

중규모 해양모형을 이용한 한반도 주변 해역 해양순환 재현

안중배 · 이해진
부산대학교 대기과학과

Reproduction of Ocean Circulation around Korean Peninsula by using a Mesoscale Ocean Circulation Model

JOONG-BAE AHN AND HAE-JIN LEE

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

본 연구에서는 중규모 해양모형을 이용하여 주어진 한반도 주변 대기경계조건에 대한 해양모형의 반응을 연구하였다. 연구는 크게 스핀업(spun-up) 실험과 재현(reproduction) 실험으로 나뉘는데, 스핀업 실험은 해양모형을 스핀업시켜 기후학적 월평균 해양상태로 유도하는 실험으로 월평균 대기상태를 경계조건으로 하여 해양모형을 장기적분하였다. 재현 실험은 1980년~1998년 동안(19년)의 한반도 주변 해역의 해양변동을 재현하고자 한 실험으로 이를 위하여 스핀업 마지막 해의 해양상태를 모형의 초기상태로 하고 그 기간 동안의 월평균 기상 자료를 경계조건으로 해양모형에 적용하여 19년간 적분하였다. 스핀업 실험에서 모형은 동해지역에서의 동한 해류의 이안, 극전선대(polar front) 형성 그리고 소규모 에디들에 의한 냉수대의 형성과 황해지역에서의 연안역과 중앙부 사이에 남북으로 형성되는 수온전선대 그리고 역풍류(Upwind Current)의 변화에 기인한 순환 구조의 계절적인 변동 등 한반도 주변해역에서 나타나는 특징적인 순환들을 잘 모사하였다. 또한 1982~98년까지에 대한 재현 실험에서는 주어진 대기 경계조건에 따른 해면온도의 변동성과 기간동안 약 0.5°C의 해면온도 아노말리의 상승을 관측과 유사하게 모사하였다. 따라서 실험은 모형이 주어진 경계조건에 대하여 해양의 평균적인 상태 뿐만 아니라 변동성도 잘 모사하고 있음을 보여주었다.

In this study, the oceanic responses to given atmospheric boundary conditions are investigated using a mesoscale ocean circulation model. The numerical experiments are divided into two parts: One is, so called, spin-up experiment and the other is reproduction experiment. The spin-up experiment simulates climatic state of ocean by integrating the ocean model with upper boundary conditions of the monthly mean atmospheric climate data. In the reproduction experiment, for the reproduction of major oceanic changes around Korean Peninsula during the period of 1980–1998 (19 years), the model has been integrated under the boundary condition of the 19-year monthly mean atmosphere data. The spun-up state of ocean generated from the spin-up experiment is assigned to the initial boundary condition of the reproduction experiment. In the spin-up experiment, the model properly simulates the major features of circulation structure around Korean Peninsula; such as separation of East Korean Warm Current (EKWC), formation of the polar front, cold water band associated with the small scale eddies in the East Sea, the formation of front along west coast, and the seasonal variation of circulation pattern caused by changing upwind current in the West Sea. In the reproduction experiment, the model has shown the interannual sea surface temperature variations and a warming trend of about 0.5°C during the period around Korean Peninsula, as in the case of the observation. Therefore, it is concluded that the model is capable of simulating not only the mean states but also the variabilities of ocean under the given atmosphere boundary conditions.

서 론

삼면이 바다인 우리나라는 기후계 또는 날씨계의 조정자로 해양의 역할이 매우 크다. 대기에 비해서 큰 열용량과 밀도를 가지는 해양은 대기로부터의 에너지를 저장하였다가 현열, 잠열 및 장파의 형태로 대기에 공급함으로써 기후계 또는 날씨계에 영향을

주게 된다. 대기와 해양은 서로 물리적, 역학적으로 밀접하게 관련되어 있기 때문에 대기와 해양간의 상호 작용을 연구하는데 있어서 주어진 대기 및 해양의 조건에 적절히 반응하는 성분모형 개발과 검증이 필수적이다. 특히 해양모형은 기후학적인 해류와 수온 분포 등의 평균장은 물론이고 해면온도 등의 변동성도 동시에 적절히 모사하여야 한다.

한반도 주변에서의 해수 순환구조와 특성에 관한 연구는 그동안 전체 해역보다는 특정 해역에 대한 연구에 한정되어왔다. 즉,

*Corresponding author: jbahn@pusan.ac.kr

지난 20여년 동안의 연구들은 한반도 주변 해역에서의 해수 물리 특성의 분포와 구조 그리고 조석에 관해서 주로 이루어졌으나 아직 한반도 전 해역에 대한 순환의 원인 규명이나 역학적 과정의 이해는 부족한 실정이다(이와 승, 1994). 그런데 이러한 해양의 물리적 특성에 대한 이해와 그 원인 규명은 대기/해양 상호작용 연구에 있어서 기초가 된다.

선행연구들을 영역별로 나누어보면 다음과 같다. 준 폐쇄성 해역이면서 심해인 동해는 대양에 존재하는 거의 모든 해수의 물리적 현상이 나타나는 해역이다. 따라서 다른 해역보다 모형을 이용한 해수의 특성과 순환의 구조 그리고 순환의 계절적 변동성에 관한 연구가 비교적 많았다. 일반적으로 동해의 표층 해수 순환에는 대한해협을 통해 유입되는 대마난류의 영향도 크지만 북서 계절풍이나 지형적 영향, 결빙 등의 국지적인 영향도 있다(승, 1992). 또한, Sekine(1987)은 동해에서의 계절적 순환구조가 겨울철에는 북서 계절풍에 의해 그리고 여름철의 경우에는 유입되는 난류에 의해서 결정된다 하였다. 이처럼 국지적인 영향을 고려하여 해수순환 구조의 계절적 변동성과 물리적 특성을 밝히고자, 승(1992a, 1993b)은 vortex stretching을 고려한 단순 모형으로 동해의 특징적인 현상(동한 난류의 이안, 북한 난류의 형성, 울릉난수괴 등)을 모사하고자 하였다. 그러나 이 지역에서의 심층 순환과 열염순환에 관한 연구는 아직 활발하지 않다.

평균 수심이 44 m의 반폐쇄성 천해인 황해에 대한 연구를 살펴보면 그 동안의 적지않은 연구에도 불구하고 전반적인 해수 순환계에 대해서 아직도 모호한 부분이 많다(김, 1998). 이 지역에서의 연구는 부이 추적 등의 분석적 접근으로 물리적인 특성을 규명하고자 하는 것과 수치모형을 이용하여 해수 순환의 특성을 파악하고자 하는 연구가 주를 이룬다. 황해는 다른 해역에 비해 대단히 얇은 수심을 가진 지형적 특성으로 기상 변동에 민감하며 국지적 영향과 외부로부터의 열과 담수 유입 등이 순환에 큰 영향을 준다. 그리고 연안지역과 해역의 중앙부 사이에 뚜렷한 연안전선이 형성되는데(이와 승, 1994), 이와 관련하여 선행연구들은 황해나 남중국해의 순환이 중국 대륙 연안에서의 담수의 유입과 대기와 해양의 상호작용, 조류의 혼합작용 그리고 쿠로시오 해류 등 국지적인 요인들에 의해 결정된다 하였다(Chen *et al.*, 1994; 방, 1998). 최근에 Hong(1998)은 세밀화된 격자와 연직층으로 구성된 모형을 이용하여 남중국해와 쿠로시오 해역의 특징적인 모습을 제시하기도 하였다.

남해지역에서의 연구는 상대적으로 다른 해역에 비해 연구 결과가 많지는 않으나 대한해협을 통과하여 동해로 유입되는 대마난류의 계절적인 변동성과 동해 해수순환의 특성을 연계하는 연구가 많았다. 그리고 해수의 물리특성의 시·공간적인 분포와 연안전선 형성 등에 관한 연구도 있었다. Yamagata(1997)는 POM(Princeton primitive equation Ocean Model)모형을 이용하여 쿠로시오 해류가 계절적인 변동을 하며 그 수송량이 하계에 최대로 나타나는 것을 보였으며, 노 등(1995)은 대한해협에서의 수온과 염분 그리고 해류의 연직적인 구조로부터 대한해협의 중앙부에서 다른 두 개의 수괴가 뚜렷한 연안전선을 형성함을 보였다.

중규모 해양모형(Mesoscale Ocean Circulation Model)을 이용한 연구는 해수의 물리적 특성을 이해하고 원인을 규명하는데 중요할 뿐만 아니라 최근 기상 및 해양의 중·장기 예측과 관련하

여 중요성이 부각되고 있는 접합 모형의 성분 모형으로써 중요하다. 본 연구에서는 지역 규모의 중·장기 중규모 대기/해양 접합 시스템 연구를 위하여 개발한 중규모 해양모형의 검증에 위하여 대기경계조건에 대한 해양모형의 반응과 해양의 평균상태를 살펴 보았다.

모형의 구조

본 연구에서 사용한 중규모 해양모형은 SOMS(Sandia Ocean Mesoscale Simulation) 모형에 기초를 둔 Cox 형태의 DieCAST(Dietrich *et al.*, 1987) 모형이다. 모형은 Boussinesq 및 정수 가정에 바탕을 두며 z-좌표계 상에서의 질량, 운동량, 열에너지 그리고 염분 보존 방정식으로 구성되어있다. 본 연구에서는 모형을 연직적으로 총 21개의 층으로 구성하였으며, 첫 번째 층의 깊이는 10 m 이고 이하 나머지 층의 깊이는 각각 21, 41, 78, 116, 163, 220, 289, 374, 477, 603, 756, 944, 1170, 1450, 1790, 2210, 2710, 3330, 4080, 5000 m로 하였다. 모형은 측면 경계조건적 적용이 용이하도록 Arakawa-C 격자망 형태로 하였고 모형 상층에 rigid-lid를 가정함으로써 외부 중력파를 제거시켰다. 모형의 격자는 위·경도 각각 0.3°×0.3°이며, 전체 모형의 계산 영역은 Fig. 1과 같이 경도 116.7E°-156E°, 위도 22.9N°-61N°이다. 중규모 해양 에디의 수평규모를 살펴볼 때 에디들의 생성과 발달 그리고 소멸을 분해하기 위해서는 최소한 위도, 경도 각각 1/12° 정도의 상세 격자가 요구된다. 그러나 1/4° 보다 낮은 분해능을 갖는 모형들끼리는 격자간격이 작을 수록 모형의 성능이 향상되는 것을 발견할 수 있

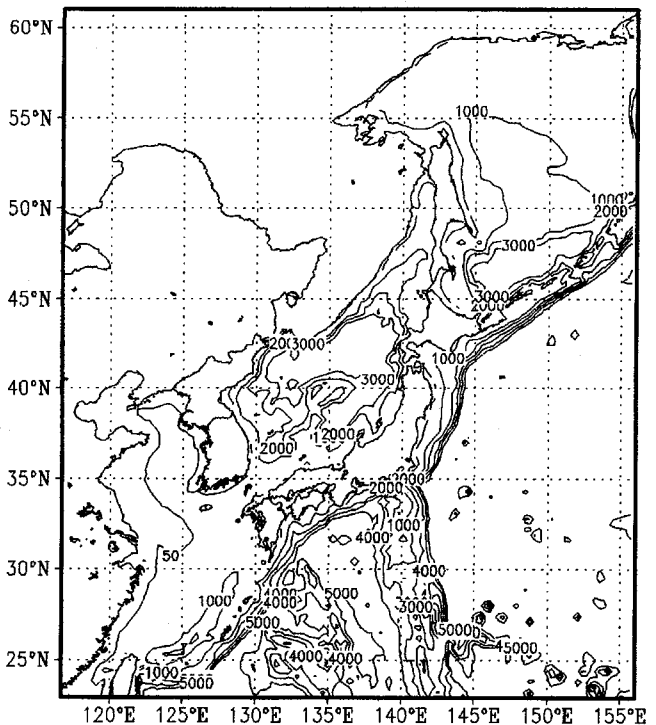


Fig. 1. Horizontal domain and geometry of the mesoscale ocean model used in the study (Contour intervals are 1000 m and 50 m, respectively, below and above 100 m depth).

으나 1/4° 보다 높은 분해능을 갖는 모형에서는 모형 격자간격의 세밀화에 따른 모형 결과의 개선에 별다른 차이를 발견할 수 없는데 이는 모형이 갖고 있는 그 밖의 불확실성 때문이다(IPCC, 1996).

본 연구에 사용된 모형의 격자는 1/4° 보다 약간 크지만 에디를 모사할 수 있는 모형이라 간주할 수 있는데, 이는 에디의 모사가 모형 격자의 크고 작음만의 문제가 아니라 에디의 수명과 관계가 있는 분산항 처리와도 관계가 있기 때문이다. 본 연구에서는 분산항을 처리함에 있어서 분산을 물리적 분산과 수치적 분산으로 나눈 후 수치적 분산을 최대한 줄임으로써 모형 내의 마찰이 수치적 안정을 위하여 지나치게 커지지 않도록 하는 수치적 방안을 사용하였다(Dietrich *et al.*, 1987). 이 방안은 방향 분산(directed diffusion)으로, 수치 분산의 방향을 고려하는 것인데 가령 유체의 흐름이 격자선에 평행한 경우 흐름의 방향에 연직 방향으로 수치 분산을 0으로 하는 것이다. 따라서 총 분산이 흐름에 평행한 방향으로 크고, 직각인 방향으로 상대적으로 작게 주어지게 된다.

경계조건

해양모형을 다루는 경우에 가장 어려운 부분 중의 하나는 모형의 측면 조건을 결정하는 것인데, 이는 관측 자료가 절대적으로 부족하기 때문이며 이로 인해 부족한 자료를 객관 분석을 통하여 내삽·외삽하는 경우 문제가 발생한다. 이와 같은 경계조건 문제를 해결하기 위하여 전 지구적인 규모의 OGCM(Ocean General Circulation Model)의 결과를 이용하는 경우도 있으나 이 경우 OGCM이 갖고 있을 문제점이 중규모 해양모형에 그대로 전이됨으로써 경계조건이 실제와 크게 다를 수 있다.

본 연구에서는 Da Silva(1994)의 기후학적 월평균 해수온 자료를 이용하여 지근 관계와 정수 관계를 만족하는 경계면 유속을 결정하여 이를 경계조건으로 이용하였다. 경계면 유속은 매 월별로 해양모형의 측면 경계조건이 주어지도록 하였다. 해양모형에 사용되는 초기자료 또한 Da Silva(1994)의 연직 32층, 위도, 경도 각각 1°의 자료를 이용하였다. 이 자료 중 기후학적 월평균 해면온도와 염분을 해양모형의 격자에 맞게 수평·연직 내삽하였고 깊이가 1000 m까지는 1월 평균값을 사용하였다. 그리고 1000 m미만부터는 모형의 최하층 깊이인 5000 m까지 연평균 자료를 이용하였다. 해류의 경우 cold start 상태를 가정하여 초기에 모든 점에서 영의 값을 갖도록 하였다. 해양모형의 측면 경계조건은 모형 남쪽의 쿠로시오 유입이 있는 곳과 일본 대륙의 남쪽을 통과하여 쿠로시오 해류의 유출이 있는 모형의 동쪽 경계에 각각 풍상층 값을 주는 upwind method를 이용하였다.

본 연구에서는 바람, 기온, 습도, 기압, 운량, 장·단파속 등의 변화에 따른 해양로의 운동량 및 열속(단파속, 장파속, 잠열속, 현열속)의 추정을 위해서 Ahn(1992)이 사용한 벌크공기역학법을 상부 경계조건으로 이용하였다.

실험방법

해양은 대기보다 열용량이 크므로 주어지는 대기 경계조건에 반응하는 시간이 길다. 따라서 해양이 준평형 상태에 도달하기 위해서는 모형의 장기적분이 요구된다. 본 연구에서는 중규모 해양

모형을 이용하여 2가지 종류의 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 해양의 상태를 기후학적 준평형 상태에 도달시키기 위한 스핀업 실험으로 이 실험에서는 대기의 기후학적 월평균 값을 경계값으로 반복적으로 주어 모형을 장기적분하였다. 본 연구에서는 모형의 최하층이 열적으로 평형 상태에 이른 시점을 준평형 상태에 이른 것으로 판단하여 스핀업 실험을 17년간 수행하였으며, 이 때 이용된 기후학적 월평균 기상 자료는 위·경도 1°×1°의 COADS(Comprehensive Ocean Atmospheric Data Set) 자료이다.

두 번째 실험은 스핀업된 기후학적 해양상태로부터 과거의 해양순환을 재현해 내기 위한 재현 실험으로 준평형 상태에 도달한 적분 17년의 최종 상태를 초기 조건으로 하고 1980-1998년 동안의 NCEP/NCAR 재분석 월평균 자료를 경계조건으로 이용하여 모형을 19년간 적분하였다. 모형 검증에 위하여 동일 기간에 대하여 위도와 경도 간격이 각각 1°인 NOAA의 OISST(Optimal Interpolation Sea Surface Temperature) 월평균 자료를 사용하였다.

스핀업 실험 결과 및 토의

Fig. 2는 적분 마지막 해로부터 5년 평균한 동해지역(127°E~142°E, 34°N~50°N)에서의 연평균 모형 최상층 온도장(a)과 유선장(b)이다. 일반적으로 동해의 상층 순환 구조와 물리적인 특성은 대한해협으로부터 유입되어 한국 연안을 따라 북상하는 동한 난류(East Korean Warm Current)와 표층 냉각의 영향을 받아 남하하는 북한 한류(North Korean Cold Current)에 의해 결정된다(송, 1992). Fig. 2(a)에서 보듯이 한반도 연안을 따라 북위 38°를 기준으로 고위도 지역에서는 주변 온도보다 낮은 해수(9°C~10°C)가 나타나며, 저위도에서는 16~18°C의 따뜻한 해수가 나타난다. 이와 같은 특징은 유선장(Fig. 2(b))을 살펴보면 더욱 확실하게 나타나는데, 약 38°N 부근에서 북으로부터 연안을 따라 남하하는 북한 한류와 대한해협으로부터 유입되어 한반도 연안을 따라 북상하는 동한 난류가 만나서 극전선대를 형성한다(Naganuma, 1973). 형성된 극전선대를 따라 사행하는 북한 한류의 연장 부분이 반시계 방향의 순환을 형성하고 약 40°N, 131°E 지역에서 주위보다 1~2°C 낮은 독립적인 냉수대가 나타나는데, 송(1993)은 이와 같은 냉수대가 동해 북부서 지역에서의 바람, 해수면의 냉각 등과 같은 기상 및 대기-해양 상호작용에 의한 국지적인 영향에 의한 것이라 하였다. 또한 극전선대 남쪽으로 Naganuma(1973)에 의해 언급된 시계방향 순환이 크게 나타나고 그 안에 복잡한 구조로 사행하는 에디들이 나타난다. 사행하는 에디들이 독립적인 순환을 형성하는 동해 남서지역(132°E, 36.5°N)에는 에디들에 의한 냉수역이 나타난다.

Fig. 3의 (a)와 (b)는 동해지역(127°E~142°E, 34°N~50°N)에서 적분 마지막해로부터 5년 월평균한 1월 평균 표층 유선장과 온도 분포이고 (c)와 (d)는 8월에 대한 각각의 분포이다. 동해지역에서의 순환의 구조는 대만난류의 유입에 의한 영향이 주를 이루나 바람이나 해수면의 냉각 그리고 해저지형 등의 국지적인 요인 등에 의해서도 순환의 구조가 결정되어지므로 이에 따라 계절적으로 다른 모습을 나타낸다(송, 1993). 모사된 1월 평균 유선장(Fig. 3(a))은 북한한류가 강화되어 북위 37°N까지 남하하고 있음을 보이고 있다. 북한한류의 강화는 동해의 북부서 지역에서 강한 북서계절풍에 의한 것으로 해면을 통한 상향 열속의 증가로 해수면 냉각

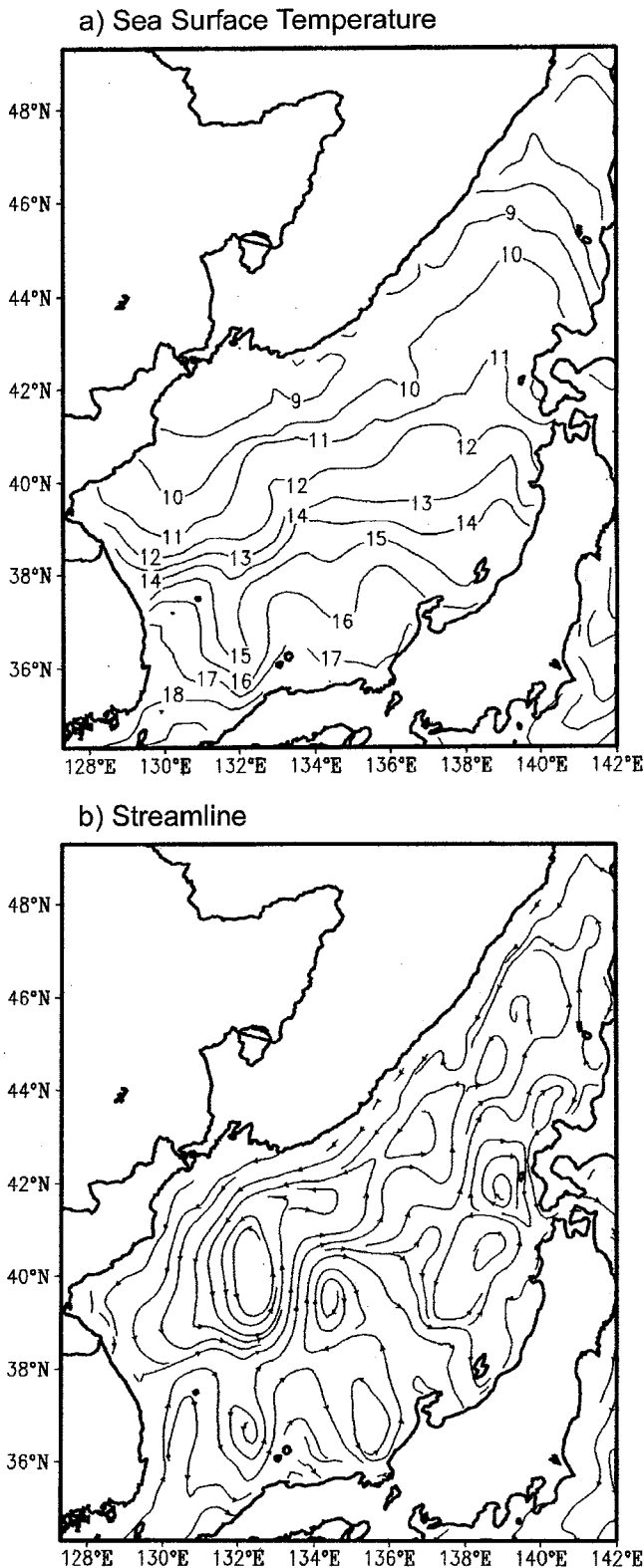


Fig. 2. Simulated (a) annual mean temperature and (b) streamfunction in the upper layer of model over East Sea.

이 두드러진다. 그리고 북한한류의 강세로 극전선대가 남쪽으로 내려와 냉수대가 북위 37°N 까지 확장되어 있다(Fig. 3(b)). 남북

간의 수온의 경도가 이 시기에 최대가 되는데 이는 해수의 경압성을 증가시켜 결국 중규모 에디의 활동을 활발하게 한다. Fig. 3(c)는 8월 평균 유선장으로 대한해협을 통하여 유입되는 난류의 수송량이 약 2Sv으로 최대에 이르는 기간이다(송, 1993). 이 기간에 대마난류의 강한 유입으로 극전선대가 동해의 북북동쪽(41°N)으로 치우쳐 있으며 1월과 비교하여 난수역이 북쪽으로 확장되어 나타난다. 동해 전체가 북태평양 고기압의 영향을 광범위하게 받는 이 기간 동안에는 겨울에 비하여 수온 경도가 작다.

Fig. 4는 동중국해를 포함한 황해 지역에서 적분 마지막해로부터 5년 월평균한 표층에서의 유선장과 온도장으로 (a)와 (b) 그리고 (c)와 (d)는 각각 1월과 8월의 평균장이다. 황해는 얕은 수심의 지형적인 특성과 탁월풍에 역류하는 역풍류(upwind current), 조석현상, 대마난류의 유입, 대기/해양 상호 작용, 담수의 유입 등 국지적 요인들이 복합적으로 작용하여 동계와 하계기간의 순환 구조가 동해에 비하여 큰 차이가 난다(김, 1998). 1월 평균 유선장(a)를 살펴보면 이 기간은 높은 수온의 대마난류의 유입과 한반도 연안과 중국 대륙연안을 따라 남향하는 흐름이 뚜렷이 구분되며 이로 인하여 125°E를 기준으로 연안류와 황해 중앙부사이에 강한 수온전선이 나타난다(Fig. 4(b)). 이것은 수심이 얕은 황해의 지형적인 특성과 탁월풍에 역류하여 형성되는 역풍류 등의 국지적인 영향 때문이다(방, 1998; 김, 1998). Fig. 4(c)는 8월의 유선장으로 1월과 아주 다른 양상을 보인다. 1월과 달리 8월에는 탁월풍의 변화에 의한 역풍류 변화로 황해 중앙부로 유입되는 대마난류가 뚜렷하게 약화되어 나타나며, 대륙 연안을 따라 흐르는 남향류 역시 약화되어 나타나고 있다. 이에 따라 황해 중앙부에 반시계방향으로 에디가 사행하면서 냉수대가 형성되며, 125°E를 중심으로 연안측의 고온수와 외해측의 냉수사이에 강한 수온전선이 남북으로 형성되는 것을 모형은 모사하고 있다. 즉, 겨울철에는 황해의 중동부와 중서부에 각각 시계 방향과 반시계 방향의 흐름으로 인하여 황해의 중앙부에 난류가 이루어지면서 난수역이 자리를 차지하게 되며, 여름에는 황해 중앙부에 반시계 방향의 에디들에 의한 흐름으로 난수역이 우리 나라 서해안을 따라 북상하게 되는 모습을 모사하고 있다. 물론 이 과정에서 시계 또는 반시계 방향의 에디가 각각 상층부에서 에크만 수렴과 발산을 일으켜 이에 의한 해수온의 추가적인 상승과 하강을 고려할 수도 있으나 황해와 같이 상층과 하층이 조석이나 마찰에 의하여 잘 혼합되어 있는 해수에서 에크만 수렴·발산이 해면온도에 기여하는 정도는 상대적으로 낮을 것이다.

재현 실험 결과 및 토의

모형의 해양순환 재현 능력을 검증하기 위하여 1980년부터 1998년까지 19년 동안의 대기의 월평균 기온, 바람, 비습, 기압, 단파속, 운량 등의 자료를 경계조건으로 모형을 적분하여 그 결과를 월평균 OISST(Optimal Interpolation Sea Surface Temperature) 자료와 비교하였다. OISST 월평균 자료가 1982년부터 사용이 용이한 관계로 1982~98년까지 17년 동안의 모형 결과와 관측에 대한 월평균을 각각 구한 후 이로부터의 아노말리를 이용하여 모형의 결과와 관측을 비교 분석하였다.

Fig. 5는 한반도 전해역(117°E-140°E, 30°N-50°N)에서 1982년~98년

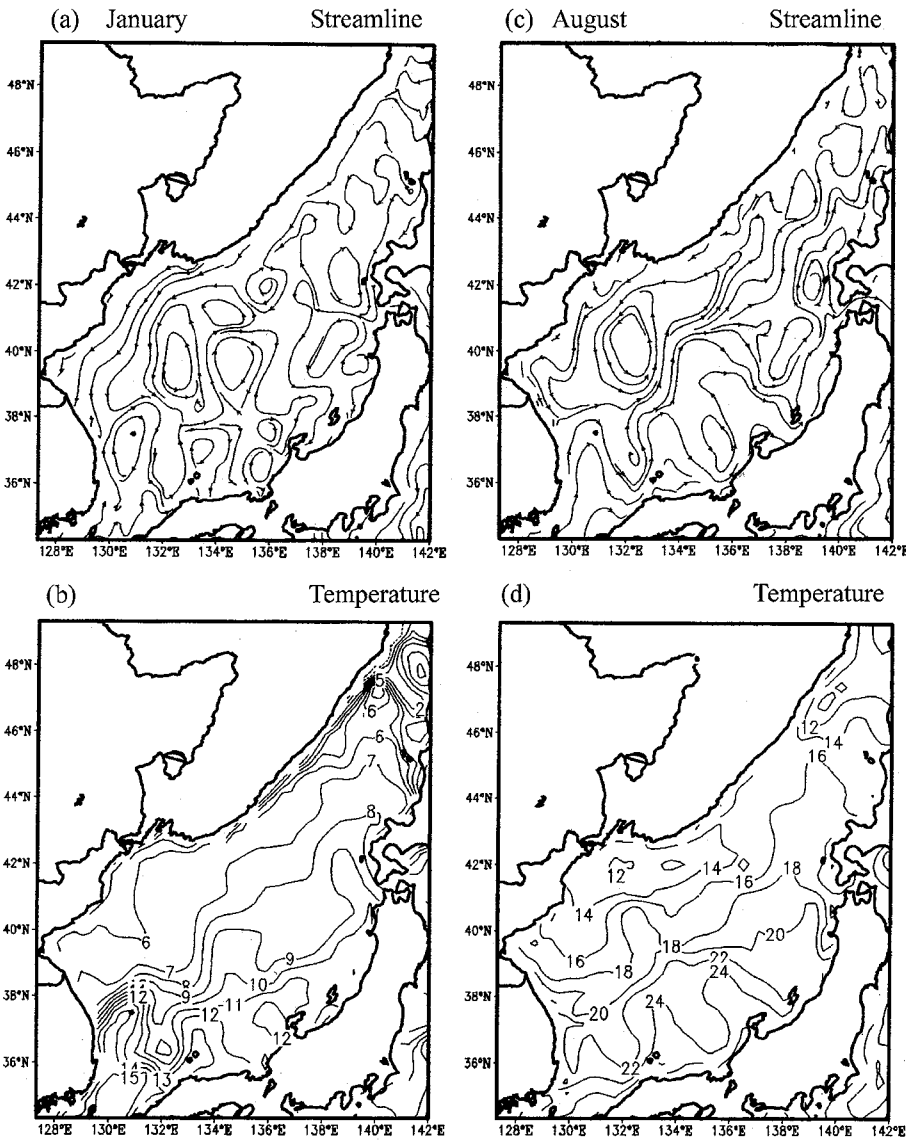


Fig. 3. Simulated monthly mean streamfunction ((a), (c)), temperature ((b), (d)) in the upper layer of model over East Sea. (a), (b) are for January. (c), (d) are for August.

동안 관측과 모형에서 나타난 해면온도 아노말리의 시간 전개이다. 이 기간에 모형은 크게 4번(85~86년, 90~91년, 94~95년, 97~98년)의 양의 아노말리와 2번(86~87년, 93~94년)의 음의 아노말리를 나타내며, 관측과 비교하였을 때 일부 기간 동안 정량적인 차이가 있기는 하지만 대체로 적분 전 기간에 대하여 모형이 해면온도의 변동성을 잘 모사하고 있다. 즉, 모형이 관측에서 보이는 해면온도 변동성을 전반적인 추세뿐만 아니라 그 변동값까지도 유사하게 모사하고 있는데, 특히 1984~85년과 80년대 후반 그리고 90년대 전반에는 관측과 모형의 결과가 거의 일치함을 보인다. 해면온도의 변동성을 간단한 1차 함수로 고려하였을 때, 이 기간동안 모형과 관측에서의 해면온도 아노말리가 각각 0.5°C와 0.8°C 상승하였다. 이는 관측과 모형 결과 모두 한반도 주변 해수온이 증가하는 경향이 있다는 것을 보인다. 또한 관측에서 최근 3년동안 한반도 주변해역에서 평균적으로 0.5°C이상의 강한 아노말리가 지속되는 모습을 보이는데, 모형 역시 이와 비슷한 추세를 모사하고 있다. 한편 이 기간 동안에는 82/83, 87/88, 91/92, 94/95, 97/98 엘

니노와 88/89, 95/96, 98/99 라니냐가 있었으나 한반도 주변의 관측 및 모형의 결과에서는 이들과 관련한 뚜렷한 변화나 상관을 찾을 수 없었다.

Fig. 6은 각 해역별 해면온도 아노말리의 시간전개로 (a)는 동해 지역이고, (b)는 황해, (c)는 남해 지역이다. 한반도 주변 해역의 평균 아노말리의 변화와 마찬가지로 각 해역에서의 변화도 전반적인 경향은 물론이고 정량적인 변화량에 있어서도 관측과 결과는 대단히 유사하다. 또한 Fig. 5에서와 같이 동해(a), 황해(b), 남해(c) 세 지역 모두 모형과 관측에서 해면온도가 전체적으로 상승하고있는데, 황해(b)와 남해(c)의 경우에 상승 경향이 더 뚜렷하다. 특히 최근 90년대 중반 이후 한반도 주변의 모든 해역에서 평년에 비해 강한 양의 아노말리가 지속적으로 나타나고 있는 것을 모형이 적절히 모사하고 있다.

Table 1은 연구 기간 동안의 각 해역별 해면온도의 아노말리 상승치를 나타냈다. 평균적으로 모형은 한반도 주변 해역에서 약 0.5°C이상의 해면온도의 아노말리 상승을 보였는데, 이와 같은 결

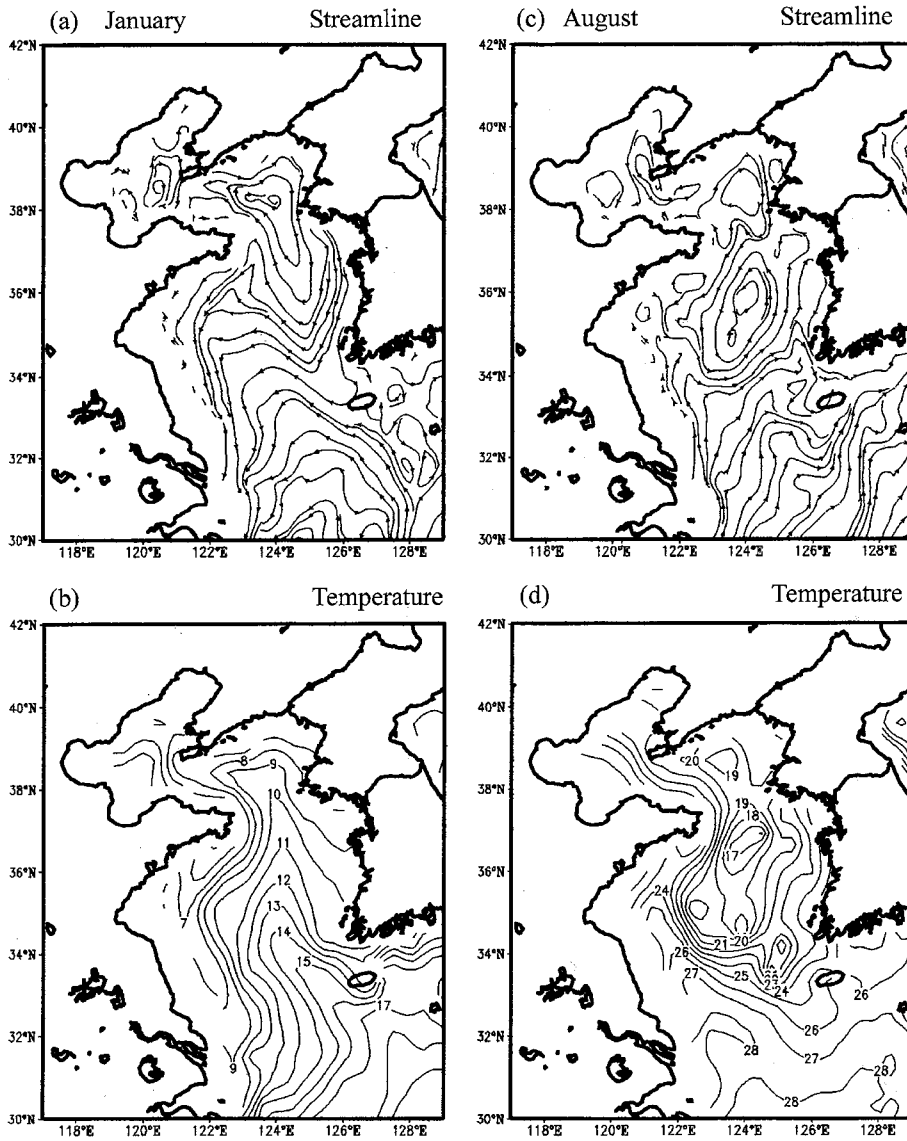


Fig. 4. Same as Fig. 3, but for over the Yellow sea.

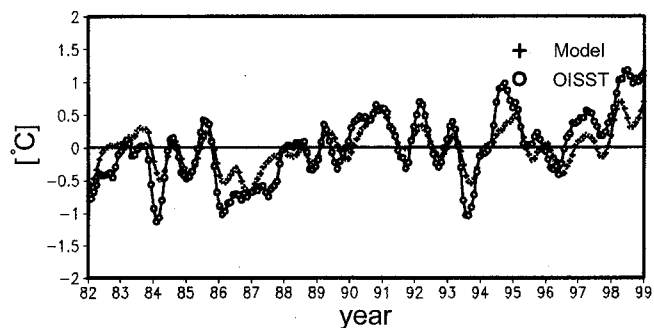


Fig. 5. Time series of sea surface temperature anomalies of the model (cross) and OISST (circle) around Korean Peninsular for the period of 1982 and 98.

과는 30년간(1968년~1997년)의 정선 수온자료 분석결과(한국해양연보 1998)와 일치하는 것으로 모형이 최근의 한반도 주변해역의 해면온도 상승 경향을 비교적 잘 재현하였다.

Fig. 7은 적분기간 82~98년 동안 한반도 전역에 대한 해면온도 아노말리에 대한 (a)모형과 (b)관측에서의 분광발도이다. 95% 신뢰수준을 넘는 주기를 살펴보면 관측과 모형 모두 1.1년의 주기가 우세하게 나타나며 다음으로 5년과 3년 정도의 주기가 탁월하게 나타났다. 관측과 모형에서 탁월하게 나타난 1.1년의 주기는 강과 노(1985) 그리고 안 등(1997)이 지적한 극조 현상(pole tide)과 관련이 있다. 그리고 다음으로 우세하게 나타난 5년 정도의 경년변동 주기는 86-87년과 91-92년 정도에 최대 진폭을 갖는 장주기의 변화가 반영된 것으로 보인다.

Fig. 8은 17년 적분 기간동안 북위 37°N를 따른 해면온도 아노말리의 시간 전개로 (a)는 모형의 결과이고, (b)는 관측에서 나타난 결과이다. 모형의 결과는 0.3° 간격으로 그려졌기 때문에 해면온도 아노말리의 상세한 변화를 보여주고 있으나 OISST의 자료는 1° 간격이므로 그림에서는 동서 방향으로 길게 아노말리가 그려졌다. 그러나 1982~84년을 제외한 거의 모든 기간동안 모형에 나타난 음과 양의 영역이 관측과 유사한 공간분포를 보여주고 있

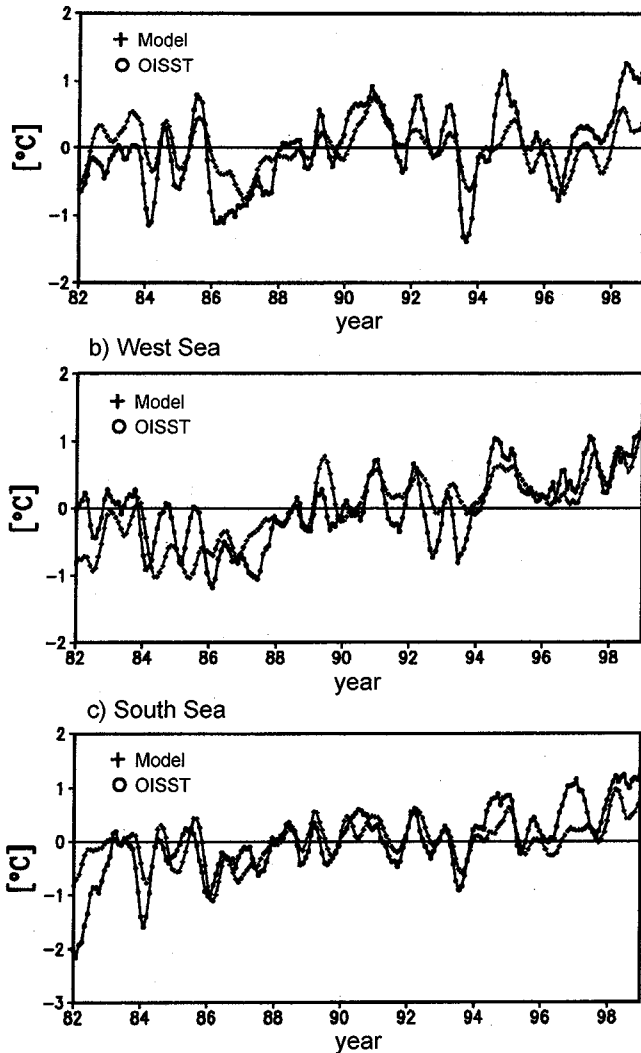


Fig. 6. Same as Fig. 5, but for a) East Sea, b) Yellow Sea and c) South Sea regions.

Table 1. Variability values of sea surface temperature anomalies for the period of 1982–98 (Unit: °C)

	Model	Oisst
East sea	0.4	0.7
West sea	0.61	0.9
South sea	0.5	1.2

다. 86~87년 기간에 130°E 부근과 93~94년의 133°E~135°E 부근에 나타나는 관측된 음의 아노말리가 모형에서도 같은 부호의 강한 아노말리로 나타난다. 1990~91년의 강한 양의 아노말리의 경우, 관측에서보다 다소 동쪽에서 최대의 값이 나타나지만 그 전체적인 분포는 상호 유사하다.

Fig. 9은 한반도 주변의 해면온도에 대한 EOF 분석으로 첫 번째 모드에 대한 공간 벡터와 시간 계수를 나타내며, (a)는 모형결과이고 (b)는 관측이다. 모형의 경우 전체 분산의 25%를 나타내는 첫 번째 모드의 공간 분포는 동중국해와 일본 남부해역을 제외한 거의 모든 지역에서 양의 부호를 가지고, 시간계수는 Fig. 4

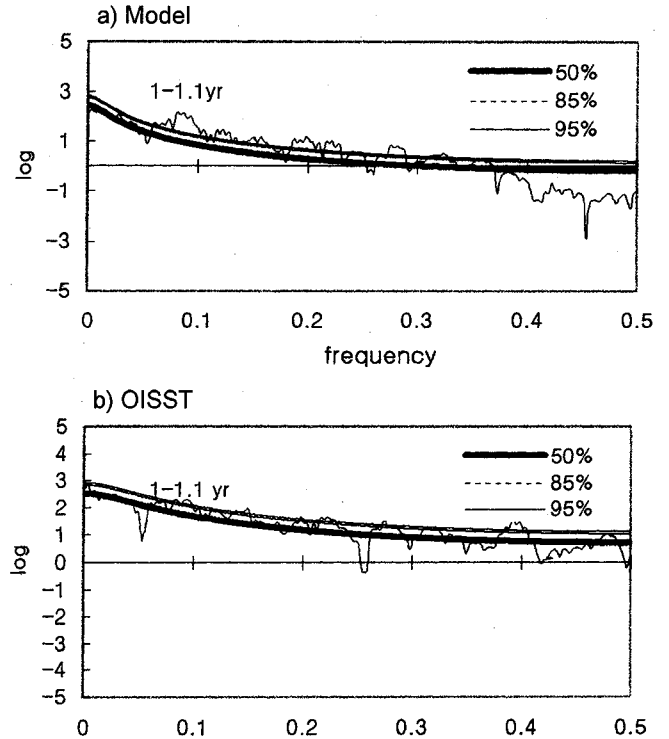


Fig. 7. Spectra of sea surface temperature anomalies for (a) model and (b) OISST around Korean Peninsula.

의 대표적인 모습을 보여주는데 83~84년, 86~88년, 93~94년의 강한 음의 아노말리와 89~92년, 94~95년 그리고 모형 적분의 마지막 3년(96~98)동안의 양의 아노말리가 나타난다. 첫 번째 EOF 모드가 전체의 68%를 나타내는 관측의 경우, 전체적으로 모형과 유사한 공간적인 분포를 보인다. 모형과 관측 자료의 격자 간격 차이 등으로 인하여 공간 분포에서는 다소의 차이를 보이고 있으나 계수의 시간적 변화의 경우에는 관측과 모형의 결과가 경향이 나 진폭에 있어서 비교적 유사하다.

결론 및 토의

본 연구에서는 대기 경계조건에 대한 중규모 해양모형의 반응을 살펴보고자 두가지 실험을 수행하였다. 모형의 평균적인 기후 상태를 살펴보기 위한 첫 번째 스핀업 실험에서는 모형의 최하층이 열적으로 평형상태에 이른 시점을 준평형 상태에 이른 것으로 판단하여 모형을 19년간 적분하였다. 이 실험 결과 모형은 기후 월평균 값에 대한 해양의 평균적인 상태를 잘 묘사하고 있었다. 먼저, 동해 지역에서 연안을 따라 북상하는 동한 해류의 이안 현상과 동한 난류와 북한 한류가 만나 37°N 부근에서 형성하는 극전선대 그리고 극전선대 주변에서 발생하는 소규모 에디 운동 등의 동해 해수 순환 구조를 결정짓는 특징적 모습들이 모형에서 나타났다. 또한 계절에 따른 극전선대의 이동과 난수역의 위치 변화 등의 계절적인 변동성 역시 모형에서 잘 묘사되었다. 그리고 황해 해수 순환의 특징적 모습 역시 모형에서 잘 묘사되었다. 황해는 수심이 얕아 대기의 변화에 대해 상대적으로 빨리 반응하여 동해

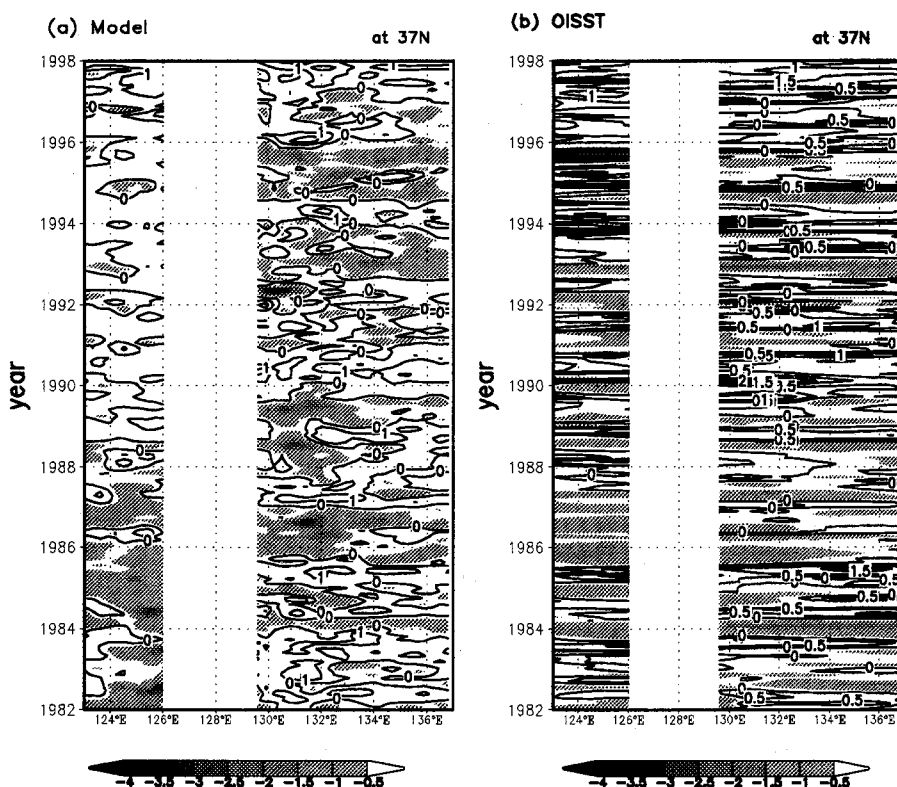


Fig. 8. Time-longitude plots of sea surface temperature anomalies of (a) model and (b) OISST along 37°N for the period of 1982–98.

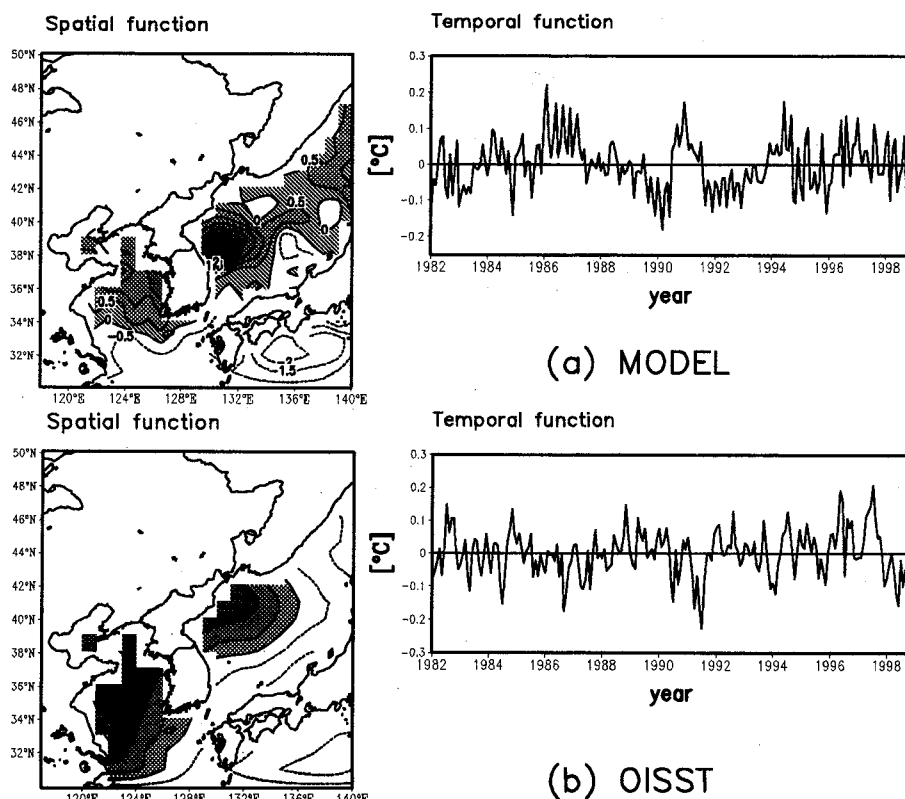


Fig. 9. Spatial distribution and time coefficient of the first EOF component of sea surface temperature anomalies for (a) model and (b) OISST.

순환 구조보다 계절에 따른 변화가 뚜렷하게 나타났다. 겨울철에 황해 중앙부로 유입되는 대마난류와 남향하는 대륙의 연안류 모사와 여름철에 역풍류에 의한 남향류의 강화로 황해 중앙부 지역의 냉수대 형성 등과 같은 순환 구조가 모형에서 묘사되었다. 따라서 본 연구에서 사용한 중규모 해양모형은 주어진 대기경계조건에 잘 반응하고 있음을 보였다.

재현 실험에서는 해양의 평균상태 뿐만 아니라 해양의 변동성을 살펴보기 위해 NCEP/NCAR 재분석 자료로부터 얻어진 1980~98년 월평균 값을 상층 경계조건으로 하여 스피업 실험의 마지막 상태를 모형의 초기조건으로 하여 모형을 19년간 적분하였다. OISST의 분석 결과 한반도 주변의 해면온도 아노말리가 지난 17년(1982~98년) 동안 0.8°C 상승하였는데, 모형에서도 동일한 기간에 약 0.5°C의 해면온도 아노말리 상승을 나타내었다. 적분 마지막 3년 동안 관측(OISST)에서 보여지는 한반도 주변 해역에서 0.5°C 이상의 강한 양의 아노말리가 지속되는 모습이 모형에서도 나타났으며, 해역별 해면온도 변동성 또한 관측과 유사하게 묘사되었다. 또한 해면온도에 대한 분광밀도 분석을 통하여 5년 주기의 경년 변동성과 1년~1.1년의 극조와 같은 주기성을 모형과 관측(OISST)에서 동일하게 찾을 수 있었으며, 해면온도 아노말리에 대한 공간 분포 역시 모형과 관측이 유사하였다.

본 연구에서 수행한 두가지 실험을 통하여 한반도 주변해역의 평균적인 순환구조와 변동성등의 물리적인 특성을 모형이 관측과 유사하게 묘사하였다. 앞으로 해수의 물리적 특성과 순환에 영향을 주는 국지적인 요인, 예를 들어 연해주 주변의 해빙(sea-ice)의 영향과 내륙 연안으로부터의 담수의 유입 등을 고려할 경우, 한반도 주변 전역에서의 해수의 순환적 특성과 물리적인 특성은 더욱 더 사실적으로 묘사될 것으로 기대한다.

본 연구는 우리 나라의 주변 해역에서의 실시간 해양상태를 예측하는데 있어서 필요한 해양상태의 초기화 작업이 중규모 해양모형을 이용한 스피업 실험과 재현 실험을 통해 적절히 이루어질 수 있음을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 '영종도(인천공항) 주변 해역의 해무에 관한 연구'를 위한 '2000년도 기상연구소 지원연구비'의 일부 보조로 이루어졌다. 모형의 설치와 운용에 도움을 준 부산대 대기과학과 조익현군에게 감사한다.

참고문헌

강용균, 노재식, 1985. 과거 30년간(1954-1983) 한국기온의 연변화 및 연별 변동. 한국기상학회지, 21: 1-10.
김철호, 1998. 황해 해수순환모델 검토. 해양연구, 20: 325-335.

노영재, 박문진, 이상룡, 이재철, 1995. 대한해협 횡단면 상의 수온·염분과 해류의 구조 및 변동. 한국해양학회지, 30: 237-249.
방익찬, 1998. Seasonal Variation of Water Mass Distributions in the Eastern Yellow Sea and the Yellow Sea Warm Current. 한국해양학회지, 33: 41-52.
승영호, 1992. 한반도 주변의 수괴와 해수순환, 한국해양학회지, 27: 324-331.
승영호, 1993. A Numerical Modeling of the East sea Circulation. 한국해양학회지, 28: 2-304.
안중배, 류정희, 조익현, 박주영, 류상범, 1997. 한반도 기온 및 강수량과 주변해역 해면온도와의 상관관계에 관한 연구. 한국기상학회지, 33: 327-336.
이흥재, 승영호, 1994. 한국 해양 물리 연구의 현황과 발전: 문헌 검토. 한국해양학회지, 39: 64-81.
Ahn, Joong-Bae, 1992. Interannual Variability at the Surface of World Oceans. *J. of Korean Meteor. Soc.*, 28: 193-209.
Chen, Changsheng, R.C. Beardsley, R. Limburner and K. Kim, 1994. Comparison of winter and summer hydrographic observations in the Yellow and East China Seas and adjacent Kuroshio during 1986. *Cont. Shelf Res.*, 14: 909-929.
Hong, Chul-hoon, 1998. Simulation of sea water Response in Deukyang Bay to Typhoon using the Princeton Ocean Model. *J. of the Korean Soc. of Oceanog.*, 3: 53-63.
Da Silva, A.M., C.C. Young and S. Levitus, 1994. Atlas of surface marine data 1994, Vol. 1: Algorithms and procedures. NOAA Atlas NESDIS 6, U.S. Department of Commerce, Wash. D.C., 83 pp.
Dietrich, D.E., M.G. Marietta and P.J. Roache, 1987. An ocean modeling system with turbulent boundary layers and topography. Part I: Numerical description, *Int. J. of Numer. Method in Fluids*, 7: 833-855.
Hodur, R.M. 1996. The Naval Research Laboratory's Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System(COAMPS). *Mon. Wea. Rev.*, 125: 1414-1430.
IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), 1996. Climate Change: The Science of Climate Change, J.T. Houghton, L.M. Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK., 480 pp.
Naganuma, K., 1973. A discussion on the existence of Tsushima Current Third sub-branch. *News Fish. Res. Japan Sea*, No. 266 pp.
Sekine, Y., 1987. A numerical experiment on the seasonal variation of the oceanic circulation in the Japan sea. *Oceanography of Asian marginal seas*, Elsevier oceanographic series, 54: 113-128.
Yamagata, T., T. Kagimoto, 1997. Seasonal transport variability of the Kuroshio: An OGCM simulation. *J. Physic. Ocean.*, 27: 403-418.

2000년 3월 6일 원고 접수

2000년 5월 15일 수정본 채택

담당편집위원: 심태보