

論文

인공 용승 해역의 해양 환경 변화에 관한 연구

김동선* · 황석범** · 김성현*** · 배상완**** · Apitha Kheawwongjan*****

*,**,****부경대학교 해양산업개발연구소, ***,*****부경대학교 해양산업공학(협)

The Study of the Oceanic Environment Variations in the Artificial Upwelling Area

Dong Sun Kim* · Suk-Bum Hwang** · Sung Hyun Kim*** · Sang Wan Bae****
· Apitha Kheawwongjan*****

*, **, ****Research Center for Ocean Industrial and Development(RCOID), Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

,**Interdisciplinary Program of Ocean Industrial Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

요 약 : 한국 남해안의 인공 용승 해역에서 발생하는 해양 환경 변화를 파악하기 위하여 2002년 및 2007년 하계의 수온, 염분, 영양염 및 유동을 관측하였다. 해중산 설치 전인 2002년의 수온, 염분은 수심 약 30~40 m에서 약층이 형성되었고, 영양염은 표층에서 저층으로 농도가 증가하였다. 해중산 설치 후인 2007년의 수온, 염분은 흐름에 따른 해중산 전면부에서는 수심 약 10~40 m에 약층이 나타났으나, 후면부에서는 수심 약 20~30 m에서 수온 및 염분 약층이 상승하여 나타났다. 영양염은 해중산 상층부 수심 약 30 ~ 40 m 집적되었다. 이와 같이 수온, 염분 및 영양염의 변화를 일으키는 원인을 파악하기 위하여 수온 및 염분을 이용하여 부력 주파수를 나타내었고 수평유동성분을 이용하여 연직전단 및 상대와도를 계산하였다. 수온, 염분 및 영양염 분포가 변화하는 지역은 수주의 혼합이 잘 이루어지는 해역으로 나타났다. 또한 이러한 해역은 상승류가 해양 환경 변화를 일으키는 주요인으로 밝혀졌다.

핵심용어 : 해중산, 성층, 인공 용승, 부력 주파수, 연직전단, 상대와도

ABSTRACT : In Southern Sea of Korea, there are upwelling area where artificial seamount were built and the environment variations (temperature, salinity, nutrient and current) of before and after built seamount were observed between 2002 and 2007. In 2002, before the seamount was built, there had stratification at 20-30 m. And in 2007, seamount was built, stratification of the seamount at the front and back of it were changed by 10-40 m and 20-30 m, respectively. To know the reason of this results, we used temperature and salinity using Brunt-Vaisala Frequency and horizontal current using vertical shear and relative vorticity. They showed upwelling was mainly reason that changed the ocean environment.

KEYWORD : Seamount, Stratification, Artificial Upwelling, Brunt-Vaisala Frequency, vertical shear, relative vorticity

1. 서 론

최근 우리나라 해양 환경은 지구 온난화로 인한 해수온 상승 및 연안역 오염등으로 인하여 어장 환경이 악화 되고 있다. 이러한 환경을 대처하기 위해서는 잡는 어업 보다는 기르는 어업으로의 전환이 필요하며, 그 방법으로 기초생산력이 다른 해역보다 월등히 높은 용승 어장을 인공적으로 개발하는

것을 생각 할 수 있다.

Ryther(1969)에 의하면 용승어장은 전해양에서 면적이 0.1%에 그치지만 어류 생산량은 전해양의 50%에 달한다. 세계적인 대표 용승어장으로는 캘리포니아, 페루 및 서아프리카 용승해역이 있으며 어군군집을 많이 형성하는 호어장으로 알려져 있다. 그리고 자연 해중산인 미국 캘리포니아 만에 위치하고 있는 EBES(El Bajo de Espiritu Santo) seamount의 조사 결과를 살펴보면 해중산 정상부에서 안정도는 매우 낮게 나타났으며, 등온선의 분포는 해중산 주변에서 낮아졌다(Castro *et al.*, 2003). 이와 같은 해중산 주변의 환경변화는 플랑크톤 및 주위에 서식하는 생물 군집들을 집적시키며 다른 환경에 비해 생물들의 높은 기초 생산력을 가지는 해역으로 나타났다(Roden and Taft, 1982; Castro *et al.*, 2003).

* 종신회원, kimds@pknu.ac.kr 051)629-7374
** 비회원, chamsin75@pknu.ac.kr 051)629-7071
*** 비회원, kenta81@pknu.ac.kr 051)629-7071
**** 비회원, bae-31@hanmail.net 051)629-7071
***** 비회원, wishing_u@hotmail.com 051)629-7071

이러한 연구 결과를 바탕으로 한국의 경남 남해안 매물도와 국도 사이에 설치되어 있는 해중산 해역의 해양 환경 변화를 조사하여 주변 해역의 환경 변화를 파악하였다.

따라서 본연구에서는 해중산 설치 전인 2002년 자료와 해중산 설치 후인 2007년 자료를 비교하여 수온, 염분 및 영양염(DIN 및 DIP)의 해양 환경 변화를 파악하였다. 이러한 환경 변화의 원인인 용승 현상이 어떠한 메카니즘으로 발생하는지를 살펴 보았다.

2. 자료 및 방법

2.1 연구해역 및 관측방법

Fig. 1은 연구해역의 정점을 나타내고 있으며 정점 01(34°36' N, 128°30' E)에 인공 해중산(42 × 112 × 20 : W × L × H, m)이 수심 약 40 m에 설치되어 있다. 해양 관측 조사는 2002년에는 정점 01을 기준으로 2 km 간격으로 동서 관측선 7개 정점(St. 25, 21, 17, 1, 15, 19, 23)과 남북 관측선 7개 정점(St. 24, 20, 16, 1, 14, 18, 22)인 정점 13개에서 실시하였다. 2007년에는 인공 해중산(정점 1)을 중심으로 반경 2 km 까지 0.5 km 간격으로 동서 관측선 9개 정점(St. 17, 12, 7, 5, 1, 3, 7, 11, 15)과 남북 관측선 9개 정점(St. 16, 12, 8, 4, 1, 2, 6, 10, 14)인 17개 정점과 그 외곽인 반경 4 km의 4개의 동서 남북 방향에 각각 정점(St. 18, 19, 20, 21)을 설정하였다. 유동 관측은 2007년 7월에 동서 방향과 남북 방향으로 6 km씩 십자 형태로 실시하였다(Table 1).

수온과 염분은 CTD(Sea-Bird Electronics, SBE-19 SEACAT Profiler)를 이용하여 0.5초마다 데이터를 기록하도록 설정한 뒤 수심 1 m 간격으로 자료를 보정하였고, 영양염(DIN, DIP)은 니스킨 채수기(Niskin bottle sampler)를 사용하여 현장에서 채취한 해수를 폴리에틸렌병에 담아 냉장보관 후 실험실에서 해양환경공정시험방법(해양수산부, 2005)에 따라 분석을 실시하였다. 유동관측은 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler; RDI, workhorse mariner 300KHz)를 이용하여 동서 및 남북 방향으로 정선 관측을 실시하였다.

Table 1. Observation station

Date	Line	Method	Station Number
5th Sep. 2002	EW SN	Temp. Salinity DIN, DIP	25, 21, 17, 1, 15, 19, 23 24, 20, 16, 1, 14, 18, 22
25th Jul. 2007	EW SN	Current	EW line 6km SN line 6km
30th Jul. 2007	EW SN	Temp. Salinity DIN, DIP	21, 17, 13, 7, 5, 1, 3, 7, 11, 15, 19 20, 16, 12, 8, 4, 1, 2, 6, 10, 14, 18,

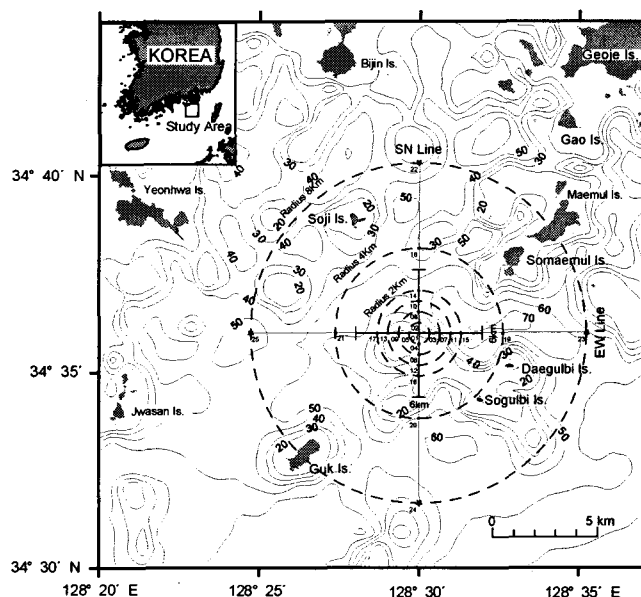


Fig. 1. Study area (•: CTD and nutrient observation station, bold line is ADCP along line observation, numbers are depth).

2.2 자료분석

CTD로 획득한 2002년 9월 및 2007년 7월에 자료를 동서 방향(EW line), 남북 방향(SN line)의 수온 및 염분의 연직 분포로 나타내었다. 동서 및 남북 방향의 영양염 연직분포를 파악하기 위하여 DIN(Dissolved Inorganic Nitrogen)과 DIP(Dissolved Inorganic Phosphate)를 수심별 자료(정점 01은 수심 10 m 간격이고 그 외의 정점들은 표층과 중층 그리고 저층)를 이용하여 객관적 보간(objective interpolation)을 실시했다.

또한 이 시기 해역의 안정도를 파악하기 위하여 수온, 염분의 값을 이용하여 부력주파수(Brunt-Vaisala frequency)를 연직적으로 나타내었다(식1).

$$N^2 = gE \approx g \left[- \left(\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{\delta \sigma_t}{\delta z} \right) \right] \quad (1)$$

여기서 N^2 : 진동수, g : 중력가속도, ρ : 밀도, $\sigma_t = \rho - 1000$, δz : 수심 변화이다.

부력 주파수는 밀도구배가 클수록 복원력이 강해지고 진동수가 커지며 진동주기가 짧아진다. 즉 수주의(water column) 안정도가 강할수록 진동수가 커지고 진동주기가 짧아진다(Pickard and Emery, 1990).

수주의 혼합 정도 및 그 회전성을 파악하기 위하여 ADCP의 수평유동(u 및 v-current)을 이용하여 연직전단(vertical shear : VS)과 상대와도(relative vorticity : RV)를 계산하였다(식2 및 3).

$$VS(\text{sec}^{-1}) = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad (2)$$

여기서, u 및 v 는 유속의 x 및 y 성분을 나타내며 z 는 ADCP의 수심 간격인 2 m이다.

$$RV(\text{sec}^{-1}) = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

여기서, u 및 v 는 유속의 x 및 y 성분을 나타내며, ∂x 및 ∂y 는 선박이 이동한 위도와 경도상의 거리를 나타낸다.

식(3)에서 양(+)의 값인 $\partial v/\partial x > \partial u/\partial y$ 일 때 반시계 방향으로 회전하는 상승류 흐름을 나타내고, 음(-)의 값인 $\partial v/\partial x < \partial u/\partial y$ 일 때 시계방향으로 회전하는 하강류 흐름의 특성을 가진다(John, 1997).

3. 결과 및 고찰

3.1 수온 및 염분 연직분포

Fig. 2는 2002년 9월 5일 수온, 염분의 동서 방향(EW line) 및 남북 방향(SN line)의 연직분포를 나타낸 것이다. 먼저 동서 방향의 수온 연직분포를 보면 전 수층에서 17~24 °C의 분포를 보이며 전 해역 수심 약 30~40 m에서 강한 수온약층을 형성하였다(St.17~19). 염분은 30.0~33.5 psu으로 표층과 저층에 걸쳐 있고 차이는 3.5 psu이며, 수심 약 30~40 m에서 염분약층이 나타났다. 남북 방향의 수온 분포는 18~25 °C를 보이며 수심 약 35~45 m에서 수온약층이 형성된 것을 볼 수 있다. 염분은 30.5~33.8 psu를 보이며 수심 약 35~45 m에서 염분약층이 형성되었다.

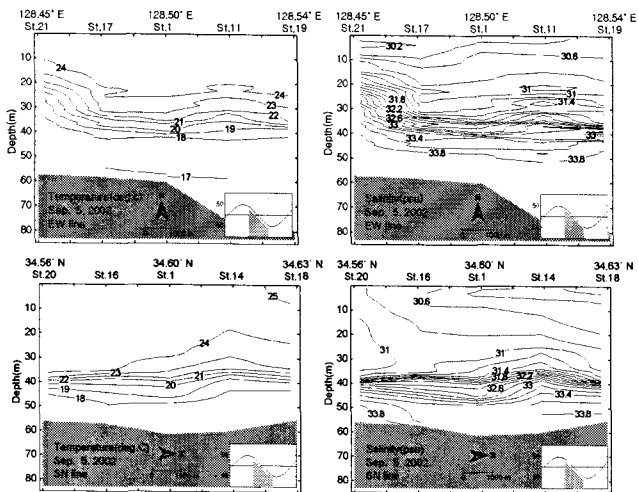


Fig. 2. Vertical distributions of Temperature and salinity at EW(upper) and SN(lower) Line on 5th September 2002.

Fig. 3은 2007년 7월 30일 수온, 염분의 동서방향과 남북 방향의 연직분포를 나타내었다. 김과 황(2006) 및 조 등(2003)에 의하면 이 지역의 조류의 주방향은 낙조시 서에서 동으로, 창조시도에서 서로 나타났다. 동서 방향의 수온은 표층 24 °C에서 저층 16 °C로 약 8 °C의 수온차를 나타내고 있다. 고나측시의 조류는 낙조시로 해중산 전면부에는 수심별로 거의 균일한 수온 분포를 보이지만 후면부에서는 수심 약 30 m 근처에서 전면부 보다 강한 수온약층이 형성되었다. 염분은 33.0~34.0 psu의 분포를 보이며 해중산의 전면부 보다 해중산 후면부에서 염분약층은 수심 약 30 m에서 형성된 것을 볼 수 있다. 남북 방향의 수온의 분포는 해중산 상부로 수렴하는 현상을 보이며 해중산 후면부 수심 약 30 m에서 수온약층이 형성되었다. 염분은 33.0~34.0 psu의 분포를 보이며 정점 01에서 해중산 상부로 수렴하는 형태를 보이고 해중산 주변부에서 염분약층이 형성되었다. 이러한 수렴현상은 해중산이 설치되어 있는 위치에 의하여 흐름의 방향에 의하여 나타나는 현상이다.

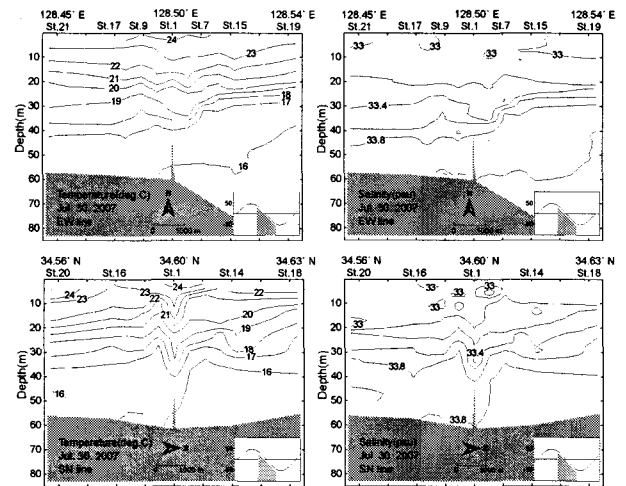


Fig. 3. Vertical distributions of Temperature and salinity at EW(upper) and SN(lower) Line on 30th July 2007.

3.2 영양염(DIN, DIP) 연직분포

2002년 9월의 동서 및 남북 방향의 DIN(Dissolved Inorganic Nitrogen)은 표·저층에 2.0~20.0 μM로 저층에서 고농도 분포를 나타내고 있다. DIP(Dissolved Inorganic Phosphate)는 표층에서 0.2 μM, 저층에서 0.7 μM로 표층보다 저층에서 고농도 분포를 보이고 있다(Fig. 4).

2007년 7월 동서 방향의 DIN은 표·저층에 2.0~20.0 μM의 농도를 보이며 해중산이 있는 정점 01에서 DIN이 해중산 상층부로 집적 되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 흐름에 따른 해중산 전면부의 저층 고농도 DIN의 이동에 의하여 집적되었다고 생각된다. 남북 방향은 정점 01의 해중산 상층부로 수렴하는 현상을 볼 수 있다. 또한 그 해중산 상층부의 DIN은 14.0 μM의 고농도 분포를 볼 수 있다. 동서 방향의

DIP는 0.2~2.0 μM 농도가 표·저층에 걸쳐 분포되어 있다. 0.9~1.2 μM 의 분포가 해중산 전면부 약 55 m에 분포하였으나 후면부에서는 그 분포가 수심 20 m까지 상승되어 나타났다. 남북 방향은 해중산 주변으로 해중산 상층으로 수렴하여 나타나는 현상을 볼 수 있다. (Fig. 5).

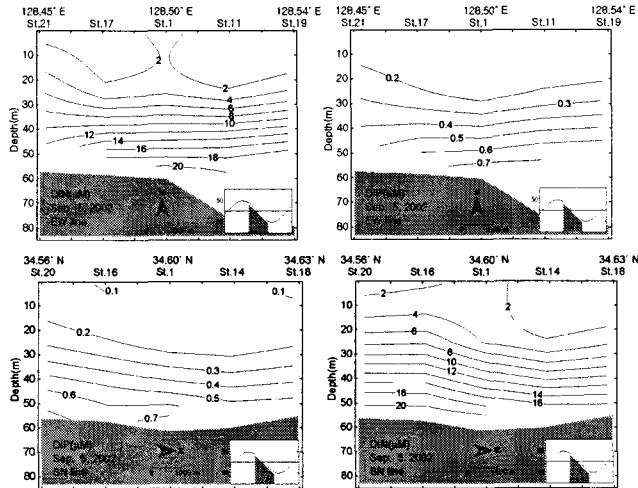


Fig. 4. Vertical distributions of DIN(Dissolve Inorganic Nitrogen) and DIP(Dissolved Inorganic Phosphate) at EW(upper) and SN(lower) Line on 5th September 2002.

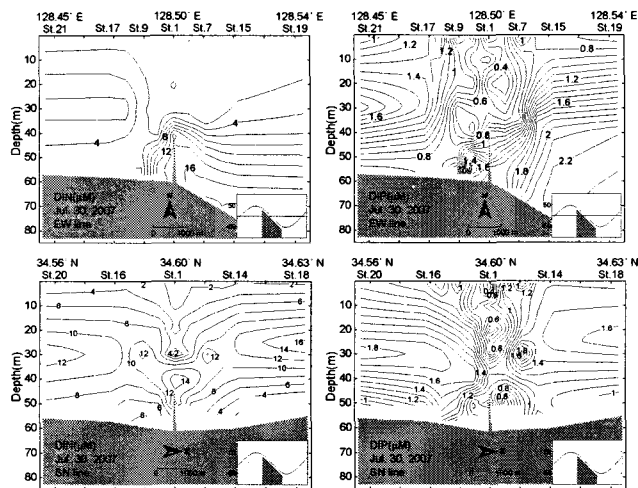


Fig. 5. Vertical distributions of DIN(Dissolved Inorganic Nitrogen) and DIP(Dissolved Inorganic Phosphate) at EW(upper) and SN(lower) Line on 30th July 2007.

3.3 부력 주파수 연직분포

Fig. 6은 수주의 안정도를 파악하기 위하여 2002년 9월과 2007년 7월의 수온, 염분 자료를 이용하여 부력 주파수(Brunt-Vaisala Frequency)의 연직분포를 나타냈다. 여기서

진하게(+ 값) 보이는 것은 안정도가 높아 혼합이 잘 일어나지 않는 것을 나타내며 백색으로 갈수록(- 값) 수주의 안정도가 낮아 상대적으로 혼합이 잘 발생하는 것을 나타낸다.

2002년 9월 동서 방향의 안정도를 보면 표층에서 수심 약 20 m까지는 혼합이 잘 일어나는 불안정 상태이며 수심 약 30~50 m에서는 진하게 나타나는 것으로 보아 안정도가 높아 혼합이 잘 일어나지 않는 해역이다. 남북 방향은 표층에서는 바람의 영향으로 혼합이 일어난 것이 보이며 수심 약 30 m까지 혼합층이 보인다. 수심 약 40 m 근처에서 가장 진하게 형성되며 이 수심은 수온약층이 나타나는 지역과 유사하다. 따라서 이와 같이 안정도가 높은 수심에서 강한 수온 약층이 형성되고 있는 것을 볼 수 있다.

2007년 7월 동서 방향의 수주 안정도를 보면 부력 주파수 50의 등온선이 해중산 전면부 수심 약 45 m에 분포하고 있으나 해중산 상층부나 후면부에서는 수심 약 30~35 m로 10 m 이상 상승하여 분포하고 있음을 볼 수 있다. 남북 방향에서는 이와 같은 현상이 더 뚜렷하게 나타났다. 즉, 해중산 상층부에서 표층 근처까지 그 영향을 볼 수 있다. 이것은 이런 지역이 다른 지역에 비해서 혼합층이 잘 발달되어 있으며 수온, 염분 및 염양염 분포에서도 잘 반영되어 나타났다.

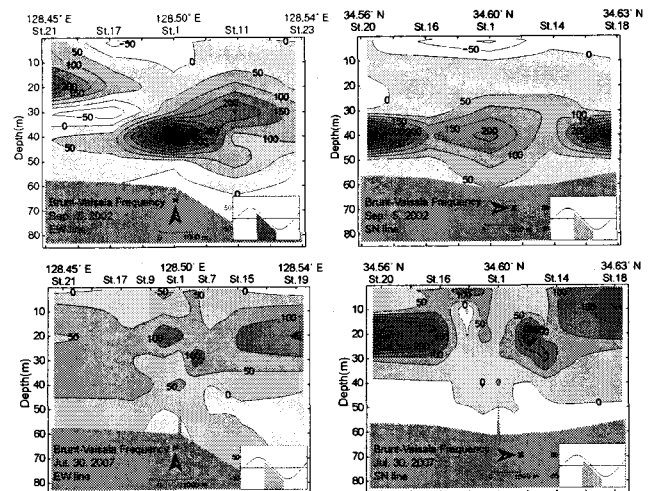


Fig. 6. Vertical distributions of Brunt-Vaisala Frequency at EW(left) and SN(right) line on 5th September 2002(upper) and on 30th July 2007(lower).

3.4 연직전단 및 상대와도의 분포

Fig. 7은 2007년 7월 소조기의 낙조시 연직전단 결과를 나타내었다. 수심 약 35 m 이천에서 작은 값을 보이고 있다. 해중산의 근처인 수심 약 47 m에서 $10.0 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 을 보이며 후면부인 수심 약 39 m 이심에서는 $5.0 \sim 15.0 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 를 보이고 있다. 해중산 전면부 수심 약 39 m 이심에서 $5.0 \sim 10.0 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 을 보인다.

상대외도는 해중산 후면부 수심 약 49 m에서 음(-)의 값인 시계 방향으로 회전하는 하강류의 분포를 나타냈다. 해중산 상부 수심 약 47 m에서 양(+)의 값인 반시계 방향으로 회전하는 상승류가 보이며, 후면부의 수심 약 39 m 이심에서는 양(+)의 값과 음(-)의 값이 혼재하여 나타났다. 따라서 연직전단이 강하게 나타나는 지역에서 상대외도가 양(+)의 값인 곳은 상승류가 음(-)의 값인 지역은 하강류가 우세하게 나타났다. 상승류가 우세하게 나타난 지역은 수온, 염분 및 영양염의 상승이 나타나는 곳과 일치했다.

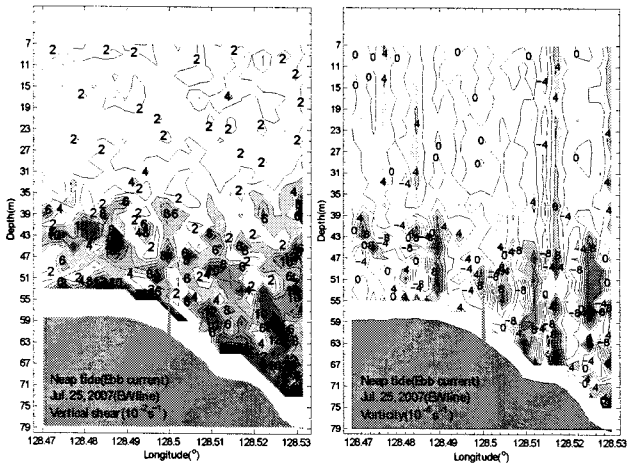


Fig. 7. Vertical shear(left) and relative vorticity(right) at EW line on 25th July 2007.

4. 결론

경남 남해안 매물도와 국도 사이에 설치되어 있는 해중산에 의한 해양 환경 변화를 파악하였다. 본연구에서는 해중산 설치 전인 2002년 자료와 해중산 설치 후인 2007년 자료를 비교하여 수온, 염분 및 영양염(DIN 및 DIP)의 해양 환경 변화를 파악하였다. 이러한 환경 변화의 원인인 용승 현상이 어떠한 매카니즘으로 발생하는지를 살펴 보았다.

먼저, 연구해역의 수온, 염분은 해중산 구축 전인 2002년에 성층이 전 수심 약 30~40 m에서 나타났다. 그러나 해중산 구축 후인 2007년에는 해중산의 전면부보다 후면부에서 성층의 수심이 약 10 m 상층에 형성되어 해중산 구축전과 변화하여 나타났다. 이러한 변화는 흐름에 따라 해중산에 의하여 후면부로 상승하여 나타났다.

영양염은 2002년에 전 수심에서 저층인 수심 약 50 m 이심에서 DIN은 20.0 μM 이고 DIP는 0.7 μM 인 고농도를 보였으며 표층인 수심 약 10 m 이천에서 DIN은 2.0 μM 이고 DIP는 0.2~0.6 μM 인 저농도의 분포가 나타났다. 하계 영양염의 분포는 표층에서 저층으로 갈수록 고농도의 분포 특성을 나타내고 있다. 해중산 설치 후인 2007년은 저층 수심 약 50 m 이

심에서 고농도, 표층 수심 약 10 m 이천에서 저농도의 분포를 보였으나 해중산의 전면부와 후면부에서 농도의 차이가 보였다. 특히 동서 방향의 DIN은 흐름이 해중산을 따라 흐르면서 전면부 저층의 고농도의 DIN이 해중산의 상부에 집적되었으며, 후면부 전체 수심 약 40 m까지 상승하여 나타났다.

해역의 안정도를 나타내는 부력 주파수(Brunt Vaisala Frequency)를 계산한 결과 2002년 하계는 안정도가 높은 지역은 성층이 있는 지역과 동일하게 나타났다. 2007년 하계는 해중산 전면부 수심 약 10~40 m 까지 안정하며 후면부는 20~30 m 까지 안정하며 30 m 이심은 불안정한 수주를 나타냈다.

수주의 혼합 정도와 회전성을 파악하기 위해 연직전단 및 상대외도를 계산한 결과 연직전단 값이 높은 지역인 수심 39 m 이심에서 상대외도는 상승류(+)와 하강류(-)의 부분이 혼재하여 나타났다.

해중산 후면부에서 수온, 염분 약층 및 영양염은 상승되고 해중산 주변 지역으로 수렴하는 현상은 상승류에 의해 수주가 불안정하여 혼합이 되어 나타나는 것이다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 『인공용승류를 이용한 어장환경 개선연구』의 연구비 지원에 의해 수행한 연구결과의 일부입니다.

참고 문헌

- [1] 조규대, 김동선, 박성은. 2003. 인공용승구조물 설치에 적합한 해역의 해양 환경 특성. 해양환경안전학회지. 12(1). pp.1-8
- [2] 김동선, 황석범. 2006. 인공용승구조물 설치에 의한 유동변화(1). 해양환경안전학회지. 12(6). pp.301-306.
- [3] A.T. Castro, G.G.d Velasco, A.V. Levinson, R.G. Armas, A. Muhlia and M.A Cosio. 2003. Hydrographic observations of the flow in the vicinity of a shallow seamount top in the Gulf of California. Estuarine Coastal and Shelf Science. 57. pp.149-162.
- [4] 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 the world ocean. Science. 166. pp.72-76.
- [5] G.L. Pickard and W.J. Emery. 1990. Descriptive Physical Oceanography. pp.54-56.
- [6] Roden, G.I. and Taft, B.A 1982. Effect of Emperor Seamounts on the messscale thermohaline structure during the summer of 1982. J. of Ecophysical Research 90: pp.839-855.