

금정산지역의 수위변동 자료를 이용한 시계열 및 지하수 함양량 분석

김태원 · 함세영 · 정재열 · 류상민* · 이정환 · 손건태** · 김남훈

부산대학교 지구환경시스템학부, *현대엔지니어링 토건·환경사업본부,

**부산대학교 수학·통계학부

(2008년 1월 24일 접수; 2008년 2월 15일 채택)

Time Series and Groundwater Recharge Analyses Using Water Fluctuation Data in Mountain Geumjeong Area

Tae-Won Kim, Se-Yeong Hamm, Jae-Yeol Cheong, Sang Min Ryu*,
Jeong-Hwan Lee, Keon Tae Son** and Nam-Hoon Kim

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**Infra & Environment Group, Hydai Engineering Co., Ltd., Seoul 158-718, Korea*

***Division of Mathematics and Statistics, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

(Manuscript received 24 January, 2008; accepted 15 February, 2008)

Abstract

Groundwater recharge characteristics in a fractured granite area, Mt. Geumjeong, Korea, was interpreted using bedrock groundwater and wet-land water data. Time series analysis using autocorrelation, cross-correlation and spectral density was conducted for characterizing water level variation and recharge rate in low water and high water seasons. Autocorrelation analysis using water levels resulted in short delay time with weak linearity and memory. Cross-correlation function from cross-correlation analysis was lower in the low water season than the high water season for the bedrock groundwater. The result of water level decline analysis identified groundwater recharge rate of about 11% in the study area.

Key Words : Groundwater recharge, Recharge area, Time series analysis, Water-level decline curve

1. 서 론

부산 금정산은 부산의 동부와 서부를 갈라놓으면서 북북동-남남서 방향으로 발달된 산악지형을 형성하는 지하수 함양지역이다. 금정산의 최고봉인

고당봉은 해발 801.5 m이다. 금정산의 중앙부의 정상에 가까운 금성동 산성 마을 일원은 북북동방향으로 지형적으로 길쭉한 분지를 형성하는데, 이곳에는 자연 습지와 농지가 분포한다. 정상부의 지표수는 대부분 분지의 중심으로 이동, 수렴하는 경향을 보인다. 또한, 금정산과 동래단층의 사이의 동래구 온천동 지역에는 동래온천이 위치하고 있다. 동래온천 지역은 한국에서 가장 유명한 온천중의 하나이다. 온천수는 공공목욕탕에서 사용되고 있다.

Han 등¹⁾은 온천수의 온도는 50.6-66.4°C의 범위를 가지며, 동래온천수는 지하 수 km의 심부순환을 거쳐 산출되고 있는 것으로 보고하였다. 이와 같이 금정산지역은 동래온천과도 관련을 가지는 특수한 지질환경 속에 있다.

손 등²⁾은 금정산지역의 지질이 하부로부터 백악기 퇴적암류인 이천리층, 유천층군 안산암질 화산암류, 불국사 화강암류, 이들을 관입하고 있는 신생대 염기성 암맥 그리고 제4기 충적층으로 구성되어 있다고 하였다. 이천리층은 금정산 줄기 북측의 금정구 청룡동에 소규모로 분포하고, 백양산 부근의 초읍동, 부암동, 연지동에 걸쳐서 소규모로 분포한다. 이 층의 구성 암석은 주로 흑색 또는 암회색의 셰일이며, 암회색 셰립질 사암이 소량 협재한다. 손 등²⁾은 안산암질 화산암류는 주로 치밀 견고한 암편질 응회암이 대부분이며 부분적으로 용암류와 응회질 퇴적암이 협재된다고 보고하였다. 안산암질 화산암류는 금정산의 남측 경계 부근인 덕천동, 만덕동 일원과 백양산 북측 구포동 일원 그리고 연지동 일원에 분포하며, 금정산 줄기의 북측 경계부인 양산시 다방동과 동면 석산리, 금산리 일원에도 비교적 큰 규모로 분포한다. 동래단층의 동측인 동래구 부곡동, 금사동, 안락동, 명륜동, 명장동 일원과 연제구 배산(해발 254.9 m) 일원에도 안산암질 화산암류가 분포하고 있다. 불국사화강암류는 금정산의 중앙부와 백양산의 남부에 분포하고 있으며, 연구 지역에서 가장 넓은 지역을 차지한다. 손 등²⁾은 불국사화강암류는 섬록반암, 화강섬록암, 각섬석화강암, 흑운모화강암, 토날라이트, 아다멜라이트, 미문상화강암, 규장암으로 이루어져 있다고 하였다. 그리고 연구지역의 불국사화강암류는 토날라이트와 아다멜라이트에 속하며, 연구지역의 대부분은 아다멜라이트지역이다. 아다멜라이트는 중립질 또는 세립질이며 홍색의 장석과 백색의 장석이 대등한 비율로 함유되어 있다. 토날라이트는 세립질이고 주로 사장석, 석영 및 각섬석으로 되어 있으며, 녹니석, 흑운모, 스피, 티탄철석, 자철석 및 저어콘 등이 들어 있다. 손 등³⁾은 신생대 염기성 암맥들이 백악기말의 화강암류를 관입하고 있으며, 금정산 중앙부의 남북방향 단층대를 따라 암맥군을 형성하고 있다고 하였다.

성 등⁴⁾은 금정산지역의 동쪽과 서쪽에는 양산단층계에 속하는 각각 양산단층과 동래단층이 NNE방향으로 달리고 있다고 보고하였다. 동래단층은 충적층으로 피복되어 있어서 지표에서 단층의 증거를 찾을 수 없으나, 인공위성사진에서는 선구조가 뚜렷이 나타나고 있다고 하였으며, 함 등⁵⁾, 손 등⁶⁾, 류 등⁷⁾은 최근에 지하지질로부터 동래단층의 증거들이 나타나고 있다고 하였다. 김 등⁸⁾, 황 등⁹⁾은 신생대 동안 양산단층이 총 20~30 km의 변위를 가지는 우수향 주향이동의 영향을 받았다고 하였다. 차¹⁰⁾는 금정산의 절리군 중 가장 우세한 방향은 남북계(N S~N20W)이며, 그 다음은 N40~60E 및 N60~70W 이고, EW방향은 미약하다고 하였다. 손 등²⁾은 화강암 내에는 소규모 단층과쇄대와 단열대가 발달하고 있으며, 이들 소규모 단층과쇄대와 단열대는 양산단층 및 동래단층과 관련되어 있다고 하였다. 금정산지역 기반암 지하수는 화강암 내의 주로 N60~80E 주향의 균열대를 따라서 동래구 및 금정구의 저지대쪽으로 흐르고 있다. 손 등³⁾은 동래온천수의 주요 상승 통로는 양산단층과 사교하는 북동-남서 방향의 2차 신장단열대인 것으로 보고되고 있으며, 각 절리군 빈도의 공간적인 분포를 통해 이 지역에는 J2와 J3방향을 가지는 절리들이 집중되어 있다고 판단된다고 하였다.

금정산 지역에는 1999년 5월에 19개의 관측공이 설치되어 15일 간격으로 수동으로 지하수위를 관측하고 있으며, 2001년 3월부터는 5개의 관측공(KJ2, KJ8, KJ15, KJ19, KJ22)에 자동수위 측정센서(Eijkelpkamps사의 Diver와 OTT사의 Orphimedes)를 설치하여 1시간 간격으로 지하수위를 측정하고 있다. 또한 2004년에 3개의 관측공(KJ7, SJ1, SJ2)에 자동수위 측정센서(Eijkelpkamps사의 Diver)를 설치하였고, 2006년에는 추가로 2개의 관측공(HT1, HT2)에 자동수위 측정센서(Eijkelpkamps사의 Diver)를 설치하였다. 본 연구에서 이용한 KJ2, KJ7, KJ8 관측공의 충적층과 풍화대의 두께의 합은 각각 5 m, 7 m, 7.5 m이며, 그 밑에는 기반암이 위치한다. 세 관측공의 충적층 및 풍화대를 합한 평균 깊이는 지하 6.5 m에 있으므로, 지하수면(지표아래 평균 2.5 m)은 이보다 4 m 더 높다. 본 연구에서는 함양지역인 금정산 기반암의 지하수위와 강수량과의 관련성을 살펴보기 위해 시계열

분석(자기상관분석, 교차상관분석, 단순 스펙트럼 분석)을 실시하였으며, 지하수위 자료로부터 지하수위 강하곡선을 구하여 연구지역의 지하수 함양을 산정하였다. 시계열 분석과 지하수 함양을 추정하기 위하여 기반암에 위치하고 있는 KJ2, KJ7, KJ8, HT1, HT2와 습지에 위치하는 SJ1의 1일 평균 수위 자료와 부산지방의 일일 누적 강수량 자료를 이용하였다(Fig. 1).

2. 재료 및 방법

2.1. 시계열 분석

시계열 분석은 크게 시간영역분석과 주파수영역 분석으로 나뉜다. 시간영역분석은 과거와 현재의 확률구조나 변화양상에 대한 정보를 기초로 하여 그 시계열의 종속성을 기술하는 모수적 모형을 만들고, 이것을 이용하여 다시 미래의 관측값을 예측하는 방법이다. 그리고 주파수영역분석은 주어진 정상 시계열의 주기가 서로 다른 사인이나 코사인 함수와 같은 주기함수의 일차결합으로 나타내며, 각 주기나 그 역수인 주파수의 영향력을 스펙트럼 형식으로 표시하여 그 시계열의 주기성을 파악하는 방법이다.

일반적으로 각기 고유한 시계열 특성을 가지는 연속적인 수리·수문자료들은 시계열 분석에 적용할 수 있다. 이번 연구의 시계열분석에서는 각 관측 지점에서 관측된 수위 자료와 일일 강수량 자료를 이용하여 시계열 특성 함수인 자기상관함수(auto-correlation function), 교차상관함수(cross-correlation function), 스펙트럴 밀도함수(spectral density function)를 구하였다.

자기상관분석(autocorrelation analysis)은 시간별 자료나 거리에 따른 자료의 자기 유사성을 계산함으로써 반복성이나 그 외 특별한 성질을 알아낼 수 있다. 자기상관분석을 실시하기 위해서는 시간 등의 순서적인 자료가 필요하며, 자료들은 일정한 간격으로 배열되어 있어야 한다. 자기상관분석은 시계열 자료의 선형성(linearity)과 기억효과를 비교할 수 있는 유용한 방법이다. 이 와 이¹¹⁾, Larocque et al.¹²⁾, Padilla and Pulido-Boshch¹³⁾는 시계열 자료가 강한 선형성과 기억효과를 가질수록 긴 지연시간 동안 자기상관함수가 0이상의 값을 가지며, 약한 선형성과 기억효과를 가질수록 짧은 지연시간에 0에 수렴하게 된다고 하였다.

자기상관함수 r_k 는 다음과 같다.

$$r_k = \frac{cov_k}{\sqrt{var_y var_{t+k}}} = \frac{(n-k)(\sum_{t=1+k}^n y_t y_{t-k}) - (\sum_{t=1+k}^n y_t)(\sum_{t=1+k}^n y_{t-k})}{\sqrt{(n-k)(\sum_{t=1+k}^n y_t^2 - (\sum_{t=1+k}^n y_t)^2)(n-k)(\sum_{t=1+k}^n y_{t-k}^2 - (\sum_{t=1+k}^n y_{t-k})^2)}} \quad (1)$$

또한 자기공분산함수 cov_k 는 다음과 같이 표현된다.

$$cov_k = \frac{(n-k)(\sum_{t=1+k}^n y_t y_{t-k}) - \sum_{t=1+k}^n y_t \sum_{t=1+k}^n y_{t-k}}{(n-k)(n-k-1)} \quad (2)$$

여기서, y_t 는 시계열 자료이며, n 은 관측값의 수, 즉 시계열 자료의 길이이다. 그리고 k 는 y_t 와 y_{t-k} 사이의 간격으로 지연시간(lag time)을 나타낸다.

교차상관분석은 입력 시계열 자료와 출력 시계열 자료 사이의 상관성(correlation)으로부터 입력 자료와 출력 자료간의 인과관계에 대한 정보를 제공하

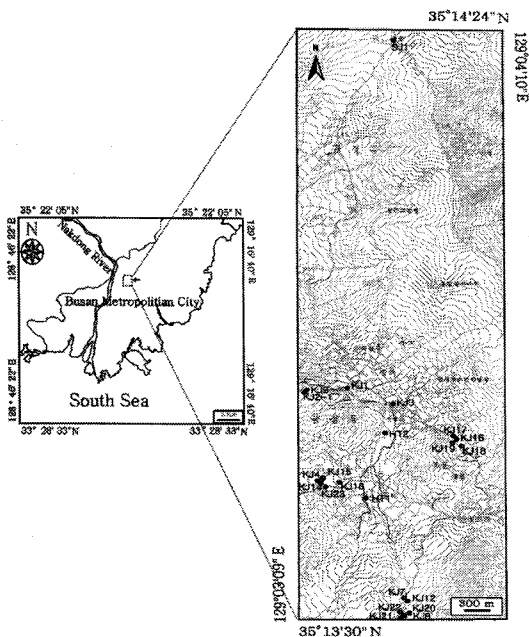


Fig. 1. Piezometers in the study area.

여 준다. 한편 x_t 와 y_t 의 교차공분산함수 r_{xy} 는 다음과 같이 표현된다.

$$r_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (3)$$

시차가 k 인 x_t 와 y_t 의 교차상관함수는 다음 식으로 표현된다.

$$\rho_{xy}(k) = \frac{r_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

Bendat et al.¹⁴⁾, Shih et al.¹⁵⁾, Shih¹⁶⁾, Shih and Lin¹⁷⁾은 스펙트럴 분석은 시계열 자료의 주기성 등을 확인하는데 효율적이라고 한다. 스펙트럴 분석에서 사용되는 스펙트럴 밀도함수는 자기상관함수의 푸리에 변환을 이용하여 시간 영역(time domain)의 관측자료를 주파수 영역(frequency domain)으로 변환한다. Larocque et al.¹²⁾은 스펙트럴 밀도함수, $S(f)$ 는 주기적 현상을 나타내는 정점(peak)을 확인하여 그 시스템의 특성을 유추해 낼 수 있다고 하였다.

$$S(f) = 2[1 + 2 \sum_{k=1}^m D(k)r(k) \cos(2\pi fk)] \quad (5)$$

$$D(k) = \frac{(1 + \cos \pi \frac{k}{m})}{2} \quad (6)$$

여기서, $f=j/2m$ 으로 f 는 주파수를 나타낸다. 그리고 j 는 1에서 m 까지이며, m 은 절삭점(cutting point)을 나타낸다. $D(k)$ 는 추정된 밀도 값이 한쪽으로 치우치지 않게 한다.

2.2. 지하수위 강하곡선을 이용한 함양량 추정법

지하수위 강하곡선을 이용한 함양율 산정은 지하수위 강하율과 지하수 함양율 사이에 직접적인 비례관계를 이용하여 지하수 함양율 a 를 구하는 방법이다. 강우시 유역의 특성에 따라 강우량 중 일부분이 지하에 함양된다고 하면, 함양지역 A 에 어느 기간 중에 내린 총 강우량이 P 이고, 지하수 침투가 시작될 때까지의 강우량이 P_0 일 때, 지하수 함양량 R 은 다음과 같다:

$$R = aA(P - P_0) \quad (7)$$

따라서 같은 지역 A 에서 어떤 기간 중 총강우량 P_1 에 의한 함양량이 R_1 이고, 일정 시간이 경과 후 또 다른 기간의 강우량 P_2 에 의한 함양량이 R_2 라면, 식 (7)에 의하여

$$R_1 = aA(P_1 - P_0) \quad (8)$$

$$R_2 = aA(P_2 - P_0) \quad (9)$$

이다. (8)식에서 (9)식을 빼 함양량의 차이는

$$R_1 - R_2 = aA(P_1 - P_2) \quad (10)$$

(10)식에서 $R_1 - R_2 = \Delta R$, $P_1 - P_2 = \Delta P$ 로 두면,

$$\Delta R = aA\Delta P \quad (11)$$

로 표현할 수 있다. (11)식은 P_1 기간의 P_0 와 P_2 기간의 P_0 가 토양함수조건에 따라 다를 수 있음에도 불구하고 평균적인 개념으로는 그 차이를 무시할 수 있다고 가정할 때 성립한다. 한편 지하수 함양량 증가분 ΔR 에 의해서 대상지역 A 에서 지하수위가 Δh 만큼 상승하였다고 하면

$$\Delta R = A\Delta h S_y \quad (12)$$

여기서, S_y 는 대수층의 비산출율이고, $\Delta h = h_1 - h_2$ 로서 두 시점의 지하수위 h_1 와 h_2 의 차이이다. 따라서 (11)식과 (12)식으로부터 지하수 함양율 a 는

$$a = \frac{\Delta h}{\Delta P} \cdot S_y = \frac{h_1 - h_2}{P_1 - P_2} \cdot S_y \quad (13)$$

와 같다. 결국 어떤 지점에서 두 시점의 지하수위 h_1 , h_2 를 관측하고, 또 각각의 강우량 P_1 과 P_2 를 알면 지하수 함양율 a 를 결정할 수 있다. 그러나 최 와 안¹⁸⁾은 S_y 를 알 수 없을 때는,

$$a = C \cdot \frac{s_{30}}{s_m} \quad (14)$$

에 의해서 지하수 함양율 a 를 구할 수 있다고 한다. 여기서, C 는 상수이고, $s_{30} = h_1 - h_2$ (30일 동안의 수위강하량), s_m 은 무강우시의 최대 지하수위 강하량이다. (14)식에서 C , s_{30} , s_m 이 결정되면, 대상지역의 지하수 함양율을 추정할 수 있게 된다. C 는 지역적으로 달라지며, 이에 따라 지하수 함양율이 달라지게 된다.

2.3. 지하수위 변동 특성

우리나라의 강우형태는 여름철에 비가 많이 내리고 겨울철에 비가 적게 내리는 계절적 차이를 보이므로, 일일지하수위자료를 건기(7~9월)와 우기(11~2월)로 구분하여 지하수위 변동을 분석하였다. 먼저 암반대수층에 위치하고 있는 KJ2의 지하수위는 2004년 1월부터 2006년 11월까지 관측된 지하수위로서 최고수위는 2006년 7월에 264.33 m(지표하 1.51 m)이며, 최저수위는 2005년 2월에 262.51 m(지표하 3.33 m)로 나타났다(Fig. 2). KJ2공에서의 관측 기간내 평균 지하수위는 263.33 m(지표하 2.51 m)이

고, 지하수위 변동폭은 1.82 m이다. 우기에 상대적으로 지하수위가 높았으며, 건기에는 지하수위가 낮아지는 계절적 변동을 잘 보여주고 있다.

KJ7의 지하수위는 2004년 11월부터 2006년 11월까지 관측된 값으로 2005년 7월에 433.83 m(지표하 1.53 m)의 최고수위를 보이며, 2005년 5월에 432.45 m(지표하 2.91 m)의 최저수위를 나타내었다. 이 기간 동안 평균지하수위는 433.24 m(지표하 2.12 m)이고 지하수위 변동폭은 1.38 m이다. 역시 암반내에 위치하고 있는 KJ8의 지하수위 변동을 보면 2006년 7월에 최고수위 452.84 m(지표하 0.82 m)를 보이고

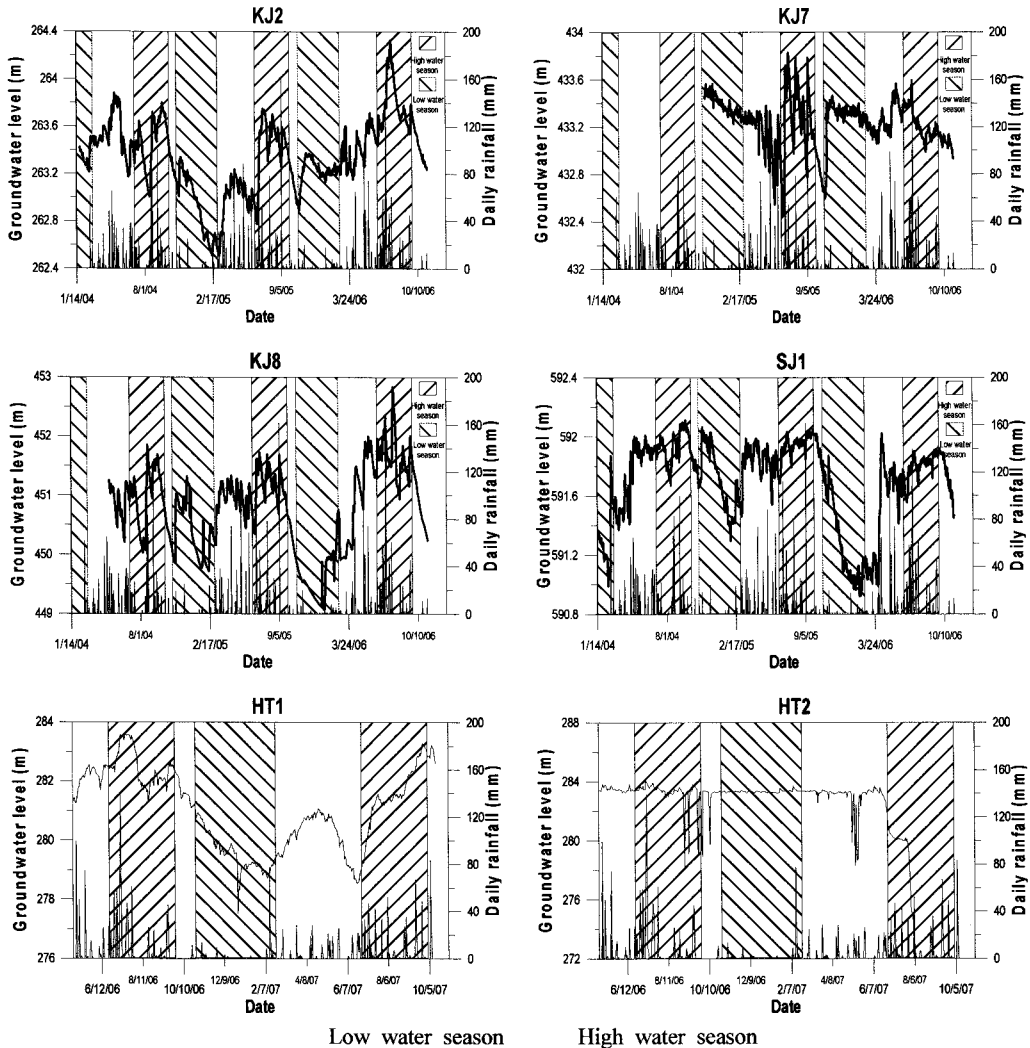


Fig. 2. Water levels at KJ2, KJ7, KJ8, SJ1, HT1, and HT2, with daily rainfall.

있으며 2006년 1월에 최저수위 449.07 m(지표하 4.59 m)를 보이고 있다. 2004년 5월부터 2006년 11월까지의 평균지하수위는 450.77 m(지표하 2.89 m)이고 수위 변동폭은 3.77 m이다. 역시 건기와 우기의 계절적 수위 변동 특성이 잘 나타나고 있다.

2006년 5월부터 2007년 10월까지 관측된 지하수공 HT1의 최고수위는 2006년 7월에 283.57 m(지표하 3.47 m)를 보였으며 최저수위는 같은 해 12월 달에 277.52 m(지표하 9.52 m)를 보이며 수위 변동폭은 6.05 m이다. 동일한 시기에 관측된 HT2는 2006년 7월에 최고수위 284.09 m(지표하 1.02 m)를 보이며, 수위 변동이 거의 없다가 2007년 8월 이후 지하수위가 지하수공 바닥 밑으로 하강하였다. 이에 대한 정확한 원인의 파악이 필요할 것으로 판단되며, HT2 약 65 m 옆으로 고속철도 터널구간공사가 진행되고 있으므로 이에 대한 영향 유무 평가가 필요하다.

한편 습지에 위치하는 SJ1는 2004년 9월에 최고수위 592.11 m(지표하 0.11 m), 2006년 2월에 590.9 m(지표하 1.32 m)의 최저 수위를 보인다. 2004년 1월부터 2006년 11월까지의 평균 수위는 591.70 m(지표하 0.52 m)이고, 수위 변동폭은 1.21 m이다.

연구 지역의 전체적인 지하수위의 변동을 보면

암반 지하수위는 건기와 우기의 계절적 변동 특성이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다(Fig. 2). 하지만 습지 수위는 SJ1에서는 계절적 변동이 미약하게나 보이고 있으나, 암반 지하수에 비해서는 계절적 특성을 잘 보여주지 못하고 있다. 또한 강수시 지하수위가 상승하지만, 강수량에 따른 지하수위 변동폭은 다소 불규칙한 경향을 보인다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 일일강수량 분석

연구지역의 일일강수량의 변화특성을 이해하기 위해, 건기(7~9월)와 우기(11~2월)로 나누어 자기상관분석과 스펙트럼분석을 실시하였다. 강수량의 시계열적 특성을 보여주는 자기상관분석과 스펙트럼분석 결과에 의하면, 건기와 우기의 일일 강수량의 자기상관함수는 모두 2일 이내의 짧은 지연시간에 0에 도달하고 있으나, 우기의 지연시간이 건기보다는 길다(Fig. 3). 그러나, 전체 기간으로 볼 때는 일일 강수량이 약한 선형성과 기억효과의 가짐을 지시해 준다. 또한 건기와 우기 모두 자기상관함수가 짧은 지연 시간에 0에 도달한 후 주기적으로 자기상관함수값이 증감하는 경향을 보여준다.

스펙트럴 밀도함수는 우기에는 20일 주기가 가장

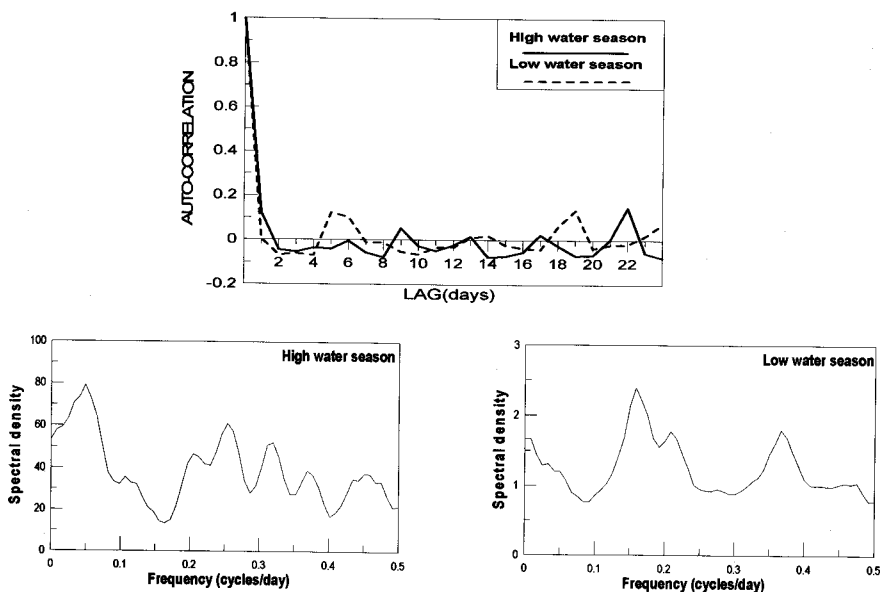


Fig. 3. Auto-correlation and spectral density functions of daily rainfall.

우세하며, 건기에는 6.3일 주기가 가장 우세하다. 이는 우기의 자기상관함수가 0에 도달하는 지연시간이 건기보다 길게 나타나는 것과 관련되는 것으로 보인다. 또한 스펙트럴 밀도함수값이 주기적으로 증감하는 경향성을 보인다.

3.2. 지하수위의 자기상관분석

지하수위의 자기상관분석 결과, KJ2의 자기상관함수는 건기(7~9월)에는 2일 이내에 0으로 수렴하였으며, 우기(11~2월)에는 5일 이내에 0으로 수렴하였다(Fig. 4). KJ7은 건기와 우기 모두 2일 이내에 0으로 수렴하였으며, KJ8 역시 건기와 우기 모두 2일 이내에 0으로 수렴하고 있다. 그리고 SJ1도 2일 이내에 0으로 수렴하며, HT1은 건기에 1일 이내, 우기에는 2일 이내에 0으로 수렴하였다. 또한 HT2에서는 건기와 우기 모두 1일 이내에 0으로 수렴하고 있다. 자기상관함수값은 우기보다 건기에 가파른 감소를 보이고 있다. 특히 HT1과 HT2공에서는 다른 공에 비해 빠른 감소를 보이고 있다. 전체적으로 볼 때, 우기의 자기상관함수는 건기의 자기상관함수보다 크며, 따라서 우기의 지하수위가 건기보다 큰 선형성과 기억효과를 가짐을 나타낸다. 즉, 연구지역의 지하수위는 건기보다 우기에 강우의 영향을 안정적으로 받음을 지시한다. 또한 건기와 우기 모두 암반의 지하수위가 습지의 수위보다 상대적으로 강한 선형성과 기억효과를 보인다. HT1과 HT2에서는

SJ1보다 지연시간이 짧게 나타나며, 이는 HT1과 HT2는 각각 음식점과 밭에서 사용하는 생활용과 농업용 지하수 양수의 영향으로 인하여 지하수위의 자기상관성이 떨어지기 때문으로 판단된다.

3.3. 강수량과 지하수위의 교차상관분석

연구지역의 지하수위와 강수량과의 상호연관성을 알아보기 위해 강수량을 입력자료로 그리고 지하수위 자료를 출력자료로 하여 교차상관분석을 실시하였다. 각 관측공별 교차상관분석은 건기(7~9월)와 우기(11~2월)로 나누어 실시하였다(Fig. 5). KJ2의 교차상관분석결과, 우기에는 0.54, 건기에 0.32의 최대 교차상관함수를 보여준다. 그리고 최대 교차상관함수에 대한 지연시간은 각각 4일로 나타났다. KJ7의 경우에는 우기에 0.18, 건기에 0.21의 최대교차상관함수를 보였으며, 지연시간은 각각 5일과 2일이다. KJ8은 우기에 0.30, 건기에 0.22의 최대 교차상관함수를 보였으며, 지연시간은 우기와 건기 모두 2일로 나타났다. SJ1은 우기와 건기에 각각 0.26, 0.34의 최대 교차상관함수를 보였으며, 최대 교차상관함수에 대한 지연시간은 각각 3일과 1일이다. HT1은 우기에 0.21, 건기에 0.09의 최대 교차상관함수를 보이며 지연시간은 각각 7일과 2일이다. 그리고, HT2는 우기에 0.01, 건기에 0.05의 매우 낮은 최대 교차상관함수를 보이며, 지연시간은 각각 0일과 6일을 보여주었다(Table 2, Fig. 5).

강수량과 지하수위의 교차상관분석 결과를 살펴 보면, 우기에는 암반내에 위치한 KJ2, KJ7, KJ8, HT1, HT2에서의 지연시간이 습지에 위치한 SJ1보다 길다는 것을 알 수 있다. 예외적으로, KJ8의 경우는 지연시간이 2일로 습지보다 짧게 나타났는데 이것은 강우 발생시 강우가 지하수공으로 직접 침투됨으로 인하여 지연시간이 짧은 것으로 판단된다. 암반 내에서 지연시간의 차이는 단일대를 따라 지하수가 함양되고, 습지의 경우에는 강수의 직접적인 침투에 의한 것으로 보인다. 건기의 강수량과 지하수위의 교차상관분석에 의해서 암반과 습지의 지연시간의 차이를 보면, 상대적으로 습지에 위치한 SJ1보다 암반내에 위치한 지하수공들의 지연시간이 길게 나타남을 알 수 있다.

Table 1. Results of autocorrelation analysis of groundwater level

Well no.	Season	Delay time (days)
KJ2	Low	1.5
	High	4.6
KJ7	Low	1.9
	High	1.9
KJ8	Low	1.9
	High	1.9
SJ1	Low	1.8
	High	1.8
HT1	Low	0.9
	High	1.9
HT2	Low	0.9
	High	0.9

3.4. 지하수위 강하곡선을 이용한 지하수함양량 산정

지하수 함양량은 (13)식과 같다. 본 연구지역에서 KJ2, KJ7, KJ8의 수위 변동폭은 각각 1.82 m, 1.38 m, 3.77 m로서 평균 수위 변동폭 $\Delta h = 2.32$ m이며, KJ2, KJ7, KJ8에서 함 등¹⁹⁾이 실시한 순간층격시험 결과로부터 비산출률 값은 각각 0.11, 0.00025, 0.1로서, 평균값은 $S_y = 0.07$ 이다. 그리고 30년간의 연평균 강수량 자료를 이용하여, 강우시 지하 침투가 즉시 발생한다고 하면 $\Delta P = 1531$ mm이다. 따라서 연구지역의 지하수 함양량은 162.4 mm이다. 그리고 30년간의 연평균 강수량(1531 mm)에 대해서, 지하수 함양율 a 는 약 11%로 산정된다.

위에서 구한 지하수 함양율 11%를 이용하여 C 를 결정하기 위하여 (14)식을 이용하였다. (14)식에서 알 수 있는 바와 같이, 지하수 함양율 a 는 C 와 s_{30}/s_m 에 의해서 결정된다. 지하수 함양율은 이미 알고 있으므로, s_{30}/s_m 만 구하면 C 가 결정된다. 따라서, s_{30}/s_m 를 구하기 위하여 2004년 1월부터 2004년 12월까지의 KJ2공의 지하수위 자료를 이용하였다. 이는 KJ2공의 지하수위는 계절적인 지하수위 변동을 잘 보여주고 있으며, 평균 지하수위는 지표하 2.5 m로서 증발산의 영향을 비교적 적게 받는 것으로 판단되기 때문이다. 지하수위 변동곡선에서 최고수위는 263.88 m이며 최저수위는 262.98 m이므로, 최대수위강하량(s_m)은 0.90 m이다. 연간 지하수위 중에서

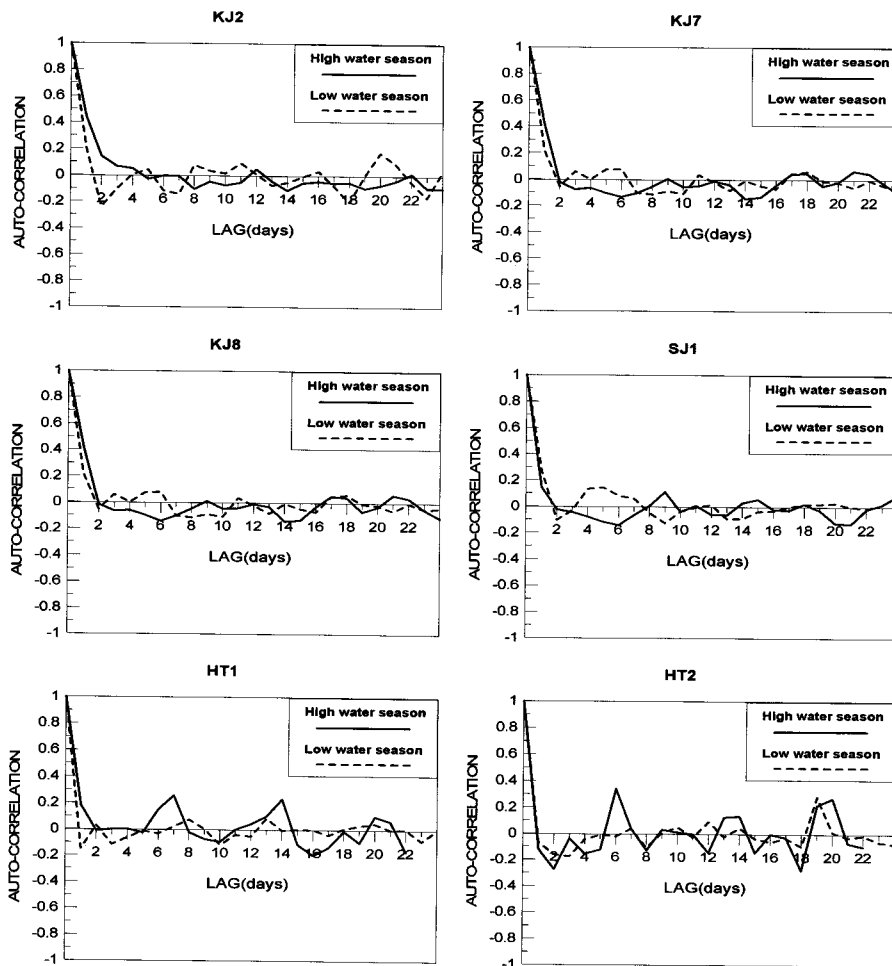


Fig. 4. Autocorrelation function of daily groundwater level.

Table 2. Time delays obtained from cross-correlation analysis using groundwater levels and precipitation

Borehole	Season	Maximum Cross-Correlation	Time delay (days)
KJ2	Low	0.32	4
	High	0.54	4
KJ7	Low	0.21	2
	High	0.18	5
KJ8	Low	0.22	2
	High	0.30	2
SJ1	Low	0.34	1
	High	0.26	3
HT1	Low	0.09	2
	High	0.21	7
HT2	Low	0.02	3
	High	0.03	5

수위가 강하하는 부분을 평행이동시켜서 경과시간에 따른 수위강하값(s)을 구하였다(Table 3). 그리고 경과시간과 수위강하량 차이(s_m-s)의 관계를 반대수방안지에 도시하여 최적의 회귀직선을 구하였다(Fig. 7). 이렇게 하여 얻어진 회귀직선은

$$s_m-s=0.9695e^{-0.0470r} \quad (15)$$

이며, 결정계수 R^2 은 0.97이다. $s_m-s_{30}=0.23$ m이므로 s_{30} 은 0.73 m이다. 또한, s_m 값은 회귀직선의 Y축 절편(0.96 m)에 해당한다. $s_{30}/s_m=0.76$ 이므로, 지하수 함양을 11%로부터 C 값은 0.145가 된다. 지하수위 강하율이 일정할 때, s_{30}/s_m 과 C 는 서로 반비례 관계에 있다(Fig. 8). 따라서, S_y 를 알지 못할 때는, 수위

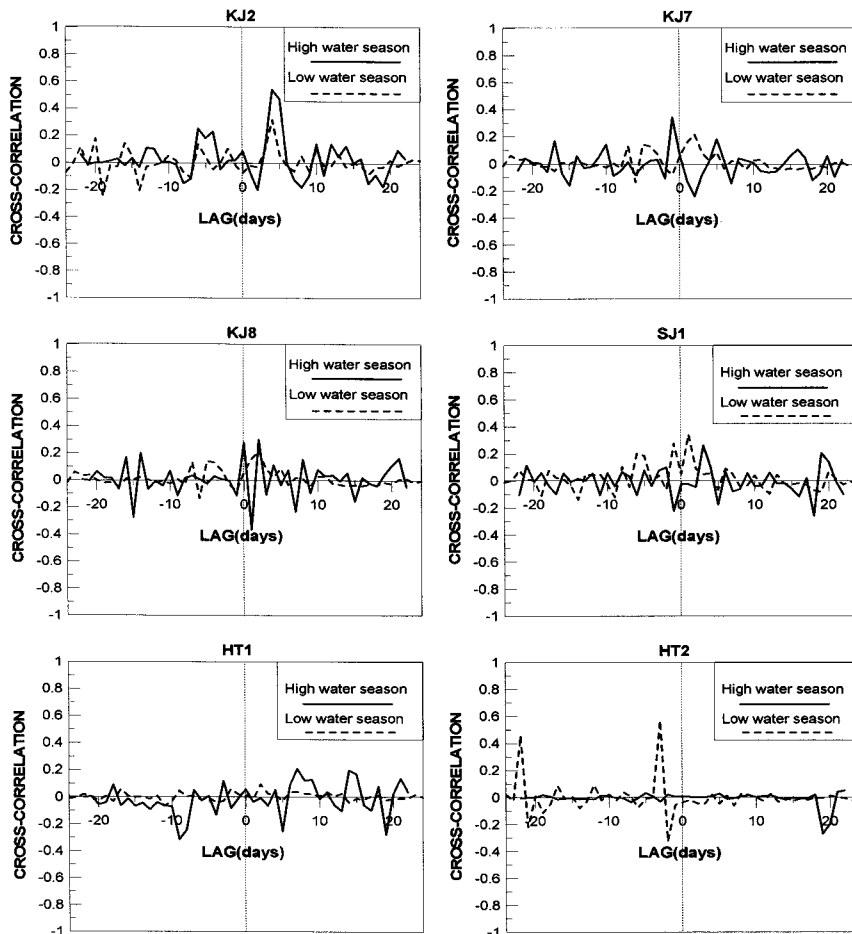


Fig. 5. Cross-correlation functions of daily groundwater level fluctuations as output and daily rainfall as input.

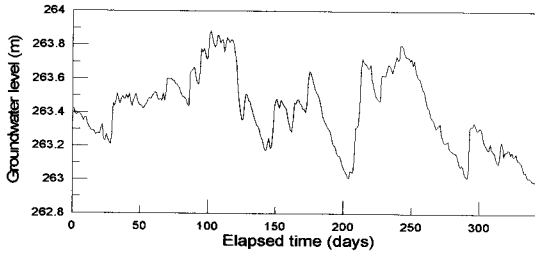


Fig. 6. Groundwater level at borehole KJ2.

Table 3. Relation between time and water level decline at KJ2 during no rainy days

Time (days)	Water level (m)	Decline, s (m)	$s_m - s$ (m)
0	263.88	0	0.90
5	263.75	0.13	0.77
10	263.61	0.27	0.63
15	263.51	0.37	0.53
20	263.37	0.51	0.39
25	263.25	0.63	0.27

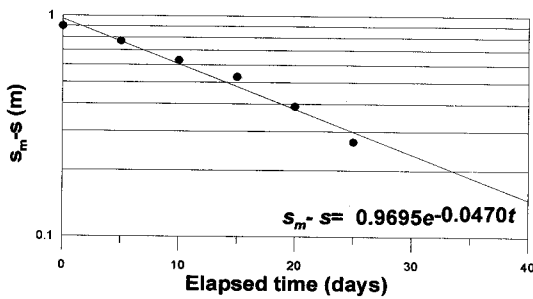


Fig. 7. Water level decline analysis using water level data from KJ2.

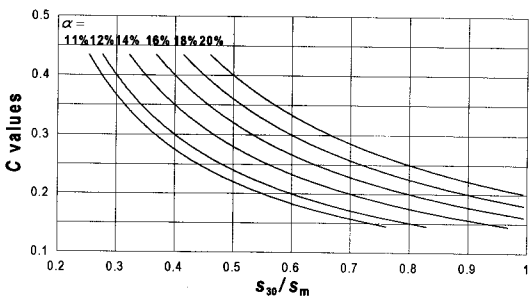


Fig. 8. C versus s_{30}/s_m according to recharge rates (11-20%).

강하곡선을 이용한 지하수 함양율 산정방법이 C값에 따라 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이번 연구에서는 부산시 금정산지역에 설치된 지하수 관측공 중에 암반대수층에 위치한 KJ2, KJ7, KJ8, HT1, HT2와 습지에 위치한 SJ1에서 획득한 수위자료에 대해 시계열 분석을 적용하였다. 일일 평균 지하수위 자료를 이용하여 자기상관분석을 실시한 결과 지연시간이 2일 이내에 0으로 수렴함으로써 약한 자기상관성을 보인다. 그러나 습지에 비해 암반대수층에 위치한 지하수위는 상대적으로 지연시간이 길게 나타나므로 습지에 위치한 지하수위보다 안정적이라고 볼 수 있다. 금정산 지역의 지하수는 약한 선형성과 기억효과를 가지며 외부자극(강수)에 안정적이지 못하며 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.

일일 평균지하수위와 일일 강수량의 교차상관분석결과, 우기일 때가 건기보다 상대적으로 높은 교차상관함수를 나타냈으며 최대상관성을 가질 때의 지연시간은 암반대수층에 위치한 지하수위 (KJ8 제외)가 습지에 위치한 SJ1보다 길다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로 미루어 암반대수층은 상부의 직접적인 침투에 의한 지하수 함양보다는 단열대를 따라서 지하수가 함양됨을 의미하며 습지에 위치한 관측공은 단열대가 아닌 상부의 불포화대를 따라 강수가 직접 침투되는 것으로 판단할 수 있다. 그리고 각 관측공에서 지연시간의 차이가 나는 것은 금정산의 함양지역의 이방성을 설명해준다.

연구지역인 금정산지역의 지하수 함양율을 지하수위 강하곡선법을 이용하여 산정한 결과, 지하수 함양율은 약 11%값을 보인다. 그러나, 수위강하곡선을 이용한 지하수 함양율 산정시에 S_0 값을 알지 못할 때는 C값에 따라 지하수 함양율이 크게 달라질 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 S_0 값을 알지 못할 경우의 지하수위 강하곡선법을 이용한 지하수 함양율 산정을 위해서는 정확한 C값 산정이 관건이다. 정확한 C값 결정을 위해서는 여러 지역에 대한 다양한 방법의 지하수 함양율 산정이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과

제번호 3-4-3)과 2단계 BK21사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

- 1) Han S. J., Hamm S.-Y., Sung I. H., Lee B. D., Cho B. W., Cho M. H., 1999, Geochemical characteristics of geothermal water and groundwater in the Dongrae hot-spring area, *The J. Eng. Geol.* 9(3), 207- 225.
- 2) 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 동래·월내도폭(1:50000) 및 설명서, 자원개발연구소, 27pp.
- 3) 손문, 함세영, 김인수, 이윤희, 정훈, 류춘길, 송원경, 2002, 부산시 금정산 일원의 지하수 유동 해석을 위한 단열계 분석, *지질공학*, 12(3), 305-317.
- 4) 성익환, 이병대, 조병욱, 류충렬, 김경수, 이춘오, 이봉주, 임현철, 지세정, 김용욱, 성기성, 박덕원, 이대하, 김중렬, 현혜자, 김유성, 1999, 한국고속철도건설공단 금정터널 지하수 유동체계 분석 및 동래온천지역영향평가, 한국자원연구소.
- 5) 함세영, 차용훈, 정재열, 2005, 부산 도심지역 미고결층과 기반암의 수리지질 특성, *지질공학*, 15(4), 407-421.
- 6) 손문, 이선갑, 김중선, 김인수, 이건, 2007, 부산시 도심지의 지하 지질구조와 단층손상과 관련된 지질위험도 분석, *자원환경지질*, 40(1), 87-101.
- 7) 류상훈, 함세영, 차용훈, 장성, 정재형, 손문, 김기석, 2007, 부산광역시 도심부 수리지질 특성과 지하지질 발달상태의 관련성, *지질공학*, 17(3), 367-379.
- 8) 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동, *지질학회지*, 28(1), 84-109.
- 9) 황병훈, 이준동, 양경희, 2004, 양산단층 주변에 분포하는 화강암질암의 암석학적 연구: 양산단층의 수평변위량, *지질학회지*, 40(2), 161-178.
- 10) 차문성, 1976, 부산지역의 불국사산성화강암류의 암석학적 연구, *광산지질*, 9(2), 85-106.
- 11) 이진용, 이강근, 2002, 강우에 대한 지하수위 반응양상 비교분석: 강원도 원주지역과 경기도 의왕지역, *한국지하수도환경학회지*, 7(1), 3-14.
- 12) Larocque M., Mangin A., Razack M., Banton O., 1998, Contribution of correaltion and spectral analysis to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France), *Journal of Hydrology*, 205, 217- 231.
- 13) Padilla A., Pulido-Boshch A., 1995, Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis, *Journal of Hydrology*, 168, 73-89.
- 14) Bendat J. S., Piersol A. G., 1991. *Random data, analysis and measurement Procedures.* John Wiley, 566pp.
- 15) Shih D. C.-F., Chiou K F., Lee C. D., Wang I. S., 1999. Spectral responses of water level in groundwater and tidal river. *Hydrol. Processes* 13(6), 889-911.
- 16) Shih D. C.-F., 1999, Determination of hydraulic diffusivity of aquifers by spectral analysis. *Stochastic Environ. Res Risk Assessment*, 13(1/2), 85-99.
- 17) Shih D. C.-F., Lin G.-F., 2002. Spectral analysis of water level fluctuations in aquifers. *Stochastic Environ. Res Risk Assessment* 16, 374-398.
- 18) 최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수 자연함양율 산정방법 연구, *지하수환경*, 5(2), 57-65.
- 19) 함세영, 김문수, 성익환, 이병대, 김광성, 2001, 순간 충격시험에 의한 화강암지역의 수리적 매개변수 산출, *지질공학*, 11(1), 63-79.