

## 제염용액내 유기산이 금속이온 이온교환에 미치는 영향

양 영 석 · 강 영 호 · 정 경 락\*

한국원자력연구소

\*전북대학교 공과대학 화학공학과

(1992년 12월 23일 접수, 1993년 2월 10일 채택)

### The Effect of Organic Acids in Decontamination Solution on Ion Exchange of Metal Ions

Yeong-Seok Yang, Young-Ho Kang, and Gyeong-Rak Jheong\*

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-606, Korea

\*Dept. of Chemical Engineering, College of Engineering, Chonbuk National University, Chonbuk 560-759, Korea

(Received December 23, 1992, Accepted February 10, 1993)

**요 약 :** 원자로 냉각시스템의 방사성 오염물질을 제거하기 위한 제염공정에서 유기산에 용해된 금속이온들은 이온교환 수지를 통과하면서 제거된다. 그러나 제염용액내 유기산들은 용액내 금속이온과 착화합물을 형성하여 이온교환수지에 대한 친화도를 감소시킨다. 이같은 관점에서 착화합물 형성이 이온교환공정에 미치는 영향 해석을 위해 코발트와 철 이온을 대상으로 Amberlite IRN-77 양이온수지와와의 이온교환실험을 수행하였다. 실험결과에서 화학제염제로 사용된 유기산 가운데 EDTA는 철 이온보다 코발트 이온과 강한 착화합물을 형성하여 코발트 이온의 수지에 대한 이온교환용량을 현저히 감소시켜 주는 성분으로 나타났다. 반면에, Oxalic Acid와 Citric Acid의 영향은 미미하였다. 또한, 실험결과로부터 이들 금속이온들에 대한 단일 성분계 및 2성분계 비선형 평형식을 결정하였다.

**Abstract:** In decontamination process to remove radioactive materials of reactor cooling system, the metal ions dissolved by organic acids in decontamination solution are separated by use of ion exchange resin in the column. However, organic acids in decontamination solution decrease the apparent affinity of the resin to metal ions. In light of this, some experiments were carried out on the Amberlite IRN-77 cation resin with cobalt and iron to gain a better understanding of the complexation effects on the ion exchange process. Experimental results showed that EDTA among organic acids used as chemical decontaminants predominantly caused reduction of ion exchange capacity of cobaltous ion to resin since this reagent formed the complex with the cobaltous ion stronger than that with the ferrous ion. In contrast, the effects of oxalic acid and citric acid were found to be negligible. And, single and two-component nonlinear equilibrium relationships of the metal ions were established using experimental data.

#### 1. 서 론

원자로 냉각시스템은 운전중 방사화된 부식생성물과 핵분열 생성물에 의해 오염되며, 일단 생성된 방사성

핵종은 계통주위에 이동, 분산, 축적되어 방사선 장 (Radiation Field)을 형성하게 된다. 현재까지 얻어진 원자로 가동경험에 의하면 가동년수와 더불어 방사선 준위는 계속 증가하는 것으로 나타나고 있다[1]. 이

같은 현상은 주로 냉각계통 구조재질의 부식에 기인하는 것인데[2, 3], 일반적으로 세심한 수질관리를 하기 때문에 냉각계통 구성재질인 스테인레스강의 부식속도는 아주 작다고 볼 수 있다.

제염공정은 원자력 시설의 방사성 오염물질을 제거하기 위한 방법으로 크게 물리적 방법과 화학적 방법으로 나누어진다. 이 가운데 화학적 제염방법은 직접 오염부위를 제염할 수 없는 배관내부나 분해하기 곤란한 계통의 구성기기 내부 등에 적용되는데, 제염제로 사용되는 유기산과 오염물질의 화학반응을 통하여 오염물질을 피오염부위로부터 용해·분산 또는 기·액화하여 제거시키는 방법이다. 특히, 저농도 화학제염공정은 고농도 화학제염공정과는 달리 유기산에 의해 용해된 오염물질을 이온교환수지탑을 통하여 농축분리하기 때문에 폐기물 처리량이 적고 적용성이 뛰어난 장점이 있어 널리 실용화되고 있다[3, 4]. 따라서 용해된 오염물질로서 방사성 장 형성의 주요원인이 되는 금속이온의 이온교환특성을 규명하는 것은 공정의 해석 및 개선을 위해 중요하다고 판단된다. 특히, 냉각계통에서 방사화된 핵종 가운데 코발트이온은 방사성 장 증가의 주요성분으로 보고되고 있다[5].

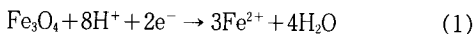
이러한 배경에서 본 연구에서는 제염용액내 유기산에 의해 용해된 방사성핵종 가운데 방사성 장 증가의 주요성분인 코발트이온과 원자로 냉각계통 주요 구성재질 원소인 철이온을 대상으로 대표적 화학제염공정인 CAN-DECON공정의 제염용액내 유기산들이 이들 금속이온의 이온교환반응에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 제염용액내 유기산

화학제염공정의 대표적인 방법인 CAN-DECON공정에서 제염제로 사용되는 유기산은 EDTA, Oxalic Acid, Citric Acid이며, 제염용액내 유기산들의 구성비는 Table 1과 같다[6].

제염공정에서 유기산들의 기능은 크게 두가지로 나누어지는데 첫째는 반응식 (1)과 같이 금속산화물을 용해시키는 것이고[7],

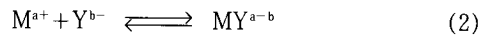


둘째는 음전기를 띤 킬레이트제가 용해된 금속이온들과 착화합물을 형성하여 이들이 계통내에 재침전하

Table 1. Typical Chemical Composition of CAN-DECON Solution

Component	Approx. wt %
EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid) (C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O <sub>8</sub> )	40
Oxalic acid (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	30
Citric acid (C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> )	30

지 못하도록 용액내에 고정시키는 것이다. 이같은 착화합물 형성과정은 다음과 같이 반응식 (2)로 표시할 수 있다[6, 8, 9].

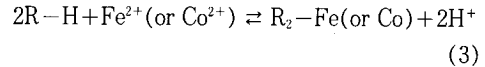


여기서, M<sup>a+</sup> : 금속이온

Y<sup>b-</sup> : 킬레이트 음이온

### 2.2. 이온교환반응

본 연구의 대상계인 Amberlite IRN-77과 Fe<sup>2+</sup> 및 Co<sup>2+</sup>에 대한 이온교환반응은 대립이온과 같은 부호의 이온들 사이에 일어나는 가역적 반응으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.



여기서 R은 이온교환수지의 구조체(structure)를 표시한다. 위의 반응식에서 정반응은 탈이온 공정(Exhaustion or Loading Phase)이며, 역반응은 재생 공정(Regeneration Process)이다.

이온교환반응이 진행됨에 따라 이온과 수지 사이의 평형상태가 도달되는데 단일성분계의 이온교환평형은 용액의 특성, 수지의 가교결합도, 수지관능기, 대상이온 및 온도 등에 영향을 받는다. 여기에서는 제염공정이 일정온도에서 이루어지기 때문에 대상이온인 철과 코발트 이온교환계에 대한 등온평형관계를 고려하였다.

일반적으로 등온평형관계는 Langmuir형으로 많이 표시되는데 저농도 범위에서는 다음과 같은 직선관계식으로 표시할 수 있다[10, 11].

$$q^* = KC \quad (4)$$

다성분계의 경우에 경험적인 원칙을 연구대상 이온계인 Fe<sup>2+</sup>-Co<sup>2+</sup> 2성분계에 적용하면 “동일 이온가일 때는 원자번호가 클수록 선택도가 높다”는 원칙에

따라 이론적으로 볼 때 철이온이 코발트이온보다 선택도가 작을 것으로 예상된다. 그러나 Pettit[12]가 여러 가지 화학제염제하에서 실험한 결과는 오히려 반대현상을 보였다. 이 결과로부터 제염용액내 유기산들이 금속이온의 이온교환용량 감소를 초래하는 주원인임을 알 수 있다. 따라서 이들의 상호관계를 정량적으로 평가해 보는 것은 공정전반의 이해와 제염제로 사용되는 유기산들이 이온교환반응에 미치는 영향평가를 위해 매우 중요하다.

다성분계의 평형관계에 대해서는 지금까지 많은 관계식들이 제시되어 왔으나 Fritz 및 Schluender의 경험식이 많이 사용되고 있다[13, 14].

$$q_i^* = \frac{a_{i0} C_i^{b_{i0}}}{w_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} C_j^{b_{ij}}} \quad (5)$$

여기서 a, b, w는 상수 또는 지수이며, i와 j는 각각 대상이온 및 이에 대응하는 이온이며 0는 대응성분이 없는 단일성분계를 나타낸다. (5)식은 특별한 경우로서 많이 알려진 관계식을 포함하고 있는데,  $b_{i0} = b_{ij} = w_i = 1$ 일때 여러경우의 다성분계 흡착 등온평형관계를 나타내는 Langmuir식이 된다. (5)식에 대하여 철 이온을 성분 1, 코발트 이온을 성분 2로 하고  $w_1$ 과  $w_2$ 를 생략하면 단일성분계 실험결과에 가장 잘 부합되는 Freundlich 평형식이 된다[13].

$$q_1^* = \frac{a_{10}}{a_{11}} C_1^{b_{10} - b_{11}} \quad (6)$$

$$q_2^* = \frac{a_{20}}{a_{22}} C_2^{b_{20} - b_{22}} \quad (7)$$

한편, (5)식을 철 이온과 코발트 이온에 대해 정리한 후,  $a_{11} = a_{22} = 1$ ,  $a_{10} = a_1$ ,  $a_{20} = a_2$ ,  $b_1 = b_{10} - b_{11}$ ,  $b_2 = b_{20} - b_{22}$ 로 놓고  $w_1$ 과  $w_2$ 를 생략해서 변형하면 다음과 같다.

$$\frac{C_1^{b_{10}}}{q_1^*} = \frac{1}{a_1} C_1^{b_{11}} + \frac{a_{12}}{a_1} C_2^{b_{12}} \quad (8)$$

$$\frac{C_2^{b_{20}}}{q_2^*} = \frac{1}{a_2} C_2^{b_{22}} + \frac{a_{21}}{a_2} C_1^{b_{21}} \quad (9)$$

위 식에서  $a_1$ ,  $a_2$  및  $b_1$ ,  $b_2$ 는 Freundlich 평형관계식의 상수값들로서 단일성분계 실험을 통하여 결정될 수 있다. 또한  $b_{10}$  및  $b_{20}$ 는 각각  $b_{10} = b_1 + b_{11}$ 과  $b_{20} =$

$b_2 + b_{22}$ 로 되어  $b_{11}$ 과  $b_{22}$ 의 함수로 표시할 수 있으므로  $1/a_1$ ,  $b_{11}$ ,  $1/a_2$  및  $b_{22}$ 는 (8)식과 (9)식의  $b_{11}$ 과  $b_{22}$ 를 최적화 함으로써 결정할 수 있다[15].

### 3. 실험

#### 3.1. 수지의 전처리

본 실험에서 사용한 이온교환수지는 원자력산업에서 널리 사용되고 있는 Amberlite IRN-77 강산성 양이온교환수지이다. 이 수지에 대한 물리화학적 특성은 Table 2와 같으며[16], 사용전 2차 증류수에 담가두어 충분히 세척하고 팽윤시킨 후 20~40mesh 범위 입자만을 선별하여 사용하였다.

#### 3.2. 용액의 제조

용액내 금속이온의 제조를 위해 Ferrous sulphate와 Cobaltous nitrate를 사용하였으며, Co-60은 방사능으로 인한 실험상의 어려움 때문에 거의 동일특성을 보이는 동위원소 Co-59를 대체사용하였다. 용액내 금속이온의 대기 접촉으로 인한 산화현상 방지를 위해 증류수에 사용전부터 충분한 시간동안 질소가스를 주입한 후 일정량의 Ferrous Sulphate와 Cobaltous Nitrate를 용해시켰다. 마지막으로 이같이 제조된 용액에 제염제로 사용되는 유기산을 첨가하여 충분한 용해와 혼합이 이루어지도록 하였다.

Table 2. Physico-Chemical Properties of Amberlite IRN-77

Ionic form	: Hydrogen(H <sup>+</sup> )
Total exchange capacity	: 1.8meq/ml minimum
Moisture content	: 55%
Ionic content(equivalent % H <sup>+</sup> , minimum)	: 99
Metal content	
Sodium, (ppm dry resin) maximum	: 50
Iron, (ppm dry resin) maximum	: 50
Copper, (ppm dry resin) maximum	: 10
Heavy metal as Pb, (ppm dry resin) : 10 maximum	
Aluminium, (ppm dry resin) maximum	: 50
Calcium, (ppm dry resin) maximum	: 50
Magnesium, (ppm dry resin) maximum	: 50
Shape	: Spherical beads
Particle size(mesh)	: 16~45

### 3.3. 실험 및 분석방법

제염제로 사용되는 유기산들이 이온교환수지에 대한 철과 코발트의 이온교환반응에 미치는 영향을 알아보기 위해 Table 3에서와 같은 일련의 실험을 수행하였다.

실험에 사용한 장치는 Fig. 1과 같으며 용기내 용액의 온도를 CAN-DECON 제염공정온도인 85°C로 고정시킨 상태에서 일정량의 수지를 평량하여 넣은 다음 마개를 한 후 shaker내에 방치하였다. 반응이 진행됨에 따라 시료는 피펫으로 채취하여 철 이온의 농도는 가능한 한 빨리 분석용 시료를 제조하여 Kontron Uvikon 820 Spectrophotometer로 철 이온에 대해 피크를 나타내는 510.4nm에서 분석하였으며, 코발트 이온의 농도는 ARL 3520B ICP-AES로 분석하였다. 이때 제1철의 제2철으로의 산화현상 방지를 위해 Barry[17]가 제시한 다음과 같은 과정으로 분석용 시료를 제조하였다.

Table 3. Summary of Experiments

Experiment No.	Solutes
1	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
2	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> +FeSO <sub>4</sub>
3	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> +0.04wt% EDTA+0.03wt% Oxalic Acid & Citric Acid
4	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> +0.04wt% EDTA
5	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> +0.03wt% Oxalic Acid & Citric Acid
6	FeSO <sub>4</sub> +0.04wt% EDTA
7	FeSO <sub>4</sub> +Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> +0.04wt% EDTA

\* Resin was Amberlite IRN-77 in all cases.

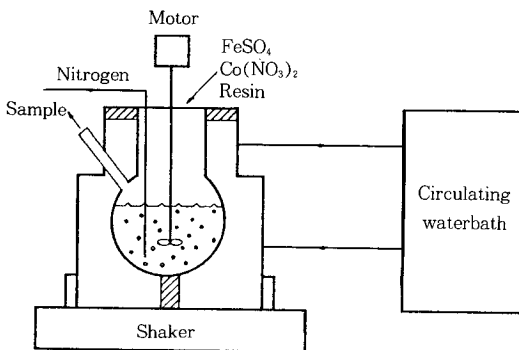


Fig. 1. Schematic representation of apparatus.

1) 시료채취전 25ml 플라스틱에 제1철 이온의 산화현상을 방지하는 0.5% o-Phenanthroline 에탄올 용액을 예상되는 철 이온의 농도에 따라 Table 4와 같이 취한다.

2) 시료채취후 Table 4에 따라 정확한 시료의 양은 o-Phenanthroline 에탄올 용액이 있는 플라스틱에 주입한다.

3) 용액을 잘 혼합한 후 증류수를 25ml 까지 채운다.

4) 이상에서 만들어진 분석용 시료를 잘 혼합한 후 30분 이내에 분석한다.

위의 과정에서 시료가 o-Phenanthroline 에탄올 용액과 혼합하게 되면 더 이상의 산화현상은 발생하지 않는다.

Table 4. Sample Size for Ferrous Concentration Determination

Expected ferrous concentration (μg/ml)	Volume of CAN-DECON solution for analysis in 25ml flask(ml)
up to 100	1.0
100~200	0.5
200~300	0.25
over 300	0.10

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 이온교환반응에 대한 유기산의 영향

유기산들이 존재하지 않을 경우의 철과 코발트 이온에 대한 이온교환평형 용량을 측정된 결과 Table 5와 같이 두 성분의 평형용량은 거의 비슷하게 나타났다. 그러나 유기산 존재하에서의 이들 금속이온들에 대한 이온교환특성에 관한 보고에 의하면[12], 철 이온에 미치는 영향은 아주 작게 나타났으며 코발트에 대해서는 이온교환용량이 현저하게 감소된다고 하였다. 따라서 코발트 이온에 대한 영향을 구체적으로 알아보기 위해 실험결과를 Fig. 2에서와 같이 실험조건에 따라 초기농도에 대한 임의의 반응시간에서 농도비를 반응시간에 대해 도시하였다. 이 그림으로부터 제염제성분 가운데 EDTA만이 존재할 경우와 전 성분이 존재할 경우는 거의 비슷한 이온교환용량을 나타내고 있으나, Citric Acid와 Oxalic Acid만이 존재할 경우와는 이온교환용량이 현저한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

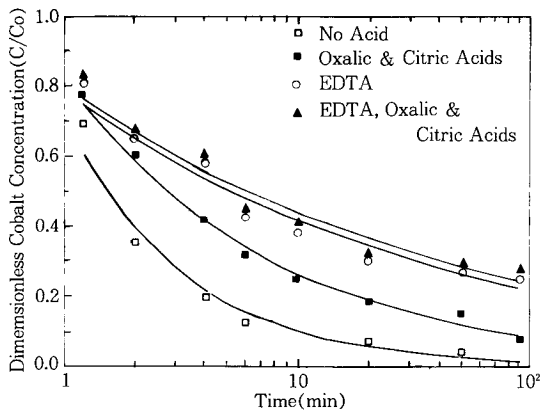


Fig. 2. Cobalt concentration as a function of time. initial cobalt concentration : 100mg/ℓ .

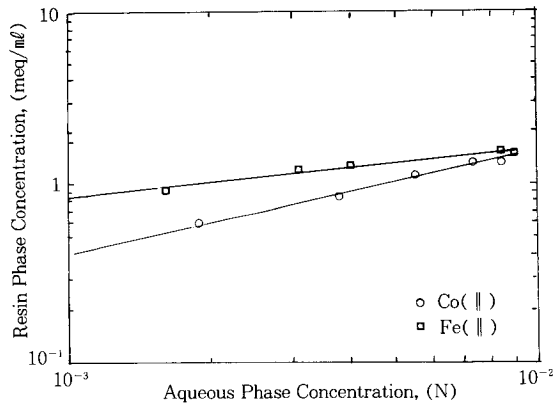


Fig. 3. Correlation of equilibrium isotherm for Fe(II)-Amberlite IRN-77 and Co(II)-Amberlite IRN-77 in presence of EDTA 400ppm.

Table 5. Initial and Equilibrium Solution Concentration for Experiments Using the Resin, Amberlite IRN-77

Species	Initial Conc.(mg/ℓ )	Final Conc.(mg/ℓ )
Ferrous	214.2	3.6
Cobalt	201.9	3.4

이 결과로부터 용액내에 EDTA와 같은 킬레이트제의 존재는 이온교환수지에 대한 코발트의 이온교환 흡착량을 감소시켜 주는 원인이며 음전기를 띤 킬레이트제와 이온교환수지 사이의 금속이온에 대한 경쟁반응의 결과로 설명이 가능하다.

따라서 화학제염공정에서 EDTA는 이온교환수지와 용액내 금속이온간의 평형관계를 변화시켜주는 주 성분이며, 상대적으로 Oxalic acid와 Citric acid의 영향은 무시될 수 있다고 볼 수 있다.

#### 4. 2. 단일성분계 평형

제염용액내 유기산 가운데 EDTA가 이온교환수지와 용액내 금속이온간의 평형관계를 변화시켜주는 주 성분이라는 앞절의 결과에 따라 EDTA 존재하에서 철과 코발트 이온에 대한 평형실험을 실시하였다. 이들 결과를 나타내는 Fig. 4와 5에서 상대이온의 농도가 0인 경우가 단일성분계에 대한 것이며, 두 성분에 대한 정량적 비교를 위해 Fig. 3과 같이 전대수 좌표를 사용하여 이온교환수지내 평형농도를 용액내 금속이온의 농도에 따라 나타냈다. 전반적으로 코발트의 이온교환평형 용량이 철 이온보다는 작게 나타났다.

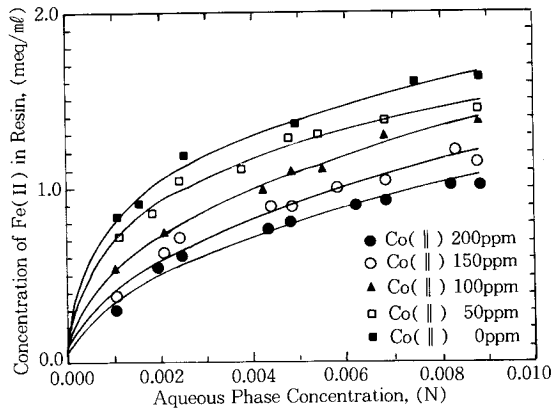


Fig. 4. Simulation of two-component equilibria for Fe(II) in Fe(II)-Co(II) system with Amberlite IRN-77 in presence of EDTA 400ppm.

이 결과는 앞에서 검토한 것처럼 유기산이 없을 경우 두 성분이 평형용량이 거의 비슷하였고, 원자가가 같으며 이온반경이 비슷할 뿐만 아니라 더우기 코발트의 원자량이 크기 때문에 이론적인 측면에서 예상되는 결과와는 반대로 나타났다.

여기서 단일성분계 실험결과에 잘 부합되는 Freundlich식을 적용하여 각 성분에 대한 평형식을 구한 결과 철 성분을 1, 코발트 성분을 2로 각각 나타내면 다음과 같다.

$$q_1^* = 6.25C_1^{0.29} \quad (10)$$

$$q_2^* = 28.72C_2^{0.63} \quad (11)$$

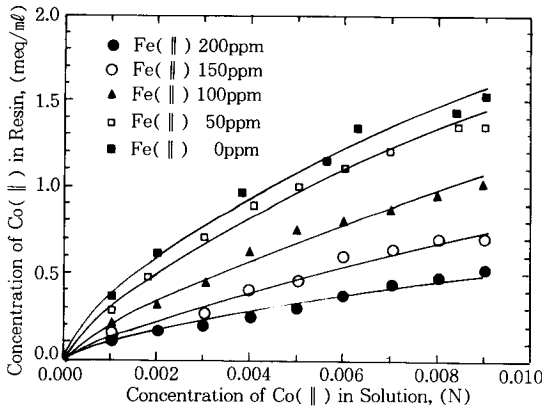


Fig. 5. Simulation of two-component equilibria for Co (II) in Co(II)-Fe(II) system with Amberlite IRN-77 in presence of EDTA 400ppm.

이상에서 살펴본 바와 같이 이온교환수지에 대한 금속이온의 평형용량 차이는 용액내 킬레이트제인 EDTA와 금속이온간의 착물결합력에 의해서 결정되는데[18], 코발트 이온에 대한 착물결합력이 현저하게 크기 때문에 이온교환용량이 철 이온에 비해 감소되었음을 알 수 있다.

농도변화에 따른 평형관계는 두 성분이 모두 비교적 낮은 농도범위에서는 선형적인 평형관계가 성립됨을 알 수 있다. 특히, 0.001N 이하에서 평형상수는 다음과 같았다.

$$Fe^{2+} - \text{Amberlite IRN-77}; K=810.9$$

$$Co^{2+} - \text{Amberlite IRN-77}; K=379.1$$

4. 3. 2성분계 평형

Amberlite IRN-77 양이온교환수지에 대한 철 및 코발트 이온의 2성분계 이온교환평형 실험결과는 Fig. 4 및 5와 같다. 그림에서 처럼 제염제 가운데 EDTA 존재하에서도 단일성분계의 결과와 마찬가지로 코발트 이온의 평형용량이 철 이온보다 전반적으로 작게 나타났다. 또한, 코발트 이온의 평형곡선은 철 이온 농도의 영향을 작게 받고 있음을 알 수 있다. 이같은 현상도 EDTA와 두 금속이온간의 착물결합력 차이로 인한 결과로 볼 수 있다. 즉, 용액내 금속이온과 EDTA가 착화합물을 형성한 후 이온교환 단계에서 음전기를 띤 착화합물과 수지 사이에 금속이온에 대한 경쟁반응이 일어나게 된다. 이때 EDTA와

의 착물결합력이 큰 코발트 이온이 철 이온보다 강한 착화합물을 형성하기 때문에 수지에 대한 이온교환량이 상대적으로 감소하게 된다는 결론을 얻을 수 있다.

한편, 2성분계에서의 각 이온에 대한 평형용량을 정량화하기 위해 이론적 배경에서 언급한 바와 같이 Radke와 Prausnitz[15]가 제시한 방법을 이용하여 실험결과로부터 다음과 같은 평형식을 얻었다.

$$\frac{C_1^{0.58}}{q_1^*} = \frac{1}{6.25} C_1^{0.29} + \frac{77.21}{6.25} C_2^{0.27} \quad (12)$$

$$\frac{C_2^{0.84}}{q_2^*} = \frac{1}{28.72} C_2^{0.21} + \frac{19,412}{28.72} C_1^{0.08} \quad (13)$$

5. 결 론

1. Amberlite IRN-77 양이온교환수지는 철과 코발트 이온에 대하여 비슷한 이온교환용량을 가지나 제염용액내 유기산들이 코발트 이온에 보다 강한 착물결합력을 나타내어 이온교환 평형용량을 크게 감소시켰으며, 이 가운데 EDTA는 강력한 킬레이트제로서 코발트 이온의 평형용량 감소의 주원인이었고 상대적으로 Oxalic Acid와 Citric Acid의 영향은 미미하였다.

2. EDTA 존재하에서 Amberlite IRN-77 양이온교환수지에 대한 단일성분계 및 2성분계 평형용량은 철 이온이 코발트 이온보다 전반적으로 크게 나타났으며, 2성분계의 경우 코발트 이온의 평형곡선은 철 이온의 농도의 영향을 많이 받는 반면, 철 이온의 평형곡선은 코발트 이온 농도의 영향을 상대적으로 적게 받았다. 이와 같은 결과를 보여주는 실험적으로 결정된 각각의 평형식은 다음과 같다.

$$\text{단일성분계 : } Fe^{2+}; q_1^* = 6.25C_1^{0.29}$$

$$Co^{2+}; q_2^* = 28.72C_2^{0.63}$$

$$\text{2성분계 ; } Fe^{2+}; q_1^* = \frac{6.25C_1^{0.58}}{C_1^{0.29} + 77.21C_2^{0.27}}$$

$$Co^{2+}; q_2^* = \frac{28.72C_2^{0.84}}{C_2^{0.21} + 19,412C_1^{0.08}}$$

NOMENCLATURE

- a : Constant
- b : Exponent
- C : Bulk liquid phase concentration(N)

- C<sub>0</sub> : Initial concentration(N)
- K : Linear equilibrium constant
- M<sup>a+</sup> : Metal cation(a=1 to 3 usually)
- q\* : Equilibrium concentration of resin(N)
- W : Constant
- Y<sup>b-</sup> : Chelating anion(b=0 to 4 usually)

Subscripts

- i : Arbitraty component
- j : The other components excluding the component i
- O : Single component system

참 고 문 헌

1. G. R. Choppin and R. L. Dillon et al, "Literature Review of Dilute Chemical Decontamination Process for Water-Cooled Nuclear Reactors", EPRI-NP-1033, 1979.
2. Gautsch, O., Lanza, F., and Weisgerber, P., *J. of European Science and Technology* **1**, 1225 (1979).
3. Perrigo, L. D., and Divine, J. R.: "Decontamination Methods", Pacific Northwest Laboratories-SA-7770, 1980.
4. NEA Group: "Decontamination Methods as related to Decommissioning of Nuclear Facilities", NEA, 1981.
5. Shaw, R. A., Naughton, M. D., and Miller, A. D.: "Radiation Exposure, Radiation Control and Decontamination", in Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities, P. 679, Plenum Press, 1980.
6. Zimmerman, G. J., and Smee, J. L.: "Development of an Improved Reagent for the CAN-DECON Decontamination Reagents by Cation Exchanges Resin", AECL, WNRE-288, 1976.
7. Smee, J. L.: "Development of an Improved Reagent for the CAN-DECON Decontamination Process; Part I, Some Theoretical Considerations", AECL, WNRE-239, 1975.
8. Smee, J. L.: "Dissolution Characteristics of Metal Oxides in Water Cooled Reactors", in Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities, P.281, Plenum Press, 1980.
9. Ringbom, A.: "Complexation in Analytical Chemistry", Chemical Analysis, Vol. VI, Interscience Publishers, New York, 1963.
10. Swee, C. F., and Richard, G. R., *I & EC Fund.*, **18**, 63 (1979).
11. Slejko, F. L.: "Adsorption Technology, A Step by Step Approach to Process Evaluation and Application", Chap. 1, Marcel Dekker, Inc., 1985.
12. Pettit, P. T., "The CAN-DECON Decontamination with Nutek L-106", AECL, CRNL-1291, 1975.
13. Fritz, W., and Schluender E. U., *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1279 (1974).
14. Liapis, A. L., and Rippon D. W. T.: "A General Model for the Simulation of Multicomponent Adsorption from a Finite Bath", *Chem. Eng. Sci.*, **32**, 619 (1977).
15. Radke, C. J., and Prausnitz, J. M., *I & EC Fund.*, **11**, 445 (1972).
16. "Rohm and Hass Ion Exchange Resins, Laboratory -Guide", Rohm and Hass Co., 1988.
17. Barry, B. J.: "Colorimetric Determination of Iron in CAN-DECON Solution Using o-Phenanthroline", AECL, Private Memorandum, Jan., 19, 1984.
18. Pronin, A. Y., Musaev, S. K., and Chmutov, K. V., *Russ. J. Phy. Chem.*, **40**, 638 (1969).