

Ra동위체로 본 하계 동해 남부 연안해역에 출현하는 10°C 이하 냉수괴의 기원

양한섭 · 김평중* · 이재철 · 문창호
부산수산대학교 해양학과 · *국립수산진흥원

Origin of the Cold Water below 10°C Occurring in the Southern Coastal Region of the Korean East Sea in Summer by Ra Isotope Distribution

Han-Soeb YANG, Pyoung-Joong KIM*, Jae-Chul LEE and Chang-Ho MOON

*Department of Oceanography, National Fisheries University of Pusan,
Pusan 608-737, Korea*

**National Fisheries Research and Development Agency,
Yangsan 626-900, Korea*

Radium isotopes were measured together with oceanographical parameters in the southern coastal region of the Korean East Sea during the period of September 2~8, 1991. In September, there were various water masses vertically distributed in this region due to formation of strongly seasonal thermoclines. These water masses were characterized by activity of radium isotopes as well as water temperature and dissolved oxygen.

Among the water masses, Japan Sea Proper Water(JSPW) below 1°C had the highest Ra-226 activities but the lowest Ra-228 concentrations. However, Tsushima Surface Water(TSW) above 20°C in water temperature had the highest Ra-228 which decreased sharply with depth. In TSW, Ra-228 activities were in the range of 194~270 dpm/kl, which were approximately 10 times higher than JSPW.

Activity ratios(A.R.'s) of Ra-228/Ra-226 were 1.9~2.6 for TSW, 0.7~1.1 for Tsushima Middle Water(TMW) of 12~17°C, 0.4~0.7 for North Korea Cold Water(NKCW) with 1~7°C and below 0.2 for JSPW. The Ra-228/Ra-226 ranged from 0.6 to 0.9 in the cold waters of 2~6°C, which were observed at depth of 65~120 m in this study area. Radium isotopes provided a useful means of identifying origins of the cold water which occurred annually at intermediate or bottom layers in the southern coastal zone of the Korean East Sea. By plotting radium isotopes against water temperature, it could be observed clearly that the cold waters between 2~6°C did not originate from the mixed water of JSPW and TMW but from NKCW.

서 론

하계 한국 동해에는 성질이 다른 수괴가 연직적으로 분포하고 있다. 이를테면, 표층에는 고온저염의 대마난류수가 존재하고 그 아래 수층에는 대마난류중층수 또는 혼합수괴가 있으며 약 250m 이심층에는 1°C 이하의 동해고유수가 존재한다. 특히, 하계 대한해협 서수도를 포함한 동해 남부 연안해역의 중·저층에는 2~10°C의 비교적 저온수가 거의 매년 출현하며, 이 저온수의 물리적 특성과 그 기원에 대해서 많은 연구(Lim and Chang, 1969; An, 1974; An and Chung, 1982; 김과 김, 1983; Lee and Na, 1985)가 수행되었다. 그러나, 이 저온수의 생성기작과 그 기원에 대해서는 아직 명확하게 밝혀져 있지 않을 뿐만 아니라 변질과정에 대해서도 많은 이견이 있다. 박(1978)은 인산염과 용존산소의 관계로부터 동해 중부 연안역의 중·저층에 출현하는 냉수괴는 북한한류역에서 침강하여 남하한 수괴이며, 감포 연안해역에만 극히 미약한 용승현상이 나타난다고 보고하였다. 그러나, 김과 김(1983)은 감포 연안해역에 나타나는 냉수괴도 묵호 북쪽 연안역으로 부터 남하한 북한한류수괴라고 주장하였다. 반면, Lee and Na(1985)에 의하면, 이러한 저온수는 동해저층냉수가 용승하면서 표·중층에 존재하는 난수괴와 혼합하여 변질된 수괴라고 상반된 의견을 제시하였다. 한편, 양 등(1991)은 동해 중부 극전선역에서 동계와 하계에 출현하는 각종 수괴의 화학적 특성을 조사하고 북한한류수와 기타 혼합수괴를 구별하는 parameter로서 AOU (Apparent Oxygen Utilization)가 염분 및 영양염류보다 더 유용하다고 보고한 바 있다.

Ra는 해수중 용해성이 비교적 강하므로 염분과 같이 해수의 수평 또는 수직혼합의 지표로 유용하게 이용되는 보존성 원소(conservative element)중의 하나이다. 특히, U/Th 계열 천연방사성 핵종인 Ra-228(반감기 5.75년)과 Ra-226(반감기 1622년)은 서로 다른 수괴의 물리적 혼합확산 과정의 추적자(tracer)로 많이 이용되어 왔다. 해수중 용존 Ra동위체의 주된 공급원의 하나는 하천수를 통한 유입이다. 또한, Ra-228은 대륙붕역 천해퇴적물로부터 상당량 용출되므로 외양역에 비해 연안역의 표층수층 농도가 상당히 높다(Moore, 1969; Li *et al.*, 1979). 반면에, Ra-226은 심해저 퇴적물로부터 많이 공급되기 때문에 심해 저층수층 농도가 매우 높다. 그리고, Ra-228의 반감기는 Ra-226에 비해 대단히 짧기 때문에 공급되는 양 뿐만아니라 연직혼

합속도에 따라서도 두 동위체의 연직농도분포는 달라질 수 있다. 따라서, 두 Ra동위체 및 동위체비의 분포로부터 수괴의 기원과 수평 혹은 수직 혼합확산의 속도를 알 수 있다(Reid *et al.*, 1979; Reid and Sackett, 1982; Reid, 1984; Elsinger and Moore, 1984; Nozaki *et al.*, 1991).

일반적으로 외양역에서 Ra-228은 표층수층 농도가 가장 높고 수심이 증가할수록 현저히 감소하나, Ra-226은 Ra-228과 정반대의 연직분포이다. 그러므로, 이 두 Ra동위체를 측정하면 동해에서 연직적으로 존재하는 각종 수괴를 특징지을 수 있을지도 모른다. Okubo(1980)는 동해에서 Ra-228을 측정하여 걸보기 수직와동확산계수를 추정할 바 있으며, Harada and Tsunogai(1986)는 Ra-226의 연직분포와 ¹⁴C 측정값으로부터 동해 심층수의 체류시간을 계산했다. 또한, 최근에는 동해 남부 연안해역 표층수층 Ra동위체의 농도로부터 동해 표층수의 기원과 특성에 대한 연구(양 등, 1992)도 있다. 그러나, 본 연구에서는 하계 동해 남부 연안해역에 출현하는 각종 수괴의 화학적 특성과 10°C 이하 저온수의 생성기작 혹은 변질과정을 보다 명료하게 밝히기 위하여 Ra동위체를 측정하였다.

재료 및 방법

부산에서 경북 영덕까지의 동해 남부 해역중 주로 수심 500 m 이하인 연안정점(Fig. 1)에서 1991년 9월 2~8일 사이에 부산수산대학교 실습선 부산 402호(총톤수 300톤)에 승선하여 수심별로 수온관측과 해수시료를 채취하였다. 수온은 수심 150 m까지 RCM-7 유속계를 이용하여 측정하였고, 용존산소 및 영양염류 측정용 시수는 반동채수기로 채수하였다. 한편, Ra동위체 분석을 위한 해수는 수중펌프(양수속도: 20l/min)를 사용하여 100~200 l를 채수하였다.

해수중 용존 Ra를 농축하기 위하여 선상에서 해수시료를 대량여과장치(직경 15cm, No. 2A 정성용여과지)로 여과한 다음, 양 등(1992)의 방법에 따라 MnO₂-fiber에 용존 Ra를 흡착시켰다. Ra동위원소를 흡착농축한 MnO₂-fiber 시료는 이온교환수로 탈염시킨 다음 비닐 봉지에 넣어 육상실험실로 옮겨 Ra를 분리정제하였다. 이 MnO₂-fiber를 (6M HCl+1% NH₂OH·HCl) 혼합용액 약 300 ml에 담귀 망간화이버가 하얗게 될때까지 가열한다. 용액을 여과하여 섬유찌꺼기를 제거한 후 여과용액의

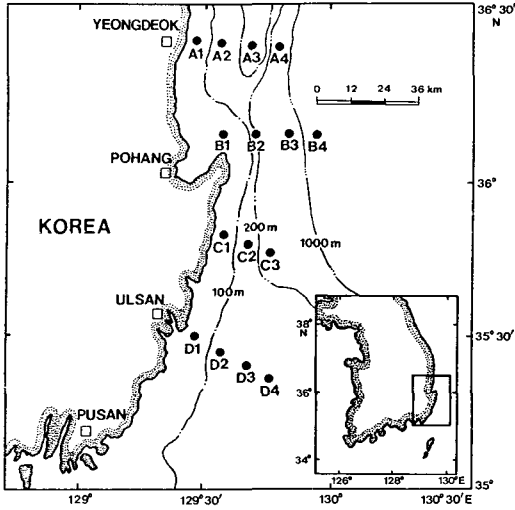


Fig. 1. Locations of the observation stations in the southern coastal region of the Korean East Sea. The contours represent bathymetry.

부피가 약 50 ml 되도록 천천히 가열 증발시킨다. 이 용액에 공침제인 Pb^{2+} 담체(carrier) 125 mg과 이온교환수 150 ml 및 10N H_2SO_4 10 ml를 첨가하여 잘 혼합하고 5N NaOH 용액을 첨가하여 용액의 pH를 1.8~2.0으로 조절한다. 이때 Ra는 $PbSO_4$ 와 함께 공침한다. 이 $PbSO_4(+Ra)$ 침전을 정량용 여과지(No. 5C)로 여과하여 450℃에서 10시간동안 회화(ashing)시키고 나서 감마선 계측용 용기에 넣어 항량을 구하고, 첨가한 Pb의 무게로 부터 화학적 수율을 계산하였다. 회화시킨 침전이 들어있는 감마선 계측용기를 밀봉한 후 Ra동위체가 딸렉종과 방사평형이 되도록 약 20일 이상 방치한 후 Ge(Li) 검출기로 감마선을 측정하였다. 이와같이 해상력이 높고 감도가 좋은 Ge(Li) 감마선 검출기를 사용하면 Ra동위체의 알파입자나 베타입자를 측정하는 방법보다 Ra의 화학적 분리 및 정제가 간단하고, Ra-226과 Ra-228을 동시에 측정할 수 있는 장점이 있다. 해수시료중 Ra동위체의 방사능 농도는 아래와 같은 식으로 계산한다.

$$A \text{ (dpm/l)} = \frac{(A_1 - A_2) \times e^{-\lambda t}}{E} \times \frac{1}{Y \times V(l)}$$

여기서, A는 해수시료중 Ra동위체의 방사능 농도(dpm/l)이고, A_1 은 시료의 Ra동위체 계수율(cpm), A_2 는 공시험값(cpm), λ 는 Ra동위체의 방사붕괴상수(min^{-1})이며, t는 시료채취일로부터 감마선 계측시까지 경과한 시간이다. 또한, E는 감마선

검출기의 계수효율(counting efficiency)이고, Y는 화학적 수율(chemical yield), V는 MnO_2 -fiber를 통과한 해수의 량(l)이다.

용존산소는 채수즉시 고정된 후 자동적정장치를 사용하여 선상에서 Winkler-Azide 방법으로 정량하였고, 영양염류 분석용 시료는 1% $CuSO_4$ 용액을 소량 첨가하여 냉동보관하였다가 육상실험실로 옮긴 다음 비색분석하였다(Strickland and Parsons, 1972). 또한 염분은 염분계(salinometer, Tsurumi model E-2)로 측정하였다.

결과 및 고찰

수온의 연직분포 특성

본 연구해역의 4개 단면(transect)에서 각 수괴의 연직분포 특성을 알아보기 위하여 수온의 수직분포도를 Fig. 2에 나타내었다. 수온의 연직분포를 보면 상대적으로 북쪽에 위치한 단면 A(영덕지선)와 단면 B(장기갑지선)에서는 수온약층(thermocline)이 대체적으로 10~30 m 사이의 수층에 존재하고 있으며, 특히 단면 B의 경우 연안정점 B1에서는 10~20 m 사이에 그리고 나머지 정점들에서는 대개 20~30 m 사이 수층에 수온약층이 존재하고 있다. 이 두 단면에 비해 단면 C(감포지선)에서는 다소 깊은 30~50 m 사이의 수층에 수온약층이 나타나고 있다. 그러나, 단면 D(울기지선)에서는 다

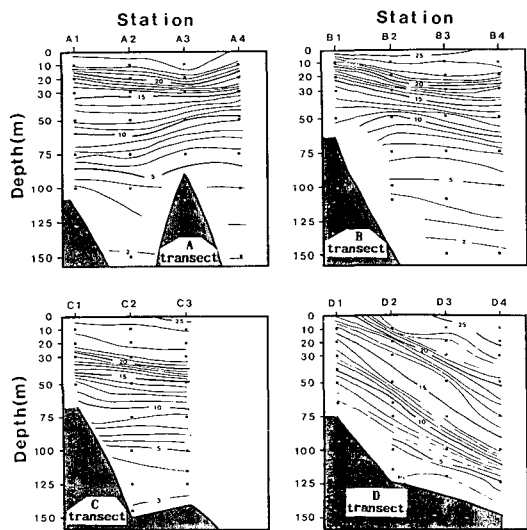


Fig. 2. Depth profiles of water temperature(°C) on each transect during 2~8 September 1991.

른 단면에서와는 달리 2개의 수온약층이 존재하며, 또한 연안정점에서 바깥쪽 정점으로 갈수록 수온약층이 나타나는 수심이 급격히 깊어지는 것이 특징적이다. 즉, 연안정점 D1에서는 10 m층의 상부 수층에 제1수온약층이 존재하고 있으나 바깥 정점으로 갈수록 점차 깊어져서 가장 바깥쪽 정점 D4에서는 40~60 m 사이에 존재하고 있으며, 제2수온약층도 마찬가지로 정점 D1에서는 30~50 m 사이의 수층에 존재하나 정점 D4에서는 100~125 m 사이에 나타나고 있다.

대마난류중층수의 특성을 나타내는 12~17°C의 수온은 각 단면과 정점별로 다르지만, 대체적으로 수온약층 하부에서 10~20 m 아래의 수층에 분포하고 있고, 특히 단면 D에서는 제1수온약층 하부와 제2수온약층 상부 사이의 수층에 존재하고 있다. 그리고, 하계 대마난류표층수의 특징인 20°C 이상의 수온은 정점 D1을 제외한 모든 정점에서 수온약층(단면 D의 경우 제1수온약층) 상부 수층에 나타나고 있다. 표층수온은 정점 D1에서 19.9°C로 최저수온을 나타냈지만, 나머지 정점들의 표층수온은 24~26°C 범위에 있었다. 한편, 10°C 이하의 냉수괴는 단면 A와 B에서는 대체적으로 50 m 이심층에 존재하나, 단면 C에서는 약 60 m 이심층에 나타나고 있다. 그러나, 단면 D에서는 10°C 등온선이 제2수온약층의 중심부에 있으며, 정점 D1에서는 40 m 수층에 존재하고 점점 깊어져서 가장 바깥쪽의 정점 D4에서는 약 110 m 수층에 10°C 등온선이 나타난다.

하계 동해에는 연직적으로 대마난류표층수, 대마난류중층수 및 동해고유수가 존재하며, 이들 수괴는 수온 및 염분으로 뚜렷하게 구별할 수 있다. 양 등(1991)에 의하면, 수온이 20°C 이상이고 염분이 33.8‰ 이하인 수괴를 대마난류표층수(TSW), 12~17°C의 수온범위와 34.20~34.50‰의 염분범위를 갖는 수괴를 대마난류중층수(TMW) 그리고 1°C 이하의 수온과 34.00~34.16‰의 염분농도를 보이는 수괴를 동해고유수(JSPW)라 부른다. 본 연구의 조사 정점에서도 표층 최저수온을 나타낸 정점 D1을 제외한 모든 정점에서 20°C 이상의 수온(20.1~25.7°C)을 나타내는 수층의 염분은 29.40~32.76‰의 범위였으며, 수온약층 상부층에 대마난류표층수가 존재한다. 또한, 12~17°C의 수온범위를 보이는 수층의 염분은 34.29~34.43‰이었고, 이는 대마난류중층수의 특성값이다. 앞서 수온의 연직분포에서 언급한 바와 같이, 이 대마난류중층수의 존재 수심은 정점별로 다르지만 대마난류표층

수의 아래 수층에 존재한다. 그러나, 본 연구에서 수심 150 m까지의 측정값 중 수온 1°C 이하의 동해고유수는 나타나지 않았다.

한편, 수온범위가 1~7°C이고 염분이 33.95~34.20‰인 수괴를 북한한류수(NKCW)라고 정의하고 있으나(Gong and Park, 1969; 양 등, 1991), 염분범위가 동해고유수와 거의 차이가 없기 때문에 1~10°C의 상대적 저온수가 동해고유수와 대마난류중층수의 혼합수괴인지 북한한류수인지는 수온 및 염분으로 구별하기가 어렵다.

수층별 Ra 동위체 농도

본 연구에서는 9개 정점의 2~3개 수층에서 채수한 해수의 Ra동위체 농도를 측정하였으며, 그 측정값은 다른 화학적 자료와 함께 Table 1에 나타내었다. Ra동위체의 농도는 정점별 혹은 수층별로 큰 차이가 있다. 따라서, 표층수, 30~60 m 수층 및 65~120 m 수층으로 나누어 Ra 동위체의 농도 및 동위체비에 대하여 고찰하고자 한다.

표층수의 경우, 수온이 19.9°C로 가장 낮고 염분이 32.93‰로 가장 높은 정점 D1을 제외하면 수온은 24.4~25.7°C이고 염분은 29.40~32.76‰ 범위로서 대마난류표층수의 특징을 가진 해수이다. 또한, 염분은 영일만 입구쪽 연안정점 B1에서 29.40‰로 가장 낮았으며, 이는 영일만으로 부터 유입된 하천수의 영향인 것으로 생각된다. 이 정점 B1에서 표층수중 Ra-228 및 Ra-226은 각각 356 dpm/kl와 142 dpm/kl로 가장 높은 농도이며, 이 또한 하천수의 영향 때문일 것이다. 그러나, 표층 수온이 가장 낮은 정점 D1에서 Ra-228 및 Ra-226의 농도는 각각 157 dpm/kl와 85 dpm/kl로 표층수중 가장 낮은 값을 보였고, 이것은 표층수보다 비교적 낮은 농도를 갖는 중·저층수의 혼합에 기인한다고 생각된다. 위의 두 정점을 제외한 나머지 정점에서 표층수중 Ra동위체의 평균농도 ± 표준편차는 Ra-228이 225 ± 23 dpm/kl이고, Ra-226이 99 ± 6 dpm/kl로서 Ra-228이 Ra-226보다 정점간 차이가 더 크다. 또한, 표층수중 Ra-228/Ra-226 방사능비는 정점 D1에서 1.9로 가장 작고 그 이외의 정점에서는 2.1~2.6 범위이다. 이들 값은 양 등(1992)에 의해 1988년 9월 중순 거의 동일한 해역의 표층수중에서 측정된 값들과 아주 잘 일치하며, 하계 대마난류표층수의 특성값이라고 할 수 있다.

수심 30~60 m 사이의 수층에서 측정된 수온은 10.0~14.3°C이고, 염분은 34.17~34.43‰ 범위였다. 이 수층범위에서 Ra-228의 방사능 농도는 정점 D1

Table 1. Chemical data for waters in the southern region of the Korean East Sea during September 2~8, 1991

Stn.	Depth (m)	Temp. (°C)	Sal. (‰)	DO (ml/l)	PO ₄ -P (μg-at/l)	NO ₃ -N (μg-at/l)	SiO ₂ -Si (μg-at/l)	²²⁸ Ra (dpm/kl)	²²⁶ Ra (dpm/kl)	²²⁸ Ra ²²⁶ Ra
A1	0	24.44	31.54	5.54	0.09	0.51	1.91	194 ± 6	93 ± 3	2.09
	50	12.03	34.38	5.18	0.78	11.08	16.50	59 ± 4	76 ± 3	0.78
	100	2.90	34.10	6.18	1.07	13.29	21.40	46 ± 3	74 ± 4	0.62
A3	0	24.26	31.70	5.52	0.09	0.03	3.31	235 ± 10	105 ± 5	2.24
	75	5.35	34.09	5.09	1.15	12.36	18.20	64 ± 3	94 ± 3	0.68
B1	0	25.70	29.40	5.25	0.04	0.44	1.69	356 ± 11	142 ± 6	2.51
	50	11.40	34.35	4.57	1.16	12.72	22.97	64 ± 3	86 ± 3	0.74
B3	0	25.61	31.70	5.52	0.18	0.23	2.53	213 ± 11	102 ± 5	2.09
	110	4.20	34.10	5.93	0.92	9.38	11.28	74 ± 4	85 ± 3	0.87
C1	0	24.81	32.13	5.60	0.18	0.77	5.62	206 ± 11	99 ± 5	2.08
	50	11.21	34.31	4.65	0.78	10.84	20.71	77 ± 4	68 ± 3	1.13
C3	0	25.43	32.76	5.29	0.46	1.52	6.52	234 ± 10	103 ± 4	2.27
	50	14.26	34.36	3.92	1.02	12.29	15.87	63 ± 2	85 ± 2	0.77
	115	4.01	34.07	5.86	1.15	13.37	23.77	55 ± 4	71 ± 3	0.77
D1	0	19.88	32.93	4.73	0.88	8.38	10.03	157 ± 6	85 ± 3	1.85
	30	12.16	34.17	4.16	0.93	10.17	18.80	92 ± 3	81 ± 3	1.14
	40	10.03	34.29	4.32	1.11	12.16	24.12	82 ± 4	86 ± 3	0.95
	65	5.38	34.09	5.42	1.39	14.81	24.82	70 ± 4	97 ± 3	0.72
D2	0	24.66	31.36	5.49	0.23	0.54	2.41	270 ± 6	105 ± 3	2.57
	60	11.88	34.43	4.57	0.68	8.77	17.55	59 ± 3	81 ± 3	0.73
	120	3.21	34.17	5.97	1.29	16.88	25.00	59 ± 3	88 ± 4	0.67
D3	9	25.43	32.24	5.07	0.23	2.88	3.71	225 ± 9	87 ± 4	2.59
	120	3.03	34.09	5.85	1.20	14.71	25.63	46 ± 3	84 ± 3	0.55

의 30 m 및 40 m 수층에서 다소 높은 값을 보이나, 59~92 dpm/kl(평균농도 ± 표준편차, 71 ± 12 dpm/kl)로서 표층수층 농도의 약 1/3정도이다. 그리고, Ra-226의 농도는 68~86 dpm/kl로 Ra-228보다 정점간 차이가 작고, 평균농도 ± 표준편차도 80 ± 6 dpm/kl로 표층수층 농도보다 약 20% 정도 작다. 또한, 두 Ra동위체의 방사능비는 0.7~1.1 범위로 표층수층 동위체비의 약 1/2정도이다.

수심 65~120 m 사이의 수층에서 측정된 결과를 보면, 수온범위는 2.9~5.4°C이고 염분은 34.07~34.17 ‰로 정점과 수심별로 수온은 2.5°C의 차이가 있으며, 염분은 0.1 ‰의 차이 밖에 없다. 그러나, Ra동위체의 농도는 대체적으로 얇은 수층에서 비교적 큰 값을 보였으며, 정점간 농도차이는 Ra-228이 Ra-226보다 비교적 컸다. 즉, Ra-228의 농도범위

(평균농도 ± 표준편차)는 46~74 dpm/kl(59 ± 10 dpm/kl)이고, Ra-226은 71~97 dpm/kl(85 ± 9 dpm/kl)였으며, 두 동위체의 비는 0.6~0.9(0.7 ± 0.1)이다. Ra-228의 농도는 중간수층에서의 측정값보다 약 20% 정도 작은 값이나, Ra-226의 농도는 중간수층보다 오히려 약간 크며 두 동위체의 비값도 중간 수층보다 약 20% 작다.

동해 북동부의 일본쪽 해역인 리만한류해역의 표층 55~80 m 사이의 수층에서 측정된 수온과 염분은 각각 1~5°C와 34 ‰정도이고, Ra-228의 방사능 농도는 47~56 dpm/kl 범위였다(Okubo, 1980). 본 연구에서 100~120 m 사이의 수층에서 측정된 Ra-228의 농도는 위의 리만한류해역에서 측정된 값과 대체적으로 같은 농도범위이다. 또한, 동해 일본쪽의 해역에서 본 연구에서와 비슷한 수

은범위를 갖는 수심 (80~100 m)에서 측정된 Ra-226의 농도는 86~92 dpm/kl 이었으며(Harada and Tsunogai, 1986), 이는 본 연구에서 측정된 값과 유사하다. 한편, 200 m 이심에 존재하는 1°C 이하의 동해고유수층 Ra동위체의 농도는 깊이에 따라 다소 다르지만 200~300 m 사이의 수층에서 Ra-228과 Ra-226의 농도는 각각 약 20~30 dpm/kl 와 140~150 dpm/kl 정도이며, Ra-228/Ra-226의 방사능 비는 0.2 이하이다(Okubo, 1980; Harada and Tsunogai, 1986). 본 연구에서 측정된 Ra-228/Ra-226의 방사능 비는 Ra-228의 방사능 농도와 좋은 정적 상관성을 보인다(Fig. 3). 그리고, 두 동위체의 방사능비는 0.6~2.6 범위이며, 대체적으로 표층수에서 가장 크고, 65~120 m 수층의 값이 가장 작다. 이처럼 Ra-228/Ra-226 방사능 비와 Ra-228의 농도가 수층별로 큰 차이를 보이는 것은 체류시간이 다르거나 서로 다른 기원의 수괴가 연속적으로 존재하고 있음을 시사한다.

냉수괴의 기원

동해 남부 연안 해역의 중·저층에 출현하는 수온 1~7°C범위의 냉수괴가 북한한류수가 남하한 것인지 혹은 1°C 이하의 동해고유수와 12~17°C의 대마난류중층수가 혼합된 수괴인지를 구분하기 위해, Table 1의 자료로부터 수온에 대한 용존산소 및 Ra동위체의 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

T-O₂ diagram(Fig. 4)을 보면, 대체적으로 수온과 용존산소는 역의 관계를 나타낸다. 표층 30~60 m 수층에서 측정된 수온범위는 10.03~14.26°C이고, 용존산소는 3.92~5.18 ml/l이다. 그중 정점 A1의 50 m 수층에서의 용존산소농도는 5.18 ml/l로 대마난류중층수의 상한값 5.0 ml/l보다 약간 높으나, 정점 D1의 30 m와 40 m 수층의 용존산소는 대마난류중층수의 하한값인 4.3 ml/l보다 다소 낮다. 한편, 수온이 2.90~5.38°C범위인 65 m 이심층의 용존산소는 정점별 농도차가 크다. 즉 비교적 얇은 수층인 정점 D1의 65 m 수층과 정점 A3의 75 m 수층에서는 수온이 약 5.4°C로 높은 반면에, 용존산소는 동해고유수보다 다소 낮았다. 북한한류수의 특성인 용존산소 6.0 ml/l 이상인 것은 가장 북쪽단면의 연안정점 A1의 100 m 수층 하나 뿐이다. 이 T-O₂ diagram으로 볼때 정점 A3의 75 m 수층과 정점 D1의 65 m 수층의 해수는 동해고유수와 대마난류중층수의 혼합수이고, 그밖의 저온수는 북한한류수가 다소 변질된 것으로 보인다. 그러나, 2~6°C범위의 냉수괴가 존재하고 있는 대부분 정점의 100 m 이

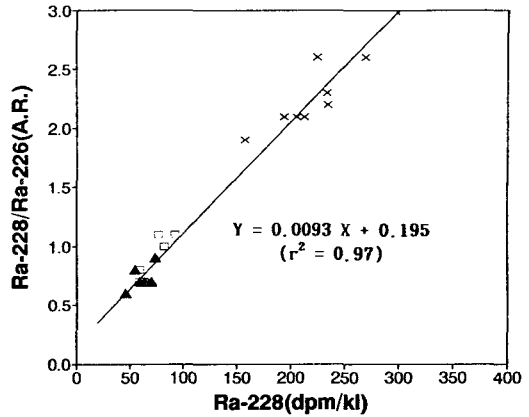


Fig. 3. Relationships between Ra-228 and activity ratio(A.R.) of (Ra-228/Ra-226) except surface data of station B1. The cross symbol indicates the values for surface water, the square symbol for the upper 30~60 m and the filled triangle for 65~120 m in depth.

심층에서의 용존산소는 5.85~5.97 ml/l로 양 등(1991)이 정의한 동해고유수의 용존산소 특성값과 비슷한 것으로 보아 북한한류수인지 혹은 혼합수괴인지를 단정하기가 어렵다.

한편, 지금까지 동해 외양역에서 조사된 Ra동위체 자료(Okubo, 1980; Harada and Tsunogai, 1986)와 본 연구의 결과를 종합하여 각 수괴의 Ra동위체 특성값을 Fig. 4에 나타내었다. 즉, 50~100 m 사이의 아표층에 존재하는 대마난류중층수의 Ra-228 농도범위는 60~95 dpm/kl, Ra-226은 65~85 dpm/kl이고, 두 동위체의 비(Ra-228/Ra-226)는 0.7~1.1 범위이다. 그러나, 100~500 m 사이의 수층에 존재하는 동해고유수의 Ra-228은 10~20 dpm/kl, Ra-226은 140~150 dpm/kl이며, 두 동위체의 비는 0.2 이하로 매우 낮은 값을 보인다. 즉, 대마난류중층수에 비해 동해고유수의 Ra-228은 현저히 감소하나, Ra-226은 반대로 증가한다. 그리고, 동해 북쪽 리만한류역의 50~80 m 수층에서 측정 보고된 수온 1~5°C 범위를 갖는 한류수의 Ra-228 농도는 45~60 dpm/kl이고, Ra-226은 85~95 dpm/kl이며, 두 동위체의 비는 0.4~0.7이다. 북한한류수역에서 1~7°C의 수온범위를 갖는 북한한류수의 Ra동위체 측정값은 보고된 바 없으므로 리만한류역에서 측정 보고된 값을 북한한류수의 특성값으로 하였다.

이와같이, 두 동위체의 농도와 동위체비 값이 수

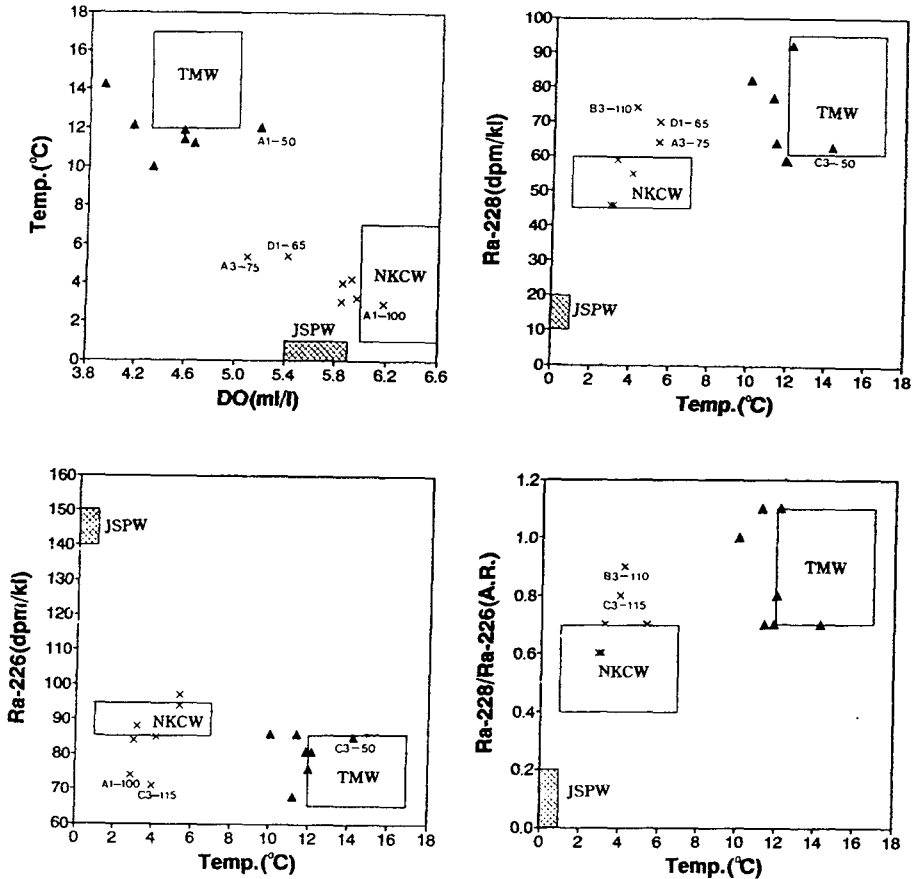


Fig. 4. Dissolved oxygen(DO), Ra-228, Ra-226 and activity ratio(A.R.) of(Ra-228/Ra-226) as functions of water temperature. Filled triangles show data for upper 30~60 m layers and cross symbols are for 65~120 m layers. Each box represent criteria of TMW(Tsushima Middle Water), NKCW(North Korea Cold Water) and JSPW(Japan Sea Proper Water) which were data compiled from literature(Okubo, 1980; Harada and Tsunogai, 1986; Yang *et al.*, 1991, 1992).

괴별 혹은 수층별로 현저히 달라지기 때문에, Ra동위체와 수온과의 관계로부터 동해 남부 연안해역의 중·저층에 나타나는 수온 1~7°C범위인 냉수괴가 어떠한 기원을 갖는 해수인지를 고찰해보자. 이 냉수괴의 Ra-228은 46~74 dpm/kl이고, Ra-226은 71~97 dpm/kl이며, 두 동위체의 비는 0.6~0.9로서 북한한류수보다 동위체비가 다소 크다. 만일, 수온 2~6°C의 해수가 동해고유수와 대마난류중층수가 혼합되어 형성되었다면, 이 냉수괴의 Ra동위체 측정값은 두 수괴를 연결한 직선상에 있어야 한다. 그러나, Ra-228과 두 동위체의 비는 두 수괴를 연결한 직선보다 훨씬 위에 있고, Ra-226은 직선의 아래에 놓여 있다. 이것은 다시말해서 동해고유수보다 Ra-228이 더 높고 Ra-226 값이 더 낮은 수괴

가 유입되었음을 의미한다. 이러한 수괴로서는 북한한류수와 대마난류표층수를 생각할 수 있다. 그러나, 앞에서 언급한 바와 같이 대마난류표층수는 수온이 20°C 이상이고 Ra동위체비 값도 2~3 정도이나, 이 해역에서는 강한 계절수온약층 때문에 표층과 혼합이 용이하지 않다. 그러므로, 이러한 수괴는 북한한류수 기원이라고 말할 수 있다. 결과적으로 본 연구에서 2.90~3.21°C의 비교적 낮은 수온 범위를 보이는 정점 A1, D2 및 D3의 100~120 m 수층의 해수는 북한한류수라고 판단된다. 그러나, 비교적 얕은 수층인 정점 A3의 75 m 수층과 정점 D1의 65 m 수층 그리고 수심이 비교적 깊은(수심 200 m 이상) 정점 B3와 정점 C3의 110~115 m 수층의 해수는 북한한류수의 특성값보다 Ra-228

농도와 두 동위체의 비값이 큰 것으로 보아 변질된 해수 즉, 북한한류수가 대마난류중층수 혹은 표층수와 혼합된 해수인 것 같다. 이를테면, 비교적 북쪽에 위치한 정점 B3에서는 다른 정점들의 비슷한 수층에 비해 Ra-228의 농도는 다소 높지만, 영양염류 농도가 현저히 낮은 것으로 보아 표층수의 영향을 비교적 많이 받은 해수라고 생각된다.

한편, 10~15°C범위의 수온을 보이는 정점 D1의 30 m와 40 m 수층 그리고 정점 C1의 50 m 수층의 해수는 대마난류중층수에 비해 염분이 다소 낮으나, Ra동위체의 비는 대마난류중층수의 특성값 중에서도 비교적 크다. 이는 수온의 연직분포(Fig. 2)에서 알 수 있듯이 표층 50 m 이내의 수층에서 수직안정도가 다른 정점에 비해 작기 때문에 Ra동위체의 비가 큰 표층수의 영향인 것 같다. 이상에서 보는 바와 같이, 동해 남부 연안해역에 출현하는 각 수괴의 고유한 Ra동위체 농도를 이용하여 이들 수괴의 기원은 물론 서로 다른 수괴의 혼합정도를 파악할 수 있다. 그러므로, 동해에서 Ra동위체의 연직분포를 보다 세밀하게 측정한다면, 표·중층의 수직 와동확산계수와 각 수괴의 물리적 혼합확산과정 및 체류시간 추정이 가능할 것으로 믿는다.

요 약

하계 한국 동해 남부 연안해역의 4개 단면에서 1991년 9월 2~8일 사이에 수온관측 및 Ra동위체의 농도를 측정하였다. 수온의 연직분포를 보면, 북쪽 단면 A와 B에서는 강한 계절수온약층이 대체적으로 표층 10~30 m 사이의 수층에 존재하고, 단면 C에서는 30~50 m 수층에 수온약층이 나타난다. 단면 D에서는 특이하게 2개의 수온약층이 존재하고 연안쪽 정점에서 바깥쪽 정점으로 갈수록 수온약층의 존재수심은 급격히 깊어지는 것이 특징적이다. 그리고, 수온약층 상부에는 수온 20°C 이상의 대마난류표층수가 존재하고, 수온약층 바로 아래 수층에는 수온 12~17°C의 대마난류중층수가 나타나며, 이 아래 수층에는 기원이 불분명한 10°C 이하의 냉수괴가 나타나고, 수심 약 150 m 이심층에는 1°C 이하의 동해고유수가 존재한다.

9개 정점의 2~3개 수층에서 채수한 해수의 Ra동위체 농도를 측정한 결과, 대마난류표층수의 특성값은 Ra-228이 225 ± 23 dpm/kl, Ra-226이 99 ± 6 dpm/kl이며, Ra-228/Ra-226 방사능의 비는 1.9~2.6 범위였다. 대마난류중층수의 특성값은 Ra-228이 71

± 12 dpm/kl로 표층수층 농도의 약 1/3정도이고, Ra-226은 80 ± 6 dpm/kl이며, 두 동위체의 비는 0.7~1.1범위였다. 한편, 수온 2~6°C범위의 냉수괴는 Ra-228이 59 ± 10 dpm/kl이고, Ra-226은 85 ± 9 dpm/kl였으며, 두 동위체의 비는 0.6~0.9범위였다.

65~120 m 사이의 수층에서 수온 2~6°C범위를 보이는 냉수괴의 기원을 밝히기 위하여 수온에 대한 용존산소 및 Ra동위체의 농도(혹은 동위체비)의 diagram을 분석하였다. 그 결과, 이 냉수괴는 북한한류수인 것으로 판명되었다. T-O₂ diagram으로는 이 냉수괴의 기원을 알기 어려웠지만 Ra동위체의 농도를 이용하면 보다 명료하게 그 기원을 알 수 있었다. 그러므로, 동해에서 Ra동위체의 연직분포 측정은 각종 수괴의 혼합확산이나 변질과정을 이해하는 데 유용할 것이다.

참 고 문 헌

- 김철호·김구. 1983. 한국 동해안에 출현하는 冷水塊의 특성과 기원. 한국해양학회지, 18(1), 73~83.
- 박청길. 1978. 한국동해안 냉수괴의 해양화학적 고찰. 한국수산학회지, 11, 49~54.
- 양한섭·김성수·강창근·조규대. 1991. 한반도 근해의 해류와 해수특성 III. 한국 동해 중부 극전선역에 출현하는 수괴의 화학적 특성. 한국수산학회지, 24(3), 185~192.
- 양한섭·권영안·김규범·김성수. 1992. 한국 동해 표층수층 ²²⁶Ra과 ²²⁸Ra의 농도분포. 한국수산학회지, 25(5), 399~405.
- An, H. S. 1974. On the cold water mass around the southeast coast of Korean Peninsula. J. Oceanol. Soc. Korea, 9, 10~18.
- An, H. S. and J. Y. Chung. 1982. The fluctuation of the thermal front in the southeastern area off Korea. J. Oceanol. Soc. Korea, 18(1), 33~40.
- Elsinger, R. J. and W. S. Moore. 1984. ²²⁶Ra and ²²⁸Ra in the mixing zones of the Pee Dee River-Winyah Bay, Yangtze River and Delaware Bay Estuaries. Estuar. Coast. Shelf Sci., 18, 601~613.
- Gong, Y. and C. K. Park. 1969. On the oceanographical character of the low temperature region in the Eastern Sea of Korea. Bull. Fish. Res. Dev. Agency, 4, 69~91.

- Harada, K. and S. Tsunogai. 1986. ^{226}Ra in the Japan Sea and the residence time of the Japan Sea Water. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 77, 236~244.
- Lee, J. C. and J. Y. Na. 1985. Structure of upwelling off the southeast coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20(3), 6~19.
- Li, Y. H., H. W. Feely and P. H. Santschi. 1979. ^{228}Th - ^{228}Ra radioactive disequilibrium in the New York Bight and its implications for coastal pollution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 42, 13~26.
- Lim, D. B. and S. D. Chang. 1969. On the cold water mass in the Korea strait. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 4(2), 71~82.
- Moore, W. S. 1969. Ocean concentration of ^{228}Ra . *Earth Planet. Sci. Lett.*, 6, 437~446.
- Nozaki, Y. 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(11), 1297~1300.
- Nozaki, Y., H. Tsubota, V. Kasumsupaya, 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. Cosmochim. Acta.*, 55, 1265~1272.
- Okubo, T. 1980. Radium-228 in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 36, 263~268.
- Reid, D. F., W. S. Moore and W. M. Sackett. 1979. Temporal variation of ^{228}Ra in the near-surface Gulf of Mexico. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 43, 227~236.
- Reid, D. F. and W. M. Sackett. 1982. Radium in the near surface Caribbean Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 60, 17~26.
- 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.
- Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons. 1972. *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, 167, 3119.

1994년 6월 4일 접수

1994년 7월 9일 수리