

지하수위 자료를 활용한 지하수 홍수취약성 지수 개발 방안

김규범* · 차은지 · 신경희

K-water연구원

요 약

강우는 하천 수위의 상승 및 주변 충적 분지내 지하수위의 상승을 야기하여 토양수분 함량 증가를 가져올 수 있는데, 이 현상들은 지표 홍수의 규모에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 지하수 관측정에서 측정된 지하수위 시계열 자료의 수위 상승 이벤트를 대상으로 수위 상승 기울기와 최고 지점에서의 지하수위 깊이를 산정하여 지하수 홍수강도를 계산하였으며, 고수위가 유지되는 기간과의 상관관계를 활용하여 홍수취약성 평가를 위한 지수를 고안하였다. 또한, 지수 산정 결과를 현장의 토양 습윤화 및 침수 현상과 비교해 본 결과 수변지역 홍수취약성 평가에 적용할 수 있을 것으로 나타났다. 향후 지하수위 미계측 지역에서의 적용성을 높이기 위해서 토양, 토지이용, 수문, 지형 등의 지역별 인자와의 상관관계로부터 홍수취약성 평가 모델을 개발할 필요가 있겠다.

주요어: 홍수취약성 지수, 지하수 홍수강도, 지하수위

Gyoo-Bum Kim, Eun-Jee Cha and Kyung-Hee Shin, 2014, Development and applicability of flood vulnerability index using groundwater levels. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 2, p. 257-268

ABSTRACT: The rise of river water level and rainfall can cause the rise of groundwater levels at the riverside alluvium and consequently bring the increase of soil moisture content. These changes can also affect the scale of surface flooding. In this study, groundwater levels' time series acquired from the monitoring wells is used to calculate both the increasing slope of groundwater level and the minimum depth to groundwater level for each increasing event. Groundwater flooding intensity (GFI) is calculated using these two factors and finally the concept of flooding vulnerability index (FVI) is introduced with the relationship between the GFI and the duration of high water level. The comparison of the field condition such as soil wetting and inundation condition with the FVI value at each monitoring well shows that the FVI is applicable to assess the flooding vulnerability in the riversides. To increase the applicability of the FVI at the non-observation area of groundwater level, the flooding vulnerability model needs to be developed considering diverse factors such as soil, land use, hydrology, and topography.

Key words: Flood vulnerability index, Groundwater flooding intensity, Groundwater levels

(Gyoo-Bum Kim, Eun-Jee Cha and Kyung-Hee Shin, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Republic of Korea)

1. 서 언

지난 수 십 년간 지속적인 지하수 양수는 하천 주변 지하수위의 강하를 초래하였는데, 국내 하천변 지하수위는 국가지하수관측망의 자료에 의하면 하천수위보다 수십 cm 정도 낮은 경우가 다수 나타난다(Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, 2011). 하천은 계절적인 강우 조건에 따라 지하수와 하천의 물의 흐름 방향이 변하면서 이득하

천과 손실하천의 특성을 모두 갖는 것이 일반적이거나 주변의 낮은 지하수위로 인하여 손실하천의 경향을 다수 보이기도 한다. 최근 하천 정비 사업을 통하여 하천수위가 과거보다 2~3 m 정도 높게 관리되면서 주변 충적층의 지하수위도 부분적으로 상승하는데, 이에 따라 지하수와 지표수의 물리적 및 화학적 상호 작용에 변화가 발생하게 된다(Kim *et al.*, 2012, 2013; Lee *et al.*, 2012). 지하수위는 지표수에 비하여 상승 속도가 느리지만 상승 이후 해당 수위의 지속

* Corresponding author: +82-42-870-7640, E-mail: gbkim@kwater.or.kr

시간이 긴 특징을 갖고 있다. 충적층내의 지하수위는 상부 비포화대의 토양 수분함량에 영향을 미치는데 높게 형성된 지하수위는 강우의 지하 침투에도 영향을 미칠 수 있다. 강우의 침투능 및 하천과 지하수위의 상호 작용 등에 영향을 미칠 수 있는 지하수위의 분포에 대한 정량적 평가가 이루어 진다면 홍수 평가를 위한 인자로서 지하수위 자료의 사용이 가능할 것이다.

영국의 환경법령학회(UK Environmental Law Association)에서 정의한 홍수의 유형에는, 해안의 조수 간만의 차이에 의하여 발생하는 홍수(Coastal flooding), 하천 제방 붕괴 등에 의한 홍수(River flooding), 집중 호우시 배출 능력 부족에 의한 홍수(Flash flooding), 지하수위의 상승에 의한 홍수(Groundwater flooding) 및 하수관거 등 배수 시스템에서의 누수에 의한 홍수(Sewer flooding) 등이 있다. 여기에서 지하수 홍수 개념은 지하수위가 상승하여 나타나는 침수, 토양 습윤화, 지표 홍수의 가속화, 침투능의 감소 등과 같은 협의의 개념을 포함한다. 지하수위의 상승과 배출 등에 의한 침수 연구는 1990년대 말부터 영국, 프랑스 및 독일 등을 중심으로 연구가 이루어지기 시작하였다(Calver *et al.*, 2000; Pinault *et al.*, 2005; Finch *et al.*, 2007; Girard and Baltassat, 2007). 독일 Dresden 지역의 Elbe 강 주변의 침수 사례의 16%가 높은 지하수위에 의하여 유발되었으며 2002년 8월 홍수기간 동안에는 지하수위가 시간당 30 cm가 상승된 사례가 있다(Kreibich *et al.*, 2009; Sommer *et al.*, 2009). 영국의 경우 England 와 Wales 지역의 경우 얇게 형성된 지하수위로 인하여 토양의 습윤화가 발생하고 Chalk 층의 높은 함수능력이 지하수의 배출을 장기간 억제하여 침수를 야기하는 것으로 평가된 바 있다(MacDonald *et al.*, 2008a, 2008b). 프랑스 Sommer 하천 유역에서도 Chalk 층이 분포하는데 수치 모델 분석 결과 하천 유량의 90%가 Chalk층내 지하수로부터의 기저유출에 의하여 발생하기 때문에 지하수위의 관리가 중요함을 밝힌 바 있다(Habets *et al.*, 2010). 또한, 미국 오하이오주에서는 카르스트 지형인 Bellevue 지역의 싱크홀에서 배출된 지하수가 홍수를 야기한 사례도 있다(Raab *et al.*, 2009).

본 연구에서는 하천변에서 충적 분지에서 충적층 지하수위 분포가 지표 홍수에 미치는 영향을 평

가하기에 앞서 강우 및 하천수위 변동시 지하수 관측점에서 나타나는 수위 변동 시계열 자료의 특성 변화를 살펴보고 홍수의 평가 인자로서 지하수위 자료를 활용하는 방안에 대하여 개념적으로 접근하고자 하였다.

2. 연구의 개념 및 접근법

지하수위의 변화는 강우량, 하천수위 변동, 지하수 양수 및 농업용수로 수위 등 다양한 요인에 의하여 나타날 수 있다. 호우기의 경우 지표수의 배제 불량으로 인한 침수가 발생할 수 있는데, 얇게 분포하는 지하수위는 상부 불포화대내의 모세관 작용 등에 의하여 토양 수분함량에 영향을 주어 강우의 지하 침투에 영향을 주거나 지표 침수 기간이 길어지는 작용을 가져올 수 있다. 또한, 갈수기에는 농업활동이 상대적으로 저조하여 지하수 양수가 이루어지지 않아 지나치게 얇은 지하수위가 장기간 유지될 경우에는 토양의 습윤화가 야기될 수 있다. 이와 같은 문제를 사전에 평가하고 예측하기 위해서는 수치 모델을 이용한 지하수위 변동을 시공간적으로 예측하거나, 실제 지하수 관측 자료로부터 해석학적으로 지하수위 변동을 예측할 수 있을 것이다. 그러나, 보다 정책적인 의사 결정을 위해서는 비교적 단순화된 지하수 홍수 취약성 평가 기법이 개발될 필요가 있다.

지하수위 관측값은 충적 매질의 투수성, 토양, 토지이용, 강우량, 인접한 하천의 수위, 주변의 지하수 양수 등 자연적, 인위적인 요인들이 반영된 것으로서 해당 지점의 토양 습윤화 및 침수 평가를 위한 인자로 고려될 수 있다. 각각의 인자들에 대한 정량적인 실험 등을 통하여 지하수위 변동에 어떻게 영향을 미치는지 평가한 후 지하수 홍수취약성 지수를 개발하는 연역적 접근이 가능하나, 실제 필요한 충분한 현장 데이터를 취득하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 지하수 홍수취약성 지수를 반영할 수 있는 지하수위 자체의 특성 인자를 기존 사례를 통하여 도입하고 이를 정량화, 객관화한 지수 산정 기법을 우선 고안한 후 실제 현장에서 나타난 현상과 비교하여 개발 기법의 적용성을 평가하고자 하였다. 추후에는 개발된 기법과 관측지점의 지형, 토지이용, 토양 등 다양한 특성과의 비교를 통하여 재검증하여 귀납적 접근을 통한 홍수취약

성 지수 개발을 완성하고자 한다.

일반적인 지하수위 상승은 강우가 발생하거나 인근 하천 수위가 상승한 이후 나타나게 되는데 매질의 특성과 지표수-지하수 연계성 등에 따라 지하수위의 상승 기울기에 차이를 보이게 된다. 지하수위가 급격히 상승한 후 오랫동안 배출되지 않고 유지된다면 지하수위가 기상 및 수문 인자와 더불어 홍수의 주요 영향인자로 고려될 수 있다. 이 점을 고려하여 그림 1과 같은 지하수위 상승 기울기와 최소 지하수위 심도를 토대로 지하수 홍수강도 개념(Groundwater flooding intensity: GFI, 단위: 1/m)을 도입하였다. 지하수위 상승 기울기의 경우 지하수위가 상승하는 시점부터 강하가 시작되는 최고점에 이르는 높이의 차이를 활용하여 계산하였으며, 수위가 가장 높을 때의 지하수위 심도를 최소 지하수위 심도로 정의하였다(Sommer and Ullrich, 2005).

$$GFI = \frac{\tan \alpha}{DTW_{min}} \quad (1)$$

여기에서, $\tan \alpha$ 는 지하수 상승 기울기, DTW_{min} 는 가장 얇은 지하수위 깊이를 의미한다. 상기 식은 지하수위 기울기가 크고 지하수위 깊이가 얇은 경우 지하수위가 높게 급상승하여 홍수 영향인자로서 지하수위가 고려될 수 있음을 의미한다. 본 계산을 위해서는 지하수위 상승 기울기 산정을 위한 기준점이 필요하며 이를 기저고수위(Base high level)라고 정의하였다. 기저고수위 결정을 위하여, 지표 농작물의 생육에 지장을 초래할 수 있는 심도(일반적인 과수는 1.0 m 이상의 유효 토심이 필요하며, 수박의 경우 최

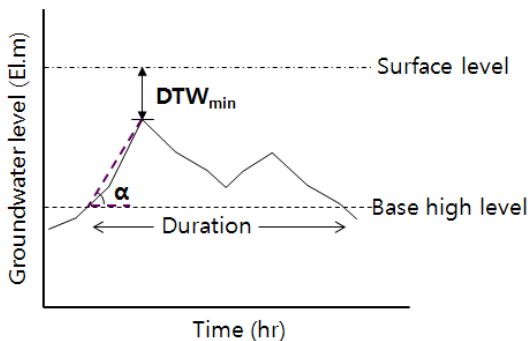


Fig. 1. Concept of flooding intensity and duration using groundwater levels (Sommer and Ullrich, 2005).

대 2.0 m 정도 필요함, 출처: <http://soil.rda.go.kr>)를 고려하였으며, 추가로 실트 점토질 토양에서의 모세관 현상에 의한 상승량 등을 추가하여 지표 부근에 습윤화 발생 가능성이 존재할 수 있는 심도로 설정하였다(Gillham, 1984). 또한, 다양한 기저고수위 조건에서의 지하수 홍수강도 산정 결과를 도출, 검토하기 위하여 지표까지 50 cm 간격의 기저고수위 마다 지하수 홍수강도 계산을 수행하였다.

아울러, 지하수위 활용 홍수취약성 평가에 있어서 지하수 홍수강도(GFI) 인자와 더불어 고수위가 유지되는 기간(Duration of high water levels)이 함께 고려될 필요가 있다. 높은 지하수위 조건이 장기간 유지된다면 토양의 수분함량 증가나 추가 강우시의 수위 상승 등으로 인하여 지표 홍수에 미치는 영향이 증가하게 되고, 높은 지하수위가 단기간 유지되는 경우보다 그 영향은 커지게 된다. 따라서, 위에서 계산된 지하수 홍수강도 인자(GFI)와 고수위 유지 기간을 함께 고려하여 지하수위를 활용한 홍수취약성 평가 모형을 개발하는 것이 필요하다.

3. 연구 지역

지하수위 시계열 자료의 취득 등 조사 분석을 위하여 낙동강 중류인 강정고령보 우안 상류 약 2~3 km 지점에 위치한 하천변 충적 분지인 경상북도 고령군 다산면 노곡리 지역을 연구지역으로 설정하였다(그림 1). 본 지역 남측은 산지 지형과 접하여 무명천이 서에서 동으로, 북측에는 낙동강이 서에서 동으로 흐르는 지역으로서 동서 방향으로 약 3.5 km, 남북 방향으로 약 1 km 내외의 폭을 갖는다. 평지의 평균 고도는 약 21 El.m로서, 대부분 비닐하우스에 의한 참외 재배가 주를 이루나 논농사를 병행하는 경우가 다수 있으며, 저지대의 특성상 연을 재배하는 지역이 연구지역내 남동쪽에 분포하고 있다. 전반적인 지형의 경사는 북측의 낙동강 쪽이 0.5~1 m 정도 높아 지표수 및 지하수의 흐름이 북에서 남으로 형성되며 남측의 무명천 방향으로 향한 후 동측으로 흐르고 있다.

본 지역의 충적층 분포를 지하수 관측정 굴착 및 시추 자료를 토대로 파악하면 표 1과 같다. 지하수 관측정인 GJM-13은 매립층, 실트질 모래, 실트질 점토, 모래질 자갈, 자갈 등의 순으로 충적층이 16 m의

두께로 분포하는 반면에, GJM-14에서는 매립층, 실트질 점토, 모래질 자갈, 자갈 등의 순으로 총적층이 15 m의 두께로 분포하고 있다. 또한, 추가 시추자료(NG-1, NG-2 및 NG-3)를 보면, 낙동강 인근인 북서측이 남동측에 비하여 수 m 정도 두꺼운 것으로 나타났다. 이 지역의 평균 총적층 두께는 약 15~20 m로 파악되었다.

4. 관측자료 시계열 특성

상기 5개 시추 지점에 지하수위 계측 장비를 설치하여 매 1시간 간격으로 지하수위 측정이 이루어졌다(그림 2). 이들 지점중 GJM-13과 GJM-14는 보 담수 이전부터 관측되었던 시설이며, NG-1, NG-2 및 NG-3은 보의 담수 이후에 설치된 시설에 해당한다. 본 연구 지역이 낙동강과 직접 접하고 있기 때문에 지하수위는 낙동강 하천 수위의 영향을 받기 쉬운

조건에 놓여 있다. 인접한 성주 관측소의 하천수위 자료를 보면 그림 3과 같으며, 강정고령보의 담수 전후(담수 기준일: 2012년 3월 15일)로 수위에 차이가 있음을 알 수 있다. 하천수위의 변동 폭은 보의 담수 이전이 담수 이후보다 훨씬 크게 나타나고 있는데, 이는 보 수위 운영이 담수 이후에 일정하게 유지되기 때문으로 해석된다(그림 3(a)). 담수 이전인 2011년의 경우를 보면, 최대 하천수위는 21.53 El.m로서 최소 하천수위 14.43 El.m보다 약 7 m 높게 나타났으나, 담수 이후인 2012년 2사분기 이후의 자료를 보면, 최대 22.44 El.m 및 최소 17.75 El.m로서 약 4.7 m의 폭으로 줄었다.

또한, 지하수위의 경우에도 담수 이전에 비하여 담수 이후에 상승되어 나타나며 호우기의 수위 변동 크기가 상대적으로 완만해졌음을 보여준다(그림 3(b), 및 그림 3(c)). 이와 같은 수위 변동 특성을 통계값으로 비교해보면, GJM-13 관측정은 보 담수 이

Table 1. Distribution of the sediment layer at the monitoring wells and drilling sites (unit: m).

Wells	Total depth	Topsoil	Silty sand	Silty clay	Sandy gravel	Gravel	Weathered rock	Bedrock
GJM-13	17.0	1.0	9.5	4.5	-	1.0	-	1.0
GJM-14	16.0	1.0	-	3.5	1.0	0.5	1.0	-
NG-1	18.0	0.6	14.7	-	2.7	-	-	-
NG-2	18.0	2.0	11.5	-	4.5	-	-	-
NG-3	20.0	0.5	7.1	8.2	4.2	-	-	-



Fig. 2. Location of the study area and groundwater monitoring wells (arrow: surface water flow direction).

Table 2. Statistics for groundwater and river water levels before and after water-filling at the barrage.

Wells and River	Water filling at barrage	Average water level (El.m)	Average Depth to water (m)	Standard deviation (m)	Skewness	Kurtosis
GJM-13	Before	16.76	3.56	0.81	0.55	-0.086
	After	19.17	1.15	0.71	-0.72	-0.746
GJM-14	Before	18.13	2.55	0.55	0.59	0.505
	After	19.27	1.41	0.58	0.60	-0.513
NG-1	Before	-	-	-	-	-
	After	21.13	2.27	0.62	-0.33	-1.607
NG-2	Before	-	-	-	-	-
	After	20.24	3.23	0.66	0.99	-0.368
NG-3	Before	-	-	-	-	-
	After	21.43	1.82	0.30	0.61	-0.920
River	Before	15.27	-	0.78	4.62	25.47
	After	19.28	-	0.37	-0.39	5.69

Remark) Skewness: a measure of the degree of asymmetry of a distribution, Kurtosis: the degree of peakedness of a distribution.

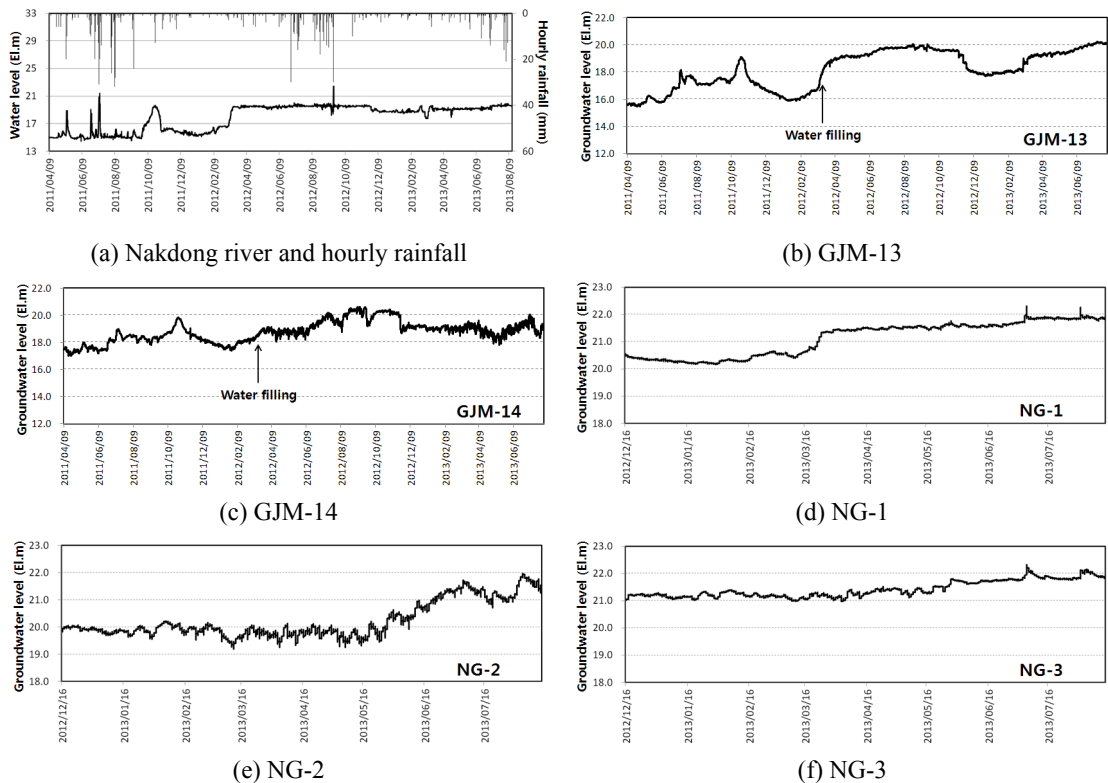


Fig. 3. Hydrographs of surface water and groundwater levels and hourly rainfall.

후에 평균 2.41 m, GJM-14는 1.14 m의 수위 상승이 발생하였는데, 낙동강 수위 상승량 4.01 m 보다는 작은 특성을 보이고 있다(표 2). 수위 변동의 표준 편차를 담수 전후로 비교해 보면, 낙동강 수위는 0.78 m와 0.37 m, GJM-13은 0.81 m와 0.71 m로 담수 이후에 줄어들어 수위 변동 폭이 작아졌음을 알 수 있다. 또한, 이들 2개 자료의 왜도(Skewness)를 보면 담수 이전에는 + 값, 담수 이후에는 - 값으로 변화되었는데, 이는 담수 이전에는 기저 수위와 비교하여 강우 등으로 인한 수위 상승이 뚜렷하면서 많이 나타났음을 설명하며, 담수 이후에는 급격한 과다 상승의 횟수가 적어지면서 상승 높기도 감소하였음을 의미한다. 반면에, 낙동강과 떨어져 있고 남측 산지로부터의 지하수 함양원이 존재하는 GJM-14는 지하수위의 표준편차가 0.55 m 및 0.58 m로 소폭 증가하여 보 담수로 인한 효과가 거의 나타나지 않았다. 또한, GJM-14의 왜도에도 변화가 거의 없었으며, 침도가 감소하여 지하수위 상승의 규모가 줄어들었음을 알 수 있다. NG-1 및 NG-3 지하수 관측정은 보 담수 이후에 관측이 개시되었으며, 기존 관측정의 담수 이후 자료와 유사한 시계열 통계 특성을 보이고 있다. 단, NG-2의 경우에는 1일 주기의 약한 변동이 존재하는 것으로 보아 주변 관정에서의 양수 영향이 일부 반영되는 것으로 보인다.

5. 홍수취약성 평가 기법 제안 및 토론

지하수 홍수강도(GFI) 인자의 계산을 위하여 기저고수위 조건을 지표로부터 3.0 m, 2.5 m, 2.0 m, 1.5 m, 1.0 m, 0.5 m 등의 깊이로 구분하여 낙동강 수위 상승 이후 기간의 자료에 대하여 적용해 보았으며, 각 지하수위 상승 이벤트마다의 계산 예를 그림 4에 나타내었다. 각각의 지하수위 상승 이벤트마다 지하수위 상승 기울기와 최저 지하수 심도를 계산하여 그 상관 관계를 그림 5에 나타내었다. GJM-13, GJM-14 및 NG-1 관측정은 갈수기 보다는 호우기에 지하수 심도가 전반적으로 얇게 분포하며, 상승 기울기도 큰 것이 일부 존재하는 것으로 나타났으며, 이는 호우기 강우 및 높은 하천수위의 영향으로 보인다. 반면에, GJM-14는 갈수기 동안에도 지하수위 심도가 얇은 경우가 다수 존재하는데, 이는 남측의 산악지역에서의 지하수 유입과 본 지점이 연구지역 내에서 저지대로서 배출이 양호하지 않은 점 등이 영향을 미치고 있다. 또한, GJM-14와 같이 갈수기의 작은 강우에도 지하수위 상승 기울기가 크게 나타나는 지역은 지하수위 심도 조건에 따라 홍수의 취약성이 증가할 수 있다. NG-3의 경우에는 계절에 따른 지하수위 상승 기울기에 큰 차이가 없으나 호우기 지하수위는 상대적으로 약간 얇은 것으로 나타났다. 전반적으로 지하수위 상승 기울기와 최저 지하수 심

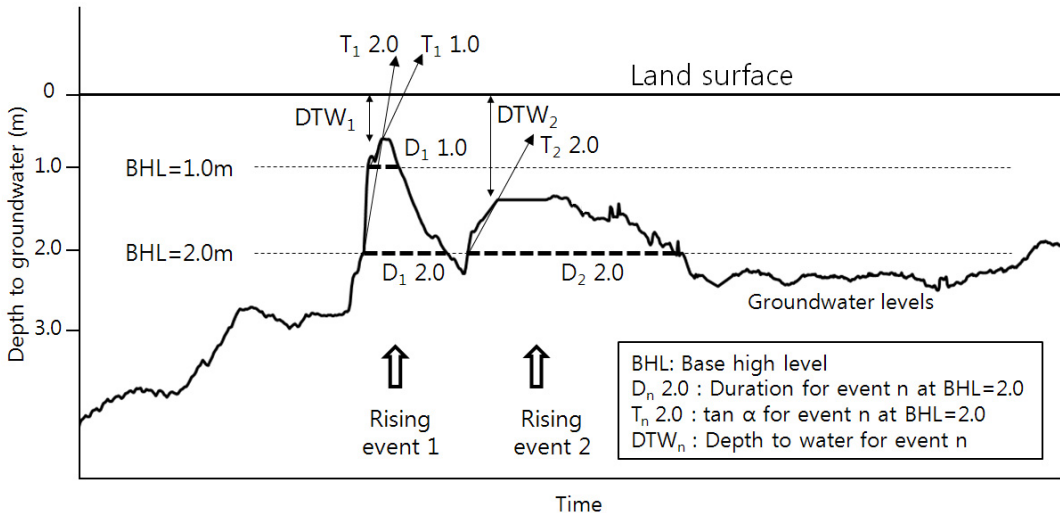


Fig. 4. Example for the calculation of depth to water, duration, and tan α at each rising event and base high level.

도는 상관성이 낮아 서로 독립적임을 보여준다.

이상 결과를 토대로 수위 상승 이벤트별로 호우기 및 갈수기에 대하여 지하수 홍수강도를 구하고 그 평균값을 표 3에 수록하였다. 갈수기와 호우기의 지하수 홍수강도는 GJM-13, GJM-14 및 NG-1 등에서 약 10배의 차이를 보이고 있다. 전체 기간 동안의 지하수 홍수강도는 GJM-14가 가장 높았으며, NG-3이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 호우기에도 유사한 경향을 보였다. 갈수기 동안에는 GJM-14가 가장 높고 GJM-13이 가장 낮아 호우기와는 다소 차이를 보이고 있다. 전체 자료로 판단해 보면, GJM-14의 경우에 지하수위가 가장 얇거나 수위 상승이 가장 급격히 이루어지는 홍수 취약성이 높음을 예상할 수 있다.

각 수위 상승 이벤트별로 지하수 홍수강도(GFI)와 고수위 유지 기간을 계산 한 후 각각을 축으로 산점도를 도시하였다(그림 6). 5개의 지하수 관측망은 동일 분지내에 위치하기 때문에 지하수 홍수강도와 고수위 기간 등 두 축의 범위가 유사한 것으로 나타났다. 고수위가 유지되는 기간은 개략적으로 최대 10,000 시간 이내이며, 지하수 홍수강도는 1 이하의 값을 보이고 있다. 이와 같이 일부 고수위가 장기간 유지되는 것으로 나타나는 것은 기저고수위를 3.0 m 또는 2.5 m 등으로 낮게 설정한 경우로서 담수 이후 높은 지하수위가 장기간 나타났기 때문이다. 두 인자간의 분포 및 상관식을 보면 상관관계가 매우 낮음을 알 수 있는데, 결정계수 R^2 도 0.3614 이하의 매우 낮은 값을 보인다. 이는 두 인자 간에 상관성이

Table 3. Average and standard deviation for groundwater flooding intensity (GFI) for wet and dry seasons after water-filling at the barrage.

Wells	Total season	Wet season (June~Sept.)		Dry season (Oct.~May)	
		Average	St. Dev.	Average	St. Dev.
GJM-13	0.0112	0.0161	0.0165	0.0021	0.0012
GJM-14	0.0365	0.0996	0.1980	0.0084	0.0058
NG-1	0.0166	0.0288	0.0465	0.0030	0.0018
NG-2	0.0067	0.0065	0.0043	0.0116 ¹⁾	-
NG-3	0.0035	0.0034	0.0029	0.0036	0.0020

¹⁾ Only one data exists.

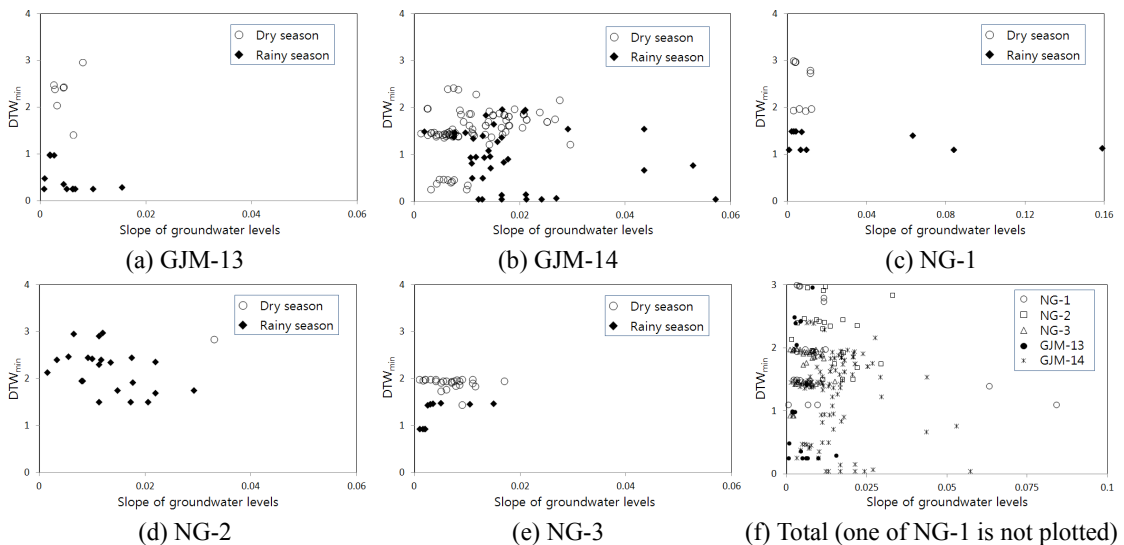


Fig. 5. Relationship between the slope of groundwater levels and the minimum depth to water for each event.

거의 없음을 의미하는 것으로서, 지하수 홍수 취약성을 평가할 수 있는 지수로서의 통계적 가능성을 보여준다.

그림 6에서 x는 고수위 지속기간을 의미하는데, 관계식의 유의성이 낮음에도 불구하고 ln(x)의 계수를 보면, GJM-14, GJM-13, NG-2, NG-3 및 NG-1의 순으로 줄어드는 경향이 있음을 알 수 있다. 그림 6(f)

에서 보듯이 그래프의 좌 하단에서 우 상단으로 갈수록 홍수 취약성이 증대하게 되는데, ln(x)의 계수가 클수록 우 상단에 위치하는 이벤트가 상대적으로 많이 존재할 수 있고, 이와 더불어 지하수 홍수강도의 평균값이 높은 경우라면 홍수 취약성이 상대적으로 크다 할 수 있다. GJM-14의 경우 지하수 홍수강도의 평균도 가장 높고 ln(x)의 계수도 가장 높아 홍

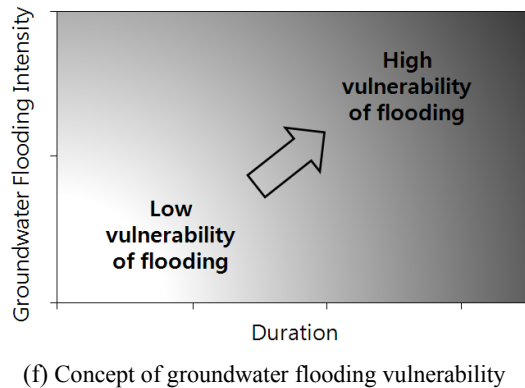
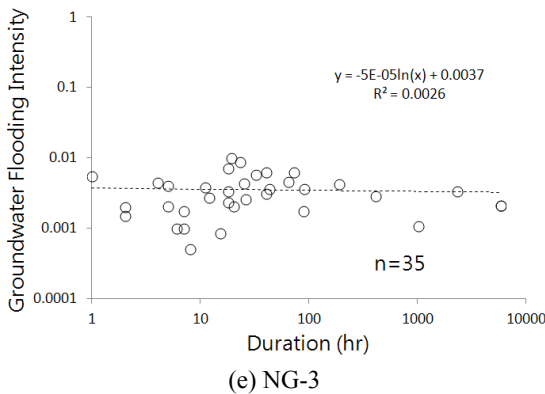
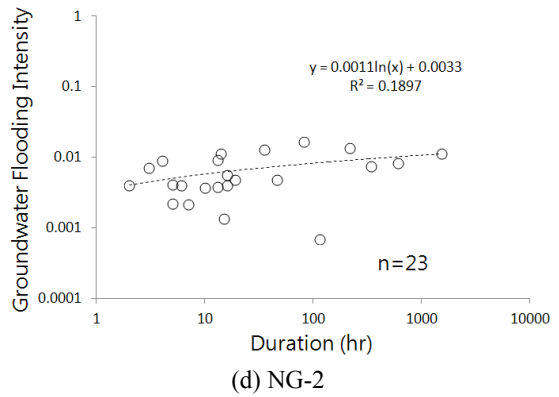
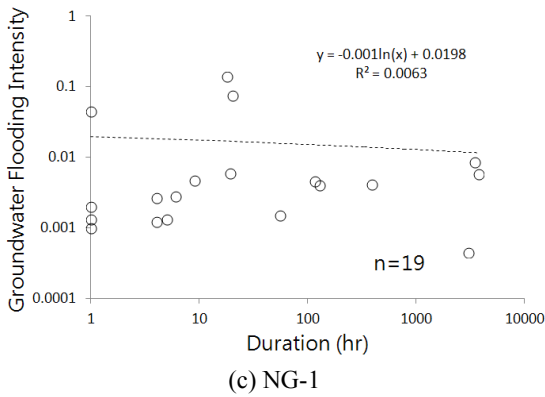
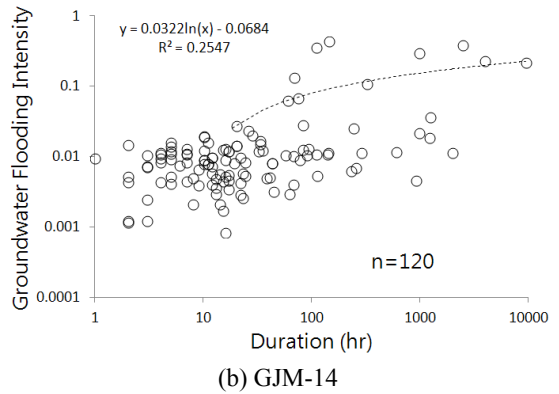
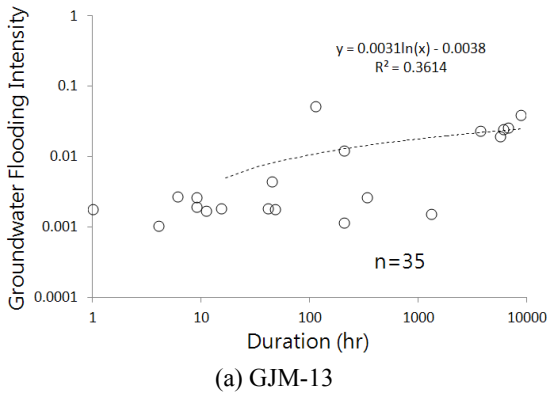


Fig. 6. Log-scale scatter plots for groundwater flooding intensity and high water level's duration after water-filling at the barrage.

수 취약성이 높을 것으로 예상된다. 그러나, GJM-13과 NG-2를 비교해 보면, 지하수 홍수강도의 평균은 NG-2가 크고 $\ln(x)$ 의 계수는 GJM-13이 커서 두 지점간의 홍수 취약성 상대 비교는 용이하지 않게 되므로 보다 정량적인 평가 기준이 필요하다.

한편, 동일한 방법으로 GJM-13 및 GJM-14를 대상으로 낙동강 수위 상승 이전의 약 1년간의 지하수위 자료를 분석한 결과는 그림 7과 같다. 지하수위가 낮게 유지되었던 보 담수 이전에도 두 관측지점의 지하수 홍수강도와 고수위 유지기간 간의 상관관계는 약한 양의 관계를 보이거나 결정계수 R^2 가 0.0717 이하의 매우 낮은 값을 유지하고 있어 담수 전에도 두 인자가 서로 선형 독립적으로서 지하수 홍수강도의 정의가 통계적으로 유의함을 보여준다. 한편, GJM-14가 GJM-13에 비하여 $\ln(x)$ 의 계수가 큰 것을 알 수 있다. 또한, 본 기간 동안에는 고수위의 유지기간이 상대적으로 짧고 지하수 홍수강도도 평균적으로는 작게 산정되었는데, 이는 낙동강의 수위가 낮고 높은 특성에 따라 홍수의 가능성에서 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 7에서 두 인자간의 $\ln(x)$ 의 계수를 그림 6과 비교해 보면 보의 담수 이후에 증가한 것으로 나타났는데, 이는 담수 이후에 지하수위가 약아지거나 상승 기울기가 증가하였거나 장기간 고수위가 유지되는 이벤트가 많아졌음을 의미한다.

이상과 같은 지하수위의 변동 특성을 고려한 결과, 지하수 홍수강도와 고수위 유지기간을 조합한 홍수취약성의 정량적 기준(홍수취약성 지수: Flooding vulnerability index (FVI)) 설정을 위하여 다음 방

법을 제시하였다. 고수위 유지기간과 지하수 홍수강도의 척도가 동일하지 않기 때문에 관측정별 상대비교를 용이하게 하기 위하여 이들의 표준화 작업을 수행하였다. 표준화란 확률변수 x_i (여기에서는 지하수 홍수강도 또는 고수위 유지기간)에 대하여 평균 μ_i 를 빼 다음 표준편차 σ_i 로 나눈 것으로서 다음 식에 의한다.

$$\text{Standardized } x_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (2)$$

표준화한 값을 가로 및 세로축으로 설정하고 표준화값이(0,0)인 지점을 축의 원점으로 이동하였으며, 각 이벤트마다 면적($Area_j$)을 산정 한 후 총 이벤트 갯수(n)로 나누어 평균 면적을 산정하는 방식을 제시하였다(그림 8).

$$\begin{aligned} \text{Flooding vulnerability} &\in dex(FVI) \quad (3) \\ &= \frac{\sum_{j=1}^n Area_j}{n} \end{aligned}$$

이와 같은 방법으로 지하수 관측지점별로 지하수 홍수취약성 지수를 산정한 결과, GJM-14는 0.7523, GJM-13은 0.3349, NG-1은 0.0231, NG-2는 0.0102 및 NG-3은 0.0069 등의 순으로 나타났으며, 이 결과에 의한 순서는 실제 현장에서의 습윤화 및 침수 현상과 유사한 것으로 나타났다.

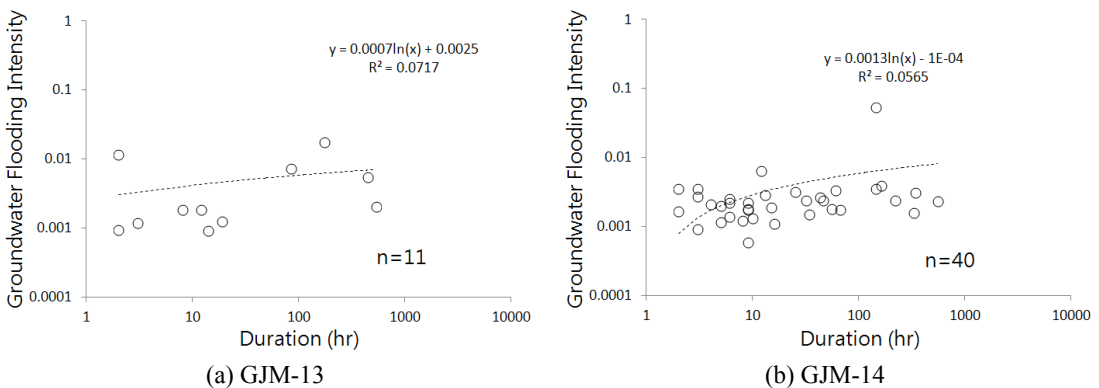


Fig. 7. Log-scale scatter plots for groundwater flooding intensity and high water level's duration before water-filling at the barrage.

상기 홍수취약성 평가 기법의 현장 적용성을 판단하기 위하여 2013년 3월말 연구지역내 농경지 및 고랑의 침수 상태, 토양의 질퍽한 상태 등에 대한 육안조사와 지하수위 측정 등 현장 조사를 실시하였다. 조사결과에 의하면, 연구지역 동남측 방향에 농경지의 침수 흔적이 다수 나타나고 있는데, 대부분 GJM-13 및 GJM-14 지점 인근에 해당한다(그림 9(a)). 이들 지점에서의 토양 습윤화 상태는 본격적인 지하수 이용이 시작되는 4월말까지 유지되어 고수위 유지에 의한 영향을 반영하고 있다. 또한, 기존 지하수 관정 등 28개 지점에서 2012년 11월에 측정된 지하수위 분포를 보면, 연구지역 동남측이 지하수위가 상대적으로 얇은 것으로 나타났으며, 지하수 관측정의 위치와 비교해 보면 홍수취약성 분석 결과가 공간적인 유사성을 갖고 있다(그림 9(b)).

본 연구에서 제시된 홍수취약성 평가 개념이 적용되기 위해서는 식(2)으로 부터 산정된 결과가 국

내 대하천변 대부분의 충적 분지에 보편적으로 활용될 수 있어야 한다. 이를 위해서는 보다 다양한 지점에서의 지하수위 시계열 자료의 취득이 요구되며 다음 사항들이 고려되어야 한다.

첫째, 식(2)를 적용하기 위하여 사용된 시계열 자료의 기간은 동일해야 각 지점별 상대 비교가 의미가 있다.

둘째, 계산된 이벤트가 많을수록 최종 계산 면적이 증가할 수 있으므로 분석의 기초가 되는 기저고수위는 모든 관측 지점에 동일한 값이 적용되어 비교되어야 한다.

셋째, 표준화 값 중 최소값을 도표의 원점(0,0)으로 변환하기 때문에 극소수 이벤트에서의 면적은 0이 될 수 있는데 지하수위 상승 이벤트 건수가 많은 경우에는 이는 무시할 수 있는 수준으로 본다.

이와 같은 고려사항과 함께, 식(2)에 의한 계산 값에 의미를 부여할 수 있도록 현장의 침수 특성 및 습윤화 조사 자료가 충분히 확보되어 홍수취약성에 대한 5단계 또는 7단계 등의 그룹핑 기준이 수치로 제시될 필요가 있겠다.

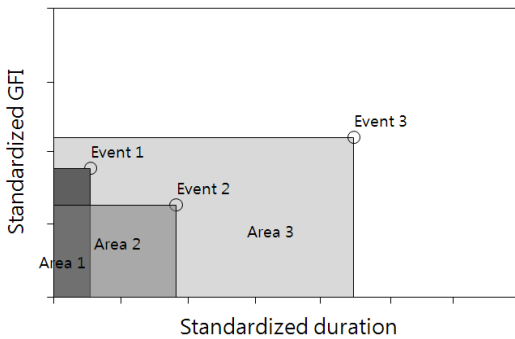
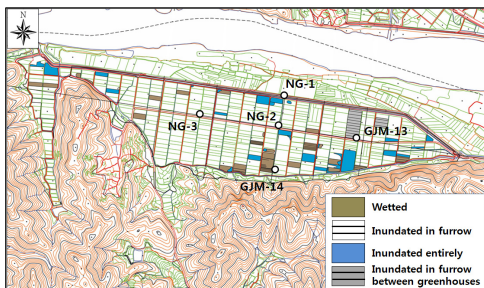


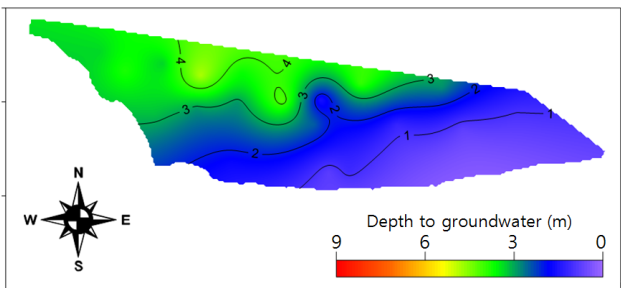
Fig. 8. Concept of flooding index calculation using groundwater levels.

6. 결 언

이상을 통하여 지하수위 시계열 자료에 기반한 매질의 홍수취약성 평가 기술의 개발 가능성을 검토해 보았다. 현재까지 국내에서는 대하천 충적 분지에 설치된 지하수 관측정이 장기간 운영된 실적이 부족하기 때문에 본 기법을 개발하기 위한 광범위한 분석은 수행되지 못하고 있다. 본 연구에서는 낙동



(a) Wetted and inundated areas during a dry season (March 31, 2013)



(b) Distribution of groundwater levels (Nov., 2012)

Fig. 9. Distribution of wetted area and groundwater levels.

강 종류의 노곡리 지역에 운영 중인 5개의 지하수 관측 자료를 분석하여 지하수위 자료를 활용한 홍수취약성 평가 기법에 대한 예비적 평가를 수행하였는데, 지하수위 시계열 자료로부터 지하수 상승 이벤트에 대한 지하수위의 상승 속도, 지하수위의 심도 및 고수위가 유지되는 기간 등의 자료를 추출하여 상호 비교 분석한다면 홍수 취약성 평가에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보았다. 이와 같은 예비적 해석 결과는 실제 현장에서 나타난 토양 습윤상태 및 침수 조사 결과 등과 유사한 것으로 평가되었으며, 향후 추가 지역에 대한 시계열 자료 분석을 통하여 본 기법을 보완하고 적용성을 높여 나갈 계획이다.

하천 수위의 상승이 주변 충적 분지에서의 지하수위 상승에 영향을 미쳐 토지 이용에 장애를 발생할 수 있다는 우려가 제기되고 있어 보다 철저하고 광범위한 지하수위 계측과 분석이 요구된다. 국내의 대하천 주변에서는 호우기 집중 호우 발생시 침수가 빈번하게 발생하였던 과거 이력을 갖고 있으나 최근에는 호우시 배수 속도가 빨라지고 침수 강도가 약해지는 것으로 평가되고 있어 홍수에 대한 관심이 저하될 수 있다. 그러나, 지하수위의 부분적인 상승이 지표 침수에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 정확한 이해와 평가가 수행되어야 하며, 현장에서 나타나는 토양 상태 및 침수 현상 등에 대한 자료가 지속적으로 축적되어 지표 홍수와 연계된 지하수위를 활용한 홍수취약성 평가 인자가 구축된다면 보다 안전한 수자원 활용과 시설물 보전에 기여할 것이다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기 술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Calver, A., Crewett, J., Davies, H., Lamb, R. and Crooks, S., 2000, Modelling Floods from Combined Surface and Subsurface Sources. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, FD0425, 78 p.
- Finch, J., Marsh, T. and McKenzie, A., 2007, A Preliminary Risk Assessment of the Potential for Groundwater Flooding during the Winter of 2007/8 - an Update. Center for Ecology and Hydrology, Oxford, 23 p.
- Gillham, R.W., 1984, The capillary fringe and its effect on water-table response. *Journal of Hydrology*, 67, 307-324.
- Girard, J.F. and Baltassat, J.M., 2007, Interreg III A, Flood1: The Role of Groundwater in Flooding Events. BRGM RP-55257-FR, 76 p.
- Habets, F., Gascoin, S., Korkmaz, S., Thiéry, D., Zribi, M., Amraoui, N., Carli, M., Ducharne, A., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Noilhan, J., Otle, C. and Viennot, P., 2010, Multi-model comparison of a major flood in the groundwater-fed basin of the Somme River (France). *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 99-117.
- 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(2), 1-11.
- Kim, G.B., Son, Y.C., Lee, S.H., Jeong, A.C., Cha, E.J. and Ko, M.J., 2012, Understanding of surface water-groundwater connectivity in an alluvial plain using statistical methods. *The Journal of Engineering Geology*, 22(2), 207-221.
- Kreibich, H., Thieken, A.H., Grunenberg, H., Ullrich, K. and Sommer, T., 2009, Extent, perception and mitigation of damage due to high groundwater levels in the city of Dresden, Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1247-1258.
- Lee, J.H., Hamm, S.Y., Lee, C.M., Lee, J.J., Kim, H.S. and Kim, G.B., 2012, Numerical simulation of groundwater system change in a riverside area due to the construction of an artificial structure. *The Journal of Engineering Geology*, 22(3), 263-274.
- MacDonald, A.M., Hughes, A.G., Vounaki, T., Graham, M.T., Lilly, A., Mansour, M. and Stephens, C.A., 2008a, Groundwater and the Forres (River Findhorn & Pilmuir) Flood Alleviation Schemes, Morayshire. Groundwater Management Programme Commissioned Report CR/08/023N, British Geological Survey, Nottingham, 82 p.
- MacDonald, D.M.J., Bloomfield, J.P., Hughes, A.G., MacDonald, A.M., Adams, B. and McKenzie, A.A., 2008, Improving the Understanding of the Risk from Groundwater Flooding in the UK, In: FLOODrisk 2008b, European Conference on Flood Risk Management. Oxford, UK, The Netherlands, CRC Press.
- Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, 2011, 2011 Annual Report of Groundwater Monitoring in Korea. Seoul, 650 p.
- Pinault, J.L., Amraoui, N. and Golaz, C., 2005, Groundwater-induced flooding in macropore-dominated hydro-

- logical system in the context of climate changes. *Water Resources Research*, 41(5), DOI: 10.1029/2004WR003169.
- Raab, J., Haiker, B., Jones, W., Angle, M., Pavey, R., Swinford, M. and Powers, D., 2009, Ground Water Induced Flooding in the Bellevue, Ohio Area, Spring and Summer 2008. ODNR Division of Water Technical Report of Investigation 2009-1, 19 p.
- Sommer, T., Karpf, C., Ettrich, N., Haase, D., Weichel, T., Peetz, J.V., Steckel, B., Eulitz, K. and Ullrich, K., 2009, Coupled modelling of subsurface water flux for an integrated flood risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1277-1290.
- Sommer, T. and Ullrich, K., 2005, Influence of Flood Event 2002 on Groundwater. Environmental Office, City of Dresden, 68 p.
-
- 투 고 일 : 2013년 9월 24일
심 사 일 : 2013년 9월 26일
심사완료일 : 2014년 1월 20일