

## 반경험식법을 이용한 미래 해수면 상승 예측

김태윤\* · 조광우\*\*†

\*, \*\* 한국환경정책·평가연구원

### Forecasting of Sea-Level Rise using a Semi-Empirical Method

Tae-Yun Kim\* · Kwang-Woo Cho\*\*†

\*, \*\* Korea Environment Institute, Seoul, 122-706, Korea

**요 약** : 본 연구는 RCP 4종 시나리오(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5)를 적용하여 얻어진 2100년까지의 대기온도 상승값을 해수면 상승 계산방법 중에 하나인 반경험식법(Semi-empirical method)에 적용하여 해수면 상승치를 예측하였다. RCP 4종 시나리오에서 얻어진 결과에 따르면 모든 시나리오에서 해수면이 꾸준히 상승하고 있음을 알 수 있었다. 2050년도까지 RCP 4종 시나리오에 대한 해수면 상승의 차이가 최대 0.08 m 이내였으나 2100년도에는 최대 0.5 m까지 해수면 상승의 격차를 보이고 있었다. RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 시나리오의 2100년도 해수면 예상 상승치는 각각 0.87 m, 1.21 m, 1.02 m, 1.36 m였다. RCP 8.5 시나리오는 2060년 이후로 대기온도 상승치가 다른 시나리오에 비해 급상승하는데, 2100년 이후 다른 시나리오와의 해수면 상승 격차는 더 커질 것으로 예상된다. 단순한 비례식으로 추정하면, 2080년도에 RCP 4종 시나리오의 최대 격차가 0.21 m였으나 20년 후인 2100년에는 그 두 배가 넘는 최대 0.5 m였다. 따라서 2120년에는 그 격차가 1.2 m 이상 될 수도 있다.

**핵심용어** : 해수면 상승, 반경험식법, 대표농도경로, 기후변화, 시나리오

**Abstract** : In this paper, we predicted sea-level rise for RCP 4scenarios(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5). To calculate sea-level rise, a semi-empirical method was used and it needs atmospheric temperature rise for each scenario. According to the results, the sea-level has been rising steadily in all scenarios. By 2050 the maximum difference of sea-level rise between the scenarios was within 0.08 m, but its difference was showed more than 0.5 m in 2100. The values of sea-level rise for RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 scenarios are 0.87 m, 1.21 m, 1.02 m, 1.36 m, respectively. In the case of RCP 8.5, the slope of atmospheric temperature rise since 2060 was very steep compared to the other scenarios so that the maximum difference of sea-level rise between the scenarios will be much larger after 2100. Estimated by a simple approximation, the maximum difference of sea-level rise can be more than 1.2 m in 2120.

**Key Words** : Sea-level rise, Semi-empirical method, RCP, Climate change, Scenario

### 1. 서 론

기후변화에 관한 정부간위원회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 발표한 제4차 보고서(The Fourth Assessment Report, AR4)에 의하면 1961년 이후로 전 세계 평균 해수면 상승은 1.8(1.3~2.3) mm/yr이며, 1993년 이후로 해수면 열팽창과 해수로 녹아 들어간 빙하의 양을 고려한 해수면 상승은 3.1(2.4~3.8) mm/yr로 보고되고 있다(IPCC AR4, 2007). 북극의 빙하도 1978년 이후로 십 년당 평균 2.7% 감

소하고 있으며, 산악지역에 쌓인 눈도 점점 감소하고 있는 상태이다(IPCC AR4, 2007). 그리하여 얼마만큼 해수면이 지속적으로 상승할 지에 관한 관심이 높아지고 있으며, 그에 관한 많은 연구가 진행되어지고 있다(Radic and Hock, 2011; National Academy of Science, 2012; Schaeffer et al., 2012).

특히 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라의 경우 조선업, 발전소(원자력과 화력), 항만 또는 어항, 도로, 산업단지, 농·축업단지, 주거단지, 유틸시설 등이 해안가 근처에 위치하고 있어 해수면 상승에 커다란 영향을 받을 것으로 예상된다. 그리고 인구 밀집지역인 해안 및 배후도시의 경우, 해수면 상승으로 인한 연안지역 침수가 우려되며 그로 인한 사회·

\* First Author : kimty@kei.re.kr, 02-6922-7851

† Corresponding Author : kwcho@kei.re.kr, 02-380-7615

경제적 손실도 엄청날 것으로 사려된다. 그 뿐만 아니라 해수가 담수지역까지 도달하여 연안 및 육지 생태계의 변화, 연안근처 동·식물들의 서식지 파괴 및 종 다양성에도 영향을 줄 것으로 생각한다. 우리나라에서도 해수면 상승에 대비하기 위하여 예상 해수면 상승에 관한 연구가 진행되어지고 있으며, Oh et al.(2011)은 IPCC AR4에 예측된 해수면 자료를 분석하고 ECHAM5/MPI-OM와 GFDL's CM2.1에서 구해진 역학고도의 자료를 통해 한반도 근해의 해수면 상승을 계산하였다. 그 결과로 한반도의 경우 향후 100년 동안 0.27 m(ECHAM5/MPI-OM) 또는 0.37 m(GFDL's CM2.1)가 상승할 것으로 예측하였다.

본 연구는 최근 우리나라 국립기상연구소(National Institute of Meteorological Research, NIMR)가 국제 표준 온실가스 배출 시나리오에 바탕을 둔 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP) 4종(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5)에 대하여 2100년까지의 계산된 대기온도 상승치를 이용하여 해수면 상승량을 예측하고자 한다. 그 방법으로 Vermeer and Rahmstorf(2009)가 제안한 반경험식법(Semi-empirical method)을 사용하였으며, 계산 결과를 다른 연구 결과물과 비교·검증하였다.

## 2. 방법론

### 2.1 해수면 상승량 계산 방법

미래의 해수면 상승량을 계산하는 방법으로는 선형가속률법, 반경험식법, 대기-해양모델링법으로 구분된다. 선형가속률법은 기존의 자료를 토대로 해수면 상승률과 가속률을 계산하고 계산된 가속률을 선형적으로 적용하여 미래의 해수면 상승량을 구한다. 기존의 자료로서는 조석자료를 사용하나 그 자료축적의 한계성이 있어 지질자료들(Salt-marsh deposits 또는 Sediment compaction)도 사용된다(Gehrels et al., 2005; Gehrels et al., 2006; Horton and Shennan, 2009). Church and White(2006)는 조석자료를 토대로 20세기 해수면 상승률  $1.7 \pm 0.3 \text{ mm yr}^{-1}$ 과 가속률  $0.013 \pm 0.006 \text{ mm yr}^{-1}$ 을 산정하였다. 이 산정된 값을 바탕으로 1990년부터 2100년까지 지구해수면이 280 mm에서 340 mm 상승할 것이라고 예측했다.

선형가속률법은 해수면의 상승률과 가속률을 바탕으로 산정하였기 때문에 그 산정결과의 불확실성이 매우 크다. 그리하여 좀 더 통계적이면서 실용적인 방법인 반경험식법이 널리 사용되어지고 있다(Rahmstorf, 2007a; Vermeer and Rahmstorf, 2009; Kemp et al., 2011). 이 방법은 지구온난화 현상을 고려한 방법으로써 대기온도와 해수면 변동의 상관관계를 토대로 해수면 상승량을 계산한다. 상관관계를 구하기 위하여 상관계수가 도입되는데, 이 상관계수는 기존의 해수

면 자료와 대기온도를 바탕으로 산정하고 보정된다. 반경험식법은 해수면 상승이 대기온도와 일차적 함수관계로 비례한다는 가정 하에 얻어진 결과이지만 과거 자료를 바탕으로 한 검증에서 이러한 가정이 상당한 신빙성이 있음을 보이고 있다(Rahmstorf, 2007b). 이 방법의 장점 중의 하나는 여러가지 대기시나리오에서 얻어진 대기상승 온도값을 이용하여 신속하게 해수면 상승 온도를 계산할 수 있다는 것이다.

마지막으로 보다 포괄적이고 발전된 방법인 대기-해양모델링법은 대기대순환 모형(Atmosphere General Circulation Model, AGCM)과 해양대순환모형(Ocean General Circulation Model, OGCM)을 접합시킨 대기-해양접합모형(Atmosphere-ocean coupled General Circulation Model, AOCGCM)을 사용하여 해수면 상승량을 계산하는 방법이다(Gregory and Lowe, 2000; Yin et al., 2009). 이 방법은 대기-해양접합모형에서 얻어진 해수의 열팽창과 해빙으로 인한 해수 밀도변화를 이용하여 해수면 상승치를 구하기 때문에 전 지구적 및 지역적 해수면 상승값을 구할 수 있다. Gregory et al.(2001)은 열 가지 다른 종류의 대기-해양접합모형을 이용하여 2090년까지의 지구 평균 해수면 상승량을 계산하였다. 그들은 모델들 간의 결과 비교를 위하여 하나의 온실가스배출 시나리오(IS92a) - Leggett et al.(1992)의 의해 제시된 온실가스 배출 시나리오로서 인구가 2100년까지 113억 명까지 늘고 평균 성장률이 2.3%로 증가하며, 신재생에너지와 재래식에너지를 함께 사용한다는 시나리오 - 를 이용하였으며, 산정된 해수면 상승값은 200 mm에서 370 mm였다.

### 2.2 본 연구에서 사용한 반경험식법

Rahmstorf(2007a)는 이만 년 전 지구 평균 온도가 4°C에서 7°C 정도 낮았을 때 평균 해수면이 현재보다 120 m 이상 낮았고, 삼백만년 전 지구 평균 온도가 2°C에서 3°C 높았을 때 평균 해수면이 오늘날에 비해 25 m에서 35 m 높았다는 사실에 근거를 두어 지구 평균 온도가 1°C씩 오를 때마다 해수면이 10 m에서 30 m 정도 높아짐을 주장했다. 이러한 자료를 바탕으로 Rahmstorf(2007a)는 해수면 상승률이 지구 평균 온도에 비례한다는 수식을 제안하고, 여러가지 온실가스 배출 시나리오로 계산된 대기온도 값을 이용하여 해수면이 2100년까지 0.5~1.4 m까지 상승함을 예측하였다.

$$\frac{dH}{dt} = a(T - T_0) \quad (1)$$

여기서,  $H$ 는 해수면,  $T$ 는 대기온도,  $T_0$ 는 해수면이 기후와 평형관계가 이루어졌을 때의 해수 기본 온도,  $a$ 는 자료로부터 얻어진 경험상수를 나타낸다. Rahmstorf(2007a)가 제

## 반경험식법을 이용한 미래 해수면 상승 예측

안한 식은 단순히 해수면 상승이 일정한 비율로 지구 평균 온도에 비례함을 나타내고 있다. 그러나 해수면 상승의 메커니즘에서 온도 변화에 빠르게 반응하는 요소(즉, 해양 표면 혼합층에서의 열함량)가 있어 이를 고려한 경험식이 필요하게 되었으며, Vermeer and Rahmstorf(2009)가 기존의 식에 짧은 시간 동안 대기온도 변화에 따른 해수면 상승을 고려한 항목을 추가하였다.

$$\frac{dH}{dt} = a(T - T_0) + b \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

여기서,  $b$ 는 자료로부터 얻어진 경험상수를 나타낸다. 1880년에서 2000년 동안의 해수면과 대기온도 자료(일 년 평균치 자료)를 이용하여 그들이 제안한 경험식을 검증하였으며, 계산된 값과 자료와의 상관관계(Correlation)가 0.99 이상이었다. 이와 더불어 Vermeer and Rahmstorf(2009)는 342가지의 시나리오를 사용하여 얻어진 대기 평균 온도 값을 경험식에 대입하여 각 가지 수의 해수면 상승값을 계산하였다. 342가지의 대기 평균 상승값은 6가지 온실가스 배출 시나리오(Table 1)와 3가지 탄소 순환 피드백 시나리오(낮음, 중간, 높음)를 고려하여 19가지 기후변화 모델들을 통해 계산된 값이다. 19가지 대기모델들에 대한 자세한 내용은 Nakicenovic and Swart(2000)와 IPCC AR4(2007)에서 얻을 수 있다. Vermeer and Rahmstorf(2009)의 연구 결과에 의하면 2100년까지 해수면이 0.75 m에서 1.9 m까지 상승하는 것으로 산정되었다. 본 연구에서는 Vermeer and Rahmstorf(2009)가 제안한 경험식을 이용하여 해수면 상승치를 예측하였다.

### 2.3 온실가스 배출 시나리오

미래의 대기온도 상승치를 산정하기 위해서 가장 중요한 사항은 온실가스 배출량을 정확하게 예측하는 것이다. 그러나 온실가스 배출은 개발도상국의 산업성장률, 신재생에너지의 기술개발 및 사용 정도, 인구증가, 온실가스 배출을 줄이려는 국제협력, 미래 사회의 사회-경제적 패턴 등 다양한 요소가 서로 연계되어 있어 하나의 배출량을 선정하는 것은 불가능하다. 그리하여 IPCC에서는 온실가스 배출 시나리오 특별 보고서(Special Report on Emissions Scenarios, SRES)를 발간하고, 그 보고서에서 40가지의 온실가스 배출 시나리오를 제안하였다(Fig. 1). 제안된 40가지의 시나리오는 6개의 시나리오 그룹(A1F1, A1T, A1B, A2, B1, B2)으로 구분되며, 이 6개의 시나리오 그룹도 4개의 가족그룹으로부터 파생되었다(Table 1). 40가지의 자세한 시나리오에 대한 설명은 IPCC SRES(2000)에서 얻을 수 있다.

Table 1. Overview of six scenario groups (Nakicenovic and Swart, 2000)

Emission Scenarios	Description
A1B	High economic growth, low population growth that peaks mid century, the rapid introduction of more efficient technologies, and balanced fuel
A1F1	High economic growth, low population growth that peaks mid century, the rapid introduction of more efficient technologies, and fossil fuel intensive
A1T	High economic growth, low population growth that peaks mid century, the rapid introduction of more efficient technologies, and predominantly non-fossil fuel
A2	Slower economic growth and technological change but high population growth
B1	Same low population growth as the A1 scenarios, but a shift toward a lower-emission service and information economy and cleaner technologies
B2	Moderate population growth, intermediate economic growth, and slower and more diverse technological change than in the B1 and A1 scenarios

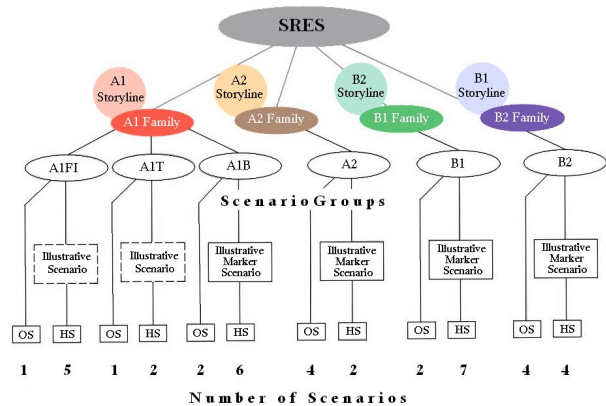


Fig. 1. Schematic illustration of SRES scenarios (IPCC SRES, 2000).

IPCC SRES(2000)에서 나온 온실가스 배출 시나리오 이외에도 많은 시나리오들이 제안되었는데 그 중에 하나가 대표 농도경로(RCP) 시나리오이다. RCP 시나리오는 다양한 분야의 전문가(통합평가 전문가, 기후모형 전문가, 육상 생태계 전문가, 온실가스 방출 관련 전문가) 집단이 모여 개발한 시나리오로서 온실가스 배출, 토지이용, 대기오염 등이 고려되었다. 시나리오 이름에서 ‘대표’는 많은 기후변화 시나리오를 대변할 수 있다는 의미이고, ‘농도경로’는 복사강제력의

변화에 따라 그 기후변화 경로가 정해진다는 뜻이다(van Vuuren et al., 2011). 거시적으로 온실가스 배출, 토지 이용정도, 대기오염에 의하여 RCP 시나리오가 구분된다(Table 2).

Table 2. Overview of four RCPs (van Vuuren et al., 2011)

Name	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Greenhouse gas emissions	Very low	Medium-low mitigation	Medium baseline high mitigation	High baseline
Land use	Medium for cropland and pasture	Very low for both cropland and pasture	Medium for cropland but very low for pasture	Medium for both cropland and pasture
Air pollutants	Medium-low	Medium	Medium	Medium-high

### 2.4 대기온도 상승 시나리오

국립기상연구소(NIMR, 2011)는 영국 기상청과 함께 RCP 시나리오 각각에 대한 대기온도 상승치를 계산하였으며, 시나리오별 정의된 복사강제력은 다음과 같다(Table 3).

Table 3. Information of four RCPs (NIMR, 2011)

Name	Radiative forcing	CO <sub>2</sub> -eq	Pathways	Comparison to SRES
RCP 2.6	~3 Wm <sup>-2</sup> before 2100 and then decline	~490 CO <sub>2</sub> -eq before 2100 and then decline	Peak-Decline	-
RCP 4.5	~4.5 Wm <sup>-2</sup> after 2100	~650 CO <sub>2</sub> -eq after 2100	Stabilization	B1
RCP 6.0	~6 Wm <sup>-2</sup> after 2100	~850 CO <sub>2</sub> -eq after 2100	Stabilization	A1B
RCP 8.5	> 8.5 Wm <sup>-2</sup> by 2100	> 1370 CO <sub>2</sub> -eq by 2100	Rising	A2~A1F1

Fig. 2의 대기온도 상승값은 RCP 4종 시나리오에서 얻어진 대기온도에 1971~2000년까지의 대기온도의 평균값(14.21°C)을 뺀 값으로서 각 RCP 시나리오에 따라 대기온도가 얼마나 상승하는가를 보여주고 있다. RCP 2.6시나리오의 경우 대기온도 상승값이 2100년도까지 1.37°C 정도 밖에 상승하지 않았으나 실제 2050년에 이미 1.37°C에 도달하였으며 그 이후의 대기온도 상승치 증감폭이 매우 적음을 알 수 있다. RCP

8.5 시나리오의 경우 대기온도 상승치가 2100년도에 5°C에 근접함을 보이고 있다. 이는 RCP 8.5 시나리오가 RCP 2.6 시나리오보다 대기온도 상승치가 세 배 정도 높음을 나타내고 있으며, RCP 4.5와 RCP 6.0 시나리오는 2100년도까지 대기온도 상승치가 각각 2.77°C와 3.23°C 증가한다(Table 4). RCP 4.5와 RCP 6.0 시나리오의 특이한 차이점은 RCP 4.5 시나리오가 2080년 전까지 RCP 6.0 시나리오보다 높은 대기온도 상승값을 보이다가 2090년도에는 두 시나리오가 비슷한 값을 가진다는 것이다. 그리고 2100년도에는 RCP 6.0 시나리오가 RCP 4.5 시나리오보다 약 0.46°C 높은 값을 보인다. 두 시나리오의 온도 상승패턴의 차이는 해수면의 상승패턴에 직접적인 영향을 줄 것이며, 그로 인하여 두 시나리오별 해수면 상승 양상이 크게 달라질 것으로 예상된다.

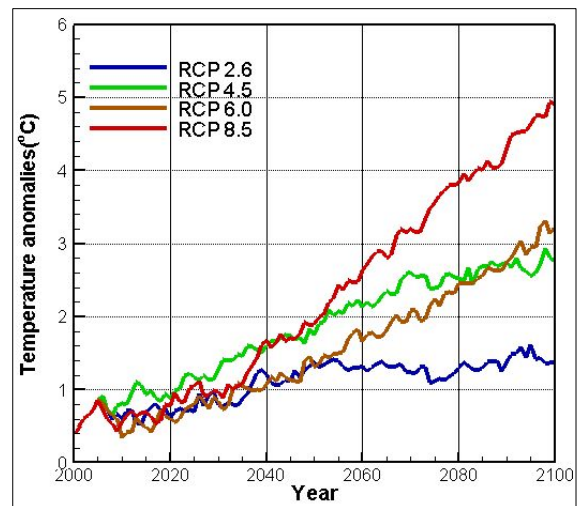


Fig. 2. Atmospheric temperature rise for four RCPs (Source: NIMR).

Table 4. Atmospheric temperature rise in year 2025, 2050, 2075, and 2100 for four RCPs (temperature relative to the reference period 1971-2000)

Name	Year 2025	Year 2050	Year 2075	Year 2100
RCP 2.6	0.70 °C	1.37 °C	1.12 °C	1.37 °C
RCP 4.5	1.17 °C	1.76 °C	2.40 °C	2.77 °C
RCP 6.0	0.80 °C	1.31 °C	2.25 °C	3.23 °C
RCP 8.5	1.04 °C	1.89 °C	3.56 °C	4.91 °C

## 3. 모델 결과

### 3.1 RCP 4종 시나리오에 대한 해수면 상승

RCP 4종 시나리오를 근거로 하여 얻어진 대기온도 상승값

## 반경험식법을 이용한 미래 해수면 상승 예측

을 Vermeer and Rahmstorf(2009)가 제안한 반경험식 방법에 적용하여 전 지구적 평균 해수면 상승치를 예측하였다(Fig. 3). 먼저 RCP 2.6 시나리오의 경우 해수면 상승곡선의 기울기가 다른 시나리오에 비해 완만함에도 불구하고 2100년도 해수면 상승값이 0.87m나 되었다. 2050년도까지는 RCP 4종 시나리오에 대한 대기온도 상승치의 차이가 1°C 미만이라 해수면 상승의 격차가 최대 0.08 m 이내였으나, 2100년도에는 RCP 4종 시나리오 별 대기온도 상승 격차가 커져 최대 0.5 m 까지 해수면 상승 격차를 보였다. 또한 RCP 8.5 시나리오의 경우는 2025년까지는 해수면 상승 양상은 다른 RCP 시나리오와 비슷하였지만 그 이후로 점점 그 차이가 커져 2100년에는 1.38 m로 최대 해수면 상승치를 나타내고 있다. 그러나 2075년도까지는 RCP 4.5 시나리오가 더 높은 해수면 상승치를 보이는데 이는 대기온도 상승값이 2050년까지 RCP 4.5 시나리오가 더 높기 때문인 것으로 유추된다. 또한 대기온도 상승치 곡선(Fig. 2)에서 RCP 8.5 시나리오는 2060년 이후로 대기온도 상승치가 다른 시나리오에 비해 급상승하는데, 급격한 온도 상승이 해수면 상승으로 반영되는 데에는 어느 정도 시간이 걸리는 것으로 예상되며 2100년 이후 해수면 상승의 격차는 더 커질 것으로 예상된다.

RCP 4.5와 RCP 6.0 시나리오를 비교해 보면, 2100년도에 RCP 6.0 시나리오가 RCP 4.5 시나리오보다 약 0.46°C 높은 대기온도 상승값을 보이나 해수면 상승값은 오히려 0.19 m 적었다(Table 5). 이는 RCP 4.5 시나리오가 RCP 6.0 시나리오보다 2090년까지 높은 대기온도 상승을 보여 해수면이 꾸준히 상승한 결과로 해석할 수 있다. 2090년 이후에 RCP 6.0 시나리오의 대기온도 상승값이 RCP 4.5 시나리오를 추월하였으나 해수면 상승으로 연결되기에는 장시간이 소요될 것으로 예상된다. 최종적으로 RCP 4종 시나리오 결과로 볼 때 탄소저감 노력을 통하여 2100년까지 최대 0.5 m까지 해수면 상승을 막을 수 있을 것으로 보인다. 그러나 더 중요한 것은 2100년을 지나면 그 차이가 점점 커질 것으로 예상되는데 단순한 비례식으로 추정하면, 2080년도에 RCP 4종 시나리오의 최대 격차가 0.21 m였으나 20년 후인 2100년에는 그 두 배가 넘는 최대 0.5 m였다. 따라서 2120년에는 그 격차가 1.2 m 이상 될 수도 있음을 나타낸다.

Table 5. Sea-level rises in year 2025, 2050, 2075, and 2100 estimated from outputs of four RCPs

Name	Year 2025	Year 2050	Year 2075	Year 2100
RCP 2.6	0.17 m	0.36 m	0.62 m	0.87 m
RCP 4.5	0.18 m	0.43 m	0.79 m	1.21 m
RCP 6.0	0.16 m	0.35 m	0.63 m	1.02 m
RCP 8.5	0.16 m	0.38 m	0.76 m	1.36 m

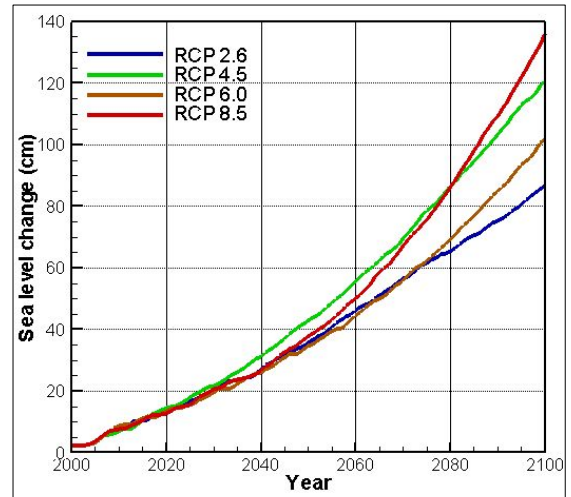


Fig. 3. Sea-level rises estimated from outputs of four RCPs.

### 3.2 RCP 시나리오와 다른 시나리오 비교

본 연구에서 사용된 해수면 상승량 계산 방법과 그 결과의 검증을 위하여 Vermeer and Rahmstorf(2009)가 사용한 342가지 시나리오 중 대기온도 상승치가 RCP 4.5 및 RCP 8.5와 비슷한 두 가지 시나리오를 선택하고, 그 두 가지 시나리오에 대하여 Vermeer and Rahmstorf(2009)가 예측한 해수면 상승치 결과와 본 연구 결과를 비교하였다. RCP 4.5와 비슷한 대기온도 상승을 나타내는 Case 1은 A1B 온실가스방출과 저탄소순환 피드백을 적용한 시나리오로서 2100년까지 1971~2000년까지의 대기온도의 평균값(14.21°C) 대비 대기온도 상승치가 2.78°C이다. RCP 8.5와 비교하기 위해 선택한 Case 2는 A2 온실가스방출과 평균 탄소순환 피드백을 적용한 시나리오이며, 대기온도가 2100년까지 4.93°C(1971~2000년까지의 대기온도의 평균값 대비) 상승함을 보인다(Table 6).

Table 6. Comparison of RCP and case scenarios for atmospheric temperature rise (temperature relative to the reference period 1971-2000)

Name	Year 2025	Year 2050	Year 2075	Year 2100
Case 1	1.00°C	1.74°C	2.40°C	2.78°C
RCP 4.5	1.17°C	1.76°C	2.40°C	2.77°C
Case 2	1.20°C	2.16°C	3.48°C	4.93°C
RCP 8.5	1.04°C	1.89°C	3.56°C	4.91°C

Case 1과 RCP 4.5 시나리오를 비교해 보면, 2100년까지 대기온도 상승치는 각각 2.78°C와 2.77°C로서 매우 근접하고 평균제곱근오차(RMSE)는 0.16°C이며 상관관계지수(r)는 0.99이었다(Table 6). 그러나 전반적으로 RCP 시나리오가 Case 1

시나리오보다 0.1~0.4 °C 높은 값을 유지하며 상승함을 보이고 있었다(Fig. 4). 이로 인하여 RCP 4.5 시나리오는 2010년도 이후로 Case 1 시나리오보다 높은 해수면 상승치를 보이며 그 차이는 시간이 갈수록 커짐을 알 수 있었다. 그리고 2100년에는 두 시나리오의 해수면 차이가 0.19 m나 되어 2000년에서 2080년 사이의 대기온도 변화 양상의 중요성을 보여주고 있었다. RCP 8.5 시나리오와 비교하기 위해 선택된 Case 2 시나리오는 2100년까지 대기온도 상승치가 RCP 8.5 시나리오 대비 0.02 °C 높고 두 시나리오의 평균제곱근오차와 상관관계지수는 각각 0.21 °C와 0.996이었다. 주목할 만한 사항은 2100년에 대기온도 상승치의 차이가 미미함에도 불구하고 0.07 m의 해수면 차이를 보였다(Table 7). 이는 2050년 중반까지 Case 2 시나리오가 RCP 8.5 시나리오보다 높은 대기온도 상승치를 가지기 때문이다. 따라서 2060년대까지 Case 2 시나리오와 RCP 8.5 시나리오 사이의 해수면 상승폭이 점점 커짐을 알 수 있다. 그러나 2060년 이후로 Case 2 시나리오와 RCP 8.5 시나리오의 대기온도 상승치가 서로 유사하여 해수면 상승곡선이 평행을 이루며 증가하였다(Fig. 5).

이들 시나리오 결과에 의하면 대기온도 상승과 해수면 상승은 서로 밀접한 관계를 가지고 있으며, 2100년까지 대기온도 상승치가 유사하더라도 2000년에서 2100년까지의 온도상승 양상에 따라 해수면 상승 결과가 다를 수 있다. 또한 RCP 시나리오를 적용하여 계산된 해수면 상승값과 Vermeer and Rahmstorf(2009)가 산정한 해수면 상승치의 비교를 통하여 본 연구에서 사용한 해수면 상승의 계산 방법이 올바르게 적용되었음이 확인되었다.

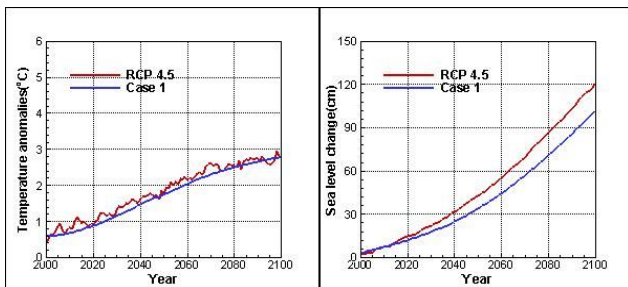


Fig. 4. Comparison of RCP 4.5 and case 1 scenarios for atmospheric temperature rise and sea-level rise.

Table 7. Comparison of RCP and case scenarios for sea-level rise

Name	Year 2025	Year 2050	Year 2075	Year 2100
Case 1	0.15 m	0.34 m	0.64 m	1.02 m
RCP 4.5	0.18 m	0.43 m	0.79 m	1.21 m
Case 2	0.20 m	0.45 m	0.84 m	1.43 m
RCP 8.5	0.16 m	0.38 m	0.76 m	1.36 m

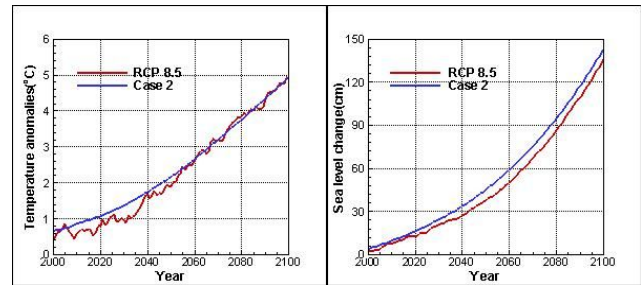


Fig. 5. Comparison of RCP 8.5 and case 2 scenarios for atmospheric temperature rise and sea-level rise.

#### 4. 결론 및 요약

본 연구는 우리나라 기상청 국립기상연구소가 제시한 RCP 4종 시나리오에 대한 대기 온도 상승치를 바탕으로 Vermeer and Rahmstorf(2009)가 제안한 반경험적법(Semi-empirical method)에 적용하여 미래 해수면 상승치를 계산하였다. 그 결과로서 RCP 4종 시나리오 모두 대기온도 상승으로 인하여 해수면이 꾸준히 상승됨을 알 수 있었다. 2050년도까지는 RCP 4종 시나리오에 대한 대기온도 상승치의 차이가 1 °C 미만이라 해수면 상승의 격차가 최대 0.08 m 이내였으나, 2100년도에는 RCP 4종 시나리오 별 대기온도 상승 격차가 커져 최대 0.5 m까지 해수면 상승 격차를 보였다. 또한 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오의 2100년도 해수면 예상 상승치는 각각 0.87 m, 1.21 m, 1.02 m, 1.36 m였다. 2075년도까지는 RCP 4.5 시나리오가 더 높은 해수면 상승치를 보이는데 이는 대기온도 상승값이 2050년까지 RCP 4.5 시나리오가 더 높기 때문인 것으로 해석된다. RCP8.5 시나리오는 2060년 이후로 대기온도 상승치가 다른 시나리오에 비해 급상승하는데 급격한 온도 상승이 해수면 상승으로 반영되는 데에는 어느 정도 시간이 걸리는 것으로 유추되며, 2100년 이후 해수면 상승의 격차는 더 커질 것으로 예상된다. 단순한 비례식으로 추정하면 2080년도에 RCP 4종 시나리오의 최대 격차가 0.21 m였으나 20년 후인 2100년에는 그 두 배가 넘는 최대 0.5 m였다. 따라서 2120년에는 그 격차가 1.2 m 이상 될 수도 있다.

주목할 만한 결과 중에 하나는 RCP 4.5와 RCP 6.0 시나리오의 비교이다. 2100년도까지 RCP 6.0 시나리오가 RCP 4.5 시나리오보다 약 0.46 °C 높은 대기온도 상승값을 보이나 해수면 상승값은 오히려 0.19 m 적었다. 이는 RCP 4.5 시나리오가 RCP 6.0 시나리오보다 2090년까지 높은 대기온도 상승을 보여 해수면이 꾸준히 상승한 결과로 해석된다. 그리고 2090년 이후 RCP 6.0 시나리오의 대기온도 상승값이 RCP 4.5 시나리오를 추월하였으나 해수면 상승으로 연결되기에는 장시

간이 소요될 것으로 예상된다.

Vermeer and Rahmstorf(2009)가 사용한 342가지 시나리오 중 해수면 상승이 RCP 4.5와 RCP 8.5의 비슷한 두 가지 시나리오를 선택하여 본 연구 결과와 비교하였다. 비교 결과에 의하면 대기온도 상승과 해수면 상승은 서로 밀접한 관계를 가지고 있으며, 2100년까지 대기온도 상승치가 유사하더라도 2000년에서 2100년까지의 온도상승 양상에 따라 해수면 상승결과가 다를 수 있었다. 또한, 본 연구에서 사용된 해수면 상승의 계산 방법이 올바르게 적용되었음이 검증되었다.

## 사 사

RCP 4종 시나리오를 적용하여 계산한 대기온도 자료를 제공해 주신 기상청 국립기상연구소에 감사드립니다. 본 연구는 기상청 기후변화감시예측 및 국가정책지원강화사업(CATER 2012-7140)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Church, J. A. and N. J. White(2006), A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophysical Research Letters*, 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826.
- [2] Gehrels, W. R., J. R. Kirby, A. Prokoph, R. M. Newnham, E. P. Achterberg, H. Evans, S. Black, and D. B. Scott(2005), Onset of recent rapid sea-level rise in the western Atlantic Ocean, *Quaternary Science Reviews*, 24, pp. 2083-2100.
- [3] Gehrels, W. R., W. A. Marshall, M. J. Gehrels, G. Larsen, J. R. Kirby, J. Eiriksson, J. Heinemeier, T. Shimmield(2006), Rapid sea-level rise in the North Atlantic Ocean since the first half of the nineteenth century, *The Holocene*, Vol. 16, No. 7, pp. 949-965.
- [4] Gregory, J. M., J. A. Church, G. J. Boer, K. W. Dixon, G. M. Flato, D. R. Jacket, J. A. Lowe, S. P. O'Farrell, E. Roeckner, G. L. Russell, R. J. Stouffer and M. Winton(2001), Comparison of results from several AOGCMs for global and regional sea-level change 1900-2100, *Climate Dynamics*, 18, pp. 225-240.
- [5] Gregory, J. M. and J. A. Lowe(2000), Predictions of global and regional sea-level rise using AOGCMs with and without flux adjustment, *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 19, pp. 3069-3072.
- [6] Horton, B. P. and I. Shennan(2009), Compaction of Holocene strata and the implications for relative sea-level change on the east coast of England, *Geology*, Vol. 37, No. 12, pp. 1083-1086.
- [7] IPCC SRES(2000), Intergovernmental Panel on Climate Change, Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge UK, pp. 1-20.
- [8] IPCC AR4(2007), Climate Change 2007 - The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), Solomon S., et al. Eds., Cambridge University Press, Cambridge UK. pp. 1-996.
- [9] Kemp, A. C., B. P. Horton, J. P. Donnelly, M. E. Mann, M. Vermeer, and S. Rahmstorf(2011), Climate related sea-level variations over the past two millennia, *PNAS*, Vol. 108, No. 27, pp. 11017-11022.
- [10] Leggett, J., W. J. Pepper, and R. J. Swart(1992), Emissions Scenarios for the IPCC: An Update. In: *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Houghton, J. T., B. A. Callander, and S. K. Varney Eds., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 69-95.
- [11] Nakicenovic, N. and R. Swart(eds)(2000), Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge UK. p. 570.
- [12] National Academy of Science(2012), Sea-Level Rise for the Coasts of California, Oregon, and Washington: Past, Present, and Future, The National Academies Press, p. 260.
- [13] NIMR(2011), National Institute of Meteorological Research, Climate Change Scenario Report 2011 to respond to the IPCC 5th Assessment Report, National Institute of Meteorological Research Press, p. 117.
- [14] Oh, S. M., S. J. Kwon, I. J. Moon, and E. I. Lee(2011), Sea Level Rise due to Global Warming in the Northwestern Pacific and Seas around the Korean Peninsula, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 3, pp. 236-247.
- [15] Rahmstorf, S.(2007a), A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise, *Science*, 315, pp. 368-370.
- [16] Rahmstorf, S.(2007b), Response to comments on "A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise", *Science*, Vol. 317, No. 5846, p. 1866, doi:10.1126/science.1141283.
- [17] Radic V. and R. Hock(2011), Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise, *Nature Geoscience*, 4, pp. 91-94.
- [18] Schaeffer M., W. Hare, S. Rahmstorf, and M. Vermeer(2012), Long-term sea-level rise implied by 1.5°C and 2°C warming

levels, Nature Climate Change, 2, pp. 867-870.

- [19] van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith, and S. K. Rose(2011), The representative concentration pathways: an overview, Climate Change, 109, pp. 5-31.
- [20] Vermeer, M. and S. Rahmstorf(2009), Global sea level linked to global temperature, PNAS, Vol. 106, No. 51, pp. 21527-21532.
- [21] Yin, J., M. E. Schlesinger and R. J. Stouffer(2009), Model projections of rapid sea-level rise on the northeast coast of the United States, Nature Geoscience, 2, pp. 262-266.

---

원고접수일 : 2013년 01월 11일

원고수정일 : 2013년 02월 05일

게재확정일 : 2013년 02월 25일