

시계열 방법을 이용한 동래온천 수위의 장기적인 변화 분석

전항택¹ · 함세영^{1,*} · 정재열² · 이철우³ · 이종태⁴ · 임우리¹

¹부산대학교 지구환경시스템학부

²한국원자력환경공단 기술연구소

³한국지질자원연구원

⁴(주)한국중앙온천연구소

요 약

잔류마그마형 온천에 속하는 동래온천은 신라시대부터 목욕용으로 이용되어온 긴 역사를 가지는 온천이다. 긴 시간 동안 온천수 개발로 인하여 동래온천의 온천수 부존량 변화가 예상되고 있다. 본 연구에서는 동래온천의 수위 변동 자료를 분석하여 온천수위의 장기적 변화 특성을 규명하였다. 1992년 1월부터 2018년 7월까지 동래온천의 두 개의 관정에서 온천수위 변동을 분석한 결과, No. 27관정에서 연 평균 지표 하 수위는 최소 71.60 m, 최대 137.70 m, 평균은 103.39 m, No. 29관정에서 최소 71.70 m, 최대 137.80 m, 평균 103.49 m로서 동절기에 온천수위가 하강하고 하절기에 상승하는 변동 특성을 보이며, 최근으로 올수록 온천수위 하강율이 커지는 경향성을 보인다. 각 관정들의 자기 상관분석 결과, 상관계수는 0.919 ~ 0.991로서 계절적인 지하수위 변동이 지속되는 것으로 나타났다. 또한, 온천수위와 강수량 및 동래온천 이용량의 교차상관 분석 결과, 강수량과의 상관계수는 -0.280 ~ 0.256, 이용량과의 상관계수는 0.428 ~ 0.553으로서 온천수 이용량에 의해서 온천수위의 변동이 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 1992년부터 2018년까지 동래온천 수위 자료를 이용하여 Mann-Kendall 검정과 Sen의 검정으로 경향성을 분석한 결과, 온천수위의 지속적인 하강은 여러 원인 중 온천수 이용량이 가장 주요한 원인으로 판단된다.

주요어: 동래온천, 온천수 이용량, 장기적인 온천수위 변화, 시계열방법, Mann-Kendall 검정, Sen 검정

Hang-Tak Jeon, Se-Yeong Hamm, Jae-Yeol Cheong, Cheol-Woo Lee, Jong-Tae Lee and Woo-Ri Lim, 2018, Analysis of long-term water level change of Dongrae hot spring using time series methods. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 5, p. 529-544

ABSTRACT: Dongrae hot spring belongs to the residual magma type and has a long history of bathing since the Silla dynasty in Korea. Due to long development of hot spring water, it is expected that the amount of hot spring water in Dongrae hot spring has been changed. In this study, long-term water level data of Dongrae hot spring were examined for recognizing the change of the hot spring. By the fluctuation analysis of the hot spring water level from January 1992 to July 2018, the maximum and minimum annual drawdowns of no. 27 well were 137.70 and 71.60 meters, respectively, with an average drawdown of 103.39 m. On the other hand, the maximum and minimum annual drawdowns of no. 29 well were 137.80 and 71.70 meters, with an average drawdown of 103.49 m. Besides, drawdown rate became bigger in recent years. As a result of analyzing autocorrelation of the two wells, the correlation coefficient ranged from 0.919 to 0.991, showing seasonal groundwater level fluctuation. The cross correlation analysis between water level and precipitation as well as water level and hot spring discharge resulted in the correlation coefficients of -0.280 ~ 0.256 and 0.428 ~ 0.553, respectively. Therefore, using Dongrae hot-spring water level data from 1992 to 2018, the Mann-Kendall test and Sen's test showed that the continuous decline of water level was mainly caused by the pumping of the hot spring water among various reasons.

Key words: Dongrae hot spring, pumping amount of geothermal water, long-term water level change, time series methods, Mann-Kendall test, Sen's test

(Hang-Tak Jeon, Se-Yeong Hamm and Woo-Ri Lim, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Jae-Yeol Cheong, Korea Radioactive Waste Agency (KORAD) R&D Center, Daejeon 34113, Republic of Korea; Cheol-Woo Lee, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Jong-Tae Lee, Korea Central Hot Spring Institute, Seoul 08591, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-51-510-2252, E-mail: hsy@pusan.ac.kr

1. 서 론

온천은 화산활동과 밀접하게 관련되는 화산성 온천과 대륙 내부에서 화산활동과 직접적인 관련없이 산출하는 비화산성 온천으로 나누어진다(Chon *et al.*, 1998; Kim, 2007).

지판의 수렴경계부에서 비교적 멀리 떨어져 있고, 안정된 대륙에 위치하고 있는 우리나라의 온천은 비화산성온천에 속하며, 잔류마그마형 온천과 심부지하수형 온천으로 분류된다(Tamanyu, 1985; Hamm *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2014). 잔류마그마형 온천은 비교적 신기의 지질시대인 중생대~신생대의 화성활동으로 관입한 심성암에 의해서 타 지역보다 높은 지열을 나타낸다. 잔류마그마형 온천은 암맥군과 관련된다고 알려져 있으며(Tamanyu, 1985), 지하 심부수 km까지 투수성이 높은 지질구조대가 발달되어 있는 지역에서 나타난다. 따라서, 잔류마그마형 온천은 대체로 35℃ 이상의 높은 온도를 나타내고, 동래온천, 해운대온천, 부곡온천 등이 이에 속한다(Hamm *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2014). 한편, 심부지하수형 온천은 지온구배에 따라서 상승하는 지온에 의해서 지하수가 데워져서 형성되며, 대체로 25~30℃의 낮은 온도를 가진다.

우리나라에서 과거부터 잘 알려져 있는 온천은 보통 40℃ 이상의 온도를 보이며, 지하로부터 자연적으로 용출하는 지열수이다. 우리나라 온천 개발의 역사는 백제로부터 시작되는 것으로 전해지며, 고려사에는 동래온천, 유성온천, 온양온천, 영산(부곡)온천, 평해온천, 평주온천, 백천온천, 이천온천, 고성온천, 신주온천, 성주온천 등이 기록되어 있다. 1981년 3월 2일 법률 제3377호의 온천법이 제정 공포된 이후로 우리나라에는 25~30℃의 온도를 가지는 온천들이 다수 개발되었으며, 현재 전국적으로 발견·신고 수리된 온천지구는 약 400 여개 지구이다.

국내에서는 지금까지 온천수의 수질화학적인 조성과 열원 등에 대해서 연구되어 왔다. 온천수에 대한 지화학적 연구로는 수리화학적인 특성 규명, 물-암석 상호반응에 의한 지화학적 진화과정 해석, 동위원소 연구, 온천수와 해수의 혼합에 관한 연구 등이 있다(Koh *et al.*, 1994; Kim and Choi, 1998; Yun *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2000; Koh *et al.*, 2001; Jeong *et al.*, 2009). 온천별로는 수안보온천의 대수층의 수위

변화와 양수량 변화 및 온천수의 지구화화적인 특성 연구(Yum and Kim, 1999), 온양온천의 양수량과 수위강하간의 관계 해석 연구 등이 있다(Jeong and Lee, 2007). Cheong *et al.* (2015)은 금정터널의 지하수 유출량과 동래온천의 관계를 지하수 모델링으로 해석하였다. Lee *et al.* (2007)은 동래 온천수의 스트론튬 동위원소($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)의 지구화학적 방법으로 화강암 균열 대수층에서의 고온 온천수의 성인에 대해서 연구하였다. 한편, Sung *et al.* (2001)은 부산지역의 지열수의 기원 및 진화에 대해서 연구한 바 있다. Han *et al.* (1999)은 동래온천수의 수질 분석 자료를 이용하여 지열 대수층의 온도와 깊이를 산정한 바 있다.

Mann-Kendall (MK) 검정(Mann, 1945; Kendall, 1975; Gilbert, 1987), Sen (1968)의 검정, 수정 MK 검정(Hamed and Rao, 1998) 등은 장기적인 지하수위 또는 온천수위 변동의 경향성 분석에 이용된다. Yue *et al.* (2002), Yue and Wang (2002)은 시계열에 계열상관성이 존재할 경우 경향성을 제거하고 난 후의 경향성 여부를 평가한 바 있다. Oh *et al.* (2005)는 상관성을 가지는 지하수위 시계열 자료의 경향성을 분석하였으며, Oh *et al.* (2006)은 수문 시계열 자료의 경향성을 분석에 관한 여러 방법들을 비교한 바 있다. 한편, Song *et al.* (2013)은 제주도 지하수위의 시계열 자료를 이용하여 변동 특성을 분석하였으며, Choi and Lee (2009)는 제주도 지역 지하수 관측망 자료를 이용하여 모수 및 비모수 변동경향 분석을 연구하였고, Kim *et al.* (2013)은 낙동강 하류지역의 하천 구조물의 건설 전, 후의 층적층 지하수위의 시계열 특성을 연구한 바 있다. 동래온천 수위의 장기적인 시계열 및 변동 특성에 관한 연구 사례는 없다.

부산광역시에 소재하는 동래온천(그림 1)은 잔류마그마형 온천으로서 국내의 고온의 온천 중에서도 신라시대부터 알려져 있는 역사가 깊은 온천이며, 오랜 기간 온천수 사용으로 인해서 온천수의 양적 변화가 예상되고 있다. 온천수위의 변화는 통계적인 방법이나 수치해석 모델링 등으로 분석할 수 있으나, 동래온천의 특성상 오랜 기간 온천수 사용으로 인하여 최초의 온천수 시스템이 변화되어 수치 모델링의 현장 적용에 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 1992년 1월부터 2018년 7월까지 온천수위 자료의 시계열 분석을 통하여, 동래온천의 장기적인

온천수위 변동 특성을 파악하고, 미래의 온천수위 변화를 예측하였다.

2. 연구방법

2.1 연구지역 소개

동래온천지구의 위치는 경도 $129^{\circ} 04'32'' \sim 129^{\circ} 05'10''$, 위도 $35^{\circ} 13'05'' \sim 35^{\circ} 13'32''$ 로써 부산광역시 동래구에 위치하고 있다. 동래온천의 동쪽에는 부산광역시 금정구와 경상남도 양산시 동면의 경계에 있는 금정산(해발 801 m)이 북동에서 남서로 뻗어 있다. 온천천은 금정산의 북동쪽에서 발원하여 구월산을 거쳐 남동쪽으로 흘러서 수영강과 합류한다(그림 1). 동래온천 주변지역의 지질은 하부로부터 백악기 이천리층과 유천층군, 불국사 관입암류, 맥암류, 제4기 충적층으로 구성되어 있다(Son *et al.*, 1978). 유천층군은 하부로부터 안산암류와 화산력 응회암으로 구성되며, 이들을 관입한 불국사 관입암류는 고기로부터 섬록반암, 화강섬록암, 각섬석 화강암, 흑운모 화강암으로 구성된다. 맥암류가 이들을 관입하고 있

으며, 최상부는 제4기 충적층으로 피복되어 있다. 맥암류와 충적층 사이에는 부정합이 존재한다.

부산광역시 상수도사업본부의 동래구 지하수관리 대장에 의하면, 온천지구내에는 총 34개소의 온천공(이용허가공 중 사용공은 23개소이고, 예비공은 11개소)이 분포하고 있으며(그림 2), 양탕장의 온천공(관리대장 4번공)은 폐공처리되었다(표 1). 동래온천장의 온천공의 착정심도는 120 m ~ 280 m의 범위이며, 총 이용허가량은 $3,013.2 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다.

2.2 시계열 자기상관/교차상관

자기 및 교차상관분석은 시스템의 입·출력과 관련한 반응 분석 시 효과적이기 때문에, 수리지질학에서 매우 유용한 방법으로 알려져 있다(Ha *et al.*, 2006).

2.2.1 자기상관

자기상관은 시간 또는 공간적으로 연속된 일련의 관측치들 간의 존재하는 상관관계를 말하며, 자기상관 분석(autocorrelation analysis)은 시계열 자료의 선형성과 기억 효과를 비교할 수 있는 방법으로, 시

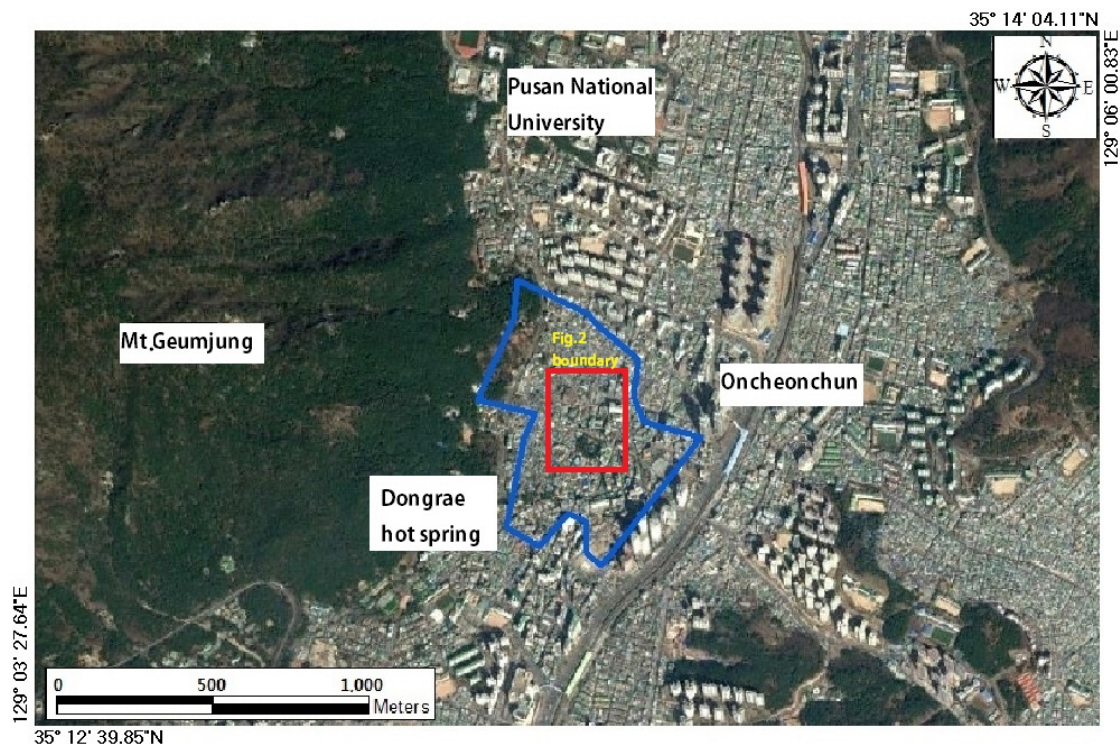


Fig. 1. Dongrae hot spring area in Busan city (Google Earth, 2017).

계열 자료가 강한 선형성과 기억효과를 가질수록 긴 lag time 동안 자기 상관 함수가 0 이상의 값을 가지며, 약한 선형성과 기억효과를 가질수록 짧은 lag time 에 0에 수렴하게 된다(Larocque *et al.*, 1998; Lee and Lee, 2000). 자기상관 함수는

$$\begin{aligned}\rho_k &= \frac{E[(y_t - \mu)(y_{t+k} - \mu)]}{\sqrt{E[(y_t - \mu)^2]E[(y_{t+k} - \mu)^2]}} \\ &= \frac{E[(y_t - \mu)(y_{t+k} - \mu)]}{\sigma_y^2}\end{aligned}\quad (1)$$

로 나타난다. 여기서, ρ_k 는 자기상관함수, μ 는 관측 값의 평균, σ^2 은 분산, $E[y_t]$ 은 시계열 y_t 의 평균이다.

2.2.2 교차상관

교차상관은 입력자료와 출력자료 시계열의 상관관계를 말하며, 교차상관함수에 의해서 그 상관성의 정도가 결정된다. 교차상관함수 $\rho_{xy}(k)$ 는 아래 식으로 표현된다.

$$\rho_{xy}(k) = \frac{\lambda_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2)$$

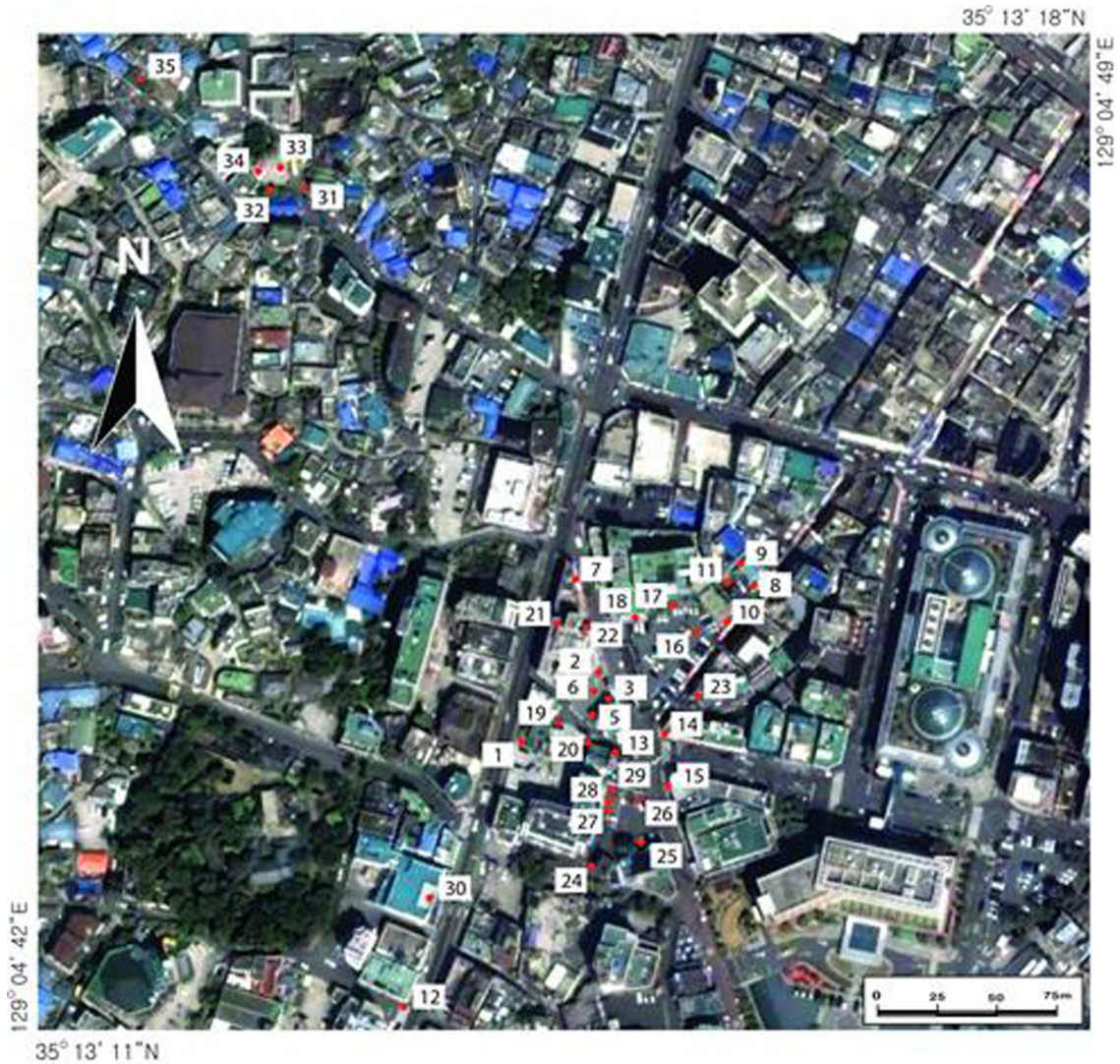


Fig. 2. Hot spring Wells in Dongrae hot spring district in 2009 (Google Earth, 2009).

Table 1. Wells in Dongrae hot spring district.

Well no.	Location	Owner	Depth (El., m)	Depth (m)	Dia. (mm)	HP	Depth of pump (m)	Permitted discharge
1	135-26	Busan City (Yantang Jang)	-194.60	211.60	250			150
2			-131.87	148.87	250	30	126	200
3	95-10		-103.00	120.00	150	50		
5			-185.28	202.28	200	30	144	200
6			-183.00	200.00	250	50		
7	95-23	Cheonil Tang	-192.00	210.00	200	30	140	56
8	142-23	Hyundai Tang	-183.00	210.00	200			250
9	124-24		-183.00	210.00	200	30	170	
10	142-22	Nongshim Hotel	-99.00	115.00	150	10		10
11	142-21		-99.00	115.00	150	10		
12	135-4	Moonhwa Tang	-89.00	107.00	150	5		20
13	96-19	Joongang Yeogwan	-191.00	210.00	200	10	150	30
14	140-41	Ongcheon Yeogwan	-191.00	210.00	200	10		56
15	140-42	Bulro Yeogwan	-211.75	230.75	200	10	150	150
16	142-20	Cheonil Tang	-192.00	210.00	200	10		
17	142-19		-192.00	210.00	200	30	150	296
18	142-18		-192.00	210.00	200	30	143	
19	96-29	Geumcheon Tang	-191.00	210.00	200	20	156	
20	96-30		-191.00	210.00	200	20	156	138
21	95-40		-191.00	210.00	200	20	178	
22	95-24	Mansu Tang	-153.62	171.62	200	20	155	150
23	140-40		-192.00	210.00	200	5		100
24	96-26	Nokcheon Hotel	-193.00	210.00	200	15	175	
25	96-27	Nokcheon Hotel	-193.00	210.00	200	10	150	150
26	96-14	Nokcheon Tangl	-193.00	210.00	200	40	145	
27	96-28	Nokcheon Tang	-193.00	210.00	200	40	150	460
28	96-21	Nokcheon Hotel	-193.00	210.00	200	40	145	
29	96-20	Nokcheon Tang	-193.00	210.00	200	40	145	
30	98-9	Jeil Tang	-91.00	110.00	125	5		40
31	66-3	Nongshim Hotel	-204.00	220.00	150	15	150	
32	77-69		-151.66	167.66	150	15	150	
33	66-2		-214.00	230.00	200	30	180	770
34	77-66		-264.00	280.00	200	30	138	
35	73-4	Honcheon Hanjeungmak	-193.00	230.00	200	3	110	26

$$\lambda_{xy}(k) = Cov(x_{\rho}x_{t+k}) \\ = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} [(x_t - \mu_x) - (y_{t+k} - \mu_y)] \quad (3)$$

여기서, μ_x 와 σ_x 는 각각 시계열자료 x_t 의 평균과 표준편차, μ_y 와 σ_y 는 각각 시계열자료 y_t 의 평균과 표준편차이고, $\lambda_{xy}(k)$ 는 시계열자료 x_t 와 y_t 의 공분산이다.

2.3 시계열 비모수적 경향성 분석

2.3.1 Mann-Kendall 검정

온천수위의 시간에 따른 경향성을 분석하기 위하여 Mann-Kendall (MK) (Mann, 1945)과 Sen (Sen, 1968)의 방법을 적용하였다. MK 방법은 시계열 자료의 경향성을 식별하기 위한 일종의 비모수 분석방법으로서 자료 값들 자체보다는 자료들의 상대적인

비교를 위한 것이다(Gilbert, 1987). 직접 측정되지 않은 자료는 측정값의 최소값보다 작은 값으로 자료 집단에 포함시킬 수 있다.

단일 기간에는 단 하나의 자료가 있는 것으로 가정하며, 만약 단일 기간에 여러 자료값이 존재할 경우 중간값을 취한다. 각 자료값은 순서상의 시계열로 되어 있으며, 모든 후속 자료값과 비교된다. MK 통계값 S 의 초기값은 0 (또는 경향성 없음)으로 가정하고, 이후 기간의 자료값이 이전 기간의 자료값보다 크면 S 는 1 씩 증가하고, 이후 기간의 자료값이 이전 기간의 자료값보다 작으면 S 는 1 씩 감소한다. 이러한 모든 증가 및 감소의 결과는 S 의 최종값으로 나타내진다. 매우 높은 양의 S 값은 증가 추세를 나타내고, 반대로 매우 낮은 음의 S 값은 감소 추세를 나타낸다. 그러나 추세를 정량적으로 산정하기 위해서는 S , n 과 관련된 확률을 계산해야 한다. MK 통계값 S 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (4)$$

여기서, 만약 $x_j - x_k > 0$ 이고 $\text{sign}(x_j - x_k) = 1$ 이고, $x_j - x_k = 0$ 이면 $\text{sign}(x_j - x_k) = 0$ 이고, $x_j - x_k < 0$ 이면 $\text{sign}(x_j - x_k) = -1$ 이다. n 은 표본자료의 개수, x_j , x_k 는 각각 시간 j , k 의 자료값을 나타낸다.

2.3.2 Sen의 검정

Sen's slope (1968)의 검정 방법은 시계열이 선형 추세를 보일 때 시간적인 추세 경사를 구하는 간단한 비모수 방법이다. 즉, 선형모델 $f(t)$ 는

$$f(t) = Q_i + B \quad (5)$$

이다. 여기서, Q_i 는 경사, B 는 상수이다. Q_i 를 구하기 위해서는 모든 자료값의 쌍의 경사 Q_i 를 구해야 한다. 즉,

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}, i = 1, 2, \dots, N, j > k \quad (6)$$

여기서 $N = n(n-1)/2$ 이고, n 은 자료의 개수이다. Sen의 추세 경사 Q_i 는 N 개의 Q_i 값의 중간값으로 한

다. 즉, N 이 홀수이면,

$$Q_i = \frac{Q_{N+1}}{2} \quad (7)$$

이고, N 이 짝수이면

$$Q_i = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_N}{2} + \frac{Q_{N+2}}{2} \right) \quad (8)$$

이다.

3. 연구결과

3.1 온천수 수위 변동 특성분석

동래온천의 수위는 1992년에는 DTW (depth to water)가 66~87 m였으나(Im et al., 1992), 1998~1999년에는 그 보다 20 m 정도 더 하강하여 1998년 녹천탕의 온천수위가 지표하 98~105 m에 위치하였고, 1일 수위변동은 2~4 m정도였다(Han et al., 1999). 본 연구에서는 동래온천 지구내 34개의 온천공 중에서 녹천탕 온천공(관리대장 27, 29번)의 자료를 이용하여 동래온천지구의 시간경과에 따른 온천수 수위 변동 특성을 파악하였다. 이는 녹천탕 온천공이 가장 장기적인 온천수위 자료(1992년 1월~2018년 7월)를 가지고 있기 때문이다. 27, 29번 온천공 온천수위는 녹천탕에서 자체적으로 하루 2회씩(오전과 오후) 측정되고 있으며, 본 연구에서는 그 자료를 제공받아 해석하였다. 시간경과에 따른 온천수위 변동을 파악하기 위해서는 월평균 수위를 구한 후 이를 그림 3에 도시하였다. 측정기간 중 27번공의 연 평균 DTW 최소값은 1992년 71.60 m이고, DTW 최대값은 2015년 137.70 m, DTW 평균값은 103.39 m, 중간값은 97.60 m이다. 29번공의 연 평균 DTW의 최저값은 1992년 71.70 m이고, 최대값은 2015년 137.80 m, DTW 평균값은 103.49 m이다(표 2, 3). 27번, 29번 온천공에서 오전과 오후의 온천수위를 보면, 2001년~2006년의 기간에는 수위가 증가하는 양상을 보이다 2006년 이후부터 온천수위가 하강하는 양상을 보이고 있다. 온천수위는 온천수 이용량이 증가하는 겨울에 하강하고, 온천수 이용량이 상대적으로 적은 여름에 상승하는 양상을 보이고 있다. 따라서 온천

Table 2. Water level fluctuation of no. 27 well from Jan. 1992 until Jul. 2018.

	Mean	Max.	Min.	Median	Kurtosis	Skew.	Std. dev.
1992	-69.2	-79.7	-54.6	-70.7	-0.80	-0.51	5.85
1993	-75.9	-86.1	-67.1	-76.4	-1.04	0.00	4.35
1994	-79.1	-90.3	-67.4	-80.6	-1.18	-0.31	6.07
1995	-78.8	-94.4	-68.1	-79.4	-1.15	-0.03	6.07
1996	-81.4	-91.5	-72.0	-81.6	-1.19	-0.08	4.98
1997	-81.7	-95.4	-70.5	-80.3	-1.36	0.13	6.92
1998	-77.1	-89.6	-66.4	-76.3	-1.36	0.13	6.37
1999	-76.5	-92.0	-67.5	-76.0	-1.22	0.16	5.77
2000	-79.0	-95.3	-70.0	-79.3	-1.18	0.16	5.68
2001	-80.7	-93.0	-70.0	-80.3	-1.25	0.05	5.88
2002	-80.0	-95.4	-73.0	-78.1	-1.25	0.37	5.51
2003	-77.0	-84.0	-69.0	-77.3	-1.17	-0.34	4.37
2004	-75.0	-83.0	-68.6	-75.0	-1.54	0.18	4.50
2005	-73.1	-86.5	-63.2	-71.5	-1.55	0.11	6.64
2006	-75.1	-83.5	-69.0	-76.0	-1.33	-0.14	3.93
2007	-83.7	-95.1	-76.0	-83.6	-0.79	0.22	3.76
2008	-90.2	-105.1	-81.0	-91.1	-1.40	-0.03	6.73
2009	-98.1	-117.4	-87.7	-97.1	-0.88	0.42	7.06
2010	-98.9	-115.1	-86.4	-99.6	-1.30	-0.13	6.69
2011	-98.6	-116.1	-87.7	-97.5	-1.30	0.29	7.31
2012	-99.6	-109.0	-91.1	-100.1	-1.18	-0.08	4.81
2013	-102.7	-120.0	-92.4	-103.0	-1.19	-0.02	5.72
2014	-105.7	-115.1	-98.0	-106.0	-1.05	-0.09	4.19
2015	-107.0	-120.7	-98.5	-105.6	-1.24	0.36	5.85
2016	-100.4	-120.0	-89.0	-99.2	-1.36	0.28	8.61
2017	-92.5	-107.1	-82.5	-92.6	-0.86	0.23	5.53
2018	-95.4	-103.2	-88.2	-95.2	-0.03	0.23	2.62
Sum	-86.4	-120.7	-54.6	-80.6	-1.19	0.11	5.77

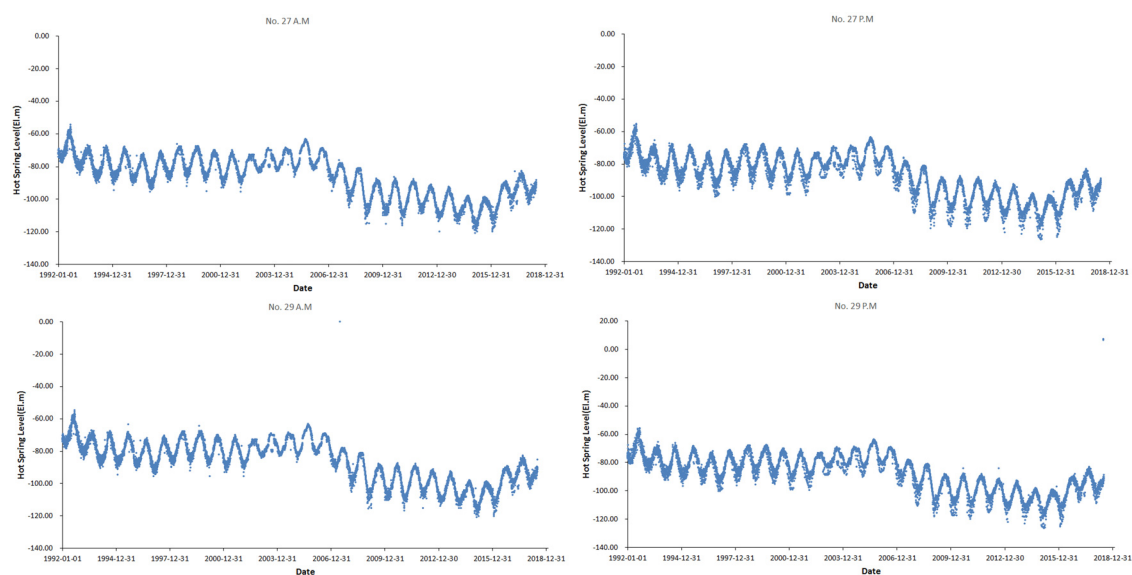
**Fig. 3.** Water level variation of nos. 27 and 29 wells of Nokcheon Tang.

Table 3. Water level fluctuation of no. 29 well from Jan. 1992 until Jul. 2018.

	Mean	Max.	Min.	Median	Kurtosis	Skew.	Std. dev.
1992	-69.4	-79.8	-54.7	-70.9	-0.83	-0.50	5.91
1993	-76.1	-86.2	-67.2	-76.5	-1.05	0.00	4.34
1994	-79.3	-90.4	-67.5	-80.7	-1.17	-0.32	6.03
1995	-78.9	-94.5	-63.5	-79.5	-1.11	-0.04	6.11
1996	-81.5	-91.6	-72.1	-81.6	-1.18	-0.08	4.97
1997	-81.8	-95.5	-70.6	-80.5	-1.35	0.13	6.89
1998	-77.2	-89.7	-68.1	-76.4	-1.36	0.14	6.34
1999	-76.6	-92.1	-64.4	-76.1	-1.20	0.15	5.80
2000	-79.1	-95.4	-70.1	-79.4	-1.18	0.15	5.67
2001	-80.8	-93.1	-70.1	-80.4	-1.24	0.05	5.87
2002	-80.0	-95.5	-73.1	-78.2	-1.25	0.38	5.51
2003	-77.1	-84.1	-69.1	-77.4	-1.17	-0.34	4.36
2004	-75.1	-83.1	-68.7	-75.1	-1.54	0.18	4.50
2005	-73.2	-86.6	-63.3	-71.4	-1.55	0.11	6.64
2006	-75.2	-83.6	-69.1	-76.1	-1.33	-0.14	3.93
2007	-83.7	-93.4	-78.1	-83.7	-1.08	0.13	3.67
2008	-90.3	-105.2	-81.1	-91.1	-1.39	-0.02	6.70
2009	-98.2	-118.1	-87.6	-97.1	-0.87	0.44	7.12
2010	-99.0	-110.1	-87.3	-99.7	-1.37	-0.16	6.63
2011	-98.7	-116.6	-87.8	-97.6	-1.29	0.29	7.28
2012	-99.8	-115.1	-91.2	-100.2	-0.99	0.02	4.89
2013	-102.8	-113.8	-92.5	-103.1	-1.35	-0.08	5.66
2014	-105.8	-115.2	-98.1	-106.1	-1.05	-0.10	4.20
2015	-107.1	-120.8	-98.6	-105.5	-1.22	0.37	5.85
2016	-100.5	-120.1	-89.1	-99.3	-1.35	0.29	8.61
2017	-93.0	-108.1	-82.6	-93.1	-0.82	0.23	5.63
2018	-95.5	-103.3	-85.3	-95.4	0.30	0.08	2.70
Sum	-86.5	-120.8	-54.7	-80.7	-1.15	0.05	5.62

수위는 온천수 이용량에 따른 계절적 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

그리고, 온천수위의 월별 및 연별 변동율을 살펴 보았다. 월별 변동율은 27번공 오전 -9.65 m ~ 8.83 m, 오후는 -10.58 m ~ 8.43 m의 범위를 보이고 있으며, 29번공은 오전 -9.65 m ~ 8.83 m, 오후는 -10.59 m ~ 8.45 m의 범위를 보이고 있다.

3.2 자기상관분석 결과

자기상관은 시점 t 와 $t+1$ 간의 상관관계를 의미하며 -1과 1 사이에서 양과 음의 상관성을 가질 수 있

다. 양의 자기상관은 일정 기간 동안 시계열 자료가 증가하거나 감소하는 경우에 나타나고, 음의 자기상관은 시점에 따라 자료값의 증감이 반복되는 경우에 나타난다. 27, 29번 온천공에 대해서 자기상관분석을 통하여 자기상관계수를 구하였다(그림 4; 표 4). 그 결과, 두 온천공에서의 자기상관계수는 0.919 ~ 0.991로서 매우 큰 양의 값을 가지는데, 이는 온천공의 온천수위가 과거부터 현재까지 지속적으로 자기상관성유지하고 있음을 의미한다. 다시 말하면, 동래온천의 수위는 단기적으로는 큰 변동을 보이지 않음을 지시한다.

Table 4. ACF of water levels in the morning and afternoon of nos. 27 and 29 wells.

Lag	No. 27 A.M.		No. 27 P.M.		No. 29 A.M.		No. 29 P.M.	
	ACF	Std. error	ACF	Std. error	ACF	Std. error	ACF	Std. error
1	.991	.010	.976	.010	.985	.010	.950	.010
2	.986	.010	.963	.010	.979	.010	.932	.010
3	.982	.010	.956	.010	.976	.010	.926	.010
4	.981	.010	.955	.010	.975	.010	.925	.010
5	.983	.010	.960	.010	.977	.010	.929	.010
6	.986	.010	.970	.010	.980	.010	.940	.010
7	.989	.010	.984	.010	.983	.010	.954	.010
8	.985	.010	.968	.010	.979	.010	.938	.010
9	.980	.010	.957	.010	.973	.010	.927	.010
10	.977	.010	.949	.010	.970	.010	.920	.010
11	.976	.010	.948	.010	.969	.010	.919	.010
12	.977	.010	.954	.010	.971	.010	.924	.010
13	.980	.010	.963	.010	.974	.010	.933	.010
14	.982	.010	.976	.010	.976	.010	.946	.010
15	.978	.010	.960	.010	.971	.010	.931	.010
16	.972	.010	.949	.010	.966	.010	.919	.010

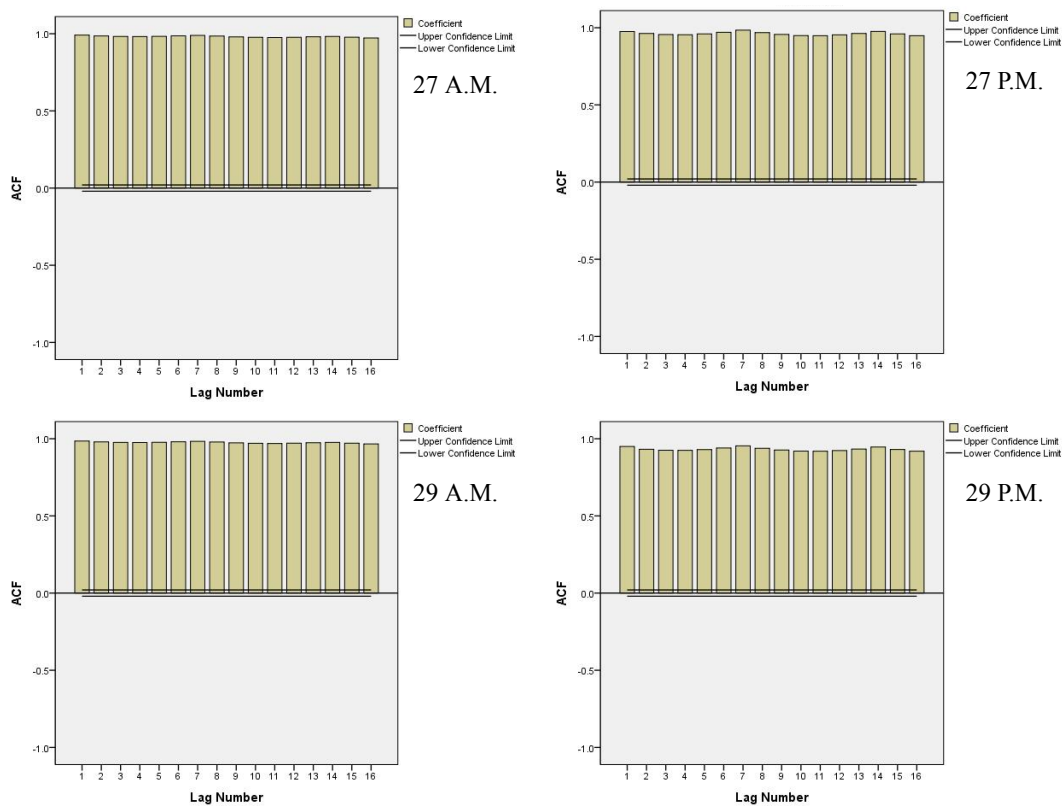


Fig. 4. Auto correlation results of water levels in the morning and afternoon of no. 27 and no. 29 wells.

Table 5. Rainfall data of Busan area by Korea Meteorological Administration.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
1992	26.0	58.9	89.4	217.4	139.9	50.0	99.2	361.3	174.3	27.6	21.8	43.1	1308.9
1993	43.1	84.9	73.9	39.3	161.2	160.6	252.4	630.3	44.8	48.6	57.3	18.9	1615.3
1994	42.0	44.4	31.5	123.5	258.9	86.4	134.9	34.5	60.4	90.7	46.3	6.4	959.9
1995	35.8	17.1	88.0	124.0	141.6	137.4	254.5	107.9	53.1	41.3	5.0	0.0	1005.7
1996	33.8	6.9	171.1	115.9	46.8	327.1	284.8	140.4	26.7	42.3	65.4	28.4	1289.6
1997	9.3	18.1	57.8	93.8	289.4	286.1	216.3	235.1	35.4	0.4	266.4	90.0	1598.1
1998	79.7	91.9	82.7	259.7	152.8	447.0	223.6	335.8	200.3	136.3	16.5	2.5	2028.8
1999	42.9	35.6	159.7	80.2	187.6	278.2	556.7	582.9	320.2	130.5	22.2	0.0	2396.7
2000	25.9	0.0	48.1	65.4	72.0	93.7	337.4	325.2	163.5	42.4	72.2	2.7	1248.5
2001	60.4	53.3	6.1	42.4	57.8	274.9	271.5	144.7	74.4	144.2	12.9	28.7	1171.3
2002	84.8	12.3	117.1	384.8	122.6	76.0	304.6	696.3	98.9	96.8	11.2	79.8	2085.2
2003	23.3	51.6	77.5	232.0	418.5	355.0	657.7	278.0	160.3	2.5	57.5	14.4	2328.3
2004	1.4	77.5	48.1	215.0	210.6	189.1	91.7	249.0	231.2	14.8	32.0	26.1	1386.5
2005	15.7	36.8	142.4	118.9	168.0	145.0	314.4	210.8	176.5	21.5	30.9	3.0	1383.9
2006	24.4	36.3	24.7	166.3	257.6	175.4	591.7	68.0	132.8	13.1	30.5	7.5	1528.3
2007	4.6	115	75.5	65.5	116.6	94.5	301.5	128.1	210.2	119.0	0.0	46.0	1276.5
2008	35.7	19.1	73.7	80.5	191.3	186.5	107.1	368.5	22.2	52.2	22.0	9.5	1168.3
2009	17.0	79.0	72.7	95.5	173.4	187.9	886.1	84.8	20.0	74.4	69.0	13.1	1772.9
2010	37.6	91.1	132.9	146.3	186.8	94.4	291.9	165.3	182.5	72.6	2.0	38.5	1441.9
2011	0.0	70.9	31.2	100.0	170.0	243.2	418.1	110.0	56.8	142.5	128.7	7.2	1478.6
2012	19.5	22.1	173.9	213.8	36.1	97.8	502.0	169.4	356.0	146.5	83.5	162.7	1983.3
2013	22.5	46.6	93.7	136.2	201.0	159.0	131.0	144.5	30.2	92.2	61.6	12.6	1131.1
2014	9.6	44.1	136.7	147.8	145.9	44.5	169.3	642.2	128.7	162.5	40.5	21.3	1693.1
2015	50.7	30.5	76.5	268.0	183.0	69.2	176.7	132.5	172.0	62.0	124.1	51.6	1396.8
2016	59.5	63.7	133.5	198.5	108.8	115.2	188.3	141.5	407.7	182.4	56.6	103.8	1759.5
2017	12.0	33.8	35.7	105.1	39.2	49.8	172.1	82.5	335.0	138.3	0.3	10.6	1014.4
2018	40.9	52.5	206.1	156.4	155.8	276.7	121.0						1009.4

3.3 교차상관분석 결과

27, 29번 온천공의 시간 경과에 따른 수위의 변동성을 파악하고, 수위 변동에 영향을 주는 요인들을 알아보기 위하여 온천수위와 강수량 그리고 온천수위와 온천수 이용량의 교차상관분석을 실시하였다. 강수량은 부산지방 기상청의 1992년~2018년 월별 강수량자료(표 5)를 이용하였고, 온천수 이용량은 동래구청의 2010년~2017년 월별 온천수 이용량 자료를 이용하였다. 교차상관분석 결과 온천수위와 강수량의 경우 상관계수는 $-0.359 \sim 0.274$ 로서 온천수위와 강수량과의 상관성은 매우 낮으며, 유의미한 상관성을 보여주지 않는다(그림 5; 표 6). 이는 온천수

가 강우에서 유래하지만, 지하로 함양되어 지하 심부 수 km 이상 심도에서 데워져서 상승하기까지는 오랜 시간이 걸리므로(Han *et al.*, 1999) 강우와 직접적인 연관성은 매우 낮기 때문에 판단된다.

한편, 온천수위와 온천수 이용량의 상관계수는 $-0.410 \sim 0.535$ 로서 온천수위와 온천수 이용량간에는 시간 경과에 따라 양과 음의 상관성이 번갈아서 나타난다(그림 6; 표 7). 이는 온천수 이용량이 많은 달과 적은 달에 대해서 각각 온천수위의 하강과 상승이 반복적으로 일어나기 때문에 해석된다. 따라서 온천수위와 온천수 이용량의 변동 양상은 유사하게 나타나고 있으며, 온천수 이용량이 온천수위 변동에 주요한 영

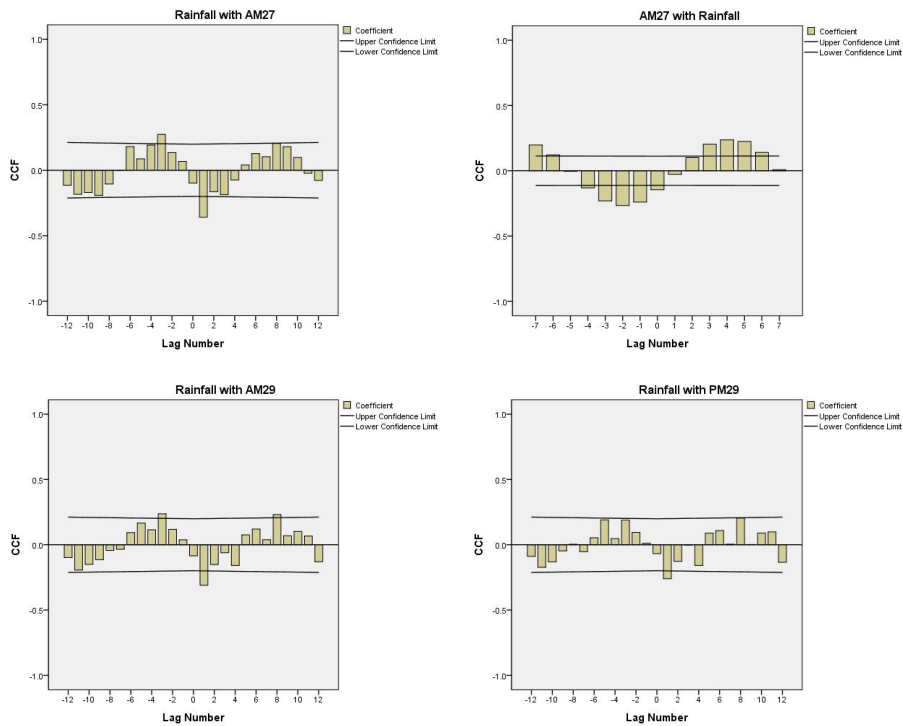


Fig. 5. Cross correlation analysis of the hot-spring water level vs. rainfall.

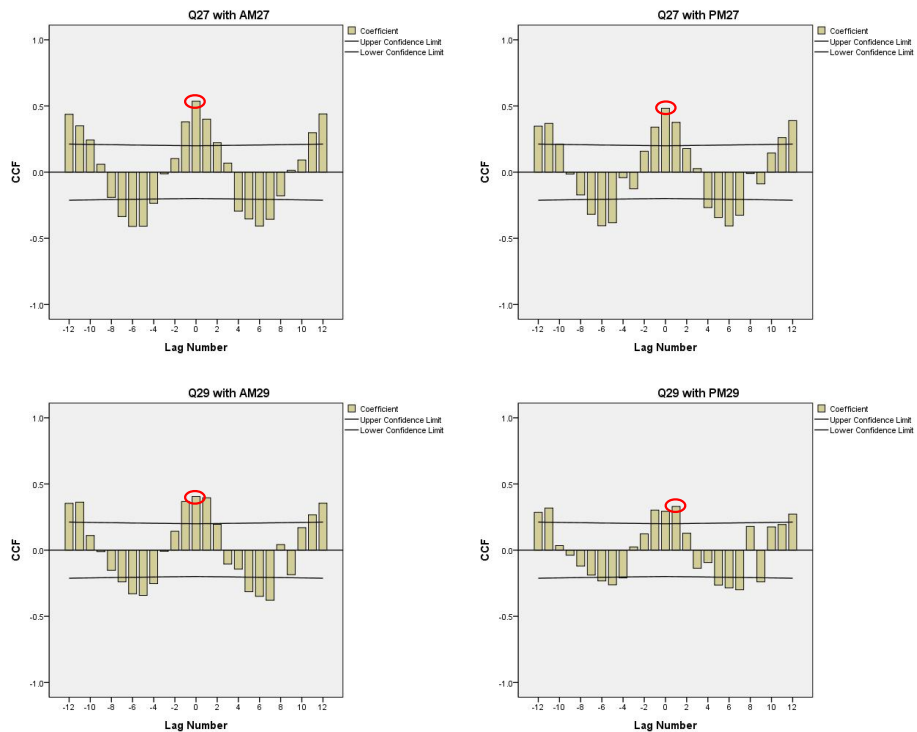


Fig. 6. Cross correlation analysis of the hot-spring water level vs. hot spring discharge (max ccf in red circle).

Table 6. Cross-correlation analysis result of the water levels vs. rainfall.

Lag	No. 27 A.M.		No. 27 P.M.		No. 29 A.M.		No. 29 P.M.	
	Cross correlation	Std. error	Cross correlation	Std. error	Cross correlation	Std. error	Cross correlation	Std. error
-12	-0.114	0.106	-0.126	0.106	-0.114	0.106	-0.088	0.106
-11	-0.184	0.105	-0.208	0.105	-0.194	0.105	-0.173	0.105
-10	-0.171	0.105	-0.156	0.105	-0.150	0.105	-0.131	0.105
-9	-0.192	0.104	-0.139	0.104	-0.114	0.104	-0.047	0.104
-8	-0.105	0.104	-0.044	0.104	-0.043	0.104	0.004	0.104
-7	0.000	0.103	-0.015	0.103	-0.035	0.103	-0.054	0.103
-6	0.180	0.103	0.105	0.103	0.093	0.103	0.054	0.103
-5	0.087	0.102	0.179	0.102	0.166	0.102	0.191	0.102
-4	0.192	0.102	0.125	0.102	0.115	0.102	0.047	0.102
-3	0.274	0.101	0.262	0.101	0.237	0.101	0.189	0.101
-2	0.134	0.101	0.112	0.101	0.118	0.101	0.095	0.101
-1	0.067	0.100	0.044	0.100	0.038	0.100	0.012	0.100
0	-0.098	0.100	-0.088	0.100	-0.085	0.100	-0.068	0.100
1	-0.359	0.100	-0.353	0.100	-0.310	0.100	-0.260	0.100
2	-0.164	0.101	-0.171	0.101	-0.152	0.101	-0.127	0.101
3	-0.187	0.101	-0.102	0.101	-0.061	0.101	-0.002	0.101
4	-0.074	0.102	-0.129	0.102	-0.158	0.102	-0.158	0.102
5	0.041	0.102	0.086	0.102	0.076	0.102	0.089	0.102
6	0.128	0.103	0.133	0.103	0.120	0.103	0.108	0.103
7	0.104	0.103	0.067	0.103	0.039	0.103	0.005	0.103
8	0.205	0.104	0.220	0.104	0.231	0.104	0.204	0.104
9	0.180	0.104	0.096	0.104	0.069	0.104	0.002	0.104
10	0.098	0.105	0.105	0.105	0.103	0.105	0.090	0.105
11	-0.023	0.105	0.035	0.105	0.067	0.105	0.099	0.105
12	-0.077	0.106	-0.112	0.106	-0.130	0.106	-0.135	0.106

향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3.4 비모수경향성 분석결과

27, 29번 온천공의 수위자료를 각 분기별로 정리하여 1992년에서 2018년 동안의 수위 경향성을 분석하고, 온천수 이용량과 온천수위 변동 경향성을 파악하였다(그림 7). 27, 29번 온천공의 오전, 오후의 수위 자료들의 경향성을 살펴보면, 1992년부터 2006년까지는 별다른 변동을 보여주지 않으나, 2006년을 기점으로 시간이 지날수록 온천수위가 하강하는 경향성을 보여준다. Sen의 기울기는 27번공의 오전 자료는 0.284, 오후 자료는 0.276, 29번공의 오전 자료는 0.283, 오후 자료는 0.272로 서로 비슷한 수위 하

강 기울기를 보이고 있다. 따라서 온천수 사용과 함께, 27번 온천공에서는 매년 1.12 m씩, 29번 온천공에서는 매년 1.11 m씩 온천수위 하강이 일어나고 있는 것으로 판단된다.

4. 토 의

동래온천의 온천수 이용량은 매년 18,192 m³ ~ 20,446 m³으로서, 매년 증가 추세는 보이지 않는다. 그러나 동래온천의 이용량이 높은 달에는 온천수위가 하강하고, 동래온천의 이용량이 낮은 달에는 온천수위가 상승하므로, 온천수 이용량이 온천수위에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 정기적으로는 동

Table 7. Cross-correlation analysis result of the water levels vs. hot spring discharge.

Lag	No. 27 A.M.		No. 27 P.M.		No. 29 A.M.		No. 29 P.M.	
	Cross Correlation	Std.Error	Cross Correlation	Std.Error	Cross Correlation	Std.Error	Cross Correlation	Std.Error
-12	0.437	0.106	0.347	0.106	0.355	0.106	0.272	0.106
-11	0.350	0.105	0.368	0.105	0.267	0.105	0.193	0.105
-10	0.243	0.105	0.212	0.105	0.170	0.105	0.176	0.105
-9	0.059	0.104	-0.014	0.104	-0.185	0.104	-0.239	0.104
-8	-0.191	0.104	-0.172	0.104	0.042	0.104	0.179	0.104
-7	-0.336	0.103	-0.319	0.103	-0.379	0.103	-0.299	0.103
-6	-0.410	0.103	-0.405	0.103	-0.349	0.103	-0.285	0.103
-5	-0.409	0.102	-0.382	0.102	-0.314	0.102	-0.264	0.102
-4	-0.235	0.102	-0.041	0.102	-0.143	0.102	-0.094	0.102
-3	-0.013	0.101	-0.126	0.101	-0.105	0.101	-0.136	0.101
-2	0.102	0.101	0.158	0.101	0.195	0.101	0.128	0.101
-1	0.381	0.100	0.340	0.100	0.396	0.100	0.330	0.100
0	0.535	0.100	0.483	0.100	0.405	0.100	0.294	0.100
1	0.400	0.100	0.376	0.100	0.367	0.100	0.302	0.100
2	0.222	0.101	0.179	0.101	0.143	0.101	0.123	0.101
3	0.069	0.101	0.027	0.101	-0.009	0.101	0.024	0.101
4	-0.295	0.102	-0.268	0.102	-0.253	0.102	-0.210	0.102
5	-0.354	0.102	-0.343	0.102	-0.342	0.102	-0.261	0.102
6	-0.407	0.103	-0.406	0.103	-0.329	0.103	-0.233	0.103
7	-0.357	0.103	-0.325	0.103	-0.239	0.103	-0.189	0.103
8	-0.178	0.104	-0.011	0.104	-0.152	0.104	-0.120	0.104
9	0.014	0.104	-0.089	0.104	-0.011	0.104	-0.038	0.104
10	0.092	0.105	0.144	0.105	0.110	0.105	0.034	0.105
11	0.298	0.105	0.261	0.105	0.362	0.105	0.318	0.105
12	0.440	0.106	0.389	0.106	0.353	0.106	0.285	0.106

래지역의 현재 온천수위는 1992년보다 더 낮으며, 이는 동래온천의 이용량을 현재 상태로 유지하더라도, 온천수위 하강은 지속적으로 일어남을 지시한다. 그러나, 온천수위와 온천수 이용량간에 상관관계 수가 높지 않음은 온천수위 하강이 다른 원인에 위해서도 영향을 받고 있음을 지시한다.

동래온천의 수위는 1992년부터 2006년 까지 별다른 변동을 보여주지 않지만 2006년을 기점으로 하강하는 추세를 보여주고 있으며, Sen 분석에 의해서도 하강 기울기를 나타낸다. Sen 분석에 의하면, 동래온천 수위는 매년 약 1.11 m씩 하강하고 있으며, 2006년 이후 온천수위 하강이 더욱 현저해지는 경향을 보이며, 이는 온천수 이용량의 증가와 관련이 있

을 것으로 추정된다. 따라서, 동래온천의 수위 강하를 방지하기 위해서는 이용량을 줄일 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 비모수적인 경향성 분석을 통해 지난 28년간의 동래온천 지역의 온천수위 변동을 평가하였다. 1992년 1월부터 2018년 7월까지 부산 동래온천 지구내 녹천탕 온천공 27번공과 29번공의 수위 변동을 분석한 결과, 온천수위 변화폭이 최대 66.1 m 정도로 크게 관측되었다. 27번 온천공의 연 평균 DTW 최소값은 1992년에 71.60 m, 최대값은 2015년에 137.70 m이며, DTW 평균값은 103.36 m이다. 한편, 29번

온천공의 경우 DTW 최소값은 1992년의 71.70 m, 최대값은 2015년의 137.80 m, 평균값은 103.49 m이다.

27번공과 29번공의 시계열분석에 의한 자기상관계수를 산정한 결과, 상관계수가 0.919~0.991로서 온천수 이용량에 따른 계절적인 수위 변동이 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한, 온천수위와 강수량 및 온천수 이용량의 교차상관 분석을 실시한 결과, 강수량과의 상관계수는 -0.280~0.256, 온천수 이용량과의 상관계수는 0.428~0.553으로 나타났으며, 이는 온천수 이용량에 의해서 온천수위가 영향을 받고 있으며, 강수량의 직접적인 영향은 미미한 것으로 판단된다.

1992년에서 2018년 동안의 녹천탕 온천공 27번공과 29번공의 분기별 수위의 경향성을 MK 검정과 Sen 검정으로 분석한 결과, 두 온천공에서 오전과 오후의 온천수위가 시간 경과에 따라 하강하는 것으로 나타났다. Sen의 기울기도 온천수위 하강을 보인다. 이러한 결과는 동래온천의 수위는 온천수 사용으로 인하여 27번공은 매년 1.120 m씩, 29번공은 1.110 m씩 온천수위 하강이 일어나고 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 지난 26년간의 동래온천의 온천수위 변동 특성을 파악하고, 미래의 온천수위 변화를 통계적으로 예측하였다. 본 연구에 의하면, 동래온천의 지속 가능한 활용을 위해서 온천수 이용량을 줄

일 필요가 있다고 판단된다. 또한 향후에는 정교한 수치 모델링에 의한 정확한 온천수 부존량 평가가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술정보통신부의 한국연구재단 중견연구사업(NRF-2017R1A2B2009033)으로 수행되었습니다. 아울러서 녹천탕 수위 자료를 제공해주신 녹천탕 관계자 분과 동래구청 관계자 분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Cheong, J.-Y., Hamm, S.-Y., Yu, I.-R., Whang, H.-S. and Kim, S.-H., 2015, Analysis of groundwater discharge into the Geumjeong tunnel and baseflow using groundwater modeling and long-term monitoring. *Journal of Environmental Science International*, 24(12), 1691-1703 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.M. and Lee, J.Y., 2009, Parametric and non-parametric trend analyses for water levels of groundwater monitoring wells in Jeju Island. *Journal of Soil and Soil and Groundwater Environment*, 14, 41-50 (in Korean with English abstract).
- Chon, H.T., Moon, H.S., Kim, K.H. and Jung, M.C., 1998,

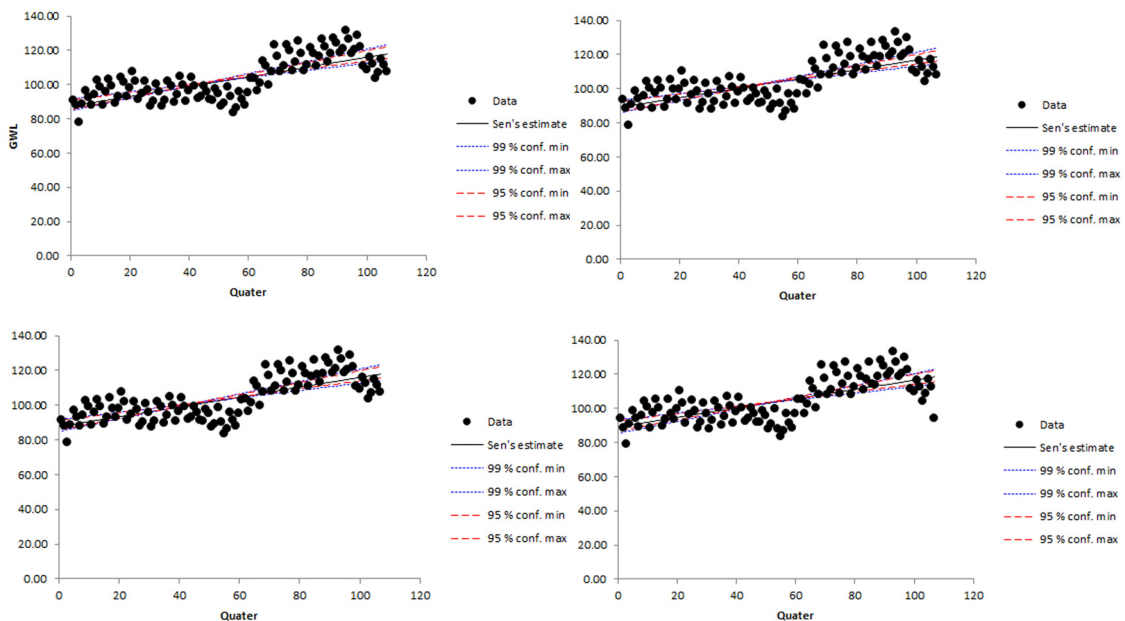


Fig. 7. Analysis of Mann-Kendall and Sen's slope for Dongrae hot spring (No. 27(a), (b) and No. 29(c), (d)).

- Environmental Geology. Seoul National University Press, 529 p.
- Gilbert, R.O., 1987, Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring. Van Nostrand Reinhold Co., NY, 320 p.
- Google Earth, 2009 (August 10, 2009).
- Google Earth, 2017 (October 7, 2017).
- Ha, K.C., Ko, K.-S., Koh, D.-C., Yum, B.W. and Lee, K.K., 2006, Time series analysis of the responses of the groundwater levels at multi depth wells according to the river stage fluctuations. Economic and Environmental Geology, 39, 269-284 (in Korean with English abstract).
- Hamed, H.K. and Rao, R.A., 1998, A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. Journal of Hydrology, 24, 182-196.
- Hamm, S.-Y., Jeon, H.T., Cheong, J.-Y., Kim, H.J., Lee, J.T. and Lee, C.W., 2009, Geological and physico-chemical characteristics of hot springs in Korea. The Korean Academy of Hot Spring, 1st Spring Symposium, 63-98.
- Han, S.J., Hamm, S.-Y., Sung, I.H., Lee, B.D., Cho, B.W. and Cho, M.H., 1999, Geochemical characteristics of geothermal water and groundwater in the Dongrae hot-spring area, The Journal of Engineering Geology, 9, 207-225 (in Korean with English abstract).
- Im, J.-Y., Lee, D.Y., Kim, Y.G., Choi, Y.S., Yeom, B.W. and Lee, J.M., 1992, Report on survey of hot spring Storage in Dongrae, Busan city. Korea institute of Geoscience and Mineral Resources, 234 p.
- Jeong, C.H., Koh, Y.K., Shin, S.H., Nagao, K. and Kim, K.H., 2009, Hydrochemistry and noble gas origin of hot spring waters of Icheon and Pocheon area in Korea. The Journal of Engineering Geology, 19, 529-541 (in Korean with English abstract).
- Jeong, J.G. and Lee, C.W., 2007, An analysis of the relationships between quantity and drawdown at the Onyang hot spring area. The Journal of Engineering Geology, 17, 177-185 (in Korean with English abstract).
- Kendall, M.G., 1975, Rank Correlation Methods, 4th edition, Charles Griffin, London.
- Kim, G.B., Cha, E.J., Jeong, H.G. and Shin, K.H., 2013, Comparison of time series of alluvial groundwater levels before and after barrage construction on the lower Nakdong river. The Journal of Engineering Geology, 23, 105-115 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.Y., Koh, Y.K., Kim, C.S., Bae, D.S. and Park, M.E., 2000, Geochemical studies of geothermal waters in Yusung geothermal area. Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, 7, 32-46 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H. and Choi, H.J., 1998, A geochemical study on the thermal water and groundwater in the hot spring area, South Korea. Journal of the Korean Earth Science Society, 19, 22-34 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., 2007, Hot spring of Korea. Ewha Womans University Press, 238 p.
- Koh, Y.K., Yun, S.T. and Ahn, J.S., 1994, Environmental isotope and hydrochemical studies of geothermal waters in Korea: Yusung geothermal area. Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers, 31, 388-399 (in Korean with English abstract).
- Koh, Y.K., Yun, S.T., Kim, C.S., Bae, D.S. and Park, S.S., 2001, Geochemical evolution and deep environment of the geothermal waters in the Bugok area: Reconsideration on the origin of sulfate-type geothermal water. Economic and Environmental Geology, 34, 329-343 (in Korean with English abstract).
- 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, 205, 217-231.
- Lee, C.-M., Hamm, S.-Y., Lee, C., Choi, S.-J. and Chung, S.-Y., 2014, Characteristics of South Korea's geothermal water in relation to its geological and geochemical feature. Journal of Soil and Groundwater Environment, 19(2), 25-37.
- Lee, S.G., Kim, T.K., Lee, J.S., Lee, T.J. and Song, Y.H., 2007, Geochemical significance of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in Dongrae hot spring water: Application of identification of hot spring water in granitic aquifer. Autumn Geological Science Association Conference, 111.
- Lee, J.-Y., Lee, K.-K., 2000, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. Journal of Hydrology, 229, 190-201.
- Mann, H.B., 1945, Non-parametric tests against trend, Econometrica 13, 163-171.
- Oh, J.S., Kim, B.S., Kim, H.S. and Seoh, B.H., 2004, Trend detection of serially correlated hydrologic series. Journal of Korean Wetlands Society, 6, 35-43 (in Korean with English abstract).
- Oh, J.S., Kim, H.S. and Seoh, B.H., 2006, Trend and shift analysis for hydrologic and climate series. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 26, 355-362 (in Korean with English abstract).
- Sen, P.K., 1968, Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63, 1379-1389.
- Son, C.M., Lee, S.M., Kim, Y.K., Kim, S.W. and Kim, H.S., 1978, Explanatory Text of the Geological Map of DongRae and Weolnae Sheets (1:50,000). Korea Research institute of Geoscience and Mineral Resources, 27 p.
- Song, S.H., Choi, K.J. and Kim, J.S., 2013, Evaluation of regional characteristics using time series data of groundwater

- level in Jeju Island. *Journal of Environmental Sciences*, 22, 609-623.
- Sung, K.Y., Park, M.E., Koh, Y.K. and Kim, C.S., 2001, Evolution and origin of the geothermal waters in the Busan area, Korea: I. Cooling and dilution by ground-water mixing after heated seawater-rock interaction. *Economic and Environmental Geology*, 34, 447-460 (in Korean with English abstract).
- Tamanyu, S., 1985, Geothermal Heat in Korea. *Geological News*, 366, 50-57.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B. and Cavadias, G., 2002, The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16, 1807-1829.
- Yue, S. and Wang, C., 2002, The applicability of pre-whitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, 38, 4-1-7.
- Yum, B.W. and Kim, Y.J., 1999, Thermal water level change and geochemistry in the Suanbo area, Korea. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 6, 55-65 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.T., Koh, Y.K., Kim, C.S. and So, C.S., 1998, Geochemistry of geothermal waters in Korea: Environmental isotope and hydrochemical characteristics, I. Bugok area. *Economic and Environmental Geology*, 31, 185-199 (in Korean with English abstract).

Received : August 1, 2018

Revised : August 21, 2018

Accepted : August 22, 2018