

해양심층수와 표층수의 혼합비율에 따른 식물플랑크톤의 증식 변화에 대한 기초연구

김아리·이승원·정동호*·문덕수·김현주

한국해양연구원 해양심층수연구센터

A Preliminary Study comparing the Growth of Phytoplankton according to the Ratio of Deep and Surface Seawater

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

Deep Ocean water Application Research center, Korea Ocean Research and
Development institute, Goseong 219-822, Korea

The artificial upwelling of deep seawater increases primary production. This study conducted a lab-scale experiment to investigate the growth of phytoplankton with the mixing ratio of deep and surface seawater. The chlorophyll content in the sample of pure deep seawater was highest, regardless of the phytoplankton groups. Nutrients contained in the deep seawater positively influenced the growth of phytoplankton. The optimum mixture to apply in an artificial upwelling system was a 1:1 ratio of deep and surface seawater. An experiment considering other environmental conditions, such as luminance and specific gravity, should be performed.

Key words: Phytoplankton, Deep sea water, Surface sea water, Artificial upwelling

서 론

용승현상은 영양염이 풍부한 심층수가 유평층까지 운반되어 식물플랑크톤 성장에 영향을 주며, 먹이사슬에 의해 어류 군집을 유도하여 풍부한 어장 형성에 도움을 준다고 알려져 있다 (Ryther, 1969; Hong et al., 2002; Cho et al., 2003; Nicholas et al., 2009). 이러한 용승현상은 표층수가 발산하기 때문에 생성된다고 알려져 있으며, 근본적인 원인은 주로 바람이 제공한다. 바람에 불면 물이 이동하게 되고 전향력이 작용하여 에크만수층이 일어나게 된다. 용승의 종류는 지역과 원인에 따라서 연안용승, 적도용승, 저기압에 의한 용승이 있다 (두산 백과사전, 2010). 우리나라 동해안은 계절풍의 영향으로 파랑 에너지가 비교적 풍부한 편에 속하고 수심경사가 급한 것으로 알려져 있으며 (Hong et al., 2002), 동해안에서 일어나는 용승은 연안용승에 속한다.

자연적인 용승현상은 해역 기초생산력 증대에 큰 기여를 하지만, 자연적으로 발생하는 해역은 국지적으로 소수 해역에 불과하다. 우리나라는 울릉도 및 울진 해역에서 계절별로 국지적 용승현상이 발생하나, 대부분의 해역에서는 용승현상이 발생하지 않는 것으로 알려져 있다 (Kim et al., 2007; Sim and Park, 1986).

자연적인 용승현상이 발생하지 않는 경우, 표층에서는 식물플랑크톤에 의해 무기영양염류가 활발히 소비되어지므로, 일반 해역에서는 영양염류가 저농도 또는 결핍상태가 된다 (Nakashima, 2005). 이러한 현상은 국내의 연구에서도 보고된

바 있다 (Kim et al., 2007; Chung et al., 1989). 특히 동해의 많은 해역은 질산염이 부족하다는 연구결과가 있으며 (Kim et al., 2007), 동해 남부해역에서 심층수 자연용승에 의해 공급되는 질소계 영양염류는 평균 기초생산력 중 6.9%에 불과한 것으로 알려져 있다 (Chung et al., 1989).

해양심층수는 수심 200미터 아래에 위치하는 청정한 해수 자원으로서, 우리나라 동해에 무한히 부존되어 있으며 (Kim et al., 2004b), 영양염류 (N, P, Si)가 풍부하여 해양식물의 성장에 긍정적인 영향을 준다고 한다. 그러나 해양심층수가 표층수에 비해 밀도가 높기 때문에, 해양심층수만을 인공 용승하여 확산시키는 경우 짧은 시간 내에 다시 해지면 부근으로 침강하게 된다. 따라서 1차 생산자인 식물플랑크톤은 해양심층수에 부존하고 있는 풍부한 영양염류를 효율적으로 이용할 수 없게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위해서는 표층수와 해양심층수를 혼합하여 밀도류 생성을 통해 먼 거리로 확산시킬 수 있도록 해야 한다.

본 연구에서는 해양심층수에 포함된 영양염류를 표층에 효율적으로 확산시키기 위한 밀도류의 최적 혼합비율을 결정하기 위해 실험적 연구를 수행하였다. 인공적인 용승에 의해 해양심층수와 표층수가 혼합되었을 경우, 식물플랑크톤의 클로로필 함량 변화를 알아보았다. 이러한 결과를 토대로, 생태학적 측면에서의 밀도류생성을 위한 해양심층수와 표층수의 최적 혼합 비율을 알아보하고자 한다.

재료 및 방법

실험생물인 식물플랑크톤은 강원도 고성군 오호해역에서

*Corresponding author: dhjung@moeri.re.kr

Table 1. The experiment groups mark of species and culture mediums (DSW, deep sea water; SSW, surface sea water)

	<i>Chaetoceros simplex</i>	<i>Tetraselmis</i> sp.	<i>Skeletonema</i> sp.	<i>Fragilaria</i> sp.	Collected total plankton group
DSW ¹	C1	T1	S1	F1	M1
DSW:SSW ² =1:1	C2	T2	S2	F2	M2
DSW:SSW=1:2	C3	T3	S3	F3	M3
DSW:SSW=1:3	C4	T4	S4	F4	M4
SSW	C5	T5	S5	F5	M5

2009년 6~7월 동안 3회에 걸쳐 수집 후 우점종 파악을 현미경 (DW THSP, Dongwon) 하에서 관찰하였다. 또한 수집된 그 자체를 총생물군 (Collected total plankton group, M1~M5)으로 하여 실험하였으며, 단일실험생물은 채집된 총생물군의 우점종과 문헌 조사를 통하여 실제해역에 많이 분포하고 있는 종에서 선택되었다 (Moon and Choi, 2003; Lee et al., 1998). 선택된 단일실험생물은 한국미세조류은행에서 분양받은 규조류 *Chaetoceros simplex* (C1~C5)와 *Fragilaria* sp. F1~F5), 강릉원주대학교 해양부유생물실험실에서 분양받은 규조류 *Skeletonema* sp. (S1~S5)와 녹색편모조류 *Tetraselmis* sp. (T1~T5)이다 (Table 1). 선택된 단일실험생물 및 채집된 총생물군의 stock culture는 20°C, 3000 lux에서 유지되었으며, 배지는 f/2배지 (Guillard and Ryther, 1962)를 이용하였다.

배양실험에 사용된 배양수는 강원도 고성군 오호해역 해양심층수와 표층수를 이용하였다. 해양심층수는 수심 300 m에서 취수하였으며, 표층수는 2009년 8월 오호해역 38°19,997, 128°32,215에서 채수하여 이용하였다. 배양수의 혼합비율은 해양심층수:표층수를 1:1, 1:2, 1:3으로 하였으며, 해양심층수와 표층수 단독구를 각각 두었으며, 각각 3개구 반복 실험하였다.

배양은 배양액 200 mL에 stock culture하고 있던 식물플랑크톤을 각각 5 mL씩 접종하였으며, 실험기간은 2주로 하였다. 본 실험은 혼합비율을 도출하기 위한 실험이므로, 기본적인 증식이 가능한 배양환경인 stock culture에 사용되는 환경으로 적용하였다. 수온은 20°C, 조도 3000 lux로 하였으며, 명암주기는 L:D = 14:10으로 하였다. 또한 부착생물의 원활한 성장을 위해 24시간 공기를 주입시켜 주었다.

배양수의 성분 분석은 Seven multimeter (Metro, USA)와 염분계 (ATAGO, Japan)를 이용하여 pH, TDS, 전도도 및 염분을 측정하였으며, 영양염자동분석기 (QuAatro, Bran Luebbe GmbH)를 통해 NO₂, NO₃, NH₄, SiO₂ 및 PO₄를 측정하였다.

증식변화 분석은 3일에 한번 90% 아세톤으로 추출하여 클로로필 함량 변화 및 건조중량을 비교하여 알아보았다 (MOMAF, 2006). 건조중량은 배양실험 전에, 생물의 건조중량과 흡광도의 상관관계를 알아보고, 그것을 바탕으로 3일에 한번 흡광도 측정을 통해 건조중량으로 계산하였다 (Fig. 1).

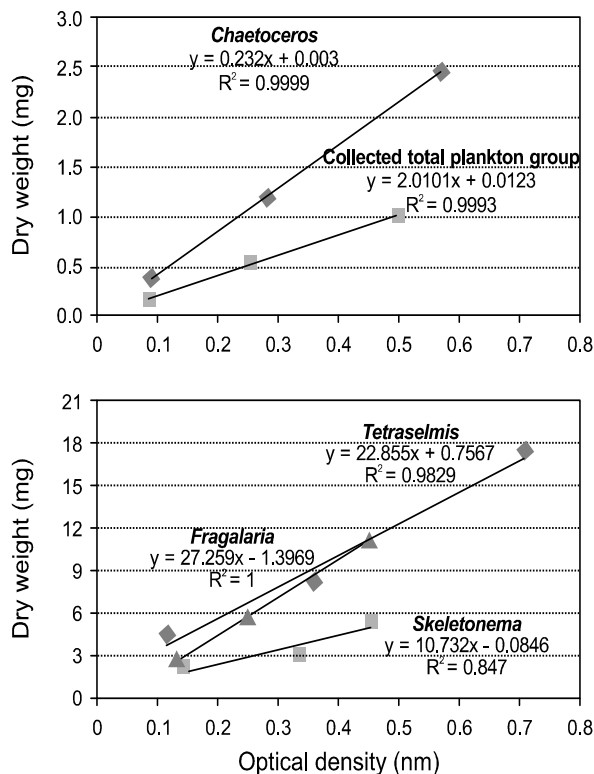


Fig. 1. Standard curve of relationship between optical density and dry weight in phytoplankton. (433 nm: *Chaetoceros simplex*, *Skeletonema* sp., *Tetraselmis* sp.; 434 nm: *Fragilaria* sp., collected total plankton group).

결과 및 고찰

배양수 성분

배양수의 일반농도는 Table 2에 나타내었다. 비중은 해양심층수가 표층수에 비해 0.01 g/cm³ 높게 나타났으며, pH도 0.3 낮게 나타났다. TDS, 전도도 및 염분은 모두 해양심층수가 표층수에 비해 높은 것으로 나타났다. 배양수는 해양심층수와 표층수의 혼합비율에 따라 3가지로 만들어졌으며, 해양심층수 첨가량이 늘어날수록 일반농도도 함께 소폭 증가하는 것으로 나타났다.

배양수의 영양염류 농도분석 결과 (Table 2), 알려진 것과 마찬가지로 측정된 모든 영양염류는 표층수에 비해 해양심층수에서 높은 함량을 보였다. 그러나 NO₂은 0.002 mg/L 이하로 매우 미량이었으며, 환경에 영향을 많이 받는 NH₄의 경우 0.026 mg/L 이하로 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 혼합실험구 간에 큰 차이를 보이지 않았다. 해양심층수의 영양염류는 표층수에 비해 NO₃의 경우 7배, SiO₂는 16.8배 높게 나타났으며,

PO₄의 경우 표층수는 매우 미량이라 측정 불가하였으나, 해양심층수는 0.0458 mg/L로 나타났다. 혼합실험구 역시 해양심층수 첨가량이 높을수록 영양염류 농도도 높아지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 울릉도의 봄철 영양염류 분포에 대한 연구와도 영양염류 범위가 비슷한 것으로 나타났다 (Kim et al., 2007). 특히 연안과 가장 가까운 울릉도 서쪽 (St. D1)의 표층 (2 μM)과 150 m 이하의 심층부분 (16~17 μM)의 영양염류 농도와 본 실험에 이용된 표층수 (3.24 μM)와 해양심층수 (16.2 μM)의 영양염류 농도의 차이가 거의 없었다.

Table 2. Water quality of culture at the water sampling (Temp., temperature; Cond., conductivity; TDS, total dissolved solids; DSW, deep sea water; SSW, surface sea water)

	DSW	1:1	1:2	1:3	SSW
Temp. (°C)	5	-	-	-	
Specific gravity (g/cm ³)	1.020	-	-	-	1.010
pH	7.513	7.733	7.737	7.776	7.801
Cond. (mS/cm)	48.80	48.20	47.80	47.80	47.30
TDS (g/L)	29.30	28.90	28.70	28.70	28.40
Salinity (%)	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4

Table 3. Nutrient of culture medium (mg/L)

	DSW	1:1	1:2	1:3	SSW
NO ₃	0.1983	0.1066	0.0795	0.0775	0.0283
SiO ₂	0.7096	0.4764	0.3141	0.2297	0.0422
PO ₄	0.0458	0.0292	0.0087	0.0087	0.0000
NH ₄	0.0260	0.0120	0.0045	0.0165	0.0155
NO ₂	0.0020	0.0016	0.0008	0.0016	0.0016

DSW, deep sea water; SSW, surface sea water.

Phytoplankton 증식

*Chaetoceros simplex*의 배양실험 결과 (Fig. 2), 전반적으로 C1에서 클로로필 a 함량과 건조중량변화가 10일까지 급격히 증가하여 다른 실험구와 비교했을 때 2배 이상 높게 나타났다. C4와 C5는 수치상으로 증식변화의 차이를 보이지 않았으며, 클로로필 a 함량이 집중 1일째에 가장 높은 것으로 보아 음의 성장을 보였다. 반면 C1~C3은 10일 이상 증식이 이루어졌는데, 이 결과는 해양심층수가 포함된 배양수에서 식물플랑크톤의 증식이 활발하다는 것을 의미한다. C1의 경우 10일이 경과된 후, C2의 경우 13일이 경과된 후 식물플랑크톤 증식이 각각 감소할 것을 추정할 수 있으며, 이것은 배양수 속에 포함된 영양염류를 소비하였기 때문인 것으로 사료된다.

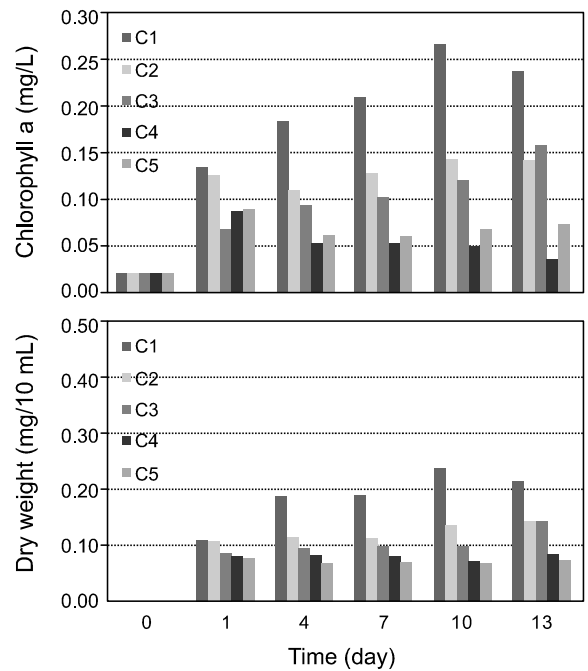


Fig. 2. Chlorophyll a contents and dry weight of *Chaetoceros simplex*.

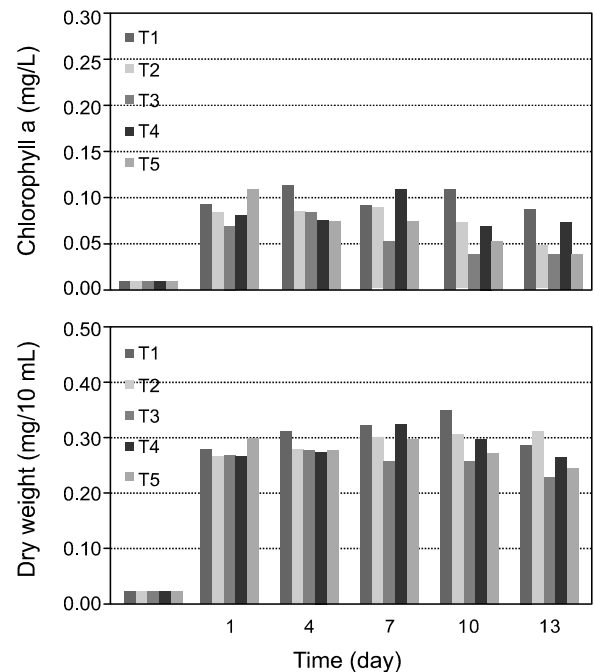


Fig. 3. Chlorophyll a contents and dry weight of *Tetraselmis sp.*

C2는 클로로필 함량과 건조중량 증가량이 C1 증가량의 절반수준의 증식변화를 보였는데, 클로로필 함량의 증가량은 해양심층수의 비율과 거의 일치하는 것으로 나타났다. *C. simplex*는 해양심층수 비율이 높으면 높을수록 식물플랑크톤의 증식이 활발해짐을 알 수 있었다. 그 이유는 규조류의 성장

에 큰 영향을 주는 규소가 해양심층수에 많이 함유되어 있는 것 때문에 사료된다 (David et al., 1982). 해양심층수는 표층수에 비해 SiO₂의 함량이 16.8배 많은 것으로 나타났다 (Table 3). 또한 해양심층수 단독구와 1:1혼합구는 N:P의 비율이 10:1에 가까운 것으로 나타났는데, 이러한 비율은 규조류 증식에 유리한 환경을 만들어주는 것으로 알려져 있다 (Hecky and Kilham, 1988). 그러나 *C. simplex*의 경우에, 해양심층수:표층수의 비율이 1:2보다 적게 해양심층수가 배합된다면, 해양심층수는 식물플랑크톤 증식에 기여하지 못한다는 것을 알 수 있다.

Tetraselmis sp.의 경우, 클로로필 a 함량은 초기 접종하였을 때 0.04-0.05 mg/L에서 1일 째 0.13-0.26 mg/L로 나타나, 1일이 경과되면서 클로로필 a 함량이 높게 증가하였으나, 그 이후에는 크게 변화를 나타내지 않았다 (Fig. 3). 배양수에 따라 약간의 차이는 있었으나, 대부분의 경우에 클로로필 a 함량은 1일이 경과하면서 약간씩 감소하는 것을 볼 수 있다. 전반적으로 *T. sp.*에서는 배양수와 시간에 따른 실험구 간의 증식 차이가 보이지 않았으며, 증식 변화가 거의 일정하게 나타났다. 해양심층수는 표층수에 비해 SiO₂의 함량이 높으나, 녹조류의 경우 Si가 성장에 영향을 주지 않는 것으로 보고된 바 있다 (David et al., 1982).

Skeletonema sp.의 배양실험결과, 클로로필 a는 모든 실험구에서 4일 이내에 최고 밀도를 나타냈다 (Fig. 4). 건조중량에서는 표층수 단독구에 비해 해양심층수 혼합실험구와 해양심층수 단독구에서 증식이 높은 것으로 나타났다. 본 종에서도 규조류인 *C. simplex*의 결과와 마찬가지로 해양심층수 단독구 (S1)와 1:1 혼합구 (S2)에서 증식이 활발하였다.

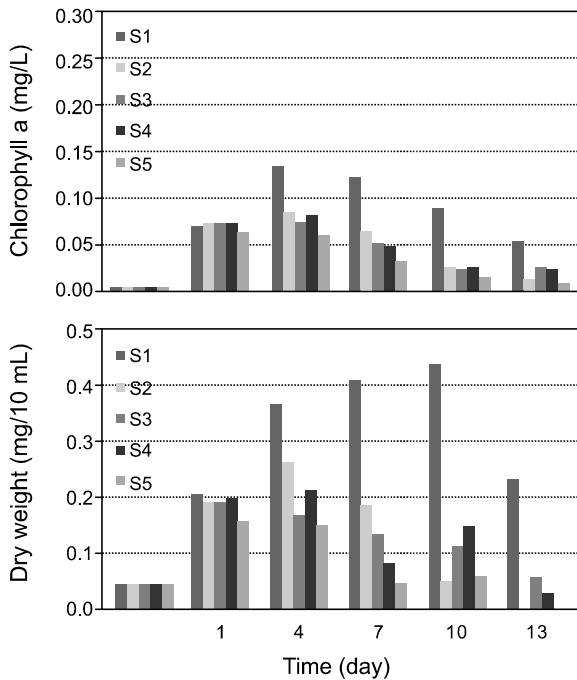


Fig. 4. Chlorophyll a contents and dry weight of *Skeletonema* sp.

*S. sp.*의 건조중량 변화로 볼 때 해양심층수와 표층수 내에 부존하는 영양염류를 4일 전후로 거의 소모하여 그 이후 감소하는 것으로 추정된다. 클로로필 a 함량변화는 혼합비율에 따른 차이가 나타나지 않았으나, 표층수 단독구에 비해 혼합구에서 함량이 높게 나타난 것으로 보아, 해양심층수의 혼합이 *S. sp.*의 성장에 긍정적인 영향을 주는 것으로 판단된다. 또한 인공용승 시스템과 같이 지속적으로 배양수가 공급된다면 S2, S3 및 S4의 증식이 보다 증대될 것으로 추측된다.

Fragilaria sp.의 실험결과, 클로로필 a와 건조중량은 접종 4일째에 모든 실험구에서 최대 증식량을 보였다 (Fig. 5). 이러한 결과는 앞선 *S. sp.*의 증식변화 비슷한 경향으로서, 배양수에 부존하고 있는 영양염의 소모가 4일 전후에 나타나는 것으로 추정된다. 그러나 *F. sp.*의 결과 중 특이한 점은 F2에서 증식이 가장 높게 나타난 것이다. F1과 F2의 건조중량은 큰 차이를 보이지는 않았지만, 본 실험에서 해양심층수 단독구보다 혼합구의 증식이 높게 나타난 것은 *F. sp.*에서 유일했다. 따라서 이러한 결과로 볼 때 해양심층수와 표층수의 혼합비율이 1:1일 때 가장 성장이 좋은 것으로 나타났으며, 1:2 비율에서도 증식효과가 있는 것으로 나타났다.

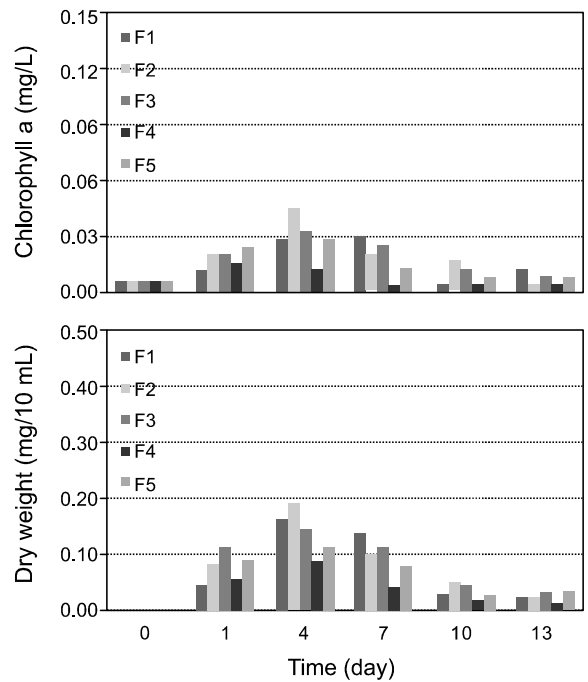


Fig. 5. Chlorophyll a contents and dry weight of *Fragilaria* sp.

Fig. 6은 채집한 총 생물 실험구의 배양 실험결과를 보여준다. M1은 다른 실험구에 비해 클로로필 a의 농도가 매우 높게 나타났으며, 건조중량 역시 13일까지 지속되었다. 해양심층수 단독구인 M1의 건조중량은 13일째에 0.0806 mg/10 ml로 나타나 다른 실험구에 비해 약 두 배 정도 높은 것으로 나타났다. M2와 M3의 결과를 살펴보면, 7일이 경과되면서 클로로필 a 농도가 감소하는 것을 알 수 있는데, 영양염의 소모로 인해

7일 이후 감소하는 것이라고 추측된다. 따라서 1:1 혼합구의 경우 4~7일 내에 배양수를 추가한다면 증식에 효과가 있을 것으로 추측된다.

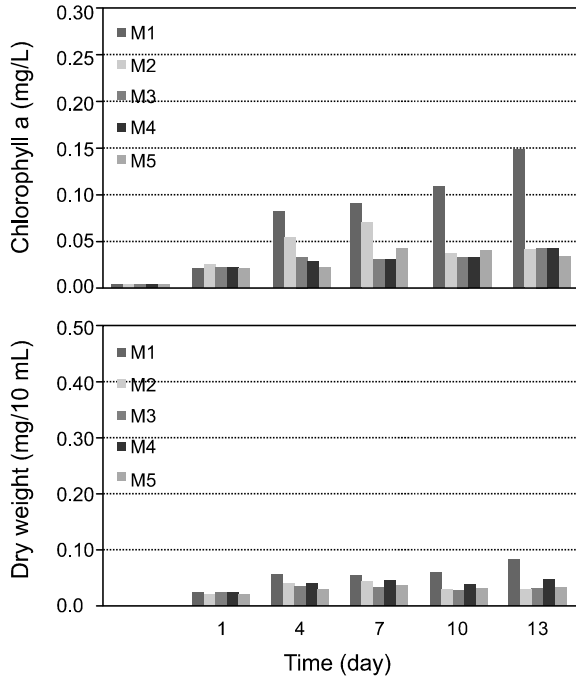


Fig. 6. Chlorophyll a contents and dry weight of collected total phytoplankton groups.

Fig. 6의 결과를 살펴보면 클로로필 함량은 M1>M2>M3>M4>M5 순으로, 건조중량은 M1>M2>M4>M3>M5 순으로 나타났다. 해양심층수:표층수 비율이 1:1인 경우에는 해양심층수 단독구에 비하여 증식효과는 낮지만, 7일까지 증식이 발생한다는 결과를 얻을 수 있었다.

채집한 총생물군의 성장은 해양심층수 원수 조건에서 가장 활발하게 일어나는 것으로 조사되었지만, 인공용승 시스템에서는 M2 조건이 보다 효과적일 것이다. 그 이유는 인공용승 시스템에서 영양염류를 먼 해역까지 확산시키기 위해서 밀도류를 생성하게 되는데, 해양심층수와 표층수를 적절한 비율로 혼합하여 확산시키기 때문이다. 따라서 인공용승시스템에서는 해양심층수와 표층수를 1:1로 혼합하여 연속 공급한다면, 식물플랑크톤 증식에 효율적으로 작용하여 해역 기초생산력 증대에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 4의 전체적인 분석 결과를 살펴보면, 앞선 결과와 마찬가지로 *C. simplex*의 경우 C1~C3까지는 10~13일까지 증식이 이루어진 것으로 나타났으며, *T. sp.*, *S. sp.*와 *F. sp.*의 경우 실험구에 따라 다소 차이를 보이지만 배양 4~7일에 최고밀도를 보이다 감소하는 것으로 나타났다. 또한 1:3 혼합 실험구와 표층수 단독구는 다른 실험구들에 비해 낮은 밀도를 보였으며, 주로 1~4일에 최고 밀도를 보여 접종 후에 증식이 거의 이루어지지 않은 것으로 생각된다. 식물플랑크톤은 각

Table 4. Maximum chlorophyll contents and dry weight of phytoplankton during culture period (Chl., Chlorophyll)

	Maximum chlorophyll		Maximum dry weight		
	Chl.a (mg/L)	Total Chl. (mg/L)	day	Dry weight (mg/10 mL)	day
C1	0.268	0.559	10	0.2369	10
C2	0.144	0.308	10	0.1439	13
C3	0.157	0.300	13	0.1411	13
C4	0.094	0.274	1	0.0819	13
C5	0.090	0.209	1	0.0735	1
T1	0.112	0.282	4	1.4263	10
T2	0.090	0.209	7	1.2663	13
T3	0.084	0.175	4	1.1292	4
T4	0.109	0.255	7	1.3196	7
T5	0.108	0.262	1	1.2054	1
S1	0.137	0.262	4	0.4376	10
S2	0.087	0.216	4	0.2608	4
S3	0.075	0.127	1	0.1901	1
S4	0.084	0.127	4	0.2113	4
S5	0.063	0.132	4	0.1547	1
F1	0.029	0.091	4	0.1625	4
F2	0.045	0.101	4	0.1905	4
F3	0.033	0.093	4	0.1457	4
F4	0.016	0.083	1	0.0897	4
F5	0.029	0.068	4	0.1121	4
M1	0.149	0.273	13	0.0806	13
M2	0.071	0.123	7	0.0436	7
M3	0.045	0.101	13	0.0335	4
M4	0.041	0.148	13	0.0456	7
M5	0.041	0.099	10	0.0355	7

종에 따라 필요로 하는 영양분이 다르기 때문에 모든 실험구에서 경향이 완전히 일치하지는 않았다 (Kim et al., 2004a; Arrigo et al., 2000; Baar et al., 1997; Lee et al., 2000). 그러나 생물종에 관계없이 해양심층수 단독구에서 클로로필 함량 및 건조중량이 대체로 높은 경향을 나타냈으며, 또한 표층수 단독구에 비해 해양심층수와 표층수의 혼합 실험구에서 클로로필 함량이 높게 나타났다. 이러한 결과는 Nakashima (2005)와 Kim (2008)가 언급했던 것과 같이, 해양심층수 내에 존재하는 영양염류가 식물플랑크톤의 증식에 긍정적인 영향을 준다는 사실을 다시 한 번 입증한다.

본 연구에서는 밀도류의 혼합비율을 결정하기 위한 기초실험으로서, 인공용승을 가정하여 해양심층수와 표층수가 혼합되었을 때 식물플랑크톤의 클로로필 함량 변화를 알아보았다.

본 연구에서는 기초생산력을 알아볼 수 있는 가장 간단한 방법인 클로로필 측정을 통해 식물플랑크톤의 증식을 알아보았다. 그러나 박테리아 등에도 클로로필 색소는 존재하며 이것으로 인해 실험에 오차가 발생할 수 있다. 따라서 배양실험 전 해양심층수와 표층수의 클로로필 a 색소 측정을 수행하였다. 그 결과 해양심층수는 10^{-10} $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만, 표층수는 0.373 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 매우 미미한 수준이었다. 따라서 클로로필로 비교하여도 큰 무리가 없을 것으로 판단되었다.

실험 결과, 해양심층수에는 규산염이 풍부하여 규조류성장에 영향을 주었다. 특히, 실험 생물 중 해양에 가장 많이 분포하는 *Chaetoceros*속에 속하는 *C. simplex*의 경우에서 해양심층수 첨가에 따른 차이를 뚜렷하게 알 수 있었다. 또한 대부분의 생물종에 있어서 해양심층수 원수 조건에서 클로로필 a 성장률이 높게 나타났다. 혼합 실험구 조건 중에서는 해양심층수와 표층수를 1:1로 혼합하였을 때 증식율이 가장 높은 것으로 나타났으며, 1:3 이상의 혼합은 표층수 단독구와 증식의 차이를 보이지 않았다. 따라서 최적혼합비율은 해양심층수와 표층수가 1:1로 유지되었을 때 식물플랑크톤의 증식에 기여할 수 있을 것으로 생각되며, 최소한 1:2 비율보다 해양심층수 비율이 높은 경우에 인공용승의 효과가 있을 것으로 예측할 수 있었다. 배양수 종류에 따라 식물플랑크톤의 증식 기간을 살펴본 결과, 종에 따라 다르긴 하지만 4~10일 수준으로 나타났다. 따라서 인공용승시스템과 같이 연속적으로 배양수를 공급할 경우 식물플랑크톤 증식이 증대될 것으로 사료된다. 본 실험은 인공용승시스템에 의하여 해양심층수와 표층수를 혼합하여 확산할 경우 1차적 효과인 식물플랑크톤 증식, 즉 기초생산력 증대에 기여할 수 있는 가능성을 보여주었다. 본 실험은 밀도류 생성과 플랑크톤 증식변화를 파악하기 위한 최적혼합비율을 알아보기 위한 실험으로서, 그 외에 다양한 환경변화를 고려하지 않았다. 따라서 향후 계절별, 조도, 수온 및 비중 등의 실험 조건을 실제 해양환경에 맞추어서 수행할 필요가 있을 것이다. 또한, 인공용승에 의한 식물플랑크톤 증식에 따른 동물플랑크톤 증식의 상관관계에 대해서도 조사할 가치도 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 “해역 기초생산력 증대를 위한 부유식 인공용승 시스템 핵심기술 연구” 및 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발” 연구사업 결과의 일부임을 밝히는 바입니다.

참고문헌

- Arrigo KR, Ditullio RB, Lizotte MP, Robbison DH, Van Woert M and Worthen DL. 2000. Phytoplankton taxonomic variability and nutrient utilization and primary production in the Ross sea. *J Geophys Res* 105, 8827-8846.
- de Baar HJW, de Jong JTM, Bakker DCE, Loscher BM, Veth C, Bathmann U and Smetacek V. 1995. Importance of iron for plankton blooms and carbon dioxide drawn in the Southern Ocean. *Nature* 373, 412-415.
- Cho KD, Kim DS and Park SE. 2003. Characteristics of oceanographic conditions in an area suitable for the construction of artificial upwelling. *J Fish Soc* 36, 187-192.
- Chung CS, Shim JH, Park YC and Park SG. 1989. Primary productivity and nitrogenous nutrient dynamics in the East sea of Korea. *J Oceanological Soc Kor*, 24, 52-61.
- David T, Susan SK and Peter K. 1982. Phytoplankton community ecology: The role of limiting nutrients. *Ann Rev Ecol Syst* 13, 349-372.
- Doosan EnCyber, 2010. Upwelling. Retrieved from <http://100.naver.com>
- Guillard RL and Ryther JH. 1962. Studies for marine planktonic diatoms *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonmule conferracea* (Cleve). *Gram Can J Microbiol* 8, 229-239.
- Hecky RE and Kilham P. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol Oceanogr* 33, 796-822.
- Hong NS, Kang SW and Kim JY. 2002. Investigation of efficiency of artificial upwelling device in East sea. *J Kor Soc Coastal & Ocean Engineers* 13, 270-273.
- Kim DS, Shim JH, Kim KT and Kang YC. 2004a. Distribution of total CO₂, Nutrients, Chlorophyll a in the Scotia Sea during austral summer. *Ocean and Polar Res* 26, 401-414.
- Kim DS, Kim KH, Shim JH and Yoo SJ. 2007. The effect of anticyclonic eddy on nutrients and chlorophyll during spring and summer in the Ulleung Basin, East Sea. *J Kor Soc Oceanography*, 12, 280-286.
- Kim HJ, Moon DS, Jung DH and Yoon SJ. 2004b. Investigation and analysis of the characteristic stability of deep ocean water (I). *J Kor Soc Marine Environmental Engineering* 7, 30-34.
- Kim KW. 2008. Cultivation of marine microalgae from east sea and production of bioactive compounds by them using deep seawater. MSc. thesis, National university of Kangnung, Gangwon, Korea.
- Lee JB, Han MS and Yang HS. 1998. The Ecosystem the southern coastal waters of the East sea, Korea - 1. Phytoplankton community structure and

- productivity in september, 1994. 1998. J Kor fish Soc 31, 45-55.
- Lee TK, Park MW, Snin KS and Jang M. 2000. Comparison on growth and biochemical composition of *Gymnodium sanguineum* and *Skeletonema costatum* grown in different N, P concentrations. Kor J Environ Biol 18, 395-401.
- Ministry of maritime affairs and fisheries. 2006. III. Marine organism. In: Marine environment official test method. Korea ocean research and development institute, Jungin I&D, Seoul, Korea, 265-278.
- Moon SG and Choi CM. 2003. A list of important species and distribution of marine phytoplankton in Korea. J of the Environmental Sciences 12, 725-733.
- Nakashima, T. 2005. What is deep ocean water; The utility of deep ocean water. In: Kaiyoushinsousui no riyou. Kim HJ, ed. Shingisul Korea 53-67; 147-157.
- Nicholas W, Atsuki K, Shigenao M, Masud B and Steve WA. 2009. Nutrient transport from an artificial upwelling of deep sea water. J Oceanography 65, 349-359.
- Ryther JH. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. Science 166, 72-76.
- Sim JH and Park YC. 1986. Primary productivity measurement using carbon-14 and nitrogenous nutrient dynamics in the southeastern sea of Korea. J Oceanological Soc Kor 21, 13-24.
-
- 2010년 5월 12일 접수
 2010년 7월 14일 수정
 2010년 8월 13일 수리