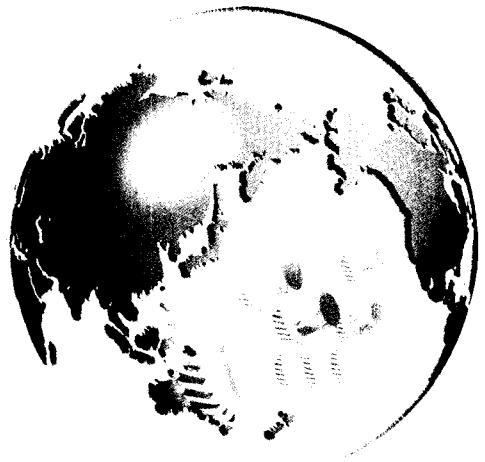


해양예보 기술의 현황

An Aspect of Ocean Prediction System



姜 永 昇*
Kang, Young Seung

* 해양기술사, (주)한국해양과학기술
부설연구소 차장.

1. 머리말

대륙성 고기압과 태평양 및 동지나해에서 발달하는 해양성 저기압의 영향권 아래에 있는 우리나라는 여름철의 태풍과 급격한 기상변화로 인한 폭풍의 영향으로 피해가 빈발하고 있다. 최근에는 태풍이나 해일과 같은 자연재해에 대한 국민의 관심이 높아지고 있으며 이러한 자연재해에 의한 피해를 줄이기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 자연재해 중에서 근래에 기상이변에 의한 피해가 급격히 증가하고 있는데, 이에 대한 연구를 수행하는데 있어서 대기와 해양을 하나의 시스템으로 보고 해양학자와 기상학자 간에 공동연구가 시도되고 있다. 그 이유는 기상과 해양은 상호 밀접한 연관성을 가지고 작용을 하기 때문이다.

지구물리유체역학(geophysical fluid dynamics)의 이론적인 발전은 허리케인의 경보시스템(hurricane warning system)을 수립하는데 있어서 많은 기여를 하였다. 즉, 이론적인 연구의 성과가 신뢰도를 가지고 허리케인의 진로를 예측하게 되었고 이는 연안과 해양에 사는 많은 생명을 허리케인으로부터 피해를 경감시키는 효과를 가져오게 되었다. 이를 근간으로 더욱 실제적인

예보 방법을 찾기 위하여 선진국에서는 지난 30여년간 많은 예산과 연구인력을 투입하여 해양예보의 적중률을 높이기 위한 많은 노력을 기울여왔다. 또한, 심각한 생태학적인 피해와 일부 국가에서는 심각한 재해를 가져온 엘니뇨(El Nino)와 같은 현상의 원인 규명과 전지구적인 환경의 변화에 영향을 미치는 요인을 연구하고 그 현상을 예측하려는 시도가 해양학자들 사이에 활발히 진행되고 있다.

따라서, 기상에 영향을 미칠 수 있는 해양의 변화에 대한 이해와 더불어 사전예측(prediction)과 예보기술(forecasting)의 현황 및 연구동향을 파악해 보는 것은 의미가 있는 일이라 생각된다. 여기서는 해양예보 기술의 현황에 대하여 고찰해보기로 한다.

2. 연안에서의 해양예보

연안에서의 해양예측은 연안어업과 해난구조에 유용하게 이용할 수 있다. 즉, 수온정보는 어획량 증대에 도움을 줄 수 있으며, 조류나 해류 정보는 경제적인 선박의 항로를 결정하는데 도움을 줄 수 있다. 이와 같은 예보를 성공적으로 수행하기 위해서는 다음의 3가지 정도의 요소가 필요하다.



그 첫째는 관심해역의 해양예보 모델링에 필요한 초기조건과 경계조건을 적절하게 설정하고 검증에 활용할 수 있는 양질의 자료를 확보하여야 하며, 둘째는, 자료의 분석과 자료동화 및 예보를 위한 계산능력을 가진 컴퓨터가 필요하다. 셋째는 검증된 좋은 모델과 적절한 자료동화 기법이 있어야 좋은 예보결과를 제공할 수 있다.

우리 나라 연안에서 가장 자주 접하는 현상은 파랑(wave)과 조류(tidal current)이므로 이에 대한 예보현황을 살펴보면 다음과 같다.

가. 파랑 (wave)

연안의 파랑은 주로 기상상태에 의해 크게 영향을 받기 때문에 기상조건의 파악과 해상풍의 추정이 일차적으로 중요한 과업이다.

현재, 해면기압자료를 입력하여 얻어진 해상풍 자료를 파랑모델이나 해일모델에 입력한 후 수치계산을 수행하여 파랑을 예측한다. 예측모델의 계산오차를 줄이기 위해서는 파랑의 관측자료를 이용하여 계산치와 관측치의 편차를 줄여 나가는 노력이 필요하다. 해양수산부에서는 수년간 연차사업으로 우리 나라 연안의 파랑관측망을 설정하여 장기파랑관측을 수행하고 있다. 이러한 자료는 우리 나라를 진행하는 태풍의 진로를 파악할 때 유용하게 사용될 수 있는데 그 예로 제주도 남측 파랑도에 설치된 해양관측 부이로부터 실시간으로 제공되는 파랑자료(파고 및 파향)로부터 해상의 상태를 파악할 수 있는 정보로 활용될 수 있다.

나. 조류 (tidal current)

조수간만(潮水干滿)의 차가 큰 우리 나라의 서해안과 남해안에서의 해수유동에 큰 영향을 미치는 주 외력은 조류이다. 우리 나라의 연안에서 많은 간척사업이 있었는데 이러한 공사로 인한 해

수유동의 변화를 파악하기 위해서 수치모형을 이용한 연구가 수행되어 왔다. 수치모형 실험은 연안 조위관측소의 조위와 조류의 관측치를 검증자료로 이용하여 공사전의 상황을 재현하고, 장래 연안개발 등으로 인한 지형이 변동될 경우 조위와 조류의 변화양상을 예측하여 변화에 대한 적절한 대응책을 마련하는데 활용하였다. 공사가 진행되는 기간동안 지속적인 환경 모니터링을 통해 해양환경의 변화 추이를 감시하고 있다. 최근에는 항해자나 일반인을 위한 조위나 조류의 실시간 예보를 위한 노력이 계속되고 있으며, 국립해양조사원(<http://www.nori.go.kr>) 등에서는 인터넷을 통하여 우리 나라 연안의 조위와 조류자료에 대한 실시간 예보자료를 서비스하고 있다.

3. 해류(ocean current)예보를 위한 요소

가. 해류예보 연구의 필요성

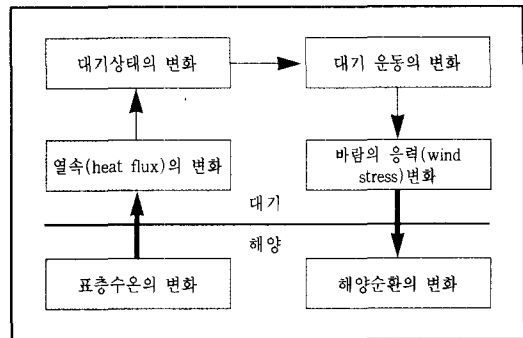
최근의 기상이변의 원인으로 나타날 수 있는 현상은 이산화탄소의 증가로 인해 오존층이 파괴되고 온실효과(greenhouse effect)로 인하여 기온이 상승하며, 극지방의 빙하가 녹아서 지구 전체적으로 볼 때 매년 2mm의 해수면이 상승할 것으로 보고되고 있는데 이러한 현상은 더욱 가속화될 것으로 보고 있다. 또한, 서태평양의 열대지방에 근원지를 두고 있는 엘니뇨현상은 태평양 지역의 기상교란을 일으켜 열대지방과 온대지방의 기상패턴이 매년 변화하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 엘니뇨에 대한 역학적 구조는 이미 잘 알려진 바와 같이 어떠한 외력에 의해 태평양의 적도부근의 동서 기압차가 감소하게 되어 무역풍이 약해지고 이로 인해 해면으로부터의 증발량이 감소하며 서부 태평양 해역의 강수량도 감소한다. 한편, 무역풍에 의한 해면용력이 감소하는 것 때문에 지금까지 서부태평

양의 표층에 쌓여 있던 난수가 내부 켈빈파(internal Kelvin wave)의 형태로 동진(東進)하여 태평양의 동부해역의 표층은 예년보다 따뜻한 해수로 덮이게 된다. 일단, 이러한 교란이 발생하면 대기는 수일~수주, 해양은 수개월~수년의 반응시간을 가지고 상호 작용하는 시스템을 이룬다. 이러한 결합된 시스템이 장래에 어떻게 될 것인가에 대한 관심이 기상학자와 해양학자의 공통된 목표라 할 수 있다. 미국과 캐나다와 같은 선진국과 우리 나라의 해양학자중의 일부가 기상예보와 같이 해수의 순환을 예보하려는 연구가 활발하게 추진 중인데, WOCE(world ocean circulation experiment)와 같은 대규모의 해양관측과 인공위성으로부터 제공되는 동시적이고 광역적인 자료의 생산이 이러한 연구를 가속화하고 있다.

나. 해류예보의 내용

해류는 파랑과 조류와는 달리 그 규모가 큰 해수순환(ocean circulation)의 형태로 나타난다. 이러한 해류를 발생시키는 기작(mechanism)은 크게 두 가지로 생각할 수 있는데 그 하나는 결빙과 증발에 의한 밀도차에 의한 흐름과 다른 하나는 바람이 해면에 미치는 압력차에 의한 흐름으로 나눌 수 있다. 최근 컴퓨터의 발달로 인해 수치모형 실험을 이용하여 전지구 규모의 해류(ocean current)의 변화를 예측하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 앞서 언급한 해류의 발생원인 중 후자에 해당하는 해양과 대기의 상호작용에 의한 상세한 기작을 살펴보면 다음과 같다. 즉, 해양은 대기에 열과 수증기를 공급함으로써 대기중의 운동에너지를 제공하고 대기는 기압차에 의한 바람과 강수를 공급하여 해양에 운동에너지를 제공하는 대기와 해양의 상호작용(atmosphere-ocean interaction)을 통해 해면에

서 풍파(wind wave)나 해류(current) 등의 운동을 일으킨다(〈그림 1〉). 이러한 해류예보를 위해서 수행해야 할 과정은 관측(observation)과 예측모델(prediction) 그리고, 자료동화(data assimilation)의 과정으로 나누어 생각할 수 있다.



〈그림 1〉 대기-해양 결합과정

① 관측(observation)

해양학 연구에 가장 기본적이면서도 중요한 해양관측은 주로 해양조사선을 이용하여 현장으로 나가서 장비를 바다에 투하하는 고전적인 방법으로 자료를 획득하여왔다. 최근에는 표층에 국한되기는 하지만 광범위한 해역을 동시에 조사할 수 있는 장점 때문에 인공위성과 원격탐사 자료를 이용하는 사례가 증가하는 추세에 있다. 그러나, 그 결과는 동시적이지만 표층에 제한된 자료이다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로 중층과 저층의 넓은 해역의 물리적인 특성과 흐름은 음향장비(acoustic device)를 이용하여 관측을 수행하기도 한다.

② 예측모델

수치해석기법과 컴퓨터 성능의 향상은 복잡한 큰 규모의 해수 순환과정을 예측하는데 큰 기여를 하였다. 즉, 해양에서 생산된 관측자료를 분석하여 현황을 파악한 후 해양의 물리적인 현상을 수식화하여 이것을 수치해석의 기법에 따라 수치



모델을 수행한다. 그리고, 연구 대상 해석과 검토하고자 하는 현상에 따라 모델의 유형을 결정한다. 시공간적인 변동성을 파악하고 와류(eddy)의 재현이 가능한 대양순환모델과 보다 진보된 방법으로 대기-해양 결합모델까지 발전하고 있다.

③ 자료 동화 (data assimilation)

최근에는 자연현상에 가장 근접한 결과를 얻기 위해서 정밀한 예측모델의 결과에 조사자료를 결합하여 모델의 결과를 향상시키는 과정을 반복하는 방법에 대한 연구가 매우 활발하게 연구되고 있는데 이러한 기법을 자료 동화(data assimilation)라고 한다.

자료 동화의 기법에는 인공위성에서 얻은 해수면의 수위자료와 해수면의 온도와 같은 해수면의 상태를 해양모델의 내부에 적용하는 방법에 따라 Blending기법과 Nudging기법 그리고, OI(optimal interpolation)기법 등으로 구분한다. 이러한 자료동화에 주로 사용하는 자료는 TOPEX/POSEIDON 고도계 자료와 각종 Lagrangian 부이로부터 얻은 자료를 활용하며 각각의 기법에 대한 내용은 다음과 같다.

· Blending기법

자료동화의 초기에 사용된 가장 간단한 기법으로 관측자료와 예측자료 사이의 오류를 직접 이용하여 새로운 변수 값을 예측하는 방법이다.

$$f^{new} = \alpha f^{obs} + (1-\alpha)f^{model}$$

f^{new} : 자료동화 후의 예측치, f^{obs} : 관측치, f^{model} : 최초 모델 계산치를 말하며

여기서, α 는 조절계수로 모델이나 역학적인 법칙을 고려하지 않고 통상 경험적으로 채택한다. 이 방법은 해수면 고도계(altimetry)의 자료를 해양내부의 역학모델에 이용하는데 간단한 상수 weight를 가하는 방법으로 Gulf stream에 대한 모델에서 사용된 바 있다.

· Nudging 기법

시간에 따른 변수의 변화 경향을 다음과 같이 표현할 수 있는데, RHS는 시간과 무관한 항을 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial f^{model}}{\partial t} = RHS - R(f_n^{model} - f_n^{obs})$$

시간 n에서 구한 모델결과와 관측결과 사이의 편차를 적절하게 조정하여 (n+1) 시간에 대한 f^{new} 를 계산할 때 사용한다. 여기서, 조절계수 R은 경험적으로 정한다. 이 방법은 지중해의 순환 모델 수행시 사용된 바 있다.

· OI(optimal interpolation) 기법

예측치와 관측치 사이의 편차를 다음과 같은 식으로 표현한다.

$$f_{n+1}^{new} = f_{n+1}^{mode} = K(Z_{n+1}^{obs} - f_{n+1}^{model})$$

여기서, Z_{n+1}^{obs} 는 (n+1) 시간에서의 관측치를 나타내며 조절계수 K는 다음과 같은 통계적인 방법에 의해 결정된다.

$$K = R_{fz} (R_{zz} + \epsilon^2)^{-1}$$

R_{fz} 는 모델예측치와 관측치 사이의 편차의 공분산(covariance)이고, R_{zz} 는 variance를 나타내며, ϵ 은 크기가 작은 관측오류를 의미한다. OI기법에서는 K값이 상수가 되며, 매 계산시마다 변할 때는 Kalman filter기법에 해당된다.

또한, 국지적으로 존재하는 자료를 인접한 다른 해역의 모델에 이용할 수 있는지를 평가하는 방법에는 Kalman filter와 adjoint 기법이 있다.

· Kalman filter 기법

Kalman에 의해 도입된 기법으로 통계적인 방법이 많이 사용되며 계산시간의 제약 때문에 단순화된 문제에만 주로 적용되어 오다가 최근에는 인

공위성에서 관측된 고도계(altimetry) 자료의 동화연구로 보다 복잡한 모델의 연구에 활용되고 있다. 또한, 인공위성의 해빙(sea ice)과 관련된 자료를 이 방법을 이용하여 해빙변화 연구에 도입하였다. 이에 대한 일반적인 관계식은 다음과 같다.

$$f^{new}(t) = f^{model}(t) + K[f^{obs}(t) - H f^{model}(t)]$$

여기서, f^{new} : 참값에 근접한 변수값, f^{obs} : 관측자료, f^{model} : 모델 계산치를 말하며, H는 관측치와 모델 계산치 사이의 관계를 나타낸다. 만일, 관측치와 모델의 격자점이 일치하지 않으면 H는 관측치에 대한 모델의 대응되는 값을 구하기 위해 내삽(interpolation) 함수를 의미한다. 편차의 크기를 최소자승개념에 의하여 정의하는 경우에

$$(f^{new} - f^{true})^T (f^{new} - f^{true})$$

의 최소화를 만족하는 K는 다음과 같다.

$$K = P^{model} H^T (HP^{model} H^T + R)^{-1}$$

여기서, P^{model} 은 모델 계산치이고, R은 관측자료내의 편차의 variance를 나타낸다. 이 방법의 특징은 P^{model} 을 구하는 과정에서 모델에 관련된 역학을 이용하는데 있다.

· Adjoint 기법

이 방법은 기상학에서 많이 이용하는 방법으로 1988년 이후에 해양물리학 분야에 소개된 variational 방법으로 표현되고 있다. 즉, 관측자료와 모델에서 계산된 값 사이의 편차를 최소화하는 조건을 만족하도록 모델을 조절하는 방법이다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i,j} (m_i - d_i) A_{i,j} (m_j - d_j)$$

여기서, m은 모델의 계산치이고, d는 관측치이며, $A_{i,j}$ 는 i 및 j번째 관측치 사이의 co-validity를 나타낸다. 이를 행렬형태로 나타내면,

$$J = \frac{1}{2} (m-d)^T A (m-d)$$

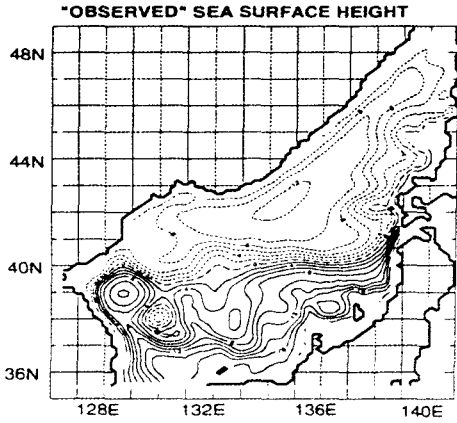
로 주어지는데 이 J를 cost function이라고 한다.

모델의 식들을 만족하면서 자료와 모델이 대응하는 값 사이의 편차를 최소화하는 것이 목적이므로 Lagrangian 함수를 정의하고 이를 최소화하는 문제를 풀면 된다.

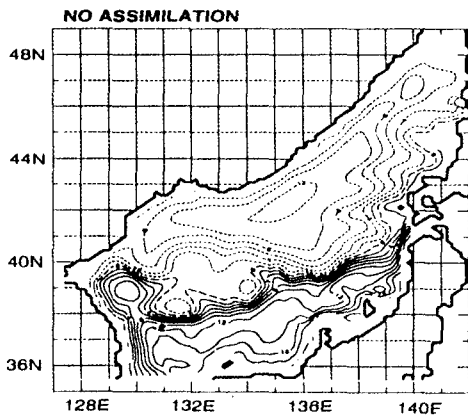
$$L = J + \sum_j \lambda_j E_j$$

여기서, λ_j 는 Lagrangian multiplier이며 양의 미지수이다. 이와 같이 가상적인 Lagrangian multiplier를 붙이는 경우를 adjoint 모델이라 한다.

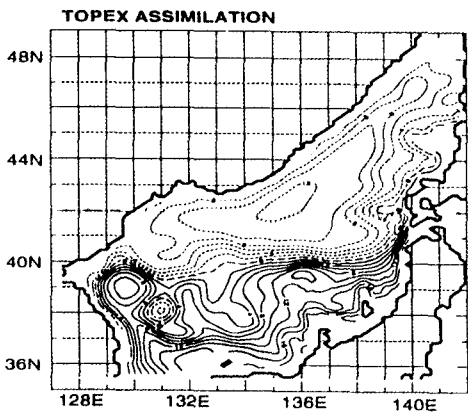
우리 나라 동해의 순환연구에 자료동화 기법을 적용한 사례가 <그림 2>~<그림 4>에 제시되어 있다. 즉, 미국의 Naval Research Laboratory에서 개발한 해양예보시스템은 TOPEX/POSEIDON으로부터 수신한 해수면 자료 SSH(sea surface height)에 OI 기법을 적용하였으며, 연직방향으로는 nudging 기법으로 모델에 적용한 후, NLOM(Navy Layer Ocean Model)로 예측을 수행하였다. <그림 2>는 1992년에 관측된 해수면 자료(sea surface height)로 등치선의 간격은 2m이며, 자료동화 과정을 수행하지 않은 결과는 <그림 3>에 제시된 바와 같이 해수면의 등치선의 형태가 관측된 해수면 자료와 비교할 때 다소 차이를 보인다. 그러나, 자료동화를 수행한 경우는 <그림 4>에 나타난 바와 같이 <그림 2>의 관측된 해수면과 비교할 때 등치선의 형태가 거의 같은 양상을 나타낸다.



〈그림 2〉 관측된 해수면 자료 (Sea Surface Height)



〈그림 3〉 자료동화를 수행하지 않은 모델 결과



〈그림 4〉 자료동화를 수행한 모델 결과

4. 해일재해예보

해일은 외력에 따라 폭풍해일(storm surge)과 지진해일(Tsunami)로 분류하며 돌발적인 외력에 의해 해수면이 비정상적으로 상승 또는 하강하는 현상을 말한다.

보통 해수면보다 높아지는 경우는 연안시설물의 침수를 야기하여 파랑의 진입을 허용함으로써 구조물을 파괴하는 결과를 초래하는 반면 해수면보다 낮아질 경우는 임해 공업시설과 발전소의 취수장치의 가동이 불가능하게 되어 심각한 문제를 일으킬 가능성이 크다.

가. 폭풍해일(storm surge)

폭풍해일은 기상교란에 의해 발생하는 해일로 특히, 강한 저기압에 의해 발생하는데 우리나라의 경우 폭풍해일의 발생빈도는 동해보다 황해가 많고 겨울에 주로 발생한다. 한편, 남해는 태풍의 발생시기인 여름과 가을에 발생하는데 이러한 폭풍해일을 예측하기 위해서는 해면기압과 해상풍 및 수심자료를 입력자료로 이용하여 수치모델로 산정하여 그 크기와 경로를 예측한다.

나. 지진해일(Tsunami)

지진해일은 해저의 지진과 화산폭발 등의 지각 변동에 의해 발생하는 현상으로 주기는 수 분~수 십분의 장주기 파장으로 전파속도가 빠르며 폭풍해일보다 해수면의 상승폭이 크므로 이에 대한 예보가 정확하지 않을 경우의 피해 규모는 매우 크게 나타날 수 있다. 이에 대한 대응방안으로는 수치계산에 의한 예상전파도를 작성하고 경보망을 가동하여 재해를 줄이는 것이 바람직한 방법이다.

이러한 지진해일에 대한 연구는 기상청의 예보국과 국립방재연구소 및 대학의 해양 및 연안공

학 분야의 학자들을 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며, 최근에는 러시아와 일본과 공동연구도 진행되고 있다.

5. 결론

최근 기후변동에 따라 태평양을 중심으로 수년 주기로 발생하는 이상 고온 현상인 엘니뇨와 이에 따른 피해가 증가하고 있으며 지구 곳곳에 가뭄과 대홍수 어획고의 감소 등 기상이변을 일으키고 있는 것을 볼 때 해양예보의 필요성이 더욱 절실히 요구되고 있다. 연안에서 해수의 수온이 3°C 이상이 변화할 경우 해양생태계에 미치는 영향은 매우 커서 어류의 성장의 경우를 볼 때 회유 및 산란에 큰 변화를 야기하는 결과를 초래하게 된다. 최근 해양물리학에서 자료 동화는 대규모의 관측과 인공위성에서 제공되는 동시적이고 광역적인 자료의 양산으로 1980년대 이후 연구가 활발하여 기상예보와 같이 해상의 상태를 예보하기 위한 측면에서 관심이 높아지고 있다.

최근에는 지구물리유체역학의 활발한 연구에 힘입어 장주기파랑, 기상의 대류(atmospheric convection), 대기-해양 상호작용(air-sea interaction) 등의 자연현상에 대한 이해도가 증진되고 있고 수치모델을 이용하여 자연현상을 근접하게 재현할 수 있게 되었다.

그러나, 해양의 순환(ocean circulation)의 경우 이를 예측하기 위해서 자료 동화(data assimilation)를 수행하는 사례가 증가하고 있으나 이를 위해서는 검증된 수치모델과 모델의 초기 및 경계 조건 설정에 사용될 관측자료의 질(quality)의 향상이 필요하며, 적절한 자료동화 기법을 사용하는 것이 중요한 요소로 작용한다. 이러한 자료동화 기법은 모델과 자료의 결합이라는 측면에서 볼 때 재해방지를 위한 모델에 적용할 경우에 좀 더 실제적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 향후 이러한 연구가 더욱 심도 있게 진행되어 정확한 해양의 순환 현상을 예보하는데 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

(원고 접수일 1999. 9. 8.)

참고문헌

1. 해양수산부, 1998. 해양예보시스템 구축.
2. 이석우, 1996. 물리해양학통론.
3. 한국해양연구소, 1996. 한반도 주변해양 자료동화 수치 모델의 개발.
4. Long R. B., 1989. Notes on assimilating observations into numerical models. Delft Hydraulics.
5. Igor Shulman, Ole Martin Smedstad, 1997. Data assimilation experiments with the navy layered ocean model. ASCE proceeding, pp. 752-765.