

<연구논문>

지진하중 입사각이 사용후핵연료 건식 저장시설의 구조건전성에 미치는 영향 분석

곽동현*·장윤석*[†]

Assessment of seismic load incident angle effects on structural integrity of a spent nuclear fuel dry storage facility

Dong-Hyeon Kwak* and Yoon-Suk Chang*[†]

(Received 15 May 2021, Revised 2 December 2021, Accepted 7 December 2021)

ABSTRACT

This study aims to assess the effect of postulated seismic loads on the structural integrity of a spent nuclear fuel dry storage facility. Firstly, three-dimensional modal and response spectrum analyses were carried out. With regard to the latter analysis, the effect of incident angles against two horizontal and one vertical response spectra was also considered. Results showed that even though two critical locations were predicted at the longitudinal axis central part of upper flow path as well as the end discontinuity part of upper and lower flow paths connector, their maximum principal stress values were less than the tensile strength. Moreover, since the influence of vertical angle was 87% higher than that of horizontal angle in particular, which should be carefully handled to demonstrate integrity of the facility.

Key Words : Concrete Equivalent Properties(콘크리트 등가물성), Dry Storage Facility(건식 저장시설), Finite Element Analysis(유한요소 해석), Seismic Load Incident Angle(지진하중 입사각)

기호설명

g = Ground acceleration(= 9.81 m/s²)

K = Confinement ratio

PGA = Peak ground acceleration

U1 = X directional seismic response spectrum

U2 = Y directional seismic response spectrum

U3 = Z directional seismic response spectrum

ϵ_{cc} = Maximum concrete strain

f'_{cc} = Maximum concrete stress

ϵ_{max} = Maximum principal strain

σ_{max} = Maximum principal stress

θ_h = Horizontal angle

θ_v = Vertical angle

ω_i = i -th natural frequency

1. 서론

우리나라를 비롯한 대부분의 국가들은 아직 처분 방침을 확정하지 못하였기 때문에 사용후핵연료를 원자력발전소(이후 '원전'으로 기술) 내의 습식 저장시설 또는 부지 내 건식 저장시설에서 냉각 및 보관하고 있다. 운전년수 증가로 인해 이러한 임시 저장시설의 용량이 포화됨에 따라 습식의 경우 기존 랙(rack) 배치의 조밀화 및 인근 발전소로의 이동과 건식의 경우 시설의 증설을 통하여 문제를 해소하여 왔다. 그러나 영구정지 원전의 해체를 추진하면서 습식 저장시설의 사용후핵연료 처리 방안이 화

[†] 책임저자, 회원, 경희대학교 원자력공학과
E-mail : yschang@khu.ac.kr
TEL : (031)201-3323 FAX : (031)204-8114
* 경희대학교 대학원

두가 되었으며, 상대적으로 확장이 용이한 건식 저장시설의 유용성이 부각되고 있다⁽¹⁾.

2011년 동일본 대지진은 국제 원자력 사건 등급(International Nuclear Event Scale; INES) 7에 해당하는 사고이다. 이 사고에서 원전 내 습식 저장시설의 콘크리트 구조물에도 문제가 발생했으며^(1,2), 후행핵주기 시스템에 대한 구조건전성 분석이 요구되었다. 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission; NRC)에서는 원전 부지 내 구조물에 대한 내진평가 기준 및 방법이 포함된 지침을 발간하여 왔다⁽³⁻⁵⁾. 국내 원전 시설의 내진 설계기준에서 설계응답스펙트럼과 감쇠비는 NRC RG를 준수하고 있다.

지진의 병진운동은 서로 직교 관계인 세 축에 기 반하며, 두 수평방향 하중과 수직방향 하중으로 구분된다. Watabe와 Tohdo⁽⁶⁾는 병진운동 요소의 상호 연관성은 하중의 방향이 서로 직교 관계일 경우 사라진다고 기술한 바 있다. 이에 따라 다양한 진원 및 크기에 따른 불확실성 해소의 일환으로, 지진하중의 형태와 입사각 차이가 구조물의 건전성에 미치는 영향이 연구되어 왔다.

Athanatopoulou 등⁽⁷⁾은 철근콘크리트 복층 구조물에 미치는 지진하중의 영향을 분석하였다. 실제 지진 이력에 근거하여 최대 지반전단력을 비교하였으나, 응력 및 변형률과 같은 공학적 매개변수는 계산하지 않았다. 또한 수평방향의 각도 변화만을 고려하였기 때문에 3차원 지진하중의 영향을 충분히 반영하였다고 보기는 어렵다. 한편 Lopez와 Torres⁽⁸⁾는 단순 콘크리트 구조물에 수평 및 수직방향 별 각도 변화를 고려한 기준 응답스펙트럼을 적용하였다. 구조물의 입사각 별 최대 지반전단력을 구하였으나, 구조건전성에 미치는 민감도 및 영향력은 평가하지 않았다.

본 연구는 지진하중의 입사각 차이가 사용후핵연료 건식 저장시설의 구조건전성에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이다. 먼저 ANSYS Mechanical 2019⁽⁹⁾ 프로그램을 사용하여 해당 시설에 대한 3차원 모드 해석과 응답스펙트럼 해석을 수행한다. 후자의 경우 가상 지진하중과 구조물 사이의 수평각도와 수직각도 간 조합을 달리하며 각 조합 별 최대값 발생 위치와 구조건전성을 확인할 수 있다. 이 때 지반-구조물 상호작용은 고려하지 않았으며, Minitab⁽¹⁰⁾ 프로그램을 사용하여 지진하중 입사각 별 영향력을 정량적으로 비교하고, 그 의미와 이유에 대해 고찰한다.

2. 해석 방법

2.1 모드 해석

모드 해석은 구조물의 고유진동수 및 모드 형상을 도출하는 것이며, 동적 해석을 위해 선행되어야 한다. 대상 구조물은 선형 거동으로 가정하며, 구조물의 모드 별 고유진동수와 모드 형상, 참여계수, 유효질량비 등이 도출된다⁽¹¹⁾.

Fig. 1은 본 연구에서 수행한 내진 해석 흐름을 간략히 나타낸 것으로써, 고유진동수와 지진 진동수 영역의 비교를 통해 공진현상 발생 가능성에 대비하여야 한다. 설비의 고유진동수에 미치는 유효질량비(effective mass ratio)의 중요성을 감안하여 해석 시 전체의 90% 이상을 도출하였다.

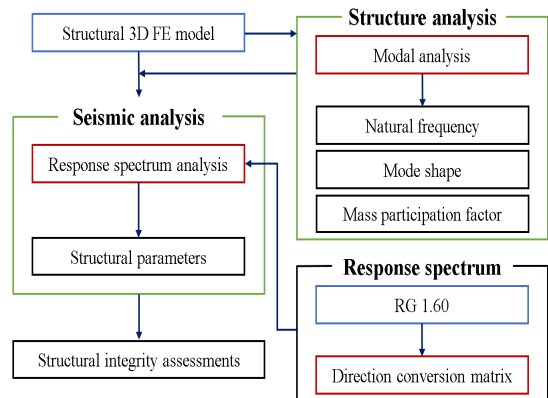


Fig. 1 Seismic analysis flow adopted in this study.

2.2 응답스펙트럼 해석

일반적으로 원전 구조물의 내진 해석 및 평가에 관한 연구는 시간이력 해석 또는 응답스펙트럼 해석을 이용하여 수행되고 있다. 시간이력 해석은 하중에 따라 구조물의 강성에 큰 변화가 발생하는 비선형해석에 적용된다. 그러나 해석에 상당한 자원이 소요되기 때문에 다양한 가정으로 일반화가 가능한 단순 지지 구조물이나 과도 해석이 필요한 특정 국부 영역에 대한 결과 도출에 제한적으로 사용되어왔으며, 층 응답스펙트럼을 추출 방법으로 이용한다. 최근 NRC는 전산해석 기술 및 자원의 급격한 발전 추세를 감안하여 비선형 시간이력 해석을 요구하고 있다. 응답스펙트럼 해석은 유한요소모델의 다자유도계 시스템을 선형 단자유도계 시스템의 복합체로 가정하여 임의 모드에서의 최대 응답을 모드 별 응력 및 변형률 형

태로 도출하는 방법으로 구조건전성을 평가 시 상대적으로 적은 해석 자원이 요구된다. 본 연구에서는 후자의 방법을 채택하였다.

NUREG-1061⁽¹²⁾에서는 3가지 응답스펙트럼 조합 방법을 제시하고 있다. SRSS(Square Root of the Sum of the Square) 방법은 모드 별 응답을 제공하여 더하고 제곱근을 취하는 합산법이다. 내진 해석에서 가장 많이 사용되는 방법이지만, 유효질량비가 높은 2개의 인접 모드의 고유진동수가 작은 모드의 진동수 크기의 10% 이내에 서로 속할 경우 응답이 과소 또는 과대평가될 수 있다. 해결책으로 모드 별 응답의 보정 결과를 이용하거나 Rosenbluth 방법 또는 CQC(Complete Quadratic Combination) 방법을 적용한다. 모드 간의 확률적인 상관도를 모드 별 감쇠비와 진동수비를 이용한 상관계수로 만들어 과소·과대를 줄이기 위한 것이다. 그러나 두 방법은 랜덤진동 해석에 주로 사용되며, 응답스펙트럼의 범위가 고유진동수에 비해서 넓을 시 적합하다. 반면 본 연구에서 사용한

응답스펙트럼의 범위는 10Hz 이상의 지진하중 고진동수 대역을 포함하고 있으며, 후술하는 모드 해석 결과에서 확인할 수 있듯이 대부분의 고유진동수 계산 결과는 지진하중 고진동수 범위에 포함된다. 또한 해석에 주로 영향을 미치는 모드 간 고유진동수간 차이가 10% 이상인 경우가 있어 SRSS 방법을 채택하였다.

3. 내진 해석

3.1 해석 모델 및 조건

3.1.1 사용후핵연료 건식 저장시설

Fig. 2는 사용후핵연료 건식 저장시설⁽¹³⁾의 형상 및 특징을 보여주는 개략도이다. Fig. 2(a)에 나타난 전체 구조의 크기는 가로 21.67m, 세로 12.66m, 높이 7.53m이고 1m 두께의 철근콘크리트 전단벽으로 구성된다. Fig. 2(b)에 도시한 냉각 시스템은 상·하단의 유로를 통해 사용후핵연료에서 방출되는 방사열을 대기 순환으로 냉각시키는 방식이며, 방사선의

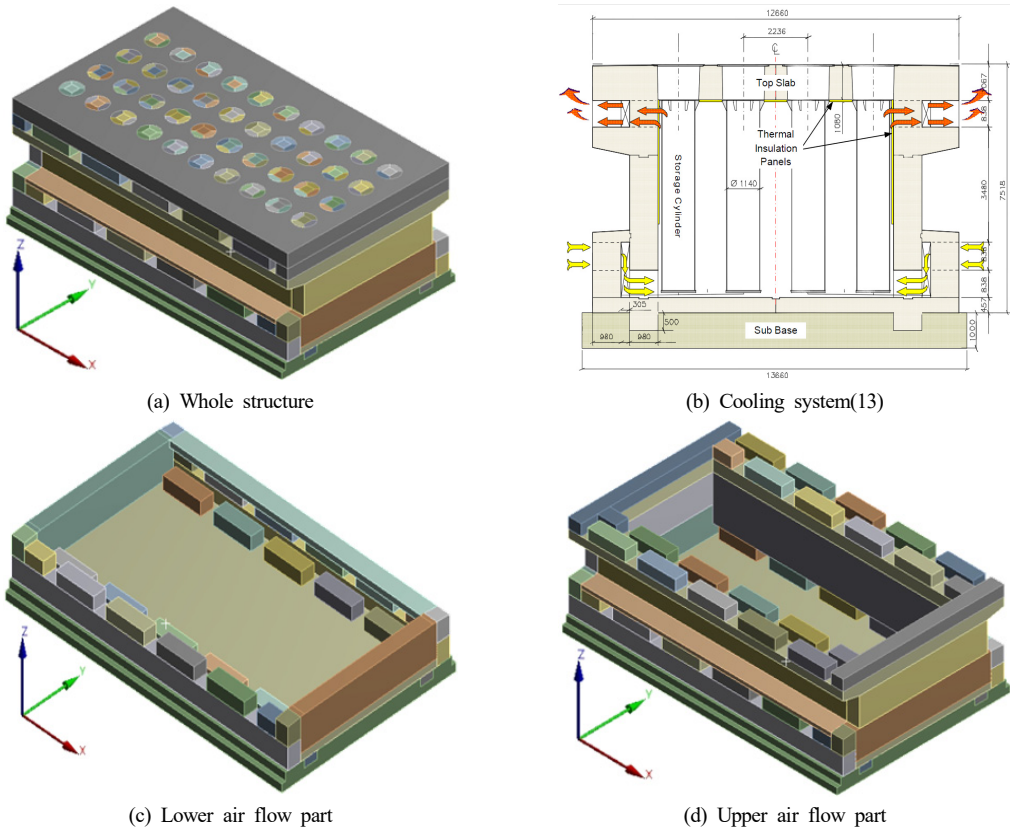


Fig. 2 Schematics of a spent nuclear fuel dry storage facility.

물리적 방호를 위해 배치는 지그재그 형태로 되어 있다. 유로의 형성은 건식 저장시설의 기능이 건전하게 유지되는지에 대한 지표로써 철근이 이어지는 일체 거동을 보이며, 구조건전성 평가 시 주요 관심 부가 된다. 중간 연결체를 기준으로 천장부와 연결되는 상단 유로와 지반에 지지되는 하단 유로로 나누어 있으며, 각각은 Fig. 2(c) 및 2(d)에 나타난 것처럼 단층 또는 복층 구조로 차이가 있다.

철근콘크리트 전단벽을 정밀하게 모델링하기 위해서는 도면의 확보뿐만 아니라 상당한 노력과 시간이 요구된다. 본 연구는 건식 저장시설의 설계가 아닌 지진하중 입사각이 구조건전성에 미치는 영향을 분석하는 것이기 때문에 내부 구조를 등가물성 콘크리트로 단순화시켰다. 또한 저장 대상인 사용후핵연료와 캐니스터의 경우 모델링에서 제외하였다. 경계조건으로 구조물의 하단면을 모든 방향으로 구속하였고 해석 모델은 Solid186(3차원 20-절점 고체, 3차원 15-절점 고체) 유한요소로 구성하였다. 전체 절점 수는 2,123,440개이고 유한요소 수는 483,160개다.

3.1.2 재료물성

Table 1은 유한요소 모델 단순화와 연계하여 철근의 특성 반영을 위해 콘크리트에 부여한 등가물성을 정리한 것이다. 이 중 일부는 2중 철근콘크리트 실험 결과를 토대로 Mander 등⁽¹⁴⁾과 Binici⁽¹⁵⁾가 제안한 예측식을 사용하여 계산하였으며, 인장강도는 압축강도의 10%로 가정했다. 지면 관계상 상세 내용 대신 주요 관련 항목만 기호 설명과 식 (1) - (6)에 요약하여 나타내었다.

본 연구에서는 탄성해석을 수행하였으며, 그 결과와 관계식을 이용해 구한 재료의 강도를 비교하여 구조건전성을 판단하였다.

Table 1 Equivalent material properties of concrete⁽¹⁵⁾

Parameter	Value
Density (kg/m ³)	2,400
Young's modulus (MPa)	34,800
Poisson's ratio	0.2
f_{cu} (MPa)	30
f_{cc} (MPa)	45
K	1.50

$$f_{cu} = 12 + f'_c(K-1) \text{ in MPa} \quad (1)$$

f_{cu} experimental results of Mander et al.⁽¹⁴⁾

K = confinement ratio (K>1)

$$\epsilon_{co} = 0.0015 + \frac{f'_c(\text{MPa})}{70000} \quad (2)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_c(\text{MPa})} \quad (3)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}(1 + 5(K-1)) \quad (4)$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}, \quad x_u = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cc}} = 5, \quad x_f = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_{cc}}, \quad n = \frac{E_c \epsilon_{cc}}{f'_{cc}} \quad (5)$$

$$f_c = \begin{cases} kf'_c(1 - |1-x|^n) & 0 \leq x < 1 \\ kf'_c - (f'_c - 12)\left(\frac{x-1}{x_u-1}\right) & 1 \leq x < x_u \\ f_{cu} \left(\frac{x-x_f}{x_u-x_f}\right) & x_u \leq x < x_f \end{cases} \quad (6)$$

3.1.3 지진하중 조건

구조물에 대한 지진하중으로는 NRC RG 1.60⁽³⁾에 제시된 가속도 기반 설계응답스펙트럼이 적용되고 있다. 연구대상인 건식 저장시설⁽¹⁶⁾의 실제 설계기준지진 최대 지반가속도(Peak Ground Acceleration; PGA)는 수평 지진하중 0.2g, 수직 지진하중 0.133g이다. 그러나 본 연구에서는 설계기준초과사고(beyond design basis accident) 가능성에 대비하는 차원에서 NRC RG 1.60에 따라 수평 지진하중 0.3g와 수직 지진하중 0.2g로 가상 입력 PGA를 설정하였고, 이는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 감쇠비는 NRC RG 1.61⁽⁵⁾에 제안된 범위를 초과하는 지진하중으로 ASCE 4-16⁽¹⁷⁾에서 제한한 값 10%를 적용하였다.

수평 및 수직 지진하중과 입사각을 고려하여 해석에 사용할 응답스펙트럼을 결정하며, 이를 위해 Huang 등⁽¹⁸⁾이 구성한 변환 행렬식 (7)을 이용하였다. 수평 2개 방향(X, Y축)과 수직 1개 방향(Z축)은 직교 관계에 있어 전술한 바와 같이 상호연관성이 없으므로, 지진하중을 3축 성분으로 분해 후 방향별로 각도 변환하여 X, Y, Z축으로 합산하였다. 각도 변환의 기준은 Fig. 4와 같이 가상 입력 PGA와 Z축과의 각도를 θ_v , X축과의 각도를 θ_h 로 설정하였다. 변환 전 응답스펙트럼 U1(X축), U2(Y축)과 U3(Z축)뿐만 아니라 변환 후 응답스펙트럼 U1', U2'과 U3'도 서로 직교한다. U1을 각도 변환의 기준으로 하고,

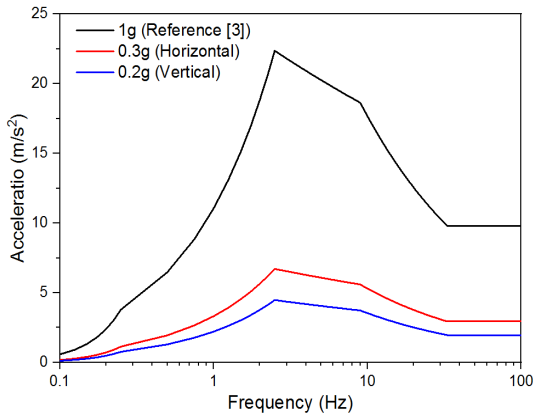


Fig. 3 Response accelerations based on RG 1.60(3).

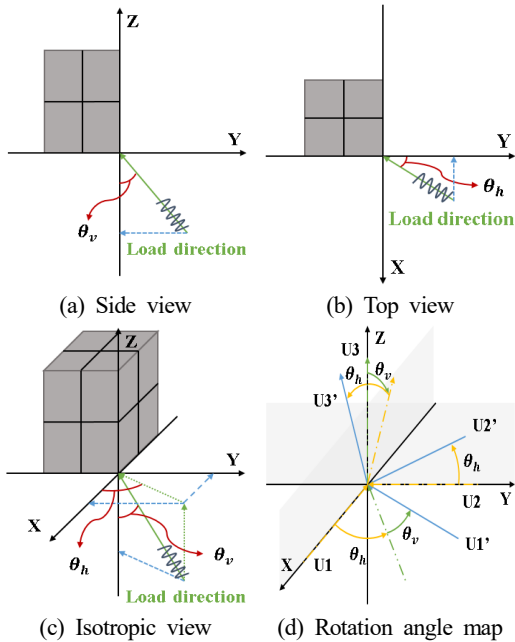


Fig. 4 Spectra conversion considering incident angles.

Table 2 Postulated seismic loads and incident angles

Analysis matrix		Vertical angle (θ_v)				
		0°	30°	45°	60°	90°
Horizontal angle (θ_h)	0°	Horizontal PGA: 0.3 g Vertical PGA: 0.2 g				
	30°					
	45°					
	60°					
	90°					

U2의 경우 θ_v 의 변환 없이 θ_h 에 대해서만 변환하였으며, U3는 θ_h 와 θ_v 모두 변환하였다. 본 논문에서 지진파의 진행 방향 축회전을 제외하였기 때문에 U2는 θ_v 에 무관하다. 또한 지진하중 입사각의 전체적인 경향성을 확인하기 위하여 0° ~ 90°의 값으로 변화시켰다.

Table 2는 고려한 수평 및 수직 지진하중 각도를 입력 PGA에 따라 정리한 것이며, Fig. 5는 변환된 각 방향 별 응답스펙트럼의 최대값을 나타낸 것이다.

$$\begin{bmatrix} U1' \\ U2' \\ U3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_h \cos\theta_v & -\sin\theta_h & -\cos\theta_h \sin\theta_v \\ \sin\theta_h \cos\theta_v & \cos\theta_h & -\sin\theta_h \sin\theta_v \\ \sin\theta_v & 0 & \cos\theta_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U1 \\ U2 \\ U3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.2 해석 결과

3.2.1 모드 해석

모드 해석을 통해 건식 저장시설의 고유진동수와 변형 형상 등을 구하였다. 신뢰성 확보를 위해 1,000개의 모드를 추출하여, 각 축의 방향 별 유효질량비가 최소 90% 이상이 되도록 하였다.

Table 3은 대표적 해석 결과의 하나로 각 축의 최대유효질량비를 정리한 것이며, X, Y, Z축에서의 최대값은 각각 53.1%, 45.6%, 10.3%로, 방향 별 유효질량비의 차이는 최대 30% 이상으로 확인되었다.

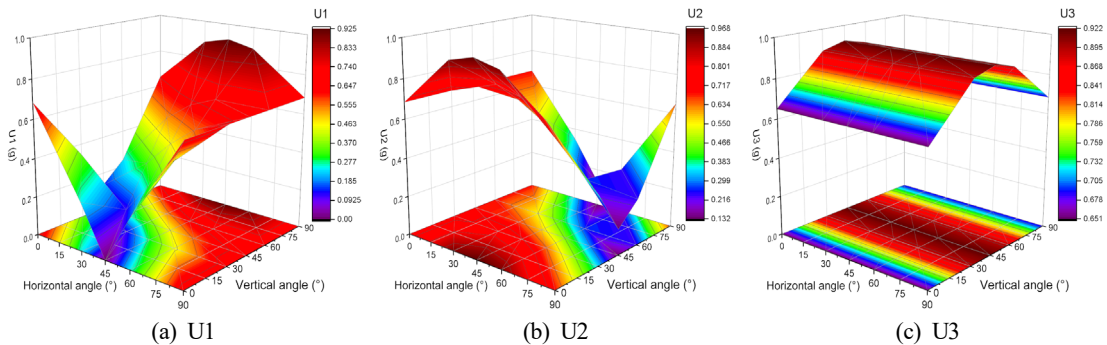


Fig. 5 Conversion results of each directional seismic response spectrum.

Table 3 Effective mass ratios with frequencies at typical modes

Mode	Frequency (Hz)	Effective mass ratio (%)		
		X (→) direction	Y (←) direction	Z (←) direction
1st	25.27	0	45.61	0
2nd	38.87	0	0	10.27
3rd	40.86	53.10	0	0

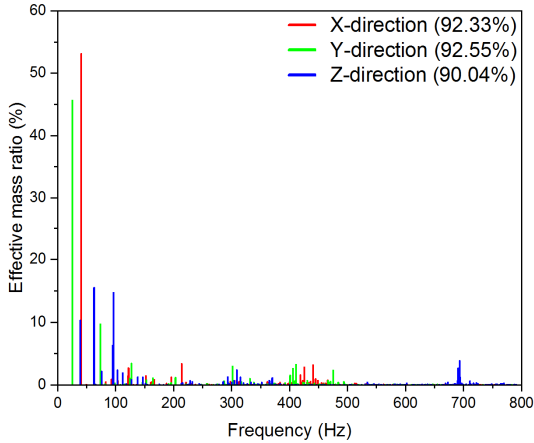


Fig. 6 Effective mass ratios for each direction

Fig. 6은 고유진동수와 각 방향 별 유효질량비의 관계를 나타낸 것이며, 동일하지는 않지만 상대적으로 저차 모드에서 큰 값이 발생하였다. Fig. 7는 주요 모드 형상의 변위를 1.5배 크게 하여 비교한 것이다. Figs. 7(a) - (c)에서 최대 전체 변형 형상을 그리고 Figs. 7(d) - (e)에서 방향별 최대 변형 형상을 확인할 수 있다.

3.2.2 응답스펙트럼 해석

지진하중 입사각 변화에 따른 응답스펙트럼 해석을 수행하였다. 여러 공학적 매개변수를 분석하였으며, 대표적인 결과로 최대 주변형률과 최대 주응력을 비교하였다. Fig. 8은 각 조건 별 최대 주변형률 분포를 보여주는 것으로써 $\theta_h = 45^\circ$ 및 $\theta_v = 0^\circ$ 일 때 4.80×10^{-5} 의 가장 큰 값이 발생하였다. 최대 주응력의 변화도 동일한 경향을 보였는데, $\theta_h = 45^\circ$ 및 $\theta_v = 0^\circ$ 일 때 1.67MPa의 최대값이 계산되었다.

최대 주변형률과 주응력은 2개 위치에서 최대값을 가지는데, Fig. 8(b)의 붉은 라벨로 표시된 상·하단 유로 연결체 끝단의 불연속부와 Fig. 8(e)의 상단 유로 중앙부이다. 이는 앞서 기술한 모드 해석 결과와도 깊은 관련이 있다. Fig. 7(f)에 나타난 1차 모드에서의 Y축 방향 최대

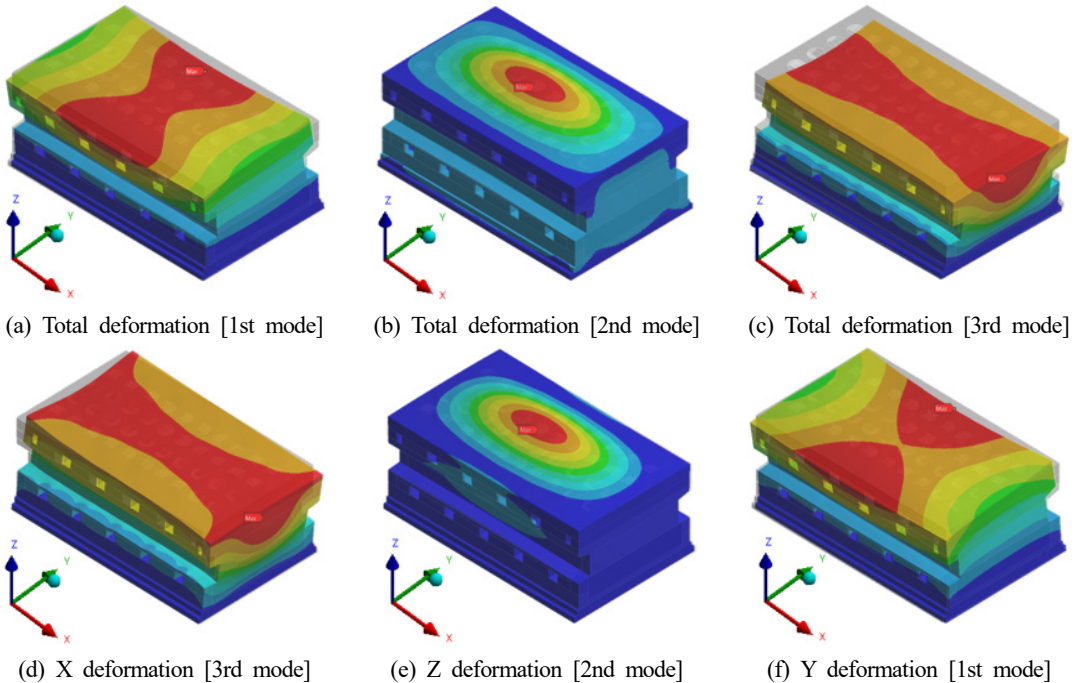


Fig. 7 Representative modal analysis results.

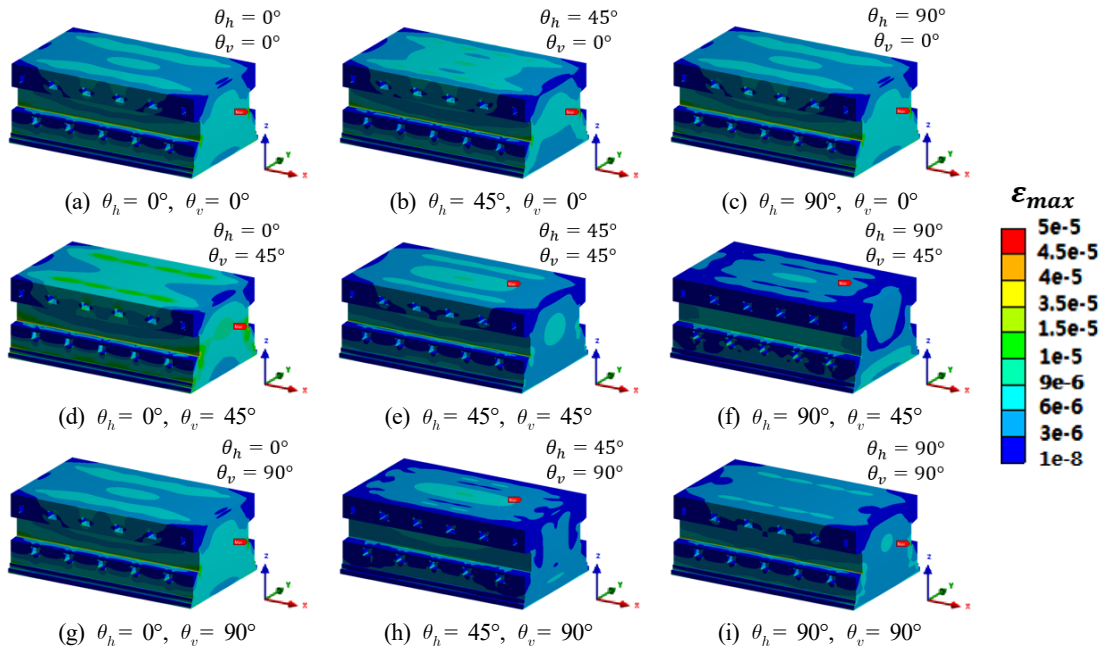
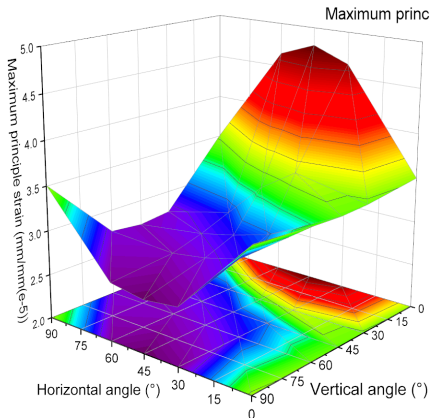
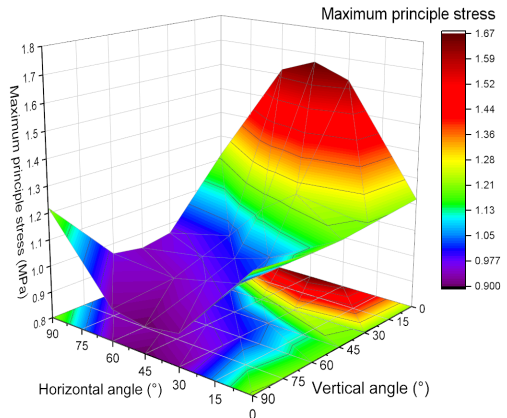


Fig. 8 Contour plots of the maximum principal strains (ϵ_{max}).



(a) Maximum principal strain (ϵ_{max})



(b) Maximum principal stress (σ_{max})

Fig. 9 Response spectrum analysis results.

Table 4 Maximum principal strain per cases

Analysis results $\epsilon_{max} (\times 10^{-5})$		Vertical angle (θ_v)				
		0°	30°	45°	60°	90°
Horizontal angle (θ_h)	0°	3.50	3.43	3.42	3.44	3.51
	30°	4.64	3.59	3.01	2.87	2.64
	45°	4.80	3.33	2.90	2.77	2.59
	60°	4.65	2.94	2.81	2.71	2.65
	90°	3.51	2.75	2.71	2.75	3.51

변형 위치와 Fig. 8(e)의 최대 주변형률 계산 위치는 상단 유로 장축 중앙부로 동일하였다. 반면, Fig. 8(b)에 나타난 최대 주변형률 계산 위치는 불연속 부에서 가장 높게 나타났다. 각 모드 별 응력이 집중되는 연결체와 불연속부라는 특징 때문으로 확인되었다.

Fig. 9은 지진하중 입사각 변화에 따른 최대 주변형률과 최대 주응력의 변화를 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 쉽게 확인할 수 있듯이 2가지 주요 매개변수의 계산 결과가 변화하는 경향은 거의

유사하였다. 모든 해석 조건에서 수평방향 각도(θ_h)가 45°에 가까울수록 큰 값들이 도출되었으며, 수직방향 각도(θ_v)의 변화에 따라 최대 주변형률 및 최대 주응력의 변화가 발생하였다. Table 4에서는 조건 별 최대 주변형률 계산 결과를 정리하였다.

3.2.3 입사각 별 영향

전 절에서 응답스펙트럼 해석 결과에 미치는 θ_h 와 θ_v 의 영향력 차이를 확인하였는데, 이는 파레토 차트와 상호작용효과 차트의 정규화를 통하여, 보다 구체적으로 비교할 수 있다. 정규화는 최대값이 나타나는 $\theta_h = 45^\circ, \theta_v = 0^\circ$ 를 기준으로 수행하였다. 먼저 정규화의 적합도 확인이 필요하므로, Fig. 10과 같은 조건 별 잔차(residual)의 정규분포도를 통해 이를 판단하였다.

잔차는 정규분포도와 해석 결과 간 분산의 제공근이다. 적합도는 해석 결과로 적합도별 잔차의 분포로 해석의 적절함을 확인할 수 있다. 본 해석의 경우 특이치가 10% 이내일 뿐만 아니라 조건의 임의성이 잘 나타나기 때문에 지진하중 입사각 해석 조건의 선정은 적합한 것으로 판단된다.

해석의 영향력은 통계처리 기법을 활용하여 정량화할 수 있다. Fig. 11(a)의 파레토 차트에서는 영향력의 크기를 수치로 비교하였으며, θ_v 의 영향력이 θ_h 에 비해 87% 크게 나타났다. α 는 유의수준으로 인자가 유의미하다는 잘못된 결정을 내리는 제1종 오류의 확률에 대한 기준이다. 통계처리 시 α 를 5%로 정하였고, 파레토 차트상 값은 2.120이다. 한편 인자들 간의 간섭작용에 해당하는 상호작용효과를 살펴보았다. Fig. 11(b)에서 θ_h 변화에 따라 선도가

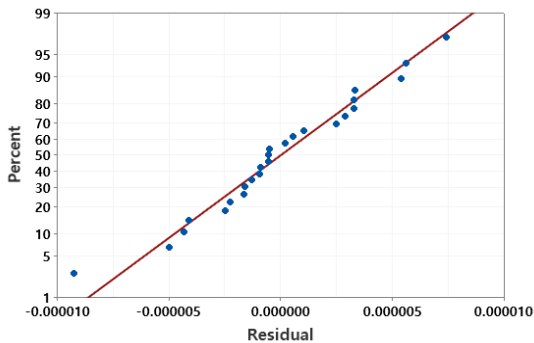
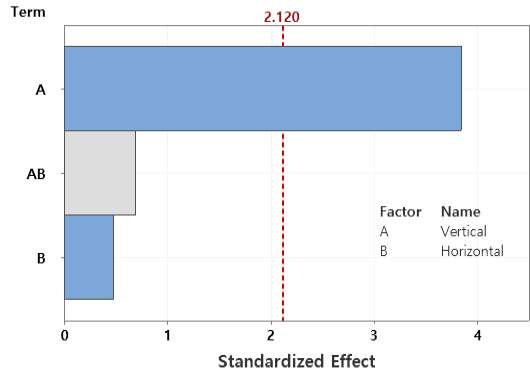
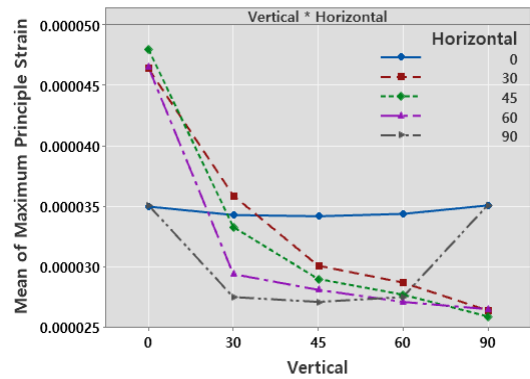


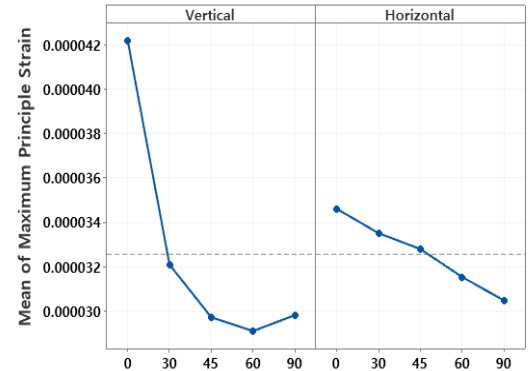
Fig. 10 Appropriateness of analysis cases with normal distribution graph



(a) Pareto chart



(b) Interaction effect chart of each case



(c) Averaged interaction effect chart

Fig. 11 Influence of θ_h and θ_v .

교차하므로, θ_h 에 의한 상호작용효과가 발생한다. 또한 Fig. 11(c)의 평균 상호작용효과 그래프에서 θ_v 의 평균 기울기가 θ_h 에 비해 68% 더 크게 나타났으며, 이는 θ_v 의 영향력이 더 크음을 의미한다.

해석의 영향력 차이는 고유진동수와 유효질량비로 설명할 수 있다. 사용후핵연료 건식 저장시설의

수평방향(X, Y축) 유효질량비는 주로 저차 모드에서 나타나며, 수직방향(Z축)은 고차 모드에서 대부분의 유효질량비가 나타난다. 동적 구조건전성은 33Hz 미만의 진동 하중에 의해 주된 영향을 받기 때문에 수직하중의 영향이 고차 모드에서 주요한 본 해석 대상의 특성으로 인해 모드 해석 결과만 분석할 경우 θ_v 가 θ_h 보다 작은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나 지진하중의 크기와 응답스펙트럼 고려 시 θ_v 의 변화로 인하여 0.3g의 수평하중이 수직하중으로 변환되고 0.2g의 수직하중이 수평방향으로 작용된다. 따라서 수직방향으로 큰 하중이 주어지고 수평방향으로 작은 하중이 가해져, θ_v 에 따른 결과의 변화가 θ_h 에 비해 크게 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 지진하중의 변화가 사용후핵연료 건식 저장시설의 구조건전성에 미치는 영향을 분석하였다. 모드 해석을 통해 고유진동수와 변형 형상을 파악하였고, 수평 및 수직 입사각(θ_h 및 θ_v) 변화에 따른 응답스펙트럼 해석을 수행하였으며, 통계 처리 기법을 활용한 입사각 별 영향력의 정량적 비교 및 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 최대 주변형률은 $\theta_h = 45^\circ$, $\theta_v = 0^\circ$ 일 때 발생하였으나, 이를 포함한 모든 조건에서 계산된 최대 주응력은 1.67MPa로 Table 1에 제시된 압축강도의 10%인 3MPa 미만이었다. 이는 설계기준 초과사고에 해당하는 수평하중 0.3g 및 수직하중 0.2g 조합의 가상 지진하중 하에서 해석 대상의 건전성이 유지됨을 의미한다.
- 입사각의 변화는 내진 해석 결과에 유의미한 차이를 발생시켰다. 대표적인 예로 $\theta_h = 45^\circ$ 및 $\theta_v = 0^\circ$ 인 경우와 $\theta_h = 45^\circ$ 및 $\theta_v = 90^\circ$ 인 경우의 해석 결과를 비교하였을 때, 최대 주변형률에서 약 46%의 차이가 나타났다.
- 응답스펙트럼 해석을 통해 취약 부위로 예측된 곳은 모드 해석에서 최대 변형이 발생한 부위와 일부 동일하였다. 해당 부위는 총 변형의 영향을 받은 상·하단 유로 연결체의 끝단 불연속부와 Y축 방향 변형의 영향을 받은 상단 유로 장축 중앙부이다.
- 사용후핵연료 건식 저장시설의 고유진동수와

유효질량비 특성으로 인하여 내진 해석에 미치는 입사각의 영향력이 다르게 나타났다. θ_v 의 영향력이 θ_h 에 비해 최대 68%까지 높게 나타났으며, 이는 수직방향 지진하중의 변화에 더 큰 영향을 받음을 의미한다.

후 기

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성 사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20184030202170)

참고문헌

- (1) F. C. Graves, M. R. Geronimo and G. A. Graves, 2012, "Centralized Dry Storage of Nuclear Fuel Lessons for U.S. Policy from Industry Experience and Fukushima," The Brattle Group.
- (2) L. H. Hamilton, 2012, "Report to the Secretary of Energy," Blue ribbon commission on america's nuclear future.
- (3) Regulatory Guide 1.60 Rev.2, 2014, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plant," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C.
- (4) USNRC, 2007, "Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, NUREG-0800.
- (5) Regulatory Guide 1.61 Rev.1, 2007, "Damping Value for Seismic Design of Nuclear Power Plants," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C.
- (6) M. Watabe and M. Tohdo, 1979, "Analyses on Various Parameters for the Simulation of Three-Dimensional Earthquake Ground Motions," In Transaction of the 5th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, 13-17 August, Berlin, Germany, Number K1/1 in K(a), pp.1-11.
- (7) A. M. Athanatopoulou, A. Tsourekas and G. Papamanolis, 2005, "Variation Of Response With Incident Angle Under Two Horizontal Correlated Seismic Components," Earthquake Resistant Engineering Structures V, Vol. 81, pp.183-192. doi: 10.2495/ERES050181.
- (8) O. A. López and R. Torres, 1997, "The Critical Angle

- of Seismic Incidence and the Maximum Structural Response,” *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 26, pp.881-894. doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(199709)26:9<881::AID-EQE674>3.0.CO;2-R.
- (9) ANSYS, Inc, 2019, “ANSYS Mechanical User’s Guide,” Release 2019 R3.
- (10) Minitab, 2020, “Getting Started with Minitab 19 for Windows,” Release 19.2020.1.
- (11) T. K. Datta, 2010, *Response Analysis for Specific Ground Motions, Seismic Analysis of Structures*, Wiley, Singapore.
- (12) USNRC, 1984, “Evaluation of Other Dynamic Loads and Load Combinations,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, NUREG-1061, Vol. 4.
- (13) K. H. Lee, J. H. Yoon, B. I. Choi and H. Y. Lee, 2004, “Heat Transfer Analysis of Consolidated Dry Storage System for CANDU Spent Fuel considering Environmental Conditions of Wolsong Site,” *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Gyeongju, Korea, 27-28 May.
- (14) J. B. Mander, M. J. N. Priestley and R. Park, 1988, “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete,” *J. Struct. Eng.*, Vol. 114, No. 8, pp.1804-1826. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).
- (15) Baris Binici, 2005, “An analytical model for stress-strain behavior of confined concrete,” *Engineering Structures*, Vol. 27, pp.1040-1051, doi: 10.1016/j.engstruct.2005.03.002.
- (16) K. H. Lee, J. H. Yoon, K. H. Yang, B. I. Choi, H. Y. Lee and G. Cho, 2003, “Design Requirements of A Consolidating Dry Storage Module for CANDU Spent Fuels,” *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Gyeongju, Korea, 29-30 May.
- (17) ASCE, 2017, “Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary,” American society of civil engineers, Virginia.
- (18) J. Q. Huang, X. L. Dua, M. Zhao and X. Zhao, 2017, “Impact of Incident Angles of Earthquake Shear (S) Waves on 3-D Non-linear Seismic Responses of Long Lined Tunnels,” *Engineering Geology*, Vol. 222, pp.168-185. doi: 10.1016/j.enggeo.2017.03.017.