

방사성물질의 해양중 거동특성 평가

송영일 · 이명찬 · 이갑복

한국전력공사 전력연구원

정성태

한국전력공사 영광원자력본부

요 약

영광원전주변 해양에서 조사된 환경방사능 조사결과를 토대로 Cs-137과 Sr-90 방사성물질의 해수와 부유물에서 분포특성과 해양생물로의 전이·농축특성을 분석하였다. 방사성물질의 분포특성 분석은 해양에서 방사성물질의 용해성과 부유물에의 흡착성 평가뿐 아니라 방사성물질의 해양확산을 평가하는데 필수적 요소이다. 지금까지는 방사성물질의 해양확산 평가시 완전 용해성으로 가정하여 단순한 해수유동 특성만을 고려하여 평가하였으나, 흡착성 등 물리화학적 거동특성을 평가함으로써 좀더 사실적인 해양확산을 평가할 수 있다. 평가결과 Cs-137과 Sr-90의 분포특성을 나타내는 분배계수가 각각 $8.1 \pm 1.4E-4$, $7.4 \pm 2.3E-5$ 로 나타났다. 이는 두 핵종 모두 용해성이 높고 흡착성이 낮음을 보여준다. 그리고 Cs-137이 Sr-90에 비해 상대적으로 흡착성이 높게 나타나고 있다. 또 전이·농축특성 분석결과를 김에서 Cs-137과 Sr-90의 전이·농축계수가 66과 3, 서대와 병어에서는 122.5와 6, 패류에서는 Sr-90의 전이·농축계수가 6으로 나타났다. Sr-90은 전반적으로 전이·농축계수가 낮게 나타나 생물체에 유입되더라도 쉽게 배출돼 축적경향이 매우 낮음을 보여준다. 반면 Cs-137은 Sr-90에 비해 상대적으로 농축특성이 높게 나타나고 있다. 향후 이를 토대로 해양의 고유 환경특성에 맞는 방사성물질의 해양중 거동특성을 고려한 해양확산평가 및 해양감시가 이뤄져야 할 것이다.

서 론

해양으로 유입된 여러 가지 방사성물질은 해수에 용해되거나, 수계의 부유물 또는 광물질(mineral)과 반응하여 흡착되거나 착화물을 형성하는 등 다양한 물리·화학적 거동특성을 갖는다. 해양에서 방사성물질의 거동특성을 파악하면 사실적인 확산평가를 할 수 있고, 방사성물질의 이동경로를 따라 효과적인 환경방사능을 감시할 수 있다. 지금까지는 방사성물질의 해양확산 평가시 방사성물질이 수계에 완전히 용해되는 것으로 가정하여 해수유동에 근거하여 확산을 평가하였다. 그러나 실제적으로 방사성물질은 용해되기도 하지만 부유물 등 다양한 해양매질에 의해 흡착돼 해저로 침적되거나 침적된 물질이 재 부유돼 이동되기도 한다. 또한 어류, 해조류, 저서생물과 같은 해양 생물체를 통해 방사성물질이 전이되기도 하고, 수계에서 거동 중 붕괴과정 등을 통해 소멸(radiological consequences)되기도 한다[1].

미국이나 영국, 일본 등 원자력 선진국에서는 방사성물질의 해양중 거동을 평가하기 위한 다양한 연구가 이뤄지고 있다[2, 3, 4, 5]. 그 중 방사성물질의 해수와 부유물에서의 농도분포 특성을 분석하여 방사성물질의 유동과정에서의 용해와 흡착정도를 규명하여, 방사성물질의 이동경로를 추적하고 수계에서 확산을 평가하는데 활용하고 있다. 통상 용해와 흡착정도를 나타내는 척도

로서 분배계수(radionuclide distribution coefficient)를 사용하고 있으며 분배계수는 다음과 같이 정의된다.

$$K_d = \frac{\text{고형물의 단위 질량당 방사성물질의 양}}{\text{수용액의 단위 부피당 방사성물질의 양}} \left[\frac{\text{Bq/mg}}{\text{Bq/l}} = \frac{\text{l}}{\text{mg}} \right]$$

분배계수가 크면 방사성물질은 부유물에 흡착성이 커지고, 흡착성이 크면 방사성물질의 유동성이 약해져 해저로 침적돼 퇴적하게 된다. 반대로 분배계수가 작으면 방사성물질의 용해성은 커지고 방사성물질은 해수유동을 따라 이동하기 쉽다. 방사성물질은 제 각각의 고유한 물리·화학적 특성을 가지며, 해역별로 존재하는 화학성분도 다르며 또한 반응정도를 결정하는 해양의 물리적 환경도 지역 및 시기에 따라 다르므로 분배계수는 방사성물질별, 지역별로 시기별로도 상이한 값을 갖는다. 본 논문에서는 영광원전 주변지역의 환경방사능 조사결과에서 검출된 방사성물질의 분배계수를 평가하고, 해양생물별 전이·농축 특성을 분석하였다.

해양환경 방사능 조사결과

영광원전 주변해역의 해수, 해저 표토층과 해조류, 저서생물, 어류 등의 해양생물에 대해 방사성물질의 농도를 조사한 결과에 따르면, 해양에서 전반적으로 Cs-137과 Sr-90이 검출되었다. 물론 이들 방사성물질은 과거에 실시한 원자핵 실험 결과 전 지구상에서 검출되는 수준으로 원자력 발전소에 의한 영향이라고 보기는 어려운 농도수준이다. 방사성물질의 유동특성을 보기 위해 영광 원전주변의 해황특성이 동일한 지점에서 채집한 매질별 시료 분석결과를 비교하였다. 분석결과 중 해수와 해저 표토층에서 분석한 Cs-137과 Sr-90의 농도를 표 1에 제시하였다[6].

해수에서 Cs-137의 평균농도는 0.0031 ± 0.0016 Bq/l 로 주로 0.002 ~ 0.004 Bq/l 사이에 분포하고 있다. 원자력안전기술원에서 조사한 결과에서도 해수의 Cs-137 농도도 0.003 ~ 0.005 Bq/l 의 분포를 보이고 있다[7]. 해저 표토층에서 Cs-137의 평균농도는 2.640 ± 1.076 Bq/kg 으로 비교적 광범위한 농도분포특성을 보이고 있다. 해수와 해저 표토층에서 Sr-90 평균농도는 각각 0.0036 ± 0.0015 Bq/l, 0.44 ± 0.20 Bq/kg 으로 나타나고 있다. 이 결과로부터 Sr-90과 Cs-137의 농도비(Sr-90/Cs-137)는 해수에서는 1.16, 해저표토층에서는 0.17을 보이고 있다. 체르노빌 사고시 조사 결과에서도 단기적으로는 가까운 지역에서 농도비는 노심에서의 농도비와 비슷한 분포를 보였으나 시간이 경과되면서 환경에서는 농도의 비가 지역별로 시기별로 상이하게 나타났다[8]. 조사결과에서도 방사성물질 별로 환경과의 상이한 물리·화학적 거동 특성 때문에 환경매질에서 일률적으로 농도의 비가 일정치 않음을 알 수 있다.

방사성물질의 해양거동은 해양의 물리·화학적 특성에 의해 크게 변화된다. 주로 부유물의 농도, pH, 염분도가 이를 좌우하는 주요요소로서, 부유물 농도가 높을수록 흡착성 방사성물질은 부착기회가 많아져 상대적으로 부유물의 방사성물질 농도가 높아진다. 또 pH는 수계에서 화학적 반응정도를 결정하고, 염분도는 수계에 존재하는 물질의 화학적성분을 좌우한다. 표 2는 영광 원전주변해역의 물리·화학 특성조사 결과로써 염분도, pH, 수온 및 부유물 농도를 제시하였다. pH와 염분도는 조사지점과 조사시기에 상관없이 거의 일정하게 나타나고 있으며, 수온은 배수로와 인접한 지역에서만 조금 높고 나머지 조사지역에서는 거의 일정하게 나타나고 있다.

표 1. 해수와 해저 표토층의 Cs-137 및 Sr-90 농도[6]

방사성 핵종	지점	시기	해수 (Bq/ℓ)	해저표토층 (Bq/kg)
Cs-137	1	4월	0.002	1.604
			0.002	1.933
		9월	0.002	1.293
			0.003	2.388
	2	4월	0.004	2.468
		10월	0.001	2.746
	3	4월	0.003	2.664
	5	4월	0.004	4.167
		10월	0.006	4.495
		평 균		0.0031±0.0016
Sr-90	1	9월	0.002	0.67
	2	9월	0.005	0.29
	3	4월	0.004	0.36
	평 균		0.0036±0.0015	0.44±0.20

그러나 부유물의 경우 지역별로 부유물 농도가 다양하게 나타나고 있다. 춘계는 부유물농도 평균이 21.3±3.4 mg/l, 추계는 45.3±2.5 mg/l 로 춘계와 추계의 농도의 차가 매우 크게 나타나고 있다. '96년에 조사한 결과에 따르면 동계, 춘계, 하계, 추계에 부유물 농도가 각각 66.8 mg/l, 23.5 mg/l, 55.8 mg/l, 42.8 mg/l 로 나타나고 있어 동계에 높고 춘계에 낮게 나타나며, 계절별로 차이가 있다[10].

표2. 영광 원전주변의 해양 환경특성 분석결과[9]

시기	지점	pH	수온 (°C)	SS(mg/l)	염분도 (‰)
춘계 (5월)	1	8.2	24.8	21.6	32
	2	8.2	15.8	25.8	32
	3	8.2	15.8	17.9	32
	4	8.2	16.2	19.8	32
	평 균	8.2	-	21.3±3.4	32
추계 (11월)	1	8.2	23.5	48	33
	2	8.2	16.2	42	32
	3	8.2	16.3	46	32
	4	8.2	16.2	45	32
	평 균	8.2	-	45.3±2.5	32

해수중 유동특성

상기 조사결과로부터 방사성물질의 해수의 용해성과 흡착성을 분석하기 위해 수용상태의 농도와 부유물에 흡착된 방사성물질의 농도의 분포를 구하였다. 조사결과는 수용성의 농도는 나타나 있으나 부유물의 농도를 알 수 없다. 그러나 부유물은 해수유동 등에 의해 해저표토층의 침적물이 수계로 부유돼 나타나며, 충분한 시간이 경과되고, 비교적 넓은 해역에서는 부유물에서의 방사성물질 농도와 해저표토층에서의 방사성물질 농도가 평형을 이루는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 부유물과 해저표토층의 방사성물질 농도를 같다고 볼 수 있다. 이를 토대로 방사성물질이 해수와 부유물에 분포하고 있는 특성을 나타내는 분배계수를 구하여 표 3에 제시하였다.

표3. 영광원전 주변해역에서 Cs-137과 Sr-90의 방사성물질 분배계수

방사성 핵종			해수	해저표토층	분배계수 (Kd)	
지점	시기	(Bq/ l)	(Bq/kg)			
Cs-137	1	4월	0.002	1.604	8.0E-4	
			0.002	1.933	9.7E-4	
		9월	0.002	1.293	6.5E-4	
			0.003	2.388	8.0E-4	
	2	4월	0.004	2.468	6.1E-4	
		10월	0.001	2.746	2.7E-3	
	3	4월	0.003	2.664	8.9E-4	
	5	4월	0.004	4.167	1.0E-3	
		10월	0.006	4.495	7.5E-4	
	평균				8.1±1.4E-4	
	Sr-90	1	9월	0.002	0.67	3.3E-4
			9월	0.005	0.29	5.8E-5
3		4월	0.004	0.36	9.0E-5	
평균				7.4±2.3E-5		

이상의 결과에 나타난 바와 같이 Cs-137의 분배계수 평균값은 $8.1 \pm 1.4E-4$ 를 나타내고 있으며, Sr-90은 $7.4 \pm 2.3E-5$ 의 값을 나타내고 있다. 분배계수를 통하여 Sr-90의 용해성이 Cs-137의 용해성보다 크다는 것을 알 수 있으며, Cs-137이 Sr-90보다 흡착성이 크다는 것을 알 수 있다. 동해의 울진 원전주변에서 측정된 결과를 토대로 분석한 결과는 Cs-137이 $3.0E-4$, Sr-90이 $4.8E-5$ 의 값을 보이고 있어[11], 오차의 범위안에서 서해안이 동해안보다 방사성물질의 흡착특성이 더 큼을 알 수 있다. 외국에서 조사된 자료를 보면 일반적으로 하천이나 호수에서 Cs-137이나 Sr-90의 흡착특성이 해수보다 더 높게 나타나고 있다[6]. 해수에서 흡착성보다 용해성이 더 높은 것은 해수중에 존재하는 음이온 상태의 Cl^- 가 양이온 상태의 Cs^{++} 및 Sr^{++} 과 결합하여 $CsCl_2$ 와 $SrCl_2$ 화합물을 만들어 해수에 용해된 채 이동하는 반면에, 하천수나 호수에서는 방사성물질과 결합하려는 음이온이 상대적으로 적어 부유물질의 표면 흡착특성이 높은 것으로 나타났다[5].

조사결과에 따른 해양생물의 전이·농축계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{전이·농축계수}(CF) = \frac{\text{평형상태에서 생물에서의 농도}}{\text{해수중 농도}}$$

생물에의 전이·농축을 평가할 때는 생물별로 식이습관과 생태환경에 따라 전이·농축계수 값이 다르게 나타나기 때문에 어종과 식물 종류별로 구분하여 평가하고 있다. 영광 원전주변 해역에서는 어류의 경우 종량이 많고, 정착성 어종인 서대와 병어의 방사능을 측정하고 있으며, 식물은 김(해태)이 주로 서식하고 있어 이들 생물의 농도와 해수의 농도에 의해 전이·농축계수 값을 구하였다. 표3은 영광원전주변 해역의 해양생물에서 검출된 Cs-137과 Sr-90의 농도를 보여준다.

표 3. 해수와 해양생물에서의 Cs-137 및 Sr-90의 농도

방사성 핵종		시 기	해수	김	서대, 병어	패류	
지 점	(Bq/l)		(Bq/kg-fresh)	(Bq/kg-fresh)	(Bq/kg-fresh)		
Cs-137	2	3월	0.001	0.162	-	-	
		6월	0.004	-	-	-	
	3	3월	0.001	0.102	-	-	
		6월	0.003	-	0.328	-	
	4	6월	0.002 *	-	0.179	-	
		9월	0.002 *	-	0.229	-	
	평 균		0.002±0.001	0.132±0.04	0.245±0.08	-	
	Sr-90	1	10월	0.002	-	0.011	0.011
			11월	0.002	0.003	-	-
4		9월	0.002 *	-	-	-	
		11월	0.002	0.012	0.013	0.013	
평 균			0.002	0.007	0.012±0.001	0.012±0.001	

* 동 지역 해수는 분석하지 않아 과거의 조사자료를 적용함

표 3에 나타난 방사성물질의 농도에 따라 Cs-137 및 Sr-90의 전이·농축계수를 구하여 표 4에 제시하였다. 생물 전이·농축계수 분석결과 Cs-137은 어류에서 비교적 높게 나타나고 있고, Sr-90은 전반적으로 낮게 나타나고 있다. Sr-90은 화학적으로 수용성을 띄기 때문에 생체내에서도 빨리 제거됨을 알 수 있다. 동 조사 결과는 외국의 해양에서 조사한 결과와 매우 비슷한 값을 나타내고 있으며, 동해안에서 조사한 값과도 매우 유사하다. 수계와 생물의 식이 및 생태환경이 충분히 평형상태라는 가정하에 전이·농축계수를 구할 수 있으며, 해황의 물리적 환경의 변화가 다양한 지점에서는 농도분석 자료의 가변성이 높기 때문에 많은 분석자료를 확보하여 수계와 생물의 대표적인 방사능 농도를 구하는 것이 필요하다.

표 4. 해양생물에의 Cs-137 및 Sr-90의 전이·농축계수

방사성 핵종	해조류			서대, 병어			패류
	영광	울진[11]	문현[12]	영광	울진[11]	문현[12]	영광
Cs-137	66	23*	30	122.5	22.5~70	20~100	-
Sr-90	3.5	-	-	6()	-	0.3~10	6

* 울진원전 자료는 미역에서의 농도로 분석한 자료임

결론

방사성물질의 해양확산을 평가할 때 지금까지는 단순히 해수유통에 의해 확산되는 것으로 평가하였다. 그러나 방사성물질은 각각의 고유한 물리·화학적 특성을 가지며, 해양특성에 따라 해양의 화학물질과의 반응특성도 변한다.

영광 원전주변 해역에서 방사성물질의 물리·화학적 특성중 흡착성을 평가하기 위해, 조사결과 검출된 Cs-137과 Sr-90의 해수와 부유물에서 농도분포 특성을 분석하였다. 분석결과에 의하면 두 방사성물질의 부유물 흡착특성은 크지 않고, 용해성이 높게 나타났다.

방사성물질의 해양생물 전이·농축특성 평가결과에서는 Sr-90의 전이농축계수가 비교적 낮게 나타나 축적정도가 낮게 나타났고, Cs-137의 전이·농축특성이 Sr-90보다는 상대적으로 높게 나타났다. 생물별로는 어류에서 높게 나타남을 보여줬다.

그러나 대표적인 분포특성을 평가하기 위해서는 해양의 물리적 환경의 변동을 고려하여 각 해양특성에 따라 조사자료를 확보하고 분배계수와 전이·농축특성의 변동성을 고려하여 평가할 필요가 있다. 그리고 방사성물질의 흡착에 대해서는 부유물의 분급도에 따라 흡착정도의 차이 (radionuclide burden)가 있으므로 부유물 입자크기별 방사성물질의 농도에 대해서도 분석하면 부유물의 분급도 별 침적특성과 재부유정도를 고려하여 해양확산을 체계적으로 평가할 수 있다. 또 해역의 부유물과 mineral의 화학적 성분을 규명하면 방사성물질의 화학적 이동형태를 규명하여 평가할 수 있다. 향후 충분한 조사를 통해 방사성물질의 물리·화학적 거동과 피폭경로별 생물에 의 전이·농축특성에 대한 대표 자료를 확보하여 우리실정에 맞는 해양확산 및 주민 피폭선량을 평가하고자 한다.

참고 문헌

1. Y. Onishi, et. al., 1982, "Critical review : Radiological Transport, Sediment Transport, and Water Quality Mathematical Modelling; and Radiological Adsorption /Desorption Mechanism."
2. C. R. Olsen, et. al, 1989, "Radionuclide Distribution and Sorption Behavior in the Susquehanna-Chesapeake Bay System". Department of Natural Resources State of Maryland.
3. P. McDonald, et.al, 1997, "The distribution coefficient of ^{60}Co in sediment from the solway Firth, UK". J of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Vol 220.
4. International Atomic Energy Agency, 1995, "Sediment K_d 's and Concentration factors for Radionuclides in the Marine Environment, Technical Report Series, No257, IAEA,Vienna.
5. 좌백성도. 1984, "환경방사능 거동, 생물농축, 인체피폭선량평가", 일본과기청 방사선의학연구소.
6. 한국전력공사, 1998, "'97 영광원전주변 환경방사능 조사 보고서"
7. 한국원자력안전기술원, 1995, "원자력시설주변 환경조사 및 평가보고서"
8. C.R.Richland, et.al., 1988, " The Potential Use of Chernobyl Fallout Data to Test and Evaluate the Predictions of Environmental Radiological Assessment Models", ORNL-6366
9. 한국전력공사, 1998, "원자력발전소 주변 환경조사 및 평가보고서"
10. 한국전력공사, 1997, "원자력발전소 주변 환경조사 및 평가보고서"
11. 송영일 외. 1997, "액체방사성물질의 해양분포 및 해양생물 농축". '97 추계 학술발표회 논문집 대한방사선방어학회.
12. John E. Till, 1983, "Radiological Assessment", NUREG/CR-3332. USNRC