

낙동강 하중도 탄섬의 지하수위 변동 및 수질 특성

Characteristics of Groundwater Levels Fluctuation and Quality in Ddan-sum Area

김 규 범[†] · 최 두 형¹⁾ · 신 선 호²⁾

Kim, Gyoobum · Choi, Doohong · Shin, Seonho

ABSTRACT : Confined aquifer, which is separated with upper clayey or silty materials, is partially distributed at the depths of the sediments in Ddan-sum area on the lower Nakdong river. Measurements of groundwater levels at 13 sites explain that groundwater flow shows seasonally various due to seasonal rainfall and agricultural water use. From 9 long-term monitoring data of groundwater levels at 7 sites, 3 types of groundwater levels time series can be classified using principal component analysis. The first type is seen in the center of Ddan-sum and has a round-shape graph due to a weak response to stream water levels. The second type exists in the outer part of Ddan-sum and shows sharply peak-shape graph due to a rapid and strong response to stream water levels and rainfall. The last type, which is seen in a deep layer, has a periodicity by tidal effect. From geochemical analysis at each monitoring sites, [Ca-HCO₃] type happens in the center of Ddan-sum far from Nakdong river, and [Na-HCO₃] and [Ca-SO₄(Cl)] types exist in the outer of Ddan-sum affected by river quality.

Keywords : Riverbank filtration, Principal component analysis, Tidal effect, Geochemistry

요 지 : 낙동강 하류 탄섬 지역은 강변여과수 개발이 이루어지는 지역으로서 상부의 점토 및 실트질 퇴적층이 물의 상하 이동을 차단하여 하부 자갈층은 피압 대수층의 특성을 보이기도 한다. 총 13개소의 관측 지점에서 측정한 지하수위 조사 결과, 강우 요인과 농업활동에 의한 양수의 영향으로 계절에 따라 지하수위 유동 방향이 차이를 보인다. 7개 지점 9개의 장기 지하수위 관측 결과, 탄섬의 지하수위 변동은 주성분분석에 의하여 3개 유형으로 분류된다. 첫 번째 유형은 탄섬 중앙부에서 나타나며 하천의 영향이 적어 완만한 변동을 보이고, 두 번째 유형은 탄섬 외곽부에서 나타나며 강우 및 하천수위에 신속히 반응하는 뾰족한 형태의 그래프를 보여 준다. 세 번째 유형은 하천수위 변동과 상관없이 일정한 주기를 갖는 경우로서 하천 본류와 떨어진 심부 자갈층에서 나타나는데, 심부 자갈층의 지하수위는 조석 영향에 의한 주기성을 보인다. 각 지점의 지화학 특성을 분석한 결과 탄섬 내부는 [Ca-HCO₃]인 천부 지하수 특성, 탄섬 외곽은 [Na-HCO₃], [Ca-SO₄(Cl)]로서 하천 영향을 받는 유형으로 나타나 수위 분류 유형과 관련성이 있다.

주요어 : 강변여과, 주성분 분석, 조석효과, 지구화학

1. 서 론

1990년대 후반 이후 국내에서는 강변여과수의 개발에 대한 관심이 증가하여 낙동강 인근에서의 충적층 지하수 개발이 활기를 띠게 되었으며 이와 함께 강변여과수에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다. 강변여과수는 하상에 퇴적된 충적층을 거치는 완속 여과의 방식으로 하천수와 지하수를 병행 취수하는 기술로서 하천수의 직접 취수보다 양질의 수질을 확보할 수 있다. 강변여과수의 수리특성에 대한 대표적인 연구로는 창원시 강변충적층에서의 지하수위 변동 특성에 대한 연구(정재열 등, 2003), 강변여과수 개발 지역의 지하수 유동 수치 모델링 연구(함세영 등, 2004, 2005), 김해 탄섬 지역에서 수리전도도의 규모 종속효과에 대한 연구(김태영 등,

2008), 창녕 증산리 지역에서 양수시험 시 관측정 설계가 추정 수리상수에 미치는 영향 분석(김병우 등, 2009), 충적층 양수정에서 우물개량을 통한 우물효율의 개선(김규범 등, 2010) 등이 있다. 특히, 지하수위 변동에 대한 연구로서, 정재열 등(2003)은 창원시 대신면 낙동강 주변의 강변 충적층에서의 지하수 변동을 평가하여 지하수위가 배후지에서 낙동강 쪽으로 가면서 낮아지는 경향을 보임을 밝혔으며, 관측정 수위 시계열 자료에 대한 자기상관분석을 통하여 낙동강 수위 영향을 많이 받는 그룹, 낙동강 수위와 취수정의 영향을 동시에 받는 그룹, 취수정의 영향을 주로 받는 그룹 등 3개 유형으로 분류한 바 있다. 이명재 등(2004)은 국내 지하수 관측소의 지하수위 시계열 자료에 대한 분석을 통하여 지하수위 변동 패턴을 분류한 바 있으며, 김규범(2005)은 주성분 분석을 통하여 국

† 정희원, 한국수자원공사 K-water연구원 수석연구원(E-mail : gbkim@kwater.or.kr)

1) 정희원, 한국수자원공사 K-water연구원 대리

2) 비희원, 한국수자원공사 K-water연구원 위촉연구원

가 지하수 관측소의 지하수위 변동 유형을 구분한 바 있다.

본 연구에서는 낙동강 하류의 하중도인 김해 탄성 지역 내 충적층 지하수 수위의 계절적 분포와 시계열적 변동 패턴을 분류하여 지하수위 분포 특성을 파악하며 수질과의 관계를 평가하는데 목적을 두었다.

2. 연구지역

2.1 지형 및 지질

연구지역은 경상남도 김해시 생림면 마사리에 위치한 낙

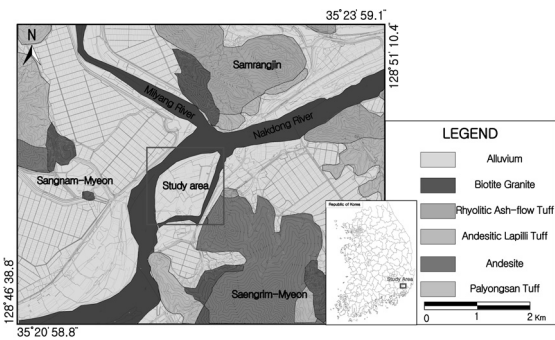


그림 1. 연구지역 위치 및 지질도

동강 내 하중도인 탄성 일원으로서 면적이 1.02km², 둘레길이는 4.76km이다. 연구지역 탄성을 중심으로 북동쪽은 미봉산(해발 283.7m), 남동쪽은 작약산(해발 377.8m), 북서쪽은 봉어등(해발 278.8m)이 존재하며 탄성 동쪽의 낙동강에서 밀양강이 합류한다. 물의 흐름 방향은 낙동강이 남서쪽에서 동쪽, 밀양강은 북쪽에서 유하하여 낙동강과 합류하여 동쪽으로 흘러 나간다. 한편, 탄성 동쪽에는 홍수기에만 흐름이 발생하는 셋강이 분포한다. 현재 본 지역에는 김해시에서 주관하는 강변여과수 개발을 위한 취수설비가 시공 중이며, 9개의 방사형 집수정을 설치하여 180,000m³/day를 공급할 계획이다.

연구지역 지질 특성은 광역적으로는 중생대에 형성된 유천층군과 불국사 관입암류인 흑운모 화강암이 기반암으로 분포하고, 탄성은 제4기 미고결 퇴적물인 충적층이 부정합으로 피복되어 있다(그림 1). 기존 시추자료에 의하면, 모래층, 실트질 모래층, 점토질 모래층, 모래질 자갈층, 자갈층, 자갈질 점토층, 풍화암층, 연암층 등의 순으로 지층이 구성되며 평균적으로 충적층의 두께는 약 30m에 이른다. 상하부의 중조립 지층은中间的 점토와 실트질 지층이 나누고 있고 하부로 갈수록 점토질이 두꺼워지는 경향을 보이는데,中间的 세립질 매질은 상부와 하부 지층간의 물의 흐름을

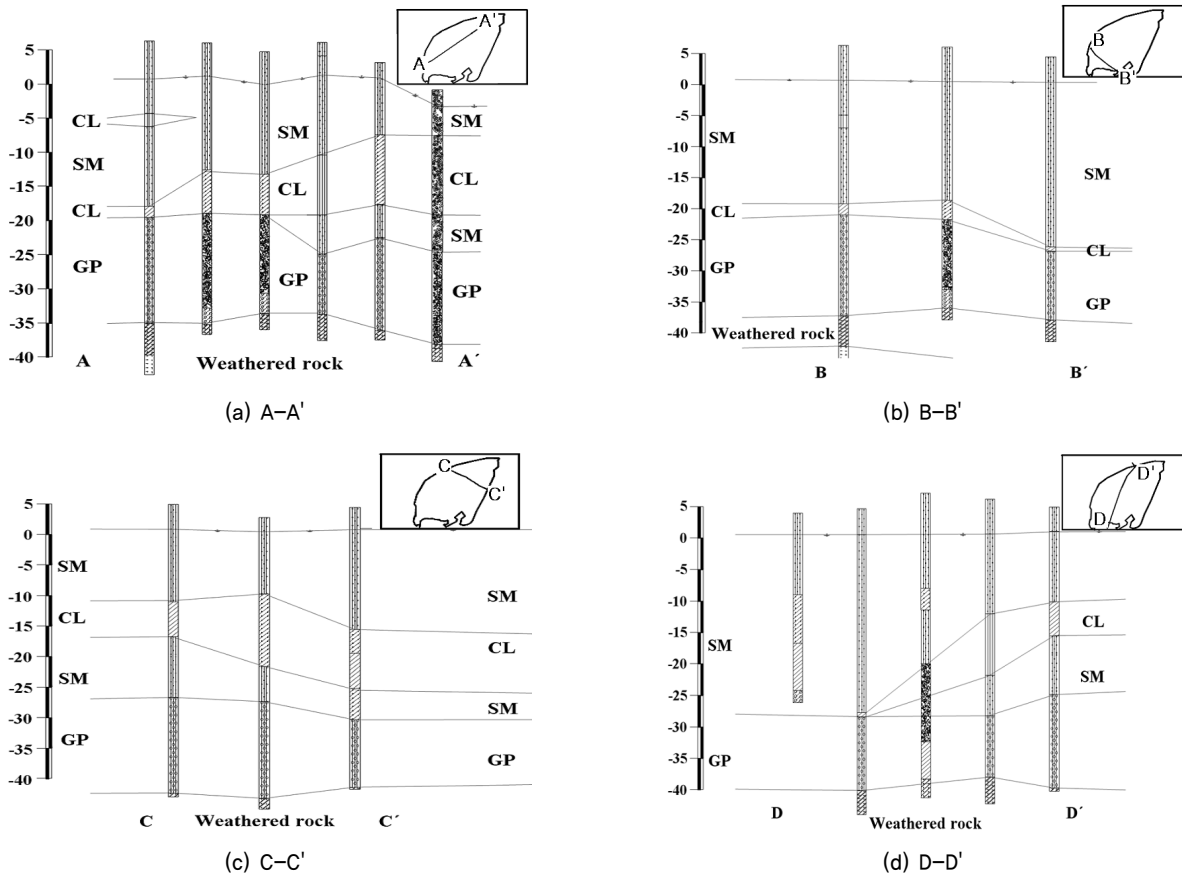


그림 2. 연구지역의 지층 단면도(CL:점토, SM:모래, GP:자갈)(김해시, 2006)

차단하는 역할을 하고 있다(김해시, 2006). 각 층별 평균 두께는 상부 모래층이 약 20.0m로 가장 두꺼우며, 하부 모래질 자갈층이 약 9.7m, 실트질 모래층이 약 9.4m, 점토질 모래층이 약 6.2m, 자갈질 점토층이 약 2.8m 및 기타의 분포를 보이고 있다(그림 2). 전반적으로 탄성의 낙동강 상류측은 자갈과 모래층이 주로 분포하여 투수성이 매우 좋은 반면 하류쪽은 점토 성분이 증가하여 투수성이 상대적으로 낮은 현상을 보인다.

2.2 지하수 관측정의 설치

현장 지하수위를 측정하기 위하여 1개 지점에 3개 심도의 관측정으로 구성된 다심도 관측정을 7개소에 설치하였다(그림 3). 다심도 관측정은 75mm(NX) 구경으로 굴착하고, 바닥에서 1m 상단에 2m의 스크린을 설치하여 물이 흐르도록 하였다. 스크린 및 케이싱이 설치된 후 여재를 채우고, 에어써징을 한 후에 상부 그라우팅을 실시하여 다심도 관측공의 시공을 마무리하였다. 이들 7개소의 다심도 관측정 중에서 지하수위의 측정은 상부 모래층과 하부의 자갈층에 자동 수위측정 장치를 설치하여 각각 측정하였다(표 1). AO 및 GO 관측정은 깊은 관측정내에 수위 측정장비를 추가하였는데 설치 심도가 35m 및 33m로서 하부 자갈층에 해당한다. 다심도관측공에 다이버를 설치하여 2008년 7월 4일부터 9월 23일까지 10분 간격으로 지하수위를 측정하였다.

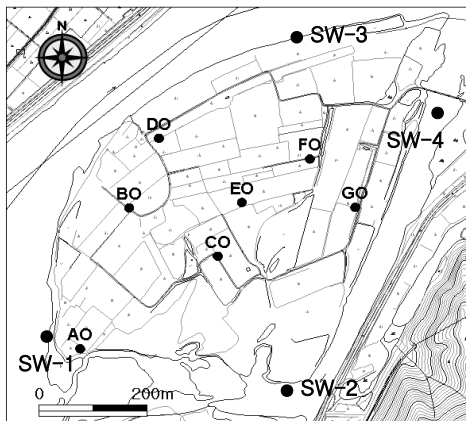


그림 3. 지하수 및 지표수 관측 위치

표 1. 다중 심도 지하수 관측정의 배치

퇴적층	관측정명	AO	BO	CO	DO	EO	FO	GO
상부 모래층	Well-1	10	10	10	6	6	6	7
	Well-2	15*	12	12	9	9	9	12*
	Well-3	-	15*	15*	11*	11*	11*	-
하부 자갈층	Well-3	35*	-	-	-	-	-	33*

Remark) *: 수위측정기 설치 심도(본문내에서 공변은 AO와 Well-2의 2를 조합한 AO-2로 부여하였음)

3. 지하수위 변동 특성

3.1 탄성의 지하수위 분포

지하수위 변화의 공간적 분포를 파악하기 위하여 지하수 관측공 및 기존 관정 13개소 이상을 대상으로 월별 지하수위 조사를 수행하였다.

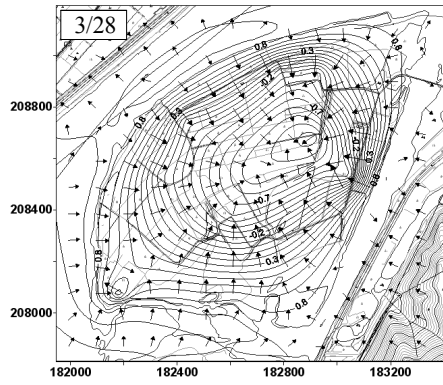
연구지역의 지하수위는 계절에 따라 차이를 보이는데, 갈수기 지하수위는 호우기보다 다소 낮으며 이는 주변의 하천 수위의 영향으로 판단된다. 반면에, 호우기에는 하천수위가 상승하고 강우량이 증가하여 지하수위 상승이 나타나고 있다(그림 4).

이와 같은 자연적인 요인에 의한 지하수위 변화뿐 아니라 인위적인 요인에 의해서도 지하수위 변동이 나타나는데, 봄 농번기 동안의 지하수위는 지하수 양수의 영향으로 하류측 중앙부로 지하수 흐름이 형성되며, 이는 조사가 이루어지는 기간 동안에 하류의 상대적으로 불량한 대수층에서의 지하수 양수에 의한 수위 강하에 기인하는 것으로 보인다. 즉, 탄성 하류측은 상대적으로 세립질인 매질의 영향에 의하여 계절에 따른 지하수위 변동이 상류측보다 크게 나타남을 알 수 있다. 한편, 탄성내 농작물 생육에 필요한 물 수요가 적어 양수가 거의 없이 자연상태를 유지하였던 호우기에는 탄성 내부의 고지대에서 외부로의 지하수 흐름이 나타나며, 상대적으로 하류측에서 높게 유지되는데 이는 하류측에 두껍게 발달하는 세립질 퇴적물이 강우의 지하 함양 및 하천으로의 배출 등을 억제하는데 기인한다.

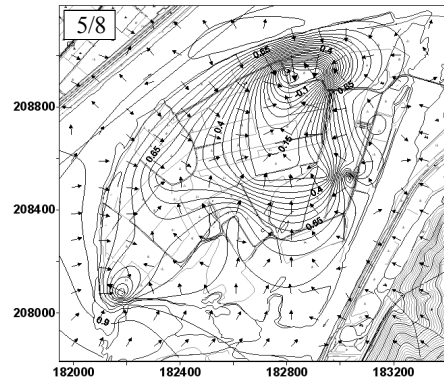
3.2 지하수위 변동 유형과 특성

주성분 분석은 변수들의 상관행렬 또는 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 이용한 스펙트럴 분해(Spectral decomposition)를 이용하여 주성분이라는 새로운 변수를 생성하는 방법이다. 이 방법을 이용하여 다수의 관측정에 대하여 서로 상관관계가 없는 몇 가지의 핵심 변수를 도출함으로써 관측정을 그룹으로 분류하고 지하수위 변동 패턴을 정의할 수 있다(박성현 등, 1999; Winter 등, 2000).

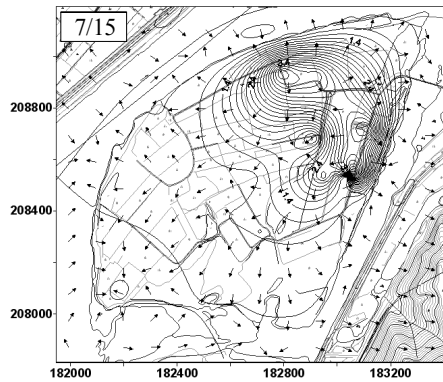
상기 9개소 지하수 관측자료를 이용하여 주성분 분석을



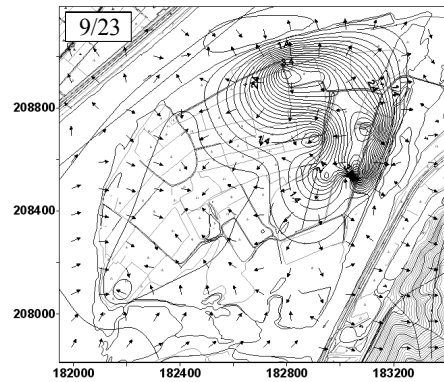
(a) 3월 28일



(b) 5월 8일



(c) 7월 15일



(d) 9월 23일

그림 4. 연구지역의 광역적인 지하수 흐름

표 2. 지하수위 변동 자료의 주성분 분석 결과

1) 설명되는 총분산

성분	초기 고유값			추출 제곱합 적재값		
	합계	분산 비율	누적 비율	합계	분산 비율	누적 비율
1	5.365	59.612	59.612	5.365	59.612	59.612
2	1.885	20.946	80.558	1.885	20.946	80.558
3	1.009	11.208	91.767	1.009	11.208	91.767
4	0.311	3.458	95.224			
5	0.210	2.335	97.559			
6	0.111	1.237	98.796			
7	0.082	0.907	99.703			
8	0.015	0.166	99.869			
9	0.012	0.131	100.000			

2) 성분 매트릭스

관측공	주성분		
	성분 1 (C1)	성분 2 (C2)	성분 3 (C3)
AO-2	0.729	-0.656	-0.106
AO-3	0.790	-0.557	0.006
BO-3	0.833	0.306	0.173
CO-3	0.723	0.512	-0.281
DO-3	0.942	-0.178	-0.145
EO-3	0.717	0.601	0.056
FO-3	0.840	0.474	-0.071
GO-2	0.885	-0.413	-0.010
GO-3	0.319	-0.006	0.927

실시한 결과 표 2에서 보는 바와 같이 전체 자료의 약 91.8%를 설명하는데 필요한 3개의 주성분이 추출되었다. 주성분 1에 의하여 전체 자료의 약 59.6%, 주성분 2에 의하여 약 20.9% 및 주성분 3에 의하여 약 11.2%가 설명된다. 성분 매트릭스에서 보듯이, 주성분 3의 기여도가 높은 GO-3을 제외하면 대부분의 관측점에서 주성분 1에 의한 설명력이 높은 것으로 나타났다.

지하수위로부터 추출된 3개 주성분의 시계열도는 그림 5와 같다. 관측 기간 동안의 주요 수문 기상 현상으로는, 관측 후 약 1,000 시차인 42일째(8월 15일)에 밀양관측소 강우량이 42mm를 보여 분석 기간 중 최대를 보였으며, 2일 후인 8월 17일에는 삼랑진 관측소의 수위가 1.0El.m 부근에서 2.5El.m로 급상승한 사례가 있다. 이 수문 기상 시점과 시계열도의 지하수위와 비교해 보면, 도출된 3개의 주성분 중에서 주성분 C1은 강우 이후 즉각적인 지하수위 상승을 보이지 않고 일정 시차를 경과한 후 하천수위 상승에 따라 지하수위가 상승되는 특징을 보이며, 주성분 C3은 주기성을 보이는 성분이다. 한편, 주성분 C2는 타 주성분에 비하여 수문현상에 가장 늦게 반응하고 완만한 형태의 지하수위 변동을 보인다.

이상 3개의 주성분은 9개 관측점에서의 지하수위 변화를 설명하는 서로 독립된 성분으로서 이들 성분의 기여도를 측

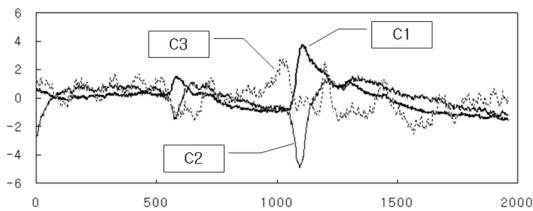


그림 5. 3개 주성분의 시계열도

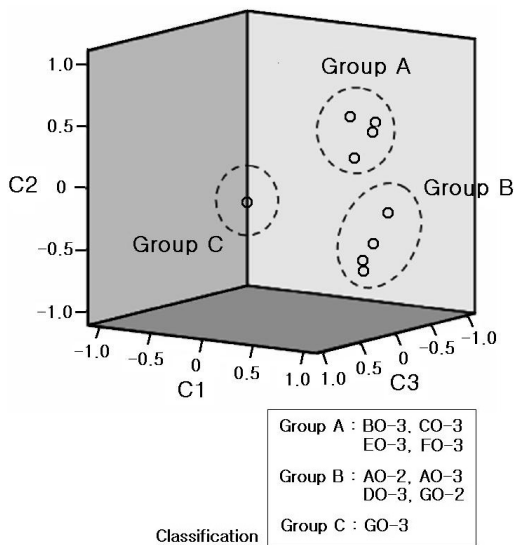


그림 6. 연구지역내 지하수위 변동 유형의 그룹화

으로 각 관측점의 소속 범위를 도식화하면 그림 6과 같다. 즉, 3개의 성분에 근거하여 9개의 관측점을 3개의 그룹으로 분류할 수 있는데, CO-3, BO-3, EO-3 및 FO-3은 그룹 A, GO-2, DO-3, AO-2 및 AO-3은 그룹 B, GO-3은 그룹 C로 분류된다.

그림 7은 각 그룹의 판석내에서의 분포를 도시한 것으로서, 낙동강의 수위 변화에 영향을 적게 받는 관측점의 경우(그룹 A: BO, CO, EO, FO 계열)는 하천과 멀리 떨어진 판석의 중앙부에 위치한다. 낙동강의 수위가 지하수위에 직접적으로 영향을 주지 못하는데, 이는 판석 내부의 불균질한 대수층 특성이 하천수의 섬 중앙부로의 유입을 원활하지 못하게 하고 판석 중앙부의 수위가 하천수위보다 상대적으로 높아 상승된 하천수가 판석 중앙부에 미치는 영향이 미미하기 때문이다. 낙동강의 수위변화와 밀접한 관련이 있는 경우(그룹 B: AO-2, AO-3, DO, GO-2)는 대부분 낙동강과 인접한 지역에 위치한다. 하천의 수위변화와 거의 관련이 없는 GO-3(그룹 C)는 스크린이 약 30m 심도에 설치되어 하부 모래자갈층에 위치하는데, 지하 약 20m지점의 점토층은 상부 모래자갈층과 하부 모래자갈층 사이를 분리시킴으로써 수직적인 물의 이동을 차단하는 것으로 보인다.

각 그룹별로 지하수위 변동 형태의 유사성을 파악하기 위하여 시계열도를 작성해 보았다(그림 8). 각 지하수위 변동 그룹은 전체적으로 하천의 수위 변동 폭보다 작은 변동을 보이고 있다. 그룹 A에 속하는 4개의 관측점은 주성분 C1의 영향을 주로 받으나 타 그룹에 비하여 주성분 C2에 의한 설명이 강한 그룹으로서 지하수위 변동이 완만하고 진동폭이 작은 형태를 보이며, 그룹 B는 주성분 C1에 의하여 강하게 설명이 되며 비교적 뾰족하고 진동폭이 가장 큰 지하수위 변동을 나타낸다. AO-2 관측공에서의 교차상관 분석 결과, 지하수위 변화는 하천수위 변화가 발생한 후 2~6

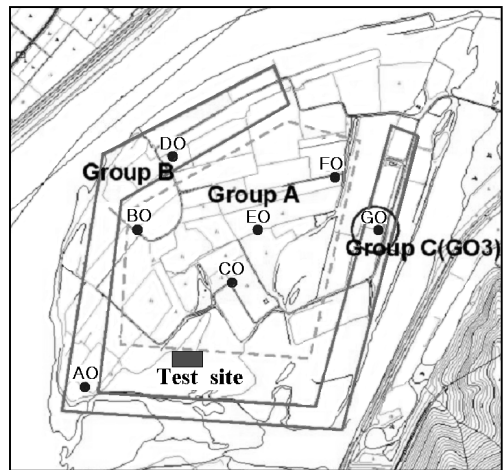
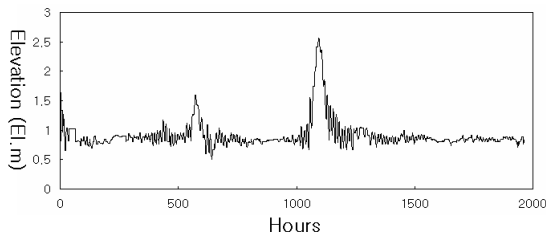


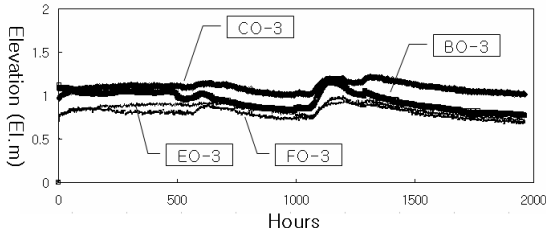
그림 7. 연구지역내 지하수위 변동 유형별 분포

시간 이내에 잘 나타나나 강우 변화와는 무관한 특성을 갖는다. 반면에 그룹 C는 주성분 C3이 영향을 끼쳐 강우 및 하천 수위 변화에 뚜렷한 반응을 나타내지 않으며 일정한 주기성을 보이고 있다.

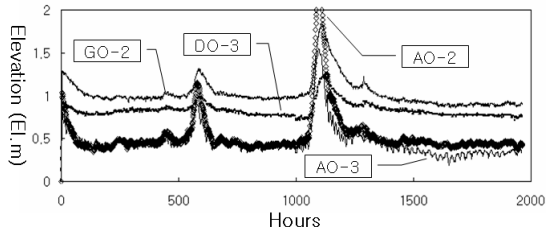
탄섬내 낙동강 상류측 하천변 50m 지점에 위치하는 AO 관측점의 경우, 중간 관측점 AO-2와 깊은 관측점 AO-3의 지하수위는 진폭은 상이하나 유사한 변동을 보이고 있어 낙동강의 영향을 동시에 받고 있음을 알 수 있다. 이들의 평균 지하수위는 하천 수위보다 약 40cm 정도 낮으나 하천 수위의 변동에 민감하게 반응한다. AO 보다 내부에 위치한 BO-3는 평균적으로 하천수위 보다 약간 높거나 유사한 지하수위를 유지하고 있으며, 지하수위 변동 형태가 Peak 특성을 잘 나타내지 않으며 호우기의 수위 상승은 하천 수위에 대한 반응시차도 늦고 완만한 상승 곡선을 보인다.



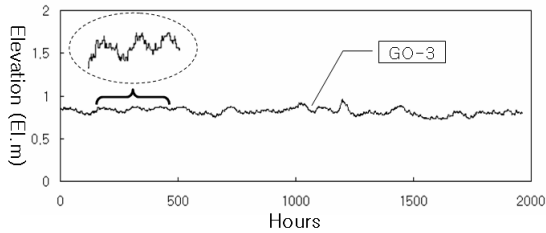
(a) 낙동강의 수위 변동



(b) 그룹 A의 지하수위 변동



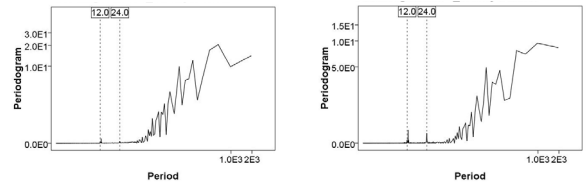
(c) 그룹 B의 지하수위 변동



(d) 그룹 C의 지하수위 변동

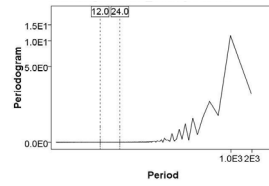
그림 8. 하천수위와 지하수위 각 그룹의 시계열도

탄섬의 가장 중앙에 위치한 CO-3은 관측점 중에서 하천 수위보다 평균 20cm 정도의 높은 평균 지하수위를 나타내며 BO-3과 마찬가지로 Peak 특성이 잘 나타나지 않고 완만한 수위 변화를 보여준다. BO의 인근에 위치한 DO-3는 호우기를 제외하고는 하천수위와 비슷한 수위 표고를 나타내며 호우 시 Peak 형태가 유지된다. 탄섬 중앙부에 위치한 EO-3와 FO-3는 하천 수위와 비슷한 표고에서 지하수위가 변동하며 호우 시 Peak 반응이 거의 나타나지 않고 급격한 수위 강하가 발생하지 않고 있다. 탄섬의 가장 동부의 경사지역 인근에 위치한 GO 관측점의 경우는, 중간 관측점 GO-2와 깊은 관측점 GO-3의 지하수위 변동에 현저한 차이를 보이고 있다. GO-2의 경우에는 평균 지하수위가 하천수위 보다 높게 형성되고, 지하수위의 변화와 하천수위 변화가 유사하며

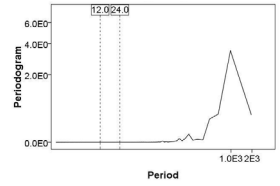


(a) AO-2

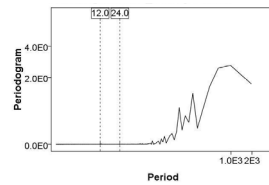
(b) AO-3



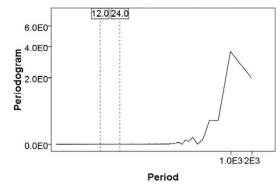
(c) BO-3



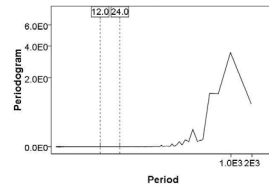
(d) CO-3



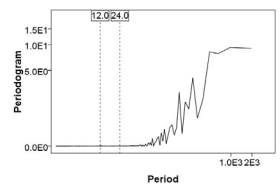
(e) DO-3



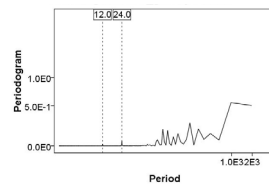
(f) EO-3



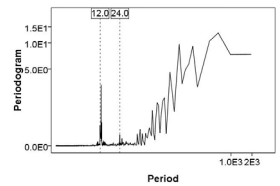
(g) FO-3



(h) GO-2



(i) GO-3



(j) River

그림 9. 지하수위와 하천수의 주기 분석(x축: 시간)

Peak 형태를 잘 보여준다. GO-3의 평균 지하수위는 하천 수위보다 약간 낮은 값을 보이며 지하수위 변동 폭이 매우 작고 주기성을 보인다(그림 9).

각 관측지점의 주기성 분석을 통한 주기도 작도 결과, AO-2, AO-3, BO-3, DO-3, GO-2는 하천의 주기성과 유사한 다양한 변동 주기를 갖고 있으며, CO-3, EO-3, FO-3는 상대적으로 주기 성분이 많지 않다. 특히, AO-3 및 GO-3 관측 지점은 12 시간 및 24시간 주기를 갖고 동일 시점에서 지하수위 고저가 나타나 조석의 영향을 받고 있음을 알 수 있다(그림 9). 하천 수위에서도 주기성이 나타나는데 낙동강 하구에서의 조석에 의한 영향이 본 지역 하천에 미치고 있음을 반영한다.

김해시 탄설의 퇴적 환경을 보면, 곡류 안쪽의 포인트 바, 하상 및 곡류부에 모래와 자갈이 퇴적되어 있으며, 곡류 안쪽의 포인트 바에는 작은 하도가 가로지르고 있다. 호우기 낙동강의 풍부한 유량은 낙동강 양쪽 사면과 상류쪽에서 공급된 퇴적물들을 더 많이 운반하게 된다. 이렇게 곡류부에 위치한 탄설에서 홍수 시 운반된 퇴적물은 평상 시의 하도를 넘어 범람되며, 이 때 범람지에서 느려진 유속은 하도보다 유속이 작아지므로 탄설 내부와 셋강 인근에는 모래, 실트, 점토와

같은 뜬짐(Suspended load) 형태로 하도 연변과 평원에 쌓이게 된다(그림 2)(정창희, 1996). 이와 같이 탄설은 대부분 모래 및 자갈층의 자유면 대수층이 넓게 분포하고 있으나, 뜬짐과 같은 세립질 입자의 이동 퇴적에 의하여 국부적으로 피압 대수층 및 누수피압대수층(모래-점토-자갈층)의 형태가 나타난다. 그림 7의 시험위치(Test site)에서의 연구 결과, 일부 대수층은 지표에서부터 모래층(두께 23m), 점토(두께 2m), 고투수성 자갈(두께 10m) 그리고 불투수성 암반층으로 구성되어 있으며, 양수시험 해석 결과 누수 피압대수층인 것으로 분석된 바 있으며(김태영 등, 2008), 이 결과는 본 연구에서 수위 변동 형태에 잘 나타난다. 즉, 심부 자갈층에서의 피압 특성은 하천수와 지하수의 직접적인 상호작용이 차단되는 경우에 나타나는데, 이로 인하여 GO-3 지점의 지하수위 변동은 하천수보다는 조석 영향에 의한 변동 주기를 잘 보여준다.

3.3 지하수위와 수질 특성

김해시 탄설에서의 현장 수질조사는 2009년 4월에 4개의 하천수와 20개의 지하수에 대한 물시료를 채취하여 지하수위 유형과의 관계를 고려한 수질특성을 분석하였다(그림 3).

표 3. 각 시료에 대한 지구화학 성분 분석 결과(2009년 4월)

공번	온도 (°C)	pH	Eh (mV)	EC (µS/cm)	DO (mg/L)	농도(mg/L)									
						Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻
SW-1	20.1	8.93	162	550	7.28	58.2	7.18	35.0	9.59	1.73	50.0	7.18	82.0	91.5	3.36
SW-2	20.8	8.77	157	579	5.15	77.5	7.19	31.1	9.52	3.53	83.0	7.03	74.0	104	2.14
SW-3	20.3	9.29	169	524	6.49	58.0	6.83	34.6	9.43	1.73	56.0	8.01	95.0	70.2	3.97
SW-4	20.6	9.61	167	592	8.97	75.8	7.11	31.5	9.41	3.55	79.0	6.50	72.0	88.5	4.27
AO-1	13.8	6.57	320	240	2.13	34.4	1.39	12.0	3.17	14.1	13.0	28.0	28.0	82.4	-
AO-2	13.6	7.12	-55.0	407	1.67	40.7	3.67	36.6	7.36	15.9	30.0	26.0	26.0	156	-
AO-3	13.6	7.44	100	593	2.46	115	6.23	8.61	6.21	14.0	82.0	58.0	58.0	159	-
BO-1	12.4	6.59	247	383	7.12	17.8	2.17	34.5	7.98	21.1	21.0	42.0	42.0	79.3	-
BO-2	11.2	6.78	274	354	4.95	15.6	2.12	32.5	8.03	20.3	22.0	46.0	46.0	73.2	-
BO-3	11.4	6.84	281	404	3.59	24.0	2.80	34.4	5.21	15.1	29.0	34.0	34.0	101	-
CO-1	14.7	6.65	107	344	2.19	15.4	2.62	39.7	7.61	27.6	35.0	19.0	19.0	104	-
CO-2	14.5	7.09	130	513	2.34	52.7	3.63	43.0	10.7	17.9	63.0	36.0	36.0	168	-
CO-3	14.4	7.10	-74.0	568	1.13	57.7	3.46	34.6	9.56	18.3	70.0	25.0	25.0	149	-
DO-1	13.1	6.04	324	365	4.19	14.7	5.58	32.2	8.95	38.7	24.0	44.0	44.0	54.9	-
DO-2	12.9	6.50	328	292	3.18	15.3	3.07	23.9	6.56	23.2	24.0	38.0	38.0	45.8	-
DO-3	12.6	6.42	221	399	1.99	28.7	13.5	30.4	7.02	19.2	34.0	49.0	49.0	97.6	-
EO-1	14.6	6.87	278	512	5.64	16.0	2.80	58.7	15.3	22.1	10.0	38.0	38.0	192	-
EO-2	14.7	6.68	279	239	2.44	9.00	1.83	18.1	6.32	18.8	5.00	16.0	16.0	82.4	-
EO-3	14.6	6.69	20.0	276	2.49	11.0	2.61	23.5	4.03	21.5	14.0	27.0	27.0	67.1	-
FO-2	13.0	7.00	248	495	2.69	26.1	5.26	58.7	9.90	18.6	28.0	53.0	53.0	162	-
FO-3	13.2	7.00	272	385	2.90	19.7	2.94	35.9	11.1	14.0	30.0	57.0	57.0	88.5	-
GO-1	15.2	6.15	244	259	5.03	10.6	3.22	20.6	6.02	19.4	20.0	28.0	28.0	36.6	-
GO-2	15.0	6.29	278	249	2.45	13.2	3.25	21.3	5.67	16.9	23.0	37.0	37.0	39.7	-
GO-3	14.5	7.08	261	313	2.19	19.3	5.45	22.2	12.3	16.3	21.0	25.0	25.0	119	-

Remark) CO₃²⁻의 '-'는 검출되지 않음을 의미함

물시료의 수리지구화학적 대표성을 나타내기 위하여 현장에서 Horiba meter(D-25, D-54)를 이용하여 수온(T), 수소이온농도(pH) 및 전기전도도(EC), 용존산소(DO), 산화환원전위(Eh)를 측정하였으며, 알칼리도는 산중화적정법을 이용하여 분석하였다. 그리고 주 양이온성분(Ca, Mg, Na, K)과 음이온성분(Cl, NO₃, HCO₃, CO₃, SO₄) 분석을 위하여 하천수 및 지하수 시료는 0.45 μ m의 멤브레인 필터지(Membrane filter)로 여과한 후 양이온 분석을 위한 시료에는 질산을 처리하였다. 채취된 시료는 ICP-OES(Perkin Elmer사의 Optima 5300DV) 및 IC(Dionex사의 DX-600)를 이용하여 양이온 및 음이온 분석을 실시하였다. 관측공별 물리적 측정치(pH, EC, Eh, DO, T) 및 화학적 수질특성에 대한 분석결과는 표 3에 정리하였다.

연구지역 하천수 수온은 20.1~20.6 $^{\circ}$ C로 일정하며, 지하수관측공의 수온은 11.2~15.2 $^{\circ}$ C로 관정마다 차이를 보인다. 하천수의 pH 값은 8.77에서 9.61까지의 약 알카리 또는 알카리의 범위를 보이며, 평균값은 9.15이다. 지하수 관측공에서의 pH 값은 6.04에서 7.10까지의 지하수 특성인 중성 범위를 보이며, 평균값은 6.75이다. 하천수의 산화-환원전위 측정결과 157~169mV로 값의 차이가 크게 나타나지 않았다. 지하수는 -55~328mV로 값의 차이가 크게 나타나며 일부 관정의 지하수가 환원환경으로 나타났다. 하천수의 전기전도도 값은 5.24~5.92 μ S/cm 범위로서 탄성 내부 지하수의 전기전도도 보다 높게 나타났다.

주 양이온 및 음이온 분석 결과를 삼각 파이프 다이어그램

(Triangular piper diagram)으로 도시하여 관측공별 지하수 시료의 화학적 특성을 검토하였다(그림 10). 연구지역내 관측지점 시료에 대하여 수질특성을 분석하면 [Ca-HCO₃], [Na-HCO₃], [Ca-SO₄(Cl)] 등 3가지 유형으로 분류되며, 지표수는 [Na-SO₄(Cl)]로 나타났다. 지하수 수질 유형이 지하수위의 변동 그룹과 유사한 그룹으로 나타나고, 이 현상이 탄성내의 위치에 따른 지표수와와의 관계, 심부의 피압대수층의 존재 등과 무관하지 않음을 보여주고 있다. 즉, 비교적 천부의 지하수 관측정은 낙동강 수위 변동에 영향을 많이 받는 탄성 외곽의 낙동강과 인접한 관측정(AO-1, 2, DO-1, 2, 3, GO-1, 2)과 탄성 중앙부에 위치하는 낙동강의 영향을 적게 받는 관측정(BO-1, 2, 3, CO-1, 2, 3, EO-1, 2, 3, FO-2, 3)으로 구분하여 해석할 수 있다. 낙동강의 수위 변화에 영향을 많이 받는 관측정의 경우 탄성 외곽의 충적층에 위치하고 있어 하천수의 영향을 받기 쉬우며, 지하수의 수질 유형은 [Na-HCO₃], [Ca-SO₄(Cl)]에 해당되며, 하천의 직접적인 영향으로 인해 지표수의 유형에 근접하게 도시되고 있다. 낙동강의 수위 변화에 영향을 적게 받는 내부의 관측정은 탄성의 불균질한 대수층 특성으로 하천수의 유입이 일정하지 않을 뿐 아니라 하천과 멀리 떨어져 있어 하천수가 직접적으로 영향을 주지 못하기 때문에 일반적인 천부 지하수 유형[Ca-HCO₃]을 보인다.

비교적 심부 시료를 채취한 AO-3 및 GO-3 관측공의 경우, 심도에 따른 수질 변화가 비교적 뚜렷하게 나타난다. AO-3 관측공은 [Na-HCO₃] 유형을 나타내며 Cl⁻ 및 HCO₃⁻ 이온이

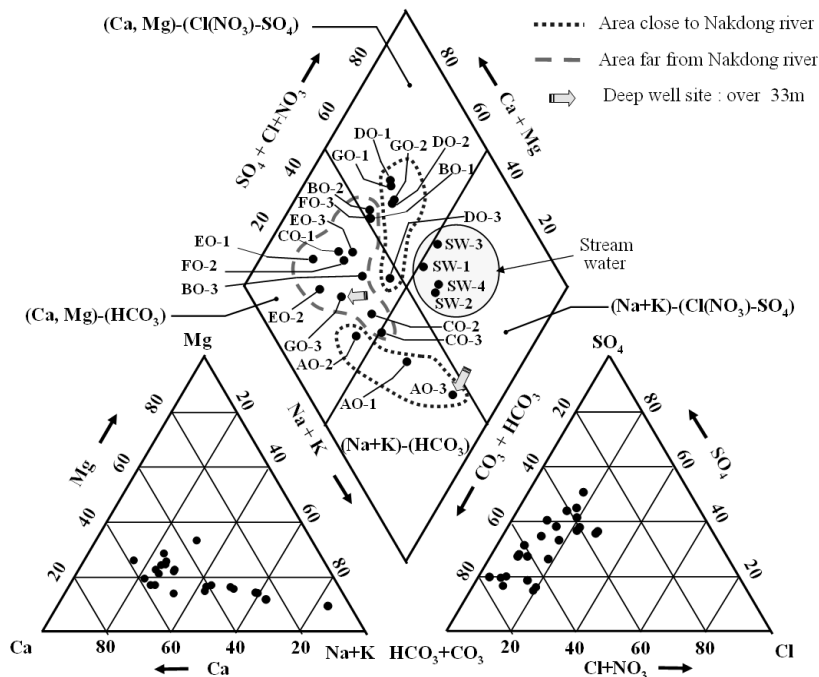


그림 10. 하천수와 지하수의 Piper 다이어그램 도시 결과

높은 값을 보인다. AO-3 지점은 심도 약 20m에 분포하는 점토층이 상부의 천부 지하수의 이동을 원활하지 못하게 함으로써 낙동강변에 위치한 일반적인 관측공의 수질 특성과는 상이한 결과를 보여준다. 또한, GO-3 관측공은 수질 유형이 $[Ca-HCO_3]$ 에 해당하나 상부 지층의 GO-1 및 GO-2와 달리 Ca의 함량이 매우 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 AO-3 및 GO-3 지점의 수질 특성이 상부 지층내 지하수와 차이를 보이는 것은 10~20m 심도에 분포하는 점토층의 영향으로 하부지층이 피압 특성을 보이기 때문이며, 특히 GO-3은 지하수위 변동이 독립적이며 물의 유입이 상부 지표면로부터 직접 이루어진 것이 아니라 수평 방향에서 이루어졌을 가능성을 제시해 준다.

반면에, 지하수위 변동은 AO-3과 GO-3가 유사하지 않는데, 이는 AO-3이 AO-2와 유사한 변동을 보이는 것으로 볼 때 상부 그라우팅 등 시공상의 문제점도 배제할 순 없으며, 인근 하천과의 근접성 등도 요인이 될 수 있을 것으로 보인다.

4. 결론 및 제언

판섬 지역은 집수정 방식에 의한 강변여과수 개발이 진행 중인 지역으로서, 다양한 조사가 수행되어 왔다. 본 연구에서는 판섬 내의 관측정의 위치와 심도별 지층 특성 등에 따라 지하수위 변동 및 수질 특성이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 판섬은 하중도로서 낙동강에 직접 인접하여 낙동강의 수위 영향을 직접 받을 것으로 예상되었으나 심도별 지하수위 관측 자료를 분석한 결과, 피압(누수 피압) 대수층이 하부에 발달하고 있어 지표 부근 상부 모래층과 하부 자갈층에서의 지하수위 변동이 다르며, 하부의 자갈층내의 지하수는 하천의 영향을 받기 보다는 조석에 의한 지하수위 변화 주기를 보이고 있다. 아울러, 판섬의 중앙부와 외곽부는 하천과의 거리 및 하천수위와 지하수위의 수두 차이 등에 따른 영향으로 지하수위 수질 유형도 각기 다르게 나타남을 알 수 있다.

지하수위 및 수질 특성은 하천수 및 지하수의 혼합 정도 및 상관관계 등에 의하여 결정될 수 있으므로 보다 양질의 수원 확보 등을 위해서는 강변여과 시공 및 설계 시 최적 위치를 파악하는 것이 필요하며, 아울러 대수층의 수위 및

수질 변화를 규명하는 것이 향후 유지 운영 과정에서 발생할 수 있는 수위 변동과 수질 변화의 원인을 파악하는데 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적인 확보기술개발사업단의 연구지원(과제번호; 3-4-3)에 의하여 수행되었으며, 연구지원 기관 및 세심한 의견을 주신 심사위원들께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김규범(2005), *지하수 관측망 최적설계 및 시계열 자료 해석*, 박사학위 논문, 서울대학교, pp. 1~391
2. 김규범, 김병우, 김성운(2010), 충적층 양수정에서 우물개량을 통한 우물효율의 개선, *한국지하수토양환경학회지*, Vol. 15, No. 1, pp. 39~49.
3. 김병우, 김규범(2009), 미고결퇴적층내 양수시험시 관측정 설계가 추정 수리상수에 미치는 영향 분석, *지질학회지*, Vol. 45, No. 6, pp. 787~797.
4. 김태영, 강동환, 김성수, 김병우, 권병혁(2008), 김해 판섬의 고투수성 누수 피압대수층에서 수리전도도의 규모종속 효과, *지질공학회지*, Vol. 18, No. 4, pp. 415~422.
5. 김해시(2006), *김해시 강변여과수 사업 토질보고서*, pp. 1~105.
6. 박성현, 조신섭, 김성수(1999), *통계자료 분석을 위한 한글 SPSS*, 고려정보산업, pp. 305~321.
7. 이명재, 김규범, 손영철, 이진용, 이강근(2004), 국가 지하수 관측소 지하수위 자료에 대한 시계열 분석 연구, *지질학회지*, Vol. 40, No. 3, pp. 305~329.
8. 정재열, 함세영, 김형수, 손건태, 차용훈, 장성, 백건하(2003), 창원시 대산면 강변충적층의 지하수위 변동 특성, *지질공학회지*, Vol. 13, No. 4, pp. 457~474.
9. 정창희(1996), *지질학 개론*, 박영사, pp. 131~141.
10. 함세영, 정재열, 김형수, 한정상, 류수희(2004), 창원시 북면 낙동강 주변 하성퇴적층의 지하수 유동 모델링, *자원환경지질*, Vol. 37, No. 5, pp. 499~508.
11. 함세영, 정재열, 김형수, 한정상, 차용훈(2005), 창원시 대산면 강변여과수 취수부지 주변의 지하수 유동 모델링, *자원환경지질*, Vol. 38, No. 1, pp. 67~78.
12. Winter, T. C., Mallory, S. E., Allen, T. R. and Rosenberry, D. O.(2000), The Use of Principal Component Analysis for Interpreting Ground-water Hydrographs, *Ground Water*, Vol. 38, pp. 234~246.

(접수일: 2010. 11. 10 심사일: 2010. 12. 6 심사완료일: 2011. 1. 14)