

# JEAC 4601에 의한 전단벽 구조물의 비선형 복원력 특성에 대한 고찰

## A Study on the Nonlinear Restoring Force Characteristics for Shear Wall Structures by JEAC 4601

이원훈<sup>1)</sup> · 김희균<sup>2)</sup> · 송성빈<sup>3)</sup> · 황기태<sup>4)\*</sup>Lee, Won Hun<sup>1)</sup> · Kim, Hee Kyun<sup>2)</sup> · Song, Sung Bin<sup>3)</sup> · Hwang, Kee Tae<sup>4)\*</sup><sup>1)</sup>(주)에코닝 엔지니어링팀 과장, <sup>2)</sup>(주)에코닝 연구소장, 공학박사, <sup>3)</sup>(주)에코닝 기술이사, 공학박사, <sup>4)</sup>(주)에코닝 대표이사, 공학박사<sup>1)</sup>Manager, Econing Co.,Ltd, <sup>2)</sup>Research Institute Director, Econing Co.,Ltd, <sup>3)</sup>Technical Director, Econing Co.,Ltd, <sup>4)</sup>President, Econing Co.,Ltd,

### / A B S T R A C T /

Structures of domestic nuclear power plants are designed to perform elastic behavior against beyond design earthquakes, but studies on the nonlinear behavior of structures have been insufficient since the beyond design earthquake. Accordingly, it is judged that it will be necessary to develop an evaluation method that considers the nonlinear behavioral characteristics to check the safety margin for a standard nuclear power plant structure. It is confirmed that the restoring force characteristics for each member level can be identified through the calculation formula, and the lateral stiffness for each story can also be easily calculated by JEAC 4601. In addition, as a result of applying the evaluation method of JEAC 4601 as a nonlinear restoring force model of the nuclear power plant, a certain degree of safety margin can be identified.

**Key words:** JEAC 4601, Earthquake, Nuclear power plant, Non-linear restoring force

## 1. 연구의 배경 및 목적

국내 원전의 경우, 안전정지 기준 0.2 g PGA 수준에서 탄성 설계를 수행하고 있다. 그러나, 동일본 대지진 발생으로 인하여 후쿠시마 원전시설에 피해가 발생하였으며 국내 또한, 2016년과 2017년에 발생한 경주지진과 포항지진을 겪으면서 설계기준을 초과하는 지진 발생 가능성이 대두되고 있다. 이에 따라 국내에도 설계기준을 초과하는 지진 발생 가능성과 관련된 가동 원전의 안전성 문제가 제기되었으며, 이에 따른 내진 성능평가와 관련된 다양한 연구가 수행되고 있다[1].

국내 원자력발전소의 구조물, 계통 및 기기는 설계기준지진에 대해 탄성 거동을 수행하도록 설계하고 있으나, 설계 초과지진 이후부터 구조물의 붕괴 전까지는 콘크리트의 균열이나 배관계의 항복, 그리고 구조물-지반 사이의 접촉 거동 등에 의하여 비선형 거동특성이 나타나지만 이에 관련된 연구가 부족한 상황이다[2].

따라서 표준형 원전의 구조물, 원자로 냉각재계통에 대해 안전여유도 확

인을 위한 비선형 거동특성을 고려한 평가법을 개발할 필요가 있을 것으로 판단하였으며, 이에 따라 설계 초과지진에 대한 구조물 및 기기의 비선형 거동특성에 관련한 연구가 체계적으로 수행됨에 따라 원자력발전소의 안전 여유도 확인과 지진 발생 시 원전 시설물의 실제 거동특성에 대하여 파악이 가능할 것으로 판단하고 있다[3].

이에 본 연구에서는 일본의 “원자력발전소 내진설계기술지침(JEAC 4601)”과 “원자력발전소 내진설계기술규정(JEAC 4601)”에서 제시하고 있는 내진벽의 비선형 스켈레톤 커브 (Skeleton Curve) 모델을 적용하여 진동실험 결과와 해석적 결과를 비교 검증하여 그 적용 타당성을 확인하는데, 그 목적이 있다.

## 2. 내력벽의 모델링

### 2.1 벽체의 비선형 모델링

벽체의 비선형 부재 모델에 대해서는 종래 다양한 제안이 발표되고 있으나, 이 논문에는 Fig. 1과 같이 등가 기둥 상하부에 강체 보 요소를 설정하고, 중앙부에는 등가 기둥 모델을 제안하였다. 재단에는 비선형 휨 스프링, 부

\*Corresponding author: Hwang, Kee Tae

E-mail: econing@econing.co.kr

(Received February 18, 2021; Revised April 5, 2021; Accepted April 5, 2021)

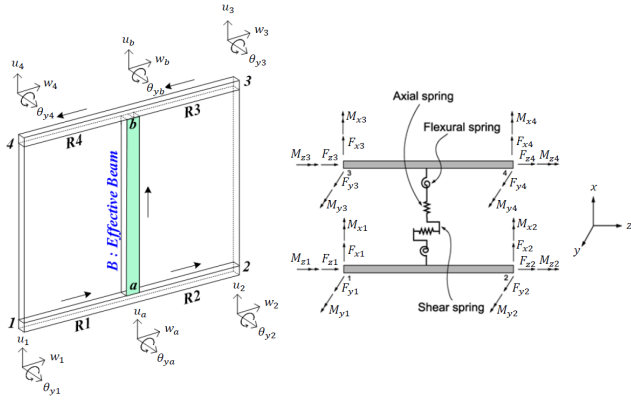


Fig. 1. Non-Linear mathematical model of Shear wall [4]

재 중앙에 비선형 전단 스프링을 갖는 모델로 구현할 수 있으며 비선형 스프링의 복원력 특성은 보통 몇 개의 선형구간의 집합으로 정의할 수 있다[5].

2.2 탄소성 복원력 특성

구조물을 다자유도계 모델로 지진 응답해석을 수행할 경우 벽체의 복원력 특성은 전단응력-전단변형 관계(이하,  $\tau$ - $\gamma$ 관계) 및 모멘트-곡률 관계(이하,  $M$ - $\phi$ 관계)로 정의하며, 모두 3선형(Tri-Linear) 이력 곡선으로 나타낼 수 있다.

2.2.1 전단파괴형 벽체의 복원력 특성 산정 방법

$\tau$ - $\gamma$ 관계의 이력특성은 JEAC 4601-2015 (원자력발전소 내진설계기술 규정, (사)일본전기협회)에서 설명한 바와 같이 최대 점 지향형 특성(Peak-Oriented)으로 반영하고 안정 루프에서는 이력 감쇠를 갖지 않는 것으로 반영하도록 한다.  $\tau$ - $\gamma$ 관계의 이력특성은 다음과 같은 법칙을 적용하여 설정하도록 한다.

- ① 최대 점 지향형으로 하며, 최댓값(또는 반대 방향 최솟값)이 제 1 절점을 지난 후에 돌아오는 것은 반대 측이 제 1 절점을 통과하지 않았다면 반대 측의 제 1 절점과 최댓값 또는 최솟값을 연결하는 직선을 따라 이동.
- ② 최댓값(또는 반대방향 최솟값)은 이력 곡선 위를 이동하는 것에 의해 갱신
- ③ 안정 루프는 면적을 갖지 않도록 반영.

최대 점 지향형 모델을 Fig. 2에 나타내었으며, 각 절점의  $\tau$ - $\gamma$  관계에 대한 상세 계산방법을 Table 1에 나타내었다.

2.2.2 휨 항복형 벽체의 복원력 특성 산정 방법

$M$ - $\phi$  관계의 이력특성은 JEAC 4601-2015 (원자력발전소 내진설계기술 규정, (사)일본전기협회)에서 설명한 바와 같이 최대 점 지향형 특성(Peak-Oriented)으로 반영하고 휨 변형이 전체 변형을 지배하는 비율은 휨 항복 이전에는 꽤 작은 것으로 생각할 수 있으므로, 휨 항복 이전(제 1, 제 2강성 영역 내)의 안정 루프는 면적을 갖지 않는 것으로 한다. 단, 제 3강성 영역 내에서는 이력 감쇠를 고려하는 것으로 한다.  $M$ - $\phi$  관계의 이력특성은 다음과

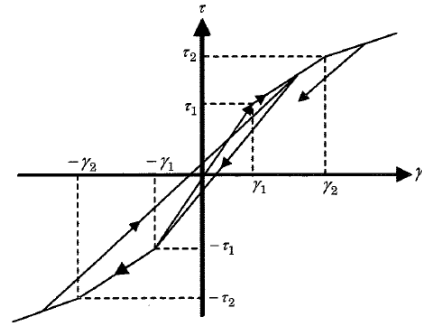


Fig. 2. Peak-Oriented Hysteresis model (Shear) [6]

Table 1. Shear stress ( $\tau$ ) and Shear strain ( $\gamma$ ) [6]

Node	Formula
First Node	$\begin{cases} \tau_1 = \sqrt{0.31 \sqrt{F_c} (0.31 \sqrt{F_c} + \sigma_V)} & (N/mm^2) \\ \gamma_1 = \tau_1 / G \end{cases}$
Second Node	$\begin{cases} \tau_2 = 1.35 \tau_1 & (N/mm^2) \\ \gamma_1 = 3 \tau_1 \end{cases}$
Ultimate Node	$\begin{cases} \tau_3 = \left(1 - \frac{\tau_s}{1.4 \sqrt{F_c}}\right) \tau_0 + \tau_s & (N/mm^2) & \tau_s \leq 1.4 \sqrt{F_c} \\ = 1.4 \sqrt{F_c} & (N/mm^2) \\ \tau_3 = 4.0 \times 10^{-3} \end{cases}$ $\tau_0 = (0.94 - \frac{0.56M}{QD}) \sqrt{F_c}$ <p>In case of <math>\frac{M}{QD} &gt; 1</math>, Apply as <math>\frac{M}{QD} = 1</math></p> $\tau_s = \frac{(P_V + P_H) \sigma_{LSUBs_y}}{2} + \frac{(\sigma_V + \sigma_H)}{2}$

$F_c$  : Compressive strength of concrete ( $N/mm^2$ )

$G$  : Shear modulus of concrete ( $N/mm^2$ )

$ELSUBc$  : Young's modulus of concrete ( $N/mm^2$ )

$P_V, P_H$  : Stirrup ratio, Main rebar ratio

$\sigma_V, \sigma_H$  : Shear stress, Axial stress ( $N/mm^2$ ) (Compression force +)

$\sigma_{LSUBs_y}$  Yield strength of rebar ( $N/mm^2$ )

$\frac{M}{QD}$  : Shear span ratio

같은 법칙을 적용하여 설정하도록 한다.

- ① 제 2강성역 내에서는 최대 점 지향형으로 하고, 최댓값(또는 반대방향 최솟값)이 제 1 절점을 지난 후에 돌아오는 것은 반대 측이 제 1 절점을 통과하지 않았다면 반대 측의 제 1 절점과 최댓값(또는 최솟값)을 연결하는 직선을 따라 이동.
- ② 제 3강성역 내에서는 최대점 지향형으로, 하고, 안정 루프는 최대곡률에 따라 등가 점성 감쇠를 부여하는 평행사변형의 형태인 Degrading Tri-Linear형으로 적용.
- ③ 최댓값(또는 반대 방향 최솟값)이 제 2절점을 넘은 후에 돌아오는 경우 반대 측의 변위가 제 2절점을 넘지 않는다면 반대 측의 제 2절점을 최솟값(또는 최댓값)으로 하는 안정 루프를 형성.
- ④ 안정 루프 내부에서의 반복에 사용되는 강성은 안정 루프의 돌아오는 강

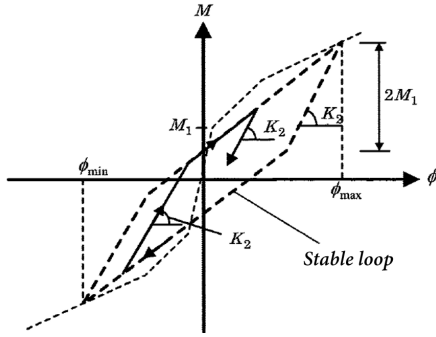


Fig. 3. Degrading Tri-Linear Hysteresis model (Flexural) [6]

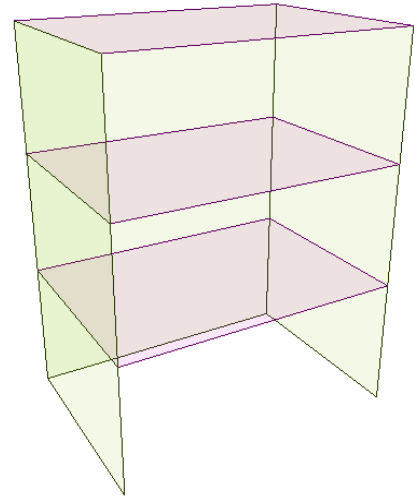


Fig. 4. Structural Analysis model

Table 2. Bending moment (M) and Curvature (phi) [6]

Node	Formula
First Node	$\begin{cases} M_1 = Z_c (f_t + \sigma_v) & (N/mm) \\ \phi_1 = \frac{M_1}{ELSUBc \cdot I_c} & (1/mm) \end{cases}$
Second Node	$\begin{cases} M_2 = M_1 & (N/mm) \\ \phi_2 = \phi_y & (1/mm) \end{cases}$
Ultimate Node	$\begin{cases} M_2 = M_u & (N/mm) \\ \phi_3 = 0.004/X_v & (1/mm) \end{cases}$

$F_c$  : Compressive strength of concrete ( $N/mm^2$ )

$G$  : Shear modulus of concrete ( $N/mm^2$ )

$ELSUBc$  : Young's modulus of concrete ( $N/mm^2$ )

$P_V, P_H$  : Stirrup ratio, Main rebar ratio

$\sigma_v, \sigma_H$  : Shear stress, Axial stress ( $N/mm^2$ ) (Compression force +)

$\sigma LSUBs_y$  : Yield strength of rebar ( $N/mm^2$ )

$\frac{M}{QD}$  : Shear Span Ratio

$I_c$  : Area moment of Inertia (Considered rebar) ( $mm^4$ )

$Z_c$  : Section modulus (Considered rebar) ( $mm^3$ )

$f_t = 0.38 \sqrt{F_c}$  : Flexural tensile strength of concrete ( $N/mm^2$ )

$M_y$  : Yield moment ( $N \cdot mm$ ) [7, 8]

$\phi_y$  : Curvature ( $1/mm$ )

$D$  : Distance of flange ( $mm$ )

$M_u$  : Full Plastic moment ( $N \cdot mm$ ) [7, 8]

성(K2)과 동등한 강성을 갖는다.

⑤ 최댓값(또는 반대 측 최솟값)은 이력 곡선 위를 이동하는 것에 의해 갱신.

Degrading Tri-Linear 모델을 Fig. 3에 나타내었으며, 절점의 M-phi 관계에 대한 상세 계산방법을 Table 2에 나타내었다.

### 2.2.3 전단벽 구조물의 모델링

대상 구조물의 모델은 3차원 입체모델로 Fig. 4에 나타내었으며, 수치해석 정보와 고유치해석 결과를 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 방향별 질량 참여율이 90% 이상 누적되도록 10차 모드까지 고려하였다.

Table 3. Numerical analysis information [9]

Item	Contents
Mode synthesis method	Complete Quadratic Combination method (CQC)
Shear restoring force characteristics	Peak-Oriented model
Flexural restoring force characteristics	Degrading Tri-linear model
PUSH-OVER analysis lateral load pattern	Story shear force distribution using response spectrum analysis [10]
PUSH-OVER analysis load method	Displacement control method
Non-linear time history analysis method	Direct integration method
Analysis model	Lumped mass model / 3D analysis model
Boundary condition of analysis model	Considering the stiffness of the bolt joint of the base plate
Damping ratio	$\xi=0.02$
Considering of damping	Instant stiffness proportion

Table 4. Eigenvalue result

Mode	Frequency (Hz)	Mass participation rate (Trans-X)	Mass participation rate (Trans-Y)	Mass participation rate (Rot-Z)
1 <sup>st</sup>	15.3555	41.3794	0.0000	37.5217
2 <sup>nd</sup>	26.2931	0.0000	75.1399	0.0000
3 <sup>rd</sup>	40.6090	41.1976	0.0000	37.9014

## 3. 비선형 해석

### 3.1 벽체의 복원력 산정

구조체의 재료 강도와 배근 상세를 반영하여 벽체의 비선형 복원력 특성을 산정하였으며, Fig. 5, Fig. 6과 같이 Skeleton Curve를 작성할 수 있다.

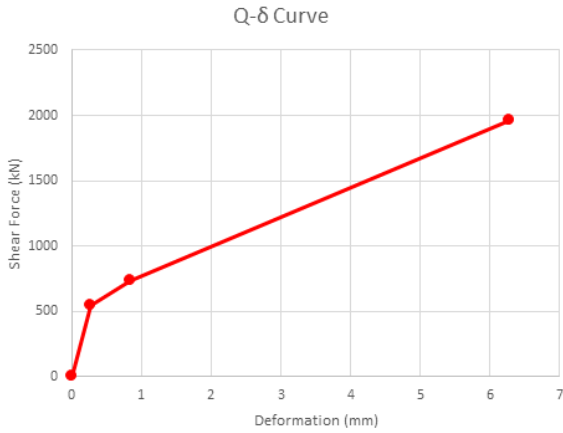


Fig. 5. Shear restoring force characteristics

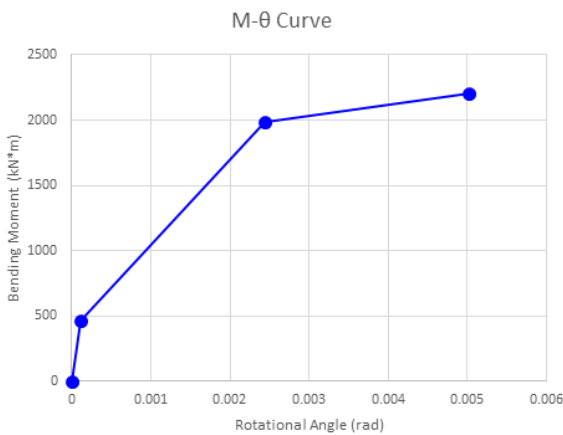


Fig. 6. Flexural restoring force characteristics

### 3.2 비선형 정적해석 [11]

#### 3.2.1 X방향 비선형 정적해석

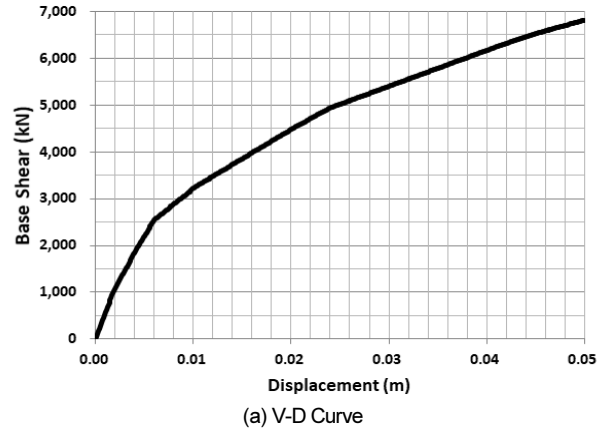
해석모델의 벽체에 비선형 복원력 특성을 입력한 후 비선형 정적해석을 수행하였다. 구조물의 성능점은 역량스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, 이하 CSM[3])을 사용하여 구조물의 최대요구가속도와 변위를 산정하였다.

##### (1) 역량스펙트럼

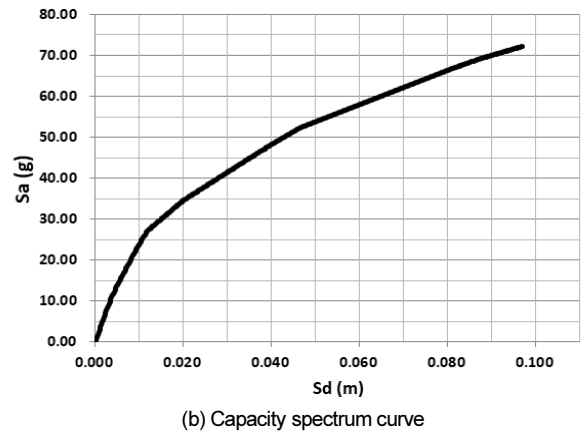
구조물의 보유 내력 & 변위 관계를 역량스펙트럼 가속도 & 스펙트럼 변위의 관계로 변환할 수 있다. Fig. 7에 구조물의 보유 내력 & 변위 관계 및 역량스펙트럼 가속도 & 스펙트럼 변위의 관계를 나타내었다. 역량스펙트럼을 확인한 결과, 구조물의 중량에 비해 보유 내력이 월등하게 크기 때문에 y축의 역량스펙트럼가속도가 1.0 g를 초과하는 것으로 확인하였다.

##### (2) 요구스펙트럼

요구스펙트럼을 산정하기 위한 지진파는 한국원자력연구원에서 제공 받은 명계리 지진파(NS방향, 1.0G PGA 수준)를 사용하였으며, 감쇠비 2%에 대한 응답가속도 & 응답 변위 스펙트럼으로 산정하였다. 산정한 요구스펙트럼은 Fig. 8에 나타내었다.



(a) V-D Curve



(b) Capacity spectrum curve

Fig. 7. Capacity Spectrum (X-dir)

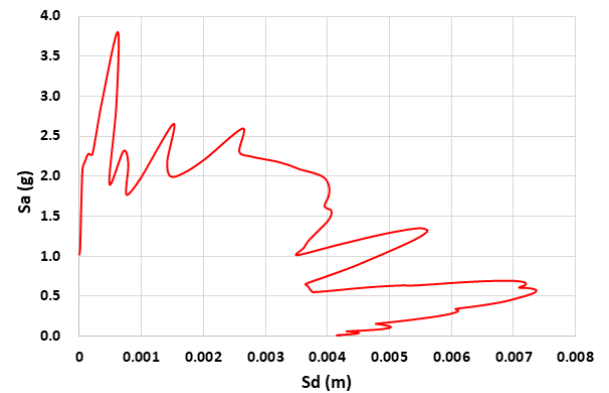


Fig. 8. Elastic Demand Spectrum

##### (3) 성능점 산정 결과

Fig. 9와 같이, 감쇠비 2% 탄성 요구스펙트럼에서 성능점이 형성되었으며 구조물은 탄성 상태인 것으로 확인하였다. 구조물의 중량보다 벽체 강도가 더 크기 때문에 역량스펙트럼이 매우 크게 평가되어 이러한 결과가 나타난 것으로 판단하였다. 비선형 정적해석 결과는 Table 5에 나타내었다.

#### 3.2.2 Y방향 비선형 정적해석

해석모델의 벽체에 비선형 복원력 특성을 입력한 후 비선형 정적해석을 수행하였다. 구조물의 성능점은 역량스펙트럼법(Capacity Spectrum Method,

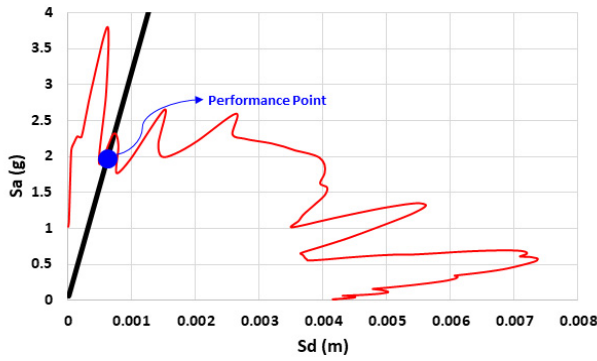


Fig. 9. Calculation of performance point

Table 5. Non-linear static analysis result - X dir

Response of performance point	Contents
Calculate method of Performance Point	ATC-40 (Procedure-A)
Structural behavior type	Structural behavior-C
Strength of performance point ( $V_B$ )	159.6 kN
Displacement of roof ( $\Delta_{roof}$ )	0.2760 mm
Capacity Spectrum acceleration ( $S_a$ )	1.891 g
Effective damping ratio ( $\beta_{eff}$ )	2.00 %
Effective period ( $T_{eff}$ )	0.0290 s
Member performance	Elastic

이하 CSM)을 사용하여 구조물의 최대요구가속도와 변위를 산정하였다.

(1) 역량스펙트럼

구조물의 보유 내력 & 변위 관계를 역량스펙트럼 가속도 & 스펙트럼 변위의 관계로 변환할 수 있다. Fig. 10에 구조물의 보유 내력 & 변위 관계 및 역량스펙트럼 가속도 & 스펙트럼 변위의 관계를 나타내었다. 역량스펙트럼을 확인한 결과, 구조물의 중량에 비해 보유 내력이 월등하게 크기 때문에 y축의 역량스펙트럼가속도가 1.0 g를 초과하는 것으로 확인하였다.

(2) 요구스펙트럼

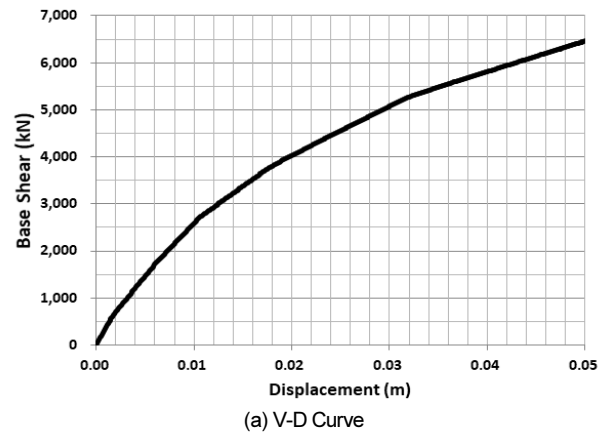
요구스펙트럼을 산정하기 위한 지진파는 한국원자력연구원에서 제공 받은 명계리 지진파(NS방향, 1.0G PGA 수준)를 사용하였으며, 감쇠비 2%에 대한 응답가속도 & 응답 변위 스펙트럼으로 산정하였다. 산정한 요구스펙트럼은 Fig. 11에 나타내었다.

(3) 성능점 산정 결과

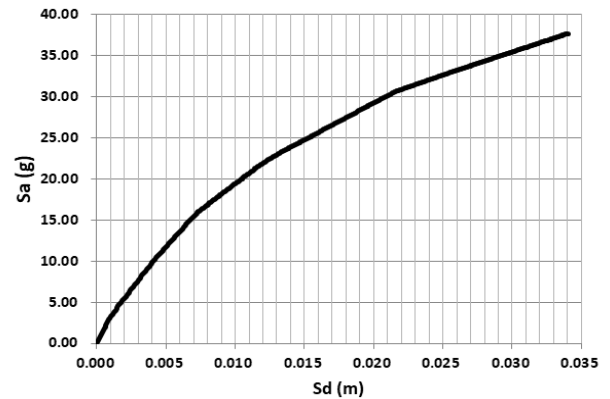
Fig. 12와 같이, 감쇠비 2% 탄성 요구스펙트럼에서 성능점이 형성되었으며 구조물은 탄성 상태인 것으로 확인하였다. 구조물의 중량보다 벽체 강도가 더 크기 때문에 역량스펙트럼이 매우 크게 평가되어 이러한 결과가 나타난 것으로 판단하였다. 비선형 정적해석 결과는 Table 6에 나타내었다.

3.3 비선형 지진 응답해석

3.2에서 설명한 비선형 정적해석은 구조물을 등가 1자유도계로 환산하여 근사적인 지진 응답해석을 수행하는 방법이다. 이 절에서는 입력 지진파



(a) V-D Curve



(b) Capacity spectrum curve

Fig. 10. Capacity Spectrum (Y-dir)

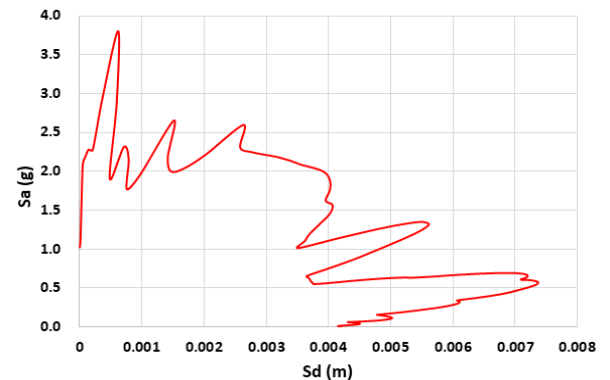


Fig. 11. Elastic Demand Spectrum

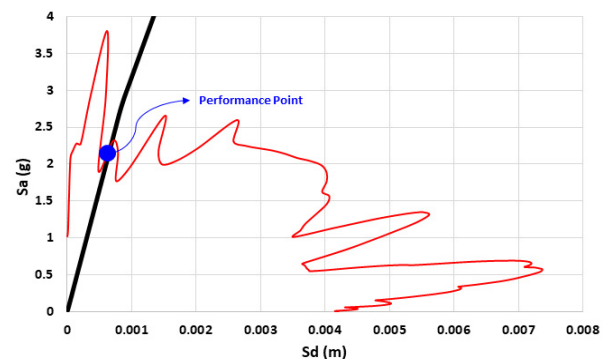


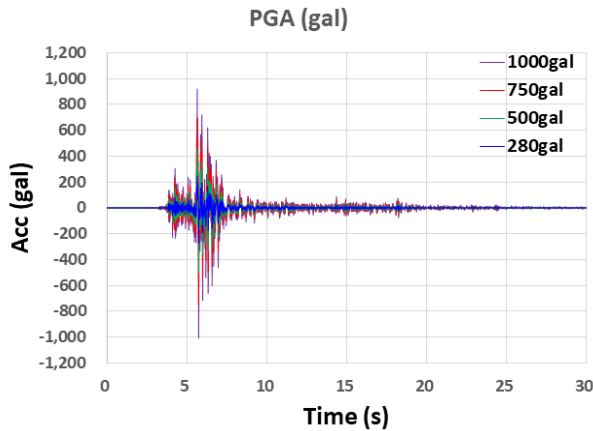
Fig. 12. Calculation of performance point

**Table 6.** Non-linear static analysis result - Y dir

Response of performance point	Contents
Calculate method of Performance Point	ATC-40 (Procedure-A)
Structural behavior type	Structural behavior-C
Strength of performance point ( $V_B$ )	328.1 kN
Displacement of roof ( $\Delta_{roof}$ )	0.8457 mm
Capacity Spectrum acceleration ( $S_a$ )	2.140 g
Effective damping ratio ( $\beta_{eff}$ )	2.00 %
Effective period ( $T_{eff}$ )	0.0380 s
Member performance	Elastic

**Table 7.** Story weight, Stiffness, Damping ratio

Story	Weight (kN)	X-dir Stiffness (kN/m)	Y-dir Stiffness (kN/m)	Damping ratio
1F	76.37	2,669,059	3,812,941	0.02
2F	75.30	2,793,615	3,990,879	0.02
3F	52.35	2,793,615	3,990,879	0.02



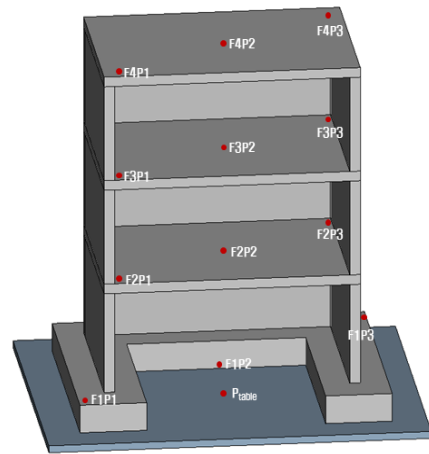
**Fig. 13.** Input seismic wave (MKL.NS)

에 대한 구조물의 실제 응답을 확인하기 위하여 비선형 지진 응답해석을 수행하였으며, 지진 응답해석을 수행하기 위하여 해석 대상 구조물의 층 중량과 강성 및 감쇠율을 각각 산정하여 입력하였다. 층별 중량은 구조물의 지중으로 산정할 수 있으며, 층 강성은 3.1에서 설명한 벽체의 복원력 특성 산정 결과를 이용하여 구할 수 있다. 감쇠는 구조물의 비탄성 거동에 따른 이력 감쇠가 반영되므로 초기 감쇠율이 2%를 초과하지 않도록 하였다[12]. 층별 중량, 강성, 감쇠율은 Table 7에 나타내었다.

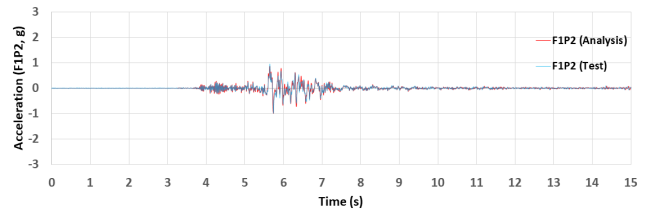
지진 응답해석은 3차원 입체모델로 해석하였으며, 비선형 지진 응답해석에 사용한 지진파는 진동대 실험에 사용한 지진파와 동일한 명계리 지진파를 0.28 g, 0.5 g, 0.75 g, 1.0 g로 표준화하여 해석을 수행하였다. 지진 응답해석에 사용한 지진파를 Fig. 13에 나타내었다.

**3.3.1 층 응답가속도**

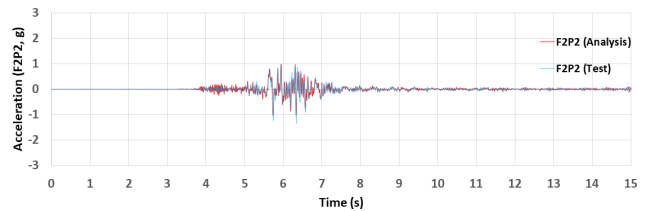
지진 입력 후 층 응답가속도를 산정하였다. 응답가속도 산정 위치는 Fig. 14에 나타내었으며, 각 층의 질량중심인 F1P2, F2P2, F3P2, F4P2 위치의 가속도 응답을 산정하였다.



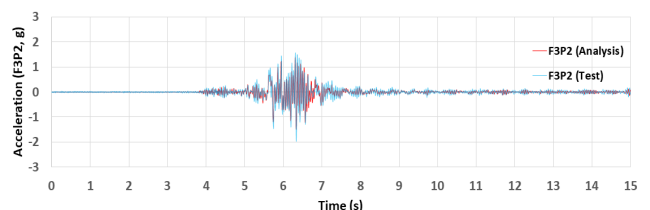
**Fig. 14.** Story response acceleration calculation position [13]



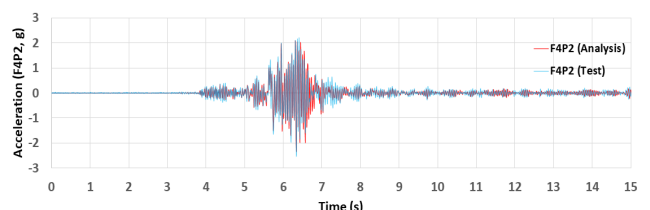
(a) Story response acceleration (F1P2)



(b) Story response acceleration (F2P2)



(c) Story response acceleration (F3P2)



(d) Story response acceleration (F4P2)

**Fig. 15.** Story response acceleration

본 논문에는 명계리 지진파 1.0 g 입력 후의 층 응답가속도 산정 결과를 Fig. 15에 나타내었으며, 층 응답가속도 산정 결과는 진동대 실험 결과와 유사한 것으로 확인하였다.

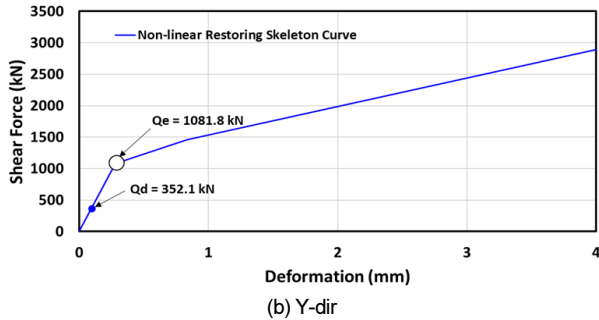
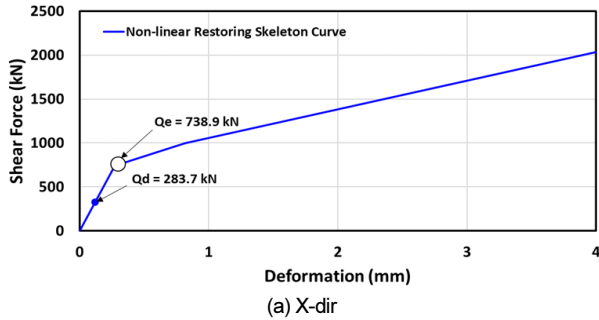


Fig. 16. Restoring Force Response by Story

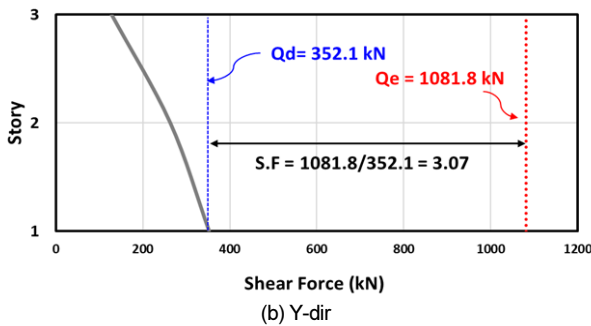
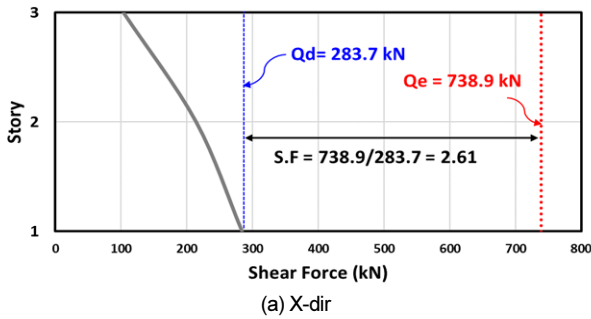


Fig. 17. Safety Margin for the Strength of Each Direction

### 3.3.2 층 전단력 검토 결과

지진 응답해석을 수행 후 복원력 응답을 Fig. 16에 나타내었다. 양방향 지진 응답 전단력은 벽체의 탄성한계 내력 이하로 나타났으므로, 구조물은 탄성 상태임을 알 수 있다. 또한, Fig. 17에 나타낸 바와 같이 탄성한계 내력에 대한 안전여유도가 대략 2.6~3.1이므로 명계리 지진파 1.0 g 수준에 대해서 충분한 안전여유도를 확보하는 것으로 평가된다 [14].

## 4. 결론

본 연구는 내진벽의 내진 성능평가를 간단히 평가할 수 있도록 제시한 JEAC 4601의 방법을 적용하여 비선형 정적해석과 비선형 동적해석 및 진동실험을 통하여 적용 타당성을 검증하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

전단벽 구조물의 진동대 실험 결과, 명계리 지진파 1.0G로 표준화한 입력 지진동에서도 탄성 상태로 나타났으며, 지진 응답해석 결과 또한 탄성 상태인 것으로 확인할 수 있었다.

전단벽 구조물의 비선형 정적해석을 수행한 결과, 요구스펙트럼에 비해 역랑스펙트럼이 충분한 것으로 확인되었다. 본 연구의 실험과 해석에 사용된 구조물은 자중만을 고려한 것이기 때문에 보유 내력이 상대적으로 매우 크게 평가되었기 때문이라고 할 수 있다.

그러나, 본 전단벽 구조물의 비선형 해석을 수행한 결과, JEAC 4601에서 제안하는 벽체의 복원력 산정식을 적용하여 부재 수준별 복원력 특성을 파악할 수 있음을 확인하였다. 또한, 층별 스켈레톤 커브(Skeleton Curve)를 산정할 수 있고 지진 응답해석 결과를 스켈레톤 커브에 나타내어 구조물의 내진 능력과 안전여유도를 확인하였다. 이는, 국내 원전건물의 내진 성능평가에도 JEAC 4601에 의한 스켈레톤 커브 산정 식을 적용하여 내진 성능과 내진 안전여유도 파악이 가능함을 확인하였다.

### / 감사의 글 /

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 에너지기술개발사업 (NO. 2019 6110100020)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### / REFERENCES /

- Kim JH, Park HG. Evaluation of shear and shear-friction strength of shear walls in nuclear power plants. Korea Concrete Institute, 2020 May;32(3):12-18.
- Kim HK, Hwang KT, Song SB. A study on the excessive design earthquake-resistance and seismic design criteria of nuclear power plants in Japan, KPVP, c2019.
- Kim HK, Hwang KT. Comparison the results of full-scale vibration test of steel frame and analysis results PF beam model. Architectural Institute of Korea, 2018:498-501.
- MIDAS IT. Analysis Manual, c2020.
- Lee KS, Lee WH. Seismic response characteristics of low-rise R/C buildings combined with shear and flexural failure systems. Architectural Institute of Korea, 2002;18(11):36-37.
- JEAC 4601-2015. Technical code for Nuclear power plant seismic design, Japan Electric Association, c2015.
- ACI Committee 349. Code requirements for nuclear safety-related concrete structures (ACI 349-13) and commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, c2013.
- ASCE/SEI 4-16. Seismic analysis of safety-related nuclear structures, American Society of Civil Engineers, c2017.

9. ASCE/SEI, Evaluation of the seismic design criteria in ASCE/SEI standard 43-05 for application to nuclear power plants, U.S. Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001, c2007.
10. Federal Emergency management Agency, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 356, Washington D.C. 2000:p.3-19.
11. ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Seismic Safety Commission, c1996.
12. Architectural Institute of Korea, Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Residential Buildings, c2019.
13. Korea Atomic Energy Research Institute, Shear wall structure vibration characteristics analysis Round Robin Analysis joint research, c2020.
14. Misaki M, Yoshiaki N, Lee KS, Post-Earthquake damage evaluation for RC buildings based on residual seismic capacity, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, No. 1179, c2004.