

강자성체를 통한 수중의 방사능 세슘이온 제거 동향

Removal of Radioactive Caesium ion using Ferromagnetic in water : A reivew

여우석*, 김종규**

Wooseok Yeo, Jong Kyu Kim

요 지

원자력 방사능 폐기물 또는 원자력 발전소 해체시 발생 가능한 세슘 이온은 인체뿐만 아니라 생태계 환경에도 큰 악영향을 미친다고 알려져 있다. 이러한 세슘 이온은 자연 속으로 손쉽게 스며들어 발생한 지역뿐만 아니라 쉽게 퍼지게 되어 넓은 지역까지 피해를 주게 되며, 반감기가 30년으로써 한번 자연계에 누출되면 장시간 잔존하여 인간 및 생태계에 악영향을 미치게 된다. 세슘이온이 몸속에 들어오게 되면 장에서 몸으로 100% 흡수되며 내장에 축적되어 연조직 전체에 분포하게 되며 갑상선 암과 같은 심각한 위험에 초래하게 된다. 2011년 발생한 후쿠시마 원전 사고 이후 국내에서도 많은 관심을 가지기 시작하였으며, 따라서 수중의 세슘이온을 제거하기 위하여 나노 입자 형태의 기능성을 가진 물질들을 적용한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 나노물질들은 수중의 세슘이온 제거에 대하여 우수한 제거효율을 보여주고 있으나 나노 입자 특성상 사용 이후 회수가 어려워 기능성 물질들의 확산 및 축적에 따른 2차 환경오염의 문제점까지 발생하게 된다. 최근 수처리 분야에서 외부 자기장을 주게 되면 자성을 띄게 되는 물질인 자성체에 대한 관심이 급등하고 있다. 이러한 자성체들은 수중에서 별도의 회수 시스템 없이 자성으로 인하여 완벽히 자기분리 된다. 세슘제거에 탁월한 기능성 물질과 완벽한 자기분리가 가능한 자성체를 결합하여 특별한 회수장치 없이 외부 자기장만 주어진다면 수중의 세슘을 효과적으로 제거 또는 처리할 수 있다. 자성체 입자 표면에 흡착제인 프러시안 블루나 제올라이트와 같은 흡착제를 합성하여 수중의 세슘을 제거하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 기존의 자성체보다 좀 더 높은 자성을 가지고 있으며 외부 자기장에 의해 강하게 반응을 한다고 알려져 있는 강자성체(Ferromagnetic)를 사용하게 된다면 흡착제와 결합 이후 더욱더 강한 자성을 가진 흡착제가 탄생하며 이를 사용하면 높은 처리율뿐만 아니라 높은 슬러지 회수율을 가질 수 있다. 따라서 본 연구는 흡착제나 이온교환수지와 같은 기능성 물질을 사용하여 수중의 세슘을 제거하는 메커니즘과 강자성체가 가지고 있는 강한 자성의 성질을 결합한 복합체 제조에 대한 연구조사를 중점적으로 실시하였다. 본 연구에 의해 연구 조사된 결과를 바탕으로 수중의 세슘 이온에 대하여 높은 제거효율과 회수율을 가지는 새로운 형태의 복합체 제조에 관한 정보를 제공하고자 한다.

핵심용어 : 세슘, 자성체, 강자성체, 복합흡착제, 방사능 폐기물

1. 서론

2011년 3월 11일 일본 후쿠시마 지역을 강타한 규모 9.0의 지진으로 인하여 후쿠시마의 다이이치 원자력 발전소 사고가 발생하였다. 이 때 발생한 방사능 낙진으로 인하여 후쿠시마의 동부 전역을 방사능 물질로 오염시켰다. 후쿠시마 지역에서 발생한 원자력 사고는 인류역사상 러시아의 체르노빌 원자력 사고 다음으로 두 번째로 큰 규모의 원자력 사고이다(Yoschenko et al., 2018). 하지만 체르노빌 원자력 사고와는 다르게 후쿠시마 지역의 원자력 발전소에서는 상당한 양의 Cs이온이 배출되었다. 그 중에서도 반감기(T1/2)가 30.1년이라고

* 학생회원 · 경남대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 · E-mail : jazz214@daum.net

** 정회원 · 경남대학교 공과대학 토목공학과 교수 · E-mail : jongkim@kyungnam.ac.kr

알려져 있는 Cs¹³⁷이온이 가장 많이 생태계 환경으로 흘러나왔으며 배출된 양은 19~24 PBq으로 추정된다 (Yoschenko *et al.*, 2018). 그림 1은 후쿠시마 지역의 Cs¹³⁷의 오염된 농도를 나타내고 있다. 그림 왼쪽 하단의 단위표에서 색이 위로 갈수록 Cs이온의 농도가 증가하며, 오른쪽 하단에 위치한 원자력 발전소에 가까울수록 오염농도가 심해짐을 알 수 있다(Yoschenko *et al.*, 2018).

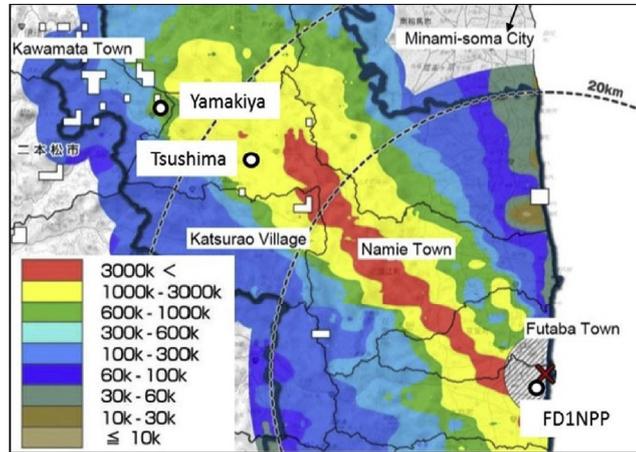


그림 1. 2013년 3월 11일의 후쿠시마 지역의 Cs¹³⁷ 이온의 오염 농도 (단위: Bq/m²)
Yoschenko et al., 2018

또한 Cs이온은 고유의 이동성으로 인하여 식품뿐만 아니라 음용수에도 쉽게 흡수되어 생태계에 많은 악영향을 끼친다. 실제 사고 발생 17일 이후 후쿠시마 지역의 원자력 발전소로부터 약 20km 이내의 지역에서 사육되는 돼지의 근육조직을 관찰한 결과, 약 150Bq(벵크렐)/kg 정도의 Cs¹³⁴, Cs¹³⁷ 이온이 검출되었다. 즉, 세슘이온에 피폭된 농축산물을 섭취하는 인간도 간접적으로 방사능 오염물질의 영향을 받게 되므로 반드시 세슘이온은 완벽하게 처리되어야만 한다. 본 연구에서는 Cs이온에 대한 기본적인 정보제공 뿐만 아니라 세슘을 제거하는 여러 가지 공법들 중 자성체를 이용한 Cs이온의 제거 방법과 앞으로 나아가야 할 방법에 대하여 제시하고자 한다.

2. 세슘(Cesium)

세슘(Cesium)은 원자번호 55번으로 원소기호는 Cs이며 단일 동위원소로 이루어져 있는 것이 아니라 질량수가 112~151범위 안에서 40가지의 동위원소가 존재한다(Charles *et al.*, 2007). 그 가운데 가장 대표적인 동위원소는 Cs¹³³, Cs¹³⁵, Cs¹³⁷, Cs¹³⁴이다. 이러한 동위원소들 가운데 Cs¹³³은 자연 속에서 존재하며 유일하게 안정된 동위원소이며, 나머지는 모두 원자력 의해 생성되는 방사성 동위원소이다(Charles *et al.*, 2007). 이 동위원소들의 반감기(T1/2)는 각각 Cs¹³⁵(230만년), Cs¹³⁷(30.17년), Cs¹³⁴(2.07년)이다(Charles *et al.*, 2007). 코발트(Co), 스트론튬(Sr)과 같은 방사성 핵종은 음이온을 많이 가지고 있어 불용성을 띄어 쉽게 분리될 수 있지만, Cs¹³⁷, Cs¹³⁴ 이온은 가용성의 성질을 띄어 수성 매질에서 이동성이 매우 높아 물속에서 쉽게 분리하기가 힘들다. 세슘이온은 나트륨(Na⁺), 칼륨(K⁺)이온과 움직임이 동일하기 때문에 인체 내부에서 Cs이온을 Na⁺, K⁺ 성분으로 오인하고 흡수한다고 알려져 있다. 그렇기 때문에 인체에서 Cs이온이 들어오게 된다면 걸러지지 않고 장에서 Na⁺, K⁺ 이온 대신 그대로 흡수되어 내장에 축적되며 인체 전체적으로 퍼지게 되며 갑상선암과 같은 인체 내부에 크나큰 병으로 번지게 되어 목숨까지 위협하게 된다. 또한, Cs 이온은 흡수로 침투하게 되면 흡과 그 속에 존재하는 유기물에 의해 쉽게 그 모양을 유지할 수 있기 때문에 지속적이고 장기간 동안 토양오염의 원인이 되며 이 토양에서 나오는 식물들까지 Cs이온에 오염되어 인체에 쉽게 전

이되어 큰 피해를 일으킨다. 따라서 세습은 인체와 생태계 환경에 큰 오염문제를 일으킴과 동시에 넓은 지역에도 악영향을 미치며 장시간 잔존하여 지속적으로 피해를 주기 때문에 완벽하게 제거되어야 한다.

3. 자성체(Magnetic substance)

자성체(Magnetic substance)란 자기장 내부에서 자화하여 자성을 가진 물체를 말한다. 그렇기 때문에 외부에서 자기장을 주게 되면 자기장에 의해 물체 내부에서 자화하여 자성력을 가지게 된다. 자성체 입자는 일반적으로 망간, 크롬, 세륨, 백금, 산소, 인, 납, 주석, 구리, 철, 니켈, 코발트 및 이들의 산화물로 구성되어있다(Wang *et al.*, 2016). 이러한 자성체가 가지고 있는 자화 성질과 기존의 수처리적 특성 가지고 있는 물질들을 결합한 자기 분리 기술을 적용하여 수처리 공정 분야에서 널리 사용하고 있다(Su *et al.* 2016). 세습을 제거하는 데에는 여러 가지 방법이 적용되고 있지만 그 중에서도 입자의 크기가 매우 작고, 부피에 비해 높은 표면적을 가지며, 우수한 자성력을 띠는 나노 사이즈의 자성체와 흡착, 이온교환 그리고 응집력을 기반으로 한 물질을 합성하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Su *et al.* 2016).

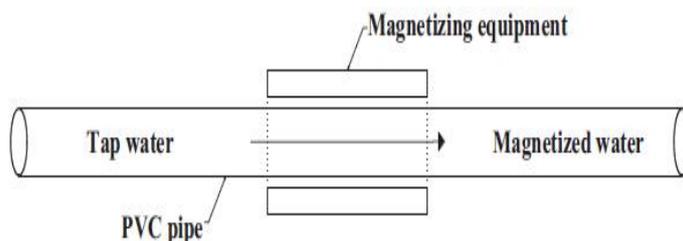


그림 2. 자화를 이용한 수처리 시스템 Wang *et al.*, 2018

그림 2는 자성체가 가지는 특별한 성질을 이용하여 수처리 공정에 적용되고 있는 시스템 보여 주고 있다. 자성체가 혼합되어 있는 물이 외부 자성력 발생장치를 통과하게 되면 자성력에 의해 물과 분리되어 물속에 있는 오염물질을 제거하는 원리이다. 이러한 원리를 이용하여 자성체에 세습을 제거할 수 있는 흡착제나 이온교환수지와 같은 기존의 기능성 물질을 합성시키면 수중의 세습을 물속에서 손쉽게 분리할 수 있다. 또한 세습과 같은 방사능 물질은 2차 오염에 대한 위험성을 가지고 있기 때문에 수처리시 발생한 슬러지를 안전하게 처리하기 위해서 자성체를 이용한 연구가 더욱더 필요하다. 표 1은 자성체를 이용한 수중의 세습을 제거한 기존의 연구를 정리하였다.

표 1. 기존의 수중의 세습을 제거한 기존의 연구

연구자	연도	합성 재료	Cs이온제거	
Sheha, R. R.	2012	Hexacyanoferrate/nanoscale magnetic	흡착용량	1965mg/g
Nakamura <i>et al.</i>	2017	Zeolite/magnetic	흡착용량	0.68mol/g
Yang <i>et al.</i>	2017	Mesoporous material/Magnetic	흡착용량	83.33mg/g
Kang <i>et al.</i>	2018	Prussian Blue/Magnetic	흡착용량	58.73mg/g

4. 강자성체(Ferromagnetic substance)

다양한 자성체 종류의 하나인 강자성체는 주로 철, 니켈, 코발트나 이들의 산화물로 이루어진 물질이다. 외부자기장이 주어지면 자화를 해서 자력을 가지게 되는 성질은 다른 자성체와 동일하나 외부자기장이 없어진 이후에도 잔존하는 잔류자성으로 인하여 여전히 자력을 가지는 특별한 성질을 지니고 있다. 자화된 강자성체는 잔류자성에 의해서 자신이 자기장이 되어 주변에 있는 다른 강자성체 물질을 끌어당길 수 있는 힘을 가지고 있다.

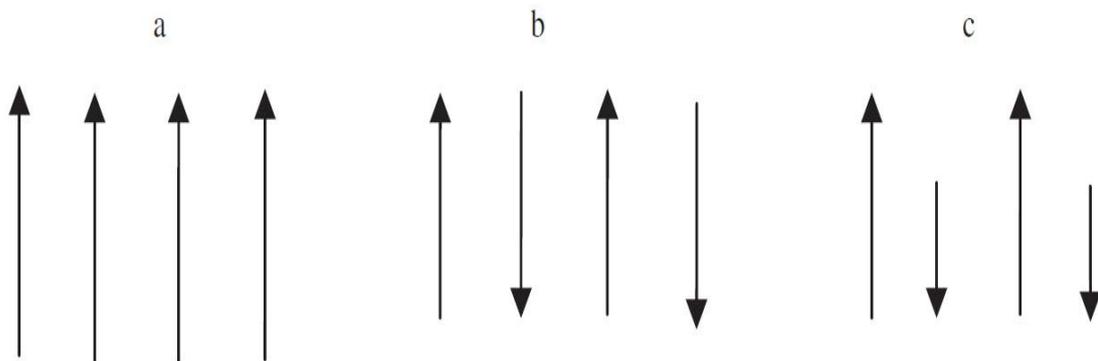


그림 3. 자기 모멘트의 방향 a. 강자성체 b. 반자성체 c.페리자성 (Kaufman et al. 2008)

그림 3은 외부 자기장이 주어질 때 강자성체(Ferromagnetic)와 반자성체(Antiferromagnetic), 그리고 페리자성체(Ferrite)의 모멘트들의 방향을 보여준다. 여기서 강자성체는 모두 같은 방향으로 자기 모멘트가 주어지기 때문에 다른 방향의 모멘트가 존재하는 반자성체, 그리고 페리자성체에 비해 자기장이 비교적 크음을 알 수 있다(Kaufman *et al.* 2008). 이러한 강자성체는 현재 의학, 전기, 통신분야 등 다양한 곳에서 사용하고 있지만, 아직 수처리 분야에서는 많은 연구가 이루어지지 않아 아직 상용화 단계까지는 도달하지 못하고 있다. 따라서 다른 종류의 자성체들 보다 자기장이 더욱더 강하며 외부자기장이 제거되더라도 잔류자성에 의해 스스로 자화하는 성질을 가지는 강자성체를 환경오염물질 제거 기술에 적용을 하면 높은 처리효율을 얻을 수 있을 것이라 판단된다. 특히 세습과 같은 2차 오염 발생에 대한 위험성을 가지고 있는 방사능 오염물질들을 처리하기 위해서는 반드시 적용되어야 한다고 판단된다.

5. 결론

본 연구를 통해 Cs이온의 유해성과 생태계환경에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. Cs이온이 완벽히 제거되지 않고 주변에 방출되게 되면 인간 생활뿐만 아니라 자연환경에도 크나큰 위협을 초래하게 된다. Cs이온을 제거하기 위하여 흡착법, 이온교환법, 침전법과 같은 다양한 방법들을 적용하여 연구하고 있으나, 여러 가지 문제점들로 인하여 처리 어려움을 겪고 있다. 다양한 재료들 가운데 외부 자기장에 의해 스스로 자화하여 자기장으로 변하는 성질을 가지며, 다른 종류의 자성체보다 자성력이 강하다고 알려진 강자성체를 Cs이온을 제거하는데 흔히 사용 중인 프러시안 블루나 제올라이트와 같은 기능성을 가진 물질들을 결합시켜 적용시킨다면, 자기력의 원리를 이용한 자기분리를 통해 Cs이온을 수중에서 손쉽게 분리하여 제거 할 수 있다. 또한, 나노 사이즈 입자들은 사용 후 완벽하게 제거되기가 힘들어 2차 환경오염을 야기할 수 있으나 이러한 문제들 까

지 쉽게 해결될 수 있다. 이렇게 강자성체와 기존의 기능성 물질들을 결합하여 Cs이온 제거에 적용된다면, 수중에 존재하는 Cs이온을 완벽하게 제거함은 물론 잔존할 수 있는 나노입자 및 슬러지까지 완벽하게 처리함으로써, 경제적, 환경적 효율적인 모든 측면을 만족할 수 있을 거라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017R1D1A1B 03032181)

참고 문헌

1. Charles, T., Garten, C. T., Hamby, D. M., Higley, K. A., Hinton, T. G., Kaplan, D. I., Rowan, D. J., Schreckhise, R. G. (2007). Cesium-137 in the Environment - Radioecology and Approaches to Assessment and Management : (Report No. 154), National Council on Radiation Protection and Measurements.
2. Kang, S. M., Rethinasabapathy, M., Hwang, S. K., Lee, G. W., Jang, S. C., Kwak, C. H., Choe, S. R., Huh, Y. S. (2018). Microfluidic generation of Prussian blue-laden magnetic micro-adsorbents for cesium removal. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 341, pp. 218-226.
3. Kaufman, A. A., Richard, O., HansenRobert, L., Kleinberg, K. (2008). Chapter 6 Paramagnetism, Diamagnetism, and Ferromagnetism. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, Vol. 42, pp. 207-254.
4. Nakamura, A., Sugawara, K., Nakajima, S., Murakami, K. (2017). Adsorption of Cs ions using a temperature-responsive polymer/magnetite/zeolite composite adsorbent and separation of the adsorbent from water using high-gradient magnetic separation. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol, 527, Issue 20, pp. 63-69.
5. Su, C., Yang, H., Song, S., Lu, B., Chen, R. (2016). A magnetic superhydrophilic/oleophobic sponge for continuous oil-water separation. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 309, pp. 366-373.
6. Wang, T., Zhou, Y., Lei, C., Luo, J., Xie, S., Pu, H. (2017). Magnetic impedance biosensor : A review. *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 90, pp. 418-435.
7. Wang, Y., Wei, H., Li, Z. (2018). Effect of magnetic field on the physical properties of water. *Results in Physics*, Vol. 8, pp. 262 - 267.
8. Yoschenko, V., Takase, T., Hinton, T. G., Nanba, K., Onda, Y., Konoplev, A., Goto, A., Yokoyama, A., Keitoku, K. (2018). Radioactive and stable cesium isotope distributions and dynamics in Japanese cedar forests. *Journal of Environmental Radioactivity*, In press.
9. Sheha, R. R. (2012) Synthesis and characterization of magnetic hexacyanoferrate (II) polymeric nanocomposite for separation of cesium from radioactive waste solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 388, pp. 21 - 30.
10. Yang, H., Yu, H., Sun, J., Liu, J., Xia, J., Fang, J., Li, Y., Qu, F., Song, A., Wu, T. (2017) Facile Synthesis of Mesoporous Magnetic AMP Polyhedric Composites for Rapid and Highly Efficient Separation of Cs⁺ from Water. *Chemical Engineering Journal*, Volume. 317, pp. 533-543.