

# 기후위기 적응정보 생산을 위한 연안재해 위험평가 지표 개선 방안 연구

이화영\* · 김수민\*\* · 서광호\*\*\* · 정광영\* · 강태순\*\*\*\* · 김명원\*\*\*\*\*†

\*국립해양조사원 해양과학조사연구실 연구사, \*\*㈜지오시스템리서치 공간융합부 선임, \*\*\*국립해양조사원 해양과학조사연구실장, \*\*\*\*㈜지오시스템리서치 전무이사, \*\*\*\*\*㈜지오시스템리서치 공간융합부 상무이사

## Improving indicators for coastal disaster risk assessment to produce climate change adaptation information

Lee, Hwa Young\* · Kim, Soo Min\*\* · Seo, Gwang Ho\*\*\* · Jeong, Kwang Young\* · Kang, Tae Soon\*\*\*\* and Kim, Myung Won\*\*\*\*\*†

\*Researcher, Ocean Research Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, KHOA, Busan, Korea

\*\*Senior Engineer, Department of Spatial Convergence, GeoSystem Research Corporation, Gyeonggi, Korea

\*\*\*Director, Ocean Research Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, KHOA, Busan, Korea

\*\*\*\*Executive Director, GeoSystem Research Corporation, Gyeonggi, Korea

\*\*\*\*\*Managing Director, Department of Spatial Convergence, GeoSystem Research Corporation, Gyeonggi, Korea

### ABSTRACT

This study sought to improve the indicators used in coastal disaster risk assessment and evaluate their applicability in order to minimize uncertainty amid the increasing climate crisis. Busan was selected as the testbed. Among the 25 assessment indicators for coastal disaster risk assessment, inundation was assessed using the probability of inundation instead of the inundation area, and changes in coastal disaster risk assessment grades were analyzed. The storm surge coastal inundation prediction maps currently used in coastal disaster risk assessments do not consider various complex inundation factors, such as wave overtopping. To reduce uncertainty, the probability of inundation, which considers all scenarios used in the creation of coastal inundation prediction maps, was applied. The coastal disaster risk assessment grade changed by up to  $\pm 1$  grade according to which inundation indicator was used. In the coastal areas of Busan, 6.2% showed a decrease of one grade, making the area relatively safer, while 5.8% showed an increase of one grade, making the area relatively riskier, and 88% showed no change in grade. Assessment using the probability of inundation provides a probabilistic assessment of potential inundation, allowing for the assessment of inundation that cannot be assessed using the specific return-period inundation areas. Coastal disaster risk assessment using the probability of inundation shows the potential to minimize uncertainty related to the changes in the coastal disaster environment and the results of climate change-induced inundation, and provides relevant adaptation information for the climate crisis.

*Key words: Coastal Disaster Risk Assessment, Climate Change, Inundation Probability, Adaptation Information, Busan*

## 1. 서론

연안은 기후변화 영향으로 해수면 상승, 태풍 강화에 따른 폭풍해일 크기 증가 등으로 침수범람 위험을 직면하

고 있다. 기후변화로 인한 태풍 강화에 대한 연구들 (Emanuel, 2013; Knutson et al., 2008, 2010, 2019, 2020; Kossin et al., 2014; Mei and Xie, 2016; Mei et al., 2015; Shimura et al., 2022)에서 열대성 저기압 발생빈도는 감소

†Corresponding author : mwkim@geosr.com (15807, GeoSystem Research Corporation, Hanlim Human Tower 172 LS-ro, Gunpo-si, Gyeonggi-do, Korea. Tel. +82-31-5180-5703)

ORCID 이화영 0000-0002-3624-9719  
김수민 0000-0002-5676-3504  
서광호 0000-0001-9417-9942

정광영 0000-0001-8566-5287  
강태순 0000-0002-5795-1152  
김명원 0000-0001-5274-1685

하지만 강도는 강해질 것으로 예측하고 있으며(Knutson et al., 2008, 2010) 폭풍해일과 파고는 증가할 것으로 제시하였다(Shimura et al., 2022). 특히 Mei and Xie (2016)는 상륙 태풍의 강도가 1970년 이후 37년간 12~15% 강해졌음을 제시하였다. 이처럼 다수의 연구결과들에서 제시된 바와 같이 태풍 강화는 강풍, 집중호우, 해일 등의 규모를 증가시켜 연안에 위치한 저지대에서 폭풍해일 및 월파로 인한 해수범람과 집중호우로 인한 내수 침수로 대규모 복합 침수와 재산·인명피해 발생 가능성을 높인다.

계속될 것으로 전망되는 기후변화 영향으로 연안에서 재해 발생환경이 변화될 것으로 예측됨에 따라 이를 정량적으로 평가하고 대응할 수 있는 상세한 정보와 과학적 평가 방안이 필요하다. 연안재해 위험평가(KHOA, 2023)는 연안에서 발생 가능한 해수면 상승, 해일, 파랑 등 재해 영향에 대한 연안 인구, 인프라 등과 연안 위험시설 및 대피소 등을 고려하여 평가한다. 이들 지표 중 해수면 상승과 해일 위험 증가에 따라 피해 발생 가능성이 높은 침수지표는 폭풍해일(KHOA, 2021)과 지진해일(NDMI, 2023)

Table 1. Indicators and weighting values of Coastal disaster risk assessment

| Index               | Weighting value  | Indicator  | Reference  | Weighting value                             |
|---------------------|--|--|--|---|
| Hazard              | 0.43   | Wind   | Korea Meteorological Administration  | 0.16  |
|                     |  | Precipitation                                      |  | 0.11  |
|                     |  | Storm Surge  |  | 0.26  |
|                     |  | Wave   | Numerical Modeling   | 0.32  |
|                     |  | Sea Level Rise                                     |  | Korea Hydrographic and Oceanographic Agency |
| Exposure            | 0.24   | Population   | National Geographic Information Institute                                    | 0.24  |
|                     |  | Building   |  | 0.17  |
|                     |  | Roads  |  | 0.10  |
|                     |  | Farmland   | Ministry of Environment  | 0.09  |
|                     |  | Vinyl Greenhouse                                   |  | 0.08  |
|                     |  | Industrial Complex·Power Plant·Airport             | Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Ministry of Environment, etc | 0.12  |
|                     |  | Fish Farm  |  | Korea Hydrographic and Oceanographic Agency |
|                     |  | Fishing Harbor and Harbor                          | Agency   | 0.11  |
|                     |  | Risk   |  | Vulnerable People                           |
| Vulnerable Facility | Authority of Land & Infrastructure Safety  |  |  | 0.18  |
| Inundation Area     | Korea Hydrographic and Oceanographic Agency<br>National Disaster Management Research Institute |  |  | 0.16  |
| Vulnerability       | 0.33   | Basement·Semi-Basement                             | Ministry of Land, Infrastructure and Transport                               | 0.14  |
|                     |  | Erosion Area                                       | Ministry of Oceans and Fisheries   | 0.10  |
|                     |  | Steep Slope Area                                   | Korea Forest Service   | 0.11  |
|                     |  | Cultural Assets                                    | Cultural Heritage Administration   | 0.09  |
|                     |  | Disaster management fund                           |  | 0.29  |
|                     |  | Local Disaster prevention and control organization | Ministry of the Interior and Safety  | 0.14  |
|                     |  | Shelter  |  | 0.24  |
| Mitigation factors  | 0.28   | Safety insurance                                   |  | 0.16  |
|                     |  | Number of public officials                         |  | 0.17  |

에 의한 침수면적으로 위험성을 평가하고 있어 기후변화 영향과 재해 발생 가능성에 대한 불확실성을 고려한 검토가 필요한 실정이다. 본 연구는 현재 연안재해 위험평가에 사용되는 침수면적에 의한 침수지표 평가를 침수발생 가능성을 고려한 침수발생확률 평가로 개선하고 적용성을 검토하여 제시하였다.

## 2. 연안재해 위험평가

### 2.1. 평가개념

연안재해 위험평가 체계는 IPCC AR6 (IPCC, 2023)의 기후변화 리스크를 준용한 평가 개념들을 사용한다. 연안재해 위험평가 상위 개념인 연안재해 위험(Risk) 지수는 국가의 재산과 인명피해에 부정적 영향을 초래할 수 있는 자연재해를 위해성(Hazard), 재해로부터 영향을 받는 지표들을 노출성(Exposure), 재해로 영향을 받을 수 있는 민감 정도를 취약성(Vulnerability)으로 구분한다(Fig. 1).

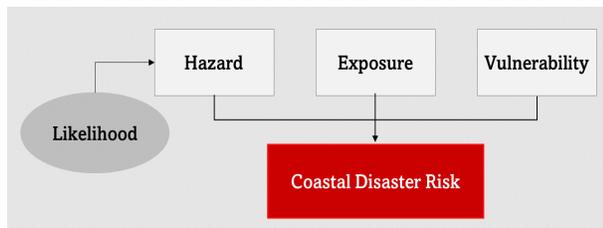


Fig. 1. Coastal disaster risk assessment framework (Seo et al., 2023)

위해성, 노출성, 취약성 지수로 평가되는 연안재해 위험 지수는 다음과 같은 함수식으로 계산한다.

$$R = (H \times W_H) + (E \times W_E) + (V \times W_V) \quad (1)$$

여기서 R은 리스크(Risk), H는 위해성(Hazard), E는 노출성(Exposure), V는 취약성(Vulnerability), 그리고 W는 각 지수의 가중치(Weight value)이다.

### 2.2. 평가지표

연안재해 위험평가는 위해성, 노출성, 취약성으로 구분되는 3가지 지수와 25개 지표로 평가된다(Table 1). 위해성은 연안에 부정적 영향을 초래할 수 있는 강풍, 강우, 해일, 파랑, 해수면 상승 등이며 노출성은 인구, 건물, 도

로, 양식장 등으로 구성된다. 취약성은 가중요소와 저감요소로 구분되는데 가중요소는 고령인구, 위험시설물, 침수면적, 침식지역 등이며 저감요소는 재난재해관리기금, 지역자율방재단, 대피소 등으로 구성된다. 평가지표는 평가 신뢰성을 확보하기 위해 정부 및 국가기관의 통계 및 분석자료를 최대한 활용하였으며(Table 1) 각 지수·지표는 전문가 가중치 설문을 통한 AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석을 통해 설정된 가중치를 갖는다(KHOA, 2023).

연안재해 위험평가는 다수의 지표들간 상호 평가를 위해 공간통계분석을 이용한 표준화 과정이 필요하다. 공간통계분석은 벡터중첩분석(Vector overlay analysis), 밀도분석(Density analysis), 버퍼링분석(Buffering analysis) 등을 사용한다. 표준화는 무차원화 과정으로 서로 다른 단위, 크기를 갖는 인자간 평가를 위해 0~1 사이의 값으로 변환한다. 연안재해 위험평가는 식 (2)와 같이 자료 평균(mean,  $\mu$ )과 표준편차(standard deviation,  $\sigma$ ) 값을 이용하여 정규분포의 확률밀도함수(PDF, Probability Density Function)를  $-\infty$ 에서  $x$ 까지 적분한 누적분포함수식을 이용한 표준화 방법을 사용한다(KHOA, 2023). 각 지수 및 지표별 위험등급을 부여하기 위해 0~1사이로 표준화된 값을 0.2로 나누고 천장함수를 취한 1~5단계로 등급화한다. 등급별 정의는 1등급(안전), 2등급(다소 안전), 3등급(재해발생 가능), 4등급(재해 다소 위험), 5등급(재해위험)으로 정의된다. 연안재해 저감대책 수립 측면에서 피해 가능성과 대책 시급성을 1~5등급으로 구분하면 낮음, 다소 낮음, 보통, 다소 높음, 높음으로 정의되며 관련 우선순위 평가에 활용될 수 있다.

$$F(x|\mu, \sigma) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

## 3. 평가지표 개선 방법

### 3.1. 시범지역 및 개선 지표 선정

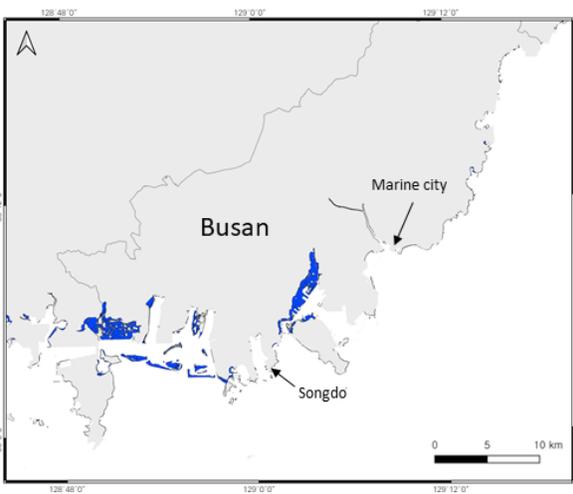
연안재해 위험평가 지표 개선을 위해 시범 적용할 대상 지역으로 부산광역시(이하 부산)를 선정하였다. 부산은 태풍의 주요 상륙지점으로 1987년부터 2022년까지 26개 태풍이 영향을 준 것으로 분석되었다. 이는 우리나라를 통과하는 태풍 80% 이상이 부산에 영향을 준 것으로 전국에 발령된 기상특보 중 해일 주의보 47%, 태풍 주의보 47%, 경보 38%가 부산으로 전국 대비 높은 비율로 나타

난다(Seo et al., 2023).

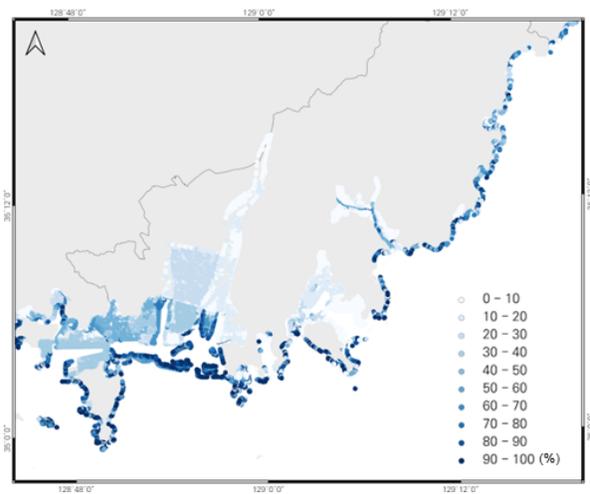
부산지역 연구 대상지에 해당하는 행정구역은 사하구, 서구, 중구, 영도구, 동구, 남구, 수영구, 해운대구, 기장군 등 총 8개 구와 1개 군으로 9개 행정구역의 총 인구는 163만명이며 경상남도 전체 인구 약 49%가 거주한다(MOIS, 2021). 이처럼 부산은 자연재해(태풍)에 대한 위해성이 높으며 연안지역 노출성, 취약성 지표들에 대한 평가 가능한 시범지역으로 분석된다.

본 연구에서는 연안재해 위험평가를 위한 25개 평가지

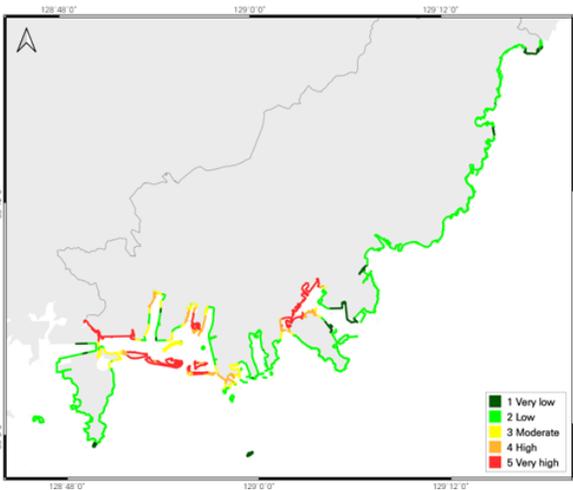
표 가운데 취약성을 의미하는 지표로 우리나라 자연재해로 인한 피해 중 큰 피해를 발생시키는 침수를 개선지표로 선정하였다. 침수지표는 연안재해 취약성 지수에 대한 가중요소로 서·남해안은 폭풍해일 해안침수예상도(KHOA, 2021), 동해안은 지진해일 침수예상도(NDMI, 2023) 침수범람 면적을 사용한다. 부산지역 침수지표 평가에 사용되는 폭풍해일 해안침수예상도는 태풍 가상시나리오를 이용하여 발생 가능한 50~200년 빈도별 폭풍해일에 따른 침수범람 지역을 산출하여 제작된 재해지도이다. 현재 서·남해안 63개



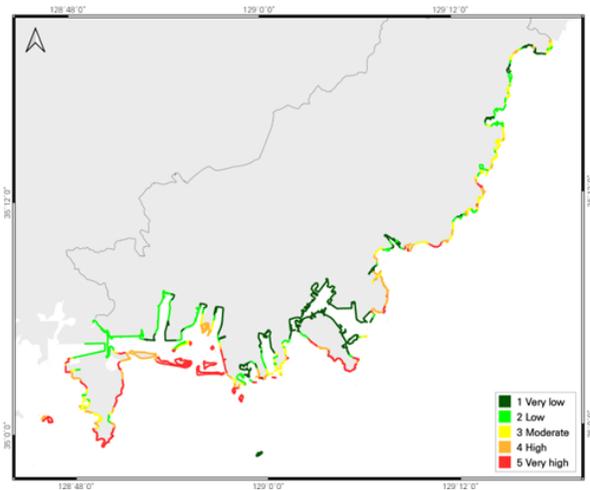
(a) Coastal inundation prediction map-based inundation area using the 100-year return period storm surge



(b) Probability of inundation by considering all scenarios used in the production of the storm surge-driven coastal inundation prediction map



(c) Assessment of inundation indicator using inundation area



(d) Assessment of inundation indicator using probability of inundation

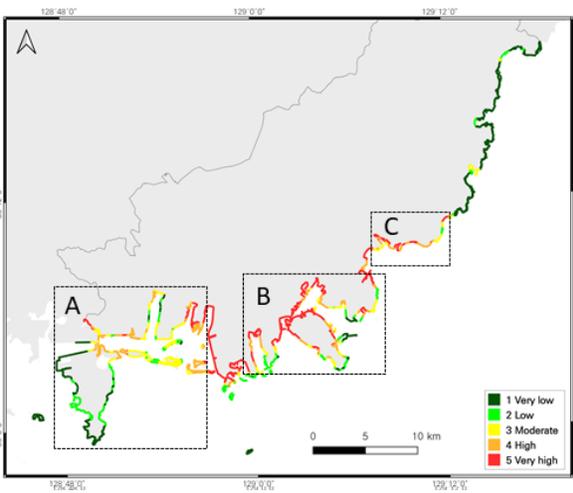
Fig. 2. The results of inundation indicators according to methods of inundation assessment

지자체에 대해 제작되어 있으며 2028년까지 동해안 지역을 포함한 전국 연안 73개 지자체로 확대하여 제작될 계획이다.

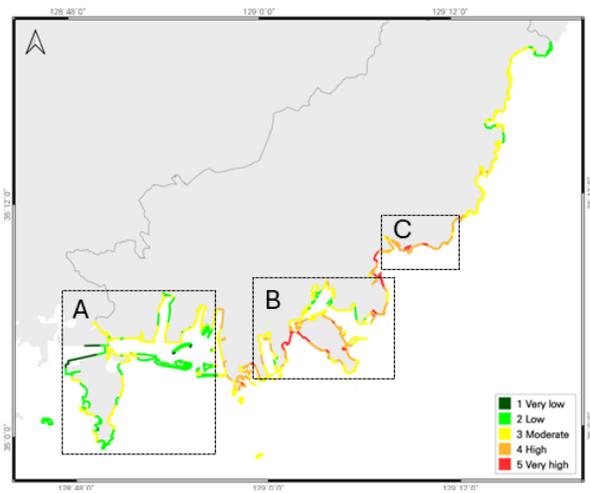
### 3.2. 침수 발생확률 적용

폭풍해일에 의한 침수범람 면적을 사용하는 연안재해 위험평가는 빈도별 해안침수예상도 중 100년 빈도 해안침수예상도를 활용하고 있으나 태풍 가상 시나리오(남해안 735개, 서해안 660개)를 이용한 침수범람 결과 중 100년 빈도에 해당하는 침수범람 면적을 제한적으로 사용하고

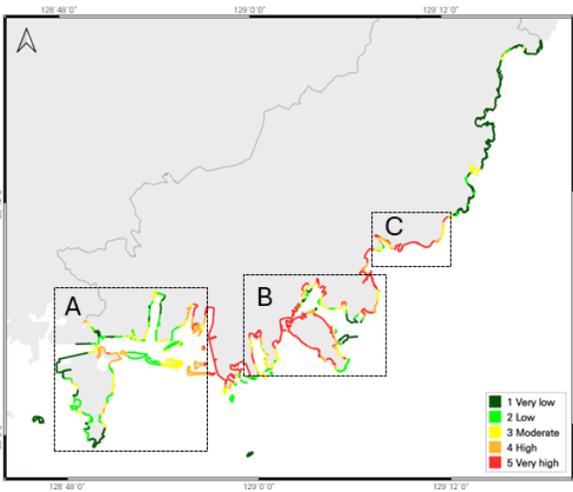
있다. 침수면적에 의한 평가는 침수깊이가 1 cm 이상 발생한 침수면적을 평가하는 방법으로 침수면적이 넓을수록 위험을 높게 평가한다. 이러한 침수면적 평가는 재현빈도에 해당되는 침수영역만을 평가하는 것으로 재현빈도 이상의 침수가 발생할 가능성을 고려하지 못하고 침수심이 얕지만 침수면적이 넓을수록 위험을 높게 평가하는 단점이 있다. 뿐만 아니라 폭풍해일에 의한 침수만을 고려한 해안침수예상도는 파랑에 의한 월파 침수, 강우 및 내수배제에 의한 침수 영향을 고려하지 못하기 때문에 침



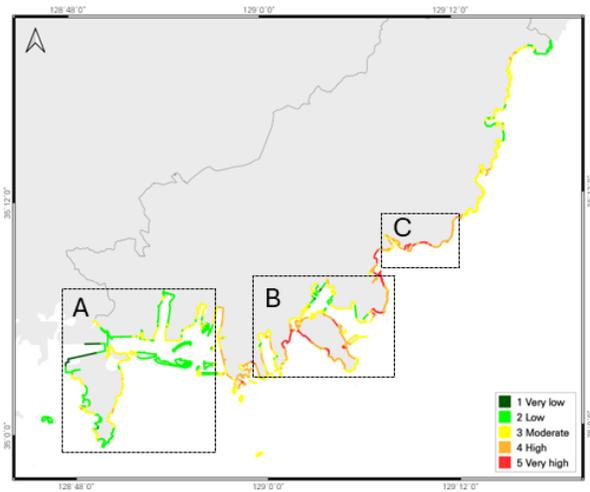
(a) Assessment results of vulnerability index using inundation area



(b) Coastal disaster risk assessment results of using inundation area



(c) Assessment results of vulnerability index using probability of inundation



(d) Coastal disaster risk assessment results of using probability of inundation

Fig. 3. Vulnerability index and coastal disaster risk assessment results according to methods of inundation indicator assessment

수면적에 대한 불확실성은 더욱 증가할 가능성이 높다. 더욱이 기후변화로 인한 폭풍해일 침수범람 발생 가능성에 대한 불확실성을 고려한다면 모든 침수범람 발생 가능성에 대한 평가가 필요하다. 본 연구에서는 폭풍해일 해안침수예상도 제작시 활용된 모든 시나리오별 침수범람 결과를 활용하여 산정된 침수지역에 대한 발생확률로 침수지표를 평가하고 적용성을 검토하였다. 부산지역의 침수발생확률은 735개 태풍 가상시나리오별로 침수 유무를 확인하여 계산되며 시나리오별 침수발생 횟수에 따른 침수발생확률은 다음과 같이 계산된다.

$$P_i = \frac{n_i}{n_s} \tag{3}$$

$P_i$ 는 침수발생확률,  $n_i$ 는 침수가 발생한 시나리오 개수,  $n_s$ 은 총 시나리오 개수를 의미한다.

### 4. 평가 결과

#### 4.1. 결과 분석

연안재해 위험평가에 사용되는 취약성 가중 요소인 침수지표를 발생 가능한 침수확률로 평가하였다. 폭풍해일에 의한 부산지역 100년 빈도 해안침수예상 범위는 Fig. 2(a)와 같으며 100년 빈도 폭풍해일에 대한 발생 가능한 침수

면적과 침수심 정보를 포함한다. 735개 태풍 가상 시나리오에 따른 침수발생 확률은 Fig. 2(b)에 제시하였다. 침수면적과 침수발생확률에 대한 침수지표 평가결과는 Fig. 2(c~d)에 각각 제시하였는데 침수지표별 평가 방법에 따라 서로 상이한 결과가 국부적으로 나타났다. 특히 침수면적에 의한 평가는 Fig. 2(a)와 같이 연안 배후지까지 침수면적이 넓게 분포한 지역에서 침수위험등급이 높게 나타났으나 침수발생확률에 의한 평가는 연안을 따라 침수 발생이 빈번한 지역에서 높게 나타난다. 침수지표 평가방법별 취약성 지수 평가 결과는 Fig. 3(a, c)와 같이 일부 국부적인 지역을 제외하고 전체적인 양상은 유사하게 나타났다. 이는 Table 1에 제시된 바와 같이 취약성 지수를 구성하는 가중요소 지표의 가중치는 0.72이며 이중 침수지표는 0.16으로 취약성 지수 평가에 기여하는 비율이 크지 않기 때문으로 분석된다.

취약성 지수에 대한 평가 결과를 도시한 Fig. 3(a, c) A, B, C 지역에서 침수면적과 침수발생확률 평가 방법에 따른 결과를 비교해 보면 국부적으로 상이한 결과를 보인다. Fig. 3(b, d)에 제시된 위험지수 평가 결과도 A~C 3개 구역에서 국부적으로 서로 다른 결과를 보이며 A와 B 지역 일부 평가등급은 다소 감소, C지역 일부는 다소 높아지는 것으로 나타났다. 이는 침수지표 가중치가 상대적으로 작고 평가 결과를 5개 등급으로 분류하였기 때문에 연안재해 취약성과 위험지수에서는 큰 차이가 발생하지 않은 것으로 분석된다. Table 2에 제시한 침수지표평가 방

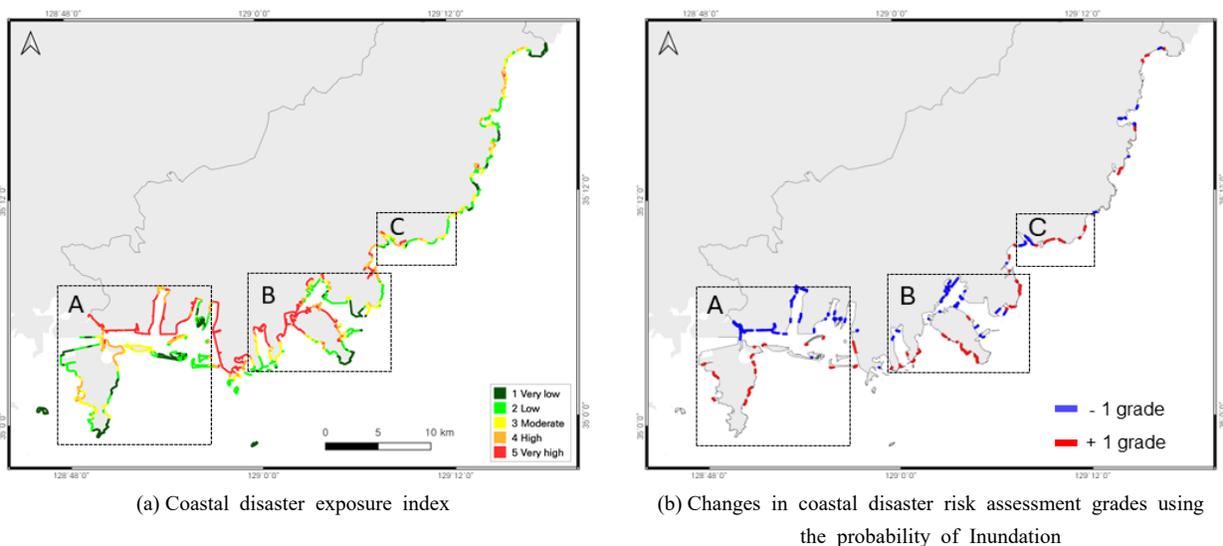


Fig. 4. (a) Coastal disaster exposure index and (b) changes in coastal disaster risk assessment grades using the method of inundation indicators assessment

Table 2. Rate of change in assessment grades according to methods of inundation assessment

| Grade | Inundation area (%)  |                     |            | Probability of inundation (%) |                     |            |
|-------|----------------------|---------------------|------------|-------------------------------|---------------------|------------|
|       | Inundation indicator | Vulnerability index | Risk index | Inundation indicator          | Vulnerability index | Risk index |
| 1     | 6.1                  | 24.9                | 1.5        | 26.3                          | 23.9                | 1.6        |
| 2     | 59.9                 | 16.4                | 25.1       | 20.6                          | 19.7                | 28.9       |
| 3     | 9.7                  | 18.2                | 50.5       | 16.1                          | 17.3                | 44.1       |
| 4     | 7.2                  | 16.5                | 18.1       | 16.5                          | 15.5                | 19.6       |
| 5     | 17.1                 | 24.1                | 4.8        | 20.4                          | 23.5                | 5.8        |

법에 따른 연안의 등급 구간별 변화를 보면 침수면적에 의한 평가는 1등급(낮음)이 6.1%로 최소, 2등급(다소 낮음)이 59.9%로 최대로 등급간 큰 차이를 보인다. 침수발생확률에 의한 평가는 3등급(보통)이 16.1%로 최소, 1등급이 26.3%로 최대이며 5개 등급에서 큰 차이는 발생하지 않는다. 이와 같이 침수면적에 의한 평가는 연안 배후지로 침수가 크게 발생할수록 침수가 상대적으로 적은 연안지역과 차이가 크게 나타난다. 이로 인해 표준화 및 등급화 과정에서 침수면적 일부가 특정 등급에 편중되어 등급간 비율 차이가 크게 나타난다. 취약성 지수와 위험 지수에서는 지역별 노출 및 취약성 지표 가중치 영향으로 큰 차이는 발생하지 않는다.

#### 4.2. 적용성 평가

앞서 분석된 평가결과에서 침수평가 방법에 따른 침수 지표별 차이가 크게 발생하였으나 취약성 및 위험지수에서 큰 차이는 발생하지 않는다. 침수지표 평가방법에 따른 차이를 정량적으로 분석해보면 부산지역 연안재해 위험평가 대상 연안 길이는 총 381,121 m로 침수발생확률에 따른 침수지표 평가로 연안재해 위험지수가 1등급 상향된 연안은 5.8%(22,518 m), 1등급 하향된 연안은 6.2%(24,301 m), 변화가 없는 연안은 88%(344,302 m)로 분석되었다. 평가된 등급 구간별 변화를 제시한 Table 2를 보면 연안재해 위험평가 등급별 변화는 5등급 1%, 4등급 1.5%, 2등급 3.8%, 1등급 0.1% 증가, 3등급은 6.4% 감소하였다.

침수발생확률 적용에 따른 연안재해 위험평가 등급별 변화와 연안재해 노출지수를 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4(a)에 제시된 노출성은 연안재해로부터 대비 및 대응하여 보호해야 할 대상으로 연안인구 및 건물, 산업단지 등을 의미한다. 침수면적을 이용한 위험평가 결과는 부산 연안 육역에 위치한 배후지에서 침수가 크게 발생하여 외해로 개방된 연안보다 상대적으로 노출성이 크게 평가되어 위험한 것으로 나타났다. 반면, 침수발생확률을 이용한 평가

에서는 경향성이 반대로 나타났다. 이러한 경향은 태풍, 해일로부터 상대적으로 영향을 자주 크게 받는 외해역에 크게 노출된 연안과 달리 내만 및 반폐쇄된 형태의 연안에서는 발생 빈도와 영향이 상대적으로 작기 때문에 판단된다. 침수발생확률에 의한 평가는 침수 규모보다 침수 발생 가능성이 높은 지역을 위험하게 평가함으로써 취약한 연안지역에 대한 위험평가가 가능하다. 특히 침수발생 확률 지표는 연안지역에서 상대적으로 발생 가능한 침수 위험평가에 적합한 것으로 평가된다.

현재 연안재해 위험평가에 사용되는 폭풍해일로 발생 가능한 100년 빈도 침수면적은 특정 재현빈도에 한정된 침수정보를 사용하고 월파, 내수배제 등 다양한 침수요인을 고려할 수 없기 때문에 2016년 태풍 차바, 2022년 태풍 힌남노 내습시 부산 해운대 마린시티와 송도부근에서 발생한 월파에 의한 침수를 반영할 수 없다. 이와 달리 침수발생확률을 이용한 평가는 일부 차이는 있지만 월파침수 등 피해가 발생한 지역을 상대적으로 위험한 것으로 평가하고 있다(Fig. 4b). 이러한 결과는 여러 침수요인에 의한 복합침수 영향이 고려되지 않더라도 태풍 가상시나리오별로 발생하는 모든 침수를 고려한 침수발생 확률로 평가할 수 있기 때문에 재현빈도를 사용한 침수면적 평가보다 기후변화 및 침수범람 결과에 대한 불확실성을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 부산을 시범지역으로 침수발생확률을 이용한 연안재해 위험평가 가능성을 확인한 연구로 향후 전국 연안을 대상으로 침수발생확률을 적용한 평가가 가능할 것으로 판단된다. 특히 침수지역에 대한 위험평가지 재현빈도별 침수면적 평가에서 제공되지 않는 침수발생확률을 제공함으로써 기후변화 등 미래 발생가능한 침수재해에 상대적으로 취약한 지역을 평가할 수 있는 장점이 있는 것으로 평가된다.

## 5. 결론

기후위기에 따른 적응정보 생산을 위해 연안재해 위험 평가에 사용되는 침수면적을 침수발생확률로 평가하였다. 침수확률 지표를 적용한 부산지역 연안재해 위험평가 결과, 연안재해 위험등급에 대한 변화는 ±1등급의 변화가 발생했는데, 특히 해운대 마린시티 일부, 송도부근 등에서 기존 침수면적 평가에서는 반영되지 못한 침수영향이 고려되어 1등급 상향된 4~5등급(위험)으로 나타났다. 이러한 결과는 폭풍해일에 의한 침수범람 평가에 특정 재현빈도(100년)를 사용함으로써 고려되지 못한 그 이상의 재현빈도 발생에 따른 침수영향이 고려되었기 때문으로 분석된다. 이는 현재 서·남해안 위험평가에 사용되는 폭풍해일 해안침수예상도가 파랑에 의한 월파 등 복합적인 침수요인을 함께 고려하지 못한 상황에서 모든 시나리오별로 발생한 침수를 발생확률로 평가하는 것이 기후변화 및 침수범람 발생에 대한 불확실성을 최소화할 수 있는 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 특정 재현빈도에 의한 침수면적 평가 보다는 시나리오별 발생 가능한 최대 침수면적을 사용하여 보수적으로 평가하거나 다양한 침수요인이 복합적으로 고려된 침수면적을 사용하는 것이 연안재해 위험평가의 불확실성을 최소화하고 신뢰도를 높일 수 있는 방안 중 하나로 분석된다. 침수지표 개선을 통한 연안재해 위험평가 결과는 연안 지자체의 기후변화로 인한 연안재해 저감대책 수립과 연안정비를 위한 우선순위 검토 및 타당성 검토에 활용 가능하다.

본 연구는 연안재해 위험평가에 활용되는 침수지표를 침수발생확률로 평가하여 적용성을 검토하고 증가하는 기후위기에 따른 연안재해 발생환경 변화와 불확실성 증가에 대응하기 위한 의미있는 연구로 인식된다. 향후, 본 연구에서 연안재해 위험평가 지표 개선 방안으로 제시한 침수지표 뿐만 아니라 위해성 지수를 구성하는 파랑, 해일, 해수면 상승 등 지표에 대한 빈도별 평가를 발생확률로 평가하여 발생가능한 불확실성을 고려하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구 결과는 평가지표 개선을 위한 방법을 제시한 기초 연구로서 향후 기후위기 적응정보 생산에 필요한 연구성과로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## References

- Emanuel K. 2013. Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proc Natl Acad Sci USA* 110(30): 12219-12224. doi: 10.1073/pnas.1301293110
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. AR6: The sixth assessment report. Geneva, Switzerland: Author.
- KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency). 2021. 2021 production of coastal inundation prediction map (Stage 2). Busan, Korea: Author.
- KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency). 2023. Coastal disaster vulnerability(risk) assessment and maintenance. Busan, Korea: Author.
- Knutson T, Suzana JC, Chan JCL, Emanuel K, Ho CH, Kossin J, Mohapatra M, Satoh M, Sugi M, Walsh K, et al. 2019. Tropical cyclones and climate change assessment: Part I: Detection and attribution. *Bull Am Meteorol Soc* 100(10): 1987-2007. doi: 10.1175/BAMS-D-18-0189.1
- Knutson T, Suzana JC, Chan JCL, Emanuel K, Ho CH, Kossin J, Mohapatra M, Satoh M, Sugi M, Walsh K, et al. 2020. Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming. *Bull Am Meteorol Soc* 101(3): E303-E322. doi: 10.1175/BAMS-D-18-0194.1
- Knutson TR, McBride J, Chan JL, Emanuel K, Holland G, Landsea C, Held I, Kossin JP, Srivastava AK, Sugi M. 2010. Tropical cyclones and climate change. *Nat Geosci* 3(3): 157-163.
- Knutson TR, Sirutis JJ, Garner ST, Vecchi GA, Held IM. 2008. Simulated reduction in Atlantic hurricane frequency under twenty-first-century warming conditions. *Nat Geosci* 1(6): 359-364.
- Kossin JP, Emanuel K, Vecchi GA. 2014. The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity. *Nature* 509(7500): 349-352.
- Mei W, Xie SP, Primeau F, McWilliams JC, Pasquero C. 2015. Northwestern Pacific typhoon intensity controlled

- by changes in ocean temperatures. *Sci Adv* 1(4): e1500014. doi: 10.1126/sciadv.1500014
- Mei W, Xie XP. 2016. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the last 1970s. *Nat Geosci* 9(10): 753-757.
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety). 2021. Disaster annual report. Sejong, Korea: Author.
- NDMI (National Disaster Management Research Institute). 2023. A study on the inundation risk analysis of tsunami in Southern region of the Eastern coast of Korea. Ulsan, Korea: Author.
- Seo GH, Oh HJ, Jung KY, Lee HY, Kim SM, Kim MW, Kang TS. 2023. Coastal disaster risk assessment based on climate change scenarios (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 14(6-2): 973-980. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.6.973
- Shimura T, Pringle WJ, Mori N, Miyashita T, Yoshida K. 2022. Seamless projections of global storm surge and ocean waves under a warming climate. *Geophys Res Lett* 49(6): e2021GL097427. doi: 10.1029/2021GL097427