

## 판별분석을 이용한 수변지역의 지하수 홍수취약성 예측 모형 개발

김태형 · 이승현 · 김규범<sup>‡</sup>

한국수자원공사 K-water연구원

### 요 약

지하수 홍수란 수변 충적층 지역에서 지하수위의 상승시 지표 습윤화 또는 침수를 의미하는 것으로서, 지표 수 홍수 규모에도 영향을 미치게 된다. 지하수위 시계열 자료를 활용한 지하수 홍수취약성 지수로부터 홍수취약성을 3개(안전, 보통, 우려)의 그룹으로 분류하였으며, 대상 지점의 물리적 특성(지형, 토양, 지층 분포, 배수 특성 및 지하수위)과의 상관성을 토대로 판별분석에 의한 예측 모형을 개발하였다. 낙동강 본류 주변을 대상으로 모형을 적용한 결과, 총 61개 중 58개 관측 지점에서 지하수 홍수취약성의 당초 분류 그룹과 모형에 의한 예측 그룹이 일치하여 95.3%에 이르는 높은 적합성을 보였다. 또한, 성주군 신천-백천 유역에 모형을 적용한 결과, 지하수 홍수취약성 우려 지역으로 평가된 일부 지역은 실제로 토양 습윤화 및 침수가 존재하고 있어 지하수위 미세측 지역에서의 적용이 가능한 것으로 나타났다. 향후 하천 주변에 대한 지하수 홍수취약성 분포도가 개발된다면 지표수와 지하수를 연계한 보다 체계적인 홍수 관리가 가능할 것이다.

**주요어:** 지하수 홍수취약성, 지하수위, 판별분석, 수변 충적층

**Tae-Hyung Kim, Seung-Hyun Lee and Gyoo-Bum Kim, 2015, Prediction model for groundwater flooding vulnerability using discriminant analysis at riverside region. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 3, p. 313-325**

**ABSTRACT:** Soil wetting or inundation due to rising groundwater table can cause groundwater flooding in the riverside alluvium and also affect the scale of surface water flooding. Three groups (safe, intermediate, and vulnerable) are classified by using groundwater flooding vulnerability index (FVI) which is calculated using groundwater level's time series measured at each monitoring well. A prediction model for the classification is developed by using a discriminant analysis, based on the correlation between the original groups and physical features (topography, soil, sediment layer distribution, soil drainage, and groundwater level-related features). 58 sites out of 61 groundwater monitoring sites are determined to be equal to the original classification and the model accuracy becomes about 95.3%. Additionally, the result in the Sincheon-Baekcheon watershed indicates that soil wetting and inundation are actually exist at some predicted flooding vulnerable areas, therefore the model can be applicable at non-monitored area of groundwater levels. Groundwater flooding vulnerability map will enable a more systematic flood management based on the surface water and groundwater interaction.

**Key words:** Groundwater flooding vulnerability, Groundwater level, Discriminant analysis, Riverside alluvium

(Tae-Hyung Kim, Seung-Hyun Lee and Gyoo-Bum Kim, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Republic of Korea)

### 1. 서 언

하천과 지하수의 상호 작용은 수문 및 수질의 변화에서 관찰할 수 있는데, 하천 수위 상승이 주변 충적 분지에서의 지하수위 상승과 토양 습윤화를 유발

할 수 있다. 지하수 홍수(본 연구에서는 지하수위 변동에 의하여 발생하는 지표 습윤화 및 침수를 포괄적으로 포함)란 “자연 및 인위적인 요인으로 지하수위가 지표위로 상승하여 지표 침수를 발생시키는 경우” 또는 “자연 및 인위적인 요인으로 지하수위가

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-42-870-7600, E-mail: [gbkim@kwater.or.kr](mailto:gbkim@kwater.or.kr)

지표면에 가까이 상승하여 지하 침투 능력을 저하시켜 홍수 피해를 증가시키는 경우”로 정의할 수 있다 (MacDonald *et al.*, 2008). 지하수 홍수에 대한 연구는 유럽을 중심으로 1990년대 말부터 시작하였으며, 지하수 홍수 발생 매커니즘 분석, 피해 현황 조사 및 경보시스템 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 (Shlemon, 1995; Habets *et al.*, 2008, 2010; Adams *et al.*, 2010). 독일 드레스덴 지역에서는 하천변 충적 분지 일부 지점에서 지하수위가 지표하 1.5 m 정도에서 1년 이상 유지되는 현상이 나타나기도 하였으며 이와 같은 현상은 주택 기초 불안정 및 지하수의 하수도내 유입 등을 야기하기도 하였다(Kreibich *et al.*, 2009; Sommer *et al.*, 2009). 빙하퇴적물이 분포하는 미국 Illinois 주에서 2~3년간 지속된 호우에

의한 초과 강우량이 지하수위를 증가시켜 지하수 홍수를 야기 시켰으며(USGS, 2000), Ohio 주의 카르스트 지형을 갖는 Bellevue 지역은 4개월간 약 600 mm의 강우로 지표 유출수가 싱크홀로 유입되면서 주변 지역 지하수위 상승을 야기하여 홍수를 발생시킨 바 있다(Raab *et al.*, 2009). 또한, 인위적인 대규모 프로젝트에 의한 사례로서는, 오스트리아 Vienna 지역에서 1992년 Freudenau 수력발전소(보) 건설 이후 증가된 하천수위가 도시 지하수위를 상승시킬 것으로 우려하여 제방에 차수벽을 설치하고 지하수 양수-주입 시스템을 설치하여 지하수위를 조절한 사례가 있다(Dreher and Gunatilaka, 1996, 1998). 한편, 슬로바키아 Gabcikobo 수력발전소(보)의 상류는 보의 설치 이전 수 십 년간 과다한 지하수 양수로 지하수

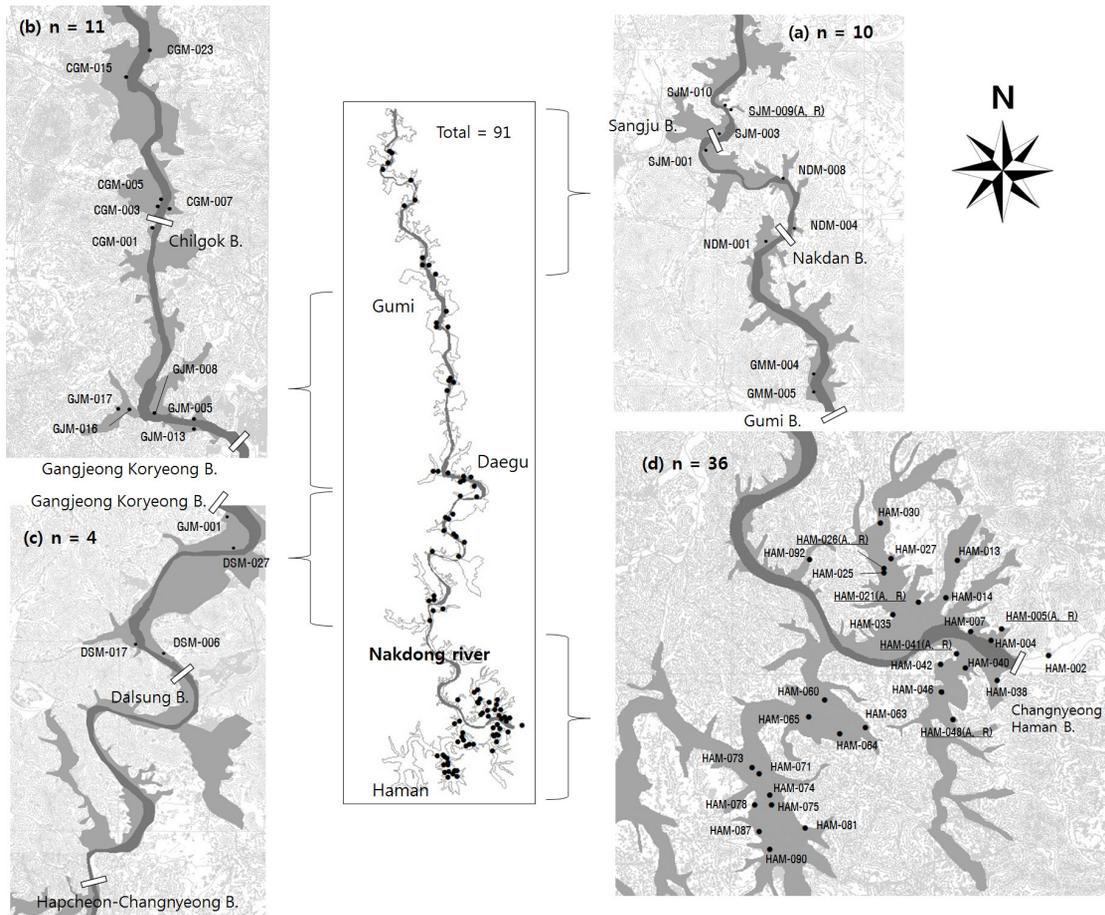


Fig. 1. Location of groundwater monitoring wells in the Nakdong watershed (n: number of monitoring wells, dark grey: Nakdong river, medium grey: alluvial deposits).

고같이 있었으나 보의 담수 이후 약 3년 이내에 1960년대 수준으로 지하수위가 회복되어 물 확보가 용이해 졌을 뿐 아니라 지하수내  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ 의 함량이 감소하는 등 수질 변화가 나타났다(Hlavatý *et al.*, 1999). 그러나, 상승된 지하수위는 지하수 홍수 우려가 발생할 수 있어 이에 대한 대책으로 다수의 수로(Seepage canal)를 다뉴브강 주변 충적분지에 건설하여 지하수위를 조절한 연구도 수행되었다(Mucha, 1999). 하천수위 상승은 산업화 이전 수준으로 지하수위를 회복시키는 긍정적인 역할을 하기도 하나, 반면에 일부 저지대의 경우에는 토양의 습윤화 등을 야기하기도 한다. 국내에서는 지하수 홍수취약성의 평가를 위하여 지하수위 관측점에서 취득된 지하수위 시계열 자료의 지하수위 상승 기울기와 최고 지하수위의 관계로부터 평가용 지수를 개발한 바 있다(Kim *et al.*, 2014).

본 연구는 지하수 관측 자료로부터 기 개발된 지하수 홍수취약성 지수와 관측지점의 지형, 토양 및 수리지질 특성과의 비교를 통하여 미세측 지역에서 취약성을 예측할 수 있는 추정 방법을 개발하고, 시범지역에 적용함으로써 그 적용성을 평가하는데 목적을 두었다.

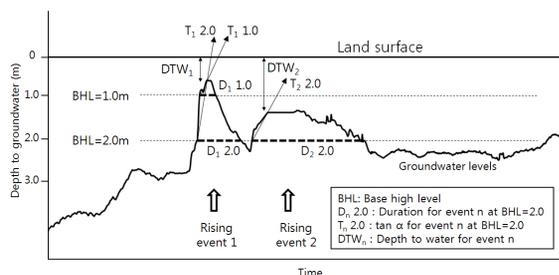
## 2. 연구 방법

본 분석을 위하여 낙동강 주변 충적분지에 설치된 91개 지하수 관측점 중 결측 및 이상 자료를 제외한 61개 관측점의 2년 동안의 지하수위 시계열 자료를 수집, 활용하였다(그림 1). Kim *et al.* (2014)는 지하수 관측점의 지하수위 시계열 자료로부터 지하수 홍수 강도(Groundwater flooding intensity, GFI)

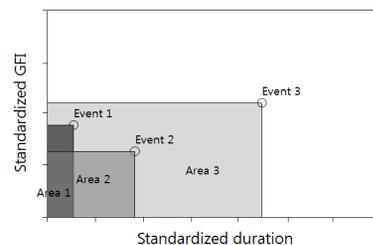
를 산정하였는데, 각 관측점의 지하수위 상승 이벤트마다 기저 고수위(Base high level; 지하수위 상승 이벤트의 시점을 결정하는 기준 수위)를 기준으로 하여 지하수위 상승 기울기( $\tan\alpha$ )와 최고 지하수위( $DTW_{min}$ )의 관계( $GFI = \frac{\tan\alpha}{DTW_{min}}$ )로부터 산정하였다(그림 2a). 그러나 지하수 홍수에 대한 피해는 높은 지하수위뿐 아니라 지속시간도 영향을 미치므로 각 지역의 지하수 홍수취약성은 지하수 홍수 강도 뿐 아니라 고수위의 유지기간(Duration)도 함께 고려되어야 한다. 따라서 아래 식으로부터 낙동강 유역 전체에 동일하게 적용할 수 있는 지하수 홍수취약성 지수(Groundwater flooding vulnerability index, FVI)를 개발하여 정량화된 평가기법을 도출한 바 있다(Kim *et al.*, 2014). 고수위 유지기간과 지하수 홍수강도의 척도가 동일하지 않기 때문에 이들을 표준화시킨 후 모든 이벤트별 면적을 구한 후 표본의 수로 나누어 최종적으로 각 관측점별 지하수 홍수취약성 지수를 산정하였다(그림 2b).

$$FVI = \frac{\sum_{i=1}^n Area_i}{n} \quad (1)$$

이상과 같이 각 관측지점에서 산정된 지하수 홍수취약성 지수가 주변 요인에 의하여 유의한 영향을 받는다면, 미세측 지역에서 적용할 수 있는 식을 개발할 수 있다. 이를 위하여 각 관측 지점의 수리특성에 영향을 미칠 수 있는 물리적 특성을 추출하고 지하수 홍수취약성 지수와와의 상관관계를 규명하는 것이 필요하다. 관측 지점의 물리적 특성인 지형, 토양,



(a) Groundwater flooding intensity



(b) Groundwater flooding vulnerability index

**Fig. 2.** (a) Concept for groundwater flooding intensity (GFI) and (b) flooding vulnerability index (FVI) calculated with groundwater monitoring data (from Kim *et al.*, 2014).

**Table 1.** Statistics of physical variables collected at each groundwater monitoring site.

	Variables	Mean	Minimum	Maximum	St. Deviation	Remark
Quantitative variables	Sediment thickness (m)	18.78	5.00	31.00	6.16	Var1
	Land surface elevation (a.m.s.l)	16.05	4.72	51.09	13.28	-
	Groundwater level (a.m.s.l.)	12.64	-0.08	46.93	12.46	-
	Distance to surface water body (m)	185.64	2.00	802.00	177.20	-
	Depth to groundwater (m)	4.43	1.26	10.63	2.13	-
	Difference between land elevation and river water level (m)	3.20	-0.63	11.32	2.32	Var2
	Difference between groundwater and river water level (m)	-0.21	-4.53	9.68	2.05	Var3
	Variables	Class	Description	Remark		
Qualitative variables	Class of soil drainage	Class 1 ~ Class 6	Class 1: very poorly drained, Class 2: poorly drained, Class 3: weakly poorly drained, Class 4: moderately well drained, Class 5: well drained, Class 6: excessively well drained	Var4		
	Soil texture of top soil	Class 2 ~ Class 8	Class 2: silty clay loam, Class 3: silty loam, Class 4: loam, Class 5: sandy loam, Class 6: fine sandy loam, Class 7: loamy sand, Class 8: loamy fine sand	Var5		
	Soil texture of subsoil	Class 1 ~ Class 6	Class 1: clayey, Class 2: fine loamy, Class 3: fine silty, Class 4: coarse silty, Class 5: coarse loamy, Class 6: sandy	Var6		
	Class of hydrologic soil feature	Type A ~ Type D	Definition: minimum rate of infiltration obtained for bare soil after prolonged wetting (Classified by the USDA (1955)). Infiltration rate : Type A > Type B > Type C > Type D	Var7		

Remark) Var 1 ~ Var 7 will become the input variables used for the equation (3) and (4). Soil classification is defined in <http://soil.rda.go.kr>.

지층 분포, 배수특성과 지하수위 등의 자료를 수집하였다(표 1). 한편, 이들 변수외에도 수리전도도, 투수량계수, 지층의 종류(점토, 실트, 모래, 자갈 등)별 두께 등도 일차적인 입력인자로 고려하였으나 미계측지역의 자료 취득 한계와 정확도 등을 고려하여 제외하였다.

지하수 홍수취약성과 관련이 있을 것으로 예상되는 변수는 양적 및 질적 변수 모두 해당될 수 있으므로 판별분석(Discriminant analysis)을 사용하여 추

정식을 고안하였다. 판별분석은 집단변수와 1개 이상의 독립변수를 이용하여 몇 개의 집단으로 분류하고자 하는 경우에 사용된다. 판별분석의 목적은 집단을 분류할 수 있는 판별식을 구하고, 이 판별식을 이용하여 새로운 집단으로 분류 및 예측하는데 있다. 이를 위해 2개 이상의 집단을 분류함에 있어 오류를 최소화할 수 있는 선형결합을 도출하는 것이 필요하고, 이 선형결합을 판별함수(Discriminant function)라고 한다(Kang and Kim, 2001). 판별함수는 다음

식으로 표현된다.

$$D = W_1X_1 + W_2X_2 + W_3X_3 \dots + W_iX_i \quad (2)$$

여기서,  $D$ 는 판별점수(Discriminant score),  $W_i$ 는  $i$ 번째의 독립변수의 판별가중치,  $X_i$ 는  $i$ 번째의 독립변수를 나타낸다. 판별분석은 독립변수들이 다변량 정규분포를 이루고, 또한 각 집단의 공분산 행렬이 동일하다는 가정하에 성립된다. 이러한 기본가

정을 만족한다면 판별분석의 절차는 ① 상관관계 및 기술통계량의 계산, ② 판별함수의 도출, ③ 판별함수의 타당성 검증, ④ 검증된 판별함수의 해석, ⑤ 판별함수를 이용한 예측 등으로 진행된다. 표 1에서 제시된 11개의 각 지하수 관측정별 특성을 토대로 지하수 홍수취약성 지수를 설명할 수 있는 입력 변수를 찾고 판별분석에 의한 정준 판별함수를 도출하여 최적 모형을 개발하였으며, 최종적으로 미세측 지역의 특성 자료를 본 모형에 입력하여 해당 지역의 지하수 홍수취약성을 평가하였다.

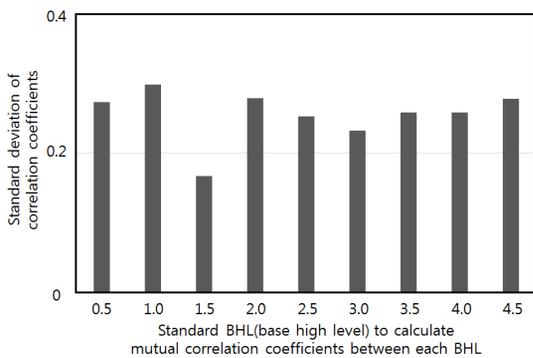


Fig. 3. Distribution of standard deviation of correlation coefficients for each base high level case.

### 3. 예측 모형 개발

#### 3.1 최적 기저고수위의 결정

기저고수위(Base high level; BHL, 그림 2a 참조)의 조건에 따라 지하수 홍수취약성 지수에 차이가 존재할 수 있으므로 최적의 기저고수위를 결정하는 것이 필요하다. 지표하 0.5 m부터 5.0 m까지 50 cm 간격으로 총 10개의 기저고수위 조건을 대상으로 지하수 홍수취약성 지수를 산정하였으며, 기저고수위 별로 산정된 지하수 홍수취약성 지수들간의 상관관계의 편차를 파악한 결과, 기저고수위가 1.5 m 인 경

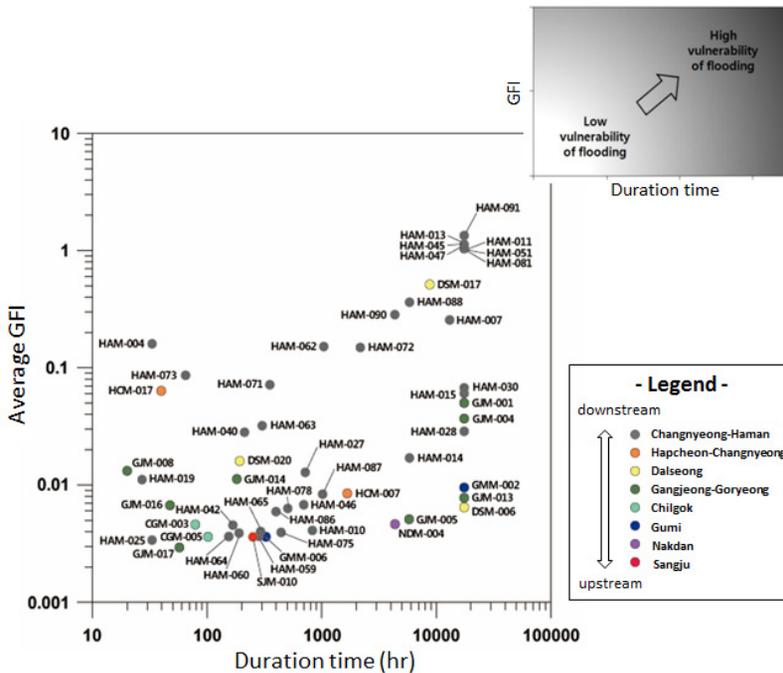


Fig. 4. Plot of the relationship between average groundwater flooding intensity and duration for each monitoring well.

우 0.17, 3.0 m인 경우에 0.23으로서 낮게 나타나 대표성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다(그림 3). 그러나 기저고수위 1.5 m인 경우는 지하수위가 기저고수위보다 낮게 존재하는 경우가 전체 관측점의 약 60%에 달하여 과다 산정되거나 계산이 무의미해져서 기준 수위로서의 역할을 담당하지 못하기 때문에 본 연구에서는 3.0 m를 대표 기저고수위로 설정하였다. 지표의 침수 현상과 농작물 피해 등이 지표 농작물의 생육에 지장을 초래할 수 있는 심도(RDA, 2014; 일반적으로 과수는 1.0 m 이상, 수박은 최대 2.0 m 정도의 유효토심이 필요함)와 토양내에서의 모세관 현상에 의한 상승효과(Duke, 1972) 등에 의하여 지배받을 수 있다는 점을 고려한다면 지하수 홍수취약성을 평가하는 현실성 있는 심도 기준으로 기저고수위 3.0 m 조건이 적절한 것으로 판단하였다.

3.2 지하수 홍수취약성 지수의 분포 특성

낙동강 주변 충적층에 설치된 지하수 관측 지점의 지하수위 시계열 자료를 토대로 지하수 홍수 강도를 산정하고 기저고수위 3 m의 경우에 해당하는 고수위 유지기간을 log-log 그래프에 도시하였는데(그림 4), 우상단으로 위치할수록 지하수 홍수에 취약한 것을 의미한다. 전반적으로는 낙동강 하류로 가면서 우상단에 위치하는 경우가 많아지는 경향을 보이고 있으나, 지하수위 분포를 지배하는 지형이나 분지의 형태 등에 따라 다양한 분포를 보인다. 하류지역(그림 1d 지역)의 경우는 지하수 홍수 강도가 매우 다양하게 나타나는데 이는 충적 분지의 발달 특성과 관련이 있다. 즉, 수지상 지류가 분포하는 경우에는 지형 표고 차이가 크지 않은 넓은 충적 분지(지점별로 지하수위가 비교적 일정함)가 발달하며, 낙동강과 평행한 방향으로 장방형의 하천변 퇴적 분지(지점별로 지하수위가 차이를 보이기도 함)가 분포하는 등 다양한 형태의 지류가 발달한다. 이와 같은 다양한 지형적 특성은 지하수위 분포 및 지하수 홍수 강도의 다양성을 보이게 한다. 기저고수위의 경우에도 충적 분지의 형태, 낙동강 본류 수위와의 관계 등에 의하여 결정될 수 있는데, 일반적으로 낙동강 본류에 인접한 큰 분지에서는 낮은 지대를 형성하며 하천수와 연계된 지하수위가 장기간 얕게 유지될 수 있으나, 원거리에 위치하거나 근거리에 산지 지형이 있는 경우에는 지하수 심도가 상대적

으로 깊어 기저고수위 유지 기간이 짧게 나타날 수 있다.

3.3 추정 모형의 개발

지하수 홍수취약성 지수를 판별 분석의 집단 변수로 활용하기 위하여, 값의 분포를 토대로 3가지 그룹으로 구분하였다(그림 5). 지하수 홍수취약성 지수에 대해 백분위수를 구한 후 50 분위수( $Q_2$ ) 이하인 수치는 1(안전)로, 50 분위수에서 75 분위수( $Q_3$ ) 미만인 수치는 2(보통)로, 75 분위수 이상인 수치는 3(우려)으로 등급을 부여하였다. 등급 분류가 실제

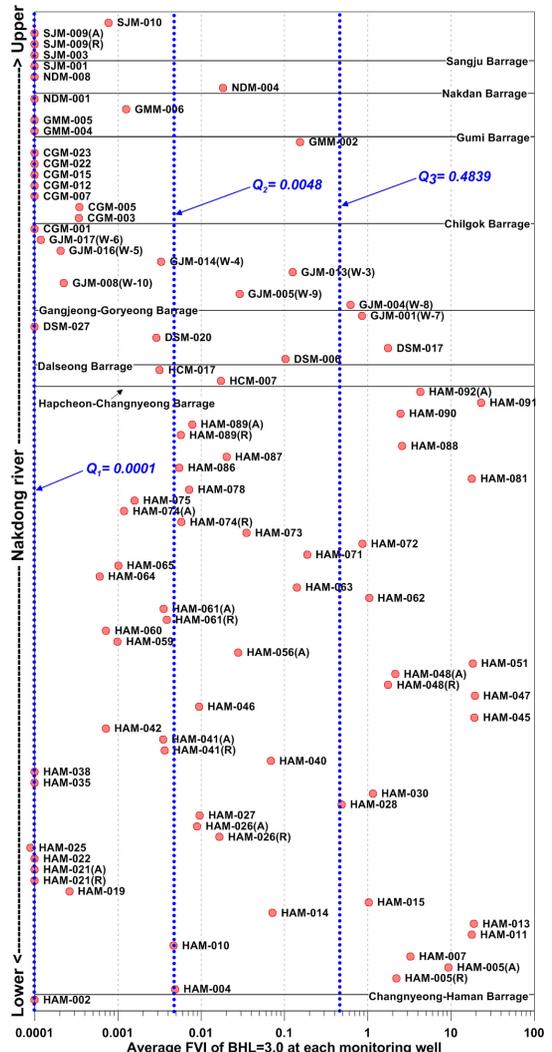


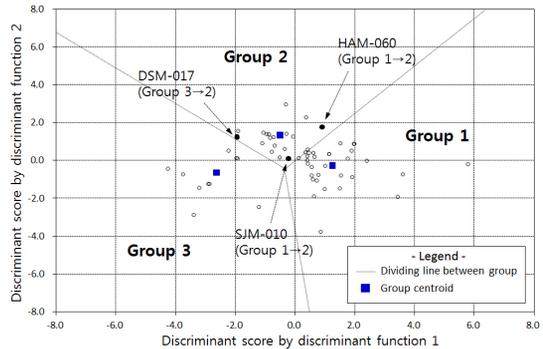
Fig. 5. Distribution of ground water flooding vulnerability index for each monitoring site along the Nakdong river.

**Table 2.** Statistic results of discriminant analysis.

Mode	Discriminant function	Percent of eigenvalue	Canonical correlation (R)	Wilks' lambda	Chi-square	p-level
Standard	DF1	81.2	0.847	0.178	94.928	0.000
	DF2	18.8	0.608	0.630	25.427	0.000

현장의 상태를 반영하는지 여부를 파악하기 위하여 수 차례 실시한 현장 답사 자료와 비교하였다. 우려 등급에 해당하는 지점은 주변에 습지가 존재하거나 저지대인 경우로서 지난 수 십 년간 상습 침수 지역인 경우가 포함되며(MOLIT, 2015), 보통 등급 중에서도 지하수 홍수취약성 지수가 큰 경우는 지표 습윤화에 대한 민원 발생 사례가 있다. 지하수 홍수취약성 지수의 분포를 보면, 낙동강 하류 지역에서 높고 상류로 가면서 줄어드는 경향을 보이는데, 이는 하류로 가면서 넓은 충적 분지와 저지대가 발달하며 지하수 흐름이 느린 것이 영향을 미치는 것으로 보인다. 이와 같은 지형 및 수리지질학적인 특성은 낙동강 중하류 지역에 다수의 습지를 발달시키는 요인으로 작용하기도 한다. 습지는 연안형(coastal), 호수형(lacustrine), 소택형(palustrine), 하천형(riverine) 및 인공형(man-made) 등으로 분류되는데, 낙동강 유역의 습지는 약 407개소로서, 이 중에서 대구/경북 지역에 185개소, 경남지역에는 213개소가 발달하고 있는데, 낙동강 유역의 습지는 하천 주변 충적 분지에 발달한 하천형 습지가 대부분이며 소택형과 호수형 습지가 일부 분포한다(Rho, 2013). 특히, 본 연구의 분석 대상 지역 중에서는 함안군 및 주변지역과 칠곡군 지역 등에서 하천형 습지가 잘 발달하는데, 우려 등급에 해당하는 관측 지점들이 이들 지역에 다수 분포하고 있다.

상기 지하수 홍수취약성 지수에 대한 3개의 집단 변수(안전, 보통, 우려)를 이용해 표 1에서 제시한 수리지질학적 인자들 중 판별분석에 유의한 인자들을 선별한 결과, 충적층의 두께(Var1), 표고와 하천수위의 차이(Var2), 지하수위와 하천수위의 차이(Var3), 배수등급(Var4), 표토토성(Var5), 심토토성(Var6), 수문학적 토양균(Var7)이 적합한 것으로 나타났다. 나머지 지형표고 등 4개 인자는 F통계량의 유의확률이 0.05를 초과하여 판별분석에 적합하지 않아 제외하였다. 이들 7개 독립변수에 대한 히스토그램 작도와



**Fig. 6.** Three groups of groundwater monitoring wells classified by two discriminant functions.

왜도 통계량 산정을 통하여 분포형태를 파악하였다. 히스토그램에서 각 독립변수들은 정규분포에 근사하게 나타나며, 왜도의 절대값이 0에 근접한 값을 보인다. 다만, 표토토성(왜도: 0.831)과 수문학적 토양균(왜도: 0.577)은 양의 왜도 분포를 갖고 있으나 이들 변수를 포함하는 경우가 제외한 경우보다 모형의 적합도에서 우수한 것으로 나타나 입력 변수로 모두 사용하였다.

주어진 입력 변수를 모두 이용하는 표준분석(Standard mode) 방법을 적용하여 판별함수를 도출하였다. 집단 변수와 7개 독립변수간의 선형적인 연관성 분석에서는 독립변수들 모두가 F 통계량의 유의확률이 0.05를 초과하지 않아 판별식이 유의한 것으로 나타났다. 최종적으로 2개의 판별함수가 도출되었는데, 각 함수별로 산정된 고유값(Eigenvalue)의 비율은 판별함수의 상대적인 기여도를 의미하는 것으로서, 판별함수 1에 의한 설명력이 81.2%, 판별함수 2에 의하여 18.8%로 나타났다(표 2). 또한, 판별함수의 우수성을 나타내는 정준상관관계(Canonical correlation)의 값은 각 판별식에 대하여 0.847과 0.608로 높게 나타났다. 최종적으로 지하수 홍수취약성을 평가하기 위한 비표준화된 판별함수는 다음과 같이 도출되었다.

**Table 3.** Comparison of original and estimated groups for each monitoring well.

Wells	FVI for BHL =3.0 m	Original group	Estimated group	Sediment thickness (m)	Input variables					
					Difference between land elevation and river level (m)	Difference between groundwater and river water level (m)	Class of soil drainage	Soil texture of top soil	Soil texture of sub soil	Class of hydrologic soil feature
HAM-002	0.0001	1	1	20.0	9.58	-0.84	4	5	5	2
HAM-004	0.0048	1	1	25.0	7.03	0.06	4	5	5	2
HAM-005 (a)	2.2063	3	3	10.0	2.45	1.26	3	3	3	1
HAM-005 (b)	9.3432	3	3	10.0	2.45	1.30	3	3	3	1
HAM-007	3.2655	3	3	5.0	3.65	0.75	5	4	2	2
HAM-013	18.9308	3	3	10.0	5.36	4.44	4	4	2	1
HAM-014	0.0720	2	2	20.0	0.09	-1.62	3	3	3	1
HAM-021 (a)	0.0001	1	1	25.0	1.03	-4.51	3	3	3	1
HAM-021 (b)	0.0001	1	1	25.0	1.03	-4.53	3	3	3	1
HAM-025	0.0001	1	1	24.0	2.25	-1.95	3	3	3	1
HAM-026 (a)	0.0166	2	2	25.0	1.14	-0.85	3	3	3	1
HAM-026 (b)	0.0089	2	2	25.0	1.14	-0.93	3	3	3	1
HAM-027	0.0096	2	2	23.0	0.45	-1.12	4	6	5	1
HAM-030	1.1486	3	3	18.0	4.56	3.87	1	3	5	1
HAM-035	0.0001	1	1	24.0	0.70	-4.22	3	3	3	1
HAM-038	0.0001	1	1	15.0	5.48	0.22	5	4	2	1
HAM-040	0.0683	2	2	20.0	2.85	0.07	4	3	3	3
HAM-041 (a)	0.0036	1	1	27.5	5.05	0.15	4	6	5	1
HAM-041 (b)	0.0035	1	1	27.5	5.05	0.16	4	6	5	1
HAM-042	0.0007	1	1	15.0	3.10	-1.36	4	6	5	1
HAM-046	0.0094	2	2	20.0	1.74	-0.79	4	3	3	1
HAM-048 (a)	1.7629	3	3	20.0	0.53	0.31	4	3	1	1
HAM-048 (b)	2.1428	3	3	20.0	0.53	0.27	4	3	1	1
HAM-060	0.0007	1	2 <sup>*)</sup>	25.5	3.05	-1.57	4	3	3	3
HAM-063	0.1409	2	2	30.0	1.41	-0.80	4	3	3	1
HAM-064	0.0006	1	1	30.0	3.35	-0.20	4	3	1	1
HAM-065	0.0010	1	1	31.0	5.05	0.82	4	3	1	1
HAM-071	0.1869	2	2	20.0	2.03	-1.21	3	3	3	1
HAM-073	0.0351	2	2	28.0	3.04	-0.76	4	3	3	3
HAM-074	0.0012	1	1	16.0	2.02	-2.60	4	3	3	1
HAM-075	0.0016	1	1	15.0	2.66	-2.01	4	3	3	1
HAM-078	0.0072	2	2	20.0	0.56	-2.29	3	3	3	1

Table 3. continued.

Wells	FVI for BHL =3.0 m	Original group	Estimated group	Sediment thickness (m)	Input variables					
					Difference between land elevation and river level (m)	Difference between groundwater and river water level (m)	Class of soil drainage	Soil texture of top soil	Soil texture of sub soil	Class of hydrologic soil feature
HAM-081	17.8283	3	3	10.0	0.74	-0.04	3	3	3	1
HAM-087	0.0201	2	2	19.0	0.73	-1.72	3	3	3	1
HAM-090	2.4804	3	3	19.0	1.42	0.48	3	3	3	1
HAM-092	4.2861	3	3	10.0	1.39	1.73	3	3	3	1
DSM-006	0.1029	2	2	20.0	5.23	3.11	5	3	3	3
DSM-017	1.7562	3	2 <sup>*)</sup>	18.0	2.51	1.08	4	3	3	3
DSM-027	0.0001	1	1	20.5	6.39	0.30	4	5	5	2
GJM-001	0.8504	3	3	16.2	7.14	5.97	4	6	5	1
GJM-005	0.0288	2	2	17.5	4.00	1.51	5	6	5	4
GJM-008	0.0002	1	1	19.5	6.05	1.51	5	6	5	4
GJM-013	0.1250	2	2	15.0	-0.34	-1.89	4	3	3	3
GJM-016	0.0002	1	1	12.5	0.72	-3.32	4	3	3	3
GJM-017	0.0001	1	1	11.0	1.93	-3.11	6	8	6	4
CGM-001	0.0001	1	1	6.0	7.01	-0.07	6	6	6	4
CGM-003	0.0003	1	1	6.0	1.38	-1.51	6	8	6	4
CGM-005	0.0003	1	1	6.0	2.73	-0.69	6	8	6	4
CGM-007	0.0001	1	1	6.0	4.19	-1.00	6	8	6	4
CGM-015	0.0001	1	1	21.0	5.32	-0.56	3	3	3	1
CGM-023	0.0001	1	1	18.0	6.80	0.28	3	4	2	1
GMM-004	0.0001	1	1	21.0	5.67	0.44	6	8	6	4
GMM-005	0.0001	1	1	19.0	4.26	-0.46	4	6	5	1
NDM-001	0.0001	1	1	23.0	8.83	-0.55	5	6	5	4
NDM-004	0.0183	2	2	19.0	3.02	0.26	5	6	5	4
NDM-008	0.0001	1	1	16.2	6.86	-0.11	5	6	5	4
SJM-001	0.0001	1	1	18.0	6.50	-4.45	6	7	6	4
SJM-003	0.0001	1	1	13.8	2.53	-1.23	5	6	5	4
SJM-009 (a)	0.0001	1	1	12.0	4.09	-0.82	5	2	2	3
SJM-009 (b)	0.0001	1	1	12.0	4.09	-1.18	5	4	2	4
SJM-010	0.0008	1	2 <sup>*)</sup>	12.0	2.96	-0.07	5	6	5	4

Remark) (a) bedrock monitoring well, (b) alluvial monitoring well, <sup>\*)</sup> different discrimination.

$$DF 1 = 0.056 \times Var1 + 0.479 \times Var2 - 0.809 \times Var3 + 0.260 \times Var4 + 0.283 \times Var5 - 0.114 \times Var6 + 0.024 \times Var7 - 4.889 \quad (3)$$

$$DF 2 = 0.160 \times Var1 - 0.430 \times Var2 + 0.156 \times Var3 + 0.889 \times Var4 - 0.869 \times Var5 + 0.900 \times Var6 + 0.166 \times Var7 - 4.920 \quad (4)$$

이상 2개의 판별식을 활용하여 각 관측정별 입력 변수에 대한 판별점수를 양 축에 도시하여 3개의 그룹으로 분류하였다(그림 6). 그룹 1은 지하수 홍수취약성 지수 분류상 안전에 해당하며, 그룹 2는 보통, 그룹 3은 우려에 상응하는 영역이다. 지하수 홍수취약성 지수가 우려 등급에 해당하였던 12개 지하수 관측정 중에서 1개(DSM-017)를 제외한 11개 관측정이

그룹 3으로 분류되어 91.7%의 정확성을 보였으며, 보통 등급에 해당하였던 15개 관측정은 100%의 정확성, 안전 등급에 해당하였던 34개 관측정은 32개가 그룹 1로 분류되고 2개(HAM-060, SJM-010)가 그룹 2로 분류되어 94.1%의 정확성을 보여 주었다(표 3). 전체적으로는 95.3%의 정확성을 보여주어 판별식의 적용성이 매우 높은 것으로 나타났다. 이들 상이한 그룹을 보인 3개 지하수 관측 지점은 그룹의 중심점(그룹 1: DF1 = 1.251, DF2 = -0.286; 그룹 2: DF1 = -0.680, DF2 = 1.268; 그룹 3: DF1 = -2.694, DF2 = -0.775)에서 비교적 원거리인 경계부에 위치함을 알 수 있다. 그룹 3에서 그룹 2로 오분류된 DSM-017은 그룹 3의 평균(13.9 m)과 비교하여 층적층이 두껍고(18.0 m), 지하수위와 하천수위의 차

이가 1.08 m로 작으며(평균 1.8 m), 배수가 상대적으로 불량하고 물의 침투능이 비교적 큰 특성을 보인다. 그룹 1에서 그룹 2로 오분류된 HAM-060은 그룹 1의 평균(18.2 m)과 비교하여 층적층이 두껍고(25.5 m), 표토와 심토가 조립질이며, 물의 침투성이 큰 특성을 보인다. SJM-010은 그룹 1의 평균(-1.1 m)과 비교하여 지하수위와 하천수위의 차이가 작고(-0.07 m), 배수가 불량하며, 표토와 심토가 세립질이고, 물의 침투능이 큰 특성을 보인다.

4. 모형의 적용성 평가

상기 판별함수의 적합성을 평가하기 위하여, 낙동강 중류 성주군의 신천-백천 유역내 층적 분지를

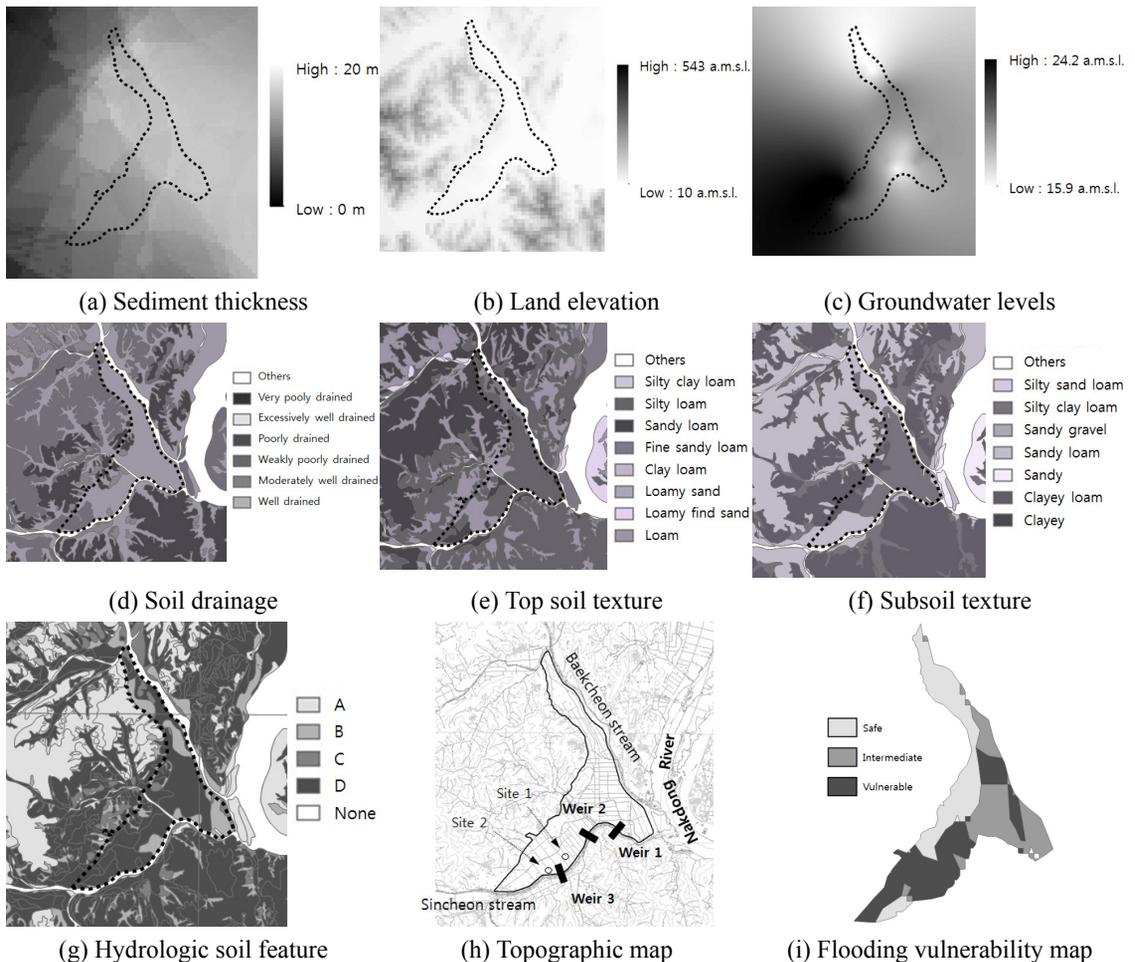


Fig. 7. Application of groundwater flooding vulnerability model at the Sincheon-Baekcheon watershed.

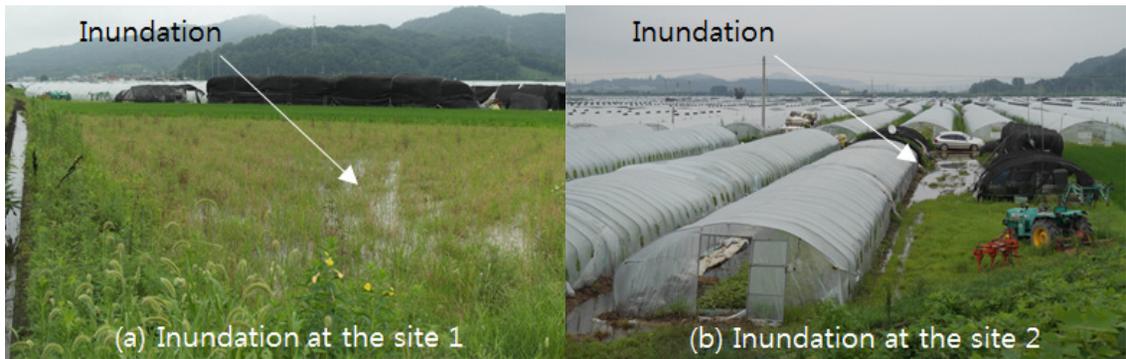


Fig. 8. Inundation examples at (a) a rice field and (b) a greenhouse near the weir 3 in Sincheon stream (see the figure 7h).

대상으로 상기 판별함수를 활용한 지하수 홍수취약성 분포도를 작성하였다(그림 7). 판별식의 입력 변수인 층적층의 두께, 지형표고, 지하수위, 표토토성, 심토토성, 배수등급 및 수문학적 토양군 등의 자료를 취득하였다. 토양 특성 자료는 국립농업과학원에서 제공받은 1:25,000 축척의 주제별(침식등급, 지형, 배수등급, 모암, 경사, 유효토심, 표토토성, 심토토성, 토양통) 지도를 사용하였으며, 수문학적 토양군은 Jung *et al.* (2006)이 제시한 토양통을 활용하여 분류된 결과를 적용하였다. 층적층의 두께는 과거 낙동강 주변에서 수행되었던 1,405개 시추자료를 토대로 크리깅 기법을 적용하여 추정하였다(K-water, 1996, 2011; Lee *et al.*, 2014). 지형 분포는 1:25,000 축척의 수치 지형도를 Arcview GIS 3.3에서 등고선 및 표고점 레이어를 추출하여 TIN을 생성한 후 레스터 파일로 변환하여 적용하였으며, 지하수위 분포는 2012년 11월에 측정한 총 32개의 지하수위 자료를 토대로 크리깅 기법으로 추정하였다.

본 지역 내 동측은 낙동강과 직접 접하며 범람에 의한 퇴적 분지의 형상을 보이는 반면에 서측은 상류에서 발원한 하천 퇴적물이 경사가 완만해 지면서 선상지 형태의 퇴적을 보이고 있다(그림 7a, 7b). 수문학적으로는 동측이 2개의 지류 하천과 낙동강 본류에 의하여 둘러싸여 있고 지류에 보가 없는 반면에 서측은 신천이 흐르고 3개의 보가 위치하고 있다(그림 7h). 동측의 층적층은 점토 내지 모래가 주로 분포하고 평균 두께는 17.7 m이나, 서측은 실트질 모래 내지 자갈이 분포하며 평균 두께는 4.7 m의 특성을 갖는다(Cha *et al.*, 2015).

지하수 홍수취약성 분포도에서 보듯이, 서측 지

역 상당 부분과 동측 지역의 중앙 일부가 지하수 홍수에 취약한 것으로 나타났는데, 안전 그룹으로 분류되는 지역은 전체 면적의 34%, 보통은 28%, 우려는 38%로 예측되었다(그림 7i). 이와 같이 서측에서 높은 취약성을 보이는 것은 서측의 세립질 퇴적양상, 배출되는 하천까지의 원거리 특성, 저지대의 넓은 분포 및 신천에 설치된 보의 영향이 작용하는 것으로 보인다. 특히, 신천에 설치된 3개의 소규모 보는 상류 하천수위를 높게 유지시켜 주변 지하수위도 높게 되는데, 실제 현장 조사에 의하면 신천에 인접한 일부 지점에서는 호우시 상승 침수가 발생할 뿐 아니라 무강우시에도 지표 습윤화 또는 부분 침수가 존재하는 것으로 파악되었다(그림 8).

### 5. 결 언

하천 수위 변동과 연계되는 지하수위의 강하 및 상승은 농업용수원의 부족, 토지의 습윤화 및 침수 등의 문제를 발생시키는데 상호 변동 특성을 정확히 파악한다면 각종 재난을 방지하고 보다 안정적인 토지 활용이 가능할 것이다. 일반적으로 우리나라 대하천 주변은 과거 홍수 범람에 의하여 넓은 층적 분지가 형성되어 있고, 호우시에는 급격한 하천수위 상승으로 배수 불량에 의한 침수의 흔적이 존재하기도 한다.

본 연구에서는 낙동강 본류 주변의 장기간의 지하수위 변동 자료와 관측 지점의 물리적 특성(지형, 토양, 지층 분포, 배수특성 및 지하수 특성)을 이용하여 지하수위 상승에 의하여 발생하는 홍수 가능성을 평가 하였다. 이를 위하여 61개 지하수 자동 관측

지점의 지하수위 시계열 자료를 토대로 지하수 홍수 취약성 지수를 산정하였으며, 실제 현장의 침수 특성을 토대로 안전, 보통 및 우려 등 3개 그룹으로 분류하였다. 분류 결과에 영향을 미칠 수 있는 관측 지점의 물리적 특성을 활용하여 판별분석을 수행한 결과, 61개의 관측점 중에서 58개 관측점이 원래 분류 결과와 동일하게 분류되어 95.3%의 높은 적합도를 보여주었다. 이와 같은 결과는 지하수위 계측이 이루어지지 않는 낙동강 주변의 수변 충적 분지에서도 기 보유하고 있는 물리적 특성 자료를 활용한다면 지하수 홍수취약성 평가가 가능함을 보여주며, 이로부터 지하수 홍수취약성 지수 분포도를 작성한다면 호우 시 또는 하천수위 상승 시 침수에 대비할 수 있는 정보를 제공할 수 있을 것이다. 향후 댐 및 보 운영에 의한 하천수의 수문 특성과 본 연구에서 검토된 수변 충적 분지에서의 지하수 홍수 특성을 종합적으로 연계 분석한다면 보다 정확한 홍수 예측 및 관리가 가능할 것으로 본다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Adams, B., Bloomfield, J.P., Gallagher, A.J., Jackson, C.R., Rutter, H.K. and Williams, A.T., 2010, An early warning system for groundwater flooding in the Chalk. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43, 185-193.
- Cha, E.J., Lee, S.H. and Kim, G.B., 2015, Changes in shallow groundwater levels and hydrochemistry according to depositional environment, river water level and groundwater pumping in the riversides. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(1), 67-80 (in Korean with English abstract).
- Dreher, J. and Gunatilaka, A., 1996, Groundwater management in the city of Vienna: Modelling, testing & monitoring for hydro power plants-II. *International Journal of Hydro Power and Dams*, 2, 545-554.
- Dreher, J. and Gunatilaka, A., 1998, Groundwater management system in Vienna - an evaluation after three years of operation. In: *Artificial Recharge of Groundwater* (Ed. J. Peters *et al.*), Amsterdam, Balkema, 167-172.
- Duke, H.R., 1972, Capillary properties of soils-influence upon specific yield. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 15(4), 688-691.
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Seguí, P., Rousset-Regimbeau, F. and Viennot, P., 2008, The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research*, 113, D06113, doi:10.1029/2007JD008548.
- Habets, F., Gascoin, S., Korkmaz, S., Thiéry, D., Zribi, M., Amraoui, N., Carli, M., Ducharne, A., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Noilhan, J., Otte, 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.
- Hlavatý, Z., Banský, L., Rodák, D. and Kučárová, K., 1999, Surface Water, Groundwater and Soil Moisture Regime, in Gabčíkovo Part of the Hydroelectric Power Project Environmental Impact Review. Faculty of Natural Sciences, Comenius University, Bratislava, Slovakia.
- Jung, K.H., Jung, S.J., Sonn, Y.K. and Hong, S.Y., 2006, Classification of hydrologic soil group of Korea soils. *Agro-environment Research 2006*, National Academy of Agricultural Science, 1029 p (in Korean with English abstract).
- Kang, B.S. and Kim, G.S., 2001, *Statistical Analysis for Social Science*. Datasolution Inc., Seoul, 522 p.
- Kim, G.B., Cha, E.J. and Shin, K.H., 2014, Development and applicability of flood vulnerability index using groundwater levels. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50(2), 257-268 (in Korean with English abstract).
- 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.
- K-water, 1996, Report on the Groundwater Survey for the Alluvial Regions in Korea. Daejeon, 46-65 (in Korean).
- K-water, 2011, Establishment of Sustainable Groundwater System and Its Merchandising. 21st Century Frontier R&D Program, Seoul, 1054 p (in Korean).
- Lee, S.H., Kim, G.B., Jeong, H.G. and Son, Y.C., 2014, Characteristics of alluvial deposits along the Nakdong River. *Proceedings of Spring Meeting of Korea Society of Engineering Geology*, 25-28 (in Korean).

- 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.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2015, WAMIS website, [http://www.wamis.go.kr/WKF/wkf\\_oflwaa\\_1st.aspx](http://www.wamis.go.kr/WKF/wkf_oflwaa_1st.aspx).
- Mucha, I., 1999, Plenipotentiary of the Slovak Republic for Construction and Operation of Gabčíkovo-Nagymaros Hydropower Scheme; Gabčíkovo Part of the Hydroelectric Power Project Environmental Impact Review. Ground Water Consulting Ltd., Bratislava, Slovakia, 399 p.
- Raab, J., Haiker, B., Jones, W., Angle, M., Pavay, 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.
- RDA (Rural Development Administration), 2014, <http://soil.rda.go.kr>.
- Rho, B., 2013, Development for wetland network model in Nakdong basin using a graph theory. *Journal of Wetlands Research*, 15(3), 397-406 (in Korean with English abstract).
- Shlemon, R.J., 1995, Groundwater rise and hydrocollapse: Technical and political implications of "Special Geologic Report Zones" in riverside county, California, USA. Proceedings of the Fifth Symposium on Land Subsidence, IAHS Publ. no. 234, The Hague.
- Sommer, T., Karpf, C., Etrich, 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.
- USDA (US Department of Agriculture), 1955, Yearbook of Agriculture. Washington, D.C.
- USGS (US Geological Survey), 2000, Groundwater Flooding in Glacial Terrain of Southern Puget Sound, Washington. WA, 5 p.

---

Received : April 14, 2015

Revised : May 19, 2015

Accepted : May 19, 2015