

한국근해의 월평균 해상풍

나정열 · 서장원 · 한상규
한양대학교 지구해양학과

Monthly-mean sea surface winds over the adjacent seas of the Korea Peninsular

JUNG-YUL NA, JANG-WON SEO AND SANG-KYU HAN
Department of Earth & Marine Sciences, Han Yang University

10년간(1978~1987) 매일 2회 발행된 천기도를 근거로 Cardone Model을 이용한 한국근해에서의 해상풍을 구하고 이를 근거로 월평균 wind-stress와 wind-stress curl의 분포를 계산하였다. 계산된 해상풍과 실측자료와의 비교를 위해 일본기상청 관측부표(Buoy 6) 자료와 비교한 결과 풍향 및 풍속이 매우 일치함을 보였다. 특히 계산된 wind-stress의 평균값은 기존의 값들에 비해서 동해의 경우 약 2배 정도로 나타나고 있다.

Wind-stress curl의 분포특성은 서해의 경우는 $120^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 를 중심으로 동·서로 부호가 서로 반대인 값을 가지며 특히 중국연안은 여름철을 제외한 전월에 음의 값을 나타낸다. 한편 동해(일본해)는 북부해역의 양의 값과 남부해역의 음의 값으로 그 특징을 보이나 북부해역의 경우 동해의 최북단 및 원산만 부근에서 최대의 양의 값이 나타나고 있다.

The sea surface winds are computed over the adjacent seas of Korea from the twice-daily weather maps for the ten-year period 1978-1987 by using the Cardone model. Monthly mean wind-stress and wind-stress curl are also calculated and given as maps. The computed surface winds are compared with observed one at the JMA (Japan Meteorological Agency) Buoy.6 and the results show a good consistency in speed and direction. In particular, the magnitude of mean wind-stress is turned out to be twice bigger than the previous results over the sea of Japan. Monthly distributions of wind-stress curl reveal that over the yellow sea by the longitudinal boundary of $120^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$, the area of negative curl exists over the western part of the sea except summer season, while the positive sign of the curl prevails over the eastern part of the Yellow Sea. However, over the Sea of Japan, with two positive maxima at the northern part and near the Wonsan Bay, the positive curl in the northern half and the negative curl in the southern of the sea characterize the monthly mean distribution of the wind-stress curl.

서 론

해양에서의 해상풍 자료는 해수 순환 및 해수의 열구조 파악에 필수적인 자료이나 현장에서의 시·공간적으로 연속성 있는 자료의 획득이 거의 불가능하기 때문에 연안 관측 혹은 선상관측 자료에

의존하였고 따라서 해상풍 자료로서의 정확성을 상실하였다. 한편 해상 관측자료가 빈약 내지는 전무한 상황에서 해상풍을 추정하는 방법으로 일기도의 해면기압과 해상풍과의 관계를 이용하는 방법과 해양 기상 모델에 의한 수치계산법을 사용해왔다. 특히 후자인 경우 Cardone Model(1969)이 대표적이며

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구과제인 "북한한류와 동해순환의 기작"의 일부로서 수행되었음.

Ekman layer와 surface layer의 역학으로부터 해상풍 계산을 할 수 있는 특징이 있다. 특히 한국근해의 해상풍 추정 및 이를 이용한 파랑예보 시도가 오래전부터 시도되어왔으며(해양연구소, 1981, 1984~87) wind stress 및 curl의 분포파악을 위해 월 평균 해면기압 및 관측바람자료를 이용한 바도 있다(Kim & Choi, 1986). 상기 시도에서 생산된 해상풍자료는 시간적인 연속성이 없을 뿐 아니라 단기간(1주일 이내) 혹은 기존의 월 평균자료에 근거한 계산내지는 추정임으로 해양-대기 상호작용을 염두에 둔 효율성은 매우 낮다고 하겠다. 이러한 효율성의 재고는 대상해역에서의 시·공간적 연속성 및 격자간격에 구애받지 않는 자료의 확보가 선결조건일 것이다. 따라서 본 논문에서는 일본 기상청(JMA, Japan Meteorological Agency) 발행 천기도(1일 2장)를 근거로 소위 Cardone Model(1969)을 이용한 10년(1978~1987) 동안의 1일 2회의 해상풍(해면위 10 m)을 계산하여 이를 근거로 시·공간적 월별 wind-stress 및 wind-stress curl의 분포를 파악하였다.

해상풍 계산 및 자료 분석

해상풍을 계산하기 위한 Cardone model의 입력 자료는 격자점별의 기압, 기온, 수온 등이며 이를 이용하여 지균풍, 온도풍 및 온도풍과 지균풍이 이루는 각 등을 구하여 해상 10 m 높이에서의 바람을 추정한다. 이때 해면 기압과 해면상의 대기 온도는 1일 2장(09 h, 21 h)의 천기도(1978~1987)로부터 구한 다음 Barnse(1964)의 객관 분석법을 이용하여 등거리 격자점 간격(557km 혹은 127 km)으로 계산하고 10일 평균 해면수온자료(Maizuru Marine Observatory) 역시 같은 격자점 간격으로 계산한다. 이 세가지를 입력 자료로 Cardone model을 이용하여 등거리 격자점에서의 해상풍을 계산한다.

해상풍 계산의 대상 해역 범위는 북위 30°, 동경 120°에서 북위 50°, 동경 140°까지이며 wind-stress 계산에서는 bulk formula를 사용하였다.

$$\tau = \rho C_D U |U| \quad \begin{array}{l} \tau: \text{wind stress} \\ \rho: \text{air density} \\ C_D: \text{the drag coefficient} \end{array}$$

이때 바람응력 계수(C_D)는 Garratt(1977)의 식을 이용하였다.

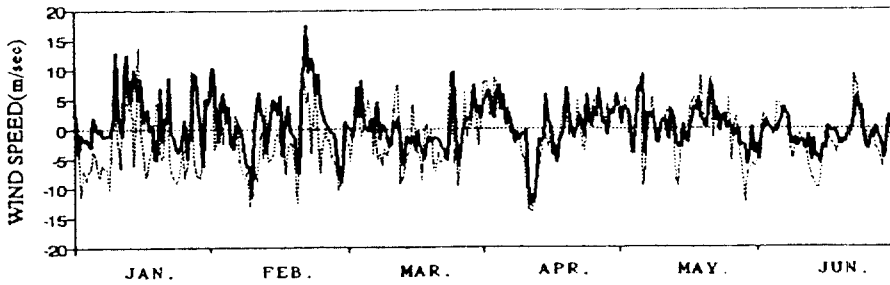
즉 $C_D = (0.75 + 0.067 |U|) \times 10^{-3}$, U : wind speed in m/sec. wind-stress curl은 wind-stress 분포를 근거로 각 격자점에서 Taylor series의 4차 항까지를 고려하여 계산한 다음 격자점 사이에서는 inverse distance cubed weighted averaging 방법으로 interpolation 하였다.

월 평균 해상풍 분포의 특성

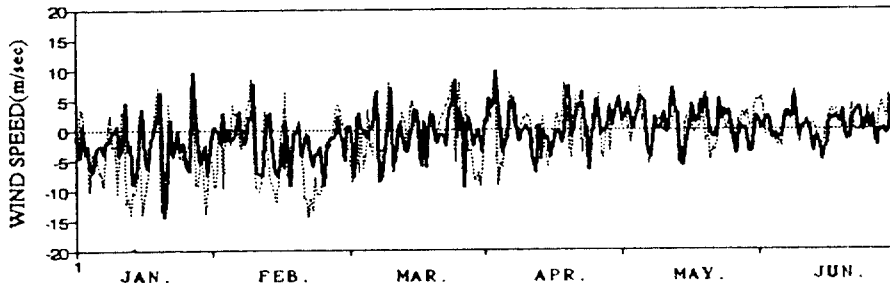
Cardone model에 의해 계산된 해상풍의 신빙성을 검토하기 위해서 JMA ODBS(Ocean Data Buoy Station) Buoy 6(37° 55' N, 134° 32'E)에서 관측한 3시간 간격의 1년간(1985)의 바람과 그 Buoy와 가장 근접한 4개의 격자점을 평균해서 12시간 간격으로 계산된 같은 기간의 바람을 비교하였다(Fig. 1). 그 결과 겨울철(1~2월)에는 Buoy 6의 바람의 세기가 계산된 바람의 세기보다 약간 크게 나타나지만(Fig. 1(b)) 전반적인 두 바람의 풍향과 풍속은 일치한다고 볼 수 있다. 특히 남풍이나 여름철에는 잘 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 1). 한반도 주변 해역에서의 월 평균 wind-stress 분포(Fig. 2)의 특징은 열대성 저기압권의 영향을 자주 받는 서남해역을 제외한 서해 및 동해(일본해도 포함)에서는 4월부터 7월까지 0.5 dyne/cm² 이하로 6월에서 7월까지의 남풍이 우세하다.

한편 동해에서는 10월부터 동해 북부상에 1 dyne/cm² 이상의 값이 나타나기 시작하여 12월에서 2월까지 동해 전해역이 1 dyne/cm² 이상을 갖고 특히 1월에는 동해 북부상에서 2.2 dyne/cm²의 최대치를 나타낸다. 서해에서는 12월에서 2월까지 한반도 서해 연안에는 1 dyne/cm² 이상의 북서풍이 우세하지만 중국 연안에서는 0.4 dyne/cm²로 미약하다. 6월부터 풍향이 남풍으로 전향되어 7월까지 0.3 dyne/cm² 이하이다. 7월부터 양자강 주변 해역에서는 열대성 저기압의 영향을 받아 9월까지 0.6~1.2 dyne/cm²의 값이 나타난다.

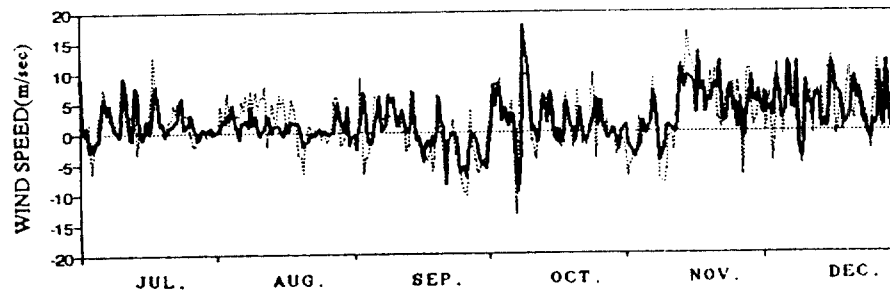
동해에서 기존에 계산된 평균 wind-stress 분포는 Kim과 Choi(1986)의 경우 1월에 약 1 dyne/cm² 정도이며 Kutsuwada(1982)의 경우는 1월에 1.2 dyne/cm² 정도가 가장 높은 값이며 4월에서 10월까지는 0.2 dyne/cm² 이하로 본 연구에서 계산된 wind-stress에 비해 그 크기가 평균적으로 약 반



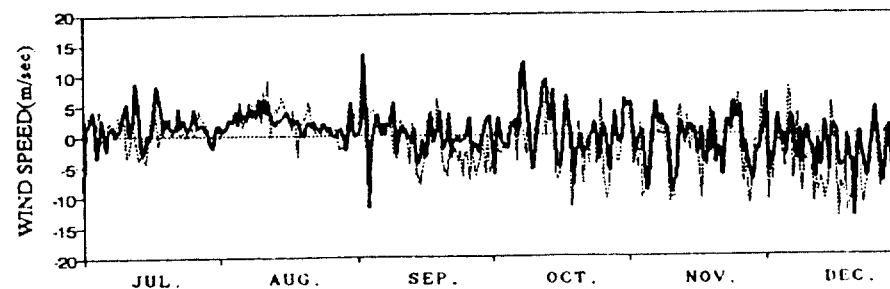
(a) Eastward components (January to June)



(b) Northward components (January to June)



(c) Eastward components (July to December)



(d) Northward components (July to December)

Fig. 1. Comparison of east and northward components of wind speed from calculation (solid line) and observation at JMA Buoy. 6 (dashed line) for one year period of 1985. (a) Eastward components (January to June), (b) Northward components (January to June), (c) Eastward components (July to December), (d) Northward components (July to December).

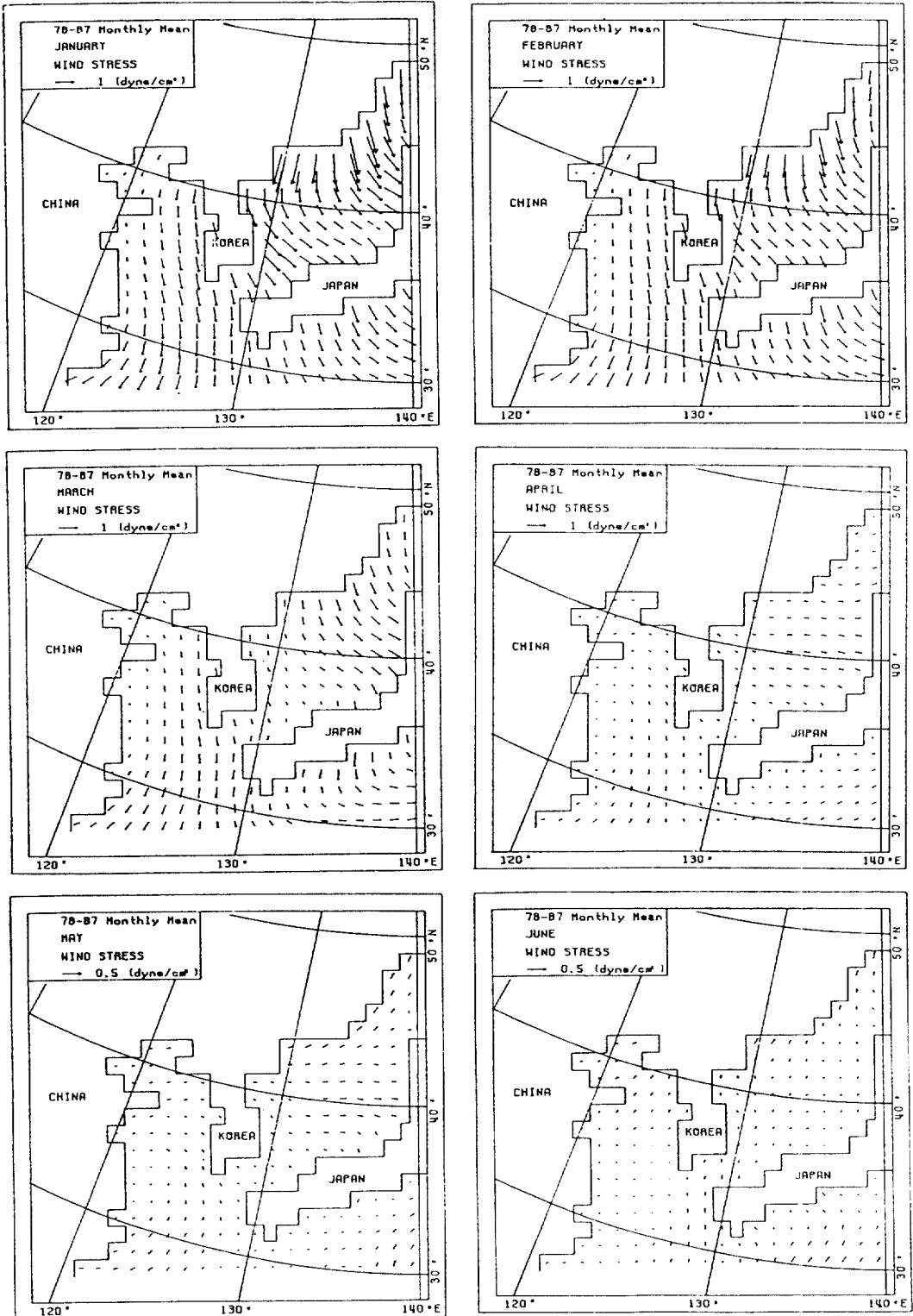


Fig. 2. Distribution of monthly mean wind-stress (dyne/cm²).

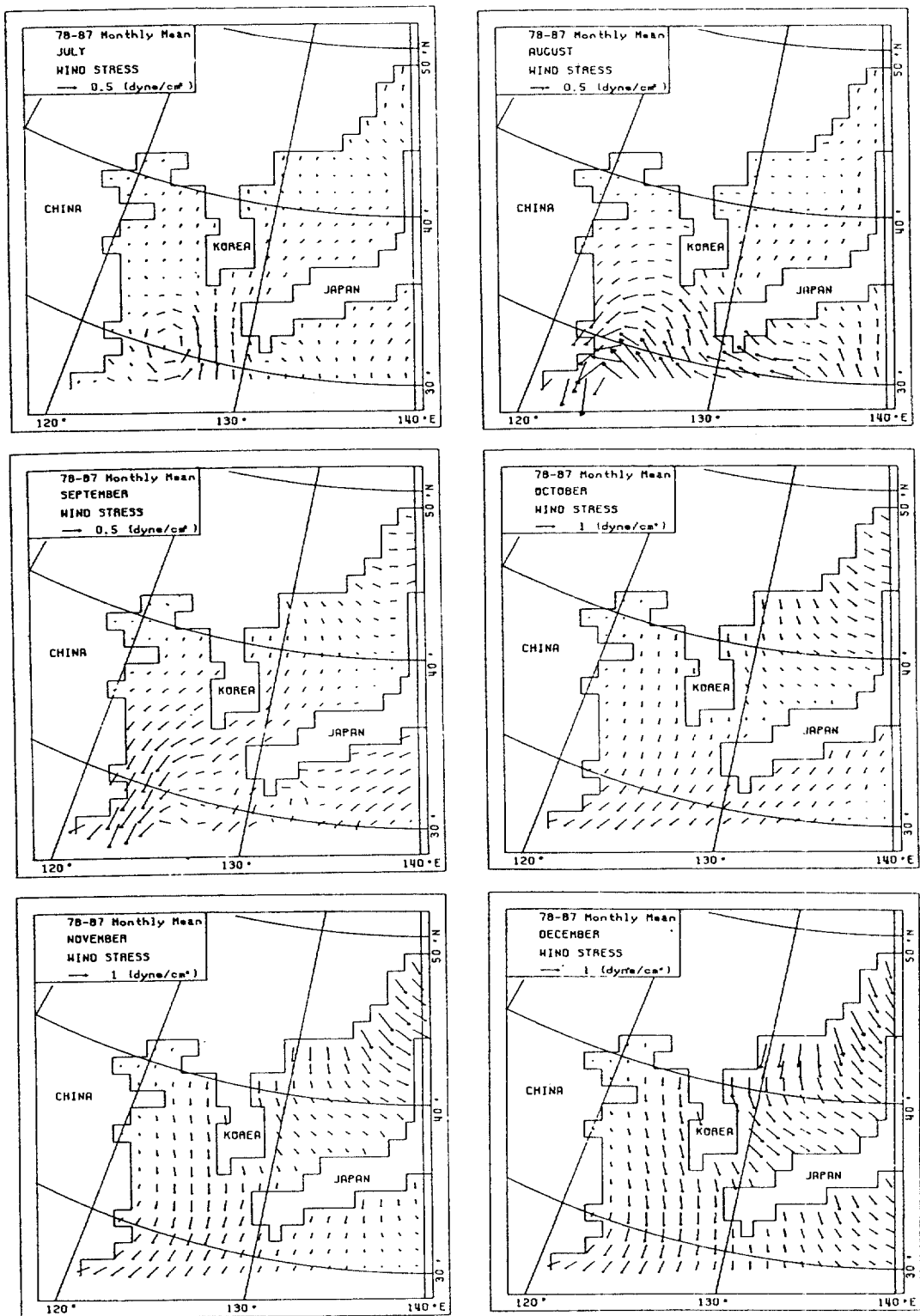


Fig. 2. continued.

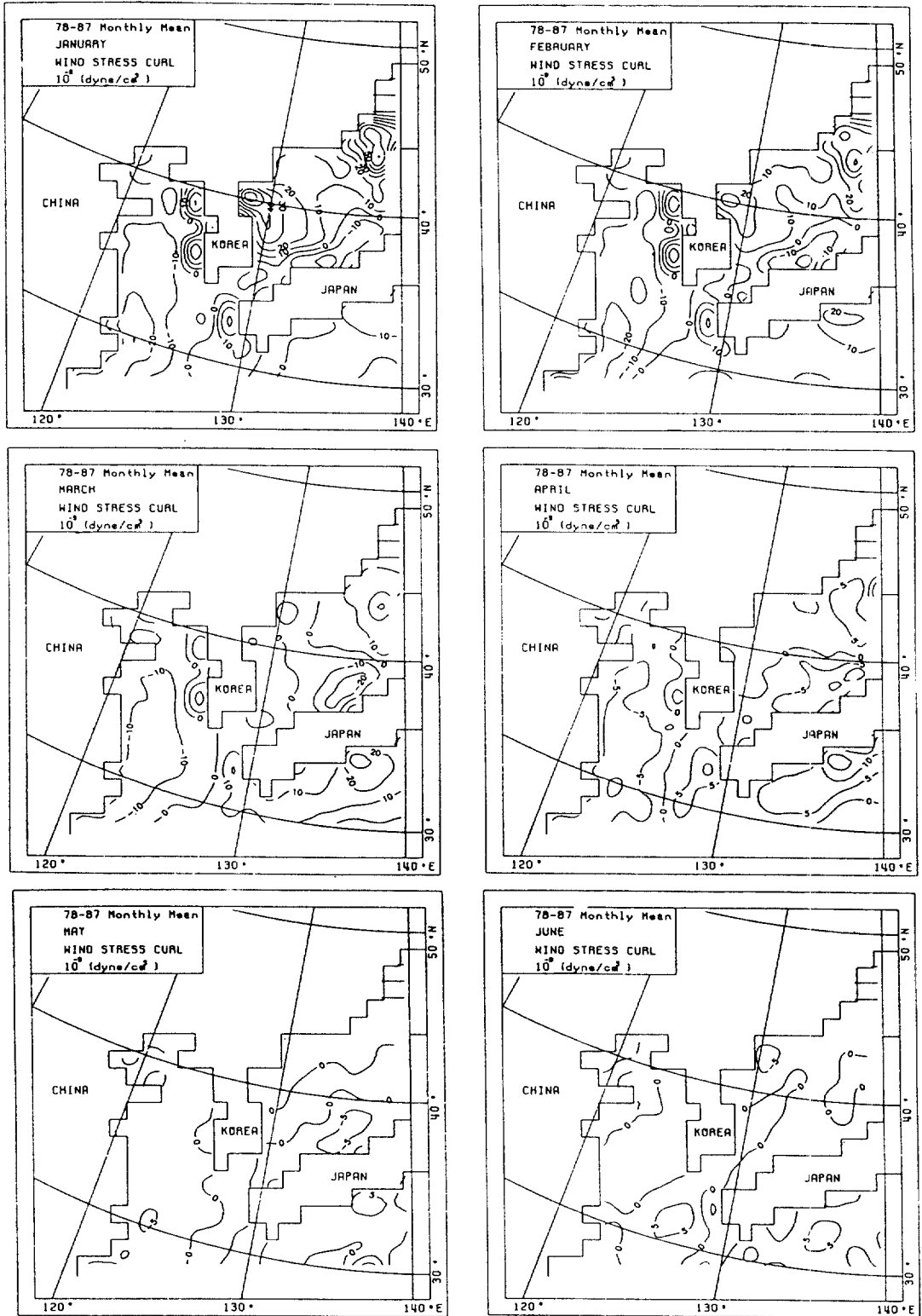


Fig. 3. Isoleths of monthly mean wind-stress curl (10^{-9} dyne/cm³).

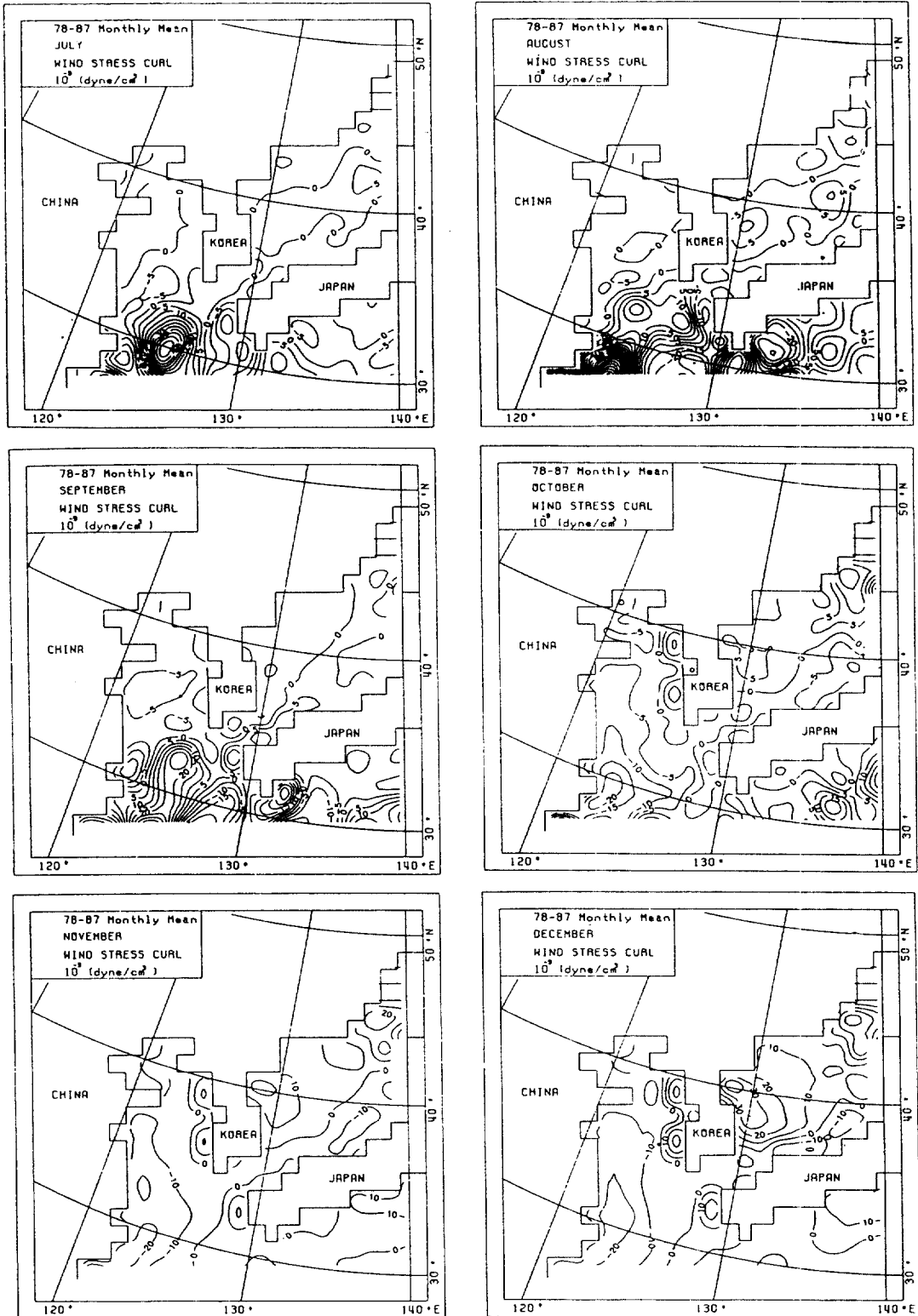


Fig. 3. continued.

정도임을 보여주고 있다. 이는 C_D 값의 차이보다는 해면기압 분포에 의해 계산된 지균풍 값이 크다는 것을 의미한다.

서해에서의 일반적인 wind-stress의 분포는 여름철에 남부해역이 북부해역보다 훨씬 큰 값을 갖는 특징을 보이고 있다. 특히 동해의 경우 여름철에 남동계열의 풍향이 9월에는 전격적으로 북서계열로 변환하면서 stress의 크기가 증가하는데 동해 북부해역의 1 dyne/cm^2 크기의 stress가 점차 동해 전해역에 걸쳐 나타나는 시기는 2월까지 지속된다.

따라서 서해는 동-서로 동해는 남-북으로 풍계의 월별 변화가 존재함을 알 수 있다. 여름철의 동지나해의 wind-stress 분포에는 열대성 저기압이 통과하는 현상을 잘 나타나고 있으며 8월에 최대치를 보이고 있다. 일반적으로 알려진 한국근해의 남동-북서 풍계의 계절변화는 매우 뚜렷하나 서해보다 동해의 wind-stress 크기가 훨씬 큼도 특이한 사항이라 하겠다. 한편 wind-stress curl의 월 평균 분포(Fig. 3)는 wind-stress 값의 월 변화와 밀접한 관계가 있음을 보여주나 겨울철 curl 값의 공간적인 변화 및 시간적인 지속성이 특이하다. 우선 서해의 경우 한국연안을 제외한 전 해역에서 음의 curl 값이 년중 우세하게 나타나고 있으며 그 경계는 대략 125°E 를 경계로 남북으로 위치하고 있다. 또한 한국연안에서 고립되어 나타나고 있는 강한 양의 curl이 35°N 과 39°N 부근에 존재함도 특이하다. 이 부근 해역에서 해상풍 중 남북성분이 위도에 따라 변하는 즉 저위도로 갈수록 증가하는 현상이 국지적 curl 값의 증가를 야기시키고 있음을 보여주고 있는 것이다. 7월에서 10월까지 지속적으로 나타나고 있는 열대성 저기압 혹은 태풍의 영향은 음의 curl 영역이 동지나해 및 일본 남서해역에 분포하는 양상을 보이고 있다. 본 연구에서 취급한 기간 내의 대상해역에서의 태풍발생 빈도수는 약 800여회에 달하며 이중 8월이 전체의 33%에 달하는 최대 빈도수를 갖고 있고 6월은 5% 내외인 것으로 관측되었다. 한편 동해에서의 curl 값의 분포는 시·공간적으로 특이한 현상을 보이고 있다. 즉 12월에서 2월까지의 겨울철에는 일본 북부연안에 음의 curl이 국지적으로 존재하고 있고 그외의 전해역이 양의 curl의 영향을 받고 있다.

더구나 동해북부(약 45°N 부근) 및 원산만 부근에

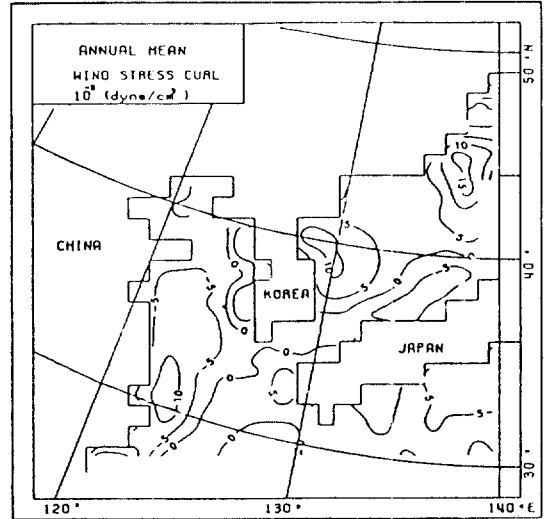


Fig. 4. Isopleths of annual mean wind-stress curl for 10 years(1978-1987) ($10^{-9} \text{ dyne/cm}^2$).

매우 큰 curl 값이 나타나고 있음은 흥미있는 분포이며 최대치는 항시 북부해역에 존재함은 이곳을 통과하는 저기압의 영향이라 사료된다.

이러한 남북방향의 curl의 분포는 여름철로 접어들면서 크기와 분포양상이 달라진다. 일본 북부연안에 존재하던 음의 curl은 그 범위가 점차 확대하여 4월경에는 동해 전해역이 북의 양의 curl과 남의 음의 curl로 양분되며 크기는 음의 curl이 우세하다.

이러한 현상은 5월부터 변하여 8월까지의 분포는 소폭의 양의 curl이 동해 중부에 동서로 걸쳐 분포되면서 음의 curl을 양분시키는 모양을 나타내며 이때의 curl의 값은 겨울철에 비하여 대체로 작은 값을 갖고 있다. 9월에서 11월까지의 겨울철의 분포로 되돌아가는 일종의 변환기적 특성을 보여 점점 증적으로 일본 북부해역의 음의 curl과 동해북부 및 원산만 부근의 양의 curl이 출현함을 보이고 있다. Curl의 분포 중 특기할 만한 것은 그 크기인 바 기존의 curl 값에 비하여 매우 큰 차이를 보인다. 즉 년 평균 curl 값의 분포중(Fig. 4) 동해에서의 기존의 값들과 비교해 보면 Sekine(1986)의 동해 전해역의 평균값인 $1 \sim 3 \times 10^{-9} \text{ dyne/cm}^2$ 보다는 10배 이상의 차이를 보이며 Kutsuwada(1982)의 평균값인 $5 \times 10^{-9} \text{ dyne/cm}^2$ 보다도 3배 이상의 값을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 등격자간격 약 1° 와 0.5° 간격의 wind-stress curl을 비교해 보면 적어도

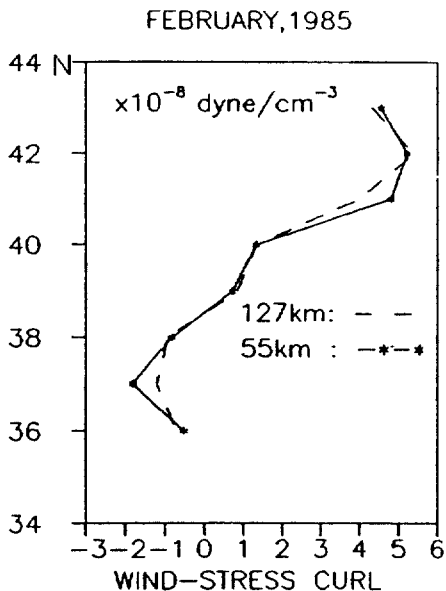


Fig. 5. Meridional profiles of the zonal means of wind-stress curl over the East sea of Korea for February 1985. Solid line represents means estimated on a 55 km×55 km grid and dashed line on a 127 km×127 km grid. (10^{-8} dyne/cm²).

본 연구에서는 격자점의 크기로 인해 curl 값의 차이는 일어나지 않음을 알 수 있다(Fig. 5). 따라서 본 연구의 등적자 간격(1° 혹은 0.5°)이 Kutsuwada의(2°×5°) 격자 간격보다 훨씬 작음으로써 야기될 수 있는 curl 값의 증가(Saunders, 1976)보다는 앞서 지적한 wind stress 값 자체가 기존의 값보다 크며 또한 공간적인 변화도 상당히 크기 때문이라고 사료된다. 이는 겨울철의 동해 중·북부해역의 wind-stress 값 2~3 dyne/cm² 및 급격한 풍향의 변화로 알 수가 있다. 한편 여름철 동해의 curl의 크기는 기존의 값들인 1×10^{-9} dyne/cm³의 범위로 크기에 있어 일치함을 보이는 것도 지적되어야 할 것이다.

결론 및 토의

해양에서의 바람은 다양한 해류순환 및 해수의 열 구조 파악에 절대적이라 할 수 있는 바, 이를 위해서 한반도 근해에서의 wind-stress와 wind-stress curl의 분포를 월별로 나타내었다.

우선 계산된 해상풍의 신뢰도는 1개 정점에서의

연속관측치와의 비교에서 풍향과 풍속이 잘 일치함을 보임으로써 증명되었다.

동해에서의 wind-stress는 10월부터 2월까지 1 dyne/cm² 이상의 북서풍이 존재하며, 여름철에는 0.5 dyne/cm² 이하의 남풍계열이 나타난다. 겨울철 중국연안에서는 0.4 dyne/cm² 정도로 미약하나 한반도 서해연안에는 1 dyne/cm² 이상의 북서풍이 우세하다. 여름철에는 양자강 주변해역에서 열대성 저기압의 영향을 받아 0.6~1.2 dyne/cm²의 값이 존재하며 6월에 0.3 dyne/cm² 이하로 세기가 가장 미약하다. 이러한 동해 및 서해의 wind-stress 크기는 기존의 계산결과보다 2배 정도 크게 나타난다. Wind-stress curl의 가장 특징적인 분포는 겨울철에 동해 북부해역에서 최대 2×10^{-8} dyne/cm³의 양이 curl이 존재하며 여름철(5월~9월)에는 -5×10^{-9} dyne/cm³ 정도의 음의 curl이 존재한다.

동해에서의 curl 값은 겨울철에는 동해북부 및 원산만 부근에 매우 큰 양의 curl 값과 일본 북부 연안에 음의 curl 값이 존재하며 여름철에 양의 curl이 동해중부에 동-서로 걸쳐 음의 curl을 양분시키는 시·공간적으로 특이한 분포를 나타낸다.

서해에서는 한국연안을 제외한 전해역에서 대략 125°를 경계로 음의 curl 값이 남북으로 위치하고 있으며 한국연안에는 강한 양의 curl이 고립되어 존재하고 있다. 한편 동해에서 겨울철에 기존의 curl 값과의 차이는 본 연구의 wind-stress 값이 크게 나타나는 점과 공간적인 변화가 큼으로 인해 발생한 것을 알 수 있다.

한편 10일 평균한 JMA 해수면 수온자료에 의한 해상풍과 일별 해수면 수온의 변화를 고려한 해상풍의 풍향, 풍속의 차이를 고려해 볼 때, 겨울철에는 수평적 해수면 수온의 차이로 인한 대기온도의 수평분포에 의해 발생하는 thermal wind보다는 해면 기압의 변화로 인한 지균풍의 효과가 더욱 우세하며 thermal wind의 효과가 강하게 나타나는 여름철의 경우에는 수평적인 수온의 변화가 미약하기 때문에 10일 평균 해수면 자료에 의한 해상풍의 결과에 내포하는 오차는 적다고 할 수 있으며, 특히 curl 값의 변화가 격자(1° 혹은 0.5°)에 관계없이 크기가 일정함은 본 연구에서 계산된 해상풍 자료의 신뢰성을 말해준다.

REFERENCES

- Barnse, S. L., 1964. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *J. Appl. Meteor.*, **3**: 396-409.
- Cardone, V. J., 1969. Specification of the wind distribution in the marine boundary layer for wave forecasting. New York Univ. School of Engineering and Science, Report GSL-TR69-1, 181pp.
- Garratt, J. R., 1977. Review of drag coefficients over oceans and continents. *Mon. Wea. Rev.*, **105**: 915-929.
- Kim, C. H. and B. H. Choi, 1986. Monthly wind stress and wind stress curl distributions in the Eastern Sea (Japan Sea). *J. Korean Association for Hydro. Sci.*, **19**: 239-248.
- KORDI, 1981. A study for wave prediction in the seas around Korea by use of the DSA-5 model. BSPE 00035-53-1.
- KORDI, 1984. Wave models for the seas adjacent to the Korean Peninsula. BSPE 00050-81-7.
- KORDI, 1985. A study on marine forecasting system for disaster prevention in Korea (1). BSPE 00050-87-1.
- KORDI, 1986. A study on marine forecasting system for disaster prevention in Korea (2). BSPG 00033-121-1.
- KORDI, 1987. A study on marine forecasting system for disaster prevention in Korea (1). BSPG 00047-164-1.
- Kutsuwada, K., 1982. New computation of the wind stress over the North Pacific Ocean. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **38**: 159-171.
- Saunders, P. M., 1976. On the uncertainty of wind stress curl calculations. *J. Mar. Res.*, **34**: 155-160.
- Sekine, Y., 1986. Wind-driven circulation in the Japan Sea and its influence on the branching of the Tsushima Current. *Progress in Oceanography*, **17**: 297-312.

Accepted January 18, 1992