2007년도 해양환경안전학회 추계학술발표회

論 文

인공용승구조물 설치에 의한 유동변화(Ⅱ)

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

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

Variation of Current by the Building of Artificial Upwelling Structure(Ⅱ)

Suk-Bum Hwang* · Dong-Sun 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 남해안 거제도 앞바다에 구축된 인공용승구조물로 인하여 발생하는 유동 변화를 파악하기 위해 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용한 정선관측을 2006년 하계 및 추계에 실시하였다. 관측 결과 하계에는 수심 약 30~40 m를 기준으로 상층과 하층의 유동분포가 상이한 경계수심이 존재하였으며, 추계에는 이러한 현상이 3층 구조로 나타났다. 또한 연직유동성분은 수심과 지역에 따라 상승류와 하강류가 번갈아 분포하였으며 이러한 현상은 관측범위를 확장하였을 때도 유사한 유동분포를 보이고 있다. 한편 ADCP의 수평유동성분을 이용하여 계산된 연직전단(vertical shear) 및 상대와도(relative vorticity)는 상승류가 발생하는 지역에서 연직전단은 큰 값을 나타내었고, 상대와도는 +값으로 상승류의 방향을 나타내었다. 이러한 결과는 유동성분의 상승류 분포역과 유사하게 나타났다.

핵심용어 : 인공용승구조물, ADCP, 연직유동성분, 연직전단, 상대와도

Abstract : To illustrate the variation of current around artificial upwelling structure which is located in the South Sea of Korea, current measurements using ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) during neap and spring tides were carried out on 27th July(summer), 14th October and 30th November(Autumn), 2006. Current after the set up of artificial upwelling structure were shown different in the upper and lower layer, the boundary between the upper and lower layer was at 27~30m depth in summer. And the boundary layer was formed structure of three layer in Autumn. Upwelling and downwelling flow were occurred around the seamount, and these vertical flows were connected from surface to bottom. The distribution of vertical shear and relative vorticity support the vertical flow around the seamount. The strength of vertical shear was higher and the direction of relative vorticity was anticlockwise (+) around the upwelling area.

Key words : Artificial Upwelling Structure, ADCP, W-Component, Vertical Shear, Relative Vorticity

1. 서 론

우리나라의 연안역은 도시화·산업화와 더불어 산업 및 생활폐수의 육상 유입으로 인한 지속적인 해양환경 오염과 대규모의 간척·매립사업의 확대 등으로 인하여 어장환경 악화가 가속되고 있다. 또한 UN 해양법(1994년 12월 발효), 일본, 중국 등의 배타적 경제수역 선포(2001년 발효) 및 조업규제강화로 어장 축소, 이에 따른 수산자원의 어획량이 줄어들고 있는 현실이다. 이러한 연안역의 환경오염 및 어장축소로 인하여 잡는 어업에서 기르는 어업으로의 수산자원의 육성에 대한 중요성이 부각되고 있다. 또한 국내·외 어업여건의 변화에 능동적으로 대체하고 연안어업을 경쟁력 있는 산업으로 육성하기 위해서 현재 국책 사업으로 바다 목장화 사업 및 인공어초 사업과 같은 수산자원조성사업이 연안역에서 실시되고 있다.

이러한 수산자원조성사업과는 다른 개념으로 해중에 구조물을 설치하여 인공적으로 용승류를 발생시키는 개념으로 인공용승류를 이용한 어장환경조성사업이 현재 남해안 거제 앞바다에서 시행되고 있다(김과 황, 2006(a); 김과 황, 2006(a); 해수부, 2005(a); 해수부, 2005(b); 해수부, 2006; 조 등, 2003).

따라서 본 연구는 현재 한국 남해안 거제도 앞바다인 소매물도와 국도 사이 해역에 설치된 인공 해중산에 의한 유동변화를 파악하기 위하여 ADCP를 이용하여 정선관측을 실시하였다. 정선관측 결과에 따른 유동변화를 제시하고 해중산에 의하여 발생되는 상승류의 존재여부와 크기 및 범위를 정량적으로 파악하였다.

* 대표저자 : 비회원, chamsin75@pknu.ac.kr, 051)620-6211
**종신회원, kimds@pknu.ac.kr, 051)620-6255
***비회원, bea-31@hanmail.net, 051)620-6211
****비회원, wishing_u@hotmail.com, 051)620-6211

2. 자료 및 방법

2.1 인공용승구조물 및 관측방법

연구해역에 설치된 인공용승구조물은 2005년부터 2006년까지 약 2년에 걸쳐 설치되었다(김과 황, 2006(a); 김과 황, 2006(a); 해수부, 2005(a); 해수부, 2005(b); 해수부, 2006;). 설치된 해중산은 블록(1 m × 1 m × 1 m)을 총 19,115개 투하하여 16~20 m(H) × 42 m(W) × 80 m(L) 규모의 크기로 해저 산맥 형태를 나타내고 있다(Fig. 1).

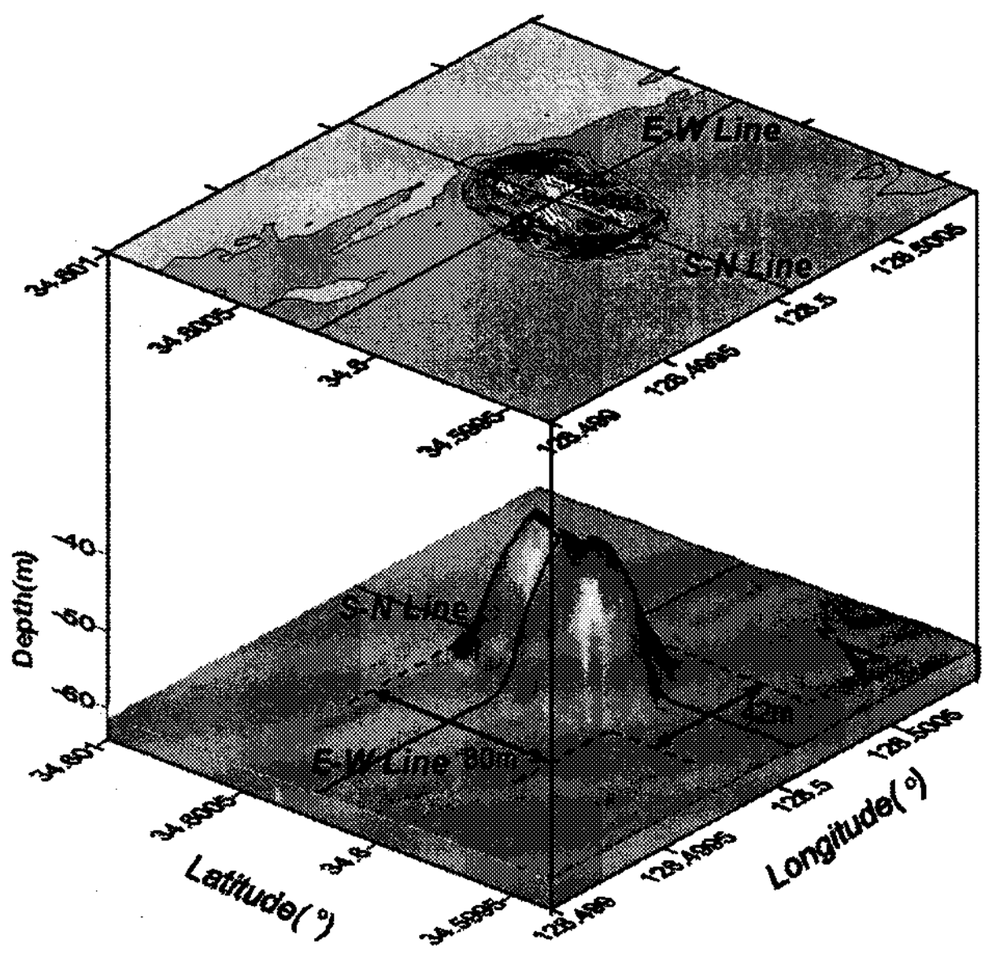

Fig. 1. 3-dimensional image of artificial upwelling structure.

본 연구의 관측방법은 고정된 정점에서의 관측보다 더 넓은 범위에서 공간적인 흐름을 파악할 수 있는 정선관측 방법을 채택하였다. 관측시기는 2006년 7월 27일(대조기) 및 10월 14일(소조기)에 직경 3 km로 해중산의 동서방향(EW line)과 남북방향(SN line)을 지나는 정선관측을 실시하였다(Fig. 1). 또한 2006년 11월 30일(소조기)에는 인공용승구조물에 의해서 변화하는 유동분포의 크기 범위를 보다 더 상세히 파악하기 위하여 연장된 범위인 직경 6 km에서 정선관측을 실시하였다(Fig. 1).

2006년 7월 27일(대조기) 및 10월 14일(소조기)에 실시한 직경 3km 정선관측 이동경로는 구조물을 중심(128° 30′ E, 34° 36′ N)으로 5개의 관측선을 경 · 위도별로 EW 및 SN line으로 각각 설정하였으며, 조시에 따라서 관측을 실시하였다. 또한 2006년 11월 30일(소조기)에 직경 6 km로 확장된 조사해역은 EW 및 SN line을 왕복 2회로 창 · 낙조시에 실시하였다.

관측에 사용된 기기는 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler; RDI, workhorse mariner 300khz)를 이용하였다. 선박 항행 시 선박의 속도는 여러 번의 테스트를 거친 결과 자료의 최소 오차속도인 약 7 knot로 일정하게 유지하여 관측을 실시하였다. 선박의 정선 관측시 해중산에 대한 정확한 위치와 해중산을 지나는 관측선 좌표 값의 위치오차를 최소화하기 위하여 DGPS(Differential Global Position System)를 ADCP와 연동하여 관측 선박의 정확한 위치와 유속 값의 실시간 자료를 획득하여 결과에 나타내었다. ADCP의 ping의 간격은 초(sec)당 1개(ping/sec=1)로 설정하였고 해저면 추적모드(Bottom tracking mode)를 실시하였으며 10 sec 및 60 sec 평균된 자료를 사용하였다. 그리고 ADCP 측정오차범위는 Bin size(Depth)를 4 m, ensemble(Δt)의 크기가 10 sec일 경우 1.18 cm/sec 이고 60 sec일 경우 0.74 cm/sec의 오차범위를 나타낸다(RDI, 1989).

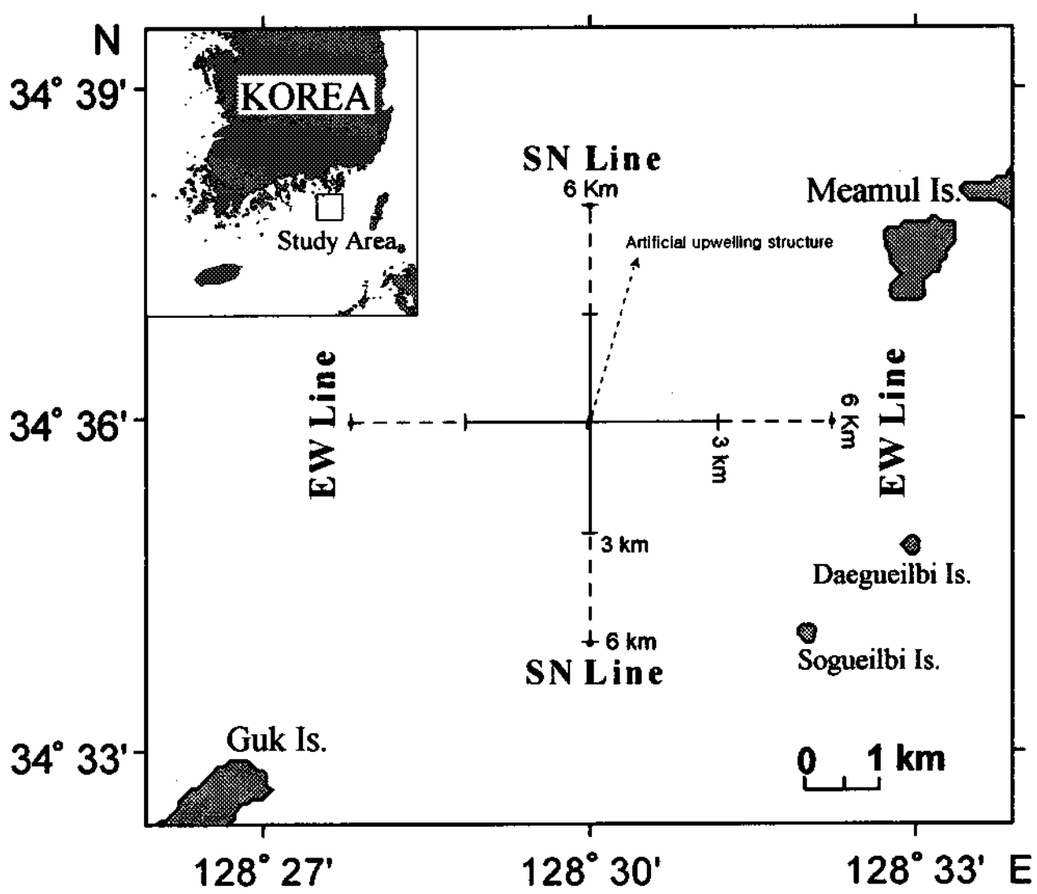

Fig. 2. Observation line of study area. Dash line is indicated the distance across of 6 km.

2.2 자료분석

연구해역의 수심별 · 공간적 유동분포를 파악하기 위하여 수평유동성분(u, v-component)를 이용하여 유향, 유속의 시계열 분포(stick vector)를 나타내었으며, 연직유동성분(w-component)의 수심별 분포도를 작성하여 상승류 및 하강류의 분포를 파악하였다. 또한 ADCP의 연직유동성분에 대한 신뢰도 및 오차에 대한 문제를 해결하기 위하여 연직전단(vertical shear) 및 상대와도(relative vorticity)를 계산하였다. 계산에 사용된 자료는 ADCP에서의 수평유동성분을 사용하였으며 수평유동성분의 오차범위는 ensemble(Δt)의 크기가 60 sec 일 때 0.74 cm/sec를 나타내었다.

1) 연직 전단(vertical shear) 계산

본 연구에서는 연직 전단을 이용하여 연직류의 크기를 계산하였고(식 1), 관측된 연직유동성분과 비교 · 분석하였다.

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

여기서, u 및 v는 유속의 x 및 y성분을 나타내며 z는 ADCP의 수심 간격인 4 m이다.

2) 상대와도(relative vorticity) 계산

본 연구에서 상대와도를 이용하여 연직(z)방향의 와도성분을 간접적으로 추정하였다. 상대와도는 연직류에 대한 방향(상승류 및 하강류)을 지시한다.

$$\text{상대와도}(\sec^{-1}) = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서, u 및 v는 유속의 x 및 y성분을 나타내고, ∂x 및 ∂y는 ADCP 관측 시 선박이 위도 및 경도 상으로 항행한 거리를 나타낸다. 식(2)에서 상대와도가 양(+)일 때, 즉 식(2)의 오른쪽 두 항이 $\partial v/\partial x > \partial u/\partial y$ 일 때 흐름은 반시계 방향으로 회전하여 상승류의 흐름을 가진다. 또한 상대와도가 음(-)인 경우 즉 $\partial v/\partial x < \partial u/\partial y$ 일 때 흐름은 시계방향으로 회전하여 하강류의 특성을 가진다(John, 1997).

3. 결과 및 고찰

3.1 수평유동성분의 분포

Fig. 3는 2006년 7월 27일 대조기 창·낙조시에 실시한 EW line에서의 수평유동성분(u, v-component)의 연직분포를 나타낸 것이다.

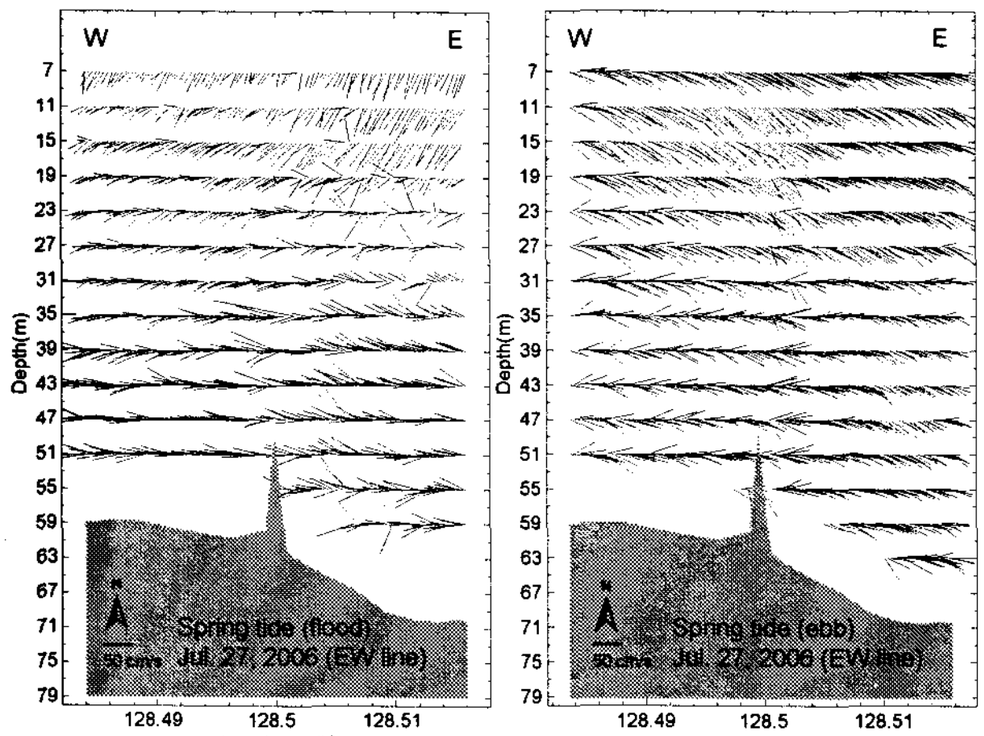

Fig. 3. Vertical distribution of stick vector along the EW line at flood and ebb current on 27th July 2006(spring tide).

창조시 EW line은 인공 해중산 동쪽의 수심 약 20 m 이천에서 강한 남서류의 흐름이 나타났으며, 수심 약 30 m 이심에서는 강한 북서류의 흐름이 나타났다. 또한 수심 약 30~40 m의 흐름은 동쪽에서 북서류의 흐름을 보이다가 서쪽으로 갈수록 남서류로 흐름이 바뀌는 양상을 보이고 있다. 또한 낙조시의 EW line의 결과는 전 수심에 걸쳐 남동류의 흐름이 우세하게 나타났다. 이와 같이 하계인 2006년 7월 27일 대조기에 실시한 정선관측의 결과는 창조시에는 수심 약 30~40 m에 경계수심이 존재하였고 그 경계수심을 기준으로 하여 상층에서는 남서류, 하층에서는 북동류의 흐름이 나타났다. 또한 낙조시의 흐름은 남동류의 흐름이 우세하게 나타났다.

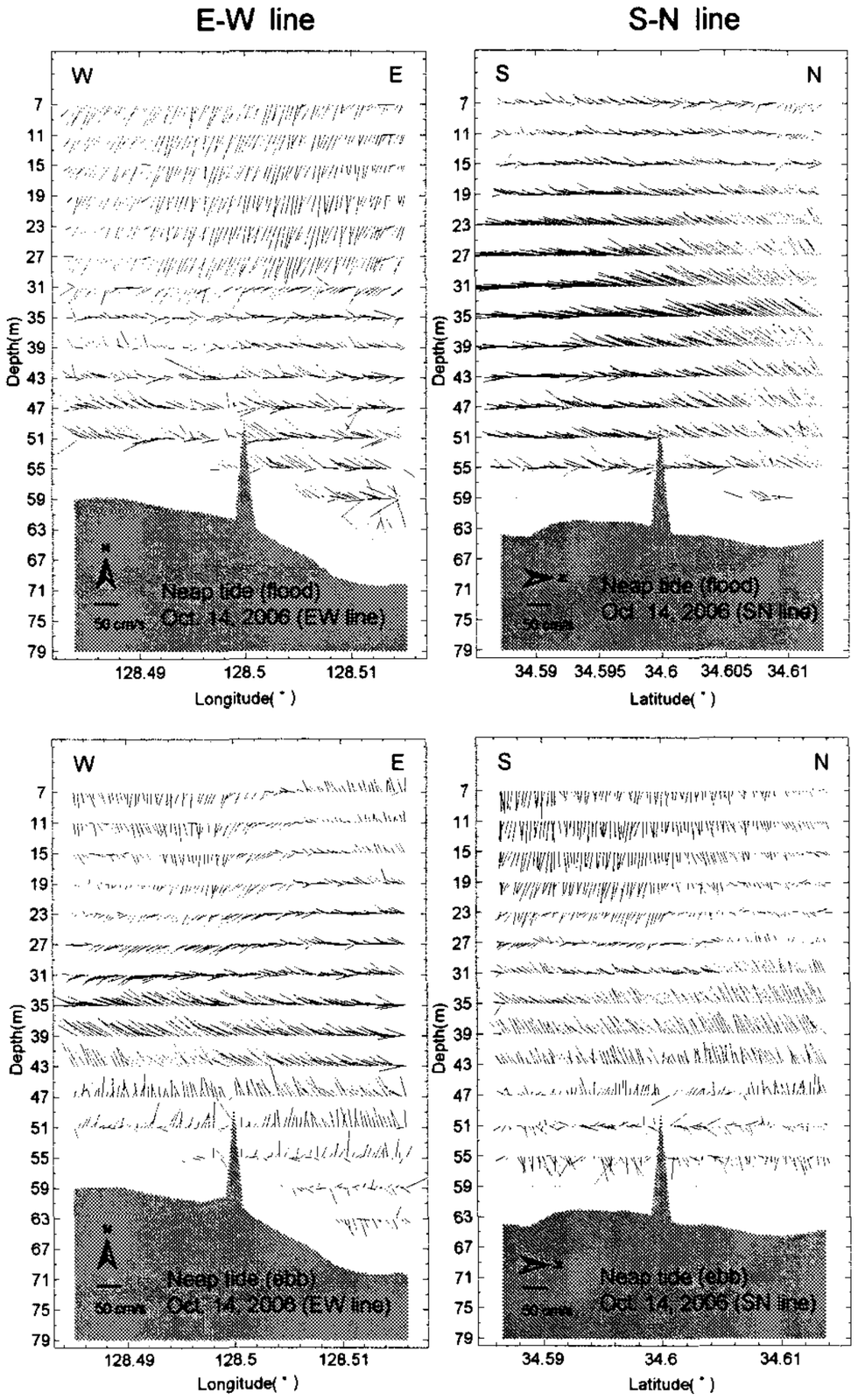

Fig. 4. Vertical distribution of stick vector along the EW and SN line on 14th October 2006(neap tide).

Fig. 4은 2006년 10월 14일 소조기 창·낙조시에 실시한 EW 및 SN line에서의 수평유동의 연직분포를 나타낸 것이다. 인공 해중산 주변을 횡단하는 EW line을 보면 전체적으로 수심 약 35 m에서 경계수심이 존재하였고 경계수심을 기준으로 상층에서는 남향류, 하층에서는 북향류의 흐름이 우세하게 나타났다. 특히 인공 해중산 북쪽의 수심 약 19 m에서 저층까지 강한 북서류의 흐름이 우세하게 나타났다. 또한 SN line에서는 전체적으로 북서류의 흐름이 우세하게 나타났다. 한편 낙조시의 유동분포를 보면, EW line에서는 서로 다른 흐름이 수심별로 존재하였다. 인공 해중산에서 서쪽 수심 약 35 m 이천에서는 남향류의 흐름이 우세하였고, 동쪽에서는 북향류의 흐름이 나타났

다. 또한 수심 35 m 이심에서는 북서류의 흐름이 나타났으며 인공 해중산 동쪽의 수심 59 m 이심에서는 남향류의 흐름이 존재하였다. 특히, 수심 35 m의 경계수심을 경계로 그 이심(수심 43 m)에서는 다른 수심에 비하여 강한 북향류를 보이고 있다. SN line 뿐만 아니라 EW line에서도 동쪽 수심 59 m 이심에서 남향류를 나타내는 3층류의 흐름이 나타났다. 즉, 수심 약 27 m를 기준으로 이천에서는 남향류의 흐름이 나타났으며 그 이심인 수심 27 m에서 북향류의 흐름이 그리고 수심 51 m 이심에서는 남향류의 분포를 보이고 있다. 특히, 수심 31~47 m에서의 북향류는 다른 수심의 유속에 비하여 강하게 나타나고 있다.

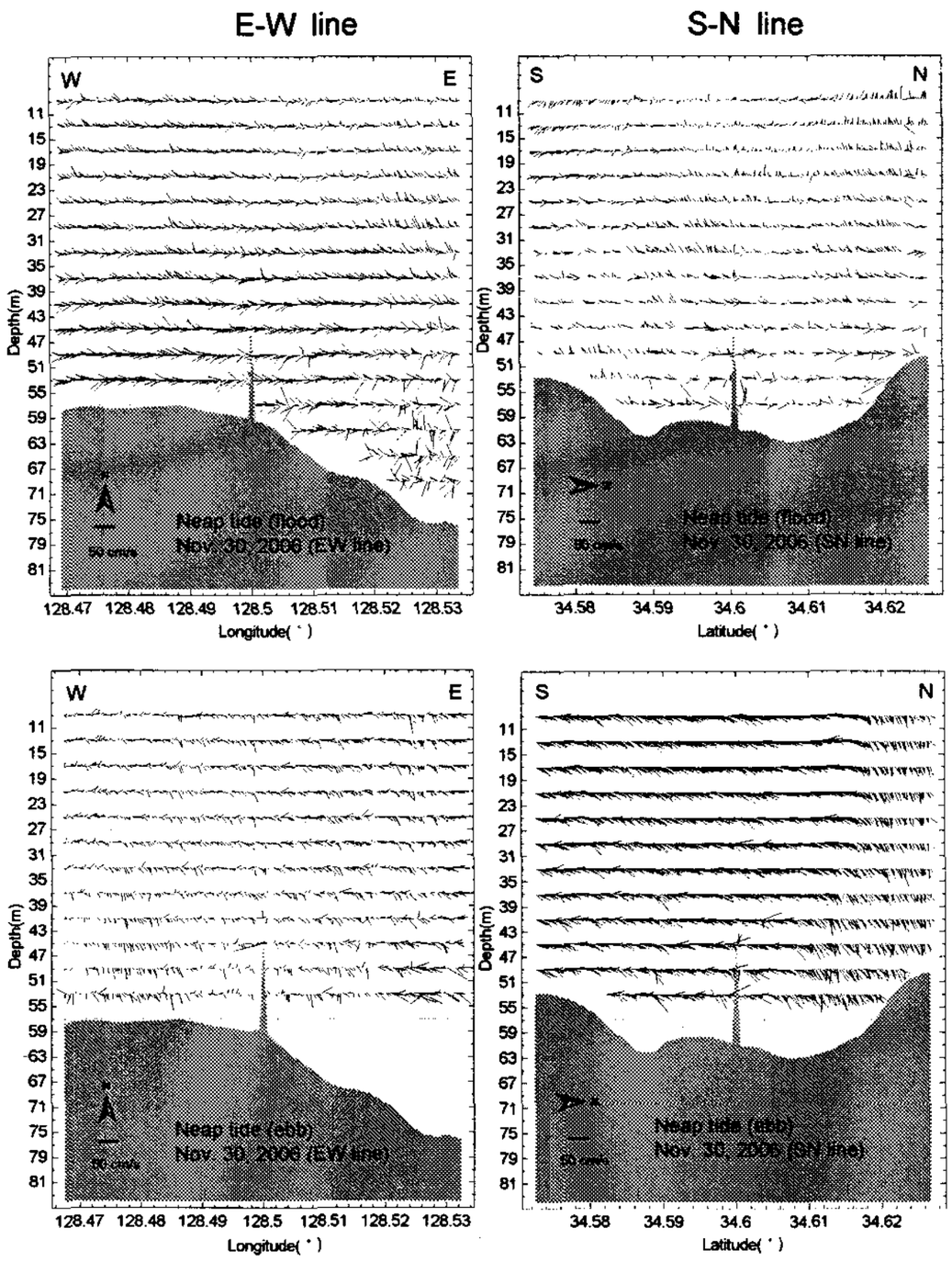

Fig. 5. Vertical distribution of stick vector along the EW and SN line on 30th November 2006(neap tide).

Fig. 5은 2006년 11월 30일 소조기 창 · 낙조시에 실시한 EW과 SN line에서의 수평유동의 연직분포를 나타낸 것이다. 창조시 EW line의 결과를 보면 흐름의 크기는 작지만 전체적으로 북서류의 흐름이 우세하였고 표층에서 저층으로 갈수록 흐름의 크기는 강해지고 흐름 방향은 북서류와 남서류가 혼합하여 나타나는 유동분포특성을 보이고 있다. 또한 SN line에서는 34.584°N에서 그 남쪽의 수심 약 20 m 이천에서는 남서류의 흐름이 우세하였으나 다른 지역에서는 표층에서 수심 약 45 m까지 북향류의 성분이 우세하게 나타났다. 한편, 인공 해중산 북쪽의 수심 약 50 m이심에서의 유동의 세기는 다른 지역에 비하여 크고 그 방향은 남 · 북향류가 번갈아 가면서 나타났다. 한편 낙조시에는 EW 및 SN line에서 전 수심 및 지역에 걸쳐 남동류의 흐름이 우세하게 분포하였다. 특히 SN line에서 북쪽역으로 갈수록 전 수심에 걸쳐서 그 크기가 강하게 나타났다.

이와 같이 인공용승구조물 주변의 공간적인 유동변화를 파악하기 위한 정선관측결과를 보면 수심 약 30~40 m를 기준으로 상층과 하층의 다른 유동특성을 보이는 경계수심이 존재하였다. 즉 하계인 2006년 7월 27일의 결과에서는 창 · 낙조시에 그 기준이 뚜렷하게 나타났지만(Fig. 4), 추계인 2006년 10월 14일의 결과는 수심 30~50 m를 기준으로 그 이천과 이심에서 유동분포가 다르게 나타나는 3층 구조를 보였다(Fig. 5). 이러한 유동분포의 결과는 10월(추계)인 관측시기에 경계수심(수심 약 27~35 m)에서 성층이 형성되어 그 이천과 이심의 흐름이 서로 다르게 나타났다고 생각한다. 또한 수심 50 m 지역에서 흐름이 서로 다른 이유는 해중산 형성으로 인한 저층에서의 확산 및 와류의 효과로 그 이천과는 다르게 분포한다. 그리고 직경 6km로 연장된 관측범위인 2006년 11월 30일의 결과는 창조시에는 북서류의 흐름이 우세하게 분포하였으며 낙조시에는 남동류의 흐름이 우세하게 나타났다. 또한 창조시보다 낙조시의 흐름의 크기가 더 크게 나타남을 알 수 있다(Fig. 6).

3.2 연직유동성분, 연직전단 및 상대와도의 분포

인공 용승구조물에 의한 상승류의 발생 유무 및 그 크기와 공간적 분포 범위를 파악하기 위해서 ADCP에서 관측된 연직유동성분(w-component)을 분석하였다. 또한 인공 해중산 주변에서 발생하는 와류의 크기 및 형성범위를 파악하기 위하여 수평유동성분(u, v-component)을 이용한 연직전단(vertical shear) 및 상대와도(relative vorticity)를 계산하였으며 연직유동성분과 비교 · 분석하였다.

계산된 연직전단 및 상대와도를 관측된 연직유동성분과 비교 · 분석하여 상승류 및 하강류에 대한 분포를 정량적으로 제시하였다. 그림에서 +값(음영부분) 및 -값(백색부분)은 연직전단에서 각각 상승류 및 하강류의 크기를, 상대와도에서는 연직류의 방향을 나타낸다. 따라서 상대와도에서의 +값은 반시계방향의 회전인 상승류의 흐름을 나타내고 -값은 시계 방향의 회전인 하강류의 흐름을 나타낸다.

Fig. 6는 2006년 7월 27일 대조기 창 · 낙조시에 실시한 연직유동성분의 분포를 나타낸 것이다. 창조시에는 인공 해중산을 중심으로 동쪽인 128.500°E~128.510°E에서 2.0 cm/sec 이상의 크기를 가지는 상승류의 분포가 표 · 저층에 걸쳐서 우세하게 나타났다. 또한 낙조시의 결과를 보면, 해중산 서쪽에서 상승류의 흐름이 표 · 저층에 걸쳐서 강하게 나타났으나 동쪽으로 갈수록 하강류보다 상승류의 세기가 약해지면서 해중산 정상부에서 하강류의 분포를 하고 있다. 이와 같이 2006년 7월 27일 대조기에 실시한 연직유동분포는 창 · 낙조시 모두 상승류의 분포가 하강류 보다 우세하게 나타났으며, 낙조시에는 상승류 및 하강류가 번갈아 분포하는 형태를 보이고 있다. 특히 낙조시의 해중산 정상부에서는 하강류가 그 주변에는 상승류가 강하게 나타나는 특성을 보이고 있다. 이러한 특성은 해중산에 의한 상승류 효과와 더불어 성층의 파괴로 인한 상 · 하층의 연직혼합에

의한 상승류의 효과가 더해진 현상으로 생각된다.

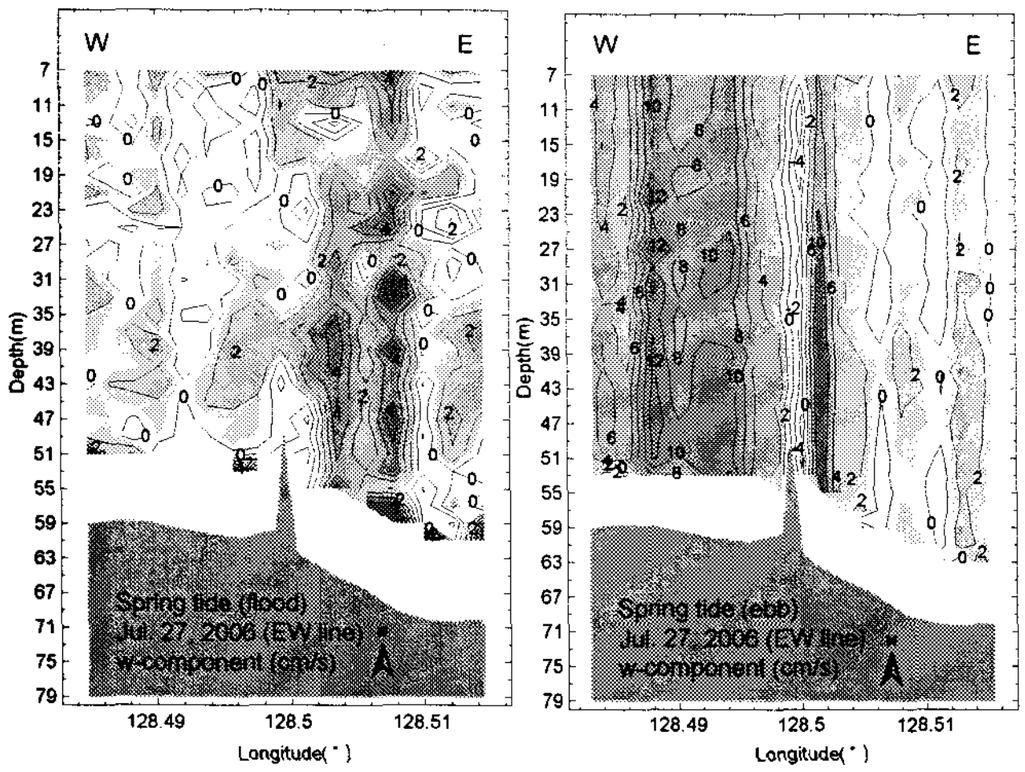

Fig. 6. Vertical distribution of w-component along the EW line on 27th July 2006(spring tide). Hatching and white color are indicated upwelling(+) and downwelling(-) flow, respectively.

Fig. 7는 2006년 7월 27일 대조기의 연직전단 및 상대와도의 결과를 연직분포로 나타내었다. 먼저 창조시의 해중산의 서쪽인 128.484°E~128.488°E에서는 연직전단의 크기가 약 2.5×10^{-2} sec^{-1}로 나타났으며 해중산 중심부까지는 약 2.3×10^{-2} sec^{-1}로 작게 나타났다. 반면, 해중산 동쪽인 128.502°E~128.508°E의 수심 약 15~43 m에서 연직전단의 값이 약 3.8×10^{-2} sec^{-1}로 가장 높은 분포를 나타내었으며 128.510°E의 수심 약 15~19 m에서 일부 높게 나타나는 분포를 보였다. 또한 창조시 상대와도는 해중산의 서쪽과 정상부에서는 +의 분포를 보였으며 128.504°E~128.507°E에서는 -값이 우세하였으며, 128.507°E~128.510°E에서는 +값이 높은 분포를 나타내었다.

한편 낙조시 EW line의 결과는 연직전단의 값이 서쪽 128.486°E~128.496°E의 수심 약 15~30 m에서 2.6×10^{-2} sec^{-1}로 높은 분포를 나타내었으며 동쪽에서는 1.9×10^{-2} sec^{-1}로 작게 분포하였다. 또한 상대와도의 결과 연직전단과 같은 지역에서 상승류(+)와 하강류(-)의 부분이 혼재하고 있었다.

이와 같은 연직전단 및 상대와도의 분포를 자연 용승해역인 미국 캘리포니아 만에 위치하고 있는 EBES(El Bajo de Espiritu Santo) seamount에서 계산한 연직전단과 비교하면 본 연구해역에 설치된 해중산 주변역에서 계산된 연직전단 크기(3.0×10^{-2} sec^{-1})에 비교하여 약 10배정도로 큰 값이다(Castro et al., 2003). EBES seamount의 경우 그 규모가 6.0×10^{7} m^3(20 m(H) × 1000 m(W) × 3000 m(L))이지만, 본 연구해역의 해중산의 규모는 6.0×10^{4} m^3(20 m(H) × 40 m(W) × 80 m(L))로 약 10^3배 정도 차이가 나타나는 결과라 생각된다. 해중산이 규모면에서 EBES보다 작지만 상승류 발생의 공간적 분포가 유사하게 나타남을 알 수 있다. 또한 해중산 주변에서 발생하는 와류는 해중산 주변에서 저층의 해류가 해중산을 돌아가는 형태의 흐름으로 Taylor column과 유사한 형태를 보이고 있다(R. Karsten, 2002). Owens and Hogg(1980)은 Gulf stream에 위치한 400 m 높이의 해중산에서 상대와도 및 연직와류가 발생하는 지역과 Taylor column이 발생하는 지역과 일치하고 있음을 밝혔다. 따라서 본 연구해역의 상대와도 및 연직전단의 결과를 보았을 때 Taylor column과 유사한 형태로 상승류 및 하강류가 발생된다고 생각된다.

따라서 2007년 7월 27일 하계의 연직유동성분, 연직전단 및 상대와도의 분포특성은 지역적으로 상승류와 하강류가 번갈아 나타나고 있으며, 상승류가 발생하는 해역이 연직전단과 상대와도에서 나타내는 상승류의 해역과 일치하고 있다.

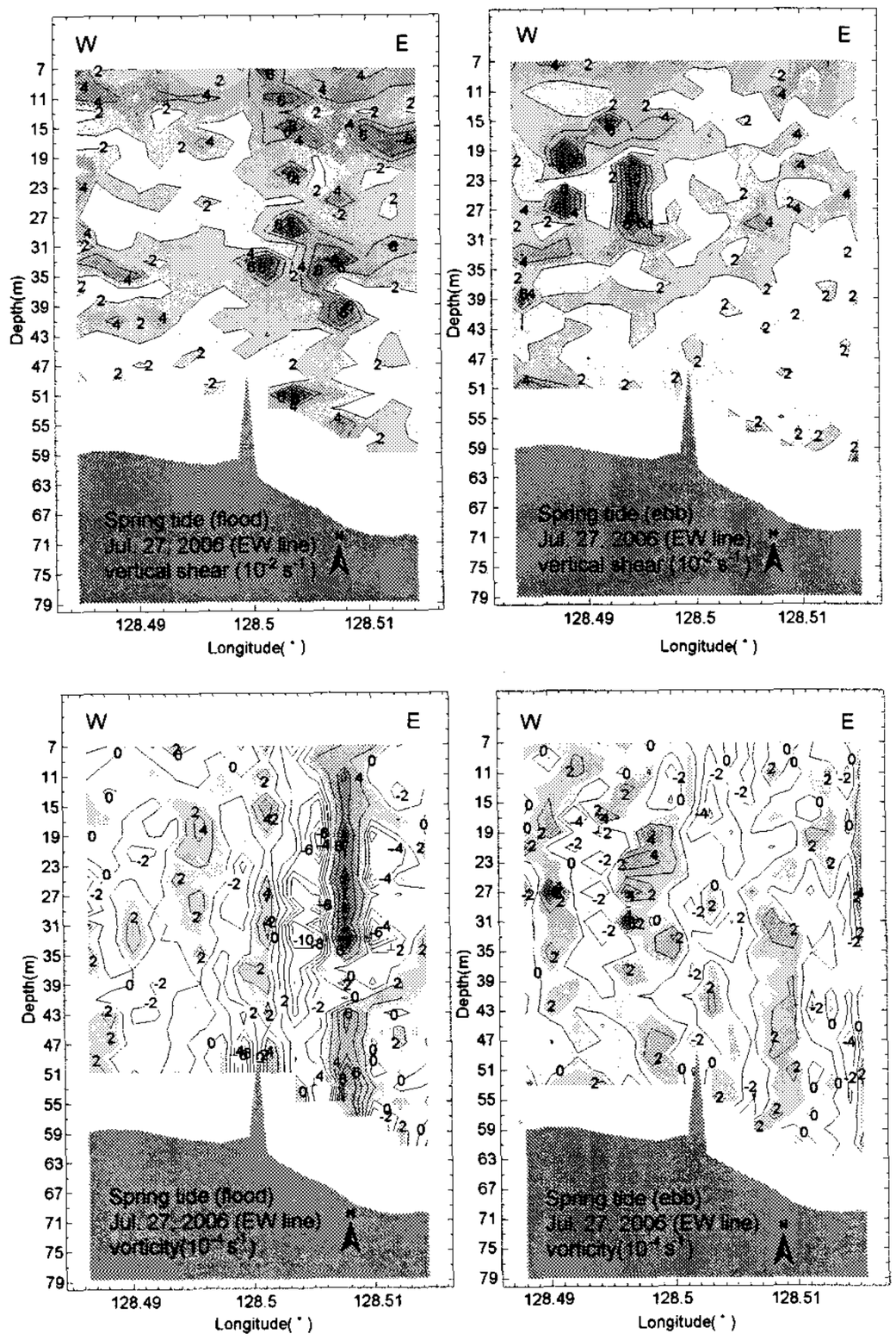

Fig. 7. Vertical distribution of vertical shear(upper panel) and relative vorticity(lower panel) along the EW line on 27th July 2006(spring tide). Hatching is indicated ascending value(+)at vertical shear and counter-clockwise direction(+) at relative vorticity.

4. 결 론

한국 경남 남해안 소매물도와 국도 사이 해역에 설치되어 있는 인공용승구조물에 대하여 유동변화를 파악하기 위해 ADCP

를 이용하여 정선관측을 실시하였으며, 그에 따른 유동분포 및 연직유동성분을 나타내었고, 해중산 주변역에서 발생하는 와류의 크기 및 형성범위를 파악하기 위하여 연직전단 및 상대와도를 계산하였다.

수평유동성분의 분포는 수심 약 30~40m를 기준으로 상층과 하층의 다른 유동특성을 보이는 경계수심이 존재하였으며, 창 · 낙조시에 따라 유동분포가 다르게 나타났다.

연직유동성분의 분포는 수심과 지역을 따라서 상승류와 하강류가 번갈아 나타나는 분포를 보였다. 이러한 특성은 해중산에 의한 상승류 효과와 더불어 표 · 저층 간의 연직혼합에 의한 성층이 파괴되는 효과가 더해진 현상으로 예상된다.

연직전단 및 상대와도의 결과는 연직전단이 큰 값을 나타나는 부분에서 상대와도가 상승류와 하강류의 방향으로 혼재하여 나타났다. 또한 해중산 정상부에서의 연직전단이 높은 분포역은 상대와도에서 상승류의 방향을 나타내었다. 이와 같이 연직유동성분에서 나타나는 상승류의 발생 해역과 연직전단 및 상대와도의 상승류 발생해역은 지역적으로 유사한 분포를 나타내었으며, 상승류 발생해역의 지역적인 일치는 연직유동성분에 대한 신뢰도 문제를 수평유동성분을 이용한 연직전단 및 상대와도 값으로 설명하였다.

따라서 인공 해중산에 의한 상승류의 발생은 저층에 존재하고 있는 고농도의 저층 영양염이 유광층으로 부상하고 조류에 의해서 확산하여 해중산 주변역의 기초 생산력 증대를 가져온다. 또한, 해중산 주변역에서의 기초 생산력 증대는 먹이연쇄효과에 따른 어류를 유도하고 집적하여 어장환경조성에 대한 가능성을 제시한다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] 김동선, 황석범. 2006(a). 인공용승구조물 설치에 의한 유동변화(1). 해양환경안전학회지. 12(6). pp.301-306.

[2] 김동선, 황석범. 2006(b). 인공용승구조물 설치해역의 해양환경 특성. 해양환경안전학회지. 12(1). pp.1-8.

[3] 조규대, 김동선, 박성은. 2003. 인공용승구조물 설치에 적합한 해역의 해양환경특성. 한수지. 36(2). pp.187-192.

[4] 해양수산부. 2005(a). 인공용승류를 이용한 어장환경 개선 연구(1차년도). pp.375.

[5] 해양수산부. 2005(b). 인공용승류를 이용한 어장환경 개선 연구(2차년도). pp.299.

[6] 해양수산부. 2006. 인공용승류를 이용한 어장환경 개선 연구(3차년도). pp.524.

[7] 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.

[8] John A. Knauss. 1997. Introduction to Physical Oceanography second edition. Prentice Hall. pp. 105.

[9] Owens, W.B. and N.G. Hogg. 1980. Oceanic observations of stratified Taylor columns near a bump. Deep Sea Research. 27. pp.1029-1045.

[10] RD-Instruments. 1989. Principles of operation: A practical primer. pp.36.

[11] Richard Karsten. 2002. Fluid Dynamics and Taylor Columns. Acadia university(http://ace.acadiau.ca/math/karsten/Projectwebpages/TimandJeff/fluid.pdf).