

# 마찰진자시스템의 마찰계수 변화에 따른 면진된 원전구조물의 거동특성 비교

## Seismic Performance Evaluation of Seismically Isolated Nuclear Power Plants Considering Various Velocity-Dependent Friction Coefficient of Friction Pendulum System

석철근<sup>1)</sup> · 송종걸<sup>2)\*</sup>

Seok, Cheol-Geun<sup>1)</sup> · Song, Jong-Keol<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>(주)티이솔루션, 풍동실험팀, <sup>2)</sup>강원대학교 토목공학과

<sup>1)</sup>TE Solution, Wind Engineering, <sup>2)</sup>Department of Civil Engineering, Kangwon National University

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

In order to improve seismic safety of nuclear power plant (NPP) structures in high seismicity area, seismic isolation system can be adapted. In this study, friction pendulum system (FPS) is used as the seismic isolation system. According to Coulomb's friction theory, friction coefficient is constant regardless of bearing pressure and sliding velocity. However, friction coefficient under actual situation can be changed according to bearing pressure, sliding velocity and temperature. Seismic responses of friction pendulum system with constant friction and various velocity-dependent friction are compared. The velocity-dependent friction coefficients of FPS are varied between low- and fast-velocity friction coefficients according to sliding velocity. From the results of seismic analysis of FPS with various cases of friction coefficient, it can be observed that the yield force of FPS becomes larger as the fast-velocity friction coefficient becomes larger. Also, the displacement response of FPS becomes smaller as the fast-velocity coefficient becomes larger.

**Key words:** Nuclear power plant, Seismic isolation system, Friction pendulum system, Coulomb' friction theory, Friction coefficient

## 1. 서론

최근 지진발생과 같은 자연재해로 인해 원자력발전소의 안전성을 높이기 위한 방안으로 면진장치의 적용이 활발히 검토되어 오고 있다. 면진장치는 구조물 고유주기의 장주기화와 감쇠의 증가로 지진하중에 대한 상부구조물의 가속도응답과 상대변위를 저감시키는데 효과적으로 작용한다. 원전에 적용 가능한 면진장치로는 고무계열과 마찰계열로 구분할 수 있는데 고무계열의 면진장치는 납-고무 면진받침(lead-rubber bearing)이 대표적이며, 마찰계열은 마찰진자시스템(FPS)이 대표적이다. 본 연구에서는 마찰계열의 대표적인 면진장치인 마찰진자시스템의 원전구조물에 대한 적용성을 분석하였다. 일반적으로 마찰계열의 면진장치의 해석모델의 작성에서 마찰계수의 역할이 중요하며, 간단한 방법으로는 마찰계수가 일정하

다고 보고 해석에 적용하는 것이 통상적이나 마찰계수는 마찰진자시스템의 속도응답에 따라 변하는 값을 가지게 되므로, 일정한 마찰계수를 사용하여 해석한다면 실제적인 거동과 차이가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 면진장치의 속도와 면압에 따른 마찰계수의 변화에 대한 기존 연구결과들[1-3]을 활용하여 다양한 지진하중에 따른 면진장치의 속도 변화에 따른 마찰계수의 변화를 해석에 반영하였으며 이를 일정한 마찰계수를 적용한 방법과 비교하였다. 결과 비교에는 면진장치의 마찰계수의 변화이력, 힘-변위관계, 원전격납구조물의 가속도 및 변위응답이 사용되었으며, 격납구조물의 상층부에 대한 층응답스펙트럼의 결과도 또한 비교하였다.

## 2. 마찰진자시스템의 면진 원리

마찰계열 면진장치 중 하나인 마찰진자시스템(FPS)은 진자의 성질을 활용하여 면진된 구조물의 고유주기를 임의로 조절할 수 있는 장점이 있다.

\*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received June 26, 2015; Revised November 15, 2015; Accepted January 5, 2016)

특징으로는 상부구조물을 지지하는 볼베어링이 일정한 곡률을 지닌 복합형 재료소재의 마찰면에서 면진장치의 진자운동으로 인하여 곡률반경과 중력에 의한 고유복원력과 마찰에 의해 감쇠력을 갖는다는 장점이 있다.

마찰진자시스템의 기본적인 설계변수는 곡률반지름과 재료의 마찰계수이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 Coulomb 마찰이론[1]에 따르면 마찰계수는 상재압이나 마찰속도에 따라 그 값은 변하지 않는 일정한 값을 지닌다고 정의하고 있다. 하지만 실제로 진자운동의 속도, 상부하중 및 유지시간, 외·내 온도 등과 같은 영향을 주는 인자에 따라 Fig. 2에 나타난 바와 같이 마찰계수는 변한다[2]. 여기서 마찰계수는 크게 정지 마찰계수, 운동 마찰계수로 나뉠 수 있으며, 정지 마찰계수는 면진장치 거동이 시작되기 직전에 발생하는 마찰계수이다. 또한, 운동 마찰계수는 마찰진자시스템의 거동 속도에 의존성을 가지며 느린 속도에서의 저속마찰계수로 평균속도 이상에서의 고속마찰계수로 분류된다. 이러한 다양한 마찰계수의 고려 유무에 따른 면진 구조물의 응답에 주는 영향을 분석할 필요가 있다. 다양한 속도-의존 마찰계수가 적용된 경우와 Coulomb 마찰이론의 일정한 마찰계수를 갖는 경우에 대하여 지진응답을 비교·분석하여 마찰진자시스템에 대한 다양한 마찰계수 적용에 따른 영향성을 검토하였다.

마찰진자시스템은 구형의 곡면과 고압에 견딜 수 있고 마찰계수가 작고 내열성 및 내식성이 우수한 PTFE를 기본소재로 사용하며 각종 금속(구리, 유리)을 혼합하여 적용하기도 한다. 마찰진자시스템은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 곡면 위에서 수평방향으로 마찰거동하며 지진에너지를 소산시킴으로 면진 효과를 나타낸다. AASHTO[3]에서는 수평 변위 수용 범위를 0.2R로 규정하고 있으며, Fig. 3에 나타난 마찰진자시스템의 각도  $\theta \approx 0$  이라고 가정할 경우 힘의 평행조건에 의해서 수평변위( $U$ )에서 수평 방향력( $F$ )을 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

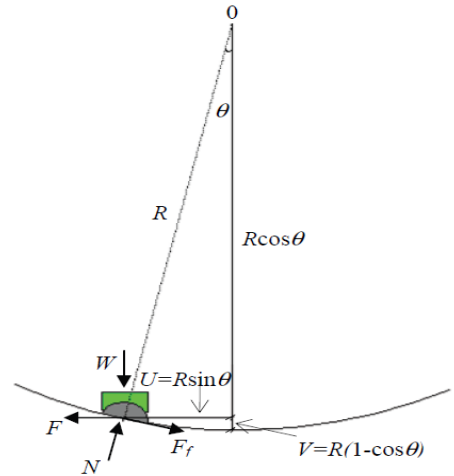


Fig. 3. Free body diagram of FPS

$$F = \frac{W}{R\cos\theta} U + \frac{\mu W}{\cos\theta} \approx \frac{W}{R} U + f W \operatorname{sgn}(\dot{U}) \quad (1)$$

여기서,  $F$ 는 수평방향력,  $W$ 는 상부 구조물에 의한 수직재하중,  $U$ 는 수평변위,  $F_f$ 는 방향성을 고려한 마찰력,  $f$ 는 마찰계수이다.

마찰진자시스템의 고유주기는 식 (2)에 나타난 바와 같이 상부구조물의 질량과 관련이 없고 곡률 반지름에 관계가 있다.

$$T_R = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (2)$$

여기서,  $R$ 은 곡률 반지름,  $g$ 는 중력가속도를 의미한다.

### 3. 면진된 원전의 구조해석 모델 및 입력지진

#### 3.1 마찰진자시스템의 해석모델

마찰진자시스템의 비선형 거동특성은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 이선형(bilinear) 모델로 나타내는 것이 일반적이며 1차 강성은 마찰력( $F_f$ )에 영향을 받는다. 마찰진자시스템의 비선형 모델을 결정하는 1차 강성( $K_u$ )과 2차 강성( $K_d$ )은 각각 식 (3)과 식 (4)로 정의한다.

$$K_u = \frac{fW}{D_y} = \frac{F_f}{D_y} \quad (3)$$

$$K_d = \frac{W}{R} \quad (4)$$

#### 3.2 면진 원전의 구조해석 모델

면진 원전의 구조해석모델은 SASSI 2000[4]의 예제모델을 사용하여

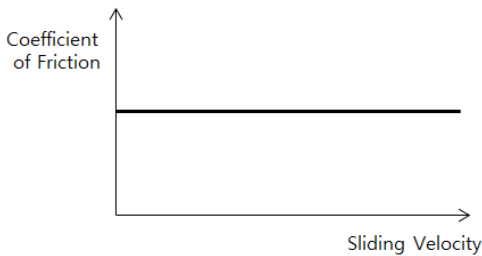


Fig. 1. Relationship between coefficient of friction and sliding velocity by Coulomb's friction theory

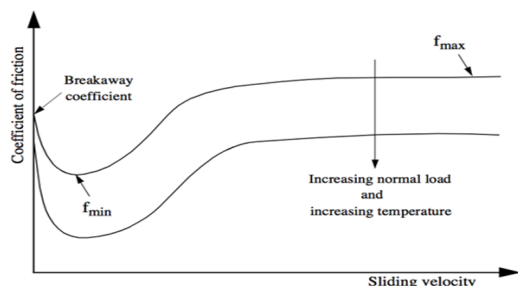


Fig. 2. Velocity-dependent friction coefficient according to sliding velocity

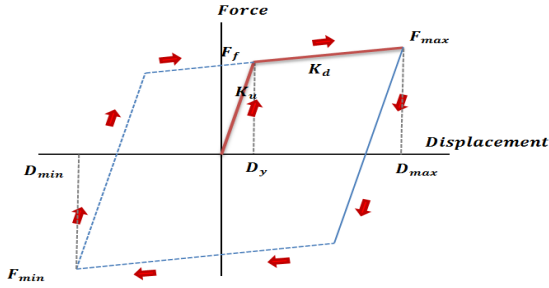


Fig. 4. Nonlinear model of friction pendulum system

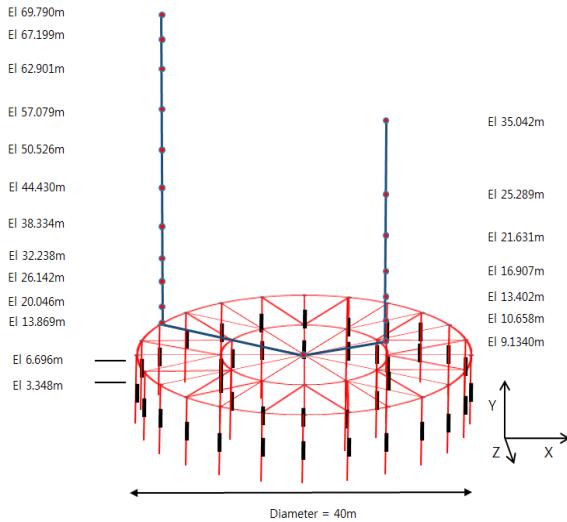


Fig. 5. Structural analysis model of seismically isolated NPP Structures with FPS

고 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 OpenSEES 프로그램[5]을 사용하여 모델링 하였다. 면진된 원전구조물의 하부매트에 36개의 마찰진자시스템을 적용 하였다. 상부구조물은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 격납 내부 구조물로 구분 하여 18개의 보요소로 모델링하였다. 격납구조물은 높이는 63.274 m이고 내부구조물은 높이는 28.346 m이며 면진장치에 의해 상부구조물은 탄성 거동만 하게 되므로 탄성요소로 모델링하였다. 상부구조물을 지지하는 매트 는 상·하부 매트로 분류하여 지름 40m, 높이 6.696 m의 원형으로 무질 량 강체로 모델링하였다. 상·하부 매트 사이에 위치한 마찰진자시스템은 OpenSEES 프로그램에서 단일오목(single concave) 형태의 마찰진자시 스템에 적합한 SingleFPBearing 명령어를 사용하여 모델링하였다.

### 3.3 마찰진자시스템의 마찰계수 산정

Coulomb 마찰이론에 따르면 마찰계수는 상재압이나 마찰속도에 관계 없이 일정하다고 정의하며 식 (5)와 같이 마찰력이 정의된다.

$$F = \mu W = \mu mg \quad (5)$$

보통 마찰계수는 실험적으로 구한 표면의 마찰력으로부터 계산하며, 본

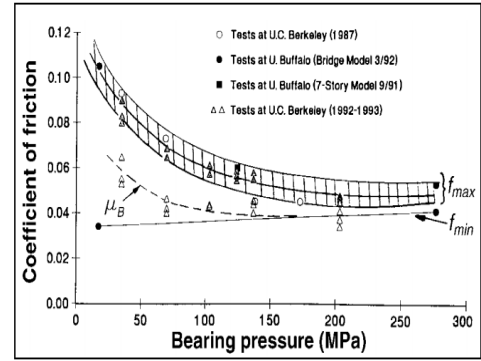


Fig. 6. Coefficient of friction at fast & low velocities

연구에서는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 FEMA-274[6] 보고서에 제시된 속 도에 따른 마찰계수를 사용하였다. Coulomb 마찰이론에 따른 일정한 마찰 계수 값 산정은 Fig. 6을 이용하여 가로축은 각 면진장치 당 재하되는 상재 압을 49 MPa로 선택하였고, 세로축은 거동 직후나 느린 속도에서 발생되 는 저속마찰계수( $f_{min}$ )보다는 일정한 속도 이상으로 증가 후 수렴하는 고 속마찰계수( $f_{max}$ )가 구조물의 거동에 큰 영향을 미칠 것으로 예상하여 고 속마찰계수를 선택하여 이에 해당하는 마찰계수 값인 0.08로 가정하였다.

속도 의존 마찰계수 값은 Fig. 6에서 상재압 49 MPa에 대응하는 마찰 계수 범위  $0.05(f_{min}) \sim 0.08(f_{max})$  값을 사용하였다. 또한, Fig. 6에 상재압 49 MPa에 대응하는 저속마찰계수의 한계치 분포인 0.035~0.06과 고속마 찰계수의 한계치 분포인 0.1~0.12를 사용하여 저속마찰계수( $f_{min}$ )과 고 속 마찰계수( $f_{max}$ )의 분포가  $0.065(f_{min}) \sim 0.10(f_{max})$ 와  $0.035(f_{min}) \sim 0.12(f_{max})$  인 경우를 해석경우로 선정하였다.

### 3.4 입력지진

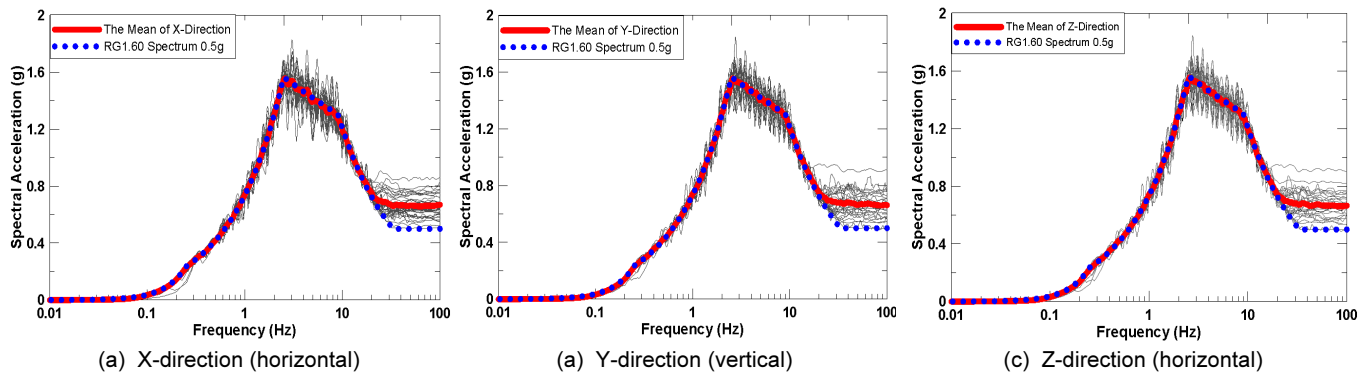
입력지진은 면진원전 성능검증 기준을 검토하기 위해 RspMatch 프 로그램[7]을 이용하여 RG1.60 설계 응답스펙트럼[8]에 부합되도록 작성한 세 방향 지진기록 30개 세트를 사용하였다. 여기서 설계응답 스펙트럼의 영 주기 가속도(ZPA)는 강진지역을 반영하기 위하여 0.5 g가 되도록 하였다.

RG 1.60 설계 응답스펙트럼에 대응하는 입력지진을 생성하기 위해 사 용된 실제계측 지진은 ATR(Active Tectonic Region) 25개와 SCR (Stable Continental Region) 5개로 선정하였으며, 지반상태는 암반을 위 주로 하였으며, 근거리(near-fault) 지진의 특성을 가진 지진을 포함시켰 으며 실제계측지진의 특성을 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타낸 지진 기록을 사용하여 RG 1.60 설계 응답스펙트럼[8]에 부합되도록 RspMatch 프로그램에 의해 수정된 3방향 지진 30 세트의 응답스펙트럼을 설계응답 스펙트럼과 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 20 Hz 이상의 고진동수 영역을 제외하고는 RG 1.60 설계 응답스펙트럼에 잘 부합하는 응답스펙트럼이 생성됨을 알 수 있다. 원전의 표준스펙트럼은 영주기 가속도(Fig. 7에서 100 Hz 에 해당하는 가속도 값)가 0.5 g 이지만 이에 대응하여 RspMatch 프로그램에 생성된 최대지반가속도는 평균이 0.64~65 g 정도로 나타나고 있다. RspMatch 프로그램이 실제 지진기록의 진동수 특성을 유지하면서 응답스펙트럼에 대응하는 인공지진을 생성하는 프로그램이지만 Fig. 7과

**Table 1.** Characteristics of seed earthquakes used in artificially generating process.

Earthquake	Station	ATR/SCR	Magnitude	Closest Distance(km)	NEHRP Site	PGA(g)
Miramich, Canada(1982)	IB2	SCR	5.7	5.10		0.3410
Saguenay, Canada(1988)	DKKY	SCR	5.9	194.70		0.1000
Parkfield(1966)	TMB	ATR	6.19	15.96	C	0.2934
San Fernando(1971)	PUL	ATR	6.61	1.81	A	1.1644
Gazli, USSR(1976)	GAZ	ATR	6.80	5.46	C	0.6438
Imperial Valley-06(1979)	E05	ATR	6.53	3.95	D	0.4481
Imperial Valley(1979)	SUP	ATR	6.53	24.61	C	0.1598
Livermore-01(1980)	KOD	ATR	5.80	17.00	D	0.1066
Victoria, Mexico(1980)	CPE	ATR	6.33	14.37	C	0.5722
Morgan Hill(1984)	CLS	ATR	6.19	23.24	C	0.0983
Morgan Hill(1984)	G06	ATR	6.19	9.86	C	0.2814
Nahanni(1985)	S1	SCR	6.76	9.60	C	1.0556
Nahanni(1985)	S3	SCR	6.76	5.32	C	0.1512
Superstition Hills-02(1987)	ICC	ATR	6.54	18.20	D	0.2933
Spitak, Armenia(1988)	GUK	SCR	6.77	36.00	D	0.2071
Loma Prieta(1989)	BRN	ATR	6.93	10.72	C	0.5263
Loma Prieta(1989)	CLS	ATR	6.93	3.85	C	0.4975
Loma Prieta(1989)	LGPC	ATR	6.93	3.88	C	0.7835
Erzican, Turkey(1992)	ERZ	ATR	6.69	4.38	D	0.4886
Cape Mendocino(1992)	CPM	ATR	7.01	6.96	C	1.3455
Northridge-01(1994)	CHL	ATR	6.69	20.45	C	0.2148
Northridge(1994)	PAC	ATR	6.69	7.01	A	0.4085
Northridge(1994)	PKC	ATR	6.69	7.26	C	0.3482
Northridge-01(1994)	RRS	ATR	6.69	6.50	D	0.6336
Kobe(1995)	KJMA	ATR	6.90	0.96	D	0.7105
Kocaeli, Turkey(1999)	GYN	ATR	7.51	31.74	C	0.1387
Kocaeli, Turkey(1999)	IZT	ATR	7.51	7.21	B	0.2037
Chi-Chi, Taiwan(1999)	TCU072	ATR	7.62	7.03	C	0.4033
ChiChi, Taiwan(1999)	TCU089	ATR	7.62	8.88	C	0.2878
Duzce, Turkey(1999)	BOL	ATR	7.14	12.04	D	0.7662

\*ATR: Active Tectonic Region, SCR: Stable Continental Region



**Fig. 7.** Comparison of acceleration response spectrum of 30 set artificially generated records by RspMatch according to RG 1.60 Spectrum

같이 고진동수에서는 잘 맞지 않는 경향을 나타낸다. 그러나 이 진동수 영역은 실제 먼진된 원천의 진동수(대략 0.5 ~ 10 Hz)와는 상당한 차이가 있는

진동수 대역이므로 구조물의 응답에 미치는 영향을 크지 않을 것으로 판단된다.

**Table 2.** Nonlinear modeling parameters of friction pendulum system

Friction coefficients		$f_{\min} \sim f_{\max}$	Friction coefficient used in calculation of elastic stiffness, $K_u$	Elastic stiffness, $K_u$	Second-slope stiffness, $K_d$
Coulomb Friction Coefficient	Case 1	0.08	0.08	$1.613 \times 10^5$ kN/m	$5.545 \times 10^3$ kN/m
Velocity Dependent Friction Coefficient ( $f_{\min} \sim f_{\max}$ )	Case 2	0.05~0.08	0.05	$1.008 \times 10^5$ kN/m	$5.545 \times 10^3$ kN/m
	Case 3	0.05~0.08	0.08	$1.613 \times 10^5$ kN/m	$5.545 \times 10^3$ kN/m
	Case 4	0.065~0.10	0.065	$1.311 \times 10^5$ kN/m	$5.545 \times 10^3$ kN/m
	Case 5	0.065~0.10	0.10	$2.017 \times 10^5$ kN/m	$5.545 \times 10^3$ kN/m
	Case 6	0.035~0.12	0.035	$0.706 \times 10^5$ kN/m	$5.545 \times 10^3$ kN/m
	Case 7	0.035~0.12	0.12	$2.420 \times 10^5$ kN/m	$5.545 \times 10^3$ kN/m

## 4. 다양한 마찰계수에 대한 면진 원전구조물의 지진응답 분석

### 4.1 다양한 마찰계수를 반영한 마찰진자시스템의 모델링

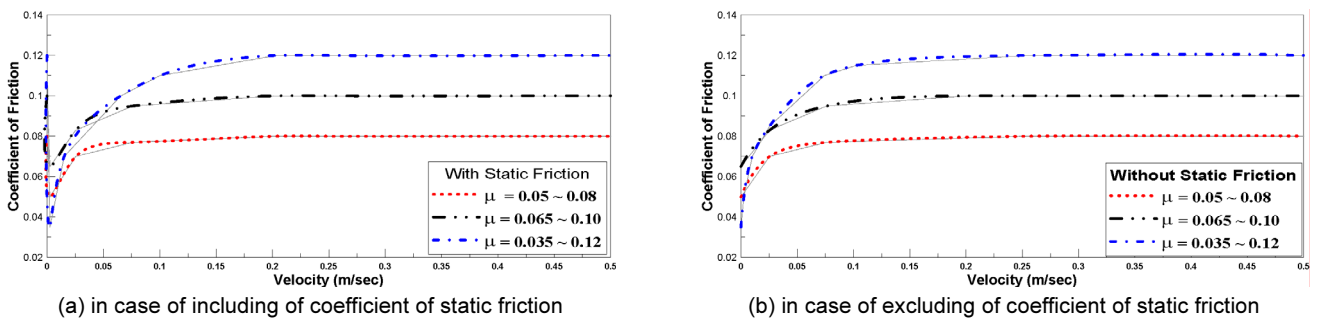
다양한 경우의 마찰진자시스템의 마찰계수 조건을 해석에 반영하기 위하여 7가지 마찰계수 경우로 구분하여 Table 2에 나타내었다. Coulomb 이론에 따른 일정한 마찰계수는 0.08로 정하였고 이는 Case 1이다. 속도 의존 마찰계수의 범위( $f_{\min} \sim f_{\max}$ )는 3.3절에 설명한 바와 같이 세 가지 경우인 0.05~0.08 (Case 2와 3), 0.65~0.10 (Case 4와 5)와 0.035~0.12 (Case 6과 7)로 정하였다. 이를 각각 Table 2에 나타낸 바와 같이 Case 2 ~ Case 7로 구분하였다. 식 (3)에서 정의한 탄차 강성( $K_u$ )를 구하는데 사용하는 마찰계수( $f$ )를 저속마찰계수( $f_{\min}$ )와 고속마찰계수( $f_{\max}$ )로 각각 적용하는 경우로 세분하여 구분하였다. 즉, 저속마찰계수( $f_{\min}$ )가 1차 강성을 구

하는 데 사용된 경우가 Case 2, 4, 6이며 고속마찰계수( $f_{\max}$ )가 적용된 경우가 Case 3, 5, 7이다.

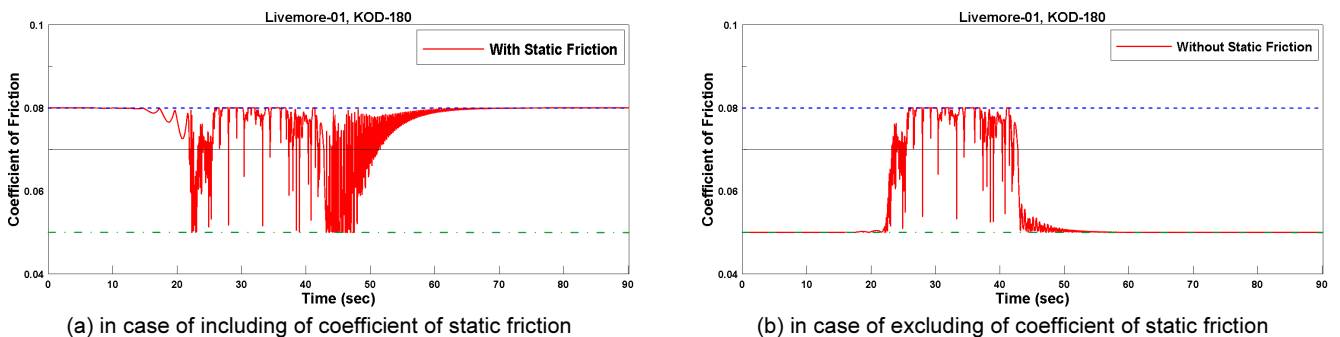
### 4.2 정지마찰계수 반영 여부에 따른 응답변화비교

정지마찰계수는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 면진장치의 미끄러짐 속도가 0인 경우의 마찰계수이다. 면진장치가 정지상태에서 미끄러짐이 발생하여 속도가 증가하면 정지마찰계수로부터 마찰계수가 감소하여 저속마찰계수에 도달하였다가 속도의 증가에 따라 다시 증가하여 고속마찰계수에 도달하여 수렴하는 경향을 나타낸다.

속도 의존 마찰계수에 정지마찰계수의 포함여부에 따른 마찰계수의 속도에 따른 변화곡선을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타난 정지마찰계수의 반영여부에 따라 Table 1의 Livermore-01(KOD) 지진으로부터 생성된 인공지진을 사용하여 면진장치의 속도에 따른 마찰계수를 Fig. 9에 비교하여 나타내었다. 면진장치의 속도이력곡선은 Fig. 10에 나타내었다.



**Fig. 8.** Comparison of velocity-dependent friction coefficient with and without static friction



**Fig. 9.** Comparison of time history of velocity-dependent friction coefficient according to whether or not to include static friction

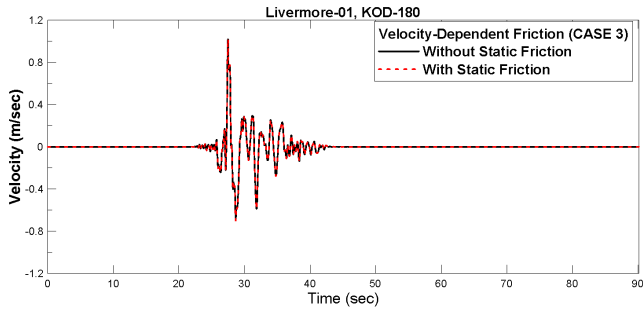


Fig. 10. Comparison of velocity response history of FPS according to whether or not to include static friction

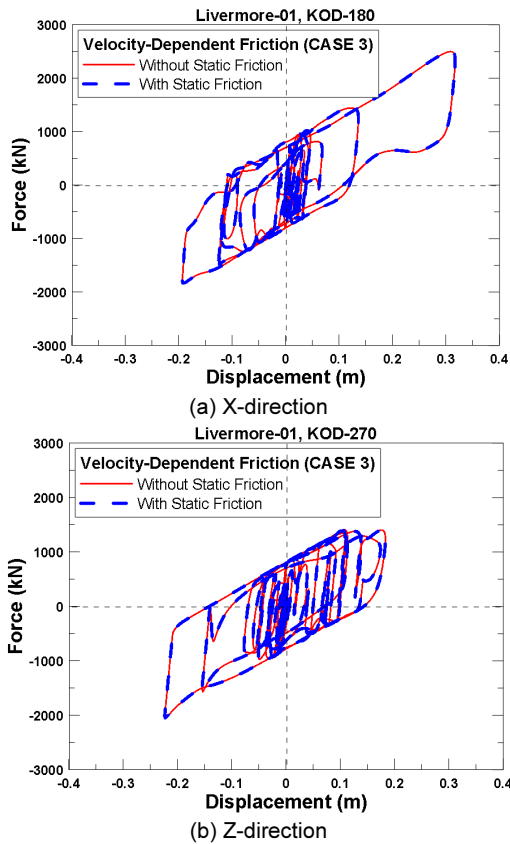


Fig. 11. Comparison of force-displacement relationship of FPS according to whether or not to include static friction

Fig. 9와 Fig. 10에 나타난 결과로부터 지진에 의해 마찰진자시스템이 의미 있는 거동(22~45초 사이의 거동)을 시작할 경우에는 고속마찰계수가 지배적인 거동을 함을 알 수 있다. 또한, Fig. 10에 나타난 결과로부터 정지마찰계수의 반영여부에 따른 면진장치의 속도차이는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 최대 속도는 정지마찰계수 반영 시 1.0187 m/sec, 반영하지 않을 시 1.01864 m/sec로 거의 일치하는 결과를 나타낸다.

정지마찰계수의 반영여부에 따른 마찰진자시스템의 두 수평방향(X와 Z 방향)에 대한 힘-변위 관계를 Case 3의 경우에 대하여 비교하여 나타내었다. 정지마찰계수의 반영 여부는 마찰진자시스템의 지진 응답에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다. 그 이유는 정지마찰계수는 미끄러짐 속도가 0인 경우에만 반영되며, 마찰진자시스템이 지진하중에 의해 거동을 하

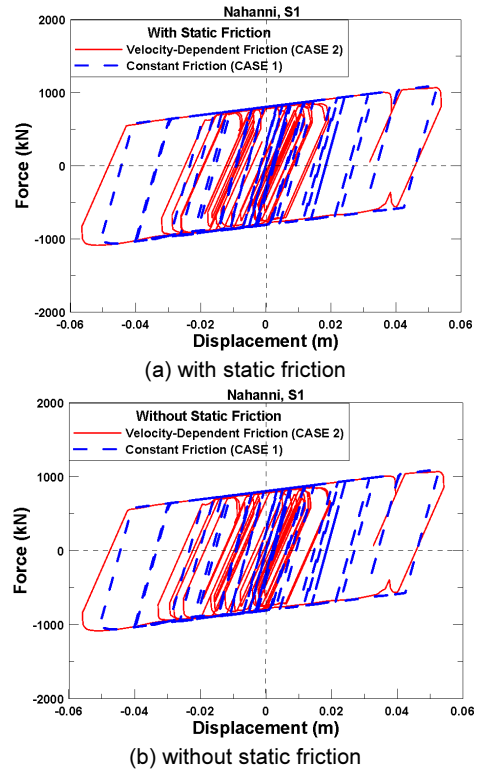


Fig. 12. Comparison of force and displacement relationship of FPS for the case of constant friction coefficient (CASE 1) and velocity dependent friction coefficient (CASE 2)

는 경우에는 Fig.10에 나타난 바와 같이 미끄러짐 속도가 0인 경우는 순간적이므로 이에 따른 정지마찰계수의 반영여부도 매우 짧은 시간에만 영향을 주게 되므로 실제적인 마찰진자시스템에 전반적인 거동에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

Table 1의 Nahanni 지진(S1)이 X 방향으로만 가해진 경우에 대하여 Coulomb 이론에 따른 일정한 마찰계수(Case 1)와 속도의 의존성을 지닌 마찰계수(Case 2)에 따른 마찰진자시스템의 힘-변위 관계를 Fig. 12에 비교하여 나타내었다. 속도의존 마찰계수를 사용한 Case 2의 변위응답이 일정 마찰계수를 사용한 Case 1에 비하여 20% 정도 크게 평가됨을 알 수 있다.

### 4.3 저속 및 고속마찰계수를 적용에 따른 초기강성의 영향

식 (3)에 나타난 마찰진자시스템의 1차 강성의 계산에 마찰계수로는 Table 2에 나타난 바와 같이 일정마찰계수, 저속마찰계수와 고속마찰계수를 사용하여 지진응답에 대해 분석하였다. 여기서, 정지마찰계수는 면진장치의 지진응답에 대한 영향이 거의 없으므로 반영하지 않았다. Fig. 13은 저속마찰계수에서 고속마찰계수의 범위가 같을 때(Case 2와 3, Case 4와 5, Case 5와 6이 동일 마찰계수 범위의 경우), 면진장치의 1차 강성을 저속마찰계수에 의해 정한 경우(Case 2, 4, 6)와 고속마찰계수에 의해 정한 경우(Case 3, 5, 7)로 구분하여 비교하였다. 저속마찰계수가 1차 강성에 적용된 경우가 동일한 조건에서 고속마찰계수가 적용된 경우에 비하여 면진장치의 변위응답을 크게 평가한다. 이는 저속마찰계수를 식(3)에 적용하여 1차 강성을 구하면 면진장치의 강성 값이 작아짐에 따라 구조물의 주기가 증가

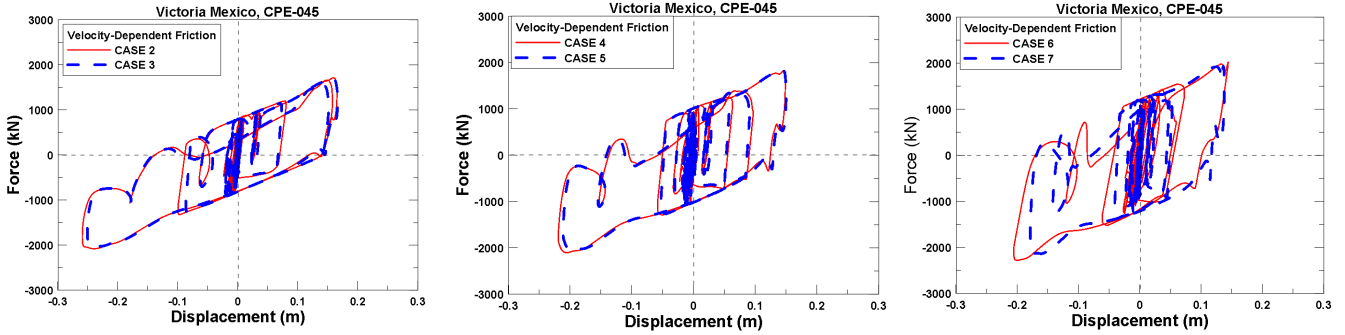


Fig. 13. Comparison of force and displacement relationship of FPS with various velocity-dependent friction

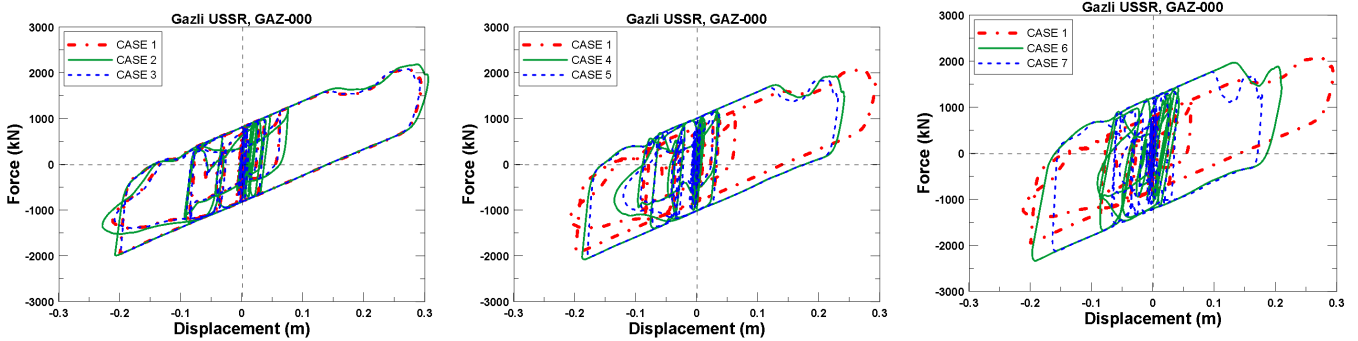


Fig. 14. Comparison of force and displacement relationship of FPS with constant friction and various velocity-dependent friction

하여 변위응답이 증가하는 것으로 판단된다.

#### 4.4 다양한 마찰계수에 따른 응답 비교

마찰진자시스템에 의해 면진된 원전 구조물에서 마찰계수 산정이 구조물 거동에 어떤 영향을 끼치는지에 대하여 분석하기 위하여, Table 2에서 정의한 7가지의 경우의 마찰계수에 대하여 지진해석을 수행하였다. Gazli 지진에 의해 생성된 인공지진에 대한 7가지 마찰계수에 대한 마찰진자시스템의 힘-변위 관계를 비교하여 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14에 나타낸 결과로부터 Case 1의 힘-변위 관계는 Case 3과 거의 동일한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 Table 2에 나타낸 바와 같이 두 모델의 비선형 물성치가 동일하기 때문으로 판단된다. 나머지 5개 경우(Case 2, 4, 5, 6, 7)는 Case 1과 힘-변위 응답의 차이를 나타내며 Case 6과 Case 7의 경우의 차이 정도가 크게 나타나고 있다. 그 이유는 마찰진자시스템의 항복력( $F_f$ )은 일정 속도 이상으로 증가 후 수렴하는 고속마찰계수( $f_{max}$ )에 의해 대부분 결정되기 때문으로 판단되며 Case 1의 일정마찰계수와 차이가 가장 큰 고속마찰계수( $f_{max}$ )를 Case 6과 Case 7이 가지고 있기 때문이다. 고속마찰계수 값이 클수록 마찰진자시스템의 마찰력을 증가시켜 항복강도는 증가시키고 증가된 항복강도에 의해 변위응답이 줄어드는 것으로 판단된다. 또한, 같은 마찰계수 범위( $f_{min} \sim f_{max}$ )를 갖는 해석모델에서 Table 2에 나타낸 바와 같이 저속마찰계수를 근거로 산정한 1차 강성이 고속마찰계수를 근거로 평가된 1차강성 보다 작게 나타나며 1차강성이 작게 평가될수록 변위응답이 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 저속마찰계수와 고속 마찰계수의 범

위가 넓을수록 그 차이는 커짐을 알 수 있다.

면진된 원전 구조물은 대부분의 지진에너지를 면진장치가 소산시킴으로서 면진장치의 상부구조물에 전달되는 지진에너지는 현저히 감소하게 된다. 면진장치에 의해 감소되는 가속도응답을 Table 2에 나타낸 30개 지진세트(3방향 지진)에 대하여 평균값을 구하고 면진장치의 위치와 격납구조물의 높이에 따라서 Fig. 15에 비교하여 나타내었다. Fig. 15에서 구조물 높이 3.3~6.6 m 사이가 면진층의 응답에 대한 것이므로, 면진장치 하부의 최대 가속도응답이 대략 0.64 g 정도이고 면진장치를 거치면서 면진장치 상부매트는 가속도응답은 0.25 g 정도로 대략 1/3 수준으로 줄어든다. 강진 지역에 국내원전을 수출하기 위하여 면진설계의 목표는 면진장치를 통하여 최대지반가속도 0.5 g 수준을 0.3 g 이하로 낮추는 것이다. 이는 국내원전이 최대지반가속도 0.3 g 수준의 원전표준스펙트럼에 대응하도록 설계가 되었기 때문에 면진장치에 의해 가속도 수준을 0.3 g 이하로 저감시킨다면 내진성능은 충분히 확보가 가능하다는 개념이기 때문이다. 즉, Fig. 15로부터 이와 같은 면진설계의 성능목표가 달성되었다고 판단된다.

Table 2에 나타낸 지진하중에 대한 격납 구조물의 높이에 따른 최대 변위의 평균을 적용된 마찰계수 7가지 경우별로 비교하여 Fig. 16에 나타내었다. Case 7의 경우가 변위응답이 다른 경우에 비하여 가장 작게 나타나고 있는데, 고속마찰계수에 의해 결정된 1차 강성과 항복력이 다른 경우에 비하여 가장 크기 때문으로 판단된다. 반대의 경우로 저속과 고속 마찰계수의 범위가 작으며 1차 강성이 저속마찰계수에 의해 결정되고 항복력이 고속마찰계수에 의해 지배적인 영향을 받는 Case 2가 가장 큰 변위를 보여주고 있다. 변위응답은 고속마찰계수에 지배적인 영향을 받는 항복력이 클수록 변위응답이 줄어들음을 알 수 있다. 즉 마찰계수의 범위에서 고속마찰계수가

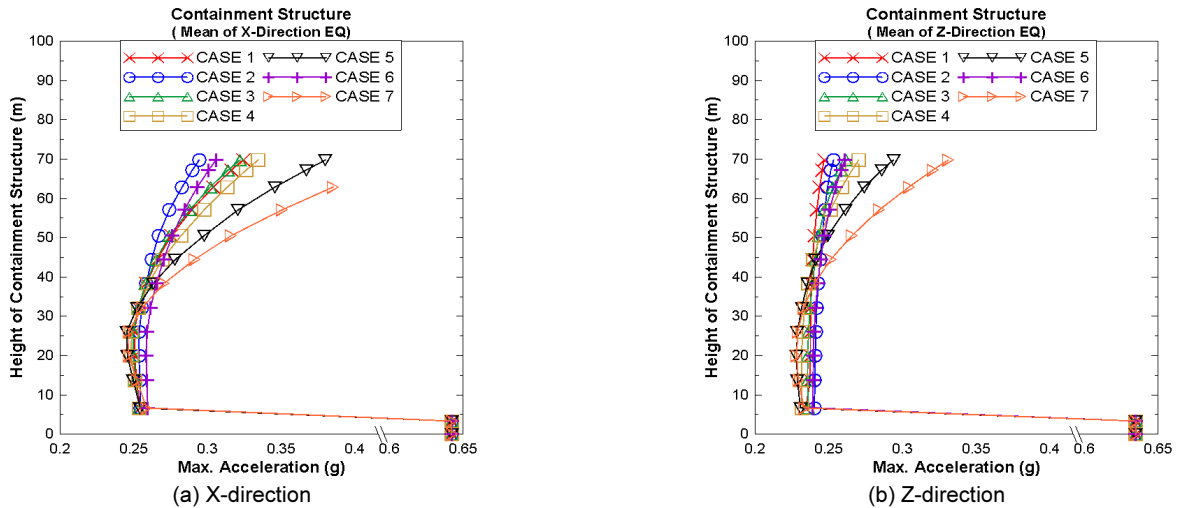


Fig. 15. Comparison of maximum acceleration response of containment structures isolated by FPS with constant friction and various velocity-dependent friction

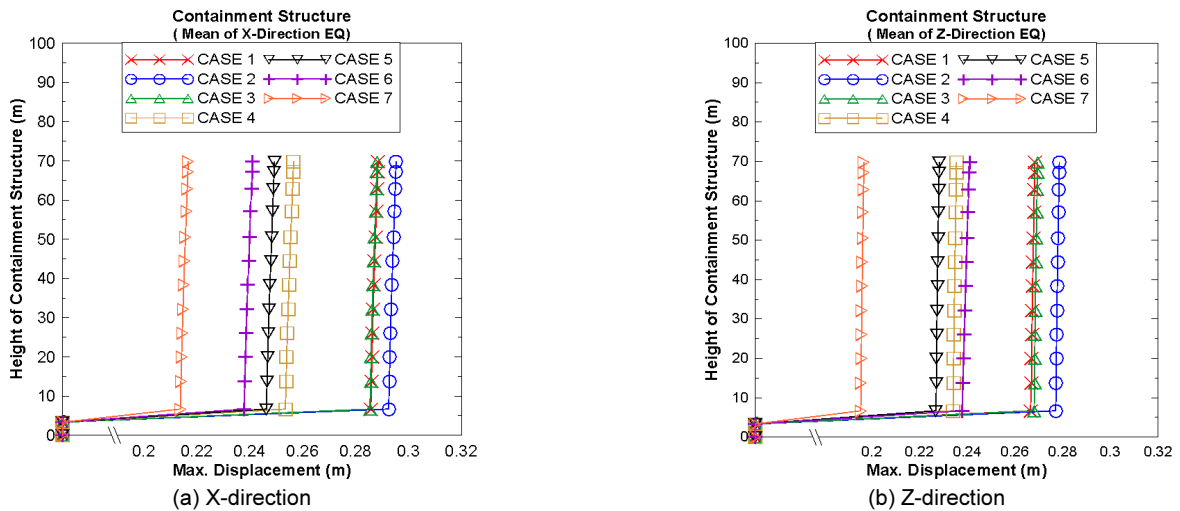


Fig. 16. Comparison of maximum displacement response of containment structures isolated by FPS with constant friction and various velocity-dependent friction

클수록 변위응답은 작아진다고 할 수 있다.

격납구조물의 최 상부에서의 가속도 응답을 구한 후, 이를 사용하여 내부응답스펙트럼(In-Structure Response Spectra)을 구하여 Fig. 17에 비교하여 나타내었다. 면진장치 고유의진동수인 0.5 Hz 보다 큰 진동수에서 가속도 응답이 증가되어 7 Hz 부근에서 가장 큰 값을 나타낸다. 7 Hz는 비면진된 원전 구조물의 고유진동수이다. 1차 강성을 고속마찰계수가 지배하고 가장 큰 마찰계수 값을 지닌 Case 7모델이 층 응답스펙트럼에서 가속도 응답이 제일 큰 것으로 나타나며, 저속마찰계수에 지배를 받으며 1차 강성이 가장 작은 Case 2모델이 지진에 대한 응답이 전체 모델 중에 제일 작은 것으로 나타났다.

일정한 마찰계수를 사용한 경우(Case 1)와 속도 의존 마찰계수의 경우(Case 2~ Case 7)의 결과의 불일치 정도를 식(6)과 같이 계산하여 Table 3에 나타내었다. 즉, 속도 의존 마찰계수를 적용한 경우의 해석결과가 일정한 마찰계수를 적용한 경우의 해석결과와의 차이 정도를 분석한 것이다.

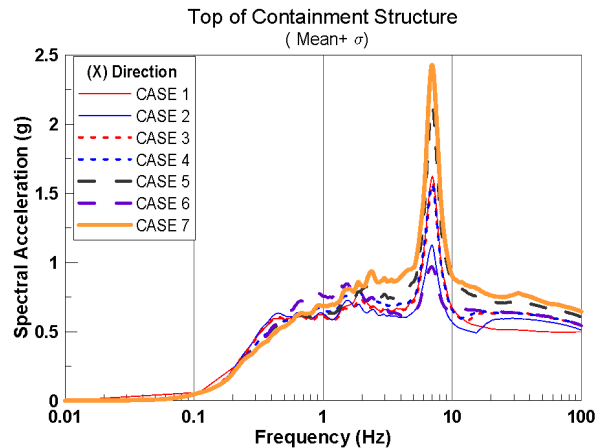


Fig. 17. Comparison of in-structure response spectra (mean+σ) at the top of NPP structure isolated by FPS with constant friction and various velocity-dependent friction



**Table 3.** Comparison of discrepancy ratio of velocity dependent friction cases (Case 2~Case 7) to constant friction case (Case 1)

Case No.	Discrepancy Ratio of Velocity Dependent Friction Cases (Case 2~Case 7) to Constant Friction Case (Case 1)					
	Friction Coefficient(%)	Period (%)	Max. Displacement on top of Containment Structures (%)		Max. Acceleration on top of Containment Structures (%)	
			X-Direction	Z-Direction	X-Direction	Z-Direction
CASE 2	-37.5	9.60	2.37	3.84	-9.20	2.62
CASE 3	0	-12.58	-0.13	0.43	-0.61	6.14
CASE 4	-18.75	-3.45	-11.07	-12.21	3.17	9.51
CASE 5	25	-21.34	-13.65	-14.92	17.25	19.06
CASE 6	-56.25	27.75	-16.45	-18.25	-5.67	5.71
CASE 7	50	-30.43	-24.86	-26.68	32.62	34.13

$$Discrepancy\ Ratio\ (\%) = \frac{Case^* - Case\ 1}{Case\ 1} \times 100 \quad (6)$$

여기서, Case 1은 일정한 마찰계수를 사용한 경우의 해석결과를 의미하고, Case \*은 속도의존 마찰계수의 경우(Case 2~ Case 7)에 대한 각각의 해석 결과를 의미한다.

Table 3에 나타난 마찰계수의 불일치율은 Table 2에 나타난 탄성 강성을 계산하는데 사용한 마찰계수의 불일치율을 의미한다. 또한 고유주기의 불일치율을 나타내었으며 변위응답의 불일치율은 Fig. 16의 결과중 원자로격벽 구조물의 상층부에 대한 변위응답으로부터 분석한 것이며 가속도 응답의 불일치율은 Fig. 15의 원자로격벽 구조물의 상층부의 결과로부터 분석한 것이다. 마찰계수의 불일치과 주기의 불일치율, 그리고 변위응답 및 가속도응답의 불일치율은 특정한 비례관계가 없음을 알 수 있다. 이는 구조물의 응답은 Table 2에 나타난 마찰계수의 범위와 면진장치의 속도에 따라 다양한 특성을 나타내기 때문에 판단된다. Table 2와 Table 3의 결과를 동시에 비교한 결과로부터 변위응답은 마찰계수 범위의 상한값인 고속마찰계수( $f_{max}$ )가 커짐에 따라 작아짐을 알 수 있으며 초기강성에 계산에 사용한 마찰계수가 클수록 변위응답도 작아지지만 변위응답에 지배적으로 영향을 주는 변수는 고속마찰계수( $f_{max}$ )임을 알 수 있다. 이는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 지진에 강진지속기간 동안에는 대부분 고속마찰계수에 도달하기 때문이다.

## 5. 결론

본 논문에서 마찰진자시스템에 의해 면진된 원전구조물의 지진응답을 다양한 특성의 마찰계수를 적용하여 해석결과를 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정지마찰계수 반영 여부에 따른 면진된 원전구조물의 지진응답의 차이는 거의 없다. 그 이유는 정지마찰계수는 면진장치의 미끄러짐 속도가 0이 되는 순간의 마찰계수로서 이 순간이 매우 짧은 시간이므로 정지마찰계수를 반영여부에 관계없이 면진장치의 응답에 거의 영향을 주지 못하기 때문이다.
- 2) 저속마찰계수가 1차 강성에 적용된 경우가 동일한 조건에서 고속마찰계수가 적용된 경우에 비하여 면진장치의 변위응답을 크게 평가한다.

이는 마찰계수 값이 작을수록 일차강성이 작아짐에 따라 고유주기의 증가 때문이다.

- 3) 7가지 마찰계수에 따른 변위응답을 비교한 결과 고속마찰계수 값이 클수록 변위응답이 크게 나타난다. 이는 고속마찰계수 값이 클수록 마찰진자시스템의 마찰력을 증가시켜 항복강도는 증가시키고 증가된 항복강도에 의해 변위응답이 줄어들기 때문이다.
- 4) 면진된 원전 구조물은 대부분의 지진에너지를 면진장치가 소산시킴으로서 면진장치의 상부구조물에 전달되는 지진에너지는 현저히 감소하게 된다. 마찰진자시스템의 적용에 의해 강진에 의한 가속도응답이 1/3 수준으로 줄었으며, 이로부터 면진설계의 성능목표가 달성되었다고 할 수 있다.
- 5) 격납 구조물의 높이에 따른 최대 변위의 평균을 적용된 마찰계수 7가지 경우별로 비교한 결과로부터, 변위응답은 고속마찰계수에 지배적인 영향을 받는 항복력이 클수록 변위응답이 줄어들음을 알 수 있다. 즉 마찰계수의 범위에서 고속마찰계수가 클수록 변위응답은 작아진다고 할 수 있다.

## / 감사의 글 /

이 연구는 2014년 지식경제부 원전융합 원천기술개발사업 “원전구조물의 면진구조 설계기준 개발(2014151010170B)” 연구과제의 지원되었기에 이에 감사드립니다. 또한 본 연구는 2015년도 강원대학교 대학회계학술연구조성비(관리번호-520150073)로 지원되었기에 이에 감사드립니다.

## / REFERENCES /

1. Wu SC, Yang SM, Dynamics of Mechanical Systems with Coulomb Friction, Stiction, Impact and Constraint Addition-Deletion-II : Planar Systems, Mechanism and Machine Theory, Vol. 21, 1986.
2. Constantinou MC, Whittaker AS, Kalpakidis Y, Fenz DM, Warn GP, Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading, MCEER-07-0012, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York, Buffalo, NY. c2007.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide Specification for Seismic Isolation Design, AASHTO, Washington, DC, c2010.

4. Lysmer J, Ostadan F, Chin CC. A system for analysis of soil-structure interaction, SASSI 2000 theoretical manual, UC Berkeley, c1999.
5. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL. OpenSees: Open System of Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Center, Univ. of Calif., Berkeley. Available from: <http://opensees.berkeley.edu>, [cited 2007].
6. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings(FEMA 274) Ch. 9. Seismic Isolation and Energy Dissipation, 9-1~9-60, Oct, 1997.
7. Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA, Bommer JJ, Markatis A, McCoy E, Mendis R. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering*. 2006;10(S1): 67-89.
8. Koh. Generation of Target Power Spectral Density Function using Design Response Spectrum, Master's thesis Hanyang University, c2007.
9. Ronald L. Mayes, Fazard Naeim, *The Seismic Design Handbook* 2nd Edition Ch.14 Design of Structures with Seismic Isolation, Kluwer Academic Publishers, c2001 p.725-755.
10. American Society of Civil Engineers, ASCE 7-10; Minimum Design Loads for Buildings and other Structures, ASCE, Reston, c2010.
11. Nobuo Murota, Maria Q.Feng and Gee-Yu Liu, Experimental and Analytical Studies of Base Isolation System for Sesimic Protection of Power Transformers, MCEER-05-0008, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2007.
12. Kim DK, Kim WB, Suh YP, Moon DS, Kim JY. Seismic Performance Evaluation for MCR of Nuclear Power Plant Isolated by FPS. Proceedings of EESK Conference, Earthquake Engineering Society of Korea, c2003, p.453-460.
13. Lee KJ, Kim KS, Suh YP. Dynamic Property Evaluation of Friction Pendulum Isolation Bearing. Proceedings of EESK Conference, Earthquake Engineering Society of Korea, c2003, p.465-472.
14. Mokha, Constaninou and Reinhorn, Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of A Sliding Isolation System With A Spherical Surface, National Center For Earthquake Engineering Research, c1990.