

## 하상 인공구조물에 의해 유도되는 지하수-하천수 시스템의 상호작용

오준호<sup>2</sup> · 김태희<sup>2\*</sup> · 성현정<sup>2</sup> · 김용제<sup>2</sup> · 송무영<sup>1</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 지질학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원

## Interaction Between Groundwater and Stream Water Induced by the Artificial Weir on the Streambed

Jun-ho Oh<sup>1</sup> · Taehee Kim<sup>2\*</sup> · Hyun-cheong Sung<sup>2</sup> · Yong-je Kim<sup>2</sup> · Moo-young Song<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chungnam National University

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

### ABSTRACT

This study investigated the interaction between groundwater and stream water systems, which is caused by the artificial weir on streambed, enforcing external stresses on the groundwater system. The study area is in Nami Natural Recreation Woods located in Chungcheongnam-do Geumsan-gun Nami-myeon Geoncheon-ri. In this study both of hydrophysical methods (hydraulic head) and hydrochemical investigations (pH, EC, major ion analysis) were applied. In order to identify the relationship between each of study results, cross-correlation analysis is performed. From results of hydrophysical methods, water level fluctuation at BH-14, installed by the weir, shows the double-recession pattern much more frequently and much higher amplitudes than the fluctuation at each of other monitoring wells. Using the results by hydrochemical investigations, hydrochemical properties at BH-14 is similar to the hydrochemical characteristics in stream water. To analyze the interrelationships between the results from each of applied methods, cross-correlation analysis was applied. Results from the correlation analyses, water levels at BH-14 and stream weir showed the highest cross-correlation in hydrophysical aspects. On the other hand, the correlation between stream weir and bridge was the highest in hydrochemical aspects. The difference between the results from each of methods is due that the hydrophysical response at BH-14, such as water level, is induced by the pressure propagation-not with mass transfer, but the hydrochemical interaction, caused by mass transport, takes much more times. In conclusion impermeable artificial weir on streambed changes the interfacial condition between the stream and surrounding aquifers. The induced water flux into the groundwater system during flood period make water level at BH-14 increase instantly and groundwater quality highly similar to the quality of stream water. Referred similarities in both of water level and water quality at BH-14 become much higher when water level at weir grow higher.

**Key words :** Groundwater-surface water interaction, Artificial weir, Water-level fluctuation, Major ion analysis, Cross-correlation analysis

### 요 약 문

본 연구는 하상인공구조물에 의해 유도되는 지하수-하천수 시스템의 상호작용을 지하수 순환을 중심으로 연구하였다. 연구지역은 충청남도 금산군 남이면 건천리의 남이휴양림으로 연구의 목적을 달성하기 위해 수리물리적 방법(수위관측)과 수리화학적 특성(pH, EC, 주 이온분석)을 분석하였으며, 이들 자료간의 연관성을 파악하기 위해서 상호상관분석을 실시하였다. 수리물리적 방법에 의한 연구결과 하상 보 수평부의 BH-14의 수위변동은 다른 지하수관정과 비교할 때 이중퇴행양상이 빈번하게 나타났으며, 그 폭도 크게 나타났다. 또한, 수리화학적 방법에 의해 얻은 결과를 자연추적자의 개념으로 사용해 보면 지하수인 BH-14가 하천에 유사한 성향을 나타내었다. 상관분석결과에서 수리물

\*Corresponding author : katzura@kigam.re.kr

원고접수일 : 2006. 3. 13    게재승인일 : 2007. 4. 19

질의 및 토의 : 2007. 6. 30 까지

리적 측면인 수위에 대한 상관분석에서 BH-14와 하상 보에서 가장 높게 나타났으며, 반면 수리화학적 측면에 대한 상관분석에서는 하상 보와 다리의 상관성이 가장 높게 나타났다. 이는 수위와 같은 물리적 상호작용은 용질거동 없이 압력의 전파에 의해 일어나는데 반하여 수리화학적 상호작용은 용질의 거동에 의해 반응이 일어나기 때문에 더 많은 시간이 걸리기 때문인 것으로 판단된다. 결과적으로 하상의 불투수성의 보에 의해 하천과 주변대수층의 경계조건이 바뀌고, 이때 지하수 시스템으로 유입되는 하천수에 의해 BH-14의 수위가 즉각적으로 상승하며, 수질에서 하천수적 성향을 나타내는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 보의 수위가 높아질수록 더욱 증가하는 경향을 나타낸다.

**주제어 :** 지하수-하천수 상호작용, 인공구조물, 수위변화, 주요이온분석, 상호상관분석

## 1. 서 론

하천과 그 주변 대수층에서는 강수나 수리적인 조건에 의해 다양한 물리적 거동양상을 나타낸다(Anderson et al., 2005; Devito et al., 1996; Linderfelt et al., 2001). 즉 하천과 지하수의 경계조건에 따라서 많은 변화가 나타나며, 이때 하천에 불투성의 보가 존재한다면 그로 인한 주변 대수층과의 경계조건에 달라져, 하천수와 지하수 모두 물리적 거동에 변화를 야기할 것이다. 그러나 지금까지의 연구들은 자연 상태의 하천과 주변 대수층의 경계부에서 관측한 자료를 바탕으로 진행된 연구들(Neger et al., 2003; Oxtobee et al., 2003; Rogers et al., 2004; Wurster et al.)로 하상의 인공구조물의 영향으로 유도되는 지하수-하천수 시스템 변화에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 하상의 인공 구조물(불투수성 하상 보)의 영향에 의한 지하수-하천수 시스템의 상호작용을 지하수 순환을 중심으로 하천수의 수위/유량 변화와 주요이온 농도의 변화를 고려한 용질거동에 대한 연구(Wrman et al., 2002)를 통해 규명하고자 한다. 다만 하상 보 설치 전과 그 후의 비교는 불가능하여 하상 보 설치 인접부와 격리지점의 측정결과를 비교하여, 하상 보에 의한 지하수-하천수 시스템간의 상호작용을 시험 사이트에 대한 조사를 통해 검토하고자 하였다.

본 연구지역은 충청남도 금산군 남이면 건천리의 남이 자연휴양림 내에 조성되어있다. 연구지역의 지하수관정은 하천을 따라 위치하고 있으며, 상류에서부터 BH-9, BH-13, BH-14, BH-15의 관정이 위치하고, 하천 조사지점은 BH-9 직상류의 하천과 보 저류지, 다리(보 하부 50 m 지점)로 지하수관정 4곳과 하천 3지점을 대상으로 연구를 수행하였고, 각각의 위치는 Fig. 1의 연구지역 지형도에 나타내었다. 이때 하천 인공구조물인 보는 본 연구 지역 중앙부에 위치한 BH-14와 BH-15 사이에 위치하고, BH-14의 경우 설치 목적 자체가 이 지역에 설치된 하천 보에 의한 영향을 관측하기 위한 것이며, BH-15의 경우 BH-

14와의 차별성을 검토하기 위한 것이다.

따라서 본 연구에서는 하천 보에 도달하기 이전(BH-9 직상류)의 하천 유량 및 주요 이온농도와 보, 그리고 보로부터 약 50여m 하류인 다리에서의 주요 이온 농도 및 유출량을 관측하고 BH-9, -13, -14, -15에서 지하수 수위 변화 및 주요이온 농도 변화를 지속적으로 관측하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 현장 모니터링

시간에 따른 지하수 시스템의 변화와 하천 유출량의 변화, 그리고 지하수-하천수 간의 상호작용 정도에 대해 검토하기 위하여, 앞서 언급한 각 관측정(BH-9, 13, 14, 15) 및 세 지점의 하천에서 2004년 10월 25일 이후 시간에 따른 변화를 지속적으로 모니터링 하였다. 이 때, 모니터링 항목과 각 모니터링 간격은 다음과 같다. 수위 모니터링은 각 관측정 및 하천 3지점에서 30분 간격으로 측정하였고, pH, EC, 온도, DO는 1주일 간격으로 매주 수요일에 실시하였으며, 주요 이온농도 변화는 1주일 간격으로 분석하였다.

이러한 항목들은 지하수계 및 하천수계에서의 변화를 거시적으로 나타내 주는 주요 지표로, 이에 대한 시간적 변화 양상 및 상호 연관성은 각 시스템의 특성 및 상호작용 특성에 대한 중요한 정보를 제공해 줄 수 있다(Crandal et al., 1999).

이와 함께, 거시적 지표로서 본 연구 지역에서의 하천 유출량에 대해 조사하였다. 이를 위해 2005년 7월 장마철에 고수위에서부터 저수위로 떨어지는 시점에 총 10차례, 2지점(상부하천 및 다리, Fig. 1)의 하천 유출량을 관측하였으며, 이를 바탕으로 본 연구지역의 전체적인 물수지 분석을 위한 기본적인 정보를 얻었다.

이 밖에도, 본 연구지역 내 자동 우량계를 설치하여, 본 연구지역에서의 강수량 및 점시증발량에 대한 모니터링도 함께 수행하였다.

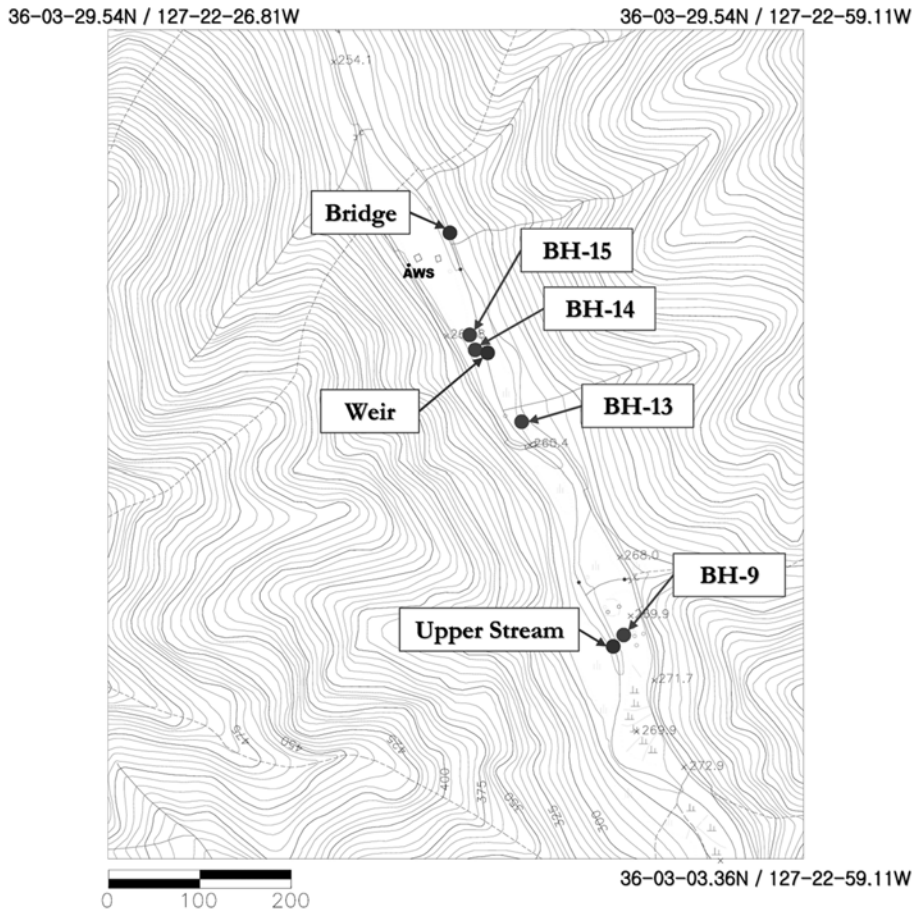


Fig. 1. Site map of study area (KIGAM, 2005).

2.2. 시계열분석

시계열 분석법은 대수층 자체의 수리지질학적 혹은 물리적 수리상수에 대한 정밀한 정보없이 입력값(강우)과 출력값(지하수위) 만으로 대상 대수층에 대한 이해를 시도 한다는 것이다(Box et al., 1994). 즉 어떤 연속적인 자료 들만으로 두 변수간의 신호적 반응양상을 해석하는 것이 다. 임의의 시계열을 나타내는 두 함수  $f(t)$ 와  $g(t)$ 가 있 다고 할 때, 두 함수의 상호상관함수  $C_{fg}(t)$ 는 다음과 같 이 정의 된다(Box et al., 1994).

$$C_{fg} = \begin{cases} \frac{1}{AN} \sum_{i=1}^{N-j} f(i)g(i+j) & j > 0 \\ \frac{1}{AN} \sum_{i=1}^{N-j} f(i-j)g(i) & j < 0 \end{cases} \quad (1) \quad A = \sigma_f \cdot \sigma_g$$

$$f_i \neq g_i$$

여기에서 시계열  $f$ 는 외부작용에 해당하는 시계열이고  $g$ 는 외부작용에 대해 반응을 나타내는 시계열이며,  $\sigma_f$ 는 시

계열  $f$ 의 표준편차이고  $\sigma_g$ 는 시계열  $g$ 의 표준편차이며,  $j$ 는 시간이격(time lag)이다. 상호상관함수는 두 시계열 자료간의 상호의존성을 나타내며, time delay( $t=0$ 과 최대상호상관 사이의 시간차)는 물리적 의미에서 그 시스템의 반응 양상을 표현한다.

본 연구에서는 관측 자료간의 정량적인 해석을 수행하기 위해 누적된 자료를 이용해 하천수위, 지하수위, 지하수질, 하천 수질 상호간의 상호상관성함수(Cross-correlation Function)를 계산하여 그 상관관계를 파악하였다. 이를 통해 각 자료간의 통계적 상관성을 명확히 하고, 흔히 말하는 지하수-하천수 혼합대(hyporeic zone)에서 나타나는 수질변화 특성을 시계열적으로 규명하고자 하였다.

3. 결 과

3.1. 지하수위 · 하천수위 변동 특성

연구결과 지하수위 변화는 강수 발생(일 강수량, Fig. 2) 시 상승하여 이후 단일 퇴행양상을 보여주는 것이 일

반적인 변화이다. 그러나 모니터링 시작 이후 강수량이 급격히 증가하는 시점(모니터링 시작이후 약 58,000분, 220,000분, 290,000분, 320,000분, 등)의 시간에서 수위 변화 양상은 이중 퇴행양상을 보여 주고 있다는 점에서 통상적인 지하수위변화와 명확한 차이점을 나타낸다. 즉, 약 58,000분 내외의 경과 시간에서 급격히 상승하기 시작한 지하수위는 최고 정점을 지나 약 60,000분의 경과 시간에 이르기까지 급격하게 감소하는 패턴을 보여주고 있

으며, 이 시점을 지나면서 지하수위의 하강 정도가 급격히 둔화되는 패턴을 보인다. Fig. 3는 단일퇴행양상과 이중퇴행양상을 나 수위가 하강할 때 하나의 기울기로 감소하는 양상을 나타내며, 반면 이중퇴행양상은 수위 하강 시 두개의 기울기로 감소하는 양상을 나타낸다. 기울기의 수와 변화는 유출성분의 변화에 따른 지하수-하천수 경계부의 조건 변화에 의한 것으로 급격한 기울기를 갖는 성분은 지표 직접유출성분이 우세한 시기 하천의 수위 조건에 의해 나타나는 퇴행이며, 비교적 완만한 기울기는 지하수의 기저유출성분에 의한 퇴행으로 판단할 수 있다. BH-9

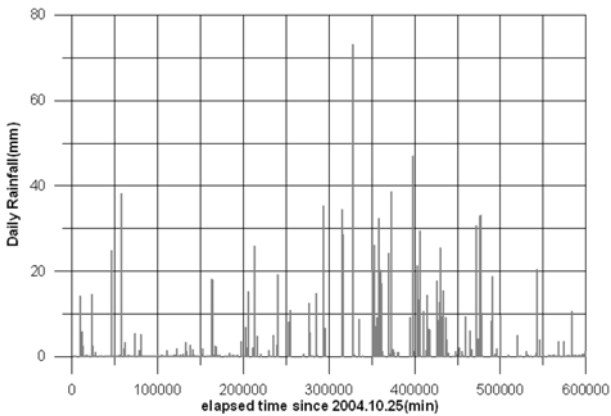


Fig. 2. Daily rainfall distribution in Geumsan area.

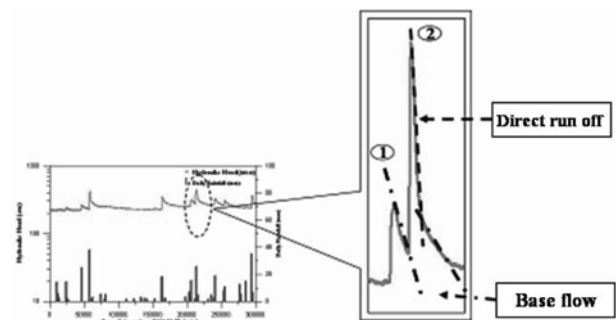


Fig. 3. Example the double-recession pattern.

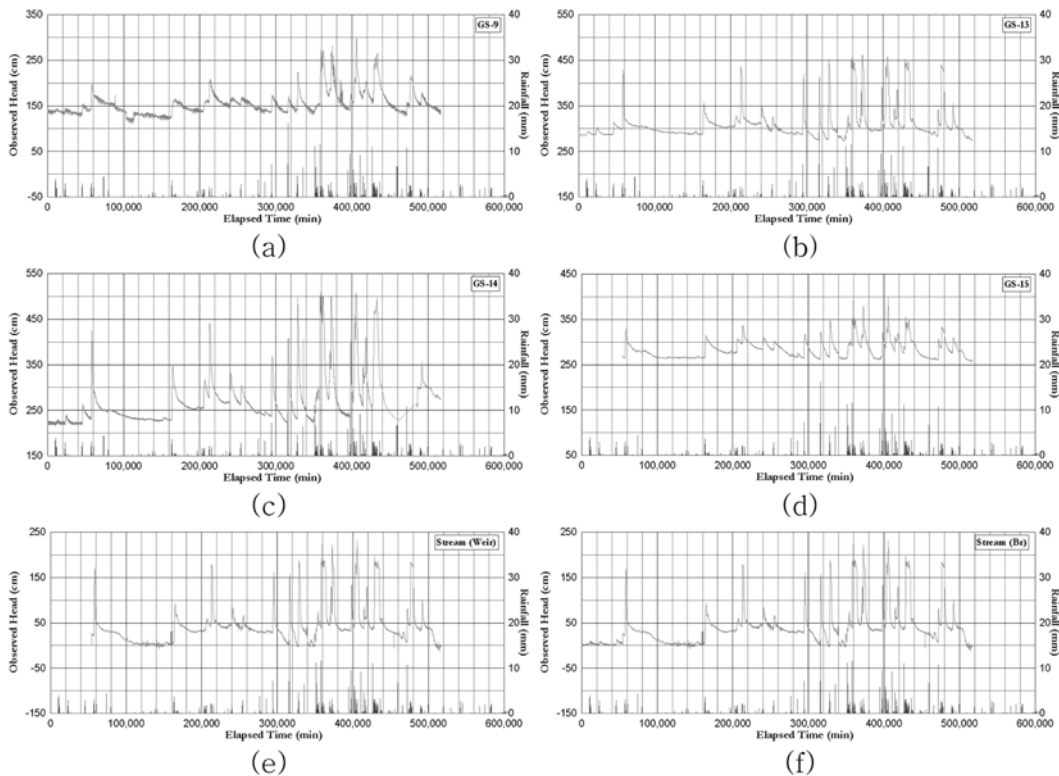


Fig. 4. Hydraulic head fluctuation at monitoring points; (a) BH-9, (b) BH-13, (c) BH-14, (d) BH-15, (e) weir, (f) Bridge (red line : hydraulic head, blue line : rainfall).

의 경우 약 58,000분, 222,000분의 두 구간에서 이중퇴행양상을 보이며, 나머지 구간에서는 단일퇴행양상을 보인다. BH-13은 수위 상승이 나타나는 대부분의 시간인 약 58,000분, 17,000분, 222,000분, 240,000분, 260,000분, 290,000분 내외의 경과시간에서 이중퇴행양상을 보인다. BH-14의 경우도 BH-13과 같이 수위상승이 나타나는 경과시간에서 이중퇴행양상이 나타난다. BH-15는 약 58,000분, 170,000분, 225,000분 내외의 경과시간에서 이중퇴행양상을 보인다. 이때 초기 퇴행양상에서의 지하수위 상승 및 하강 폭의 측면으로 보게 되면 다시 두 가지의 그룹으로 구분할 수 있다. 먼저 BH-13과 BH-14 관측점의 경우처럼 초기 퇴행에서 지하수위의 상승 및 하강 폭이 1 m 이상(BH-14는 약 1.2 m, BH-13은 약 1 m)의 변화폭을 보여 주는 그룹과 나머지 관점에서처럼 초기 퇴행에서 지하수위의 상승 및 하강 폭이 20 cm 내외의 수위 변화폭을 보여주는 그룹으로 구분되었다(Fig. 4 지하수관정에서의 수위변화를 나타낸 그래프). 또한 보와 주변 관정(BH-14, -15)에서의 수위변화 패턴을 검토해보면, 보와 BH-14의 수위변화 패턴은 그 반응 시점이나 수위상승 폭에서 매우 유사한 양상을 나타냈으며, 대부분의 수위 하강시 이중퇴행양상을 보였다. 반면 BH-15의 경우는 보나 BH-14와 반응시점에서는 유사한 반응을 보였으나 그 상승폭이 작으며, 간헐적으로 이중퇴행양상을 나타내었다.

3.1.2 하천 유출량측정결과

본 연구지역의 하천수위에 따라 총10회에 걸쳐 유출량을 측정하였으며, Table 1과 Table 2는 본 연구지역의 하류인 다리지점과 상부 하천에서 몇몇 시간의 하천유출량을 측정한 결과이다. Fig. 5는 하천상부와 다리에서 측정된 유출량을 비교하여 나타낸 그래프로 원안의 점들이 중심선을 기준으로 왼쪽에 표시에 다리에서 관측한 유출값이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 연구지역의 하천이 하류로 가면서 지하수의 기저유출에 의해서 유출이 증가하는 이득하천임을 알 수 있다. 또한 Fig. 6(하천 다리 지점에서의 유출량)을 보면 유출이 증가하는 시점에서 앞서 수위 변동에서 설명했던 단일퇴행양상을 보이는 시점과 이중퇴행양상을 보이는 시점이 구별되어 나타났다.

3.2. 현장 수질 분석 및 주요이온 농도 변화

3.2.1 현장 수질 분석

지하수-하천수의 상호작용에 대한 증거 확보 및 인공구조물에 의한 지하수-하천수 혼합대의 명확한 정의를 위하여 지하수 및 하천수의 주요이온 농도 변화와 현장수질

Table 1. Result of measurements of flow rate at bridge

DATE	Time	Flow rate (t/d)	Head (cm)	Velocity (cm/s)	Area (cm <sup>2</sup> )
7월 06일	14:00	9,615	19.7	7.60	14,625
7월 08일	11:45	4,941	17.1	4.09	13,952
7월 09일	12:00	4,893	17.2	5.49	10,310
7월 09일	16:30	4,893	20.1	7.70	11,000
7월 10일	11:12	9,572	23.6	7.35	15,075
7월 11일	15:43	251,841	43.8	72.14	40,400
7월 12일	11:10	56,340	31.5	26.49	24,610
7월 12일	15:45	44,138	26.5	23.70	21,550
7월 13일	15:45	17,593	24.1	13.04	15,610
7월 27일	11:08	748	14.8	1.66	5,220

Table 2. Result of measurements of flow rate at upper stream

DATE	Time	Flow rate (t/d)	Head (cm)	Velocity (cm/s)	Area (cm <sup>2</sup> )
7월 06일	14:00	9,017	13.9	22.7	4,590
7월 08일	11:05	3,305	11.8	10.8	3,530
7월 09일	11:25	5,056	14.5	15.4	3,791
7월 09일	14:00	6,587	14.9	19.4	3,940
7월 10일	11:40	18,219	21.0	38.7	5,455
7월 11일	14:50	252,883	48.5	120.8	24,225
7월 12일	11:52	45,650	25.2	60.7	8,705
7월 12일	15:07	37,369	23.5	55.2	7,835
7월 13일	16:00	13,600	17.7	28.5	5,515
7월 27일	12:05	1,062	7.9	7.8	1,575

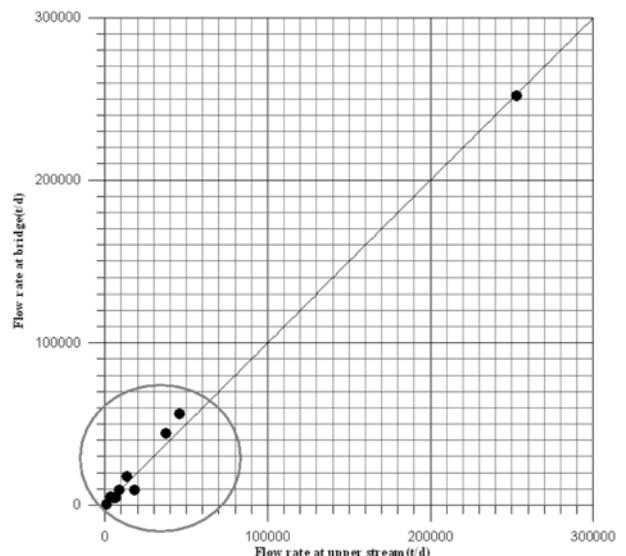


Fig. 5. Comparison of bridge and upper stream.

변화를 조사하였다. 현장수질 조사 조사결과 중 pH의 결과를 Fig. 7(a)에 나타내었고, EC결과는 Fig. 7(b)에 제시

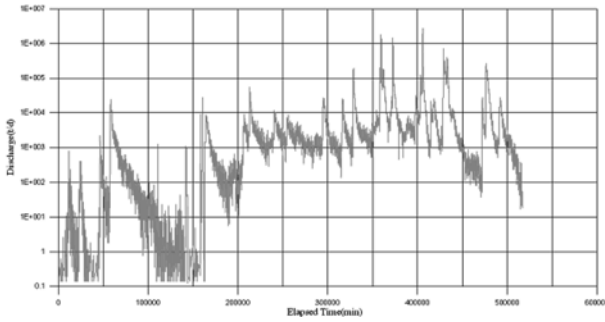
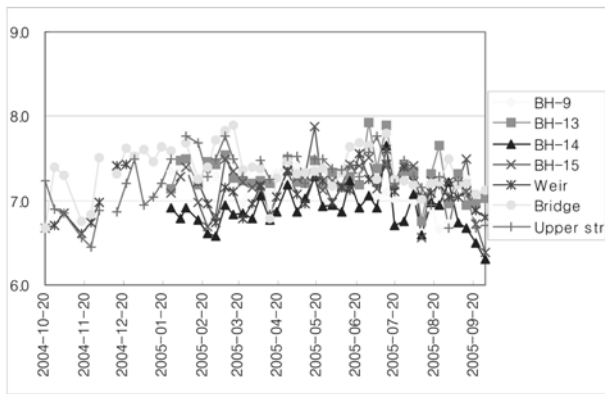


Fig. 6. Discharge of bridge.



(a)

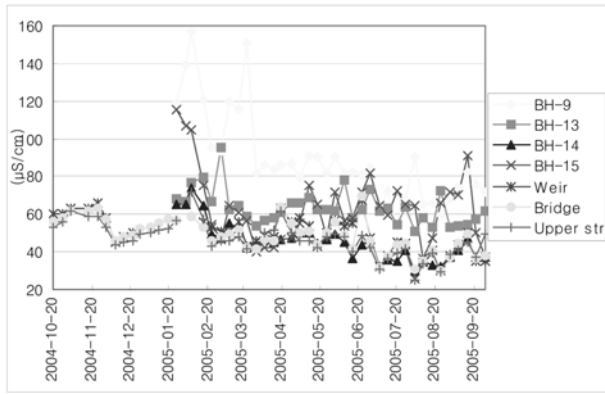


Fig. 7. Temporal variation (a) pH., (b) EC.

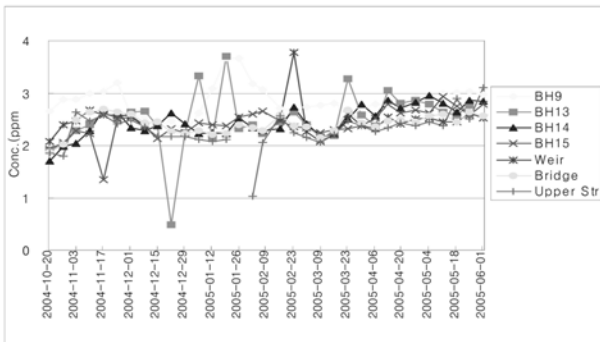
하였으며 겨울철 결빙으로 시료채취가 불가능해 누락된 자료가 일부 존재한다. 조사 결과 전반적인 pH와 EC의 측정값이 하천과 지하수에서 서로 다른 변화양상을 나타내었다. 먼저 (a)의 pH에 대한 조사결과 그래프를 보면 pH6.5~8 사이에서 강우의 영향에 의해 변화하는 것으로 보이고, 관측점간 큰 차이점이 드러나진 않지만 전반적으로 하천수가 지하수보다 다소 낮은 경향을 보인다. 다만 BH-14는 다른 지하수와 달리 하천의 변화값과 유사한 낮은 pH값을 나타내고 있다. (b)의 EC측정그래프를 보면 4

월을 기준으로 전과 후에 나타나는 값에서 전반적으로 다른 양상을 보이는데 먼저 BH-9는 4월전까지 약 80~160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 사이에서 큰 폭의 변화를 보인다 4월부터는 약 60~90  $\mu\text{S}/\text{cm}$  사이로 이전기간에 비해서 낮은 값을 보인다. 또한 BH-13은 약 50~100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 변화를 보인다 4월부터 약 50~80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 변화를 보이고, BH-14는 약 40~70  $\mu\text{S}/\text{cm}$  내외에서 변화하다 4월부터 약 30~50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 변화를 나타내며, BH-15는 약 40~120  $\mu\text{S}/\text{cm}$  내외의 큰 변화 폭을 보인다 그 후 40~80  $\mu\text{S}/\text{cm}$  내외에서 변화하는 양상을 나타낸다. 반면 하천수의 경우는 지하수관정에서처럼 4월을 전후한 차이점이 나타나지 않으며, 전반적으로 30~60  $\mu\text{S}/\text{cm}$  내외의 값에서 변화하는 양상을 나타낸다. 지하수관정과 하천에서의 EC측정값과 일강우량을 비교, 검토하여 보면, 전체적인 패턴은 강수 발생으로 지표유출 성분이 증가하는 시점에서 낮아지는 경향을 보이는 것으로 생각된다. 지하수관정에서는 강수 발생 후 EC값이 급격히 낮아지는 패턴을 보이고 하천수도 강수발생 후 EC값이 낮아지는 양상을 나타내지만 그 폭은 지하수 관정보다는 작게 나타나고 있다. 그러나 BH-14에서는 EC값 자체나 그 변화양상은 다른 지하수관정보다는 하천수와 유사한 결과를 보이고 있다.

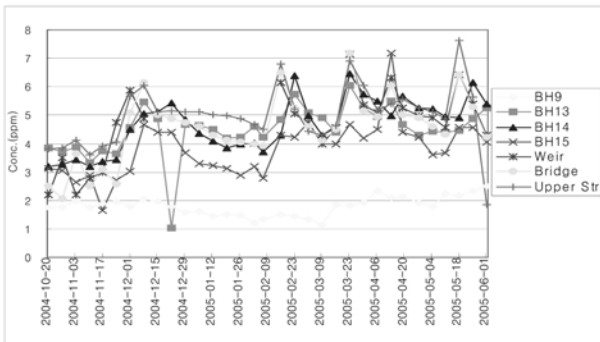
3.2.2 주요이온분석결과

Fig. 8에 (a)의  $\text{Cl}^-$ 이온분석결과 그래프에서 BH-9는 2~4 ppm 사이로 관측점 중 가장 높게 나타났고, BH-13은 0.5~4 ppm 사이로 관측값의 변화가 가장 크게 나타났으며, 나머지 관측지점의 분석결과는 2~3 ppm 사이 값을 나타내었다. 다만 보에서  $\text{Cl}^-$ 이온 농도가 3.78 ppm까지 일시적으로 증가하는 시점(05년2월23일) 이 관찰되었다. Fig. 8에 (b)의  $\text{NO}_3^-$ 의 분석 결과 그래프를 관찰하면 BH-9에서의  $\text{NO}_3^-$  값은 1~2 ppm 내외로 관측지점 중 가장 낮게 나타났으며, 변화폭에서도 다른 관측지점에 비하여 작게 나타난다. 반면 나머지 관측점에서의  $\text{NO}_3^-$  값은 2~8 ppm 사이로 나타나며, 변화폭도 크게 나타난다. 또한 분석결과에서 하천수의  $\text{NO}_3^-$  값이 비교적 높게 나타났다.

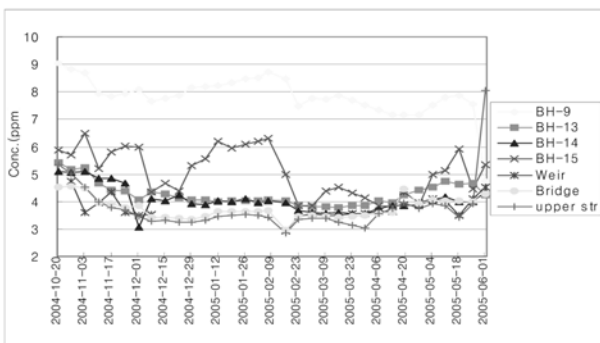
Fig. 8의 (c)는  $\text{Si}^{4+}$ 에 대한 이온분석결과 그래프로 지하수 관정의 결과값이 하천에 비하여 높게 나타남을 알 수 있다. 먼저 BH-9는 대부분의 값이 7 ppm 이상으로 관측지점들 중에서 가장 높은 값을 나타내며, 하천에서 관측된 값에 일치하는 시점이 없다. 반면 나머지 지하수 관정에서는 하천의 관측값과 유사해지는 시점이 나타나는데 먼저 BH-13은 4~5 ppm 사의 값을 나타내며, 4월에 하



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Temporal variation (a) Cl<sup>-</sup>, (b) NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, (c) Si<sup>4+</sup>.

천과 유사한 값을 보이는 시점이 나타난다. BH-15는 4~7 ppm 사이의 비교적 높은 값을 나타내고, 2월 이후 값이 낮아지며 간헐적으로 하천의 값과 유사해지는 시점이 발생한다. 반면 BH-14는 4 ppm 내외의 값을 나타내며, 2월 이후 하천의 관측값과 유사한 결과를 나타낸다.

3.3. 시계열분석결과

연구지역의 관정과 하천에서 조사한 누적자료간의 상호 관계를 알기 위하여 상관성분석을 실시하였다. 상관계수는 두 자료간의 상관성을 -1에서부터 1까지로 표현하며, -1에 근접할 수 록 음의 상관성이 높아지며 1에 가까워

Table 3. The correlation coefficients of water level

	BH-9	BH-13	BH-14	BH-15	Bridge	Weir
BH-9	1					
BH-13	0.87(-180)	1				
BH-14	0.84(-180)	0.93(0)	1			
BH-15	0.87(-210)	0.86(0)	0.95(0)	1		
Bridge	0.84(-210)	0.71(0)	0.84(0)	0.82(0)	1	
Weir	0.87(-150)	0.93(0)	0.97(0)	0.92(0)	0.85	1

지면 양의 상관성이 높아진다. 즉 상관계수가 -1에 가까워진다는 것은 입력값이 증가할수록 출력값에 해당하는 시계열함수는 음의 방향으로 감소하는 것을 의미하고, 상관계수가 1에 가까워지면 두 시계열함수가 같은 방향으로 증가하는 것을 의미한다. 또 상관계수의 절대값이 증가할수록 절대적인 상관성은 커지며, 일반적으로 최대상관계수가 0.6 이상일때 두 시계열함수간의 상관성에 대하여 신뢰성을 갖는다. 반면 상관계수가 0에 근접할수록 두 시계열자료간의 상관관계가 미약한 것으로 판단한다. 또한 시간이격이 갖는 물리적 의미는 외부작용이 가해졌을 때 그 작용에 의해 반응결과가 나타나는 시간을 의미한다. 본 연구에서는 수리물리적 방법과 수리화학적 방법을 통해 얻은 자료를 바탕으로 상호상관성분석을 수행하였다. Table 3~7은 시계열분석 결과 중 최대상관계수와 최대상관계수에 해당하는 시간이격을 나타낸 표로, 괄호안의 숫자는 시간이격이고, 입력값에 해당하는 자료가 가로줄이며 세로는 출력값에 해당한다. Table 3의 수위에 대한 상호상관성분석 결과를 보면 모든 경우의 상관계수가 양의 상관성을 나타내었다. 특히 BH-14와 보의 최대상관계수는 0.971로 가장 높은 상관성을 보이며, 이때의 시간이격은 영(0)으로 나타났다. 또한 BH-13과 BH-14, BH-13과 보, BH-14와BH-15, BH-15와 보간의 최대상관계수가 0.9 이상으로 비교적 높은 상관성을 보이며, 시간이격도 모두 0으로 나타난다. 이는 각각의 자료가 수위에 대하여 비교적 높은 상관성을 갖으며 그 반응도 즉각적임을 지시한다.

Table 4는 EC 의 시계열 자료에 대한 상호상관성분석 결과로 최대상관계수가 0.6 이상인 결과를 보면, BH-9와 BH-13, BH-14와 BH-15, BH-14와 보, 다리와 보간의 상관성분석에서 0.6 이상의 최대상관계수를 나타내며, 이때 다리와 보가 0.95로 가장 높은 상관성을 보이고 그 다음으로 BH-14와 보가 0.72의 상관성을 보인다. Table 5는 Cl<sup>-</sup>에 대한 시계열분석결과로 BH-9는 하천위와 0.67의 상관계수를 나타내며, BH-13은 상부 하천과 -0.642로 음의 상관성을 보이고, BH-14와 보는 0.703, 보는 상부

**Table 4.** The correlation coefficients of EC

EC	BH-9	BH-13	BH-14	BH-15	Bridge	Weir	Upper str
BH-9	1						
BH-13	0.64(-21)	1					
BH-14	0.62(0)	0.39(21)	1				
BH-15	-0.46(14)	-0.37(42)	-0.42(-35)	1			
Bridge	0.38(-7)	0.32(14)	0.68(0)	0.34(0)	1		
Weir	0.45(-7)	0.34(14)	0.72(0)	0.31(0)	0.95(0)	1	
Upper str	0.32(28)	0.34(0)	0.49(0)	-0.38(35)	0.54(0)	0.49(0)	1

**Table 5.** The correlation coefficients of Cl<sup>-</sup>

Cl	BH-9	BH-13	BH-14	BH-15	Bridge	Weir	Upper str
BH-9	1						
BH-13	0.42(-7)	1					
BH-14	-0.33(56)	-0.40(63)	1				
BH-15	0.38(14)	0.36(14)	0.52(7)	1			
Bridge	0.58(-70)	0.45(-63)	0.58(0)	0.25(49)	1		
Weir	0.40(28)	-0.54(63)	0.70(0)	0.59(21)	0.40(0)	1	
Upper str	0.67(7)	-0.64(35)	0.42(-28)	0.59(-7)	0.39(70)	0.71(-28)	1

**Table 6.** The correlation coefficients of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

N03	BH-9	BH-13	BH-14	BH-15	Bridge	weir	upper str
BH-9	1						
BH-13	0.51(-42)	1					
BH-14	0.42(0)	0.42(0)	1				
BH-15	0.53(-42)	0.50(0)	0.77(0)	1			
Bridge	0.42(-63)	0.55(0)	0.77(0)	0.77(0)	1		
Weir	0.43(-63)	0.47(0)	0.7(-7)	0.63(0)	0.84(0)	1	
Upper str	0.44(-7)	0.28(-7)	0.62(-7)	0.50(0)	0.79(0)	0.75(0)	1

**Table 7.** The correlation coefficients of Si<sup>4+</sup>

Si	BH-9	BH-13	BH-14	BH-15	Bridge	weir	upper str
BH-9	1						
BH-13	0.36(-70)	1					
BH-14	0.31(-7)	0.80(0)	1				
BH-15	0.52(-7)	0.43(14)	0.59(7)	1			
Bridge	-0.33(49)	0.79(0)	0.61(-7)	-0.50(49)	1		
Weir	-0.27(49)	0.65(-7)	0.59(-7)	-0.40(35)	0.83(0)	1	
Upper str	-0.49(0)	0.48(7)	0.49(0)	-0.41(49)	0.68(0)	0.72(0)	1

하천과 0.714의 상관관계를 나타내 Cl<sup>-</sup>이온에 대한 최대 상관계수가 가장 높게 나타났다.

Table 6은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>에 대한 상호상관함수 분석 결과로, 다리나 보가 입력값으로 들어가는 시계열분석에서는 그 상

관계수가 0.7 이상으로 높게 나타났으며, 특히 이들 둘간의 상관성분석에서는 최대상관계수가 0.836으로 가장 높게 나타났다.

Table 7은 Si<sup>4+</sup>에 대한 시계열 분석결과로 BH-13과



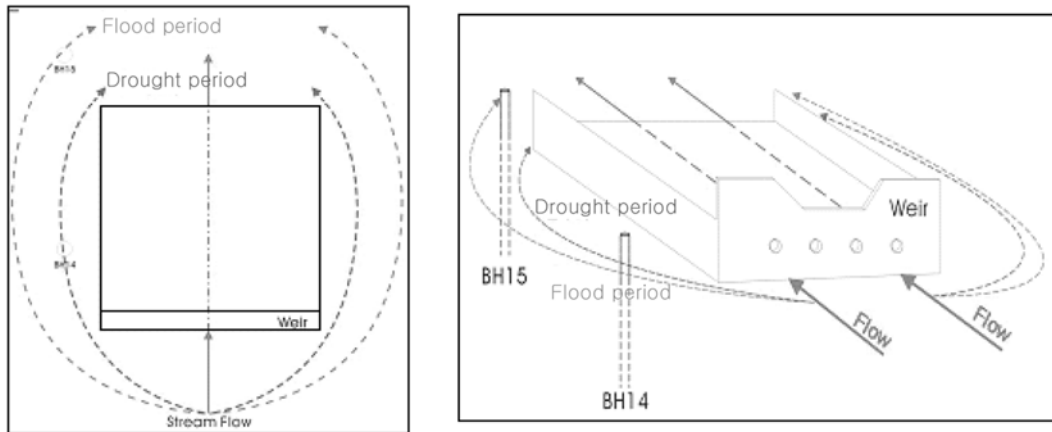


Fig. 9. Concept model of groundwater-surface water flow system at article weir.

BH-14, BH-13과 bridge, 그리고 다리와 보에 대한 최대 상관계수는 0.7 이상으로 높게 나타나며, 이때의 시간이격은 영(0)으로 나타난다. 이중 다리와 보의 최대상관계수는 0.83으로 가장 높은 상관성을 나타낸다.

#### 4. 토 의

지하수-하천수의 혼합대에서의 지하수위 변화는 하천에 가깝거나 습지가 존재할수록 하천수의 영향을 받아 수위 변화가 크게 나타나는 것으로 보고되었다(Devito et al., 1996). 본 연구의 수위모니터링 결과를 보면 지하수의 상승 및 하강의 측면에서 두 가지 그룹으로 구분되어졌다. 먼저 변화폭이 20 cm 내외의 일반적인 지하수 관정에서의 변화폭을 보인 그룹(BH-9, 15)과 변화폭이 1 m 이상으로 수위 변화폭에서 특징적인 변화를 보인 그룹(BH-13, 14)으로 구분할 수 있다. 이렇게 지하수의 상승과 하강 쪽에서 특징적인 양상이 나타나는 원인은 BH-13의 경우 보의 배후 습지로 만수위 시 보의 물이 관정 앞까지 치는 것이 확인되었으며, 이때 유입된 하천수 때문에 수위가 상승하는 것으로 보인다. BH-14의 경우는 인접한 BH-15와 비교할 때 수위의 상승과 하강에서 큰 폭의 차이를 보이는데 BH-14의 수위상승 폭은 1 m 이상으로 하천 보의 수위상승 패턴과 동일한 양상을 보이며, 반면 BH-15는 상승폭이 20 cm 내외의 변화를 보인다. 인접한 두 관정에서 이렇게 다른 수위변화 패턴을 나타내는 이유는 보의 수위가 상승하면서 보와 BH-14 대수층의 하천과의 상호작용 조건이 바뀌어 하천수가 보 하부와 수평부의 BH-14 주변 대수층으로 복류하고, 이때 유입된 하천수가 BH-14의 수위를 상승시키는 것으로 보인다. 즉, 하천 보의 수위가 지하수면 보다 높게 상승하는 정도에 따라 유입되는

하천수의 양이 달라지며, 반대로 보의 수위가 주변 대수층의 지하수위 보다 낮아 질 경우에는 하천으로 기저유출이 일어나는 것으로 해석할 수 있다는 것이다. 결과적으로 보의 수위가 상승하여 BH-14 주변대수층의 지하수면 보다 높게 상승할 때 대수층으로 보의 하천수가 유입되기 시작하며, 보의 수위가 더욱 상승하여 유입되는 하천수의 양이 많아지는 경우에 BH-15에 영향을 미치는 것으로 보인다. 이는 홍수기에 BH-15에서 간헐적으로 나타나는 이중퇴행으로 알 수 있다.

또한 BH-14 주변 대수층으로 유입된 하천수는 다시 하류의 하천을 통해 유출되는 것으로 판단된다. 이는 Fig. 5의 상류 하천과 하류 다리 지점의 유출량을 비교한 그래프를 통해 연구지역의 하천이 하류로 갈수록 지하수의 유출에 의해 유량이 증가하는 이득하천임을 알 수 있으며, 이는 BH-14 주변 대수층으로 유입된 하천수가 다시 하천으로 유출된다는 것을 알 수 있다. 또 Fig. 6의 하천 다리 지점의 유출량 그래프를 보면 앞서 수위 변동 특성에서 설명한 단일 퇴행과 이중 퇴행이 나타난다. 먼저 단일 퇴행 패턴은 하천의 수위 상승 시 보에 의하여 하천의 흐름이 차단되고 그로 인해 하천수가 보 주변 대수층으로 유입된 후 다시 하천으로 유출되어 하천의 수위 상승 시에 직접 유출성분이 나타나지 않는 단일 퇴행을 보이는 것으로 판단되며, 이중 퇴행 패턴은 보의 한계 수위를 넘는 하천의 흐름으로 인하여 보 위로 하천수의 흐름이 발생하고 그로 인해 하천수의 직접 유출과 지하수의 기저유출 두 성분이 하천 흐름을 구성하여 초기의 시간에 따른 하천 유량 감소곡선의 기울기와 후기의 기울기가 명확히 구분되는 이중 퇴행 패턴을 보인다는 것이다.

이러한 해석은 수리화학적 거시적 지표인 pH, EC 등의 변화나, 주요 이온의 농도 변화 양상으로부터도 뒷받침 될

수 있다. 일반적으로 지하수에서는 그 생성 및 이동과정에서 암석과의 다양한 반응으로 인하여 EC 값이 지표수에 비하여 크게 나타난다. 본 연구에는 수리화학적 연구를 통해 얻은 결과를 자연추적자 개념으로 사용하여 관측지점간의 연결성을 검토하였다. 연구결과 자연추적자의 개념으로 현장의 EC결과와  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Si^{4+}$ ,  $Sr^{2+}$ 의 이온 분석결과를 토대로 관측지점간의 연결성을 확인해 보았다. 전반적인 연구결과에서 BH-9의 측정된 값들은 다른 관측지점과 비교할 때 크거나 변화양상에서 많은 차이를 보이여 연결성을 찾기가 어려웠다. BH-15도 다른 관측지점과 차이를 보였지만, 간헐적으로 하천과 비슷한 결과를 보이는 기간이 존재한다. 반면 BH-13과 BH-14는 결과값에서 BH-13이 EC나 이온분석값에서 약간 높은 결과를 보이긴 하지만 하천과 유사한 값을 보인다. 이는 앞서 언급한 것처럼 BH-13의 위치가 보의 배후 습지에 해당하기 때문에 평상시 기저유출이 우세한 경우 지하수의 특성을 보이다가 집중 강우시 보에 의해 수위가 상승된 하천수위의 영향으로 하천수가 지하수 시스템으로 역유해 들어올 가능성을 지시해 주고 있다. 이와 함께 BH-14의 경우에도 하천 보의 EC값과 주요이온분석값의 변화 패턴과 매우 유사한 반응을 나타내고 있어 하천과의 연결성이 있음을 생각해볼 수 있다. 이는 앞서 언급한 하천과 지하수위 관계와 같이 하천보의 수위 상승으로 인해 하천수가 BH-14 주변 대수층으로 유입되어 BH-14가 지하수관정임에도 불구하고 하천수의 성격을 나타내는 것이며, BH-15의 경우 간헐적으로 하천수적 성격을 보이는 것은 보의 수위가 일정수위 이상으로 상승하여 유입되는 하천수의 양이 많아져 보 인근의 지하수 시스템으로의 영향 범위가 확장되었을 때, BH-15에 까지 영향을 미쳐 발생하는 것으로 볼 수 있다는 것이다.

지하수위의 시간적 변동특성이나, 수리화학적 특성의 변화는 가장 널리 활용되는 선형시계열 분석 방법의 하나인 교차상관분석을 통해서도 확인할 수 있다. 시계열분석법은 대수층 자체의 수리지질학적 혹은 물리적 수리상수에 대한 정밀한 정보없이 입력값과 출력값만으로 대상 대수층에 대한 이해를 시도하는 것으로 어떤 연속적인 자료들만으로 두 변수간의 신호적 반응양상을 해석하는 것이다 (이진용 외, 2002). 수위자료에 대한 시계열 분석 결과 (Table 3)에서 보듯이 관측 지점간의 상관계수가 높게 나타났으며, 자료들의 시간이격도 대부분 영(0)에 가까웠다. 이는 강우 발생시 일어나는 수위상승 및 하강의 관계에 의한 것으로 관측지점들이 강우에 의해 직접적인 영향을 받는다는 것을 지시하는 것이며, 특히 BH-14가 0.97로

다른 관정에 비해 하천 보 수위와 가장 높은 교차상관관계를 보여주고 있다는 것은 두 지점간의 수위 상승 및 하강이 물리적으로 직접 연관되어 있다는 것을 뒷받침해 주고 있다. 이러한 특성은 수위에 대한 시계열적 변동 특성 뿐만 아니라 수리화학적 특성의 시간에 따른 변화에서도 확인할 수 있다. EC에 대한 상관성 분석 및 주요 이온분석 결과에서 하천의 다리와 하천보가 분석항목에서 가장 높은 상관 관계를 나타내는데, 이는 동일한 줄기의 하천 흐름 상에서 당연한 결과로 보아야 한다. 이외 하천과 지하수 시스템과의 상호 연관성이라는 측면에서 볼 때, 보와 BH-14의 최대상관계수는 하천 내 다른 관측지점간의 상관성에 비해 낮은 상관성을 보이지만 다른 관측지점에 비교했을 때 상대적으로 높은 상관성을 나타낸다.

이렇게 수리물리적 결과와 수리화학적 결과의 최대상관관계를 나타내는 지점에 차이가 생기는 이유는 먼저 수위의 경우는 보의 수위가 상승하여 주변 대수층(BH-14)과의 경계조건이 바뀌면서 주변대수층 전체에 유입되지 않더라도 유입이 일어나는 시점에서 물리적 작용에 의하여 수위 상승의 효과를 나타내지만 화학적 용질거동에 있어서는 하천수가 주변 대수층으로 직접적인 유입이 있어야 화학적 변화가 일어나기 때문에 수위에서는 높은 상관관계를 나타내지만 화학적결과에 대한 시계열분석 결과에서는 비교적 낮은 값을 보이는 것으로 판단된다. 반면, 보 하부의 하천인 다리의 경우 보의 하천수가 직접 유입되기 때문에 수리화학적결과에 대한 상관성이 높게 나타나는 것으로 생각된다. 시계열분석 결과로 볼때 BH-14와 보의 관계는 물리적인 수위상승에는 직접적이며 즉각적인 반응이 일어나는데 반하여 화학적 작용을 나타내기 위해서는 어느 정도의 지연시간이 필요한 것으로 확인되었다.

## 5. 결 론

하상의 인공 구조물의 영향에 의한 지하수-하천수 시스템의 상호작용을 지하수 순환을 중심으로 하천수의 수위/유량 변화와 용질거동에 대한 연구를 통해 규명하였다.

하상 인공구조물에 의한 지하수-하천수 시스템의 상호작용을 검토하기위해 하천과 지하수위 변화를 지속적으로 관측하였다. 전반적인 지하수위 모니터링 결과에서 지하수의 상승 및 하강의 폭의 측면에서 두 가지 그룹으로 구분되었다. 먼저 초기 퇴행에서 지하수위의 상승 및 하강 폭이 1 m 이상의 특징적인 결과를 보인 그룹(BH-13, BH-14)과 20 cm 내외의 일반적인 지하수 관정에서의 변화를 나타내는 그룹(BH-9, BH-15)으로 구분되었다. 이렇

계 특징적인 수위변화를 나타내는 원인은 BH-13의 경우는 보의 배후 습지로 지표유출성분의 직접적인 영향을 받아 나타나는 현상이며, BH-14의 경우 하천 보의 수위 상승 시 주변 대수층과의 경계조건이 달라져 하천수가 지하수계로 유입되어 수위 상승의 효과가 발생하는 것으로 보인다. 반대로 하천 보의 수위가 지하수면 보다 낮아지면서 BH-14의 기저유출이 발생하는 것으로 판단된다. 또한 하천 보의 수위상승이 증대되면 BH-15에까지 하천수의 영향이 미치며, 이로 인해 BH-15에서 간헐적으로 BH-14와 같은 현상이 관측되는 것이라 할 수 있다.

EC현장수질 분석자료를 보면 전체적인 패턴은 강수 발생으로 지표유출 성분이 증가하는 시점에서 낮아지는 경향을 보였으며, 이때 지하수관정인 BH-14는 하천수의 EC 변화와 매우 유사한 변화를 보였다. 또한 BH-14는 주요 이온분석에서도 다른 지하수 관정 보다는 하천수와 같은 변화를 나타냈다. 이러한 변화 역시 앞서 언급한 수위 결과와 같이 하천보의 하천수가 유입되어 발생하는 것으로 판단된다. 수위자료에 대한 시계열분석결과 BH-14와 보의 상관계수가 가장 높게 나타났으며, 시간이격도 영(0)으로 나타났다. 이는 강우 발생 시 일어나는 수위의 상승 및 하강에 의한 것으로 앞서 언급한 하천 보와 BH-14 주변대수층의 관계에 의해 BH-14와 하천보의 수위가 직접적으로 영향을 주고받아 나타나는 것으로 판단된다. 또한 주요이온분석에서는 하천보와 하천다리의 최대상관계수가 가장 높게 나타난다. 이는 하천보의 하천수가 BH-14에 유입되어 화학적인 작용을 하기위해서는 어느 정도의 시간지연이 필요한데 반해 하천다리에서는 보의 하천수가 하상으로 직접 유입되기 때문인 것으로 해석하는 것이 타당하다.

결과적으로 하상에 인공구조물이 존재하면 하천보와 주변대수층과의 경계조건에 따라 하천수의 유입과 지하수의 기저유출이 반복된다. 이때 유입되는 하천수에 의해 주변 대수층에서는 다른 지역의 지하수에 비하여 하천수적 성향을 나타내며, 이러한 현상은 Fig. 8에서와 같이 보의 수위가 높아질수록 보다 명확하게 나타나며, 이는 하상 인공 구조물에 의해 인위적으로 유도되는 지하수-하천수 상호작용의 직접적 증거라 할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-2-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김용제 등, 2005, 지하수-하천수 연계순화/유동 시스템 개발, 한국지질자원연구원, 수자원의 지속적 확보기술개발, 1차년도보고서.
- 이진용, 이강근, 2002, 강우에 대한 지하수위 반응양상 비교분석: 강원도 원주지역과 경기도 의왕지역, 한국지하수토양환경학회지, 7(3-14).
- Anderson, E.I., 2005, Modeling groundwater-surface water interactions using the Dupuit approximation, *Advances in Water Resources*, 28, 315-327.
- Box, G.P., Jenkins, G.M., and Reinsel, G.C., 1994, Time series analysis, Prentice-Hall Inc, 407-413.
- Crandall, C.A. and Kantz, B.G., 1999, Hydrochemical evidence for mixing of river water and groundwater during high-flow conditions, lower Suwannee River basin, Florida, USA, *Hydrogeology Journal*, 7, 454-467.
- Devito, K.J., Hill, A.R., and Roulet, N., 1996, Groundwater-surface water interactions in headwater forested wetlands of the Canadian Shield, *Journal of Hydrology*, 181, 127-147.
- Fetter, C.W., 2001, Applied hydrogeology, Prentice-Hall Inc, 46-48, 55-58.
- Linderfelt, W.R. and Turner, J.V., 2001, interaction between shallow ground-water, saline surface water and nutrient discharge in a seasonal estuary: the Swan-Canning system, *Hydrological Process*, 15, 2631-2653.
- Negrel, P., Petelet-Giraud, E., Barbier, J., and Gautier, E., 2003, Surface water-groundwater interactions in an alluvial plain: Chemical and isotopic systematics, *Journal of Hydrology*, 277, 248-267.
- Oxtobee, J.P.A. and Novakowski, K.S., 2003, Ground water-surface water interaction in a fractured rock aquifer, *Groundwater*, 41, 667-681.
- Rodgers, P., Soulsby, C., Petry, J., Malcolm, I., Gibbins, C., and Dunn, S., 2004, Groundwater-surface water interactions in a braided river: a tracer-based assessment, *Hydrological processes*, 18, 1315-1332.
- Wöman, A., Packman, A.I., Johansson, H., and Jonsson, K., 2002, Effect of flow-induced exchange in hyporheic zone on longitudinal transport of solutes in streams and rivers, *Water resources research*, 38(1), 1001.
- Wurster, F.C., Cooper, D.J., and Sanford, W.E., 2002, Stream/aquifer interactions at Great Sand Dunes National Monument, Colorado: influences on interdunal wetland disappearance, *Journal of Hydrology*.