

HadGEM2-AO 모델이 모의한 AMOC 수십 년 변동 메커니즘

위지은¹ · 김기영² · 이조한³ · 부경온³ · 조천호³ · 김철희¹ · 문병권^{1,*}

¹전북대학교 과학교육학부/융합과학연구소, 561-756, 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567

²(주)포디솔루션, 153-788, 서울특별시 금천구 벚꽃로 244

³국립기상과학원, 697-845, 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

A Mechanism of AMOC Decadal Variability in the HadGEM2-AO

Jieun Wie¹, Ki-Young Kim², Johan Lee³, Kyung-on Boo³, Chunho Cho³,
Chulhee Kim¹, and Byung-kwon Moon^{1,*}

¹Division of Science Education/Institute of Fusion Science, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

²4D Solution Co., LTD., Seoul 153-788, Korea

³National Institute of Meteorological Research, Jeju 697-845, Korea

Abstract: The Atlantic meridional overturning circulation (AMOC), driven by high density water sinking around Greenland serves as a global climate regulator, because it transports heat and materials in the climate system. We analyzed the mechanism of AMOC on a decadal time scale simulated with the HadGEM2-AO model. The lead-lag regression analysis with AMOC index shows that the decadal variability of the thermohaline circulation in the Atlantic Ocean can be considered as a self-sustained variability. This means that the long-term change of AMOC is related to the instability which is originated from the phase difference between the meridional temperature gradient and the ocean circulation. When the overturning circulation becomes stronger, the heat moves northward and decreases the horizontal temperature-dominated density gradients. Subsequently, this leads to weakening of the circulation, which in turn generates the anomalous cooling at high latitudes and, thereby strengthening the AMOC. In this mechanism, the density anomalies at high latitudes are controlled by the thermal advection from low latitudes, meaning that the variation of the AMOC is thermally driven and not salinity driven.

Keywords: Atlantic meridional overturning circulation (AMOC), decadal variability, self-sustained variability, thermally driven

요약: 북대서양 자오면 순환(AMOC)은 그린란드 부근에서 고밀도 해수의 침강으로 유도되는데, 이것은 열과 물질을 수송시키기 때문에 기후 시스템의 중요한 요소이다. 이 연구는 전 지구 기후모델 중 하나인 HadGEM2-AO 모델에서 모의된 AMOC의 특징과 장기변동 메커니즘을 분석하였다. AMOC 지수를 이용한 지연 상관 분석을 통해 AMOC의 수십 년 변화는 해양 자체유지 변동으로 간주할 수 있었다. 즉 AMOC의 장기 변화는 남북 수온 경도와 해양 순환의 위상차로 인해 발생하는 불안정성에 의한 것으로 분석되었다. AMOC가 강해지면서 열의 북향 수송에 의해 남북 수온 경도가 작아지고, 따라서 해수의 순환과 열 수송이 줄어들었는데, 이와 함께 고위도에서는 냉각이 유도되어 결과적으로 다

*Corresponding author: moonbk@jbnu.ac.kr

Tel: +82-63-270-2824

Fax: +82-63-270-2802

시 AMOC가 강해지게 된다. 이 메커니즘은 저위도로부터 이루어지는 열의 양에 따라 고위도 지역의 밀도 변화가 결정되기 때문에 AMOC의 변동을 염분 유도가 아닌 열적 유도 과정으로 이해할 수 있다.

주요어: 북대서양 자오면 순환(AMOC), 수십 년 변화, 자체유지 변동, 열적 유도

서론

북대서양 자오면 순환(Atlantic meridional overturning circulation, AMOC)은 그린란드 부근 해역에서 침강하여 자오면 상에서 순환하는 해수의 흐름으로 (Rahmstorf, 2006; Kuhlbrodt et al., 2007), 적도의 잉여 열을 고위도로 재분배하기에 (대서양에서 약 1PW 수송) 지구 기후계의 핵심 요소로 간주되고 있다(Macdonald and Wunsch, 1996; IPCC, 1996; Matsumoto et al., 2013; Lavin et al., 1998; Ganachaud and Wunsch, 2000; Trenberth and Caron, 2001; Johns et al., 2011). AMOC의 변화는 갑작스런 전지구 기후변화를 초래한다고 알려졌다(Clark et al., 2002; Duplessy et al., 1992; McManus et al., 2004; Thornalley et al., 2011). 이것의 대표적인 예로서 Younger-Dryas 빙하기를 들 수 있다(Mayewski et al., 1993; Rahmstorf, 2002). 약 13,000년 전에 발생한 이 사건은 북미 대륙의 빙하가 녹으면서 다량의 담수가 북대서양 고위도로 유입되면서 발생한 것으로 알려져 있다. 담수화의 결과로 AMOC의 세기가 약화되었고, 열 수송량이 감소되어 북반구 고위도에서 빙하기가 약 1,300년 동안 지속되었다(Mayewski et al., 1993; Mignot et al., 2007; Carlson, 2010; Jackson, 2013). 북대서양 지역에 담수화 강제력을 준 기후모델은 대체로 AMOC의 약화를 모의하였으며, 이러한 방식의 모델 실험은 AMOC의 약화에서 기인된 기후 반응을 연구하는데 흔히 이용된다(Vellinga and Wood, 2002; Dahl et al., 2005; Zhang and Delworth, 2005).

Rahmstorf et al. (2015)는 AMOC가 1970년 이후로 크게 약화되었고, 지구 온난화에도 불구하고 이로 인하여 북대서양 일부에 기온 감소가 나타난다고 제시하고 있다. 여기서 최근 수십 년간 AMOC가 약화된 원인으로 그린란드 육빙(ice sheet)의 용해를 들고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 보고서는 지구 온난화로 인해 앞으로 AMOC가 약해질 것으로 전망하였는데(IPCC, 2013), 몇몇 연구에서는 고위도의 강수량 증가와 같은 물

순환의 변화를 그 원인으로 지적하고 있다(Manabe and Stouffer, 1994; Haywood et al., 1997; Wood et al., 1999). 결합모델 상호비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)의 모델을 이용한 정량적 연구에서는 2100년에 AMOC 강도가 현재에 비해 약 21% (RCP4.5 시나리오 경우), 혹은 36% (RCP8.5 시나리오 경우) 정도 감소할 것으로 내다보고 있다(Cheng et al., 2013).

위에서 언급한 담수화와 같은 강제력에 의해서 나타나는 변화뿐만 아니라, AMOC는 다양한 주기의 자연 변동성을 보인다. 관측에 의하면(Rayner et al., 2011), AMOC의 변동성에는 장기 변동뿐만 아니라 계절 및 경년 변동도 포함됨을 알 수 있다(Cunningham et al., 2007; McCarthy et al., 2012). 그러나 기후에 미치는 영향은 대체로 수십 년 변동 혹은 더 긴 장주기 변동에 의해 유도된다. 이에 대한 예로서, Schlesinger and Ramankutty (1994), Delworth and Mann (2000), Kerr (2000), Knight et al. (2005), Ba et al. (2013)은 북대서양 해수면 온도의 수십 년 주기 변동과 AMOC의 변동이 밀접하게 관련되어 있다고 제시하였다.

대부분 대기-해양 접합 모델은 기후 변동에 영향을 주는 수십-수백 년 주기의 AMOC 변화를 잘 모의하고 있다(Delworth et al., 1993; Delworth et al., 1997; Delworth et al., 2007; Timmermann et al., 1998). 이들 중 Delworth et al. (1993)은 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) 접합 모델을 이용하여 40-80년 주기의 AMOC 변동성을 찾아내었다. 그러나 AMOC의 변동 주기는 모델에 따라 다소 차이를 보인다. 예를 들면, 해들리 센터(Hadley Centre) 모델 중 하나인 HadCM3의 경우에는 GFDL 모델보다 짧은 25년 주기성이 두드러지게 나타났다(Dong and Sutton, 2005).

이에 덧붙여 AMOC의 장기 변동을 초래하는 메커니즘은 아직까지 분명치 않으며, 다양한 견해가 제시되고 있다(Park, 2005). 이 메커니즘들은 크게 세 가지로 나뉘어져 있다. 먼저 해양의 내재적 모드(self-sustained mode)를 들 수 있는데, 여기서는 AMOC의

강도와 남북 밀도 경도(혹은 온도나 염분) 사이의 위상차가 변동성의 원인으로 작용한다(Weaver et al., 1991; Te Raa and Dijkstra, 2002). 다음으로 대기-해양의 상호작용(Weaver and Valcke, 1998; Timmermann et al., 1998), 그리고 대기 강제력에 의한 해양의 수동적 반응(Mikolajewicz and Maier-Reimer, 1990; Delworth and Greatbatch, 2000)이 제시되고 있다. 이 두 메커니즘들은 각각 대기와 해양의 쌍방 통행식(two-way) 관계와 일방 통행식(one-way) 관계를 갖는다. 전자의 경우(대기-해양 상호작용)는 대기 강제력에 의한 해양의 변화가 다시 대기 변화를 이끈다.

AMOC의 장기 변동 메커니즘을 이해하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면, 앞서 언급한 것과 같이 AMOC의 변동이 기후에 미치는 영향이 크고, 동시에 해양의 장기 변동과 관련된 기후 시스템의 예측성을 높일 수 있기 때문이다(Griffies and Bryan, 1997). 그러나 AMOC의 직접 관측기간은 10여 년 정도로 매우 짧다. 따라서 AMOC의 장기 변동에 대한 연구를 위해서 장기 적분된 모델 모의 자료가 흔히 사용된다. 관측 자료가 충분히 확보되지 않은 환경에서 다양한 모델의 모의 결과를 분석하는 것은 필요하다. 따라서 이 연구는 AMOC 변동성의 이해를 높이기 위하여, HadGEM2-AO 기후모델이 모의한 AMOC의 장주기 변동 메커니즘을 분석하였다. 우리는 산업화 이전(Pre-industrial, PI) 시나리오 자료를 분석하였는데, 이는 AMOC의 자연 변동성을 파악하기 위해서다. 이 논문은 먼저 2절에서 모델과 모의 자료에 대한 설명, 3절에서 HadGEM2-AO 모델이 모의한 AMOC 지수, 4절에서 AMOC의 변동 메커니즘, 5절에서 AMOC 변동성이 전지구의 기후에 미치는 영향, 6절에서 요약 및 토의 순으로 구성되었다.

모델 및 분석 자료

HadGEM2-AO 모델은 CMIP5에 포함된 모델 중 하나로 Baek et al. (2013)에서 모델의 구성과 모의 특징이 자세하게 설명되어 있다. 이 모델은 대기, 지면, 해양, 해빙 모형을 포함하고 있으며 강의 유입과 에어로졸 과정을 고려하고 있다. 대기 모델은 수평 해상도 N96 (경도 1.875°×위도 1.25°), 연직 38층을 가지며, 해양 모델은 수평 해상도가 1° 간격이며, 위도 남북 30°부터 적도 방향으로 점점 조밀해져서 적도에서는 간격이 1/3°가 된다. 해양모델의 연직 해상도는

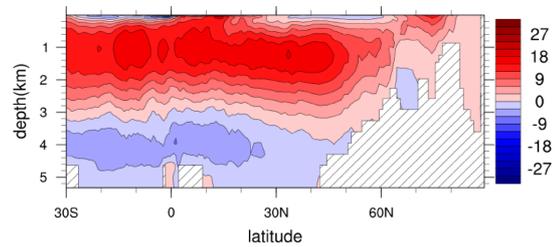


Fig. 1. Mean meridional overturning stream function in the Atlantic (Sv), averaged over the 300-yr simulation period.

40층이다.

HadGEM2-AO 모델의 PI 실험은 이산화탄소를 1860년 수준인 286.3 ppm으로 고정하고 적분되었으며(Baek et al., 2013), 이 연구에서는 300년 동안(2100-2399년)의 모의 자료를 분석하였다. 분석에 사용된 변수는 남북방향 해류, 수온, 염분, 해수면 온도, 해빙 농도이다. 여기서 남북방향 해류는 대서양 평균 자오면 순환을 계산하는데 이용하였다.

AMOC 지수의 정의

AMOC의 변동성을 나타내는 AMOC 지수를 정의하기에 앞서, 먼저 모델에서 모의된 대서양 평균 자오면 유선 함수를 Fig. 1에 나타냈다. Fig. 1에 나타난 AMOC의 특징을 살펴보면, 해수는 표층(해수면부터 수심 약 1.5 km 사이)에서 북향하여 고위도 해역(60-90°N)에서 침강하고 있다. 이 침강한 해수는 북대서양 심층수(North Atlantic Deep Water, NADW)가 되어 남쪽으로 흐르고, 일부는 열대지방의 넓은 지역에서 서서히 상승하여 순환이 완성된다. 그리고 북대서양 심층수 밑에서는 남극 저층수(Antarctic Bottom Water, AABW)가 반시계 방향으로 순환하고 있다. 남반구 저위도 지방과 북반구 중위도 지역 표층에서 반시계방향의 약한 해수의 흐름을 볼 수 있는데, 이것은 무역풍과 편서풍에 의한 바람 강제력에 의해 발생하는 표층 순환이라 추측된다. Fig.1에 나타난 AMOC의 모양과 크기는 다른 모델의 모의 결과와 매우 유사하며(Allison et al., 2015의 Fig. 1 참조), AMOC에 대한 자세한 특징은 Rahmstorf (2006)에서 볼 수 있다.

AMOC의 변동성을 대표하는 시계열로서 우리는 수심 1-3 km, 위도 30-90°N 지역에서 구한 연평균 AMOC의 최댓값을 사용하였다. 이 지역은 AMOC

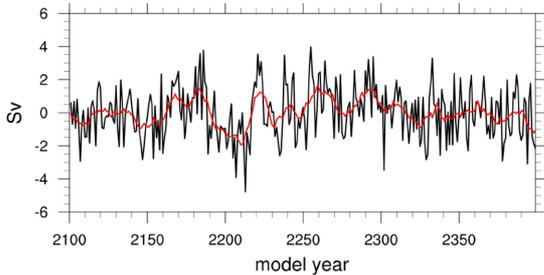


Fig. 2. Time series of the strength of the AMOC (black), computed as the maximum stream function in the 30-90°N between 1-3 km and its 11-yr moving average (red) which is used as an AMOC index in this study. Units are in Sv.

유선 함수의 변동성이 큰 지역에 해당하므로(그림은 제시하지 않음), 이 시계열이 AMOC의 변동을 잘 반영할 것으로 예상할 수 있다. 선행 연구의 경우, 최댓값 대신 평균값을 사용하거나 계산한 영역이 다소 차이가 있지만, 우리와 비슷한 방법으로 AMOC 시계열을 구하고 있다(Swingedouw et al., 2006; Wouters et al., 2012; Cheng et al., 2004; Cheng et al., 2013).

Fig. 2에 연평균 AMOC 최댓값의 편차(300년 평균을 뺀 것을 의미)와 이를 11년 이동 평균한 시계열을 함께 나타냈다. 편차를 구하기 전인 연평균 AMOC 최댓값의 평균과 표준편차는 각각 20.2Sv, 1.6Sv으로, 표준편차를 이용한 변동성의 크기는 전체 평균의 약 16% ($\sim 2 \times 1.6 / 20.2 \times 100$) 정도를 차지하고 있다. 이 결과는 Cheng et al. (2004), Greatbatch and Zhang (1995)들이 제시한 값들과 유사하다. Fig. 2를 통하여 AMOC의 변동 스펙트럼은 경년 변동부터 수십 년 변동에까지 넓게 걸쳐있는 것을 알 수 있다. 이를 파워 스펙트럼(power spectrum) 분석한 결과 HadGEM2-AO가 모의한 AMOC는 3-6년, 9년, 19년, 40년, 100년의 변동성을 갖는 것으로 드러났다(Fig. 3). Fig. 2에서 흥미로운 특징은 2310년 이후에는 이전과 다르게 적색 잡음(red noise) 형태의 AMOC 변동성을 볼 수 있다는 점이다. 이와 같은 변동성의 변화는 대기의 추계적 강제력(stochastic forcing)에 의한 해양의 반응에 기인된 것으로 추정된다(Kwon and Frankignoul, 2014). 우리는 AMOC의 장기 변동성에 초점을 두었다. 이를 위하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 11년 이동 평균한 시계열을 AMOC 지수로 정의하여 분석에 이용하였다.

AMOC가 저위도에서 고위도 지방으로 열을 수송

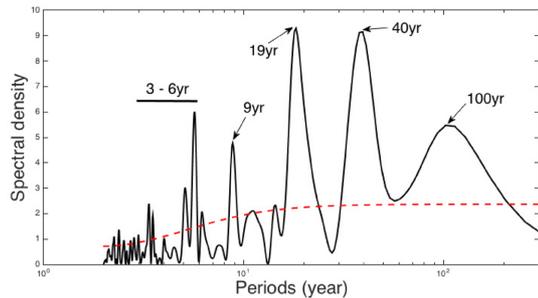


Fig. 3. Power spectrum for the time series of the strength of the AMOC from Fig. 2. Dashed line indicates 95% confidence red noise spectrum.

하므로, AMOC의 세기가 강할 때 극지방이 따뜻해지고 이로 인해 해빙의 농도가 감소할 것으로 예상된다(Mahajan et al., 2011). 이와 같은 AMOC의 강도와 해빙과의 관련성은 이 연구에서 정의된 AMOC 지수를 검증하는데 사용될 수도 있을 것이다. AMOC 지수의 유용성을 확인하기 위하여, AMOC 지수와 대서양의 해수면 온도 및 해빙 농도 간 회귀계수를 Fig. 4에 나타냈다. AMOC의 세기가 강할 때, 래브라도 해, 그린란드 해, 노르웨이 해 등의 해역에서 해수면 온도의 상승과 함께 해빙의 농도가 감소함을 확인할 수 있다. 이와 함께 남대서양에서는 해수면 온도의 감소가 나타나는 데, 이 현상은 강한 AMOC에 의한 북향 열 수송에 기인한 결과로 볼 수 있다. 이와 같은 남북 반구 사이의 상반된 형태의 변화를 쌍극자 시소(bipolar seesaw) 변동이라 하는데(Stocker, 1998), 만약 AMOC가 멈추게 된다면 북반구는 기온의 하강이, 남반구는 상승이 나타날 것을 암시하고 있다(Rahmstorf, 2002). Fig. 4의 결과는 이와 관련된 연구에서 나타난 AMOC의 영향에 의한 결과와 일치한다. 따라서 이 연구에서 정의된 AMOC 지수가 AMOC 세기의 장기 변동(수십 년 주기)을 잘 나타낸다고 말할 수 있다.

AMOC의 변동 메커니즘

AMOC의 변동은 북대서양의 수온이나 염분 분포에 영향을 주며, 이 결과로 밀도의 분포 변화가 나타나고 밀도 분포 변화는 다시 해양 순환의 강화 또는 약화를 가져올 것으로 예상할 수 있다. 우리는 먼저 AMOC의 변화와 해양의 수온 구조와의 관련성을 조사하였다. 이를 위하여 앞 절에서 정의한 AMOC 지

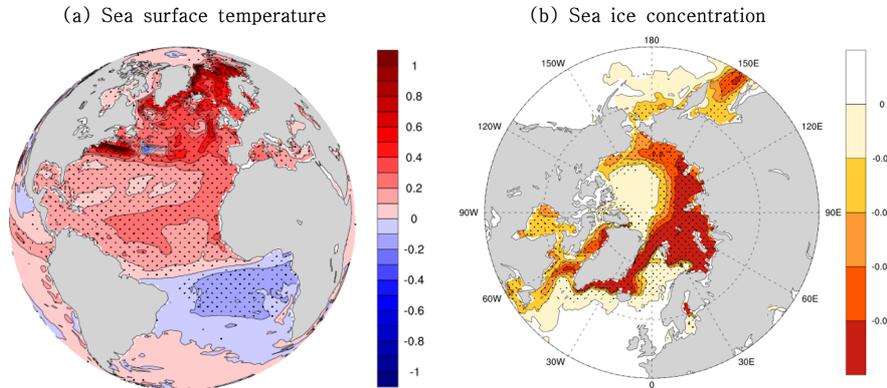


Fig. 4. Regressed fields of (a) sea surface temperature ($^{\circ}\text{C Sv}^{-1}$) and (b) sea ice concentration (Sv^{-1}) against AMOC index, respectively. Dotted area denotes the statistically significant at 95% confidence level.

수를 이용하여 자오면 유선 함수와 동서평균 수온의 지연 회귀 분포를 계산하였다(Fig. 5). 이 그림으로부터 저위도의 열을 고위도로 이동시키고, 고위도에서 북대서양 심층수를 형성하여 열을 해수 깊은 곳으로 이동시키는 AMOC 모습을 확인할 수 있다. 먼저 lag -12 yr (AMOC의 세기가 최대인 때로부터 12년 전을 의미함)일 때, 중위도(북위 30°N , 수심 1 km)에 위치했던 온난한 해수가 lag -6 yr 에 이르면서 북쪽으로 이동하였다. 고위도(70°N 부근)에 다다른 이 해수는 이후 수심이 깊은 곳으로 침강한다(lag $+6\text{ yr}$). 온난한 해수는 점점 해저로 이동한 뒤 lag $+24\text{ yr}$ 에서는 대서양 심층에서 남하하기 시작한다.

여기서 주목할 특징은 온난한 해수가 고위도에 도달한 이후부터, 저위도에서 차가운 해수가 나타나면서 AMOC의 세기가 약해진다는 점이다. 다시 말하여, 온난한 해수가 북쪽으로 이류되면서(동시에 한랭한 해수가 저위도에 형성되고 있음) 남북 수온 경도가 역전되고(즉 북쪽의 밀도가 낮아지고), 이로 인하여 AMOC의 약화를 가져오고 있다(lag $+6\text{ yr}$). AMOC가 약화되면 북향 열 수송이 차단되어 저위도에는 온난한 해수가, 고위도에는 한랭한 해수가 생성되면서 다시 AMOC가 강화된다(lag $+24\text{ yr}$). 이런 과정이 변질이 발생하면서 AMOC의 장기 변동성이 나타나는 것으로 이해할 수 있다. 여기서는 해양 상층에서 북쪽으로 이류 되는 해수의 수온 편차에 의해 AMOC의 강도가 좌우된다. 수온 편차의 변화를 살펴 보기 위하여, 수심 0.5 km부터 1 km까지 대서양 영역을 동서 평균한 해수의 온도와 AMOC 지수간의 지연 회귀계수를 Fig. 6에 나타냈다. Lag -20 yr 일 때

저위도에서 온난한 해수가, 고위도에서 차가운 해수가 발생하여, 이 시기에 남북 온도경도는 최대가 된다. 시간이 지나 AMOC 세기가 최대가 되었을 때, 남북 온도경도가 없어진 것을 확인할 수 있다. 이후 AMOC의 세기가 점점 감소하여 lag $+20\text{ yr}$ 일 때 고위도 지역이 따뜻하고 저위도 지방이 차가워져 남북 온도경도가 역전되었다. 따라서 HadGEM2-AO 모델에서 모의되는 AMOC의 장기 변동성은 AMOC의 강도와 남북 온도경도 사이의 위상 불일치에 의해 발생하며, 전적으로 열적인 차이에 의해 유도된다고 말할 수 있다. 이와 비슷한 AMOC 변동 메커니즘은 Greatbatch and Zhang (1995)이 간단한 모형을 이용하여 제시한 바 있다.

그런데 해수의 밀도 변화는 수온뿐만 아니라 염분에 의해서도 영향을 받기 때문에, 이 열적 유도 메커니즘의 타당성을 확보하기 위해서는 AMOC 변화에 따른 염분 분포의 변화를 함께 조사해야 한다. 이를 위하여, 우리는 남북 수온경도(이후 T_{diff} 로 표기함)를 수심 0.5-1 km의 저위도 영역(30°S - 30°N) 해수 온도에서 고위도 영역(60 - 90°N)의 온도를 뺀 값으로 정의하였다. 여기서 T_{diff} 를 이렇게 정의한 이유는 T_{diff} 가 양수일 때가 고위도가 한랭하여 (밀도가 커져) AMOC가 강화되는 순환을 나타내기 위해서다. 또한 남북 염분경도(이후 S_{diff} 로 표기함)를 앞서 정의한 온도경도와는 반대로 고위도 영역에서 저위도 영역을 빼서 구하였다. 마찬가지로 S_{diff} 가 양수일 때가 AMOC가 강화될 때를 의미하도록 정의하였다. 이를 통해서 구한 남북 수온경도와 남북 염분경도를 AMOC 지수와 함께 Fig. 7에 나타냈는데, 수심 년 변동성만을 추출하

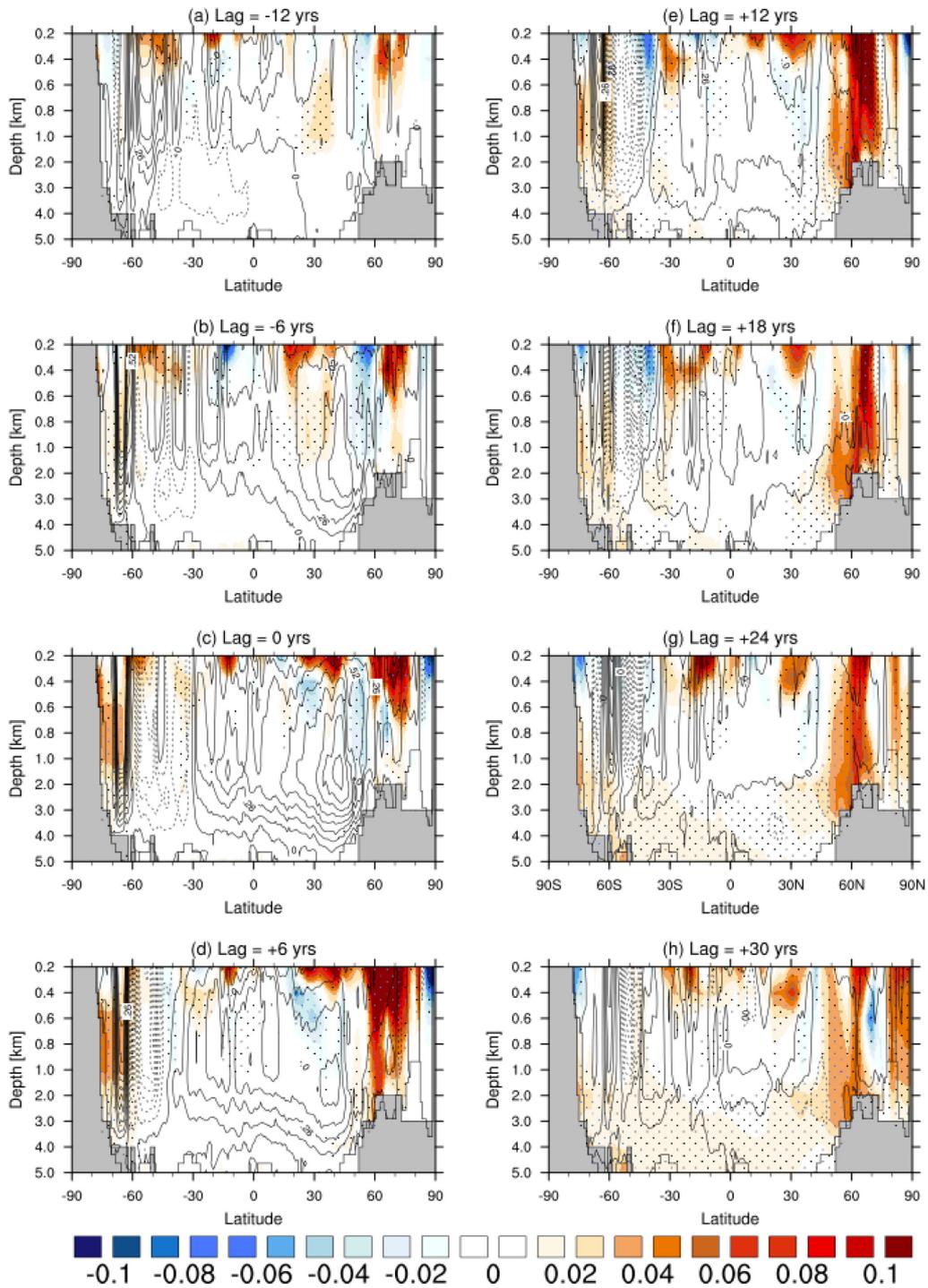


Fig. 5. Lead-lag regressed fields of AMOC stream function (contour, Sv Sv^{-1}) and ocean temperature (shading, $^{\circ}\text{C Sv}^{-1}$) against the AMOC index. Note that the vertical axis is stretched in the upper 1km. Dotted indicates the statistical significant at 90% confidence level for the ocean temperature.

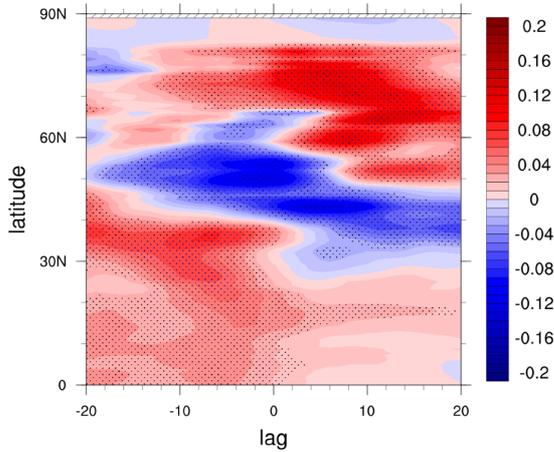


Fig. 6. Lead-lag regressed field of ocean temperature ($^{\circ}\text{C Sv}^{-1}$) with AMOC index. Dotted indicates the statistical significant at 90% confidence level.

여 분석하기 위하여 이들 세 시계열을 대역(bandpass) 필터(주기: 10-60년)하여 분석에 사용하였다. 대역 필터하지 않는 시계열을 사용하였을 때는 그래프에 짧은 주기에 의한 영향이 보였지만, 이후에 논의할 핵심 결과에는 큰 변화가 없었다.

Fig. 7에서 이들 T_{diff} , S_{diff} , AMOC 지수 간에 보이는 위상차에 주목할 필요가 있다. 자세히 살펴보면, T_{diff} 가 먼저 증가하면, 이후에 AMOC 지수, 그리고 S_{diff} 가 차례로 증가한다(이것은 2260년 부근에서 쉽게 확인할 수 있다). 앞서 논의한 바 있듯이, 이 세 시계열의 변동을 통해 다음을 엿볼 수 있다. 먼저 저위도가 따뜻하고 고위도가 차가운 상태에서(즉, T_{diff} 의 증가), AMOC의 세기가 점점 강해진다. 이후 AMOC에 의해 저위도의 열이 고위도로 이동하여 남북 온도경도가 거의 사라질 때쯤($T_{\text{diff}} \sim 0$) AMOC의 세기는 최대가 되고, 이후 약해진다. 저위도 지역의 열이 고위도 지방으로 지속적으로 이동하여 남북 온도경도가 반대로 조성되었을 때($T_{\text{diff}} < 0$) AMOC는 거의 사라지면서 점차적으로 반대 방향의 순환으로(즉 AMOC 지수가 음수) 변한다. S_{diff} 의 경우는 AMOC 지수를 1/4 파장 뒤따르는 형태를 보이고 있다. 따라서 염분의 변동은 수온의 분포와 반대 위상을 나타내며, 이는 염분 변동이 AMOC의 변동에 의해 결정됨을 의미한다. 이들 관계를 자세히 설명하면 다음과 같다. 먼저 열대에서 대서양 고위도로 이동하는 해수는 고농도의 염분을 갖는다. 따라서 AMOC의 강도가 최대일 때 고위도에서 염분이 증가하고, S_{diff} 는 거의 사

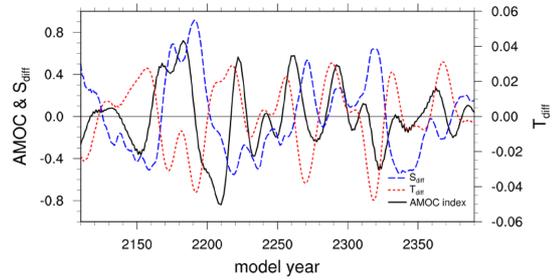


Fig. 7. The bandpassed (10-60 yr) time series of AMOC index (Sv), surface meridional ocean temperature gradient (T_{diff} , $^{\circ}\text{C}$), and surface meridional salinity (S_{diff} , psu).

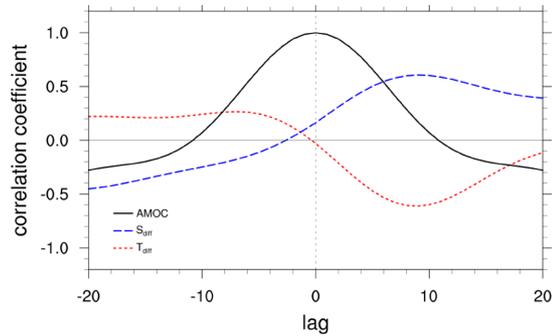


Fig. 8. Lead-lag correlation coefficients between AMOC index and surface meridional ocean temperature gradient (T_{diff}), and between AMOC index and surface meridional salinity gradient (S_{diff}). Negative lags mean that AMOC is leading. Autocorrelation of the AMOC index is also shown. Note that the time series were smoothed with a bandpass filter as shown in Fig. 7 before computing the lead-lag correlations.

라지게 된다. 이후 AMOC의 세기가 약해지지만 여전히 북쪽으로 수송된 고염분의 해수에 의해 S_{diff} 는 증가하게 된다.

이상의 논의는 Fig. 8을 이용하면 좀 더 분명히 이해할 수 있다. 이 그림은 수온 경도(T_{diff})와 염분경도(S_{diff})를 이용하여 AMOC 지수에 대해 구한 지연 상관관계수, 그리고 AMOC 지수의 자기상관관계수를 함께 나타내고 있다. AMOC 지수의 자기상관관계수의 최솟값이 약 lag ± 14 yr에서 나타나는 것으로 볼 때, 이 지연 상관관계수를 통해 이해할 수 있는 AMOC의 변동 주기는 약 30년임을 추정할 수 있다. 이것은 앞의 파워스펙트럼(Fig. 3)이나 대서양 내부 구조의 변화를 보인 Fig. 5와 일치하며, 특히 30년 주기성은 파워스펙트럼에서 볼 수 있는 두 개의 수십 년 주기(19 yr, 40 yr)의 평균에 가깝다.

T_{diff} 의 변화는 lag -6yr에서 최댓값을 가진다. 즉 남북 온도경도가 최대가 된 후 약 6년 뒤에 AMOC의 값이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 즉 남북 수온의 분포가 AMOC의 강도를 이끄는 것을 확인할 수 있으며, 앞서 살펴본 것과 같이 AMOC의 장기 변동이 열적 유도됨을 알 수 있다. 그리고 AMOC의 세기가 가장 강할 때(즉 lag 0) 남북 수온 경도는 거의 사라지는 것을 볼 수 있다. 이러한 수온 분포의 변화는 AMOC에 의해 온난한 해수가 고위도로 이루어졌음을 뒷받침하고 있다(Fig. 6). 이후 lag 0-9년 동안 남북 수온 경도(T_{diff})가 계속 작아지는데 이는 AMOC가 비록 약해지고 있지만 여전히 온난한 해수를 고위도로 수송시키는 것을 알 수 있다(Fig. 5 참조). Lag +9년 후부터는 AMOC의 순환 방향이 반대로 바뀌는데 이와 동시에 남북 수온 경도는 최소에서 다시금 증가하기 시작한다. 즉 이 시기부터는 AMOC에 의한 북향 열 수송이 사라지고 오히려 고위도의 해양이 냉각됨을 알 수 있다.

S_{diff} 의 경우는 T_{diff} 와 거의 반대 위상을 보이고 있다. 따라서 AMOC의 장기 변동성은 염분의 남북 분포에 의해 유도되는 것이 아니라는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, 우리 모델에서 AMOC의 수십 년 주기 변동은 염분 유도 과정으로 생성된 것이 아니라고 말할 수 있다. 만약 염분 차이에 의해 AMOC가 유도된다면, Fig. 8의 S_{diff} 는 T_{diff} 와 유사한 자연 상관을 보여야 할 것이다. 여기서 오히려 염분의 남북 분포는 AMOC 장기 변동에 따른 이유에 의해 결정되고 있다. 그렇기에 고위도에서 염분이 최대가 되는 시기(lag +9 yr)와 AMOC가 반시계 방향으로 순환을 시작하는 시기와 일치하는데, 이는 이때에 더 이상 열대의 고염분 해수가 고위도로 수송되지 않기 때문이다.

결론 및 토의

많은 연구들에서 기후 변동에 영향을 미치는 요소로 해양 순환의 변화를 고려하고 있다. AMOC는 중요한 해양 순환 중 하나로 다루어졌으며, 과거의 급작스러운 기후 변동이 AMOC의 붕괴를 초래한 원인으로 지목되어 다양한 연구가 진행되었다(Clark et al., 2002). 최근 이슈가 되고 있는 지구 온난화 멈춤(global warming hiatus)의 원인도 해양 변화를 들고 있으며(Held, 2013), 특히 Wie et al. (2014)는 온난화 멈춤에 따른 해양의 열적 구조와 AMOC와의 연

관성을 제시한 바 있다.

우리는 HadGEM2-AO 모델의 산업화 이전 시나리오(PI)의 300년 모의 자료를 분석하여, 이 모델에서 모의된 AMOC의 수십 년 변동 메커니즘을 찾고자 하였다. 우리 모델은 AMOC의 여러 요소들, 즉 표층 해류, 고위도에서 심층수 형성, 남극 저층수 등을 잘 재현하였다. AMOC의 장기 변동성을 대표하는 시계열은 연평균 AMOC의 고위도 영역(45°N 북쪽, 수심 1-3 km)에서 가장 높은 값을 택하여 11년 이동 평균하여 얻었다. 이 AMOC 시계열은 AMOC가 갖는 다양한 주기의 변동성(경년, 수십 년, 백년) 중 수십 년 주기(20-40년)의 변동을 잘 나타내고 있다. 이 AMOC 시계열을 이용하여 AMOC가 강할 때 북반구 고위도 지역의 해수면의 온도 상승과 해빙의 감소, 남반구의 해수면 온도 하강이 발생함을 알 수 있었는데, 이 결과는 해양의 열 전달자(컨베이어 벨트, Marshall and Speer, 2012)인 AMOC의 역할을 명확히 보여주었다.

HadGEM2-AO 모델이 모의하는 AMOC의 장기 변동은 대체로 열적 유도되는 것으로 분석되었다. 즉 AMOC의 수십 년 변동(주기 ~30년)은 남북 수온 경도와 AMOC의 강도의 위상차에서 발생하였다. 열대의 따뜻한 해수가 AMOC에 의하여 북대서양으로 수송되면서 고위도 해수의 밀도가 낮아지고, 그 결과로 AMOC의 세기가 약해진다. 여기서 AMOC가 약해지지만 여전히 북향 열 이류가 있으므로 남북 수온경도(T_{diff})는 반대 부호(즉 고위도가 양, 저위도가 음의 편차를 가짐)를 갖게 된다. 이때 열 수송에 의한 남북 온도경도와 AMOC의 세기는 서로 평형을 이루지 못하고, 이들 사이에는 약 9년의 시간 지연이 존재한다(Fig. 8). 이 위상차가 AMOC를 계속 진동하게 하는 불안정성을 유도하는 것이다. 염분의 남북 분포는 AMOC에 의한 이류에 전적으로 결정되어 Delworth et al. (1993)가 제시한 염분의 차이에 의해 유도된 AMOC와는 차이가 있었다. 그들의 모델은 고위도 침강 지역의 해수 염분의 크기가 AMOC 강도에 대해 약 수년 앞서 진행하였다. 즉, 염분의 변화가 AMOC 진동을 이끌었다. 열적 유도와 염분 유도된 AMOC 변동은 해양의 두 변수(즉 수온과 AMOC 강도 혹은 염분과 AMOC 강도)의 위상차에 의해 유도된다. 여기에는 대기-해양 접합 과정이나 대기 추계적 강제력이 필요치 않는다. 따라서 HadGEM2-AO 모델에서 AMOC 장기 변동은 일종의 해양의 “자체변동 모드(self-sustained mode)”이라 말할 수 있다.

이 연구에서 분석된 HadGEM2-AO 모델은 AMOC는 경년 변동부터 수백 년 변동까지 넓은 스펙트럼의 주기성을 보였으며, 그 중 약 30년 주기의 메커니즘을 분석하였다. 서론에서 언급했듯이 아직까지 AMOC 장기 변동성을 설명하는 메커니즘에 대한 의견의 일치가 이뤄지지 않고 있으며, Zhu and Junglaus (2008)이 제시한 것처럼 주기에 따라 다양한 메커니즘이 동시에 존재할 가능성도 있다. 앞으로 다른 주기의 메커니즘이나 다른 기후 변동(예: 엘니뇨, 북대서양 변동)과의 상호 관련성에 대한 연구가 필요할 것이다.

사 사

이 연구는 “NIMR-2012-B-2(기후변화 예측기술 지원 및 활용연구)”의 지원으로 수행되었습니다. 논문 원고를 심사하고 여러 보완점을 제시해 주신 김학성 교수님과 익명의 심사위원께 감사드립니다.

References

- Allison, L., Hawkins, E., and Woollings, T., 2015, An event-based approach to understanding decadal fluctuations in the Atlantic meridional overturning circulation. *Climate Dynamics*, 44, 163-190, doi: 10.1007/s00382-014-2271-9.
- Ba, J., Keenlyside, N.S., Park, W., Latif, M., Hawkins, E., and Ding, H., 2013, A mechanism for Atlantic multidecadal variability in the Kiel Climate Model. *Climate Dynamics*, 41, 2133-2144, doi: 10.1007/s00382-012-1633-4.
- Baek, H.-J., Lee, J., Lee, H.-S., Hyun, Y.-K., Cho, C., Kwon, W.-T., Marzin, C., Gan, S.-Y., Kim, M.-J., Cho, D.-H., Lee, J., Lee, J., Boo, K.-O., Kang, H.-S., and Byun, Y.-H., 2013, Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 49, 603-618, doi: 10.1007/s131043-013-0053-7.
- Carlson, A.E., 2010, What caused the Younger Dryas cold event? *Geology*, 38, 383-384, doi: 10.1130/focus042010.1.
- Cheng, W., Bleck, R., and Rooth, C., 2004, Multi-decadal thermohaline variability in an ocean-atmosphere general circulation model. *Climate Dynamics*, 22, 573-590, doi: 10.1007/s00382-004-0400-6.
- Cheng, W., Chiang, J.C.H., and Zhang, D.X., 2013, Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) in CMIP5 Models: RCP and historical simulations. *Journal of Climate*, 26, 7187-7197, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00496.1.
- Clark, P.U., Pisias, N.G., Stocker, T.F., and Weaver, A.J., 2002, The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature*, 415, 863-869, doi: 10.1038/415863a.
- Cunningham, S.A., Kanzow, T., Rayner, D., Baringer, M.O., Johns, W.E., Marotzke, J., Longworth, H.R., Grant, E.M., Hirschi, J.J., Beal, L.M., Meinen, C.S., and Bryden, H.L., 2007, Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5 degrees N. *Science*, 317, 935-938.
- Dahl, K.A., Broccoli, A.J., and Stouffer, R., 2005, Assessing the role of North Atlantic freshwater forcing in millennial scale climate variability: A tropical Atlantic perspective. *Climate Dynamics*, 24, 325-346, doi: 10.1007/s00382-004-0499-5.
- Delworth, T.L., Manabe, S., and Stouffer, R.J., 1993, Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model. *Journal of Climate*, 6, 1993-2011.
- Delworth, T.L., Manabe, S., and Stouffer, R.J. 1997, Multidecadal climate variability in the Greenland Sea and surrounding regions: A coupled model simulation. *Geophysical Research Letters*, 24, 257-260.
- Delworth, T.L. and Greatbatch, R.J., 2000, Multidecadal thermohaline circulation variability driven by atmospheric surface flux forcing. *Journal of Climate*, 13, 1481-1495.
- Delworth, T.L. and Mann, M.E., 2000, Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Climate Dynamics*, 16, 661-676.
- Delworth, T.L., Zhang, R., and Mann, M.E., 2007, Decadal to Centennial Variability of the Atlantic from Observations and Models. Schmittner, A., Chiang, J.C.H., and Hemming, S.R. (eds.), *Ocean Circulation: Mechanisms and Impacts-Past and Future Changes of Meridional Overturning*, American Geophysical Union, Washington, D.C., USA, doi: 10.1029/173GM10, 131-148.
- Dong, B. and Sutton, R.T., 2005, Mechanism of interdecadal thermohaline circulation variability in a coupled ocean-atmosphere GCM. *Journal of Climate*, 18, 1117-1135.
- Duplessy, J., Labeyrie, L., Arnold, M., Paterne, M., Duprat, J., and Weering, T.V., 1992, North Atlantic sea surface salinity and abrupt climate changes. *Nature*, 358, 485-488.
- Ganachaud, A. and Wunsch, C., 2000, Improved estimates of global ocean circulation, heat transport and mixing from hydrographic data. *Nature*, 408, 453-457.
- Greatbatch, R.J. and Zhang, S., 1995, An interdecadal oscillation in an ocean basin forced by constant heat

- flux. *Journal of Climate*, 8, 81-91.
- Griffies, S.M. and Bryan, K., 1997, Predictability of North Atlantic multidecadal climate variability. *Science*, 275, 181-184.
- Haywood, J.M., Stouffer, R.J., Wetherald, R.T., Manabe, S., and Ramaswamy, V., 1997, Transient response of a coupled model to estimated changes in greenhouse gas and sulfate concentrations. *Geophysical Research Letters*, 24, 1335-1338.
- Held, I.M., 2013, The cause of the pause. *Nature*, 501, 318-319.
- IPCC, 1996, *Climate Change 1995*. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., and Maskell, K. (eds.). The IPCC second scientific assessment. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 572 p.
- IPCC, 2013, Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1552 p.
- Jackson, L.C., 2013, Shutdown and recovery of the AMOC in a coupled global climate model: the role of advective feedback. *Geophysical Research Letters*, 40, 1182-1188, doi: 10.1002/grl.50289.
- Johns, W.E., Baringer, M.O., Beal, L.M., Cunningham, S.A., Kanzow, T., Bryden, H.L., Hirschi, J.J.M., Marotzke, J., Meinen, C.S., Shaw, B., and Curry, R., 2011, Continuous, array-based estimates of Atlantic Ocean heat transport at 26.5°N. *Journal of Climate*, 24, 2429-2449, doi: 10.1175/2010JCLI3997.1.
- Kerr, R., 2000, A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 288, 1984-1985, doi:10.1126/science.288.5473.
- Knight, J., Allan, R., Folland, C., Vellinga, M., and Mann, M., 2005, A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophysical Research Letters*, 32, 2-5, doi:10.1029/2005GL024233.
- Kuhlbrodt, T., Griesel, A., Montoya, M., Levermann, A., Hofmann, M., and Rahmstorf, S., 2007, On the driving processes of the Atlantic meridional overturning circulation, *Reviews of Geophysics*, 45, RG2001, doi: 10.1029/2004RG000166.
- Kwon, Y.O. and Frankignoul, C., 2014, Mechanisms of multidecadal Atlantic meridional overturning circulation variability diagnosed in depth versus density space. *Journal of Climate*, 27, 9359-9376.
- Lavin, A., Bryden, H.L., and Parilla, G., 1998, Meridional transport and heat flux variations in the subtropical North Atlantic. *The Global Atmosphere and Ocean System*, 6, 269-293.
- Macdonald, A.M. and Wunsch, C., 1996, An estimate of global ocean circulation and heat fluxes. *Nature*, 382, 436-439.
- Mahajan, S., Zhang, R., and Delworth, T.L., 2011, Impact of the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) on Arctic surface air temperature and sea ice variability. *Journal of Climate*, 24, 6573-6581, doi: 10.1175/2011JCLI4002.1.
- Manabe, S. and Stouffer, R.J., 1994, Multiple-century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of carbon dioxide. *Journal of Climate*, 7, 5-23.
- Marshall, J. and Speer, K., 2012, Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling. *Nature Geoscience*, 5, 171-180, doi: 10.1038/ngeo1391.
- Matsumoto, K. and Yokoyama, Y., 2013, Atmospheric $\Delta^{14}\text{C}$ reduction in simulations of Atlantic overturning circulation shutdown. *Global Biogeochemical Cycles*, 27, 296-304, doi:10.1002/gbc.20035.
- Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Whitlow, S., Twickler, M.S., Morrison, M.C., Alley, R.B., Bloomfield, P., and Taylor, K. 1993, The atmosphere during the Younger Dryas. *Science*, 261, 195-197.
- McCarthy, G., Frajka-Williams, E., Johns, W.E., Baringer, M.O., Meinen, C.S., Bryden, H.L., Rayner, D., Ducez, A., Roberts, C., and Cunningham, S.A., 2012, Observed interannual variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5°N. *Geophysical Research Letters*, 39, 1-15, doi :10.1029/2012GL052933.
- McManus, J.F., Francois, R., Gherardi, J.M., Keigwin, L.D., and Brown-Leger, S., 2004, Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. *Nature*, 428, 834-837.
- Mignot, J., Ganopolski, A., and Levermann, A., 2007, Atlantic subsurface temperatures: response to a shutdown of the overturning circulation and consequences for its recovery. *Journal of Climate*, 20, 4884-4898, doi: 10.1175/JCLI4280.1.
- Mikolajewicz, U. and Maier-Reimer, E., 1990, Internal secular variability in an ocean general circulation model. *Climate Dynamics*, 4, 145-156.
- Park, Y.-G., 2005, Climate change and the thermohaline circulation of the oceans. *Journal of Atmosphere, KMS*, 15, 69-74. (in Korean)
- Rahmstorf, S., 2002, Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature*, 419, 207-214.
- Rahmstorf, S., 2006, Thermohaline ocean circulation. Elias, S.A. (eds). *Encyclopedia of Quaternary Sciences*, Elsevier, Amsterdam.
- Rahmstorf, S., Box, J., Feulner, G., Mann, M., Robinson, A., Rutherford, S., and Schaffernicht, E., 2015, Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic

- Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change*, 5, 475-480.
- Rayner, D., Hirschi, J.J.-M., Kanzow, T., Johns, W.E., Wright, P.G., Frajka-Williams, E., Bryden, H.L., Meinen, C.S., Baringer, M.O., Marotzke, J., Beal, L.M., and Cunningham, S.A. 2011, Monitoring the Atlantic meridional overturning circulation. *Deep-Sea Research*, 58, 1744-1753.
- Schlesinger, M.E. and Ramankutty, N., 1994, An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, 367, 723-726, doi: 10.1038/367723a0.
- Stocker, T.F., 1998, Climate change-The seesaw effect. *Science*, 282, 61-62, doi: 10.1126/science.282.5386.61.
- Swingedouw, D., Braconnot, P., and Marti, O., 2006, Sensitivity of the Atlantic meridional overturning circulation to the melting from northern glaciers in climate change experiments. *Geophysical Research Letters*, 33, L07711, doi:10.1029/2006GL025765.
- Te Raa, L.A. and Dijkstra, H.A., 2002, Instability of the thermohaline ocean circulation on interdecadal timescales. *Journal of Physical Oceanography*, 32, 138-160, doi: 10.1175/1520-0485(2002)032<0138:IOTTOC> 2.0.CO;2.
- Thornalley, D.J.R., Barker, S., Broecker, W.S., Elderfield, H., and McCave, I.N., 2011, The Deglacial Evolution of North Atlantic Deep Convection. *Science*, 331, 202-205, doi: 10.1126/science.1196812.
- Timmermann, A., Latif, M., Voss, R., and Grotzner, A., 1998, Northern Hemispheric interdecadal variability: a coupled air-sea mode. *Journal of Climate*, 11, 1906-1931, doi: 10.1175/1520-0442-11.8.1906.
- Trenberth, K.E. and Caron, J.M., 2001, Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. *Journal of Climate*, 14, 3433-3443.
- Vellinga, M. and Wood, R.A., 2002, Global climate impacts of a collapse of the Atlantic thermohaline circulation. *Climate Change*, 54, 251-267. doi: 10.1023/A:1016168827653.
- Weaver, A.J., Sarachik, E.S., and Marotzke, J., 1991, Freshwater flux forcing of decadal and interdecadal oceanic variability. *Nature*, 353, 836-838, doi: 10.1038/353836a0.
- Weaver, A.J. and Valcke, S., 1998, On the variability of the thermohaline circulation in the GFDL coupled model. *Journal of Climate*, 11, 759-767.
- Wie, J., Moon, B.-K., Kim, K.-Y., and Lee, J., 2014, The global warming hiatus simulated in HadGEM2-AO Based on RCP8.5. *Journal of Korean Earth Science Society*, 35, 249-258, doi: 10.5467/JKESS.2014.35.4.249. (in Korean)
- Wood, R.A., Keen, A.B., Mitchell, J.F.B., and Gregory, J.M., 1999, Changing spatial structure of the thermohaline circulation in response to atmospheric CO₂ forcing in a climate model. *Nature*, 399, 572-575, doi: 10.1038/21170.
- Wouters, B., Drijfhout, S., and Hazeleger, W., 2012, Interdecadal North-Atlantic meridional overturning circulation variability in EC-EARTH. *Climate Dynamics*, 39, 2695-2712.
- Zhang, R. and Delworth, T.L., 2005, Simulated tropical response to a substantial weakening of the Atlantic thermohaline circulation. *Journal of Climate*, 18, 1853-1860.
- Zhu, X.H. and Jungclauss, J., 2008, Interdecadal variability of the meridional overturning circulation as an ocean internal mode. *Climate Dynamics*, 31, 731-741.

Manuscript received: June 8, 2015

Revised manuscript received: June 16, 2015

Manuscript accepted: June 19, 2015