

부산광역시 도심부 수리지질 특성과 지하지질 발달상태의 관련성

류상훈¹ · 함세영*¹ · 차용훈² · 장 성³ · 정재형⁴ · 손 문¹ · 김기석⁵

¹부산대학교 지구환경시스템학부, ²(주)지오그린21, ³한국농촌공사 경남본부

⁴한국건설기술연구원 지반공학연구부, ⁵(주)희송지오테크

Relationship between Hydrogeological Characteristics and Subsurface Geology in Central Busan Megacity

Sang-Hun Ryu¹, Se-Yeong Hamm*¹, Yong-Hoon Cha², Seong Jang³,
Jae-Hyeong Jeong⁴, Moon Son¹, and Ki-Seok Kim⁵

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University, ²GeoGreen21 Co., Ltd.

³Gyeongsangnam-Do office, Korea Rural Community & Agriculture Corporation

⁴Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology

⁵Heesong Geotek Co., Ltd.

본 연구에서는 부산광역시 도심지역인 부산진구 양정동에서 동구 수정동까지의 주로 경부고속철도 터널 통과 예정지역 지반조사로부터 얻어진 시추공 자료, 지하수위 자료, 공내 유향·유속 자료 그리고 현장수리시험 분석 자료를 바탕으로 천부지층과 수리지질 특성의 관련성을 평가하였다. 지하수위(Y)와 지형고도(X)의 관계식은 $Y = 0.75X - 7.00$ 이며, 상관계수는 0.78로서 비교적 높은 편이다. 매립층, 충적층, 풍화대의 두께와 지하수위의 상관성을 살펴본 결과, 풍화대의 두께(A)의 자연로그값과 지하수위(Y)의 상관성이 상대적으로 높게 나타났으며, 그 회귀식은 $Y = \exp(9.974A) - 14.155$ 과 같다. 지하수 유향·유속 결과, 지하수 유향은 대체적으로 남쪽~남서쪽으로 향하고 있으며, 이는 지역적인 지하수 분포와 대체로 일치한다.

주요어 : 수리지질 특성, 지하지질, 지하수위, 터널 공사, 부산광역시

This study intended to evaluate hydrogeological characteristics in relation to subsurface geology data obtained from borehole, groundwater level, borehole flowmeter test, and field hydraulic tests. The regression equation of groundwater level (Y) versus ground elevation (X) is expressed by $Y = 0.75X - 7.00$ with quite high correlation coefficient of 0.78. Relationship between groundwater level and thickness of landfill, alluvium, and weathered zone results in higher correlation of groundwater level (Y) versus natural log value of weathered zone (A) than other correlations, with the regression equation $Y = \exp(9.974A) - 14.155$. The result of groundwater flow measurement in the boreholes indicates that groundwater flows towards between south and southwest, and this approximately agree with regional distribution of groundwater levels.

Key words : hydrogeological characteristics, subsurface geology, groundwater level, tunnel excavation, Busan Megacity

서 언

우리나라에서는 대도시 지역의 교통을 해소하기 위하여 지하철을 건설하여 왔으며, 최근에는 고속철도용 지

하터널을 도심지역에 건설하고 있다. 도심지역의 터널 건설은 지하수 유동체계를 변화시키고 지하수 개발뿐만 아니라 향후 도심지역의 공사로 인한 환경변화에도 영향을 미치게 된다. 그러나, 도심지역의 수리지질 특성을

*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

파악하기 어려운 것은 첫째로 우리나라 대부분의 도심 지역의 지표면이 많은 구조물과 아스팔트, 시멘트 등으로 덮여 있기 때문이다. 도심지역에서는 현장여건상 시추가 어려운 경우가 많으므로 수리지질학적 정보를 얻기가 어렵고, 지하수부존조사, 지하수영향조사 등을 수행할 때 정확한 수리지적 특성을 파악할 수 없다. 두번째로는 우리나라 도심지역에서는 지하철공사나 각종 토목공사에 따른 시추조사를 하고 있으나, 시추자료들이 체계적으로 관리되지 못하는 경우가 많기 때문이다. 따라서 장기적인 대규모 도심지 개발이나 추가적인 지하철 건설시에 과거의 시추조사 자료가 효과적으로 활용되지 못할 뿐만 아니라, 지하지질 및 수리지질 상태를 종합적으로 해석하는데도 별 도움을 주지 못하고 있다. 이는 국가적으로 볼 때 큰 경제적 손실이기도 하다. 세번째로 도심지역의 특성상 고속철도나 지하철 건설공사와 같은 특수한 경우가 아니고는 다량의 시추자료를 얻을 수 없기 때문에, 도심지역 지층과 지하수 유동 특성의 관련성

을 연구하기가 쉽지 않다는 것이다.

부산광역시의 중앙부에는 대체로 남북방향으로는 산지가 분포하기 때문에 동서간의 교통을 원활하게 하기 위한 목적으로 여러 개의 터널이 건설되어 있다. 만덕고개를 횡단하는 도로터널인 만덕 1터널과 만덕 2터널이 건설되어 있으며, 역시 만덕고개를 횡단하는 지하철 3호선 터널도 2005년에 건설되었다. 또한 금정산 지역에는 장전동과 화명동을 잇는 도로터널인 산성터널이 계획되어 있다. 한편 남북방향으로는 금정산 줄기를 종단하는 고속철도 금정터널이 건설 중에 있으며, 이 터널은 도심지의 부산진역 부근까지 계획되어 있다. 부산광역시 도심에는 지상에 대규모 아파트 단지, 상업지구 등이 분포하고 있으며, 지하철 1호선, 2호선(일부 개통), 3호선(일부 개통)이 건설되어 운행되고 있다. 지하철 1, 2, 3호선이 건설되어 있는 상태에서 도심을 통과해서 건설되고 있는 고속철도 터널 공사는 주변의 지하수 유동체계를 더욱더 크게 변화시킬 가능성이 있다. 따라서 기존

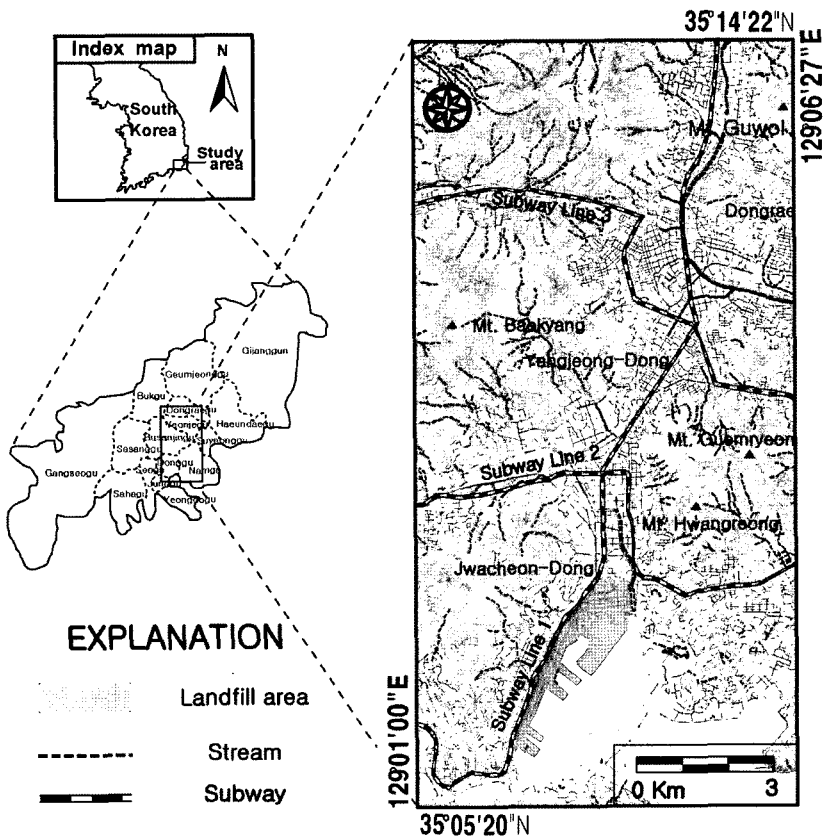


Fig. 1. Location map of the study area.

지하철 1, 2, 3호선 터널과 아울러서 경부고속철도 도심 구간 터널 공사로 인한 부산 도심지역의 지하수 유동체계 해석은 매우 중요하다. 또한 해안에 비교적 가까운 동구 수정동 지역에서는 고속철도 터널 건설로 인한 염수침투의 가능성도 있다. 이 지역은 과거에 연안 퇴적층(펄층)이 분포하던 지역으로서 지금은 매립된 상태이며, 지하수 유동체계 변화에 의해서 해안 매립지역의 펄층에 함유되어 있는 염분이 담지하수 염분농도를 변화시킬 수 있다.

현재까지 부산지역에 대한 다수의 지하수 유동 및 수리지질학적 특성에 관한 연구가 수행되었다. 성익환 등(1999)와 조병욱(2001)은 부산지역 전체에 대해서 지하수 유동과 용존 무기물의 특성을 연구하였다. 함세영 등(1999)는 부산 북서부지역 화강암 지하수의 지하학적 특성 및 오염 가능성을 연구하였다. 건설교통부와 한국수자원공사(2003)는 부산지역의 지하수 기초조사를 통하여 부산광역시 전역의 수리지질, 지하수 부존특성, 지하수 수질 및 오염취약성평가, 지하수 보전·관리방안을 제시하였다. 또한 함세영 등(2005)은 부산 도심지역 미고결층과 기반암의 수리지질 특성을 비교·연구하였다.

부산지역의 지형 특성상, 건설되는 많은 터널은 지하수 유동체계 변화, 터널내 지하수 유출로 인한 주변지역의 지하수위 변동 그리고 지하수 수질 변화 등을 유발할 수 있다. 또한 터널 공사 중과 완공 후 운영으로 인해서 터널 주변지역과 그 지상에 있는 건물의 안정성에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 연구는 부산시 도심부를 통과하는 경부고속철도 터널 통과 예정지역 기반조사의 일환으로 수행된 시추조사 자료와 부산광역시청의 지하수공 자료(건설교통부와 한국수자원공사, 2003)를 바탕으로 부산도심지역의 천부지층과 수리지질 특성의 관련성을 평가하였다. 연구지역은 부산광역시 부산진구 양정동에서 동구 수정동까지의 지역(Fig. 1)이며, 경부고속철도 터널 통과 예정지역 기반조사로부터의 시추자료, 지하수위 분포, 공개 유향·유속시험 자료 그리고 현장수리시험 분석 자료를 이용하였다.

천부지질의 발달상태

지질개요

연구지역(부산광역시 양정동~수정동)은 백악기 경상분지의 남동부에 위치하고 있으며 계곡부의 제4기 충적층을 제외하고는 모두 백악기 암석들로 이루어져 있다(Fig. 2). 지질은 하위로부터 백악기 유천층군에 해당하

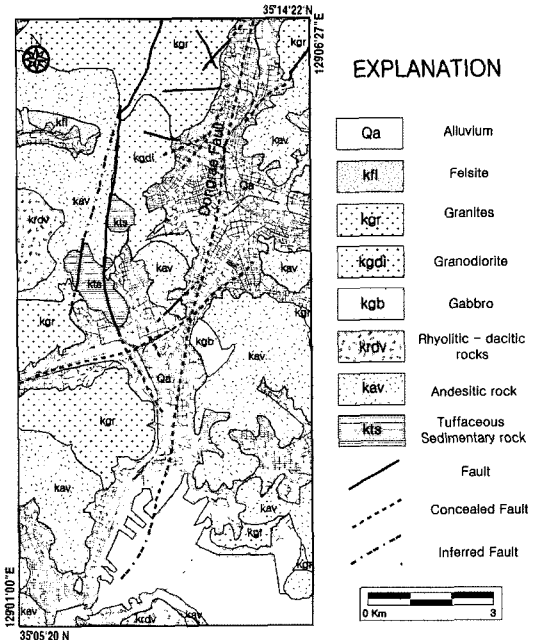


Fig. 2. Geology of the study area (Modified from Son et al., 1978).

는 응회질 퇴적암, 안산암질 암, 유문암질-테사이트질 암석, 반려암 그리고 불국사화강암류(화강섬록암, 화강암, 규장암)로 이루어져 있다(손치무 등, 1978; 장태우 등, 1983; 손문 등, 2007). 최하위층인 응회질 퇴적암은 이천리층에 해당되며(손치무 등, 1978), 연구지역 중앙부 백양산 일원에 소규모로 분포한다. 흑색 및 암회색의 셰일이 우세하고 일부 셰릴질 사암이 협재되며, 후기 화성활동으로 심하게 접촉변성되어 대부분 호온펠스로 산출된다. 연구지역에서 가장 넓은 분포면적을 보이는 안산암질암은 주로 유리질 또는 용결응회암과 화산각력암으로 구성되며 일부 용암류가 협재된다. 백양산과 영도에 소규모로 분포하는 유문암질-테사이트질 암석은 주로 석영과 장석의 결정편을 함유한 용결응회암과 화산력응회암으로 구성되며 일부 용암류가 산출된다. 반려암은 연구지역 중앙부 황령산 서쪽 산기슭에 소규모로 분포하는데, 특징적으로 사장석을 핵으로 하는 수 cm 직경의 암구(orbicule)를 다량 포함하는 구상반려암으로써(Kim et al., 1979) 천연기념물 267호로 지정되어있다.

불국사화강암류(화강섬록암, 화강암, 규장암)는 대부분 동래단층의 서편에 분포한다(Fig. 2). 화강섬록암은 만덕동과 온천2동에 분포하는데, 사장석 반정이 우세한 반상조직을 보여준다. 주성분 광물은 석영, 사장석, 정장석,

흑운모이며 부성분 광물로 각섬석, 녹니석, 자철석, 자류철석 등이 관찰된다. 화강암류는 북으로부터 금정산, 수정산, 엄광산에서 관찰되며, 관입 연변에서는 국지적으로 규장암 암상으로 변화되는 양상을 보인다. 연구지역의 북서부 만덕동에는 안산암질암을 동서방향으로 관입한 약 1 km 폭의 독립적인 규장암체가 산출되기도 한다.

제4기 충적층은 주로 북북동방향의 동래단층을 따라 형성된 계곡부에 두껍게 분포한다. 1980년 이후 실시된 부산시의 지하철과 고속철도 건설을 위한 조사용의 총 203개의 시추자료에 의하면, 이곳 제4기 퇴적층은 대부분 점토질, 실트질 그리고 사질층의 호층으로 구성되고, 기저 요지에는 역층이 불연속적으로 협재되어 있다. 사질 및 점토질층 내에는 천해성 환경을 지시하는 다수의 연체동물 패류화석과 미화석 산출이 보고되었다(오건환, 1988; 손문 등, 2007). 또한 연구지역의 중앙부인 서면교차로와 양정교차로 사이 지역에서는 제4기 충적층의 분포심도가 가장 얇고 그 남쪽으로 가면서 점차 심도가 깊어진다. 이 충적층의 분포심도와 특성을 고려하여 서면교차로 남쪽 지역은 제4기의 오랜 기간 해침을 경험하였음이 보고된 바 있다(손문 등, 2007).

연구지역의 지질구조는 양산단층계에 속하는 북북동

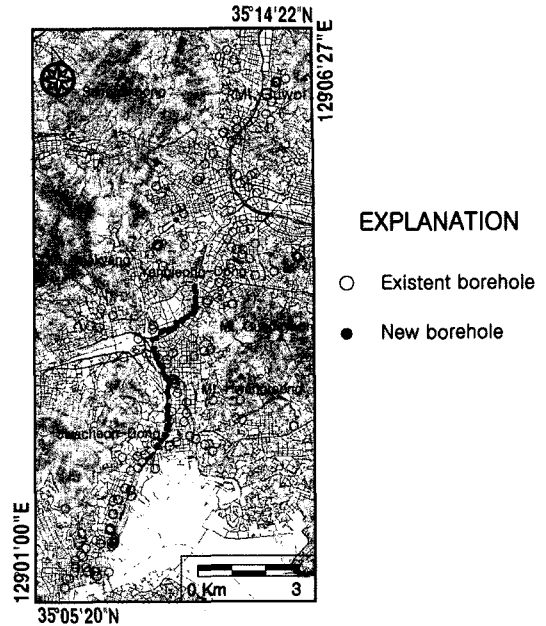


Fig. 3. Location of the boreholes.

방향의 동래단층과 북북동에서 남쪽으로 북북서방향으로 굴곡되는 금성동단층(손문 등, 2002), 그리고 연구지

Table 1. Description of borehole geology.

	Geology	Landfill	Alluvium	Weathered zone	Soft rock
Existent boreholes (205)	Min. thick., m (A)	0.00	0.00	0.00	0.00
	Max. thick., m (B)	16.00	31.00	46.30	20.5
	Range, m (B - A)	16.00	31.00	46.30	20.5
	Arithmetic mean, m	2.39	7.99	10.28	1.89
	Median, m	1.30	7.00	8.20	1.00
	Standard dev.	3.02	6.64	9.91	3.02
	Skewness	1.66	1.06	3.19	4.56
	Kurtosis	2.91	0.80	18.46	23.16
New boreholes (48)	Min. thick., m (A)	0.00	0.00	0.40	0.00
	Max. thick., m (B)	12.00	14.50	39.30	65.00
	Range, m (B - A)	12.00	14.50	38.90	65.00
	Arithmetic mean, m	2.02	4.34	16.09	38.43
	Median, m	1.50	3.45	14.2	41.75
	Standard dev.	1.94	3.49	10.22	16.09
	Skewness	3.01	1.08	0.64	-0.77
Kurtosis	14.34	0.09	-0.34	-0.13	
Total boreholes (253)	Min. thick., m (A)	0.00	0.00	0.00	0.00
	Max. thick., m (B)	16.00	31.00	46.30	65.00
	Range, m (B - A)	16.00	31.00	46.30	65.00
	Arithmetic mean, m	2.32	7.30	11.08	8.82
	Median, m	1.50	36.00	8.90	1.4
	Standard dev.	2.84	6.32	9.03	16.18
	Skewness	1.81	6.00	8.9	1.40
Kurtosis	3.77	1.31	1.89	2.47	

역 중앙부 가야로를 따라 연장되는 동북동방향의 단층으로 대표된다(손문 등, 2002, 2007). 또한, 동래단층 주변에는 동래단층의 부차단층(subsidiary fault)으로 추정되는 북동과 동서방향 등의 소규모 단층들이 여러 개 존재하고 있다. 동래단층은 연구지역 중앙부인 양정교차로 부근에서 단층파쇄대의 폭이 약 50m로 가장 좁으며 남쪽과 북쪽으로 갈수록 폭이 넓어져 남쪽의 부산진역 부근에서는 약 250m에 달하는 것으로 보고된 바 있다(손문 등, 2007). 금성동 단층은 경사가 수직에 가까운 우수향 주향이동단층으로 약 10m의 파쇄대 폭을 가지며 남쪽으로 연장되어 본 연구지역 남부지역인 범일동

에서 동래단층과 교차한다(손문 등, 2007). 연구지역 중앙부의 동북동방향 단층은 선구조 분석과 시추조사를 통해서 최근에 인지된 매몰단층으로 단층파쇄대의 폭은 약 10m이다(손문 등, 2007).

천부지층의 공간적 분포 특성

기존의 205개 부산광역시 지하수공 자료(건설교통부, 한국수자원공사, 2003)와 경부고속철도 건설을 위한 지반조사를 위한 48개 시추공(TB-1~TB-9, TB-12, TB-14~TB-16, TB-18, TB-19, TB-21~TB-23, TB-26~TB-31, TB-31~TB-38, TB-40, TB-42~TB-44, TB-47, TB-

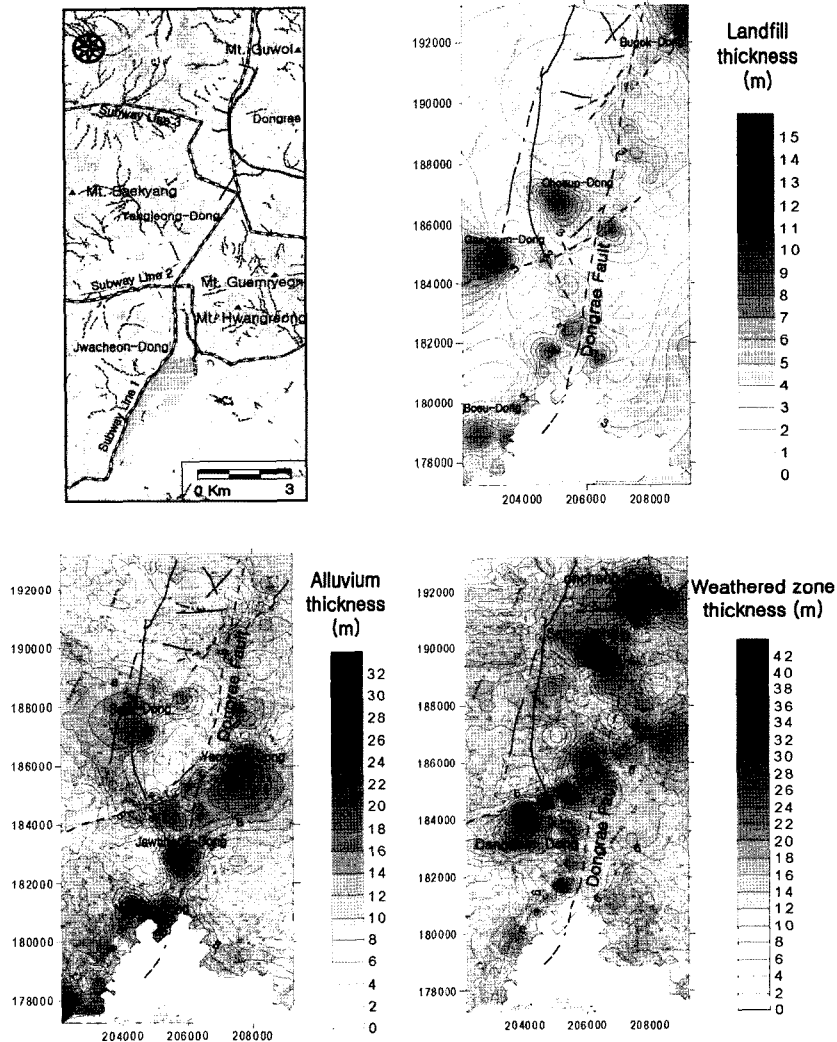


Fig. 4. Thickness distribution of landfill, alluvium and weathered zone.

48, TB-51~TB-54, TB-56~TB-58) 자료에 의하면(Fig. 3), 연구지역의 지하지질은 지표로부터 매립토층, 충적층(자갈, 모래, 점토, 실트), 풍화대(풍화토, 풍화암), 연암순으로 분포하고 있다(Table 1). 총 253개 지하수공 자료를 이용하여, 매립토층, 충적층, 풍화대의 두께 분포를 크리깅으로 구하였다(Fig. 4). 각 층의 평균 두께는 매립토는 2.32 m, 충적층은 7.30 m, 풍화대는 11.08 m, 연암층은 8.82 m로 나타났다. 기존 지하수공의 평균 굴착심도는 20 m 내외로서 지점에 따라서 풍화대 및 연암의 전체 두께를 굴착하지 않은 경우에는 풍화대 및 연암의 두께 산정에서 제외하였다. 고속철도 터널 예정구간 주변에 시추된 48개 시추공의 평균 굴착심도는 40m내외로서 풍화대 및 연암의 두께를 비교적 정확하게 나타내고 있다.

매립토층의 두께는 부산진구 개금동에서 15 m로 가장 두껍게 나타났으며, 중구 보수동에서 14 m, 부산진구 초읍동에서 11 m, 금정구 부곡동에서도 10 m로 높게 나타났다(Fig. 4). 한편 충적층은 중구 남포동에서 31 m로 가장 두껍게 나타났으며, 동구 좌천동에서 26 m, 남구 문현동에서 22 m, 연제구 연산동에서 18 m, 동래구 사직동에서 16 m로 나타났다. 풍화대층의 두께는 부산진구 당감동에서 40 m로 가장 두꺼우며, 부산진구 범천동과 부전동에서 30 m, 동래구 사직동에서 30 m, 동래구

온천동에서 35 m로 나타났다.

신규 시추공 중 동래단층과 인접한 시추공(TB-3~TB-9)의 연암부에는 동래단층에 의한 단층 파쇄대가 발달되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 동래단층을 따라서 대체로 충적층과 풍화대의 두께가 두껍게 나타나며(Fig. 4), 이는 지질개요에서도 언급되었다. 그러나, 동래구 온천동 이북에서는 충적층의 두께가 얇아지는 경향성을 보인다. 이는 해안에서 내륙으로 갈수록 충적층의 두께가 얇아지고 있으며, 반면에 서면교차로 남쪽 지역은 제4기의 오랜 기간 해침(손문 등, 2007)에 의해서 충적층의 두께가 두꺼워졌음을 의미한다.

수리지질 특성

지층의 수리전도도

양정동의 시추공 TB-3호공에서 수행한 양수시험 결과, 안산암질 화산암류의 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(함세영 등, 2005). TB-3호공 주변의 균열대는 동래단층대에 해당하고, 블록은 상대적으로 균열의 발달이 미약한 부분에 해당한다. 동래단층대가 단층비지나 풍화산물에 의해서 낮은

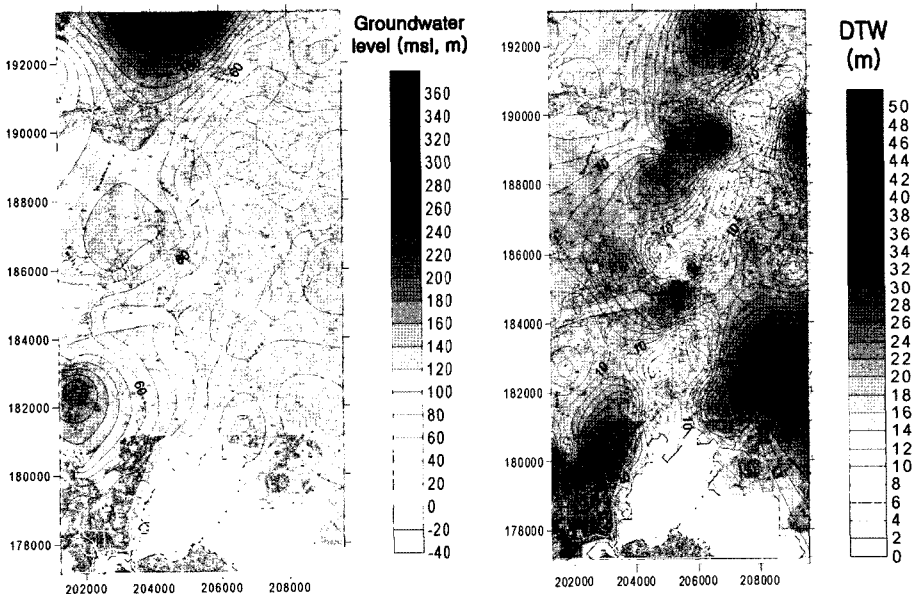


Fig. 5. Distribution of groundwater level and depth to water (DTW).

Table 2. F-test and t-test using groundwater level and surface elevation.

Correlation coefficient	F-test		t-test			
	Critical value	Calculated value	Slope		Intercept	
			Critical value	Test value	Critical value	Test value
0.7800	4.03	27.84	6.31	27.84	6.31	6.97

수리전도도를 가진다는 것을 지시한다. 한편, 부산진역 부근 규장암 풍화대에 굴착한 TB-58호공의 양수시험 결과, 수리전도도와 평균 비저유율은 각각 $6.08 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 와 $1.71 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ 이다. 이는, 연구지역내에서는 동래단층대의 수리전도도가 기반암 풍화대의 수리전도도보다 낮다는 것을 지시한다.

지하수위 분포 특성

고속철도 예상노선을 따라 시추한 47개 시추공과 그 주변지역에 위치하는 24개 지하수공, 그리고 건설교통부와 한국수자원공사(2003)에 의한 101개 지하수위 자료를 근거로 크리깅에 의해서 작성한 지하수위 등고선도에 의하면(Fig. 5), 전체적인 지하수 유동은 고지대인 북서쪽에서 저지대 및 해안지역인 남서쪽으로 일어나고 있다. 지하수위는 대체로 지표면 아래 4~8 m에 위치하지만, 일부 지역에서는 지하수위가 비정상적으로 낮다. 지하수위가 낮은 곳을 보면, 남구 대연동에서는 지표면 아래 약 50 m에 위치하고, 동래구 사직동에서는 38 m, 동구 영주동에서는 36 m, 금정구 장전동에서는 32 m, 그리고 부산진구 부전동, 양정동에서는 지하수위가 지표면 아래 28 m에 위치한다.

인위적인 영향을 받지 않은 상태에서 지하수는 평형 상태에 있으며, 지하수위는 지형고도와 정비례관계를 보인다(Fetter, 2001; Williams and Williamson, 1989). 연구지역내의 지하수위와 해발고도의 두 집단의 분산이 동일할지를 검정하기 위하여 F-검정을 실시하였다. 그 결과, 임계값은 4.03이고, 계산값은 27.84로서 귀무가설이 기각된다. 따라서, 지하수위와 해발고도의 분산이 같다는 증거가 없으므로, 지하수위와 해발고도 간의 상관계수의 유의성을 확인하기 위한 t-검정을 실시하였다(Table 2). t-검정 결과, 기울기와 절편의 계산값이 임계값보다 크다. 따라서, 지하수위와 해발고도 간의 상관계수의 유의성이 확인되었다. 계산된 지하수위(Y)와 지형고도(X)의 관계식은

$$Y = 0.75X - 7.00 \quad (1)$$

이며, 상관계수는 0.78로서 비교적 높은 편이다(Fig. 6).

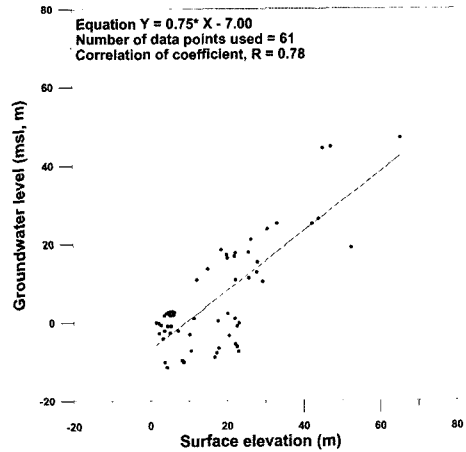


Fig. 6. Surface elevation vs. groundwater level.

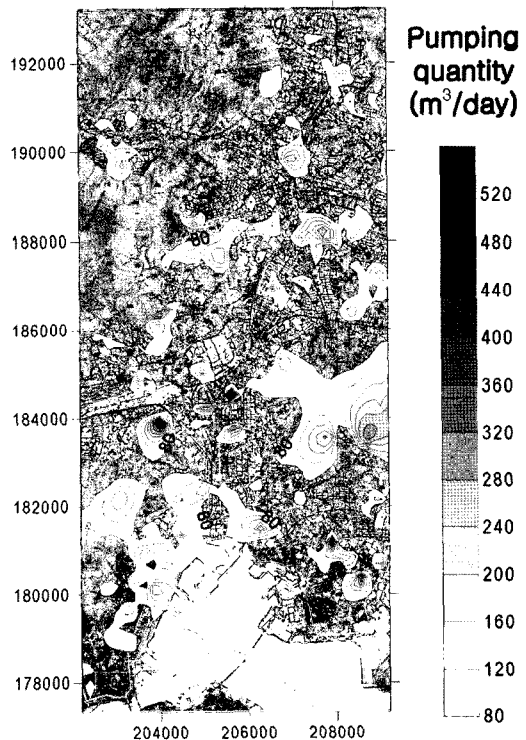


Fig. 7. Distribution of pumping amount in the study area.

(1)식에서 보면, 연구지역내에서는 대체로 지표면 아래 7m에 지하수위가 형성되어 있음을 알 수 있다. 또한 남구 대연동, 동래구 사직동, 동구 영주동, 금정구 장전동, 부산진구 부전동, 양정동 지역의 상대적으로 낮은 지하수위(Fig. 5)는 지하수 사용량(Fig. 7)이나 또는 지하철내로의 지하수 배출량 때문으로 판단된다. 참고로 1999년에 지하철 1호선에서 배출된 지하수 배출량은 1일 약 3200 m³이었다(성익환 등, 1999).

지하수 유동 특성

지하수 유향유속

지하수 유향유속 측정의 원리

지하수공의 심도별 유향유속 측정기에는 임펠러(Hanson and Nishikawa, 1996), 열 파동(Kerfoot, 1982; Hess, 1986; Morin et al., 1988), 초음파(Miyakawa et al., 2000), 전자파(Boman et al., 1997)를 이용하는 종류들이 있다. 또한 유동측정 방향에 따라서는 1차원, 2차원 또는 3차원으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 미국 Kerfoot Technologies사(과거는 KVA사)에서 제작된 공내 유향유속측정기(heat-pulse flowmeter)를 사용하였다(Kerfoot, 1982). 이 공내 유향유속 측정기에는 수평방향의 지하수 유동을 측정하는 2차원(2-D) 유향유속 측정기(GEOFLO 모델 200)와 수직방향의 지하수 흐름을 측정하는 1차원(1-D) 유향유속 측정기(GEOFLO 모델 100)가 있다. 유향유속 측정기는 유향유속 측정 probe가 부착된 케이블, 알루미늄 로드, reel box, 중앙처리장치(컴퓨터)로 구성된다. 유향유속 측정값은 probe가 부착된 케이블을 알루미늄 로드와 연결시켜서 시추공내로 내려서 측정된 지하수 유동 속도와 방향(2-D의 경우에는 수평방향 그리고 1-D의 경우에는 아래쪽 또는 위쪽 방향)을 장비 제작회사에서 제공하는 S/W로 자동 분석·처리하게 된다.

2-D 유향유속측정 probe의 중앙에는 열원(heat source)이 있다. 열원의 주위에는 십자상으로 4개의 thermistors가 위치하고 있다. 지하수유동 측정을 위해서는 먼저 5~15분(보통 10분)간 정류상태를 유지시킨다. 그리고 열원으로부터 30초 동안 열파(heat pulse)를 발생시킨다. 자료의 일관성을 유지하기 위해서는 항상 1번 열 감지 센서(thermistor)를 자북방향과 일치시킨다. 2-D 측정기의 경우에는 N-S방향과 E-W방향의 지표온도(reference temperature)가 스크린에 나타난다. 2-D 유향유속측정기로는 최소 1~2 cm/day 정도의 지하수 유속 측정이 가능

하다. 시추공내에서 지하수가 유동할 때, 열파가 지하수 유동방향으로 전달된다. 이때 지하수 유동방향으로는 온도가 올라가고 지하수 유동방향의 반대방향으로는 온도가 내려간다. 이 온도 차이는 열파가 서로 반대편의 열 감지 센서에 도달했을 때 최대가 되며, 이는 지하수유동 속도에 비례한다. 그러나 주된 지하수유동 방향에 직각으로 위치하는 열 감지 센서에서는 동일한 열을 받기 때문에 온도차이가 나타나지 않는다. N, S, E, W에 위치하는 열 감지 센서에서 열원에서 나오는 열파에 의한 N-S방향의 온도 차이와 E-W방향의 온도 차이를 감지하고, 이를 벡터합성함으로써, 지하수유동 방향과 유속을 구하게 된다.

1-D 유향유속측정 원리는 기본적으로 2-D 측정기와 같으며, probe의 상하에 설치된 열 감지센서에서 열파(heat pulse)에 의한 온도 변화를 감지하여 지하수의 상·하 방향의 유동과 유속을 알아낸다. 1-D 유향유속 측정기로는 0.1 ml/min이상의 유동 측정이 가능하다.

지하수 유향·유속 측정 결과

동래단층대 주변인 양정동 지역의 시추공 TB-4호공, 부산 지하철1호선과 고속철도터널계획구간의 교차점 부근인 좌천동의 TB-51호공, 부산진역 주변의 TB-57호공에서 1-D와 2-D 유향·유속 측정기를 사용하여 지하수 유향·유속 측정하였다(Table 3). 양정동 지역의 TB-4호공의 심도 40~48m에서 2-D 지하수 유향·유속을 측정한 결과, 지하수 유동방향은 S21~27W(남남서방향)이다(Table 4, Fig. 8). 지하수위 분포도(Fig. 8)에서는 TB-4지점의 지하수 유동방향이 남남동으로서 유향·유속 측정 결과와 비슷한 경향성을 보여 주고 있다. 수평방향의 지하수 유속은 $5.3\sim 5.6 \times 10^{-4}$ cm/sec로서 측정구간에서 거의 일정한 유속을 보이고 있다. 한편 동일 심도에서 1-D 지하수 유향·유속 측정 결과, 상하로의 지하수 유동을 감지할 수 없었다.

지하철 1호선과 교차하는 TB-51호공에서는 심도 33.5~45.0m에서 2-D 유향·유속을 측정한 결과, 지하수 유동방향은 S7~15W(거의 남쪽)을 가리키고 있다. 한편 지하수위 분포도(Fig. 8)에서는 지하수 유동방향이 남동방향으로서 유향·유속 측정 결과와 비슷한 경향을 보여준다. 수평방향의 지하수 유속은 $7.8\sim 8.8 \times 10^{-4}$ cm/sec로서 TB-4호공보다 크게 나타나고 있다. 동일 심도에서의 1-D 유향·유속 측정 결과, 45m 심도에서는 상하로의 지하수 유동을 감지할 수 없었고, 33.5m와 37.0m에서는 윗방향으로 그리고 41.6m에서는 아랫방

Table 3. Borehole specification for flowmeter test.

	Rock type	Depth (m)	Layer	Screen depth
TB-4	Andesitic rock	63.1	Alluvium	0.0-0.5
			Weathered zone	0.5-22.7
			Soft rock	22.7-45.0
			Hard rock	45.0-63.1
TB-51	Andesitic rock	61.5	Landfill	0.0-2.4
			Alluvium	2.4-12.0
			Weathered zone	12.0-46.0
TB-57	Granite	33.0	Soft rock	46.0-61.5
			Landfill	0.0-1.8
			Alluvium	1.8-11.5
			Weathered zone	14.5-18.8
			Soft rock	18.8-33.0

Table 4. Groundwater flow direction and velocity in the boreholes.

No	Depth (m)	1-D		2-D		Geology
		Flow direction	Flow rate (ml/min), flow velocity (cm/sec)	Flow direction	Velocity (cm/sec)	
TB-4	39.5	-	-	206.8	5.29×10^{-4}	Soft rock
	44.0	-	-	205.0	5.64×10^{-4}	Soft rock
	46.5	-	-	202.7	5.64×10^{-4}	Soft rock
	48.0	-	-	200.9	5.64×10^{-4}	Soft rock
TB-51	33.5	UP	0.2, 4.24×10^{-5}	192.4	7.76×10^{-4}	Weathered zone
	37.0	UP	0.1, 2.12×10^{-5}	194.9	8.82×10^{-4}	Weathered zone
	41.5	DOWN	0.4, 8.49×10^{-5}	187.0	8.11×10^{-4}	Weathered zone
	45.0	-	-	189.5	8.11×10^{-4}	Weathered zone
TB-57	17.0	UP	0.4, 8.49×10^{-5}	235.6	3.53×10^{-4}	Weathered zone
	20.4	UP	0.6, 1.27×10^{-4}	239.0	3.18×10^{-4}	Soft rock
	25.2	-	-	239.9	6.35×10^{-4}	Soft rock
	27.3	-	-	239.6	5.64×10^{-4}	Soft rock

향으로 지하수 유동이 일어나고 있다. TB-51호공이 위치하는 지역은 지하수 배출지역이므로 대체적으로 지하수 유동이 윗방향으로 일어나지만 지질구조대의 발달상태에 따라 아랫방향으로도 지하수 유동이 일어나는 것으로 해석된다. 수직방향의 지하수 유속은 $2.1 \sim 8.5 \times 10^{-5}$ cm/sec로서 수평방향의 지하수 유속보다 1/100 정도로 작게 나타난다.

부산진역 주변에 위치하는 TB-57호공의 심도 17.0~27.3 m에서 2-D 유향·유속 측정을 실시한 결과, 지하수 유동방향은 S56~60W(남서쪽)를 가리키고 있다

(Fig. 8). 한편 지하수위 분포도에서는 TB-57지점의 지하수 유동방향이 남동쪽이다. 정상적으로는 지하수 유동이 해안인 남쪽 또는 남동쪽으로 일어나겠지만, 2-D 유향·유속측정에서 지하수 유향이 남서쪽으로 나타나는 것은 염수 침투의 가능성을 암시하는 하나의 증거가 될 수 있을 것으로 판단된다. 수평방향의 지하수 유속은 $3.2 \sim 6.4 \times 10^{-4}$ cm/sec이며, 심도가 깊을수록 지하수 유속이 빨라지는 경향성을 보인다. 그러나 전체적인 지하수 유속은 TB-51호공보다 작게 나타나고 있다. 한편 동일한 심도에서 1-D 유향·유속을 측정할 결과, 심도

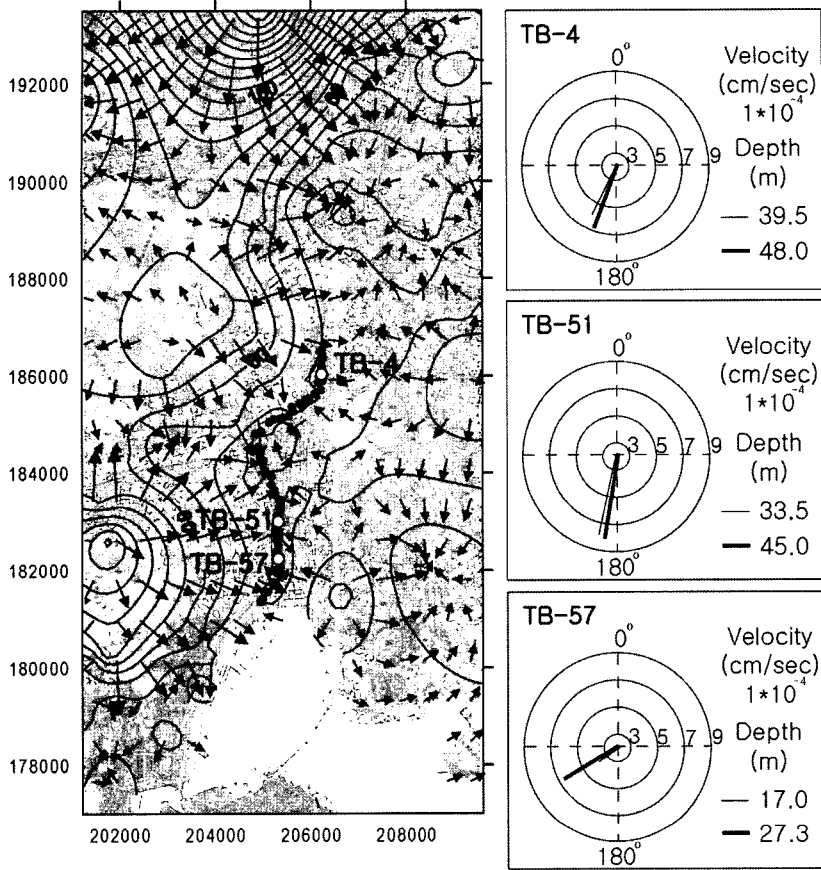


Fig. 8. Groundwater flow orientation and velocity by 2-D flowmeter test.

25.2 m와 27.3 m에서는 상하로의 지하수 유동을 감지할 수 없었고, 17.0 m와 20.4 m에서는 뒷방향으로 지하수 유동이 일어나고 있다. 지하수유동이 뒷방향으로 일어나는 것은 TB-51호공이 배출지역에 위치하고 있음과 잘 일치한다. 수직방향의 지하수 유속은 $8.5 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-4}$ cm/sec이므로서 TB-51호공의 수직방향의 지하수 유속보다 크다.

지하수 유향·유속 측정 결과를 종합하면, 지하수 유향은 대체적으로 남쪽~남서쪽으로 향하고 있다. 또한 해안에 가까운 부산진역의 TB-57공에서 남서쪽에서의 지하수 유향은 염수 침투의 가능성을 암시하는 하나의 증거가 될 수 있을 것으로 판단된다.

지하수위와 양수량의 연관성

부산시 지하수 현황자료 중 연구지역내 속하는 2553개 지하수공 중에서 양수량 80 m³/day 이상인 554개 지하수공 자료를 이용하여 지하수 양수량 분포도를 작성

하였다(Fig. 7). 지하수 양수량은 부산진구가 다른 지역에 비해 많다. 구체적으로는 서면 교차로 부근이 734 m³/day, 가야1동 가남초등학교 부근이 500 m³/day, 부전2동 경남공고 부근이 492 m³/day, 연지동 연학초등학교 부근이 486 m³/day 등으로 나타났다. 남구에서는 대연4동의 지하수 양수량이 많은 것으로 나타났다. 구체적으로는 부산공업고교 부근이 508 m³/day, 석포여중 부근이 400 m³/day로 높게 나타났다. 동래구에서는 사직1동과 명륜1동에서 지하수 양수량이 각각 432 m³/day, 300 m³/day로 높게 나타났다. 수영구에서는 광안4동 광안터널 입구에서 350 m³/day로 지하수 양수량이 높았다.

지하수 양수량 분포(Fig. 7)와 지하수위 분포(Fig. 5)를 비교해 보면, 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

지하수위와 지층 두께의 연관성

매립층, 충적층, 풍화대의 두께와 지하수위의 연관성

Table 5. F-test result between geological thickness and groundwater level.

Thickness	Correlation coefficient	Critical value	Test value
Landfill	-0.1265	4.08	0.60
Alluvium	0.1014	4.08	0.62

Table 6. F-test and t-test using thickness of weathered zone and groundwater level.

Thickness	Correlation coefficient	F-test		t-test			
		Critical value	Calculated value	Slope		Intercept	
				Critical value	Test value	Critical value	Test value
Weathered zone	0.7238	4.08	50.61	6.31	0.36	6.31	50.55
Weathered zone (natural log value)	0.6468	4.08	33.12	6.31	9.24	6.31	33.06

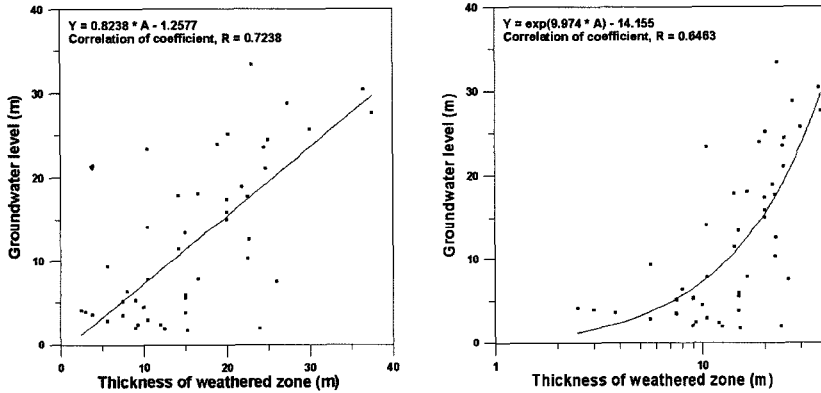


Fig. 9. Regression curves between groundwater level vs. thickness of weathered zone.

을 분석하였다. 이를 위하여, 먼저 F-검정을 이용하여 지하수위 자료와 매립층, 충적층, 풍화대의 두께 자료간의 분산이 동일한지를 검정하였다(Table 5). F-검정 결과, 매립층과 충적층의 계산값은 각각 0.60, 0.62로서 임계값(4.08)보다 작다. 이는 신뢰구간이 95%일 때 매립층과 충적층은 지하수위와 분산이 동일하여 상관분석의 의미가 없다는 것을 나타낸다. 따라서 매립층, 충적층과 지하수위간의 회귀분석은 실시하지 않았다. 실제로 연구지역내에서 지하수위는 매립층이나 충적층보다 깊은 지역인 풍화대에 위치하는 경우가 많다.

한편, 풍화대 두께와 지하수위의 분산이 동일한지를 검정하기 위해 F-검정을 실시한 결과, 계산된 F값(50.61)이 임계값(4.08)보다 크므로 풍화대와 지하수위의 분산이 다르다는 것을 알 수 있다(Table 6). 그 다음 t-검정을 실시한 결과, 상관계수는 0.7238로 비교적 높게 나타났으나, 절편의 계산값(0.36)이 임계값(6.31)보

다 작은 것으로 나타났다. 따라서 풍화대 두께와 지하수위 간의 상관성이 유의하다는 것을 확인할 수 없었다. 그래서 풍화대 두께의 자연로그 값과 지하수위간에 F-검정과 t-검정을 실시하였다(Table 6). F-검정 결과, 계산된 F값(33.12)이 임계값(4.08)보다 큰 값을 가지므로 풍화대 두께의 자연로그 값과 지하수위간의 분산이 다르다는 것을 알 수 있다. 따라서 t-검정을 실시한 결과, 상관계수는 0.6468로서 풍화대 두께와 지하수위간의 상관계수(0.7238)보다 약간 낮게 나타났으나, 기울기와 절편의 계산값이 각각 임계값보다 높게 나타났다. 즉, 풍화대 두께의 자연로그 값과 지하수위간에는 상관성이 유의하다는 것을 알 수 있었다. 풍화대 두께(A)의 자연로그와 지하수위(Y)간의 회귀식은

$$Y = \exp(9.974A) - 14.155 \tag{2}$$

로 계산되었다. Fig. 9는 지하수위와 풍화대 두께의

회귀곡선을 보여주고 있다.

결 론

본 연구에서는 부산광역시 도심지역인 부산진구 양정동에서 동구 수정동까지의 경부고속철도 터널 통과 예정지역 지반조사로부터 얻어진 시추공자료, 기존의 부산광역시 지하수공 자료, 지하수위 분포, 공내 유향·유속 시험 자료 그리고 현장수리시험 분석 자료를 바탕으로 지하지질과 수리지질 특성의 관련성을 평가하였다.

연구지역의 지하지질은 지표로부터 매립토층, 충적층(자갈, 모래, 점토, 실트), 풍화대(풍화토, 풍화암), 연암순으로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 충적층의 두께는 해안에서 내륙으로 갈수록 얇아지고 있으며, 특히 동래구 온천동 이북에서는 얇아지는 경향성을 보인다. 반면에 서면교차로 남쪽 지역은 제4기의 오랜 기간 해침(손문 등, 2007)에 의해서 충적층의 두께가 두꺼워졌음을 지시한다. 또한 동래단층을 따라서 대체로 충적층과 풍화대의 두께가 두껍게 나타나고 있다.

지하수위(Y)와 지형고도(X)의 관계식은 $Y = 0.75X - 7.00$ 이며, 상관계수는 0.78로서 비교적 높은 편이다. 매립층, 충적층, 풍화대의 두께와 지하수위의 상관성을 살펴본 결과, 풍화대의 두께와 지하수위의 상관성이 상대적으로 높게 나타났으며, 풍화대 두께의 자연로그 값과 지하수위간에는 상관성이 유의하다는 것을 확인할 수 있었다. 풍화대 두께(A)의 자연로그와 지하수위(Y)간의 회귀식은 $Y = \exp(9.974A) - 14.155$ 이다. 따라서 지하수위는 풍화대의 두께에 대해서 지수함수적으로 변화하고 있으며, 지하수 환경변화에 따라 회귀식도 달라질 것으로 예상된다.

지하수 유향·유속 측정 결과, 지하수 유향은 대체적으로 남쪽-남서쪽으로 향하고 있으며, 이는 연구지역의 지하수위 분포와 대체로 일치한다. 또한 지하수 양수량 분포와 지하수위 분포를 비교해 보면, 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

본 연구는 부산광역시 도심지역의 터널공사, 지상 및 지하구조물 건설에 따른 지하수 환경변화 및 구조물의 안정성을 평가하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부, 한국수자원공사, 2003, 부산지역 지하수 기초조사 보고서, 10-23.
- 성익환, 조병욱, 이병대, 지세정, 류충렬, 김통권, 윤옥, 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, 이건, 2007, 부산시 도심지의 지하 지질구조와 단층선상과 관련된 지질위험도 분석, 자원환경지질, 40(1), 87-101.
- 손문, 함세영, 김인수, 이용희, 정훈, 류춘길, 송원경, 2002, 부산시 금정산 일원의 지하수 유동 해석을 위한 단층계 분석, 지질공학, 12(3), 305-317.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국지질도 동래·월래도폭 (1:50,000) 및 설명서, 자원개발연구소, 27p.
- 오건환, 1988, 부산항의 매몰지형. 부산대학교 자연과학대학 논문집. 16, 169-185.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상규, 이동우, 1983, 한국지질도 부산·가덕도폭 (1:50,000) 및 설명서, 한국동력자원연구소, 22p.
- 조병욱, 2001, 부산지역의 지하수자원의 수리지질학적 특징, 경북대학교 일반대학원 이학박사 학위논문, 164p.
- 함세영, 조명희, 성익환, 김정숙, 이병대, 조병욱, 한석중, 1999, 부산 북서부 화강암 지역 지하수의 화학적 특성, 수처리기술, 7(2), 57-68
- 함세영, 차용훈, 정재열, 2005, 부산 도심지역 미교결층과 기반암의 수리지질 특성, 지질공학, 15(4), 407-421.
- Boman, G.K., Moltz, F.J., and Boone, K.D., 1997, Borehole flowmeter application in fluvial sediments: Methodology, results, and assessment, Ground Water, 35(3), 443-450.
- Fetter, C.W., 2001, Applied Hydrogeology, 4th ed, University of Wisconsin- Oshkosh, 598p.
- Hanson, R.T. and Nishikawa, T., 1996, Combined use of flowmeter and time-drawdown data to estimate hydraulic conductivities in layered aquifer systems, Ground Water, 34(1), 84-94.
- Hess, A.E., 1986, Identifying hydraulically conductive fractures with a slow-velocity borehole flowmeter, Can. Geotech. J., 23, 69-78.
- Kerfoot, W.B., 1982, Comparison of 2-D and 3-D groundwater flowmeter probes in fully-penetrating monitoring wells, Proceeding of the second national symposium on aquifer restoration and ground water monitoring, May 26-28, 1982, Columbus.
- Kim, H.S., Kim, J.S., and Kim, H.M., 1979, Orbicular Gabbroic Rocks from the Hwangryeong Mountain District, Pusan, Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, 15(4), 295-313.
- Miyakawa, K., Tanaka, K., Hirata Y., Kanauchi, M., 2000, Detection of hydraulic pathways in fractured rock masses and estimation of conductivity by a newly developed TV equipped flowmeter, Eng. Geol., 56, 19-27.

- Morin, R.H., Hess, A.E., Poullet, F.L., 1988, Determining the distribution of hydraulic conductivity in a fractured limestone aquifer by simultaneous injection and geophysical logging, *Water Resour. Res.*, 26, 587-595.
- Williams, T.A. and Williamson A.K., 1989, Estimating water-table altitudes for regional ground-water flow modeling, *U.S. Gulf Coast, Ground Water*, 27(3), 333-340.

2007년 8월 9일 원고접수, 2007년 9월 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

차용훈

(주)지오그린21
152-719 서울특별시 구로구 구로동 197-10번지
E&C벤처드림타워 2차 901호
Tel: 02-6330-2500
Fax: 02-6330-2507
E-mail: hoony-96@hanmail.net

장 성

한국농촌공사 경상남도본부 환경지질팀
641-733 경남 창원시 북 15로 242(용호동 8-3)
Tel: 055-269-9462
Fax: 055-261-8612
E-mail: seong@ckr.or.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

손 문

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-2248
Fax: 051-517-6389
E-mail: moonson@pusan.ac.kr

김기석

(주)희송지오택
서울특별시 서초구 양재동 16-3 율화빌딩 3층
Tel: 02-576-3801
Fax: 02-579-5835
E-mail: hsgeotek@chol.com