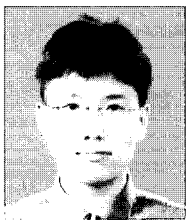
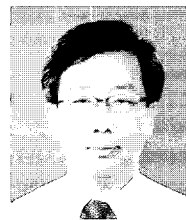


태풍 루사와 매미에 의한 한반도 주변 해역의 심해파 산정

Significant Wave Condition around Jeju Island on Typhoon Rusa and Maemi



엄현민 | (주)헤이이엔씨 부설기술연구소 연구원



고진석 | (주)헤이이엔씨 부사장

1. 서론

해파에 대한 정보는 해양 및 연안 구조물의 설계와 해양개발 계획, 연안구조물의 설계, 해안의 침식과 퇴적 과정의 이해 등 여러 가지 목적을 위하여 필요하다. 특히 해안 및 해양에 건설되는 구조물은 바람, 해파, 조류, 지진 등의 자연의 힘에 대항하면서 그 기능을 발휘하게 된다. 우리는 이러한 해양 환경외력에 대하여 각종 해양조사 및 연구를 행하여, 환경하중이 구조물에 미치는 영향을 가능한 정확하게 이해하고 그 크기를 신뢰성 있게 예측하기 위해 노력하고 있다. 해안과 해양구조물에 영향을 미치는 제반 해양현상 중에서 가장 특징적이고 영향이 큰 것이 해파이다. 하지만 해파는 해양현상 중에서 복잡한 변화를 갖는 현상 중의 하나이며, 이를 보다 정확히 예측하기 위한 노력이 계속되고 있다.

해상의 바람에 의하여 발생, 발달되는 해파는 풍파(wind-sea)와 너울(swell)의 형태로서 전파되는데 이는 해양의 에너지 분포 중에서 가장 큰 비중을 차지하고 있으며 따라서 해상상태를 결정하는 가장 큰

요인이 된다. 해양의 바람은 시공간적인 변화가 커서 바람의 크기가 크고 지속적인 풍역의 해양에서는 해파의 발생발달과정에서 풍파가 형성되며 발생된 해파가 발생지점을 벗어나면 너울의 형태로 자유로이 전파되어 나가게 된다. 따라서 한 해역에 대해서는 풍파와 너울의 복합적인 요소에 의하여 해상상태가 결정된다.

이와 같은 파의 특성을 파악하기 위한 기초이론은 19세기에 완성되었지만 공학분야 및 현업에 적용되기에는 수십 년이 걸렸다. 실제적인 파의 이론과 실무가 본격적으로 결합된 것은 제2차 세계대전 중의 일이며 해파추정은 바람이 비교적 일정한 해역에서의 풍속과 파고의 경험적인 관계를 사용하여 처음 시도되었다(Sverdrup and Munk, 1947). Wilson(1965)은 태풍과 같이 풍속의 변화가 심한 해역에서의 해파 추산법을 발표하였다. Gelci 등(1957)은 스펙트럼내의 에너지 평형 개념을 적용하여 해파를 추산하는 해파 모형인 스펙트럼 해파모형(DSA-5)을 개발하였다. 이 에너지 평형 방정식에 기초한 스펙트럼 에너지 해파 모형은 여러 유형으로 구분되어 꾸준한 개발을 통해

세계 주요 해양국이 현업에 적용하여 오고 있다. 이 중에서 제 3세대 해파 모형인 WAM 모형(WAMDIG, 1988)은 가장 잘 검증된 모형으로서 세계의 40여 연구진들이 전구적 또는 지역적 규모로서의 예보(ECMWF, FNOC, KNMI, NMC)에 적용하고 있으며, 현장자료 검증(LEWEX, SWADE, ERS-1 검증) 및 지역적 해파연구(지중해, 북해, hurricane 해파 추정)에 이용되고 있다.

고조석, 고해파, 폭풍해일 및 쓰나미 등 자연현상에 노출되어 있는 한반도 주변해역 중 서해안은 동중국해로부터 파급된 조석이 연안에 이르러 복잡한 지형특성으로 조위증폭이 발생되어 큰 조차 분포를 나타내고, 하계에는 태풍, 동계에는 계절풍에 의한 고해파와 폭풍해일에 의해 고조위를 발생시키며, 동해안은 넓은 수역에 비해 대한해협, Tartar 해협, Soya 해협 및 Mamiya 해협을 통한 조석 파급 효과가 적어 조차는 적으나 고해파, 폭풍해일 및 쓰나미에 의해 고조위 발생이 이루어져 연안재해를 일으킨다.

본 논문에서는 최근에 한국, 일본, 중국 등에 큰 영향을 준 2002년 15호 태풍 루사와 2003년 14호 태풍 매미의 상황을 재현함으로써 한반도 주변해역에 발생한 해파를 추정함으로써, 설계시 태풍과 같은 악기상 상황에 대한 방호대책 수립시 기초자료로 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 수치모의 사상

2.1 태풍 루사(0215)

2002년 15호 태풍 루사는 일본 가고시마 남동측으로 450km 떨어진 해역에서 생성되었으며 시속 24km의 속도로 북서진하였으며 류큐열도를 지난 후에 제주도 동측 해안을 거쳐 전라남도 해안으로 상륙하였으며 이때 중심기압은 960~965hPa로 나타났다.

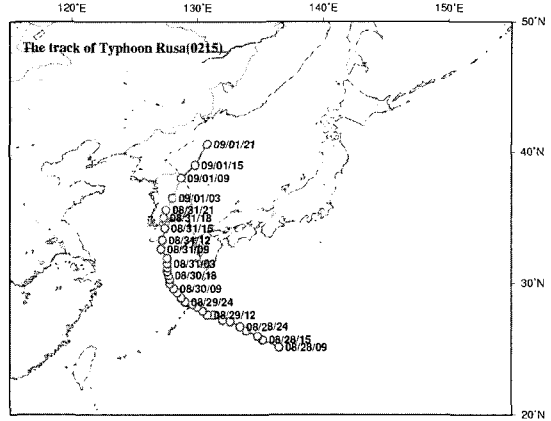


그림 1. Track for typhoon Rusa(0215)

8월 31일부터 9월 1일 사이에 강원도에 내린 비로 수천의 가옥이 침수되고 교통 및 통신이 단절되었으며 강릉시의 동측 해안에 내린 강우량은 871mm로 이것은 기상관측상 하루동안 가장 많이 내린 것이다. 기존의 최대량은 1981년에 장흥에 547.4mm였다.

범람과 산사태 등으로 인해 200명 이상의 사상자가 발생하였으며 피해액은 5.5조원에 이르렀다. 이 태풍으로 인해 28,100채의 가옥이 무너지며 농지 85,000ha가 침수되었다. 우리나라의 주요 교통로인 경부 고속도로와 철도를 포함한 202 곳의 도로와 교량이 피해를 보았다.

2.2 태풍 매미(0314)

태풍 매미는 2003년의 14호 태풍이며 풍속과 대기압 부분에서 역사상 가장 큰 것으로 기록되었다. 기상학자들은 1904년에 기상 관측을 시작한 이후로 가장 빠른 풍속을 관측했다고 말했다. 매미는 950 hPa의 기압으로 9월 12일에 경상남도에 내습하였다. 과거 1959년 태풍 사라 때에는 952 hPa이었다. 풍속의 경우 12일 오후에 제주에서 초속 60m, 약 시속 135 miles의 강풍이 관측되었는데 기존의 최대값은 2000년의 태풍 프라피룬 내습시 관측된 초당 58.3m

이었다. 13일 새벽에는 한국의 남해안에 내습하였으며 부산항의 80m 높이의 크레인을 파괴시켰다. 태풍이 이렇게 강력했던 이유는 이전 태풍들의 경우 북진하면서 그 강도가 약해졌던 반면에 태풍 매미의 경우 남태평양에서 생성되었던 강도가 그대로 유지되면서 한반도에 내습했기 때문이다.

또한 태풍 매미는 전국적으로 최대 450mm의 강우량을 기록했으며, 제주는 60에서 270mm, 전라남도는 70에서 300mm, 경상남도는 100에서 450mm, 전라북도는 30에서 130mm, 그리고 충청도는 20에서 160mm를 나타냈다. 강원도에는 20에서 400mm인 반면에 서울 및 경기도에는 10에서 50mm로 상대적으로 적은 양의 비가 내렸다.

국립방재연구소와 재해대책본부의 보고서에 따르면 사상자가 130명으로 집계되었다. 태풍으로 인한 재산 피해액은 4.8조원 (약 41억 달러)에 달했으며 9,000채의 가옥이 파괴되었으며 강풍으로 인한 전선의 파괴도 발생하였다. 또한 873개의 도로와 30개의 다리, 489대의 차량, 15158ha의 농지가 붕괴되고 침수되었다.

2003년 발생한 태풍인 매미(0314)의 경우 류큐 열도를 지난후 계속 북상한 후 제주도 동측해안, 남해안을 거친 후에 우리나라 남부를 통과하여 동해상으로

로 빠져나갔다. 한반도 통과시의 최저중심기압은 950hPa로 나타났다. 모형 수행 기간은 태풍이 모형 영역내에 포함되기 시작하여 소멸되기까지의 9월 11일 03시부터 9월 13일 21시까지로 정하였다.

3. 수치모형실험

3.1 실험 방법

이상과 추정은 WAM cycle 4 모형(WAMDIG, 1988)을 이용하였으며 본 모형은 2차원 파랑 스펙트럼의 형태에 대한 어떠한 가정 없이 2차원 파랑 스펙트럼의 변화를 파랑에너지 보존방정식으로 적분하여 계산하는 제3세대 모형이다.

모형의 기본방정식은 다음과 같다(G?nther, Hasselman과 Janssen, 1992).

$$\frac{dF}{dt} + \frac{\partial}{\partial \Phi} (\Phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\lambda F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\theta F) = S \quad (1)$$

: $(f, \theta, \Phi, \lambda)$

여기서, F 는 $(f, \theta, \Phi, \lambda)$ 에 관련된 스펙트럼 밀도 함수이고, f, θ, Φ 및 λ 는 각각 주파수, 방향, 경도, 위도를 나타낸다. θ, Φ, λ 는 큰 순환에 따른 파들의 전파방향과 위치에 따른 변화이다. 근원함수 S 는 바람입력 S_{in} , 백파에 의한 소산 S_{dis} , 그리고 비선형 전파항 S_{nl} 들의 합이다.

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

모형의 영역은 남측 경계를 20° N, 북측 경계를 50° N, 서측 경계를 115° E, 동측 경계를 155° E 로 설정하여 북서 태평양 해역과 동중국해, 황해 및 동해를 포함하도록 수립되었다. 수립된 한반도 주변 해역의 지형

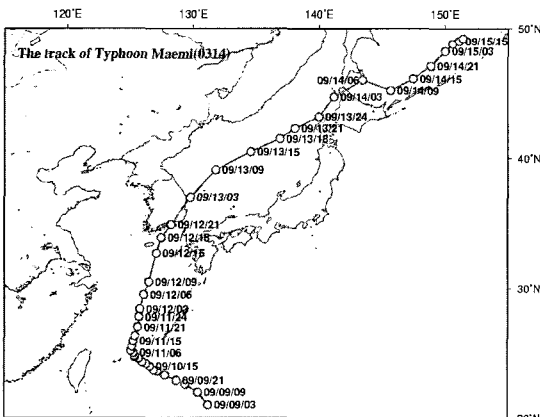


그림 2. Track for typhoon Maemi(0314)

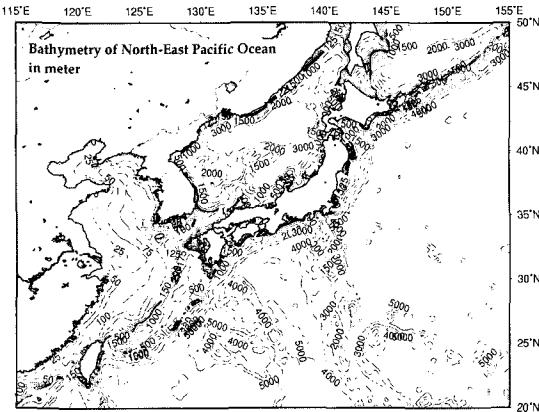


그림 3 Depth for computation area

적인 특성은 북서 태평양 해역은 4,000~5,000m의 수심 분포를 보이며 육봉으로 둘러싸인 동해는 2,000m 이상의 수심분포를 보이고 있는데 황해는 다른 지역과 달리 1,000m 이내의 수심 분포를 보이고 있다. 동해는 대한해협을 통해 황해, Tsugaru 해협과 Soya 해협을 통해 북서 태평양, Mamiya 해협을 통해 Okhotsk 해와 연결되어 있고 황해는 Ryukyu 열도를 통해 북서 태평양과 연결되어 있다. 또한 황해 및 동중국해 지역은 조석의 영향이 매우 강하고 자주 내습하는 태풍 기간에는 폭풍해일과 높은 해파가 발생한다.

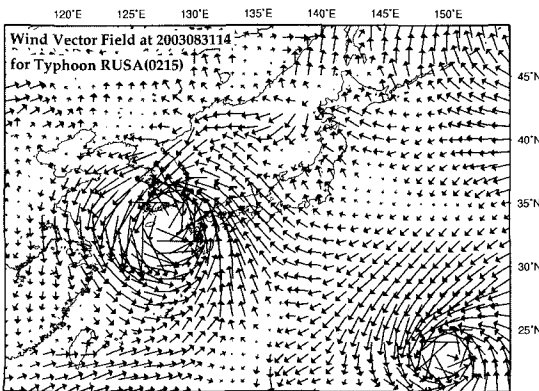


그림 4(a). Wind vector field for typhoon Rusa(0215) at 2002. 8. 31. 14

모형에 적용된 격자 구성은 5분 격자 체계로 구성되어 경도간 481개, 위도간 361개의 격자 체계를 갖는다. 수심 자료는 NOAA의 Digital Bathymetric Data Base 5-minute (DBDB5) 수심자료로부터 취하였다.

WAM 모델에 있어 Δt 의 채택은 CFL 안정조건을 만족하도록 120초로 하였다. 또한, 주파수 영역을 25개 대역으로 나누었으며 0.042Hz ~ 0.411Hz로 방향은 12개의 영역(30°)으로 나누어 방향 스펙트럼을 구성하였다.

바람장 자료는 기상청의 기상모형인 MM5 모형에서 산출된 자료를 이용하였으며 공간적으로 5분(약 50km) 간격, 시간적으로 1시간 간격으로 내삽하여 입력하였다.

4.2 실험 결과

실험 결과로는 태풍 루사와 매미상황에서 광역 및 제주 화순항 지역의 유의파고, 평균 및 침두주기, 파향 분포를 산정하였다.

태풍 루사에 대한 최대유의파고와 평균주기, 침두주기의 분포가 그림 6~11에 제시되어 있다. 가장 큰 유의파고는 태풍의 경로를 따라 한반도 남해안에

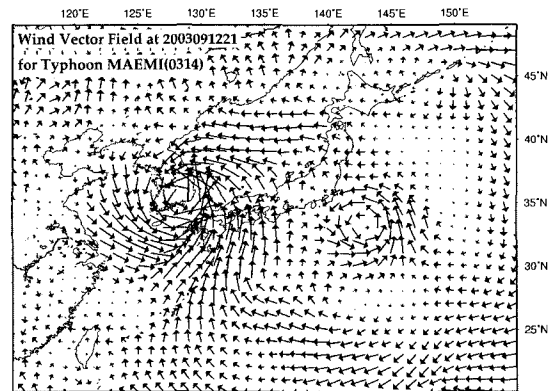


그림 4(b). Wind vector field for typhoon Maemi(0314) at 2003. 9. 12. 21

표 1. Maximum Significant Wave Height and Period around Hwasun Port in Jeju

Content	Significant Wave Height(m)	Mean Period(sec)	Peak Period(sec)
Rusa(0215)	10.4~10.6	14.1~14.3	16.8~17.2
Maemi(0314)	8.5~8.7	13.2~13.8	14.0~14.9

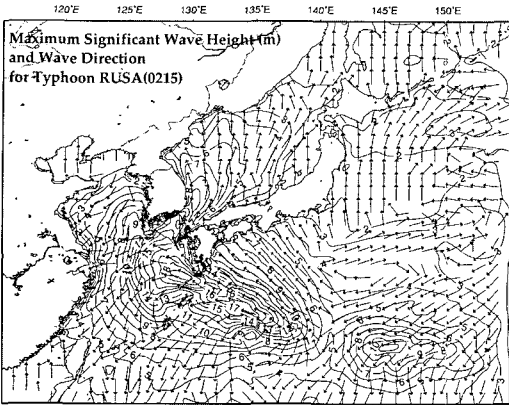


그림 5. Maximum Significant Wave Height(m) and Direction for typhoon Rusa(0215)

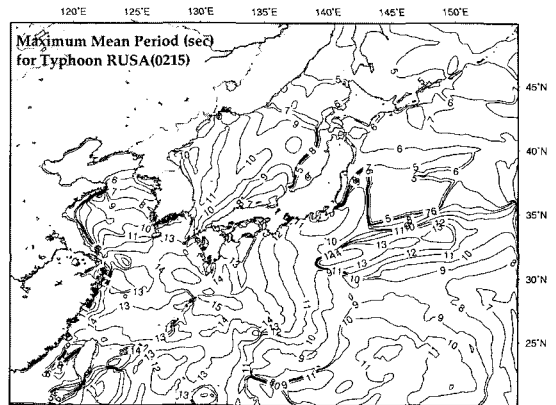


그림 6. Maximum Wave Mean Period(s) for typhoon Rusa(0215)

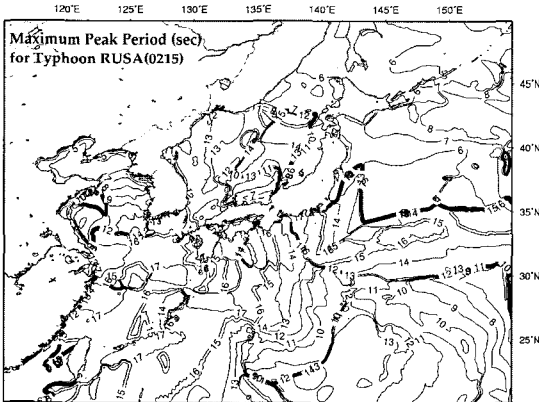


그림 7. Maximum Wave Peak Period(s) for typhoon Rusa(0215)

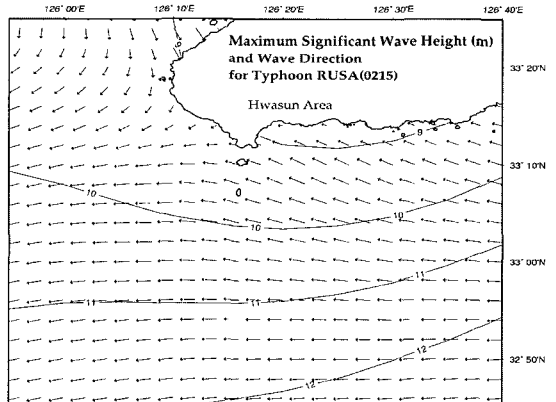


그림 8. Maximum Significant Wave Height(m) for typhoon Rusa(0215) around Hwasun Port

8~14m, 중국 항주만에 4m 이상, 일본의 서측해역에 14~16m가 나타났다. 평균주기는 한반도 동측해역에 10~11sec, 중국의 산둥반도 남측에는 6~9sec가 계산되었다. 그리고 태풍의 영향을 먼저 받는 제주도 남측해안에 위치한 화순항에서의 시간에 따른 유의파고, 평균주기, 풍향, 파향의 변화들을 그림 12에 제시하였다. 풍향이 태풍의 북상에 따라 남동풍에

서 북동풍으로 변동하였으며, 태풍이 제주도 동측해안을 지나친 후에는 북풍에서 북서풍으로 변화하였다. 8월 30일 23시경에 유의파고가 약 9.4m로 최대값을 나타냈으며 평균주기의 경우 8월 29일부터 15sec를 유지하였다.

제주도 남서해안에서 최대유의파고는 9~11m로 나타났으며 파향은 SE에서 E계열이 대부분이었다.

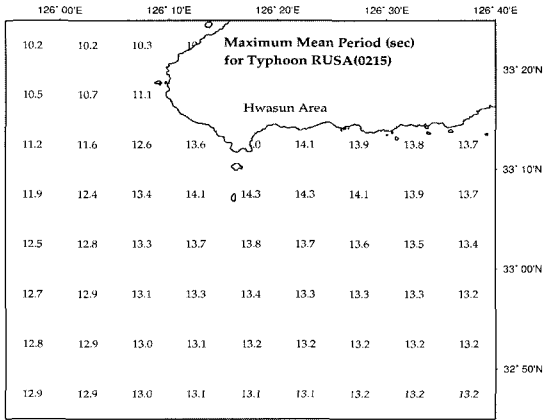


그림 9. Maximum Wave Mean Period(s) for typhoon Rusa(0215) around Hwasun Port

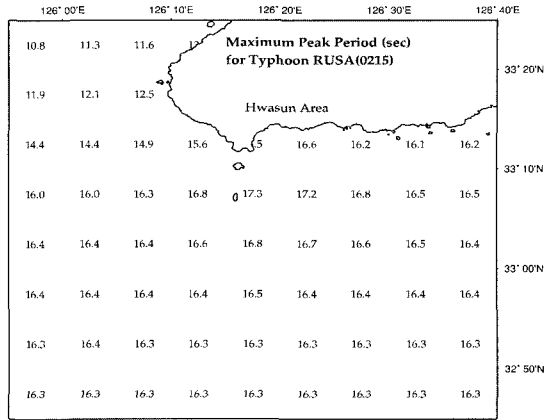


그림 10. Maximum Wave Peak Period(s) for typhoon Rusa(0215) around Hwasun Port

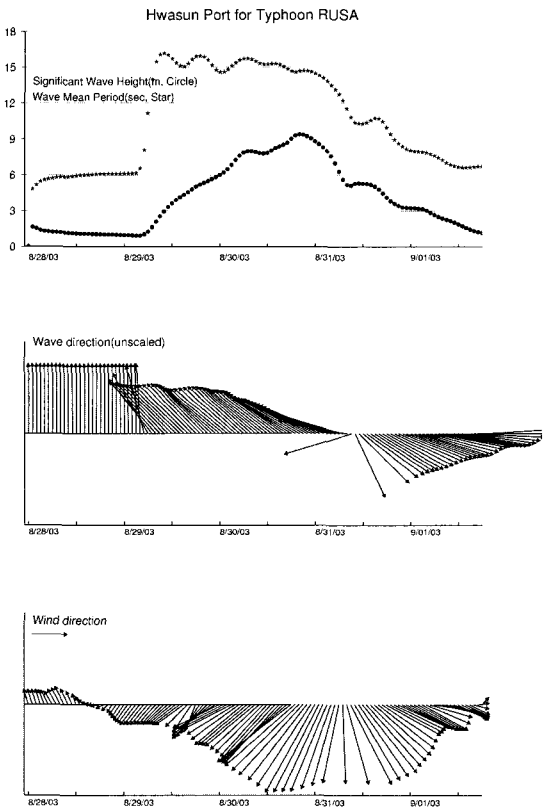


그림 11. Variation of Significant Wave Height and Wave Mean Period(s) for typhoon Rusa (0215) on Hwasun Port

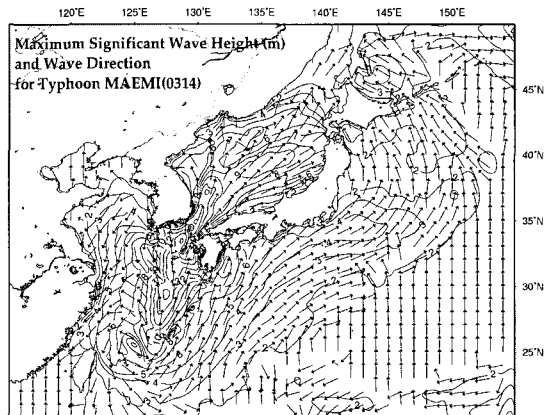


그림 12. Maximum Significant Wave Height(m) and Direction for typhoon Maemi(0314)

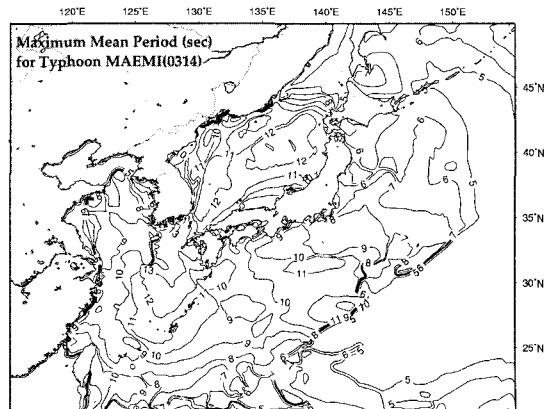


그림 13. Maximum Wave Mean Period(s) for typhoon Maemi(0314)

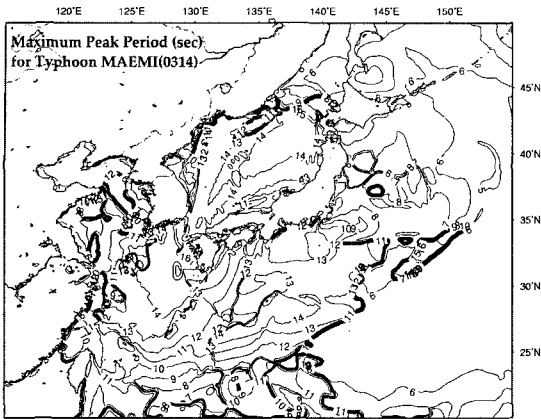


그림 14. Maximum Wave Peak Period(s) for typhoon Maemi(0314)

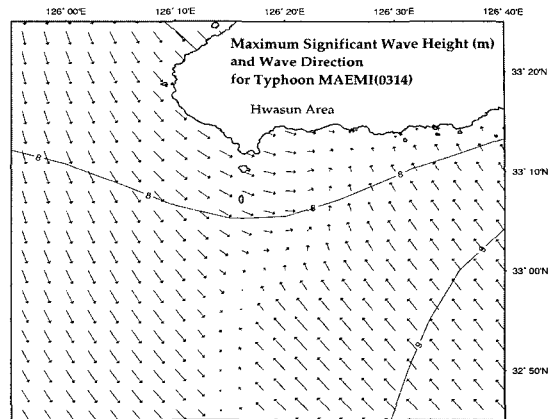


그림 15. Maximum Significant Wave Height(m) for typhoon Maemi(0314) around Hwasun Port

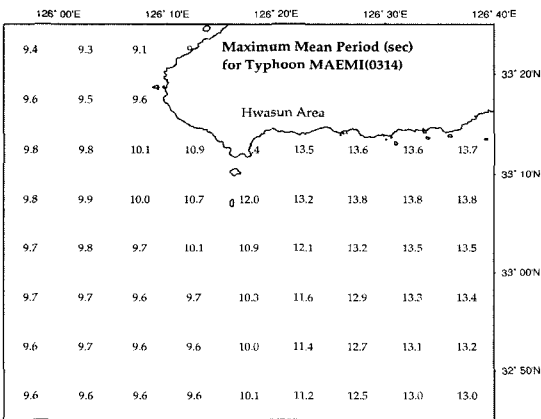


그림 16. Maximum Wave Mean Period(s) for Typhoon Maemi(0314) around Hwasun Port

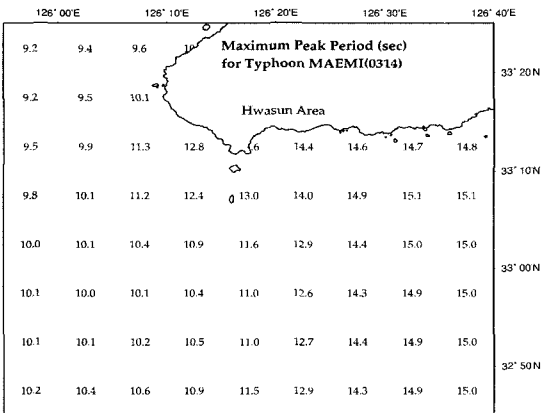


그림 17. Maximum Wave Peak Period(s) for Typhoon Maemi(0314) around Hwasun Port

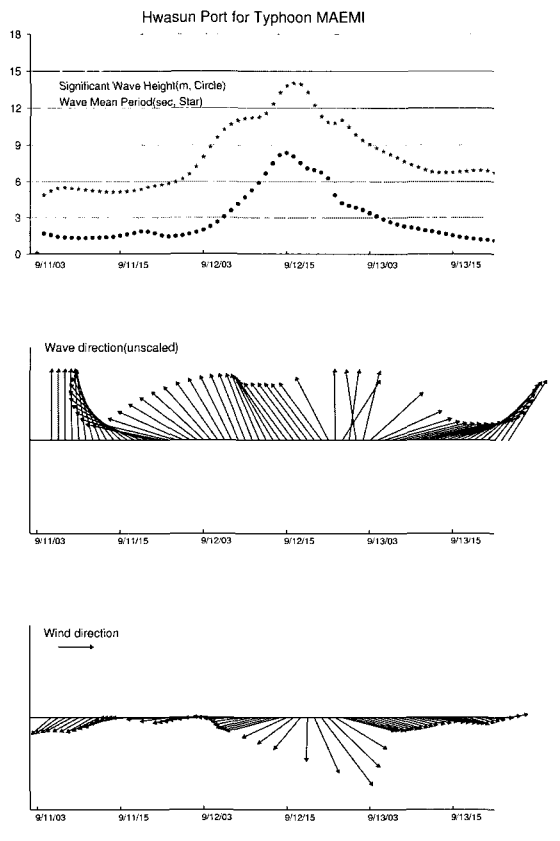


그림 18. Variation of Significant Wave Height and Wave Mean Period(s) for Typhoon Maemi (0314) on Hwasun Port

평균주기와 첨두주기는 각각 13~14sec와 15~17sec로 나타났다.

태풍 매미에 대한 실험결과 최대 파고가 우리나라 남해 먼바다에서 14m 이상이 산정되었으며, 우리나라 주변해역의 동해안에서는 5~9m, 남해안에서는 6~12m, 서해안에서는 2~5m의 파고가 계산되었다. 동해안과 남해안의 경우 태풍 진행방향의 오른쪽인 위험반경에 위치하여 동풍과 남풍의 영향으로 서해보다 상대적으로 큰 파고가 산정되었고, 평균주기 및 첨두주기를 살펴보면 계산영역에서의 최대값은 각각 13sec와 16sec 정도가 계산되었다. 또한 우리나라 주변해역의 경우 동해안과 남해안에는 10~13sec, 서해안에는 6~8sec의 평균주기가 산정되었다.

제주 화순항 인근 해역에서는 ESE부터 SE계열의 8.5~8.7m 정도의 크기를 갖는 최대유의파가 발생하였으며 평균주기는 13.2~13.6sec, 첨두주기는 14.0~14.9sec 정도로 나타났다.

4.3 기존 심해파 제원과의 비교

태풍 내습에 따른 심해파 제원을 기존의 추산결과 자료(수산청 보고서, 1988)와 비교 검토하였다. 이를 위해 과거 태풍으로 인해 피해가 발생하였던 지역을 선택하였으며 선정된 곳은 부산, 울산, 제주이며 그림 19에 비교위치를 나타내었다.

기존 심해파 제원과 금회 실험 결과를 비교한 결과 부산 및 울산지역의 경우 루사(0215), 매미(0314)때

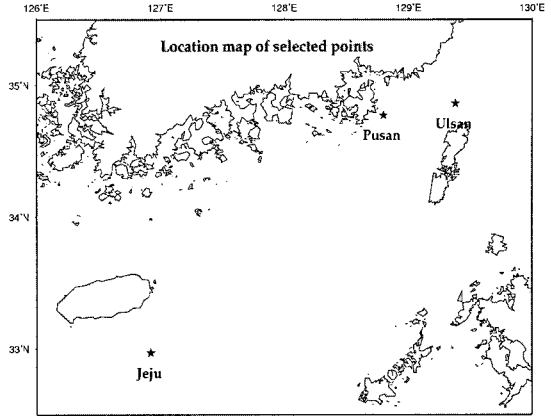


그림 19. Location of Selected Significant Waves

에는 기존 심해파를 상회하는 파랑이 발생하였으며, 제주지역의 경우 루사때 파랑이 12.86m, 16.4sec로 기존 설계파 보다 큰 것으로 나타났다. 이를 통해 태풍 루사와 매미의 내습시 초과 파랑으로 인해 부산, 제주, 울산 지역에 피해가 발생했음을 간접적으로 알 수 있다.

5. 결론

현재 구조물 설계파를 산정하기 위해 사용하고 있는 심해파 제원은 1987년 이전의 태풍자료로부터 추정된 결과이다. 그러나, 지구온난화, 엘니뇨 현상 등의 대기 환경 변화에 따라 태풍의 발생지점이 불규칙하게 발생함에 따라 최근 몇 년간 우리나라를 관통하

표 2. Comparison Significant Wave Height and Peak Period according to Ports and Typhoons

구분		제 주	부 산	울 산
기존 심해파 제원	파고(m)	10.9	10.1	10.2
	주기(sec)	15.0	14.0	14.0
루사 (0215)	파고(m)	12.8	12.2	11.4
	주기(sec)	16.4	14.9	14.1
매미 (0314)	파고(m)	10.0	11.2	12.1
	주기(sec)	14.9	16.4	15.0

는 태풍의 빈도가 증가하고 있고, 이로 인한 피해가 속출하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 한반도 주변해역에서의 심해파의 추정을 위해 현재 전세계적으로 잘 검증이 되어 있고 전구적이고 지역적인 예보 및 검증, 추정 연구에 이용되고 있는 WAM cycle 4 모형(WAMDIG, 1988)을 사용하고 최근에 한국, 일본, 중국 등에 큰 영향을 준 2002년 15호 태풍 루사와 2003년 14호 태풍 매미의 상황을 재현하기 위해 태풍이 한반도에

영향을 미쳤던 기간을 포함하도록 실험기간을 결정하여 계산하였다.

금회 산정 결과와 기존 심해파 제원과의 비교에서 알 수 있듯이 태풍 루사와 매미의 내습시 초과 파랑으로 인해 부산, 제주, 울산 지역에 피해가 나타났음을 간접적으로 알 수 있었다. 따라서 방재공학적으로 안전하게 해안 및 항만 구조물의 설계하기 위한 심해파 제원에는 최근의 초대형 태풍의 발생 빈도와 강도의 증가와 같은 기상 이변에 대한 고려가 필요하다.

참고문헌

- Gelci, R., Cazale, H., Vassal, J. (1957) Prevision de la houle. La methode des densites spectroangulaires. Bull. Inform. Comite Central Oceanogr. Etude Cotes, 9, 416.
- G?nther, H., Hasselmann, S. and Janssen, P. A. E. M. (1992) The WAM model Cycle 4. Report No. 4, Hamburg.
- Sverdrup, H. U. and W. H. Munk (1947) Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting. Publication 601, Hydrographic Office, U.S. Navy, 50 pp.
- WAMDI group : S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing (1988) The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. J. Phys. Oceanography, 18, pp. 1775-1810.
- Wilson, B.W. (1965) Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, 1959. Deutsche Hydrogra-Phische Zeit-Schrift, 18, Heft 3.