

## **Simultaneous Separation and Determination of $^{14}\text{C}$ and $^3\text{H}$ in Spent Resins from PWR Nuclear Power Plants**

가압경수로형 원전에서 발생된 폐수지의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  동시 분리 및 측정

**Soon-Dal Park**, Jung-Suck Kim, Jong-Goo Kim, Sun-Ho Han  
and Kwang-Yong Jee

Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

[nsdpark@kaeri.re.kr](mailto:nsdpark@kaeri.re.kr)

박순달, 김정석, 김종구, 한선호, 지광용  
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received March 26, 2007/Approved July 30, 2007)

### **Abstract**

In this work  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  distribution characteristics of spent resins from nuclear power plants(NPPs), pressurized water reactors(PWRs), was investigated . It was found that the recovery percent of  $^{14}\text{C}$  by the wet oxidation-acid stripping was 81%~100% for the added activity range of  $^{14}\text{C}$ , 0.72 Bq~460 Bq, and it was not affected by the kinds of stripping acids, 3 N-HCl, 3 N-HNO<sub>3</sub> and 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. And the recovery percent of  $^3\text{H}$  by distillation using the same apparatus was 81%~101% for the added activity range of  $^3\text{H}$ , 0.60 Bq~435 Bq. Among the tested stripping acids, 3 N-HCl, 3 N-HNO<sub>3</sub> and 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, only the trapped  $^3\text{H}$  solution by distillation in 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> was compatible with the 3H scintillator, Ultimagold XR. Neither of the  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  trapping solutions from the spent ion exchange resin samples by the wet oxidation-3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> stripping contained gamma nuclides. However, some gamma nuclides,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{54}\text{Mn}$ , were found in the trapped  $^3\text{H}$  solutions of the spent resins by the wet oxidation-3 N-HCl stripping. It was the same for the  $^3\text{H}$  trapping solutions of the spent resins by Sample Oxidizer(PACKARD MODEL 307). Meanwhile only two nuclides,  $^{134}\text{Cs}$ , and  $^{137}\text{Cs}$ , were found in the  $^{14}\text{C}$  trapping solutions of the spent resins by Sample Oxidizer(PACKARD MODEL 307). It was found that most of the  $^{14}\text{C}$  in the spent resins existed as inorganic carbon form, more than about 70% of the total  $^{14}\text{C}$  content. Among the analyzed 30 spent ion exchange resin samples, the average concentration of  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  for the high radioactive samples, 8 samples, was 19000 Bq/g  $\pm$  41000 Bq/g, 670 Bq/g  $\pm$  460 Bq/g and that for the low radioactive samples, 22 samples, was 4.2 Bq/g  $\pm$  4.3 Bq/g, 6.0 Bq/g  $\pm$  5.3 Bq/g, respectively. And the average  $^{14}\text{C}/^3\text{H}$  ratio for the high radioactive samples, was higher, 28, than that of low

radioactive samples, 0.70. Some linear relationship trend was found between the activity concentrations of  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$ .

**Keywords** : Wet oxidation-acid stripping,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ , spent resin

## 요 약

가압경수로형 원자력발전소의 운영과정에서 발생된 폐수지내  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 분포특성을 조사하였다.  $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$  표준용액을 사용한  $^{14}\text{C}$ 의 회수율 측정결과, 사용한 산의 종류에 관계없이, 3 N-HCl, 3 N-HNO<sub>3</sub>, 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 주입한  $^{14}\text{C}$  농도 0.72 Bq~460 Bq 범위에서 81%~100%의 회수율을 나타내었다. 같은 장치를 사용하여 HTO 표준용액 종류에 의한  $^3\text{H}$ 의 회수율은 주입한  $^3\text{H}$  농도 0.60 Bq~435 Bq 범위에서 81%~101% 이었다. 습식산화-산용출법에 의한 폐수지의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  동시분리시, 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 사용했을 때 다른 감마핵종에 의한 방해가 없었으며,  $^3\text{H}$  포집액이 섬광제와 잘 혼합되었다. 그러나 3 N-HCl을 사용했을 때  $^3\text{H}$  포집용액에서  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  및  $^{54}\text{Mn}$  등의 감마핵종이 검출되었다. 또한 Sample Oxidizer에 의한  $^3\text{H}$  포집용액에서도  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  및  $^{54}\text{Mn}$  등이 검출되었으며,  $^{14}\text{C}$  포집용액에서는  $^{134}\text{Cs}$  및  $^{137}\text{Cs}$ 이 검출되었다. 폐수지의 총  $^{14}\text{C}$  함량중 약 70% 이상이 무기 탄소로 확인되었다. 30개 폐수지 시료중 8개 고방사능 폐수지의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 평균농도는 각각 19000 Bq/g $\pm$ 41000 Bq/g, 670 Bq/g $\pm$ 460 Bq/g이었으며 22개 저방사능폐수지에서는 각각 4.2 Bq/g $\pm$ 4.3 Bq/g, 6.0 Bq/g $\pm$ 5.3 Bq/g이 검출되었다. 고방사능 폐수지의 평균  $^{14}\text{C}/^3\text{H}$ 비는 28로 저방사능 폐수지의 0.70에 비해 높게 나타났으며,  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 농도는 서로 비례하는 경향을 보였다.

**중심단어** : 습식산화-산용출,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ , 폐수지

## I. 서 론

폐수지는 원자력발전소의 일차냉각재, 감속재, 열수송계통 및 기타 2차계통의 수질정화계통에서 사용후 방출되는 이온교환수지이다. 폐수지의 발생량은 잡고체를 제외한 중저준위방사성폐기물량의 약 60%에 달한다. 원자력발전소에서는 시설내의 용수처리를 위해 여러 가지 종류의 이온교환수지를 사용하고 있다. 주로 H형의 강산성 양이온 및 OH형의 강염기성 음이온교환수지가 혼합된 혼상 이온교환수지를 사용하고 있다[1,2,3,4,5,6]. 가압경수로형 원자로에서는 주로 구슬형, 비등경수로에서는 분말형 이온교환수지를 사용하고 있다[5]. 수처리에 사용한 폐수지에는 냉각재, 감속재 등에 불순물로 존재하는

미세부유물 및 용존 되어 있는 여러 가지 방사성핵종이 함유되어 있다. 또한 폐수지중  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 는 폐수지의 장기저장이라는 관점에서 중요한 문제점으로 인식 되고 있다[3,4,5,6]. 따라서 방사성폐기물의 효율적인 관리와 철저한 환경오염감시를 위해서는 폐수지중  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 에 대한 측정 자료의 축적이 요구된다.

$^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 는 순수한 베타방출체의 휘발성 핵종으로 폐기물중 이들의 농도는  $^{60}\text{Co}$  및  $^{137}\text{Cs}$ 과 같은 감마핵종의 농도와는 상관성이 낮은 것으로 알려져 있다. 또한 방사성폐기물중  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  농도는 주요 감마 핵종에 비해 매우 낮은 농도로 존재하며, 시료의 조성이 매우 복잡하다. 따라서  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 준위 파악은 시료를 화학적인 방법으로 전처리하여 분리한

후 측정하는 파괴분석을 해야 한다[8,9].

폐수지로부터  $^{14}\text{C}$ 의 분리방법에는 산용출, 기체치환, 열용출 및 초임계 상태의  $\text{CO}_2$ 를 이용한 동위원소교환법 등이 보고되어 있다[1,3,4,5,6,9,10]. 연구결과에 의하면 이온교환수지에서  $^{14}\text{C}$ 는 주로 탄산이온 혹은 중탄산이온으로 존재하며, 이온교환수지 매질에 교환된 탄소나 이온의 형태로 존재할 가능성은 낮은 것으로 알려져 있다[1,3,4,6,9]. 산용출법에 의한  $^{14}\text{C}$  분석은  $^{14}\text{C}$ 가 탄산이온( $\text{CO}_3^{2-}$ ) 혹은 중탄산이온( $\text{HCO}_3^-$ )으로 이온교환수지에 흡착되어 있는 것으로 가정 하고 있다. 폐수지의 산용출에는 3 N-HCl, 3 N-HNO<sub>3</sub>를 주로 사용하고 있으며, 또한 양이온수지에 존재할 수 있는  $^{14}\text{C}$ 의 분리를 위해 25 wt/v%의 KOH를 산용출 전에 사용한 예도 보고되어 있다[1]. 질소에 의한 열용출과  $\text{CO}_2$ 에 의한 기체치환은 효율성이 낮은 것으로 알려져 있다. 폐수지의  $^{14}\text{C}$ 를 산용출법으로 분석한 결과 93~99%의 회수율을 보였다는 보고가 있다[1,3,4,6]. 또한 초임계  $\text{CO}_2$  동위원소교환법으로 폐수지중  $^{14}\text{C}$ 를 96% 이상 회수한 예가 있다[5].

시료의 총삼중수소 분석시 HT는 고온 혹은 화학적인 습식산화에 의해 HTO 형태로 분자체, 저온포집관등에 포집하여 분석한다. 삼중수소의 측정법으로는 가스비례계수관법, ionization chambers, 질량분석기 및 액체섬광계수기법 등이 있다[2,8]. 최근 액체섬광계수기 기술의 발달로  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 측정감도와 측정한계가 크게 향상되었다. 현재 대부분의 실험실에서  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 측정시 분석절차가 간단하고 경제적인 액체섬광계수기를 사용하고 있다[8].

아직 국내에서 발생된 폐수지의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  분포에 대한 자료가 많지 않은 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 우리나라의 가압경수로형 원자력발전소에서 발생된 폐수지중  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 분포를 조사하였다. 습식산화-산용출법에 의한 폐수지중  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  분리시 몇 가지 산의 영향을 검토하였다. 또한 같은 폐수지 시료에 대해 습식산화-산용출법 및 Sample Oxidizer에 의한 분석결과를 비교, 검토하였으며, 폐수지내  $^{14}\text{C}$ 의 화학종을 분석하였다.

## II. 실험

### 가. 용출 산의 종류에 따른 영향

습식산화-산용출법에 의한  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 분리시 용출 산의 종류에 따른 영향을 검토하기 위해 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 3 N-HCl 및 3 N-HNO<sub>3</sub>를 사용하여  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 회수율을 측정하였다. 또한 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 3 N-HCl로 폐수지 시료의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 를 분석하여 결과를 비교하였으며,  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  포집용액을 감마스펙트로미터(EG&G Ortec Model GMX-30190-P HPGe, T-25)로 분석하여 감마 핵종의 존재를 확인하였다. 몇 가지 폐수지 시료에 대해서는 습식산화-산용출법과 Sample Oxidizer(PAKCARD MODEL 307)에 의한 분석을 병행하여 그 결과를 비교하였다. 동시에 각 분석법으로 분리한 용액의 감마 핵종을 분석, 비교하였다.

### 나. $^{14}\text{C}$ 및 $^3\text{H}$ 의 분리 및 회수율 측정

$^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 분리에는 그림 1의 습식산화-산용출장치를 사용하였다 [11,12]. 그림 1의 장치에  $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ (1.43x10<sup>6</sup> dpm/mL, PACKARD) 및 HTO(7.35 x 10<sup>5</sup> dpm/mL, PACKARD) 표준용액을 적절한 농도로 취하여  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 를 분리한 후 액체섬광계수기(PACKARD 2500 TR/AB)를 사용하여 회수율을 측정하였다.  $^{14}\text{C}$ 는 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 3 N-HCl 및 3 N-HNO<sub>3</sub>매질에서  $^{14}\text{CO}_2$ 로 분리하여 헬륨 운반기체로 Permafluor E+ 10 mL 및 Carbosorb E 10 mL의 혼합용액에 흡수시켰다. 이 용액을 그대로  $^{14}\text{C}$  회수율 측정에 사용하였

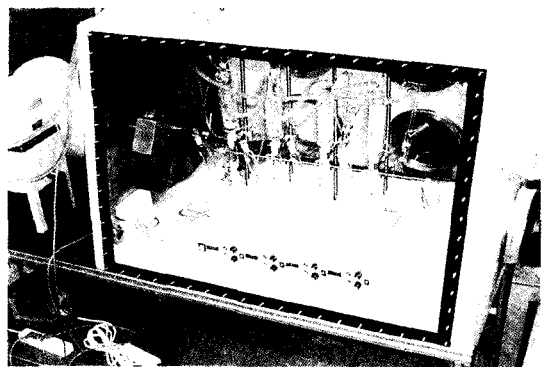


Fig. 1. Wet oxidation-acid stripping apparatuses which were installed inside of a glove box for  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  separation in spent resins.

다.  $^3\text{H}$ 는 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$  매질에서  $^{14}\text{C}$  분리 후 남아 있는 용액을 증류시켜 HTO로 수집한 후 증류액 5 mL를 Ultimagold XR 15 mL와 혼합하여  $^3\text{H}$  회수율 측정에 사용하였다.

이온교환수지에 흡착된  $^{14}\text{C}$ 의 회수율을 측정하기 위해  $^{14}\text{C}$ 가 흡착된 모의 폐수지 시료를 제조하였다. 이온교환수지는 양이온교환수지(IRN77)와 음이온교환수지(IRN78)가 1 : 1 당량비로 혼합되어 있는 혼합수지(Rhom & Hass사, AMBERLITE IRN 150L)를 사용하였다. 10 ml 유리버커 5개에 미리 세척해둔 사용하지 않은 혼합수지를(AMBERLITE IRN 150L) 1 g씩 취하고, 여기에 pH 10의 완충용액을 이온교환수지가 잠길 정도로 가하였다. 이 10 mL 비커에  $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$  표준용액을  $^{14}\text{C}$  농도가 460 Bq/g되게 가하여 잘 저어주면서 일주일 동안 혼합수지에 흡착시켰다.  $^{14}\text{C}$ 를 흡착시킨 수지를 여과한 후 실온에서 건조하여 모의 폐수지로 사용하였다. 이 모의 폐수지와 여과액의  $^{14}\text{C}$ 를 측정하였다.

## 다. 폐수지분석

### ① 시료채취

원자로 1차 계통의 수처리에서 사용된 고 방사능 폐수지는 보관탱크, 저장탱크를 거쳐 폐수지 건조설비에서 건조후 고 건전성 용기에 담을 때 원격시료 채취장치를 이용하여 약 5 g 정도 채취하였다. 2차 계통 및 기타 용수의 수처리에서 사용된 저 방사능 폐수지는 시료당 약 50 g씩 채취하였다. 고방사능 폐수지의 시료 용기는 뚜껑의 직경이 큰 30 mL 용량의 고밀도폴리에틸렌병을 사용하였다. 저방사능 폐수지의 시료 용기는 125 mL 용량의 고밀도폴리에틸렌병을 사용하였다. 채취한 폐수지 시료는 특별한 전처리 없이 분석하였다.

### ② $^{14}\text{C}$ 및 $^3\text{H}$ 의 분리 및 측정

폐수지의 표면선량을, 시료의 상태, 보관 시료의 양 및 취급의 용이성 등을 고려하여 약 0.1 g~2.0 g의 폐수지를 무게 달아 3구 200 mL의 둥근플라스크에 취하고 그림 1과 같이 장치에 결합시켰다.  $^{14}\text{C}$  포집관에 Carbsorb E 10 mL와 Permafluor E<sup>+</sup> 10 mL를 가하여 장치에 연결하였다. 장치의 모든 연결부위를 잘 밀봉하여 기체의 누설이 발생되지 않도록 하였다. 본 연구

에서는  $\text{CO}_2$  흡수 효율이 매우 좋은 아민계의 Carbsorb E 10 mL와 섬광제인 Permafluor E<sup>+</sup> 10 mL의 혼합용액을  $\text{CO}_2$  포집용액으로 사용하여 이것을 그대로 액체섬광계수 측정에 사용하였다.

폐수지 시료를 자석 짓개로 잘 절어주면서 액체시약 공급관을 통하여 4 M-KOH 5 mL를 서서히 주입하였다. 4 M-KOH의 주입이 끝나면 액체시약 공급관의 코크를 닫고, HTO 수집기의 코크를 열어 놓은 상태에서 약 30분간 폐수지를 용출시켰다. 4 M-KOH에 의한 폐수지의 용출과정은 양이온수지에 흡착되어 있는  $^{14}\text{C}$ 를 분리하기 위한 것이다. 4 M-KOH에 의한 용출이 끝난 후  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  5 g과  $\text{AgNO}_3$  0.5 g을 둥근 플라스크에 가하고 액체시약 공급관을 통하여 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$  20 mL를 5초에 1 방울의 속도로 적가하였다. 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$  20 mL의 주입이 끝나면 액체시약 공급관의 코크를 닫고 히팅 맨들의 온도를 약 96°C로 유지한 상태에서 헬륨 운반기체를 흘려주면서  $^{14}\text{C}$ 를 분리하였다. 약 2시간 정도 반응 시킨 후  $^{14}\text{C}$ 의 포집을 끝내고 HTO 수집관의 코크를 닫고 HTO를 수집하였다. 약 20 mL 정도의 HTO 증류액이 수집될 때까지 계속 증류하였다.  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 분리가 끝난 후  $^{14}\text{C}$  포집용액을 액체섬광계수 측정용 바이알로 옮겼다. 액체섬광계수측정용 바이알에 HTO 증류액 5 mL 및 Ultimagold XR 15 mL를 취하고 잘 혼합하였다. 이 용액을 하룻밤 방치한 후 액체섬광계수측정에 사용하였다(Packard 2500 TR/AB).

## 라. 폐수지내 $^{14}\text{C}$ 의 화학종 분석

폐수지내  $^{14}\text{C}$ 의 화학적 존재 형태를 확인하기 위해, 몇 가지 폐수지 시료에 대해  $^{14}\text{C}$ 의 화학종을 분석하였다. 무기성  $^{14}\text{C}$ 는 폐수지를 가운하지 않고 실온에서 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 만 가하여 3시간 분리하였다. 이렇게 분리하여 측정된  $^{14}\text{C}$ 의 농도를 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  및  $\text{AgNO}_3$ 를 가하고 96°C의 가온상태에서 구한 총  $^{14}\text{C}$  농도와와의 차를 유기성  $^{14}\text{C}$ 로 계산하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 가. 용출 산의 종류에 따른 영향

$^{14}\text{C}$ 가 표지된  $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$  표준용액과  $^3\text{H}$  표준용액

으로  $^{14}\text{C}$  2383 Bq,  $^3\text{H}$  1225 Bq을 가하고 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 3 N-HCl 및 3 N- $\text{HNO}_3$ 을 사용하여 회수율을 측정된 결과  $^{14}\text{C}$ 는 산의 종류에 관계없이 약 95% 이상의 회수율을 나타내었다.  $^3\text{H}$ 는  $^{14}\text{C}$  포집 후 습식산화-산용출장치의 온도를 약 96°C로 올린 상태에서 역류냉각하여 증류액을 수집하였다. 이렇게 수집한 증류액 5 mL를 취하여 섬광제인 Ultimagold XR과 혼합한 결과 3 N-HCl 및 3 N- $\text{HNO}_3$ 로 증류, 수집한 용액 5 mL는 Ultimagold XR 15 mL와 혼합시 흰색침전이 생성되어 액체섬광계수 측정이 불가능하였다. 그러나 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 로 수집한 용액 5 mL는 Ultimagold XR 15 mL와 혼합시 침전이 생성되지 않고 잘 용해되었으며, 100%의 회수율을 보였다.

산용출에 의한 폐수지중  $^{14}\text{C}$ 의 제거는 폐수지에  $^{14}\text{C}$ 가 탄산이온( $\text{CO}_3^{2-}$ ) 혹은 중탄산이온( $\text{HCO}_3^-$ )등의 무기성 탄소로 흡착되어 있다는 가정에 의한 것이다[1,3,4,6]. 염산, 질산 등의 휘발성 산은 폐수지에 탄산이온 혹은 중탄산이온 형태의 무기성 탄소로 흡착되어 있는  $^{14}\text{C}$ 를 잘 용출시킬 수 있다. 따라서  $\text{CO}_2$  기체로 포집하는  $^{14}\text{C}$ 의 경우 휘발성 산인 HCl,  $\text{HNO}_3$ 가  $^{14}\text{C}$ 의 회수율 측정에 방해를 일으키지 않았다. 그러나 HTO 증류액에는 HCl,  $\text{HNO}_3$ 가 휘발되어 증류액을 강산성으로 만들고 섬광제와 반응하여 침전을 생성시키게 된다. 이와 같은 방해가 비휘발성 산인 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$  사용시 나타나지 않았다. 따라서 시료의  $^{14}\text{C}$ 와  $^3\text{H}$ 를 동시 분리시  $\text{HNO}_3$ , HCl 과 같은 휘발성 산은 사용할 수 없을 것이다.

표 1에 고방사능 폐수지(표면선량을 약 300  $\mu\text{Sv/g/h}$ )에 대해 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 와 3 N-HCl를 사용한 습식산화-산용출법 및 Sample Oxidizer로 분리한  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  포집용액의 감마핵종분석결과를 나타내었다. 표 1에서 보는 바와 같이 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 로 분리한  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  포집용액의 감마분석결과 계측시간을 50000초로 하였을 때  $^{14}\text{C}$  포집용액에서는 감마핵종이 검출되지 않았으며,  $^3\text{H}$  포집용액에서는 미량의  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  등이 검출되었다. 3 N-HCl을 사용한 경우 3000초 계측시  $^{14}\text{C}$  포집용액에서는 감마핵종이 검출되지 않았으나, HTO 포집용

**Table 1. Results of gamma spectrometer analysis for  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  trapping solutions of a spent resin**

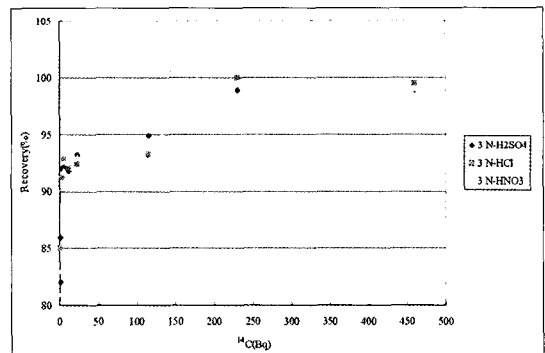
Nuclides	Wet oxidation-3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ stripping counting time 50000 seconds (Bq)		Wet oxidation-3 N-HCl stripping, counting time 3000 seconds (Bq)		Sample Oxidizer counting time 3000 seconds (Bq)	
	$^{14}\text{C}$	$^3\text{H}$	$^{14}\text{C}$	$^3\text{H}$	$^{14}\text{C}$	$^3\text{H}$
$^{60}\text{Co}$	ND*	0.13	ND	42	ND	238
$^{134}\text{Cs}$	ND	0.48	ND	152	41	1380
$^{137}\text{Cs}$	ND	0.61	ND	179	51	1640
$^{54}\text{Mn}$	ND	0.21	ND	23	ND	115

ND\*: Not detectable

액에서는 비교적 높은 농도의  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  및  $^{54}\text{Mn}$ 등이 검출되었다. 또한 Sample Oxidizer로 분리하였을 경우  $^{14}\text{C}$  포집용액에서도 일부 핵종이 검출되었으며,  $^3\text{H}$  포집용액에서는 높은 농도의 감마핵종이 검출되었다. HCl에 의한 폐수지의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  분리시 휘발성감마핵종에 의한 방해가 있을 수 있으며,  $^3\text{H}$  포집액을 강산성화시켜 섬광제와 혼합되지 않는 것으로 나타났다.

### 나. $^{14}\text{C}$ 및 $^3\text{H}$ 의 회수율

그림 2에 습식산화-산용출법에 의한  $^{14}\text{C}$ 의 주입 방식능 및 산의 종류에 따른  $^{14}\text{C}$ 의 회수율 측정결과를 나타내었다. 그림 2에서 보는 바와 같이  $^{14}\text{C}$ 의 회수율은  $^{14}\text{C}$  주입량 0.72 Bq~460 Bq 범위에서 81%~100%였으며 상대 표준편차는 1%~9%를 나타내었다.  $^{14}\text{C}$ 의 회수율은 용출에 사용한 산의 종류, 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 3 N-HCl 및 3 N- $\text{HNO}_3$ , 와 의미 있는 상관성이 없었으며 주입한  $^{14}\text{C}$ 의 농도가 높을수



**Fig. 2. Recovery yields of  $^{14}\text{C}$  with standard solutions of  $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$  by wet oxidation-acid stripping method as a variation of the added activity of  $^{14}\text{C}$  and acids matrix.**

록 상대적으로 높은 회수율을 보였다. 본 연구에서 사용한 무기탄소형태의  $^{14}\text{C}$  표준용액( $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ )은 강산에서  $^{14}\text{CO}_2$  형태로 방출되므로  $^{14}\text{C}$ 의 회수율이 용출에 사용한 산의 종류와 상관없을 것이다. 또한  $^{14}\text{C}$  주입농도가 낮을수록 측정값의 상대 표준편차가 높게 나타났다.

표 2에 모의 폐수지 시료의  $^{14}\text{C}$  측정결과를 나타내었다. 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$  매질에서 분리하여 회수율을 측정된 결과 5개 시료의 평균 회수율이 98% 이었으며, 상대 표준편차는 2% 이하 이었다. 모의 폐수지 여과액에서는  $^{14}\text{C}$ 가 4 Bq/mL 이하로 검출되었다.

그림 3에 3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$  매질에서  $^3\text{H}$  주입량 0.60 Bq~435 Bq에 따른 회수율 측정 결과를 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이  $^3\text{H}$  주입 방사능 약 6 Bq 이상에서  $^3\text{H}$ 의 회수율이 98% 이상이었으며 상대 표준편차는 4% 이하였다. 그러나 3H 주입 방사능 약 0.60 Bq~2.4 Bq 에서는 회수율이 81%~83% 수준으로 약간 낮아졌으며, 상대 표준편차는 약 5%로 높아졌다.  $^3\text{H}$  주입 방사능이 낮을수록 회수율이 감소하는 것은  $^{14}\text{C}$ 의 경우와 마찬가지로 지로 장치의 바탕값 및 증류액 회수시 손실 등에 기

인하는 것으로 생각된다.  $^{14}\text{C}$ 에 비해 낮은 주입농도에서  $^3\text{H}$ 의 회수율이 더 낮아지는 것은  $^3\text{H}$ 의 액체상 광계수 측정효율이 30% 정도로  $^{14}\text{C}$ 에 비해 약 2배 이상 낮고, 섬광제인 Ultimagold XR과 HTO의 혼합비가 최고 3 : 1로 낮기 때문이다. 원자로에서  $^3\text{H}$ 는 HT 형태의 기체로 방출되며 이것은 공기중에서 쉽게 산화되어 HTO의 형태로 존재하게 된다. 따라서 냉각재 및 감속재 등의 수처리에 사용된 폐수지에  $^3\text{H}$ 는 HTO의 수분으로 존재한다.

**다. 분석방법에 따른  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  분석결과**

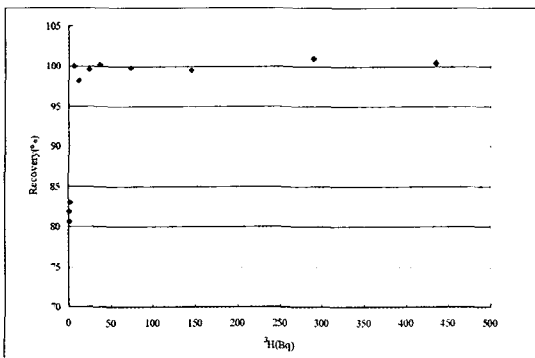
표 3에 몇 가지 폐수지에 대해 습식산화-3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 용출법 및 Sample Oxidizer에 의한  $^{14}\text{C}$  및 3H 분석결과를 나타내었다. 분석한 4개 폐수지 시료중 시료 1, 2에서는  $^{14}\text{C}$ 가 2 Bq/g~6 Bq/g이 검출되었으며, 분석방법간에 의미 있는 차이는 발견되지 않았다. 시료 3에서  $^{14}\text{C}$ 는 습식산화-3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 용출법이 Sample Oxidizer에 비해 약 12% 높게 측정되었으나, 시료 4에서는 반대로 Sample Oxidizer의  $^{14}\text{C}$  분석결과가 습식산화-3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 용출법에 비해 약 40% 높게 측정되었다.

폐수지에서  $^{14}\text{C}$ 는 주로 탄산이온이나 중탄산이온과 같은 음이온으로 존재한다. 따라서 폐수지에서  $^{14}\text{C}$ 는 대부분 음이온수지에 흡착되어 있을 것이다. 냉각재 수처리에 사용한 양이온 폐수지에서도 총  $^{14}\text{C}$ 의 약 6% 정도가 검출되었다는 보고가 있다 [1,10]. 양이온 수지에 대한  $^{14}\text{C}$ 의 흡착 메커니즘이 확실히 밝혀 지지 않았지만,  $^{14}\text{C}$ 가 금속이온에 직접 결합 되어 있거나 입자성 물질에 흡착되어 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서는 양이온 및 음이온 수지에 흡착되어 있는  $^{14}\text{C}$ 를 분리하기 위해  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{KOH}$  용출법을 사용하였다.

혼합폐수지 시료의  $^{14}\text{C}$  분석결과는 시료의 양이온 및 음이온 혼합비율에 크게 영향을 받을 것이다. 이외에 폐수지의  $^{14}\text{C}$  농도는 시료를 채취한 이온교환수지 칼럼의 위치, 폐수지의 보관시간 및 pH에 따라 달라질 수 있다[3]. Sample Oxidizer에 의한  $^{14}\text{C}$  분석 시 분석에 사용할 수 있는 시료의 무게는 약 0.5 g 이하이다. 이와 같은 폐수지 시료의 균질도 특성과 측

**Table 2 Results of  $^{14}\text{C}$  analysis for the simulated spent resins**

No	Added (Bq)	Found (Bq)	Mean(Bq)	Standard deviation(Bq)
1		455		
2		444		
3	460	449	450	5.8
4		445		
5		457		



**Fig. 3. Recovery yields of  $^3\text{H}$  with standard solutions of HTO by wet oxidation-3 N- $\text{H}_2\text{SO}_4$  stripping as a variation of the added activity of  $^3\text{H}$ .**

정방법에 따른 시료 무게의 제약은  $^{14}\text{C}$  측정결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 시료 균질도 특성 및 시료 무게를 고려하면 두 방법간의  $^{14}\text{C}$  분석결과 차이는 용인될 수 있는 수준으로 생각된다.

D. L. Moir 등은 CANDU형 원자로의 냉각재 수처리기에 사용한 IRN-150 이온교환수지의  $^{14}\text{C}$ 를 고압연소법과 8.0 N-HCl에 의한 산용출법으로 분리, 분석하였다. 고압연소법과 산용출법에 의한  $^{14}\text{C}$  분석결과 각각  $1.3 \times 10^6$  Bq/mL,  $2.0 \times 10^6$  Bq/mL가 검출되었으며 이와 같은 결과의 차이는 시료의 균질도를 고려하면 용인될 수 있다고 주장하였다[3]. 또한 J. E. Martin은 경수로의 수처리기에 사용한 혼합폐수지 시료에 대해 25 wt/v% KOH와 37 wt/v% HCl을 사용한 산/알칼리용출법과 약 600~700°C의 온도에서 CuO 촉매칼럼이 있는 튜브형전기로를 이용한 고온산화법에 의한  $^{14}\text{C}$  분석결과를 비교하였다. 두 분석방법간의  $^{14}\text{C}$  분석결과는 비슷하였으며 따라서 폐수지 시료의  $^{14}\text{C}$  분석시 산/알칼리용출법이 유리하다고 주장하였다. 특히  $^{14}\text{C}$ 가 무기성 음이온의 형태로 이온교환수지의 작용기에 결합되어 있으므로 이온교환수지의 매질까지 산화시키는 고온산화법을 적용할 필요가 없다는 것이다[1].

표 3에서 보는 같이 저방사능 시료인 1, 2번 시료의  $^3\text{H}$  측정값에 의미 있는 차이가 없었다. 그러나 고방사능 시료인 3, 4번은 습식산화-3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>용출법에 비해 Sample Oxidizer에서 10~20배 높은  $^3\text{H}$ 가 검출되었다. 이것은 앞서 기술한 바와 같이 Sample Oxidizer에 의한 HTO 수집시 휘발성감마핵종의 방해에 의한 것이다. 시료의 표면선량을 측정결과 시료 1~2번은 측정한계 이하였으나 시료 3, 4번은 약 60  $\mu\text{Sv/hr/g}$ ~300  $\mu\text{Sv/hr/g}$ 으로 높게 나타났다.

**라. 폐수지내  $^{14}\text{C}$ 의 화학종분석**

표 4에 몇 가지 폐수지에 대해 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 실온에서  $^{14}\text{C}$ 를 산용출, 분리하여 측정된 무기  $^{14}\text{C}$ 와 습식산화-3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>용출법에 의한 총  $^{14}\text{C}$ 의 분석결과를 나타내었다. 유기성  $^{14}\text{C}$ 의 함유율은 습식산화-3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>용출법으로 분리하여 측정된  $^{14}\text{C}$ 의 함량에서 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 구한  $^{14}\text{C}$ 의 함량을 차감하여 구할

**Table 3. Results of  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  analysis of spent resins from PWR nuclear power plants, depending on the analysis methods**

Sample	$^{14}\text{C}$		$^3\text{H}$	
	Wet oxidation-3 N-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> stripping (Bq/g)	Sample Oxidizer (Bq/g)	Wet oxidation-3 N-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> stripping (Bq/g)	Sample Oxidizer (Bq/g)
1	1.9	1.7	9.0	11
2	5.4	6.1	14	11
3	5591	7828	1426	14635
4	119207	106869	757	15844

**Table 4. Results of inorganic and total  $^{14}\text{C}$  analysis of spent resins from PWR nuclear power plants**

	Inorganic $^{14}\text{C}$ (Bq/g)	Total $^{14}\text{C}$ (Bq/g)
Sample A		
1	0.79	0.74
2	1.7	2.2
3	1498	1566
4	1625	2281
5	5436	5591
Sample B		
1	0.51	0.68
2	5.0	5.4
3	32	46
4	5893	7155
5	114153	119207
Sample C		
1	0.12	0.13
2	5.0	6.2
3	11	13
4	807	1062
5	12557	13671

수 있다. 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에 제공된 폐수지의  $^{14}\text{C}$ 중 약 70% 이상이 무기성  $^{14}\text{C}$ 로 존재하였다.

**마. 폐수지의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  분석결과**

본 연구에서는 폐수지내  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 동시분리를 위해 습식산화-3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용출법을 사용하였다. 측정결과 불검출(Not Detectable(ND)) 표시는 식 1과 같이 최소측정가능방사능농도(Minimum Detectable Activity(MDA))를 구하여 측정결과가 이 값 이하이면 불검출(ND)로 표시하였다[15]. MDA값은 식 1에서 보는 바와 같이 시료의 측정시간과 시료량을 중

가시킴으로서 낮출 수 있다. 그러나 실제 시료 측정 시간과 시료량은 측정방법에 따라 제약을 받는다.

$$MDA(Bq/g) = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{C_b T_b}}{E_{eff} V_{(g)} T_s * 60} \dots\dots (1)$$

여기서 Eff; <sup>14</sup>C 및 <sup>3</sup>H 계측효율

V<sub>(g)</sub>; 시료무게

T<sub>s</sub>; 시료의 측정시간

C<sub>b</sub>; 바탕값 측정계수

T<sub>b</sub>; 바탕값 측정시간

표 5에 각 원자력발전소에서 발생된 30개 폐수지의 <sup>14</sup>C 및 <sup>3</sup>H 분석결과를 나타내었다.

A 원자력발전소 7개 시료중 3개의 고방사능 폐수지 시료에서 <sup>14</sup>C 1566 Bq/g~5591 Bq/g, <sup>3</sup>H 632 Bq/g~1426 Bq/g 검출되었다. 이 시료들의 표면선량율은 약 30 μSv/g/hr~ 60 μSv/g/hr 이었다. 나머지 4개의 저방사능 폐수지 시료에서 <sup>14</sup>C 0.20 Bq/g~2.2 Bq/g, <sup>3</sup>H 4.7 Bq/g~21 Bq/g 검출되었다. 또한 평균 <sup>14</sup>C/<sup>3</sup>H비 1.4로 <sup>14</sup>C가 높게 검출되었다.

B 원자력발전소 12개 시료중 3개의 고방사능 폐수지 시료에서 <sup>14</sup>C 4134 Bq/g~119207 Bq/g, <sup>3</sup>H 142 Bq/g~757 Bq/g 검출되었다. 이 시료들의 표면선량율은 약 60 μSv/g/hr~300 μSv/g/hr 이었다. 나머지 9개의 저방사능 폐수지 시료에서 <sup>14</sup>C 0.16 Bq/g~46 Bq/g, <sup>3</sup>H 0.13 Bq/g~14 Bq/g 검출되었다. 또한 평균 <sup>14</sup>C/<sup>3</sup>H비는 29로 <sup>14</sup>C가 높게 검출되었으며, 조사된 발전소중 가장 높은 값을 보였다.

C 원자력발전소 11개 시료중 2개의 고방사능 폐수지 시료에서 <sup>14</sup>C 1062 Bq/g~13671 Bq/g, <sup>3</sup>H 62 Bq/g~1044 Bq/g 검출되었다. 이 시료들의 표면선량율은 약 20 μSv/g/hr~90 μSv/g/hr 이었다. 나머지 9개의 저방사능 폐수지 시료에서 <sup>14</sup>C 0.08 Bq/g~13 Bq/g, <sup>3</sup>H 0.66 Bq/g~16 Bq/g 검출되었다. 또한 평균 <sup>14</sup>C/<sup>3</sup>H비는 3.1로 <sup>14</sup>C가 높게 검출되었다.

분석한 30개 폐수지중 8개 고방사능 폐수지의 <sup>14</sup>C 및 <sup>3</sup>H 분포범위는 각각 1062 Bq/g~119207 Bq/g,

**Table 5. Results of <sup>14</sup>C and <sup>3</sup>H analysis of spent resins from PWR nuclear power plants**

	<sup>14</sup> C (Bq/g)	<sup>3</sup> H(Bq/g)	<sup>14</sup> C / <sup>3</sup> H
<b>Sample A</b>			
1	0.20	6.0	0.03
2	0.74	21	0.04
3	1.9	9.0	0.21
4	2.2	4.7	0.47
5	1566	632	2.5
6	2281	879	2.6
7	5591	1426	3.9
Mean	1349	425	1.4
Standard deviation	2089	569	
<b>Sample B</b>			
1	0.16	0.13	1.2
2	0.18	0.15	1.2
3	0.46	7.7	0.06
4	0.68	13	0.05
5	0.72	5.7	0.13
6	5.4	14	0.39
7	38	3.6	11
8	39	3.0	13
9	46	9.8	4.7
10	4134	142	29
11	7155	430	17
12	119207	757	157
Mean	25297	300	29
Standard deviation	52588	364	
<b>Sample C</b>			
1	0.08	1.8	0.04
2	0.13	3.3	0.04
3	0.14	0.66	0.21
4	0.66	1.9	0.35
5	3.3	16	0.21
6	4.3	8.0	0.54
7	6.0	11	0.55
8	6.2	2.1	2.9
9	13	6.4	2.0
10	1062	62	17
11	13671	1044	13
Mean	269	61	3.1
Standard deviation	529	88	

62 Bq/g~1426 Bq/g이었으며, 평균농도는 각각 19333 Bq/g±40559 Bq/g, 672 Bq/g±458 Bq/g이었다. 또한 22개 저방사능 폐수지의 <sup>14</sup>C 및 <sup>3</sup>H 분포범위는 각각 0.08 Bq/g~46 Bq/g, 0.13 Bq/g~16



Bq/g이었으며, 평균농도는 각각  $4.2 \text{ Bq/g} \pm 4.3 \text{ Bq/g}$ ,  $6.0 \text{ Bq/g} \pm 5.3 \text{ Bq/g}$  이었다. 고방사능 폐수지 및 저방사능 폐수지의 평균  $^{14}\text{C}/^3\text{H}$  비는 각각 28 및 0.70으로 고방사능폐수지에서  $^3\text{H}$ 에 비해  $^{14}\text{C}$ 의 농도가 상대적으로 높게 검출되었다.

중수로형 원자력발전소의 감속재 수처리에서 사용한 폐수지에서  $7.4 \times 10^5 \text{ Bq/mL} \sim 7.8 \times 10^6 \text{ Bq/mL}$ 의  $^{14}\text{C}$ 가 검출되었다는 보고가 있다. J. E. Martin은 비등경수로 및 가압경수로의 폐수지에서 각각  $1.1 \text{ Bq/g} \sim 140 \text{ Bq/g}$ ,  $19 \text{ Bq/g} \sim 1924 \text{ Bq/g}$ 의  $^{14}\text{C}$ 를 검출하였다. 또한 M. Snellman등은 가압경수로에 사용한 양이온, 음이온 및 혼합폐수지에서 각각  $22 \text{ Bq/g}$ ,  $40 \text{ Bq/g}$  및  $393 \text{ Bq/g} \sim 12600 \text{ Bq/g}$ 의  $^{14}\text{C}$ 를 검출하였다[1,3,6].

본 연구에서 사용한 폐수지는 혼합폐수지이므로 폐수지내  $^{14}\text{C}$  농도는 폐수지의 양이온, 음이온 혼합 비율, 시료를 채취한 칼럼의 위치, pH 및 보관시간 등에 영향을 받는다. 또한 폐기물내  $^3\text{H}$ 의 농도는 폐기물의 수분함량에 비례하는 것으로 알려져 있다[8]. 즉 폐기물의 발생원이 같다면 그 폐기물의  $^3\text{H}$  농도는 수분 함량으로부터 예측할 수 있다. 그러나 같은 수분 함량에서도 수분의 발생원에 따라  $^3\text{H}$ 의 농도는 크게 달라질 것이며, 수분의 발생원이 같아도 보관 방법이나 보관시간에 따라 수분의 함량이 달라진다. 그림 4, 5, 6에 본 연구에서 측정된 폐수지내  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  농도의 상관도를 나타내었다. 그림 4, 5, 6에서 보는 바와 같이 같은 베타 방출핵종인  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 농도는 서로 비례하는 경향을 보였다.

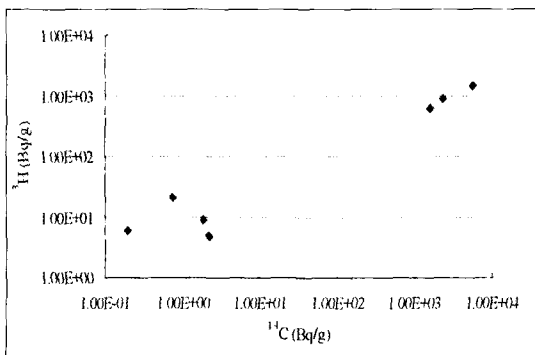


Fig. 4. Relationship between  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  activity concentrations of A spent resins.

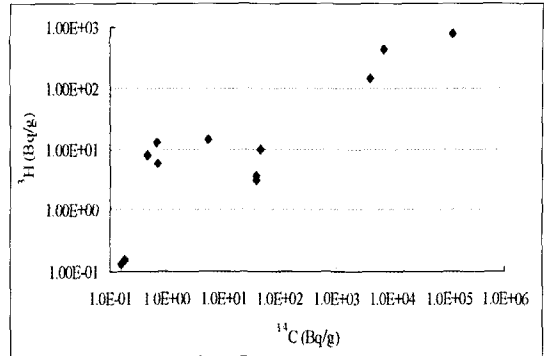


Fig. 5. Relationship between  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  activity concentrations of B spent resins.

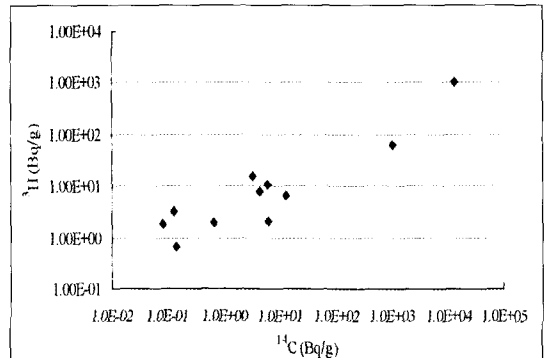


Fig. 6. Relationship between  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  activity concentrations of C spent resins.

#### IV. 결론

$\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$  표준용액으로 습식산화-산용출법에 의한  $^{14}\text{C}$  회수율 측정결과 산의 종류에 관계없이, 3 N-HCl, 3 N-HNO<sub>3</sub>, 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 주입한 방사능에 따라  $^{14}\text{C}$ 의 회수율이 81%~100% 이었다. HTO 표준용액의 습식산화-산용출법에 의한 실험결과 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 매질에서 증류, 포집한 용액은 Ultimagold XR에 잘 용해되었으며, 주입한  $^3\text{H}$  방사능에 따른  $^3\text{H}$ 의 회수율이 81%~101%였다. 실험결과 습식산화-산용출법에 의한 폐수지의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  동시분리시 3 N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 매질이 가장 적절하였다. 폐수지의 총  $^{14}\text{C}$ 중 약 70% 이상이 무기성 탄소로 확인되었다. 분석한 30개 폐수지중 8개 고방사능폐수지 시료의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 평균농도는 각각  $19000 \text{ Bq/g} \pm 41000 \text{ Bq/g}$ ,  $670 \text{ Bq/g} \pm 460 \text{ Bq/g}$  이었다. 나머지 22개 저방사능폐수지 시료의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 평균농도는 각각  $4.2 \text{ Bq/g} \pm 4.3 \text{ Bq/g}$ ,

6.0 Bq/g±5.3 Bq/g이었다. 폐수지중  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$ 의 농도는 서로 비례하는 경향을 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] J. E. Martin, "Carbon-14 in Low-Level Radioactive Waste from Two Nuclear Power Plants," Health Phys., 50(1), pp. 57-64(1986).
- [2] "Review of Methods for the Analysis of Total Tritium and Organically Bound Tritium," NCAS-TR-99-003(1999).
- [3] D. L. Moir, K. J. Ross, J. D. Chen, A. W. Tarr, E. L. Bualas, W. A. Boivin, D. C. Doern, D. L. Hoffman, J. P. M. Ross, "Determination of  $^{14}\text{C}$  in Spent Moderator Ion-Exchange Resin From Bruce Nuclear Generating Station A," J. of Radioanal. Nucl. Chem., 85(1), pp. 69-81(1994).
- [4] B. R. Nott and D. J. R. Dodd, Ontario Hydro Research Divison's Program for Treatment of Spent Ion-Exchange Resins, INIS-mf-7139(1981).
- [5] S. A. Dias, and J. P. Krasznai, "Selective Removal of Carbon-14 from Ion Exchange Resins Using Supercritical Carbon Dioxide," CONF-960804-vol 3(1996).
- [6] M. Snellman and L. Salonen, "Carbon-14 in Ion Exchange Resins from Finnish Nuclear Power Plants," INIS-mf-9040(1984).
- [7] H. J. Choi, H. L. Lee, K. S. Suh and H. S. Kang, "Prediction of the Tritium Concentration in the Soil Water After the Operation of Wolsong Tritium Removal Facility," Nucl. Enging. Tech., 37(4) pp. 385-390(2005).
- [8] IAEA, Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14, IAEA Technical Reports Series NO. 421(2004).
- [9] A. Raymond, B. Lagarde and A. Pitiot, "Studies on Important Radionuclides for the Safety of A Radioactive Waste Disposal Site:Correlation Between Easily Measurable Gamma Emitters and Long-Lived radionuclides," Nucl. Tech., 115, pp. 192-197(1996).
- [10] M. S. Mozes, "Volume Reduction of Spent Ion-Exchange Resin by Acid Digestion," Nucl. Tech., 59, pp. 270-278(1982).
- [11] 박순달, 김정석, 지광용, 김종구, 김원호, "원자력발전소의 수처리계통에서 발생된 폐수지의  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  분포측정," 한국방사성폐기물학회 춘계학술발표회, Vol.4 No. 1, pp. 85, 2006. 6. 15-16, 한양대학교서울캠퍼스.
- [12] 안홍주, 이흥래, 한선호, "화학적산화방법을 이용한 농축폐액내  $^{14}\text{C}$  및  $^3\text{H}$  정량," 한국방사성폐기물학회지, 3(3), pp. 193-200(2005).
- [13] J. N. Vance, J. E. Cline, D. E. Robertson and S. Eabry, Characterization of Carbon-14 Generated by the Nuclear Power Industry, EPRI TR-105715 (1995).
- [14] 이상진, 양호연, 김경덕, "중수로 원전  $^{14}\text{C}$  발생특성 및 이온교환수지에 의한  $^{14}\text{C}$  흡, 탈착 거동 분석," 한국방사성폐기물학회 춘계학술발표회, Vol.2 No. 1, pp. 147-157, 2004. 6. 23-25, 경희대수원캠퍼스.
- [15] L. A., Currie, "Limits for qualitative detection and quantitative determination," Anal. Chem., 40, pp. 586-593(1968).