

# 태풍 ‘매미’ 내습시 관측자료를 이용한 울산 해역의 파고 분포 산출

† 김강민\* · 김종훈\* · 유하상\* · 정원무\*\*

\*(주)세일종합기술공사 기술연구소, \*\*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 책임연구원

## Calculation of the Wave Height Distribution in the Vicinity of Ulsan waters using the Observed Date of Typhoon Maemi

† Kang-Min Kim\* · Jong-Hoon Kim\* · Ha-Sang Ryu\* · Weon-Mu Jeong\*\*

\*Port and Coastal Development Institute, Seil Engineering Co., Ltd. Seoul 150-051, Korea  
\*\*Korea Ocean Research & Development Institute Ansan 426-744, Korea

**요약** : 항만 및 해안구조물의 설계시 사용되는 천해역에서의 파랑장 계산은 내륙 관측소의 바람자료를 이용하거나 심해파 추산모형에 의하여 추출된 심해파계원을 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 전자의 경우는 관측소가 대부분 내륙에 위치하여 파랑발달을 모의하기 위한 정확한 바람자료를 얻기란 매우 어렵다. 또한, 후자의 경우는 아주 넓은 영역에서 큰 격자크기로 계산이 이루어지기 때문에 연안 및 천해역 지형을 상세히 재현하지 못하므로 임의의 정점에 대한 정확한 정보를 파악하기도 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 우리나라 동남부 해역의 태풍 ‘매미’ 내습시의 파랑 관측자료를 사용하여 천해역에서의 파랑장 계산을 수행하였다. 또한, 계산된 파랑장의 정확도를 확인하기 위하여 울산해역 인근의 파고 및 파향 관측결과를 비교·검토하였다. 울산해역에 대한 파고분포 산출결과, 관측정점에서 파고는  $\pm 1.3\%$ 의 차이를 보여 기존의 방법보다 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 파랑장, 심해파, 태풍 매미, 파랑 추산모형, 파고분포

**Abstract** : For calculation of wave field for design of coastal and port structures, generally the wind fields from inland observation record or the predicted waves from deep water wave transformation model are being used. However, for the first case, as we should revise the wave data adopting correcting parameters depending on the distance from the coast and location, it is difficult to extract water waves from wind field. Furthermore, for the second case, because of the calculation which executed under very large grid sizes in the wide domain, the simulation(wave transformation) implied uncertainty in the near shore area and shallow region. So it's difficult to obtain exact data from the simulation. Thus, in this study the calculation of wave field on shallow water is accomplished using the observed data of typhoon 'Maemi' in the Korea Eastern South sea. Moreover, for the accuracy of the calculated wave field, we compared and studied the observed data of wave height and direction on the vicinity of the Ulsan waters. It is proved that the results of this study is more accurate than the existing method with showing  $\pm 1.3\%$  difference between observed and calculated wave height distribution in Ulsan waters

**Key words** : Wave field, Deep water wave, Typhoon 'Maemi', Wave transformation model, Wave distribution

## 1. 서론

전지구적인 관점에서 대기이상 현상으로 인하여, 우리나라에 영향을 주는 태풍들의 규모와 강도는 점차로 커지고 발생빈도 또한 증가할 것으로 예측된다. 이에 따른 피해규모 또한 커질 것으로 예상된다. 특히, 우리나라 동남부 해역에 큰 재해를 입힌 2003년 9월에 내습한 태풍 ‘매미’의 출현 이후, 연안역 방제에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 즉, ‘매미’의 출현은 항만 및 연근해의 해양개발에 있어서 또 하나의 설계과 기준을 제시하였다고 말할 수 있을 정도이다.

항만 및 해안구조물의 설계와 구조검토에 있어서 파랑은 중요한 외력요소 중 하나이며, 최근 기후변화로 인하여 태풍이 대형화되는 추세이므로 태풍내습으로 인한 극한파랑의 재현은 매우 중요하다 할 수 있다.

일반적으로 천해역에서의 설계파 계산은 크게 두 가지 경우가 있다. 첫 번째 방법은 심해에서 발달된 파가 천해로 전파되기 어려운 내만(內灣)의 경우로, 내륙관측소의 바람자료를 이용하여 파랑장을 계산하는 것이고, 두 번째 방법은 외해의 에너지가 전달되는 트인 해역의 경우로, WAM 모형이나 Wave Watch III 모형 등에 의해 심해설계파를 산출하고(신 등, 2004) 그 값을 입력치로 하여 천해파랑변형을 계산하여 그 해

† 교신저자 : 종신회원, kikami@seileng.com 02)840-5182  
\* jhkim@seileng.com 02)840-5183  
\* coolwave@seileng.com 02)840-5181  
\*\* wmjeong@kordi.re.kr 031)400-6326

역의 천해설계파를 산출하는 방법이다.

그런데 전자의 경우는 관측소가 대부분 내륙에 위치하여 파랑발달을 모의하기 위한 정확한 바람자료를 얻기란 매우 어렵고 후자의 경우는 심해설계파 산출에 있어서 격자간격이 큰 광역에 대한 계산이 이루어지기 때문에 상세한 지형 및 수심을 제대로 반영하지 못하므로 천해역에 사용하기 위한 임의의 정점에 대한 정확한 정보를 파악하기란 곤란하다.

따라서, 본 연구에서는 항만 및 해안 구조물 설계시 설계파고 산출기술의 또 다른 방법을 제시할 목적으로 태풍 매미 내습시 관측된 파랑자료의 스펙트럼을 분석하였으며, 이를 모형의해경계 조건에 맞게 재구성하여 태풍 매미 내습시 파랑장을 계산하였다.

또한, 본 연구에서 제시된 방법의 정확도를 알아보기 위하여 앞에서 제시된 두 번째 방법을 이용하여 계산되어진 파고, 파향, 주기를 입사파 제원으로 하여 태풍 매미 내습시 천해파랑변형을 계산하여 본 연구에서 제시된 방법으로 수행된 실험결과와 비교하였다.

## 2. 태풍 '매미' 내습시 파랑변형실험

### 2.1 파랑 관측자료

제14호 태풍 '매미'는 괌 북서쪽 약 400km 부근해상(16.0°N, 141.5°E)에서 발생하였으며, 느리게 북서진하여 2003년 9월 9일 09시경 태풍으로 발달한 후 11일 09시경에 중심기압이 910hPa로 최저를 나타내었다. 2003년 9월 12일 06시경부터 북북동진하면서 빠른 속도로 진행하여, 12일 18시경 제주도 성산포 동쪽 해상을 거쳐 12일 20시경 경상남도 사천시 해안으로 상륙하였으며, 계속 북북동진하여 13일 02시 30분경에 경북 울진 해안을 거쳐 동해로 진출하였다(기상청, 2003).

태풍 매미의 진로는 Fig. 1과 같으며, 울산해역에 내습하는 단주기파의 특성을 파악하기 위하여 설치된 파향·파고계를 통하여 수집된 태풍 매미 내습시 파랑자료를 수집하였다. Table 1에 정점들의 경·위도, 관측기간, 설치수심 등을 정리하였다(해양수산부, 2004).

태풍 매미 내습시 파랑장 계산은 파랑관측 자료로부터 최대 유의파고가 출현한 기간(2003. 9. 12 23:00~23:27)에 대한 스펙트럼 분석결과를 이용하여 수행하였다. 태풍 매미 통과시 관측 스펙트럼은 Fig. 3과 같으며, 정점 S1에서의 유의파고( $H_s$ ) 9.45m(최대파고 14.68m, 첨두주기 12.8sec, 1/3최대유의파 평균주기( $T_{H_{1/3}}$ )는 10.8sec, 대표파향은 S7.0°E), 정점 S2에서의 유의파고는 7.52m(최대파고 13.11m, 첨두주기 15.1sec, 1/3최대유의파 평균주기 11.0sec, 대표파향 S46.4°W)로 나타났다.

Table 1 Summary of wave observation for typhoon 'Maemi'

Point	Period(2004년)	Location(WGS84)	depth(m)	Remark
S1	8. 6~9. 17	129°25.76'E 35°26.08'N	53.0	8.30~9.7 (mis-survey)
S2	8. 6~11. 13	129°22.42'E 35°25.37'N	25.0	-

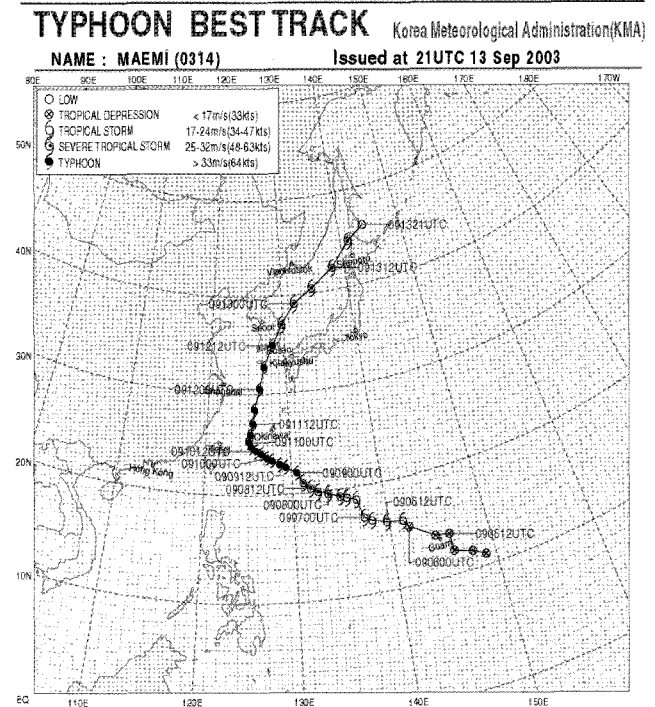


Fig. 1 The track of typhoon 'Maemi' (Typhoon Research Center, 2003)

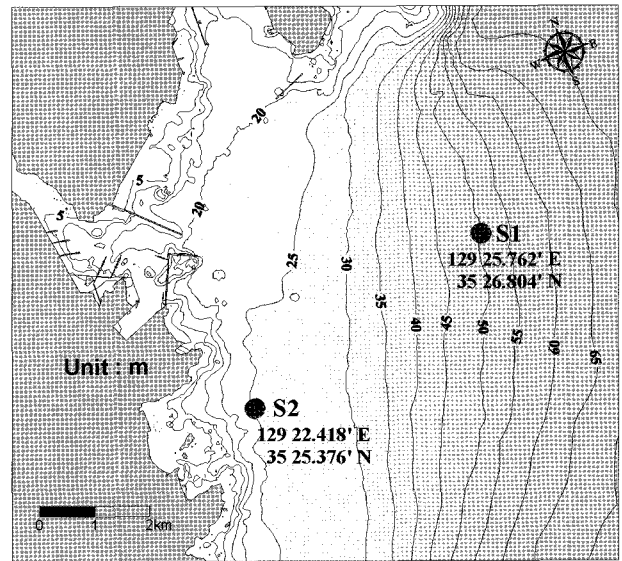


Fig. 2 Location of wave observation and bathymetric chart in the study area

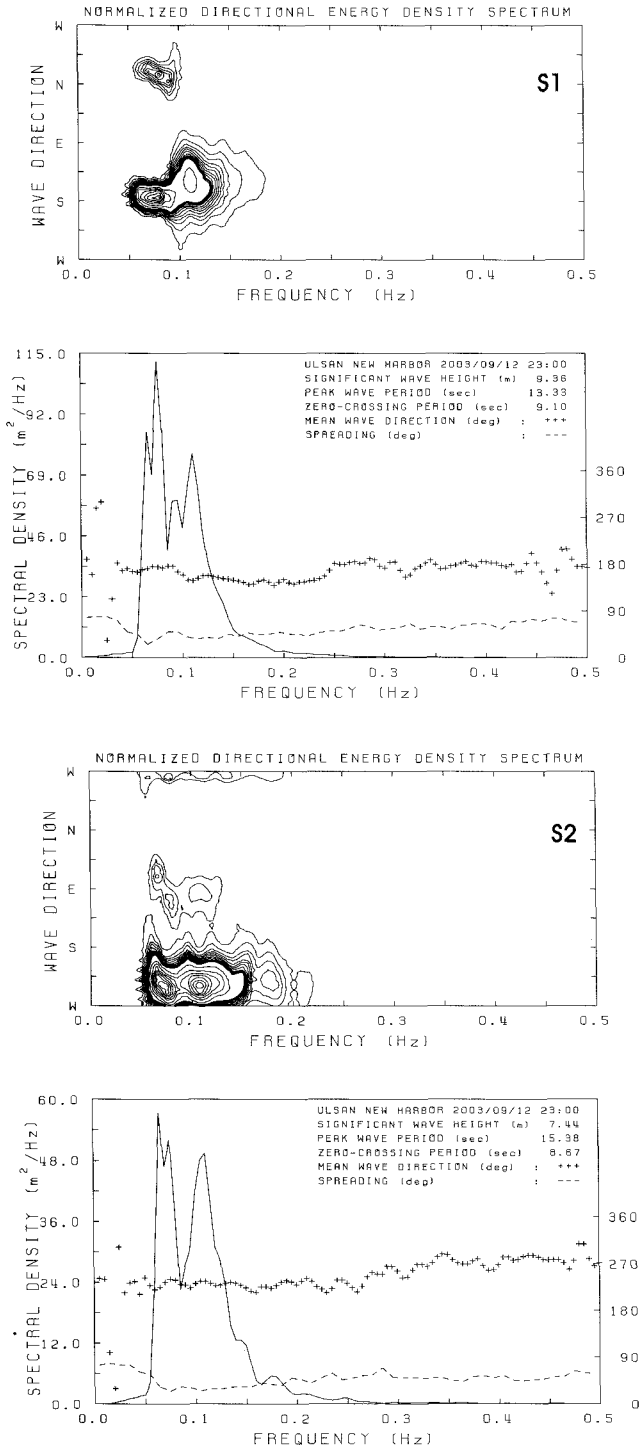


Fig. 3 Analysis result of directional-frequency spectrum at 'Maemi' passed S1, S2 point

2.2 적용모형(SWAN)

SWAN(Simulating Wave Nearshore) 모형은 네덜란드 델프트(Delft) 공과대학에서 개발한 파랑수치모형으로 주어진 바람과 해저면 및 해류 조건으로부터 연안역, 호수 및 하구의 파랑을 계산한다. 이 모형의 기본방정식은 파동의 작용 평형 방정식(Wave action balance equation)이며, 사용되는 파랑에너지의 원천항(Source term)에 따라 제1세대, 제2세대 및 제3

세대 모형으로 분류된다(Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

위 식에서 좌변의 1항은 작용 밀도의 시간 변화량, 2항과 3항은 지리적 공간에서의 파동의 전파, 4항은 수심과 흐름의 변화에 의한 상대주파수의 천이 그리고, 5항은 수심과 흐름에 의한 굴절을 나타낸다.  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma/\theta)/\sigma$ 로서 에너지밀도 스펙트럼(wave action density spectrum),  $\sigma$ 는 각주파수,  $\theta$ 는 파향을 나타낸다. 그리고,  $c_x, c_y$ 는 각각 x, y방향의 전파속도(군속도)를,  $c_\sigma, c_\theta$ 는  $\sigma$ 와  $\theta$ 공간에서의 전파속도를 각각 나타낸다. 우변의 항  $S(=S(\sigma, \theta))$ 는 원천항(Source and dissipation)을 나타내며, 이는 파랑의 생성, 소산 및 비선형 상호작용에 의한 에너지 전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2)$$

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

바람에 의한 에너지 유입, 백파에 의한 에너지 소산, 저면에 의한 에너지 소산, 쇄파에 의한 에너지 소산, 4파 비선형 상호작용, 3파 비선형 상호작용 등에 대한 자세한 설명은 Booji et al.(2004)에 자세히 나타나 있다.

2.3 모형의 구성

태풍 매미 내습시 파랑 재현을 위한 계산영역은 동서 방향으로 20km, 남북 방향으로 30km로, 격자 간격은 50m 정방격자로 구성하였으며 주변지형 및 수심을 적절하게 모형에 재현될 수 있도록 하였다. 해안선의 위치와 격자점의 수심은 울산해역 주변의 해도와 항만 정밀해도를 이용하여 입력하였다.

적용모형인 SWAN의 특성상 측면경계 부근에서 부정확한 결과가 도출되는 점을 감안하여 스펙트럼 분석에서 얻어진 결과를 이용한 실험시에는 모델영역을 서측으로 20° 기울여 수행하였다. 수치모의시 사용된 발생스펙트럼은 JONSWAP으로, 스펙트럼 방향 분할은 0~360°를 36개로, 주파수 분할은 0.04~0.33Hz를 35개로 하였으며, 제 조건들은 SWAN 모형의 기본값(default)으로 입력하였다.

Table 2 Study case according to the incident wave condition

Case	Input condition of incident wave
CASE SP	Observed wave
CASE TP	Calculated wave by typhoon model

실험은 두 가지 경우로 나누어 수행하였다. 첫 번째 실험

(CASE SP)은 2.1절에서 언급한 바와 같이 파랑관측 자료로부터 최대 유의파고가 출현한 기간의 자료를 스펙트럼 분석하여 얻은 결과를 이용하여 수행하였으며, 두 번째 실험(CASE TP)은 첫 번째 실험과 상대적인 비교를 위하여 Fig. 4와 같이 한국해양연구원(Kang et al., 1988)에서 수행한 태풍 모형으로 계산된 심해설계파 제원을 추출하여 수행하였다. 실험안은 Table 2에 제시한 바와 같이 CASE SP는 Fig. 5의 파랑관측 자료의 주파수-파향 스펙트럼을 이용하여 입사파 제원(입사파 스펙트럼)으로 사용하였으며 CASE TP는 전술한 태풍 모형의 계산결과에서 추출한 파고 11.2m, 주기 11.2sec, 파향 S27°E로 입사파 제원으로 사용하였다.

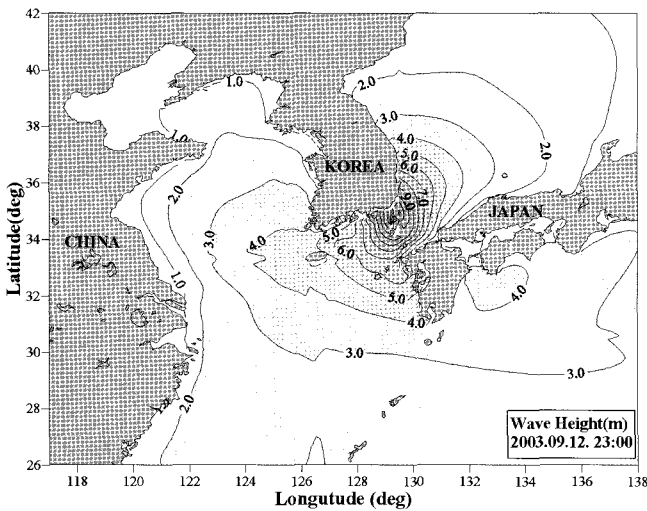


Fig. 4 Wave height distribution by typhoon model at the time of typhoon passage in the Ulsan waters

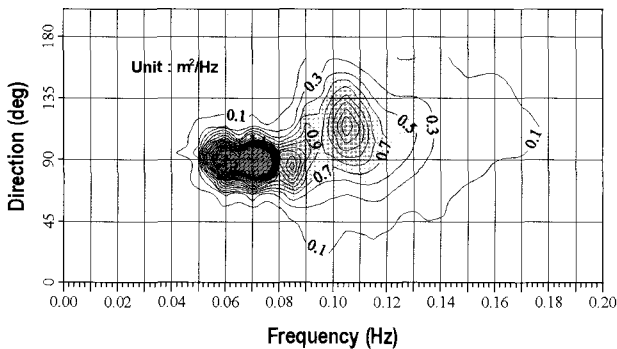


Fig. 5 Incident spectrum of model for CASE SP

2.4 모형의 검증 및 결과

모형의 검증은 Fig. 2에 표기된 정점 S1, S2에 대한 관측파랑값과 각 실험안별로 계산된 값을 비교하여 수행하였다. 비교 결과를 Table 3에 제시하였다.

CASE SP의 경우, S1 정점의 관측파고와 파향은 9.45m, S7°E, 계산된 파고와 파향은 9.57m, S5.9°E이다. S2 정점의 관측파고와 파향은 7.52m, S35°E, 계산된 파고와 파향은 7.43m, S23.1°E으로 나타났다. 관측치와 비교하여 S1 정점에

서 파고는 -1.3%, 파향은 1.1° 차이를, S2 정점에서 파고는 +1.2%, 파향은 11.9°의 차이를 보였다.

CASE TP의 경우, S1 정점의 경우 계산된 파고와 파향은 10.58m, S29.7°E이며, S2 정점의 경우 계산된 파고와 파향은 8.16m, S39.9°E으로 나타났다. 관측치와 비교하여 각 정점별 관측값에 대한 계산값의 비는 S1 정점에서 파고는 -12.0%, 파향은 -22.7°의 차이를, S2 정점에서 파고는 -10.0%, 파향은 -4.9°의 차이를 보여 CASE SP에 비하여 정확도가 떨어지는 결과를 보이고 있다.

CASE SP에 비해 CASE TP가 상대적으로 큰 파고값을 나타내고 있는데, 이러한 원인은 앞에서 언급한 바와 같이 태풍 모형이 큰 격자 크기로 계산되어 천해역의 지형과 수심을 제대로 반영하지 못한 결과라 판단된다.

CASE SP에 의한 각 정점별 주파수-파향 스펙트럼 형상을 Fig. 6에 제시하였다. S1 정점은 관측 스펙트럼과 유사하게 재현되었으며, S2 정점에서는 다소 큰 차이를 보이고 있으나 주파향은 관측자료와 실험결과가 S35°E, S23.1°E로 90% 이상의 정확도를 보이는 것으로 나타났다.

각 실험안에 따른 태풍 매미로 인한 울산 해역의 파고분포 계산결과, CASE SP의 경우, 남방파제 전면 파고는 7.66m, 범월갑방파제 전면 파고는 7.46m, 범월갑 방파호안의 파고는 6.33m로 나타났다. 반면 CASE TP의 경우, 각각 8.14m, 8.08m, 7.15m로 CASE SP에 비하여 큰 값을 나타나는 양상을 보이는 것으로 나타났다.

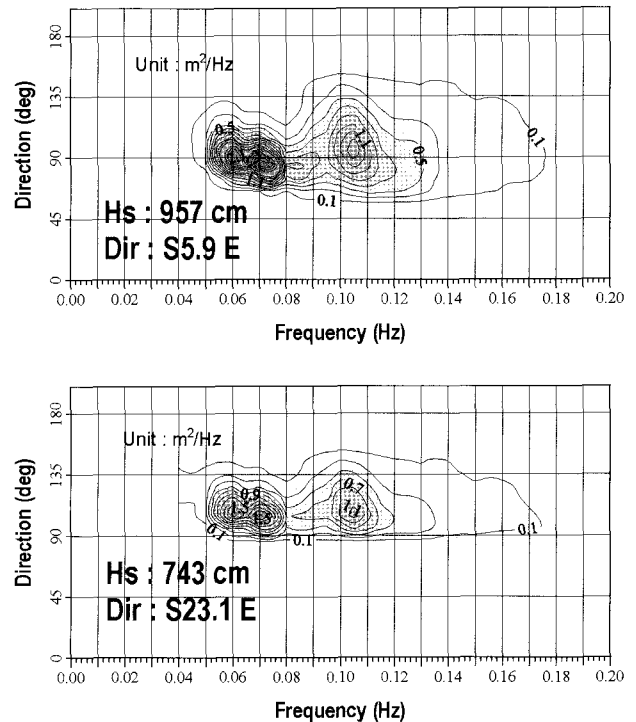


Fig. 6 Calculated frequency-direction spectrum by numerical model at stations S1 and S2

Table 3 Calculated results from CASE SP

Point	Observed data		Calculated data				Height Ratio(Cal./Sur.)		Direction Diff(Cal.-Sur.)	
			CASE SP		CASE TP					
	Height(m)	Dir.(°)	Height(m)	Dir.(°)	Height(m)	Dir.(°)	CASE SP	CASE TP	CASE SP	CASE TP
S1	9.45	S7° E	9.57	S5.9° E	10.58	S29.7° E	1.013	1.12	1.1	-22.7
S2	7.52	S35° E	7.43	S23.1° E	8.16	S39.9° E	0.988	1.04	11.9	-4.9

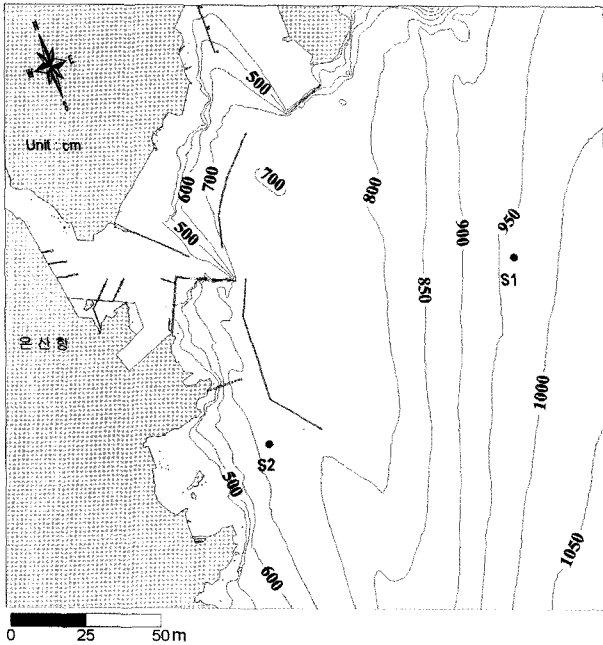


Fig. 7 Calculated result of wave height distribution by using survey data of typhoon 'Maemi'(CASE SP)

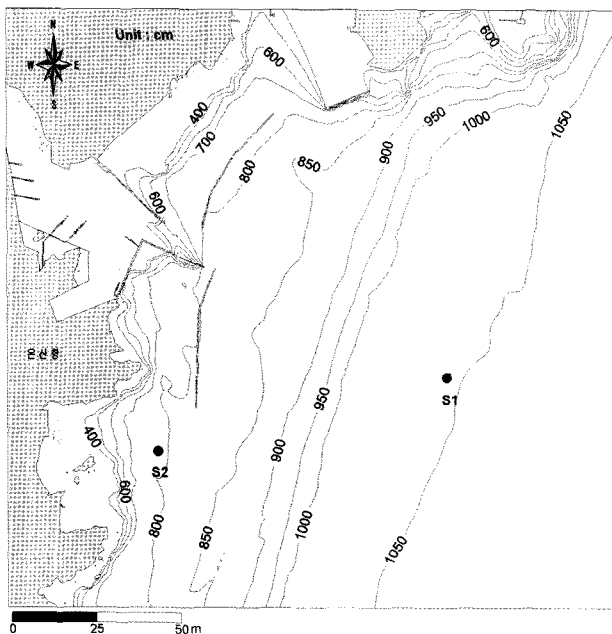


Fig. 8 Calculated result of wave height distribution by using typhoon model data(CASE TP)

### 3. 결론 및 제언

항만 및 연안해역에 있어서 공공의 토목시설 혹은 해양개발과 관련된 설계 및 구조검토를 수행할 경우, 파랑은 가장 중요한 외력 요소의 하나이다. 일반적으로 극한파랑의 재현이나 설계파랑 산정은 전해역 심해설계과 자료를 이용하거나 태풍 모형의 결과를 근거로 한 심해설계과 제원을 이용하여 천해파랑변형모형을 운용하여 얻게 된다. 본 연구에서는 상기의 방법과는 다르게 태풍 매미 내습시의 파랑관측자료를 이용하여 우리나라 동남부해역의 천해 파랑장을 계산하였다. 결과는 관측자료와의 검증을 거쳐 보정하였으며, 나아가 태풍 모형에서 추출된 심해설계과 제원을 이용한 파랑변형실험 결과와 비교하여 접근방법에 따른 정확도를 분석하였다.

파랑 계산결과, 파고비(계산값/관측값)와 파향차(계산값-관측값)는 다음과 같이 나타났다. ①기존 태풍모형의 결과값을 이용하였을 경우 S1 정점에서의 파고비와 파향차는 1.12, -22.7°로, S2 정점에서의 파고비와 파향차는 1.04, -4.9°로 동측으로 편재되는 경향을 보이고 ②파랑관측자료를 근거로 한 입사파 스펙트럼을 이용한 경우, S1 정점에서의 파고비와 파향차는 1.013, 1.1°로, S2 정점에서는 0.988, 11.9°로 파고의 경우는 ±0.13%이내의 관측값 대비 정확도를 나타내는 것으로 나타났다.

심해파가 천해로 전파될시 많은 파랑변형이 발생하기 때문에 영역 및 입사파 조건 부여시 가능한 동일한 조건을 두어야 하나, 천해 파랑변형모형의 경계 및 계산 등에 영향을 적게 주기 위하여 각 실험안별로 모형의 영역을 다르게 하였음을 밝힌다.

### 참고 문헌

- [1] 기상청(2003), 태풍 '매미' 진로, <http://www.kma.go.kr>.
- [2] 신승호, 홍기용(2004), "제3세대 파랑추산모형을 이용한 태풍 '매미'의 극한파랑 재현(II)", 한국항해항만학회 29권 8호, pp.745-752.
- [3] 해양수산부(2004), 울산신항 남방파제 및 기타공사 기본·실시설계용역 보고서, 6권 해양조사편, pp.33-98.
- [4] Booij, N., Haagsma, IJ. G., Holthuijsen, L. H., Kieftenburg, A.T.M.M., Ris, R. C., van der Westhuysen, A. J., and Zijlema, M.(2004), "SWAN-User manual, Delft University of Technology", Environmental Fluid

Mechanics Section.

- [5] Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., and Walden, H.(1973), "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project(JONSWAP)", Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.
- [6] Kang, S. W., Lee, D. Y., Park, K. S., Shim, J. S., Oh, B. C., Jun, K. C., and Kim, S. I.(1988), "Hindcast of typhoon waves in the South and the East Sea of Korea", Ocean Research 10(2), pp.57-67.

---

원고접수일 : 2007년 4월 6일

원고채택일 : 2007년 7월 12일