Estimation of Groundwater Level Fluctuation of the Crystalline site Using Time Series Analyses in South Korea

시계열분석을 이용한 결정질암 지역의 지하수위 변동 평가

Jeong-Hwan Lee, Haeryong Jung*, Eunyong Lee and Sujeong Kim
Korea Radioactive Waste Agency, 111, Daedeok-daero 989, Yuseong, Daejeon, Korea

이정환, 정해룡*, 이은용, 김수정
한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received April 3, 2013 / Revised June 17, 2013 / Approved August 5, 2013)

This study is characterized the groundwater flow pattern near crystalline site of Yangbook-Myeon, Gyeongju City, South Korea. From the time series analyses, groundwater level could be classified into 4 types reflecting the hydrogeological characteristics and rainfall pattern. The type I (DB1-1, DB1-2) may be directly influenced by rainfall pattern. The type II (DB1-3, DB1-7, KB-1, KB-2, KB-3, KB-7, KB-14, KB-15) may be influenced by rainfall event as well as groundwater flow through water-conducting features. The type III (DB-5, DB1-6, DB2-2, KB-10, KB-11, KB-13) may be predominantly happens in the crystalline rock mass, groundwater in this type flows through the minor fracture networks rather than direct effect of rainfall event. The type IV (DB1-8, KB-9) may be influenced by irregular variation of the groundwater level due to anisotropy and heterogeneity of crystalline rock.

Key words: Groundwater level, Time series analysis, Rainfall, Fracture, Crystalline rock

본 연구는 경상북도 경주시 양북면 지역의 결정질 암반의 지하수위 모니터링 자료를 이용하여 지하수 유동 특성을 평가하였다. 시계열분석 결과, 수리 지질 특성과 강우 사건을 반영한 4가지 변동 유형으로 분류할 수 있다. 유형 1(DB1-1, DB1-2)은 지하수위가 강우 사건의 영향을 가장 크게 받고 있다. 유형 2(DB1-3, DB1-7, KB-1, KB-2, KB-3, KB-7, KB-14, KB-15)는 공간적으로 단열대 주변에 분포하여 지하수투수특성대 발달이 우수하기 때문에, 강우의 직접적인 침투와 주단열대를 통한 지하수 유동이 동시에 나타난다. 유형 3(DB-5, DB1-6, DB2-2, KB-10, KB-11, KB-13)은 주단열대와 원거리에 분포한 결정질 암반에 위치되기 때문에 강우의 직접적인 침투 영향보다는 고지대의 함양지역에서 소규모의 단열대를 통한 지하수 유동이 우세하게 일어난다. 유형 4(DB1-8, KB-9)는 결정질암반의 다양한 불균질성에 의해 지하수위 변동이 영향을 받고 있다.

중심단어 : 지하수위, 시계열분석, 강우, 단열대, 결정질 암반

*Corresponding Author. E-mail: nohul@korad.or.kr, Tel: +82.42.601.5314

1. 서론

우리나라는 국토면적이 70% 이상 산지 지형으로 구성되어 있기 때문에 국토의 효율적인 활용 측면에서 직선화 도로, 고속도로, 고속철도, 지하철, 도수로터널, 유류 저장 시설, 방사성폐기물 처분장 등의 지하 구조물 건설이 불가피한 실정이다[1]. 지하 구조물 굴착이나 건설의 대상이 되는 매질은 대부분 결정질 암반에 해당되어 미고결 충적층이나 다공질 암반에 비해서 지하수 유동이 극히 제한된다. 왜냐하면 결정질 암반내의 불연속 파쇄대의 수리적 및 역학적 특성이 지하수 유동을 지배하는 중요한 요소이기 때문이다[2]. 따라서, 지하 암반의 불연속 파쇄대의 발달 상태와 수리지질학적 특성에 대한 정밀조사와 연구는 결정질 암반을 개발 및 이용하기 위해 반드시 선행되어야 하며, 지하 구조물의 안정성 평가에도 필수적인 필요요건에 해당된다[3].

결정질 암반내에 분포하는 불연속 파쇄대를 대상으로 한 연구는 대형 지하 구조물인 원유, LPG, LNG 등의 지하 비축기지 및 방사성폐기물 처분장 건설에 따라 1990년대 중반 이후로 광범위하게 수행되어오고 있다[4, 5]. 이들 지하 구조물들의 운영은 특히 결정질 암반의 불연속 단열대와 지하수 유동과 밀접한 상호 관련성을 가진다. 연구지역 주변의 결정질 암반에서 수행된 연구들은 세부지질 조사를 통하여 화산 활동 진화[6], 암석과 광물의 화학적 특성[7], 단층각력암의 암석학적 특성 연구[8], 처분 부지의 단열 발달 특성을 규명하기 위한 단열 발달사 및 단열밀도, 배경 단열대의 통계적 분석 등의 구조지질학적 연구[9, 10], 시추조사, 각종 수리시험 및 지구물리탐사 자료를 종합적으로 분석하여 수리지질체계 특성을 파악한 수리지질 특성 연구[11, 12], 지하수 분석을 통하여 수질이 물-암석 반응, 해염의 영향, 양이온 교환 반응이 주요한 수질 결정 요인임을 평가 연구[13], 처분장 건설에 따른 지하수 위 변동을 예측하고, 사일로 내로의 유입량, 이동로 거리, Darcy 속도를 규명한 지하수 수치 모델링 연구[14, 15, 16] 등의 다양한 지질학적 연구들이 수행되었다. 그러나 선행 연구들은 세부 지질조사 및 수리지질 구조 구축, 수리 시험을 통한 수리 매개변수 도출, 수리화학적 분석, 지하수 수치해석 기법 평가 연구 등이 주로 수행되었지만 연구지역의 지하수위 모니터링 자료를 이용하여 결정질 암반 내의 지하수 유동 특성 및 패턴을 규명하는 연구는 미진한 수준이다.

기본적으로 결정질 암반지역에서 인위적인 일련의 과

정들은 평형 상태의 지하수 유동을 교란 및 재분포시키기 때문에 이에 따라 지하수 유동 체계와 지하수 수문 순환을 변화시킬 수 있다. 따라서 결정질 암반 지역에서 구조물 건설 및 굴착 따른 종합적인 환경지질학적 특성을 규명하기 위해서는 지하수 유동 특성 및 지하수 수문 특성이 먼저 규명되어야만 한다. 본 연구는 18 개의 시추공에 대해서 장기적인 지하수 환경 모니터링 자료를 분석하고 시계열 분석법을 활용하여, 결정질 암반지역의 지하수 유동 특성을 평가하고자 한다.

2. 연구지역

연구지역은 행정구역상 경상북도 경주시 양북면 봉길리에 해당되며, 지형 경사는 전반적으로 서고동저형의 특성을 나타내고 있고 동서방향으로 발달한 산지와 계곡에 의해서 소하천들이 동해로 유입되고 있다. 이러한 소하천들은 건천의 성격을 띠고 있고 유로 길어도 짧게 형성되고 있다. 지질은 하부로부터 상부로 백악기 경상누층군의 퇴적암, 제 3기 관입암류인 섬록암과 화강섬록암, 반상질 조면암질 안산암, 이들을 피복하고 있는 제 4 기 충적층이 분포되고 있다(Fig. 1)[6, 17]. 백악기 퇴적암류는 연구지역의 서쪽과 남쪽으로 넓게 분포하고 있으며, 주로 녹회색, 암회색 내지 담회색 사암과 녹회색 및 암회색 셰일이 교호하면서 발달되고 제3기 화강암류에 의해 관입되어 부분적으로 관입암체 주변에서 혼펠스화 되어 있다. 제3기 관입암류인 섬록암과 화강섬록암은 연구지역의 대부분을 차지하고 있으며, 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 점이적으로 화강섬록암에서 섬록암으로 전이하고 입자의 크기도 조립질에서 세립질로 변화되고 있다. 주구성광물로는 사장석, 각섬석, 흑운모, 정장석, 석영과 불투명광물 등이다. 관입시기는 전암을 통한 K-Ar 측정연대법에 의하면, 59.8 ± 1.8 Ma의 연령을 가지는 것으로 분석되어, 화강섬록암은 제3기 팔레오세에 관입한 것으로 보고되고 있다. 반상질 조면암질 안산암은 연구지역의 중앙부에서 백악기 퇴적암을 관입한 형태로 소규모로 분포하고 있다. 대부분 1~2 mm 크기의 사장석과 단사회석을 반정으로 함유하고 있으며, 부분적으로는 각섬석과 흑운모가 반정으로 일부가 관찰되기도 한다. 연구지역의 지질구조는 층리와 취성 파괴 및 변형에 의해 생성된 절리와 단열이 복합적으로 발달하고 있다[6]. 층리는 백악기 퇴적암류에서 관찰되고 있으며, 층리면의 주향은 대체적으로 북북동~북동($N20^{\circ} \sim 50^{\circ}E$) 방향으로 비교적 일정한 패턴을 보이고 경사도 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 각을 이루면

Fig. 1. Geological map of the study area (from Hwang et al., 2007).

서 북서쪽으로 향하고 있다. 절리는 백악기 퇴적암류, 제 3기 관입암류 및 제3기 화산암류 등 모두에서 규칙적으로 발달하고 있는데, 남북방향 절리군, 동서방향 절리군, 북동방향 절리군, 북서방향 절리군, 충상 절리군 등 5 개 방향의 절리군들이 분포하고 있다. 충상 절리군을 제외하고는 절리군의 경사가 수직에 가까운 고각으로 발달한다. 단열대 조사를 위해서 정밀지표조사와 시추자료를 수행한 결과, 5 개(Z21, Z22, Z23, Z31, Z32)의 수직 단열대들이 발달하고 있고 이들은 국지규모의 단열대들로 보고되었다[12].

3. 연구방법

시계열 분석 방법 중에서 자기상관분석과 교차상관분석은 시간 변화에 따른 수리수문자료의 변동 원인 규명 및 예측을 위하여 널리 수행되고 있는 지구통계분석 방법이다[18, 19]. 자기상관분석(autocorrelation analysis)과 교차상관분석(cross-correlation analysis)을 적용하기 위해서는 동일한 간격으로 연속적으로 측정된 자료가 필수적이기 때문에, 적용에는 많은 제한성을 가지고 있었다. 그

러나 모니터링 기법 및 기술 발전에 따른 시계열 자료들의 연속적인 측정이 가능하게 됨으로서, 강변여과수 취수 지역의 수문 및 수질평가 연구[20, 21], 결정질암반 지역의 지하수 변동 및 함양 특성[22, 23], 카르스트 지역에서 지하수위 및 지하수 유출 특성 평가[24, 25] 등의 자기상관분석과 교차상관분석을 통하여 다양한 수리 및 수문학 적 연구들이 수행되고 있다[26]. 본 연구에서는 수리 수문 자료 특성 분석에 널리 적용되고 있는 자기상관분석과 교차상관분석을 지하수 변동 특성을 규명하기 위하여 수행하였다[27]. 자기상관분석은 자기의 유사성을 계산함으로써 반복성이나 그 외 특별한 성질을 파악하는 것이다. 자기상관분석에서 자기상관함수는 1에서부터 다양한 패턴으로 0까지 감소하며, 이때까지 소요된 시간을 지연시간(lag time)이라고 한다. 시계열 자료로부터 계산된 지연시간이 길수록 장기간 동안의 영향을 받고 자기상관성이 높은 반면에 짧은 경우 단기간의 영향성과 자기상관성이 낮음을 의미한다[28].

계산된 자기상관계수로부터 시차값(lag number)에 대한 자기상관함수(autocorrelation function)를 도시되는데, 자기상관함수는 주어진 시차값에 대하여 자기값의 선형

성(linearity)와 기억효과(memory effect)를 가지게 된다. 길이 n 과 시차 τ 를 가지는 시계열의 자기상관계수는 아래와 같다.

$$r_{\tau} = \frac{\text{cou}_{\tau}}{\sqrt{\text{var } y_t \text{ var } y_{t+\tau}}} \quad (1)$$

여기서, y_t 는 측정값, τ 는 측정값들 간의 시차값, $\text{var } y_t$ 와 $\text{var } y_{t+\tau}$ 는 각각 y_t 와 $y_{t+\tau}$ 의 분산이다. 그리고 자기공분산은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{cou}_{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-\tau} (y_t - \bar{y})(y_{t+\tau} - \bar{y}) \quad (2)$$

$\bar{y}$ 는 평균값, n 은 측정값의 총 개수이다. 일반적으로 자기공분산은 0에서부터 $n/4$ 시차값까지만 유의하다[29].

한편, 교차상관분석은 입력 시계열 자료와 출력 시계열 자료간의 시간영역에서 상관성으로부터 인과관계에 대한 정보를 평가할 수 있다. 두 인자 중에서 영향을 주는 입력인자(input)와 영향을 받는 출력인자(output) 사이의 상관관계를 분석한다[30]. 교차상관함수는 ± 1 의 범위를 가지며 최고점에 도달한 시간을 지연시간(time delay)을 분석하여 두 시계열 상호간의 스트레스 전파 속도를 평가할 수 있다. 즉, 지연시간이 짧을수록 입력인자가 출력인자에 영향을 미치는 속도가 빠름을 의미한다. 교차상관함수는 다음과 같이 계산된다[31].

$$\gamma_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

$$C_{cy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{n-\tau} ((x_t - \bar{x}) - (y_{t+k} - \bar{y})) \quad (4)$$

여기서, σ_x 와 σ_y 은 x_t 와 y_t 의 표준편차, $r_{xy}(k)$ 은 $k>0$ 에서의 교차상관함수, n 은 측정값의 총 개수, $\bar{x}$ 와 $\bar{y}$ 는 시계열 자료 x_t 와 y_t 의 평균값이다. 연구지역의 지하수위 변동 특성을 규명하기 위해서 SAS 통계 프로그램[32]를 이용하여 자기상관분석과 교차상관분석을 실시하였다.

4. 연구결과

4.1 강우량 분석

연구지역의 연강우량을 평가하기 위해서, 연구지역에 설치된 기상대에서 2006년 1월부터 2010년 12월까지 측정된 수문 자료를 분석하였다. 연평균 강우량은 약 1281.1 mm이고, 2006년에 1693.0 mm로 최대이고, 2009년의 1033.0 mm가 최소값을 나타내고 있다(Table 1). 강우량은 5년 동안에 대체로 감소되는 경향성을 보여주고 있다. 한편, 월별 평균 강우량은 7월(318.6 mm), 8월(163.8 mm), 9월(184.6 mm)의 우기에 전체 강우량의 약 52%가 집중되는 것으로 나타났다.

4.2 수리지질 특성

결정질 기반암에서의 지하수 유동은 취성변형(brittle deformation)으로 생성된 단층, 단열, 절리 등의 구조적 요소(structural element)로 정의된 지하수투수특성대(water-conducting feature)에서 발생한다[33]. 따라서, 지하수투수특성대의 분석은 결정질 암반내의 지하수 유입과 유출 분석에 중요한 인자에 해당된다. 본 연구에서는 지하수투수특성대를 지하수 주 유입지점으로 가정하여, 연구

Table 1. Basic statistics of rainfall at meteorological station (unit : mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
2006	38.5	50.0	25.0	114.5	210.0	128.0	556.0	213.0	257.5	42.5	40.5	17.5	1693.0
2007	14.0	46.0	103.5	44.0	77.0	131.0	291.5	142.5	302.0	60.5	6.0	13.0	1231.0
2008	224.0	7.5	87.0	86.0	129.0	226.5	196.0	277.0	25.5	24.5	16.0	13.5	1312.5
2009	23.5	47.0	38.5	37.0	77.5	156.5	377.0	40.0	106.5	43.5	71.0	15.0	1033.0
2010	19.0	102.0	99.5	103.0	141.5	37.0	172.5	146.5	231.5	40.0	6.5	37.0	1136.0
Mean	63.8	50.5	70.7	76.9	127.0	135.8	318.6	163.8	184.6	42.2	28.0	19.2	1281.1

Fig. 2. Location of monitoring wells in the study area.

지역의 총 18개 시추공(KB-1~KB-3, KB-7, KB-9~KB-11, KB-13~KB-15, DB1-1~DB1-3, DB1-5~DB1-8, DB2-2)에 수행된 수압 시험 결과를 바탕으로 유입지점(10^{-7} m/s)의 심도별 비율을 계산하였다(Fig. 2)[34]. 유입지점은 본 연구지역에서 제안된 투수성 구조의 수리전도도 값과 NAGRA 보고서에서 제안된 수리전도도 값을 이용하여 결정하였다.

DB1-3, DB1-5, DB1-7, DB2-2, KB-3, KB-13, KB-14 들은 시추공 전체 심도에 대한 기하평균 수리전도도 값이 1.00×10^{-7} m/s를 초과하며, 포화대 깊이에 대한 지하수 유입지점 길이 비율도 80%이상을 차지한다(Table 2). 그러나, DB1-1, DB1-2, DB1-6, DB1-8, KB-1, KB-2, KB-7, KB-9, KB-10, KB-11, KB-15은 전체 심도에 대한 기하평균 수리전도도 값이 1.00×10^{-7} m/s를 이하로 평가되었다.

Table 2. Hydrogeological characteristics of drilling wells in the study area

Well name	Surface elevation (a.m.s.l)	Drill depth (m)	Hydraulic conductivity (m/s)			Inflow point property	
			Max.	Min.	Geomean	Number	Inflow length /saturation depth (%)
DB1-1	4.85	205	1.24×10^{-6}	2.54×10^{-10}	3.87×10^{-08}	23	69.4
DB1-2	12.65	213	5.78×10^{-7}	3.06×10^{-10}	1.26×10^{-08}	18	58.9
DB1-3	38.7	91.6	1.66×10^{-6}	5.32×10^{-8}	3.03×10^{-7}	12	91.1
DB1-5	63.7	114	5.94×10^{-6}	6.52×10^{-9}	2.46×10^{-7}	16	100.0
DB1-6	31.8	232	1.17×10^{-6}	2.26×10^{-10}	8.93×10^{-9}	14	43.9
DB1-7	92.7	155.4	1.13×10^{-6}	1.00×10^{-10}	2.86×10^{-7}	22	91.7
DB1-8	166.2	198.6	6.37×10^{-7}	6.54×10^{-9}	7.21×10^{-8}	24	100.0
DB2-2	63.3	139.9	1.31×10^{-6}	7.19×10^{-10}	4.05×10^{-7}	20	87.8
KB-1	36.57	109	7.36×10^{-7}	6.91×10^{-9}	4.82×10^{-8}	7	47.6
KB-2	58.88	94.5	1.47×10^{-6}	3.06×10^{-9}	5.01×10^{-8}	8	61.2
KB-3	70.13	39	1.91×10^{-6}	1.22×10^{-6}	1.53×10^{-6}	2	100.0
KB-7	69.3	185	1.05×10^{-6}	4.94×10^{-9}	3.54×10^{-8}	21	92.4
KB-9	35.53	230	1.19×10^{-7}	1.40×10^{-9}	3.54×10^{-8}	14	48.6
KB-10	81.46	230	1.21×10^{-7}	1.19×10^{-8}	5.47×10^{-8}	29	94.2
KB-11	77.14	230	1.21×10^{-7}	2.09×10^{-8}	7.62×10^{-8}	28	99.4
KB-13	77.3	230	7.91×10^{-7}	6.73×10^{-9}	1.26×10^{-7}	27	86.7
KB-14	56.59	217.5	5.27×10^{-7}	4.70×10^{-9}	1.01×10^{-7}	29	98.8
KB-15	108.06	270	9.35×10^{-7}	1.93×10^{-9}	5.29×10^{-8}	22	74.6

4.3 지하수위 변동 특성

연구지역의 지하수위 변동 특성을 평가하기 위해 18 개 시추공에 대해서 2005년도부터 지하수위 모니터링을 수행하고 있다. 18 개 시추공은 나공 상태로서, 측정된 지하수위는 각 지점의 지하수면을 나타낸다. 우선 연구지역의 지하수위의 평형상태를 규명하기 위해 2007년 11월30 일 일평균 지하수위(Y)와 관측공 상부 지표고도(X)와 상관성을 분석한 결과(Fig. 3), 인위적인 영향을 받는 것으로 보이는 DB1-8과 KB-9을 제외한 상관식은 $Y=0.93X-6.37$ 이고 결정계수(r^2)은 0.91로서 상관성이 크게 나타나는데, 이는 지하수위가 인위적인 영향보다는 동적인 평형상태로 분포되고 있는 것으로 판단된다[35]. 따라서 지하수위는 계곡지역에서 얇게 위치하고 산지지역에는 깊게 분포하는 지형적 특성을 잘 반영하고 있다[36].

한편, 지하수위 변동 패턴을 평가하기 위해서 2007년 1월부터 2007년 11월까지 1 시간 간격으로 측정된 지하수위 자료를 일평균 자료로 변환하여 분석하였다. 연구지역의 계절적인 지하수 변동 특성은 국가지하수관측망 자료의 지하수위 변동 특성과 비교하여 4가지 유형(Type I ~Type IV)으로 분류하였다[37]. 유형 1(Type I)은 DB1-1과 DB1-2이 포함되며, 지하수위는 강수 사건에 의해 직접적으로 영향을 받아 심하게 변동하고 있다(Fig. 4). 유형 2(Type II)에는 DB1-3, DB1-7, KB-1, KB-2, KB-3, KB-7, KB-14, KB-15이 포함되며, 이들은 우기의 강한 강우 사건에 의해서 상승한 지하수위가 강우 사건이 이후 완만한 지하수위 감소 특성을 나타내고 있다(Fig. 5). 유형 3(Type III)은 DB1-5, DB1-6, DB2-2, KB-10, KB-11, KB-13을 포함하며, 유형 3의 지하수위는 유형 2보다 강

우 사건에 의한 수위변동 영향이 작지만 보다 장기적인 계절적 변동 양상이 우세하게 나타난다(Fig. 6). 한편 유형 4(Type IV)는 DB1-8과 KB-9이 포함되며, 불규칙한 지하수위 변동 특성을 보이고 있다(Fig. 7).

4.4 시계열분석

4.4.1 자기상관분석

연구부지 지하수의 수리 및 수문 특성을 평가하기 위해서 강우량과 지하수위에 대해서 자기상관분석을 실시하였다. 강우량의 자기상관분석 결과에 의하면, 자기상관함수는 지하수위보다 5 일 이내로 짧은 지연시간에 0에 도달하기 때문에 가장 약한 선형성과 기억효과를 나타낸다. 또한

Fig. 3. Relationship between surface elevation and groundwater level in the study area.

Fig. 4. Time series data of groundwater level (Type I).

Fig. 5. Time series data of groundwater level (Type III).

Fig. 6. Time series data of groundwater level (Type III).

자기상관함수는 지연시간 0에 도달한 후 주기적으로 증감하는 경향성을 보여주고 있다.

18 개 시추공 지하수위의 자기상관함수를 분석한 결과, 수문 특성으로 분류된 지하수 변동 유형에 따라 자기상관함수 분포도 뚜렷하게 구분된다(Fig. 8). 유형 1에 포함되는 시추공의 자기상관함수는 지연시간이 약 30 일 이내로 빠르게 0으로 수렴하여 가장 약한 선형성과 기억효과를 보인다. 유형 2의 경우, 자기상관함수가 0 일부터 30 일

까지는 빠르게 감소되지만 약 30 일부터 60 일까지는 감소율이 완만해진 후 다시 급해지는 분포를 나타낸다. 그리고 지연시간은 KB-1과 KB-7을 제외하곤 모든 시추공에서 약 73 일 후 0에 도달한다. 유형 3의 자기상관함수는 유형 2와 다르게 감소율의 변곡없이 지속적으로 일정하게 감소되는 패턴을 나타내며, 지연시간은 64 일 ~ 100 일로 다양하게 0에 도달된다. 한편, 유형 4의 자기상관함수의 분포는 특정한 경향성을 나타내지 않고 불규칙한 분포를 나타낸다.

Fig. 7. Time series data of groundwater level (Type IV).

Fig. 8. Autocorrelation of levels of groundwater at the monitoring wells in 2007.

4.4.2 교차상관분석

연구지역의 강우 사건과 지하수위 사이의 관련성을 인지하기 위해 교차상관함수를 분석하였다. 여기서, 강우를 입력 시계열, 지하수위를 출력 시계열로 적용하였다(Fig. 9). 유형 1 (DB1-1, DB1-2)의 지연시간은 각각 4일(0.332)

과 23일(0.182)에 강우 사건과 가장 큰 교차상관함수를 보이며 급격하게 교차상관함수가 감소되면서 음의 값으로 전환한다. 유형 2의 경우, 강우 사건에 의한 입력 지연시간은 거의 20일부터 24일까지이며, 최대 교차상관함수도 0.138~0.244 범위로 나타난다. 한편, 유형 3의 최대 교차

Fig. 9. Cross-correlation of levels of groundwater at the monitoring wells in 2007.

상관함수는 약 지연시간이 75 일 이상을 나타내며, DB1-6 을 제외하고는 초기 지연 시간 동안에 교차상관함수가 음 의 값을 나타낸다.

5. 토 의

결정질 암반 지역의 지하수위는 1차적으로 대수층의 매질 특성과 2차적인 단층, 단열, 균열 등의 지하수투수 특성대외도 밀접한 관련이 있다[38]. 연구지역에 분포하 는 19개 중에서 DB1-3, DB1-5, DB1-7, DB2-2, KB-3, KB- 13, KB-14들은 시추공 전체 심도에 대한 기하평균 수리전도 도 값이 1.00×10^{-7} m/s를 초과하며, 포화대 깊이에 대한 지 하수 유입지점 길이 비율도 80%이상을 차지한다. DB1-5 을 제외한 모든 시추공들은 연구지역내의 단열대와 인접 하게 분포되어 지하수투수특성대 요소들이 많이 포함되 기 때문에 수리전도도가 우수한 것으로 판단된다. 그러나 DB1-1, DB1-2, DB1-6, DB1-8, KB-1, KB-2, KB-7, KB-9, KB-10, KB-11, KB-15은 전체 심도에 대한 기하평균 수리 전도도 값이 1.00×10^{-7} m/s를 이하이며, KB-2, KB-15를 제 외하고는 단열대와 단열대 사이에 위치하는 결정질 암반 에 시추공들이 분포되어 지하수투수특성대 요소들이 상대

적으로 적게 포함되어 수리전도도가 낮은 것으로 사료된 다[33, 39].

한편, 지하수위 변동 패턴을 평가하기 위해서 2007년 1 월부터 2007년 11월까지 1시간 간격으로 측정된 지하수위 자료를 분석한 결과 4가지 지하수위 변동 유형으로 분류 하였다. 유형 1(DB1-1, DB1-2)의 지하수위는 강수 사건에 의해 직접적으로 영향을 받아 수위곡선이 심하게 변동하 고 있으며, 자기상관함수의 감소율이 가장 크고 지연시간 또한 약 30일 이내에 빠르게 0으로 수렴한다. 또한 교차상 관함수도 최대값을 지시한 후 급격한 기울기로 음의 값으 로 전환된다. 따라서 강우와의 관련하여 볼 때, 이들 시추 공들은 다른 시추공들과 비교하여 저지대에 위치하기 때 문에, 우기의 강한 강우사건의 입력 신호가 불포화대를 통 과하는 동안 보호되며, 포화대의 지하수위에 직접적인 영 향을 주는 것으로 판단된다.

유형 2(DB1-3, DB1-7, KB-1, KB-2, KB-3, KB-7, KB- 14, KB-15)의 지하수위는 우기의 강한 강우 사건에 의해서 상승된 지하수위는 완만한 경사로 지하수위가 감쇠를 나 타내며, 자기상관함수의 감소율은 0 일부터 30 일까지는 빠르게 감소되지만 약 30 일부터 60 일까지는 감소율이 완 만해진 후 다시 급해지는 분포를 나타낸다. 또한 교차상관

함수 분포도 최대값을 가진 후 감소하다가 다시 증가하는 패턴을 보여주고, 최대 교차상관함수는 유형 1과 비교하여 상대적으로 작은 수치를 나타낸다. 이는 강우의 지표 침투 사건의 입력 신호가 감소됨을 의미하여 지하수 유동에 영향을 미치는 다른 요인이 있음을 지시한다[31]. 유형 2에 포함되는 시추공들은 연구지역내의 주요한 단열대와 인접하게 분포하여 수리적 특성이 우수하기 때문에, 강한 강우 사건으로 인한 직접적인 지표 침투와 함께 고지대에서 함양된 지하수가 단열대에 포함된 지하수투수특성대를 통하여 빠르게 유입되는 것으로 사료된다. 따라서 유형 2의 지하수위 변동은 강우에 의한 영향과 단열대를 통한 지하수 유동 특성이 동시에 반영되어 나타나는 것으로 판단된다.

유형 3(DB1-5, DB1-6, DB2-2, KB-10, KB-11, KB-13)의 지하수위는 유형 2보다 강우 사건에 의한 수위변동 영향이 작고 지하수위 감쇠가 늦게 일어나며, 자기상관함수 변동도 변곡이 없이 일정하게 감소되는 추세를 나타낸다. 또한 최대 교차상관함수는 약 지연시간이 75 일 이상으로 길며, DB1-6을 제외하고는 초기 지연 시간 동안에 교차상관함수가 음의 값을 나타낸다. 이는 새로운 입력 인자(강우 사건)의 도착 이전에 이미 이전 입력 인자의 지속적인 감쇠에 따른 지하수위의 하강으로 설명될 수 있다[31]. 유형 3의 시추공들은 주단열대에서 원거리에 위치하여 유형 2보다 수리적 특성이 작다. 따라서 유형 3의 지하수위는 직접적인 강우의 지표 침투보다는 거리가 떨어진 상부 함양지역으로부터 침투된 지하수가 결정질 암반내의 소규모 단열대를 통하여 느리게 발생하는 계절적인 지하수 유동에 의해서 영향을 받고 있음을 지시한다. 이러한 지하수위 변동 패턴은 결정질 암반지역에서 기존에 수행된 Lee and Lee (2000)과 Kim et al (2008) 등의 연구 결과와도 잘 일치한다[22, 40]. 따라서, 시추공이 위치하는 결정질 암반의 수리지질학적 조건에 따라 강우의 직접적인 침투 특성과 암반 대수층을 통한 지하수 유동 특성이 서로 다르게 중첩되어 일어날 수 있음을 지시한다[23, 41].

한편, 유형 4는 DB1-8과 KB-9이 포함되며, 이들의 안정된 지하수위는 지표고도 아래로 41 m (DB1-8)와 18 m (KB-9)에 각각 위치하여, 주변의 인위적인 요인이나 암반의 불균질성 등의 영향을 받은 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구는 경상북도 경주시 양북면 결정질암반 지역에 분포하는 18개 시추공의 지하수위 모니터링 자료를 이

용하여 계절적인 지하수 유동 특성을 평가하였다. 연구지역에 분포하는 18개 시추공 중에서 단열대 주변에 위치하는 KB-3, DB2-2, DB1-3, DB1-7, DB1-5, KB-13, KB-14들은 시추공 전체 심도에 대한 기하평균 수리전도도 값이 1.00×10^{-7} m/s 이상 나타내어, 지하수투수특성대가 많이 포함되는 것으로 판단된다. 이러한 공간적인 수리지질 특성의 차이는 강우 사건에 대한 반응성과 단열대 및 소규모 단열망을 통한 광역적인 지하수 유동 반응성이 시추공에 따라 수리적으로 차이가 발생됨을 지시한다.

자기상관분석 결과, 수리 지질 특성과 강우 사건을 반영한 4가지 변동 유형으로 분류할 수 있다. 유형 1(DB1-1, DB1-2)은 저지대에 분포하고 있으며 지하수위가 강우 사건의 영향을 가장 크게 받고 있다. 유형 2(DB1-3, DB1-7, KB-1, KB-2, KB-3, KB-7, KB-14, KB-15)는 단열대 주변에 위치하여 지표의 파쇄대를 통한 강우의 유입과 단열대를 통한 지하수 유동이 동시에 영향을 받는다. 유형 3(DB-5, DB1-6, DB2-2, KB-10, KB-11, KB-13)은 모두 파쇄대와 원거리에 분포하기 때문에 파쇄대를 통한 강우 사건의 직접적인 영향보다는 소규모 단열대를 통한 지하수 유동 더 우세하게 일어난다. 유형 4(DB1-8, KB-9)는 암반의 다양한 불균질성과 이방성에 의해 지하수위가 영향을 받고 있다. 이러한 특성은 동일한 강우 사건에 대한 다른 지하수위 반응성을 평가한 교차상관분석을 통해서도 확인된다. 유형 1은 반응성이 빠르고 큰 교차상관함수 수치를 나타내어 불포화대를 통한 강우 사건의 직접적인 침투 영향을 받는 반면, 유형 3은 반응성이 느리며 초기 교차상관함수의 수치가 음의 값을 나타내고 상대적으로 작기 때문에, 강우 사건보다는 고지의 함양 지역으로부터 침투된 지하수가 소규모 단열망을 통하여 지하수 유동이 우세하게 일어남을 지시한다.

본 연구를 통하여 도출된 지하수위 시계열 자료의 분류 결과는 향후 지하수위 지속 강하 지역에 대한 추가 조사 및 원인 규명, 낮은 지하수 함양율을 보이는 지역에 대한 지하수 개발 관리 대책 수립 등에 기초적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2012171020001A). 또한 논문 교정을 도와준 박보배에게도 깊이 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] J.H. Lee , S.Y. Hamm, J.Y. Cheong, J.H. Jeong, S.K. Park, N.H. Kim and G.B. Kim, "Numerical simulation of the change in groundwater level due to construction of the Giheung tunnel", *The Journal of Engineering Geology*, 20(4), pp. 449-459 (2010).
- [2] P.A. Domenico and F.W. Schwartz, *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, New York, p. 824 (1990).
- [3] Y. Kim, T. Kim, K.Y. Kim, S.H. Hwang and B.G. Chae, "Analysis of groundwater flow characterization in fractured aquifer system", *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 10(4), pp. 33-44 (2005).
- [4] L. Jing, C.F. Tsang and O. Stephansson, 1995, "DECOVALEX - An international cooperative research project on mathematical models on coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics ABstracts*, 32(5), pp. 389-398 (1995).
- [5] S.H. Moon, Y.S. Kim, K. Ha, C.H. Won and J.Y. Lee, "Geological structures and their relation to groundwater system around K-1 oil stockpile", *Economic and Environment Geology*, 43(2), pp. 149-162 (2010).
- [6] J.H. Hwang, Y.H. Kihm, Y.B. Kim and K.Y. Song, "Tertiary hydroexplosion at Bonggil-ri, Yangbuk-myeon, Gyeongju", *Journal of Geological Society of Korea*, 43(4), pp. 453-462 (2007).
- [7] G.Y. Kim, Y.K. Koh, B.Y. Choi, S.H. Shin and D.H. Kim, "Geochemical characteristics of the Gyeongju LILW repository II. rock and mineral", *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, 6(4), pp. 307-327 (2008).
- [8] C.O. Choo, Y.D. Jang and C.J. Chang, "Mineralogical characteristics of hydrothermal laumontite and adularia in the breccia zone of a fault, Yangbuk-myeon, Gyeongju and implications for fault activity", *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 25(1), pp. 23-36 (2012).
- [9] K. Jin and Y.S. Kim, "Fracture developing history and density analysis based on grid-mapping in bonggil-ri, Gyeongju, SE Korea", *The Journal of Engineering Geology*, 17(3), pp. 455-469 (2007).
- [10] S.H. Ji, K.W. Park, K.S. Kim and C. Kim, "Analysis of the statistical properties for the background fractures in the LILW disposal site of Korea", *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, 6(4), pp. 257-263 (2008).
- [11] J.J. Choi, W.M. Sung and J.S. Hahn, "Analysis of pumping test data and the prediction of drawdown for Daejong-Chun area", *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 26(4), pp. 541-549 (1993).
- [12] K.S. Kim, C. Kim, D.S. Bae, S.H. Ji and S.T. Yoon, "Hydrogeological characteristics of the LILW disposal site", *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, 6(4), pp. 245-255 (2008).
- [13] B.Y. Choi, G.Y. Kim, Y.K. Koh, S.H. Shin, S.W. Yoo and D.H. Kim, "Geochemical characteristics of a LILW repository I. groundwater", *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, 6(4), pp. 297-306 (2008).
- [14] C.S. Oh and J.M. Kim, "Three-dimensional numerical simulation of groundwater flow and salt and radionuclide transport at a low and intermediate level radioactive waste disposal site in Gyeongju, Korea", *Journal of Geological Society of Korea*, 44(4), pp. 489-505 (2008).
- [15] K.W. Park, S.H. Ji, C. Kim, K.S. Kim and J.Y. Kim, "Numerical simulation of groundwater flow in LILW repository site 1. groundwater flow modeling", *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, 6(4), pp. 265-282 (2008).
- [16] S.Y. Hamm, J.Y. Cheong, J.H. Lee, C.W. Jeong and J. Park, "Prediction of groundwater level change in association with the construction of low/intermediate level radioactive waste repository in South Korea", *MODFLOW and More 2008*, International Ground Water Modeling Center, pp. 264-268 (2008).
- [17] W.C. Choi, J.H. Hwang, U. Yoon and D.H. Kim, *Geological map and explanatory note of the Eoil sheet (1:50,000)*, Korea Research of Geology Mining and Materials, p. 42 (1988).

- [18] M. Larocque, A. Mangin, M. Razack and O. Banton, "Contribution of correlation and spectral analysis to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France)", *Journal of Hydrology*, 205, pp. 217-231 (1998).
- [19] M.J. Yi, G.B. Kim, Y.C. Sohn, J.Y. Lee and K.K. Lee, "Time series analysis of groundwater level data obtained from national groundwater monitoring stations", *Journal of Geological Society of Korea*, 40(3), pp. 305-329 (2004).
- [20] J.Y. Cheong, Hydrogeological and hydrological characteristics of a riverbank filtration area in the lower Nakdong River basin, Korea, Ph.D. diss., Pusan National University, p. 199 (2008).
- [21] J.H. Lee, Groundwater - river interaction in the middle Nakdong River basin using physicochemical analyses and numerical modeling, Ph.D. diss., Pusan National University, p. 222 (2012).
- [22] J.Y. Lee and K.K. Lee, "Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system", *Journal of Hydrology*, 229, pp. 190-201 (2000).
- [23] J.Y. Lee and L.K. Lee, "A comparative study on characteristics of waterlevel responses to rainfall in the two aquifer system", *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 7(1), pp. 3-14 (2002).
- [24] G. Panagopoulos and N. Lambrakis, "The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems : application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete)", *Journal of Hydrology*, 329, pp. 368-376 (2006).
- [25] T. Mathevet, M. Lepiller and A. Mangin, "Application of time-series analyses to the hydrological functioning of an Alpine karstic system : the case of Bange-L'Eau-More", *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), pp. 1051-1064 (2004).
- [26] J.C. Davis, *Statistics and data analysis in geology*, John Wiley & Sons, p. 638 (2002).
- [27] J.H. Lee, S.Y. Hamm, J.Y. Cheong, H.S. Kim, E.J. Ko, K.S. Lee and S.I. Lee, "Characterizing riverbank-filtered water and river water qualities at a site in the lower Nakdong River basin, Republic of Korea", *Journal of Hydrology*, 376, pp. 209-220 (2009).
- [28] H.M. Choi, J.Y. Lee, K. Ha and G.P. Kim, "The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju Island", *The Journal of Engineering Geology*, 21(4), pp. 337-348 (2011).
- [29] J.Y. Chong, S.Y. Hamm, H.S. Kim, K.T. Son, Y.H. Cha and S. Sang, "Characteristics of waterlevel fluctuation in riverside alluvium of Daesan-myeon, Changwon City", *The Journal of Engineering Geology*, 13(4), pp. 457-474 (2003).
- [30] J.Y. Lee, M.J. Yi and D. Hwang "Dependency of hydrologic responses and recharge estimates on waterlevel monitoring locations within a small catchment", *Geosciences Journal*, 9(3), pp. 277-286 (2005).
- [31] J.M. Jeong, Y.C. Park, Y.J. Jo and J.Y. Lee, "Time series analysis of groundwater level fluctuation data in Cheonjeonri, Chuncheon, Gangwon-do", *Journal of Geological Society of Korea*, 46(2), pp. 171-176 (2010).
- [32] SAS Institute Inc., *SAS Version 9.1.3*. Cary, North Carolina : SAS Institute Inc (1995).
- [33] NAGRA, *Geology of the crystalline basement of northern Switzerland and derivation of geological input data for safety assessment models*, Technical Report 93-12, p. 236 (1998).
- [34] K.W. Park, K. Kim, Y.K. Koh and J.W. Choi "Synthetic study on the geological and hydrogeological model around KURT", *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, 9(1), pp. 13-21 (2011).
- [35] J.H. Lee, S.Y. Hamm, J.Y. Cheong, J.H. Jeong, N.H. Kim, K.S. Kim and H.T. Jeon, "Estimation of groundwater flow rate into Jikri tunnel using groundwater fluctuation data and modeling", *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 14(5), pp. 29-40 (2009).
- [36] Alan, E.K., *Geology for engineers and environmental scientist*, 3rd ed., Prentice-Hall, New Jersey, p. 696 (2006).
- [37] Ministry of Construction & Transportation, *Report of development of National groundwater monitor-*

- ing network, GW-2002, Korea Water Resources Corporation, p. 393 (2002) (in Korea).
- [38] S.H. Moon, K.Y. Kim, K. Ha, Y.S. Kim, C.H. Won, and J.Y. Lee, "Groundwater flow modeling and suggestion for pumping rate restriction around K-1 oil stockpiling base with geological consideration", *The Journal of Engineering Geology*, 20(2), pp. 169-181 (2010).
- [39] NAGRA, Kristallin- I Safety assessment report, Technical Report 93-22, p. 396 (1994).
- [40] T.W. Kim, S.Y. Hamm, J.Y. Cheong, S.M. Ryu, J.H. Lee, K.T. Son and N.H. Kim, "Time series and groundwater recharge analyses using water fluctuation data in mountain Geumjeong area", *Journal of the Environmental Sciences*, 17(2), pp. 257-267 (2008).
- [41] N. Massei, J.P. Dupont, B.J. Mahler, B. Laignel, M. Fournier, D. Valdes and S. Ogier, "Investigating transport properties and turbidity dynamics of karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses", *Journal of Hydrology*, 329, pp. 244-257 (2006).