Article

동해 재분석 자료에 나타난 북한한류의 계절 및 경년변동성

김영호^{1*} · 민홍식²¹한국해양연구원 연안개발연구본부²한국해양연구원 해양환경연구본부

(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Seasonal and Interannual Variability of the North Korean Cold Current in the East Sea Reanalysis Data

Young Ho Kim^{1*} and Hong Sik Min²¹Coastal Engineering Research Department, KORDI²Marine Environment Research Department, KORDI

Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Analyzing the results of East Sea Regional Ocean Model using a 3-dimensional variational data assimilation scheme, we investigated spatial and temporal variability of the North Korean Cold Current (NKCC) in the East Sea. The climatological monthly mean transport of the NKCC clearly shows seasonal variation of the NKCC within the range of about 0.35 Sv ($=10^6 \text{ m}^3/\text{s}$), which increases from its minimum (about 0.45 Sv) through December-January to March, decreases during March and May, and then increases again to the maximum (about 0.8 Sv) in August-September. The volume transport of the NKCC shows interannual variation of the NKCC with the range of about 1.0 Sv that is larger than seasonal variation. The southward current of the NKCC appears often not only in summer but in winter as well. The width of the NKCC is about 35 km near the Korean coast and its core is located under the East Korea Warm Current. The North Korean Cold Water (NKCW), characterized by low salinity and low temperature, is located both under the Tsushima Warm Water and in the western side of the maximum southward current of the NKCC that means the NKCC advects the NKCW southward along the Korean coast. It is revealed that the intermediate low salinity water, formed off the Vladivostok in winter, flows southward to the south of 37°N through 2~3 paths; one path along the Korean coast, another one along 132°E, and the middle path along 130°E. The path of the intermediate low salinity varies with years. The reanalysis fields suggest that the NKCW is advected through the paths along the Korean coast and along 130°E.

Key words : East Sea, North Korean Cold Current, seasonal variation, inter-annual variation, East Sea Regional Ocean Model

1. 서 론

동해는 대한해협을 통해 유입된 난수가 상층에 분포하고 있는 남쪽의 난수역과 상대적으로 수온이 낮은 북쪽의 냉수역으로 나뉘며 두 해역의 경계에는 극전선이 존재한

다. 이 난수역과 냉수역은 북위 37~38도 부근의 한국 동해안 해역에서 만나며 따라서 이 해역은 해황의 공간적인 변화가 심한 곳이다. 한국 동해안을 따라 흐르며 고온고염의 대만난류를 수송하는 동한난류 밑에는 주로 봄철과 여름철에 주위보다 수온이 현저히 낮은 냉수가 존재한다. 이 냉수는 인접한 해수에 비해 상대적으로 염분은 낮고 용존산소량은 높은 특징을 보이는데 이러한 물리·화학적

*Corresponding author. E-mail : yhkim@kordi.re.kr

특성으로부터 이 냉수는 북한이나 러시아 연안역에서 생성되어서 연안을 따라 남하한 북한한류계수로 알려져 있다(김과 김 1983; Cho and Kim 1994).

Kim and Chung(1984)은 1981년 9월에 울릉분지 남서쪽에서 염분이 최소이고 용존산소량이 최대인 수괴를 발견하고 이를 동해중층수라고 명명하였다. 북한한류계수와 동해중층수는 물리·화학적 특성이 유사하여 구분 짓기가 어려우며 두 수괴를 구분하고 형성 기원과 이동 경로를 밝히는 것이 또 하나의 과제가 되었다. Cho and Kim (1994)은 1991년 동해 남서부역에서 행해진 CTD 관측 결과로부터 물성이 서로 비슷한 북한한류계수와 동해중층수는 수평적으로 그리고 수직적으로 위치를 달리한다고 보고하였으며 북한한류계수의 염분최소층 수온이 동해중층수의 수온보다 다소 낮다고 보고하였다. 또한, 이러한 물성과 분포 위치의 차이가 생기는 이유로서 두 수괴가 다른 해역에서 형성됐을 가능성과 형성 해역은 같지만 형성 시기와 동해남서부(울릉분지)로의 이동경로가 다를 가능성을 제시하였다. 한편, 북한한류의 존재를 추정해 볼 수 있는 한국 연안역에서의 해류추정 및 직접 관측이 실시되기도 했지만(이 등 1989; Kim 1999; Chang *et al.* 2002), 관측기간이 매우 짧거나 해류관측 기간동안 해수 물성이 함께 관측되지 않아서 북한한류계수의 남하 및 계절변동을 입증하기에는 부족하였다.

직접적인 물성관측과 해류관측을 대신하여 3차원 수치 모델을 이용하여 북한한류계수를 재현하고 계절변동 및 기원을 밝히고자 하는 연구가 수행되어 왔다(Kim and Yoon 1999; Yoshikawa *et al.* 1999; Kim and Seung 1999; Yoon and Kawamura 2002). 이들 모델 연구에서는 북한한류계수를 비교적 성공적으로 재현했다고 평가되나, 염분최소층을 관측치보다 100 m 이상 깊게 모사하였으며, 북한한류계수의 이동과 연관된 북한한류의 계절변동의 모사에서 여름철보다는 겨울철에 북한한류가 남하하는 것으로 모사하였다. 이는 여름철에 북한한류계수가 한국 동해안을 따라 남쪽으로 확장하며 겨울철에는 오히려 북쪽으로 쇠퇴하는 관측결과와 상반된다.

Kim *et al.*(2007)은 GFDL-MOM3에 기반한 동해순환 모델에 3차원 변분동화기법(3-dimensional variational data assimilation)을 적용하여 자료동화 체계를 구축하였으며, 이 체계에 1993년부터 2002년까지 동해의 수온과 해면 고도변이를 동화하여 0.1° 이하의 정밀격자상에서 10일 간격의 3차원 수온과 염분, 그리고 해류의 재분석 자료를 생산하였다. 비교 검증 결과 100 m 재분석 수온장과 관측 수온장의 상관도는 평균 0.79로 높았으며 울릉분지 내의 중규모 현상들을 잘 재현하였으며, 특히 여름철에 북한한류가 남하하는 현상을 재현하는 등 동해의 순환을 현실적으로 재현하는 것으로 파악되었다. 본 연구에서는

Kim *et al.*(2007)의 10년간의 동해 수온 및 염분 그리고 해류의 재분석 자료를 이용하여 북한한류의 시공간 변동 특성과 북한한류계수의 남하 경로를 밝히고자 한다.

한편, 북한한류계수를 정의함에 있어 북한한류계수의 수온범위를 $1\sim5^\circ\text{C}$ 라고 한 점은 대부분 연구에서 일치하나 염분범위는 연구마다 서로 다르게 제시되어 왔다(박 1979; 김과 김 1983; Cho and Kim 1994). $1\sim5^\circ\text{C}$ 수온 범위에서 염분이 34.05 psu 이하인 해수를 북한한류계수라고 하면 모든 연구의 정의를 만족하므로 본 연구에서는 북한한류계수의 정의를 $1\sim5^\circ\text{C}$ 수온 범위에서 염분이 34.05 psu 이하인 해수로 한다. 동해중층수와 북한한류계수를 구분하는 것이 본 연구의 주된 목적이 아니므로, 본 연구에서는 편의상 북한한류계수를 포함하여 울릉분지 주변에서 관측되는 $1\sim5^\circ\text{C}$ 의 염분최소층을 갖는 수괴를 중층저염수로 지칭하고, 그중에서 특히 동한난류 밑으로 한국 동해안을 따라 남하하는 중층저염수를 북한한류계수로 하여 동해중층수와 북한한류계수의 용어 혼동을 피하고자 한다.

2. 3차원 변분동화기법을 이용한 동해자료동화 체계

동해순환모델은 수평방향으로는 B 격자체계를, 수직방향으로는 Z 격자체계를 갖는 MOM3에 기반을 두고 있다. 남북방향으로는 0.1° 로 격자간격이 일정한 반면 동서방향으로는 한국 동해안에서는 0.06° 간격으로 조밀하고 동쪽으로 갈수록 점점 성기게 되어 동경 130° 동쪽에서는 0.1° 간격이 되는 가변격자체계를 도입하였다. 이처럼 동해안에서 조밀한 격자 간격을 구성한 이유는 동한난류와 북한한류를 보다 정밀하게 모사하기 위함이다. 수직방향의 격자간격은 표층 부근의 해양혼합층을 정밀하게 모사하기 위해 표층에서 2.5 m 간격으로 조밀하게 구성하고 바닥층에서 445.97 m 간격으로 성기게 구성하였다.

등밀도면을 가로지르는 혼합이 수치적 오차에 의해 과도해지는 문제를 최소화하기 위하여 수온과 염분에 대해 SOM 수평 이류방안(Hofmann and Maqueda 2006)을 도입하였으며, 등밀도면을 따르는 물성 혼합을 모수화하기 위하여 RM 혼합방안(Roberts and Marshall 1998)을 사용하였고, 해면경계층을 모수화하기 위해서는 KPP(K-Profile Parameterization) 경계면 혼합방안(Large *et al.* 1994)을 사용하였다.

개방경계조건으로는 대한해협을 통해 유입되는 해류와 쓰가루해협과 쓰야해협을 통해 유출되는 해류를 모수화하기 위하여 수온과 염분 그리고 순압류에 방사조건(radiation condition)과 완화조건(restoring condition)을 적용하였다(Marchesiello *et al.* 2001). 그리고 개방경계의

수온과 염분의 완화조건을 위한 자료로는 WOA(World Ocean Atlas 2001)의 기후 월평균 수온과 염분 자료를 이용하였으며, 대한해협에서 개방경계의 순압류를 위한 완화조건을 위해 1993년부터 1998년 3월까지의 한국의 부산과 일본의 모지 사이의 해면 고도를 이용해 추정된 대한해협 수송량을 그리고 1998년 4월부터 2002년까지는 대한해협 해저케이블을 이용해 추정된 대한해협 수송량(Kim *et al.* 2004)을 이용하였다. 쓰가루해협과 쓰야해협을 통해 유출되는 수송량은 Na *et al.*(2007)의 결과를 따라 각각 대한해협 수송량의 2/3와 1/3로 하였다. 해면경계 조건으로는 해면을 통한 열속 조건으로 Bulk Formula(Large *et al.* 1997)를 적용하였고 담속 조건으로는 WOA 자료의 해면 염분에 완화하는 조건을 적용하였다. 3차원 배경오차공분산(background error covariance)을 모수화하기 위하여 Weaver and Courtier(2001)의 방법대로 확산

방정식을 이용한 상관모델의 수립방안을 사용하였다. 이로써 수치적으로 빠른 계산이 가능해졌으며 복잡한 해안선 등을 고려할 수 있는 보다 일반적인 형태의 배경오차공분산을 구성할 수 있었다.

한편, 해면고도계 자료를 동화하기 위하여 해면압력이 변화함에 따라 바닥압력은 변화하지 않으면서 수온과 염분의 프로파일은 수직적으로 이동되는 Cooper and Haines(1996)의 방안을 적용하여 수괴특성과 잠재와도의 보존이 만족되도록 하였다. 또한, 본 연구에서는 지오이드의 오류로 인하여 자료동화 체계가 영향을 받지 않도록 해면고도 대신에 해면고도변이를 이용하는 새로운 방안을 제안하였다(Kim *et al.* 2007).

이렇게 수립된 자료동화 체계를 이용하여 1993년부터 2002년까지 국립수산물자원과 일본해양자료센터의 정선 관측 자료, CREAMS 관측과 Argo 관측의 수온 프로파일

Fig. 1. Simulated currents at 340 m in winter (a, c) and summer (b, d), 1997 (a, b) and 1999 (c, d).

자료 그리고 비정기적인 XBT 관측 자료를 동해순환모델에 동화하였다. 또한, 위성관측자료로 해면수온과 해면고도계 자료를 동화하였다. 이를 통해 동해순환모델의 매 격자점에서 10일 간격 해면고도와 수온, 염분 그리고 유속의 재분석 자료를 생산하였다. 이렇게 생산된 재분석 자료는 일반적인 동해의 순환뿐만 아니라 울릉 분지의 중규모 현상을 성공적으로 재현하는 것으로 검증되었다(Kim *et al.* 2007). 뿐만 아니라 기존 수치모델에서는 재현되지 않았던 여름철에 북한한류가 남하하는 현상이 잘 재현되었으므로 재분석 자료는 북한한류의 시공간 변동 특성을 파악하기에 매우 유용한 자료를 제공한다.

3. 북한한류의 시공간 변동

동해 남서부 해역에서 북한한류의 특징이 두드러지게 나타나는 340 m층을 택하여 동해 재분석 자료에서 보이는 북한한류의 분포 특성을 분석하였다(Fig. 1). 한국 동해안을 따라 남하하는 북한한류의 특징이 뚜렷하게 보이며 남하 이후 북위 36도 경에 위치하는 울릉분지의 남단을 돌아 일본 연안을 따라 동진하는 형태가 나타난다. 한국 동해안을 따라 남하하는 북한한류의 폭은 약 35 km이고 최대 유속은 약 10 cm/s이며, 북한한류의 남하 경향은 겨울철(Fig. 1a, c)보다는 여름철(Fig. 1b, d)에 더욱 뚜렷하다.

북한한류와 북한한류계수의 공간 특성을 파악하기 위해 1999년 8월의 재분석 자료를 택하여 북위 36도에 평행한 단면(Fig. 1의 N 단면)에서 수온과 염분 그리고 남북 방향 유속의 분포를 분석하였다(Fig. 2). 표층에서 최대 유속 약 40 cm/s이고 수심 100 m까지 유속이 10 cm/s 이상인 북한한류가 뚜렷하게 보이며 그 아래 수심 약 150~600 m에서 유속이 7.5 cm/s 이상인 남향류가 보인다. 전자는 동한난류에 해당하며 후자는 북한한류에 해당한다. 표층의 동한난류의 위치는 고온고염의 대마난류수의 위치와 대체로 일치하여 동한난류가 대마난류수를 수송하는 일반적인 특

징을 잘 묘사한 것으로 판단된다. 수온이 1~5°C이며 염분이 34.05 psu 이하인 북한한류계수는 동경 130.3도의 서쪽, 수심 150~350 m에 존재하며 최대의 남향류가 존재하는 영역보다 서쪽에 위치한다. 비록 북한한류의 유속의 수직구조는 기존 연구에서 보고된 바가 없으나 수온과 염분의 구조는 관측 자료로부터 보고된 결과(김과 김 1983;

Fig. 3. Southward volume transport of the NKCC across line N (Fig. 1) from 1993 to 2002 (a), and its climatological monthly mean (b). Volume transport was calculated by integrating southward velocity from 100 m to 700 m. Red line in (a) denotes the 370-day running average of the volume transport.

Fig. 2. Vertical sections of simulated temperature, salinity and meridional velocity in August, 1999 across line N (Fig. 1).

Cho and Kim 1994)와 대체로 일치하므로 북한한류계수와 북한한류의 모사가 사실적인 것으로 판단된다.

N 단면의 수심 100~700 m를 통과하여 남향하는 유속을 적분하여 얻어진 북한한류 수송량(Fig. 3a)의 기후 월 평균 자료(Fig. 3b)를 이용하여 북한한류의 계절변동성을 조사하였다. 10년간 월평균 북한한류의 수송량은 8~9월에 최대인 약 0.8 Sv ($=10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)이고 12~1월에 최소인 약 0.45 Sv 이며 계절변동 폭은 약 0.35 Sv 이다. 8~9월에 북한한류의 수송량이 최대인 점은 김과 김(1983)이 여름철에 북한한류가 강화된다고 제안한 것과 일치한다. 해수물성 관측 자료로는 북한한류의 남하가 강화되기 시작하는 시기를 정확하게 알 수 없었으며 겨울에서 여름으로 갈수록 강화되는 형태를 정확하게 파악할 수가 없었다. 재분석 자료에서는 북한한류 수송량이 증가하기 시작하는 시기가 1월경인 것으로 나타났으며 8월까지 꾸준히 증가하는 형태를 보이기보다는 3~5월에 잠시 감소하다가 다시 증가하

는 1년에 두 번의 피크가 있는 형태를 보인다.

평균적인 계절변동 외에 북한한류 수송량의 경년 변동 또한 매우 큰 것으로 파악되었다(Fig. 3a). 8월경에 수송량이 최대인 형태는 대부분 모든 해에 나타났으나 그 크기는 해에 따라 크게 달랐다. 그 예로 1996년과 1999년 8월에는 북한한류 수송량이 1.4 Sv 이상이었으나 2001년 8월에는 0.4 Sv 이하였다. 10년간 북한한류 수송량의 경년 변동폭은 약 1.0 Sv 으로 평균 계절변동폭(Fig. 3b 참조)보다 크게 나타났다. 12개월 이동평균으로 본 북한한류의 연평균 수송량(Fig. 3a의 붉은 실선)을 분석한 결과, 북한한류의 연평균 수송량은 1993년부터 1996년까지 증가하다가 1998년까지 감소하고 다시 1999년에 최대인 1.0 Sv 까지 증가하다가 2001년에 최소인 0.2 Sv 까지 감소한 후 증가하였다. 2001년에 북한한류의 계절변동폭도 작고 수송량도 작았던 점은 다른 해와는 구별되는 특이한 형태로 관측자료에서 발표된 적이 없는 형태이다. 10년간 북한한류

Fig. 4. Vertical sections of meridional velocity across line N in March (a) and August (b) from 1993 to 2002.

수송량의 시계열자료(Fig. 3a)의 연별 계절변동에서 북한한류 수송량은 1월부터 증가하기 시작하여 2월 또는 3월부터 감소한 후 다시 4월이나 5월에 증가하기 시작하여 8월이나 9월에 최대에 이른 후 감소하는 형태가 10년 중에서 가장 일반적인 계절변동으로 Fig. 3b에 나타난 기후월 평균 계절변동과 유사함을 알 수 있었다. 1993년 2월, 1996년 3월, 1997년 3월 그리고 2000년 3월의 북한한류 수송량은 각각 0.9, 1.0, 1.2, 그리고 1.3 Sv로 평균적인 북한한류 수송량의 계절변동과는 다르게 겨울철 수송량이 여름철 기후 월평균 수송량보다 큰 점은 주목할 만하다.

기후 월평균 수송량(Fig. 3b)에서 최대값이 나타나는 3월과 8월을 중심으로 1993년부터 2002년까지 N 단면에서 남북방향 유속분포를 분석하였다(Fig. 4). 2001년 8월의 경우 북한한류라고 특징지을 수 있는 유속구조가 나타나지 않지만 이를 제외한 모든 해의 8월에 한국 연안역의 약 150 m 보다 깊은 수심에서 북한한류가 남하하는 유속구조를 볼 수 있다. 그중에서도 북한한류의 수송량이 1.4 Sv 이상으로 컸던 1996년과 1999년 8월의 경우, 북한한류의 남향류 유속이 7.5 cm/s 이상으로 다른 해의 8월에 비해 크게 나타났다. 북한한류의 평균적인 분포는 표층의 강한 동한난류 밑에 위치하는 것이며 2001년 8월과 1996년 8월을 제외한 모든 해의 유속구조가 이와 같은 형태를 갖는다. 그러나 1996년 8월의 유속구조는 동한난류가 다른 해에 비해 더 동쪽에 위치하고 그 서쪽 표층에서 10 cm/s 이상의 남향류가 존재하며 그보다 깊은 200~500 m 수심에서 7.5 cm/s 이상의 남향류가 존재하는 형태로 평균적인 구조와는 다르게 나타났다.

북한한류의 존재는 여름철 유속구조에서만 파악되는 것은 아니며 겨울철 유속구조에서도 파악된다. 1994년, 2001년, 2002년 3월에는 한국 연안역에서 북한한류라고 특징지을 수 있는 뚜렷한 남향류가 나타나지 않았지만, 대부분 해의 3월에는 남향하는 북한한류의 존재가 파악되었다. 3월의 유속구조는 대부분 8월에 출현하는 북한한류의 유속구조와 크게 다르지 않으며, 특히 2000년 3월의 경우, 동한난류 밑으로 250 m 보다 깊은 수심에서 7.5 cm/s 이상의 강한 남향류가 나타난다. 1996년과 1997년의 경우, 표층에서 10 cm/s 이상인 남향류가 심층까지 연결된 유속구조가 보이며, 이것은 일반적으로 최대 남향류가 200 m 이심에 존재하는 여름철 평균적인 북한한류의 유속구조와는 다른 형태이다.

북한한류에 대한 선행 연구들은 주로 여름철 북한한류의 남하에 초점을 맞추었다. 그러나 재분석 자료를 분석한 결과, 북한한류의 남하가 늦은 겨울 또는 이른 봄에 이미 시작되며 2월 또는 3월에 북한한류 수송량의 피크가 나타나며 여름철인 8월이나 9월에 더 큰 피크가 나타나는 것으로 파악되었다.

4. 중층저염수의 남하 경로

북한한류와 밀접하게 연관되어 있는 북한한류계수의 남하는 선행 연구들(김과 김 1983; Yun *et al.* 2004)에 의하면 동해 연안역을 따라 남하하는 것으로 판단되나 울릉분지에 북한한류계수와 물리·화학적 특성이 비슷한 동해중층수가 출현하고 있어 중층저염수의 기원 및 남하 경로를 파악하는 것이 북한한류계수의 특성을 이해하고 동해중층수와와의 상호 관계를 밝히는데 주요할 것으로 사료된다.

중층저염수의 기원에 대해서는 Yoshikawa *et al.*(1999)와 Yoon and Kawamura(2002) 등이 수치모델을 이용하여 블라디보스토크 연안역에서 표층의 저염수가 겨울철에 침강하면서 생성되는 것으로 제안한 바 있다. 그러나 중층저염수의 남하 경로에 대해서는 Yun *et al.*(2004)이 북한과 러시아 연안역에서 겨울철에 생성된 중층저염수가 4월부터 10월까지 남하한다고 기술하면서 세 개의 남하 경로를 제안한 것 외에는 관측 자료나 수치모델을 이용하여 밝혀진 바가 없다.

중층저염수의 남하 경로를 파악하기 위하여 재분석 자료에서 중층저염수의 저염분 특성이 잘 나타나는 수심 235 m 염분의 시간에 따른 수평분포 변화를 분석하였다(Fig. 5). 재분석 자료에 의하면 중층저염수는 대체로 북위 40도 이북, 동경 132도 이서에서 생성되어 2~3개의 경로를 통하여 남하한다. 1997년의 경우, 겨울철에 생성된 저염수는 두 개의 경로를 통하여 남하한다. 먼저 겨울동안 생성된 중층저염수는 봄철에 한국 연안역을 따라 남하하며, 6월 이후에는 대체로 동경 130도를 따라 남하하다가 6월경에 북위 37도의 한국 연안역에 근접하는 것으로 나타났다. Fig. 5e의 A는 1997년에 한국 연안역을 따라 남하하는 중층저염수를 나타내며 B는 외해역으로 남하하는 중층저염수를 나타낸다. A저염수와 B저염수가 남하하는 시기와 경로가 다른 것을 알 수 있다.

1999년의 경우에는, 2월에서 3월에 생성된 저염수의 대부분이 봄철에서 여름에 이르기까지 주로 한국 연안역을 따라 남하하며 저염수의 일부가 동경 132도를 따라 남하하여 독도 근해역까지 이르는 것으로 나타났다. Fig. 5g의 C는 1999년에 한국 연안역을 따라 남하하는 중층저염수를 나타내며 D는 동경 132도를 따라 독도 근해역까지 남하하는 중층저염수를 나타낸다. 1999년의 C저염수는 1997년의 A저염수와 대체로 비슷한 경로를 따라 남하하며 1997년보다 염분이 낮고 북위 36도의 울릉분지 남단까지 남하한다. 반면에 1999년의 D저염수는 1997년의 B저염수보다 동쪽 경로를 통해 남하하며 B저염수가 6월경에 한국 연안역에 도달한 것과 달리 D저염수는 한국 연안역으로 접근하지 않는 것이 특징이다.

남하 경로가 뚜렷하지 않은 경우(Fig. 5i, j)의 예가 있기

Fig. 5. Horizontal distribution of salinity at 235 m in February, April, June and August for the period of 1993~2002.

(Fig. 5. Continued)

(Fig. 5. Continued)

는 하지만 대체로 한국 연안역을 따르는 경로와 동경 132도를 따르는 경로 및 두 경로의 중간인 동경 130도를 따르는 경로 등 세 개의 경로를 통해 중층저염수가 남하하는 것으로 나타났다. 동경 130도를 따라 남하하는 저염수가 봄철에 한국 연안역에 접근하는 반면(Fig. 5d, e), 동경 132도를 따라 남하하는 저염수는 한국 연안역에 접근하지 않는 것(Fig. 5f, g, h)이 특징적이다. 앞에서 기술한 중층저염수의 남하 경로는 Yun *et al.*(2004)이 제안한 세 개의 남하 경로와 대체로 일치한다. 위와 같은 남하 경로를 통해 볼 때, 북위 37도 이남의 한국 연안역에 여름철에 출현하는 저온저염의 북한한류계수는 서일본분지로부터 한국 연안을 따르는 경로와, 동경 130도를 따르는 경로를 통해 남하한 중층저염수일 것으로 사료된다.

5. 토 의

본 연구에서는 Kim *et al.*(2007)의 10년간의 동해 수온 및 염분 그리고 해류의 재분석 자료를 이용하여 북한한류의 계절 및 경년변동과 공간특성을 파악하고, 북한한류계수의 남하 경로를 밝히고자 하였다. 재분석 자료는 북한한류가 늦은 겨울이나 봄철부터 남하하기 시작하면서 수송량이 증가하다가 3~5월경에 감소한 후 다시 증가하여

8~9월경에 최대인 0.8 Sv에 이르는 계절변동을 뚜렷하게 모사했으며 북한한류 수송량의 계절변동폭은 약 0.35 Sv이었다. 북한한류 수송량의 경년변동폭은 1.0 Sv으로 계절변동폭보다 크게 나타났다. 또한, 북한한류는 연안역으로부터 약 35 km 이내의 좁은 해역을 통해 남하하는 것으로 나타났다. 매년 겨울에 생성되는 중층저염수는 2~3개의 경로로 남하하는 것으로 나타났으며 그중에서 북한한류계수는 한국 연안역을 따르는 경로와 동경 130도를 따르는 경로로 남하하는 중층저염수일 것으로 사료된다.

선행 연구들에 이용되었던 관측자료로부터는 추정하기 어려운 이러한 자세한 북한한류의 계절변동성과 공간특성의 파악은 재분석 자료를 이용했기 때문에 가능하였다. 따라서 향후 북한한류의 변동성을 관측하고자 할 때 여름철뿐만 아니라 겨울철 관측도 요구되며 수치모델을 이용하여 북한한류를 재현하려면 고해상도의 격자망을 필요로 할 것이다.

1987년 12월에 북위 37.55도의 한국 동해안역에 북한한류계수가 넓게 분포하고 있다고 보고한 Kim *et al.*(1991)을 제외하면 본 연구에서 제시한 늦은 겨울 또는 봄철부터 남하하기 시작하여 2월이나 3월에 피크를 나타내는 북한한류의 남하에 대해서는 아직까지 보고된 바가 없다. Kim *et al.*(2006)은 북한한류계수로부터 기원하고 대한해

협 서수도를 따라 남하하는 대한해협 저층냉수가 기존에는 여름철에만 대한해협으로 유입되는 것으로 알려졌으나 12월이나 1월에 한번 더 유입되는 것으로 보고한 바 있다. Kim *et al.*(2006)의 결과는 본 연구에서 제시한 바와 같이 여름철 외에 겨울철이나 봄철에도 상당한 남향 유속을 갖는 북한한류가 존재할 가능성을 내포한다고 할 수 있다.

북한한류에 관한 선행 연구들에서는 해류 자료의 부재 및 해수물성 관측 자료의 시공간적인 제약으로 인하여 주로 계절변화에 초점을 맞춰왔다. 비록 Min *et al.*(2006)이 대한해협 주변의 냉수괴들에 대한 경년변동에 주목하였으나 주로 대한해협 저층냉수와 대한해협 주변의 냉수괴들과의 관계성에 대하여 논하였다. 본 연구에 사용된 재분석 자료에서는 한국 연안역을 따라 남하하는 북한한류의 계절변동이 뚜렷하게 나타날 뿐만 아니라 경년변동 또한 그 변동폭이 계절변동에 비교될 만큼 뚜렷하였다. 따라서 북한한류의 경년변동성을 파악하기 위한 직접적인 장기 해류관측이 요구되며 재분석 자료와 비교할 필요가 있다.

아직까지 북한한류의 남하에 대한 물리적인 기작이 밝혀지지는 않았지만, 북한한류가 동한난류 밑으로 남하하고 저온저염의 중층저염수가 100 m 이심의 수온약층 보다 깊은 수심에 존재한다는 점을 고려할 때 동해의 열염순환의 일환이라는 견해(Kim 2006)가 있다. 본 연구에 사용된 동해 재분석 자료는 북한한류의 경년변동 등 시공간변동을 시험하기에 유용한 자료가 될 것이며, 향후 면밀한 분석을 통해 북한한류의 물리적인 기작에 대해 연구하고 검증할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD031003AD)으로 수행되었으며 한국해양연구원의 연구프로그램(PE9811A, PE98040)으로부터 일부 지원을 받았습니다.

참고문헌

김철호, 김구. 1983. 한국 동해안에 출현하는 냉수괴의 특성과 기원. *한국해양학회지*, **18**(1), 73-83.
 박청길. 1979. 한국 동해의 용존산소의 분포에 관한 연구. *한국해양학회지*, **14**(2), 67-70.
 이흥재, 석문식, 김철호. 1989. 한국 동해에서 남동심층류 관측. *한국해양학회지*, **24**(2), 63-68.
 Chang, K.-I., N.G. Hogg, M.-S. Suk, S.-K. Byun, Y.-G. Kim, and K. Kim. 2002. Mean flow and variability in the southwestern East Sea. *Deep-Sea Res. I*, **49**, 2261-2279.
 Cho, Y.-K. and K. Kim. 1994. Two modes of the salinity

minimum layer in the Ulleung Basin. *La mer*, **32**(3), 271-278.
 Cooper, M. and K. Haines. 1996. Altimetric assimilation with water property conservation. *J. Geophys. Res.*, **101**(C1), 1959-1977.
 Hofmann, M. and M.A.M. Maqueda. 2006. Performance of a second-order moments advection scheme in an ocean general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **111**, C05006. doi:10.1029/2005JC003279.
 Kim, C.-H. and J.-H. Yoon. 1999. A numerical modeling of the upper and the intermediate layer circulation in the East Sea. *J. Oceanogr.*, **55**, 327-345.
 Kim, C.H., H.-J. Lie, and K.-S. Chu. 1991. On the intermediate water in the southwestern East Sea (Sea of Japan). p. 129-141. In: *Oceanography of Asia Sea*, ed. by K. Takano. Elsevier, Amsterdam.
 Kim, K. and J.Y. Chung. 1984. On the salinity-minimum and dissolved oxygen maximum layer in the East Sea (Sea of Japan). p. 56-66. In: *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*, ed. by T. Ichiye. Elsevier, New York.
 Kim, K.J. and Y.H. Seung. 1999. Formation and movement of the ESIW as modeled by MICOM. *J. Oceanogr.*, **55**, 369-382.
 Kim, K., S.J. Lyu, Y.-G. Kim, B.H. Choi, K. Taira, H.T. Perkins, W.J. Teague, and J.W. Book. 2004. Monitoring volume transport through measurement of cable voltage across the Korea Strait. *J. Atmos. Ocean Tech.*, **21**(4), 671-682.
 Kim, Y.H. 1999. Physical characteristics of the North Korean Cold Water and currents off Jumunjin. M.S. Thesis, Seoul National University. 90 p.
 Kim, Y.H. 2006. Numerical experiments on the North Korean Cold Current in the East Sea. Ph.D Thesis, Seoul National University. 126 p.
 Kim, Y.H., K.-I. Chang, J. Park, S.K. Park, S.-H. Lee, Y.-G. Kim, K.-T. Jung, and K. Kim. 2007. Comparison between a reanalyzed product by the 3-dimensional variational assimilation technique and observations in the Ulleung Basin of the East/Japan Sea. *J. Marine Syst.* (Submitted).
 Kim, Y.H., Y.-B. Kim, K. Kim, K.-I. Chang, S.J. Lyu, Y.-K. Cho, and W.J. Teague. 2006. Seasonal variation of the Korea Strait Bottom Cold Water and its relation to the bottom current. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L24604. doi: 10.1029/2006GL027625.
 Large, W.G., G. Danabasoglu, S.C. Doney, and J.C. McWilliams. 1997. Sensitivity to surface forcing and boundary layer mixing in a global ocean model :

- Annual-mean climatology. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 2418-2447.
- Large, W.G., J.C. McWilliams, and S.C. Doney. 1994. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, **32**, 363-403.
- Marchesiello, P., J.C. McWilliams, and A. Shchepetkin. 2001. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Model.*, **3**, 1-20.
- Min, H.S., Y.H. Kim, and C.-H. Kim. 2006. Year-to-year variation of cold waters around the Korea Strait. *Ocean Sci. J.*, **41**(4), 227-234.
- Na, Hanna, Y. Isoda, K. Kim, Y.H. Kim, and S.J. Lyu. 2007. Recent observation of hydrography, currents and volume transport in the straits of the East/Japan Sea: A review. *J. Marine Syst.* (Submitted)
- Roberts, M. and D. Marshall. 1998. Do we require adiabatic dissipation schemes in eddy-resolving ocean models? *J. Phys. Oceanogr.*, **28**, 2050-2063.
- Weaver, A. and P. Courtier. 2001. Correlation modeling on the sphere using a generalizing diffusion equation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **127**, 1815-1846.
- Yoon, J.H. and H. Kawamura. 2002. The formation and circulation of the intermediate water in the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, **58**, 197-211.
- Yoshikawa, Y., T. Awaji, and K. Akitomo. 1999. Formation and circulation processes of intermediate water in the Japan Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 1701-1722.
- Yun, J.-Y., L. Magaard, K. Kim, C.-W. Shin, C. Kim, and S.-K. Byun. 2004. Spatial and temporal variability of the North Korean Cold Water leading to the near-bottom cold water intrusion in Korea Strait. *Prog. Oceanogr.*, **60**, 99-131.

Received Jan. 22, 2008

Accepted Jan. 29, 2008