

CDI에 의한 음용수 정수처리 기술개발 현황 및 전망

권 순 국

(서울대학교 농업생명과학대학 교수)

1. 서 론

질산염 오염은 세계적으로 심각한 환경오염 문제 중의 하나로서 부각되고 있다. 특히 대규모 축산 단지나 넓은 농경지가 있는 농촌에서는 귀중한 음용수 原水인 지하수가 질산염에 오염되고 있으며 도서 지방이나 해안 지대에서는 수자원이 부족하므로 생기는 현상이기는 하지만, 쓰고 버리는 폐수를 정화하여 재이용해야 하거나 바닷물을 정수, 처리해야 할 곳이 점차 늘어나는 등 상수도의 혜택을 받지 못하는 농어촌 지역의 음용수의 공급과 관리는 앞으로 사회적인 문제로 대두될 가능성이 매우 커지고 있다.

따라서 물 속에 함유되어 있는 불필요한 각종 염류를 효과적으로 그리고 경제성 있게 제거하는 기술의 개발이 점차 관심의 대상이 되고 있다. 현재 많이 쓰이는 물 속의 각종 염이온을 제거하기 위한 방법은 ① 역삼투법 (Reverse Osmosis : RO) ② 역전기투석법 (Electrodialysis Reversal : EDR) ③ 이온교환법 (Ion Exchange : IX) ④ 생물처리법 ⑤ 증발법 등으로 나눌 수 있으나 비용 문제(경제성)와 각각 방식이 가지는 여러가지 문제점으로 인하여 농촌에 곧 바로 실용화 할 수 있는 기술로 발전시키기에는 한계가 있다. 이러한 것을 혁신적으로 해결하기 위한 음용수 처리방법이 CDI(Capacitive Deionization)에 의

한 정수 처리 기술인데 현재 미국 Lawrence Livermore 국립연구소에서 연구를 진행중이다. 이 방법은 전력 소비가 아주 적어서 우리나라와 같이 전기 값이 상대적으로 비싼 농촌 지역과 도서 지방의 음용수 정수 방법으로 각광을 받을 수 있을 것으로 생각된다. 더욱이 구조가 단순하고 운영이 아주 간단하다는 점이 매력적이다. 현재로서는 이 기술을 도입한다고 하여도 해수의 담수화에 이용하기에는 기술적으로 해결되어야 할 몇 가지 문제가 남아 있으므로 어려운 실정이다. 그러나 상수도 공급이 곤란한 농촌지역 또는 도서, 해안지방의 수질이 나쁜 원수(原水)를 음용수로 바꾸는데는 별 문제없이 이용될 수 있을 것으로 생각되며 또한 경제적인 처리가 가능할 것으로 예측된다. 본 고에서는 CDI에 의한 음용수 정수 처리기술을 소개하고자 한다.

2. CDI란 무엇인가?

우주항공산업에서의 필요성 때문에 1980년대 이후에 들어와서 비표면적이 아주 큰 여러 가지 물질이 다수 개발되었는데 그 중의 하나가 미국 Lawrence Livermore 국립연구소에서 개발한 Carbon Aerogel이다. 이러한 물질이 개발되므로써 종래에는 엄두도 낼 수 없었던 CDI 기술이 개발될 수 있었다. CDI는 물 속에 녹여져 있는 각종 이온을 제거하는데 다

공질 전극에 의한 정전장을 이용하는 기술이다. 그림. 1에서와 같이 NaCl이나 NaNO_3 의 수용액을 아주 높은 비표면적($400\sim 1,100\text{m}^2/\text{g}$)을 가지는 Carbon Aerogel로 된 전극 다발로 통과시키면 염소이온, 질산 이온, 황산 이온, 불소 이온 등과 같은 비환원성 이온이나 철 이온, 소듐 이온, 칼슘 이온, 알루미늄 이온 등과 같은 비산화성 이온들을 주어진 전장에 의하여 용액으로부터 제거한다. 동시에 이러한 공정은 중금속이나 다른 종류의 불순물을 제거하는 데에도 곧 바로 응용이 가능하다. CDI 기술은 다른 재래식 기술보다도 여러 가지 면에서 유리한 점을 많이 가지고 있다. 이온교환법에서의 가장 큰 문제점은 각종 이온을 물속에서 제거한후 어느 정도 시간이 지나면 반드시 재생 과정을 거쳐야 하는 것인데 이 때 산, 알칼리 및 소금과 같은 물질이 다량 요구되며 이것이 경제성 및 2차폐기물 발생과 관련되어 문제가 되는 수가 많다. 반면에 CDI에서는 전지를 방전하므로서 Carbon Aerogel을 간단하게 재생할 수 있으므로 경제적이며 2차적인 폐기물의 발생이 없다. 또한 증발법보다는 에너지 사용면에서 극히 효율적

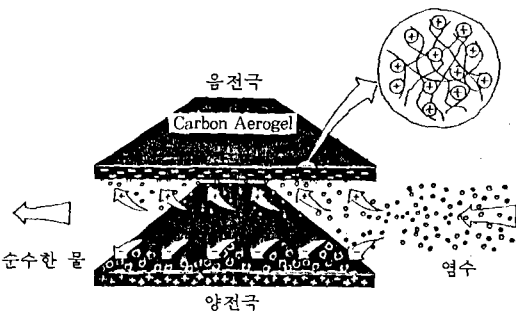


그림. 1. Carbon Aerogel 전극을 사용한 CDI의 원리를 나타내는 구조도

(음이온과 양이온이 음극과 양극에 형성된 Electrical Double Layer에 흡착된다. 염의 수용액을 아주 큰 비표면적을 가진 Carbon Aerogel의 전극 사이로 통과시키면 물로부터 다량의 이온을 제거시킬 수 있다. Farmer et.al(1995) Paper presented to 1995 Pacific Rim Environmental Conference)

이고, 전기분해법이나 역삼투법에서 요구되는 막(膜)이나 고압 펌프가 사용되지 않기 때문에 에너지의 효율적인 사용을 기함과 동시에 운전 관리상에도 많은 이점을 가진다.

3. CDI의 개발 배경 및 역사

수용액으로부터 중금속을 회수하기 위하여 다공 전극을 사용한 기술에 대한 많은 논문과 특허를 찾아볼 수 있다. 이 경우 금속 이온은 비교적 적은 비표면적을 가진 음극 표면에도 잘 전착(電着)된다. CDI에 관한 최초의 연구를 들자면 60년대 초 염수의 탈염에 대하여 다공성의 활성탄 전극을 사용한 것이다. 그후 활성탄 판(床)을 이용한 가역 전기흡착법 혹은 CDI와 비슷한 연구가 1970년대 초에 수행되었다 그리고 계속적인 연구로 인하여 다공질 탄소 전극의 capacitive charging에 대한 포괄적인 이론모델이 개발되었다. 그 몇 년후 1980년 이스라엘에서 CDI에 대한 연구결과가 발표되었다. 이 연구에서는 이론적으로는 완성된 것이기는 하였으나 전극 손상에 의한 성능저하 문제를 해결하지 못하는 등 몇 가지 기술적인 문제를 해결하지 못하였기 때문에 정수 처리에는 응용되지 못하였다. 그러나 이 연구에서 실시한 예비적인 경제성 분석에서 만약 전극의 내구성만 적절하게 향상시킬 수 있다면 이 기술을 기본으로 하여 효율적이고, 낮은 비용의 탈염 처리공장을 건설할 수 있음이 입증되었다. 이 연구는 Carbon Aerogel이 발명되기 약 10년전에 이루어졌으므로 이 물질을 사용할 수는 없었다. 전반적으로 볼 때 재래식의 활성탄을 이용하는 CDI시스템은 여러가지 실용상의 문제에 봉착되었다고 볼 수 있었다.

1990년에 들어와서야 Carbon Aerogel을 포함한 다공질 탄소 전극을 기본으로 한 많은 수퍼 축전지가 에너지 저장에 응용하기 위하여 개발되기 시작하였다. 우선 다공질 활성탄

전극을 사용한 Double Layer 축전지가 일본에서 개발되었다. 그후 미국 Lawrence Livermore 국립연구소는 Carbon Aerogel을 기본으로 한 에너지 저장 장치의 개발 필요성 때문에 Double Layer Capacitor를 개발하였다. 이 장치에서 사용된 Carbon Aerogel 전극은 $100 \sim 700 \text{m}^2/\text{cm}^3$ 의 대단히 큰 체 표면적을 가지며 반면에 가비중은 $0.3 \sim 1.0 \text{g}/\text{cm}^3$ 으로 비교적 적은 편이다. 이러한 물질의 특징은 아주 높은 에너지 밀도를 가진 장치를 개발할 수 있게 하며, 또한 이러한 물질의 전기적인 연속성은 저장된 에너지를 급속도로 방출할 수 있게 한다.

4. CDI의 정수처리 성능

비록 간단한 실험 장치에서의 실험결과 이기는 하지만 Carbon Aerogel을 이용한 CDI는 물로부터 NaCl과 NaNO_3 를 대단히 효과적으로 제거할 수 있었다. 시료의 농도 범위는 $10 \sim 1,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (= mmhos/cm , $1,700 \mu\text{S}/\text{cm}$ 는 대개 NaCl 1,000ppm과 같다)였고, 전압 수준은 0.0, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2V였다. 회분형 장치를 사용한 실험에서 1.0L/min의 유량으로 전해액 4.0L를 계속 순환시켰으며, 1회 통과 실험에서는 25mL/min의 율로 20L의 전해액을 전극 다발에 통과시키므로써 실험을 수행하였다. 전압 1.2V에서 가장 좋은 결과를 나타냈음을 알 수 있었고, $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 의 전해액으로부터 95%의 염을 제거할 수 있었다. 염 농도가 높을수록 실용화된 제염 성능을 가지기 위해서는 더 많은 Carbon Aerogel 전극이 필요하며, 장기간 사용(수개월)으로 성능이 저하(6~8%)됨을 확인할 수 있었다. 그러나 다행히도 대부분의 성능 저하는 주기적으로 전극을 방전시킴으로써 재생이 되어 성능을 회복할 수 있음이 밝혀졌다. 그림. 2는 몇 가지 전압 하에서 NaCl와 NaNO_3

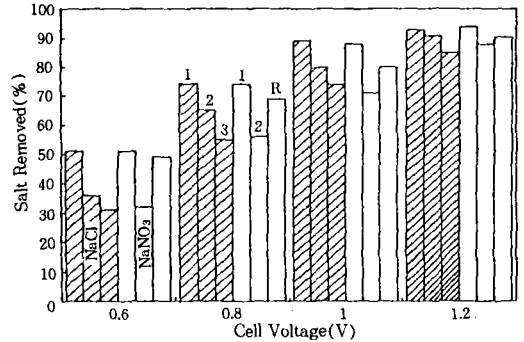


그림. 2. Carbon Aerogel의 전착능에 대한 노화 효과를 나타내주는 NaCl과 NaNO_3 용액에 대한 자료

(0.6~1.2V 범위의 전압에서의 제염율. 유량 1L/min로 체적 40L의 전해액을 완전 순환시킴. 신품 전극=1, 수주일 경과후의 전극=2, 수개월 경과 전극=3, 전극의 극 교환으로 재생된 노화 전극=R, Farmer et.al(1995) Paper presented to 1995 Pacific Rim Environmental Conference)

의 농도를 달리했을 때 제염율을 나타내고 있다.

5. 전 망

현재 Lawrence Livermore 연구소에서의 연구는 실험실 규모의 초보 단계 연구라 할 수 있으므로 앞으로 NaCl이나 NaNO_3 이외의 다른 염류에 대한 실험과 고농도에서의 추가적인 연구를 필요로 하여 현재 연구가 진행되고 있으며, 곧 공장시설 규모의 실용화 단계로 진입할 것으로 예상된다. 또한 dual 시스템으로 개발하여 한편의 전극 다발이 염류를 제거하는 동안에 다른 한쪽에서는 다공질 물질의 전극을 재생시키는 작업을 하게 할 수 있으며 재생시 발생된 전류를 다시 이온 제거에 사용한다면 공정 전체의 에너지 효율이 향상될 것으로 기대된다.

앞으로 이러한 장치가 실용화되기 위해서는 Carbon Aerogel 전극의 내구성 향상이 가장 중요한 문제중의 하나이며 이것에 대한 연구도 현재 동시에 진행 중에 있다.

그러나 궁극적으로 바닷물을 연속적으로 담

수화하기 위해서는 현재 실험실 수준에서 보다 전극의 숫자가 크게 증가되어야 할 것이며 이러한 경우 Carbon Aerogel이 상업화를 위하여 대량생산 된다고 하더라도 가격면에서 문제가 될 수 있고 더욱이 상세한 경제성 분석을 위해서는 더욱 정교한 에너지 분석에 대한 연구가 수행되어야 한다.

현재까지 밝혀진 바에 의하면 수자원이 한정된 지역에서 수질이 나쁜 원수를 처리하는 데는 상당히 가치가 있는 기술로 생각되며, 전기 저항이 낮은 다공질 탄소를 사용하여도 전력 소모를 획기적으로 줄일 수 있어 전력비가 상대적으로 비싼 우리 나라에서 앞으로 혜택을 볼 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Seawater and Desalting; A. Delyannis and E.-E. Delyannis, Ed.; Springer-Verlag, Berlin, 1980.
2. K. Moeglich, "Apparatus for Removal of Contaminants from Water," U. S. Pat. No. 4,072,596 February 7, 1978.
3. W. J. Blaedel, J. C. Wang, "Flow Electrolysis on a Reticulated Vitreous Carbon Electrode," Anal chem, 1979, 51, 799-802.
4. G. F. Platek, "Reticulated Electrode for Recovery of Metal Ions," U. S. Pat. No. 4,515,672, May 07, 1985.
5. A. M. Johnson, A. W. Venolia, J. Newman, R. G. Wilbourne, C. M. Wong, W. S. Gillam, S. Johnson, R. H. Horowitz, "Electrosorb Process for Desalting Water," Office of Saline Water Research and Development Progress Report No. 516, U. S. Dept. Interior Pub. 200 056, March 1970, 31p.
6. A. M. Johnson, I. Newman, "Desalting by Means of Porous Carbon Electrodes," I. Electrochem. Soc., 1971 118, 510-517.
7. Y. Oren, A. Soffer, "Water Desalting by Means of Electrochemical Parametric Pumping : II. Separation Properties of a Multistage Column," J. Appl. Electrochem. 1983 13, 489-505.
8. Keitaro Katsu, "Double Layer Electric Capacitor," Nippon Electric Co., Jap. Pat. Appl, 91-303689.
9. S. T. Mayer, R. W. Pekala, J. L. Kaschmitter, "The Aerocapacitor : An Electrochemical Double-layer Energy-Storage Device" J. Electrochemical Soc., 1993 140 446-451.
10. R. W. Pekala, S. T. Mayer, I. F. Poco, J. L. Kaschmitter, "Structure and Performance of Carbon Aerogel Electrodes," in Novel Forms of Carbon II, C. L. Renschler, D. M. Cox, I. J. Pouch, Y. Achiba, Eds., MRS Symp. Proc. 349 79 (1994).
11. R. W. Pekala et al., "Supercapacitors Based on Carbon Foams," U. S. Pat. No. 5,260,855.
12. R. W. Pekala, in Ultrastructure Processing of Advanced Materials, D. R. Uhlmanjn, D. R. Ulrich, Eds., John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 1992, pp. 711-717.
13. J. C. Farmer, D. V. Fix, G. V. Mack, J. F. Poco, J. K. Nialsen, R. W. Pekala, J. H. Richardson, "Capacitive Deionization of Seawater," 1995 Pacific Rim Environmental Congeronce in San Francisco, CA, USA, 1995.