

라듐 동위원소와 염분을 이용한 동중국해, 남해 및 대한해협 해수의 기원과 혼합비율 추정

김기현* · 한정희¹

충남대학교 해양학과, ¹기초과학지원연구소

Origin and Mixing Ratio of Water Masses in the East China Sea, the South Sea and the Korea Strait using Radium Isotopes and Salinity

KEE HYUN KIM* AND JEONG HEE HAN¹

Department of Oceanography, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea
¹Isotope Research Team, Korea Basic Science Institute, Taejon 305-333, Korea

동중국해, 남해와 대한해협에서 채취한 해수 시료의 ²²⁸Ra/²²⁶Ra 방사능비와 염분을 이용하여, 장강수(CW), 황해수(YSW) 그리고 쿠로시오수(KW)간의 혼합비율을 추정하였다. 동중국해의 경우 97년 8월 채집시료의 ²²⁸Ra/²²⁶Ra 방사능비와 염분을 이용한 혼합도는 이 지역이 KW, YSW 그리고 CW 순으로 세 단성분 모두의 영향을 받고 있다는 것을 나타낸다. 또한 동중국해의 경우 CW의 혼합비율은 염분만으로도 추정이 가능하였다. 남해와 대한해협의 경우 혼합비를 추적자로 ²²⁸Ra/²²⁶Ra 방사능비와 염분을 이용하고 세 개의 단성분을 이용한 혼합비율추정에서 대부분의 정점은 CW의 영향이 매우 적은 것으로 나타났다. 또한 이 값들은 혼합비를 추적자로 ²²⁸Ra/²²⁶Ra 방사능비를 이용하고, CW를 제외한 두 개의 단성분만을 이용하여 추정된 혼합비율과 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 CW의 영향을 받을 것으로 생각되는 우기나 단성분간 정확한 혼합비를 추정이 요구될 경우 혼합비를 추정에는 세 단성분을 이용하여, ²²⁸Ra/²²⁶Ra 방사능비와 염분이 동시에 고려되어야 한다.

In order to study origin and mixing ratio of surface water masses in the East China Sea (ECS), the South Sea of Korea and the Korea Strait, we use three end-member mixing equation. We use ²²⁸Ra/²²⁶Ra activity ratio and salinity as two conservative tracer and the Changjiang Water (CW), the Yellow Sea Water (YSW), and the Kuroshio Water (KW) as three end members. Results show that ECS surface water includes all the three end-member water, in the order of KW (50–90%), YSW (20–40%) and CW (0–20%) in August 1997. Also, the amount of CW can be approximately estimated by salinity alone. Surface water of the South Sea and the Korea Strait includes very small or almost no CW (below 2% except station 9) in May 1998. Thus in the Korea Strait mixing ratio could be estimated by ²²⁸Ra/²²⁶Ra activity ratio tracer alone between two end-members, KW and YSW. However, in order to get more accurate results or in case of rainy season, a mixing equation based on two tracers and three end-members is required.

서 론

동중국해는 중국의 동쪽에 있으며, 북쪽에는 황해(Yellow Sea)가 있다. 또한 대부분 수심 200 m이내의 대륙붕 지역에 자리잡고 있으며, 남쪽 대륙사면을 따라 쿠로시오(Kuroshio)가 흐르고 있다. 또한 장강(Changjiang, 양자강)은 9.282×10^{11} ton/yr의 육수를 황해와 동중국해로 공급한다(Zhang *et al.*, 1994).

김 등(1991)은 1980년 6월 동중국해와 제주해협 지역을 조사한 결과 장강에 의해 저염화된 장강 희석수가 동중국해를 거쳐 제주해협을 통과하여 남해까지 확장됨을 확인하였다. 김 등(1991)이 인용한 Yu *et al.*(1983)의 1981년 8월 자료는 동중국해에 장강수

가 직접 영향을 주고 있는 것으로 나타났다. 김 등(1998)은 저염화현상이 제주해협과 제주도 남부해역을 포함하는 제주도 인근해역까지 나타나고 있는 것을 확인하였다. Bang and Lie(1999)의 수치모델 모의실험에 의한 결과도 이상의 연구결과와 비슷하다. 이러한 결과들을 종합하면 여름철에 장강수가 동중국해에 저염화현상을 일으키는 것은 확실하며, 제주해협을 거쳐 남해까지도 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

Nozaki *et al.*(1989)는 대마난류가 강에서 황해와 동중국해로 유입된 육성물질을 대양으로 운반하는 주요 이동수단이 될 것이라고 지적하였으며, 이와 김(1998)은 저염수가 동중국해는 물론 동해까지 영향을 주며, 한반도 주변해역의 생태계에 영향을 줄 것이라고 지적하였다. 따라서 대한해협에서의 저염수의 혼합비율 추정이 다수 연구자에 의해 수행되었다.

*Corresponding author: khkim@cuvic.cnu.ac.kr

Nozaki *et al.*(1989)는 동중국해에서 수괴간 혼합비를 추정에 대한 추적자로 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비의 사용가능성에 대해 토의하고, Okubo(1980)의 대한해협 동수도 자료를 이용하여 대마난류에 $20 \pm 6\%$ 의 대륙붕수(동중국해 또는 황해 해수)가 포함되어있다고 추정하였다.

이와 김(1998)은 대한해협을 통과하는 대마난류수에는 쿠로시오수(Kuroshio Water, KW)와 장강희석수(Changjiang Dilute Water, CDW)로 구성되었으며, $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비를 이용하여 여름철인 9월 자료의 경우 $58 \pm 3\%$ 겨울철인 2월의 경우 $10 \pm 3\%$ 의 CDW가 포함되었다고 추정하고, CDW가 동해 저염해수의 기원일 것으로 추정하였다.

김(1999)은 동중국해에서 얻어진 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비와 Nozaki *et al.*(1989)와 이와 김(1998)의 식을 이용하여 동중국해의 해수에 존재하는 장강희석수의 비율(14~87%)을 추정하였다. 양과 이(1999)는 라듐 동위원소를 이용하여 동중국해와 남중국해에서 표층수의 조성을 연구하였다.

이상의 연구에서 문제점은 첫째로 “장강희석수(CDW)”를 단성분으로 사용한 점이다. CDW는 장강수(Changjiang Water, CW)와 황해수(Yellow Sea Water, YSW), 또는 CW와 KW, 혹은 이 세 성분 모두가 임의의 성분으로 혼합되어 생성되므로 염분, $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비 및 기타 화학성분의 값이 시간과 공간에 따라 변한다. 따라서 CDW는 단성분으로 사용할 수 없다. 두 번째 문제점은 이들 연구는 두 단성분간 혼합비를 추정에 사용되는 Nozaki *et al.*(1989)와 이와 김(1998)의 혼합방정식을 이용했다는 점이다. 그러므로 CW가 유입되는 여름철 동중국해와 같이 3개 이상의 단성분으로 구성된 수괴에 대해서 사용할 수 없다. 이 혼합방정식은 겨울철 대한해협 수괴처럼 CW가 없거나 매우 적게 포함된 경우에 제한적으로 사용할 수 밖에 없다.

이 연구에서는 위 여러 연구에서 나타난 문제점을 극복하기 위하여 대한해협과 남해 그리고 동중국해 모두에 적용될 수 있는 단성분수괴를 결정하고, 한반도 주변해역의 수괴혼합비를 추정에 적합한 추적자를 선정하며, 단성분 수괴 사이의 혼합비율을 추정하고 연구지역의 해수혼합과정을 유추하고자 한다.

시료채취 및 분석

동중국해 해수시료 채취는 해양공동조사선 탐양호를 이용하여 1997년 8월 19일부터 9월 1일까지 북위 $30^{\circ}00' \sim 34^{\circ}00'$, 동경 $124^{\circ}00' \sim 127^{\circ}00'$ 에서 이루어졌다(Fig. 1). 남해 및 대한해협의 시료는 1998년 5월 25일에서 28일 북위 $33^{\circ}50' \sim 34^{\circ}55'$, 동경 $128^{\circ}00' \sim 129^{\circ}05'$ 해역(Fig. 1)에서 탐양호를 이용하여 채수하였다. 라듐 동위원소 측정을 위하여 해수시료 20리터를 채수하였다. 해수시료는 실험실로 옮겨진 후 즉시 Whatman GF/C filter를 이용하여 여과한 뒤 라듐동위원소를 $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ 형태로 침전시켰다. 동중국해 시료에 대해서는 BaSO_4 의 회수율을 알아보기 위하여 ^{133}Ba 을 일정량(1.713 dpm) 첨가하였다. 이 방법으로 측정된 BaSO_4 의 회수율은 95%이상이었다.

회수된 $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ 는 기초과학지원연구소가 보유한 35%의 상대효율을 가진 well-type HPGc 검출기를 이용하여 측정하였다. 검출기의 효율결정은 Kim and Burnett(1983) 방법을 사용하였고, 효

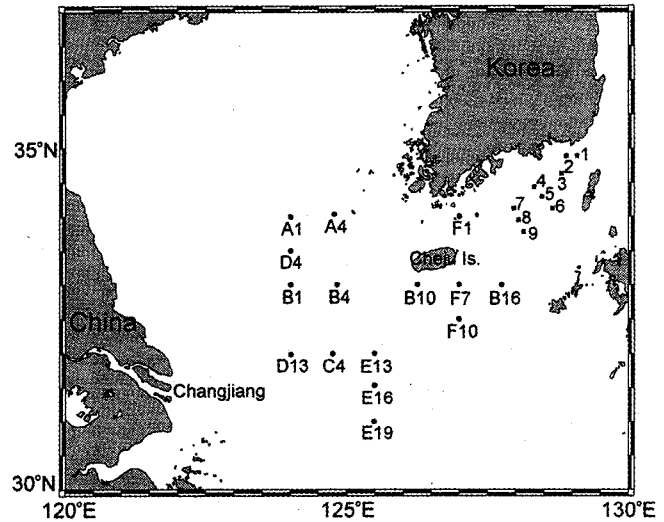


Fig. 1. Map showing sampling stations in the East China Sea (ECS), the South Sea and the west channel of the Korea Strait. Sampling was conducted by R.V. Tamyang in August 1997 for the ECS (soild circle) and in May 1998 for the South Sea and the Korea Strait (soild rectangle).

율결정과 검증은 IAEA와 EPA 표준시료를 이용하여 수행하였다.

결 과

97년 8월 동중국해에서 얻어진 자료를 Table 1에 나타내었다. 염분은 27.00~33.84 범위에 존재하였다. 이 지역 표층수의 ^{226}Ra 는 4.10~6.86 mBq/l, ^{228}Ra 는 5.58~11.65 mBq/l의 값을 갖는다. $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비는 0.99~2.25의 범위를 가진다. Table 2는 98년 5월 남해와 대한해협 서수도에서 관측된 자료들을 나타낸다. 모든 시료가 33이상의 염분을 가지며, ^{226}Ra 는 1.42~2.47 mBq/l, ^{228}Ra 는 2.23~5.05 mBq/l의 값을 갖는다. $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비는 1.27~2.05의 범위를 가진다.

토 의

단성분 수괴의 결정

쿠로시오는 큐슈 남서쪽에서 분기되어 쿠로시오 분기해류(Kuroshio Branch Current, KBC)를 생성하고, 남해로 유입된다. 이 해류는 남해에서 동진하여 대한해협을 거쳐 동해로 유입되는 대마난류(Tsushima Warm Current, TWC)를 형성한다(Lie and Cho, 1997; 이, 1997). 이들 연구에 의하면 계절적으로 KBC의 일부가 제주도 서쪽해역을 돌아 남해로 유입되는 것이 관찰되었다.

Zhang and Weng(1996)은 1992년 5월 자료를 이용하여 황해의 수괴를 8개로 구분하였다. 그 중 표층수괴는 중앙부에 황해수(Yellow Sea Water, YSW)가 존재하고, 남동쪽에 쿠로시오 기원의 황해난류수(Yellow Sea Warm Current Water, YSWCW), 남서쪽에는 CW에 의해 희석된 장강희석수(Changjiang Diluted Water, CDW), 북동쪽에는 한국서안수(West Coastal Water of Korea, WCWK)가 존재한다. 중국연안에는 북서쪽에 청산냉수(Chengshan Cape Cold Water, CCCW), 동부에는 장수연안수(Northern Jiangu

Table 1. Radium isotopes and salinity data from the East China Sea in August 1997. Bq (Becquerel) is SI unit of radioactivity which means decay per second.

Station	Latitude(N)	Longitude(E)	Salinity	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²²⁸ Ra/ ²²⁶ Ra
				(mBq/l)	(mBq/l)	
A01	33°59'84"	124°00'04"	29.29	4.87±0.23	9.36±0.48	1.92±0.13
A04	34°22'24"	124°46'84"	29.42	5.06±0.22	10.97±0.47	2.17±0.13
B01	33°00'07"	124°00'04"	29.37	4.53±0.23	9.14±0.48	2.02±0.15
B04	32°59'93"	124°49'92"	30.66	5.32±0.18	7.70±0.33	1.45±0.08
B10	33°00'14"	126°15'20"	29.55	4.57±0.21	8.56±0.41	1.87±0.13
B16	32°59'95"	127°45'25"	33.84	5.62±0.26	5.58±0.39	0.99±0.08
C04	32°00'00"	124°45'13"	31.59	6.86±0.33	8.50±0.60	1.24±0.11
D04	33°30'07"	124°00'05"	30.04	4.84±0.24	10.92±0.54	2.25±0.16
D13	31°59'34"	124°00'41"	27.00	6.33±0.30	11.65±0.58	1.84±0.13
E13	32°00'28"	125°29'82"	29.68	5.68±0.27	8.82±0.50	1.55±0.11
E16	31°32'00"	125°29'97"	30.06	4.10±0.19	9.21±0.42	2.25±0.15
E19	30°59'91"	125°29'31"	29.95	5.15±0.23	9.50±0.46	1.84±0.12
F01	34°00'20"	125°00'36"	31.60	4.23±0.19	8.69±0.43	2.06±0.14
F07	33°00'04"	127°00'08"	30.93	5.73±0.24	9.47±0.49	1.65±0.11
F10	32°30'23"	127°00'04"	33.35	4.75±0.21	7.30±0.39	1.54±0.11

Table 2. Radium isotopes and salinity data from the South Sea and the Korea Strait in May 1998.

Station	Latitude(N)	Longitude(E)	Salinity	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²²⁸ Ra/ ²²⁶ Ra
				(mBq/l)	(mBq/l)	
1	35°55'	129°05'	34.20	1.92±0.18	3.42±0.28	1.78±0.23
2	34°55'	128°54'	33.65	1.42±0.18	2.23±0.28	1.58±0.29
3	34°40'	128°49'	34.05	2.07±0.23	2.62±0.35	1.27±0.22
4	34°28'	128°21'	33.70	1.83±0.17	3.42±0.23	1.86±0.21
5	34°20'	128°29'	34.15	2.47±0.18	5.05±0.32	2.05±0.20
6	34°10'	128°40'	34.00	2.37±0.17	3.68±0.22	1.56±0.14
7	34°10'	128°00'	33.61	2.10±0.15	4.35±0.22	2.07±0.18
8	34°00'	129°05'	33.95	1.85±0.18	2.42±0.37	1.31±0.24
9	33°50'	128°10'	33.00	2.05±0.17	3.23±0.23	1.58±0.17

Coastal Water, NJCW)가 존재한다. WCWK는 한국연안을 따라 남하하여 남해로 유입되어 남해연안수(South Sea Coastal Water, SSCW)를 구성하는 것으로 보인다.

남해와 대한해협은 해수는 대마난류수(Tsushima Warm Current Water, TWCW)와 SSCW로 구성되어 있다.

이와 같은 사실들로부터 동중국해 표층수, 남해수 및 대한해협 유입수는 장강수(Changjiang Water, CW), 황해수(Yellow Sea Water, YSW) 그리고 쿠로시오수(Kuroshio Water, KW) 세 단성분이 혼합하여 생성되었다고 볼 수 있다.

Fig. 2는 이상의 연구결과를 토대로 동중국해 해수를 구성하는 단성분과 각각의 단성분간 발생 가능한 혼합과정을 유추한 모식도이다. 단성분으로 YSW, KW 그리고 CW가 존재하며, 각 수괴간 혼합 및 이동과정은 아직 불확실하다. 각 단성분간 혼합비율은 동중국해에서의 혼합과정을 이해하는데 중요한 단서이다.

추적자의 선택

수괴를 구분하는 추적자로는 염분, 수온, 그리고 라듐동위원소 방사능비를 비롯하여 여러 물리, 화학 그리고 생물학적 추적자들이 사용되고 있다. 염분은 수온과 더불어 수괴를 구분하는데 사용되는 주요한 추적자이다. 특히 CW의 염분은 0이며, KW의 염분은 34.67(Nozaki *et al.*, 1991), YSW의 염분은 32.32로 다른 두

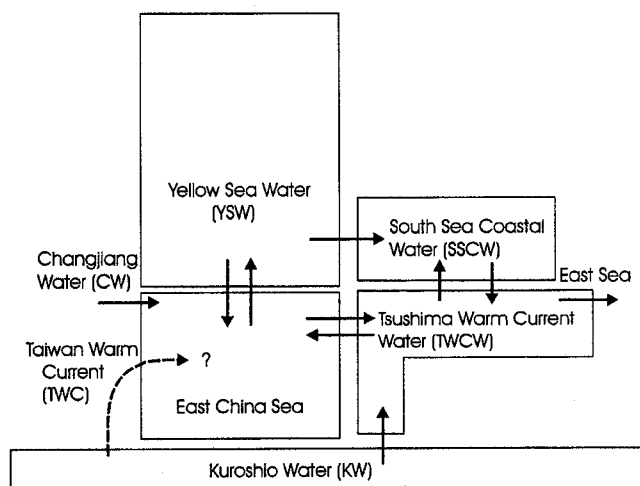


Fig. 2. The schematic diagram of the possible transfer pathways between the end-member water masses, Yellow Sea Water (YSW), Changjiang Water (CW), and Kuroshio Water (KW).

수괴와 CW의 특징을 명확히 구분할 수 있으므로 CW의 혼합과정에 대한 추적자로 사용하기에 적합하다. 수온은 표층수에서 비보존적(non-conservative)일 수 있다. 또한 동중국해에서 각 수괴간

수온차가 다른 추적자에 비해 크지 않고(약 2배, Nozaki *et al.*, 1991) 수괴간 혼합에 민감하지 않아서 이 지역에서 두 수괴간 혼합과정 추적자로 적합하지 않다.

라뎀동위원소는 연안수와 외양수의 혼합에 대한 연구에 많이 이용되고 있다(Reid, 1984; Moore *et al.*, 1986; Nozaki *et al.*, 1991; Schmidt and Reys, 1996). 특히 Nozaki *et al.*(1989)는 동중국해 대륙붕수의 ^{228}Ra 방사능값이 KW에 ^{228}Ra 방사능값에 비해 약 40배나 높다고 보고하였다. 이러한 사실은 ^{228}Ra 이 KW와 대륙붕수간 혼합에 민감하게 변화할 것이며, 이 지역의 혼합과정 연구를 위한 추적자로 사용될 수 있음을 나타낸다.

$^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비 또는 염분 단독으로 세 단성분을 구별할 수 없다. Nozaki *et al.*(1991)의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비를 이용하여 혼합비율을 추정할 경우 CW는 YSW와 KW의 혼합에 의해 만들어진 것으로 나타난다. 또한 염분만으로는 YSW와 KW를 구분하기 어렵다. 이 문제점은 두 추적자로 염분과 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비를 함께 사용하면 세 단성분간에 뚜렷한 차이가 나타나게 되어 해결될 수 있다.

단성분 값의 추정

단성분 값 추정에는 Nozaki *et al.*(1991)가 1987년 5월에서 6월에 걸쳐 쿠로시오(대만 동부와 큐슈 남부), 황해, 그리고 동중국해에서 측정한 자료와 Elsinger and Moore(1984)의 1980년 여름의 장강자료를 이용하였다.

KW의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비와 염분은 Nozaki *et al.*(1991)가 제시한

$$\begin{aligned} ^{226}\text{Ra} &= 1.09 \text{ mBq/l} \\ ^{228}\text{Ra} &= 0.28 \text{ mBq/l} \\ ^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra} &= 0.25 \\ \text{Salinity} &= 34.67 \end{aligned}$$

값을 사용하였으며, CW 단성분에 대해서는

$$\begin{aligned} ^{226}\text{Ra} &= 1.67 \text{ mBq/l} \\ ^{228}\text{Ra} &= 3.17 \text{ mBq/l} \\ ^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra} &= 1.90 \\ \text{Salinity} &= 0 \end{aligned}$$

을 이용하였다. 이 값은 Elsinger and Moore(1984)가 1980년 여름에 장강하구와 근해에서 얻은 값을 기초로 Nozaki *et al.*(1991)가 추정한 값이다. CW를 단성분으로 사용하기 위해서는 강에서 시간에 따른 라뎀동위원소의 농도변화와 라뎀이 하구에서 보이는 비보전적 행동에 대한 토의가 필요하다. 장강하구의 라뎀동위원소 분석값은 매우 적으며, Elsinger and Moore(1984)의 자료만이 다수 연구자에 의해 인용되고 있다. 따라서 장강수에서의 라뎀동위원소의 시간에 따른 농도변화여부와 범위에 대해 토의가 불가능하다. 그러나 이들의 연구시기와 이 연구의 시료채취시기가 비슷하여 강물에서의 라뎀동위원소 값 변화에 관련없이 이 연구를 위한 CW의 단성분 값으로 사용 가능하다고 생각한다.

Nozaki *et al.*(1991)이 추정한 CW의 라뎀동위원소 값은 강하구에서 라뎀동위원소의 비보전적 행동을 고려하여 얻어진 값이다. 또한 Elsinger and Moore(1984)의 연구에 따르면 염분 16이하의 저

염지역은 30 mg/l 이상의 입자태를 포함하며, 염분 4.5에서 16사이에서 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비가 거의 일정한 값(~ 1.9)을 가지고, 9에서 최대 라뎀동위원소 값을 가진다. 또한 염분 9이상에서 최대 염분까지 ^{226}Ra 는 대륙붕수와 혼합에 의해 감소하는 경향을 보인다. 대륙붕지역의 정점에서는 염분 16이상이고, 3 mg/l 이하의 입자태를 포함하고 있으며 라뎀동위원소비는 증가하는 경향을 보인다. 이러한 사실들을 종합할 때 장강하구에서 라뎀동위원소의 주된 공급작용인 입자로부터 탈착은 저염의 강하구에서 주로 일어나며, 강하구를 벗어난 고염의 대륙붕 지역에서는 그다지 큰 영향을 주지 못하는 것으로 생각된다.

YSW의 값은 Nozaki *et al.*(1991)의 황해 서남부 해역 6개 정점의 값을 평균한

$$\begin{aligned} ^{226}\text{Ra} &= 2.38 \text{ mBq/l} \\ ^{228}\text{Ra} &= 8.43 \text{ mBq/l} \\ ^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra} &= 3.54 \\ \text{Salinity} &= 32.32 \end{aligned}$$

이다.

$^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비와 염분을 이용한 혼합비율의 추정방법

동중국해와 대한해협 해수의 기원은 크게 CW, YSW 그리고 KW 3가지로 볼 수 있다. 따라서 혼합방정식은 3개의 단성분에 대한 혼합을 표현할 수 있어야 한다. 3개의 단성분 수괴(A, B, C)가 f_A, f_B, f_C 의 비율로 혼합하여 생성된 수괴 M에서 성분 X는 식 1의 혼합방정식으로 나타낼 수 있다.

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

서로 다른 비율의 혼합은 비선형적으로 나타난다. 따라서 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비를 이용한 혼합비율의 추정은 1차적으로 식 1에 각 단성분에 대한 $^{228}\text{Ra}, ^{226}\text{Ra}$ 값과 염분을 대입한 후 혼합비율을 달리 하면서 계산된 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비와 염분을 구하여 혼합도(mixing diagram)를 그린 후 혼합도에 실측자료를 도시함으로써 대강의 혼합비율을 얻을 수 있다. 각 단성분사이의 더욱 정확한 혼합비율은 반복회귀법(iteration method)에 의해 구할 수 있을 것이다.

혼합비율 추정과 혼합과정

97년 8월 자료와 Nozaki *et al.*(1991)의 자료를 Fig. 3에 나타내었고, Fig. 3으로부터 얻어진 혼합비율을 Table 3에 나타내었다. 이 시기에 CW의 혼합비율은 장강하구에 인접한 정점 D13에서 21%로 가장 높았고, KW의 혼합비율은 쿠로시오에서 분리된 KBC가 북상하는 경로에 위치해 있는 정점 B16에서 87%로 가장 높았다. 이 두 정점 이외의 다른 정점들은 혼합비율의 공간적 분포에 경향성이 없어 수괴의 혼합과정을 유추할 수 없었으며, 이것은 이 지역의 수괴혼합과정이 매우 복잡하게 일어난다는 것을 의미한다.

이 시기에 연구지역의 정점들 대부분은 50~80%의 KW를 포함하고, 20%~50%의 YSW를 그리고 CW를 5~15% 포함하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 종합할 때 이 시기에 동중국해 표층수의 경우 KW, YSW 그리고 CW의 순으로 영향을 주는 것으로 보인다.

Nozaki *et al.*(1991)에 의해 얻어진 자료에 의하면 중국연안의

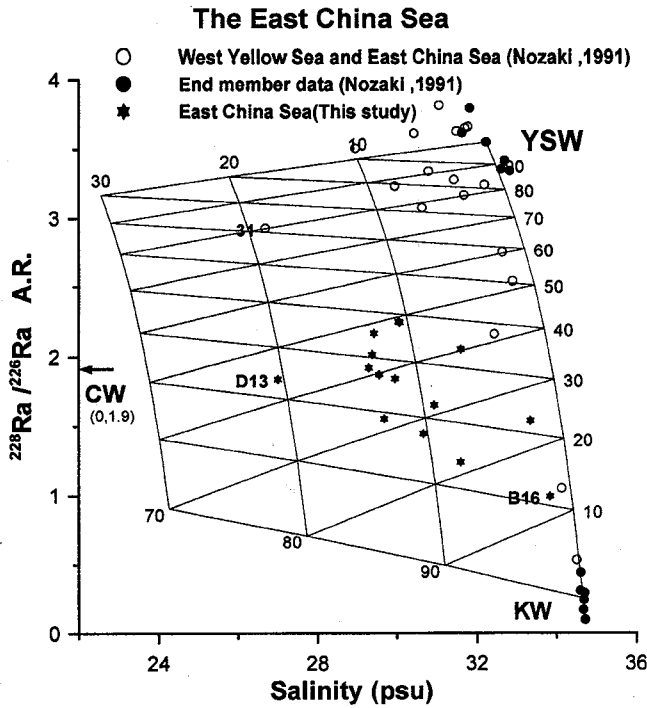


Fig. 3. Mixing diagram for the East China Sea data in August 1997 (this study) and from May to June 1987 by Nozaki *et al.*(1991). Most samples are affected by Changjiang Water (CW).

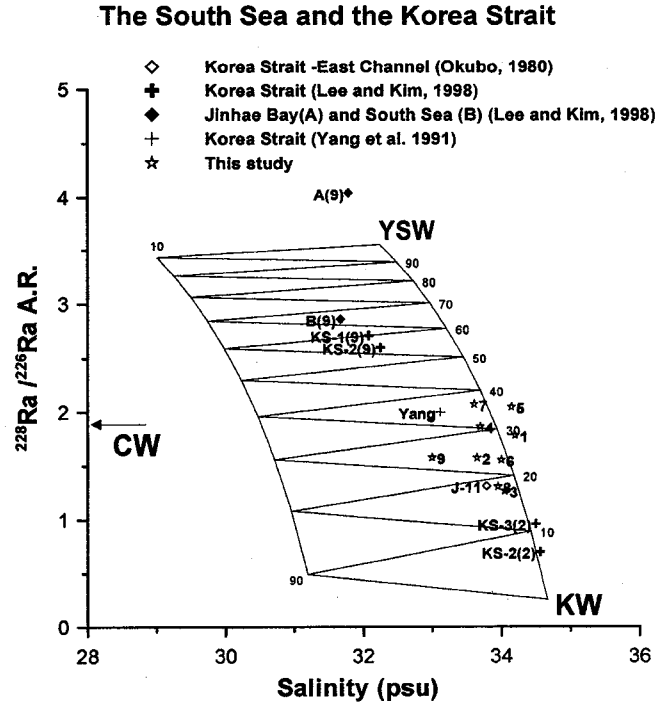


Fig. 4. Mixing diagram for the South Sea and the Korea Strait.

정점 31은 약 20%의 CW를 포함하고, 나머지 정점은 10%이하의 CW를 포함하고 있는 것으로 나타났다. 전체적으로 볼 때 97년 8월말 보다 KW와 CW의 혼합비율은 작게 나타나는 반면 YSW의 혼합비율은 높게 나타났다. 이것은 Nozaki *et al.*(1991)의 시료채집시기가 5월에서 6월로 우기 이전이고, 많은 정점이 본 연구해역보다 북서쪽 해역에 위치하기 때문에 CW와 KW의 영향을 적게 받았기 때문으로 보인다. 양과 이(1999)는 1989년 7월과 8월 사이 동중국해에서 채집된 시료에 대해서 라듐동위원소와 염분을 각각 사용하여 KW의 비율을 추정한 결과 장강하구에서 가장 가

까운 E10의 경우 34~40%, 쿠로시오에 인접한 정점 E11의 경우 약 86~95%, 그리고 남해 입구 제주도 동쪽해역에 위치한 정점 E12의 경우 약 68~73%의 KW를 포함하고 있다고 보고하였다. 우리 연구의 정점 D13보다 동쪽에 위치한 정점 E10에서 KW의 비율이 적은 것으로 나타났다. 이러한 결과들을 종합하면 우기에는 동중국해의 넓은 지역에 대해 CW가 영향을 주며, KW와 YSW의 혼합비율도 시간에 따라 변화할 수 있음을 의미한다. KW와 YSW의 혼합비율의 시간적 변화와 CW의 유입량 변화가 두 수괴 간 혼합비율에 영향을 주는지는 추가적인 연구를 필요로 한다.

Table 3. Mixing ratio of each end member water by 3 component mixing equation in the East China Sea (August 1997). Last column is the ratio of CW calculated from salinity and 2 end-member only (CW and KW). The results from two methods are similar.

Station No.	3 end member-mixing equation			2 end member-mixing equation
	Kuroshio Water	Yellow Sea Water	Changjiang Water	Changjiang Water
A01	58	28	14	15.5
A04	51	36	13	15
B01	56	31	13	15
B04	72	17	11	12
B10	60	26	14	15
B16	87	11	2	2
C04	78	14	8	9
D04	51	38	11	13
D13	55	24	21	22
E13	68	19	13	14
E16	51	38	11	13
E19	62	26	12	14
F01	60	33	7	9
F07	68	23	9	11
F10	75	22	3	4

Table 4. Mixing ratio of each end member water by 3 component mixing equation in the South Sea and the Korea Strait (May 1998). Last two columns are the mixing ratio calculated by the model of Nozaki *et al.*(1989) and Lee and Kim (1998). Results from both methods are similar because the effect of CW is negligible.

Station No.	3 end member-mixing equation			2 end member-mixing equation	
	Kuroshio Water	Yellow Sea Water	Changjiang Water	Kuroshio Water	Yellow Sea
1	72	28	0	71	29
2	75	23	2	76	24
3	83	17	<1	83	17
4	69	30	1	69	31
5	65	35	0	64	36
6	77	23	<1	77	23
7	63	36	1	64	36
8	82	18	1	82	18
9*	74	22	4	76	24

98년 5월 대한해협과 남해에서 채취된 시료의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비를 Fig. 4에 나타내었고, 추정된 혼합비율은 Table 4에 나타내었다. 98년 5월 시료에서 KW의 양은 65~85% 범위에 존재하는 것으로 나타났다. 대부분의 정점이 KW의 단성분 값과 YSW의 단성분 값을 연결하는 혼합선상에 존재하며, CW에 의한 영향은 5%미만으로 나타났다.

98년 5월 자료는 전반적으로 남해연안에 위치한 정점이 외양에 존재하는 정점보다 KW의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 그러나 정점 9는 가장 외양에 존재하면서 가장 많은 CW를 포함하고 있으며, KW의 양도 정점 8 보다 적다. 이러한 현상은 이 시기의 인공위성 해표면온도(SST)사진(한국해양연구소 해양자료서비스 제공, <http://www.kordi.re.kr/orsd/index.htm>)에서 볼 수 있듯이 TWCW와 연안수의 경계면이 불규칙하게 발달하는 현상으로 설명될 수 있다. 또한 YSW 혹은 CW가 TWC상에 패취(patch) 형태로 포획 운반될 가능성도 배제할 수 없다.

대한해협에서 측정된 기존의 자료들도 이 지역의 해수가 5%미만의 CW를 포함하고 있는 것을 보여준다. 이들 자료들은 겨울철(이와 김, 1998)이 여름철(양 등, 1992; Okubo, 1980)보다 KW의 양을 더 많이 포함하고 있다는 것을 보여준다. 이러한 결과들을 종합할 때 대한해협에 존재하는 해수에는 KW의 양이 절대적으로 많으며, 겨울이 여름보다 높은 비율로 KW를 포함한다는 것을 알 수 있다.

남해 및 대한해협에서 남해 내만수와 낙동강의 영향

이와 김(1998)의 자료에 의하면 진해만의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비가 YSW의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비보다 높게 나타나며, 진해만의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비는 대한해협 해수에서 얻어진 자료들이 나타내는 혼합선상에 존재하지 않는다. 이것은 만에서 ^{228}Ra 이 농축되었기 때문으로 생각된다. 그러나 거제도 앞 남해에서 얻어진 시료의 경우 대한해협 해수에서 얻어진 자료들이 나타내는 혼합선상에 존재한다. 이것은 진해만의 해수가 대한해협을 흐르는 해수에 양적인 면에서 큰 영향을 주지는 못한다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 이와 김(1998)의 결론과도 일치한다. 그러나 남해에 존재하는 만들의 해수가 남해외양 해수에 얼마나 영향을 주는지는 추가적인 연구가 필요하다.

98년 5월의 자료에서 낙동강 하구에 인접한 정점 2나 부산 앞

바다에 위치한 정점 1의 경우에도 쿠로시오 단성분과 황해수 단성분간의 혼합선상에 위치한다. 이것은 이 시기에 이 지역에서 낙동강의 역할이 무시될 수 있음을 의미한다.

혼합비율 추정방법의 선택

단성분간 혼합비율을 추정하기 위하여 Nozaki *et al.*(1989), 이와 김(1998), 김(1999) 그리고 양과 이(1999)는 하나의 성분-즉 라뎀동위원소-과 두 개의 단성분-CDW와 KW-을 표현하는 혼합방정식을 이용하였다. 그러나 이 혼합방정식을 이용할 경우 혼합비율 추정방법 단원에서도 전술하였듯이 CW가 YSW와 KW의 혼합에 의해 만들어진 것으로 나타난다. 따라서 CW가 포함되지 않거나 극히 미미한 양이 포함된 제한된 경우에 사용 가능하다. 따라서 이 연구에서는 기존의 연구와는 달리 라뎀동위원소와 염분을 동시에 사용하고, 세 개의 단성분을 구별하여 각 단성분간 혼합비율을 구하였다. 그러나 적용지역의 특성에 따라 혼합비율 추정방법은 단순화될 수 있다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 CW의 혼합비율은 염분에 의해 가장 잘 나타난다. 따라서 염분만으로도 CW의 혼합비율을 유의한 값 범위내에서 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 이 경우 CW에 대응하는 단성분으로 YSW와 KW중 어느 것을 선택하느냐에 따라 CW의 혼합비율이 변화한다. 동중국해 시료에 대해 KW를 단성분으로 선택하여 염분만으로 CW의 혼합비율을 구한 결과를 Table 3에 나타내었다. 결과는 세 개의 단성분을 이용한 혼합방정식으로 구한 CW의 혼합비율보다 최대 30%까지 높게 나타났으나 그 차이는 1~2% 포인트에 불과하였다. 따라서 동중국해의 경우 CW의 대략적인 혼합비율은 염분만으로도 추정이 가능하나, 세 단성분간 혼합비율 추정이 필요할 경우 단성분으로 CW, KW와 YSW를 선택하고, 추적자로서 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비와 염분을 모두 사용하여야 한다.

양과 이(1999)는 동중국해에서 두 개의 단성분으로 CDW와 KW를 사용하고, 혼합비율 추정을 위한 성분으로 라뎀 동위원소와 염분을 각각의 추적자로 사용하여 KW의 혼합비율을 구하였다. 라뎀 동위원소와 염분에 대해 서로 다른 혼합방정식을 사용해 구해진 각각의 KW 혼합비율간의 차이가 대륙붕안쪽으로 갈수록 커지는 것으로 보고하고 대륙붕에서 표층수와 중층수가 혼합한 결과 일 것으로 예상하였다. 그러나 연구지역이 대부분 동중국해에 위

치한 우리 연구의 결과는 라듐동위원소와 염분을 추적자로 사용하고 세 단성분 혼합방정식을 이용한 결과와 염분만을 이용한 결과에서 CW의 혼합비율이 큰 차이를 보이지 않았으며, 대륙붕안 쪽으로 갈수록 차이가 커지지도 않았다. 이러한 상충된 결과는 혼합비율을 추정하는 방법의 차이와 단성분 값의 결정방법차이 때문으로 생각된다.

대한해협과 남해의 경우 CW의 혼합비율이 5%미만이다. 따라서 CW의 영향을 무시하고 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비만으로 KW와 YSW의 혼합비율을 구할 수 있다. 그러나 CW의 영향이 무시될 수 없는 경우 세 개의 단성분을 이용한 혼합방정식의 이용이 필수적이다.

대한해협에서 KW와 YSW 두 단성분만을 선택하고, Nozaki *et al.*(1989)과 이와 김(1998)의 식에 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비를 대입하여 두 수괴간의 혼합비율을 추정한 결과 세 개의 단성분을 이용하여 구한 혼합비율과 큰 차이를 보이지 않는다(Table 4). 이러한 결과는 이 지역에 대한 CW의 영향이 매우 작기 때문일 것이다.

또한 이와 김(1998)에 따르면 9월 시료의 경우 58% 그리고 2월 시료의 경우 10%의 CDW를 포함하는 것으로 보고하였다. 이들 자료를 세 개의 단성분을 이용한 혼합도(Fig. 4)에서 각 단성분의 혼합비율을 구할 경우, 9월 자료의 경우 52와 58%를, 2월 자료의 경우 7과 11%의 YSW를 포함하고 있는 것으로 나타나, 서로 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 이와 김(1998)이 사용한 CDW의 단성분값이 이 연구에서의 YSW의 단성분값과 매우 비슷하기 때문이다.

이러한 결과들을 종합할 때 대한해협 유입수의 경우 겨울철처럼 CW의 유입량이 무시될 수 있는 경우 KW와 YSW 두 단성분만을 선택하고 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비만으로 혼합비율을 구할 수 있다.

결 론

기존 연구들과는 달리 동중국해와 남해 그리고 대한해협에 존재하는 모든 수괴에 적용될 수 있는 단성분 수괴로 CW, KW와 YSW를 선택하고, 이들 사이의 혼합비율 추정을 위한 추적자로 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비와 염분을 함께 이용하였다.

이 모델을 이용하여 각 수괴사이의 혼합비율을 추정된 결과 1997년 8월 동중국해 표층수의 경우 KW(50~80%), YSW(20~50%) 그리고 CW(5~15%)의 순으로 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 그러나 각 단성분간 혼합과정은 시공간적으로 매우 복잡하여, 현재까지의 자료만으로 밝히기는 어렵다.

남해와 대한해협의 경우 주로 KW와 YSW로 구성되어 있으며, 겨울철이 여름철보다 많은 양의 KW를 포함하고 있으며, CW의 양은 5%미만으로 적게 나타났다. 이러한 결과들로부터 한국 주변 해역에서 세 단성분간 혼합과정과 저염수 이동과정에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

연구지역의 수괴에 대한 각 단성분간 혼합비율을 추정하기 위하여 세 개의 단성분을 선택하고, $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능비와 염분을 추적자로 이용하는 것이 기존의 방법들보다 일반적으로 정확한 결과를 준다. 그러나 특수한 상황에서는 단순한 방법이 적용될 수 있다. 즉 CW의 영향을 많이 받는 지역에서 CW의 혼합비율은 염분만으로 추정이 가능하며, CW의 영향이 매우 작거나 없다고 생각되는 지역에서는 KW와 YSW를 단성분으로 하고, 기존의 혼합

방정식(Nozaki *et al.*, 1989; 이와 김, 1998)이 적용될 수 있다.

사 사

이 연구는 1997년도 교육부의 해양수산분야 학술연구 조성비의 지원(KIOS-97-M-05, 김기현; 다수의 추적자를 사용한 동해유입수의 기원과 혼합과정 연구)으로 수행된 것입니다. 이 논문의 심사과정에서 유익한 지적을 해주신 부산대학교 이동섭 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 시료채취에 도움을 주신 탐양호 선장과 선원 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 김 구, 노홍길, 이상호, 1991. 하계 제주도 주변 해역의 수계 및 해수환경. 한국해양학회지, **26**: 262-277.
- 김성수, 고우진, 조영조, 이필용, 전경암, 1998. 1996년 여름철 남해 표층수의 이상저염수 현상과 영양염류의 분포특성. 한국해양학회지, **3**: 165-169.
- 김향배, 1999. Ra 동위원소를 이용한 남해와 중국주변해역에서 수괴의 기원 및 해수의 체류시간. 부경대학교. 석사학위논문. 53 pp.
- 양한섭, 권영안, 김규범, 김성수, 1992. 한국 동해 표층수중 ^{226}Ra 과 ^{228}Ra 의 농도분포. 한국수산학회지, **25**: 399-405.
- 양한섭, 이동섭, 1999. 여름철 동중국해 및 남중국해 표층수의 Ra 동위원소를 이용한 수계분석. 한국해양학회지, **4**: 305-311.
- 이동섭, 김기현, 1998. ^{228}Ra 를 이용한 이상 저염 대마난류수의 기원 추적 연구. 한국해양학회지, **3**: 175-182.
- 이흥재, 1997. 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환. 한국해양연구원, BSPN 00319-964-1, 563 pp.
- Bang, Inkweon and H.-J. Lie, 1999. A Numerical Experiment on the Dispersion of the Changjiang River Plume. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **34**: 185-199.
- 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. Coastal. Shelf Sci.*, **18**: 601-631.
- Kim, K.H. and W.C. Burnett, 1983. Gamma-ray Spectrometric determination of uranium series nuclides in marine phosphorites. *Anal. Chem.*, **55**: 1797-1800.
- Lie, H.-J. and C.-H. Cho, 1997. Surface current fields in the eastern East China Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **32**: 1-7.
- 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**: 2574-2580.
- 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 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **16**: 1297-1300.
- 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**: 1265-1272.
- Okubo, T., 1991. ^{228}Ra in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **36**: 263-268.

- Reid, D.F., 1984. Radium variability produced by shelf-water transport and mixing in the western Gulf of Mexico. *Deep Sea Res.*, **31**: 1501–1510.
- Schmidt, S and J.-L. Reyss, 1996. Radium as internal tracer of Mediterranean Outflow Water. *J. Geophys. Res.*, **101**: 3589–3596.
- Zhang, Jin, W.-W. Huang, and M.-G. Liu, 1994. Geochemistry of Makor Chinese river-estuary system. In: *Oceanography of China Seas*, edited by Zhou D. *et al.*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands, pp. 179–188.
- Zhang, Qi-Long and X.-C. Weng, 1996. Analysis of water masses in the South Yellow Sea in spring. *The Yellow Sea*, **2**: 74–82.
-
- 2000년 3월 21일 원고접수
2000년 6월 19일 수정본 채택
담당편집위원: 김경철