지질학회지 제 54권 제 4호, p. 399-413, (2018년 8월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 54, no. 4, p. 399-413, (August 2018)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2018.54.4.399

ISSN 0435-4036 (Print)
ISSN 2288-7377 (Online)

양구군 해안분지 논의 수리지질학적 특성 평가

윤상웅[1,2] · 신경선[1,2] · 이진용[1,2,‡]
[1]강원대학교 지질학과
[2]강원대학교 크리티컬존선도연구실

요 약

본 연구에서는 강원도 양구군 일대 해안분지 소규모 논에서 현장수리시험, 수정 지하수위 변동법 및 시계열 분석을 통해 논의 수리지질학적 특성을 평가하였다. 이를 위해 2017년 4월 27일부터 12월 1일까지 논토양 및 주변 7개의 관측정(YGW1, YGW2, YGW3, YGW4, YGW5, YGW6, YGW7)에서 현장조사 및 자료를 수집하였다. 분석 결과 연구지역의 논은 상대적으로 투수성이 큰 사질 답 논토양 유형으로 분류되었고 하천 주변에 분포하는 것으로 나타났다. 추수기에 갈라진 논토양은 물이 불포화대를 통해 빠르게 침투하도록 촉진시켰다. 연구지역의 대수층은 타 지역에 비해 평균 수리전도도 및 평균 지하수 함양율(20.6%)이 높게 추정되었다. 낮은 상대습도, 큰 일사량, 긴 일조시간에 의해 논의 증발산량은 5월에 3.48 mm/day로 가장 크게 기록되었다. 한편 강우이벤트 시 자동수위계가 설치된 5개의 관측정은 모두 강우 반응을 보이나 그 중 논 내 위치한 관측정 3개(YGW5~7)는 논토양 특성에 인해 다른 관측정에 비해 상대적으로 둔감한 반응을 보인다. 또한 시계열 분석을 통해 연구지역의 대수층은 강우에 민감한 반응을 보였으며 지하수-하천수가 수리적 연결성이 좋은 것으로 해석되었다.

주요어: 증발산량, 논, 수리전도도, 수정 지하수위 변동법, 시계열 분석

Sang Woong Yun, Gyeong Seon Shin and Jin-Yong Lee, 2018, Evaluation on hydrogeologic characteristics of the paddy fields in the Haean basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 4, p. 399-413

ABSTRACT: This study was evaluated hydrogeologic characteristics in the paddy field of the Haean basin, Yanggu of Gangwon Province using hydraulic tests, modified watertable fluctuation, and time series analysis methods. For this purpose, we collected data at paddy fields and monitoring wells (YGW1, YGW2, YGW3, YGW4, YGW5, YGW6, YGW7) from April 27 to December 1 2017. As a results, the paddy fields in the study area was classified as a sandy soil type with relatively high permeability and distributed around the stream. The mean hydraulic conductivity and the mean groundwater recharge ratio (20.6%) were higher in the study area than in the other areas. Evapotranspiration due to low relative humidity, large solar radiation, and long sunshine hours was the largest calculated at 3.48 mm/day in May. On the other hand, five monitoring wells responded sensitively to rainfall during the rainfall event, but the monitoring wells (YGW 5~7) in the paddy fields showed relatively insensitive response due to paddy soil characteristics. In addition, time series analysis showed that the aquifer in the study area was sensitive to rainfall, and groundwater and stream water was considered to be highly hydraulically connected.

Key words: evapotranspiration, paddy field, hydraulic conductivity, modified water table fluctuation method, time series analysis

(Sang Woong Yun, Gyeong Seon Shin and Jin-Yong Lee, Department of Geology, and Critical Zone Frontier Research Laboratory, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

1. 서 론

최근 전구적인 기후변화는 기온 상승뿐만 아니라 강수패턴 변화로 인해 식생, 토지이용 및 물수지 변화에 큰 영향을 끼치고 있다. 이 중 집중 폭우, 극심한 가뭄, 강설량 감소와 같은 강수패턴의 변화는 지표 및 지하의 수자원에 큰 변동을 초래하고 있다(Pritchard *et al.*, 1999; Goderniaux *et al.*, 2009; Ficklin *et al.*, 2010).

‡ Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

이에 많은 연구자들은 기후변화에 따른 안정적인 수자원 확보 및 효율적인 이용을 위해 물수지 관련 연구에 박차를 가하고 있다(Chen *et al*., 2004; Scibek *et al*., 2007; Goderniaux *et al*., 2009; Ficklin *et al*., 2010). 기후에 취약한 지표수에 비해 상대적으로 보전적인 지하수자원의 중요성이 점차 부각되고 있으며 물수지 구성요소 중 하나인 지하수 함양 연구에 관심이 쏠리고 있다.

한편 논은 세계최대 담수 저수지로서 논의 지하수 함양 기능이 매우 크다. 이미 대만, 일본에선 논의 물수지 정량화 관련 연구가 수행되고 있다(Hamada and Komae, 1998; Liu *et al*., 2001; Chen and Liu, 2002; Chen *et al*., 2002). 특히 일본은 논의 지하수 함양 기능의 중요성을 인식하고 지하수 의존도가 높은 농촌지역의 지하수량을 증대시키기 위해 휴경지 논에 물을 공급하면 정부는 농민에게 월 11,000엔/10a를 지원해준다(Shimada, 2014). 논에 물을 공급한 결과 연구지역의 지하수량은 약 2.5배 증가한 것으로 추정되었다(Shimada, 2014). 논에 물 공급은 인공함양(습지, 저수지, 관정)의 일종으로 대수층에 물을 인위적으로 주입하여 지하수량을 증진시킨다(Todd, 1959; Asano, 1985; Bouwer, 2002).

또한 논의 인공함양은 자연저장 능력을 활용하여 지속적인 수자원 관리에 기여하고 담수된 논물이 불포화대를 통과하면서 자연 정화능력을 기대할 수 있다(Reilly *et al*., 2000). 그 밖에 논은 벼의 생육을 통해 여름철 냉방효과(증발산) 및 대기정화(이산화탄소 감소), 논둑에 인한 홍수 및 토양유실 방지 등 공익적인 기능들이 많다(Eom *et al*., 1993). 국내에선 논에 대한 많은 연구가 수행되었지만 수리지질학적 측면에서 연구가 미비하다. 본 연구에서는 강원도 양구군 해안면 소규모 논에서 현장수리시험, 수정 지하수위 변동법 및 시계열 분석을 통해 논의 수리지질학적 특성을 정량적으로 파악하고자 한다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역

연구지역은 소양강 상류 유역에 해당되며 행정구역상 강원도 양구군 해안면(38.239～38.329°N, 128.083～128.173°E)으로 한반도 정중앙에 위치하고 있다. 그림 1a에서 해안분지는 고구마 모양의 전형적인 분지로 가로축 6.7 km, 세로축 10.5 km 그리고 총 면적 62 km^2로 이는 곧 해안면에 해당된다. 또한 면적대비 고도차가 커 을지전망대에서 분지의 전경이 한 눈에 들어온다. 해안분지의 수계는 나뭇가지 모양처럼 수지상 또는 방사상의 형태로 발달하였고 강우시 분지를 둘러싼 도솔산(1,147 m), 대우산(807 m), 가칠봉(1,242 m) 등 높은 산지에서 지하수 함양 및 지표 유출되어 저지대 주요 하천인 성황천, 도솔천, 만대천을 거쳐 당물골로 빠져나가는 단순한 수리지질학적 시스템을 보여준다.

농업 밀집지역인 해안분지는 농번기인 5월부터 9월까지 논농사를 위해 대량의 관개수가 필요하기 때문에 지하수 관정 및 주요 하천을 중심으로 논이 집중 분포하고 있다. 본 연구에서는 인위적인 영향에 의해 지하수위 변화를 최소화하기 위해 하천수를 관개수로 이용하는 논 2곳을 선정하였다(그림 1b). 각 논의 면적은 14,209 m^2, 3,080 m^2이며 논에 인접한 하천은 성황천과 도솔천이 합류하는 지역으로 연중 하천이 유하하고 있다. 논 주변에는 충적 관측정(YGW1, YGW2, YGW3, YGW4, YGW5, YGW7)과 암반 관측정(YGW6)으로 총 7개의 지하수 관측정이 설치되어 있다.

연구지역의 일반지질은 크게 선캠브리아기 변성암 복합체와 쥬라기 흑운모 화강암으로 구성되어 있다. 분지 외륜 및 능선에는 변성암 복합체로 주로 편마암, 편암 및 규암 혹은 석류석이 산출되고 분지 내부는 흑운모 화강암이지만 장기간 풍화작용에 의해 풍화토(saprolite)로 나타난다(Won *et al*., 1987, 1988). 그 외에 하천을 중심으로 제4기 충적층이 분포하고 있다. 특히 분지 내 지질조사 시 신선한 화강암 노두를 찾기 매우 힘들고 대부분 암석에 손을 대면 쉽게 부셔진다(Lee, 2009). 이에 분지의 생성원인으로 운석 충돌설 등 여러 생성 가설이 있지만, 기존 선캠브리아기 변성암복합체 지역에 쥬라기 흑운모 화강암이 관입 후 오랜 차별침식 작용에 의해 분지가 형성된 것이 유력하다(Won *et al*., 1987, 1988; Kwon *et al*., 1990).

그림 2a에서 실제 경작면적을 살펴보면 쌀의 경우 2010년부터 2014년까지 501 ha에서 368 ha로 약 26.5%가 감소하였고, 배추의 경우 2002년부터 2014년까지 139 ha에서 7 ha로 약 94.9%가 크게 감소하였다. 무는 2007년에서 2009년 사이 양구군청에서 주최한 대대적인 시래기 축제의 영향으로 생산량이 급증하였으나 축제 이후 2011년부터 무의 생산량이 급감하였다.

2011년 이후 주요 농산물의 전체 경작지 면적은 점차 줄어들어 드는 반면 과수원의 사과 재배 면적은 2007년부터 2014년까지 꾸준히 증가하는 추세다. 이는 기후변화로 인한 기온이 따뜻해지면서 재배지역의 북상과 재배기술 향상으로 과수재배 면적이 매년 늘어나고 있다. 최근 연구지역의 농작물 재배형태는 양구군청의 인삼재배 장려와 높은 수익성으로 인해 무밭, 배추밭, 논이 인삼밭으로 해마다 대체되고 있다.

그림 2b에서 각 경작지 면적 증감에 따라 농산물 생산량도 함께 변화하였다. 매년 논과 배추의 경작지 면적이 지속적인 감소함에 따라 생산량도 함께 줄어든다. 시래기 축제에 힘입어 2007년에서 2009년까지 무의 생산량은 11,154 ~ 13,847 metric ton으로 최대 생산량을 보인 후 2009년 대비 5,369 metric ton (59.7%)로 생산량이 크게 감소하였다. 다른 농작물이 비해 10 ha당 생산량이 높은 감자, 무, 배추는 경작지 면적에 영향을 받는 것으로 판단된다.

2.2 현장조사 및 자료수집

논에 대한 기초자료를 수집하기 위해 논 내부 및 바깥 인근의 지하수 관측정을 선정하여 2017년 4월 27일부터 12월 1일까지 현장조사를 수행하였다. 그림 3a는 해안분지 내 소규모 논에서 6개의 지하수 관측정, 하천(도솔천, 성황천) 및 대형증발계 설치에 대한 개략도이다. 그림 3b는 그림 3a에 대한 단면도이며 일반적인 논의 물수지 요소들에 대한 양적 평형관계를 아래와 같이 식(1)을 보여준다(Chen *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2009).

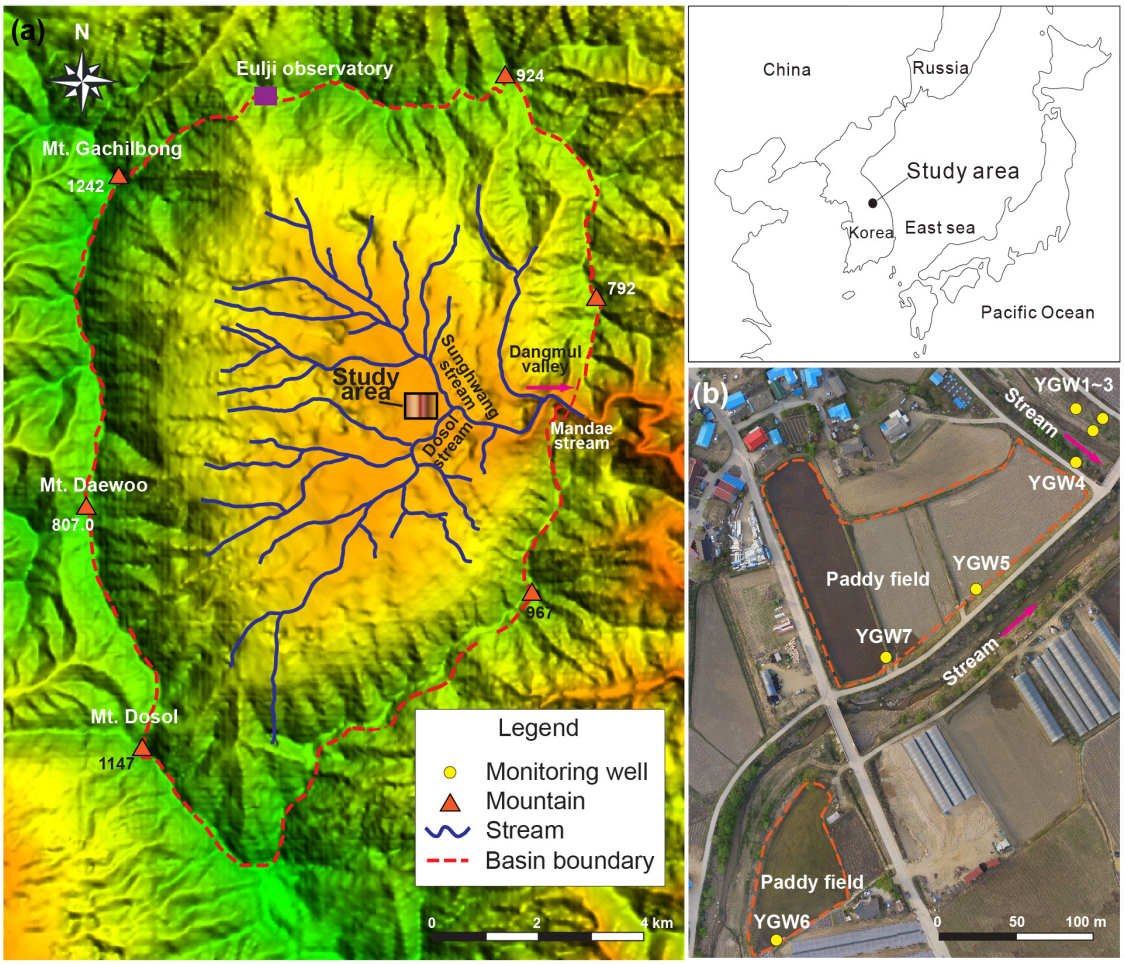

Fig. 1. Map of (a) the Haean basin in Yanggu county, (b) aerial photo of the study area.

강우량(*RAIN*)+관개수량(*IRRI*)=
증발산량(*EVA*)+지표유출량(*SURFLO*)+ (1)
침투량(*VTFLO*)+누수량(*HZFLO*)

논의 물수지 구성요소들에 대한 특성파악을 위해 토양입도 분석(grain size analysis), 더블링 침투속도 시험(double-ring infiltrometer test), 순간수위변화시험(slug test) 및 증발량 측정(evaporation measurement)을 각각 수행하였다. 현장에서 수행된 다양한 시험은 측정기간 및 횟수가 각각 상이하다.

연구지역 내 논토양의 입도분석을 위해 2017년 5월 2일에 가로세로 1 m, 깊이 1 m로 트렌치하여 깊이별(30, 60, 90 cm) 토양단면으로부터 각각 200 g씩 시료 채취하였다(그림 3c). 채취된 토양시료를 비커에 넣어 40℃로 1차 건조 후 과산화수소를 사용하여 유기물을 제거하였다. 2차 건조 후 실온에서 식혀 각 토양시료의 무게를 측정하였다. 체 분석시 체눈 크기는 4.0, 2.0, 1.0, 0.71, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063 mm의 체를 사용하여 분리작업을 하였다. 분리작업이 종료 후 각 체의 시료가 손실되지 않도록 주의하여 입도별로 무게를 측정하였다. 또한 0.063 mm 이하 시료는 강원대학교 공동실험실습관에 분석 의뢰하여 레이저 산란방식으로 입자의 크기 및 입도분포를 측정하는 LPSA (Laser Particle Size Analyzer) 입도분석기(Mastersizer 2000)로 분석되었다.

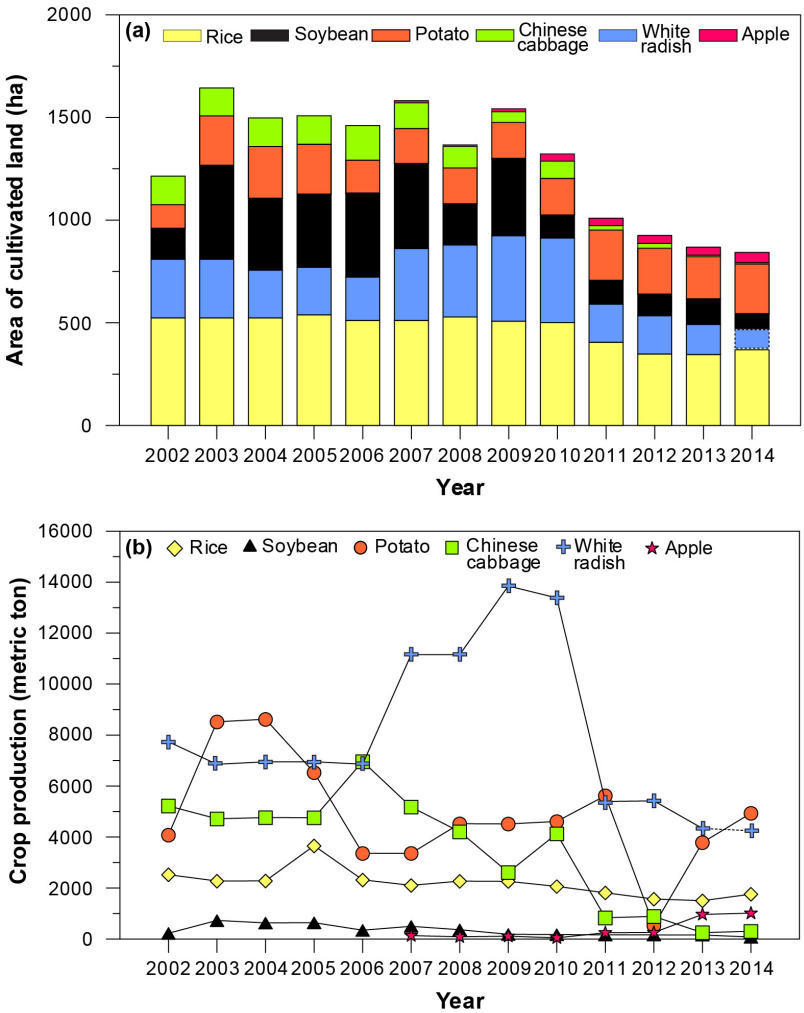

Fig. 2. Changes in (a) area of cultivated land and (b) crop production from 2002 to 2014.

침투속도 시험은 연구지역 내 논토양을 대상으로 2017년 5월 2일과 9월 7일 총 2회 실시하였다(그림 3d). Double-ring infiltrometer를 사용하면 토양 표면 침투속도를 현장에서 간편하게 측정할 수 있다. 이 장치는 미국 ASTM D3385 규격 요구사항에 충족한다. 측정원리는 두 개의 링 안에 같은 높이로 동시에 물을 채우고 시간 경과에 따라 물이 토양 속으로 침투속도를 측정하는 것이다. 외부 링은 보다 정확한 측정결과를 위해 버퍼(buffer)역할을 한다. 즉 토양의 침투속도는 내부 링의 토양 속으로 침투되는 물 흐름에 의해 결정된다. Double-ring infiltrometer의 제원은 내부 링의 지름 300 mm, 외부 링의 지름 600 mm, 높이 250 mm, 두께 10 mm로 스테인리스 스틸로 제작되었다.

순간수위변화시험(slug test)은 2017년 5월 2일, 6월 23일, 9월 7일, 10월 12일, 12월 1일에 관측정 YGW1~5, YGW7을 대상으로 각 3회씩 실시되었다(그림 3e). 순간수위변화시험은 단공을 대상으로 수리시험을 실시

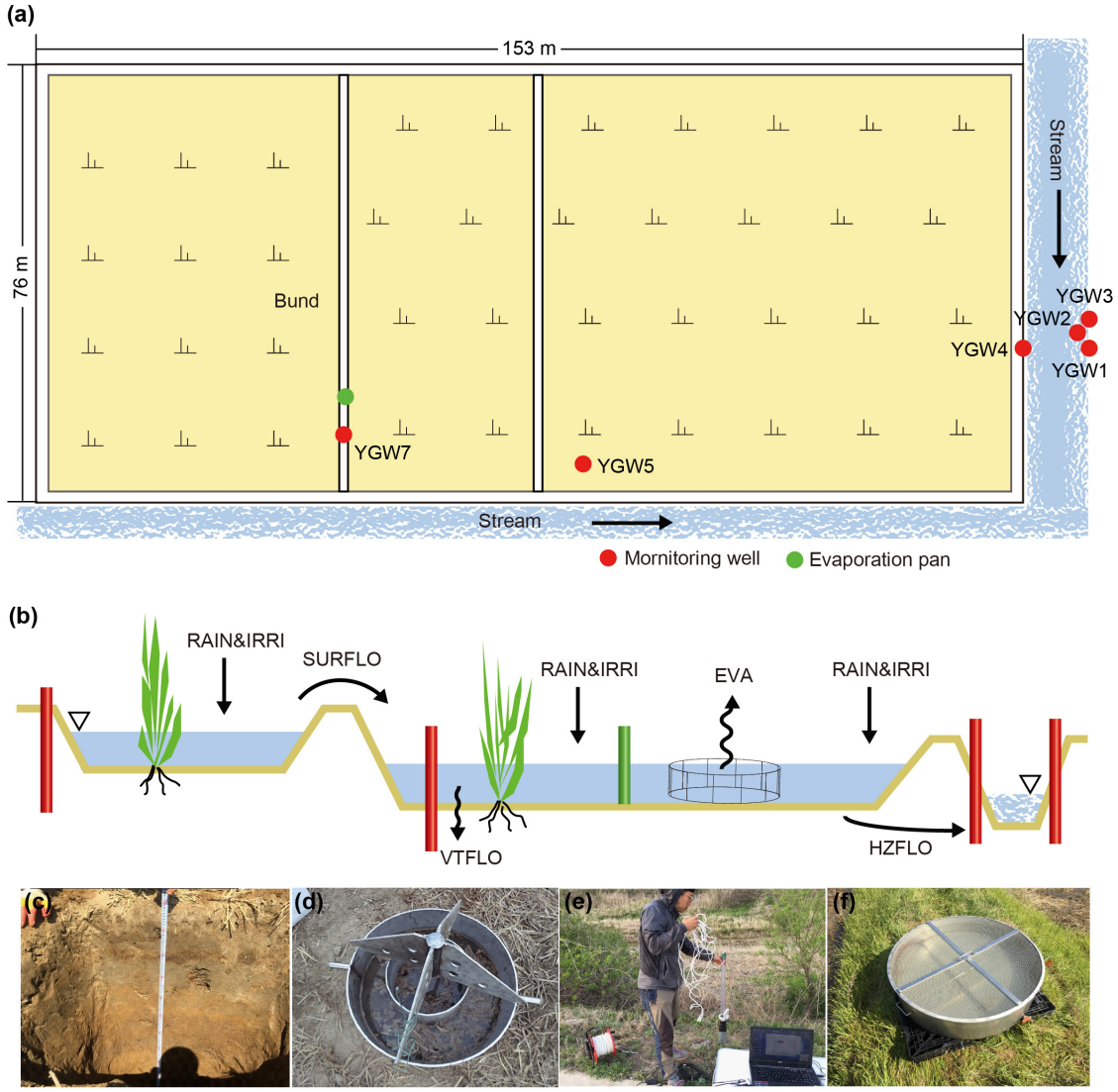

Fig. 3. Outline of (a) the experimental field, (b) schematic diagram of water budget components in the paddy environment (from the left showing (c) soil profiling, (d) double-ring infiltrometer test, (e) slug test, and (f) evaporation measurement).

Table 1. Characteristics of groundwater wells in this study.

Well ID	Total well depth (m)	Screen (cm)	Inner diameter (mm)	Outer diameter (mm)	Altitude (m)	Usage
YGW1	4.0	200	40	50	419	Research
YGW2	4.0	200	40	50	419	Research
YGW3	6.0	200	40	50	419	Research
YGW4	5.0	200	40	50	419	Research
YGW5	2.5	200	40	50	417	Research
YGW6	120.0	−	150	170	418	Agriculture
YGW7	5.8	−	50	65	417	Agriculture

−: no data

하기 때문에 단시간에 특정 대수층의 수리상수값(수리전도도, 비저류계수)을 추정할 수 있다. 현장에서 흔히 이용되는 베일러(bailer)를 이용하여 관측정에 순간적으로 물을 제거 후 짧은 회복 수위변화를 자동수위측정기(Model 3001, Solinst)를 이용하여 자료를 수집하였다. 이에 상용프로그램인 AQTESOLV 4.5 (HydroSOLVE, Inc.)를 사용하여 수리상수값을 산정하였다.

논 내 증발량 측정은 무강우 기간인 2017년 5월 2~3일, 5월 3~9일 2회 실시하였다(그림 3f). 이 표준세트의 대형증발계는 스테인리스 스틸로 제작되었고 일명 Class A Pan으로 불려진다. 대형증발계의 지름은 122 cm, 높이 25.4 cm이며 바닥이 평평하고 장애물이 없는 장소에 7.5 cm의 나무 받침대를 설치하여 대형증발계와 지면사이에 공기가 순환토록 했다. 일반적으로 증발량 측정기간은 짧게는 하루 또는 길게는 일주일을 측정한다. 증발량은 상대습도, 기온, 풍속에 의해 영향을 크게 받기 때문에 인근 기상자료도 함께 수집하였다. 한편 Food and Agriculture Organization (FAO)에서 개발한 CROPWAT 8.0 전산프로그램에 기상자료를 입력한 후 Penman-Monteith 방법을 이용하여 2017년 5월부터 10월까지 월별 논의 증발산량을 산출하였다.

표 1에서 각 관측정의 심도는 YGW6이 120 m로 가장 깊고 논 내부에 설치된 YGW5는 2.5 m로 가장 깊이가 얕았다. YGW1, 2, 3, 4, 5의 내경과 외경은 각각 40, 50 mm이고 농업용 관정인 YGW6, 7은 내경과 외경이 각각 150, 50 mm 그리고 170, 65 mm이다. 각 관측정의 해발고도는 417~419 m로 근소한 범위를 보였다. 또한 YGW1, YGW4, YGW5, YGW6, YGW7에 자동수위측정기(Model 3001, Solinst)를 설치하여 2017년 4월 27일부터 2017년 9월 7일까지 수위를 매 시간 측정하였고 YGW2에서는 수위 보정을 위해 대기압 측정을 하였다. 연구지역의 기온(℃), 강우량(mm), 일조시간(hours), 상대습도(%), 풍속(m/s) 등 해안면사무소에 설치된 기상청의 무인자동기상관측장비(Automatic Weather Station)에서 매 시간 기상자료를 획득하였다.

2.3 수정 지하수위 변동법(modified WTF method)

지하수 함양율을 추정하는 방법에는 수문유출 분리곡선을 이용한 방법, 지하수 및 토양열을 이용한 방법, 환경동위원소를 이용한 방법, 포화대 수치 모델링법, 지하수위 변동법, 지하수위강하곡선법 등 다양하다. 본 연구에서는 수정 지하수위 변동법(modified WTF method)을 이용하여 지하수 함양율을 산출하였다. 이 방법은 강우이벤트 시 강우가 불포화대를 통해 지하수면까지 도달하면 지하수위 상승시켜 지하수 함양이 된다는 기본 전제가 깔려있다. 수정 지하수위 변동법은 아래 식(2)과 같이 2017년 4월 27일부터 9월 7일까지 개별 강우량과 이로 인해 상승한 지하수위를 합산 후 비산출률을 곱하여 평균 지하수 함양율을 구한다(Moon *et al*., 2004; Lee *et al*., 2005).

$$\alpha = \frac{h_1 + h_2 \cdots + h_n}{P_1 + P_2 \cdots + P_n} \times S_y = \frac{\sum h}{\sum P} \times S_y \quad (2)$$

α : 함양율, P_n: 개별 강우량, h_n: 개별 강우에 따른 지하수위 상승, S_y: 비산출률

수정 지하수위 변동법은 다른 지하수 함양율 추정방

법에 비해 간단하지만 비산출률에 따라 지하수 함양율의 정확도가 차이난다. 따라서 대수성 시험을 통해 해당 지역의 비산출률을 정확하게 구하는 것이 매우 중요하다. 이 연구에서는 Korea Rural Community Corporation (2008)의 해안분지 이현지구 지하수개발 지하수영향조사서를 참고하여 비산출률(S_y)=0.03으로 적용하였다.

2.4 시계열 분석

시계열 분석은 자료의 연속적인 변동특성, 외부자극에 의한 반응 정도 및 인자들 간의 상호관계를 해석하는데 활용된다(Angelini, 1997; Larocque *et al.*, 1998). 지하수위 자료는 연속적으로 기록된 시계열 형태로 나타난다. 자동수위측정기로부터 획득한 5개 지하수 관측정(YGW1, YGW4, YGW5, YGW6, YGW7)의 수위에 대해 시계열 분석을 실시하였다. 교차상관분석 시 연구기간 동안 발생한 강우(rainfall)를 입력자료(input)로 사용하고 5개의 지하수 관측정을 출력자료(output)로 사용하여 산출하였다.

이 연구에서 사용한 시계열 특성함수는 자기상관함수, 스펙트럼밀도함수, 조절시간 및 교차상관함수이다. 자기상관함수는 시간에 따른 연속적인 자기값의 선형성과 기억효과를 평가할 수 있다(Angelini, 1997; Larocque *et al.*, 1998). 자기상관함수에서 자기상관성이 강하고 긴 기억효과를 가지면 자기상관함수는 느리게 감소하지만 자기상관성이 약하고 짧은 기억효과를 가지면 자기상관함수는 빠르게 감소한다(Lee and Lee, 2002). 스펙트럼밀도함수는 푸리에변환으로 시간을 주기로 변환할 수 있으며 자료의 전반적인 특성과 주기성을 정량적으로 평가할 수 있다(Larocque *et al.*, 1998). 조절시간은 외부자극을 주는 영향인자의 지속성과 시간의 길이를 나타낸다(Angelini, 1997; Larocque *et al.*, 1998). 교차상관함수는 두 시계열 자료의 상호의존성을 나타내며 지체시간을 통해 상호의존성이 가장 높아지는 시간과 전파속도를 정량적으로 계산할 수 있다(Larocque *et al.*, 1998; Lee and Lee, 2002).

3. 결과 및 토의

3.1 논토양 및 대수층의 수리특성

체 및 정밀입도분석기(LPSA)를 이용하여 깊이별

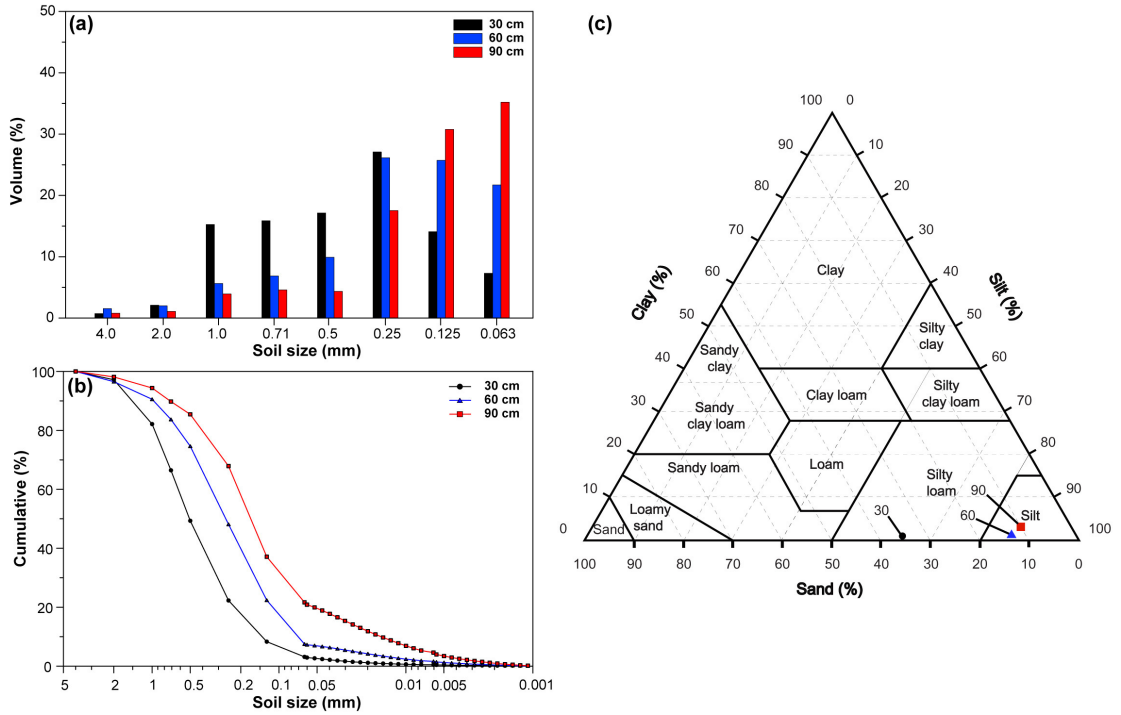

Fig. 4. Results of the grain size analysis for different depth soils ((a) volume of the soil size, (b) distributions of cumulative particle size, and (c) texture triangle of the paddy field soils).

Table 2. Results of grain size analysis for the paddy field soils. The hydraulic conductivity (K) was estimated using various empirical methods.

Method	Depth (cm)	d_{60} (mm)	d_{10} (mm)	Uniformity coefficient (C_u)	Sorting	K value (cm/s)
Hazen	30	0.63	0.14	4.50	Moderately	2.00×10^{-2}
	60	0.36	0.07	4.92	Moderately	6.18×10^{-3}
	90	0.21	0.02	13.86	Poorly	1.64×10^{-4}
Beyer	30	0.63	0.14	4.50	Moderately	2.00×10^{-2}
	60	0.36	0.07	4.92	Moderately	6.30×10^{-3}
	90	0.21	0.02	13.86	Poorly	2.24×10^{-4}
Kozeny-Carman	30	0.63	0.14	4.50	Moderately	2.00×10^{-2}
	60	0.36	0.07	4.92	Moderately	4.77×10^{-3}
	90	0.21	0.02	13.86	Poorly	7.80×10^{-5}
Slichter	30	0.63	0.14	4.50	Moderately	6.95×10^{-3}
	60	0.36	0.07	4.92	Moderately	1.77×10^{-3}
	90	0.21	0.02	13.86	Poorly	3.41×10^{-5}
Terzaghi	30	0.63	0.14	4.50	Moderately	4.00×10^{-2}
	60	0.36	0.07	4.92	Moderately	1.00×10^{-2}
	90	0.21	0.02	13.86	Poorly	3.02×10^{-4}
USBR	30	0.63	0.14	4.50	Moderately	7.91×10^{-3}
	60	0.36	0.07	4.92	Moderately	1.62×10^{-3}
	90	0.21	0.02	13.86	Poorly	2.71×10^{-4}

(30, 60, 90 cm) 토양시료의 입도별 개별함량 분석결과 깊이 30 cm 토양시료의 경우 1.0, 0.71, 0.5, 0.25 mm 크기의 시료 비율이 3개 토양시료 중 가장 높았다(그림 4a). 반면 깊이 90 cm 토양시료의 경우 0.125, 0.063 mm 이하에서 각각 30.77, 35.2%로 높은 비율을 보였다. 입도분석에 의한 누적함양별 분석결과 3개의 토양시료 입자들은 대부분 모래와 실트에 속하며 그 외 작은 자갈과 점토에 일부 해당되었다(그림 4b). 또한 3개의 토양시료를 토양 조직 삼각도(soil texture triangle)에 도시한 결과 깊이 60, 90 cm 토양시료는 실트 영역에 속했고 30 cm 토양시료는 실트질롬 영역에 표시되었다(그림 4c). 깊이별 토양시료(30, 60, 90 cm)의 균등계수는 각 4.50, 4.93, 13.86으로 산정되었다(표 2). 깊이 90 cm의 토양시료는 다른 토양시료(30, 60 cm)에 비해 균등계수가 가장 커 토양 입도분포가 가장 좋은 반면에 균등계수가 6이상으로 분급이 불량한 것으로 나타났다.

입도분포를 이용한 토양의 수리전도도는 Hazen, Beyer, Kozeny-Carman, Slichter, Terzaghi, USBR의 다양한 경험식을 이용하여 산출하였다. 결과적으로 경험식을 이용하여 산출된 각각의 수리전도도는 근소한 차이가 났다. 이에 깊이 30, 60, 90 cm 토양시료의 수리전도도 범위는 각각 6.95×10^{-3}~2.00×10^{-2}, 1.62×10^{-3}~1.00×10^{-2}, 3.41×10^{-5}~1.64×10^{-4} cm/s로 보였다(표 2). 수리전도도의 평균값은 각각 1.91×10^{-2}, 5.11×10^{-3}, 1.79×10^{-4} cm/s로 나타났다.

논에서 Double-ring infiltrometer를 이용하여 2017년 5월과 9월에 실시한 현장 침투시험 결과 포화수리전도도는 각각 1.38×10^{-4}와 3.8×10^{-4} cm/s로 산출되었다(그림 5). 9월에 측정한 포화수리전도도가 5월보다 약 3배 차이난다. 5월의 논토양은 객토 및 다짐상태였으며 9월엔 추수기로 논바닥이 갈라진 상태였다. 9월의 논바닥은 갈라진 틈을 통해 물이 빠르게 침투되기 때문에 9월의 포화수리전도도가 크게 나타난 것으로 추정된다(Liu *et al.*, 2003). 또한 입도분석과 현장투수시험의 수리전도도는 서로 상이하게 나타났다.

6개의 관측정(YGW1~5, YGW7)을 대상으로 순간수위변화시험을 5회 실시하였다. 합리적인 수리전도도를 산출하기 위해 연구지역이 비피압대수층 전제하에 AQTESOLV의 Bouwer-Rice 방법을 채택하였다.

Table 3. Estimated hydraulic conductivities from the slug tests using the Bouwer-Rice method in unconfined aquifer.

Well ID	Date	H_o (m)	K (cm/s)	Mean (cm/s)
YGW1	2017.05.02	0.52	1.98×10^{-3}	3.33×10^{-3}
	2017.06.23	1.07	3.60×10^{-3}	
	2017.09.07	1.20	5.18×10^{-3}	
	2017.10.12	0.63	4.89×10^{-3}	
	2017.12.01	0.34	1.01×10^{-3}	
YGW2	2017.05.02	0.13	2.80×10^{-3}	2.91×10^{-3}
	2017.06.23	0.11	5.45×10^{-3}	
	2017.09.07	−	−	
	2017.10.12	0.13	2.01×10^{-3}	
	2017.12.01	0.11	1.38×10^{-3}	
YGW3	2017.05.02	0.78	9.53×10^{-3}	5.57×10^{-3}
	2017.06.23	0.18	1.13×10^{-2}	
	2017.09.07	−	−	
	2017.10.12	0.52	9.16×10^{-4}	
	2017.12.01	0.22	5.43×10^{-4}	
YGW4	2017.05.02	0.55	8.41×10^{-4}	1.04×10^{-3}
	2017.06.23	−	−	
	2017.09.07	0.53	1.28×10^{-3}	
	2017.10.12	0.69	9.18×10^{-4}	
	2017.12.01	0.29	1.15×10^{-3}	
YGW5	2017.05.02	0.21	8.28×10^{-4}	2.58×10^{-3}
	2017.06.23	−	−	
	2017.09.07	0.49	4.49×10^{-3}	
	2017.10.12	0.64	3.55×10^{-3}	
	2017.12.01	0.49	1.44×10^{-3}	
YGW7	2017.05.02	−	−	2.64×10^{-3}
	2017.06.23	−	−	
	2017.09.07	0.34	2.94×10^{-3}	
	2017.10.12	0.38	2.36×10^{-3}	
	2017.12.01	0.33	2.63×10^{-3}	

−: no data

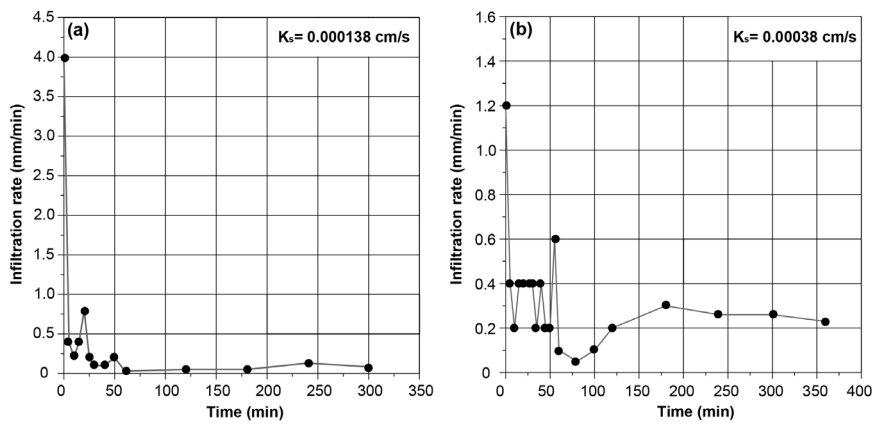

Fig. 5. Saturated hydraulic conductivities estimated from the infiltration tests performed in (a) May and (b) September in the paddy field.

Table 4. Evapotranspiration (ET) estimated using CROPWAT 8.0 for the Haean Basin in Yanggu.

Month	Min. temp. (℃)	Max. temp. (℃)	Humidity (%)	Wind (m/s)	Sun (hr)	Rad. ($MJ/m^2/day$)	ET_o (mm/day)
May	11.0	21.5	68	0.8	8.0	21.3	3.48
Jun.	20.6	26.2	90	0.4	3.9	15.7	3.11
Jul.	19.9	27.4	90	0.4	3.8	13.2	2.96
Aug.	16.0	25.5	90	0.3	3.8	14.4	2.87
Sep.	11.3	19.6	85	0.3	6.5	15.7	2.52
Oct.	3.0	17.1	85	0.4	5.0	11.1	1.56
Mean	13.6	22.9	84	0.4	5.2	15.2	2.75

현장자료를 이용하여 산출한 결과 각 관측정(YGW1~5, YGW7)의 전체평균 수리전도도는 3.33×10^{-3}, 2.91×10^{-3}, 5.57×10^{-3}, 1.04×10^{-3}, 2.58×10^{-3}, 2.64×10^{-3} cm/sec로 나타났다(표 3). 6개 관측정의 수리전도도는 편차가 작아 같은 매질의 대수층으로 해석된다.

3.2 논의 증발산량 산정

증발산량의 관측은 효율적인 수자원 관리를 위해 물수지 연구에 중요한 구성 요소 중 하나이다. 본 연구에서 논 내 증발량 측정은 맑은 날씨가 지속된 2017년 5월 2~3일, 5월 3~9일 2회 실시하였다. 첫 번째 증발량 측정결과 하루 동안 증발량은 2 mm/day를 기록하였다. 증발량과 밀접한 관련된 기상요소인 기온, 상대습도, 일사, 풍속은 각각 일평균 18.6℃, 41.9%, 280.2 W/m^2, 0.4 m/s로 나타났다. 두 번째 증발량 측정결과 7일 동안 총 증발량은 35 mm 발생했으며 평균 약 5.8 mm/day다. 이 기간 동안 기온, 상대습도, 일사, 풍속은 일평균 15.2℃, 48.4%, 206.2 W/m^2, 0.7 m/s로 나타났다. 각각 측정기간이 상이하지만 증발량의 영향을 주는 주요 인자는 풍속으로 추정된다(Lee, 2002). 일반적으로 대형증발계가 태양열 복사로 인한 열전도 때문에 호수 및 저수지보다 증발량이 크다(Fetter, 1988).

한편 우리나라의 몬순기후 특성상 벼농사는 일모작으로 재배된다. 이에 CROPWAT에 기상자료를 입력하여 2017년 5월부터 10월까지 벼의 증발산량을 추정하였다. 월 평균 벼의 증발산량의 산출결과 5월 3.48, 6월 3.11, 7월 2.96, 8월 2.87, 9월 2.52, 10월 1.56 mm/day로 나타났고 전체 증발산량은 506 mm를 보였다(표 4). 연구기간 동안 5월에 벼의 증발산량이 가장 높았다. 이는 다른 월에 비해 낮은 상대습도, 강한 일사량, 긴 일조시간의 영향인 것으로 해석된다.

3.3 지하수위 변동 및 지하수 함양 특성

2017년 4월 27일부터 9월 7일까지 각각의 지하수위 그래프를 비교하여 강우이벤트에 의한 지하수위 반응양상을 평가하였다(그림 6). 이 기간 동안 내린 강우량은 959 mm로 연강수량 1,209 mm 중 79%를 차지하였다. 강우 이벤트(일강우량 10 mm이상)는 총 24번 발생하였다. 그 중 70 mm이상 집중호우가 2차례 있었으며 나머지 강우이벤트들은 20 mm 안팎을 보였다. 또한 시간당 최대 강우강도는 8월 24일 38 mm/hr, 7월 21일 35 mm/hr, 7월 8일 31 mm/hr 순이었다. 이 중 7월 21일과 8월 24일은 1시간에 내린 비의 양이 일강수량 약 80%를 차지하였다.

강우이벤트 시 YGW1, YGW4, YGW5, YGW6, YGW7의 지하수위는 전반적으로 강우에 민감하게 반응하였다. 이 연구에서 강우시 논 내 YGW5~7은 하천에 인접한 관측정 YGW1과 YGW4에 다른 관측정에 비해 강우 반응 및 수위강하 시간이 지연된 결과를 보였다. 실트와 모래로 구성된 논토양을 통해 담수된 논물이 장시간 지하수함양을 주는 것으로 판단된다.

연구기간 동안 발생한 강우량 및 지하수위 변화자료를 수정 지하수위 변동법을 이용하여 관측정별 지하수 함양율을 산출하였다(표 5). 각 관측정 산출결과 지하수 함양율은 12.6~32.7% 범위를 나타났으며 전체 평균 지하수 함양율은 20.6%이었다. 연구지역에서 Choi and Lee (2010)의 지하수 함양율을 산출한 결과를 비교하면 평균 지하수 함양율 15.2~28.5% 범위 및 전체 평균 지하수 함양율 22.1%로 비슷하게 나타나 이 산출값의 신뢰성을 뒷받침해준다. YGW1과 YGW4 경우 하천과 매우 인접한 위치(1~2 m)에

있어 직접적인 강우의 지하수 함양 및 하천유량 증가로 지하수위가 급격히 상승한 것으로 추정된다(Choi and Lee, 2010). 그 결과 이 관측정의 지하수 함양율은 다른 관측정(YGW5~7)에 비해 약 2~2.5배가 과대평가되었다.

3.4 자기상관 및 교차상관 분석결과

5개 관측정(YGW1, YGW4, YGW5, YGW6, YGW7)

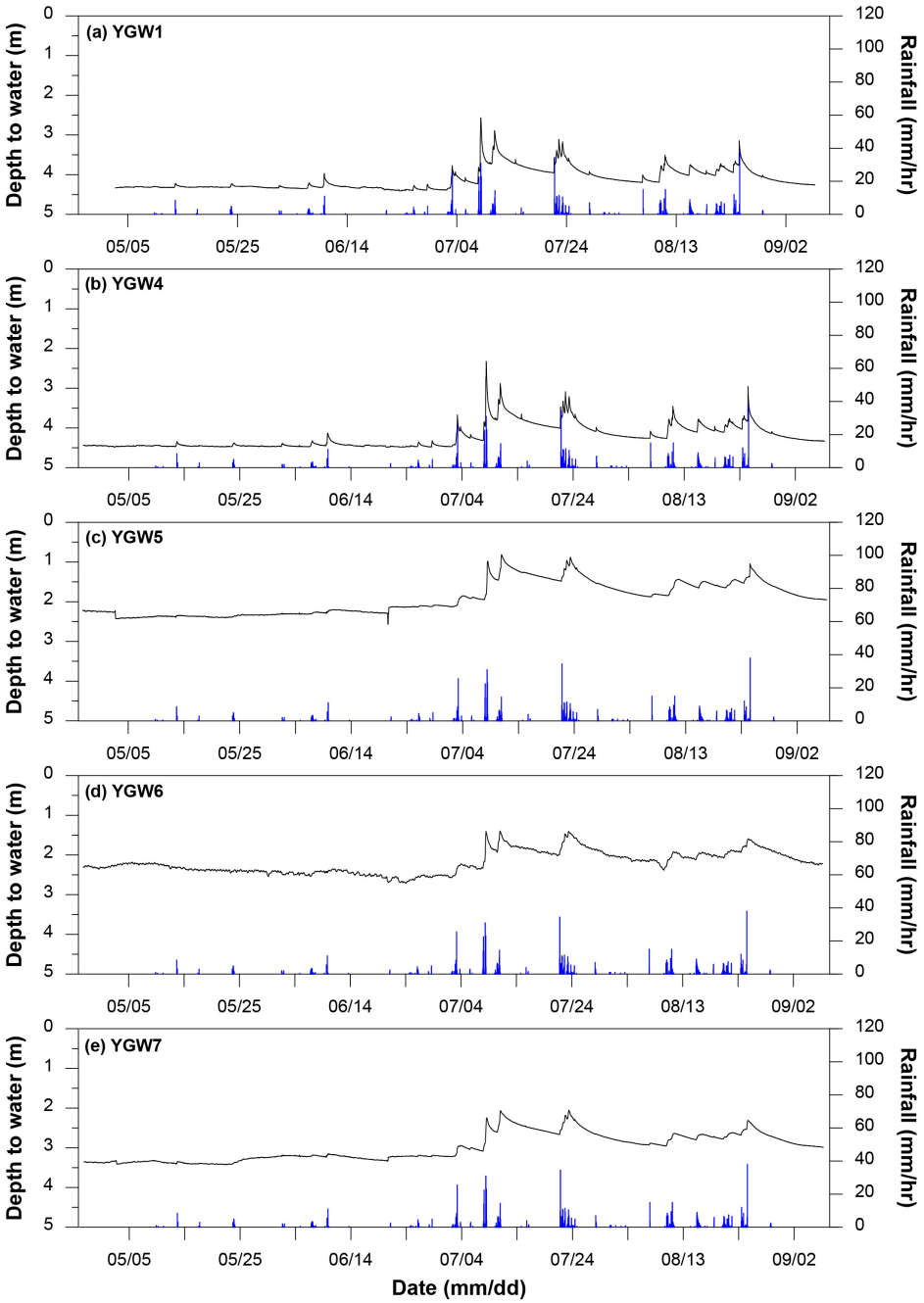

Fig. 6. Groundwater levels (depth to water) between April 26 and September 7, 2017 (YGW1, YGW4, YGW5, YGW6, YGW7).

의 시간별 지하수위의 자기상관 및 스펙트럼 밀도함수를 나타냈다. 자기상관분석의 지연시간(lag time)은 자기상관함수가 0에 도달하는 시간을 의미하며 수리지질학적 특성에 따라 각 관측정의 지연시간이 다르게 보였다. 5개 관측정 중 가장 긴 지연시간을 보인 관정은 1,151시간으로 분석된 YGW7이었으며 YGW4 1,128시간, YGW6 1,117시간, YGW1 1,096시간, YGW5 1,075시간 순으로 나타났다(그림 7a). YGW1은 다른 4개 관측정에 비해 자기상관함수가 상대적으로 빠르게 감소한다. 이는 YGW1이 자기상관성이 낮고 기억효과 및 선형성이 약한 것으로 해석되며 지하수위가 어떠한 스트레스를 받았을 때 그 영향에 대해 빠른 반응하고 큰 영향을 받는다고 추정된다. 즉 YGW1은 다른 4개의 관측정의 지하수위에 비해 불안정적임을 의미하는데 이 관측정은 하천에 인접하고 있어 강우이벤트 시 하천의 유량증가에 의한 영향을 직접적으로 받기 때문이다(Choi and Lee, 2010).

한편 YGW5는 다른 관측정보다 비교적 느리게 자기상관함수가 감소한다. 이는 자기상관성이 높고 기억효과 및 선형성이 강한 것으로 해석된다. 또한 이 관측정의 지하수위가 어떤 스트레스에 인해 변동 후 원상태로 회복하는데 까지 소요시간이 길고 영향이 작은 것으로 판단된다. 논 내 위치한 YGW5는 논의 수리지질학적 특성에 의해 영향을 받는 것으로 추정된다. 즉 강우이벤트 시 논물이 지표유출이 되지 않고 일정한 높이로 담수되며 저투수성인 논토양에 지속적으로 침투하여 지하수위에 영향을 주는 것으로 판단된다.

각 관측정의 스펙트럼 밀도분석 결과 YGW1 0.001056 (39.5일 주기), YGW4 0.00095 (43.9일 주기), YGW5 0.000929 (44.9일 주기), YGW6 0.000908 (45.9일 주기) 그리고 YGW7 0.000929 (44.9일 주기)로 나타났다(그림 7b). 하천 인근에 위치한 YGW1과 YGW4는 논 내 관측정(YGW5, YGW6, YGW7)에 비해 상대적으로 단주기를 보였다. 이는 강우이벤트 시 하천유량의 증가로 관측정의 지하수위가 영향을 받았다는 주장을 뒷받침해준다. 결과적으로 연구지역 내 5개 관측정은 충적대수층과 암반대수층으로 명확히 구분되지 않았다. 이는 모든 관측정이 수리적 연결성이 매우 좋은 것으로 추정된다(Choi and Lee, 2010; Yun *et al.*, 2015, 2017).

Table 5. Groundwater recharge ratios estimated using modified WTF method in the paddy fields.

Well ID	∑H (mm)	∑P (mm)	∑H/∑P	Recharge ratio (%)	Mean (%)
YGW1	7,280	767	9.5	28.5	
YGW4	8,360	769	10.9	32.7	
YGW5	3,970	816	4.9	14.7	20.6
YGW6	3,420	816	4.2	12.6	
YGW7	3,990	840	4.8	14.4	

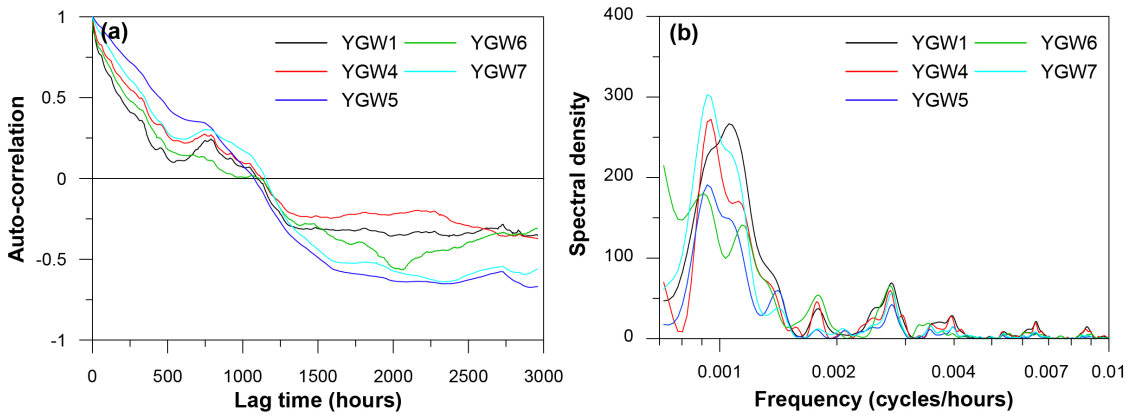

Fig. 7. Auto-correlation and spectral density functions of hourly groundwater levels (YGW1, YGW4, YGW5, YGW6, YGW7).

강우와 지하수위의 상관관계를 평가하기 위해 교차상관 분석을 실시하였다. 이에 강우량을 입력(input) 자료로 지하수위를 출력(output)자료로 이용하였다. 분석결과 하천에 가까운 YGW4가 최대지연시간 1시간, 최대상관함수는 0.31로 상호연관성이 가장 높았다(그림 8). 더불어 YGW1도 최대지연시간 2시간, 최대상관함수 0.32로 높은 상호연관성을 보였다. 즉 강우로 인해 늘어난 하천유량이 관측정의 지하수위에 영향을 주어 약 1~2시간 안에 지하수위가 빠르게 상승하였다. 반면 논 내에 위치한 YGW5~7은 각각 최대지연시간 13, 12, 15 시간, 최대상관함수 0.22, 0.17, 0.22로 YGW1과 YGW4에 비해 긴 지연시간 및 낮은 상호연관성을 보였다. 이는 저투수성인 논토양으로 인해 나타난 결과로 판단된다. 또한 강우이벤트 시 모든 관측정의 지하수위가 민감하게 반응하기 때문에 지하수 함양율 추정을 위한 지하수위변동법은 적합한 방법이라고 사료된다(Choi and Lee, 2010).

4. 결 론

본 연구는 양구군 해안분지의 소규모 논에서 현장 수리시험, 수정 지하수위 변동법 및 시계열 분석을 통해 논의 수리지질학적 특성을 평가하였다. 연구지역의 논토양 유형은 6개 유형(보통 답, 사질 답, 습답, 미숙 답, 염해 답, 특이산성 답) 중 사질 답에 해당되었다. 사질 답은 우리나라 전체 답 면적의 32.3%로 크게 차지하고 있으며 대부분 하천 변에 분포하고 있다. 이는 연구지역의 논이 주요 하천에 분포 사실과 일치한다. 또한 사질 답은 점토가 부족으로 인해 투수성이 커 보통 답에 비해 쌀 생산성이 비교적 낮은 것으로 나타났다. 논은 토양의 상태에 따라 포화수리전도도가 크게 차이나며 특히 논바닥이 갈라진 틈을 통해 물이 빠르게 침투되는 것으로 해석되었다. 또한 6개의 관측정에 대해 순간수위변화시험 결과 수리전도도가 크며 같은 매질의 대수층으로 추정되었다. 또한 논의 증발산량은 5월 3.48 mm/day로 가장 높게 나타났으며 이는 상대습도, 일사량, 일조시간에 기인된 것으로 판단된다.

강우 시 5개의 관측정은 강우에 민감한 반응을 보였지만 논 내 위치한 YGW5~7은 다른 관측정보다 강우 반응 및 수위강하의 지연시간을 보였다. 이는 담수된 논물이 장시간 지하수함양에 영향을 주는 것으로 해석된다. 또한 연구지역의 평균 지하수 함양율은 20.6%로 다른 지역보다 높게 산정되었다. 이는 수리지질학적인 관점에서 연구지역은 폐쇄형 지하수 함양지역(전형적인 분지형태)이기 때문인 것으로 판

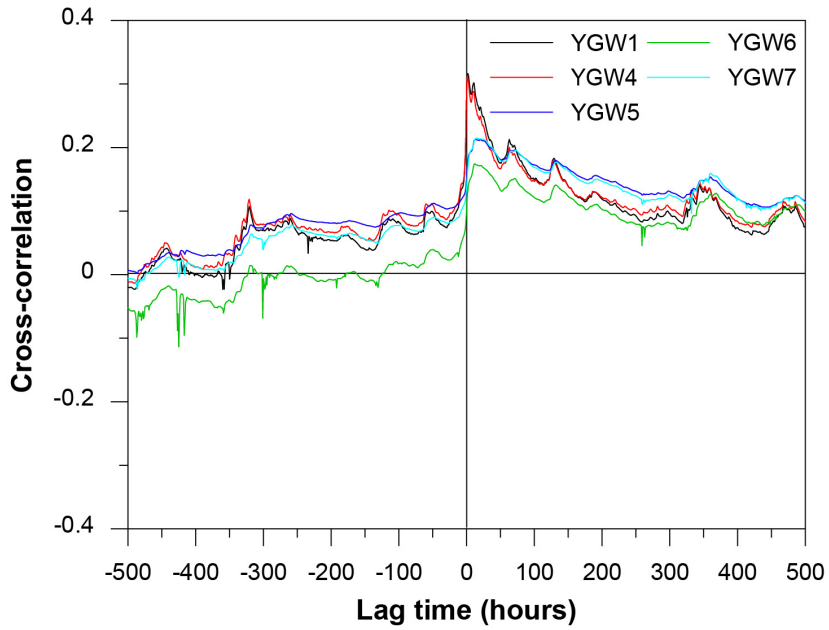

Fig. 8. Cross-correlation functions for precipitation-groundwater levels (YGW1, YGW4, YGW5, YGW6, YGW7).

단된다. 한편 시계열 분석을 통해 연구지역의 대수층은 강우에 민감한 반응을 보였고 지하수-하천수는 수리적으로 상호 연결성이 좋은 것으로 평가되었다. 향후 불포화대 수치모델링인 HYDRUS, SUTRA을 이용하여 강우패턴 변화에 따른 논의 지하수함양량을 정량적으로 산출할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2015R1A4A1041105).

REFERENCES

Angelini, P., 1997, Correlation and spectral analysis of two hydrogeological systems in Central Italy. Hydrological Sciences Journal, 42, 425-439.

Asano, T., 1985, Artificial recharge of groundwater. Butterworth Publishers, 767 p.

Bouwer, H., 2002, Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, 10, 121-142.

Chen, S.K. and Liu, C.W., 2002, Analysis of water movement in paddy rice fields (I) simulation studies. Journal of Hydrology, 260, 206-215.

Chen, S.K., Liu, C.W. and Huang, H.C., 2002, Analysis of water movement in paddy rice fields (II) simulation studies. Journal of Hydrology, 268, 259-271.

Chen, Z., Grasby, S.E. and Osadetz, K.G., 2004, Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada. Journal of Hydrology, 290, 43-62.

Choi, H.M. and Lee, J.Y., 2010, Groundwater level distribution and rainfall response characteristics in Haean basin of Yangu. Journal of Soil and Groundwater Environment, 15(6), 1-8 (in Korean with English abstract).

Eom, K.C., Yun, S.H., Hwang, S.W., Yun, S.G. and Kim, D.S., 1993, Public benefit from paddy soil. Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer, 26(4), 314-333 (in Korean with English abstract).

Fetter, C.W., 1988, Applied hydrogeology. Merrill Publishing Company, Ohio, 492 p.

Ficklin, D., Luedeling, E. and Zhang, M., 2010, Sensitivity of groundwater recharge under irrigated agriculture to changes in climate, CO_2 concentrations and canopy structure. Agricultural Water Management, 97, 1039-1050.

Goderniaux, P., Brouyère, S., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Therrien, R., Orban, P. and Dassargues, A., 2009, Large scale surface-subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. Journal of Hydrology, 373, 122-138.

Hamada, H. and Komae, T., 1998, Analysis of recharge by paddy field irrigation using ^{222}Rn concentration in groundwater as an indicator. Journal of Hydrology, 205, 92-100.

Kim, H.K., Jang, T.I., Im, S.J. and Park, S.W., 2009, Estimation of irrigation return flow from paddy fields considering the soil moisture. Agricultural Water Management, 96, 875-882.

KR (Korea Rural Community Corporation), 2008, Report of groundwater impact assessment. Gangwon Regional Headquarters, Chuncheon, 58 p (in Korean).

Kwon, Y.S., Lee, H.H., Han, U., Kim, W.H., Kim, D.J., Kim, D.I. and Youm, S.J., 1990, Terrain analysis of Haean basin in terms of earth science. Journal of the Korea Earth Science Society, 11(3), 236-241 (in Korean with English abstract).

Larocque, M., Mangin, A., Razack, M. and Banton, O., 1998, Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). Journal of Hydrology Journal, 205, 217-231.

Lee, B.Y., 2002, Short-term variation in Class A Pan evaporation. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 4(4), 197-202 (in Korean with English abstract).

Lee, J.Y., 2009, Importance of hydrogeological and hydrologic studies for Haean basin in Yanggu. Journal of the Geological Society of Korea, 45(4), 405-414 (in Korean with English abstract).

Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2002, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. Journal of Hydrology, 229, 190-201.

Lee, J.Y., Yi, M.J. and Hwang, D., 2005, Dependency of hydrologic responses and recharge estimates on water-level monitoring locations within a small catchment. Geosciences Journal, 9, 277-286.

Liu, C.W., Chen, S.K., Jou, S.W. and Kuo, S.F., 2001, Estimation of the infiltration rate of a paddy field in Yun-Lin, Taiwan. Agricultural Systems, 68, 41-54.

Liu, C.W., Cheng, S.W., Yu, W.S. and Chen, S.K., 2003, Water infiltration rate in cracked paddy soil. Journal of Geoderma, 117, 169-181.

Moon, S.K., Woo, N.C. and Lee, K.S., 2004, Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater. Journal of Hydrology, 292, 198-209.

Pritchard, S.G., Rogers, H.H., Prior, S.A. and Peterson, C.M., 1999, Elevated CO_2 and plant structure: a review. Global Change Biology, 5, 807-837.

Reilly, J.F., Horne, A.J. and Miller, C.D., 2000, Nitrogen removal from a drinking water supply with a large-scale free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge. Ecological Engineering, 14, 33-47.

Scibek, J., Allen, D.M., Cannon, A.J. and Whitfield, P.H., 2007, Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. Journal of Hydrology, 333, 165-181.

Shimada, J., 2014, The trans-boundary management of groundwater resources in Kumamoto area, Japan. KIGAM presentation 2014, Daejeon, April 29, 1-58.

Todd, D.K., 1959, Annotated bibliography on artificial recharge of groundwater through 1954. United State Geological Survey, Water Supply Paper, 1477, 115 p.

Won, J.K., Lee, M.W. and Woo, J.K., 1987, Geologic and geographic characteristics of Haean basin. Memorial Book of 40th Anniversary of Kangwon Nation University, Kangwon National University, 45-57 p (in Korean).

Won, J.K., Na, K.C. and Lee, M.W., 1988, Geology in northern area of Demilitary Zone (Geology). Cultural Heritage Administration of Korea, 114-120 p (in Korean).

Yun, S.W., Jeon, W.H. and Lee, J.Y., 2017, Evaluation of hydrochemical characteristics of groundwater and stream water in a heavy agricultural region of the Haean basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 53(5), 727-742 (in Korean with English abstract).

Yun, S.W., Lee, H.G. and Lee, J.Y., 2015, Variation of stream water quality and baseflow contribution from groundwater during rainfall event in the Haean basin. Journal of the Geological Society of Korea, 51(6), 611-621 (in Korean with English abstract).

Received : July 2, 2018
Revised : July 20, 2018
Accepted : July 23, 2018