

## 기후 변화와 해양 열염분 순환

박영규

한국해양연구원 해양기후환경연구본부  
(2005년 1월 8일 접수; 2005년 3월 17일 승인)

# Climate Change and the Thermohaline Circulation of the Oceans

Young-Gyu Park

*Ocean Climate and Environment Research Division  
Korea Ocean Research and Development Institute*

(Manuscript received 8 January 2005; in final form 17 March 2005)

### Abstract

In this short article, oceanic processes that could have strong effect on the climate have been explained while focusing on the oceanic thermohaline circulation (THC). First, the structure of THC is explained using a simple scaling law. Then, the thermohaline catastrophe, which is believed to be a cause of a rapid climate changes observed in paleoclimate records, and interdecadal variations in THC are explained. The interactions between the oceans and CO<sub>2</sub> are also mentioned briefly.

**Key words:** climate change, thermohaline circulation, thermohaline catastrophe, interdecadal variability

### 1. 서론

해수의 비열은 공기 비열에 비하여 매우 크고, 해양에 포함되어 있는 이산화탄소의 양이 대기에 축적되어 있는 이산화탄소양의 50배 가량이고, 해양순환이 적도에 축적된 태양의 복사열을 극지방으로 수송한다는 점 등에서 해양이 지구기후에 큰 영향을 미칠 것이라는 것은 쉽게 알 수 있다. 지구온난화가 급격한 빙하기를 초래할 수 있다는 것을 주제로 한 영화 “투모로우 (The day after tomorrow)”에서도 해양순환의 변화가 빙하기의 원인이었다 (이 영화에서 다루는 기후 변화는 이론적으로 가능하지만 영화에서처럼 급격한 변화는 불가능하다).

해양의 순환은 바람에 의해 생기는 표층의 풍성순환과 남북방향의 해수면 밀도차에 의해 생기는 열염분순환으로 나눌 수 있다. Fig. 1에 표시된 것과 같은 열

염분순환은 해양의 심층순환을 구성하며, 전 대양을 연결하는 통로이다. 열염분순환이 대양을 한 바퀴 도는데 천년이상 걸리는 것으로 알려져 있다. 열염분순환은 기후의 증장주기 변동성과 온실효과를 일으키는 대기 이산화탄소에도 큰 영향을 미쳐, 해양이 기후에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 이에 대한 이해가 필수적이다. 여기에서는 먼저 열염분순환의 특성에 대하여 간단히 설명하고, 열염분순환이 기후에 미치는 영향에 대하여 고찰한다.

### 2. 열염분순환의 구조

극지방에서는 냉각에 의해 표층의 물이 무거워져 연직대류가 발생하여 표층의 물이 심층으로 가라앉는데 이를 “심층수생성”이라 한다 (Fig. 2). 연직대류동안 해양에 저장되어 있는 열이 대기로 방출되고, 대기 상태에 대한 정보나 화학물질 등이 해양심층으로 전달되고, 해양의 심층과 표층이 급격하게 섞인다. 심층으로 가라앉은 찬 물은 해저면을 따라 적도해역으로 흘러가면서, 해양표층에서 태양복사에 의해 확산되어 오는 열을 상쇄하기 위해 서서히 표층으로 떠오른다 (Fig. 3). 표층에서는 연직대류에 의해 가라앉은 물을

\*Corresponding Author: Young-Gyu Park, Ocean Climate and Environment Research Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, P.O. Box 29, 425-600, Korea  
Phone : +82-31-400-6131, Fax : +82-31-408-5829  
E-mail: ypark@kordi.re.kr

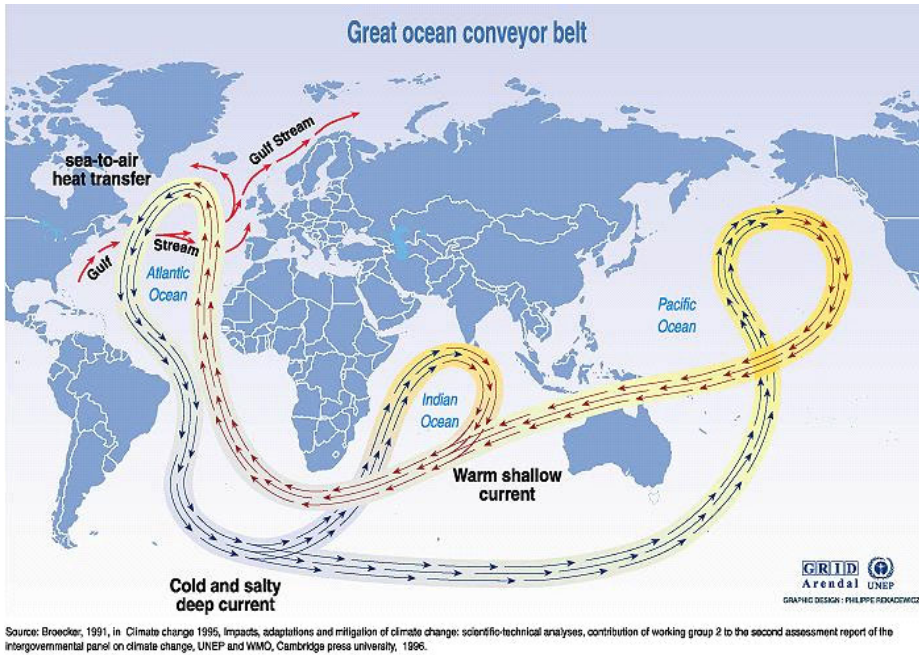


Fig. 1. Schematic diagram of global thermohaline circulation.

보충하기 위해 적도해역에서 극해역으로 움직이는 따뜻한 흐름이 발생한다. 이것은 Fig. 1에 표시된 전지구 열염분순환을 매우 단순화 시킨 것으로, 실제 모습과는 차이가 있지만 열염분순환의 특성을 이해하는 데는 유용하게 사용할 수 있다.

일반적으로 해양의 대순환은 지형류균형과 연속방정식이나 선형 와도 보전방정식에 의해 지배된다. Fig. 2에 표시된 것과 같은 열염분순환에는 앞서 언급한 두 식에 열보전방정식이 추가되는데, 열보전방정식 중 수직방향 열확산과 이류가 균형을 이루는 것(Munk 1966)

으로 알려져 있어 (Fig. 3), 열염분순환은 다음 세 식에 의해 지배된다.

$$fu_z = \frac{g}{\rho_o} \rho_y, fv_z = -\frac{g}{\rho_o} \rho_x$$

$$u_x + v_y + w_z = 0$$

$$wT_z \approx \kappa T_{zz}$$

여기서  $\rho_o$ 는 해수의 평균밀도를,  $g$ 는 중력상수를,  $\kappa$ 는 수직확산계수를 의미하며, 밀도는 온도에 의해 결정된다고 단순화하였다.

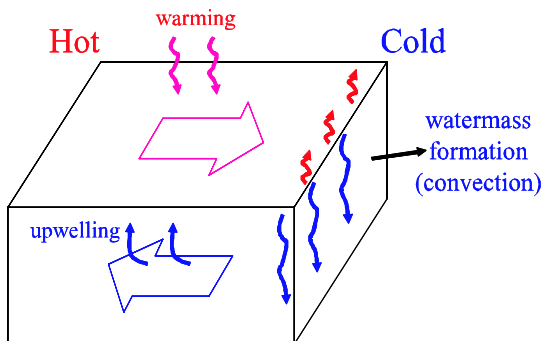


Fig. 2. Schematic diagram of the thermohaline circulation.

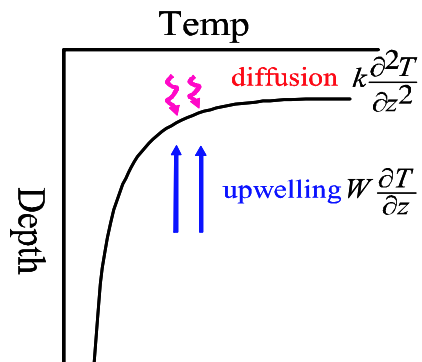


Fig. 3. Heat balance in the thermocline.

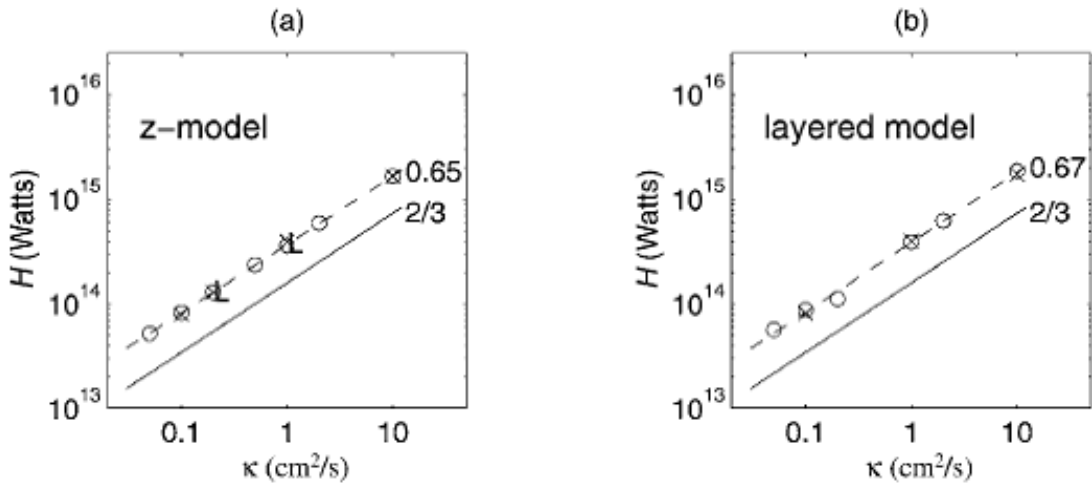


Fig. 4. Comparison of heat transport from numerical experiments and a scale law. See Park and Bryan (2000) for detail.

위 식을 기초로 규모분석을 수행하면, 열염분순환의 강도  $\psi$  와, 극향열수송량  $H$  을 수직확산계수  $\kappa$ 와 열염분순환을 일으키는 남북방향온도차  $\Delta T$ 의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi = \left( \frac{\alpha^2 L^2 g \alpha \Delta T}{f} \right)^{1/3}$$

$$H = \rho_o C_p \left( \frac{L^4 g \alpha^2 \Delta T^4}{f} \right)^{1/3}$$

여기서  $C_p$ 는 해수의 비열을,  $a$ 는 열팽창계수를,  $L$ 은 해양의 크기를 나타낸다.

이 이론은 기본적으로 Robinson & Stommel에 의해 1959년에 제기 되었고, Bryan & Cox (1967)이 수치실험을 통하여 그 타당성을 제시하였으나, 이후에 행해진 Marotzke (1997)나 Huang & Chou (1994) 등의 모델연구는 이 이론이 타당하지 않을 수 있음을 주장하였다. Fig. 4는 Park & Bryan (2000)이 수행한 이상적 수치모형실험결과의 일부로 극향열수송량과 수직확산계수간 관계가 위에 표시한 식을 사용한 모형이나 해저지형에 관계없이 매우 정확하게 성립함을 보여준다. 열염분순환의 강도 역시 위에서 제시한 식을 매우 정확하게 따른다. 이들은 Marotzke (1997)이 주장한 불일치는 모델결과를 물리적으로 해석하지 않아 생긴 문제임을 보여주었다. 등의 해석에 문제가 있음을 밝혀내고, 모델결과를 물리적으로 해석하면 위에 기술한 관계식이 Fig. 4에는 표시한 바와 같이 모델종류나 해

저지형에 관계없이 매우 정확하게 성립함을 보여주었다. 위에 표시한 관계식의 타당성은 Park & Whitehead (1999)의 회전유체실험에서도 증명되었다.

### 3. 열염분순환과 기후변화

고기후연구에서 얻은 결과는 과거 지질시대에 발생했던 전지구적 기후변화가 열염분순환과 밀접한 관계가 있을 수 있음을 시사한다. 열염분순환의 강도는 기본적으로 해수면 밑도의 남북방향 구배에 의해 결정된다. 해수의 밑도는 수온과 염분의 함수인데, 표층수온의 구배와 표층염분의 구배는 서로 반대방향이라 수온의 영향이 강할 경우 현재와 같이 고위도 해역에서 심층수가 생성되는 열염분순환이 생기고, 염분의 영향이 우세할 경우 염분의 영향으로 적도해역의 물이 고위도 해역의 물보다 무거워져 심층수생성이 적도해역에서 일어나는 현재와 반대방향의 열염분순환이 생성된다.

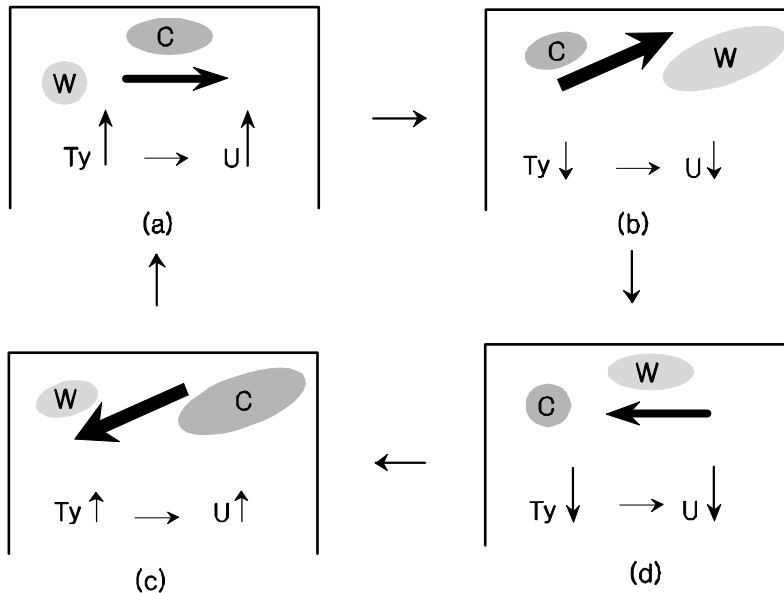
표층의 온도와 염분은 표층경계조건에 의해 결정되는데, 수온은 기본적으로 해양과 대기의 되먹임 기작으로 인해 그 변화범위가 어느 정도 고정되어 있다. 염분을 결정하는 증발과 강수량은 해양의 염분과 아무런 상호작용을 하지 않기 때문에, 염분은 이론적으로 0에서 소금의 결정이 생기는 범위까지 변화할 수 있다. 고위도 해역에 강수나 담수유입이 증가하면, 해양순환과 표층염분구배의 상호작용과 열염분순환의 비선형성

으로 인해 현재의 열염분순환이 반대방향으로 바뀌는 급격한 기후변화가 생길 수 있다 (Stommel 1961; F. Bryan 1987). 이를 thermohaline catastrophe라 하며, 이는 최근 상영된 미국영화 “투모로우 (원제: The day after tomorrow)”에서 나타나는 급격한 기후변화의 이론적 배경이다. 지구온난화에 의해 고위도 해역으로 유입된 담수가 열염분순환의 변화를 통하여 급격한 기후변화를 초래할 수 있음은 해양-대기 접합 기후모델 등에서도 나타난다. 하지만 이런 급격한 기후변화의 정도는 사용한 모델이나 경계조건 등에 크게 좌우되어, 예측의 정확도는 높지 않다. 실제로 Park (2000)은 단순한 상자모형에서 앞서 언급한 열염분순환의 관계식을 적용함으로써 열염분순환이 Stommel (1961) 등이 제시한 것 보다 훨씬 안정적임을 보여주었고, Tziperman (1994) 등은 초기화시 염분경계조건을 변화시키면 안정적인 열염분순환을 얻을 수 있음을 보여주었다.

열염분순환은 Delworth *et al.* (1993)가 기후모델링을 통하여 제시한 것처럼 기후의 중장주기 (수십년 주기) 변동성과도 관련이 있고, Griffies & Bryan (1997)은 변동성을 파악하면 예측력을 높일 수 있음을 보여주었다. 열염분순환의 변동성은 해양과 대기의 상호작용 (Delworth *et al.* 1993), 대기의 단주기 변동에 대

한 해양순환의 반응 (Hasselmann 1976; Delworth & Greatbatch 2000), 해양순환자체의 불안정성 (Te Laa & Dijkstra 2002) 등에 의해 생기는 것으로 알려져 있는데, 해양과 대기의 상호작용에 의한 것과 해양의 불안정성에 의한 것의 구별이 어려운 경우가 많다 (Greatbatch & Zhang 1995).

해양의 불안정성에 의해 생기는 변동성은 아무런 외력의 변화 없이도 생기기 때문에 가장 근본적인 현상이라 할 수 있는데, 이의 역학적 구조에 대하여는 여러 가지 이론이 있다. 대부분의 이론은 열염분순환의 강도와 열염분순환을 일으키는 남북방향 온도 혹은 밀도구배간 위상차가 변동성을 일으킨다는 가정에서 출발하나 이 위상차의 원인에 대해서는 정확한 물리적 설명을 제시하지 못하였다 (Te Laa & Dijkstra 2002). Park (2005)은 이런 위상차나 아무런 가정 없이 열염분순환의 변동성을 설명하는 이론을 제시하였다 (Fig. 5). 냉대해역에 생기는 차가운 온도이상은 서쪽해안에서 동쪽해안으로의 흐름을 강화시켜, 더운 온도이상을 만들어 낸다. 더운 온도이상은 차가운 온도이상만 들어낸 흐름에 의해 동해안까지 이동한 후 대륙을 따라 반시계방향으로 회전하며 차가운 온도이상을 밀어 내면서 냉대해역에 더운 온도이상을 만들어 낸다. 이



**Fig. 5.** Schematic diagrams for the dynamics of the variability. ‘W’ is for a warm anomaly, and ‘C’ for a cold one. Arrows indicate velocity anomalies due to temperature anomalies. Here,  $T_y$  is mean meridional temperature gradient over the northern part of the basin,  $U$  is the magnitude of zonal flow induced by  $T_y$ .

더운 온도 이상은 동쪽에서 서쪽으로 움직이는 속도가 이상을 만들어 더운물의 공급을 차단함으로써 차가운 온도 이상을 만들어 낸다. 이 차가운 온도 이상은 흐름을 거슬러 반시계방향으로 회전하면서 냉대해역의 더운 온도 이상을 밀어내고 차가운 온도 이상으로 냉대해역을 채우면서 변동성을 유지한다.

#### 4. 해양순환과 해양-대기 이산화탄소교환

인류가 산업활동이나 산림파괴를 통하여 방출한 이산화탄소의 30% 가량이 해양으로 흡수되기 때문에 정확한 지구온난화 시나리오 작성을 위해서는 해양-대기 이산화탄소 교환량에 대한 평가가 필요하다. 해양-대기 이산화탄소 교환은 해양과 대기간 이산화탄소의 분압차에 의해 결정되는데, 대기의 이산화탄소분압은 공간적으로 큰 변화가 없는데 반해, 해양의 이산화탄소분압은 해수의 온도, 해양순환, 플랑크톤 등에 의하여 결정되어 큰 공간적 변화를 보인다. 따라서 해양-대기 이산화탄소 교환량의 공간적 변화는 해양의 이산화탄소분압분포에 의해 좌우된다. 해수의 온도와 플랑크톤의 분포는 해수순환에 의해 크게 영향을 받기 때문에, 해양순환은 해양-대기 이산화탄소교환량 추정에 있어서도 매우 중요한 요인이어서, 1990년대 이후부터 해양탄소순환과 연구가 본격적으로 시작되었고, 해양순환과 해양탄소순환모형이 기후시스템모형의 중요요인으로 자리잡아가고 있다.

해양순환과 해수의 탄소화학이 결합된 해양생지화학모델링을 이용한 연구가 본격적으로 시작된 지는 아직 오래 되지 않아, 많은 부분에 해결해야 할 문제들이 남아있다. 가장 대표적인 예로, 해양-대기 이산화탄소 교환이 가장 활발하게 일어나는 곳으로 알려진 남극해에서 탄소순환구조가 잘 파악되지 않았고, 기후변화로 인해 해양탄소순환구조가 어떻게 변화하는지도 아직 잘 파악되지 않았다.

대기이산화탄소농도가 증가함하면 해양으로 흡수되는 이산화탄소의 양도 증가한다. 지구온난화에 의해 수온상승은 해수로 흡수되는 이산화탄소양을 늘릴 수도 줄일 수도 있다. 수온이 상승하면 이산화탄소의 해수에 대한 용해도가 감소하고, 심층순환이 약화되어 해수로 흡수되는 이산화탄소의 양이 감소한다. 하지만 증가된 수온은 해양의 일차생산력을 높여 해양의 탄소분압을 낮추어 해양으로 흡수되는 양을 증가시킬 수 있다. 생지화학 모델링 연구결과에 따르면 용해도 감

소와 심층순환 약화의 영향이, 일차생산력증가의 영향보다 커서 해양을 고려하면 해양이 고려되지 않았을 때보다 지구온난화가 더욱 가속될 가능성도 있다.

해양의 열염분순환과 해양의 이산화탄소저장능력을 이용한 이산화탄소저감연구도 미국, 일본 노르웨이 등을 중심으로 진행되고 있다. 심층으로 유입된 물질은 약 천년이상 해양 심층에 남아있을 수 있기 때문에, 해양심층에 이산화탄소를 주입하면 장기간 대기로부터 격리시킬 수 있다. 하지만 이에 의한 환경영향은 아직 미지수로 남아 있다.

#### 5. 결 언

지금까지 해양순환이 기후에 미칠 수 있는 영향을 열수송, 변동성, 이산화탄소의 측면에서 간단하게 살펴본다. 이와 같이 해양순환 특히 열염분순환이 기후와 밀접하게 관계되어 있으나 아직 많은 부분이 정확히 규명되지 않았거나 정량화 되지 않았다. 따라서 정확한 기후예측과 기후시스템에 대한 이해를 위해서는 열염분순환과 기후간 상호관계뿐만 아니라 열염분순환 자체에 대해서도 깊이 있는 연구와 이해가 많이 필요한 실정이다.

#### 사 사

이 연구는 KORDI의 “기후변화 모니터링 및 예측을 위한 요소기술개발”, 환경부의 “생지화학 모델링을 통한 한반도 주변해역과 북태평양 이산화탄소 순환 분석평가기술개발”, KISTI의 “제4차 전략과제”의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Bryan, F., 1987: Parameter sensitivity of primitive equation ocean general circulation models. *J. Phys. Oceanogr.*, 17, 970-985.
- Bryan, K., and M. D. Cox, 1967: A numerical investigation of the oceanic general circulation. *Tellus*, 19, 54-80.
- Delworth, T. L., and R. J. Greatbatch, 2000: Multidecadal thermohaline circulation variability driven by atmospheric surface flux forcing. *J. Climate*, 13, 1481-1495.
- , S. Manabe, and R. J. Stouffer, 1993: Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, 6, 1993-2011.
- Greatbatch, R. J., and S. Zhang, 1995: An interdecadal oscillation in the thermohaline circulation. *J. Climate*, 8, 1270-1283.

- lation in an idealized ocean basin forced by constant heat flux. *J. Climate*, 8, 82-91.
- Griffies S.M. and K. Bryan, 1997: Predictability of North Atlantic interdecadal climate variability. pages 181-184, 10 January 1997 *Science*.
- Hasselmann, K., 1976: Stochastic climate model. I: Theory. *Tellus*, 28, 473-485.
- Huang, R. X., and R. L. Chou, 1994: Parameter sensitivity study of saline circulation. *Climate Dyn.*, 9, 391-409.
- Marotzke, J., 1997: Boundary mixing and the dynamics of three-dimensional thermohaline circulations. *J. Phys. Oceanogr.*, 27, 1713-1728.
- Munk, W. H., 1966: Abyssal recipes. *Deep-Sea Res.*, 13, 707-730.
- Park, Y. -G., 2004: The dynamics of interdecadal variability of thermally driven circulation. *Submitted*
- , Y. -G., and J. A. Whitehead, 1999: Rotating convection driven by differential bottom heating. *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 1208-1220.
- , and K. Bryan, 2000: Comparison of thermally driven circulations from a depth-coordinate model and an isopycnal-layer model. Part I : Scaling-law sensitivity to vertical diffusivity. *J. Phys. Oceanogr.*, 30, 590-605.
- Robinson, A., and H. Stommel, 1959: The oceanic thermocline and the associated thermohaline circulation. *Tellus*, 2, 295-308.
- Stommel, H. M., 1961: Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus*, 13, 224-230.
- Te Raa, L. and H. D. Dijkstra, 2002: Instability of the thermohaline ocean circulation on interdecadal timescales. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 138-160.
- Tziperman, E., J. R. Toggweiler, Y. Feliks, and K. Bryan, 1994: Instability of the thermohaline circulation with respect to mixed boundary conditions: Is it really a problem for realistic models? *J. Phys. Oceanogr.*, 24, 217-232.