해수면 상승을 고려한 연안 지역의 Flood Nomograph 선정

Establishment of a Flood Nomograph in Coastal Areas Considering Sea-Level Rise

김동준* · 최경민** · 송양호*** · 이정호****

Kim, Dong Jun*, Choi, Kyung Min**, Song, Yang Ho***, and Lee, Jung Ho****

Abstract

Climate change caused by global warming is raising the average sea level. The rise in sea level leads to an increase in river water levels within the affected range, which increases the possibility of flooding in water due to erosion of outfall to the coast and rivers. Therefore, it is necessary to recognize in advance the risk of occurrence of domestic flooding, which is aggravated by the effect of rising sea levels, and to construct new boundary conditions for predicting urban flooding accordingly. In this study, Flood Nomograph for two research areas was selected in consideration of the regional characteristics of coastal areas and the scenario of sea level rise. As a result of the analysis, as the sea level rose, the amount of flood critical rainfall decreased numerically. It is believed that this study can be used as a necessary basis for improving flood forecast and warning data considering sea level rise in coastal cities in the future.

Key words : Sea Level Rise, Flood Nomograph, Climate Change, Flood Warning System

요 지

지구온난화에 따른 기후변화는 평균 해수면을 상승시키고 있다. 해수면의 상승은 그 영향 범위 내의 하천 수위의 상승으로 이어지며, 이는 해안 및 하천으로 방류되는 토구의 잠식에 따른 내수침수 발생 가능성을 증대시키는 원인이 된다. 따라서 해수면 상승 영향에 의해 가중되는 내수침수 발생 위험을 사전에 인지하고, 이에 따른 도시침수 예측을 위한 새로운 경계조건의 구성이 필요하다. 본 연구에서는 연안 지역의 지역적 특성과 해수면 상승 시나리오를 고려하여 2개의 연구지역에 대한 Flood Nomograph를 선정하였다. 분석결과 해수면이 상승함에 따라 홍수임계 강우량의 수치적인 감소를 보였다. 본 연구는 향후 연안 도시들의 해수면 상승을 고려한 홍수에 ·경보 자료 개선을 위한 필요 근거로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 해수면 상승, Flood Nomograph, 기후변화, 홍수에 ·경보

1. 서 론

지구온난화로 인한 기후변화는 다양한 자연 · 사회적 문제를 야기한다. 연안 지역 중 ·소도시는 기후변화로 인한 해수면 상승에 직접적인 영향을 받는 지역으로써 해수면

상승에 의한 취약성 문제가 대두되고 있다. 해수면의 상승은 해당 범위에 존재하는 하천 수위의 상승에 영향을 주며, 이는 해안 및 하천으로 방류되는 토구를 잠식시켜 내수침수 발생 가능성을 증대시킨다. 이와 함께 내수배제불량, 해안저지대 침수 등 복합적인 홍수피해를 야기할 위험성이 있다.

*정회원, 국립한밭대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail: junhydro@gmail.com)

Member, Master Course Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanbat National University

**정회원, 국립한밭대학교 건설환경공학과 박사과정(E-mail: withckm@gmail.com)

Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanbat National University

***정회원, 대전세종연구원 미래기획실 연구위원(Tel: +82-44-550-3551, E-mail: ysong@dsi.re.kr)

Member, Research Fellow, Future Planning Division, Daejeon Sejong Research Institute

****교신저자, 정회원, 국립한밭대학교 건설환경공학과 교수(Tel: +82-42-821-1612, Fax: +82-42-821-1589, E-mail: leejh@hanbat.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanbat National University

이에 최근에는 기후변화로 인한 해수면 상승에 관한 위험성 관련 국내 연구들이 다양하게 수행되고 있다. Jo (2015)는 기상청 RCP 기후 시나리오를 적용한 우리나라 해안의 자연 및 사회·경제 시스템의 영향평가를 통하여 연안시스템의 평가 수행 체계를 제안하였다. Park et al. (2015)은 해수면 상승 시나리오 고려하여 각 방조제별 처오름높이 산정을 통해 서해안 국가관리 방조제에 대한 방조제 독마루 높이의 안정성을 평가하였다. Hwang et al. (2020)은 기후변화로 인해 발생하는 복합재난의 위험성을 인지하고 사회경제적 위험요소의 절대기준을 마련하여 평가하였다. Lee et al. (2015)는 기후변화에 따른 해안토지이용의 변화를 인지하고 해수면 상승 취약성 지수 개발을 통한 취약지 평가 체계를 제안하였다. Park et al. (2018)은 인천광역시의 녹지 및 습지를 대상으로 기후변화에 따른 해수면상승을 고려하여 생태계서비스 피해비용 추정을 통해 인천 지역의 피해비용을 산정하였다. Kim and Suh (2019)는 여름철 태풍으로 인한 폭풍해일 발생 위험성을 인지하고 해안 저지대 월파범람에 대한 해석을 통해 미래기후에 대한 월파범람 위험성 대책을 강구하였다. 앞서 조사된 연구들을 살펴보면 해수면 상승에 따른 해안가 인접 연안 지역에 대한 재해의 위험성을 주목하였다. 또한 국토의 지형적인 특성에 관하여 해수면 상승에 따른 위험성이 전방위적으로 대두되고 있다. 국가 홍수에·경보의 경우 과거 주요 대하천 중심의 홍수에·경보로 시작되었고 중·소 하천에서의 예경보 시스템이 부족한 실정이다. 현재까지의 내수 침수 예보 또는 경보 가능한 명확한 법적 근거가 없으며, 주요 시와 같은 지자체에서의 자체 침수 예측 시스템을 구축하여 운영하는 것이 실상이다(Lee, 2020). 이러한 홍수에·경보를 위해 Flood Nomograph에 대한 연구들 또한 다양하게 수행되고 있다.

Bae et al. (2012)은 SWMM 모형을 이용하여 청계천의 지점별 홍수량을 선정하였으며 그에 따른 홍수예보를 위한 Flood Nomograph를 개발하였다. Jo and Jeon (2013)은 부산 거제지구를 대상으로 실시간 침수예측이 가능한 Flood Nomograph를 개발하였으며 이를 검증하였다. Cheong et al. (2018)은 미계측 소하천 특성을 고려하여 소하천 예·경보를 위한 Nomograph를 구축하였으며 실측자료와 비교하였다. 이와 같이 기존의 Flood Nomograph는 하천 및 강우를 중점으로 연구가 진행되었다. 본 연구에서는 서해안과 남해안 해역의 연안 도시 우수관망을 대상으로 우수관망 평가방식인 신뢰도를 기반으로 시나리오에 따른 조위를 방류토구에 적용 및 분석하였다. 산정된 신뢰도 결과를 통하여

강우강도 및 강우지속시간과 같은 강우변수 정보만으로 침수 유발 및 발생시간을 빠르게 예측가능한 Flood Nomograph를 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 연구 시나리오 설정

5차 평가 보고서(Fifth Assessment Report, AR5)에 따르면 지구온난화가 지구의 평균 해수면을 상승 시키고 있다고 언급하였다(IPCC, 2014). 해당 보고서는 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)의 시나리오에 따라 평균 해수면 변화 예상치를 나타내었다. 이후 해당 평가 보고서를 기반으로 다양한 연구들이 진행되고 있으며 본 연구에서는 해당 RCP 시나리오를 기반으로 한 연구 결과인 KOEM (2012)의 해수면 상승 시뮬레이터의 데이터를 사용하였다. 해수면 상승 시뮬레이터의 데이터는 RCP 8.5일 때 우리나라 해역에서의 2050년의 평균 해수면 상승고를 0.4m로 보고하였으며 이 값을 본 연구에 적용하였다. 본 연구에서는 자체적인 시나리오를 설정하여 진행하였다. 시나리오는 4가지를 설정하였으며, 각각은 해당 지역의 토구에 적용되는 조위 값이다. Scenario 1은 해당 지역의 평균해면 값이며, Scenario 2는 평균해면 값에 2050년 평균 해수면 상승고를 더한 값이다. Scenario 3은 해당 지역의 약최고고조위 값이며, Scenario 4는 약최고고조위에 2050년 평균 해수면 상승고를 더한 값이다. 본 연구에서 적용한 지역들의 조위는 KHOA (2015) 격자형 해양정보의 기본수준점 데이터를 사용하였다. 본 연구에 적용한 Scenario에 따른 조위 데이터는 Table 1과 같다.

2.2 우수관망 신뢰도

Lee (2012)의 신뢰도는 우수관망의 파괴 확률을 정량적으로 나타낸 값이다. 본 논문에서는 Lee (2012)의 신뢰도 개념을 사용하였으며, 해당 논문에서의 거리척도방법(Distance Measure Method, DMM)을 사용하였다. 거리척도방법은 차원이 다른 단위를 갖는 데이터를 동일차원으로 변화하여 비교가능하도록 만드는 방법이다. 또한 신뢰도 산정식은 기존의 Lee (2012)에서 개선된 우수관망신뢰도(Improved Reliability of Sewer system using DMM, $IRSDMM$)를 사용하였다. 해당 식은 Eq. (4)와 같으며 각각의 인자들에 대한 설명은 다음과 같다. 적용 강우에 따라 발생하는 총 월류 발생량(V_o)_i와 총 유입량(V_i)_i을 통한 Eq. (1)과 같은 월류 발생량

Table 1. Sea Level Scenarios According RCP 8.5 on 2050

unit : [EL.m]				
Research Area	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Gunsan Wolmyeong-dong	0.000	0.400	3.685	4.085
Jeju Samdo 2-dong	0.000	0.400	1.490	1.890

비율 *RVDMM* (Reliability of overflow Volume using DMM)을 산정하였다. 적용 강우에 따라 발생하는 총 월류 발생 노드 개수(N_o)_{*i*}와 총 노드 개수(N_t)_{*i*}을 통한 Eq. (2)와 같은 월류 발생 지점 비율 *RNDMM* (Reliability of number of overflow Node using DMM)을 산정하였다. 최장 월류 시간 (H_o)_{*i*}과 강우지속시간(H_t)_{*i*}을 통한 Eq. (3)과 같은 빈도별 월류 발생 시간 비율 *RHDMM* (Reliability of flooded Hours using DMM)을 산정하였다. 각각의 비율 인자들을 종합하여 개선된 우수관망 신뢰도를 산정하였다. 각각의 인자는 EPA-SWMM 5.1을 이용하여 산출하였다.

$$RVDMM = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{V_{0i}}{V_t}\right)^2}}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

$$RNDMM = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{N_{0i}}{N_t}\right)^2}}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

$$RHDMM = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{H_{0i}}{H_t}\right)^2}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$IRSMM = 1 - \frac{\sqrt{(1-RVDMM)^2 + (1-RNDMM)^2 + (1-RHDMM)^2}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

2.3 Flood Nomograph 및 산정 기준

Bae et al. (2012)와 Jo (2014)에서 제시한 Flood Nomograph 개념을 본 연구에 적용하였다. Flood Nomograph는 강우현상에 의한 대상 유역의 홍수발생(Flood Occurrence)임계 값을

Fig. 1. Concept of Flood Nomograph

의미한다. 즉 Flood Nomograph는 강우지속시간에서 강우량을 변경하여 홍수 발생 시의 강우량을 이은 선을 의미한다. 강우강도(Rainfall Intensity)와 강우지속시간(Duration)과 같은 강우변수정보만으로 침수유발 및 발생시간을 빠르게 예측하여 도시 홍수예보가 가능하다는 장점이 존재한다. Fig. 1은 Flood Nomograph의 예시 그림이다. X축에는 강우지속시간(min), Y축에는 강우강도(mm/hr)로 구성되어있다. 또한, 그래프 상단은 홍수 발생을, 그래프 하단은 홍수 미발생으로 안전함(Safety)을 의미한다.

본 연구에서의 신뢰도 결과 값을 기반으로 한 Flood Nomograph 도출과정은 Fig. 2와 같다. 그림의 순서는 좌측 상단에서 반시계방향으로 진행된다. 설명에 앞서 해당 지역의 관망이 최소 10년의 설계빈도를 갖기 때문에 Scenario 1일 때 10년 빈도에 해당하는 강우에 대한 신뢰도 값을 홍수임계점으로 설정하였다. Fig. 2의 좌측 상단 첫 그림과 같이 Scenario 1에서의 10년 빈도에 해당하는 강우량을 통하여 Flood Nomograph가 산정된다. 이후 두 번째 좌측 하단의 그림과 같이 Scenario 1에서 해당 지역의 10년 빈도 강우량이 자연수가 아닌 정수이므로 신뢰도 값을 보간법을 사용하여 산출하였다. 이후 우측 하단의 그림과 같이 다른 시나리오에서 Scenario 1에서 선정한 강우지속시간 별 신뢰도와 동일한 값일 때의 강우량을 산출하여 타 시나리오에서의 Flood Nomograph를 산정하였다. 마지막으로 우측 상단의 그림과 같이 해수면 상승에 따른 Flood Nomograph의 변화를 보기 위하여 한 개의 그래프에서 비교하였다. 본 연구에서는 시나리오 별 선정된 강우량(mm)-지속시간(min) 그래프를 강우강도(mm/hr)-지속시간(min)데이터로 변환하였으며 강우강도-지속시간 데이터의 추세선을 도출하였다.

Fig. 2. Calculation Process of Flood Nomograph

3. 연구결과

3.1 적용 강우 및 적용 지역

본 연구에서는 지역 별 강우 분포 자료를 huff4 분위를 기준으로 제작 및 적용하였다. 강우지속기간은 10분, 30분, 60분, 120분, 180분, 360분, 720분, 1,440분을 기준으로 총 8개 강우를 설정하였다. 강우량은 초기 강우량 5 mm를 기점

으로 5 mm씩 증분시켜 신뢰도 결과를 산출하였다.

본 연구에서는 전라북도 군산시 내항지구(월명동)와 제주도 산지천지구(삼도2동)를 대상으로 진행하였다. 해당 지역들의 토구는 각각 해안으로 연결되어있다. 해당 지역들의 면적은 Table 2와 같으며, 해당 지역의 모습은 Fig. 3과 같다. 또한 각 지역에 기본수준점(Tidal Bench Mark, T.B.M.)을 표시하였다.

Table 2. Extent of Research Area

unit : [ha]	
Research Area	Extent (ha)
Gunsan Naehang Area	107.388
Jeju Sanjicheon Area	52.978

3.2 지역 별 IRSDMM 결과

본 장에서는 앞서 언급한 지역들의 신뢰도 결과를 도출하였다. Tables 3~6은 Scenario에 따른 군산시 내항지구에 대한 IRSDMM결과값이다. Tables 7~10은 Scenario에 따른 제주도 산지천지구에 대한 IRSDMM결과값이다. 해당 결과들은 동일한 강우일 때 지속시간이 늘어날수록 관망의 성능인

Fig. 3. Image of Research Area

Table 3. IRSDMM Result of Gunsan in Scenario 1

Rainfall (mm)	Rainfall Duration (min.)							
	10	30	60	120	180	360	720	1440
60	0.457	0.677	0.772	0.992	1.000	1.000	1.000	1.000
65	0.457	0.610	0.757	0.976	1.000	1.000	1.000	1.000
70	0.430	0.570	0.751	0.961	1.000	1.000	1.000	1.000
75	0.436	0.578	0.725	0.938	0.992	1.000	1.000	1.000
80	0.408	0.546	0.722	0.898	0.992	1.000	1.000	1.000
85	0.402	0.553	0.709	0.862	0.992	1.000	1.000	1.000
90	0.384	0.573	0.703	0.849	0.992	1.000	1.000	1.000
95	0.362	0.554	0.689	0.817	0.992	1.000	1.000	1.000
100	0.362	0.521	0.664	0.824	0.972	1.000	1.000	1.000

신뢰도는 증가하며, 동일한 지속시간일 때 강우량이 늘어날 수록 관망의 성능인 신뢰도는 감소하는 양상을 수치적으로 확인할 수 있다.

3.3 지역별 Flood Nomograph 산정

위의 지역들의 산출된 신뢰도를 기반으로 시나리오 별 Flood Nomograph를 산정하였다. Tables 11과 12는 군산시 내항지구의 Flood Nomograph 결과값을 강우량 기준, 강우강도 기준으로 산출한 표이다. 산출된 데이터를 기준으로 Flood

Table 4. IRSDDMM Result of Gunsan in Scenario 2

Rainfall (mm)	Rainfall Duration (min.)							
	10	30	60	120	180	360	720	1440
60	0.457	0.683	0.772	0.992	1.000	1.000	1.000	1.000
65	0.450	0.610	0.757	0.976	1.000	1.000	1.000	1.000
70	0.424	0.584	0.738	0.961	1.000	1.000	1.000	1.000
75	0.430	0.565	0.725	0.938	0.992	1.000	1.000	1.000
80	0.408	0.546	0.722	0.898	0.992	1.000	1.000	1.000
85	0.402	0.553	0.709	0.868	0.992	1.000	1.000	1.000
90	0.384	0.573	0.696	0.849	0.992	1.000	1.000	1.000
95	0.362	0.560	0.689	0.824	0.992	1.000	1.000	1.000
100	0.362	0.528	0.670	0.818	0.972	1.000	1.000	1.000

Table 5. IRSDDMM Result of Gunsan in Scenario 3

Rainfall (mm)	Rainfall Duration (min.)							
	10	30	60	120	180	360	720	1440
60	0.418	0.489	0.554	0.756	0.888	1.000	1.000	1.000
65	0.418	0.466	0.548	0.743	0.856	0.984	1.000	1.000
70	0.392	0.469	0.522	0.743	0.831	0.977	1.000	1.000
75	0.398	0.457	0.534	0.718	0.811	0.961	1.000	1.000
80	0.372	0.452	0.521	0.708	0.802	0.969	1.000	1.000
85	0.365	0.466	0.482	0.689	0.784	0.969	1.000	1.000
90	0.359	0.447	0.479	0.691	0.762	0.962	1.000	1.000
95	0.344	0.441	0.492	0.685	0.738	0.929	1.000	1.000
100	0.350	0.429	0.454	0.654	0.733	0.908	1.000	1.000

Table 6. IRSDDMM Result of Gunsan in Scenario 4

Rainfall (mm)	Rainfall Duration (min.)							
	10	30	60	120	180	360	720	1440
60	0.418	0.471	0.541	0.628	0.718	0.727	0.724	0.720
65	0.418	0.466	0.529	0.625	0.697	0.711	0.707	0.704
70	0.392	0.462	0.520	0.613	0.680	0.699	0.693	0.690
75	0.398	0.457	0.521	0.600	0.662	0.687	0.680	0.677
80	0.372	0.452	0.489	0.592	0.627	0.675	0.668	0.666
85	0.365	0.453	0.456	0.578	0.610	0.665	0.659	0.656
90	0.365	0.441	0.447	0.572	0.602	0.655	0.649	0.645
95	0.338	0.436	0.441	0.553	0.592	0.647	0.643	0.638
100	0.344	0.423	0.428	0.521	0.581	0.635	0.635	0.631

Table 7. IRSDMM Result of Jeju in Scenario 1

Rainfall (mm)	Rainfall Duration (min.)							
	10	30	60	120	180	360	720	1440
60	0.494	0.721	0.834	0.952	1.000	1.000	1.000	1.000
65	0.494	0.712	0.824	0.929	1.000	1.000	1.000	1.000
70	0.487	0.682	0.808	0.910	1.000	1.000	1.000	1.000
75	0.489	0.649	0.769	0.895	1.000	1.000	1.000	1.000
80	0.448	0.605	0.767	0.884	0.985	1.000	1.000	1.000
85	0.433	0.562	0.749	0.871	0.952	1.000	1.000	1.000
90	0.427	0.535	0.735	0.857	0.934	1.000	1.000	1.000
95	0.430	0.534	0.712	0.843	0.918	1.000	1.000	1.000
100	0.419	0.518	0.703	0.832	0.907	1.000	1.000	1.000

Table 8. IRSDMM Result of Jeju in Scenario 2

Rainfall (mm)	Rainfall Duration (min.)							
	10	30	60	120	180	360	720	1440
60	0.504	0.724	0.844	0.952	1.000	1.000	1.000	1.000
65	0.494	0.712	0.818	0.929	1.000	1.000	1.000	1.000
70	0.489	0.689	0.810	0.910	1.000	1.000	1.000	1.000
75	0.489	0.647	0.769	0.895	1.000	1.000	1.000	1.000
80	0.448	0.600	0.758	0.883	0.984	1.000	1.000	1.000
85	0.435	0.558	0.751	0.870	0.952	1.000	1.000	1.000
90	0.433	0.537	0.740	0.856	0.934	1.000	1.000	1.000
95	0.430	0.516	0.721	0.845	0.918	1.000	1.000	1.000
100	0.422	0.514	0.707	0.835	0.907	1.000	1.000	1.000

Table 9. IRSDMM Result of Jeju in Scenario 3

Rainfall (mm)	Rainfall Duration (min.)							
	10	30	60	120	180	360	720	1440
60	0.471	0.704	0.784	0.861	0.930	1.000	1.000	1.000
65	0.466	0.664	0.757	0.845	0.907	1.000	1.000	1.000
70	0.457	0.655	0.733	0.833	0.892	1.000	1.000	1.000
75	0.457	0.644	0.718	0.821	0.876	1.000	1.000	1.000
80	0.403	0.598	0.698	0.806	0.864	1.000	1.000	1.000
85	0.395	0.567	0.678	0.795	0.853	1.000	1.000	1.000
90	0.392	0.546	0.668	0.781	0.844	1.000	1.000	1.000
95	0.375	0.523	0.657	0.767	0.835	1.000	1.000	1.000
100	0.372	0.520	0.643	0.756	0.828	1.000	1.000	1.000

Nomograph를 Figs. 4와 5에 그래프로 표현하였다. 또한 산출된 강우강도 기준 Flood Nomograph 결과를 통하여 회귀곡선을 Table 13에 산출하였으며 해당 회귀곡선 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 해당 그래프는 X, Y축에 각각 log를

취하였다. Tables 14와 15는 제주시 산지천지구의 Flood Nomograph 결과값을 강우량 기준, 강우강도 기준으로 산출한 표이다. 산출된 데이터를 기준으로 Flood Nomograph를 Figs. 7과 8에 그래프로 표현하였다. 또한 산출된 강우강도

Table 10. IRSDMM Result of Jeju in Scenario 4

Rainfall (mm)	Rainfall Duration (min.)							
	10	30	60	120	180	360	720	1440
60	0.446	0.616	0.702	0.793	0.861	0.988	1.000	1.000
65	0.435	0.596	0.683	0.779	0.846	0.981	1.000	1.000
70	0.438	0.558	0.668	0.762	0.834	0.973	1.000	1.000
75	0.424	0.554	0.661	0.750	0.821	0.985	1.000	1.000
80	0.381	0.540	0.649	0.736	0.809	0.984	1.000	1.000
85	0.372	0.517	0.635	0.725	0.800	0.942	1.000	1.000
90	0.364	0.495	0.625	0.714	0.793	0.923	1.000	1.000
95	0.355	0.476	0.613	0.689	0.785	0.906	1.000	1.000
100	0.355	0.465	0.608	0.656	0.777	0.894	1.000	1.000

Table 11. Flood-Nomograph of Gunsan Area Expressed by Rainfall
unit : [mm]

Duration (min.)	Scenario			
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
10	20.6	20.6	20.6	20.6
30	38.6	38.6	21.7	20.6
60	58.3	58.3	25.2	21.4
120	85.6	85.6	25.4	25.1
180	89.2	70.0	35.0	30.0
360	117.2	117.2	60.0	35.0
720	169.4	169.4	120.0	40.0
1,440	201.6	201.6	201.6	50.0

Table 12. Flood-Nomograph of Gunsan Area Expressed by Rainfall
Intensity
unit : [mm/hr]

Duration (min.)	Scenario			
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
10	123.6	123.6	123.6	123.6
30	77.2	77.2	43.5	41.1
60	58.3	58.3	25.2	21.4
120	42.8	42.8	12.7	12.5
180	29.7	23.3	11.7	10.0
360	19.5	19.5	10.0	5.8
720	14.1	14.1	10.0	3.3
1,440	8.4	8.4	8.4	2.1

Fig. 4. Flood Nomograph of Gunsan Area Expressed by Rainfall

Fig. 5. Flood Nomograph of Gunsan Area Expressed by Rainfall Intensity

Table 13. Trend Line of Gunsan According to Scenarios

Scenario	Trend Line	R^2
Scenario 1	$y = 494.44x^{-0.544}$	0.9884
Scenario 2	$y = 487.33x^{-0.547}$	0.9810
Scenario 3	$y = 255.51x^{-0.526}$	0.8608
Scenario 4	$y = 666.37x^{-0.807}$	0.9941

Fig. 6. Trend Line Graph of Gunsan Area According to Scenarios

기준 Flood Nomograph 결과를 통하여 회귀곡선을 Table 16에 산출하였으며 해당 회귀곡선 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. 본 연구는 우수관거의 설계빈도인 10년 빈도 강우량을 홍수 발생 시작지점으로 선정하였다. 이를 기준으로 Flood Nomograph를 도출하였다.

Table 11은 군산 지역의 Flood Nomograph 결과를 강우량으로 표현한 표이다. 해수면이 상승하여 Scenario 1에서 Scenario 2로의 변화일때는 차이가 거의 없다. 이는 평균해면에서 0.4 m의 조위가 증가하였다고 하더라도 영향이 거의 없음을 의미한다. 하지만 Scenario 2에서 Scenario 3으로 해수면이 상승할 때 강우지속시간별 강우량이 감소하였기 때문에 Flood Nomograph에서 급격한 변화가 나타난다. Scenario 3에서 Scenario 4로 해수면이 상승하면 군산시 내항지구의 관망의 우수관망으로써의 역할을 거의 하지 못하는 모습을 보인다. 이는 해수면이 상승함으로 인해 방류토구가 이미 잠겼음을 나타내기도 한다. 방류토구의 잠식으로 인해 우수관망은 저류의 역할의 비중이 더 큰 상황에 놓인 것으로 보인다.

Table 12는 군산 지역의 Flood Nomograph 결과를 1시간

Table 14. Flood-Nomograph of Jeju Area Expressed by Rainfall unit : [mm]

Duration (min.)	Scenario			
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
10	22.6	22.6	22.3	18.5
30	41.4	41.7	40.0	22.5
60	61.7	60.9	47.1	35.4
120	91.3	91.5	61.5	35.3
180	113.7	113.7	74.5	41.0
360	160.5	160.5	110.4	55.0
720	214.1	214.1	214.1	80.4
1,440	264.9	264.9	264.9	214.1

Fig. 7. Flood Nomograph of Jeju Area Expressed by Rainfall

단위 강우강도로 표현한 표이다. 강우강도를 통한 표현으로 인하여 그래프 상에서 차이가 덜 하지만, 해수면 상승에 따른 변화는 확연한 차이를 보인다. Fig. 5는 Scenario 1에서 보다 Scenario 4에서 홍수에 ·경보 조기 가동의 필요성을 확인할 수 있다.

Table 13은 군산시 내항지구 Flood Nomograph의 결과의 회귀곡선과 해당 식의 결정계수(R^2)이다. 해당 회귀곡선에서 x 는 강우지속시간이며, y 는 강우강도이다. Scenario 3의 회귀곡선과 Scenario 4의 회귀곡선을 비교하였을 때 강우지속시간이 짧을 때 역전현상이 일어나는 이유는 짧은 강우지속시간에서 강우강도는 비슷하지만 Scenario 4에서는 강우지속시간이 길어질수록 Scenario 3보다 상대적으로 강우강도가 감소하기 때문에 회귀곡선을 그렸을 경우 역전되는 모습을 보인다.

Table 15. Flood-Nomograph of Jeju Area Expressed by Rainfall Intensity

Duration (min.)	Scenario			
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
10	135.6	135.6	134.0	111.0
30	82.8	83.5	80.0	44.9
60	61.7	60.9	47.1	35.4
120	45.7	45.8	30.8	17.6
180	37.9	37.9	24.8	13.7
360	26.8	26.8	18.4	9.2
720	17.8	17.8	17.8	6.7
1,440	11.0	11.0	11.0	8.9

unit : [mm/hr]

Fig. 8. Flood Nomograph of Jeju Area Expressed by Rainfall Intensity

Table 14는 제주 지역의 Flood Nomograph 결과를 강우량으로 표현한 표이다. 해수면이 상승하여 Scenario 1에서 Scenario 2로의 변화일때는 차이가 거의 없다. 하지만 Scenario 2에서 Scenario 3으로 해수면이 상승할 때 강우지속시간 별 강우량이 감소하였기 때문에 Flood Nomograph에서 약간의 감소가 나타난다. Scenario 3에서 Scenario 4로 해수면이 상승시 제주시 산지천지구의 관망의 성능이 기존 평균해면에 비하여 수치적으로 감소하였음을 확인 할 수 있다.

Table 15는 제주 지역의 Flood Nomograph 결과를 1시간 단위의 강우강도로 표현한 표이다. 해수면 상승에 따른 변화는 군산시 내항지구의 결과만큼은 아니지만 눈에 띄는 차이를 보인다. Fig. 8 또한 Scenario 1에서보다 Scenario 4에서 홍수에 · 경보를 조기에 가동의 필요성을 나타낸다.

Table 16. Trend Line of Jeju According to Scenarios

Scenario	Trend Line	R^2
Scenario 1	$y = 456.42x^{-0.494}$	0.9915
Scenario 2	$y = 456.55x^{-0.494}$	0.9915
Scenario 3	$y = 386.84x^{-0.499}$	0.9736
Scenario 4	$y = 315.61x^{-0.561}$	0.9224

Fig. 9. Trend Line Graph of Jeju Area According to Scenarios

Table 16은 제주시 산지천 지구 Flood Nomograph의 결과의 회귀곡선과 해당 식의 결정계수(R^2)이다. 해당 회귀곡선에서 x 는 강우지속시간이며, y 는 강우강도이다. 해수면의 상승에 따라 회귀곡선이 시나리오 별 평행하게 감소하는 양상을 띄었다.

4. 결 론

연안 지역 중 · 소도시는 기후변화로 인한 해수면 상승에 직접적인 영향을 받는 지역으로써 해수면 상승에 의한 취약성 문제가 대두되고 있다. 해수면의 상승은 영향 범위 내에 하천 수위 상승으로 이어지며, 해안으로 연결된 방류투구에 직접적인 배수위 영향을 미친다. 이러한 영향은 해수면 상승으로 인한 배수위 작용으로 우수관망 내 통수능을 감소시켜 예측 시기 이전에 침수가 발생할 수 있으며 그 규모 또한 배가될 수 있다. 또한 국가 홍수에 · 경보 시스템은 주로 하천 중심으로 진행되어왔으며 중 · 소 하천에서의 예경보 시스템이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 연안 지역 중 · 소도시에 해수면 상승 시나리오를 적용하였으

며 Lee (2012)의 우수관망 신뢰도 방식을 개선하여 사용하였다. 홍수에·경보를 위하여 신뢰도 결과를 산출 후 시나리오별 Flood Nomograph를 산정하였다. 산정 결과 해수면 상승에 따라 Flood Nomograph의 급격한 저하가 확인되었다. 방류토구가 해수면 상승과 함께 잠식됨으로써 해당 우수관망의 통수능을 감소시키며, 이는 홍수에·경보의 조기 가동으로 연결될 필요성이 존재함을 수치적으로 확인하였다. 또한 방류토구의 잠식으로 인해 우수관망 기능이 우수의 배출이 아닌 저류의 역할 비중이 상승함을 확인하였다. 이에 따른 방안으로 해당 지역들의 취약성을 개선하기 위하여 별도의 저류지 및 펌프장 설치와 같은 추가적인 저류 및 배수시설이 필요하다. 본 연구는 향후 연안 도시들의 해수면 상승을 고려한 홍수에·경보 자료 개선을 위한 필요 근거로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시 수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002950004).

References

- Bae, D.H., Shim, J.B., and Yoon, S.S. (2012). Development and assesment of flow nomograph for the real-time flood forecasting in cheonggye stream. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 11, pp. 1107-1119.
- Cheong, T.S., Choi, H.S., and Joo, J.S. (2018). Establishment of a measured data-based nomograph for enhancing the small stream flood warning system. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 6, pp. 369-376.
- Hwang, S.M., Oh, H.M., Nam, S.Y., and Kang, T.S. (2020). Coastal complex disaster risk assessment in busan marine city. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 26, No. 5, pp. 506-513.
- 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.
- Jo, D.J. (2014). Application of the urban flooding forecasting by the flood nomograph. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 6, pp. 421-425.
- Jo, D.J., and Jeon, B.J. (2013). Development of flood nomograph for inundation forecasting in urban districts. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 3, pp. 37-42.
- Jo, K.W. (2015). *Studies on the coastal impact assessment and adaptation strategy based on RCP climate scenario*. Korea Environment Institute. <http://repository.kei.re.kr/handle/2017.oak/2029>
- Kim, H.J., and Suh, S.W. (2019). Vulnerability analyses of wave overtopping inundation by synthesized typhoons with sea-level rise. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 5, pp. 253-264.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA). (2015). *Ocean data in grid framework*. Retrieved October 1, 2021, from <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/gis/category/observe/observeSearch.do?type=EYS>
- Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM). (2012). *Simulator for sea level rise*. Retrieved October 1, 2021, from <https://www.koem.or.kr/simulation/gmsl/rcp45.do>
- Lee, H.M., Kang, T.S., and Cho, K.W. (2015). Impact assessment of sea_level rise based on coastal vulnerability index. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 27, No. 5, pp. 304-314.
- Lee, J.H. (2012). Development of a reliability estimation method for the storm sewer network. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 225-230.
- Lee., S.S. (2020). *A study of the integrated management of flooding and inundation according to the unification of water management* (2020-1). Korea Environment Institute.
- Park, J.H., Kim, S.Y., and Park, C. (2018). *Estimation of the damage cost of ecosystem services due to sea level rise* (2018.14). Incheon Institute. <http://dx.doi.org/10.34165/urbanr.2018..14.49>
- Park, W.K., Kim, H.J., Choi, H., and Lee, H.M. (2015). Stability assessment of dike height at west coast area of Korea for future sea level rise. *Journal of Korean Society of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 2, No. 4, pp. 186-196.

Received	November 18, 2021
Revised	November 22, 2021
Accepted	November 26, 2021