

KURT 지하수콜로이드의 심도별 특성 분석: 이동형 LIBD 시스템을 이용한 지하수콜로이드 크기와 농도 분석

박태진, 백민훈, 이태엽, 정종태

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

etipark@kaeri.re.kr

1. 서론

고준위폐기물 처분 부지 환경에서 지하수에 용해된 악티나이드 계열은 콜로이드 입자로 존재하거나 의사콜로이드를 형성해 이동하는 것으로 알려져 있다. 따라서 방사성폐기물의 처분 안전성에 대한 불확실성을 저감하고 핵종의 이동 특성을 이해하기 위해서 지하수에 존재하는 콜로이드의 다양한 특성을 조사하는 연구가 필요하다. 또한 콜로이드의 기초 특성을 현장에서 연구할 수 있는 기술 확보가 매우 중요하다.

지하수에 존재하는 대부분의 콜로이드 입자는 크기가 100 nm 이하이고 농도가 ppm 이하의 미량으로 존재한다. 이는 일반적인 분석방법의 측정 한계로 인해 지하수콜로이드의 기초 특성 분석을 어렵게 하는 이유가 된다. 크기와 농도가 매우 낮은 콜로이드의 분석이 가능한 분석 시스템 중 하나가 레이저유도파열검출(LIBD, Laser-Induced Breakdown Detection)이다.

LIBD 기술은 수용액 속에 존재하는 작은 입자를 파열시킬 때 발생하는 충격파 및 섬광을 검출함으로써 입자의 크기 및 농도에 관한 정보를 얻는 기술을 말한다. 콜로이드 입자의 농도와 크기에 대한 LIBD의 측정범위는 농도가 1 ng/L (ppt)부터 수 mg/L (ppm)까지, 크기가 10 - 1000 nm 이다. 이는 보편적인 콜로이드 입자 분석방법인 광자상관분광학(PCS, Photon Correlation Spectroscopy) 기술과 비교할 때, 매우 작은 크기 및 낮은 농도의 측정이 가능함을 보여준다. 한 예로, 약 20 nm 정도의 직경을 가진 입자에 대한 LIBD의 민감도는 PCS에 비해 약 백만 배 이상 뛰어나다[1].

본 연구에선 이동이 가능하여 현장에서 적용이 가능한 LIBD 시스템을 제작·활용하여 한국원자력연구원 내 지하처분연구시설(KURT)에서 채취한 지하수 내 콜로이드의 심도별 기초 특성을 분석하고 다른 분석 방법(예: 광자상관분광학)에서 얻어진 결과와 비교한다.

2. 본론

2.1 KURT 지하수

콜로이드 특성 분석을 위해 본 실험에 사용한 KURT 지하수는 화강암반 지하수를 대표한다. 이는 대체적으로 NaHCO_3 형의 지하수로 이온강도가 낮고 약알칼리성(pH: 8.3-8.5)이다. 이 지하수 내 콜로이드의 심도별 기초 특성 확인을 위해 총 일곱 종류의 지하수가 다중패커 시스템이 설치된 약 500 m 심도의 DB-1 시추공으로부터 깊이 42 - 60 (I2), 92 - 115 (I3), 116 - 199 m (I4), 200 - 229 m (I5), 230 - 246 m (I6), 247 - 300 m (I7), 301 - 500 m (I8)에서 채취되었다. 핵종 이동에 대한 영향이 거의 없는 큰 콜로이드 제거를 위해 450 nm 기공 크기의 필터(Millipak 40, Millipore)로 전여과를 실시하였다.

LIBD와 상호보완적 실험(TEM, PCS 등)[2]을 완수하려면 지하수의 농도를 증가해야 하는데 본 연구에선 접선흐름 한외여과(TFUF, Tangential Flow Ultra-Filtration)를 통하여 지하수 I4 - I7 20L에 대해 약 100-200배 농축하여(I4, I7 100배 농축; I5, I6 200배 농축) 비교분석하였다.

2.2 LIBD 시스템을 이용한 KURT 지하수 분석

지하수콜로이드의 농도를 산출하고자, LIBD 분석 상 최적화된 농도의 콜로이드에 대한 S-곡선을 산출하였다. KURT 지하수콜로이드가 대부분 50 - 100 nm 크기로 가정하면, 측정된 지하수콜로이드의 농도는 지하수 (I4)는 40 ppb, (I5)는 20 ppb, (I6)은 20 ppb, (I7)은 40 ppb임을 알 수 있었다(그림 1(a)(b)(c) 참조).

콜로이드 크기에 대한 정보는 유효초점거리(EFL, Effective Focal Length) 측정을 통해 얻을 수 있다. 이는 동일물질입자의 크기가 작을수록 EFL이 상대적으로 짧고, 큰 입자는 EFL이 상대적으로 긴 현상을 이용한 것이다. 표준 입자에 대해 얻어진 크기 측정용 검정선을 그림 1(d)에 나타냈다. 지하수 (I4), (I5), (I6), (I7)에 존재하는 콜

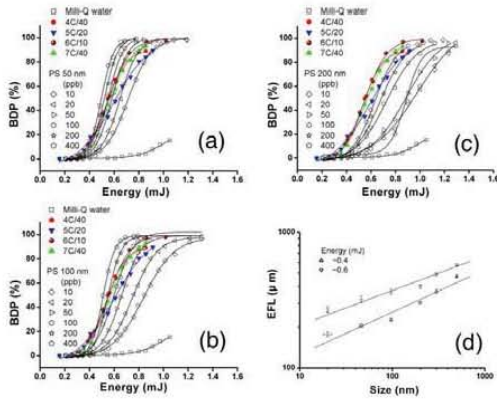


Fig. 1. Estimation of the depth-dependent concentration of the KURT groundwater colloids employing S-curves of the standard polystyrene colloids with sizes of (a) 50 nm, (b) 100 nm, and (c) 200nm. 4C/40, 5C/20, 7C/40 represent the 5 times concentrated groundwater colloids, while 6C/10 do 10 times. (d) shows EFL calibration curves obtained from the standard colloids for the size estimation.

로이드의 측정된 EFL의 평균을 통해 산출된 콜로이드의 평균 크기는 각각 68 ± 35 , 72 ± 29 , 76 ± 10 , 126 ± 28 nm이었다.

2.3 PCS 시스템을 이용한 분석

그림 2에 2 - 4 ppm 농도로 농축된(LIBD 측정으로 확인) 각 지하수 시료를 PCS로 조사·분석한 결과를 보였다. 지하수콜로이드의 크기는 50 nm에서 400 nm에 걸쳐 분포되어있고, 50 - 100 nm의 크기를 갖는 콜로이드의 숫자가 가장 많은 것으로 나타났다. PCS 결과에 따른 지하수콜로이드의 평균 크기는 KURT 시추공 심도 구간에 큰 영향없이 비슷한 값을 나타내었다.

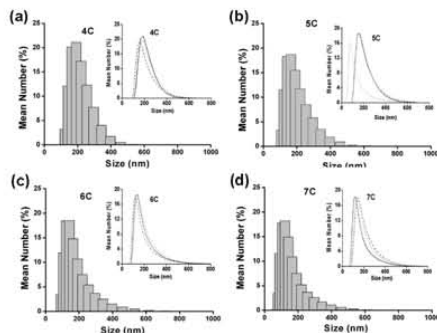


Fig. 2. PCS analysis on the concentrated KURT groundwater colloids (a) 4C, (b) 5C, (c) 6C, and (d) 7C.

아울러 전기역학적 전위차(zeta potential)를 측정을 통해 상대적으로 깊은 심도 구간의 지하수 콜로이드((I6), (I7))가 낮은 심도 구간의 지하수

로이드 ((I4), (I5)) 보다 안정성이 뛰어난 것을 알 수 있었다.

3. 결론

KURT 지하수 콜로이드는 주로 aluminosilicate 계열의 점토광물, calcite 광물, 금속 산화물 및 유기물로 존재하며, 크기는 주로 50~200 nm (일부는 5 nm 정도의 작은 크기에도 존재), 농도는 약 20~40 ppb 정도로 매우 낮은 것으로 나타났다. 지하수콜로이드의 크기 및 농도 측정결과를 표 1에 정리하여 나타내었다. LIBD 측정 결과와 달리 PCS 측정 결과에 따른 지하수콜로이드의 평균 크기는 KURT 시추공 심도 구간에 큰 영향 없이 비슷한 값을 나타내며 상대적으로 크게 측정되었다. 이는 LIBD 측정이 PCS 측정 보다 작은 콜로이드에 더 민감하기 때문인 것으로 유추된다.

Table 1. Comparisons on the size and concentration of the KURT groundwater colloids.

GW (depth, m)	Size (nm)			Conc. (ppb)	
	TEM	PCS	LIBD	ICP-MS	LIBD
I4 (116~199)	50~200	259.8	68 ± 35	35.7	40
I5 (200~229)		255.0	72 ± 29	17.7	20
I6 (230~246)		248.9	76 ± 10	11.7	20
I7 (247~300)		241.9	126 ± 28	45.9	40

4. 감사의 글

본 논문은 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- [1] Jung, E. C. et al., Detection of Colloidal Nanoparticles in KURT Groundwater by a Mobile Laser-Induced Breakdown Detection System, Journal of Korean Radioactive Waste Society, Vol. 9, No. 1, pp. 41-8. 2011.
- [2] 백민훈 외, 한국방사성폐기물학회, 2012년 춘계학술발표회 논문요약집, in press.