

서해안 매립지 내 지하수유동과 조석에 관한 상관성 분석

박종오^{1*} · 송무영² · 박충화¹

¹대전대학교 지반설계정보공학과

²충남대학교 지구환경과학과

Analyses of Correlation Between Groundwater Movement and Tidal Effect in West Costal Landfill Area

Jong-Oh Park^{1*}, Moo-Young Song², and Chung-Hwa Park¹

¹Department of Geotechnical Design Engineering, Daejeon University

²Department of Earth and Environmental Sciences, Chungnam National University

조수 간만의 차가 큰 서해 해안 매립지역에서의 지하수 유동을 지층별로 표준관입시험을 통한 N값의 산출, 현장투수 시험을 통한 투수계수 측정, 인공위성 영상자료에 대한 선구조 분석 및 각 시험시추공에서 조석의 변화에 따른 지하수 유향유속을 측정하여 비교 분석하였다. 현장투수시험을 통하여 얻은 투수계수는 풍화대 구간이 해성퇴적토층보다 작은 값들을 보이지만 전반적으로 분포 경향이 비슷하게 나타났다. 지하수 유향유속은 해성퇴적토층에서 조석의 변화 방향인 동서 방향인 반면, 풍화대 구간에서는 특정 지점에서 선구조와 일치하는 N45E 방향이 우세하였다. 24시간 동안의 관측에서 지하수 유향변화는 전반적으로 조석의 변화보다 약 2시간 정도 늦게 나타났으며, 이는 조석 효과에 의한 수리경사가 계속적으로 변동되며 나타나는 압력파의 전달에 소요되는 시간으로 판단된다.

주요어 : 지하수 유동, 해안매립지, 조석효과, 투수계수, 선구조

The groundwater movement in the west costal landfill area was analyzed by measuring N value by Standard Penetration Test, coefficient of permeability by falling head method, linear structure analysis by Digital Elevation Method, groundwater flow direction and rate by flowmeter logging due to tidal variation in the each borehole. The coefficients of permeability of the weathered zone and of the marine deposit showed similar values although some values of weathered zone show smaller values than those of the marine deposit. The major groundwater flow and rate in the marine deposit observed as east-west direction due to tidal variation, but on the other hand, it was observed as N45E in weathered zone which is the major direction of the linear structures in the area. 2 hours delayed changes of the groundwater flow direction was observed during the 24 hours observation, and it seems to be a travel time of the tidal wave which cause the continuous change of the hydraulic gradient of the groundwater.

Key words : groundwater flow, coastal landfill, tidal effect, permeability, linear structure

서론

지층에서 투수계수에 따른 지하수의 유동은 매립지내의 쓰레기 침출수로 인한 지하수 오염, 해안지역에서 부분별한 지하수 사용으로 인한 해수침투, 지하수 고갈로 인한 지반 침하 및 폐기물 매립지역에서 방사능 누출 등에 관하여 매우 중요한 요소이다. 특히 해안지역에서

조석의 변화에 따른 지하수 유향유속은 지하수의 수리경사가 조석의 영향으로 상승과 하강을 반복하여 변화할 것으로 보이므로, 지층구성에 따른 장기 관측자료를 이용하여 해석함으로써 향후 해안지역과 관련된 침출수의 오염원 이동에 관하여 매우 유용할 것이다. 즉, 해안지역에서 지하수위 변화는 조석 영향에 의한 압력파로 대수층의 공극내에 물이 포화되거나 불포화되는 현상으

*Corresponding author: jopark@dju.ac.kr

로 저류량의 변화에 연관되며 압력과의 속도, 진폭, 파장, 조석의 주기, 대수층의 투수량계수, 저류계수 및 해안으로부터의 거리 등에 의하여 영향을 받는다.

지하수의 유동 측정은 유속측정기를 이용한 방법, 추적자 시험을 통한 방법 및 조석에 의한 지하수위 변화에 대한 지하수의 유동 방향을 유추하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 유속측정기를 이용하여 지하수 유향 유속을 산정하였다. 이러한 방법을 이용한 연구로 국내에서는 시추공에서 유속측정기를 이용하여 암반대수층의 구간별 수리전도도 산정(구민호와 차장완, 2002), 시추공간에서 수리적 연결특성을 파악하기 위하여 유향유속 검증 연구(황세호 등, 2003), 지하수 유향유속 자료와 균열분포를 이용한 균열 암반의 특성화 기법(김태희 등, 2004) 등이 있으며, 국외에서는 암반대수층에서 시추공내의 지하수 유속을 측정하여 투수계수를 이용한 지하수 유동에 대한 수치모델 개발(Paillet *et al.*, 1990), 다층구조의 대수층에서 유속측정으로 얻은 투수계수를 이용한 수치적 분석(Ruud and Kabala, 1997; Xiang, 1995) 등이 있다.

본 연구지역은 김포 매립지역으로 해양 점토로 덮인 간척지로서 쓰레기 매립으로 인하여 해성점토층이 부등침하가 발생되었으며(김계남 등, 2000) 조수간만의 차가 약 9 m 이상 나타나는 지역이다. 연구 목적은 연구지역 내에서 총 15지점을 선정하여 시추조사를 실시하였으며, 지층상태에 따른 표준관입시험을 통한 N값의 산출, 현장투수시험을 통한 투수성 측정, 인공위성 영상 자료에 대한 선구조 분석 및 각 시험시추공에서 지하수 유향유속의 측정등을 통하여 조석의 변화에 따른 지하

수 유동과 토질 특성 및 지질 구조선에 대한 연관성을 파악하였다.

지형 및 지질

연구지역은 행정구역상 인천광역시에 위치하며 북측으로 경기도 김포시, 서측으로 서해바다, 남과 동측으로 인천시와 접하고 있으면서 주변에 구릉성 산지와 541만 평 규모의 매립지로 형성되어 평탄한 지형을 이루고 있다. 주변의 지형은 동측으로 철마산(226 m), 계양산(395 m) 등에 의하여 둘러싸여 있으며 동에서 서측으로 흐르는 공촌천과 심곡천의 수계가 있다(Fig. 1).

연구지역의 주변 지질은 충적층으로 경계가 명확하지 않으나 북측으로 주로 선캠브리아기의 운모편암과 흑운모편암, 동측으로 유문암과 화강반암, 서측으로 중생대 주라기 화성암류인 흑운모화강암 및 남측으로 홍색 장석화강암이 분포하고 있다(최위찬 등, 1995).

연구지역에 대한 인공위성 영상자료 분석은 지형고도 자료(DEM, Digital Elevation Method)에 대하여 지표면의 기복, 경사방위각 등을 태양의 위치에 따른 음영효과를 사용하여 선구조 분석을 실시하였다. 선 구조의 분석 결과는 전반적으로 N45E와 N65W의 방향으로 우세하게 나타났다.

연구 방법 및 결과

연구지역은 구릉성 산지와 매립지로 형성된 평탄한 지형으로, 해안에 근접하여 조석의 변화에 영향을 받는

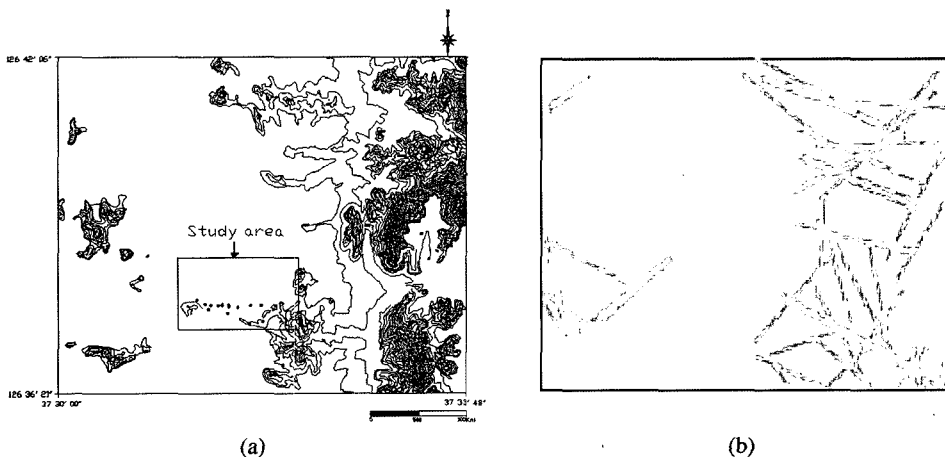


Fig. 1. Location map of the study area (a) and linear structures represented in analysis using the digital elevation method (b).

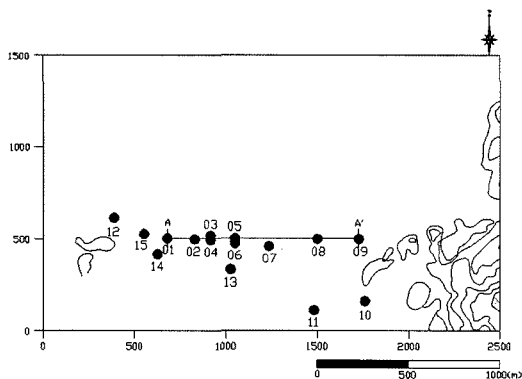


Fig. 2. Borehole locations in study area.

지역으로서 조석과 수리경사에 따른 지하수 유동을 지층의 구성에 따라 쉽게 파악할 수 있을 것이다. 이러한 특성들을 파악하기 위하여 시추조사는 연구지역내에 총 15개 지점을 선택하여 실시하였으며 표준관입시험을 통한 N값과 지층 구성의 현황을 파악하였다(Fig. 2).

지층은 Table 1에서와 같이 매립층, 해성퇴적토층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성된다. 쓰레기 매립층은 시추공 09, 10 및 14에서 천부에 부분적으로 매립층과 혼재되어 나타나고 있다. 전반적인 지층의 구성을 보면 매립층은 Fig. 2의 양측에 있는 시추공 09, 12에서 얇게 피복된 반면 중앙 부분으로 갈수록 깊어지는 경향을 보인다. 토성의 특징은 전반적으로 갈색내지 황

갈색으로 점토 및 점토질 모래, 모래섞인 자갈 등으로 구성되며 N값의 변화폭이 매우 크게 나타났다. 해성퇴적토층은 상부 매립층과 유사한 분포를 보이며 시추공 06과 13에서 약 20 m 심도까지 나타나는 것으로 보아 구릉성 산지에서 멀어질수록 점차적으로 깊어지는 것으로 관찰되며, N값은 평균 410/30 정도로 연약한 지층으로 판단된다. 풍화토층은 기반암인 화강암이 장기간에 걸친 풍화 및 변질을 받아 토양화 된 상태로서 실트질 모래로 이루어져 있다. 풍화암층은 풍화토층 하부에 존재하는 지층으로서 암석 본래의 역학적 성질을 상실한 상태로 N값이 50/15~10으로 나타났다. 연암층은 많은 풍화상태를 보이며 코어회수율(TCR, Total Core Recovery)이 35~100%이며, 암질지수(RQD, Rock Quality Designation)가 0~98%으로 나타났다.

Fig. 3은 축선 A-A'에 있는 시추공에 대한 지층의 단면도로서 구성 성분과 그 심도를 구별하여 도식화 하였다. 시추는 일반적으로 연암이 분포하는 심도를 기준하여 약 12.0~22.0m까지 굴진하였다. 해양퇴적토층은 시추공 04와 06으로 연구지역 중앙부에서 가장 폭이 크며 풍화토층은 시추공 07과 09에서 가장 두껍다.

현장투수시험은 지층 특성에 따른 투수성을 파악하기 위하여 시추공 내에서 변수위법으로 각 지층별로 투수계수를 구하였다. 각 지층별 투수계수는 전반적으로 Table 2에서와 같이 매립층에서 $1.35 \times 10^{-4} \sim 6.89 \times 10^{-4}$ cm/sec, 해성퇴적토층에서 $2.06 \times 10^{-5} \sim 7.21 \times 10^{-4}$ cm/sec,

Table 1. Information for the layers represented in each borehole.

BH No.	Elevation (m)	Thickness of a layer (m)					Total depth (m)
		Reclamation	Landfill	Marine deposit	Weathered zone	Weak rock	
1	5.9	0.0~2.4	-	2.4~4.2	4.2~9.7	9.7~12.0	12.0
2	6.2	0.0~4.2	-	4.2~6.4	6.4~10.4	10.4~12.0	12.0
3	4.6	0.0~1.0	-	1.0~7.8	7.8~11.5	-	11.5
4	5.9	0.0~3.3	-	3.3~11.4	11.4~16.0	-	16.0
5	5.5	0.0~4.0	-	4.0~15.7	15.7~16.8	16.8~19.5	19.5
6	6.1	0.0~5.3	-	5.3~17.3	17.3~19.8	19.8~22.5	22.5
7	6.4	0.0~4.5	-	4.5~10.2	10.2~22.0	-	22.0
8	5.8	0.0~2.7	-	2.7~9.7	9.7~16.0	-	16.0
9	7.1	1.3~2.5	0.0~1.3	2.5~7.5	7.5~20.5	-	20.5
10	7.7	0.0~2.8	2.8~4.5	4.5~9.9	9.9~16.0	-	16.0
11	7.9	0.0~5.0	-	5.0~5.2	5.2~7.0	7.0~10.0	10.0
12	3.1	-	-	0.0~7.9	7.9~14.5	-	14.5
13	8.2	0.0~10.7	-	10.7~20.0	20.0~23.5	-	23.5
14	7.8	0.0~1.2 3.2~4.7	1.2~3.2	4.7~5.3	5.3~8.5	-	8.5
15	4.1	0.0~1.3	-	1.3~5.1	5.1~10.0	-	10.0

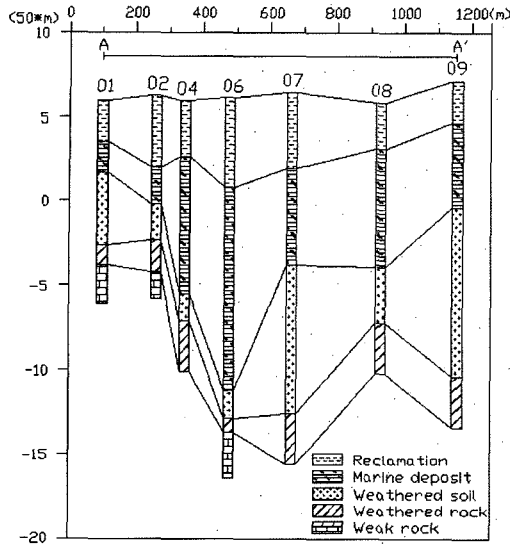


Fig. 3. Geologic cross-section acquired from drilling data in the A-A' line of Fig. 2.

Table 2. Average values acquired from the permeability test in each layer.

layers	distribution extent	average
reclamation	$1.35 \times 10^{-4} \sim 6.89 \times 10^{-4}$	3.30×10^{-4}
marine deposit	$2.06 \times 10^{-5} \sim 7.21 \times 10^{-4}$	3.36×10^{-4}
weathered soil	$3.16 \times 10^{-5} \sim 3.74 \times 10^{-4}$	1.94×10^{-4}
weathered rock	$1.26 \times 10^{-4} \sim 2.24 \times 10^{-4}$	1.76×10^{-4}

풍화토층에서 $3.16 \times 10^{-5} \sim 3.74 \times 10^{-4}$ cm/sec, 풍화암층에서 $1.26 \times 10^{-4} \sim 2.24 \times 10^{-4}$ cm/sec의 분포 범위를 보였다.

Fig. 4는 각 시추공에 있는 해성퇴적토층들의 투수계수 크기의 비를 나타낸 것으로 110 cm/sec를 기준으로 보았을 때의 크기를 도식화한 것이다. 시추공 05, 06과 13 지점은 전반적으로 지층의 폭이 두꺼우며 또한 모래 질자갈이 지층에 협재되어 있어 투수계수와 N값이 높게 나타난 것으로 판단된다. 측정 심도는 시추공 05와 06에서 약 4.06.0 m이며 시추공 13에서 19.721.5 m 사이이다. 시추공 09와 15번은 실트질 점토 및 모래로 구성되어 있어 투수계수가 매우 작게 나타난 것으로 본다.

Fig. 5는 풍화대 구간에서의 투수계수의 분포를 나타낸 것으로 전반적으로 해성퇴적토층보다 작은 값을 보이고 있다. 그러나 풍화대 구간에서의 투수계수 크기는 거의 해성퇴적토층과 동일한 경향으로 나타나고 있으나 시추공 15에서 작은 투수계수를 보인 반면 시추공 06에서 큰 투수계수를 보이고 있다. 시추공 09에서의 투수

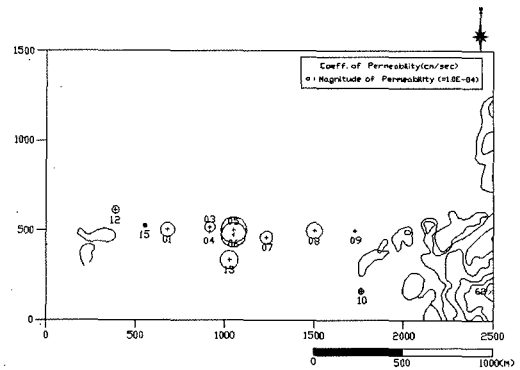


Fig. 4. Distribution map for the coefficient of permeability represented in the marine deposit. The diameter of reference circles are determined on the basis of coefficient of permeability 110 cm/sec.

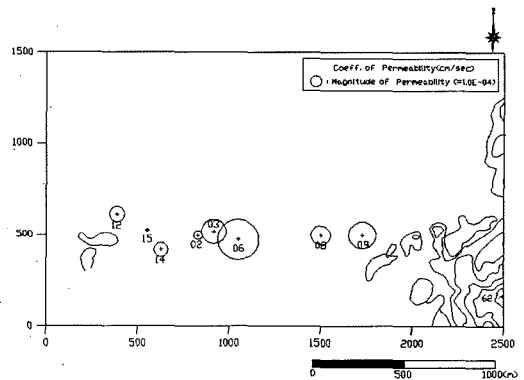


Fig. 5. Distribution map for the coefficient of permeability represented in the weathered zone. The diameter of reference circles are determined on the basis of coefficient of permeability 110 cm/sec.

계수는 해성퇴적토층에서 실트질 점토로 매우 작은 값을 나타낸 반면 풍화암층에서 실트질 모래로 약간 큰 값을 보였다. 전반적으로 각 지층에 대한 투수계수의 경향을 보면 연구지역의 중심부(시추공 06, 07)는 구릉성 산지의 지역(시추공 09, 12)보다 지층의 심도가 깊으며 비교적 큰 투수계수로 나타났다. 즉, 연구지역 중심부는 해수의 유입으로 지층이 매우 연약한 상태로 있으며 모래 및 자갈이 얇게 박층으로 분포하여 비교적 투수계수가 클 것으로 판단된다.

본 연구에서 지하수 유향유속 측정은 시추공 내에 GeoFlo Model 200의 측정기를 사용하여 유향 및 유속을 측정하였다. 측정 원리는 지하수체 내에서 열원이 지

하수의 동수구배에 따른 이동보다 빠르게 전달된다는 원리를 이용하여 지하수의 유향과 유속이 측정되어진다. 즉, 탐침자(probe) 내에 있는 열원은 중심부에 있으며 이로부터 발생된 온도가 각 방향에 있는 센서에 감지되어진다. 유속 방향은 자북을 기준으로 시계 방향으로 각도를 계산하여 벡터로 표시되어진다. 측정 방법으로는 시추공 내에 정호 보호막을 설치하며 공 내의 상태가 안정되기 위하여 약 24시간 후에 탐침자를 측정하고자 하는 깊이에 설치한다. 탐침자는 부유물질이 공극에서 이동시에 와류를 방지하기 위하여 퍼지팩커(Fuzzy packer)를 장착한다. 지하수 유향유속의 측정은 일반적으로 지하수의 유동방향을 수직적인 변위로 측정하지만 본 연구에서 동·서와 남·북의 수평적 방향으로 측정하여 자북을 기준으로 흐름 방향을 설정하였으며 또한 이에 대한 유속의 크기를 벡터로 표시하였다(Table 3). 즉, 연구지역에서 지하수 흐름의 방향은 전반적으로 조

석의 변화에 따라 동·서 방향으로 연장되어 있으며 자북을 기준으로 해성퇴적토층에서 주로 44~92°와 245~280°, 풍화대 구간에서 220~300°를 보였다. 조석의 변화에 대한 유속의 방향성은 전반적으로 일치하지만 해성퇴적토층에서 시추공 05와 06에서 매우 상이하게 나타났는데 이는 지층의 특성 및 지질 구조선을 따라 지하수의 유동 경로가 각기 다르게 형성되어 있는 것으로 판단된다. 즉, 유속에 대한 등포텐셜은 조석 변화에 따라 거시적으로 작용하여 대체로 동·서 방향으로 나타나지만 서로 상이한 지층이 있는 지역에서 유동이 다르게 나타나는 것으로 보인다.

유속의 크기는 보편적으로 $1.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ cm/sec의 정도를 보였으나 일부에서 매우 작거나 큰 유속을 보이는 지점이 있다. 매우 작은 유속을 보이는 지층은 해성퇴적토층에서 표준관입시험의 N값의 변화보다 토질의 특성에 따른 모래, 실트 및 점토에 대한 함량의 구

Table 3. Results for the flowmeter logging in the layers.

BH No.	Layer	Depth (m)	Flow Rate ($\times 10^{-4}$ cm/sec)			Flow Angle ($^{\circ}$)	Remark
			E-W	N-S	Total		
1	marine deposit	3.5	11.5	7.2	13.5	272.2	ebb tide
	weathered zone	6.5	-3.8	-20.8	21.1	190.8	
2	marine deposit	4.7	6.7	-22.5	23.5	163.1	flowing tide
	weathered zone	7.5	-7.7	-5.6	9.6	233.9	
3	marine deposit	3.5	2.1	0.0	2.1	86.5	flowing tide
	weathered zone	8.7	-15.1	-1.4	15.2	265.3	
4	marine deposit	5.5	81.1	-3.5	81.2	92.4	flowing tide
	weathered zone	12.5	8.1	15.1	17.2	28.5	
5	marine deposit	5.5	-39.5	-3.8	39.7	264.4	flowing tide
	weathered zone	16.0	-11.6	-6.3	13.2	241.6	
6	marine deposit	6.5	-30.6	5.6	31.2	280.4	flowing tide
	weathered zone	18.5	-8.1	-10.5	13.3	216.8	
7	marine deposit	6.5	-15.1	-6.3	16.4	247.3	ebb tide
	weathered zone	12.3	-141.1	-32.4	144.8	257.1	
8	marine deposit	4.5	50.8	1.0	50.8	91.3	ebb tide
	weathered zone	11.5	-1.7	1.0	2.0	301.8	
9	weathered zone	19.5	-7.4	-3.1	8.0	246.3	flowing tide
	marine deposit	7.0	-19.4	-4.2	19.8	257.5	
10	weathered zone	14.5	-9.8	-8.8	13.2	229.0	flowing tide
	weathered zone	9.0	-14.1	-11.6	18.2	230.8	
11	weathered zone	9.0	-14.1	-11.6	18.2	230.8	flowing tide
	marine deposit	5.5	-12.3	-5.6	13.4	245.0	
12	weathered zone	10.0	-4.2	-3.8	5.7	227.5	ebb tide
	weathered zone	10.0	-4.2	-3.8	5.7	227.5	
13	marine deposit	12.0	8.8	9.1	12.7	44.0	flowing tide
	weathered zone	23.0	-34.9	7.0	35.6	281.2	
14	weathered zone	6.7	-9.5	-7.4	12.0	232.7	ebb tide
	marine deposit	3.0	-4.2	-1.7	4.5	246.8	
15	weathered zone	7.0	-6.7	-8.1	10.5	220.4	ebb tide
	weathered zone	7.0	-6.7	-8.1	10.5	220.4	

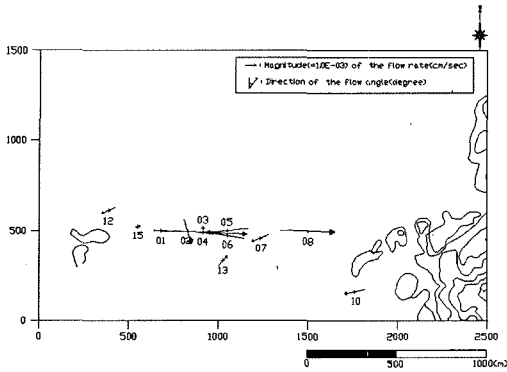


Fig. 6. Flow angles and flow rates measured by flowmeter logging in the marine deposit.

성비에 의하여 작은 유속으로 나타나는 것으로 보인다. 풍화대 구간에서는 시추공 07에서 $1.44 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 의 매우 빠른 유속을 보였는데 이는 지질 구조선과 토질의 특성과 관련되어 투수성이 높은 것으로 해석되며 특히 유속의 크기는 남·북 방향보다 동·서 방향으로 매우 높게 나타났다. 본 연구에서 보면 유속의 크기에 따른 방향성은 전반적으로 조석이 동·서 방향으로 변화하지만 지질 및 토질의 특성에 따라 남·북 방향으로도 이동함을 알 수 있다.

Fig. 6은 해성퇴적토층에서 지하수 유속의 크기와 방향을 나타낸 것으로서 조석의 변화 방향인 동·서로 대별된다. 작은 유속을 보이는 지점은 시추공 01, 03 및 15 위치로서 약 $2.0 \times 10^{-4} \sim 4.5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 의 범위를 보이고 있으며 01과 15 위치는 썰물인 반면 03 위치는 밀물일 시점이다. 비교적 큰 유속을 보이는 지점은 04와 08 위치로서 $5.0 \times 10^{-3} \sim 8.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 의 범위를 보이며 04 위치는 밀물인 반면 08 위치는 썰물일 때이다. 특히 03, 04, 05 및 06 위치는 시추공이 가까이 있는 지점이지만 지하수가 조석의 변화에 관계없이 한 방향으로 모이는 것이 특징적으로 03과 04 시추공과 05와 06 시추공 사이에 지질 구조선이나 투수성이 좋은 지층이 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 비교하여 볼 때 우리는 해성퇴적토층이 일정 기간에 퇴적되어 있지만 토질 특성에 따른 함량 구성비가 매우 다양하며 지하수 유동 역시 많은 변화를 보이는 것으로 관측되었다.

Fig. 7은 해성퇴적토층 하부에 있는 풍화대 구간에서의 지하수 유속의 크기와 방향을 나타낸 것으로서 조석의 변화 방향에 대하여 어느 정도 일관성을 보이지만 특정 지점에서 상관성이 없는 것으로 판단되었다. 전반

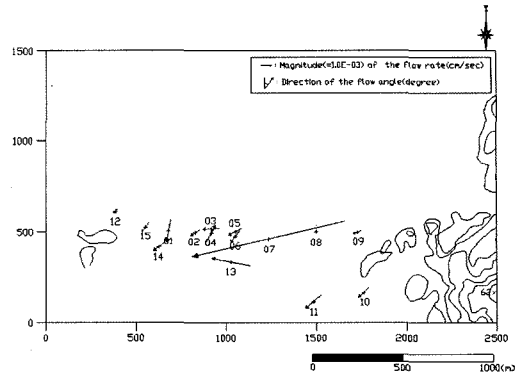


Fig. 7. Flow angles and flow rates measured by flowmeter logging in the weathered zone.

적인 지하수 흐름의 방향은 북·동측으로 조사지역에 나타나는 선구조선의 방향과 일치하는 경향을 보였다. 특히 시추공 01, 04 및 15 지점은 유속 측정에서 동·서 방향보다 남·북 방향으로 더 큰 유동을 보였으며 유동 방향은 자북을 기준으로 01에서 190.8, 04에서 28.5 및 15에서 220.4의 방향이다. 즉, 풍화대 구간은 조석의 변화 방향에 따라 지하수의 흐름이 어느 정도 반영되지만 해성퇴적토층과 달리 북·동 방향으로 발달된 지질구조선에 따른 토질 특성에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 시추공 07 지점은 썰물시에 $1.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 의 매우 빠른 유속을 보이며 바다 방향으로 흘러 나가는데 이는 조석 변화에 따른 지하수 유동과 관련되며 동·서 방향으로 발달된 지질 구조선에 의한 유로를 통하여 흐르는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 시추공 01과 13번에서 시간의 변화에 따른 지하수 유향에 대한 조석의 변화를 나타낸 그림이다. 지하수 유향은 자북을 기준으로 변화되는 각도를 일정한 시간대로 24시간 측정하였으며 조석의 높이는 한국해양연구원에서 제시된 조석표를 이용하여 유향의 측정 시각에 대한 해수 높이를 표시한 것이다. 측정위치는 시추공 01에서 5.5 m 깊이이며, 13에서 12.0 m 깊이로 모두 해성퇴적토층에 해당된다. 해성퇴적토층에서의 지하수 유향은 전반적으로 Fig. 6에서 제시된 바와 같이 조석의 변화 방향인 동·서로 변화 될 것으로 판단된다. 지하수 유향에 대한 조석의 변화를 비교하여 볼 때 우리는 두 시추공에서 유향의 변화가 조석의 변화보다 약 2시간 정도 늦게 나타나며 조석의 변화는 서해안 지역으로 간만의 차가 약 9 m 정도 차이가 나는 것을 볼 수 있다. Fig. 8(a)는 시추공 01에서 유향과 조석 변화를 오전 10

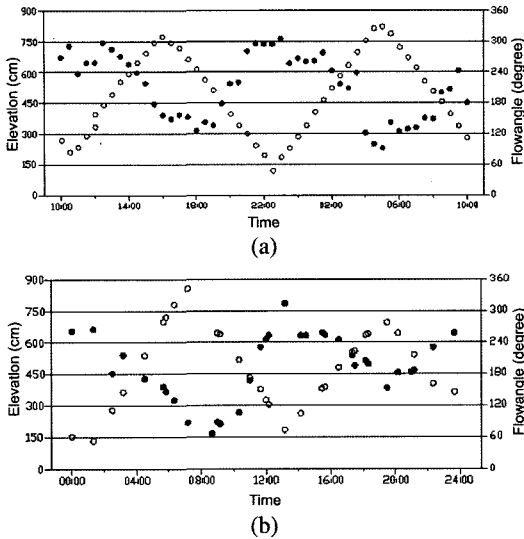


Fig. 8. Relationship between the elevation of tidal flow and the angle of groundwater flow measured in the marine deposit layer of the borehole 1 (a) and 13 (b).

시부터 약 30분 마다 24시간을 측정하여 비교한 것으로서 유향이 썰물시에 자북을 기준으로 서측 방향인 240~300°이며 밀물시에 동측방향인 70~150°로 나타나 조석변화에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉 유향은 모래가 협재되어 있는 5.5 m 깊이의 해성퇴적토층의 구간에서 측정하였으므로 점토질에 비하여 투수성이 좋으므로 조석의 변화에 밀접한 상관성을 보이는 것으로 판단되었다. 또한 유속의 범위는 $1.20 \times 10^{-3} \sim 1.58 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 의 범위로 Table 3에서 제시된 $1.35 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 와 유사하였다. Fig. 8(b)는 시추공 13에서 유향과 조석의 변화를 0시부터 약 1시간 간격으로 측정된 것으로서 조석 변화에 대한 진폭이 크게 나타날수록 상대적으로 유향의 변화도 크게 작용되는 것을 볼 수 있다. 또한 유속의 범위는 대체적으로 $8.82 \times 10^{-4} \sim 2.11 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 의 범위로 시추공 01과 거의 유사한 분포를 보인다. 유향과 조석의 변화에 대한 진폭의 관계는 오전 8시 부근에 상대적으로 매우 크게 나타난 반면 오후 8시 부근에 서로 작은 진폭의 비를 보였다. 이러한 관계는 해안 대수층에서 조석 효과에 의한 지하수위 수리경사가 계속하여 변동되는 압력과의 전달로 생성되는 것을 알 수 있다. 즉, 조석에 대한 유향유속의 변화는 피압 대수층의 경우 유체압의 변화에 의해 생성되는데 대수층의 투수량계수, 조석의 주기와 진폭 및 해안으로부터 거리 등에 의한 영향을 밀접하게 받는 것으로 보인다.

토의 및 결론

본 연구에서는 홍색장석화강암을 기반으로 하고 상부에 해성퇴적토층과 매립층이 존재하는 지역에서 총 15 개의 시추조사를 실시하였으며 표준관입시험에 의한 N 값 산출, 현장투수시험을 통한 투수성 측정, 각 시험시추공에서 지하수 유향유속의 측정 및 인공위성 영상자료에서 선구조 분석으로 조석의 변화에 따른 지하수 유동을 비교 분석하였다.

시추자료에서 제시된 지층의 구성은 전반적으로 상부부터 매립층, 해성퇴적토층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층이며 점토질 모래, 모래섞인 자갈 등으로 구성되어 있어 N값의 변화폭이 매우 크게 나타났다. 해성퇴적토층은 Fig. 3의 축선 A-A'의 시추 단면도에서 보면 구릉성 산지의 중앙 부근인 시추공 06과 13에서 약 20 m 심도까지 나타나며 산지에서 멀어질수록 점차적으로 깊어짐을 알 수 있다. 풍화토층은 화강암이 장기간에 걸친 풍화 및 변질을 받아 토양화 된 상태로 실트질 모래로 이루어져 있으며 풍화암층은 풍화토층 하부에 존재하는 지층으로서 암석 본래의 역학적 성질을 상실한 상태로 N값이 50/15~10 정도로 나타났다.

현장투수시험 시추공내에서 수위하강법으로 각 지층별로 투수계수를 구하였으며 해성퇴적토층에서 $2.06 \times 10^{-5} \sim 7.21 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$, 풍화토층에서 $3.16 \times 10^{-5} \sim 3.74 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$, 풍화암층에서 $1.26 \sim 2.24 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 의 분포 범위를 보였다. 각 시추공에서 제시된 투수계수는 풍화대 구간이 해성퇴적토층보다 작은 값을 보이면서 비슷한 경향으로 나타났다.

지하수 유향유속 측정은 해성퇴적토층에서 조석의 변화 방향인 동·서로 구분되는 반면 해성퇴적토층 하부에 있는 풍화대 구간에서 조석의 변화 방향에 대하여 어느 정도 일관성을 보이지만 특정 지점에서 상관성이 없는 것으로 나타났다. 풍화대구간에서 지하수 흐름은 북·동 방향으로 조사지역에 나타나는 선구조선 분석 결과와 거의 일치하는 N45E 방향이 우세하였다. 즉, 풍화대 구간은 조석의 변화 방향에 따라 지하수의 흐름이 어느 정도 반영되지만 해성퇴적토층과 달리 북·동 방향으로 발달된 지질구조선에 따른 토질 특성에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 해성퇴적토층에서의 유향은 시추공이 밀집된 위치인 03, 04, 05 및 06에서 지하수가 조석의 변화에 관계없이 일정한 방향으로 모이는 것으로 보아 이는 시추공 사이에 지질 구조선이나 투수성이 좋은 지층이 존재하는 것으로 판단된다.

시추공 01과 13에서 지하수 유향의 변화는 전반적으로 일정한 경향을 보이면서 조석의 변화보다 약 2시간 정도 늦게 나타났다. 또한 조석의 차이는 서해안 지역으로 간만의 차가 약 9m 정도 나타나므로 매우 큰 유향의 변화가 보여졌다. 시추공 13에서 유향의 변화에 대한 진폭은 조석의 변화와 비례하여 오전 8시 부근에 상대적으로 매우 크게 나타난 반면 오후 8시 부근에 서로 작은 진폭의 비를 보였다. 이러한 관계는 해안 대수층에서 조석 효과에 의한 지하수위 수리경사가 계속하여 변동되는 압력파의 전달로 생성되는 것을 알 수 있다. 즉, 조석에 대한 유향유속의 변화는 피압 대수층의 경우 유체압의 변화에 의해 생성되는데 대수층의 투수량계수, 조석의 주기와 진폭 및 해안으로부터 거리 등에 의한 영향을 밀접하게 받는 것으로 보였다.

참 고 문 헌

- 구민호, 차장환, 2002, 시추공 유속 검증을 이용한 압반 대수층의 수리전도도 분포 산정, 지질학회지, 12(3), pp.257-271.
- 김계남, 구자공, 원휘준, 오원진, 2000, 김포매립지 주변 지하수오염 확산 저감 방법 연구, 한국지하수토양환경학회, 7(1), pp.1-7.
- 김태희, 신제현, 황세호, 김구영, 조병욱, 채병곤, 김용제, 2004, 지하수 유향-유속 자료 및 균열 분포를 이용한 균열압반 특성화 기법, 한국지하수토양환경학회, 추계 학술발표회, pp.155-158.
- 최위찬, 김규봉, 최성자, 윤 욱, 진명정, 1995, 김포-인천 도폭 지질조사보고서, 한국지질자원연구원.
- 황세호, 염병우, 김용제, 2003, 유향, 유속검증을 이용한 시추공간 수리적 연결 특성 파악, 한국지하수토양환경학회, 추계학술발표회. pp.263-266.
- Paillet, F.L., Hess, A.E., and Morin, R.H., 1990, Estimation of the relative permeability distribution in fractured granitic rocks by means of vertical flow measurements in the Siblingen borehole, Switzerland, Colorado, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report, pp.90-4034.
- Ruud, N.C., and Kabala, Z.J., 1997, Numerical evaluation of the flowmeter test in a layered aquifer with a skin zone, J. Hydrol., Vol.203, pp.101-108.
- Xiang, J., 1995, The evaluation of the flowmeter test in three-layer aquifers and the influence of disturbed zones, J. Hydrol., Vol.166, pp.127-145.

2006년 7월 3일 원고접수, 2006년 9월 14일 게재승인

박종오

대전대학교 공과대학 지반설계정보공학과
300-716, 대전광역시 동구 용운동 96-3
Tel: 042-280-2575
Fax: 042-280-2570
E-mail: jopark@dju.ac.kr

송무영

충남대학교 지구환경과학과
305-764, 대전광역시 유성구 궁동 220
Tel: 042-821-6423
E-mail: mysong@cnu.ac.kr

박충화

대전대학교 공과대학 지반설계정보공학과
300-716, 대전광역시 동구 용운동 96-3
Tel: 042-280-2571
Fax: 042-280-2570
E-mail: chpark@dju.ac.kr