

## Ion Exchange Behavior of $^{137}\text{Cs}$ , $^{60}\text{Co}$ on Diphosil, a new ion exchange resin

Su-Jeong Kim · Sang-Jin Lee · Ho-Yeon Yang and Sang-Woon Shin

Nuclear Environment Technology Institute  
Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd.

### Diphosil 이온교환수지에 의한 $^{137}\text{Cs}$ , $^{60}\text{Co}$ 의 이온교환 거동

김수정 · 이상진 · 양호연 · 신상운

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원

(2003년 7월 19일 접수, 2004년 2월 13일 채택)

**Abstract** - Diphosil, a new version of the organic-inorganic composite resin developed by ANL has a structure of the chelating diphosphonic acid groups grafted to a silica support. To apply Diphosil for the treatment of liquid radioactive waste from nuclear power plants, the adsorption equilibrium and column experiments were carried out for the main radionuclides,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$ , in the liquid radwaste stream. Through the adsorption equilibrium experiments, the removal efficiencies of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$ , and the effects of non-radioactive ions on the removal efficiency have been measured in various conditions using radiotracers. The breakthrough curves for the tested tracers were obtained from the laboratory scale column tests using the simulated liquid radioactive waste. In addition, the removal capacity of Diphosil is compared with that of Amberlite IRN 77 resin, generally used in nuclear power plants.

**Key words** : Diphosil, organic-inorganic composite resin, liquid radioactive waste, radioactive waste, radwaste treatment, ion exchange

**요약** - ANL에서 개발한 유·무기 복합의 신이온교환수지인 Diphosil은 silica 물질에 diphosphonic acid 그룹을 결합시킨 구조를 가지고 있다. Diphosil을 원전 운영 중 발생하는 방사성폐액 처리에 적용하기 위해 주대상 핵종인  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ 을 사용하여 흡착 평형과 컬럼 실험을 수행하였다. 흡착 평형 실험을 통하여  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{60}\text{Co}$ 의 제거율과 그 제거율에 미치는 다양한 조건에서 비방사성 이온의 영향을 조사하였다. 대상 핵종에 대한 파괴곡선은 모의 방사성 폐액을 이용한 실험실 수준의 컬럼 실험을 통해 구하였고, Diphosil의 제거능력을 현재 원전에서 쓰이고 있는 Amberlite IRN 77 수지와 비교하였다.

**중심어** : Diphosil, 유·무기 복합수지, 액체 방사성폐기물, 방사성폐기물, 방사성폐기물 처리, 이온교환

### 서 론

현 가압경수로형 원자력발전소 운영중에 발생하는 방사성 액체폐기물은 주로 증발농축기를 이용하여 처리되고 있다. 그러나 증발기 운영시 폐액내에 존재하는 각종 화학물질 및 불순물 등으로 인해 거품, 스케일, 부식, 막힘 등의 문제가 자

주 발생하고 있으며 폐액내 불산의 결정화 성질 때문에 폐액 농축도를 높히는데 제한을 받게 되므로 증발농축기에만 의존하는 폐액 처리법으로는 큰 감용효과를 기대할 수 없다[1-2]. 따라서 이온교환 방법이 원전에서 발생하는 방사성 폐액을 처리하기 위한 폐액증발기의 대체공정으로 적용되고 있으며 점차 그 비율이 증가하고 있는 추

세이다[3]. 그러나 이온교환공정에 주로 이용된 유기 이온교환수지는 방사성 핵종 뿐만 아니라 폐액 농도의 대부분을 차지하는 일반 화학 물질 까지도 함께 제거하게 되므로 비효율적이며, 많은 부피의 폐수지가 발생하게 된다[4-5].

이러한 문제점을 해결하기 위하여 폐액중의 방사성 핵종만을 선택적으로 제거함으로써 기존 이온교환공정의 효율을 높이고 2차 폐기물의 부피도 대폭 줄일 수 있는 공정개발이 활발하게 진행되고 있다. 실제로 Jacob 등은 여러 가지 흡착제, 무기이온교환수지 및 유기이온교환수지를 사용한 소규모 컬럼 실험, 파이롯트장치 실험 등을 통하여 기존의 방법보다 개선된 이온교환공정을 제시하였다[6-7]. EPRI NP-5786에서는 원전 방사성 폐액처리에 사용할 수 있는 여러 가지 전처리방법의 특징 및 효과, 선택적 이온교환수지에 대한 특성 등을 미국 Duke 전력사의 McGuire와 Oconee 원전 폐액을 대상으로 실험한 결과를 발표한 바 있다[8].

현재 무기이온교환수지를 사용하여 방사성 폐액을 처리하고 있는 대표적인 가압경수로형 원자력발전소로는 Fort Calhoun 발전소, Salem 발전소 North Anna 발전소, Arkansa 발전소 등이 보고되고 있으며[9-10] 국내 원전중 고리원자력본부에서도 선택성이온교환설비를 운영중이나 아직 운영기간이 짧아 많은 자료는 없는 상태이다. 이들의 경험에 따르면 일반적으로 무기이온교환수지를 사용할 경우 유기이온교환수지를 사용시보다 5-10 배정도 수지수명이 긴 것으로 보고되고 있다.

미국 Argonne National Laboratory(ANL)에서 개발한 Diphonix는 Styrene 계열의 중합체에 diphosphonic acid 리간드가 연결되어 있는 새로운 킬레이팅 이온교환수지로서[11] 미국 Millstone 원전에 적용한 결과 방사성 핵종 제거특성이 우수한 것으로 알려졌다[12]. 그러나, Diphonix는 수지에 흡착된 악티나이드나 금속 이온이 쉽게 탈착되는 단점이 있기 때문에 이를 보완하기 위해 Diphonix의 diphosphonic acid 기에 silica를 접합시킨 유·무기 복합 이온교환체인 Diphosil(Diphonix + silica)이 개발되어 강산성 분위기하에서 악티나이드 이온 및 다가 금속이온의 제거능 및 저온 고화특성에 관한 연구가 ANL에서 진행되고 있으며 국내 기관에서도 공동연구로 참여하고 있다[13].

본 연구에서는 Diphosil을 원전에서 발생되는 방사성 폐액에 적용하기 위해서 원전 운영중 발

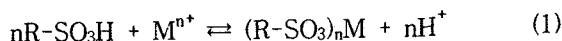
생되는 주핵종인  $^{137}\text{Cs}$  및  $^{60}\text{Co}$ 에 대한 회분식 흡착실험과 실패액 수준으로 제조한 모의폐액을 대상으로 한 컬럼 실험을 통하여 흡착거동을 파악하였다. 또한 현재 원전에서 실제 사용하고 있는 유기이온교환수지 Amberlite IRN 77 과의 성능을 비교·평가하기 위하여 컬럼실험을 통하여 각 수지의 기초 성능을 분석하였다.

## 실험재료 및 방법

### 실험재료

실험에 사용된 비방사성 금속이온은 Cs (I) 및 Co(II)로서 분석용 특급시약인 CsCl,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 를, 트레이서로 사용한 방사성 동위원소는 Eckert & Ziegler Company 제품으로 0.1M HCl에 용해되어 있는  $1\mu\text{Ci ml}^{-1}$   $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{60}\text{Co}$ 을 희석하여 모의폐액을 제조하였다. 이온교환수지로 사용된 Diphosil(상품명 Silica Diphonix resin, Lot No. DS-B500-C-H)은 Eichrom사에서 생산된 새로운 수지로 60~100 mesh 크기 범위의 것을 사용하였다. Diphosil은 Diphonix<sup>TM</sup>와 silica의 합성어로서 Fig. 1에서도 알 수 있듯이 Diphonix의 diphosphonic acid기를 포함한 silica 물질이다. sulfonic 기와 diphosphonic기를 리간드로 가지는 Diphonix가 유기 양이온 교환수지라면 silica에 diphosphonic기가 결합된 Diphosil은 유·무기의 성질을 동시에 가진  $\text{H}^+$ 형 양이온 교환수지로서 강산성 용액에서 악티나이드와 같은 방사성 물질이나 다가의 금속이온과 높은 안정도를 가진 complex 물질을 형성하여 여러 성분이 혼합되어 있는 수용액에서 대상 이온의 선택적인 분리에 사용되고 있다. Fig. 1에 Diphosil의 화학구조를 나타내었다[14].

Diphonix와 Diphosil의 차이점은 대상 이온이 흡착된 수지의 고화시 Diphonix는 유기물 분해에 의한 가스 발생이 일어나는 반면에 Diphosil은 열에 강하여 가스 발생량이 적고, 방사성 핵종이나 기타 금속 이온의 누출 가능성이 적으며 고화제를 따로 첨가하지 않고도 온도 변화에 의해 안정한 고화가 이루어진다는 것이다. 또한 Diphosil은 Diphonix와 달리 비가역적으로 산성 수용액계로부터 높은 이온가의 금속 이온을 흡수할 수 있다. 강산성 양이온 교환수지의 이온교환반응은 다음과 같다[15].



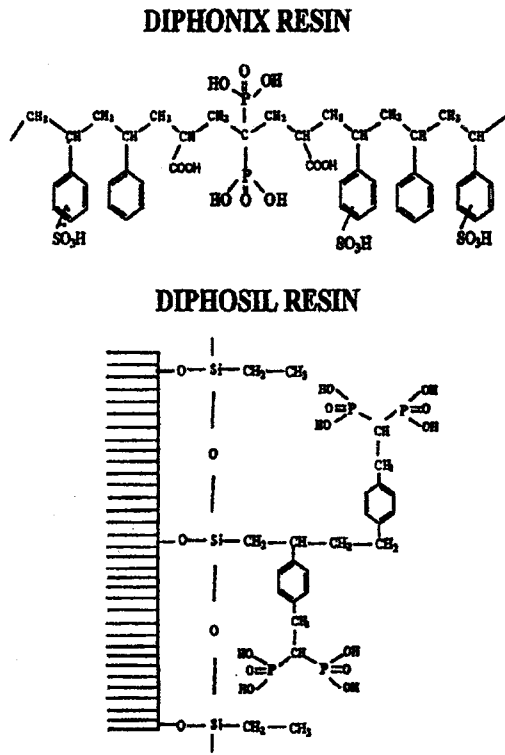


Fig. 1. Chemical structures of the Diphonix and Diphosil resins.

Diphosil을 실험에 사용하기 위해 별도의 전처리 과정을 거치지 않고, 3차 증류수로 세척한 후 약 60°C의 오븐에서 72hr 이상 건조시킨 다음 데시케이터 내에 보관하여 사용하였다.

**실험방법**

폐액에 포함된 주핵종에 대한 Diphosil의 흡착 특성을 알아보기 위해 단성분 및 다성분계 이온교환 평형 실험과 고정층 컬럼 실험을 수행하였다.

우선 virgin Diphosil을 대상으로 열중량 분석(Thermogravimetric analysis)을 실시하여 수분, 유기물 및 무기물(실리카)의 함량을 알아보아 수지의 기본 특성을 살펴보고, 반응 전·후의 pH를 측정하여 비교하였다.

이온교환 평형실험은 농도별로 준비된 각각의 금속이온 용액에  $^{137}\text{Cs}$  및  $^{60}\text{Co}$ 을 각각  $10^{-3}\mu\text{Ci/ml}^{-1}$ 의 방사능을 갖는 tracer로 주입하여 이 모의 폐액 32ml와 Diphosil 1g을 플라스크에 넣은 다음, 일정한 교반속도를 유지하면서 충분히 평형에 도달하도록 약 18시간 이상을 반응시켰다. 20,000rpm에서 5분간 원심분리한 후 0.2 $\mu\text{m}$  syringe filter로 여과한 뒤 이 중 25ml를 채취하여 MCA-HPGe (Multi Channel Analyzer-High Purity Germanium Detector)로 잔류 핵종의 농도를 측정하였다. 또한 양이온에 대한 Diphosil의 선택도를 알아보기

Table 1. Experimental conditions for adsorption equilibrium.

Items	Conditions		Remarks
	Experiment 1	Experiment 2*	
Ion Exchange Resin	Diphosil (60 ~ 100 mesh)		*The components of simulated wastewater are prepared based on the Kori units 3&4; B(600), Na(200), Ca(50), Mg(100), Fe(1), () : ppm
Co, Cs concentration (ppm)	0.05 ~ 400	-	
Radiotracer ( $^{137}\text{Cs}$ , $^{60}\text{Co}$ )	About $10^{-3}\mu\text{Ci/ml}^{-1}$		
Ratio (resin : solution)	1 g : 32 ml		
Temperature (°C)	25±1		
Reaction time (hr)	About 18		

Table 2. Experimental conditions for column runs.

Items	Conditions	Remarks
Ion Exchange Resin	Diphosil, Amberlite IRN 77	The components of simulated wastewater are prepared based on the Kori units 3&4; Na(200), Ca(50), Mg(100), Fe(1) () : ppm
Radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ , $^{60}\text{Co}$ )	About $10^{-3}\mu\text{Ci/ml}^{-1}$	
Flow rate (mlmin <sup>-1</sup> )	2	
Packing length (cm)	5	

위하여 여러 양이온(Na, Ca, Mg, Fe)을 고리 3·4호기 수준으로 제조하여 <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co의 제거율 변화를 알아보았고 실험 조건을 Table 1에 나타내었다.

Diphosil과 현재 원전에서 사용하고 있는 Amberlite IRN 77 수지와의 성능 비교를 위해 고정층 컬럼 실험을 수행하였고 실험조건을 Table 2에 나타내었다. 컬럼은 Bio-Rad 사 제품으로 직경 0.7cm × 20cm의 유리 재질이고 고정층 컬럼 실험 장치는 시료 공급 펌프, 컬럼, 시료 채취 장치 등으로 구성되어 있다.

### 결과 및 고찰

Diphosil은 불투명한 백색 미세 입자로서 육안으로도 상당한 양의 수분을 함유하고 있음을 알 수 있었다.

또한 핵종흡착을 위한 관능기가 유기물에 부착되어 있으며 이들은 다공성 무기 실리카에 부착되어 있으므로 열처리 조건에 따라 유기물의 산화상태가 상이할 것으로 판단되어 1차적으로 virgin Diphosil을 대상으로 열중량 분석(Thermogravimetric analysis)을 실시하여 수분, 유기물 및 무기물(실리카)의 함량을 알아보았다. 열분석 실험은 일본 Seiko 회사의 TG/DTA 300 기기를 사용하여 상온에서 1000℃ 이상까지 가열하면서 Diphosil의 무게 변화를 관찰하였고 가열시의 노내 분위기는 불활성(질소) 및 산화(공기) 분위기에서 각각 실시하였다.

산화분위기에서의 열분석 실험자료로부터 Diphosil의 구성성분을 살펴 본 결과를 Table 3에 나타내었다. Diphosil에는 약 38.8%의 수분이 함유되어 있으며, 무기물 함량은 약 50% 임을 알 수 있었다.

각 금속이온을 함유한 용액은 초기 pH가 약 4~7의 값을 나타내었고 이온교환반응이 진행됨

에 따라 pH2.5 이하로 낮아졌는데 이는 반응이 진행되면서 식 (1)에 의해 치환기에서 수소이온과 양이온이 치환되면서 용액내로 수소이온이 빠져나오기 때문이다.

Fig. 2~4에 <sup>137</sup>Cs과 <sup>60</sup>Co의 단일 및 혼합 시료 일 경우 비방사성 Cs, Co 농도 변화에 따른 제거율을 나타내었다.

Fig. 2와 Fig. 3에 나타낸 대로 단일성분 <sup>137</sup>Cs과 <sup>60</sup>Co 핵종의 흡착 제거율은 비방사성 원소의 농도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

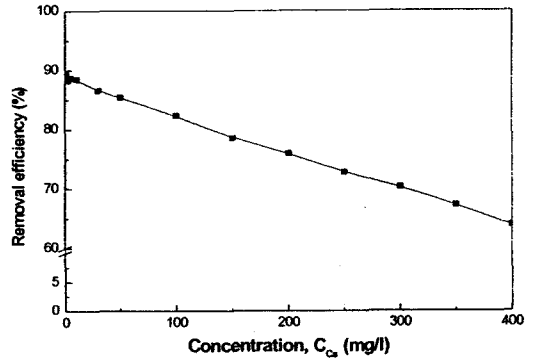


Fig. 2. Removal efficiency of <sup>137</sup>Cs by Diphosil.

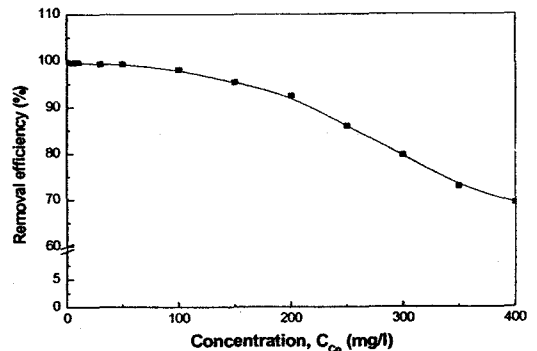


Fig. 3. Removal efficiency of <sup>60</sup>Co by Diphosil.

Table 3. Composition of Diphosil by TG/DTA.

Component	Composition, wt%		Remarks
	w/ moisture	w/o moisture	
Moisture	38.84	-	R.T. ~ 110℃
Organics	11.34	18.5	110℃ ~ 640℃
Inorganics	49.82	81.5	640℃ ~

$^{137}\text{Cs}$ 의 경우 비방사성 Cs 이온의 농도가 0.1 ppm일 때 제거율이 89%로서 Diphosil 1g에 의해 최대 제거되는 양이 0.0032mg으로 나타났다.

$^{60}\text{Co}$ 의 경우 비방사성 Co 이온의 농도가 50 ppm일 때 제거율이 99%로서 Diphosil 1g에 의해 최대 제거되는 양이 1.6mg으로  $^{137}\text{Cs}$ 보다 500배 큰 것으로 나타났다. Fig. 4에 두 대상 핵종의 혼합 성분계에서 Diphosil에 대한 경쟁 흡착 제거율을 나타내었다. 2가 이온인 Co의 경우 단일성분계나 혼합성분계에서 같은 흡착 경향을 나타내어 제거율 차이가 없지만 1가 이온인 Cs의 경우 혼합성분계에서 농도가 낮을 때는 제거율 변화가 그리 크지 않으나 200ppm일 경우 50%의 제거율 감소를 보였다. 이러한 결과는 Cs(I) 이온보다 전자가 큰 Co(II) 이온이 농도가 증가하면서

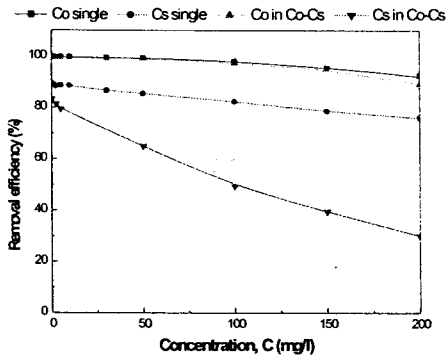


Fig. 4. Competitive adsorption for each radionuclide in a binary solution (Co-Cs) onto Diphosil.

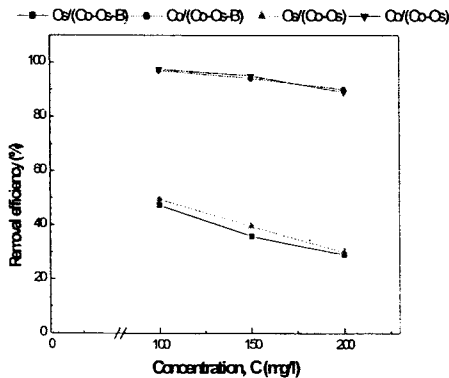


Fig. 5. The effect of Boron ions on the removal efficiency for each radionuclide in a ternary solution (Co-Cs-B) onto Diphosil.

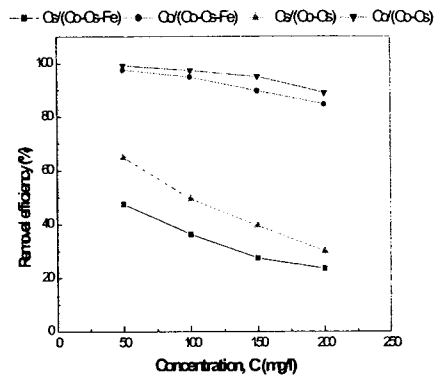


Fig. 6. The effect of Fe ions on the removal efficiency for each radionuclide in a Ternary solution (Co-Cs-Fe) onto Diphosil.

기흡착된 Cs(I)과 이온교환이 일어나는 것으로 이온교환반응에서 이온교환의 정도는 각 이온의 전자가에 비례한다는 문헌 결과와 일치했다[16].

Fig. 5와 Fig. 6에 B 이온과 Fe 이온이 두 대상 핵종과 공존할 때의 비방사성 이온의 농도에 따른 제거율을 나타내었다. B 이온이 600 ppm 존재할 경우 Co나 Cs 모두 제거율 차이가 거의 없는 것으로 나타났는데 이는 B 이온이 음이온이기 때문에 양이온 교환수지인 Diphosil의 교환기인 수소이온과 치환되지 않는 것으로 생각된다.

Table 4에 각각의 양이온들이 존재할 때 Cs, Co의 제거율을 혼합 이성분계에서의 Cs, Co의 제거율과 비교하였다. 각각의 양이온이 공존할 경우 제거율은 약 5 ~ 18% 정도 감소했다. Table 4에서도 알 수 있듯이  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 동일 전자의 Na(I) 이온과, 전자가 하나 큰 Ca, Mg 이온이 존재할 때 제거율이 50% 감소하였으나 3가 이온인 Fe가 존재할 때의 제거율은 오히려 1가, 2가 이온 공존시보다 Co, Cs 제거율이 높게 나타났다.  $^{60}\text{Co}$ 의 경우 전자가 낮은 Na(I) 이온의 영향은 10% 미만으로 적게 받는 것으로 나타났고, 동일 전자를 갖는 Ca, Mg 이온이 공존할 때 제거율이 20% 정도 감소하는 것으로 나타났다. Fe(III) 존재시  $^{60}\text{Co}$ 의 제거율은  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우와 마찬가지로 1가, 2가 이온보다 영향을 덜 받는 것으로 나타났다. 전자가 큰 금속일수록 수지의 선택도가 크기 때문에 이온 교환의 정도가 더 크다는 문헌[16]에 입각해 볼 때, 전자가 큰 Fe(III) 이온이  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{60}\text{Co}$  핵종과 공존시 선택도가 큰 Fe 이온이 더 많이 흡착되기 때문에 상대적으

Table 4. The effect of non-radioactive ions on the removal efficiency.

	Removal efficiency (%) at 200 ppm	
	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
RI ( $^{137}\text{Cs} + ^{60}\text{Co}$ )	30.0	89.0
RI + B	28.9	89
RI + Na	16.7	80.0
RI + Ca	15.2	73.6
RI + Mg	12.2	63.7
RI + Fe	23.5	84.8

Table 5. The effect of non-radioactive ions on the removal efficiency.

	Removal efficiency (%) at 0.01N	
	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
RI + Na	9.96	65.87
RI + Ca	3.54	42.48
RI + Mg	6.73	50.4
RI + Fe	7.27	45.38

로  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{60}\text{Co}$ 의 제거율이 급격히 감소하여야 하는데 본 실험에서는 전자가와 이온교환량이 뚜렷한 관계를 보이지 않았다. 즉 Fe 이온이 Co(II), Cs(I) 핵종과 공존할 경우 Fe 이온이 두 핵종에 비해 전자가가 크기 때문에 이론적으로 Fe 이온의 흡착율이 증가하여 Co(II), Cs(I)의 흡착 제거율이 가장 낮은 값을 보여야 하는데 Co(II) 및 Cs(I) 제거율이 각각 85, 24%로서 Co-Cs 2성분계 실험결과와 비슷하였다. 이는 고리 3, 4호기 실패액을 기준으로 제조한 모의 폐액 내 Fe 이온의 농도가 다른 이온의 농도보다 상대적으로 작았기 때문에 제거율 차이가 나지 않았을 가능성이 있다. 이 가능성을 확인하기 위해 Co, Cs, Na, Ca, Mg, Fe 6가지의 금속 이온의 농도를 0.01N 로 동일하게 제조한 후  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ 를 tracer로 주입하여 같은 방법으로 실험을 수행하였다. 그러나 Fe(III), Ca(II), Mg(II) 이온의 제거율은 거의 비슷한 것으로 나타났다. 실험결과를 Table 5에 요약하였으며 보다 정확한 해석을 위해 추가 보완실험이 요구된다.

Fig. 7에 Diphosil과 Amberlite IRN 77 수지의 고정층 컬럼 실험 결과를 나타내었다. C/Co = 0.1을 기준으로 하면 Diphosil과 Amberlite IRN

77 은 각각  $^{60}\text{Co}$ 을 21, 75ml 처리하여 Diphosil이 처리 유량이 적게 나타났으나 대상 핵종에 대한 반응이 빠르게 일어나고 초반부에 핵종의 100% 제거가 가능했다. 그러나 Amberlite IRN 77은 초기에도 핵종을 100% 제거하지 못하는 것으로 나타났다.

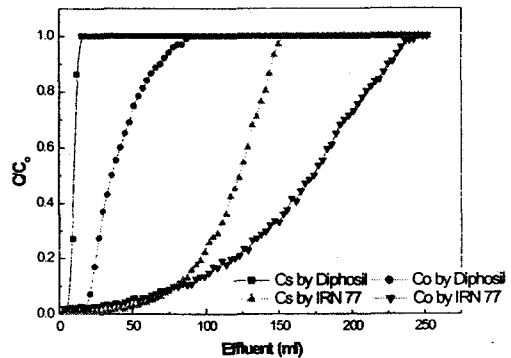


Fig. 7. Breakthrough curve for  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  by Diphosil and Amberlite IRN 77.

## 결 론

유·무기 복합 이온교환수지인 Diphosil에 대한  $^{137}\text{Cs}$  및  $^{60}\text{Co}$  핵종의 액상 흡착평형실험 및 고정층 컬럼실험에서 흡착특성을 실험적으로 조사·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Diphosil 함량은 수분이 38.8%, 무기물 함량이 50%로 나타났다.
2. 이온교환반응이 진행됨에 따라 치환기로부터 해리된 수소이온에 의해 용액내의 pH는 감소하였다.
3. 단일 성분  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{60}\text{Co}$  핵종의 경우 Diphosil 1g당 각각 0.0032mg, 1.6mg을 제거하는 것으로 나타났다.
4. 2성분 혼합 성분 ( $^{137}\text{Cs}$  &  $^{60}\text{Co}$ )의 경우 단일 성분 흡착과 비교할 때  $^{60}\text{Co}$ 은 제거율의 차이를 보이지 않았으나  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 최대 50%의 제거율 감소를 나타내어서 Co의 선호도가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 고정층 컬럼실험에서도 같은 결과를 보여  $^{60}\text{Co}$  존재시  $^{137}\text{Cs}$ 의 제거는 불가능한 것으로 나타났다.
5.  $\text{B}^-$  이온이 존재하는 경우 대상 핵종에 끼치는 영향은 미비하였으나 다른 양이온의 경우 제거율이 떨어지는 경향을 보였다.
6. Diphosil은 Amberlite IRN 77보다 처리 유량은 적지만 핵종을 100% 제거할 수 있는 것으로 나타났고 Amberlite IRN 77 수지는 많은 유량을 처리할 수 있었지만 100% 핵종을 제거할 수 없는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구기반확충사업 원자력선진기술확보 분야의 지원 연구비로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Moghissi, Radioactive waste technology, ASME, 223-274(1986)
2. IAEA, Treatment of low and intermediate level liquid radioactive wastes, Technical report series No. 236, 91-113(1984)
3. EPRI, Radwaste generation survey update, EPRI/NP-5526, Vol. 2(1988)
4. Analytical resources, INC., and United mineral & energy, INC., Operational experience with selective Ion-exchange media in sluiceable pressurized demineralizers at nuclear power plants, DOE/IP/12640-TI88 008554
5. 박종길, 액체 폐기물 증발기와 이온교환 수지 탱크의 경제적 운전, 3/4 전력기술 workshop (방사선 안전관리)(1988)
6. N. P. Jacob, Operation of radwaste ion-exchange processing at nuclear power plants, Waste Management, Vol. 2, 409 (1984)
7. N. P. Jacob, Improved PWR liquid waste processing using zeolite and organic resins, EPRI-5991(1988)
8. Electric Power Research Institute, Pre-treatment and Selective Materials for Improved Processing of PWR Liquid Radioactive Wastes, EPRI NP-5786(1988).
9. Analytical Resources, Inc. and United Mineral & Energy, INC., Operational Experience with Selective Ion-Exchange Media in Sluiceable Pressurized Demineralizers at Nuclear Power Plants, DOE/ID/12640-TI88 008554.
10. A. Bilau and F. Ruter, Liquid radwaste processing history at Fort Calhoun Nuclear Station, Waste Management, Vol. 2(1986)
11. E. Philip Horwitz, A new ion exchange resin for the treatment of industrial waste streams, contaminated groundwaters, and mixed-wastes, Chemical separations Science (1995)
12. David G. Peiffer and Lawrence E. Jassin, "Northeast utilities, Millstone station's experience with Eichrom industries' Diphonix<sup>TM</sup> selective ion-exchange resin in liquid radioactive waste processing", radioactivity and radiochemistry, vol. 6. No. 3(1995)
13. R. Chiarizia, E. P. Horwitz and K. A. D Arcy, Uptake of metal ions by a new chelating ion exchange resin, solvent extr. Ion. Exch., 14, 6(1996)
14. U. S. EPA, Integrated Risk Information System(IRIS) on Uranium, soluble salts, environmental criteria and assessment office, office of health and environmental

assessment, office of research and development, Cincinnati, OH.

15. Friedrich Helfferich, Ion exchange, McGraw-Hill Book Company, 162-166 (1962)
16. C. A. Christophi and L. Axe, Competition of Cd, Cu and Pb adsorption on goethite, J. Environ. Eng., 126, 66-74(2000)