

## 기후변화 시나리오에 따른 최대 가능 태풍강도 추정 및 이에 따른 폭풍해일고 양상 모의

윤종주 · 전기천<sup>†</sup> · 심재설 · 박광순  
한국해양과학기술원 연안재해재난연구센터

### Estimation of Maximum Typhoon Intensity Considering Climate Change Scenarios and Simulation of Corresponding Storm Surge

Jong-Joo Yoon, Ki-Cheon Jun<sup>†</sup>, Jae-Seol Shim and Kwang-Soon Park  
Coastal Disaster Research Center, KIOST 787 Haeanro, Ansan, Gyeonggi, Korea

#### 요 약

지구온난화에 따른 해수의 온도 상승은 태풍의 대형화와 강도증가의 원인이 된다. 본 논문에서는 태풍발생에 있어서의 열역학적 최대한계이론을 적용하여 미래의 기후변화 시나리오에 따른 해수온도의 상승과 기온의 수직성층분포 변화를 고려한 동북아 해역의 지역별 가능 최대태풍의 강도를 추정하였다. IPCC 4차 보고서[2007]에 제시된 기후변화 시나리오를 적용하였으며 각 시나리오에 따라 추정된 태풍의 최대 가능 강도의 결과는 최저중심기압 및 최대풍속의 공간분포로 제시하였는데, 대기 중 이산화탄소의 농도 증가에 비례하여 더 큰 최대 가능강도가 추정되었다. 또한 각 시나리오에 따른 최대 가능강도를 가지는 가상태풍에 의한 폭풍해일고를 수치모의 하였다. 가상태풍의 경로에는 태풍 Maemi(2003)를 따라 적용하였다. 산출된 폭풍해일고의 결과는 최대기후변화 시나리오의 경우, 태풍 Maemi를 모의한 경우에 비해 지역에 따라 약 29~110 cm(36~65%)의 해일고 상승이 나타났으며, 특히 마산에서는 기존의 재귀년도 200년 폭풍해일고를 최대 19cm 상회하는 것으로 나타났다.

**Abstract** – The rise in sea surface temperature (SST) as a global warming enhance overall typhoon activity. We assumed that there exist thermodynamic limits to intensity that apply in the absence of significant interaction between storms and their environment. The limit calculations depend on SST and atmospheric profiles of temperature and moisture. This approach do appear to provide resonable upper bounds on the intensities of observed storms and may even be useful for predicting the change in intensity over a long period time. The maximum storm intensities was estimated through the global warming scenarios from IPCC-AR4 report over the North-East Asia. The result shows stronger intensities according to scenarios for increase of carbon dioxide levels. And storm surge simulations was performed with the typhoons which were combined route of the typhoon Maemi (2003) and intensity as climate change scenarios. The maximum increase of storm surge heights was shown about 29~110 cm (36~65%) regionally. Especially at Masan, the result of simulated maximum surge height exceed the 200 years return period surge.

**Keywords:** Global warming(지구온난화), Potential intensity(가능강도), Intensity limit(강도한계), IPCC scenario(IPCC 시나리오), Storm surge(폭풍해일), Numerical simulation(수치모의)

#### 1. 서 론

온실효과에 따른 지구온난화로 전세계적인 기후변화가 진행되고 있다. 우리나라는 이러한 지구온난화의 영향으로 평균기온이 상승

하고 있으며, 특히 여름철 보다는 겨울철 기온 상승이 뚜렷하고 최고기온보다는 최저기온 상승이 두드러진 현상을 보이고 있다[최광용 등, 2008]. 또한 지난 30년간 태풍의 위력이 강해지면서 앞으로 20~30년 뒤에는 슈퍼태풍이 내습할 것이라는 예측도 나오고 있다(송기섭, 하만복[2007]).

지구온난화에 따른 기온상승은 해수 온도의 상승으로 이어지게

<sup>†</sup>Corresponding author: kcjun@kiost.ac

되는데 이는 태풍의 대형화와 강도증가에 직접적인 원인이 된다. 태풍의 위력은 해수면과 태풍 상공 대기온도의 차이로 결정 나는데 바다가 따뜻할수록 강한 태풍이 발생한 가능성이 높다 (Emanuel[1986, 1994]). 지구온난화로 인하여 주요 에너지원인 해양에서의 잠열 온도가 상승하기 때문에 수증기 증발이 더욱 활발해지게 되며, 이에 따라 태풍의 에너지원이 증가하게 되는 것이다 (Bister and Emanuel[2002]). 이에 따라 머지않은 미래의 슈퍼태풍의 가능성이 제기되고는 있으나 또다른 주장으로는 태풍의 강도가 지속적으로 증가하지만은 않을 것이라는 견해도 있다 (Emanuel *et al.*[2008]). 태풍은 연안역에 재해를 일으키는 주요 원인이 되는데, 태풍 시 발생하는 고파랑과 해일에 의해서 연안 저지대에 침수범람 피해가 발생되고 각종 연안구조물에 피해가 가해지게 된다. 따라서 이러한 태풍의 강도 변화에 따른 연안 항만에서의 재해대책 수립 문제는 매우 중요하다. 이와 관련하여 국내에서는 Hur *et al.*[2006a, 2006b]이 태풍 Maemi(2003), Sarah(5914) 등을 조합한 가상태풍을 적용하여 경남해안의 폭풍해일고를 모의하였다. 또한 Kang *et al.*[2008]은 서남해안과 제주해역에 태풍 Rusa(2002)를 이용하여 그 이동경로를 서쪽으로 각각 1, 2도 이동시켜 폭풍해일고의 변화를 분석하였으며, Hur *et al.*[2008]은 태풍 Maemi의 경로에 허리케인 Katrina(2005) 등 전세계적으로 큰 피해를 입힌 폭풍의 강도를 적용한 슈퍼태풍을 가상모의하여 폭풍해일고를 추정한 바 있다. 또한 국토해양부[2010]에서는 과거의 폭풍해일고를 추산하고 이를 통계분석하여 주요 해역별 태풍에 의한 재귀년도별 극치 해일고 값을 추산하는 연구를 수행하였다. 연안방재차원에서 이러한 연구는 매우 중요한데, 특히 원자력 발전소 등의 주요연안 산업 시설물은 발생 가능한 극한의 외력 조건에서도 안전한 설계고를 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 이를 위해서는 과거의 통계 자료로 추산된 극치 해일고 뿐 아니라, 미래의 기후변화가 고려된 최대 가능 태풍의 강도를 추정하고 이에 대한 안전성을 확보할 수 있도록 해야 한다.

본 연구에서는 기후변화 시나리오에 따라 미래에 발생 가능한 태풍의 최대강도를 추정하기 위하여 태풍발생에 있어서의 열역학적 최대한계이론을 적용하였다. 이를 통하여 미래의 수온상승과 기온의 수직 성층분포변화를 고려한 동북아 해역의 지역별 가능 최대 태풍의 강도를 추정하였다. 강도한계치 추정을 위한 미래의 장기간 기후 모델자료는 IPCC(유엔정부간 기후변화위원회)의 4차 보고서 [2007]의 기후변화 시나리오를 모의한 독일의 MPI-M(Max Planck Institute for Meteorology)의 결과를 사용하였다. 각 시나리오에 따라 추정된 태풍의 최대 가능 강도의 결과는 최저중심기압 및 최대 풍속의 공간분포로 제시하였다. 그리고 각 시나리오별로 발현 가능한 최대의 강도를 가지는 가상태풍이 내습 시 얼마나 큰 폭풍해일고를 발생시킬 수 있는지에 대한 수치실험을 진행하였다. 가상태풍의 경로는 남해해역에서 과거의 기왕 최대태풍의 극값을 경신한 태풍 Maemi의 것을 이용하였다. 이를 통해 미래의 기후변화 시나리오에 따라 발생 가능한 강력한 태풍에 의한 여수, 마산, 부산 등 남해안의 주요 연안지역에서의 최대 폭풍해일고의 변동성을 살펴보았다.

## 2. 강도한계치 추정

태풍은 여러 물리 과정에 의한 복잡한 동적시스템에 의해 생성된다. 태풍의 강도는 최저중심기압과 최대풍속으로 표시할 수 있는데, 기후변화에 따른 태풍강도의 변화를 예측하는 것은 쉽지 않다. 기후모델에서 태풍강도를 충분히 모의하지 못하기 때문에, 기후모델에서 모의된 해수면온도와 기온의 연직구조로부터 태풍의 강도를 추정하고자 한다.

태풍의 영향권과 영향권 밖의 뚜렷한 상호 작용이 없다고 가정할 경우, 열역학적 한계에 의해 태풍의 강도가 제한될 수 있음이 이론적으로 나타났고 (Emanuel [1986]), 태풍의 관측을 통해 이러한 한계이론에 의한 강도의 상한치가 비교적 잘 보이는 것으로 나타났다 (Emanuel[1995]). 강도한계치 추정 이론의 장점은 해수면 온도와 대기 온습도의 연직 자료 등을 이용하여 태풍 강도의 한계치를 직접 계산할 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 동북아 일대에서의 가능 최대 태풍 강도를 Emanuel[1995]이 제시한 강도한계치 추정 모델을 이용하여 미래의 기후변화 시나리오(IPCC[2007])에 따라 산출하였다.

### 2.1 강도한계치 추정 모델

태풍 중심에서 상승하는 공기가 방출하는 잠열에너지의 일부는 바람에너지의 생성원으로 이용된다. 태풍을 발달시키는 모든 에너지는 해수면으로부터의 열교환에 의해 생성된다고 가정하면, 수면으로부터 태풍으로의 유입 가능한 에너지는 다음과 같다.

$$G \propto \rho V_s (k_o - k_a) \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $V_s$ 는 해상풍속,  $k_o$ 와  $k_a$ 는 각각 해수와 대기경계에서의 해양과 대기의 엔탈피 값이다. 태풍이 거의 정상상태(강도의 변화가 없는 상태)에 도달하면 생성된 에너지의 대부분은 강한 바람과 해수면과의 마찰에 따라서 소산되는데, 이러한 마찰에 의한 소산에너지  $D$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$D \propto \rho V_s^2 \quad (2)$$

상기의 식 (1)과 (2)를 해상풍속에 대한 식으로 나타내면 다음의 식 (3)과 같으며, 태풍중심 부근의 해수면 온도  $T_s$ 와 기온의 연직구조로부터 최대해상풍속  $V_s$ 를 산출할 수 있다.

$$V_s^2 \approx \varepsilon T_s (k_o - k_a) \quad (3)$$

또한, 태풍중심 부근에서는 기압경도력과 원심력이 평형을 이루며 일정한 각속도의 바람장을 갖는다고 가정하면, 다음과 같이 최대풍반경에서의 기압( $P_m$ )과 최대풍속( $V_m$ )으로부터 중심기압( $P_c$ )을 산출할 수 있다.

$$P_c \approx P_m \exp \frac{V_m^2}{2RT_s} \quad (4)$$

여기서,  $R$ 과  $T_s$ 는 각각 대기의 기체상수와 태풍의 상층으로 공기가 유출되는 지점의 기온을 나타낸다.

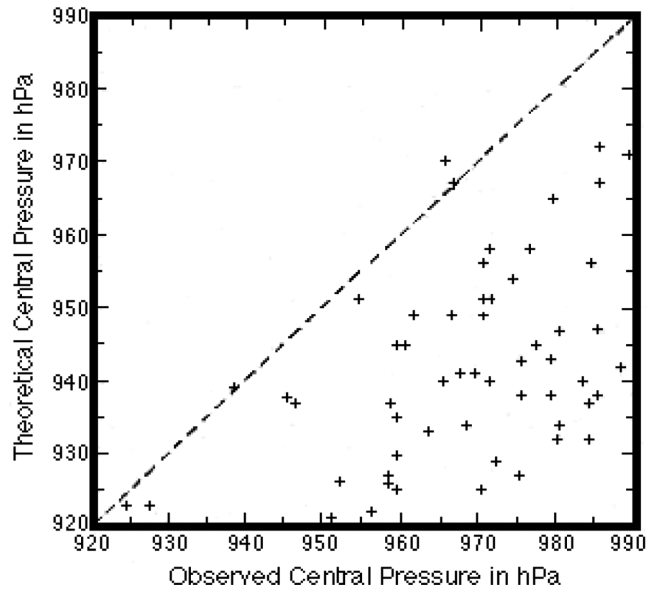


Fig. 1. Comparison between observed and theoretical central pressure (Emanuel 1995).

Emanuel[1995]은 강도한계이론의 검증에 위하여 기상자료를 이용하여 열대저기압 중심기압의 최대치의 계산값과 관측값을 비교하였는데(Fig. 1), 이론상 계산된 중심기압의 최대 한계치는 관측된 값보다 더 크게 나타나는 경향을 보였다. 이는 각각의 태풍이 실제 가능한 최대 강도를 발현하지 못하고 있는 것으로 해석될 수 있으며, 대기와 해양간의 복잡한 상호작용이 태풍강도감소의 큰 요인으로 작용하고 있음을 보여준다.

2.2 기후변화 시나리오를 고려한 최대가능 태풍강도의 추산

전 세계적으로 과거와 미래의 지구온난화 영향 등이 고려된 각종 기후변화 시나리오(IPCC 4차 보고서[2007])에 따른 기상예측모델을 많은 연구소에서 수행하고 있다. IPCC 4차 보고서에서는 여러 종류의 기후변화 시나리오를 제시하고 있으며, 동일한 시나리오에 따라 전세계의 약 22개의 연구소에서 기후변화예측 모델을 수행하여 그 결과를 WDC(World Data Center for Climate, Hamburg) 웹 페이지에 공유하고 있다. 본 연구에 적용된 IPCC의 기후변화 시나리오는 그 중에서 3가지 경우로서 지구온난화에 대한 직접적인 지표로서 온실효과에 대한 기여도가 가장 높은 이산화탄소의 농도변화에 따른 기후변화를 모의한 것이다(Table 1).

본 연구에서는 강도한계이론을 적용한 동북아 해역의 가능 태풍 강도를 추정하였는데, 이를 위한 입력 데이터는 독일 MPI-M(Max Planck Institute for Meteorology)의 ECHAM5 기후모델을 통해 산출되는 각종 기후변화 시나리오 별 결과 자료를 이용하였다. 수치 계산은 강도한계치 추정 모델을 이용하여 각 격자별로 계산이 수행되며, 해수면 온도와 연직 기압, 기온 및 혼합비 등의 수직 대기 분포 정보가 입력 자료로 쓰이게 된다. 강도한계치 추정 모델에 적용되는 기후모델의 자료는 각 시나리오에 따라 월평균 단위로 입력된다. 최종적으로 강도한계치 추정 모델의 결과는 각각 식 (3)과

Table 1. Applied climate change scenarios as a report IPCC AR4 (2007)

시나리오	설명
1PCTTO 2X	1860년부터 70년간 매년 1%씩 이산화탄소 농도 증가(현재의 2배까지), 이후 150년 모의
1PCTTO 4X	1860년부터 140년간 매년 1%씩 이산화탄소 농도 증가(현재의 4배까지), 이후 150년 모의
20C3M	산업혁명부터 20세기까지의 이산화탄소 농도 모의(1860-2000)

Table 2. Outline of model set-up for maximum typhoon potential intensity

	모델 개요	비고
지역	115°E ~ 135°E 25°N ~ 45°N	
격자크기	1.8°×1.8°	
적용기간	1860년 ~ 2200년	월평균 자료 셋 적용
시나리오	20C3M 1PCTTO 2X 1PCTTO 4X	1PCTTO 4X가 가장 심하게 기후변화 진행
입력자료	MPI-M ECHAM5 모델 - 수온(SST, °C) - 해면기압(hpa) - 대기압(21개 층, hpa) - 대기온도(21개 층, °C) - 혼합비(21개 층)	21개 층 자료 : Surface, 1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100 hpa
출력자료	최저중심기압(hpa) 최대풍속(m/s)	강도한계치 추정모델 적용

식 (4)에서 제시된 최대풍속( $V$ )과 최저중심기압( $P$ )으로 산출된다. 최대 가능태풍강도의 추정을 위한 강도한계치 추정 모델의 개요를 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2에는 본 연구에서 강도한계치 추정모델로 추정된 각 시나리오별 최대가능태풍 강도의 공간분포를 나타낸 것이다. 태풍강도는 최저중심기압과 최대풍속으로 구분하여 나타냈으며, 대기 중 이산화탄소 농도치에 비례하여 20C3M, 1PCTTO 2X, 1PCTTO 4X 시나리오 순으로 더 낮은 최저중심기압과 더 높은 최대풍속이 분포하는 것으로 추정되었다. 우리나라 남해 및 동해의 분포를 살펴보면 20C3M 시나리오의 경우 약 940~950 hpa의 최저중심기압과 60~70 m/s의 최대풍속이 나타나고, 1PCTTO 2X 시나리오의 경우 약 920~930 hpa의 최저중심기압과 70~80 m/s의 최대풍속, 그리고 1PCTTO 4X 시나리오의 경우 약 910~930 hpa의 최저중심기압과 75~85 m/s의 최대풍속이 추정되었다. 또한 황해에서는 최대풍속 분포가 남해 및 동해의 경우와 비슷한 범위를 보이지만, 최저중심기압의 경우 20C3M 시나리오의 경우 약 930~970 hpa, 1PCTTO 2X 시나리오의 경우 약 900~940 hpa, 그리고 1PCTTO 4X 시나리오의 경우 약 900~920 hpa가 추정되어 남해 및 동해에 비해 약 10~20 hpa 더 낮은 분포를 나타내는 것으로 추정되었다.

3. 가상태풍에 의한 가능 최대해일고의 추산

전 세계적으로 지구 온난화가 지속되면서 해수면의 온도가 상승

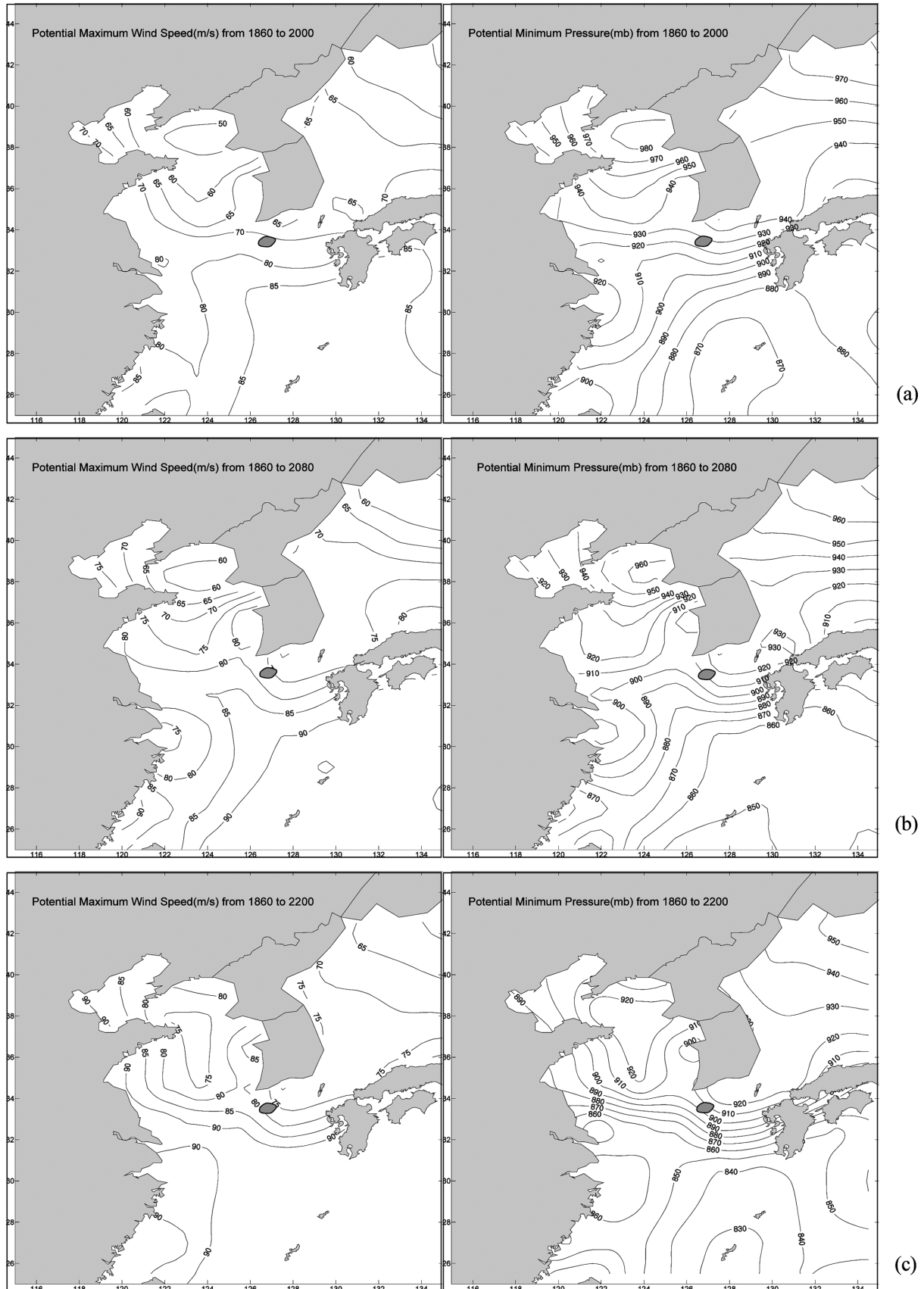


Fig. 2. Estimated maximum Intensities as IPCC scenarios((a)20C3M, (b)1PCTTO 2X, (c)1PCTTO 4X - maximum wind speed (left), minimum Pressure (right)).

하고 이에 따라 태풍의 강도가 증가하고 있다. 2003년에 우리나라 남동부를 내습하여 태풍 관측 역사상 가장 큰 피해를 입힌 태풍 Maemi 이후, 이에 못지않은 대형 태풍의 가능성은 계속 제기되고 있다. 미국의 경우 허리케인 Katrina가 2005년도에 뉴올리언스에 상륙하면서 슈퍼태풍의 위력으로 발달하여 막대한 피해를 입힌 사례가 있다. 슈퍼태풍이란 중심 최대풍속이 67 m/s 이상이고, 1000 mm/day 이상의 강우를 동반하는 폭풍으로 정의된다(JTWC, 미국합동태풍정보센터). Fig. 2의 미래 기후변화 시나리오에 따른 가능 최대태풍강도 분포에서 나타나는 바와 같이 지구온난화가 지속적으로 진행될 경우, 발현가능 한계강도에 가까운 슈퍼태풍 급의 강력한 태풍이 내습할 가능성이 있다. 이러한 가능 최대태풍의 실제 발생 확률은 매우 낮지만 연안에 위치한 발전소 등의 주요 시설물의 설계에는 방재차원에서 이러한 극한 요소까지 고려되어야 할 필요성이 있다. 본 연구에서는 이러한 미래의 가능 최대 태풍강도가 적용된 태풍이 내습할 경우, 얼마나 큰 폭풍해일고가 분포하게 될지를 수치모델로 모의하여 검토하였다. 이를 위하여 과거 우리나라에서 가장 큰 폭풍해일고에 의한 피해를 준 태풍 Maemi를 기준으로 폭풍해일고를 산정하고, 태풍 Maemi의 경로와 앞에서 제시한 기후변화 시나리오 20C3M, 1PCTTO 2X, 1PCTTO 4X에 따른 최대강도가 적용된 태풍특성(최저중심기압)을 기존의 태풍 정보에 조합하여 가상태풍을 선정하고, 이에 따른 폭풍해일고의 특성을 비교하였다.

### 3.1 폭풍해일 산출 모형 수립

폭풍해일고의 산정에는 삼각형 가변격자망을 사용하는 3차원 유한체적모형 FVCOM (Finite-Volume Coastal Ocean Model, Chen *et al.*[2004, 2006])이 적용되었다. FVCOM은 유한차분모델 또는 유한요소모델과는 다른 적분형태의 지배방정식을 갖는데 유한차분법의 흐름계산을 이용하여 수치적으로 계산하며, 유한요소법과 같은 삼각형 격자망을 이용한다. 유한체적법은 개개의 제한된 요소와 완전한 계산영역으로 질량보존된다. FVCOM은 유한차분법의 간단한 이산법의 능률성과 유한요소법의 기하학상의 유연성을 잘 조화한 장점이 있다.

폭풍해일고 산출을 위한 외력으로서 해상풍과 기압장에 대한 공간분포장이 필요한데, 본 연구에서는 태풍 파라미터 모델인 CE(U.S. Army Corps of Engineers) 해상풍 모델을 이용하여 태풍시 바람과 기압장을 산출하였다. CE 해상풍 모델의 주요 입력 파라미터에는 태풍의 중심위치, 최저중심기압, 최대풍 반경 등이 포함된다. CE 해상풍 모델은 Cardone *et al.*[1992], Thompson and Cardone[1996] 등의 연구에 소개되어 있다. FVCOM 모형에서 사용되는 풍속에 대한 항력계수  $C_D$ 는 Large and Pond[1981]가 제안한 식을 다음과 같이 수정하여 사용하였다.

$$C_D = \begin{cases} 0.0012 & , (|U_{10}| \leq 11 \text{ m/s}) \\ 10^{-3}(0.49 + 0.065|U_{10}|) & , (|U_{10}| \geq 11 \text{ m/s}) \\ 10^{-3}(0.49 + 0.065 \times 25) & , (|U_{10}| \leq 11 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $U_{10}$ 은 10 m 대기에서의 풍속이다.

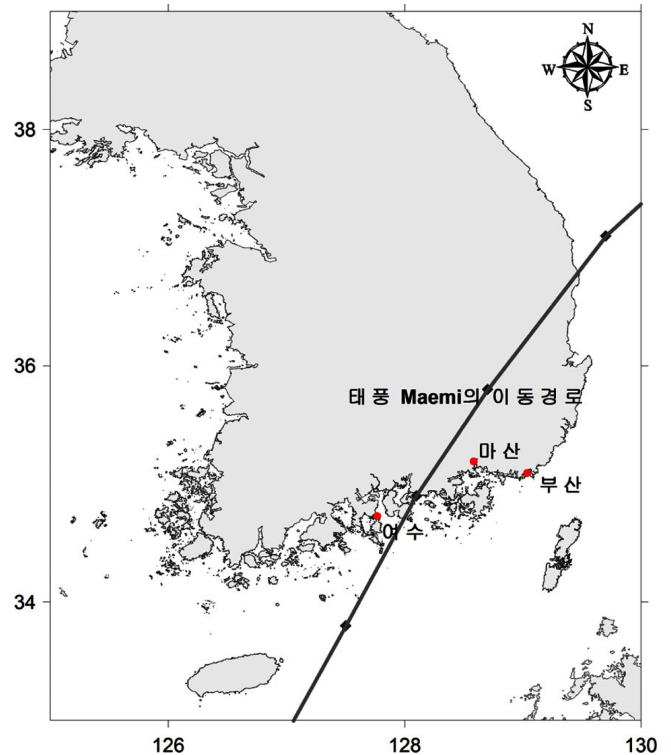


Fig. 3. Track of Typhoon Maemi (solid dotted line) and main tidal observation station near the track (red point).

Fig. 3에는 폭풍해일고의 계산을 위해 적용된 태풍 Maemi의 진행경로와 내습경로 주위의 주요 조위 관측지점의 위치를 나타내었다. 태풍 Maemi의 경로를 살펴보면 제주도의 북동부를 지나 경남 사천으로 상륙하여 경북 울진부근을 거쳐 동해상으로 빠져나갔는

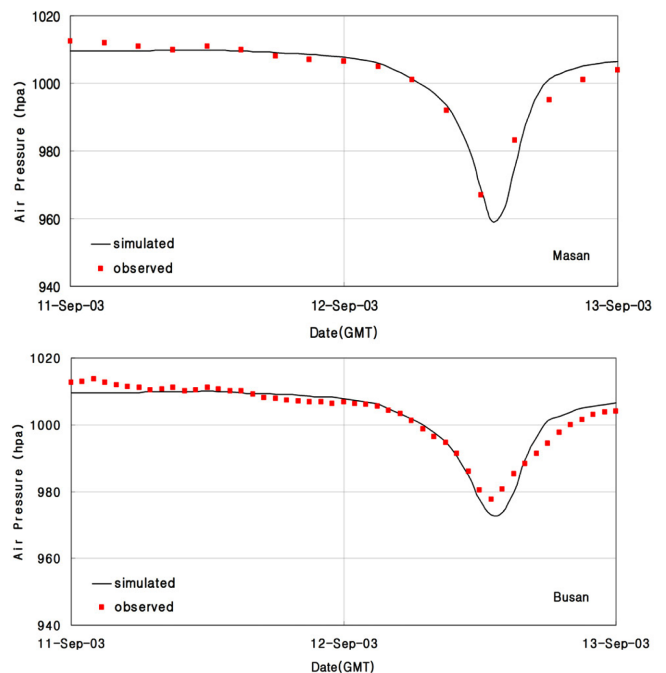


Fig. 4. Comparisons between observed and simulated air pressure time variations at Masan & Busan.

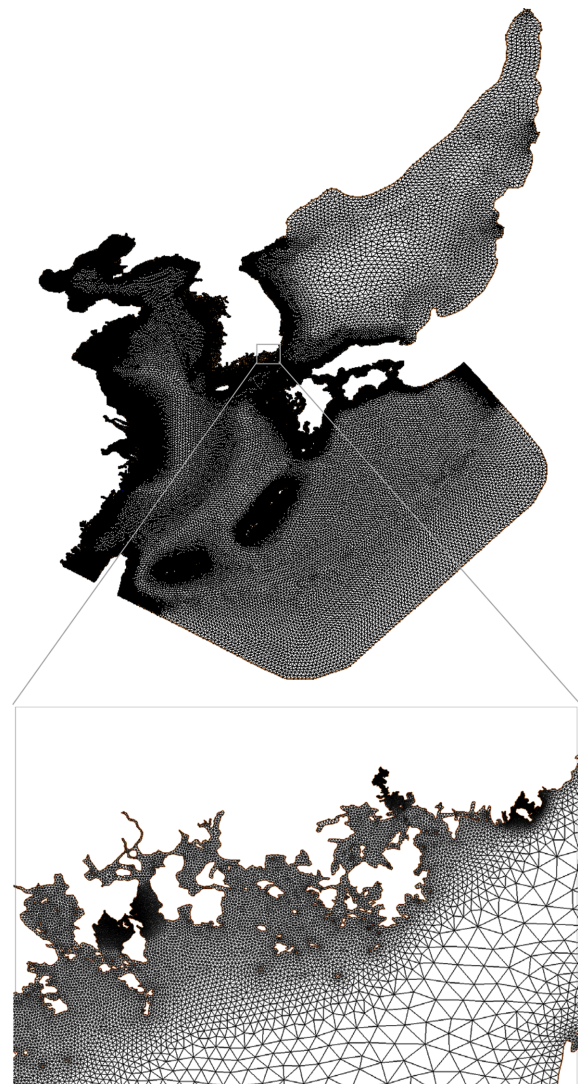
**Table 3.** Information of design storm with central pressure for various IPCC AR4 scenarios

일시(GMT)	태풍 중심위치		최대풍반경 (km)	시나리오별 최저중심기압(hpa)			
	위도(N)	경도(E)		태풍 Maemi	20C3M	IPCTTO 2X	IPCTTO 4X
2003.09.11 01:00	25.30	125.10	60	910	878	852	842
2003.09.11 06:00	25.80	125.20	60	915	877	854	840
2003.09.11 12:00	26.80	125.40	60	930	876	858	838
2003.09.11 18:00	28.55	125.85	60	935	877	866	843
2003.09.11 21:00	29.50	126.10	60	940	880	867	844
2003.09.12 00:00	30.50	126.50	60	945	883	865	845
2003.09.12 03:00	31.60	126.70	60	945	895	875	860
2003.09.12 06:00	32.70	127.00	75	950	914	898	889
2003.09.12 09:00	33.80	127.50	70	950	933	919	917
2003.09.12 12:00	34.90	128.10	60	955	944	928	923
2003.09.12 15:00	35.80	128.70	80	960	945	926	925
2003.09.12 18:00	37.10	129.70	80	970	946	927	926
2003.09.12 21:00	37.80	130.70	80	970	947	929	928
2003.09.13 00:00	38.60	131.70	90	975	948	933	932
2003.09.13 06:00	40.50	134.50	150	980	965	957	946

데, 우리나라 남부를 관통하여 큰 피해를 입힌 대표적인 태풍의 진행경로를 보여주었다.

Fig. 4에는 태풍 Maemi 통과시의 CE 해상풍 모델에 의해 계산된 부산과 마산 검조소 지점에서의 기압 시간변화를 관측값과 비교하여 나타낸 결과인데, CE 해상풍 모델의 계산치는 관측치를 잘 재현하는 것으로 나타났다. CE 해상풍 모델에 의한 태풍 Maemi의 해상풍 추산은 Lee *et al.*[2008], Kwon *et al.*[2008], Kang *et al.*[2009]의 연구에서도 검증되었다. Table 3에는 기후변화 시나리오가 고려된 가능 최대태풍강도(최저중심기압)를 각 시나리오별로 태풍 Maemi의 경로에 적용한 가상태풍의 정보를 나타내었다. Table 3에 제시된 기후변화 시나리오에 의한 가상태풍의 최저중심기압 분포를 원래의 태풍 Maemi에서의 값과 비교해 볼 때, 시나리오에 따른 태풍의 최저중심기압이 더 낮게 분포하는 것으로 나타났다. 20C3M 시나리오의 경우는 산업혁명 이후부터 현재(1860년~2000년)까지의 대기 중 이산화탄소 농도를 가정한 것이어서 현재의 가능 최대태풍의 강도를 가늠해 볼 수 있는 시나리오인데, 이를 바탕으로 추정된 가상태풍의 최저중심기압은 태풍 Maemi의 경우에 비하여 더 낮은 최저중심기압의 분포를 나타내었다. 이는 시나리오별로 산출된 가상태풍이 강도한계치 추정모델에 의해서 추정된 최대한계치의 강도를 따르는 태풍의 발생을 가정한 것이기 때문이다. 따라서 태풍 Maemi의 경우도 이론상 가능한 최대 강도에는 못 미친 경우라고 추정할 수 있다. 대부분 실제의 태풍은 대기와 해양간의 복잡한 상호작용에 의해서 발현 가능한 최대의 강도에 이르지 못하는데, 이는 초강력 태풍으로 분류되는 태풍 Maemi가 20C3M 시나리오에 의한 가상 태풍에 비해 더 강하게 나타나지 못한 이유로 설명될 수 있다.

폭풍해일고의 계산은 조석-흐름 상호작용에 의한 비선형성을 고려하기 위하여 폭풍해일과 조석을 동시에 고려하여 수치모의한 결과에서 조석만을 모의한 결과를 빼주어 산출하였다. 개방경계에서

**Fig. 5.** Grid system for FVCOM.

의 조석조건은 NAO99b/NAO99b(Mastsumoto *et al.*[2000])의 단기 해양 조석 모델 결과에서 제공되는 조화상수 중 주요 8개 분조를 사용하였다.

### 3.2 격자망 구성

FVCOM 모형에서 폭풍해일고를 계산하기 위한 격자망의 구성은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 황해, 동해 및 동중국해를 포함하는 광역의 영역을 가지고 있다. 격자망은 삼각형의 가변격자로서 연안에서의 최소격자 크기는 약 600~700 m이고, 부산, 마산, 여수 인근해역에서는 50~60 m 정도로 상세히 구성하였다. 격자망의 절점(node)은 136,570개, 셀(element)은 258,482개이다. 모델은 3차원으로 계산되며, 수직 격자는 11개의 sigma-layer로 구성되었다.

### 3.3 최대 폭풍해일고의 비교

여수, 마산, 부산 등은 태풍 Maemi 내습 시 조위의 상승과 함께 큰 폭풍해일고가 관측된 주요 지역이다. 본 연구에서는 이들 지역에 대한 과거의 태풍 Maemi에 의한 폭풍해일고를 산출하고, 앞서 Table 3에서 제시한 각 기후변화 시나리오에 의한 가상태풍 조건으로 산출한 폭풍해일고의 결과와 비교하였다. 지역적인 변동성의 시간변화를 알아보기 위해 Fig. 6에서와 같이 각 관측지점에서의 폭풍해일고 변화양상을 도시하였다.

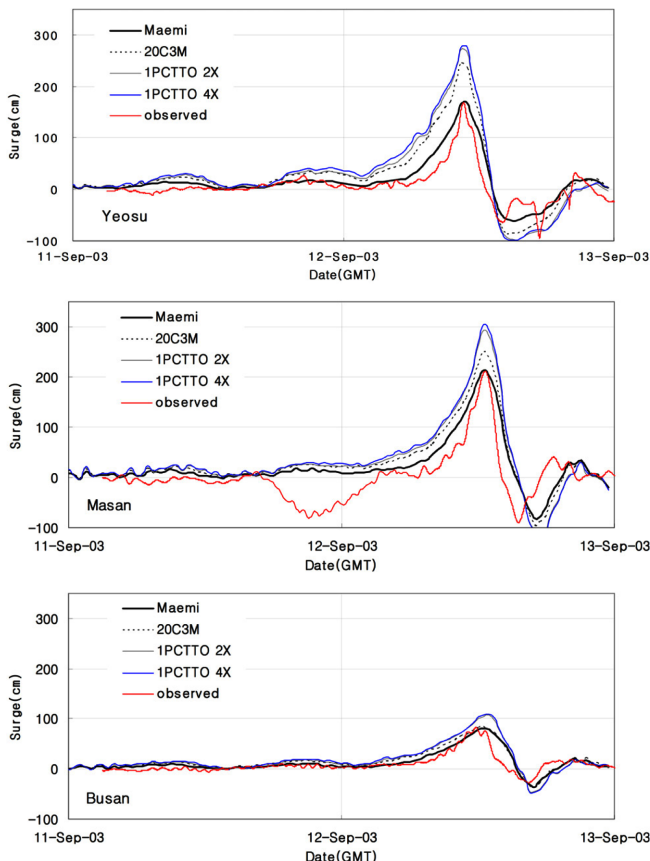


Fig. 6. Comparisons of storm surge time variations according to various typhoon scenarios at Yeosu, Masan and Busan.

관측자료는 국립해양조사원의 1분 조위자료를 사용하였으며, 원 자료에서 추산 조위값을 빼주어 비조위 성분을 추출하고, 이를 폭풍해일고의 관측값으로 적용하였다. FVCOM 모델에 의한 태풍 Maemi의 폭풍해일고 산출 결과를 보면 마산에서는 관측 최대값에 비해 각각 2 cm가 크게 산출되었고, 여수 및 부산에서는 각각 2 cm, 4 cm가 작게 산출되었다. 이는 태풍시의 바람장을 재현하는데 적용되는 기상 파라미터의 관측치에 여러 오차요인이 존재하기 때문인데, 전반적인 폭풍해일고 변화 양상은 잘 모의되는 것으로 나타났다. 각 기후변화 시나리오에 따른 폭풍해일고의 전반적인 시간 변화 양상은 각 시나리오별로 달리 적용된 최저중심기압의 분포에 따라 최대해일고의 산출 결과가 크게 나타났다.

Table 4의 좌측에는 각 시나리오에 따른 4개 조위 관측지점에서의 모의된 폭풍해일고의 최대값과 태풍 Maemi 모의시의 최대값 결과에 대비한 증가율을 제시하였으며, 우측에는 국토해양부[2010]에서 추산한 재귀년도 별 폭풍해일고를 비교하여 나타내었다. Fig. 7에는 Table 3에서 제시한 결과를 막대그래프로 비교하여 나타내었다.

우선 시나리오 별 최대해일고 산출 결과를 보면 여수, 마산 등 태풍의 진로에 가까이 위치한 관측지점에서의 해일고 상승률이 상대적으로 크게 나타났다. 가상태풍에 의한 폭풍해일고의 최대치를 비교해보면, 태풍 Maemi 시의 폭풍해일고에 비해 1PCTTO 2X 시나리오의 경우 여수에서 105 cm(63%), 마산에서 80 cm(38%), 그리고 부산에서는 27 cm(34%)의 해일고 상승이 가능할 것으로 모의되었다. 또한 1PCTTO 4X 시나리오의 경우 여수에서 109 cm(65%), 마산에서 92 cm(43%), 그리고 부산에서는 29 cm(36%)의 해일고 상승이 나타났다.

20C3M 시나리오의 경우 1860년부터 2000까지의 대기 중 이산화탄소 농도 상승분만을 반영한 시나리오임에도 불구하고 태풍 Maemi의 모의 결과에 비해 여수에서 78 cm(46%), 마산에서 36 cm(17%), 그리고 부산에서는 4 cm(4%)의 해일고 상승이 나타났다. 이는 현재의 기후 상황에서도 태풍이 발현 가능한 최대 강도의 한계 에너지를 나타낼 경우 태풍 Maemi에 비해서 20C3M 시나리오

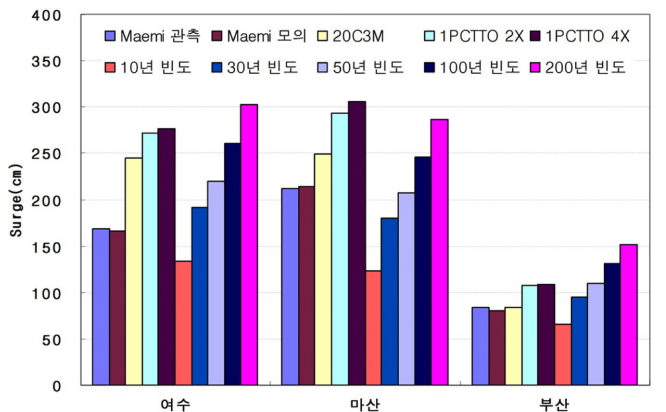


Fig. 7. Comparison chart of maximum storm surge height according to various typhoon scenarios design surge height for each return period.

**Table 4.** Comparison of maximum storm surge height according to various typhoon scenarios and design surge height for each return period

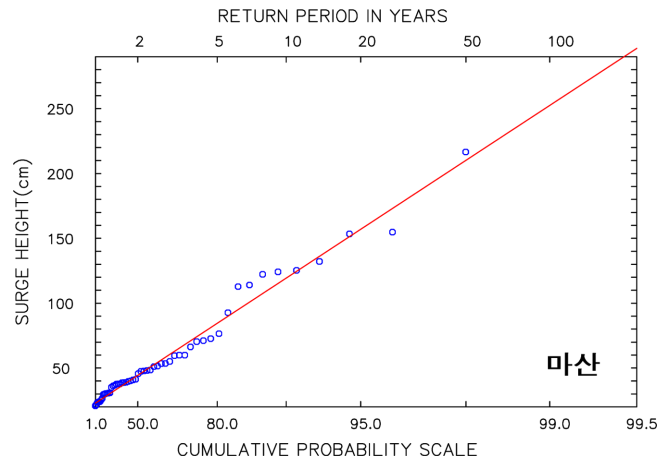
관측소/시나리오	최대해일고(cm)					재귀년도 별 폭풍해일고(cm)				
	태풍 Maemi 관측	태풍 Maemi 모의	20C3M (증가율)	1PCTTO 2X (증가율)	1PCTTO 4X (증가율)	10년	30년	50년	100년	200년
여수	169	167	245 (46%)	272 (63%)	277 (65%)	134	191	220	261	303
마산	212	214	250 (17%)	294 (38%)	306 (43%)	124	180	207	246	287
부산	84	80	84 (4%)	107 (34%)	109 (36%)	66	95	110	131	152

의 가상태풍의 결과만큼의 더 큰 폭풍해일고의 발생이 가능하다는 것을 나타낸다.

기후변화 시나리오에 따른 각 지점에서의 최대해일고 값을 Table 4의 우측에 제시한 국토해양부[2010]의 연구에서 추산된 각 재귀년도별 폭풍해일고의 값과 비교하여 보면 태풍 Maemi의 경우 마산에서 재귀년도 50년을 상회하는 태풍이었음을 알 수 있고, 20C3M 시나리오는 재귀년도 100년, 1PCTTO 2X와 1PCTTO 4X의 경우는 재귀년도 200년을 각각 7 cm, 19 cm 정도로 상회하는 수준임을 보여주고 있다. 여수의 경우 20C3M 시나리오는 재귀년도 50년, 1PCTTO 2X와 1PCTTO 4X의 경우는 재귀년도 100년의 폭풍해일고를 상회하는 수준을 나타내었다. 또한 부산에서는 모든 기후변화 시나리오에 따른 폭풍해일고 결과가 재귀년도 50년의 값에 못 미치는 것으로 나타났는데, 이는 태풍 Maemi가 부산을 내습한 대표 태풍이 아니었으며, 어느 정도 거리를 두고 지나갔기 때문으로 보인다. 따라서 본 연구에서의 태풍 Maemi의 경로를 활용한 결과는 특히 마산 인근해역에 대한 가능 최대 폭풍해일고 값을 제시해 줄 수 있다고 할 수 있다. 이와 함께 특정 해역에서의 가능 최대 해일고의 추산을 위해서는 그 해역에서의 과거 최대 폭풍해일고를 일으킨 태풍 등의 경로를 활용할 수 있다.

연안의 구조물을 설계고에 고려되는 폭풍해일고에 대한 설계해면값은 과거의 태풍에 의한 해일고를 수치모의하여 이를 재귀년도별로 극치통계분석하여 사용하거나 조위관측값이 있는 경우 기왕의 고극조위값을 적용한다(해양수산부[2005]). 그러나 과거의 태풍에 의한 해일고 자료를 통계분석하는 극치해석의 경우, 약 50여 년간의 과거 태풍 자료로부터 구한 빈도해석의 결과는 100년 이상의 재귀년도 분석에서는 그 신뢰성이 떨어질 수 있다. 이는 국토해양부[2010]에서 수행한 재귀년도별 폭풍해일에 의한 설계해면의 극치통계분석 결과 중 마산에서의 예를 나타낸 Fig. 8에 나타난 바와 같다.

Fig. 8에서 보이는 바와 같이 50년 이상의 재귀년도에 대한 통계값은 단순히 선형적으로 증가한다는 가정을 내포하고 있는데, 먼 미래에 발생할 수 있는 해일고의 극값은 재귀년도의 증가에 따라 무한히 증가하는 것이 아니라 어느 정도의 한계값을 가지게 된다. 여기서의 한계값은 발생 가능한 특정 현상의 극값으로 제시될 수 있는데, 특별히 안전한 설계가 필요한 특수 연안시설물 등의 설계에는 이러한 미래의 발생 가능한 극값에 대한 안전성이 확보되어야 한다. 단순히 100년 혹은 200년 재귀년도의 통계치를 설계에 적용하는 데는 제약이 있다. 왜냐하면 어떠한 재귀년도를 적용할 것인지 결정하기 쉽지 않을 뿐만 아니라, 극치분석에 의한 값이 과거의

**Fig. 8.** Extreme distribution for storm surge height at Masan (KORDI [2010]).

해양 조건이 미래에도 동일하게 작용할 것이라는 가정 하에 추산된 것이기 때문에 재귀년도가 늘어날수록 신뢰성이 떨어지고 기후변화를 고려하지 못하는 단점을 갖고 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서의 기후변화 시나리오가 고려된 최대가능태풍에 의한 최대 폭풍해일고의 산출은 특정 지역에서의 폭풍해일고의 극치값을 추산하는 여러 방안 중 하나로서 그 활용성이 있을 것으로 본다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 태풍의 발생에 있어서 열역학적 최대 한계이론을 적용한 강도한계치 추정 모델을 이용하여 대기 중 이산화탄소 농도에 따른 미래의 기후변화 시나리오에 따라 동북아 해역의 지역별 가능 최대태풍의 강도를 추정하였다. 각 기후변화 시나리오에 따른 태풍의 가능 강도는 최저중심기압 및 최대풍속의 공간분포로 제시하였다. 산출된 가능 최저중심기압 및 최대풍속의 공간분포를 살펴보면 시나리오 상의 대기 중 이산화탄소의 증가분에 따라 가능 강도도 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

또한 시나리오별로 발생 가능한 최대강도의 가상태풍을 선정하여 각각의 폭풍해일고를 산출하였다. 이를 위하여 각 시나리오별로 산출된 태풍강도의 공간분포로부터 과거 남해 동부역에 최대의 폭풍해일고 피해를 입힌 태풍 Maemi의 경로를 따르는 시나리오별 가상태풍을 설정하여 폭풍해일고 산출 수치모의를 수행하였으며, 각각의 추정된 폭풍해일고를 비교검토하였다.

각 조위관측 지점에서의 기후변화 시나리오에 따른 가상태풍에



의한 최대해일고 분포는 태풍 Maemi의 모의 결과에 비하여 각 시나리오 별로 여수에서 78~110 cm (46~65%), 마산에서 36~92 cm (17~43%), 그리고 부산에서는 4~29 cm (4~36%)의 최대 상승을 나타내었다. 특히 마산의 경우 미래의 기후변화 시나리오가 고려된 가능 폭풍해일고의 최대값은 기존 연구에서 산출된 재귀년도 200년 확률의 폭풍해일고를 최대 19 cm 상회하는 것으로 나타났다.

태풍 Maemi 내습 시 우리는 마산을 비롯한 경남 연안역의 특정 지역에서 큰 폭풍해일로 인하여 많은 인명 및 재산피해를 입었다. 따라서 이상과 같은 미래의 기후변화 요소가 고려된 최대가능 태풍에 의한 피해는 얼마나 막대할 것인지에 대해서 그 위험성을 충분히 판단할 수 있다. 특히 연안에 위치하는 발전소나 가스시설 등의 주요 시설물의 경우에는 발생 가능한 극한의 외력 조건에 대해서도 안전성을 확보할 수 있도록 설계되어야 하는데, 이에 대해 기후변화 시나리오를 고려한 태풍강도의 증가를 폭풍해일고의 산출에 반영한 본 연구는 태풍에 의한 가능한 폭풍해일고의 극값을 추정할 수 있는 좋은 방안이 될 수 있다.

기후변화가 앞으로 어떻게 진행될지는 정확히 예측하기는 어렵지만, 과거에 비해 더 강력한 해안재난의 가능성이 제기되고 있는 만큼 이에 대한 방재시설과 방재대책의 수립을 위한 장기적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 향후 다양한 기후변화 시나리오에 따른 연안침수예상도 등의 재해도를 작성하는데 있어서도 본 연구의 결과를 활용하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 연구개발사업 “운용해양(해양예보)시스템 연구” 및 한국해양과학기술원의 기본사업 “해일 침수범람지역 예측기술 및 재해도(Hazard Map) 작성기술 개발” 및 “연안파랑 관측, 분석 및 장기산출”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Bister, M., Emanuel, K.A., 2002, “Low frequency variability of tropical cyclone potential intensity. 1. Interannual to interdecadal variability”, *J. Geophys. Res.*, 107(D24), 26(1-15).
- [2] Cardone, V.J., Cox, A.T. Greenwood, J.A. and Thompson, E.F., 1992, “Upgrade of Tropical Cyclone Surface Wind Field Model”, CERC-94-14, U.S. Army Corps of Engineers.
- [3] Chen, C., Cowles, G. and Beardsley, R.C., 2004, An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM user manual, 1st ed., Tech. Rep. 04-0601, 183 pp., School of Mar. Sci. and Technol., Univ. of Mass., Dartmouth.
- [4] Chen, C., Beardsley, R.C. and Cowles, G. 2006, “An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system”, *Oceanography*, 19(1), 78-89.
- [5] Choi, G.Y., Kwon, W.T., Boo, K.O. and Cha, Y.M. 2008, “Recent Spatial and Temporal Changes in Means and Extreme Events of Temperature and Precipitation across the Republic of Korea”, *J. the Korean Geographical Society*, Vol.43, No.5, 681-700.
- [6] Emanuel, K.A., 1986, “An air-sea interaction theory for tropical cyclones”, Part I *J. Atmos.* 42, 585-604.
- [7] Emanuel, K.A., 1994, *Atmospheric Convection*. Oxford Univ Press, New York, 580.
- [8] Emanuel, K.A., 1995, “Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics”, *J. Atmos.* 52, 3969-3976.
- [9] Emanuel, K.A., Sundararajan, R. and Williams, J., 2008, “Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 89, 347-367.
- [10] Hur, D.S., Yeom, G.S., Kim, J.M., Kim, D.S. and Bae, K.S., 2006a, “Estimation of Storm Surges on the Coast of Busan”, *KSOE*, Vol.20, No.3, 37-44.
- [11] Hur, D.S., Yeom, G.S., Kim, J.M., Kim, D.S. and Bae, K.S., 2006b, “Storm Surge Characteristics According to the Local Peciliarity in Gyeongnam Coast”, *KSOE*, Vol.20, No.3, 45-53.
- [12] Hur, D.S., Lee, H.W., Lee, W.D. and Bae, K.S., 2008, “Storm Surge Height on Busan and Gyeongnam coastal region by an Attack of Super-Typhoon”, *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Eng.*, Vol.20, No.1, 128-136.
- [13] IPCC, 2007, *Climate Change : The physical basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1-996.
- [14] JTWC(Joint Typhoon Warning Center), <http://metocph.nmci.navy.mil/jtwc.php/>.
- [15] Kang, J.W., Park, S.J. and Park, M.W., 2008, “Rising Tendencies of both Tidal Elevation and Surge Level at the Southwestern Coast”, *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Eng.*, Vol.20, No.1, 14-24.
- [16] Kang S.W., Jun, K.C., Park, K.S. and Han, S.D., 2009, “Storm Surge Hindcasting of Typhoon Maemi in Masan Bay, Korea”, *J. Marine Geodesy*, 32, 1-14.
- [17] Kwon, J.I., Lee, J.C., Park, K.S. and Jun, K.C., 2008, “Comparison of Typhoon Wind Models Based on Storm Surge Heights Induced by Typhoon Maemi”, *Asia-Pacific J. Atmospheric Sciences*, 44, 443-454.
- [18] Large, W. and Pond, S., 1981, “Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds”, *J. Phys. Oceanogr.* 11, 324-336.
- [19] Lee, J.C., Kwon, J.I., Park, K.S. and Jun, K.C. 2008, “Calculations of Storm Surges, Typhoon Maemi”, *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Eng.*, Vol.20, No.1, 93-100.
- [20] Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M., 2000, “Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan”, *Journal of Oceanography*, 56, 567-581.
- [21] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010, *Development of Storm Surge and Tsunami Prediction System and*

- Estimation of Design Water Level for major ports in Korea, 143.
- [22] Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005, Design Standards of Harbor and Fishing Port(I)(항만 및 어항 설계 기준(상)), 159.
- [23] Song, K.S. and M.B. Ha, 2007, "Disaster Measures for SUPER typhoon(SUPER 태풍에 대비한 재난 대책)", 도로, Korean Society of Road Engineers, Vol.9, No.3, 106-114.
- [24] Thompson, E.F. and Cardone, V.J., 1996, "Practical modeling of hurricane surface wind field", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 122(4), 195-205.
- [25] WDC(World Data Center for Climate, Hamburg), <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Index.jsp>.
- 
- 2012년 5월 17일 원고접수  
2012년 6월 13일(1차), 2012년 9월 10일(2차) 심사수정일자  
2012년 9월 18일 게재확정일자