

DELFT-3D를 이용한 울산신항 주변해역의 불규칙파랑변형에 관한 연구

김재중* · 김남현**

*동아대학교 토목해양공학부 교수, **동아대학교 대학원

A study on the Characteristics of Irregular Wave Transformation in the vicinity of Ulsan New Port by using the DELFT-3D

Kim Jae-Joong* · Kim Nam-Hyun**

*Division of Civil and Ocean, Donga University, Pusan 604-714, Korea

**Graduate school of Donga University, Pusan 604-714, Korea

요약 : 본 연구는 최근의 연안역 개발 사업 이전에 선행되어야 하는 물리학적 변화요인들(파랑변형과 주변해역의 해양 환경적 변화 요인 등)에 대한 연구에 그 목적이 있다. 이러한 관점에서 울산 신항과 같은 연안역에서의 DELFT-3D: WAVE(SWAN)을 이용하여 대상 해역의 파랑특성을 파악했다. 파랑특성 파악을 위해서 다방향 불규칙파의 굴절 및 천수변형을 동시에 풀 수 있는 에너지 평형 방정식을 사용한 수치모델인 SWAN 모델에 대해 연구하였다. 이러한 과정을 통해서 울산 신항 주변 해역의 불규칙 파랑특성을 파악했다. 파랑특성 파악의 가장 좋은 방법은 현장 파고계를 설치하여 장기간에 걸쳐 파랑을 직접 관찰하는 것이다. 그러나 광범위한 지역에 대한 파랑특성 파악에는 어려움이 있어서 이에 대한 대안으로 수치모델인 DELFT-3D: WAVE를 이용해서 불규칙 파랑특성을 파악했다.

핵심어 : 울산 신항, 불규칙 파랑, 파랑변형, DELFT-3D: WAVE(SWAN)

Abstract : Environmental problems and safety problems in coastal area is one of the most important factors for designing coastal structures and maintaining facilities in coastal zone. And thus study on Wave transformation around coastal area is very important to develop a new port or on industrial area. Delft 3D-WAVE is applied to Ulsan new port area and the calculated results are analysed and compared with measured data. Delft 3D wave module is based on SWAN model which considers wave shoaling and refraction for irregular wave. This module also covers wind effect, bottom friction, white-capping and wave breaking effect. The results of this study show a good agreement with measured data and thus Delft 3D-WAVE module can be applied to simulate irregular wave transformation in coastal area.

Key words : Ulsan new port, Irregular wave, Wave transformation, Shoaling, Refraction, DELFT-3D WAVE(SWAN)

1. 서 론

인구 증가에 따른 공간의 부족으로 인해 연안 매립 및 방조제를 축조, 간척지를 조성하는 사업이 활발히 진행되고 있다. 또한 경제성장으로 인한 해상 물동량 증가에 따라 선박이 대형화되고 있으며, 이에 따라 새로운 항만 개발도 활발하여 최근 아산, 광양, 부산 신항만 건설사업 등 연안역 개발 사업이 활발히 이루어지고 있다.

이러한 연안역의 개발로 인해서 연안해역의 파랑변형 및 해수유동 양상이 변화되어 토사이동에 의한 제반 문제점들이 발생하고 있다. 파랑은 자연 현상 중에서도 변화가 복잡한 현상의 하나로서, 그 실제의 파악은 용이하지가 않다. 파랑은 여러 가지 성질을 가지고 있는데 일반적으로 그 생성은 바람에 의하여 발생되고 폭풍우 속에서는 산처럼 큰 파도로 발달했다가 바람이 통과하고 나면 완전히 사라져 버리는 것이 파랑의 일례이다.

파랑은 생성된 지점으로부터 멀리 전파되는 동안 장주기파가 단주기파에 비해 더 빨리 전파하는 분산성에 의하여 파랑이 확산된다. 파랑의 변형에는 수심이 얇아짐에 따라 파고가 증가하는 파의 천수(shoaling), 파의 방향이 수심이 얇은 쪽으로 꺾이는 굴절(refraction), 파의 에너지가 높은 곳에서 낮은 곳으로 퍼져나가는 파의 회절(diffraction), 파가 수심의 변화나 구조물에 의해 위상의 변화가 생기고 되돌아가는 파의 반사(reflection), 수심이 아주 얇아서 그 에너지가 한계상태에 이르러 부서지면서 발생하는 쇄파(breaking), 파랑과 해류가 공존하는 경우의 파향, 파속의 변화 등 여러 가지가 있다.

연안역 개발이나 항만개발과 같은 대규모 사업을 계획하기 위해서는 이러한 파랑변형과 주변해역의 해양 환경적 변화요인 등 물리학적 변화요인들에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 연구는 이러한 관점에서 울산 신항을 대상으로 DELFT-3D program을 이용하여 대상해역에서의 파랑특성을 연구 분석 하였다.

* 대표저자 : 김재중(중신회원), jkkgb@dau.ac.kr 051)200-7792

** k0204you@hotmail.com 051)200-5554

2. 지배 방정식

2.1 에너지 평형 방정식

외부의 에너지 유입을 Q , 에너지의 전파속도 벡터를 v 로 하면 에너지 평형방정식은 식(1)과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \nabla \cdot (Sv) - Q = 0 \quad (1)$$

여기서, S : 방향스펙트럼

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial f}, \frac{\partial}{\partial \theta} \right)$$

$$v = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_f \\ v_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_g \cos \theta & C_g \sin \theta \\ & \frac{\partial f}{\partial t} \\ \frac{C_g}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right) & \end{pmatrix}$$

여기서 다음과 같은 가정을 하면, 에너지 평형방정식의 기초식을 유도할 수 있다.

- ▶ 파는 시간적으로 변화하지 않는다.
- ▶ 성분파의 주기는 변화하지 않는다.
- ▶ 외부에너지의 유입은 없다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (Sv_x) + \frac{\partial}{\partial y} (Sv_y) + \frac{\partial}{\partial \theta} (Sv_\theta) = 0 \quad (2)$$

2.2 SWAN Model

SWAN(Simulation Waves Nearshore) 모델은 네델란드 델프트(Delft) 대학에서 개발한 파랑수치 모델로서, 주어진 바람과 해저면 및 해류 조건으로부터 연안역, 호수 및 하구의 파랑을 계산한다. 이 모델의 기본방정식은 파랑작용의 평형방정식(wave action balance equation)이다.

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

- 공간좌표 상에서의 이류 수송(advection)
- 수심과 흐름에 의한 굴절 현상(refraction)
- 수심과 흐름에 의한 천수 현상(shoaling)
- 반대 방향의 흐름에 의한 파랑의 블록킹 및 반사(blocking and reflection)

한편, 본 모델에서는 다음과 같은 원천 항을 고려할 수 있다.

- 바람에 의한 파랑에너지 생산
- 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 모델에

서는 파랑은 2차원 작용 스펙트럼으로 표현된다. 강한 비선형 조건에서도 스펙트럼을 사용하는 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) $N(\sigma, \theta)$ 를 의미한다. 흐름이 존재하는 경우 작용 밀도(action density)는 보존되지만 에너지 밀도(energy density)는 보존되지 않기 때문에 작용이 에너지 보다는 일반화된 물리량이다. 작용 밀도 스펙트럼과 에너지 밀도 스펙트럼의 관계는 식(3)과 같다.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (3)$$

여기서, σ 는 각주파수(intrinsic angular frequency)로 절대 각주파수(absolute angular frequency) ω 와의 관계는 식(4)와 같다.

$$\omega = \sigma + \vec{K} \cdot \vec{U} \quad (4)$$

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

1) 작용평형 방정식

파랑 스펙트럼의 발달은 식(5)와 같은 작용평형 방정식에 의하여 기술된다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (5)$$

위 식에서 좌변의 제 1항은 작용 밀도의 시간 변화량, 제 2항과 제 3항은 지리적 공간에서의 작용의 전파, 제 4항은 수심과 흐름의 변화에 의한 상대주파수의 천이 그리고, 제 5항은 수심과 흐름에 의한 굴절을 나타낸다. 선형파 이론에 의한 파랑의 전파속도는 식(6)과 같이 표현된다.

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial h} \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \vec{K} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = - \frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial m} + \vec{K} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (6)$$

여기서 s 와 m 는 각각 파향선(wave ray)과 파향선에 수직인 좌표를 의미한다. 식(7)의 파랑 평형방정식의 우변은 원천항(source and dissipation)을 나타내며 이는 파랑의 생성, 소산 및 비선형상호작용에 의한 에너지 전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (7)$$

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

3. 울산신항 주변해역의 파랑특성

3.1 분석, 검증방법 및 입력조건

1) 분석 및 검증방법

어떤 특정 지역의 파랑 특성을 파악하는 가장 좋은 방법으로는 그 지역에 파고계를 설치하여 장기간에 걸쳐 파랑을 직접 관측하는 것이다. 하지만, 이 방법은 신뢰할 만한 결론을 얻기 위해서 매우 긴 시간 동안 파랑을 관측해야만 하고 또한 관측 지역이 비교적 제한적이어서 광범위한 지역에 대한 파랑 특성 파악을 할 수 없다. 이에 대한 대안으로서 수치모델을 이용해서 특정 지역의 파랑 특성을 파악하는 방법이 많이 제안되고 있다. 이에 본 연구에서는 DELFT-3D:WAVE(SWAN)를 이용해서 울산 신항 주변 해역의 파랑 특성을 분석해내고자 한다.

수치모델은 항상 오류 가능성을 내포하고 있기 때문에 계산 결과를 관측 자료나 실험 자료 등과 함께 비교해 그 정확성을 검증해야만 한다. 본 연구에서는 울산 신항 주변에서 파랑 계산을 수행하여 계산 결과를 관측 결과와 함께 비교해 그 정확성을 검증하고자 한다.

2) 입력 조건

① Bathymetry

해도로부터 수심을 읽어 들여 bathymetry를 구축하여 Fig.1에 나타내었다. 계산영역은 30km×40km이며, 최대 수심은 60m이다.

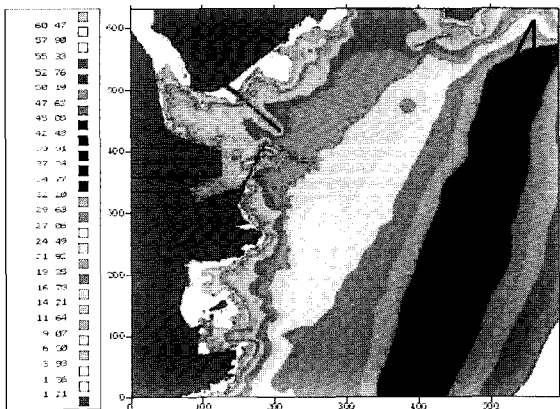


Fig. 1 Bathymetry of the study area

② 공간 계산 격자 및 시간 격자 간격

공간 계산 격자간격은 20m으로 설정하였으며, 시간 격자

간격은 1분으로 하였다. SWAN의 Numerical Scheme은 Implicit scheme의 일종인 ADI scheme을 이용하고 있어 계산 격자 간격에 관계없이 계산 결과는 안정된다.

③ 입사파

심해입사파 자료로 한국해양연구원에서 10년 넘게 관측한 바 있는 울산항의 장기파랑 자료를 사용하였다. 본 연구에서는 해양연구원의 장기파랑 자료 중, 2003년 11월 22일부터 12월 11일까지의 관측치를 외해경계에서의 입력자료로 사용하였다. 관측치의 입력은 일일 평균 유의파고를 해당일의 입력치로 하여 계산기간동안 동일한 방법으로 대상해역에서의 파랑 변형을 수행하였다.

④ 기상자료

SWAN 모형의 파랑변형 계산에서는 원천항을 고려함으로써 대상해역인 울산항 주변의 불규칙파랑 특성이 보다 상세히 고려하고자 하였다. 즉, 식(5) 우변의 원천항에 바람에 의한 에너지 유입을 추가로 고려하기 위하여, 기상청으로부터 해상풍 자료를 구하여 1시간 단위의 풍향, 풍속 자료(265°~330°)를 대상해역의 기상자료로 가정하여 입력하였다.(호미곶 검조소 해상풍 자료, 2003년 11월1일~2003년12월31일)

3) 검증

SWAN의 계산 결과를 파랑 관측 결과와 함께 비교하였다. 한동대학교에서 울산 신항 방파제 주변에 대해 2000년부터 파랑 관측을 실시하였는데, 그 관측 지점을 다음의 Fig.2에 나타내었다. (Ahn 등, 2004)

세 가지 종류의 파고계가 이용되었는데, 이 중에서 결측 자료 등에 의해 자료의 신뢰성이 떨어지는 Radar형 파고계는 제외하고 Buoy형 파고계 (129°22' 59" E, 35°27' 20" N) 관측 자료를 이용하여 파랑을 검증하였다. Radar형 파고계는 관측이 용이한 반면에 정확성이 떨어지는 단점이 있어 보정(Calibration)을 반드시 실시해야만 한다.

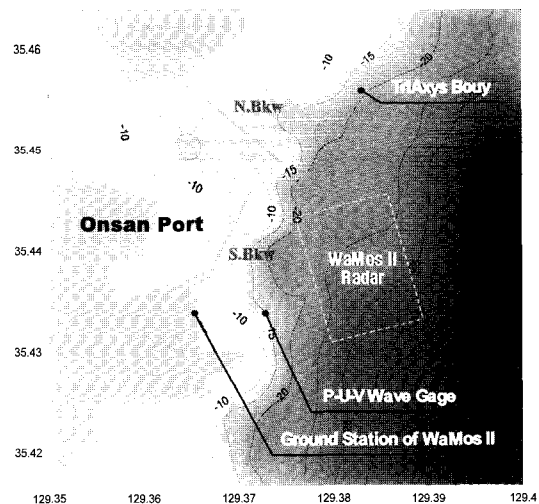


Fig. 2 Wave observation sites

3.2 수치모델

1) 수치모델의 적용

입력 자료들을 이용하여 울산 신항 주변 해역의 파랑을 계산하였다.

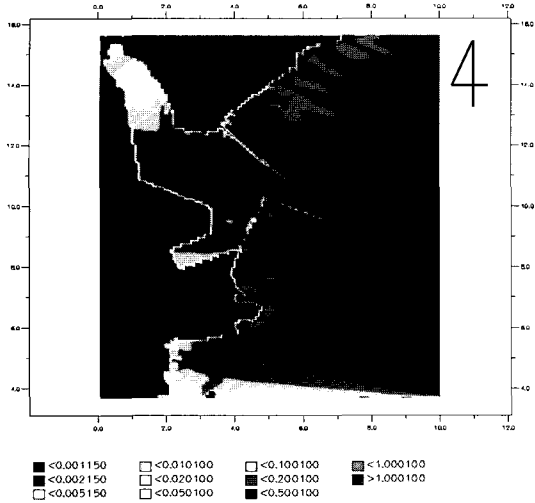


Fig. 3 Calculated significant wave height (03'11.23, m)

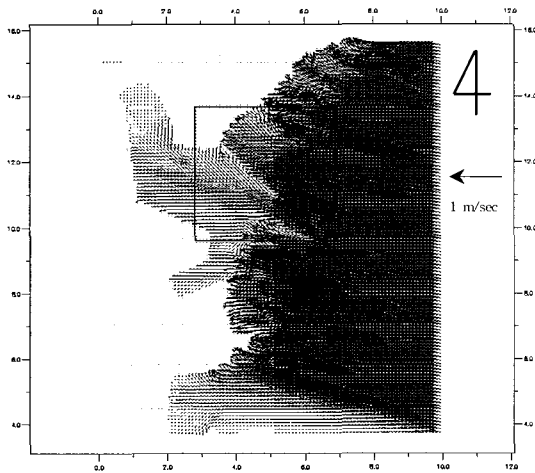


Fig. 4 Calculated wave vector(03'11.23)

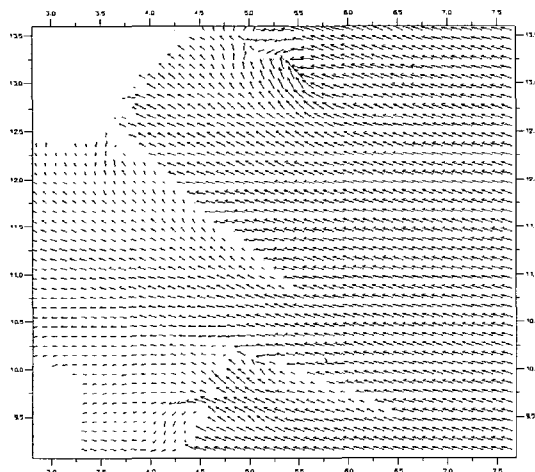


Fig. 5 Wave vector :zoom (03'11.23)

이때의 계산 결과 중, 2003년 11월 23일 12시(Hs:0.43m)의 계산결과에 해당하는 유의파고분포도와 파랑 벡터도를 Fig.3 ~ Fig.5에 나타내었다

3.3 관측값과 계산값의 비교

관측값와 계산값을 비교하여 다음의 Fig.9~Fig.12에 나타내었다. 또한 일 최고파고에 대한 관측값과 계산값을 비교하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Comparison between observation data & calculated data

관측 일시	Hs (관측) (m)	Hs (계산) (m)	Tm (관측) (sec)	Tm (계산) (sec)	Tp (관측) (sec)	Tp (계산) (sec)	Dir (관측) (deg)	Dir (계산) (deg)
11.23 08:00	0.46	0.565	4.7	4.913	10	12.721	103.4	104.640
11.24 12:00	0.46	0.468	3.9	4.367	3.9	4.174	125.8	137.378
11.25 22:00	0.54	0.6312	4.7	4.730	6.7	6.982	96.4	99.410
11.26 08:00	1.19	1.254	5.3	5.620	9.5	10.770	98.8	99.863
11.27 03:00	1.64	1.865	5.2	5.409	7.4	8.519	107.8	108.041
11.28 11:00	2.27	3.019	6.3	6.672	9.5	10.682	103.9	111.901
11.29 01:00	0.99	1.083	5.4	5.718	8.3	8.459	113.2	116.445
11.30 23:00	0.91	0.936	4.1	4.236	7.1	7.665	108.6	114.619
12.01 02:00	0.9	0.945	4.5	4.550	6.7	6.708	113.3	117.566
12.02 00:00	0.51	0.577	4.9	5.258	6.9	9.060	112.9	116.339
12.03 14:00	0.29	0.294	4.1	4.355	6.7	8.525	110.7	113.386
12.04 21:00	0.32	0.320	4	4.146	8.7	9.222	122.1	124.284
12.05 07:00	0.47	0.513	4.2	4.901	7.7	9.291	89.9	96.292
12.06 10:00	0.69	0.739	4.6	5.786	5.1	5.464	131.5	133.109
12.07 21:00	0.34	0.404	4.7	4.797	10.5	11.354	123.3	124.367
12.08 00:00	0.35	0.413	4.8	4.914	10	11.117	103.2	110.202
12.09 23:00	0.39	0.392	4.2	4.464	10	10.745	103.6	116.925
12.10 17:00	0.39	0.438	4.2	4.856	6.3	6.392	110.6	112.740

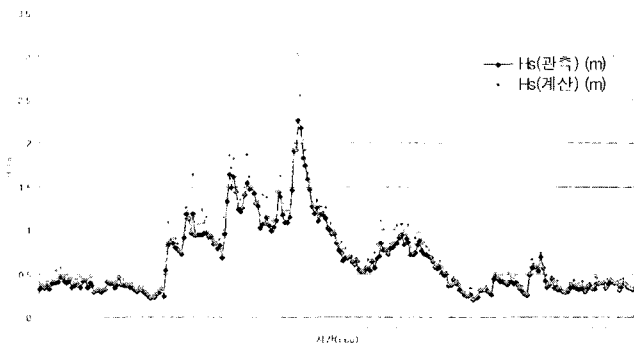


Fig. 6 Comparison between observation data & calculated data(Hs)

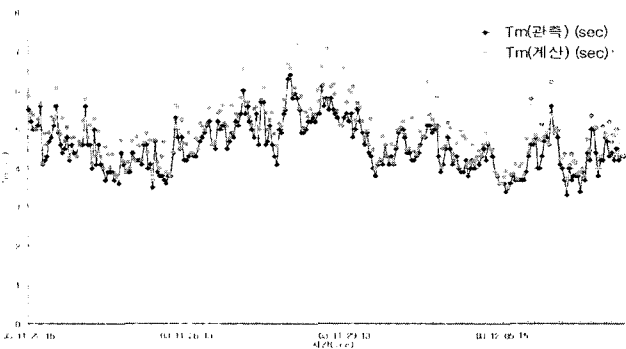


Fig. 7 Comparison between observation data & calculated data(Tm)

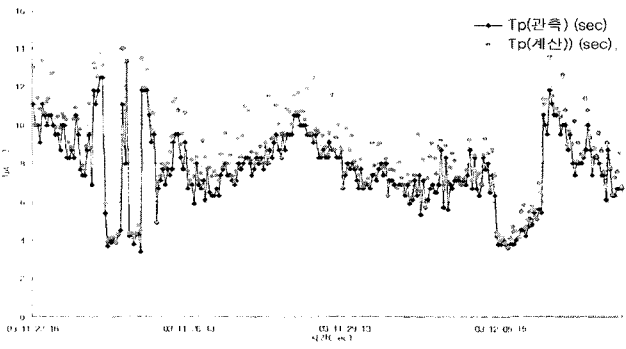


Fig. 8 Comparison between observation data & calculated data(Tp)

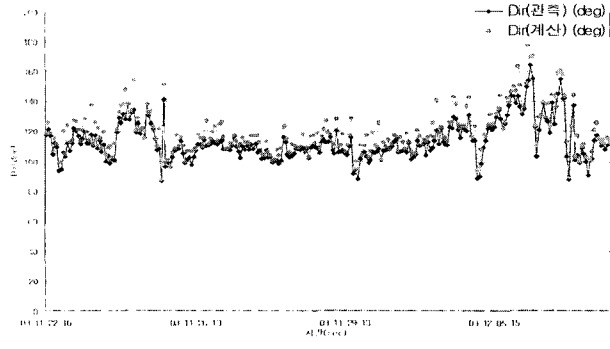


Fig. 9 Comparison between observation data & calculated data(Dir)

Fig.3~Fig.5를 보면 전반적으로 동향계열의 파가 입사되었을 때, 울산 신항 근해에서 비교적 파고가 큰 특성을 지니고 있다. 이는 북향계열이나 남향계열의 파랑은 해저지형에 의한 파랑의 굴절이나 방파제의 영향을 받아 울산 신항 근해에서 상대적으로 큰 영향을 미치지 못하기 때문으로 분석된다.

Fig.6~Fig.9와 Table 1에서 알 수 있듯이 파고와 주기, 파랑에 대한 관측값과 계산값은 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 유의 파고의 경우 전체 적인 경향의 일치성을 보여주고 있으며, 관측치와 계산치의 평균 오차는 8.3%, 최대 23.5%의 오차를 나타냈다. 평균주기 자료의 경우, 평균오차 6.1%, 최대 19.3%이었고 첨두 주기 자료의 경우, 평균오차 9.5%, 최대 20.1%의 오차를 나타냈으며 파향에 있어서도 평균오차 4.7%, 최대 13.3%의 오차를 나타냈다. 관측치와 계산치에 대한 종합적인 분석결과 본 연구에서 사용한 DELFT-3D: WAVE를 울산 신항에 적용한 결과 상당히 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

SWAN 모델은 불규칙 파랑을 제한하기 때문에 파랑 스펙트럼에 대한 분석을 하였다. 다음의 그림들은 2003년 12월 1일, 12월 6일에 대한 일 최대 파고 일 때의 buoy형 파고계에서의 관측값(129°22' 59" E, 35°27' 20" N)과 계산값의 spectrum을 비교한 결과이다.

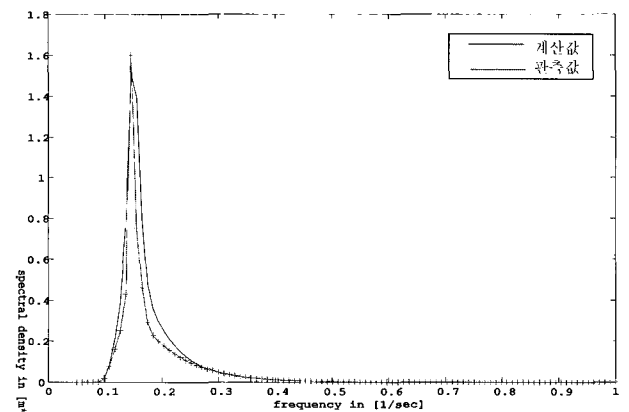


Fig. 10 Comparison between observation data & calculated data(03'12.01)

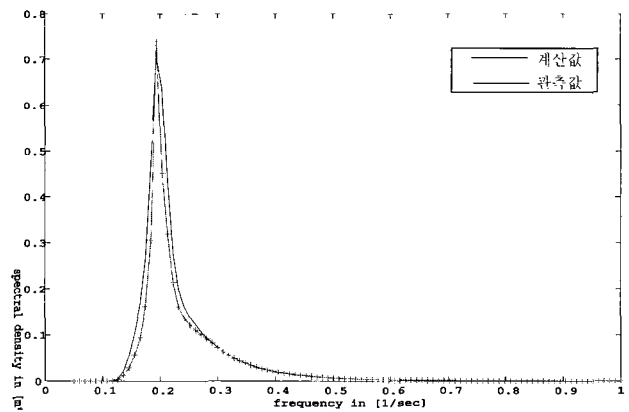


Fig. 11 Comparison between observation data & calculated data(03'12.06)

Fig.10~Fig.11에서 알 수 있듯이 spectrum을 비교해보면 Fig.6~Fig.9의 Hs, Tp, Tm, Dir에서의 비교결과와 마찬가지로 관측값과 계산값이 거의 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 울산 신항을 대상으로 DELFT-3D:WAVE 모형을 적용하여 불규칙 파랑에 대한 관측치와 계산치를 비교 분석 하였다.

계산값과 관측값의 비교그림을 볼 때, 유의파고 관측치와 계산치의 평균 오차는 8.3%, 최대 23.5%의 오차를 나타냈다. 평균주기의 경우, 평균오차 6.1%, 최대 19.3%이었고 침두 주기 자료의 경우, 평균오차 9.5%, 최대 20.1%의 오차를 나타냈으며, 파향에 있어서도 평균오차 4.7%, 최대 13.3%의 오차를 나타내었다. Buoy형 파고계에서의 관측자료와 계산결과에 대한 스펙트럼 비교결과로부터는 본 연구에서의 계산결과가 관측자료와 전반적으로 유사한 경향을 보여줌을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 사용한 DELFT-3D:WAVE로써 충분히 대상해역에서의 불규칙 파랑특성을 재현할 수 있다고 판단 된다. 본 모형은 wave module을 실행시킨 후, 계산결과를 그래픽으로 옮기는 작업없이 곧 바로 DELFT-GPP module에서 결과를 볼 수 있어서 편리하게 불규칙 파랑의 특성을 파악할 수 있는 장점이 있지만, 본 연구에서 이용한 버전에서는 불규칙 파랑의 굴절은 고려하나 회절에 대해서는 고려를 하지 않는 단점을 가지고 있다. 향후, 회절까지 고려한 module이 개발되면 보다 정확한 불규칙 파랑 특성 재현이 가능하리라 기대된다.

후 기

본 연구는 동아대학교의 교비지원에 의한 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- [1] Ahn, K.M., S.H. Lim, Y.K. Choi and S.M. Ahn(2004), "Accuracy Estimation of wave observation using x-band nautical radar", Workshop on Wave, Tide Observations and Modelings in the Asian-Pacific Region, pp.73-82
- [2] Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen and R.C. Ris(1996), The "SWAN" wave model for shallow water, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, pp.668-676
- [3] Booij, N., Haagsma, I.J.G., Kieftenburg, A.T.M.N., and Holthuijsen, L. H., (2000), SWAN implementation manual-SWAN Cycle III version 40.11.
- [4] Dalrymple, R. A., and R. G. Dean(1984), "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", Prentice-Hall
- [5] Goda, Y.(1985), "Random Seas and Design of Maritime Structures", University of Tokyo Press

원고접수일 : 2005년 2월 23일
원고채택일 : 2005년 4월 29일