

부산광역시 동래지역 천부지질의 수리적 특성

류상훈¹ · 함세영^{1*} · 정재형² · 한석종³ · 정재열¹ · 장성⁴ · 김형수⁵

¹부산대학교 지구환경시스템학부, ²한국건설기술연구원 지반연구부

³(주) 동아지질 지반공학부, ⁴한국농촌공사 경남본부, ⁵한국수자원공사 수자원연구원

Hydraulic Characteristics of Shallow Geology in Dongrae Area, Busan Megacity

Sang-Hun Ryu¹, Se-Yeong Hamm^{1*}, Jae-Hyeong Jeong², Suk-Jong Han³,
Jae-Yeol Cheong⁴, and Hyung-Su Kim⁵

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University

²Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology

³Geotechnical Engineering Dept., Dong-A Geological Engineering Co., Ltd.

⁴Gyeongsangnam-Do Office, Korea Rural Community & Agriculture Corporation

⁵Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

현재 한국에서는 도로 터널, 철도 터널, 지하 석유저장시설 및 방사성 폐기물 저장시설과 같은 지하구조물들이 많은 곳에서 건설되고 있다. 지하구조물 건설을 위해서는 자연적인 요인(지질, 수리지질, 토양, 식생, 지형 및 수계)과 인위적인 요인(토지 이용, 도시화, 인구, 문화 및 교통)이 고려되어야 한다. 특히, 수리지질은 지하구조물의 안정성과 구조물에 의한 지하수계의 영향을 평가하기 위해서 중요한 요소로서 고려되어야 한다. 본 연구는 부산시 지하철 3호선 건설을 위해서 굴착된 45개 시추공을 이용하여 동래교차로에서부터 서동까지 지역의 천부지층의 수리지질 특성을 규명하고자 하였다. 본 연구지역의 30개 시추공에서는 불포화대와 포화대의 슬러그시험을 실시하였다. 슬러그시험 결과, 불포화대의 구간별 수리전도도 평균값은 포화대의 구간별 수리전도도 평균값 보다 더 높은 것으로 나타났다. 또한, 포화대의 슬러그시험 결과는 포화대의 최상부의 수리지질 특성을 잘 반영하는 것으로 보인다.

주요어 : 지하구조물, 수리전도도, 슬러그시험, 불포화대, 포화대

At present, underground structures such as road tunnels, railway tunnels, underground petroleum storages and radioactive waste storages are being constructed in numerous places in Korea. For the construction of underground structures, it should be accounted for natural factors (geology, hydrogeology, soil, vegetation, topography and drainage patterns) and human-social factors (land use, urbanization, population, culture and transportation). Especially, hydrogeology should be regarded as an important factor for evaluating the safety of underground structures and their impact to groundwater system around the structures. This study aimed to recognize hydrogeological characteristics of shallow formations in the area from Dongrae crossway to Seo-Dong where 45 boreholes were drilled for the construction of Line-3 subway in Busan Megacity. Slug tests for unsaturated and saturated zones were conducted on 30 boreholes in the study area. From the result of the slug tests, it was identified that average zonal hydraulic conductivity in the unsaturated zone was higher than that in the saturated zone. Besides, the slug test result in the saturated zones may reflect hydraulic properties of the upper most part of the saturated zones.

key words : underground structure, hydraulic conductivity, slug test, unsaturated zone, saturated zone.

서 론

현재 우리나라에서는 대도시지역에서는 지하철, 고속

철도 터널 등의 지하구조물공사가 시행되고 있다. 우리나라는 국토면적에 비해서 복잡한 지질을 가지고 있으므로, 지하구조물 건설공사에서 부딪치게 되는 수리지질

*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

학적 요인도 다양하다. 수리지질학적 특성은 지하구조물 공사의 안정성과 주변지역에 미치는 여러가지 복잡한 지하수영향과 밀접한 관련을 가진다. 또한 이러한 지하구조물공사에서는 지질, 수리지질, 토양, 식생, 지형, 수계 등의 자연 요소 뿐만 아니라, 토지이용, 도시화 정도, 인구, 문화, 교통 등의 인문사회적인 요소도 고려된다.

본 연구지역은 부산지하철 3호선 2단계 2공구(부산광역시 동래구 내성교차로부터 동래구 안락교차로까지)와

3공구 구간(안락교차로부터 서동까지) 중 동래구 동래교차로에서 시작하여 동래구 안락교차로를 지나 금정구 서동 일원까지 지역으로서 총 연장은 약 3km이다(Fig. 1). 연구지역에는 45개의 시추공(DBA-1~DBA-20, BA-1~BA-21)이 굴착되었다. 총 45개의 시추공 중 매몰되지 않고 상태가 양호한 18개공(DBH-9, DBH-10, DBH-12, DBH-13, DBH-14, DBH-17, DBH-18, DBH-1-1, BA-1, BA-8, BA-9, BA-11, BA-12, BA-18, BA-19,

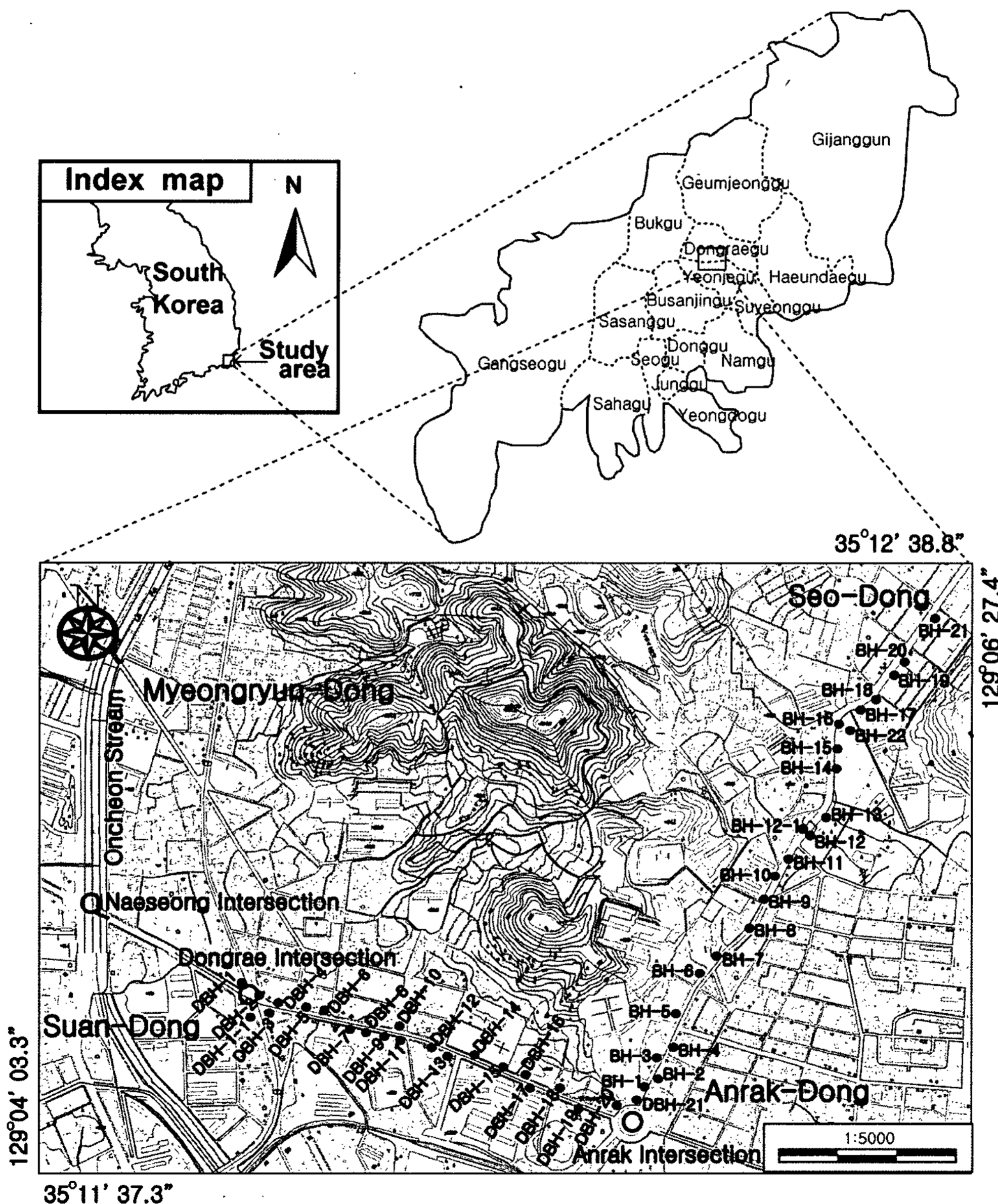


Fig. 1. Location of boreholes (black circles) in the study area, Busan Megacity (upper right figure).

BA-20, BA-21, BA-22)의 포화대에서는 구간별 순간충격시험으로 수리전도도를 구하였으며, 7개공(BA-6, BA-7, BA-9, BA-10, BA-11, BA-17, BA-20)에서는 포화대 전체 구간에서 순간충격시험을 실시하여 수리전도도를 구하였다. 그리고 12개 시추공(DBH-14, DBH-17, DBH-1-1, BA-3, BA-4, BA-5, BA-6, BA-7, BA-8, BA-12-1, BA-14, BA-15)에서는 불포화대의 수리전도도를 구하였다.

지금까지 부산지역에 대한 다수의 수리지질 특성 연구(성익환 등, 1999; 조병욱, 2001; 건설교통부와 한국수자원공사, 2003)와 지하수 수질 특성 연구(함세영 등, 1999, 2006)가 있었다. 성익환 등(1999)과 조병욱(2001)은 부산광역시 전체에 대해서 지하수 유동과 용존 무기물의 특성을 연구하였다. 건설교통부와 한국수자원공사(2003)는 부산광역시의 지하수 기초조사를 통하여 수리지질, 지하수 부존특성, 지하수 수질 및 오염취약성평가, 그리고 지하수 보전·관리방안을 제시하였다. 함세영 등(1999)는 부산 북서부지역 화강암 지하수의 지화학적 특

성 및 오염 가능성을 연구하였다. 또한 함세영 등(2006)은 부산광역시 사상공단지역의 지하수 수질 및 오염 특성을 제시하였다. Hamm et al.(2007)은 부산 금정산지역 화강암에 대한 수압시험과 시추자료 및 초음파 텔레뷰어 자료로부터 단열의 밀도, 간극과 수리전도도의 관련성을 연구하였다. 그러나, 부산 도심지역은 대부분이 불투수성 재질로 덮여 있어서 지표지질 및 수리지질 연구가 어렵고 현장수리시험이 용이하지 않아서, 몇몇 연구들만이 수행되었다(함세영 등, 2005; 류상훈 등, 2007). 함세영 등(2005)은 부산 도심지역 미고결층과 기반암의 수리적 특성을 비교·연구하였다. 류상훈 등(2007)은 부산지역 도심부 수리지질 특성, 특히 지하수위와 천부지질의 발달상태를 비교·분석하였다.

본 연구의 목적은 (1) 부산광역시 동래구 수안동, 안락동, 명장동과 금정구 서동지역의 충적층, 풍화대, 연암의 수리지질 특성을 규명하고, (2) 시추공 심도별 수리전도도 변화를 파악하며, (3) 순간충격시험분석에 의해서 불포화대와 포화대의 수리전도도 특성을 규명하기 위

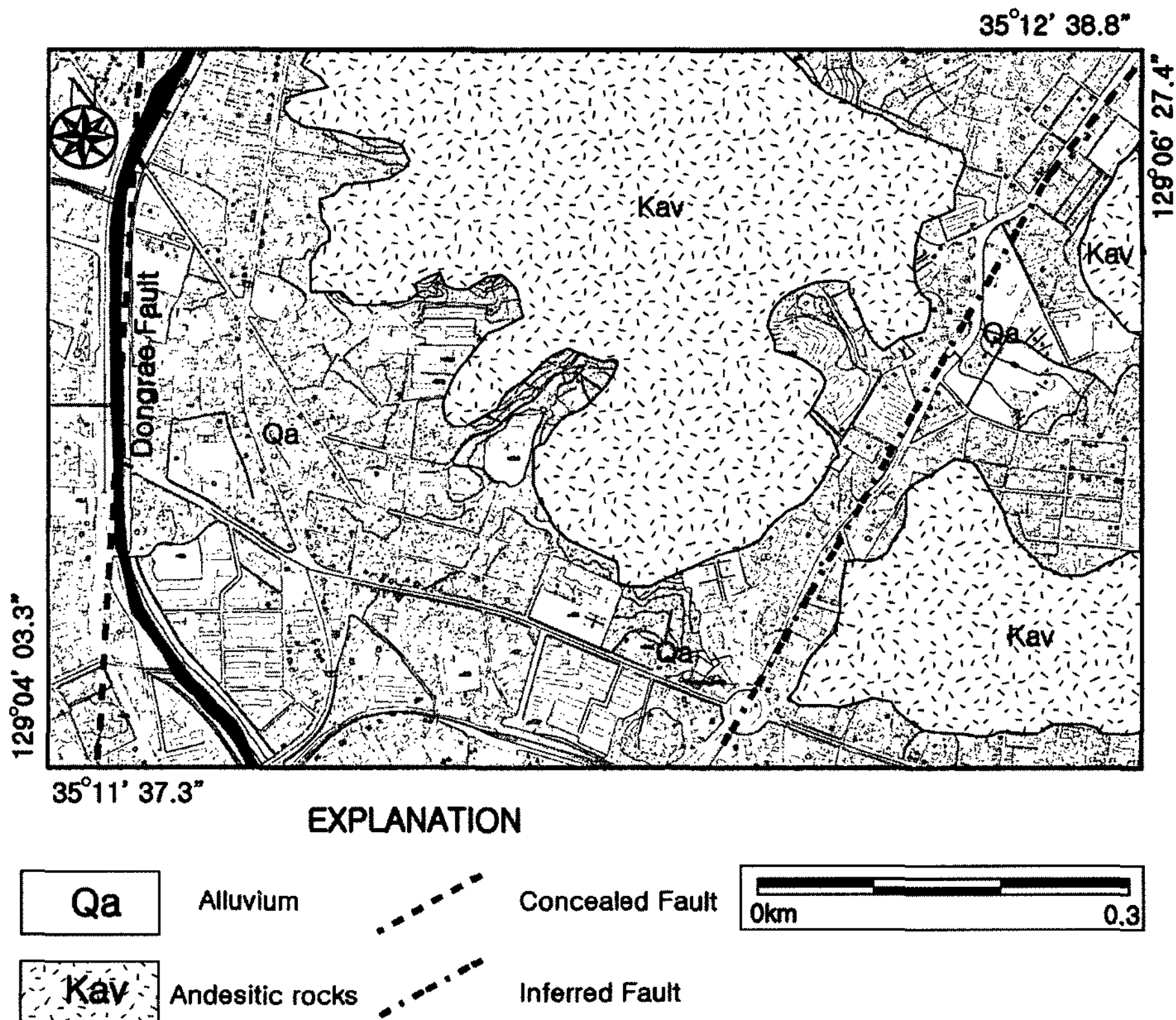


Fig. 2. Geology of the study area (modified from Son et al., 1978).

한 것이다. 불포화대의 순간충격시험 분석은 케이싱의 아래 특정 구간에 물을 주입한 후 수위변화를 분석하였다. 포화대의 구간별 순간충격시험분석은 일정 구간에 이중팩커를 설치하고 팩커 설치구간에 물을 주입하여 수위변화를 관측하여 분석하였다. 또한 포화대 전체 구간에 대한 순간충격시험분석은 폐쇄된 쇠파이프(슬러그)를 투입하여 지하수위 변화를 관측하고 원상태로의 수위 회복을 관측하는 슬러그 주입 순간충격시험과 슬러그를 인양하고 난 후 지하수위가 최초 수위로 회복될 때까지 관측하는 슬러그 인양 순간충격시험 분석을 실시하였다.

지질개요

부산광역시의 지질은 고기로부터 백악기 유천층군의 이천리층의 응회질 퇴적암, 안산암질암, 유문암질-데사이트질암, 백악기 불국사화성암류의 반려암, 화강섬록암, 화강암, 규장암 그리고 제4기 충적층으로 이루어져 있다(손

치무 등, 1978; 장태우 등, 1983; 손문 등, 2007). 이천리층의 응회질 퇴적암은 백양산 일원에 소규모로 분포하며, 흑색 및 암회색 셰일이 우세하고 심하게 접촉변성되어 대부분 호온펠스로 산출된다. 안산암질암은 주로 유리질 또는 용결응회암과 화산각력암으로 구성되며, 가장 넓은 분포 면적을 보인다. 유문암질-데사이트질암은 주로 용결응회암과 화산각력암으로 구성되며, 소규모로 분포한다. 반려암은 황령산 일대에 소규모로 분포한다. 불국사화강암류에 속하는 화강섬록암, 화강암, 규장암은 대부분 동래단층의 서편에 분포한다.

본 연구지역은 부산광역시 동래구 수안동, 안락동, 명장동과 금정구 서동 일원으로 백악기 유천층군의 안산암질암과 제4기 충적층으로 이루어져 있다(Fig. 2). 45개 시추공 자료에 의하면, 연구지역의 천부지질은 지표로부터 매립토층, 충적층(자갈, 모래, 실트), 안산암질암의 풍화대와 연암 순으로 분포한다(Fig. 3). 시추공들의 평균 굴착심도는 33 m정도이고, 일부 시추공(BH-21, DBH-21,

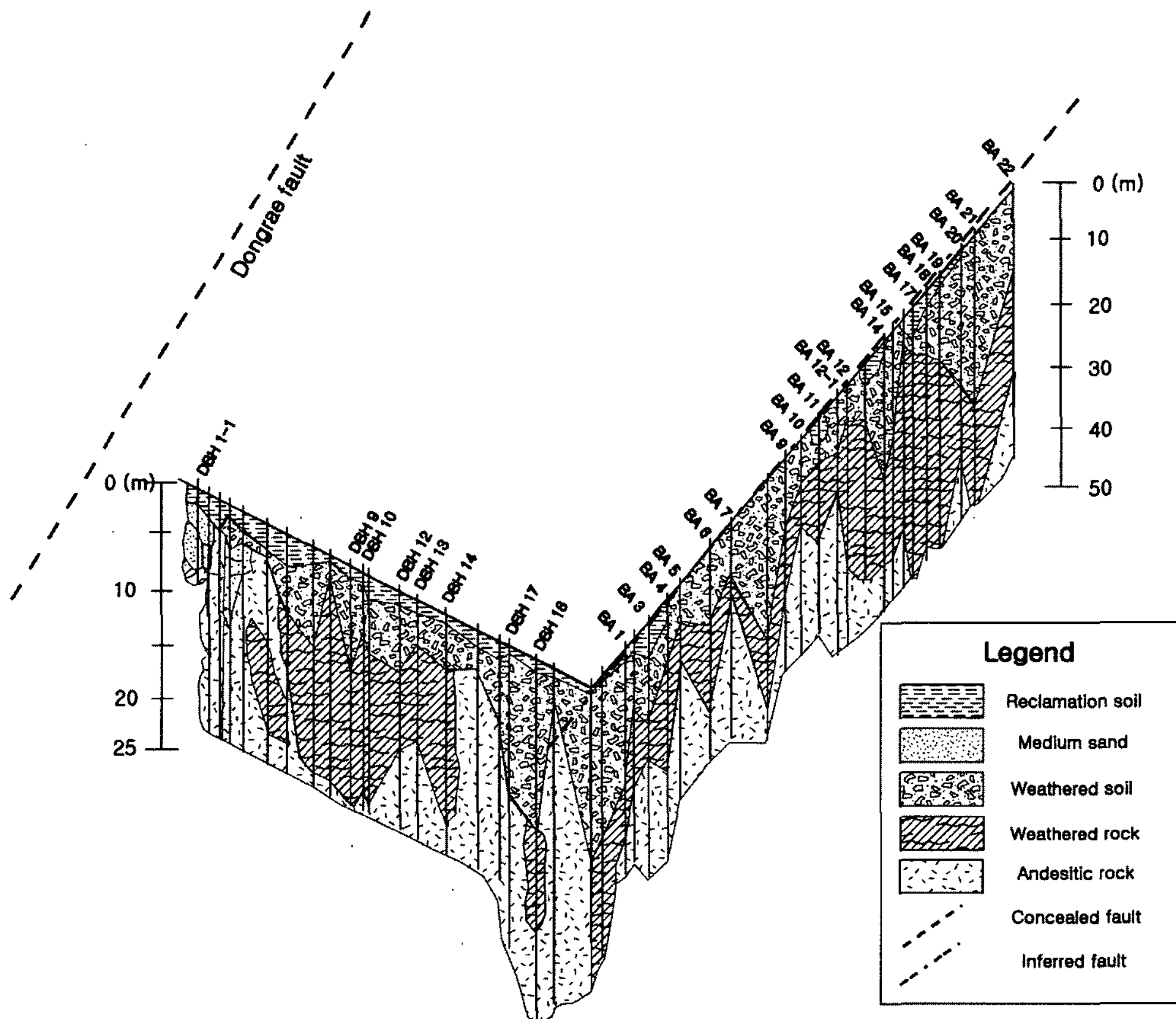


Fig. 3. Geological cross-section based on borehole geology.

Table 1. Thicknesses of landfill, alluvium, weathered zone, and soft rock in the study area.

	Landfill	Alluvium	Weathered zone	Soft rock
Min. thick., m (A)	0	0	0	0
Max. thick., m (B)	5.50	25.00	14.00	31.3
Range, m (B - A)	5.50	25.00	14.00	31.3
Arithmetic mean, m	1.32	9.68	2.27	9.23
Median, m	1.20	7.50	1.00	6.60
Standard dev.	1.11	6.27	3.9	8.44
Skewness	1.11	0.83	1.77	0.74
Kurtosis	2.90	-0.17	3.19	-0.45

DBH-1-1)을 제외하고는 기반암인 안산암질암 상부까지 굴착되어 풍화대 및 연암의 두께를 알 수 있다. 각 층의 평균 두께를 보면, 매립토는 1.32 m, 충적층은 9.68 m, 풍화대는 2.67 m, 연암층은 9.23 m로 나타난다(Table 1).

매립토층의 두께는 안락교차로 부근에서 크게 나타났으며, 시추공 BH-3에서 5.5 m로 가장 두껍게 나타났다. 충적층은 서동지역의 시추공(BH-20, BH-21)에서 25 m로 가장 두껍게 나타났으며, 안락교차로 부근(DBH-18, DBH-20)에서도 20 m 내외로 비교적 두껍게 나타났다. 풍화대의 두께 역시 서동지역(DBH-20, DBH-21)과 안락교차로 부근(BH-17, BH-20, BH-21)에서 각각 14 m, 8 m 정도로 두껍게 나타난다. 연암의 두께는 안락동과 서동의 경계지역(BH-16, BH-17, BH-18, BH-19)에서 25 m 정도로 두껍게 나타나며, 동래고등학교 부근(DBH-8, DBH-9)에서도 20 m 정도로 두껍게 나타난다. 매립토층, 충적층, 풍화대의 전체 두께는 동래단층에서 멀어질수록 증가하는 양상을 보인다.

연구지역의 지질구조를 보면, 연구지역 서쪽에 남북방향으로 흐르는 온천천을 따라 동래단층이 지나고 있으며, 연구지역의 북동부인 서동 부근에는 동래단층의 부차단층으로 추정되는 단층이 존재한다(Fig. 2). 이 부차단층은 서동부근에서 충적층, 풍화대, 연암의 두께가 두껍게 나타나는 것과 연관성이 있을 것으로 사료된다.

순간충격시험의 이론적인 배경

불포화대의 순간충격시험

불포화대의 순간충격시험은 보통 시추공 굴착과 동시에 실시한다. 불포화대의 순간충격시험은 전체 구간이나 케이싱의 아래 특정 구간에 물을 주입한 후 수위변화를 측정한다(Fig. 4). 불포화대의 순간충격시험 해석방법은 U. S. Bureau of Reclamation(1958)에 의해서 제안되었다(이기복, 1998). 시험공내에 물을 주입하면, 물은 시추

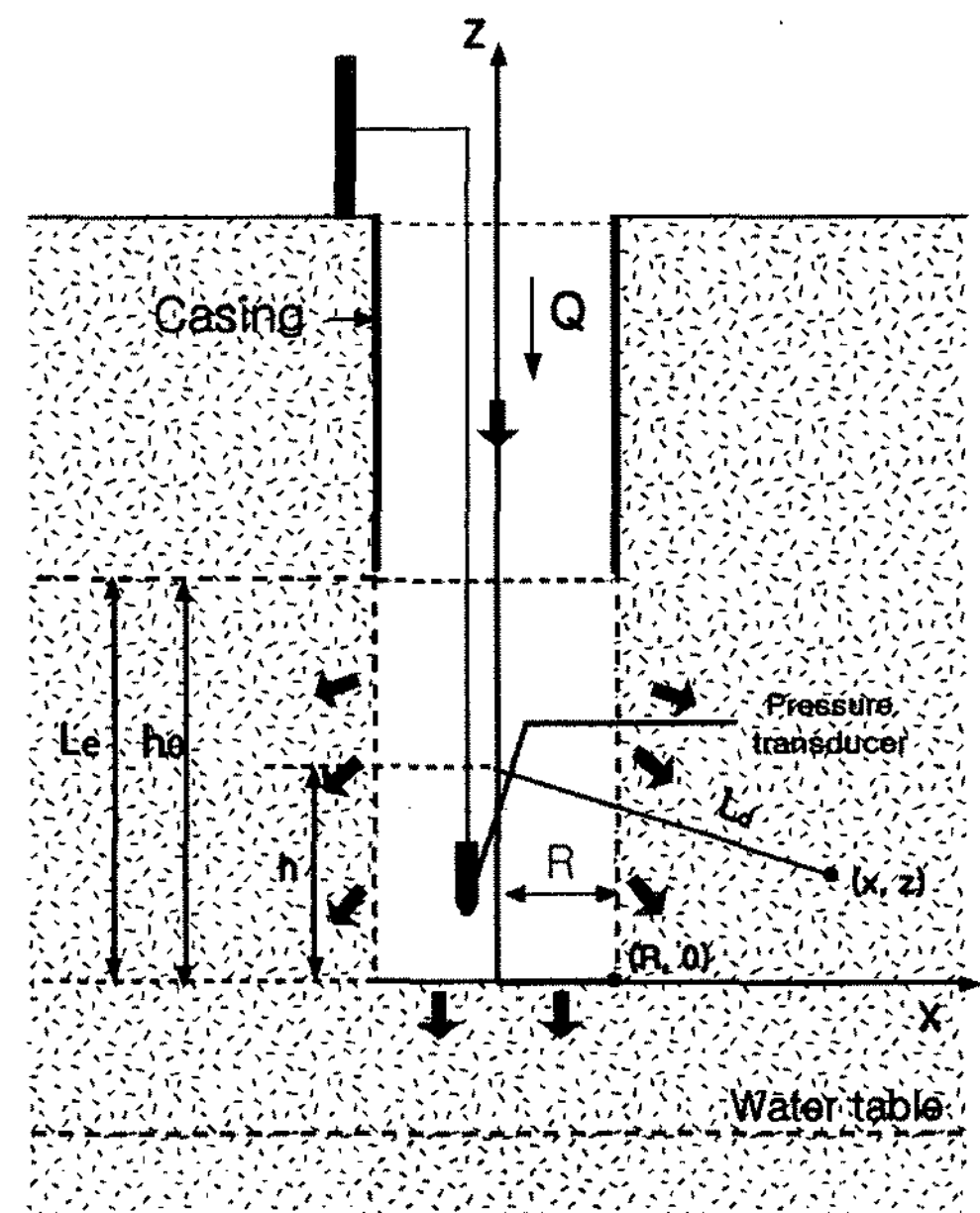


Fig. 4. Schematic diagram of slug test for unsaturated zone.

공 중심으로부터 방사상으로 퍼져나가며, 단위 수위변화 (Δh , 무차원)에 대한 주입률 $\Delta q(L^2T^{-1})$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta q}{\Delta h} = \frac{(h_0 - h)}{h_0^2 / 2} Q \quad (1)$$

여기에서 주입률은 $Q(= \pi R^2 h_0, L^3T^{-1})$, h_0 는 주입시 ($t=0$) 수위(L), h 는 $Z=0$ 에서 $Z=h_0$ 사이의 임의의 점(L) 이다. 그리고 Δq 는 시추공내 수위변화에 비례한다. q 에 의해서 점(x, z)에서의 수두증가(Δh)는 Darcy의 법칙에 따르며 다음의 식과 같이 된다.

$$\Delta q = K(\Delta h / L_d) \cdot 4\pi L_d^2 \quad (2)$$

여기서 L_d 는 점($0, h$)에서 점(x, z)까지의 거리이며,

다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_d = (x^2 + (z-h)^2)^{1/2} \quad (3)$$

(3)식을 (2)식에 대입하고, (2)식을 (1)식에 대입하여 h 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta h = \frac{Q(h_0-h)\Delta h}{2\pi K h_0^2 \{x^2 + (z-h)^2\}^{1/2}} \quad (4)$$

따라서

$$1 = \frac{Q(h_0-h)}{2\pi K h_0^2 \{x^2 + (z-h)^2\}^{1/2}} \quad (5)$$

(5)식을 0에서 h_0 까지 h 에 대해서 정적분하면,

$$h_0 = \left[\frac{Q}{2\pi K h_0^2} (z-h_0) \sinh^{-1} \left(\frac{z-h_0}{x} \right) + z \sinh^{-1} \left(\frac{z}{x} \right) - \{x^2 + (z-h_0)^2\}^{1/2} + \{x^2 + z^2\}^{1/2} \right] \quad (6)$$

점 $(R, 0)$ 에서의 h_0 는

$$h_0 = \frac{Q}{2\pi K h_0^2} [h \cdot \sinh^{-1}(h_0/x) - (R^2 + h_0^2)^{1/2} + R] \quad (7)$$

따라서, 수리전도도 K 는

$$K = \frac{Q}{2\pi K h_0^2} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{h_0}{R} \right) - \left\{ \left(\frac{R}{h_0} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} + \frac{R}{h_0} \right] \quad (8)$$

역쌍곡선 함수

$$\sinh^{-1} x = \ln \{x + (x^2 + 1)^{1/2}\} \quad (9)$$

이므로, (8)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{Q}{2\pi K h_0^2} \left(\ln \left[\frac{h_0}{R} + \left\{ \left(\frac{h_0}{R} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} \right] - \left\{ \left(\frac{R}{h_0} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} + \frac{R}{h_0} \right) \quad (10)$$

$h_0 \gg 10R$ 의 경우에, (10)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{Q}{2\pi K h_0^2} \left(\ln \left[\frac{h_0}{R} + \left\{ \left(\frac{h_0}{R} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} \right] - 1 \right) \quad (11)$$

포화대의 순간충격시험

순간충격시험은 슬러그(체적을 알고 있는 밀폐된 쇠 파이프)를 순간적으로 투입/회수하거나 물을 주입한 시 각부터 수위가 평형상태에 도달할 때까지 경과시간별로

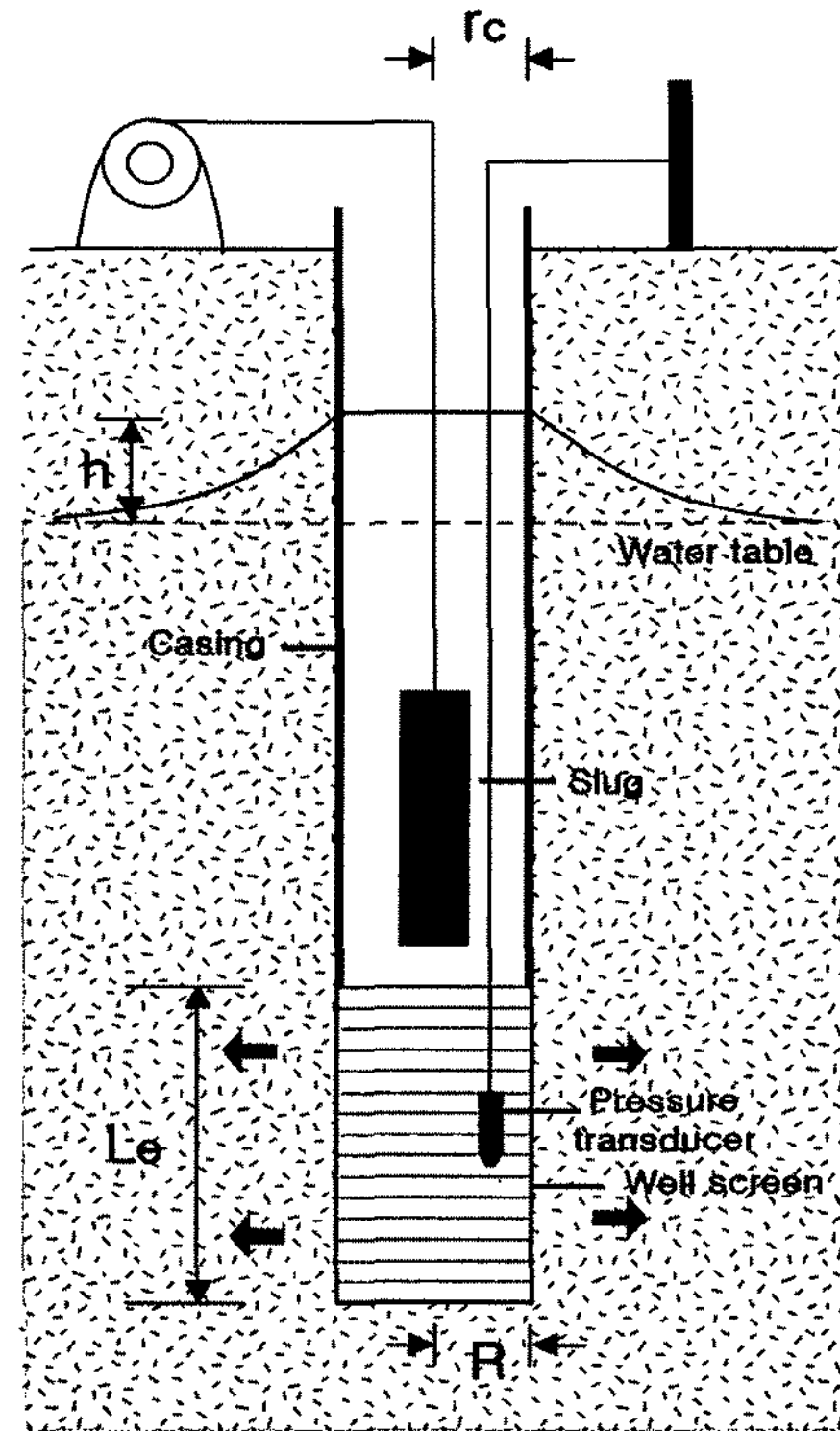


Fig. 5. Schematic diagram of slug test in saturated zone

수위 변화를 측정하는 방법이다(Fig. 5). 시험 초기에 빠른 수위변화를 측정하기 위해서는 압력센서와 같은 자동수위 측정센서를 시험시작 전에 미리 시추공내에 설치하여야 한다. 순간충격시험은 전체 시추공 구간에 대해서 실시하거나, 시추공에 패커를 설치하여 특정 구간에 대해서 실시할 수도 있다. Hinsby et al.(1992)는 사질 하상퇴적층에 소규모 충격시험법을 적용하였다.

순간충격시험으로부터 구하는 수리상수는 시험정의 수위변화와 관련된다. 수리상수를 구하는 이론에는 Cooper-Bredehoeft-Papadopoulos법(Cooper et al., 1967; Papadopoulos et al., 1973), Hvorslev법(Hvorslev, 1951), Bouwer & Rice 법(Bouwer and Rice, 1976; Bouwer, 1989), KGS식(Hyder et al., 1994), Nguyen & Pinder법(Nguyen and Pinder, 1984)이 있다. Cooper-Bredehoeft-Papadopoulos법(이하에서는 C-B-P법이라 칭함)은 피압대수층 내에 완전히 관통·개방된 또는 스크린을 설치한 시추공에 적용할 수 있다. Nguyen & Pinder법은 피압대수층내에 부분관통하고 있는 우물에 적용할 수 있지만 C-B-P법, Hvorslev 법, Bouwer & Rice법보다는 잘 쓰이지 않는다. 그 이유는 Nguyen & Pinder법이 수리상수 분석 해법상에 한가

지 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. Hvorslev법은 원칙적으로 비교적 천부의 모래층 또는 점토층의 자유면 대수층에 부분 굴착된 피조미터 또는 오거 시추공에서 실시한 순간충격시험을 해석하는 방법이다. $L_e/R > 8$ 인 경우에 Hvorslev법에 의한 수리전도도 K 는 다음과 같은 식으로부터 구해진다.

$$K = \frac{r_c^2 \ln(L_e/R) \ln(h_1/h_2)}{2L_e (t_2 - t_1)} \quad (12)$$

여기서, R 은 우물스크린의 반경(L), r_c 는 우물 케이싱의 반경(L), L_e 는 우물스크린의 길이(L)이다. K 는 수리전도도(LT^{-1})이다. h_1 과 h_2 는 각각 경과시간 t_1 , t_2 의 수위(L)이다. 위 식은

$$K = \frac{r_c^2 \ln(L_e/R)}{2L_e t_0} \quad (13)$$

과 같다. 여기서, t_0 는 최초상승이나 최초하강의 37%에 해당하는 수위에 도달하는데 걸린 시간으로서 원래의 유량을 유지하면서 수위가 평형상태로 되는데 걸리는 시간이다. 위 식은 Hvorslev법의 여러 가지 조건들 중 한 가지 조건에 대한 식이지만, 상당히 유용한 식으로서 우물스크린의 반경에 비해서 시험구간이 상당히 큰 경우의 자유면대수층에 적용이 가능하다. 그러나 그 밖의 조건들에 대해서는 Hvorslev법의 다른 식을 적용하여야 한다.

Bouwer & Rice법은 완전 관통 또는 부분 관통된 시추공이나 스크린된 우물에 적용될 수 있다. Bower & Rice법은 원래 자유면대수층에 제안된 방법이지만 스크린의 최상부가 상부 가압층으로부터 어느 정도 아래에 위치한다면 피압대수층에도 적용될 수 있다. Bower & Rice의 식은

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_e/R)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{h_0}{h_t}\right) \quad (14)$$

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 구간의 길이이다. 그리고 h_0 는 경과시간 0일 때의 수위강하(L), h_t 는 경과시간 t 의 수위강하(L)이다. 그러나 R_e 는 경험적인 변수로 보아야 하며, 실제 유효반경으로 볼 수는 없다(Butler, 1998).

C-B-P법은 완전 피압대수층의 상위에 반경 r_c 의 케이

싱이 설치되어 있고, 대수층에는 반경 R 의 스크린이 설치되거나 나공상태의 우물에 대해서 순간충격시험을 실시한 경우에 적용할 수 있다. Cooper et al.(1967)식은

$$H(t) / H_0 = F(\eta, \mu) \quad (15)$$

과 같다. 여기서, $\eta = T/r_c^2$, $\mu = R^2 S/r_c^2$ 이며, H_0 는 우물에 어떤 분량의 물을 순간적으로 주입시켰을 때 자연수위보다 상승한 수위이고, $H(t)$ 는 경과시간 t 의 수위와 자연수위의 차이이다. 그리고 T 는 투수량계수, S 는 저류계수이다. $F(\eta, \mu)$ 는

$$F(\eta, \mu) = \frac{8\eta}{\pi^2} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\mu u^2}{\eta}\right) \frac{1}{u \Delta(u)} du \quad (16)$$

와 같다. 여기서, $u = r^2 S / (4Tt)$ 이다. C-B-P법은 투수량계수(T)와 저류계수(S) 그리고 수리전도도(K)를 구할 수 있다. 그러나, C-B-P법으로 구한 저류계수는 투수량계수나 수리전도도보다는 신뢰성이 낮다. 이는 순간충격시험으로 구한 저류계수보다는 투수량계수에 더 민감하며, 유효 스크린 반경의 불확실성이 투수량계수 보다는 저류계수값에 훨씬 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 그렇지만, 순간충격시험에 관측공을 이용하면 저류계수의 불확실성은 크게 개선될 수 있다(McElwee et al., 1995b). 또한 관측공 자료를 이용하면 유효 스크린 반경의 불확실성도 상당히 줄일 수 있다(Butler et al., 1996). 그러나 이 경우에 관측공은 시험공과 약 10m 이내의 상당히 가까운 거리에 위치하여야 하며, 스크린도 시험공과 거의 같은 심도에 위치하여야 한다(McElwee et al., 1995a).

순간충격시험분석의 적용

불포화대의 수리전도도 산출

동래구 안락동, 명장동 및 금정구 서동 일원의 12개 관측공(BA-3, BA-4, BA-5, BA-6, BA-7, BA-8, BA-12, BA-14, BA-15, DBH-14, DBH-17, DBH-1-1)에 대해서 불포화대의 특정구간에서 순간충격시험 분석으로 수리전도도를 산출하였다. 시험시간은 30분이며, 시험 초기의 유량(m^3/s)은 곡선의 형태를 보이며 감소하다가 시험 경과시간 7분부터는 일정한 유량을 보인다. 따라서 수리전도도를 산출할 때 7분 이후의 유량 자료를 이용하였다. 8개 시험공(BA-3, BA-6, BA-7, BA-8, BA-12, DBH-14, DBH-17, DBH-1-1)에서는 충적층에서 순간충격시험을 실시하였고, 4개 관측공(BA-4, BA-5, BA-14, BA-15)에서는 풍화대와 연암에서 순간충격시험을 실시

Table 2. Hydraulic conductivities in unsaturated zone.

Borehole	Test zone (m)	K (m/s)
BA-3	Alluvium (7.0-7.5)	1.46E-6
BA-3	Alluvium (14.5-15.0)	2.19E-6
BA-5	Alluvium (4.0-4.5)	1.08E-6
BA-6	Alluvium (4.5-5.5)	4.68E-6
BA-6	Alluvium (9.0-10.0)	1.27E-6
BA-7	Alluvium (5.5-6.5)	6.67E-7
BA-8	Alluvium (5.5-6.5)	1.38E-6
BA-12-1	Alluvium (3.0-4.0)	9.97E-7
BA-12-1	Alluvium (5.0-6.0)	4.33E-7
DBH-14	Alluvium (1.5-3.0)	2.13E-6
DBH-17	Alluvium (3.0-4.5)	3.19E-6
DBH-1-1	Alluvium (2.0-4.5)	3.05E-6
BA-4	Soft rock (15.0-15.5)	1.81E-5
BA-5	Weathered zone (9.0-10.0)	1.44E-5
BA-14	Weathered zone (19.5-21.0)	6.23E-6
BA-15	Weathered zone (15.0-16.7)	2.67E-6
	Maximum	1.81E-5
	Minimum	4.33E-7
	Range	1.77E-5
	Mean	3.75E-6
	Median	2.16E-6
	Standard deviation	4.59E-6
	Kurtosis	6.34
	Skewness	2.45

하였다. USBR(1958)법에 의해서 구한 불포화대 수리전도도는 $4.33E-7 \sim 1.81E-5$ m/s 범위에 있으며 평균은 $3.75E-6$ m/s이다(Table 2). 또한 충전층의 수리전도도($1.88E-6$ m/s) 보다 연암과 풍화대의 수리전도도($1.04E-0$ m/s)가 약 10배 정도로 더 높다.

포화대의 수리전도도 산출

동래구 안락동, 명장동 및 금정구 서동 일원의 17개 관측공(BA-1, BA-8, BA-9, BA-12, BA-18, BA-19, BA-20, BA-21, BA-22, DBH-9, DBH-10, DBH-12, DBH-13, DBH-14, DBH-17, DBH-18, DBH-1-1)의 포화대에서 순간충격시험분석으로 수리전도도를 산출하였다. 시험시간은 30분간이며, 수리전도도 산출은 Hydro-Solve사의 AQTESOLV for Window-Professional 소프트웨어(Ver. 3.01)를 이용하였다. 관측공 BA-9, BA-12에서는 연암에서 구간별 순간충격시험을 실시하였고, 나머지 15개 시험공에서는 충전층에서 구간별 순간충격시험을 실시하였다. Hvorslev법에 의하면, 포화대의 수리전도도는 $5.94E-8 \sim 2.96E-6$ m/s 범위에 있으며, 평균은 $7.65E-7$ m/s이다. 한편, Bouwer & Rice법에 의하면, 수리전도도는

$1.43E-8 \sim 3.53E-6$ m/s 범위에 있으며, 평균은 $6.96E-7$ m/s이다(Table 3). 따라서 두 가지 방법에 의한 수리전도도값은 거의 비슷하다.

7개 시추공(BA-6, BA-7, BA-9, BA-10, BA-11, BA-17, BA-20)에서는 시추공 전체구간에 대하여 순간충격시험을 실시하여 수리전도도를 산출하였다(Table 4). 슬러그 주입에 의한 순간충격시험에 의하면, Hvorslev법으로 구한 수리전도도는 $4.60E-7 \sim 2.48E-5$ m/s 범위에 있으며, 산술평균값은 $1.18E-5$ m/s이다. 한편 Bouwer & Rice법에 의한 수리전도도는 $2.87E-7 \sim 1.76E-5$ m/s 범위에 있으며, 산술평균은 $8.79E-6$ m/s이다. 따라서 Bouwer & Rice법에 의한 수리전도도보다 Hvorslev법에 의한 수리전도도가 약간 크게 나타난다. C-B-P법에 의하면, 투수량계수는 $3.84E-6 \sim 9.14E-4$ m²/s (평균값 $2.29E-4$ m²/s) 그리고 저류계수는 $6.61E-4 \sim 1.37E-3$ (평균값 $9.10E-4$)이다.

한편, 슬러그 인양 순간충격시험을 실시하고, Hvorslev법으로 구한 수리전도도는 $5.74E-7 \sim 6.80E-5$ m/s이며, 산술평균값은 $1.98E-5$ m/s이다. Bouwer & Rice법에 의한 수리전도도는 $4.56E-7 \sim 5.53E-5$ m/s이며, 산술평균값은 $1.55E-5$ m/s이다. C-B-P법에 의하면, 투수량계수는 $3.23E-$

Table 3. Hydraulic conductivity estimates of test sections of saturated zone using slug tests.

Borehole	Test section (m, DTW)	Water level (m, DTW)	K (m/s) by Hvorslev	K (m/s) by Bouwer-Rice
BA-1	Alluvium (6.0 - 7.0)	3.60	1.29E-07	1.10E-07
BA-8	Alluvium (20.0 - 21.0)	9.40	2.94E-07	3.23E-07
BA-9	Alluvium (11.0 - 12.0)	2.50	3.25E-7	3.73E-7
BA-11	Alluvium (6.0 - 7.0)	4.30	1.35E-6	1.58E-6
BA-18	Alluvium (5.0 - 6.0)	3.50	8.02E-7	1.01E-6
BA-19	Alluvium (10.0 - 11.0)	7.20	8.68E-8	9.63E-8
BA-20	Alluvium (15.0 - 16.0)	12.50	1.91E-7	2.50E-7
BA-21	Alluvium (13.3 - 14.3)	7.70	5.94E-8	7.59E-8
BA-22	Alluvium (12.0 - 13.0)	9.10	4.89E-7	6.02E-7
DBH-9	Alluvium (10.0 - 15.0)	3.50	3.66E-7	3.69E-7
DBH-9	Alluvium (15.0 - 20.0)	3.50	2.69E-7	2.65E-7
DBH-10	Alluvium (3.0 - 4.5)	3.58	1.30E-6	1.46E-6
DBH-12	Alluvium (6.0 - 9.0)	3.81	1.71E-6	1.79E-7
DBH-13	Alluvium (3.0 - 5.0)	3.82	6.31E-7	6.94E-7
DBH-14	Alluvium (4.5 - 6.0)	3.29	9.47E-7	1.07E-7
DBH-14	Alluvium (7.5 - 9.0)	3.29	1.10E-6	1.21E-6
DBH-17	Alluvium (6.0 - 7.5)	5.48	1.25E-6	1.43E-8
DBH-17	Alluvium (9.0 - 10.5)	5.48	1.37E-6	1.64E-6
DBH-18	Alluvium (7.5 - 8.5)	3.88	7.80E-7	9.74E-7
DBH-1-1	Alluvium (4.5 - 6.5)	4.18	2.62E-7	2.80E-7
BA-9	Soft rock (14.0 - 15.0)	2.50	1.55E-7	1.76E-7
BA-12	Soft rock (10.0 - 11.0)	9.30	2.96E-6	3.53E-6
	Maximum		2.96E-6	3.53E-6
	Minimum		5.94E-8	1.43E-8
	Range		2.90E-6	3.52E-6
	Mean		7.65E-7	6.96E-7
	Median		5.60E-7	3.46E-7
	Standard deviation		7.00999E-7	8.19E-7
	Kurtosis		3.22307	6.01330
	Skewness		1.56546	2.20336

6~7.37E-4 m²/s이고, 평균값은 1.93E-4 m²/s이다. 그리고 저류계수는 7.33E-4~1.37E-3이고, 평균값은 9.43E-4이다.

깊이별 지질과 수리전도도의 관계

전체구간 및 구간별 순간충격시험이 3회 이상 실시된 BA-6, BA-9, DBH-14, DBH-17에 대해서, 깊이별 지질과 수리전도도의 관계를 살펴보았다(Fig. 6). Fig. 6에서 막대는 수리전도도값을 나타내며, 전체구간 순간충격시험에 의한 수리전도도는 지하수면부터 공 바닥까지 막대로 표시하였다. BA-6호공에서는 지표로부터 충적층이 13 m까지, 풍화대는 13~14 m, 기반암은 14.0 m이하로 되어 있다. 충적층 구간(4.5~5.5 m, 9.0~10.0 m 구간)과 기반암에서 실시된 순간충격시험 자료로부터, 지질과 수리전도도의 관계

를 보면, 충적층보다 기반암인 안산암질 암석에서 수리전도도가 크게 나타난다. 시추주상도를 근거로 볼 때, 이는 기반암 상부에 발달되어 있는 절리의 영향으로 판단된다.

BA-9호공에서는 충적층이 지표~12 m, 기반암은 12.0 m부터 그 이하로 구성되어 있다. 충적층(11.0~12.0 m 구간), 기반암(14.5~15.5 m 구간) 그리고 전체구간에 대해서 순간충격시험에 의한 지질과 수리전도도의 관계를 보면, 충적층보다 기반암의 수리전도도가 작다는 것을 알 수 있다.

DBH-14호공에서는 지표로부터 매립토층(지표~1.8 m), 충적층(1.8~7.5 m), 풍화대(7.5~10.0 m), 기반암(10.0 m이하) 순으로 되어 있다. DBH-14호공에서는 매립층 및 충적층(1.5~3.0 m 구간), 충적층(4.5~6.0 m 구간), 풍화대(7.5~9.0 m 구간)에서 실시한 순간충격시험분석 결과, 매립층 및 충적층의 수리전도도가 가장 크고, 충적층의 수

Table 4. Hydraulic parameters of whole section of saturated zones using slug tests.

Well No.		K(m/s) by Hvorslev	K(m/s) by Bouwer-Rice	K(m/s) by C-B-P	T(m ² /s) by C-B-P	S by C-B-P
BA-6	Injection	1.98E-5	1.65E-5	7.49E-6	1.97E-4	6.61E-4
	Withdrawal	2.07E-5	1.29E-5	4.03E-6	1.06E-4	7.33E-4
BA-7	Injection	7.30E-6	5.77E-6	8.50E-7	2.32E-5	9.02E-4
	Withdrawal	5.35E-6	4.48E-6	1.42E-6	3.88E-5	9.02E-4
BA-9	Injection	9.44E-6	7.25E-6	8.34E-7	2.26E-5	8.13E-4
	Withdrawal	8.70E-6	6.85E-6	2.32E-6	6.28E-5	9.02E-4
BA-10	Injection	2.48E-5	1.76E-5	3.44E-5	9.14E-4	1.23E-3
	Withdrawal	6.80E-5	5.53E-5	2.77E-5	7.37E-4	1.23E-3
BA-11	Injection	2.03E-5	1.37E-5	1.66E-5	4.36E-4	1.37E-3
	Withdrawal	3.45E-5	2.76E-5	1.52E-5	3.99E-4	1.37E-3
BA-17	Injection	4.60E-7	2.87E-7	9.85E-8	3.84E-6	6.61E-4
	Withdrawal	8.75E-7	8.06E-7	1.35E-7	5.28E-6	7.33E-4
BA-20	Injection	5.06E-7	4.17E-7	1.13E-7	5.09E-6	7.33E-4
	Withdrawal	5.74E-7	4.56E-7	7.15E-8	3.23E-6	7.33E-4
	Maximum	6.80E-5	5.53E-5	3.44E-5	9.14E-4	1.37E-3
	Minimum	4.60E-7	2.87E-7	7.15E-8	3.23E-6	6.61E-4
	Range	6.75E-5	5.50E-5	3.43E-5	9.11E-4	7.09E-4
	Mean	1.58E-5	1.21E-5	7.95E-6	2.11E-4	9.27E-4
	Median	9.07E-6	7.05E-6	1.87E-6	5.08E-5	8.58E-4
	Standard deviation	1.84E-5	1.48E-5	1.13E-5	2.99E-4	2.61E-4
	Kurtosis	4.43	5.36	1.25	1.31	-0.92
	Skewness	1.91	2.13	1.51	1.52	0.82

Table 5. F-test and t-test with respect to test section and hydraulic conductivity.

Correlation coefficient	F-test		t-test	
	Critical value	Calculated value	Slope	Intercept
-0.1646	4.08	1.00	1.00	0.80

리전도도가 가장 작다. 그리고 풍화대에서는 중간값을 보이고 있다.

DBH-17호공에서는 매립토층이 지표~2m, 충적층은 2.0~19.5m, 기반암은 19.5m이하부터 분포한다. DBH-17호공에서는 충적층(3.0~4.5m, 6.0~7.5m, 9.0~10.5m 구간)에서 순간충격시험을 실시하였다. 지질과 수리전도도의 관계를 보면, 충적층내에서는 대체로 심도가 증가할수록 수리전도도가 감소하는 경향성을 보인다.

38개 순간충격시험 자료에 대하여, 충적층의 시험구간과 수리전도도의 회귀분석을 실시하였다(Table 5). 먼저, 충적층의 시험구간과 수리전도도의 분산이 동일한지를 검정하기 위해 유의수준 95%에서 F-검정을 실시하였다. F-검정 결과, 계산된 F 값(1.00)이 임계값(4.08)보다 작다. 또한, t-검정 결과, 기울기는 1.00, 절편은 0.80로서 기울기의 제곱과 절편의 제곱이 임계값(4.08)보다 작다. 따라서, 충적층의

시험구간과 수리전도도의 상관성은 없는 것으로 나타났다.

동래단층과 수리전도도의 관계

대규모의 단층대에는 단층점토가 불투수층 막을 형성할 수 있고, 반대로 투수성 파쇄대가 지하수 유동의 주요 통로 역할을 할 수도 있다. 9개 관측공(BA-4, BA-5, BA-6, BA-7, BA-12, BA-14, BA-15, BA-17, BA-20)에서 풍화대, 연암 그리고 전체구간의 순간충격시험을 실시하였으며, 동래단층과 수리전도도와의 관계를 살펴본다. 이들 관측공과 동래단층은 1794~2414m 떨어져 있다. 동래단층으로부터 1794~1854m 떨어져 있는 관측공(BA-4, BA-5, BA-6)에서는 1.44E-5~1.98E-5 m/s의 수리전도도를 보인다. 동래단층으로부터 1902~2212m 거리에 있는 BA-7, BA-12, BA-14, BA-15공에서는 2.67E-

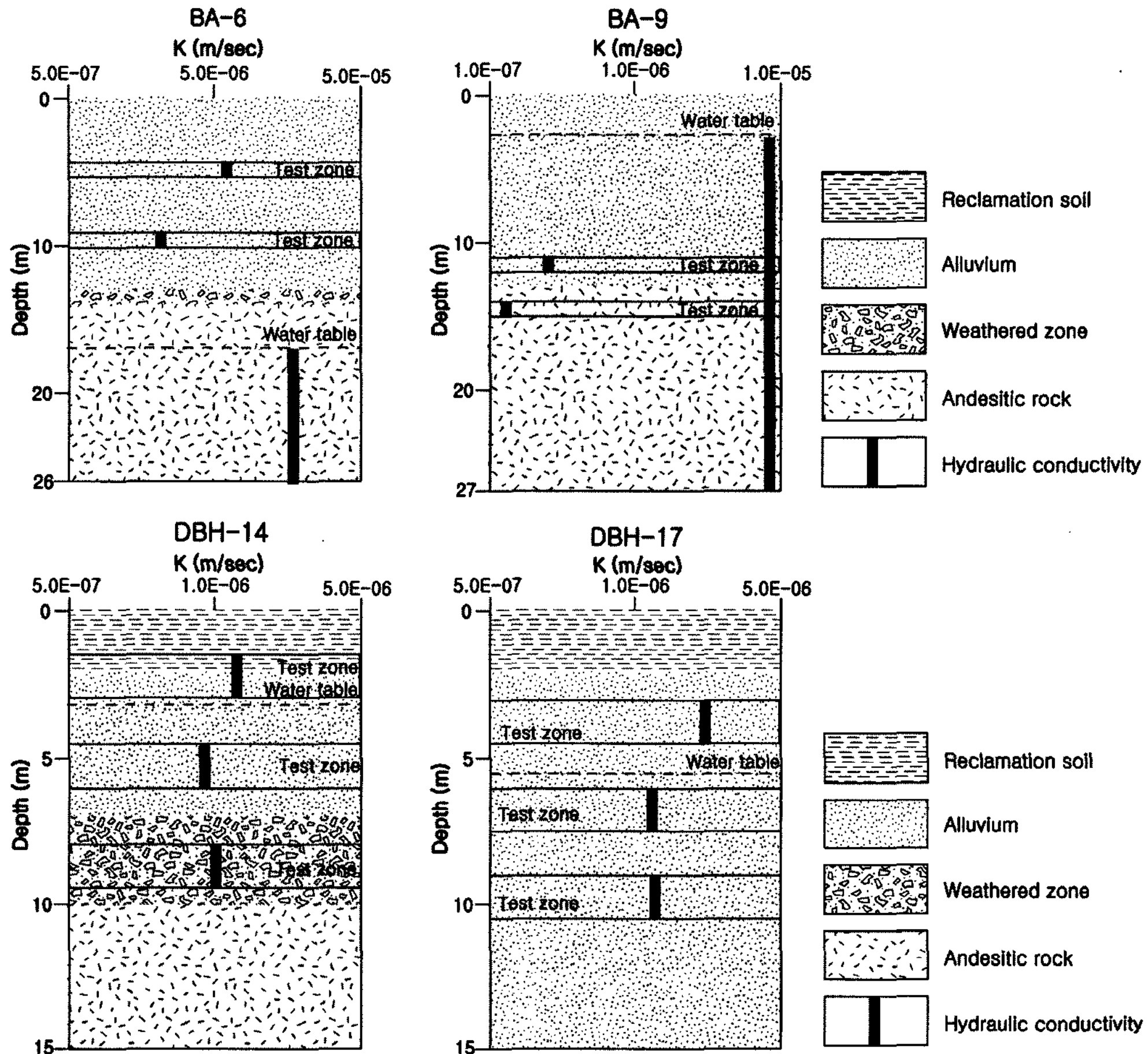


Fig. 6. Hydraulic conductivity with geologic cross-section.

6~7.30E-6 m/s의 수리전도도를 보인다. 한편, 동래단층으로부터 2274~2414 m 떨어져 있는 BA-17, BA-20에서는 4.60E-7~5.06E-7 m/s의 수리전도도를 보인다. 따라서, 동래단층으로부터 1794~2414 m 에서는 동래단층으로부터 거리가 멀어질수록 수리전도도가 감소하는 경향을 보인다.

동래단층으로부터 1794~2414 m 떨어진 관측공들의 수리전도도(K)와 동래단층으로부터의 거리(D)간의 상관분석을 실시하였다(Table 7). 풍화대 및 연암에서 측정된 수리전도도(K)와 동래단층으로부터의 거리(D)의 분산이 동일한지 검정하기 위해, 9개 관측공 자료에 대하여 유의수준 95%에서 F-검정을 실시하였다(Table 8). F-검정 결과, 계산된 F 값(27.53)이 임계값(5.59)보다 크므로 분산이 서로 다르다는 것을 알 수 있다. t-검정 결과, 기울기는 -5.25, 절편은 5.92의 값이므로, 기울기의 제곱과 절편의 제곱이 임계값(5.59)보다 크다. 따라서, 동래단층

과 1794~2414 m 떨어진 거리에서는 풍화대 및 연암의 수리전도도(K)와 동래단층으로부터의 거리(D)간에 상관성이 있으며, 상관계수는 -0.8929이다. 풍화대 및 연암의 수리전도도(K)와 동래단층으로부터의 거리(D)의 회귀식은

$$K = -2.47(D)+5.81 \quad (18)$$

이다(Fig. 7). 따라서, 회귀분석에 의해서도, 동래단층으로부터의 거리가 1794.4~2414.3 m 범위에서는 동래단층으로부터 멀어질수록 수리전도도가 감소하는 것으로 나타났다.

결론

본 연구는 부산지하철 3호선 2단계 구간인 부산시 동래구 동래교차로에서 시작하여 동래구 안락교차로를 지

Table 6. Relation between hydraulic conductivity (K) and distance from Dongrae fault (D).

	Location (TM)		D (m)	K (m/s)
	X	Y		
BA-4	189073.2	208898.0	1794.45	1.81E-5
BA-5	189126.2	208899.4	1792.15	1.44E-5
BA-6	189253.6	208969.8	1853.60	1.98E-5
BA-7	189307.1	209021.5	1901.55	7.30E-6
BA-12	189692.7	209304.4	2157.29	2.93E-6
BA-14	189922.0	209378.9	2215.62	6.23E-6
BA-15	189969.6	209378.8	2212.16	2.67E-6
BA-17	190080.8	209448.2	2273.78	4.60E-7
BA-20	190235.0	209599.6	2414.35	5.06E-7

Table 7. F-test and t-test between hydraulic conductivity and distance from Dongrae fault.

Correlation coefficient	F-test		t-test	
	Critical value	Calculated value	Slope	Intercept
-0.8929	4.08	27.53	-5.25	5.92

나 금정구 서동 일원까지 지역의 층적층, 풍화대, 연암의 수리적 특성을 파악하였다. 연구를 위하여 지하철공사를 위해서 굴착한 총 45개 시추공 중 30개 시추공에서 순간 충격시험분석을 실시하였다.

순간충격시험분석 결과, 불포화대의 구간별 수리전도도는 $4.33E-7 \sim 1.81E-5$ m/s 범위에 있으며 평균값은 $3.75E-6$ m/s이고, 포화대의 구간별 수리전도도는 $5.94E-8 \sim 2.96E-6$ m/s 범위에 있으며, 평균값은 $7.65E-7$ m/s이다. 또한 포화대 전체 구간의 수리전도도는 $4.60E-7 \sim 2.48E-5$ m/s 범위에 있으며, 평균은 $1.18E-5$ m/s이다. 따라서, 포화대의 구간별 수리전도도가 가장 낮은 값을 보이며, 포화대 전체구간에 대한 평균 수리전도도가 불포화대의 구간별 수리전도도 평균값보다 약 3배 가량 높게 나타난다. 또한, 층적층내 시험심도와 수리전도도의 회귀분석 결과, 층적층내 시험심도와 수리전도도간에는 상관성이 없는 것으로 나타났다.

동래단층으로부터의 거리가 1794~2414 m 범위일 때, 동래단층으로부터의 거리와 수리전도도간에 회귀분석을 실시한 결과, 상관계수는 -0.8929이었으며, 동래단층으로부터 거리가 멀어질수록 수리전도도가 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구는 최근 우리나라의 도시지역들에서 수행되고 있는 지하철 등의 지하구조물 공사와 관련된 수리지질학적 요인의 정량적 평가에 필요한 정보를 얻는데 도움을 줄 수 있다.

사 사

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-4-3)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드린다. 또한 현장조사 자료를 제공하여 주신 (주)동아지질에 감사드린다.

참 고 문 헌

- 건설교통부, 한국수자원공사, 2003, 부산지역 지하수 기초조사 보고서, 10-23.
- 류상훈, 함세영, 차용훈, 장성, 정재형, 손문, 김기석, 2007, 부산광역시 도심부 수리지질특성과 지하지질 발달상태의 관련성, 지질공학, 17(3), 367-379.
- 성익환, 조병욱, 이병대, 지세정, 류충렬, 김통권, 윤욱, 이봉주, 임현철, 이종철, 이병태, 김경구, 성기성, 이인호, 추창오, 김정숙, 김문수, 최경국, 함세영, 최광선, 김인수, 조명희, 심형수, 원지훈, 정상용, 박희영, 강동환, 심병완, 김병우, 1999, 지하수 오염방지 및 음용화 기술연구(부산지역), 한국자원연구소, 541p.
- 손문, 이선갑, 김종선, 김인수, 이진, 2007, 부산시 도심지의 지하 지질구조와 단층손상과 관련된 지질위험도 분석, 자원환경지질, 40(1), 87-101.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국지질도 동래·월래도폭 (1:50,000) 및 설명서, 자원개발연구소, 27p.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 한국지질도 부산·가덕도폭 (1:50,000) 및 설명서, 한국동력자원연구소, 22p.
- 조병욱, 2001, 부산지역의 지하수자원의 수리지질학적 특징, 경북대학교 일반대학원 이학박사 학위논문, 164p.

- 이기복, 1998, *지반조사법*, 도서출판 과학기술, 799p.
- 함세영, 김문수, 성익환, 이병대, 김광성, 2001, 순간충격 시험에 의한 화강암지역의 수리적 매개변수 산출, *지질공학*, 11(1), 63-79
- 함세영, 차용훈, 정재열, 2005, 부산 도심지역 미고결층과 기반암의 수리지질 특성, *지질공학*, 15(4), 407-421.
- 함세영, 김광성, 이정환, 정재열, 성익환, 장성, 2006, 부산 시 사상공단지역의 지하수 수질 특성, *자원환경지질*, 39(6), 753-770.
- Bouwer, H., 1989, The Bouwer and Rice, Slug test-an update, *Ground Water*, 27(3), 304-309.
- Bouwer, H. and Rice, R.C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resour. Res.*, 12(3), 423-428.
- Butler, J.J., Jr., 1998, *The design, performance, and analysis of slug tests*, Lewis Publishers, 252p.
- Butler, J.J., Jr., 1996, *Slug tests: Some practical considerations*, Kansas Geological Survey Open-File Rept. 94-16.
- Butler, J.J., Jr. and Hyder, Z., 1994, An assessment of the Nguyen and Pinder method for slug test analysis, *Ground Water Monitoring and Remediation*, 14(4), 124-131.
- Cooper, H.H., Jr., J.D. Bredehoeft, and I.S. Papadopoulos., 1967, Respose to a finite diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resour. Res.*, 3, 263-269.
- Fetter, C.W., 2001, *Applied Hydrogeology*, 4th ed., Prentice Hall.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., 604p.
- Hamm, S.-Y., Kim, M.S., Cheong, J.-Y., Kim, J.-Y., Son, M., and Kim, T.-W., 2007, Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite, *Eng. Geol.*, 92, 73-87.
- Hvorslev, M.L., 1951, Time lag and soil permeability in groundwater observations. Bull. 36, *Waterways Experiment Station Corps of Engineers*. U. S. Army. Vicksburg, Mississippi, 50 p.
- Hyder, Z, Bulter, Jr., C.D. McElwee and W.Liu, 1994. Slug tests in partially penetrating wells, *Water Resources Research*, 30(11), 2945-2957.
- Hinsby, K., Bjerg, P., Andersen, L.J., Skov, B., and Clausen, E.V., 1992, A mini slug test for determination of a local hydraulic conductivity of an unconfined sandy aquifer. *J. Hydrol.*, 136, 87-106.
- McElwee, C.D., Bohling, G.C., and Butler, J.J., r., 1995a, Sensitivity analysis of slug tests. Part 1. The slugged well, *J. Hydrol.*, 164, 53-67.
- McElwee, C.D., Bohling, G.C., and Butler, J.J., r., 1995b, Sensitivity analysis of slug tests. Part 2. Observation wells. *J. Hydrol.*, 164, 69-87.
- Nguyen, V. and Pinder, G.F., 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.
- Papadopoulos, I.S., Bredehoeft, J.D., and Cooper, H.H., Jr., 1973, On the analysis of "slug test" data, *Water Resour. Res.*, 9, 1087-1089.
- U. S. Bureau of Reclamation, 1958, *Earth Manual.*, 253p.
- Zieger, T., 1976. Determination of rock mass permeability. U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Technical Report S-76-2, Vicksburg, Mississippi, 88p.
- Zlotnik, V., 1994, Interpretation of slug and packer tests in anisotropic aquifers, *Ground Water*, 32(5), 761-767.

2008년 2월 7일 원고접수, 2008년 3월 12일 게재승인

류상훈

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3453
Fax: 051-516-7767
E-mail: rsh80@pusan.ac.kr

함세영

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-2252
Fax: 051-516-7767
E-mail: hsy@pusan.ac.kr

정재형

한국건설기술연구원 지반연구부
411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311번지
Tel: 031-910-0378
Fax: 031-910-0211
E-mail: jjhcivil@kict.re.kr

한석중

(주)동아지질 지반공학부
부산광역시 금정구 구서동 1033-2번지
Tel: 051-580-5653
Fax: 051-580-5650
E-mail: sjhan@dage.co.kr

정재열

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3453
Fax: 051-516-7767
E-mail: jjy@pusan.ac.kr

김형수

한국수자원공사 수자원연구원
305-730 대전광역시 유성구 전민
Tel: 042-860-0330
Fax: 042-8670-0592
E-mail: hskim@kwater.or.kr

장성

한국농촌공사 경상남도본부 환경지질팀
641-733 경남 창원시 북 15로 242(용호동 8-3)
Tel: 055-269-9462
Fax: 055-261-8612