

용승을 고려한 인공해중산 최적배치 수치실험

김성현 · 김동선^{1)*}

부경대학교 해양산업개발(협), ¹⁾부경대학교 해양산업개발연구소
(2011년 5월 2일 접수; 2011년 6월 8일 수정; 2011년 7월 22일 채택)

Numerical Upwelling Experiment for Optimum Arrangement of Artificial Seamount

Seong Hyeon Kim, Dong-Sun Kim^{1)*}

Interdisciplinary Program of Ocean Industrial Engineering the Graduate School, Pukyong National University, Busan 599-1, Korea

¹⁾*Research Center for Ocean Industrial Development(RCOID), Pukyong National University, Busan 599-1, Korea*
(Manuscript received 2 May, 2011; revised 8 June, 2011; accepted 22 July, 2011)

Abstract

In order to estimate volume transport by upwelling for single artificial seamount, same shape and size of artificial seamount already deployed was applied to numerical experiment. The result showed that strong upwelling appeared at front while took place downwelling at rear. The strongest upwelling existed at the top of the artificial seamount. Volume transport by upwelling was computed as 785 m³/s. Column arrangement was applied to two artificial seamount in three cases; case 1) no clearance, case 2) sixty-five meters of clearance as half of artificial seamount's length, and case 3) hundred-thirty meters of clearance as an artificial seamount's length. All cases of column arrangements showed more upwelling volume transport than that of single seamount. Particularly, the case of no clearance calculated as 106% and appeared the most upwelling effect comparing to two other cases. Row arrangement was also applied to two artificial seamount in three cases; case 4) no clearance, case 5) forty meters of clearance as an artificial seamount's width, and case 6) eighty meters of clearance as twice of artificial seamount's width. Upwelling volume transport in case 4 increased 48% than the case of single seamount. Other two cases of 5 and 6 were estimated as 97% increased and more effective than case 4. According to the case experiments, column arrangements show more upwelling volume transport than that of row arrangements. In cases of column arrangements, with decreasing clearance between two seamount, the effect increases while showing maximum value at clearance zero. In cases of row arrangements, on the contrary, with decreasing clearance between two seamount, the effect decreases while showing minimum value at clearance zero. Since simple barotropic condition was considered for this study, further study is necessary by considering baroclinic condition to get close to reality. In conclusion, in deploying artificial seamount, optimal arrangement should be well designed to enhance primary and secondary productivity and to increase the diversity of species as well as reducing time and space.

Key Words : Volume transport, Upwelling, Artificial seamount, Numerical experiment, Downwelling

*Corresponding author : Dong-Sun Kim, Research Center for Ocean Industrial Development (RCOID), Pukyong National University, Busan 599-1, Korea
Phone: +82-51-629-7374
E-mail: kimds@pknu.ac.kr

1. 서론

해양의 용승(upwelling)현상은 표층수가 바람과 같은 다른 외력에 의하여 이동될 경우 그 자리를 보충하

기 위하여 저층의 해수가 상층으로 상승하는 것을 말한다(Beer, 1997). 연안용승은 북반구에서 육지를 오른쪽(왼쪽)에 두고 바람이 연안과 평행하게 북풍(남풍)이 지속적으로 불 경우(남반구는 반대) 에크만 수송(Ekman transport)에 의하여 연안의 표층수가 외해로 이동하게 되고 이를 보충하기 위하여 저층수가 상승하는 현상이다(Ekman, 1905; Dietrich, 1972). 연안용승이 발생하면 풍부한 영양염을 가진 저층수(Codispoti와 Friederich, 1978)가 표층의 유광층으로 도달하여 연안해역의 기초생산력이 증가하게 되고 먹이연쇄작용으로 어군군집을 유도하는 역할을 하게 된다. Ryther(1969)는 용승현상이 일어나는 지역을 용승어장으로 정의하고 전 세계 어장 면적의 1%에 불과하지만 어류 생산량은 전체의 50%에 이른다고 하였다. 세계적으로 대표 용승어장은 페루 해안, 캘리포니아 해안, 벵겔라 해안 등이 있으며, 이들 어장은 어류 생산량이 높은 것으로 알려져 있다. 또한 용승현상은 해저지형의 영향을 받기도 하는데 캘리포니아 해안에 위치한 자연 해중산인 EBES(El Bajo de Espiritu Santo)의 정상부에서 수온 및 염분이 수렴하고 정상부에서 수주의 안정도가 낮고(Trasviña-Castro 등, 2003), 주변의 플랑크톤을 자연 해중산 주변에 유집시켜 다른 환경에 비해 높은 기초생산력을 나타내는 해역으로 보고되었다(Smith, 1980; Castro 등, 2003).

최근 한국 연안역은 도시화, 산업화 및 공장화로 인한 생활 및 산업폐수의 유입 증가로 해양 환경이 심각하게 파괴되어 어장환경의 악화가 가속화 되고 있다(FAO, 1998). 따라서 연안역의 어장환경을 개선하여 수산자원을 조성하기 위해 인공어초 및 바다목장화사업 등을 실시하고 있다. 한편 용승 메커니즘을 이용하여 기초생산력을 인공적으로 높이기 위하여 한국 남해안 매물도 인근에서 “인공용승류를 이용한 어장환경개선 연구”를 수행하였다. 이 지역의 인공해중산은 높이 16~23 m, 폭 42 m, 길이 129 m로 설치되었으며, 물리환경, 수질·생태환경, 생물상 및 어류상 조사 등 다각적인 연구를 실시하였다(국토해양부, 2008, 2009).

김 등(2008)은 인공해중산 설치 후에 흐름에 의해서 인공해중산 후면부 수온약층의 형성수심이 설치전보다 약 10 m 상승하였다고 했다. 해역의 안정도를 나

타내는 부력주파수(Brunt Vaisala Frequency)는 인공해중산 주변에서 높았고, 연직전단 및 상대와도 계산 결과 상승류 및 하강류가 혼재하여 나타났다(Royer, 1978; Booth, 1988). 또한 하계 저층에 존재하는 고농도의 영양염이 인공해중산 상부에 집적한다(White 등, 1998). 결과적으로 인공해중산 구축 전과 비교하여 영양염 증가에 따른 기초생산력 향상(Yanagi와 Nakajima, 1991; 김 등, 2008)으로 어장환경개선의 효과를 기대할 수 있다. 인공해중산을 이용하여 보다 효과적인 용승 결과를 발생시키기 위해서는 구조물의 크기(Beckmann, 1999) 뿐 만 아니라 구조물 배치 방법(Yanagi와 Nakajima, 1991)의 다각화를 시도할 필요가 있다. 특히 여러 개의 인공해중산을 제한된 공간에서 가장 효율적인 용승효과를 발생시키기 위해서는 배열과 이격거리를 고려한 최적의 구조물 설치방법이 사전에 연구되어야 한다.

현재 한국 남해안에 설치되어있는 인공해중산은 최적지선정에서부터 시설에 이르기까지 오랜 시간(약 10년)과 많은 예산이 소요되었다(해양수산부, 2002, 2005a, 2005b, 2006, 2007; 국토해양부 2008, 2009). 현장의 환경을 반영하기에 어려운 유광층이상의 수심이 깊은 바다에서는 최적의 인공해중산을 설치하기 위해서 사전에 수치모델을 이용한 이상적인 구조물 배치 방안이 제시되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 단일 인공해중산을 수치 모델화하고 복수 인공해중산을 설치 할 경우 가장 효율적인 구조물 배치 방안을 제시한다. 이러한 결과를 통하여 구조물 배치 조건을 도출하여 현장에 적용한다면 보다 효과적인 인공용승류 발생을 기대 할 수 있다.

2. 자료 및 방법

2.1. 수치유동모델

본 연구는 미국 Princeton 대학의 대기과 해양과학 연구센터 및 Dynamics 연구소, NOAA의 지구물리 유체역학실험실 등에서 해양학적 문제에 적용하기 위하여 개발된 3차원 해양순환모델인 POM (Princeton Ocean Model)을 이용하였다(Blumberg와 Mellor, 1987).

모델의 영역 및 계산 조건은 한국 남해안에 설치한

인공해중산과 비슷한 제원과 환경 조건을 이용하였다. 모델 영역은 Fig. 1과 같이 수심 60 m의 channel 중앙에 높이 20 m, 길이 130 m, 폭 40 m의 인공해중산을 설치하였고, 일정한 유속을 부여하기 위하여 남북은 폐쇄경계(close boundary), 동서방향은 개방경계(open boundary)로 구성하였다. 모델에 사용한 유속 및 유향은 해양수산부(2002, 2005a, 2005b, 2006, 2007)와 국토해양부(2008, 2009)에서 실시한 인공해중산(34° 36'N, 128° 30'E) 해역의 자료를 사용하였다. 즉 수치 모델에 사용한 유속은 인공해중산의 설치 전인 2005년 2월과 6월에 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler; RDI, Workhorse mariner 300kHz)를 사용하여 1일(25시간) 계류 관측한 자료로, 대조기 평균 유속 65.0 cm/s를 모델 계산에 일괄적으로 적용하였다. 또한 흐름에 대하여 인공해중산의 경사면이 수직으로 받을 수 있도록 서쪽 경계에서 동쪽 경계로 일정한 유향을 설정하였다. 계산은 인공해중산에 의하여 직접적으로 발생하는 효과를 파악하기 위하여 모든 수심에 수온 및 염분을 동일하게 부여한 순압조건(barotropic condition)에서 실시하였다.

모델 channel의 x축과 y축의 길이는 각각 2 km 및 1 km로 하였고, 격자 구성은 x축과 y축 모두 10 m인 ($\Delta x = \Delta y = 10\text{ m}$) 정방격자로 구성하였다. 연직 방향의 σ -layer 개수는 총 5개로 수심 60 m를 표층에서

저층까지 동일한 간격으로 나눴다. 계산의 시간간격은 CFL 조건($\Delta t = dx / \sqrt{2gh}$)을 고려하여 external time step은 0.05초, internal time step은 0.25초로 하였다. 총 운동에너지는 4시간까지 급격하게 증가하다가 6시간 이후에 서서히 안정화 되고 있으며, 총 계산 시간은 총 운동에너지가 충분히 안정화를 이룬 24시간으로 하였다. 계산 값은 최종 계산된 24시간의 계산 결과 값을 사용하였다.

2.2. 인공해중산의 용승유량

인공해중산에 의해 직접적으로 발생하는 용승유량을 계산하기 위하여 각층에서 수평유속의 1/100보다 큰 상승유속(upwelling velocity)에 해당하는 upwelling cell number를 구하였다. 또한 용승유량(upwelling flux)은 상승유속에 모델의 계산 격자 크기($\Delta x = \Delta y = 10\text{ m}$)를 곱하여 구하였다.

복수 인공해중산을 설치할 경우 구조물 설치방법에 따른 용승유량의 효과를 파악하기 위하여 열(column)과 행(row) 배치로 나누어 실험하였다. 먼저 인공해중산의 열(column) 배치는 인공해중산 길이(130 m)에 대한 이격거리의 비율로 하였다. 즉 2개 인공해중산이 이격거리가 없이 붙은 형태인 Case 1 (0 L ; 0 m), 이격거리가 인공해중산 길이의 0.5배인 Case 2 (0.5 L ; 65 m) 그리고 인공해중산의 길이의 1배인 Case 3 (1.0 L ; 130 m)으로 하였다. 한편 인공해중산

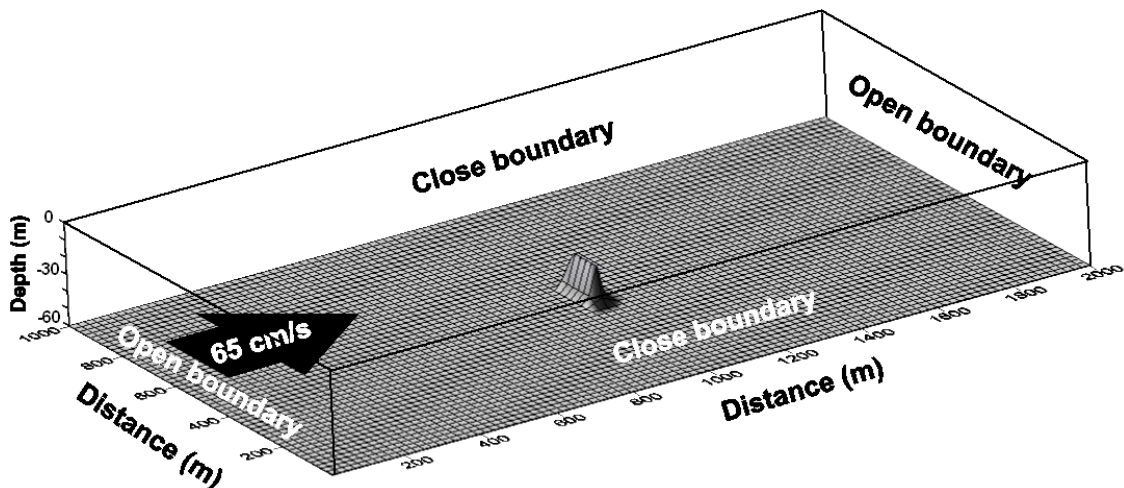
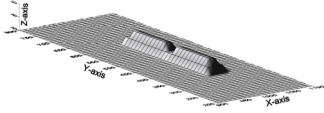
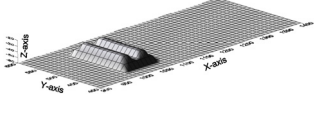
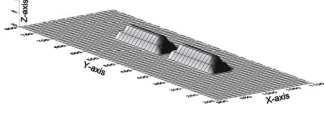
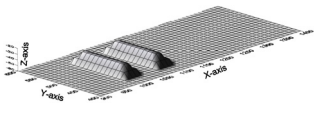
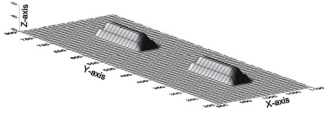


Fig. 1. Model domain is shown. Number in arrow is input speed.

Table 1. Column and row arrangement of artificial seamount

Case (Clearance)	Column Arrangement	Case (Clearance)	Row Arrangement
Case 1 (0 L ; 0 m)		Case 4 (0 W ; 0 m)	
Case 2 (0.5 L ; 65 m)		Case 5 (1 W ; 40 m)	
Case 3 (1 L ; 130 m)		Case 6 (2 W ; 80 m)	

L : length of artificial seamount (=130 m), W : width of artificial seamount (=40 m)

의 행(row) 배치는 인공해중산의 폭(40 m)에 대한 비율로 2개의 인공해중산이 붙은 형태인 Case 4 (0 W ; 0 m), 이격거리가 폭의 1배인 Case 5 (1 W ; 40 m) 그리고 2배인 Case 6 (2 W ; 80 m)으로 나누어 설치하였다(Table 1).

3. 결과 및 고찰

3.1. 단일 인공해중산

먼저 단일 인공해중산의 용승효과를 파악하기 위하여 모델 결과 중 연직유속 성분을 이용한 용승유량을 비교하였다.

Sigma(σ)-좌표계는 연직(z)좌표를 수심에 대하여 분해하고 있으며 실제 해저지형에 가깝게 저층경계를 고려할 수 있고 저층에서의 이류과정을 보다 현실에 가깝게 재현할 수 있다. 이에 반해 z-좌표계는 그림과 같이 저층 경계가 계단처럼 구성되기 때문에 해저지형 경사에 따른 저층 흐름을 재현하기에 문제점을 가진다. 저층의 흐름을 재현하기에는 σ -좌표계를 이용하는 것이 유리하나 실제적인 연직유속을 계산하기에는 어려움이 있다. 따라서 sigma 좌표계로 구해지는 연직유속을 직교좌표계로 변환(Haidvogel 등, 1991)하여 인공해중산의 배치에 따른 용승유량의 변화를 파악하였다(Chapman과 Haidvogel, 1992).

Fig. 2는 sigma 좌표계와 직교좌표계에서 수행한 모델결과의 연직유속분포를 비교한 것이다. Sigma 좌표계로 계산한 결과(Fig. 2, upper row)를 보면 인공해중산 전면부에서 $-0.007 \sim -0.025$ m/s의 음(-)의 값인 하강류, 후면부에서 $0.007 \sim 0.025$ m/s의 양(+)의 값으로 상승류가 나타났다. 그러나 이러한 현상은 해양수산부(2002)의 수리모형 실험에서 구조물의 전면부에서 흐름이 구조물의 경사를 따라 상승하고 후면부에서는 하강하는 것과 다른 결과이다. 또한 이 결과는 층간 흐름으로 경사면에서 발생하는 연직유속을 설명하는 것에 무리가 있으며, 또한 일반적인 구조물 경사면의 흐름에 대한 수리모형 실험 결과(McCartney, 1975; Huppert와 Bryan, 1976; 박 등, 2003)와 상이한 것이다. 한편 sigma 좌표계를 직교좌표계로 수정한 계산 결과(Fig. 2, lower row)는 인공해중산 전면부에서 강한 상승류가 발생하였고 후면부에서는 하강류를 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 흐름이 인공해중산을 만나 경사면을 따라 올라가면서 상승류가 발생하고 정상부를 통과한 후 해중산의 경사면을 따라 내려가면서 하강류가 발생한 결과로, 수평적인 흐름이 인공해중산을 만나 경사면에서 발생하는 연직유속(Beckmann과 Haidvogel, 1997)을 잘 보여주고 있다.

단일 인공해중산 주변의 직교좌표계로 수정 계산한 수평유속(U)과 연직유속(W) 성분의 연직분포로

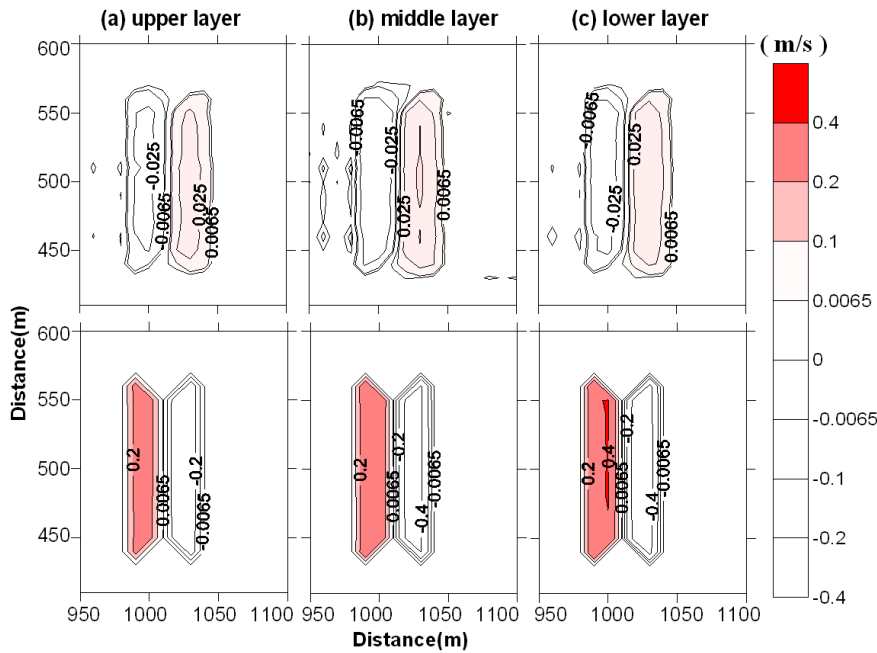


Fig. 2. Distribution of w-component by sigma coordinate (upper row) and modify coordinate (lower row) at one artificial seamount. Hatching and white color are indicated upwelling(+) and downwelling(-) flow, respectively.

가로축은 거리를 세로축은 수심을 나타내며 음영으로 인공해중산을 표시하였다(Fig. 3). 인공해중산의 경사면을 따라 전면부에서 상승하는 흐름을 보이며 후면부에서는 하강하는 흐름을 나타내고 있으며, 구조물 정상부에서 강한 흐름을 볼 수 있다.

Fig. 4는 단일 인공해중산 주변의 U, V 및 W의 3차원 vector를 나타낸 것으로 인공해중산 전면부에서 상승류, 후면부에서는 하강류가 발생하고 인공해중산

정상부에서 수평유속이 다른 지역에 비해 강하게 나타났다. 이와 같이 구조물 정상부에서 유속이 강해지는 현상은 해중산 정상부의 압력이 저하되고 항력(drag)은 증가되기 때문에 발생한다(Cummins, 2000). 또한 유체역학적으로 흐름이 장애물을 통과 할 경우 흐름과 장애물의 경계면에서 가속이 이루어지고 압력과 항력변동이 구조물 정상부의 유속을 증가시키는 것이다(박, 1989). 한편 자연 해중산 주변에서의 흐름

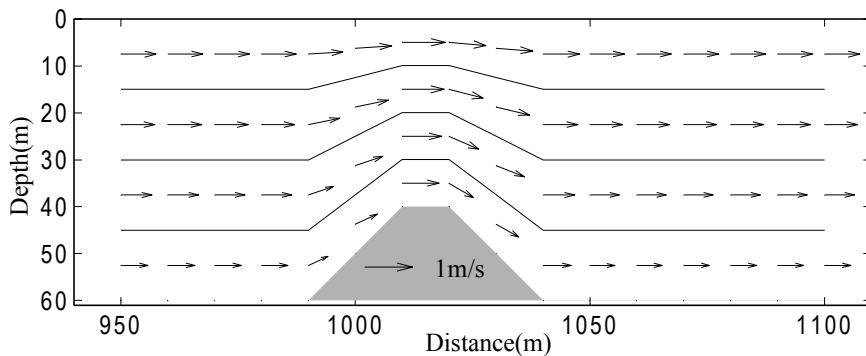


Fig. 3. Distributions of UW components at one artificial seamount.

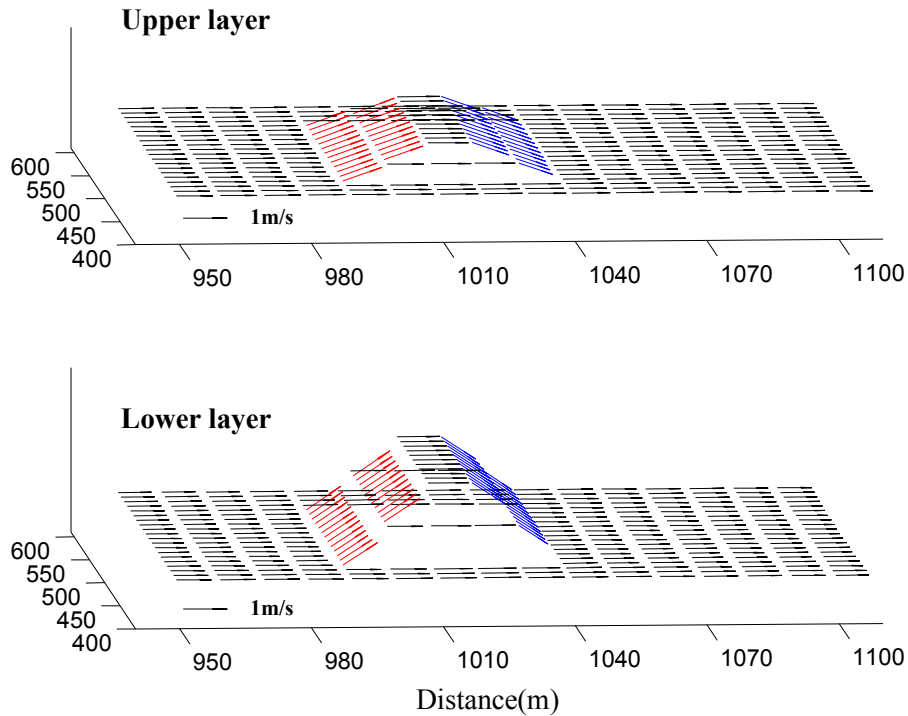


Fig. 4. Distributions of U, V and W components at one artificial seamount.

은 시계방향의 환류가 발생하고 해중산의 정상부에서는 하강류, 양 측면에서는 상승류가 발생한다. 이와 같은 현상으로 해중산 정상부의 수주 안정도가 높게 나타나고, 수온분포가 수렴하여 주변의 환경을 변화시킨다(Castro 등, 2003). 따라서 인공해중산 정상부에서 환류와 같은 흐름을 재현하기 위해서는 순압적인(barotropic) 흐름 뿐 만 아니라 경압적인(baroclinic) 조건하에서의 모델 수행(Gjevik과 Moe, 1994)이 필요하다고 생각한다.

3.2. 인공해중산의 열(column) 배치

인공해중산에 의한 용승효과를 극대화시키기 위해 구조물 배치에 따른 용승유량을 계산하였다. 먼저 2개의 구조물을 열 배치(column arrangement)했을 때, 즉 Case 1, 2 및 3의 U(수평유속)와 W(연직유속) 성분의 분포를 Fig. 5에 나타냈다. Case 1의 위쪽 인공해중산(A)과 아래쪽 인공해중산(C)를 지나는 흐름은 전면부에서 상승류 후면부에서 하강류를 보이고 있으며 2개의 인공해중산 사이(B)에서도 2개의 인공해중산을

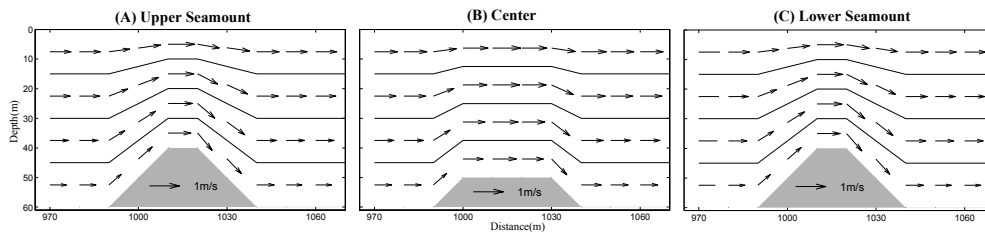
연결시키는 작은 구조물로 인하여 상승류와 하강류가 나타났다. Case 2와 3의 흐름은 인공해중산의 전면부에서 상승류가 후면부에서 하강류의 분포를 하지만 2개의 인공해중산 사이에서는 연직적인 흐름은 발생하지 않고 수평흐름만 나타났다. Case 1과 Case 2, 3을 비교하면 2개의 인공해중산 사이(B)에서 발생하는 작은 구조물에 의한 연직류의 흐름에 변화가 있을 뿐 그 외의 영역에서는 거의 동일한 형태의 연직류가 나타났다.

2개 인공해중산의 열(column) 배치에 따른 연직 유속을 보면(Fig. 6), Case 1은 모든 층의 전면부와 후면부에서 각각 상승류 및 하강류가 나타났다. 유속의 세기는 upper layer에서 0.007~0.2 m/s로 상승류가 인공해중산이 설치되어 있는 수층인 lower layer에서 0.007~0.4 m/s로 upper layer 보다 유속이 크게 분포했다. 2개의 인공해중산에서 발생한 상승류의 영역이 1개의 인공해중산을 설치한 경우보다 연직류가 발생하는 공간적인 분포(今村 등, 1995)가 더 넓은 것으로 확인되었다. 또한 2개의 인공해중산을 0.5 L (65 m)

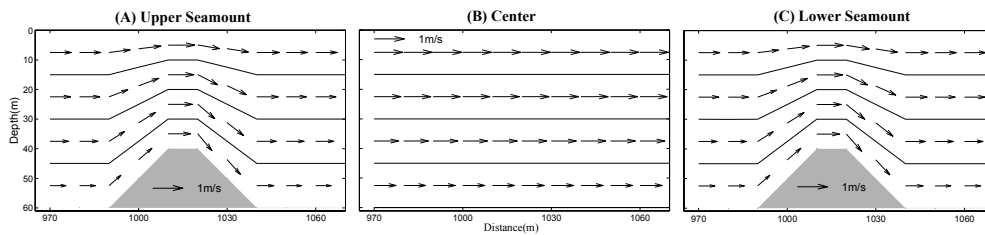
이격한 Case 2과 1.0 L (130 m) 이격한 Case 3의 흐름의 형태는 인공해중산의 전면부에서 상승류가 후면부에서는 하강류로 Case 1과 큰 차이는 없었다. 그러나 2개의 인공해중산사이 이격거리 만큼에 해당하는 공간 즉 Case 2와 3의 경우 2개의 인공해중산 사이의 공간에서는 연직류 분포가 나타나지 않았다. 따라서 2개

의 인공해중산을 열 배치를 할 경우 이격거리가 없는 경우 2개 인공해중산 사이의 구조물의 영향으로 연직류의 발생효과는 최대인 것으로 나타났다.

Case 1



Case 2



Case 3

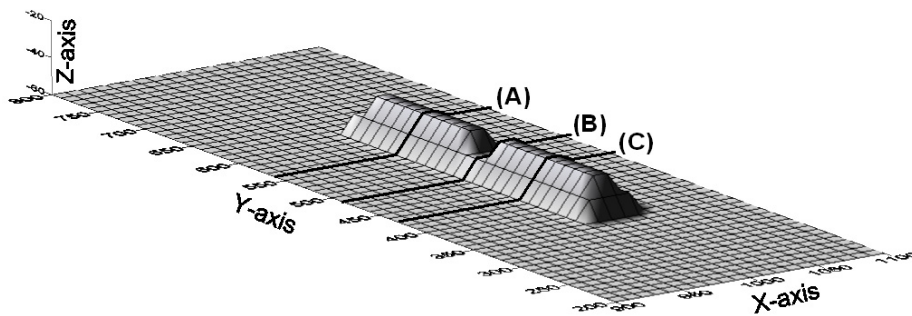
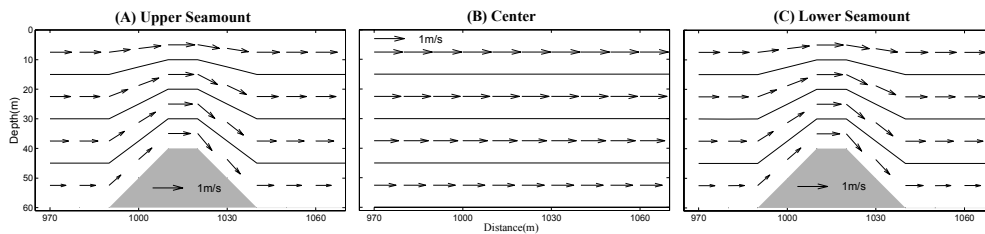


Fig. 5. Distributions of UW components at two artificial seamount in Case 1, Case 2 and Case 3. Vertical section lines(lower figure) show upper seamount(A), center(b) and lower seamount(C), respectively.

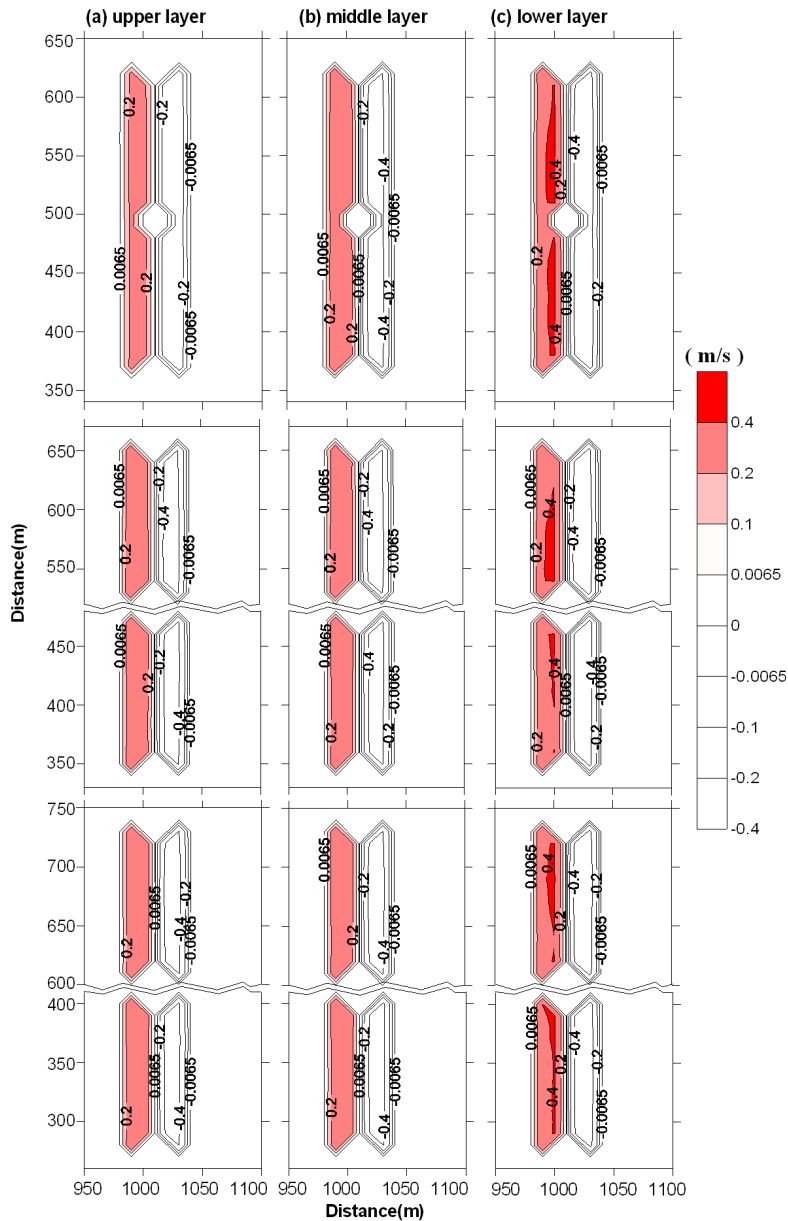


Fig. 6. Distribution of w-component at two artificial seamount. Case 1 (upper row), Case 2 (middle row) and Case 3 (lower row). Hatching and white color are indicated upwelling(+) and downwelling(-) flow, respectively.

3.3. 인공해중산의 행(row) 배치

2개의 인공해중산을 행으로 배치했을 때인 Case 4, 5 및 6의 수평유속(U)과 연직유속(W)을 Fig. 7에 나타냈다. 이 그림은 인공해중산의 중앙을 지나는 단면을 나타낸 것으로 Case 4를 보면 인공해중산이 설치

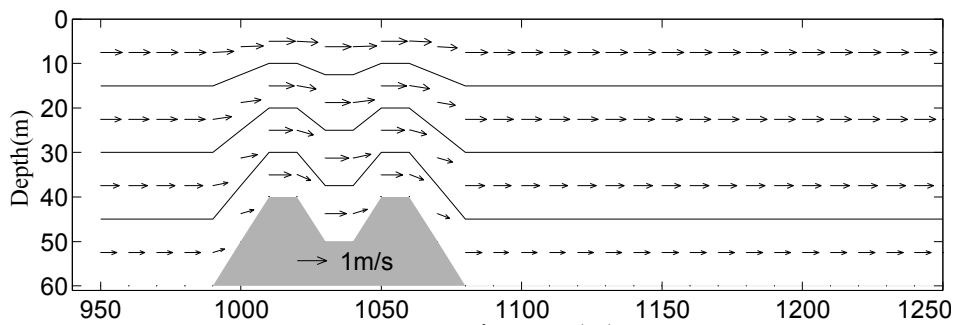
되어 있는 지역에서 단일 인공해중산과 마찬가지로 전면부에서는 상승류가 후면부에서는 하강류가 강하게 보이며 그 이외의 지역에서는 연직류의 흐름이 발생하지 않았다. Case 5 및 6의 경우 인공해중산의 전면부에서 상승류가 후면부에서 하강류를 볼 수 있지

만, 2개의 인공해중산 사이에서는 연속적인 흐름은 찾을 수 없고 수평적인 흐름만 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 2개의 인공해중산 중 우측에 위치한 인공해중산의 전면부에서 나타나는 상승류를 보면 Case 4는 상승류가 수십별로 하나의 화살표만 보이지만 Case 5 및 6은 2개의 화살표가 보여 Case 4보다 상승류가 많이 발생 하는 것을 알 수 있다.

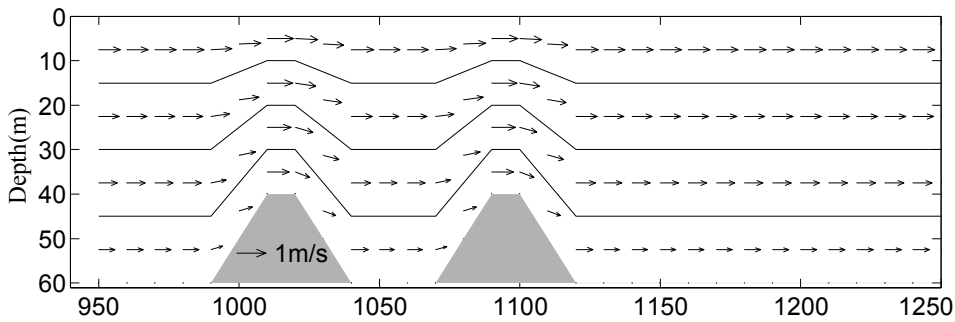
2개의 인공해중산을 행으로 배치했을 때 인공해중

산에 의한 층별 연직류 분포를 파악하였다(Fig. 8). Case 4, 5 및 6의 lower layer에서의 상승류의 유속이 upper layer에서의 상승류의 유속보다 크게 나타났다. 2개의 인공해중산이 붙어있는 Case 4를 보면 인공해중산 사이의 상승류 및 하강류가 나타나는 영역이 Case 5 및 6 보다 작은 것을 확인 할 수 있으며, 상승류의 값은 차이를 보이지 않았다. 이와 같은 결과는 흐름이 인공해중산을 지나갈 때 왼쪽에 위치한 인공해중

Case 4



Case 5



Case 6

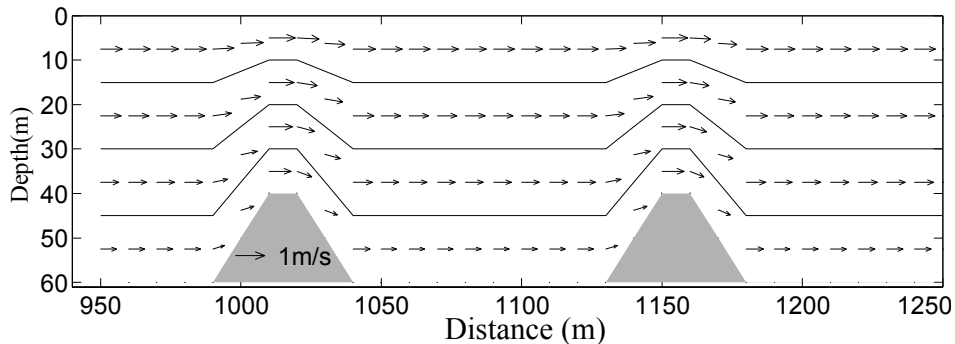


Fig. 7. Distributions of UW components at two artificial seamount in Case 4, Case 5 and Case 6.

산에 의하여 수평흐름의 유속이 감소하게 되고 이로 인하여 오른쪽에 위치한 인공해중산에서 감소된 수평 흐름에 의하여 인공해중산의 경사면을 따라 흐르는 연직유속이 약화된 것으로 판단한다.

따라서 2개의 인공해중산을 행으로 배치할 경우, 이격거리가 없는 Case 4 (0 W, 0 m)의 상승류에 비해 1.0 W (40 m) 이격한 Case 5와 2.0 W (80 m) Case 6의 상승류 흐름의 크게 나타났다. 즉 2개의 인공해중산의 행배치를 할 경우에는 2개의 인공해중산간의 이

격거리가 감소함에 따라 즉 이격거리가 없을 때 2개 인공해중산 사이의 구조물의 영향으로 발생하는 연직류가 최소인 것으로 나타났다.

3.4. 용승유량의 비교

인공해중산 배치에 따른 용승유량의 계산결과를 Table 2에 나타냈다. 먼저 단일 인공해중산인 경우를 보면, 평균유속이 0.327 m/s로 용승유량은 785 m³/s이다. 한편, 2개의 인공해중산을 열(column) 배치한 경우인 Case 1, 2 및 3는 모델에서 상승류가 나타난 계

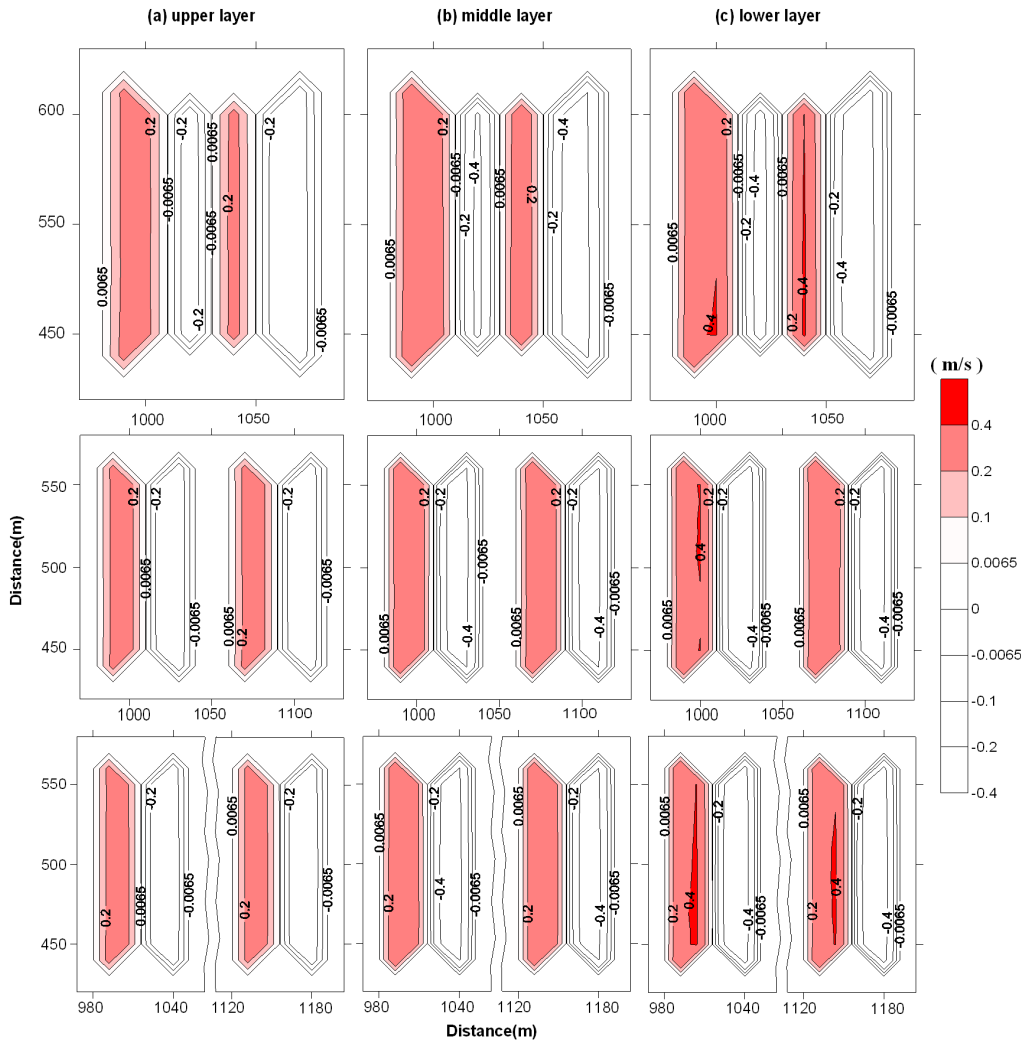


Fig. 8. Distribution of w-component at two artificial seamount. Case 4 (upper row), Case 5 (middle row) and Case 6 (lower row). Hatching and white color are indicated upwelling(+) and downwelling(-) flow, respectively.

산격자가 48개로 동일하였으나, 연직유속의 세기는 각각 0.338, 0.334, 0.334 m/s로 Case 1에서 가장 크게 나타났다. Case 1의 용승유량은 1,621 m³/s로 단일 인공해중산의 용승유량보다 약 835 m³/s 증가한 효율성이 106% 높게 나타났다. 또한, Case 2 및 3의 용승유량은 각각 1,603 m³/s 및 1,601 m³/s로 단일 인공해중산의 용승유량 보다 효율이 각각 104% 및 103% 높게 나타났다. 따라서 2개의 인공해중산을 열 배치한 결과는 상승류가 발생한 계산격자가 48개로 3가지(Case 1, 2 and 3)의 경우 동일하였으나 연직유속의 차이로 인하여 용승유량의 차가 발생했다. 즉 3가지의 경우 모델결과는 단일 인공해중산에 의한 용승효율에 비해 모두 100% 이상 상승하였으며, Case 1 일 때 가장 높았다.

이와 같은 결과는 구조물 크기에 따른 용승효과를 실험한 결과 구조물 크기가 증가 하였을 때 용승효과도 구조물의 크기에 비례하여 증가 한다고 보고한 것 (Yanagi와 Nakajima, 1991)과 유사한 현상을 보였다. 따라서 본 연구에서 2개의 인공해중산을 열 배치 할 경우 단일 인공해중산보다 1배 이상의 용승효과가 있었으나 그 중에서 2개의 인공해중산이 구조물간의 이격거리가 없는 때 용승효과가 효율적인 것으로 판단 된다.

Table 2. Upwelling flux(m³/s) according to column and row arrangement

Case (Clearance)	Upwelling Cell Number	Mean Velocity (m/s)	Upwelling Flux (m ³ /sec)	Efficiency Increase (%)
single (no)	24	0.327	785	-
1 (0 L; 0 m)	48	0.338	1,621	106
2 (0.5 L; 65 m)	48	0.334	1,603	104
3 (1.0 L; 130 m)	48	0.334	1,601	103
4 (0 W; 0 m)	35	0.332	1,162	48
5 (1 W; 40 m)	48	0.322	1,547	97
6 (2 W; 80 m)	48	0.322	1,547	97

L : Length of Artificial Seamount (=130 m), W : Width of Artificial Seamount (=40 m)

한편 2개의 인공해중산을 행 배치(row arrangement) 하여 실험한 용승유량 결과, Case 4의 모델에서 상승류가 발생한 계산격자는 35개, Case 5 및 6는 48개로 Case 4에서 가장 작게 나타났다. 연직유속은 Case 4의 경우 0.332 m/s로 가장 크며, Case 5 및 6는 0.322 m/s로 유속의 차이가 발생하지 않았다. Case 4의 용승유량은 1,162 m³/s 이고 Case 5와 6의 용승유량은 1,547 m³/s로 계산되었다. 즉 인공해중산의 행 배치 결과 연직유속이 나타난 계산격자는 Case 4에서 가장 작고 연직유속은 가장 크게 나타났다. 그러나 Case 4와 Case 5 및 6 연직유속의 차는 0.01 m/s로 작지만, 상승류가 발생하는 계산격자는 Case 5와 6가 Case 4보다 13개가 많기 때문에 용승유량도 그에 비례하여 Case 5와 Case 6가 크게 나타난다고 판단된다. 또한 Case 4에서 인공해중산의 크기는 단일 인공해중산보다 행으로 1배 증가하였으나 용승유량의 증가율은 단일 인공해중산의 발생량에 비해 약 48% 정도밖에 증가하지 못했다. 한편 Case 5 및 6의 결과를 보면 단일 인공해중산에 비하여 약 97% 가까이 용승유량이 증가한 것을 확인 할 수 있다. 이 결과를 볼 때 흐름에 대하여 인공해중산을 행 배치 할 경우 수평유속의 영향을 받을 수 있는 범위 내에서 이격거리를 둘 경우 구조물 배치의 추가 배치에 따른 용승유량의 효과가 발생한다. 즉 2개의 인공해중산의 최소 이격거리가 감소할 수록 행 배치에서 용승효과는 최소화이다. Case 4에서 처럼 2개의 인공해중산이 행(row)으로 서로 붙어있을 경우 수평유속이 전면에 있는 인공해중산을 지나면서 유속이 감소되어 후면에 위치한 인공해중산에 도달하는 수평유속에도 영향을 주게 되어서 결과적으로 용승유량의 증가는 약 48% 정도 발생했다. 그러나 인공해중산을 행으로 배치할 경우라도 구조물 사이의 이격거리를 고려한다면(Case 5와 6) 단일해중산에 비해 약 97%의 용승효과가 나타날 수도 있다. 따라서 2개의 인공해중산을 행 배치 할 경우 수평 유속에 의한 이격거리를 고려해야하며, 본 연구에서와 같이 수평유속이 65 cm/s 일 경우 이격거리에 수평유속 세기를 고려하였을 때 효율적인 용승효과가 발생할 수 있을 것으로 판단한다.

따라서 현재의 인공해중산에 의한 용승효과를 높이기 위해 구조물을 추가적으로 설치할 때, 행(row)

배치보다 열(column) 배치로 구조물을 설치할 경우 더욱더 효과적인 용승이 발생할 수 있다. 한편 구조물 간의 이격거리는 구조물의 열(column) 배치인 경우에는 효과가 없으며, 공간적으로 행(row) 배치를 할 필요가 있는 경우는 고려해야 할 사항이다.

4. 결론

인공해중산을 이용하여 보다 효과적인 용승 결과를 발생시키기 위해서는 해저에 설치할 구조물 배치 방법의 다각화를 시도할 필요가 있다. 특히 여러 개의 인공해중산을 제한된 공간에서 가장 효율적인 용승효과를 발생시키기 위해서는 배열과 이격거리(clearance)를 고려한 최적의 구조물 설치방법이 사전에 연구되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 3차원 해수유동모델을 이용하여 인공해중산의 여러 가지 다른 배열에 의한 용승효과를 조사하였다. 먼저 현재 설치된 인공해중산과 동일한 크기의 인공해중산을 수치 모델화하여 단일 해중산에 대한 용승효과를 파악하였다. 단일 인공해중산 전면부에서 상승류, 후면부에서는 하강류가 발생하고 인공해중산 정상부에서 수평유속이 다른 지역에 비해 강하게 나타났다. 또한 단일 인공해중산에 대한 용승 유량은 $785 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산출되었다.

한편 인공해중산 2개에 대한 열(column) 배치를 이격거리가 없이 붙은 경우인 0 m (Case 1), 인공해중산 길이의 반인 65 m 띄운 경우 (Case 2), 그리고 인공해중산 길이인 130 m 띄운 경우 (Case 3)의 3가지에 대해서 비교 실험하였다. 열 배치 결과 모든 경우에서 단일 인공해중산보다 높은 용승유량이 나타났으며 그 중 인공해중산이 붙어있는 경우가 단일 해중산보다 용승유량이 106% 증가하여 다른 경우 보다 용승효과가 높은 것으로 나타났다.

또한 인공해중산 2개를 행(row)으로 배치하여 이격거리 없이 붙인 경우 (Case 4), 이격거리를 인공해중산 폭 만큼인 40 m를 띄운 경우 (Case 5), 그리고 인공해중산 폭의 2배인 80 m 만큼 띄운 경우 (Case 6)에 대해서 실험하였다. 2개의 인공해중산이 붙어 있는 Case 4에서 단일 인공해중산의 용승유량보다 약 48% 정도밖에 증가하지 못했지만, Case 5 및 6은 약 97%

증가하여 Case 4보다 용승효과가 크게 나타났다.

따라서 본 연구 결과, 2개의 인공해중산을 배치 할 경우 용승효과는 열 배치가 행 배치보다 효율적인 것으로 나타났다. 또한 열 배치의 경우 2개의 인공해중산의 이격거리가 근접 할수록 최대의 용승효과를 유도 할 수 있으며, 행 배치를 할 경우 2개 인공해중산의 이격거리가 가까울수록 즉 이격거리가 없을 때 용승효과는 최소로 나타났다. 이상의 결과는 순압적(barotropic) 조건만을 고려한 결과로 현장에 가까운 인공해중산의 배치환경을 파악하기 위해서는 경압적(baroclinic) 조건을 고려한 연구가 필요하다. 이러한 최적의 구조물 배치 조건은 인공해중산에 의한 효과적인 용승류 발생이 가능하여 기초생산력이 증가하고 생물 종의 다양화로 인한 해역의 비옥화가 가능할 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 “인공용승류를 이용한 어장환경개선 사업”과제로 수행되었으며, 본 연구에 많은 정보를 제공한 포항공과대학교 박동호 박사께 감사드립니다.

참고 문헌

- 김동선, 황석범, 김성현, 배상완, Apitha Kheawwongjan, 2008, 인공 용승 해역의 해양 환경 변화에 관한 연구, 해양환경안전학회, 춘계학술대회 발표 요약집, 147-151.
- 국토해양부, 2008, 인공용승류를 이용한 어장환경개선 연구.
- 국토해양부, 2009, 인공용승류를 이용한 어장환경개선 연구(VI).
- 박이동, 1989, 유체역학, 보성문화사, 555.
- 박성은, 조규대, 김동선, 이충일, 황재동, 윤종휘, 2003, 성층화된 수로에서 3차원 Hilldp 의한 유속장 변동, 해양환경안전학회지, 9(2), 73-77.
- 해양수산부, 2002, 인공용승류를 이용한 어장환경조성 연구.
- 해양수산부, 2005a, 인공용승류를 이용한 어장환경개선 연구.
- 해양수산부, 2005b, 인공용승류를 이용한 어장환경개선

- 연구.
- 해양수산부, 2006, 인공용승류를 이용한 어장환경개선 연구.
- 해양수산부, 2007, 인공용승류를 이용한 어장환경개선 연구.
- 今村 均, 友田啓二郎, 鈴木達雄, 紘理成一, 1995, 人工湧昇流發生漁場造成の研究, 沿岸工学論文集, 42, 1131-1135.
- Beckmann, A., 1999, Dynamical processes at isolated seamounts, Habilitation thesis, Carl-von-Ossietzky University Oldenburg.
- Beckmann, A., Haidvogel, D. B., 1997, A simulation of flow at Fieberling Guyot, *J. Geophys. Res.*, 102, 5595-5613.
- Beer, T., 1997, *Environmental Oceanography* second edition, CRC Press, 367.
- Blumberg, A. F., Mellor, G. L., 1987, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In : *Three dimensional Coastal Models* (N. S. heaps, ed.), American Geophysical Union, Washington, D.C., 1-16.
- Booth, D. A., 1988, Eddies in Rockall Trough, *Oceanol. Acta*, 11, 213-219.
- Castro, A. T., Velasco, G. G. D., Levinson, A. V., Armas, R. G., Muhlia, A., Coiso, M. A. , 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, 149-162.
- Chapman, D. C., Haidvogel, D. B., 1992, Formation of Taylor caps over a tall isolated seamount in a stratified ocean, *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 64, 31-65.
- Codispoti, L. A., Friederich G. E., 1978, Local and mesoscale influences on nutrient variability in the northwest African upwelling region near Cabo Corberiro. *Deep-Sea Research*, 25, 751-770.
- Cummins, P. F., 2000, Stratified flow over topography: time-dependent comparisons between model solutions and observations. *Dynamics of Atmospheres and Ocean*, 33, 43-72
- Dietrich, G. (ed), 1972, *Upwelling in the ocean and its consequences-Geoforum Oxford-11*, Elsevier Science, Pergamon-Frankfurt.
- Ekman, V., 1905, On the influence of the earth's rotation on ocean currents. *Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik*, 2(II), 1-52.
- FAO, 1998, Fishery country profile - Republic of Korea. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, Report No. FID/CP/ROK.
- Gjevik, B., Moe, H., 1994, Steady and transient flows around banks located near a shelf edge, *Cont. Shelf Res.*, 14, 1389-1409.
- Haidvogel, D. B., Wilkin, J. L., Young, R. E., 1991, A semi-spectral primitive equation ocean circulation model using vertical sigma and orthogonal curvilinear horizontal coordinates, *J. Comput. Phys.*, 94, 151-185.
- Huppert, H. E., Bryan, K., 1976, Topographically generated eddies, *Deep Sea Res.*, 23, 655-679.
- McCartney, M., 1975, Inertial Taylor columns on a beta-plane, *J. Fluid Mech.*, 68, 71-95.
- Royer, T. C., 1978, Ocean eddies generated by seamounts in the north Pacific, *Science*, 199, 1063-1064.
- 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, 72-76.
- Smith, R. L., 1980, *Ecology and field biology*, 3rd ed. Haper & Row, N.Y., 800.
- Trasviña-Castro, A., Gutierrez de Velasco, G., Valle-Levinson, A., González-Armas, R., Muhlia, A., Cosio, M.A., 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, 149-162.
- White, M., Mohn, C., Orren, M., 1998, Nutrient distributions across the Porcupine Bank, *ICES J. Mar. Sci.*, 55, 1082-1094.
- Yanagi, T., Nakajima, M., 1991, Change of oceanic conditions by the man-made structure for upwelling, *Marine Pollution Bulletin*, 23, 131-135.