기후변화에 따른 해수면 상승을 고려한 연안도시 침수위험성 평가

Flood Risk Assessment for Coastal Cities Considering Sea Level Rise due to Climate Change

박윤경* · 정병순** · 김이호***

Park, Yoonkyung*, Jung, Byungsoon**, and Kim, Reeho***

Abstract

The purpose of this study was to present disaster prevention performance targets for Korean coastal cities, given the rise in sea level due to climate change. The disaster prevention performance targets for coastal cities are used to assess flood risk caused by increased sea levels. The proposed disaster prevention performance targets give additional consideration for design tide level or design flood level, which are design factors for hydraulic structures located along the coast. The rate of sea level rise in the West Sea was 0.61 cm/year. It was the fastest rise rate of all of Korea's seas. The sea level rise rate in the East Sea was calculated at 0.58 cm/year. This study also quantitatively confirmed that flood damage increases according to sea level rise using the United States' Environmental Protection Agency-Storm Water Management Model (EPA-SWMM). This study suggested a method for setting the disaster prevention performance targets of expected flood damage in coastal cities. Therefore, suggested disaster prevention performance targets should be highly specialized for coastal cities. However, sea level rise and rainfall are key factors that cause floods. Therefore, further research on disaster prevention in coastal cities should be carried out to consider the combined effects of sea level rise and rainfall.

Key words : Climate Change, Coastal City, Flood Risk, Sea Level Rise

요 지

본 연구는 대한민국 연안도시를 대상으로 기후변화로 인해 증가하는 해수면을 고려한 방재성능목표를 제시하고, 이를 활용하여 기후변화에 따라 높아진 해수면으로 인해 연안도시에서 발생하는 침수의 위험성을 평가하고자 하였다. 이 때, 제시되는 방재성능목표는 해수면 상승률로서 연안에 위치하는 수공시설물의 설계인자인 설계 조위, 설계 홍수위에 추가적으로 고려할 수 있도록 하였다. 산정된 방재성능목표 해수면 상승률은 서해가 0.61 cm/year로 가장 높았으며, 동해가 0.58 cm/year로 산정되었다. 또한 해수면이 상승함에 따라 침수피해가 증가하는 것을 EPA-SWMM을 통해 정량적으로 확인하였다. 본 연구는 연안도시의 침수피해를 유발하는 해수면 상승을 고려하여 방재성능목표 설정방안을 제시하였다. 따라서 연안도시에 특화된 방재성능목표라고 할 수 있다. 그러나 연안도시의 침수를 유발하는 요소는 해수면 상승과 함께 강우량도 존재한다. 따라서 추후 연구에서는 연안도시에 침수 피해를 유발하는 해수면 상승과 강우량을 동시에 고려한 연안도시 방재연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기후변화, 연안도시, 침수위험성, 해수면 상승

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 도시물순환연구센터 박사후 연구원(Tel: +82-31-910-0551, Fax: +82-31-910-0291, E-mail: parkyoonkyung@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Postdoctoral fellow, Urban Water Cycle Research Center, Department of Land, Water & Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**정회원, (주)씨에스기술 대표이사(E-mail: bsjung@kookmin.ac.kr)
Member, CEO, Coastal Simulation Technology

***한국건설기술연구원 국토보전연구본부 도시물순환센터 센터장(E-mail: rhkim@kict.re.kr)
Head of Center, Urban Water Cycle Research Center, Department of Land, Water & Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

1. 서론

전 지구적인 기후변화에 의한 피해는 점점 가속화되고 대형화 되고 있는 추세이다(UN, 2014). 태풍, 폭풍해일 등의 자연 재난 규모가 대형화 될 뿐 아니라 강우의 형상과 특성이 과거 사상과는 다르게 변화하여 집중호우가 빈번해지고 주요 호우사상에 대한 불확실성이 크게 증가하여 침수피해가 증가되고 있는 실정이다(IPCC, 2014). 우리나라는 약 14,963 km의 해안선과 약 4,000 km²의 연안육지를 보유한 반도국가로, 총 인구의 27.4%(약 14,108천 명)가 연안도시에 거주하고 있다(MOF, 2015a, 2015b). 바다와 인접한 연안도시는 특히 자연재해에 취약한 문제를 안고 있는데, 2009년에서 2013년 동안의 자연재해 피해금액을 살펴보면, 연안도시에서 발생한 자연재해는 우리나라 전체 피해금액의 68%(약 4,323억 원)를 차지할 정도이다(KMI, 2015).

이처럼 연안도시의 자연재해 피해에 영향을 미치는 가장 큰 요인 중 하나가 해수면 높이이다. 만약 최종 방류구가 바다와 접해있어 해수면이 높은 시기에 강우가 발생한다면, 해수면보다 낮은 지역에 위치한 저지대에서 강우가 배출되는 것은 어려우므로 육지에 침수현상이 발생하게 된다. 즉, 연안도시 지역은 기후변화로 인한 강우특성 변화 뿐 만 아니라 기후변화로 인한 해수면 상승에 까지 영향을 받는 지역으로, 연안도시 지역은 기후변화로 인한 강우특성 변화, 해수면 변화까지 모두 고려해야 바람직한 방재대책을 마련할 수 있다(Cha et al., 2016; Park et al., 2018).

도시지역의 풍수해 방제를 위한 선행연구를 살펴보면, 주로 강우량 변화로 인한 홍수량 변화와 같은 수문학적 영향변화에 주목하고 있다. 기후변화 시나리오의 강우자료를 활용하여 강우량 변화가 예상되는 국내 주요지점들의 확률강우량을 예측하고, 이를 이용하여 수공구조물의 설계에 활용하는 연구가 진행되었다(Kim et al., 2011; Seo et al., 2012; Sung et al., 2012). 전술한 바와 같이 연안도시에서 발생하는 풍수해의 경우 강우뿐 만 아니라 해수면과도 밀접한 관련이 있어 연안도시의 특성을 고려한 방재기준 설정에 대한 연구가 증가하고 있는 추세이다. Park et al. (2018)은 우리나라 연안도시 방재성능목표를 설정하기 위해 해수위와 강우의 관계를 분석하는 연구를 진행하였다. 연구결과, 연안도시의 풍수해는 강우보다 해수면 상승이 주요한 인자인 것으로 확인하였다. 이는 연안도시의 방제를 위해서는 강우뿐만 아니라 해수면 상승에 대한 요인도 함께 고려해야 한다는 것을 의미한다. Choi et al. (2019)은 XP-SWMM을 이용하여 연안도시 지역의 재해발생 위험성을 해수면 상승에 따라 평가하였다. 대상지역의 경우, 현 상황에서도 일부 침수가 일어나고 있지만 해수면이 상승함에 따라 피해 면적이 점진적으로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

우리나라에서는 홍수와 호우 등에 의한 자연재해 피해를

최소화 하고자 지자체별로 방재성능목표 강우량(Disaster Prevention performance Target Rainfall)을 설정하여 재해예방정책을 실시하고 있다(MOIS, 2017a). 고시하고 있는 방재성능목표 기준을 살펴보면 대부분 과거 기왕 자료에 의존하고 있고, 특히 연안도시의 경우 기후변화로 인한 해수면 상승 반영이 미흡하여 실제 적용에는 한계점이 있다. 이러한 한계점을 개선하기 위하여 본 연구는 미래 기후변화 시나리오의 직접적으로 반영하여 연안도시에 특화된 방재성능목표 설정방안을 제시하고자 한다. 또한 기후변화에 의해 증가한 해수면으로 인하여 연안도시의 침수위험성의 변화를 본 연구에서 제시하는 방재성능목표를 활용하여 살펴보고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 조위관측소 및 관측소별 미래 해수면 상승고 산정

기후변화에 따른 해수면 상승고를 고려한 방재성능목표를 설정하기 위해서 우리나라 22개 조위관측소를 대상으로 하고자 하였다. 22개 조위 관측소에 인접한 지자체를 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 22개 중 14개 조위 관측소(군산, 목포, 목호, 부산, 속초, 안흥, 여수, 완도, 울릉도, 울산, 인천, 통영, 평택, 포항)는 시·군 단위의 지자체와 인접하고 있으며, 7개의 조위 관측소(거문도, 서귀포, 성산포, 위도, 제주, 추자도, 흑산도)는 읍·면·동 단위의 지자체와 인접하고 있어 해수면 상승물의 지역적 특성을 시·군 단위보다 세밀하게 고려된다. 가덕도 조위 관측소의 경우 부산 조위 관측소와 인접한 지자체가 동일하기 때문에 부산 조위 관측소를 대표로 설정하였다. 조위관측소에 인접한 지자체의 설정은 국립해양조사원에서 실시간 고조정보를 제공하는 조위 관측소의 관련지자체와 동일하게 구분된다.

미래 해수면 상승고의 추정에는 Global Climate Model (GCM) 결과를 downscaling 하거나 GCM 결과를 입력조건으로 하여 Regional Climate Model (RCM)을 수행하는 방법으로 산출할 수 있다. 이러한 방법의 경우 상당한 검토기간, 비용이 필요로 하며, 결과에 대한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 CLIMsystems (Li and Urich, 2017)를 활용하여 비교적 간단하게 미래 해수면 자료를 획득하고자 하였다. CLIMsystems는 Representative Concentration Pathways (RCP) 시나리오 기반의 GCM 24개 모델결과를 재분석하는 프로그램으로 해수면 상승고를 예측할 수 있는 프로그램이다. 미래 해수면 자료는 CLIMsystems를 이용하여 조위 관측소 주변의 해수면 상승고를 분석하고, 1995년~2015년을 대상으로 관측조위 자료의 해수면 상승률과 RCP 시나리오 기반의 CLIMsystems의 해수면 상승고를 비교한다. 이후 CLIMsystems에 지역 해수면 상승률을 보정하여 2005년부터 2100년까지의 미래 해수면 상승고를 추정하게 된다.

Table 1. Adjacent Local Governments by Tide Gage Stations

Sea Area	Tide Gage Station	Adjacent Local Government
East Sea	Sokcho	Sokcho-si, Gosung-gun (GW), Yangyan-gun
	Mookho	Gangneung-si, Donghae-si, Samcheok-si
	Pohang	Gyeongju-si, Pohang-si
	Ulsan	Ulsan-si
	Ulleungdo	Ulleung-gun
South Sea	Wando	Gangjin-gun, Wando-gun, Jangheung-gun, Haenam-gun
	Yeosu	Gwangyang-si, Yeosu-si, Namhae-gun, Hadong-gun
	Tongyoung	Sacheon-si, Tongyoung-si, Gosung-gun (GN)
	Busan	Busan-si
	Geomundo	Samsan-myeon, Yeosu-si
	Gadukdo	-
West Sea	Incheon	Incheon-si, Gimpo-si, Siheung-si
	Pyeongtaek	Asan-si, Pyeongtaek-si
	Anheung	Taejeon-gun
	Gunsan	Gunsan-si, Gimje-si, Buan-gun
	Mokpo	Mokpo-si, Muan-gun, Sinan-gun, Youngam-gun
	Wido	Weido-myeon, Buan-gun
	Heuksando	Heuksan-myeon, Sinan-gun
Adjacent Sea on Jeju	Jeju	Northern Jeju
	Seongsanpo	Eastern Jeju
	Seogwipo	Southern Jeju
	Chujado	Chuj-myeon, Jeju-si

Fig. 1. Location of Adjacent Local Governments by Tide Gage Stations

2.2 해수면 상승을 고려한 방재성능목표 설정 방안

해수면 상승과 관련하여 풍수해저감종합계획(MOIS, 2017b), 하천설계기준·해설(MOLIT, 2017), 하수도시설기준(ME, 2011), 항만 및 어항기술(MOF, 2017), 연안시설 설계기준·해설(MOF, 2016) 등을 검토하였다. 이를 토대로 기후변화가 상승하는 해수면을 고려하기 위해서는 설계조위에 해수면 상승률을 고려하는 것이 적절하다고 판단하였다. 본 연구에서는 방재성능목표 강우량에 기후변화 영향을 고려한 개선안을 참고하여 기후변화로 인해 상승하는 해수면을 고려할 수 있는 방재성능목표를 설정하는 방안을 설정하고자 하였다.

방재성능목표 강우량 개선안은 기존의 방재성능목표 강우량에 미래 기후변화 영향을 반영하는 것이다(MOIS, 2017a). 이를 위해서 다양한 연구진에 의해 산정된 59개 강우관측소 지점별 미래 확률강우량을 사용하였다. 이는 미래 확률강우량은 어떤 모형의 미래 강우량을 이용하였는지, 어떠한 편차 보정 과정을 거쳤는지에 따라서 그 값이 달라지기 때문에, 미래 예측의 불확실성을 감안한다면 특정 방법론이 우수하다고 평가하기 어려운 측면이 있어 다양한 미래 확률강우량의 결과들을 앙상블 평균하여 활용하였다. 지점별 확률강우량의 증감률을 티센망을 적용하여 전국 169개 지자체별 증감율을 미래기간별(단기, 중기, 장기)로 산정된다. 단기(~2040년)에는 전국 지자체 평균 증감률이 약 5%, 중기(~2070년)는 약 10%, 장기(~2100년)는 약 15% 정도 증가하는 것으로 예측되었다. 방재성능목표 강우량 개선을 위하여 단기(~2040년)를 목표연도 기준으로 결정하고 지역별 방재성능목표 강우량을 설정하였다. 우선 기존의 방법론을 적용하여 지속시간별 30년 빈도 확률강우량을 산정한 뒤 2040년까지 전국 지자체별 평균 증감률인 5%를 할증하고 이를 5mm 단위로 상향조정하는 것으로 방재성능목표 강우량에 미래 기후변화 영향을 고려하고자 하였다. 더불어 확률강우량 증감률의 지역적 편차를 고려하고자 지자체 확률강우량 증감률이 5~10%인 지자체는 관심 지자체로, 10% 이상인 지자체는 주의 지자체로 분류하여 추가적인 할증을 고려할 수 있도록 고려하였다.

해수면 상승을 고려한 연안도시에 특화된 방재성능목표는 전술한 방재성능목표 강우량 개선방안을 참조하여 설정하고자 하였다(Fig. 2 참고). 미래 해수면 상승자료의 경우 미래 예측의 불확실성을 감안하기 위하여 RCP 4.5와 RCP 8.5의 조위 관측소별 해수면 상승과 자료를 앙상블 평균하여 이용하였다. 이를 바탕으로 미래기간을 단기(~2040년), 중기(~2070년), 장기(~2100년)별 평균 해수면 상승률(cm/year)을 산정한다. 방재성능목표 강우량과 동일하게 해수면 상승률 역시 목표연도를 단기(~2040년)를 기준으로 동해, 남해, 서해, 제주 해역별로 평균 상승률을 산정하여 연안 지자체에 권고하고자 하였다. 강우량과 마찬가지로 해수면 역시 지역적 편차가 있기 때문에, 해역 평균 해수면 상승률보

다 높게 상승하는 조위 관측소를 대상으로 조위 관측소에 인접한 지자체를 관심지자체로 구분하여 추가적인 해수면 상승률을 제공할 수 있도록 고려하고자 하였다.

Fig. 2. Disaster Prevention Performance Target Setting Considering Sea Level Rise according to Climate Change

실제 방재성능목표를 방재정책방향 결정 등에 활용하기 위해서는 지자체 별로 방재성능목표를 제공되어야 한다. 방재성능목표 강우량 역시 기상관측 지점별 확률강우량을 티센망으로 공간 평균하여 지자체 별로 방재성능목표 강우량을 제공하고 있다. 또한 확률강우량의 지역적 특성을 반영하고자 전국 지자체 확률강우량 평균 증가율(5%)보다 더 큰 증가율을 보인 지자체에 대해 추가 권고를 할 수 있도록 전국 지자체를 일반/관심/주의 지자체로 구분하였다. 본 연구에서도 이와 유사하게 해역별로 산정된 해수면 상승률은 각 해역에 위치한 지자체(55개)에 권고하도록 구성하였다. 동해역에는 12개 연안 지자체(울산시, 강릉시, 경주시, 동해시, 삼척시, 속초시, 포항시, 고성군, 양양군, 영덕군, 울릉군, 울진군)가 위치하며, 서해역은 24개 연안 지자체(인천시, 군산시, 김제시, 김포시, 당진시, 목포시, 보령시, 서산시, 시흥시, 아산시, 안산시, 평택시, 화성시, 고창군, 무안군, 부안군, 서천군, 신안군, 영광군, 영암군, 진도군, 태안군, 함평군, 흥성군), 남해역은 17개 연안 지자체(부산시, 거제시, 광양시, 사천시, 순천시, 여주시, 창원시, 통영시, 강진군, 고성군, 고흥군, 남해군, 보성군, 완도군, 장흥군, 하동군, 해남군)가 위치한다. 제주도는 2개 지자체(서귀포시, 제주시)로 구성되어 있지만, 방재성능목표 강우량과 동일하게 제주도를 크게 4개의 지역(동서남북)으로 구분하여 제주근해의 해수면 상승률을 제공하고 있다.

해수면 상승률의 지역적 특성을 고려한 해수면 상승률 권고안은 다음과 같은 방법을 통해 설정하였다. 1) 해역별 평균 상승률과 해역 내 조위 관측소의 해수면 상승률 비교한 후, 2) 조위 관측소 해수면 상승률이 더 클 경우, 조위 관측소 인근 지자체를 관심지자체로 구분하고 해당 조위 관측소 해수면 상승률을 추가적으로 권고한다. 마지막으로 3) 조위 관측소 해수면 상승률이 해역 평균 상승률보다 작을 경우 인접한 연안 지자체는 일반 지자체로 구분하고 해역별 평균 상승률을 권고하는 것으로 설정하였다.

3. 연구결과

3.1 미래 해수면 상승률

본 연구에서는 방재성능목표 강우량 기준년도인 2005 년과 해수면 기준년도를 일치시켜 미래 해수면 상승고 자료를 생산하였다. 기후변화에 따라 변화하는 해수면 상승률의 경향성을 파악하기 위하여 단기(~2040년), 중기(~2070년), 장기(~2100년) 별로 해수면 상승률을 산정하였다(Table 2).

RCP 시나리오에 상관없이 단기(~2040년)에서 장기(~2100년)으로 갈수록 해수면 상승률이 크게 산정되는데 이는 미래로 갈수록 우리나라 연안에서 해수면 상승이 더욱 가속화되는 것을 의미한다. 따라서 기후변화로 인해 증가하는 해수면을 고려한 방재시설의 성능평가 및 설계가 수행되어야 함을 확인할 수 있다. 22개 조위 관측소 중 목포 조위 관측소는 RCP 시나리오 및 미래기간에 상관없이 해수면 상승률이 연간 1 cm 이상 상승하여 가장 빨리 해수면이 상승할 것으로 예측되었다.

기후변화로 인한 해수면 상승을 고려한 방재성능목표를 제시하기 위해서 RCP 4.5에서 해수면 상승률과 RCP 8.5에서 해수면 상승률을 평균한 양상별 평균법을 적용하였다. 그 결과, 단기(~2040년), 중기(~2070년), 장기(~2100년)의 평균 해수면 상승률이 각각 약 0.61 cm/year, 0.89 cm/year, 1.09 cm/year로 산정되었다. 해수면 상승률의 지역적 특성을 반영하기 위하여 해역별 평균을 산정한 결과, 제주 근해가 가장 큰 해수면 상승률을 보여 기후변화로 인한 해수면 상승률이 가장 민감하게 반응하고 있음을 확인하였다. 서해

Table 2. Sea Level Rise Rate by Future Period

Tide Gage Station	Rate of Sea Level Rise (cm/year)					
	Short-term (~2040)		Medium-term (~2070)		Long-term (~2100)	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Incheon	0.44	0.50	0.61	0.86	0.65	1.24
Pyeongtaek	0.64	0.70	0.81	1.06	0.85	1.44
Anheung	0.53	0.59	0.70	0.95	0.74	1.33
Gunsan	0.54	0.60	0.71	0.96	0.75	1.34
Wido	0.37	0.43	0.54	0.79	0.58	1.17
Mokpo	1.11	1.17	1.28	1.53	1.32	1.91
Heuksando	0.40	0.46	0.57	0.82	0.61	1.20
Wando	0.46	0.53	0.64	0.89	0.68	1.26
Geomundo	0.74	0.81	0.92	1.17	0.96	1.54
Yeosu	0.49	0.56	0.67	0.92	0.71	1.29
Tongyoung	0.53	0.60	0.71	0.96	0.75	1.33
Gadukdo	0.64	0.71	0.82	1.07	0.86	1.44
Busan	0.52	0.56	0.65	0.85	0.69	1.15
Ulsan	0.54	0.58	0.67	0.87	0.71	1.17
Pohan	0.57	0.61	0.70	0.90	0.74	1.20
Mookho	0.50	0.54	0.62	0.81	0.67	1.09
Sokcho	0.52	0.56	0.64	0.83	0.68	1.12
Ulleungdo	0.69	0.74	0.83	1.04	0.87	1.35
Jeju	0.83	0.90	1.01	1.26	1.05	1.63
Seogwipo	0.72	0.79	0.90	1.15	0.94	1.52
Seongsanpo	0.99	1.06	1.17	1.42	1.21	1.79
Chujado	0.59	0.65	0.76	1.01	0.80	1.39
Mean	0.61	0.67	0.77	1.00	0.81	1.36

와 남해는 유사한 해수면 상승률을 보였으며, 동해는 기후변화에 따른 해수면 상승률이 가장 낮을 것으로 예측되었다.

Fig. 3은 단기(~2040년)의 해수면 상승률을 나타낸 것으로, 연안도시에 특화된 방재성능목표를 설정하기 위한 자료로 활용하였다. 이는 기후변화를 고려한 방재성능목표 강우량과 동일하게 목표연도를 단기(~2040년)로 기준으로 설정하기 위해서이다. 제주 근해에 위치한 검조소의 해수면 상승률이 0.82 cm/year로 가장 높게 나타났으며, 동해가 해수면 상승률이 0.58 cm/year로 가장 낮게 나타났다. 조위관측소 중에서는 목포에서 해수면 상승률이 가장 높은 것으로 확인되었다(1.14 cm/year).

3.2 연안도시 특성을 반영한 방재성능목표 설정

해역별 해수면 평균 상승률 및 해수면 상승률의 지역적 특성을 고려하여 연안도시에 적용할 수 있는 기후변화로 인한 해수면 상승을 반영한 방재성능목표 설정을 위한 해수면 상승률이 Fig. 4에서 표기한 바와 같이 권고될 수 있다. Fig. 4에서 붉은 색으로 표기된 조위 관측소는 각 해역 평균 해수면 상승률보다 더 높은 상승률을 가지는 조위 관측소이다. 해당 관측소 주변에 위치한 지자체(Fig. 4에서 빗금으로 표시된 지자체)에서는 해역 평균 해수면 상승률을 고려할 수 있지만 지자체 주변에 위치한 조위 관측소의 해수면 상승률을 추가로 고려할 수 있다.

서해역의 권고 해수면 상승률은 0.61 cm/year이며, 이보다 더 높은 해수면 상승률을 보이는 조위 관측소는 목포(1.14 cm/year)와 평택(0.67 cm/year)으로서 해당 조위 관측소와

인접한 지자체는 관심 지자체로 구분하여 추가 권고해수면이 제시된다. 목포시, 무안군, 신안군, 영암군은 목포 조위관측소에 인접하고 있어 추가 권고 해수면 상승률은 1.14 cm/year이다. 평택 조위관측소와 인접한 아산시, 평택시는 0.67 cm/year의 해수면 상승률이 추가적으로 권고될 수 있다. 조위 관측소 대신(당진시, 서산시), 보령(보령시, 홍성군), 안산(안산시, 화성시), 영광(고창군, 영광군, 함평군), 장항(서천군), 진도(진도군)는 미래 해수면 상승률을 산정할 수 없는 조위 관측소로 이와 인접한 지자체는 일반 지자체로 구분하여 해역 평균 해수면 상승률을 권고하는 것으로 정의하였다.

남해역의 권고 해수면 상승률은 0.60 cm/year이며, 이보다 더 높은 해수면 상승률을 보이는 조위 관측소는 거문도와 가덕도로서 해당 조위 관측소와 인접한 지자체는 여수시 삼산면 즉, 거문도 1개 읍·면·동 단위 지자체가 관심 지자체로 분류되어 추가 권고 해수면 상승률 0.78 cm/year이 제시된다. 조위 관측소 거제(거제시), 고흥(순천시, 고흥군, 보성군), 마산(창원시)은 미래 해수면 상승률을 산정할 수 없는 조위 관측소로 이와 인접한 지자체는 일반 지자체로 구분하여 해역 평균 해수면 상승률을 권고하는 것으로 정의하였다.

동해역의 권고 해수면 상승률은 0.58 cm/year이며, 이보다 더 높은 해수면 상승률을 보이는 조위 관측소는 포항(0.59 cm/year), 울릉도(0.71 cm/year)로서 해당 조위 관측소와 인접한 지자체는 경주시, 포항시, 울릉군으로 3개 지자체는 관심 지자체로 분류된다. 경주시, 포항시에는 포항 조위관측

Fig. 3. Ensemble Average Sea Level Rise Rate During Short-Term (~2040) (cm/year)

Fig. 4. Disaster Prevention Performance Target of Coastal Cities

소의 해수면 상승률이 추가로 권고되며, 울릉군은 울릉도 조위관측소의 해수면 상승률이 추가 권고될 수 있다. 영덕군과 울진군은 후포 조위 관측소와 인접하여 있으나 해당 조위 관측소는 2003년 이후에 관측을 시작하여 미래 해수면 상승률을 산정할 수 없어 일반지자체로 구분하여 해역 평균 해수면 상승률을 권고하는 것으로 정의하였다.

제주 근해의 권고 해수면 상승률은 0.82 cm/year이며, 이보다 더 높은 해수면 상승률을 보이는 조위 관측소는 제주와 성산포로서 해당 조위 관측소와 인접한 지자체는 제주 북부와 제주 동부이다. 해당 지자체는 관심 지자체로 분류되어 추가 권고 해수면 상승률이 제시된다. 제주 북부는 제주 조위관측소에 인접하여 있어 0.87 cm/year가 추가 권고되며, 제주 동부는 성산포 조위관측소와 인접하여 있어 1.03 cm/year가 추가 권고된다. 모슬포 조위 관측소(제주 서부)는 미래 해수면 상승률을 산정할 수 없는 조위 관측소로 이와 인접한 지자체는 일반 지자체로 구분하여 해역 평균 해수면 상승률을 권고하는 것으로 정의하였다. 추자도 조위 관측소는 읍·면·동 단위 지자체인 제주시 추자면에 인접해 있으며, 해당 지자체는 일반 지자체로 구분되어 제주 근해 평균 해수면 상승률이 권고되는 것으로 정의하였다.

3.3 미래 해수면 상승을 고려한 방재성능목표를 활용한 연안도시 침수위험성 평가

기후변화로 인해 해수면이 상승하게 되면 조위 관측소 주변 주요시설물에도 영향을 미치지만 연안도시의 침수피해 규모에도 영향을 미치게 된다. 이에 우리나라 주요 연안도

시의 EPA-SWMM모형을 구축하여 해수면 상승에 따른 월류량 산정 및 침수노드 개수를 확인하여 기후변화로 인해 상승하는 해수면이 연안도시 침수 피해에 미치는 영향을 간접적으로 확인하고자 하였다. 이를 위해 EPA-SWMM이 구축된 부산시 센텀지구, 목포시 해안로 배수구역을 대상으로 하였다(Fig. 5).

월류량 산정 및 침수노드 개수를 확인하기 위해 입력되는 강우자료는 각 지자체의 방재성능목표 강우량을 산정하기 위해 활용된 지자체 30년 빈도 지속시간 3시간의 확률강우량을 이용하였다(MOIS, 2017a). 외수위 조건으로 입력되는 해수면은 3가지 경우로 구성 하였다. Case 01은 현재 시점의 주변 조위 관측소의 약최고고조위, Case 02는 10년 후의 주변 조위 관측소의 약최고고조위(Case 01 약최고고조위 + 해수면 상승률 × 10 year), Case 03은 20년 후 주변 조위 관측소의 약최고고조위(Case 01 약최고고조위 + 해수면 상승률 × 20 year)로 구성하였다.

부산 센텀지구와 인접한 조위관측소는 부산으로서 해당 조위 관측소의 약최고고조위는 D.L. 129.8 cm이다. 기후변화에 따른 해수면 상승률 0.6 cm/year를 활용하여 미래 시점(10년 후, 20년 후)의 약최고고조위를 산정하였다(Table 3 참고). 모의를 위해 사용되는 부산시 방재성능목표강우량은 162.7 mm이다.

침수피해 분석결과, 해수면이 상승할수록 월류량과 침수노드의 개수가 증가하는 것을 확인하였다(Table 4). 센텀지구의 총 노드개수는 195개로 현재 시점에서의 침수가 발생하는 노드개수가 2개인 것으로 침수피해 규모가 크지 않을

(a) Centum district, Busan

(b) Coastal route district, Mokpo

Fig. 5. Aerial Image and EPA-SWMM of Study Areas for Flood Risk Assessment

Table 3. Input Data in Centum District, Busan

Case		Sea Level (DL. cm)	Disaster Prevention Performance Target Rainfall (mm)
01	Present	129.8	162.7
02	After 10 years	135.8	
03	After 20 years	141.8	

Table 4. Flood Damage in Centum District, Busan

Case		Flood (10^6 ltr)	Number of Damaged Node	Total Number of Node
01	Present	0.008	2	195
02	After 10 years	0.009	9	
03	After 20 years	0.010	13	

것으로 예상된다. 그러나 현재보다 해수면이 12 cm 상승하는 경우(Case 03), 침수노드 개수가 13개로서 센텀지구의 침수피해 규모를 증가시킬 것으로 분석되었다. 또한 미래로 갈수록 침수가 발생하는 노드 수와 함께 월류량이 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 해당 지역의 침수규모는 막대하다고 할 수 없으나, 상권이 밀집한 지역으로서 유동인구가 많은 지역이다. 따라서 약간의 침수피해 증가는 많은 인명 및 재산피해를 유발할 수 있으므로 해수면 상승에 따른 방재대책이 필요할 것으로 판단된다.

목포시의 방재성능목표강우량은 104.2 mm이며, 목포 해

안로 배수구역과 인접한 조위관측소는 목포로서 해당 조위 관측소의 약최고고조위는 D.L. 486.0 cm이다. 기후변화에 따른 해수면 상승률 1.14 cm/year를 활용하여 미래 시점(10년 후, 20년 후)의 약최고고조위를 산정할 수 있다(Table 5 참조).

목포 해안로 배수구역의 침수피해 분석결과(Table 6), 해수면이 상승할수록 월류량이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 총 노드 개수 대비 침수가 발생하는 노드 비율이 58% 이상을 차지하고 하고 있어, 해당 배수구역은 기후변화로 인한 해수면 상승을 우선적으로 고려한 방재시설 성능 평가

Table 5. Input Data in Coastal Route District, Mokpo

Case		Level (DL. cm)	Disaster Prevention Performance Target Rainfall (mm)
01	Present	486.0	104.2
02	After 10 years	497.4	
03	After 20 years	508.8	

Table 6. Flood Damage in Coastal Route District, Mokpo

Case		Flood (10 ⁶ ltr)	Number of Damaged Node	Total Number of Node
01	Present	109.330	57	90
02	After 10 years	126.966	53	
03	After 20 years	142.194	55	

및 방재시설의 설계가 필요할 것으로 판단된다. 목포 해안로 배수구역의 해수면 상승에 따른 월류량은 증가하고 있으나 침수노드 개수가 선형적으로 증가하지 않았다. 이는 해당 배수구역의 강우유출 배제에 지체가 발생하여, 특정 노드에서 월류량이 증가하였지만 이로 인해 주변 노드에서 침수가 발생하지 않는 현상으로 판단된다.

서해는 다른 해역보다 해수면 상승률이 높은 해역이며, 그 중에서도 목포는 해수면 상승률이 가장 높은 조위 관측소이다. 본 연구결과에 따르면 목포 주변의 해수면이 20년 후에는 현재보다 약 20 cm 상승할 것으로 예측되며, 그에 따라 침수피해 역시 크게 증가할 것으로 예측된다. 따라서 해당지역에 대해서는 해수면 상승으로 인한 방재대책을 시급히 마련해야 할 것으로 판단된다.

부산 센텀지구, 목포 해안로 배수구역을 대상으로 기후변화로 인해 해수면 상승함에 따라 발생하는 침수위험성을 정량적으로 평가할 수 있었다. 해당 연구결과는 기후변화로 인해 상승하는 해수면에 대비한 연안도시 방재정책 방향을 결정하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 침수위험성을 평가하기 위해 해수면 상승에 대한 다양한 경우를 고려하고 있으나 침수를 유발시키는 요인 중 하나인 강우량에 대해서는 하나의 경우(방재성능목표 강우량, 기후변화를 고려한 30년 빈도 확률강우량)만을 활용하고 있어, 실제 연안도시 방재를 위해서는 보다 다양한 강우량과 해수위 시나리오를 적용해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

연안도시는 강우량의 증가 뿐 만 아니라 해수면 상승으로 인해 침수피해가 발생할 수 있는 지역이다. 따라서 기존에 활용하고 있는 방재성능목표는 강우량만을 고려하고 있기 때문에 연안도시의 특성이 반영되었다고 할 수 없다. 이에 본 연구에서는 연안도시의 특성을 고려한 방재성능목표를 해수면 상승률로 정의하고 해수면 상승만을 고려한 방재성

능목표 기준을 제시하였다. 본 연구에서 제시하는 방재성능목표는 실제 방재시설의 평가 및 설계에 활용되는 설계 조위 및 홍수위에 n년 후 해수면 상승량을 더하는 것으로서 방재성능목표가 설정되도록 방법론을 정립하였다. 이 때, n년 후 해수면 상승량은 본 연구를 통해 산정된 해수면 상승률(cm/year)에 n년을 곱하여 산정된다. 해수면 상승률은 해역별(동해역, 남해역, 서해역, 제주 근해) 평균값으로 제공되며, 해역 평균 해수면 상승률보다 더 큰 해수면 상승률을 가진 조위 관측소 인접 지자체는 관심 지자체로 구분하여 해당 조위 관측소의 해수면 상승률이 추가권고 될 수 있는 안을 마련하였다. 본 연구에서 제시된 방법을 이용하여 연안도시(부산 센텀지구, 목포 해안로 배수구역)의 침수피해 영향을 EPA-SWMM을 통해 살펴본 결과, 해수면이 상승함에 따라 현재보다 침수피해 등 자연재해 규모가 커질 것으로 예측되었다. 해수면 상승률이 높은 목포지역의 경우에는 해수면이 20 cm 이상 증가할 것으로 예측되며, 그에 따라 침수피해 역시 커질 것으로 예측되었다. 따라서 해수면 상승에 대비한 방재정책이 시급히 마련되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시하고 있는 방재성능목표는 단순히 기후변화에 따라 상승하는 해수면 상승률만을 고려하고 있어 연안도시에서 발생하는 재해특성을 모두 반영하였다고 할 수 없다. 따라서 효과적인 방재를 위해서는 기후변화에 따라 변화하는 강우량, 해수면을 함께 고려한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었으며(2019002950004), 박윤경 박사후연구원은 ‘국가과학기술연구회 핵심연구분야 우수인력발굴지원 사업’의 지원을 받았습니다.

References

- Cha, W., Choi, J., Lee, O., and Kim, S. (2016). Probabilistic analysis of sea level rise in Korean major coastal regions under RCP 8.5 climate change scenario. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 6, pp. 389-396.
- Choi, G., Lee, J., Ham, D., Park, Y., and Song, Y.H. (2019). An analytical study of the problems and a plan for improving of disaster prevention performance in coastal cities. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 7, pp. 463-470.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Mitigation of climate change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press.
- Kim, Y.H., Yeo, C.G., Seo, G.S., and Song, J.W. (2011). Estimation of regional probable rainfall based on climate change scenarios. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 3, pp. 29-35.
- Korea Maritime Institute (KMI). (2015). *A study on coastal safety assessment measures against natural disaster*.
- Li, Y., and Ulrich, P. (2017). *SimCLIM for ArcGIS marine manual and FAQ Version 1.1*. CLIMsystems.
- Ministry of Environment (ME). (2011). *Sewage facility standard*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (MOLIT). (2017). *Standard description of river design*.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). (2015a). *Our coast at a glance*.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). (2015b). *Coastal Basic survey*.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). (2016). *Design criteria and explanation of coastal facilities*.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). (2017). *Harbour and fishing port technology*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2017a). *Criteria for the establishment and operation of disaster prevention performance targets by region considering the impact of future climate change, etc.*
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2017b). *Detailed standard for establishing comprehensive plans for reducing storm and flood damage at cities and counties*.
- Park, Y., Kim, S., Lee, J.H., and Song, Y.H. (2018). Relationship analysis of sea level-rainfall for determination of disaster prevention performance in coastal cities. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 7, pp. 469-474.
- Seo, L., Jeon, M., Kim, T.W., and Kim, S. (2012). Ensemble prediction of future design rainfalls considering climate change. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 2, pp. 159-171.
- Sung, J.H., Kim, B., Kang, H.S., and Cho, C. (2012). Non-stationary frequency analysis for extreme precipitation based on representative concentration pathways (RCP) climate change scenarios. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 2, pp. 231-244.
- United Nations (UN). (2014). *World urbanization prospects*. Department of Economic and Social Affairs, United Nation, New York.

Received	October 20, 2020
Revised	October 20, 2020
Accepted	October 28, 2020