

VAF 변분법을 이용한 전구 해양자료 동화 연구

안중배 · 윤용훈¹ · 조익현² · 오혜람

부산대학교 대기과학과, ¹기상연구소 해양기상지진연구실, ²기상청 수치예보과

A Study of Global Ocean Data Assimilation using VAF

JOONG-BAE AHN, YONG-HOON YOON¹, EEK-HYUN CHO², AND HERAM OH

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University,

¹Meteorological Research Institute, ²Korea Meteorological Administration

본 연구에서는 전구 해양에서 관측되는 ARGO 및 TAO 해양 자료를 이용하여 해양의 3차원적인 구조를 분석·동화하고 궁극적으로 해양대순환모형을 위한 초기장을 생산하였다. 초기장의 생산을 위하여 전구 해양대순환 모형인 MOM3.1을 이용하였으며 생산한 배경장에, 계산시간과 계산공간을 절약할 수 있는 공간필터를 사용한 변분법(VAF, variational analysis using filter)을 이용하여 ARGO와 TAO 수온 자료를 동화하였다. 또한 본 연구에서는 자료 동화가 미치는 지속적인 영향을 살펴보고자 실험적분을 수행하였는데, 모형의 초기입력 자료를 자료동화 기법을 적용한 경우와 적용하지 않은 두 가지로 나누어 비교 실험을 수행하였다. 본 연구에서 자료 동화된 분석장은 OISST와의 비교를 통해 적절히 생산되었음을 보여주었다. 관측자료를 동화한 분석장을 초기자료로 한 10개월간의 적분결과를 살펴보면, 자료 동화를 통해 제거된 모형의 계통적 bias가 적분이 진행되는 과정에서 관성 중력과 등의 형태로 소멸되지 않고 지속적으로 관측과 유사하게 유지되었다. 이는 본 연구에서 실행한 자료동화가 모형의 역학적인 균형을 유지하면서 적절히 이루어졌음을 의미하며, 전구 대순환 모형을 이용한 중·장기 대기·해양 예측에 이러한 해양 자료동화가 대단히 유용하다는 것을 의미한다.

ARGO and TAO data which supply three dimensional global ocean information are assimilated to the background field from a general circulation model, MOM3. Using a Variational Analysis using Filter (VAF), which is a spatial variational filter designed to reduce computational time and space efficiently and economically, observed ARGO and TAO data are assimilated to the OGCM-generated background sea temperature for the generation of initial condition of the model. For the assessment of the assimilation impact, a comparative experiment has been done by integrating the model from different initial conditions: one from ARGO-, TAO-data assimilated initial condition and the other from background state without assimilation. The assimilated analysis field not only depicts major oceanic features more realistically but also reduces several systematic model bias that appear in every current OGCMs experiments. From the 10-month of model integrations with and without assimilated initial conditions, it is found that the major assimilated characteristics in sea temperature appeared in the initial field remain persistently throughout the integration. Such implies that the assimilated characteristics of the reduced sea temperature bias is to last in the integration without rapid restoration to the non-assimilated OGCM integration state by dispersing mass field in the form of internal gravity waves. From our analysis, it is concluded that the data assimilation method adapted in this study to MOM3 is reasonable and applicable with dynamical consistency. The success in generating initial condition with ARGO and TAO data assimilation has significant implication upon the prediction of the long-term climate and weather using ocean-atmosphere coupled model.

Keywords: ARGO, Ocean Data Assimilation, VAF, OGCM, TAO

서 론

접합대순환모형은 기후예측이나 장기예보를 가능하게 하는 유일한 객관적인 도구이다(Storch *et al.*, 1997). 그런데 접합 모형에 의한 미래의 예측은 대기 모형이나 해양 모형과 달리 완전한 초

기치 문제이다. 즉 접합 모형을 위한 완벽한 초기자료의 제공은 미래 예측의 최대 관건이다(Kalnay, 2003). 초기자료는 궁극적으로 관측으로부터 제공된다.

전세계 해양에서 선박, 부이(Buoy), 위성 등에 의해 많은 해양 관측자료가 제공되고 있다. 그 중에서도 특히 ARGO(Array for Real-time Geostrophic Oceanography) 자료(ARGO, 2004)는 수심 별로 제공되어 기후적인 관점에서 전구 해양대순환에 크게 영향

*Corresponding author: jbahn@pusan.ac.kr

을 주는 아표층, 심층 순환 및 전구 해양의 3차원적인 구조를 이해하는데 그 중요성이 크다.

관측 기술의 발달과 더불어 자료동화 기법도 슈퍼컴퓨터의 발달과 함께 최근에는 4차원 동화기법이 소개(Bouttier and Courtier, 1999)되는 등 많은 발전이 이루어지고 있다. 선박이나 위성에서 관측되는 수온 자료 등에는 일반적으로 2차원적인 자료동화를 적용하나, ARGO와 같은 심층자료에 대해서는 3차원 혹은 4차원적인 자료동화가 활용될 수 있다. 그러나 아직 해양에 대하여 대기 와 같은 정도의 자료동화 기법을 적용하기에는 관측자료가 시·공간적으로 부족하여 이러한 점을 극복할 수 있는 자료동화 방법의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 전구에서 관측되는 다양한 수온 자료를 대상으로 3차원적인 해양 초기자료를 생산하기 위하여 변분법(variational analysis method)에 의한 자료동화 기법을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 자료동화 방법은 공간필터를 이용한 변분법으로써 다른 변분법과 유사한 결과를 보이나 특히 많은 행렬에 대한 계산 속도가 빠르고, 자료저장 공간을 적게 차지하는 등 많은 장점이 있다.

본 연구에서는 공간필터를 이용한 변분법으로 해양대순환모형의 결과에 ARGO, TAO(Tropical Atmosphere/Ocean) array 관측 자료를 동화함으로써 분석자료를 생산하였다. 또한 본 연구에서는 이 자료를 다시 전구 해양대순환모형에 초기입력자료로 이용하여 적분을 수행함으로써 자료동화에 따른 해양순환 구조의 변화와 영향을 파악하고자 하였다.

실험방법 설계

자료 동화 알고리즘 구성

Fig. 1은 본 연구에서 구성한 자료 동화 알고리즘을 나타내고 있다. 먼저 자료동화에 필요한 배경자료를 생산하기 위해 NCEP/NCAR 재분석 기후값 자료를 경계조건으로 사용하여 100년의 spin-up을 거친 후, 준 평형상태에 이른 해양대순환 모델에 월 평균 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용하여 1990년부터 2002년까지 13년간 재현 실험을 하였다. 재현 실험의 마지막에 해당하는 2002년 12월 31일의 수온장을 배경장으로 하였고, 여기에 ARGO와 TAO array자료를 이용하여 2차원 변분법으로 자료 동화하여 분석장을 생산하였다. 대기의 순환과 달리 해양은 성층화 되어 있기 때문에 수일 정도의 짧은 동화창(assimilation window)의 시간 규모 관점에서 순환은 거의 수평적이라 할 수 있다. 따라서 본 연

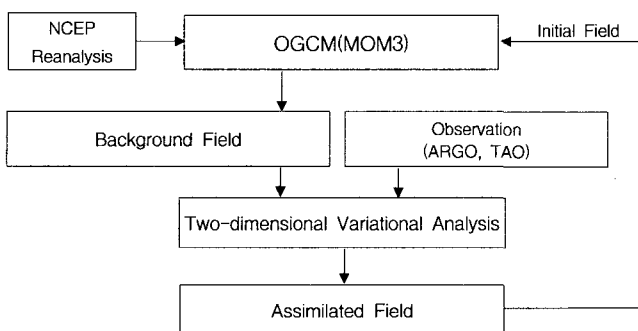


Fig. 1. Schematic of data assimilation algorithm applied in this study.

구에서는 효율적인 변분법에 의한 계산량을 고려하여 각 연직층에서의 수평적 수온장에 대해 2차원 변분법으로 자료동화를 수행하였다.

또한 자료동화의 지속 효과(impact)를 검증하기 위해 두 가지 적분 실험을 하였는데, 먼저 자료동화를 하지 않은 배경장을 초기장으로 입력하여 10개월간 적분하였고, 두 번째로 ARGO와 TAO 자료를 동화한 분석장을 초기입력 자료로 하여 10개월간 적분하였다.

배경 자료 생산을 위한 해양모형의 개요

본 연구에서 사용된 전구 해양대순환모형(OGCM)은 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory(GFDL)에서 개발된 Modular Ocean Model version 3.1(MOM3.1)이다(Pacanowski and Griffies, 1998). 수평으로는 구면 좌표계를 사용하였고, 격자 형태는 지균 조절(geostrophic adjustment)에 효과적인 Arakawa-B 격자 방안을 사용하였다. 모형의 수평 해상도는 위·경도 각각 2.5°로 일정하고 총 144×72개의 격자점을 가진다. 연직적으로는 고도 좌표계를 사용하며, 표층으로부터 5,600 m까지 15층의 구조를 가진다. 각 층의 경계는 25, 50, 75, 100, 135, 207, 352, 597, 965, 1465, 2097, 2852, 3707, 4635, 5600 m에 위치한다. 100년간 장기 적분을 위한 OGCM의 대기 경계 조건으로써 NCEP/NCAR 월 평균 재분석 자료를 사용하였다. 또한 수온과 염분에 대한 초기 조건으로 Levitus(1982) 1월 평균 자료를 사용하였다.

본 연구에서는 해양 모형만으로 적분할 때 발생할 수 있는, 고위도에서 수온이 어는점보다 낮아지는 비현실적인 문제를 해결하기 위하여 MOM3.1에 해빙모형을 접합하여 사용하였다. OGCM에 접합한 해빙모형은 Semtner(1976)에 기초한 3층 열역학 해빙 모형으로써, 해빙의 열역학적 과정을 고려하였다(안과 이, 2001).

관측 자료

해양 자료동화를 위해 본 연구에서 사용한 관측자료는 ARGO와 TAO array 자료이다. 두 자료는 각각 해양 심층의 수온 자료를 시간적으로도 비교적 조밀하게 제공하기 때문에 자료동화를 통하여 해양의 3차원적인 구조를 파악할 수 있는 적합한 자료이다.

ARGO 플로트는 수심 2000 m까지 잠수하여 해류를 따라 약 9 일동안 이동한 뒤 표면으로 상승하면서 관측한 수심별 수온과 염분 자료를 Argos 위성 시스템(Argos satellite system; Service Argos, 2001)을 통해 육상의 자료센터로 보내주고 다시 잠수한다. ARGO 플로트는 이러한 과정을 반복하며 해류를 따라 대양을 떠다니면서 2,000 m의 깊이까지에 대해 약 10일 정도의 주기를 가지고 관측자료를 제공하고 있다(Carval, 2002).

ARGO 자료가 제공되는 수심은 해양 대순환 모형 MOM3의 각 연직층의 수심과 다르다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 해양 대순환 모형의 각 층의 가운데 깊이에 대해 ARGO 자료를 선형적으로 내삽 하였다. 본 연구에서 이용한 해양 대순환 모형은 연직 15층으로, 각 층의 가운데 깊이는 12.5, 37.5, 62.5, 87.5, 112.5, 156.7, 257.2, 446.1, 748.8, 1181.2, 1748.7, 2446.1, 3257.2, 4156.7, 5112.5 m이다.

Fig. 2는 본 연구에서 자료동화에 이용한 2002년 12월 31일의 ARGO 자료의 분포를 나타내고 있다. 북태평양과 북대서양을 중심으로 자료가 분포되어 있고 적도 태평양 부근 및 남반구 해양

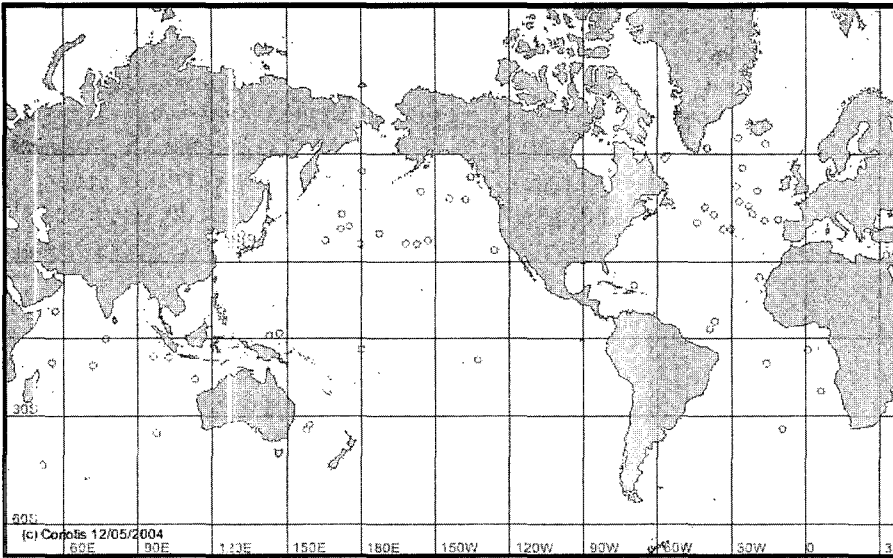


Fig. 2. Global ARGO data distribution for December 31, 2002. From Coriolis (2004).

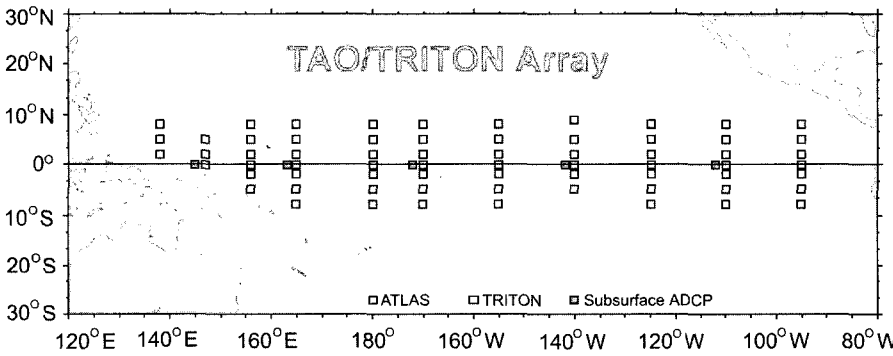


Fig. 3. Moored buoys of the Tropical Atmosphere Ocean (TAO) Array. From NOAA (2004).

에는 자료의 양이 부족하다. 적도 태평양에서 부족한 자료를 보충하기 위해 TAO array 자료를 사용하였다.

TAO array 관측은 적도 태평양에 70여 개의 계류(mooring)로 구성되어 해수면 근처에서 500 m 깊이까지의 수온이 각 지점별로 관측되고 있으며(Busalacchi, 1997), Argos 위성 시스템에 의해 실시간으로 관측 자료를 제공한다. 또한 Fig. 3은 TAO array 관측지점을 나타내고 있으며, 적도 지역을 중심으로 위도 상으로는 9°N, 8°N, 5°N, 2°N, 0°, 2°S, 5°S, 8°S이고, 경도로 137°E, 147°E, 156°E, 165°E, 180°, 170°W, 155°W, 140°W, 125°W, 110°W, 95°W에 위치하고 있다.

ARGO 자료의 경우, 수심 2,000 m까지 제공되지만, TAO array는 수심 500 m까지 자료가 제공된다. 따라서 ARGO 자료와 TAO 자료를 함께 이용하기 위해 ARGO와 TAO 자료를 해양 모형의 연직 1층에서 8층(446 m)까지에 대해 내삽하여 자료동화에 이용하였다.

자료 동화 기법

변분법에서는 비용함수, J 를 분석과 관측, 분석과 배경 사이의 거리의 제곱에 비례하는 것으로 아래의 식 (1)과 같이 정의한다(Lorenc, 1986; Courtier, 1997).

$$J = \frac{1}{2} \{ [y^o - H(x)]^T R^{-1} [y^o - H(x)] + (x - x^b)^T B^{-1} (x - x^b) \} \quad (1)$$

여기서 B 는 배경오차 공분산 행렬이고, R 은 관측오차 공분산 행렬이며, H 는 모형변수를 관측지점으로 옮겨주는 관측연산자이다. y^o 는 관측 벡터이고, x 는 분석 벡터, x^b 는 배경 벡터이다.

배경오차 공분산 행렬 B 의 역행렬을 구하는 문제를 해결하기 위해, 새로운 벡터를 정의한다(Lorenc, 1988; Derber and Rosati, 1989).

$$v = B^{-1}(x - x^b) \quad (2)$$

따라서 비용함수에 대한 식 (1)은 새롭게 정의된 벡터에 대해 다시 쓸 수 있다.

$$J(v) = \frac{1}{2} \{ v^T B^{-1} v + [H(Bv + x^b) - y]^T R^{-1} [H(Bv + x^b) - y] \} \quad (3)$$

그러나 변분법을 적용하는 데 있어서 야기되는 문제점이 있는데, 그것은 배경오차 공분산 행렬에 대한 계산량이 많다는 것이다. 다시 말해 배경오차 공분산 행렬 B 가 매우 크기 때문에 저장해 두지 않고 필요할 때마다 매번 계산하게 된다. 따라서 B 에 대한 계산량을 줄이기 위해 공간 필터를 사용한다(Lorenc, 1992). 본 연구에서 사용한 방법인 필터를 이용한 변분법(Variational Analysis using a Filter, VAF)은 다음과 같다(Huang, 2000).

먼저 초기추정치 $v^0=0$ 에서 최대경사 하강법(steepest descent

method; Arfken, 1985)을 이용한 최소화 알고리즘(minimization algorithm), $v^{n+1} = v^n - \alpha \nabla_v J$ 을 거치게 되는데, 여기서 필요한 비용함수의 경도를 식 (4)로 구한다. 여기에서 위첨자 n 은 계산 반복 횟수를 의미하며, α 는 일정한 수($\alpha > 0$)로 주어진다.

$$\nabla_v J = G\{v + H^T R^{-1}[H(Gv + x^b) - y]\} \quad (4)$$

최종 분석해는 $x^{VAF} = x^b + Gv^\infty$ 이다. H 는 H 의 집선 선형 연산자를, v^∞ 는 여러 번 계산을 반복하여 비용함수 J 가 최소가 될 때의 v 의 값을 의미한다. 여기서 G 는 공간필터(Spatial Filter)로 배경오차 공분산 행렬 B 에 대한 선행정보를 기초로 해서 고안하게 된다. 공간필터에 대해 간단히 소개하면 다음과 같다(Huang, 2000).

본 연구에서 사용한 공간필터는 아래에 식 (7)로 나타내는 truncated Gaussian filter이다. 이 필터를 사용함으로써 행렬 B 에 많은 원소들을 0으로 둘 수 있게 된다. 반복 수렴을 위해 식 (8)과 같은 필터 값을 사용하게 된다.

$$x^* = Gx \quad (5)$$

$$x_i^* = \sum_{\substack{-0.5I \leq (\lambda_j - \lambda_i)/(0.5I+1)\Delta\lambda \leq 0.5I \\ -0.5I \leq (\phi_j - \phi_i)/(0.5I+1)\Delta\phi \leq 0.5I}} g_{ij} x_j \quad (6)$$

$$g_{ij} = w_{ij} \left\{ \sigma_b^2 \exp\left[-\left(\frac{r_{ij}}{L_f}\right)^2\right] \right\} \quad (7)$$

$$w_{ij} = \frac{\sin[(\lambda_j - \lambda_i)/(0.5I+1)\Delta\lambda] \sin[(\phi_j - \phi_i)/(0.5I+1)\Delta\phi]}{(\lambda_j - \lambda_i)\pi/(0.5I+1)\Delta\lambda (\phi_j - \phi_i)\pi/(0.5I+1)\Delta\phi} \quad (8)$$

여기서 x^* 는 필터를 적용한 x 를 나타내며, g_{ij} 는 필터계수이고 w_{ij} 는 Lanczos window, σ_b^2 은 배경오차의 표준편차를 의미하며, ψ 와 λ 는 위경도이고 I 와 J 는 경도와 위도방향으로의 필터차수, r_{ij} 는 격자점 i 와 j 사이의 거리를 말한다. L_f 는 영향반경으로 본 연구에서는 800 km로 두었다. 이 방법에서 필요한 총 계산량은 최대 $(I+1)(J+1) \times N$ 이다. 여기서 I 와 J 는 다음의 조건 식 (9)에 의해 결정된다.

$$\frac{I\Delta\lambda}{2L_f} \approx \frac{J\Delta\phi}{2L_f} \approx \sqrt{2} \quad (9)$$

한편, 식 (1)에서 나타낸 비용함수의 경도를 0으로 두고 x 에 대해 정리하면, 아래의 식 (10)과 같은 최량 선형 비편향 추정량(Best Linear Unbiased Estimation-BLUE) 해를 구할 수 있게 된다(Courtier, 1997).

$$x^{BLUE} = x^b + BH^T(HBH + R)^{-1}(y - Hx^b) \quad (10)$$

여기서 H 는 선형 관측연산자이다. BLUE해는 선형이론에 근거하여 자료동화를 통해 얻을 수 있는 분석값에 대한 이상적인 값이다. BLUE해는 $(HBH + R)^{-1}$ 의 정확성에 의존하는데, 관측자료의 수가 많을 경우 문제가 된다. 따라서 용이한 계산을 위해 여러 자료선택법(data selection method)이 이용된다. 본 연구에서는 BLUE해를 구하기 위해 많이 쓰이는 자료선택법 중의 하나인 box-method를 이용하였다. 이것은 분석영역을 여러 개의 상자로 나뉘어서 분석

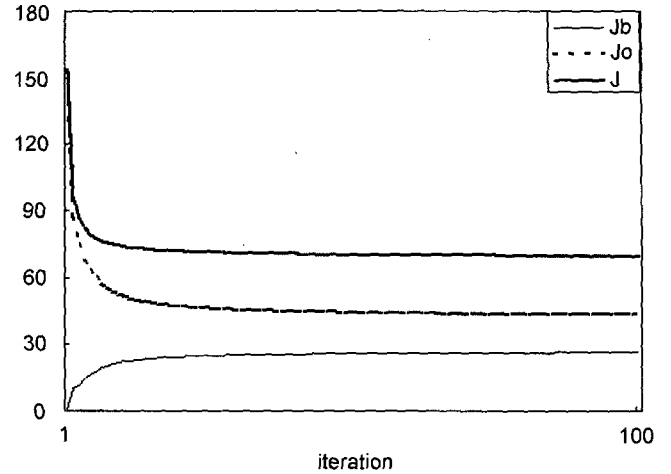


Fig. 4. The cost function J_b , J_o , and at J each iteration (VAF).

하는 방법이다.

만약 관측오차 간에 상관관계를 가지지 않는다고 가정하면, 관측오차 공분산 행렬 R 은 대각성분의 값이 관측 표준편차의 제곱(σ_o^2)이 되는 대각행렬(diagonal matrix)이 된다. 본 연구에서는 σ_o 의 값을 1°C 로 두었다. 배경오차의 경우에는 상관관계를 가진다고 가정하고, 배경오차 공분산 행렬 B 의 각 성분은 식 (11)로 나타낼 수 있는 Gaussian 함수로 계산한다. 여기서 σ_b 의 값은 1°C 로 두었다.

$$b_{ij} = \sigma_b^2 \exp\left[-\left(\frac{r_{ij}}{L}\right)^2\right] \quad (11)$$

본 연구에서는 100번의 반복을 거쳐 계산하였다. Fig. 4에서는 각 반복에 대해 배경오차 비용함수(J_b), 관측오차 비용함수(J_o)와 분석오차 비용함수(J)를 나타내었다. 초기 반복에서 비용함수는 가장 큰 변화를 보인다. 반복이 증가할수록 분석값은 배경값에서 멀어지기 때문에 배경오차 비용함수(J_b)는 증가하다가 일정한 값을 가진다. 하지만 분석값이 관측값에 대해서는 가까워지므로 관측오차 비용함수(J_o)는 감소하다가 일정한 값에 이르면서 결과적으로 전체 비용함수는 최소값을 가지게 된다.

결과 및 분석

ARGO 자료와 TAO 자료를 이용한 분석장

자료동화기법으로 VAF를 사용하면 배경오차 공분산 행렬 B 에 대한 계산량을 줄일 수 있게 된다(Huang, 2000). 본 연구에서는 VAF를 사용함으로써 그 결과가 BLUE해와 비교했을 때 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있었다. 2002년 12월 31일에 대한 분석 결과인 Fig. 5를 보면 VAF으로 계산된 결과와 BLUE해의 차이가 0.2°C 이내로 유사한 결과를 나타낸다. 따라서 관측의 수가 증가할 때 문제가 생길 수 있는 최적내삽법을 사용하지 않고도 필터를 이용한 변분법을 통해 최적해에 가까운 BLUE해와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 6은 ARGO와 TAO 자료를 이용하여 동화한 수온 분석장에서 배경장을 뺀 그림이다. (a)는 수심 12.5 m에 해당하고(표층), (b)는 수심 87.5 m(네 번째 층), (c)는 수심 112.5 m(다섯 번째 층)에

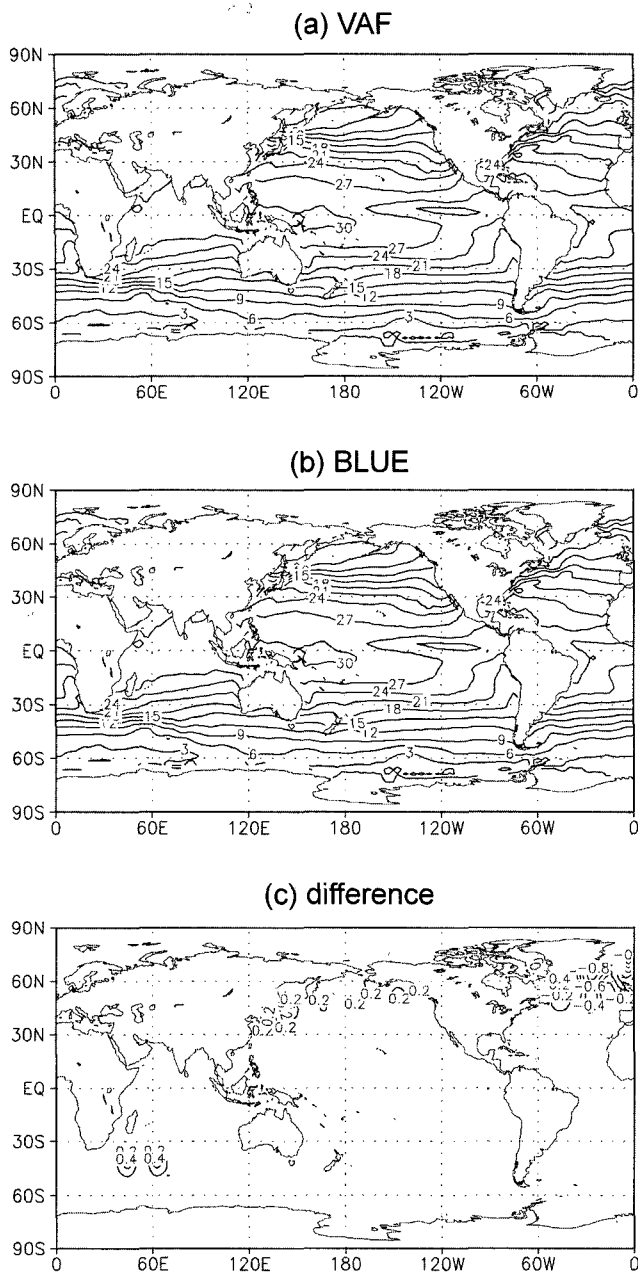


Fig. 5. (a) VAF analysis, (b) BLUE analysis, and (c) the difference between the two.

대한 분석장과 배경장의 차이를 나타낸다. 각 수심마다 관측 자료가 분포된 지점을 중심으로 자료 동화의 효과를 볼 수 있다. 특히, 적도 지역을 중심으로 양의 차이를 나타내고 있는데, 이것은 대부분의 해양 대순환 모형들이 적도 용승을 과대 모사함으로써 발생하는 적도지역에서의 cold bias 문제(Han, 1984)를 해결할 수 있는 가능성을 의미한다. 더불어 많은 해양 모형들이 남북 온도 경도를 약하게 모사하는 문제점을 가지고 있는데 자료동화는 중위도에서 모사되는 수온은 차고 적도에서 모사되는 수온은 따뜻하게 조절함으로써 남북 온도 경도를 강하게 모사하여 좀 더 현실에 가까운 수온 분포를 나타낼 수 있었다. 또한 해양모형이 가지는 문제점 중의 하나로, Gulf stream 및 North Atlantic Drift가 잘

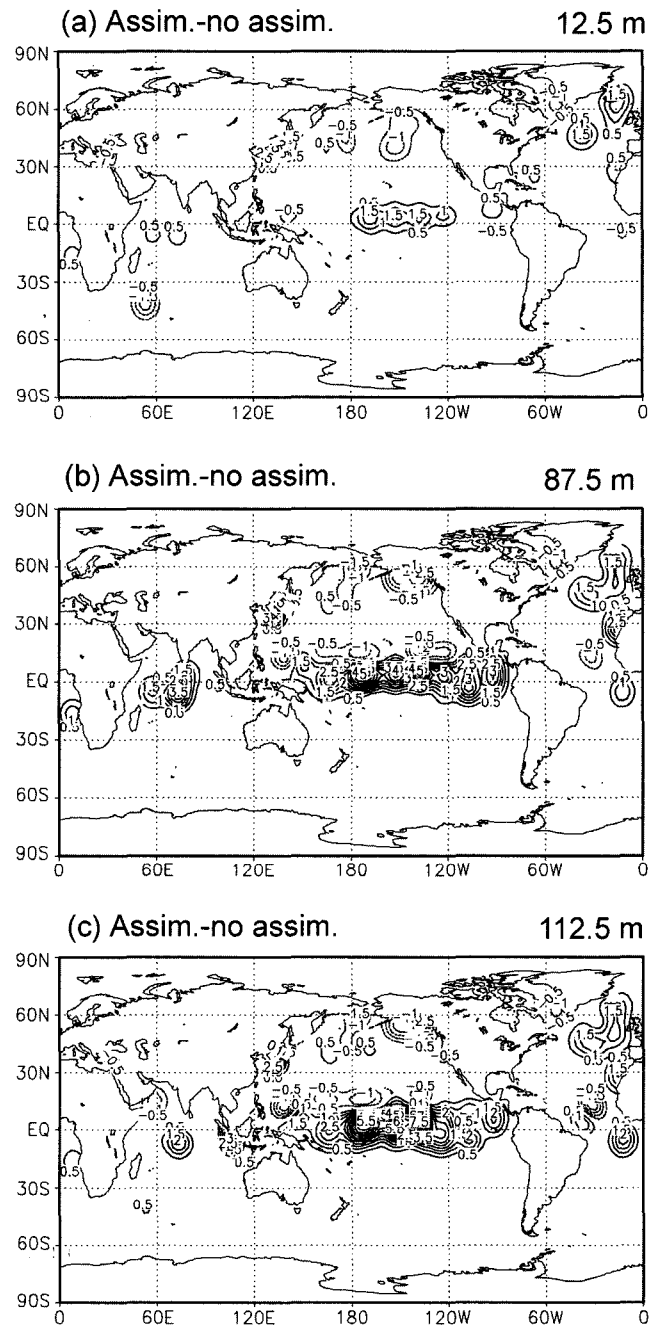


Fig. 6. The difference between ARGO+TAO-assimilated result and background sea temperature field for the 1st layer of the model (a), the 4th layer (b) and the 5th layer (c). Contour interval is 0.5°C.

모사하지 못하여 발생하는 대서양 북부 지역의 cold bias가 있다. 그러나 Fig. 6에서 보듯이 대서양 북부지역에서 양의 차이를 나타내고 있는데 이것은 자료동화를 통해 이 지역에서 많은 해양모형들이 안고 있는 북대서양 지역의 cold bias 문제를 해결할 수 있다는 것을 의미한다. 위도 30도 이하에서의 차이는 거의 없는 데 이는 동화장의 간격이 짧고 이 기간 동안 동화에 참여한 자료가 이들 지역에서는 거의 없었기 때문이다.

동화된 분석장의 연직적 분포를 살펴보면 아표층에서의 자료동

화의 효과(impact)가 크게 나타난다. 적도 해역과 북대서양, 북태평양 부근에서 모형의 표층 수온은 최대 1.5°C의 차이를 나타내는데 반해, 수심 87.5 m에서는 최대 5°C, 수심 112.5 m에서는 최대 7°C의 차이를 보이고 있다. 또한 그림에는 나와 있지 않지만, 수심 446.1 m에서도 최대 2°C의 차이를 보인다. 해양의 아표층에서 자료동화의 효과가 큰 이유는 아표층에서 연속적인 수온의 기울기가 큼에도 불구하고 이를 적절히 모사할 수 있는 연속 격자간격이나 혼합층 모수화가 적절하지 못하기 때문으로 사료된다. 따라서 자료동화는 현재 대부분의 해양모형이 아표층 및 심층의 모사에 취약한 단점을 보완할 수 있는 훌륭한 수단이 될 수 있음을 의미한다.

OISST에 대한 모형의 표층 수온 비교

NOAA에서 제공하는 OISST(Optimal Interpolation Sea Surface Temperature) 자료는 전구 해양에 대해 위·경도 각각 1°의 간격의 해수면 온도 자료로써 해양의 표면에서 수심 1 m사이의 평균 수온을 나타낸다. 이에 비해 본 연구에서 사용한 모형의 경우, 표층이라 하더라도 수심 12.5 m에서의 수온이기 때문에 모형의 결과를 OISST 자료와 비교한다는 것은 사실상 어려워 보인다. 또한 모형에 의해 생산된 배경장과 분석장은 2002년 12월 31일에 대한 수온을 나타내고 있으나, OISST 자료는 daily 자료가 아닌 2002년 12월 31일을 포함한 주(weekly) 평균 자료이다. 해양 관측이 아직까지 많이 부족한 상황이며, 특히 중·하층에 대해서는 관측 자료와의 비교하기 어렵고 정확하지는 않지만 OISST 자료와 모형의 표층 수온을 비교해 봄으로써 해양 자료 동화의 효과를 어느 정도 확인해 볼 수 있다.

자료동화를 하지 않은 배경장과 OISST 자료의 차이를 나타내는 Fig. 7의 (a)를 보면 적도 동태평양에서 음의 차이를 나타내는데, 이는 앞에서 언급했듯이 현재 적도용승을 과대하게 모사하는 모든 해양모형의 계통적 오차라고 할 수 있다.

반면 ARGO 자료와 TAO 자료로 동화한 분석장과 OISST를 비교한 Fig. 7의 (b)를 보면, 적도 동태평양 부근에서 음의 차이가 현저히 줄어든 것을 알 수 있다. 이것은 적도 태평양에 분포된 TAO 자료에 의한 동화 효과로 볼 수 있다. 따라서 자료동화를 통해 적도 동태평양에서 해양모형이 가지는 계통적인 오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

쿠로시오 해류와 걸프 해류와 같이 극으로 향하는 해류가 있는 대륙의 동안에서의 수온은 관측에 비해 높게 모사되는데, 이는 거의 모든 해양 대순환 모형에서 나타나는 계통 오차이다. 이것은 좁은 지역을 강하게 흐르는 서안 경계류의 중심 위치를 제대로 모의하기에는 모형의 수평 해상도가 성기기 때문이다. 자료동화를 한 경우(b)에는 자료동화를 하지 않은 경우(a)에 비해 OISST와의 차이가 2°C 가량 줄어든 것을 볼 수 있다.

자료 동화한 초기장의 적분 결과

ARGO자료와 TAO자료를 이용하여 연속 8층까지 자료 동화한 분석장을 초기장으로 해양모형에 입력하여 10개월간 적분하였고, 적분 1개월 후의 결과와 적분 10개월 후의 결과를 비교해 보았다. 또한 적분 이후의 자료 동화 효과를 비교하기 위해 자료 동화를 하지 않은 배경장도 10개월간 적분하였다.

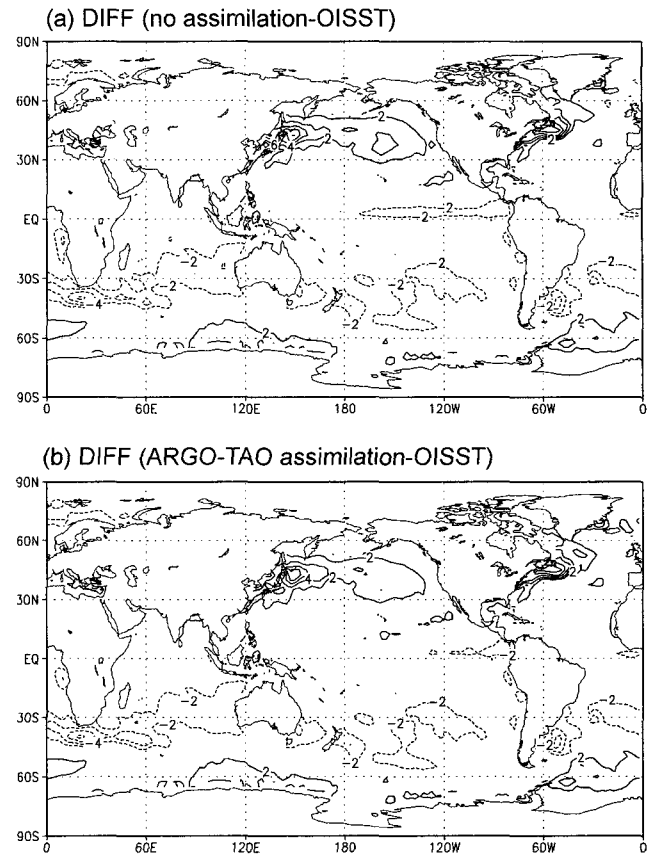


Fig. 7. the difference between (a) the background sea surface temperature (b) ARGO+TAO-assimilated result and the OISST field for the uppermost layer. Contour interval is 2°C.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 1개월과 10개월 적분 결과로써, 자료동화를 한 분석장을 초기조건으로 한 모형 결과에서 자료동화를 하지 않은 배경장을 초기조건으로 구한 모형결과를 뺀 것이다. (a)는 표층 수온의 1개월 적분 결과, (b)는 수심 87.5 m(네 번째 층), (c)는 수심 112.5 m(다섯 번째 층)에 대한 적분 결과를 나타낸다. Fig. 8을 보면, 서안 경계류 부근에서 적분 이전에 보였던 자료동화 효과가 지속되는 것을 볼 수 있다. 특히 아표층에서 그 효과는 더 뚜렷하게 지속된다. 이에 반해 모형의 표층은 적분이 진행되면서 자료동화의 영향이 심층에 비해서 상대적으로 크게 감소한다. 이는 해양모형의 표층부근이 자료동화에 의한 영향을 아표층에 비하여 비교적 적게 받았으며 또한 이어지는 10개월 적분에서 대기 경계조건에 의한 영향을 먼저 받는 영역이기 때문인 것으로 사료된다.

우리나라를 비롯한 중위도 지역은 표층 및 아표층에서 수온의 수평적인 온도경도가 크기 때문에 자료동화 효과가 적도지역과 비교하여 현저하게 나타났다. 적도지역의 경우, 적분 전에는 최대 4.5~7.5°C 정도의 차이가 있었지만 적분 10개월 후에는 최대 2.5°C 정도의 차이를 보여 자료동화 효과가 많이 감소되었다(Fig. 9). 반면에 우리나라를 포함한 중위도 지역에서는 0.5~2.5°C의 차이를 나타내다가 적분 이후에는 0.5~2°C 정도의 차이로 약간 감소하여, 자료동화 효과가 상당기간 지속된 것으로 보인다. 또한 쿠로시오 해류와 관련하여 서안경계에 나타나는 전구 해양모형의 계통적인 오

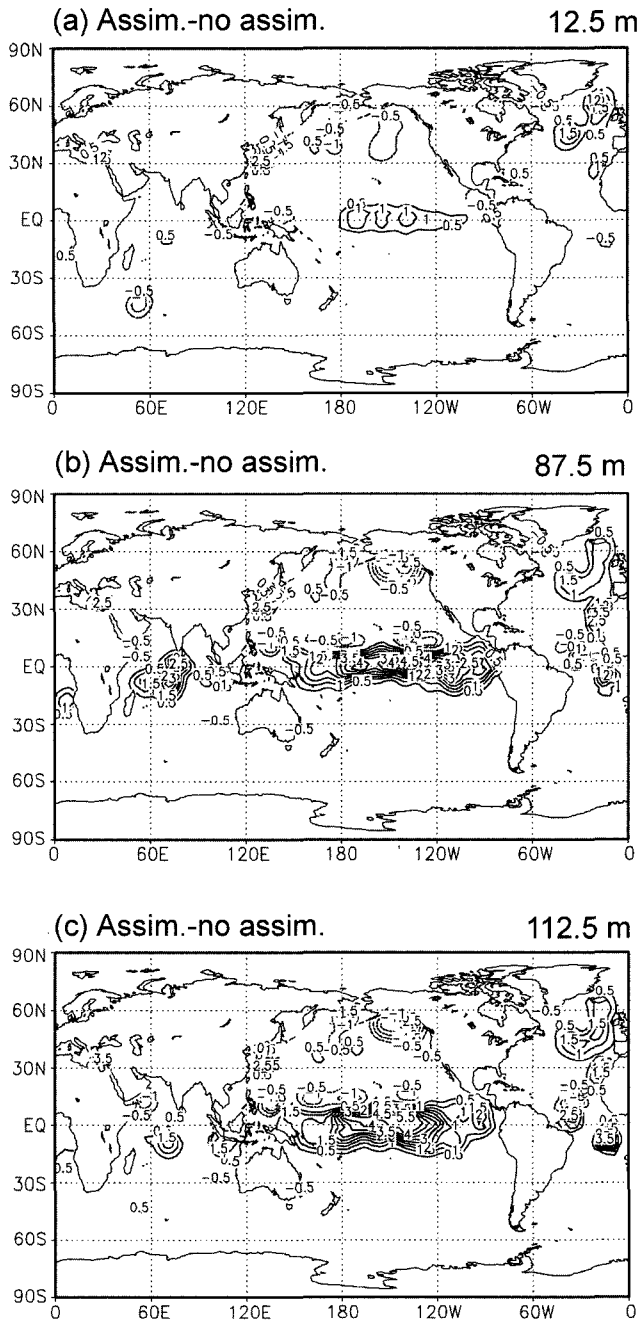


Fig. 8. The difference between sea temperature fields after 1-month of integration from initial conditions of ARGO+TAO assimilation and without assimilation for the 1st layer of the model (a), the 4th layer (b) and the 5th layer (c). Contour interval is 0.5°C.

차가 감소됨을 볼 수 있는데 이러한 점은 중위도 지역에서 표층 뿐만 아니라 아표층 이하 심층에 대한 자료 동화의 중요성을 보여주는 결과이다. 자료 동화장의 길이가 단 하루이었음에도 불구하고 10개월이 경과한 후에도 그 영향이 지속된다는 것은 대단히 의미 있는 결과이며 동화장을 넓히고 동화의 주기를 짧게 하여 자료동화를 실시하는 경우, 일부 지역만이 아닌 전구 해양에 대해 자료동화 효과가 크게 나타날 것으로 기대할 수 있다.

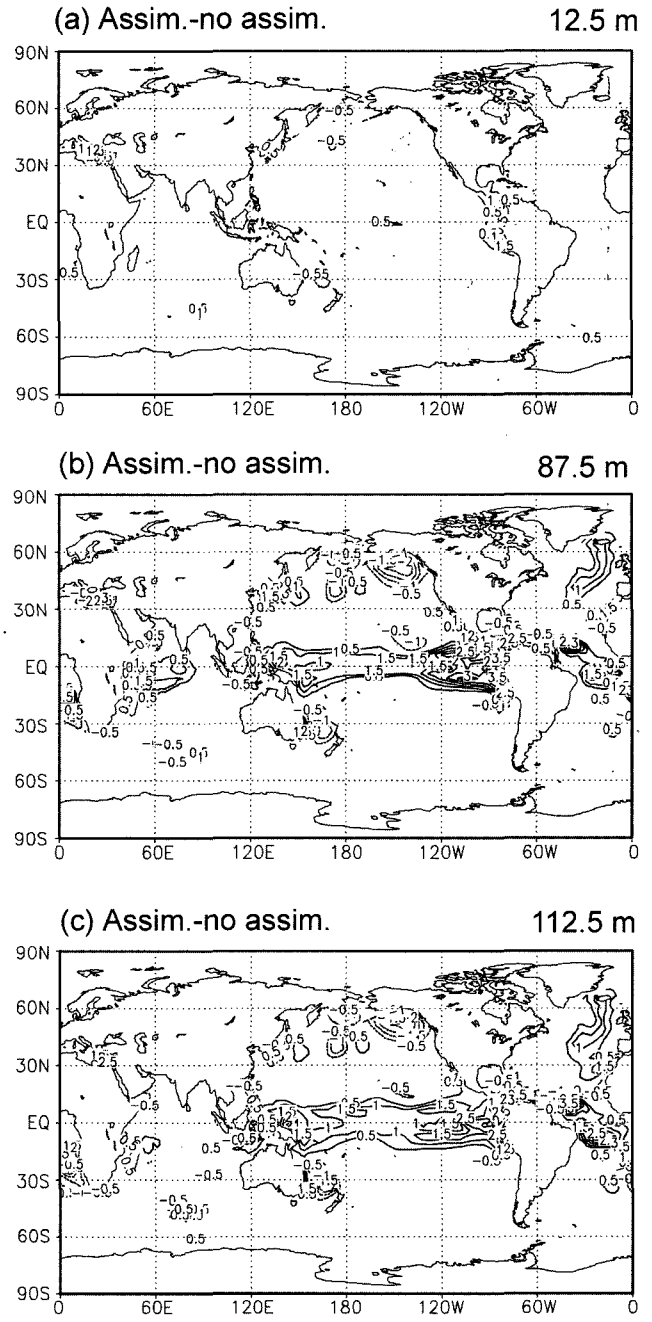


Fig. 9. Same as Fig. 8, but for 10-month of integration.

적도에서의 연직 분포

Fig. 10은 적도에서의 연직 분포로, 표층에서 수심 500 m까지의 수온 변화를 나타낸다. 자료동화한 분석장(a)과 자료동화하지 않은 배경장(b)은 서태평양에서의 깊은 수온약층과 동태평양에서의 얇은 수온약층을 나타내고 있다. 그러나 분석장이 배경장보다 동태평양에서 수온약층을 더 얇게 묘사하고 있다. 이것은 모형의 연직 격자가 조밀하지 못함으로 인해 중앙 및 동태평양에서의 얇은 수온약층을 묘사하지 못하는 문제점(박, 2003)을 자료동화로써 해결할 수 있음을 나타내는 것이다. 즉, 분석장과 배경장의 차이(c)를 보면, 적도 혼합층이 존재하는 깊이를 중심으로 분석장이 배

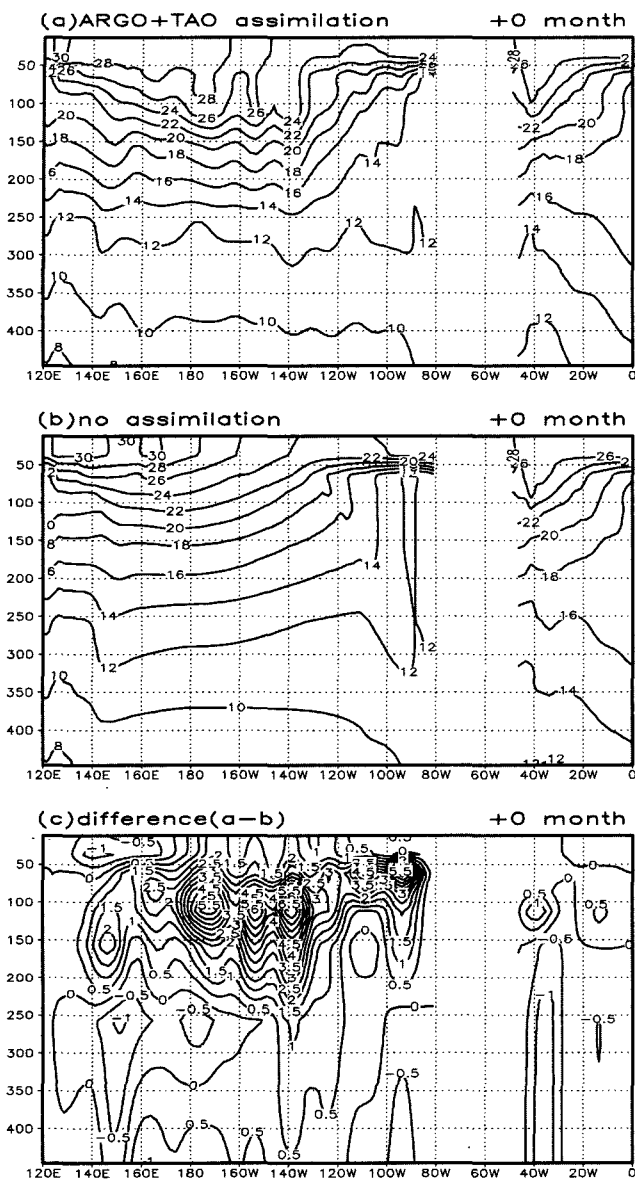


Fig. 10. Vertical distributions of sea temperature along the equator, for (a) ARGO+TAO-assimilated result, (b) background field and (c) the difference between the two.

경장에 비해 더 따뜻하게 모사됨으로써 양의 차이를 보이고 있다. 이것은 자료 동화에 의해서 해양 대순환 모형이 적도 용승을 과대 모사함으로써 적도 해양 혼합층이 얇아짐으로 인해 야기되는 적도 중앙 및 동태평양 혼합층 부근의 cold bias가 제거되었음을 보여주는 결과이다.

Fig. 11은 시간이 경과함에 따라 자료동화의 효과가 어느 정도 지속되는지를 보여주는 그림이다. 이 그림은 Fig. 10에서 보인 분석장과 배경장을 각각 초기자료로 하여 1개월(a), 3개월(b), 6개월(c), 10개월(d) 적분한 결과에 대한 차이를 나타낸다. 즉, 자료 동화가 실시된 분석장을 초기 조건으로 한 적분 결과에서 배경장을 초기 조건으로 한 적분 결과를 뺀 결과이다. 분석장에서 확인된 자료동화의 효과는 1개월 적분 후에도 거의 그대로 유지되고 있

음을 알 수 있다. 특히 아표층의 80~150 m 부근에서 자료동화를 하지 않았을 경우와 비교하여 $+4.5^{\circ}\text{C}$ 의 큰 차이를 보이며, 200~300m에는 -0.5°C 의 차이를 나타내는 지역이 보인다. 1개월 적분 이후의 모습은 초기 분석장에서 보여지는 차이에 비하여 큰 차이가 없을 정도로 자료동화의 효과가 지속되고 있으나 그 이후에는 적도 중앙 및 서태평양을 중심으로 차이가 점차 줄어들고 있는 모습이다. 그러나 적도 중앙 및 서태평양에서 여전히 3, 6, 10개월 후에도 $2.5^{\circ}\text{C}\sim 1^{\circ}\text{C}$ 정도의 차이가 지속적으로 보여지고 있다. 이는 해양 대순환 모형이 적절히 모사하는 못하는 수온 약층에서의 강한 연직 수온 경도가 자료동화에 의해서 현저히 개선되었음을 보여주는 결과이며 이러한 개선된 효과는 적분이 진행됨에 따라 점차 약해지기는 하나 상당기간 유지되고 있음을 보여준다. 이는 대순환 모델이 모사한 적도 태평양 해류와 수온의 열역학적 분포가 자료동화에 의해 열역학적으로 적절히 동화한 후 열적 관성에 의해서 상당기간 유지되고 있음을 보이는 결과이다. 대기모델의 경우 짧은 열적 관성으로 말미암아 대기 자료 동화의 효과가 수일에 불과하다는 점에 비추어 이러한 결과는 대기-해양 시스템의 장기 예측 측면에서 해양 자료 동화의 중요성을 보여주는 대단히 고무적인 결과이다.

또한 장기 기상 예측이나 엘니뇨 예측과 같은 수 주에서 수 개월에 이르는 대기-해양 시스템의 예측을 위해서는 적도 해양의 순환과 이와 관련한 아표층에서의 수온 아노말리의 변동이 적절히 모사되는 것이 중요한데 이는 아노말리의 적절한 모사 능력이 엘니뇨/라니냐 발생유무와 강도예측에 중요한 요인으로 작용되기 때문이다. 따라서 자료동화에 의해 관측에 유사하게 도출된 초기 분석장은 이후 아표층 지역의 수온 아노말리를 보다 현실적으로 모사하게 함으로써 장기간 심층 해양구조에 영향을 줄 수 있으며, 이러한 영향은 궁극적으로 전구 해양의 순환에도 긍정적으로 작용할 것으로 보인다. 따라서 이러한 영향에 대한 보다 심도있는 평가는 또 다른 연구를 통해서 이루어져야 할 것이다.

결론 및 요약

본 연구에서는 전구 해양 관측 자료 중에서 특히 해면 아래의 아표층(subsurface) 및 심층에 대한 정보를 제공해주는 ARGO와 TAO 자료를 이용하여 해양의 3차원적인 구조를 분석·동화하고 궁극적으로 해양대순환모형의 초기장을 생성하기 위한 기초적인 연구를 수행하였다.

전구 해양에서 생산되는 ARGO 자료 및 TAO array 해양 관측 자료를 이용하기 위하여 2차원 변분법에 기초한 자료 동화 알고리즘을 구성하였다. 자료동화 초기에 입력될 배경장으로는 100년의 spin-up을 거친 후 준 평형상태에 이른 해양대순환 모형에 1990년부터 월평균의 NCEP 재분석 자료를 사용하여 재현 실험한 후 2002년 12월 31일까지 적분된 결과를 이용하였다. 재현실험에 의해 구성된 배경장과 여러 층에서 관측된 ARGO와 TAO 수온 자료를 이용하여 자료 동화함으로써 모형적분을 위한 초기자료를 생산하였다. 본 연구에서는 자료동화 기법으로 계산량과 저장량을 감소시키기 위해 최근 제안된 공간필터를 이용한 변분법(VAF, variational analysis using filter)을 사용하였다(Huang, 2000).

자료동화의 영향을 파악하기 위하여 전구해양대순환 모형

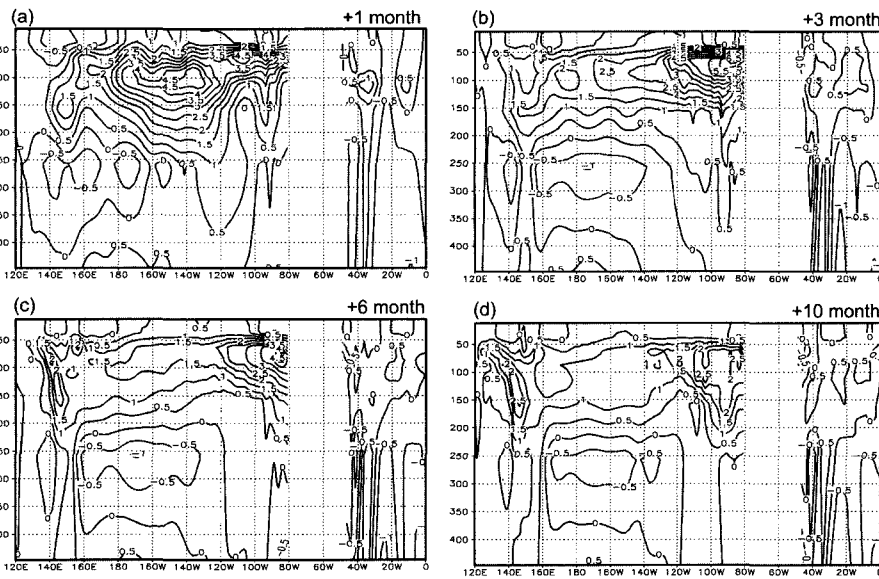


Fig. 11. Same as Fig. 10(c), but for (a) one month of integration, (b) three months of integration, (c) six months of integration, and ten months of integration.

(MOM3.1)을 이용하여 자료동화한 결과를 자료동화하지 않은 배경장 결과와 비교함으로써 살펴보았다. 또한, 모형에서의 자료동화의 영향이 얼마나 지속되는지에 대한 평가를 위해 모형의 초기 입력 자료를 자료동화 기법을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 나누어 비교함으로써 연구를 수행하였다.

ARGO와 TAO 자료를 이용한 자료 동화는 대부분의 해양 대순환 모형들이 적도 용승을 과대 묘사함으로써 발생하는 적도지역에서의 cold bias를 적절히 제거하고 있음을 보여주었다. 또한, 자료동화를 통해 배경장에 비하여 분석장은 중위도에서는 차고 적도는 따뜻하게 묘사하여 남북 수온경도를 강화시킴으로써 많은 해양 모형들이 세밀하지 못한 모형격자 간격으로 인하여 남북 온도경도를 약하게 묘사하는 문제점을 개선하고 보다 더 현실에 가까운 수온 분포를 보일 수 있었다. 또한 연직적으로는 자료동화의 효과가 아표층에서 특히 큰 것으로 밝혀졌는데, 이는 연직적인 수온의 기울기가 심한 아표층에서의 수온을 모형들이 적절히 묘사하지 못하는 경향을 자료동화를 통하여 크게 개선하였음을 보여준 결과이다. 이러한 결과들은 본 연구에서 실행한 자료동화가 열역학적인 균형을 유지하면서 적절히 이루어졌음을 의미한다.

자료 동화된 초기자료를 이용하여 10개월간 적분된 결과를 살펴보면, 관측자료가 분포된 지역을 중심으로 자료동화에 의한 효과가 지속적으로 반영되는 것을 알 수 있다. 이것은 10개월 적분 이후에도 계속해서 자료동화의 효과가 모형에 영향을 주고 있음을 나타내는 것이다. 자료동화 유무에 따른 차이가 적분이 진행되는 과정에서 관성 증력과 등의 해양파의 형태로 소멸되지 않고 지속적으로 관측과 유사하게 동화된 모습을 보이는 것은 엘니뇨를 포함한 중-장기 대기-해양 예측에 이러한 자료동화가 큰 의미를 갖는 것으로 해석할 수 있다. 해양의 열적 관성을 고려할 때 아표층 지역에서 대한 초기조건의 개선은 해양의 계절변동, 연변동 및 년변동의 묘사에 지대한 영향을 미칠 것으로 사료된다. 또한 일정한 자료동화 주기를 고려하여 관측 자료를 좀더 많이 활용한다면 앞으로 더욱 현실적인 해양의 초기자료 및 분석 자료를 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상연구소 주관의 “전지구 해양변화 감시시스템 구축(ARGO)”의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

박혜선, 2003. 대기-해양-해빙 접합 모형 개발과 ENSO 예측성 연구. 부산대학교, 이학박사 학위논문, pp. 42–45.
 안중배, 이진아, 2001. 해양대순환모형을 이용한 해빙의 역할에 관한 수치실험 연구. 한국해양학회지, **6**: 225–233.
 Arfken, G., 1985. *Mathematical Methods for Physicists*, 3rd ed. Orlando, FL. Academic Press: pp. 428–436.
 ARGO, cited 2004. Part of the integrated global observation strategy. Available online from <http://www-argo.ucsd.edu/>.
 Bouttier, F., and P. Courtier, 1999. *Data assimilation concepts and methods: Meteorological training course lecture series*. ECMWF, pp. 3–33.
 Busalacchi, A.J., 1997. Oceanic Observations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**: 131–154.
 Carval, T., 2002. *Argo data management: User's manual*. Ifremer, pp. 6–7.
 Coriolis, cited 2004. Global ocean profiles. Available online from <http://www.coriolis.eu.org/cdc/DataSelection/cdcDataSelections.asp>.
 Courtier, P., 1997. Variational methods. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**: 211–218.
 Derber, J. and A. Rosati, 1989. A global oceanic data assimilation system. *J. Phys. Oceanogr.*, **19**: 1333–1347.
 Han, Y.-J., 1984. A Numerical World Ocean General Circulation Model. Part II. Baroclinic Experiment. *Dyn. Atmos. Oceans*, **8**: 141–172.
 Huang, X.Y., 2000. Variational analysis using spatial filters. *Mon. Wea. Rev.*, **128**: 2588–2600.
 Kalnay E., 2003. *Atmospheric modelling, data assimilation and predictability*. Cambridge University Press, pp. 136–204.

- Levitus, S., 1982. Climatological Atlas of the World Ocean. NOAA Prof. Paper 13, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 173 pp.
- Lorenc, A.C., 1986. Analysis methods for numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**: 1177–1194.
- Lorenc, A.C., 1988. Optimal nonlinear objective analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **114**: 205–240.
- Lorenc, A.C., 1992. Interactive analysis using covariance functions and filters. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **118**: 569–591.
- NOAA, cited 2004. Tropical Atmosphere Ocean Project: Data delivery. Available online from http://www.pmel.noaa.gov/tao/data_deliv/.
- Pacanowski, R.C. and S.M. Griffies, 1998. The GFDL modular ocean model user guide. The GFDL Ocean Group Technical Report NO. 2, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, USA.
- Semtner, A.J., 1976. A model for the Thermodynamic Growth of Sea Ice in Numerical Investigations of Climate. *J. Phys. Oceanogr.*, **6**: 379–389.
- Service Argos, 2001. Basic description of the Argos system. Available online from <http://www.argosinc.com/>.
- Storch, J.S., V.V. Kharin, U. Cubasch, G.C. Hegerl, D. Schriever, H. Storch, and E. Zorita, 1997. A Description of a 1260-Year Control Integration with the Coupled ECHAM1/LSG General Circulation Model. *J. Climate*, **10**: 1525–1543.

2004년 3월 22일 원고접수

2004년 12월 6일 수정본 채택

담당편집위원: 이재학