

동중국해 외대륙붕 저층수의 영양염 기원

정창수⁽¹⁾, 홍기훈⁽¹⁾, 김석현⁽¹⁾, 김영일⁽¹⁾, 문덕수⁽¹⁾, 박준건⁽¹⁾, 박용철⁽²⁾, 이재학⁽¹⁾, 이홍재⁽¹⁾

The origin of dissolved inorganic nutrients by Kuroshio Intermediate Water in the eastern continental shelf of the East China Sea

by

Chang Soo Chung⁽¹⁾, Gi Hoon Hong⁽¹⁾, Suk Hyun Kim⁽¹⁾, Yong Il Kim⁽¹⁾, Duk Soo Moon⁽¹⁾, Jun Kun Park⁽¹⁾, Yong Chul Park⁽²⁾, Jae Hak Lee⁽¹⁾ and Heung Jae Lie⁽¹⁾

요 약

1993년 12월과 1994년 8월 2회에 걸쳐 동중국해 동부해역 관측선 J (30° N)의 용존무기영양염들의 분포에 대해 조사하였다. 고온고염의 특성을 지닌 쿠로시오 표층수의 질산이온 및 규산농도는 각각 $2\mu\text{M}$ 이하와 $5\mu\text{M}$ 이하로 낮다. 반면에 수심이 증가할수록 질산이온 및 규산농도는 급격히 증가하여 쿠로시오 중층수에서는 각각 20~40, 45~100 μM 범위로 높았다. 대륙붕역 저층수와 쿠로시오 중층수의 수온과 용존무기영양염 관계는 용존무기영양염이 풍부한 쿠로시오 중층수가 대륙붕수로 관입되고 있음을 암시한다. 수온, 염분 및 규산 농도를 해수추적자로 이용하여 수괴들의 혼합을 분석한 결과, 대륙붕 저층수는 대륙붕단 바로 바깥쪽 수심 약 100~400 m의 쿠로시오 중층수와 혼합수라는 것이 밝혀졌다. 이와같이 대륙붕단을 따라 대륙사면에서 대륙붕안으로 올라오는 높은 용존무기영양염 농도를 지닌 용승해수는 동중국해 대륙붕역의 식물플랑크톤 일차생산력을 증가시키는 중요한 영양염 공급원으로 사료된다.

Abstract

The distributions of dissolved inorganic nutrient contents were investigated along transection line J (30° N) in the eastern East China Sea in December 1993 and August 1994, respectively. The concentrations of nitrate and silicate in the Kuroshio Surface Water (KSW) with high temperature and high salinity were low below $2\mu\text{M}$ and $5\mu\text{M}$, respectively. However, these were increased sharply with depth and ranged from 20 to 40, 45 to 100 μM , respectively, in the Kuroshio Intermediate Water (KIW). The relationship between temperature and nutrients suggests that Kuroshio Intermediate Water with rich nutrients were intruded into the bottom water of the outer continental shelf in the East China Sea. The bottom water of the outer continental shelf was made of two end-members mixing; nutrient depleted warm water and nutrient enriched cold water.

(1) 한국해양연구소 해양환경기후본부
(2) 인하대학교 생물해양학부

Based on temperature, salinity and silicate concentration, the nutrients in the bottom water of the outer continental shelf suggested to be supplied through the vertical mixing of Kuroshio subsurface water in the depth range of 100~400m. Upwelled nutrient rich water appears to be a important source of nutrients for primary production in the continental shelf area of the East China Sea.

Keywords: East China Sea, Kuroshio Intermediate Water, Nitrate, Silicate, Upwelling

I. 서 론

황해를 포함한 동중국해의 총 면적은 1.25×10^6 km²으로서 이중 약 72 %가 수심 200 m 이내의 대륙붕역으로 구성되어 있다. 남쪽으로 부터는 고온 빈영양의 쿠로시오가 동중국해로 유입됨으로서 연안을 제외한 대륙붕역에서는 춘계부터 추계에 표층 혼합층내의 용존무기영양염, 특히 질산이온 및 인산이온은 식물플랑크톤의 이용으로 인해 연중 결핍되어 있다고 보고되고 있다 (한국해양연구소[1994, 1995]). 그러나 해양생물 생산의 기본을 이루는 식물플랑크톤의 연간 일차생산력은 약 $15 \text{ mol C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로서 (Shiah et al.[1995]; Hama [1995]), 연간 대기중의 0.013~0.030 Gt의 이산화탄소가 동중국해 대륙붕역에 흡수되어 중요한 이산화탄소의 공급을 담당하고 있다 (Wang et al.[2000]). 이러한 높은 일차생산력을 유지하기 위해서는 상당량의 용존무기영양염이 공급되어야 한다.

동중국해의 주요 영양염 공급원로서는 크게 중국대륙의 하천과 외해 심층수의 용승을 들 수 있다. 그러나 수심이 얇은 기수역 조차도 운송도중 식물플랑크톤의 섭취로 인하여 하천에 의한 기여도가 10% 이내 (Nixon and Pilson[1983]; Carpenter and Capone[1983])인 것으로 보고되고 있기 때문에, 동중국해 대륙붕역에서 하천에 의한 기여도는 그다지 크지 않을 것으로 사료된다. 또한 Chen[1996][2000]은 동중국해 용존무기영양염 수치 추정을 통해 동중국해 대륙붕단을 따라 대륙붕으로 진입하는 쿠로시오 표층아래 용승수의 기여도가 양자강에 의한 기여도보다 질산이온은 약 7배 정도 크다고 보고하였다. 따라서 동중국해에서는 심층수 용승에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다 (Chern and Wang[1990]; Wong et al.[1991]; Liu et al.[1992]; Chen et al.[1995]; Chen[1996]).

쿠로시오가 대륙붕단으로 접근하면서 일어나는 심층수 용승은 연중 지속적으로 일어나며 (Liu et al[1992]), 심층수 용승이 일어나는 대륙붕단역은 저염의 연안수와 고염의 쿠로시오가 접하면서 연중

강한 수온 및 염분전선을 형성하여, 전선을 경계로 한 물질교환은 대륙붕역의 생지화학적 과정들의 주요한 조절요인으로서 작용한다고 보고하였다 (Wong et al.[1991]). 또한 용승된 해수의 용존 무기 영양염 농도는 용승의 세기와 생물활동 정도에 따라 좌우된다고 보고하였다 (Wong et al. [1991]).

동중국해에 접한 황해 및 남해는 동중국해로부터 염과 각종 해양물질을 제공받기 때문에 동중국해에서 심층수의 용승에 대한 연구는 우리나라 주변해역의 용존무기영양염의 분포 특성을 이해하기 위해서라도 매우 중요하다.

이에 따라 본 연구는 대륙붕과 1000 m 이상의 수심을 갖는 북위 30° N에 위치한 관측선 J를 선정하여 용존무기영양염의 분포특성과 대륙붕역으로의 주요 용존무기영양염 공급원을 규명하는데 중점을 두었다.

2. 재료 및 방법

연구해역은 29° 00'~30° 00' N, 126° 30'~129° 00' E에 위치한 관측선 J로서 1993년 12월 6일~13일과 1994년 8월 23일~9월 3일까지 2회에 걸쳐 한국해양연구소 연구선인 은누리호를 이용하여 조사 관측되었다 (Fig. 1). 조사정점에 대한 위치

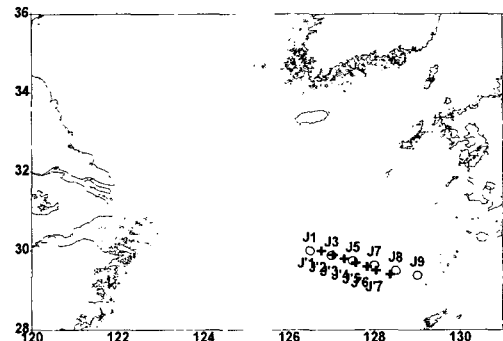


Fig. 1 Location of sampling stations in the eastern East China Sea in December 1993 (o) and August 1994 (+)

Table 1 Depths of water sampling at each station along transection line J of the East China Sea in December, 1993 and August 1994

Station	Latitude (N)	Longitude (E)	Depth (m)	Sampling Depth (m)
6~13 December 1993				
J'1	30° 00'	126° 46'	100	0, 15, 30, 50, 70, 90
J'2	29° 54'	127° 2'	110	0, 15, 30, 50, 75, 100
J'3	29° 48'	127° 18'	126	0, 15, 30, 50, 75, 100, 120
J'4	29° 42'	127° 34'	372	0, 15, 30, 50, 75, 100, 200, 350
J'5	29° 36'	127° 50'	837	0, 15, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500
J'6	29° 30'	128° 03'	1,029	0, 15, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500
J'7	29° 24'	128° 22'	1,054	0, 15, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500
23 August ~ 3 September 1994				
J1	30° 00'	126° 30'	92	0, 10, 20, 30, 50, 75
J3	29° 53'	127° 00'	100	0, 10, 20, 30, 50, 75, 95
J5	29° 45'	127° 30'	162	0, 10, 20, 30, 50, 75, 110, 150
J7	29° 38'	128° 00'	1,002	0, 20, 30, 50, 75, 100, 160, 450, 700, 990
J8	29° 30'	128° 30'	1,048	0, 10, 20, 30, 100, 150, 500, 1,044
J9	29° 23'	129° 00'	790	0, 20, 40, 100, 150, 300, 500, 784

및 수심은 Table 1에 나타내었다.

수온 및 염분자료는 SBE 9/11 CTD를 사용하여 측정하였다. 용존무기영양염 분석용 해수시료는 Rosettedp 5리터 니스킨 채수기를 부착하여 채수전 CTD에 의해 측정된 수온 및 염분 수직자료를 이용하여 채수수심을 선정하였다. 해수시료는 선상에서 GF/F 여과지를 사용하여 여과한 후 20ml 폴리에틸렌병에 담아 냉동보관하여 실험실로 운반한 다음, Grasshoff 등[1983]에 의거하여 Technicon AA2 자동분석기로 질산이온 (정밀도: 10 μM에서 ±0.5%) 및 규산 (정밀도: 10 μM에서 ±0.5%) 농도를 분석하였다.

3. 결 과

3.1 수온 및 염분

1993년 12월 관측선 J에서의 표층 수온 및 염분은 각각 20.23~24.40°C, 34.25~34.91‰ 범위로서 수온, 염분 모두 대륙붕역에서 외해쪽으로 갈수록 점차 증가하는 양상을 보였다. 대륙붕역에서 수온

및 염분 수직분포는 활발한 수직혼합으로 인하여 표, 저층간에 균일하였다. 그러나 외해역에서는 쿠로시오의 영향으로 수온과 염분이 각각 24°C, 34.8‰ 이상의 고온고염 해수가 표층에서 수심 약 200m 까지 분포하고 있다 (Fig. 2A, 2B). 대륙붕 단역에서 수온은 표층을 향해 볼록한 반구형의 등온선을 보이고 있고, 외해쪽으로 급격하게 떨어지는 경사를 보이면서 외해수와 강한 수온전선을 형성하고 있다.

1994년 8월 표층 수온 및 염분은 각각 28.25~28.98°C, 33.95~34.56‰ 범위로서 1993년 12월에 비해서는 정점간에 큰 차이가 없었다. 그러나 대륙붕역에서는 수심 20~75m에 강한 수온약층이 형성되어 있어 표, 저층수간의 혼합을 방해하여 수온과 염분이 약 8°C, 0.6‰ 차이를 보였다 (Fig. 3A, 3B). 외해역 또한 12월 경우와는 달리 정점 J7과 J8을 경계로 대륙붕역에서는 34‰ 이하의 저염을 보이나, 외해 정점 J9의 100~200m 수심에서는 34.8‰의 고염수 관입구조가 보였다. 대륙붕 단역에서 수온의 수직분포는 12월과 마찬가지로 표층을 향하는 반구형의 등온선을 보였다.

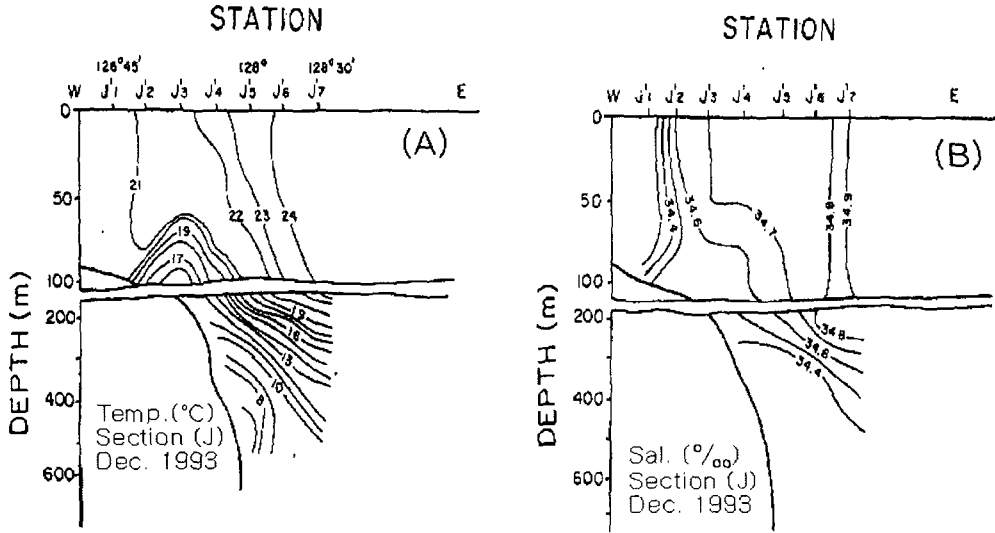


Fig. 2 The vertical distributions of temperature (A) and salinity (B) along transection line J of the eastern East China Sea in December, 1993

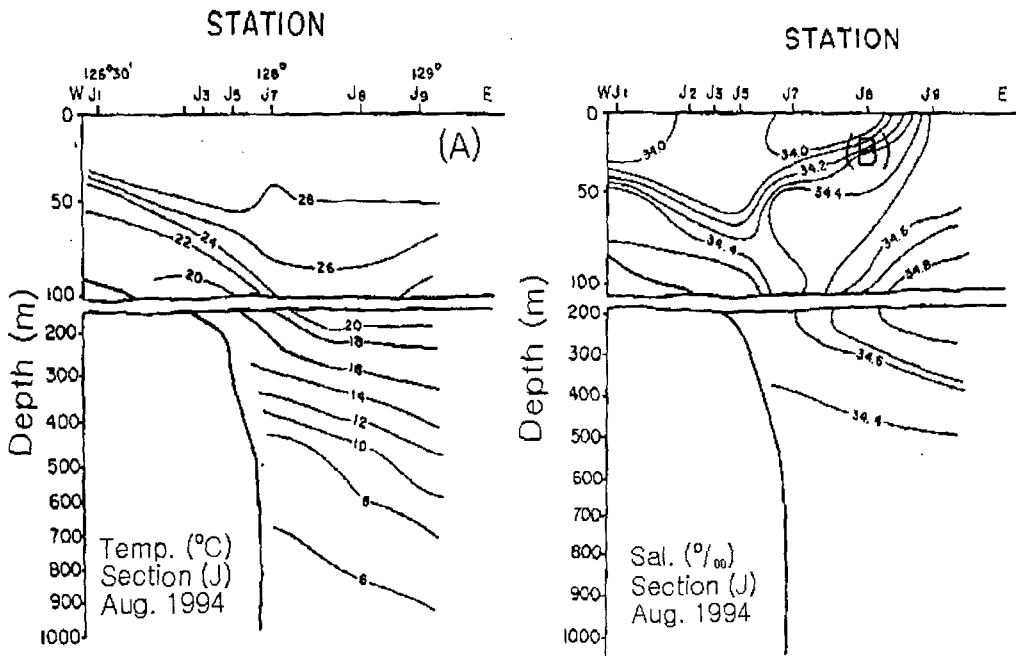


Fig. 3 The vertical distributions of temperature (a) and salinity (b) along transection line J of the eastern East China Sea in August, 1994

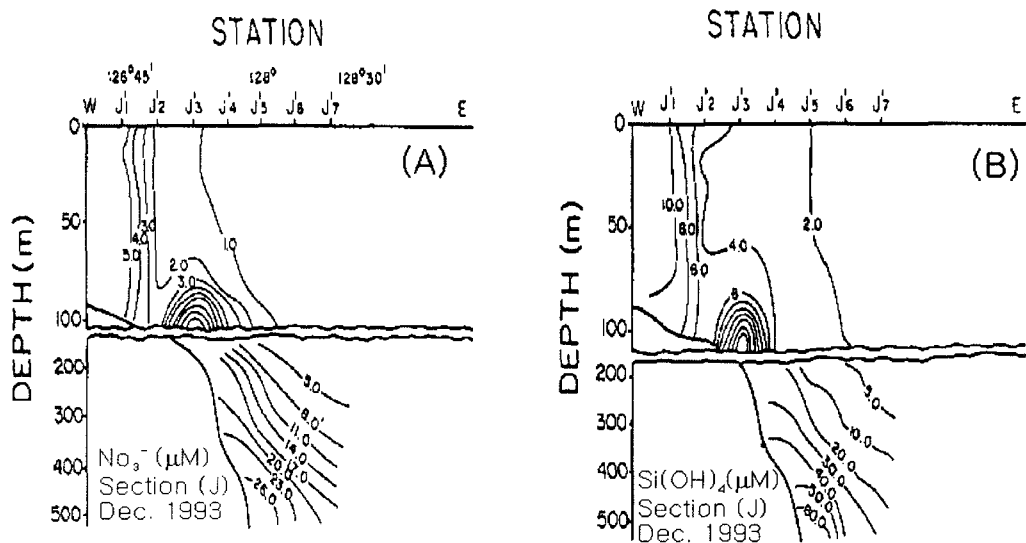


Fig. 4 The vertical distributions of nitrate (A) and silicate (B) along transection line J of the eastern East China Sea in December, 1993

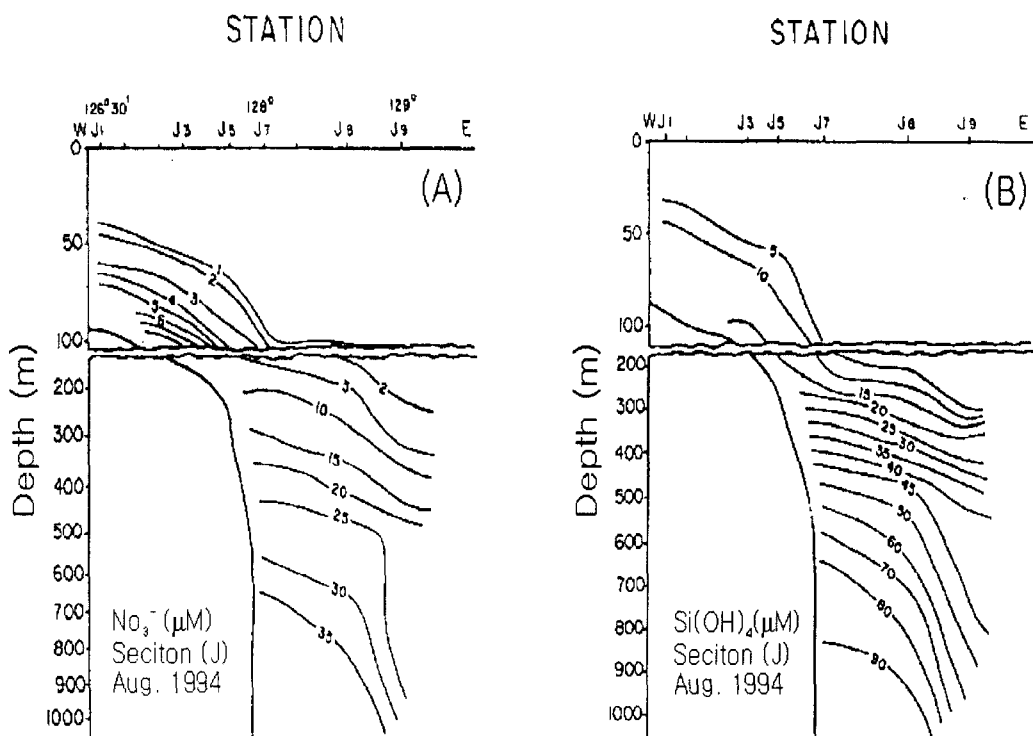


Fig. 5 The vertical distributions of nitrate (A) and silicate (B) along transection line J of the eastern East China Sea in August, 1994

3.2 용존무기영양염

1993년 12월 질산이온 및 규산농도 또한 수온 및 염분 분포 양상과 유사하여 대륙붕역에서는 수직적으로 균일하였으며, 표층에서도 각각 $3\mu\text{M}$ 이상과 $6\mu\text{M}$ 이상으로 높았다. 그러나 외해역에서는 빈영양의 고온고염 해수의 영향으로 표층부터 200 m 수심에서 질산이온 및 규산농도는 각각 $1\mu\text{M}$ 이하와 $2\mu\text{M}$ 이하로 낮으나, 수심 증가에 따라 질산이온 및 규산농도는 급격히 증가하여 500 m 수심에서 각각 $27\mu\text{M}$ 과 $65\mu\text{M}$ 의 높은 농도를 보였다 (Fig. 4A, 4B). 대륙붕단역에서 질산이온 및 규산 농도분포는 수온 분포 양상과 유사하여 표층을 향한 반구형의 등영양염선을 보여, 고농도를 가진 외해역 심층수가 대륙붕단을 따라 대륙붕역으로 용승되고 있음을 암시한다.

1994년 8월 표층혼합층내에서 질산이온 농도는 전반적으로 $0.5\mu\text{M}$ 이하로서 상당히 결핍되어 있었다. 그러나 수온약층을 경계로 수심 증가에 따라 질산이온 및 규산 농도는 급격히 증가하여 대륙붕역 저층에서는 각각 $10\mu\text{M}$ 과 $15\mu\text{M}$, 외해역 저층에서는 각각 $39\mu\text{M}$ 과 $100\mu\text{M}$ 로 높은 농도를 보였다 (Fig. 5A, 5B). 대륙붕단역에서 질산이온 및 규산 농도 수직 분포 양상은 하계와 마찬가지로 표층을 향하는 반구형의 등영양염선을 보이고 있어, 8월에도 풍부한 영양염을 지닌 외해역 심층수가 용승되고 있음을 알수있다.

4. 고 찰

4.1 수괴에 따른 용존무기영양염 함량 분포 특성

1993년 12월은 표, 저층수의 수직혼합이 활발하여 34.25 psu의 저염을 보인 대륙붕 가장 안쪽 정점 (J1)을 제외하고는 크게 쿠로시오 표층수 (Kuroshio Surface Water, KSW: $T>24^{\circ}\text{C}$, $S>34.4\%$), 쿠로시오 열대수 (Kuroshio Tropical Water,

KTW: $19<T<24^{\circ}\text{C}$, $34.8<S<34.9\%$)와 쿠로시오 중층수 (Kuroshio Intermediate Water, KIW: $T<10^{\circ}\text{C}$, $S<34.35\%$)로 나눌 수 있다 (한국해양연구소[1994][1995]).

그러나 1994년 8월에는 대륙붕 연안수의 유입으로 1993년 12월보다 더욱 큰 변화를 보여 수온 및 염분 범위가 넓게 분포되고, 크게 고온고염의 KSW, KTW, 대륙붕 연안수와 KSW 혼합수 및 저온저염의 KIW로 구분되었다.

수온-염분 도표를 이용하여 각각의 수괴에 따른 질산이온과 규산농도 범위를 나타낸 결과를 Table 2에 나타내었다. KSW 및 KTW에서 질산이온 및 규산농도는 식물플랑크톤의 활발한 이용으로 인하여 (한국해양연구소[1994][1995]) 각각 $2\mu\text{M}$ 이하와 $5\mu\text{M}$ 이하의 낮은 농도값을 보이고 있다. 그러나 수온 및 염분이 각각 8°C 이하와 34.4% 이하의 특성을 보이는 KIW에서는 이들 농도들이 각각 $20\mu\text{M}$ 이상과 $45\mu\text{M}$ 이상으로 급격히 증가하였다.

4.2 심층수 용승에 의한 용존무기영양염의 대륙붕내 유입

대륙붕역 저층에서 보이는 높은 용존무기영양염 농도를 가진 해수의 공급원은 중국연안수, 황해저층냉수 및 대륙붕밖 심층수 (KIW)를 들 수 있다. 이러한 다양한 공급원중 하계 황해 저층냉수의 수온 및 염분은 각각 $<11^{\circ}\text{C}$ 와 31~34%로 알려져 있으나 (Park[1985]), 본 조사기간 동안 동중국해 대륙붕 저층수의 염분은 대부분이 34.4% 이상의 고염으로 이루어져 있었다. 또한 대륙붕단역에서 표층을 향한 반구형의 등온선 및 등영양염선 형태는 풍부한 용존무기영양염을 지닌 외해역 심층수의 용승때문인 것으로 추측되었다.

Ito et al.[1994]은 동중국해 저층의 Ekman layer에서 유발되는 흐름과 내부조석 (internal tide) 및 쿠로시오의 사행에 의해 대륙사면상에서

Table 2 Typical salinity, temperature, nitrate and silicate for each water masses of the transection line J

Water masses	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity ($\%$)	Nitrate (μM)	Silicate (μM)
Kuroshio Surface Water	>24	>34.4	<2.0	<5.0
Kuroshio Tropical Water	19.0~24.0	34.8~34.9	0.2~3.6	1.4~4.5
Kuroshio Intermediate Water	<8	<34.4	20~40	45~100

용승되는 해류가 발생한다고 보고하였다. 따라서 본 연구는 풍부한 영양염을 지닌 심층수 (쿠로시오 중층수)의 용승으로 인한 대륙붕내로의 유입에 대한 가설을 세우고자 한다.

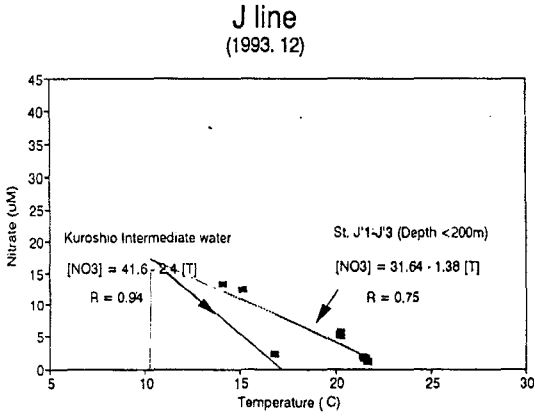


Fig. 6 Linear regressions for the T-Nitrate of the shelf bottom water and Kuroshio Intermediate Water below 300m depth at station J'5 in December 1993

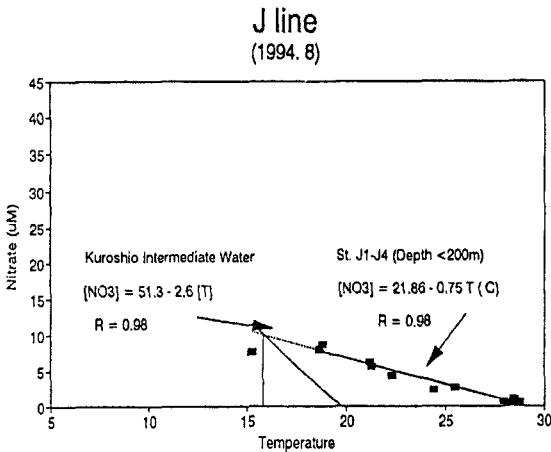


Fig. 7 Linear regressions for the T-Nitrate of the shelf bottom water and Kuroshio Intermediate Water below 300m depth at station J7 in August 1994

쿠로시오 중층수와 대륙붕수와의 연관성 여부를 추정하기 위해 수온과 질산이온 상관관계를 살펴 보면, 대륙붕 밖 정점 J'5 (12월)와 J7 (8월)의 수심 300m 이하의 쿠로시오 중층수에서의 질산이온과 수온간의 기울기는 하계 (2.6), 동계 (2.4)간의

거의 차이가 없다 (Fig. 6~7). Liu et al.[1988]과 Wong et al.[1991]이 대만 동부 쿠로시오 해역의 수심 300m 이상의 심층수를 대상으로 분석한 질산이온 및 수온간의 기울기는 2.2~2.8 범위로서 본 결과와 거의 일치한다. 이는 수심 300m 이상의 심층수에서는 수온 변화에 따른 질산이온 농도 변화가 거의 없음을 의미한다. 그러나 대륙붕내 정점들에서의 수온과 질산이온간 농도간의 기울기는 동계에 1.4, 하계에 0.8로서 계절에 따른 차이를 보였다 (Fig. 6~7). 대륙붕역에서 수온-질산이온간의 직선과 수심 300 m 이상의 심층수 직선간의 교차는 대륙붕수가 용존무기영양염이 풍부한 쿠로시오 중층수의 영향을 받는다는 것을 시사하고, 여기서 두 직선간의 교차점은 KIW의 단성분 (end member)을 가리키는 것으로서 하계에는 수온 약 15°C 부근이고, 동계에는 10°C 부근으로서 동계가 낮다.

위에서 언급하였듯이 수온 및 용존무기영양염의 수직분포도로 부터 심층수가 대륙붕단을 따라 용승한다는 것을 추정할 바 있고, 수온과 질산이온간의 관계에서는 대륙붕 저층수는 KIW의 영향을 받는 해수라고 밝힌 바 있다. 이러한 추론에서 더 나아가 대륙붕내로 유입되는 해수가 대륙붕밖 어떤 수심범위에 있는 해수와 같은 성질을 갖고 있는지 추정하기 위하여 Ito et al.[1994]의 방법을 사용하였다.

여기서 H_0 는 혼합이 일어나는 수괴의 상층 한계 수심이고, H 는 하층 한계 수심이다. 만일 H_0 와 H 수심범위를 갖는 해수가 수직적으로 혼합될 경우 대륙사면상 I번째 정점 J_i 의 혼합이 일어나는 상층 한계수심 (H_0)과 혼합이 일어나는 하층한계 수심 (H)의 수심범위에서 혼합된 해수가 대륙붕단을 따라 정점 J_{i-1} 의 저층에 입력된다. 정점 J_i 의 H_0 와 H 의 수심범위의 해수가 수직적으로 혼합될 경우 혼합수는 원래 각각의 수심들에서 원래 갖고 있던 값들은 결국은 평균 수온 (T)과 염분 (S) 및 규산 농도 (Si)를 갖게 된다는 가정하에 아래 방정식을 사용하여 평균 수온, 염분 및 규산의 농도를 계산하였다.

$$T = \frac{1}{(H - H_0)} \int_{H_0}^H T_{(z)} dz \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{(H - H_0)} \int_{H_0}^H S_{(z)} dz \quad (2)$$

$$Si = \frac{1}{(H - H_0)} \int_{H_0}^H Si(z) dz \quad (3)$$

여기서 정점 선택은 대륙붕 저층해수는 대륙붕 바로 바깥쪽의 정점의 혼합해수가 올라 온다는 가정하에 정점 J'5 (12월)와 J7 (8월)을 선택하였고, 위의 방정식을 이용하여 혼합이 일어날 수 있는 가능한 수심범위를 많은 조합을 통해 나온 평균 수온, 염분 및 규산농도를 도시하였다 (Fig. 8~9).

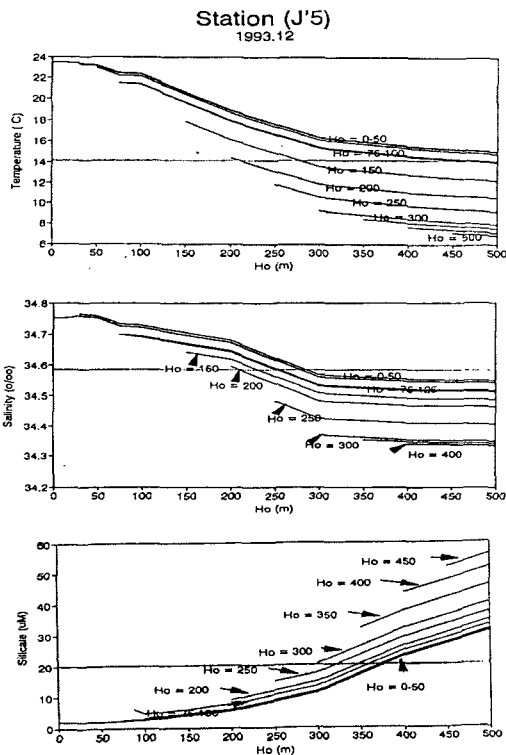


Fig. 8 Water properties produced by the vertical mixing of water in the depth range of H_0 to H at station J'5 in December 1993

규산은 질산이온 및 인산이온과는 달리 비교적 생화학반응에 참여하지 않고 생물체의 골격구조를 이루고 있기 때문에 해수에 용해되는 시간이 길다는 비교적 안정된 성질을 갖고 있어 (Broecker and Peng[1982]) 해수 추적자로 선택되었다.

Fig. 6과 7에서 대륙붕 저층에서 가장 높은 규산 농도를 보인 정점의 수온, 염분 및 규산을 위의 방정식에 대입하여 그려보면 각각에 해당하는 H_0 와 H 값을 계산할 수 있다.

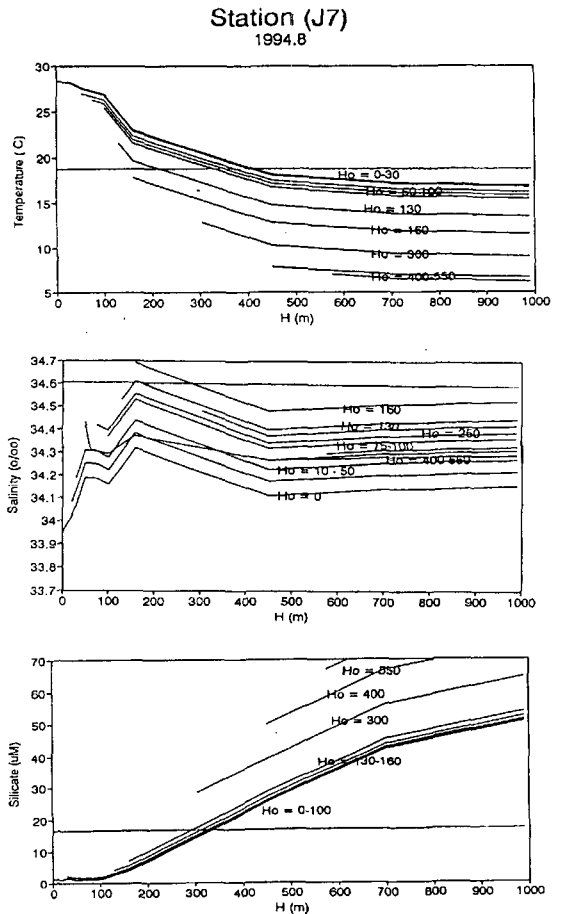


Fig. 9 Water properties produced by the vertical mixing of water in the depth range of H_0 to H at station J7 in August 1994

12월의 경우, 수온 14.1°C, 규산 20 µM에 해당하는 선은 H_0 140m와 H 370m에서 서로 교차한다 (Fig. 10). 이것은 수온 14.1°C, 규산 20 µM을 가진 대륙붕 저층에 있는 해수는 대륙붕 바로 바깥쪽의 정점 J'5의 140~370m의 수심범위에 있는 해수와 성질이 같음을 의미한다. 여기서 염분은 수온 및 규산과는 상관관계를 보이지 않아 본 지역의 수직 혼합에 대한 수심범위를 측정하는 인자로서 적당하지 않음을 보여주었다.

8월의 경우, H_0 와 H 는 각각 100m와 330m로서 또한 수온 18.8°C, 규산 16.6 µM을 가진 대륙붕 저층해수가 대륙붕 바로 바깥쪽의 정점 J7의 100~330m 수심범위의 혼합된 해수와 성질이 같다는 것을 알 수 있었다 (Fig. 11).

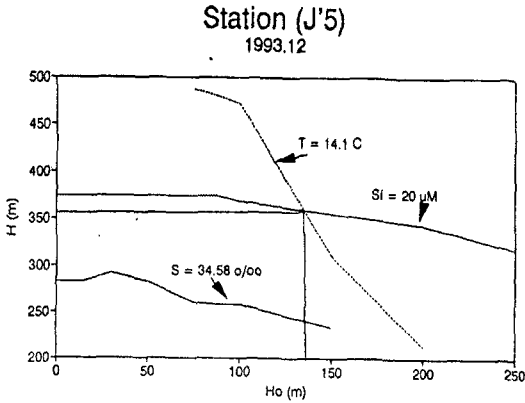


Fig. 10 Combinative values of Ho and H determined from the water properties at station J'5 in December 1993

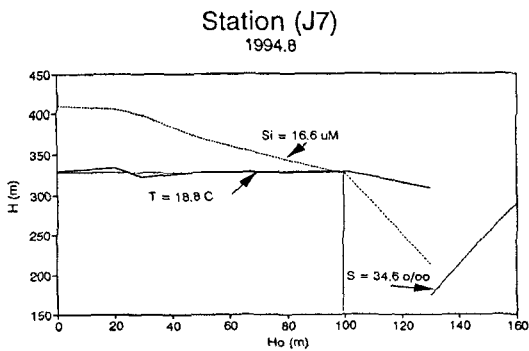


Fig. 11 Combinative values of Ho and H determined from the water properties at station J7 in August 1994

이상의 결과로부터 풍부한 용존무기영양염을 지닌 KIW가 동계 및 하계에 대륙붕단을 따라 용승되어 대륙붕 저층에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

위에서 얻은 혼합 수심의 상층 및 하층한계를 동계 및 하계의 수온-염분 도표에 각각 도시해보면, 동계 (12월)에는 단지 대륙붕단 부근의 저층에만 포함되어 있는 반면에, 하계 (8월)에는 대륙붕역 수온약층 아래 수심은 거의 모두 해당됨을 알 수 있었다 (Fig. 12).

이것은 대륙붕역으로 용승하여 유입되는 정도는 계절에 따라 차이가 있다. 동계에는 대륙붕역에서 표·저층수간의 수직혼합으로 인하여 형성된 수괴가 외해역의 쿠로시오 중층수 수괴와는 성질이 다

T - S Diagram

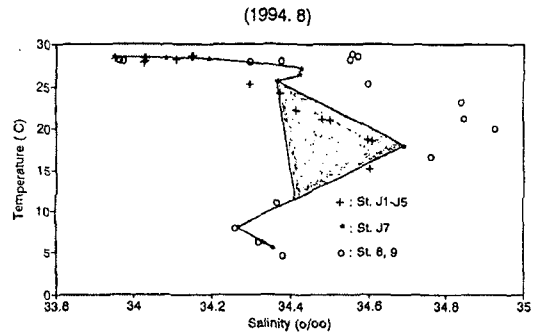
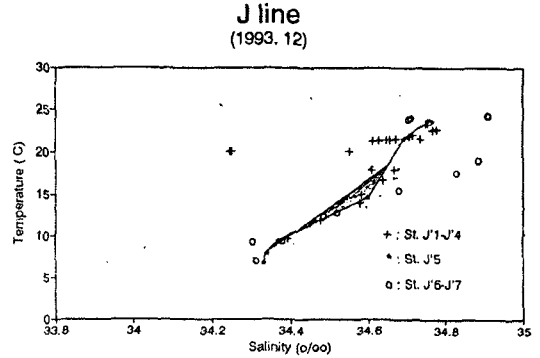


Fig. 12 T-S diagram along transect J of the East China Sea in December 1993 and August 1994 (The shaded area indicates the data domain with water properties produced by the vertical mixing of Kuroshio water in the depth range of 140~370 m in December and 100~300m in August)

르기 때문에 (Fig. 4에서 대륙붕역의 등온선 및 등염선이 수직으로 형성되어 수평적 진입에 대한 장벽역할, 그리고 수온 및 염분약층이 깊은 수심 200m에서 형성), 쿠로시오 중층수가 용승 또는 유입되기 어려운 수온 및 염분 분포 구조를 이룬다. 그래서 단지 대륙붕단 부근의 저층수에만 영향을 미친다. 이에 비하여 하계에는 수온약층이 동계에 비하여 얇은 수심 (20~75m)에서 형성되기 때문에 (Fig. 5에서 등온선과 등염선이 수평적으로 형성되어 수평적 진입에 대한 장벽역할로서의 역할이 미약함) 외해역의 쿠로시오 중층수가 성층수심 (20~75m)까지 쉽게 용승할 수 있고, 대륙붕단 부근에서 대륙붕 안으로 수평 진입이 쉬운 수온 및 염분 분포 구조를 이룬다. 따라서 쿠로시오 중층

수가 동계에 비하여 대륙붕역까지 진입할 수 있다. Fu [1992]는 동계에 동중국해 북서쪽으로 확장하는 쿠로시오 세기가 감소하고, 대류 (convection)의 혼합이 활발하여 쿠로시오 수면하 해수의 용승이 약화되기 때문에 심층수의 용승은 하계 및 추계에 가장 강한 반면에 동계 및 춘계에 가장 약화된다고 보고하여 본 연구 결과와 일치하였다. Chen et al.[1995] 또한 대만 북동해역 대륙붕내에서 쿠로시오 중층수의 용승에 따른 기여도는 동계에 약 10~30%인데 반해, 하계에는 30% 이상이라고 보고하였다.

이러한 대륙붕 밖 심층수의 용승에 의해 공급되는 풍부한 용존무기영양염은 중국연안수에 의한 공급과 더불어 동중국해 대륙붕역의 식물플랑크톤의 일차생산력을 향상시키는 중요한 용존무기영양염의 공급원일 것으로 사료된다.

5. 결 론

이상의 결과와 토의를 종합한 결론은 다음과 같다.

1. 관측선 J의 용존무기영양염 농도 분포는 고온고염저영양염을 지닌 쿠로시오 표층수와 저온저염고영양염을 지닌 쿠로시오 중층수에 의해 조절된다.
2. 대륙붕역의 표층 용존무기영양염은 동계에는 표, 저층수의 활발한 수직혼합으로 인해 비교적 풍부하지만, 하계에는 활발한 식물플랑크톤 섭취로 인하여 결핍되어 있다.
3. 대륙붕역으로 용승해수가 유입되는 정도는 계절에 따라 차이를 보여 하계가 동계보다 쿠로시오 중층수의 대륙붕 진입이 더욱 활발하다.
4. 대륙붕단을 따라 대륙붕역으로 입력되는 쿠로시오 중층수는 풍부한 무기영양염을 지님으로서 대륙붕역의 높은 식물플랑크톤의 일차생산력을 유지하기 위한 중요한 공급원일 것으로 판단된다.
5. 용존무기영양염 분포 특성에 대한 연구는 해양환경에서의 수괴특성 파악과 대륙붕수 및 외해수간의 혼합에 대한 단서를 제공하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 한국해양연구소 (PE99754, PE00784-01) 지원에 의해 수행되었습니다. 논문의 수정과 보완에 큰 도움을 주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 한국해양연구소, 1994, 동중국해의 이용과 개발을 위한 동중국해 해황과 대마난류수의 기원 보고서.
- [2] 한국해양연구소, 1995, 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환 (1차년도) 보고서.
- [3] Broecker, W.S., and Peng, T.H., 1982, "Tracers in the Sea", A publication of the Lamont-Doherty Geological Observatory, Columbia University, Palisades, New York 10964.
- [4] Carpenter, E.J., and Capone, D.G., 1983, "Nitrogen fixation by marine Oscillatoria (Trichodesmium) and the world's oceans", in Carpenter and Capone (ed.). Nitrogen in the marine environment, Academic Press, 62-103.
- [5] Chen, C.T.A., 1996, "The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf", *Oceanol. Acta*, Vol.19, No.5, 523-527.
- [6] Chen, C.T.A., Ruo, R., Pai, S.C., Liu, C.T., and Wong, G.T.F., 1995, "Exchange of water masses between the East China Sea and the Kuroshio off northeastern Taiwan", *Cont. Shelf Res.*, Vol.15, 19-39.
- [7] Chen, C.T.A., Lin, C.M., Huang, B.T., and Chang, L.F., 1996, "The stoichiometry of carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur and oxygen in the particular matter of the western North Pacific marginal seas", *Mar. Chem.*, Vol.54, 179-190.
- [8] Chen, C.T.A., 2000, "The three Gorges Dam: Reducing the upwelling and thus primary productivity in the East China Sea", *Geophysic. Res. Lett.* Vol.27, 381-383.
- [9] Chern C.S. and Wang, J., 1990, "On the water masses at northern offshore area of Taiwan", *Acta Oceanogr. Taiwanica*, Vol.22, 14-32.
- [10] Fu, Y., 1992, "Influence of Kuroshio water on the distribution of dissolved oxygen in the northern East China Sea", *Acta Oceanol. Sin.*, Vol.11, 305-316.
- [11] Grasshoff, K., Ehrhardt, M., and Kremling, K., 1983, "Methods of seawater analysis", *verlag chemie*, 419p.
- [12] Hama, T., 1995, "Seasonal change of the primary productivity in the East China Sea",

- In S. Tsunogai, K. Iseki, I. Koike and T. Oba (ed.). *Global Fluxes of carbon and its related substances in the coastal sea-ocean-atmosphere system*. M & J. International, Yokohama, Japan.
- [13] Ito, T., Kaneko, A., Tsubota, H. and Gohda, N., 1994, "The characteristic distribution of silica over the East China Sea Shelf Slope", *J. Oceanogr. Japan*, Vol.50, 465-477.
- [14] Liu, K.K., Pai, S.C., and Liu, C.T., 1988, "Temperature-nutrient relationships in the Kuroshio and adjacent waters near Taiwan", Vol.21, 1-17.
- [15] Liu, K.K., Gong, G.C., Pai, C.Z., Pai, S.C., Wei, C.L., and Chao, S.Y., 1992, "Response of the Kuroshio upwelling to the onset of the northeast monsoon in the sea north of Taiwan observations and a numerical simulation", *J. Geophys. Res.*, Vol.97, 12511-12526.
- [16] Nixon, S.W., and Pilson, M.Q., 1983, "Nitrogen in estuarine and coastal marine ecosystem. in Carpenter and Capone (ed)", Nitrogen in the marine environment. *Academic Press*, 565-648.
- [17] Park, Y.H., 1985, "Some important summer oceanographic phenomena in the East China Sea", *J. Oceanogr. Soc. Korea*, Vol.20, No.2, 12-21.
- [18] Shiah, F.K., Gong, G.C., and Liu, K.K., 1995, "A preliminary survey on primary productivity measured by the ^{14}C assimilation method in the Keelung area", *Acta Oceanogr. Taiwanica*, Vol.34, 1-16.
- [19] Wang, S.L., Chen, C.T.A., Hong G.H., and Chung, C.S., 2000, "Carbon dioxide and related parameters in the East China Sea", *Cont. Shelf Res.*, Vol.20, 525-544.
- [20] Wong, T.F.G., Pai, S.C., Liu, K.K., Liu, C.T., and Chen, C.T.A., 1991, "Variability of the chemical hydrography at the frontal region between the East China Sea and the Kuroshio north-east of Taiwan", *Est. Coast. Shelf Sci.*, Vol.33, 105-120.