 는 균열대의 수리전도도(LT^{-1}), S_s 는 균열대의 비저유율(L^{-1}), S_1 는 균열대내 수위강하(L), r 은 양수정과 관측정간의 거리(L), v 는 구상체 블록으로부터 균열대쪽으로 공급되는 단위체적당 지하수량(T^{-1})으로서, 블록의 중심으로부터의 거리(L) ρ 에 대한 블록내의 수두 변화율에 비례하며(Fig. 2),

$$v = - \frac{3K'}{b'} \left(\frac{\partial s_2}{\partial \rho} \right)_{\rho=0} \text{ 와 같이 표현된다}$$

(Moench, 1984). b' 는 구상체 블록의 중심으로부터 균열대까지의 방사상 거리(L) 즉, 구상체 블록의 반지름이다.

또한 양수에 따른 우물내의 저장량의 변화는

$$W_s \frac{\partial s_w}{\partial t} = Q + 2\pi K b r_w \left(\frac{\partial s_1}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (2)$$

여기서, Q 는 양수량(L^3T^{-1}), W_s 는 우물저장계수(L^2), S_w 는 양수정에서의 수위강하(L), r_w 는 양수정의 반경(L), b 는 균열대의 두께(L)이다.

만약 공벽과 대수층 간에 미소두께의 우물손실이 존재한다면, 양수정내의 수위강하는 $r = r_w$ 에서의 대수층의 수위강하와 다를 것이다.

$$s_w(t) = s_1(r_w, t) - s_{r_w} \left(\frac{\partial s_1}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (3)$$

여기서, S_1 는 우물손실상수이다. 초기조건은

$$s_w(r, t=0) = s_1(r, t=0) = s_2(r, t=0) = 0 \quad (4)$$

이고, 경계조건은 양수시작후 경과시간 t 에 대해서

$$s_1(r \rightarrow \infty, t) = s_2(r \rightarrow \infty, t) = 0 \quad (5)$$

이다. 여기서, S_2 는 블록내 수위하강(L)이다.

한편, 구상체 블록내 수위하강 미분방정식은

$$\frac{\partial^2 (\rho S_2)}{\partial \rho^2} = \frac{S_s'}{K'} \frac{\partial (\rho S_2)}{\partial t} \quad (6)$$

과 같다. 여기서, K' 는 블록의 수리전도도(LT^{-1}), S_s' 는 블록의 비저유율(L^{-1})이다. (6)식의 초기조건은 양수정으로부터의 모든 거리에 대해서

$$S_2 = 0 \quad (t=0 \text{ 일 때 } 0 < \rho \leq b' \text{ 에 대해서}) \quad (7)$$

이고, 경계조건은

$$s_2 = s_1 + b' S_F \left(\frac{\partial s_2}{\partial \rho} \right)_{\rho=b'} \quad (8)$$

이다. 그리고 양수경과시간 t 와 $\rho = 0$ 에 대해서 S_2 는 유한한 값을 가진다. S_F 는 무차원의 균열스킨 상수로서 $S_F = K' b_s / K_s \rho$ 와 같다. 여기서 b_s 는 균열스킨의 두께(L)이고, K_s 는 균열스킨의 수리전도도(LT^{-1})이다.

상기 식들에 무차원의 매개변수를 도입하면,

$$t_D = \frac{4K_t t}{S_s r_w^2} \quad (9)$$

$$r_D = r / r_w \quad (10)$$

$$\rho_D = \rho / b' \quad (11)$$

$$s_{iD} = \frac{4\pi K b s_i}{Q} \quad (i=1, 2, w) \quad (12)$$

$$W_{sD} = \frac{W_s}{\pi b r_w^2 (S_s + S_s')} \quad (13)$$

과 같다. 무차원 매개변수들을 이용하여 (1), (2), (3),

(6)식을 무차원식으로 고치고, Laplace 변환시키면

$$\frac{1}{r_D} \frac{d}{dr_D} \left(r_D \frac{d \bar{s}_{1D}}{dz_D} \right) = 4p\omega \bar{s}_{1D} - \lambda \left(\frac{d \bar{s}_{2D}}{d\rho_D} \right)_{\rho_b=0} \quad (14)$$

$$pW_{sD} \bar{s}_{wD} = \frac{1}{p} + \frac{1}{2} \left(\frac{d \bar{s}_{1D}}{dr_D} \right)_{r_D=1} \quad (15)$$

$$\bar{s}_{wD}(p) = \bar{s}_{1D}(1,p) - s_f \left(\frac{d \bar{s}_{1D}}{dr_D} \right)_{r_D=1} \quad (16)$$

$$\frac{d^2 (\rho_D \bar{s}_{2D})}{d\rho_D^2} = \frac{12p(1-\omega)}{\lambda} (\rho_D \bar{s}_{2D}) \quad (17)$$

과 같이 된다. 여기서, p 는 Laplace 변수이다. 블록과 균열간의 교차류(cross-flow)계수(λ , 무차원)와 균열

과 블록의 비저유율의 합에 대한 균열의 비저유율의 비(ω , 무차원)는 각각

$$\lambda = \frac{3K r_w^2}{K b'^2} \quad (18)$$

$$\omega = \frac{S_s}{S_s + S_s'} \quad (19)$$

와 같다.
(17)식의 일반해는

$$\rho_D \bar{s}_{2D}(\rho_D, p) = A \cosh(n\rho_D) + B \sinh(n\rho_D) \quad (20)$$

와 같다. 여기서,

$$n^2 = \frac{12p(1-\omega)}{\lambda} \quad (21)$$

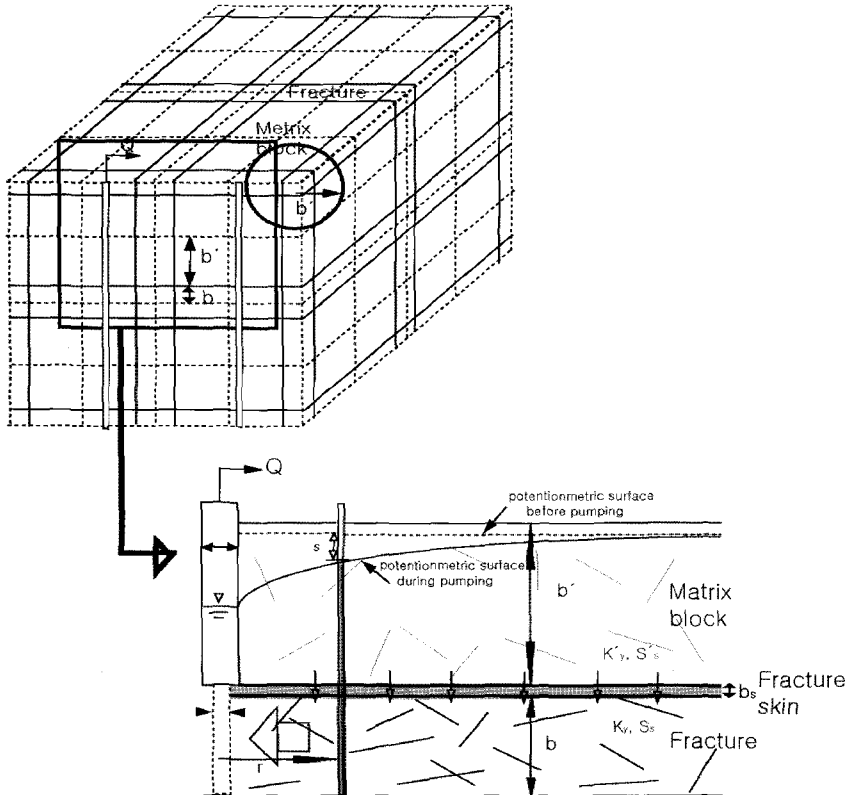


Fig. 2. Sphere-shaped dual-porosity model.

이다. 초기조건 (7)식과 경계조건 (8)식을 이용하여, A, B를 구하고, 이를 (20)식에 대입하면

$$\bar{s}_{2D} = \frac{\bar{s}_{1D} \sinh(n\rho_D)}{\sinh(n\rho_D) + S_F \rho_D (\sinh(n) - n \cosh(n))} \quad (22)$$

이 된다.

Laplace 영역에서 균열대내의 양수정과 관측정의 수위하강 해는

$$\bar{s}_{wD} = \left\{ p \left[p W_{sD} + \frac{1}{2} \frac{\sigma K_1(\sigma)}{K_0(\sigma) + s_f \sigma K_1(\sigma)} \right] \right\}^{-1} \quad (23)$$

$$\bar{s}_{1D} = \left\{ p \left[p W_{sD} + \frac{1}{2} \frac{\sigma K_1(\sigma)}{K_0(\sigma) + s_f \sigma K_1(\sigma)} \right] \right\}^{-1} \frac{K_0(\sigma r_D)}{K_0(\sigma) + s_f \sigma K_1(\sigma r_D)} \quad (24)$$

이 된다. 여기서,

$$\sigma^2 = 4p\omega + \frac{\lambda n \tanh(n)}{1 + S_F n \tanh(n)} \quad (25)$$

이고, $K_0(\sigma)$ 와 $K_1(\sigma)$ 는 각각 독립변수 σ 의 0차수 2종 변형 베셀함수와 1차수 2종 변형 베셀함수이다. (22), (23), (24)식은 Stehfest algorithm(1970)에 의해서 실수영역으로 변환시킬 수 있다.

암반대수층의 양수시험 결과 해석

동래단층대가 지나가는 부산진구 양정동의 암반대 수층에서 양수시험을 실시하였다(Fig. 1). 양수정 PW1은 단층대의 기반암(지하 60m)까지 굴착하였다. 관측공 OW1-1(TB-3공)과 OW1-2는 양수정으로부터 각각 3m 거리에 위치하고 있다(Fig. 3). 2004년 5월 12일에 양수정 PW1에서 4시간 동안 33m³/d로 양수하였으며, 이때 PW1, OW1-1(TB-3), OW1-2에서 수위하강을 관측하였다. 양수정에는 Solinst 사의 Level logger(수위 측정범위 30m), 관측공에는 Eijkelkamp 사의 Diver DI240(수위 측정범위 10m)을 설치하여 1초 간격으로 수위강하를 자동 측정하였고, 양수종료 후 4시간 45분 동안 수위회복을 측정하였다.

PW1, OW1-1(TB-3공), OW1-2의 시추주상도 자료에 의하면, 지표에서 10m까지는 매립토와 충적층으로 구성되어 있으며, 20m까지는 풍화대 그리고 공저인 60m까지는 안산암질암으로서 전체적으로 파쇄대가 발달되어 있다(Fig. 3). OW1-1(TB-3)호공 시추자료에

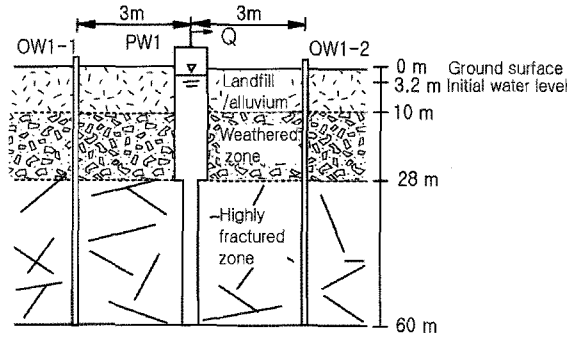


Fig. 3. Pumping and observation wells drilled in the fractured rock.

Table 1. Pumping test analysis at the bedrock aquifer using Moench's spherical-block dual-porosity model.

Pump well	Obs. well	T (m ² s ⁻¹)	K (ms ⁻¹)	S	S _s (m ⁻¹)	K' (ms ⁻¹)	S _s ' (m ⁻¹)
PW1	PW1	2.14E-5	5.32E-7	2.07E-6	5.17E-8	4.42E-8	1.15E-7
	OW1-1 (TB-3)	2.93E-5	7.33E-7	1.03E-4	2.58E-6	1.68E-8	1.14E-3
	OW1-2	3.17E-5	7.92E-7	2.52E-5	6.30E-7	9.70E-9	6.95E-4
	Arith. mean	2.75E-5	6.86E-7	6.41E-5	1.61E-6	2.36E-8	9.18E-4

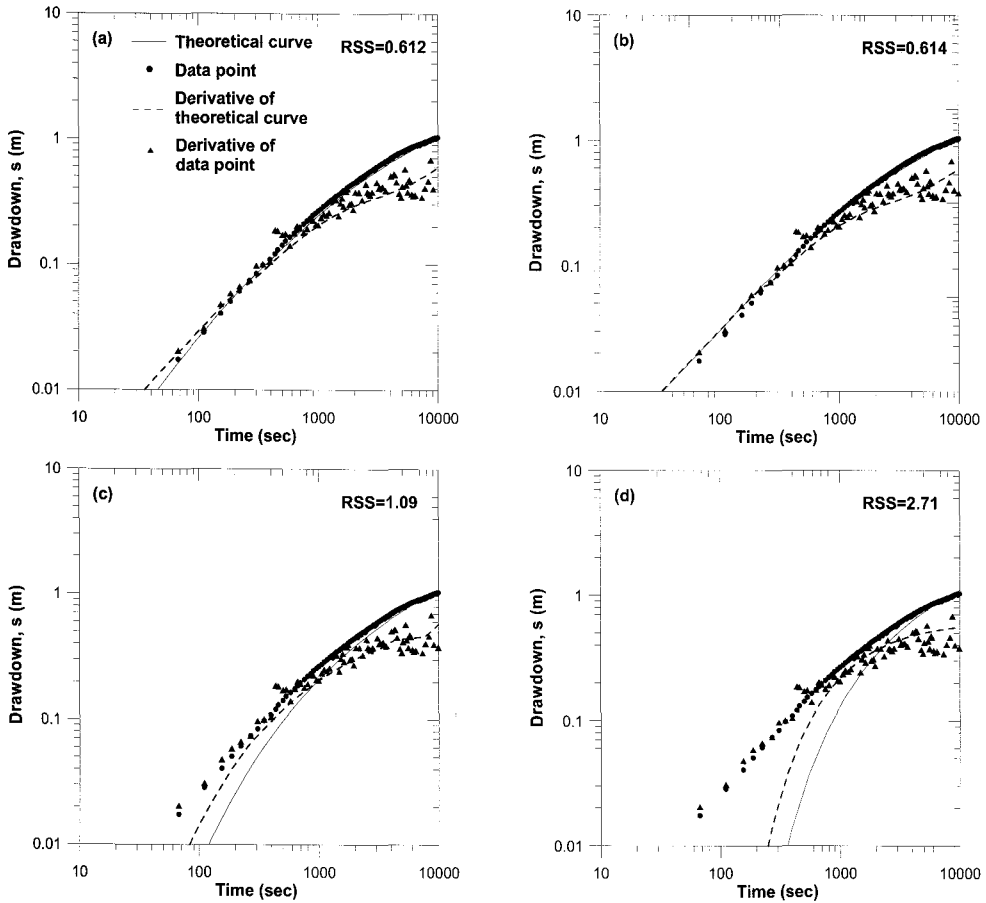


Fig. 4. Comparison of various models for pumping test analyses at borehole OW1-1 (bedrock aquifer). (a) Moench (1984) dual-porosity model with spherical-shaped blocks; (b) Moench (1984) dual-porosity model with slab-shaped blocks; (c) Moench (1985) leaky aquifer model; (d) Theis (1935) model.

의하면, 지표하 42~58m의 심하게 파쇄되어 있는 구간이 동태단층대의 것으로 판단된다. 안산암절암내에 발달되어 있는 절리들은 주로 수직절리와 경사각 10°, 45° 절리들이다. 그리고 변질대로 보이는 일부 구간에서는 지하수에 의한 풍화작용의 산물인 점토광물이 절리간극을 충전하고 있다. 이와 같은 지질학적 증거들로 볼 때, Moench(1984)의 구상체 이중공극모델이 적당할 것으로 예상되었다. 따라서 양수시험에서 얻어진 수위관측자료를 이용하여 Moench(1984)의 구상체 이중공극모델, Moench(1984)의 판상체 이중공극모델, Moench(1985)의 누수대수층 모델, Theis 식을 적용시켜 본 결과, 역시 구상체 이중공극모델이 가장 적

합한 모델로 나타났다(Fig. 4).

구상체 이중공극모델에 의해서 수리지질수를 구한 결과, 양수정 PW1에서는 균열대(단층대)의 수리전도도가 5.32×10^{-7} m/s, 비저유율이 $5.17 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$ 이다(Table 1). OW1-1공에서는 수리전도도가 7.33×10^{-7} m/s, 비저유율이 $2.58 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, 그리고 OW1-2공에서는 수리전도도가 7.92×10^{-7} m/s, 비저유율이 $6.30 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ 이다. 따라서, 균열대의 평균 수리전도도와 비저유율은 각각 6.86×10^{-7} m/s, $1.61 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 이다 한편, 블록(절리의 발달이 미약한 부분)의 평균 수리전도도와 비저유율은 각각 2.36×10^{-8} m/s와 $9.18 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 이다. 블록의 평균 비저유율 계산시에는 양수정인 PW1의 값을 배제

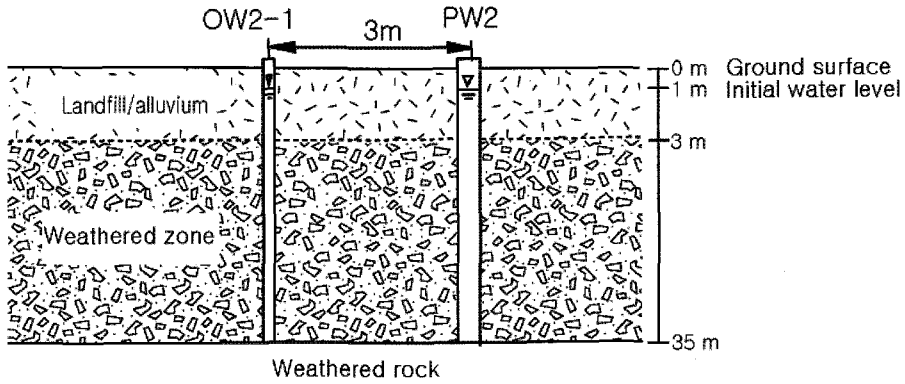


Fig. 5. Pumping and observation wells drilled in the unconsolidated aquifer.

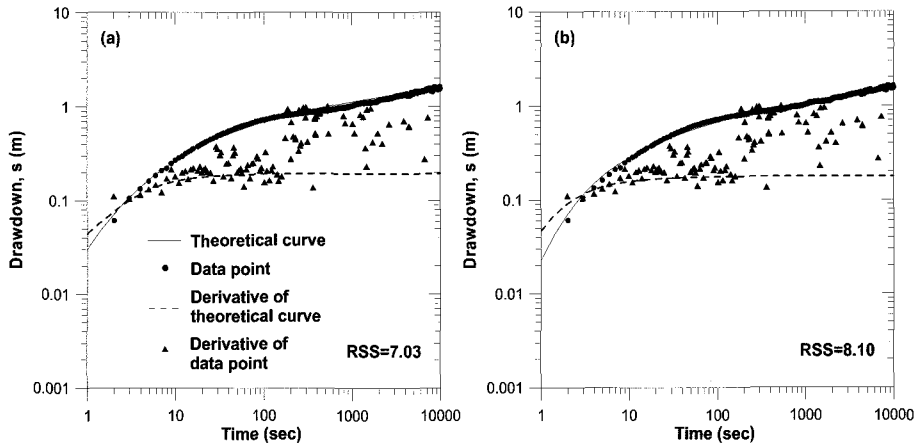


Fig. 6. Observed and theoretical curves of borehole PW2 for the unconsolidated aquifer using (a) Neuman and (b) unconfined Theis models.

Table 2. Pumping test analysis at the unconsolidated sediment using Neuman’s unconfined aquifer model.

Pump well	Obs. well	T (m ² s ⁻¹)	K (ms ⁻¹)	S	S _s (m ⁻¹)
	PW2	3.28E-4	1.51E-5	2.81E-1	1.29E-2
PW2	OW2-1 (TB-58)	1.32E-3	6.08E-5	3.70E-3	1.71E-4
	Arith. mean	8.42E-4	3.39E-5	3.70E-3	1.71E-4

하였다. 그 이유는 양수정에서는 유효반경의 불확실성으로 인하여 비저유율값의 오차가 매우 크기 때문이다(Table 1). 균열대와 블록의 수리전도도와 비저유율을 비교하면, 균열대의 투수성이 블록보다 크고, 저류성은 더 작음을 알 수 있다.

암반대수층의 두께가 40m이므로 양수정에서의 투수량계수는 $2.14 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 이다. 한편, OW1-1의 투수량계수와 저류계수는 각각 $2.93 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 와 1.03×10^{-4} 이고, OW1-2에서는 투수량계수와 저류계수가 각각 $3.17 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 와 2.52×10^{-5} 이다. 따라서 균열대의 평균 투수량계수와 평균 저류계수는 각각 $2.75 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 와 6.41×10^{-5} 이다. 평균 저류계수 계산시에 양수정의 저류계수는 고려하지 않았다.

미고결층에서의 양수시험 결과 해석

동구 수정동의 부산진역 부근 미고결층에서 양수시험을 실시하였다. 양수정 PW2로부터 3m거리에 관측공 OW2-1공(TB-58공)이 위치하고 있다(Fig. 5). 양수정 PW2에서는 4시간 동안 $69 \text{ m}^3/\text{d}$ 로 양수시험을 실시하였으며, 양수종료 후 3시간 동안 수위회복을 관측하였다. 기반암의 경우와 같이 자동 수위 측정센서를 사용하여 지하수위를 측정하였다. OW2-1공(TB-58공)의 시추자료에 의하면, 지상에서 3m까지는 모래질 실토와 점토로 구성된 층적층과 매립층이 분포한다. 특히, 지하 10.5m 부근에는 실트내지 점토로 구성된 해성층이 분포하며 패각화석(이매패)을 함유하고 있다. 그 아래 35m까지는 규장암맥의 풍화대로 이루어져 있다(Fig. 5). 풍화대내에는 지하수에 의한 변질대와 다수의 절리들이 발달되어 있다.

시추자료에 의하면 이 지역의 미고결층은 대체로 자유면대수층에 해당함을 알 수 있다. 그러나, 대수층의 종류를 확인하기 위하여 자유면대수층의 Neuman(1975)식과 Theis식을 서로 비교한 결과, Neuman식의 잔차제곱의 합(Residual Sum of Squares, RSS)은 7.03이고, Theis식은 8.10으로서 자유면대수층의 Neuman식이 수위하강곡선과 더 잘 맞는 것으로 나타났다(Fig. 6). 양수정에서 Neuman식으로 구한 투수량계수는 $3.28 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, 저류계수는 2.81×10^{-1} 이고, 관측공에서는 투수량계수는 $1.32 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, 저류계수는 3.70×10^{-3} 이다(Table 2). 한편, 투수량계수를 대수층의 두께(21.7m)로 나누어서 수리전도도를 구한 결과, 양수정 PW2에서는 $1.51 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 관측공 OW2-1에서는 $6.08 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 이다.

순간충격시험

순간충격시험 이론

순간충격시험은 수리상수를 구할 수 있는 경제적인 현장시험으로서 시추공에 순간적으로 밀폐된 쇠파이프(dummy)를 투입하거나 물을 주입하여 변화되는 수위를 측정한다. dummy 투입후 지하수위가 원래 수위로 회복되면 dummy를 인양한다. 지하수위 측정은 dummy의 투입부터 dummy 인양 후 지하수위가 원래 상태로 회복될 때까지 측정한다. 그리고 측정된 지하수위값을 Hvorslev(1951), Bower & Rice(1976), Cooper-Bredhoeft- Papadopulos(1967)의 순간충격시험 해석법에 입력하여 수리상수를 구하게 된다.

Hvorslev법은 원칙적으로 피조미터와 오거 시추공과 같이 비교적 천부의 모래층 또는 점토층에 대해서 대수층을 완전히 관통하고 있지 않은 경우에 적용된다. $L_e/R > 8$ 인 경우에 Hvorslev법에 의한 수리전도도는 다음과 같은 식으로부터 구해진다.

$$K = \frac{r_c^2 \ln(L_c/R)}{2L_e} \frac{\ln(h_1/h_2)}{(t_1 - t_2)} \quad (26)$$

여기서, R은 우물스크린의 반경(L), r_c 는 우물 케이싱의 반경(L), L_c 는 우물스크린의 길이(L)이다. K는 수리전도도(LT^{-1})이다. h_1 과 h_2 는 각각 경과시간(T_1 , T_2)의 수위(L)이다. 위 식은

$$K = \frac{r_c^2 \ln(L_c/R)}{2L_e T_0} \quad (27)$$

과 같다. 여기서, T_0 는 최초상승이나 최초하강의 37%에 해당하는 수위에 도달하는데 걸린 시간(T)으로서 원래의 유량을 유지하면서 수위가 평형상태로 되는데 걸리는 시간이다. 위 식은 Hvorslev법의 여러 가지 조건들 중 한 가지 식이지만, 상당히 유용한 식으로서 우물스크린의 반경(R)에 비해서 시험구간이 상당히 큰 경우의 자유면대수층에 적용이 가능하다. 그러나 그 밖의 조건들에 대해서는 Hvorslev법의 다른 식을 적용하여야 한다.

Bower & Rice 방법은 원래 자유면대수층에 제안된 방법이지만 스크린의 최상부가 상부 가압층으로부터 어느 정도 아래에 위치한다면 피압대수층에도 적용될 수 있다. Bower & Rice의 식은

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_e/R)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H_t}{H_0}\right) \quad (28)$$

과 같다. 여기서, R_e 는 유효반경(L), R 은 우물 스크린이나 나공 구간의 반경(L), L_e 는 우물스크린 또는 나공 구간의 길이(L)로서 물이 주입되는 구간이다. 그리고 H_0 는 경과시간 0일 때의 수위강하(L), H_t 는 경과시간 t의 수위강하(L)이다. 그러나 유효반경 R_e 는 경험적인 변수로 보아야 하며, 실제 유효반경으로 볼 수 없다(Butler, 1998).

Cooper-Bredhoeft-Papadopoulos법(C-B-P법)은 완전 피압대수층의 상위에 반경 r_c 의 케이싱이 설치되어 있고, 대수층에는 반경 R의 스크린이 설치되거나 나공상태의 우물에 대해서 적용된다. C-B-P법으로는 투수량계수, 저류계수, 수리전도도를 구할 수 있다. 그러나 C-B-P법으로 구한 저류계수는 투수량계수나 수리전도도보다는 신뢰성이 낮다. 그 이유는 순간충격 시험자료는 저류계수보다는 투수량계수에 훨씬 더 민감하기 때문이다(McElwee et al., 1995a). 또한 유효 스크린 반경(스크린 자체의 반경, 자갈충진대까지의 반경 또는 시추로 인해서 파쇄대까지 확대된 반경)의 불확실성이 투수량계수보다는 저류계수값에 훨씬 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 그러나 순간충격시험에 관측공을 이용한다면, 저류계수의 불확실성은 크게 개선될 수 있으며(McElwee et al., 1995b), 유효 스크린 반경의 불확실성도 상당히 줄일 수 있다(Butler et al., 1996). 그러나 이 경우에 관측공이 시험공과 상당히 가까운 거리(약 10m 이내)에 위치하여야 하며, 스크린도 시험공과 거의 같은 심도에 위치하여야 한다(McElwee et al., 1995a).

순간충격시험 결과 해석

2004년 4월 3일부터 4월 22일까지 8개 시추공(TB-3, TB-5, TB-18, TB-27, TB-30, TB-47, TB-50, TB-58)에서 순간충격시험을 실시하였다. 이들 시추공은 대체로 풍화암까지 굴착되었으며, 그 심도는 얇은 것은 33.1m(TB-58호공)에서 깊은 것은 64.1m(TB-27호공)까지이다. 순간충격시험에서는 dummy의 투입과 인양시에 지하수위가 순간적으로 변화되므로 자동으로 지하수위를 측정하는 것이 필수적이다. 따라서 자동 수

위측정 센서인 Eijkelkamp 사의 Diver DI240(수위 측정범위 10m)를 이용하여 1초 간격으로 지하수위를 측정하였다. 순간충격시험은 지하수위가 안정되는 시간에 따라 짧게는 약 30분에서 길게는 3시간 30분 동안 실시되었다.

Bower & Rice법과 Hvorslev법으로 구한 평균 수리전도도 값은 각각 2.92×10^{-6} m/s와 2.60×10^{-6} m/s로서 Bower & Rice해가 약간 더 큰 값을 보인다(Table 3). Fig. 7은 TB-3호공에서의 주입 및 인양 순간충격시험 결과를 보여주는 그래프이다. 이론적으로는 dummy의 투입과 인양에 관계없이 같은 수리전도도 값을 보여주어야 하지만, Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 dummy 인양시 수리전도도가 주입시보다 약간 더 크게 나타난다. dummy의 투입시와 인양시의 수리전도도가 다르게 나타나는 현상은 dummy가 움직이는 영향권 내의 시험공벽 및 공벽 부근의 스킨에 의해서 일어날 수 있거나, dummy의 투입과 인양시의 압력의 차이에 의해서 일어날 수 있다(함세영 외, 2001). 시험공벽 및 공벽 부근의 스킨은 케이싱의 설치상태, 케이싱과 공벽간의 충전재 유무, 공벽에 점토물질의 침전 또는 투수성 균열의 발달상태 등에 영향을 받는다.

한편 C-B-P법으로 구한 평균 투수량계수와 평균 저류계수는 각각 9.84×10^{-4} m²/s와 1.21×10^{-2} 이다.

결론

부산광역시에는 지형적인 특성상 산지가 도시의 중심을 남북으로 관통하고 있어서 교통소통을 위한 도로 터널들이 다수 건설되어 있다. 지하철 1호선, 2호선, 3호선이 건설되어 있다. 한편 고속철도 터널이 금정산 줄기를 관통하여 도심지로 들어와 부산진역 부근까지 계획되어 있다. 본 연구는 이와 같이 다수의 도로터널, 지하철, 고속철도 터널이 이미 건설되었거나 건설 중에 있는 부산광역시 도심지역 중 부산진구 양정동부터 동구 수정동 사이 지역에 대한 수리지질 특성을 파악하기 위하여 수행되었다.

본 연구를 위하여 부산진구 양정동의 기반암과 부산진역 부근의 미고결층에서 양수시험을 실시하였다. 특히 양정동의 기반암 지역은 동래단층대와 만나는 지역으로서 동래단층의 수리지질 특성을 파악하는데 중점을 두었고, 부산진역 부근의 미고결층에서 행한 양수시험에서는 해안매립층과 해안퇴적층의 수리지질 특성을 파악하고자 하였다. 양수시험분석에 의한 수리상수 산출을 위해서는 시추자료와 지질자료를 근

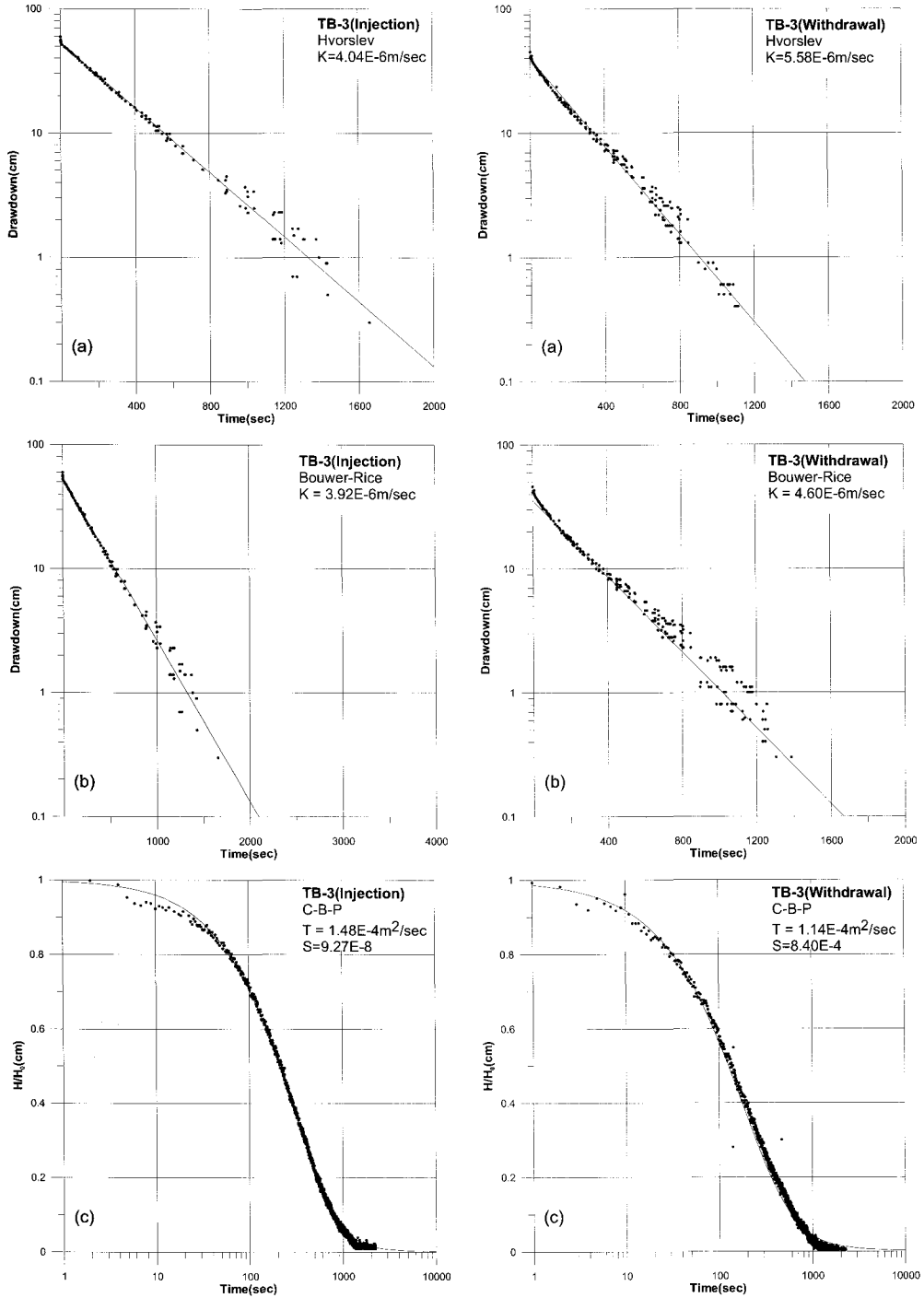


Fig. 7. Injection and withdrawal slug test analyses at borehole TB-3 using (a) Hvorslev, (b) Bower & Rice and (c) C-B-P methods.

Table 3. Hydraulic parameter estimates from the slug tests: LF landfill; AL alluvium; WZ weathered zone; HF Highly fractured zone.

Well no.	Hydraulic parameter	K (ms ⁻¹) by Bouwer & Rice method	K (ms ⁻¹) by Hvorslev method	T (m ² s ⁻¹) by C-B-P method	S by C-B-P method	Borehole description
TB-3	Injection	3.92E-06	4.04E-06	1.48E-04	9.27E-08	LF: 1.5m WZ: 26.5m HF: 32.0m
	Withdrawal	4.60E-06	5.58E-06	1.14E-04	8.40E-04	
TB-5	Injection	3.00E-06	3.00E-06	4.39E-03	2.23E-05	AL: 4.5m WZ: 29.5m HF: 28.0m
	Withdrawal	2.10E-05	1.63E-05	1.04E-02	4.62E-09	
TB-18	Injection	4.18E-07	5.02E-07	4.39E-05	9.85E-09	LF: 0.8m AL: 6.7m WZ: 28.5m HF: 16.0m
	Withdrawal	3.96E-07	4.63E-07	1.63E-05	1.73E-02	
TB-27	Injection	4.71E-07	5.06E-07	5.41E-05	9.35E-09	AL: 2.8m WZ: 10.3m HF: 51.0m
	Withdrawal	5.12E-07	6.30E-07	5.84E-05	9.35E-09	
TB-30	Injection	1.71E-06	2.99E-06	7.18E-05	1.00E-01	AL: 2.2m LF: 3.0m WZ: 21.8m HF: 35.5m
	Withdrawal	1.96E-06	2.86E-07	7.36E-05	5.09E-02	
TB-47	Injection	7.44E-07	8.92E-07	3.79E-05	9.97E-04	AL: 4.1m LF: 2.0m WZ: 55.4m
	Withdrawal	1.08E-06	1.29E-06	3.35E-05	1.01E-02	
TB-50	Injection	1.36E-06	1.63E-06	7.56E-05	1.05E-03	AL: 1.5m LF: 1.5m WZ: 21.0m HF: 31.0m
	Withdrawal	1.71E-06	1.82E-06	6.64E-05	1.28E-02	
TB-58	Injection	1.17E-06	1.43E-06	1.43E-04	1.22E-09	AL: 4.4m LF: 11.3m WZ: 13.7m
	Withdrawal	2.17E-07	2.63E-07	1.52E-05	3.24E-07	
	Max.	2.10E-05	1.63E-06	1.04E-02	1.00E-01	-
	Min.	2.17E-07	2.63E-07	1.52E-05	1.22E-09	-
	Arith. mean	2.92E-06	2.60E-06	9.84E-04	1.21E-02	-
	Median	1.36E-06	1.36E-06	6.91E-05	4.31E-04	-
	Standard dev.	5.17E-06	3.95E-06	2.73E-03	2.68E-02	-
	Skewness	3.48	3.12	3.22	2.83	-
	Kurtosis	12.7	10.14	10.6	8.21	-

거로 수위하강자료에 가장 적합한 대수층 모델을 선정하였다.

양정동의 기반암에서의 양수시험과 시추자료에 의하면 Moench의 구상체 이중공극모델이 적합한 것으로 나타났다. 균열대의 평균 수리전도도와 평균 비저유율은 각각 $6.86 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, $1.61 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 이고, 블록의 평균 수리전도도와 평균 비저유율은 각각 $2.36 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 와 $9.18 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 이다. 이는 균열대의 투수성이 블록보다 크고, 반대로 저류성은 더 작음을 시사한다. 양정동 기반암의 균열대는 동래단층대에 해당하고, 블록은 절리의 발달이 미약한 부분에 해당한다. 이는 균열대에 해당하는 동래단층대가 단층비지나 풍화산물에 의해서 낮은 수리전도도($6.86 \times 10^{-7} \text{ m/s}$)를 가지는 것을 지시한다.

부산진역 부근의 미고결층에서의 양수시험 결과, Neuman의 자유면대수층 모델이 적합한 것으로 나타났다. 이 모델에 의하면, 양수정 PW2에서는 수리전도도가 $1.51 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 관측공 OW2-1에서는 $6.08 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 이다. 순간충격시험 결과, Bower & Rice법과 Hvorslev법으로 구한 평균 수리전도도 값은 각각 $2.92 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 와 $2.60 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 이다. 미고결층의 상부는 세립질(모래질 실트와 점토)로 구성되어 있으므로 순간충격시험에서 구한 수리전도도는 상부 미고결층을 대표함을 알 수 있다. 양수시험에서 구한 수리전도도는 양수시험의 특성상 전체 구간에서 지하수가 채수되며, 하부 미고결층인 풍화대의 수리전도도가 상부 미고결층의 수리전도도보다 더 크므로 미고결층 전체의 평균적인 수리전도도를 대표함을 알 수 있다.

기반암 균열대의 평균 투수량계수와 평균 저류계수는 각각 $2.75 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 와 6.41×10^{-5} 이고, 미고결층의 평균 투수량계수와 평균 저류계수는 각각 $8.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 와 3.70×10^{-3} 이다. 또한 순간충격시험에 의한 미고결층의 평균 투수량계수와 저류계수는 각각 $9.84 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 와 1.21×10^{-2} 이다. 따라서 미고결층의 투수량계수와 저류계수가 기반암의 투수량계수와 저류계수보다 더 큰 것을 알 수 있다.

본 연구는 부산 도심지역의 지하수 개발, 지하수 오염 그리고 지상 및 지하구조물 건설에 따른 지반안정성 및 지하수 영향을 평가하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

참고문헌

김정숙, 1999, 부산 금정지역 지하수의 수리지구화학적 특성 연구, 부산대학교 대학원 이학석사 학위논문, 74 p.

성익환, 이병대, 조병욱, 류충렬, 김경수, 이춘오, 이봉주, 임현철, 이병대, 지세정, 김용욱, 성기성, 박덕원, 이대하, 김중렬, 현혜자, 김유성, 함세영, 윤선, 김학준, 1999a, 금정터널지하수 유동체계 분석 및 동래은천지역 영향평가, 한국자원연구소, 443 p.

성익환, 조병욱, 이병대, 지세정, 류충렬, 김통권, 윤욱, 이봉주, 임현철, 이종철, 이병대, 김경구, 성기성, 이인호, 추창오, 김정숙, 김문수, 최경국, 함세영, 최광선, 김인수, 조명희, 심형수, 원지훈, 정상용, 박희영, 강동환, 심병완, 김병우, 1999b, 지하수 오염방지 및 음용화 기술연구(부산지역), 한국자원연구소, 541 p. 심병완, 2003, 부산 동남해안 지역의 수리동역학적 해수침투 특성연구, 부경대학교 일반대학원 이학박사 학위논문, 123 p.

정상용, 권해우, 이강근, 김윤영, 1997, 부산 석대 폐기물 매립지 일원의 수질 환경, 지하수환경, 4권 4호, 175-184.

조명희, 1999, 부산 남부지역 안산암질암 지하수 및 서북부지역 화강암 지하수의 수질 특성 비교연구, 부산대학교 대학원 이학석사 학위논문, 103 p.

함세영, 1999, 구상체 및 판상체 이중공극 프락탈 매체 내 지하수 유동, 지질학회지, 35권 2호, 137-146.

함세영, 조명희, 성익환, 김성숙, 이병대, 조병욱, 한석중, 1999, 부산 북서부 화강암지역 지하수의 화학적 특성, 수처리기술, 7권 2호, 57-68.

함세영, 조명희, 황진연, 김진섭, 성익환, 이병대, 2000, 부산 금정산-백양산 일대 용천수, 지하수 및 지열수의 지화학적 특성, 한국환경과학회지, 9권 3호, 229-239.

함세영, 김문수, 성익환, 이병대, 김광성, 2001, 순간충격시험에 의한 화강암지역의 수리적 매개변수 산출, 지질공학, 11권 1호, 63-79.

Barenblatt, G.E., Zheltov, I.P. and Kochina, I.N., 1960, Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, Jour. Appl. Math. Mech. Engl. Transl., 24(5), 1286-1303.

Boulton, N.S. and Streltsova, T.D., 1977, Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation, J. Hydrol., 35, 257-269.

Bower, H. and Rice, R.C., 1976, A slug test for determining hydroaulec conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, Water Resour. Res., 12(3), 423-428.

Butler, J.J., Jr., McElwee, C.D., and Liu, W., 1996,

- Improving the quality of parameter estimates obtained from slug tests, *Ground Water*, 34(3), 480-490.
- Butler, J.J., 1998, The design, performance, and analysis of slug tests, Lewis publishers, 252 p.
- Cho, B.W., 2001, Hydrogeological Characteristics of the Groundwater Resources in the Busan Area, Korea, doctoral thesis of Kyungpook National University, 164 p.
- Cooper, H.H., Jr., Bredehoeft, J. D., and Papadopulos, I. S. 1967, Respose to a finite diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resour. Res.*, 3, 263-269.
- Gringarten, A.C. and Witherspoon, P.A., 1972, A method of analyzing pump test data from fractured aquifers, *Proc. Symp. Rock Mechanics, Int. Soc. Rock Mechanics and Int. Assoc. Eng. Geol.*, Stuttgart, 3-B, p. 1-9.
- Gringarten, A.C. and Rammy, H.J., 1974, Unsteady state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration or restricted entry, *Soc. Petrol. Engrs. J.*, 263-269.
- Han, S. J., Hamm, S.-Y., Sung, I. H., Lee, B. D., Cho, B. W., and Cho, M. H, 1999, Geochemical Characteristics of Geothermal Water and Groundwater in the Dongrae hot-spring Area, *Eng. Geol.*, 9(3), 207-225.
- Hantush, M.S., 1960, Modification of the theory of leaky aquifers, *J. Geophy. Res.*, 19(4), 1019-1035.
- Hantush, M.S. and Jacob, C.E., 1955, Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, *Am. Geophys. Union Trans.*, 36, 95-100.
- Hvorslev, M.J., 1951, Time lag and soil permeability in ground water observations, U. S. Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, Bulletin 36, 50 p.
- Kazemi, H., 1969, Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distributions, *Trans. Soc. Pet. Eng. AIME*, 246, 451-462.
- McElwee, C.D., Bohling, G.C., and Butler, Jr., J.J., 1995a, Sensitivity analysis of slug tests. Part 1. The slugged well, *J. Hydrol.*, 164, 53-67.
- McElwee, C.D., Bohling, G.C., and Butler, Jr., J.J., 1995b, Sensitivity analysis of slug tests. Part 2. Observation wells. *J. Hydrol.*, 164, 69-87.
- Moench, A.F., 1984, Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin, *Water Resour. Res.*, 20, 831-846.
- Moench, A.F., 1985, Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers, *Water Resour. Res.*, 21(8), 1121-1131.
- Neuman, S.P., 1975, Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response, *Water Resour. Res.*, 11, 329-342.
- Neuman, S.P. and Witherspoon, P.A., 1969, Theory of flow in a confined two aquifer system, *Water Resour. Res.*, 5(4), 803-816.
- Papadopulos, I.S. and Cooper, H.H., 1967, Drawdown in a well of large diameter, *Water Resour. Res.*, 3(1), 241-244.
- Sauty, J.-P. and Kinzelbach, W., 1992, CATTI, IGWMC-BAS 24 PC, Ver. 3.01E, 63 p.
- Stehfest, H., 1970, Algorithm 368, Numerical inversion of Laplace transforms, *Commun. ACM*, 13(1), 47-49.
- Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Am. Geophys. Union Trans.*, 16, 519-524.
- Warren, J.E. and Root, P.J., 1963, The behavior of naturally fractured reservoirs, *SPEJ*, 3(2), 245-255.

투 고 일	2005년 10월 10일
심 사 일	2005년 10월 11일
심사완료일	2005년 11월 30일

함세영
 부산대학교 지질학과
 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산30번지
 Tel: 051)510-2252
 Fax: 051)516-7767
 E-mail: hsy@pusan.ac.kr

차용훈
부산대학교 지질학과
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산30번지
Tel: 051)510-3451
Fax: 051)516-7767
E-mail: geocyh@pusan.ac.kr

정재열
부산대학교 지질학과
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산30번지
Tel: 051)510-3451
Fax: 051)516-7767
E-mail: jjy@pusan.ac.kr