

## 인공 용승 구조물 설치에 적합한 해역의 해양환경 특성

조규대 · 김동선\*<sup>†</sup> · 박성은\*

부경대학교 해양학과, \*부경대학교 해양산업개발연구소

### Characteristics of Oceanographic Conditions in an Area Suitable for the Construction of Artificial Upwelling

Kyu-Dae CHO, Dong-Sun KIM\*<sup>†</sup> and Sung-Eun PARK\*

Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

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

To evaluate the oceanographic conditions for the artificial upwelling we measured vertical stratification coefficients, current speed distribution and grain size distribution of bottom sediment in the vicinity of Gukdo and Somaemuldo near Geoje-do. There were a strong stratification between surface and bottom layers in summer, the stratification was weak from autumn to winter, and the water was well mixed during winter. In summer nutrient concentration of the bottom layer was 4 times higher than that of the surface layer. Underwater currents were strong in the bottom layer. We conclude that the oceanographic conditions in the area will meet the basic requirement for the construction of artificial upwelling.

Key words: Artificial upwelling, Stratification, Nutrient

#### 서 론

우리 나라 연안해어업은 주변국인 일본, 중국 등의 배타적 경제수역 선포, 조업규제강화로 어장이 축소되고 있어 연안해역의 중요성이 크게 부각되고 있다. 또한, 최근 우리나라 연안역은 대규모의 간척사업확대 등으로 어장의 축소화와 더불어 도시화·산업화로 인한 산업 및 생활폐수의 유입으로 인하여 연안 어장환경이 악화되고 있는 실정이다.

따라서 이러한 국내의 어업여건의 변화에 능동적으로 대처하고, 연안어업을 경쟁력있는 산업으로 육성하기 위해서는 수산자원조성사업의 중요성이 크게 요구되고 있다. Ryther (1969)는 해양에서 용승류해역의 면적은 0.1%밖에 되지 않지만, 어류 생산량은 전해양의 1/2에 달한다고 보고하였다. 이와 같이 용승류해역이 어류생산성이 높은 이유로서는 영양염이 풍부한 저층수가 용승에 의해 유광층에까지 운반되어 식물플랑크톤을 대량 발생하여 해양기초생산력이 향상되어서 먹이사슬에 의해 어류의 군집을 유도하기 때문이다. 또한, 용승류해역은 다른 해역과 비교해서 해조류, 새우류, 패류 등의 생산량이 약 3배, 우뚝가사리의 생산력은 약 10배에 달한다고 보고되었다.

또한 인공어초에 의한 수산자원 조성효과는 사용 어초의 구조, 크기, 배치형태 및 시설규모 등의 요인에 의해 크게 영향을 받으나, 실제 어장이용 측면에서 볼 때 시설규모의 크기가 가장 중요한 요인이라 할 수 있다. 인공어초 시설어장은 어획량에 있어서, 일반 어장에 비해 1.2-12.0 (평균 2.7배)의 효과가 있고, 자연어초장보다 1.3-2.2배의 어획효

과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 어업생산에 집결되는 기능 이외에 미성어 보호 육성 등 자원배양 기능과 어군을 유도하는 유도기능을 갖고 있음이 확인되고 있다 (NFRDI, 1989, 1992).

위의 2가지 장점을 접목하여, 인위적으로 해양에 구조물을 설치함으로써 용승류를 발생시켜, 연안해역의 기초생산력을 증대시켜 좋은 어장을 조성하려는 새로운 개념이 대두되고 있다.

일본의 분고수도 (Bungo Channel) 우와해 (Uwa Sea)에서 인공 용승류 발생구조물 (가로: 45 m, 세로: 10 m)의 설치에 의한 효과는 조류유속이 2할 증가하고, 아표층의 클로로필 a 농도는 2-3배 증가하였으며, 동물플랑크톤의 개체수 및 침전량도 2배로 증가하였다. 또한, 저서생물이 인공 용승 구조물 설치 후 2년간은 감소하였으나 3년 이후에는 종개체수가 증가하였던 것으로 밝혀졌다 (Yanagi and Nakajima, 1990, 1991). 인공 용승류 발생구조물은 어초의 역할도 하여 정어리, 전갱이, 고등어 및 말쥐치 등과 같은 표·중층어가 구조물주위에 모여있는 것도 밝혀졌다 (Yanagi et al., 1991). 위의 구조물을 3배의 크기로 하였을 때 그 효과는 구조물의 크기에 비례하여 증가하는 것으로 보고되었다. 이를 토대로 일본에서는 나가사키현 기타시마해역에서 대규모 용승어장조성이 추진되었다 (SRFGC, 1996-1999).

현재 우리나라 연안해역의 수산자원 및 환경을 회복시키고자 하는 노력의 일환으로 인공어초나 해양복합장 등에 대한 연구사업이 진행되고 있는 실정이다. 그러나 이러한

<sup>†</sup> Corresponding author: kimds0909@mail1.pknu.ac.kr

연구 사업에 있어서 만약 적지 선정을 잘 못 할 경우 오히려 또 다른 오염원으로 전락할 위험이 크므로 철저한 사전 조사와 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 연근해 해역에서 영양염과 미네랄성분이 풍부한 저층수를 표층으로 용승시킴으로써, 자연적인 해수수질개선 및 기초생산력 증가로 인한 생물자원 조성을 위한 인공구조물을 설치하여 용승류가 발생 가능한 해역을 선정하고 그 지역에 대한 해양환경특성을 밝히고자 한다.

## 연구 방법

### 해역의 선정 방법

인공구조물 설치해역을 선정하기 위해서 문헌조사 및 연구 사례를 통하여 기본요건들을 설정하였다 (Yanagi and Nakajima, 1990, 1991; Yanagi et al., 1991; SRFGC, 1996-1999). 해역 선정의 기본요건을 보면, 먼저 용승류를 발생시킬 수 있는 효과적인 유속이 필요하다. 특히 저층의 유속이 약하지 않은 해역이어야 한다는 것이다. 또한 해저 수심이 유광층보다 깊은 해역으로 우리나라 연안역의 경우 평균적인 유광층의 깊이는 약 20m로써 이 수심 이상의 해역이어야 한다. 하계에도 성층 (stratification)이 발달하지 않거나 발생하여도 잘 파괴 될 수 있는 곳이 적합한 장소이다. 이것은 성층이 너무 강한 해역에 구조물을 설치하면 용승류는 발생하지 않기 때문이다. 그리고 구조물의 안정을 고려하여 퇴적물 입도 조성이 sand나 sandy silt등으로 구성되어진 곳이며, 어장 이용이 원활히 촉진되는 해역일 것으로 설정하였다. 이러한 기본조건을 가지고 우리나라에서 적용시킬 수 있는 해역을 보면, 동해의 경우에는 구조물을 설치하기에 수심이 너무 깊고, 서해의 경우 큰 조석간만의 차이로 혼합의 효과가 너무 크기 때문에 구조물 설치에 따른 효율성을 기대하기 어렵다. 따라서 1차적으로 남해안을 광역범위로 하여 인공 용승류를 발생시킬 수 있는 구조물 설치해역으로 선정하였다.

### 적지성 평가 방법

인공 용승 구조물을 설치하기에 적합한 해역인가에 대한 적지성을 평가하기 위해서 최적지 선정의 기본요건을 통해서 인공 용승 구조물 설치지역으로 선정된 남해안의 거제도 앞바다 소매물도와 국도 주변해역에 대한 해양환경조사를 실시하였다 (Fig. 1). 2001년 8월 23일, 11월 21일과 2002년 2월 25일에는 협의의 영역 (S-Area)에서 해양환경조사를 실시하였다. 또한 인공구조물의 설치전·후의 해양환경변화를 조사하기 위하여 협의의 영역 (S-Area)의 정점 01을 중심으로 하여 정점간의 거리가 보다 확장된 광역화된 영역 (L-Area)에서 구조물 설치전 2002년 9월 3일과 11월 28일에 해양환경조사를 실시하였다 (Fig. 1).

해양환경 조사 항목 및 방법을 보면, 우선 물리환경 조사로써 수온 및 염분은 수심 0.5 m 간격으로 Seabird-19 CTD

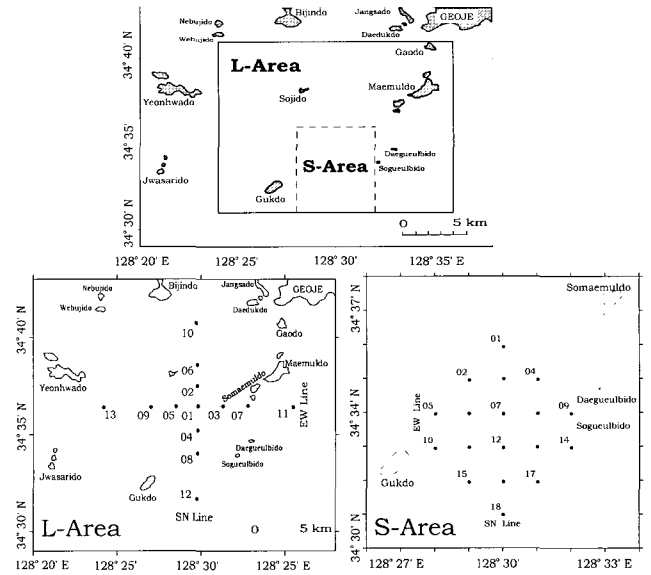


Fig. 1. Locations of observation stations. The SN-line and EW-line show the south and north line, east and west line, respectively.

를 이용하여 측정하였으며, 밀도는 수온과 염분의 자료를 이용하여 computer software를 이용하여 산출하였다. 해수 유동조사를 위하여 관측 정점 01 (S-Area)의 수심 5m에 RCM 9를 설치하여 표층의 해류를 관측하였으며, 저층 (수심 약 50 m)에 음향유속계 (Nortek, Acoustic Doppler Profile)를 설치하여 수층별로 30분 간격으로 측정 (monitoring)하였다.

영양염 (질산질소, 아질산질소, 암모니아질소, 인산인)을 분석하기 위하여 정점별로 반돈채수기 (van Dorn sampler)를 사용하여 표층 (수심 1 m), 중층 (수심 25 m) 수층 및 저층수 (near bottom)를 채수하여 폴리에틸렌 병에 담아 냉장보관 후 실험실로 옮겨 해양환경 공정시험 방법 (해양수산부, 2002)에 따라 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 인공 용승구조물 설치 해역의 선정

#### 1) 성층계수 계산

남해안에서 인공용승을 발생시킬 수 있는 구조물을 설치하기에 적합한 장소를 선택하기 위하여 먼저, 2차원 조류 모델을 통해 계산된 최강 창조시의 유속과 수심자료를 사용하여 남해안의 성층계수 ( $\log(H/U^3)$ , H: depth (m), U: tidal current velocity (m/s))를 계산했다 (Fig. 2).

성층계수는 Simpson and Hunter (1974)가 최초로 도입한 개념으로 성층계수가 2.5-3.0 범위의 값을 가지는 해역에 조석전선이 위치한다고 보고한 바 있으나 이러한 값은 해역별로 다소 차이를 보인다. 즉, 한국 서해안의 경우 조석전선이 위치하는 해역의 성층계수는 약 1.2-1.85 정도, 제

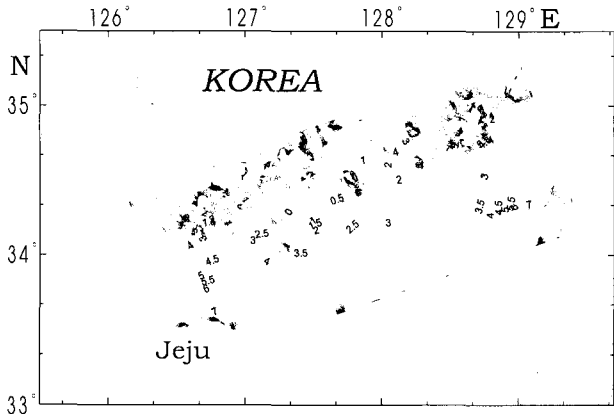


Fig. 2. Distribution of stratification parameter,  $\text{Log}(h/U^3)$ , in the South Sea of Korea. ( $h$ : depth (m),  $U$ : tidal current velocity (m/s))

주도 북부연안역의 경우에는 2.2 정도로 영국 주변해역이나 일본의 세토내해의 2.5-3.0 범위 (Yanagi and Okada, 1993)보다는 약 0.5-1.0 정도 적은 값을 가진다. 이와 같은 조석전선역은 활발한 수직혼합으로 인한 혼합역과 상대적으로 성층이 강하게 형성되어 있는 성층역이 경계를 이루는 지역이다. 연안역의 성층은 하계에 해양표면의 가열로 인해 형성되며 조석혼합이 강한 해역에서는 파괴될 수 있다. 또 조시에 따라 조류가 변화하므로 조석전선의 위치는 시간에 따라 항상 변동하지만 그 변동범위는 약 10 km 이내 (Simpson and Hunter, 1974)인 것으로 알려져 있다. 특히 성층이 강하게 형성되는 하계에는 조석전선의 위치가 크게 변동하지 않는다 (Yanagi and Okada, 1993).

계산결과 거제도 앞바다 남서부해역과 여수반도 앞바다에 걸쳐서 성층계수가 약 1.5-2.5 범위의 조석전선대가 분포하고 있다. 이와 같은 현상은 Yang et al. (1998)에 의한 인공위성을 이용한 남해안 전선대의 분포양상과 비교적 잘 일치하고 있다. 한편 제주도 북부 연안역의 경우에는 2.0-3.5의 범위를 보여 Kim et al. (1998)이 주장한 2.2와 일치하고 있으며 이러한 결과를 종합해보면 본 연구에서 계산된 남해안의 성층계수가 잘 재현되고 있는 것으로 판단된다.

Yanagi and Okada (1993)는 세토내해에서 인공용승을 발생시키는 인공 구조물을 설치할 경우 성층계수가 2.5-3.0 범위인 해역, 즉 조석전선이 형성되는 위치가 적합하다고 하였다. 그 이유로는 조류가 너무 강한 곳에서는 여름에도 성층이 거의 형성되지 않게 되고, 반대로 조류가 너무 약한 곳에서는 인공적으로 용승을 발생시킬 수 있는 정도의 유속이 제공되지 않기 때문이다. 따라서 인공 구조물을 설치할 수 있는 적지를 선정할 경우 조석전선이 위치할 수 있는 성층계수의 범위를 파악하는 것이 매우 중요하다 할 수 있다. 실제 일본의 경우 지역 어민들이 어업활동을 거의 하지 않던 해역의 해저에 인공구조물을 설치하고, 구조물 설치 이후부터 어업활동이 시작된 사례가 있다 (Yanagi and

Nakajima, 1990, 1991; Yanagi et al., 1991; SRFGC, 1996-1999). 즉 인공구조물이 새로운 어장을 형성한 것이다. 따라서 이러한 연구 결과에 의해서 우리 나라 남해안에 조석전선이 형성되고 있는 거제도 앞바다 해역이 인공 구조물을 설치하여 인위적으로 용승을 발생시키기에 적합한 지역으로 조사되었다.

2) 저질분포 특성

한국 남해안에서 해저 퇴적물 분포에 대한 연구사례를 종합하여 Fig. 3에 나타내었다. 한국 서남해역의 대륙붕에는 비교적 두꺼운 현생 점토 퇴적층이 해안선과 평행한 방향성을 가지고 발달되어 있다 (Park, 1983). 이러한 두꺼운 대상 (belt)의 점토 퇴적물을 머드벨트 (mud belt)라고 한다. 남해와 황해는 대륙붕이 잘 발달되어 있고, 퇴적물의 공급원인 하천이 비교적 잘 발달되어 있어 머드벨트가 동해보다 더 넓게 분포한다.

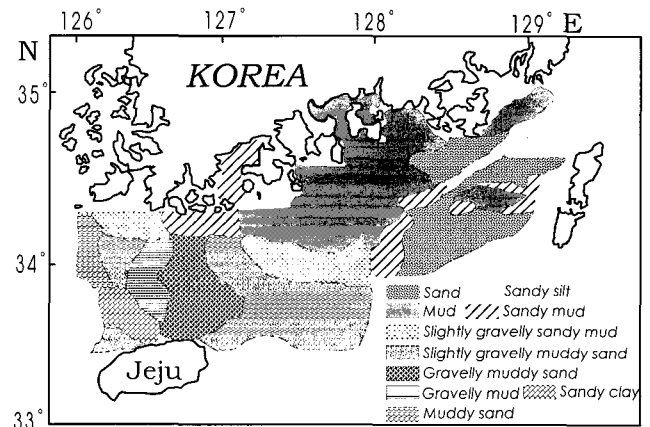


Fig. 3. Distribution of surface sedimentary facies in the South Sea, Korea.

남해지역에 분포하는 해양 퇴적물의 기원은 섬진강, 낙동강 등 하천으로부터의 직접 유입, 황해와 동중국해 세립질 퇴적물의 해류에 의한 부유 상태로의 이동, 그리고 외대륙붕지역에서 발견되는 빙하기 해수면 하강과 관련된 잔류 퇴적물 등으로 나눌 수 있다 (KIER, 1986; Park et al., 1989; Park and Yoo, 1988; Kim et al., 1992). 남해지역 해양 퇴적물의 분포 특성은 연안을 따라 mud가 분포하며, 외해로 가면서 gravelly mud, sand순으로 변화한다. Emery (1968)는 남해지역의 외대륙붕지역에 분포하는 조립질의 sand를 잔류퇴적물이라 하였다.

이상과 같이 남해지역의 퇴적물 분포 유형을 살펴 보면, 남해도 남쪽에는 mud가 넓게 분포하며 외해쪽으로 (남동부) 가면서 sand의 함량이 68-93%로 급격히 증가하는 양상을 보인다 (Sung, 1994). 부산과 거제도 사이의 낙동강에 인접한 지역에서는 sand의 함량이 25-39%의 보이고 있으며, 외해로 가면서 clay의 함량이 증가하나 수심 70 m 부근

에서부터 sand의 함량이 73%로 급격히 증가한다.

따라서 이와 같은 현상을 종합해 보면, sand나 sand silt가 분포하고 있는 거제도 앞바다를 중심으로 인공 용승 구조물을 설치하기에 적합한 저질환경으로써 조사되었다.

인공 용승구조물 설치 해역의 해양학적 특성

1) 수괴 특성

하계 (2001년 8월 23일, 2002년 9월 3일), 추계 (2001년 11월 21일, 2002년 11월 28일) 및 동계 (2002년 2월 25일)에 관측한 수온 및 염분값을 이용하여 연구 해역의 수괴를 분석하기 위하여 T-S도를 이용하였다. Fig. 4는 그 결과를 나타낸 것인데 세로축은 수온을 나타내고 있고, 가로축은 염분을 나타내고 있으며, T-S도상의 타원선은 등밀도선을 표시하고 있다.

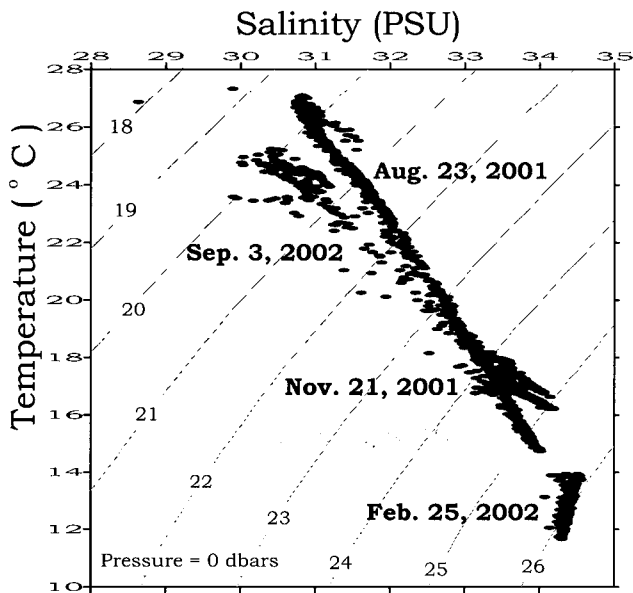


Fig. 4. T-S diagram of water masses observed on August 23, November 21, 2001 and February 25, September 3, November 28, 2002.

하계 (2001년 8월 23일, 2002년 9월 3일)의 수괴는 수온이 약 14.7-27.3°C, 염분은 약 28.6-34.0 psu의 넓은 범위의 해수가 존재하고 있으며, 표층과 저층간에 강한 성층이 형성하고 있음을 알 수 있다.

그러나 추계 (2001년 11월 21일, 2002년 11월 28일) 및 동계 (2002년 2월 25일)의 수온과 염분은 각각 14.1-18.0°C, 32.7-34.2 psu 및 11.6-13.8°C, 34.0 psu 이상의 범위로 하계에 비하여 변화폭이 작게 나타난 것을 볼 수 있다. 이 지역은 하계에는 표층과 저층간에 성층이 형성되고 추계에서 동계로 갈수록 성층은 파괴되며, 표층과 저층간의 연직 혼합이 발생하여 거의 균질한 해수가 존재한다.

2) 영양염 분포

Fig. 5-6은 하계 (2001년 8월 23일, 2002년 9월 5일), 추계 (2001년 11월 21일) 및 동계 (2002년 2월 25일) 영양염 (DIN 및 DIP)의 남북성분 (SN Line) 및 동서성분 (EW Line)의 연직분포를 나타낸 것이다. 영양염 농도는 하계 계절적인 강한 성층현상에 의해 표층에서 낮고 저층에서 높은 경향을 보였으며, 표층의 영양염 농도에 비하여 저층에서 평균 4배 이상의 고농도를 보였다. 또한 성층현상이 파괴되는 추계에는 하계에 비하여 표층에서의 영양염 농도가 증가하기 경향을 보이고 있으며, 동계에는 표층과 저층의 전 수층에서 고농도의 영양염 분포를 보이고 있다. 따라서 고농도의 영양염을 함유한 저층수를 표층으로 용승시킬 경우 전 계절에 걸쳐 표층에서 영양염이 풍부하여 그에 따른 기초생산력이 증가 할 것으로 보인다.

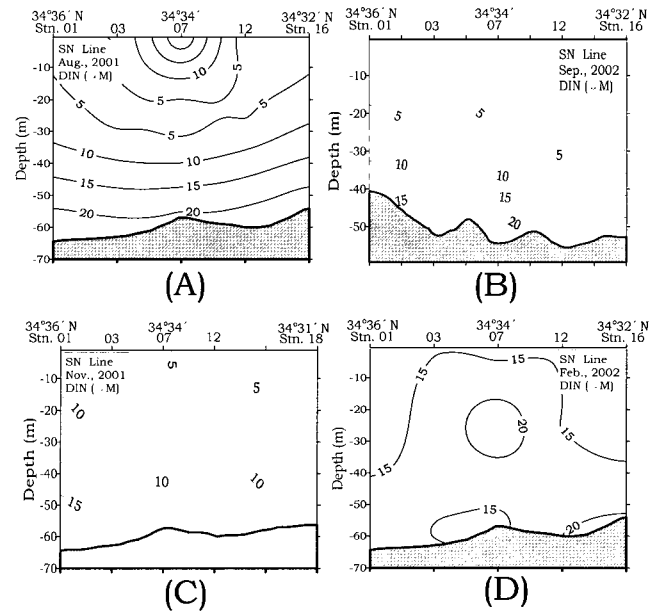


Fig. 5. Vertical distribution of DIN (dissolved inorganic nitrogen) along SN-line on August 23, 2001 (A), September 3, 2002 (B), November 21, 2001 (C) and February 25, 2002 (D).

3) 유동 특성

연구해역인 매몰도와 욱지도 부근의 해류양상을 파악하기 위하여 관측정점 01 (2001년 8월 23일-24일)에서 24시간 모니터링을 실시하였다. Fig. 7은 정점 01 (S-Area)에서 실시한 해류관측 결과를 수층별 시계열로 나타낸 것이다. 표층 (수심 5 m)에서의 해류는 남동방향의 흐름이 우세하게 나타나고 있다. 수심이 증가 할수록 표층에서 나타난 남향류의 흐름보다 북향류의 흐름이 우세하게 나타나고 있다. 특히 일 반적으로 표층에서 수심이 증가 할수록 저층에서의 흐름은 해저마찰력으로 인하여 표층의 흐름에 비하여 작게 나타나지만, 정점 01에서는 해저 가까이 (수심 48 m)에 북향류의 큰 흐름이 존재하고 있음을 알 수 있었다. 저층에서 나타

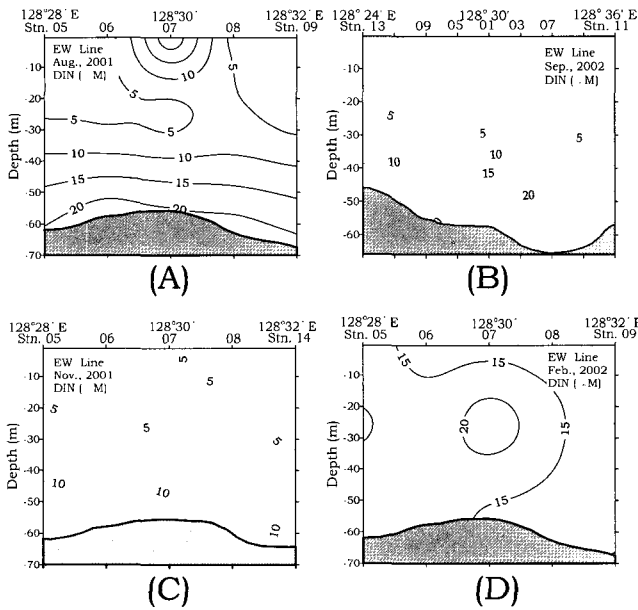


Fig. 5-1. Vertical distribution of DIN along EW-line on August 23, 2001 (A), September 3, 2002 (B), November 21, 2001 (C) and February 25, 2002 (D).

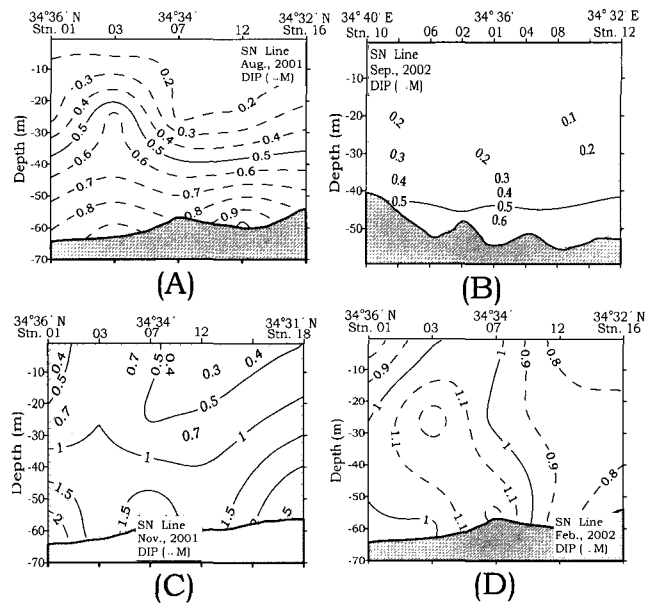


Fig. 6-1. Vertical distribution of DIP along EW-line on August 23, 2001 (A), September 3, 2002 (B), November 21, 2001 (C) and February 25, 2002 (D).

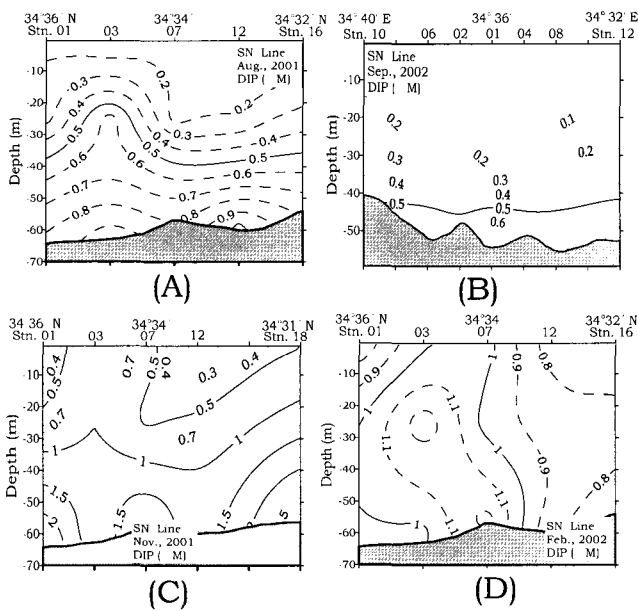


Fig. 6. Vertical distribution of DIP (dissolved inorganic phosphate) along SN-line on August 23, 2001 (A), September 3, 2002 (B), November 21, 2001 (C) and February 25, 2002 (D).

나는 강한 흐름은 본 연구목적인 인공구조물을 이용하여 하계 저층의 고농도 영양염을 표층으로 상승시킬 수 있는 물리적인 작용으로의 적용이 가능한 것으로 생각한다.

정점 01에서 관측된 저층의 강한 흐름이 이 지역에서 하계에만 나타나는 현상인지 또는 쓰시마난류의 영향에 의한

것인지에 대해서는 설명 할 수 없으며, 앞으로 이 지역에서 보다 장기적인 유동관측에 의해서 이러한 현상의 정확한 해석이 가능 할 것으로 생각한다.

### 감사의 글

본 연구는 해양수산부의 인공용승류를 활용한 어장환경 조성에 관한 연구내용의 일부분입니다.

### 참고 문헌

Emery, K.O. 1968. Relict sediments on continental shelves of world. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 52(3), 445-464.

Kim, D.C., Park, Y.A., Lee, C.B., Kang, H.J. and J.H. Choi. 1992. Sedimentation and physical properties of inner shelf sediment, South Sea of Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 28(6), 60614.

Kim, S.H., H.K. Rho and C.M. Choi. 1998. A study of the hydrographic conditions and tidal front on the northern coastal area of Cheju Island. *J. Kor. Fish. Soc.*, 31(3), 437-446. (in Korean)

KIER (Korea Institute of Energy and Resources). 1986. Geological study on the shallow water-Marine geophysical study on the continental shelf off Southern Coast, Korea Institute of Energy and Resources Rept., 149 pp. (in Korean)

MOMAF (Ministry of Maritime Affairs & Fisheries). 2002. Standard methods for the examination of sea water, sediment and marine organism. 330 pp. (in Korean)

NFRDI (National Fisheries Research and Development

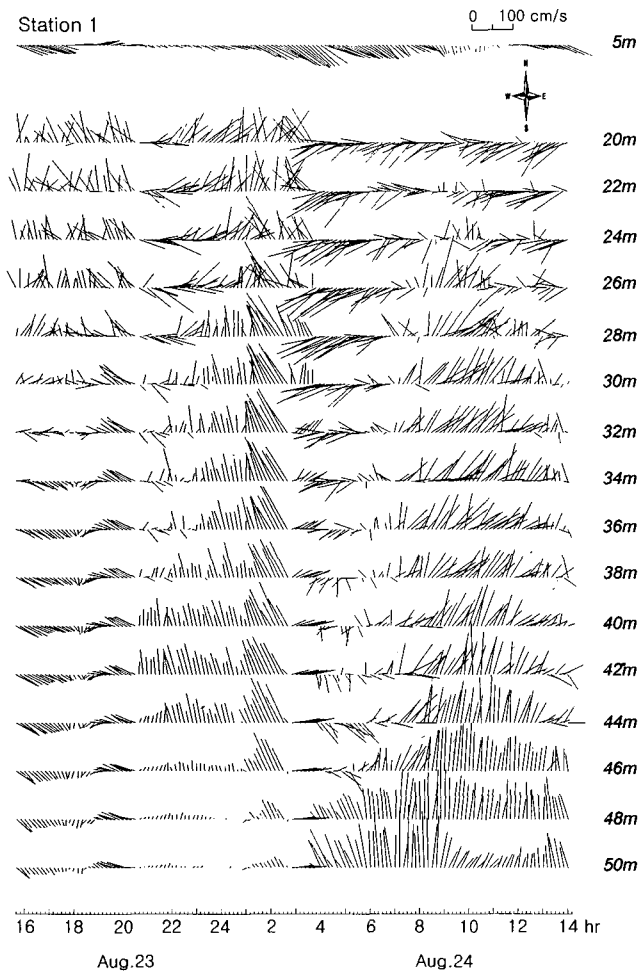


Fig. 7. Time series of the observed currents at St. 01 from August 23-24, 2001.

Institute). 1989. Survey on the productivity of the artificial fishing reef to the coastal of Korea. Tech. Report 82, 107 pp. (in Korean)

NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 1992. Studies on the effectiveness of fishier resources enhancement of artificial reef in Korean coastal waters. Tech. Report 95, 89 pp. (in Korean)

Park, S.C. and D.G. Yoo. 1988. Depositional history of

Quaternary sediments on the continental shelf off the Southeastern coast of Korea (Korea Strait). *Mar. Geol.*, 79, 65-75.

Park, Y.A. 1983. The nature of Holocene sedimentation and sedimentary facies on the continental shelves of Korea. Summer Conference for Domestic and Foreign Scholars of Science and Technology: KOFST, 72-80.

Park, Y.A., C.B. Lee, Y.G. Cho, J.Y. Choi and S.Y. Bak. 1989. The Holocene marine sediment distribution on the continental shelf of the Korea South Sea and the early Holocene sea level standing evidence. *Korea J. Quaternary Res.*, 2(1), 13-24. (in Korean)

Ryther, J.H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Science*, 166, 72-76.

Simpson, J.H. and J.R. Hunter. 1974. Fronts in the Irish Sea. *Nature*, 250, 404-406.

SRFGC (Society for the Research of Fishing Grounds Construction). 1996-1999. Study for development for fishing grounds construction system. (in Japanese)

Sung, J.Y. 1994. Sedimentary environment and geoacoustic modeling of the shelf sediment, South Sea of Korea MS Thesis, National Fisheries University of Pusan, 114 pp. (in Korean)

Yanagi, T. and M. Nakajima. 1990. On the effect of man-made structure for upwelling as an artificial reef. *Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr.*, 54(3), 249-254.

Yanagi, T., M. Nakajima, S. Ootake and K. Kondoh. 1991. Man-made structure for upwelling as an artificial reef, *Fish. Engineer*, 27(1), 73-77.

Yanagi, T. and M. Nakajima. 1991. Change of oceanic condition by the man-made structure for upwelling. *Mar. Poll. Bull.*, 23, 131-135.

Yanagi, T. and S. Okada. 1993. Tidal fronts in the Seto Inland Sea. *Mem. Fac. Engineer., Ehime Univ.*, 12(4), 337-343.

Yang Y.J., S.H. Kim and H.K. Rho. 1998. A study on the temperature fronts observed in the South-West Sea of Korea and the northern area of the East China Sea. *J. Kor. Fish. Soc.*, 31(5), 695-706. (in Korean)

2003년 2월 21일 접수

2003년 4월 28일 수리