

^{228}Ra 를 이용한 이상 저염 대마난류수의 기원 추적 연구

이동섭 · 김기현¹

부산대학교 해양학과, ¹충남대학교 해양학과

A Study on the Origin of Anomalously Low Saline Tsushima Current Water Using ^{228}Ra

TONGSUP LEE AND KI HYUN KIM¹

Department of Marine Science, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea
¹Department of Oceanography, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

동해의 울릉분지 표층에서 1996년 9월 초부터 11월 사이에 염분* 32 이하의 저염 해수가 출현했음이 최근 학계에 보고되었으며, 이 해수의 기원으로 여름철에 제주도 부근까지 세력을 확장하는 장강 유출수가 지목되었다. 대한해협을 서수로를 통과하는 해수가 두 단성분(장강 희석수와 쿠로시오 해수) 간의 단순한 혼합에 의한다는 가정 하에 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능 비를 보존적 추적자로 활용하여, 두 수괴가 대한해협 서수로를 통과하는 표층수를 형성하는데 얼마나 기여하는가를 산정하였다. 알려진 두 단성분의 ^{228}Ra , ^{226}Ra 방사능 측정값과 대한해협 서수로에서 측정된 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능 비로써 계산한 결과, 장강 희석수는 평균 염분이 32.17이었던 1996년 9월에 대한해협 서수로 표층수의 58±3% 그리고 평균 염분이 34.53이었던 1997년 2월에는 10±3% 기여하였던 것으로 나타났다. 이것은 제한된 자료와 매우 단순한 모델로부터 얻은 결과이지만 장강 유출수가 동해 내부에까지 영향을 주고 있음을 지시하며, 현재 장강 수계에 건설중인 삼협댐이 완공되면 장강 희석수 자체의 변화로 인해 북부 동중국해와 울릉분지 부근에 걸쳐 수십년 시간 규모의 해양 환경 변화가 일어날 것으로 판단된다.

Recently it is reported that anomalously low saline surface waters (salinity < 32) occurred at the Ulleung Basin in the East Sea—Japan Sea, during early September to November 1996. Apparent source of such a low saline water mass seems remotely linked to the Changjiang Dilute Water (CDW), which expands to the vicinity of Cheju Island during a flood season. Based on the assumption that waters passing through the Western Channel of the Korea Strait are formed by a mixing of Kuroshio Water and CDW, simplified two end-member mixing model using $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ as a conservative tracer is applied to calculate the contribution of each end member for the formation of low saline surface seawater. Model calculations show CDW contributes 58±3% in September 1996 (S=32.17) and 10±3% in February 1997 (S=34.53) in the formation of surface water flowing into the Western Channel of the Korea Strait. Although results are deduced from a simplified model with limited data, this study demonstrates that Changjiang discharge is clearly traceable to the interior of the East Sea—Japan Sea in fall season. Undergoing Three Valley Dam construction in the Changjiang River would invoke inevitable changes in the nature and discharge of CDW and its impacts on the marine environment might be significant in the northern East China Sea and even in the Ulleng Basin for coming decades.

서 론

대한해협은 타 해역의 물질이 동해 내부로 유입되는 유일한 통로로서 이 곳을 통과하는 해수의 양과 질적 특성은 동해의 해양 및 생태 환경에 커다란 영향을 줄 것이다. 동해 내부의 해수와 물리화학적 특성이 현저하게 다른 해수의 유입은 수괴 간에 전선을 형성하여 동해의 해양 기후(ocean climate)를 결정하며, 표층 해수의 화학 특성은 기초생산자로부터 주요 어획 대상 어

종에 이르기까지 전 생태계 구성원에 영향을 주기 때문에, 유입수의 화학 특성과 관련된 해수의 기원을 추적하는 것은 해양과 정의 이해는 물론 자원 관리 측면으로도 중요하다.

최근 이 등(1996)은 추계에 대한해협을 서수리로 유입되는 대마난류수의 염분이 32 정도로 매우 낮으며, 이러한 저염 수괴가 동계에 표층수가 냉각되어 수직혼합이 이루어질 때까지 울릉도 남부 해상에 넓게 분포하고 있음을 학계에 보고하였다. 한반도 주변 해역에서 이와 같이 대량의 저염 해수를 공급할 수 있는

*본 논문에 사용된 염분의 단위는 ‰입니다.

것은 연간 $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 를 배출하는 장강(Guan and Mao, 1982)이 가장 유력한 후보이고, 다른 가능성으로는 시베리아 빙하가 녹은 물을 들 수 있으나 동해 중앙부에 존재하는 극전선의 발달은 해빙 기원 가능성을 배제시키기에 충분하다. 그러나 지금까지의 연구에서는 일반적으로 대마난류로 통칭되는 대한해협 유입수의 형성에 장강 회석수가 기여할 것이라고 주목하지 않고 있었다. 현재 대한해협을 통해 동해로 유입하는 해류는 큐슈 남방에서 쿠로시오 본류로부터 분지된다는 학설이 지배적이다(Lie and Cho(1994)의 fig. 1 참조). 그러나 쿠로시오 해수는 고온고염의 특성을 지니고 있기 때문에 이 학설로서는 저염 해수의 유입을 설명할 수 없다.

표층 부이(뜰개)를 이용하면 해류를 직접 관측할 수 있지만 장강 하구 부근과 남해에서의 어획 강도가 너무 커서 지금까지 이 해역의 해수가 한반도 남해역을 통과하여 대한해협으로 이동하는지 여부를 판명할 수 있을 정도로 충분한 자료가 획득된 바 없다(한국해양연구소, 1997). 가을철 동해의 울릉도 부근 표층에 존재하는 염분 32 이하의 저염 해수의 기원이 장강 회석수로서 남해를 거쳐 대한해협 서수로를 통해 유입된다면, 홍수기에 세력이 강해진 장강 회석수가 저밀도로 인한 부력 효과 때문에 고유한 특성을 유지한 채 이동되었을 것으로 가정할 수 있으므로, 강물 기원임을 지지하는 적절한 화학적 추적자를 이용하면 이를 증명할 수 있다고 판단된다.

해수에 천연적으로 존재하는 라듐은 가능성이 높은 추적자 중 하나이다. 알칼리 토족에 속하는 라듐은 해수에 잘 녹아 해수와 함께 이동하며, 강물을 통해 바다로 유입되거나 해수에 골고루 분포하는 우라늄의 붕괴로 생성된다. 라듐은 강물에서는 주로 입자에 흡착되어 존재하며 염하구에 도달하면 이온간의 상호작용으로 탈착되기 시작하여 강물이 바닷물에 의해 배경 염분으로 혼합될 때까지 염분에 따라 농도는 일정하게 증가한다(Elsinger and Moore(1984)의 fig. 3 참조). 이후 라듐은 바닷물의 이류와 확산을 통해 해수 내에 분포하게 된다. ^{226}Ra (반감기; 1,622 년)은 반감기가 길어 대양의 해수에서는 농도의 차가 크지 않다. 반면, ^{228}Ra (반감기; 5.75 년)은 강물과 대륙 주변부 퇴적물이 주공급원으로 연안 해수에서 농도가 높고 멀어질수록 감소하기 때문에 표층수의 확산 연구에 효율적으로 사용할 수 있다(Kaufman *et al.*, 1973; Elsinger and Moore, 1984).

라듐의 모핵종인 토륨은 해수에서 강한 반응성을 지니기 때문에 해양에서 매우 빠른 속도로 제거되며, 퇴적물 안에서 방사능 붕괴를 통해 생성된 라듐은 수직확산, 용승 등을 거쳐 해수 표층으로 전달되고, 또한 수중에서 중정석(BaSO_4) 생성에 참여하며, 일부 생물에 의해 흡수 또는 흡착되기도 하기 때문에 라듐의 생지화학적 순환과정은 비교적 복잡하다. 따라서 ^{226}Ra 의 절대 방사능보다는 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능 비(activity ratio)를 사용하면 추적자로서의 보존성이 향상되어 연안역에서 외양 해수와 연안 해수 사이의 혼합을 연구하는데 더욱 효과적이므로(Moore *et al.*, 1985; Scott, 1987; Nozaki *et al.*, 1991), 해양 주변부 과정을 연구하는데 적합한 방사능 추적자로서 주목 받고 있다. 라듐 추적자의 활용법은 70년대에 Willard Moore와 동료들에 의해 확립되었으며, 현재 널리 이용되고 있는 산화망간(MnO_2)에 의한 흡착 추출법도 이들이 개발하였다(Moore, 1969). Kim and Burnett

(1983, 1985)은 중전에 알파 계수기로 측정하던 라듐 및 일련의 U-Th 계열의 방사능을 고품위 저매니움(HPGe) 광자 검출기를 활용하여 기존의 복잡한 방사화학적 분리 과정을 거치지 않고 간편하게 측정하는 방법을 제시한 바 있다.

우리나라 주변 해역과 동중국해에서 이미 라듐을 추적자로 이용한 연구가 여러 차례 수행되었다. Okubo(1980)는 대한해협 및 동해의 일본쪽 해역에서 수층 별로 라듐 동위원소 농도를 측정하여 수직 와동확산계수를 구하였고, Harada and Tsunogai(1986)는 라듐 동위원소의 수직분포로부터 동해 고유수의 체류시간을 계산하였으며, Nozaki *et al.*(1991)은 라듐 동위원소의 수평분포와 $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 비로써 황해 해수와 동중국해 대륙붕수의 체류시간을 계산하였다. 국내에서도 대한해협과 동해 남부역의 표층수에 대하여 양 등(1992, 1994)이 연구한 바 있으나, 동해 내부의 저염 표층수의 기원에 대한 연구는 수행된 바 없다.

이 연구에서는 동중국해와 남해를 거쳐 북상하는 대마난류의 표층수가 쿠로시오의 표층수로부터 기원한다는 학설에 의거하여 쿠로시오 표층수를 가장 낮은 ^{228}Ra 방사능을 지니는 하나의 단성분(end member)으로, 반면 장강 회석수는 가장 높은 ^{228}Ra 방사능을 지니는 또 하나의 단성분으로 설정하고 이들의 단순 혼합에 의해 저염수가 생성된다는 단순화된 두 단성분 혼합 모델을 구성하였다. 동중국해와 남해의 전역은 대륙붕 위의 천해로서 저층 퇴적물로부터 장강으로부터의 유입량을 증가하는 양의 ^{228}Ra 이 표층수로 공급될 소지가 높다(Nozaki *et al.*, 1991). 그러나 저염의 수피가 염분이 크게 증가하지 않으면서 동해 내부로 이동하기 위해서는 밀도 성층이 강하게 발달하여 수직 확산과 혼합이 무시할 정도로 작을 것으로 가정하는 것이 큰 무리가 없다고 판단하였다.

시료 채취 및 분석

대한해협의 서수리와 남해 서부 연안 표층 해수의 ^{226}Ra , ^{228}Ra 시료는 해양조사선 탐양호를 이용하여 1996년 9월과 1997년 2월의 두 차례에 걸쳐 7 개 조사 정점에서 채취하였다(Fig. 1). 해수로부터 용존 라듐의 추출은 산화망간을 이용한 흡착법을 이용하였다(Moore, 1976). 길이 25 cm의 아크릴 섬유로 실을 꼬아 만든 상업용 여과봉을 묶은 염산으로 세척한 후, 길이 7~8 cm로 자르고 Moore(1976)의 방법에 따라 산화망간 피복섬유사(MnO_2 fiber)로 만들었다. 증류수로 세척한 산화망간 피복섬유사는 젖은 상태로 부피 약 750 ml의 원통에 충전시켜 사용하였다. 탐양호 선저 약 3 m에 설치된 청정 해수관으로부터 전동 펌프로 끌어올린 수도에 연결하여 해수를 통과시키며 라듐을 흡착시켰다. 해수는 먼저 구경 10 μm 의 여과봉을 통과시켜 입자를 제거시켰으며 산화망간 피복섬유통(MnO_2 cartridge) 뒤에 적산 유량계를 연결하여 유속을 조절하고 유량을 측정하였다. 여과시켜 흡착에 사용된 해수의 양은 시료 당 최소 100 l가 넘도록 하였다.

해수와 반응시킨 산화망간 피복섬유사는 실험실로 옮겨 증류수로 염을 제거하고 오븐에서 건조시킨 다음 전기로(muffle furnace)에 넣고 450°C에서 연소시켰다. 일부 불완전 연소로 재에 남은 탄소 찌꺼기는 재를 식힌 뒤 진한 과산화수소를 소량씩 가하여 제거하였다. 처리된 재는 6M 염산(EM 등급)을 넣고 약

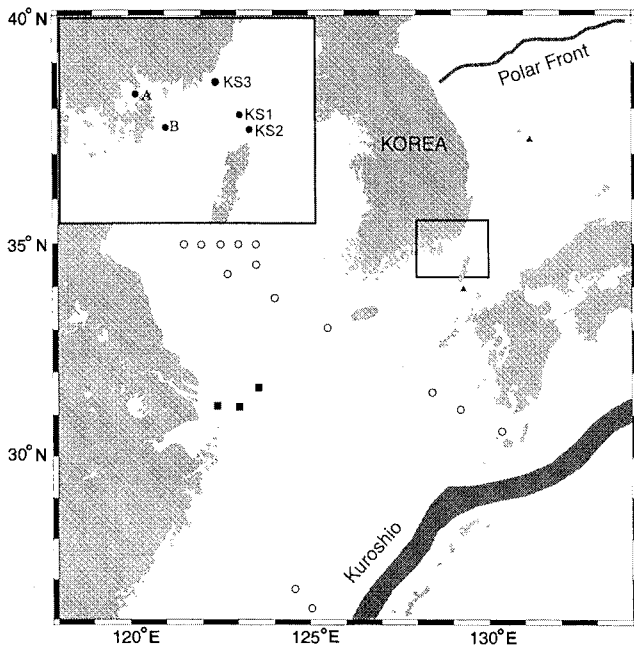


Fig. 1. Map showing the stations where surface seawater was analyzed for its activity ratio of ²²⁸Ra/²²⁶Ra. Filled circles in the blown-up map (this study); empty circles (Nozaki *et al.*, 1991); filled triangles (Okubo, 1980); filled squares (Elsinger and Moore, 1984).

한 열을 가하며 용해시킨 뒤 저어 주면서 색이 없어질 때까지 hydroxylamine-hydrochloric acid를 가하였다. 불용성 침전물은 거친 등급의 유리 여과기로 가압하지 않고 걸러내고 여과액은 약하게 가열하여 부피가 50 ml 이하가 되도록 친천히 증발시켰다. 여기에 약 500 mg 납 수용체(Pb(NO₃)₂)를 붉은 질산에 녹여 넣어주고 진한 황산과 NaOH를 넣어주며 pH를 1.5 정도로 조절시켜 Pb(Ra)SO₄의 형태로 라듐을 공침시켰다(Yamada and

Nozaki, 1986). 침전물은 0.45 μm 여과지로 걸러 전기로에서 300°C로 연소시킨 뒤 고품위 게르마늄(HPGe) 광자 검출기 계수용기에 옮기고 밀봉하여 4 주 이상 보관하여 방사능 평형에 도달시킨 뒤 방사능을 측정하였다. ²²⁶Ra의 방사능은 ²¹⁴Pb가 내는 295.2 KeV, 352.0 KeV의 광량자, 그리고 ²¹⁴Bi가 내는 609.2 KeV에서의 계수로서 측정하였으며, ²²⁸Ra는 ²²⁸Ac가 내는 968.9 KeV에서의 계수값으로 측정하였다. ²²⁸Ra의 방사능은 시료 채취와 분석 사이에 경과된 시간에 따른 방사능 붕괴를 보정하였으며 해수로 처리하지 않은 산화망간 피복섬유사의 바탕값(blank)을 제거하였다.

결과 및 고찰

대한해협을 서수로로 지나는 표층 해수와 진해만 그리고 남해의 북서 해역의 표층수로부터 측정된 ²²⁸Ra/²²⁶Ra의 방사능 비는 CTD(SBE 9/11 plus)로 측정된 염분과 함께 수록하였다(Table 1). 측정된 ²²⁸Ra/²²⁶Ra 값은 0.70에서 4.04로 넓은 범위에 걸쳐 나타났다(Table 2).

1996년 9월 염분과 ²²⁸Ra/²²⁶Ra 값

대한해협 표층수의 염분은 초가을(9월)과 늦겨울(2월)에 큰 차이를 보여 9월에는 32.3 이하였으며 동시기에 내만(진해만)의 비교 정점 A와 남해 외해역의 비교 정점 B에서는 더욱 낮아 각각 31.67과 31.79를 기록하였다(Fig. 2). 이는 1996년 가을철에 남해 전해역 표층이 비교적 낮은 염분의 해수로 덮였음을 반영한다. Table 1은 각 정점 표층 해수의 ²²⁸Ra/²²⁶Ra 값이 염분과 역상관 관계에 있음을 보여주며, 염분에 비해 뚜렷한 차이를 나타내었다.

진해만의 ²²⁸Ra/²²⁶Ra의 비는 4.04로 다른 지역에 비해 높게 나타났다는데 이는 우기에 지표층을 통해 연안역으로 유입되는 물로

Table 1. Measured ²²⁸Ra/²²⁶Ra activity ratios of surface waters at stations in the Korea Strait in September 1996 and February 1997 (For comparison, ²²⁸Ra/²²⁶Ra activity ratios of semi-enclosed Chinhae Bay (Station A in Fig. 2) and open water (Station B in Fig. 2) in South Sea were also analyzed. ²²⁸Ra and ²²⁶Ra activities are decay corrected and background corrected; background activities of ²²⁸Ra and ²²⁶Ra measured from untreated Mn-fiber are 0.24 and 0.16 dpm/g, respectively.)

Station	Sampling date	Location	²²⁸ Ra/ ²²⁶ Ra	Salinity
KS-1	96/09/16	34°54'31"N, 129°23'34"E	2.71±0.05	32.08
	97/02/18	" "	8.03±3.40	34.52
KS-2	96/09/17	34°30'43"N, 129°17'12"E	2.60±0.06	32.25
	97/02/18	" "	0.70±0.05	34.56
KS-3	97/02/18	35°00'58"N, 129°08'44"E	0.96±0.24	34.50
A	96/09/19	35°00'21"N, 128°20'07"E	4.04±0.06	31.79
B	96/09/20	34°45'34"N, 128°59'46"E	2.86±0.09	31.67

Table 2. Results of the simplified two end-member mixing model for waters flowing into the Korea Strait (Calculated *f* values (see Equations 1–3) designate the fraction of Changjiang Dilute Water. Remaining fraction is assumed to be Kuroshio water.)

Date	Salinity	²²⁸ Ra/ ²²⁶ Ra	<i>f</i> value (%)	Source
September–October 1977	33.785	1.31±0.03	0.19±0.01	Okubo, 1980
September 1988	33.12	2.0±0.4	0.37±0.12	Yang <i>et al.</i> , 1992
September 1996	32.17	2.65±0.06	0.58±0.03	This study
February 1997	34.53	0.83±0.15	0.10±0.03	"

부터 많은 양의 ^{228}Ra 가 공급되었거나, 수심이 얕아 퇴적물로부터 동행했던 모핵종 ^{232}Th 의 방사능 붕괴로 생성된 ^{228}Ra 가 저층으로부터 많이 공급되었기 때문으로 판단된다. 이에 반해 염분이 약간 높은 비교 정점 B는 진해만보다 훨씬 낮은 2.86의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 값을 나타냈으며, 이것은 진해만보다는 염분이 상대적으로 높은 대한해협 표층수에 더 가까운 값이다. 염분보다는 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 가 큰 차이를 보이므로, 두 비교 정점간의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 차이는 해수의 교환 정도를 반영하는 것으로 판단된다. 진해만의 경우 육지 또는 저층 퇴적물로부터 ^{228}Ra 의 공급이 원활히 이루어짐에 반해 낮은 ^{228}Ra 방사능을 지닌 외해역 해수와 섞임이 제한적이기 때문에 결과적으로 높은 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 값을 가지게 된다. 반면 정점 B에서는 대한해협 표층수와 상등한 수준의 값을 보여 외해역 해수와 원활하게 혼합된 결과로 해석된다. 이로 보아 대한해협 부근 일대의 남해역은 상부 혼합층 아래에 존재하는 저층 해수로부터의 교환이 적은 경우라면, 즉 강한 바람에

의한 하부 혼합 또는 지역적인 용승이 무시될 정도이면, 이 해역의 표층수는 약간의 차이는 있지만 모두 비슷한 정도의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 비를 보일 것이라고 예상할 수 있었다.

수온과 염분의 실측 자료는 이 시기에 수온 및 염분 약층이 강하게 발달하여 해수의 수직 혼합이 매우 어려울 것이라는 예상을 지지한다. 이러한 수직 구조는 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 비가 통상적인 수온 및 염분 관측으로 해결하기 어려운 연안역에서의 수괴 분석에 매우 유용하게 사용될 수 있는 가능성을 나타내고 있다.

1997년 2월 염분과 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 값

1997년 2월에 대한해협 표층수의 염분은 34.5 이상의 높은 값을 보였으며, $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 값은 평균 0.83으로 아주 낮았다(Fig. 2; Table 2). 이 염분값은 쿠로시오 분류의 염분 대표값 34.668에 매우 근사한 것으로서(Nozaki *et al.*, 1991), 이로 보아 표층 해수는 쿠로시오 해류에서 분지하여 동중국해와 남해를 거치는 동

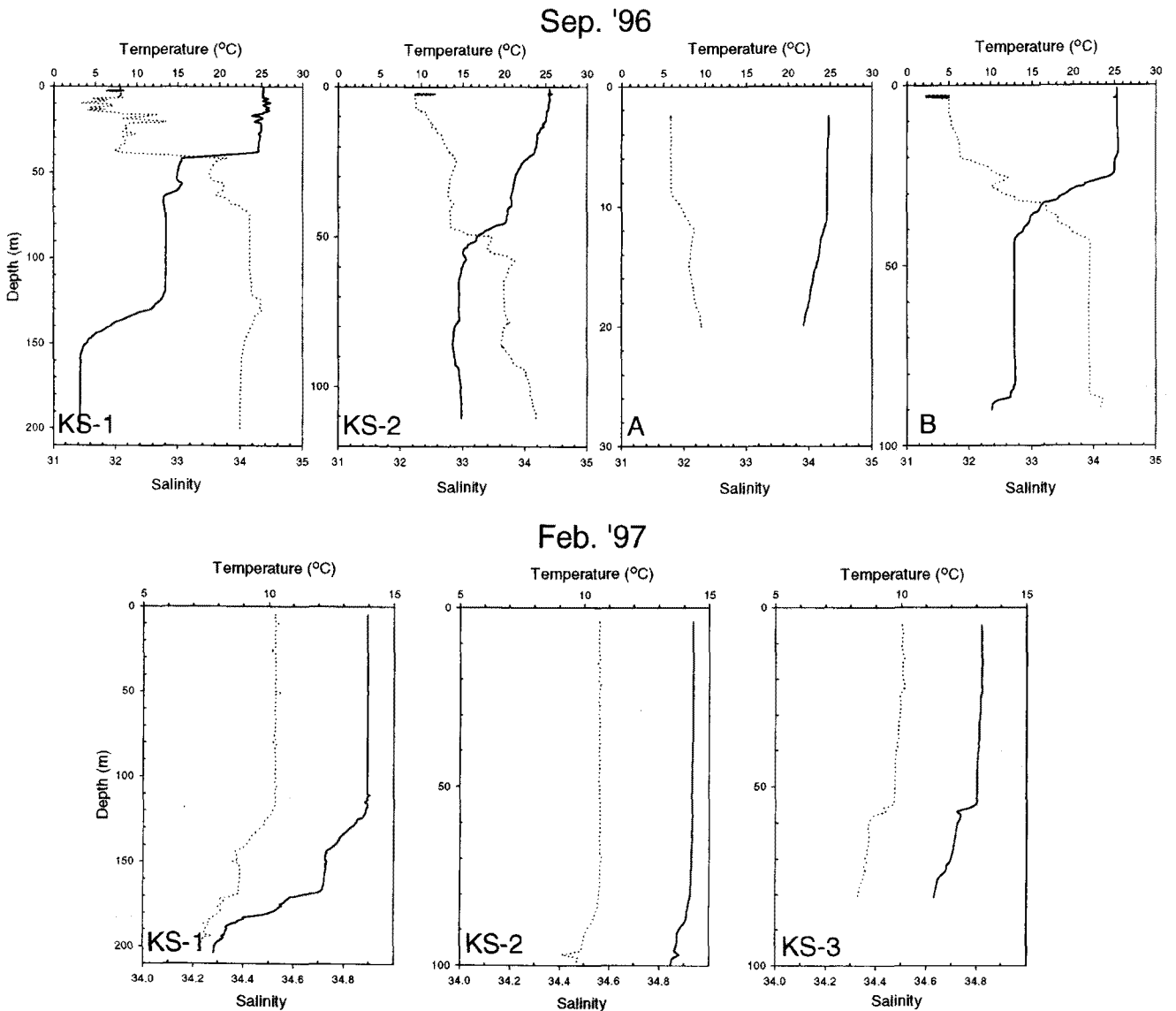


Fig. 2. Vertical structures of temperature (solid line) and salinity (dotted line) at the sampling stations. Note that scales are different by stations.

안 동중국해의 저염 해수와 거의 섞이지 않으면서 복잡한 해수로 판단된다. 낮은 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 값도 이 해수가 연안을 떠난 지 상당한 시일이 경과한 것을 의미하므로, 이 자료 또한 대한해협 표층수가 쿠로시오 표층수와 아주 유사한 성질을 지니고 있음을 지지한다. 낮은 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 값은 대마난류가 비교적 수심이 얇은 대륙붕 위를 상당한 거리 이동하였음에도 불구하고 저층으로부터 공급되는 ^{228}Ra 에 의한 교란이 적었음을 지지하므로, $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 방사능 비를 가지고 수직혼합을 무시한 단순한 표층수 혼합 모델로서 해수의 기원을 추적할 수 있을 것이라는 이 연구의 가정을 지지하고 있다.

두 단성분 수괴의 단순 혼합 모델에 의한 대한해협 유입수의 기원 추적

남해와 동중국해의 표층 해수를 구성하는 대표적인 단성분(end member)은 쿠로시오 해수와 장강 희석수로서 이들의 혼합에 따라 남해 및 동중국해의 해수가 생성된다고 단순화시켜 접근할 수 있다(Figs. 3, 4). 물론 이 해역의 표층수는 저층에 존재하는 해수와 상호작용에 의해 일부 변화를 겪게 된다. 그러나 조사 정점에서의 수온과 염분의 수심에 따른 분포는 해수의 표층 혼합이 어려운 상황이어서(Fig. 2) 저층 해수에 의한 혼합의 효과는 무시될 정도의 크기로 판단된다.

Nozaki *et al.*(1991)은 대만 북동부에서 측정한 자료를 분석하여 쿠로시오 해수의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 비가 0.25(염분=34.668)라고 발

표하였다. 한편 동시기에 류슈 남서쪽 수심 200 m 이심 해역의 표층수 방사능 비도 평균 0.25로서(Nozaki *et al.*(1991)의 fig. 4 참조) 이 값을 쿠로시오 단성분의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 값으로 채택하였다.

장강 유출수의 ^{228}Ra 와 ^{226}Ra 의 방사능 값은 Elsinger and Moore(1984)에 의해 이미 발표된 바 있다. 이들의 연구 결과에 의하면 강물과 해수의 혼합시 ^{228}Ra 와 ^{226}Ra 는 비보전적으로 변화된다. 염분 16 이하에서는 탈착 과정에 의해 두 방사능 동위원소가 염분과 양의 상관 관계를 가지며 증가한다. 염분이 22 이상인 해역에서 ^{228}Ra 의 방사능 값은 저층 퇴적물로부터의 공급에 의해 여전히 증가하나 ^{226}Ra 는 외해역 해수에 의한 희석으로 감소한다. 따라서 장강수의 혼합역에서 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 값은 염분에 따라 증가하는 경향을 보이며 염분 30.4인 해역에서 3.30 ± 0.10 , 그리고 염분 32.4인 해역에서 3.40 ± 0.24 로 보고되었다. Nozaki *et al.*(1991)은 Elsinger and Moore(1984)의 자료를 바탕으로 장강수 단성분(염분=0)의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 값을 1.90으로 추정하였다. 이들이 조사한 시기는 우기로서 이 값을 대표값으로 인용하여도 별 무리가 없다고 판단된다. 그러나 장강 유출수의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 는 염하구에서 변화되고 이후 외해역의 해수와 혼합되며 또한 값의 변화가 심하게 일어나므로, 이 연구에서는 유출수 자체보다는 배경 농도로까지 염분이 증가한 장강 희석수를 단성분으로 선택하였다. 이 경우 두 단성분간의 혼합 모델에서 장강 희석수가 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 비의 최대값을 제공한다. Nozaki *et al.*(1991)의 자료에 따르면 장강 희석수의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 최대값

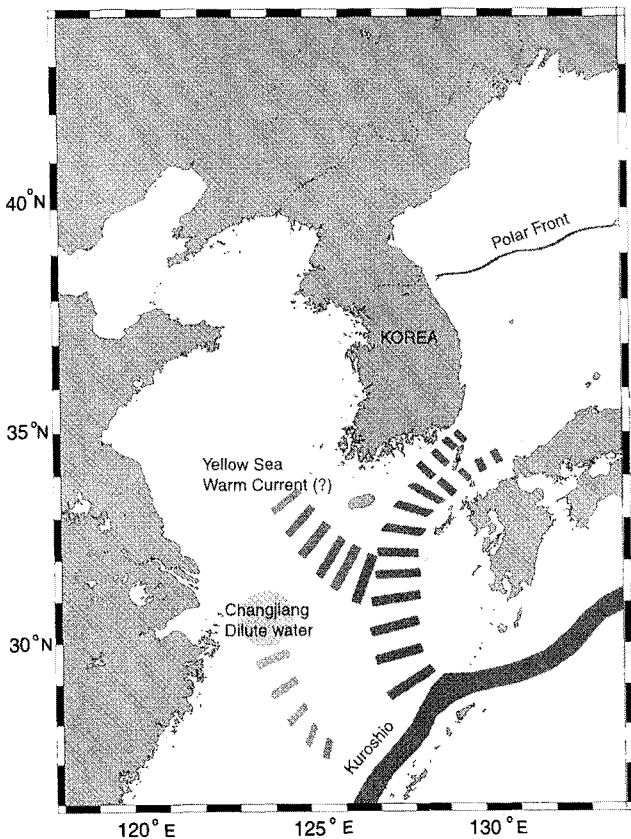


Fig. 3. Hypothesized schematic diagram of surface currents near the Korea Strait in September 1996.

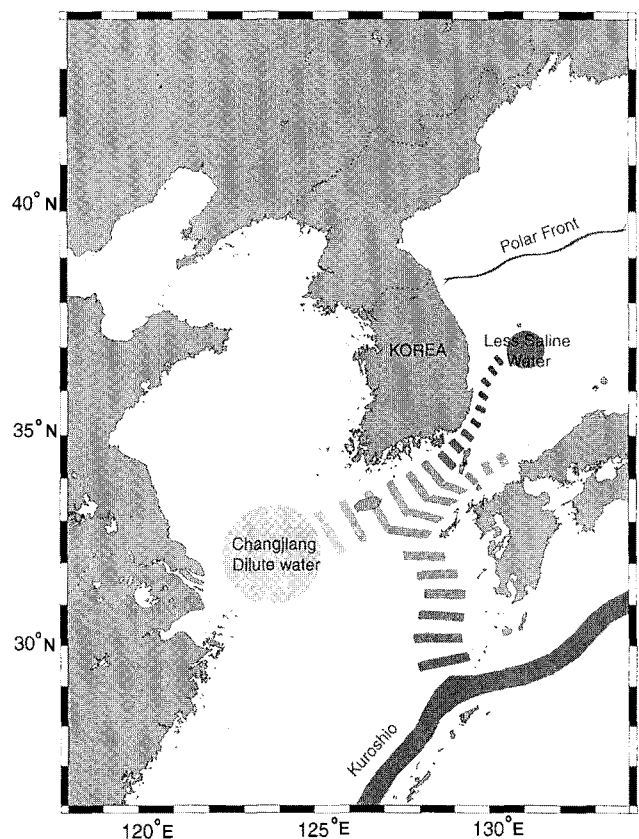


Fig. 4. Hypothesized schematic diagram of surface currents near the Korea Strait in February 1997.

은 1987년 5월에서 6월 사이 장강 하구 외해역에서(염분=31.06) 측정된 3.82이다.

황해의 35°N 이남, 124°E 이서 해역의 경우 저층 퇴적물로부터의 라듐 공급 때문에 표층수는 장강 희석수에 비해 더 높은 ^{228}Ra 와 ^{226}Ra 를 나타내나, $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 비는 약 3.5 정도로 큰 변화를 보이지 않는다(Nozaki *et al.*(1989)의 fig. 2b 참조). 따라서 대한해협으로 유입되는 저염 해수의 생성에 장강 희석수를 하나의 단성분으로 가정하면, 이 해수덩이의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 값은 대략 3.7 ± 0.2 의 범위로 추정되며 이 값을 장강 희석수의 단성분 값으로 활용하였다.

두 가지 단성분 해수가 혼합하여 제 3의 해수를 형성하는 경우 해수에서의 Ra의 물질 균형은 Nozaki *et al.*(1991)이 제시한 다음 식으로 표현된다:

$$\{\text{Ra}\}_3 = f\{\text{Ra}\}_1 + (1-f)\{\text{Ra}\}_2 + \{\text{Ra}\}_{\text{ex}} \quad (1)$$

식에서 { }는 방사능, 아래첨자 1, 2, 3은 두 단성분과 이들의 혼합으로 생성된 해수를 지칭하며, f 는 조성비, 아래첨자 ex는 혼합에 의해 새로 형성된 해수에 외부로부터 공급된 라듐을 가리킨다. $\{\text{Ra}\}_{\text{ex}}$ 는 저층 해수로부터의 공급, 부유 입자로부터의 탈착, 생물에 의한 흡수와 배출, 그리고 시간에 따른 붕괴를 모두 고려한 항이다.

대한해협으로 유입되는 해수가 장강 희석수와 쿠로시오 해수의 두 단성분간의 단순 혼합으로 생성되고, 저층 해수에 의한 교환이 무시될 정도이며, 유속이 충분히 빠르다고 가정하면, ^{228}Ra 의 시간에 따른 방사능 붕괴도 무시된다. 그 결과 $\{\text{Ra}\}_{\text{ex}}$ 항이 무시되어 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 비를 보존적 추적자로 취급할 수 있다. 대한해협 표층수의 형성에 대한 장강 희석수의 기여도를 f 라 하면 대한해협으로 유입되는 해수의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 물질 균형식은 아래와 같다.

$$\left\{ \frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}} \right\}_{\text{KS}} = \frac{f\{^{228}\text{Ra}\}_{\text{C}} + (1-f)\{^{228}\text{Ra}\}_{\text{K}}}{f\{^{226}\text{Ra}\}_{\text{C}} + (1-f)\{^{226}\text{Ra}\}_{\text{K}}} \quad (2)$$

식에서 아래첨자 KS, C, K는 각기 대한해협 서수로 표층수, 장강 희석수, 쿠로시오 표층수를 나타낸다. 식 (2)를 f 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$f = \frac{\left\{ \frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}} \right\}_{\text{KS}} - \left\{ \frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}} \right\}_{\text{K}}}{\left\{ \frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}} \right\}_{\text{KS}} - \left\{ \frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}} \right\}_{\text{C}} + \frac{\{^{226}\text{Ra}\}_{\text{C}}}{\{^{226}\text{Ra}\}_{\text{K}}} \left(\left\{ \frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}} \right\}_{\text{C}} - \left\{ \frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}} \right\}_{\text{KS}} \right)} \quad (3)$$

식 (3)에 위에서 언급한 단성분의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 값, 그리고 대한해협에서 측정된 값, 그리고 Nozaki *et al.*(1991)이 발표한 ^{226}Ra 방사능 값을 대입하여 구한 f 값들은 Table 2에 정리하였다. 계산에 사용한 값들은 아래와 같다.

$$\{^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}\}_{\text{KS}} = 2.65 \pm 0.06 \quad (1996\text{년 } 9\text{월})$$

$$\{^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}\}_{\text{KS}} = 0.83 \pm 0.15 \quad (1997\text{년 } 2\text{월})$$

$$\{^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}\}_{\text{C}} = 3.7$$

$$\{^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}\}_{\text{K}} = 0.25$$

$$^{226}\text{Ra}_{\text{K}} = 65 \text{ dpm}/10^3 \text{ l-해수}$$

$$^{226}\text{Ra}_{\text{C}} = 131 \text{ dpm}/10^3 \text{ l-해수}$$

계산 결과 f 값은 1996년 9월의 경우 0.58 ± 0.03 , 1997년 2월의 경우는 0.10 ± 0.03 로 산출되었다. 이 값은 가을철에 대한해협으로 유입되는 해수의 55내지 61%는 장강 희석수이고 나머지는 쿠로시오 해수로 조성되었음을 의미한다. 동시기에 해당하는 1977년 9월에서 10월 사이에 Okubo(1980)가 대한해협 동수로에서 측정된 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 값 1.31 ± 0.03 을 사용하면 f 값은 0.19 ± 0.01 이고, 1988년 9월 양 등(1992)의 대한해협 자료 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra} = 2.0 \pm 0.4$ 로부터는 f 값이 0.37 ± 0.12 로 구해진다(Table 2). 따라서 가을철에 대한해협으로 들어오는 해수에서 장강 희석수가 차지하는 비율은 동일 시기라 하더라도 20에서 60%로 경년 변동이 매우 크다는 것을 알 수 있었다. 이러한 변동은 동시에 측정된 염분 자료에서도 나타난다. 대한해협에서 9월에 조사된 염분은 1977년에 33.785(Okubo, 1980), 1988년에는 평균 33.12(양 등, 1992), 그리고 이번 조사 결과는 32.17로서 각기 f 값 0.19, 0.37, 0.58에 대응된다.

동해 내부에 존재하는 저염 표층수는 1977년 9월 조사에서도 뚜렷하게 관찰되었다(Okubo, 1980). 당시 울릉도 부근 해역의 염분은 32.737로서 동해의 다른 조사 정점은 물론 대한해협 유입수의 염분 33.785보다도 낮았다. 그리고 저염 해수의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 비는 2.42 ± 0.15 로서 동해의 다른 해역에 비해 많게는 2 배 이상 높은 값을 보였다(Okubo(1980)의 table 1 참조). 양 등(1992)의 1988년 9월 염분 자료도 32.7 이하의 저염을 보이나 조사 정점이 동해 연안에 집중되어 있어 동해 내부에서의 저염수의 존재를 확인할 수 없었다. 양 등(1994)의 1991년 9월 대한해협~영덕 조사에서는 표층에서 32 이하의 낮은 염분이 관측되었으며, $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 값 또한 2 이상으로 조사되었다. 이렇게 표층 저염 해수가 주변의 해수에 비해 높은 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 값을 갖는 것은 동해에 큰 강이 없으며, 동해 북부로부터의 저염수 이동이 극전선에 의해 저지된다는 점을 감안할 때, 가능한 공급원은 장강 희석수를 주성분으로 하는 대한해협 유입수로서 이는 늦여름부터 초가을에 걸쳐 장강 유출수와 북서 동중국해 표층수가 상당량 동해로 흘러 드는 것을 입증한다. 모델에 따르면 염분이 32.1 이하일 경우 60% 이상이 장강 희석수로 나타난다.

최근의 연구 결과로 동해 중부에 극전선이 발달하며 내부에 2~3 개의 중규모 와류가 항상 존재한다는 사실이 알려졌다(Isoda, 1994; Lee *et al.*, 1997). 와류 중 하나는 대략 울릉분지 위에 위치하며, 일년 중 특정시기(여름~초겨울)에 나타난다고 알려진 이상 저염 해수는 이 와류의 거동과 깊이 관련된 것으로 보인다. 즉, 대한해협으로 유입된 저염의 장강 희석수는 와류에 의해 고립되어 고유한 저염 특성을 유지하다가 겨울철 혼합에 의해 저층의 저온저염 해수와 섞이며 소멸하는 것으로 판단된다.

기존 염분 자료는 장강 희석수의 동해로의 유입량이 해마다 큰 폭으로 변동함을 지시한다. 현재 장강의 삼협에 대규모 댐이 건설 중이어서 금년부터 2010년까지 장강의 유출량은 계속해서 감소되고 이후로도 강물의 이용에 따라 유출량의 변화가 일어날 전망이다. 특히 장강의 연간 유수량의 70~80%가 집중되는(Guan and Mao, 1982) 홍수기의 유출량이 줄게 되면 장강 희석수의 세력이 크게 약화될 것이 분명하다. 따라서 황해 남부와 제주 연안은 직접 영향을 받게 될 것이고 비록 매우 제한된 자

료와 지나치게 단순화된 모델로서 얻은 결과이지만 이러한 영향은 동해 내부에까지 영향을 주게 될 것으로 보인다.

염분이 낮은 해수에는 육상에서 공급된 많은 양의 영양염이 포함되어 있으며, 이러한 특성은 북부 동중국해의 규산염 분포 자료에서 잘 나타난다(국립수산진흥원, 1997). 표층으로의 저염 해수 유입은 부력에 의해 강력한 성층을 이루므로 가을철에 수온 하강과 바람에 의한 성층의 파괴가 인접 해역에 비해 지연될 수 있다. 동해의 추계 식물플랑크톤 대번식이 11월에서 12월 사이로 매우 늦게 나타나는 것과 저염 해수에 의한 성층 강화 사이에는 직접 관련이 있을 것으로 예견된다. 이러한 설명이 맞다면 향후 동해 표층수의 고염화가 진행되면서 식물플랑크톤 번식이 앞당겨지게 될 것이다. 또한 동해 유입수의 해수 특성 변화는 동해의 회유성 어종에 다소간 영향을 줄 것으로 판단된다. 이러한 양상은 여러모로 최근에 밝혀진 대규모 해양기후체계의 변동(regime shift)과 비슷한 양태를 보인다. 따라서 양자간의 영향력을 비교하기 위한 장기적인 관찰이 필요하다.

겨울철(1997년 2월)의 경우는 대한해협으로 유입되는 해수의 $10\pm 3\%$ 만이 장강 희석수 기원이며, 대부분은 쿠로시오 해수로 이루어지는 것으로 산출되었다. 이 시기의 유입수의 염분은 34.53으로 쿠로시오 단성분 34.668에 매우 근접한 값으로 염분 또한 장강 희석수에 의한 혼합이 미약함을 지지하고 있다. 그러나 지금까지 겨울철(갈수기)에 장강 희석수의 ^{228}Ra 와 ^{226}Ra 의 방사능 값이 조사된 바 없기 때문에, 가을철에 조사된 값을 적용하는 것이 적절한 것인지에 대해서는 향후 연구에서 검토되어야 하며 계산된 값보다 훨씬 큰 오차를 지니는 것으로 해석되어야 한다. 이번에 사용한 두 단성분 단순혼합 모델은 남해안 일대의 ^{228}Ra 와 ^{226}Ra 의 방사능 값과 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 비가 모두 장강 희석수보다 낮을 때에만 유효하다. 따라서 이 모델의 적용은 차후 남해 조사를 통해 검증되어야 할 필요가 있다.

쿠로시오 해류에서 분지된 대마 난류가 동중국해와 남해로 북상하며 장강 희석수와 혼합되는 정도가 여름과 겨울에 크게 다르다는 점에 대해 주목할 필요가 있다. 기존 연구 결과와 이 연구의 결과로부터 동해로 유입되는 표층 해수의 기원에 대한 가설을 단순화된 모식도로 제시하였다(Figs. 3, 4). 홍수기에는 장강 희석수의 세력이 용성하여 한반도 남쪽을 향해 북서 방향으로 팽창하며 남해를 서진하여 대한해협 서수로를 지나 울릉분지에 이르러 저염 해수덩이를 형성하는 것으로 보인다(Fig. 3). 한편 고온고염의 특성을 갖는 대마난류의 주류는 동수로를 지나 일본 열도쪽으로 향해 진행할 것으로 예상되어 늦여름에서 초가을에 대한해협 양쪽 수로를 통과하는 해수는 기원도 다르고 진로도 다를 것으로 예상된다. 이와 같은 대한해협에서의 해류의 분지는 울릉분지 내의 와류가 관여하는 것으로 보이므로 이에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

겨울철 갈수기에 장강 희석수의 세력이 약화된 시기에는 제주도 남서방에서부터 산둥 반도 쪽으로 열염해수의 관입이 위성관측자료에 뚜렷이 나타난다(Liu, 1985). 따라서 황해 난류라 지칭되기도 하는 이 열염해수에 의해 장강 희석수의 동진이 저지되므로 지금까지 알려진 대로, 장강 희석수는 중국 연안을 따라 중국 연안수와 혼합되며 남진 또는 남동진하다가(Gu, 1985), 방향을 틀어 동진하여 북상하는 대마난류와 혼합되고 그 일부

가 대한해협의 서수리로 유입하는 것으로 보인다(Fig. 4). 그 결과 겨울철에 대한해협 두 수로의 해수는 초가을처럼 큰 차이가 나지 않을 것으로 예상된다.

라듐 이외에도 해수의 기원을 추적하는 데 쓰일 수 있는 화학 추적자가 다수 존재한다. Kang *et al.*(1994)에 의해 산소 동위원소를 이용한 연구가 황해에서 이미 수행되었는데, 산소 동위원소 자료 또한 단성분 혼합 모델의 적용이 가능하다. 염분의 경우는 장강 유출수의 염분이 0이므로 장강 유출수가 대한해협으로 얼마가 유입하는지를 산출할 수 있는 장점이 있다. 하지만 염분은 강우와 증발, 그리고 염확산에 의해 변하고 한반도에서 유출되는 담수와 구별이 어려워 나름대로의 단점이 있다. 따라서 대한해협으로 유입되는 해수의 기원을 정량적으로 밝히기 위해서는 다수의 추적자에 대한 연구가 당분간 계속되어야 할 전망이다.

사 사

이 연구는 1996년도 교육부의 해양/수산분야 학술조성연구비의 지원에 의해 수행된 것입니다. 해양 조사에 도움을 주신 해양조사선 탐양호 및 해양과학공동연구소 관계자와 자료 획득과 처리에 도움을 주신 부산대 해양학과 이상룡, 정익교 교수께 감사드립니다. 논문의 수정과 보완에 큰 도움이 된 익명의 심사위원과 문장을 다듬어 주신 학회 편집간사의 노고에 고마움을 전합니다.

참고문헌

- 국립수산진흥원, 1997. 1997년도 해양조사연보, **46**: 465-470.
- 양한섭, 권영안, 김규범, 김성수, 1992. 한국 동해 표층수 중 ^{226}Ra 와 ^{228}Ra 의 농도 분포. 한국수산학회지, **25**: 399-405.
- 양한섭, 김평중, 이재철, 문창호, 1994. Ra 동위체로 본 하계 동해 남부 연안해역에 출현하는 10°C 이하 냉수괴의 기원. 한국수산학회지, **27**: 404-412.
- 이동규, 강기룡, 한상복, 1996. 여름-가을 동해표층해역의 저염수에 관한 연구. 한국해양학회 학술발표회 1996년도 추계 요약집, pp. 81.
- 한국해양연구소, 1997. 인공위성추적부이에 의한 동중국해 동부역의 상층해류도. In: 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환, 과학기술처, pp. 142-148.
- Elsinger, R.J. and W.S. Moore, 1984. ^{226}Ra and ^{228}Ra in the mixing zones of the Pee Dee River-Winhay Bay, Yangtze River and Delaware Bay estuary. *Est. Coast. Shelf Sci.*, **18**: 601-613.
- Gu, Y.H., 1985. A study on the cause of the path turning of the Changjiang River dilute water. *Oceanol. Limnol. Sinica*, **16**: 362-369.
- Guan, B. and H. Mao, 1982. A note on circulation of the East China Sea. *Chinese J. Oceanogr. Limnol.*, **5**: 5-16.
- Harada, K. and S. Tsunogai, 1986. Ra-226 in the Japan Sea and the residence time of the Japan Sea Water. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **77**: 236-244.

- Isoda, Y., 1994. Warm eddy movements in the Eastern Japan Sea. *J. Oceanogr.*, **50**: 1–15.
- Kang, D.-J., C.S. Chung, S.-H. Kim, G.H. Hong and K.-R. Kim, 1994. Oxygen isotope characteristics of seawaters in the Yellow Sea. *La Mer*, **32**: 279–284.
- Kaufman, A., R. Trier and W.S. Moore, 1973. Distribution of ^{228}Ra in the world ocean. *J. Geophys. Res.*, **78**: 8827–8848.
- Kim, K.H. and W.C. Burnett, 1983. γ -ray spectrometric determination of uranium series nuclides in marine phosphorites. *Anal. Chem.*, **55**: 1797–1800.
- Kim, K.H. and W.C. Burnett, 1985. ^{226}Ra in phosphate nodules from the Peru/Chile seafloor. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**: 1073–1081.
- Lee, J.C., Y.J. Ro and D.-K. Lee, 1997. Structure of front and eddies off the coast of Korea: a preliminary reviews of the Polar Front Experiments. *Bull. Fac. Bioresour. Mie Univ.*, **17**: 77.
- Lie, H.-J. and C.-H. Cho, 1994. On the origin of the Tsushima Warm Current. *J. Geophys. Res.*, **99**: 25081–25091.
- Liu, B.Y., 1985. The interpretation for the distribution of the surface water in the East China Sea using the digital contrast stretching for the NOAA infrared information. *J. Shandong Coll. Oceanol.*, **15**(4): 23–30.
- Moore, W.S., 1969. The measurement of ^{228}Ra and ^{228}Th in seawater. *J. Geophys. Res.*, **74**: 694–704.
- Moore, W.S., 1976. Sampling ^{228}Ra in the deep ocean. *Deep-Sea Res.*, **23**: 647–651.
- Moore, W.S., R.M. Key and J.L. Sarmiento, 1985. Techniques for precise mapping of ^{226}Ra and ^{228}Ra in the ocean. *J. Geophys. Res.*, **90**: 6983–6994.
- Nozaki, Y., V. Kasemsypaya and H. Tsubota, 1989. Mean residence time of the shelf water in the East China Sea and the Yellow Sea determined by $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **16**: 1297–1300.
- Nozaki, Y., H. Tsubota, V. Kasemsupuya, M. Yashima and N. Ikuta, 1991. Residence times of surface water and particle reactive ^{210}Pb and ^{210}Po in the East China and Yellow Seas. *Geochim. Gosmochim. Acta*, **55**: 1265–1272.
- Okubo, T., 1980. Radium-228 in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **36**: 263–268.
- Scott, M.R., 1987. Continental margins as sources and sinks for open ocean tracers: evidence from radionuclides. *US GOFS Plan. Rept.*, **6**: 81–85.
- Yamada, M. and Y. Nozaki, 1986. Radium isotopes in coastal and open ocean surface waters of the western North Pacific. *Mar. Chem.*, **19**: 379–389.

1998년 4월 27일 원고 접수

1998년 8월 6일 수정본 채택