

## 태풍 힌남노 내습시 부산 해운대 마린시티의 호안 월파 발생 특성

장성철<sup>1</sup> · 윤한삼<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 해양산업개발연구소 전임연구원  
<sup>2</sup>부경대학교 교양교육원 교수

## Characteristics of Wave Overtopping Generation over seawall at Busan Haeundae Marine City During Typhoon Hinnamnor

Sung-Chul Jang<sup>1</sup> and Han-Sam Yoon<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Postdoctoral Research Scientist, Research Center for Ocean Industrial and Development, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

<sup>2</sup>Professor, College of Liberal Arts, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

### 요 약

본 연구는 태풍 힌남노 내습 당시 해운대 마린시티의 호안에 대해 실시간 촬영한 동영상상을 바탕으로 월파 발생 특성에 대해서 고찰하였다. 시간대별 월파 발생 횟수, 월파고 그리고 배후 인도, 도로 등에 발생하는 해수 침수 정도를 연속 촬영된 동영상상을 이용하여 분석하였다. 호안 배후면이 건물로 인해 막혀있는 구역(I area)과 배후 도로로 연결되는 구역(II area)으로 구분하여 월파 현상을 분석한 결과, 해수 침수 정도는 I 구역이 II 구역보다 1.28~1.54배 크다는 것을 알 수 있었다. 이는 I 구역이 파 에너지가 집중되는 돌출형 호안이기 때문으로 생각된다. 또한 태풍 내습 전에는 I 구역과 II 구역이 월파고와 배후 해수 침수 정도가 비슷한 경향을 나타내었으나 태풍 내습시에는 I 구역에서는 높은 월파고에 의한 발생 빈도가 큰 반면에 II 구역에서는 중간 정도의 월파 발생 빈도가 크다는 것을 알 수 있었다. 최종적으로 태풍 내습시 마린시티 호안에서 공간적으로 월파 현상뿐만 아니라 배후지 침수량에도 차이 나는 점을 발견할 수 있었다.

**Abstract** – This study examines the wave overtopping generation characteristics based on real-time video of the seawall of Haeundae Marine City at the time of Typhoon Hinnamnor. The number of occurrences of wave overtopping by time period, the height of wave overtopping, and the degree of seawater inundation occurring on sidewalks and roads in the background were analyzed separately using continuously filmed videos. As a result of analyzing the wave overtopping phenomenon by dividing the backside of the seawall into an area blocked by buildings (area I) and another area connected to the back road (area II), the degree of seawater inundation in area I was about 1.28 to 1.54 higher than that of area II. This is thought to be because Area I is a protruding seawall where wave energy is concentrated. Also, before the typhoon invasion, the wave overtopping height and the degree of seawater inundation in area I and II showed similar trends. However, during typhoon invasion, it was found that the occurrence frequency of high wave overtopping height was high in area I, whereas the frequency of occurrence of medium-sized wave overtopping was high in area II. Finally, it was found that there was a difference not only in the wave overtopping phenomenon but also in the degree of seawater inundation in the hinterland at the seawall when Typhoon attacked.

**Keywords:** Typhoon Hinnamnor(태풍 힌남노), Haeundae Marine City(해운대 마린시티), Seawall(호안), Real-time Video(실시간 동영상), Wave Overtopping(월파)

### 1. 서 론

2022년 제11호 태풍인 힌남노(Hinnamnor)는 기후관측 사상 아열대성 해양이 아닌 북위 25도선 이북에서 발생한 첫 번째 슈퍼태

풍이다. 일본 남쪽 해상에서 태풍으로 발달하여 대만과 중국 방항으로 서진 후, 일본 오키나와 일대에서 급격히 방향을 바꿔서 한반도로 북상하여 우리나라 남동연안에 영향을 주었다.

태풍 힌남노는 2022년 9월 6일 새벽에 경남 거제 일대에 상륙하여 내륙을 통과한 뒤 아침에 동해상으로 빠져나가 저녁에 온대지

\*Corresponding author: yoonhans@pknu.ac.kr

기압으로 소멸하였다. 태풍 경로가 동편화되어 한반도를 통과함으로써 우리나라 대부분의 영역이 안전반원에 위치하였으나 태풍으로 인한 피해는 대부분 해안 지역에 집중되었다. 특히 태풍 내습 당시 부산의 서구 송도 해안, 광안리 수변공원, 해운대 마린시티, 청사포 등 해안가 인근 도로 및 시설물들이 호안 월파 피해를 받았다.

특히 해운대 마린시티는 2003년 매미(Maemi), 2010년 덴무(Dianmu), 2012년 볼라벤(Bolaven)·산바(Sanba), 2016년 차바(Chaba) 등 태풍 내습 때마다 해안도로가 부서지고 인근 주거·상업 시설 지하가 침수되는 등 큰 피해를 입어왔다(Yoon et al., [2017]).

Yoon et al.[2017]은 2016년 태풍 차바(Chaba) 내습시 해운대 마린시티 주변에서 수집된 기상청 파랑관측자료, 유튜브(YouTube)의 촬영 동영상(7개) 및 기존 호안 설계보고서 등의 자료를 수집하여 태풍 내습 파랑 및 월파의 특성, 호안 마루높이에 대한 고찰을 수행한 바 있다. 이를 통해 해운대 마린시티 호안의 경우 태풍의 고파랑 내습시 호안 월파량이 지형적으로 돌출된 호안 및 저평가된 천단고, 수심 제약에 의한 중복파의 쇄파조건, 대기 바람에 의한 파랑 응력에너지 증가로 인해 호안 설계 당시 허용 월파량 0.01 m<sup>3</sup>/m·sec을 초과하여 발생한 것으로 보고한 바 있다.

하지만 Yoon et al.[2017]의 연구에 사용된 유튜브 동영상은 인근 주민들이 태풍 내습시 일시적이고 단편적인 목적에서 촬영하여 공유한 것으로 태풍 내습시의 시공간적으로 연속적인 호안 월파 현상을 분석함에는 미흡하였다. 그러나 이번 태풍 힌남노 내습시에는 KBS, MBC 등의 주요 방송국에서 약 12시간 동안의 호안 월파 장면을 고정 지점에서 촬영하여 보도함으로써 호안 월파 장면을 실시간으로 확인할 수 있었다.

이에 본 연구에서는 KBS와 MBC 방송국이 해운대 마린시티 호안에 대해 실시간 촬영한 동영상상을 유튜브에서 수집하여 태풍 힌남노 내습시 호안을 넘어 월파된 현상에 대해서 고찰하고자 하였

다. 연속 촬영된 동영상으로부터 시간대별 월파 발생 횟수, 월파 정도를 크기별 상/중/하로, 배후 인도 및 도로 등에 발생하는 해수의 침수 정도를 대/중/소로 구분하여 분석하였다. 이와 더불어 태풍 힌남노 내습 당시의 주변 해역에서 관측된 해양파랑 발생 자료, 풍향과 풍속의 지역상세 기상자료와 비교함으로써 해운대 마린시티 호안 월파 상황을 추정하고 그 특징을 살펴보고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구에서는 태풍 힌남노 내습시 부산항 인근의 기상 및 해상 물리환경특성을 분석하기 위해 육상 4개 정점의 기상 상세 관측 자료와 1개 정점의 해상 파고부이 관측 자료를 수집하였다.

Fig. 1(A)에서 육상 4개 정점은 기상청(KMA[2022])의 지역별 상세 관측자료(St.W1(영도), St.W2(오륙도), St.W3(부산남구), St.W4(해운대))이고 해상 1개 정점은 날찌누리로부터 오륙도에 설치된 파고부이(St.W2) 자료이다. St.W1~St.W4의 각 관측 정점의 자료는 태풍 힌남노 내습 시기인 2022년 9월 5일 18시부터 6일 10시까지의 30분 간격(파고부이 자료는 1시간 간격)의 풍속, 풍향 및 대기압의 3가지 기상 요소이며 파고부이(St.W2)에서의 자료는 파고(최대 및 유의파고, 주기) 및 파향의 2가지 해양 요소이다. 그리고 태풍 내습시 조위 변화는 국립해양조사원(KHOA[2022])의 실시간 해양 관측 정보 시스템(Korea Ocean Observing and Forecasting System, KOOFS)을 이용하여 부산 조위관측소에서 실관측된 조위와 폭풍해일고를 분석하였다.

또한 태풍 힌남노 내습 당시 해운대 마린시티 호안을 촬영한 언론 보도 영상을 유튜브로부터 수집하여 호안 구간으로 내습된 파랑의 월파 상황을 분석하였다. 해석에 사용한 동영상의 촬영 위치는 Fig. 1(B)의 C1, C2와 같이 부산 마린시티의 호안 지역이다. C1지점에

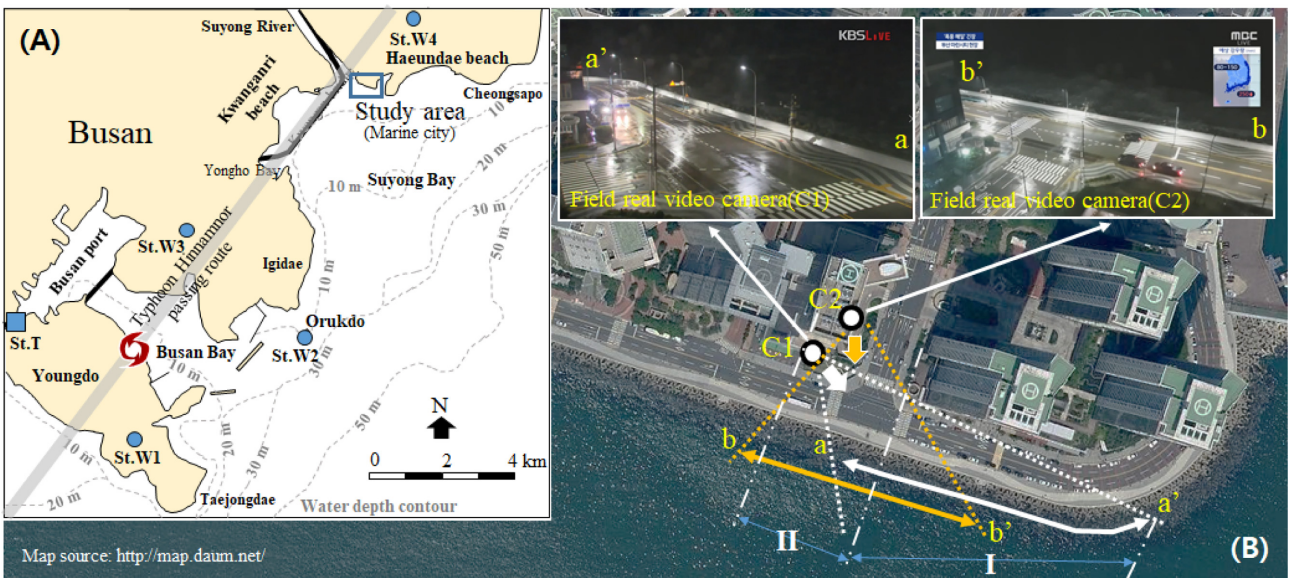


Fig. 1. The location of land-ocean observation stations (1) and the position of the camera that took the target seawall (2).

서의 촬영 영상(YouTube, [2022a])은 KBS 방송국에서 제공한 것으로 9월 5일 18시부터 9월 6일 6시까지 총 12시간의 영상 자료를 제공하며 Fig. 1(B)의 a~a'구역의 호안 및 배후지역을 관찰할 수 있다. 그리고 C2지점의 촬영 영상(YouTube, [2022b])은 MBC 방송국에서 제공한 것으로 9월 5일 22시부터 9월 6일 10시까지 총 12시간의 영상 자료를 제공하며 Fig. 1(B)의 b~b'구역의 호안 및 배후지역을 관찰할 수 있다. 물론 카메라가 관찰하는 호안 영역의 길이가 I 구역(a~a')이 II 구역(b~b')보다 크다는 점을 감안하면 I 구역에서 월파 현상이 더 많을 것으로 예상할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 호안 영역의 길이 차이에 따른 영향은 고려하지 않기로 하였다.

본 연구에서는 전술한 촬영 동영상으로부터 시간대별 월파 발생 횟수 그리고 월파의 발생 정도를 상/중/하로 구분하여 분석하였다. 월파의 발생 정도는 2가지 관점에서 분석하였다. 먼저 호안 마루(천단)를 넘는 해수에 대해서 30분 간격으로 그 월파 발생 횟수를 계산하여 합산하였다. 또한 그 월파고 크기는 호안 배후 가로등의 높이( $H_M \approx 6$  m)를 기준으로 월파시 파의 처오름 높이( $\zeta$ )에 따라 상( $H_H, \zeta > H_M$ )/중( $H_M, 0.5 H_M < \zeta < H_M$ )/하( $H_L, \zeta < 0.5 H_M$ )로 평가하였다(Fig. 2(A)). 다음으로는 호안 마루(천단)를 넘어온 해수에 대해서 배후 인도 및 도로 등에 발생하는 해수의 침수 정도를 대( $Q_L$ )/중( $Q_M$ )/소( $Q_S$ )로 구분하여 평가하였다(Fig. 2(B)). 여기서 배후

지 침수 정도는 호안 마루를 넘는 해수가 배후 인도와 반대편 차도에 도달하는 경우를 대( $Q_L$ ), 해수가 배후 인도까지만 도달하는 경우를 중( $Q_M$ ), 호안 마루 인근에서 월파만 발생하고 배후로 침수가 발견되지 않는 경우를 소( $Q_S$ )로 설정하였다.

또한 해운대 마린시티와 같이 연속된 호안이라 할지라도 구조물의 마루높이, 외해 입사파랑의 비선형성 및 주기, 구조물과 이루는 입사각, 경사입사와 내습시 입사파와 반사파의 상호작용에 의한 증폭과 발생 여부, 호안 사면상의 쇄파 유무, 호안 마루상의 바람의 방향 및 세기 등에 따라서 호안 월파 현상이 일어날 수도 그렇지 않을 수도 있다.

하지만 상기 2개의 동영상으로 전술한 다양한 요인들을 구분해서 해석하기란 불가능하다. 이에 본 연구에서는 동영상에 촬영한 전체 영역 중에서 호안 배후면이 건물로 인해 막혀있는 구역(I area)과 배후 도로로 연결되는 구역(II area)으로 구분하여 월파 현상을 분석하고자 하였다. 이는 대상 지역의 배후면에 위치한 고층 건물로 인해 빌딩풍이 발생할 경우 호안 월파에 어떠한 작용을 할 것인지 추정해 보기 위한 것이다. 일반적으로 기압이 높은 곳에서 낮은 곳으로 공기가 이동하며 2배 이상의 풍속, 급강하, 소용돌이 등을 일으키는 현상이 벤투리(Venturi) 효과인데 II 구역이 호안 월파 발생 가능성 및 빈도 등에서 I 구역보다 그 효과가 더 크게 나타날 가능성이 있기 때문이다.

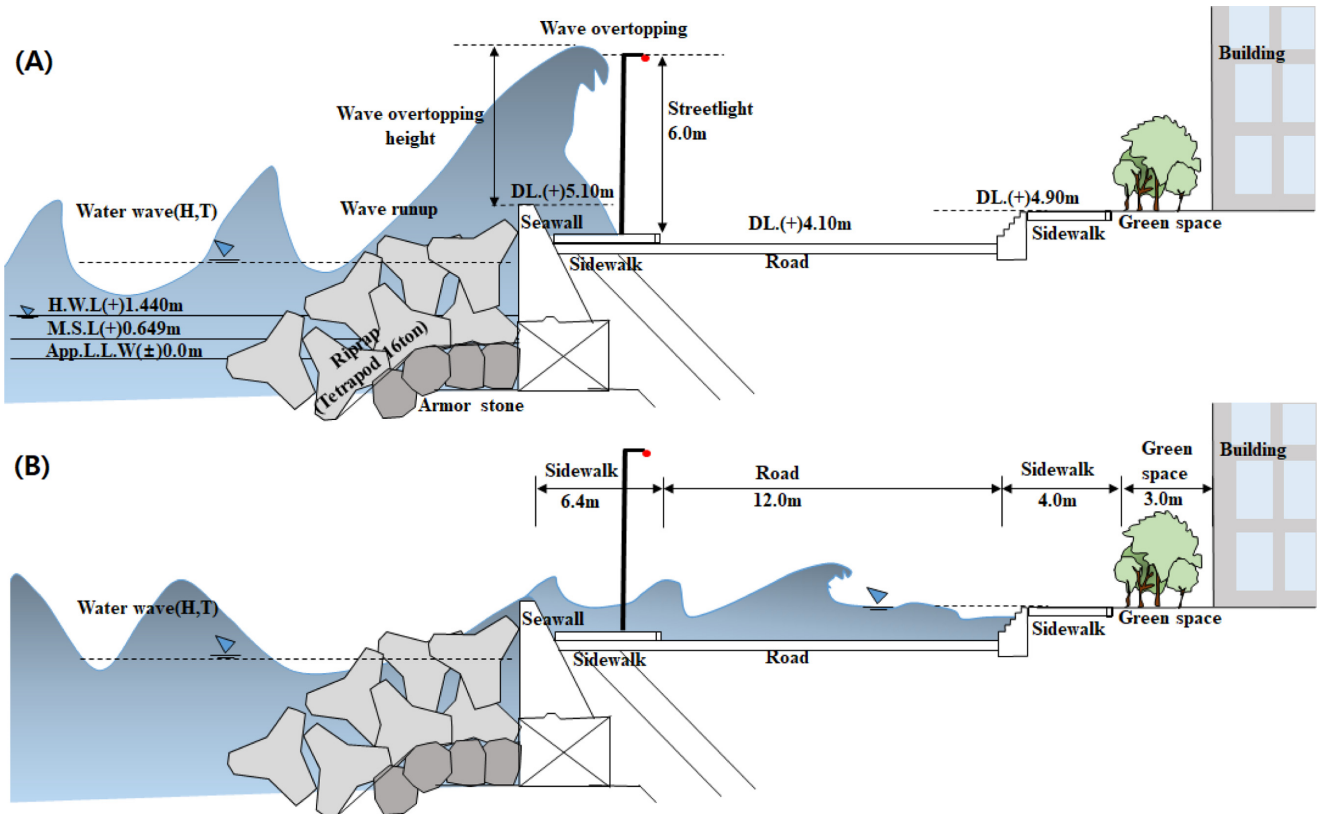


Fig. 2. Sketch of the sea water level change induced by wave overtopping around the seawall at 'Haeundae Marine City' during the passing of typhoon.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 대기 및 해양환경 조건

부산 연안의 태풍 힌남노 내습시 대기 및 해양물리환경 변화를 알아보기 위하여 2022년 9월 5일부터 16시간의 시간경과에 따른 대기 기상자료와 해양의 해면기압, 바람장(풍속, 풍향), 조위 그리고 입사 파고를 살펴보았다. Table 1은 태풍 힌남노 내습시 6일 2시부터 7시까지의 시간경과에 따른 대기 기상자료와 해양 상황을 정리한 결과이다. 표에서 (-)로 표기된 부분은 조사 정점에 관측 센서가 없거나 태풍 내습 당시 결측된 것을 의미한다.

먼저 Fig. 3은 태풍 힌남노 내습시 각 관측 정점에서 계속되어진 해면기압을 시계열로 나타낸 것이다. 태풍이 부산 연안을 통과할

시 St.W2(오륙도)에서 6일 6시에 해면기압이 958.1 hPa으로 관측 되었다. 특히 St.W2의 매분 관측 기록을 살펴보면 5시 53분에 중심기압 955.9 hPa이 기록되어 태풍 내습시 부산 연안 관측치 중 가장 낮은 해면기압을 기록하였다.

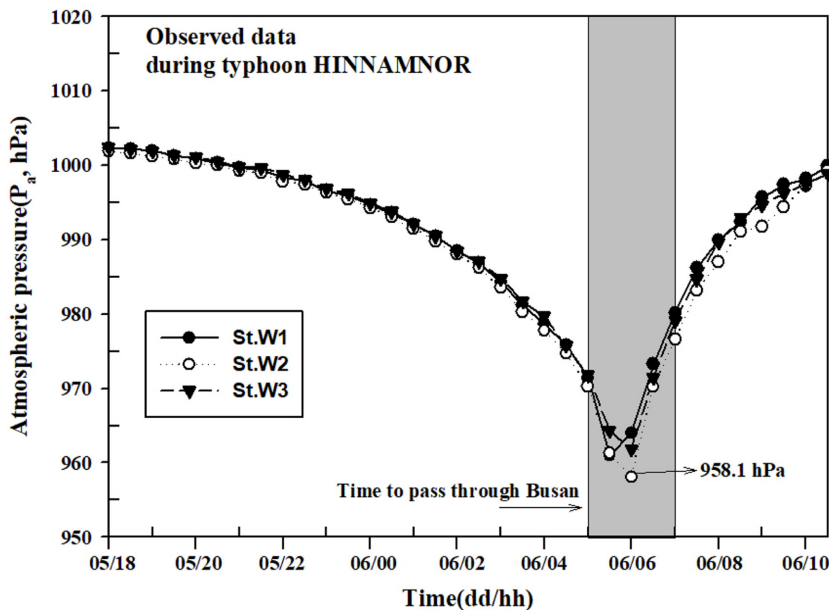
Fig. 4는 태풍 힌남노 내습시 각 관측 정점별 풍속 시계열을 나타낸 것이다. St.W1~St.W4에서의 풍속은 태풍이 북상하는 과정에서 증가하는 양상을 보였다. 부산 연안에 태풍이 통과하던 5시 30분에 St.W2(오륙도)에서 28.5 m/s, St.W1(영도)에서 16.0 m/s의 최대 풍속이 나타났는데 이는 두 정점이 해상과 육상의 관측소 차이, 주변 산이나 건물의 지형적 영향, 관측기기의 차이 등으로 다소 큰 오차를 보이는 것으로 생각된다.

이상의 그림에서 태풍 중심이 6일 6시경 부산 연안을 통과하면서

**Table 1.** Hourly meteorological and ocean wave data measured each observation station in Busan coast during the passing of typhoon Hinnamnorr

Time	Busan port		St.W1			St.W2			St.W3			St.W4					
	$W_L$	Mea./Pre.	$P_a$	$V_w$	$V_d$	$P_a$	$V_w$	$V_d$	$H_{max}$	$H_{1/3}$	$T_w$	$P_a$	$V_w$	$V_d$	$P_a$	$V_w$	$V_d$
02:00	135	/ 80	988.5	6.9	66.7	988.1	10.6	80.5	5.1	3.9	6.4	988.5	7.7	78.2	-	4.5	45.7
02:30	119	/ 84	986.9	10.2	70.5	986.2	16.8	85.6	-	-	-	987.1	5	92.5	-	3.9	58.1
03:00	163	/ 88	984.3	6.7	66.4	983.6	17.6	83.2	6.7	4.3	6.8	984.8	5.1	77.3	-	5	21.9
03:30	176	/ 91	981.2	13.5	81.2	980.3	22.5	86.3	-	-	-	981.7	11.1	91.2	-	6.9	49.5
04:00	152	/ 93	978.7	14.5	63.4	977.8	22.7	84.5	7	5.1	6.8	979.7	7	95.7	-	3.9	55.8
04:30	157	/ 94	975.9	6.7	77.1	974.7	27.3	93.6	-	-	-	975.8	<b>12.8</b>	96.7	-	4.8	59.6
05:00	<b>213</b>	<b>/ 93</b>	971.4	7.5	85.9	970.3	23.6	98.1	<b>12.1</b>	<b>7.6</b>	8.1	971.8	10.1	107	-	2.8	104.9
05:30	174	/ 91	<b>961</b>	<b>16</b>	86.3	961.3	<b>28.5</b>	99.8	-	-	-	964.3	12.7	93.1	-	<b>7.4</b>	185.6
06:00 (05:53)	161	/ 88	964	6.9	212.1	<b>958.1</b> <b>(955.9)</b>	22.4	267.2	-	-	9	<b>961.8</b>	7.5	294.4	-	1.7	356.1
06:30	102	/ 84	973.3	6.5	243.6	970.2	21.2	249.4	-	-	-	971.4	7.4	264.9	-	9.1	244.9
07:00	59	/ 79	980.2	6.6	275.5	976.6	24.3	268.6	-	-	7.6	979.1	10.2	286.3	-	5.2	313.9

※  $W_L$ : Tidal water level (cm),  $P_a$ : Atmospheric pressure(hPa),  $V_w$  &  $V_d$ : Wind velocity (m/s) and direction (deg.),  $H_{max}$ : Maximum wave height(m),  $H_{1/3}$ : Significant wave height(m),  $T_w$ : Mean wave period (sec)



**Fig. 3.** Time series of fluctuations in the atmospheric pressure of sea surface in the Busan coast during the passing of typhoon Hinnamnorr.



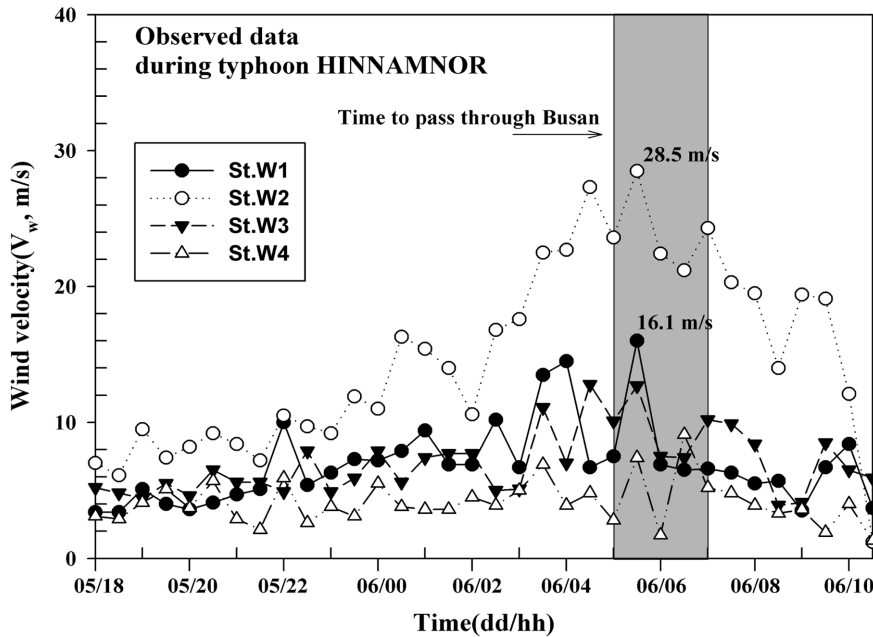


Fig. 4. Time series of fluctuations in the wind velocity measured each locations in the Busan coast during the passing of typhoon Hinnamnor.

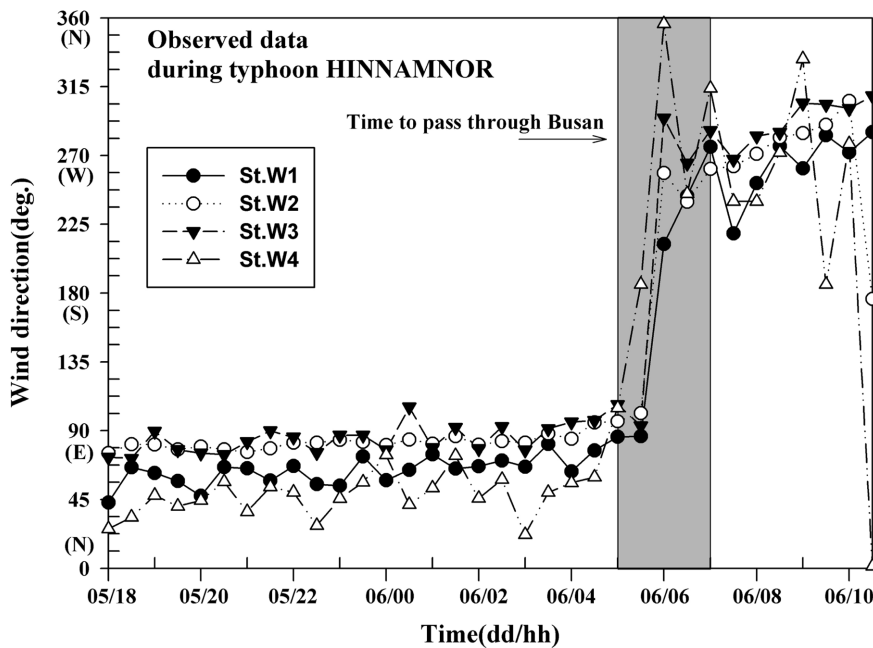


Fig. 5. Time series of fluctuations in the wind direction measured each locations in the Busan coast during the passing of typhoon Hinnamnor.

해수면에 직접적인 영향을 주었을 것으로 추정된다. 태풍 중심이 통과한 뒤에는 기압이 다시 가파르게 증가하고, 풍속도 빠르게 감소하는 등 기상 환경이 빠르게 정상으로 회복되는 전형적인 특성을 유지하였다.

그리고 Fig. 5는 태풍 힌남노 내습시 관측 정점별 풍향의 시계열을 나타낸 것이다. 태풍이 부산 연안에 도달하기 전인 5일 18시의 각 관측 정점별 풍향 분포 특징을 살펴보면 태풍 내습 전에는 대부분

정점에서 NE 방향의 바람이 불다가 태풍 내습 시점에서(5시 30분)는 급격히 W 방향으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 태풍이 북상하는 과정에서 부산 지역이 태풍 중심의 오른쪽 반원(위험반원, dangerous semicircle)에서 왼쪽 반원(가항반원 또는 안전반원, navigable semicircle)으로 변하는 위치에 있기 때문에 일어나는 현상이라 할 수 있다. 이는 해양환경에도 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

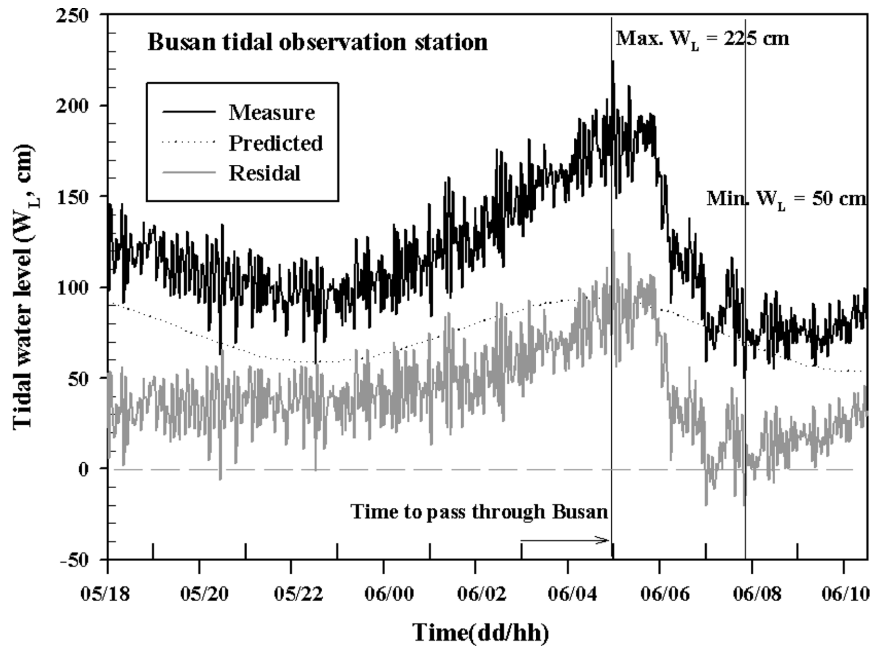


Fig. 6. Time series of tide change in the Busan coast during the passing of typhoon Hinnamnor.

Fig. 6은 태풍 힌남노 내습시 5일 18시부터 16시간의 시간경과에 따른 부산 조위관측소에서 관측된 실측 조위와 예측 조위를 나타내고 있다. 여기서 검정 실선은 실측 조위, 점선은 예측 조위 그리고 회색 실선은 잔차(관측값-예측값)를 나타낸다. 이를 살펴보면, 부산 조위관측소의 예측 조위는 6일 5시에 93 cm가 예측되었으나 이번 태풍 힌남노 내습시에 예측 조위보다 42% 증가된 225 cm가 관측되었다. 이는 폭풍 해일고(Storm surge)가 최대 132 cm 만큼 증

가하여 태풍 힌남노의 영향으로 부산 연안의 조위가 상승하였음을 알 수 있다. 그리고 태풍의 영향을 벗어나는 6일 7시 이후에는 잔차가 0에 가까워지는 것을 확인할 수 있으며 Fig. 3에서 해면기압의 정상화 시점과 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 7과 Fig. 8은 태풍 힌남노 내습시 St.W2(오륙도)에서 계측된 1시간 간격의 파랑 관측 자료를 나타내고 있다. 6일 5시에 최대 파고 12.1 m, 유의파고 7.6 m, 평균 파고 3.8 m로 계측되었

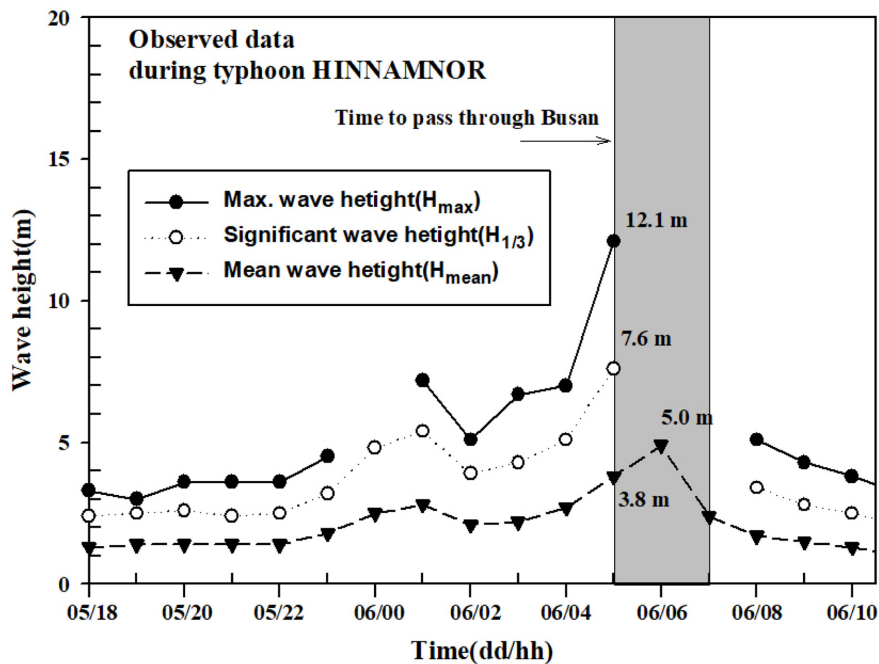


Fig. 7. Time series of fluctuations in the wave height measured at St.W2 during the passing of typhoon Hinnamnor.

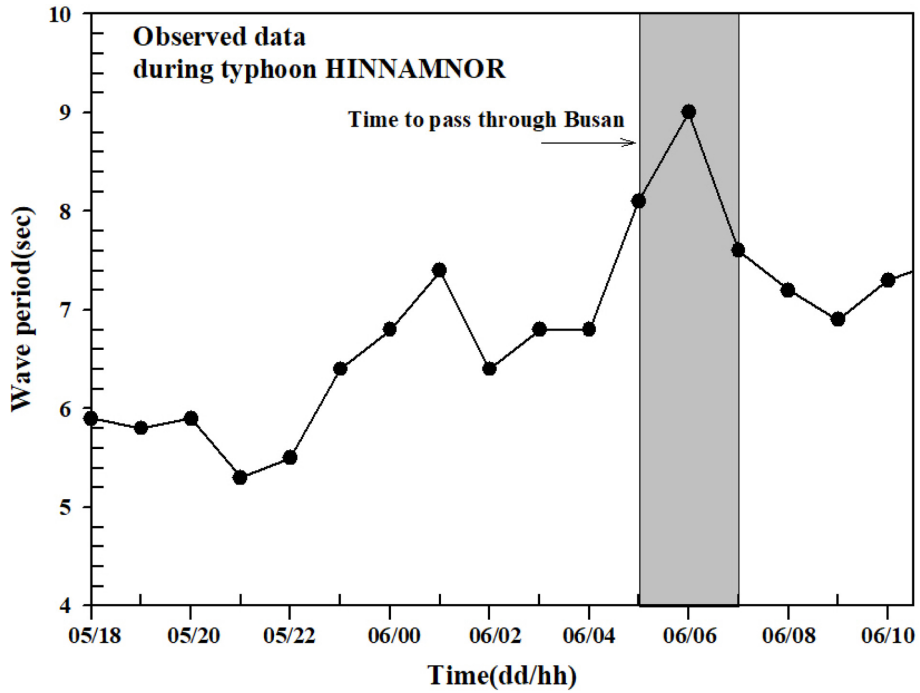
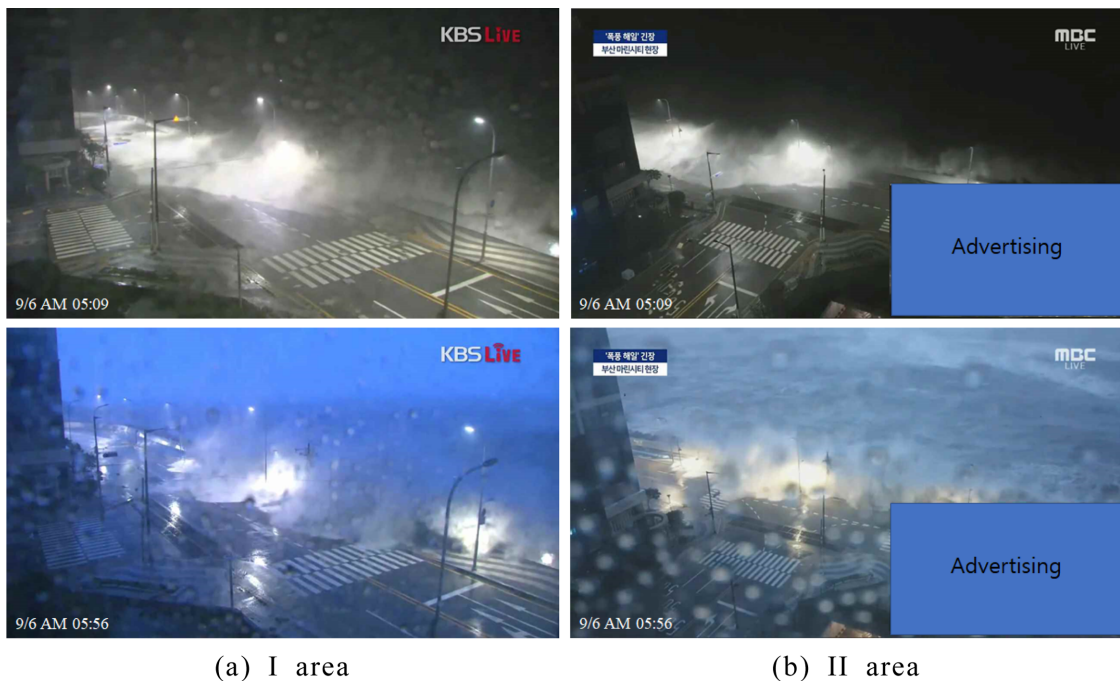


Fig. 8. Time series of fluctuations in the wave period measured at St.W2 during the passing of typhoon Hinnamnor.

으며 이때 평균 파주기는 8.1 sec이었다. 가장 파고가 높을 것으로 예상되는 6시의 경우(평균 파고는 5.0 m) 결측되어 정확한 값은 알 수 없으나 5시의 경우보다 더 컸을 것으로 추정된다.

이상의 결과를 태풍 힌남노 내습 기간인 6일 2시부터 7시까지의 30분 간격(파고 부이 자료는 1시간 간격)의 조위, 해면기압, 풍속,

풍향, 파고(최대 및 유의파고, 주기) 자료를 정리하면 Table 1과 같다. 표에서 대체적으로 모든 요소들이 최댓값을 보이는 시간은 6일 4시 30분부터 6시까지 약 1시간 30분 동안에 발생하는 것을 알 수 있다. 태풍 내습시 부산 연안의 최대 조위가 관측된 시간은 4시 59분이었다.



(a) I area

(b) II area

Fig. 9. The video images of wave overtopping over seawall ((a) I area and (b) II area) at Busan Haeundae Marine City during passing of typhoon Hinnamnor.

3.2 호안 월파 출현 빈도

Fig. 1(B)의 동영상 촬영 위치인 C1, C2에서 살펴본 해운대 마린시티 호안에서의 시간대별 월파 발생 횟수 그리고 월파의 발생 정도를 상/중/하 또는 대/중/소로 구분하여 분석하였다. Fig. 9는 Fig. 1(B)의 C1, C2에서 촬영한 동영상의 이미지 영상으로 6일 05시 09분과 56분에 해당하는 호안 월파 장면이다.

결과적으로 Table 2는 태풍 힌남노 내습시 5일 18시부터 6일 9시까지의 시간경과에 따른 I 구역과 II 구역에서의 월파 상황을 정리한 것이다. 또한 Fig. 10의 경우 부산 조위관측소의 조위 관측 시계열과 호안 구간별로 월파 발생 횟수를 나타낸 시계열 그래프이다.

Table 2에서와 같이 태풍이 내습하는 시간동안에 I 구역에서는 총 809회, II 구역에서는 총 472회의 월파가 발생하였다. I 구역과 II 구역을 모두 합하면 1,281회이고 I 구역이 II 구역보다 337회만

큼 더 많이 월파가 발생하였음을 알 수 있다. 가장 많은 월파가 발생한 시간은 태풍의 중심이 부산 연안에 상륙하여 해변기압이 가장 낮은 때인 6일 6시에 발생하였는데 이때 마린시티 호안의 월파는 I 구역에서  $H_{sum}=111$ 회, II 구역에서  $H_{sum}=72$ 회로 총 183회 관측되었다.

그리고 Fig. 10을 살펴보면 시간 경과에 따라서 호안 월파 발생 횟수는 조위 증가와 더불어 증가하는 경향을 보이고 있는데 태풍의 영향으로 조위가 상승된 4시 이후에는 호안 월파 횟수가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 태풍의 중심이 부산 연안에 상륙한 6시경에 최대치를 보이고 7시 이후에는 월파 출현 빈도가 절반 이하로 낮아졌으며 9시 이후에는 월파가 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

특징적으로 I 구역에서 5일 21시( $H_{sum}=17$ 회), 24시( $H_{sum}=32$ 회),

Table 2. The number of wave overtopping occurrences over the seawall at Haeundae Marine City during the passing of typhoon Hinnamnor

Day	Time	I area							II area							Calculation		
		$H_H$	$Q_L$	$H_M$	$Q_M$	$H_S$	$Q_S$	$H_{sum}(a)$	$H_H$	$Q_L$	$H_M$	$Q_M$	$H_S$	$Q_S$	$H_{sum}(b)$	a+b	a-b	b/a(%)
5/Sep. /2022	18:32	0	0	2	2	8	8	10	0	0	2	2	1	1	3	13	7	30.0
	19:02	0	0	0	3	10	7	10	0	0	0	0	1	1	1	11	9	10.0
	19:32	0	0	3	3	7	7	10	0	0	1	0	2	3	3	13	7	30.0
	20:02	2	1	1	2	5	5	8	1	1	4	3	1	2	6	14	2	75.0
	20:32	0	0	5	5	4	4	9	0	0	0	0	1	1	1	10	8	11.1
	21:02	1	1	6	7	10	9	17	0	0	0	0	5	5	5	22	12	29.4
	21:32	0	0	2	2	3	3	5	0	0	0	0	2	2	2	7	3	40.0
	22:02	0	0	0	0	9	9	9	0	0	0	0	0	0	0	9	9	0.0
	22:32	0	1	4	4	9	8	13	0	0	0	0	2	2	2	15	11	15.4
	23:02	0	0	2	2	4	4	6	0	0	1	0	0	1	1	7	5	16.7
23:32	0	0	9	7	15	17	24	0	0	1	1	3	3	4	28	20	16.7	
6/Sep. /2022	00:02	2	2	9	9	21	21	32	1	1	3	5	7	5	11	43	21	34.4
	0:32	0	0	9	9	7	7	16	0	0	2	1	0	1	2	18	14	12.5
	1:02	0	0	1	1	7	7	8	0	0	0	1	3	2	3	11	5	37.5
	1:32	0	0	2	0	7	9	9	0	0	1	0	0	1	1	10	8	11.1
	2:02	0	0	13	15	27	25	40	0	0	2	2	11	11	13	53	27	32.5
	2:32	5	4	17	18	13	13	35	1	1	4	4	4	4	9	44	26	25.7
	3:02	0	2	11	9	8	8	19	0	3	7	4	8	8	15	34	4	78.9
	3:32	1	1	9	9	9	9	19	0	0	1	1	6	6	7	26	12	36.8
	4:02	1	4	23	20	12	12	36	0	2	10	8	7	7	17	53	19	47.2
	4:32	1	12	26	22	12	5	39	1	16	19	11	17	10	37	76	2	94.9
	5:02	3	24	37	31	20	5	60	2	22	38	24	10	4	50	110	10	83.3
	5:32	4	30	59	46	16	3	79	1	20	42	36	21	8	64	143	15	81.0
	6:02	19	46	63	54	29	11	111	4	36	46	35	22	1	72	183	39	64.9
	6:32	12	14	34	38	20	14	66	7	15	29	23	16	14	52	118	14	78.8
	7:02	12	12	18	18	16	16	46	10	10	14	14	12	12	36	82	10	78.3
	7:32	2	2	12	12	19	19	33	3	3	15	15	10	10	28	61	5	84.8
	8:02	3	3	8	8	9	9	20	2	2	2	2	9	9	13	33	7	65.0
	8:32	0	0	4	4	9	9	13	1	1	5	5	3	3	9	22	4	69.2
	9:02	0	0	2	2	4	4	6	0	0	1	1	3	3	4	10	2	66.7
9:32	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	2	0	100.0	
Total sum		68	159	391	362	350	288	809	34	133	250	198	188	141	472	1,281	337	

※  $H_H, H_M, H_S$ : The number of wave overtopping occurrences according to the size of the wave overtopping height and subscripts H, M, and S mean High, Medium, and Small, respectively;  $Q_L, Q_M, Q_S$ : The number of wave overtopping occurrences according to the degree of seawater inundation in the hinterland and subscripts L, M, and S mean Large, Medium, and Small, respectively



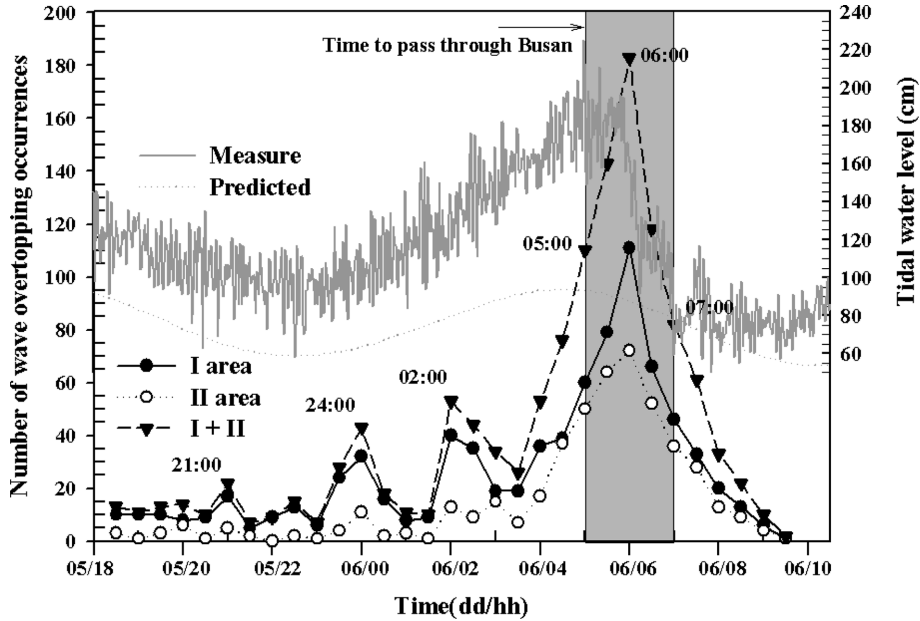


Fig. 10. Time series of tide changes and number of wave overtopping occurrences over the seawall at ‘Haeundae Marine City’ during the passing of typhoon Hinnamnor.

6일 2시( $H_{sum}=40$ 회)에 호안 월파가 일정한 패턴으로 증가하는 경향을 보이고 있으나 이에 반해 II 구역에서는 5일 21시( $H_{sum}=5$ 회), 24시( $H_{sum}=11$ 회), 6일 2시( $H_{sum}=13$ 회)로서 상대적으로 적은 횟수의 월파 상황을 보이고 있어 대조를 보이고 있음을 알 수 있다.

더구나 5일 20시~24시의 경우 해상 조위 상태가 저조시에 해당함에도 불구하고 호안 월파가 일부 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 4의 해상 풍속의 시간별 변화와 함께 살펴보면 해면기압, 풍향 및 파랑의 영향보다는 돌풍(바람 강도의 강화)에 의한 영향으로 추측된다.

### 3.3 호안 월파 크기

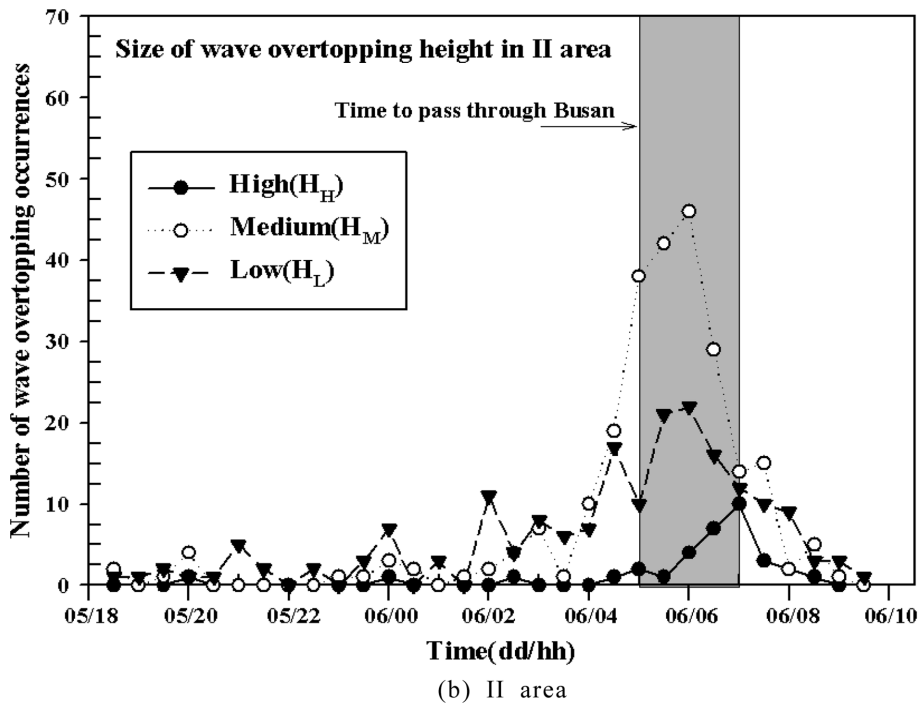
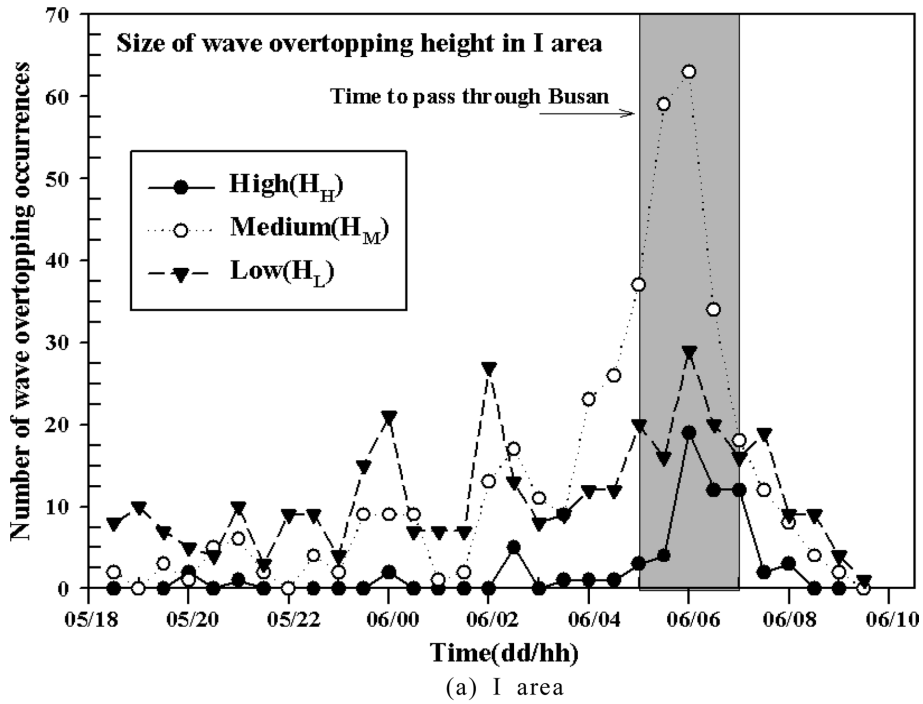
본 연구에서는 태풍 힌남노 내습시 부산 해운대 마린시티 호안에서 발생한 월파의 크기를 월파고(파의 처오름 높이)와 배후 침수량의 2가지 관점으로 평가하여 분석하였다.

먼저 Fig. 11은 각 대상 구역별 호안 마루(천단)를 넘는 해수에 대하여 월파고(파의 처오름 높이)를 호안 배후 가로등의 높이를 기준으로 상( $H_H$ )/중( $H_M$ )/하( $H_L$ )로 나누어 분석하였다. 그 결과를 그림에서 살펴보면 태풍 내습시 호안 월파의 출현빈도는 증가하는 경향으로 나타났으며 그 중 호안 배후 가로등의 높이의 절반보다 높은 월파고( $H_M$ )를 가지는 월파의 빈도가 큰 것으로 나타났다. 가장 많은 월파가 발생한 시간인 6일 6시에 호안의 월파는 I 구역에서 상( $H_H$ ) 19회, 중( $H_M$ ) 63회, 하( $H_L$ ) 29회로 나타났으며 II 구역에서는 상( $H_H$ ) 4회, 중( $H_M$ ) 46회, 하( $H_L$ ) 22회로 관측되었다. 또한 I 구역이 II 구역보다 월파 횟수가 1.54배(64.9%) 많은 상황임에도 불구하고 가로등 높이(약 6 m)보다 높은 월파고( $H_H$ )를 가지는 월파는 I 구역이 II 구역보다 4.75배로 관측되었다. 이는 I 구역이 파 에너지가

집중되는 돌출형 호안으로 파의 중첩에 의한 고파랑의 파가 내습되어 발생된 것으로 판단된다.

다음으로 Fig. 12는 각 구역별 호안 마루(천단)를 넘어온 해수에 대해서 배후 인도 및 도로에 발생하는 해수 침수 정도를 대( $Q_L$ )/중( $Q_M$ )/소( $Q_S$ )로 구분하여 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 대체적으로 태풍 내습시 발생한 월파의 침수 정도가 차도를 넘어 건물 인도까지 도달하는 침수의 발생 빈도가 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 그리고 가장 많은 월파가 발생한 시간인 6일 6시에 호안의 월파는 I 구역에서 대( $Q_L$ ) 46회, 중( $Q_M$ ) 54회, 소( $Q_S$ ) 11회로 나타났으며 II 구역에서는 대( $Q_L$ ) 36회, 중( $Q_M$ ) 35회, 소( $Q_S$ ) 1회로 관측되었다. 배후 인도 및 도로에 발생하는 해수 침수 정도는 I 구역이 II 구역보다 대( $Q_L$ )의 경우 1.28배, 중( $Q_M$ )의 경우 1.54배 크다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과를 바탕으로 태풍 힌남노 내습시 부산 연안에 도달하기 전인 6일 5시 이전에는 월파고와 배후 해수 침수 정도가 비슷한 경향을 나타내었으나 태풍이 부산 연안에 도달한 5시 이후에는 I 구역에서는 높은 월파고( $Q_L$ )에 의한 발생 빈도가 큰 반면에 II 구역에서는 중간( $Q_M$ ) 정도의 월파 발생 빈도가 크다는 것을 알 수 있었다. 호안 공간상으로 월파 현상은 상대적으로 편차를 보이거나 배후 침수량이 차이 나는 월파 발생 특성을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 태풍 내습 당시 Fig. 7 및 Fig. 8에서 살펴볼 수 있는 것과 같이 높은 파고와 장주기 성분을 가진 파랑 내습에도 불구하고 Fig. 5에서 알 수 있듯이 태풍 진행 경과에 따라 E 계열에서 N~W 계열로의 풍향이 급격하게 변화함에 따라서 호안을 넘는 해수에 대해서 반대 방향의 바람 작용에 따른 에너지 소산 작용으로 생각할 수 있다.



**Fig. 11.** The evaluation of the number of wave overtopping occurrences over seawall ((a) I area and (b) II area) at Busan Haeundae Marine City according to the wave overtopping height during passing of typhoon Hinnamnor.

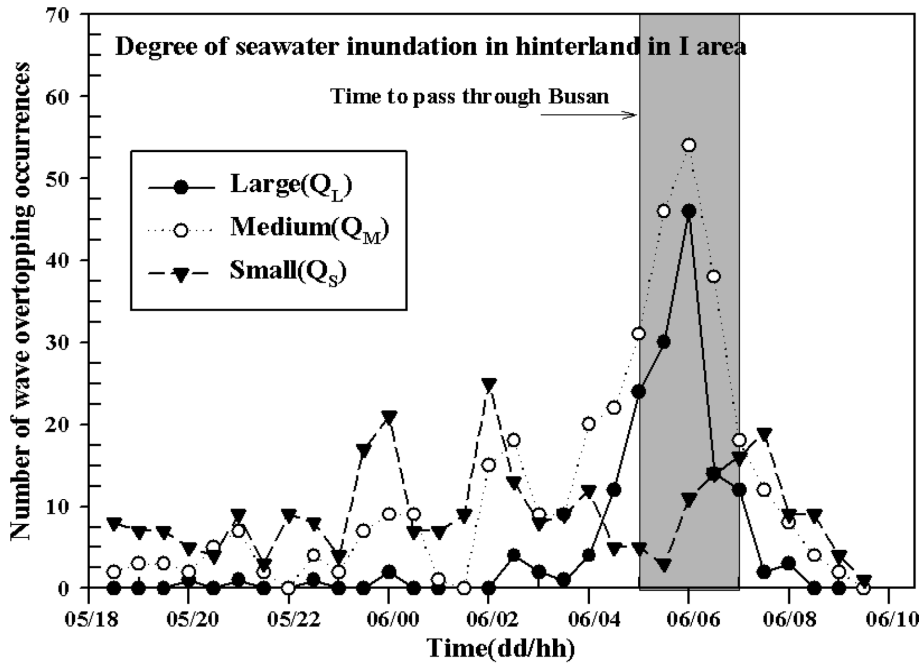
**3.4 마린시티의 호안 월파 발생 특성**

해운대 마린시티 호안에 대해 KBS와 MBC 방송국이 실시간 촬영한 동영상으로부터 태풍 힌남노 내습시 호안을 넘어 월파된 현상에 대해서 고찰한 결과를 정리하면 다음과 같다.

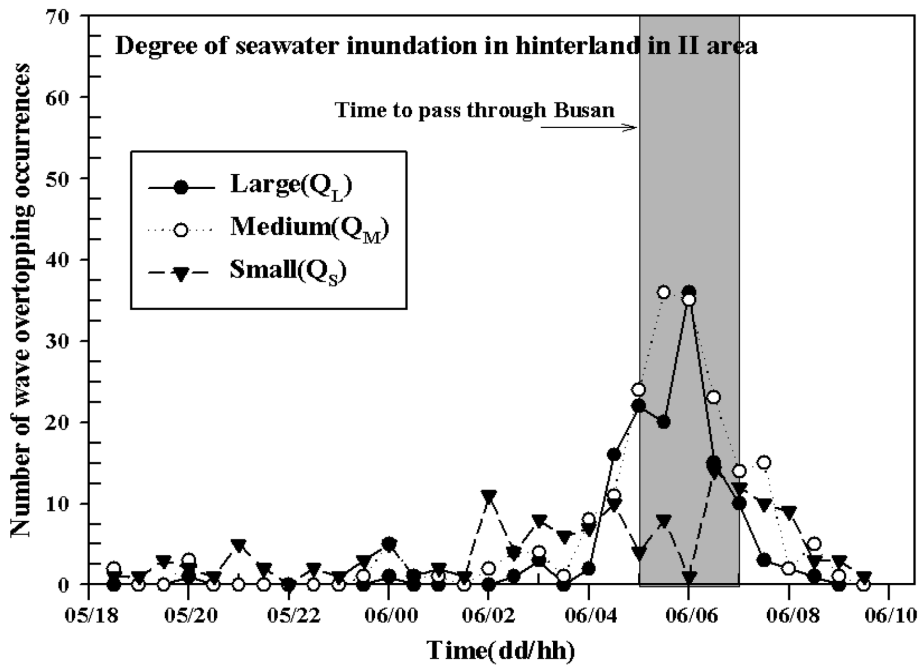
태풍 힌남노 내습 기간인 6일 2시부터 7시까지의 30분 간격(파고 부이 자료는 1시간 간격)의 조위, 해면기압, 풍속, 풍향, 파고(최대 및 유의파고, 주기) 자료로부터 태풍의 영향으로 대체적으로 모

든 요소들이 최댓값을 보이는 시간은 6일 4시 30분부터 6시까지 약 1시간 30분 동안에 발생하는 것을 알 수 있다.

이를 바탕으로 촬영 동영상으로부터 확인한 가장 많은 월파가 발생한 시간은 태풍의 중심이 부산 연안에 상륙하여 해면기압이 가장 낮은 때인 6일 6시에 발생하였다. 시간 경과에 따라서 호안 월파 발생 횟수는 조위 증가와 더불어 증가하는 경향을 보이고 있는데 태풍의 영향으로 조위가 상승된 4시 이후에는 호안 월파 횟수



(a) I area



(b) II area

Fig. 12. The evaluation of the number of wave overtopping occurrences over seawall ((a) I area and (b) II area) at Busan Haeundae Marine City according to the degree of seawater inundation in the hinterland during passing of typhoon Hinnamnor.

가 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다.

동영상이 촬영한 전체 영역 중에서 호안 배후면이 건물로 인해 막혀있는 구역(I area)과 배후 도로로 연결되는 구역(II area)으로 구분하여 월파 현상을 분석한 결과, I 구역이 파 에너지가 집중되는 돌출형 호안으로 파의 중첩에 의한 고파랑의 파가 내습되어 발생된 것으로 판단된다. 또한 배후 인도 및 도로에 발생하는 해수 침수 정도는 I 구역이 II 구역보다 대( $Q_L$ )의 경우 1.28배, 중( $Q_M$ )의 경

우 1.54배 크다는 것을 알 수 있다.

이는 대상 지역의 배후면 고층 건물로 인해 빌딩풍이 발생할 경우 호안 월파에 어떠한 작용을 할 것인지에 대해서 전술한 바와 같이 풍속, 급강하, 소용돌이 등을 일으키는 현상인 벤투리(Venturi) 효과가 클 것으로 예상되었던 II 구역이 예측과는 달리 I 구역에서 호안 월파 발생 및 빈도가 더 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 바탕으로 태풍 힌남노 내습시 부산 연안에 도달

하기 전인 6일 5시 이전에는 I 구역과 II 구역이 월파고와 배후 해수 침수 정도가 비슷한 경향을 나타내었으나 태풍이 부산 연안에 도달한 5시 이후에는 I 구역에서는 높은 월파고( $Q_I$ )에 의한 발생 빈도가 큰 반면에 II 구역에서는 중간( $Q_M$ ) 정도의 월파 발생 빈도가 크다는 것을 알 수 있었다. 즉, 호안 공간상으로 월파 현상은 상대적으로 차이를 보이고 배후 침수량에도 차이 나는 점을 발견할 수 있었다. 이에 따라서 배후지 월파 및 해수 침수에 따른 피해 정도가 공간상으로 차이를 보일 가능성이 크다고 할 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 태풍 힌남노 내습시 해운대 마린시티 호안에 대해 실시간 촬영한 동영상을 바탕으로 호안 월파 현상에 대해서 고찰하고자 하였다. 연속 촬영된 동영상으로부터 시간대별 월파 발생 횟수, 월파고, 배후 인도 및 도로 등에 발생하는 해수 침수 정도를 구분하여 분석하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 태풍 힌남노 내습시 5일 18시부터 6일 9시까지의 I 구역에서는 총 809회, II 구역에서는 총 472회의 월파가 발생하였다.

(2) 가장 많은 월파가 발생한 시간은 태풍의 중심이 부산 연안에 상륙하여 해면기압이 가장 낮은 때인 6일 6시에 발생하였는데 이때 마린시티 호안의 월파는 I 구역에서  $H_{sum}=111$ 회, II 구역에서  $H_{sum}=72$ 회로 총 183회 관측되었다. 호안 월파 발생 횟수는 조위 증가와 더불어 증가하는 경향을 보였다.

(3) 호안 배후면이 건물로 인해 막혀있는 구역(I area)과 배후 도로로 연결되는 구역(II area)으로 구분하여 월파 현상을 분석한 결과, 해수 침수 정도는 I 구역이 II 구역보다 1.28~1.54배 크다는 것을 알 수 있었다. 이는 I 구역이 파 에너지가 집중되는 돌출형 호안이기 때문으로 생각된다.

(4) 태풍 내습 전에는 I 구역과 II 구역이 월파고와 배후 해수 침수 정도가 비슷한 경향을 나타내었으나 태풍 내습시에는 I 구역에서는 높은 월파고( $H_H, Q_I$ )에 의한 발생 빈도가 큰 반면에 II 구역에서는 중간( $H_M, Q_M$ ) 정도의 월파 발생 빈도가 크다는 것을 알 수

있었다.

(5) 태풍 힌남노 내습시 해운대 마린시티 호안에서는 공간상으로 월파 현상이 상대적으로 차이를 보이고 배후 침수량에도 차이 나는 점을 발견할 수 있었다. 배후 해수 침수 정도에서 I 구역이 II 구역보다 대( $Q_I$ )의 경우 1.28배, 중( $Q_M$ )의 경우 1.54배 크게 나타났다.

한편, 본 연구에서 논의된 태풍 힌남노의 부산 연안 통과 시점에서의 해운대 마린시티 지역에서 발생한 호안 월파의 시간적 발생 특성 연구는 향후 호안 월파 정량관측 및 저감 대책, 배후지 침수 대책 수립 등을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 생각된다.

#### 후 기

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2022R1A6A3A01085986).

#### References

- [1] Korea Meteorological Administration (KMA), 2022, <https://www.weather.go.kr/w/index.do>. (accessed 2022.09.29)
- [2] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA), 2022, [http://www.khoa.go.kr/oceangrid/koofs/kor/observation/obs\\_real.do](http://www.khoa.go.kr/oceangrid/koofs/kor/observation/obs_real.do). (accessed 2022.09.29)
- [3] YouTube, 2022a, KBS Live, <https://www.youtube.com/watch?v=DXnOwF7ROIIM>. (accessed 2022.09.06)
- [4] YouTube, 2022b, MBC Live, <https://www.youtube.com/watch?v=6FIQJ5QOmD8>. (accessed 2022.09.06)
- [5] Yoon, H.S., Park, J.H. and Jeon, Y.H., 2017, A Study on Wave Overtopping of the Seawall at Haeundae Marine City During the Passing of Typhoon Chaba, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 20(3), 152-159.

Received 30 December 2022

1st Revised 31 January 2023, 2nd Revised 26 April 2023

Accepted 27 April 2023