

## 해역 기초생산력 증대를 위한 부유식 인공용승시스템 요소기술

정동호\* · 이호생\* · 김현주\* · 문덕수\* · 이승원\*

\*한국해양연구원 대전분원 해양구조물·플랜트연구부 해양심층수연구센터

### Key Technologies for Floating Type Artificial Upwelling System to Strengthen Primary Production

Dong-Ho Jung\*, Ho-Saeng Lee\*, Hyeon-Ju Kim\*, Deok-Soo Moon\* and Seung-Won Lee\*

\*Deep Ocean Water Application Research Center, Marine Structure&Plant research department, Daejeon branches, KORDI, , Korea

**KEY WORDS:** Primary production 기초생산, Artificial upwelling system in floating type 부유식 인공용승시스템, Deep seawater 해양심층수, Fisheries resource 어족자원

**ABSTRACT:** The abundant nutrients contained in deep seawater are delivered by natural upwellings from the deep sea to the surface sea. However, the natural upwelling phenomenon is limited to specific areas of the sea; in other areas, the thermocline separates the surface sea from the lower layer. Thus, the surface layer is often deficient in nutritive salts, causing the deterioration of its primary productivity and ultimately leading to an imbalance in the marine ecosystem. Without a consistent supply of nitrogenous nutritive salts, they are absorbed by phytoplankton, resulting in a considerable problem in primary productivity. To solve this issue, a floating type of artificial upwelling system is suggested to artificially pump up, distribute, and diffuse deep seawater containing rich nutritive salts. The key technologies for developing such a floating artificial upwelling system are a floating offshore structure with a large diameter riser, self-supplying energy system, density current generating system, method for estimating the emission and absorption of CO<sub>2</sub>, and way to evaluate the primary production variation. Strengthening the primary production of the sea by supplying deep seawater to the sea surface will result in a sea environment with abundant fishery resources.

#### 1. 서 론

자연용승이 발생하는 해역은 전 세계적으로 0.1%밖에 되지 않지만, 영양염이 풍부한 심층수를 유광층까지 운반하여 식물플랑크톤 번성에 영향을 준다고 알려져 있다(Ryther, 1969). 이것은 먹이사슬에 의해 어류 군집을 유도하여 풍부한 어장 형성에 도움을 준다. 그러나, 자연용승이 매우 제한적으로 발생하기 때문에, 심층수로부터 표층으로의 영양염 공급은 원활히 이루어지지 못하는 현실이다. 최근 발표된 연구 결과에 의하면, 해수면 수온 상승으로 인하여 1950년 이후로 식물플랑크톤이 약 40% 감소했다 (Danial et al., 2010). 해수면 온도가 상승하면 '데드 존(Dead zone)'층이 형성되어 심해로부터 공급되는 영양분을 충분히 공급받지 못한 식물 플랑크톤은 제대로 자랄 수 없게 된다. 식물 플랑크톤은 우리가 숨 쉬는 공기의 절반을 생산하는 중요한 매개체이며, 해수면의 이산화탄소를 감소시켜 바다속 모든 생태계를 지탱해주는 역할을 한다.

우리나라 동해역에서도 앞서 언급한 현상들이 일부 발견되고 있다. 우리나라 동해역의 울릉도 해역에서 자연용승이 발생하여 인근 해역은 영양염이 풍부한 것으로 알려져 있다. 그러나, 우리나라 동해역의 거의 모든 해역에서 표층에는 영양염이 고갈

되어 있는 것으로 파악되었다. 특히 자연용승이 많이 발생하는 울릉도 인근에서도 표층 부근에는 영양염이 체류되지 못하는 것으로 조사되었다. 그 이유는 자연용승에 의하여 심층의 해양 심층수가 용승되기도 짧은 시간 내에 혼합되어 다시 심층으로 침강되는 특징을 나타내기 때문이었다. 식물플랑크톤이 빛과 영양염을 이용하여 광합성을 하기 위해서는 영양염이 일정 시간 이상 유광층에서 체류되어야 하나, 자연용승된 해양심층수는 짧은 시간 내에 심층으로 다시 침강되기 때문에 울릉도 인근 해역에서 발생하는 자연용승은 기초생산력 증대에 크게 기여하지 못하였다. Chung et al. (1989)의 연구결과도 유사한 결과를 보여주고 있는데, 동해역 남부 표층 인근에 성층이 형성되어 심층으로부터 영양염이 공급되지 못하고 있는 것으로 나타났다. 이로 인하여 표층에서 식물플랑크톤의 광합성에 의하여 미소하게 남아있는 영양염이 소비되어 표층은 영양염이 고갈된 상태라는 것을 알 수 있었다. 특히 질소계 영양염 비율이 낮기 때문에 여러 가지 공급원을 통하여 질소계 영양염이 공급되지 않을 경우 기초생산력에 큰 문제가 될 수 있다는 것을 언급하였다. 한국해양연구원에서 수행된 연구결과도 위의 두 연구결과와 유사한 결과로 나타났다 (KORDI, 1994). 우리나라 동해역에 관한 영양염 조사 결과에 의하면 대부분의 해역에서 표층은 영양염이 고갈된

것으로 파악되었다.

이상의 참고문헌들을 종합해 볼 때, 전 세계적으로 혹은 우리나라 동해역의 대부분 표층해역은 영양염이 고갈되어 있는 상태라는 사실을 알 수 있었다. 다양한 공급원을 통하여 영양염이 공급되지 않을 경우 기초생산력에 큰 문제가 발생하게 되며, 해양생태계의 안정성까지도 문제가 될 것이다. 따라서, 인공적으로 표층에 영양염을 공급하는 방안이 강구되어야 할 것이다.

해양심층수는 수심 200m 아래에 위치하는 청정성, 저온성, 부영양성, 미네랄성, 안정성 등의 5대 특성을 가지고 있는 청정해수 자원이다 (국토해양부, 2005). 특히 해양심층수에 풍부하게 포함된 영양염을 표층으로 용승시켜서 확산시킬 수 있다면, 영양염 부족에 의한 기초생산력 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

본 연구에서는 영양염을 풍부하게 내포하고 있는 해양심층수를 표층으로 인공적으로 용승시킨 후, 확산 및 체류시킬 수 있는 인공용승시스템에 관하여 기술적으로 고찰한다. 국외에서 개발된 사례를 조사하며, 국외 개발 시스템의 특징을 분석한다. 특히, 영양염이 고갈된 해역은 육지로부터 멀리 위치하는 외해이기 때문에, 외해에 부존하는 해양심층수 자원을 인공용승시켜 활용할 수 있는 요소기술에 대하여 분석한다.

## 2. 부유식 인공용승시스템 국외 개발 사례

부유식 인공용승 시스템에 관한 연구는 미국과 일본에서 진행된 사례가 있다. 반면, 국내에서는 부유식 인공용승시스템에 관한 개발 사례는 없지만, 천혜역 해저면에 고정식 인공용승구조물을 설치한 사례가 있다(김동선 등, 2006). 해저면에 콘크리트 블록을 군집으로 설치하여, 해저면 부근에서 발생하는 흐름을 해수면으로 유도하여 영양염을 해수면으로 이송시키는 개념이다. 일본에서는 총 3건의 인공용승 시스템을 개발하여 운용한 사례가 있다. 외해역에 설치한 사례가 3건, 내해역에 1건이 있는데 개발된 시스템에 관하여 간단히 소개한다.

### 2.1 호우요 프로젝트

일본에서는 1989년에 토야마만에서 하루에 2.7만톤을 250m 심해에서 끌어올리는 시스템을 실험해역에서 운용한 사례가 있다. 해역비옥화 플랜트 ‘호우요(Houyo)’를 개발하여 실증 실험을 위하여 실험해역에 설치하여 운용하였으나, 태풍에 의해서 라이저(Riser)가 파손되는 사고가 발생하여 철수되었다. 취수되는 해양심층수는 해수면에서 그대로 뿌리는 시스템을 적용하였으나, 표층수와 밀도차에 의해서 바로 해저면으로 가라앉아서 큰 효과를 얻지 못했다. 호우요 구조물은 해역비옥화를 위한 최초의 구조물이라는 상징적인 의미를 가지기는 하지만, 식물플랑크톤이 영양염을 이용하기 위해 필요한 체류시간 조건을 만족시킬 수 없었다. 즉, 밀도류 생성에 관한 개념을 적용하지 못해서 실패로 돌아갔다.

### 2.2 고카쇼 프로젝트

1997년에는 수심 15m의 고카쇼(Gokasho) 내해지역에서 밀도

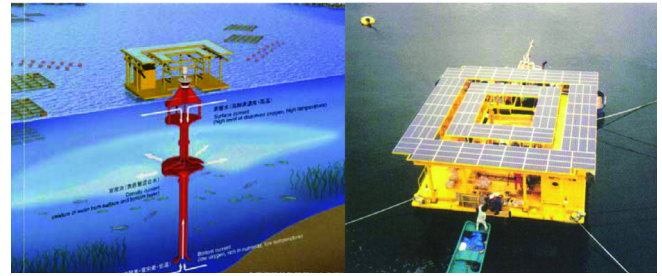


Fig. 1 DCG system installed at Gokasho bay in Japan (Left : Concept design, Right : Operation)

류확산장치(DCG : Density current generator)를 개발하여 설치하였다(Fig. 1). 고카쇼 만은 육지로 둘러싸인 내만 지역으로 일본에서 매우 유명한 낚시터였다. 그러나, 표층과 저층과의 성층화가 진행되면서 해수 순환이 이루어지지 않아서 수질악화 문제가 발생하였다. 이 문제를 해결하기 위하여 저층수를 용승시켜 표층수와 혼합하여 확산시키는 밀도류 확산장치를 적용하였다. 현재 10년 이상 시스템을 운용 중이며, 시스템을 설치한 이래로 저층의 용존산소량이 증대되어 수질이 개선되어 어획량이 지속적으로 증가하고 있는 것으로 조사되고 있다. 고카쇼 프로젝트는 천혜에 적용되어 내만 수질개선 목표는 충분히 달성하였다. 또한 호우요 프로젝트에서 적용하지 못했던 밀도류 시스템을 반영하여 용승류의 확산 기능을 성공적으로 수행하였다. 그러나, 해양환경하중이 비교적 크게 작용하지 않는 내만에 설치되었기 때문에, 상부구조물의 설계 개념 및 연직 라이저의 개발 등의 중요한 시스템적 과제는 적용하지 않았다.

### 2.3 타쿠미(Takumi) 프로젝트

일본 사단법인 마린 포럼21에서 해양심층수를 어장조성기술로 활용하여 해역비옥화에 이용하기 위하여 ‘타쿠미’ 프로젝트를 발족하였다. ‘타쿠미’는 직경 1m의 라이저 파이프를 이용하여 10만톤/일의 해양심층수를 취수하여 20만톤/일의 표층수와 혼합하여 밀도류를 생성 후 확산시키는 시스템으로 고안되었다(Fig. 2). ‘타쿠미’는 심층수와 표층수를 임펠러로 혼합해서 동일한 밀도층에 방류하고, 밀도 성층되어 있는 유광층에 밀도류를 생성해서 장시간 동안 체류하도록 고안되었다(Ouchi, 2003). ‘타쿠미’는 해양환경 하중에 의해서 안정된 거동을 나타내는 SPAR 형 해양구조물 형식으로 제작되었으며, 운용은 디젤유 공급에 의한



Fig. 2 TAKIUMI developed in Japan (Left : final fabricated structure, Right : installed structure in real sea)

발전기로 이루어졌다. 동경 인근 사카미 만에 설치되어 약 3년간 실증실험을 거쳐서 현재는 철수된 상태이다. 시스템 운용으로 인하여 밀도류가 일정 거리까지 확산된 것은 확인하였으나, 식물플랑크톤 번성 등에 관한 실증 결과에 관한 조사 및 분석은 이루어지지 못하고 사업이 종료되었다. 타쿠미 프로젝트는 하드웨어 측면에서 많은 기술적 진전을 보였지만, 실제 인공용승된 영양염 성분이 해역에 어떤 영향을 미치는가에 관한 근본적인 연구목표에 관한 접근은 제대로 이루어지지 않았다.

### 3. 해양심층수 인공용승을 위한 부유식 인공용승 시스템 핵심요소 기술

앞 절에서 언급한 바와 같이, 일본에서는 해양심층수의 인공용승 및 확산 시스템 개발을 위한 연구 및 실증을 수행하였다. 이를 통하여 해양심층수에 풍부한 영양염을 표층에 공급하여 해역기초생산력 증대에 기여하고자 하였으며, 때로는 수질개선에 활용하기도 하였다. 그러나, 인공용승시스템의 본질적인 개발 목표는 해역기초생산력을 증대시키는 것이기 때문에, 하드웨어적인 개발 외에도 소프트웨어적인 측면에서 연구가 이루어져야 한다. 본 장에서는 육상에서 멀리 위치하는 수심 200m 아래의 해양심층수 자원을 인공용승 및 확산시키기 위해 필요한 부유식 인공용승시스템의 하드웨어적인 측면과, 인공용승의 영향에 관한 소프트웨어적인 측면의 요소기술들에 관하여 고찰한다.

해역 기초생산력 증대에 기여할 수 있는 부유식 인공용승시스템의 핵심기술은 크게 5가지로 분류될 수 있으며, 각 세부기술은 Fig. 3과 같이 정리 될 수 있다. Table 1에서는 각 요소기술에 대한 영향 인자와 제약요소 등을 보여주고 있다.

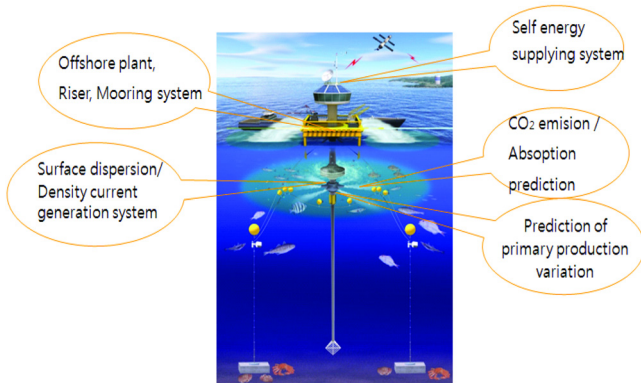


Fig. 3 Key technologies for developing artificial upwelling system in floating type

### 3.1 부유식 인공용승 구조물

부유식 인공용승시스템에 있어서 가장 기본적인 요소는 시스템 유지를 위한 구조물이다. 구조물은 크게 세 부분으로 구성되는데, 상부구조물, 계류시스템, 그리고 라이저이다. 상부구조물은 전체 시스템 구성요소를 탑재하며 부력을 제공하는 요소로써, 열악한 해양환경에서도 안정된 거동 특성을 나타내어야 한다. 상부구조물은 탑재요소에 따라 구조물 형식 및 규모가 결정되는데, 특히 에너지공급 시스템의 종류에 따라 상부구조물 규모가 결정되기 때문에 두 시스템의 상관관계를 잘 고려해야 한다. 타쿠미에서 적용한 SPAR형식은 전체 시스템의 연직 거동이 작게 발생하기 때문에 추천될 수 있는 구조형식이다. 상부구조물과 계류시스템은 일반적인 해양구조물 설계 및 개발 기술이 그대로 적용될 수 있기 때문에 비교적 접근이 쉬우나, 라이저는 대용량의 인공용승을 위해서 직경이 매우 큰 라이저 파이프가 적용되어야 하므로 재료적인 측면에서 구조적인 안전성 측면까지 새롭게 고려되어야 한다. 일일 백만톤 이상의 해양심층수를 취수하기 위해서는 최소 직경 3m이상의 라이저 파이프가 사용되어야 한다. 정동호 등(2004)은 해양심층수 취수를 위한 소형 라이저에 관한 연구를 수행한 사례가 있지만, 대구경 라이저에 관한 연구는 부족하다. 따라서, 상용으로 적용 가능한 대구경 파이프에 대한 재질 검토가 이루어져야 한다. 라이저 파이프를 선정시에는 여러 가지 요소를 고려할 필요가 있는데, 첫째는 해양환경에서 안전할 수 있도록 충분한 구조적 강도를 가져야 한다. 경제적으로 효율적이어야 하며, 생산과 공급이 용이해야 한다. 해양에서 작업이 용이하도록 운송과 작업이 쉬워야 한다. 재질의 비중이 너무 작으면 해수 중에서 부상되기 때문에 중량 보강이 필요하며, 너무 큰 경우에는 큰 장력이 작용하여 부력재가 필요하므로 적당한 비중의 재질이 유리하다. Table 2에서는 국내에서 생산 가능한 파이프에 대하여 특성을 분석한 결과를 보여주고 있다. 유리섬유강화플라스틱 (GFRP, Glass Fiber-reinforced Plastic) 파이프는 비중이 약 1.8로 해수에서 부상되지 않으며, 강도는 강관에 비하여 작지만 비교적 크기 때문에 안전성도 높은 편이다. 무엇보다도 최대 직경이 3.6m까지 국내에서 생산이 가능하며, 가격도 저렴하기 때문에 대구경 라이저를 위한 적절한 재질로 사료된다.

대구경 라이저 재질로 선정된 GFRP관에 대하여 기초적인 거동특성 해석(고유치해석)을 수행하였다. Table 3에서는 직경 3m, 길이 250m 라이저 파이프에 대한 고유치 해석 결과를 보여준다. 1차와 2차 고유주기가 파랑에너지가 큰 15초 이상을 넘기 때문에 기초 거동특성은 우수한 것으로 사료된다. 향후 보다 자세한 동적해석을 통하여 선정된 라이저파이프에 관한 안전성을 확보해야 할 것이다.

Table 1 Influence factors and restriction elements for key technologies

	Influence Factors	Restriction elements
Offshore plant, riser, mooring system	Pumping seawater quantity	Large diameter pipe
Self energy supplying system	Energy consumption quantity	Energy production efficiency
Density current generation system	Seawater temperature distribution	Ocean current
Prediction of CO <sub>2</sub> emission/absorption	Ocean environmental condition	-
Prediction of primary production variation	Seawater temperature	Staying time at sea surface

**Table 2** Pipe properties

	HDPE	Steel	GFRP
Strength	250~280 kgf/cm <sup>2</sup>	4000 kgf/cm <sup>2</sup>	2500~3000 kgf/cm <sup>2</sup>
Elastic modulus	8.0×103kgf/cm <sup>2</sup>	2.1×106kgf/cm <sup>2</sup>	8.×104kgf/cm <sup>2</sup>
Specific gravity	0.95~0.96	7.8	1.8~2.0
Heat conduct	0.3 kcal/mhr°C	54 kcal/mhr°C	0.22 kcal/mhr r°C
Water quality	Good	Contamination	Good
Roughness	150	100	100
Price (300mm)	USD73/m	USD100/m	USD58/m
Welding	Heat welding	Welding	Flange bolt
Construction	Easy to handle	Uneasy	Easy
Environmenta l point	Good	Not good	Good
Manufacture	Smaller than 1.2m	Smaller than 2.5m	Smaller than 3.6m
Supply	Domestic	Domestic	Domestic

**Table 3** Natural periods(s) of GFRP pipe of 250m length

Mode No.	Natural periods (s)
1st	131.7
2nd	29.5
3rd	10.3
4th	5.1
5th	3.0

**3.2 자가에너지 공급시스템**

인공용승시스템에서 취수와 확산을 위해서는 동력이 필요하며, 이에 따른 에너지 공급이 필수적이다. 취수와 확산은 거의 동시에 발생하게 되며, 시스템의 설계에 따라 최소한의 에너지를 이용한 취수와 확산이 이루어질 수 있어야 한다. 취수와 확산을 위한 에너지 중 취수에는 비교적 적은 에너지가 소모되는데, 그 이유는 취수를 위한 양정을 낮게 설계하여 심층수가 자연압력에 의해 취수될 수 있기 때문이다. 따라서, 취수보다 확산을 위한 에너지 설계가 보다 중요하다.

취수 및 확산방식은 크게 세 가지로 나누어 질 수 있는데, 그 첫째는 펌프 취수시스템이다. 펌프 취수시스템은 전동펌프 혹은 자연에너지를 이용한 구동펌프를 이용하여 심층수와 표층수를 취수하는 방법이다. 둘째는 프로펠러 방식 취수시스템인데, 밀도류를 생성하고자 하는 수층에 임펠러 두 대를 서로 반대 방향으로 설치하여 표층수와 심층수를 동시에 흡입해서 밀도류를 생성하여 확산시키는 방법이다. 프로펠러 방식은 일본의 타쿠미에서 적용되었다. 셋째는 기포펌프 시스템으로, 압축공기의 부상에 따라 심층수가 표층으로 취수되는 방식이다.

외해에 설치되는 부유식 인공용승시스템은 외부에서 인공적

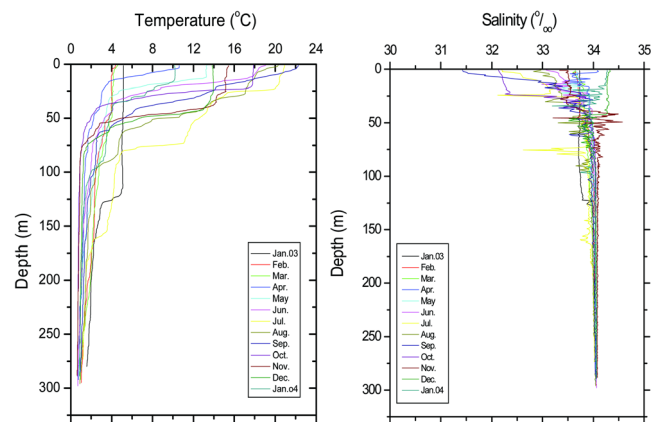
으로 에너지를 공급한다면 경제적 비용이 크게 발생할 수 있기 때문에, 풍력, 태양력, 파력, 조류력 그리고, 해양온도차발전 등의 신재생 해양에너지를 이용하는 방안을 고려해야 한다. 해양에너지는 이용 방식에 따라 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 기계 에너지를 직접 이용하는 방식인데, 풍력, 파력, 조력 등의 에너지를 기계에너지로 변환하여 양수기나 공기압축기로 활용하는 방식이 있으며, 해양에너지를 전기에너지로 변환한 후 취수시스템의 기계적 에너지로 변환하는 방식이 있다. 두 방식 중에서 적용시스템의 특징에 따라 효율적인 시스템을 취하게 되는데, 일반적으로 단계 감축에 의한 에너지 손실을 방지하기 위해서 전자가 보다 효율적이다.

많은 종류의 해양에너지 중에서 해역의 특성을 분석하여 가장 효율적인 에너지원을 적용해야 한다. 특히 외해에 구조물이 설치되는 경우에는 파력과 풍력을 이용한 에너지 활용이 효율적일 것으로 사료되는 바, 두 시스템을 복합적으로 활용하는 복합발전시스템에 관한 고안이 이루어져야 한다. 취수되는 해양심층수와 표층수를 이용한다면 해양온도차발전 또한 적용 가능하지만, 발전플랜트를 탑재하기 위해서 비교적 큰 재하중이 요구되기 때문에 설계하중에 대한 검토가 필요하다. 효율적인 자가에너지 공급시스템의 설계와 적용도 중요하지만, 사용 에너지를 최소화하기 위한 전력 및 제어 시스템 설계도 중요하다.

**3.3 밀도류 생성 및 확산 시스템, 밀도류 확산 예측시스템**

인공용승시스템이 해역 기초생산력 증대에 기여하기 위한 필수조건 중의 하나는 인공용승에 의해 표층에 공급된 영양염이 표층이 일정 시간 이상 체류되는 것이다. 일본의 ‘효우요’ 개발 사례에서 언급했던 바와 같이, 심층수를 취수 후 표층에 그대로 살포하는 방식은 심층수가 유광층에 체류하지 못하고 밀도차이로 인하여 다시 심층으로 침강하게 된다. 따라서, 밀도류의 생성 및 확산시스템 개발을 통한 체류시간 연장 기술에 관한 연구가 수행되어야 한다.

대부분의 해역은 수온 및 염분 등에 의해 성층화되는데, Fig. 4에서는 우리나라 강원도 고성 인근 해역의 수온 및 염분 분포의 성층화된 예를 보여준다(국토해양부, 2005). 우리나라 동해역은



**Fig. 4** Seasonal variation of water temperature and salinity in Gosung according to water depth (MTLM, 2005)

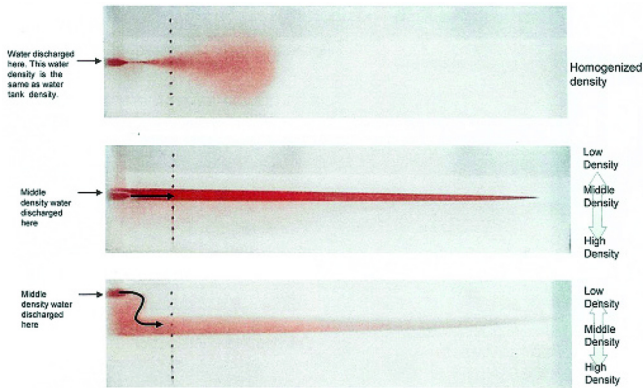


Fig. 5 Experiment for diffusion effect by density current (Ouchi, 2003)

계절에 따라 변화가 있기는 하지만, 대개 수심 20~70m 해역에서 성층화가 발생하는 것을 알 수 있다. 밀도류는 표층수와 심층수가 혼합된 중간 수온의 해수를 성층화된 두 수층의 중간 수온층을 통하여 확산시키는 개념이다. Fig. 5에서는 밀도류에 의한 확산 효과를 실험으로 보여주고 있는데, 밀도류에 의한 특정 수심층에서 먼 거리까지 확산되는 것을 볼 수 있다(Ouchi, 2003).

밀도류의 효율을 증대시키기 위해서는 최적 수온 및 수심, 유속, 유량 등 다양한 매개변수들에 대한 인자 분석이 필요하다. 이를 위해서는 밀도류 확산에 관한 수치시뮬레이션 개발이 필요하며, 실험적 연구를 통한 검증 및 분석이 필요하다.

밀도류 생성시스템의 효율은 실제 해양 환경 특성에 따라 크게 성능이 변하게 된다. 특히, 해역의 해류, 조류, 그리고 취송류 등의 흐름 조건에 따라 효율이 좌우될 수 있다. 따라서, 실제 해양 환경에서 인공용승시스템의 밀도류 생성시스템에 의하여 인공용승된 밀도류가 어떻게 확산되는지에 관한 밀도류 확산 예측시스템 개발이 필요하다. 밀도류 확산 예측시스템 개발을 위해서는 시스템을 적용하고자 하는 해역의 물리 환경적 특성에 관한 데이터베이스화가 이루어져야 한다. 해역 데이터베이스와 3차원 해수유동 시뮬레이션 개발을 통하여 실제 해역에서 인공용승류가 어떻게 확산되는가를 판단할 수 있을 것이다. 확산 시뮬레이터 개발을 통하여 어떤 특정 해역에서 인공용승시스템의 성공 가능성을 판단할 수 있으며, 적정 취수량 산정을 위한 평가 자료로도 활용할 수 있다.

3.4 이산화탄소 수치해석

최근 이산화탄소 방출 문제가 사회적 이슈로 대두됨에 따라 인공용승에 의한 해역 이산화탄소 변화는 중요한 문제 중의 하나이다. 심층은 표층에 비하여 이산화탄소 농도가 높기 때문에, 인공용승에 의하여 이산화탄소가 표층 혹은 대기 중으로 방출되어 대기 중의 이산화탄소 농도를 증가시킬 수 있다. 반면, 인공용승에 의해 영양염, 태양광, 그리고 이산화탄소가 광합성 작용을 하게 되며, 이산화탄소를 흡수하는 효과를 얻을 수 있다. 인공용승에 의하여 이산화탄소 농도가 증가하거나 감소하는가에 관한 문제는 해수 중 혹은 해수와 대기 간에 발생하는 복잡한 메커니즘을 이해하고 해석해야 한다.

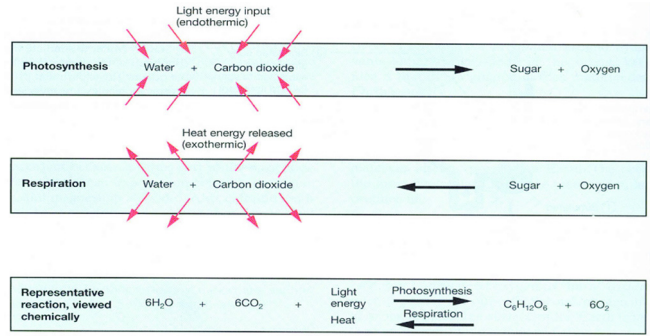


Fig. 6 Carbon dioxide fixation by photosynthesis and organic matter decomposition by respiration

해수 중에서 이산화탄소 밀도에 영향을 미치는 메커니즘은 크게 생물펌프와 알카리펌프로 나누어진다. 생물펌프에 영향을 미치는 매개변수는 광합성에 의한 1차생산력, 영양염, 탄소순환, 인공용승 등이 있으며, 알카리펌프는 탄산칼슘 침전에 의한 용해에 의해 지배된다. Fig. 6에서는 광합성 작용에 의한 이산화탄소 고정작용과 호흡작용으로 인한 유기물 분해 과정을 보여준다. 표층수에서는 태양에너지, 이산화탄소 및 영양염을 이용하여 광합성 작용이 발생하여 유기물이 합성된다( $6H_2O + 6CO_2 \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$ ). 이 결과로 이산화탄소와 영양염은 소모되며, 유기탄소가 합성된다. 반면 심층수에서는 태양광이 도달하지 않기 때문에 유기물 분해를 위한 호흡작용만 일어난다( $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6H_2O + 6CO_2$  발생). 따라서, 산소가 소모되며 이산화탄소가 생성되어, 심층수 중 전탄산 농도가 증가하는 결과를 가져온다. 또한 유기물이 분해되어 유기영양염의 무기물화가 되면서 영양염이 증가된다. 따라서, 심층수에서 유기물 분해(생물펌프)와 탄산칼슘 용해(알카리펌프)에 따라 전탄산량이 증가하게 된다.

해수 중의 전탄산 농도는 광합성/호흡 작용과 탄산칼슘의 용해와 침전에 의해 지배되는데, 광합성 작용에 의해 전탄산량의 농도는 감소하고 호흡작용에 의해 증가한다. 탄산칼슘의 용해에 의해 알카리도가 증가하여 전탄산 농도가 증가하며, 탄산칼슘 침전에 의해 알카리도가 감소하고 전탄산 농도가 감소한다. 해수 중의 이산화탄소 농도는 해수와 대기와의 상호 작용에 의해서도 지배된다. 해양에서 대기로 이산화탄소가 방출되면 알카리도는 불변하지만 전탄산량은 감소하며, 해양으로 유입되면 알카리도는 불변하지만 전탄산량은 증가하게 된다.

따라서, 인공용승에 의한 이산화탄소 수지를 추정하기 위해서는 표층에서 발생하는 광합성에 의한 유기물 생성, 이산화탄소 소비, 영양염 소비 및 심층에서 발생하는 유기물 분해, 탄산량 증가, 영양염 생성 등의 생물펌프의 해석과 표층에서 형성된 유기물과 탄산칼슘의 침강에 의한 심층수의 전탄산량과 알카리도 변화 등의 알카리펌프 해석을 동시에 수행해야 한다. 또한 대기와의 이산화탄소 교환에 관한 해석도 동반되어야 한다.

3.5 기초생산력 증대 효과 분석

인공용승시스템의 주된 기능은 심층에 풍부하게 부존하는 영양염을 영양염이 부족한 해수면 부근으로 공급하는 것이다. 표층으로 공급된 영양염은 식물플랑크톤이 광합성 작용을 하는데

주된 요소가 되기 때문에, 해역의 기초생산력 증대에 기여하기 위해서는 충분한 양의 영양염이 공급되어야 한다. 해양심층수 공급에 의한 식물플랑크톤의 증식 효과를 극대화시키기 위해서는 다양한 환경인자들을 고려해야 한다. 첫째는 표층수와 심층수의 비율인데, 연구결과에 의하면 심층수:표층수=1:1 조건에서 식물플랑크톤 증식 효과가 높게 나타났다(김아리 등, 2010). 심층수 원수에서는 식물플랑크톤 증식효과가 더 높게 나타났지만, 실제 해양환경에서 해양심층수를 인공용승시켰을 경우 심층수의 밀도가 높아서 저층으로 바로 침강하기 때문에 현실적으로 불가능하다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 인공용승류를 먼 거리까지 확산시키기 위해서는 밀도류를 생성시켜야 하므로 표층수와 심층수를 적절한 비율로 혼합할 필요가 있다. 실험 결과에 의하면 심층수가 표층수의 절반 이상으로 비율이 높은 조건에서만 심층수의 영양염 성분이 기초생산력 증대에 기여할 수 있기 때문에, 향후 시스템 설계에서 잘 반영해야 할 것이다.

이상의 연구 내용과 함께 대용량의 해양심층수 취수를 통하여 발생할 수도 있는 생태계의 변화에 대하여 예측 및 모니터링이 필요하므로, 이에 관한 연구도 수반되어야 한다(이인철 등, 2008).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 우리나라 뿐만 아니라 전 세계적으로 문제가 되고 있는 해역의 기초생산력 부족 문제를 해결하기 위한 방안으로 인공용승시스템을 제시하며, 이에 필요한 요소기술들의 특징을 분석하였다. 인공용승시스템의 가장 핵심적인 하드웨어는 대량의 해양심층수를 심층에서 표층까지 이송하는 라이저이며, 일일 수백만톤 이상의 해양심층수를 취수한다고 가정할 경우 직경 3m 이상의 파이프 개발이 필요하다. 대규모 취수관으로 개발 가능한 관종 중 GFRP 파이프가 구조적, 경제적으로 가장 뛰어난 것으로 분석되었기 때문에 향후에 적용이 용이할 것으로 사료된다. 인공용승시스템이 주로 외해에 설치되기 때문에 에너지 공급이 가장 큰 문제이며, 따라서 에너지 자가공급시스템이 고려되었다. 많은 종류의 자연에너지원 중에서 파력과 풍력을 복합적으로 활용한다면 외부에서 인위적인 에너지 공급없이 자연에너지에 의해 시스템이 운용될 수 있을 것이다. 이를 위해서는 최소 에너지 소모를 위한 시스템 설계가 수반되어야 한다. 해양심층수의 인공용승에 의해 부차적으로 발생하는 이산화탄소 확산 및 흡수 문제는 정확한 메카니즘 정립 및 분석을 통하여 수치 분석을 수행해야 할 것이다. 이를 위해서는 생물펌프, 알가리펌프, 그리고 대기와 표층수와의 상호작용에 의한 이산화탄소 영향을 정확히 이해하여 분석해야 할 것이다. 밀도류 확산시스템의 설계는 인공용승시스템의 효능을 결정짓는 요소인데, 인공용승된 해양심층수를 표층에 장시간 동안 체류하면서 먼 거리까지 확산시킬 수 있어야 한다. 밀도류의 설계에서는 적용해역의 해양환경을 조사/분석한 후 성층된 수심을 통하여 혼합수를 확산시켜야 하며, 밀도류 확산 시뮬레이션을 수행하여 밀도류의 확산 범위 및 체류시간을 예측할 수 있어야 한다. 밀도류 생성시스템에서 심층수:표층수 비율을 조정할 수 있으며, 혼합비에 따라 기초생산력 증대에 기여할 수 있는 여부가 결정될 수 있다. 심

층수:표층수=1:1 비율에서 기초생산력 증대가 높게 나타나기 때문에 이를 고려한 설계가 이루어져야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 한국해양연구원의 '해역기초생산력 증대를 위한 부유식 인공용승시스템 핵심기술 연구' 및 국토해양부의 '해양심층수의 에너지 이용기술 연구' 과제 결과 중 일부를 밝힙니다.

#### 참 고 문 헌

Chung, C.S., Shim, J.H., Park, Y.C., and Park S.G. (1989). "Primary productivity and nitrogenous nutrient dynamics in the East Sea of Korea", The Journal of the Oceanological society of Korea, Vol 24, pp 52-61.

Daniel G. B., Marlon R. L. & Boris W. (2010). "Global phytoplankton decline over the last century", Nature, Vol 466, pp 591-596.

Kim, D.S., Kim, K.H., Shim, J.H., and You S.J. (2007). "The effect of anticyclonic eddy on nutrients and Chlorophyll during spring and summer in the Ulleung basin, East Sea", [The Sea] Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol 12, pp 280-286.

Korea Ocean Research & Development Institute (KORDI). (1994). "Atlantis"

Ouchi K. (2003). "Ocean nutrient enhancer "TAKUMI" for the experiment of fishing ground creation", Proc. 5th Ocean Mining Symposium, ISOPE, Tsukuba, Japan.

Ryther J.H.. (1969). "Photosynthesis and fish production in the sea", Science, Vol 166, pp 72-76.

국토해양부 (2005) "해양심층수의 다목적 이용기술 개발" 1단계 보고서

김동선, 황석범, 김대현 (2006), "인공용승구조물 설치에 의한 유동변화", 해양환경안전학회 추계학술대회

김아리, 이승원, 정동호, 문덕수, 김현주 (2010), 해양심층수와 표층수의 혼합비율에 따른 식물플랑크톤의 증식 변화에 대한 기초연구", 한국수산과학회지, Vol 43 No 4

이인철, 윤석진, 김현주 (2008). "생태계모형을 이용한 동해 심층수 개발해역의 수질환경 변화예측", 한국해양공학회지, Vol 22 No 2

정동호, 김현주, 박한일 (2004), "수치해석적 방법을 통한 해양심층수 취수용 유연 라이저의 거동 해석에 관한 연구", 한국해양공학회지, Vol 18 No 4

2011년 12월 2일 원고 접수

2012년 1월 29일 심사 완료

2012년 2월 9일 게재 확정