



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

낙동강 하구역의 입사과향에 따른
파랑변형특성에 관한 연구



2009년 2월

부경대학교 대학원
해양공학과

박 순

공 학 석 사 학 위 논 문

낙동강 하구역의 입사과향에 따른
파랑변형특성에 관한 연구

지도교수 류 청 로

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2009년 2월

부경대학교 대학원

해양공학과

박 순

박순의 공학석사 학위논문을
인준함.

2008년 12월 19일



주 심 공학박사 이 인 철 ㉠

위 원 공학박사 윤 한 삼 ㉠

위 원 공학박사 류 청 로 ㉠

목 차

List of Figures.....	ii
List of Tables.....	iii
List of Symbols.....	iv
ABSTRACT.....	v
1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적.....	1
1.2 연구내용 및 방법.....	2
2. 낙동강 하구역 해양 환경	4
2.1 해양물리환경.....	4
2.2 해양기상환경.....	6
3. 파랑관측자료 분석 및 결과	7
3.1 현장파랑관측.....	7
3.1.1 거제 해상관측부이.....	7
3.1.2 낙동강 하구역 파랑관측.....	7
3.2 관측자료 분석 및 결과.....	9
3.2.1 분석방법.....	9
3.2.2 시계열 분석.....	10
3.2.3 파향별 관측자료 분석.....	12
3.2.4 거제 해상관측부이자료 분석.....	17
4. 입사파향에 따른 파랑 변형 수치모의	20
4.1 SWAN 모형의 개요.....	20
4.1.1 기본방정식.....	20
4.1.2 적용방법.....	33
4.1.3 수치계산방법.....	34
4.2 모형의 검증.....	37
4.3 파랑 변형 수치모의.....	40
4.3.1 입력 조건 설정.....	40
4.3.2 계산결과.....	41
5. 요약 및 결론	48
참고문헌	50

List of Figures

- Fig. 1 Flow chart of study.
- Fig. 2 The location map of study area and the symbol ★ notes Geoje floating buoy(KMA marine and meteorology buoy) and the symbol ☆ notes wave measurement site of Nakdong estuary.
- Fig. 3 Time-series of wave measurements in Nakdong estuary and Geoje buoy for 12~17, April and 16~30, May, 2007 and wind measurements in Geoje buoy for same period.
- Fig. 4 $H_{max}/H_{1/3}$ ratio:(a) Nakdong estuary (b) Geoje buoy in SW (top plot) and NE (bottom plot) direction.
- Fig. 5 Wave height and period ratio in Nakdong estuary.
- Fig. 6 Relationship between wave steepness, Ursell number and Q_p . Left is SW direction and right is NE direction, respectively.
- Fig. 7 Directional Distribution of wave (a) and wind (b), right bar charts are seasonal directional distribution observed by Geoje floating buoy in 2007.
- Fig. 8 Wave height and period ratio for each direction SW, SSW, NE and ENE.
- Fig. 9 3D-bathymetry of the coarse grid domain.
- Fig. 10 Computational grid domains; Area No. 1 : wide domain
Area No. 2 : nested.
- Fig. 11 Surface pressure map (KMA, Korean meteorological

Administration).

Fig. 12 Comparison of spectrum density in SW direction at each time.

Fig. 13 Cumulative curve of wave height and wind speed.

Fig. 14 Wave height ratio (H/H_i) and wave direction vector.

Fig. 15 The sketch of cross section.

Fig. 16 Cross sectional profile of H/H_i .

Fig. 17 Cross sectional profile of wave steepness.

List of Tables

Table 1 Tidal nonharmonic constants in Gadeokdo

Table 2 Information of location and observation parameter for observation sites

Table 3 Information of Computation and nesting grid

Table 4 Comparison of wave spectral parameter between computed and measured

Table 5 Input conditions in SWAN Numerical simulation cases

List of Symbols

H	: Wave height
$H_{1/3}$	: 1/3 Significant wave height
$H_{\max}$	: Maximum wave height
T	: Wave period
T_m	: Average wave period
T_s	: Significant wave period
T_p	: Spectrum peak period
U_r	: Ursell number
Q_p	: Spectrum peakedness parameter
h	: Water depth
H/L	: Wave steepness
L	: Wave length
H/H_i	: Wave height ratio

A Study on Wave Deformation by Incident Wave Direction in Nakdong River Estuary

Soon Park

*Department of Ocean engineering, Graduate School
Pukyong National University*

ABSTRACT

Nakdong estuary, where is located in the southeast of Korea, is characterized by very complex bathymetry due to several sandbars parallel to shoreline, and their bathymetry is actively changing in short and longer periods because of the successive wave actions. The accurate understanding of waves in Nakdong estuary is very important to investigate morphological characteristics of Nakdong estuary, as the waves is one of main driving forces inducing topographical changes over this area. Therefore, the study conducted data analysis with wave measurements and numerical simulations using SWAN wave model to identify spatial wave characteristics depending on the incident wave condition.

The main results from the study are summarized as following.

1) Wave observations present the coastal area of Nakdong estuary is mostly exposed to waves coming from the SW and the NE which develops very different wave climate at inshore of Nakdong estuary; under the southwesterly waves, inshore waves are relatively high, whereas inshore waves are very small less than

0.5 m under the waves from the NE, although offshore waves are over 2 m.

2) To improve the model performance in the study area, SWAN wave model is validated against the wave observations. From the validation work, we achieve reasonable results with the differences of 0.1 sec and 0.03 m on the peak wave period and the significant wave height.

3) Wave simulations were conducted under the 5 representative wave directions (SW, SSW, S, SSE, SE) which is mainly affected by the wave climates in Nakdong estuary. When waves come from the SW and SE, inshore waves are relatively small due to the strong diffraction and sheltering effect by Gadeok Is. and Dadeapo. However, under the incident waves from the SSW ~ SSE which is nearly normal to the shoreline waves over the study area, generally bigger than other directional conditions.

4) Cross sectional waves were compared over the Nakdong estuary. Waves in the eastern region where has rapid seabed slope are suddenly changed along the cross sections. However, the waves in the western region, in front of Jinudo, are mildly changed. The wave steepness are rarely changed over the western area of Nakdong estuary, but they are suddenly increase from the water depths less than 5 m in the eastern region.

5) Wave climates in Nakdong estuary are significantly influenced by geological effect depending on the incident wave direction. Under the NE direction which is annually predominant, it has weak influences to inshore waves of Nakdong estuary. Waves from the S and SW directions have lower occurrences compared to the NE direction, it strongly influences to the wave climate of the area.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

일반적으로 해양 파랑은 해안 구조물 설계 및 해안과정 (Coastal process)의 주요 외력인자로서 매우 주요한 설계인자이지만 수심이 불규칙한 해역에서의 해양 파랑의 변형 특성을 명확히 규정하기에는 대단히 어려운 문제이다.

낙동강 하구역은 우리나라 대표적인 하구역으로 해저 경사가 대단히 완만하고 대부분 수심 10 m 이하의 천해역이다. 특히, 하구 사주가 외해 방향으로 생성·발달하고 있으며(유 등, 2006) 타 지역의 삼각주 지형과는 달리 부정형적인 사주가 발달하고 있다. 이러한 하구 사주 변화의 원인이 되는 주요 해양외력으로 많은 연구자들이 파랑의 영향력이 크게 작용한 결과로 제시한 바 있다(최, 1996; 김, 2005; 유 등, 2006).

낙동강 하구역과 같은 연안역에서의 해양 파랑은 대부분 바람에 의해 발생한 풍파로서 풍파가 풍역을 벗어나면 너울이 되고, 그 진행거리에 따라서 감쇄한다. 이에 대한 해석방법으로 Sverdrup and Munk는 풍속과 취송거리, 취송시간의 함수로, 이후 Bretschneider가 이들의 제안식을 수정한 SMB법을 제안한 바 있다.

심해에서 발생한 파랑은 수심이 얕은 천해역으로 전파해 감에 따라 해저 마찰 및 수심의 영향(천수 변형), 쇄파에 의한 에너지 소산(쇄파 변형), 지형 및 구조물에 의한 회절 및 굴절현상 등 파랑의 변형이 발생하게 된다. 아울러 해양파의 변형특성을 고려하여 각 해석방법을 현상에 따라 올바르게 적용하여 사용하는 것이 중요하며 한 가지 방법만을 이용하는 것은 파랑의 제현상을 충분히 설명할 수 없다.

심해파랑이 연안으로 입사할 때 해역의 지형 및 해저 지형의 영향이 입사파의 파향에 따라 크게 달라진다. 낙동강 하구역의 경우 서쪽으로

가덕도와 동쪽으로 다대포가 있어 반 폐쇄적인 지형을 가지고 있으며 남쪽으로 외해와 연결되어 있는 형태를 가지고 있어 입사 파향에 따라 지형의 영향이 크게 달라진다.

이에 대한 연구로는 SethuRaman (1978)은 연안역에서 부이 관측자료를 이용하여 풍향이 변화할 경우에 파진행방향, 파경사, 파의 발달상태가 함께 변화함을 연구하였으며, Perrie and Toulany (1995)는 육풍이 불 경우, 육상에 의해 취송거리와 취송시간이 제한되어 해풍이 불 때와는 다른 파랑특성을 나타냄을 밝혔다.

또한, 낙동강 하구역에서의 파랑 변형 특성을 해석하기 위하여 박 등 (2007)은 낙동강 하구역의 파랑관측자료와 인근 무인기상관측소 및 거제 해상관측부이의 기상관측자료를 이용하여 바람과 파고와의 상호관련성을 알아보았으며, 박 등 (2008)은 심해 입사파랑의 파향분포와 파향변화에 따른 낙동강 하구역과 심해파랑과의 상관성을 분석한 바 있다. 그 결과에 따르면 낙동강 하구역은 계절별로 하계에는 남서방향의 파향이 탁월하며 동계에는 북동방향의 파향이 탁월한 것으로 나타났으며, 파랑 관측 결과로서 파향에 따라 파고와 주기 및 심해파랑과의 관련성이 크게 차이난다고 주장하였다.

본 연구에서는 수치모의시 최적의 입력값을 결정하는데 파향이 미치는 영향을 살펴보았으며 이를 이용하여 낙동강 하구역의 부정형적 사주 발달의 대표적인 외력인자인 파향별 입사파랑 발생 특성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 낙동강 하구역으로 입사가 가능한 파향에 대하여 각 파향이 변화함에 따라 낙동강 하구역의 파랑 특성이 어떻게 변화하는지를 심해·천해 허장관측자료 분석 및 파랑변형 수치모의를 통해 공간적, 단면적으로 분석하고자 하였다.

1.2 연구내용 및 방법

본 논문에서는 거제해상관측부이의 1년간 (2007년)의 자료와 낙동강

하구역 현장관측자료를 이용하여 거제해상관측부이를 심해로, 낙동강 하구역을 천해로 가정하여 심해의 파랑 특성에 따른 낙동강 하구역의 파랑특성을 분석하였다. 특히 외해의 파향에 따라 지형 및 수심의 영향이 크게 달라지며 회절 및 굴절의 영향도 달라지게 되므로 외해의 파향 분포를 분석하여 낙동강 하구역의 입사 가능한 심해 파향을 분석하였다. 천해인 낙동강 하구역의 파랑관측자료는 탁월심해파향에 따라 분리하여 각 파향별 관측자료의 통계적 특성을 분석하였다. 또한 각 파향 및 풍향에 대한 연간 발생빈도를 분석하여 낙동강 하구역으로 입사가능한 외해 파향 및 풍향의 분포를 분석하였다.

외해 입사파랑의 파향 변화에 따라 낙동강 하구역의 파랑특성에 미치는 영향의 정량적인 분석을 위하여 SWAN (Simulating WAeVs Nearshore) 모델을 이용하여 외해입사파랑의 파향을 달리하여 수치모의를 실행하였으며 해역의 바람조건 및 입사파랑의 파고와 주기도 달리 하여 낙동강 하구역의 파랑 특성을 분석하였다. 연구의 흐름은 Fig. 1과 같다.

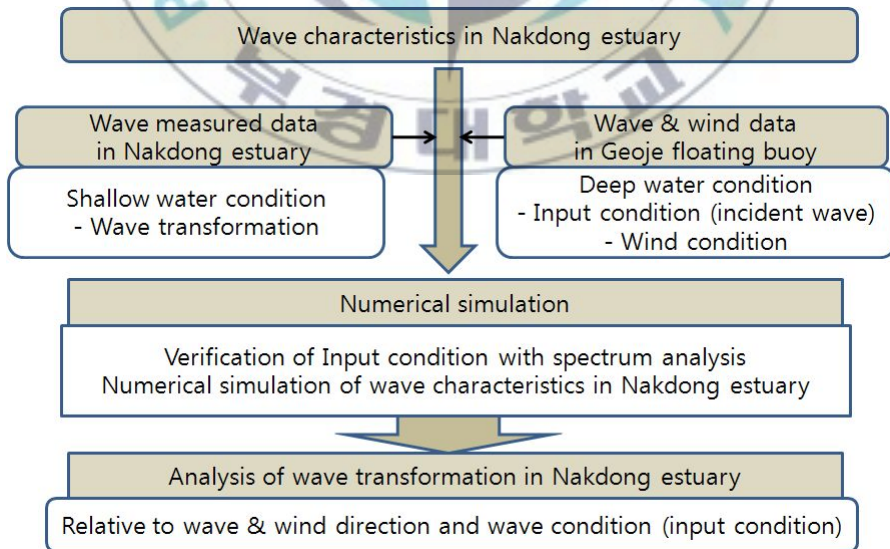


Fig. 1 Flow chart of the study.

2. 낙동강 하구역 해양 환경

2.1 해양물리환경

(1) 조석

연구대상해역의 조석특성은 반일주조가 탁월하며, 최대분조는 M_2 및 S_2 분조로서 그 진폭은 각각 40 cm, 18.9 cm 정도이며, 지각은 각각 232.8° , 261.3° 정도이다(유, 2006).

부산항이 위치하고 있는 우리나라 남해안 동부해역 조석은 일조부등이 매우 적고 대개 규칙적인 승강이 이루어진다. 조시의 부등은 저조

Table 1 Tidal nonharmonic constants in Gadeokdo (유, 2006)

Division	D.L (cm)	E.L (cm)	Remark (cm)
Approximate highest water level (Approx.H.H.W)	190.6	95.3	
High water level ordinary spring tide (H.W.O.S.T)	178.3	83.0	
High water level ordinary mean tide (H.W.O.M.T)	152.0	56.7	
High water level ordinary neap tide (H.W.O.N.T)	125.7	30.4	
Mean sea leve (M.S.L)	95.3	0.0	
Low water level ordinary neap tide (L.W.O.N.T)	64.9	-30.4	NO.1 T.B.M
How water level ordinary mean tide (H.W.O.M.T)	38.6	-56.7	DL.(+)381.9 EL.(+)286.6
Low water level ordinary spring tide (L.W.O.S.T)	12.3	-83	
Approximate lowest low water level (Approx.L.L.W)	0.0	-95.3	
Spring Range	166.0		
Mean Range	113.4		
Neap Range	60.8		

는 크고, 고조에는 거의 없다. 이에 반하여 두 저조의 높이에는 거의 부등은 없으나, 두 고조의 높이에는 다소 부등이 있다. 고조는 일반적으로 봄철에는 오전에, 여름철에는 야간에, 가을철에는 오후에, 겨울철에는 주간에 일어나는 것이 상례이다. 남해안 서부에 있어서도 일조부등은 크지 않다(국립해양조사원, 1994).

남·서해안에서 평균 고조간격은 8시간에서 10시간 52분까지이나 부산 지역은 8시간 2분이며, 다대포 지역은 8시간 6분, 가덕 지역은 8시간 18분이며, 대조승은 부산이 약 1.2 m로, 다대포 약 1.4 m, 가덕도 약 1.8 m의 서해안 및 남해안 서부에 비해 조차가 적은 지역에 해당된다. 일조부등은 현저하지 않으며 심한 날이라도 1일 2회의 규칙적인 승강을 하고 최고 고조는 하절기에는 야간, 동절기에는 주간에 일어나며, 평균해면은 2~3월이 가장 낮고 8~9월이 가장 높게 일어난다(유, 2006).

(2) 파랑

낙동강과 인접한 부산항의 파랑자료 분석결과에 의하면(손, 1999), 부산항의 주파향은 NE, NNE, SSW계열의 3개의 파향이 우세하다.

20년 장기간 파랑 통계로부터 부산항 외해에서의 파고별 출현율은 유의파고 0.5 m 미만이 16.8 %로 정온상태이며, 0.5~1.0 m의 파랑은 41.0 %로 1.0 m미만의 파랑이 대부분을 차지하고 있다. 또한 1.0~1.5 m의 파랑은 24.3 %, 1.5~2.0 m의 파랑은 10.1 %, 2.0~2.5 m의 파랑은 4.5%의 발생율을 보이며, 2.5 m이상의 파랑은 극히 작게 나타났다.

또한 유의파주기의 출현율은 정온상태를 제외하면 4초대 이하가 28.3 %이며 4~5초대는 14.9 %, 5~6초대가 19.3 %로 6초대 미만의 주기를 가진 파랑이 50 %를 초과하고 있음을 알 수 있다. 8~10초대는 3.9~6.3 %를 나타내며 10초 이상의 주기를 가진 파랑도 2.4 %를 차지한다.

2.2 해양기상현황

기상청(www.kma.co.kr)에서 운영하는 가덕도 무인기상관측소의 1년간 (2007년)의 관측자료를 분석한 결과 연평균 풍속은 8.1 m/s 이며, 최대 풍속은 23 m/s 였다. 풍향의 분포를 살펴보면 북서 계열이 24.6 %로 가장 높은 비율로 나타났으며 동 (E)이 16.56 %, 북북서 (NNW)가 11.16 %, 동북동 (ENE)이 10.97 % 순으로 나타났다. 계절별로는 봄철에는 평균 풍속은 5.9 m/s 이며, 북서 계열의 풍향이 22.86 %, 동 계열이 15.32 %로 가장 우세하였다. 여름철에는 평균 풍속은 5.5 m/s 이며 동 (E)풍향이 29.46 %로 가장 우세하였고 북서 (NNW)가 12.82 %, 동남동 (ENE)10.31 %순으로 나타났다. 가을철에는 평균 풍속은 3.2 m/s , 풍향은 동북동 (ENE)이 20.72 %, 북서 (NNW)가 18.86 % 순으로 나타났고 겨울철에는 평균 풍속이 8.08 m/s , 풍향은 북서 (NW)가 42.52 %, 북북서(NNW) 15.74 %순으로 나타났다. 전체적으로 여름철에는 동 (E)계열이, 겨울철에는 북서 (NW)가 우세하였으며 봄철 및 가을철에는 북서 (NW)및 북동 (NE)계열이 고르게 나타나는 것으로 조사되었다.

3. 파랑관측자료 분석 및 결과

3.1 현장파랑관측

천해역의 현장파랑관측은 낙동강 하구역에서 수행하였으며 거제 해상관측부이의 관측자료를 심해의 파랑관측자료로 이용하였다. 낙동강 하구역의 파랑관측지점과 거제 해상관측부이의 위치와 제원은 Fig. 2와 Table 1에 각각 나타내었다.

3.1.1 거제 해상관측부이

기상청 (KMA, Korean Meteorological Administration)에서는 우리나라 주변해역에 5개의 해양기상관측부이 (KMA marine and meteorological buoy)를 운영하고 있다. 본 연구에서는 거제도 해양기상관측부이의 자료를 이용하였다. 거제도 해양기상관측부이는 매시간 풍향, 풍속(평균, Gust), 파향, 파고(최대, 유의, 평균), 파주기, 기압, 기온, 수온 등의 자료를 제공하고 있다. 바람 자료는 매시간 10분 동안 관측하여 백터 평균하여 산출하며, 파랑은 가속도계를 이용하여 20분 동안 1,024개의 자료를 취득하여 유의파고 등을 산출한다. 그러나 해양기상관측부이의 자료는 파향 및 풍향은 16방위로 나타내고, 주기를 소수점 없이 정수로만 표기하고 있으므로 자료 해석을 위한 해상도 (Resolution)는 낮은 편이다.

3.1.2 낙동강 하구역 파랑관측

낙동강 하구역의 파랑관측시기는 계절풍의 영향이 비교적 적은 춘계로서 1차 (2007년 4월 12일 13:00~27일 09:00, 약 15일), 2차 (5월 16일 12:00~30일 10:00, 약 14일)의 2회에 걸쳐 실시하였다. 관측기기는 압력식 파고계 (기기명 : Compaq-WH, Alec electronics co., LTD., japan)를 사용하였고 파고계를 거치대에 장착시킨 후 해저면에 착저하

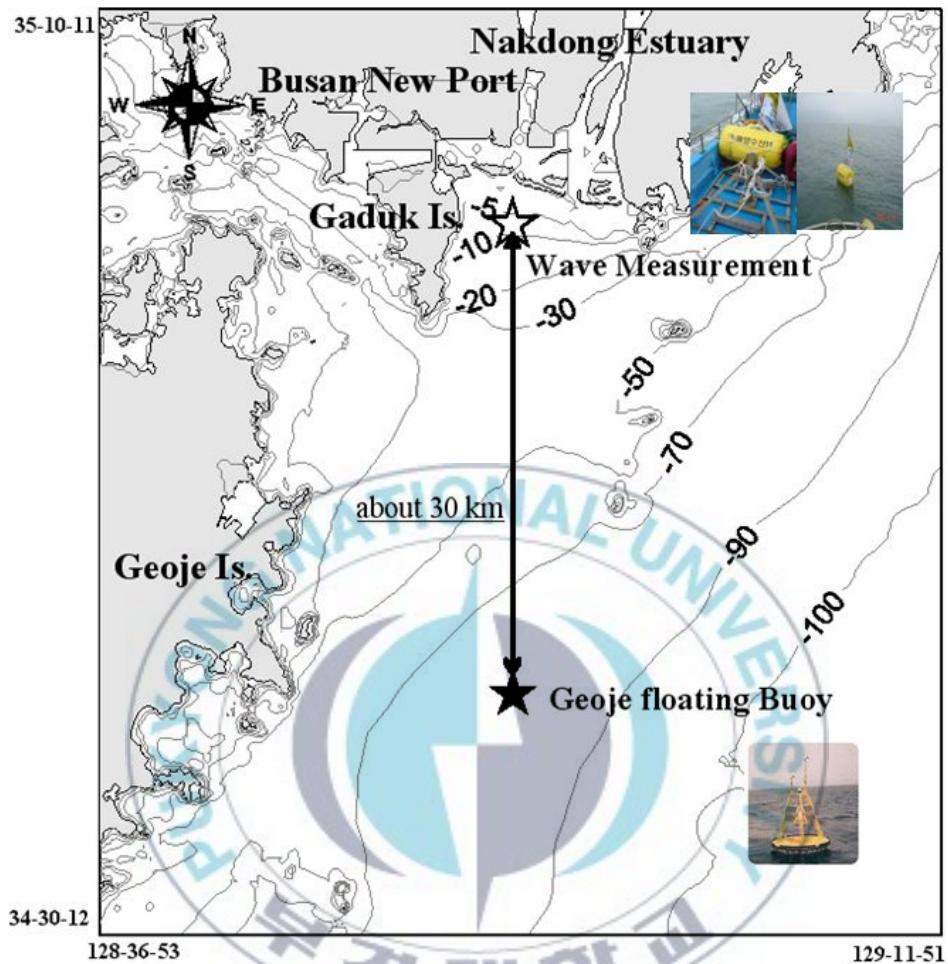


Fig. 2 Location map of study area and the symbol ★ notes Geoje floating buoy (KMA marine and meteorology buoy) and the symbol ☆ notes wave measurement site of Nakdong river estuary.

여 해수면에 부이 (Bouy)를 계류하여 파랑관측지점을 표시하였다. 관측 Mode는 Burst Mode, Sampling Frequency는 4 Hz로 설정하여 매 시간 12분 30초간 수위변동을 관측하여 3,000개의 Data를 획득하였으며 이를 매시간에 대한 대표파랑으로 설정하였다.

실제 해상의 불규칙한 파를 검출하기 위하여 zero-up cross법으로 파

Table 2 Information of location and observation parameter for observation sites

Site	Depth(m)	Location		Observation parameter
St.1	6	Nakdong River Estuary	N35° 02'43'', E128° 53'12''	Wave height, period
St.2	84	Goeje floating buoy	N34° 46', E128° 54'	Wave height, period, direction & Wind speed, direction

고와 주기를 정의하며, 자유표면에 의해 검출되어진 파고는 다음과 같은 식 (1)로 보정하였다.

$$H_c = N \cdot H_p \cdot \cosh(2\pi h/L) \quad (1)$$

여기서, H_c 는 보정된 파고이며, N 은 보정계수, H_p 는 수압에 의해 검출된 파고, $\cosh(2\pi h/L)$ 은 감쇠계수, h 는 평균수위로서 정해지는 수심이며 L 은 분산관계식에 의해 구해지는 파장이다.

3.2 관측자료 분석 및 결과

3.2.1 분석방법

낙동강 하구역에서의 파랑관측기간 동안의 파랑관측자료와 거제 해상관측부이의 파랑 및 기상자료 시계열 분석 및 상관분석을 시행하였다. 거제 해상관측부이에서 관측된 외해 파향에 따라 낙동강 하구역과 거제 해상관측부이를 각각 남서(SW)계열과 북동 (NE)계열로 나누어 각 파향에 따라 통계분석을 시행하였다. 통계분석은 각 파향별 유의파고와 최대파고비 및 주기에 따른 파고출현빈도를 분석하였다. 또한 Q_p 값에 대한 어셀 수(*Ursell Number*)의 변화를 살펴보았다.

관측기간 동안의 외해입사파랑 특성을 알아보기 위하여 낙동강 하구역 파랑관측기간의 거제 해상관측부이 자료도 동시에 비교분석하였다. 또한 외해입사파랑의 연도별 및 계절별 특성을 알아보기 위하여 거제 해상관측부이의 1년간 (2007년)의 자료를 분석하여 파향 및 풍향 분포를 분석하여 낙동강 하구역으로 입사하는 파랑의 주 파향을 살펴보았다. 또한 주 파향의 주기에 따른 파고의 출현빈도 분석을 수행하여 각 파향의 대표파를 분석하였다.

3.2.2 시계열 분석

Fig. 3은 4월과 5월의 낙동강 하구역의 파랑관측기간 동안의 거제 해상관측부이와 낙동강 하구역의 유의파고, 평균주기 및 거제 해상관측부이의 파향, 풍향, 그리고 풍속을 나타낸 것이다. 관측기간 동안의 주 파향은 4월과 5월 모두 북동 (NE)과 남서 (SW)파향이였다. 4월의 거제부이의 평균유의파고는 1.09 m , 최대유의파고는 2.3 m 였으며 낙동강 하구역의 평균유의파고는 0.29 m , 최대유의파고는 0.88 m 였다. 5월의 거제부이의 평균유의파고는 1.1 m , 최대유의파고는 2.7 m 였으며 낙동강 하구역의 평균유의파고는 0.305 m , 최대유의파고는 1.72 m 로 5월의 유의파고가 다소 높았다. 거제부이가 전체적으로 높은 파고를 나타내고 있는데 이는 낙동강 하구역의 수심이 약 6 m 이며 거제 해상관측부이가 84 m 인 것을 감안하면 저면 마찰 및 쇄파 등에 따른 파랑에너지 감소에 기인한 것으로 볼 수 있다. 풍향은 파향에 비하여 비교적 분산성이 크지만 전체적으로 파향과 유사한 분포를 나타내고 있으며 풍속은 거제부이의 파고와 증감의 경향이 유사한 것으로 나타났다. 주기는 낙동강 하구역은 대부분 $4\sim6\text{ sec}$ 에 분포하고 있으나 거제부이는 $2\sim12\text{ sec}$ 로 낙동강 하구역보다 넓은 범위에 분포하고 있음을 알 수 있다.

파고와 풍속의 상관성을 알아보기 위하여 상관분석을 수행한 결과

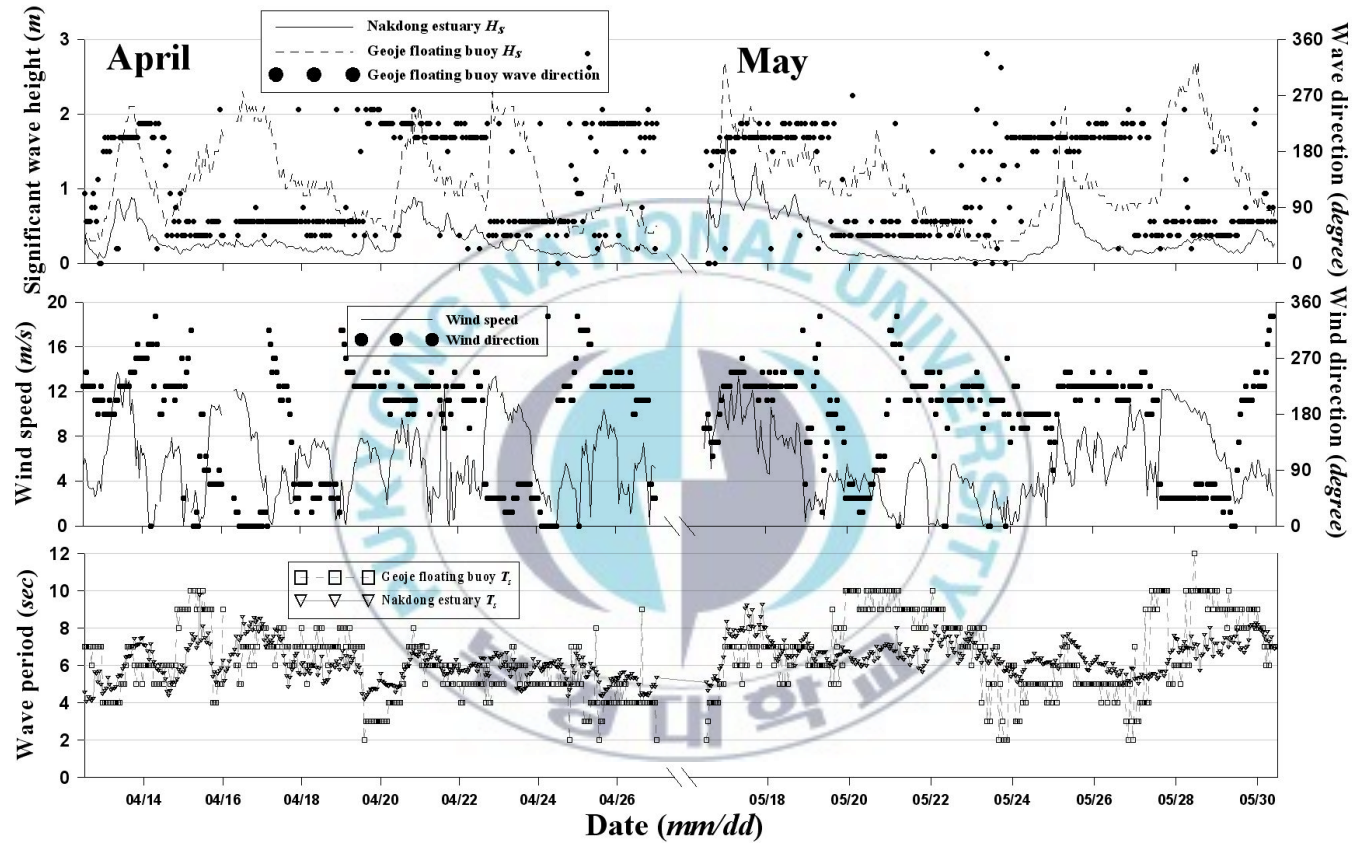


Fig. 3 Time-series of wave measurements in Nakdong estuary and Geoe buoy for 12~17, April and 16~30, May, 2007 and wind measurements in Geoe buoy for same period.

거제부이의 파고와 풍속과의 상관계수는 4월의 경우 0.61, 5월은 0.64였으며 낙동강 하구역의 파고와 풍속과의 상관계수는 4월에 0.36, 5월에 0.47로 거제부이보다 낮게 나타났다. 이는 낙동강 하구역과 거제해상관측부이와 약 30 km 떨어진 거리에 위치하고 있으며 거제부이보다 수심이 훨씬 낮은 천해역이므로 국지적인 바람의 영향뿐만 아니라 외해 입사파랑에도 크게 영향을 받는 것으로 판단되며 특히 외해파향에 따라 낙동강 하구역의 파고 증감이 크게 달라지는 것으로 나타났다. 거제 부이의 파향이 남서 (SW)계열이 우세한 경우 낙동강 하구역과 거제부이의 파고의 상관계수는 0.81~0.91이었으며 북동 (NE)계열의 파향이 우세한 경우는 상관계수가 0.36~0.60으로 낮은 상관성을 보였다. 이는 입사파향에 따라 수심 및 지형적 효과의 차이에 의한 것으로 판단된다. 따라서 거제 해상관측부이의 파고가 2 m 이상인 경우에 주파향이 북동 (NE)과 남서 (SW)인 경우로 구분하여 각 파향의 관측값에 대한 통계분석을 실행하였다.

3.2.3 파향별 관측자료 분석

(1) $H_{max}/H_{1/3}$ 비

일반적으로 설계시 사용되고 있는 최대파고 비는 $H_{max}=(1.6\sim2.0)H_{1/3}$ 이며, 특정한 파고는 설계파 추정치 신뢰도, 계산공식의 정도, 구조물의 중요성 및 파괴 거동특성 등을 감안하여 채택된다. 본 연구에서 얻어진 각 파향별 최대파고 비와 이론적 최대파고비를 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과 혼성제의 직립부 설계시의 관계식인 $H_{max}=1.8H_{1/3}$ 을 초과하는 파가 다소 출현하는 것으로 나타났으며, $H_{max}=2.0H_{1/3}$ 을 초과하는 고파는 거의 나타나지 않았다. 최대파고 비를 살펴보면 거제 해상관측부이의 최대파고 비의 선형회귀식은 각각 $1.62H_{1/3}$, $1.63H_{1/3}$ 으로 상술한 일반적인 관계식보다 다소 높은 값을 나타내었다. 낙동강 하구역의 경우 남서 (SW)계열이 $1.58H_{1/3}$, 북동 (NE)계열이 $1.54H_{1/3}$ 로 북동 계열의 최대파고 비의 선형회귀식이 비교적 낮은 값을 나타내었다.

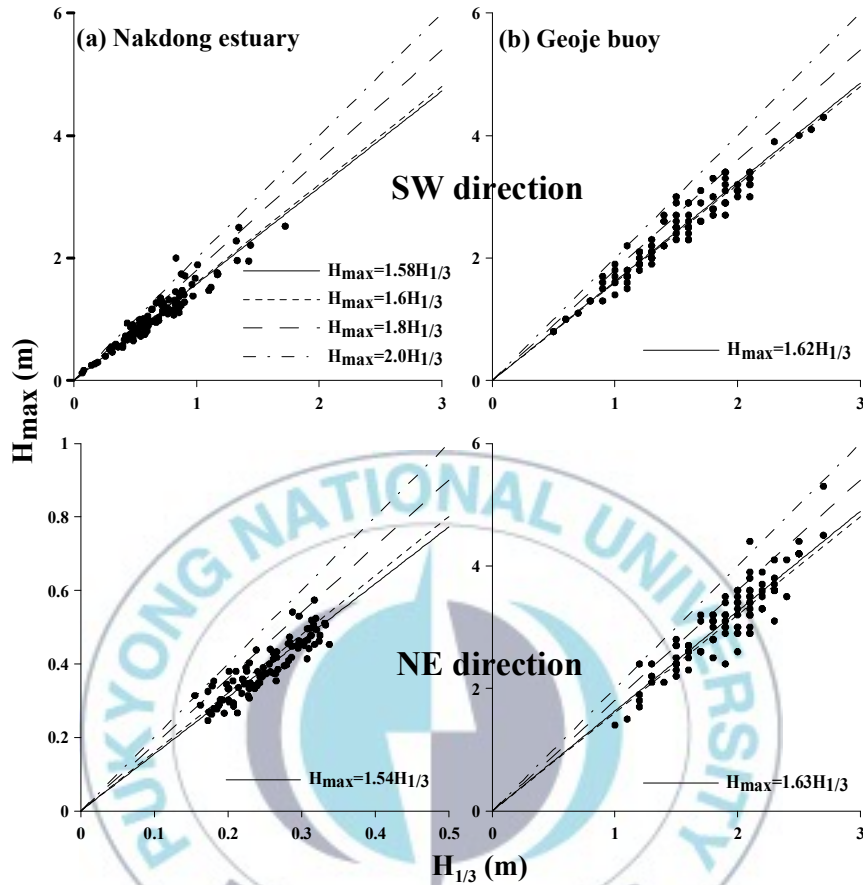


Fig. 4 $H_{max}/H_{1/3}$ ratio: (a) Nakdong estuary (b) Geoje buoy in SW (top plot) and NE (bottom plot) direction.

(2) 파향별 주기에 따른 파고출현빈도

각 파향별 파랑출현빈도비와 0.01, 0.05, 0.1의 파형경사 (H/L)는 Fig. 5에 나타내었다. 남서 (SW)계열의 경우 파형경사는 0.01~0.05사이에 대부분의 파형경사가 분포하는 것으로 나타났으며 일부는 0.05 이하에 분포하는 것으로 나타났다. 북동 (NE)계열의 낙동강 하구역의 파형경사는 대부분 0.01이하로 분포하는 것으로 나타났다. 북동 (NE)계열의 경우 최대 풀현 파랑은 주기 5 sec의 파고 0.2 m가 약 25 %의 출현율을 나타내었으며 남서 계열의 경우 주기 약 6~7 sec, 파고 0.7 m정

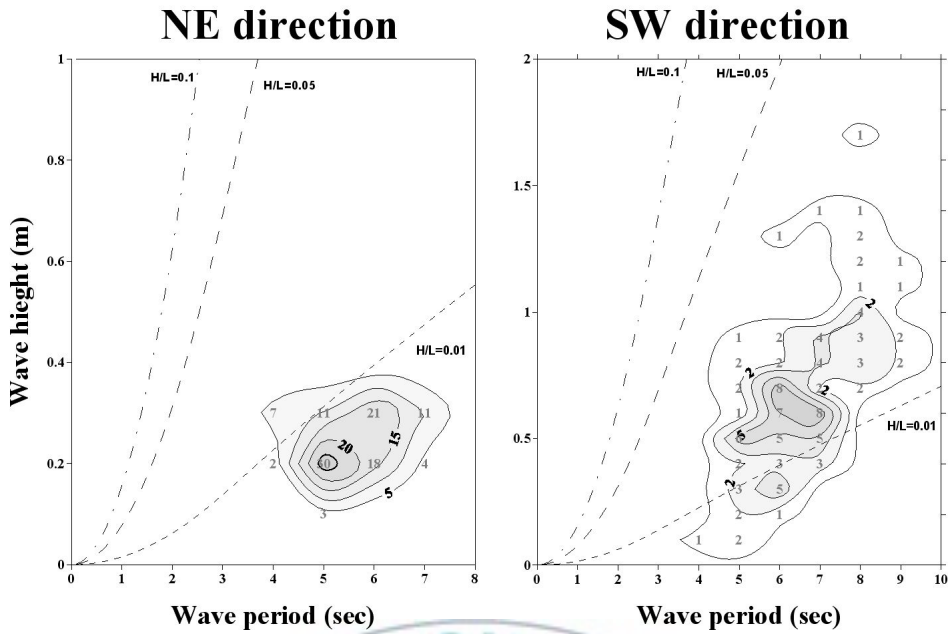


Fig. 5 Wave height and period ratio in Nakdong estuary.

도의 파랑이 약 7.5 %의 출현율을 나타내었다.

(3) 파향별 Q_p 값에 대한 파형경사 (H/L) 및 어셀 수 (U_r Number)

Goda(1975)는 Longuet-Higgins(1962)가 제안한 스펙트럼 폭에 대한 파라미터 ε 대신 스펙트럼 첨예도를 나타내는 식 (1)와 같은 Q_p 를 제안하였다.

$$Q_p = \frac{2 \int_0^{\infty} f S(f)^2 df}{\left[\int_0^{\infty} S(f) df \right]^2} \quad (2)$$

여기서, $S(f)$ 는 스펙트럼 밀도이다. Q_p 는 백색잡음일 경우 1.0의 값을 취하며, 스펙트럼의 피크가 뽕족할수록 큰 값을 취한다. 파균형성을 비롯한 해양파랑의 통계적 특성은 스펙트럼 첨예도와 밀접한 관계를 가지므로 해양파랑특성의 통계적 변동기구를 표현하는 인자로서 Q_p 가 유용한 것으로 제시된 바 있다 (Ryu et al., 1989). 따라서 각 파향의 Q_p 의 변화와 Q_p 에 대한 파형경사 (H/L)와 Ursell Number ($U_r =$

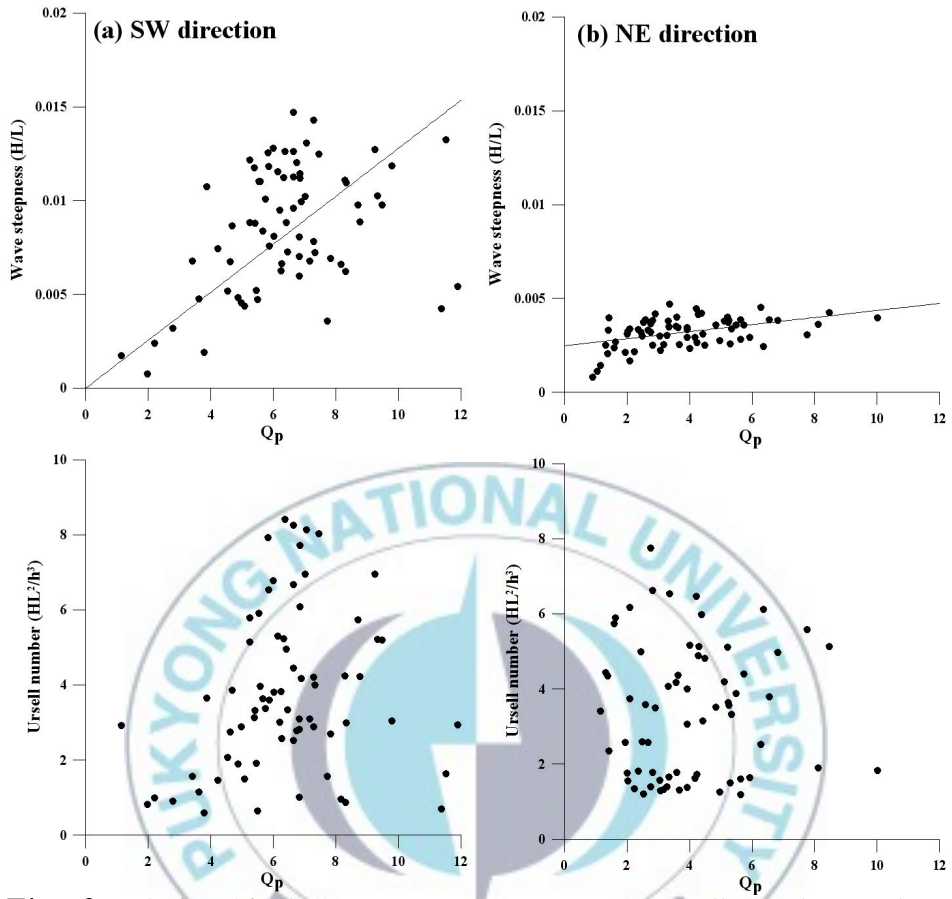


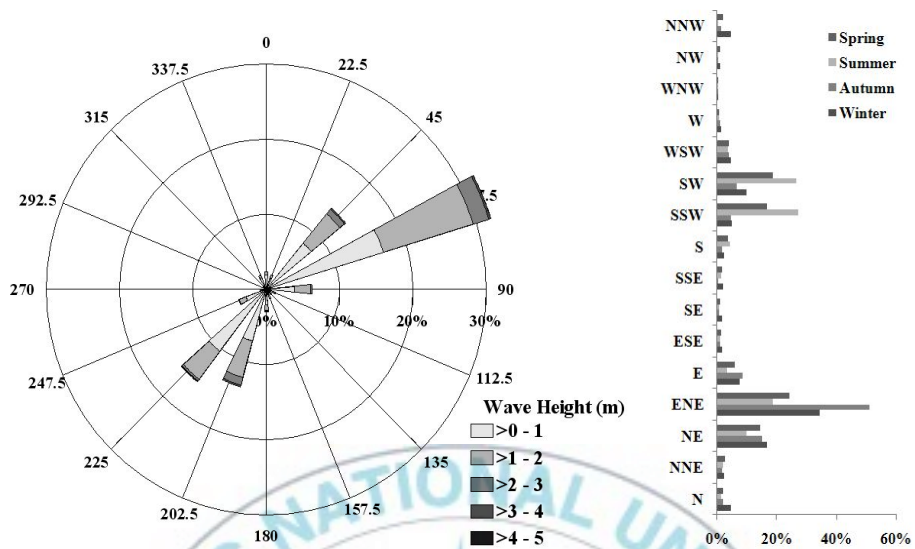
Fig. 6 Relationship between wave steepness, Ursell number and Q_p . Left is SW direction and right is NE direction, respectively.

HL^2/h^3)를 분석하였다(Fig. 5). 파형경사와 U_r 의 파장 (L)은 식 (2)의 분산관계식을 이용하여 구하였다.

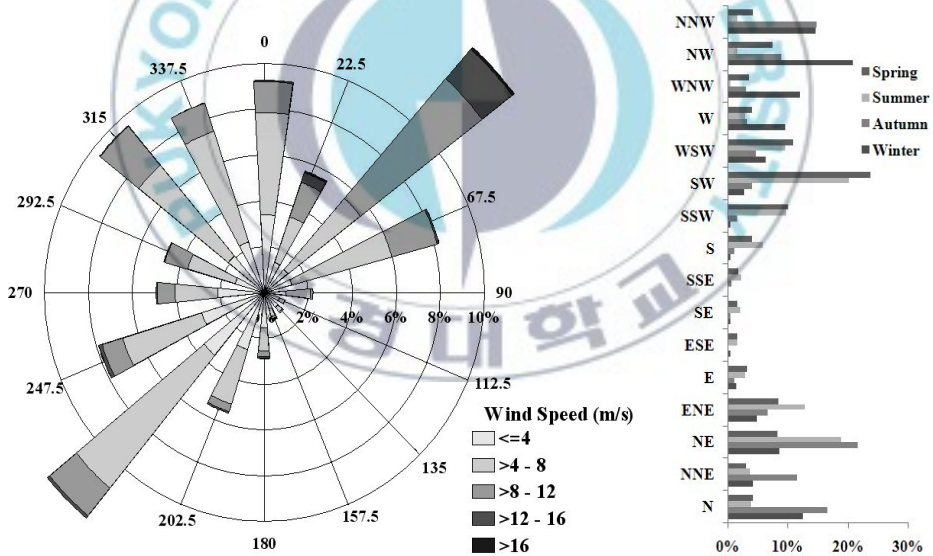
$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (3)$$

여기서, T 는 주기이며 h 는 수심이다.

남서 (SW)계열의 경우 Q_p 가 증가함에 따라 파형경사가 증가하는 선



(a) Directional distribution of wave



(b) Directional distribution of wind

Fig. 7 Directional Distribution of wave (a) and wind (b), bar charts are seasonal directional distribution observed by Geoje floating buoy in 2007.

형적인 관계를 나타내었으며 북동 (NE)계열의 경우 Q_p 가 증가에 따라 파형경사가 소폭 증가하였으나 Q_p 값이 2 정도 에서 파형경사는 거의 증가하지 않았다. 남서 계열의 경우 Q_p 값이 약 6정도에서 Ur 이 최대 값을 나타내었으며 이후로는 Ur 이 감소하는 것으로 나타났으며, 북동 계열은 Q_p 값의 변화에 따른 Ur 의 변화가 거의 나타나지 않았다.

3.2.4 거제 해상관측부이자료 분석

(1) 파향, 풍향 분포

거제 해상관측부이의 1년간 (2007년)의 연, 계절별 파향 및 풍향 분포는 Fig. 7에 나타내었다. 본 논문에서는 풍향과 파향 모두 진행하여 들어오는 방향으로 표기하였다. 먼저 풍향을 살펴보면 북동 (NE)과 남서 (SW)가 각각 14.3 %, 12.8 %로 가장 탁월하였으며, 다음으로 북서 (SW)9.6 %, 북북서 (NNW)8.7 % 순이었다. 특히 남동 (SE)계열의 풍향은 거의 나타나지 않았다. 계절별로는 봄에는 남서 (SW)풍향이 가장 탁월하였으며, 여름에는 남서 (SW), 북동 (NE), 가을에는 북동 (NE), 겨울에는 북서 (NW)계열의 풍향이 가장 탁월하였다. 이는 계절 풍의 영향이 잘 나타난 것으로 봄, 여름에는 남 (S)계열의 풍향이, 가을, 겨울에는 북 (N)계열의 풍향이 탁월하였다. 파향은 풍향에 비하여 비교적 분산도가 적었으며 탁월 파향은 동북동 (ENE)과 남서 (SW)로 각각 32.1 %와 15.5 %였고 이는 풍향과 유사한 결과이다. 풍향은 북서 (NW)계열도 다수 출현하였으나 파향은 북서 (NW)계열은 거의 나타나지 않았는데 이는 북서쪽에 거제도 등 육지가 위치하여 외해와 연결된 북동 (NE)방향에서는 파랑이 유입되나 북서 (NW)방향에서는 파랑이 유입되지 않음에 기인한 것으로 볼 수 있다. 또한 풍향과 파향 모두 남동 (SE)계열은 거의 나타나지 않았다. 계절별로는 봄에는 동북동 (ENE)과 남서 (SW), 여름에는 남남서(SSW) 및 남서 (SW)가, 가을에는 동북동 (ENE), 겨울에는 동북동 (ENE)및 북동 (NE)이 탁월한 파향으로 나타났다. 계절별로도 풍향과 파향이 유사한 분포를 가지는

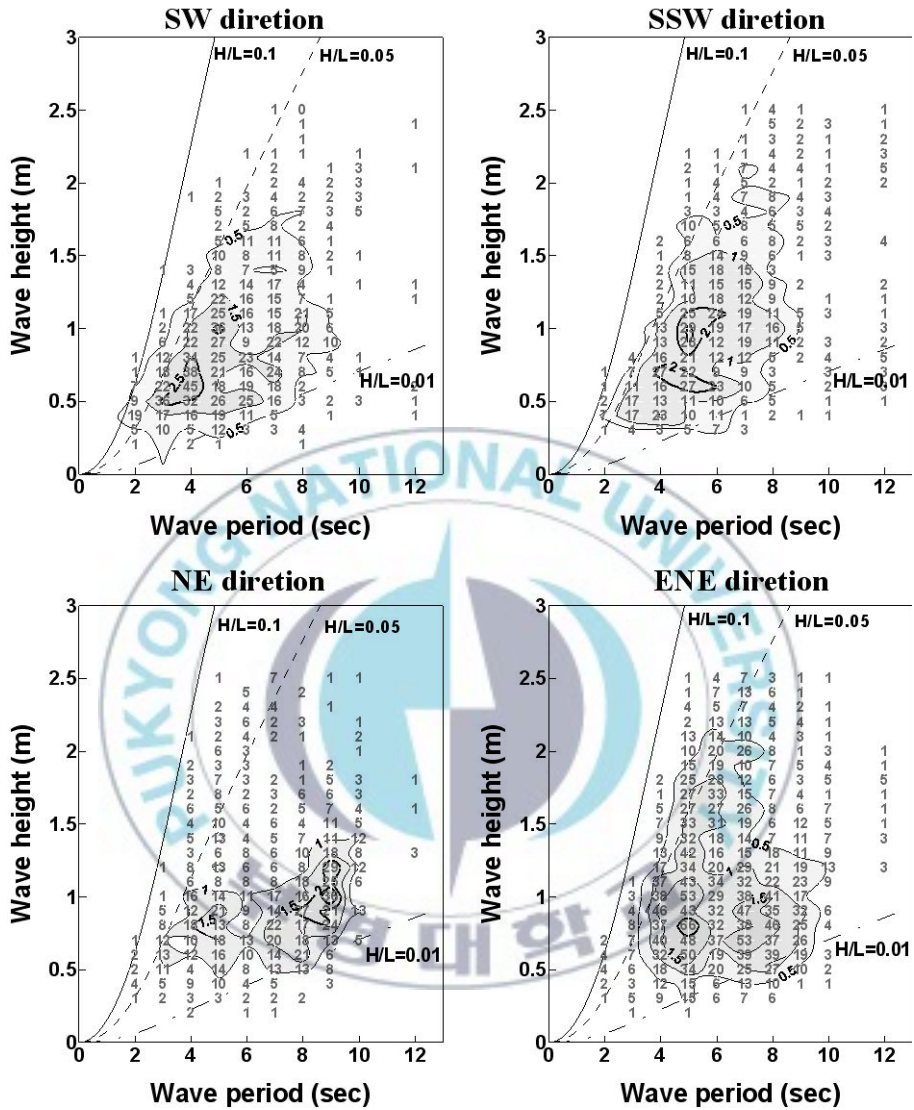


Fig. 8 Wave height and period ratio for each direction SW, SSW, NE and ENE.

것으로 나타났다.

(2) 파향별 파랑출현빈도

Fig. 8은 거제 해상관측부이의 파향별 파랑출현빈도를 나타낸 것이다. 남서 (SW)계열의 경우 주기 4 sec, 파고 0.6 m, 남남서 (SSW)파향은 주기 5 sec, 파고 1 m, 북동 (NE)계열의 경우 주기 9 sec, 파고 1 m, 동북동 (ENE)계열의 경우 주기 5 sec, 파고 0.8 m의 파랑이 가장 높은 출현빈도를 나타내었다.

남서 (SW)계열의 경우 최대도수 출현 주기가 1peak로 나타났으며 4~5 sec의 단주기였으나 북동 (NE)및 동북동 (ENE)계열에서는 4~5 sec의 단주기와 6~7 sec의 장주기에 다수의 파랑이 출현하는 2peak의 최대도수 출현이 나타났다. 이는 북동 (NE)및 동북동 (ENE)계열은 외해입사파랑 뿐 아니라 국지적인 풍파의 발달로 인한 단주기 파랑이 강하게 작용한 것으로 판단된다. 모든 파향에서 파형경사는 대부분 0.01~0.05사이에 분포하였으며 0.05이상의 파형경사와 0.01이하의 파형경사도 다소 나타났으나, 0.1이상의 파형경사는 모든 파향에서 나타나지 않았다.

4. 입사파향에 따른 파랑변형 수치모의

4.1 SWAN 모형의 개요

4.1.1 기본방정식

본 연구에서는 공간적인 파랑변형 특성을 파악하기 위해서 SWAN 모형을 사용하였는데 SWAN (Simulating WAVes Nearshore, delft Univ. Tech., Netherland) 모델은 바람, 수심 및 해류 조건으로부터 근해, 호수 및 강어귀에서 파랑의 특성인자를 추정하는 제3세대 수치 파랑모델이다 (Booij et al., 1999; Ris et al., 1999).

SWAN 모델 (version 40.51)은 파랑변형 계산용 수치모형으로서 바람에 의한 파의 생성, 수심변화에 따른 파의 굴절, 백파와 바닥마찰, 쇄파에 의한 파의 소멸, 구조물에 의한 반사 및 회절 등을 고려할 수 있으며, 주어진 바람과 해저면 및 해류 조건에 대한 연안역, 호수 및 하구의 파랑변형을 계산한다. 이 모형의 기본 방정식은 파랑작용의 평형 방정식 (wave action balance equation)이며, 사용되는 파랑에너지의 원천항 (source terms)에 따라 제 1세대, 제 2세대, 제 3세대 모형으로 구분한다.

심해파가 다방향·다주기의 불규칙파로 주어지므로, 수치모형은 불규칙파의 전파변형을 정도 높게 계산할 수 있어야 하며, 특히 합성파의 효과인 쇄파와 바닥마찰을 현실성 있게 고려하기 위해서는 방향별, 주기별 성분파를 동시에 해석할 수 있는 모형이 필수적이다. SWAN 모형은 방향 분산성이 강한 불규칙파의 해석에 유리하며 각 성분파에 대한 계산이 동시에 이루어지므로 각 성분파의 합성과 정보를 필요로 하는 불규칙파의 부분 쇄파 및 해저마찰을 정도 높게 고려할 수 있는 장점이 있다.

또한 대상해역 주위의 상세한 수심을 반영하기 위해 계산영역을 여러 단계의 격자 간격을 가지는 큰 격자, 중간격자, 작은 격자 등으로

구분하고, 각 영역간의 연결은 SWAN 코드에 내장되어 있는 Nesting 기능을 이용하여 각 성분파의 파고와 전파방향이 정도 높게 전달되도록 할 수 있다. 실제적인 계산을 위해서는 물리적인 효과를 동시에 고려하여 수치실험을 수행하는 것이 타당하므로 계산영역에서의 바람에 의한 파랑에너지의 생성과 백파, 쇄파, 저면 마찰 등에 의한 파랑에너지의 소산, 비선형 상호작용에 의한 에너지 교환 그리고 심해입사파 제원을 동시에 반영하여 수치실험을 수행한다.

SWAN 모형에서 고려되는 전파과정 (propagation processes)은 다음과 같다.

- ◆ 공간좌표 상에서의 이류 수송 (advection)
- ◆ 수심과 흐름에 의한 굴절 현상 (refraction)
- ◆ 수심과 흐름에 의한 천수 현상 (shoaling)
- ◆ 장애물에 의한 파랑의 차폐, 반사 및 회절 (blocking, reflection and diffraction)

한편, SWAN 모형은 다음과 같은 원천항을 고려한다.

- ◆ 바람에 의한 파랑에너지 생성
- ◆ 백파에 의한 파랑에너지 소산
- ◆ 쇄파에 의한 파랑에너지 소산
- ◆ 저면 마찰에 의한 파랑에너지 소산
- ◆ 비선형 상호작용에 의한 에너지 교환(제 2차 비선형 상호작용, 제 3차 비선형 상호작용)

쇄파대에서 나타나는 비선형성은 강하지만 SWAN 모형에서는 파랑은 2차원 작용스펙트럼으로 표현된다. 강한 비선형 조건에서도 스펙트럼을 이용하는 이유는 스펙트럼이 그러한 조건의 파랑을 통계적으로 충분히 서술할 수는 없지만 파랑의 2차 모멘트의 스펙트럼 분포는 예측이 가능하기 때문이다. 여기서 고려되는 스펙트럼은 에너지 밀도 스펙트럼 (energy density spectrum) $E(\sigma, \theta)$ 가 아니고 작용 밀도 스펙트럼 (action density spectrum)은 보존되지만 에너지 밀도 (energy

density)는 보존되지 않기 때문에 작용 에너지보다는 일반화된 물리량이다. 작용 밀도 스펙트럼과 에너지 밀도 스펙트럼의 관계는 다음과 같다.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (4)$$

여기서, σ 는 각주파수 (intrinsic angular frequency)로 절대 각주파수 (absolute angular frequency) ω 와 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$\omega = \sigma + \vec{K} \cdot \vec{U} \quad (5)$$

여기서, $\vec{K}$ 와 $\vec{U}$ 는 각각 파수와 유속의 벡터이다.

1) 작용 평형 방정식

파랑 스펙트럼의 발달은 작용평형 방정식에 의하여 기술된다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (6)$$

위 식에서 좌변의 제 1항은 작용 밀도의 시간 변화량, 제 2항과 제 3항은 지리적 공간에서의 작용전파, 제 4항은 수심과 흐름의 변화에 의한 상대주파수의 천이 그리고 제 5항은 수심과 흐름에 의한 굴절을 나타낸다. 선형파 이론에 의한 파랑의 전파속도는 아래와 같다.

$$C_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad (7)$$

$$C_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad (8)$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \vec{K} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (9)$$

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial\sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{K} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (10)$$

여기서, s 와 m 은 각각 파향선 (wave ray)과 파향선에 수직인 좌표를 의미한다.

다음의 파향 평형방정식의 우변은 원천항 (source and dissipation)을 나타내며 이는 파랑의 생성, 소산 및 비선형상호작용에 의한 에너지 전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (11)$$

여기서, S_{in} 은 바람에 의한 에너지 유입, S_{ds} 는 파랑에너지의 소산, S_{nl} 은 비선형 파랑간 상호작용을 나타낸다.

2) 바람에 의한 에너지 유입

SWAN 모형에서 바람에 의한 파랑의 생성은 다음 식으로 표현한다.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (12)$$

여기서, A 는 선형파의 성장을 의미하며, BE 는 파의 지수적 성장이다. SWAN 모형에서 풍속 U_{10} 은 10 m 고도의 값이며, 모형에 적용되는 마찰속도 (friction velocity)는 다음과 같이 정의된다.

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (13)$$

여기서, C_D 는 마찰계수 (friction coefficient)로 다음과 같이 정의된다.

(Wu, 1982)

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 s/m \times U_{10}) \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (14)$$

바람에 의한 파의 선형 성장을 계산하는 A는 philips(1957)에 의한 공진 기구를 반영하는 것으로, Pierson-Moskowitz(PM) 주파수 보다 낮은 저주파의 성장을 제한하기 위해 Cavaleri Malanotte-Rizzoli (1981)의 식을 사용 한다 (Tolman, 1992).

$$A = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{g^2 2\pi} [U_* \max(0, \cos(\theta, \theta_m))]^4 H \quad (15)$$

$$H = \exp(-(\sigma/\sigma_{PM}^*)^{-4}) \quad \text{with} \quad \sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad (16)$$

여기서, θ_m 는 풍향, H 는 필터, σ_{PM}^* 는 Pierson & Moskowitz에 따른 완전발달해상상태 (fully developed sea state)상에서 첨두주파수 (peak frequency)이다.

한편, B 는 Miles(1957)의 전단기구를 나타내며 SWAN 모형에서는 Komen et al.(1984)의 식과 Janssen(1991)의 식 중에서 선택할 수 있도록 한다. Komen et al.(1984)의 식은 Snyder et al(1981)의 식에 근거를 두고 있으며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{k} = \left(E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-2} \quad (17)$$

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (18)$$

SWAN 모형은 두 가지 형태의 바람 계산식을 가지므로 앞의 식에 적

용되는 계수들도 두 가지의 형태를 가진다.

Komen et al. (1984)식의 적용시 다음과 같다.

$$C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}, \quad \delta = 0, \quad P = 4 \quad (19)$$

Janssen(1992) 식의 적용시 다음과 같다.

$$C_{ds} = 4.10 \times 10^{-5}, \quad \delta = 0.5, \quad P = 4 \quad (20)$$

이 상수들은 Komen et al.(1984)과 Janssen(1991)이 이상적인 파랑성장 조건하에서의 에너지 균형을 고려하여 얻은 것이다.

3) 저면에 의한 에너지 소산

저면에서 에너지 소산은 저면마찰 (bottom friction), 저면운동 (bottom motion), 침투 (percolation) 및 불규칙 저면상의 산란 (bottom scattering) 등에 의하여 발생한다 (Shemdin et al., 1978). 모래로 구성된 대륙붕에서의 에너지 소산은 주로 마찰에 의하여 발생한다. JONSWAP 실험에서 스펙트럼 파랑 모형에 사용할 수 있는 마찰 소산식을 유도하였는데 (Hasselmann et al., 1973) 이 식은 선형 모형으로서 마찰계수의 선택이 적당한 경우 여러 조건 특히 너울과 폭풍에 대해서 좋은 결과를 나타낸다.

SWAN 모형에서는 Weber(1991)의 식을 사용하여 저면 마찰 소산을 계산한다.

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (21)$$

여기서, C_{bottom} 은 저면 마찰계수로서 일반적으로 U_{rms} 로 정의되는 저

면에서의 궤도운동 (bottom orbital motion)에 영향을 받는다.

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (22)$$

JONSWAP에서 사용된 경험적인 선형 모형에서는 $C_{bottom} = 0.038m^2sec^{-3}$ 식을 사용하였는데 이 값은 너울에 대해서도 적용할 수 있다. 일반적으로 저면마찰 계수는 파랑 조건 (wave condition)에 의존하지만, Bouws and Komen(1983)이 풍파에 대해서 제안한 $C_{bottom} = 0.067m^2sec^{-3}$ 식은 많은 경우에 유효한 것으로 보고된 바 있다. (Cavaleri et al., 1989; Tolman, 1994; Luo and Monbaliu, 1994) Colins(1972)의 항력 마찰 모형에서는 다음과 같은 식이 유도된다.

$$C_{bottom} = C_f g U_{rms} \quad (23)$$

여기서, $C_f = 0.015$ (Collins, 1972)이며, Madsen et al.(1988)의 와점성 모형에서는 다음 식을 사용한다.

$$C_{bottom} = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms} \quad (24)$$

여기서, f_w 는 Jonsson(1966) 공식으로부터 구해지는 무차원 마찰계수이다.

$$\frac{1}{\sqrt[4]{f_w}} + \log_{10} \left[\frac{1}{\sqrt[4]{f_w}} \right] = m_f + \log_{10} \left[\frac{a_b}{K_N} \right] \quad (25)$$

여기서, $m_f = -0.08$ (Johnson and Carlsen, 1976)이며, a_b 는 저면 부근에서 수립자 운동의 진폭 (excursion amplitude)이며, K_N 은 저면의 조도이다.

$$a_b^2 = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (26)$$

여기서 a_b/K_N 가 1.57보다 작으면 무차원 마찰계수는 $f_w = 0.30$ 으로 한다 (Johnson, 1980).

4) 쇄파에 의한 에너지 소산

불규칙한 파랑장 (Random wave field)에서 수심에 의하여 발생하는 쇄파에 의한 파랑 에너지 소산의 계산에는 단파 (bore)모형이 적용될 수 있다 (Battjes and Janssen, 1978; Thronton and Guza, 1983). 쇄파에 의한 단위 평면당 평균 에너지 소산 (D_{tot})은 다음과 같이 정의된다.

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \right) Hm^2 \quad (27)$$

여기서, $\alpha_{BJ} = 1$ 이다. 또한 Q_b 는 쇄파로 다음의 식으로 계산된다.

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{Hm^2} \quad (28)$$

여기서, Hm 은 주어진 수심에서의 최대파고이며, $\bar{\sigma}$ 는 평균 주파수로 아래와 같이 계산된다.

$$\bar{\sigma} = E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sigma E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (29)$$

쇄파 소산의 스펙트럼 분포 특성을 Battjes and Beji(1992) 와 Vincent et al. (1994)의 실험으로부터 유추해 보면 쇄파가 파랑 스펙트럼의 형상에는 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 이러한 사실에 근거하여 Eldeberky and Battjes(1995)는 파랑 스펙트럼에 비례하는 쇄파 소산 공식을 도출하였으며 이것이 SWAN 모형에서 사용되는 쇄파 소산 공식이다.

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = D_{tot} \frac{S(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (30)$$

SWAN 모형에서 최대파고 $Hm = Yd$ 로 계산되며, 여기서, Y 는 쇄파계수이고, d 는 총 수심이다.

5) 4파 비선형상호작용

심해에서 4파 비선형상호작용 (또는 제 3차 비선형상호작용, quadruplet wave-wave interactions) 효과는 스펙트럼의 첨두주파수를 저주파쪽으로 이동시키는 것이다. 이 현상은 약 비선형성으로 수학적인 방정식은 Hasselmann(1962)에 의하여 도출된다. 4파 비선형상호작용을 엄밀하게 계산하는 데는 매우 많은 계산시간이 소요되므로 SWAN 모형에서는 이산 상호작용 근사법 (discrete interaction approximation)을 사용하고 있다. 이 근사법은 무수히 많은 4파 상호작용 배치 중에서 가장 영향이 큰 하나의 배치만을 고려하는 것이다 (실제로는 이 배치에 대한 경상[mirror symmetrical]도 고려하므로 총 배치수는 2개임). 배치에 포함된 4파의 주파수는 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \quad (31)$$

$$\sigma_3 = \sigma(1 + \lambda) = \sigma^+ \quad (32)$$

$$\sigma_4 = \sigma(1 - \lambda) = \sigma^- \quad (33)$$

여기서, $\lambda = 0.25$ 이다. 첫 번째 배치에서 두 개의 파수 벡터는 동일하다. 반면에 다른 두 파는 각각 상대적으로 $\theta_3 = -11.5^\circ$, $\theta_4 = -33.6^\circ$ 의 각도를 갖는다.

한편, 두 번째 배치에서는 $\theta_3 = -11.5^\circ$, $\theta_4 = 33.6^\circ$ 가 된다. 심해에서의 이산 상호작용 근사는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta) \quad (34)$$

위 식 우변의 제 1항은 제 1배치에 의한 비선형상호작용이며 제 2항은 제 2배치 (제 1배치의 경상 배치)에 의한 비선형항으로 아래와 같이 계산된다.

$$S_{nl4}^*(\sigma, \theta) = 2\delta S_{nl4}(\alpha_1\sigma, \theta) - \delta S_{nl4}(\alpha_2\sigma, \theta) - \delta S_{nl4}(\alpha_3\sigma, \theta) \quad (35)$$

여기서, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = (1 + \lambda)$, $\alpha_3 = (1 - \lambda)$ 이며, 각 항은 다음과 같이 계산된다 ($i=1, 2, 3$).

$$\begin{aligned} \delta S_{nl4}(\alpha_i\sigma, \theta) = C_{nl4}(2\pi)^2 g^{-4} \left(\frac{\sigma}{2\pi} \right)^{11} [E_{nl4}^2(\alpha_i\sigma, \theta) \frac{E(\alpha_i\sigma^+, \theta)}{(1 + \lambda)^4} + \frac{E(\alpha_i\sigma^-, \theta)}{(1 - \lambda)^4} \\ - 2 \frac{E(\alpha_i\sigma, \theta)E(\alpha_i\sigma^+, \theta)E(\alpha_i\sigma^-, \theta)}{(1 - \lambda^2)^4}] \end{aligned} \quad (36)$$

여기서, $C_{nl4} = 3 \times 10^7$ 이다. 한편, $S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)$ 는 위 식에 상대 파향을 대

입하여 계산할 수 있다.

Hasselmann(1981)은 JONSWAP, 스펙트럼에 대하여 천해에서의 4파 상호작용을 정밀하게 계산한다. 그들은 이 계산으로부터 천해에서의 상호작용을 심해파에 대한 값으로 표현하는 아래와 같은 공식을 도출하여 SWAN 모형에 도입하였다.

$$S_{n/4, \text{finitedepth}} = R(k_p d) S_{n/4, \infty \text{initewater}} \quad (37)$$

여기서, R은 다음과 같이 정의된다.

$$R(k_p, d) = 1 + \frac{C_{sh1}}{K_p d} (1 - C_{sh2} \cdot K_p d) \exp(C_{sh3} - K_p d) \quad (38)$$

여기서, K_p 는 JONSWAP 스펙트럼의 첨두 주파수이고 d 는 수심이다. 또한, $C_{sh1} = 5.5$, $C_{sh2} = 6/7$, $C_{sh3} = -1.25$ 로 주어진다.

6) 3파 비선형상호작용

파장과 파고에 비하여 수심이 많아지게 되면 3파 비선형상호작용(또는 제2차 비선형상호작용, triad interactions)의 영향을 무시할 수 없게 된다. 3파 비선형 상호작용은 파랑의 에너지를 저주파 영역에서 고주파 영역으로 이동시킨다. 3파 비선형상호작용에 의해서 생성되는 저주파 영역은 SWAN 모형에서는 고려하지 않는다. Eldeberky(1996)는 3파 비선형상호작용을 계산하기 위한 LTA (Lumped Triad Approximation) 근사법을 제안하였으나, 본 모형에서는 이를 다소 변형한 Eldeberky & Battjes(1995)의 DTA (Discrete Triad Approximation) 방법을 채택하였다.

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^{-}(\sigma, \theta) + S_{nl3}^{+}(\sigma, \theta) \quad (39)$$

$$S_{nl3}^+ = \max(0, \alpha_{EB} 2\pi c c_g J^2 |\sin(\beta)| [E^2(\frac{\sigma}{2}, \theta) - 2E(\frac{\sigma}{2}, \theta)E(\sigma, \theta)]) \quad (40)$$

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(2\sigma, \theta) \quad (41)$$

여기서, α_{EB} 는 조정가능 비례상수이고, β (biphase)는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left[\frac{0.2}{Ur}\right] \quad (42)$$

그리고 Ur(Ursell number)은 다음과 같이 주어진다.

$$U_\varphi = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{Hs \overline{T^2}}{d^2}, \quad \overline{T} = \frac{2\pi}{\sigma} \quad (43)$$

또한, 상호작용계수 J는 다음과 같이 정의된다 (Madsen & Sorensen, 1993).

$$J = \frac{K_{\sigma/2}^2 (gd + 2c_{\sigma/2}^2)}{K_\sigma d (gd + \frac{2}{15}gd^3k_\sigma^2 - \frac{2}{5}\sigma^2d^2)} \quad (44)$$

3파 비선형 상호작용은 $0.1 < U_\varphi < 10$ 인 경우에만 계산한다.

7) 회절효과

본 연구에서 사용한 SWAN 모형은 섬 및 구조물 배후에서의 회절효과를 고려하기 위하여 굴절과 회절에 대한 환경사 방정식 (Mild slope equation)에 기초한 근사법을 사용하였다. 가장 간단한 형식으로 흐름이 없다는 ($c_\sigma = 0$) 가정하에 즉, 회절이 없는 경우에 대하여 공간과

스펙트럼상의 전파속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_{x,0} = \frac{\partial w}{\partial k} \cos(\theta) \quad (45)$$

$$c_{y,0} = \frac{\partial w}{\partial k} \sin(\theta) \quad (46)$$

$$c_{\theta,0} = -\frac{1}{k} \frac{\partial w}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial n} \quad (47)$$

여기서, k 는 파수이고 n 은 파향선에 수직이며, 파수 k 와 회절 매개변수 δ 의 관계는 eikonal 방정식을 이용하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$k^2 = k^2(1 + \delta) \quad (48)$$

여기서, δ 는 회절 매개변수로 다음과 같다.

$$\delta = \frac{\nabla(cc_g \nabla H_s)}{cc_g H_s} \quad (49)$$

따라서 회절로 인한 전파 속도는 다음과 같이 정의된다.

$$c_x = c_{x,0} \bar{\delta} \quad (50)$$

$$c_y = c_{y,0} \bar{\delta} \quad (51)$$

$$c_\theta = c_{\theta,0} \bar{\delta} - \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial x} c_{y,0} + \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial y} c_{x,0} \quad (52)$$

여기서, $\bar{\delta} = \sqrt{1 + \delta}$ 이다.

4.1.2 적용방법

모델에서 작용보존방정식은 유한차분법으로 해석하였으며, 정상상태를 가정할 경우 독립변수 시간은 평형방정식으로부터 제거된다. 또한, 4개의 90° 간격 구역에서 일차풍상차분법과 Four sweep법과 같은 전진법으로 해석하며, 스펙트럼공간에서 여러변수들을 풍상차분법과 중앙차분법을 같이 사용하여 음해법으로 수치해석한다.

원천항에 대한 수치해석법은 양해법과 음해법을 같이 사용하며, 양해법은 스펙트럼에서 원천항의 양의 부분에 사용되었고, 음해법은 4차 상호작용을 제외한 음의 원천항을 해석하는데 사용된다. 4차 상호작용은 계산의 효율성을 고려하여 양해법으로 계산하였으며, Nesting기법을 사용하여 상세역과 같은 높은 정밀도를 요구하는 지역에 적용한다. 또한, JONSWAP스펙트럼을 이용하여 측면과 외해측 경계조건을 만들어 적용한다.

$$S(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_m} \right)^{-4} - \frac{1}{2} \frac{(f-f_m)}{\sigma f_m}} \quad (53)$$

여기서, α : Phillips 상수 (Phillips' constant), f_m : 첨두주파수 (peak frequency), ρ : 첨두향상계수 (peak enhancement constant)이다. σ 는 스펙트럼의 폭을 결정하는 파라미터로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_a \text{ for } f \leq f_m \\ \sigma &= \sigma_b \text{ for } f > f_m \end{aligned}$$

Hasselmann et al.(1973)이 북해에서 관측한 심해파랑자료의 분석결과에 의하면, 취송거리 (fetch)와 풍속의 함수로 결정되며, ρ , σ , σ_b 의 평균값은 각각 3.3, 0.07, 0.09로 나타난다. 특히, ρ 의 분포 범위는 1.0~6.0이고, 평균파향은 아래와 같이 정의된다 (Kuik, 1988).

$$\theta_{mean} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\int \sin(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \cos(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right\} \quad (54)$$

SWAN 모델의 광역 결과에서 Nesting 기법을 사용하여 협역에 대하여 계산하였다. 또한 SWAN에서 유의파고(H_s), 파향(Dir), 주기(T_m)은 각각 식 (55), (56), (57)과 같이 주어진다.

$$H_s = 4 \sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (55)$$

$$Dir = \arctan \left[\frac{\int \sin(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \cos(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right] \quad (56)$$

$$T_m = 2\pi \left(\frac{\iint \omega E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \right)^{-1} \quad (57)$$

여기서, $E(\omega, \theta)$: 분산밀도 스펙트럼이며 ω : 도플러 효과를 포함하는 분산관계식에 의해 결정되는 절대각주파수이다.

4.1.3 수치 계산 방법

계산영역은 Fig. 9~10에 나타난 바와 같이 거제 해상관측부이를 포함하는 광역과 낙동강 하구역의 협역으로 구성하여 광역 계산 결과를 협역 계산의 경계조건으로 이용하여 계산하였다. 영역 No. 1과 No. 2에 대한 격자의 세부 설명은 Table 3에 정리하였다. 계산영역의 해안선 및 수심은 국립해양조사원 (NORI; National Oceanographic Research Institute)에서 발행하는 거제도 동부 해역 수치해도 (n224a)에서 추출하였으며, 해도상의 수심을 보간하여 각 격자점의 수심을 추출하였다. 수치해도의 수심은 기본수준면 (D.L.: Datum Level)으로 나

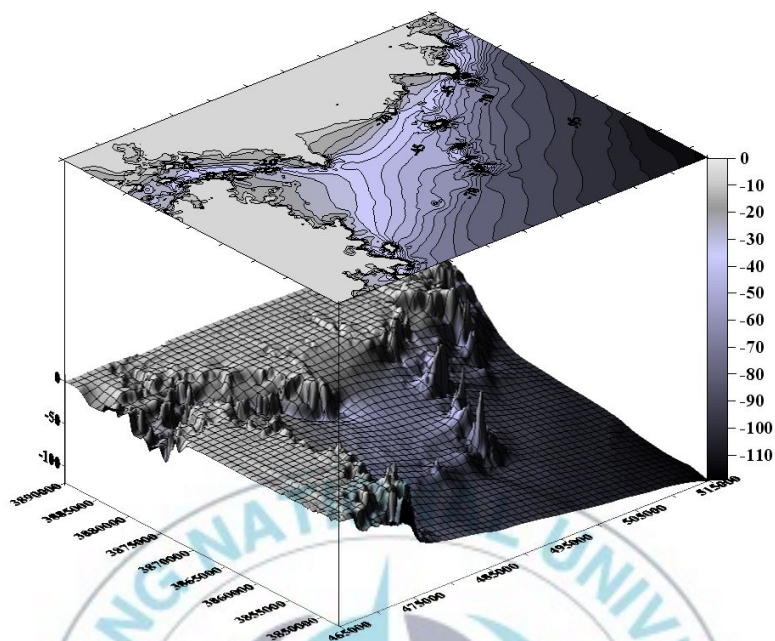


Fig. 9. 3D-bathymetry of the coarse grid domain.

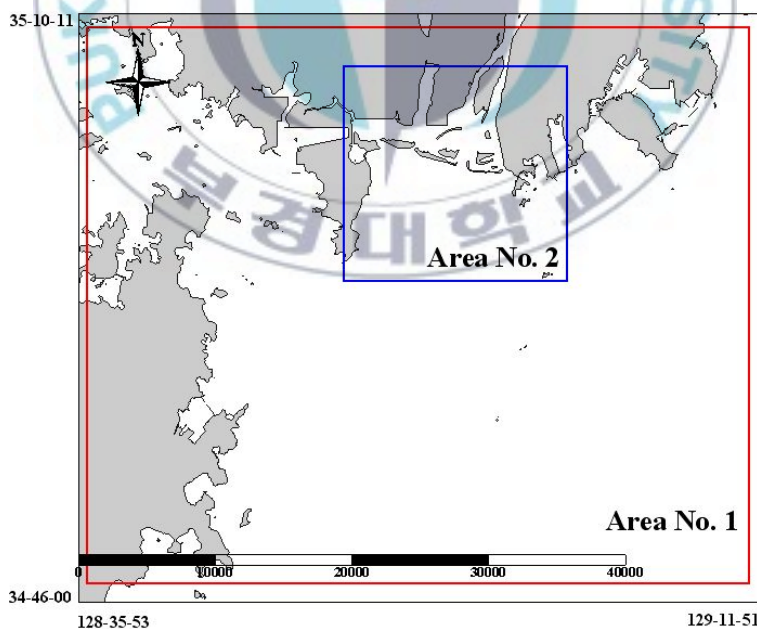


Fig. 10 Computational grid domains; Area No. 1 : wide domain
Area No. 2 : nested grid.

Table 3 Information of Computation and nesting grid

Grid	Distance (km)	Location	Grid size(m)	Grid number
Wide	50×43	E 128° 36'53'' ~ 129° 11'51'' N 34° 46'00'' ~ 35° 10' 11''	200×200	251×215
Nested	16×15	E 128° 49'48'' ~ 128° 59'30'' N 34° 58'12'' ~ 35° 06'36''	50×50	321×301

타나 있으므로 본 계산에서는 대상 해역의 평균해면 (M.S.L.: Mean Sea Level)인 0.953 m (국립해양조사원, 2004)를 보정하여 사용하였다.

바람조건은 계산 영역 전체에 모두 일정한 풍속과 풍향을 적용하였는데 이는 Fig. 11의 기압분포도에서 나타난 바와 같이 계산 영역내의 풍역장이 일치한다고 가정하여 전체 영역에 일정한 풍속과 풍향이 작용하는 것으로 계산하였다.

경계에서의 파랑 스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼을 적용하였으며 극대증진계수 (γ)는 3.3을 적용하였고 방향 분해능은 64방위이며 주파수 분해능은 0.04~1 Hz (1~25 sec)의 범위로 25개 분할로 계산하였다. 또한 바람에 의한 에너지 유입과 쇄파, 저면 마찰 및 백파에 의한 에너지 감쇠항을 고려하였으며 시뮬레이션은 SWAN 모형에서의 파랑 발달이 98 % 정상상태가 될 때까지 반복 실행하여 각 격자점에서의 유의파고, 주기 등의 파랑인자와 각 주파수 대역별 스펙트럼 에너지 밀도 등을 산출하였으며 관측결과와의 비교 및 검증을 통하여 낙동강 하구역의 입사파향에 따른 파랑변형 특성을 분석하였다.

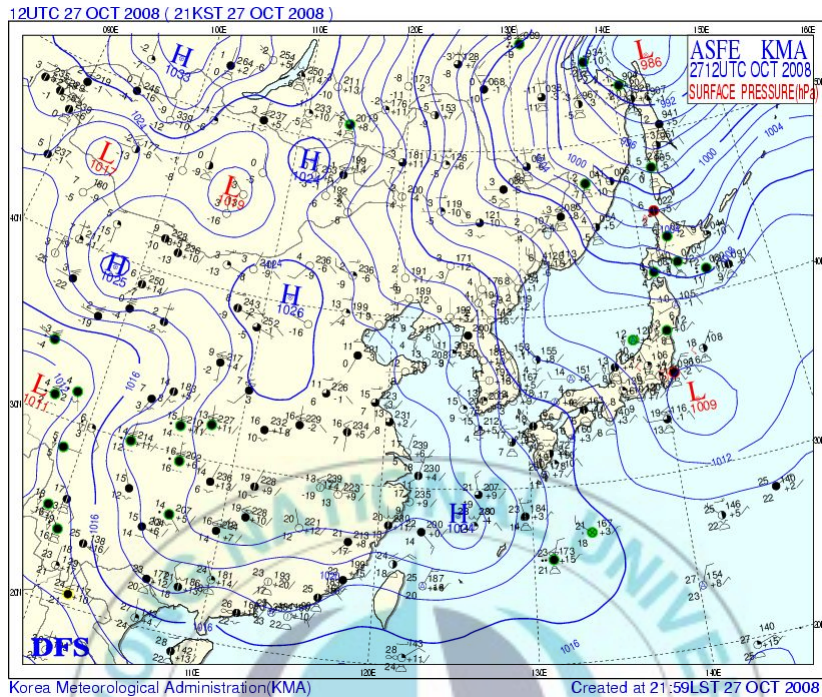


Fig. 11 Surface pressure map (KMA, Korean meteorological Administration).

4.2 모델의 검증

(1) 주파향 산정

낙동강 하구역의 주 입사파향은 북동(NE), 남서(SW)이며 특히 파향이 북동 계열의 경우 낙동강 하구역에 미치는 영향이 미미한 것으로 판단되어 거제부이의 파향과 풍향이 남서 방향으로 5~10시간 이상 지속된 시기의 유의과고, 주기, 풍향과 풍속을 입력값으로 사용하여 낙동강 하구역의 관측결과와 계산결과의 스펙트럼을 비교하였다(Fig. 12). 각 결과의 관측값과 계산값은 Table 4에 정리하였다.

(2) 스펙트럼 형상 비교

남서(SW)파향시의 바람을 고려한 경우와 고려하지 않을 경우의 수치

Table 4 Comparison of wave spectral parameter between computed and measured

Date	Input			Measurement		SWAN result			
						Wind		No-wind	
	H_s (m)	T (sec)	Wind speed (m/s)	H_s (m)	T_p (sec)	H_s (m)	T_p (sec)	H_s (m)	T_p (sec)
04-13 18:00	2.1	7	10	0.89	7.18	0.92	7.26	0.72	7.26
04-21 01:00	2.1	7	8.5	0.85	7.18	0.85	7.28	0.72	7.26

모의 결과와 관측결과를 비교한 결과 유의파고는 최대 0.03 m, 첨두주기는 약 0.1 sec의 차이로 수치모의 결과가 매우 높은 재현성을 나타내었다. 스펙트럼 형상 비교시 스펙트럼 에너지 밀도의 첨두는 관측치가 다소 높은 것으로 나타났으며 고주파수 영역에서도 에너지 첨두가 발생하였으나 수치모의결과에서는 고주파수 영역의 에너지 밀도는 관측치보다 다소 낮은 값을 나타내었다. 이는 풍속이 높고 취송거리가 짧을수록 단주기 성분의 에너지가 커지며 이로 인하여 스펙트럼 첨두가 고주파수 영역으로 옮겨지는데 본 수치모의에서는 바람장을 계산 영역에 일정하게 적용하였으므로 고주파수 영역의 파랑에너지를 과소평가 한 것으로 판단된다.

남서(SW)계열 파향의 수치모의결과와 관측결과를 비교한 결과 수치모형의 재현성이 우수한 것으로 나타났으며 낙동강 하구역으로 입사 가능한 파향에 대하여 파랑변형 수치모의를 수행하였다.

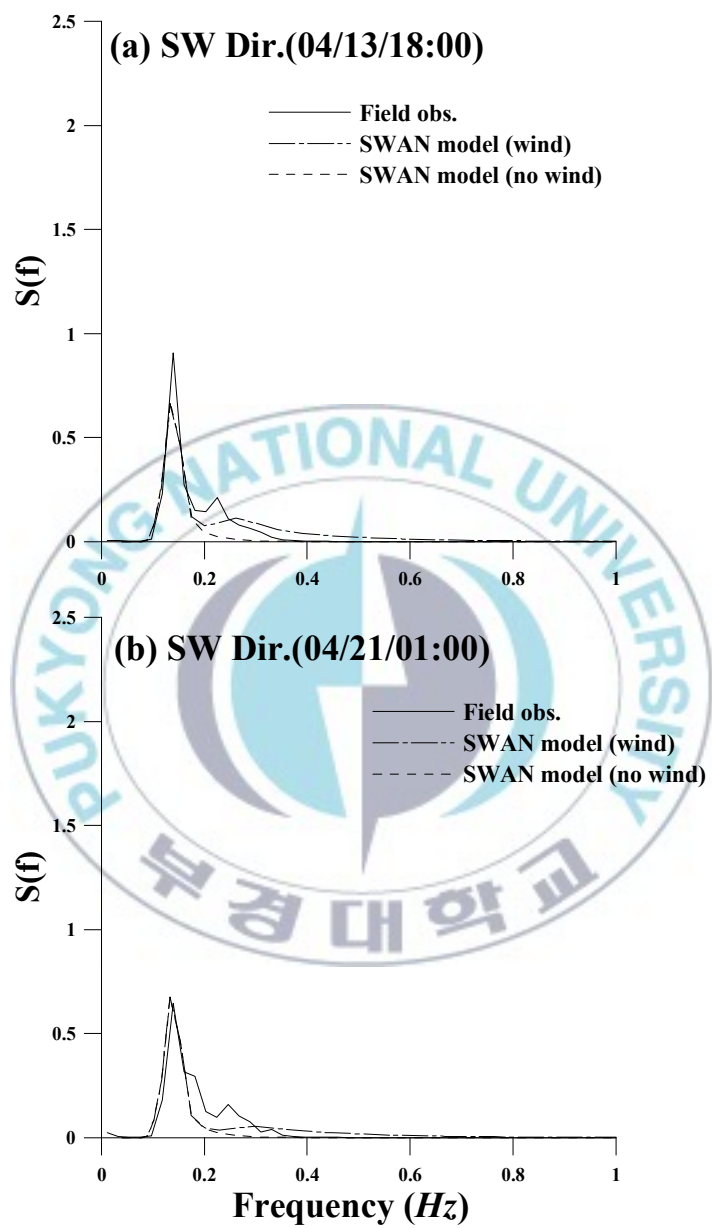


Fig. 12 Comparison of spectrum density in SW direction at each time

4.3 파랑 변형 수치모의

4.3.1 입력조건 설정

거제 해상관측부이의 1년간 (2007) 관측자료를 분석하여 낙동강 하구역의 파랑특성에 유효한 파향을 분석한 결과 남서계열의 파향이 입사할 경우 북동계열의 파향이 입사할 때보다 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 낙동강 하구역에 남서, 남남서, 남, 남동, 남남동계열의 5방향을 주입사파향으로 선정하였으며 Fig. 13의 거제부이의 1년간 (2007년)의 파고 및 풍속의 누적곡선에서 상위 90 %의 값을 가지는 파고와 풍속을 각 파향에 대한 입력자료로 사용하였다(Table 5). 특히 낙동강 하구역에서 입사파향에 따라 파향의 변화가 가장 민감한 지점을 선정하고 그 지점을 전후로 하여 낙동강 하구역의 파랑특성을 분석하였다. 분석은 낙동강 하구역 사주섬 중 도요등의 해안선으로부터 거리가 400 m인 지점에서 4 km 길이의 종단면을 설정하여 진우도 동측까지 3 km간격으로 수직선을 설정하여 파고, 파향, 주기 및 파형경사 등을 분석하여 파향변화에 따른 파랑 변형 특성을 정성적·정량적으로 분석하고자 하였다.

Table 5 Input conditions in SWAN Numerical simulation cases

Case	Input			
	H_s (m)	T_s (sec)	Wind speed (m/s)	Wind Direction
SW	2.2	7.6	9	SW
SSW				SSW
S				S
SSE				SSE
SE				SE

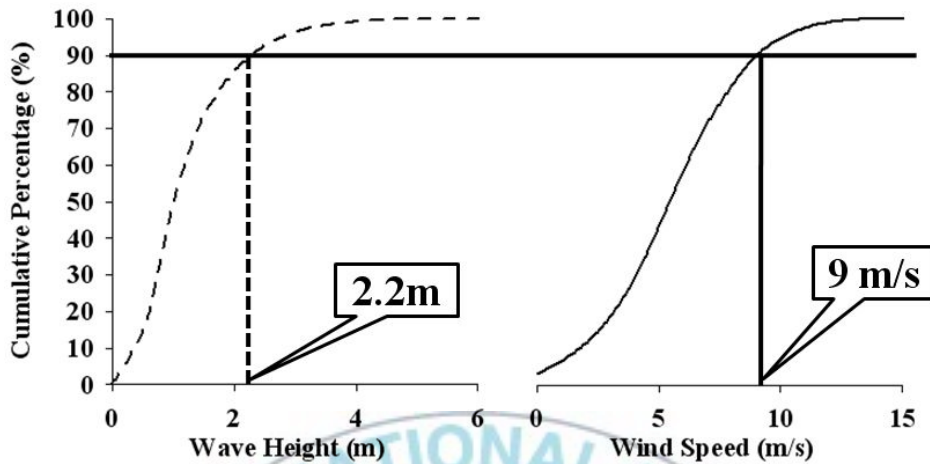


Fig. 13 Cumulative curve of wave height and wind speed.

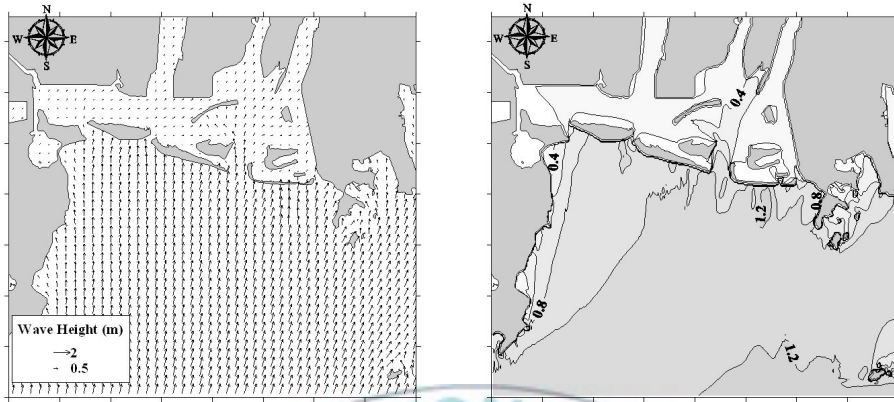
4.3.2 계산결과

(1) 파고와 파향의 공간 분포 특성

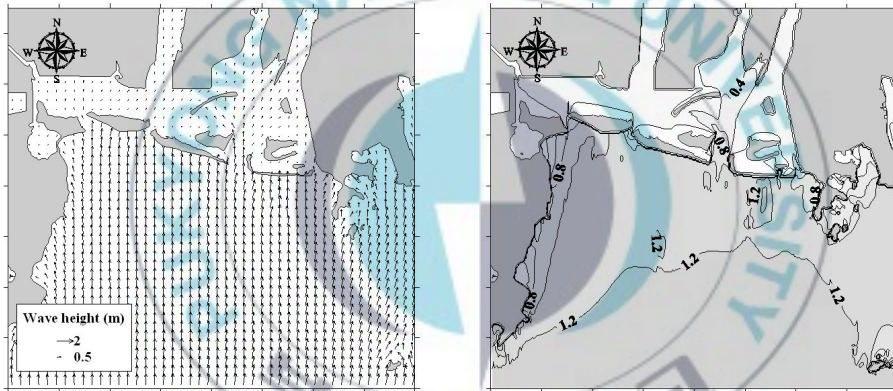
각 파향에 따른 파고분포와 파향분포는 Fig. 14에 나타내었다. 파향은 입사파향이 사주 전면 수심 10 m 해역까지 거의 그대로 유지되는 것으로 나타났으며 사주섬 전면의 수심이 5 m이하로 감소하는 지점에서 모든 입사파향에서 남, 남서계열로 파향이 굴절되는 것으로 나타났다. 특히 낙동강 하구역은 서측보다 동측의 해저 경사가 160:1 정도로 서측의 400:1의 해저경사보다 비교적 급하므로 파향의 변화가 급격하게 나타난 것으로 판단된다.

파고분포를 보면 남계열의 파향이 우세한 경우 파고비가 가장 높게 분포하였으며 다음으로 남남동, 남남서, 남동, 남서계열의 순으로 파고분포가 높은 것으로 나타났다. 남 방향 및 남남서, 남남동 파향이 탁월한 경우 사주섬 전면의 극천해역까지 높은 파고가 유지되는 것으로 나타났다.

SW



SSW



S

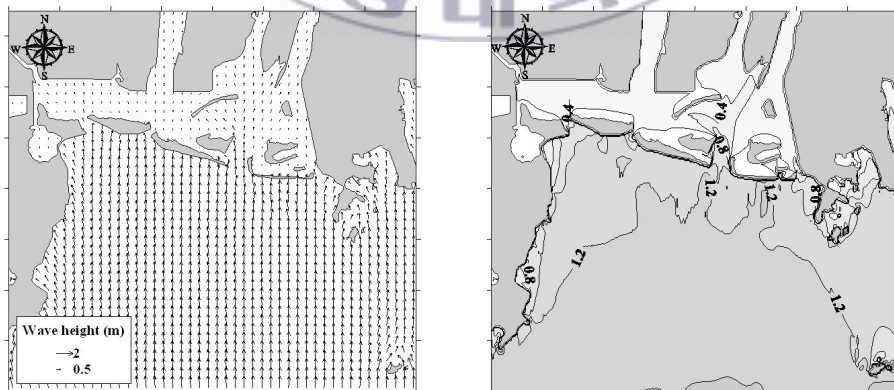


Fig. 14 Wave height ratio (H/H_i) and wave direction vector.
(continue)

SSE



SE

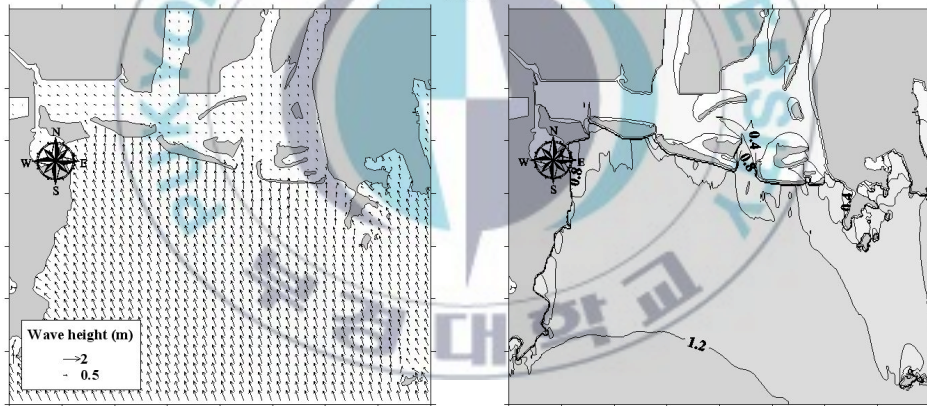


Fig. 14 Wave height ratio (H/H_i) and wave direction vector.

(2) 파고비와 파형경사의 단면 분포 특성

각 단면의 해저경사는 A~A'부터 D~D'까지 각각 400:1, 333:1, 180:1, 160:1 이며(Fig. 15) 해저경사가 완만한 A, B 단면은 파향에 따라 파고비는 0.4~0.6으로 전파되어 4 km를 전파하는 동안 모든 파향에서 0.1 이하의 파고비 감소가 나타났다. 해저경사가 비교적 급한 C, D단면에서는 파고비는 A, B 단면과 비슷한 0.5~0.6의 파고비가 전파되었으나 단면을 전파하는 동안 C단면에서는 모든 파향에서 파고비가 0.1이상로 감소하였으며 D 단면에서는 약 0.2의 파고비가 감소하여 파고비의 감소폭이 A, B 단면보다 더 큰 것으로 나타났다.

특히 C, D 단면에서 단면의 경사가 급격하게 변하는 구간에서는 파

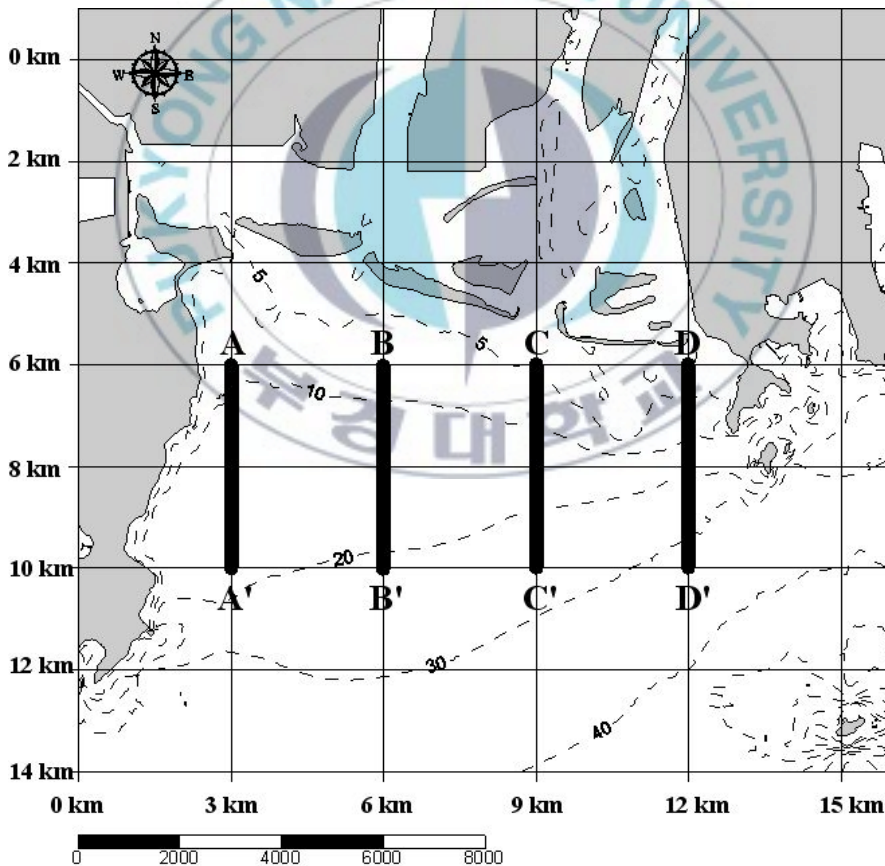


Fig. 15 The sketch of cross section.

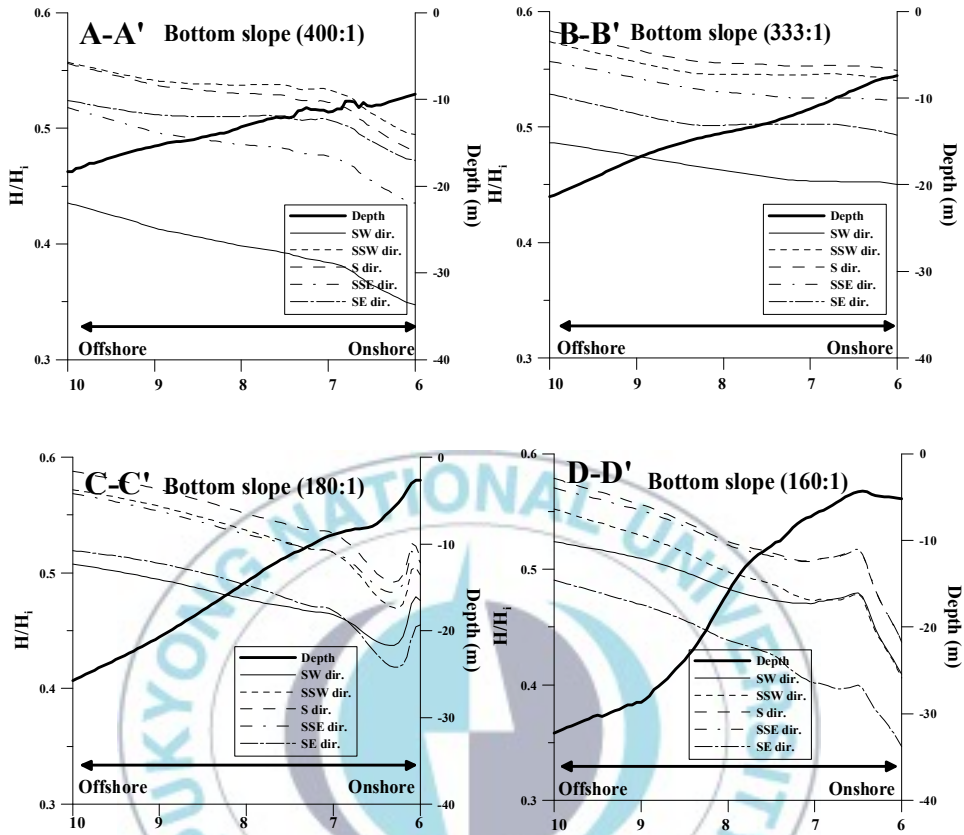


Fig. 16 Cross sectional profile of H/H_i .

고비가 일시적으로 상승하는 것을 볼 수 있는데 이는 쇄파로 인한 일시적인 파고의 상승으로 파고비가 높아진 것으로 볼 수 있다. 파향별로 살펴보면 종단면에 진입하는 파고비는 남, 남동, 남서계열이 모든 단면에서 약 0.6으로 나타났으나 단면을 전파하면서 파고비의 감소폭이 A단면에서 가장 낮은 0.05였으며 D단면에서는 0.25까지 감소하는 것으로 나타나 가장 변동폭이 큰 파향인 것으로 나타났다. 남서계열의 파향은 A, B단면에서, 남동계열의 파향은 C, D단면에서 가장 낮은 파고비를 나타내었는데 이는 남서계열의 파랑은 낙동강 하구역으로 진입하면서 육역의 영향으로 인하여 낙동강 하구역의 서측으로 진입하는 파랑이 어느 정도 차폐되어 나타난 결과이며 남동계열도 마찬가지로

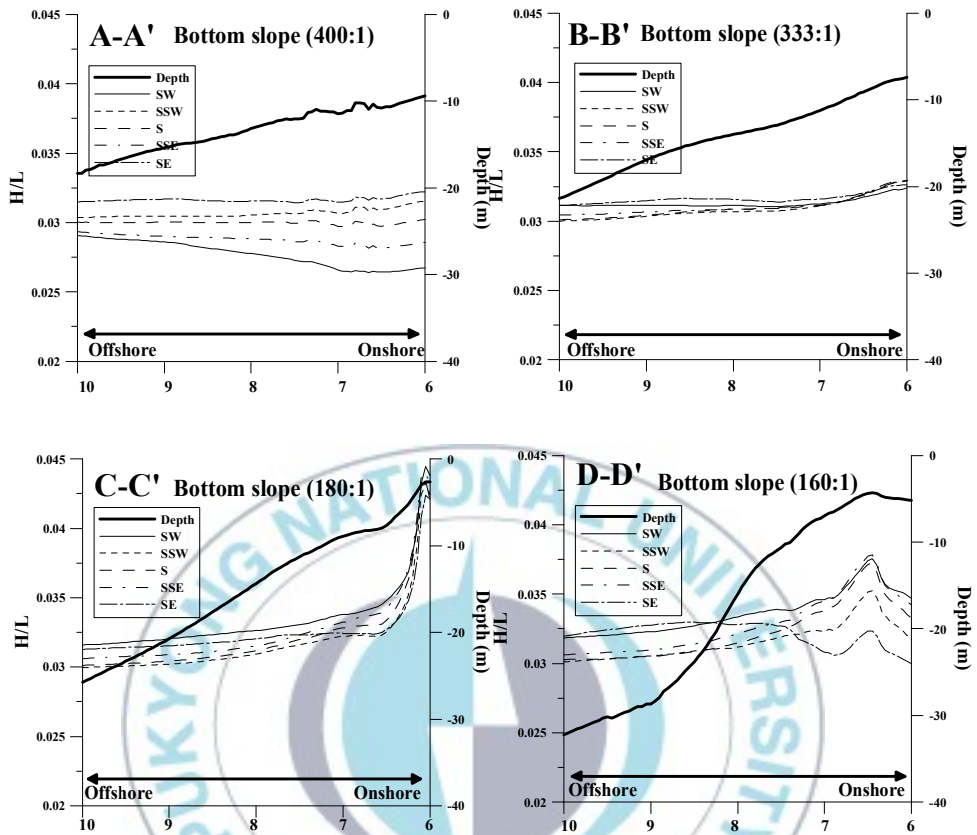


Fig. 17 Cross sectional profile of wave steepness.

로 하구 사주섬의 해안으로 진입하면서 육역의 영향으로 파랑이 다소 차폐되어 나타난 결과로 볼 수 있다. 특히 낙동강 하구역으로 직접입 시하는 남, 남남서와 남남동계열에서 육역의 영향이 적어지게 되어 상대적으로 높은 파고비가 나타나는 것으로 판단된다.

각 단면별 파형경사는 Fig. 17에 나타내었다. 파형경사는 대부분 0.02 ~ 0.04 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 해저경사가 급한 C, D 단면에서는 수심 약 5 m 이내의 지점에 이르면 모든 파향에서 파형경사가 다소 상승하였다가 다시 하락하는 것을 볼 수 있다. 해저경사가 완만한 A, B 단면을 보면 A 단면에서는 파형경사가 해안으로 전파할수록 서서히 감소하는 경향을 나타내며 B 단면에서는 해안으로 전파하여도 파

형경사의 감소가 거의 나타나지 않으며 다소 증가하는 것을 볼 수 있다. 해저경사가 비교적 급한 C, D 단면에서는 수심의 변화가 일정한 약 3 km 까지는 파형경사의 변화가 크게 나타나지 않았으나 수심의 변화가 급격한 지역에서 파형경사의 변동도 크게 나타났다. 특히 파형경사가 급격히 상승한 지점을 지나면 파형경사는 큰 폭으로 하락하는 것으로 나타났는데 이는 수심이 급격히 낮아짐으로 인하여 쇄파로 인한 파랑에너지의 손실에 인한 것으로 판단된다. 파고비의 변화와 비교하면 파형경사가 상승하는 지점과 파고비가 상승하는 지점이 일치하는 것으로 볼 수 있는데 이는 쇄파로 인한 파고의 일시적 상승 이후 파랑에너지 감소로 파고가 급격히 낮아짐으로 인해 일어나는 현상으로 볼 수 있다.



5. 요약 및 결론

본 논문에서는 외해입사파랑의 파향 변화에 따른 낙동강 하구역의 파랑 특성의 변화를 공간적, 정량적으로 분석하고자 낙동강 하구역의 파랑 관측자료와 거제 해상관측부이의 파랑 및 바람자료의 통계분석을 실시하였다. 분석된 관측자료를 수치모의의 입력값으로 사용하여 파향에 따른 낙동강 하구역의 수치모의실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 낙동강 하구역의 파랑관측자료 분석결과 낙동강 하구역 파랑 특성은 입사파랑의 파향에 따라 크게 다른 영향을 받는 것으로 나타났다.

2) 거제 해상관측부이자료를 이용하여 낙동강 하구역의 입사파랑 특성을 통계적으로 분석한 결과, 낙동강 하구역의 주 입사파향은 동북동, 남서, 북동, 남남서이며 계절적으로도 탁월 파향이 뚜렷하였다. 이는 계절풍의 영향 및 낙동강 하구역이 북서쪽의 육역과 남동쪽의 육역으로 인하여 남서와 북동의 두 방향이 탁월한 파향으로 나타난 것으로 판단된다.

3) 관측값과 수치계산값의 스펙트럼 형상 비교 결과 스펙트럼 첨두주기의 차이는 0.1 sec 였으며 유의파고는 0.03 m 의 차이로 수치모의의 재현성이 양호한 것으로 나타났다. 바람의 영향을 제외한 수치계산결과는 첨두주기의 차이는 거의 나타나지 않았으나 유의파고를 과소평가하였다. 스펙트럼 형상은 수치모의 결과가 관측결과의 고주파수 영역의 에너지 밀도를 과소평가하였는데 이는 수치 모형이 국지적인 바람의 영향을 모두 고려하지 못하여 고주파수 영역의 에너지를 과소평가하여 발생한 것으로 판단된다.

4) 입사파향 및 해역 단면에 따라 파랑특성의 변화도 크게 다르게 나타났다. 낙동강 하구역의 해저경사가 비교적 급한 동쪽 해안에서는 파랑 특성의 변동이 매우 급격하게 발생하였으며 해저경사가 완만한 서쪽 해안에서는 단면에 따른 파랑특성의 변동은 크게 나타나지 않았으

며 파향에 따라 파랑특성이 매우 다르게 나타났다.

5) 남서 및 남동계열의 입사파향이 전파할 경우 가덕도와 다대포 등의 육역으로 파랑이 일부 차폐되며 남계열의 입사파향이 전파될 경우 차폐되는 영역이 없이 낙동강 하구역으로 직접 입사하므로 상대적으로 높은 파고비를 나타내었다.

이상의 결과로 볼 때, 낙동강 하구역은 서쪽으로는 가덕도, 동쪽으로는 다대포로 인하여 주 파향인 남서 및 북동이 탁월한 경우, 유역의 차폐효과로 인하여 대부분의 파랑이 감쇠되었다. 특히 연중 가장 탁월한 파향인 북동의 경우 매우 낮은 파고 분포를 나타내며 남서 및 남남서 파향이 탁월한 경우 낙동강 하구역에 비교적 높은 파고가 분포할 것으로 예상된다. 또한 실제 발생 빈도가 비교적 낮았던 남, 남남동과 같은 파향이 탁월한 경우 하구역 사주섬 전면까지 외해 입사파고가 거의 유지될 것으로 예상되며 하구역에 직접적으로 영향을 줄 것으로 예상된다.

본 연구의 수치모의에서는 풍향과 파향이 일치하는 것으로 계산하였으나 실제 해역에서 풍향과 파향은 차이가 날 수 있으므로 이에 대한 파랑 변형 특성은 차후 더 세밀하게 검토되어야 할 것이다. 특히 스펙트럼 결과 비교에서 고주파수 영역의 에너지 밀도의 차이가 나타났는데 이는 차후 수치모의시 바람입력조건을 보다 보완해야 할 것으로 판단된다. 또한 본 수치 모의에서는 흐름에 의한 영향을 고려하지 않았으므로 차후 흐름을 고려한 세밀한 분석이 요구된다.

본 연구를 통해 도출되어진 연구결과는 부정형적 사주 발달에 영향을 미치는 파랑 및 파랑으로 인해 발생하는 해빈류와 표사이동 예측을 위한 수치모의시 낙동강 하구역의 외력조건 입력자료 선정과 하구역 파랑 특성을 예측하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 국립해양조사원 (2004, 2005). 조석표.
- 기상청 (2007). www.kma.go.kr
- 김성환 (2005). “낙동강 하구둑 건설과 삼각주 연안 사주섬 지형변화”, 서울대학교 박사학위논문.
- 김지민, 허동수, 김창훈, 김도삼 (2007). “지형을 고려한 해상풍 모델 (MASCON)과 SWAN 모델의 결합에 의한 천해파랑 산정”, 한국 해안·해양공학회지 Vol 19, No 1, pp 57-65.
- 김태희, 오희진, 윤용훈 (2004). “경기만 주변 해역의 국지 파랑 관측 자료 비교”, 한국기상학회지 Vol. 40, No. 4 pp 485-495.
- 류청로 (1984). “사석방파제의 수리학적 최적설계에 관한 기초적 연구”, 오사카대학 공학부 토목공학과 박사학위논문.
- 류청로, 김현주, 김종욱 (1989). “해양파랑의 통계적 변동성 해석”, 한국수산학회지 Vol. 22, No. 1, pp 41-47.
- 류황진, 홍기용, 신승호, 송무석, 김도영 (2004). “SWAN 모델을 이용한 제주해역 장기 파랑분포 특성 연구”, 한국해양환경공학회지, Vol 7, No 3, pp 137-145
- 박순, 유창일, 윤한삼, 류청로 (2007). “춘계 낙동강 하구역의 파랑과 기상조건과의 상관성 분석”, 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp. 417-422.
- 박순, 유창일, 윤한삼, 류청로, 이인철 (2008). “외해 입사파랑의 파향에 따른 낙동강 하구역 파랑 특성 분석”, 한국마린엔지니어링학회 공동학술대회 논문집, pp. 237-238.
- 박순, 박효봉, 유창일, 윤한삼, 류청로 (2008). “낙동강 하구역 파랑분포 특성 수치모의”, 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp. 72-76.
- 신민철 (2005). “천해역에서 SWAN모형의 적용성 검토” 명지대학교

석사학위논문.

손병규, 류청로 (2001). “주전해역의 파랑의 통계적 변동 특성”, 한국해양공학회지 Vol. 15, No. 3, pp 20-27

유창일, 윤한삼, 류청로, 이인철 (2006). “해도분석을 통한 낙동강 하구 사주 면적의 시·공간 변화”, 한국해양공학회지 Vol 20, No 6, pp 54-60.

유창일 (2006). “낙동강 하구역 사주의 생성과 발달 특성에 관한 연구”, 부경대학교 석사학위논문.

최병습 (1996). “낙동강 하구둑 주변의 수리학적 특성에 관한 연구”, 부산대학교 박사학위논문.

Battjes, J.A. and J.P.F.M. Jassen (1978). “Energy loss and set-up due to breaking of random waves”, Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp. 569-587

Booij, N., Haagsma, IJ.G., Holtjuijsen, L.H., Kieftenburg, A.T.M.M., Ris, R.C., Van Der Westhuysen, A.J. and Zijlema, M. (2006). SWAN-User manual. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section, available from <http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>(Version 40. 51AB, 2006).

Eldebersky, Y and J.A Battjes (1995). “Parameterization of triad interactions in wave energy models”, Proc. Coastal Dynamics Conf. 95, Gdansk, Poland, pp. 3-52.

Hasselmann, K (1962). “On the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum”, part I, J of fluid mechanics. Vol. 12, pp. 481~500.

Hasselmann, K and J.I. Collins (1968). “Spectral dissipation of finite-depth gravity waves due to turbulent bottom friction”, J. Mar. Res., 26, pp. 1-12.

- Hasselmann, K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Muller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden (1973). "Measurement of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)", Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.
- Hasselmann, S. and K. Hasselmann (1981). "A symmetrical method of computing the non-linear transfer in a gravity-wave spectrum", Hamburger Geophys. Einzelschr., Serie A., 52, pp. 8.
- Goda, Y.(1985). "Random sea and design of marine structures", University of Tokyo Press, pp 1-323.
- Johnson, I.G. (1980). "A new approach to rough turbulent boundary layers", Ocean Engineering, 7, pp. 109-152.
- Kuik, A.J., G.Ph. van Vledder and L.H. Holthuijsen (1988). "A method for the routine analysis of pitch-and-roll buoy wave data", J. Phys. Oceanogr., 18, pp. 1,020-1,034.
- Longuet-Higgins, M. S.(1952). " On the statistical distributions of sea waves", J. of Marine res., Vol. 11, No. 3, pp 245-265.
- Madsen, O.S., Y.-K. Poon and H.C. Graber (1988). "Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory", Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp. 492-504.
- Perrie, W. and B. Toulany (1995). "Relating friction velocity to spectral wave parameter", J. Phys. Oceanogr., Vol 25, No 2, pp 266-279.
- R G. Dean, R. A. Dalrymple (1984). "Water wave mechanics for Engineers and Scientist", Prentice-Hall, Inc. pp 1-345.

- SethuRaman, S. (1978). "Influence of mean wind direction on sea surface wave development", J. Phys. Oceanogr., Vol. 8, No. 5, pp 926-929.
- Tolman, H.L. (1992b). "An evaluation of expressions for the wave energy dissipation due to bottom friction in the presence of currents", Coastal Engineering, 16, pp. 165-179.
- Weber, S.L. (1991a). "Bottom friction for wind sea and swell in extreme depth-limited situations", J. Phys. Oceanogr., 21, pp. 149-172.
- Weber, S.L. (1991b). "Eddy-viscosity and drag-law models for random ocean wave dissipation", J. fluid Mech., pp. 232, pp. 73-98.

