

겨울철에 발생한 이상 남파 관측

Observation of Abnormal Waves from South in Winter

김태림* · 전기천* · 박광순* · 김상익*

Taerim Kim*, Kicheon Jun*, Kwangsoon Park*, and Sangik Kim*

요 旨 : 1997년 11월 25일 겨울철에 남해안에서 이례적으로 남쪽으로부터 전파되는 높은 파고가 관측되었다. 4 m 정도의 이러한 이상 파고는 시간차를 두고 마라도, 부산 그리고 울릉도 순서로 각각에 설치한 파고계에 관측되었으며 특히 서귀포항 공사 중에 발생하여 큰 피해를 입혔다. 겨울철에 발생하는 이상 남파(南波)는 저기압의 이상 발달 및 이동으로 인한 것으로 추측되며 이를 살펴보기 위하여 일기도 및 수치모델에 의한 파랑장의 분포 등을 조사하여 그 발생 가능성에 대하여 연구하였다. 앞으로도 겨울철에 발생할 수 있는 이러한 이상 남파에 대한 주의를 요한다.

핵심용어 : 이상 남파, 파고 관측, 일기도, 수치모델, 저기압

Abstract □ On the 25th of November in 1997 winter season, unprecedented high waves were recorded at the southern part of Korea Peninsular. The significant wave heights over 4 m were recorded at Marado, Pusan and Ullungdo successively with time lags. Seoguipo breakwaters which were under construction were damaged by the unexpected high waves. These unprecedented southerly high waves in winter seem to be caused by unusual development and traveling of low pressure. Weather charts and wave fields calculated by a numerical model were analyzed to examine the unusual development of these waves. Protection against the southerly high waves in winter must be considered in coastal constructions and structures.

Keywords : abnormal waves from south, wave measurement, weather chart, numerical model, low pressure

1. 서 론

해양에서는 과학적으로 예보할 수 없는 현상이 빈번하게 발생하며 인접한 연안은 물론 파의 형태로 전파되어 원거리에 위치한 해안에도 직접적인 영향을 끼친다. 가장 대표적인 예인 쓰나미는 화산 폭발이나 해저 지진 등으로 인하여 발생하며 대양의 건너편에서도 관측된다. 또한 해양에서의 기상 조건이 해양 표면의 운동과 공명현상을 일으킴으로 인해서도 큰 파가 형성, 이동되는데 이러한 파들은 거의 예보가 불가능해 큰 피해를 일으킨다. Wiegel *et al.*(1958)은 1954년 태풍 Carol의 pressure jump와 같은 속도로 이동하는 높은 파고를 관측하였고 Draper and Bownass(1982)는 1979년 영국 해협을 강타한 비정상파들이 중대서양에서 발생한

사이클론과 같은 속도로 움직이던 주기 18~20초의 파랑들이었다는 것을 밝혀냈다. Thieke *et al.*(1993)은 1992년 7월에 갑자기 플로리다 해안을 강타한 큰 파들이 이동 중이던 기압의 변동이 동시에 이동 중이던 자유해수표면파와 공명현상을 일으킴으로써 발생하였다고 추론하였다. 저기압 전선이나 태풍 등의 발생에 의한 폭풍이나 높은 파고는 현재 거의 예보를 통하여 대비를 하고 있으나 종종 이상 저기압의 발생에 의한 경우 예상치 못한 큰 피해를 일으키는 것으로 보고되고 있다.

우리나라는 여름철에는 남동풍에 의한 남동파가 우세하고 겨울철에는 북서풍이 우세하며 파랑도 이러한 북서풍에 의하여 발생한 북서파가 일반적이다. Fig. 1의 (a)와 (b)는 각각 1979년부터 1998년까지 20년 동안 마라

*한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 (Coastal & Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

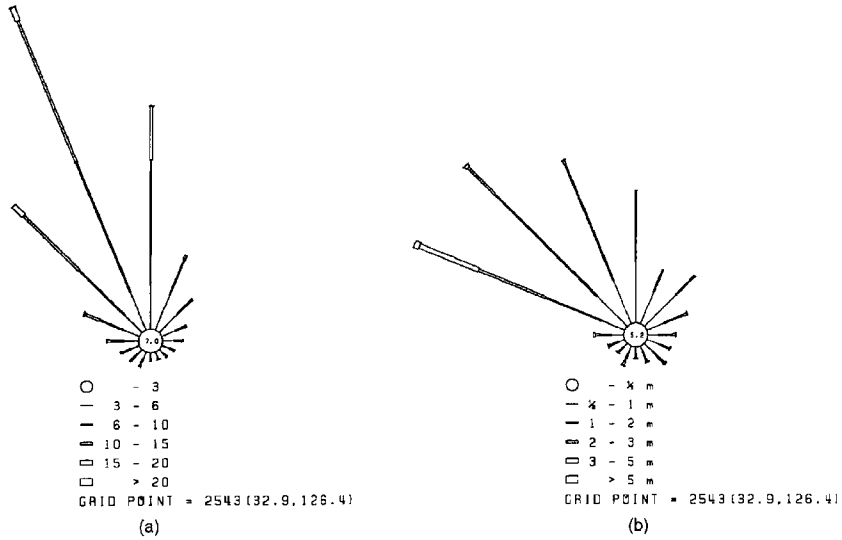


Fig. 1. Wind rose(a) and wave rose(b) at Marado for 20 years.

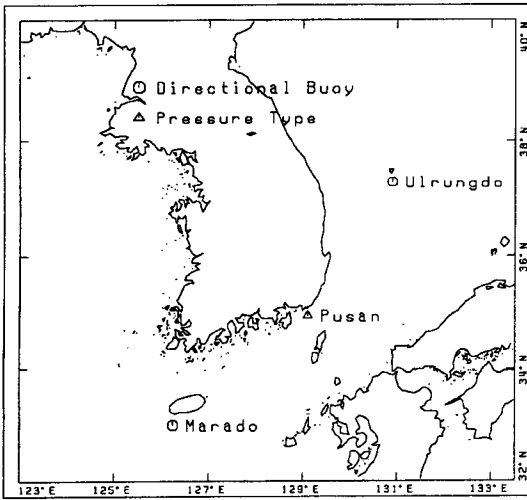


Fig. 2. Location map of wave measurements.

도에서의 바람장미와 파랑장미를 보여 주고 있다. 방향별 분포에서 보듯이 북서풍과 북서파가 월등히 우세하며 이러한 통계적 자료를 바탕으로 남향의 항구나 연안 구조물의 경우 공사의 대부분이 겨울 동안에 이루어진다. 그러나 1997년 11월에는 주로 여름철에 발생하는 이동성 저기압이 겨울철에 발생하여 약 3일간 남풍 계열의 바람이 강하게 불었으며 이로 인한 높은 파고로 인하여 피해가 컸다. 본 논문에서는 겨울철에 발생한 이상 남파현상에 대하여 살펴보고 그 원인을 분석하여 보고자 한다.

2. 이상 남파 관측

2.1 파랑 관측 자료 분석

겨울철인 1997년 11월 25일 자정부터 마라도 앞바다의 부이식 파향 파고계에서 관측되기 시작한 남파는 급격히 그 파고가 증가하여 25일 10시에 유의파고 3.85 m 최대 파고 6.41 m를 기록하였으며 이후 급격히 파고가 줄기 시작했다(Fig. 3). 부산 태종대 앞바다의 수심 13 m에 설치한 수중식 파고계에서는 25일 18시에 유의 파고 4.03 m 최대파고 4.79 m가 기록된 후 급격히 감소하였으며 울릉도 사동 앞의 부이식 파향 파고계에서는 26일 03시에 최대 유의 파고 4.75 m, 최대파고 7.77 m가 기록된 후 급격히 줄어들었다. 특기할 만한 사항은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 거의 남동쪽으로 일직선 배열 상태에 있는 3개의 파랑 관측소에서 시간적 간격을 두고 남쪽에서 북쪽으로 감에 따라 관측소의 최대파고 기록 시간이 지연되어 나타난다는 사실과 비록 부산 파랑 관측지점이 연안 근처의 13 m 수심에 위치하여 천해 효과가 작용하겠지만 기록된 최대 파고가 남쪽에서 북쪽으로 감에 따라 점차 증가한다는 것이다. 이와 같은 관측소별의 시간적 지연과 최대 파고의 지연은 크게 두가지 요인으로 짐작하여 볼 수 있는데 첫째 취송거리에 의한 파의 성장에 의한 요인과 저기압 전선의 이동에 따른 파의 성장 요인으로 볼 수 있다. 첫 번째 요인의 경우 바람이 일정한 방향으로 지속적으로 불 경우 파랑은 바람이 부는 방향으로 전파되어가면서

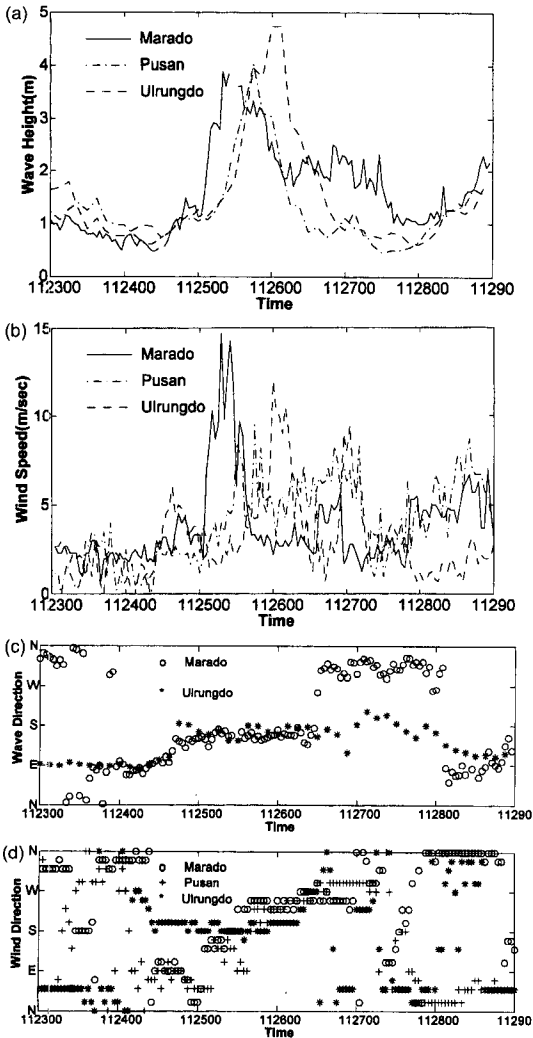


Fig. 3. Time series of (a) wave height, (b) wind speed, (c) wave direction and (d) wind direction recorded at Marado, Pusan and Ullungdo.

바람으로부터 에너지를 얻어 성장하게 되는데 이 때 취송 거리가 길수록 높은 파고가 발생하게 된다. 본 논문의 관측기록의 경우 관측소들을 취송거리에 대해서 일직선상에 놓기에는 상대적으로 좁은 대한해협으로 인하여 무리가 따르며 또한 관측된 파들이 일단 최고 파를 기록한 후 그 값을 유지하지 않고 급격히 감소하는 것으로 보아 취송거리에 의한 요인으로 보기엔 어렵다. 두 번째 요인인 저기압 전선의 이동에 따른 파의 성장은 전선의 이동과 거의 같은 속도로 이동되는 파들이 전파되어 가면서 바람으로부터 에너지를 받아 계속 성장하는 경우인데 이때는 전선이 통과한 후에는 그 해역

의 파고가 급격히 줄어들게 되므로 본 연구에서 관측된 예들을 잘 설명하는 것으로 보인다. 풍속의 경우를 보면 역시 파고와 마찬가지로 최대 풍속이 마라도에서 부산, 그리고 울릉도 순으로 순차적으로 나타나나 그 최대 풍속은 파고와는 달리 마라도의 경우 가장 크게 나타나므로 파고가 풍속의 직접적인 요인 외에도 전선의 이동에 따른 파의 성장이 있었음을 보여주고 있다.

2.2 기상 관측 자료 분석

우리나라는 계절풍대에 위치하고 있어서 바람, 기온, 강수량 등 기후 요소는 계절풍의 영향을 많이 받는다. 특히 겨울에는 대륙의 영향을 받는 기후가 그리고 여름에는 해양의 영향을 받는 기후가 나타난다. 바람의 경우 제주에서 관측한 월별 평균 풍향을 보면 11월-3월까지는 북서풍이 주로 불고 4월-9월까지는 남동풍이 되고 있다(정, 1973). 즉 지역에 따라서 계절풍이 시작하는 시기와 그 빈도에는 차이가 있으나 대체로 우리나라는 여름에는 남동 계절풍이 겨울에는 북서 계절풍이 불고 있다. 계절풍의 원인으로 계절에 따르는 기압 배치의 변동을 들 수 있는데 여름에는 남고북저형으로 남동쪽 해양상에 발달된 고기압으로부터 북서쪽 대륙 내부의 저기압으로 바람이 불게 되어 남동풍이 된다. 반대로 겨울에는 서고동저형으로 대륙내부에 고기압이 발달하고 해양상에 저기압이 발달하여 풍향은 북서풍이 된다. 즉 11월부터 해양성 고기압이 그 자취를 감추게 되는 반면에 한랭한 대륙성 고기압이 득세하여 감에 따라 대륙 내부로부터 한랭한 북서 계절풍이 불어오기 시작한다. 특히 겨울의 기상배치는 매우 특이한 성질을 가지고 있어서 봄이나 가을과 같이 잘 변하지 않아 매일 유사한 서고동저형의 기압배치가 나타나 북서계절풍이 월등히 우세하게 분다.

위에 열거한 두 계절의 바람 외에 우리나라에서 중요한 바람으로 이동성 저기압에 수반되는 바람을 들 수 있다. 대부분의 이동성 저기압은 북반에서 동진하여 우리나라를 횡단하여 동해로 진입한 후 진로를 점차로 북으로 바꾸어 북해도 방향으로 동북동진 하는데 동해에서 발달하면 강수는 많지 않지만 동해 중남부에서는 남서풍이 강하게 분다. 이러한 이동성 저기압은 주로 하계에 많이 발생하며 동계에는 극히 드물다(민, 1973).

겨울철인 1997년 11월말에 발달한 저기압은 하계에 발달하는 저기압과 비슷한 양상을 띠고 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 서해 남부상에 위치한 저기압이 경

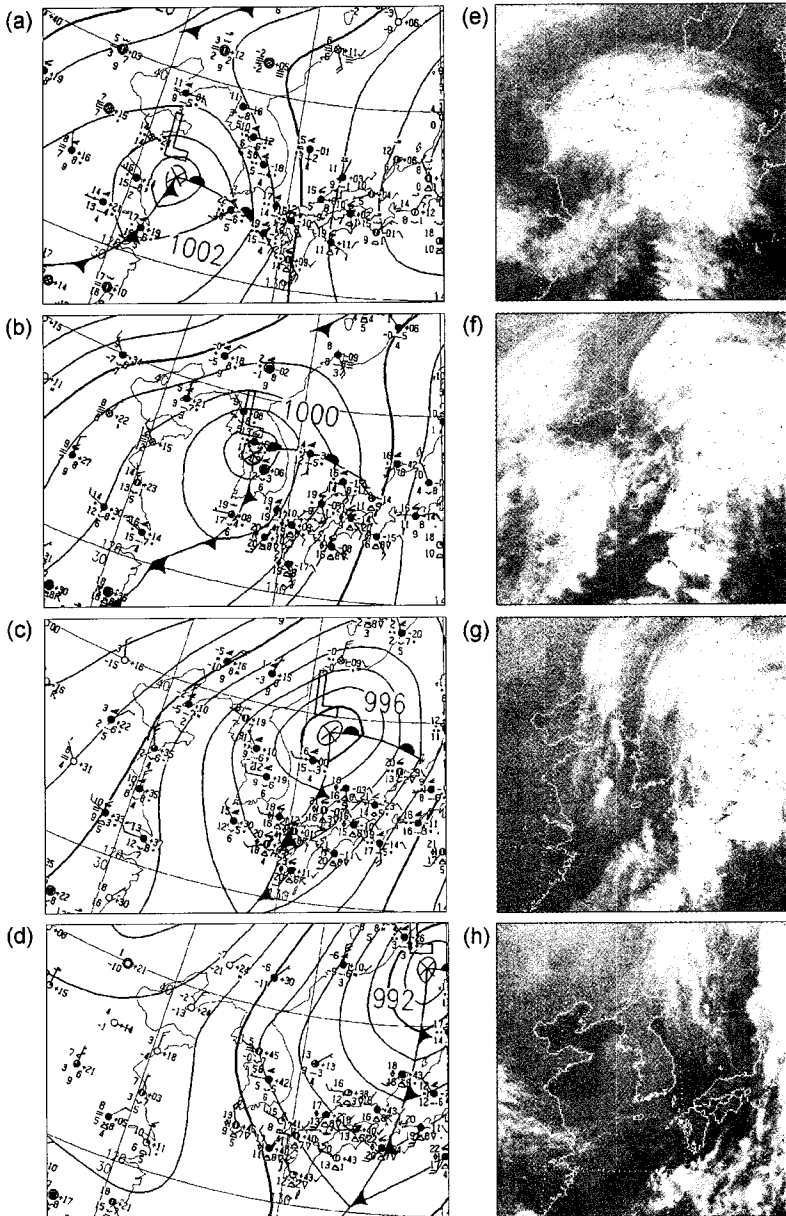


Fig. 4. Weather charts and GMS images around Korea at (a, e) 09:00, Nov. 25, (b, f) 21:00, Nov. 25, (c, g) 09:00, Nov. 26 and (d, h) 21:00, Nov. 26 in 1997.

기도 부근을 거쳐서 동해 북부로 이동하는 것을 볼 수 있다. 기상청은 겨울철에 발생한 이러한 이상기후의 원인과 관련, 한반도 북서쪽의 대륙성 고기압과 남동쪽의 해양성 고기압이 팽팽히 맞서면서 전선대가 형성됐고 이 전선을 따라 해양 수증기를 동반한 남서쪽 저기압이 상륙, 비를 뿌리고 있기 때문이라고 분석했다(동아일보, 1997). 1997년 11월 25일 제주도 해역의 기상상황을 보

면 11월 25일 오전 8시를 기해 제주도 지방에 호우주의보가 발효되었으며, 남동-남서풍이 초속 14~18 m로 강하게 불고 부근 바다에도 3~4 m의 높은 파도가 일었다.

2.3 이상 남파에 의한 피해 상황

초겨울인 11월말에 여름 장마철과 유사한 날씨를 보인 이 기간 동안 많은 피해가 속출하였다. 특히 전선대

를 동반한 강한 기압골이 지나면서 초속 7~20 m의 강한 바람과 함께 많은 비가 내렸으며 11월 중 강수량이 사상 최고치를 기록하고 폭우피해까지 나타났다(동아일보, 1997). 폭우에 이어 초겨울에 이례적으로 폭풍도 몰아쳐서 남부 해상에 폭풍주의보가 발효되었으며 해상은 3~4 m의 높은 파도와 초속 14~18 m의 강한 바람이 불었고 제주와 타지방을 연결하는 6개 노선 모두 여객선 운항이 전면 중단되었다. 또한 제주부근 바다에서 어선이 실종되거나 조난되는 등 해난사고가 잇따라 발생했고 해상에 설치됐던 방어양식 가두리 양식장이 높은 파도에 해안으로 떠밀려 파손 혹은 유실되어 7억여 원의 피해가 발생하였다. 또한 부산 수영구 앞바다 광안대로 공사장에서 작업용 바지선 5척이 높은 파도에 휩쓸려 떠내려가는 등 피해가 속출했다. 특히 남동파가 많은 여름철을 피해 겨울철 동안 서귀포항 방파제 건설 공사를 하던 중 갑작스럽게 높은 남동파가 발생하여 건설현장에서 큰 피해를 입었다. Fig. 5(a)는 1997년 11월 25일 오후 4시 제주도 남쪽에 위치한 서귀포항에서

의 파랑 상황을 보여 주고 있으며, Fig. 5 (b)는 그 다음날 파랑에 의하여 방파제 위로 이동된 구조물들의 파편을 보여주고 있다.

3. 파랑 수치 모델 결과 분석

겨울철에 비정상적으로 발생하는 남파에 의한 피해를 줄이기 위해서는 이러한 겨울철 남파 가능성에 대한 대비와 함께 수치 모델을 통하여 정확한 예보를 하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 겨울철 남풍기간 동안의 ECMWF(European Center for Medium range Weather Forecasting) 바람 자료를 입력하여 현재 한국해양연구소에서 20년 장기 파랑 시뮬레이션을 위해 운용하고 있는 HYPA 파랑 모델을 수행한 후 그 결과를 관측 결과와 비교하며 살펴보았다.

3.1 HYPA 파랑 모델

스펙트럼 파랑 모델은 성분파간의 비선형 에너지 교환(energy transfer due to nonlinear wave-wave interactions)의 고려 방법에 따라 여러 가지로 분류되는데 그중 파라메타 모델은 성분파간의 비선형 에너지 교환을 불연속적인 각 성분파에 대하여 계산하지 않고 파라메타로 표현하여 고려하는 모델로서 대표적인 것이 HYPA(Hybrid Parametrical wave prediction) 모델이다. 특히 HYPA 모델의 전해 버전인 HYPA-S 모델은 파랑의 발생, 전파, 소산 등 여러 메카니즘을 고려하기 때문에 우리나라의 경우 동계계절풍, 동해선풍에 적용하면 효과적이다.

HYPA모델은 북해(North Sea)에서의 대규모 국제공동 해상관측 사업인 JONSWAP 실험, 1977년의 NORSWAM 사업, 1979년의 MARSEN 사업의 연구 결과로부터 개발된 CH(coupled hybrid)형의 모델이다. 이 모델은 독일의 Hambrug 대학과 Max Plank 기상연구소의 Hasselmann 그룹에 의하여 완성되었으며 이 모델에 대해서는 많은 연구 논문(Günther *et al.*, 1979)이 있다. 해양파의 스펙트럼을 분석해 보면 해상의 바람에 의하여 발생하는 풍파(wind sea)과 너울(swell)의 에너지가 가장 큰 비중을 점유하고 있기 때문에 이들이 해상상태를 결정하는 주요 요인이 된다. HYPA 모델의 기본구성은 이와 같이 바람에 의한 해파 발생해역의 해상상태를 수치모의하는 풍파 모델(wind sea model)과 해상풍이 갑자기 약해지거나 발생해역 밖의 해상상태를 모의하는 너울 모델(swell model)로 나누어지며 이 두 모델을 해상풍의

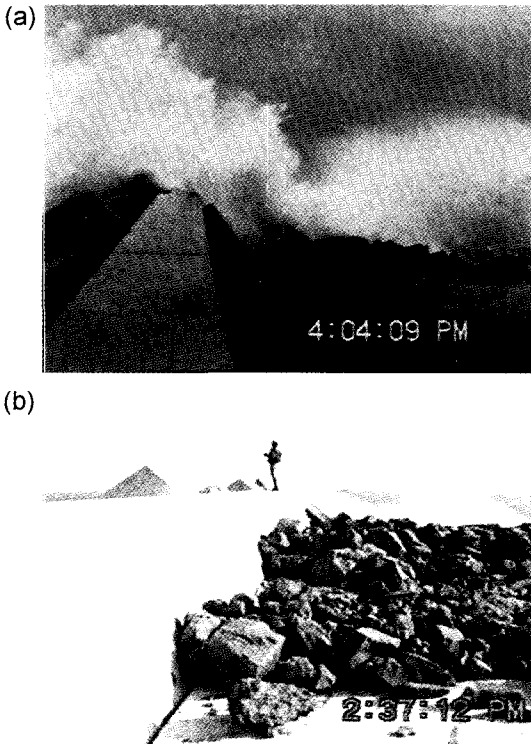


Fig. 5. Video images taken at Seoguiipo breakwater construction site (a) during at storm on Nov. 25 and (b) after the strom on Nov. 26, 1997.

변화와 해상조건에 따라 유기적으로 연결하여 해상상태를 파악할 수 있도록 고안되었다. 모델의 기본식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla F = S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (1)$$

여기서 $F = F(f, \theta; \mathbf{x}, t)$ 는 2차원 에너지 스펙트럼, \mathbf{V} 는 군속도 벡터, S 는 총 원천항, S_{in} 은 바람으로부터의 에너지 유입, S_{nl} 은 비선형 상호작용에 의한 에너지 전달, 그리고 S_{ds} 는 백파에 의한 에너지 소산항이다. 심해의 경우 군속도는 다음과 같다.

$$V = \frac{g}{4\pi f} \quad (2)$$

2차원 에너지 스펙트럼 F 는 주파수 f 와 방향 θ 의 함수로 HYPA 모델에서는 다음과 같이 쓴다.

$$F(f, \theta) = E(f)G(\theta) \quad (3)$$

여기서 E 와 G 는 각각 1차원 주파수 스펙트럼과 방향 분포함수를 의미하며 다음 식이 성립한다.

$$E(f) = \int_{-\pi}^{\pi} F(f, \theta) d\theta \quad (4)$$

HYPA 모델에서 1차원 스펙트럼은 5개의 파라미터로 표현되는 JONSWAP 형, 방향분포 함수는 cosine 자승 법칙을 적용한다. 즉

$$E(f) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-\frac{5}{4}(\frac{f}{f_m})^4} \gamma^e \frac{1}{3} \left(\frac{f}{\sigma_m} \right)^2 \quad (5)$$

여기서 α 는 Phillip의 상수로 대략 0.0081의 값을 가지며, f_m 은 첨두주파수, γ 는 첨두향상계수(peak enhancement coefficient)로서 완전히 발달된 스펙트럼의 경우 1의 값을 갖는다. 한편 σ 는 스펙트럼의 폭에 관계하는 파라메타로 다음과 같다.

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a, & f \leq f_m \\ \sigma_b, & f \geq f_m \end{cases} \quad (6)$$

평균 JONSWAP 스펙트럼에 대하여 σ_a 는 0.07, σ_b 는 0.09의 값을 갖는데 평균 JONSWAP 스펙트럼은 바람으로부터의 유입되는 에너지와 비선형 상호작용에 의한 에너지 전달, 백파에 의한 에너지 소산이 균형을 이룰 때 나타나는 안정된 스펙트럼형이다.

HYPA모델은 우리나라 주변해역에 대한 검증이 아직

충분히 검증이 이루어지지 않은 다른 여러 모델들에 비해서 많은 hindasting과 예보를 통하여 검증이 이루어졌으며 더욱이 수행 시간이 짧고 효율적이다. 특히 우리나라 주변해역에 대한 20년간 파랑 시뮬레이션을 통하여 자료가 축적되었으므로 파랑 모델 수행에 따른 초기조건이 해결된다(한국해양연구소, 1997).

3.2 모델 수행 결과

Fig. 6의 (a), (b), (c), (d)는 각각 Fig. 4의 일기도 (a), (b), (c), (d)와 같은 시각의 ECMWF 해상풍 자료이다. 일기도의 자료에서 예상한 바와 같이 저기압 중심으로부터 반시계 방향의 해상풍이 주도적으로 불며 저기압 중심이 동해로 이동됨에 따라 반시계 방향의 해상풍 중심도 같이 이동하는 것을 볼 수 있다. 우리나라 남해안의 경우 초기에는 남서 혹은 남동풍이 강하게 불었지만 점차 서풍으로 바뀌었으며 저기압 중심이 동해 북부로 이동된 뒤에는 북서풍으로 바뀌었다. Fig. 6의 (e), (f), (g), (h)는 같은 시각의 HYPA 파랑 모델의 수행 결과이다. 풍향과 마찬가지로 남해안의 경우 남동풍 혹은 남서풍이 초기에는 우세하지만 저기압 중심이 이동함에 따라 북서풍으로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 또한 등파고선을 보면 최고 파고가 나타나는 해역이 남서 해역에서 동해의 북동 해역으로 이동되는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 Fig. 3에서와 같이 모델 결과에서 마라도, 부산, 울릉도에 해당하는 해역에서의 파랑 및 바람의 시간에 따른 변화를 그린 것이다. 마라도의 경우 25일 09시에 최대 유의파고 4.27 m로 계산되었고 부산에서는 25일 18시에 3.39 m, 울릉도에서는 26일 00시에 3.07 m가 계산되었다. 바람의 경우 관측치와 마찬가지로 마라도에서 가장 큰 풍속이 나왔고 이어 부산, 울릉도 순으로 순차적으로 최대 풍속이 나왔다.

모델 결과와 관측 결과의 비교에서 특기할 만한 사항은 바람의 경우 마라도에서 세 개의 비교 해역 중 가장 큰 풍속이 관측되고 이어 부산, 울릉도 해역에서 시간적 지연을 두고 각각의 최대 풍속이 관측된다는 점이다. 그러나 파랑의 경우 바람과 마찬가지로 마라도, 부산, 울릉도의 순서로 시간적 지연을 두고 최대 파고가 관측된다는 점은 유사하지만 현장 파랑 관측의 경우 마라도에서 울릉도 쪽으로 감에 따라 더 큰 최대 파고가 관측되는 데에 반해서 수치 모델에서는 마라도에서 가장 큰 파가 계산되고 이어 울릉도, 부산의 순서로 최대 파고가 각각의 해역에서 계산된다는 점이다. 이러한 이

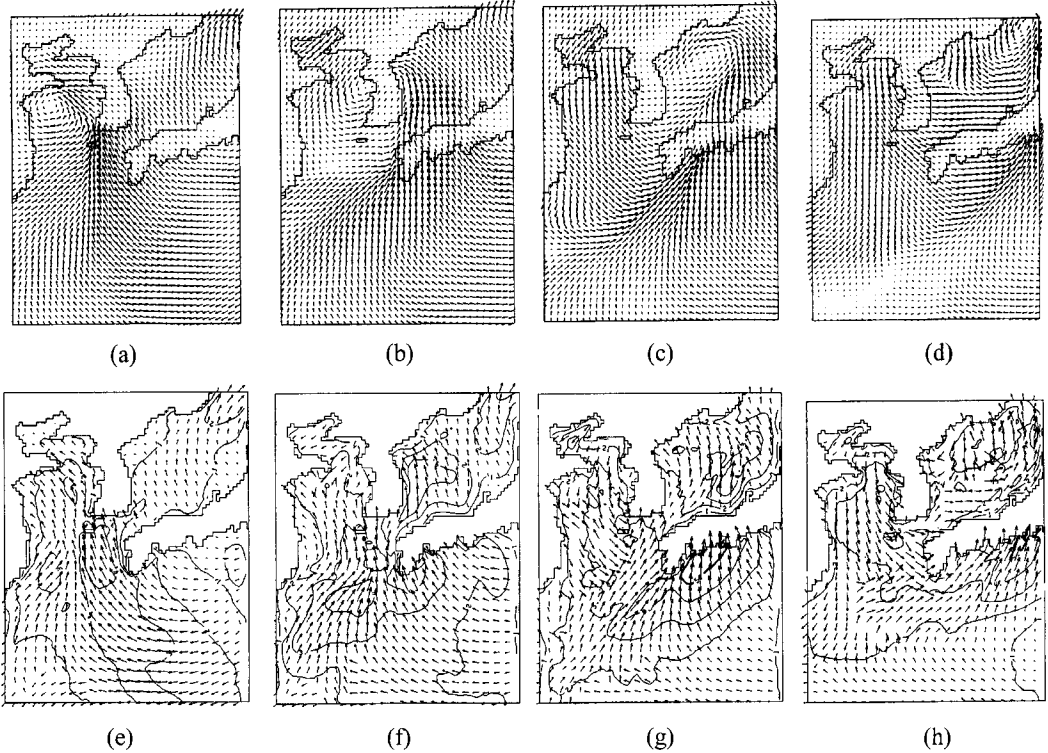


Fig. 6. Wind fields and wave fields around Korea at (a, e) 09:00, Nov. 25, (b, f) 21:00, Nov. 25, (c, g) 09:00, Nov. 26 and (d, h) 21:00, Nov. 26 in 1997.

유는 실제 해양에서는 풍속이 감소하더라도 이동성 저기압의 전선과 같이 이동하는 파랑의 경우 파랑이 모델에서 수행하는 계산보다 더 성장할 수 있다는 것을 의미하며 이러한 과정은 수치모델에서 고려되지 않는다.

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 1997년 11월 겨울에 발생한 이상 남파에 대한 관련 자료를 수집하여 그 원인을 분석하고 또한 파랑 수치모델을 수행하여 그 결과를 검토하였다. 겨울철에 발생하는 이상 남파는 매우 특이한 현상으로 예기치 않은 많은 피해를 발생시킨다. 겨울철에 발생하는 이동성 저기압은 주로 여름철에 발생하는 온대성 저기압과 같은 특성을 갖고 있으며 심한 폭풍우와 함께 큰 남파를 발생시킴으로써 주로 겨울철에 이루어지는 남향 계통의 항만사업에 큰 피해를 입힐 수 있다. 이상 남파 발생 당시의 일기도와 구름사진의 분석 결과 서해상의 온대성 저기압이 경기도 지역을 거쳐서 동해의 동북부 해역으로 이동되는 것을 볼 수 있었다. 이에 따라 관측

풍속의 경우도 전선이 지나감에 따라 마라도에서 최대 풍속이 관측된 후 시간적 지연을 두고 부산, 울릉도 순서로 이동되는 것이 관측되었으며 파랑도 마찬가지로 마라도, 부산, 울릉도 순서로 순차적으로 각각 최대파고를 기록한 후 급격히 감소하는 것을 보였다. 그러나 관측된 최대 파고는 마라도, 부산, 울릉도로 감에 따라 점차 증가하여 온대성 저기압 전선의 이동이 파랑의 성장에 관련이 있다는 것을 암시하였다. 파랑 수치 모델을 수행한 결과 각 관측 해역에서 최대 파고가 관측되는 시각과 매우 근접한 시각에 역시 순차적으로 최대 파고가 관측되는 것을 재현하였으나 풍속이 가장 크게 계산된 마라도에서 역시 가장 큰 파고를 계산함으로써 저기압의 이동에 따른 파의 성장을 계산하는 데는 그 한계가 있었다. 서론에서 언급한 바와 같이 기압전선의 이동에 따른 기상 난류가 같은 속도로 이동하는 파랑과 공명 현상을 일으킬 때는 아주 큰 파가 발생하게 되는데 본 논문에서 이러한 공명현상을 밝히기에는 자료가 부족한 상태이며 실험 및 더 많은 연구를 통하여 그 현상을 밝혀야 할 것이다. 또한 수치 모델의 경우에

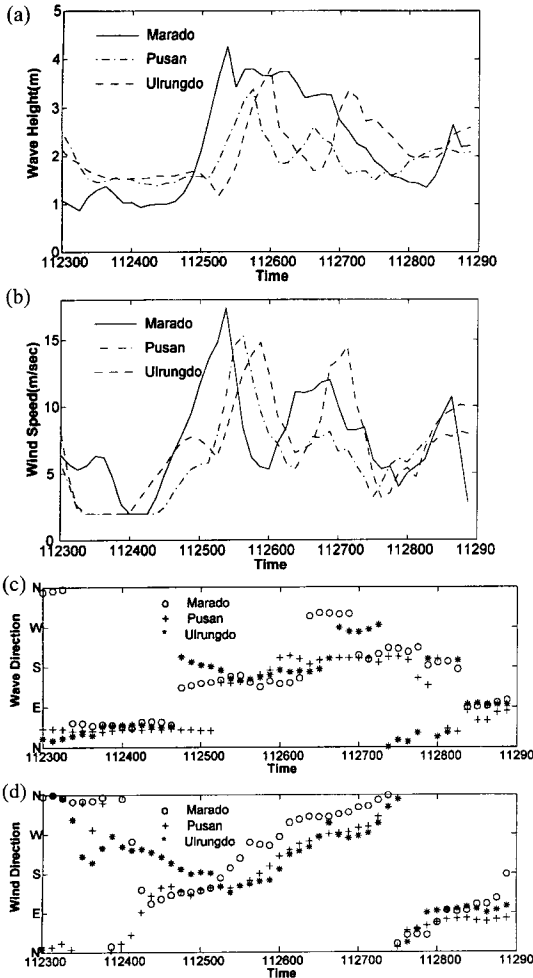


Fig. 7. Time series of (a) wave height, (b) wind speed, (c) wave direction and (d) wind direction calculated at Marado, Pusan and Ulrungdo.

도 현재 운용중인 다른 여러 모델을 수행하여 보고 그 결과들을 비교하고 재검토할 필요가 있으며 아울러 수치모델에는 저기압 전선의 이동에 따른 파와 기상의 난

류간의 공명현상으로 인한 성장에 관한 요소를 보충하여야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 논문에 사용된 GMS 구름사진과 기상자료는 기상청으로부터 제공 받았으며 서귀포항 방파제 피해 사진은 서귀포 동부 건설로부터 제공받았습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

동아일보, 1997. 초겨울에 웬 장대비...엘니뇨영향 「이상난동」 전주곡, 동아일보 1997년 11월 26일 사회면.
 민병언, 1972. 해양 기상학, 한국해양대학교 해사도서관판부.
 정창희, 1973. 한국의 기후, 일지사.
 한국해양연구소, 1997. 천해파랑 산출 시스템 구축 용역(IV) 보고서.
 Drapper, L.D. and Bownas, T.M., 1982. Unusual waves on European coasts, February 1979. *Proc. 18th Coastal Engineering Conf.*, ASCE, Cape Town, South Africa, pp. 270-281.
 Günther, H., Rosenthal, W., Wears, T.J., Worthington, B.A., Hasselmann, K. and Ewing, J.A., 1979. A hybrid parametrical wave prediction model, *J. Geophys. Res.* **84** pp. 5727-5738.
 Thieke, R.J., Dean, R.G. and Garcia, A.W., 1993. The Daytona Beach "Large Wave" Event of 3 July 1992. *Proc. Ocean Wave Measurement and Analysis*, ASCE, pp. 45-60.
 Wiegel, R.L., Snyder, C.M. and Williams, J.E., 1958. Water gravity waves generated by a moving low pressure area, *Transactions, American Geophysical Union*, **39**(2), pp. 224-336.

Received December 8, 1999

Accepted January 5, 2000