

중·저준위 방사성폐기물 처분장의 지상시설에 대한 지진 취약도 평가

Seismic Fragility Evaluation of Surface Facility Structures in Intermediate-Low Level Radioactive Waste Repository

박 준 희† 김 민 규* 최 인 길**
Park, Junhee Kim, Min Kyu Choi, In-Kil

요 지

방사성폐기물의 처리과정에서 발생한 설계하중 이상의 지진은 방사성 물질을 외부로 노출시킬 수 있으므로 방사성폐기물 처분장은 설계시 지진에 대하여 충분한 여유도를 가지도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 방폐장의 지상구조물에 대한 지진성능을 평가하기 위하여 지진 취약도 분석을 수행하였다. 지진 취약도 평가에 의하면, 해석모델로 선정된 인수저장 시설과 방사성폐기물 건물은 장방형의 구조물로서 구조물의 축에 따라 지진 성능이 약 23%~43% 다르게 나타났다. 최소 손상수준을 기준으로 할 경우 인수저장시설과 방사성폐기물 건물의 HCLPF 성능은 각각 0.52g와 0.93g로 나타났으며, 방사성폐기물 건물은 원전의 격납건물과 유사한 지진성능을 보였다.

핵심용어 : 방사성폐기물 처분장, 비선형정적해석, 손상수준, 지진 취약도, 지진 성능

Abstract

Since a seismic exceeding design load can result in exposing radioactive material during disposal process of radioactive wastes, the repository should be designed with enough seismic margin. In this paper, a seismic fragility analysis was performed to evaluate the seismic capacity of surface facility structures. According to the analysis results, since inspection & store facility and radioactive waste facility have a rectangle geometry, the seismic capacity was differently presented about 23%~43% according to the axis of structures. The HCLPF capacity of inspection & store facility and radioactive waste facility was 0.52g and 0.93g, respectively. And it was observed that seismic capacity of radioactive waste facility was similar to that of a containment for nuclear power plants.

Keywords : radioactive wastes repository, nonlinear static analysis, damage level, seismic fragility, seismic capacity

1. 서 론

방사성폐기물이란 방사능 물질 및 이와 접촉하여 방사능에 오염되어 폐기대상인 물질을 의미한다. 방사성폐기물은 고준위와 중·저준위로 구분할 수 있다. 고준위 폐기물은 원자력 발전소(이하, 원전)에서 발생한 사용후 핵연료를 의미하고, 중·저준위 폐기물은 원자력 발전소 및 병원 등과 같이 방사능을 사용하는 시설에서 발생하는 폐기물로서 장갑, 의류, 주

사기 등을 의미한다. 방사성폐기물은 방사능에 오염되어 일 반폐기물과 같이 처분할 수 없다. 그래서 별도의 처분시설로 수송되어 영구적으로 처분한다.

현재 원자력을 이용하는 대부분의 국가에서 이용하는 방사성폐기물의 처분방식은 각국의 자연 및 인문사회 환경, 원자력 및 관련 기술의 성숙도에 따라 다르며, 각국이 요구하는 안전성에 따라 상당한 차이가 있다. 대표적인 처분방식으로는 동굴처분방식과 천층처분방식이 있다. 천층처분방식은 지

† 책임저자, 정희원·한국원자력연구원 종합안전평가부 박사후연구원
Tel: 042-868-4859 ; Fax: 042-868-8256
E-mail: jhpark78@kaeri.re.kr

* 한국원자력연구원 종합안전평가부 선임연구원

** 한국원자력연구원 종합안전평가부 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

표 30m 아래 인공방벽을 설치하여 폐기물을 처분하는 방식으로 표토층이 발달되고 배수가 잘 되며 강우량이 적은 곳에 적합한 방식이다. 반면 동굴처분방식은 지하 100~300m사이의 암반에 동굴을 뚫고 폐기물을 처분하는 방식으로 사고로부터 폐기물의 격리 및 방호효과가 천층처분방식에 비하여 크다(원자력환경관리센터, 1992).

국외에서는 영국의 NIREX(2003)와 미국의 유카마운틴 프로젝트(DOE, 2008)를 통하여 방사성폐기물 처분장(이하, 방폐장)의 지진 재해도를 분석하였지만 방폐장의 구조적 안전성과 관련된 연구는 진행되지 않았다. 그러나 일반 건축물에서 전단벽 시스템의 지진성능에 대한 연구는 오래전부터 진행되어 왔다. 최근 국내에서 방폐장과 관련된 연구는 대부분 지하처분 공동으로 한정되어 있다. 지하처분시설 뿐만 아니라 지상시설은 방사성폐기물을 중간저장하는 시설로써 방폐장의 지속적이고 안전한 운영을 위하여 지진에 대한 안전성이 확보되어야 한다.

원전 구조물 및 주요기기의 지진안전성 평가에서는 내진성능을 정량화하는 방법으로 지진취약도 분석이 사용되어 왔다(Choi, 2006). 따라서 본 연구에서는 국내 방폐장의 지상시설에 대한 내진성능을 정량적으로 평가하기 위하여 방폐장의 대표 지상시설인 인수저장시설과 방사성폐기물 건물을 대상으로 지진 취약도 평가를 수행하였다. 대상모델은 장방형의 구조물이기 때문에 지진과 같은 횡력에 대하여 강축과 약축이 존재하게 된다. 따라서, 구조물의 방향에 따른 지진 취약도를 평가하여 방향에 따른 지진성능의 차이를 분석하였다. 또한 허용손상수준별 지진취약도를 평가함으로써 방폐장의 지상시설들의 한계상태에 따른 지진성능을 평가하였다.

2. 방폐장의 지진 손상 시나리오

원전에서 발생한 폐기물은 방폐장에서 운송, 인수 및 검사를 통하여 지하처분시설에 영구처분된다. 방폐장에서 발생한 지진은 2종류의 손상을 가져올 수 있다. 첫째, 폐기물 용기의 손상이다. 방사성폐기물은 특수하게 제작된 용기에 밀폐되어 방폐장으로 운송된다. 방사성폐기물의 인수 및 검사의 과정에서 지진이 발생하면 선반에서 처분용기가 낙하할 수 있다. 그러나 처분용기의 내부는 콘크리트로 충전되므로 용기가 손상되더라도 방사능이 외부로 노출될 확률은 작다.

두 번째 손상은 지진에 의한 구조물 및 기기의 손상이다. 방폐장의 구조물은 지진에 의하여 벽체의 균열이 발생하거나 설계하중 이상의 지진이 발생할 경우 구조물의 심각한 손상 및 붕괴를 초래할 수 있다. 지진에 의한 구조물의 손상은 구조물 자체의 손상뿐만 아니라 구조물 내부 기기들의 작동에도 영향을 미친다.

3. 해석모델 및 파괴기준

3.1 해석모델의 모델링

방폐장의 지상시설을 모델링하기 위하여 국내 월성에 위치한 중저준위 방사성폐기물 처분시설의 안전성분석보고서(한국수력원자력주식회사, 2008)를 참고하여 인수저장시설과 방사성폐기물 건물을 해석모델로 선정하였다.

인수저장시설은 방사성폐기물을 사일로에 처분하기 전 인수 및 검사를 하는 시설이다. 인수저장시설은 차량에 의하여 운송중인 폐기물이 내부까지 진입될 수 있도록 차량진입로를 포함한 중준위 저장소, 저준위 저장소, 인수·검사실로 구성되어 있다.

인수저장시설은 3차원 유한요소법을 사용하여 그림 1과 같이 모델링하였다. 해석모델은 장축방향으로 71m, 단축방향으로 53m인 전단벽 구조시스템이다. 중준위 저장소와 저준위저장소의 높이는 각각 13.6m와 9.3m이다. 일반적으로 지진 하중이 작용할 경우 슬래브는 횡하중의 전달요소로 작용한다. 본 연구에서는 면내변형만을 고려하여 막요소(membrane)를 사용하여 두께 45cm의 슬래브를 모델링하였다. 콘크리트와 철근의 강도는 각각 2.35kN/cm^2 , 40.00kN/cm^2 을 사용하였으며, 월성 방폐장의 현장방문에 의하여 철근비는 0.092를 적용하였다. 또한 콘크리트의 피복두께는 콘크리트 구조설계기준(2007)과 현장방문에 의하여 5cm로 모델링하였다.

방사성폐기물 건물은 그림 2와 같이 폭 30m, 길이 60m, 높이 17m의 3층으로 된 철근콘크리트전단벽 시스템이다. 각 층 슬래브의 두께는 45cm, 벽두께는 60cm로 가정하였다. 내부기기들은 중력하중으로 치환하여 고정하중은 9.8kN/m^2 , 활하중은 5.3kN/m^2 이다. 지붕층은 다른 층에 비하여 시설물

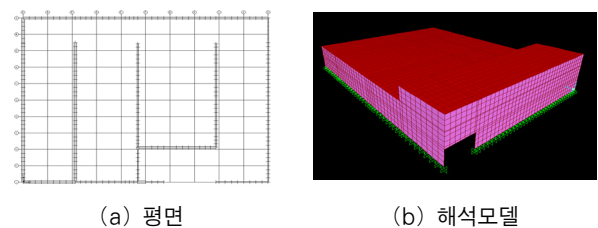


그림 1 인수저장시설

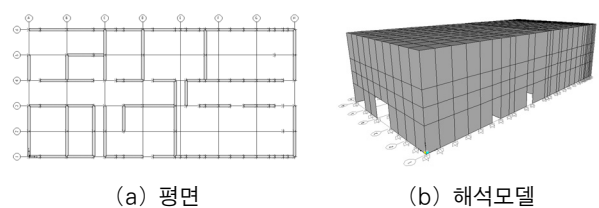


그림 2 방사성폐기물 건물

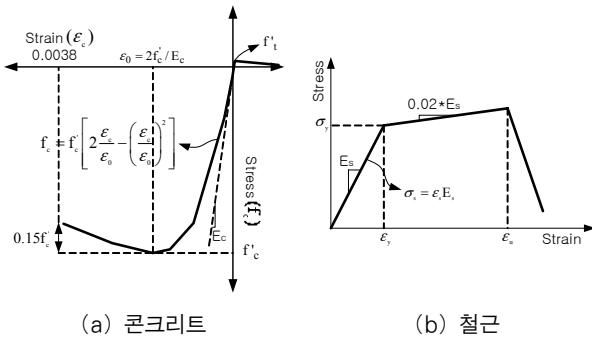


그림 3 재료의 응력-변형률관계

이 적기때문에 활하중을 1.5kN/m^2 로 가정하였다. 콘크리트와 철근의 강도는 각각 3.14kN/cm^2 , 40.00kN/cm^2 이다. 재료의 이력모델은 인수저장시설과 같은 모델을 적용하였다. 방사성폐기물건물의 내진범주는 “2”로써 인수저장시설보다 높게 설계 되어있기 때문에 철근비 또한 인수저장시설보다 높은 0.167인 것을 월성 방폐장의 현장방문을 통하여 조사하였다.

해석프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였으며, 벽체는 적층셀요소를 사용하여 콘크리트와 철근을 모델링하였다. 재료의 비탄성을 고려하기 위하여 콘크리트와 철근의 응력변-형률 관계는 그림 3과 같이 모델링하였다. 콘크리트의 경우 극한 변형율을 0.0038로 하였고, 철근의 경우 0.2로 하였다. 철근의 경우 항복후강성비를 2%로 가정하였으며, 극한 변형율 이후 강도저감을 함께 고려하였다. 방폐장의 지반은 화강섬록암으로 되어있기 때문에 지반과 구조물의 상호작용은 없는 것으로 가정하여 구조물의 기초를 각축방향의 변위와 회전에 대하여 고정으로 모델링하였다. 실제 인수저장시설은 방사성폐기물 건물과 출입구가 연결되어 있지만 연결부의 강성은 구조물의 강성과 비교하여 매우 작으므로 지진시 연결부에 의한 구조물의 상호간섭이 없는 것으로 가정하고 저장시설을 서로 독립적으로 해석하였다.

3.2 해석모델의 고유치해석

전단벽 구조시스템은 대부분의 횡력을 전단벽에 의하여 저항하는 시스템으로 전단벽이 위치한 방향에 따라 구조물의 강성은 다르며, 지진 하중에 대한 강축과 약축이 발생하게 된다. 특히 방폐장의 지상시설은 외부벽체 뿐만 아니라 내부벽체도 횡력 저항요소로써 작용한다. 따라서 모델링시 횡력을 저항하는 내부벽체를 함께 모델링하여 고유치해석을 수행하였다. 고유치해석결과 그림 4와 같이 인수저장시설의 1차모드는 장축방향으로 변형이 발생하였고, 2차모드는 단축방향으로 변형이 발생하였다. 인수저장시설의 장축으로 1차모드 변형이 발생한 이유는 내부벽체에 의한 단축방향의 전단

표 1 해석모델의 고유진동수

	인수저장시설	방사성폐기물건물
장축	9.84	12.85
단축	12.46	9.69

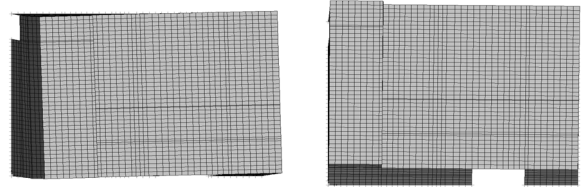


그림 4 인수저장시설의 모드형상

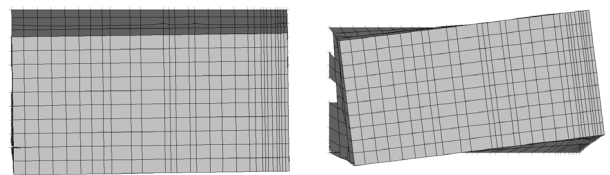


그림 5 방사성폐기물 건물의 모드형상

강성이 장축방향보다 크기 때문이다. 표 1은 인수저장시설의 축에 따른 고유진동수이다.

방사성폐기물 건물은 그림 5와 같이 인수저장시설과 반대의 결과를 나타내었다. 1차모드는 방사성폐기물 건물의 단축방향으로 변형이 발생하였고, 2차모드는 방사성폐기물 건물의 장축방향으로 변형과 비틀림 함께 발생하였다. 방사성폐기물 건물의 모드형상이 인수저장시설과 다른 이유는 구조물의 가로-세로비가 크기 때문으로 판단된다. 또한 내부벽체의 위치와 개구부의 위치에 따라 강성중심과 질량중심의 차이가 발생하고 이로 인하여 비틀림이 장축방향의 변형과 함께 발생한 것으로 판단된다. 장축방향과 단축방향의 고유진동수는 표 1과 같다.

3.3 파괴기준

구조물의 파괴기준은 구조물의 성능평가지 중요한 손상지수로 사용된다. 따라서 구조물의 정확한 내진성능을 평가하기 위하여 실험에 의한 성능한계를 정의해야 한다. 그러나 실규모 모델의 성능평가지 다양한 제약이 따른다. 예를 들면, 실험장비의 용량부족, 실험실의 공간 부족 등의 문제가 있다. 따라서 일반적으로 내진성능평가지 축소실험에 의하여 구조물의 내진성능을 평가하거나 기준에서 제시하고 있는 한계상태를 이용하여 구조물의 파괴기준을 정의하고 있다.

전단벽이 비탄성거동을 하면 변형이 급격하게 증가하므로 변위기준은 파괴기준으로써 중요하다. 따라서 최근 원전구조

표 2 허용 층간변위비(ASCE 43-05, 2005)

허용 층간변위비		
LS-A	LS-B	LS-C
0.0075	0.006	0.004

(LS-A: Significant damage, LS-B: Generally repairable damage, LS-C: Minimal damage)

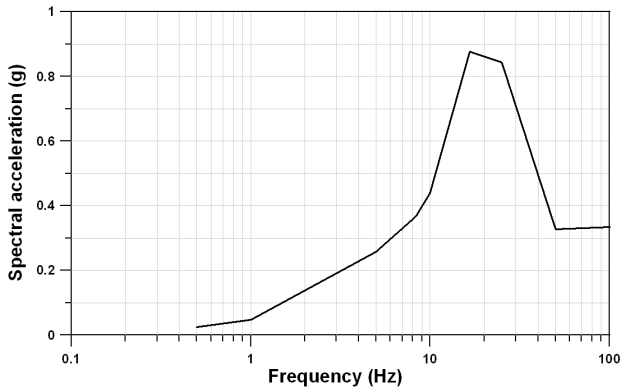


그림 6 평가용 스펙트럼가속도

물의 기준에는 강도기준 뿐만 아니라 변위기준을 함께 제시하고 있다. 표 2에서 나타나듯이 ASCE 43-05에서는 구조물의 손상상태를 최소 손상, 복구 가능한 손상, 심각한 손상으로 구분하여 허용 층간변위비를 정의하고 있다. 본 연구에서는 ASCE 43-05에서 제시하는 허용 층간변위비를 전단벽의 한계상태로 정의하여 방폐장의 지상시설에 대한 지진 취약도를 평가하였다.

4. 입력지진동

방폐장의 지진응답을 산정하기 위하여 응답스펙트럼해석을 수행하였다. 해석시 사용한 가속도스펙트럼은 그림 6과 같다. 현재 국내원전은 내진설계시 NRC Reg. Guide 1.60에 의한 표준설계지진스펙트럼을 사용하고 있으며, 원전의 내진성능평가시 부지고유스펙트럼 혹은 등재해도스펙트럼을 사용하고 있다. 본 연구에서는 김민규 등(2011)이 제시한 국내 방폐장을 대상으로 작성된 평가용 지반응답스펙트럼을 사용하였다. 국내 월성부지는 화강섬록암으로 되어있기 때문에 지반강성이 크다. 따라서 평가용 지반응답스펙트럼은 그림 6과 같이 진동수가 20Hz부근의 고진동수 영역에서 탁월진동수를 형성하였다.

5. 지진 취약도 평가

5.1 지진 취약도의 산정

취약도 계산시 식 (1)과 같은 안전계수로 불리는 일련의

랜덤변수를 이용하여 취약도를 산정하였다. 안전계수 “F”는 성능계수(F_{SC})와 응답계수(F_{RS})의 곱으로 나타낼 수 있으며 식 (2)와 같이 표현된다. 성능계수는 구조물의 탄성거동과 비탄성거동을 고려하기 위한 계수로써 강도계수(F_g)와 비탄성에너지흡수계수(F_μ)에 의하여 식 (3)과 같이 산정할 수 있다. 응답계수는 F_{SA} 스펙트럼 형상계수, F_δ 감쇄계수, F_M 모델링계수, F_{MC} 모드응답조합계수, F_{EC} 지진성분조합계수, F_{SD} 수평지진방향계수, F_{SS} 지반-구조물 상호작용계수의 곱으로 식 (4)와 같다. 본 연구에서는 구조물의 성능을 보수적으로 평가하기 위하여 응답계수를 1로 가정하였다.

$$F = \frac{\text{actual seismic capacity}}{\text{actual response at SSE}} \quad (1)$$

$$F = F_{SC} F_{RS} \quad (2)$$

$$F_{SC} = F_g F_\mu \quad (3)$$

$$F_{RS} = F_{SA} F_\delta F_M F_{MC} F_{EC} F_{SD} F_{SS} \quad (4)$$

지진하중에 대한 구조물의 파괴확률은 일반적으로 식 (5)를 이용하여 산정할 수 있다. 여기서, Φ , a , A_m , β_C 는 각각 정규변수의 누적분포함수, 요구변수, 중앙값 성능변수, 임의성과 불확실성의 조합된 대수표준편차를 나타낸다. 요구변수는 지진응답해석에 의한 지진응답을 나타내며, A_{SSE} 는 안전정지지진(safety shut-down earthquake, SSE) 가속도를 나타내는 것으로 국내의 경우 0.2g~0.3g의 안전정지지진을 보편적으로 사용하고 있다. 본 연구에서는 A_{SSE} 를 0.2g로 사용하였다. 중앙값 성능은 식 (6)과 같이 산정된다.

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln(a/A_m)}{\beta_C}\right) \quad (5)$$

$$A_m = F_{SC} F_{RS} A_{SSE} \quad (6)$$

$$\beta_C = \sqrt{\beta_r^2 + \beta_u^2} \quad (7)$$

성능 중앙값과 대수표준편차를 이용한 취약도 곡선은 불확실성의 정도에 따라 평균곡선, 메디안곡선, 95%신뢰도곡선, 5%신뢰도곡선으로 표현되며, 원전구조물의 지진성능은 95%신뢰도 수준에서 5%파괴확률로 나타낸다. 이를 고신뢰도저 파괴확률(High Confidence of Low Probability of Failure, HCLPF)라 하며, HCLPF는 식 (8)을 이용하여 산정할 수 있다(Reed and Kennedy, 1994).

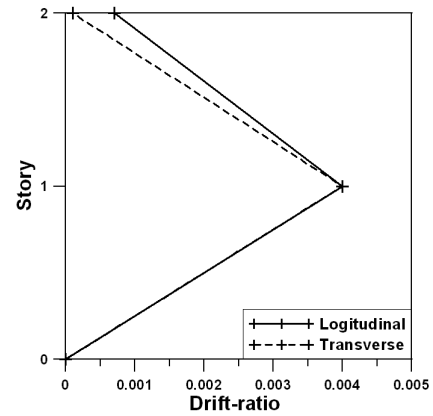
$$HCLPF = A_m \cdot e^{-1.65(\beta_r + \beta_u)} \quad (8)$$

5.2 Pushover 해석에 의한 성능 산정

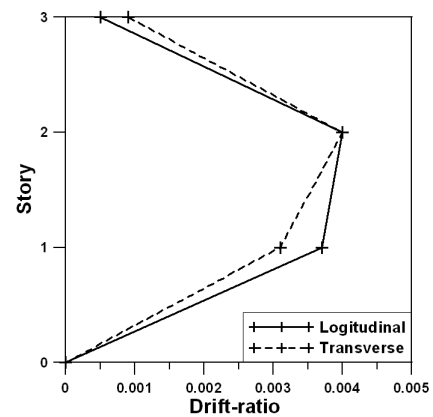
인수저장시설의 성능을 평가하기 위하여 비탄성정적해석을 수행하였다. 1차모드 형태로 횡하중을 점진적으로 증가시키면서 인수저장시설의 변위가 한계상태를 초과할 때까지 비탄성정적해석을 수행하였다. 그 결과 그림 7 (a)와 같은 밀면 전단력과 변위의 관계를 얻을 수 있었다. 단축방향으로 전단강성이 크기때문에 단축방향의 강성과 항복강도는 장축방향보다 크게 나타났다.

방사성폐기물 건물은 장축방향의 전단강성이 크기 때문에 그림 7(b)의 힘-변위 관계에서도 나타나듯이 장축방향의 강성과 항복강도가 단축방향보다 크게 나타났다. 방사성폐기물 건물의 항복강도가 인수저장시설의 항복강도보다 크게 나타나는 이유는 방사성폐기물 건물의 콘크리트의 강도가 인수저장시설의 콘크리트 강도보다 높기 때문이다. 그리고 방사성폐기물 건물의 내진등급이 인수저장시설보다 높기 때문에 설계시 높은 지진하중에 견딜 수 있도록 설계되어 있다. 그 결과 방사성폐기물 건물의 전단강성이 인수저장시설보다 크게 나타났다.

그림 8은 비선형정적해석에 의한 해석모델의 층간변위비



(a) 인수저장시설

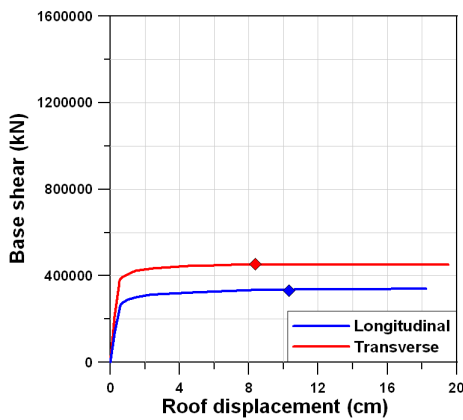


(b) 방사성폐기물 건물

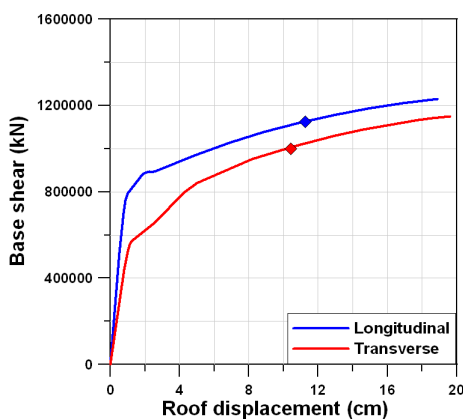
그림 8 해석모델의 층간변위비

표 3 해석모델의 연성도 산정

방향	인수저장시설			방사성폐기물 건물		
	δ_y (cm)	δ_u (cm)	μ	δ_y (cm)	δ_u (cm)	μ
장축	2.79	10.29	3.68	1.95	11.46	5.88
단축	2.32	8.17	3.52	1.99	10.61	5.32



(a) 인수저장시설



(b) 방사성폐기물 건물

그림 7 해석모델의 힘-변위 관계

를 나타낸다. 구조물의 층간변위비는 횡력에 의하여 발생한 층간변위를 층고로 나누어준 값으로 지진에 의한 구조물의 성능평가지 중요한 손상지수가 된다. 인수저장시설은 구조물의 높이-폭 비(aspect ratio)가 1이하인 전단벽 시스템으로 전단거동이 지배적이다. 그 결과 횡력에 대하여 그림 8(a)와 같이 1층의 변위가 2층의 변위보다 크게 나타났다. 따라서 지진 하중에 의하여 인수저장시설에 손상이 발생하게 되면 구조물의 하부에서 손상이 먼저 발생할 것으로 판단된다. 방사성폐기물 건물의 변형도 인수저장시설과 유사하게 하부층에서 변형이 많이 발생하는 것 그림 8(b)에서 알 수 있다. 따라서 방사성폐기물 건물에서 손상이 발생할 경우 층간변위가 큰 2층에서 손상이 먼저 발생할 것으로 판단된다.

구조물의 비탄성거동을 고려하기 위하여 지진 취약도 평가시 비탄성에너지흡수계수를 사용한다. 예제모델의 비탄성에

너지흡수계수를 산정하기 위하여 연성도를 먼저 산정해야 한다. 구조물의 연성도는 항복변위와 최대변위에 의하여 간단하게 산정할 수 있다. 산정된 연성도는 표 3과 같다. 표 3에서 알 수 있듯이 구조물의 축에 따라 연성능력은 다르게 나타난다. 인수저장시설과 방사성폐기물 건물 모두 장축방향의 연성도가 크게 나타났다.

5.3 강도계수와 비탄성에너지흡수계수의 산정

강도계수를 산정하기 위하여 본 연구에서는 PGA 0.33g의 월성지역의 평가용 지반스펙트럼을 사용하여 응답스펙트럼해석을 수행하였다. 표 4의 응답은 가진방향별 지진응답을 CQC방법(complete quadratic combination)을 통하여 산정한 결과이다. 구조물의 전단성능은 푸쉬오버해석에 의한 항복하중으로 정의하였다.

구조물의 강도계수는 구조물의 항복강도와 응답스펙트럼에 의한 전단강도의 비를 이용하여 산정하였다. 산정된 강도계수를 표 5에 나타내었다. 방사성폐기물 건물은 인수저장시설보다 비교적 많은 내부벽체들에 의하여 전단강성과 항복강도가 크다. 따라서 방사성폐기물 건물의 전단성능이 인수저장시설보다 크게 나타났다(표 4). 그림 7의 입력스펙트럼에 의하면 고유진동수가 9Hz~10Hz 사이에서 가속도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 단축방향 고유진동수가 9.84Hz인 인수저장시설은 장축에 비하여 지진 응답이 크게 나타났다. 이와 반대로 방사성폐기물 건물은 장축방향의 고유진동수가 단축방향보다 높기 때문에 지진 응답도 장축방향이 단축방향보다 크게 나타났다.

방사성폐기물 건물의 폭-길이 비가 인수저장시설의 폭-길이 비보다 크기 때문에 방향별 강도계수의 차가 크게 나타났다. 그래서 인수저장시설의 경우 강도계수는 축에 따라 약 21%의 차이를 보였지만, 방사성폐기물 건물의 경우 축에 따라 강도계수는 약 35%의 차이를 보였다.

Seismic probabilistic risk assessment (SPRA)에서는 비탄성에너지흡수계수를 얻기 위해 일반적으로 Riddell-Newmark 방법으로 사용하여 왔다. 이 방법은 사용하기 매우 쉬우나 전단벽의 이력거동에 대해 보수적이지 않으며 특히 지반운동의 지속시간이 긴 경우 보수적이지 않음을 NUREG/CR-3805(1984)에서 지적하고 있다. 따라서 지반운동의 지속시간을 고려할 수 있는 Effective Riddell-Newmark Method이 제시되었다.

Effective Riddell-Newmark Method을 이용한 비탄성에너지흡수계수는 입력응답스펙트럼의 진동수범위에 따라 식 (10)~식 (12)과 같이 산정된다. 여기서, μ' : 항복후강성비

표 4 해석모델의 밀면전단력 (단위:kN)

방향	인수저장시설		방사성폐기물건물	
	응답	성능	응답	성능
장축	70632	285053	135364	845356
단축	119309	398067	123928	574461

표 5 강도계수와 비탄성에너지흡수계수

방향	인수저장시설		방사성폐기물건물	
	F_s	F_μ	F_s	F_μ
장축	4.04	2.48	6.25	3.31
단축	3.34	2.42	4.64	3.11

를 고려한 시스템 연성도, α : 감쇠비에 따른 상수, f : 구조물의 진동수, β : 구조물의 감쇠비, PGA: 침두지반 가속도를 나타낸다. r_a , r_v , q_a , q_v 및 C_F 는 EPRI의 보고서(Reed 등, 1994)에서 제시하고 있는 식을 이용하여 산정하였다. 콘크리트 전단벽의 핀칭효과와 지진의 긴 지속시간을 고려하여 식 (13)과 같이 비탄성에너지흡수계수는 산정된다. 여기서, C_D 는 입력지진의 지속시간을 고려하기 위한 계수로써 본 연구에서는 0.6을 사용하였다. 산정된 비탄성에너지흡수계수는 표 5와 같이 구조물의 축에 따라 차이가 발생하였지만 강도계수보다 차이가 크지 않았다.

$$F'_\mu = Max[F_{\mu1}, F_{\mu2}], F_{\mu1} = Min[F_{\mu3}, F_{\mu4}] \quad (9)$$

$$F_{\mu2} = C_F[(q_v + 1)\mu' - q_v]^{r_v} \text{ (Amplified vel. range)} \quad (10)$$

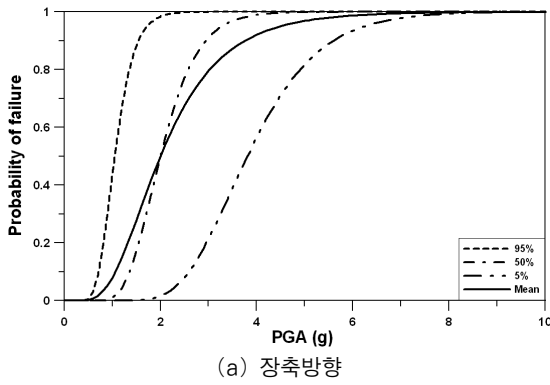
$$F_{\mu3} = [(q_a + 1)\mu' - q_a]^{r_a} \text{ (Amplified acc. range)} \quad (11)$$

$$F_{\mu4} = \frac{S_a(f, \beta)}{PGA} \mu'^\alpha \text{ (Rigid range)} \quad (12)$$

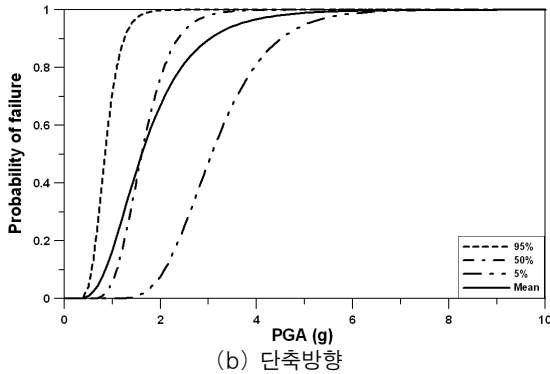
$$F_\mu = 1 + C_D(F'_\mu - 1) \quad (13)$$

6. 지진 취약도 곡선

구조물의 지진 취약도 곡선은 구조물의 메디안 성능값과 랜덤성(β_r)과 불확실성(β_u)에 대한 대수표준편차를 이용하여 작성할 수 있다. Park 등(1998)은 구조시스템에 따라 랜덤성(β_r)과 불확실성(β_u)의 대수표준편차를 각각 다르게 제시하고 있다. 특히, 전단벽 구조시스템일 경우 β_r 과 β_u 를 각각 0.3과 0.39로 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 Park 등(1998)이 제시한 대수표준편차를 사용하여 지진 취약도 곡선을 작성하였다. 그림 9와 그림 10은 신뢰수준에 따라 작성된 해석모델의 지진 취약도 곡선이다. 같은 최대지반 가속도에서 두 건물의 단축방향에 대한 파괴확률이 장축방향에 대한 파괴확률보다 높게 나타났다. 또한 같은 최대지반 가속도에서 방사성폐기물 건물의 파괴확률이 인수저장시설보다

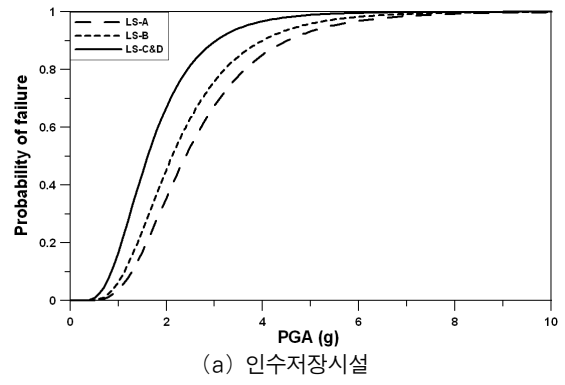


(a) 장축방향

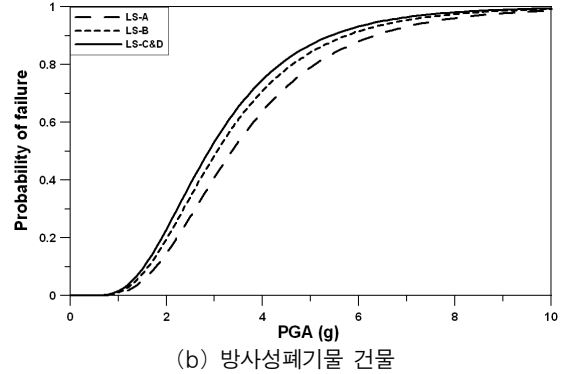


(b) 단축방향

그림 9 인수저장시설의 지진 취약도 곡선

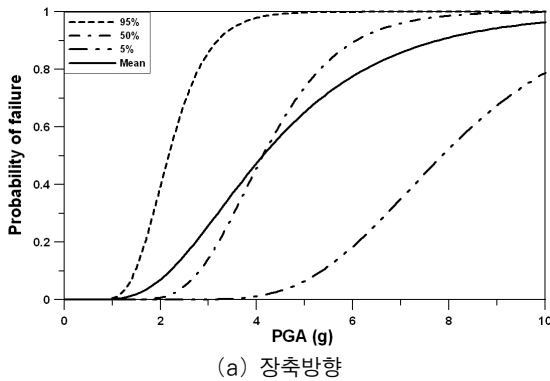


(a) 인수저장시설

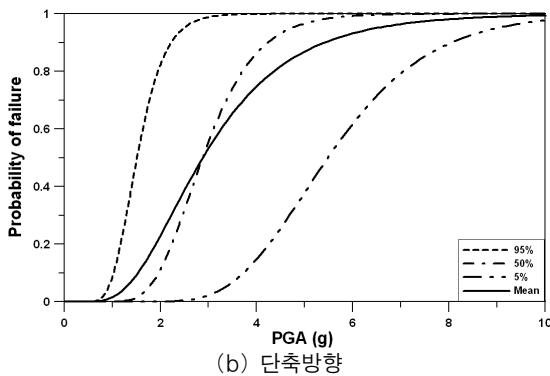


(b) 방사성폐기물 건물

그림 11 허용손상수준에 따른 지진 취약도 곡선



(a) 장축방향



(b) 단축방향

그림 10 방사성폐기물 건물의 지진 취약도 곡선

낮게 나타났다.

지진하중에 의한 원전 구조물의 성능은 일반적으로 중앙값 성능과 HCLPF에 의하여 정량화된다(표 6). 표 6은 구조물

표 6 건물의 축에 따른 지진 성능

방향	인수저장시설		방사성폐기물건물	
	Am	HCLPF	Am	HCLPF
장축	2.00	0.64	4.13	1.33
단축	1.61	0.52	2.88	0.93

의 한계상태를 최소 손상(LS-C)을 기준으로 구조물의 축에 따라 나타내었다. 두 지상시설 모두 단축방향의 지진성능이 장축방향보다 낮게 나타났다. 따라서 해석모델의 지진성능은 단축방향에 의하여 결정될 것이다.

성능에 근거한 구조물의 내진설계를 수행할 경우 구조물의 성능수준은 목표성능을 정하기 위하여 필수적이다.

인수저장시설은 설계시 내진범주 3으로 일반구조물에 해당하는 조건으로 내진설계가 되었지만, 지진에 의하여 심각한 손상은 구조물의 붕괴를 초래할 수 있으므로 LS-A를 구조물의 한계상태로 보긴 힘들다. 그러나 복구 가능한 손상을 한계상태로 할 경우 복구기간 동안 일시적으로 방폐장의 운영에만 영향을 줄뿐 구조물의 손상에는 큰 영향이 없으므로 한계상태로 정의할 수 있다. 허용손상기준에 따라 지진 취약도 곡선을 작성하면 그림 11(a)와 같다. 그리고 인수저장시설의 HCLPF 성능은 허용손상수준에 따라 0.52g~0.77g로 나타났다.

방사성폐기물 건물의 경우 동위원소폐기물이 보관되는 건물로써 방사성폐기물의 격리기능 및 처리기능, 방사성유출물 감시기능, 방사성구역 공기정화기능을 수행하므로 복구가능

표 7 허용손상수준에 따른 지진 성능

허용손상수준	인수저장시설		방사성폐기물건물	
	Am	HCLPF	Am	HCLPF
LS-A	2.40	0.77	3.36	1.08
LS-B	2.12	0.68	3.05	0.98
LS-C&D	1.61	0.52	2.88	0.93

한 손상이나 심각한 손상을 한계상태로 정의하기 힘들다. 따라서 최소손상을 한계성능으로 정의하는 것이 합리적으로 판단된다. 방사성폐기물 건물의 허용손상수준에 따른 지진취약도곡선을 그림 11(b)에 나타내었다. 최소손상을 한계성능으로 정의할 경우 방사성폐기물 건물의 HCLPF성능은 0.93g로 나타났다. 방사성폐기물 건물의 HCLPF성능은 전단벽의 파괴를 기준으로 하며 보수적인 응답계수를 이용하여 산정되므로 기기의 파괴를 기준으로 지진취약도를 산정하거나 현실적인 응답계수를 사용할 경우 본 연구에서 제시된 HCLPF 성능과 다를 수 있다. 이러한 가정을 고려하면 방사성폐기물 건물의 지진성능은 HCLPF가 0.87g~1.30g인 격납건물과 유사한 것으로 나타났다.

7. 결 론

본 연구에서는 지진 취약도 평가를 통하여 중·저준위방폐장의 지상시설에 대한 지진성능을 정량적으로 평가하였다. 인수저장시설과 방사성폐기물 건물은 직사각형태의 전단벽 시스템으로 지진성능이 구조물의 축에 따라 다르게 나타났다. 지진성능은 비탄성에너지흡수계수보다 강도계수에 의하여 지배되었다.

최소 손상수준을 기준으로 할 경우 인수저장시설의 HCLPF 성능은 0.52g이며, 방사성폐기물 건물의 HCLPF 성능은 0.93g로 방사성폐기물 건물이 인수저장시설보다 약 80% 큰 지진성능을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 국내 원전의 안전정지지진(SSE)이 0.2g임을 고려한다면 방폐장의 지상시설은 충분한 내진성능을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.

ASCE 43-05의 허용손상수준은 구조적파괴에 근거하여 제시되어 있지만 방폐장의 지상시설은 구조적 파괴뿐만 아니라 기능적 파괴에 의하여 기능을 상실할 수 있다. 따라서 추후 기능적 파괴를 고려한 지진 취약도 평가가 함께 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KEITEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 2009T100100511).

참 고 문 헌

- 김민규, 이현미, 이경미 (2011) 중·저준위 방사성폐기물 처분장의 지진위험도평가를 위한 지반운동스펙트럼 산정, 한국지진공학회, 15(1), pp.57~63.
- 원자력환경관리센터 (1992) 중저준위 방사성폐기물의 대표적 육지 처분방식의 비교 고찰, KAERI-NEMAC/TR-1/92, 1992.
- 한국수력원자력주식회사 (2008) 중저준위 방사성폐기물처분 시설 안전성분석보고서.
- 한국콘크리트학회 (2007) 콘크리트구조설계기준.
- ASCE 43-05 (2005) Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities, American Society of Civil Engineers.
- Choi, I.K., Choun, Y.S., Ahn, S.M., Seo, J.M. (2006) Seismic Fragility Analysis of a CANDU Type NPP Containment Building for Near-fault Ground Motions, KSCE Journal of Civil Engineering, 10, pp.105~112.
- Department of Energy (2008) Safety Analysis Report, DOE/RW-0573, Rev. 0, U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, 1551 Hillshire Drive Las Vegas, Nevada 89134.
- Kennedy, R.P., Short, S.A., Merz, K.L., Tokarz, F.J., Idriss, I.M., Power, M.S., Sadigh, K. (1984), Engineering Characterization of Ground Motion, NUREG/CR-3805.
- Newmark, N.M., Riddell, R. (1979) A Statical Study of Inelastic Response Spectra, Proc. of the 2nd US Conference on Earthquake Engineering, Stanford University.
- Nirex (2003) Generic Repository Studies, Report no. N/079.
- NRC (1973) Design Response Spectra for Sesimc Design of Nuclear Power Plants, US NRC Regulatory Guide 1.60.
- Park, Y.J., Hofmayer, C.H., Chokshi, N.C. (1998) Survey of Seismic Fragilities used in PRA Studies of Nuclear Power Plants, *Reliability Engineering and System Safety*, 62, pp.185~195.
- Reed, J.W., Kennedy, R.P. (1994) Methodology for developing seismic fragilities, EPRI TR-103959.

- 논문접수일 2011년 9월 20일
- 논문심사일
1차 2011년 9월 28일
2차 2011년 11월 4일
- 게재확정일 2011년 11월 9일