

해양심층수와 지하염수 자원의 특성

문덕수[†] · 정동호 · 김현주 · 신필권
한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Comparative Analysis on Resources Characteristics of Deep Ocean Water and Brine Groundwater

D.S. Moon[†], D.H. Jung, H.J. Kim and P.K. Shin

Korea Ocean Research & Development Institute/Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KORDI/KRISO), Daejeon 305-600, Korea

요 약

해양심층수는 겨울철 표층수의 냉각으로 인하여 동해 고위도 지역인 극 지역에서 형성된 후 점차로 표층수와 혼합이 차단된 상태로 순환한다. 하구역 혼합만큼 뚜렷하지는 않지만, 지하염수는 순환해수와 지하수의 혼합물이다. 높은 삼투압을 가지고 있는 해수는 바다와 연결된 대수층으로 스며들어 지하수와 혼합하게 된다. 해양심층수와 지하염수의 자원특성을 파악하기 위하여 이들 수괴의 기원과 성분 및 각 수자원에 대한 수질 특성과 자원 안정성을 조사하였다. 해수 중 산소와 수소 동위원소 비는 0%, 인 반면, 지하염수는 지표수의 순환선(meteoric water line) 위에 있거나, 벗어나는 경우도 있다. 이러한 현상은 두 수괴가 다른 기원을 가지고 있다는 것을 의미한다. 해수에 용존된 주성분 이온(Na, Ca, Mg, K) 들은 각각 일정한 성분비를 이루고 있다. 그러나 지하염수에서 이들 주성분 원소들의 일정성분비의 법칙이 성립하지 않는 것이 관측되었다. 그 이유는 주변 토양과 지하수 사이의 화학적 반응에 기인한다. 또한 해양심층수는 지하염수에 비하여 기능성 미량 원소들이 풍부하고 생물학적 친화력이 높은 반면, 유해한 박테리아와 인공 오염물이 적은 특성을 가지고 있으며, 자원적인 측면에서도 안정성을 가지고 있다.

Abstract – Deep Ocean Water (DOW) is formed within restricted area including polar sea (high latitude) by cooling of surface seawater and globally circulating in the state of isolation from surface seawater. Although it is not as obvious as estuaries mixing, brine ground water is mixture of recirculated seawater and ground water. Seawater having high osmotic pressure infiltrates into an aquifer which is connected to the sea. In order to clarify the characteristics of deep ocean water and brine ground water, we investigated their origins, chemical compositions, water qualities and resources stabilities. While concentrations of stable isotopes (¹⁸O and ²H) in seawater is 0‰, those in brine ground water is on meteoric water line or shifted toward oxygen line. It means that origin of brine ground water is different than that of deep ocean water. The ions dissolved in seawater (Na, Ca, Mg, K) are present in constant proportions to each other and to the total salt content of seawater. However deviations in ion proportions have been observed in some brine ground water. Some causes of these exception to the rule of constant proportions are due to many chemical reactions between periphery soil and ground water. While DOW has a large quantity of functional trace metals and biological affinity relative to brine ground water, DOW has relatively small amount of harmful bacteria and artificial pollutants.

Keywords: Deep ocean water(해양심층수), Brine groundwater(지하염수), Water resources(수자원), Chemical composition of water resources(수자원의 화학적 조성)

1. 서 론

해양심층수란 “태양광이 도달하지 않는 수심 200 m 이상의 깊은 곳에 존재하여 유기물이나 병원균 등이 거의 없을 뿐 아니라

연중 안정된 저온을 유지하고 있으며, 해양식물의 생장에 필수적인 영양염류가 풍부할 뿐 아니라 생물(인체)의 구성원소와 유사한 조성을 하고 있는 해수”(김현주 등 [2002])로 정의된다. 수심 200 m 이상에 부존하는 “해양심층수”는 저온 안정성, 부영양성, 청정성 등의 자원적 특성을 가지고 있으며, 생물유래 무기원소의 공급에 의해 그 조성이 생물과 비슷한 특성을 가지고 있다. 한편, 최근 연

[†]Corresponding author: dsmoon@kriso.re.kr

안 역에서 지하수를 개발하는 과정에 염수가 나오자 “지하염수”를 지하 심층에서 퍼 올린 해수라는 의미의 ‘해양암반심층수’ 급기야는 ‘해양성 심층수’ 등으로 오도하는 사례 늘고 있다.

지하염수도 그 자체로서 유용한 자원이 될 수 있음에도 불구하고 해양심층수와 혼동되게 호칭함에 따라 국민들의 직접적인 또는 간접적인 피해가 우려되고 있고, 그 차이에 대한 체계적인 분류와 자원적 차별성을 명확히 할 필요가 있는 것으로 강조되고 있다.

이로부터, 본 연구에서는 해양심층수와 지하염수의 생성기구를 고찰하고, 이에 따른 수질특성을 비교분석함으로써 두 수자원의 효율적 활용방안에 대해 발전적 고찰을 실시하고자 한다.

2. 실험 및 분석방법

본 조사는 동해 표층수와 심층수의 계절별 수질 변화를 알아보기 위하여, 강원도 고성군 연안에서 3 km 떨어진 심층수 취수 예정 지역 3곳(St. 1, 2 및 3)을 매달 조사하였다. 또한 지하염수의 수질을 조사하기 위하여 경기도 서해안과 남해안 그리고 한반도 남동해안 지역에서 지하관정을 이용하여 개발된 지하염수를 조사 대상으로 하였다.

동해 표층수와 심층수의 수질 환경 조사를 위해 강원도립대학에서 보유하고 있는 소형 조사선(강원 401호와 해송호)을 이용하였다. 동해 심층수의 수질변화를 조사하기 위해 4 l 용량의 반돈(Van Dorn) 채수기를 사용하여 원하는 수심까지 원치로 내린 후 전달 추(messenger)를 내려 닫히게 한 다음 채수하였다. 채수한 물은 측정목적에 맞게 폴리에틸렌병과 멸균 채수병에 채수하여 실험실로 옮겨와 실험하였다. 채수된 해수 시료의 수온과 염분, pH 그리고 용존산소는 채수와 동시에 관측된 C.T.D(Idronaut 316)에서 자료를 취하였다. 지하염수의 수온·염분·pH·용존산소는 현장에서 D.O Meter(Yellow Springs Instruments Co. Model 55, USA)와 염분도계(Yellow Springs Instruments Co. Model 30, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였다.

본 연구에서 수행한 미량원소 분석을 위한 시료 채취를 위해 미리 산으로 세척한 4 l 고밀도 폴리에틸렌 병을 사용하였다. 채취된 시료는 이물질의 유입을 방지하기 위하여 폴리에틸렌 필름으로 이중 포장한 후 즉시 실험실로 옮겨졌고 시료 1 l 당 증류된 염산(6N) 4 ml를 가한 후 분석 때까지 상온에 보관하였다. 미량원소 분석을 위한 실험에 사용된 모든 시약은 증금속 측정용 또는 고순도 시약이었으며, 용액의 제조 및 세척은 정제된 초순수를 이용하였다. 미량원소들은 APDC-NaDDC 혼합용액과 시트레이트 완충용액을 이용하여 브롤런드의 용매추출법을 변형시켰으며 분리 및 농축하여 ICP(Perkin Elmer Optima 2000DV)를 이용하여 미량원소의 분석을 실시하였다(해양수산부, [1997]). 미량원소의 분리 및 농축은 위한 모든 조작들은 Clean bench에서 수행하였으며, 측정계통 오차를 줄이기 위하여 실험실에서 제작한 질 검정을 위한 표준물질도 함께 분석하였다.

화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand: COD)은 해수 시료 50 ml에 알칼리성 하에서 일정과량의 과망간산칼륨용액을 더하고 수욕상에서 50분간 가열한 후 냉각시켰다(해양환경공정시험방법, [1988]). 그 다음 시료용액에 요오드칼륨을 넣고 황산을 더하여 산성으로 만들어 요오드를 유리시킨 후 치오황산나트륨으로

적정하였다.

영양염은 Strickland and Parsons[1972]의 비색법으로 질산염(Nitrate), 아질산염(Nitrite), 암모니아(Ammonia), 규산염(Silicate), 인산염(Phosphate)을 측정하였다. 영양염 분석을 위한 시료는 채수한 후 membrane filter(47 mm, 0.45 μm)로 여과한 후, 여과된 시료를 분석 시까지 냉동 보관하였다.

동해표층수와 심층수 그리고 지하염수에 대한 미생물학적 검사는 대장균군 및 일반세균을 대상으로 하였다. 시료에 대한 일반세균군 및 대장균군 검사는 해양환경공정시험방법 [1998]에 준하여 실시하였으며, 사용된 배지는 Plate Count Agar, Lactose Broth 및 BGLB였으며, 배지 모두 Difco사(USA) 제품을 사용하였다.

시료의 수소 및 산소 동위원소 측정을 위하여 공기와 기체교환이 차단된 상태로 채취된 시료는 수소가스와 산소 가스로 만든 후 안정동위원소 질량분석기(Optima)에서 측정했다. 채취된 시료는 수소추출 진공장치와 산소 동위원소 분석용 CO₂ 가스 준비 진공장치(김규한, [1991])을 이용하여 시료가 준비되었다. 준비된 가스시료는 표준시료와 교대로 질량분석기에 도입되어 질량분석을 하게 된다. 분석된 안정동위원소비는 표준시료와 분석용 시료간의 천분율 편차를 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) * 1000 (\text{‰})$$

여기서, 산소의 경우에는 δ¹⁸O로 표현하며, R 대신에 ¹⁸O/¹⁶O로 바꾸면 된다. 수소 δD(Deuterium)는 D/H 등으로 바꾸어 넣으면 된다. 산소와 수소는 표준시료로 표준평균해수(Standard Mean Ocean Water: SMOW)를 사용하였다.

해수 및 지하염수 시료 중의 ²²²Rn 분석은 액체섬광계수기(Pharmacia Wallac Quantalus 1220)을 이용하여 측정하였다. 각 시료는 20 ml low K vial에 cocktail 용액인 HiSafe III 15 ml와 시료 5 ml을 혼합한 후 액체섬광계수기를 이용하여 10분씩 10번 측정하였다.

3. 해양심층수와 지하염수의 기원

해양심층수는 극지방(고위도 지역)의 한정된 지역에서 표층해수가 냉각되어 심층으로 침강한 후 형성된다. 그 후 해양심층수는 수온약층에 의해 표층해수와 혼합이 차단된 상태로 등밀도선을 따라 느리게 순환한다. 따라서 해양심층수는 기상, 하천수, 인간활동의 영향을 받는 표층해수와는 다른 물리·화학적 고유 특성을 지닌 수괴이다. 한편, 육지 해안의 지하관정을 이용하여 채취되는 지하염수는 지하수와 해수가 혼합된 물이다. 지하염수는 지하수가 부존할 수 있는 지층구조(투수성과 저류성에 따라 결정)에서 삼투압이 높은 해수가 충전층이나 균열 또는 파쇄대가 발달된 암반을 따라 침투하여 섞인 결과이다. 충전층 지하수의 경우, 지표수 함양 등의 지하수의 보충조건은 상대적으로 양호하나 한천수량의 변화나 수질오염에 민감할 수 있다. 해안지방에서 나오는 충전층 지하염수도 하천의 영향 뿐 아니라 표층 해수나 연안 저층 해수의 영향을 받게 됨을 의미한다. 암반 지하수의 경우, 암석 형성시의 공극 및 지각변동에 의한 균열 파쇄대의 발달 정도에 좌우되며 충전층 지하수보다 지표수의 수질과 수량에 의한 영향을 덜 받는다. 그러나, 지하수 충전이나 유동속도가 느려 일단 오염되면 원상회

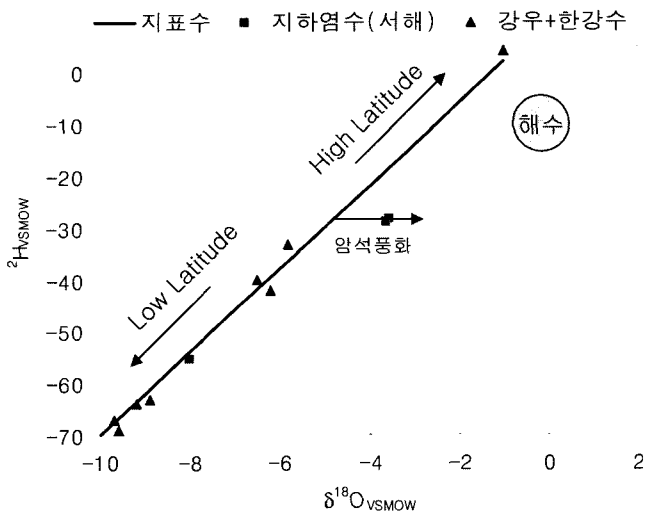


Fig. 1. Relationship between δD and $\delta^{18}O$ (relative to SMOW) in meteoric water samples.

복이 어렵다. 암반 지하염수도 암반 단층, 균열, 절리 등을 통해 유입되어 온 지하수가 해수와 혼합된 염수이므로 지하수원과 해수원의 성분에 좌우된다. 이러한 과정에서 일정부분 여과기능과 지층으로부터의 용출기능 등이 작용하게 된다. 결국, 지질학적 영향이 크다는 의미이다.

Fig. 1은 안정동위원소인 ^{18}O 과 2H 을 이용하여 해수와 지하염수의 기원을 잘 보여주고 있다. 자연계의 구성물질은 대부분 산소를 가지고 있으며 지구의 수권, 암석권, 대기권에서 산소와 수소가 중요한 구성성분으로 되어있다. 자연계 물질의 산소 동위원소 비는 해수 0‰, 순환수 +10~ -45‰ 내외의 값을 가진다(Susan, [1992]). 그리고 수소 동위원소비는 해수 0‰, 순환수는 +50~ -350‰ 이상의 값을 가진다. 25°C에서 해수가 증발하여 만들어진 수증기단은 온도에 영향을 받아 위도효과, 고도 효과와 내륙효과가 나타나서 동위원소 값이 변화한다. 수증기단이 응축되어 강우현상을 일으킬 때 응축 후 남은 수증기단은 동위원소비가 점점 가벼워져

응축이 진행됨에 따라 점점 동위원소 값이 가벼운 비를 내리게 된다. 따라서 저위도에서 고위도 지역으로 갈수록 지표수(순환수) 중의 산소와 수소의 동위원소 비는 가벼워지며, 산소와 수소 동위원소 사이에는 온도효과에 의해 $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ 관계식(meteoric water line)에 도시됨을 조사하였다(Craig, [1961]). 한반도 지역에서 순환수(지표수) 중의 δD 은 +10‰에서 -100‰ 사이에서 변하며 $\delta^{18}O$ 은 0‰에서 -10‰ 사이에서 계절적으로 meteoric water line 사이에서 변화한다(김규한, [1991]).

그러나, 서해안의 지하 600 m에서 채취한 지하염수는 이러한 meteoric water line에서 벗어나서 나타나고 있다. 이러한 현상은 순환수가 지하에 스며들어 암석과 상호반응을 일으켜 동위원소 교환이 일어날 경우 동위원소값의 변화를 발생한다. 특히 순환수와 지하염수의 동위 원소 비를 비교하면, 지하염수에서 산소편이(Oxygen shift) 현상이 지하염수에서 뚜렷이 나타나고 있다(Gunter, [1977]). 이러한 산소편이는 수소동위원소의 변화없이 산소동위원소의 변화가 나타나는 것을 말하며, 물과 암석의 상호작용이 일어날 때 발생한다. 지하염수는 해수와는 다른 수소-산소 동위원소 비를 가지고 있고, 이것은 두 수괴가 다른 기원을 가지고 있다는 것을 의미한다. 지하염수는 산소편이 현상을 고려하면, 지하염수의 대부분 기원은 지표의 순환수로 추정된다. 한편, 이 지하염수의 염분도는 16‰로 측정되었다. 따라서 서해안 지하관정에서 채취된 지하염수는 지하로 침투된 지하수에 표층해수가 침투되어 혼합된 수괴로 추정된다.

4. 해양심층수와 지하염수의 성분비교

해양심층수는 바다에 존재하는 해수의 일부이자 일종이다. 해수는 주성분 원소에 대한 고유의 일정성분비 원칙을 만족시키는 바닷물이다(Chester, [1990]). 그러나 지하염수의 주성분(미네랄) 원소의 비는 해수의 조성비와 전혀 다르다. 지하염수의 성분 함량과 조성비는 주변지질로부터 영향을 많이 받아 칼슘이 특별히 많거나 마그네슘 등이 특별히 많은 경우가 있다(Fig. 2). 지하염수에서 Na의 상대 함량 비는 해수보다 낮고 지하수보다는 높게 나타

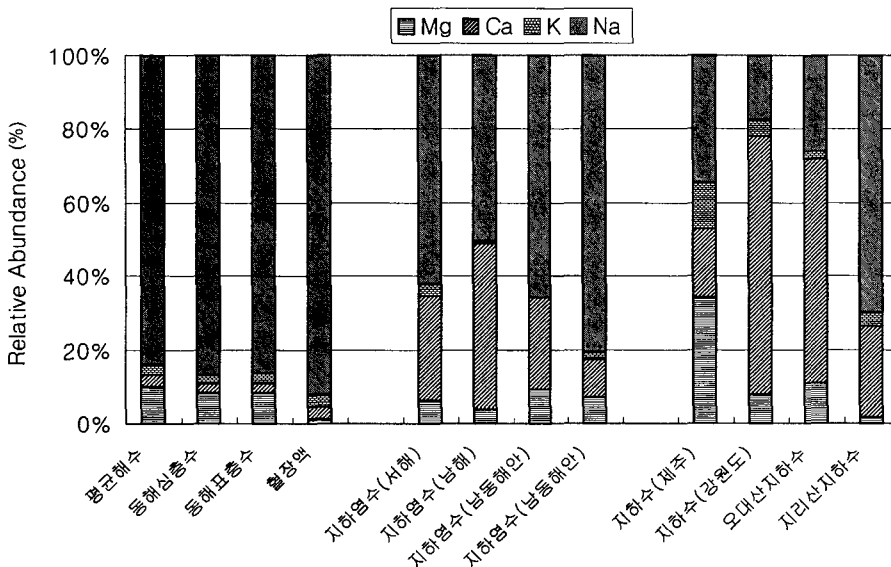


Fig. 2. Relative mineral abundance of seawater, brine water and groundwater adjusted to Na=100%.

Table 1. Comparison on stability, eutrophication, clearness of deep ocean water, surface seawater and brine groundwater.

	항 목	단 위	동해표층수	동해심층수	지하염수
안정성	수온	°C	1.0-21.5	0.4-0.9	14-28
	염분도	‰	32.4-34.2	34.0-34.2	5-25
	용존산소	mg/L	3.87-7.50	5.0-6.5	2.71
부영양성	Nitrate	μM	0.1-9.5	13.5	variable (>5.64)
	Silicate	μM	4.2-17.5	32.5	variable (~208)
	Phosphate	μM	0.30-1.75	2.75	variable
청정성	COD	mg/L	0.36-1.00	0.1-0.2	1.4
	세균	CFU	0-35	ND	90
	방사능 (²²² Rn)	dpm/L	0.045	0.067	32666
미량원소	Fe	μg/L	ND-2.5	ND-0.6	496
	Mn	μg/L	ND-0.6	ND-0.6	31-1750
	Se	μg/L	21-49	20-70	ND
	Ge	μg/L	7.8-150	5.2-300	ND

났다. 반대로 지하염수에서 Ca과 Mg의 상대 함량 비는 해수보다 높고 지하수에 비하여 낮게 나타나고 있다. 이것은 지하염수가 지하수와 해수가 혼합된 수괴라는 사실을 나타내며 혼합되는 과정 중에 Ca과 Mg이 물과 암석의 상호작용으로 인하여 풍화된 것을 의미한다. 또한, 생물체(인체)와의 친화성 관점에서 살펴보면, 인간의 혈장 액에서 주성분 원소(Na, K, Mg, Ca)의 상대 함량 비는 해수와 비슷한 조성을 가지고 있어 해수는 인체와 친화도가 높은 것으로 나타나고 있다.

부영양성의 경우, 해양심층수는 해역별 차이는 약간 있지만 안정적인 반면, 지하염수는 주변지질에 따라 규산염이 특별히 많거나 질산염이 특별히 많은 등의 편차가 크게 나타났다. 기능성 미량원소의 경우 셀레늄과 게르마늄과 같은 기능성 미량원소의 경우 지하염수는 거의 없는 반면 해양심층수는 함량이 높게 나타났다. 또한 Fe과 망간의 농도는 해양심층수에서 낮게 나타나는 반면, 지하염수에서는 높게 나타나고 있다(Table 1).

5. 해양심층수와 지하염수의 안정성 및 청정성

해양심층수가 가진 자원 안정성 관점에서 비교해 보기로 한다. 저온성의 경우, 해양심층수는 년중 2°C 이하(태평양계는 10°C 이상도 있음)이지만 지하염수는 수온이 14~28°C로 수온의 변화가 크게 나타났다(Table 1). 또한 염분도는 표층해수와 해양심층수의 경우 33.3~34.2‰로 연중 변화폭이 좁은 반면, 지하염수의 경우, 해수의 침투 정도에 따라 5~25‰로 변화가 심하게 나타났다. 용존산소도 동해 심층수의 경우 5.0~6.5 ml/L로 높게 나타나는 데 이는 표층수의 수온이 낮은 해역에서 동해심층수가 형성될 때 많은 양의 산소를 용존 시켜 침강하기 때문이다. 반면에 지하염수에서의 용존산소 농도는 2.71 ml/L로 낮게 나타는데, 이는 대기와 산소교환이 차단된 상태에서 지하에 존재하는 유기물을 분해하는데 용존산소를 소모하기 때문에 지하수(지하염수)에서 빈산소 상태의 수질이 나타난다. 이러한 빈산소 또는 무산소 상태의 지하염수는 원소들의 산화-환원 반응에 작용하기 때문에 화학적으로도 상당히 불안정하다. 이러한 지하염수 자원의 불안정성은 자원관리의 측면에서 여러 가지 문제점을 가지고 있다.

부영양성의 경우, 영양염(N, P, Si)들의 농도는 동해 표층수에서 낮은 반면, 동해심층수에서는 높게 나타나고 있어 전형적인 영양염의 연직분포 양상을 보여주고 있다. 또한 이들 영양염 사이의 농도비(P:N:Si)는 일정하게 유지되어 되어 생물이 이용할 수 있는 균형을 이루고 있다. 그러나, 지하염수에서 영양염의 비율은 일정하지 않고 특정 영양염이 높게 검출되는 경우가 많다.

청정성의 경우, 해양심층수는 병원균이나 유해 중금속 물질 등에 문제가 전혀 없었지만 지하염수의 경우는 문제가 없는 경우도 있고, 문제가 되는 경우도 있다(Table 1). 해양심층수의 수질은 미생물학적으로도 물리화학적으로도 안정되어, 무기적으로 청정한 해수가 된다. 따라서 유기물을 영양원으로 하는 유해한 세균이나 병원균 등은 해양심층수에서 거의 없으며, 인위적인 오염물이 전혀 없다. 또한, 해양심층수는 지구상 물의 약 93%에 해당하는 무한정 자원이지만 지하염수는 유한하다는 지적을 하지 않을 수 없다(Fig. 3).

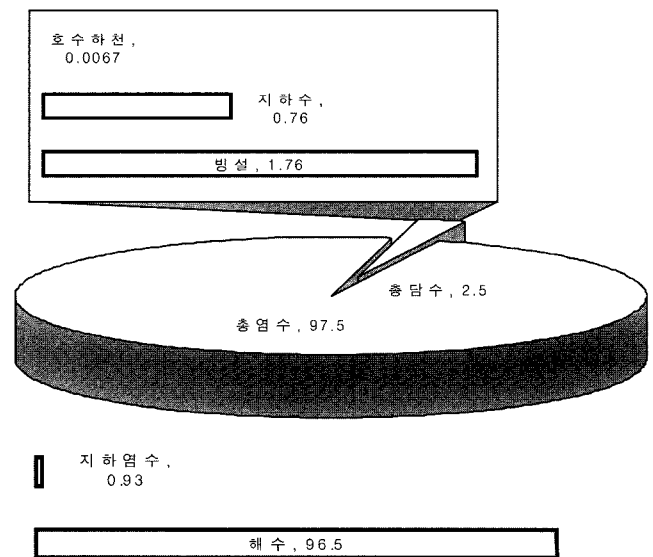


Fig. 3. Relative abundance of global hydrological resources.

6. 결 론

물 부족을 해소하기 위한 신규수원이 필요하며, 이로부터 지금 까지 사용하지 않았던 수자원에 대한 관심이 커지기 시작했다. 그 중에서 순환재생형 해양수자원으로서 해양심층수가 주목을 받고 있는 것은 다양한 자원적 특성에 기인한다. 한편, 이 바닷물과는 다른 심층의 지하수중 염분이 있는 저염분수는 비교적 저동력으로 담수화가 가능하다는 점에서 주목할 만 지하수 자원의 하나이다. 이들을 효과적으로 이용하기 위해서는 수자원적 가능성을 살펴볼 필요가 있고, 기원 및 성분 분석에 의한 안정성 및 청정성 등의 비교가 필요하였다.

이로부터, 해양심층수와 지하염수는 명백하게 다른 물임을 알 수 있다. 지하염수의 경우, 지하수법에 의한 수질기준의 측면에서 보면 오염된 지하수일 수도 있다. 그러나, 위험하고 안전하지 못한 물이라는 의미는 아니다. 수처리를 통해 용수로 탈바꿈할 가능성도 있고, 특정한 오염물질만 없다면 해수보다 염분이 낮아 담수화 비용이 상대적으로 적게 들 수도 있다. 그러나, 원수를 직접 이용할 경우에는 안정성에 대한 철저한 검증이 이루어지지 않으면 안된다. 특히, 해양심층수는 시간적, 공간적 수질특성의 변화가 거의 없는 반면 지하염수는 혼합수의 원천이 되는 지하수(지표수), 표층(연안 저층)해수 및 주변지질의 영향을 많이 받게 되므로 용도에 따라 신중한 조사, 분석을 통해 안전성을 검증받는 절차가 이루어지지 않으면 안 된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 '해양심층수 다목적 이용 개발(3)' 연구결과 중 일부임을 밝힌다.

참고문헌

- [1] 김현주 등, 2000, "동해 심층수의 다목적 개발 기획연구", 해양수산부.
- [2] 김현주 등, 2001, 2002, "해양 심층수의 다목적 개발(1,2)", 해양수산부.
- [3] 해양수산부, 1997, "해양환경공정시험 방법".
- [4] Strickland and Parsons, 1972, "A Practical handbook of seawater analysis", Bull. Fish. Res. Bd. Canada, 167.
- [5] 김규한, 1991, "동위원소지질학", 대우학술총서, 자연과학 74, 민음사.
- [6] Susan, 1992, "An Introduction to Marine biogeochemistry", John Wiley & Sons, New York.
- [7] Craig, H., S.L. Miller, and G.J. Wasserburg, eds, 1961, "Isotopic and cosmic chemistry", Morth-Holland, Amsterdam.
- [8] Gunter, 1977, "Principles of Isotope Geology", 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York.
- [9] Chester, 1990, "Marine Geochemistry", Unwin Hyman, London.

2003년 12월 17일 원고접수

2004년 2월 10일 수정본 채택