

해체 구조물의 방사화 분포 연구

박희성*, 홍상범*, 이근우*, 정종헌*, 진성일**
*한국원자력연구소 원자력 연구시설 해체 기술개발
**충남대학교 정보통신공학부 컴퓨터공학과
e-mail : parkhs@kaeri.re.kr

A Study of Radiation Distribution for Dismantling a Nuclear Facility

Hee-Seong Park*,
Sang-Bum Hong*, Kyne-Woo Lee*, Chong-Hun Jung*, Seong-Il Jin**

*Dept. of D&D Technology R&D Division, KAERI
**Dept. of Computer Science, Chungnam National University

요 약

연구로 및 원자력 시설의 해체 공정 절차 수립과 해체 시나리오 선정에 기초 자료를 제공하고자 컴퓨터 그래픽스를 응용한 방사화 분포 가시화 연구가 수행되었다. 해체 전 시료 채취와 핵종 분석을 통해 방사능 자료가 확보된 연구로 2 호기 조사실(Exposure Room)과 조사실 주변의 콘크리트 차폐체(Concrete Shielding)를 대상으로 방사화 분포 가시화 실험이 이루어졌다. ⁶⁰Co 에 오염된 조사실의 벽면과 콘크리트 차폐체의 깊이 별로 조사된 방사능 농도 값을 기초로 하여 이들 구조물을 3 차원으로 모델링 한 후 Contour mapping 을 수행하여 방사화 분포 가시화를 완료하였다. 방사능 정도를 가시화 한 결과와 콘크리트 차폐체 깊이에 따라 지수 함수적으로 감소하고 있었던 결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 연구 결과 자료는 향후 해체 활동 중 방사선에 노출되는 작업자의 피폭선량 평가 모델에 중요한 역할을 수행할 것이다.

1. 서 론

연구로 및 원자력 시설 해체의 최대 현안 문제는 시설물을 해체할 때 방사선의 노출로부터 작업자의 안전성과 해체 공정의 경제성을 최적화 시키는 데 있다. 한국원자력연구소는 2000 년 11 월에 정부로부터 서울 공릉에 위치한 연구로 해체 승인을 얻어 연구로 2 호기 해체를 완료하였으며, 현재는 연구로 1 호기를 해체 하고 있다.

수명이 오래된 연구로 및 원자력 시설의 운전 이력과 상세 도면 그리고 해체 기획에 필요한 기초 자료의 부재로 인해 효율적이고 합리적인 해체 전 공정에 대한 계획을 수립하기가 어렵다. 특히 해체 활동 중 방사선원이 나타나게 되면, 초기 해체 기획을 재조정해야 하는 모순을 낳게 되고, 나아가 해체 비용의 과도한 지출을 초래하게 된다. 방사선에

조사된 시설물의 핵종 농도 분포를 3 차원 그래프로 정확히 묘사하므로써 원자력 시설 해체의 원론적인 문제를 해결할 수 있는 방사화 분포 가시화 연구가 수행되었다. 이 연구의 중요성은 방사능에 오염된 시설물을 대상으로 시료 채취와 핵종 분석으로부터 구해진 자료를 시각화 함으로써 해당 시설물에 대한 해체 공정 절차와 시나리오를 선정하는데 기초 자료를 제공해 줄뿐만 아니라 해체 작업자의 안전 의식을 고취 시킬 수 있고, 해체 작업의 효율성을 증진시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

원자력 시설 해체와 관련한 방사화 분포도 가시화 기술을 살펴보면, PWR 원자로를 대상으로 방사화 콘크리트의 재활용 가능성을 연구한 경우[1]와 원자로 계통의 주요 부품들에 대하여 방사능 재고량을 계산한 후 선량 값을 그래프로 처리한 경우

그리고 해체 시설 내부를 3D 컴퓨터 모델로 재연시킨 후 대상물에 대하여 그래프로 표현한 경우[2]등이 있다. 또한 작업자의 피폭선량을 평가하기 위해 가상현실 기법[3]과 3D CAD[4]를 이용하여 방사능 분포를 그래프로 처리한 경우도 찾아볼 수 있다. 그러나 이들 기술들은 방사화된 해체 대상물의 실체를 단순 CAD 로 나타낸 것에 불과하며, 방사화된 구조물의 정체를 규명한 것이 아니기 때문에 연구로와 원자력 시설 해체 계획 시 기초 자료로써 활용할 수 없다는 단점이 있다. 본 연구에서는 콘크리트 차폐체 내부의 방사능 재고량을 예측하기 위해 DD 750 core boring machine 으로 시료를 채취한 후 핵종 분석을 수행했던 연구로 2 호기 내 조사실과 콘크리트 차폐체를 대상으로 방사화 분포도에 대한 가시화 연구를 실험하였다.

2. 방사능 재고량 평가 및 분석

연구로 및 원자력 시설 해체의 방사화 및 표면 방사능 재고량 평가는 이들 시설물을 해체 할 경우 가장 먼저 수행해야 될 선행 과제 중 하나이다. 중성자에 조사된 해체 대상 시설물의 방사성 핵종 농도와 방사능 및 이로 인한 감마 선량은 대상 구성물질에 대한 중성자 방사화 계산으로부터 추정할 수 있다. 방사능 재고량 산정은 원자로 운전기간에 걸친 방사성핵종의 생성과 소멸을 포함하여 많은 종류의 방사성핵종을 계산할 수 있는 ORIGEN2 코드와 계산된 방사능 자료를 활용하여 수송 이론을 이용한 ANISN 나 DOT/DORT 혹은 TORT 코드 그리고 MicroShield 와 같은 점 선원 코드를 이용하여 계산할 수 있다[5]. 그러나 이들 코드들은 기하학적 모델링의 한계와 핵 단면적과 선원항의 균정수화 등에서 발생하는 코드 고유의 불확실성을 포함하고 있어 콘크리트 차폐체 심층부에 존재하는 선원항을 계산하기는 어려운 현실이다. 최근에는 감마 카메라를 이용하여 오염된 시설물에 존재하는 방사선을 측정하는 기술이 개발[6]되고 있지만 콘크리트 차폐체 내부의 농도를 판별하지는 못하고 있다. 현재 연구로 시설의 방사능 분포 재고량은 해체 구조물의 시료를 채취하여 방사능 핵종과 농도를 밝혀내고 있으며, 이 값을 기초로 하여 측정된 방사능 값이 0.4Bq/g 이상은 방사성 폐기물, MDA~0.4Bq/g 은 자체 처분 대상 폐기물 그리고 0.4Bq/g 보다 적은 대상은 비 방사성폐기물로 구분하여 해체 일정 계획을 세우고 있다.

3. 방사화 분포 가시화

가. 방사선 자료 및 핵종 분포

중성자로부터 방사화된 해체 시설의 방사화 분포

가시화를 위해 연구로 2 호기 내에 콘크리트 차폐체로 구성되어 있는 조사실(Exposure Room)을 선정하였다. 조사실은 큰 부피의 기기 또는 시편을 높은 에너지의 중성자 및 감마선 속에서 조사시키기 위해 설치된 시설로 가로 3m, 세로 3.7m, 높이 2.7m 크기로 약 3.4m 두께의 고강도 콘크리트로 차폐되어 있고, 콘크리트의 방사화를 방지하기 위해 내부 벽 및 천장은 약 30cm 의 보론(boron)으로 처리되어 있다. 조사실의 실제 모습을 그림 1 에 나타내었다.

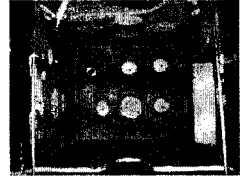


그림 1. 조사실 원형

시료를 채취한 지점은 그림 2 와 같이 바닥을 제외한 29 위치(서쪽(8), 북쪽(7), 동쪽(3), 천정(5), 차폐문(6))에서 측정이 이루어졌다. 차폐체 콘크리트의 중성자 방사화에 따른 핵종은 ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu, ¹⁵⁴Eu 등이 검출 되었다. 방사화 분포도 가시화에 사용된 핵종은 액티비티(Activity)가 가장 높은 ⁶⁰Co 을 선정하였다. 조사실에 대하여 위치별로 측정된 자료를 표 1 에 나타내었다. 또한 천정을 제외한 조사실의 서쪽, 북쪽, 동쪽 및 차폐문의 경우 중성자에 의한 깊이별 방사능 분포를 측정하였다.[7] 콘크리트 깊이 별 측정된 결과를 표 1 에 나타내었다.

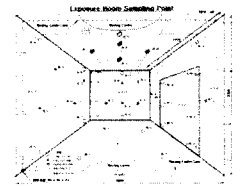


그림 2. 방사선 측정 위치

표 1. 콘크리트 차폐체 벽면 및 깊이별 측정값

위치	측정값				단위 Bq/g					
	동	서	북	차폐문	0	4.5	9.5	10		
(1-1)	0.9142	0.898	0.481	0.597	0.67	0.668	0.713	1.563	1.966	0.96
(1-2)			0.14	0.202						
(1-3)			0.137	0.144						
(2-1)	0.2612	0.49	0.362	0.888				0.39		0.33
(2-2)	0.1157		0.105	0.453						
(2-3)				0.182						
(2-4)				0.076		5	0.147	0.152	0.587	0.871
(2-5)				0.055		9.5		0.106		0.26
(3-1)	0.2894	0.493	0.42	0.771						
(3-2)			0.14	0.207						
(3-3)			0.116	0.154				0.165		
(3-4)				0.063						
(4-1)		0.336	0.345	0.402				0.253		
(4-2)		0.14	0.188	0.108					0.34	
(4-3)				0.053						
(4-4)				0.035						
(5-1)		0.556	0.251	0.343						
(5-2)			0.084	0.084				0.058	0.107	0.134
(5-3)				0.059						
(5-4)				0.029						
(5-5)				0.013						
(6-1)		0.285	0.33	0.315						
(6-2)		0.248	0.11	0.082						
(6-3)				0.012						
(7-1)		0.264	0.33							
(7-2)		0.089	0.105							
(8-1)		0.172								0.097
(8-2)		0.073								
(9-1)										
(9-2)										
(9-3)										
(9-4)										
(9-5)										
(9-6)										
(9-7)										
(9-8)										
(9-9)										
(9-10)										
(9-11)										
(9-12)										
(9-13)										
(9-14)										
(9-15)										
(9-16)										
(9-17)										
(9-18)										
(9-19)										
(9-20)										
(9-21)										
(9-22)										
(9-23)										
(9-24)										
(9-25)										
(9-26)										
(9-27)										
(9-28)										
(9-29)										
(9-30)										

나. 방사화 분포 3D 모델링

연구로 2 호기 조사실 바닥과 천정 및 각 벽면 그리고 차폐문을 둘러싸고 있는 콘크리트 차폐체 내부에 조사된 방사선 분포 가시화는 실험 및 과학적 데이터를 3 차원으로 plotting 해주는 TECPLOT 소프트웨어

어를 사용하였으며, 표 1 에서 제시한 값을 입력 자료로 하였다. 이 값을 기초로 조사실 벽면의 방사화 정도를 구하기 위해 각 벽면을 112 개 노드(node)와 149 개 요소(element)로 구분한 뒤 삼각형 메쉬법(triangulation mesh)으로 모델링 하였다. 노드와 노드 간 측정 데이터가 없는 경우는 inverse-distance algorithm 을 사용하여 구간 별 잔여 방사능 값을 구하였다. 방사화된 조사실의 방사능 분포를 그림 3 에 나타내었다.

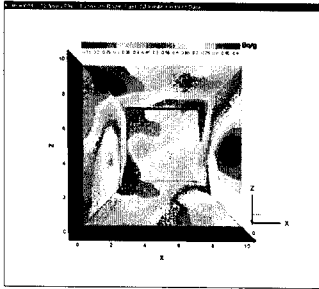


그림 3. 조사실 벽면 방사화 분포

그림에서 보는 바와 같이 동쪽 벽면이 가장 많이 조사되었고, 그 다음으로 서쪽 벽면이 방사화 되었음을 그래프를 통해 알 수 있다. 30cm 크기의 고강도로 구축된 조사실 콘크리트 차폐체 내부에 함유된 방사능을 3 차원으로 표현하기 위해 표 1 의 자료를 이용하여 21 개 노드와 29 개 요소들로 모델링 하였으며, contour mapping 은 조사실 벽면과 동일한 방법으로 설계하였다. 깊이 별 방사능 농도를 쉽게 구별할 수 있도록 12 개의 슬라이스(slice)로 나누어 가시화 시켰다. 콘크리트 차폐체의 깊이 별

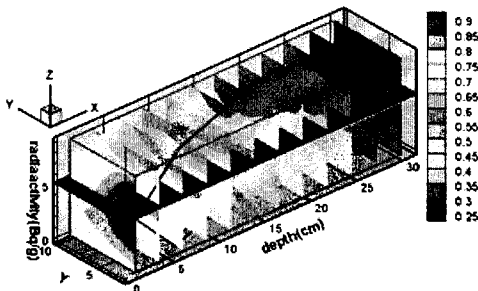


그림 4. 콘크리트 차폐체 깊이 별 방사능 분포

방사능 분포를 그림 4 에 나타내었다. 그림 4 와 같이 방사능 농도가 0.4Bq/g 인 지점에서 깊이 25cm 이상인 경우 해체 시 발생된 폐기물은 모두 비 방사성폐기물로 간 주 할 수 있으며, 25cm

이내인 경우는 방사성폐기물 또는 자체 처분 폐기물로 처리 및 처분 할 수 있을 것으로 본다. 조사실 콘크리트 차폐체 깊이에 따른 ^{60}Co 의 방사능 분포는 그림 5 와 같이 깊이에 따라 지수함수적으로 감소하고 있었는데, 컴퓨터 그래픽을 이용한 방사화 분포 가시화 결과에서도 측정 결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

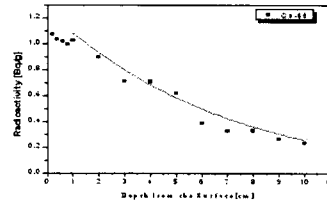


그림 5. 콘크리트 차폐체 시료 채취 측정 분석 결과

4. 결 론

컴퓨터 그래픽스를 응용하여 연구로 시설 해체에 선행되어야 할 방사화 분포 가시화 연구가 수행되었다. 연구로 2 호기의 조사실과 콘크리트 차폐체를 대상으로 30 여년 동안 방사선에 조사된 이력 자료와 시료를 채취 한 후 핵종 분석한 데이터를 이용하여 이들 구조물에 함유된 방사능 농도를 컴퓨터 그래픽으로 처리하였다. 조사실 벽면의 경우 바닥을 제외한 5 개 지점의 29 위치에서 측정된 ^{60}Co 자료를 사용하였으며, 콘크리트 차폐체 내부에 함유된 방사능 분포는 깊이 별로 측정된 자료를 이용하였다. 실험 데이터와 측정치를 3 차원으로 plotting 하는 TECPLOT 소프트웨어를 사용하여 각 벽면과 차폐체 내부를 삼각형 메쉬법으로 모델링 한 후 방사화 분포 가시화를 완료하였다. 가시화를 수행한 결과 시료 채취와 핵종 분석 과정에서 확인되었던 내용과 조사실 벽면의 위치 별로 존재했던 방사능과 깊이 별 기울기 등이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었으며, 3 차원 모델링을 통해 해체 구조물과 방사능 존재를 사실감 있게 표현함으로써 해체 감독자와 해체 작업자들에게 해체 시설물에 조사된 방사화 분포를 정확하게 이해시킬 수 있었다. 방사화 분포 가시화 연구 결과는 해체 작업자의 방사선 노출로부터 안전성을 도모해주며, 해체 공정 계획 및 해체 작업의 효율성을 증진시킬 수 있는 유용한 도구로 활용될 것이다. 또한 방사선에 오염된 해체 공간에서 작업을 하는 작업자의 피폭선량 평가 시스템의 중요한 모듈로 사용될 것이다.

참고문헌

1. Klein M, et al., "The Management of Radioactive Concrete arising from the Dismantling of a Pressurised Water Reactor: The R&D Project on the Recycling of Radioactive Concrete ", International Conference on Radioactive Waste Management and Environment Remediation, ICEM, Vol 2, pp 1009-1014, 2001.
2. Charles E, et al., "Computer Mapping and Visualization of Facilities for Planning of D&D Operations", International Conference on Radioactive Waste Management and Environment Remediation, ICEM, Vol 2, pp 1749-1753, 1995.
3. D J Lee, et al., "Virtual reality for Inspection, Maintenance, Operation and Repair of Nuclear Power Plant(VRIMOR).
4. Rindahl, G., et al., "International Conference on Safe Decommissioning for Nuclear Activities", IAEA, Berlin, 2002.
5. R.J. Morford, "Source Term and Shielding Calculations to Support Decommissioning of Shippingport Reactor," WHC-SA-0206, Westinghouse Hanford Company, 1988.
6. Le Goaller C., et al., "On Site Nuclear Video Imaging", Waste Management 1998, Tucson AZ, Feb 1998.
7. 박진호 외., "원자력 시설 제염 해체 사업", KAERI/RR-2625/2005.