Journal of KOSHAM
Vol. 13, No. 4 (Aug. 2013), pp. 267~272
ISSN 1738-2424(Print), ISSN 2287-6723(Online)
http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2013.13.4.267

열팽창 효과를 직접 고려한 미래 지구온난화에 의한 북서태평양에서의 상세 해수면 상승 연구

The Regional Steric Sea Level Rise due to Global Warming in the Northwestern Pacific

임채욱* · 김동훈 · 우승범*****

Lim, Chaewook · Kim, Dong-hoon · Woo, Seung-bhum

Abstract

In order to consider the effect of steric sea level change directly, we developed the regional version ocean circulation model (ReMOM) using the GFDL MOM version 4 which does not use the Boussinesq approximation. The GFDL CM2.1's SRES A1B and B1 results from IPCC were used for the initial and boundary conditions in the northwestern Pacific. The sea surface temperature and sea surface height were increased by about 2°C and 30cm for SRES A1B, and about 1°C and 22 cm for SRES B1 after 100 years, respectively. East Sea was affected by steric effect more than Yellow Sea. It caused by the warmer Tsushima current passing the Korea strait due to global warming. The sea level rises by the direct steric effect were higher than by the indirect steric effect.

Key words : Steric, Boussinesq approximation, MOM4, Sea level rise

요 지

이 연구에서는 steric 효과에 의한 해수 체적 변화를 직접 고려하기 위하여 Boussinesq 근사를 사용하지 않는 MOM(Modular Ocean Model) version4 전지구 해양 순환모형을 지역모형화하여 사용하였다. 연구에 사용된 초기치와 경계치 자료들은 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제공하는 GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)의 CM2.1 자료를 사용하였고, 지구온난화 시나리오는 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) A1B와 B1을 선택하였다. 우리나라를 포함하는 북서태평양을 연구지역으로 하였으며, 해안선이 복잡한 황해 등을 고려하기 위하여 0.2도의 해상도로 구축하였다. SRES A1B의 경우 2100년에는 2000년에 비하여 수온/해수면은 약 2°C/30 cm 상승하고, SRES B1은 약 1°C/22 cm 상승하였다. 동해는 steric에 의한 변화가 더 큰 것으로 나타났는데, 대한해협을 통과하는 대마난류의 수온이 상승하여 밀도변화에 의한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. Steric 효과를 간접적으로 계산한 결과보다 직접적으로 고려한 연구 결과가 해수면 상승을 더 높게 예측하였다. 그 이유는 간접적으로 계산한 역학고도는 수심이 낮은 지역에서 해수면 상승치를 계산할 수 없고 변화되지 않은 체적이 해저의 압력으로 작용하여 소멸되었기 때문인 것으로 분석된다.

핵심용어 : 열팽창, 부시네스크 근사, MOM4 모형, 해수면 상승

1. 서 론

해수면이 상승하는 요인은 크게 세가지로 분류된다. 알래스카와 히말라야의 빙하와 만년설이 녹는것과, 그린란드와 남극의 대빙원의 녹음 그리고 해수 수온의 증가에 따른 열팽창이다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 발표한 지구온난화 제 4차 보고서(Richard Alley *et al.* (2007))에서는 2100년까지의 해수면이 19~59 cm 상승한다고 전망했다.

해수면이 상승할 경우, 홍수 시 기후변화에 따른 강우강도의 증가와 맞물려 홍수피해를 증가시킴으로써 홍수로 인한 피해를 증가시킬 가능성이 높다. 해수면 상승에 따른 연안구조물의 공사비 증가 등 구조적 분야의 사회비용이 상승함은 물론 해일 범람구역의 증가와 연안습지 훼손 등 막대한 경제적 손실이 발생하므로 이에 대한 보다 정확한 연구가 진행되어야 한다.

*정회원. 인하대학교 해양과학과 박사과정(E-mail: lichwo@gmail.com)
Member. Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University, Incheon 402-751, Korea. the Master's Course
**연세대학교 대기학과. 연구교수
Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Research Professor
***교신저자. 정회원. 인하대학교 해양과학과. 교수(Tel: +82-32-860-8255, Fax: +82-32-862-5236, E-mail: sbw529@gmail.com)
Corresponding Author. Member. Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University, Professor

해수면 상승은 전 지구적으로 발생하지만, 지역적으로 많은 차이를 보인다. 쿠로시오를 포함한 북서태평양, 브라질 남부 연안, 호주 서부 연안, 북극 지역 등에서 해수면 상승이 높을 것으로 예상하고 있다(Landerer *et al*., 2007; Yin *et al*., 2009).

우리나라에서는 2011년에 국립해양조사원(KHOA, 2011)에서 IPCC자료를 이용하여 지구온난화로 인한 우리나라 근해의 해수면 변화 예측을 위한 연구를 진행하였다. 그러나 IPCC의 대부분의 기후모델들은 Boussinesq 가정이 적용되어 있기 때문에, 밀도 변화에 의한 해수 팽창효과를 직접 고려하지 못하고 진단(diagnostic)방식으로 계산해야한다. 이러한 기후모형들은 해수면 변동을 계산하기 위하여 역학고도(dynamic height)를 사용하였다. 또한 Oh *et al*.(2011) 등이 이와 비슷한 연구를 진행 하였다.

지구온난화와 해수면 상승 등의 기후 변화를 예측하기 위해 많은 수치모형들이 사용된다. 해양에 관련된 수치모형들은 수온과 염분, 해류변화, 해수면 상승 등에 대한 예측을 위해 사용한다. 그러나 대부분의 모델은 Boussinesq 근사를 사용함으로써 해수면 변화를 해양 전체의 체적변화로써 고려 할 수 없다. Boussinesq 근사란 평균 밀도에 비하여 시간적으로 변화하는 밀도는 아주 미비하다고 가정하여 밀도 변화를 무시하는 것이다. 이 때문에 밀도 변화에 밀접한 연관을 갖는 해수면 변화는 일반적인 해양 모델의 예측 결과로부터 진단적 방법으로 구할 수 밖에 없다. 본 연구에서 사용된 MOM4 (Modular Ocean Model version4)는 이러한 단점을 해결하기 위하여 non-Boussinesq 체계를 사용한 모형이다(부록참고).

지역적으로 상세한 예측 결과를 얻기 위하여 전지구 해양순환 모형인 MOM4를 북서태평양으로 지역모형화하고 IPCC에 제출된 CM2.1의 전지구 자료로부터 SRES A1B와 B1의 초기장과 경계장을 추출하여 재모의 하였다. CM2.1의 자료는 1도의 해상도를 갖고 50개 층으로 구성되어 있다.

지역모형화한 결과와 IPCC에서 제공하는 CM2.1의 결과를 비교하여 해수면 변화의 차이를 연구하였다.

2. 모형개발

2.1 지역해양순환모형

지구온난화에 의한 해수면 변화를 보다 현실적으로 예측하기 위해서는 기본적으로 열팽창에 의한 해수면의 변화를 모의할 수 있어야 하며, 해빙의 거동과 육빙의 녹음에 의한 해수 체적 변화 등을 고려할 수 있어야 한다(참고: Fig. 1). 그러므로 해양 모형은 밀도변화를 고려할 수 있는 non-Boussinesq 유체 모형이어야 하며, 해수면의 조건은 자유수면으로 표현이 가능해야 한다. 모형의 해상도는 지역 규모의 예측이 가능할 정도의 고해상도 모형이 필요하며, 수십 ~ 수백년의 모의를 위해서 병렬최적화가 필요하다.

MOM ver.1과 같은 과거의 해양순환모형은 해면을 강체해면(rigidlid)으로 가정하여 해수면 변화를 따로 계산하지 않아도 되는 계산상의 이점을 취득하였다. 그러므로 이러한 모형들은 지구온난화에 의한 해수면 상승을 예측할 수 없으므로 자유수면을 가진 해양순환 모형의 개발이 필수적이며 최근에 개발되고 MOM4와 POP(Parallel Ocean Program), HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) 등의 전지구 해양순환모형들은 이 문제를 해결하고 있다.

해수면 변화는 육빙의 녹음으로 인한 강물의 유출입(source), 강수와 증발(water forcing), 해류의 수렴과 발산(dynamics), 해수의 열팽창(steric) 등이 영향을 끼친다(Fig. 1).

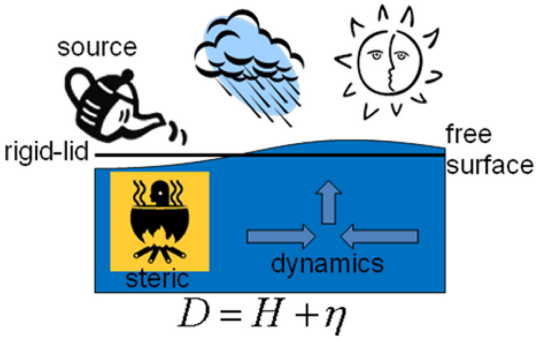


Fig. 1. Factors for Sea Level Change

본 연구에서는 전지구 해양순환모형인 MOM4를 이용하여 북서태평양 주변해역의 상세 해수면 변화예측을 할 수 있도록 지역해양순환모형으로 개발하여 ReMOM(Regional MOM)이라고 명명하였다. MOM4는 전지구 해양순환모형이므로 지역 해양순환모형으로 설정하기 위해서 해당 지역에 맞는 지형과 초기치, 경계치 등을 새로 준비하였다. 또한 지역모형에서 안정적으로 모의되는 경계치 등을 새로 준비하였다. 또한 지역모형에서 안정적으로 모의되는 경계치 입력방법으로 스폰지 방법을 선택하였으며 지역 해상도에 맞는 각종 모수화 방법과 계수를 설정하였다. 위도는 115°~150°, 경도 20°~52°이고, 수심이 낮은 황해 및 대한 해협의 폭 등을 현실적으로 표현할 수 있도록 수평 해상도를 0.2° 간격으로 구성하였다. 연직층은 34개의 층으로 구성하였다(Fig. 2).

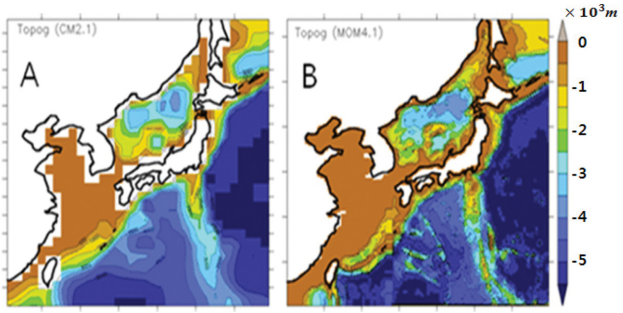


Fig. 2. The Regional Resolution from GFDL CM2.1 (A) and ReMOM (B)

2.2 초기치 및 경계자료

예측모의에 사용한 초기장과 경계장은 CM2.1 모형의 IPCC 예측 결과를 사용하였다. IPCC에서 제공하는 여러 가지 예측 결과 중 신뢰성이 높고 검증이 잘 이루어진 결과로 선정하였다.

해수표층에 들어가는 자료는 바람장(Wind stress), 표층수온(Sea Surface Temperature), 표층염분(Sea Surface Salinity)

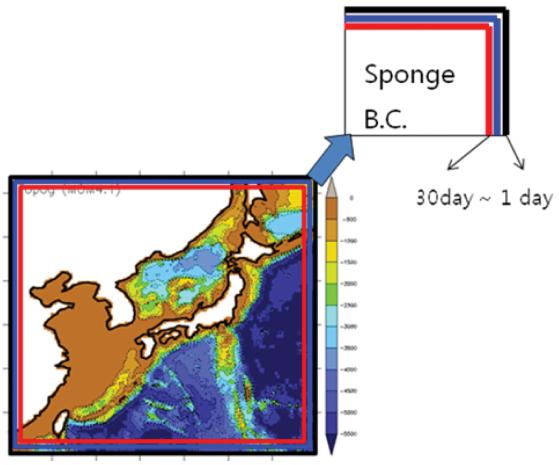


Fig. 3. The Sponge Boundary Condition for Lateral Boundary

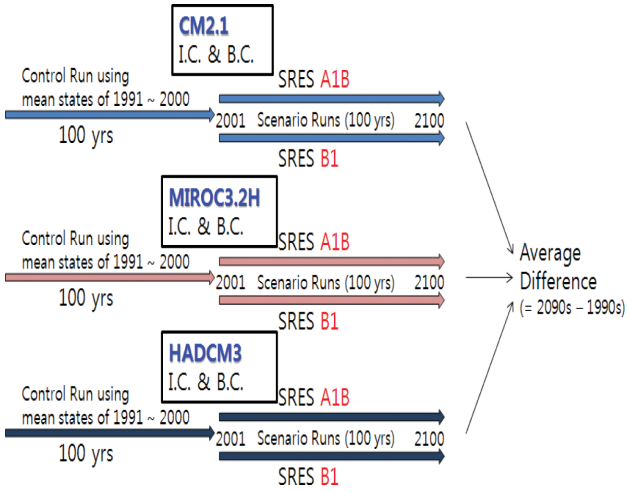


Fig. 4. Schematic of Simulation Processes

을, 측면은 수온과 염분을 sponge boundary 형태의 경계치로 주었다. Sponge boundary에서의 경계효과를 최소화 하기 위하여 안쪽의 damping time은 30일로 길게 주었으며, 바깥쪽으로 나가면서 점차적으로 줄여 가장 바깥쪽에서는 1일로 주었다(Fig. 3).

미래 기후 시나리오에 의해 해수면 상승을 예측하기 위해서는 2000년 현재의 초기장이 필요하다. 초기장을 만들기 위하여 CM2.1의 전지구 결과 중 1991년~2000년의 10년 평균 결과를 경계치로 하여 100년간 안정화 모의를 하였다. 그 후 시나리오에 따른 경계치를 이용하여 각각 100년간 예측 모의하고 최종 10년간(2090~2100년)의 결과와 2000년의 결과의 차이를 비교하여 분석하였다(Fig. 4).

2.3 시나리오 선택

IPCC에서 개발한 SRES는 총 40가지가 있으나 GFDL은 이 중에서 주요 6가지의 SRES를 이용한 결과를 제공하고 있다. 온실가스의 감축을 위한 인류의 노력을 고려하여 예측한 것으로, 본 연구에서는 A1B와 B1의 시나리오를 사용하였다(Richard Alley *et al.* 2007).

A1시나리오는 세계 경제의 매우 급속한 성장과 금세기 중반에 최고에 도달할 지구촌 인구, 그리고 새롭고 좀 더 효율적인 기술의 급속한 도입을 가정하였다. A1시나리오는 설명하는 기술변화 방향에 따라 3개의 군이고, A1T(비화석 에너지 자원), A1B(자원간의 균형), A1F1(화석 집약적)으로 나눌 수 있다.

B1 시나리오의 경우는 지구 인구는 A1과 같지만 경제구조는 서비스 및 정보 경제 쪽으로 좀 더 급속히 변하는 것을 가정하고 있다. 이러한 이유로 시나리오들 중에서 가장 낮은 CO_2 수치를 보인다.

3.결과 및 분석

3.1 경계치(CM2.1)와 ReMOM의 해수면 상승 비교(A1B)

CM2.1과 ReMOM의 100년 동안의 time series(Fig. 5)를 살펴보면, 수온의 경우 약 2°C 상승하며 큰 차이를 보이지 않았다. 이에 반해 해수면 상승의 경우 CM2.1은 10 cm, ReMOM은 30 cm상승하며 큰 차이를 보였다. 이는 2배가 넘는 차이를 보이는 것이다.

이것은 밀도차에 의한 해수면 변화를 직접 고려할 수 있는 것에 기인하는 것으로 판단되며, 또한 해상도의 차이로 좁은 해역의 해수면 상승까지 예측하였기 때문인 것으로 판단된다.

일반적으로 IPCC에 제공된 미래 해수면 상승 결과들은 Boussinesq 모형을 사용함으로써 전지구적으로 해수 체적의 변화가 없고 지역적으로의 변화만을 고려할 수 있었다. 그러므로 IPCC에 제공된 기존의 연구들은 이를 극복하기 위하여 모의된 결과 중 수온의 변화를 이용하여 밀도변화에 의한 체적 변화를 재계산하여 분석하였다. 이러한 단점을 제거한 non-Boussinesq 모형을 사용함으로써 수온변화에 의한 해수 체적변화를 모형에서 직접 고려하고 해류와의 상호작용이 이루어짐으로써 좀 더 현실적인 모의 결과를 도출할 수 있었다.

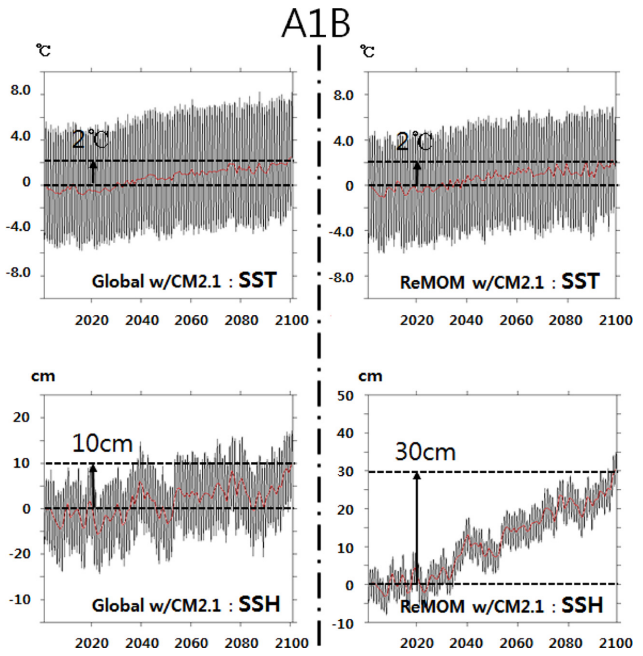


Fig. 5. The Rises of Sea Surface Temperature(upper) and Sea Surface Height(lower) in the Northwestern Pacific from CM2.1 (left) and ReMOM(right)

Fig. 6에서 보면 IPCC에서 제공하는 CM2.1 전지구모형의 결과를 역학고도로부터 간접적으로 계산한 결과(A)와 non-Boussinesq 모형을 사용한 ReMOM의 결과(B)의 해수면 상승 변화차이를 볼 수 있다. 해수면 상승 변화가 ReMOM이 더 큰 것을 확인 할 수 있다.

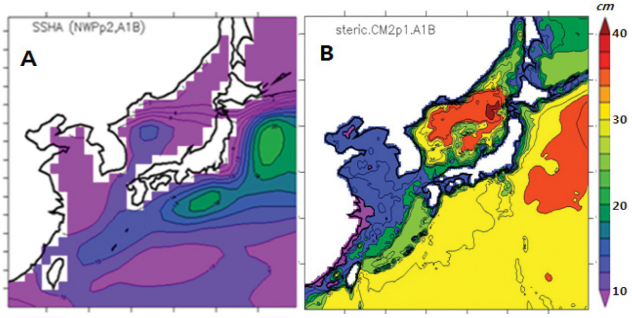


Fig. 6. The Horizontal Sea Level Changes from CM2.1 (A) and ReMOM (B)

3.2 경계치(CM2.1)의 SRES A1B, B1 비교

우리나라 주변해역 북서태평양에서의 해수면 수온 변화는 A1B는 약 2°C, B1은 약 1°C의 상승률을 보였다. 이에 따른 해수면 변화는 A1B는 약 30 cm, B1은 약 22 cm 상승하는 것으로 분석이 되었다. 이는 각각의 시나리오에 합당하는 결과로 분석되고, CO_2를 증가시키는 연료의 사용량이 늘어나게 되면 해수면 상승에 어떠한 영향을 끼치게 될지 보여주는 결과이다(Fig. 7).

두 경우의 수온 상승을 비교해 보면 약 2배의 차이를 보이지만 해수면 높이는 그렇지 않다. 수온이 2배 더 높다면 해수면도 2배 더 높아야 하는 것이 이론상으로 성립되어야 하지만, 그렇지 않은 이유는 성층화되어 있는 해양의 수온 변화에 따른 해수면 높이 변화의 속도가 느리기 때문이다.

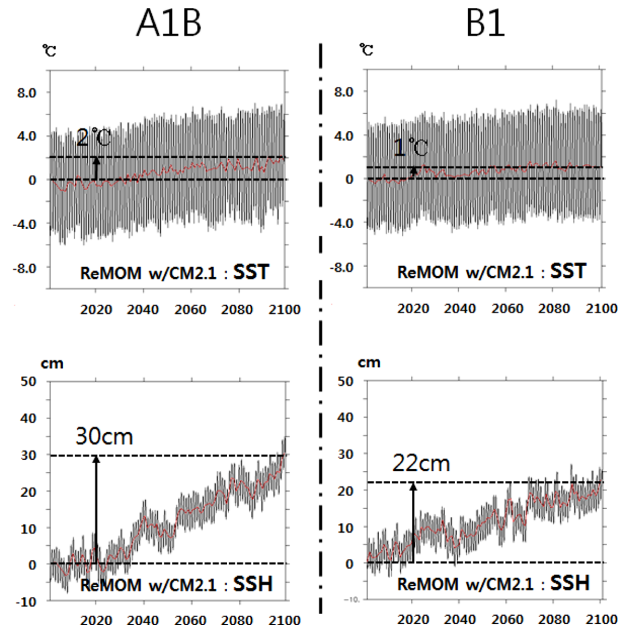


Fig. 7. The Rises of Sea Surface Temperature(upper) and Sea Surface Height(lower) in the Northwestern Pacifc from ReMOM for SRES A1B(left) and B1(right)

수온 증가가 해수면을 상승시키기는 것은 더 오랜 시간을 필요로 한다. Tsutsui *et al.* (2007)의 연구에 따르면 2100년 이후에 온실 가스의 증가를 멈춘 후에도 2300년이 지난 후까지 해수면은 계속해서 상승한다.

3.3 Steric

열팽창에 의한 체적변화인 steric 효과는 수심이 낮은 황해에서는 그 변화에 한계가 있고 수심이 깊은 동해에서는 그 효과가 큰 것으로 나타났다.

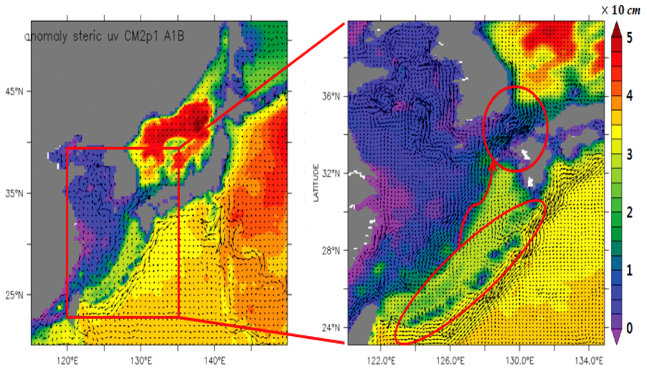


Fig. 8. The Changes of Tsushima Current due to Sea Level Changes

Fig. 8에서 수심이 깊은 동해와 북서태평양 지역 대부분이 steric 효과에 큰 영향을 받는 것을 볼 수 있다. Steric항은 밀도 변화에 의한 부피 변화를 나타내는데, 이 밀도 변화는 수온과 염분에 의해 달라진다. Steric항의 변화가 일어나기 위해서는 충분한 수심을 필요로 한다. 동해와 태평양의 경우는 수심이 충분히 깊기 때문에 steric항이 크게 영향을 끼치는 것으로 분석된다.

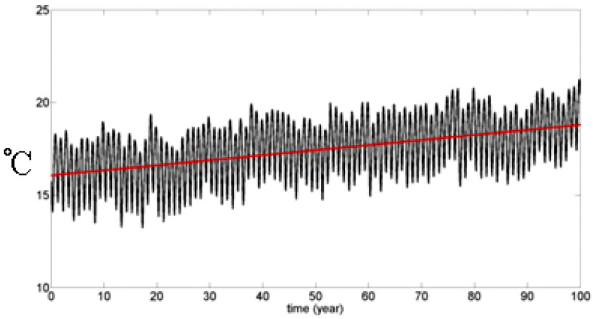


Fig. 9. The Temperature Change of Tsushima Current Passing Korea Strait (SRES A1B)

Fig. 9에서는 대마난류의 수온변화를 나타낸 시계열 자료인데, 대한해협을 따라서 들어오는 난류의 수온이 상승하는 것을 볼 수 있다. 반면 황해의 경우 가장 깊은 곳의 수심이 약 80 m 안팎이고, 평균 수심이 약 44 m 안팎이기 때문에 steric항이 충분히 적용되니 힘들다.

4. 결론 및 요약

해수면 상승은 전 지구적으로 발생하지만, 지역적으로 많은 차이를 보인다. 이를 위해 전 지구 해양순환모형인 MOM4를

이용하여 북서태평양 주변해역의 상세 해수면 변화예측을 할 수 있도록 지역해양순환모형인 ReMOM을 개발하였다. ReMOM은 열팽창을 직접 고려하여(steric) 해수면 변화를 모의하기 때문에 보다 현실적인 예측이 가능하다.

예측모의에 사용한 초기장과 경계장은 CM2.1, 모형의 IPCC 예측 결과 중 SRES A1B와 B1의 결과를 사용하였다. 초기장은 전지구 결과 중 1991~2000년의 10년 평균결과를 경계치로 하여 100년간 모의하였다. 그 후 시나리오에 따른 경계치를 이용하여 각각 100년간 모의하였고, 최종 10년간(2090~2100년)의 결과와 2000년의 결과의 차이를 비교하여 분석하였다.

경계치로 들어간 CM2.1 모형의 경우 2100년까지의 해수면 상승치를 12 cm로 모의하였다. ReMOM의 경우 28 cm의 해수면 상승치를 나타냈다. 두 모형의 경우 수온 상승은 3°C로 같았다. 이것은 밀도차에 의한 해수면 변화를 직접 고려한 것과 해상도의 차이로 좁은 해역의 해수면 상승까지 예측하였기 때문으로 판단된다.

teric효과가 동해와 북서태평양에 더 큰 영향을 끼치는 이유는 대한해협을 통해 들어오는 난류가 늘어나고, 이 난류 자체가 지구온난화로 인해서 수온이 상승하기 때문이라고 판단된다. 또한 수심이 깊은 지역에 steric 효과가 크게 작용하기 때문이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-2021)과 2013년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

Anthropogenic forcings beyond the twenty-rst century. Climate Dynamics, Vol. 28, pp. 199-214.

Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2011) Sea Level Rise due to Global Warming in the Northwestern Pacific and Seas around the Korean Peninsula (II).

Landerer, F.W., Jungclaus, J.H., and Marotzke, J. (2007) Regional dynamic and steric sea level change in response to the IPCC-A1B scenario, *J. Phys. Oceanogr*, Vol. 37, pp. 296-312.

Oh, S.M. Kwon, S.J. Moon, I.J., and Lee, E.I. (2011) Sea Level Rise due to Global Warming in the Northwestern Pacific and Seas around the Korean Peninsula, Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 23, pp. 236-247.

Richard Alley, Terje Berntsen, Nathaniel L. Bindoff, Zhenlin Chen, Amnat Chidthaisong, Pierre Friedl (2007) The IPCC 4th Assessment Report, IPCC.

Tsutsui, J. Yoshida, Y., and Kim, D.-H. (2007) Long-term climate response to stabilized and overshoot.

Yin, J., Schelsinger, M.E., and Stouffer, R.J. (2009) Model projections of repid sea-level rise on the northeast coast of the United States. Nature Geoscience, Vol. 2, pp. 262-266.

◎ Received January 10, 2013
◎ Revised January 15, 2013
◎ Accepted July 1, 2013

부 록

Boussinesq

해수면 변화 예측에 있어서 해양순환모형의 중요한 문제점 중 하나는 대부분의 모형들이 Boussinesq 가정을 한다는 것이다. 수온 염분의 변동에 의한 해수의 질량 및 부피가 변하지 않는다는 가정이다. 해수의 팽창과 수축에 의한 밀도 변화를 제대로 고려하지 못하기 때문에 지구 온난화에 의한 해수의 열팽창을 제대로 구현할 수 없다. Boussinesq 가정은 평균 밀도에 비하여 그 변화는 아주 미비하다고 가정함으로써 시작되고, 다음의 식과 같이 나타낸다.

$$\rho(x,y,z,t) = \rho_0 + \rho(x,y,z,t), \rho_0 \gg \rho(x,y,z,t)$$

이러한 과정에 의해 다음과 같은 식이 도출된다.

$$\frac{1}{\rho}\nabla\rho \approx \frac{1}{\rho_0}\nabla\rho$$

밀도 변화가 미비하다는 가정으로 부터$\rho \fallingdotseq \rho 0$가 성립된다. 이 식을 이용한 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + \nabla\cdot\vec{u} = 0 \rightarrow \nabla\cdot\vec{u} = 0$$

이 식은 원래의 연속방정식은 질량보존방정식을 의미하였는데, Boussinesq 가정을 함으로써 체적보존방정식으로 바뀌게 되는 것이다.

Boussinesq 유체에서 열이 가해지면 밀도가 감소되고, 체적이 보존되므로 해수면의 변화 없이 질량과 해저 바닥의 압력이 감소되는 영향을 준다. 하지만 nonBoussinesq 유체에서는 열이 가해지면 밀도가 감소되고 이로 인해 체적과 해수면의 감소를 가져오지만 해저 바닥의 압력은 변하지 않는다. 이러한 이유로 해수면 변하에 관한 연구, 해저 바닥의 압력을 고려하는 연구등에서는 Boussinesq 가정을 하는 것은 적절하지 못하다.

nonBoussinesq 체계의 자유수면 방적식은 연직 방향에 대하여 해저 바닥에서 자유수면까지의 합을 $D = H + \eta$로 표현할 경우 Griffies *at al*.(2007)에서처럼 유도 할 수 있다.

$$\eta_{,t}^{nonBouss} = \underbrace{-\left(\frac{1}{\rho}\right)_z \nabla\cdot\overrightarrow{U^p}}_{dynamics} + \underbrace{\left(\frac{\rho_w}{\rho}\right)_z q_w}_{water\ for\ cing} + \underbrace{\frac{1}{\rho}\int_{-H}^{\eta} dz\rho S^{(M)}}_{source} \underbrace{- D\partial_t \ln\overline{\rho^z}}_{steric}$$

Boussinesq 가정을 따르는 자유수면 방정식은 다음과 같다.

$$\eta_{,t}^{Bouss} = \underbrace{-\nabla\cdot\vec{U}}_{dynamics} + \underbrace{\left(\frac{\rho_w}{\rho_0}\right)q_w}_{water\ for\ cing} + \underbrace{\int_{-H}^{\eta} dz S^{(V)}}_{source}$$

역학부분(dynamics), 해수면에서의 강제력(water forcing), 유출입(source) 항목은 두 식 모두 고려하고 있다. 해수면에서의 강수 등에 의한 강제력은 두 방정식에서 모두 고려할 수 있으며, 유출입에 대해서는 각각 질량에 대하여, 체적에

대하여 보존된다.

두 식의 차이는 $-D\partial_t \ln\overline{\rho^z}$ (steric)의 유무이다. 밀도변화에 의해서 해수면이 변화되는 새로운 항목인데, 연직 평균 밀도가 감소하게 되면 해수면이 증가하게 되고 반대로 연직 평균 밀도가 증가하게 되면 해수면은 감소하게 된다. 이것은 지구온난화에 의한 해수면 변화 예측에 있어서 열팽창을 고려할 수 있는 아주 중요한 항목이다.

일반적으로 steric은 $-\int_{-H}^{\eta}\frac{1}{\rho}\frac{D\rho}{Dt}dz$ 의 형태로 나타내어진다.

Boussinesq 가정을 하는 모형에서는 밀도변화가 0이므로 비압축성 물체의 경우를 계산하여 무시하지만, steric은 압축성 물체의 경우를 계산하기 때문에 $\frac{1}{\rho}\frac{D\rho}{Dt}$를 고려해야 한다. Richard (1994) 등의 논문에서 steric 항을 위와 같이 정의하고 있다. 또한 steric항은 dynamic height로 볼 수 있다.

Steric은 염분과 수온에 큰 영향을 받게된다. Steric 항을 살펴보면 밀도로 계산을 하는데, 밀도는 염분과 온도, 압력의 함수이고, 염분과 수압에는 비례하고 온도에는 반비례한다. 해수의 밀도는 염분변화보다 수온변화에 더 민감하며, 물은 압축성이므로 압력증가에 따라 밀도증가를 보이지만 미미한 수준이다.

본 연구에서 사용된 상세 지역 해양 순환모형은 non-Boussinesq 체계의 모형으로서 열팽창에 의한 해수면 변화를 좀 더 현실적으로 고려할 수 있다. 현재 대부분의 해양순환 모형들은 Boussinesq 가정을 하고 있기 때문에 연직 밀도변화에 의한 해수면 변화를 제대로 고려하지 못하고 있다.