

# 낙동강 유역의 기후변화를 고려한 경향성 분석과 Delphi 기법을 이용한 가뭄 취약성 지수 개발

양정석\* · 김일환\*\*

Yang, Jeong-Seok\*, Kim, Il-Hwan\*\*

## Development of Drought Vulnerability Index Using Delphi Method Considering Climate Change and Trend Analysis in Nakdong River Basin

### ABSTRACT

A vulnerability index was developed for drought by using trend analysis and Delphi method. Twelve indicators were selected based on three groups, i.e., hydrological, meteorological, and humanistic groups. Data were collected from Nakdong river watershed. Three trend tests, i.e., Mann-Kendall, Hotelling-Pabst, and Sen's trend tests, were performed for standardizing the indicators and Delphi method was used to estimate the weights for individual indicators. The drought vulnerability index was calculated for seven regions in the Nakdong watershed and Hapcheon turned out to be the most vulnerable region among the study regions. The drought vulnerability index developed in this study can be applied to other regions in Korea for establishing national water resources management plan.

**Key words :** Climate change, Drought, Trend test, Delphi method, Vulnerability index

### 초 록

기후변화로 인한 이상기후 현상 중 가뭄에 대한 취약성 지수를 자료의 경향성 분석과 Delphi 기법을 이용하여 개발하였다. 낙동강 유역 자료를 이용하여 수문학적, 강우 사상적, 인문학적 자료를 바탕으로 총 12개의 지표를 선정하였다. 선정된 지표를 Mann-Kendall trend test, Hotelling-Pabst trend test, Sen's trend test 등 3가지 경향성 검정을 통해 표준화하고, 델파이 기법을 통해 국내의 수자원 전문가들의 의견을 반영하여 각 지표에 가중치를 부여하였다. 최종적으로 산출된 가뭄에 대한 취약성 지수에서 낙동강 유역 중에서 함천 주변 지역이 가뭄에 가장 취약하다는 결과가 나왔다. 이 취약성 지수 개발을 통해 우리나라 전 지역에 적용하게 되면 향후 수자원 정책 수립에 있어서 많은 도움이 될 것이라 사료된다.

**검색어 :** 기후변화, 가뭄, 경향성 검정, 델파이 기법, 취약성 지수

## 1. 서론

수자원 정책을 수립하는데 있어서 유역의 수량, 수질, 강수량 등과 같은 일차적인 지표만으로 평가하여 유역 관리를 하기에는 많은 어려움이 따른다. 유역 시스템을 구성하는 요소들을 종합적으로 평가할 수 있는 통합지수와 다양한 지표들이 필요하다(Kang et al.,

\* 정회원 · 교신저자 · 국민대학교 건설시스템공학부 부교수, 공학박사 (Corresponding Author · Kookmin University · [gyang@kookmin.ac.kr](mailto:gyang@kookmin.ac.kr))

\*\* 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정, 공학사 ([igablessed@nate.com](mailto:igablessed@nate.com))

Received March 25, 2013/ revised May 1, 2013/ accepted July 3, 2013

2008). 유역의 자연재해 등에 대응하는 능력을 평가하는 것은 취약성이라는 말로 정의되는데, 취약성이란 일반적으로 재해로 인해 발생하지 모르는 잠재적 피해량을 의미한다. IPCC(2007)에서는 취약성을 기후변화 예측 시나리오에 따른 민감도, 적응능력 등에 대한 함수관계를 통해 정의하였다. 현재 국제적으로 널리 사용되고 있는 수자원 분야의 취약성 지수로는 WPI (Water Poverty Index), SWSI (Social Water Stress Index) 등이 있다(Sullivan, 2002). 국내에서는 유역의 정책 수립 및 결정을 하기 위해 Yu and Kim (2008)에 의해 경기도 지역의 기후변화에 대한 상대적 취약성을 평가하였다. Son et al.(2011)은 DPSIR 개념을 이용한 기후변화를 고려한 홍수 취약성 지수를 북한강 유역에 적용하였다.

기후변화는 그 위험성이 날로 심각해지고 있는 가운데 IPCC 제 4차 보고서에서는 화석 연료의 사용량이 현재 추세를 유지한 채 증가한다면, 21세기 말 지구의 평균 기온은 약 6℃ 상승하고, 해수면은 59cm 상승할 것이라고 하였다. 기후학자들에 의하면 예측된 지구 기온의 증가 및 수문 순환의 극한 현상의 발생빈도가 높아지고 강도가 더 강해질 것이라 보았다(Hisdal et al., 2001). 이 중 가뭄은 누적된 기후현상으로부터 발생하는 극한 기후재해 중 하나라고 정의하였다(Oliver, 2005). 최근 50년간 우리나라의 강수량 분석 결과 무강우일수가 증가하며 80mm 이상 강우 일수 또한 증가하는 경향을 보이고 있다(National Institute of Meteorological Research, 2004). 기후변화의 영향으로 강우발생일수의 감소, 연강수량의 증가, 강우강도 증가현상이 나타남을 예상할 수 있으며 각각 홍수와 가뭄의 발생 가능성을 증가시킨다고 판단된다(Bae et al., 2008).

본 연구는 Yang et al.(2012)이 발표한 “경향성 분석을 통한 가뭄취약성 지수의 개발”의 후속 연구로 기존의 연구에서는 가뭄에 영향을 주는 10개의 지표를 선정하고 각 지표의 연 자료를 수집하여 이를 세 가지 경향성 검정을 통해 취약성 지수를 산정하였다. 이는 각각의 지표에 대해서 자료의 경향성만을 통해 각 지표가 가뭄에 영향력을 비교하지 않고 자료에 대해서 분석을 하여 취약성 지수의 객관성이 떨어지는 결과라고 할 수 있다. 이에 객관성을 확보하고 신뢰도를 높이기 위한 방법으로 델파이 방법을 적용하였다. 낙동강 유역을 대상으로 22개 지표에 대한 자료를 수집하고 델파이 방법의

설문 중 개방형 질문을 통해 지표를 선정하였다. 기존의 연구에서 개발된 세 가지 수문, 강우 사상, 인문분야에 대한 개념을 도입하고 가중치를 분야별 지표별로 각각 산정하였다. 이를 선정된 지표에 적용하여 낙동강 유역의 최종적인 가뭄에 대한 취약성 지수를 산정하였다. 가뭄에 대해서 경향성 검정을 통해 기후변화, 도시화, 복지수준의 증가 등에 대해서 고려하였고, 전문가들의 설문을 통해 가중치를 적용하여 보다 객관적이고 신뢰성 있는 지수를 개발하였다고 판단된다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 지표 선정

본 연구에서는 3가지 측면으로 나누어 지표들을 분류하였다. 총 22개의 지표들을 수문학적, 강우 사상적, 인문학적 지표로 나누었다. 이는 취약성 지수를 산정하는데 민감도와 적응능력을 고려해야 하는데 수문학적 분야와 강우 사상적 분야는 이 중 가뭄에 대한 민감도로 분류할 수 있고, 인문학적 분야는 적응 능력에 해당한다. 민감도에 해당하는 수문학적 분야는 수문분야 중 지표수와 지하수에 대한 분야로 구성되어 있고, 강우 사상적 분야는 가뭄에 영향을 주는 강우의 유형에 따른 지표가 포함되어 있는 분야이다. 3가지 분야 및 각각에 대한 지표는 Table 1에 정리되어있다.

#### 2.1.1 수문학적 지표

##### 2.1.1.1 지하수위

지하수위는 유역의 수자원 부존량을 가늠할 수 있는 척도가 될 수 있고 지하수위의 하강은 하천의 건천화, 지반침하, 해안 지방의 염수 침입 등 여러 문제들을 야기하게 된다. 우리나라의 경우 지하수 사용량이 많은 부분을 차지하고 있으며, 총강우량은 증가하나 강우 강도가 높아지는 추세에 있어 지하수위는 하강하는 추세이다.

##### 2.1.1.2 하천수위

하천수위는 주된 용수원으로 가뭄에 직접적인 영향을 미치는 지표 중 하나이다. 하천수위가 하강할 경우 주변 지역의 생활, 공업, 농업 등에 이용 가능한 수자원이 그만큼 저하한다고 볼 수 있다.

Table 1. Study Area and Gauge Station

No.	Groundwater Gauge Station	River Level Gauge Station	Rainfall Gauge Station	Administrative Area
1	Sangju-Seomun	Sabeol	Sabeol	Sangju
2	Daegu-Bisan	Hwawon	Sungju	Daegu
3	Daegu-Hyungpung	Goryeonggyo	Goryeonggyo	Daegu
4	Hapcheon-Jeogjung	Jukgo	Jukgo	Changnyung, Hapcheon
5	Changnyung-Youngsan	Jindong	Jindong	Changnyung, Haman

## 2.1.2 강우사상적 지표

### 2.1.2.1 연강수량

1년간 총 강수량으로 연강수량의 증가율은 높아지고는 있으나 사용할 인구가 증가하고 무강우일수가 증가하여 강우가 집중되어 수자원을 확보하는데 많은 어려움이 있다.

### 2.1.2.2 무강우일수

기상청의 강우관측소일별 관측 자료를 수집하여 유효강우량이 0인 경우를 포함하여 무강우일수를 산정하였다. 무강우일수가 많아 질수록 가뭄을 유발할 수 있는 확률이 늘어난다고 판단된다.

### 2.1.2.3 80mm/day 이상 연강우일수

일강수량 중 80mm 이상일 경우의 강우일수를 산정하여 강우가 집중되는 것에 대한 지표로 판단하였다. 강우가 집중되면서 무강우일수가 증가한다면 가뭄에 큰 영향을 준다고 판단된다.

### 2.1.2.4 강우편차율

연강수량의 월별 최대 발생 비율과 최소 발생 비율의 차이를 나타내는 것으로, 월별 최대 강수편차를 연강수량으로 나눈 값을 구한다. 강수량의 월별 변동성의 정도를 나타낼 수 있는 지표로 월별 최대 강수편차는 월별 최대 강수량과 최소 강수량의 차이를 통해 강수량의 절대 값을 통해 수자원 관리의 난이도를 추정할 수 있다.

### 2.1.2.5 강우집중률

1년간 일강수량이 80mm이상일 경우의 강우량을 합산하여, 연 강수량으로 나눈 값을 의미한다. 강우량을 통해 강우강도를 판단할 수 있는 기준이 된다고 판단된다. 가뭄이 심한 연도의 경우 일 강수량이 80mm 이상인 강우량이 전무할 수 있지만, 평균적으로 연강수량 중 16~20%의 비율을 차지한다.

## 2.1.3 인문학적 지표

### 2.1.3.1 1인당 가용 수자원

지역별 연강수량을 지역 인구로 나눈 것으로, 수용대비 가용수량은 가장 직접적으로 판단할 수 있으나, 용수 공급 현황을 고려하지 못한다면 현실적인 물수지 상황과 거리가 있을 수 있다.

### 2.1.3.2 수자원 부족량

지역별 연강수량을 지역면적을 곱한 값으로 실질적인 지역의 수자원에 대한 값이라고 볼 수 있다. 수자원 부족량은 1인당 가용 수자원과 증폭되는 성향을 볼 수 있지만 이는 각 지역에 대한 절대적인 수자원에 대해서만 고려를 하고 있는 값이다.

### 2.1.3.3 지역별 용수 이용량

지역별로 생활용수, 공업용수, 농업용수에 이용되는 수자원에 대한 값이다. 지역별로 공급되는 수자원에 비해 사용되는 양이 늘어날수록 가뭄에 대한 취약성을 나타낸다고 판단된다.

### 2.1.3.4 상·하수도 보급률

수자원을 활용하는 지역의 복지 수준을 가늠할 수 있는 척도로 보급이 높은 지역일수록 가뭄에 대한 대비가 되어 있다고 판단할 수 있다. 상·하수도 통계연보를 통해 수집하였다.

### 2.1.3.5 상·하수도 요금 격차지표

수자원에 대한 요금을 수집하여 지역별로 비교한 지표로 수자원 공급이 원활하고 처리할 수 있는 시설이 확충이 된 지역일수록 낮은 값을 나타낸다. 산정하는 방법은 다음과 같다.

$$\text{요금격차지표} = 1 - \frac{\text{지역요금} - \text{최저요금}}{\text{최고요금} - \text{최저요금}} \quad (1)$$

### 2.1.3.6 물이용 공평성

물이용에 대한 접근의 공평성을 나타내는 지표로 필요한 자료로는 상·하수도 보급률, 지역요금, 최고 및 최저 요금이 고려된다. 산정하는 방법은 다음과 같다(Dong et al., 2009).

$$I_{Equity} = \frac{I_{Water} + I_{Sewer} + I_{Price}}{3} \times 100(\%) \quad (2)$$

$$I_{Equity} = \text{물이용공평성}$$

$$I_{Water} = \text{상수도보급률}(\%)$$

$$I_{Sewer} = \text{하수도보급률}(\%)$$

$$I_{Price} = \text{상하수도 요금공평성}$$

$$= [\alpha + (1 - \alpha)\beta] \times 100(\%)$$

$$\alpha(\text{최저요금수준}) = \frac{\text{최저요금}}{\text{최고요금}}$$

$$\beta(\text{요금격차지표}) = 1 - \frac{\text{지역요금} - \text{최저요금}}{\text{최고요금} - \text{최저요금}}$$

### 2.1.3.7 물 재정 건전성

물 재정 건전성은 물이용 비용 중 물 관련 부담금 혹은 물 값 등으로 충당하는 비율을 말한다. 필요한 자료는 상수도 자본수입, 상·하수도 세입, 하수도 사용료, 원인자 부담금등을 포함한다. 산정하는 방법은 다음과 같다.

$$\text{물재정건전성} = \frac{\text{상수도자본수입} + \text{하수도사용료} + \text{원인자부담금}}{\text{상수도세입} + \text{하수도세입}} \times 100(\%) \quad (3)$$

### 2.1.3.8 물 자급률

지역에서 생산되는 용수로 지역에서 사용하는 용수를 직접 공급할 수 있는지에 대한 지표로 용수 이용량과 광역 상수도 이용량이 포함되어 있다. 물 자급률이 높을수록 지역의 가뭄을 해소하는데 능동적으로 대처할 수 있다. 물 자급률을 산정하는 방법은 다음과 같다.

$$\text{물 자급률} = \frac{\text{용수이용량} - \text{광역상수도 공급량}}{\text{용수이용량}} \quad (4)$$

### 2.1.3.9 취수율

용수 이용량 중 하천 및 지하수에서 직접 공급하는 양을 나타내며 취수율이 높을수록 수자원의 효율적인 이용을 하지 못하는 지역으로 분류되며 그 지역의 복지수준을 가늠할 수 있는 척도가 된다고 판단된다.

## 2.2 비모수적 경향성 검정을 통한 표준화

각각 선택된 지표들의 경우 각 지표 별로 편차가 심하여 가중치를 부여하기 전에 이에 대한 조정이 필요하다. 이를 위해 각 지표별로 표준화를 실시한다. 표준화의 방법에는 순위 매기기, Z-스코어, 스케일 재조정 등이 있는데 순위 매기기의 경우 가장 단순하고 간단한 방법이라 할 수 있지만 가중치를 부여할 경우 극값으로 치달을 수 있어 적합하지 못하다. Z-스코어 방법의 경우 표준화 방법으로 가장 보편적으로 사용되고 있지만 각 국가별 지표에 대한 자료가 정규분포를 나타낸다고 했을 때 신뢰도가 높은 방법이기에 부적합하다고 판단하였다(Yu and Kim, 2008). 스케일 재조정 방법은 표준편차보다 지표의 범위에 기반을 두어 모든 자료가 동일한 범위를 갖도록 하는 것이다.

본 연구에서는 지수 산정을 위해서 관측 자료의 경향성 분석을 통해 각 지표들을 표준화 시키는데 자료의 길이가 짧고 자료의 편차가 커 비모수적 경향성 검정을 통해 기울기와 경향성 유무를 통해 지수를 산정하였다. 연 자료 분석 시 t-Test, Spearman's Rho Test, Hotelling - Pabst Test, Mann - Kendall Test Sen's Test 등이 있다. 이 중 본 연구에서는 Mann - Kendall Test, Hotelling - Pabst Test, Sen's Test를 통해 경향성 유무를 판단하고 세 가지 방법의 경향성 검정에서 모두 경향성이 나타나면 신뢰성을 나타낸다고 판단하여 절대적으로 3점을 산정하고 각 지표별로 기울기를 통해 +, -를 판단하였다.

### 2.2.1 Mann-Kendall Test

Mann-Kendall Test (Mann, 1945)는 시계열 자료에서 경향성의 여부를 판단하기 위한 검정으로 비모수적인 통계기법을 활용하여 자료의 단조 경향을 분석하는데 수자원 분야에서 널리 사용되고 있다(Lee et al, 2010). 자료의 수가  $n$ 인 자료계열  $x$ 에서 다음과 같은  $S$ 를 다음과 같이 통계량으로 정의할 수 있다.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

여기에서  $n$ 은 관측값의 수이며  $x_j$ 와  $x_i$ 는 각 관측시점  $j$ 와  $i$ 에서의 관측 값이다. 그리고 각 관측 값을 쌍으로 비교하는 방법으로 증가(+), 감소(-), 상등(0)의 값을 이용할 수 있으며, 어떤 시점을  $i(1 \leq i \leq n)$ 로 하였을 때 관측 값  $x_i$ 는  $N$ 개의  $x_j - x_i(j > i)$  차분 쌍을 만들고 이차분의 부호를 계산하게 되면 통계량  $S$ 는 근사적으로 평균  $\mu = 0$ 이고 분산  $\sigma^2$ 는 다음과 같이 표시되는 정규 분포를 따른다.

$$\sigma^2 = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^g t_i(t_i-1)(2t_i+5)] \quad (6)$$

여기서  $g$ 는 동점처리에 필요한 동점그룹의 수이며,  $t_i$ 는  $i$ 번째 동점그룹의 자료수이다. 통계량  $S$ 가 정규분포를 따르므로 다음과 같이 표준정규변량  $Z$ 를 계산할 수 있다.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\sigma^2}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S_1}{\sqrt{\sigma^2}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

이와 같이 계산된 표준정규변량  $Z$ 가 표준정규분포 양측검정의 95% 신뢰도의 한계 값인  $Z = \pm 1.96$  사이에 들면 주어진 자료계열은 경향을 가지지 않는 것으로 판정한다.

### 2.2.2 Hotelling-Pabst Test

Hotelling-Pabst Test (Conover, 1971)는 자료의 수가  $n$ 인 주어진 자료계열  $Z$ 에서 오름차순으로 정렬하고, 자료계열  $Y$ 에 대해서 작성한 후 다음과 같은 통계량  $S$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$S = \sum_{i=1}^n [R(x_i) - i]^2 \quad (8)$$

여기서  $R(x_i)$ 는 자료계열  $X$ 의 순위다. 이와 같이 정의된 통계량은 근사적으로 평균  $\mu$ 와 분산  $\sigma^2$ 이 다음과 같이 표시되는 정규분포를 따른다.

$$\mu = \frac{n(n^2 - 1)}{6} \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \left[ \frac{n(n^2 - 1)}{6\sqrt{n(n-1)}} \right] \quad (10)$$

통계량  $S$ 가 정규분포를 따르므로 다음과 같이 표준정규변량  $Z$ 를 구한다.

$$Z = \frac{H - \mu}{\sigma} \quad (11)$$

여기서 계산된 표준정규변량  $Z$ 가 다음과 같은 경우 경향성은 가지지 않는 것으로 판정한다.

$$|Z| \leq \mu_{1-\alpha/2} \quad (12)$$

여기서  $\mu_{1-\alpha/2}$ 는 표준정규분포의  $1-\alpha/2$ 분위 수에 해당되는 값이며,  $\alpha$ 는 유의수준이다.

### 2.2.3 Sen's Test

Sen's Test (Salmi et al., 2002; Lee et al, 2006)는 이상값, 결측값 등이 있을 경우에도 경향성을 판단할 수 있는 방법으로 Sen의 경향성 추정자(estimator)를 구하기 위해서 기울기 추정값(slope estimate)을 다음과 같은 방법으로 구한다.

$$Q = \frac{x_i' - x_i}{i' - i} \quad (13)$$

여기서 관측시점  $i'$ 의 관측값은  $x_{i'}$ , 관측시점  $i$ 의 관측값은  $x_i$ 이다.  $i$ 는 일련 순서이고  $i' > i$ 이다. 따라서  $n$ 이 관측값의 개수라고 할 때,  $N' = n(n-1)/2$ 이다.

도출된  $Q$ 값을 크기에 따라 새로 나열한 후 중앙값(median)을  $N'$ 이 홀수일 경우,

$$S = Q_{[(N'+1)/2]} \quad (14)$$

$N'$ 이 짝수일 경우

$$S = \frac{Q_{[N'/2]} + Q_{[(N'+1)/2]}}{2} \quad (15)$$

로 구한다.

가설검정을 하기 위해  $S$ 에 대한 분산값이 필요한데, 작은 수의 자료에 적용시킬 수 있는 Kendall (1975)의 식을 수정하여 다음과 같은 분산 추정값을 구하는 식을 사용한다.

$$var(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (16)$$

여기서  $t_p$ 는 서로 같은 관측값을 갖거나 감지되지 않는(non-detect) 관측값의 수를 뜻하며,  $q$ 는 이러한 수이다. 이들 값을 이용하여 다음과 같은 신뢰 구간을 구할 수 있다.

$$M_1 = \frac{N' - Z_{1-\alpha} [var(s)]^{1/2}}{2} \quad (17)$$

$$M_2 = \frac{N' + Z_{1-\alpha} [var(s)]^{1/2}}{2} \quad (18)$$

$Z_{1-\alpha}$ 는 정규분포의  $(1-\alpha)100\%$  지점으로, 경향성이 없다는 귀무가설에 대하여  $M_1$ 과  $M_2$ 에 해당되는  $Q$ 값이 0을 포함하지 않으면 귀무가설은 기각되어 경향성이 있다고 판단할 수 있다.

### 2.2.4 지표별 표준화

수문학적 지표는 비모수적 경향성 검정을 통해 모두 하강할 경우 3점, 2개의 분석 방법에서 하강할 경우 2점, 1개의 검정에서만 하강할 경우 1점, 유의하지 않고 하강할 경우 0.5점을 부여했다. 수위가 상승할 경우에는 반대로 -3점에서 -0.5점으로 산정하였다.

강우 사상적 지표는 연강수량의 경우 수문학적 지표와 마찬가지로 하강할 경우 3점에서 0.5점, 상승할 경우 -3점에서 -0.5점을 부여하였고, 무강우일수, 80mm/day 이상 연강우량, 강우편차율, 강우집중률은 상승할 경우 3점에서 0.5점, 하강할 경우 -3점에서 -0.5점을 산정하였다.

인문학적 지표는 1인당 가용 수자원량, 수자원 부존량, 상, 하수도 보급률, 물이용 공평성, 물 재정 건전성, 물 자급률, 취수율의 경우 3가지 비모수적 경향성 검정에서 모두 하강할 경우 3점을, 유의하지는 않으나 선형 회귀분석에서 하강할 경우 0.5점을 산정하였고, 반대의 경우 -3점에서 -0.5점을 산정하였다. 지역별 용수

이용량, 상, 하수도 요금격차 지표의 경우에는 상승할 경우 3점에서 0.5점을 부여하였고, 하강할 경우 -3점에서 -0.5점을 부여하였다.

### 2.3 델파이 방법을 이용한 가중치 부여

Delphi 기법은 적절한 예측방법을 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 미래 예측 방법이다. 해수담수화분야의 전문가를 선정하고 다단계 연구를 진행하는데 막대한 시간이 필요하며 극단적 의견을 처리하는데 어려움이 있지만 문제를 냉정하고 객관적으로 검토할 수 있다는 장점이 있다(Lee, 2001). 설문은 참여그룹 중 소수의 극단적 의견에 대한 재조정을 고려하고 객관적인 결론을 도출하기 위해 총 3번의 설문을 진행하였으며 각 단계별 피드백을 통해 의견을 수렴하였다. 1차 델파이 설문은 개방형 질문을 통해 지표의 선정에 대한 의견을 수렴하였고, 2차, 3차 설문을 통해 지표의 가중치를 결정하였다. 총 22명을 대상으로 설문을 실시하였으며 여러 대학의 수자원 분야 교수 6명, 박사 과정 3명, 석사 수료 5명, 석사 과정 2명이 참여하였다. 또한 수자원 실무를 담당하고 있는 기업의 대리 이상 3명이 구성되었고, 수자원 관련 공기업에서 3명이 설문에 참여하였다.

가중치 산정방법은 다음과 같다.

$$Y = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times \beta_i \times X_i \quad (19)$$

$\alpha$  = 분야별 가중치

$\beta$  = 인자별 가중치

$X$  = 표준화한 지수

$Y$  = 최종 가뭄 취약성 지수

표준화한 지표에 Delphi 기법을 통해 결정된 가중치를 부여한다.

### 3. 연구 지역

연구 지역은 낙동강 유역 중 강우관측소, 하천 및 지하수위 관측소를 파악하여 관측소간의 거리가 10km 이내인 지점으로 선별하였다. 강우와 하천수위는 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)의 관측 자료를 활용하였으며, 지하수위는 국가지하수관측망(GIMS)의 관측 자료를 이용하였다. 각 관측자료의 길이가 최소 8년 이상이며 연속된 결측일이 최장 10일 이하인 지역을 선정하였다. 현재 연구는 4대강 사업전의 경향성을 분석하였고

Table 2. Selected Indicators

Item	Group	Detailed Indicators
Drought Vulnerability	Hydrology	Annual Average Groundwater Level
		Annual Minimum Groundwater Level
		Annual Average River Level
		Annual Minimum River Level
	Precipitation Pattern	Number of Non-Rainy Days
		Rainfall Concentration Ratio
		Rainfall Deviation
	Humanity	The Amount of Water Available per Capita
		Water Usage Equity
		Financial Soundness for Water Resources
Local Water Independence Ratio		
		Water Withdrawal Ratio

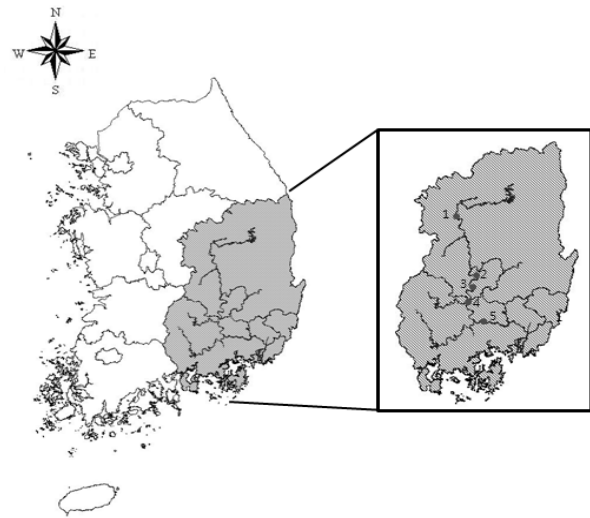


Fig. 1. Study Area

사업 후의 자료는 길이가 짧아 그에 대한 경향성을 판단하기에 무리가 있어 사업전의 자료에 대해서 경향성을 분석하여 지수를 산정하였다. 그 결과 구미, 칠곡, 낙단을 제외한 총 5개 지역을 선정할 수 있었다. 각 연구 지점별 관측소명은 다음과 같이 Table 2와 Fig. 1에 정리하였다.

### 4. 연구 결과

#### 4.1 1차 델파이 설문 조사를 통한 지표의 선정

1차 델파이 설문은 개방형 질문으로 22개의 지표에 대한 의견을 수렴하고 부적합한 지표들에 대한 의견을 종합하고 전체 전문가 집단 중 80% 이상의 의견이 부적합하다고 판단하였을 때 그 지표들

은 제외하고 최종적으로 가뭄에 영향을 미치는 지표들을 선정하였다. 선정된 지표는 다음의 Table 3과 같다.

최종적으로 선정된 지표는 총 12개로 수문학적 지표가 4개, 강우 사상적 지표가 3개, 인문학적 지표가 5개로 구성되었다. 수문학적 지표 중 제외된 것은 연 최대 지하수위, 연 최대 하천수위로 가뭄에 미치는 영향이 미미하여 제외되었다. 강우 사상적 지표에서는 연 강수량, 80mm/day 이상 연 강우일수가 제외되었다. 연 강수량의 경우 강수량의 증가량을 살펴볼 수 있는 지표이지만 가뭄에 미치는 영향을 미치지 못하고 선정된 지표 중 강우 집중률에서 강우 강도에 대해서 고려할 수 있어 가뭄에 더 큰 영향을 미친다는 이유로 제외되었다. 80mm/day 이상 연 강우일수 또한

강우 집중률과 중복되는 성향을 가지는 지표로 최종적인 지표에서는 제외되었다. 인문학적 지표에서는 수자원 부족량이 1인당 가용 수자원과 중복되는 성향을 가져 제외되었고, 지역별 용수 이용량은 물 자급률에 포함되어 있어 중복되며 용수 이용량만으로는 가뭄에 영향을 미치지 않는다는 이유로 제외되었다. 상, 하수도 보급률과 상, 하수도 요금 격차 지표는 물이용 공평성을 통해 모두 고려할 수 있는 지표로 정의되어 최종적인 지표에서 제외되었다.

#### 4.2 경향성 검정을 통한 표준화

최종적으로 선정된 지표들의 자료를 Mann-Kendall Test, Hotelling-Pabst Test, Sen's Test를 통해 경향성 유무에 따라 표준화를

Table 3. Drought Vulnerability Index Before the Application of Delphi Method

Index	Gangjeong	Dalseong	Sangju	haman	Hapcheon
Annual Average Groundwater Level	0.5	0.5	3	-0.5	3
Annual Minimum Groundwater Level	-0.5	3	-0.5	-0.5	3
Annual Average River Level	0.5	3	3	3	3
Annual Minimum River Level	3	3	3	3	0.5
Number of Non-Rainy Days	-0.5	-0.5	0.5	0.5	-0.5
Rainfall Concentration Ratio	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Rainfall Deviation	0.5	0.5	3	0.5	3
The Amount of Water Available per Capita	3	0.5	0.5	0.5	0.5
Water Usage Equity	-3	-3	-0.5	-3	-3
Financial Soundness for Water Resources	-0.5	-0.5	-3	0.5	-0.5
Local Water Independence Ratio	-0.5	-0.5	0.5	3	2
Water Withdrawal Ratio	-0.5	-0.5	-3	-0.5	-1
Vulnerability index	1.5	5	6	6	9.5

Table 4. Indicator Through the Delphi Method the Weights for Results

Item	Group	Weights for groups		Indicators	Weight for indicators	
		Sum	Weight		Sum	Weight
Drought Vulnerability	Hydrology	1	0.316	Annual Average Groundwater Level	1	0.256
				Annual Minimum Groundwater Level		0.219
				Annual Average River Level		0.354
				Annual Minimum River Level		0.171
	Precipitation pattern		0.396	Number of Non-Rainy Days	1	0.305
				Rainfall Concentration Ratio		0.392
				Rainfall Deviation		0.303
	Humanity		0.288	The Amount of Water Available per Capita	1	0.233
				Water Usage Equity		0.226
				Financial Soundness for Water Resources		0.162
				Local Water Independence Ratio		0.226
				Water Withdrawal Ratio		0.153

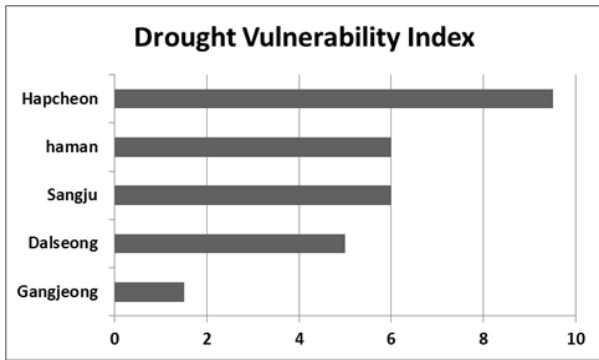


Fig. 2. Drought Vulnerability Index Before the Application of Delphi Method

통해 다음과 같은 결과가 나왔다. 자세한 사항은 Table 4와 Fig. 2에 자세히 나타났다.

표준화의 결과를 보게 되면 합천 지역이 9.5로 가장 높은 점수를 가지게 되었다. 합천 지역은 연 평균, 최저 지하수위와 연 평균 하천수위가 경향성을 가지며 하강하고 있고 강우 편차율이 증가하는 경향성을 띄어 최고점인 3점을 받게 되었다. 물이용 공평성과 취수율에서 가뭄의 위협성을 해소하고 있지만 다른 부분의 위협성을 해소하기에 부족한 모습을 보이고 있다. 상주와 함안 지역에서 6점을 나타내면서 가뭄에 취약한 지역으로 나타났다. 상주 지역은 수문학적 지표인 연 평균 지하수위와 연 평균 하천수위, 최저 하천수위가 하강하는 경향성을 띄며 유의하게 나타나 수문학적 지표에서만 8.5를 차지하고 있다. 수문학적 관점에서의 관리 방안이 필요하다고 판단된다. 강우 사상 지표에서도 강우 편차율이 증가하는 경향을 가지며 3점을 획득하게 되어 수자원 관리에 어려운 지역이라고 판단된다. 함안 지역은 연 평균 하천수위와 연 최저 하천수위에서 하강하는 경향을 띄고 있어 3점을 나타내고 있다. 또한 물 자급률에서 하강하는 경향을 보이며 가뭄을 해소하는데 많은 어려움이 있을 것으로 보여 진다. 표준화를 통해 가중치의 개념 없이 각 지표가 모두 -3점에서 3점을 지니고 있어 대입하게 되면 다음과 같은 산정 결과가 나타나게 된다. 가뭄에 영향을 미치는 정도가 같다고 판단할 수 없기 때문에 이에 대해서 가중치를 산정하여 보다 정확성 있는 결과가 필요하다.

### 4.3 델파이 방법을 통한 최종 가중치 산정 결과

델파이 방법을 이용하여 설문을 통해 산정된 가중치 결과이다.

Fig. 3~6는 최종 설문을 바탕으로 만들어진 델파이 차트이다. 델파이 차트의 경우 회색으로 나타난 막대가 중간 값의 분포를 나타내고 검은색으로 나타난 막대가 상위 25%의 분포를 나타내고 있다. 얇은 막대의 경우 중간 값에서 최댓값과 최솟값의 차이를 나타내주고 있다. 델파이 설문 응답을 바탕으로 이를 도시화한

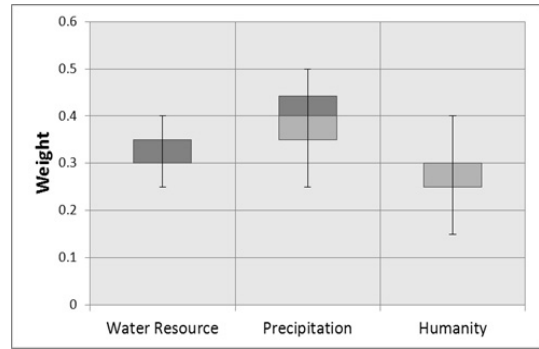


Fig. 3. Delphi Chart for Groups

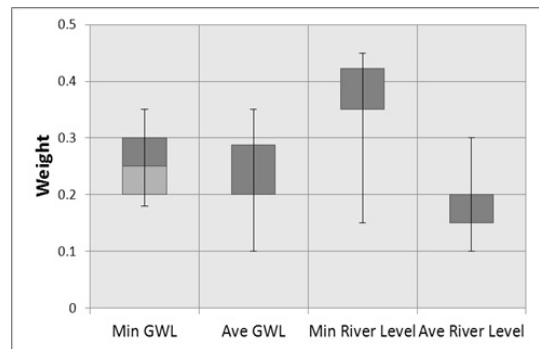


Fig. 4. Delphi Chart for Hydrology Indicators

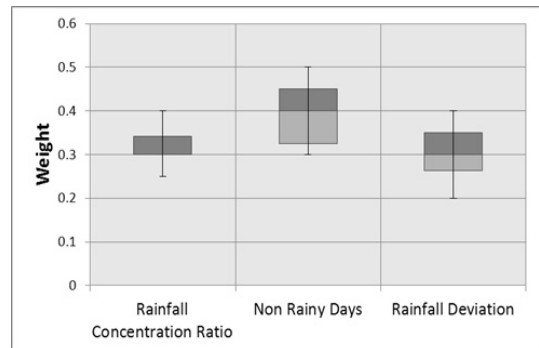


Fig. 5. Delphi Chart for Precipitation Indicators

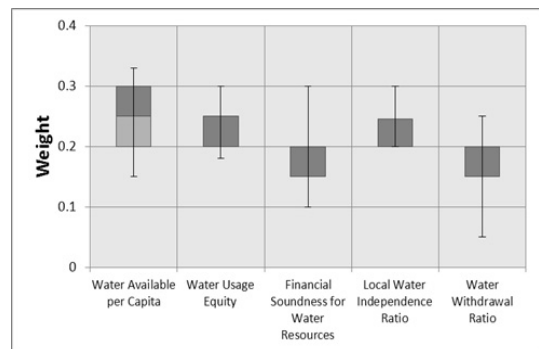


Fig. 6. Delphi Chart for Humanity Indicators



Table 5. Drought Vulnerability Index

Index	Gangjeong	Dalseong	Sangju	haman	Hapcheon
Annual Average Groundwater Level	0.013	0.013	0.081	-0.013	0.081
Annual Minimum Groundwater Level	-0.012	0.069	-0.012	-0.012	0.069
Annual Average River Level	0.019	0.112	0.112	0.112	0.112
Annual Minimum River Level	0.054	0.054	0.054	0.054	0.009
Number of Non-Rainy Days	-0.020	-0.020	0.020	0.020	-0.020
Rainfall Concentration Ratio	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026	-0.026
Rainfall Deviation	0.020	0.020	0.120	0.020	0.120
The Amount of Water Available per Capita	0.067	0.011	0.011	0.011	0.011
Water Usage Equity	-0.065	-0.065	-0.011	-0.065	-0.065
Financial Soundness for Water Resources	-0.008	-0.008	-0.047	0.008	-0.008
Local Water Independence Ratio	-0.011	-0.011	0.011	0.065	0.043
Water Withdrawal Ratio	-0.007	-0.007	-0.044	-0.007	-0.015
Vulnerability index	0.025	0.143	0.270	0.167	0.312

차트이다. 대부분의 델파이 차트에서 대부분이 의견이 모아지면서 가중치의 신뢰성을 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 연 최저 하천수위는 최솟값이 많이 낮게 나타나는데 이는 설문 참여자 중 연 최저 하천수위에 대해서 연 중 최저 하천수위의 수위만으로 가뭄 여부를 판단하는데 신뢰성이 조금 떨어진다는 의견이었다. 이로 인해 중간 값과 최솟값의 차이가 크게 나타나게 되었다. Table 5는 설문을 통해 얻어진 최종 가중치를 산정하였다.

설문결과 수문학적 지표, 강우 사상적 지표, 인문학적 지표 중 강우 사상적 지표가 최고 점수 1중 0.396을 나타내며 가장 큰 가중치를 가졌고 인문학적 지표가 0.288로 가장 낮은 가중치를 갖게 되었다. 수문학적 지표에서는 연 최저 하천수위가 네 가지 지표 중 0.354로 가장 높게 나타났고 연 최저 지하수위가 0.256의 가중치를 갖게 되었다. 강우 사상적 지표 중 무강우일수가 0.392로 가장 높게 나타났으며 강우 집중률과 강우 편차율이 0.305, 0.303의 가중치를 갖게 되었다. 인문학적 지표 중에서는 1인당 가용 수자원이 0.233으로 가장 높게 나타났으며 가뭄에 가장 큰 영향을 미친다는 결과가 나왔다. 물이용 공평성과 물 자급률이 0.226으로 다음으로 영향을 미친다는 의견이었다. 이를 바탕으로 최종적인 가뭄 취약성 지수를 산출하였다.

#### 4.4 최종 가뭄취약성 지수 개발

경향성 검정으로 표준화한 지표에 가중치를 적용한 결과이다. 표준화만을 하였을 때 9.5로 가장 높은 취약성을 보였던 합천 지역은 가중치를 적용하였을 때 0.312로 나타났다. 상주와 함안은 표준화 후 6점을 받았으나 가중치 적용 후 각각 0.27과 0.167을 받으며 많은 차이가 나타났다. 이는 가중치를 적용하게 되면서

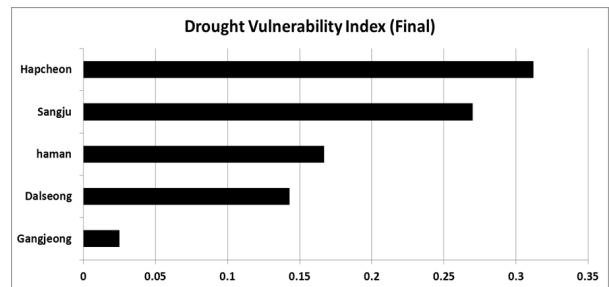


Fig. 7. Drought Vulnerability Index

강우 사상 분야에서 가뭄에 취약함을 드러내면서 많은 점수를 얻게 되었고 함안은 상대적으로 인문분야에서 취약함을 드러냈으나 가중치를 적용했을 때 가중치가 적게 산정되어 최종적인 가뭄 취약성 지수에서는 더 낮게 나타났다. 경향성 검정을 통한 표준화한 지수를 사용하게 되면 가뭄에 영향을 끼치는 각각의 영향력이 다른데 바로 적용하여 취약성을 평가하기에는 많은 무리가 있다. 델파이 방법의 설문을 통해 여러 수자원 분야의 전문가들의 의견을 반영하여 가중치를 결정하였다. 이를 적용하여 산출된 최종 취약성 지수는 수치적으로 모니터링의 개념을 포함한 지수와 더불어 수자원 전문가들의 의견을 반영하여 객관적이고 신뢰성을 높인 취약성 지수라고 판단된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 과거의 자료를 수집하여 이에 대한 경향성을 통해 모니터링의 개념을 포함한 지수를 개발하였다. 이는 과거

자료를 통해 기후변화 및 도시화, 복지 등의 변화가 포함되어 있는 가뭄 취약성 지수이다. 이에 수자원 분야 연구를 하고 있는 전문가 집단을 구성하여 델파이 방법의 설문지를 통해 각 분야별 각 지표별 가중치를 달리하여 최종적인 취약성 지수를 산정하여 객관성을 부여하였다. 이를 낙동강 유역의 강정, 달성, 상주, 함안, 함천에 적용하였다.

가중치를 부여하기 전에는 칠곡과 함천이 가장 취약한 지역으로 나타났지만 최종 가뭄 취약성 지수 산정 결과 함천이 가장 취약한 지역으로 나타났다. 또한 가중치를 부여하였을 때 상주 또한 상대적으로 취약한 지역으로 나타났다. 가뭄 취약성 지수를 산정하는데 있어서 각각의 지표가 중요하지만 취약함의 영향을 미치는 정도는 모두가 다르다. 이에 수자원 분야의 전문가 집단을 구성하여 의견을 반영한 개별적인 가중치를 부여하는 것이 객관성과 신뢰성을 높인 최종적인 취약성 지수라고 할 수 있다.

경향성 검정을 통한 표준화 방법에서 중요한 것은 자료의 길이와 신뢰성이라고 할 수 있다. 각 기관에서 관리하고 있는 하천수위, 지하수위 등의 값은 결측일이 다수 발견되었고, 지하수위의 경우 자료의 길이가 짧다. 경향성 검정을 통해 모니터링의 개념을 도입하여 취약성 지수 산정방법을 개발한 결과 관측기간의 장기화와 더불어 자료의 길의 향상이 이루어진다면 기후변화, 도시화, 복지의 시간에 흐름에 따른 취약성 지수의 변화 또한 도모할 수 있을 것이라 판단된다.

가중치를 결정하는데 있어서 수자원 전체적인 방면에 대해서 설문지를 실시하였고 이에 대한 것을 적용하였다. 후속 연구로 이에 대해서 지역적인 편차를 고려하고 지역적인 특성을 파악하여 설문지를 실시한다면 지역 특성에 따른 가중치를 달리하여 보다 정확한 취약성 지수가 산정될 수 있을 것이라 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2012년 교육과학기술부 기초연구사업-중견연구자(핵심연구)의 연구지원비(2012-005348)를 지원받아 수행된 연구입니다.

## References

Bae, D. H., Jung, I. W. and Chang, H. (2008). "Long term trend of precipitation and runoff in Korean river basins." *Hydrological Process*, Vol. 22, No. 14, pp. 2644-2656 (in Korean).

Choi, D. J., Park, D. H., Park, S. J., Lee, J. H. and Lee, H. J. (2009). "Development of water policy indicators : Water use indicators." *Journal of Water Resource Association*, KWRA, Vol. 11, No. 3, pp. 156-160 (in Korean).

Conover, W. J. (1971). *Practical nonparametric statistics*, Wiley.

Hisdal, H., Stahl, K., Talaksen, L. M. and Demuth, S. (2001). "Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent." *International Journal of Climatology*, Vol. 21, No. 3, pp. 317-333.

IPCC (2007). *Climate change 2007: The physical science synthesis report*, Cambridge University Press, Cambridge.

Kang, M. G., Lee, K. M., Ko, I. H. and Jeong, C. Y. (2008). "Development of a integrated indicator system for evaluating the state of watershed management in the context of river basin management using factor analysis." *Journal of Water Resource Association*, KWRA, Vol. 44, No. 3, pp. 277-291 (in Korean).

Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*, Charles Griffin, London, p. 202.

Lee, J. J., Jang, J. Y. and Kwak, C. J. (2010). "An analysis of temporal characteristic change for various hydrologic weather parameters (I) - On the basic statistic, trend." *Journal of Water Resource Association*, KWRA, Vol. 43, No. 4, pp. 409-419 (in Korean).

Lee, J. S. (2001). *Method of Delphi*, Publisher of Education and Science, Science Education (in Korean).

Lee, J. Y., Yi, M. J., Lee, J. M., Ahn, K. H., Won, J. H., Moon, S. H. and Cho, M. J. (2006). "Parametric and non-parametric trend analysis of groundwater data obtained from national groundwater monitoring stations." *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, KoSSGE, Vol. 11, No. 2, pp. 56-67 (in Korean).

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, pp. 245-259.

National Institute of Meteorological Research (2004). *Regional climate scenarios for climate change, output technology(III)* (in Korean).

Oliver, J. E. (2005). *Encyclopedia of world climatology*, Springer, Berlin Heidelberg New York, p. 855.

Salmi, T., Maatta, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T. and Amnell, T. (2002). "Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the mann-kendall test and sen's slope estimates -The excel template application makesens." *Finnish Meteorological Institute*, Helsinki, p. 35.

Son, M. W., Sung, J. Y., Chung, E. S. and Jun, K. S. (2011). "Development of flood vulnerability index considering climate change." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 3, pp. 231-248 (in Korean).

Sullivan, C. A. (2002). "Calculating a water poverty index." *World Development*, Vol. 30, No. 7, pp. 1195-1210.

Yang, J. S., Park, J. H. and Kim, N. K. (2012). "Development of drought vulnerability index using trend analysis." *Journal of Water Resource Association*, KWRA, Vol. 32, No. 3B, pp. 185-192 (in Korean).

Yu, G. Y. and Kim, I. A. (2008). *Introduction method development and vulnerability assessment index of climate change*, Korea Environment Institute (in Korean).