

시계열 분석을 이용한 하천수위에 따른 다심도 관정의 지하수위 변동해석

하규철¹ · 고경석¹ · 고동찬¹ · 염병우¹ · 이강근^{2*}

¹한국지질자원연구원, ²서울대학교 지구환경과학부

Time Series Analysis of the Responses of the Groundwater Levels at Multi-depth Wells According to the River Stage Fluctuations

Kyoochul Ha¹, Kyung-Seok Ko¹, Dong-Chan Koh¹, Byoung-Woo Yum¹ and Kang-Kun Lee^{2*}

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM)

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Aquifer responses to the river stage fluctuations were analyzed between the groundwater level and the river stage in an alluvial aquifer. The auto-correlation and cross-correlation as a time series analysis were applied. Study site is a floodplain in the Mangyeong river. Groundwater levels in each depth representing the silt and sand(SS), gravel and sand(GS), and weathered zone(WZ) layer were monitored. The groundwater levels were more sensitive to the river stage fluctuations than rainfall. Since the river stages are influenced by the gate operations downstream and tide, show periodic patterns, and the correlation coefficients with rainfall is low. Cross-correlation function between groundwater level in each depth do not show any delay time, then response time is very short to each depth. Cross-correlation analysis were performed to estimate the response time of groundwater levels to river stage fluctuations. Groundwater levels respond to the river stage within 30 minutes to 1 hour in wells near the stream. Short time lag between groundwater level and river stage indicates the quick response. A different response time imply the hydraulic inhomogeneity of the site, and a probable high permeability zone between river and aquifer can be inferred. Mangyeong-river in study site is a gaining stream normally, and river stage rising by gate operation or floods makes river water flow into groundwater. The auto-correlation and cross-correlation functions as a time series analysis can be a good tool to interpret the aquifer responses to stream stage fluctuation

Key words : Time series analysis, Groundwater level fluctuation, Multi-depth well, Aquifer response

지하수위와 하천수위와의 상호반응과 수리적으로 다른 특성을 가지는 각 층별(실트질 모래층, 자갈모래층, 풍화대층) 반응관계를 알아보기 위하여 시계열 분석에서 많이 사용되어 온 방법인 자기상관분석과 교차상관분석방법을 이용하였다. 만경강 하천부지에 각 층을 대표하는 깊이에서 지하수위를 관측한 결과, 지하수위가 강수량보다는 하천수위변동에 민감하게 반응하고 있었다. 연구지역의 하천수위변동은 만경강 계수문의 조절과 조석의 영향을 받아 주기적인 수위변동이 우세하기 때문에 강수량과의 상관성은 낮다. 다심도 관정에서 각층별 하천수위에 대한 지하수위 반응은 시간지연 없이 서로 같이 변동하는 것으로 나타났으며, 반응시간은 하천과 가까운 관정에서 30-60분 이내로 빠르며 하천에서 거리가 멀어지면서 반응시간은 대체로 늦게 나타났다. 그러나 하천과 멀리 떨어져 있는 관정이더라도 하천수위에 대하여 빠른 반응을 보이는 관정이 있으며, 이는 하천과 대수층과의 높은 수리적 연결성을 나타낸다. 지하수위의 하천에 대한 반응양상이 다르게 나타나는 것은 대수층의 수리적 불균질성에 의한 것으로 사료된다. 연구지역의 하천은 대체로 지하수위가 하천수위보다 높게 관측되고 있기 때문에 지하수가 하천으로 유출되는 이득하천의 성격을 가지고 있다고 판단되나, 하천의 급격한 수위상승에 따라 역으로 하천의 물이 지하수로 공급되는 손실하천의 성격도 보여주었다. 하천수위와 대수층이 연결된 시스템에서 시계열분석으로서의 자기 및 교차상관분석은 수리적 상호관계를 파악하기 위한 유용한 도구로 활용될 수 있다.

주요어 : 시계열분석, 지하수위변동, 다심도 관정, 대수층 반응

*Corresponding author: kkleee@snu.ac.kr

1. 서 언

Winter(1999)에 의하면 지표수와 지하수는 대부분 연결되어 있어, 지표수는 지하수와 따로 분리하여 생각할 수 없다고 하였다. 심지어는 지표수가 불포화대에 의하여 분리되어 있다고 하더라도, 지표수가 침투 또는 침투되어 지하수로 함양될 수 있기 때문에 지표수와 지하수를 별개의 수자원으로 다루어서는 안 된다. 따라서, 지표수와 지하수간의 상호작용에 의하여 어느 한쪽이 오염되거나, 개발이 되었을 경우 다른 한쪽에 영향을 줄 수 있으므로, 지하수와 지표수간의 상호작용에 대한 연구는 수자원의 관리측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

지표수 중에서 대표적인 것이 하천이며, 하천과 지하수의 상호작용은 기본적으로 3가지 형태로 나타난다. 하천이 지하수로부터 물을 공급받는 경우(이득하천)와 반대로 하천수가 지하수로 침투해 들어가는 경우(손실하천), 그리고 대수층과 하천이 불포화대로 단절되어 있지만 하천수가 지속적으로 아래의 대수층으로 물을 함양시키는 경우가 그것이다. 같은 하천이라도 지역, 지질 및 지층 특성 등 제반 여건에 따라서, 또한 시기적으로도 홍수기와 갈수기에 따라 이득과 손실이 번갈아 나타난다(Fetter, 1988).

제방저류효과(bank storage effect)가 이루어지는 지역에서는 하천과 지하수의 상호작용이 활발할 것으로 예상된다(Fetter, 1988; Werner *et al.*, 2006; Chen *et al.*; 2006; Lin and Medina, 2003). 이러한 지역에서의 수위의 변동양상은 하천과 지하수위가 서로 역전되는 현상이 빈번하게 이루어질 것이며, 대수층의 불균질적인 특성 때문에 각 층마다 수위의 변동양상도 달라질 것으로 예측된다.

따라서 이번 연구에서는 지표수인 하천과 지하수가 연결된 시스템에서의 하천수위와 지하수위를 동시에 관측하고 이들의 변동양상을 파악하여 수위에 있어서의 하천과 지하수의 수리적인 연결성을 파악하고자 하였다. 특히, 수리적으로 다른 특성을 가지는 지층별로 수위를 관측할 수 있도록 다심도 관정을 설치하여 깊이별로 지하수위의 변동양상을 관측하여 상대적인 지하수의 흐름을 비교 분석하고자 하였다.

하천수위와 다심도 관정에서의 지하수위의 반응양상을 관측하고 분석하는 것은 하천과 대수층의 수리적인 연결성을 확인하고, 이들 간의 상호작용을 이해하는데 도움이 될 것으로 생각된다. 특히, 지표수와 지하수를 연계이용하기 위한 강변여과 방식이나 지하수 저류(지

하수 댐)방식과 같은 방법들이 많이 추진되고 있기 때문에, 이러한 연구는 지표수-지하수시스템의 기초적인 수위자료와 지하수와 하천의 상호작용의 과정을 파악하는데 도움을 줄 것으로 기대한다.

2. 연구지역 및 대수층 특성

연구지역은 전주시 덕진구 도덕동에 위치하는 만경강 고수부지지역으로, 북쪽으로부터 익산천이 합류하며, 벼농사, 밭농사 등 농경활동이 빈번하게 이루어지는 곳이다(Fig. 1(a)). 만경강은 전라북도 완주군 동상면 원동산에서 발원하여 고산천, 소양천, 전주천 등의 지류와 합류하여 서해로 유입되는 하천으로서 유역면적 1528.1 km², 유로연장 77.4 km인 동진강과 함께 우리나라 최대의 농경지대인 호남평야의 수원지 역할을 하고 있는 강이다. 하상 퇴적물은 주로 실트, 점토 및 모래로 구성되어 있으며, 대부분의 제외측 고수부지는 농경지로 이용되고 있다(건설교통부, 2000). 연구지역의 약 5.8 km 상류에서는 전주천이 합류하고, 7.1 km 하류에는 염수침입방지와 관개를 위한 만경강 제수문이 설치되어 있다.

연구지역의 지하수와 하천의 상호작용을 파악하기 위하여, 하천과 수직적, 수평적으로 배열하여 지하수 관정을 설치하였다. 다심도 관정은 일단 굴착구경 65 mm으로 암반층 상부 풍화대까지 굴착한 후, 지층 특성을 고려한 깊이별로 직경 25 mm와 6 mm의 폴리에틸렌(PE)관을 다발로 묶어서 굴착공에 안치하는 형식으로 만들었으며 스크린은 각 PE관의 끝부분 약 5cm에 설치되었다. 다심도 관정은 B1, B2, B3, B4, B5, B6의 6개 공이 설치되었으며, 자동지하수위 측정은 이중 직경 25 mm 크기의 관정에서만 이루어졌다. 관정 C는 다심도 관정을 개발하기에 앞서 연구지역의 대략적인 지층 분포와 기반암 특징을 알아보기 위하여 층적층을 지나서 약 15m 정도를 더 굴진 하였다. 관정 C는 전체 정호 구간에서 스크린을 내었기 때문에 층적층과 일부 암반 지하수의 특징을 포함할 것으로 생각되었다. E1공은 다른 다심도 관정의 수위와 비교할 목적으로 간이 시추기를 6.5m의 얇은 깊이에 설치되었다.

대수층의 지층 상태와 분포 특징은 굴착시 슬라임과 표준관입시험(SPT)에 의하여 회수된 코아에 의해 조사되었다. 연구지역의 표면토양은 대부분이 실트질 모래로 구성되어 있으며, 실트질 또는 점토질 층들이 협재되어 있다. 이는 유수에 의해 퇴적된 층적층으로 해석되며, 점토질이나 실트질 층들은 홍수에 의하여 또는

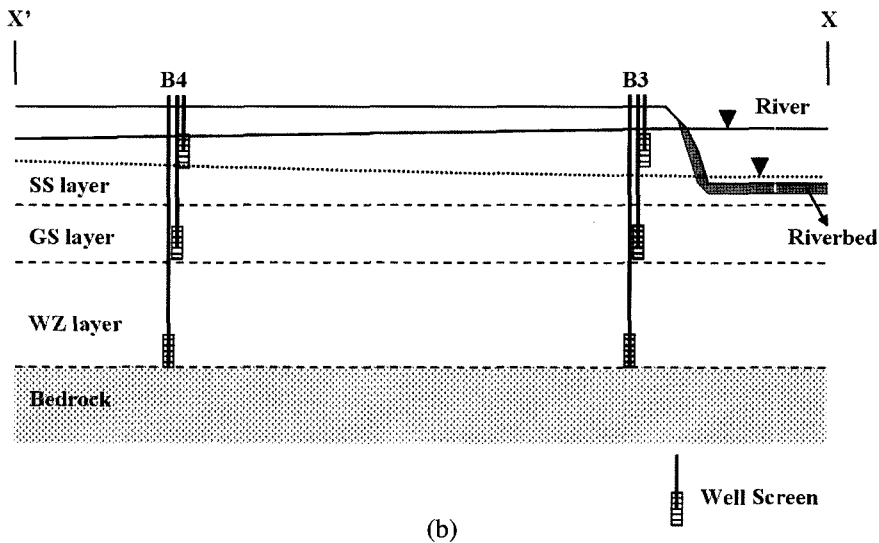
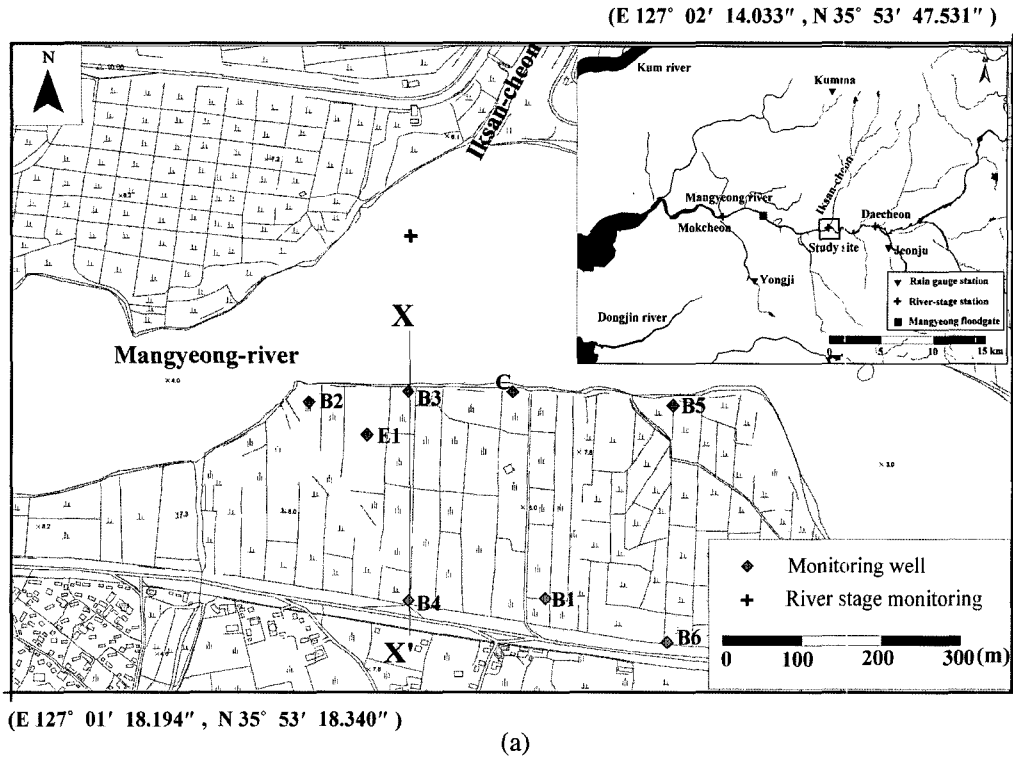


Fig. 1. Study site, (a) site location and monitoring wells, and (b) schematic diagram of cross-section XX'.

농경을 위한 지층의 다짐과 교란 등의 분급작용 때문에 나타나는 것으로 생각된다. 시추자료에 의한 층적층의 깊이별 분포를 보면 지표로부터 실트질 모래층, 자갈모래층, 풍화대층으로 구분된다. 실트질 모래층 (silty sand layer, SS layer)은 점토 및 실트질 토양이

모래층에 부분적으로 협재되어 있는 층으로 5.3-9.3 m 두께를 가지고 있다. 실트질 모래층 하부는 4.0-6.7 m 두께의 자갈과 모래로 이루어진 자갈 모래층 (gravel and sand layer, GS layer)과 6.2-16.0 m의 두께에 걸쳐서 분포하는 풍화대층(weathered zone layer, WZ

Table 1. Monitoring wells.

Well	Longitude	Latitude	Elevation (EL. m)	Well depth (m)	Hydrogeologic Layer
B1	127°01'47.2"	35°53'23.4"	7.24	4.0	SS
				9.0	GS
				27.0	WZ
B2	127°01'33.7"	35°53'31.4"	6.12	3.9	SS
				8.9	GS
				21.9	WZ
B3	127°01'40.0"	35°53'31.9"	7.27	4.0	SS
				11.0	GS
				18.5	WZ
B4	127°01'40.3"	35°53'22.1"	8.33	9.0	SS
				14.0	GS
				23.8	WZ
B5	127°01'54.3"	35°53'31.3"	7.70	6.0	SS
				10.0	GS
				30.0	WZ
B6	127°01'54.7"	35°53'20.5"	7.59	5.5	SS
				11.0	GS
				27.0	WZ
C	127°01'46.4"	35°53'32.0"	8.01	36.0	
E1	127°01'38.0"	35°53'30.0"	7.17	6.5	SS

SS : Silt and Sand, GS : Gravel and sand, WZ : Weathered zone

layer)으로 구성되어 있다. Fig. 1(b)는 연구지역 지층의 수직적 분포와 설치된 다심도 관정의 모식도를, Table 1은 개발된 관정들의 제원과 좌표 및 측량작업에 의하여 얻어진 관정의 표고를 나타내었다. Table 1에서 B1에서 B6까지의 다심도관정은 25 mm 구경의 지하수 수위관측정들만 표시하였다.

연구지역 대수층의 수리지질학적 특성을 살펴보면 다음과 같다. B1, B4, B6공의 양수시험을 통하여 평가된 각 층의 수리전도도는 자갈모래층 (GS layer)는 약 4.8-21.4 m/day로 가장 높고, 풍화대층 (WZ layer)은 자갈모래층보다 낮은 2.9-6.6 m/day 이었다. 실트모래층 (SS layer)의 수리전도도는 매우 낮은 0.03 m/day부터 부분적으로 4.8 m/day의 높은 값을 갖는 경우도 있는 것으로 조사되었다. 따라서 연구지역의 경우 자갈모래층이나 풍화대층이 주 대수층인 것으로 판단되며, 실트모래층은 하부의 자갈모래층과 풍화대층으로 구성된 대수층에 대한 피압층(confining layer)의 역할을 하는 것으로 평가되었다.

3. 연구방법

3.1. 하천 및 지하 수위 관측

하천과 지하수위 관측을 위해 만경강 1개 지점과 다

중심도 관측정을 포함한 지하수 관측정 총 14개 지점에 대하여 자동수위 관측 장비를 이용하여 2004년 8월 19일부터 10월 13일까지 10분 간격으로 수위를 관측한 자료를 분석에 사용하였다. 자동 수위 측정을 위해 사용된 기기는 Van Essen Instruments사의 수위 변동 폭 5 m 내지 10 m용 Diver이다. 연구지역의 하천 수위는 수위 높이에 상관없이 안정된 관측이 용이하며 하천 수위를 가장 잘 대표할 수 있는 위치에 자동수위 관측장비를 설치하여 수위를 관측하였다(Fig. 1(a)). 연구기간 동안 연구지역 하천수위의 평균은 해발 3.11 m이고, 최대 5.30 m, 최소 1.82 m로 3.48 m의 변동폭을 가지고 있었다.

연구지역의 하천 수위에 대한 변동원인을 파악하기 위하여 인근의 만경강 수위 관측 자료를 조사하였으며, 조사된 수위관측소는 상류의 대천관측소와 하류의 목천 관측소이다(Fig. 1(a)). 대천관측소는 연구지역으로부터 약 5.6 km 상류에, 목천 관측소는 약 11.2 km 하류에 각각 위치하고 있으며 두 관측소의 수위자료는 영산강 홍수 통제소에서 30분 간격으로 자동으로 기록하여 제공된 자료를 이용하였다(<http://www.hrfco.go.kr>). 목천관측소는 서해안으로부터 강채널을 따라서 약 12 km정도 떨어진 곳으로 조석에 의한 수위변동이 그대로 나타난다.

연구지역 강우량은 건설교통부의 전주, 금마, 용지 관측소의 자료를 산술평균한 값을 사용하였다(Fig. 1(a)). 연구 기간 중 내린 총 강수량은 총 236 mm이었으며, 2004년 9월 16일 8시경에 30분당 최대 13 mm를 기록하였다. 동기간 동안 2002년도와 2003년도에 내린 총 강수량은 각각 147 mm, 380 mm로서 관측 기간 동안 내린 강수량은 많은 양도, 적은 양도 아닌 중간정도의 수치라고 생각된다. 장기간의 자료가 부족해서 평년의 강수량과 비교는 어렵다. 30분당 최대 강수량은 2002년도에 12 mm, 2003년도에 26 mm이다.

3.2. 자기상관 및 교차상관 분석

지하수위와 하천수위와의 상호반응과 각층별 반응관계를 알아보기 위한 방법으로 시계열 분석에서 많이 사용되어온 방법인 자기상관분석과 교차상관분석방법을 이용하였다(Kim *et al.*, 2005; Lee and Lee, 2000; Larocque *et al.*, 1998). Larocque *et al.*(1998)은 카르스트 지역에서 용천수의 유량과 수위자료, 전기전도도와 온도 시계열자료의 자기 및 교차상관분석과 스펙트럼 분석을 통하여 공간적으로 대수층의 불균질성(heterogeneity)과 수리적인 연결성을 분석하였다. Lee and Lee(2000)는 균열암반에서 지하수위자료와 강수량자료를 자기 및 교차상관분석을 적용하여 깊이별 강수에 대한 지하수 함양특성을 분석하였다. 또한 Kim *et al.*(2005)은 해안대수층에서의 지하수위, 전기전도도를 해양조석 자료와 교차상관분석을 이용하여 비교함으로써 대수층에서 지하수의 물리화학적 특성이 조석 효과와 밀접하게 관련되어 변동하는 것을 확인하였다. 정재열 등(2003)은 강변여과수 취수장 부지에서 지하수위 자료를 자기상관분석한 결과 강한 선형성과 기억 효과를 가지는 것을 확인하였다.

이와 같이 자기 및 교차상관분석과 스펙트럼 분석은 시스템의 입출력과 관련된 반응을 분석하는데 효과적이기 때문에, 수리지질학에 있어서 매우 유용한 방법으로 알려져 있다. 이번 연구에 있어서는 이러한 자기 및 교차상관분석을 하천수위변동과 관련한 지하수위변동, 다심도 관정에서의 깊이에 따른 강수에 대한 반응 및 하천수위에 대한 반응을 알아보고자 적용하였다. 이번 연구에서 사용된 분석방법은 자기상관함수와 교차상관함수를 비교하는 것으로 다음의 과정에 의하여 계산된다.

자기상관 분석(autocorrelation analysis)은 시계열 자료의 선형성 (linearity)과 기억효과를 비교할 수 있는 방법이다. 시계열자료가 강한 선형성과 기억효과를 가질수록 긴 지연시간동안 자기상관함수가 0이상의 값을

가지며, 약한 선형성과 기억효과를 가질수록 짧은 지연 시간에 0에 수렴하게 된다(Kim *et al.*, 2005; Lee and Lee, 2000; Larocque *et al.*, 1998). 교차상관분석(cross-correlation analysis)은 입력시계열자료 와 출력시계열자료 사이의 연관성(linkage)을 알아보기 위하여 사용되는 것으로, 입력 자료와 출력자료간의 인과관계(causal relationship)에 대한 정보를 제공하여 준다.

자기상관함수 와 교차상관함수는 다음과 같이 계산이 된다.

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \tag{1}$$

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{X})(x_{i+k} - \bar{X}) \tag{2}$$

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \tag{3}$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{X})(y_{i+k} - \bar{Y}) \tag{4}$$

여기에서 k 는 시간지연(time lag; $k=0 \sim m$), n 은 시계열 길이, \bar{X} 은 x_t 시계열의 평균이다. m 은 절삭점(cutting point)으로 분석기간을 의미하며, 대개의 경우 시계열 길이, n 의 1/4값을 사용한다(Davis, 1986). σ_x 와 σ_y 각각 시계열 x_t 와 y_t 의 표준편차이고, \bar{Y} 는 y_t 시계열의 평균이다. 교차상관함수를 이용하여 시간지연 $k=0$ 과 최대 교차 상관함수 값 사이의 시간지연(time lag)으로 정의되는 지체시간(delay time)을 구할 수 있는데, 지체시간이 짧으면 짧을수록 입력시계열에 대한 출력시계열의 반응시간이 빠르고 시스템내의 스트레스의 전파가 잘 된다는 것을 의미 한다(Larocque *et al.*, 1998).

4. 하천수위와 지하수위변동 특징

4.1. 하천수위변동 특징

Fig. 2는 만경강 수위관측소인 상류의 대천관측소와 하류의 목천관측소에서 관측된 수위와 연구지역에서 자동 수위관측장비에 의해 관측된 하천수위를 강수량과 비교하여 나타낸 것이다. 연구지역의 하천수위 변동양상을 보면 강수량에 대한 반응이 나타나는 부분도 있지만, 그보다는 약 12시간 간격의 주기적으로 상승과 하강을 반복하는 부분이 많은 것을 관찰할 수 있었다. 연구지역 하천수위는 강수의 발생과는 별개로 수위가 급격하게 올라가거나 내려가는 양상이 관찰되며 이러

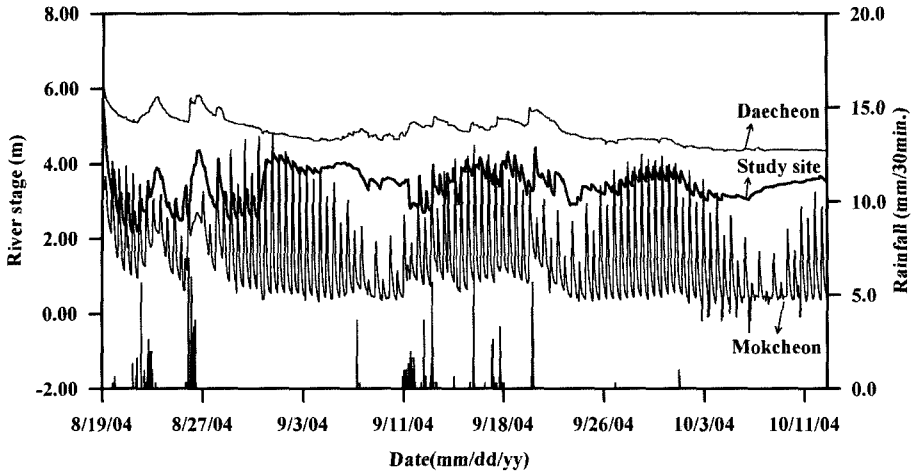


Fig. 2. River stage fluctuations in Mangyeong-river with rainfall.

한 주기성은 연구지역 하류부에 위치하는 목천관측소 수위자료와 약 2시간정도의 시간 지연을 가지고 일치되는 경향을 보여준다. 목천관측소 수위는 약 12시간, 24시간, 15일 주기의 성분이 우세하게 나타나며 이는 조석에 의한 영향으로 해석된다. 해수의 조석에 의한 수위변동 양상이 만경강 채널을 따라서 목천까지 전해지고 있는 것이다. 목천 관측소와 연구지역 사이에는 만경강 제수문이 있어 해수의 침투를 방지하기 때문에 연구지역 하천수위 변동의 12시간 주기 성분은 조석과 직접적인 관련은 없는 것으로 사료된다.

연구지역으로부터 7.1 km 하류에 위치해 있는 만경강 제수문은 홍수 조절과 관개용수의 지속적인 공급을 원활히 하는 역할을 담당하고 있다. 관개용수의 확보와 해수의 침입을 막기 위하여 제수문을 닫는 경우, 제수문 위쪽에 위치하고 있는 연구지역의 하천수위는 상승하게 된다. 제수문의 조작은 고조(high tide) 때 해수의 침입을 막기 위해 수문을 닫고, 저조(low tide) 때는 수문을 열어놓기 때문에, 조석과 비슷하게 연구지역의 수위도 이러한 조석주기와 잘 들어맞는 것이다. 집중호우가 예상될 때는 제수문을 열어 미리 강물을 빼놓는 경우도 있으므로, 연구지역의 하천수위는 강수보다는 제수문의 조작에 의한 영향이 더 크게 나타난다.

연구지역 상류부에 위치한 대천관측소에서는 목천관측소와는 달리 이러한 제수문이나 조석에 의한 주기성은 거의 나타나지 않는다(Fig. 2). 대천 관측소의 하천수위는 강수와 얼마 정도의 상관성을 가지고 변동하고 있는 모습을 보여주며, 제수문 조작에 의한 영향은 이곳까지는 전달되지 않음을 알 수 있었다.

관측기간 동안 하천수위와 강수량의 단순상관계수를 계산한 결과, 목천과 연구지역의 하천수위는 강수량과 각각 0.08, -0.02의 상관계수를 가지며 대천관측소 수위와는 0.17의 상관계수를 갖는다. 목천과 연구지역의 하천수위가 강수와 상관계수가 작게 나타나는 것은 주기적인 조석이나 만경강 제수문의 조작에 의한 영향이 잘 반영되고 있기 때문이다. 대천관측소에서는 이러한 조석이나 제수문의 조작에 의한 영향이 적어서, 상대적으로 강수와 상관성이 높게 나타난다.

4.2. 지하수위 변동 특징

Table 2는 연구지역에서 지하수위가 관측된 관측정들에 대한 수위 변동 특성에 대한 기초통계자료를 나타낸 것이다. 관정 이름이 B로 시작하는 것은 다심도 관정을 지칭하며, 괄호로 넣은 숫자는 스크린이 설치된 깊이를 나타낸 것이다. 지하수위 관측정들을 하천과 가까운, 즉 하천 수위의 영향을 많이 받을 것으로 예상되는 곳에 위치하는 관정을 Group I으로, 비교적 멀리 떨어진, 하천수위 영향이 적을 것으로 예측되는 곳에 있는 관정을 Group II라고 구분하였다(Table 2). Group I에 속하는 관정의 수위관측은 B3공의 깊이 4 m, 11 m, 18.5 m에서 이루어졌으며, B5공에서는 센서사정상 30 m 깊이에서만 수위관측이 이루어졌다. C공은 SS층, GS층, WZ층 및 일부 암반층을 포함하는 관정이고, E1공은 SS층만을 관통하는 관정인데, 이들도 수위관측이 이루어져 같이 표시하였다. Group II에 속하는 관정으로는 14 m, 23.8 m 깊이의 B4공, 5.5 m, 11 m, 27 m 깊이의 B6공, 4 m, 9 m, 27 m 깊이

Table 2. Basic statistics of groundwater level fluctuation.

(a) Group I							
Statistics	B3(4)	B3(11)	B3(18.5)	C	B5(30)	E1	
Average	3.34	3.28	3.24	3.18	3.24	3.33	
Median	3.22	3.25	3.20	3.16	3.22	3.31	
Mode	3.21	3.03	2.99	2.92	3.32	3.64	
Standard Dev.	0.20	0.27	0.27	0.27	0.31	0.23	
Range	1.04	1.33	1.36	1.27	1.55	0.95	
Minimum	3.19	2.88	2.83	2.74	2.73	2.95	
Maximum	4.23	4.21	4.19	4.01	4.28	3.90	

(b) Group II								
Statistics	B1(4)	B1(9)	B1(27)	B4(14)	B4(23.8)	B6(5.5)	B6(11)	B6(27)
Average	4.47	4.23	4.31	3.87	4.01	5.90	3.74	3.79
Median	4.47	4.28	4.23	3.84	4.01	5.89	3.71	3.76
Mode	4.51	4.27	4.21	4.18	4.10	5.75	3.76	3.97
Standard Dev.	0.33	0.27	0.26	0.23	0.22	0.22	0.31	0.30
Range	1.26	1.27	1.42	0.95	0.98	1.30	2.40	2.29
Minimum	3.84	3.66	3.62	3.49	3.60	5.52	3.27	3.33
Maximum	5.10	4.93	5.04	4.44	4.57	6.83	5.67	5.62

의 B1공이다.

Group I에 속하는 관정들의 지하수위는 해발 2.77 m에서 4.28 m로 분포하고, Group II에 속하는 관정들은 해발 3.27 m에서 5.62m사이에서 변동하고 있다. 하천과 가까운 Group I에 속하는 관정의 지하수위보다 하천에서 멀리 떨어져 있는 Group II에 속하는 관정의 지하수위가 대체로 높게 형성되어 있는 것으로 보아 전체적으로 지하수의 흐름방향은 하천 쪽으로 향하고 있는 것으로 판단된다. 지하수위의 변동은 Group I이나 Group II 모두 약 30cm 내외의 표준편차를 가지고 있고, 44cm의 표준편차를 가지고 변동하고 있는 하천의 수위변동과 비교된다.

Fig. 3은 각 그룹별 관정에서의 대표적인 수위변동을 하천수위변동과 함께 나타낸 것이다. 대표적으로 Group I에서는 GS층의 B3(11), C공, E1공의 지하수위 변동을 나타내었고, Group II에서는 같은 GS층에 속하는 B1(9), B4(14), B6(11)의 지하수위 변동을 그래프에 표시하였다. Group I에 속하는 지하수 수위는 하천의 수위변동과 매우 비슷한 분포를 보여주고 있다. 하천의 주기성이 나타나는 부분이나 감쇠하는 구간들이 지하수위에도 그대로 반영되어 있는 것을 알 수 있다. Group I의 지하수위는 대체로 하천수위보다 낮게 나타나고 있지만, 때로는 하천수위보다 높게 나타나는 경우도 관찰할 수 있다. 수위의 상대적인 고저로 판단해 보건데, 대체적으로 하천에서 지하수로의 유입이 발생하

다가, 반대로 지하수에서 하천으로 유출이 발생하기도 한다는 것을 알 수 있다. 흐름방향의 역전이 빈번하게 이루어지기 때문에, 하천과 지하수와의 상호작용이 활발할 것으로 생각된다. Group I에서 지하수위의 공간적 분포는 C공의 지하수위가 대부분의 관측 기간 중 B3공과 B5공보다 낮은 지하수위를 보이고 있고, B3공과 B5공은 서로 높고 낮음이 반복적으로 엇갈려 나타나고 있다.

Group II에 속하는 지하수 수위는 Group I과는 달리 대체적으로 하천수위보다 높게 형성되어 있어 지하수 흐름방향이 하천 쪽으로 향하고 있을 것으로 보인다. B6공을 제외하고 B1, B4공에서는 하천의 단기간의 주기성이 나타나지 않고 있는데, 하천과의 거리가 멀기 때문에 하천의 변동양상이 전해지지 않기 때문으로 생각된다. 그러나 B6공에서는 B1, B4공과는 달리 Group I의 지하수위와 같이 하천수위와 매우 유사하게 변동하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 사실은 B6공과 하천의 수리적인 연결성이 매우 좋다는 것을 시사하는 것이다. B1, B4, B6공 모두 주변 양수에 의한 영향이 나타나는 부분도 나타나며, 장기적인 경향은 하천수위 변동을 따라가고 있는 것으로 보인다.

다심도 관정에서 깊이별 지하수위 변동을 살펴보면, B6공을 제외하고, 대부분 깊이에 따른 수위 차는 수 cm 정도로 작다. 그러나 이러한 수위차가 장기적으로 지속되고 있는 것으로 보아, 지층 상하부의 지하수의

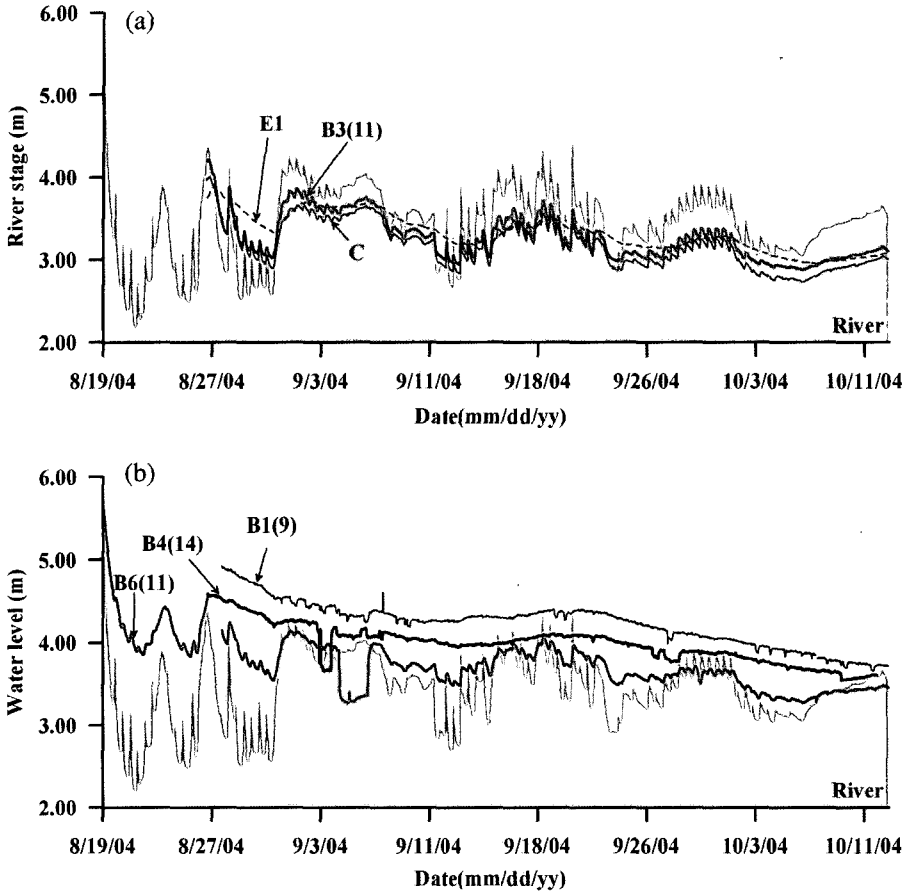


Fig. 3. Fluctuation of the river stage and ground water level of (a) Group I, and (b) Group II.

흐름 방향 역시 일정하게 유지되고 있는 것으로 보인다. Fig. 4는 B3공과 B6공에서 깊이별로 지하수위의 상대적인 위치가 지속적으로 유지되는 것을 보여주는 것이다. B3(4)공에서 지하수위가 수평적으로 나타나는 부분은 센서 아래로 수위가 내려가 자료의 누락이 발생한 부분이다.

B1공에서의 깊이별 수위분포를 보면 상부 층인 실트모래층(SS)의 B1(4)관정의 수위가 가장 높고, 그 아래로 B1(9), B1(27)순서로 지하수위가 높다(Table 2). 상부로부터 하부로 지하수위 포텐셜이 낮아진다고 할 수 있고, 이는 지하수의 흐름이 상부에서 하부 쪽으로 향하고 있다는 것을 시사하고 있다.

B3공에서는 B3(11)의 지하수위가 가장 높고, B3(4), B3(18.5)순서로 지하수위가 높게 나타나는 것을 관찰할 수 있으므로 중간층인 자갈모래층(GS)에서 상부 실트모래층(SS)과 하부 풍화대층(WZ)으로 지하수 흐름방향이 형성되어 있는 것으로 추측된다. B4공의 경우는

상부층인 자갈모래층(GS)의 B4(14)수위와 풍화대층(WZ)의 B4(23.8)수위가 서로 높고 낮은 상태가 번갈아 나타나고 있다.

B6공에서 실트모래층(SS)에 속하는 B6(5.5)의 수위는 B6(11)이나 B6(27)과는 약 2 m 정도의 높은 지하수위를 지속적으로 가지고 변동하고 있는 특이한 형태를 보이고 있다. B6(5.5)관정에서 관측되는 지하수위는 투수성이 약한 실트질 점토층이 아래의 자갈모래층(GS)과 풍화대층(WZ)을 피압하고 있어, 수리적으로 상부층과 단절되어 있기 때문으로 생각된다. 즉, 부유대수층(perched aquifer)의 성격을 갖는 것으로 추측된다. B6(11)과 B6(27)을 비교하여 보면, B6(27)의 지하수위가 B6(11)보다 항상 위에서 변동하고 있어 아래에서 위로 지하수의 유동방향을 형성하고 있는 것으로 보여진다.

2004년 10월에 연구지역에 있는 기존 공들과 금번에 설치된 공들로부터 측정된 지하수위로부터 작성된

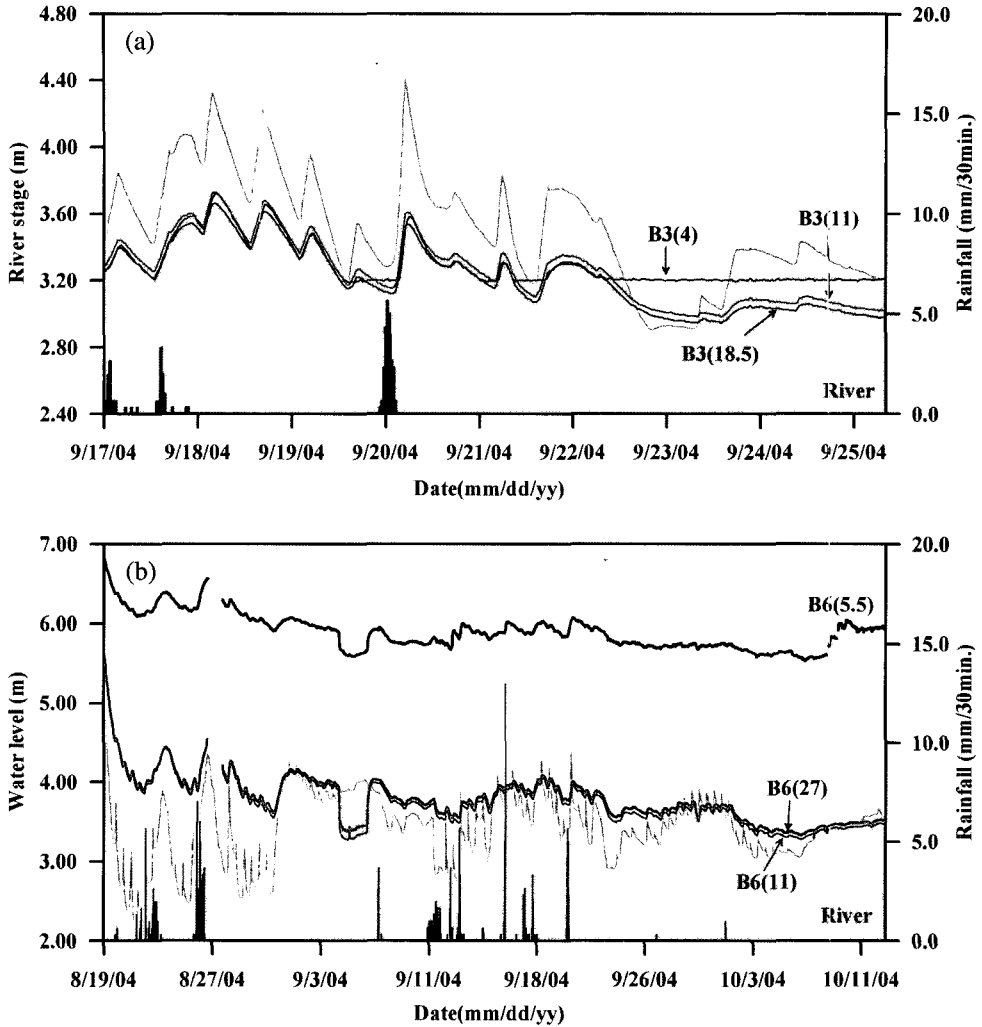


Fig. 4. Groundwater level fluctuations at multi-depth wells of (a) B3, and (b) B6.

연구지역의 공간적 지하수위 분포는 Fig. 5에 나타나 있다. 기존공들의 경우 농업용 관정들로서 대부분 약 7 내지 8m정도의 얇은 깊이에 설치된 관정들이다. B6 (5.5)는 부유대수층(perched aquifer)의 지하수위를 나타낼 뿐, 연구지역의 일반적인 지하수위라고 보기 어렵기 때문에 수위등고선의 작성에는 포함시키지 않았다. 지하수위가 하천으로부터 멀리 떨어진 곳에서 높고 하천 쪽으로 갈수록 낮아지는 것을 알 수 있다. 연구지역의 동쪽 블록에서 지하수위가 낮게 분포하는 것이 B6공의 하천과의 수리적 연결성이 좋은 현상과 관련을 갖고 있는 것으로 보여진다.

공간적인 지하수위 분포를 보면 하천에서 멀리 있는 관정의 지하수위가 대체로 높고, 하천과 가까운 곳에

서는 낮은 것을 볼 때, 대체적으로 지하수의 흐름방향은 하천 쪽으로 향하고 있을 것으로 추측된다. 즉, 연구지역의 하천은 이득하천(gaining stream)이라고 생각할 수 있다. 그러나, 시계열 자료를 보면, 하천의 수위변동폭이 커서 주변의 대수층의 지하수위보다 높은 구간들이 많이 나타나는 것으로 볼 때, 연구지역의 하천은 손실하천(losing stream)과 이득하천(gaining stream)의 성격을 모두 가지고 있으며, 하천과 인접한 지층은 하천의 급격한 수위상승에 의한 계방저류효과를 간직하고 있다고 할 수 있다. 손실하천과 이득하천의 성격이 혼재하기 때문에, 다심도 관정의 지하수위분포가 상부층에서 하부층으로, 또는 하부층에서 상부층으로 흐름의 역전이 발생하고 있는 것으로 생각된다.

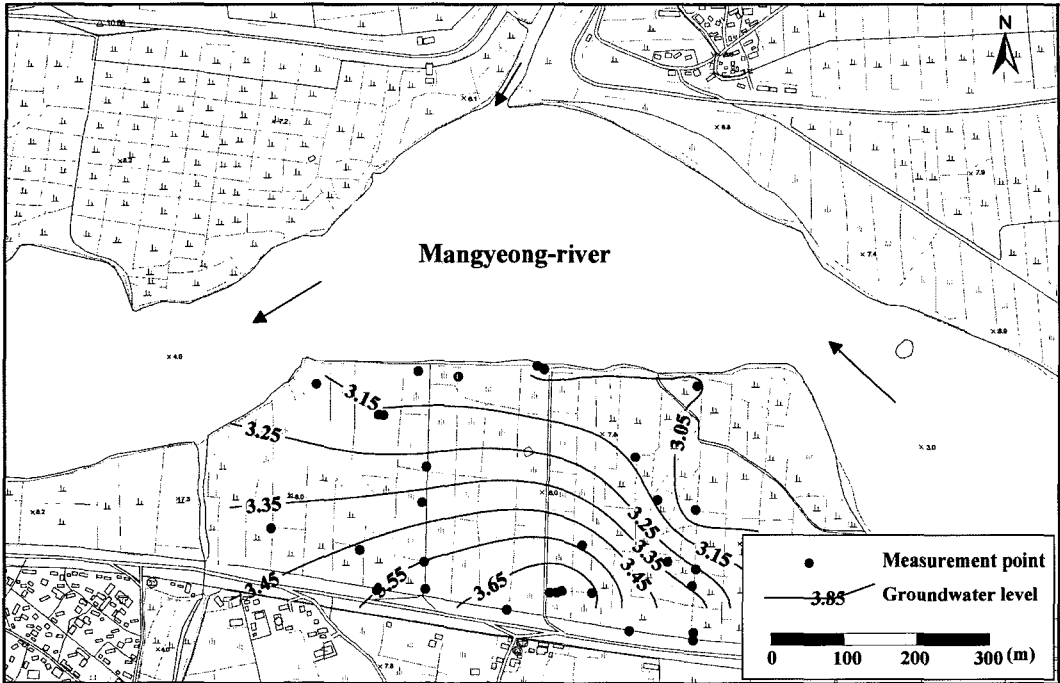


Fig. 5. Distribution of groundwater level in October, 2004.

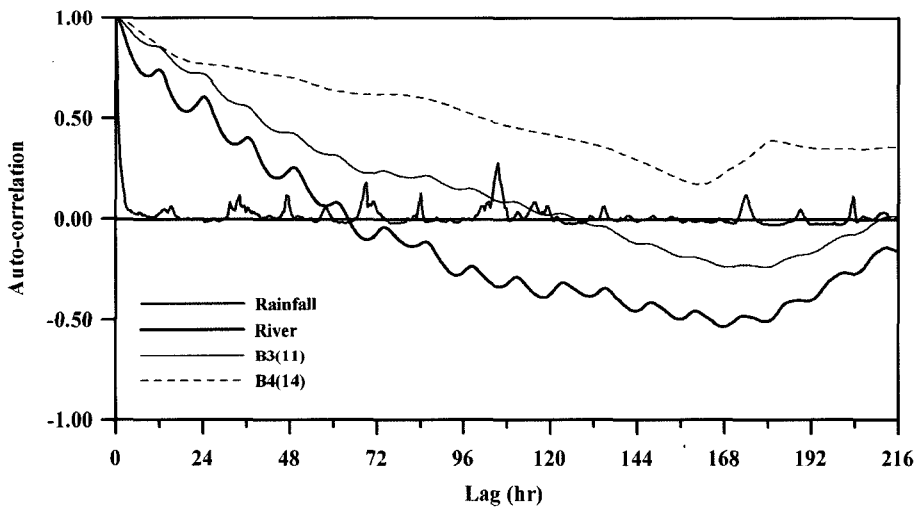


Fig. 6. Auto-correlation function of selected groundwater levels, river stages, and rainfall.

5. 상관분석결과 및 논의

5.1. 자기 및 교차상관 분석 결과

연구지역의 지하수위와 만경강 하천수위의 관측 자료간의 수리적인 연관성을 파악하기 위하여 시계열 분석 방법중 자기상관분석과 교차상관분석을 하였다. 분석을 위해 결측 자료가 없는 구간인 2004년 8월 27일

부터 10월 4일까지 30분 간격의 1800개 자료를 추출 하였다. 이 연구에서는 강수량과 하천수위변동을 주요한 지하수위변동요인으로 보고 이들과 관련한 상관분석을 실시하였다.

Fig. 6은 연구지역의 하천수위와 Group I의 B3(11), Group II의 B4(14)의 지하수위, 강수량의 자기상관함수를 보여주는 것이다. 강수량은 10시간 이내로 빠르게 0

에 접근하고 있지만, 하천수위자료는 64시간, B3(11) 지하수위는 128시간이 지난 후에 0에 수렴하면서 약 12시간의 주기성을 가지는 것을 보여주고 있다. B4(14)는 B3(11)보다도 긴 시간이 지난 후에도 0에 수렴하지 않고 있으면서, 하천수위와 같은 주기성은 나타나고 있지 않다.

강수량은 빠르게 0에 접근하고 있기 때문에, 자료간에 상호관련성(inter-correlation)이 적다고 할 수 있다. 연구지역의 하천수위는 약 12시간 간격의 주기성이 잘 나타나고 있는 것은 조석 때와 시간적으로 맞추

어 조작되는 만경강 제수문의 개폐에 의한 것으로 볼 수 있다. 하천수위와 B3(11)의 지하수위가 일정한 주기성을 갖고, 밀접하게 관련되어 변동하고 있는 것이 자기상관함수를 통하여 확인 되었다. Group I에서 속하는 관정들에서는 모두 B3(11)과 유사한 자기 상관함수 형태를 가지고 있다.

B4(14)의 지하수위와 같은 Group II에 속하는 지하수위의 자기상관함수는 하천수위와 같은 주기성은 보이지 않고 긴 시간동안에도 0에 수렴하고 있지 않은, 강한 선형성과 기억효과를 가지고 있는 것으로 생각된

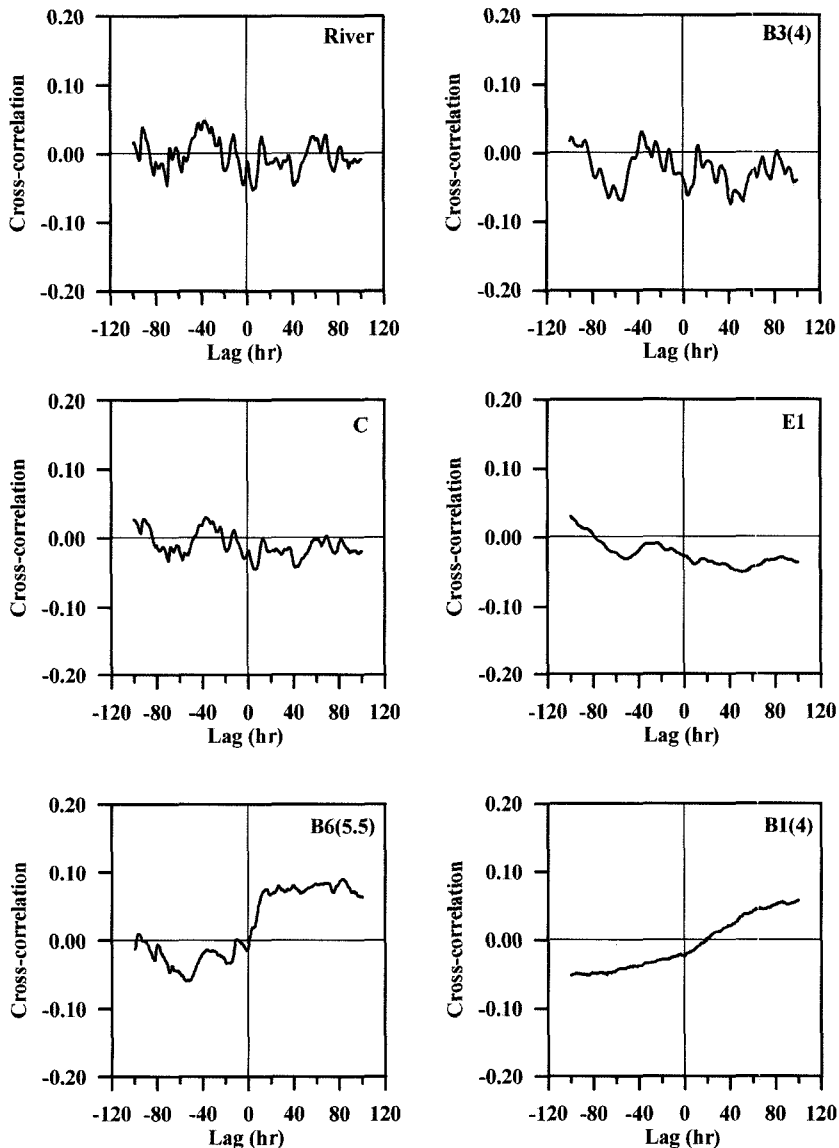


Fig. 7. Cross-correlation function of groundwater levels, river stages as output, and rainfall as input.

Table 3. Result of Cross-correlation analysis

(a) Layer to layer				
Input	Output	Delay time	Cross-correlation coefficient	Comment
B3(11)	B3(4)	0 hr.	0.94	GS to SS
	B3(18.5)	0 hr.	0.99	GS to WZ
B6(5.5)	B6(11)	0 hr.	0.84	SS to GS
B6(27)	B6(11)	0 hr.	0.99	WZ to GS
B1(4)	B1(9)	0 hr.	0.99	SS to GS
B1(9)	B1(27)	0 hr.	0.95	GS to WZ
B4(14)	B4(23.8)	0 hr.	0.99	GS to WZ

(b) River to groundwater				
Input	Output	Delay time	Cross-correlation coefficient	Comment
River	B5(30)	1 hr.	0.87	
	C	1 hr.	0.79	
	B3(11)	30 min.	0.82	
	E1	17 hr.	0.47	
	B6(27)	3 hr.	0.42	
	B6(5.5)	3 hr.	0.05	perched water
	B1(9)	15 hr	-0.05	negatively correlated
	B4(14)	15 hr	-0.11	negatively correlated

다. B6공에서는 다른 Group II의 지하수위 보다는 Group I의 자기상관함수를 따르고 있어 하천수위와 강한 상관성을 예측하게 한다. 하천수위의 자기상관함수가 약 12시간의 주기성을 나타내고 있는 것은 이지역의 하천과 대수층의 수리적인 상호작용을 이해하는 중요한 특징이다.

Fig. 7은 강수량과 연구지역의 하천수위, 지하수위의 교차상관함수를 나타낸 것이다. Fig. 7로부터 상호관련성이 낮은 강수량에 대하여 하천수위와 지하수위에 대한 반응성의 정도를 확인해 볼 수 있다. 하천과 가까운 Group I에 속하는 지하수위는 하천수위에 대하여 시간지연이 0일 때, 교차상관함수는 모두 -0.01에서 -0.04안에 분포하고 있고 일정한 시간지연 후에도 교차상관함수는 0.1미만의 매우 낮은 값을 보여주고 있다. Group II 관정의 경우 일정한 시간지연 후에 B6(5.5)는 약 12시간에서 0.08, B1(4)는 0.07정도의 상관함수 값까지 상승하는 것으로 보아서 Group I 지하수위보다는 강수량에 대하여 상관성이 더 좋다고 할 수 있다.

Fig. 8은 다심도 관정에서의 각층별 깊이에 따른 지하수위변동의 상관성을 보여주는 것이다. 교차상관함수를 구하기 위해 입력값과 출력값을 지하수위가 형성되어 있는 상대적인 고저에 따라서 높은 곳에 있는 지하수위를 입력값으로, 아래쪽에 있는 지하수위를 출력값으로 설정하였다. 교차상관함수는 최대 교차상관함수값

을 나타내는 시간지연 값을 계산해서 시스템의 입력에 대한 출력의 반응성을 나타내기 위한 것으로 깊이에 따른 지하수위간에 지체시간을 비교할 수 있게 된다.

Table 3은 지하수위의 각층별, 그리고 하천수위와의 교차상관분석결과를 나타낸 표이다. B3공은 11m깊이의 B3(11)지하수위가 가장 높게 나타났기 때문에 B3(11)지하수위를 입력 값으로, B3(4)와 B3(18.5)지하수위를 출력 값으로 하였다. B6공은 5.5m 깊이의 B6(5.5)지하수위가 11m 깊이의 B6(11)지하수위로, 27m 깊이의 B6(27)지하수위가 11m 깊이의 B6(11)지하수위로 스트레스가 전파되는 것으로 가정하였다. B1공은 4m 깊이의 B1(4)지하수위가 9m 깊이의 B1(9)지하수위로, B1(9)지하수위가 27m 깊이의 B1(27)지하수위로 스트레스의 전파가 일어나는 것으로 가정하였고, B4공의 경우에는 14m 깊이의 B4(14)지하수위가 23.8m 깊이의 B4(23.8)지하수위로 전해지는 것으로 가정하였다. Fig. 8을 보면 각 깊이별 스트레스의 전파에 따른 시간지연은 관찰되지 않고 있다. 이로부터 분석 시간간격인 최소한 30분 안에는 수위변동이 각 깊이 상호간에 전달되고 있어 동시에 변동하고 있는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 9는 하천수위에 대한 지하수위의 교차상관함수를 나타낸 그래프이다. Group I에 속하는 B5(30), C, B3(11)지하수위는 지체시간이 각각 1시간, 1시간, 30분

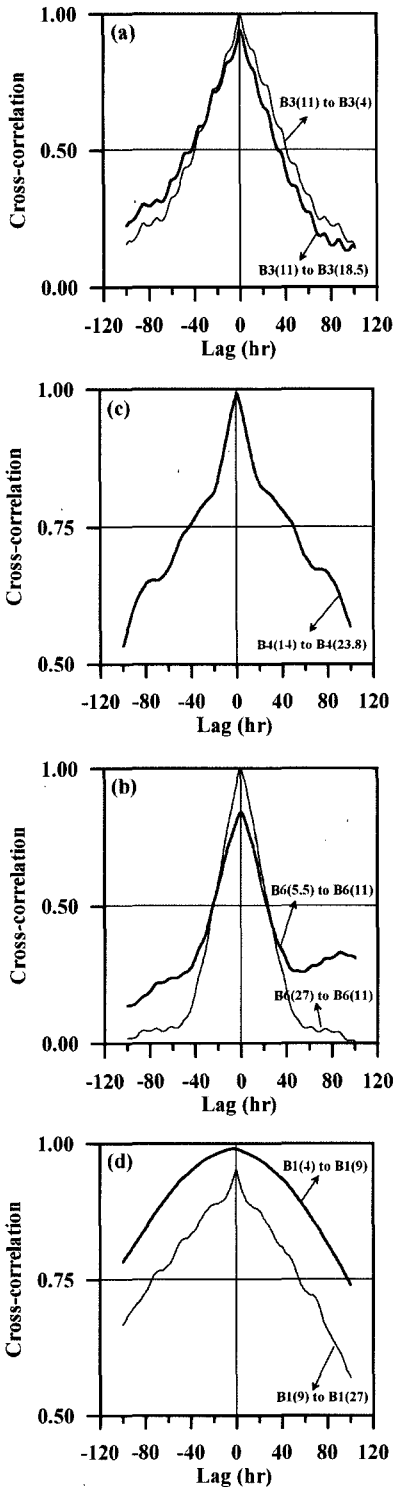


Fig. 8. Cross-correlation function between groundwater levels at multi-depths,

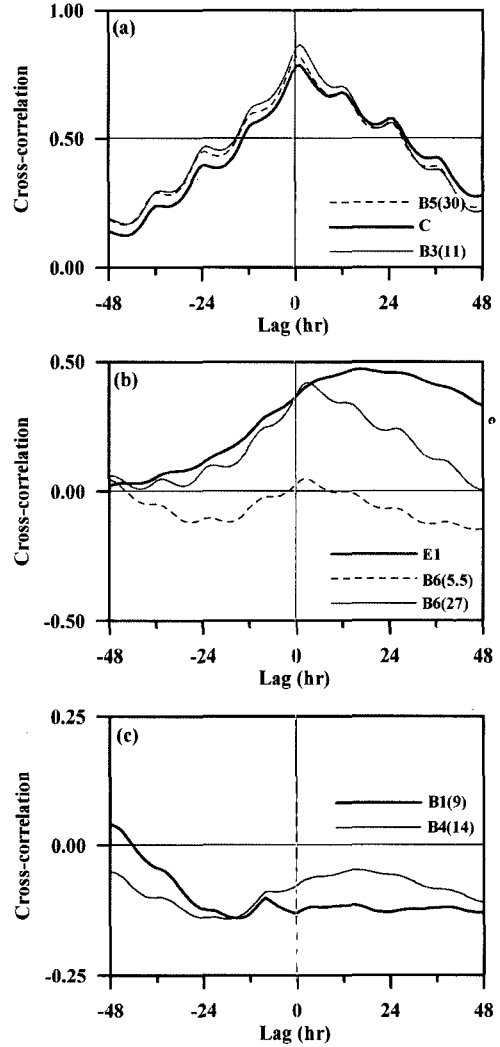


Fig. 9. Cross-correlation function between groundwater levels as output, and river stages as input, (a) wells near the river, (b) B6 and E1 wells, (c) wells distant from the river.

에 0.87, 0.79, 0.82로 높은 교차상관함수를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 9(a)). Group II로 분류했던 공들 중에 하천수위와 매우 유사하게 변동하는 B6공과 Group I으로 분류한 공들 중에 하천과 가장 거리가 먼 E1공의 지하수위와 하천수위의 교차상관함수는 Fig. 9(b)에 나타내었다. B6(27)는 시간지연 3시간에서 0.42, E1는 시간지연 17시간에서 0.47의 교차상관함수를 나타내었다. 약 2m정도 이상 지하수위가 형성되어 있는 B6(5.5)의 지하수위에 대하여도 하천수위에 대한 상관함수를 구해본 결과, B6(27)와 같이 시간지연 3시

간에서 최대교차상관합수를 보여주었고, 그 값은 0.05로 낮은 값을 나타내었다. Group II에 속하는 B1(9), B4(14)공의 지하수위는 하천수위와 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타났고, 그 값은 -0.05, -0.11이다(Fig. 9(c)). 특히, B1(9)와 B4(14)에서 하천수위와 음의 상관관계가 나타나는 것은 양수에 의한 수위강하에 의한 효과가 나타났기 때문으로 생각된다.

이상과 같은 교차상관분석결과, 하천과 가까운 관정의 경우에는 하천수위와 밀접하게 관련되어 변동하고 있으며, 하천과 멀리 있는 관정에서는 그 영향 정도가 낮다고 할 수 있다. 연구지역의 하천수위는 강수량과 무관하게, 하류의 만경강 제수문의 조작이나, 제수문이 열려 있을 경우에는 조석에 의하여 변동하기 때문에 강수량과 그 상관성이 낮다. 지하수위가 강수와 매우 낮은 상관성을 보이는 것은 하천과 가까운 곳의 지하수위가 하천수위와 동조하기 때문으로 생각된다. 하천과 멀리 떨어진 관정에서도 강수량과 낮은 상관성을 보이는 것은 농경활동과 관련한 관개용수의 공급과 지

하수 사용과 같은 인위적 요인이 관여하고 있기 때문으로 생각된다. 장기적인 추세를 볼 때, 이러한 관정에서도 하천수위와 어느 정도 관련을 지을 수도 있기 때문에 하천수위변동도 강수량과 지하수위간의 상관성이 낮게 나타나게 하는 원인이 될 수도 있다.

5.2. 상관분석에 의한 대수층 지층 특성 및 지하수위 변동 해석

관정별 하천수위에 대한 반응은 Group I에서 B3공이 30분으로 가장 빠르고, 멀어지면서 그 반응이 약해지는 것으로 생각된다. 하천으로부터 약 68m 떨어진 E1공에서는 반응 시간이 17시간 정도로 계산이 되었다. Group II에 속하는 지하수위와 하천수위와의 교차상관합수를 보면 B6공의 B6(5.5), B6(27)관정의 지하수위에서 약 3시간 정도의 지체 시간을 보이고 있고, 나머지 공들에서는 상관성이 낮게 나타났다. 하천과 멀리 떨어진 B6공에서 하천과 가까운 E1공보다 더 빨리 하천수위변동에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이

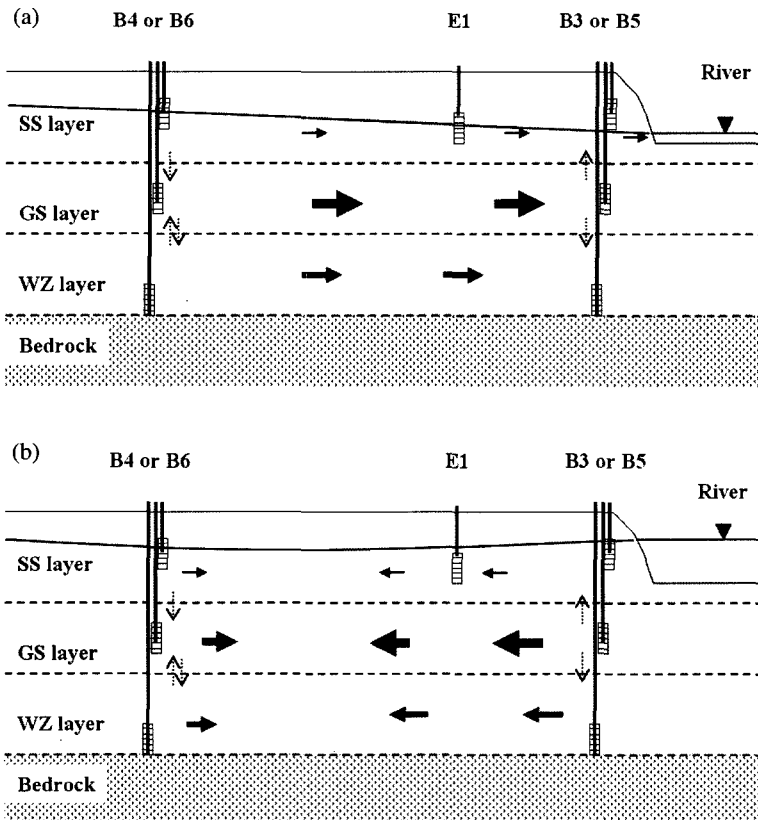


Fig. 10. Schematic diagram of interactions between groundwater and river in study site, (a) during normal times, (b) during flood times. The size of arrows represent the relative amount of flow, and dotted lines are probable hydraulic potential lines.

와 같은 사실은 하천과 B6공 사이에 투수성이 매우 좋은 지층이 분포되어 있을 것이라는 추측을 가능하게 한다. B1공과 B4공에서는 하천수위변동에 대하여 음의 상관성이 나타나는 것은 주변 양수에 의하여 수위 하강이 발생하였기 때문으로 생각된다.

관측 기간 동안의 하천수위는 Group I에 속하는 관정의 지하수위와 그 상대적인 높낮이가 서로 역전되는 양상이 반복되고 있는데, 제방저류효과가 미치는 관정이라고 생각된다. 이 지역은 하천과 지하수의 상호작용이 매우 활발하게 나타나는 곳이라고 판단된다. 반면, Group II에 속하는 관정의 지하수위는 하천수위보다 항상 높게 나타나고 있으므로 지속적으로 하천으로 지하수가 공급되는 것으로 해석할 수 있다.

하천수위와 지하수위의 상대적 고저와 상관분석을 통한 지하수 수위반응양상을 가지고 추측한 연구지역의 층적층지하수와 하천과의 개념모델을 Fig. 10에 나타내었다. 대체로 연구지역의 만경강은 하천수위가 지하수위보다 낮아서 주변 지하수가 하천으로 물이 공급되지만, 집중호우나 조석에 의한 하천수위의 상승이 발생하여 주변 지하수보다 수위가 높아지는 현상이 발생하게 되면 하천에서 주변 지하수로 물이 침투되어 제방저류효과를 나타내는 지역이 나타난다. B6와 같이 하천과 수리적인 연결성이 좋은 구간에서는 하천수위 변동에 대한 지하수위의 반응은 더 빨리 그리고, 더 멀리 전파되어 나갈 것으로 생각된다.

다심도 관정의 심도별 지하수위의 분포상태를 보면, 하천에서 멀리 떨어진 관정인 경우 높낮이가 역전이 되기도 하지만, 보통은 GS층에서 지하수위가 SS층이나 WZ층의 지하수위보다 낮게 나타나고 있다. 하천과 인접한 곳에 있는 관정인 경우에는 GS층의 수위가 주변 SS층이나 WZ층보다 높게 나타나고 있다. 지하수위가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 지하수의 유동이 일어나는 일반적인 사실로 유추하면, 하천에서 멀리 있는 관정의 경우 지하수의 흐름은 GS층으로 수렴하며, 하천과 가까운 관정인 경우에는 오히려 GS층에서 주변 층으로 발산하는 것으로 생각할 수 있다.

하천과 가까운 곳에서의 지하수위 분포는 투수성이 높은 GS층에서 SS층이나 WZ층보다 하천수의 공급이 빨리 진행되어 지층 상하로 전달되어 나타나는 것으로 생각된다. 지층 상하로 전달되는 시간은 거의 동시적이어서 30분의 시간간격으로는 층별 지체시간의 구분이 나타나지 않으며, 하천과 GS층의 수위반응은 30분 이내로 매우 짧은 것으로 생각된다.

하천과 멀리 떨어진 관정에서는 흐름의 방향이 거의

변하지 않고, 주변의 수리경사에 따라 하천으로 지하수가 흘러들어가는 시스템이므로 투수성이 높은 GS층의 지하수가 먼저 빠져 나가며, 다른 층에서 이를 보충하는 시스템이기 때문에 GS층의 수위가 낮게 형성되어 있는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 이러한 수위분포는 항상 그렇게 나타나지는 않고, 상대적인 함양특성에 따라서, 각 층별 상대적인 고저는 역전이 될 수도 있다. 지하수 함양지에서 나타나는 수직적인 흐름이 우세한 곳에서는 아래쪽으로 갈수록 수위가 낮게 형성되어 있는데, B1공에서 이러한 함양지 특성을 보여주고 있다고 할 수 있다.

6. 결론 및 의견

하천과 지하수와의 수리적인 상호작용을 알아보기 위하여 만경강 하천부지에 다심도 관정을 설치하였다. 실트질 모래층, 자갈모래층, 풍화대층을 대표하는 깊이 에 자동 지하수위 관측센서를 설치하고 2004년 8월 19일부터 10월 13일까지 지하수위와 하천수위를 관측한 결과, 연구지역의 하천수위변동은 만경강 제수문의 조절과 조석의 영향을 받아 주기적인 수위변동이 잘 나타나고 있었다. 하천과 인접하여 있는 관정은 하천의 주기적인 수위변동이 그대로 지하수위에서도 반영되고 있고, 하천과의 상대적인 높낮이에 따른 수리경사에 의하여 하천수가 지하수로 공급되기도 하고, 지하수가 하천으로 유출되기도 하는 제방저류효과가 잘 나타난다. 하천과 멀리 떨어진 관정의 지하수위는 몇몇 관정을 제외하고 주기적인 양상은 나타나고 있지 않으며 하천수위와의 상관성도 매우 낮게 나타났다. 이러한 관정들의 지하수위는 하천수위보다 항상 높게 나타나고 있으므로 지속적으로 하천으로 지하수가 공급되는 것으로 해석할 수 있었다.

자기상관분석을 통하여 상호관련성이 낮은 강수량과 강한 선형성을 갖는 하천수위와 지하수위와의 교차상관분석을 통하여 입력 값으로서의 수위변동과 출력 값으로서의 수위변동을 비교하였다. 연구지역의 강수량과 하천수위, 지하수위간에는 상관성이 낮게 나타났으며 이는 하루의 만경강 제수문의 조절 또는 조석에 의한 효과에 의한 수위변동이 우세하기 때문으로 생각된다.

연구지역 지층 특성을 대표하는 깊이별 지하수위의 교차상관분석의 결과 30분의 시간 간격으로는 시간지연을 관측하지 못했으므로, 수위변동의 깊이에 따른 전파는 30분 이하로 빠른 전파속도를 가질 것으로 생각된다. 하천수위에 대한 지하수위의 변동의 교차상관분

석을 통해서 하천과 대수층간의 반응시간을 파악할 수 있었으며, 하천과 가까운 관정에서 30분 또는 1시간 이내로 빠르게 하천수위변동에 지하수위가 반응하며 하천과 멀리 떨어져 있을수록 늦게 반응하는 것으로 나타났다. 그러나 하천과의 거리가 멀리 있음에도 하천수위에 대한 반응시간이 빠른 B6공 같은 경우에는 하천과의 매우 높은 수리적 연결성이 시사하고 있다.

연구지역의 지하수위는 강수량보다는 하천수위변동에 더 민감하게 반응하는 것으로 판단된다. 하천의 수위변동은 주변 대수층으로 전파되는데, 지층이 수리적으로 불균질하기 때문에 지역적으로 빨리 전달되거나 느리게 전달되는 양상을 교차상관분석을 통하여 확인할 수 있었다. 연구지역의 지층은 실트모래층, 자갈모래층, 풍화대층으로 층적대수층을 구분할 수 있는데, 투수성은 지역적으로 차이는 있지만 대체로 자갈모래층이 가장 투수성이 높았다. 따라서 지층의 분포가 연속적이라면 투수성이 좋은 자갈모래층을 따라서 하천수위변동이 먼저 전해질 것이다. 하천과 가까운 관정에서 자갈모래층의 지하수위가 상부층인 실트모래층이나 하부 풍화대층보다 높게 형성되어 있고, 하천과 멀리 있는 관정에서는 그와는 반대의 양상을 갖는 것은 이러한 각 층별 수리전도도의 불균질성과 관련하여 해석할 수 있다.

사 사

이 연구는 공공기술이사회 정책과제인 “지하수환경개선을 위한 미소생물의 생태학적 응용과 오염물질 이동 예측기법 개발연구” 사업의 일환으로 수행되었으며, 다심도 관정의 개발에 많은 도움을 주신 군산대학교의 김강주 교수님과 김현중님께 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부 (2000) 만경강, 동진강수계 유량측정조사 보고서, 524p.
- 정재열, 함세영, 김형수, 손건태, 창용훈, 장성, 백건하 (2003) 창원시 대산면 강변층적층의 지하수위 변동 특성. *지질공학*, v. 13, p. 457-474.
- Chen, X., Chen D.Y. and Chen, X.-H. (2006) Simulation of baseflow accounting for the effect of bank storage and its implication in baseflow separation. *Journal of Hydrology, in press*.
- Fetter, C.W. (1988) *Applied Hydrogeology*. 2nd Edition, Merrill, Columbus, OH, 592p.
- Davis, J.C. (1986) *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, 2nd Ed. 646p.
- Kim, J., Lee, J., Cheong, T., Kim, R. Koh, D. Ryu, J. and Chang, H. (2005) Use of times series analysis for the identification of tidal effect on groundwater in the coastal area of Kimje, Korea. *Journal of Hydrology*, 300, p. 188-198.
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., and Banton, O. (1998) Contribution of correlation and spectral analysis to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, v. 205, p. 217-231.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K. (2000) Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. *Journal of Hydrology*, v. 229, p. 190-201.
- Lin, Y.-C. and Medina, Jr. M.A. (2003) Incorporating transient storage in conjunctive stream-aquifer modeling. *Advances in Water Resources*, v. 26(9), 1001-1019.
- Werner, A.D., Gallagher, M.R. and Weeks, S.W. (2006) Regional-scale, fully coupled modeling of stream-aquifer interaction in a tropical catchment. *Journal of Hydrology, in press*.
- Winter, T.C. (1999) Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, v. 7, p. 28-45.

2006년 5월 12일 원고접수, 2006년 6월 15일 게재승인.