

해운대의 파랑 및 흐름 구조의 특성파악을 위한 현장 관측실험 Field Observations of Spatial Structure of Hydrodynamics Including Waves and Currents in the Haeundae Coast

도기덕* · 유제선* · 이희준** · 도종대* · 진재율*
Kideok Do*, Jeseon Yoo*, Hee Jun Lee**, Jong-Dae Do* and Jae-Youll Jin*

요지 : 본 연구에서는 사질 해안인 해운대 해수욕장을 대상으로 수리·퇴적 작용의 동적구조 규명에 필요한 현장 관측실험을 수행하였다. 연안에서 발생하는 계절별 파랑 및 수리 현상을 정량적으로 파악하기 위하여, 동계 및 하계 집중 관측기간 중 해안선의 법선 방향으로 3개 정점 및 해안선 방향으로 3개 정점 등 공간적으로 여러 정점에 파랑 및 층별 유속 관측장비를 설치하였다. 파랑 관측자료의 분석결과, 동계에는 동해안으로부터 입사하는 E계열 파랑이 대부분이며, 하계에는 S계열과 ESE 계열이 공존하는 분포를 가지고 있다. 대상 해역에서 유속의 공간적 분포는 전체적으로 주 흐름방향이 동계와 하계에 조석운동의 영향으로 동서방향으로 형성되어 있다. 심해역에서 천해역로 갈수록 연안지형의 영향으로, 유속의 세기는 약해지며 유속의 방향은 해안선 및 등수심선과 나란하게 변형되어 나타나고 있다. 본 연구를 통하여 제시된 파랑 및 흐름 등 수리특성에 관한 기초 분석자료는 동 기간에서 측정한 모래이동량 및 지형변화 관측자료와 연계하여, 대상 해역의 침퇴적 정도를 정량적으로 산출하는데 활용될 수 있다.

핵심용어 : 파랑변형, 유속분포, 해운대, 해수욕장, 지형변화

Abstract : Field observations were conducted to collect hydrodynamic and morphological data, which are needed to account for mechanisms of bathymetry changes caused by physical forcings, in Haeundae beach. In order to quantitatively describe characteristics of wave transformations and current patterns in space in winter and summer, in-situ sensors for measuring waves and current profiles were installed at three locations in the cross-shore direction and also three locations in the along-shore direction. As for the results of wave measurements, waves with main direction from the east dominate in winter while waves are incident from the S and the ESE in summer. Analysis of current data reveals that currents over the study domain are considerably influenced by a pattern of tidal motions, thereby, mainly oscillating in the direction of tidal currents, i.e., east-west directions, in both winter and summer. Currents tend to be influenced by local bathymetry in the shallow water region, with the direction changed along the depth contours and the magnitude reduced as they approach the shoreline. The results analysed from the hydrodynamic data through this study can be further combined with the morphological and bathymetry data, leading to the quantification of seasonal sediment transport rates and sand budget changes.

Keywords : wave transformation, current distribution, sand beach, beach erosion

1. 서론

연안역에서 발생하는 모래 이동 및 지형변화에 대해서 다양한 연구가 수행되었지만, 모래 이동이 가장 활발하게 발생하는 쇄파대 및 포말대의 현상에 대한 연구는 아직 부족한 현실이다. 쇄파대 및 포말대 지역은 파랑의 쇄파로 인하여 발생하는 난류적 특성, 비선형성 및 불규칙성이 매우 강하여 현상 규명이 매우 어려우며(Grasmeijer and Ruessink, 2003), 계측 기기의 한계로 인하여 관측도 난해하다. 본 연구에서는

연안역에서 발생하는 모래 이동 및 지형변화에 대한 현상 이해도를 향상하기 위해 소조차 파랑우세 사질해안인 해운대 해수욕장을 대상으로 하여 대규모 현장 관측을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 연안역에서의 관측 자료는 연안역에서의 모래 이동 원인 규명 및 매커니즘에 대한 이해도를 향상시키는 데 도움이 될 것이며, 이는 지형변화 예측 수치모델의 정확도 향상 및 연안침식 저감 공법의 효과를 증진 시키는 효과를 가져다 줄 것이다.

본 연구의 대상 해역인 해운대 해수욕장은 1.4 km의 사질

*한국해양과학기술원 연안재해 · 재난연구센터(Corresponding author: Jeseon Yoo, Coastal Disaster Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan 426-744, Korea, Tel: +82-31-400-7727, Fax: +82-31-408-5827, jyoo@kiost.ac)

**한국해양과학기술원 지질 · 물리연구본부(Marine Geology & Geophysics Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan 426-744, Korea)

해안으로 연간 이용객이 1,500만명에 이르는 국내 제1의 해수욕장이다. 1947년 이전 춘천천 유로 변경에 의해 모래 공급이 차단됨에 따라 지속적으로 해변폭이 감소한다고 알려져 있다. 해양수산부에서는 해운대 해수욕장의 해변폭을 유지하기 위해 2013년도부터 대규모 연안정비사업을 시행 중에 있다. 연안정비사업은 해변폭 증가 및 유지를 위해 양빈 62만 m^3 , 잠제 2기 (동백섬 측 200 m, 미포측 200 m), 돌제 100 m, 유실 방지공 45 m를 설치하는 것으로 계획되어 있다(부산광역시 해운대구, 2011) (Fig. 1). 하지만 설계된 잠제 배후 해안의 국지 침식 가능성이 지적됨에 따라 잠제 설치는 수행되고 있지 않으며, 상대적으로 내방객이 적은 동계에 대규모 양빈 (2013년 동계/186,711 m^3 , 2014년 동계/180,170 m^3 , 2015년 춘계/220,123 m^3 양빈)이 수행되어 해변면적을 크게 증가시켰다. 하지만, 양빈 완료 직후 양빈 안정화 작용 및 하계 태풍에 의하여 해변 폭은 지속적으로 감소하고 있다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2014).

본 연구의 대상 해역인 해운대 해수욕장에 대한 연구는 1980년대부터 지속적으로 수행되고 있다. 수치모델을 이용하여 해운대 해역의 단면 지형변화 및 해안선 변형에 대한 연구가 수행되었으며(Ok et al., 1986; Park and Lee, 1989), 수리모형 실험을 통해 모래 유실을 방지하기 위한 해운대 양빈 공법에 대한 연구가 수행되었다(Min et al., 1987). 현장 실험에 대한 연구는 Choi et al.(2004)과 Lee et al.(2007a, 2007b)에서 방사선 동위원소를 대상해역에 투입하여 해운대 해역의 모래 이동에 대한 연구를 수행하였다. 최근에는 현재 수행 중인 연안정비사업을 위한 기본 및 실시 설계로 인하여 대상 해역의 관측 자료를 활용하여 해운대에 내습하는 파랑 및 해빈류 패턴을 분석하여 수치모델을 이용하여 계절별 모래 이동 패턴을 분석하는 연구가 수행되었다(Lee et al., 2007b; Kim et al., 2013). 하지만 연안정비사업을 위한 기본 및 실시 설계에서의 수행한 현장 조사는 침식 여부의 정량적인 규명보다는 공법 선정을 중심으로 진행되었다. 이러한 연

유로 파랑 및 조류 관측은 계절별로 수행되어 장기적인 해양조사 자료가 부족하며, 상대적으로 깊은 수심 (20 m 이상)에 장비가 계류되어 내해에서 발생하는 수리 및 표사이동 특성을 규명하기에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 해운대 해수욕장의 표사이동 매커니즘을 규명하고 이를 통해 지형변화 양상을 파악하기 위해 현장 정밀 관측실험을 수행하였다. 해운대 전면 수심 약 20 m 지점에 AWAC 1기를 계류하여 2013년 8월부터 현재까지 장기 파랑 관측을 수행 중이며, 이를 분석하여 해운대 해역에 내습하는 파랑의 계절별 특성을 살펴보았다. 그리고 해운대 해역의 계절별 수리동역학적 특성 및 고파랑에 의한 지형변화를 정량적으로 분석하기 위해 상대적으로 수심이 얇은 5개의 정점에 수리·표사 정밀 관측시스템과 파랑 및 층별 유속 관측장비를 설치하였다. 그리고 각각의 관측 정점에서 발생하는 파랑 변형 및 수리특성에 대한 분석을 수행하여 외력 조건(파랑)에 따라 발생하는 흐름 및 모래 이동 특성을 규명하였다.

2. 관측 내용 및 방법

2.1 관측 기간 및 정점

연안에서 발생하는 모래 이동은 대부분 외해에서 입사하는 파랑 특성에 큰 영향을 받는다. 본 연구의 대상해역인 해운대 해수욕장의 외해 파랑 특성은 하계에 발생하는 S계열의 파랑과 동계 E계열의 파랑이 대부분이다. 본 연구에서는 이러한 대상해역의 파랑 특성에 따라 연안에서 발생하는 수리·표사특성을 분석하기 위해 동계(14.02.12~14.04.10)와 하계(14.08.22~14.09.11)로 기간을 나누어 관측을 수행하였다. 현장 관측은 장기파랑 및 해류 관측을 위한 3개의 정점(W)과 연안에서 발생하는 수리·표사현상 관측을 위한 3개의 정밀 관측정점(S)에서 수행되었다. 6개의 관측실험 위치 중 5개의 지점은 평균수심 약 10 m 이내에 위치하였다. 이 6개의 관측실험 위치는 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 3개의 W정점은

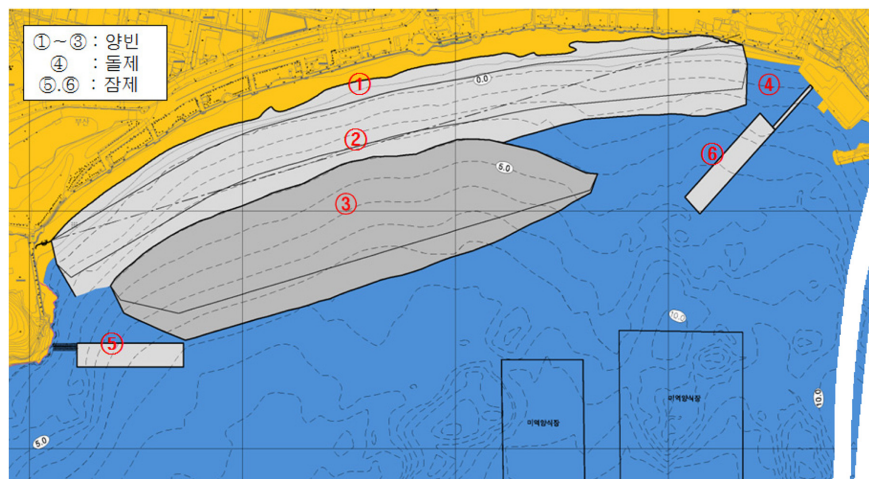


Fig. 1. Layout of construction plan in the governmental beach protection project for the Haeundae Beach (Haeundaegu of Busan Metropolitan City,, 2011).

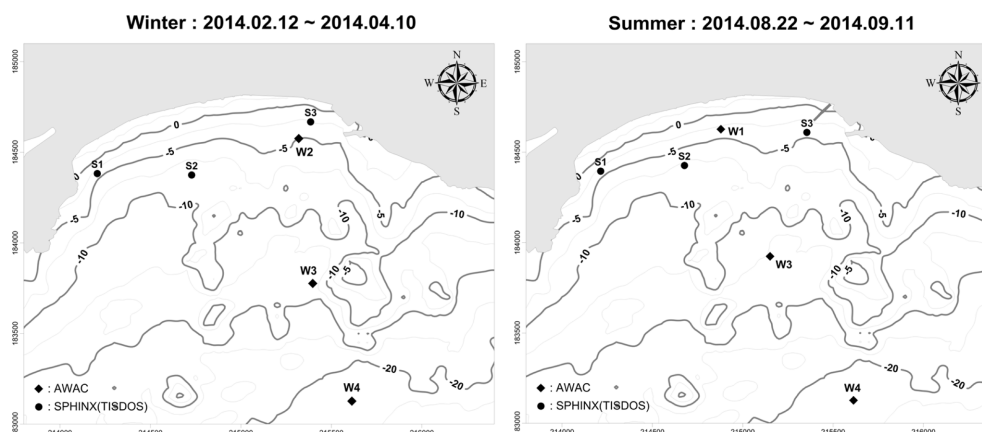


Fig. 2. Bathymetry (bottom contours in meter above MSL) of Haeundae Beach and the measurement locations (S1 to S3 and W1 to W4).

Table 1. Loactions of obsercation points with durations and water depths

St		TM_X (East Belt)	TM_Y (East Belt)	Observation duration
Winter	S1	214206.3353	184382.1475	14.02.13 ~ 14.03.17
	S2	214727.7306	184373.7341	14.02.13 ~ 14.03.21
	S3	215385.2874	184667.5949	14.02.13 ~ 14.04.02
	W2	215319.6404	184575.0304	14.02.12 ~ 14.04.10
	W3	215396.9295	183776.5610	13.09.01 ~ 14.03.11
Summer	S1	214213.9089	184394.4865	14.08.22 ~ 14.10.16
	S2	214677.0263	184426.0421	14.08.22 ~ 14.09.10
	S3	215355.0158	184608.9898	14.08.22 ~ 14.09.12
	W1	214879.1744	184626.6870	14.08.22 ~ 14.10.17
	W3	215151.1553	183924.4929	14.08.22 ~ 14.10.17
	W4	215613.1898	183127.0977	13.07.25 ~ Present

파랑 및 층별 유속관측장비인 AWAC(제조사: Nortek)를 활용하여 외해 파랑이 연안의 지형으로 인하여 발생하는 파랑 변형(쇄파, 굴절 및 회절) 및 흐름을 관측하기 위한 것이다. S 정점의 경우에는 정밀 관측시스템인 SPHINX 및 TISDOS를 활용하여 연안역에서의 파랑, 흐름 및 모래농도를 관측하기 위한 것이다. 이 정밀 관측시스템은, 타워형 철재 프레임에 유속 연직분포 관측장비(PC-ADP 및 ADCP, 제조사: Sontek 및 Teledyne), 정밀 유속 관측장비(Vector 및 ADV,

제조사: Nortek 및 Sontek), 그리고 부유사 입경 및 탁도 관측장비(LISST-100x 및 OBS, 제조사: Sequoia Scientific 및 D&A/Seapoint)를 부착하여 제작되었으며, 각 정점에서 파랑, 연직 유속분포, 바닥경계층 정밀 유속분포, 그리고 특정 높이에서의 유속 및 모래(또는 탁도)농도를 측정하기 위한 종합 관측장비이다. Fig. 2는 2013년 5월 수심측량을 통해 얻은 대상해역의 수심도 및 관측 위치를 보여주고 있으며, Table 1은 본 연구에서 관측한 정점의 위치, 수심 및 관측 기간에 대한 실험내용을 요약한 것이다. 이 중 외해에 위치한 W4 정점은, 2013년 07월 25일부터 2014년 10월 16일까지 파랑 및 해류에 대한 관측을 수행하여 해운대 해역의 태풍 등 외력에 의한 지형변화 패턴 분석에 활용하고자 하였다.

Table 2는 각각의 정점에서 활용된 기기와 각각의 관측관련 사항을 보여주고 있다. 정점 S1과 S2의 경우에는 연직분포 관측장비를 상·하방으로 설치하여 바닥부터 표층까지의 관측을 수행하였으나, 정점 S3의 경우에는 관측장비의 부족으로 인하여 바닥면에서의 관측을 정점관측장비로 대체하였다. 각 정점에서의 파랑 정보는 상방 ADCP를 통해 유의파고, 유의파 주기 및 침두 파향을 계산하였다. 본 연구에서는 ADCP의 파압센서 및 유속도플러 센서로부터 측정된 수압 및 3축(x-y-z) 유속벡터 시계열자료를 파향·파고 스펙트럼 분석법 중 하나인 IMLM(Iterated Maximum Likelyhood Method)을 이용하여 유의파고, 유의파 주기 및 침두 파향을 계산하였다.

Table 2. Instruments, sensor elevations and observation items at each station

	Sensor type	Measuring item	Sampling interval	Sampling height
S1	ADCP1200	wave, currents and acoustic intensity	30 min	255 cm ~ water surface (upward)
	PC-ADP	currents and acoustic intensity	30 min	3 cm ~ 93 cm (downward)
	VECTOR	currents and acoustic intensity	30 min	25 / 50 cm
S2	ADCP600	wave, currents and acoustic intensity	30 min	330cm ~ water surface (upward)
	ADCP1200	currents and acoustic intensity	30 min	1 cm ~ 96 cm (downward)
	ADV	currents and acoustic intensity	30 min	25 / 50 cm
S3	ADCP1200	wave, currents and acoustic intensity	30 min	310cm ~ water surface (upward)
	ADV	currents and acoustic intensity	30 min	25 / 50 cm

2.2 수리특성 정밀 관측 시스템

본 연구에서는 대상해역의 계절별 모래이동 패턴 및 고파랑에 의한 모래 유실 현상을 정량적으로 파악하기 위해 해안선 평행방향으로 3 정점(S1, S2 및 S3)에 정밀관측시스템을 설치하였다. 본 연구에서 활용한 정밀 관측 시스템에는 유속 연직분포 관측장비가 상·하방으로 설치되어 있으며, 이 관측장비는 바닥으로부터 표층까지 유속, 유향 및 음향강도에 대한 정보를 수집할 수 있다. 그리고 추가적으로 저면으로 25 cm 및 50 cm 지점에 정점관측장비(Vector 및 ADV)를 설치하여, 연직분포 관측장비의 검보정 및 고파랑시 발생하는 난류현상을 정밀하게 측정하는데 활용한다. 마지막으로, 부유사 입경 및 탁도 관측 장비(LISST-100x 및 OBS)를 활용하여 해당 정점에서 파랑 및 흐름에 의해 부유된 모래 농도 및 탁도를 관측하며, 이를 통해 연직 분포 관측장비로부터 수집한 음향강도를 실제 모래농도로 환산하는데 사용한다. 본 연구에서는, 모래 농도 관측자료와 탁도 및 음향강도 관측자료 사이의 검보정에 관한 실내 검보정 실험이 아직 진행중이어서, 모래 농도에 관한 관측자료는 제외하고 파랑 및 흐름 등 수리특성 관측자료에 대해서만 고찰하였다.

3. 관측 결과 및 분석

3.1 장기 파랑관측 결과 (W4 정점)

Fig. 3 은 W4 정점에서 2013년 7월 25일부터 2014년 10월 16일까지 15개월 동안 관측한 유의파고, 유의파 주기 및 첨두파향에 대한 시계열 자료이다. 해운대 해역의 파랑 특성은 겨울철(11월 ~ 3월)에는 동해안으로부터 입사하는 ESE 계열 고파랑에 영향을 받으며, 상대적으로 여름철(6월 ~ 10월)에는 태풍 시를 제외하면 낮은 파랑에너지 분포를 보인다. 해운대 해역의 여름철 주파향은 계절풍에 의하여 발생하는 S계열 및 ESE 계열 파랑이 대부분이다. 본 연구에서는 태풍시 파랑 특성을 분석하기 위해 관측 기간동안 대상해역에 영향을 미친 태풍 특성을 분석해보았다. 관측이 수행된 15개월 동안 대상해역에 직·간접적으로 영향을 미친 태풍은 7개이며, 각각의 태풍 시 발생한 최대 파고 및 동일 시간에 관측된 첨두 주기 및 주파향을 Table 3에 나타내었다.

관측 기간 동안 발생한 최대 유의파고는 4.0 m로, 2014년 10월 태풍 봉풍 시에 발생하였다. 태풍으로 인하여 입사하는 파랑의 파향 분포를 살펴보면 2014년 하계에 발생한 태풍 너구

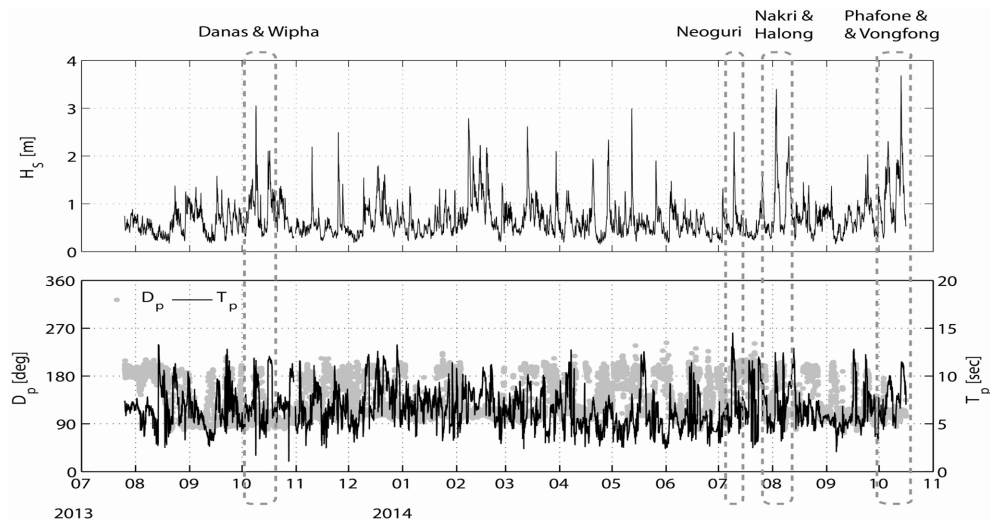


Fig. 3. Temporal variations of significant wave heights, spectral peak periods, and peak sectoral wave directions at W4 during Jul. 25, 2013 to Oct. 16, 2014. Dotted boxes indicate the storm events.

Table 3. Maximum significant wave heights, peak periods and peak wave directions during seven typhoons

	Danas	Wipha	Neoguri	Nakri	Halong	Phafone	Vongfong
H_s (m)	3.17	2.25	2.59	3.52	2.42	2.40	3.97
H_{max} (m)	5.10	3.54	3.78	5.32	3.66	3.56	5.77
T_p (sec)	9.18	11.68	11.78	7.46	9.00	9.41	10.46
T_s (sec)	9.03	11.11	10.63	7.80	8.74	8.95	9.61
D_p (deg)	120.3	101.6	180.8	155.3	113.2	109.3	117.4
SPR (deg)	28.67	15.34	18.67	26.54	26.55	28.71	21.74
Date (peak)	13/10/08 23:00	13/10/16 20:00	14/07/09 22:00	14/08/03 04:00	14/08/10 05:00	14/10/06 04:00	14/10/13 14:00
Duration ($H_s > 1m$)	36 Hr	42 Hr	26 Hr	71 Hr	72 Hr	71 Hr	115 Hr

리 및 나크리의 경우에는 S 계열, 그리고 다른 5개의 태풍의 경우에는 ESE 계열 파랑이 관측되었다. 특히, 태풍 나크리의 경우, 다른 태풍들과는 다르게 파주기 Ts가 Tp 보다 크게 관

측되었다. 보통은 Tp가 Ts 보다 10% 정도 큰 값을 보이는 것으로 알려져 있다 (Goda, 1985). 태풍 나크리가 내습할 때 관측된 파향스펙트럼의 계산결과들을 살펴본 결과, 서로 다른 파향과 파주기를(각각, S계열 약 10초 주기와 SE계열 약 7.5초 주기) 갖는 2개의 파군이 입사함에 따라 이로부터 Ts가 Tp보다 크게 계산된 것으로 파악되었다. 대상 해역에서 태풍 시 내습하는 파랑 특성은 태풍의 진행 경로에 큰 영향을 받으며, 또한 대상 해역의 지형 특성에 의해 태풍 시에도 S계열 및 ESE 계열로 파랑이 주로 내습함을 이 관측결과로부터 알 수 있다.

본 연구에서는 W4 정점에서 15개월 동안 관측한 파랑자료를 파향 및 파고별 통계 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 4 및 5에 나타내었다. 또한, Fig 4는 관측 전기간에 대한 파랑 다이어그램 분석결과이다. 이 파랑 다이어그램으로부터, 해운대 해역의 파랑 특성은 동해안으로부터 입사하는 ESE 계열 및 태풍시 발생하는 S계열이 지배적임을 알 수 있다. Table 4 및 5의 분석결과, 대부분의 파랑이 E 계열 파랑 (52.8 %) 및 S계열 (26.0 %)에서 입사하며, 고파랑이 내습하는 겨울철 및 여름철에도 유사한 주파향 분포를 보여준다. 춘계의 경우에는 S 계열과 ESE 계열의 파랑이 우세하지만, 상대적으로 파고는 그리 크지 않다. 하계의 경우에도 춘계와 유사한 파랑 분포를 보이지만 S 계열의 파랑이 더욱 많이 발생하며, 특히 유의파고 2m이상의 고파랑은 태풍에 의해 발생하는 S 계열이 대부분이다.

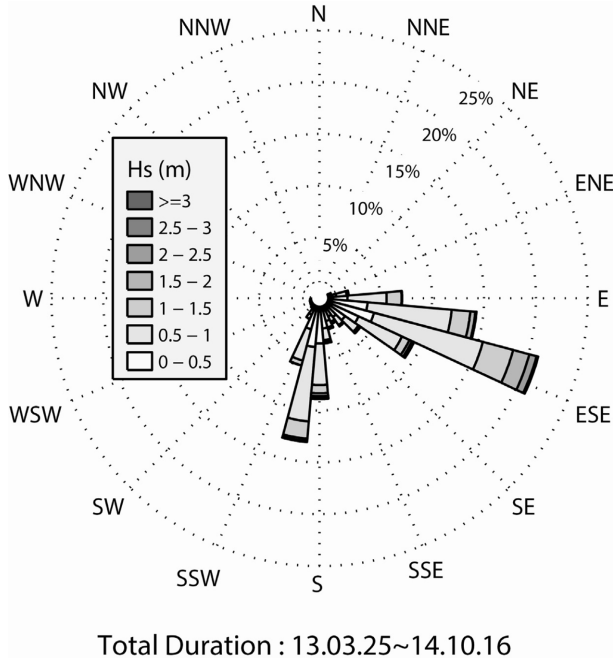


Fig. 4. Frequency of occurrence between significant wave height and peak directions at W4 station.

Table 4. Monthly wave direction histogram

Wave Direction	Month												Sum (%)
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
N	0.0	0.4	0.1	0.8	0.8	1.3	0.6	0.3	0.3	0.8	0.1	0.3	0.5
NE	0.8	1.2	0.8	2.6	1.9	4.4	2.3	5.5	14.9	15.2	1.4	0.8	5.5
E	65.9	88.5	57.3	59.2	30.8	48.6	17.6	29.8	62.2	78.0	44.9	62.8	52.8
SE	8.9	4.5	11.7	16.3	17.5	19.3	18.5	20.8	10.8	2.6	22.4	14.7	13.9
S	23.9	4.8	29.2	18.2	45.6	22.8	58.4	42.7	10.8	3.3	30.4	21.0	26.0
SW	0.5	0.0	0.1	1.3	1.7	2.7	0.8	0.2	0.5	0.0	0.4	0.4	0.6
W	0.0	0.4	0.5	0.8	1.1	0.6	1.1	0.5	0.3	0.0	0.3	0.0	0.5
NW	0.0	0.1	0.1	0.8	0.7	0.3	0.8	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.3

Table 5. Monthly wave height histogram

Wave Height	Month												Sum (%)
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
0-0.5	49.7	15.3	27.2	47.5	41.9	49.8	46.2	38.1	31.9	22.8	53.8	35.2	37.4
0.5-1	44.2	47.0	56.4	40.8	51.7	45.7	46.6	46.7	57.0	36.5	39.6	49.7	47.2
1-1.5	6.0	23.2	12.7	7.4	4.0	4.3	4.7	9.2	10.0	25.0	3.8	12.0	10.5
1.5-2	0.0	8.3	1.6	3.1	1.2	0.2	1.8	3.2	0.9	10.8	1.9	3.1	3.1
2-2.5	0.0	4.8	1.7	1.3	0.4	0.0	0.6	1.9	0.1	3.2	0.7	0.0	1.2
2.5-3	0.0	1.3	0.4	0.0	0.5	0.0	0.1	0.3	0.0	0.8	0.3	0.0	0.3
3-3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.5	0.0	0.6	0.0	0.0	0.2
3.5-4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0

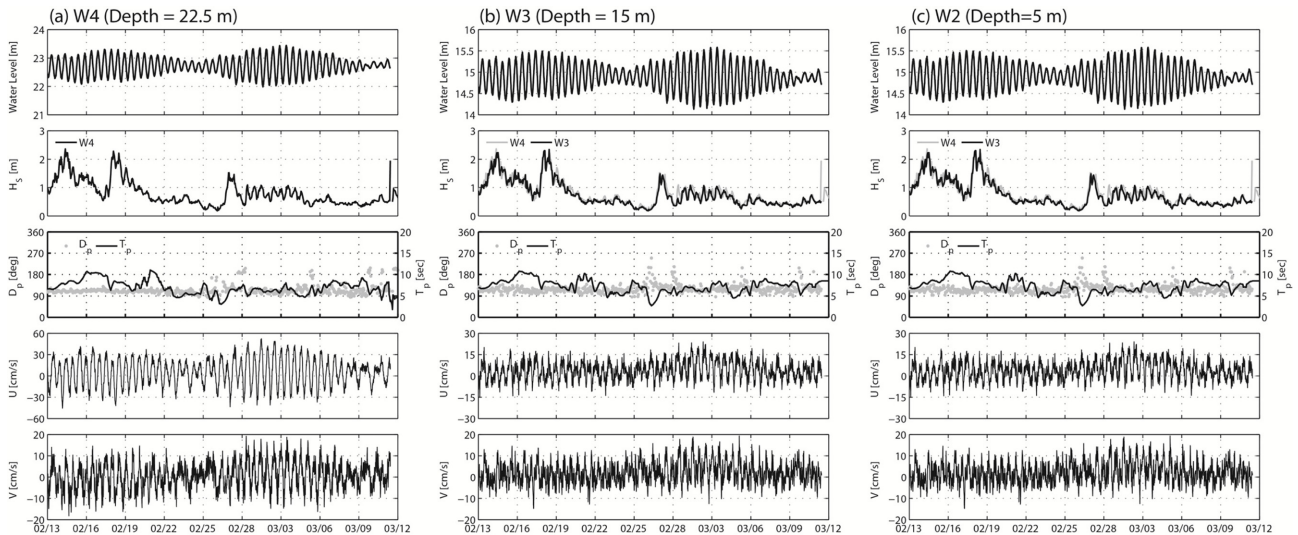


Fig. 5. Temporal variations of significant wave heights, spectral peak periods, and peak spectral wave directions measured from W2 to W4 locations during winter observation. U and V components of currents indicate the east(+) and north(+) directions, respectively.

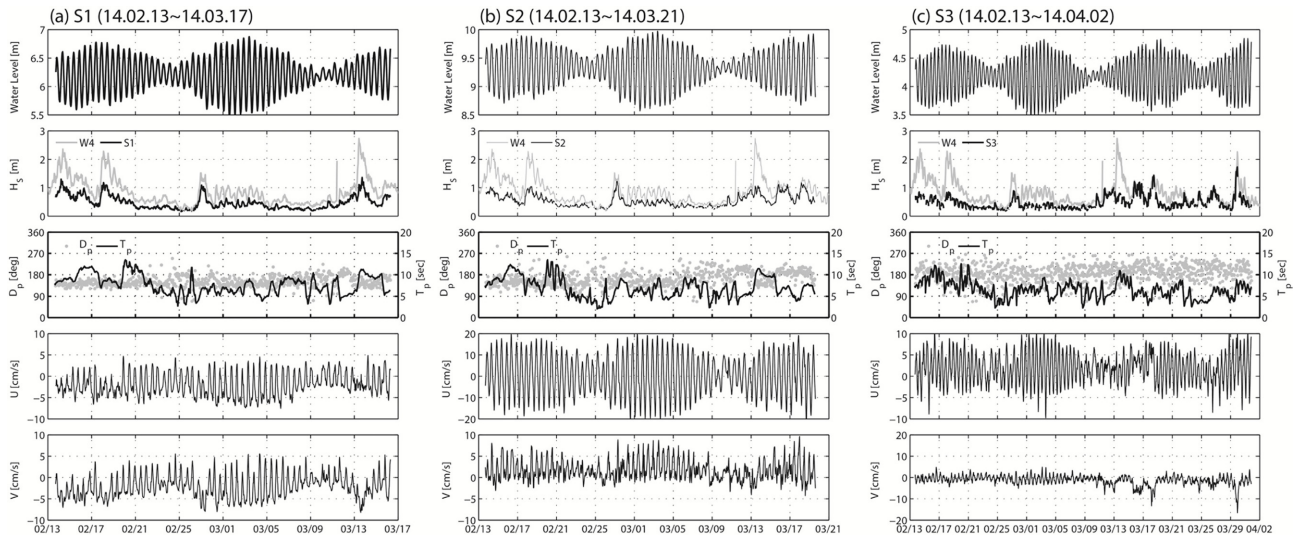


Fig. 6. Temporal variations of significant wave heights, spectral peak periods, and peak spectral wave directions measured from S1 to S3 during winter observation. U and V components of currents indicate the east(+) and north(+) directions, respectively.

3.2 동계 수리특성 정밀관측 결과

동계 수리특성을 파악하기 위하여, 2014년 02~03월 중에 해안선의 법선방향으로, 수심 22m(W4 정점), 수심 15m(W3 정점) 및 수심 5m(W2 정점)에 AWAC 장비를 설치하여 수심 변화에 따른 파랑, 유속 및 유향의 변화를 살펴보았으며, 그 시계열 관측결과를 Fig. 5에 나타내었다. W4 정점에서 관측된 외해 파랑은 W3 정점에 도달할 시에는 큰 변화가 없으며, 상대적으로 수심이 얇은 W2 정점에는 파고가 급격히 감소한다. 파주기의 경우에는 큰 변화가 없으며, 파향은 수심이 얇아짐에 따라 해안선에 수직 방향으로 변화하는 굴절 현상이 관측되었다. 유속의 경우에는 외해에 위치한 W4 정점에서 가장 크게 발생하였으며, 수심이 얇아짐에 따라 감소하는 패턴을 보인다.

Fig. 6은 2014년 동계에 해안선 방향과 나란히 S1, S2 및 S3 정점에 설치한 수리·표사 정밀 관측장비(SPHINX 및

TISDOS)에서 관측한 유의파고, 침두주기, 침두파향과 표층 및 저층에서의 유속·유향에 대한 시계열 자료이다. 본 연구에서는 대상 해역의 양단 및 중앙부분에서 발생하는 파랑 변형 및 연안류를 관측하기 위해 관측 정점을 동백섬 인근(S1 정점), 해운대 해수욕장 중앙(S2 정점) 및 미포항 인근(S3 정점)에 위치하였다. 정밀 관측 장비는 AWAC 장비에 비해 높은 해상도를 가지고 있어 바닥면 인근에서의 수리·표사 특성을 정밀하게 관측할 수 있다. 세 정점에서 관측된 파랑특성은 W2 정점과 유사하게 수심의 변화로 인하여 파랑이 감소하며, 해안선에 수직 방향으로 파향이 변화한다. 유속 역시 수심으로 인하여 외해에 비해 감소하는 패턴을 보이며, 해운대 양단(S1 및 S3 정점)에서는 외해 방향 흐름이 우세하며 중앙 부분(S2 정점)에서는 해운대 조석 패턴과 유사하게 동·서 방향의 분포를 보인다.

Fig. 7은 해운대 해역의 파랑 및 흐름 패턴의 공간적 변형

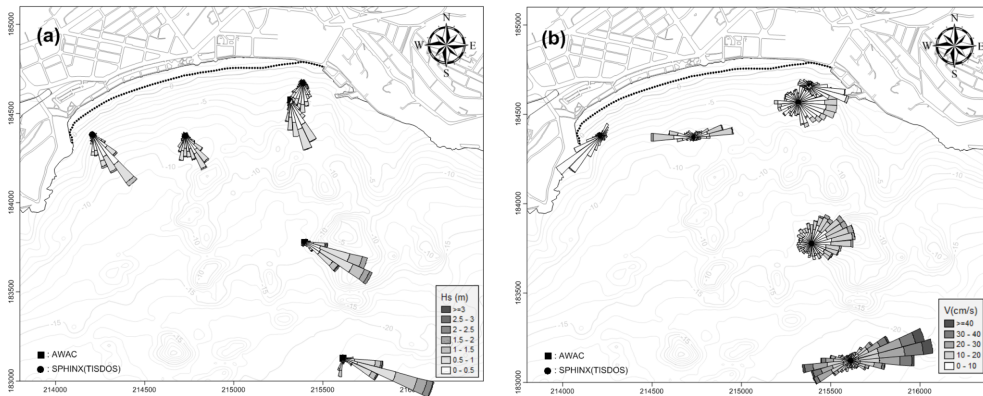


Fig. 7. Wave transformation and current patterns in the Haeundae coast during winter observation. Rose diagrams of (a) waves with incident directions and (b) currents with traveling directions.

에 관한 특성을 분석하기 위해 각각의 관측 정점에 파랑 다이어그램과 방향별 유속 분포도를 나타낸 것이다. 파랑 다이어그램이 지시하는 방향은 파랑의 입사방향을 의미하며, 유속 분포도에서의 방향은 흐름의 진행방향을 가르킨다. 해운대 동계에 발생하는 파랑은 대부분 동해에서 입사되는 남동계열 파랑이 대부분이며, 외해에서 입사한 파랑은 미포항 인근의 암초로 인하여 강한 굴절현상이 발생하여 내해에서는 해안선에 거의 수직 방향으로 파향이 변화한다. W3 정점(수심 15 m)에서는 파랑 감쇠가 그리 크지 않으나, 상대적으로 수심이 얕은 W2 정점과 S1, S2 및 S3 정점에서는 대상 해역 전면에 위치한 암초로 인해 외해 파랑이 많은 부분 감소한다. 관측 기간 동안 동백섬 인근에 위치한 S1 정점에서 큰 파랑이 관측되었는데, 이는 외해에서 발생한 파랑이 대부분 ESE 계열이기 때문이다.

Fig. 7에 나타난 동계 관측기간 방향별 유속 분포의 특성은 주 흐름방향이 대체적으로 동서방향으로 발달하고 있음을 보여준다. 이는 대상 해역의 흐름 패턴이 우리나라 주변을 따라 진행되는 조석운동에 크게 영향을 받고 있음을 의미한다 (Kang et al., 1995; Teague et al., 2001). 특히, 천해역 보다는 심해역에서 유속의 세기가 상대적으로 크게 형성되어 있다. 반면, 천해역의 해운대 해변 가까이에서는 만곡형 해안지형의 영향으로 유속의 크기가 심해역에 비하여 작고, 또한 해변 양 끝단에서는 유속의 방향이 외해쪽으로 유출되는 형태를 보여주고 있다. 이와 더불어, 이 천해역은 파랑 쇄파에 의한 흐름의 영향을 크게 받는 지역이므로, 주 파향이 SE계열인 동백섬 인근의 S1과 S2정점에서는 유속의 방향이 동쪽방향보다는 남서쪽이나 남서방향으로 더 빈번하게 발생하고 있다. 미포항 인근의 S3정점에서는, 주 파향이 SSW계열로 회절되어 있어 유속의 방향이 동남쪽으로 더 빈번하게 발생하는데 기여하고 있다.

본 연구에서 제시된, 동계 파랑 및 흐름 패턴 등 수리특성의 관측결과는, 모래농도 관측자료나 지형변화 관측자료와 연계하여 대상 해역에서 지형변화 특성을 파악하는데 필요한 기초자료 중 하나다. 기존 연구에서(Lee et al., 2007a), 동계에

모래이동의 방향이 동쪽에서 서쪽으로 흐른다는 정성적 분석을 제시한 바가 있다. 본 연구의 분석결과는, 이러한 기존 연구의 정성적 분석결과에 대해서 동계 모래이동이 파랑 및 흐름 패턴의 영향으로 동쪽 보다는 서쪽 방향으로 더 빈번하게 발생함을 정량적으로 제시해 주고 있다.

3.3 하계 수리특성 정밀관측 결과

해운대 해역에서의 하계 수리특성을 파악하기 위하여, 동계와 유사하게 총 6개 정점에서 수집한 정밀 관측자료를 분석하였다. Fig. 8은 AWAC이 설치된 3 정점(W4, W3 및 W1)에서 관측된 파랑, 유속 및 유향에 대한 시계열 자료이다. 관측 기간 중에 태풍과 같은 이벤트가 발생하지 않아 상대적으로 관측된 파고는 작다. 그리고 하계 기간 동안 발생하는 파향은 동계와는 달리 S 계열(180°)과 E 계열(90°)이 공존하는 특성을 보인다. S 계열에서 입사하는 파랑(8월 26일 및 9월 4일)의 경우에는 해안선에 수직으로 입사하여 W2 정점에서 파랑 감쇠가 그리 크지 않다. 하지만, E 계열에서 입사한 파랑(8월 28일 ~ 9월 2일)의 경우에는 동계와 같이 강한 굴절 및 파랑 감쇠 현상이 발생하였다. 이러한 특성은 해운대 해수욕장은 하계에 발생하는 S계열의 높은 파랑에 취약한 특성을 가짐을 보여준다. 유속의 경우에는 적은 파랑 에너지로 인하여 조석운동에 의한 조류의 패턴에 큰 영향을 받고 있음을 보인다.

Fig. 9은 2014년 하계에 수리·표사 정밀 관측장비(SPHINX 및 TISDOS)를 통하여 취득한 세 정점(S1, S2 및 S3)에서의 파랑(유의파고, 침두주기, 침두파향)과 유속(표층 및 저층에서의 유속과 유향)에 대한 시계열 자료이다. 관측 정점의 위치는 동계 관측과 동일하게 대상해역의 양단과 중앙 부분에 위치하였으며 바닥면 인근에서의 수리·표사 특성에 대한 정밀 관측을 수행하였다. 세 정점에서 관측된 파랑 특성은 AWAC 장비에서 관측 결과와 유사하게 S 계열의 파랑의 경우에는 파고의 변화가 그리 크지 않지만, E 계열 파랑의 경우에는 파고가 급격하게 감소한다. 유속의 경우에는 관측 기간 중에 큰 파랑이 발생하지 않아 조류와 유사한 패턴

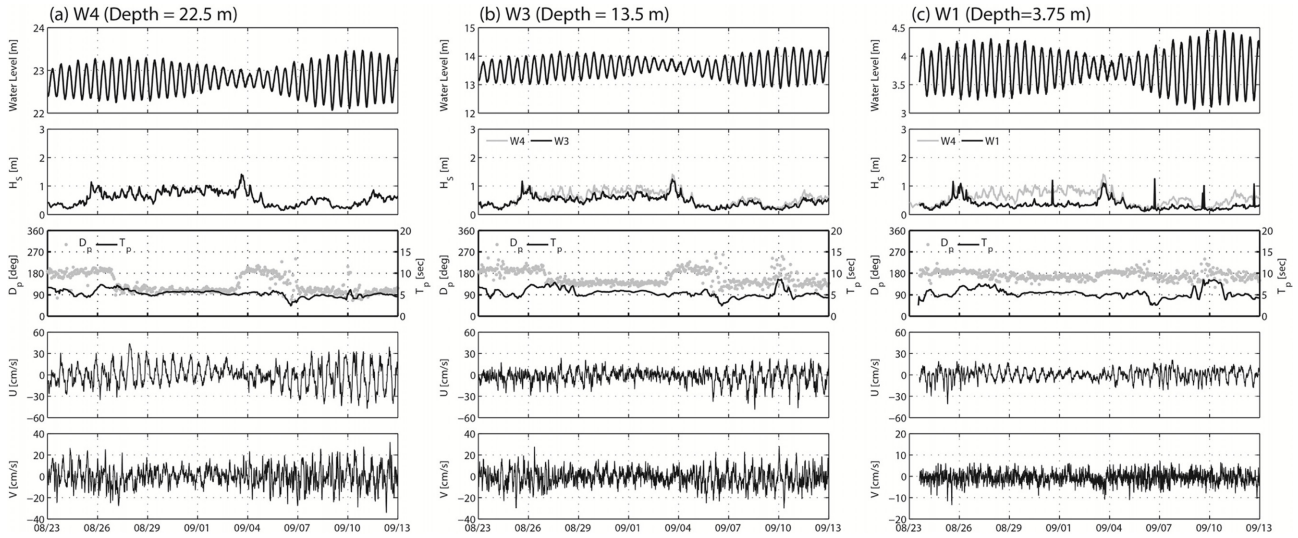


Fig. 8. Temporal variations of significant wave heights, spectral peak periods, and peak spectral wave directions measured at W1, W3 and W4 during summer observation. U and V components of currents indicate the east (+) and north(+) directions, respectively.

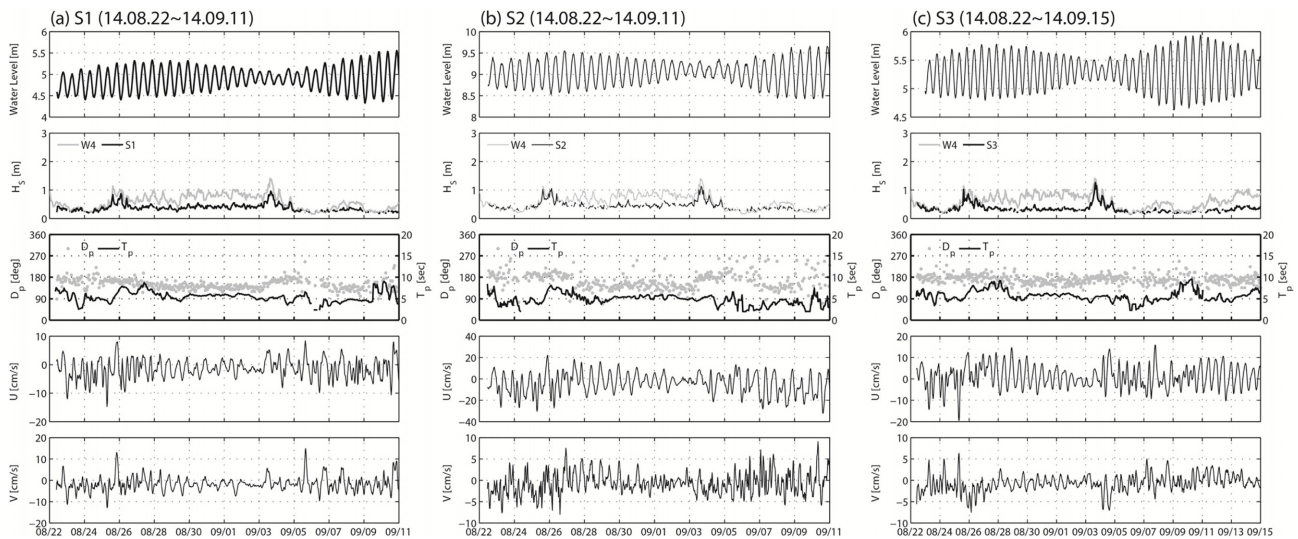


Fig. 9. Temporal variations of significant wave heights, spectral peak periods, and peak spectral wave directions measured from S1, to S3 during summer observation. U and V components of currents indicate the east (+) and north(+) directions, respectively.

을 보인다. 유향의 경우에는 동계 관측과 유사하게 대상해역 양단에서는 외해 방향으로 유출되는 모습을 보이며, 중앙부 분에서는 동·서 방향의 분포가 우세하다.

해운대 해역의 하계 파랑 및 흐름 패턴의 공간적 변화특성을 파악하기 위하여, 동계 분석과 동일하게 각각의 관측 정점에 파랑 다이어그램과 방향별 유속 분포도를 Fig. 10에 나타내었다. 해운대 하계에 외해에 입사하는 파랑은 앞에서 기술한 바와 같이 S계열 및 ESE 계열 파랑이 대부분이다. S계열의 파랑은 파고 및 파향의 변화가 그리 크지 않지만, ESE 계열의 파랑은 동계 관측과 동일하게 내해에 근접할수록 파고 및 파향이 변화하는 특성을 보인다. 이는 Fig. 2에서 제시된 것처럼 해저지형 특성의 영향에 기인한 것으로 추정된다. Fig. 2에서 수심이 15 ~ 20 m 범위에 해당하는 해저지형을 보면, 동쪽 부분에 해저톱(shoal)이 수심 5 m 높이까지 솟아 있음을 알 수 있다. 이로 인하여, 동쪽에서 입사하는 파

랑은 해저톱 위를 지나는 동안 파랑에너지가 크게 감쇠되는 영향을 받는 것으로 판단된다.

하계 방향별 유속 분포의 특성은 주 흐름방향이 동계와 유사하게 동서방향으로 발달하고 있다. 이로부터, 동계와 마찬가지로 하계기간도 대상 해역의 흐름 구조가 조류에 의해 크게 지배받고 있음을 알 수 있다. 심해역의 W4정점에서는 유속의 세기가 큰 흐름이 동서방향으로 뚜렷하게 나타나고 있다. 반면, 수심이 얕아질수록 유속의 세기는 줄어들고, 유속의 주 흐름방향은 해안선 및 등수심선을 따라 형성되어 발달하고 있다. 해변의 양단에서는, 동계와 유사하게 해수욕장방향의 유속 보다는 외해방향의 유속이 더 세고 또한 빈번하게 발생하고 있다. 주 파향이 S계열로 변형된 천해역의 해수욕장 중앙부에서는, 유속의 방향에 대한 파향의 영향이 최소화되었기 때문에, 흐름방향이 조석운동의 방향을 따라 동서방향으로 대등하게 형성되어 있다.

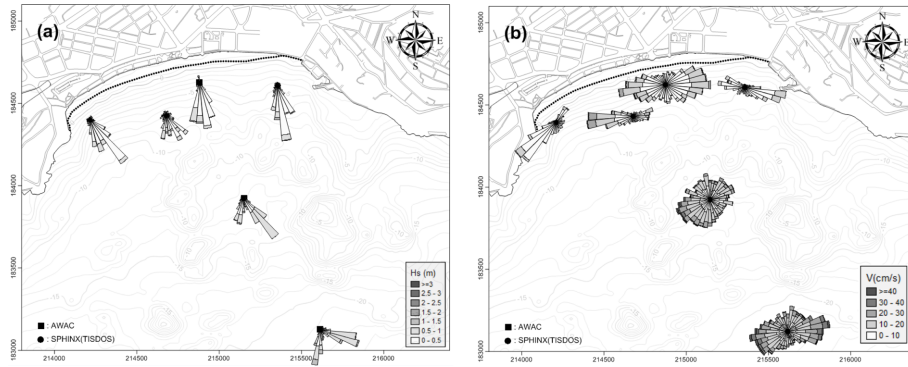


Fig. 10. Wave transformation and current patterns in the Haeundae coast during summer observation. Rose diagrams of (a) waves with incident directions and (b) currents with traveling directions.

동계의 흐름 구조와 비교하여, 하계에도 유속이 특정 방향으로 치우쳐서 한쪽으로 흐르는 분포는 보이고 있지 않으며, 다만 포켓 비치의 특성으로 인하여 해수욕장 양단에서는 외해방향으로 유출되는 특성이 나타나고 있다. 이는 하계 계절적 특성일 수도 있지만, 관측기간 내에 고파랑이 발생하지 않아 천해역에서 조류의 영향을 많이 받는 대신 입사파의 영향이 두드러지지 않았을 가능성도 내포하고 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 연안역에서 발생하는 수리·퇴적 작용의 동적구조 규명에 필요한 종합 관측자료를 수집하고자, 소조차 사질 해안인 해운대 해수욕장을 대상으로 하여 현장 관측실험을 수행하였다. 연안에서 발생하는 표사 이동을 정량적으로 파악하기 위해서는 파랑 및 수리 현상에 대한 정보가 필수적이므로 파랑 및 층별 유속 관측 장비 AWAC 3기를 해안선 수직 방향으로 설치하여 파랑 변형(쇄파, 굴절 및 회절)과 흐름 관측을 수행하였다. 그리고 파랑특성을 포함하여 퇴적물 농도가 높은 해저면 부근에서 수리·퇴적 현상을 연속적으로 관측할 수 있는 수리·표사 정밀 관측시스템을 해안선 평행 방향으로 세 정점에 설치하였다. 이를 통해 본 연구에서는 현장 관측 자료를 정밀 분석하여 대상 해역의 계절별 파랑 및 흐름 등 수리현상의 공간적 변화특성을 분석하였다.

해운대 해수욕장을 대상으로 수행한 파랑 관측 결과를 분석하면 동계에는 동해안으로부터 입사하는 E계열 파랑이 대부분이며, 하계에는 S계열과 ESE 계열이 공존하는 분포를 가지고 있다. 이러한 외해 파랑 분포는 내해에 도달함에 따라 파향에 따라 각기 다른 특성을 보인다. 동계에 주로 발생하는 E 계열의 파랑의 경우에는 미포항 인근의 암초로 인하여 강한 굴절 현상이 발생하여 내해에 도달할 시에 파고가 크게 감소하지만, S 계열의 파랑의 경우에는 ESE 계열과 다르게 파랑 감쇠가 그리 크지 않다. 이는 외해에 발생한 파랑 에너지가 해변에 직접적으로 도달함을 의미하며, S 계열의 고파랑에 취약한 특성을 가짐을 의미한다.

대상 해역에서 유속의 공간적 분포는 전체적으로 주 흐름

방향이 동계와 하계에 공통적으로 조석운동에 의한 조류의 영향으로 동서방향으로 형성되어 있다. 심해역에서 천해역로 갈수록 연안지형의 영향으로, 유속의 세기는 약해지며 유속의 방향은 해안선 및 등수심선과 나란하게 변형되어 나타나고 있다. 또한, 해수욕장의 천해역 양단에서는 흐름 패턴이 내만 쪽보다는 외해 쪽으로 강하게 유출되는 경향을 보이고 있다. 보통 대상해역에서 관측되는 유의파고 3 m 이상의 고파랑은 대부분 하계 태풍 내습시에 국한되어 발생한다. 본 연구에서, 하계 관측기간에 상대적으로 태풍과 같은 고파랑이 내습하지 않아 극치 폭풍 사상에 따른 파랑 및 흐름 구조를 규명하기에는 아직 한계가 있다.

본 연구를 통하여 제시된 대상 해역에서의 파랑 및 흐름 등 수리특성에 관한 기초 분석자료는 동 기간에서 측정된 모래 이동량 및 지형변화 관측자료와 연계하여, 대상 해역의 침퇴적 정도를 정량적으로 산출하는데 활용될 수 있다. 현재, 한국해양과학기술원에서는 각 정점에서 수집한 관측기기의 탁도 및 음향강도를 모래농도로 변환하는 실내 검·보정 실험을 수행하고 있으며, 후속으로 계절별 모래이동 및 지형변화 특성에 대한 분석결과도 도출할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원(연안침식 대응기술 개발) 및 한국해양과학기술원(연안침식저감 원천기술 개발, PE99326)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Choi, B.-J., Jung, S.-H., Kim, J.-B. and Lee, J. S. (2004). A Study on the Sediment Transport using Radioisotope Tracer. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 16(3), 162-170 (in Korean).
- Goda, Y. (1985) Random Seas and Design of Maritime Structures. University of Tokyo Press, Tokyo.
- Grasmeijer, B.T. and Ruessink, B.G. (2003) Modeling of waves and currents in the nearshore parametric vs. probabilistic approach.

- Coastal Engineering, 49, 185-207
- Haeundaegu of Busan Metropolitan City (2011). Report of the Detailed Design on the Coastal Improvement Project at Haeundae Beach (in Korean)
- Kang, S.K., Chung, J., Lee, S.R. and Yum, K.-D. (1995) Seasonal variability of the M2 tide in the seas adjacent to Korea. Continental Shelf Research, 15(9), 1087-1113.
- Kim, G.-S., Ryu, H.-S., Park, H.-S. and Kim, K.-M.. (2013). Characteristics of Sediment Transport under External Force in Haeundae Beach. Journal of Navigation and Port Research, 37(6), 663-671 (in Korean).
- Lee, J.S., Tac, D.H. and Woo, J.G. (2007a). Characteristics of Seasonal Wave, Wave-Induced Current and Sediment Transport in Haeundae Beach. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 19(6), 574-585 (in Korean).
- Lee, J.S., Tac, D.H., Yoon, E.C. and Kim, S.Y. (2007b). Characteristics of Seasonal Sediment Transport in Haeundae Beach. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 19(6), 547-556 (in Korean).
- Min, B.-H., Ok, C.-Y. and Yu, S.-H. (1987). An Experimental Study on the Beach Nourishment Method of Haeundae Beach. Journal of Ocean Engineering and Technology, 1(1), 84-93 (in Korean).
- Ok, C.-Y., Kim, H.-G. and Min, B.-H. (1986). A Study on the Similarity of the Change of Beach Profile. Journal of Korean Association of Hydrological Sciences, 19(4), 355-364 (in Korean).
- Park, I.H. and Lee, J.S. (1989). Shoreline Change Model in Haeundae Beach. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 1(1), 50-62 (in Korean).
- Report on the Beach Erosion Monitoring Project in Busan (in Korean)
- Teague, W.J., Perkins, H.T., Jacobs, G.A. and Book, J.W. (2001) Tide observations in the Korea-Tsushima Strait. Continental Shelf Research, 21(5), 545-561.

Received 28 July, 2015

Revised 18 August, 2015

Accepted 19 August, 2015