

B형 방사성폐기물 운반용기 구조 안전성 해석 평가

김동학, 서기석, 남경오, 이주찬, 이경호*, 이상진*, 백창열*

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

*원자력환경기술원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

dhkim@kaeri.re.kr

본 연구에서는 저준위방사능물질 및 표면오염물체로 분류되지 않는 방사능 한도량 A값 이상의 방사성물질 DOT-17H 드럼(직경 620 mm X 높이 890 mm) 1개를 원자력발전소의 폐기물처리시설에서 중간저장고로 운반하기 위한 B형 방사성폐기물 운반용기에 대한 구조 안전성 평가를 수행하였다. 80 mm 두께의 철판을 이용하여 차폐를 수행하는 한편 구조재료로서의 역할을 하도록 하였다. 드럼을 운반용기 내부에 적재하는 경우에 크레인을 이용하여 취급이 가능하도록 상부개폐를 하였으며 취급장비의 사용을 위하여 드럼과 운반용기의 간격을 100 mm 정도 떨어지도록 내부 지지구조물을 설치하였다. 차폐용기는 운반내용물인 방사성폐기물 드럼이 적재 되어 있고, 격납을 유지하며 차폐능을 보장하여야 한다. 완충용기는 운반용기가 이송 중에 발생할 수 있는 열이나 충격으로부터 차폐용기를 보호한다. 차폐용기의 내부크기는 직경 820 mm X 높이 910 mm이며 외부크기는 직경 980 mm X 높이 1,070 mm이며 완충용기의 내부크기는 직경 970 mm X 높이 1,115 mm이며 외부크기는 직경 1,380 mm X 높이 1,510 mm이다. 운반용기의 적재중량은 400 kg이며 총중량은 4.3 톤이다.

표 1은 B형 운반용기 해석의 종류를 나타낸다. 정상운반조건에서의 1.2 m 자유낙하, 적층, 관통 압력 등을 수행하였고 사고운반조건에서의 9 m 낙하, 파열, 침수, 압력 및 화재 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 자유낙하방향은 1.2 m 낙하와 9 m 낙하에 대하여 바닥수직낙하, 뚜껑수직낙하, 수평낙하, 바닥무게중심낙하, 뚜껑무게중심낙하, 바닥경사낙하, 뚜껑경사낙하의 7개 방향으로 수행하였으며 관통 및 파열은 뚜껑, 측면, 바닥방향에 대하여 해석을 수행하였다.

운반용기의 해석에 대한 개요를 표 2에 나타내었다. B형 운반용기의 구조해석을 수행하기 위한 유한요소모델을 대칭성을 고려하여 만들었다. 볼트 체결부는 고정구속조건(Tied Constraint)를 적용하였으며 각 부재간 사이는 마찰이 없는 접촉조건(Contact constraint)으로 가정하였다. 이러한 모델을 이용하여 ABAQUS/Explicit를 사용하여 해석을 수행하였다. 사용된 요소의 종류는 3차원 요소인 C3D8R(8-node linear brick, reduced integration with hourglass control)이다. 요소의 개수는 33,801개이며 절점의 수는 52,697개이다. 차폐용기 셸은 탄소강 A-105이며 차폐용기 뚜껑과 바닥, 내부지지구조, 완충용기의 케이스는 탄소강 A-36이다. 격납경계로 ASME sec. III div. 3의 평가를 하기 위하여 차폐용기 셸과 뚜껑, 바닥은 탄성으로 가정하였다. 그 이외의 탄소강으로 제작된 차폐용기의 내부지지구조 및 완충용기의 케이스는 탄소성으로 가정하였다. 탄소강의 탄소성 응력-변형률 관계는 항복응력 이후에 연신률에 해당하는 소성변형이 인장응력까지 선형경화변형을 하고 그 이후에 강체소성변형을 한다고 가정하였다. 완충용기의 케이스 내부에는 폴리우레탄 폼과 3M사의 단열재가 포함되어 있다. 단열재는 내부 200 mm에서 8 mm 정도로 얇고 구조적으로 큰 역할을 하지 않으므로 모델에서 제외하였다. 폴리우레탄폼은 205 kg/m³의 밀도를 가지며 이러한 밀도의 압축시편에 대한 압축시험결과를 토대로 응력-변형률 관계를 결정하였다. 폴리우레탄폼의 응력-변형률 관계는 소성변형률이 1이 되는 지점까지 동일하게 압축시험결과를 외삽하여 적용하였다. 드럼의 경우, 중량이 400 kg이 되도록 밀도를 조정하고 높은 강성을 가졌다고 가정하였다.

표 3은 방사성폐기물 운반용기에 대한 구조해석의 결과를 나타낸다. 국부적인 부분에 집중응력이 발생되며 이를 제외한 대부분의 영역에서는 낮은 응력을 보여준다. 차폐용기 셸의 두께에 따른 평균응력 및 최대 응력으로 정상운반조건 및 가상사고조건에서의 응력제한치와 비교하여 평가하였다. 적층, 압력, 관통 및 침수조건에서 최대응력은 응력제한치에 비하여 매우 낮은 값을 보여

준다. 낙하 파열조건에서도 응력제한치 이하의 최대응력값을 보여준다. 그러므로 B형 방사성폐기물 운반용기의 구조적 건전성은 유지되고 있음을 알 수 있다.

표 1. B형 방사성폐기물 운반용기 해석의 종류

조건	정상운반조건				사고운반조건			
	1.2m 낙하	적층	관통	압력	9m 낙하	파열	압력	침수
방향	수직 (바닥/뚜껑)		바닥		수직 (바닥/뚜껑)	바닥		
	수평		측면		수평	측면		
	무게중심 (바닥/뚜껑)		뚜껑		무게중심 (바닥/뚜껑)	뚜껑		
	경사 (바닥/뚜껑)				경사 (바닥/뚜껑)			

표 2. B형 방사성폐기물 운반용기 해석의 개요

해석코드		ABAQUS/Explicit	
해석 방법	해석모델	3차원 1/2 모델로 C3D8R를 적용(요소 수:33,801, 절점 수:2,697)	
	경계조건	대칭경계조건, 중력가속도 적용.	
	재료특성	탄소성해석, 격납경계(차폐용기 쉘, 뚜껑 및 바닥)은 탄성	
해석 조건	정상운 반조건	1.2 m 낙하	초기속도 : 4.9 m/sec
		적층	운반용기 중량의 5배를 차폐용기에 직접 적용
		관통	초기속도 : 4.4 m/sec(관통봉에 적용)
		압력	내압 : 700 kPa
	가상사 고조건	9 m 낙하	초기속도 : 13.3 m/sec
		파열	초기속도 : 4.4 m/sec
		침수	외압 : 2 MPa

표 3. B형 방사성폐기물 운반용기에 대한 구조해석의 결과

정상운반조건			사고운반조건			
해석조건	최대 응력	응력제한치	해석조건	최대응력	응력제한치	
바닥수직	126.4	233.73	바닥수직	284.3	337.84	
뚜껑수직	135.2		뚜껑수직	196.4	337.84	
수평	본체		147.7	수평	297.8	337.84
	뚜껑		101.9	바닥무게중심	276	279.9
바닥무게중심	126.4		뚜껑무게중심	282	337.84	
뚜껑무게중심	228.9		바닥경사	310	337.84	
바닥경사	113.9		뚜껑경사	313.5	337.84	
뚜껑경사	123.2		침수	30.71	337.84	
적층	2.21		바닥파열	55.3	337.84	
압력	10.75		측면파열	275.3	279.9	
관통	차폐용기에 응력발생 없음		뚜껑파열	55.8	337.84	