

## 원자력 발전소에서 전기탈이온법을 이용한 붕소의 제거와 회수: 이온전도성 매개체에 대한 영향

송 정훈, 연 경호, 문 승현  
광주과학기술원 환경공학과

### Removal and Recovery of Boron using Continuous Electrodeionization in a Nuclear Power Plant: Effect of ion-conducting media

Jung-Hoon Song, Kyeong-Ho Yeon, Seung-Hyeon Moon  
Department of Environmental Science and Engineering,  
Kwangju Institute of Science and Technology

#### 1. 서론

원자력발전소의 일차냉각재는 핵연료로부터 핵분열 에너지(열)를 흡수하여 증기발생기로 전달하는 유체이며 이 유체가 물일 때 일차냉각수라 한다. 원자로 냉각재는 핵분열생성물과 부식생성물로 인해 방사능을 띄게 되며 원자로 냉각재 계통의 순도를 유지하기 위해 정화공정을 거친 후 다시 회수하도록 하고 있다. 이러한 역할을 담당하는 계통이 화학 및 체적제어 계통(CVCS)이다. 이 기능을 수질관리 측면에서 보면 크게 원자로 냉각재의 정화처리와 반응도 제어제인 붕소의 농도조절로 나뉘어 진다[1].

전기탈이온 공정은 이온교환법과 전기탈이온법의 혼합공정으로 방사성 핵종을 제거 및 농축시킬 수 있으며 폐이온교환수지가 발생되지 않는다. 이러한 관점에서 전기탈이온법은 일차냉각수를 처리하는데 적합한 공정으로 고려되었고, 원자로 반응도 억제제인 붕소의 회수와 제거를 위한 연구를 수행하였다.

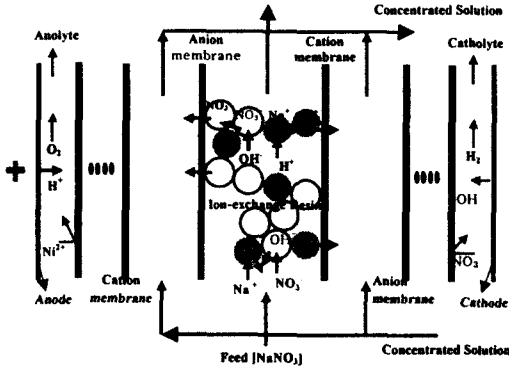


Fig. 1. Schematic diagram of the CEDI system

#### 2. 이론

Fig 1에서 보는 바와 같이 전기투석의 회석실에 이온교환수지와 같은 이온교환매개체를 충전한 공정이 전기탈이온 공정이다. 원수보다 높은 전기전도성이 있는 이온교환매개체를 충전함으로써 이온의 전달을 촉진하며 이온교환매개체는 전기장하에서 연속적으로 재생된다. 따라서 폐이온교환수지의 발생이 없으며 이온교환수지탑과 다르게 재생을 위하여 화학약품이 필요하지 않다.

전기탈이온에 의한 붕소의 제거와 회수 시스템에서는 Bipolar 경계층에서의 물의 해리 현상이 중요하다.

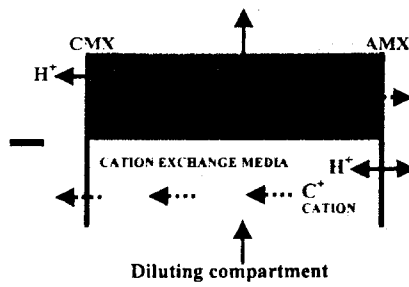


Fig. 2. Principle of boron removal

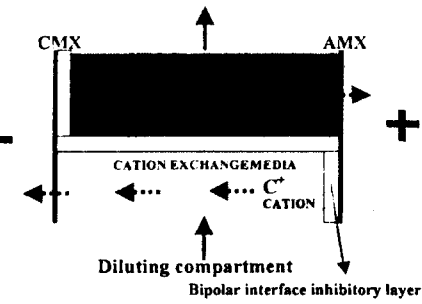


Fig. 3. Principle of boron recovery

Fig. 2에서 보는 바와 같이 반대되는 전하가 만나는 경계층은 양이온교환매개체와 음이온교환매개체, 양이온교환매개체와 음이온교환막, 음이온교환매개체와 양이온교환막의 세가지 경우가 존재하게 된다. 이러한 Bipolar 경계층에서 물의 해리로 인하여 붕소와 같은 약이온종이 음이온교환수지층에서 pH 9 이상되어 이온화합으로서 제거되게 된다(Fig. 2). 전기탈이온 장치에서 약이온종을 회수하기 위해서는 Bipolar 경계층에 물의 해리를 억제하는 망을 설치하여 약이온종의 해리를 방지할 수 있다(Fig. 3).

### 3. 실험

붕소제거와 회수를 위한 전기탈이온 모듈은 Fig. 4와 같이 AMX 음이온교환막과 CMX 양이온교환막 (Tokuyama Soda Co. Ltd.), 1 셀쌍, 개개 이온교환막 유효면적 20 cm로 구성되었다. 이온전도성 매개체로는 이온교환수지와 이온교환섬유가 사용되었다. 이온교환수지(IX)는 Rohm and Haas Co.의 AMBERLITE Nuclear grade IRN 77 강산성양이온교환수지(CIX) & 78 강염기성음이온교환수지(AIX)가 사용되었다. 이온교환섬유는 Institut Textile de France의 AMPS 강산성양이온교환섬유(CIET)와 PLEXIMON 강염기성음이온교환섬유(AIET)가 사용되었다.

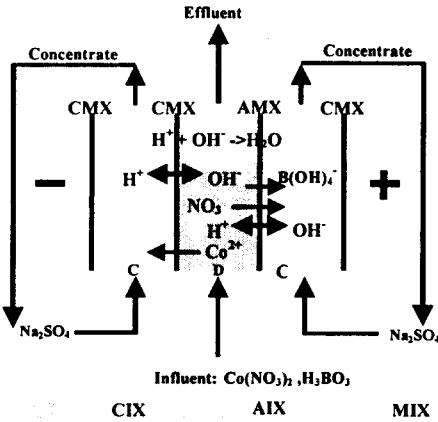
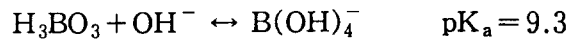


Fig. 4. Cell configuration of the CEDI

### 4. 결과 및 토론

#### 4.1 붕소제거

전기탈이온 모듈에서 약이온종인 붕소가 제거되는 원리는 양이온교환막과 음이온교환매개체 사이(Bipolar interface)에서 물의 해리로 인해 발생된 수산화이온으로 인해 pH가 9.3 이상 증가하여 붕산(Boric acid)이 붕소이온(Borate ion)으로 이온화합으로서 제거된다.



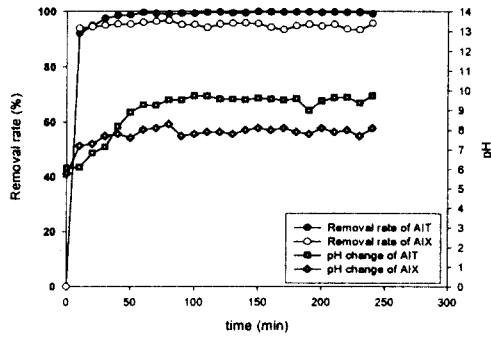


Fig. 5. Variation of removal rate and pH with time

붕소 제거실험의 결과 Fig.5에서와 같이 음이온교환섬유는 99 %의 제거율을 나타낸 반면 음이온교환수지는 93 %의 제거율을 나타내었다. 이온교환수지보다 이온교환섬유의 제거율이 높은 이유는 위의 Fig.6에서 보는 바와 같이 음이온교환섬유(AIT)가 음이온교환수지(AIX)보다 음이온교환막(AEM)과의 접촉면적이 훨씬 더 크기 때문에 bipolar 경계면에서 물분해현상이 촉진된 것으로 사료된다.

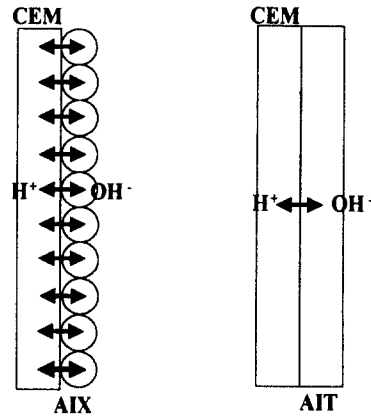


Fig. 6. Contact area between membrane and resin or between membrane and textile

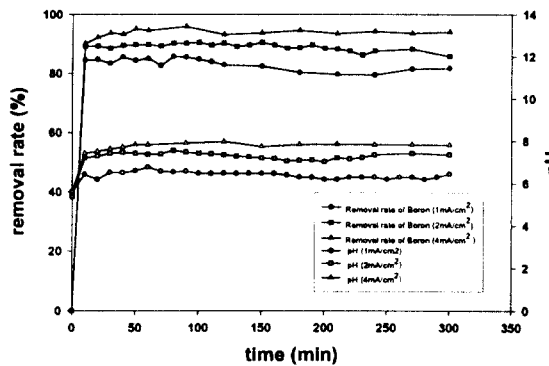


Fig. 7. Variation of boron removal and pH with current density

정의된 Bipolar사이의 물의 해리현상을 설명하는 이론에 의해 다음과 같이 계산하였다.[2]

$$\frac{k_d(E)}{k_d} = 1 + b + \frac{b^2}{3} + \frac{b^3}{18} + \frac{b^4}{180} + \frac{b^5}{2700} + \frac{b^6}{56700} + \dots, \quad b = 0.09636 \frac{E}{\epsilon_T T^2}$$

전기장밀도가  $10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 보다 클 때 위의 식은 다음과 같이 해리율상수

Fig. 7은 전류밀도에 따른 제거율과 pH의 변화를 나타내었다. 전기탈이온 공정에서 전류밀도의 증가에 따라 물의 해리현상이 증가하기 때문에 pH 또한 증가하게 된다. 따라서 pH 증가에 일차적으로 영향을 미치는 인자는 전류밀도와 Bipolar 접촉면적임을 알 수 있었다.

#### 4.2 붕소회수

전기탈이온 시스템을 이용한 붕소의 회수는 다음과 같은 Second Wien Effect라고

(dissociation rate constant)에서 전기장의 효과를 계산하는데 이용되어질 수 있다.

$$\frac{k_{d(E)}}{k_d} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} (8b)^{-\frac{3}{4}} e^{(8b)^{\frac{1}{2}}}$$

$K_{d(E)}$  = 전기장하에서 물의 해리 상수  
 $K_d$  = 전기장이 없을 때의 물의 해리 상수,  
 $E$  = 전기장밀도(electric field density)  
 $= V \cdot m^{-1} = 8.0 \times 10^8 V \cdot m^{-1}$   
 $2\lambda$  = 전이영역(transition layer의 두께)  
 $= 3 \text{ nm} = 3 \times 10^{-9} \text{ m}$   
 $\Delta\phi^{tr} = (8.0 \times 10^8) \times (3 \times 10^{-9} \text{ m}) = 2.4 \text{ V}$   
 [From  $E = \Delta\phi^{tr}/2\lambda$ ],  $T = 298.15 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $\epsilon_T$  = 상대적 유전율(relative permittivity)  
 $= 78.57$  at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  in water

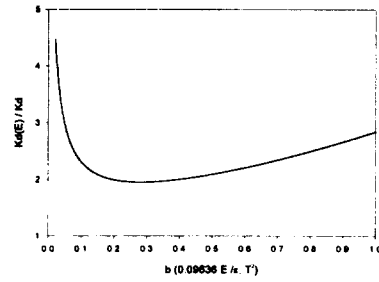


Fig. 8.  $K_{d(E)}/K_d$  calculated from the second Wien effect

Fig.2 에서 b는 0.28이었을 때 최소를 나타냄으로서 Bipolar 경계면의 간격이 117.84 nm로 계산되었다. 따라서 117.84 nm이상일 때 반대되는 전하로 인한 물의 해리 현상이 일어나지 않을 것이라 가정할 수 있다.

Fig. 9에서 붕소최대회수율은 이온교환수지 94 %, 이온교환섬유 89 %를 나타내었다. 이온교환용량에 기인하여 4.4 meq/g인 이온교환수지가 1.0 meq/g인 이온교환섬유보다 높은 회수율을 나타낸 것으로 사료된다. 전류 밀도의 증가에 따라 붕소회수율이 감소하는 이유는 Bipolar 억제망을 설치한 간격에서 확산경계층이 형성되어 농도분극 현상으로 pH가 상승하였기 때문이다.

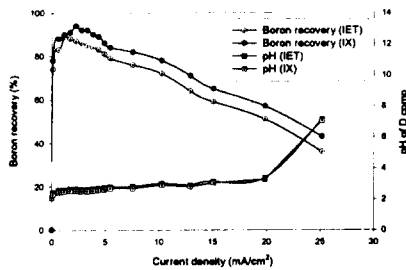


Fig. 9. Variation of boron recovery with current density

## 5. 사사

본 연구는 한국과학기술기획평가원에서 주관하는 원자력기초연구의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 6. 참고 문헌

1. Jan Severa: Handbook of radioactive contamination and decontamination, Elsevier, p 117-155 (1991)
2. Strathmann, H. Krol, J.J., Rapp, H.-J., Eigenberger, G., Limiting current density and water dissociation in bipolar membranes, J. membrane Science, 125, p 123-142 (1997)