

치료용 광자선의 상대깊이선량
측정을 위한 1차원 광섬유
팬텀선량계의 제작 : 센서 사이의
cross-talk 측정

문진수¹ · 장경원¹ · 유욱재¹ · 한기택¹ ·
전다영¹ · 이봉수^{1*}

¹건국대학교 의료생명대학 의학공학부,
의공학실용기술연구소

Fabrication of One-dimensional
Fiber-optic Phantom Dosimeter
for Measuring Relative Depth
Dose of Therapeutic Photon
Beam : Measurement of
Cross-talk between Two Sensors

Jinsoo Moon¹, Kyoung Won Jang¹,
Wook Jae Yoo¹, Ki-Tek Han¹, Daeong
Jeon¹, Bongsoo Lee^{1*}

¹School of Biomedical Engineering, College of
Biomedical & Health Science, Research Institute of
Biomedical Engineering, Konkuk University

Abstract

In this study, we fabricated an one-dimensional fiber-optic phantom dosimeter by arraying four scintillator-optical fiber sensors for measuring relative depth dose of a 6 MV therapeutic photon beam. The scintillation light from the 1-D fiber-optic phantom dosimeter is measured using a photo-multiplier tube.

We measured the relative depth doses of 6 MV photon beam using the 1-D fiber-optic phantom dosimeter, and the results are compared with those measured using EBT films.

Keywords : phantom dosimeter, organic scintillator, optical fiber, photon beam

서 론

방사선 치료를 위한 고 에너지 광자선은 표면선량 (surface dose)이 낮고, 표면에서부터 최대선량 깊이까지 선량이 급격하게 증가하는 선량보강영역(build-up region)을 형성시킨다[1]. 급격한 선량변화의 특성을 가지는 선량보강영역에서 선량 측정에 사용되는 이상적인 선량계는 물과 등가인 성질(water-equivalence)을 가지고, 급격한 선량 변화에 대하여 정확한 측정이 가능하며, 높은 공간 분해능을 가지는 감지부(sensing part)로 구성되어야 한다[2].

일반적으로 방사선 흡수선량(absorbed dose) 측정에 널리 사용되고 있는 이온전리함(ionization chamber)의 경우, 정확한 선량을 측정할 수 있지만 센서의 두께가 10 mm로 상대적으로 크므로 표면선량을 측정할 수 없는 단점을 가지고 있다. 반면에 EBT 필름은 타 선량계와 비교하여 0.2 mm로 높은 공간분해능 가지나, 재사용 및 실시간 측정이 불가능하다는 단점이 있다[3-4]. 이에 따라 최근에는 물과 등가인 성질을 가지며 소형으로 제작이 가능한 유기섬광체(organic scintillator)와 광섬유를 사용하는 섬광체-광섬유 선량계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[5].

섬광체-광섬유 선량계는 유기섬광체, 광섬유 그리고 광 계측장비로 구성된다[6]. 유기섬광체는 부피가 매우 작아 높은 공간 분해능을 가지고, 물과 등가인 성질을 가지므로 복잡한 보정작업을 필요로 하지 않으며, 선량율(dose rate)에 대하여 선형적인 응답을 갖는다. 또한 광섬유는 방사선 치료환경에서 전자기파의 영향을 받지 않으며, 섬광신호의 원거리 전송이 가능하다는 장점을 갖는다. 광 계측장비로는 미약한 빛에도 감도가 우수한

* 380-701 충북 충주시 단월동 건국대학교 의료생명대학 의학공학부
전화 : 043-856-0976, Fax : 043-851-0620, E-mail : bslee@kku.ac.kr

광증배관(photo-multiplier tube, PMT), 빛에 대한 고속 응답을 가지고 감도 파장이 넓은 포토다이오드(photodiode), 광 신호를 이미지화 할 수 있고 다채널 측정이 용이한 전하결합소자(charge coupled device, CCD) 등을 주로 사용한다. 이와 같은 섬광체-광섬유 선량계는 0.5 mm 이하의 높은 공간 분해능을 가지는 센서로 제작이 가능하며, 다수의 광섬유 선량계를 다차원으로 배열하여 한 번의 측정만으로도 선량보강영역에서 선량분포를 다차원으로 측정할 수 있는 팬텀선량계(phantom dosimeter)로의 제작이 가능하다.

본 연구에서는 치료용 광자선의 상대깊이선량(relative depth dose) 계측을 위하여 4개의 섬광체-광섬유 센서로 구성된 1차원 팬텀선량계를 제작하였다. 각각의 광섬유 선량계는 1 mm 두께의 정방형(square) 유기섬광체와 광섬유를 사용하였고 각 센서에서 발생하는 간섭신호를 최소화 하기위해 검은색 폴리염화비닐(polyvinyl chloride, PVC) 필름을 격막(septum)으로 사용하였다. 그리고 제작된 팬텀선량계를 이용하여 선량보강영역에서의 표면 및 상대깊이선량을 측정하였고, EBT 필름을 이용한 측정 결과와 비교하였다.

실험재료 및 방법

본 연구에서 제작된 1차원 광섬유 팬텀선량계의 감지부는 유기섬광체와 플라스틱 광섬유 그리고 격막으로 구성된다. 유기섬광체는 원자번호가 낮은 물질로 구성되며 두께가 1 mm인 정방형 유기섬광체(BCF-12, Saint-Gobain Ceramic & Plastics, Inc.)를 사용하였다. BCF-12는 435 nm의 최대 방출파장과 3.2 nsec의 감쇄 시간(decay time)을 갖는다. 광섬유 팬텀선량계 제작에 사용되는 플라스틱 광섬유(BCF-98, Saint-Gobain Ceramic & Plastics, Inc.)는 두께가 1 mm인 정방형 광섬유이다. 광섬유의 코어(core)와 클래딩(cladding)은 각각 폴리스티렌(polystyrene)과 아크릴(acrylic)로 이루어져 있으며, 굴절율은 각각 1.60, 1.49이다. 마지막으로 광섬유 팬텀선량계 내에서 발생하는 광 신호의 간섭 최소화를 위하여 격막으로 검은색 PVC 필름을 사용하였다.

제작된 1차원 광섬유 팬텀선량계의 감지부로부터 발생한 섬광 신호를 광 계측장비까지 전달하기 위해 원거리 전송용 원형(round) 플라스틱 광섬유를 사용하였다.

사용된 광섬유(SH-4001, Mitsubishi Inc.)는 직경이 1 mm이며 계단형 굴절율(step-index)을 갖는 멀티모드(multi-mode) 광섬유이다. 광섬유의 코어와 클래딩은 각각 폴리메틸메타크릴레이트(polymethylmethacrylate, PMMA)와 불소 중합체(fluorinated polymer)로 이루어져 있으며, 굴절율은 각각 1.492, 1.402이다. 광섬유의 개구수(numerical aperture, NA)는 0.510이다.

광 계측기로는 광증배관(H5784, Hamamatsu Photonics K.K. Co.)을 사용하였다. 광증배관은 420 nm에서 최대 응답파장을 가지며 106의 신호 이득(gain)을 갖는다.

치료용 광자선(photon beam)은 의료용 선형가속기(CLINAC 2100C/D, Varian)에서 발생하는 6 MV 에너지의 광자선을 이용하였다.

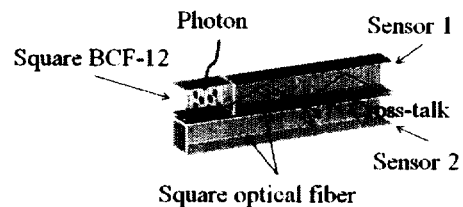


Fig. 1. Structure of the sensing part to measure cross-talk between two sensors

광섬유 팬텀선량계는 여러 개의 섬광체-광섬유 센서로 구성되어 있기 때문에 센서 사이에서 발생하는 섬광빛(scintillation light)의 간섭을 최소화 하여야 한다. 그림 1은 두 개의 센서 사이에서 발생하는 섬광빛의 간섭을 측정하기 위한 광섬유 팬텀선량계의 감지부 구성을 보여준다. 섬광빛의 간섭을 측정하기 위해서 섬광체와 광섬유로 구성되어 섬광빛과 체렌코프 빛(Cerenkov light)이 함께 발생하는 센서-1과 광섬유를 사용하여 체렌코프 빛만 발생하는 센서-2를 제작하였다. 일반적으로 체렌코프 빛은 하전입자가 어떠한 투명한 매질 속에서 빛보다 빠른 속도로 움직일 때 발생하는 빛이다 [7].

그림 2는 두 센서 사이에서 발생하는 간섭신호의 측정결과를 보여주고 있다. 센서-1에서 발생하는 섬광빛을 1이라고 할 때, 센서-2에서 발생된 체렌코프 광량은 0.04로 측정되었다. 하지만 두 개의 센서를 포개어 놓고 간섭신호를 측정한 결과, 센서-2에서 발생된 광량은 0.25로 측정되었다. 이는 센서-1과 센서-2 사이에서 빛의 간섭이 발생한 결과로 판단되며, 두 센서 사이에 발생하는 간섭신호는 약 0.21인 것을 확인할 수 있다.

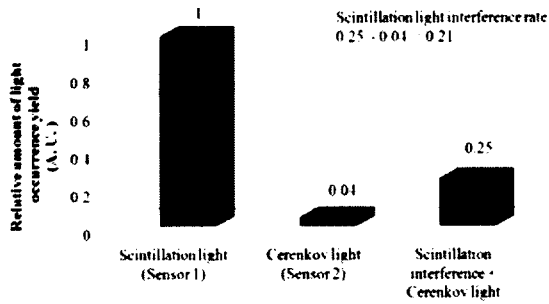


Fig. 2. Measurements of cross-talk between two sensors

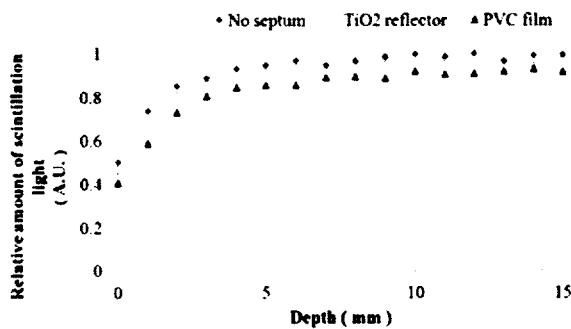


Fig. 3. Relative amount of scintillating light according to the various kinds of septa

그림 3은 검은색 PVC 필름과 이산화 타이타늄(titanium dioxide, TiO₂) 반사체를 격막으로 사용한 경우와 격막이 없을 경우, PMMA 팬텀의 깊이에 따라 측정된 광량을 보여준다. 선량계의 센서 사이에 격막이 없을 경우 가장 많은 광량이 발생하였으며, 검은색 PVC 필름을 격막으로 사용하였을 때 가장 적은 광량이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 격막이 없는 감지부에서 센서 사이의 간섭이 가장 크고, PVC 필름을 사용했을 경우 간섭이 가장 적은 것을 의미한다. PVC 필름은 두께가 0.1 mm로 얇으며, 물과 등가인 성질을 가지므로 광섬유 팬텀선량계의 격막으로 적합하다.

본 연구에서는 격막물질의 유무 및 종류에 따른 실험 결과에 따라 PVC 필름을 이용하여 4개의 센서를 가지는 1차원 광섬유 팬텀선량계를 제작하였다. 제작된 1차원 광섬유 팬텀선량계의 정방형 유기섬광체와 정방형 광섬유의 접합부는 여러 종류의 연마지(polishing pad)를 이용하여 연마하였으며, 광학용 에폭시(optical epoxy)로 결합하였다.

그림 4는 1차원 광섬유 팬텀선량계를 이용하여 고 에너지 광자선의 상대깊이선량을 측정하기 위한 실험구성

을 보여주고 있다. 치료용 6 MV 에너지의 광자선이 광섬유 팬텀선량계에 조사되면 감지부에서 발생된 섬광빛은 20 m 길이의 원형 플라스틱 광섬유를 통해 광증배관으로 전송되고, 광증배관의 출력신호는 신호수집장치(DAQ board, NI 6259, National instruments Inc)를 거쳐 컴퓨터로 디스플레이 및 저장된다.

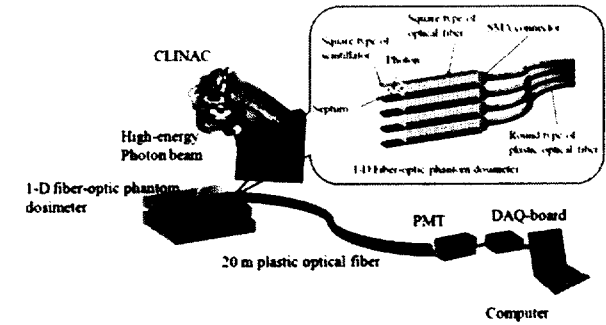


Fig. 4. Experimental setup for measuring relative depth dose using the phantom dosimeter

실험 결과

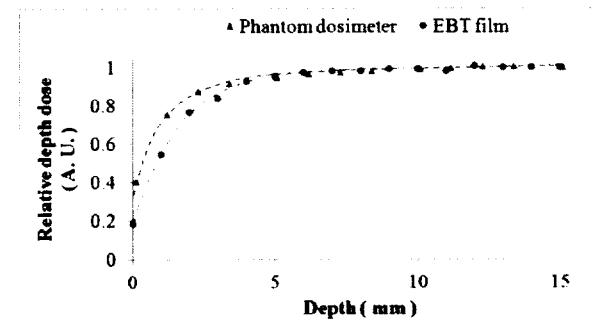


Fig. 5. Relative depth doses obtained with the phantom dosimeter and the EBT films

그림 5는 광섬유 팬텀선량계를 이용하여 측정된 광자선의 표면 및 상대깊이선량 결과를 보여준다. 실험결과, 6 MV 광자선 선량보강영역의 최대선량깊이인 15mm에서 최대값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 피부 표면에서 측정된 표면선량의 차이는 광섬유 팬텀선량계와 EBT 필름의 두께 차이로 인한 것으로 판단된다.

그림 6은 EBT 필름과 광섬유 팬텀선량계에서 측정된 표면선량의 차이를 보여주고 있다. 표면선량(0 mm)에서 약 22%의 차이가 발생하였으며, 측정 깊이의 증가에 따

라 두 선량계에서 측정된 값의 차이가 줄어드는 것을 확인 하였다. 일반적으로 표면선량은 선량계의 공간분해능에 의존하므로 0.2mm의 두께를 가지는 EBT 필름의 경우 1 mm의 두께를 가지는 광섬유 팬텀선량계보다 더 낮은 표면선량을 갖는 것을 확인할 수 있다.

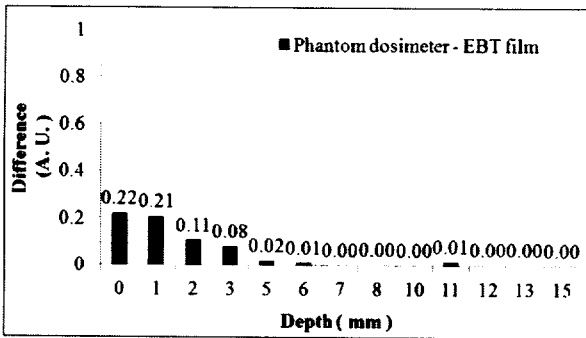


Fig. 6. Differences between relative depth doses obtained with the phantom dosimeter and the EBT films

결 론

방사선 치료를 위한 고 에너지 광자선은 표면선량이 낮고, 피부표면에서부터 최대선량 깊이까지 선량이 급격하게 증가하는 선량보강영역을 형성시키므로 신중한 치료 계획이 필요하다. 본 연구에서는 급격한 선량변화에 선형적인 응답을 가지는 유기섬광체와 플라스틱 광섬유 그리고 PVC 필름 격막을 사용하여 1 mm의 높은 공간분해능을 가지는 1차원 광섬유 팬텀선량계를 제작하였다.

광섬유 팬텀선량계와 EBT 필름을 사용하여 6 MV 광자선의 선량보강영역에서 상대깊이선량을 측정된 결과, 표면선량을 제외한 상대깊이선량이 거의 일치하는 것을 확인하였다. 표면선량의 경우, 팬텀선량계와 EBT 필름의 공간분해능 차이로 인하여 약 22%의 차이가 발생된 것을 판단된다.

앞으로의 연구 방향은 섬광체 센서를 사용하여 광자선의 선량보강영역을 한 번에 측정할 수 있는 다채널 광섬유 팬텀선량계를 개발하는 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(20110004711).

참 고 문 헌

- [1] F. M. Khan: The Physics of Radiation Therapy, Williams & Wilkins, Maryland, USA (1984) 323-332
- [2] D. J. Manson, D. E. Velkey, J. A. Purdy and G. D. Oliver: Measurement of surface dose using build-up curve obtained with extrapolation chamber, Radiology, 115: 473-474 (1975).
- [3] B. M. Rogina and B. Vojnovic: Application of optical fiber sensors for radiation dosimetry, Radiat. Meas. 26: 599-602 (1996).
- [4] T. Aoyama, S. Koyama, M. Tsuzaka and H. Maekoshi: A depth-dose measuring device using a multichannel scintillating fiber array for electron beam therapy, Med. Phys., 24: 1235-1239 (1997).
- [5] D. Letoumeau, J. Pouliot and R. Toy: Miniature scintillating detector for small field radiation therapy, Med. Phys. 26: 2555-2561 (1999).
- [6] A. S. Beddar, T. J. Kinsella, A. Ikhlef and C. H. Sibata: A miniature scintillator-fiberoptic-PMT detector system for the dosimetry of small fields in stereotactic radiosurgery, IEEE Trans. Nucl. Sci. 48: 924-928 (2001).
- [7] M. Takiue, Y. Yoshizawa and H. Fujii: Cerenkov counting of low-energy beta-emitters using a new ceramic with high refractive index, Appl. Radiat. Isot. 61: 1335-1337 (2004).

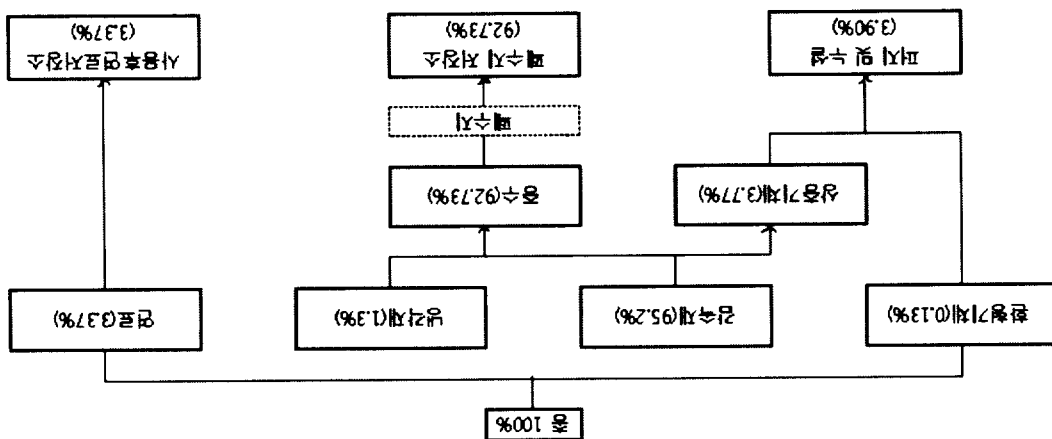
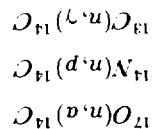


Figure. 1 ¹⁴C production rates in the systems at PWR [1]

2.1 원형원전 내 ¹⁴C 발생원

¹⁴C는 원형 원전 계통 내에서 다음과 같은 중성자 포획반응으로 생성된다.



¹⁴C 이 많이 발생시키는 구역은 열중성자 속이 꽂아 표적원자와 반응이 잘 일어나는 감속재, 1차측 열수송계통, 핵연료, 및 원형기체계통이다. 발생된 ¹⁴C는 정화장치를 통해 제거되지만, 일부가 환경으로 배출된다. Fig. 1은 중성자의 각각의 계통에서 ¹⁴C 생성률을 보여준다.

a) 감속계통

원형 원전에서는 원자로 내부 상중기체인 헬륨가스를 이용하여 감속재의 임력을 제어한다. 헬륨가스와 냉각수 헬륨 원전에서는 원자로 내부 상중기체 외에도 중수 증기, 원소, 중수소 등이 섞여 있으며, ¹⁴C의 일부가 ¹⁴CO₂ 형태로 변해 섞여 있다. 중수소는 북반성 기체가 기 때문에, 일정 농도 이하로 제한해야 한다. 따라서 중수소 농도가 증가하면 농도를 줄이기 위해 헬륨가스를 주입하고, 기체 폐기물은 연료(Stack)를 통해 상중기체와 함께 방출시킨다.

d) 핵연료

핵연료 펠렛은 지르콘로이 피복재로 둘러 쌓여있는데, 이 피복재 안에는 핵연료와의 마찰을 줄이기 위해서 헬륨 원종이 피막되어 있다. 또 내부에는 중성기체로서 질소가 들어가 있어서, 이 질소가 중성자 포획반응을 일으킨다. 중수소에는 상당한 연료종이 장차되어 있는데 이 연료종 피복재에는 핵연종이 피막되어 있어 상당한 ¹⁴C가 발생한다. 이 때문에 Table. 1에서 보듯이, 핵연료 계

c) 원형기체계통

중수소의 임력과 관련된 클러드리아 사이에 있는 공간에 원소나 탄소는 체우는데 이를 원형기체라고 한다. 원형기체는 임력관 내에 충전되어 있는 냉각재의 열이 클러드리아 관련 외부에 있는 감속재로 전달되는 것을 막는다. 과거에는 원소를 사용하여 열전달을 막았으나, 원소가 방사화 반응을 일으켜 다량의 ¹⁴C를 생성하기 때문에 현재는 이산화탄소를 이용하고 있다. 그렇지만 여전히 ¹³C 이 표적원자가 되어 ¹⁴C를 생성하고 있다.

b) 1차측 열수송계통

1차측 열수송계통은 감속재와 마찬가지로 중수물이 용하여 핵연료의 열을 냉각하는 냉각재 계통이다. 이 계통은 핵연료로부터 얻은 열에너지의 2차측 열수송계통에 전달하는 역할을 한다. 1차측 열수송계통에 존재하는 중수소의 총 무게는 약 205톤이지만, 중성자 속이 꽂은 지역에 존재하는 중수의 양은 총 무게의 3.1%에 불과하다. 그러므로 중성자 포획반응도 3.1% 일어난다고 가정할 수 있다[2].

원자력 발전소의 C-14 처리

기술 및 저감방안 고찰

이정민 · 문추현

원자력 발전 연구부

경북 경주시 석강동 707 동국대학교(경주)

Review of Technologies for Processing and Methods for Reducing C-14 at Wolsung Nuclear Power Plants

Jung Min Lee and Joo Hyun Moon

College of Energy & Environment

Dongguk University Gyeongju Campus 707,

Sekyong-Dong, Gyeongju, Gyeongangbuk-Do,

Korea 780-714

요약

Safe disposal of radioactive waste is one of the critical issues for the sustainable use of nuclear energy in generating electricity. For this, reduction in the volume of radioactive waste for final disposal is very important under the situation where the storage space is restricted. C-14 is a radionuclide with a half-life of 5,730 years, which causes problems in handling the radioactive wastes including it and then in reducing the volume of the wastes due to its radiological and chemical properties. Hence, this study reviewed the current status of technologies for processing and methods for reducing C-14 in the radioactive wastes at Wolsung nuclear power plants.

Key words : nuclear energy, radioactive wastes, C-14

1. 서론

원자력 이용이 확대되면서 방사성 폐기물의 안전관리는 원전의 지속적 이용을 위한 필수조건이다. 원전 가동에 따라 방사성폐기물 누적량도 증가하여, 최종처리 비용이 원전 부지 내 방사성폐기물 보관시설을 운영하는데 큰 어려움과 함께 있다. 장기간의 핵융합 실험은 폐기물은 편감기가 쉽기 때문에 중·저준위 방사성폐기물 처리 시설로 이동할 수 없어, 원전 부지 내 보관시설에 오랜 기간 저장해 두어야 하기 때문에 보관시설 운영에 큰 부담이 되고 있다.

원전 부지 내 방사성폐기물 보관시설 운영에 가장 큰 어려움은 방사성폐기물 장기간의 핵융합 실험이다. C-14는 반감기가 5,730년이며, ¹⁴N으로 붕괴하면서 최대 0.156 MeV의 베타(β) 입자를 방출한다. C-14는 우주선에 의해 생성되어 자연에 광범위하게 분포하고 있다. 유기물 형태로 순환하면서 식품에 고정되고, 식품을 통해 사람에게로 유입된다. 이렇게 섭취된 C-14는 혈액을 통해 체내를 순환하는데, 생물학적 반감기는 40일이다. 하지 않는다면 체내에는 C-14이 계속 잔류하고 있기 때문에, 주요 관리대상이 되고 있다.

원전 계통에서 발생하는 C-14 중 생성량 중 약 1.71%가 환경으로 방출되고 있다. 원전 특성상, 경수로는 C-14이 더 많이 발생한다. 조사에 따르면, 경수로보다 증수로에서 C-14이 약 5~6배 더 많이 방출된다[1]. 이 때문에 각국에서는 증수로에 대한 C-14의 감시를 더 철저하게 하고 있다. 따라서 원전에서는 증수로 4기가 위치한 원전의 C-14 처리 기술 및 저감방안을 살펴보고자 한다.

2. 결론

국내 가동 원전 중 월성원전 1~4호기는 증수로이고, 나머지는 모두 경수로이다. 증수는 경수에 비해 5~6배 정도 많은 C-14를 방출한다[1]. 이는 증수로에서 증수(D₂O)를 이용하고 있기 때문인데, 증수에 포함된 ¹⁷O 이 동위원소의 표적원자가 되어 C-14를 생성하기 때문이다.

통에서의 ^{14}C 생성율이 감속재 다음으로 많이 발생한다.

발생원	생성율(%)	제거율(%)	방출률(%)
감속재	95.25	91.43	3.17
핵연료	3.37	0.00	0.00
1차열전달	1.30	1.30	0.13
환형기체	0.13	0.00	0.00

Table. 1 Production, removal and release rates of ^{14}C in the PHWR[3]

2.2 ^{14}C 의 제거기술 현황

Fig. 2는 월성원전에서 ^{14}C 의 제거과정을 단순하게 표현한 것이다.

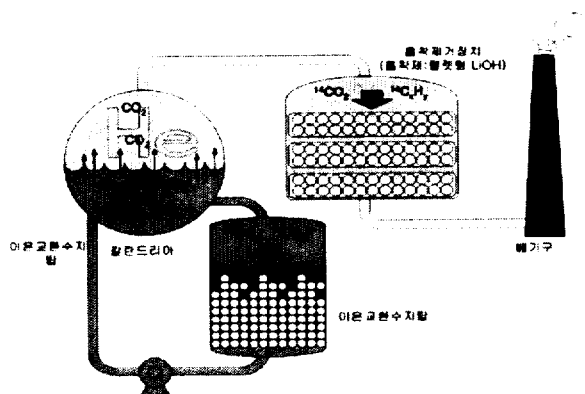


Figure. 2 Principle to remove ^{14}C [4]

현재 월성 원전에는 ^{14}C 을 제거하기 위해 7~9개의 이온교환수지를 사용한다. 이온교환수지는 액체폐기물을 처리하는데 많이 이용된다. 액체폐기물에 포함된 ^{14}C 핵종을 제거하기 위해, IRN-150 이온교환수지(양이온, 음이온 이온교환수지를 동일 당량비로 혼합한 수지)를 주로 이용하고 있다.

참고문헌[2]에 따르면, 월성원전에서 사용 중인 IRN-150 이온교환수지의 HCO_3^- 의 최대 흡착량은 약 11mg-C/g이며 이온 탈착을 위한 후보용액인 NaOH, NaNO₃, NH₄H₂PO₄의 이온별 수지에 따른 흡착 친화도는 NO₃⁻ > HCO₃⁻ ≥ H₂PO₄⁻로 나타났다. 흡착 친화도가 높을수록 이온교환수지에서 잘 붙으며 그 결과 탈착을 원하는 이온의 탈착이 잘 일어난다. 따라서 NO₃⁻ 이온의

흡착량이 다른 두 이온보다 훨씬 높아 수지로부터 HCO₃⁻ 이온의 탈착이 매우 용이한 것으로 나타났다. 또한 실제 NH₄H₂PO₄ 용액은 HCO₃⁻ 이온의 수지로부터 탈착율은 NaNO₃보다는 낮으나 탈착과 동시에 $^{14}CO_2$ 로 기체화가 잘 일어나 실제 폐수지 처리 시 $^{14}CO_2$ 에 대한 기체화 단계가 필요가 없는 편리성을 가진다는 결론이 나왔다. 즉, ^{14}C 의 수지로부터 제거 및 $^{14}CO_2$ 기체화에 의한 핵종 농축에 유리할 것으로 판단된다는 결론을 도출했다[2].

^{14}C 는 계통 내 pH 특성 때문에 각 계통마다 여러 가지 이온형태로 존재한다[5]. Fig. 3은 계통 내 존재하는 주요 이온들의 분포를 보여준다. Fig. 3에 따르면 감속재 계통에서는 H₂¹⁴CO₃(탄산) 과 H¹⁴CO₃⁻(중탄산이온) 비율이 높다. 감속재가 이온교환수지탑을 통과하면, 이들 이온이 수지 작용기인 H⁺와 OH⁻ 이온으로 전환되어 정화된다[3]. 이때 감속재의 pH가 7이상까지 상승하여 감속재 내 이산화탄소와 H₂¹⁴CO₃의 농도가 감소하고 H¹⁴CO₃⁻의 농도는 높아진다. 이것들은 음이온 교환수지에 의해 제거되는 비율을 증가시킨다.(이는 H¹⁴CO₃⁻ 이온의 수지 친화력이 좋기 때문이다.). 또한 pH가 10~11로 운전되는 1차측 열수송계통에서 ^{14}C 은 H¹⁴CO₃⁻이나 CO₃²⁻(탄산이온)의 형태로 많이 존재한다. 이 계통 내 탄소는 주로 정화계통에 설치된 음이온 교환수지에 의해 100% 제거되어, 폐수지와 함께 처분장으로 운반되어 저장된다.

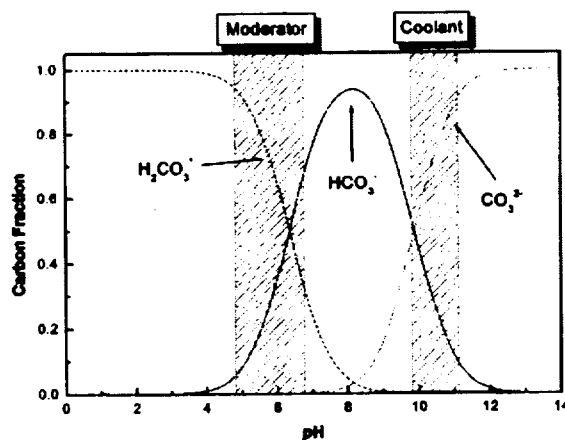


Figure. 3 Distribution of carbon chemical species with solution for the PHWR[5]

^{14}C 는 기체 폐기물로도 방출된다. Fig. 2에서 보듯이 상층기체에 섞여있던 $^{14}\text{CO}_2$ 기체가 중수소와 함께 연돌(Stack)을 통해 빠져나가게 되는데, 배기구에 설치된 흡착 제거장치에 의해 제거된다. 즉, 펠렛 형 고효율 고체 흡착제인 LiOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 충전된 세정기를 통과시켜 흡착 처리한다. 그러면 $^{14}\text{CO}_2$ 와 흡착제의 반응으로 안정한 금속 탄산염이 만들어지는데, 이것을 폐수지와 함께 처분장으로 보내 보관한다.

2-3 ^{14}C 배출 저감방안 현황

다음은 ^{14}C 저감 방안이다.[1]

- (a) 감속재 계통에서 90%이상 발생되므로 이 계통의 지속적인 감시 필요
- (b) ^{14}C 방출량 증가는 이온교환수지의 교체 주기와 직결되므로 주기적인 관리 필요
- (c) ^{14}C 발생 메커니즘 억제
- (d) 원자로 계통 및 저장탱크 상층 기체인 CO_2 기체 사용을 가급적 억제

사실 중수를 이용하는 감속재나 1차측 열수송계통에서 ^{14}C 생성을 억제하는 것은 한계가 있으므로, 다른 곳에서 줄이는 수밖에 없다. 원전 운전 경험에 따르면, 원전의 적절한 유지보수만으로도 방사성핵종의 방출을 저감할 수 있다는 것을 보여주고 있다. $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 반응을 통해 ^{14}C 을 생성하는 질소는 공기와 함께 원전 내부로 들어오는 질소 또는 원자로 구조물의 부식 방지를 위해 사용되는 질소에 의해 공급된다. 따라서 중수공급탱크에 헬륨가스를 살포하여 질소와 공기를 배기하고 있다. 하지만 여기서 ^{14}C 기체가 배출될 가능성이 생기지만 포집기를 이용하여 98% 제거된다.

^{14}C 저감은 감속재 이온교환수지로 90%이상 이뤄진다. 하지만 수지에 ^{14}C 가 포화되어 더 이상 포집이 불가능할 때 ^{14}C 이 방출될 수 있으므로 수지를 주기적으로 교체해주어야 한다. 월성 원전에서는 현재 이온교환수지의 교체 주기를 약 4,300시간(대략 6개월)에서 3,000시간으로 단축하였다. 또한 감시주기를 월 1회에서 월 2회로 늘려 배출가스 감시를 강화하였다. 원전 계획 예방정비 중에는 원자로가 정지되면서 정화계통도 멈추게 되어 ^{14}C 배출량이 증가한다. 이 때문에 공기가 유

입되는 것을 막기 위해, 감속재의 상층기체는 가능한 정상적으로 작동되게 하며, 원자로 가동 시 유입공기를 배출하기위한 가스제거 운전을 시행하고 있다. 또한 원자로 반응도 조절을 위한 독 물질 주입 시, 감속재 정화계통 운전이 일시 정지되는데, 이때도 독 물질 농도와 수지 성능을 적절히 유지하고, ^{14}C 배출량 감시를 강화하며, 정화계통 운전을 가능한 멈추지 않도록 하고 있다.

상기 방안들은 현재 원전 내에서 현실적으로 사용하는 것들이다. 물론 이들 방안 외에도 다양한 방안들을 고려할 수 있다. 더 좋은 흡착제 개발로 ^{14}C 을 더 많이 흡착시키거나, ^{14}C 을 다른 화학 원소와 반응시켜 다른 안정 물질로 변환시키는 것 등을 고려할 수 있다. 하지만 아직까지 이런 방법들은 실제 적용되지 못하고 있다.

3. 논 의

^{14}C 는 약한 베타입자를 방출하지만, 반감기가 길기 때문에 인체와 환경에 장기간 영향을 줄 수 있다. 원전 사용이 늘어남에 따라 ^{14}C 발생량과 외부 환경으로 방출량도 증가하고 있어 주요 감시대상이 되고 있다. 이러한 문제 외에도 ^{14}C 을 포함한 방사성폐기물이 계속 발생함에 따라, 원전 부지내 방사성폐기물 보관시설의 운영에 어려움을 겪고 있다. ^{14}C 의 반감기가 길어서 장기간 보관을 해야 하는데, 보관시설의 용량은 한정이 되어 있기 때문이다. 이 때문에 원전에서 ^{14}C 의 발생을 줄이고, 발생한 ^{14}C 을 적절히 처리하여 처분대상 폐기물의 양을 줄이기 위한 다양한 기술을 개발하고 있는 실정이다.

^{14}C 는 이온교환수지를 통해 거의 제거 되지만 아쉽게도 단독분리가 아직 불가능하다. 따라서 원전에서는 한 달에 약 20톤의 폐수지로 발생되고 있을 만큼, 상당한 양의 폐기물이 발생하고 있다. 그러나 ^{14}C 의 반감기가 길기 때문에 중·저준위 방사성폐기물시설로 운반이 제한되고 있고, ^{14}C 폐기물을 보관할 수 있는 원전 부지내 보관공간은 턱없이 부족하다. 따라서 ^{14}C 폐기물의 부피 최소화는 원전의 지속적 가동을 위해서는 반드시 풀어야할 숙제와도 같다.

이에 따라 본 논문에서는 중수로 4기가 위치한 월성 원전의 ^{14}C 처리기술 및 저감방안을 검토하였다.

월성 원전에서는 ^{14}C 을 제거하기 위해 7~9개의 이온 교환수지를 사용하고 있었다. 액체폐기물에 포함된 ^{14}C 핵종을 제거하기 위해, IRN-150 이온교환수지를 주로 이용하고 있다. 상층기체에 섞여있는 $^{14}\text{CO}_2$ 기체가 외부로 방출되기 전에, 배기구에 설치된 흡착 제거장치를 이용해 제거하고 있다. 이와 함께, (a) 감속재 계통에서 90%이상 발생되므로 이 계통의 지속적인 감시, (b) ^{14}C 방출량 증가는 이온교환수지의 교체 주기와 직결되므로 주기적인 관리, (c) ^{14}C 발생 메커니즘 억제, (d) 원자로 계통 및 저장탱크 상층 기체인 CO_2 기체 사용을 가급적 억제 등을 통해 ^{14}C 의 발생을 억제하고 있다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 원자력대학생논문연구사업의 지원을 받았습니다.

5. 참고문헌

- [1] 한국전력공사 전력연구원 원자력연구실 방사선 화학 그룹: 국내외 원전의 C-14 관리동향 및 저감기술, 32 (2005)
- [2] 한국전력공사 전력연구원: 중수로 환경방출 방사성 이산화탄소 제거장치 개발(최종연구보고서), 143 (2004)
- [3] 이갑복: 국내원전 주변 H-3 및 C-14 섭취선량 평가 경로인자 해석, 142 (2005)
- [4] 양양희 외: 대한 방사선 방어학회, 이경호 경수로 원전 사용후 연료저장조수 내의 14C 거동 특성 평가, 2 (2009)
- [5] 한국수력원자력: IRN-150 혼상수지의 이온 흡착특성 및 폐수지로부터 탈착용액을 이용한 C-14핵종의 제거 특성, 12 (2006)
- [6] 신진명 외: 방사성탄소 및 이산화탄소 포집재, 그 제조방법 및 이를 이용한 포집 방법, 8 (2005)

