



## Assessment of the vulnerability of groundwater level management in Nakdong river basin

Yang, Jeong-Seok<sup>a\*</sup> · Lee, Jae-Beom<sup>a</sup> · Kim, Il-Hwan<sup>a</sup>

<sup>a</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University

Paper number: 17-064

Received: 14 August 2017; Revised: 16 October 2017; Accepted: 16 October 2017

### Abstract

Groundwater management vulnerability was assessed using TOPSIS (Techniques for Order Performance by Similarity to Ideal Solution) for 21 administrative districts in Nakdong river basin. Ten indicators were selected for 21 administrative districts in the Nakdong river basin by collecting natural, human, and social data sets. The selected indicators were standardized using rescale method, and each indicator was weighted by considering the questionnaire of expert group. The results of the weights determination survey showed that the annual average groundwater level index was 0.157 and this is the highest value. The annual average precipitation index was 0.154 and the annual groundwater recharge index was 0.152. The lowest weighted index was 0.043 for population density. Finally, the result of assessment of groundwater management vulnerability showed that Sangju-si was the most vulnerable to groundwater management among 21 administrative districts in Nakdong river basin because the annual average precipitation, annual average groundwater recharge, and annual average groundwater use indicators were highly vulnerable. The second and the third vulnerable regions were Yecheon-gun and Haman-gun respectively. The assessment of groundwater management vulnerability for the five major river basins in Korea can be a essential basis for the establishment of groundwater management policy.

**Keywords:** Groundwater level, TOPSIS, Vulnerability assessment, Nakdong river basin

## 낙동강 유역 지하수위 관리 취약성 평가

양정석<sup>a\*</sup> · 이재범<sup>a</sup> · 김일환<sup>a</sup>

<sup>a</sup>국민대학교 건설시스템공학부

### 요 지

TOPSIS (Techniques for Order Performance by Similarity to Ideal Solution)를 이용하여 낙동강 유역의 21개 시·군을 대상으로 지하수위 관리 취약성을 평가하였다. 낙동강 유역 21개 시·군을 대상으로 자연, 인문, 사회적 자료를 수집하여 10개의 지표를 선정하였다. 선정된 지표를 스케일 재조정법을 이용하여 표준화 하고, 전문가 집단의 설문을 반영하여 각 지표에 가중치를 부여하였다. 가중치 산정 설문 결과 연평균 지하수위 지표가 0.157으로 가장 큰 가중치를 받았으며, 연평균 강수량 지표가 0.154, 연도별 지하수함양량 지표가 0.152로 얻어졌다. 가장 적은 가중치를 얻은 지표는 인구 밀도로 0.043의 가중치를 얻었다. 최종적으로 지하수위 관리 취약성 평가 결과, 상주가 연평균 강수량, 연평균 지하수 함양량, 연평균 지하수 이용량 지표에서 높은 순위의 취약성을 보여 낙동강 유역 21개 시·군 단위 행정구역 중 가장 취약한 것으로 결과가 나타났다. 그 뒤로 예천군, 함안군의 순으로 취약성이 높게 나타났다. 향후 한국의 5대강 유역 지하수위 관리 취약성 평가는 전국 지하수위 관리 정책 수립에 필수적이라고 판단된다.

**핵심용어:** 지하수위, TOPSIS, 취약성 평가, 낙동강 유역

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-910-4289  
E-mail: jyang@kookmin.ac.kr (J.-S. Yang)

## 1. 서론

최근 기후변화에 따라 가뭄과 홍수에 대한 피해가 점차 증가하고 있다. IPCC (2013)은 우리나라가 포함된 중위도 지역의 건기와 우기의 강우편차가 증가하고, 지표온도의 상승에 따라 극한강우사상이 더 빈번하게 발생할 것을 경고 하였다. IPCC (2007)에서는 기후변화 취약성은 유역의 자연재해 등에 대응하는 능력을 평가하는 것으로 정의했는데, 취약성이란 일반적으로 재해로 인해 발생할지 모르는 잠재적 피해량을 의미한다. Chung *et al.* (2010)은 홍수, 가뭄, 물 관리 등 수자원 분야의 기후변화에 대한 취약성 평가를 전국적 및 지역단위에 따라 다른 기준 적용이 필요하며 평가 규모별 적정 유역의 크기를 제시하였다. Yang *et al.* (2012)은 금강 및 낙동강 유역 10개 지점에 대하여 가뭄 취약성 지표를 선정하고 경향성 검정을 이용한 가뭄취약성 지수를 개발하였다. Yang and Kim (2013)은 Delphi 기법과 자료의 경향성 검정을 이용하여 기후변화를 고려한 낙동강 유역의 가뭄취약성 지수를 개발했다.

이러한 상황에서 지하수는 지표수에 비해 오염에 대한 위험이 적고 각종 용수로의 생산 단가가 높지 않아 지표수보다 안정적인 수원으로서의 관심이 증대되고 있다. 기후변화로 인한 가뭄과 환경오염 등의 외부적인 문제가 심화되고 있는 현 상황에서 안정적이고 지속가능한 수자원에 대한 수요는 계속해서 증가하고 있다(Chenini *et al.*, 2015). 기존에 많이 이용되었던 수원인 하천, 저수지 등과 같은 형태의 지표수는 가뭄으로 인한 수위 저하로 수량, 수질 측면에서 수원으로서 안정적인 역할을 다하지 못하고 있다. 높아지는 관심과 함께 지하수의 무분별한 사용이 증가하고 있다. 가뭄과 같은 자연적인 요인과 함께 도시화의 영향으로 불투수면적의 증가, 지하구조물 공사 등과 같은 인위적인 요인에 의해 지하수위의 하강이 이슈화 되고 있다. 지하수위의 하강은 단순히 가용한 지하수자원이 줄어든다는 피해뿐 아니라 생태계 교란, 농작물 피해, 하천 건천화, 지반침하, 싱크홀 등과 같은 심각한 2차 피해를 야기 할 수 있다. Yang *et al.* (2015)은 목감천 유역의 도심지에 대하여 다기준 의사결정기법과 MODFLOW를 이용한 투수성 포장재 적용 지역 우선순위화에 대한 연구를 진행하였고 이는 도심지 지하수위 하강으로 인한 피해를 예방할 수 있는 방법임을 제시하였다. 지하수관측연보(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, MLIT, 2015)의 국가지하수관측망 지하수위 관측소 관측 자료에 의하면 5대강 권역(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)에서의 지하수위 하강 관측소 비율은 평균적으로 약 56.8%에 이른다. 이는 2015년도 관측 자료까지의 비율로 최근 3개년 동안 가뭄 피해가 심해지

고 있는 상황이므로 앞으로의 지하수위 하강 비율은 더 늘어날 것으로 보인다.

국내외의 지하수 관련 취약성 평가는 지하수의 수질에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Farjad *et al.* (2012)은 Southwest Izeh Plain의 지하수자원의 오염을 예방하는 정책의 제안으로 다기준 의사결정기법을 이용하여 지하수자원 오염 취약성을 지도에 나타냄으로써 제시하였다. Jose *et al.* (2012)은 GIS에 기반한 SINTACS Model을 적용하여 Oaxaca Central Valleys의 지하수 취약성 평가를 실시하였다. Lee *et al.* (2008)은 지하수 오염 취약성 평가 방법 중 DRASTIC 기법 및 지하수 수치모사 기법을 병행하여 부여 일대의 지하수 오염 취약성 변화를 평가하였다. 국내외의 지하수 취약성 평가 관련 연구는 지하수 수질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 지하수위에 대한 취약성 평가 관련 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 기존의 연구는 수자원의 이용과 관리에 대한 전국적인 규모의 정책 분석 및 관리, 소유역의 지하수 수질에 대하여 이루어졌다. 또한 지하수위는 가뭄 또는 홍수 같은 재해, 지하수 대수층 오염의 취약성을 평가하는 한 지표로서 사용되었다. 이에 본 연구는 국내의 지하수위 자료를 이용한 지하수위 관리 취약성 평가를 실시하여 행정구역 별 지하수에 대한 인식을 재고하고, 지하수위 관리의 중요성을 강조하고자 하였다.

본 연구는 현재 이용하고 있는 수자원 중 지하수의 수위를 낙동강 유역의 행정구역 별 취약성 평가를 실시하였다. 지하수 관리는 지하수위에 영향을 줄 수 있는 인자의 상호 비교 평가를 통하여 지하수위에 위험이 될 수 있는 인자를 판단하고 그에 대한 대안을 마련하는 것을 의미한다. 지하수위에 대한 행정구역별 취약성 평가를 실시하기 위해 지하수위에 영향을 줄 수 있는 자연, 인문, 사회 등 다양한 분야의 10개의 인자들을 설문 결과를 통하여 지표로 선정하고 가중치를 부여하였다. 선정된 지표에 대해서 연 자료를 수집하여 지하수위 관리 취약성을 평가할 수 있는 지수로 산정하였다. 선정된 지표와 각 지표별로 산정된 지수에 가중치를 적용하고 낙동강 유역 행정구역 별 최종 취약성을 평가하기 위해 다기준 의사결정기법 중 TOPSIS 기법을 적용하였다.

## 2. 연구지역

낙동강은 강원도 태백시에서 발원하여 대구 분지를 지나 부산 서쪽에서 갈라져 남해로 흘러가는데, 그 유역면적이 23,384 km<sup>2</sup>에 이른다. 낙동강 유역 내 시·군 중, 본 연구에서

선정된 연구지역은 낙동강 유역 중 낙동강 본류가 지나가는 21 개 시·군 단위 행정구역으로 선정하였다. 각 행정구역 내의 강우관측소, 하천 및 지하수위 관측소를 파악하여 각 행정구역 별 강우, 하천 및 지하수위 자료를 수집하였다. 강우는 기상청 일 강수 관측 자료와 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)의 일 강수 관측 자료를 활용했고, 지하수위는 국가 지하수정보센터(GIMS)에서 연도별 지하수 관측연보 내의 관측 자료를 활용했으며, 하천수위는 국가수자원관리 종합

정보시스템(WAMIS)의 각 시·군 행정구역 내의 하천수위 관측소 일단위 관측 자료를 활용하였다. 각 관측 자료는 지하수위를 국가지하수관측망 관측 자료를 이용하였기 때문에 1996년 이후 관측 자료를 수집하였고, 관측 기간 내 관측 자료의 결측 일이 10일 이상인 관측소는 제외하였다.

연구지역 위치는 다음과 같이 Fig. 1에 나타내었고, 연구지역 내 각 시·군별 강수, 지하수위, 하천수위 관측소 목록은 Table 1에 정리하였다.

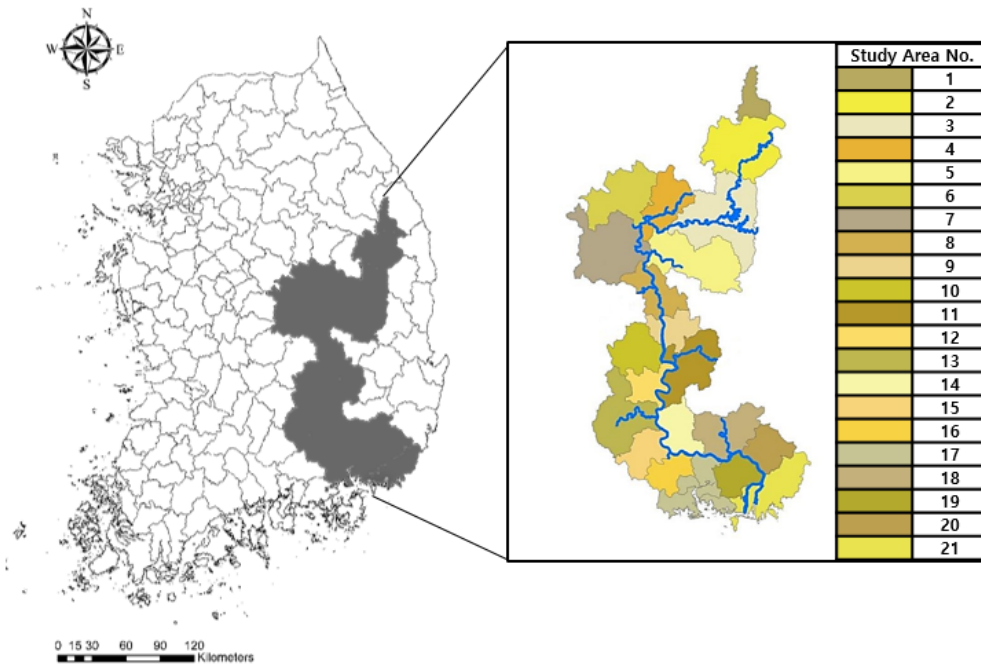


Fig. 1. Study area

Table 1. List of selected observations station for each administrative district

No.	Administrative district	Precipitation observation station	Groundwater level observation station	River level observation station
1	Taebaek-si	Taebaek	Hwangji	Jangseong
2	Bonghwa-gun	Bonghwa	Myeongho	Docheon
			Jaesan	Socheon
3	Andong-si	Andong	Taehwa	Andong
			Gilan	
			Waryong	
			Nokjeon	
4	Yecheon-gun	Dongro 2	Yecheon	Gudam
		Sihang	Pungyang	Jibo
		Wolpo		
5	Uisung-gun	Euisung	Angye	Nakdong
6	Mungyeong-si	Mungyeong	Mungyeong	Galma
				Maleung
			Yeongsun	Mungyeong
				Jeomchon

**Table 1.** List of selected observations station for each administrative district (Continue)

No.	Administrative district	Precipitation observation station	Groundwater level observation station	River level observation station
7	Sangju-si	Sangju	Gongseong	Gajang
				Dongmun
			Seomun	Byeongseong
				Sangju
8	Gumi-si	Gumi	Goah	Gumi
			Dogae	
			Wonpyeong	
9	Chilgok-gun	Waegwan	Gasan	Waegwan
			Waegwan	
10	Seongju-gun	Seongju	Byeokjin	Seongju
11	Daegu-si	Daegu	Gachang	Daeam
				Daepyong
			Daebong	Dongho
				Dongchon
				Sangyeok
			Bisan	Seongseo
				Jukgok
			Hyeonpung	Hwawon
Hyeonpung				
12	Goryeong-gun	Goryeong	Goryeong	Gaejin 2
				Goryeong
				Ssangrim
13	Hapcheon-gun	Hapcheon	Samga	Ibang
			Yaro	
			Jeokjung	Jeokpogyo
			Hapcheon	
14	Changnyeong-gun	Changnyeong	Seongsan	Imhaejin
			Yeongsan	Jangma
15	Uiryeong-gun	Bongsu Sinban	Nakseo	Masuwon
			Bongsu	
			Uiryeong	
16	Haman-gun	Haman	Chilwon	Jindong
17	Changwon-si	Changwon	Jinhae Jaemun	Susan
			Masan Jinjeon	
			Masan Hapseong	
			Bukmyeon	
18	Miryang-si	Miryang	Gagok	Sammun
			Danjang	Samrangjin
			Hanam	Miryang 1
				Miryang 2
19	Gimhae-si	Gimhae	Samjeong	Wolchon
			Saengrim	
20	Yangsan-si	Yangsan	Woongsang	Gasan
				Daeri
				Soto
				Yangsan
21	Busan-si	Busan	Deokcheon	Gupo
			Dongdaesin	
			Jangan	

### 3. 연구방법

본 연구의 연구순서는 Fig. 2에 나타낸 순서와 같다. 먼저, 낙동강 유역 행정구역 별 지하수위 관리 취약성 평가를 위하여 자연, 사회, 인문 등의 자료를 고려한 후보 지표를 선정하고 선정된 후보 지표에 대한 자료를 수집한다. 선정된 후보 지표를 이용하여 설문지를 작성하고, 전문가 집단에 대한 설문을 거쳐 후보 지표 중 취약성 평가의 지표를 결정하게 된다. 지표가 결정된 후 결정된 지표의 가중치를 결정하는 설문을 진행하게 된다. 설문을 통한 결과를 정리하여 결과를 전문가 집단에 정보를 제공하고, 재 설문을 통하여 최종 지표 별 가중치를 결정하게 된다. 지표와 지표별 가중치가 결정되면 TOPSIS를 이용하여 행정구역 별 지하수위 관리 취약성 평가를 실시하고, TOPSIS 결과를 통하여 지하수위 관리에 가장 취약한 행정구역을 판단하게 된다.

#### 3.1 지표의 선정

본 연구에서는 낙동강 유역 행정구역 별 지하수위 관리 취약성 평가를 위하여 설문을 통한 최종 지표선정에 앞서 후보 지표들을 자연, 사회, 인문 적 자료를 고려하여 선정하였다. 선정된 후보 지표들에 대하여 자연, 사회, 인문적 자료를 고려한 이유는 취약성 지수를 산정함에 있어서 민감도와 적응능력을 고려해야 하는데, 자연적 자료는 민감도로 분류할 수 있고, 인문, 사회적 자료는 적응능력에 해당하기 때문이다. 민감도에 해당하는 자연적 자료는 지표수와 지하수에 대한 자료를 고려한 지표와 지하수위에 영향을 주는 강우 자료를 고려한 지표가 포함되어 있다.

자연적 자료를 고려한 지표 중 강우 자료를 고려한 지표로 무 강우일수, 80 mm/day 이상 연 강우일수, 강우편차율, 강우 집중률, 연평균 강수량 다섯 가지 지표를 포함하였으나 지표 선정 관련 설문 결과 연평균 강수량을 제외한 나머지 지표가 지하수위와의 상관성을 보기 힘들다는 설문 결과를 통하여 강우 자료를 고려한 지표로 연도별 연평균 강수량을 선정하였다. 지하수 자료를 고려한 지표로 지하수위는 2015년까지의 자료를 보았을 때, 연구지역 21개 시·군 내 49개 국가지하수관측망 지하수위 관측소 중 33개 관측소에 지하수위의 하강이 발생하였고, 전국적으로 지하수위 하강 관측소의 비율이 높아지고 있다. 지하수 함양량은 연구지역 내의 각 행정구역마다

토양 구성 물질과 형태가 다르므로 행정구역마다 다른 지하수 함양량을 가진다. 우리나라 지하수 관리 기본계획(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, MLIT, 2007)과 Chung *et al.* (2011)은 지하수 개발 가능량은 수문 순환계가 파괴되지 않고 지하수 장애를 일으키지 않는 범위 내에서 지속적으로 대수층으로부터 양수할 수 있는 지하수량을 의미하며 행정구역 별 지하수 개발 가능량은 해당 지역의 10년 빈도 갈수시의 지하수 연 함양량을 적용하기 때문에 지하수 개발량이 해당 지역의 지하수 함양량을 나타낼 수 있다. 하천수위 자료를 고려한 지표로 하천수위는 해당 행정구역의 주된 용수원으로 사용되기 때문에 하천수위의 하강은 지하수 이용량 증가로 유추할 수 있다. 또한 Lee *et al.* (2006)에 의하여 하천수위와 지하수위의 장기기 변화추세는 서로 다르나, 수위변화 양상은 파형과 변화주기 등에서 거의 일치하며 지하수위의 변화 원인이 하천수위에 있다는 연구가 있었다.

인문, 사회적 자료를 고려한 지표는 총 급수인구, 인구밀도, 지하수 이용량, 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율, 상수도 보급률, 지하수위 관측정 개소 수의 지표를 선정하였다. 총 급수인구는 환경부에서 발간하는 상수도 통계(Ministry of Environment, 2016)에 의하면 총 급수인구는 급수인구와 미급수인구의 합으로 산정된다. 총 급수 인구는 지자체 내의 총 인구와 동일하고, 급수인구는 광역상수도 및 지역상수도를 이용하는 인구, 미급수 인구는 마을상수도, 소규모 급수시설, 전용상수도를 포함하는 소규모 수도시설에 의한 급수 인구를 의미한다. 인구밀도는 연구지역 내 행정구역 및 연도별 단위 면적당 인구를 의미한다. 1차 지표선정 설문 결과에 따라 인구밀도가 높을수록 해당 행정구역의 지하수의 수요량이 증가하기 때문에 지표로 선정하였다. 지하수 이용량은 해당 지역의 지하수위에 영향을 직접적으로 미칠 수 있는 인자이다. 해당 연구지역의 주거, 산업 등의 형태에 따라 지하수 이용량의 차이가 나타난다. 지하수 이용량을 산정할 때 시설농예, 수도 작 등과 같은 농가의 지하수 이용량을 별도로 하나의 지표로 선정하지 않은 것은 각 농가의 무분별한 지하수 사용이 지하수위에 영향을 크게 미칠 수 있으나, 각 농가의 지하수 이용량이 명확히 기록되지 않아 지하수 통계연보에서 수집할 수 있는 자료만을 수집하여 분석하였기 때문이다. 연도별 지하수 이용량은 해당 지역의 인구가 증가함에 따라, 도시화가 진행됨에 따라 감소하는 것으로 나타난다. 수자원 이용량은 행정

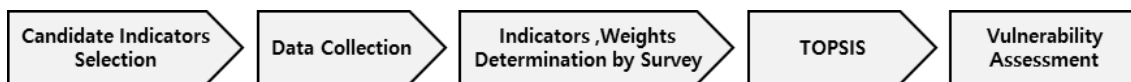


Fig. 2. Procedure of vulnerability assessment

구역 별 지하수 이용량과 광역상수도 이용량을 더하여 산정하였다. 산정된 연도별, 행정구역 별 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율 추세를 분석함으로써 해당 지역의 지하수 이용량 비율이 지하수위에 영향을 줄 수 있다. 상수도 보급률은 상수도 보급률이 높을수록 각종 용수 사용에서 지하수 사용량의 비율이 낮다. 지하수위 관측소의 개소수가 많으면 해당지역에서 지하수위 하강에 대한 관측 및 예측 시기, 관리 방안 수립 측면에 있어서 안정적이게 된다.

### 3.1.1 연평균 강수량

연평균 강수량은 1년간 총 강수량의 평균으로 연도별 연평균 강수량이 감소하면 해당 행정구역의 지하수위 관리에 더욱 취약할 수 있다고 판단할 수 있다.

### 3.1.2 지하수위

행정구역 별 지하수위는 행정구역의 지하수자원 부족량을 가능할 수 있는 척도가 되며 우리나라의 많은 지역에서 지하수위가 하강하고 있는 추세이므로 지속적인 관측이 필요하다.

### 3.1.3 지하수 함양량

지하수 함양량은 지하수 개발 가능량을 고려하여 수집하였고, 지하수 함양량이 줄어들 경우 대기에서 강수 형태로 내린 물이 지하수 대수층으로 유입되는 양이 줄어드는 것을 의미하며 이는 지하수위 변동에 영향을 미친다.

### 3.1.4 하천수위

하천수는 주된 용수원으로 하천수위가 감소할 경우 지하수 이용량이 증가하고, 지하수가 하천수로 유입되어 지하수위의 하강을 야기할 수 있다.

### 3.1.5 총 급수인구

우리나라의 수자원 이용량 중 지하수 이용량이 많은 부분을 차지하고 있으므로 총 급수인구가 증가할 경우 지하수 이용량이 증가하여 지하수위에 영향을 미칠 수 있다.

### 3.1.6 인구 밀도

인구 밀도가 높을수록 물 이용량이 많아지며 이에 지하수 이용량이 증가하기 때문에 지하수위 관리에 취약성이 있다고 볼 수 있다.

### 3.1.7 지하수 이용량

지하수 이용량은 지하수위에 직접적인 영향을 미치며 지

하수 이용량이 많을수록 해당 지역은 지하수위 관리에 더 취약하다고 판단할 수 있다.

### 3.1.8 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율

우리나라 수자원 이용량은 지속적으로 증가하는 추세이고, 지하수 이용량 역시 증가하는 추세이다. 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율은 해당 지역의 수자원에 대한 지하수의 존도를 알 수 있다.

### 3.1.9 상수도 보급률

상수도 보급률이 낮을수록 용수 이용에 상수도를 이용하므로 지하수의 직접적인 사용이 늘어나 지하수위 관리에 취약성이 있다고 판단된다.

### 3.1.10 지하수위 관측정 수

행정구역별 지하수위 관측정 수를 파악하여 수집하고, 수집된 지하수위 관측정 수를 모두 더하여 산정하였다. 지하수위 관측정 수가 적을 경우 지역적인 지하수위 변동 분석이 어렵기 때문에 지하수위 관리에 취약성이 있다고 판단된다.

## 3.2 가중치 산정

설문을 통해 전문가의 의견을 반영하여 가중치를 산정하였다. 산정된 가중치는 Delphi 설문 방법에 의해 결정되는데, Delphi 방법은 적절한 예측 방법을 찾을 수 없을 때 전문가들의 직관을 동원하여 미래를 예측하는 방법이다. 전문가들의 익명성을 통한 의견 교환을 통해 일정한 주제에 대해서 반복적인 피드백을 하여 서로의 의견을 수렴하고 합일점을 찾는 기법으로 전문가들의 집단적 사고를 통한 미래예측 방법이다 (Linstone and Turoff, 1975).

설문은 총 25명에 대해서 실시하였으며 설문 구성원은 수공학과 관련된 전문가 집단을 대상으로 실시하였다. 설문은 총 3번 진행하였으며, 각 단계별 피드백을 통하여 의견을 수렴하였다. 1차로 선정된 각 후보 지표들에 대하여 지하수위 관리 취약성에 영향을 줄 수 있는 지표를 선정하였다. 1차 설문 결과 피드백 후 2, 3차에 걸친 설문을 통하여 각 지표의 가중치의 합이 1이 되도록 하여 지표의 가중치를 산정하였다.

## 3.3 TOPSIS

TOPSIS 기법은 다기준 의사결정기법(Multi Criteria Decision Making, MCDM) 중 하나이다. 다기준 의사결정기법은 목표에 따른 최선의 대안을 선정하는 과정 중에서 어느 하나의 기준이 아닌 여러 기준이 동시에 고려되어야 하는 경우에

적용될 수 있다. Hwang and Yoon (1981)이 처음으로 소개한 TOPSIS는 양의 이상적인 해(Positive Ideal Solution)과 부의 이상적인 해(Negative Ideal Solution)의 거리를 통해 대안을 선정하는 기법으로 대안 별 거리를 통하여 이상적인 해를 찾는 방법이며 다양한 의사결정 문제에 활용되고 있다(Park *et al.*, 2016).

선정된 지표들은 지표별로 각각의 단위와 범위가 상이하 다. 가중치를 적용하기 이전에 각 지표들의 자료에 대해서 표준화를 실시하여야 한다. 표준화 방법으로 지표의 연구지역 내 행정구역별 자료들에 대해서 단순히 오름차순 또는 내림차순으로 순위를 매기는 순위 매기기 방법, 지표의 자료들을 표준정규분포로 변환하고 자료 분포의 표준편차를 이용하여 각 지표의 자료 값이 해당 자료 분포의 평균값보다 상대적으로 얼마나 떨어져 있는지 표준화된 변수 Z값으로 나타내는 방법 인 Z-스코어 방법, 지표의 범위를 기반 한 표준화 방법으로 지 표의 자료 값의 중간값을 이용하여 표준화 하고 그 결과로 모 든 지표들을 0~1사이의 값을 갖도록 하는 스케일 재조정 방법 등이 있다(Nardo *et al.*, 2005).

본 연구에서는 위의 표준화 기법 중 각 지표별로 정규분포 를 갖지 않는 자료들이 많고, 지표별 특성이 상이하므로 스케 일 재조정 방법을 이용하여 자료들에 대한 표준화를 실시하였 다. 지표의 표준화 단계에서 표준화된 각 지표에 Delphi 방법 을 통하여 선정된 가중치를 부여한다. 가중치가 부여된 표준 화 값에 대한 각 지표별 양의 이상적인 해와 부의 이상적인 해 는 각 지표의 최대값과 최소값으로 계산될 수 있다. 행정구역 별 양의 이상적인 해의 거리와 부의 이상적인 해의 거리는 앞 서 계산된 지표의 양의 이상적인 해, 부의 이상적인 해를 이용 하여 계산한다. 계산된 행정구역 별 각 지표의 양의 이상적인 해의 거리와 부의 이상적인 해의 거리를 모두 더한다. 계산된 양의 이상적인 해의 거리와 부의 이상적인 해의 거리를 이용 하여 각 행정구역 별 상대적 근접도 계수를 계산한다. 앞서 계 산된 상대적 근접도 계수를 이용하여 각 행정구역 별 지하수 위 관리 취약성 우선순위 지역을 결정한다. 우선순위가 높은 지역은 상대적 근접도 계수의 크기의 순으로 결정할 수 있다. 앞서 설명한 TOPSIS 적용 과정과 방법은 Fig. 3에 나타내 었다.

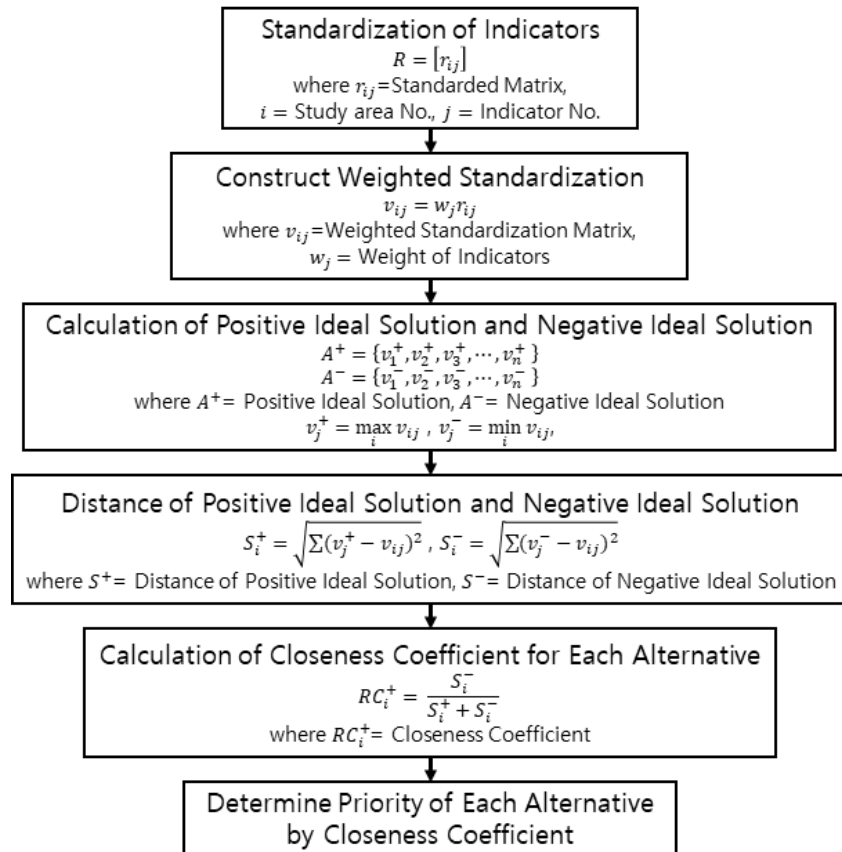


Fig. 3. TOPSIS method

## 4. 연구결과

### 4.1 지표의 결정 및 가중치 산정

1차 설문은 개방형 설문으로 설문을 통하여 연구지역에 대한 지표를 결정하였다. 자연적 자료를 고려한 후보 지표는 연 강수량, 80 mm/day 이상 연 강우일수, 강우 편차율, 강우집중률, 연평균 강수량, 무 강우일수, 연평균 지하수위, 연평균 하천수위, 연평균 지하수 함양량을 포함하였다. 인문, 사회적 자료를 고려한 후보 지표는 연도별 총 급수인구, 연도별 지하수 이용량, 연도별 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율, 인구밀도, 상수도 보급률, 지하수위 관측정 개소수를 포함하였다.

총 15개의 후보 지표 중 지표 결정 설문 결과와 결측 자료를 갖고 있는 지표를 제외한 결과 최종적으로 자연적 자료를 고려한 지표 중 연평균 강수량, 연평균 지하수위, 연평균 하천수위, 연도별 지하수 함양량이 선정되었다. 연 강수량이 연평균 강수량과 중복되고 80 mm/day 이상 연 강우일수, 강우 편차율, 강우집중률이 지하수위 변동과 상관성을 갖기 힘들다는 전문가 설문 결과에 따라 강수량자료에 관련된 후보 지표 중 연평균 강수량을 제외한 나머지 지표들은 선정되지 않았다. 연평균 지하수위가 하강할 경우 해당 행정구역의 지하수위 관리에 취약하거나 장래에 취약해질 가능성을 내포하고 있고, 연평균 하천수위가 하강할수록 장래의 지하수위 하강 및 지하수위 관리 취약성이 있다고 볼 수 있으며, 지하수함양량이 감소할 경우 지하수위가 하강하게 되어 해당 행정구역의 지하수위 관리 취약성이 높게 나타날 수 있다.

인문, 사회적 자료를 고려한 후보 지표 중 총 급수인구, 인구밀도, 지하수 이용량, 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율, 상수도 보급률, 지하수위 관측정 개소수가 지표로 선정되었다.

총 급수인구와 인구밀도가 높을 경우 지하수 이용량이 타 지역보다 높을 것으로 예상되며, 지하수 이용량이 많은 지역의 지하수위 관리 취약성이 높게 산정된다. 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율은 지하수 이용량 지표와 유사하나 해당 지역의 수자원 이용량이 다르기 때문에 유사한 지하수 이용량이더라도 수자원 이용량에 따라 지하수 이용량 비율이 다르므로 지하수위 관리에 대한 취약성이 나타날 수 있다. 상수도 보급률이 낮을수록 상수원 및 각종 용수에 지하수 비율이 높아진다.

전문가 집단은 총 25명으로 구성하였고, 수자원 및 기타 전공의 전문가로 구성하였다. 전문가 집단의 구성원은 수자원 및 기타전공의 교수, 연구원, 학생 등으로 구성하였으며 경력과 연령을 다양한 계층으로 선정하였다. 전문가 집단 설문을 통하여 산정된 가중치로 연평균 지하수위 지표가 0.157 으로 가장 큰 가중치를 받았으며, 그 뒤로 연평균 강수량 지표가 0.154, 연도별 지하수함양량 지표가 0.152로 얻어졌다. 가장 적은 가중치를 얻은 지표는 인구 밀도로 0.043 의 가중치를 얻었는데 지하수위 관리에 큰 영향을 주지 않을 것이라는 의견이 있었다.

1차 지표 선정 설문을 통해 선정된 지표와 2, 3차 설문을 통하여 산정된 지표별 가중치는 Table 2와 같다.

### 4.2 TOPSIS를 이용한 최종 지하수위 관리 취약성 평가

전문가 집단을 대상으로 한 설문을 통해 산정된 가중치를 적용하여 TOPSIS를 이용한 낙동강 유역 행정구역 별 최종 지하수위 관리 취약성 평가를 실시하였다. TOPSIS를 적용하기 위한 각 지표 별 수집된 데이터 값은 Table 3과 같다. 지하수위 관측정 개소수, 상수도 보급률 지표의 데이터는 2016년의 자료를 수집하여 이용하였고, 위의 두 지표를 제외한 나머지 지

Table 2. Description and results of selected indicators

Item	Indicator	Description	Weight	Reference
Groundwater level management vulnerability	AP	Annual average precipitation	0.154	www.kma.go.kr
	GWL	Annual average groundwater level	0.157	www.gims.go.kr
	RL	Annual average river level	0.140	www.wamis.go.kr
	GWR	Annual groundwater recharge	0.152	www.gims.go.kr
	WSP	Annual total water supply population	0.048	www.me.go.kr
	PD	Annual population density	0.043	kosis.kr
	GWU	Annual groundwater use	0.153	www.gims.go.kr
	RGW	Ratio of groundwater use to water use	0.062	www.gims.go.kr www.me.go.kr
	RWS	Ratio of water supply	0.046	www.me.go.kr
	GWM	The number of groundwater monitoring well	0.045	www.gims.go.kr
	Sum of weights			1



**Table 3.** Data of each indicator for using TOPSIS

SA	AP	GWL	RL	GWR	WSP	PD	GWU	RGW	RWS	GWM
Taebaek-si	-0.875	-0.032	-0.017	-475068	-716	-1.842	24966	0.001	100	1
Bonghwa-gun	-1.758	0.001	0.085	-754693	-771	-0.471	374081	0.003	90	12
Andong-si	-1.073	-0.037	0.034	-543138	-1290	-0.631	2770373	0.019	100	12
Yecheon-gun	-2.238	-0.151	-0.150	-292334	-1179	-1.436	1082930	0.007	75	2
Uisung-gun	-1.181	0.147	-0.163	-1076228	-1602	-1.166	1176797	0.000	88.9	1
Mungyeong-si	-1.439	0.128	-0.053	-562026	-1030	-0.872	811244	0.007	100	12
Sangju-si	-2.756	-0.025	-0.039	-1356077	-1695	-1.105	2479171	0.012	70.8	5
Gumi-si	-0.689	-0.019	0.036	-186237	6134	9.812	-45049	0.002	100	14
Chilgok-gun	-0.916	-0.001	-0.055	-65385	1780	3.170	-1374620	-0.026	100	4
Seongju-gun	-1.693	-0.074	0.162	-158000	-518	-0.698	-761404	-0.005	70	1
Daegu-si	-0.715	-0.046	0.180	-1003660	131	0.581	-1338393	-0.001	100	139
Goryeong-gun	-1.399	-0.036	-0.028	-144166	-201	-0.249	600307	-0.004	100	5
Hapcheon-gun	-0.003	-0.101	0.301	-1296990	-936	-0.806	164938	-0.002	100	5
Changnyeong-gun	-0.351	0.004	-0.062	-1037827	-842	-1.065	-358631	-0.006	100	19
Uiryeong-gun	0.011	0.098	-0.040	-832311	-435	-0.696	583555	-0.003	69.2	32
Haman-gun	-1.525	-0.119	0.061	-1046512	139	0.900	1104107	0.004	90	4
Changwon-si	-1.687	0.099	-0.032	-527507	542	-2.983	-1917479	-0.007	100	169
Miryang-si	-1.274	-0.029	-0.166	-624964	-1279	-1.336	-498760	-0.018	75	42
Gimhae-si	-0.008	0.370	-0.072	-1033219	13660	26.756	-999435	-0.020	100	73
Yangsan-si	-2.733	-0.030	-0.008	-412251	6851	14.470	15337	-0.008	92.3	51
Busan-si	-1.149	0.075	0.015	586080	-20477	-33.208	-1982129	-0.001	100	202

표는 연도별 자료의 선형회귀분석 결과를 이용하여 TOPSIS를 적용하였다. 지하수위 관측정 개소수, 상수도 보급률 지표를 제외한 나머지 지표에서 양의 값의 경우 최초 관측년도로부터 2015년까지 지속적으로 해당 지표의 연도별 자료값이 증가하는 것이고, 음의 값이 경우 해당 지표의 연도별 자료값이 감소하는 것을 의미한다.

최종 산정된 낙동강 유역 전체 연구지역의 상대적 근접도 계수 순위는 Fig. 4와 같고, 상대적 근접도 계수(Closeness Coefficient, CC)순위가 높을수록 해당 행정구역의 지하수위 관리 취약성이 높은 것을 의미한다. 상대적 근접도 계수는 0.255~0.540의 범위로 산정되었다. 상주시의 상대적 근접도 계수가 0.540으로 산정되어 낙동강 유역 연구지역 중 지하수위 관리가 가장 취약한 행정구역으로 나타났으며, 다음 순위로 예천군의 상대적 근접도 계수가 0.496, 함안군의 상대적 근접도 계수가 0.458로 산정되었다. 이 결과는 가중치를 적용하지 않은 지표의 표준화 총 지수 합 의 결과와 동일하게 나타났다. 가중치를 적용하지 않은 지표의 총 지수 합 의 결과로는 상주시, 예천군, 함안군 순으로 지하수위 관리가 가장 취약한 행정구역으로 나타났다.

상주시가 총 급수인구 지표에서 21개 행정구역 중 부산광역시와 함께 가장 많이 감소하는 것으로 나타나지만 강수량, 지하수 함양량, 지하수 이용량, 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율의 지표에서의 취약성이 높은 것으로 나타나며, 21개 행정구역의 관측정 수의 평균 개소수가 38개인데 반해 상주시의 관측정 수는 5개소에 불과하여 지하수위의 지속적인 관측이 어려울 것으로 보이고, 상주시의 상수도 보급률은 70.8%로 상수도 이용 시 지하수의 이용이 클 것으로 예상되기 때문에 TOPSIS 결과로 상주시가 21개 행정구역 중 지하수위 관리에 가장 취약한 것으로 나타났다. 또한 예천군은 상주시와 마찬가지로 총 급수인구와 인구밀도가 감소하지만 지하수위 선형회귀분석 결과가 전체 21개 행정 구역 중 -0.151로 가장 큰 하강을 보이고, 하천수위 선형회귀분석 결과가 -0.150으로 하천수위와 지하수위에 대해서는 상주시보다 취약한 것으로 나타났다. 하지만 강수량, 지하수 함양량, 지하수 이용량, 물 이용량 중 지하수 이용량 비율 지표에서 상주시가 더 높은 순위의 취약성을 나타내기 때문에 예천군의 취약성이 2순위로 나타났다. 함안군은 상수도 보급률이 90%에 이르고, 행정구역 내 하천수위가 증가하고 있으나 강수량, 지하수위,

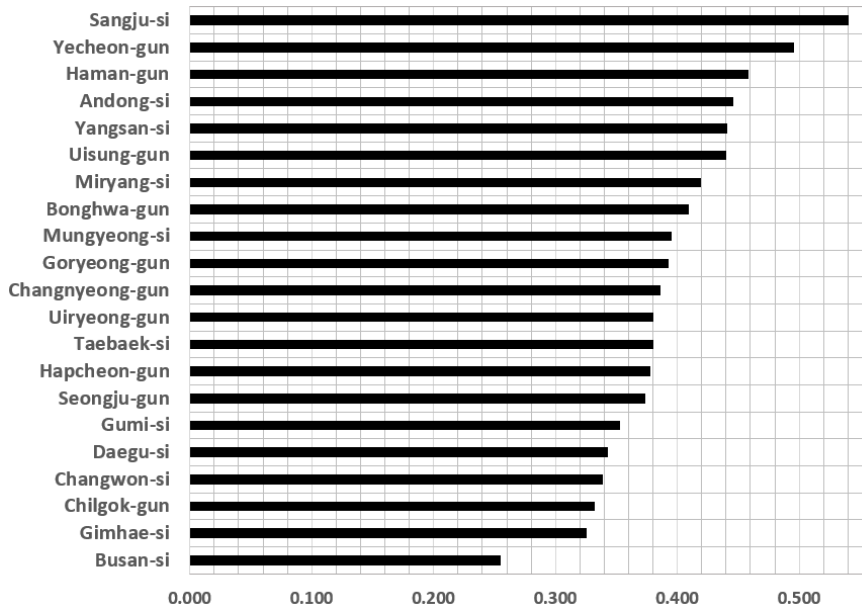


Fig. 4. TOPSIS results (Closeness Coefficient, CC)

지하수 함양량, 지하수 이용량, 총 급수인구 지표가 취약한 것으로 나타났다. 또한 총 급수인구와 인구밀도가 증가하고 있고, 지하수위 관측정 개소수가 4개소에 불과하기 때문에 21개 행정구역 중 3순위로 지하수위 관리 취약성이 나타났다.

### 5. 결론

본 연구에서 낙동강 유역의 행정구역 별 지하수위 관리 취약성 평가를 실시하였다. 낙동강 유역의 행정구역 별 지하수위 관리 취약성 평가를 위하여 연구지역으로 낙동강 본류가 흐르는 21개 시·군을 선정하였고, 행정구역 별 자연, 인문, 사회 등의 자료를 수집하고 수집된 자료 중 결측 일이 10일 이하이고 1996년부터 2015년까지 연속된 자료에 대해서 지하수위 관리에 영향을 줄 수 있는 인자들을 지표로 선정하였다. 선정된 지표들은 전문가를 대상으로 설문 실시하여 지하수위 관리 취약성 평가를 위한 최종 지표를 선정하였고, 가중치 산정 설문을 실시하여 선정된 최종 지표별 가중치를 부여하였다. 지표 선정 설문 결과로 연평균 지하수위, 연평균 강수량, 행정구역 별 연평균 하천수위, 지하수 함양량, 지하수 이용량, 수자원 이용량 중 지하수 이용량 비율, 총 급수인구, 행정구역 별 인구밀도, 상수도 보급률, 지하수위 관측소 개소수가 선정되어 총 10개의 지표가 선정되었다.

행정구역 별 지하수위 관리 취약성 평가를 하기 위해 TOPSIS 기법을 이용하여 상대적 근접도 계수를 산정한 후,

상대적 근접도 계수가 큰 순서로 지하수 관리 취약성이 큰 행정구역을 결정하였다. 상대적 근접도 계수 결과로 상주시 0.540, 예천군 0.496, 함안군 0.458 순으로 지하수위 관리에 취약한 것으로 나타났다. 이 결과는 가중치를 부여하지 않은 지표의 총합의 지하수위 관리가 취약한 순서가 상주시, 예천군, 함안군으로 나타났던 것과 동일하게 나타났다. 상주시가 21개 행정구역 중 가장 높은 취약성을 갖는 것으로 평가된 것은 가중치가 가장 높게 산정된 지하수위 지표에서는 예천군과 함안군이 가장 높은 취약성 순위를 보이지만 지하수위 지표를 제외한 강수량, 지하수 함양량, 지하수 이용량 지표에서 상주시가 전체 행정구역 중 1, 2위의 취약성 순위로 나타났기 때문이다.

연구 결과는 강우사상의 변화로 인한 가뭄과 홍수피해의 심화와 안정적이고 지속개발 가능한 대체 수자원 개발의 측면에서 지하수자원의 중요도가 높아지는 현 시점에서 행정구역 별로 지하수자원, 지하수위 관리를 위한 정책적 결정에 정량적인 근거로써 논리적인 수단이 될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서 지표의 종류를 더욱 세분화 하고 계층화하여 더욱 객관성 있는 지표 및 가중치 선정 과정이 이루어진다면 지하수위 관리, 나아가 지하수자원 측면에서 행정구역 별로 다양한 정책적 판단에 도움이 될 수 있을 것이라고 판단된다. 이후 연구에서는 낙동강 유역의 행정구역뿐만 아니라 한강, 금강, 영산강, 섬진강 유역의 행정구역에 대해서 지하수자원 관리 취약성 분석 및 평가를 통하여 수자원이 부족한 행정구역에서 지하수가 안정적이고 지속가능한 취수원으로써의 역할을 할 수 있는지 판단의 근거를 제시하도록 하겠다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 연구지원비(17CTAP-C129791-01)를 지원받아 수행된 연구입니다.

## References

- Chenini, I., Zghibi, A., and Kouzana, L. (2015). "Hydrogeological investigations and groundwater vulnerability assessment and mapping for groundwater resource protection and management: state of the art and a case study." *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 109, pp. 11-26.
- Chung, I. M., Lee, J. W., and Kim, N. W. (2011). "Estimation exploitable groundwater amount in Musimcheon watershed by using an integrated surface water-groundwater model." *Economic and Environmental Geology*, Vol. 44, No. 5, pp. 433-442.
- Chung, J. W., Lee, W. K., Choi, G. S., Lee, S. C., Choi, S. H., and Choi, H. A. (2010). "Application study of vulnerability assessment models for water resources to climate change by spatial and watershed scales." *Journal of Climate Change Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 21-30.
- Farjad, B., Zulhaidi, H., Mohamed, T. A., Pirasteh, S., and Wijesekara, N. (2012). "Groundwater intrinsic vulnerability and risk mapping." *Water Manage*, Vol. 165, pp. 441-450.
- Hwang, C. L., and Yoon, K. (1981). "Multiple attribute decision making an introduction." *Sage Publications*, Thousand Oaks London New Delhi, pp. 38-45.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: The physical science synthesis report*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jose, A. R., Felipe, O. T., Ismael, S. M. (2012). "Analysis of aquifer vulnerability and water quality using SINTACS and geographic weighted regression." *Environmental Earth Sciences*, Vol. 66, No. 8, pp. 2257-2271.
- Lee, B. J., Ha, G. C., Koo, M. H., Moon, S. H., Cho, M. J., and Cho, S. H. (2006). "Effluent from a wastewater treatment plant and stream/groundwater interaction." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 62, No. 4, pp. 625-633.
- Lee, H. J., Park, E. G., Kim, K. J., and Park, K. H. (2008). "A joint application of DRASTIC and numerical groundwater flow model for the assessment of groundwater vulnerability of Buyeo-eup area." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 13, No. 1, pp. 77-91.
- Linstone, H. A., and Turoff, M. (1975). *The Delphi method: Techniques and applications*, Vol. 29, Reading, MA: Addison-Wesley.
- Ministry of Construction and Transport (2007). *Groundwater Management Plan Report*. Korea Ministry of Construction and Transport, pp. 13-15.
- Ministry of Environment (2016). *Statistics of Waterworks*. Ministry of Environment, pp. 262-269.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015). *Groundwater Investigation Annual Report*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015). *Groundwater Observation Annual Report*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., and Tarantola, S. (2005). "Tools for composite indicators building. European Commission, EUR 21682 EN." *Institute for the Protection and Security of the Citizen*, Joint Research Centre Ispra, Italy.
- Park, H. S., Kim, J. B., Um, M. J., and Kim, Y. J. (2016). "Assessment of water use vulnerability in the unit watersheds using TOPSIS approach with subjective and objective weights." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 8, pp. 392-685.
- Yang, J.-S., and Kim, I.-H. (2013). "Development of drought vulnerability index using Delphi method considering climate change and trend analysis in Nakdong river basin." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 6, pp. 2245-2254.
- Yang, J.-S., Park, J.-H., and Kim, N.-K. (2012). "Development of drought vulnerability index using trend analysis." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3, pp. 185-192.
- Yang, J.-S., Son, M.-W., Chung, E.-S., and Kim, I.-H. (2015). "Prioritizing feasible locations for permeable pavement using MODFLOW and multi-criteria decision making methods." *Water Resources Management*, Vol. 29, No. 12, pp. 4539-4555.