Article

2006~2010년 기간 동안 대한해협 서수도에서 관측된 해수 물성의 변동

민홍식^{1*} · 박재훈¹ · 최아라² · 박영규¹ · 신경순³ · 장풍국³

¹한국해양연구원 기후·연안재해연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787
²과학기술연합대학원대학교 해양환경시스템과학과
(305-350) 대전광역시 유성구 가정로 217
³한국해양연구원 남해분원
(656-830) 경상남도 거제시 장목면 장목1길 41

Observation of Water Property Variations in the Western Channel of the Korea Strait During 2006-2010

Hong Sik Min^{1*}, Jae Hun Park¹, A-Ra Choi², Young-Gyu Park¹, Kyoungsoon Shin³,
and Pung-Guk Jang³

¹Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Marine Environmental System Science, UST
Daejeon 305-350, Korea

³South Sea Branch, KORDI
Geoje 656-830, Korea

Abstract : Seasonal to inter-annual variations of water properties in the western channel of the Korea Strait are investigated using quasi-monthly hydrographic observations collected during 2006-2010. Weak vertical temperature and salinity gradients are observed during the winter months and these remain until May. At the upper layer, temperature increases from March and reaches a maximum in August, while salinity decreases during the same period. Near-bottom water shows low temperatures during late winter and fall with a minimum peak in September. Korea Strait Bottom Cold Water produces thick layers (>20 m) in 2006 and 2010, while it is observed very near the bottom with relatively high temperature in 2008 and 2009.

Key words : Korea Strait, Korea Strait Bottom Cold Water, hydrographic observation, interannual variation, western channel

1. 서 론

동해의 해수 물성의 특징은 극전선을 경계로 확연하게 대비되어 북쪽의 냉수역과 남쪽의 난수역으로 나뉜다. 울

릉분지와 야마토분지가 포함되는 난수역의 해양 환경은 대마난류의 경로와 대마난류수의 분포에 의해 크게 좌우된다. 동중국해로부터 동해로 유입되는 대마난류수의 이동 통로인 대한해협은 대마도를 경계로 동수도와 서수도로 나뉜다. 동수도는 120 m보다 얕음에 비해 서수도의 깊은 골에서는 그 수심이 200 m에 이른다(Fig. 1). 대마난류

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

Fig. 1. Hydrographic station (solid circle) and bottom topography of the Korea Strait. Areas deeper than 140 m are shaded

Fig. 2. Temperature profiles for the period of weak stratification (December~May); a) 2006, b) 2007, c) 2008, d) 2009, e) 2010

수를 수송하는 대마난류는 동수도를 통과하는지 서수도를 통과하는지에 따라 그 경로가 다르다. 동수도를 통과하는 대마난류는 일본의 북서해안을 따라 흐르지만 서수도를 통과하는 대마난류는 대마도 북쪽에서 일부가 동쪽으로 흐르는 것을 제외하면 대부분 울릉분지 쪽으로 흐른다 (Teague et al. 2002의 Fig. 6, Takikawa et al. 2005의 Fig. 2). 따라서 울릉분지의 상층부 해양 환경은 대한해협 서수도를 통과하여 유입되는 대마난류수의 분포에 의해 좌우된다.

대마난류의 지류인 동한난류는 울릉분지에 대마난류수를 공급하는 주된 해류로서 그 형성이 대한해협 서수도에 나타나는 냉수의 구조에 의해 지배를 받는 것으로 보고되었다 (Isobe 1997; Cho and Kim 2000). 대한해협 서수도에서 따뜻한 대마난류수 아래에 존재하는 이 대한해협저층냉수는 여러 연구의 관심 주제였다 (Lim and Chang 1969; Cho and Kim 1998; Johnson and Teague 2002; Na et al. 2010). 대한해협저층냉수는 여름에 가장 많이 확장되고 그 수온도 여름에 가장 낮다는 보고 (Lim and Chang 1969)가 있는 반면 Johnson and Teague (2002)는 1999년 5월~2000년 3월 동안 관측된 바닥수온 자료에서 대한해협저층냉수가 여름에 가장 발달하고 겨울에 약한 연변화는 보이지 않았고 대신 5월~6월과 12월~1월에 대한해협저층냉수의 지속적인 관입이 있었다고 보고했다. 그러나 Johnson and Teague (2002)의 주장은 1년도 되지 않는 짧은 기간의 관측을 토대로 한 것으로 여러 해 동안 관측한 결과에서 보이는 평균적인 대한해협저층냉수의 변동과는 거리가 있다. 대다수의 대한해협저층냉수에 대한 연구가 격월로 관측된 자료를 바탕으로 한 것에 비해 Min et al. (2006)은 1982년~1992년의 11년 동안 해저케이בל로 매월 관측된 바닥수온을 분석하여 서수도의 바닥수온이 평균적으로 4월 무렵에 하강하기 시작하여 9월 무렵에 최소가 됨을 밝혔다. Min et al. (2006)은 4월~9월 동안 보이는 바닥수온의 하강 외에 11월경에 보이는 하강을 근거로 대한해협저층냉수가 여름에만 발달하지 않고 겨울에도 다시 발달한다고 주장하였다. Kim et al. (2006)은 대한해협저층냉수의 계절변화를 대한해협에서 보이는 해류의 순압 성분과 경압 성분의 변화와 연관지었다. 즉 대한해협저층냉수가 여름에 발달하는 것은 남서향 경압 성분이 여름에 최대인 점과 관련이 있는 것으로 해석하였고 성층이 약한 겨울에 대한해협저층냉수가 다시 발달하는 것은 대마난류의 수송량이 최소인 점과 관련된 순압적 반응으로 해석하였다.

이제까지의 대한해협저층냉수에 대한 연구는 월변화를 분석하기에 부족한 격월로 수행된 정선 관측자료를 이용한 연구가 대부분이었다. 이에 비해 Min et al. (2006)이나 Johnson and Teague (2002)가 이용한 바닥수온 자료는 시

간 간격이 조밀하여 대한해협저층냉수의 수온의 시간 변화를 세밀하게 분석하는 데 이용될 수 있지만 대한해협저층냉수의 두께 등 구조에 대한 정보를 제공하지 못한다. 이 연구에서는 2006년부터 2010년까지 격월 간격보다 시간적으로 조밀하게 관측한 자료를 분석하여 대한해협저층냉수의 시간적 변화와 수직 구조를 조사하였다. 그리고 울릉분지 상층의 해수 물성과 깊은 연관이 있는 대한해협 서수도로 유입되는 대마난류수의 물성도 조사하였다.

2. 결 과

이 연구에서는 대한해협 서수도의 깊은 골의 서쪽 사면에 해당하는 위치 (Fig. 1의 ●)에서 2006년 3월부터 2010년 11월까지 5년 동안 CTD (SBE 911plus)를 이용하여 관측한 해수 물성 자료를 이용하였다. 관측점의 수심은 약 110 m이며 CTD를 100 m보다 깊게 내려 CTD와 바닥과의 거리가 10 m 이하가 되도록 바닥 가까이까지 관측하였다. 관측 간격은 격월보다 조밀하도록 한 달에 1회 이상 관측하였으나 2006년 12월, 2008년 2월과 11월~12월, 2009년 2월~3월과 7월, 2010년 5월과 8월에는 관측을 하지 못하였다. 관측된 자료는 CTD 후처리과정 (Kim et al. 2000; 최 등 2010)을 거쳤으나 2008년 1월 관측 자료는 CTD 이상으로 인해 후처리과정을 통해서도 자료의 질이 개선되지 않아 분석에서 제외하였다.

12월~5월의 수온·염분 구조

대부분 해에서 5월까지의 표층부터 바닥까지 수온의 차이가 크지 않았고 염분도 표층에 저염수가 나타나는 여름에 비해서 연직 차이가 크지 않았다 (Fig. 2, Fig. 3). 12월 관측은 2007년에 2회 (6일, 20일), 2009년에 1회 (22일) 수행되었다. 2007년 12월 6일 관측에서는 표층부터 약 55 m까지 수온과 염분이 일정한 구조가 보였고 75 m 아래에서 다시 수온과 염분이 일정한 구조가 보였다. 2007년 12월 20일에는 수온과 염분이 일정한 층이 14일 전인 6일보다 깊게 표층부터 약 95 m까지 나타났으며 그 수온은 16.8°C로 1°C 정도 낮았다. 또한 6일 관측에서는 보이지 않았던 구조인 바닥 근처 95 m 아래에서 바닥까지 수온이 낮아지고 염분이 증가하는 구조가 보였다. 2009년 12월 22일에는 표층부터 50 m까지 수온이 약 17.7°C, 염분이 34.4인 매우 균일한 해수가 존재하였고 그 아래로 수심이 증가할수록 수온과 염분이 감소하는 구조가 나타났다.

1월에 관측이 수행된 2007년, 2009년, 2010년에 표층의 수온은 16°C 이하이고 바닥수온은 12°C 이상으로 연직 수온 차이가 4°C 이하였다. 위 3년 중에는 2007년 1월의 표층 수온이 15°C 이하로 가장 낮았다. 특히, 2007년 1월

Fig. 3. Salinity profiles for the period of weak stratification (December~May); a) 2006, b) 2007, c) 2008, d) 2009, e) 2010

에는 관측이 2회(10일, 18일) 수행되었는데 1월 10일에는 수온이 표층부터 약 60 m까지 14.7°C로 거의 일정하고 그 아래에서는 깊어질수록 약간 감소하는 구조가 보였다. 1월 18일의 수온은 표층부터 60 m까지는 1월 10일(8일 전)의 수온과 거의 동일하지만 60 m 아래에서는 수온이 더 감소하여 바닥에서 약 12°C였다. 염분은 표층에서 60 m까지는 약 34.1로 1월 10일과 18일에 거의 같았으나 1월 10일에는 60 m 아래의 염분이 상층보다 약간 낮은 반면 1월 18일에는 60 m 부근을 경계로 하층의 염분이 34 이하로 상층과 하층의 차이가 더 뚜렷해졌다. 1월 10일과 18일의 수온과 염분이 60 m 위에서는 같지만 60 m 아래에서는 다르고, 1월 18일의 수온과 염분 구조가 60 m를 경계로 2층 구조인 점으로 미루어 60 m 아래의 해수가 염분이 낮고 수온이 낮은 해수로 바뀐 것으로 판단된다.

2007년 1월 18일에 나타난 상층과 하층의 뚜렷한 2층 구조(수온과 염분이 높은 상층과 수온과 염분이 낮은 하층)는 2008년 3월에도 나타난다. 2008년 3월에는 70 m를 경계로 두 층으로 나뉘며 상층의 수온은 하층보다 1°C 이

상 높고 염분은 0.1 정도 높다. 관측된 3월 수온 중에서는 2006년의 수온이 가장 낮고 2007년의 수온이 가장 높는데 2006년 3월 8일의 수온이 2007년 3월 13일의 수온에 비해 상층에서는 1.5°C 정도 낮고 하층에서는 1.5°C 이상 낮다. 그렇지만 2006년 3월 17일의 수온 구조는 바닥 근처의 수온은 3월 8일의 수온과 거의 비슷하지만 표층에서 약 20 m까지 1°C 이상 높고 65 m에서 약 95 m까지는 0.5°C 정도 높아 9일만에 상층 수온이 1°C 이상 변했다. 따라서 이 관측 자료만으로 해에 따른 3월의 상층 수온의 높고 낮음을 논하기는 어렵다.

2006년 4월에는 3회(6일, 17일, 27일) 관측이 있었다. 4월 6일에는 깊이가 40 m보다 깊고 수온이 15°C보다 낮은 표면혼합층이 관측되었는데 4월 17일에는 표면혼합층의 깊이가 25 m 정도로 4월 6일에 비해 얇고 수온도 0.5°C 이상 높았으며 4월 27일에는 표면혼합층이 더 얇아 그 깊이가 20 m 정도였으나 수온은 4월 17일에 비해 낮았다. 그 반대로 50 m보다 깊은 수심에서 수온은 4월 6일에 가장 높았고 4월 17일에 낮아졌다가 4월 27일에 다시

높아졌다. 연직 수온 구배는 4월 17일에 가장 컸다. 한편 염분은 4월 6일에 가장 높았고 4월 17일에 가장 낮았다.

2006년 4월 6일에 관측된 것처럼 표면혼합층이 40 m보다 깊은 구조는 2007년 4월 6일과 2008년 4월 28일, 2010년 4월 30일 관측에도 나타났다. 2008년 4월 28일의 표면혼합층 수온은 2006년 4월 6일의 수온과 비슷하지만 2007년 4월 6일과 2010년 4월 30일의 수온은 14°C 이하로 1°C 정도 더 낮았다. 시기적으로 20일 이상 차이가 남에도 2006년 4월 6일과 2008년 4월 28일, 2007년 4월 6일과 2010년 4월 30일의 표면혼합층의 수온이 비슷하고 오히려 더 늦게 관측된 2010년 4월 30일의 수온이 2006년 4월 6일의 수온보다 1°C 정도 낮은 것은 유의할 만하다. 대부분 70 m(2006년 4월 6일에는 85 m)부터 바닥까지 수온이 일정한 층이 관측되었으며 그 층의 수온은 2006년 4월 17일에 11°C 정도로 가장 낮았고 2008년 4월 28일에 13°C 이상으로 가장 높았다. 염분은 전 층에서 34 이상이었으며 2006년과 2008년이 2007년, 2009년, 2010년에 비해 전 층에서 높았다.

해에 따른 5월의 표층 수온은 그 차이가 1°C 이하로 작은 데 비해 저층에서의 수온은 2°C 이상 차이가 나기도 한다. 2009년 5월에는 수온과 염분의 구조에서 특이한 형태가 보인다. 즉, 60 m부터 수심이 깊어지면서 수온과 염분이 계단 형태로 같이 감소하는 모습이 보이다가 바닥 근처에서 수온과 염분이 증가하는 형태가 보인다. 이러한 구조는 저층에서 활발한 해수의 유동이 있음을 암시한다.

6월~11월의 수온 · 염분 구조

표층부터 저층까지 수온 차이와 염분 차이가 크지 않는 겨울에 비해 여름에는 상층에 고온저염의 해수가 존재하여 수온과 염분의 연직 구배가 컸다(Fig. 4, Fig. 5). 즉, 여름으로 가면서 상층의 수온은 올라가고 염분은 낮아졌다. 6월의 상층 수온은 2006년 6월 20일에 관측된 수온이 가장 낮았고 염분도 표층에서 33 이하인 2006년에 가장 낮았다. 수온이 높고 염분이 낮은 상층 아래 약 50 m부터 90 m까지의 중층에서는 연직으로 수온과 염분이 상대적

Fig. 4. Temperature profiles for the period of strong stratification (June~November); a) 2006, b) 2007, c) 2008, d) 2009, e) 2010

Fig. 5. Salinity profiles for the period of strong stratification (June~November); a) 2006, b) 2007, c) 2008, d) 2009, e) 2010

으로 일정한 구조가 모든 해에 있었다. 이 층의 해에 따른 수온 차이는 1.5°C 보다 작았고 염분 차이는 가장 작은 2009년과 가장 높은 2008년이 약 0.4 정도였다. 90 m 수심 아래 저층의 수온과 염분은 2006년과 2008년에는 90 m 수심 위 중층의 수온이나 염분과 유사함에 비해 2007년, 2009년, 2010년에는 바닥 근처에서 수온이 급격하게 감소하는 구조가 있었다.

7월, 8월에는 6월보다 상층의 수온이 더 올라가고 염분은 낮아져 성층화가 심해졌다. 8월 관측이 결여된 2010년을 제외하면 모든 해에 표층 수온은 8월이 1년 중에 가장 높았다. 8월 다음으로는 9월에 표층 수온이 높았으며 10월은 9월보다 낮았다.

2006년 8월 29일과 9월 4일에 95~100 m 부근에서 수심이 증가할수록 수온이 5°C 이상 급격하게 감소하여 바닥 근처에서 수온이 9°C 이하였다. 2006년 9월 28일에는 수온이 약 11.5°C 로 8월말~9월초보다 수온이 높은 대한해협저층냉수가 90 m부터 바닥까지 존재했으며 10월 10일에는 8월말~9월초보다는 높지만 9월말보다는 낮은 9.5°C

정도의 수온을 보이는 대한해협저층냉수가 85 m부터 바닥까지 존재하여 두께가 가장 두꺼웠다. 10월 10일에는 염분도 34 이하로 낮아 관측 기간 동안 여름에 관측된 대한해협저층냉수의 염분 중에 가장 낮았다. 한편 10월 10일에는 표층의 저염수 밑에 수온이 15°C 정도이고 염분이 34.5 정도인 대마난류중층수가 관측되지 않았고 대신 60 m 부근의 저염수 밑 70~80 m 부근에 염분이 33.2인 해수가 관측되어 수온-염분 관계가 대한해협에서 일반적으로 관측되는 수온-염분 관계에서 벗어나는 형태를 보였다 (Fig. 6).

2006년 7월 7일에는 바닥 근처에서 중층보다 1.5°C 정도 낮은 수온이 관측되었으나 6월 20일과 7월 24일에는 관측되지 않았다. 이와 유사하게 2007년 7월 26일에는 95 m보다 깊은 수심에서 중층보다 2°C 정도 낮은 수온이 관측되었으나 8월 16일에는 관측되지 않았고 8월 26일에 다시 관측되었다. Johnson and Teague (2002)는 1999년 8월~10월 기간 동안 바닥수온이 짧은 주기로 변하는 것을 관측하였으며 그 이유로 냉수의 경계에서는 수온의 수평

Fig. 6. Relationship between temperature and salinity for the period of strong stratification (June–November); a) 2006, b) 2007, c) 2008, d) 2009, e) 2010

구배가 매우 크고 이 수평 구배를 조류나 짧은 주기의 해류 변화가 관측 기기를 가로질러 이동하기 때문이라고 추정하였다. 이러한 경계의 이동에 의해 수온이 짧은 기간 안에 변하는 것처럼 2006년 6월~7월과 2007년 7월~8월에 중층보다 낮은 수온이 바닥 근처에서 관측되거나 관측되지 않거나 한 이유는 용승 등에 의해 상대적으로 낮은 수온의 해수가 관측점의 바닥 근처에서 유동하기 때문인 것으로 판단된다.

2007년 9월~10월에 바닥 근처의 수온은 7월~8월보다 4°C 이상 낮은 9°C 이하였다. 7월~8월에는 저층의 염분은 중층과 거의 비슷하였지만 9월~10월에는 수온이 낮아지는 수심에서 염분도 같이 낮아져 저층의 염분이 중층보다 낮았다. 9월~10월에 관측된 바닥 근처의 냉수는 뚜렷하게 낮은 수온과 중층과의 염분 차이로 보아 대한해협저층냉수라고 판단된다. 11월에도 바닥 근처에서 수온이 감소하는 구조가 보이지만 수온은 10월에 비해 높아 13°C 이상이었다. 한편 2007년 10월에는 20°C 이상 되는 수온 범위에서 수심에 따라 수온이 감소하지 않고 오히려 증가하는 수온 역전 구조가 여러 번 보인다. 수온-염분 관계도(Fig. 6)에서 보이는 바와 같이 수온이 증가할 때 염분도 같이 증가하여 수온 역전에 의해 밀도 역전은 일어나지 않았다. 비교적 단순한 수온-염분 구조를 보이는 대마난류중층수와 달리 대마난류중층수 위의 상층에서 보이는 이러한 복잡한 수온-염분 구조는 상층에서 물성이 다른 여러 해

수가 섞이고 있음을 추정케 한다. 이러한 구조(수심에 따라 수온과 염분이 같이 증가했다가 같이 감소하는 형태를 반복하는 구조)는 2007년보다 2006년에 더 오랫동안 관측되었는데 2006년에는 8월~11월 관측에서 이러한 구조가 보였다.

2008년 6월부터 9월초까지 표층의 고온저염수 아래에 대마난류중층수가 약 50 m부터 거의 바닥까지 차지했으며 대한해협저층냉수가 관측되지 않았다. 9월 23일에 비로소 대마난류중층수 아래 바닥 근처에 수온이 12°C 이하인 해수가 관측되었다. 10월 6일에는 대마난류중층수 아래 저층수의 수온이 9월보다 1°C 정도 높고 두께도 얇게 관측되었다.

2009년에는 6월에 대마난류중층수 아래 바닥 근처에서 대마난류중층수의 수온보다 낮은 수온이 관측되긴 하였으나 12°C 이상으로 수온이 비교적 높았다. 8월, 9월에는 대마난류중층수가 바닥까지 차지하고 있어 저층의 냉수가 관측되지 않았다. 10월에 95 m 부근부터 수온이 감소하여 바닥에서 11°C 정도의 수온이 관측되었으며 11월에는 10월보다 10 m 정도 얇은 85 m 부근에서 수온이 감소하였다.

2010년에는 6월에 대마난류중층수 아래 수온이 감소하는 구조가 보인 이후 계속해서 저층의 냉수가 관측되었다. 7월에는 다른 해의 7월에 관측되지 않은 낮은 수온인 10°C 정도의 냉수가 95 m 정도까지 존재하는 것이 관측

되었다. 9월에는 7월보다 더 낮은 수온인 8°C 정도의 수온을 갖는 대한해협저층냉수가 90 m 아래에 존재하는 것이 관측되었다. 10월과 11월에는 바닥 근처에서 수온이 일정한 층이 관측되었으나 그 수온은 9월에 비해 높았고 두께도 얇았다.

Fig. 7. Temperature as a function of depth and time; a) 2006, b) 2007, c) 2008, d) 2009, e) 2010. The time period between two consecutive observations longer than 60 days is blanked

수온-염분의 시간 변화

수온과 염분의 시간에 따른 변화를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 표층부터 110 m까지 수심에 따른 수온과 염분의 변화를 표시하였으며 CTD 관측 수심이 110 m보다 얇은 경우는 가장 깊은 관측 수심까지만 표시하였다. 또한

Fig. 8. Salinity as a function of depth and time; a) 2006, b) 2007, c) 2008, d) 2009, e) 2010. The time period between two consecutive observations longer than 60 days is blanked

연속된 두 관측이 60일 이상 차이가 나는 기간은 도시하지 않았다. 17°C 이상이 되는 수온은 5월 이전에는 보이지 않고 6월 이후에 나타났다. 표층 수온은 3월 이후에 꾸준히 증가하여 8월에 최대를 보였다. 표층 수온이 올라갈 때 표층 염분도 낮아져 5월 이후에는 표층 염분이 34 이하로 되며 8~9월에 최소였다.

20°C 등온선의 수심은 대부분 10월까지 깊어져 수온이 20°C 이상인 해수가 차지하는 부분이 10월까지 커짐을 알 수 있다. 앞에서 언급한 복잡한 구조가 나타난 2007년 10월을 제외하면 수온이 20°C 이상인 해수의 염분은 34 이하였다. 즉, 상층에 수온이 높고 염분이 낮은 표층수가 10월까지 증가했다. 10월 이후에 관측이 실시된 2007년, 2009년, 2010년에서 10월 이후에는 상층의 수온이 감소하고 염분이 증가하는 양상이 나타났으며 12월에는 고온저염의 표층수가 사라졌다.

여름에 보이는 대한해협저층냉수의 발달은 해에 따라 차이가 컸다. 2008년과 2009년에는 냉수가 바닥 가까이에서 서만 보였고 그 수온도 높았으나 2006년, 2007년, 2010년에는 10°C 이하인 냉수도 관측되었으며 특히 2006년 10월과 2010년 9월에는 냉수의 두께가 20 m 이상이였다. 2009년 9월에 대한해협저층냉수가 관측되지 않은 점을 제외하면 대한해협저층냉수는 8월~10월에 수온이 가장 낮았다. 이는 Min et al. (2006)이 대한해협 서수도에서 바닥 수온이 9월에 가장 낮다고 보고한 것과 일치한다. 대마난류중층수가 관측되지 않았던 2006년 10월 10일을 제외하면 여름철 대한해협저층냉수는 대마난류중층수 아래에 존재하였고 염분이 대마난류중층수보다 낮았다. 대체적으로 대한해협저층냉수의 염분은 냉수의 수온이 낮을수록 더 낮았다. 이는 대한해협저층냉수가 상대적으로 염분이 낮은 해수임을 의미한다.

대한해협저층냉수에 대한 이전 연구에서는 주로 격월로 수행된 정선 관측 자료를 이용하였다. 이 연구에서처럼 매월 관측한 자료를 이용한 경우와 격월로 관측한 자료를 이용한 경우를 비교하기 위하여 격월 관측 수온의 시간 변화를 조사하였다(Fig. 9). 조사에 사용된 자료는 한국해양자료센터(KODC)에서 제공하는 국립수산물과학원의 207 관측선의 3번 정점의 수온이다. 207 관측선의 3번 정점은 관측점과 수심이 비슷하고 관측점에서 북동쪽으로 약 20 km 떨어진 곳이다. 표층의 대마난류표층수의 수온이 8월에 최대인 점은 격월 관측 자료에도 나오지만 9~10월 경에 대마난류표층수 하부의 수심이 깊은 형태가 2006년과 2008년에는 비슷하게 보이지만 2010년에는 파악되지 않는다. 대한해협저층냉수 부분에서는 여름에 저층에서 수온이 낮은 형태가 일부 보이긴 하지만 대한해협저층냉수의 수온과 발달 시기가 제대로 표현되지 않는다. 즉, 대한해협저층냉수의 수온은 9월에 가장 낮는데 8월과 10월

Fig. 9. Temperature as a function of depth and time based on KODC data; a) 2006, b) 2007, c) 2008, d) 2009, e) 2010

에 관측이 이루어지기 때문에 9월의 발달 형태가 파악되지 않는다.

관측과 모형 비교

관측점의 위치가 서수도 깊은 골의 서쪽 사면에 해당하여 깊은 골의 해황과 약간 차이가 있겠지만 깊은 골에서

대한해협저층냉수가 발달할수록 관측점의 저층에 발달된 냉수가 관측될 것으로 예상된다. 대한해협을 가로질러 부산-하마다 간 해저에 매설된 해저케이블에서 관측된 바닥 수온의 변화에서 서수도 깊은 골 근처 관측점들의 바닥수온의 변화 양상이 비슷함은 이를 뒷받침한다(Min et al. 2006).

여름철 대한해협저층냉수는 그 낮은 수온으로 인해 동중국해에서 유입된 해수가 아니라 동해 내부에 그 기원을 둔 해수로 생각되어 왔다(Yun et al. 2004). Chang (2004)은 1993년 5월부터 1995년 5월까지 서수도의 깊은 골에서 수행한 해류 관측에서 1994년 2월과 3월을 제외한 거의 모든 시기에 거의 항시적으로 남향하는 바닥해류가 있음을 보고하였다. Camellia호에 장착된 ADCP를 이용하여 관측한 해류를 보고한 Takikawa (2005)에서는 1997년 2월~2002년 8월 기간 동안 월평균 해류 분포에서 2월~4월을 제외한 다른 달에 수심 150 m보다 깊은 수심에서 해류가 남향임이 보인다.

서수도의 깊은 골에서 남향류가 강할수록 대한해협저층냉수가 잘 발달하고 관측점의 저층에서도 대한해협저층냉수의 발달된 형태가 파악될 것으로 유추된다. 이를 확인하기 위해서 관측에 나타난 대한해협저층냉수의 변화와 해류를 비교하는 것이 필요하다. 정확한 비교를 위해서는 2006년~2010년 동안 대한해협 서수도에서 직접 관측한 해류를 이용하여야겠지만 이 연구에서는 자료동화모형 결과와 비교하였다.

이 연구에 사용된 자료동화모형 자료는 자료동화모형 컨소시엄(Consortium for Data Assimilative Modeling)이 제공한 일일 간격 HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model, Chassignet et al. 2007) 결과이다. 자료동화에 사용된 해양 관측 자료는 위성에서 관측된 해수면 수온 및 해면 고도, Argo profiling float에 의해 관측된 연직 수온과 염분, 그리고 정선 관측 자료 등이다(www.hycom.org 참조).

관측점에 인접한 격자점(동경 129.36도, 북위 34.90도)에서의 수온, 염분과 대한해협을 통과하는 해류 성분을 Fig. 10에 도시하였다. 겨울에 표층부터 바닥까지 수온이 거의 일정한 형태는 관측에서 나타난 형태와 유사하고 여름에 표층에 보이는 고온의 해수가 다른 해에 비해 2006년과 2007년에 더 깊은 수심까지 존재하는 점도 관측과 유사하다. 2006년과 2007년 여름에 대한해협저층냉수가 나타나고 2007년에 비해 2006년에 더 발달된 형태도 관측과 유사하게 모의되었다. 그러나 관측에서는 2008년에 비해 2010년에 대한해협저층냉수의 수온이 낮았으나 모형에서는 2010년 여름의 대한해협저층냉수가 제대로 모의되지 않았다. 대한해협 서수도의 지형이 복잡하여 모형의 격자 설정이 지형을 얼마나 잘 반영하는가에 따라 대

Fig. 10. Temperature (a), salinity (b), and along-strait current (c) as a function of depth and time from the ocean reanalysis of the HYCOM

한해협저층냉수의 모의 정도가 차이가 난다. 격자점의 위치와 수심이 관측점과 다름에도 모형이 어느 정도 대한해협저층냉수의 발달을 모의했다고 판단된다.

2006년과 2007년 여름에 저층에서 수온이 낮은 시기에 저층의 염분도 낮게 모의되었으며 해류는 남향으로 모의된 반면, 저층에 냉수가 모의되지 않은 2009년과 2010년에는 염분이 낮은 형태도 보이지 않고 남향하는 해류도 모의되지 않았다. 이는 모형에서 모의된 여름에 대한해협 서수도의 저층에 나타나는 냉수는 염분이 낮은 해수이고 남향류와 밀접하게 연관되어 있음을 의미한다. 모형에서 모의된 이런 연관성을 고려하면 대한해협저층냉수의 수온이 상대적으로 낮고 두께도 두꺼웠던 2006년과 2010년 여름에 대한해협 서수도의 저층에서 강한 남향류가 존재했을 것으로 판단된다.

3. 요약 및 토의

울릉분지의 해양 환경에 영향을 줌에도 불구하고 대한해협 서수도를 통해 유입되는 해수의 물성에 대한 연구는 울릉분지의 물성 분포와 변화에 대한 연구에 비해 부족한

편이었다. 또한 대마난류의 분지에 영향을 줘 울릉분지의 해양환경에 미치는 영향이 큰 대한해협저층냉수에 대한 연구는 주로 격월로 관측된 자료를 바탕으로 이루어졌다. 이 연구에서는 2006년부터 2010년까지 5년 동안 매월 관측한 자료를 이용하여 대한해협 서수도의 물성 변화에 대해 조사하여 대한해협을 통과하는 해수 물성의 변화와 대한해협저층냉수의 변화를 분석하였다.

관측 기간 동안 17°C 이상의 수온이 관측된 시기는 6월 이후로, 5월까지의 표층부터 바닥까지 수온의 변화가 크지 않았다. 상층의 수온은 3월 이후 증가하여 8월에 최대였으며 상층의 수온이 올라갈 때 염분은 낮아져 8~9월에 염분이 최소였다. 수온이 높고 염분이 낮은 대마난류표층수의 양은 10월에 가장 많았다.

바닥 근처의 수온은 해에 따라 차이가 크고 짧은 기간 동안 변동이 있지만 대체로 3월 이후 높아지고 9월경에 최소였다. 여름에 가장 잘 발달하는 대한해협저층냉수의 수온과 두께도 해에 따라 차이가 커 2008년과 2009년에는 대한해협저층냉수가 바닥 가까이에서만 관측되었고 그 수온도 높았으나 2006년과 2010년에는 대한해협저층냉수가 바닥에서 20 m 이상까지 존재함이 관측되었고 그 수온도 낮았다.

수온과 염분의 연직 구조 비교에서 알 수 있듯이 대한해협 서수도를 통해 동해로 유입되는 대마난류수의 물성은 한 달 이내의 짧은 간격에도 변화가 있다. 또한 2007년 10월 관측 자료에서 수온과 염분이 복잡한 연직 구조를 보이듯이 여러 해수가 섞여서 동해로 유입되는 형태를 띠기도 하고 2006년 10월에서처럼 대마난류중층수가 존재하는 수온 범위에서 낮은 염분이 관측되기도 하였다. 이러한 미세한 구조는 한국해양자료센터가 제공하는 표준 수심의 물성 자료로는 파악되지 않는다.

한편, 대한해협저층냉수는 기존의 바닥수온 관측으로 보고된 것처럼 9월경에 가장 발달하고 수온도 가장 낮은 것으로 관측되었다. 그렇지만 격월 관측에는 대한해협저층냉수가 가장 발달하는 9월이 포함되지 않기 때문에 격월 관측 자료로는 대한해협저층냉수의 발달을 정확하게 파악하기가 어렵다. 대한해협저층냉수는 2006년 8월~9월처럼(Fig. 4) 바닥 근처까지 관측해야 그 존재 여부를 확인할 수 있는 경우가 있다. 따라서 대한해협에서 조사를 수행할 때 대한해협저층냉수의 존재를 파악하기 위해서는 최대한 바닥 가까이까지 관측을 해야 하며 그 변동성을 정확히 파악하기 위해서는 관측 간격이 한 달 이내여야 한다.

대한해협서수도의 골에 해당하는 지점의 자료동화모형 결과에서 여름철 대한해협저층냉수가 발달한 시기에 남향류가 강한 것으로 나타났다. 비록 대한해협저층냉수가 발달한 시기가 관측과 다르지만, 이는 남향류가 강할 때 대

한해협저층냉수가 발달함을 의미한다. 따라서 2006년~2010년 동안 관측에서 보이는 대한해협저층냉수의 발달이 해에 따라 다른 대한해협에서 남향하는 해류의 세기가 해에 따라 다르기 때문으로 추정할 수 있다. 그렇지만 관측점이 서수도의 깊은 골에 해당하지 않고 서쪽 경계에 해당하기 때문에 관측점으로 직접 냉수가 남향하지 않아도 깊은 골의 대한해협저층냉수가 용승 등에 의해 관측점으로 확장되어 관측점에서 대한해협저층냉수가 존재할 수 있다. 즉, 대한해협저층냉수의 두께, 용승, 남향하는 해류의 차이 등에 의해 관측점에서 대한해협저층냉수의 발달 정도가 결정될 수 있다. 그러므로 정확한 대한해협저층냉수의 발달 과정과 이동, 기작에 대한 이해를 위해서는 물성 관측과 더불어 직접 관측한 해류와 더욱 정확한 자료 동화모형의 결과 등을 이용한 조사가 요구된다.

사 사

현장 조사에 많은 도움을 주신 연구선 “장목호” 승무원께 감사드립니다. 이 연구는 “기후변화가 남해권역 해양 생태계에 미치는 영향 및 기능평가 기술개발(PM56600)”, “유출 CO₂의 거동 모사 및 모니터링 표준화 구축(PMS227D)”과 “북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구(PE98563)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 최아라, 박영규, 민홍식, 김경홍 (2009) 후처리과정을 통한 CTD 관측 자료 품질 개선에 대하여. *Ocean and Polar Res* **31**(4):339-347
- Chassignet EP, Hurlburt HE, Smedstad OM, Halliwell GR, Hogan PJ, Wallcraft AJ, Bleck J (2007) The HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *J Mar Syst* **65**:60-83
- Cho Y-K, Kim K (1998) Structure of the Korea Strait Bottom Cold Water and its seasonal variation in 1991. *Cont Shelf Res* **18**:791-804
- Cho Y-K, Kim K (2000) Branching mechanism of the Tsushima Current in the Korea Strait. *J Phys Oceanogr* **30**:2788-2797
- Isobe A (1997) The determinant of the volume transport distribution of the Tsushima Warm Current around the Tsushima/Korea Straits. *Cont Shelf Res* **17**:319-336
- Johnson DR, Teague WJ (2002) Observations of the Korea Strait Bottom Cold Water. *Cont Shelf Res* **22**:821-831
- Kim Y-G, Kim K, Cho Y-K, Ossi H (2000) CTD data processing for CREAMS expeditions: Thermal-lag correction of sea-bird CTD. *J Korean Soc Oceanogr* **35**(4):192-199

- Kim YH, Kim Y-B, Kim K, Chang K-I, Lyu SJ, Cho Y-K, Teague WJ (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
- Lim DB, Chang D (1969) On the cold water mass in the Korea Strait. *J Oceanol Soc Korea* **4**:71-82
- Min HS, Kim YH, Kim C-H (2006) Year-to-year variation of cold waters around the Korea Strait. *Ocean Sci J* **41**(4):227-234
- Na H, Kim K-Y, Chang K-I, Kim K, Yun J-Y, Minobe S (2010) Interannual variability of the Korea Strait Bottom Cold Water and its relationship with the upper water temperatures and atmospheric forcing in the Sea of Japan (East Sea). *J Geophys Res* **115**:C09031. doi:10.1029/2010JC006347
- Takikawa T, Yoon JH, Cho KD (2005) The Tsushima Warm Current through Tsushima Straits estimated from ferryboat ADCP data. *J Phys Oceanogr* **35**:1154-1168
- Teague WJ, Jacobs GA, Perkins HT, Book JW, Chang K-I, Suk M-S (2002) Low frequency current observations in the Korea Strait. *J Phys Oceanogr* **32**:1621-1641
- Yun J-Y, Magaard M, Kim K, Shin C-W, Kim C, Byun S-K (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 Jul. 25, 2011

Revised Aug. 10, 2011

Accepted Aug. 23, 2011