J. Soil Groundw. Environ. Vol. 19(4), p. 12~22, 2014
http://dx.doi.org/10.7857/JSGE.2014.19.4.012
ISSN 1598-6438 (Print), ISSN 2287-8831 (Online)

≪ **Research Paper** ≫

시계열분석과 요인분석에 의한 결정질 암반의 지하수 유동 평가

이정환[1]* · 정해룡[1] · 윤시태[1] · 김지연[1] · 조성일[2]
[1]한국원자력환경공단
[2]한국수력원자력(주) 중앙연구원

Evaluation of Goundwater Flow Pattern at the Site of Crystalline Rock using Time Series and Factor Analyses

Jeong-Hwan Lee[1]* · Haeryong Jung[1] · Si-Tae Yun[1] · Jee-Yeon Kim[1] · Sung-Il Cho[2]
[1]Korea Radioactive Waste Agency
[2]Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD

ABSTRACT

This study evaluated the pattern of groundwater fluctuation in cyrstalline rock using time series and factor analyses. From the results, groundwater level for the 18 wells was classified into 4 types reflecting the hydrogeological properties and rainfall event. Type 1 (DB1-5, DB1-6, DB2-2, KB-10, KB-13) was significantly influenced by groundwater flow through water-conducting features, whereas type 2 (DB1-3, DB1-7, KB-1~KB-3, KB-7, KB-11, KB-14, KB-15) was affected by minor fracture network as well as rainfall event. Type 3 (DB1-1, DB1-2) was mainly influenced by surface infiltration of rainfall event. Type 4 (DB1-8, KB-9) was reflected by the irregular variation of groundwater level caused by anisotropy and heterogeneity of crystalline rock.

Key words : Groundwater level, Time series analysis, Factor analysis, Rainfall, Water-conducting features

1. 서 론

미고결 충적층이나 다공질 매질 등과는 다르게 결정질 암반에서 지하수 유동은 극히 제한적이고 국부적인 단열대 및 단층대를 통해서 발생된다(Domenico and Schwartz, 1990). 이는 결정질 암반내에서 지하수 유동을 지배하는 가장 중요한 인자는 불연속면들의 수리적 및 기하학적 특성임을 지시한다(Meiri, 1985; Barton et al., 1995; Leckenby et al., 2005; Ko et al., 2010). 따라서, 지하 암반의 불연속 파쇄대의 발달 상태, 수리지질학적 특성에 대한 정밀조사 및 이와 관련 연구는 지하 구조물 건설하기 전에 반드시 선행되어야하며, 또한 지하 구조물 건설 후의 안정성 평가에도 필수적으로 요구된다(Kim et al., 2005; Lee et al., 2009a; Lee et al., 2010; Ji and Koh, 2010).

결정질 암반내에서 지하수 유동 및 지하수위 변동 연구는 대형 지하 구조물인 원유, LPG, LNG 등의 지하유류 비축기지 및 방사성폐기물 처분장 건설에 따라 1990년대 중반 이후로 폭넓게 연구되고 있다(SKB, 1998; Kim and Jeong, 2002; Park et al., 2008; Moon et al., 2010; Lee et al., 2013). 특히, 지하수 수문순환의 일환으로 지표로 침투된 강우가 결정질암내에 발달하고 있는 단열대를 통한 유동 현상을 규명하는 연구들이 수행되고 있으며 상당한 연구 성과들이 도출되고 있다(Larocque et al., 1998; Lee et al., 2004; Panagopoulos and Lambrakis, 2006; Choi and Lee, 2010; Choi et al., 2011; Kim et al., 2012).

그러나 앞의 선행 연구들은 강우량과 지하수 변동과의 상관성을 규명하여 지하수 침투 및 함양 특성을 규명한 것으로서, 강우량과 지하수위 변동을 상세 수리 시험 결

*Corresponding author : oathway@korad.or.kr
Received : 2013. 8. 20 Reviewed : 2014. 8. 5 Accepted : 2014. 8. 6
Discussion until : 2014. 10. 31

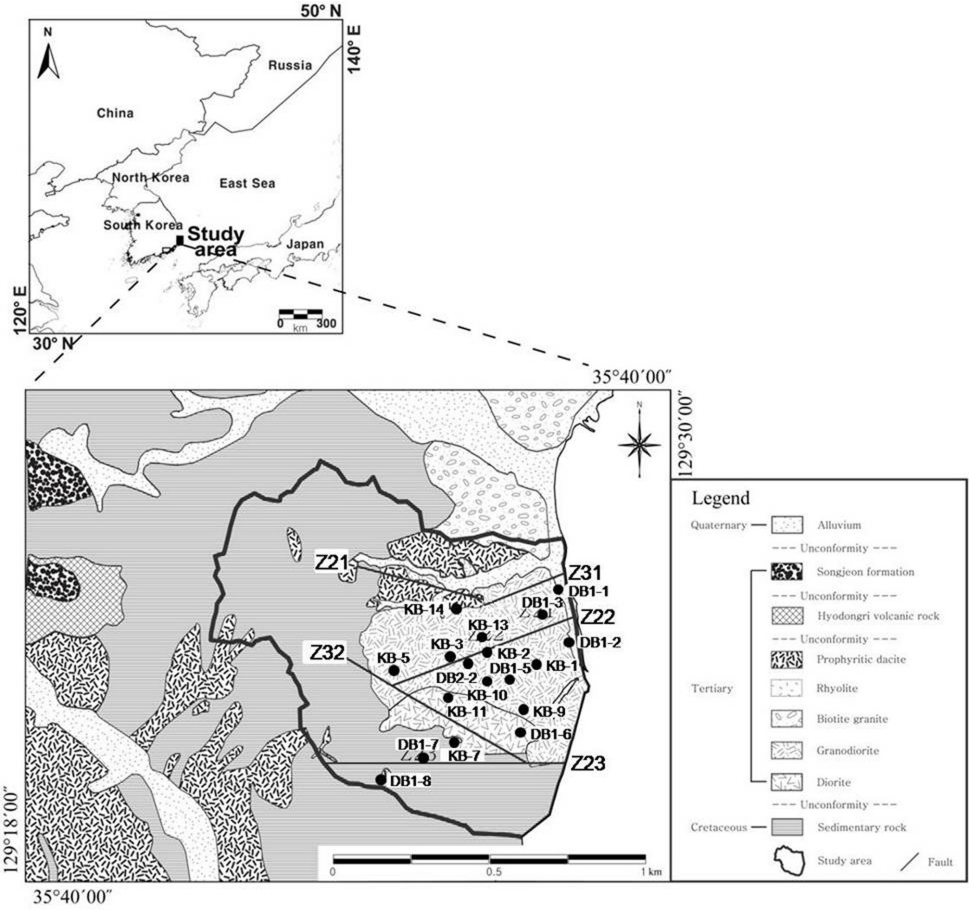


Fig. 1. Geological map of the study area (from Hwang et al., 2007).

과와 지구통계적인 분석을 종합한 연구는 미진한 편이다. 따라서 본 연구는 18개의 관측공의 상세 수리 시험 결과 자료와 장기적인 지하수 변동 모니터링 자료를 분석하고 시계열분석과 요인분석 기법을 활용하여 결정질 암반 지역의 지하수 유동 특성을 평가하고자 한다.

2. 연구지역

연구지역은 경상북도 경주시 양북면 일원으로서, 해발고도는 300 m 이하, 경사도는 약 30% 미만의 완만한 지형을 형성하고 있다(Park et al., 2008). 서고동저형의 지형 경사로 인해서 동서방향의 산지들이 발달하며 이들 사이의 계곡부에는 건천형태의 소하천들이 분포한다(Fig. 1). 지질분포는 하부로부터 상부로 백악기 퇴적암, 제3기 관입암류에 포함되는 섬록암, 화강섬록암, 반상질 조면암질 안산암과 이들 모두를 피복하고 있는 제4기 충적층이 계곡부를 따라서 분포된다(Choi et al., 1988; Hwang et al., 2007). 한편, 연구지역에는 국소 규모의 5개(Z21, Z22, Z23, Z31, Z32)의 수직적인 단열대들이 분포하고 있다(Kim et al., 2008).

3. 연구방법

3.1. 시계열 분석

시계열 분석은 일정한 주기를 가지며 동일한 간격으로 연속적으로 측정된 시간 종속 변수들을 바탕으로 그 변동 원인 규명 및 예측을 위하여 수행되는 분석 기법이다(Larocque et al., 1998). 시계열 분석기법 중에서 수리·수문자료 특성 분석에 널리 적용되고 있는 방법이 자기상관분석(autocorrelation analysis)과 교차상관분석(cross-correlation analysis)이다(Cheong et al., 2003; Lee et al., 2009b). 자기상관분석은 시계열 자료들의 자기상관함수를 계산하여 자기의 유사성과 반복성이나 그 외 특별한 성질을 파악하는 방법이다(Choi et al., 2011). 한편, 교차상관분석은 입력 시계열 자료와 출력 시계열 자료간의 시간영역에서의 상관성으로부터 인과관계에 대한 정보를 평

가할 수 있다(Lee et al., 2005). 교차상관함수는 ±1의 범위를 가지며 최고점에 도달한 시간인 지연시간(time delay)을 분석하여 두 시계열 상호간의 스트레스 전파 속도를 산정한다. 본 연구에서는 자기상관분석과 교차상관분석을 이용하여 강우량과 지하수위의 상호 변동 특성을 분석하였다.

3.2. 요인분석

요인분석은 대규모 자료집단을 단순화하고 체계화하여 일반화시켜 자료의 의미를 고찰하는 다변량 기법의 일종으로서, 상관성이 큰 최초 변수들로 집단화할 수 있다(Papatheodorou et al., 2007). 요인 추출 모델은 보통 PCA(Principal Component analysis) 기법으로 도출되며 1 이상의 고유값(eigenvalue)을 선택하고, 각 요인들에 대한 요인적재의 분산을 최대화하도록 Varimax 직각회전방식을 이용하여 요인들을 직교변환한다(Jöreskog et al., 1976). 요인분석은 Q-모드분석과 R-모드분석으로 구분될 수 있으며(Davis, 2002), Q-모드 분석은 다변량 공간에서 변수들을 집단화하여 측정값들 간의 관련성을 평가하는 기법이고(Reghunath et al., 2002; Lee et al., 2009c; Kim et al., 2013), R-모드 분석은 공분산으로부터 고유값과 고유벡터를 추출하여 각각의 변수들 간의 관계를 규명할 수 있다(Hamm et al., 2006; Ko et al., 2008). 본 연구에서는 Q-모드 분석을 실시하여 공간적인 지하수위 변동 특성에 따른 관계 유형을 추출하고자 분석하였다. 시계열 분석과 요인분석을 수행하기 위해서 SAS ver. 9.1.3 통계 프로그램을 이용하였다(SAS Institute Inc., 1995).

4. 결과 및 고찰

4.1. 강우량 분석

연구지역의 계절적인 강우량 변동을 조사하기 위해서, 2006년 1월부터 2010년 12월까지 연구지역 내에 설치된 기상대의 1일 누적 강우량 자료를 분석하였다. 5년 동안의 연평균 강우량은 약 1,281 mm로서, 남부지방 연평균 강우량인 1,200~1,300 mm 범위에 포함된다(Song et al., 2005). 우리나라의 강우 사건은 연평균 강우량의 약 66%가 6월에서 9월 사이에 집중강우 형태로 발생되고 있는데, 연구지역 역시 6월부터 9월까지 누적 월별 평균 강우량(802.8 mm)이 연평균 강우량의 약 62.7%에 해당된다(Table 1). 이는 연구지역의 수문순환 특성이 계절적으로 우기와 건기로 뚜렷하게 구분되며, 우기 동안의 강한 강우사건이 지하수위 변동에 직접적으로 영향을 미칠 수 있음을 지시한다.

4.2. 수리지질 특성

결정질 암반에서 지하수 유동은 1차 공극보다는 2차 공극에 해당되는 단층, 단열, 절리 등의 투수성 지질구조(water-conducting feature)에서 더 우세하게 발생한다. 따라서 투수성 지질구조들은 시추공 내로 지하수의 유입과 유출을 지배하는 주요한 인자이다(NAGRA, 1998). 연구지역의 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 분석하여, Park et al. (2011)이 제안한 화강암 지역에 대한 투수성 구간($> 10^{-7}$ m/s)을 지하수 유입 및 유출 지점으로 가정하여 해석하였다.

DB1-3, DB1-5, DB1-7, DB2-2, KB-3, KB-13들은 시추공 전체 심도에 수리전도도의 중앙값이 1.00×10^{-7} m/s을 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-14, KB-15은 전체 심도에 대한 수리전도도 중앙값이 1.00×10^{-7} m/s 이하로 분석된다.

연구지역에 분포되는 5개의 단열대들과 18개 시추공과의 공간적인 분포를 비교한 결과, DB1-5를 제외한 DB1-3, DB1-7, DB2-2, KB-3, KB-13 시추공들은 국소 단열대와 인접하게 분포되기 때문에, 시추공 내에 투수성 지질구조들이 다수 포함되어 수리적 특성이 우수한 것으로 판단된다(Fig. 1). 그러나, KB-2를 제외한 DB1-1, DB1-2, DB1-6, DB1-8, KB-1, KB-7, KB-9, KB-10, KB-

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

Table 2. Hydrologeological parameters of the 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.	Median	Number	Inflow length /saturation depth (%)
DB1-1	4.85	205	1.24×10^{-6}	2.54×10^{-10}	6.76×10^{-08}	23	69.4
DB1-2	12.65	213	5.78×10^{-7}	3.06×10^{-10}	2.40×10^{-08}	18	58.9
DB1-3	38.7	91.6	1.66×10^{-6}	5.32×10^{-8}	2.66×10^{-07}	12	91.1
DB1-5	63.7	114	5.94×10^{-6}	6.52×10^{-9}	3.77×10^{-07}	16	100
DB1-6	31.8	232	1.17×10^{-6}	2.26×10^{-10}	8.72×10^{-10}	14	43.9
DB1-7	92.7	155.4	1.13×10^{-6}	1.00×10^{-10}	6.98×10^{-07}	22	91.7
DB1-8	166.2	198.6	6.37×10^{-7}	6.54×10^{-9}	7.76×10^{-08}	24	100
DB2-2	63.3	139.9	1.31×10^{-6}	7.19×10^{-10}	6.10×10^{-07}	20	87.8
KB-1	36.57	109	7.36×10^{-7}	6.91×10^{-9}	3.21×10^{-08}	7	47.6
KB-2	58.88	94.5	1.47×10^{-6}	3.06×10^{-9}	3.43×10^{-08}	8	61.2
KB-3	70.13	39	1.91×10^{-6}	1.22×10^{-6}	1.57×10^{-06}	2	100
KB-7	69.3	185	1.05×10^{-6}	4.94×10^{-9}	2.36×10^{-08}	21	92.4
KB-9	35.53	230	1.19×10^{-7}	1.40×10^{-9}	1.97×10^{-08}	14	48.6
KB-10	81.46	230	1.21×10^{-7}	1.19×10^{-8}	4.67×10^{-08}	29	94.2
KB-11	77.14	230	1.21×10^{-7}	2.09×10^{-8}	9.65×10^{-08}	28	99.4
KB-13	77.3	230	7.91×10^{-7}	6.73×10^{-9}	1.47×10^{-07}	27	86.7
KB-14	56.59	217.5	5.27×10^{-7}	4.70×10^{-9}	9.40×10^{-08}	29	98.8
KB-15	108.06	270	9.35×10^{-7}	1.93×10^{-9}	5.53×10^{-08}	22	74.6

11, KB-14, KB-15은 국소 단열대와 단열대 사이의 결정질 암반 지역에 분포되기 때문에, 투수성 지질구조 요소들이 상대적으로 적게 포함되어 수리적 특성이 낮은 것으로 사료된다(NAGRA, 1994).

4.3. 지하수위 변동 특성 해석

4.3.1. 지하수위 관측 자료 분석

계절적인 지하수위 변동 특성을 평가하기 위해서, 2007년 1월부터 2007년 11월까지 1시간 간격으로 측정된 지하수위 관측 자료를 일평균 자료로 변환하여 분석하였다. 연구지역의 지하수위 변동 패턴은 국가지하수 관측망의 지하수위 변동 특성과 상호 비교하여 결정하였다(Minstry of Construction & Transportation, 2002; Yi et al., 2004).

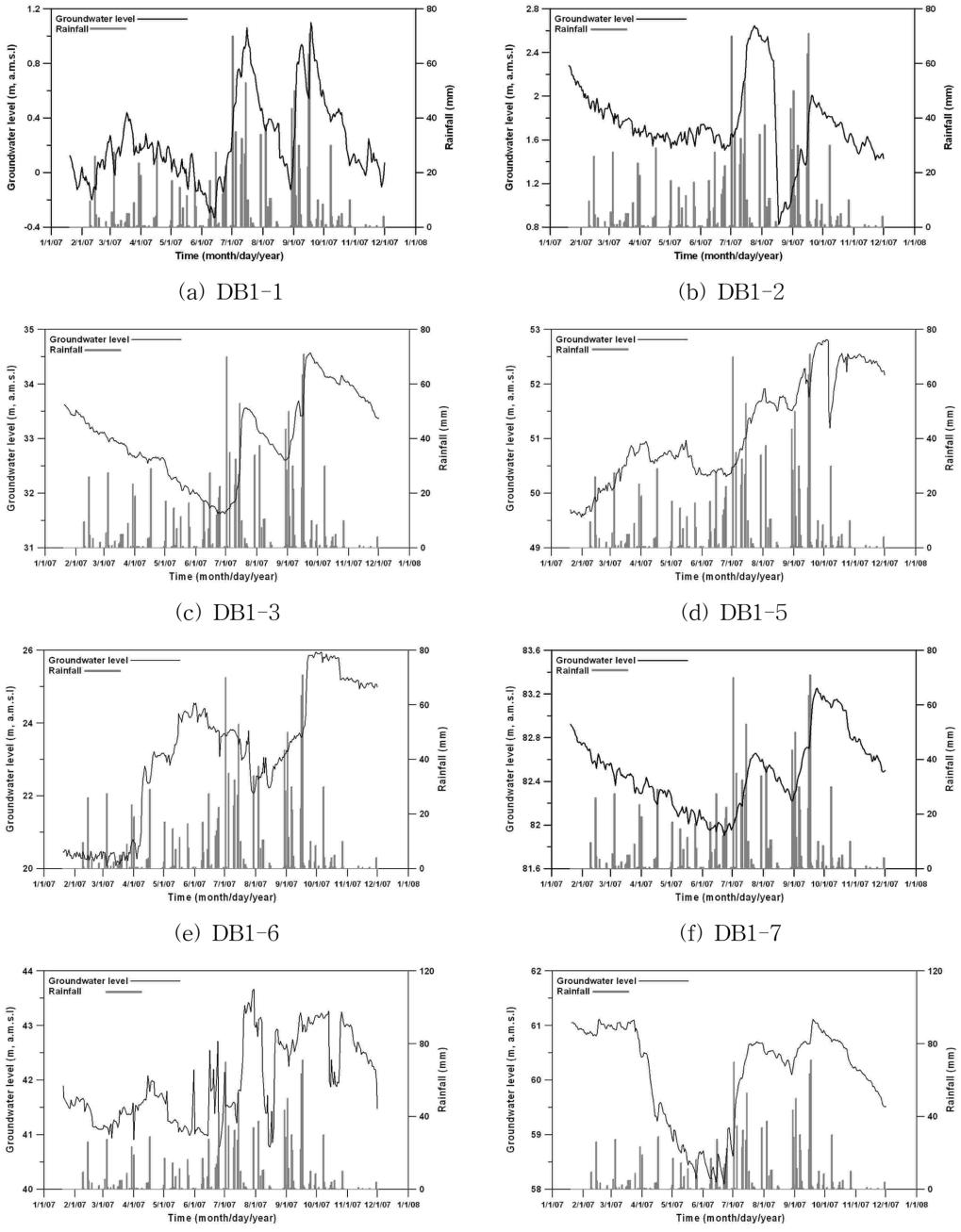
연구지역의 지하수위는 강우 사건에 의한 계절적인 변동이 나타나고 있으나, 시추공의 공간적 분포에 따라 다른 지하수위 변동 특성을 나타내고 있다(Fig. 2). DB1-1과 DB1-2의 지하수위는 강우 사건에 의해 직접적으로 영향으로 인해, 지하수위가 민감하게 변동하며 감쇠반응도 빠르게 발생한다. DB1-3, DB1-5, DB1-6, DB1-7, DB2-2, KB-1, KB-2, KB-3, KB-7, KB-14, KB-15, KB-10, KB-11, KB-13의 지하수위는 강우 사건에 의한 반응이 작고 감쇠 반응도 다양한 형태로 완만하게 발생되고 있다. 한편, DB1-8과 KB-9의 지하수위는 지표고도 아래로 41 m (DB1-8)와 18 m(KB-9)에 각각 위치되며, 불규칙적인 변동을 나타낸다. 이러한 시추공별 지하수위 변동 차이는 강우 사건에 대한 결정질 암반의 수문학적 반응 특성에 기인됨을 지시한다(Lee et al., 2013).

4.3.2. 시계열분석

연구지역의 지하수위 변동을 정량적으로 평가하기 위해서 강우량과 지하수위에 대해서 자기상관분석과 교차상관분석을 실시하였다. 자기상관분석 결과, 강우량은 지연시간이 5일 이내로 빠른 감소를 나타내어 약한 선형성과 기억효과를 나타낸다. 지하수위는 4가지 변동 유형(Type)로 분류된다(Fig. 3). 유형 1은 DB1-5, DB1-6, DB2-2, KB-10, KB-13가 포함되며, 자기상관함수가 변곡점 없이 일정하게 감소되는 패턴을 나타낸다. 유형 2(DB1-3, DB1-7, KB-1~KB-3, KB-7, KB-11, KB-14, KB-15)의 경우, 자기상관함수가 0일부터 30일까지는 빠르게 감소되지만 약 30일부터 60일까지는 감소율이 완만해진 후 다시 급해지는 경향성을 보인다. 유형 3은 DB1-1, DB1-2이 포함되며, 자기상관함수의 지연시간이 약 30일 이내로 빠르게 0으로 수렴함에 따라 가장 약한 선형성과 기억효과를 나타낸다. 한편, 유형 4에는 DB1-8, KB-9가 포함되며, 자기상

관함수가 특정한 경향성 없이 불규칙한 경향을 나타낸다.

연구지역의 강우 사건과 지하수위 사이의 관련성을 규명하기 위해 교차상관분석을 실시하였다. 강우를 입력 시계열, 지하수위를 출력 시계열로 적용하였다(Fig. 4). 유형 1은 지연시간이 증가함에 따라 교차상관함수는 로그함수 곡선 형태를 나타내며, DB1-6을 제외하고는 초기 지연시간 동안에 교차상관함수가 음의 값을 나타낸다. 이는 새로운 입력 인자(강우 사건)의 도착 이전에 이미 이전 입력 인자의 지속적인 감쇄에 따른 지하수위의 하강으로 설명될 수 있다(Jeong et al., 2010). 유형 2는 지연시간 20일부터 24일 사이에서 최대 교차상관함수를 가진 후 감소하다가 다시 증가되는 경향을 나타낸다. 이는 강우의 지표 침투 사건의 입력 신호가 감소됨을 의미하여 지하수위 변동에 영향을 미치는 다른 요인이 있음을 의미한다



(a) DB1-1 (b) DB1-2

(c) DB1-3 (d) DB1-5

(e) DB1-6 (f) DB1-7

(g) DB1-8 (h) DB2-2

Fig. 2. Time series data of groundwater level in the study area.

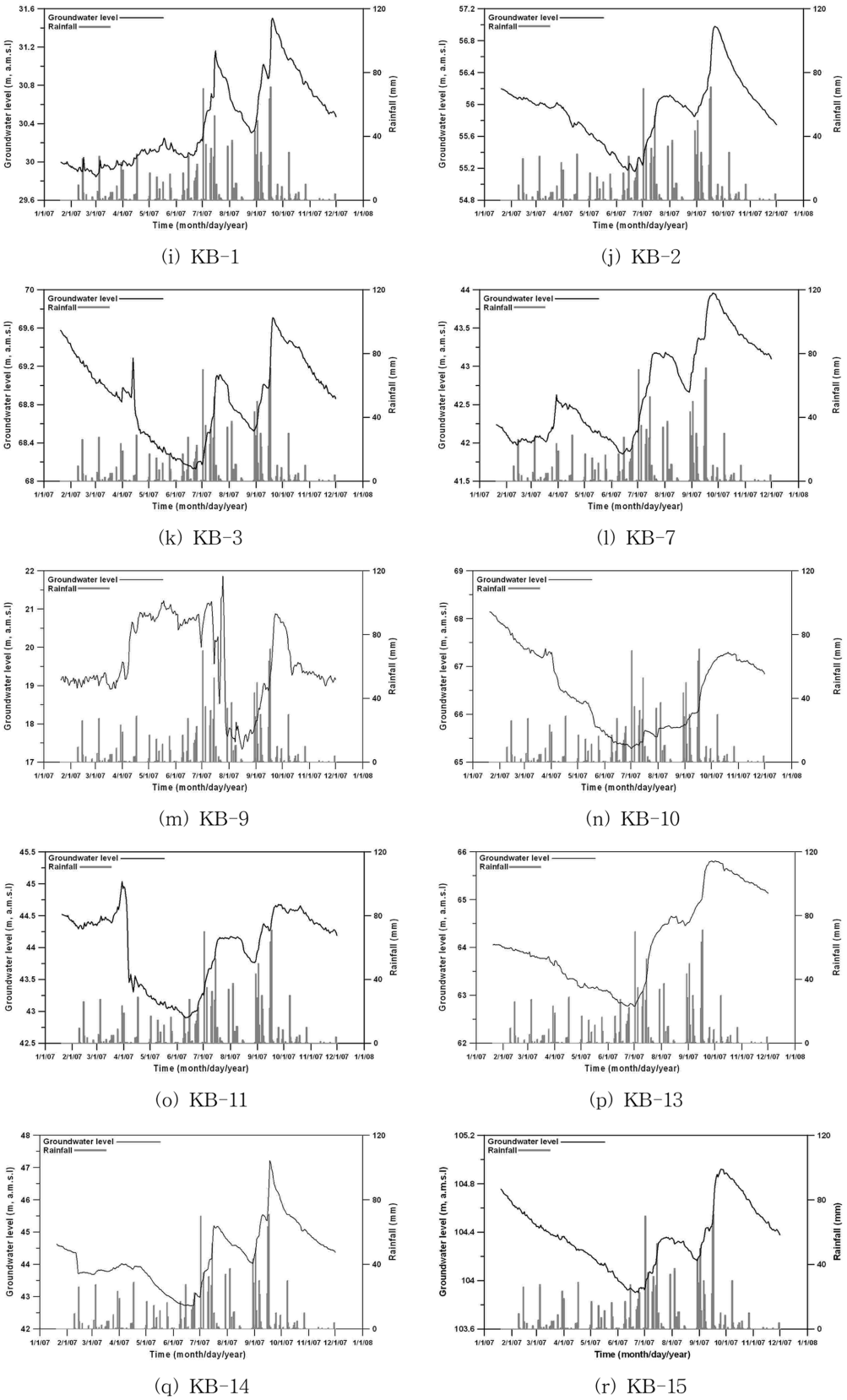
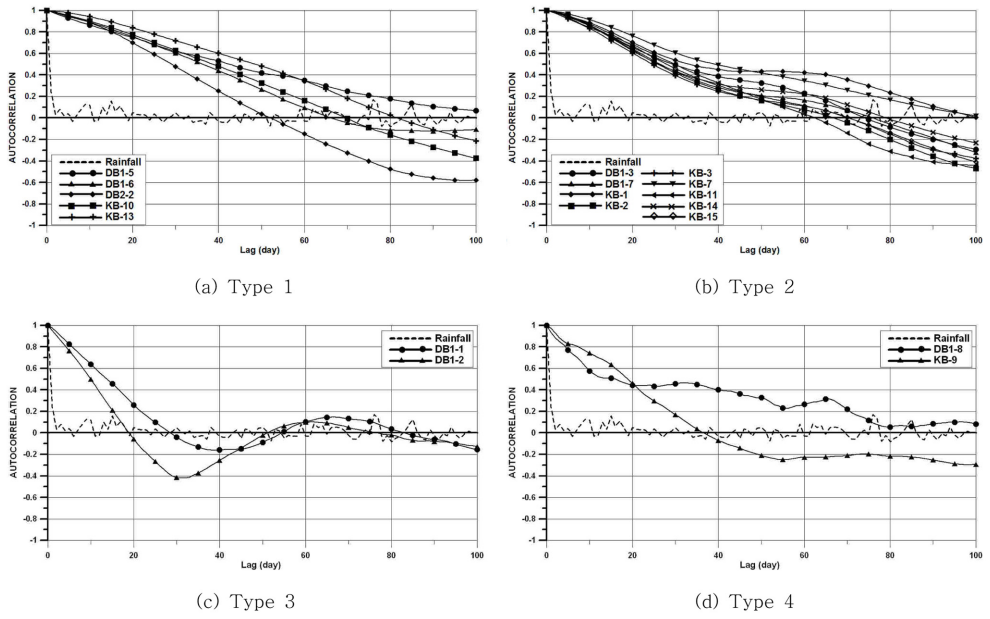


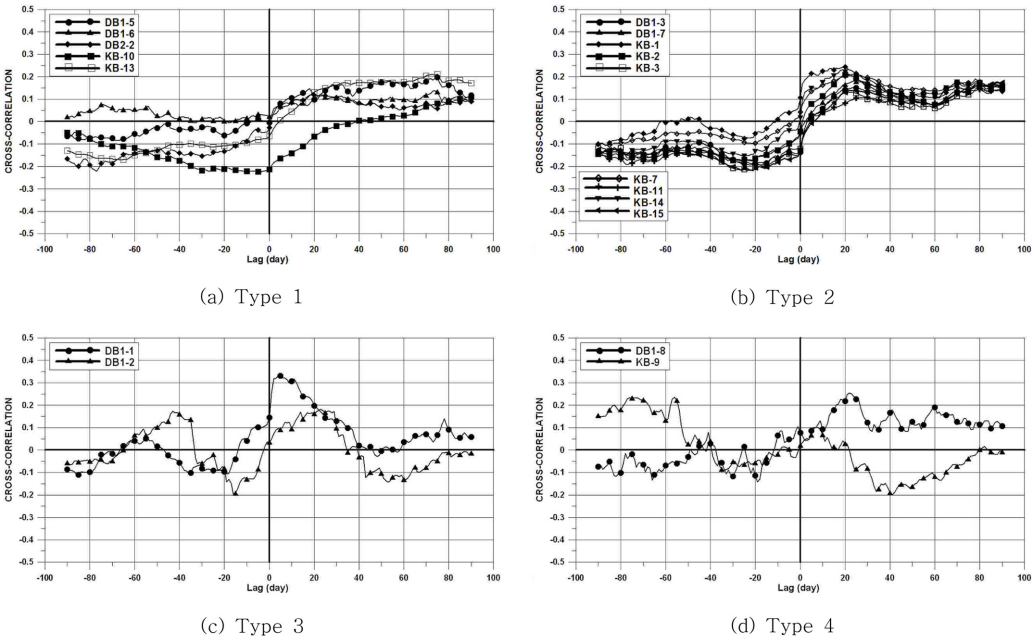
Fig. 2. Continued.



(a) Type 1 (b) Type 2

(c) Type 3 (d) Type 4

Fig. 3. Autocorrelation functions of groundwater level and rainfall in the study area.



(a) Type 1 (b) Type 2

(c) Type 3 (d) Type 4

Fig. 4. Cross-correlation functions in the study area.

(Jeong et al., 2010). 유형 3의 경우, 강우에 대한 최대 교차상관함수가 다른 유형들보다 크고 지연시간에 따른 교차상관함수도 급격하기 감소되면서 음의 값으로 전환된다. 이는 유형 3의 지하수위는 강우 사건에 의한 영향이 가장 크게 나타남을 지시한다. 한편, 유형 4는 특정한 경향성 없이 불규칙한 분포를 나타낸다.

4.3.3. 요인분석

연구지역에서 관측된 지하수위와 시계열 분석을 바탕으로 결정된 지하수위 변동 특성을 정량적으로 규명하기 위해서, Q-모드 요인분석을 실시하였다. 고유값이 1 이상인 5개의 요인을 추출하였으며, 전체 설명율은 약 96.7%이다 (Table 3).

Table 3. Varimax rotated Q-mode factors for drilling wells in the study area

	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5	Communality
Rainfall	0.02	–0.12	–0.09	**0.25**	–0.03	0.09
DB1-1	0.34	0.15	0.32	**0.75**	0.02	0.81
DB1-2	–0.25	0.26	0.46	**0.50**	0.17	0.62
DB1-3	0.50	**0.79**	0.29	0.01	–0.16	0.98
DB1-5	**0.94**	0.09	–0.02	–0.01	–0.20	0.93
DB1-6	**0.88**	–0.15	–0.23	–0.12	0.33	0.97
DB1-7	0.41	**0.82**	0.35	0.11	–0.06	0.97
DB1-8	**0.69**	0.23	0.23	0.24	–0.12	0.66
DB2-2	–0.12	0.46	**0.79**	0.24	–0.19	0.95
KB-1	**0.86**	0.18	0.21	0.40	0.07	0.98
KB-2	0.26	**0.67**	0.62	0.22	–0.08	0.95
KB-3	0.15	**0.86**	0.45	0.08	–0.08	0.97
KB-7	0.52	0.14	**0.83**	0.05	0.10	0.99
KB-9	–0.08	–0.15	0.04	0.01	**0.93**	0.89
KB-10	–0.20	**0.85**	0.13	–0.40	–0.10	0.95
KB-11	–0.02	0.24	**0.96**	–0.05	0.03	0.98
KB-13	**0.76**	0.54	0.06	–0.11	–0.33	0.99
KB-14	**0.62**	0.60	0.30	0.33	–0.13	0.96
KB-15	0.14	0.64	**0.74**	–0.04	0.07	0.99
Eigenvalue	9.28	3.59	1.95	1.07	0.73	
Variance explained by the factor (%)	54.0	20.9	11.4	6.2	4.3	
Cumulative persent of variance (%)	54.0	74.8	86.2	82.4	96.7	

요인 1에 대해 높은 양(+)의 적재량을 보이는 시추공은 DB1-5, DB1-6, DB1-8, KB-1, KB-13, KB-14로서, 불규칙한 지하수위 변동을 지시하는 DB1-8과 KB-1, KB-14를 제외하고는 지하수 유형 1에 포함된다. 요인 1에 포함되는 시추공들의 지하수위는 직접적인 강우의 지표 침투보다는 원거리의 산지지역으로부터 함양된 지하수가 결정질 암반내의 수리적 특성이 우수한 단열들을 통해 발생하는 계절적인 지하수 유동 패턴을 반영하는 것으로 판단된다(Jeong et al., 2010). 요인 2에 대해 높은 양(+)의 적재량을 보이는 시추공은 DB1-3, DB1-7, KB-2, KB-3, KB-10이며 KB-10을 제외하고는 지하수 유형 2와 일치한다. 요인 2에 포함되는 시추공들의 지하수위는 우기의 강한 강우 사건에 의해서 부분적으로 영향을 받고 있으며, 낮은 수리적 특성으로 인한 국소적으로 느린 지하수 유동의 영향이 동시에 나타나고 있음을 지시한다. 요인 3(고유값 : 1.95)에 양의 적재량을 나타내는 시추공은 DB2-2, KB-7, KB-11, KB-15이며, 지하수 유형 1과 유형 2의 중첩된 특성 반영하는 것으로 판단되며, 강우 사건에 대한 지하수 변동 특성과 지하수위 감쇠 특성을 비교하면 유형 2의 영향이 더 우세하게 미치는 것으로 판단된다. 한편, 요인 4(고유값 : 1.07)에는 유형3의 DB1-1, DB1-2, 강우가 적재되며, 강우사건에 영향이 주요하게 나타남을 지시한다. 이러한 결과는 상대적으로 해발고도가 낮은 소규모 유역에서 지하수 변동 및 함양률이 높은 연구결과와도 잘 일치한다(Lee et al., 2005; Choi and Lee, 2010). 요인 5(고유값 : 0.73)에는 불규칙한 지하수위 변동을 지시하는 유형 4에 해당되는 KB-9이 포함된다. 따라서 시추공이 위치하는 결정질 암반의 수리지질학적 조건에 따라 강우의 직접적인 침투 특성과 결정질 암반을 통한 지하수 유동 특성이 서로 다르게 중첩되어 발생됨을 의미한다(Lee and Lee, 2000; Lee and Lee, 2002; Massei et al., 2006).

5. 결 론

본 연구는 결정질 암반지역에 분포하는 18개 시추공의 지하수위 관측 자료를 시계열분석과 요인분석을 통하여 결정질 암반의 지하수의 유동 특성을 평가하고자 하였다. 연구지역의 강우량은 1,281 mm로서, 약 66%가 6월과 9월 사이에 집중된다. 수문학적으로 우기와 건기가 명확하

게 구분됨에 따라 우기의 강한 강우는 지하수위 변동에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인에 해당된다.

연구지역의 수리적 특성은 단열대 주변에 분포되는 시추공들(DB1-3, DB1-5, DB1-7, DB2-2, KB-3, KB-13)은 균질한 결정질 암반 영역 시추공들(DB1-1, DB1-2, DB1-6, DB1-8, KB-1, KB-2, KB-7, KB-9, KB-10, KB-11, KB-14, KB-15)보다 수리적 특성이 우수한다. 이러한 공간적인 수리지질학적 특성으로 인해서, 각각의 시추공 지하수위는 외부 수문 인자들의 스트레스 반응과 계절적인 지하수 유동, 순환 등의 영향이 서로 다르게 반영되는 변동 특성이 일어난다.

시계열분석과 요인분석 결과, 수리지질 특성과 강우 사건에 반응성을 고려한 4가지 지하수 변동 유형으로 구분할 수 있다. 유형 1(DB1-5, DB1-6, DB2-2, KB-10, KB-13)은 강한 선형성과 기억효과를 가지고 있으며, 강우 사건에 의한 초기 반응성이 음의 값을 나타낸다. 이는 지하수위 변동이 강우 사건의 직접적인 영향보다는 결정질 암반내의 단열대를 통한 계절적인 지하수 유동의 영향이 우세하게 영향을 미치고 있음을 지시한다. 유형 2(DB1-3, DB1-7, KB-1~KB-3, KB-7, KB-11, KB-14, KB-15)는 자기상관함수와 교차상관함수 분포가 이정(bimodal)곡선 형태를 나타내고 있으며, 유형 1과 비교하여 수리적 특성이 작다. 따라서, 지하수위가 우기의 강한 강우 사건에 의해서 부분적으로 영향을 받고 있으며, 낮은 수리적 특성으로 인한 느린 지하수 유동 특성이 동시에 나타남을 지시한다. 유형 3(DB1-1, DB1-2) 공간적으로 저지대에 분포되어 지하수위가 강우 사건의 직접적인 영향을 받는다. 유형 4(DB1-8, KB-9)는 인위적인 요인과 결정질 암반의 불균질성과 이방성에 의해 지하수위가 영향을 받고 있다.

본 연구를 통하여 시계열분석과 요인분석 기법들이 지하수 환경을 평가하는데 유용한 기법 및 도구임을 설명하였다. 따라서 본 연구를 통하여 도출된 분석 결과는 향후 지하구조물 굴착에 따른 지하수위 환경 변화 원인 규명과 불균질한 결정질 암반 지역에 대한 지하수위 변동 평가 등에 기초적인 해석방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 결정질 암반지역의 지하수위 변동은 다양한 수리·수문학적 요인들을 반영하여 발생되기 때문에 장기적인 지하수위 변동과 지하수 유출량을 감시하는 체계적인 시스템이 국가 제도적으로 정착되어야할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20121710200001A). 또한 논문 교정 작업을 맡아준 박보배님께도 감사를 전합니다.

References

Barton, C.A., Zoback, M.D., and Moos, D., 1995, Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock, *Geology*, **23**, 683-686.

Cheong, J.-Y., Hamm, S.-Y., Kim, H.-S., Son, K.-T., Cha, Y.-H., Jang, S., and Baek, K.-H., 2003, Characterisitics of waterlevel fluctuation in riverside alluvium of Daesan-myeon, Changwon City, *J. Eng. Geol*., **13**(4), 457-474.

Choi, H.-M. and Lee, J.-Y., 2010, Groundwater level distribution and rainfall response characteristics in Haean basin of Yangu, *J. Soil Groundw. Environ*., **15**(6), 1-8.

Choi, H.-M., Lee, J.-Y., Ha, K., and Kim, G.-P., 2011, The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju Island, *J. Eng. Geol*., **21**(4), 337-348.

Choi, W.C., Hwang, J.H., Yoon, U., and Kim, D.H., 1988, Gological map and explanatory note of the Eoil sheet (1:50,000), Korea Research of Geology Mining and Materials, 42 p.

Davis, J.C., 2002, Statistics and data analysis in geology, 3rd ed., John Wiley & Sons, 638 p.

Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, New York, 824 p.

Hamm, S.-Y., Kim, K.S., Lee, J.-H., Cheong, J.-Y., Sung, I.H., and Jang, S., 2006, Characteristics of groundwater quality in Sasan industrial area, Busan metropolitan city, *Econ. Environ. Geol.,* **39**, 753-770.

Hwang, J.H., Kihm, Y.H., Kim, Y.B., and Song, K.Y., 2007, Tertiary hydroexplosion at Bonggil-ri, Yangbuk-myeon, Gyeongju, *J. Geol. Soc. Korea*, **43**(4), 453-462.

Jeong, J.-M., Park, Y.-C., Jo, Y.-J., and Lee, J.-Y., 2010, Time series analysis of groundwater level fluctuation data in Cheonjeonri, Chuncheon, Gangwon-do, *J. Geol. Soc. Kor*., **46**(2), 171-176.

Ji, S.-H., and Koh, Y.-K., 2010, The state-of-the art of groundwater flow modeling for safety assessment of a radwaste repository, *J. Geol. Soc. Kor*., **46**(2), 181-195.

Jöreskog, K.G, Klovan, J.E., and Reyment, R.A., 1976, Geological factor analysis, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. Oxford, New York, 178 p.

Kim, G.-B., Cha, E.-J., Jeong, H.-G, and Shin, K.-H., 2013, Comparison of the time series of alluvial groundwater levels before and after barrage construction on the lower nakdong

river, *J. Eng. Geol*., **23**(2), 105-115.

Kim, G.-B., Son, Y.-C., Lee, S.-H., Jeong, A.-H., Cha, E.-J., and Ko, M.-J., 2012, Understanding of surface water - groundwater connectivity in an alluvial plain using statistical methods, *J. Eng. Geol*., **22**(2), 207-221.

Kim, K.S. and Jeong, J.G., 2002, Hydrogeological stability study on the underground oil storage caverns by numerical modeling, *J. Eng. Geol*., **12**(1), 35-51.

Kim, K.-S., Kim, C.-S., Bae, D.-S., Ji, S.-H., and Yoon, S.-T., 2008, Hydrogeological characteristics of the LILW disposal site, *J. Korean Radioactive Waste Soc*., **6**(4), 245-255.

Kim, Y., Kim, T., Kim, K.-Y., Hwang, S.-H., and Chae, B.-G., 2005, Analysis of groundwater flow characterization in fractured aquifer system, *J. Soil Groundw. Environ.*, **10**(4), 33-44.

Ko, N.-Y., Ji, S.-H., Koh, Y.-K. and Choi, J.-W., 2010, Influence of the fractured zone seize on the regional groundwater flow model of Olkiluoto site, Finland, *J. Geol. Soc. Korea*, **46**(6), 619-631.

Ko, K.-S., Ahn, S.S., Suk, H.J., Lee, J.S. and Kim, H.-S., 2008, Hydrogeochemistry and statistical analysis of water quality for small potable water supply system in Nonsan area. *J. Soil Groundw. Environ.*, **13**(6), 72-84.

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), *J. Hydrol*., **205**, 217-231.

Leckenby, R.J., Sanderson, D.J., and Lonergan, L., 2005, Estimating flow heterogeneity in natural fracture systems, *J. Volcanol. Geotherm. Res*., **148**, 116-129.

Lee, J.-H., Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Jeong, J.-H., Kim, N.-H., Kim, K.-S., and Jeon, H.-T., 2009a, Estimation of groundwater flow rate into jikri tunnel using groundwater fluctuation data and modeling, *J. Soil Groundw. Environ*., **14**(5), 29-40.

Lee, J.-H., Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Jeong, J.-H., Park, S.-K., Kim, N.-H., and Kim, G.-B., 2010, Numerical simulation of the change in groundwater level due to construction of the Giheung tunnel, *J. Eng. Geol*., **20**(4), 449-459.

Lee, J.-H., Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Kim, H.-S., Ko, E.-J., Lee, K.-S., and Lee, S.-I., 2009b, Characterizing riverbank-filtered water and river water qualities at a site in the lower Nakdong River basin, Republic of Korea, *J. Hydrol.,* **376**, 209-220.

Lee, J.-H., Hamm, S.-Y., Kim, K.S., Cheong, J.-Y., Ryu, S.M., Kim, D.-H., and Kim, H.-J., 2009c, Evaluation of groundwater quality using factor analyses and agrochemicals in an agricultural area, *Econ. Environ. Geol.*, **42**(3), 149-162.

Lee, J.-H., Jung, H., Lee, E., and Kim, S., 2013, Estimation of groundwater level fluctuation of the crystalline site using time series analyses in South Korea, *J. Korean Radioactive Waste Soc*., **11**(3), 179-192.

Lee, J.-Y. and Lee, L.-K., 2002, A comparative study on characteristics of waterlevel responses to rainfall in the two aquifer system, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, **7**(1), 3-14.

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, *J. Hydrol*., **229**, 190-201.

Lee, J.-Y., Yi, M.J., and Hwang D., 2005, Dependency of hydrologic responses and recharge estimates on waterlevel monitoring locations within a small catchment, *Geo. J*., **9**(3), 277-286.

Lee, S.R., Kim, Y.S., Lee, J.W., Park, J.H., and Woo, I., 2004, Development of a technique for lineament density calculation and its application to groundwater yield, *J. Geol. Soc. Kor*., **40**(3), 293-304.

Massei, N., Dupont, J.P., Mahler, B.J., Laignel, B., Fournier, M., Valdes, D., and Ogier, S., 2006, Investigating transport properties and turbidity dynamics of karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses, *J. Hydrol*., **329**, 244-257.

Meiri, D., 1985, Unconfined groundwater flow calculation into a tunnel, *J. Hydrol.*, **82**, 69-75.

Ministry of Construction & Transportation, 2002, Report of development of National groundwater monitoring network, GW-2002, Korea Water Resources Corporation, 393 p (in Korea).

Moon, S.-H., Kim, Y.-S., Ha, K., Won, C.H., and Lee, J.-Y., 2010, Geological structures and their relation to groundwater system around K-1 oil stockpile, *Econ. Environ. Geol.,* **43**(2), 149-162.

NAGRA, 1998, Geology of the crystalline basement of northern Switzerland and derivation of geological input data for safety assessment models, Technical Report 93-12, 236 p.

NAGRA, 1994, Kristallin- Safety assessment report, Technical Report 93-22, 396 p.

Panagopoulos, G. and Lambrakis, N., 2006, 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), *J. Hydrol.,* **329**, 368-376.

Papatheodorou, G., Lambrakis, N., and Panagopoulos, G., 2007, Application of multivariate statistical procedures to the hydrochemical study of a coastal aquifer: an example from Crete, Greece, *Hydrol. Process.,* **21**, 1482-1495.

Park, K.W., Ji, S.-H., Kim, C.S., Kim, K.S., Kim, J.Y., 2008, Numerical simulation of groundwater flow in LILW Repository site: . Grondwater flow modeling, *J. Korean Radioactive Waste*

Soc., **6**(4), 265-282.

Park, K.W., Kim, K., Koh, Y.K., and Choi, J.W., 2011, Synthetic study on the geological and hydrogeological model around KURT, *J. Korean Radioactive Waste Soc*., **9**(1), 13-21.

Reghunath, R., Murthy, T.R.S., and Raghavan, B.R., 2002, The utility of multivariate statistical techniques in Hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India, *Water Res.,* **36**, 2437-2442.

Song, Y.-S., Jang, Y.H., and Kim, J.-S., 2005, Landslide characteristics induced by heavy rainfall in Samcheok area, *J. Eng. Geol*., **15**(4), 435-445.

Yi, M.-J., Kim, G.-B., Sohn, Y.-C., Lee, J.-Y., and Lee, K.-K., 2004, Time series analysis of groundwater level data obtained from national groundwater monitoring station, *J. Geol. Kor*., **40**(3), 305-329.

SAS Institute Inc., 1995, SAS Version 9.1.3 Cary, North Carolina : SAS Institute Inc.

SKB, 1998, Parameters of importance to determine during geoscientific site investigation, Technical Report 98-02, 130 p.