

## 천해역 파랑발달에 대한 태풍경로의 영향

이경선 · 김정태 · 류청로  
부경대학교 해양공학과

### The Effect of the Typhoon Course on the Shallow Water Wave

KYUNG-SEON LEE\*, JUNG-TAE KIM\* AND CHEONG-RO RYU\*

Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

KEY WORDS: Typhoon 태풍, Wind speed 풍속, Shallow water wave 천해파랑, Wave numerical simulation 파랑수치모형실험

**ABSTRACT:** 천해역의 파랑발달에 대한 태풍경로의 영향력을 분석 하였다. 우리나라 남동해안에 주로 피해를 초래할 것으로 판단되는 태풍의 경로를 '남해안 상륙 후 내륙 통과'와 '대한해협통과'로 분류하고 각 경로에 따른 태풍규모와 파랑발달을 1956년부터 2004년까지의 기상자료를 바탕으로 검토하였다. 태풍 경로의 영향력 분석은 천해역 파랑발달의 주요외력이 지형조건에 의해 결정되므로(즉, 폐쇄해역은 태풍의 바람장이 주요외력이며, 개방해역은 심해 전달파랑과 바람장의 영향을 동시에 받는다), 개방해역과 폐쇄해역의 경우로 나누어 수치모형실험을 통해 수행하였다. 실험조건은 태풍 '매미'의 강도와 특성 값을 기준으로 하였으며, 대상해역은 부산신항 인근해역과 원전항 인근해역을 개방형과 폐쇄형 해역으로 대별하여 실험을 수행하였다.

자료의 분석결과 최근 이상기후현상으로 태풍의 강도가 커지고 있음을 뒷받침 하는 근거는 찾아보기 힘들었으며, 2000년대 이후로 남해안에 상륙하는 경로'1'이 대한해협을 통과하는 경로(경로'2')보다 그 내습빈도가 커지고 있음을 볼 수 있었다. 태풍의 경로와 풍향이 같은 방향인 경로'1'일 때 에너지가 집중되어 태풍중심기압과 풍속과 파고의 증가가 함께 일어난다. 그러나 태풍의 경로와 풍속의 방향이 일치하지 않는 경로'2'의 경우는 에너지가 분산되므로 태풍중심기압과 풍속은 함께 증가하나 파랑에너지는 함께 발달하지 않는 것으로 보였다. 내습한 태풍의 강도를 경로별로 비교한 결과, 경로'1'이 경로'2'보다 큰 강도를 가지고 연안역에 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

### 1. 서 론

태풍의 영향에 따른 연안역의 물리적 환경변화나 피해에 관한 연구는 그 외력조건 복잡성과 다양성으로 인해 관측값을 이용한 통계적 해석방법을 중심으로 수행되어왔다. 그러나 국내의 경우 구조물이나 항만시설이 위치한 연안역의 파랑상황에 대한 관측이 부진한 것이 현실이며, 예측을 위한 수치적방법도 많은 시간과 노력이 필요한 복잡한 과정으로 수행된다. 그러므로 연안역의 태풍파랑 해석시 기왕의 관측치를 통한 통계적 해석방법의 이용보다는 파랑추정에 필요한 영향외력을 인자화하여 각 인자들의 상대적 크기를 비교하는 등의 보다 신속하고 접근이 용이한 파랑추정방법이 필요할 것이다.

태풍에 의한 파랑추정은 국내의 경우 심해역 적용모델인 WAM 모델을 이용하고 있으며, 그 정확도를 높이기 위해 해양관측 기지를 설치하는 등 많은 노력을 기울이고 있다. 연안의 설계파랑을 보다 정밀하게 산정하기 위해 파랑수치모의 계산방법을 제안하여 태풍, 폭풍 등 악기상의 영향권이 충분히 포함될 수 있는 원해의 광역적 특성과 함께 연안내해의 세부 지형과 국지적인 조건을 고려하는 노력도 이루어졌다(강시환 등, 2005). 그러나 연안내해의 기상학적 특성을 고려하지 못한 한계가 있었고, 이러한 꾸준한 노력에도 불구하고 폭풍파랑의

특성을 필요로 하는 연안역의 이용자들에게 직접적이고 신속한 정보제공이 어려운 것이 현실이다. 그 이유는 천해역의 태풍파랑은 심해역과 비교할 때 여러 외력인자(연안의 국지적 지형조건과 태풍의 강도와 이동경로와 속도 등)가 복잡하게 작용하기 때문이다. 이러한 천해 파랑발달의 외력요인 중 태풍의 이동 경로는 연안방재의 측면에서 큰 영향력으로 작용한다.

지금까지 우리나라에 영향을 미치는 태풍경로에 대한 많은 논의가 진행되어 왔으며, 주로 경로별 피해사례에 관한 연구와 경로의 통계분석이 이루어져 왔다. 태풍의 진로에 관한 연구는 통계적 방법에 의한 분류(박종길, 1992)와 전향여부에 의한 분류(이동규 등, 1992)등이 수행되었으나, 후자의 방법은 이상진로를 갖는 유형이 제외되었으며 그 수가 전체태풍 수 중 약 10%나 되기 때문에 정확한 분류방법으로 보기 어렵다(박종길 외 5인, 2006)고 검토된바 있다. 연안에 큰 피해를 초래한 태풍 매미와 루사 등의 경로를 검토해 볼 때 남해안에 상륙하는 경우와 대한해협을 통과하여 동해북부로 빠져나가는 경우의 두 가지 경로가 주요위험 경로로 판단되어진다. 이러한 경로의 영향력은 대상해역의 좌측 통과 시 더 클 것이라는 개념으로 알려져 있으나, 경로에 대한 천해파랑 발달특성에 관한 연구는 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 천해역의 파랑발달에 대한 태풍경로의 영향력을 검토하려 한다. 우리나라 연안 이용자의 입장에서 주로

피해를 줄 것으로 판단되는 태풍의 경로를 '남해안 상륙 후 내륙 통과'와 '대한해협통과'로 분류하고 각 경로에 따른 태풍규모와 파랑발달을 1956년부터 2004년까지의 기상자료를 바탕으로 검토하였다. 태풍 경로의 영향력은 천해역 파랑발달의 주요 외력이 지형조건에 의해 결정되므로(즉, 폐쇄해역은 태풍의 바람장이 주요외력이며, 개방해역은 심해 전달파랑과 바람장의 영향을 동시에 받는다), 개방해역과 폐쇄해역의 경우로 나누어 분석해 보았다. 실험조건은 태풍"매미"의 강도와 특성 값을 기준으로 하였으며, 대상해역은 부산신항 인근해역과 원전항 인근해역을 개방형과 폐쇄형 해역으로 대별하여 실험을 실시하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 풍파추진모형(SWAN)

SWAN에서 파랑스펙트럼의 발생은 Cartesian 좌표계에 대해 Spectral action balance equation으로 설명된다(Hasselmann et al., 1973).

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

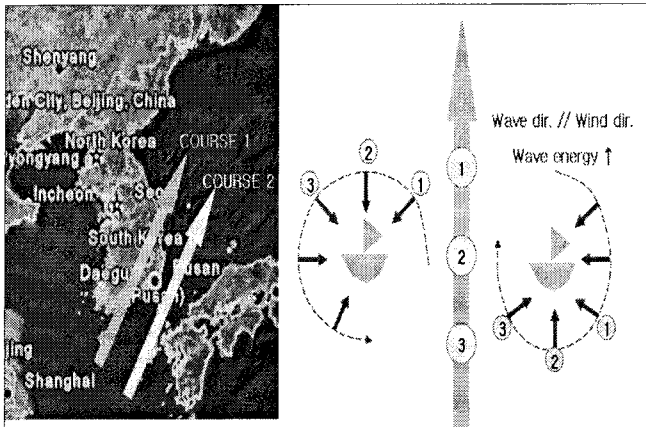


Fig. 1 The damage course of the typhoon in the South Sea

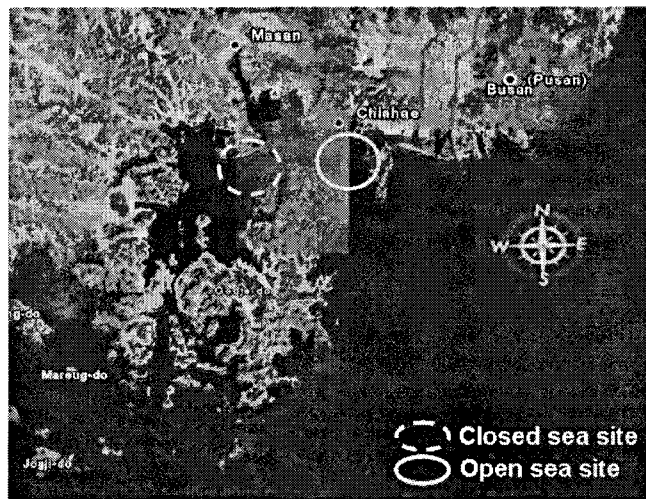


Fig. 2 Study area

여기서  $\sigma$ : Relative frequency,  $\theta$ : Wave direction,  $N$ : Wave action density이며,  $\sigma$ 에 의해 Energy density와 구분된다.  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)$ 이며,  $E(\sigma, \theta)$ 는 Wave energy density이다. 식 (1)은 흐름의 분포와 간단한 저면지형효과를 포함한 약산식이다. 식 (1)에서 좌변의 첫 번째 항은 시간에 대한 Action density의 변화율을 표현한다. 두 번째, 세 번째 항은 x-, y-space에서 속도  $c_x$ 와  $c_y$ 의 전달을 포함한 지형학적 공간에서 운동량 전달을 말한다. 네 번째 항은  $\sigma$ -space에서 전달속도  $c_\sigma$ 를 갖는 수심과 흐름의 변화에 대해 변형하는 Relative frequency를 표현한다. 다섯 번째 항은  $\theta$ -space에서 전달속도  $c_\theta$ 를 갖고 수심과 흐름에 따라 변형하는 굴절을 표현한다. Action balance equation의 우측의 S는 파랑에너지 생성과 소산, 비 선형 파랑-파랑간 상호간섭의 효과를 나타내는 에너지 밀도항에 대한 근거가 되는 항이다.

SWAN에서 사용되는 Source term은 Wind input에 의한 에너지 증가, 파랑간 비선형 간섭에 의한 에너지 수송, Whitecapping, Bottom friction, Depth-induced wave breaking 등에 의한 에너지 소산 등이 있다.

Action balance eq.의 적분값은 다섯 개의 차원(시간, 지형

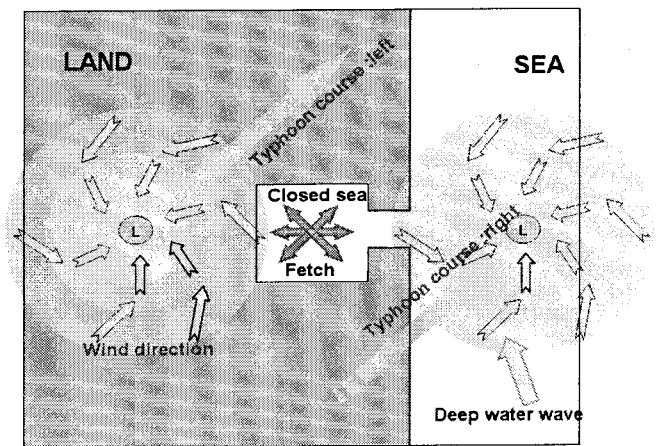
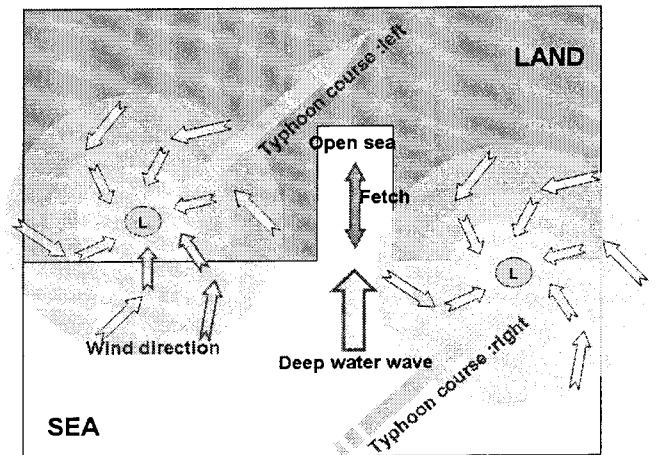


Fig. 3 Boundary condition of the shallow water wave estimation on the closed and open sea

공간, 스펙트럼 공간)에서 유한차분 Scheme을 적용하여 SWAN wave model에서 실행된다. 유한 차분형은 식(2)와 같이 표현된다. 여기서  $\Delta t$ 는 전달시간 step이고,  $\Delta x, \Delta y, \Delta \sigma, \Delta \theta$ 등은 지형 공간과 스펙트럼 공간의 증가분이고,  $i_t$ 는 Time-level index이고,  $i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta$ 등은 격자수이며,  $n^*$ 은 Explicit or implicit 근사에 대한  $n$  또는  $n-1$ 과 같다. 이것은 Source term에 의존하며, 여기서  $n$ 은 반복횟수이다. 계수  $nv, nu$ 는 스펙트럼 공간에서 Upwind or central의 정도를 결정한다. 불연속인 주파수는 낮은 주파수와 기준 주파수 사이에서 결정되며, 파랑관련 파라미터의 적분을 계산하기 위해 사용된다.

$$\begin{aligned}
 & \left[ \frac{N_i^{n,t} - N_i^{n-1,t}}{\Delta t} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta} + \left[ \frac{[c_x N]_{i_x} - [c_x N]_{i_x-1}}{\Delta x} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i, n, t} \\
 & + \left[ \frac{(1-nu)[c_\sigma N]_{i_\sigma+1} + 2\nu[c_\sigma N] - (1+nu)[c_\sigma N]_{i_\sigma-1}}{2\Delta\sigma} \right]_{i_x, i_y, i_\theta}^{i, n, t} \\
 & + \left[ \frac{[c_y N]_{i_y} - [c_y N]_{i_y-1}}{\Delta y} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta}^{i, n, t} \\
 & + \left[ \frac{(1-nv)[c_\theta N]_{i_\theta+1} + 2\nu[c_\theta N]_{i_\theta} - (1-nv)[c_\theta N]_{i_\theta-1}}{2\Delta\theta} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma}^{i, n, t} \\
 & = \left[ \frac{S}{\sigma} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i, n^*, t} \quad (2)
 \end{aligned}$$

## 2.2 실험조건

연구에 사용되는 태풍의 경로는 대상해역을 중심으로 좌측과 우측을 지나가는 경우로 단순화 하였고, 태풍의 경로에 따른 바람장의 변화패턴은 좌측경로의 경우 E→SE→S→SW이며, 우측경로의 경우 NE→N→NW방향으로 변화한다(Fig.1).

대상해역은 태풍에 의한 영향을 크게 받은 것으로 판단되는 남해안의 해역을 임의로 선정하였으며, 파랑발달의 주요외력인 심해 전달파의 영향력이 미치는 정도에 따라 개방형(부산신항 전면)과 폐쇄형(원전항 인근해역)으로 나누었다(Fig.2).

대상해역에 작용하는 외력조건은 다음과 같다. 개방형의 경우, 심해 전달파가 직접 영향을 미치며 태풍의 영향력을 크게 받아 강한 바람장에 의한 파랑발달이 추가로 고려되어야 한다. 그리고, 폐쇄형 해역의 경우는 심해 전달파가 거의 영향을 미치지 않으며 태풍의 직접 영향으로 인해 강한 풍파가 발달할 것으로 판단된다(Fig.3). 실험에 사용되는 태풍특성은 최근 우리나라 남해안에 큰 피해를 초래했던 태풍“매미”의 제원을 사용하며, 그 바람장을 추정하여 적용한다. 심해파 제원은 대상해역 인근의 파랑관측결과를 바탕으로 역 추정하여 적용한다.

## 4. 연구결과 및 해석

우리나라 남·동해안에 영향을 미칠 것으로 판단되는 기왕의 태풍자료(1956년~2004년)를 수집하였다. 남해안에 상륙하거나 동해를 통과하는 경로의 태풍은 총 41개의 경우가 있었으며, 이중 남해안에 상륙한 태풍은 23개의 경우였다. 우리나라

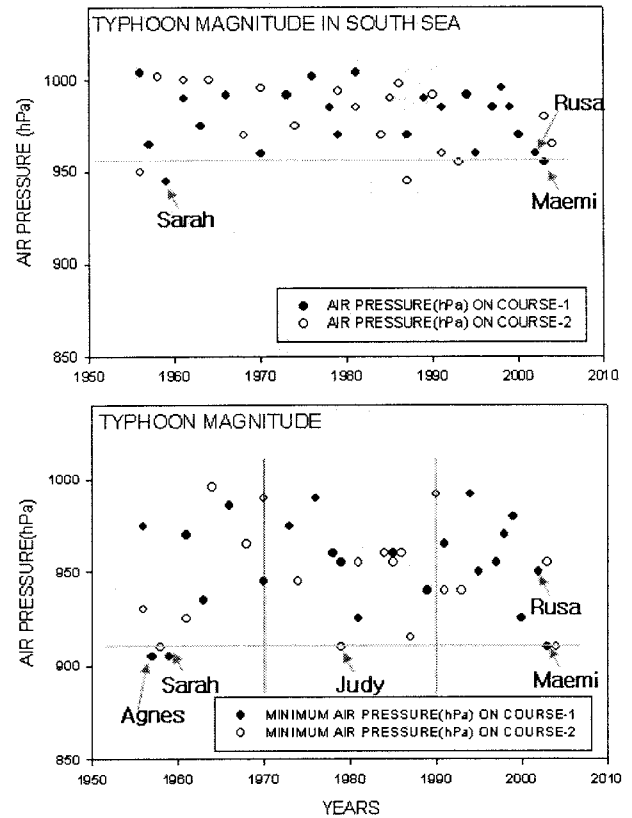


Fig. 4 The magnitude of typhoon since 1956

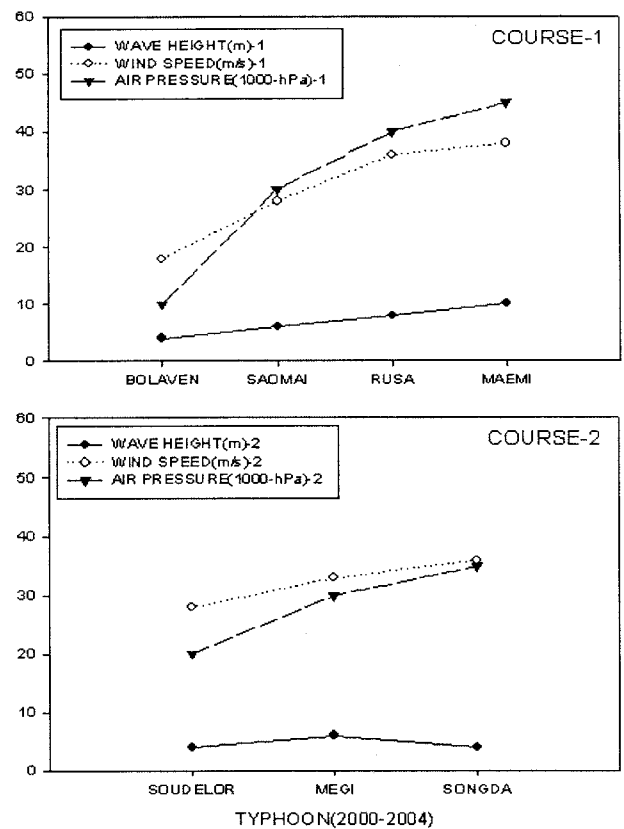


Fig. 5 The deep water waves, wind speed, and air pressure classify by typhoon course

라 재해 기록상에 큰 피해를 주었던 태풍은 남해안을 상륙한 태풍의 경우로 Sarah, Rusa, Maemi 등이 이에 포함된다.

자료의 분석결과 최근 기상변동으로 태풍의 강도가 커지고 있음을 뒷받침하는 근거는 찾아볼 수 없었다. 2000년대 이전의 경우 경로'1'과 '2'가 비슷한 빈도로 발생 하였으나, 2000년대 이후로 남해안에 상륙하는 경로'1'이 대한해협을 통과하는 경로(경로'2')보다 그 내습빈도가 커지고 있음을 볼 수 있었다 (Fig. 4). 경로'1'과 '2'에 따른 태풍중심기압, 최대풍속, 심해파랑의 발달을 비교해본 결과(Fig. 5), 태풍의 경로와 풍향이 같은 방향일 경우인 경로'1'은 에너지가 집중되며, 태풍중심기압과 풍속과 파고의 증가가 함께 일어난다. 그러나 태풍의 경로와 풍속의 방향이 일치하지 않는 경로'2'의 경우는 에너지가 분산되므로 태풍중심기압과 풍속은 증가패턴이 비슷하나 파랑 에너지는 함께 발달하지 않는 것으로 보였다. 또한, 내습한 태풍의 강도를 경로별로 비교한 결과, 경로'1'이 경로'2'보다 큰 강도를 가지고 연안에 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

## 후 기

본 연구는 BK사업의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 강시환, 전기천 (2005). "태풍시 연안내해에서의 설계파랑 모의 산정", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회.
- 기상청 (2002). 기상연보
- 국립방재연구소 (2003). 태풍 '매미' 피해 현장조사 보고서
- 류청로, 김현주, 김종욱 (1989). "해양파랑의 통계적 변동성 해석", Korean Fish. Soc., 22(1), pp 41~47.
- 류청로, 윤홍주, 박종화, 김현주 (1993). "한국연안의 극치 파랑 환경과 Freak Wave의 특성에 관한 연구",
- 박종길, 김병수, 정우식, 김은별, 이대근 (2006). "한반도에 영향을 주는 태풍의 통계적 특성변화", Korean Meteorological Society, 16(1), 1-17.
- 안수한, 이상주, 박인보 (1976). "우리나라 연안의 태풍시의 파랑 계산에 대하여", 대한토목학회지, 제24권, 4호, pp 101~110.
- 유명진, 황충현 (1971). "울산만의 파랑추정".
- 해양수산부 (1999). 항만 및 어항 설계기준(하권)
- 해양수산부 (1999). 해상파랑 관측 및 조사
- Hasselmann, K. (1974). "On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping", Bound.-layer Meteor., 6, 1-2, pp 107-127.