

# 비닐하우스 지역의 지하수 양수에 따른 지하수-하천수 상호 유동 변화 분석

## Change of Groundwater-Streamflow Interaction according to Groundwater Abstraction in a Green House Land

김 남 원\* / 이 정 우\*\* / 정 일 문\*\*\* / 김 창 환\*\*\*\*

Kim, Nam Won / Lee, Jeongwoo / Chung, Il Moon / Kim, Chang Hwan

### Abstract

Increased use of water curtain facilities to keep green house warm during winter cultivation has been known to cause excessive groundwater abstraction which might lead to decline of groundwater level, resulting in streamflow depletion. Therefore it is required to quantitatively assess the effects of groundwater abstraction on the streamflow depletion such as magnitude and extent. The objective of this study is to assess the change of stream-aquifer interaction according to groundwater abstraction near stream. To this end, a green house cultivation land in Sooha-ri, Sindun-myun, Icheon-si, Gyeonggi-do was selected as a field experimental site, and monitoring wells were established near and within stream to observe the water level and temperature changes over a long period of time. From the observed water level and temperature data, it was found that the river reach of interest changed to a losing stream pattern during the winter cultivation season due to groundwater level decline around pumping wells near the stream. The continuous exchange rates between stream and aquifer were estimated by plugging the observed water level data series into the experimental relation between head difference and exchange rate, showing the streamflow depletion by 16% of the groundwater pumping rate in Feb, 2011.

**Keywords** : groundwater abstraction, green house, water curtain facility, groundwater-streamflow interaction, streamflow depletion

### 요 지

겨울철 작물재배를 위해서 비닐하우스 보온을 위한 수막시설의 이용이 늘어나고 있어 과도한 지하수 이용에 따른 수위 강하 및 하천수 감소를 유발하고 있다. 따라서 수막시설재배 지역에서의 지하수 양수가 지하수 대수층과 연결된 하천에 어떠한 영향을 미치는지를 정량적으로 평가해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 경기도 이천시 신둔면 수하리 일대 수막시설재배지역에 지하수위와 온도를 계측하기 위한 지하수 관측공을 제내지와 제외지에 설치하고 관측 결과를 분석하여 지하수 양수에 따른 하천-지하수 상호 유동계의 변화를 평가하였다. 연구대상지역은 수위와 수온 관측 결과, 수막시설재배

\* 한국건설기술연구원 수자원연구실, 선임연구위원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr)

Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

\*\* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구위원 (e-mail: ljw2961@kict.re.kr, Tel: 031-910-0529)

Corresponding Author, Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구실, 연구위원 (e-mail: imchung@kict.re.kr)

Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, ilsanseo-gu, goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

\*\*\*\* 한강홍수통제소 하천정보센터, 연구사 (e-mail: kchkas@korea.kr)

Han River Flood Control Office, 328 Dongjakdae-ro, Seocho-gu, Seoul 137-049, Korea

기간 동안 지하수 양수의 영향으로 하천수가 지하수계로 유입되는 손실하천의 양상을 나타내었다. 하천바닥층에 대해 침윤계 실험을 통해서 유도한 수두차와 침윤량간의 관계에 자동관측된 수위자료를 대입하여 하천과 지하수계 상호간 유동량의 연속적인 변화를 산정한 결과 수막시설재배가 한창인 2월말에는 지하수 이용량의 약 16% 만큼의 하천수가 감소하는 것으로 분석되었다.

**핵심용어** : 지하수 양수, 비닐하우스, 수막시설재배, 지하수-하천수 상호 유동, 하천수 감소량

## 1. 서 론

하천 주변 지역에서는 농작물 재배를 위해서 지하수를 많이 이용하고 있고, 또한 농업용수 공급을 위해 대형 관정으로부터 대규모로 지하수 채수가 일어나고 있는 경우도 있다. 이러한 지하수 이용이 과도할 경우에는 대수층과 연결된 인근 하천 유량의 감소를 유발하며 국부적인 하천 고갈까지 야기하여 하천 건천화의 주요한 원인으로 작용할 수 있다. 특히 농경지의 효율적 이용과 농가 고소득을 위해 지난 십수년간 비닐하우스 설치 면적이 급격하게 늘어났으며, 이는 불투수 면적의 증가로 인한 지하수 충전의 억제뿐만 아니라 연중 지하수 이용으로 인한 지속적인 지하수위 강하를 일으키고 있다. 더욱이 겨울철에는 비닐하우스 시설의 보온을 위해서 외부 기온 보다 높은 지하수를 양수해서 비닐하우스 내외벽 사이에 뿌려주는 방식의 수막시설재배가 늘어나고 있어 과도한 지하수 이용에 따른 수위 강하 및 하천수 감소를 더욱 가속화하고 있는 실정이다. 따라서 안정적인 하천수 확보를 위한 하천관리 방안의 일환으로 하천 인근 비닐하우스 지역에서의 지하수 이용이 하천수량에 어떠한 영향을 미치는지를 정량적으로 파악할 필요가 있다.

지하수 이용량과 하천수량 변화와의 상관관계를 규명하기 위해서는 우선적으로 하천과 이와 연결된 대수층간의 수리적 상호 유동 특성 파악이 선행되어야 한다. 관측 결과에 기초하여 하천수와 지하수의 수리적 상호작용을 분석한 국내 연구는 그리 많지 않다. 전중욱 등(2005)는 경안천 주변에 발달하는 충적층 분포지역 중 사계절 비닐하우스 농업이 대규모로 이루어지고 있는 지역에 대해서 하천과 충적 지하수 간의 수리적 연관성과 질산염의 거동을 파악하고 강변에서의 지하수 양수에 의한 충적 지하수의 수리적 변화를 규명하였다. 수위측정 결과를 토대로 충적지하수가 대부분 하천을 향하여 유동하고 있지만 대상 지역의 하류부에 하천변에 설치한 농업용 대형 관정에서의 양수에 의하여 충적 지하수계로의 하천수의 인위적인 유입이 가속화되고 있음을 나타내었다. 하규철 등(2006)

은 만경강 하천부지에 다심도 관정을 설치하여 지하수위와 하천수위와의 상호반응과 수리적으로 다른 특성을 가진 각 층별 반응관계를 알아보기 위해서 자기상관분석과 교차상관분석방법을 이용하여 수리적 상호관계를 파악하였고, 하천과의 이격거리에 따른 하천과 대수층간의 반응 시간을 평가하였다. 이봉주 등(2006)은 대전 유성구 하수처리장의 방류수와 처리수가 유입되는 갑천의 하천수위의 변동간의 관련성, 그리고 하천수위 변동과 지하수위의 변동간의 관련성을 분석하여, 하천수-지하수 상호작용의 진단과 정량화의 수단으로 하수처리장 처리수 방류에 의한 하천수위의 주기적 변동 특성을 수리지질학적 입력 신호로서의 활용 가능성을 평가하였다. 조성현 등(2003)은 전남 곡성군 삼기천 소유역에서 관측한 하천수위과 지하수위 자료를 기초로 시간에 따른 하천의 수리경사 변화곡선으로부터 지하수 관측지점에서의 기저유출률을 산정하여 기여도를 평가하였고, 지하수-하천수 수위곡선을 이용하여 그 양상을 비교한 결과, 강우에 대하여 하천수위가 지하수위보다 변동이 더 빠른 양상을 나타내었다. 환경친화적인 추적자로서 하천수와 하상에서의 온도차를 분석하여 지하수와 하천수의 상호 유동 관계를 해석하는 방법도 이용되고 있는데, 김구영 등(2006)은 예산군의 소규모 유역에서 3개소에서 하상의 공극수와 지표수의 온도를 관측하여 이득하천과 손실하천을 구분하려는 연구를 수행하였다. 소유역의 상류에 위치한 지점에서 온도 시계열 자료를 분석한 결과 하상의 온도는 하천수의 온도와 유사한 일일 변동특성을 나타내어 하천수가 지하수로 유동하며, 하류에 위치한 지점에서는 하상의 온도가 시간에 따라 일정한 값을 보여 지하수가 하천수로 유동하는 것으로 분석되었다.

지하수 양수에 따른 하천 영향을 모니터링한 해외 연구 사례로 뉴질랜드의 Wellington Regional Council (WRC)에서는 관개용 지하수 관정이 Papawai 하천에 미치는 영향을 평가한 결과, 관개용 관정에서의 지하수 양수로 인해 관개기간 동안 지하수위가 약 0.1~0.2m 낮아지고 약 18%의 하천유량 감소가 발생한 것으로 보고하였다. 뉴질

랜드의 Tasman District Council (TDC)에서는 건천화가 진행되고 있는 Little Sydney 하천 인근에 위치한 7개의 관개용 관정에서의 지하수 양수에 따른 지하수위 저하 및 하천수량 변화를 관측하였으며, 1998년 지하수 양수와 무양수에 대해서 상류로부터 하류까지 6개 지점에서 하천유량을 관측한 결과 무양수일인 경우 하류로 내려올수록 완만한 하천유량 감소가 일어났으나, 양수일인 경우엔 하류로 내려올수록 하천유량이 증가하다가 다시 감소하며 일정구간 거의 변화가 없다가 최하류단에서 급격한 감소가 일어나는 양상을 보였다. 하천유량의 증가 구간은 관개 후 회귀수의 하천유입에 따른 것으로 분석하고 있다. 이러한 측정 결과로부터 TDC는 지하수 양수로 인한 하천에 미치는 단기간 영향은 크지 않을 수 있으며, 따라서 장기간 영향을 평가해야 한다고 강조하고 있다(Environment Canterbury, 2000). Hunt et al. (2001)은 농경지 배수를 목적으로 만들어진 폭 2.5 m의 Doyleston 수로 인근 지역에서의 양수로 인한 수로의 내 유량의 변화를 관측하였다. 양수관정에서 약 10시간 동안 17.5 L/s로 양수하면서 양수관정 및 주변 관측점에서 지하수위 변화를 계측하였고, 동시에 200 m 상하류지점에 위어를 설치하여 하천유량의 변화를 측정하였다. 상하류단 유량의 차이는 1.2 L/s이었고, 상류단에서의 유량감소는 4.8 L/s로서 하류단에서의 유량감소를 함께 고려하여 지하수 양수로 인하여 총 10.8 L/s의 유량이 감소되는 것으로 관측되었다(Environment Canterbury, 2000). Nyholm et al. (2001)은 덴마크의 Halla A 하천 인근에서 지하수 양수에 따른 하천수 감소량을 현장 계측과 수치해석 모델링을 병용하여 추정하였다. 하천에서 60 m 떨어진 곳에서 1997년과 1998년 두 차례에 걸쳐 양수시험을 실시하여 지하수위 변화를 계측하였

고, 이러한 지하수위 관측 자료는 3차원 지하수 유동 모형인 MODFLOW의 매개변수 검증에 활용되었다. 모델링 결과를 이용하여 지하수위 저하량, 수두경사, 하천수량의 감소량 등을 평가하였다. Nyholm et al. (2003)은 동일 지역 Halla A 하천에 대해 관측 유출수문곡선으로부터 지하수 양수에 의한 영향과 증발산 등 기상 조건에 의한 영향을 분리해내는 방법을 제시하였고, 지하수 양수에 의한 영향으로 양수시험기간동안 양수정으로부터 140 m와 350 m 떨어진 곳의 하천유량은 지하수 양수 15 L/s로 인하여 각각 4 L/s와 5~7 L/s 만큼 감소하는 것으로 관측되었다.

이상과 같이 해외에서는 지하수 양수에 의한 하천수량 변화를 직접적으로 관측한 연구가 진행되어 왔으나, 국내에서는 지하수 양수로 인한 하천 영향 관측을 직접적으로 다루기보다는 하천수와 지하수간의 수리적 연관성 분석에 국한된 기초적인 연구가 주로 이루어져 왔다. 따라서 본 연구에서는 하천변 지하수 양수에 따른 하천수량 변화를 관측 결과에 기반하여 정량적으로 평가하고자 하였으며, 이를 위해서 경기도 이천시 신둔면 수하리 일대 수막시설 재배치지역에 지하수위와 온도를 계측하기 위한 지하수 관측공을 제내지와 제외지에 설치하여 지하수 양수에 따른 하천-지하수 상호 유동계에 미치는 영향을 분석하였다.

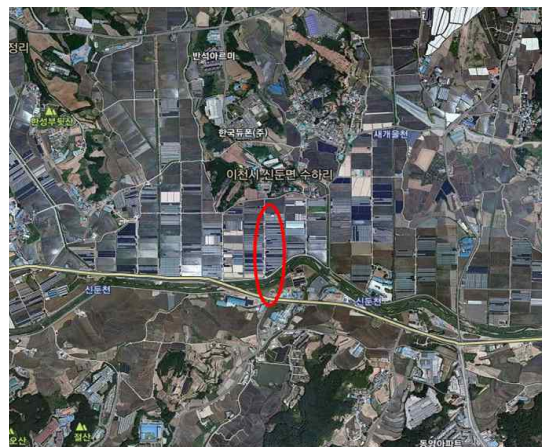
## 2. 하천변 지하수 이용 영향 평가 시범지역 선정 및 관측시스템 구축

### 2.1 하천수-지하수 상호 유동 관측 지역 선정

하천수와 지하수간 상호 유동을 관측하고 지하수 이용에 따른 하천 영향을 평가하기 위한 시범사이트로 주민 협조 등 관측공 설치가 가능하고 비닐하우스 시설재배 지



(a) Test-bed within Sinduncheon watershed



(b) Green house lands in Sooha-Ri Sindun-Myun

Fig. 1. Test-Bed for Observing Groundwater-Streamflow Interaction

역으로 지하수 이용량이 많은 지역인 이천시 신둔면 수하리 일대에 관측 시범 지역으로 선정하였다(Fig. 1). 관측 시범 지역은 Fig. 1(a)와 같이 복하천 지류인 신둔천 유역 내에 위치해 있고, Fig. 1(b)와 같이 하천 인근에 비닐하우스가 밀집해 있어 토지피복의 변화와 지하수 이용에 의한 영향이 하천에 직접적으로 미치는 지역이다.

## 2.2 관측 방법 선정

하천과 대수층간 상호 유동량을 관측에 의해 산정하는 방법은 일반적으로 크게 4가지로 구분되는데, 첫 번째는 하천수위 측정과 함께 하천 주변의 지하수 무물망(network of wells)의 지하수위를 측정하여 수두경사와 유동량을 계산하는 방법이고, 두 번째는 피에조미터를 하천바닥에 설치하여 하천수위와 지하수위차를 측정하여 Darcy 법칙에 의해 유동량을 계산하는 방법이고, 세 번째는 침윤계(seepage meter)를 이용하여 하천바닥을 통해 유동하는 하천수와 지하수의 교환량을 직접 계측하는 방법이며, 네 번째는 상·하류단의 하천유량 차이 계측하여 이를 하천과 대수층간의 유동량으로 간주하는 것이다. 세 번째 방법을 제외하고는 모두 간접 산정 방식이다.

본 연구에서는 측정이 가장 용이한 네 번째 방법을 우선적으로 검토하였으나 시험유역내 관심 하천구간의 상하류단 유량 차이가 미소하여 계측오차 범위에 포함될 가능성이 높아 하천-대수층간 유동량 산정 방법으로 적절하지 않은 것으로 판단되어 이 방법은 제외하였다. 따라서 두 번째와 세 번째 방법을 혼용하는 것을 관측 방법으로 선정하였으며, 안정적이고 장기간의 관측을 위해서 피

에조미터 대신에 하상에 관정을 굴착 활용하는 방법으로 개선하였다. 첫 번째 방법은 하천-대수층간 유동량 산정에는 직접적으로 활용되지는 않았지만, 제내지와 제외지에 수위 관측공을 설치하여 계절적인 지하수위의 변동과 양수에 의한 지하수위의 변화를 파악하는데 사용되었다.

## 2.3 하천수-지하수 상호유동 관측 시스템 구축

경기도 이천시 신둔면 수하리 일대 신둔천 인근 비닐하우스 밀집지역에 하천수와 지하수의 수위 및 수온, 하천바닥층을 통과하는 지하수유동량을 측정하기 위한 관측 시스템을 Fig. 2와 같이 구축하였다. 관측 시스템은 지하수의 수위와 수온을 측정하기 위한 직경 50 mm의 관측공 9개소(제내지 지하수 수위/수온 관측공 5개소, 제외지 지하수 수위/수온 관측공 4개소), 하천수의 수위와 수온을 측정하기 위한 직경 50 mm의 관측봉 2개소(제외지 하천 수위/수온 관측봉 2개소), 관측공 내에 설치한 압력/온도 자동관측기(Mini Diver) 및 기압/온도 자동관측기(Mini Baro-Diver), 하천바닥층의 지하수 유동량 측정을 위한 침윤계(Seepage Meter) 등으로 구성되었다(국토해양부 한강홍수통제소, 2011).

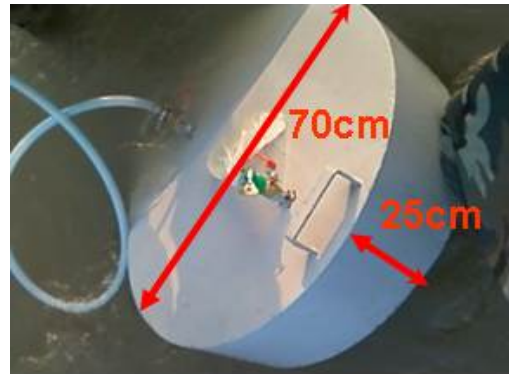
제내지에 설치한 지하수 관측공은 하천의 좌안측 제방 옆부터 시작하여 40~50 m 간격으로 농로를 연하여 지상에서 8~10 m 심도만큼 굴착하여 설치(BH-1~5)하였고, 제외지에 설치한 지하수 관측공은 하천바닥에서 2m와 5 m 심도의 두 가지 종류로 제내지 지하수 관측공의 연장선상(BH-6, 7)과 여기서부터 하류쪽으로 약 200 m 떨어진 곳(BH-8, 9)에 설치하였다. 하천수 관측봉(SW-1, 2)



Fig. 2. Groundwater-Streamflow Observation System



(a)



(b)

Fig. 3. Pictures Showin the Seepage Meter Used in the Experiment : (a) Field Installation and (b) Key Features with Dimensions

은 하천수의 유출입이 자유롭도록 상하단부가 뚫려있는 형태로 제작되었으며 별도의 하상 굴착없이 지하수 관측공 강관 옆면에 부착하였다. 각 관측공과 관측봉에는 직경 22mm의 수압/온도 자동관측기(Diver)를 와이어에 연결하여 수중에 잠기게 설치하였다. 이 자동관측기는 센서, 리튬전지, 스테인레스로 실링된 하우스의 데이터 로거로 구성되어 있으며 본 연구에서는 1시간을 측정시간간격으로 설정하였다. 2010년 11월 1일부터 하천과 하천 인근에서 관측을 실시하였으며, 하천에 설치한 관측공은 생태하천조성을 위한 하상준설이 2011년 5월말에 시작됨에 따라 철거하였다. 하천바닥을 통해 유동하는 하천수와 지하수의 교환량을 직접 계측하기 위해서 Fig. 3과 같이 스테인레스 재질의 직경 70cm, 두께 25cm의 침윤계(seepage meter)를 제작하여 시험하천구간에 적용하였다. 침윤계 드럼 상단부에 2개의 구멍을 뚫어 한 곳은 하천으로의 유입량 혹은 대수층으로의 유출량의 체적 변화량을 잴 수 있도록 물 주머니(bag)를 연결하였고, 다른 한 곳은 매설 및 제거시 드럼내 공기를 배출시킬 수 있도록 직경 15mm의 비닐호수를 연결하였다. 각 구멍은 조작 및 계측의 용이성을 위해서 밸브를 설치하였다. 침윤량을 측정하고 지하수와 하천수의 수위차간의 관계식을 구한 후에, 시간단위로 자동관측된 수위자료를 대입하여 연속적인 하천-대수층간 유동량을 산정하는 절차를 따랐다.

#### 2.4 지하수 이용량 조사

시험 관측 지역에는 수십 개의 지하수 관정이 있으나 실제로 유량계가 설치되어 있는 관정이 없어 수중모터펌프의 가동에 소비되는 전력량을 검침하고 단위 전력소비량에 대한 양수량을 감안해 산정하는 전력소비량을 이용하는 방법으로 지하수 양수량을 산정하였다. 하나의 전신

주에 수 개의 관정이 연결되어 있고 거의 대부분의 관정의 출수관이 지상에 노출되지 않고 비닐하우스 내 물공급 파이프에 직접 연결되어 있어 개별 관정의 출수량을 측정할 수 없다. 따라서 비닐하우스 각 동에서 농배수로로 집수되어 유출되는 양을 2개소에서 측정하고 이를 지하수 이용량으로 간주하였다. 수막시설제배 기간동안 사용된 지하수는 비닐하우스 동간 배수로를 통해 유출되는데, 배수로 토양이 거의 결빙상태를 유지하고 있고 지하수 양수가 야간에 이루어지기 때문에 증발도 작아 지하수 양수의 토양층을 통한 재 충전량은 매우 작다. 따라서 손실량은 무시하고 농배수로로 집수된 유량 전량을 지하수 이용량으로 간주하였다.

수막시설제배를 위한 지하수 양수가 겨울철 야간에 이루어지기 때문에 농배수로가 결빙되어 있어 유량 측정이 용이하지 않다. 따라서 농배수로 내 유량 측정이 가능한 2010년 3월 초 야간에 유량과 전력소비량을 동시에 관측하여 지하수 이용량과 전력소비량간의 관계를 유도하였다. 유량은 농배수로 내 수위와 유속을 측정하여 산정하였으며, 자동수위측정기로 연속적으로 측정된 수위 기록치를 유량으로 환산하였다. Fig. 4는 농배수로 2개소의 유량을 나타낸 것으로 하류쪽 농배수로 유량이 지하수 관정 밀도가 상대적으로 커서 상류쪽 농배수로 유량보다 약 2배 정도 크게 관측되었다.

농배수로 유량 측정과 함께 각 전신주의 전력소비량을 검침한 후 누적하여 이 지역의 총 지하수 이용량과 총 전력소비량간의 관계를 도출한 결과, 단위전력소비량 대비 지하수이용량은  $1.681 \text{ m}^3/\text{kW}$ (= $273.8 \text{ m}^3/162.9 \text{ kW}$ )으로 산정되었다. 월 1 또는 2회 전력소비량을 검침하여 월간 전력소비량을 산정하고, 여기에 전력소비량 대비 지하수이용량의 비  $1.681 \text{ m}^3/\text{kW}$ 를 곱하여 월별 지하수 이용량을

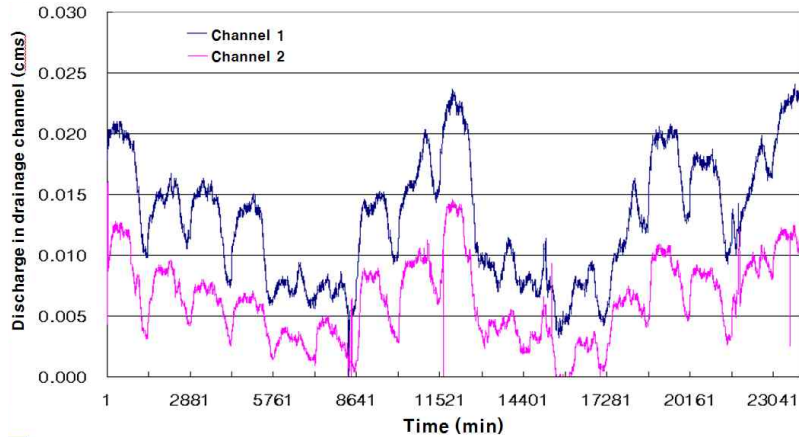


Fig. 4. Discharges in Agricultural Drainage Channel

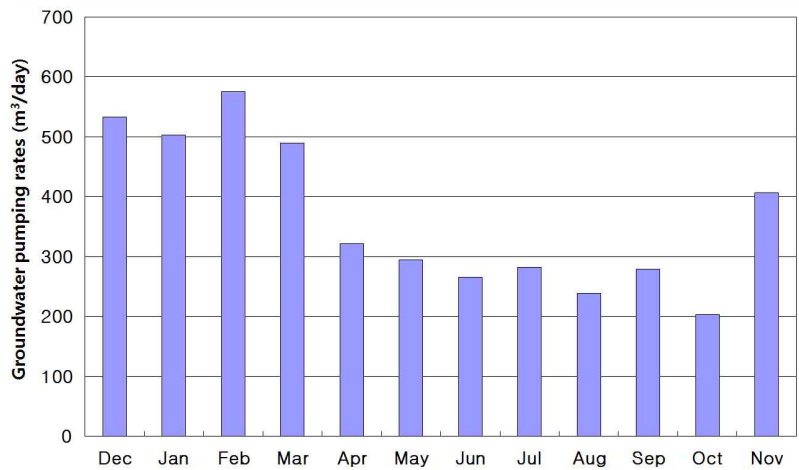


Fig. 5. Monthly Groundwater Pumping Rates

Fig. 5와 같이 추정하였다.

본격적인 수막시설재배기간인 12~3월까지의 지하수 이용량은 일평균 약 500~600톤/일로 농번기인 5~6월보다도 2배 정도 많이 사용하고 있으며, 10월에 최소 200톤/일을 사용했고, 다시 수막시설재배가 시작되는 11월에 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다.

### 3. 관측 결과 및 분석

#### 3.1 제내지 관측공의 지하수와 하천수 수위/수온 관측 결과

Fig. 6은 제내지 관측공 5개소에서 자동관측한 지하수위의 시간적 변화를 나타낸 것이다. 관측이 시작된 2010년 11월 초에는 하천에서 가장 멀리 떨어진 관정 BH-5의 지하수위가 가장 높고 하천에 가까워질수록 점차 지하수위가 낮아져 하천 방향으로 수두경사가 형성되어 지하수

가 하천으로 유출되는 이득하천의 양상을 나타내었다. 11월 중순 이후부터 수막재배가 본격적으로 시작됨에 따라 지하수위가 하강하고 있었으며 12월부터는 하천수위가 지하수위보다 높아 대수층으로 역구배가 형성되어 하천수가 지하수계로 유입되는 손실하천으로 변화하였다. 하루 동안의 지하수위 변화를 보면, 현지에서 보통 저녁 6시부터 아침 6~7시까지 12시간 이상 동안 많은 양의 지하수를 양수해서 비닐하우스에 공급하기 때문에 지하수위가 내려가다가 양수가 중단된 주간에 지하수위가 일부 회복되는 지하수위의 증감을 반복하는 진폭 변화를 보이고 있다. 그러나 지하수위가 완전 회복하기 전에 다시 수막재배를 위해 양수가 반복되기 때문에 지하수위는 2011년 2월까지 계속해서 낮아지고 있는 현상을 나타내었다. 하천에서 약 200m 떨어진 곳에서는 수막시설재배 기간동안 최대 3.5m의 수위강하가 발생하였다. 2011년 2월말에 최저 지하수위를 기록한 이후에 3월부터 기온이 상승함에

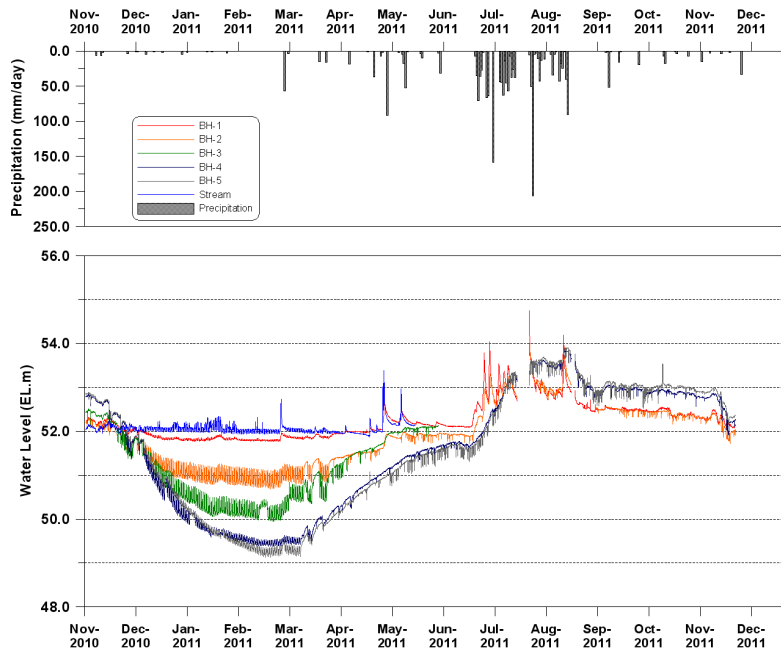


Fig. 6. Observed Water Levels at the Monitoring Wells Located Outside of the Stream

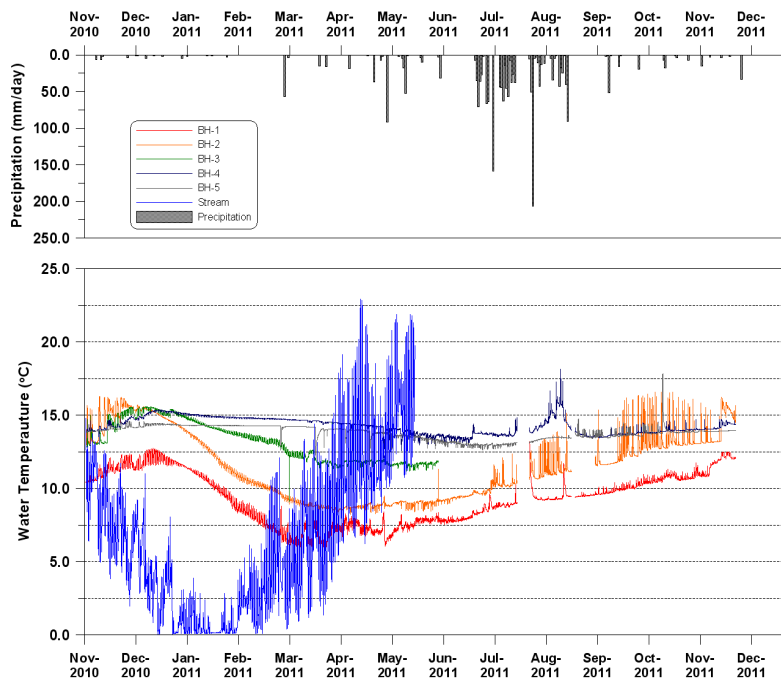


Fig. 7. Observed Water Temperatures at the Monitoring Wells Located within the Stream

따라 수막시설재배용 양수량이 줄어 지하수위가 점차 회복되고 있다. 3월부터 5월까지의 지하수위 회복은 강우량이 많지 않은 점으로 볼 때 강우에 의한 영향보다는 상류 지역으로부터 지하수위가 낮아진 하천변으로의 지하수 유입에 의한 것으로 판단된다. 이는 하천변 지하수 양수가 하천 인근 지역뿐만 아니라 상류지역의 지하수 저하

를 유발할 가능성도 존재함을 내포하고 있다. 2011년 6월 중순 이후부터 우기에 들어서면서부터 강우로 인한 하천 수위의 상승과 지하수 충전으로 빠르게 지하수위가 상승하고 있다. 우기 종료 후 제내지 관측공의 9월 지하수위가 수막시설재배가 한창인 2월에 비해 약 1.5~4m 만큼 상승하였고, 하천에서 멀어질수록 지하수위가 높은 전형적

인 이득하천으로 변화했다. 즉, 겨울철과 초봄 수막시설재배로 인해 과다 사용된 지하수로 인해 저하된 지하수가 홍수기 함양으로 인해 다시 회복되었음을 의미한다. 9월부터 11월초까지는 매우 완만한 지하수위 감소가 일어났고, 2011년 11월 초 지하수위는 관측개시일인 2010년 11월 1일의 지하수위와 비슷한 수치를 보였으며, 11월 중순 이후 수막시설재배가 시작되면서 다시 지하수위의 하강이 시작되었다.

Fig. 7은 제내지 관측공 5개소에서 자동관측한 지하수의 온도 측정치를 도시한 것이다. 하천에서 멀리 떨어져 있는 BH-4, 5번 관측공은 연중 수온 변화가 작으며 상대적으로 하천 가까이에 위치한 BH-1, 2번 관측공은 연중 수온의 변화가 크게 발생하였다. 따라서 하천 가까이에서는 하천수 온도의 영향을 직접적으로 받고 있음을 의미한다. 특히 11월부터 2월까지 기온의 하강으로 하천수 온도가 감소하고 있는데 이러한 하천수 온도 감소 영향이 수개월 지체되어 제내지 관측공 지하수위에 나타나고 있다. 일반적으로 지하수 온도는 약 14°C를 유지하고 있는데, BH-1, 2번 관측공은 이 보다 낮은 온도를 기록하고 있어 겨울철 상대적으로 차가운 하천수가 지하수계로 유입되고 있음을 의미한다. 이처럼 온도 측정으로 하천수와 지하수의 유동 변화를 간접적으로 추정할 수 있다. 하천에서 멀어질수록 하천수 온도 영향으로 인한 시간적 지체가 길어지고 지하수 온도의 진폭변화 또한 줄어드는 특징을 보이고 있다. 최저 온도 발생 일 역시 하천수 온도에 비해 지하수 온도는 수개월 지체되고 있다. 하천 가까이에 위치한 BH-1, 2번 관측공의 경우 3, 4월에 온도 감소가 둔화되는데 이는 기온 상승의 영향과 함께 양수량의 감소에 따른 지하수위 회복됨에 따라 하천수의 지하수계로의 유입이 줄어들면서 기인한 것으로 판단된다. 5월부터는 기온 상승과 지하수위 회복의 영향으로 지하수 온도의 완만한 상승이 12월까지 이루어지고 있다. BH-2번 관측공의 경우 7월부터 12월까지 온도의 진폭변화가 크게 발생하는 특이한 현상을 보이고 있는데, 이는 관측공에 매우 인접하여 양수정이 위치해 있어 지하수 이용 시간대에는 지하수위가 떨어짐에 따라 BH-2번 관측공 아래 깊은 층의 지하수 유입과 관측공 방향으로 상대적으로 높은 지하수(예, BH-4, 5번 주변 지하수)가 유입되어 지하수 관측공의 온도가 일시적으로 올라간데서 기인한 것으로 보인다. 양수 중단 후에는 BH-2 관측공 주변의 지하수위의 회복으로 다시 원래 온도로 회복되는 양상을 보였다. 12월에 접어들면서 진폭 변화가 줄어들었는데 이는 지하수위 저하가 국지적으로 발생한 것이 아니라 지역 전반적으로 감

소하였기 때문인 것으로 분석되었다.

### 3.2 제외지 관측공의 지하수와 하천수 수위/수온 관측 결과

제내지 관측공 설치 라인의 연장선상 하천 단면(중류)에서 상, 하류쪽으로 약 200m씩 떨어진 단면까지 총 400m 구간을 관심 하천구간으로 설정하였다. 따라서 관측공의 설치 지점은 하천구간 중류부와 하류부이다. Fig. 8은 관측기간동안 관심 하천구간 중류부 하천바닥에 설치한 관측공내 센서에 자동 기록된 하천수위, 지하수위 자료를 나타낸 것이고 Figs. 9~11은 이를 확대하여 월별로 나타낸 것이다. 그림에서 BH-6은 하천바닥에서 심도 5m까지 굴착한 관측공을, BH-7은 하천바닥에서 심도 2m까지 굴착한 관측공의 지하수위를 나타내고 있다. 하천수위 변화에 직접 영향을 받고 있는 하천바닥층의 지하수위(수두)는 하천수위에 즉각 반응하여 하천수위 변동 패턴과 동일한 양상을 보이고 있다. Fig. 9와 같이 2010년 11월 초에는 지하수위가 더 높아 명확한 이득하천의 특징을 보였으나, 수막재배가 시작된 11월 중순 이후에는 이득 및 손실하천의 두 가지 특징을 나타내었다. 즉 이득에서 손실하천으로 전환되는 과도기로 볼 수 있다. Figs. 9~11에서와 같이 11월부터 3월까지의 하천수위의 시간적 변화를 보면, 하루동안 수위의 변화폭이 수막재배가 시작된 이후 커지고 있고 3월 중순까지 24시간을 주기로 하천수위 및 지하수위의 증감을 보이고 있다. 제내지 비닐하우스 지역 지하수위는 저녁때 양수가 시작되면서 하강하다 오전에 양수 중단 후 일부 수위가 회복되어 최대치를 기록하고 있으나, 제외지 하천수위 및 하천수위 변화에 직접 영향을 받고 있는 하천바닥층 지하수수두는 하루 중 양수 시작 전인 17시경에 최소치를 기록하고 있고, 18시경에 양수가 시작되면서 하천수위가 지속적으로 상승하다가 자정 이후에는 상승이 둔화되어 거의 일 최대치에 도달하였으며, 월별로 차이는 있으나 양수가 종료된 후 보통 오전 6~9시경에 최대 수위를 기록하고 있다. 이는 관측 지역뿐만 아니라 관측 지역을 기준으로 상류 지역에서도 수막시설재배를 위한 지하수를 이용하고 있어 야간에 양수된 지하수가 하천으로 직접 배출되어 관측 하천구간에 도달함에 따라 일시적으로 하천 유량과 하천수위 상승을 일으킨 것이다. 수막시설에 공급된 지하수가 하천으로 직접 배출됨에 따라 겨울철 하천유량의 증가를 가져오는 것처럼 보이지만, 실제로 중요한 문제는 하천인근의 지하수위의 저하로 인해 봄과 초여름 농번기에 기저유출 감소를 초래하게 되는 점이다.



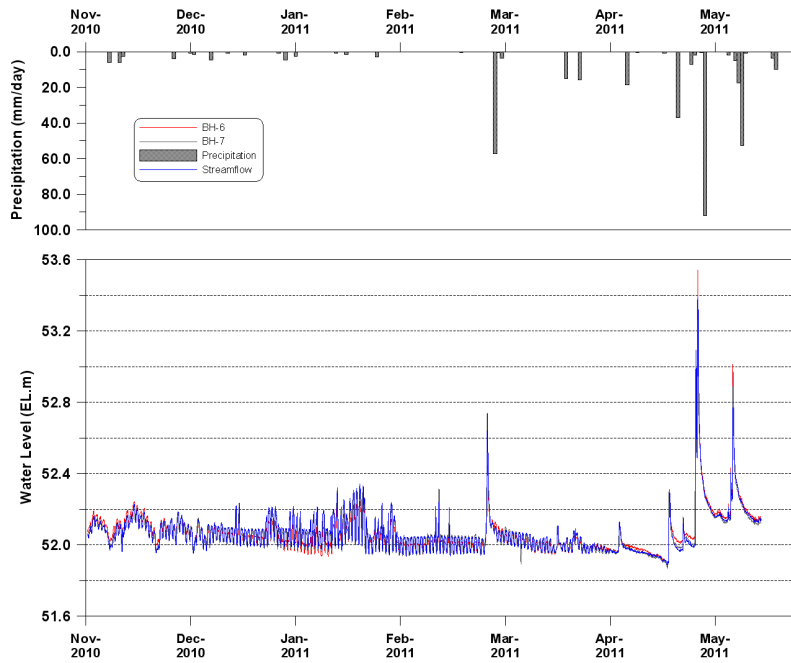


Fig. 8. Observed Water Levels at the Monitoring Wells within Stream (middle reach)

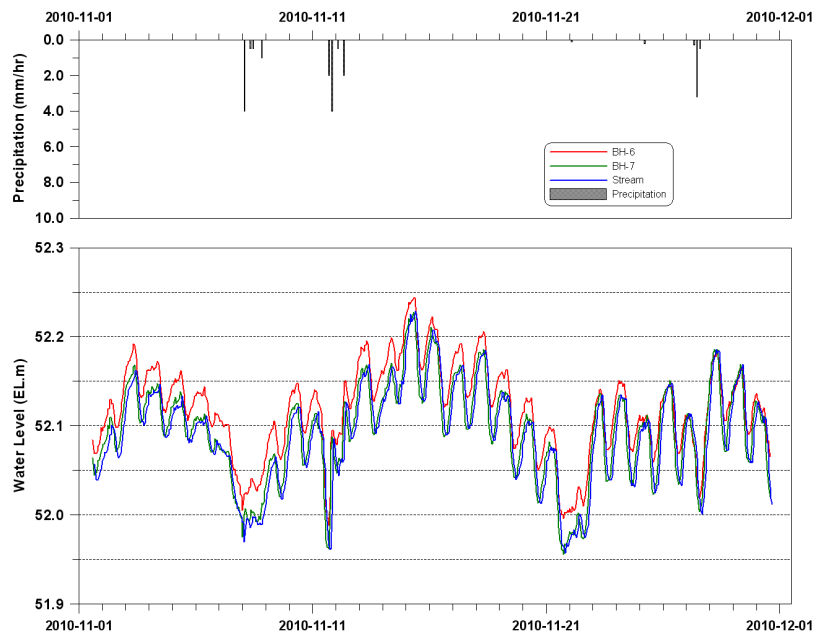


Fig. 9. Observed Water Levels at the Monitoring Wells within Stream (middle reach) in Nov. 2010

한편, Fig. 8에서 12월말에서 2월 중순까지 강수의 변화와 관계없이 수위의 진폭변화가 불규칙하게 심한 상승을 보이고 있는 기간이 발생하였다. 이는 당시 영하의 기온이 지속되어 하천수위 관측공내 물은 완전히 얼고 관측공내 상층부 또한 얼어 센서에 과한 압력이 작용하여 일시적으로 수위값의 급상승을 유발한데서 기인한다.

Fig. 12는 관측기간동안 관심 하천구간 하류부 하천바

닥에 설치한 관측공 내 센서에 자동 기록된 하천수위, 지하수위 자료를 나타낸 것이고, Figs. 13~15는 이를 확대하여 월별로 나타낸 그림이다. 지하수위와 하천수위는 중류부와 유사한 양상을 보이고 있으며, 특히 이득에서 손실로의 전환되는 양상이 중류부보다 명확하게 보이고 있다. 중류부와 마찬가지로 하천수위의 일주 변화를 보면 하루 주야간 동안 하천수위의 변화폭이 수막재배가 시작

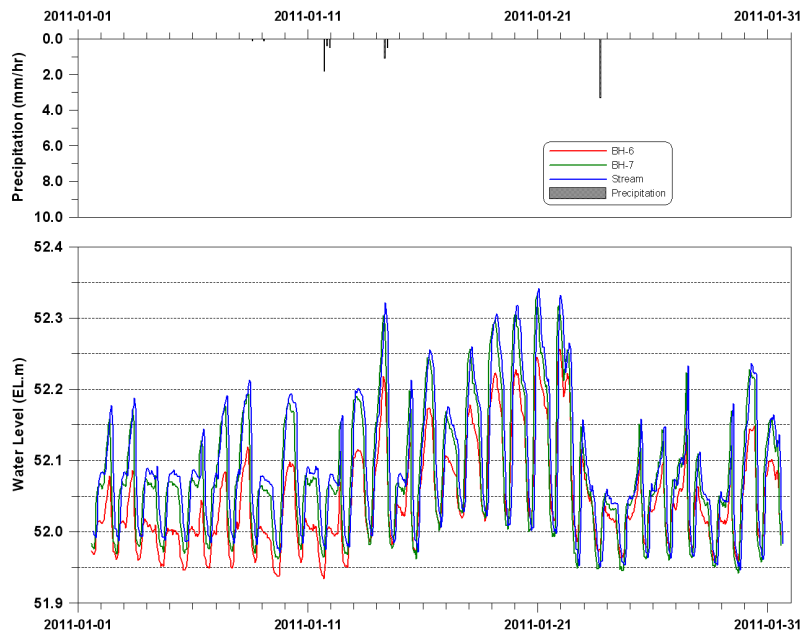


Fig. 10. Observed Water Levels at the Monitoring Wells within Stream (middle reach) in Jan. 2011

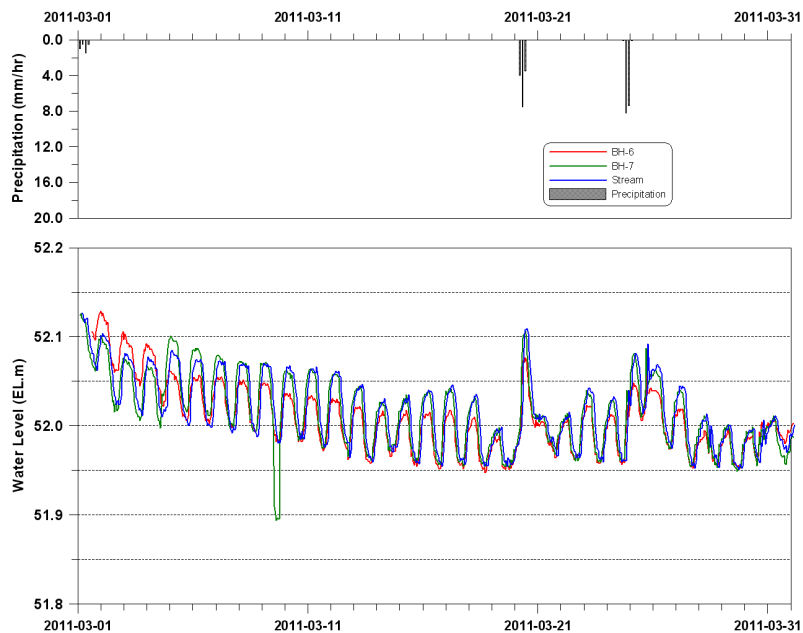


Fig. 11. Observed Water Levels at the Monitoring Wells within Stream (middle reach) in Mar. 2011

된 이후 커지고 있고 약 24시간을 주기로 하천수위 및 지하수위의 증감을 보이고 있다. 중류부와 마찬가지로 12월 말에서 2월초에 관측공내 물이 얼어 센서에 과한 압력이 작용하여 수위의 진폭변화가 불규칙하게 심한 변화를 보였으며, 결빙으로 인해 12월말부터 3월초는 하천수위 결측 기간이 발생하였다.

Fig. 16은 하천 관측구간 중류부 하천바닥에 설치한 관측공내 센서에 자동 기록된 하천수와 지하수의 온도 자료

를 나타낸 것이다. 심도 5m 관정(BH-6)내 11월에서 12월 초까지의 수온은 거의 일정하게 유지되어 지하수가 하천으로 유출되는 이득하천의 양상을 보이고 있으며, 그 이후부터 3월 하순까지는 수온의 진폭변화가 발생하고 있어 하천수가 지하수계로 유입되는 손실하천의 양상을 보였다. 심도 2m 관정(BH-7)내 수온은 하천수에 보다 직접적인 영향을 받아 진폭 변화가 심도 5m 관정보다 크게 발생하였다. 이러한 진폭 변화는 하천수의 지하수로의

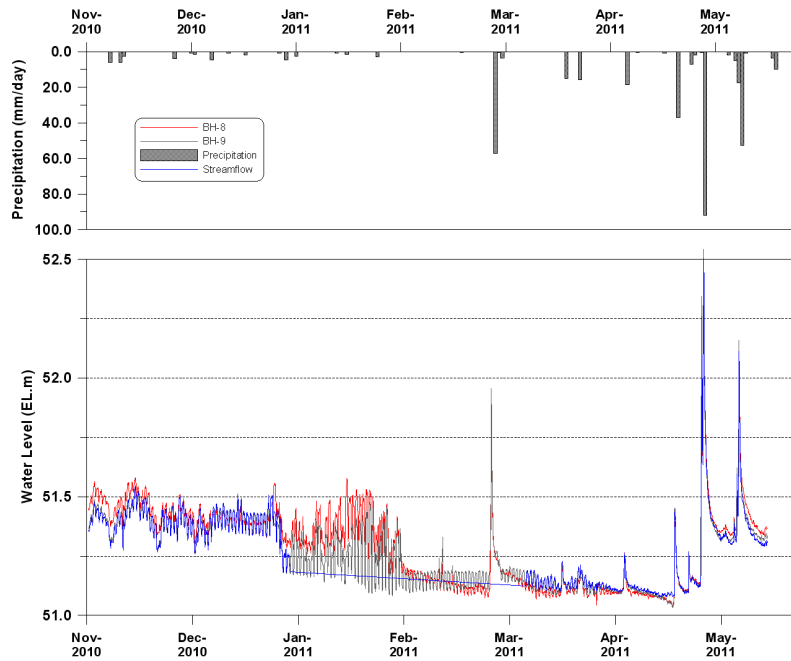


Fig. 12. Observed Water Levels at the Monitoring Wells within Stream (lower reach)

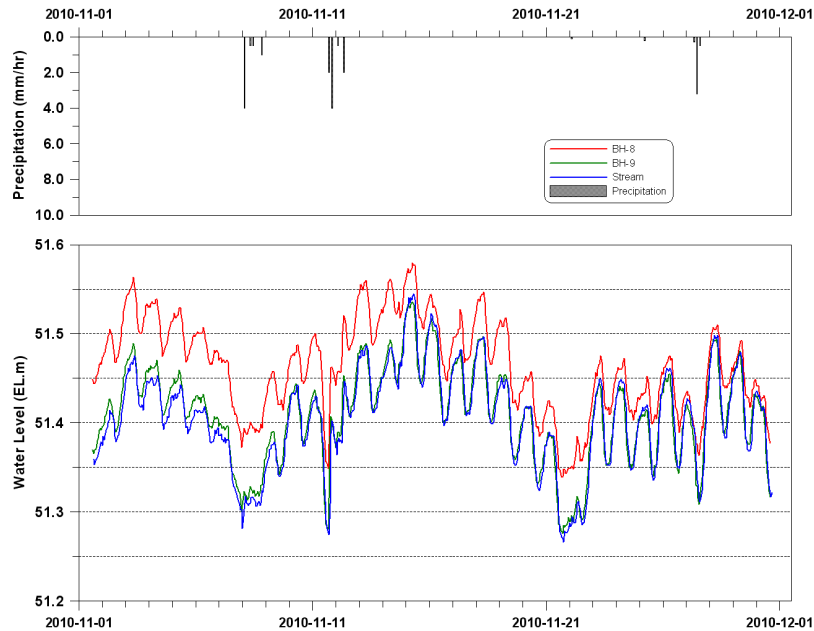


Fig. 13. Observed Water Levels at the Monitoring Wells within Stream (lower reach) in Nov. 2010

유입에서 기인한 것으로 수막시설재배 기간동의 지하수 양수에 의한 지하수위 저하로 인해 하천에서 대수층 방향으로 유동이 발생하였음을 의미한다. 수막시설재배가 종료된 3월 하순부터 지하수 온도의 진폭 변화는 줄어들고 있으며 4월 이후에는 거의 변화가 없어 다시 이득하천의 양상을 나타내었다. 중류단 수온 측정 결과에 근거한 이득, 손실하천 시기는 수위 측정 결과에 의한 이득, 손실하천

시기와 일치하였다. 따라서 수온 관측은 수위 측정 결과의 신뢰도를 높이는 보완적 기능을 할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 17은 하천 관측구간 하류부 하천바닥에 설치한 관측공내 센서에 자동 기록된 하천수와 지하수의 온도 자료를 나타낸 것이다. 심도 5m 관정(BH-8)내 11월 하순까지의 수온은 거의 일정하게 유지되어 지하수가 하천으로 유출되는 이득하천의 양상을 보이고 있으며, 12월과 1월

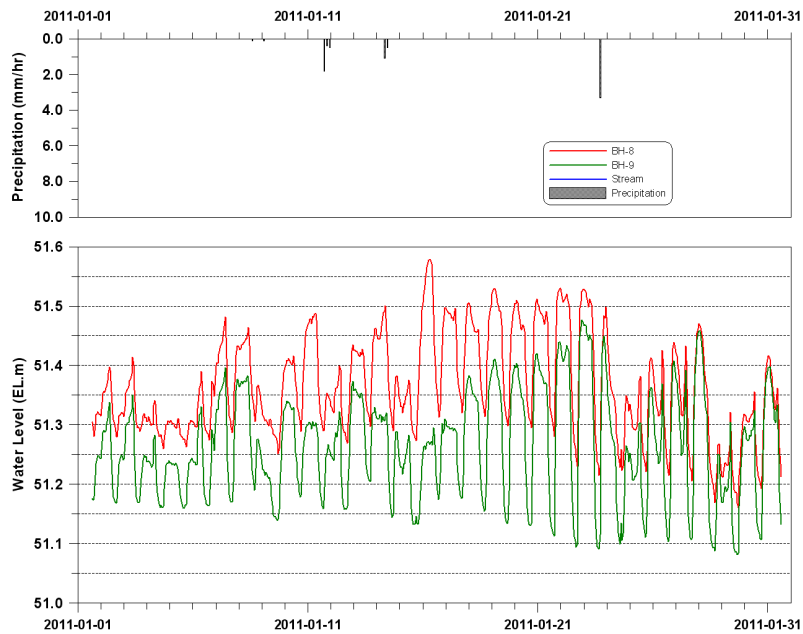


Fig. 14. Observed Water Levels at the Monitoring Wells within Stream (lower reach) in Jan. 2011

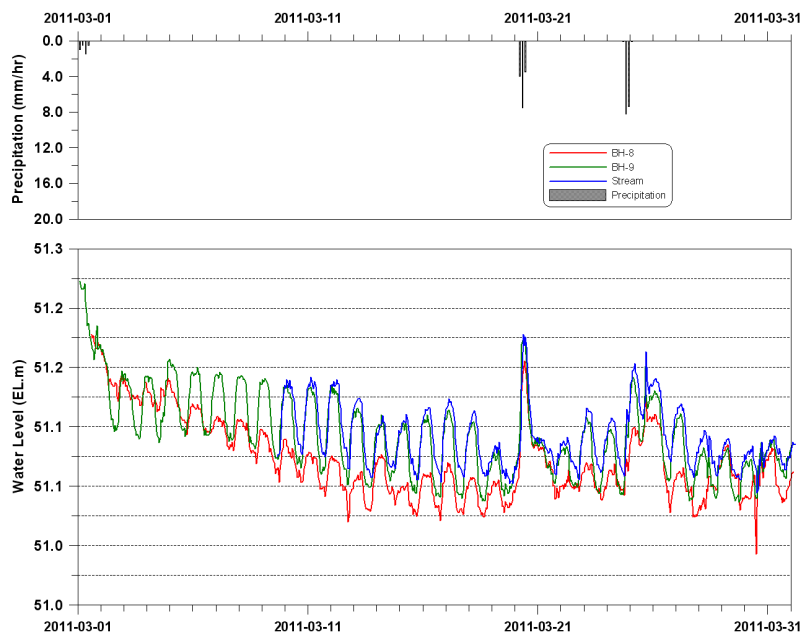


Fig. 15. Observed Water Levels at the Monitoring Wells within Stream (lower reach) in Mar. 2011

에는 차가운 하천수가 지하수계로 유입되어 지하수 온도가 점차 낮아지고 있으며 수온의 진폭변화가 발생하였다. 이러한 진폭 변화는 중류부와 마찬가지로 하천수의 지하수로의 유입에서 기인한 것으로 수막시설제배 기간동의 지하수 양수에 의한 지하수위 저하로 인해 하천에서 대수층 방향으로 유동이 발생하였음을 의미한다. 2월 중순부터 진폭변화가 줄어들어 하천수의 영향이 점차 줄어들고 있음을 알 수 있다. 지하수 온도의 안정화는 중류단보다

다소 빠르게 진행되었지만 전반적으로 중류단의 수온 변화 양상과 유사하다. 심도 2m 관정(BH-9)내 수온은 하천수에 비해 진폭은 작으나 하천수의 온도 변화 양상을 따라가고 있으며 하천수에 보다 직접적인 영향을 받아 심도 5m 관정(BH-8)보다 진폭 변화가 상대적으로 크게 발생하였다. 하천수 온도 및 심도별 지하수 온도로부터 12월부터 2월 중순까지는 손실하천의 특성이 분명하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

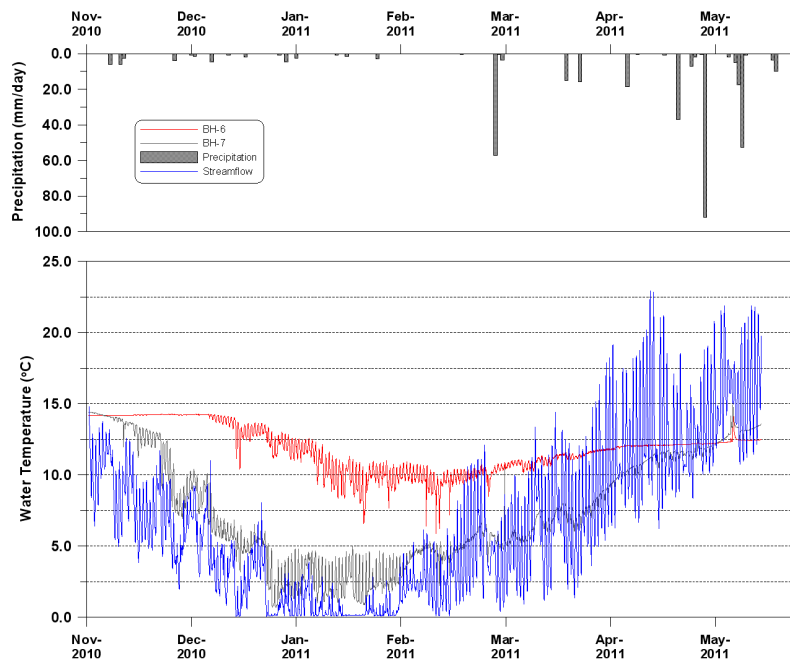


Fig. 16. Observed Water Temperatures at the Monitoring Wells Located within the Stream (middle reach)

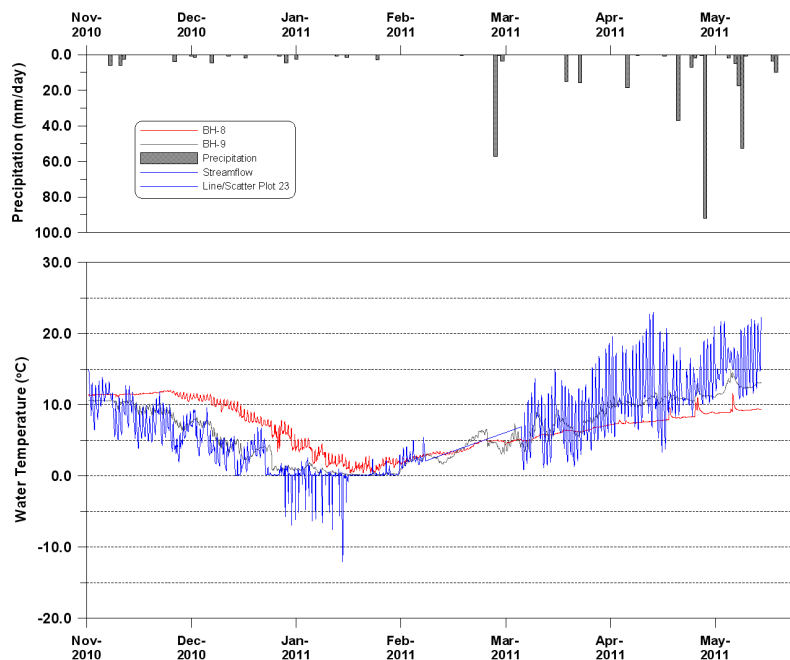


Fig. 17. Observed Water Temperatures at the Monitoring Wells Located within the Stream (lower reach)

### 3.3 하천-대수층 상호 교환량 관측 결과

자체 제작한 침윤계를 이용하여 하천수 관측봉 SW-1, SW-2 부근에서 침윤량(하천-대수층 상호 교환량)을 측정하였으며, 침윤계를 하상에 매설 후 안정화 시간을 포함하여 보통 3~ 9시간 동안 설치하였다. 관심 하도구간

의 침윤량을 정밀하게 구하기 위해서는 하상 전체에 격자형으로 설치하는 것이 이상적이나 이러한 측정 방식은 측정 장비 개수와 소요 시간을 고려하면 현실적으로 어렵다. 따라서 침윤계 설치 지점은 침윤량을 자동관측한 수위와의 관계를 맺을 수 있는 하천수 관측봉 SW-1, SW-2 부근으로 국한하였다. 설치 지점이 하도구간의 대표성을

가지는 지를 검토하기 위해서 원통형의 간이침투계를 이용하여 하도 종방향으로 약 20여 m 간격마다 침투실험을 수행하였으며, 실험 결과 동일 수두차 조건에서 침투시간의 큰 차이를 나타내지 않아 침윤계 설치 지점이 대표성이 있는 것으로 간주하였다. 침윤계에 부착한 체적 변화량 측정용 물 주머니의 동결로 인해 측정이 실패한 경우를 제외하고 안정적으로 측정(측정일: 11/2, 12/7, 12/10, 2/9, 3/9, 3/30, 4/19)된 결과를 Fig. 18에 나타내었다. Fig. 18(a)는 하천내 설치된 지하수 관측공 BH-6, BH-7과 하천수 관측봉 SW-1 근처에서 측정된 침윤량을 침윤계 단면적으로 나눈 값(단위면적당 교환량)과 측정 시간동안의 평균 수두차(심도 5 m 관측공 BH-6내 지하수두와 하천수 관측

봉 SW-1의 하천수위 간 차이)와의 관계를 나타낸 것이다. 수두차와 침윤량간 관계는 약간의 비선형성을 보이지만, 실무 적용성을 높이기 위해 선형 관계로 나타내었다. 마찬가지로 하류단 지하수 관측공 BH- 8, BH-9와 하천수 관측봉 SW-2 근처에서 단위면적당 침윤량 측정 결과와 수두차(심도 5 m 관측공 BH-8내 지하수두와 하천수 관측봉 SW-2의 하천수위 간 차이)간의 관계를 Fig. 18(b)에 나타내었다.

시간단위로 연속적으로 자동관측한 수두차(Fig. 19)를 Fig. 17과 Fig. 18에 표기된 선형 관계식에 대입하여 시간단위의 침윤량으로 환산하고 다시 침윤계의 면적으로 나누어 시간단위의 단위면적당 교환량(Fig. 20)을 산정하였

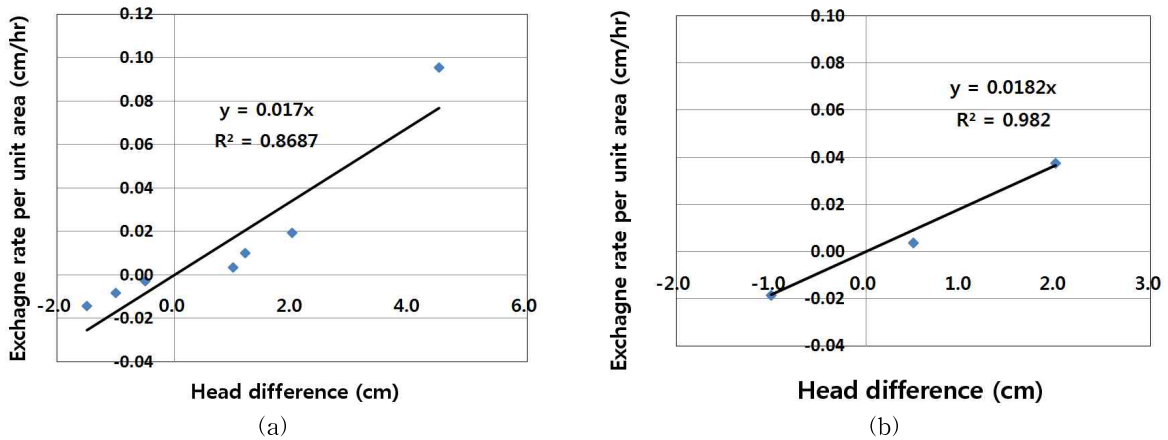


Fig. 18. Exchange Rates : (a) Middle Reach and (b) Lower Reach

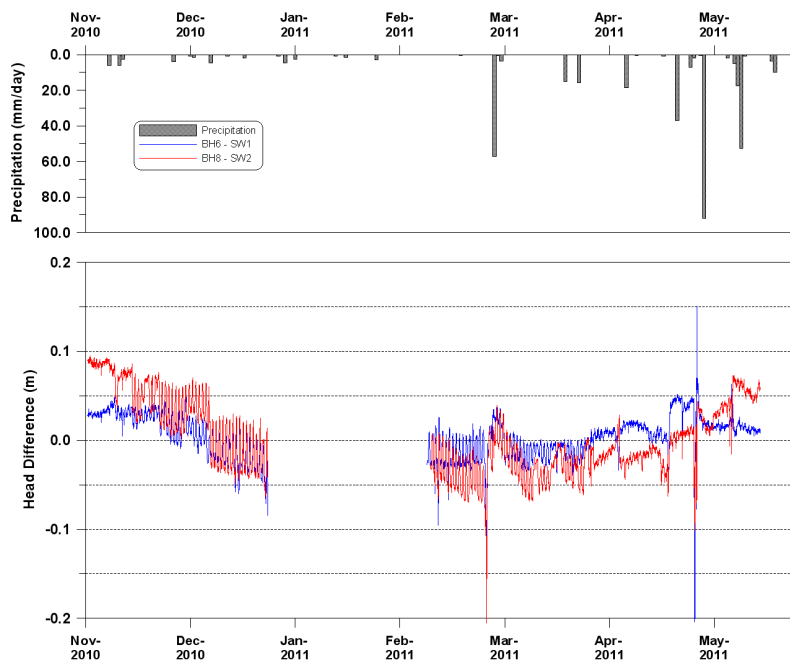


Fig. 19. Difference between Groundwater Level and Stream Stage

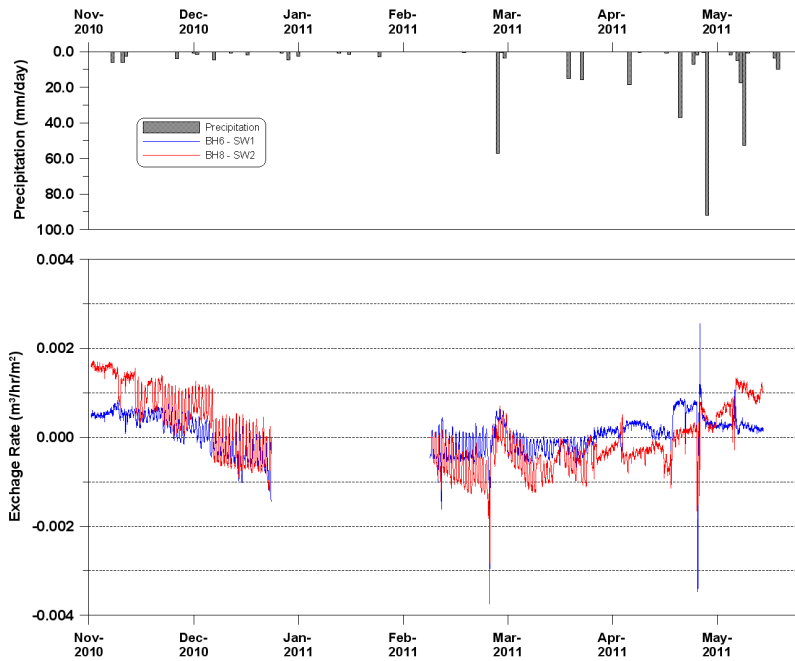


Fig. 20. Exchange Rate (+gaining stream, - losing stream)

다. 단위면적당 교환량에 하천길이와 폭을 곱하면 수막재배기간동안 지하수 이용에 따른 하천수의 변화량을 산정할 수 있다. 11월에는 전반적으로 양의 값을 보여 이득하천이나, 12월부터 3월까지 약 4개월에 걸쳐 음의 값을 보여 손실하천의 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 두 지점의 평균적인 단위면적당 교환량을 보면, 11월 초에는 약  $0.001 \text{ m/hr}$  ( $0.024 \text{ m/day}$ ) 만큼의 지하수가 하천으로 유출되고 있었으며, 이 값에 저수로폭 약  $5\text{m}$ 와 하천구간길이 약  $400\text{m}$ 를 곱하면 관심하천 구간 내에서 대수층에서 하천으로 지하수유동량을 산정하면 약  $50 \text{ m}^3/\text{일}$ 이다. 12월에는 하천의 동결로 인한 결측 시기를 제외하고 두 지점의 단위면적당 교환량을 평균하면  $-0.0005 \text{ m/hr}$  ( $-0.012 \text{ m/day}$ )로서 지하수 유동방향이 하천에서 대수층으로 바뀌었고, 마찬가지로 하도구간의 수면적을 곱하면 하천에서 대수층으로 약  $-25 \text{ m}^3/\text{일}$ 의 유동이 발생하였다. 2월에는 단위면적당 교환량이 최대  $-0.0008 \text{ m/hr}$  ( $-0.020 \text{ m/day}$ ) 만큼 발생하여 약  $-40 \text{ m}^3/\text{일}$ 의 하천수가 대수층으로 손실되는 것을 알 수 있었다. 여기서 손실량 최대치는 하루동안 진폭변화를 보이는데 관측지역 상류지역의 수막시설재배 영향을 배제한 가장 낮은 유동량 값을 채택하였다. 2월 하천수 손실량의 일 최대치  $40 \text{ m}^3/\text{일}$ 을 기준으로는 지하수 이용량  $570 \text{ m}^3/\text{일}$ 의 약 7% 만큼의 하천수가 대수층으로 손실되고 있다. 수막시설재배가 시작되기 전인 11월초와 수막시설재배가 한창인 2월말의 교환량을 비교해 보면 약  $90 \text{ m}^3/\text{일}$ (2월 이용량  $570 \text{ m}^3/\text{일}$  대비 약 16%)만큼의 차이

가 발생하였으며 이는 감수형태를 보이는 지하수 유출의 자연적 감소량을 무시하면 지하수 양수로 인한 하천수 감소량(stream flow depletion)에 해당한다.

#### 4. 결 론

비닐하우스 면적의 증가와 함께 겨울철 수막시설재배 방식의 증대로 인해 많은 양의 지하수가 양수되고 있어 지하수 저하로 인한 하천수 감소를 더욱 가속화하는 것으로 인식되고 있으나, 실제로 수막시설재배를 위한 지하수 양수가 하천수량에 양적으로 얼마나 영향을 미치는 지에 대한 평가가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 경기도 이천시 신둔면 수하리 일대 비닐하우스 밀집 지역을 시범 관측지역으로 선정하여 지하수 양수에 따른 지하수위의 변화, 하천-대수층간 상호 유동량의 변화, 하천수 감소량을 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위하여 지하수와 하천수의 수위 및 수온을 관측하기 위한 관측공을 하천 바닥 및 하천주변에 설치하여 연속적으로 자동 관측하고, 침윤계를 제작하여 하천과 대수층간의 상호 유동량을 직접 계측함으로써 지하수 양수에 따른 지하수위 변화와 하천-대수층간의 상호유동량의 변화를 모니터링하였다.

제내지 지하수위 관측 결과에 따르면, 수막시설재배가 시작되기 전인 2011년 11월 초에는 하천방향으로 지하수위 경사가 형성되어 이득하천의 양상을 보였으나 11월 중순부터 수막시설재배로 지하수 양수량이 많아짐에 따라

12월부터는 하천수위보다 지하수위가 낮아 하천에서 대수층으로 유동이 발생하는 손실하천으로 변화하였다. 3월까지 계속되는 수막시설재배로 인하여 지하수위는 지속적으로 하강하였고, 하천에서 약 200m 떨어진 관측공에서는 최대 3.5m만큼 지하수위가 떨어졌으며, 수막시설재배가 종료된 3월 말 이후부터 지하수위가 다시 상승하여 우기를 거쳐 다시 완전 회복되는 양상을 나타내었다. 지하수 온도는 전반적으로 하천수 온도와는 수개월 지체되는 양상을 보였으며, 하천 가까이에 위치한 관측공내 지하수 온도는 하천수 온도의 영향을 직접적으로 받아 연중 수온의 변화가 크게 발생하였다. 특히 지하수 온도의 감소는 겨울철 상대적으로 차가운 하천수가 지하수계로 유입되고 있음을 의미한다. 이처럼 온도 측정으로 하천수와 지하수의 유동 변화를 정성적으로 추정할 수 있음을 입증하였다.

하천바닥에 설치한 관측공의 지하수두와 하천수위의 차이 비교를 통하여 시기적으로 이득, 손실하천의 구분을 보다 명확하게 할 수 있었다. 제내지와 마찬가지로 제외지 관측결과를 통해서도 수막시설재배 기간 동안에는 지하수위보다 하천수위가 높은 손실하천 시기가 지배적으로 발생하였음을 알 수 있었다. 특히, 제외지 하천수위 및 지하수두는 재내지와는 반대로 하루 중 양수 시작 전인 17시경에 최소치를 기록하였고 18시경에 양수가 시작되면서 하천수위가 지속적으로 상승하여 오전 6~9시 경에 최대 수위를 기록하였다. 이는 관측 지역을 기준으로 상류 유역에서 수막시설재배를 위해 양수된 지하수가 하천으로 직접 배출되어 하천수위 상승을 일으킨 데서 기인한 것이다. 제외지 지하수 온도는 11월에서 12월 초까지는 거의 일정하게 유지되어 지하수가 하천으로 유출되는 이득하천의 양상을 나타내었으나, 본격적인 수막시설재배가 시작된 이후 3월 하순까지는 수온의 진폭변화가 발생하고 있어 하천수가 지하수계로 유입되는 손실하천의 양상을 보였다. 이러한 진폭 변화는 지하수 양수 후 낮아진 지하수위로 인해 하천에서 대수층 방향으로 수두경사가 형성되었기 때문이다. 수막시설재배가 종료된 3월 하순부터 지하수 온도의 진폭 변화는 줄어들고 있으며 4월 이후에는 거의 변화가 없어 다시 이득하천의 양상을 나타내었다. 따라서 수온 관측은 수위 측정 결과의 신뢰도를 높이는 보완적 기능을 할 수 있음을 알 수 있다.

하천바닥층에 대해 침윤계 실험을 통해서 수두차와 침윤량 간의 관계를 유도하였으며, 여기에 자동관측된 수위 자료를 대입하여 수막시설재배 전후의 하천과 지하수계 상호간 유동량의 변화를 산정하였다. 관측 시범 지역은 겨울철 수막시설재배를 위한 지하수 양수로 인하여 하천

으로의 지하수 유출이 억제되고 역으로 하천수가 지하수계로 유입되었으며, 특히 2월에는 지하수 이용량의 최대 7% 만큼 하천수가 지하수계로 유입되었으며 수막시설재배 기간 이전인 11월에 비해 하천수가 지하수 이용량의 약 16% 만큼 감소하는 것으로 분석되었다.

하상에 설치된 지하수위, 하천수위 관측공, 그리고 침윤량 측정 장비 등의 관측시스템은 하천인근 지역에서의 하천과 지하수 상호 유동특성을 파악하는데 유용하게 이용될 수 있으며, 관측 결과는 수자원 정책의 기초자료로 활용되어 향후 지하수와 하천수의 영향권 정립 등 하천과 지하수 관리체계 개선을 위한 초석이 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 한강홍수통제소 “하천변 지하수 이용에 따른 영향 평가” 과제의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 국토해양부, 한강홍수통제소 (2011). 하천변 지하수 이용에 따른 영향 평가 보고서.
- 김구영, 전철민, 김태희, 오준호, 정재훈, 박승기 (2006). “열추적자를 이용한 지하수-하천수 혼합대 연구.” **자원환경지질**, 제39권, 제5호, pp. 525-535.
- 이봉주, 하규철, 구민호, 문상호, 조민조, 조성현 (2006). “하수처리장 방류수와 하천-지하수 상호작용.” **지질학회지**, 지질학회, 제42권, 제4호, pp. 625-633.
- 진종욱, 윤성택, 권장순, 윤성문, 강정욱, 한찬 (2005). “경안천변 충적지하수의 수리지구화학 연구: 하천변에서의 양수에 수반된 지하수 유동 및 수질 변화.” **한국지하수토양환경학회 춘계 학술발표회 논문집**, 한국지하수토양환경학회, pp. 332-335.
- 조성현, 하규철, 조민조 (2003). “지하수와 하천수의 수위 변화 비교.” **한국지하수토양환경학회 추계 학술발표회 논문집**, 한국지하수토양환경학회, pp. 206-209.
- 하규철, 고경석, 고동찬, 염병우, 이강근 (2006). “시계열 분석을 이용한 하천수위에 따른 다심도 관정의 지하수위 변동해석.” **자원환경지질**, 제39권, 제3호, pp. 269-284.
- Environment Canterbury (2000). Guidelines for the assessment of groundwater abstraction effects on stream



flow.

Hunt, B., Weir, J., and Clausen, B. (2001). "A stream depletion field experiment." *Ground Water*, Vol. 39, No. 2, pp. 283-289.

Nyholm, T., Christensen, S., and Rasmussen, K.R. (2001). "Flow depletion in a small stream caused by ground-water abstraction from wells." *Ground Water*, Vol. 40, No. 4, pp. 425-437.

Nyholm, T., Rasmussen, K.R., and Christensen, S. (2003). "Estimation of stream flow depletion and uncertainty from discharge measurements in a small alluvial stream." *Journal of Hydrology*, Vol. 274, pp. 129-144.

논문번호: 12-067	접수: 2012.06.26
수정일자: 2012.07.18/07.20	심사완료: 2012.07.20