한국해양환경공학회지
Journal of the Korean Society
for Marine Environmental Engineering
Vol. 12, No. 3. pp. 133-142, August 2009

라듐 동위원소 방사능비를 추적자로 사용한 동중국해 북부 해역에서 장강 유출수의 영향 추정

김기현† · 김승수
충남대학교 지구환경과학부 해양환경과학전공

Radium Isotope Ratio as a Tracer for Estimating the Influence of Changjiang Outflow to the Northern Part of the East China Sea

Kee Hyun Kim† and Seung Soo Kim
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

요 약

2009년으로 예정된 산샤댐 완공 후 인근해역에 대한 장강 유출수의 영향을 예측하기 위해 라듐 동위원소의 방사능비($^{228}Ra/^{226}Ra$)와 염분을 이용하여 북부 동중국해의 표층수를 쿠로시오수(Kuroshio Water; KW), 동중국해수(East China Sea Water; ECSW), 장강수(Changjiang Water; CW)등 세가지 단성분 수괴로 나누고, 세 단성분 사이의 혼합비를 추정하였다. 2005년 11월에 동중국해 북부해역의 32개 정점(조사선 '탐구3호'), 2006년 7월에 20개 정점(조사선 '해양 2000호'), 2006년 8월에 17개 정점(조사선 '이어도호')에서 표층해수의 시료 각 300 L씩을 망간섬유에 통과시켜 라듐을 농축하였고, $Ba(Ra)SO_4$형태로 공침된 라듐 동위원소를 감마선 분광분석법으로 측정하였다. 라듐 동위원소 방사능비와 염분을 이용하여 추정된 세 단성분의 혼합비는 풍수기에 장강수가 약 1-23%, 쿠로시오수가 0-30 %, 동중국해수는 58-100 % 사이에 분포하였다. 여름철 인공위성 이미지에서 장강수 플룸이 동쪽으로 향하는 것이 관찰되듯, 이 연구에서도 장강수 혼합비가 동쪽으로 갈수록 감소하는 것이 관찰되는데 이는 이 지역에 여름에 우세한 남동계절풍에 의한 표층수의 엑크만 수송 때문이라고 생각된다. 갈수기에는 연구해역의 표층수에 장강수가 거의 포함되지 않는 것으로 나타났다. 장강수의 혼합비가 증가할수록 용존 무기질소의 농도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 용존 무기질소의 주 공급원이 장강수임을 의미하며, 혼합곡선이 제거의 형태를 보이는 것은 장강수가 인근 해수와 혼합시에 식물플랑크톤의 섭취 같은 생물작용에 의하여 질산염이 소모되는 것으로 설명할 수 있다.

Abstract – In order to understand the present environmental condition and future impingement of Changjiang (Yangtze River) outflow upon the adjacent seas after the scheduled completion of the Sanxia (Three Gorges) Dam in 2009, we tried to estimate the mixing ratios among surface waters of three end-members: Changjiang Water (CW), Kuroshio Water (KW), and East China Sea Water (ECSW) using $^{228}Ra/^{226}Ra$ activity ratio and salinity as tracers. Water samples were collected from 32 stations in November 2005 (*R/V Tamgu 3*), from 20 stations in July 2006 (*R/V Ocean 2000*) and from 17 stations in August 2006 (*R/V Ieodo*) in the northern part of the East China Sea. Radium isotopes in ~300 liters of surface seawater were extracted onboard by filtering through manganese impregnated acrylic fibers and following coprecipitation as $Ba(Ra)SO_4$. Activities of radium isotopes were determined by a high purity germanium detector. Results show that the fraction of CW was in the range of 1-23% in the study area, while KW was in the range of 0-30 % and ECSW 58-100 %. The eastward plume of Changjiang outflow, commonly observed in satellite images during summer and also displayed by the eastward-decreasing CW fraction in this study, could be attributed to Ekman transport caused by the SE monsoon prevailing in this region during summer. Results of this study showed that in the drought season, there was a little or no fraction of CW in the study area. Concentration of dissolved inorganic nitrogen (DIN) showed strong positive relationship with the fraction of CW, suggesting Changjiang as the major source of nitrogen. The

†Corresponding author: khkim@cnu.ac.kr

mixing curve of DIN indicates the removal of nitrate by biological uptake during the mixing of CW with ambient seawater in the study area.

Keywords: East China Sea(동중국해), Sanxia Dam(산샤댐), Changjiang Outflow Water(장강 유출수), Surface water(표층수), Ra isotopes(라듐 동위원소), Mixing ratio(혼합비)

1. 서 론

1.1 이상저염수의 출현과 장강수

북서태평양 지역에서 담수 유출량이 최대인 장강(長江, 양자강)의 여름철 유출수는 동중국해와 한반도 인근해역에 큰 영향을 준다. 김 등[1991]은 1980년 6월 동중국해와 제주해협 지역을 조사한 결과 장강수(Changjiang Water, CW)와 연안해수가 혼합되어 저염화된 장강희석수(Changjiang Diluted Water, CDW)가 동중국해를 거쳐 제주해협을 통과하여 동해까지 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 김 등[1998]은 이런 저염화 현상이 제주해협과 제주도 인근해역까지 광범위하게 나타나고 있는 것을 확인하였다. 1996년 울릉분지에 출현한 이상저염수(anomalously low salinity water)에 대한 연구에서 이와 김[1998]은 $^{228}Ra/^{226}Ra$ 방사능비를 추적자로 사용하여 동해 울릉분지 해역의 표층 염분이 34.53이던 갈수기(1997년 2월)에는 대한해협 표층수에 대한 장강수의 혼합비율이 10±3%에 불과하였으나, 울릉분지 표층 염분이 32.17이던 풍수기(1996년 9월)에는 무려 58±3%에 달하는 것으로 추정하였다. 이처럼 CW는 풍수기 동중국해, 황해 남부, 남해의 표층수와 대한해협 유입수의 상당부분을 공급하고 있다.

김과 한[2000]은 풍수기와 갈수기에 황해 남부, 남해 및 대한해협에서 $^{228}Ra/^{226}Ra$ 방사능비를 측정하여 장강수(CW), 황해수, 쿠로시오수(KW) 등 3개 단성분(end-member) 사이의 혼합비를 추정하였다. 이들의 연구에 의하면 풍수기에 재주도 인근해역에서 11%~14%가 장강수였으나, 갈수기의 남해와 대한해협 표층수에서는 4% 미만이었다.

현재 장강에 건설중인 산샤댐(Sanxia Dam)은 댐 길이 2,300 m, 높이 185 m로 세계 최대 규모이다. 이미 댐의 본체는 완공되어 물 가두기가 진행 중이며 댐 물의 수질이 극도로 오염되고 있다(Wu *et al*., 2004). 최종적으로 댐이 완공되는 2009년 이후에는 자연적인 강수량 변화뿐 아니라 홍수조절을 통한 인위적 유출수량 변동과 이에 따른 간헐적 오염물질 대량배출로 한반도 인근해역 해양환경에 급격한 변동이 예상되므로 현시점에서 장강수의 영향과 확산범위를 파악할 필요가 있다.

1.2 라듐추적자

라듐 동위원소는 해수혼합과 순환과정에 대한 연구를 위한 추적자로 널리 사용된다. 심해저 퇴적물에서 어미핵종 ^{230}Th의 붕괴로 생성되어 저층수로 확산되는 딸핵종 ^{226}Ra은 그 반감기가 1,622년으로 대양의 순환주기와 유사하므로 해수순환 연구에 좋은 추적자로 사용된다(Koczy[1958]). 반면에 ^{228}Ra은 연안퇴적물에서 어미핵종 ^{232}Th의 붕괴로 생성되어 연안 표층수로 유입되어 외양으로 확산되므로 표층수 내 농도는 연안에서 외해 쪽으로 갈수록 감소한다 (Moore[1969]; Schmidt and Reyss[1996]). 따라서 ^{228}Ra은 표층수의 수평와확산 연구에 추적자로 널리 사용된다(Kaufman *et al*. [1973]; Knauss *et al*.[1978]; Moore *et al*.[1980]; Lee and Kim[1997]). 두 라듐 동위원소의 기원과 유입경로가 이처럼 서로 다르므로 각각 상이한 환경에서 생성된 수괴(water mass)는 서로 다른 ^{226}Ra과 ^{228}Ra 농도와 방사능비를 보인다.

해양 심층수의 수괴혼합 연구를 위해서는 수온(T), 염분(S), 용존산소(DO) 등을 추적자로 사용할 수 있으나, 표층수의 경우에는 대기와 접촉하며 냉각, 가열, 기체교환으로 수온이나 용존산소는 변하므로 사용할 수 없다. 표층수 중의 ^{226}Ra과 ^{228}Ra 농도는 염분처럼 증발이나 강우로, 영양염류처럼 생물의 섭취로 농도가 변할 수 있으나 $^{228}Ra/^{226}Ra$ 방사능비는 오직 수괴혼합과 방사붕괴에 의해서만 변화한다(Moore *et al*.[1986]; Key *et al*.[1985]). 강우와 증발의 효과를 무시할 수 있을 경우에는 염분 역시 보존적이기 때문에 라듐 방사능비와 염분을 이용하여 수괴혼합 과정을 추정할 수 있다(Moore *et al*.[1986]; Okubo[1980]; Nozaki *et al*.[1989]).

1.3 장강수의 혼합연구

이전의 장강수 혼합에 대한 연구 (김[1999]; 양과 이[1999]; 이와 김[1998])에서는 쿠로시오수(KW)와 장강희석수(CDW)를 단성분으로 사용하였다. 그러나 CDW는 장강수(CW)와 연안해수가 임의 비(random ratio)로 혼합된 것이므로 염분과 $^{228}Ra/^{226}Ra$ 방사능비가 일정하지 않아서 단성분으로 사용하기에 적합하지 않다. 이점을 개선하여 김과 한[2000]은 동중국해 북부해역의 표층수를 3개 단성분의 혼합결과로 해석하고, 장강수, 쿠로시오수, 황해수를 세 가지 단성분으로 제시하였다. 여기서 그들은 '황해수'라는 이름을 동중국해수, 황해수, 남해수 등 북태평양 아열대 Gyre의 서북쪽 대륙붕 주위에 있는 연안표층수를 아우르는 이름으로 사용하였다. 그러나 이들 연안수를 지역적이나 양적 규모로 비교할 때 '황해수'라는 이름보다 '동중국해수'가 더욱 대표성 있는 이름으로 생각된다.

따라서 이 연구에서는 김과 한[2000]이 사용한 '황해수'와 동일한 수괴를 가르키는 이름으로 '동중국해수'(ECSW, East China Sea Water, ECSW)를 채택하여 KW, CW, ECSW를 3개 단성분의 이름으로 사용할 것이다.

1.4 연구목적

이 연구의 목적은 2009년 산샤댐 완공 후 나타날 장강수의 유

출수량 변화가 우리나라 인근해역에 미칠 영향을 예측하기 위하여, 현재 상태에서 라듐동위원소를 추적자로 이용하여 동중국해 북부해역에서 장강수, 쿠로시오수, 동중국해수 등 3개 수괴간 혼합비를 추정하고 장강수의 영향을 파악하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역

황해를 포함하는 동중국해는 세계에서 가장 큰 주변해(marginal sea)중 하나로서 면적이 1.25×10^6 km^{2}이고, 대부분의 지역이 수심 200 m 이하인 대륙붕(0.9×10^6 km^2)인 해역이다(Zhang *et al.*, 2004). 동중국해와 주변해역의 해류 순환은 크게 북향의 고온·고염 대양기원 해류와 남향의 저염 연안해류로 구성된다(Fig. 1). 대양기원의 해류는 쿠로시오, 대마난류, 대만난류, 황해난류이고, 연안류는 황해와 동중국해의 연안류와 한국 서부 연안을 따라 남향하는 연안류가 있다(한국해양연구원[1997]).

2.2 라듐 농축방법

이 연구에서는 해수로부터 라듐 동위원소를 추출하고 농축하기 위해서 해수를 망간섬유(manganese fiber)로 여과하는 방법을 사용하였다. 망간섬유는 해수로부터 효과적으로 라듐을 추출하는 것으로 알려져 있으며(Moore *et al.*[1976]), 이 연구에서 사용된 망간섬유는 공극 크기 1 μm인 아크릴 섬유를 감아서 규격화된 정수기용 여과 카트리지(filter cartridge)를 사용하여 제작하였다. 제작방법을 간단히 설명하면, 카트리지를 0.4 M $KMnO_4$ 용액에 담그고 80-85 °C로 약 2시간 가열하여 섬유가 완전히 검은색으로 변하면 꺼내어 1일간 식혀서 안정화된 후 증류수로 씻어 사용하기 전까지 젖은 상태로 polyethylene bag에 보관한다. 라듐농축은 현장에서 약 300 L의 표층해수를 유속 5-7 L/min로 망간섬유 카트리지에 통과시켰으며, 라듐 동위원소가 농축된 카트리지는 분석시까지 polyethylene bag에 밀봉하여 보관하였다.

Fig. 1. Current systems in the East China Sea: (a) 1=Kuroshio Warm Current; 2=Tsushima Warm Current; 3=Yellow Sea Warm Current; 4=West Korea Coastal Current; 5=China Coastal Current; 6=Taiwan Warm Current (from Guan[1994]).

2.3 시료의 채취

갈수기 시료채취는 2005년 11월 23일부터 2005년 11월 26일까지 국립수산과학원의 해양조사선 탐구 1호에 승선하여 실시하였다(Fig. 2). 3개선 32개 정점에서 표층해수 300L씩 망간섬유로 농축하였다. 풍수기 시료는 2006년 7월 19일부터 2006년 7월 26일까지 국립해양조사원의 해양조사선인 해양 2000호에 승선하여 동중국해 북부해역 20개 정점에서 표층수 300 L씩 망간섬유로 여과

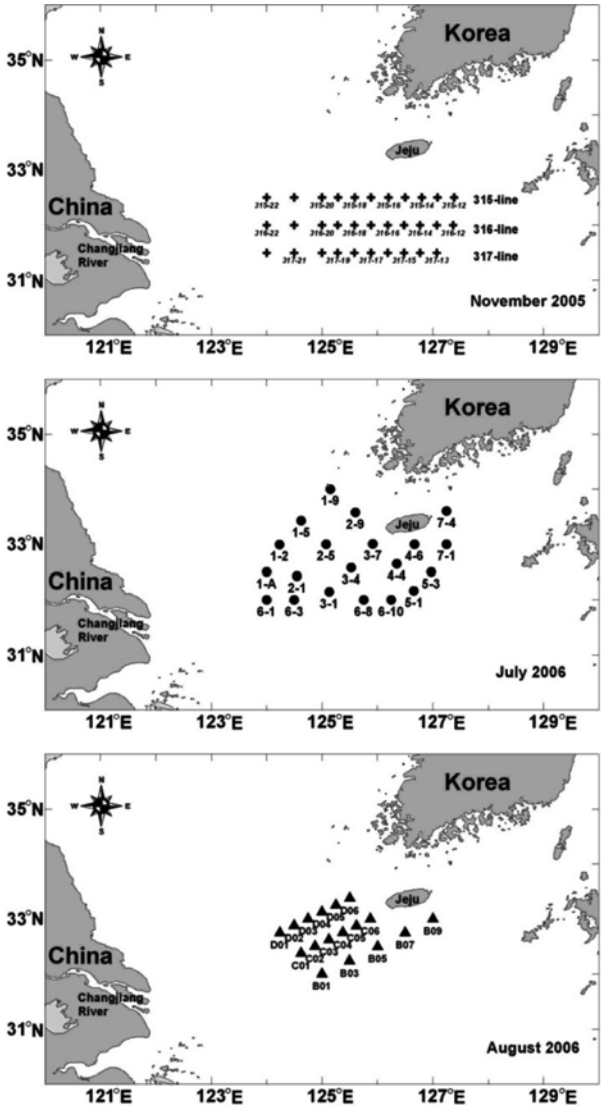

Fig. 2. Maps showing sampling stations in the northern East China Sea. Closed circles represent the stations where samples were collected in July, triangles in August, and crosses in November 2006.

하여 라듐 동위원소를 농축하였다. 또 한국해양연구원 소속인 이어도 호에 승선하여 2006년 8월 11일부터 2006년 8월 16일까지 동중국해 북부해역의17개 정점에서 표층수를 농축하였다(Fig. 2).

영양염 분석용 시료는 니스킨 채수기(Niskin sampler)를 이용하여 1 L의 시료를 채취하였으며, 채수 즉시 0.45 μm 유리섬유여과지(GF/C)를 이용하여 선상에서 여과한 후 분석 시까지 냉동 보관하였다.

2.4 망간섬유로부터 라듐 추출 및 $BaSO_4$ 공침

약 750 ml의 1 M 염산하이드록실아민(NH_2OHHCl) 용액을 수욕조에서 50 °C로 맞추고 망간섬유를 담근 후 30% 과산화수소를 20 ml 첨가한다. 망간섬유에서 검은색이 빠질 때쯤 진한 염산을 5~6 ml 첨가하고 완전히 표백될 때까지 50 °C를 유지한다. 망간섬유가 완전히 표백되면 꺼내어 식힌 후 1 M 염산으로 헹구어 짜내며 꺼낸다. 남은 용액을 여과지(Whatman NO. 2)로 걸러낸다. 걸러진 용액에 진한 황산 약 1 ml를 첨가하여 혼합시키고 $BaCl_2$ 1.8 g을 물에 녹여 첨가하여 약 10시간 동안 라듐을 $BaSO_4$로 공침시킨 후 상등액을 걷어내고 공극이 0.45 μm인 박막 여과지 (membrane filter paper)로 침전물을 걸러내어 건조기에서 90 °C로 하루 동안 건조시킨다. 건조된 침전물은 desiccator에서 식힌 후 고밀도 폴리에틸렌 재질의 감마선 측정용기(counting vial)에 담고 중량을 측정하고 라돈이 유출되지 않도록 에폭시 접착제로 밀봉한다.

밀봉된 시료는 어미핵종 ^{226}Ra과 딸핵종 ^{222}Rn ($t_{1/2}$=3.8일) 사이에 방사평형이 이루어지도록 1개월 이상 숙성(aging)시킨다. 이때 라듐의 화학적 회수율(chemical yield)은 다음과 같다.

$$\text{Chemical yield}(\%) = \frac{\text{weight of } BaSO_4 \text{ in vial(g)}}{\text{weight of dissolved } BaCl_2\text{(g)} \times 1.1209} \quad (1)$$

2.5 추출효율

망간섬유로 라듐 동위원소를 농축하는 과정에서 동위원소분별(isotopic fractionation)은 무시할 수 있으므로 해수시료의 $^{226}Ra/^{228}Ra$ 방사능비는 추출효율 없이도 측정 가능하다. 그러나 해수시료의 ^{226}Ra과 ^{228}Ra 방사능을 각각 측정하기 위해서는 추출효율을 알아야 한다.

Fig. 3처럼 연결된 각 카트리지에서 Ra 추출 효율이 같다고 가정하면, A_0=해수 중 라듐방사능(Bq/L), A_1=제1 카트리지에서 측정된 라듐방사능(Bq/L), A_2=제2 카트리지에서 측정된 라듐방사능(Bq/L), E=추출효율이라 하면, 추출효율은 $E=1-(A_2/A_1)$로 주어지며, 해수 중 라듐방사능은 $A_0=A_1/E$ 로 주어진다.

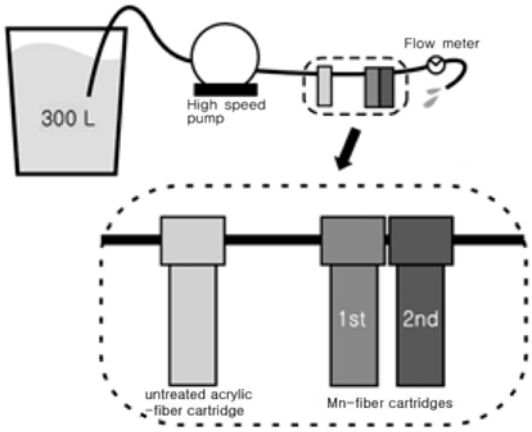

Fig. 3. A schematic diagram showing the array of manganese fiber cartridges for extracting radium isotopes from seawater.

2.6 감마선 분광분석

Ra측정은 Kim and Burnett[1983] 방법에 따라 우물형 고순도 게르마늄 검색기를 사용하여 감마선 분광분석법으로 측정하였다. ^{226}Ra은 ^{214}Pb의 photopeak인 295 keV, 352 keV와 ^{214}Bi의 photopeak인 609 keV에서 측정하였으며, ^{228}Ra은 ^{228}AC의 peak인 338 keV, 911 keV, 969 keV를 측정하였다.

2.7 영양염 분석

2006년 7월에 채취된 시료는 영양염 자동분석기를 이용하여 분석하였다. 7월 자료는 NO_2^-와 NO_3^-가 함께 분석되었다. 2006년 8월에 채취된 시료는 Parsons *et al*.[1984]의 방법에 따라 분광광도계를 이용하여 측정하였고, NO_2^-와 NO_3^-가 따로 분석되었다.

2.8 단성분 값의 추정

이 연구에 사용된 단성분 값들을 Table 1에 나타내었다. CW는 Elsinger and Moore[1984]가 1980년 여름에 측정한 자료를 이용하였다. KW와 ECSW는 Nozaki *et al*.[1991]의 자료를 사용하였다.

2.9 해수 혼합 모델

세 단성분 A, B, C가 각각 f_A, f_B, f_C 씩 혼합된 혼합물의 농도(X_M)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$X_M = f_A \cdot X_A + f_B \cdot X_B + (1-f_A-f_B) \cdot X_C \quad (4)$$

여기서 X_A, X_B, X_C는 각각 단성분 A, B, C내 물질 X의 농도, f_A, f_B, f_C 는 각 단성분의 혼합비이다($f_A + f_B + f_C = 1$). 이 식을 염분(S)과 $^{228}Ra/^{226}Ra$ 방사능 비(R)에 대해서 적용하면:

Table 1. Salinities, activities of ^{226}Ra and ^{228}Ra, and $^{228}Ra/^{226}Ra$ activity ratios of three end-members, Kuroshio water (KW), Changjiang water (CW), and East China Sea water (ECSW)

End-member	Salinity(psu)	^{226}Ra(mBq/l)	^{228}Ra(mBq/l)	$^{226}Ra/^{228}Ra$	Reference
KW	34.67	1.09	0.28	0.25	Nozaki *et al*., 1991
CW	0.00	1.67	3.17	1.90	Elsinger and Moore, 1984
ECSW	32.32	2.38	8.43	3.54	Nozaki *et al*., 1991

$$S_M = f_A \cdot S_A + f_B \cdot S_B + (1-f_A-f_B) \cdot S_C \quad (5)$$

$$R_M = f_A \cdot R_A + f_B \cdot R_B + (1-f_A-f_B) \cdot R_C \quad (6)$$

A, B, C가 각각 KW, ECSW, CW일 경우에, 장강수 CW는 담수이므로 S_C=0 이다.

$$S_M = f_A \cdot S_A + f_B \cdot S_B \quad (7)$$

각 정점에서 얻어진 염분(S)과 방사능비(R) 측정값에 대하여 위 식 (6)과 식 (7)의 연립방정식을 풀어 각 단성분의 혼합비 f를 구한다.

3. 결과 및 토의

3.1 수온과 염분 분포

Fig. 4와 Fig. 5는 연구지역 표층수의 수온과 염분 분포를 보여준다. 2006년 7월 동중국해 북부 표층수의 수온은 22.76-26.78 °C 범위에 존재하였고, 8월에는 28.00-32.06 °C 범위에 있었으며, 제주도 남서쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4).

2006년 7월 동중국해 북부 표층수의 염분은 26.58-32.78 사이의 범위에 있고, 2006년 8월 표층수의 염분은 24.96-30.42 범위에 존재하였다. 연구지역 표층수의 염분은 제주도 남서쪽으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다(Fig. 5).

3.2 라듐 동위원소의 분포

2006년 7월과 8월 동중국해 북부해역에서 얻어진 라듐 동위원소 자료를 Table 2와 3에 나타내었다. 연구해역 표층수의 ^{228}Ra의 방사능은 9.66-28.81 dpm/100L 범위에 있었고, ^{226}Ra의 방사능은 3.17-7.79 dpm/100L 범위에 존재하였다. 라듐동위원소의 방사능비(^{228}Ra/^{226}Ra)는 2.55±0.08부터 3.70±0.04까지의 범위이며, 평균값은 3.14±0.08이었다.

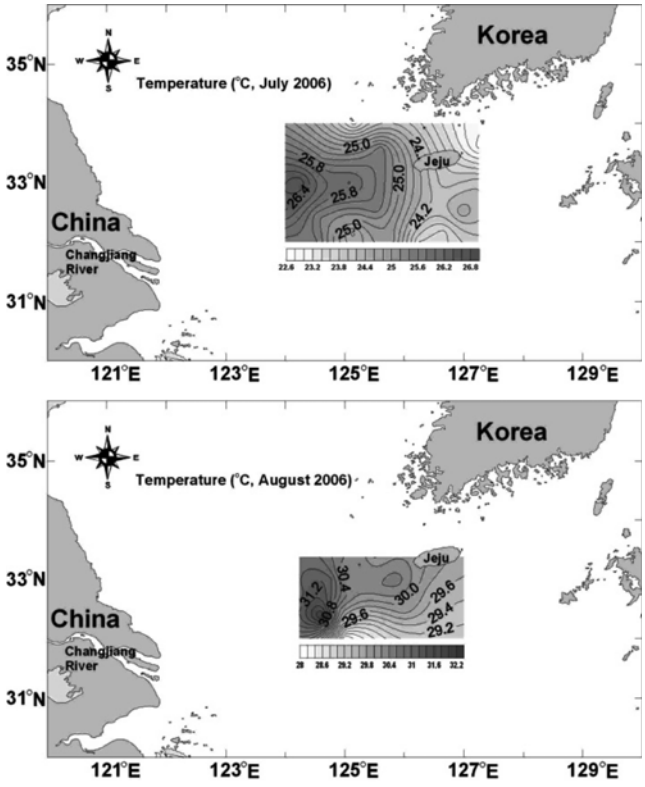

Fig. 4. Distribution of temperature in surface water of the northern ECS in July and August 2006.

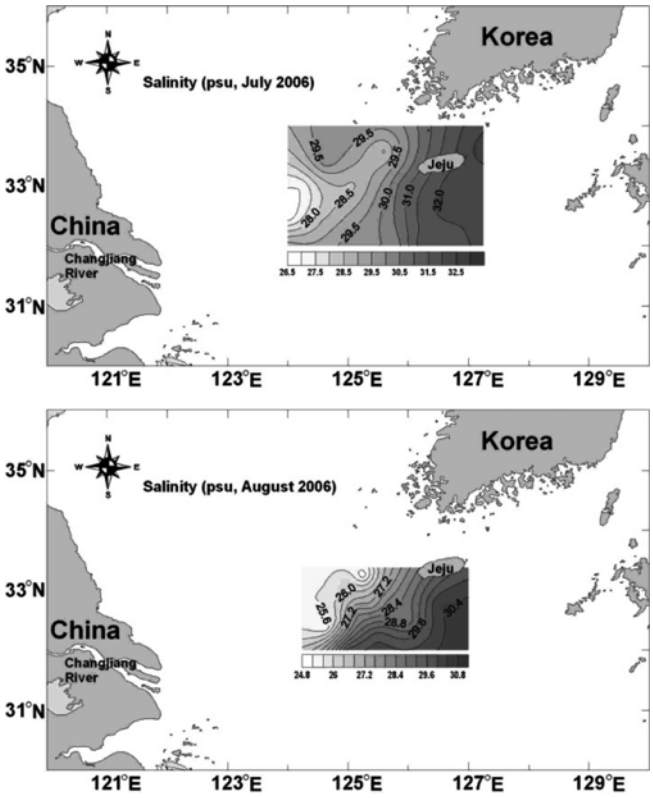

Fig. 5. Distribution of salinity in surface water of the northern ECS in July and August 2006.

3.3 세 단성분 수괴의 혼합비

^{228}Ra/^{226}Ra 방사능비와 염분을 이용하여 추정된 각 단성분값들을 Table 4과 Fig. 6에 제시하였다. 풍수기인 7, 8월과 갈수기인 11월 자료를 비교하면, 풍수기에 KW의 혼합비는 0-30% 범위에 있고, 제주도 동부 정점인 7-4에서 가장 높은 값을 보였다. 따라서 제주도 동부지역은 KW가 가장 많은 영향을 주는 것으로 보인다. ECSW의 혼합비는 58-98%로 제주도 남서쪽 정점 3-7에서 가장 높은 비율을 보였다. CW의 혼합비는 1-23% 범위로 C01 정점과 D05 정점에서 가장 높았다. 그러나 갈수기에는 표층수중에서 CW의 함량이 거의 없거나 미량 포함되어 있는 것으로 나타났다.

Nozaki, *et al.* [1989]에 의해 얻어진 자료에 의하면 중국연안의 정점에서 풍수기에 약 20%의 CW를 포함하고, 김과 한[2000]의 자료에 의하면 장강하구에 인접한 정점에서 21%의 CW를 포함하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 7). 이 연구에서 얻어진 풍수기 CW의 최대값은 23% 로 위 자료들과 비슷한 값을 나타냈다(Fig. 7).

풍수기에 추정된 각 단성분간 혼합비의 수평분포를 Fig. 8에 나

Table 2. Salinities, temperature, activities of ^{226}Ra and ^{228}Ra, and ^{228}Ra/^{226}Ra activity ratios of the northern ECS in July 2006. Errors for the radium activities are based on 1-sigma counting statistics

Station	Salinity psu	Temp. (°C)	^{226}Ra (dpm/100L)	^{228}Ra (dpm/100L)	^{228}Ra/^{226}Ra
1-A	26.58	26.38	5.86 ± 0.11	15.55 ± 0.28	2.65 ± 0.07
1-2	27.07	26.78	5.60 ± 0.12	15.24 ± 0.31	2.72 ± 0.08
1-5	29.96	25.38	7.36 ± 0.15	25.96 ± 0.49	3.53 ± 0.10
1-9	30.00	23.52	7.60 ± 0.09	25.98 ± 0.31	3.42 ± 0.06
2-1	28.46	25.44	6.38 ± 0.08	21.38 ± 0.23	3.35 ± 0.06
2-5	28.40	26.02	5.54 ± 0.14	17.67 ± 0.39	3.19 ± 0.11
2-9	28.43	25.50	5.96 ± 0.10	18.06 ± 0.27	3.03 ± 0.07
3-1	29.81	24.35	4.61 ± 0.09	12.25 ± 0.22	2.66 ± 0.07
3-4	29.94	25.52	8.25 ± 0.12	27.65 ± 0.44	3.35 ± 0.07
3-7	30.84	24.99	8.42 ± 0.08	31.13 ± 0.24	3.70 ± 0.04
4-4	31.97	24.27	7.45 ± 0.18	23.46 ± 0.56	3.15 ± 0.11
4-6	32.18	23.91	5.88 ± 0.14	17.25 ± 0.39	2.93 ± 0.10
5-1	31.87	23.54	6.95 ± 0.11	24.36 ± 0.36	3.50 ± 0.08
5-3	32.04	24.52	4.19 ± 0.04	11.69 ± 0.14	2.79 ± 0.04
6-1	29.32	25.71	6.17 ± 0.12	16.45 ± 0.35	2.67 ± 0.08
6-3	29.15	25.66	3.43 ± 0.08	10.44 ± 0.25	3.04 ± 0.10
6-8	30.07	24.98	6.88 ± 0.26	24.20 ± 0.36	3.52 ± 0.14
6-10	31.84	23.60	6.64 ± 0.10	20.61 ± 0.34	3.10 ± 0.07
7-1	32.03	24.14	4.90 ± 0.09	12.68 ± 0.27	2.59 ± 0.07
7-4	32.78	22.76	4.55 ± 0.10	11.61 ± 0.27	2.55 ± 0.08

Table 3. Salinities, temperature, activities of ^{226}Ra and ^{228}Ra, and ^{228}Ra/^{226}Ra activity ratios of the northern ECS in August 2006. Errors for the radium activities are based on 1-sigma counting statistics

Station	Salinity psu	Temp. (°C)	^{226}Ra (dpm/100L)	^{228}Ra (dpm/100L)	^{228}Ra/^{226}Ra
B01	29.73	28.00	6.85 ± 0.14	22.00 ± 0.40	3.21 ± 0.09
B03	29.88	29.03	6.51 ± 0.12	20.43 ± 0.33	3.14 ± 0.08
B05	28.54	29.94	5.71 ± 0.12	17.18 ± 0.32	3.01 ± 0.09
B07	30.42	29.57	4.62 ± 0.06	13.35 ± 0.24	2.89 ± 0.05
B09	30.26	29.58	6.39 ± 0.07	21.56 ± 0.21	3.37 ± 0.05
C01	25.27	32.06	7.20 ± 0.15	18.35 ± 0.42	2.55 ± 0.08
C02	26.35	30.35	6.51 ± 0.13	17.54 ± 0.33	2.69 ± 0.07
C03	27.87	30.15	7.95 ± 0.14	21.55 ± 0.37	2.71 ± 0.07
C04	27.32	30.19	7.18 ± 0.14	24.80 ± 0.47	3.45 ± 0.09
C05	27.86	30.39	6.38 ± 0.13	19.46 ± 0.34	3.05 ± 0.08
C06	28.16	30.51	7.69 ± 0.14	24.07 ± 0.38	3.13 ± 0.07
D01	25.32	30.85	7.23 ± 0.13	20.89 ± 0.35	2.89 ± 0.07
D02	25.66	31.32	7.91 ± 0.14	22.42 ± 0.36	2.83 ± 0.07
D03	25.78	31.07	8.07 ± 0.14	22.75 ± 0.37	2.82 ± 0.07
D04	26.30	30.17	7.48 ± 0.13	23.80 ± 0.36	3.18 ± 0.07
D05	24.96	30.42	6.16 ± 0.16	18.77 ± 0.41	3.05 ± 0.10
D06	26.42	29.98	6.54 ± 0.16	17.56 ± 0.39	2.68 ± 0.07

타내었다. KW의 경우 제주도 서부 해역에서 가장 높은 함량을 보이고, ECSW는 전 연구지역에서 50% 이상의 혼합비를 갖는 것으로 나타났으며, 연구지역의 북서쪽에서 높은 함량을 보였다. CW의 혼합비는 장강쪽에서 북동 방향으로 분포하였고, 제주도 인근 해역까지 그 영향이 미치는 것으로 나타났다. 본 연구에서 나타난 바와 같이 여름철 CW의 플룸이 북동 방향으로 뻗어 있는 이유를 이 등[2005]은 여름철 이 해역에 남동계절풍이 불 때 엑크만 수송(Ekman transport)이 북동방향으로 일어나기 때문인 것으로 설명하고(Fig. 8) 있으나 구체적인 증거는 아직 부족하다.

풍수기의 이전 연구결과들과 이 연구에서 얻어진 세 단성분간의 혼합비를 Table 5에 나타내었다. 김[1999], 이와 김[1998], 양과 이[1999]는 단성분 혼합비를 추정하기 위하여 CDW와 KW 두 단성분을 이용하였다. 그러나 전술한 바와 같이 CDW는 CW와 연안수가 임의로 혼합되어 생성되므로 단성분으로 사용하기에 적합하

Table 4. Mixing ratio of end member waters in the northern ECS in November 2005, July and August 2006. (KW: Kuroshio water CW: Changjiang water ECSW: East China Sea water)

July and August in 2006				November in 2005			
Station	KW (%)	ECSW (%)	CW (%)	Station	KW (%)	ECSW (%)	CW (%)
1-A	17	64	19	315-12	90	9	1
1-2	17	66	17	315-13	88	11	1
1-5	0	93	7	315-14	85	15	0
1-9	0	93	7	315-15	81	19	0
2-1	0	88	12	315-16	67	33	0
2-5	4	83	12	315-17	66	34	0
2-9	9	78	13	315-18	45	55	0
3-1	22	68	9	315-19	57	43	0
3-4	2	90	8	315-20	0	100	0
3-7	0	96	4	315-21	4	96	0
4-4	11	87	2	315-22	4	90	6
4-6	18	81	2	316-12	56	44	0
5-1	0	98	1	316-13	70	30	0
5-3	22	76	2	316-14	66	34	0
6-1	21	68	11	316-15	37	63	0
6-3	10	80	11	316-16	69	31	0
6-8	0	93	7	316-17	44	56	0
6-10	12	86	2	316-18	0	100	0
7-1	28	69	3	316-19			
7-4	30	69	1	316-20	4	93	3
B01	6	86	8	316-21	21	75	4
B03	8	84	8	316-22	6	94	0
B05	10	78	12	317-13	66	34	0
B07	16	77	7	317-14	55	45	0
B09	2	92	7	317-15	58	42	0
C01	19	58	23	317-16	21	79	0
C02	16	64	20	317-17	34	66	0
C03	24	60	16	317-18	30	70	0
C04	0	85	15	317-19	0	100	0
C05	8	78	14	317-20	1	99	0
C06	6	81	13	317-21	29	70	1
D01	9	69	22	317-22	23	77	0
D02	11	68	21				
D03	11	67	21				
D04	4	77	19				
D05	3	74	23				
D06	20	61	20				

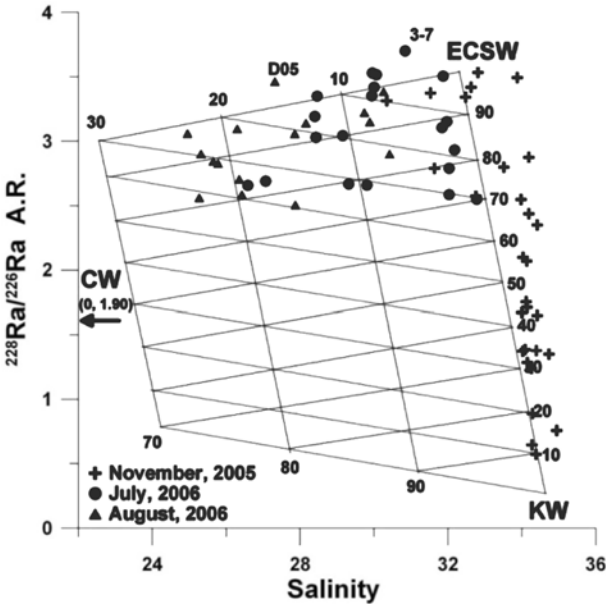

Fig. 6. A ternary mixing diagram for surface waters of the northern ECS in November 2005, July and August 2006. (KW: Kuroshio water; CW: Changjiang water; ECSW: East China Sea water).

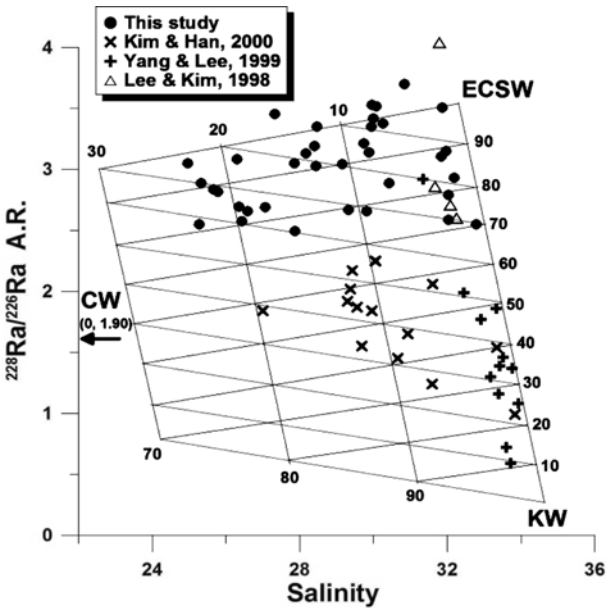

Fig. 7. A ternary mixing diagram for surface waters of the northern ECS in rainy season. (KW: Kuroshio water; CW: Changjiang water; ECSW: East China Sea water).

지 않다. 따라서 이전 연구에 보고된 CDW의 혼합비와 이 연구의 CW의 혼합비를 직접적으로 비교할 수는 없었다. 김과 한[2000]의 연구결과를 보면 CW의 혼합비는 이 연구결과의 값과 비슷한 범위에 분포하였고, KW는 김과 한[2000]의 결과가 대체적으로 높게 나타났다. ECSW의 경우는 이 연구결과 값이 높은 범위에 존재하였다. 이처럼 비슷한 지역의 혼합비가 달라지는 이유는 연구지역의 수괴 혼합과정이 시간적 공간적으로 매우 복잡하게 일어나고 있기 때문이라고 생각된다.

3.4 영양염 농도와 장강수 혼합비의 관계

라듐동위원소와 염분을 이용하여 추정한 CW의 혼합비와 영양염 농도 사이의 관계를 Fig. 9에 나타내었다.

이 연구해역에서 표층수의 인산염 농도는 장강수 혼합비(CW%)와 특별한 관계를 보이지 않는다(Fig. 9a). Kim, *et al.*[2006]의 연구에서도 동중국해 북부해역에서 염분과 영양염의 농도 사이에는 특별한 경향성이 존재하지 않는다고 보고한 바 있다.

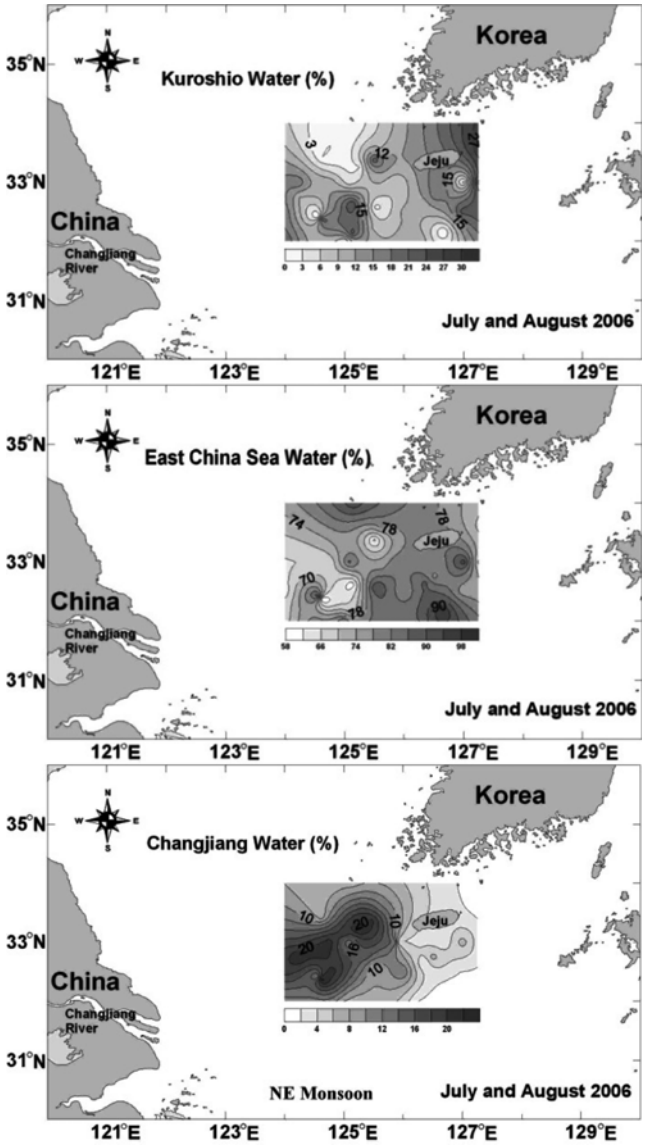

Fig. 8. The fraction of each end-members in the surface water of the northern ECS in July and August 2006.

Table 5. Comparison of results with previous mixing studies. YSW designated the same water mass as the ESCW in a previous study. (KW: Kuroshio water; CW: Changjiang water; ECSW: East China Sea water; YSW: Yellow Sea water; CDW: Changjiang Dilute Water)

Water mass	KW	ECSW (YSW)	CW	CDW	Reference
Mixing fraction (%)	0-30	58-98	1-23	-	This study
	29-87	11-70	2-21	-	Kim and Han, 2000
	> 60	-	-	14-87	Kim, 1999
	73	-	-	27	Yang and Lee, 1999
	34-100	-	-	58±3	Lee and Kim, 1998

이 연구에서 장강수 혼합비가 증가함에 따라 용존무기질소(DIN) 농도가 함께 증가하고, 그 혼합곡선의 형태가 아래로 볼록한 사실(Fig. 9b)은 다음 두 가지를 시사한다: i) 장강수는 인근해역에

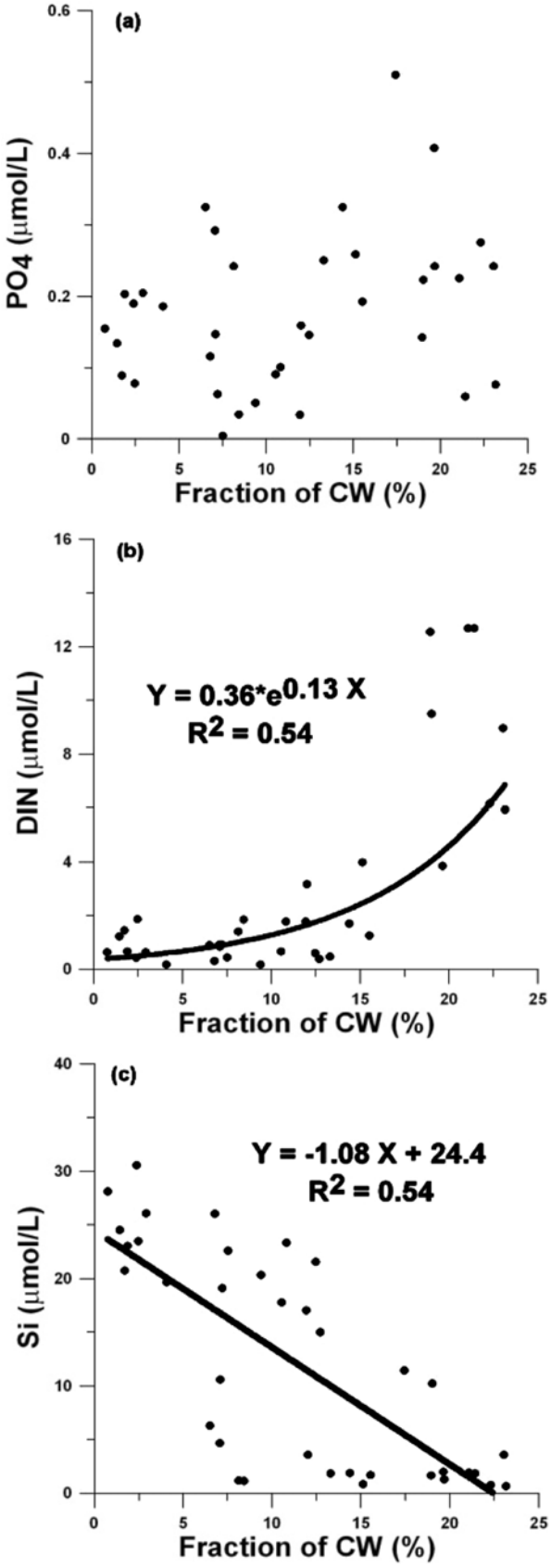

Fig. 9. Concentration of nutrients as a function of the fraction of CW(%) in the northern ECS in July and August 2006.

대한 DIN의 주 공급원이다. 그리고 ii) 장강수가 영양염이 결핍된 연안해수나 쿠로시오수의 표층수와 혼합되는 동안 식물플랑크톤의 섭취와 같은 생물작용에 의하여 DIN이 소모된다. 이와는 달리 Edmond, *et al*.[1985]와 Wang, *et al*.[2003]은 염분이 증가함에 따라 질산염이 선형으로 감소하는 경향, 즉 장강수가 연안해수와 희석되는 동안 질산염이 보존적인 거동을 보인다고 보고하였다. 이러한 차이가 나타나는 이유는 전술한 Edmond, *et al*.[1985]나 Wang, *et al*.[2003]의 연구에서는 질산염 분포만을 고려한 반면, 본 연구에서는 고려한 DIN은 암모늄염(NH_4^+), 아질산염(NO_2^-) 및 질산염(NO_3^-) 농도의 총합(DIN=[NH_4^+]+[NO_2^-]+[NO_3^-])이며, 해양식물은 이 세 가지 DIN 성분 중에서 일차적으로 NH_4^+, 다음으로 NO_2^-, 맨 마지막으로 NO_3^-을 이용하기 때문이다. 원양의 표층수에서는 질산염이 DIN의 대부분을 차지하지만 본 연구해역과 같은 연안이나 강하구에서는 암모늄염과 아질산염이 상당량 분포하고, 해양식물이 DIN 중에서 암모늄염과 아질산염을 우선적으로 이용하면 질산염 농도는 변화하지 않지만 총량인 DIN은 감소할 것이다.

규산염의 경우는 용존 규산염 농도가 낮은 장강수가 규산염 농도가 높은 연안 표층수와 일차혼합되는 보존적 혼합의 경향성을 보인다(Fig. 9c).

이상의 결과로 미루어 볼 때 장강수는 인근해역에 상당량의 용존무기질소를 공급하여 식물플랑크톤 등이 이를 이용하지만, 장강수에 의한 인산염이나 규산염 공급은 인근해역 생태계에 크게 중요하지 않음을 시사한다.

4. 결 론

중국 장강에 산샤댐이 완공 된 후 인근해역에 대한 장강수의 영향을 예측하기 위해 동중국해 북부 표층수의 라듐 동위원소의 방사능비와 염분을 이용하여 표층수괴 혼합비를 추정하였다.

풍수기 동중국해 북부 표층수중 $^{228}Ra/^{226}Ra$ 방사능 비는 2.55-3.70 사이의 범위에 분포하였고, 평균값은 3.14±0.08이었다. 라듐 동위원소비와 염분을 이용하여 추정된 세 단성분의 혼합비는 각각 쿠로시오수(KW)가 0-30%, 동중국해수(ECSW)는 58-100%, 장강수는 1-23% 사이에 분포하였으며 여름철에 제주도 인근해역까지 영향이 미치는 것으로 나타났다. 그러나 갈수기인 2005년 11월에는 동중국해 북부 표층수중 장강수(CW)는 포함되어 있지 않거나, 최대 6%로 매우 적은 양을 포함하고 있었다.

또한 장강수의 혼합비와 용존 무기질소의 농도 사이의 관계는 인근해역에 대한 용존 무기질소의 주요 공급원이 장강수임을 의미하며, 장강수가 혼합 확산되는 동중국해 북부해역 전역에 걸쳐 생물작용에 의하여 질산염이 소모되는 경향을 보인다.

5. 후 기

이 논문은 2004년-2006년 해양수산부에서 김기현에게 지원된 "산소, 수소, 라듐 동위원소를 추적자로 이용한 양자강수의 영향 예측 연구"의 결과로부터 완성된 김승수의 석사학위 논문(제목: 라듐 동위원소를 추적자로 사용한 장강유출수의 동중국해 북부해역에 대한 영향 추정)의 일부이다. 이 연구를 위해 현장에서 많은 도움을 주신 탐구3호, 해양2000호, 이어도호의 선장과 선원 여러분 및 동승한 해양학자 여러분의 노고에 감사 드린다. 그리고 분석을 도와준 충남대학교 해양학과 해양방사화학실 식구들에게 고마움을 전한다.

참고문헌

[1] 김 구, 노홍길, 이상호, 1991. 하계 제주도 주변 해역의 수계 및 해수환경. 한국해양학회지, 26, pp.262-277.

[2] 김기현, 한정희, 2000. 라듐동위원소와 염분을 이용한 동중국해, 남해 및 대한해협 해수의 기원과 혼합비율 추정. 한국해양학회지, 5, pp.216-233.

[3] 김성수, 고우진, 조영조, 이필용, 전경암, 1998. 1996년 여름철 남해 표층수의 이상저염수 현상과 영양염류의 분포특성. 한국해양학회지. 3, pp.165-169.

[4] 김향배, 1999. Ra동위원소를 이용한 남해와 중국주변해역에서 수괴의 기원 및 해수의 체류시간. 부경대학교. 석사학위논문. pp.53

[5] 양한섭, 이동섭, 1999. 여름철 동중국해 및 남중국해 표층수의 Ra 동위 원소를 이용한 수계분석. 한국해양학회지, 4, pp. 305-311.

[6] 이동섭, 김기현, 1998. ^{228}Ra를 이용한 이상 저염 대마난류수의 기원 추적 연구. 한국해양학회지, 3, pp.175-182.

[7] 이석우, 1992. 한국근해해상지, 집문당, pp.334.

[8] 이준수, Takeshi Matsuno, 이재학, 방익찬, 이동규, 2005. 위성추적부이를 이용한 2003년, 2004년 여름 동중국해 장강희석수의 거동에 대한 연구, 2005년도 한국해양과학기술협 의회 공동학술대회 초록집, pp.687.

[9] 한국해양연구원, 1997. 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환(3차년도)-동중국해 동부해역 중심, BSPN 00319-964-1, pp.561.

[10] Edmond, J.M., A. SpiVack, B.C. Grant, M.H. Hu, Z. Chen, S. Chen and X. Zeng, 1985. Chemical dynamics of the Changjiang estuary, Continental Shelf Res., 4, pp.17-36.

[11] Elsinger, R.J. and W.S. Moore, 1984, ^{226}Ra and ^{228}Ra in the mixing zones of the PeeDee River-Winhay Bay, Yangtze River and Delaware Bay estuaries. Est. Coasta. Shelf Sci., 18, pp.601-631.

[12] Key, R.M., R.F. Stallard, W.S. Moore, J.L. Sarmiento, 1985. Distribution and flux of ^{226}Ra and ^{228}Ra in the Amazon River Estuary. Journal of Geophysical Research, 90, pp.6995-7004.

[13] Kim D.S., J.H. Shim, and S.J. Yoo, 2006. Seasonal variations in nutrients and chlorophyll-a concentrations in the northern East China Sea, Ocean Science Journal, 41(3), pp.125-137.

[14] Kim K.H. and W.C. Burnett, 1983, Gamma-ray Spectrometric determination of Uranium-Series nuclides in marine phosphorites, Analytical Chemistry, 55(11), pp.1796-1800.

[15] Knauss K. G., T.L. Ku, and W.S. Moore, 1978. Radium and tho-

rium in the surface waters of the East Pacific and coastal Southern California. Earth p[lanet. Sci. Lett., 39, pp.235-249.

[16] Koczy, F.F., 1958, natural radium as a tracer in the ocean: internat. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, 2nd, Geneva, Proc., 18, pp.351-357.

[17] Lee. J.S. and K.H. Kim, 1997. The distribution of ^{228}Ra in, and the Eddy Diffusivity of, Surface Waters of the Coastal Southwestern East Sea, The Journal of the Kor. Soc. Oceanogr., 32(2), pp.60-61.

[18] Moore, W.S., 1969. Ocean concentration of ^{228}Ra, Earth Planet. Sci. Lett., 6, pp.437-446.

[19] Moore, W.S., 1976. Sampling ^{228}Ra in the deep ocean, Deep-Sea Res., 23, pp.647-651.

[20] Moore, W.S., H.W. Feely and Y.-H. Li 1980. Radium isotopes in sub-Arctic waters. Earth Planet. Sci. Lett., 49, pp.329-340.

[21] Moore, W.S., J.L. Sarmiento and R.M. Key, 1986. Tracing the Amazon component of surface Atlantic Water using ^{228}Ra, salinity and silica, J. Geophys. Res., 91, pp.2574-2580.

[22] Nozaki, Y., V. Kasemsupaya and H. Tsubota, 1989, Mean residence time of the shelf water in the East China and the Yellow Seas determined by ^{228}Ra/^{226}Ra measurements. Geophys. Res. Lett., 16, pp.1297-1300.

[23] Nozaki, Y., H. Tsubota, V. Kasemsupaya, M. Yashima and N. Ikuta, 1991, Residence time of surface water and particle-reactive ^{210}Pb and ^{210}Po in the East China and Yellow Seas. Geochem. Cosmochem. Acta, 55, pp.1265-1272.

[24] Okubo, T., 1980, Radium-228 in the Japan Sea, J. Oceanogr. Soc. Japan, 36, pp.263-268.

[25] Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. (Eds.), 1984, A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Oxford: Pergamon Press. pp.173.

[26] Schmidt, S. and J.L. Reyss, 1996. Radium as internal tracer of Mediterranean outflow water, J. Geophys. Res., 101, pp.3589-3596.

[27] Wang, B.D., W.L. Wang and R. Zhan, 2003. Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea. Estuarine Coast. Shelf Sci., 58, pp.127-136.

[28] Wu, J., J. Huang, X. Han, X. Gao, F. He, and M. Jiang, 2004. The Three Gorges Dam: an ecological perspective. Front Ecol. Eviron. 5, pp.241-248.

[29] Yu, Z. X., Y. S. Su, G. Yu, and F. B. Li, 1984. A preliminary analysis of modified water masses in the sea area near the Yangtze River mouth and the Jizhou Island. Journal of the Shandong College of Oceanology, 14, pp.1-12.

[30] Zhang Y., L. Zhu, X. Zeng, and Y. Lin, 2004. The biogeochemical cycling of phosphorus in the upper ocean of the East China Sea. Est. Coast. And Shelf Sci., 60, pp.369-379.

2009년 4월 1일 원고접수
2009년 5월 6일 심사완료
2009년 8월 18일 수정본 채택