

동아시아 해역 해수면 순열속의 장기 변동 특성

나정열* · 이성욱
한양대학교 지구해양학과

Characteristics of Long-term Variability of the Net Heat Flux on the Sea Surface in the East Asian Marginal Seas

JUNGYUL NA* AND SEONG WOOK LEE

Department of Earth & Marine Sciences, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea

동아시아 해역에서의 해양-대기 상호 작용의 장기 시·공간 변동을 이해하기 위해 1978년부터 1995년까지 18년간 12시간 간격으로 연속적으로 산출된 해수면 순열속 자료를 이용하여 경험적 직교함수 분석을 하였다. 전체 분산의 73%에 해당하는 3개 모드중, 1년 주기성이 우세한 제 1 모드는 황해 산동반도 부근과 동해 중앙부 및 북동부 해역에서 변동이 크게 나타났다. 남쪽과 북쪽이 쌍극자형의 공간적 변동 양상을 보이는 제 2 모드에서는 3.6년과 2.3년의 주기성이 우세하게 나타났다. 제 2 모드 시간계수는 엘니노와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되며 태평양 동부 적도 해역의 해수면 수온 변동과는 반대 위상을 가지며 4개월의 시간 차이를 갖는 것으로 나타났다. 동쪽과 서쪽이 쌍극자형의 변동성을 갖는 제 3 모드에서는 6-9년 주기의 성분이 다른 모드에 비해 뚜렷이 나타났다. 또한 산동반도 남부해역과 블라디보스톡 외해에서는 겨울철 열 손실이 800 W/m^2 가 넘는 강한 열손실이 발생하는 경우가 빈번하며 산동반도 남부 해역에서의 발생 빈도가 블라디보스톡 남부해역보다 약 2배 정도 많은 것으로 나타났다. 발생 시기는 블라디보스톡 외해에서는 1월에 주로 발생하는 반면 산동반도 남부에서는 12월과 1월에 걸쳐 나타나는 차이를 보였다.

In order to extract the spatio-temporal characteristics of long-term variability of the net heat flux on the sea surface in the East Asian marginal seas, empirical orthogonal function (EOF) analysis was conducted using data set calculated every 12 hours interval during 1978-1995. Among the first three modes explaining 73% of the total variance, the first mode having high peak at 1 year period indicates high variability area around the Sandong Peninsula and central and northeastern part of the East Sea. In the second mode which has spatial distribution of dipole type at the north and south, the peaks appear at 3.6 year and 2.3 year cycles. Time coefficient of the second EOF is believed to have close relation with the El Nino and has out-of-phase variation with NINO3 SST. Lagged correlation between NINO3 SST and time coefficient of the second EOF indicates four month time delay in the NINO3 SST. In the third mode which has opposite sign at the east and west, the periodicity of 6-9 year cycle has relatively clear appearance compared to other two EOFs. Also, high heat loss exceeding 800 W/m^2 in winter time occurred at the south part of the Sandong Peninsula and Vladivostok. It reveals more frequent occurrence of about two times at the Sandong Peninsula than Vladivostok. The event is concentrated in January at Vladivostok, but it occurs primarily in December and January at the Sandong Peninsula.

서론

한반도 주변 해역과 동중국해 및 일본 남부 해역을 포함하는 동아시아 해역은 계절적 몬순에 의해 해양-대기간 열교환에 있어 대륙 및 해양의 영향이 상호 교차하는 해역으로 북미의 멕시코만과 더불어 시·공간적 변동성이 큰 해역으로 알려져 있다. 특히 동중국해로부터 일본 남부 해안을 따라 흐르는 쿠로시오 해류는 방대한 양의 열 에너지를 해양에서 대기로 방출한다. 뿐만 아니라 거

울철 강한 북서 계절풍에 동반되는 차갑고 건조한 기류에 의한 순간적인 열 손실은 대기로의 열 방출을 더욱 촉진시킬 수 있다. 해수면에서의 이러한 열 교환은 여러 시·공간적 변동의 형태로 이 지역의 기후 변화에 영향을 미칠 수 있으므로 이 해역에서의 열 교환 양상을 정확히 이해하는 것은 해양-대기계의 상호 작용에 대한 이해를 향상시킬 뿐만 아니라, 해수 순환과 기후 변화에 미치는 영향 및 기후변화 신호 검출 및 예측 등의 연구에 매우 중요한 부분을 차지한다고 할 수 있다.

동아시아 해역에서의 해수면을 통한 열 교환과 관련한 최근의 연구로는 Kang *et al.*(1994), Park *et al.*(1995), Hirose *et al.*(1996);

*Corresponding author: najy0252@email.hanyang.ac.kr

1999), Na et al.(1999) 등을 들 수 있다. 연구자마다 연구 해역 및 방법에 다소 차이가 있지만 이들 연구의 공통점은 주로 해수면을 통한 열 교환량의 정량적인 산정 및 계절적 변동특성의 파악이라고 할 수 있다. 최근 들어 전 세계적인 이상기상을 야기시키는 것으로 알려진 엘니뇨의 심각성에 대한 인식이 확산되면서 보다 장기적인 시각에서 해양-대기계에서의 상호작용에 대한 이해의 중요성이 강조되고 있다. 하지만 자료의 제약으로 인해 보다 장기적인 관점에서의 시·공간적 변동 특성에 대한 연구는 아직까지 미비한 실정이며 최근에 이르러서야 비로소 동아시아 주변 해역을 포함하는 12시간 간격의 장기 열속 자료의 이용이 가능하게 되었다(Na et al., 1999).

본 연구에서는 이 자료를 이용하여 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF) 방법을 적용하여 동아시아 해역의 장기 열속 변동에 나타나는 특성을 고찰하고자 한다. 이를 위해 자료 및 방법에서는 연구에 사용한 자료와 경험적 직교함수의 성질에 대해 간단히 정리 하였고, 순열속의 변동특성에서는 경험적 직교함수 분석 결과와 국지적 해역에서의 겨울철 변동 특성을 설명 하였으며, 결론 및 토의에서는 연구 결과를 요약하였다.

자료 및 방법

자료

본 연구에서 사용한 열속 자료는 78년부터 95년까지의 기간 동안에 일본 기상청에서 발행한 1일 2회의 일기도와 10일 평균 해수면 수온, 한국 기상청에서 관측한 정점 자료 등을 근거로 산출되었다(Seo, 1997). 열속 계산에 필요한 성분인 기온, 습윤 온도, 기압, 운량(Cloudiness), 비습(Specific Humidity) 등은 일기도에 기재되어 있는 값을 위주로 이용하였고, 한국 기상청의 정점 관측 자료를 사용하여 보완하였다. 해상풍은 일기도를 근거로 Cardone 모델을 이용하여 산출하였고(Han et al., 1995), 해수면 수온은 일본 기상청의 10일 평균 해수면 수온 자료를 내삽하여 이용하였다.

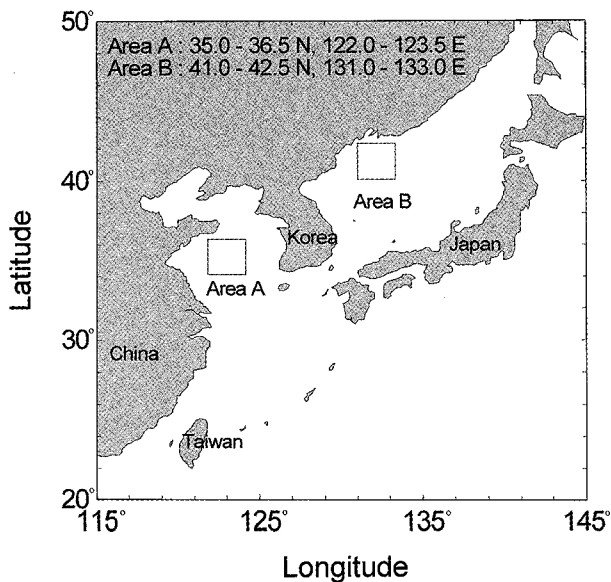


Fig. 1. Map showing the study area.

연구 대상 해역은 동해, 황해, 동중국해 및 북태평양의 일부 해역을 포함하는 20-50°N 및 115-145°E 영역으로 구성하였으며(Fig. 1), 이 범위내에서 0.5°의 경도 및 위도 간격으로 격자망을 구성하였으며, 각 격자점에서 18년 동안 12시간 간격으로 연속적으로 산출된 열속 자료중 본 연구에서는 순열속(Net Heat Flux) 자료만을 이용하였다. 열속 자료의 산출 과정에 대해서는 Na et al.(1999)에서 상세히 언급한 바 있으므로 여기에서는 생략하였다.

경험적 직교 함수 산출

순열속의 장기적인 시·공간 변동성을 파악하기 위해 경험적 직교 함수 방법을 적용하였다. 경험적 직교 함수 방법은 시·공간 변동성을 동시에 효과적으로 제시할 수 있는 통계적 방법중 하나이다(Na et al., 1991, 1997). 이는 임의의 공간적 범위 내의 격자점에서 시간에 따라 누적된 자료를 활용하여 시간에 대하여 평균을 구한 후 이로부터 각 시간에서의 잔차의 시계열을 구한 후, 격자점 사이의 잔차의 교차 공분산 행렬을 구성하여 이 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 구하는 방법이다.

잔차의 교차 공분산 행렬은

$$C(i,j) = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k H(i,t)H(j,t), \quad i,j=1,2,\dots,n \quad (1)$$

으로 표시되고, 여기서 n 은 격자점의 수로서 2145개 이고, k 는 임의의 격자점에서의 18년 간의 자료의 수로서 13148개이다. $H(i)$ 와 $H(j)$ 는 각 격자점에서의 순열속의 잔차(Residual)로서

$$H(i,t) = H(i,t) - \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k H(i,t) \quad (2)$$

로서 주어진다. 본 연구의 대상 해역에 포함하는 격자점의 수가 2145개 이므로 구성되는 공분산 행렬은 2145×2145가 된다.

공분산 행렬의 해를 구하는 과정은

$$\sum_{j=1}^n C(i,j)\Phi_N(j) = \lambda_N \Phi_N(i), \quad N=1,2,\dots,n \quad (3)$$

와 같은 고유값(λ_N) 문제가 되며, 이때 구해지는 고유벡터 $\Phi_N(i)$ 를 경험적 직교 함수라 한다. 각 고유값의 고유벡터는

$$\sum_{j=1}^n \Phi_M(i)\Phi_N(j) = \delta_{MN}, \quad \delta_{MN}: \text{Kronecker delta} \quad (4)$$

으로 표시되는 직교 조건을 만족한다. 또한 고유벡터와 임의의 점에서의 잔차 사이에는

$$H(i,t) = \sum_{N=1}^n E_N(t)\Phi_N(i) \quad (5)$$

$$E_N(t) = \sum_{i=1}^n H(i,t)\Phi_N(i) \quad (6)$$

의 관계가 있다. 여기서 $E_N(t)$ 는 N 번째 고유함수의 시간에 따른 변동 폭을 나타내는 시간계수(Time Coefficient)로 열속의 잔차에 고유벡터를 곱한 값의 합으로 정의된다.

고유값과 시간 계수와 잔차 사이에는

$$\frac{1}{k} \sum_{t=1}^k E_N(t)^2 = \lambda_N \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k} \sum_{t=1}^k H(i, t)^2 \right) = \sum_{N=1}^n \left(\frac{1}{k} \sum_{t=1}^k E_N(t)^2 \right) = \sum_{N=1}^n \lambda_N \quad (8)$$

의 관계가 있으므로 고유값은 각 고유벡터의 분산에 해당함을 알 수 있고, 고유값의 합은 원래 자료의 분산의 합과 같게 된다.

고유벡터는 고유값으로 설명되는 분산이 공간적으로 어떻게 변동하는가를 나타내는 함수로, 각 함수가 갖는 물리적 의미를 정확히 규명하기는 힘들어도 전체 자료에 포함된 복잡한 공간적 변동성의 많은 부분을 설명할 수 있는 대표적인 몇 개의 고유함수를 추출할 수 있다는 것은 경험적 직교함수 분석이 지니는 장점중의 하나이다(Preisendorfer, 1988). 또한 시간계수로부터는 특징적 공간적 변동 형태의 시간에 따른 변동 특성에 대한 정보를 얻을 수 있다.

한편 경험적 직교 함수에는 자료의 시·공간적 제약으로 인해 항상 어느 정도의 오차가 포함되어 있으므로 이론적 직교함수와는 차이가 있다. 자료로부터 계산된 고유값이 지니는 오차는

$$\delta\lambda_N \approx \lambda_N (2/k)^{1/2} \quad (9)$$

으로 근사가 가능한데(North *et al.*, 1982), 이는 각 고유값이 지니는 오차의 범위를 나타내준다. 여기서 k 와 N 은 각각 자료의 수와 산출되는 고유함수의 수를 나타낸다. 따라서 인접한 2개의 고유값의 차이가 각 모드의 편차의 범위보다 큰 경우는 안정된 직교 함수라 할 수 있다.

순열속의 변동 특성

순열속의 장기 변동 특성

순열속(Net Heat Flux)은 대기와 해양의 온도차와 습도차, 해상에서의 풍속 등의 영향을 반영하는 현열속(Sensible Heat Flux)과 잠열속(Latent Heat Flux) 뿐만 아니라 태양단파복사(Solar Radiation)와 해면장파복사(Longwave Radiation)의 효과를 고려하므로 여러 물리적 인자가 복합적으로 작용하는 해양-대기계의 상호작용 및 변동성 고찰에 적합하다고 할 수 있다.

순열속의 장기 변동 특성의 공간적 분포를 파악하기 위해 먼저 연구 대상 해역 내에서 0.5° 간격으로 산출된 2145개 각 격자점에서 18년간 1일 2회 산출된 13148개의 순열속 자료에 대해 평균과 표준 편차를 구하였다(Fig. 2).

평균 열속장의 공간적 분포 특성은 전 해역에서 음의 부호 값을 나타낸다. 이는 해수면으로부터 대기로의 열 방출이 일어남을 의미하는데 이러한 대기로의 열 방출은 대만 동쪽과 일본 남서 해안을 연결하는 쿠로시오 해류의 진행 축 주위에서 크게 나타날 뿐만 아니라 일본 서해안의 쓰가루 해협 주위와 황해의 산둥반도 남부 해역 부근에서도 크게 나타난다. 반면에 블라디보스톡 부근과 양쯔강 입구에서는 다른 해역에 비해 열 손실이 상대적으로 작은 분포가 나타나고 있다.

블라디보스톡 부근에서 최저값을 나타내고 일본 서해안쪽으로 접근하면서 대기로의 열 손실량이 점진적으로 증가하는 동해 순열속의 공간적 분포 양상은 Park *et al.*(1995) 및 Hirose *et al.*(1996)의 결과와도 잘 일치하고 있다. 황해 및 동중국 해역에서 나타나는 일본 남부의 큐슈와 대만을 연결하는 선을 축으로한 부근에서

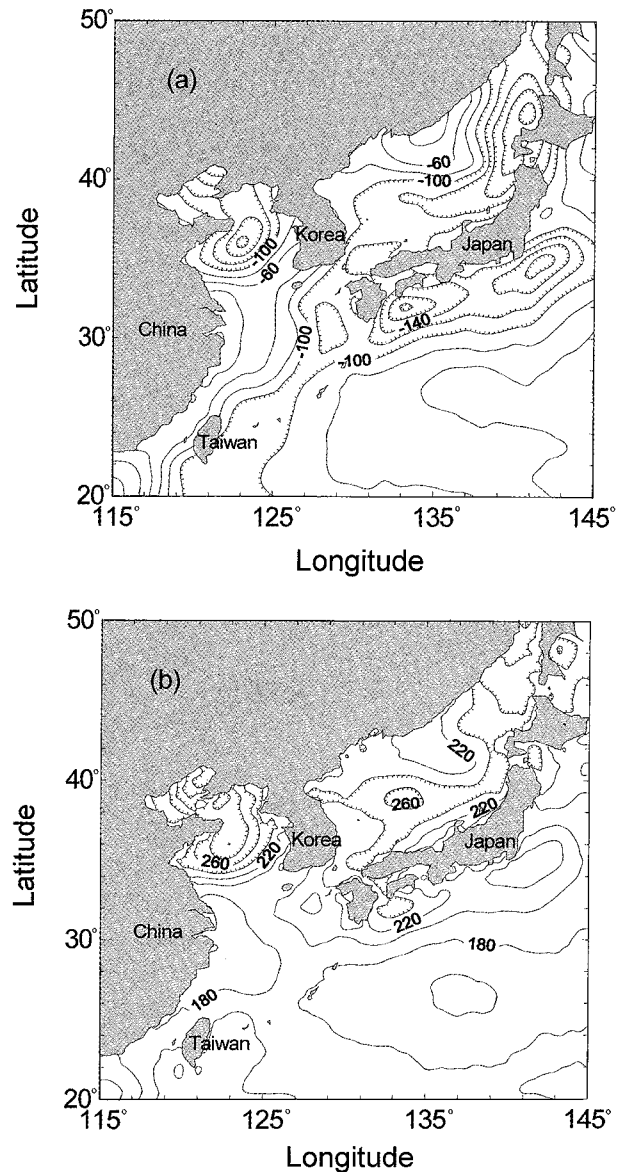


Fig. 2. Distribution of the mean (a) and standard deviation (b) of the net heat flux over the East Asian marginal seas during 1978–1995. The unit is W/m^2 .

손실이 크게 나타나고 황해 쪽으로 접근하면서 감소하는 경향은 Kang *et al.*(1994) 및 Hirose *et al.*(1999)의 결과와 유사하다. 하지만 산둥반도 부근에서 나타나는 대기로의 강한 열 방출은 앞에서 언급한 연구에서는 볼 수 없었던 결과이다.

순열속의 이러한 분포는 Na *et al.*(1999)의 장파복사속, 잠열속 및 현열속의 년 평균 공간 분포에서도 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이들 열속의 산출에 해양과 대기의 온도차의 영향이 직접 또는 간접적으로 반영된다는 점을 고려할 때, 블라디보스톡과 산둥반도 부근에서 나타나는 대기로의 최저 및 최대 열 방출은 이 해역에서의 해수면 수온과 대기 기온의 공간적 분포와 관련이 있을 것으로 여겨진다. Na and Seo(1998)에서 나타나는 산둥반도 부근의 년 평균 해수면 온도와 기온의 공간적 분포 형태는 각각 등은 선이 북쪽으로 기울어진 ‘^’형과 남쪽으로 기울어진 ‘v’형으로

Table 1. Properties of the first four eigenvalues of the net heat flux over the East Asian marginal seas during 1978–1995

Mode	Eigenvalue	Error	Contribution to Total Sum (%)	Cumulative Sum (%)
1	56815965.35	±700737.79	62.23	62.23
2	5721391.95	±70564.59	6.27	68.50
3	4127983.36	±50912.34	4.52	73.02
4	2574758.22	±31755.69	2.82	75.84

서로 반대의 분포 양상을 보이고, 블라디보스톡 부근에서는 수온은 ‘V’형의 분포 양상을 보이거나 기온의 등온선은 위도선과 평행한 직선에 가까운 분포를 보인다. 이러한 분포 양상은 산동반도 부근에서는 대기와 해양의 온도차가 크게 발생하고 블라디보스톡 부근에서는 상대적으로 작은 온도차를 유발할 수 있을 것으로 생각된다.

한편, Na *et al.*(1999)은 열속과 관련된 선행 연구 결과와의 비교를 통해 연구자마다 분석에 이용하는 자료의 출처 및 열속의 산출 방법, 자료의 공간적 동시성 및 시·공간적 조밀성 등의 차이로 인해 열속의 분포 양상 및 수치적 값에 일부 차이가 있을 수 있음을 논의한 바 있다.

표준 편차는 황해와 동해의 중앙부를 연결하는 북위 38° 선을 축으로한 부분 주변과 동해 북동부 해역에서 큰 변동성을 나타내고 있다. 대체적으로 표준 편차가 크게 나타나는 부분에서 열 손실이 많이 발생하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

순열속의 시·공간 변동성의 특징을 추출하기 위해 경험적 직교함수 분석을 통해 고유값 및 고유벡터를 산출하였고(Table 1, Fig. 3), 이로부터 각 모드의 시간 계수를 계산한 후 이에 대해 주파수 분석을 하였다(Fig. 4, Fig. 5). 각 모드의 시간 계수는 저역 통과 필터를 적용하여 1.8년 보다 짧은 주기의 변동 성분은 감쇄시킨 후 나타내었다. 또한 18년보다 긴 주기 성분의 영향을 제거하기 위해 2차 회귀 곡선을 구하여 경향(Trend)을 제거하였으며, 이러한 신호에 대해 주기성 분석을 하였다. 또한 주파수 분석 결과에 포함된 잡음 성분을 나타내는 적색잡음(Red Noise)은 1차 자기 회귀 모델을 이용하여 구하였다(Mann and Lees, 1996).

계산된 고유값 가운데 상위 4번째 까지의 고유값, 즉 분산은 전체의 약 76%에 해당하며, 각각의 고유값의 오차 범위는 앞 절에서 설명한 기준을 만족하고 있다. 그러므로 산출된 고유값 및 고유벡터는 자료의 시공간적 부족함으로 인해 야기될 수 있는 모드 상호간의 혼합 등에 의한 영향이 작다고 할 수 있다.

제 1 모드는 전체의 약 62.2%에 해당하는 변동성으로 주파수 특성은 1년(1 cpy) 주기의 성분이 가장 우세하게 나타나고, 2.3년(0.4 cpy), 1.5년(0.67 cpy) 및 6개월(2 cpy)의 주기성이 잡음 성분보다 높게 나타난다(Table 1, Fig. 5). 그밖에 3년 이상의 주기를 갖는 장주기 성분이 1년 주기의 변동 신호의 진폭을 변화시키는 경향을 시간 계수에서 찾아볼 수 있다(Fig. 4). 공간적 변동 형태는 대상 해역의 전 범위에서 동일한 부호를 갖는 변동 양상을 보이며, 특히 황해 중부 이상의 해역과 동해 중앙부 및 북동 해역에서 큰 변동값을 갖는다. 이는 표준 편차의 분포와 거의 일치하고 있다. 따라서 제 1 모드로 설명되는 전체 변동의 62.2%는 해수면을 통한 열 방출 혹은 흡수가 전 해역에서 동일한 방향으로 진행

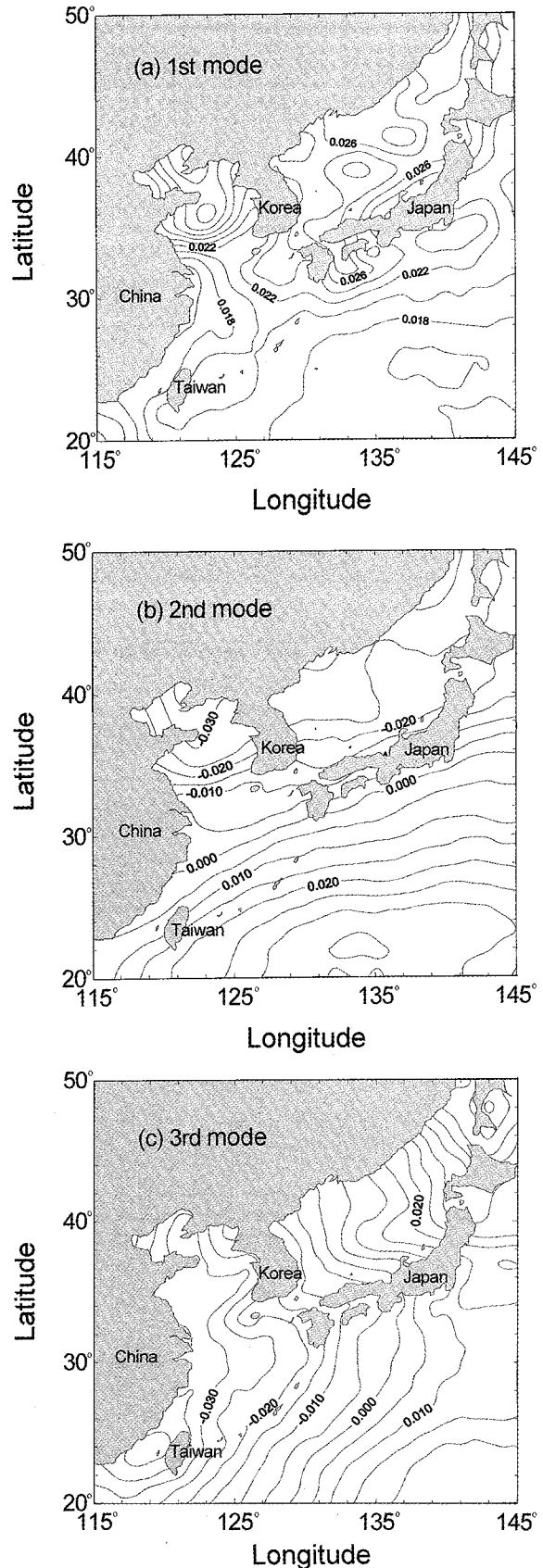


Fig. 3. The first three EOFs (or modes of variability) of the net heat flux.

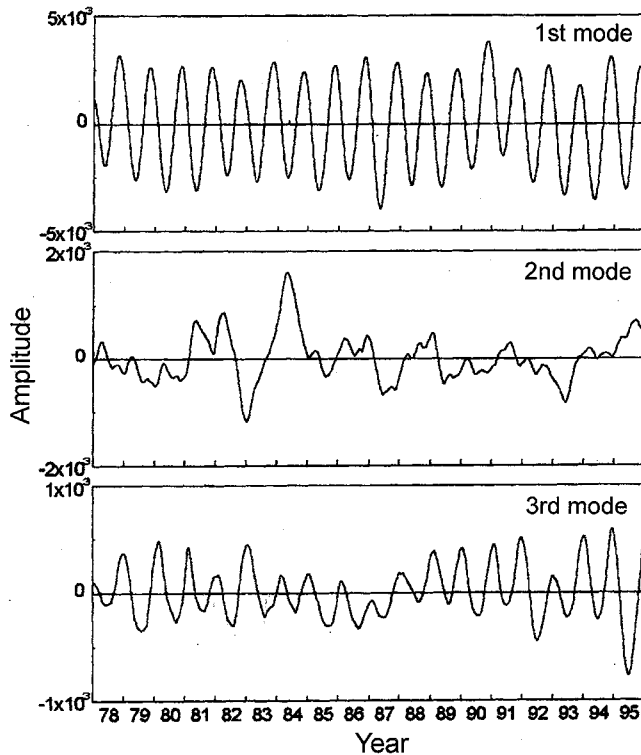


Fig. 4. Time coefficient of the first three EOFs of the net heat flux.

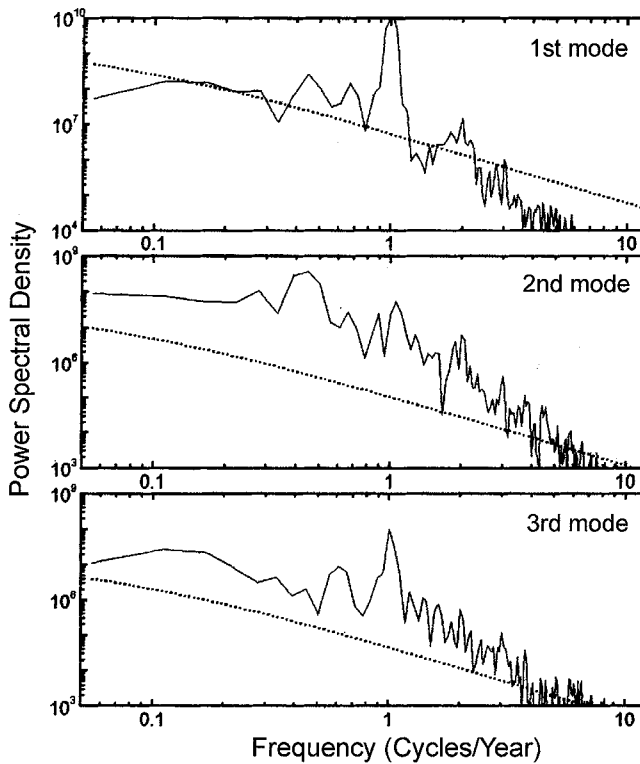


Fig. 5. Power spectral density of the time coefficient of the first three EOFs. The dotted line indicates a line of red noise.

되는 양상이며, 이에는 1년 주기 변동성의 영향이 가장 우세함을 알 수 있다.

제 2 모드는 전체의 약 6.3%에 해당하는 변동 모드이다(Table 1). 공간 벡터는 일본 남서쪽의 류슈 남단과 중국을 연결하는 위도 28-30° 선을 경계로 하여 남쪽과 북쪽이 반대의 변화 양상을 나타낸다(Fig. 3). 이 경계는 외견상 동아시아 해역과 태평양을 구분하는 것 처럼 보인다. 본 연구에서는 제시하지 않았지만 이 부근은 실제로 수심 100-200 m 정도의 대륙붕이 형성되는 곳으로 (Hirose *et al.*(1999)의 Fig. 12) 이를 경계로 천해와 심해 또는 동중국해와 북태평양의 구분이 가능하다. 따라서 제 2 모드의 변동 형태는 북태평양의 일부 해역을 포함시켰을 때, 동중국해 이북의 순열속 변동 특성이 북태평양의 변동과는 반대의 양상을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 제 2 모드의 시간 계수에서는 제 1 모드의 시간 계수와는 달리 2개월 이상의 주기를 갖는 성분들이 대부분 잡음의 영향보다 높게 나타나고 있다. 2.3년(0.4 cpy) 주기 성분이 가장 우세하게 나타나고 3.6년(0.28 cpy), 1.5년(0.67 cpy), 1.13년(0.83 cpy), 0.95년(1.05 cpy), 6개월(2 cpy) 및 4개월(3 cpy) 주기 성분이 나타남을 볼 수 있다. 따라서 제 2 모드는 제 1 모드와 비교할 때 1년 변동 주기 이외의 성분을 고찰할 때 적합한 것으로 볼 수 있다.

제 3 모드는 전체의 약 4.5%에 해당하는 변동 형태로 제 2 모드와는 달리 동쪽과 서쪽의 위상이 반대로 변하는 양상을 보인다. 제 3 모드의 주기성은 제 1 모드와 유사하게 1년 주기의 성분이 가장 우세하게 나타나고 이 외에 1.6년(0.6 cpy) 주기와 6-9년(0.17-0.11 cpy) 주기의 성분이 특징적으로 나타난다. 제 1 모드와 비교할 때 1년 주기의 성분이 우세한 점은 유사하지만 1년 미만 주기에서는 뚜렷한 특징을 찾기가 어렵다. 또한 6-9년 주기에서 피크 값을 나타내는 점도 제 1 모드와 유사하지만 제 3 모드에서는 잡음의 영향보다 높게 나타남을 알 수 있다.

이상의 3개 모드의 주파수 분석 결과에 대해 1년 이상의 주기성을 갖는 성분들의 비교를 통해 특징을 요약하면 제 1 모드에서는 2.3년, 1.5년 및 1년, 제 2 모드에서는 3.6년과 2.3년, 제 3 모드에서는 6-9년, 1.6년 및 1년 주기의 성분이 특징적인 성분이라 할 수 있겠다(Fig. 5).

한편, Na *et al.*(1997)은 1978년부터 1992년까지 12년간의 기압, 바람 및 해수면 온도 자료에 대해 연구대상 해역을 동해에만 국한시켜 EOF 분석을 한 바 있다. 각각의 파라메타에 대한 모드별 시간 계수(Na *et al.*(1997)의 Fig. 9~12)를 본 연구의 결과와 비교하면 제 2 모드에서는 동서 방향 바람과 해수면 온도에서 약 2.3년의 주기성에 대한 에너지가 강함을 알 수 있다. 또한 제 3 모드에서는 남북 방향 바람과 해수면 온도가 약 5.5년 이상의 주기에서 큰 에너지를 갖는다. 이는 순열속의 제 2 모드에 나타나는 2.3년 주기 변동은 동서 방향 바람과 해수면 온도의 영향이 그리고 제 3 모드에 나타나는 6-9년 주기 변동은 남북 방향 바람과 해수면 온도의 영향이 복합적으로 작용하여 나타난 결과일 수도 있음을 나타내 준다고 할 수 있다.

Kang(1998)과 Kang and Jeong(1996)은 최근 한반도의 기온 및 강수량과 엘니뇨와의 관련성에 대한 연구에서 3년 및 5-7년 주기의 변동이 엘니뇨 주기와 밀접한 관련이 있음을 지적한 바 있다. 엘니뇨는 통상 적도 동태평양 부근의 해면 수온이 평년보다 높은 상태가 지속되는 현상을 가리키지만 해수면 수온 상승률의 정도에 대한 통일된 기준이 없으므로 연구자에 따라 발생 해역 및 발

Table 2. List of El Nino episodes compiled by Trenberth (1997) during 1979–1995

Beginning Month	Duration(month)
1979. 1	7
1982. 7	16
1986. 8	19
1991. 7	17
1993. 2	8
1994. 6	10

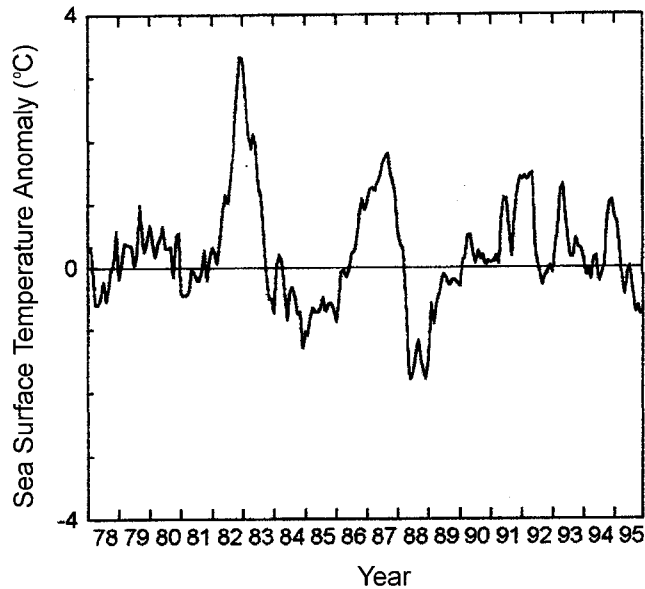


Fig. 6. Time series of the SST anomaly at the eastern equatorial Pacific (NINO3) area.

생 년도 등에 차이가 있을 수 있다(Cha *et al.*, 1999). 여기에서는 비교적 최근에 정리된 결과(Trenberth, 1997)의 일부를 Table 2에 나타내었다. 또한 미국 기상청의 기후 예측 센터에서 엘니노 예측을 위해 사용하는 태평양 동부 적도해역의 NINO3 지수지역(5N-5S, 150-90 W)의 월 평균 해수면 온도 변동을 Fig. 6에 나타내었다. 이에 의하면 본 연구의 대상 기간인 1979년부터 1995년 사이에 6회의 엘니노가 발생 하였으며, 82년과 83년 사이에 가장 강력한 엘니노가 발생 하였음을 알 수 있다.

아울러 순열속의 제 2 모드의 시간 계수의 값이 음의 부호값을 갖는 시기가 엘니노 발생 시기에 해당하는 경향을 보여주고 있는데, 음의 부호 값을 갖는 6회중 4회가 엘니노 발생 시기에 해당하고 있다. 특히 79년과 80년 사이, 82년과 83년 사이, 87년에 피크 값을 갖는 경향과 엘니노가 강했던 82년과 83년 사이에 가장 큰 피크값을 나타내는 점은 태평양 동부 적도 지역의 해수면 온도 변동 추이와 잘 일치하고 있다. 시간계수의 값에 신호대 잡음을 고려하여 적절한 임계값(Threshold)을 설정할 수 있다면 이러한 관련성은 더욱 분명해질 수 있을 것으로 생각된다. 순열속의 시간계수가 동 태평양의 해수면 온도와 반대의 위상을 나타내는 것은 엘니노 발생시 동아시아해역의 기온과 수온의 차가 커져 현열속 및 잠열속이 증가하는데 기여한 때문으로 판단된다. Fig. 7은 NINO3 지수

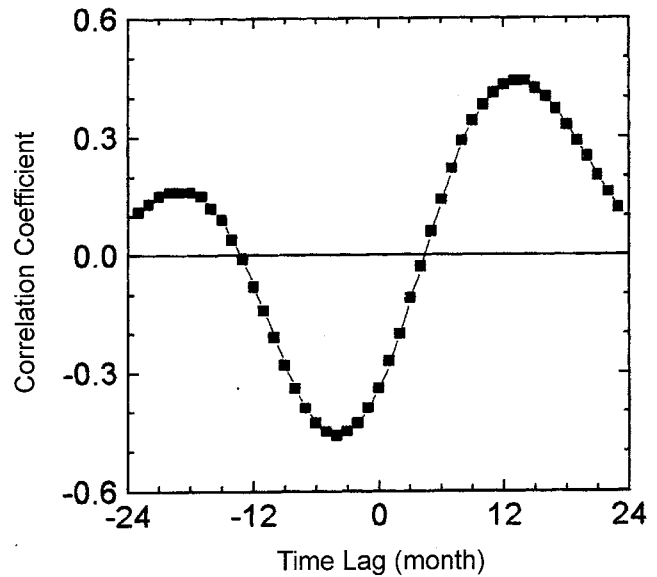


Fig. 7. Lagged correlation coefficient between time series of SST anomaly at NINO3 area and time coefficient of the 2nd EOF of net heat flux.

해역의 해수면 수온과 동아시아 해역 순열속의 제 2 모드 시간계수 사이에 시간지연이 있을 때의 상관 계수를 나타낸 것으로 두 시계열 사이의 상관성은 제 2 모드의 시간계수가 NINO3 지수 해역의 해수면 온도보다 4개월 정도 선행할 때 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한 두 시계열은 약 34개월(2.8년) 주기에서 상호 연관되어 변동함을 알 수 있다.

겨울철 극지적 변동 특성

한반도 근해의 장기적인 년 평균 해수면 열 수지의 공간적 분포(Fig. 2)에서 주변 해역보다 열 손실이 매우 크게 나타나는 산동반도 남부 해역과 열 손실이 최저로 나타나는 블라디보스톡 해역은 주목할만하다. 이러한 경향은 주로 9월부터 3월까지의 월 평균 분포에서 나타나는데 12월부터 2월 사이의 겨울에 특히 현저하게 나타난다(Na *et al.*, 1999).

Table 3. Numbers of the event of severe heat transfer to the atmosphere exceeding 800 W/m²

Net Heat Flux (W/m ²)	Number of Event	
	Area A (south of the Sandong Peninsula)	Area B (off Vladivostok)
~-1500	1	0
-1500~-1400	1	0
-1400~-1300	4	0
-1300~-1200	7	2
-1200~-1100	17	10
-1100~-1000	33	10
-1000~-900	73	37
-900~-800	74	35
~-800	210	94

블라디보스톡 해역의 경우 겨울철 강한 북풍과 이에 동반된 차가운 기류는 순간적인 해수면 열 손실을 야기시키며, 이로 인한 심층 대류 현상이 지적되는 해역이기도 하다(Kawamura, 1998). 또한 산동반도 남부 해역은 황해 저층냉수의 핵이 존재하는 해역의 일부로(KORDI, 1998), 이 해역에서의 겨울철 강한 열 손실은 황해 저층냉수가 겨울철 냉각 및 혼합에 의해 발생될 수 있음을 암시하고 있다.

지중해에서 겨울철 알프스 산을 넘어 프랑스 리옹만 해역에 불어오는 차갑고 강한 바람인 Mistral이 1000 W/m² 정도의 강한 해수면 열 손실을 발생시키며, 이로 인해 심층 대류가 발생됨(Schott and Leaman, 1991)을 고려할 때 블라디보스톡 해역과 산동반도 남부 해역에서 발생하는 겨울철 해수면 열 손실의 특징 및 년 변동은 고찰해 볼 가치가 있다.

이를 위해 산동반도 남부와 블라디보스톡 외해에서 800 W/m² 이상의 해수면 열 손실이 발생하는 빈도를 해수면 순 열속 자료를 위주하여 분석하였다. 겨울철을 대표할 수 있는 12월부터 2월 사이의 3개월 동안 대상 해역(Fig. 1참조)에서 계산된 정점값

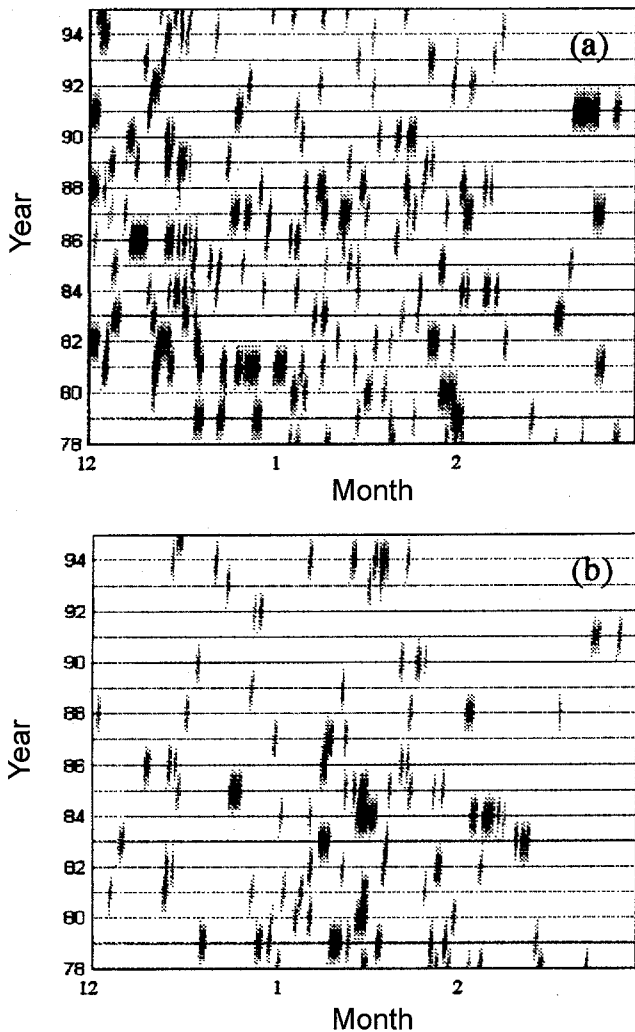


Fig. 8. Year-month distribution of the event of severe heat transfer to the atmosphere exceeding 800 W/m². a) Area A: south of the Sandong Peninsula, b) Area B: off Vladivostok.

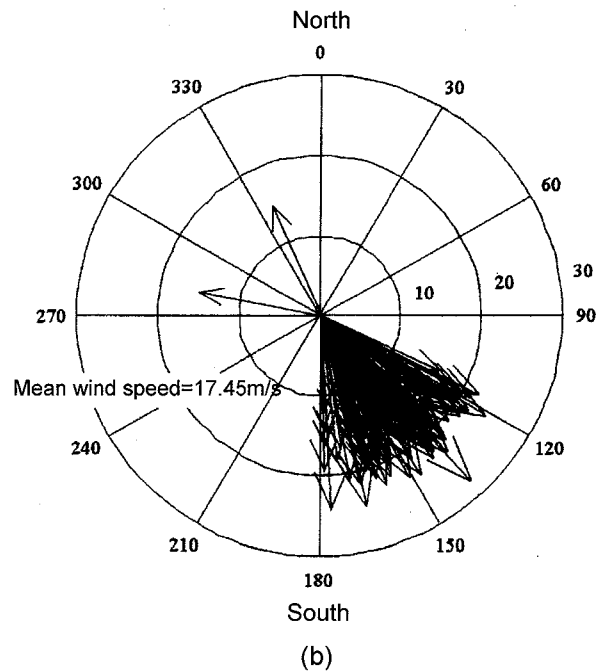
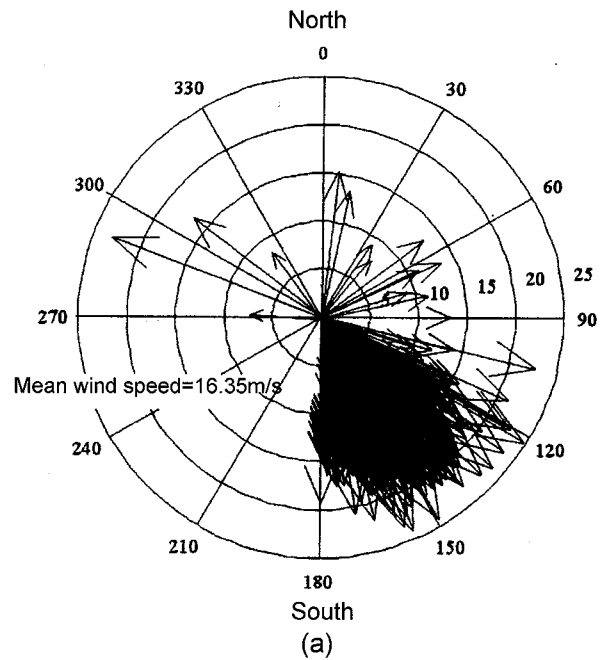


Fig. 9. Distribution of wind direction and mean wind speed at the time of severe heat loss. a) Area A: south of the Sandong Peninsula, b) Area B: off Vladivostok.

들의 1일 공간 평균을 구하여 800 W/m² 이상인 경우의 횟수와 연도별 및 월별 분포를 분석하였다(Table 3, Fig. 8).

블라디보스톡 보다는 산동반도 남부 해역이 동일한 범위대의 해수면 열 손실량을 발생시키는 횟수가 2-3배 정도 많고, 최대값 역시 블라디보스톡 보다 큼을 알 수 있다. 특히 800 W/m² 이상의 매우 큰 열 손실이 나타나는 시기가 블라디보스톡은 1월에 집중되어 나타나는 경향이 있지만, 산동반도 남부 해역에서는 12월에

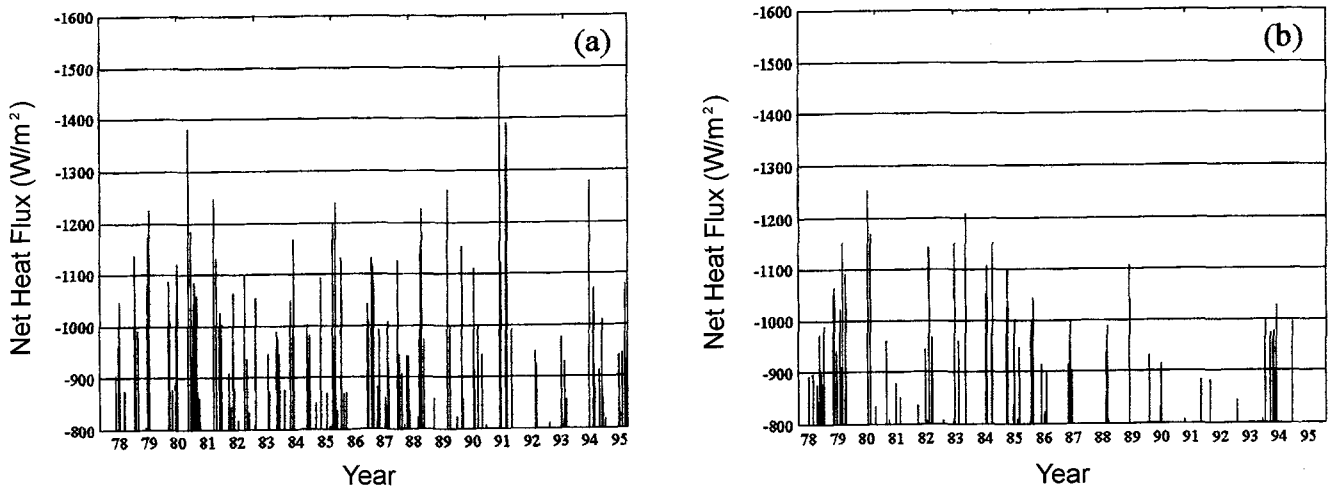


Fig. 10. Annual variation of the magnitude of the event of severe heat transfer to the atmosphere. a) Area A: south of the Sandong Peninsula, b) Area B: off Vladivostok.

서 1월에 걸쳐 나타나고 있음을 볼 수 있다.

또한 800 W/m² 이상의 큰 손실이 발생할 때의 해상풍은 북서풍이 우세하며 풍속의 평균값은 산동반도 남부에서는 16.35 m/s이고 블라디보스톡 외해에서는 17.45 m/s로 블라디보스톡 해역이 다소 크게 나타난다(Fig. 9). 이는 풍속, 기온차 및 습도차 등의 영향을 반영하는 현열속과 잠열속의 영향이 큼을 짐작케한다.

한편, 연구 대상 기간 동안에 800 W/m² 이상의 열손실이 발생하는 시기의 년 변동 양상은 두 해역의 변동 양상이 현격히 다르게 나타나고 있다(Fig. 10). 산동반도 해역에서는 80년, 85년 및 91년에 최대 열 손실이 발생하여 약 5-6년 주기성이 나타나는 경향을 보이지만 블라디보스톡 부근에서는 이러한 경향을 찾기가 어렵다.

결론 및 토의

한반도 주변 해역을 포함하는 동아시아 해역에서 12시간 간격으로 18년간 연속적으로 산출된 해수면 순열속 자료를 이용하여 이 해역에서 나타나는 장기 변동 특성을 경험적 직교함수 분석을 통해 고찰하였다. 또한 년 평균 공간 분포에서 주변 해역보다 열손실이 크게 나타나는 산동반도 남부해역과 최저로 나타나는 블라디보스톡 외해에서의 겨울철 열속 특성을 분석하였다.

경험적 직교함수 분석을 통해 전체 변동의 73%를 나타낼 수 있는 3개의 주요 변동 모드를 산출하였다. 3개 모드는 모두 분산과 공간벡터의 안정성을 판단할 수 있는 조건을 만족하였다.

제 1 모드는 전체 분산의 62.2%에 해당하는 변동 함수로서 시간 영역에서는 1년 주기성의 에너지가 다른 성분들에 비해 월등히 높게 나타났고, 공간 영역에서는 전 해역이 동일한 변동 부호를 나타내지만, 특히 황해 중부 해역 이상과 동해 중앙부 및 동해 북동부 등의 변동이 큰 것으로 나타났다.

제 2 모드는 전체 분산의 6.2%를 나타내는 함수로 대략적으로 북태평양과 동중국해의 경계를 기준으로하여 남쪽과 북쪽의 변동 방향이 반대인 쌍극자 형의 공간적 변동 양상을 나타낸다. 제 1 및 제 3 모드와 비교할 때 1년 주기의 성분이 약하게 나타나고 2.3

년과 3.6년의 주기성이 우세하게 나타나는 것이 제 2 모드의 특징이라고 할 수 있겠다.

제 3 모드는 전체 변동의 4.5%를 설명할 수 있는 함수로 쌍극자형 분포 양상은 대체로 제 2 모드와 유사하나 동쪽과 서쪽이 반대로 변하는 변하는 점이 다르다. 시간 영역의 변동성은 1년 주기가 우세한 점은 제 1 모드와 유사하지만 6-9년 주기의 피크가 나타나는 점은 다른 모드에서는 나타나지 않는 결과이다.

제 2 모드와 제 3 모드에서 나타나는 2.3년, 3.6년 및 6-9년 주기성은 대략 2-7년의 주기를 갖는 것으로 알려진 엘니뇨의 주기에 포함된다. 특히 제 2 모드의 시간계수는 엘니뇨와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되며, 제 2 모드의 시간계수와 태평양 동부 적도 해역의 수온 변동사이에는 4개월의 시간차가 있는 것으로 나타났다.

한편, 산동반도 남부와 블라디보스톡 외해는 겨울철에 800 W/m²의 강한 열 손실이 발생하는 경우가 빈번하다. 이러한 강한 열 손실은 블라디보스톡 보다는 산동반도 남부에서 보다 빈번한데, 블라디보스톡에서는 1월에 집중적으로 나타나는 반면 산동반도 남부에서는 12월에서 1월에 걸쳐 나타난다. 강한 열 손실로 인한 심층 대류의 발생(Schott and Leaman, 1991)을 고려할 때, 산동반도 남부 해역의 열 손실은 황해 저층냉수가 겨울철 냉각 및 혼합에 의해 발생할 수 있는 후보지일 수 있음을 암시한다고 할 수 있다.

사 사

본 논문은 (1998)년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며, 논문의 원고를 세밀히 검토해 주신 심사위원들께 감사드립니다.

참고문헌

Cha, E.J., J.G. Jhun and H.S. Chung, 1999. A study on characteristics of climate in South Korea for El Nino/La Nina years. *J. Korean*

- Meteor. Soc.*, **35**: 98–117.
- Han, S.K., H.J. Lie and J.Y. Na, 1995. Temporal and spatial characteristics of surface winds over the adjacent seas of the Korean Peninsula. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **30**: 550–564.
- Hirose, N., C.H. Kim and J.H. Yoon, 1996. Heat budget in the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, **52**: 553–574.
- Hirose, N., H.C. Lee and J.H. Yoon, 1999. Surface Heat flux in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**: 401–417.
- Kang, I.S., M.K. Kim and T.B. Shim, 1994. Seasonal variation of surface heat budget and wind stress over the seas around Korean Peninsula. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **29**: 325–337.
- Kang, I.S., Y.K. Jeong, 1996. Association of interannual variation of temperature and precipitation in Seoul with principal modes of Pacific SST. *J. Korean Meteor. Soc.*, **32**: 339–345.
- Kang, I.S., 1998. Relationship between El-Nino and korean climate variability. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**: 390–396.
- Kawamura, H. and P. Wu, 1998. Formation mechanism of Japan Sea proper water in the flux center off Vladivostok. *J. Geophys. Res.*, **103**: 21611–21622.
- KORDI, 1998. A study on water circulation and material flux in the Yellow Sea. BSPN 97357-00-1103-1, 105pp.
- Mann, M.E. and J.M. Lees, 1996. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Climatic Change*, **33**: 409–445.
- Na, J.Y., S.W. Lee, K.D. Cho, 1991. A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea Peninsula. *J. Korean Fish. Soc.*, **24**: 215–228.
- Na, J.Y., S.K. Han, J.W. Seo, Y.G. Noh and I.S. Kang, 1997. Empirical orthogonal function analysis of surface pressure, sea surface temperature and winds over the East Sea of the Korea (Japan Sea). *J. Korean Fish. Soc.*, **30**: 188–202.
- Na, J.Y., J.W. Seo, 1998. Atlas of the sea surface winds and heat flux in the East Asian marginal seas. Hanyang Univ., 52pp.
- Na, J.Y., J.W. Seo and H.J. Lie, 1999. Annual and seasonal variations of the sea surface heat flux in the East Asian Marginal Seas. *J. Oceanogr.*, **55**: 257–270.
- North, G.R., T.L. Bell, R.F. Cahalan and F.J. Moeng, 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Wea. Rev.*, **110**: 699–706.
- Park, W., I.S. Oh and T. Shim, 1995. Temporal and spatial distributions of heat fluxes in the East Sea (Sea of Japan), *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **30**: 91–115.
- Preisendorfer, R.W., 1988. Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography, Elsevier, 425pp.
- Schott, F. and K.D. Leaman, 1991. Observations with moored acoustic doppler current profilers in the convection regime in the Golfe du Lion, *J. Phys. Oceanogr.*, **21**: 558–574.
- Seo, J.W., 1997. Research on the sea surface winds and heat flux in the East Asian marginal seas. Ph. D. thesis, Hanyang University, Korea, 231pp.
- Trenberth, K.E., 1997. The definition of El Nino. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**: 2771–2777.

2000년 3월 23일 원고 접수

2000년 4월 28일 수정본 채택

담당편집위원: 이재학

신속게재