

방사성폐기물 드럼 비파괴 검사를 위한 X-ray 장비 평가

박종길, 맹성준, 황태원

한수원(주) 원자력발전기술원, 대전광역시 유성구 장동 25-1번지

gospel77@khnp.co.kr

1. 서론

원전에서 발생된 방사성폐기물 드럼을 영구 처분장에 처분하기 위해서는 드럼 내용물의 물리 화학적 특성이 처분사업자가 제시한 인수요건에 적합한지를 검사해야 한다. 검사해야 할 항목은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 그 중 한 가지는 대표드럼을 선정하고 선정된 드럼내용물의 시료를 채취하여 분석하는 파괴분석 항목이고 다른 하나는 드럼의 내용물의 시료를 채취하지 않고 분석하는 비파괴분석 항목이다. 인수기준 중 파괴분석항목으로는 킬레이트제 농도, 고화체의 침출 지수, 방사선 영향, 압축강도, 유리수, 가스 발생, 부식성, 폭발성 물질 등 유해물질의 존재 유무 및 농도 등이며 비파괴 분석항목으로는 내용물, 빈 공간, 유리수, 압축강도이다. 압축강도와 유리수가 파괴 및 비파괴 항목 모두에 해당하는 이유는 대표시료를 채취하여 파괴적인 방법으로 측정할 수도 있고 비파괴 장비를 사용하여 측정할 수도 있기 때문이다. 비파괴 검사 기술 중 X-ray CT(computed tomography) 기술을 이용하면 드럼내 내용물 파악은 물론 빈공간과 유리수에 대해 정량분석이 가능한 것으로 알려져 있다[1,2]. 본 논문에서는 원전에서 보관하고 있는 드럼들의 특성을 분석하고 검사에 필요한 X-ray 에너지를 계산하여 검사 장비 사양을 결정한다. 그리고 나서 검사방법에 대한 시나리오를 구성하며, 각 시나리오별로 소요되는 비용을 계산하여 경제성 비교를 하고 경제성이 우수한 시나리오들의 적용 가능성 등을 고려하여 최적의 시나리오를 선정한다.

2. X-ray 출력 결정

X-ray 비파괴 검사장비를 이용하여 검사해야 할 내용은 드럼의 내용물, 유리수 정량분석(HIC 드럼의 경우 1 vol.%이하, 기타 드럼은 0.5 vol.% 이하임을 입증), 채움율(85% 이상)이다. X-ray 검사 장비의 사양을 결정하기 위해서는 드럼 종류별로 드럼 사양 및 내용물을 조사하고 드럼을 투과시킬 수 있는 X-ray 출력을 결정해야 한다. 원전별로 보유하고 있는 드럼 종류는 크게 320 L 이하 드럼, 1,200 L 드럼 및 2,000 L 드럼으로 나눌 수 있는데 본 논문에서는 320 L이하의 드럼만 X-ray를 이용하여 검사한다고 가정하고 드럼별 구성 물질을 조사하여 X-ray의 출력별 투과 능력을 계산하였다. 검사체가 복합적인 재료로 이루어져 있을 때 X-ray 투과율은 다음 식으로부터 구해진다.

$$I_n = I_o \exp \left[- \sum_{i=1}^n (\mu_i x_i) \right]$$

여기서 μ_i 는 물질 i 의 선형감쇠계수이고 x_i 는 해당 물질의 두께이다. 투과율을 계산하기 위해 드럼의 구성 물질들에 대한 선형감쇠계수를 구하였다. 복합물질의 선형감쇠계수는 NIST의 웹사이트[3]에 제공되어 있는 질량감쇠 계수에 각 물질의 밀도를 곱하여 계산하였다. 적절한 X-ray 에너지 선정기준은 일반적으로 엑스선 검출기의 신호대 잡음비(S/N) 값을 고려하면 투과율(I/I_o)은 10^{-4} 이상이 되어야 한다.

계산결과 450 KeV X-ray 장비를 이용하여 검사가 가능한 저밀도 드럼 수는 58,992 드럼으로 나타났고 드럼 종류는 DOT-17H(200 L)(가연성 잡고체, 비가연성 잡고체, 탈수 폐수지, 파라핀 고화체), 차폐 잡고체(260 L)(가연성 및 비가연성 잡고체), DOT-17H 재포장(320 L)(가연성 및 비가연성 잡고체, 탈수 폐수지, 파라핀 고화체), 차폐 잡고체 재포장(320 L)(가연성), 초고압 압축 재포장(320 L)(가연성 잡고체, 철재 드럼을 제외한 비가연성 잡고체)로 나타났다. 2~3 MeV X-ray 장비를 이용하여 검사가 가능한 고밀도 드럼 수는 18,502 드럼으로 나타났고 드럼 종류로는 DOT-17H (200 L)(붕산 및 폐수지 시멘트 고화체, 폐필터 드럼), DOT-17H 재포장(320 L)(붕산 및 폐수지 시멘트 고화체, 폐필터 드럼), 초고압 압축 재포장(320 L)(철재)로 나타났다.

3. 검사시나리오 구성 및 경제성 검토

검사 시나리오 구성을 위해 다음과 같이 가정하였다: ① 기 발생 폐기물을 처리한 후에는 고밀도 드럼은 발생하지 않는다, ② 연간 검사대상 드럼 수는 13,000드럼이다, ③ 검사방법은 RTR(Real Time Radiography)로 유리수 및 빈공간 존재 유무를 빠르게 검사하고 상세검사가 필요한 경우에는 CT 검사를 수행한다. 이때 드럼당 소요되는 시간은 RTR 검사 5분, RTR과 CT검

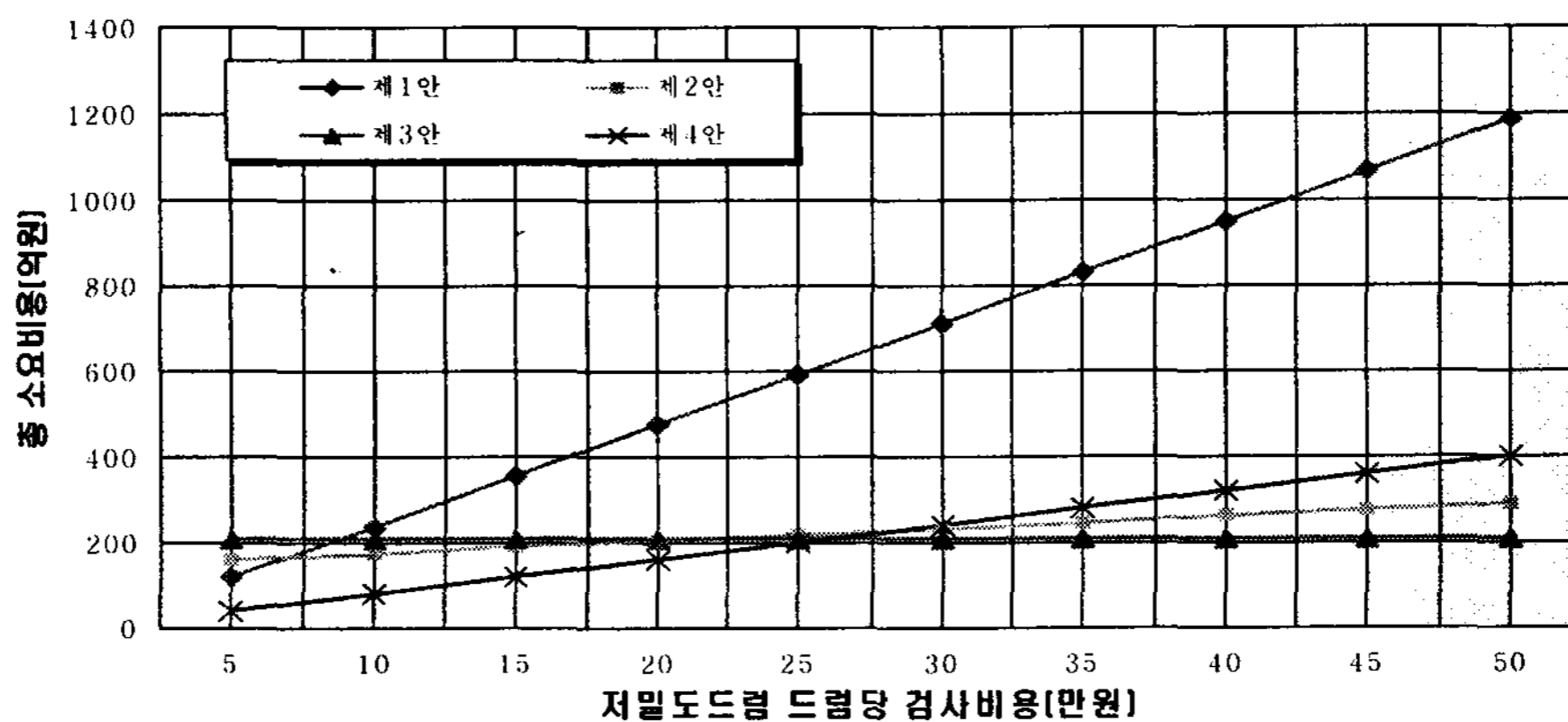
사를 함께 하는 경우는 30분이다, ⑤ 검사에 투입 가능시간은 약 1,664 시간이다(52주 × 0.8(연간 유효작업 분율) × 5일/주 × 8시간/일 = 1,664시간).

연간 검사해야할 13,000드럼을 검사하는데 필요한 X-ray 장비 숫자를 계산하기 위해 CT 검사를 해야 할 드럼 분율에 따라 검사소요시간을 계산하고 연간 장비 사용시간인 1,664시간으로 나누어 소요 대수를 계산하였다. 초고압 압축 재포장 드럼은 유리수나 채움을 측면에서 CT 검사를 할 필요가 없을 것으로 예상되므로 CT 검사 대상 드럼 분율은 50% 이하일 것이다. 따라서 이동식 장비 2대이면 연간 13,000드럼을 검사할 수 있을 것으로 판단된다. 만약 X-ray 설비를 이용하여 드럼내의 내용물만 검사한다면 CT 검사가 필요하지 않을 것이고 RTR 검사만 하게 되면 이동식 장비 1대면 검사가 가능하다.

경제성 분석을 위해 다음과 같은 4가지 시나리오를 구성하였다: ① 제1안 : 모두 외주로 검사한다, ② 제2안 : 이동형 0.45 MeV 장치 2대를 구매하여 검사하고 0.45 MeV로 검사가 되지 않는 드럼은 외주로 검사한다, ③ 제3안 : 이동형 0.45 MeV와 3.0 MeV X-ray 장비를 각 1대 구매하여 자체 검사한다, ④ 모두 외주로 검사하되 과거 발생 폐기물의 검사가 종료되는 6년 동안만 시행하고 향후 발생하는 폐기물에 대한 비파괴 검사는 시행하지 않는다.

경제성 및 적용성 검토를 위한 가정 사항은 다음과 같다: ① 이동형 X-Ray 시스템 가격 : 3.0 MeV(5.0 백만원), 0.45 MeV(2.5백만원), ② 연간 유지보수비 : 장비 가격의 10%, ③ 3.0 MeV 설비이용 외주 검사비 : 0.45 MeV 설비를 이용하는 검사비의 2배, ④ 외주 검사 시점 및 물량(1안 및 2안) : 검사가 시작된 시점부터 5년째 되는 해에 9,300드럼, 6년째 되는 해에 9,300드럼, ⑤ 인건비 : 2인 1조, 1인당 연간 3,000만원, ⑥ 할인율 및 감가상각 : 5%, 40년 동안 정액법.

위의 가정들과 현가 계산식을 이용하여 네 가지 시나리오에 대해 40년간 소요되는 총비용을 계산한 결과는 다음 그림과 같다.



4. 결론

X-ray CT 시스템을 이용하면 드럼내 내용물 검사, 유리수 검사, 채움율의 정량검사가 가능하며, 연간 13,000 드럼을 검사하기 위해서는 450 KeV와 2~3 MeV 이동형 장비 각 1대가 필요하고 내용물 검사만 할 경우에는 2~3 MeV X-ray RTR 이동형 장비 1대면 충분한 것으로 나타났다. 고출력 장비의 경우 차폐 등으로 인해 이송에 어려움이 예상되므로 2 MeV급 설비를 확보하여 운영하는 것이 바람직하다고 판단된다. 4가지 검사 시나리오에 대한 경제성 및 적용 가능성 검토 결과는 발생자가 장비를 확보하여 자체적으로 검사하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 그 이유는 외주 검사를 단기간만 하는 업체를 수배하는데 어려움이 있고 설령 수배 가능하다 하더라도 저밀도 드럼 당 검사비용이 25만원 이상될 가능성이 크기 때문이다.

참고문헌

- [1] Richard H. Bossi, Frank A. Iddings, George C. Wheeler(Technical Editors); Patrick O. Moore(Editor), "Nondestructive Testing Handbook(3rd Edition) - Volume 4 : Radiographic Testing", Chapter 3 and 11, American Society for Nondestructive Testing, INC.,(2002).
- [2] R. T. Bernardi and Harry Martz, Jr., "Nuclear Waste Drum Characterization with 2MeV X-Ray and Gamma-Ray Tomography", *Material Evaluation*. Vol. 53, No. 10, Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing(October 1995): p 1121-1122, 1124-1126.
- [3] NIST 웹사이트 : <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>