

‘95 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

방사성 핵종 측정 평가를 위한 감마 스캐닝 자동화 장치 개발 및 몬테칼로 핵종 모사 코드 검증

정우태, 고덕준, 이명찬
한국원자력연구소

요 약

방사성 폐기물 드럼 내에 함유된 핵종의 종류 및 농도를 비파괴적으로 평가하기 위하여 드럼이 상하 또는 회전 운동을 하게 한 후 감마선을 검출하는 감마 스캐닝 자동화 장치 및 관련 평가 기술을 개발하였다. 자동화 장치를 컴퓨터로 제어하기 위한 컴퓨터 프로그램은 사용자가 사용하기에 편리하도록 컴퓨터 화면에 나타난 여러가지 기능 키들을 마우스를 사용하여 간단하게 조작할 수 있게 하였다. 또한 본 연구에서 개발한 몬테칼로 전산 코드의 검증 작업도 수행하였다.

1. 서 론

원자력 발전소에서 발생된 방사성 폐기물을 시멘트 등으로 고화하여 200리터 드럼에 장입한 경우 그 드럼의 무게가 약 200-400 Kg으로 작업자가 운반하기가 불가능하며 또한 인체에 유해한 방사선을 방출하는 방사성 폐기물 드럼의 비파괴적 평가를 위해 드럼을 상하 및 회전 운동을 하게 할 수 있도록 하기 위해서는 자동화된 시스템을 구성할 필요가 있다. 자동화 시스템은 드럼을 취급(handling)하는 장치와 드럼을 회전 또는 상하로 이송시키면서 감마선을 검출하는 장치로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 200리터의 고화체 방사성 폐기물 드럼을 대상으로 컴퓨터를 사용하여 드럼을 회전 및 상하로 정밀하게 이송시킬 수 있고 드럼과 방사선 검출기 사이의 거리를 정밀하게 조절할 수 있는 장치를 개발하고 그 장치를 이용하여 감마선 검출 실험을 수행하였다. 감마선 검출 방법을 이용하여 핵종을 측정 평가하기 위한 장치는 미국, 영국 등에서는 여러가지 모델이 상용으로 개발되어 있으나 드럼의 회전 속도, 상하 이송 속도, 감마선 검출기와 드럼간의 거리 등 실험 조건을 여러가지로 바꾸어 가면서 데이터를 얻기에는 불편한 점이 많고 가격 또한 고가여서 자체 제작하여 사용하기로 하였다.

모의 방사성 폐기물 드럼을 제작하여 코발트(Co-60)를 장입한 후 측정된 방사선 검출 실험 데이터와 몬테칼로 모사 코드를 이용한 계산 결과의 비교 검토 및 해석해와 몬테칼로

계산 결과의 비교를 통해 본 연구의 전 단계에서 개발된 몬테칼로 모사 코드의 검증 작업도 수행하였다[1,2,3].

2. 감마 스캐닝 자동화 장치 개발

2.2 장치 개발

현재까지 개발된 감마선 검출 핵종 파고 분석 장치 중 대표적인 것으로 미국 Canberra사에서 개발한 것과 영국 AEA사에서 개발한 것을 들 수 있는데 본 연구에서는 미국 Canberra사의 장치를 모델로 하여 개발하였다. 이 모델은 DC 모터를 사용하여 드럼을 회전 및 상하로 이동시키는 구조로 되어 있다. 본 연구에서는 이러한 기본적인 드럼의 회전 및 상하 이동을 서보 모터를 사용하여 정밀 제어가 가능하게 하였으며, 검출기와 드럼간의 거리도 또한 별도의 서보 모터를 이용하여 제어할 수 있게 하였다. 그림 1에서는 개발된 NDA (Nondestructive Assay) 장치의 개략도를 보여주고 있다.

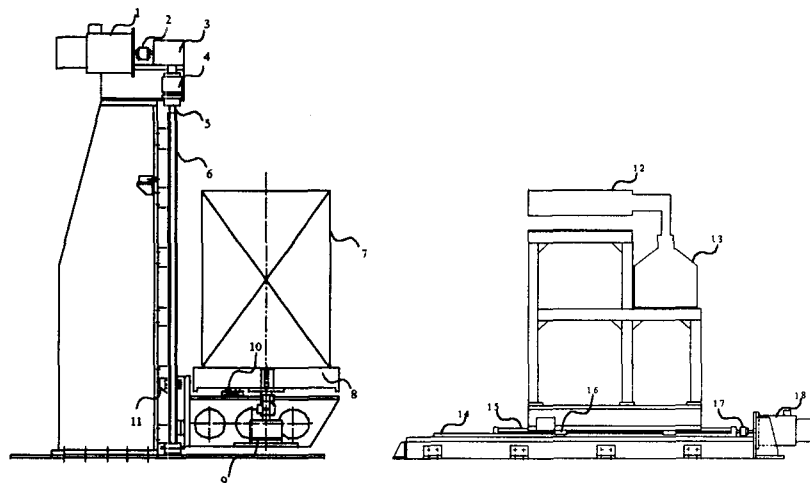


그림 1. 감마선 검출을 이용한 방사성 핵종 측정 평가 장치

장치의 제작에 사용된 모터는 그림 1에서 1, 9, 18로 표시된 출력 1kW 급의 일본 미쯔비시사의 AC 서보 모터 HA-SE102BG를 3대 사용하였고, 서보 모터 드라이버는 미쯔비시사의 MELSERVO-J를 사용하였다. 서보 모터를 제어하기 위한 제어기는 PC에 장착하여 대당 2축까지 제어가 가능한 서보랜드사의 SFH-PC/AT를 2대 장착하여 한대는 그림 1의 장치 본체에 설치된 두대의 모터(1, 9)를 제어하고 나머지 한대로는 검출기의 위치를 제어하기 위한 모터(18)를 제어하는데 사용하였다. 서보 모터 1은 커플링 2 및 감속기 3, 커플링 4를 통해 볼스크류 5를 회전시켜 드럼 7을 상하로 이동하기 위해 사용되었으며, 서보 모터 9는

드럼 7을 회전 운동 시키기 위해 사용되었다. 드럼 7은 원형판 8위에 놓여지며 원형판 8 아래에는 로드셀 10이 장착되어 드럼의 중량을 측정하도록 되어있다.

2.3 장치 제어 프로그램 개발

그림 1에서 보여주는 장치를 컴퓨터로 제어하기 위해 개발된 제어 프로그램은 마우스로 모든 기능을 제어하도록 구성하였다. NDA 장치는 3개의 AC 서보 모터로 제작되었으므로 장치 제어 프로그램도 각각의 서보 모터를 개별적으로 제어할 수 있게 작성하였다. 각 모터를 동작시키기 위해서는 먼저 power on 스위치를 눌러 모터에 전원을 공급하여야 한다. 마우스를 이용하여 화면상에 나타난 power on 스위치를 누르면 컴퓨터에 장착된 디지털 출력 보드를 통해 주전원에 연결된 릴레이가 작동하여 서보 모터에 전기가 공급된다. 이 상태에서 각 모터를 원하는 방향으로 회전 시킬 수 있다. 드럼을 여러 부분으로 나누어 각 부분을 회전 시키면서 감마선을 측정할 수 있도록 회전 운동과 상하 운동을 동시에 일어나게 할 수 있게 하였다. 또한 드럼 장착 후 하나의 버튼만 작동하여 감마 스캐닝 작업을 자동적으로 수행할 수 있는 메뉴도 마련하였다. 상하 및 좌우 이송의 경우 이송량을 화면상에 그래프로 표시하여 컴퓨터 화면만으로 각 장치의 현재 위치도 알 수 있게 하였다.

3. 몬테칼로 모사 코드 검증

3.1 모사 코드 개발

방사성 폐기물 드럼내에 존재하는 핵종에서 방출되는 방사선이 검출기에 검출될 평균 확율을 구하기 위하여 몬테칼로 모사 코드를 개발하였다[1]. 본 연구에서 개발한 몬테칼로 모사 코드는 드럼에서 방출되는 감마선을 추적하였으며, 광자가 드럼내의 매질과 한번 또는 여러번 충돌한 후 검출기에 검출될 확율과 충돌없이 검출될 확율을 동시에 구할 수 있게 하였다.

3.2 모사 코드의 검증 실험

몬테칼로 전산프로그램의 유효성 및 타당성을 검증하기 위하여 Co-60을 감마 선원으로 사용하여 방사선 검출 실험을 수행하였다. 이 실험을 위해 NaI 검출기, 시멘트로 고화 처리한 200리터 드럼(약 300 Kg), MCA(다중 채널 분석기)가 사용되었다. 200리터 드럼(반경 60.2cm, 높이 88.4cm)에는 그림 3에서 보는 바와 같이 실험에 사용할 감마선원의 삽입을 위해 일정한 간격을 두고 드럼의 중심으로 부터 90도의 간격으로 4 방향에 hole을 설치하였다.

자연 방사능의 측정을 위하여 측정 시간은 매회당 10분씩, 10회의 측정을 실시하였다. 실험에서 평균 측정값은 30 cps(count per second) 였으며, 표준 편차는 5 cps 였다.

첫번째 실험(실험 1로 명명)에서는 Co-60 감마 선원은 그림 2에서 사용한 좌표계에서 (0, 0, 68)에 위치시켰다. 이때 드럼의 외부에 위치한 NaI 검출기의 window는 감마선원을 향하도록 (0, 60, 68)에 설치하였다. 이 실험에서 측정을 10회 반복하였으며, 측정 시간은 매회당 10분이었다. 위 실험에서 평균 측정값은 421(cps) 였으며, 평균에 대한 표준 편차는 7 cps 였다.

실험 조건을 달리하여(실험 2로 명명) Co-60 감마 선원을 드럼의 외부 표면으로 부터 20 cm 떨어진 지점인 (0, 10, 68)에 위치시켰다. 이 실험에서도 10회 반복하여 측정하였으며, 측정

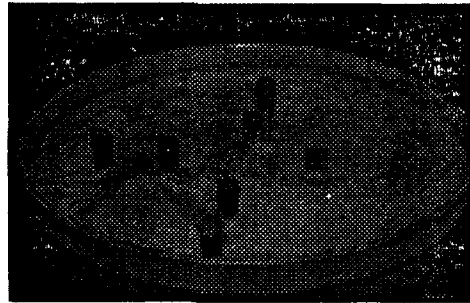
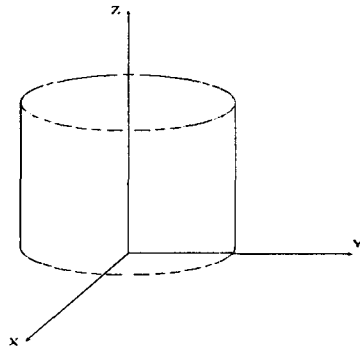


그림 2. 방사성 폐기물 드럼 좌표계 그림 3. 실험용 모의 방사성 폐기물 드럼

시간은 실험 1과 같이 매회당 10분 이었다. 이 실험에서 평균 측정값은 6,834(cps)였으며, 표준편차는 166 cps 였다. 앞의 실험에서 구한 총검출값과 자연방사선 검출값과의 차이로부터 Co-60의 순수 측정값을 구할 수 있다. 실험 1에서 Co-60의 순수 검출값은 391이며, 실험 2에서는 6,804이다.

본 연구에서 개발한 몬테칼로 전산코드를 이용한 모의 실험에서는 Co-60 감마 선원 대신에 한 개의 photon이 드럼내 임의의 한 좌표에 존재한다고 가정하였다. 계산 결과는 감마선이 200리터 드럼내의 매질(matrix)의 핵과 충돌을 일으키면서 드럼 외부에 위치한 NaI 검출기에 측정될 평균 확률(AvgC)과 매질의 핵과 아무런 충돌 반응을 일으키지 않고 NaI 검출기에 측정될 평균 확률(AvgU)로 출력된다. 드럼의 외부에 위치한 NaI 검출기에 의하여 측정되는 총 측정 평균 확률(AvgT)은 AvgC와 AvgU의 합으로 계산한다.

광자의 history 가 100인 경우에, 몬테칼로 코드를 이용한 전산모의에서는 앞에서 실시한 실험 1과 실험 2의 경우, 각각에 대하여 AvgU, AvgC 그리고 AvgT를 계산하였으며, 그 결과는 표 1과 같다.

표 1의 결과에 의하면 실험 1의 경우, AvgU/ AvgT와 AvgC/AvgT의 비율은 각각 7.2 %와 92.8 % 이고, 실험 2의 경우, AvgU/ AvgT와 AvgC/ AvgT의 비율은 각각 10 %와 90 % 이다. 총 측정된 감마선의 약 92.8 % 는 드럼내의 매질(matrix)의 핵과 충돌을 일으켰으며

단지 총 측정된 감마선의 7.2 % 만이 드럼내의 매질을 통과하여 검출되는 동안 매질의 핵과 아무런 반응 없이 진행되어 드럼 외부에 위치한 검출기에 도달함을 보여주고 있다.

실험에 이용된 Co-60 감마선원의 방사능의 세기는 0.86 mCi 이며, 이것은 초당 3.182×10^7 개의 photon을 방출한다. 위의 두가지 실험에서 실험 1에서의 순수 감마선 검출값은 391cps (count per second) 였고, 실험 2의 순수 검출값은 6804cps였다. 표 1에서 보는 바와 같이 광자의 history가 100 인 경우에는 실험 1의 AvgU는 2.3636E-05 이었고, 실험 2의 AvgU는 1.3925E-04 였다. 이 경우도 광자 1개에 대한 전산모의 결과이기 때문에 실제의 실험 결과와

표 1. 몬테칼로 전산모의 결과 (history = 100)

	Avg U	Avg C	Avg T
실험 1	2.3636d-05	3.0669d-04	3.3032d-04
실험 2	1.3925d-04	1.2540d-03	1.3933d-03

비교하기 위하여, Co-60 감마선원의 방사능 세기인 $3.182E+07$ (dps)를 곱하면, 실험 1의 AvgU는 752(cps)가 되고, 실험 2의 AvgU는 4,431 (cps)가 된다. 표 2에 이 결과들을 정리하였다.

표 2. 실험값과 몬테칼로 전산모의값의 비교

	실험값(cps)	Avg U(history = 50)	Avg U(history = 100)
실험 1	391	752	752
실험 2	6,804	4,449	4,431

위의 결과 비교는 전체 검출에서 10 % 정도만이 고려된 AvgU값을 근간으로 하였기 때문에 실험값과 AvgU 값의 상대오차가 -34.6 %부터 92.3 % 다소 크게 나타났다. 이 실험으로 부터 알 수 있는 것은 몬테칼로 계산 결과는 단순히 광자가 드럼내의 매질과 충돌하거나 충돌하지 않고 검출될 확율을 계산하나 MCA를 사용한 실험의 경우 각 에너지별 count수가 얻어지므로 두 경우를 비교하기 위해서는 MCA의 출력 데이터에서 energy band를 얼마로 잡아서 몬테칼로의 코드에서 계산한 Avg U와 비교할 것인가를 결정하여야 하며, 검출기의 검출 효율도 고려하여야 하므로 실험치와 이론치와의 비교를 위한 체계적인 방법의 개발이 필요함을 알 수 있었다.

실험치와 몬테칼로 계산 결과의 체계적인 비교를 위한 방법론의 개발은 향후 과제로 남겨두고 해석해와 몬테칼로 계산 결과를 비교 검증을 시도하였다. 비교 계산의 조건은 Co-60 선원을 (0, 0, 68) 에 위치시킨 경우 (Case 1로 명명) 와 (0, 10, 68)에 위치시킨 경우 (Case 2로 명명)의 두가지를 고려하였다. 두가지 경우 모두 NaI 검출기의 좌표는 (0, 50, 68)이었다. 표

3에서는 두 계산 결과를 표로 보여주고 있다. 아래 계산 결과에서 개발된 몬테칼로 코드의 출력은 해석해와 상당히 근사적임을 알 수 있었다.

표 3. 해석해와 몬테칼로 계산 결과와의 비교표

	Avg U (CPS)	해석해(cps)	상대 오차
Case-1	2,722	2,278	16.3%
Case-2	17,177	18,270	-6.4%

4. 결론 및 향후 연구 과제

실험실 규모 핵종 측정 평가 장치의 하드웨어 제작 및 소프트웨어 개발을 통해 외국 제품에만 의존하던 감마 스캐닝 자동화 장치의 국산화를 위한 기술과 경험을 확보하였으며, 이 장치를 사용하여 감마선 측정 실험을 수행하였다. 감마 스캐닝 자동화 장치는 서보 모터를 사용해 제작하여 정밀 위치 제어가 가능하게 하였고 컴퓨터를 이용하여 장치의 모든 기능을 제어할 수 있게 하였다.

제작된 장치를 사용한 감마선 측정 실험 결과와 몬테칼로 모사 코드의 계산 결과를 비교하여 몬테칼로 모사 코드의 타당성을 실험적인 측면에서 고찰하였다. 모의 방사성 폐기물 드럼을 제작하여 수행한 방사선 검출 실험 결과 실험값은 391cps 였으며 전산 모사 결과는 752cps 였다. 실험 결과와 전산 모사 결과가 다소 차이가 나는 것은 검출 자체의 불확실성과 사용한 시멘트에 대한 정확한 감쇄계수의 부재, MCA의 출력 데이터에서 에너지 band의 폭을 얼마로 할 것인지에 대한 불확실성, 검출기의 검출 효율 등에 원인이 있는 것으로 판단된다. 실험치와 몬테칼로 계산 결과의 단순 비교는 곤란하며 이를 위해서는 보다 체계적인 방법론의 개발이 필요함을 알 수 있었다.

해석해와 몬테칼로 계산 결과의 비교 검증을 위한 두가지 경우의 계산 조건에 대해 상대 오차가 16.3% 및 -6.4%로서 개발된 몬테칼로 코드의 계산 결과가 해석해에 근접하였다.

참고 문헌

- [1] 박헌휘외 다수, “고화체 특성 규명 연구”, 원자력환경관리센터, KAERI-NEMAC/RR-65/92, 1992.
- [2] 박헌휘외 다수, “고화체 특성 규명 연구 제 3권 방사성 핵종의 비파괴적 평가 기술 개발”, 원자력환경관리센터, KAERI/NEMAC/RR-92/ 93, 1993.
- [3] 고덕준, “감마선 방출 핵종 분석 시스템의 최적 설계를 위한 상대질량분해능 기법”, 석사학위 논문, 한국과학기술원, 1995.