

계층화 분석기법을 이용한 해수침투 취약성지수 개발

양정석* · 김일환**

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

Development of Seawater Intrusion Vulnerability Index Using AHP

ABSTRACT

Sea level rise due to global warming causes seawater intrusion into aquifers in coastal areas. Seawater intrusion vulnerability index was developed using PSR (Pressure, State, Response) model and analysis hierarchy process (AHP). Coastal regions in Korea, Gangwon-do Sokcho-si, Incheon-si Ganghwa-gun, Chungcheongnam-do Taean-gun, Jeollanam-do Yeosu-si, Jindo-gun were chosen and 14 indicators were selected by considering the humanities, economic, social, environmental aspects. Re-scaling method was used for the standardization of indices and questionnaire survey was performed to calculate weight values for each index. The results showed that Yeosu-si was selected as the most vulnerable region to seawater intrusion. The seawater intrusion index developed in this research can be used to analyze the vulnerable regions to seawater intrusion and to establish a policy to minimize the seawater intrusion problems in coastal regions.

Key words : Climate change, Seawater intrusion, Analysis hierarchy process (AHP), Vulnerability index

초록

기후온난화로 인해 해수면 상승은 연안지역의 해수침투 피해를 야기했다. 해수침투에 대한 취약성 지수를 PSR 모형과 계층화 분석 방법(AHP)을 이용하여 개발하였다. 우리나라 삼면의 연안지역 중 강원도 속초시, 인천시 강화군, 충청남도 태안군, 전라남도 여수시, 진도군을 선정하여 인문, 경제, 사회, 환경 등의 자료를 바탕으로 14개 지표를 선정하였다. 스케일 재조정방법을 통해 지표의 표준화를 실시하고, 전문가들의 의견을 반영한 설문으로 얻어진 가중치를 부여하여 해수침투 취약성 지수를 산정하였다. 그 결과 전라남도 여수시가 해수침투에 가장 취약한 지역으로 선정되었다. 개발된 해수침투 취약성 지수는 해수침투 피해를 최소화 할 수 있는 향후 정책을 결정하는 중요한 도구 및 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 기후변화, 해수침투, 계층화 분석방법(AHP), 취약성 지수

1. 서론

20세기에 접어들면서 전 세계는 기후 온난화로부터 야기된 해수면 상승으로 연안지역의 해수침투 피해에 대해서 경고하고 있다. 해수면 상승은 연안지역의 해수침투 피해를 심화 시키고 있다. 해수침투로 인한 1차적인 영향은 연안지역의 해수 침범 영역이 증가하는 것이다. 해수침투가 진행됨에 따라 인간의 활동에 제약을 주는 지하수의 오염, 농작물의 염수 피해, 산업 활동의 제약 등 피해가 늘어가고 있다. 또한 연안 생태계의 균형을 파괴하여 그 피해는 갈수록 심해지고 있다. 우리나라만 해도 전국 국가산업단지의 78%가 연안에 위치하고 있어 해수침투를 막고 피해를 줄이기 위한 연구는 절실하게 필요한 입장이다(Yook et al., 2011).

* 정회원 · 교신저자 · 국민대학교 건설시스템공학부 부교수, 공학박사 (Corresponding Author · Kookmin University · jyang@kookmin.ac.kr)

** 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정, 공학사 (Kookmin University · igablessed@nate.com)

Received September 3, 2014/ revised October 8, 2014/ accepted January 6, 2015

전 세계적으로 해수면 상승에 대한 연구는 활발히 진행돼 왔으며 1991년 당시에 21세기의 해수면 상승률에 대해서 연 평균 0.6cm로 예측했고(IPCC, 1992), 최근의 제 4차 보고서에 따르면 21세기 말에는 최대 59cm에 이르는 해수면 상승을 예측했다(IPCC, 2007). Cho and Kim(2009)의 보고서에 따르면 지난 16년간 우리나라 주변 해역의 해수면 상승률은 평균 4.02mm/year로 지구 평균보다 약 30% 높게 나타났다. 해수면 상승이 진행되면서 이에 대한 대책 마련이 시급한 상황이다. 한정된 자원에 정책 혹은 시설 보강으로 막연하게 해수침투 피해를 대비한다는 것은 많은 어려움이 있다. 이를 위해 연안지역을 중심으로 정량적인 분석을 통해 취약한 지역을 선정하여 대비하는 것이 정책 결정자의 입장에서 최선의 방법이라고 할 수 있다.

이러한 해수침투 방지정책의 우선순위를 위해 미국 지질조사국(USGS, 1999; 2000)에서는 연안의 지형학적 특징, 해수면 상승률, 과거 해안선의 변화 등을 종합하여 연안 지역의 상대적 취약성을 정량화하는 연구를 시행하였다. Walker and CCIAP(2007)는 환경적인 요인 외에 사회 단위별로 인문, 사회, 경제 등의 평가요인을 달리하여 연안지역의 기후변화 취약성에 대해 연구를 시행하였다. 국내에서는 KHOA(2010)에서 연안 재해를 중심으로 하는 연안재해 취약성 평가를 실시하여 연안 시스템에서 발생하는 재해에 대해 취약성의 정도를 정량적으로 표시하는 방법으로 연구를 진행하였다. 그동안의 연안지역의 취약성 평가 및 지수에 대한 연구는 환경적인 요인만을 고려하거나 기후변화에 대한 취약성을 포괄적으로 접근하였다. 혹은 연안지역의 재해를 중심으로 이에 대한 취약성을 목적으로 하였다. UNEP(2005)의 연안 취약성 산정에서는 PSR 모형을 이용하여 총 5개 지표표를 사용하였다. 여기에 포함된 지표로는 인구밀도, 자연재해 발생 가능성, 식생대 면적, 지리적 노출도, 인간개발지수 등이 있다.

이에 본 연구에서는 연안지역의 기후변화로 인한 취약성 혹은 재해에 대한 취약성이 아닌 해수침투에 대한 취약성을 목표로 다양한 방면의 자료를 지역 간의 차이로 비교하여 이를 수치적인 분석과 더불어 전문가들의 의견을 반영하여 취약성에 대한 평가를 하는 지수 개발을 목표로 하였다. 해수침투에 대한 피해가 늘어나고 있는 가운데 정량적인 분석을 통한 정책의 우선순위를 결정하여 피해를 최소화해야 한다. 해수침투 취약성 지수를 산정하기 위해 지표의 선정은 OECD(1993)에서 개발한 PSR(Pressure - State - Response) 모형을 이용하여 자료를 정량화하고 Satty(1972)가 개발한 계층화 분석 방법(Analysis Hierarchy Process)을 통해 가중치를 부여하여 지수를 산정하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 계층화 분석과정(AHP)를 이용하여 우리나라에

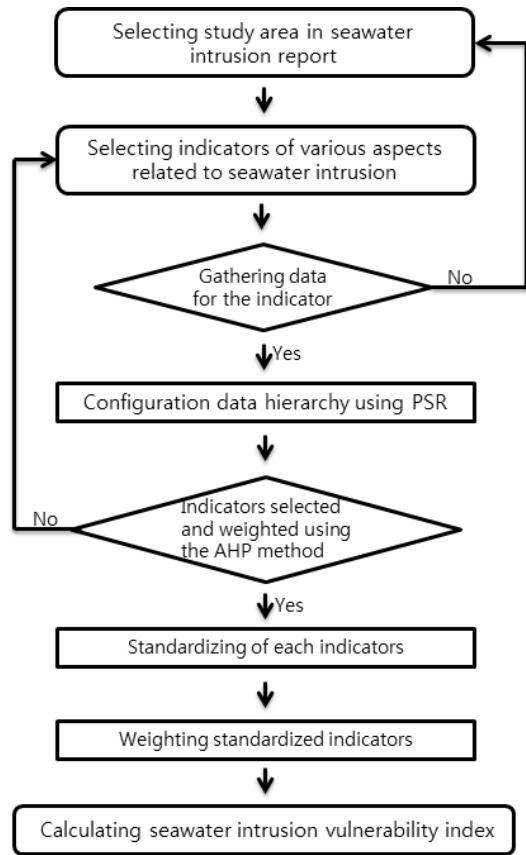


Fig. 1. Flow Chart

적용할 수 있는 해수침투 취약성 지수를 개발하였다. 한국농어촌공사에서 발행한 해수침투 조사 보고서(2012)의 해수 영향이 지속적으로 관찰할 필요가 있는 지역 중에서 선정하였다. 선정된 지역에 있어서 해수 침투에 영향을 미치는 환경, 인문, 사회, 경제 등의 다양한 방면의 자료를 수집하였다. 수집한 자료를 해수침투 취약성 평가를 위한 계층화를 위해 OECD(1993)가 개발한 지속가능성을 평가할 수 있는 개념모형인 PSR 모형을 이용하였다. 계층화된 자료를 바탕으로 계층화 분석과정의 1:1 쌍대 비교 설문을 실시하여 인자 선정 및 가중치를 결정하였다. 각 지표에 표준화를 실행하고 가중치를 부여하여 최종적으로 해수침투 취약성 지수를 산정하였다. 본 연구의 전체적인 순서는 Fig. 1에 있다.

2.1 연구지역

해수침투 조사 보고서(2012)의 해수 영향 지속 관찰 지역 중 해수침투에 영향을 미치는 자료를 수집 가능한 지역으로 선정하였다. 그 결과 우리나라의 다섯 지역이 선정 되었다. 인문, 경제, 환경 등의 자료는 국가통계포털(www.kosis.kr)에서 제공하는 2010년의 자료를 활용하였다. 강우자료는 기상청(www.kma.go.kr)에서

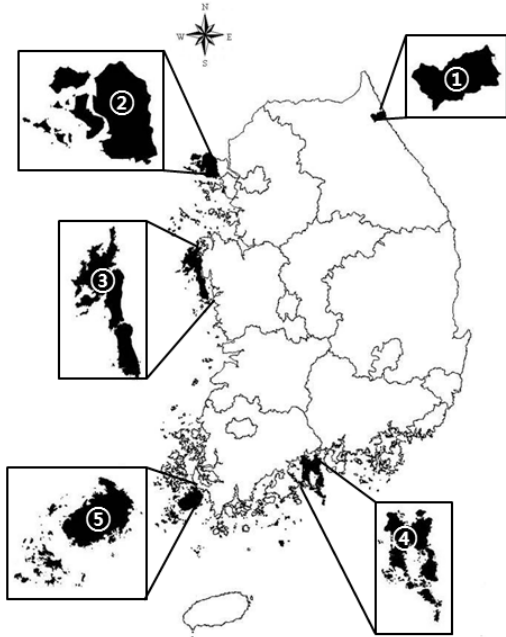


Fig. 2. Study Area

Table 1. Study Area Location

Sea	No.	Study Area
East sea	①	Gangwon-do Sokcho-si
West sea	②	Incheon-si Ganghwa-gun
	③	Chungcheongnam-do Taean-gun
South sea	④	Jeonlanam-do Yeosu-si
	⑤	Jeonlanam-do Jindo-gun

제공하는 각 지역의 자료를 수집하여 분석하였다. 지하수위 자료는 농어촌지하수넷(www.groundwater.or.kr)에서 제공하는 2007년부터 2010년까지의 자료를 이용하여 하강하는 추세를 분석하였다. 지하수 이용량 자료는 국가 지하수 정보센터(www.gims.go.kr)에서 제공하는 2010년의 자료를 활용하였다. 해수위는 국립해양조사원(www.khoa.go.kr)에서 제공하는 지역의 2007년부터 2010년까지의 자료를 이용하여 상승하는 추세를 분석하였다. 이 자료 중 결측일이 최장 10일 이하이고 2010년까지의 자료가 있는 지역을 선정하였다. 선정된 지역의 위치는 Fig. 2에 나타나 있다.

최종적으로 선정된 지역은 동해에서 강원도 속초시, 서해에서는 인천시 강화군, 충청남도 태안군, 남해는 전라남도 여수시와 진도군이 선정되었다.

2.2 PSR (Pressure-State-Response) 모형

다양한 분야에 대해서 취약성 평가를 할 때 중복되는 부분 혹은 기준의 경계가 모호한 지표들에 대해서 분류를 하여야 한다. 이를

위해 본 연구에서는 OECD(1993)에서 개발한 PSR 모형을 사용하였다. PSR 모형의 기본적인 개념은 인간의 활동들이 환경에 압력을 주어 자연의 상태에 영향을 미치게 되며 이러한 것에 대한 인식과 행동을 통해 정부 등에서 정책과 제도 혹은 인간의 활동을 억제하는 방법 등을 통해 반응한다는 것이다. PSR 모형은 서로의 인과관계에 주목하여 의사결정자들에게 도움이 될 뿐만 아니라 대중들이 관련 요소들에 대해서 서로 관계가 있음을 볼 수 있게 해준다.

본 연구에서는 연구지역의 해수침투로 발생하는 피해, 해수침투가 발생하게 되는 원인, 이에 대응하는 인간의 활동에 대해서 정량적인 평가를 하기 위해 PSR 모형을 이용하였다.

2.3 표준화 방법

선택된 지표들은 각각의 범위 및 단위가 다르다. 가중치를 적용하기 이전에 각 지표들의 자료에 대해서 표준화를 실시하여야 한다. 표준화 방법 중에는 순위 매기기, Z-스코어, 스케일 재조정 등이 있다.

순위 매기기는 표준화 방법 중 가장 간단하고 간편한 방법이다. 지표의 각 지역별 자료들에 대해서 오름차순 혹은 내림차순을 통해 순위를 정하는 방법이다. 이 방법은 간단하기는 하지만 지표들에 대한 수치가 간단하고 많은 정보를 내포하기에는 많은 어려움이 있다(Yu and Kim, 2008).

Z-스코어 방법은 표준화 방법 중 가장 보편적으로 사용되는 방법이다. 이는 모든 자료들에 대해서 표준정규분포로 변환하여 자료의 수치가 분포의 평균으로부터 표준편차의 차이를 통해 표준화된 변수 Z 값으로 나타내는 방법이다. 이 방법은 자료가 정규분포일 경우 큰 신뢰도를 갖지만 자료가 정규분포를 띄고 있지 않을 경우 가중치를 부여했을 때 극값으로 치달을 수 있다(Yu and Kim, 2008).

스케일 재조정 방법은 지표의 범위를 기반으로 하는 표준화 방법이다. 중간 값을 이용하여 정규화를 실시하여 지표들이 모두 동일한 범위를 갖도록 만든다(Nardo et al., 2005).

본 연구에서는 각 지표별로 지역별 편차가 있고 정규 분포를 띄지 않는 자료들이 많아 스케일 재조정 방법을 통해 자료들에 대해서 표준화를 실시하였다. 스케일 재조정 표준화 방법은 다음과 같다.

$$I_j^i = \frac{x_j^i - \min_j(x^i)}{\max_j(x^i) - \min_j(x^i)} \quad (1)$$

$i = \text{indicator No.}$
 $j = \text{study area No.}$

위의 식에서 i 는 각각의 지표를 나타내고 j 는 지역을 나타내며 I_j^i 는 i 번째 지표의 j 지역의 표준화된 지표이다.

2.4 계층화 분석과정(AHP)

해수침투 취약성 지수를 산정하는데 있어 다방면의 자료를 평가하기 위해 다양한 기준에 의해 평가가 이루어지므로 일정한 방법 및 체계가 없다면 최종적인 취약성 지수를 산정하는데 많은 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 복수 평가 기준을 만족시키기 위해 상대적 중요성을 결정하는 방법인 계층화 분석과정(AHP)을 사용하였다.

계층화 분석과정(AHP)은 다수의 요소들을 계층적으로 분류하여 전문가의 의견조사에 의한 주관적 가중치를 추정하여 구하는데 사용한다. 일반적인 가중치를 추정하는 방법에는 전문가의 의견을 이용하여 구한 가중치와 통계적 방법에 의해 구한 객관적 가중치를 종합한다. 전문가의 도의가 이루어진 보편적 결과를 주는 주관적 방법과 자료의 특성을 반영하는 객관적 방법을 종합함으로써 각 방법의 장점을 도모할 수 있는 기법으로 Satty(1972; 1977)에 의해 개발되었다.

계층화 분석과정(AHP)의 가장 큰 장점은 1:1 쌍대비교를 통해 수많은 기준 혹은 지표들에 대해서 가중치 또는 중요도를 산출해낼

수 있다는 것이다(Satty, 1972).

계층화 분석과정(AHP)의 산정방법은 다음과 같다.

2.4.1 상대적 중요도 계산

1:1 쌍대비교를 통해 두 요소 간의 선호도 혹은 상대적인 중요도를 나타내는 측정척도가 나타난다. 계층화 분석 방법(AHP)에서는 인지심리학 분야의 연구결과를 기초로 하여 9점 척도를 기본형으로 이용하고 있으며 각 수치는 Table 2와 같다(Satty, 1980).

설문을 통해 얻어진 1:1 쌍대 비교 척도를 이용하여 지표들의 우선순위를 도출하기 위해서 이원비교 행렬을 구성하고 단 하나의 숫자로 나타내기 위해 가중치 계산을 하여야한다. 가중치 계산 중 가장 확실한 방법인 Satty(1980)이 제안한 고유 벡터법을 사용하였다.

고유 벡터법은 의사 결정자가 한 계층에서 n 개의 평가항목에 대해서 이원비교행렬을 구성한다. $n \times n$ 을 갖는 $A = (a_{ij})$ 라는 행렬이 구성되고 $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$, 주대각선의 원소 값은 모두 1이 되는 역수행렬 성질을 갖게 된다.

비교행렬에서 가중치로 구성된 벡터 w 를 산정하기 위해 Satty (1980)은 다음과 같은 비교행렬 A 의 주 고유 벡터에 의한 방법을 제안하였다.

$$\begin{aligned} Aw &= \lambda w \\ |A - \lambda I| &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

고유치 λ 는 n 차 대수방정식을 통해 n 개의 근을 갖는다. 이중 가장 큰 고유치가 λ_{max} 이며 이때의 w 가 행렬 A 의 주 고유 벡터이다.

2.4.2 일관성 검증

계층화 분석 방법(AHP)는 일관성 비율에 의해 판단의 일관성을 측정하는데, Satty(1980)는 일관성 비율이 0.1 미만이면 합리적인 일관성을 갖는 것으로 판단하고, 0.2 미만일 경우 용납할 수 있는

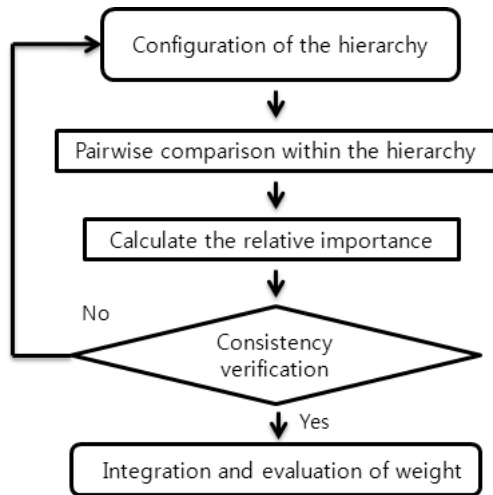


Fig. 3. Procedure of AHP

Table 2. Basic Standard of Pairwise Comparison

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to objective
3	Slight/Weak importance	Experience and judgement slightly favour one activity over another
5	Strong importance	Experience and judgement strongly favour one activity over another
7	Demonstrated importance	An activity is strongly favoured and its dominance is demonstrated in practice
9	Absolute importance	The evidence favouring one activity over another is of highest possible order of affirmation
2.4.6.8	Intermediate values between two adjacent judgements	When compromise is needed

Table 3. The *RI* Values for *n*

<i>n</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>RI</i>	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.51

Table 4. Description of Indicators

Factors	Indicators	Description (Year)	Reference
Pressure	P	The number of people who live in certain areas (2010)	http://kosis.kr
	PD	Population per unit area (2010)	http://kosis.kr
	GRDP	Gross regional domestic product (2010)	http://kosis.kr
	GVAFI	Gross value added and factor income (2010)	http://kosis.kr
State	GWL	Ground water level (2007-2010)	www.groundwater.or.kr
	SWL	Seawater level (2007-2010)	www.khoa.go.kr
	GWU	Ground water use (2010)	www.gims.go.kr
	NRD	The number of non-rainy days (2010)	www.kma.go.kr
	RCR	Rainfall concentration ratio (2010)	www.kma.go.kr
	PIA	Percentage of impervious area (2010)	http://kosis.kr
	LC	Length of coastline (2010)	http://kosis.kr
Response	GMW	The number of ground water monitoring well (2010)	www.gims.go.kr
	IFS	The number of irrigation facilities and sea walls (2010)	http://kosis.kr
	WSR	Water supply ratio (2010)	http://kosis.kr

수준의 일관성을 갖는다고 판단하였다. 일관성 비는 평균 무작위 지수(Random Index, RI)를 이용하여 계산한다.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1} \tag{3}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

주어진 *n*과 *RI*는 Table 3과 같다.

주어진 행렬에서 *CI*값이 순수한 무작위 행렬에 얼마나 접근하고 있는가를 나타내는 척도이다.

2.5 가중치 부여

계층화 분석 방법을 통해 전문가의 의견을 반영한 가중치를 산정하였다. 이를 최종적인 지수로 산정하는 방법은 다음과 같다.

$$I = \sum_{i=1}^4 w_p w_i P_i + \sum_{j=1}^7 w_s w_j S_j - \sum_{k=1}^3 w_r w_k R_k \tag{4}$$

위의 식에서 *w_i*는 Pressure 항목 지표에 대한 가중치, *w_p*는 Pressure 항목에 대한 가중치, *P_i*는 표준화된 Pressure 항목의 지표 값이다. 마찬가지로 *w_j*는 State 항목 지표에 대한 가중치,

*w_s*는 State 항목에 대한 가중치, *S_j*는 표준화된 State 항목의 지표, *w_k*는 Response 항목 지표에 대한 가중치, *w_r*는 State 항목에 대한 가중치, *R_k*는 표준화된 Response 항목의 지표이다.

3. 연구 결과

3.1 PSR 모형을 통한 지표 결정

PSR의 기본 개념은 인간의 활동들이 환경에 입력을 주며, 자연자원의 상태에 영향을 미쳐, 이에 대한 인식과 행동을 통해 사회가 정책과 제도 등을 통해 반응한다는 것이다. 이러한 서로의 인과관계에 대해 대중들이 환경 및 관련 요소들과 밀접하지는 않아도 상호간의 영향을 미치며 연결되어 있음을 알 수 있다.

해수침투로 인해 직접적으로 인간의 활동에 입력을 받는 요소로 인구, 인구밀도, 지역 내 총 생산, 지역 내 총 부가가치와 요소소득을 선정하였다. 해수침투로 인해 지역 내 인구 및 인구 밀도가 바뀌며 지역 내 총 생산 및 부가가치와 요소소득에 큰 영향을 받는다.

상태에 영향을 미치는 잠재적인 피해 가능성과 위험성을 갖는 요소로는 지하수위, 해수위, 지하수 이용량, 무강우일수, 강우집중률, 불투수면적 비율, 해안선의 길이를 선정하였다. 지하수위가 하강하고 해수위가 상승하면 해수침투는 심각해질 것이고, 지하수 이용량이 증가하고 불투수면적 비율이 증가하게 되면 지하수위가

하강하게 된다. 무강우일수가 증가하고 강우집중률이 증가하게 되면 강우강도의 증가로 인해 지하수계로 함양되는 수자원의 양이 감소하게 된다. 상대적으로 해안선의 길이가 길수록 해수침투에 불리한 요소로 작용한다. 상태에 포함되는 지표로 위의 7가지를 제외하고 초기에는 연강우량, 녹지비율, 함양률, 지하수 유출량, 대수층 두께, 투수계수, 지표의 투수계수 등 여러 가지의 지표들이 있었으나 녹지비율 및 지표의 투수계수는 불투수면적 비율과 밀접한 연관을 갖고 있으며 이 지표를 통해 고려할 수 있는 부분이라는 의견으로 제외되었다. 연강우량은 강우량만으로는 지하수에 큰 영향을 주기보다는 무강우일수가 많고, 강우집중률이 커지면 지하로 침투되는 수자원의 양이 줄어들어 지하수위를 낮추는 더 큰 요인으로 작용한다는 의견으로 제외되었다. 지역의 함양률, 지하수 유출량, 대수층 두께, 투수계수 등 지하수의 수문순환과 연관된 지표들에 대해서는 결과적으로 지하수위가 하강하는지 혹은 상승하는지가 더 큰 해수침투의 요인으로 작용한다는 전문가의 의견을 반영하여 제외하였다.

사람들의 인식과 행동에 영향을 미쳐 이에 대해 반응하는 요소로는 지하수위 관측정 개수와 수리시설 및 방조제 개수, 상수도 보급률이 있다. 지하수위 관측정에서 해수침투의 오염을 바로 관측하여 이에 대처할 수 있는 방안을 마련할 수 있다. 수리시설 및 방조제 개수가 많을수록 해수침투에 대한 영향을 적게 받으며 해수침투에 대한 대응 방안이다. 상수도 보급률이 높을수록 해수침투로 인해 오염된 지역에 대해서 수자원 공급이 원활하게 된다. 선정된 지표들에 대한 설명은 Table 4와 같다.

3.2 계층화 분석과정(AHP)를 이용한 가중치 산정

계층화 분석과정의 설문을 통해 각 계층 간의 요소 및 지표들에 대해서 1:1 쌍대 비교를 통해 가중치를 결정하였다. 설문은 총 36명에 대해서 실시하였으며 해수침투와 관련된 다양한 분야 및 계층에 대해서 실시하였다. 설문 응답자의 구성은 Table 5와 같다.

설문을 통해 일관성 지수 0.15 미만을 만족하는 23명에 대한 자료를 분석하여 가중치를 산정하였으며 그에 대한 결과는 Table 6과 같다.

전문가들의 설문을 통해 얻어진 가중치로는 해수침투의 상태에 영향을 미치는 State에 가장 중요한 요인으로 PSR 항목 중에서 가장 큰 값을 나타냈다. State 항목 중 지하수위 추세, 해수위 추세가 첫 번째, 두 번째로 큰 가중치를 얻었으며, 7개 지표 가중치의 평균이 0.143일 때 0.168과 0.153으로 나타난 해안 길이 및 지하수 이용량도 중요한 지표로 나타났다. 위의 가중치로 보아 상태에 영향을 미치는 지표들이 해수침투 취약성에 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

Table 5. Configuration of Questionnaire Survey Target

Major	No.
Water Resources	19
Ocean	12
Others	5
Total	36

Occupation	No.
Professor	4
Researcher	11
Student	12
Company	6
Others	3
Total	36

Career (year)	No.
above 15	7
10 - 15	12
5 - 10	11
below 5	6
Total	36

Age (year)	No.
above 50	4
40 - 50	13
30 - 40	10
below 30	9
Total	36

Table 6. Weights of Indicators

Component	Weights	Indicators	Weights
Pressure	0.213	P	0.313
		PD	0.201
		GRDP	0.251
		GVAFI	0.235
State	0.543	GWL	0.224
		SWL	0.211
		GWU	0.153
		NRD	0.077
		RCR	0.069
		PIA	0.098
		LC	0.168
Response	0.244	GMW	0.363
		IFS	0.401
		WSR	0.236

3.3 스케일 재조정법을 통한 지표의 표준화

최종적인 지수를 산정하기에 앞서 다양한 분야의 지표에 대해서 표준화를 실시하였고 가중치는 모두 동일하게 적용한 결과는 Table 7과 같다.

스케일 재조정방법을 통해 지표들을 표준화하게 되면 각 지표들은 0 - 0.071값을 갖게 되고 동일한 가중치를 적용하였다. 표준화만을 거친 총 지수에서는 여수시가 가장 높은 0.478을 나타내고 있다. 이는 인구와 지역 내 총 생산, 지역 내 총 부가가치 및 요소소득,

해수위 상승 추세, 무강우일수, 해안길이에서 각 지역 중 최댓값을 갖게 되어 가장 높은 수치를 나타내고 있다. 이에 반해 진도군은 -0.017을 갖게 되는데 이는 해수침투에 취약함을 나타내는 Pressure 부분과 State 부분보다 해수침투에 대한 대응을 나타내는 Response 부분에서 더 높은 점수를 받게 되어 위와 같은 결과를 나타내게 되었다.

위의 수치들을 통해 각 지표들의 지역 간의 차이를 알 수 있고 지표 항목 간의 차이도 알 수 있다. Pressure의 지표 중 지역 내

Table 7. Standardization of Indicators (Equal Weight)

Component	Indicators	Sokcho-si	Ganghwa-gun	Taeon-gun	Yeosu-si	Jindo-gun
Pressure	P	0.014	0.009	0.008	0.071	0.000
	PD	0.071	0.009	0.005	0.050	0.000
	GRDP	0.002	0.004	0.004	0.071	0.000
	GVAFI	0.001	0.001	0.002	0.071	0.000
State	GWL	0.071	0.014	0.000	0.053	0.043
	SWL	0.042	0.000	0.053	0.071	0.068
	GWU	0.000	0.023	0.071	0.014	0.008
	NRD	0.032	0.040	0.000	0.071	0.000
	RCR	0.002	0.046	0.071	0.027	0.000
	PIA	0.000	0.047	0.071	0.023	0.018
Response	LC	0.000	0.021	0.038	0.071	0.048
	GMW	0.000	0.054	0.036	0.036	0.071
	IFS	0.000	0.034	0.071	0.034	0.070
Response	WSR	0.071	0.000	0.021	0.048	0.060
	Total	0.165	0.127	0.197	0.478	-0.017

Table 8. Weighting Values of Indicators

Component	Indicators	Sokcho-si	Ganghwa-gun	Taeon-gun	Yeosu-si	Jindo-gun
Pressure	P	0.013	0.009	0.008	0.067	0.000
	PD	0.043	0.005	0.003	0.030	0.000
	GRDP	0.002	0.003	0.003	0.053	0.000
	GVAFI	0.001	0.001	0.001	0.050	0.000
State	GWL	0.122	0.024	0.000	0.091	0.073
	SWL	0.068	0.000	0.086	0.115	0.109
	GWU	0.000	0.027	0.083	0.017	0.009
	NRD	0.019	0.023	0.000	0.042	0.000
	RCR	0.001	0.024	0.037	0.014	0.000
	PIA	0.000	0.035	0.053	0.017	0.013
Response	LC	0.000	0.026	0.049	0.091	0.062
	GMW	0.000	0.066	0.044	0.044	0.089
	IFS	0.000	0.046	0.098	0.046	0.096
Response	WSR	0.058	0.000	0.017	0.039	0.048
	Total	0.210	0.065	0.164	0.457	0.033

총 생산(GRDP)은 여수 지역이 최댓값을 갖게 되고 진도군이 최솟값으로 나타난다. 다른 지표들에 비해 다른 지역의 지수들이 현저하게 떨어지는 0.002, 0.004를 나타내는데 이는 여수에 비해 현저하게 낮은 지역 내 총 생산 금액으로 나타났기 때문이다. 이외는 대조적으로 State의 지표 중 해수위 추세(SWL)과 Response의 지표 중 수리시설 및 방조제 개수(IFS)는 지역간의 최댓값과 최솟값의 차이가 크지 않아 최댓값에 비해 두 번째, 세 번째 값이 높게 나타났다.

3.4 가중치를 적용한 최종 해수침투 취약성 지수 산정

계층화 분석 방법을 통해 얻은 가중치를 적용하여 전문가의 의견을 반영한 지역별 해수침투 취약성 지수를 산정하였다. 결과는 Table 8과 같다.

전문가들의 의견을 반영한 최종 해수침투 취약성 지수이다. 가중치를 부여했을 때 최고점수는 1점이며 해수침투 피해에 대해서 연구 지역 중 가장 취약한 지역이라고 할 수 있다. 우리나라 5개 연안지역 중 여수가 0.457을 나타내며 해수침투에 가장 취약한 지역으로 선정되었다. 이는 해수위 상승 추세에서 최근 가장 큰 기울기를 보이면서 상승하고 있고 지하수위 하강하는 추세도 속초에 이어 두 번째로 크게 하강하고 있다. 전문가의 의견을 반영한 가중치에서 가장 중요하다고 생각하는 두 가지 지표인 해수위 상승추세와 지하수위 하강추세에서 높은 취약성을 보이며 가장 취약한 지역으로 선정이 되었다.

가중치를 적용하기 전에는 두 번째로 취약한 지역으로 나타난 태안 지역이 적용 후 0.164를 나타내며 세 번째를 나타내고 있고 속초가 0.210을 나타내며 두 번째로 취약한 지역으로 나타났다. 이는 가중치를 적용했을 때 피해가능성과 위험성 부분에서 지하수위 하강 추세에서 최대치인 0.122를 나타내고 있고 방어능력 및 대응 면에서도 상대적으로 취약함을 나타내고 있다. 속초와는 반대로 태안은 가중치 반영 후 상대적으로 덜 중요하다고 판단되는 지하수 이용량, 강우 집중률, 불투수 면적 비율에서 최대치를 나타내 지하수위 하강 추세가 최대치인 속초에 비해서 덜 취약하다는 결과가 나타났다.

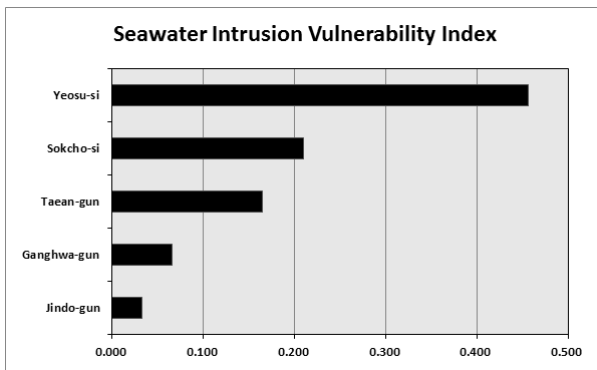


Fig. 4. Seawater Intrusion Vulnerability Index

4. 결론

해수침투 취약성 지수 개발을 하는데 있어 기존의 연구에서는 재해 중심 혹은 소규모 지역 사회에 국한된 지표 설정을 하였다. 이에 본 연구에서는 인문, 사회, 경제 등의 자료를 수집하여 PSR 개념 모형을 이용하여 지표들을 계층화하였다. 계층화된 지표들을 통해 AHP의 설문방법을 통해 가중치를 산정하여 해수침투 취약성 지수를 나타냈다. 다양한 방면의 지표들의 자료를 수집하는데 있어서 지하수위 및 해수위 자료에서 2010년을 기준으로 하여 결측기간이 최장 10일 이하이고, 연속된 자료 4년 이상인 지역을 선정하였다. 그 결과 동해에서는 강원도 속초시, 서해는 인천시 강화군, 충청남도 태안군, 남해에서 전라남도 여수시, 진도군을 연구지역으로 선정하였다. PSR 모형을 이용하여 해수침투로 인해 직접적으로 인간의 활동에 압력을 받는 요소, 상태에 영향을 미치는 잠재적인 피해 가능성과 위험성을 갖는 요소, 사람들의 인식과 행동에 영향을 미쳐 이에 대해 반응하는 요소로 나누어 지표를 계층화 시켰다. 인간의 활동에 압력을 받는 요소로는 인구, 인구밀도, 지역 내 총 생산, 지역 내 총 부가가치와 요소소득을 선정하였고, 상태에 영향을 미치는 요소로는 지하수위, 해수위, 지하수 이용량, 무강우일수, 강우집중률, 불투수면적 비율, 해안선의 길이를 지표로 선정하였다. 다양한 기준에 대한 수치에 대해서 정량화하기 위해 스케일 재조정 방법을 통해 지표들을 표준화 하였다. 표준화된 지표에 대해서 계층화 분석 방법(AHP)의 설문을 통해 전문가들의 의견을 반영한 가중치를 산정하여 최종적인 해수침투 취약성 지수를 산정하였다.

전문가들의 의견을 반영한 가중치 산정 결과 State에 대한 가중치가 가장 높게 나타났고, 그 중 지하수위 추세, 해수위 추세가 높은 가중치를 얻었다. 이는 해수침투가 일어나는 과정 중 지하수위와 해수위에 대한 요인이 가장 크다는 의견이다. 기후변화가 일어나면서 해수위가 상승하게 되고, 그와 더불어 지하수위가 하강하여 해수침투의 경계면이 내륙으로 들어와 해수침투에 대한 피해가 늘어난다는 의견이다. 그 외에도 해안선의 길이가 길고, 지하수이용량이 많은 지역이 상대적으로 해수침투에 취약하다는 의견이다.

표준화를 거쳐 동일 가중치를 가정한 결과, 각 지표에 대한 지역적 편차가 나타났다. 지역적 편차가 크게 나타난 지표로는 인구, 인구밀도, 지역 내 총 생산, 지역 내 총 부가가치 등이 있다. 이는 지역적으로 다른 지역들에 비해 여수가 비약적 발전으로 인해 인구, 지역 내 총 생산, 지역 내 총 부가가치 등이 월등히 높은 수치를 기록해 이와 같은 결과가 나타났다. 속초는 인구에 비해 면적이 좁아 인구밀도에서는 가장 큰 수치가 나타났고, 뒤를 이어 여수가 다른 지역에 비해 큰 수치를 나타내고 있다. 이와 대비되어 지역적으로 편차가 적은 지표로는 Response에 속해 있는 지표들로 나타났다. 지하수 관측정 개수, 수리시설 및 방조제 개수,

상수도 보급률은 지역적으로 크게 차이가 나지 않아 극값과 중간값들이 순차적으로 나타나고 있다.

최종적으로 산정된 지수를 확인한 결과 여수시에 대한 취약성 지수가 가장 높게 산정되었다. 이는 가중치를 고려했을 때 상태에 영향을 미치는 지표인 해수위 상승하는 추세 가장 크게 나타났고, 해안의 길에서 높은 점수를 받게 되어 이와 같은 결과가 나타났다. 동일 가중치를 주었을 때에는 속초시보다 태안군 지역이 더 취약한 지역으로 선정되었다. 가중치 부여 후 상태에 영향을 미치는 지표에서 더 취약한 지역으로 나타난 속초시가 태안군보다 더 취약한 지역으로 선정이 되었다. 또한 진도군은 동일 가중치를 부여했을 때에는 -0.017을 받아 취약함을 나타내는 지수가 다른 지역에 비해 매우 적게 나타났으나 가중치 부여 후 0.033을 받아 가장 취약하지 않은 지역으로 나타났지만 -값에서 +값으로 변화하였다. 이는 각 지표간의 자료도 중요하지만 전문가들의 의견을 반영한 가중치 결정이 결과에 영향을 미치는 부분이 중요하다는 것을 알 수 있다.

해수침투 취약성 지수 산정을 통해 해수침투에 영향을 미치는 지표들을 구성하였다. 이를 통해 각각의 지표가 해수침투에 영향을 미치는 정도에 대해서 판단할 수 있었고 대응에 대한 연구가 절실함을 알 수 있었다. 지하수위 하강 경향이 뚜렷하게 나타나는 속초시 및 여수시는 지하수위 회복 및 유지를 위한 대응방안이 필요하다. 지하수위 회복 및 유지하는 방안으로는 지하수 인공함양, 저영양개발 등의 신기술을 도입하는 방법들이 있다. 또한 속초와 여수시는 지하수 관측정, 수리시설 및 방조제 설치에 대한 관심을 갖고 설치하여 해수침투에 대한 신속한 대응이 필요한 시점이다.

본 연구에서 개발한 해수침투 취약성 지수는 시, 군 단위 구역에 대해서 인문, 사회, 경제, 환경 등의 자료를 고려하여 현재 상태에 대한 해수침투에 대한 취약성을 정량화된 지수를 통해 비교 분석할 수 있다는 장점이 있다. 해수침투 피해를 방지하고 예방하는 정책결정을 하는데 이와 같은 연구 방법을 한다면 우선순위를 결정하여 이에 대한 근거를 마련할 수 있다. 연구과정 중 다양한 분야의 자료를 수집하면서 결측 구간 및 자료의 길이가 짧은 지역이 많았다. 자료의 질이 향상되고 좀 더 세분화한다면 더욱 다양한 분야를 도입한 해수침투 취약성 지수의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

우리나라는 삼면이 바다인데 이에 대한 각 연안의 특성도 다르다. 이에 대한 연안 특성을 고려한 지표를 개발한다면 해수침투에 대해서 좀 더 신뢰성과 객관성을 확보한 지수를 산정할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리 연구사업 연구지원비(13AWMP-B066761-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Cho, K. W. and Kim, K. J. (2009). "Sea level rise and costal vulnerability in Korea." *Environment Forum*, Vol. 13, No. 9, Korea Environment Institute (in Korean).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1992). *A common methodology for assessing vulnerability to sea-level rise-second revision: Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea*. Appendix C, Ministry of Transport, public Works and Water Management, Hague Netherlands.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Climate change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (KHOA) (2010). *Coastal vulnerability assessment, disaster planning and pilot base building system*. KHOA No. 11-1611234-000120-10 (in Korean).
- Korea Rural Community (KRC) (2012). *Seawater Intrusion Report*. Korea Rural Community Cooperation (in Korean).
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A. and Taranta, S. (2005). *Tools for composite indicators building*. EUR 21682 EN, Italy.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) (1993). *OECD core set of indicators for environmental performance reviews*. OECD Environment Monographs, No. 83, OECD, Paris, France.
- Satty, T. L. (1972). *An eigenvale allocation model for prioritization and planning*. Energy Management and Policy Center, University of Pennsylvania, US.
- Satty, T. L. (1977). "A scaling method for priorities in hierarchical structures." *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, pp. 234-281.
- Satty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York, US.
- United Nations Environment Program (UNEP) (2005). *Assessing Coastal Vulnerability: Developing a Global Index for Measuring Risk*.
- United States Geological Survey (USGS) (1999). *National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast*. Open-file report 99-593, USGS, US.
- United States Geological Survey (USGS) (2000). *National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise: Preliminary Results for the U.S. Pacific Coast*. Open-file report 00-178, USGS, US.
- Walker, I. J. and Chamber of Commerce and Industry Australia Philippines (CCIAP) A580 Team (2007). *Coastal vulnerability to climate change and sea-level rise: Northeast Graham Island, Haida Gwaii(Queen Charlotte Islands), British Columbia*. CCIAP Project A580 Final Report, University of Victoria, Canada.
- Yook, K. H., Jung, J. H. and Ahn, Y. S. (2011). *A study on the coastal vulnerability assessment model to sea level rise*. NRCS Publication No. 11-02-65, Korea Maritime Institute (in Korean).
- Yu, G. Y. and Kim, I. A. (2008). *Development and application of a climate change vulnerability index*. KEI RE-05, Korea Environment Institute (in Korean).