

최적 내삽 방안에 의한 파랑 자료동화 시스템 개발 Development of Ocean Wind Wave Data Assimilation System Adapting 2D-Optimal Interpolation Method

박상욱¹, 박중숙², 류상범³, 조천호⁴
Sangwook Park¹, Jong Suk Park², Sang Boom Ryoo³, and ChunHo Cho⁴

1. 서 론

기상청은 3세대 파랑모델 WAVEWATCH-III v2.22 (Tolman, 2002)를 기반모델로 사용하여 1/2° 해상도의 전지구 파랑예측 시스템(GoWW3), 1/12° 해상도의 지역 파랑예측 시스템(ReWW3), 6개 도메인으로 구성된 1/120° 해상도의 국지연안 파랑예측 시스템(CoWW3)를 1일 2회(00,12UTC) 현업운영하고 있다. 이러한 시스템들의 초기 스펙트럼은 앞선 시간대에서 모델 수행 후 생성된 해당 시각의 모델 restart 스펙트럼을 사용하고 있다. 이러한 방식은 해상풍 hindcast를 사용하여 초기 스펙트럼을 만드는 방법과 함께 파랑 자료동화 과정이 없는 상황에서 적용될 수 있는 방법 중의 하나이다. 파랑 모델에서 초기 스펙트럼은 해상풍 입력자료에 의하여 빠르게 적응하므로 초기장 지속 효과는 그다지 크지 않다. 그러나 관측 스펙트럼의 장주기 성분이 모델 스펙트럼의 초기장에 반영될 수 있다면 자료동화의 효과가 파랑예측 개선에 나타날 수 있다.

Voorrips et al.(1997)은 최적 내삽(OI:Optimal Interpolation) 방안을 적용하여 pitch-and-roll 부이에서 관측된 2-D 스펙트럼의 자료동화 과정 및 초기장 개선 효과를 기술하고 있으며, Chen et al.(2004)은 부이자료 OI-자료동화에 의한 미국환경예측센터(NCEP)의 전지구 파랑예측 시스

템의 예측 성능 개선을 언급하고 있다. 유럽중기예보센터(ECMWF)의 전지구 파랑예측 시스템은 Jason 위성 관측 유의파고 자료를 동화시킴으로서 세계에서 가장 앞서는 초기장 생성 및 모델 예측 결과를 보이고 있다(Janssen et al., 2005). 네덜란드 기상청(KNMI)은 북해에서부터 노르웨이 해협에 걸쳐 설치된 계류부이 관측 스펙트럼을 이용한 자료동화 과정을 지역 규모 파랑예측 시스템에 적용시키고 있다. 외해에서 내해로 전파되는 파랑에너지(특히 장주기 시그널) 정보를 모델 초기장에 적절히 포함시킴으로서 12시간 이후까지 초기장의 영향이 미치는 양상을 보이고 있다(Voorrips,1997).

본 연구에서는 이러한 결과들을 바탕으로 기상청 지역 파랑예측 시스템에 최적 내삽 방안을 적용한 연안 계류부이 자료동화 모듈의 개발 및 초기장 개선 효과가 모델 예측에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 2009년 봄철 해안해양공학회 학술대회의 “너울” 특별 세션에서 다루어졌던 2008년 2월 23-24일 강릉 안목항 사례(박 등, 2009)에 대하여 자료동화의 효과를 살펴보았다. 2장에서는 본 연구에서 구현된 최적 내삽 방안에 의한 자료동화 과정과 초기 스펙트럼을 리스케일링하는 방법을, 3장에서는 1개월(2009년 6월) 동안에 나타난 자료동화 적용 효과에 대한 통계분석과 너울 사례 적용 결과를 기술하였다.

1 국립기상연구소 지구환경시스템연구과 기상연구사

2 발표자: 국립기상연구소 지구환경시스템연구과 연구원

3 국립기상연구소 지구환경시스템연구과 기상연구관

4 국립기상연구소 지구환경시스템연구 과장

2. 파랑 자료동화 방안

2.1 최적 내삽법의 적용 과정

해상풍 또는 파랑의 분석과정은 수치모델 및 자료동화 기법의 발전에 따라 점차 세밀화되고 있다. 불규칙하게 분포하는 관측자료를 수치모델에서 사용되는 격자점 자료로 만드는 과정을 객관분석(Objective Analysis)이라 한다. 일반적으로 수치모델의 격자점에 존재하는 관측자료의 분포와 개수는 한정되므로 추가의 정보가 필요하게되며 이러한 정보는 기후치, 물리적 법칙, 또는 수치모델의 예측치를 이용하게 되는데 이러한 값을 배경장(Background)이라 한다. 적절한 배경장을 통해서 관측의 부족한 점을 메우고 역학적, 물리적 균형을 이루면서 배경장에 포함된 정보와 관측값에 포함된 정보를 효과적으로 섞는 과정이 중요하게 되었다. 이러한 과정이 자료동화이며, 자료동화는 수치모델 변수의 시간적 변화와 물리 법칙을 이용하여 관측 정보가 수치모델 상태와 결합되어 만들어져가는 분석 방법인 것이다. 초기의 자료동화 기법은 통계적 방식에 기초한 최적내삽법(Optimal Interpolation) 등이 사용되었으나 점차 비중관 관측자료(위성 및 레이더 등)가 증가하면서 변분법(Variational Methods)을 적용하는 형태로 발전하고 있다.

본 연구는 기상청의 5개 계류부이(덕적도, 칠발도, 거문도, 거제도, 동해 부이)에서 관측된 유의파고를 활용하여 지역 파랑예측 시스템에 장착될 2차원 최적 내삽법 적용 자료동화 모듈의 개발이다. Eq. (1)은 2차원 최적 내삽법 과정에서 사용되는 방식이다.

$$Y_o = \sum_{j=1}^m W_j (X_j^o - X_j^f) + X_o^f \quad (1)$$

여기서 Y_o 는 분석값을 나타내고, W_j 는 가중치, $(X_j^o - X_j^f)$ 관측증분, X_o^f 는 초기추정치를 나타낸다. j 는 각 모델의 분석지점을 나타내고, o 는 관측지점, f 는 예보, m 은 총 관측개수를 나타낸다.

최적 내삽법의 특징은 관측자료의 각 격자점에서 내삽의 중요도를 계산할 때 과거의 통계자료를 이용하여 예보오차의 공간구조를 미리 파악하는 점이다. 그러나 본 연구에서는 부이 관측자료를 직접 자료동화에 사용하기 때문에 관측값에는 오차가 없다고 가정하고 최적내삽법을 적용하였다. 따라서 Eq. (1)은 Eq. (2)와 같은 형태가 된다.

$$\sum_{j=1}^m (\mu_{ij}^p) W_j = \mu_{ig}^p, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

여기서, W_j 는 가중치 벡터, μ_{ij}^p 는 배경오차 상관행렬, μ_{ig}^p 는 모델의 각 격자점과 관측점 사이의 배경오차 상관을 나타낸다. 오차의 상관이 큰 모델일수록 자료의 영향은 광범위하게 끼치게 된다. 본 연구에서는 가중치를 계산하기 위해 로렌츠 상관모델(Lorenc, 1988)를 이용하여 배경오차 상관을 계산하였고 가중치는 거리에 따라 균일한 오차상관을 가지게 된다. 5개 지점의 부이관측 유의파고와 2007-2008년도 모델 유의파고 사이의 상관관계를 조사하여 상관계수 0.8 이상을 나타내는 거리가 평균적으로 80km 정도로 나타나고 있으며 이에 상응하는 로렌츠 상관모델의 영향반경을 결정하였다. (Fig. 1).

최적내삽법을 통하여 모델의 초기장을 향상시키는 방식은 두 가지가 있다. 첫 번째 방식은 파랑모델에서 산출된 유의파고와 관측된 유의파고를 이용하여

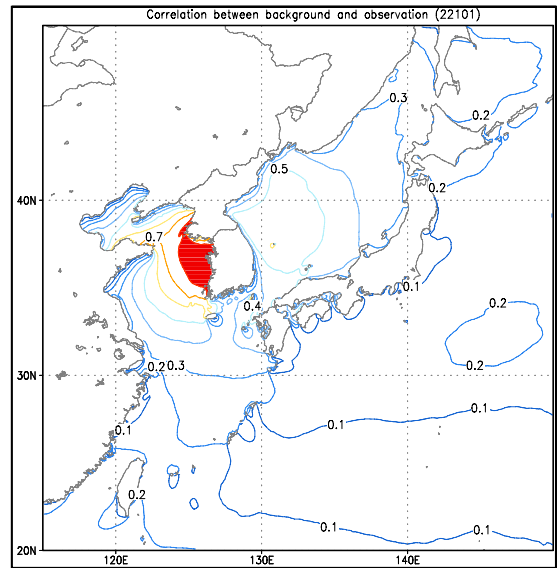


Fig. 1. The significant wave height correlation between Deokjeokdo(22101) buoy observation and model data for the period of 2007-2008.

자료동화를 수행한 후 모델 초기장의 스펙트럼을 개선시키는 방식인 OI-I(Optimal Interpolation of Integrated parameters)와 관측 스펙트럼 자료를 이용하여 모델의 스펙트럼을 바로 자료동화하는 OI-P(Optimal Interpolation of Partitions) 방식이 있다. 선행연구에서는 OI-I 방식보다 OI-P 방식이 초기장 개선에 효과적이라는 결과를 보이지만, 현재 실시간 관측 스펙트럼의 획득은 어려운 상황이므로 본 연구

에서는 OI-I 방식을 채택하고 있다.

2.2 자료동화 모듈 구성 및 초기 스펙트럼 리스케일링

1일 2회(00,12UTC) 지역 파랑예측 시스템에서 생성되는 초기 스펙트럼을 초기추정치(배경장)으로 사용하고 매시간 계류부이에서 관측되는 유의파고의 동화 과정을 Fig. 2에서 도식적으로 표현하였다. 이 과정에서 생성되는 유의파고 분석치를 이용하여 Fig. 3과 같은 3시간 간격 파랑실황도를 산출한다.

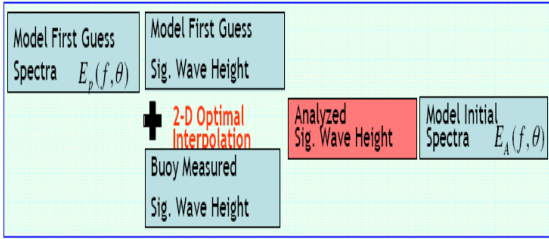


Fig. 2. Schematic diagram of the regional wind wave prediction system data assimilation procedure.

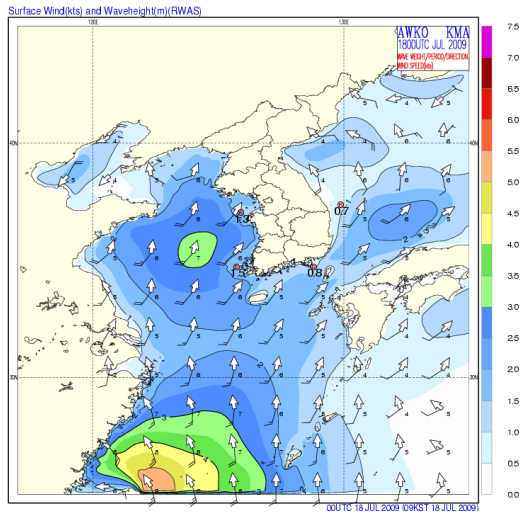


Fig. 3. Wind wave analysis chart generated using analyzed significant wave height. The mean wave direction and wave periods are shown together.

관측자료에 의하여 수정된 유의파고를 이용하여 파랑모델의 초기 스펙트럼을 생성하는 방법은 Esteva(1988)에 의하여 제안된 배경장과 분석장의 비(ratio)를 사용하여 초기 스펙트럼을 리스케일링(rescaling) 한다 (Eq. (3)).

$$\xi_a(f, \theta) = (\eta_a / \eta_m)^2 \times \xi_m(f, \theta) \quad (3)$$

여기서, $\xi_a(f, \theta)$ 는 스펙트럼 분석치를, η_a 는 유의파고 분석치를, η_m 은 유의파고 배경치를, $\xi_m(f, \theta)$ 는 스펙트럼 배경치를 각각 의미한다. 따라서 자료동화 과정 이후, $\xi_a(f, \theta)$ 를 초기 스펙트럼으로하여 모델 적분이 이루어진다.

3. 자료동화 적용 효과 분석

2장에서 기술된 자료동화 모듈을 2009년 6월 한달 기간 동안 1일 2회(00,12UTC) 분석 싸이클을 갖는 시스템을 병행 운영하여 얻은 모델 수행 결과와 기존의 현업운영 모델의 결과를 비교하여 자료동화 적용 효과를 분석하였다. 자료동화 과정에 사용된 부이 자료를 다시 자료동화 효과의 검증에 사용한다는 것은 모순이지만 부이 이외의 해상관측 자료 획득이 어려워 우선은 부이자료를 이용하여 자료동화 효과의 크기 및 지속 시간 등을 살펴보았다. Fig. 4는 5개 부이 지점에 대한 자료동화 적용과 미적용 사이에 나타난 편차(BIAS, 모델값-관측값), 평방제곱근 오차(RMSE)의 차이를 나타낸다.

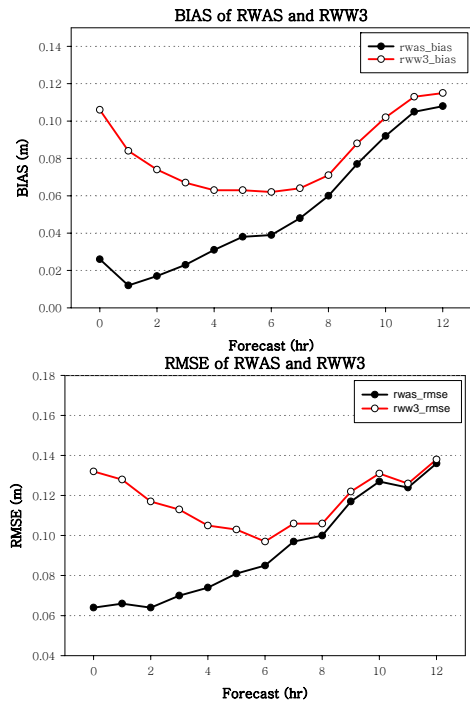


Fig. 4. Significant wave height validation statistics (Bias and RMSE) with (filled circle) and without (open circle) data assimilation for Jun. 2009.

모델 적분 시작 후 관측자료의 영향이 미치는 효과는 처음 6시간 정도까지 차이를 보이다가 점차 줄

어들어 12시간 정도가 되면 자료동화의 효과는 매우 미미하게 나타난다. 특정 사례에 대한 자료동화의 적용과 미적용 결과를 시계열로 표시해보면 관측자료의 효과가 시간이 지남에 따라 급속히 줄어드는 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 강릉 안목항에서 인명 피해를 발생했던 2008년 2월 23일 ~ 25일 사이의 동해와 거제도 부이에서 관측된 유의파고와 자료동화 적용 및 미적용 결과의 유의파고 시계열이다. 이 기간의 동해부이 지점에서는 모델의 과대모의를 자료동화 시점에서 관측에 가깝게 끌어내리지만 바로 그 효과가 감쇄하고 있다. 거제도부이 지점은 너울의 영향으로 지속적으로 관측 유의파고가 올라가고 있으나 모델의 과소모의 경향을 자료동화 시점에서 잠시 관측에 접근하려하고 있으나 수시간 후 다시 배 경장을 쫓아가는 경향을 보이고 있다.

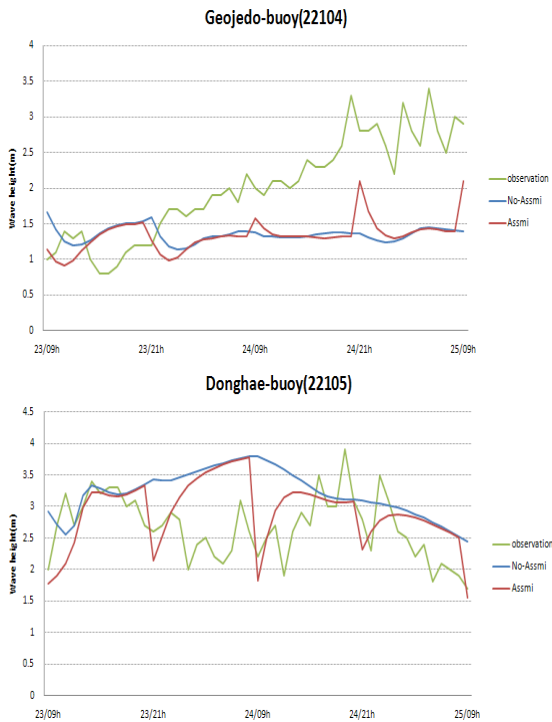


Fig. 5. Significant wave height time series with and without data assimilation for Feb. 23-25, 2008 at two buoy location.

동 기간의 자료동화 시점에 거제도 부이 지점에서의 방향스펙트럼을 살펴보면(Fig. 6), 자료동화의 효과가 장주기 성분에서 약간 강화된 효과를 나타내고 있다.

결론으로, 파랑 파라미터(유의파고)를 동화시키는 OI-I 방식은 12시간 이내에 관측자료의 효과가 소멸

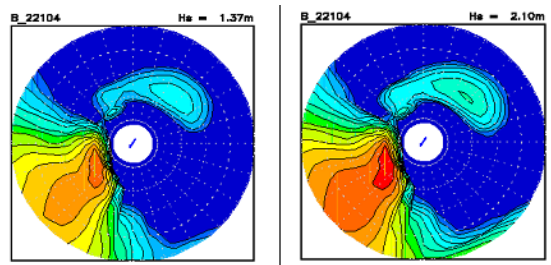


Fig. 6. Directional wave spectrum energy ($m^2/Hz/Rad.$) without (left) and with (right) data assimilation in 08/24-21:00LST at Geojaedo buoy location.

하는 것으로 나타나며, 관측된 방향 스펙트럼 자체를 동화시키는 OI-P 방식에서 장주기 성분이 얼마나 그 효과를 지속시킬 수 있는가를 이후 연구에서 살펴보고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소 지구환경시스템연구과의 '관측기술 지원 및 활용 연구' 연구과제의 일부로 진행되었으며, 슈퍼컴퓨터 전산환경을 제공하여 주신 기상청 슈퍼컴운영팀 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

- 박상욱, 박중숙, 장필훈, 김정식, 2009: 2006-2008년도 너울로 의심되는 이상고파 사례의 Hindcast. 한국해양·해양공학회 학술발표 논문집.
- Janssen, P., J.R. Bidlot, S. Abdalla, H. Hersbach, 2005: Progress in ocean wave forecasting at ECMWF. Technical Memorandum No. 478.
- Esteva, D.C., 1988: Evaluation of preliminary experiments assimilating Seasat significant wave heights into a spectral wave model, *J. Geophys. Res.*, 93, 14,099-14,106.
- Lorenz, A. C., 1988: Optimal nonlinear objective analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114, 205-240
- Tolman, H. L., Balasubramanian B., Burroughs L. D., Chalikov D. V., Chao Y. Y., Chen H. S., and Gerald V. M., 2002a: Development and implementation of wind generated ocean surface wavemodels at NCEP. *Wea. Forecasting*, 17, 311-333.
- Voorrips, A.C., V.K. Makin and S. Hasselmann, 1997: Assimilation of wave spectra from pitch-and-roll buoys in a North Sea wave model. *J. Geophys. Res.* 102 (C3), 5829-5849.