

하계 인공용승구조물 주변해역의 물리환경변화

서호산* · 김동선**†

* 부경대학교 해양산업공학(협), ** 부경대학교 생태공학과

Variation of Physical Environment near the Artificial Upwelling Structure during the Summer

Ho-San Seo* · Dong-Sun Kim**†

* Interdisciplinary Program of Ocean Industrial Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

** Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약 : 인공용승구조물 설치 전·후 주변해역의 하계 물리환경특성을 조사하였다. 구조물 설치 전(2002년)의 수온구조는 수심 30m에 강한 성층이 형성되었다. 한편 구조물 설치 3~4년 후(2012, 2013년)의 수온구조는 조류방향에 따라 구조물에 의한 성층의 형성수심 및 세기가 변화하였다. 이와 같은 현상은 구조물에 의한 연직류의 효과로 하계 강한 성층에 의해 저층에 분포하는 저수온수가 상승류에 의해 부상하여 성층분포에 영향을 미친 것으로 판단한다. 또한 구조물 설치 이후 연직류의 분포를 보면, 구조물 중심으로 국지적인 상승류 및 하강류가 혼재하여 나타났다. 즉 연직류는 조류방향에 따라 시·공간적인 변화를 보이면서 흐름이 진행되는 방향의 구조물 후면 부에서 형성하는 상승류에 의해 성층이 약화되는 현상을 볼 수 있다. 또한 구조물에 의해 발생하는 연직류는 보다 넓은 해역으로 확장하여 발생한다. 본 연구해역에 설치한 인공용승구조물에 의해 발생하는 국지적인 용승은 한국 남동해안에 나타나는 연안 용승에 비해 유량이 100배 이상 크게 나타났다. 이와 같이 구조물에 의해 발생하는 상승류는 하계 저층에 존재하는 고농도의 영양염을 표층으로 상승시켜 주변해역의 기초생산량을 증가 시키는 역할을 가능하게 한다.

핵심용어 : 인공용승구조물, 성층, 국지적인 상승류, 국지적인 하강류, 영양염

Abstract : In order to study the characteristics of physical environment in water column around the artificial upwelling structure, CTD and currents measurements were carried out along line observations. Before installation of artificial upwelling structure was installed, the stratification of water column existed 30m in water depth. After installation of artificial upwelling structure, however, stratification formation depth and strength changed depending on currents directions. It seems that the change of stratification has a close relation with upwelling of lower temperature water. After installing the artificial upwelling structure, the distributions of vertical flows were analyzed. Local upwelling and downwelling flows showed a distinct time and spacial changes. Local upwelling flows caused by artificial upwelling structure appeared 100 times larger than coastal upwelling in the South-East Sea of Korea. Upwelling flows generated by the artificial structure raised the high concentration of nutrients to upper layer from lower layer breaking stratification in the summer. Thus, upwelling structure plays an important role for vertical water circulation improving the food environments by increasing primary production.

Key Words : Artificial upwelling structure, Stratification, Local upwelling flow, Local downwelling flow, Nutrient

1. 서 론

한국의 수산물 수출은 2005년(271만ton) 기준 9천만 \$로 23 위, 수입은 1억\$로 세계 10위를 보여 수산선진국으로써의 면

모를 확고히 함과 아울러 중요한 식량자원으로써 국가 경제 발전에도 크게 기여했다. 그러나 2009년 어업생산량은 284만 ton으로 감소했다(FAO, 2009). 어업생산량 감소현상의 주 원인은 UN해양법의 발효와 더불어 연안국들이 200해리 경제 수역을 선포함으로써 원양어선의 조업어장이 줄어들었다. 또한 근해어업도 일본, 중국 등의 배타적 경제수역 선포, 조업규제강화로 어장이 축소되고 있어 연안해역의 중요성

* First Author : sasa9668@nate.com, 051-629-7071

† Corresponding Author : kimds@pknu.ac.kr, 051-629-7071

이 크게 부각되고 있다. 따라서 이러한 국내의 어업여건의 변화에 능동적으로 대처하고, 연안어업을 경쟁력 있는 산업으로 육성하기 위해서는 수산자원환경조성의 중요성이 크게 요구되고 있다.

용승현상에 의한 용승어장은 그 면적이 세계 어장 면적의 1%에 불과하지만, 어류의 생산량은 총생산량의 50%에 도달한다(Ryther, 1969). 용승해역에서 이와 같이 어류생산성이 높은 이유는 영양염이 풍부한 저층수가 용승에 의해 유광층으로 운반되고 식물플랑크톤이 대량 발생하여 기초생산력의 증가로 좋은 먹이환경이 형성하기 때문이다.

영양염이 풍부한 저층수를 이용한 연구를 보면, 일본에서 저층수를 끌어올려 수온약층 부근의 수질환경을 변화시키는 연구가 진행되어 왔다. 먼저 라이저(Riser) 파이프를 이용해 저층수를 취수하여 표층으로 끌어올리는 방식을 이용한 1989년 Houyo 프로젝트, 1997년 Gokasho, 그리고 2003년 Takumi 프로젝트가 진행되었다(Ouchi, 2003). 특히 인공용승을 발생시키기 위해 일본 Bungo Channel의 Uhwa Sea에서 구조물(넓이: 20 m, 높이: 10 m)을 설치하였다. 구조물의 설치에 의한 효과는 조류유속이 20% 증가하고, 아표층의 클로로필 a 농도도 2~3배 증가, 동물플랑크톤의 개체수 및 침전량도 2배로 증가했다. 또한 저서생물은 설치 후 2년간 감소하였으나 3년 이후에 종·개체수가 증가했다. 인공 용승류 발생구조물은 어초의 역할 또한 수행하여 정어리, 전갱이, 고등어 및 말쥐치 등과 같은 표·중층어가 구조물 주위에 모여 있는 것도 밝혀졌다. 구조물의 크기가 커질수록 그 효과는 비례하여 증가하는 것으로 보고되었다(Yanagi and Nakajima, 1991). 이를 응용하여 일본에서는 나가사키현 앞바다에서 인공용승 구조물을(넓이: 120 m, 높이: 12 m) 이용하여 대규모 용승어장조성을 추진했다(Suzuki, 2002).

한편 한국 연안역에서 실시되고 있는 어장환경개선사업으로는 동·서·남해안에서 인공어초사업과 바다목장화사업 등이 있다. 또한 일본에서 실시한 어장환경조성과 유사한 개념을 가지고 실시한 인공용승류를 이용한 어장환경조성사업에서 인공용승구조물(길이: 112 m, 폭: 42 m, 높이: 16~20 m, Fig. 1)을 정점 4에 설치하였다(2005~2009년, 5개년)(MLTM, 2009). 또한 구조물 설치 후의 인공용승구조물 주변해역에서 수산생물 자원조사 및 잠재생산력 평가(2012~2013년)를 실시하였다(KIMST, 2013).

일반적으로 하계 연안역은 태양복사에너지에 의해 연직 혼합이 원활하지 않은 성층(stratification)이 형성된다. 그 결과, 하계의 연안역은 저층에 고농도의 영양염이 축적된다(Jung et al., 2013).

연근해 해역에 인공용승구조물을 구축하는 목적은 구조물에 의해 연직류를 발생시켜 하계의 해수순환을 원활하게

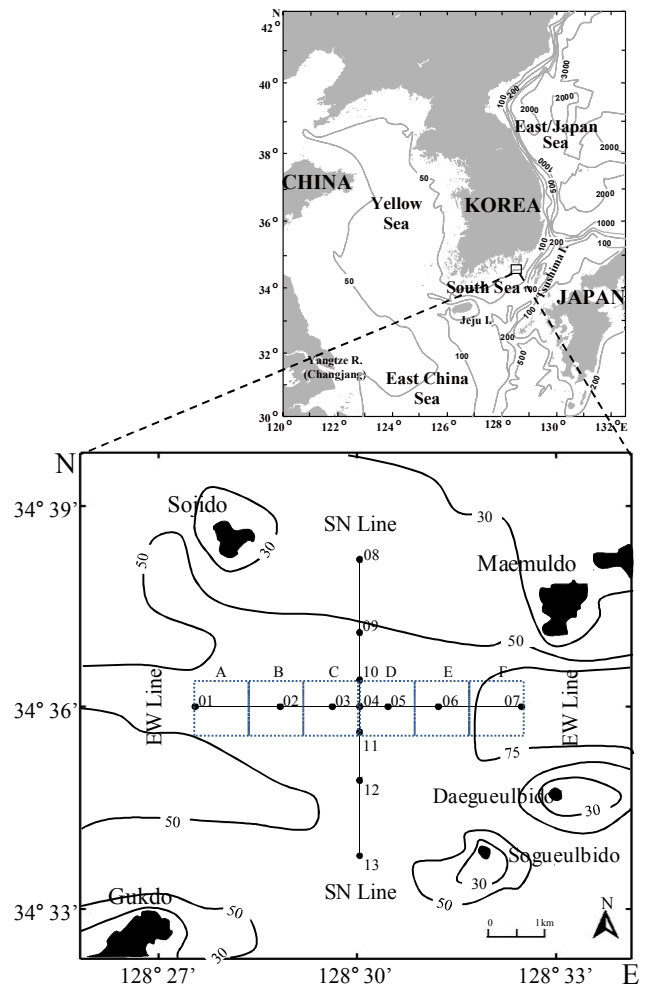


Fig. 1. Observation stations of study area. Numbers are depth contours (m). Circles (observation station 01~13), solid straight lines and dotted line squares are indicated CTD, ADCP observed station and vertical flux calculation area, respectively (lower panel).

하는 것이다. 또한 국지적인 용승은 하계 저층에 존재하는 풍부한 영양염을 유광층으로 부상시켜 좋은 먹이환경해역을 조성하는 것이다.

한국 남해안에 설치된 인공용승구조물에 의한 연구사례를 보면, 구조물 설치 유무에 따른 해양 환경특성(Kim and Hwang, 2006a)과 유동의 변화(Kim and Hwang, 2006b)가 있다. 또한 Kim and Shimasaki(2013)는 인공용승구조물에 의해 영양염이 공간적으로 변화에 대해 보고하였다. 그러나 이러한 인공용승구조물 효과에 대한 선행 연구들은 구조물 설치 전 또는 설치 중의 조사에 한정되었다.

따라서 본 논문에서는 성층이 가장 뚜렷하게 형성하는 하계에 인공용승 구조물 구축 전과 설치 이후의 안정적인 수

중생태계에서 구조물 주변의 수온변화, 유동 및 구조물에 의한 용승유량에 대해 조사하였다.

2. 자료 및 방법

한국 남해안 매물도 남서쪽에 위치한 구조물 설치지점(St. 4; 34° 36'N, 128° 30'E)을 중심으로 하계 수온 및 연직유동조사를 실시했다(Fig. 1). 또한, 관측영역은 조시(潮時)를 고려하여 직경 6km로 동서 관측선(EW line) 및 남북 관측선(SN line)으로 수온 및 유동을 조사했다.

수온은 CTD(Sea-Bird Electronics, SBE-19 Seacat Profiler)를 이용하여 13개 정점(Fig. 1)에서 인공용승구조물이 설치 전인 2002년과 설치 후인 2012년 및 2013년 하계 관측했다. 연직류는 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler, 300 KHz, RD Instruments) 유속계를 선박에 장착하여 정선관측을 실시했다. 유동조사에서 정선관측은 고정된 정점에서 실시하는 정점관측보다 더 넓은 범위에서 시·공간적인 흐름을 파악할 수 있는 장점이 있다.

본 해역의 조류는 창조시 서향하고, 낙조시 서쪽에서 동향하는 흐름분포를 보이고 있다(MORI, 2002). 따라서 남북 방향으로 설치된 인공용승구조물에 흐름의 영향이 가장 효과적으로 나타나는 동서방향에 중점을 두어 분석하였다.

먼저, 인공용승구조물에 의한 성층의 변화양상을 보기 위해 하계의 구조물 설치 전(2002년)과 3~4년 이후(2012, 2013년)의 수온 연직분포를 비교했다(Fig. 2). 구조물에 의한 성층 구조의 변화를 쉽게 파악할 수 있도록 최대수온연직경사(dT/dz , T: Temperature, z: depth)(Kirinich and Hebert, 2005)로 나타내었다. 즉 수온변화가 가장 강하게 나타나는(MTWC: Maximum Thermocline through the Water Column) 수심을 파악하였다. 또한 흐름 방향에 따른 구조물의 효과를 파악하기 위해 구조물의 전면부와 후면부에서 성층 강도를 파악했다. 성층 강도(Strength of Stratification, SS)는 수심에 따른 수온변화가 급격한 수층인 수온약층의 깊이에 대한 수온변화($\Delta t/\Delta d$, 여기서, Δt : temperature variation, Δd : thermocline thickness)로 계산했다.

하계 인공용승구조물 주변에서 연직류의 공간적 분포를 파악하기 위해 구조물 설치 3~4년 이후인 2012, 2013년 9월 창·낙조시 연직 유동분포를 그렸다. 그리고 연직류의 분포와 수온 분포의 특성을 비교·분석하기 위해 2가지의 결과를 중첩하여 나타내었다. 또한 구조물에 의해 발생하는 상승류의 세기는 최강수온약층(MTWC)이 형성하는 수심을 경계로 그 상층과 하층의 평균 상승유속을 이용하여 분석하였다.

또한 연직유량은 성층이 형성하는 수심을 경계로 창·낙조시를 대상으로 계산하였다. 구조물에 의해 발생하는 국지적

인 용승유량을 파악하기 위해서 EW line(6 km)을 1 km 간격으로 분할하여 각 구간(A-F, Fig. 1)을 대상으로 단위면적(1 km²)에 대한 수심평균 연직유량을 계산하였다. 연구해역에서 계산된 구조물에 의한 구역별 상승류 세기를 유사연구 결과와 비교·분석 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 하계 연직 수온분포

인공용승 구조물 설치 전·후 성층의 변화를 파악하기 위해 연직수온분포를 분석하였다(Fig. 2). 인공용승구조물 설치 전인 2002년 9월의 수온분포는 수심 약 30~40m에서 강한 성층이 형성되었다. 구조물이 설치된 위치(St. 4)에서 서쪽역과 동쪽역의 MTWC가 수심 약 35m에 형성되어 표·저층의 혼합이 약해 비교적 안정된 해황을 보이고 있다. 구조물 설치 3년 후인 2012년 9월의 수온은 수심 40~50m에 성층이 형성되어 있고 비교적 안정적인 형태를 보인다. 창조시 서향하고 낙조시 동향하는 조류 방향에 대한 구조물 후면부에서 등수온선 간격이 다소 넓어지는 특징을 볼 수 있다. 구조물 설치 4년 후인 2013년 9월 창조시 MTWC 형성 수심은 30~40m로 2002년과 동일한 수심에 형성되었다. 그러나 구조물 주변 등수온선은 굴곡이 있는 형태를 보인다. 낙조시 MTWC는 동향하는 조류 방향에 따른 구조물 후면부(동쪽)에서 전면부 형성 수심에 비해 약 10m 상승하여 나타난다. 이는 구조물에 의해 발생한 상승류의 영향으로 강하게 형성된 성층이 파괴된 것으로 판단된다.

2012년 MTWC는 구조물이 설치되어 있음에도 불구하고 구조물 설치 전인 2002년과 같이 MTWC가 굴곡이 작은 형태를 보인다. 2012년의 MTWC 형성수심은 약 40~50m로 2002년과 2013년 조사에 비해 약 10~20m 정도로 혼합층이 깊고 수온은 3~4°C 낮게 나타난다. 2012년 8월과 9월에 걸쳐(8월 31일부터 9월 18일) 3개의 강력한 태풍(14호 TEMBIN : 4등급 중형, 15호 BOLAVEN : 4등급 대형, 16호 SANBA : 5등급 슈퍼태풍)이 연속으로 한반도를 관통했다(KMA, 2012). 따라서 2012년의 수온연직 분포는 관측시기(2012년 9월 27일) 한 달 전부터 계속되는 강한 태풍(최대풍속 45~56 m/s)들에 의해 표층과 저층의 활발하게 혼합하여 혼합층이 깊어지고 성층이 저층에 형성하였던 것으로 볼 수 있다.

또한 Fig. 3은 구조물에 의한 성층의 세기변화를 파악하기 위해 조류의 주 방향에 따른 구조물의 전면부와 후면부의 성층 강도(Strength of Stratification, SS)를 나타낸 것이다. 인공용승구조물 설치 전인 2002년 조사 결과 구조물 위치를 기준으로 조류 방향에 따른 전면부와 후면부의 SS 값이 각각 0.28, 0.26°C/m로 0.02°C/m 차이를 보였다. 반면 구조물 구축

하계 인공용승구조물 주변해역의 물리환경변화

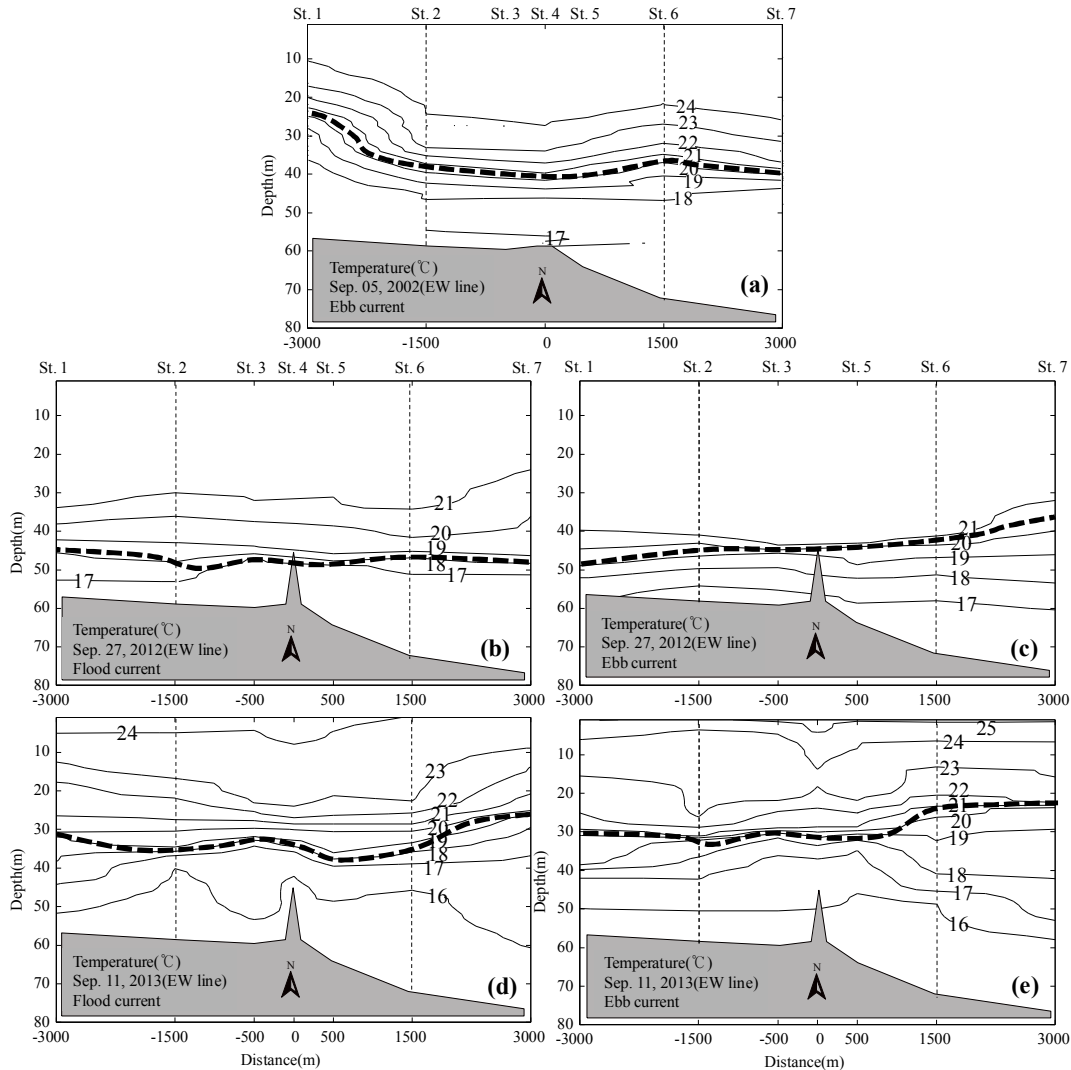


Fig. 2. Vertical distribution of water temperature (EW line) obtained by CTD observation on September 5, 2002 (a), September 27, 2012 (b, c) and September 11, 2013 (d, e). Observed from flood currents (b, d), and ebb currents (c, e). The vertical dotted lines shows a $\Delta t/\Delta d$ calculating station at Figure 3 (bold dotted line : MTWC).

3년 후인 2012년 강한 태풍의 영향을 받은 이후 혼합층이 깊고 등수온의 변화가 작아서 해수가 순압적으로 나타난다. 그러나 흐름에 의한 구조물 주변의 SS는 후면부에서 창·낙조시 각각 $0.06^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 감소하였다. 2013년, 조류 방향에 따른 구조물 전면부와 후면부 SS 값의 차는 $0.06\sim 0.21^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 범위로 구조물 구축 이전(2002년)에 비해 약 3~11배 크게 나타났다. 조류방향에 따른 구조물 후면부의 SS 값이 전면부에 비해 감소하였다. 즉 성층과 SS의 관계를 보면, 조류 방향에 따른 구조물 전면부와 후면부의 SS 차가 클수록 후면부의 등수온선의 간격이 넓어지고 MTWC의 형성 수심이 변화하여 나타났다고 판단할 수 있다.

온대지역의 하계는 강한 태양 복사열에 의해 표층수가 가

열되어 표층과 저층의 수온 차에 의해 일정한 수심에서 강한 성층이 발달한다. 이러한 시기의 따뜻한 표층수와 차가운 저층수간에 밀도 차로 인해 안정된 수괴를 이룬다(Lee et al., 2007). 따라서 하계 수온분포는 표·저층수간의 연직 혼합을 방해 하는 벽(wall)과 같은 성층이 형성한다. 인공용승구조물 설치 전에는 정점 4(구조물 설치)를 기준으로 동쪽과 서쪽의 성층형성수심의 변화가 거의 발생하지 않는다. 그러나 구조물 설치 후 성층은 조류의 주방향에 따른 구조물의 후면부에서 약화되고 성층이 형성되는 수심은 아래, 위로 변했다. 따라서 이와 같은 현상은 인공구조물로 인해 연직류가 발생하여 국지적인용승이 나타나 저층의 밀도가 높은 차가운 물을 상승시킨 것이다.

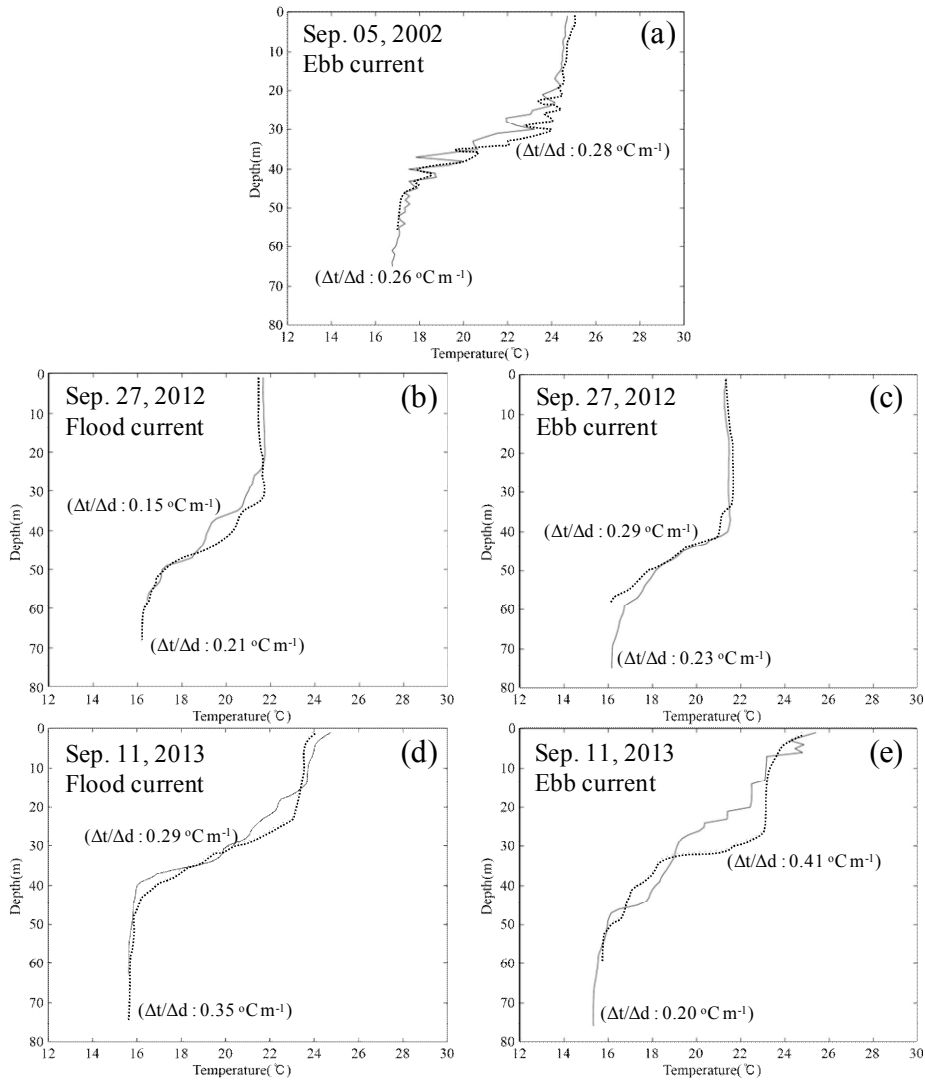


Fig. 3. Water temperature variation (Δt) in depth changes (Δd) of thermocline according to the structure front (dotted line) and rear (solid line) area of the tidal current direction on September 5, 2002 (a), August 28, 2006 (b), September 13, 2007 (c), July 24, 2008 (d), August 21, 2009 (e), September 27, 2012 (f) and September 11, 2013 (g).

3.2 연직 유동 분포

인공용승구조물 설치 이후 하계 창·낙조시의 연직 수온과 유동 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 2012년 창·낙조시의 연직류는 전반적으로 상승류 및 하강류가 혼재하여 나타났다. 또한 상승류는 구조물이 설치되어 있는 상부(St. 4) 주변해역에서 강하게 나타났다. 특히 연직류는 성층이 발달한 수심 40~50 m의 상층부 혼합층(mixed layer: 0~40 m)에서 $\pm 2\text{ cm/s}$ 범위로 약하게 나타났다. 또한 하부층(50 m~bottom)에서 연직류의 유속은 $\pm 4\text{ cm/s}$ 로 상층부에 비해 약 2배로 강하게 분포한다. 2013년 창·낙조시 연직류의 분포를 보면, 상승류 및 하강류가 혼재하여 나타났고 그 강도는 2012년 보다 2배 이상이다. 또한 2013년 연직류의 공간분포는 수온약층이 형성된 수

심(25~35 m)을 기준으로 상층부에서 하강류가 우세하고 하층부에서 상승류가 우세한 상반된 결과를 볼 수 있다. 창조시 상승류는 구조물 주변해역(반경 0.5 km 이내)에서 가장 강하게 분포한다. 한편 낙조시 상승류의 공간분포는 조류 방향이 동쪽으로 흘러 구조물 후면부(구조물 동쪽)에서 가장 강하게 나타났다. 성층형성은 구조물 전면부에서 수심 약 30 m, 후면부에서 상승류에 의해 표층 부근에 분포한다. 수온약층이 가장 강하게 나타나는 수심(MTWC) 분포는 하강류가 우세한 혼합층과 상승류가 우세한 저층과의 경계와 유사하게 나타났다.

2013년 해저면 부근의 상승류는 MTWC 상층부의 상승류보다 우세하게 나타났다. 이와 같은 현상은 2006년(Hwang et

하계 인공용승구조물 주변해역의 물리환경변화

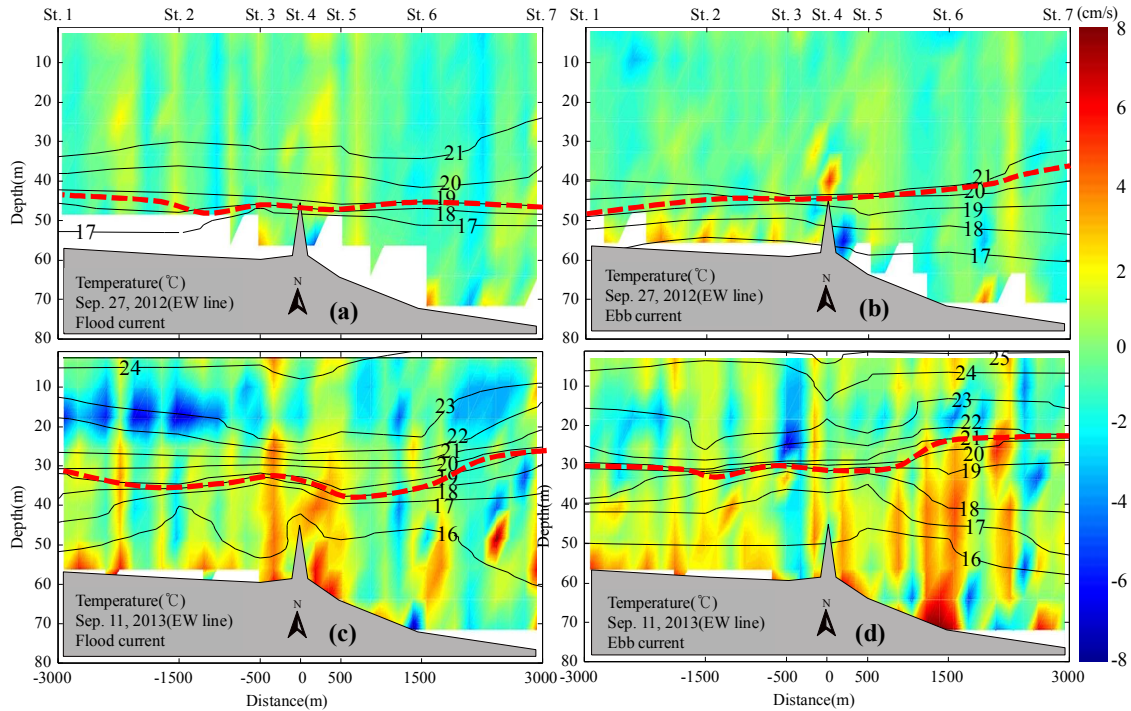


Fig. 4. vertical distribution of w-component (color bar) with temperature (black solid line) on September 27, 2012 (upper panel) and September 11, 2013 (lower panel). Observed from flood currents (left column), and ebb currents (right column) in mean tide (red bold dotted line : MTWC).

al., 2007)과 2008년(Kim and Shimasaki, 2013) 동일 해역의 하계 상승류의 공간분포와 유사한 형태를 보이고 있다. 한편 MTWC 상승부의 연직유속의 범위는 2013년에 비해 2012년이 작다. 2012년 관측조사 한 달 전부터 3회(TEMBIN, BOLAVEN, SANBA)에 걸쳐 태풍의 영향으로 혼합층이 형성하여 MTWC가 수심이 2013년에 비해 약 15 m 깊어졌다. 따라서 본 해역에 설치된 인공구조물은 2012년과 2013년 혼합층 형성 유무에 의한 MTWC의 형성 수심에 따라 저층에서 발생하는 상승류가 제어되는 것으로 판단된다. 즉 2013년 MTWC가 수심 약 30m에 형성되고 구조물에 의해 발생하는 상승류는 아표층까지 영향을 미친다. 그러나 2012년 혼합층이 깊게 형성한 시기에 구조물에 의해 발생한 상승류는 MTWC가 수심 약 45 m 형성되어 상층으로 이동이 약화되는 현상을 볼 수 있다.

성층이 가장 강하게 형성하는 수심(MTWC)의 상층부와 하층부의 평균 상승유속을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 상층부의 상승유속은 점선, 하층부는 실선으로 나타냈다. 2012년 창조시 상승유속의 공간분포는 인공용승구조물이 설치된 4번 정점을 기준으로 서쪽 약 550~3000 m 부근에서 “0”이다. 이것은 이때의 MTWC가 수심 45 m 해저면 부근에 형성되어 혼합층이 깊어서 나타나는 현상이다. MTWC 하층부의 상승유속은 구조물 주변부(±500 m, 여기서, 동쪽방향: +, 서쪽방향: -)에서 평균 1.3 cm/s, 특히 St. 3(-500 m)에서 3.2 cm/s로 가

장 강하게 나타났다. MTWC 상층부의 상승류는 구조물 동쪽 St. 5(동쪽, 0~500 m)에서 2.5 cm/s로 가장 빠르고 구조물 서쪽에서는 평균 0.3 cm/s로 나타났다. 구조물을 기준으로 1 km 이상 떨어진 동쪽 해역은 MTWC 하층부에서 상승류의 분포를 확인할 수 있으나, 상층부는 상승유속이 거의 나타나지 않는다. 2012년 낙조시 MTWC 하층부의 평균 상승류는 서쪽해역에서 1.4 cm/s, 동쪽해역에서 0.8 cm/s로 서쪽이 동쪽에 비해 약 1.75배 크다.

2013년 창조시 상승류는 2012년에 비해 강하게 나타났다. 창조시 상승류가 집중적으로 나타난 구조물 주변부(±500 m)에서 평균 상승유속을 보면 MTWC 하층부에서 4.9 cm/s, 상층부에서 1.4 cm/s로 나타났다. 낙조시 구조물 동쪽해역(1000~2000 m)에서 상승류가 집중적으로 나타났고 평균 상승유속은 MYWC 하층부에서 5.3 cm/s, 상층부에서 1.6 cm/s로 나타났다. 따라서 강하게 형성된 성층은 인공용승 구조물로 인해 저층에서 발생하는 상승류를 약 67~68% 약화시킴을 알 수 있다.

3.3 성층 시기의 국지적 연직유량 산정

A-F 구역(Fig. 1)에서 계산된 연직유량을 Table 1에 나타내었다. 2012년 창조시 D구역을 제외한 구역에서 하강류가 우세하고 구조물 동쪽 E구역(1000~2000 m)의 하강유량이 $-8.5 \times 10^3 \text{ Sv}$ (flux, Sv: $\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) 로 가장 강하게 나타난다. 낙조시 연직유

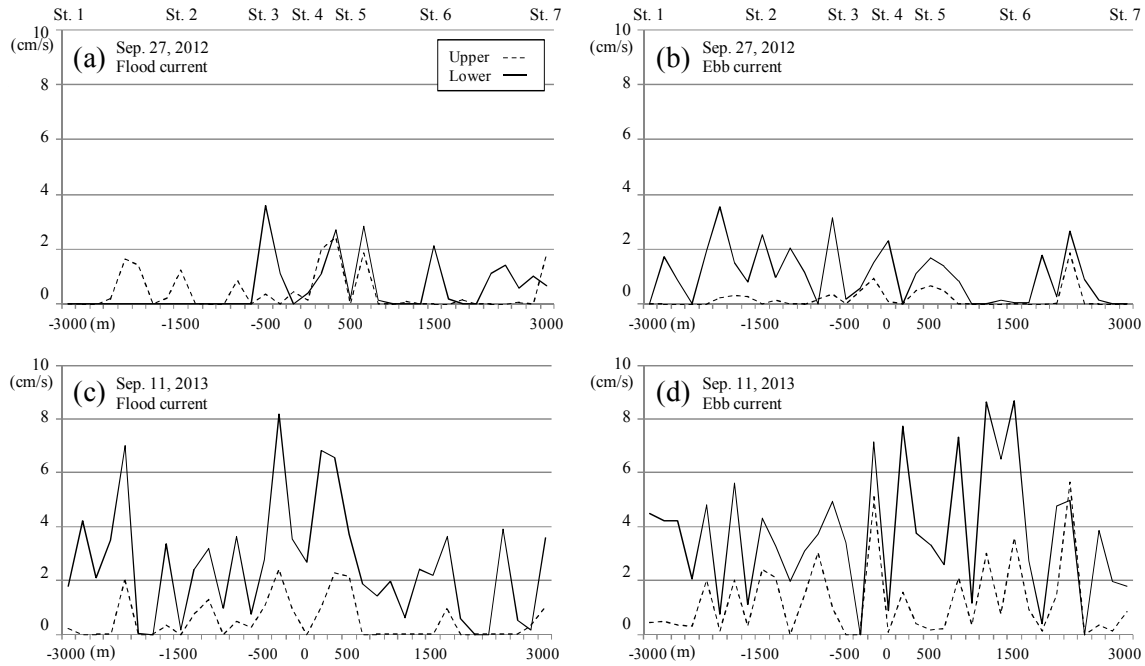


Fig. 5. On the basis of MTWC depth exhibited a mean vertical velocity where the upper (dotted line) and lower (solid line) layers on September 27, 2012 (upper panel) and September 11, 2013 (lower panel). Observed from flood currents (left column), and ebb currents (right column).

량은 창조시와 반대로 전 구역에서 상승류가 나타났으며 구조물 주변 (C), (D)구역(±1000 m)에서 가장 강한 상승류 분포를 보였다. 2013년 창조시 구조물 주변인 (C), (D) 구역에서 상승유량은 각각 $10.2 \times 10^3 Sv$, $17.9 \times 10^3 Sv$ 로 강하게 나타났고 구조물과 거리가 1000 m 이상 떨어진 구역에서는 대부분 하강유량이 크게 나타났다. 반면 2013년 낙조시의 경우 전 구역에서 상승유량이 우세하게 나타났으며 구조물 동측 (E) 구역(1000~2000 m)에서 $18.5 \times 10^3 Sv$ 로 상승유량이 가장 강하게 나타났다. 2012년과 2013년의 창조시 하강유량이 우세한 구역이 다수 나타나지만, 낙조시의 경우 모든 구역에서 상승유량이 우세하다.

Kim and Hwang(2006b)에 의하면 2006년 인공용승구조물 설치 중(구조물 설치기간 : 2005~2009년)에 조시별 연직유량

을 계산한 결과 창조시와 낙조시 모두 하강유량에 비해 상승유량이 더 우세하고, 창조시보다 낙조시 상승유량이 더 크게 나타났다. 2006년 연직유량과 본 연구에서 계산한 연직유량은 유사한 경향을 나타낸다. 이는 조사해역 동쪽으로 갈수록 깊어지는 지형특성에 의한 volume transport의 energy 변화로 발생하는 결과로 판단된다.

Picard and Emery(1990)에 의하면 연안역의 용승해역에서 상승유속은 $0.005\sim 0.0116\text{ cm/s}$ 라고 했다. 그리고 한국 동해연안에서 수치실험 결과에 따른 연안용승에 의한 상승유속은 $0.0101\sim 0.0164\text{ cm/s}$ 로 계산되었다(Lim, 2014). 또한 일본 Bungo Channel에서 인공구조물(넓이: 20 m, 높이: 10 m)을 이용한 사례를 보면 구조물 설치 전과 후의 연직유속의 표준편차가 각각 1.7 cm/s 와 2.6 cm/s 로 구조물 설치 후 1.8배 증가하였다

Table 1. Average volume transport of vertical flux per unit area (1 km^2) ($Sv: \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$)
(+: local upwelling flux, -: local dowelling flux)

Obs. time	Area	A	B	C	D	E	F
Sep. 27, 2012	Flood	-3.1×10^{-3}	-8.3×10^{-3}	-2.7×10^{-3}	2.3×10^{-3}	-8.5×10^{-3}	-6.4×10^{-3}
	Ebb	2.7×10^{-3}	3.2×10^{-3}	3.8×10^{-3}	3.7×10^{-3}	0.9×10^{-3}	2.4×10^{-3}
Sep. 11, 2013	Flood	0.5×10^{-3}	-6.6×10^{-3}	10.2×10^{-3}	17.9×10^{-3}	-0.7×10^{-3}	-3.9×10^{-3}
	Ebb	8.4×10^{-3}	14.4×10^{-3}	12.6×10^{-3}	14.1×10^{-3}	18.5×10^{-3}	11.8×10^{-3}

(Yanagi and Nakajima, 1991). 한편 한국 남해안에 설치된 인공 용승 구조물에서 연직류가 가장 강하게 나타나는 2013년 낙조시 구조물 동측 E구역의 평균 연직 유속은 1.85 cm/s로 나타났다. 따라서 인공용승 구조물에 의해 국지적으로 발생하는 연직유속은 자연적으로 발생하는 용승에 비해 100배 이상이다.

연직류는 조시(창·낙조)에 따라 공간적으로 이동하여 발생한다. 이러한 시·공간적인 연직류의 발생은 구조물에 의한 용승효과를 보다 넓은 해역으로 확장하여 발생하게 한다. 구조물에 의해 발생하는 상승류는 하계 저층에 존재하는 고농도의 영양염을 유광층까지 상승시킬 수 있는 메커니즘으로 작용하게 된다. 하계 인공용승구조물에 의해 발생한 연직류는 먹이연쇄작용에 의해 먹이환경이 풍부한 좋은 어장의 형성이 기대된다.

4. 결론

인공용승 구조물의 유무에 따라 주변해역의 물리환경변화를 파악하였다. 인공 용승구조물에 의해 발생하는 상승류는 강한 성층을 약화시켜 수온분포를 변화시켰다. 즉 구조물 설치 전에는 수온에 의해 형성하는 성층이 변동하지 않고 일정한 수심에 나타났다. 그러나 인공 용승구조물이 설치된 후의 성층형성 수심은 구조물에 의해 발생한 연직류에 의해 약 10 m 변화하였다.

연직류의 공간분포는 구조물을 중심으로 하여 상승류와 하강류가 조시(창·낙조)에 따라 혼재하여 나타나는 특징을 보이고 있다. 즉 조류 방향(동·서향류)에 따라 구조물을 중심으로 상승류와 하강류가 공간적인 변화하여 확산하는 양상이다.

용승유량은 구조물 2 km 반경 내에서 강하게 나타내며 창조시보다 낙조시 상승류가 우세하게 나타난다. 또한 혼합층이 뚜렷하고 성층형성 수심이 깊을수록 용승유량은 작게 나타난다.

하계 인공용승 구조물에 의해 발생하는 상승류는 저층에 존재하는 영양염을 유광층으로 부상시키는 역할을 한다. 이것은 결과적으로 인공구조물 설치 주변해역의 기초 생산력을 증가시키고 좋은 어장이 형성될 수 있는 기반 여건을 조성한다. 그러나 성층은 해황 특성, 특히 4계절이 뚜렷한 온대지역은 계절적으로 성층 형성 수심이 다르다. 따라서 계절적으로 변화하는 성층의 형성 수심과 형태 변화에 따른 열·염구조의 특성과 구조물의 영향에 관한 연구가 수행되어질 필요가 있다. 또한 대조기와 소조기 유속 차에 의한 영향 및 구조물 크기 변화에 따른 용승유량 변화에 대해서도 파악되어 구조물의 효과에 대해 연구되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] FAO(2009), FAO yearbook, Fishery and Aquaculture Statistics, Food and Agriculture Organization of the United Nations, p. 78.
- [2] Hwang, S. B., D. S. Kim, S. W. Bae and K. Apitha(2007), Variation of Current by the Building of Artificial Upwelling Structure(II), 2007 Research conference of Korean Society of Marine Environment & Safety, p. 214.
- [3] Jung, D. H., H. H. Shin, S. W. Jung and D. I. Lim(2013), Variations and Characters of Water Quality during Flood and Dry Seasons in the Eastern Coast of South Sea, Korea, Korean Society of Environmental Biology, Vol. 31, No. 1, pp. 19-36.
- [4] Kim, D. S. and S. B. Hwang(2006a), Characteristics of Oceanographic Environment in a Sea Area for the Building of Artificial Upwelling Structure, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 12, No. 1, pp. 1-8.
- [5] Kim, D. S. and S. B. Hwang(2006b), The Variation of Current by the Building of Artificial Upwelling Structure (I), Journal of th Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 12, No. 4, pp. 301-306.
- [6] Kim, D. S. and Y. Shimasaki(2013), Change in Marine Environment after Artificial Reef Deployment in the South Sea of Korea, Kyushu University, Vol. 58, No. 2, pp. 403-415.
- [7] KIMST(2013), Assesment of potential productivity and fisheries resources in a Artificial Upwelling System, Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion Republic of Korea, p. 365.
- [8] Kirinich, A. R. and D. Hebert(2005), The structure of the coastal density front at the outflow of Long Island Sound during spring 2002, Continental Shelf Reaserarch, 25, pp. 1097-1114.
- [9] KMA(2012), National Typhoon Center, <http://typ.kma.go.kr/TYPHOON/index.jsp>.
- [10] Lee, C. I., D. H. Koo, J. H. Yun and D. S. Kim(2007), Stratification Variation of Summer and Winter in the South

- Sea of Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 13, No. 2, pp. 119-125.
- [11] Lim, W. H.(2014), Hydrodynamic numerical experiments at upwelling region in the East Sea of Korea, Pukyung National University Graduate School, pp. 56-58.
- [12] MLTM(2009), Improvement of Fishing Ground Environments using Artificial Upwelling (5th year), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Republic of Korea, p. 378.
- [13] MORI(2002), Tidal current chart (Busan to Yeosu), National Oceanographic Research Institute, Ministry of Maritime Affairs and Fisheries Republic of Korea, p. 20.
- [14] Ouchi, K.(2003), Ocean nutrient enhancer “TAKIMI” for the experiment of fishing ground creation, Proc. 5th Ocean Mining Symposium, ISOPE, Tsukuba, Japan, p. 37.
- [15] Picard, G. L. and W. J. Emery(1990), Descriptive Physical Oceanography: An Introduction, Elsevier, pp. 276-290.
- [16] Ryther, J. H.(1969), Photosynthesis and fish production in the sea, The production of organic matter and its conversation to higher forms of life vary throughout the world ocean, Science, 166, pp. 72-76.
- [17] Suzuki, T.(2002), Ocean Fertilization by the man-made Sea-Mountains Built with Coal Ash Concrete Blocks, Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 734-736.
- [18] Yanagi, T. and M. Nakajima(1991), Change of oceanic condition by the man-made structure for upwelling, Marine Pollution Bulletin, 23, pp. 131-135.

Received : 2015. 07. 30.

Revised : 2015. 08. 21.

Accepted : 2015. 08. 27.