

Bayesian Network를 이용한 해수면 상승에 따른 잠재적 침수위험 평가*

Risk Assessment of Potential Inundation Due to Sea Level Rise Using Bayesian Network

박상진** · 이동근*** · 성선용**** · 정태용*****

Park, Sang-Jin · Lee, Dong-Kun · Sung, Sun-Yong · Jung, Tae-Yong

Abstract

In the coming years, coastal areas will be affected by rising sea levels due to climate change. Korea is surrounded by water on three sides and has many big cities around its coastal zone. Thus, Korea must be prepared for various effects that may be caused by rising sea levels. Among the possible effects of rising sea levels are inundation, coastal erosion, saltwater intrusion, and biological effects. We particularly focused on the impact of inundation and assessed potential inundation risks. Finding potentially vulnerable areas is the core objective of the present study. The following variables were collected and selected from a literature review: rising sea levels, significant wave height, mean tide range, slope, and elevation.

Bayesian Networks (BNs) were used to find potentially vulnerable areas, as BNs allow diverse variables to be reflected to predict coastal change, probabilities to be predicted, and they quantify uncertainty based on probabilities. Assessing coastal vulnerability using BNs is a meaningful approach, as they consider various aspects of the situation. The probability of potential inundation was drawn from the results and showed areas' probability for being at risk. In conclusion, this research is significant because it identifies areas vulnerable to potential inundation in the coastal zone. The method could be applied in other cases of coastal urban planning that consider the impact of future climate change.

키 워 드 ■ 해안지역, 기후변화 영향, 잠재적 취약지역, 확률, 해안 도시계획

Keywords ■ Coastal Zone, Climate Change Impacts, Potential Vulnerable Area, Probability, Coastal Urban Planning

I. 서 론

전 세계적으로 가장 크게 부각 되고 있는 환경 이슈는 단연 기후변화이다. 기후변화로 인해 최근 몇 년간 자연생태계 및 사회시스템은 부정적인 방

향으로 급변하기 시작하였고 특히 해수의 온도가 상승하면서 극지방의 빙하가 녹고 해수열팽창이 일어나면서 (Dasgupta et al, 2011) 해수면이 상승하는 현상이 과거 수 십 년간 지속되어 오고 있다. IPCC 4차 보고서에서는 해수면이 2100년까지 0.18~0.59m 상승할 것으로 전망하고 있다(IPCC,

* 본 연구는 2013년도 환경부 차세대 에코이노베이션 기술 개발사업의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 : 416-111-014)

** 서울대학교 대학원 생태조경·지역시스템 공학부 석사과정 (주저자: parkssang87@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 생태조경·지역시스템 공학부 교수 (교신저자: dkle7@snu.ac.kr)

**** 서울대학교 환경대학원 협동과정 박사과정 (공동저자: white109@snu.ac.kr)

***** KDI 국제정책대학원 (공동저자: tyjung00@gmail.com))

2007).

해수면 상승 현상은 향후 해일, 태풍, 침식, 해수 침투 등의 영향으로 해안지역에 막대한 영향을 끼칠 수 있으며(장동호 외, 2008), 전 지구적인 기후 변화의 위험 속에서 각별히 주의를 필요로 하는 곳 중 하나가 바로 연안도시이다(최충익 외, 2012). 연안도시의 경우 바다에 인접한 특성 때문에 내륙도시의 재해에 추가하여 각종 해일이나 파고로 인한 피해가 가중될 수 있는 만큼 각별한 주의와 관리의 적응체계구축이 필요하다(Cheong, 2008; 육근형 외, 2008; Yoo et al, 2011). 또한 예부터 해안지역은 환경·생태적 요소와 함께 사회·경제적 요소가 공존하는 부분이 많았기 때문에 더욱 중요하다(Nicholls et al, 2007).

특히 우리나라는 삼면이 바다고 해안지역에 대도시가 많이 위치하고 있어 해수면 상승으로 인한 재해로부터 안전한 도시 조성을 위해 적응대책 마련이 시급하다. 또한 해안지역은 지역마다 그 특성이 다르고 끊임없이 변화하기 때문에 지역별로 차별화된 대책을 세워야 하며 이를 위해서는 기후변화로 인한 잠재적 피해를 정량적으로 평가하는 일이 선행되어야 한다.

이를 위해 국제사회에서는 해수면 상승과 관련하여 과거 90년대부터 이론적 접근부터 과학적 모델링과 정량적인 방법으로 연안 취약성을 분석한 연구가 많이 진행되어 왔다. 최근 들어 확률·통계학적 방법인 베이저안 네트워크(Baysian Network, BN)를 이용한 평가가 많이 진행되고 있다. 반면 국내에서는 국외보다 해수면 상승과 관련하여 연구의 진행을 뒤늦게 시작하였으며 해수면 상승 시나리오와 토지피복변화를 이용한 피해와 대책 등의 연구(김장수, 2013), CAD 및 Sketch-up 3D 등의 컴퓨터 프로그램으로 침수시뮬레이션을 통한 대응방안 연구(홍성기 외, 2013), 시설물의 영향에 관한 연구(이동욱, 2011), LiDAR 및 다중시기 위성영상 등을

활용한 침수 취약성 평가에 대한 연구(한종규, 2009; 장동호, 2010)가 있었다. 그러나 기존 국내 연구에서는 기후변화라는 현상을 시뮬레이션에 의존하여 평가함으로써 미래의 불확실성을 그대로 노출시킨다는 한계점이 있다. 앞서 설명하였듯이 지역별로 차별화된 대책을 세우기 위해서는 미래에 피해가 일어날 가능성을 파악하고 그 불확실성을 줄일 수 있는 정량적인 방법을 통한 평가가 필요하다.

따라서 본 연구는 베이저안 네트워크라는 확률·통계학적인 방법을 활용하여 기후변화로 인한 해수면 상승이 해안지역에 가져올 수 있는 잠재적 위험을 정량적으로 평가하여 위험지역을 찾는 것이 연구의 목적이 되겠으며 평가 후 위험지역에 대해 환경부에서 제공하는 토지피복지도를 활용하여 위험성 높은 지역의 특성을 바탕으로 한 지역을 예로 가능한 대책제안을 추가적으로 제안하고자 한다.

II. 연구 범위

본 연구에서는 연안의 전반적인 취약성 평가가 아니기 때문에 사회·경제적인 지표는 제외하고 해안환경변화와 연안환경 조건의 범위만을 적용하여 해수면 상승에 따른 침수피해의 위험을 평가하고자 한다.

그리고 우리나라는 삼면이 바다이고 대도시들은 주로 해안지역에 발달하였다. 특히 서해의 경우 해수면이 동·남해에 비해 낮은 대신 조위의 차가 심하고 대부분 저지대에 속하기 때문에 향후 해수면 상승에 대해 민감하게 반응할 가능성이 크다. 따라서 본 연구의 대상지는 (그림1)와 같이 우리나라 서해안이며 그 중 인천시를 중심으로 김포, 시흥, 안산, 화성, 평택, 아산, 당진, 서산시 등을 포함하는 해안선을 대상지로 선정하였다.

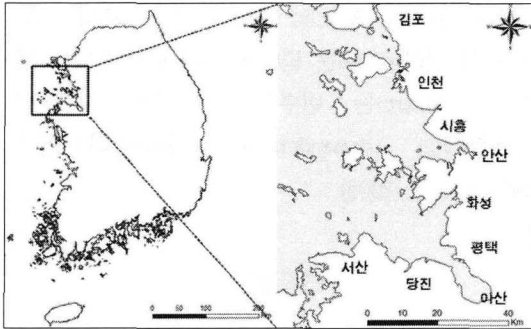


그림 1. 연구 대상지
Fig. 1. The Study Area

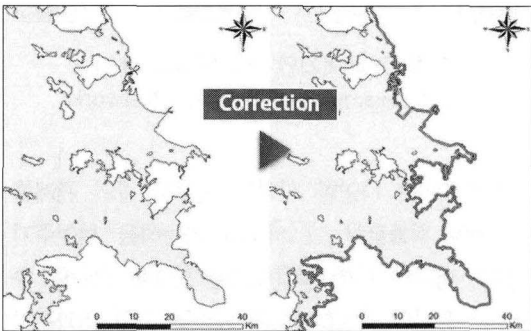


그림 2. 보정된 연구 분석 대상(해안선)
Fig. 2. The corrected shoreline

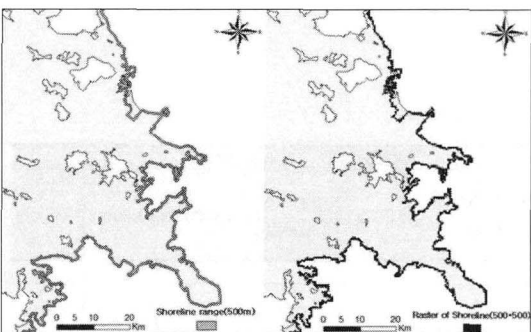


그림 3. 해안선의 500m 범위 설정 및 Raster 변환
Fig. 3. 500m buffer and Raster file

또한 대상지에 포함된 서해의 크고 작은 섬들은 분석에 장애요소가 될 수 있으므로 정확한 결과를

도출하기 위해서 육지와 닿는 해안선만을 고려하였으며 최근 모습을 반영하기 위해 (그림2)와 같이 보정을 하였다.

그리고 선행연구에서는 우리나라 서해의 약 5배가 되는 미국의 동부해안선을 대상으로 5km*5km 사이즈로 분석하였다(Gutierrez, B, 2011). 본 연구는 분석의 셀 크기를 최소 1km*1km보다 작게 적용하여 (그림3)와 같이 분석의 기초자료로서 해안선을 따라 500m의 범위를 설정하고 500m*500m의 Raster파일로 변환하였다.

III. 연구 방법

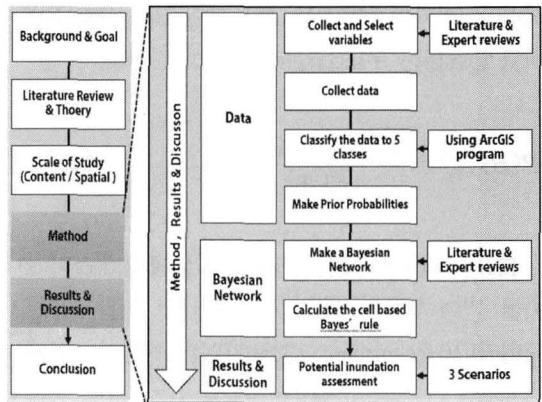


그림 4. 연구흐름도 및 방법론
Fig. 4. Flow chart and methodology

(그림4)은 연구의 흐름과 방법론을 설명하고 있다. 첫 번째로 문헌조사를 통해서 해수면 상승에 대한 해안지역의 취약성 평가를 설명할 수 있는 변수들을 수집하고 평가에 활용될 수 있는 변수들을 [표1]과 같이 중복 선택 및 해양분야 전문가 자문을 통해 다섯 가지 변수를 선정하였다. 다음으로 각 변수의 데이터를 수집하고 수집된 데이터를 바탕으로 ArcGIS 9.3 프로그램을 활용하여 다섯 등급을 두어 공간적으로 표현하였다. 각 등급에 해당하

는 셀의 개수가 사전확률이 되며 본 연구의 목적에 맞는 BN을 새로이 구성하여 각 셀별로 베이즈 이론(Bayes's rule)에 기초하여 확률계산을 하였다.

베이즈 이론은 두 확률 변수의 사전 확률과 사후 확률사이의 관계를 나타내는 정리로, 어떤 새로운 사건이 생겼을 때 다음 사건이 일어날 가능성을 구하는 것을 말한다. 여기서 새로운 사건을 A라고 하고 그로 인해 다음에 일어날 사건을 B라고 하였을 때 확률A를 $P(A)$ 라 표기하며 사전확률(Prior probability)이라고 하고 확률B를 $P(B)$ 로 표기하며 사후확률(Posterior probability)이라 한다. 그리고 사건 A, B에 대한 사전 확률과 사후 확률의 관계는 수식(1)과 같고 수식(1)이 바로 Bayes's rule의 기본 식이다. 여기서 $P(B|A)$ 는 A에 대한 B의 사후 확률이고 $P(A|B)$ 는 우도(Likelihood¹⁾)라고 한다.

$$P(B|A) = \frac{P(B) \cdot P(A|B)}{P(A)} \quad (1)$$

BN은 위에서 설명한 베이즈 이론에 기초하며 변수들 간의 확률적 의존성을 나타내는 확률 그래프 모형이다(Heckerman, 1995). BN은 방향성 비순환

그래프(Directed Acyclic Graph : DAG)로서, 그래프의 각 마디(node)는 변수를 나타내고, 마디를 연결하는 호(arc)는 변수 간의 조건부 의존성(conditional dependency)을 표현한다.(그림5, Sadoddin, A, 2005)

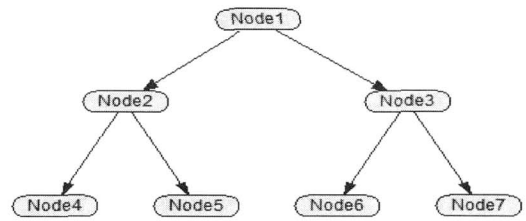


그림 5. 베이지안 네트워크의 예시
Fig. 5. Examples of Bayesian Network

또한 BN은 다양한 성격의 변수들 간의 관계를 설정하여 확률로서 그 사후의 가능성을 보여주기 때문에 미래에 대한 불확실성을 최대한 감안할 수 있다는 장점을 갖는다. 또한 요소들 간의 인과관계를 어떻게 설정하느냐에 따라 결과 값이 달라질 수 있어 복잡한 프로세스를 가진 해안지역을 평가하기에 적합하다.

표 1. 문헌조사를 통해 얻은 변수 목록 및 선정

Table 1. Collected and selected variables from literature reviews

Literatures	External condition						Topographic condition					
	tide	wave	sea level rise	storm surge potential	wind	erosion rate	slope	shoreline change	geology	nature habitats	geomorphology	Relief
1	○	○	○				○				○	
2		○	○	○	○					○	○	○
3		○				○			○		○	
4	○	○	○				○	○			○	
5	○		○									
6	○										○	
Selection	●	●	●				●				●	
1	A Bayesian network to predict coastal vulnerability to sea level rise(2011)											
2	Natural Capital : The Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services(2011)											
3	Predicting coastal cliff erosion using a Bayesian probabilistic model(2010)											
4	Importance of Coastal Change Variables in Determining Vulnerability to Sea- and Lake-Level Change(2010)											
5	Vulnerability of Turkish coasts to accelerated sea-level rise(2009)											
6	Need for adaptation strategy against global sea level rise : an example from Saudi coast of Arabian gulf(2012)											

IV. 연구 결과

1. 자료구축

변수의 선정과정에서 우선 선행연구를 통해 해수면 상승에 대한 연안지역의 취약성, 침식영향, 적응 대책을 세우기 위한 평가 등의 문헌 등을 통해 목적에 맞는 변수의 목록을 나열하였다. [표1]를 보면 변수의 목록은 크게 외적인 요소(External condition)와 연안이 원래 가지고 있는 성질인 내적인 요소(Topographic condition)로 크게 두 부류로 나눌 수가 있다. 먼저 외적인 요소에는 파고, 조위, 해수면 상승, 폭풍해일, 바람, 침식률 등이 있으며 내적인 요소에는 경사, 해안선 변화, 지질, 지형, 서식지, 지형조건, 표고차 등이 있다. 이 중에서 평가에 공통적으로 사용하고 있는 변수들에 대해 우선 선택하고 해양 전문가 자문을 통해 최종 5개의 변수를 선정하였다.

표 2. 변수의 출처 및 속성

Table 2. Source of data

	Variables	Abbreviation	Unit	Source of data
External condition	Mean tide	T	meter	Korea Hydrographic and Oceanographic Administration
	Significant wave Height	W	meter	Korea Hydrographic and Oceanographic Administration
	Sea level rise	SLR	Mm/year	Literature reviews
Topographic condition	Slope	S	°	Korean DEM(30*30)
	Elevation	E	Meter	Korean DEM(30*30)

하지만 지형의 경우 침수위험을 평가하고자 하는 본 연구의 목적에는 맞지 않을뿐더러 국외에서 적용되는 분류기준이 우리나라에 맞지 않기 때문에 지형을 그대로 사용하기보다 고도(Elevation)로 대체를 하는 것이 평가에 적절하다고 판단하였다. 따라서 최종적으로 선정된 변수는 경사, 고도, 조위,

파고, 해수면 상승이다. 더 정확히 설명하면 조위의 경우 평균조위, 파고는 유의파고를 사용하였으며 해수면 상승의 경우 대상지의 규모를 고려하여 시나리오별로 동일한 상승률을 적용하였다. [표2]와 같이 다섯 변수의 데이터를 확보하고, 그 데이터를 ArcGIS 9.3 프로그램을 활용하여 [표3]과 같이 변수를 5등급으로 분류하였다. 분류 기준은 ArcGIS 9.3 프로그램 내에 있는 quantile이라는 변수 분류 방법으로 구분하였으며 이는 다섯 등급 내 동일한 개수가 들어가도록 하여 만드는 등급 분류기준방법이다.

표 3. 데이터 재분류

Table 3. Reclassified the data to 5 classes

Variables /Reclassify	1	2	3	4	5
Elevation	> 17	8 ~ 17	5 ~ 8	4 ~ 5	< 4
Slope	> 0.60	0.27 ~ 0.60	0.13 ~ 0.27	0.04 ~ 0.13	< 0.04
Significant wave Height	0.04 ~ 0.15	0.15 ~ 0.21	0.21 ~ 0.23	0.23 ~ 0.29	0.29 ~ 0.31
Mean tide range	469 ~ 477	477 ~ 489	489 ~ 496	496 ~ 519	519 ~ 562
Sea level rise	0.5m		1m,	2m	
Impact	← Not risk		Stable	Risk →	

표 4. 각 변수에 분류등급에 해당하는 셀 개수

Table 4. Cell counts of each classes

Variable	1	2	3	4	5
Elevation(m)	102	109	144	161	272
Slope(°)	142	149	170	173	154
Wave(m)	153	160	156	157	157
Tide(m)	148	166	165	155	149

[표4]는 해수면 상승 변수를 제외한 나머지 4개 변수의 1등급부터 5등급까지 분류된 등급에 해당하는 셀의 개수이다. 여기서 각 등급에 해당하는 셀 개수가 그 변수의 사전확률이다.

2. Bayesian Network 구성

먼저 네트워크를 구성하기에 앞서 연안에서 일어나는 변수간의 관계를 이해하기 위해 (그림6)의 선행연구의 네트워크를 참고하였다. 선행연구에서는 해수면 상승, 파고, 조위가 경사, 지형, 결과 값에 각각 영향을 미친다. 이를 바탕으로 (그림7)과 같이 본 연구의 목적에 맞게 새롭게 해안프로세스를 표현하였다.

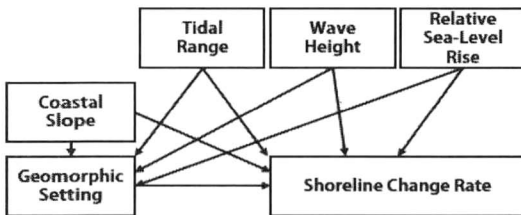


그림 6. 기존 논문에서의 베이지안 네트워크 구성
Fig. 6. A Bayesian Network which is explained in 「A Bayesian network to predict coastal vulnerability to sea level rise」(Gutierrez, B. et al., 2011, Journal of Geophysical Research)

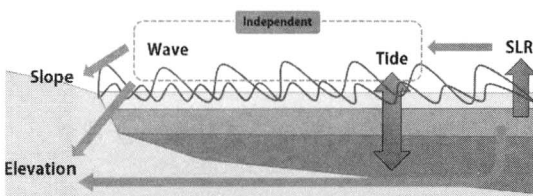


그림 7. 변수들 간의 관계 이해
Fig. 7. Understanding of relations with variables in coastal area

여기서 해수면 상승 변수는 파고와 조위에 영향을 미치고 파고와 조위는 경사와 고도에 영향을 미치면서 서로 독립적이다. 이렇게 다섯 변수의 연안에서의 새로운 관계를 통해 (그림8)과 같이 본 연구의 목적에 맞는 새로운 베이지안 네트워크(BN)을

구성하였다.

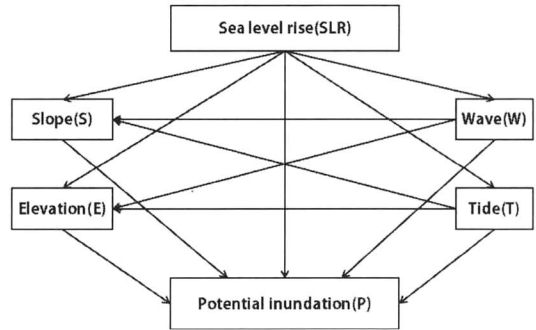


그림 8. 새롭게 구성된 베이지안 네트워크
Fig. 8. Structure of Bayesian Network

$$\begin{aligned}
 P(P|SLR, S, E, W, T) &= \frac{P(P) \cdot P(SLR, S, E, W, T|P)}{P(SLR, S, E, W, T)} \\
 &= \frac{P(P) \cdot P(W) \cdot P(T)}{P(SLR) \cdot P(S) \cdot P(E)} \\
 &\quad \times \frac{P(SLR|E) \cdot P(SLR|T) \cdot P(SLR|P)}{P(SLR|S) \cdot P(SLR|E)} \\
 &\quad \times \frac{P(S|P) \cdot P(E|P) \cdot P(E|P) \cdot P(T|P)}{P(W|S) \cdot P(T|S) \cdot P(W|E) \cdot P(T|E)}
 \end{aligned} \tag{2}$$

(그림8)으로부터 앞서 설명한 Bayes' rule에 근거하여 수식(2)의 계산식을 만들었다. 수식(2)는 크게 두 부분으로 나누어 볼 수 있다. $P(P)$, $P(W)$, $P(T)$, $P(SLR)$, $P(S)$, $P(E)$ 의 연산이 포함된 앞부분은 각 노드(Node)의 사전확률(Prior Probabilities)이고 나머지 부분은 우도(Likelihood)라고 하여 각 변수들 간에 미치는 영향의 정도라고 볼 수 있다. 수식(2)에서 우도에 해당하는 부분은 다음과 같은 몇 가지 가정을 두었다. 첫째, 해수면 상승이 조위, 파고, 고도, 경사, 잠재침수의 변수에 미치는 우도를 각각 20%의 비율로 가정하였다. 둘째, 잠재침수에 영향을 주는 우도는 각각 25%의 값을 가진다고 가정하였다. 셋째, 파고와 조위는 경사와 고도에 각각

50%의 우도를 가진다고 가정하였다. 이렇게 3가지 가정을 바탕을 두어 계산식을 재구성한 결과 다음 수식(3)과 같이 나타났다.

$$\begin{aligned}
 &P(P|SLR, S, E, W, T) \\
 &= \frac{P(P) \cdot P(SLR, S, E, W, T|P)}{P(SLR, S, E, W, T)} \\
 &= \frac{P(P) \cdot P(W) \cdot P(T)}{P(SLR) \cdot P(S) \cdot P(E)} \times \frac{25 \cdot 20 \cdot 20}{20 \cdot 20} \times \frac{25 \cdot 25 \cdot 25}{50 \cdot 50 \cdot 50} \quad (3) \\
 &= \frac{P(P) \cdot P(W) \cdot P(T)}{P(SLR) \cdot P(S) \cdot P(E)} \times 1.25
 \end{aligned}$$

표 5. P(P)와 P(SLR)의 정의

Table 5. Definition the P(P), P(SLR)

P(Sea Level Rise(SLR)), P(Potential inundation(P))				
Scenarios	SLR	DEM(cell)	P(P)	
1	low	0.5m	40/788	0.05
2	Medium	1m	70/788	0.08
3	high	2m	98/788	0.12
Scenarios	Equation			
Scenario1	$\frac{P(W) \cdot P(T)}{P(S) \cdot P(E)} \times 1.25 \times 0.05$			
Scenario2	$\frac{P(W) \cdot P(T)}{P(S) \cdot P(E)} \times 1.25 \times 0.08$			
Scenario3	$\frac{P(W) \cdot P(T)}{P(S) \cdot P(E)} \times 1.25 \times 0.12$			

그러나 수식(3)에서 주요하게 봐야 할 것은 P(P), P(SLR)이다. 해수면 상승의 경우 시나리오별로 항상 같은 확률이 적용되기 때문에 P(SLR)은 항상 1이다. 결국 해수면 상승 시나리오가 0.5m, 1m, 2m가 될 때 각각의 P(P)의 확률이 달라진다. P(P)는 시나리오별로 해수면이 상승할 때 대상지 내에서의 물에 잠기는 셀 개수의 확률로 적용하였다.

3. 실행결과 및 해석

표 6. 결과 값 등급화 과정

Table 6. Classification of results

등급(Class)	범위(Extents)	확률(Probability)
1	< 0.05	< 5%
2	0.05-0.10	5% - 10%
3	0.10-0.15	10% - 15%
4	0.15-0.20	15% - 20%
5	0.20 <	20% <

기상청(2012)에 따르면 미래 2100년까지 RCP 4.5/8.5 시나리오에서 해수면 상승이 서해와 남해의 경우 각각 53cm, 65cm가 오르고 동해의 경우 99cm까지 오른다고 설명한다. 이를 바탕으로 0.5m 해수면 상승과 최대 1m, 2m의 해수면 상승의 시나리오를 가정하였다. 결과는 해수면이 0.5m, 1m, 2m 상승하였을 때 각각의 확률 결과 값이 도출된다. 또한 가독성을 높이기 위해 [표6]과 같이 절대적 기준을 가지고 다섯 등급으로 등급화를 하여 도면화 하였다.

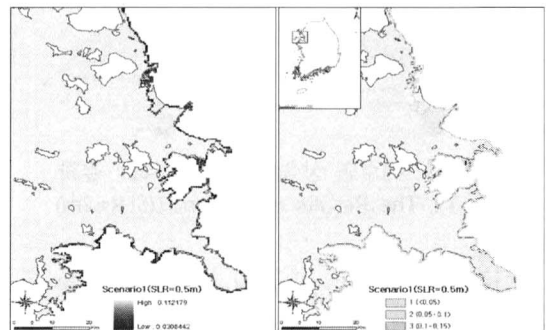


그림 9. 해수면 상승이 0.5m일 때의 결과
Fig. 9. The Results of scenario1(SLR=0.5m)

(그림9)은 해수면 상승이 0.5m일 때, 결과이며, 좌측의 그림은 계산된 확률 값이고 우측 그림은 이를 절대적 기준으로 등급화 한 그림이다. 등급1이

0.05(5%) 이하의 확률 값을 가지는 지역이고 등급이 올라갈수록 상대적으로 위험한 지역이다. 시나리오1에서는 등급3의 지역까지 나타나며 확률의 범위는 0.1~0.15이다.

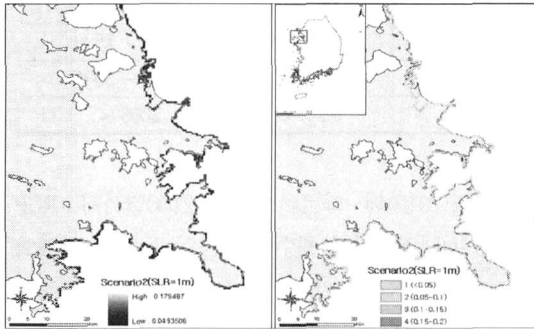


그림 10. 해수면 상승이 1.0m일 때의 결과
Fig. 10. The Results of scenario1(SLR=1m)

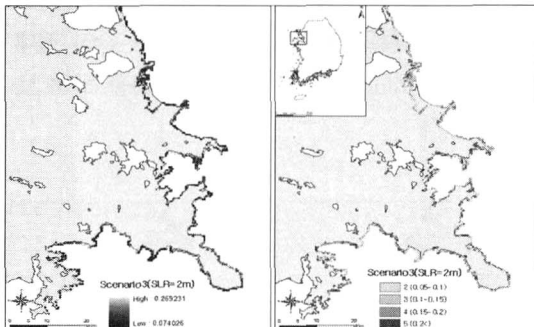


그림 11. 해수면 상승이 2.0m일 때의 결과
Fig. 11. The Results of scenario3(SLR=2m)

(그림10)는 해수면 상승이 1m일 때의 결과를 보여준다. 0.5m상승과 비교하였을 때 확률 값이 증가하였으며 (그림9)와 비교하여 4등급(0.15~0.20)인 지역이 나타났다. 마지막으로 (그림11)은 해수면 상승이 2m때의 결과이고 앞의 두 결과에 비해 확률 최대 값이 비교적 크다. 우측그림에서도 볼 수 있듯이 세 번째 결과에서 나타난 5등급에 해당하는 지역은 다른 지역에 비해 비교적 위험하다고 할 수

있다.

표 7. 시나리오별 확률 결과 값

Table 7. The probabilities of each scenarios

Scenario	Probability(%)
1(SLR=0.5m)	3 ~ 11
2(SLR=1.0m)	5 ~ 18
3(SLR=2.0m)	7 ~ 27

3가지 시나리오의 결과를 종합하면 [표7]과 같다. 해수면이 상승할수록 확률의 범위와 최대가 증가하며 이는 해수면이 상승할수록 침수위험의 가능성이 증가한다고 할 수 있다. 그러나 시나리오3을 고려하더라도 최대가 27%로 값 자체가 크지 않기 때문에 결과적으로 대상지내에서 해수면 상승으로 인한 잠재적 침수위험의 가능성은 확률적으로 낮다고 할 수 있다. 그러나 가능성이 낮다고 하여도 가장 위험할 수 있는 시나리오3에서의 20% 이상의 위험성의 확률을 가지는 등급5의 지역에 대해서는 지역 특성에 맞는 대책이 필요하다고 사료된다.

우선 분석결과로 인해 위험가능성이 높은 지역에 대한 지역특성을 분석해보고 그 중 한 지역을 예로 가능한 대책을 제안하고자 한다. 방법은 (그림12)의 좌측그림과 같이 해수면이 2.0m가 상승하는 시나리오3에서 가장 위험 가능성이 높은 등급5에 해당하는 지역을 추출하고 (그림12)의 우측 그림과 같이 환경부에서 제공하는 토지피복을 활용하여 그 지역의 토지이용을 확인하였다. 그리고 인구밀도가 높은 지역이거나 사회·경제적 활동이 일어나 경제적 피해를 입을 수 있는 지역 등을 확인하였다.

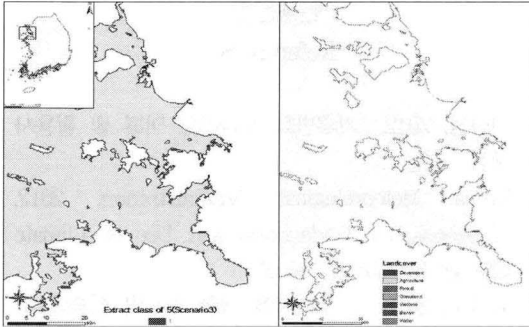


그림 12. 시나리오3에서의 등급5인 지역과 그 지역에 해당하는 토지피복
Fig. 12. Reclassified in Scenario3(Left) and landcover(Right)

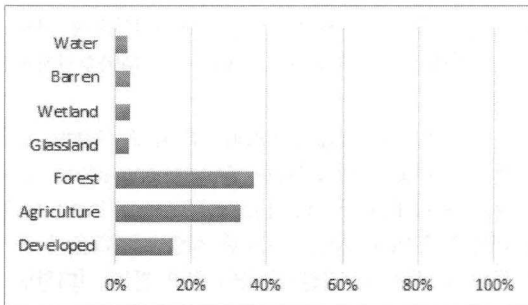


그림 13. 위험지역에서의 토지피복 정보
Fig. 13. Landcover information at class 5 in Scenario3

그리고 위험지역의 토지이용특성을 분석해본 결과 (그림13)과 같이 위험한 지역 중 인구밀도가 높고 사회·경제적인 활동이 가능한 지역에서의 위험성이 높은 지역의 비율이 전체의 약 절반에 가까운 토지피복을 포함하고 있어 국토 관리적 측면에서의 대책이 필요하다고 말할 수 있다.

위험가능성이 높은 지역 중에는 (그림14)와 같이 해안가에 공업용도로 쓰이는 지역이 있다. 이러한 지역에 대해서는 크게 두 가지 대책이 가능할 것이다. 첫째는 해안에서 떨어진 곳으로 공업지역을 옮기는 set-back, 두 번째는 파고 및 조위를 막을 수

있는 해안 가까이에 방파제 또는 이안제를 두는 것이다.

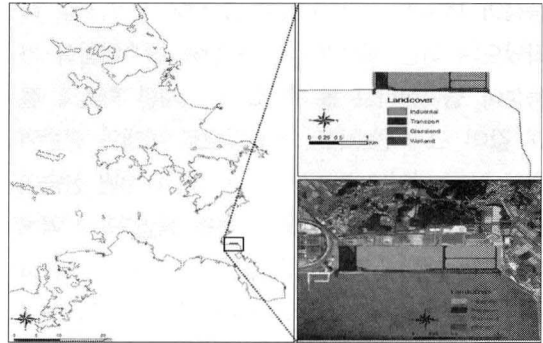


그림 14 위험지역 중 공업지역의 용도를 가지고 있는 지역의 예시

Fig. 14. An example of expected hazard area which is industrial region.

V. 고찰 및 결론

기존 국내 연구의 해수면 상승에 대한 취약성 평가에서 주로 활용한 방법은 해수면 상승률과 파고나 조위 등을 고려하여 시뮬레이션을 하거나 영상자료를 활용하여 분석 및 예측하는 방법이 주로 이루어져 왔다. 그러나 이러한 방법은 복잡한 프로세스를 가진 해안환경을 적절히 반영하지 못하고 미래에 대한 불확실성을 그대로 노출시킨다는 단점이 있다.

따라서 본 연구는 이러한 한계점을 최대한 보완하고자 Bayesian Network라는 확률·통계학적 방법을 활용하였다. 이는 다양한 변수의 관계를 설정하고 사전확률을 통해 미래의 사건이 일어날 가능성을 보여주며 변수의 불확실성을 최대한 감안해줄 수 있다는 점에서 기후변화 연구에 큰 장점이 되는 도구이다. 이 외에도 수학적 이론에 근거하기 때문에 다방면의 분야에 활용될 수 있다는 장점이 있다.

Bayesian Network을 통해 서해안의 해수면 상승에 대한 침수위험의 잠재가능성을 평가해본 결과, 미래에 해수면이 0.5m, 1m, 2m 상승할 때 위험가능성의 범위가 각각 3~11%, 5~18%, 7~27%로 나타났다. 이는 해수면 상승과 함께 침수위험의 가능성이 증가한다고 볼 수 있다. 하지만 확률의 절대 값이 크지 않으므로 전반적으로 미래의 침수위험이 높지 않다고 평가할 수 있으나 해수면 상승이 2.0m 때의 가장 위험가능성 높은 등급5의 지역에 대해서는 대책이 필요하다. 결과적으로 확률의 절대 값이 낮게 도출된 것은 Bayesian Network의 계산식에서 우도에 대한 가정들이 있었기 때문이라 사료되며 등급화 기준에서 상대적 기준을 설정하였다는 점과 오랜 기간 구축된 데이터를 수집하지 못하였다는 점도 포함될 것이다. 따라서 향후 연구에서는 등급화 선정에서 절대적 기준을 마련하고 Bayesian Network 계산에서 우도를 명확히 설정할 필요가 있다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 복잡한 해안 프로세스를 설명하기 위해 설명력이 강하다고 판단이 되는 다섯 변수를 선정하고 그 변수들 간의 관계를 설정하여 국내에선 다소 생소한 방법론인 Bayesian Network라는 확률·통계학적인 방법을 가지고 미래에 대한 불확실성을 감안하여 정량적으로 평가하였다는 점에서 의미가 있다. 또한 해수유입으로 인한 침수피해의 잠재적 영향을 받을 수 있는 위험지역을 파악함으로써 재해로부터 안전한 도시조성을 위한 재해·예방적 차원의 국토·도시계획 체계 확립의 기초연구로 활용될 수 있다는 점에도 연구의 의의가 있다.

주1. Likelihood : a function of how likely an event is. Likelihood functions play a key role in statistical inference, especially methods of estimating a parameter using a statistics. (<http://en.wikipedia.org/>)

인용문헌

References

1. 기상청, 2012, “기후변화 시나리오 이해 및 활용사례집”, 서울.
Korea Meteorological Administration, 2012, “Casebook for Understand and Use of Climate Change Scenarios”, Seoul.
2. 김장수, 2013. “기후변화에 의한 해수면 상승에 따른 태안해안지역 침수 및 침식 취약성 평가”, 공주대학교 대학원 박사학위논문.
Kim Jang su, 2013, “Vulnerability Assessment for Inundation and Erosion under the Sea-level Rise due to Climate Change in Taean Coastal Area”, Ph.D. Dissertation, Kongju University
3. 육근형, 정지호, 안용성., 2011. 해수면상승에 따른 연안취약성 평가모형연구, 서울: 한국해양수산개발원.
K.H.Yook, J.H.Jung, Y.S.Ann, 2011, A Study on the Coastal Vulnerability Assessment Model to Sea Level Rise, Seoul: Korea Maritime Institute.
4. 이동욱, 부양수, 2011. “해수면 상승 시나리오에 따른 제주연안지역 건설시설물의 영향 분석”. 『대한토목학회지』, 31(2D): 267-274.
D.W.Lee, Y.S.Bu, 2011, "Analysis on Effect of Construction Facilities depending on a Scenario of Sea level Rise around Jeju Coastal Area", *Korean Society of Civil Engineers*, 31(2D): 267-274.
5. 장태수, 한종규, 김성필, 장동호, 2009, “항공 LiDAR 자료를 이용한 슈퍼태풍 내습시 해운대 해수욕장 인근 도심지역 침수피해 규모 추정”. 『한국공간정보학회지』, 17: 341-350
T.S.Jang, S.K.Han, S.P.Kim, D.H.Jang, 2009. “Estimation of Inundation Damages of Urban area Around Haeundae Beach Induced by Super Storm Surge Using Airborne LiDAR Data”, *Journal of Korea Spatial Information Society*, 17: 341-350
6. 장동호, 김찬수, 박지훈., 2010. “다중시기 위성영상을 활용한 충남해안지역의 해수면 상승에 따른 침

- 수위험성 평가”, 「한국사지리학회지」, 20:71-83
- D.H.Jang, C.S.Kim, J.H.Park, 2010, “Assessment of Flood Risk under Rise of Sea Level in Chungnam Coastal Area Using Multi-temporal Satellite Imagery Data”, *Journal of the Association of Korean Photo-Geographers*, 20: 71-83
7. 장동호, 정종관, 손석원, 홍기병, 2008. 서해안 해수면상승에 따른 영향 및 대책, 충남: 충남발전연구원.
- D.H.Jang, J.G.Jung, S.W.Son, K.B.Hong, 2008, *Impacts and Strategy due to Sea level Rise in West Coastal Area*, Chungnam: Chungnam Development Institute
8. 최충익, 임월시, 이숙희, 김준형, 2012. “연안도시 기후변화적응을 위한 법제도적 고찰”, 「도시행정학보」, 25:325-346
- C.I.Choi, W.S.Yim, S.H.Lee, J.H.Kim, 2012, “Institutional Approach for Coastal Cities' Adaptation to Climate Change,” *Journal of the Korean Urban Management Association*, 25: 325-346
9. 홍성기, 강영훈, 이한석, 2013. “부산 영도 해안의 해수면 상승에 따른 침수대책 연구”, 「한국항해항만학회지」, 37(4): 409-418
- S.K.Hong, Y.H.Kang, H.S.Lee, 2013, “A Study on Flooding Prevention Scheme due to Sea Level Rise at Young-do Coast in Busan”, *Journal Korean Institute of Navigation and Port Research*, 37(4): 409-418
10. Alpar, B, 2009. “Vulnerability of Turkish coasts to accelerated sea-level rise”, *Geomorphology*, 107(1-2):58-63.
11. Cooper, J., & Pilkey, O., 2004. “Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule”, *Global and planetary change*, 43(3-4): 157-171.
12. Dasgupta, S. & Laplante, B. & Murray, S. & Wheeler, D., 2011. “Exposure of developing countries to sea-level rise and storm surges”, *Climatic Change*, 106:549-579
13. David Heckerman, 1995. *A Tutorial on Learning With Bayesian Networks*, Microsoft Research: Technology Division Microsoft Corporation.
14. D. S. Suresh Babu & Siva Sivalingam & Terry Machado, 2012. “Need for adaptation strategy against global sea level rise: an example from Saudi coast of Arabian gulf”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 17:821-836
15. Peter Kareiva, 2011, *Natural Capital : The Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*, U.K. : Oxford University Press.
16. Gutierrez, B., Plant, N., & Thieler, E., 2011. “A Bayesian network to predict coastal vulnerability to sea level rise”, *Journal of Geophysical Research*, 116:1-15
17. Hapke, C., & Plant, N., 2010. “Predicting coastal cliff erosion using a Bayesian probabilistic model”, *Marine geology*, 278:140-149
18. Nicholls, R., 2007. *Adaptation Options for 2 Coastal Areas and Infrastructure : 3 An Analysis for 2030*, U.K. : University of Southampton.
19. Pendleton, E. & Elizabeth A. B Robert Thieler & S. Jeffress Williams, 2010. “Importance of coastal change variables in determining vulnerability to sea-and lake-level change”, *Journal of Coastal Research*, 26:176-183
20. Yoo, G., Hwang, J., & Choi, C., 2011, “Development and application of a methodology for vulnerability assessment of climate change in coastal cities”, *Ocean & Coastal Management*, 54:524-534
21. Sadoddin, A., & Letcher, R., 2005. “A Bayesian decision network approach for assessing the ecological impacts of salinity management”, *Mathematics and Computers in Simulation*, 69:162-176
22. <http://en.wikipedia.org/>

논 문 투 고	2013-11-25
1차 심 사 완 료	2014-01-02
수 정 일	2014-01-16
2차 심 사 완 료	2014-02-07
개 재 확 정 일	2014-02-07
최 종 본 접 수	2014-02-11