

태풍의 풍향특성을 고려한 천해파 산정에 관한 연구

이경선 · 김정태 · 류청로
부경대학교 해양공학과

A Study on the Numerical Calculation for Shallow Water Waves Considering the Wind Direction Characteristics of Typhoon

KYUNG-SEON LEE, JUNG-TAE KIM AND CHEONG-RO RYU
Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

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

ABSTRACT: While a typhoon is traveling, characteristics of its wind fields are continuously changing, producing severe changes in local water level and wave conditions, especially, when a typhoon comes into shallow water. However, there have not been many studies related to local typhoon effects, especially, considering real time changes of wind direction related to the coastal topography. In the study, the characteristics of the wind field by typhoon and topographical characteristics in shallow water are considered, as well as conditions of wave climate estimation. These are performed by the SWAN (Simulating waves nearshore) model, in order to estimate the growth of wave energy due to the wind field. It can be strongly suggested that the wave energy of the of an inner bay should be estimated when the direction of the bay entrance and the wind direction of the typhoon are identical. The result of the numerical calculations is in better agreement with the observed data than the result of the conventional estimation techniques.

1. 서 론

태풍이 천해역을 통과하면, 태풍에 의한 풍파와 해수면 상승은 천해역의 지형특성에 의해서 복잡하게 변동하며, 이와 같은 현상은 해안구조물을 파괴시키는 등 연안에 예기치 못한 피해를 주기도 한다. 이러한 관점에서 안수환 등(1976)은 우리나라 해역의 특성과 태풍 및 기상특성을 검토한 결과, 남해 및 남해의 일부항만의 설계파는 태풍에 의해서 결정해야 하고, 서해 및 남해안의 일부와 제주도의 북쪽 해안의 각 항의 설계파는 동기 계절풍에 의해 결정해야 한다는 것을 강조하기도 하였다.

연안에 설치되는 해안구조물에 작용하는 외력조건은 일반적으로 태풍에 의한 고파랑과 수위증가이다. 특히, 우리나라 남동해안에 설치되는 구조물의 설계는 태풍의 내습빈도에 따른 파랑의 통계적 특성값을 주요 외력조건으로 사용하고 있다. 그러나, 최근에 와서 구조물의 안정성과 관련된 파랑조건이 이상 기상 현상등에 의해 점점 그 규모와 강도가 커지고 있고, 여기에 따른 대책과 설계기준 강화의 필요성이 대두되고 있는 것이 현실이다. 실제로 우리나라 남해안은 태풍의 내습으로 강력한 바람과 해일이 발생하여 해안구조물의 파괴가 빈번히 일어났고, 이때마다 복구와 대책에 관한 연구가 진행되어

왔다(국립방재연구소, 2003). 그러므로 해양구조물의 안정성에 대한 평가를 위해 태풍내습이 천해역의 파랑장에 끼치는 영향을 추정하고, 태풍파랑에 의한 구조물의 피해를 최소화할 수 있는 방안을 연구할 필요가 있다. 이를 위해 태풍 내습시 발달하는 파랑특성에 대한 보다 정확한 예측과 과거의 태풍시에 발생되었던 파랑의 정확한 추정 연구가 선행되어야 한다.

한편, 국내의 경우 항만구조물 설계를 위한 심해파 추정시에 태풍의 초기와 주요영향기간, 말기의 특성을 고려한 Wind+swell 시스템이 적용되고 있으나, 천해파랑의 추정은 기 추정된 심해파 제원을 이용한 Swell 시스템만을 적용하고 있다. 이러한 시스템은 천해파가 태풍의 강한 바람장 영향을 직접 받는 경우 그 발달규모가 과소평가될 위험이 있다. 그러나 천해역에서 바람장은 연안의 복잡한 해안선과 섬 등의 지형학적 조건과 태풍의 복잡한 풍향변동에 의해 크게 좌우되므로, 천해파 추정시 입력조건으로서 바람의 평가는 쉽지 않은 과제이다.

본 연구에서는 태풍의 풍역변화를 고려한 천해역의 파랑산정조건을 규정하여 천해역의 지형조건에 따른 파랑의 불확정성을 보다 체계적으로 보완할 수 있는 천해파랑 산정방법을 제시하고자 한다. 구체적인 연구 방법으로, 가덕수도 인근 해역을 중심으로 태풍 '매미'의 풍역변화 특성과 해역의 지형특성을 고려한 수치모형 입력조건에 대해 검토하고, 이를 적용하여 부산신항 전면 해역을 중심으로 태풍 '매미'의 내습에 대한

교신저자 이경선: 부산광역시 남구 대연3동 599-1

051-620-6222 ks760229@hanmail.net

시간대별 파랑수치모형실험을 실시하고, 실험결과와 대상 해역의 파랑관측 데이터, 그리고 우리나라에서 보편적으로 사용되고 있는 기존의 천해파 산정방법(Swell 시스템)에 의한 결과를 비교·검토함으로써 천해파 산정방법의 개선방향을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 풍파추정모형(SWAN)

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

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

여기서 σ : 상대주파수, θ : 파향, N : 파랑작용밀도이며, σ 에 의해 에너지 밀도와 구분된다. $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$ 이며, $E(\sigma, \theta)$ 는 파랑에너지 밀도이다. 식 (1)은 흐름의 분포와 간단한 저면지형효과를 포함한 약산식이다. 식 (1)에서 좌변의 첫 번째 항은 시간에 대한 운동밀도의 변화율을 표현한다. 두 번째, 세 번째 항은 x , y -공간에서 속도 c_x 와 c_y 의 전달을 포함한 지형학적 공간에서의 운동량 전달을 말한다. 네 번째 항은 σ -공간에서 전달속도 c_σ 로써 수심과 흐름의 변화에 대해 변형하는 상대주파수를 표현한다. 다섯 번째 항은 θ -공간에서 전달속도 c_θ 로 수심과 흐름에 따라 변형하는 굴절을 표현한다. 식 (1)의 우측의 S 는 파랑에너지 생성과 소산, 비선형 파랑-파랑 간 상호 간섭의 효과를 나타내는 에너지 밀도의 원천항이다.

SWAN에서 사용되는 원천항은 바람의 입력에 의한 에너지 증가, 파랑간 비선형 간섭에 의한 에너지 수송, 백파, 저면마찰, 수심변화에 의한 쇄파등에 의한 에너지 소산 등이 있다.

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

식 (1)의 적분값은 다섯 개의 차원(시간, 지형공간, 스펙트럼 공간)에서 유한차분 기법을 적용하여 SWAN wave model에서 실행된다. 유한 차분형은 식 (2)와 같이 표현된다. 여기서 Δt 는 전달시간, Δx , Δy , $\Delta\sigma$, $\Delta\theta$ 등은 지형 공간과 스펙트럼

공간의 증가분이고, i_t 는 시간을 나타내는 지수이고, i_x , i_y , i_σ , i_θ 등은 격자수이며, n^* 은 양해 혹은 음해법에 의해 n 또는 $n-1$ 과 같다. 이것은 원천항에 의존하며, 여기서 n 은 반복횟수이다. 계수 m , m_u 는 스펙트럼 공간에서 전진 혹은 중앙차분을 결정한다. 불연속인 주파수는 낮은 주파수와 기준 주파수 사이에서 결정되며, 파랑관련 파라미터의 적분을 계산하기 위해 사용된다.

2.2 바람장 추정

태풍의 바람장은 시·공간적으로 변화가 크고, 그 중심이 빠른속도로 이동하고 있으며, 관측자료가 거의 전무하므로 중심 부근의 기압과 바람을 파악하기가 어려운 실정이다. 일반적으로 태풍 통과시의 해상풍 산출은 주로 중심기압, 최대풍 반경, 주변기압 분포 등의 태풍파라미터로부터 경험적 함수 관계를 도출하여 사용하고 있는데, 이는 기상예측 결과인 일기도를 이용하여 추정한 바람의 특성값으로써 일기도의 기압장을 분석하는 과정에서 큰 오차를 낼 수 있는 단점이 있다. 한편, 태풍의 영향권내의 등압선을 등심원으로 가정하여, 몇 개의 파라미터로 태풍 중심 주위의 기압분포를 해석하고 해상풍을 추정하는 방법이 제시되었다(유명진과 황충현, 1971).

풍파발생의 주원인인 풍속은 기압경도(기압차/수평거리)에 비례한다. 등압선이 직선일 때는 Coriolis의 힘(지구 회전에 의한 편향력으로 바람방향에 직각으로 작용함)과 기압경도에 의한 힘이 주로 작용하며 풍향은 등압선에 평행하며, 이때의 바람을 지형풍(Geostrophic wind)이라 한다. 반면, 등압선이 곡선일 때는 편향력과 기압경도 외에 원심력이 작용하며 풍향은 북반구에 있어서는 반시계방향으로 중심을 향하는 형상을 나타내며, 등압선의 접선과 이루는 각(α)은 Table 1과 같다. 이 때의 바람을 경도풍(Gradient wind)이라 하며, 경도풍속은 식 (3)으로 표현된다. 이 식은 계산하기가 곤란하므로 Fig. 1와 같이 경도풍속 결정의 Nomograph를 만들어 이용한다(해양수산부, 1999). Fig. 1는 일기도상에서 독취된 기압경도 ($\Delta\gamma$)와 태풍중심의 위치(ϕ)에 따라 발생하는 바람장의 강도(Wind speed)를 도식화한 것으로써, 실제 해면에 작용하는 바람장의 강도는 위도에 따른 지형풍과 해상풍의 관계(Table 1)를 적용하여 환산해서 사용되어야 한다. 또한, 태풍의 중심은 편서풍에 의해 이동하고 있으므로, 이상의 방법으로 산정된 추정지점의 풍향과 풍속을 태풍의 이동방향과 속도성분으로 합성하여 시간별 풍향·풍속변화를 추정한다.

$$U_{gr} = \pm \gamma \left(\sqrt{\omega \sin \phi \pm \frac{G}{\rho \gamma}} - \omega \sin \phi \right) \quad (3)$$

γ : A radius of an isobaric line

ω : Angular velocity(7.29×10^{-5} sec)

ρ : Air density

ϕ : Latitude of observation point

G : $\Delta\rho / \Delta\gamma$: Gradient of air pressure

(+) : High atmospheric pressure

(-) : Low atmospheric pressure

2.3 천해파 추정

기존의 천해파 산정 방법은 통계적 방법으로 추정된 심해파 제원의 전파만을 고려하므로, 태풍내습으로 인해 천해역에 직접 작용하는 바람장의 영향은 천해파 산정과정에서 고려되지 못하였다. 그러나, 태풍 내습시 천해역의 파랑을 추정하기 위해서는 심해의 입사파랑 조건뿐만 아니라 대상해역에 작용하는 바람장 특성을 고려하는 산정방법의 도입이 필요하다.

기존의 천해파 산정과정에서 심해 입사파랑 조건과 지형특성에 따른 파랑변형만을 고려한데 반해 본 연구에서는 천해역의 풍역변동이 파랑장에 미치는 영향을 고려한 천해파랑 추정방법을 제시하고자 한다. 간략하게 설명하면, 태풍의 바람장이 천해역에 작용하게 되면 입의해역을 중심으로 볼 때 시간에 따라 풍향과 영향범위가 달라지며, 이에 따라 파랑에너지의 발달 특성이 달라지므로, 천해파 수치모형 실험시 태풍내습과 관련한 지형·기상·파랑특성에 부합하는 경계조건의 결정이 중요하다. 본 연구에서는 천해역의 파랑장에 영향을 끼치는 태풍의 통과기간에서 지형특성과 풍향변화를 천해파 발달의 가장 중요한 요인으로 판단하여, 이에 따른 천해파 산정조건을 검토한다. 단, 지형의 고도효과는 지역적 풍계특성을 변화시키는 중요한 인자일 것이나 여기서는 수평적 폐 경계역으로만 취급하고 고려하지 않는 것으로 한다.

Table 1 Relation of sea surface and gradient wind speed

Latitude	10°	20°	30°	40°	50°
α	24°	20°	18°	17°	15°
U_d/U_{gr}	0.51	0.60	0.64	0.67	0.70

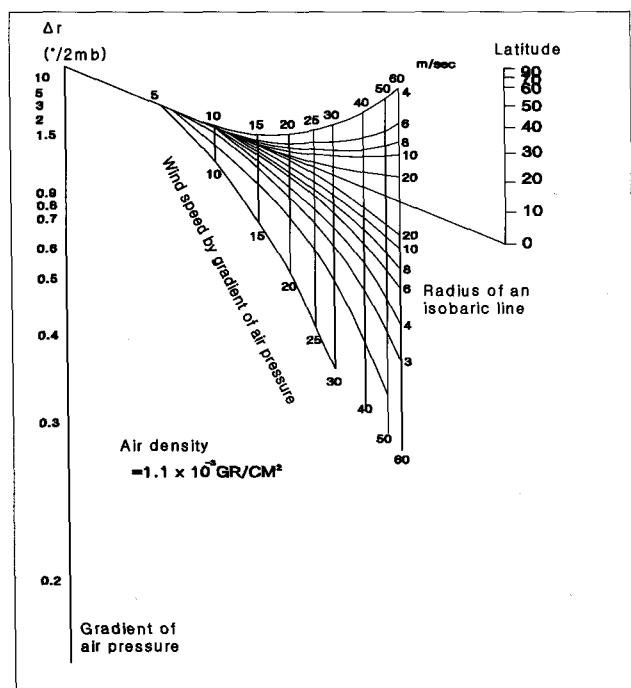


Fig. 1 Results of gradient wind speed estimation

이상의 천해파 산정방법의 적용성을 검토하기 위해 최근 우리나라에 내습하여 해안구조물에 피해를 준 태풍‘매미’의 영향을 분석 한다. 또한, 대상해역의 천해파를 산정하기 위하여 파랑에너지 증가 요인인 바람장과 심해파 제원을 추정 및 관측의 방법을 이용하여 시간별로 분석하고, 이를 근거로 하여 시간별 파랑수치모형실험을 실시한다.

3. 태풍 ‘매미’ 내습시 천해파 산정조건

3.1 태풍 ‘매미’ 내습시 파후(Wave climate) 변화요인 분석

최근 우리나라 남해안의 구조물에 큰 피해를 주었던 태풍 ‘매미’는 괌섬 북서쪽 해상에서 발달하여 제주도 성산포 동쪽 해상을 거쳐 우리나라 남동부 지역을 관통하는 경로를 보였다. 이때, 그 중심기압의 최저값이 950hPa 이었으며, 북제주군 기상대에서 순간최대 풍속이 60m/s로 관측되어 우리나라 기상관측 기록사상 최고치를 보였다. 연구대상해역인 가덕수도 인근 천해역은 태풍경로의 우측에 위치하며, 태풍중심의 이동경로와 비교적 인접한 위치에 있어서 강한 바람이 발생하고, 심해역에서 발달한 태풍파랑이 직접 영향을 끼치므로 어느 해역보다 태풍의 피해가 클 것으로 판단되는 조건을 갖춘 것이었다.

3.1.1 풍향·풍속

태풍의 통과시간별 풍향의 변화를 요약하면, 태풍중심이 북북동 방향으로 대상해역의 좌측을 통과하여 이동함에 따라 풍향은 태풍중심의 이동경로에 따라 E→SE→S→SSW→SW로 변화한다. 그리고, 풍속은 대상해역과 태풍중심간의 상대적인 위치에 따라 10~40m/s의 범위로 추정되며, 풍속이 최대가 되는 시점은 태풍의 진로중 그 중심이 대상해역에 가장 인접한 구간을 벗어나는 시점(21:00, Sep. 12, 2003)으로 이때의 풍향은 S 방향 성분이 우세하였다.

기상관측 결과(Fig. 3)중 기상관측소의 위치가 비교적 내륙에 있는 기상관측소인 마산, 거제의 데이터(Fig. 2)는 해안부근에 위치한 관측소의 데이터보다 지형적 이유로 풍속이 작게 나타나기도 하므로, 파랑추정의 자료로는 부적합하다. 또한 풍향의 변화는 태풍중심을 향해 반시계방향으로 부는 경도풍의 영향과 태풍의 진행방향에 의한 영향을 동시에 받는다.

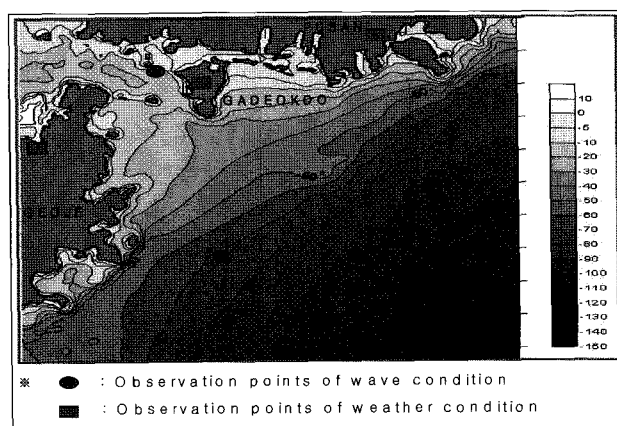


Fig. 2 Observation points of wave and weather condition

3.1.2 파랑(Swell) 내습

태풍 '매미' 내습시 대상해역 인근의 두개의 지점에서 파랑관측 데이터가 입수되었고, Fig. 4는 두개의 파랑관측자료를 정리한 결과이다. 태풍의 풍역이 진입하기 전인 12일 12시 이전에는 거제전면파고($d(\text{수심})=80\text{m}$)가 부산신항 전면($d=20\text{m}$)의 파고보다 큰 경향을 보이다가, 태풍의 풍역이 천해역(가덕수도 인근해역)에 본격적으로 영향을 끼치면서 천해역(부산신항전면)의 파고가 심해역(거제도 전면)의 파고보다 큰 경향을 볼 수 있다. 이러한 현상은 천수효과와 강한 바람의 영향을 동시에 받은 것으로 판단된다.

3.1.3 지형(해안선)특성

태풍의 강력한 바람은 천해역에서의 파랑장 변화와 수위변화의 주된 요인이며, 연구대상해역은 진해항(Jinhae port), 마산만(Masan bay), 용원(Yongwon) 등의 크고 작은 폐쇄성 내만을 끼고 있다. 이들 폐쇄성 해역은 지형학적으로 남, 동, 서쪽 등 한 방향으로 개방되어 있으며, 이러한 지형적 조건에 의해서 각 해역이 받는 태풍의 영향은 그 통과시간에 따라 시시각각 변하게 된다. 즉, 각 해역에 입사하는 파랑에너지는 태풍의 풍향과 관련하여 그 전달 패턴이 변동한다. 수위변화는 각 내만의 형상특성에 따라 풍역의 영향을 크게 받기도 하나, 외해와 떨어진 폐쇄적 해역일수록 지형적 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 이와 같이 천해역의 지형특성과 바람장의 변화에 따른 천해파 산정조건을 설정하기 위해, 가덕수도에 인접한 각 내만

의 형태를 그 지형적 특성에 따라 개방성 해역(부산 신항 인근해역)과 폐쇄성 해역(마산만, 진해만, 용원)으로 분류하고, 풍역 변화와 각 내만의 형태에 따른 파랑에너지 변화요인을 추정할 필요가 있다.

상술한 기상, 해상조건을 이용하여 천해역의 파랑을 추정하기 위해서는 보정작업을 거쳐야 한다. 즉, 각 요소를 경계조건화하기 위한 추정과 관측된 결과를 비교·분석하여 타당한 값을 적용할 필요가 있다. 여기서, 태풍 '매미' 통과시의 가덕수도 인근 천해파추정을 위한 적절한 경계조건의 설정이 다음과 같이 수행된다.

3.2 천해파 수치모형실험 경계조건 검토

3.2.1 시간적 제약조건

풍파가 발달하기 위해서는 충분한 시간과 취송거리가 확보되어야 한다. 그러나, 태풍에 의한 바람장은 시간에 따라 지속적으로 변화하므로, 태풍내습으로 인한 파랑에너지의 발달을 추정하기 위해 다음과 같은 가정을 규정해 둘 필요가 있다.

- (1) 바람장은 임의 시간에 대하여 공간적으로 일정하다.
- (2) 임의시간에 발생하는 바람장은 파랑이 충분히 발달하는 조건을 만족한다.

연안해역의 경우, 태풍파랑을 추정하기 위해서 변동하는 바람장의 시간별 변화특성을 고려하여, 각 해역의 지형특성에 따른 파랑추정의 시간적 제약조건이 필요하다. 즉, 폐쇄적인 내만에서 만의 입구방향과 대상해역에 작용하는 풍향이 일치하는 시점을 중심으로 파후가 추정되어야 한다. 예를 들면, 진해만의 경우는 풍향이 E~ESE인 시점이 파랑에너지가 충분히 발달하여 입사할 조건에 해당되고, 마산만의 경우는 풍향이 SE~S인 시점이며, 부산신항 인근 해역은 S~SSW의 풍향이 우세한 시점을 중심으로 태풍파랑을 산정하여야 한다(Fig. 5).

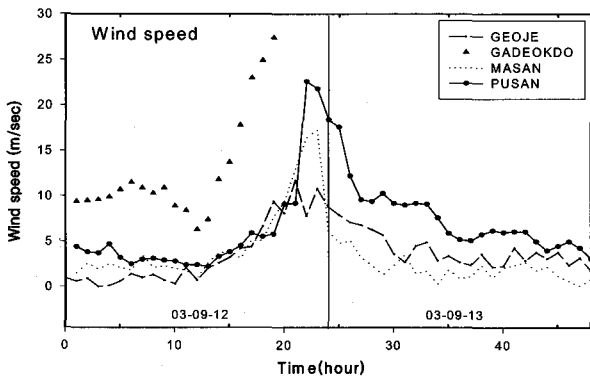


Fig. 3 Observed wind speed during the typhoon

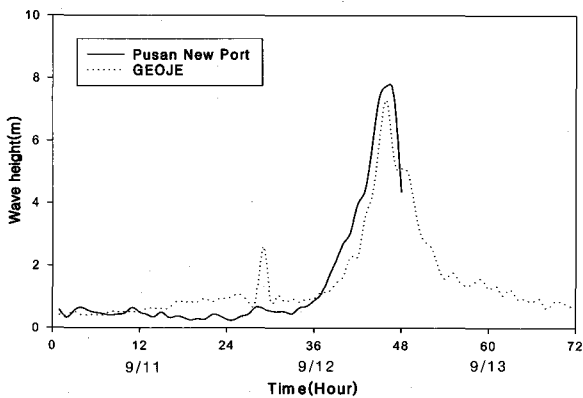


Fig. 4 Observed wave height during the typhoon (in Pusan new port and Geoje wave observation stations)

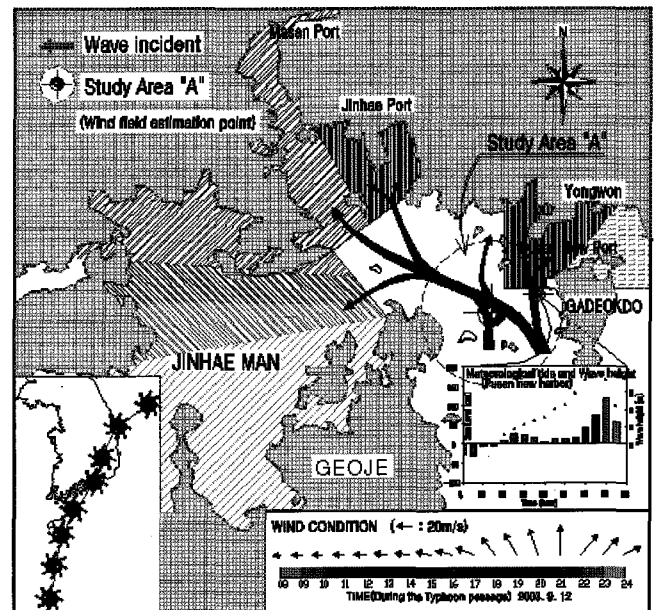


Fig. 5 Variation of wind effect, wave height during the typhoon 'Mae-mi'

3.2.2 풍향·풍속조건

수치모형실험의 경계조건을 결정하기 위해 태풍내습시의 바람장을 추정할 수 있는 기압 분포자료를 시간별로 정리한다. 각 시간대의 일기도를 바탕으로 추정지점의 풍속과 풍향을 산정하며, 태풍의 통과시간별 대상 해역인 'A'인근해역(Fig. 5)이 받는 Wind effect의 변화를 산정한다. 산정된 풍속결과와 대상 해역에 가장 인접한 해상·기상관측(AWS)자료를 비교한 결과(Fig. 7)중 큰 값이 본 수치모형 실험에 대한 입력조건으로 사용된다.

결정된 풍속과 풍향은 천해에서 지형적 영향을 많이 받게 되므로, 연구대상해역에 직접 영향을 미칠 것으로 예상되는 풍향의 범위는 제한된다. 이러한 풍향 범위 내에서 대상해역에 가장 큰 영향을 끼칠 바람조건을 경험적으로 도출해 낼 수 있다.

3.2.3 파랑조건

파랑수치모형실험의 경계조건중 하나인 파랑조건은 다음의 방법으로 선정한다. 일정시간에 실험 영역 내에서 파랑의 주기는 일정하므로, 파랑의 주기와 방향은 천해역(부산 신항 방파제 전면)의 관측값을 근거로 하고, 파고는 심해역(거제도 전면 해상) 관측자료를 바탕으로 하여 역추정하는 방법을 이용하여 입사조건을 결정한다.

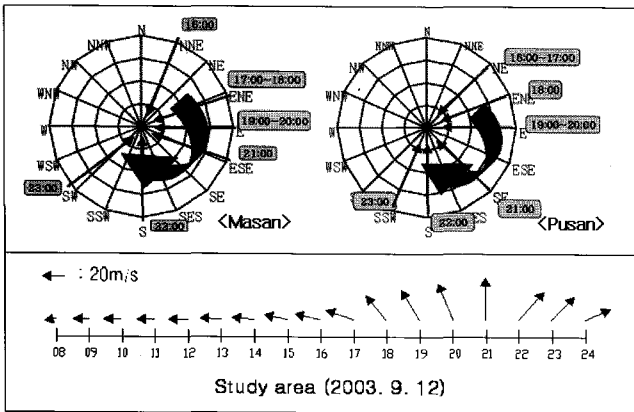


Fig. 6 Wind direction observation and estimation

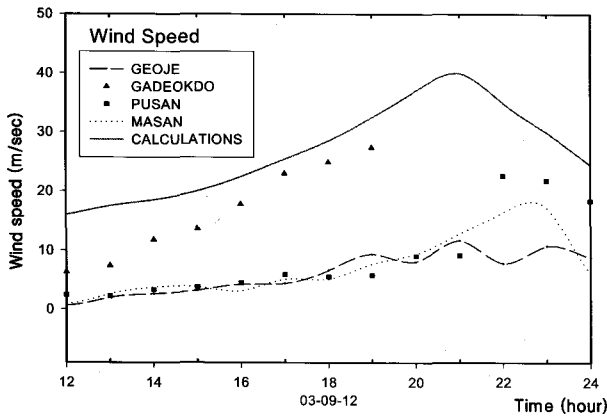


Fig. 7 Wind speed observation and estimation (2003. 9. 12. 12:00 ~ 2003. 9. 13. 00:00)

대상해역에 입사 가능한 심해파향(S~SSW)의 범위 내에서 시행 착오법으로 모형실험을 수행하였을 때 검증지점에 입사 가능한 파향 범위는 $\pm 5^\circ$ 정도의 변동을 보였으며, 검증지점의 태풍에 의한 파향 변동은 입사심해파에 의한 영향뿐 아니라 풍향(Wind direction)의 영향도 무시 할 수 없을 것으로 판단 된다.

3.2.4 실험조건 및 방법

실험대상해역은 우리나라 남동해안에 위치한 가덕수도 인근 해역이며, 크고 작은 섬들로 둘러싸인 해역의 파랑장 재현을 위한 계산 영역결정은 무엇보다도 지형적 특성(수심변화)에 따른 심해입사파의 변형과정(굴절, 천수효과 등)이 충분히 고려할 수 있는 범위로 결정한다. 또한, 태풍 진입시 변동하는 풍역을 충분히 고려하기 위해 임의시간에 대하여 가급적 같은 풍역 조건을 가질 수 있는 범위로 경계를 결정한다. 파랑수치모형 실험시 심해입사파랑(swell)은 거제도 전면의 파랑관측값과 대상지점의 관측파향을 동시에 만족하기 위해 시행착오법으로 역추정하며, 추정된 심해입사파 제원을 이용하여 천해파랑을 산정한다. 그리고, 풍파는 대상해역을 중심으로 추정된 시간별 풍향·풍속을 이용하여 풍파추정모형을 통해 산정되며, 심해입사파랑과 풍파의 영향을 함께 고려하기 위해 각각의 결과를 선형중첩하는 방법이 사용된다. 폭풍해일로 인한 수위변화의 영향은 본 실험에서 고려하지 않는다.

4. 연구결과 및 해석

4.1 실험결과

태풍의 풍역이 진입하면서 대상 해역의 파랑장에 영향을 주는 요소를 심해파의 전달에 의한 너울의 파랑에너지와 바람에 의한 풍파로 정의하여, 각각의 관측 데이터와 산정결과를 바탕으로 파랑수치모형실험을 실시하였다. 이러한 실험결과에 대해 각각의 에너지를 갖는 파랑성분을 선형 중첩하여 관측지점에서의 파고값과 비교하고, 풍역 진입효과를 배제한 일반적 경우의 파랑산정 모형실험의 결과와도 비교해 보았다. 수치모형실험의 결과, 풍역 진입효과를 적용한 결과가 풍역을 고려하지 않은 결과에 비해 관측 값에 더 근사한 경향을 보였다(Fig. 8).

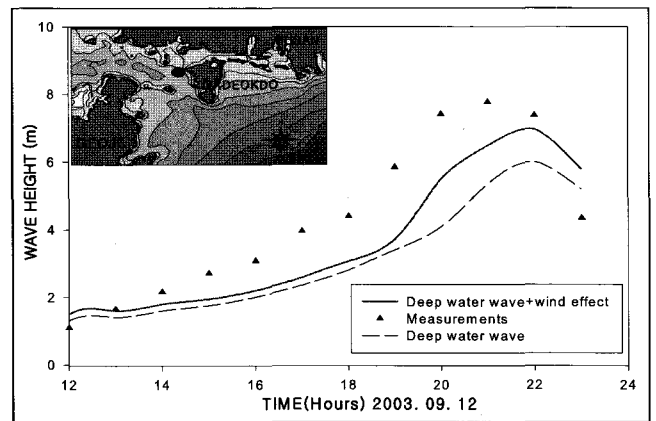


Fig. 8 Results of wave numerical simulation

점증점의 위치가 부산 신항 전면해역이므로 풍향이 S~SSW로 작용하는 시간인 2003. 9. 12 21시~22시에 풍파가 가장 발달하는 조건에 해당하고, 이러한 영향은 실험결과에서 잘 나타난 것으로 판단된다. 또한, 관측파고가 최대가 되는 시간과 계산 값이 최대가 되는 시간이 서로 다른 것은 풍역의 이동속도보다 파랑의 발달속도가 느리기 때문에 나타나는 현상으로 대략 한시간 정도의 편차가 발생하였다.

4.2 한계 및 고찰

태풍파랑 추산시 바람장에 대한 영향을 고려하였으나 관측치와 비교할 때 어느 정도의 오차가 남아 있는 것을 볼 수 있다. 이는 천해역에 입사하는 심해파랑(Swell)과 풍역영향(Wind wave) 이외에 해일에 의한 영향을 고려하지 않아 발생한 것으로 생각되며, 지역적으로 급격한 차이를 보이는 수위변동은 천해의 파랑장에 적지 않은 영향을 끼칠 것으로 추측된다.

실험대상해역의 지형과 태풍 '매미' 진로의 특성으로 볼 때 실험영역의 극치파랑에너지 추정은 극치파랑과 극치풍향이 평행하므로, S 또는 SSW의 바람이 불며 Swell이 가장 큰 시간인 9월 12일 21시의 조건에서 수행하여야 할 것으로 판단된다. 태풍 '매미'의 통과조건일 때 대상해역에서 바람장의 영향은 swell의 영향보다 상대적으로 작으나, 무시할 수 없는 규모인 것으로 판단된다.

대상 해역 이외의 경우 또한, 태풍의 영향을 받는 천해파 추정시 풍파영향과 Swell영향을 각각 검토하여야 한다. 즉 심해입사파(Swell)의 영향이 적게 미치는 폐쇄적 해역의 경우는 풍파의 발생이 주된 외력인자로 작용기도 하고, 본 연구의 결과와 같이 개방형 해역의 경우는 심해입사파의 영향력이 지배적이다.

5. 결론 및 요약

태풍 내습시 천해파랑 추정시에는 심해에서 발달한 Swell뿐만 아니라 풍역이 이동하면서 발생시키는 Wind wave 효과도 함께 고려해야 한다. 그리고, 천해역의 파랑에너지 발달은 지형적 영향을 크게 받으므로 천해파 산정시 대상으로 하는 항이나 해안의 지형·기상학적 특성에 따라 좀 더 정도 높은 파랑수치모형실험을 위한 경계값의 범위를 설정할 필요가 있음을 강조할 수 있다.

본 연구는 태풍의 천해역 통과시 풍역의 변화특성을 고려한 천해역의 파랑산정조건을 규정하여 천해역의 지형조건에 따른 파랑의 불확정성을 보다 체계적으로 보완할 수 있는 천해파 산정방법을 제시하고자 하였으며, 연구 단계별로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

태풍 내습시 강한 바람장에 의한 수위변화와 파랑에너지의 증가요인을 지형특성과 풍향특성에 연관하여 논의할 수 있었으며, 이러한 외력조건 가운데 해안구조물에 작용하는 가장 큰 외력인자인 파랑에너지 증가와 관련하여 가덕수도 인근 천해역의 지형과 태풍 '매미'의 풍향을 고려한 천해파랑 산정조건

에 적용하여 그 신뢰성을 검증할 수 있었다. 그리고, 이상의 파랑산정조건을 적용한 천해파랑 산정 방법을 제시하여, 태풍 '매미'의 통과시 부산신항 전면 해역의 파랑장에 대한 시간대별 수치모형 실험을 실시하였고, 대상해역내의 파랑관측결과와 비교하여, 그 정도의 향상성을 확인 할 수 있었다.

대상해역이 태풍에 의한 바람장의 영향을 받기 시작하는 시점부터 완전히 통과할 때까지의 시간별 풍향 변화특성으로 볼 때, 진해만의 경우 태풍중심이 대상해역에 근접하여 통과하기 전까지(E 방향) 파랑에너지가 가장 발달하고, 마산만의 경우는 태풍중심이 통과하는 시점부터 통과한 직후(E~S 방향), 부산신항 전면의 경우는 태풍중심이 해역에서 멀어지기 시작하는 시점부터 풍역을 벗어나는 시점(SSE~SW 방향)까지 파랑에너지가 발달하는 조건에 해당하는 특징을 발견할 수 있었다. 즉, 폐쇄성 내만의 파랑에너지 산정은 만 개구부의 방향과 태풍의 풍향이 일치하는 시점이 극치외력의 발생조건과 유관함을 확인할 수 있었다. 이러한 천해파 산정조건에 따라 부산신항 전면 해역의 시간별 풍향, 풍속, 수위, 입사파랑조건 등의 관측 및 추정결과를 정리(Fig. 5)하고, 이를 입사 및 경계조건으로 설정하여 천해파 수치모형실험을 수행하였다. 수치모형은 바람장으로 인한 천해역의 파랑에너지 증가를 추정하기 위해 SWAN(Simulating waves nearshore)를 사용하였고, 실험의 결과는 부산신항 전면의 파랑관측값을 기준으로 비교할 때 풍역의 변화를 고려하지 않은 기존의 천해파산정 방법에 의한 결과보다 실측값에 더 근접한 것을 볼 수 있었다(Fig. 8).

이상의 연구결과는 바람장의 특성중 지형인자로 인한(특히 육지의 고도변화에 따른) 국소적인 바람장의 변화가 고려되지 않은 것이며, 천해파 산정조건에 이러한 국소적인 풍향·풍속의 변화가 적용된다면 보다 정확한 천해파 산정결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 국립방재연구소 (2003). "태풍 '매미' 피해 현장조사 보고서".
 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)".
 Hasselmann, K. (1974). "On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping", Bound.-layer Meteor., Vol 6, No 1-2, pp 107-127.

2006년 10월 10일 원고 접수
 2007년 2월 6일 최종 수정본 채택