

## NSCAT (NASA Scatterometer)에 의한 한국근해의 해상풍

이 동 규

부산대학교 해양과학과

### Ocean Surface Winds Over the Seas Around Korea Measured by the NSCAT(NASA Scatterometer)

Dong-Kyu Lee

Department of Marine Sciences, Pusan National University

#### Abstract

The NSCAT(NASA Scatterometer) carried by the Japanese Advanced Earth Observing Satellite(ADEOS) was the first high resolution(25 km) device for the direct wind measurement over the ocean. Even it was ceased to operate in June of 1997 because of the power failure, it gave the first opportunity to the marine meteorologists to study the direct measured ocean wind during its 9 months of operation, especially around Korea. This study is to show monthly mean ocean wind and wind stress curl fields around Korea from January, 1997 to June, 1997.

Mean ocean winds in January are predominantly northwesterly and the strongest wind(12 m/s) is found near Vladivostok. The winds in the western East Sea are strongly influenced by the mountain range in Korea and these topographically influenced winds make about five times larger wind stress curl fields than previous estimates based on the weather maps. The calculation of Sverdrup transport in the East Sea shows the possibility of the directional change of the East Korean Cold Current from southward to northward direction caused by the winter wind. The downwelling area near North Korea has maximum estimated speed of 45 m in January and this wind induced downwelling makes good condition for the formation of Intermediate East Sea Water together with vigorous mixing by the strong wind.

Keyword : ocean wind, scatterometer.

## 요 약

일본에 의해 발사된 ADEOS 위성에 탑재된 NSCAT(NASA Scatterometer)은 고밀도(25 km) 해상풍 측정을 위한 최초의 관측기기이다. 비록 전원장치 고장으로 1997년 6월 작동을 중지하였지만, 작동하던 9개월동안 해양기상학자들에게 최초로 직접 관측한 해상풍, 특히 한국 근해의 해상풍을 연구하는 기회를 제공하였다. 본 연구에서는 1997년 1월부터 1997년 6월까지의 월평균 해상바람장과 바람응력궤를 보여준다.

1월평균 한국 근해의 바람장은 강한 북서풍(8 m/s)이 우세하였으며 가장 강한 바람은 블라디보스톡 근해의 바람(12 m/s)이었다. 동해 서부 해역 즉 우리나라 근해의 해상풍은 산맥에 의해 영향을 받았으며 이 지형으로 인해 변화한 바람은 기압도를 근거로 추정된 지금까지의 바람응력궤 값보다 5배 정도 큰 바람응력궤 값을 유발하였다. 스버드립 해수수송량(Sverdrup transport) 계산은 겨울철 바람이 동한한류의 방향을 남향에서 북향으로 바꾸는 가능성을 보여주었다. 북한 근해에서 바람응력궤에 의한 해수침강속도는 최대 월 45 m정도이었고, 바람에 의한 해수 침강이 바람에 의한 강한 혼합과 더불어 동해중층수 형성에 좋은 조건을 이 해역에 만들어 주는 것으로 밝혀졌다.

## 1. 서 론

NSCAT(NASA Scatterometer)은 1996년 8월에 발사된 일본의 ADEOS(Advanced Earth Observing Satellite)에 탑재된 관측기기 중 하나로 전 지구 해상에 초고밀도(최소 25 km 간격)로 해상풍을 직접 측정하는 관측기기이다. 불행하게도 1997년 6월 하순 위성의 전원장치 고장으로 관측이 중단되었으나 해상풍 자료가 수집된 8개월 동안 이제까지 관측 자료가 거의 없었던 해역, 특히 한국 근해의 해상풍을 연구할 좋은 기회를 제공하였다.

우리나라 근해에는 일본 기상청에서 설치 운용하는 동해의 기상부이가 유일한 해상 관측 기기이며, 특히 동해 연안은 고도가 높은 산맥으로 막혀 있어 우리나라 근해 해상풍 연구에 어려움이 많았다. 한국 근해의 해상풍 연구는 이제까지 기압도에 의해 계산된 해상풍을 이용한 연구였는데, 나 등(1992)은 일본기상청(Japan Meteorological Agency)의 12시간 간격 기압도를 사용하였고 강 등(1994)은 유럽중기기상예보소(ECMWF)의 1000 mb 온도, 비습, 지오폠펜셜 고도와 미국기상청(NMC)의 해표면 온도 자료를 사용하여 해상풍을 계산하였다. 육지와 해안선을 따라 위치한 기상 관측소의 기압 관측치를 이용한 해상풍 추정은 대략적인 바람의 경향 즉 계절풍 등을 연구하기에는 적합하나 바람에 의해 변화하는 해류 등을 연구하는 물리해양학적 연구에는 부적당하였다. 그 이유는 바다는 바람응력에 직접 반응하기보다는 바람응력궤(wind stress curl)에 의해 움직이며 바람응력궤 값은 바람응력의 공간 변동량을 나타내므로 단지 큰 규모의 기압변화에 의한 바람응력 계산으로는 바람응력의 공간 변동을 정확하게 추정할 수 없기 때문이다.

산란측정기로 측정된 해상풍은 1978년 발사된 SEASAT-A에 탑재된 SMMR(Scanning

Multichannel Microwave Radiometer)를 이용한 것이 처음이었으나 좋은 자료를 취득하지는 못하였다. 그 다음 2세대 위성에 의한 해상풍 측정기는 미국 국방성에서 국방기상위성프로그램(Defense Meteorological Satellite Program)의 일환으로 발사한 인공위성에 탑재한SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)이다. SSM/I에 의한 해상풍 관측은1987년부터 현재까지 수행되고 있으며 Atlas(1996)에 의해 해상풍 자료가 분석되었고 해양기상학자들에게 공개되었다. 그러나 SSM/I에 의한 바람자료는 풍속은 작은 간격으로(25 km) 위성에 의해 측정되나 풍향은 위성에 의해 측정되지 못하여 유럽중기기상예보소의 수치모델 결과치를 사용한다. 그 결과 연구자들이 사용할 수 있도록 만들어진 해상풍 자료는 동서방향으로 2.5°, 남북방향으로 2°간격으로 구성되어 자료 간격이 너무 큰 단점이 있다.

본 연구는 1997년 1월부터 1997년 6월까지 격자간격 25km 간격의 제3세대 산란측정기인 NSCAT(NASA Scatterometer)에 의한 우리나라 근해의 해상풍 자료를 분석한 것으로 고밀도 간격으로 직접 관측된 해상풍 연구이다. 2장에서는 산란측정기에 대한 설명과 자료처리 방법을 설명하였고, 3장에서는 월평균 바람응력과 바람응력궤를 계산하였으며 지금까지 발표된 기압도에 의한 바람응력궤 값과 비교하였다. 4장에서는 동해에서 월평균 바람응력을 이용한 스버드럽 해수수송량(Sverdrup transport)과 바람에 의해 형성되는 해수의 수직운동 속도를 계산하고 분석하였으며 5장에서는 토의와 결과 요약을 하였다.

## 2. 자료와 방법

산란측정기(scatterometer)는 극초단파(microwave)를 위성에서 지구를 향해 쏘아 해표면에 의해 반사된 파의 강도를 측정한다. 반사된 파의 강도는 바람에 의해 생성되는 파도에 의해 변하는 해표면의 거친정도(roughness)에 따라 변한다. 산란측정기는 구름이나 공기중의 분진이 반사파 강도 측정에 영향을 주지 않아 전 지구를 커버하는 전천후 해상풍 측정기이다. NSCAT은 6개의 막대형 안테나로 구성되었으며 위성이 관측해역을 지나가면서 위성의 궤도에서 양방향으로 관측(dual-swath)하는 Ku-band 산란측정기이다(Naderi *et al.*, 1991; Graf *et al.*, 1996). NSCAT은 최고 25km 간격으로 전 지구의 바다를 적어도 2일에 한번은 관측하도록 계획된 저궤도 위성이다. 그림 1은 위성이 우리나라 근해를 지날 때의 관측 범위를 나타낸 그림이고 위성이 궤적을 따라 지나가면서 양 쪽 600km 씩 1200km 범위로 측정하며, 위성궤적 바로 밑의 329km는 전파가 미치지 않는 구역을 포함하여 총 1529km 폭으로 위성궤적이 이루어져 있다.

NSCAT에 의한 해상풍 측정의 정밀도는 원래 풍속의 경우 표준오차가 2 m/s 이내 그리고 풍향의 경우는 20로 설계되었으나 Ebuchi(1997)에 의한 일본 근해의 3개 해상기상부이와의 비교연구에 의하면 1997년 1월 1일부터 1997년 2월 26일까지 표준오차는 1.6 m/s로 아주 좋았으나 풍향의 표준 오차는 42.5°로 기기 설계보다 크게 나타났다. 풍향의 오차가 크게 나타난 것은 기상부이가 순간 풍속을 측정할 반면 NSCAT은 바람에 의해 생성되는 파도에 의한 것이어서 적어도 15분 이상 지

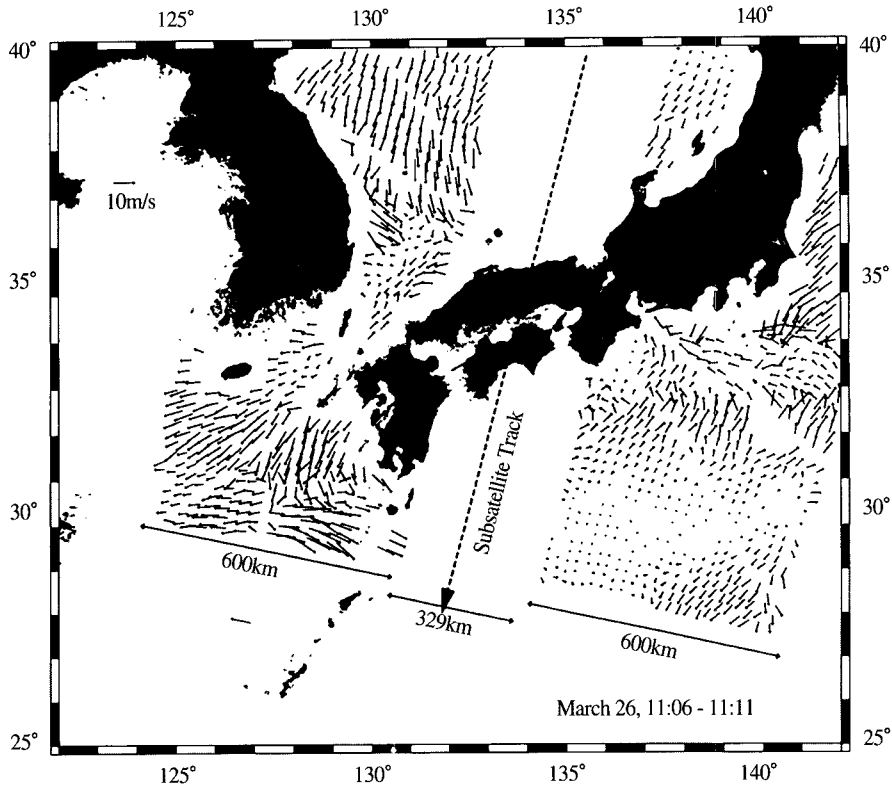


Fig. 1. The ocean wind measurements by the NSCAT. The satellite track and its coverage range are also drawn.

속적으로 부는 바람의 풍향을 측정하는 점과 안테나 6개를 사용하여도 NSCAT에 의한 풍향 측정의 이중성(ambiguity) 때문에 반대 방향의 풍향을 잘못 선택할 경우도 있기 때문이다. 그러나 풍속이 5 m/s 이상일 때는 풍향의 정확도가 커진 것으로 나타났다.

본 연구에서는 미국의 제트 추진 연구소(Jet Propulsion Lab, [podaac.jpl.nasa.gov](http://podaac.jpl.nasa.gov))에서 처리한 25 km 간격의 NSCAT 해상풍 자료 중 북위 30°-45°사이 그리고 동경 118°-142°사이의 자료를 사용하였다. 그림 1은 우리나라 근해를 1997년 3월 26일 오전 11:06부터 11:11까지 위성이 지나갈 때 위성의 궤적과 NSCAT에 의해 관측된 해상풍을 표시한 그림이다. 그림 2는 동해(134°33'E, 37°55'N)에 위치한 일본 기상청의 기상부이에서 관측된 풍속과 NSCAT에 의해 측정된 풍속과의 비교이다. NSCAT에 의한 해상풍 값은 기상부이에서 20km이내에서 측정된 것이며 전 연구기간동안 Ebuchi(1997)의 결과와 비슷한 표준오차를 보인다.

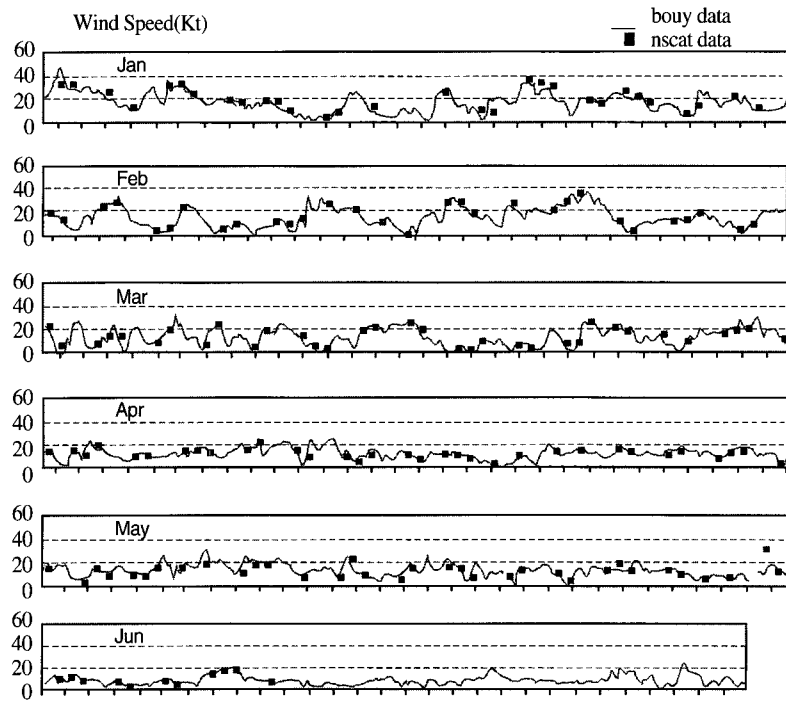


Fig. 2. The time plots of wind measurement by the NSCAT and the JMA weather buoy. The NSCAT winds are from the measurements which lie within a 20 km radius of the weather buoy.

### 3. 결 과

#### 1) 월평균 해상풍

그림 3-8은 1997년 1월부터 6월까지 우리나라 근해에서의 월평균 해상풍과 표준오차타원 (standard error ellipse)을 나타낸다. 월평균 해상풍은  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  간격 상자에서 월평균을 계산하여 그림에 나타냈으며 월평균에 대한 표준 오차는  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  간격 상자에서 계산한 후  $1^{\circ}$  간격으로 그림에 나타내었다. 일본의 혼슈섬 남쪽 태평양상의 해상풍도 그림에 포함되어 있으나 결과에 대한 설명은 우리나라 근해로만 국한하여 태평양상의 해상풍에 대한 설명은 생략하였다.

그림 3은 1월평균 해상풍을 나타낸다. 황해의 중국 연근해에서는 중국 대륙의 영향으로 북서풍이 아주 약하나, 황해의 우리나라 연근해와 남해에서는 계절풍인 북서풍이 평균 8-10 m/s로 강하게 불었으며 표준오차는 동해보다 적게 나타났다. 동해에서는 러시아의 블라디보스톡에서 동해로 아주 강한 북서풍이 부는데 월평균 풍속은 12 m/s 정도였다. 북한 해안의 개마고원과 러시아 해안

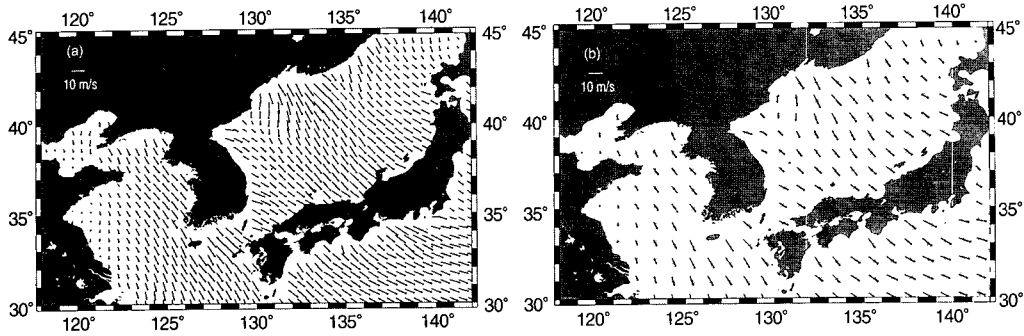


Fig. 3. Monthly mean (a) wind velocity vectors and (b) selected mean wind vectors with standard error ellipses for January, 1997.

의 시호테알린 산맥 사이의 계곡으로 시베리아 고기압권에 의해 형성된 계절풍이 동해로 강하게 불어 나가며 이 강한 북서풍은 동해를 가로질러 일본의 혼슈섬 연안까지 불고 있다. 개마고원의 영향을 받는 북한 연해에서는 개마고원이 만주로부터 시작하여 약 500 km 정도에 걸쳐있으면서 북서풍을 차단하는 역할을 하여 풍향도 북풍으로 바뀌고 풍속도 약해졌다. 반면 남한 연안의 해상 풍은 태백산맥의 영향을 잘 보여주고 있는데 전형적인 지형에 의한 바람의 영향을 보여준다. 포텐셜 와도보존(Conservation of potential vorticity)에 의해 바람이 산맥을 넘어갈 때 동서 방향 성분의 속도는 변하지 않고 남북 방향 성분의 바람 속도는 약해진다. Batchelor(1967)에 의하면 산맥을 통과하기 전의 남북방향 속도가  $V$ 라면 산맥통과 후 속도는  $V - f_0 A/H_0$ 가 된다. 여기서  $f_0$ 은 코리올리스 힘(Coriolis force)을 나타내며  $A$ 는 산맥의 단면적  $H_0$ 은 대기 경계층의 두께이다. 황해에 부는 북서풍과 같은 방향과 속도를 가진 바람이 고도 1.5 km 폭 150 km의 태백산맥을 넘어간다고 가정하고 포텐셜 와도 보존을 적용해 산맥의 영향을 계산해 보았다. 서해에서 풍향이 정북에서 140°의 바람이 풍속 8 m/s로 태백산맥을 지나면서, 대기경계층의 두께를 해면에서 약 5 km라고 하면, 동해에서 남북방향의 속도가 약 2 m/s 정도 약해지는 것으로 계산된다. 이것은 북서풍이 서풍에 가까워진다는 것을 의미한다. 동해의 130°E, 36.5°와 40°사이에서 평균 풍속 5.4 m/s에 평균 풍향이 정북에서 125°로 나타났으며 이것은 남북방향 속도가 2.5 m/s 줄고 동서방향 속도가 1 m/s 약해진 것으로 나타나, 마찰력으로 인한 우리나라 서부 평야지대와 태백산맥에서의 속도 감소(1 m/s)를 감안하면 포텐셜와도보존의 이론에 의한 계산 값과 크게 차이가 나지 않는다. 포항 근처 연해에서 다른 동해안 연해보다 강한 바람이 부는 이유는 소백산맥과 태백산맥 사이에 낙동강을 따라 형성된 계곡과 대구에서 포항 쪽으로 형성된 태백산맥이 끝나는 지점과 경남 알프스 사이에 형성된 계곡의 영향으로 골바람 효과를 받은 때문으로 생각된다. 표준오차는 동해가 서해나 남해보다 크게 나타났으며 동해 동부와 서부 해역에서는 동서방향이 남북방향 오차보다 크나 블라디보스톡 골바람이 우세한 동해 중앙부분은 바람의 주 방향인 북서 방향으로 크게 나타났다. 또한 제주도

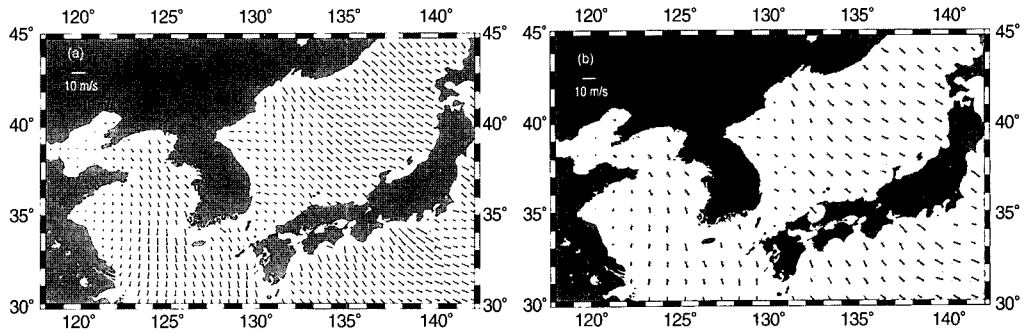


Fig. 4. Monthly mean (a) wind velocity vectors and (b) selected mean wind vectors with standard error ellipses for February, 1997.

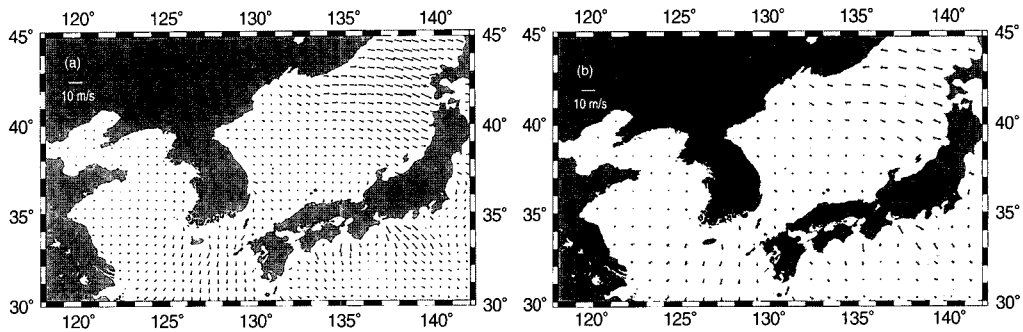


Fig. 5. Monthly mean (a) wind velocity vectors and (b) selected mean wind vectors with standard error ellipses for March, 1997.

근해에서 1월평균 해상풍의 표준오차가 우리나라 근해에서 가장 작게 나타났다.

2월평균 해상풍과 표준오차는 그림 4에 나타냈으며, 서해 북부 해상풍과 블라디보스톡 골바람은 1월 보다는 약해졌으나 1월과 형태는 비슷하다. 남해와 서해 남부 해상은 북풍으로 바뀌었고 동해 연안의 해상풍은 서풍이 우세하다. 표준오차는 1월과 비슷하나 제주도 근해의 표준오차가 1월보다 커졌다. 3월의 해상풍과 표준오차는(그림 5) 우리나라의 봄철의 시작으로 해상풍의 계절 변화를 보여준다. 러시아와 사할린 섬 사이의 동해 북부 해상은 서풍이 강하게 불며 블라디보스톡 근해의 블라디보스톡 골바람은 사라졌다. 북한과 남한 연안의 해상풍은 아주 약해졌으나 표준오차가 큰 것으로 보아 해상풍 변동 폭이 큰 것을 알 수 있다. 황해는 전반적으로 바람이 약해져 평균 1 m/s 정도였으며 남해는 북풍이 4 m/s로 2월과 상이하였다.

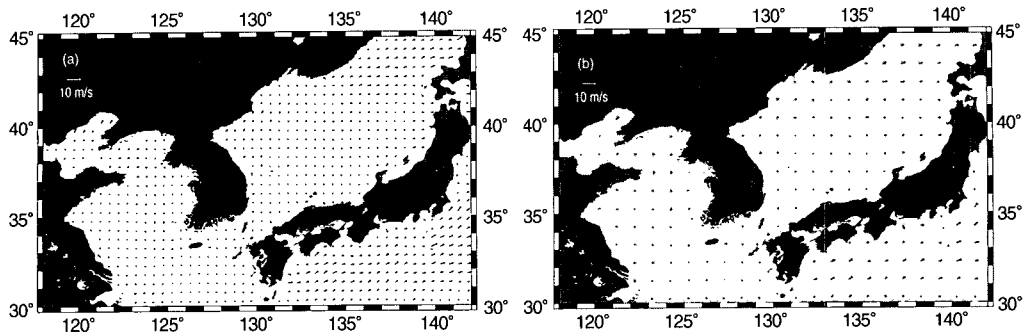


Fig. 6. Monthly mean (a) wind velocity vectors and (b) selected mean wind vectors with standard error ellipses for April, 1997.

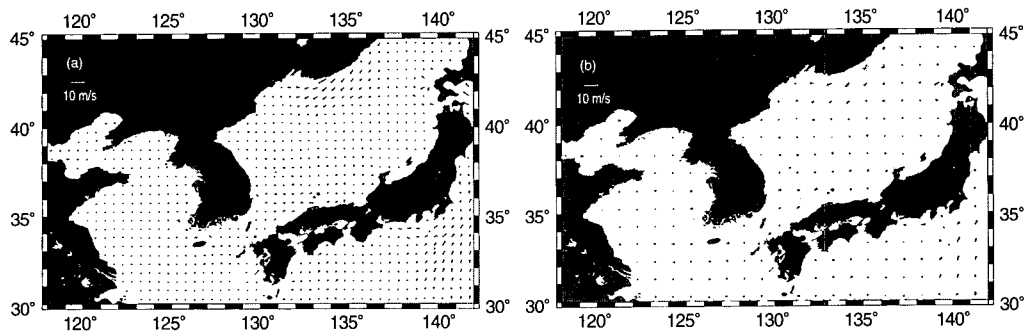


Fig. 7. Monthly mean (a) wind velocity vectors and (b) selected mean wind vectors with standard error ellipses for May, 1997.

그림 6은 4월평균 해상풍과 표준오차를 나타낸다. 우리나라 근해 전 해상에 월평균 바람은 1 m/s 이하였으며 남해를 제외하고 황해와 동해에서는 표준오차도 그다지 크지 않았고 남해와 일본 쪽 동해에서 표준오차가 크게 나타났다. 5월에는(그림 7) 러시아 연안에 해안선을 따라 남쪽으로 부는 해안풍이 발달하였고 표준오차도 해안과 평행한 것으로 보아 이 해역의 해안풍은 해안선에 의해 형성되는 것으로 보인다. 이 해안풍은 해안에서 바람에 의한 역크만수송(Ekman transport)에 의해 해수의 침강을 일으켜 봄철 동해 중층수 형성의 요인이 될 것으로 예상된다. 그러나 이 때 침강되는 해수는 겨울철 결빙된 해빙의 용해로 염분도가 낮아(Lee *et al.*, 1998) 겨울철에 형성되는 중층수와 해수 특성이 달라 이에 대한 더욱 상세한 연구가 필요하다. 동해와 남해 그리고 황해 전 해상에 월평균 해상풍은 1 m/s였으며 동해 남부 해상에 2-3 m/s의 서풍이 발달하였다.



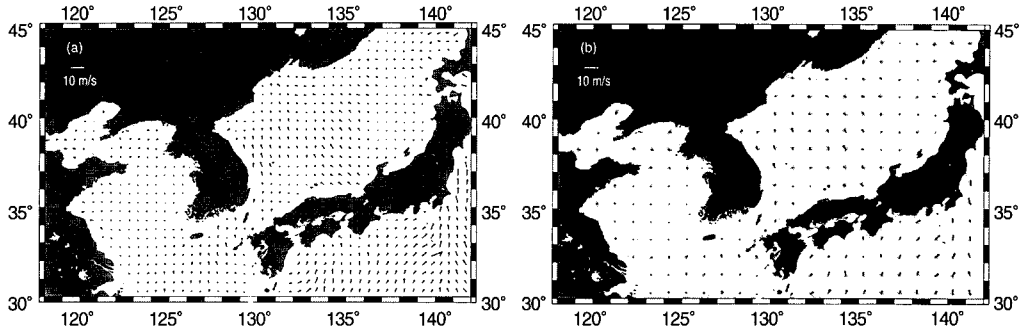


Fig. 8. Monthly mean (a) wind velocity vectors and (b) selected mean wind vectors with standard error ellipses for June, 1997.

그림 8에 나타난 6월의 해상풍은 장마철의 시작으로 장마전선이 형성되는 북위 30°근방의 해상 풍 표준오차가 커졌다. 남해에는 남풍이 발달하기 시작했으며 우리나라 동해 남부 연안에 남서풍이 불어 이 해역의 냉수대 형성에(이 등, 1998) 작용을 한다. 동해 북부 해역의 바람장은 남풍이 우세하고 연안에서 강한 바람이 동해 중앙부에서 약해지고 다시 일본 쪽에서 강해지는 국지적인 변화를 보인다. 러시아 연안의 해안을 따라 5월부터 부는 바람은 6월에는 약해졌으나 표준오차타원이 해안선을 따라 이루어지는 것으로 보아 6월에도 이 해역의 주요 바람장을 형성하는 것으로 보인다.

## 2) 바람 응력궤

그림 9-11은 1월부터 6월까지의 바람 응력궤(wind stress curl)를 보여준다. 1월에 황해는 음의 응력궤를 남해와 황해의 우리나라 연안은 양의 응력궤를 나타낸다. 가장 흥미있는 현상은 동해 북부 해상의 응력궤인데 동해 북부는 블라디보스톡 근해의 블라디보스톡 골바람의 영향으로 블라디보스톡에서 북쪽에 위치한 근해 해상은 강한 양의 응력궤 값을 그리고 북한 근처의 해상은 음의 응력궤 값을 보인다. 이 응력궤 값은 강 등(1994)과 나 등(1992)이 계산한 응력궤 값과 비교하면 거의 5배 이상 크게 차이가 나는 값이어서 지형의 영향을 받는 해상풍을 추정할 때 격자 간격에 따라 응력궤 값은 큰 차이가 난다는 것을 단적으로 보여준다. 물론 본 연구는 1997년 한해의 월평균 바람응력으로부터 계산한 값이기는 하나 나 등(1992)의 10년동안의 1월평균값과는 차이가 너무 커 격자점 간 해상풍 변화량에 의해 계산되는 응력궤 값 추정은 실제 측정값과는 차이가 클 것이라고 본다. 나 등(1992)에 의한 1월 응력궤의 형태도 NSCAT에 의한 응력궤 형태와도 크게 차이가 나는데 그들에 의한 응력궤 형태는 동해에서 원산만 근해와 러시아 연안에 중심을 둔 강한( $4-5 \times 10^{-8} \text{ dyn/cm}^3$ ) 양의 응력궤와 혼슈섬 연안에 중심을 둔 약한( $-1 \times 10^{-8} \text{ dyn/cm}^3$ ) 음의 응력궤 형태인데 본 연구에 의한 응력궤 형태는 혼슈섬 연안에는 주로 양의 응력궤 값을 보이고 북한연안에

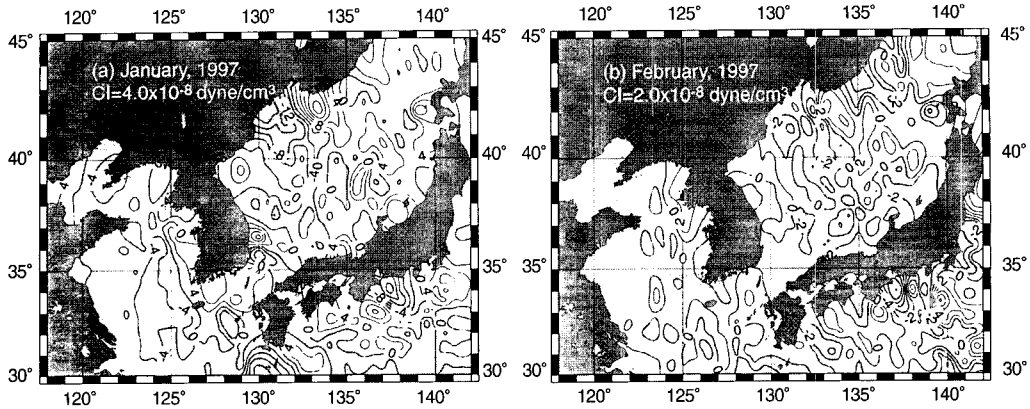


Fig. 9. Distribution of wind stress curl in (a) January and (b) February.

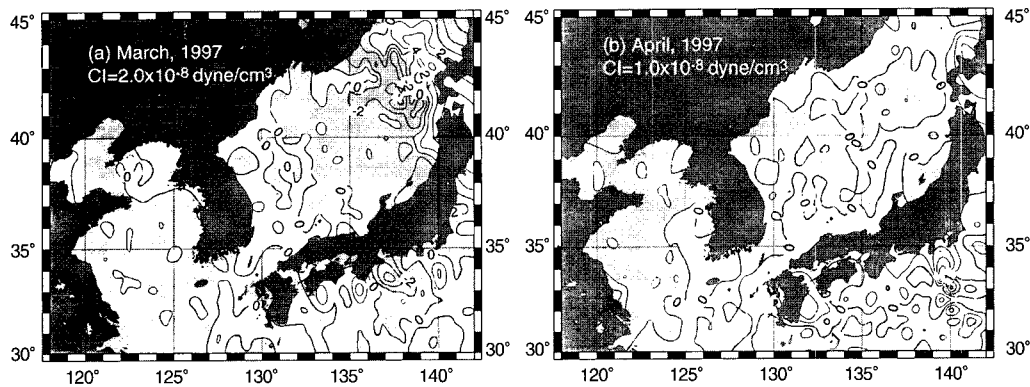


Fig. 10. Distribution of wind stress curl in (a) March and (b) April.

중심을 둔 강한( $-12 \times 10^{-8}$  dyn/cm<sup>3</sup>) 음의 응력궤 그리고 러시아 연안에 중심을 둔 강한( $20 \times 10^{-8}$  dyn/cm<sup>3</sup>) 양의 응력궤 형태를 보여 동해 북부 해상의 응력궤는 블라디보스톡 골바람의 영향이 절대적인 것을 보인다. 원산만 근해에 중심을 둔 양의 응력궤 값은 본 연구에서 계산된 양의 응력궤 이 나 등(1992)에 의해 계산된 값의 2 배였으며 미치는 범위는 훨씬 작았다. 반면 강 등(1994)에 의한 1월 응력궤 형태를 보면, 북한 연안의 음의 응력궤 형태는 본 연구와 같으나 미치는 범위와 응력궤 값에는 차이를 보였다. 러시아 연안의 양의 응력궤 형태는 응력궤의 중심이 본 연구에서는  $132^{\circ}$ - $135^{\circ}$  사이였는데 나 등(1992)에 의해 계산된 응력궤는 중심이  $135^{\circ}$  동쪽에 위치해 중심 위치의 차이를 보였으며 강 등(1994)의 결과에는 이러한 양의 응력궤는 중심이 연안에서 떨어진 동해

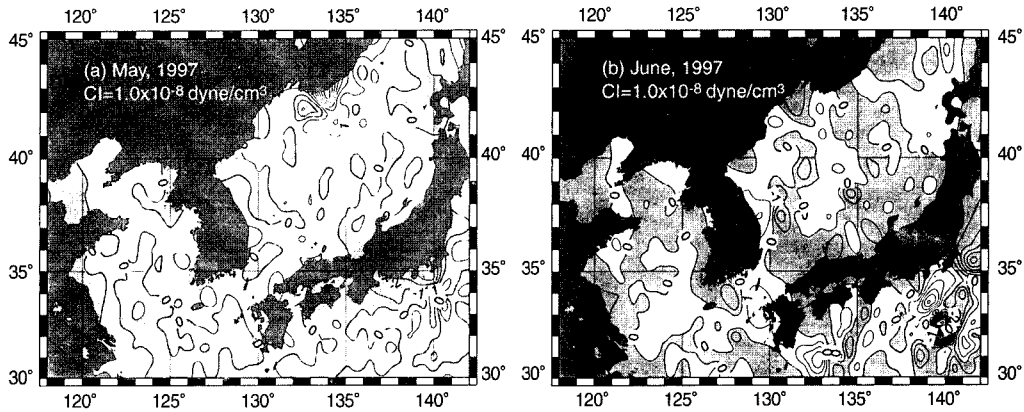


Fig. 11. Distribution of wind stress curl in (a) May and (b) June.

내해에 위치하고 값도 작아 본 연구와 차이를 보였다. 황해와 남해는 동해와 달리 나 등(1992)의 결과와 큰 차이는 없었으나 강 등(1994)은 서해 연안의 양의 응력궤 값이 나타나지 않아 본 연구와의 차이를 보여주었다. 본 연구에 나타난 특이한 결과 중 하나는 우리나라 쪽 동해 남부 해상에 나타난 음-양 응력궤가 짝 형태로 나타난 것으로 다른 연구에는 전혀 나타나지 않은 작은 스케일의 응력궤 형태이다. 이것은 포항 근해에서 대구 포항간 계곡의 영향으로 강한 서풍이 불고, 포항 이남의 연안에서는 경상남도와 전라남북도에 걸쳐있는 넓은 산맥이 강원도 근해보다 풍향 풍속에 더 큰 영향을 준 결과로 본다.

2월(그림 9-b)은 동해에서는 아직 겨울철 북서계절풍의 영향으로 1월과 비슷한 형태나 값은 작아진 응력궤 형태가 보인다. 서해의 북한연안에서 양의 응력궤 값을 보이는데 이것은 나 등(1992)의 결과와도 상이하나 나 등(1992)의 서해 남부의 양의 응력궤는 본 연구에서는 나타나지 않았다. 3월(그림 10-a)에는 러시아와 홋카이도 섬 사이에 형성되는 강한 서풍대의 영향으로 이 해역에서 음 양 응력궤가 짝 형태로 나타났으며 이것은 다른 연구에서는 나타나지 않은 형태이다. 5월(그림 11-a)에는 시베리아 연안의 해안을 따라 부는 해안풍 때문에 강한 양의 응력궤가 시베리아 연안에 나타났고 우리나라 근해에서는 대체적으로 양의 응력궤 값을 보였다. 6월(그림 11-b)은 바람이 남풍으로 바뀌어 동해 중부상에서 동해 중부의 남풍이 우리나라와 일본 연안보다 약해지는 국지적 변화의 영향으로 작은 스케일의 응력궤 값 변화를 보인다.

#### 4. 동해에서의 바람에 의한 해수유동

동해는 크기는 작으나 태평양이나 대서양과 같은 대양의 특성을 가지기도 하여 강한 북서풍이 우세한 1월의 해상풍을 이용하여 해수유동을 유출하여 보았다. Sverdrup 관계식은

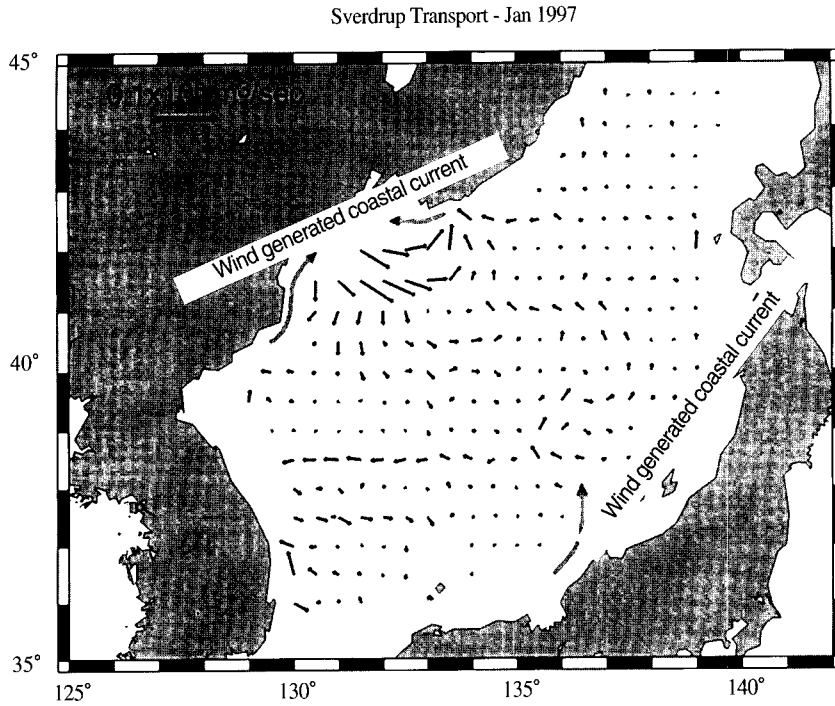


Fig. 12. Sverdrup transport of the East Sea in January, 1997.

$$\beta \cdot M_y = \nabla \times \tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

이때 여기서  $\beta$ 는 코리올리스 상수의 위도에 따른 변화량,  $M_y$ 는 해수의 남북 방향 수송량 그리고  $\nabla \times \tau$ 는 바람응력꺾이다. 동서방향 해수수송량은 연속방정식,

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

의 관계식을 이용하여 적분식,

$$M_x = \int_{x=\text{일본해안}}^x \left(-\frac{\partial M_y}{\partial y}\right) dx \quad \dots\dots\dots (3)$$

으로 구한다. 적분은 일본 해안에서부터 시작하였는데 그 이유는 겨울철에는 일본해안에 일본 해안을 따라 흐르는 연안류가 관측되지 않아(Lee et al, 1997) 일본 해안에서는  $\partial M_y / \partial y \approx 0$  이기 때문이다. 그림 12는 이렇게 계산한 스버드립 수송량을 나타낸 것인데 동해의 음의 응력꺾 값을 가

지는 북한 연안에서 바람이 연안 해역에서 외해로 빠져나가는 큰 해수의 흐름을 유발한다. 양의 응력궤 값을 가지는 러시아 연안에서는 외해에서 해안쪽으로 바람이 해수를 이동시켜 북한 연안은 해안선을 따라 북쪽으로 흐르는 연안해류를 만들 수 있고 시베리아 연안은 남쪽으로 흐르는 연안해류를 바람이 만들 수 있다. 양(1996)에 의한 위성추적 뜰개의 궤적을 보면 10월 초에 북한해류가 남향류에서 북향류로 북한 연안에서 바뀌는 것을 볼 수 있는데 북한해류의 방향이 바뀌는 원인이 겨울철 블라디보스톡 골바람에 의한 바람응력궤일 가능성이 있다고 본다. 일본의 노토 반도 근해에서 동해 내부 쪽으로 흐르는 해수 유동을 볼 수 있는데 이것은 대한해협 동수도로 유입되어 혼슈 섬 연안을 따라 흐르는 대마난류의 흐름이 겨울철에는 바람에 의해 생성된 스버드럽 수송에 의해 차단되는 영향을 대마난류에 준다고 본다. 대마난류는 여름철에는 대한해협으로 유입된 후 혼슈 섬을 따라 흐르다가 수가루 해협으로 빠져나가나 여름철을 제외한 계절에는 동해내부로 유입되어 동해 내부에서 큰 크기의 와류를 형성한다는 것이 Lee *et al*(1997)에 의한 위성추적 뜰개 연구결과로 밝혀졌다.

해수의 엑크만층(Ekman Layer)의 경계에서의 바람에 의한 수직방향 성분의 속도  $w$ 는

$$w = \frac{1}{\rho f} \nabla \times \tau \dots\dots\dots (4)$$

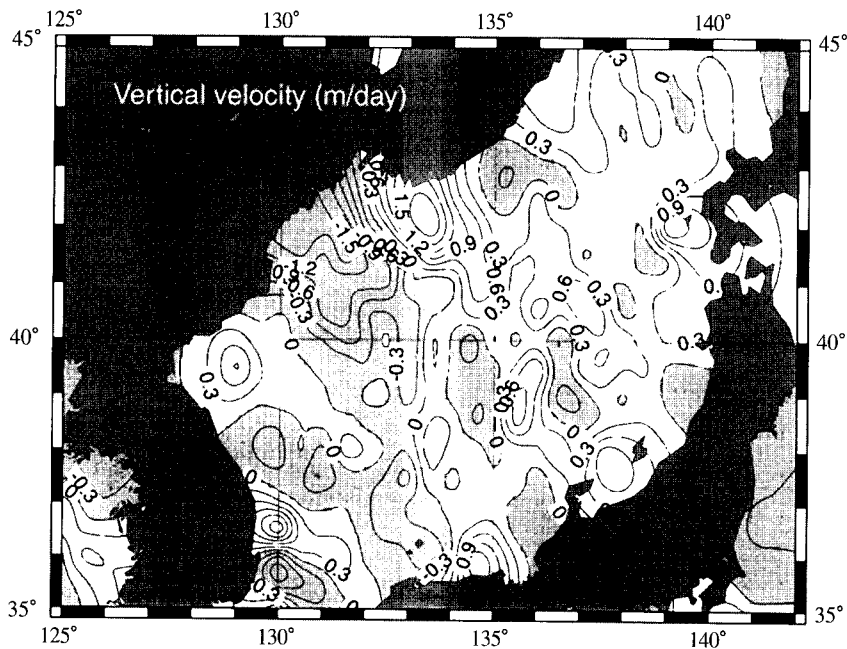


Fig. 13. Calculated vertical velocity(m/day) in the East Sea in January, 1997.

이다. 위 식에 의해 계산된 1월의 수직성분 해수 유동 속도는 그림 13에 나타내었는데 블라디보스톡과 북한 연안에서 강한 해수 침강을 보여준다. 동해에서는 겨울철 동해북부 해상에서 찬 해수가 침강하여 동해 중층수를 형성한다고 알려져 왔는데 바람에 의한 표층수 침강속도는 최고 1.5 m/day로 계산되었으며 이는 1월 한달동안 약 45 m 정도 해수가 침강하는 것을 의미한다. 이 블라디보스톡에서 북한 연안에 이르는 해역에서는 음의 바람응력결에 의해 해수가 침강하고(겨울동안 약 100 m), 강한 바람에 의해 표층해수가 깊은 바다의 해수와 혼합되며, 차가운 시베리아 고기압권의 영향으로 해수온도가  $-1^{\circ}\text{C}$  이하로 떨어지며 이로 인해 해수의 밀도가 높아져 해수 침강이 일어나는 등 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 동해 중층수 형성이 활발하게 이루어지는 것으로 보인다

## 5. 결론 및 토의

비록 ADEOS의 전원장치 고장으로 NSCAT에 의한 자료 수집이 6월로 끝났지만 1997년 1월부터 6월까지의 NSCAT에 의해 수집된 해상풍 자료를 처리하여 우리나라 근해의 해상풍을 연구하였다. 겨울에는 북서풍이 전 해상에 우세하고 러시아의 우수리 강 계곡을 통해 블라디보스톡 연안으로 부는 골바람이 동해 해상을 지배하였고 봄철에는 우리나라 근해의 해상풍은 아주 약해지나 남해에서만 3월에 3 - 4 m/s의 북풍이 불어 특이하게 나타났다. 4월과 5월에 우리나라 근해 전 해상의 해상풍은 1 m/s 이하였으며, 6월 장마철에 접어들면서 남풍이나 남서풍으로 바람의 방향이 바뀌면서 바람이 강하여졌다.

바람 응력결 값은 나 등(1992)이나 강 등(1994)과는 겨울철에 아주 다르게 나타났으며 1월에 최대로 약 5배의 차이가 생겨 해안 지형의 영향이 나타나지 않는 기압도를 이용한 해상풍 응력결 값 계산의 한계를 보여주었다. 1월에 블라디보스톡 연안에서 강한 음의 응력결과 시베리아 연안의 양의 응력결이 쌍의 형태로 이루어진 것이 보이며 일본연안은 양의 응력결 값을 보였다. 5월에는 시베리아 해안선을 따라 연안풍이 형성되었으며 이 바람으로 인해 양의 응력결이 형성되었다. 1월의 응력결을 이용한 스버드립 해수 수송은 북한한류를 10월 초에 남향류에서 북향류로 바꾸는 요인이 되는 것으로 보이며 일본의 노토 반도 근해에서는 혼슈섬을 따라 연안류 형태로 흐르는 대마난류를 방해하여 대마난류가 동해 내부로 흘러 들어가게 만드는 것으로 보인다. 수직방향의 해수 유동은 1월에 블라디보스톡 연해에서 최대 월 45 m 정도 해수를 침강시키는 것으로 보이며 겨울 3개월동안 약 100 m 정도의 해수 침강 효과를 보인다고 추정된다. 강한 북서풍에 의한 해수 혼합, 해수 냉각에 의한 밀도 증가 그리고 바람에 의한 침강효과가 복합적으로 작용하여 이 블라디보스톡 남쪽 연해가 동해 중층수 형성의 주 해역이라고 여겨진다.

NSCAT에 의한 직접적인 해상풍 관측은 우리나라 근해에서는 해상풍 직접 관측으로는 처음이며 본 연구에 의해 처음으로 밝혀진 것들은 다음과 같다. 1) 1월평균 12 m/s가 넘는 블라디보스톡

골바람이 동해 해상을 덮으며 블라디보스톡 연안에서 해수 침강의 여러 여건이 형성되어 동해 중층수 형성의 주요 해역이 된다. 2) 우리나라 연안에서의 해상풍은 우리나라 지형의 영향을 받아 개마고원 근해에서는 풍속이 약해지고 방향이 북풍으로 바뀌었으며 태백산맥을 넘어갈 때는 남북 방향 속도성분이 약 2.5 m/s 정도 줄어든 경향을 보인다. 포항 근해에서는 골바람으로 인해 산맥의 영향을 받는 강원도 근해나 경상남도 근해보다 바람이 강하고 이로 인해 남한 연안에 음 양의 응력결이 짝을 이루는 형태를 만든다. 3) 3월에는 남해에서 월평균 3-4 m/s 정도의 다른 해역보다 강한 북풍이 불며 러시아와 홋카이도섬 사이의 해상에서 강한 서풍대가 형성된다. 4) 5월에는 시베리아 해안선을 따라 북동풍인 해안풍이 형성되며 큰 양의 응력결 값을 만든다.

산란측정기에 의한 해상풍 관측은 위성을 이용한 원격탐사로만 관측이 가능한 대표적인 예이며, NSCAT에 의해 처음으로 우리 나라 근해에서 고밀도 관측이 이루어졌다. 불행하게도 NSCAT에 의한 해상풍 관측이 중단되었으나 유럽 위성국에 의해 관측되고 있는 ERS-1에 의해서도 현재 해상풍 관측이 이루어지고 있어 ERS-1에 의한 해상풍 자료가 입수되는 대로 연구할 예정이다. 또한 미국에 의해 QuickSCAT이라고 명명된 산란측정기가 1998년 11월 발사되는 위성에 탑재될 예정이고, 동해에서는 풍향 풍속 측정이 가능한 위성추적 뜰개를 1999년부터 3년에 걸쳐 50여 개 띄울 예정이어서 앞으로 몇 해 동안 우리 나라 근해의 해상풍 연구가 활발해 질 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- 강인식, 김맹기, 심태보, 1994. 한반도주위 해양에서의 해면 열수지와 응력의 계절변화. 한국해양학회지, 29(4): 325-339.
- 나정열, 서장원, 한상규, 1992. 한국근해의 월평균 해상풍. 한국해양학회지, 27(1): 1-10.
- 양준용, 1996. 인공위성 추적 부표로 추정된 동해 북부 해역의 해류 구조. 서울대학교, 석사논문.
- 이동규, 권재일, 한상복, 1998. 감포-울기 연안해역에서 발생하는 냉수대 현상과 해상풍과의 관계. 한국수산학회지, 31(3): 359-371
- Atlas, R., R.Hoffman, S.Bloom, J.Jusem and J.Ardizzone.1996. A Multi-year Global Surface Wind Velocity Data Set Using SSM/I Wind Observations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(5): 869-882.
- Batchelor, G. K., 1967. An introduction to fluid dynamics. Cambridge University Press, Cambridge, U. K., pp 573-574.
- Ebuchi, N., 1997. Observation of marine surface winds by ADEOS/NSCAT. Proceedings of international symposium on remote sensing, November 5-7, 1997, Pusan, Korea.
- Graf, J., C. Sasaki, C. Winn, W. T. Liu, W. Tsai, M. Freilich, and D. Long, 1996. NASA Scatterometer Experiment. 47<sup>th</sup> International Astronautical Congress, Oct 7-11, 1996, Beijing, China.
- Lee, D.-K., J. C. Lee, S. R. Lee and H.-J. Lie, 1997. A circulation stud of the East Sea using satellite tracked

drifters. Part I: Thushima Warm Current. *J. Korean Fish. Soc.*, **30**(6): 1021-1032.

Naderi, F. M., M. H. Freilich, and D. G. Long, 1991. Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean—An overview of the NSCAT Scatterometer system. *Proceedings of the IEEE*, **79**, 6, June 1991.