

## 한반도 주변 해역 5개 정점에서 파랑과 바람의 관계

고희종<sup>1,\*</sup> · 방익찬<sup>1</sup> · 김태희<sup>2</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 해양학과, 690-756, 제주도 제주시 제주대학로 66번지

<sup>2</sup>기상청 기후국 관측담당관실, 156-720, 서울특별시 동작구 신대방2동

## Relations between Wave and Wind at 5 stations around the Korean Peninsula

Hee-Jong Ko<sup>1,\*</sup>, Ig-chan Pang<sup>1</sup> and Tae-hee Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Oceanography Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

<sup>2</sup>Observation Division, Climate Bureau, KMA, Seoul 156-720, Korea

**Abstract:** The relationships between wave and wind around the Korean Peninsula have been analyzed with the data from the buoys moored at five stations (Dugjug-do, Chilbal-do, Geomoon -do, Geoje-do, Donghae) by Korea Meteorological Administration. Generally, the relationship between wave and wind is the highest at the stations in the West Sea and the lowest at the stations in the South Sea, and the middle at the station in the East Sea. The characteristics shown at each station are as follows. Highest wave is developed at Chilbal-do with strong northwesterly wind in winter because the sea is opened in the wind direction and wave is amplified by shoaling effect. At Chilbal-do, wave directions coincide with wind directions relatively well. On the other hand, waves are not fully developed at Dugjug-do in winter due to limited fetch since the sea is blocked by Hwanghae-do in the northwest direction. The limitation in fetch is more serious at the stations in the South Sea. In the South Sea, the direction of dominant northerly wind is blocked by land so that wave heights are small even with very strong northerly wind. In the South Sea, whatever wind direction is, waves dominantly come in the direction from the East China Sea, which are from the south at Geomoon-do and the southwest at Geoje-do. At these directions, waves are coming even with weak wind. At the station in the East Sea, waves are highly developed due to vast area, but not so high as in Chilbal-do because wind and wave directions do not coincide in many cases. As shown, wind direction is important in the wave development as well as wind speed. The reason is that the fetch is determined by wind direction. In the case of long-lasting wind with fixed direction at Chilbal-do and Dugjug-do, wave directions are well coincident with wind directions and wave heights increase with response time, which is the duration between the highest wind and wave. However, in the case of disagreement between wind and wave directions at the station in the East Sea, wave heights do not increase as highly as at Chilbal-do and Dugjug-do in spite of strong wind and longer response time. The results show us that waves are highly developed with strong wind, long fetch, and long duration, and also show that wave development ratios are different at different stations due to environmental factors such as the direction towards sea or land, bottom topography, and the scales of adjacent seas.

**Keywords:** wind, wave, buoy, shoaling effect, West Sea, South Sea, East Sea, East China Sea

**요 약:** 한반도 주변 해역의 5개 지점(덕적도, 칠발도, 거문도, 거제도, 동해 정점)에서 관측된 기상청의 해양 기상 관측 부이 자료를 이용하여 각 해역에서 바람과 파도의 관계를 분석하였다. 전반적으로는 서해 정점에서는 파도가 바람의 영향을 가장 많이 받고 남해 정점에서는 파도가 바람의 영향을 가장 적게 받으며 동해 정점에서는 그 중간이며 각 정점 별 특징은 다음과 같다. 칠발도에서는 풍속이 강한 겨울철의 주 풍향인 북서방향으로 바다가 트여있고 얕은 수심에 의한 여울효과로 가장 높은 파도가 발달하며 풍향과 파향이 다른 정점에 비해서 가장 잘 일치한다. 이에 비해 덕적도는 북서방향이 황해도에 의해 막혀 있기 때문에 취송거리가 제한되어 겨울철에 충분히 발달한 파도가 생기지 않는다. 이러

\*Corresponding author: hjong2@cheju.ac.kr

Tel: 82-64-702-7738

Fax: 82-64-725-2461

한 취송거리의 제한은 남해 정점에서 더 크다. 북풍이 우세한 남해의 두 정점에서는 북쪽의 육지 때문에 파도의 발달이 제한되어 바람이 강해도 파고는 거의 높아지지 않는다. 남해 정점에서는 어느 방향에서 바람이 불든지 모든 파향의 파가 고르게 유입되며 그 중 우세한 파향은 항상 동중국해에서 유입되는 방향이다. 그 방향은 거문도와 거제도에서 각각 남쪽 방향과 남서 방향이며 이 방향으로는 바람이 약할 때도 파도가 유입된다. 동해 정점에서는 수심이 깊어 파도가 크게 발달하지만 풍향과 파향이 일치하지 않는 경우가 많아 파고의 발달이 칠발도에서 보다는 낮다. 이와 같이 풍속과 더불어 풍향이 파랑발달에 중요한 이유는 풍향에 의해 취송거리가 결정되기 때문이다. 덕적도와 칠발도에서 풍향이 변하지 않고 오래 지속되는 경우를 보면 파향이 풍향과 일치하며 파고는 최대풍속 후에 최대파고가 나타나는 반응시간이 길수록 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나 풍향과 파향이 일치하지 않는 동해 정점의 경우에서는 풍속이 크고 반응시간이 길어도 파고가 서해 정점에서와 같이 많이 높아지지는 않는다. 이상의 결과는 풍속이 클수록, 취송거리가 길수록, 지속시간이 길수록 파고가 크게 발달하는 일반적인 경향과 더불어 각 정점별로는 육지와 바다의 방향, 해저지형, 주변해역의 규모 등의 환경조건에 의해 바람에 의한 파도의 발달율이 달라지는 것을 보여준다.

주요어: 바람, 파랑, 부이, 여울현상, 서해, 남해, 동해, 동중국해

## 서론

바람에 의한 파랑의 발달에 대해서는 많이 연구되어 왔으며 이러한 연구를 바탕으로 우수한 파랑 모델들이 개발되어 발전하고 있다(Tolman, 1989, 1991, 1992, 1999; 오 등, 1990). 파랑모델은 관측이 어려운 광범위한 해역에서 파랑을 계산하고, 파랑발달에 영향을 주는 해안선이나 해저지형의 영향도 계산할 수 있게 해주기 때문에 해안 공학적 측면에서도 연안역의 파랑 수치모델을 이용한 파랑 변조특성에 관한 연구가 이루어지고 있다(정 등, 1992; 정과 채, 1994). 이러한 파랑모델의 발달은 관측이 쉽지 않은 해상풍과 파랑의 분석에 많은 도움을 주었다. 요즈음에는 특성이 다른 해역에서 해상풍과 발달하는 파랑의 관계를 주로 수치모델을 이용해서 분석하며, 파랑에 대한 연구는 적은 수의 파랑관측자료를 그 해역의 대표자료로 이용하여 그 해역에 맞는 파랑모델의 조건을 찾는 방향으로 이루어지고 있다(문 등, 1998; 서와 장, 2003). 즉, 많은 관측자료를 분석하여 그 해역의 해상풍과 파랑의 관계를 찾고 그 관계를 파랑모델에 적용하는 방법보다, 관측된 파랑을 가장 잘 계산해 낼 수 있는 조건들을 찾아 그 조건들로부터 해상풍과 파랑의 관계를 알아낸다. 전자는 관측과 분석이 매우 어렵다는 단점이 있으나 분석결과가 자료에 바탕을 두고 있기 때문에 믿을 수 있다는 장점이 있는 반면 후자는 분석이 쉽다는 장점이 있으나 많은 임의의 수치들에 의해 계산결과가 좌우되기 때문에 분석결과가 작은 오차에도 크게 증폭된 결과로 반영되는 단점이 있다. 두 방법 모두 장점과 단점을 가지고 있으며 파랑연구에 상호보완적이다. 문제는 후자

의 연구에 비해 전자의 연구는 아주 저조한 상태라는 것이다. 그 이유는 우리나라 주변해역에서 체계적인 연구를 할 만큼의 관측자료가 풍부하지 않았기 때문이다. 그러나 1996년부터 기상청에서 우리나라 주변해역에 해양 기상 관측 부이를 설치하기 시작하여 현재는 서해에 2대, 남해에 2대, 동해에 1대의 해양 기상 관측 부이를 설치되어 각 해역을 연구할 수 있는 풍부한 관측자료가 얻어지고 있다.

최근에는 기상청의 해양 기상 관측 부이의 관측자료로 우리나라 각 해역에 대한 해상풍과 파랑의 관계가 많이 연구되고 있다. 현재 기상청에서 운용하고 있는 해양 기상 관측 부이의 관측자료를 이용한 연구는 주로 후자에 해당되는 연구(윤 등, 1998; 서와 장, 2003; 장 등, 2003)이다. 이러한 연구들의 주된 목적은 예측기술을 개발하여 보다 정확한 예보를 하기 위한 것이다. Hwang 등(1999)은 동중국해 해역의 NCEP 6시간 예측자료를 이용하여 WAM(Wave Modeling) 모델결과를 TOPEX/POSEIDON 위성자료와 비교 검증하였으며, 서와 장(2003)은 기상청에서 사용되는 중규모 기상모델(MMS/KMA)의 예측해상풍을 입력자료로 제3세대 파랑 모델(WAVEWATCH-III)을 적용하여 한반도 주변해역의 해상풍과 파랑특성을 분석하고 관측값과 모델 결과의 상관성과 함께 모델의 재현여부를 검증하였다. 이 연구에서는 MMS/KMA 모델의 결과인 해상풍 자료가 파랑예측 모델의 초기자료로서 적절한지 검증하기 위해서 해양 기상 관측 부이의 해상풍 자료가 사용되었다. 또한 장 등(2003)의 파랑모델과 부이자료를 이용한 파랑인자 특성분석에서는 모델과 관측부이의 자료를 이용하여 파랑인자 특성에 관한 분석이 이루어졌다. 윤 등(1998)

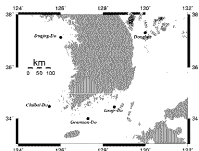


Fig. 1. Locations of the meteorological and oceanographic buoys by KMA (Korea Meteorological Administration).

의 월평균 부이 자료류 이용한 해양-대기 일교차량 산출 및 파랑의 북성에 관한 연구에서는 월평균 해양 기상 관측 부이가 설치된 지역에서의 파랑 방향의 경향을 분석하여 바람이 강한 겨울철이 여름철에 비해 높은 파의 출현율이 많음을 보이며 있다. 그러나 이러한 연구의 주 목적은 파랑모델의 개선이기 때문에 우리나라 각 주변해역에서 바람과 파도의 관계분석과 변화요인을 설명하기에는 부족하다.

본 연구에서는 해양 기상 관측 부이가 설치되어 운영되고 있는 지점의 파도를 바람과의 관계로 분석하여 각 해역별로 파도의 발달이 바람(풍속, 휘황거리, 지속시간)과 어떤 관계가 있는지 이해하고자 한다. 사용한 자료는 기상청에서 설치한 서해 2대, 남해 2대, 동해 1대의 5대의 해양 기상 관측 부이로부터 관측한 자료 중 2001년부터 2002년까지의 자료들이다. 해양 기상 관측 부이의 위치와 정보는 Fig. 1과 Table 1에 정리하였다. 분석은 덕적도, 월만도, 거문도, 거제도, 동해 정점의 해양 기상 관측 부이에서

관측된 자료류 1시간 간격으로 산출한 풍향, 풍속, 파향, 유의파고 자료류 사용하였다. 바람자료는 매시간 10분 동안 관측된 것을 벡터 평균하여 산출한 것이며, 파도자료는 가속도계류 이용하여 20분 동안 1,024개의 자료류 취득하여 유의파고(1/11/3) 등의 파랑자료류 산출한다(김 등, 2004).

본 연구에서는 각 정점에서 관측된 풍속과 파고의 전반적인 변화를 계절별로 살펴보고, 강한 바람이 부는 기간인 겨울철을 중심으로 풍속과 파고의 관계를 분석하였다. 그리고 풍향의 변화가 파향과 파고에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였으며 같은 풍향의 바람이 지속될 때 파도의 변화율 비교 분석하였다.

### 정점별 바람과 파도의 계절변화

우리나라 주변 해역의 바람과 파고의 북성을 파악하기 위하여 각각의 정점에서 관측된 바람과 파고류 분석해 보았다. 분석자료는 2001년 1월부터 2002년 12월까지의 관측자료류 각각 봄(3월-5월), 여름(6월-8월), 가을(9월-11월), 겨울(12월-2월)로 나누어 풍향, 풍속과 파향, 파고를 비교하였다(Fig. 2). 본 논문은 그림에서는 풍향과 파향을 일반적인 방법과는 다르게 표시하였다. 일반적으로 풍향은 유입되는 방향으로 표시되고 파향은 유출되는 방향으로 표시되기 때문에 그림에 풍향과 파향을 동시에 표시할 경우 180도 위상의 차이가 생겨 풍향에 의해 생성된 파향이 풍향과 일치하지 않게 보인다. 그림에서 풍향과 파향을 일치시키기 위해 본 논문의 그림에서는 모두 풍향의 표시방법과 같이 유입되는 방향으로 표시하였다. 그러나 설명에서는 일반적인 방법을 사용하였다. 예를 들면, 그림에서 풍향과 파향이 05도일 때 풍향은 북풍인데 비해 파향은 남풍이며 풍향과 파향이 90도

Table 1. Information of the five buoys by KMA

Buoy	Location	Water Depth
Dugjug-do	37°14'N, 126°01'E 15 Km west of Dugjug-island	30 m
Chilbal-do	34°48'N, 125°47'E 2 Km northwest of Chilbal-island	33 m
Goseom-do	34°01'N, 127°03'E 14 Km east of Goseom-island	80 m
Gaejo-do	34°46'N, 128°54'E 16 Km east of Gaejo-island	84 m
Donghae	37°32'N, 130°01'E 70 Km east of Donghae city	1,518 m

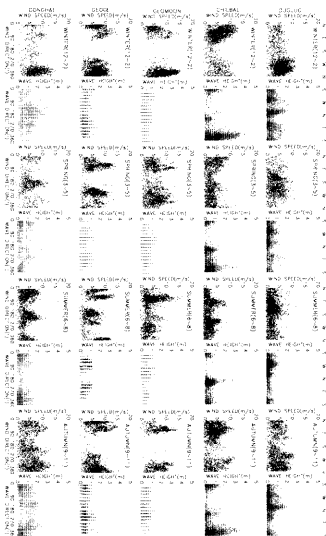


Fig. 2. Seasonal variation of wind and wave at five buoy stations (Both the directions of wind and wave are the directions from which they are coming).

일 때 풍향은 동풍인데 비해 파향은 서향이다. Fig. 2에서는 도음을 주기 위해 풍향과 파향을 일치시킨 방향을 밑에 표시하고 일반적으로 사용하는 풍향과 파향을 위에 표시하였다.

#### 서해연근해(덕적도 정점과 칠발도 정점)

서해 중북부의 경기만에 위치한 덕적도 정점 근해 해역의 지형적 특징은 북쪽과 동쪽은 육지로 둘러싸여 있고 서쪽과 남쪽은 바다이며 그 수심은 약 30 m 내외로 낮다. 덕적도보다 남쪽에 위치한 칠발도 정점 근해 해역은 동쪽이 육지이며 수심은 약 30 m 내외로 덕적도 해역과 비슷하다.

두 해역에서 관측된 최대 풍속은 겨울철에 약 15 m/s 정도이며 여름철에 약 12 m/s 정도로 겨울철이 강하고 여름철이 약하다. 봄철과 가을철의 풍속은 각각 여름철과 겨울철의 경향으로 변하는 중간 정도이다. 이러한 풍속의 계절적인 변화경향은 파고의 경향과 비슷하다. 즉 파고는 겨울철에 최대 약 4 m 정도로 높는데 비해 여름철에는 칠발도에서 3 m를 제외한 대부분은 1 m 정도로 낮다. 특히 칠발도에서의 파고는 덕적도보다 훨씬 높아 4 m까지 관측된다. 풍향을 보면 덕적도에서는 가을철과 겨울철에 북서풍이 우세한데 비해 봄철과 여름철에는 남풍이 우세하고, 칠발도에서는 가을철부터 봄철까지 북풍계열이 우세한데 비해 여름철에는 남풍계열이 비교적 우세하여 약간의 차이를 보인다. 두 정점에서 풍속이 강한 겨울철을 비교해 보면 덕적도에서는 북서풍이 우세한데 비해 칠발도에서는 북동풍이 우세하다. 풍향과 파향은 다른 연근해보다는 비교적 일치하지만 일치하지 않은 경우도 있다. 덕적도에서는 계절별로 우세한 파향이 뚜렷하지 않은데 비해 칠발도에서는 북향이 우세한 여름철을 제외한 가을철부터 봄철까지 남동향이 뚜렷하다.

전반적으로 파고는 풍속에 따라 겨울철에 높고 여름철에 낮는데 비해 파향은 풍향과 정확하게 일치하지는 않는다. 특히 칠발도에서 가을철부터 봄철까지 북동풍이 강하게 부는데도 남서향의 파향은 적으며 오히려 남동향의 파향이 많다. 이것은 북동풍에 의해 남서향의 파도가 발생하더라도 칠발도 정점 부근 해역의 해저지형에 의해 연안으로 굴절되기 때문인 것으로 보인다.

#### 남해연근해(거문도 정점과 거제도 정점)

남해의 두 정점에서 관측된 바람은 두 가지 특징

이 있다. 첫째, 풍속은 서해 정점과 비교했을 때 강하다. 둘째, 풍향은 연중 북풍계열이 우세하게 나타난다. 다만 여름철에는 북풍 외에 남풍도 북풍계열만큼은 우세하지 않지만 뚜렷해진다. 즉, 남해의 두 정점에서는 모든 계절에 북풍계열이 우세하고 풍속도 서해에서보다 강한테 이것은 남해가 북쪽으로 육지에 의해 막혀있다는 것을 감안하면 이해하기 힘든 현상이다.

남해의 정점들에서는 연중 풍속이 강하기 때문에 파고의 계절변화도 뚜렷하지 않다. 따라서 서해 정점에서와 같이 파고가 풍속에 비례하는 현상(Fig. 4)은 남해 정점들에서는 뚜렷하지 않으나 거문도에서 여름철 태풍에 의해 강한 바람이 불었을 때는 높은 파고가 나타났다. 칠발도에서 풍속과 파고가 겨울철에 각각 약 15 m/s와 4 m이며 여름철에는 각각 12 m/s와 3 m 정도인데 비해 거문도와 거제도에서는 태풍이 불었을 때를 제외하면 연중 파고가 대략 2 m 정도로서 강한 바람(겨울철 거제도에서 최대 18 m/s)에 비해 파고가 낮다. 풍향에서는 북풍계열이 우세한데 비해 파향에서는 우세한 방향이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 다만 여름철 태풍에 의해 강한 동풍이 불었을 때는 서향의 높은 파고가 나타났다.

남해 정점들에서 서해보다 강한 북풍계열의 바람이 연중 관측되었다는 것도 이해하기 힘들지만 그와 같이 강한 바람과 특징한 풍향에도 불구하고 파고가 낮으며 우세한 파향이 있기는 하나 비교적 모든 방향의 파향이 고르게 관측되었다는 것은 남해의 정점들에서 파고와 파향이 바람에 의해 영향을 많이 받지 않는다는 것을 보여준다.

#### 동해연근해 (동해 정점)

동해에 부이가 설치된 동해 정점은 수심이 약 1500 m로 깊은 바다이며 연안에서 약 70 km 떨어진 곳에 위치해 있다. 풍속은 겨울철 최대 약 17 m/s 정도로 강하며 여름철에 강한 몇 번을 제외하면 대체로 약 13 m/s 정도로 약하다. 파고도 풍속과 비슷하게 겨울철에 약 3 m 정도로 높고 여름철에 약 2 m 정도로 낮다. 동해 정점의 파고는 칠발도를 제외한 다른 정점들에서 보다 높다. 풍향은 겨울철에 북풍계열이 우세한데 비해 봄철부터 가을철까지는 남풍과 북풍이 모두 우세하다. 파향은 풍향과 일치하지 않게 나타난다. 겨울철에 북서풍이 우세한데 비해 파향은 풍향과 반대방향의 북향이 우세하며 여름철에 우세한

남풍에도 불구하고 북향의 파도는 아주 약하게 나타나며 오히려 남향의 파도가 우세하다.

동해 정점에서는 남해 정점에서와는 달리 풍속과 파고는 비례하며 칠발도를 제외하고 풍속에 비해 다른 정점들에서보다 높은 파고가 나타난다. 이것은 동해의 수심이 깊어 파도가 잘 발달되기 때문으로 보인다. 그러나 파향은 풍향과 일치하지 않으며 오히려 반대로 나타나기도 한다. 이것은 동해가 넓은 다른 곳에서 발달한 파가 쉽게 전파되어 올 수 있는 환경 때문일 것이다.

각 관측정점에서 나타난 결과들을 요약하여 연근해역의 특징을 보면 서해 정점에서는 파고와 파향이 바람에 의해 가장 많이 영향을 받는 해역이며 남해 정점에서는 파고와 파향이 풍속 및 풍향과 관계없이 거의 일정한 바람의 영향을 가장 적게 받는 해역이다. 이에 비해 동해 정점의 파고는 풍속의 영향을 많이 받지만 파향은 풍향과 다르게 나타난다.

### 해역별 바람과 파도의 관계

앞 장에서 관측자료용 비교해 본 결과 바람에 의해 발달하는 파도가 각 정점별로 상당히 다르다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이 장에서는 각 정점별로 파도의 발달이 다르게 나타나는 원인을 알아보았다. 우선 파도의 발달이 다른 이유가 풍속에 의한 것인지를 알아보기 위하여 평균풍속과 평균파고의 관계류 구하였다. 평균자료로 분석한 이유는 관측자료에서는 풍향과 파향이 계속 변하기 때문에 그들의 평균자료

가 그 해역의 특성을 나타낸다고 보았기 때문이다. 그러나 파고발달이 각 해역에서 다른 원인이 풍속뿐만 아니라 수심이 깊어, 예를 들어 남해에서는 풍속이 다른 해역보다 더 강했음에도 불구하고 파고의 발달은 가장 작았기 때문이다. 따라서 다음에는 풍향의 영향을 알아보았다. 풍향에 의해 취송거리가 달라지므로 각 해역의 특성이 나타날 수 있기 때문이다. 그 결과 파고발달의 특성이 해역마다 다른 이유가 풍향에 따른 취송거리의 제한으로 설명될 수 있음을 알 수 있었다. 풍속과 파고의 분석에서는 바람이 가장 강한 1개월동안의 관측자료로부터 평균 풍속에 대한 평균 파고의 발달율을 각 정점별로 구하였고, 풍향의 영향에서는 육지에 의해 파도가 진행할 수 있는 거리가 제한 받는 방향과 제한 받지 않는 방향에서 부는 바람의 풍향으로 취송거리의 영향을 분석하였다.

그밖에 흥미로운 현상으로 풍속의 변화가 파고의 변화에 나타날 때까지 걸리는 시간(반응시간)이 각 해역마다 다르다는 것인데 이 반응시간이 다른 예를 제시하였다. 이 예들은 풍향이 거의 일정하게 유지되는 자료를 찾아 반응시간을 최대풍속과 최대파고가 나타난 시간차이로 구한 후 앞에서 구한 파도의 평균 발달율과 비교하여 정점별 특성을 알아보았다.

### 풍속에 의한 파고의 발달률

5개 정점의 월평균 풍속과 월평균 유의파고류 비교한 결과(Fig. 3), 풍속이 강한 계절과 파고가 높아지는 계절이 일치하는 정점은 서해 정점과 동해 정점

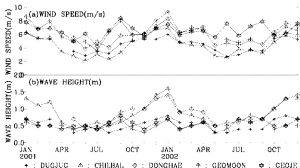


Fig. 3. (a) Monthly wind speeds and (b) monthly significant wave heights at the five buoys.

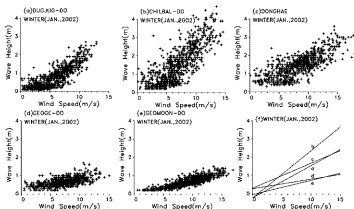


Fig. 4. Plots of wind speeds and significant wave heights observed at the five buoys in January, 2002. (f) represents their relations.

이며, 남해 정점의 해역에서는 풍속이 강한 계곡에도 파고가 높지 않다. 정점별 파고는 전반적으로 칠만도와 동해 정점에서 높으며 덕적도, 거문도, 거제도에서는 낮다. 그러나 다른 해역에 비해 동해 정점의 풍속은 강하지만 칠만도의 풍속은 강한 편이 아니다. 오히려 파고가 낮은 거문도와 거제도에서 풍속이 강하다. 예를 들어 거문도와 거제도에서 2001년 9월(8 m/s, 8.4 m/s)과 2002년 1월(9.3 m/s, 7.5 m/s)에 풍속이 강하지만 파고는 1 m에도 못 미치는 데 비해, 2002년 1월에 칠만도에서는 풍속이 6.9 m/s이지만 파고는 1.7 m 정도로 높다. Fig. 3은 파고와 풍속의 관계가 해역마다 다르다는 것을 보여준다.

각 해역별 풍속과 파고의 관계를 알아내기 위하여 월평균 풍속이 가장 강한 1월에 관측된 풍속과 파고의 관계를 그려프르 그려 보았다(Fig. 4). Fig. 4의 (a)-(c)는 각각의 정점에서 관측된 풍속과 파고의 관계이고 (f)는 각 정점에서 나타난 풍속과 파고의 관계를 직선으로 표시한 것이며 직선의 관계식은 Table 2와 같다. 이 관계식은 파고를 풍속의 함수로 표현한 것으로 기울기의 크기로 파고의 발달정도를 알 수 있다. 물론 이 기울기를 정확하게 파고의 발달율을 볼 수는 없다. 왜냐하면 풍속과 파고의 관계를 직선으로 나타낼 수는 없는데다 풍속과 파고가 비례하지 않거나 풍향과 파향이 일치하지 않는 상태가 많이 포함되어 있기 때문이다. 그러므로 Table 2의 관계식

은 여러 영향들이 복합되어 평균적으로 나타나는 각 정점별 풍속과 파고의 관계이다. 그럼에도 불구하고 이 기울기로 각 정점의 파도 발달율을 가능케 보는 것은 각 해역의 특성을 이해하는 데 도움이 된다. 왜냐하면 Table 2의 관계식에는 최대풍속과 최대파고의 관계가 가장 크게 포함되어 있기 때문이다.

Fig. 4(a-c)를 보면 서 울절에 최대파고는 칠만도에서 가장 높고 다음으로 동해 정점에서 높으며 그 다음은 덕적도, 그리고 거제도와 거문도에서 가장 낮다. 최대풍속은 동해 정점에서 가장 강하고 다음으로 거문도, 칠만도, 거제도, 덕적도 순으로 낮아진다. Fig. 4(f)에서 10 m/s의 풍속에서 발달한 평균 파고도 칠만도, 동해 정점, 덕적도, 거제도, 거문도 순으로 파고가 낮아져 최대파고와 그 순서가 같다. 그러나 파도의 발달율은 이 순서와 다르기 때문에 풍속이 15 m/s 정도로 강해지면 평균 파고의 순서가 바뀔 수도 있

Table 2. Relation between wind speed and wave height in January, 2002

Position	Relation (H=Wave height(m), W=Wind speed(m/s))
Dugje-do	$H=0.17W-0.23$
Chilral-do	$H=0.26W-0.23$
Gomcoon-do	$H=0.18W-0.05$
Gejg-do	$H=0.05W-0.28$
Donghae	$H=0.14W-0.30$

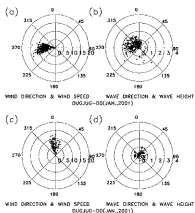


Fig. 5. Comparison of wind and wave roses at Dugjug-do in January, 2001. ((b) is the wave for (a) wind (westerly wind), (d) is the wave for (c) wind (northerly wind).)

다. 파고의 발달율은 칠발도(0.26), 덕적도(0.17), 동해 정점(0.14), 거문도(0.08), 거제도(0.05) 순으로 낮아진다. 이 결과는 풍속이 약한 계절에까지 적용되지는 않는다. Fig. 3에서 보듯이 풍속이 보다 약한 봄철과 가을철에는 동해 정점의 파고가 가장 높으며 풍속이 약해지는 여름철에는 동해 정점의 파고가 다른 정점에 비해 높지 않다. 이러한 차이는 주변 바람에 의해 발달하는 파도 외에 다른 곳에서 유입되는 파고의 유무(남해 정점과 동해 정점)와 해저지형이 낮아지며 발생하는 파고의 증폭(서해 정점) 등의 상황에 의해 영향을 받기 때문일 것이다. 바람이 약할 때는 파도의 발달율이 달라짐에도 불구하고 바람이 강할 때는 파도의 발달이 칠발도에서 가장 크고 남해연안에서 가장 낮다는 것은 이 분석으로부터 알 수 있다.

#### 풍향에 따른 취송거리의 영향

풍향이 파고의 발달에 영향을 줄 수 있는 것은 주변의 육지에 의해 파도의 취송거리에 영향을 주기 때문이다. 이 절에서는 각 관측 정점에서의 지형적 특성에 따라 풍향별 파고의 파황을 비교하였다. 우선 서해의 두 정점에서 취송거리의 영향을 알아 보았다 (Fig. 5). 취송거리의 영향을 알기 위해서는 바람에 의해 파도가 충분히 발달할 수 있는 거리가 확보되

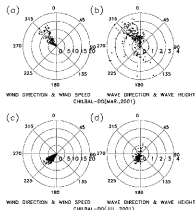


Fig. 6. Comparison of wind and wave roses at Chilbal-do in March (a,b) and in July (c,d), 2001. ((b) is the wave for (a) wind (northwesterly wind), (d) is the wave for (c) wind (southwesterly wind).)

어야 하며 또한 다른 곳에서 발달한 파고의 유입이 적어야 좋다. 이런 점에서 서해의 두 정점은 다른 정점들보다 파도와 취송거리의 관계류 파악하기에 적당하다. 덕적도에서는 육지에 의한 취송거리의 영향이 어떻게 나타나는지 살펴보았으며(Fig. 5) 칠발도에서는 취송거리의 제한이 없을 때 풍속과 파고의 관계류 살펴보았다(Fig. 6).

덕적도에서는 육지의 영향을 받지 않는 풍향(서풍)과 육지의 영향을 받는 풍향(북풍)의 경우를 비교하였다. 시기는 풍속이 강하며 서풍과 북풍이 뚜렷하게 나타나는 2001년 1월 중 두 풍향의 바람(Fig. 5a와 c)과 그 때의 파도(Fig. 5b와 d)를 선대하여 비교하였다. 두 풍향의 경우에 풍속은 최대 약 12 m/s로 비슷하지만 그 바람에 의해 발생한 파고는 각각 최대 약 2 m와 약 1 m로 서풍일 때가 높다. 이것은 육지에 의해 취송거리가 작아질 경우에 파도의 발달이 적어 진다는 것을 보여준다. 또한 서풍일 때 파랑이 동향(그림에서는 서향, 270도)으로 풍향과 같은 방향인데 비해 북풍일 때는 파랑이 풍향과 일치하지 않아 취송거리가 짧을 경우에 바람이 파도의 발달에 결정적이지 않는다는 것을 보여준다. 이러한 결과는 정기만 주변 해역에서 파고를 발달시킬 수 있는 주변 바람 성분은 서풍계열이라는 김 등(2004)의 결과와 일치



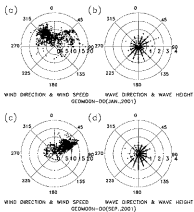


Fig. 7. Comparison of wind and wave roses at Geomoon-do in January (a,b) and in September (c,d), 2001.

한다.

취송기기가 충분할 경우에 풍속과 파도의 발달을 확인하기 위해 칠발도에서 2001년 3월의 북서풍(Fig. 6a)과 2001년 7월의 남서풍(Fig. 6c)이 경우를 선택하여 비교하였다. 두 방향은 칠발도에서 육지의 영향을 받지 않는다. 두 풍향에서 파고는 풍속이 약 15 m/s(북서풍)일 때 약 4 m이며, 약 8 m/s(남서풍)일 때 약 1.5 m로 관측되었다. 이 관측치는 칠발도에서 계산된 풍속과 파고의 관계인  $H = 0.26W - 0.23$ (Table 2)보다 북서풍일 때 파고가 약간 더 발달했음을 보여준다. 또한 두 경우 모두 풍향과 파향은 일치하는데 북의 풍속이 강할 때(북서풍) 더 잘 일치하고 있다. 풍속이 약할 때(남서풍)는 풍향과 다른 파향도 많이 관측되는데 이것은 다른 해역에서 발달한 파의 유입이나 굴절 등의 영향이 상대적으로 크게 나타나기 때문일 것이다. 반대로 풍속이 강할 경우에는 바람에 의해 발달한 파가 매우 크기 때문에 다른 영향들이 상대적으로 작게 나타난다.

남해의 두 정점에서 풍향과 파향의 관계를 나타낸 것이 각각 Fig. 7과 8이다. 시기는 2001년 1월과 2001년 9월로 거문도(Fig. 7)에서는 북서풍과 북동풍이 우세하고 거제도(Fig. 8)에서는 북풍이 우세하다. 남해 정점들에서는 서해(Fig. 5와 6)와 동해의 정점(Fig. 9)들에서와 달리 풍향이 거의 일정하기 때문에

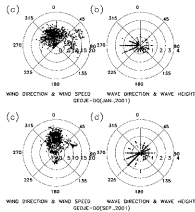


Fig. 8. Comparison of wind and wave roses at Geoje-do in January (a,b) and in September (c,d), 2001.

1개월 간의 자료를 모두 표시하였다. 남해의 정점들에서는 풍속이 15 m/s보다 강할 때도 파고가 2 m 이상 발달하는 파도는 별로 없으며 파향은 풍향과 관계없이 비슷한 양상이다. 거문도에서는 북서풍과 북동풍에 관계없이 파향은 북향(그림의 남향, 180도)이 비교적 우세하며 거제도에서는 북풍에도 불구하고 남향(그림의 서향, 270도)이 우세하다. 이러한 결과는 두 가지 북풍을 보여준다. 파고가 풍속의 영향을 받지 않으며 풍속에 비해 파고가 낮다는 것과 파향이 풍향에 영향을 받지 않고 우세한 방향이 일정하다는 것이다. 파고가 풍속의 영향을 많이 받지 않는 것은 이 해역의 우세한 파도가 주변해역의 바람에 의해 발생하지 않는다는 것을 말해주며 파향이 풍향에 관계없이 일정하다는 것은 그 파도들이 다른 해역에서 발생한 후 일정한 방향에서 유입되고 있다는 것을 나타낸다. 이 해역에서 바람이 파도의 발달에 결정적인 도움을 주지 못하는 이유는 바람들이 주로 북풍 계열이며 이 방향은 북쪽의 육지로 인해 취송기기가 짧기 때문이다. 거문도를 보면 북풍계열에 의해 발달한 남향(그림의 북향, 0도)이 파도가 북향(그림의 남향, 180도)의 파도에 비해 파고가 작다. 즉, 북풍에 의해 발달한 파도보다는 동중국해에서 유입되는 파도의 파고가 높다. 파도의 유입 방향은 거문도에서는 남쪽(파향은 북향)이며 거제도에서는 남서향(파향은

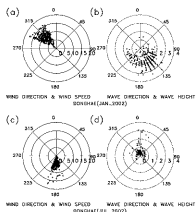


Fig. 9. Comparison of wind and wave roses at Donghae in January (a,b) and in July (c,d), 2002. (b) is the wave for (a) wind (northwesterly wind), (d) is the wave for (c) wind (southerly wind).

북동향)으로 이 두 해역이 동중국해로 향할 방향과 일치한다(Fig. 1). 이러한 결과는 육풍이 부는 경우에는 휘송시간과 휘송거리가 짧아 파랑인지에 바람정보 가 많이 포함되어 있지 않다는 보고(장 등, 2003)와 일치한다.

동해 정점에서는 서해와 남해의 특징들이 복합적으로 나타난다. 즉, 파고는 풍속에 비해하는데 비해 파향은 풍향과 일치하지 않았다. Fig. 9에서 2002년 1월과 7월 풍에서 북해 풍향과 파향이 다른 예류 그런 것이다. 2002년 1월 북서풍이 강할 때 파향은 북서향(그림의 남풍향, 135도)이고 2002년 7월 남풍이 강할 때 파향은 남향(그림의 북향, 0도)으로 파향은 풍향과 반대이다. 그러나 풍향과 파향이 다름에도 불구하고 파고는 풍속과 비례한다. 이와 같이 상반되어 보이는 현상을 이해하기는 쉽지 않다. 다만 정점부근의 바람을 발생시키는 기압배치가 멀리 떨어진 곳에서는 다른 풍향을 만들어 내는데 동해의 규모가 커서 그들을 모두 포함하고 있는 결과로 해석된다.

#### 파도 발달의 예

바람이 파도의 발달에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 일정한 방향의 바람이 오랜 시간 동안 지속적으로 부는 경우를 찾아야 하는데 실제 관측에서

그러한 경우를 찾기는 쉽지 않다. 이 경우에는 덕적도, 칠발도, 동해 정점에서 가능한 같은 풍향의 바람이 오랜 시간 동안 지속되는 경우(Fig. 10)를 통해 풍속과 파고의 관계를 알아보았다. 동해 정점의 풍향은 시간이 지남에 따라 변하기는 하지만 급격한 변동 없이 완만하게 변하기 때문에 선택되었으며, 남해 정점들은 바람과 파도의 관계가 낮아 제외되었다.

최대풍속과 최대파고가 나타나는 시간의 차이를 제외하고는 세 정점의 경우 모두 파고의 반응이 풍속의 변화와 거의 일치해 바람과 파고의 관계가 밀접함을 알 수 있다. 그러므로서 풍속과 파고의 유사한 관계는 풍향과 파향이 같은 덕적도와 칠발도에서 뿐만 아니라 거의 반대방향(180도 차이)인 동해의 경우에도 비슷하다. 최대풍속 후 최대파고가 발생하는 반응시간은 덕적도, 칠발도, 동해 정점에서 각각 2시간, 6시간, 9시간으로 나타났다. 참고로 장 등(2003)에 의해 계산된 자료에서는 최고풍속 후 최대파고가 발생하는 시간이 덕적도, 칠발도, 거제도에서 각각 2시간, 동해 정점에서는 3시간이었다. 이와 같이 반응시간이 다른 이유는 풍향이 있다. 장 등(2003)이 사용한 자료는 풍향의 변화가 심한 가을철(2001년 9월, 10월) 자료로서 풍향의 변화에 의해 파고가 충분히 발달하지 못한 것으로 보인다. 덕적도, 칠발도, 동해 정점에서 얻은 세 경우들은 같은 풍향이 오랫동안 유지되기 때문에 심한 풍향변화가 포함된 자료로부터 얻은 Table 2의 관계보다는 파고가 높다. 덕적도, 칠발도, 동해 정점에서 최대파고일 때 풍속은 각각 9.4 m/s, 11.5 m/s, 14.4 m/s이며 이 풍속으로 Table 2의 관계에서 얻은 파고는 각각 1.3 m, 2.8 m, 2.3 m인데 비해 Fig. 10에 나타난 최대파고는 각각 1.8 m, 4.6 m, 3.6 m이다. Table 2의 관계에서 보다 증가한 비율(증가율)은 덕적도, 칠발도, 동해에서 각각 32%, 67%, 55%로서 풍향과 파향이 같은 경우(덕적도와 칠발도) 반응시간이 길어짐에 따라 증가율도 커지며 파향이 다른 경우(동해 정점) 반응시간이 길어도 증가율은 많이 커지지 않고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 풍향의 변화가 심하지 않고 바람의 지속시간이 길어지면 파고가 높아지며 풍향과 파향이 일치할 때 더욱 효과적이라는 것을 보여준다.

#### 결론과 토의

우리나라 주변 해역에서 관측되는 바람과 파도관

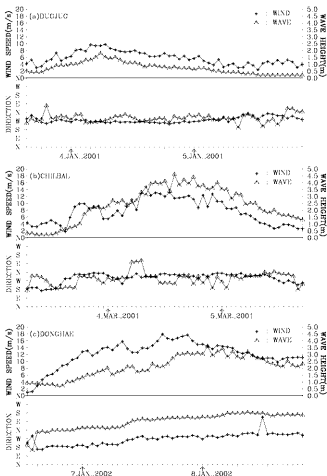


Fig. 10. Time series of wind speed and significant wave height observed (a) at Dugjug in 3-5 January, 2001 and (b) at Chilbal in 3-5 March, 2001 and (c) at Donghae in 6-8 January, 2002.

분석한 결과 정점별 특징은 다음과 같다. 서해 정점들에서는 파도의 발달이 바람에 의해 가장 많이 영향을 받고 남해 정점들에서는 파도의 발달이 바람의 영향을 가장 적게 받으며 동해 정점은 중간이다. 동해 정점에서 파고는 풍속의 영향을 받으나 파향은

풍향과 다르게 나타난다. 서해 정점들에서 바람과 파고의 관계가 높은 이유는 풍속이 강한 겨울철의 주된 풍향에서 위송거리가 길고 수심이 얕아짐에 따라 발생하는 파고의 증폭 때문이다. 서해연근해에서 바다로 드문 방향에서 바람이 불어오면 풍향과 파향의

일치하고 풍속과 지속시간에 따라 파고가 발달한다. 겨울철 칠발도에서 약 4 m 이상의 파고의 출현은 11.5 m/s 이상의 북서풍이 6시간정도 지속되었을 때 나타난다. 덕적도에서 비슷한 풍속일 때 육지가 방해하는 북풍보다 바다로 트여있는 서풍일 때 파고가 발달하는 것도 같은 이유이다. 취송거리가 짧은 때는 파도의 발달에 제한을 받는다. 이런 결과는 남해 정점들에서 바람과 파도의 관계가 낮은 것도 설명할 수 있다. 남해에서는 연중 북풍이 우세하게 부는데 북풍은 육지에 의해 취송거리가 짧아지기 때문이다. 그러므로 북풍에 의해 발생하는 남향의 파도보다 높은 파고의 파도가 동중국해에서 유입되며 우세한 파향은 거문도에서는 북향이고 거제도에서는 북동향이다. 따라서 남해 정점들에서는 바람과 파도의 관계가 가장 낮다. 동해 정점은 서해와 남해 정점들의 환경과는 달리 수심이 깊고 파도가 발생하는 해역이 넓어 파도의 유입방향도 여러 방향으로 자유롭다. 따라서 정점 주변해역의 바람뿐만 아니라 먼 곳의 바람에 의해 발달한 파도가 자유롭게 유입되어 풍향과 파향이 일치하지 않는 경우가 많다. 그러나 풍향과 파향이 일치하지 않는 경우에도 풍속과 파고의 관계가 높은 것은 흥미로운 현상이다. 본 논문에서 사용한 자료로는 그 이유를 알 수는 없으나 정점 주변해역의 바람과 정점 외해의 바람이 풍향은 달라도 같은 기상현상에 의해 생성된 바람이기 때문에 그 풍속이 파고에 비해한 결과로 추측된다.

풍속과 풍향만이 아니라 지속시간도 파도의 발달에 영향을 주는데 지속시간의 영향을 분석하기에는 일정한 방향으로 오랜 시간 동안 지속적으로 바람이 분 경우가 별로 없다. 따라서 본 연구에서는 최대풍속이 나타나는 시각 후 최대파고가 나타나는 시간(반응시간)과 파고의 발달을 분석해 보았다. 덕적도와 칠발도에서 풍향이 변하지 않고 오래 지속되는 경우를 보면 파향이 풍향과 일치하며 파고의 크기는 반응시간이 길수록 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나 풍향과 파향이 일치하지 않는 동해 정점의 경우에는 풍속이 크고 반응시간이 길어도 파고가 서해 정점(칠발도)에서와 같이 많이 높아지지는 않는다.

이상의 결과는 풍속이 클수록, 취송거리가 길수록, 지속시간이 길수록 파고가 크게 발달하는 것을 보여주며 그에 따른 파도의 발달율은 바람, 육지와 바다의 방향, 해저지형, 주변해역의 규모나 방향 등에 의해 각 정점별로 다르다는 것을 보여준다. 이러한 연

구결과의 의미는 일반적으로 알려진 바람과 파도의 관계가 우리나라 주변해역에서는 실제로 어떤 차이가 있는지를 관측결과로 분석한 것이다. 그러나 풍속, 풍향, 파고, 파향이 자주 바뀌고 일치하지 않는 관측 자료에서 바람과 파도의 관계를 분석한다는 것이 쉬운 일이 아니었다. 따라서 많은 노력에도 불구하고 본 연구에서는 가장 기본적인 분석에 그칠 수 밖에 없었다.

## 사 사

본 논문은 제주대학교 두뇌한국 21 사업 중 RA지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문을 읽고 친절하게 심사를 해주신 공주대학교 신희열 교수님과 그 외 심사위원께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- 김태희, 오희진, 윤용훈, 2004, 경기만 주변 해역의 국지 파랑 관측 자료 비교, 한국기상학회지, 40 (4), 495 p.
- 문일주, 오임상, 이동은, 윤용훈, 정순갑, 조주영, 1998, 한국근해의 파랑예측을 위한 제3세대 파랑모델 WAM의 적용, 한국기상학회지, 34 (3), 446-458.
- 서장원, 장유순, 2003, 중규모 기상모델(MM5/KMA)과 3세대 파랑모델(WAVEWATCH-III)로 계산된 한반도 주변 해역의 2002년 월평균 해상풍과 파랑 분포 특성, 한국해양학회지, 8 (3), 262-273.
- 오임상, 김태희, 정종률, 봉종현, 1990, 천해 파랑 모델 개발에 관한 연구, 한국기상학회지, 26 (3), 139-155.
- 윤용훈, 홍성길, 홍윤, 이지연, 1998, 칠발도 Buoy자료를 이용한 해양대기 열교환량 산출 및 파랑 특성에 관한 연구, 한국해양학회지, 3 (1), 9-15.
- 장유순, 서장원, 김태희, 윤용훈, 2003, 파랑모델과 부이 자료를 이용한 파랑인자 특성 분석, 한국해양학회지, 8 (3), 274-284.
- 정신택, 채장원, 정원무, 1992, 흐름이 존재하는 완경사해역에서 파랑변형 수치모형실험, 한국해양·해양공학학회지, v4 (1), 1-9.
- 정신택, 채장원, 1994, Current Refraction and Diffraction Model for Irregular Waves, 한국해양·해양공학학회지, v6 (3), 260-265.
- Hwang, P. A., Bratos, S. M., Taegue, W. J., Wang, D. W., Jacobs, G. A. and Resio, D. T., 1999, Wind and Waves in the Yellow and East China Seas: A Comparison of spaceborne altimeter measurements and model results, Journal of Oceanography, 55, 307-325.
- Tolman, H. L., 1989, The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. Communications

- on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delf University of Technology, ISSN 0169-6548, Rep. 89-2, 72 p.
- Tolman, H. L., 1991. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Physical Oceanography*, 21, 782-797.
- Tolman, H. L., 1992. Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model. *Journal of Physical Oceanography*, 22, 1095-1111.
- Tolman, H. L., 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH-version 1. 18. Technical Note, NCAR NWS Ocean Modeling Branch: 110 p.

---

2005년 2월 25일 원고 접수  
2005년 3월 21일 수정 원고 접수  
2005년 3월 21일 원고 채택