

# 지동복원 및 보강 시스템과 결합된 면진받침의 지진거동과 평가

허종완\*

Hu, Jong Wan\*

## Seismic Behavior and Estimation for Base Isolator Bearings with Self-centering and Reinforcing Systems

### ABSTRACT

Flexible base isolation bearings that separate superstructure from ground have been widely used in the construction field because they make a significant contribution to increasing the fundamental period of the structure, thereby decreasing response acceleration transmitted into the superstructure. However, the established bearing devices installed to uphold the whole building give rise to some problems involved with failure and collapse due to lack of the capacity as modern structures are getting more massive and higher. Therefore, this study suggests new isolation bearings assembled with additional restrainers enabled to reinforcing and recentering, and then evaluates their performance to withstand the seismic load. The superelastic shape memory alloy (SMA) bars are installed into the conventional lead-rubber bearing (LRB) devices in order to provide recentering forces. These new systems are modeled as component spring models for the purpose of conducting nonlinear dynamic analyses with near fault ground motion data. The LRB devices with steel bars are also designed and analyzed to compare their responses with those of new systems. After numerical analyses, ultimate strength, maximum displacement, permanent deformation, and recentering ratio are compared to each model with an aim to investigate which base isolation models are superior. It can be shown that LRB models with superelastic SMA bars are superior to other models compared to each other in terms of seismic resistance and recentering effect.

**Key words** : Lead-rubber bearing (LRB), Base isolation, Superelastic shape memory alloy (SMA), Reinforcing bar, Recentering

### 초 록

지반과 상부 구조물 사이의 경계에서 유연성이 확보된 지진동 격리 받침 시스템을 설치한 후에 전체 구조물의 고유 주기를 연장하고 구조물에 전달되는 지진 가속도를 저감하여 구조물을 보호하는 면진 설계 방식이 최근 건설 현장에서 널리 활용되고 있다. 하지만 도심지의 현대 구조물이 점차 대형화 및 고층화 되면서 기존의 면진 받침을 그대로 사용하기에는 지진 발생시 저항 능력의 부족으로 인한 전단파괴 혹은 잔류변형이 발생하여 구조물의 사용성 향상을 위한 보수 및 붕괴 위험에 따른 철거의 문제점을 발생시킨다. 따라서 본 연구에서는 기존에 주로 사용되는 면진 받침의 저항 강도와 복원성을 향상시키기 위하여 부가적인 개장 시스템을 설치하고 지진 하중에 대한 성능을 평가하고자 한다. 초탄성 형상기억합금 소재의 보강 봉을 납 적층 고무 받침에 설치한 면진 시스템을 설계하고 단자유도 스프링 모델로 모형화하여 지진 데이터를 활용하고 비선형 동적 해석을 실시하였다. 본 연구에서 제안된 면진 시스템이 성능적인 우수성을 입증하기 위하여 기존에 사용된 면진 받침과 여기에 추가로 강재 봉으로 보강된 면진 시스템과의 극한 전단 저항력, 복원성 및 잔류변형 발생 등을 해석을 통하여 비교 평가하였다. 그 결과 초탄성 형상기억합금 소재의 제어 봉으로 보강된 면진 받침이 다른 면진 받침과 비교하여 지진저항 성능에 있어서 우수함을 확인하였다.

**검색어** : 납 적층 고무 받침, 면진 시스템, 초탄성 형상기억합금, 보강 봉, 복원성

\* 정회원·교신저자·국립인천대학교 도시환경공학부, 국립인천대학교 방재연구센터, 조교수 센터장 공학박사 기술사  
(Corresponding Author · Incheon National University · [jongp24@incheon.ac.kr](mailto:jongp24@incheon.ac.kr))

Received April 28, 2015/ revised June 25, 2015/ accepted July 2, 2015

### 1. 서론

지진에 대한 피해를 저감하기 위하여 인류는 오래 전부터 면진의 개념을 구조물 설계에 적용하여 왔다. 면진 시스템이 도입된 구조물은 지진에 대하여 직접 저항하기 보다는 반대 방향으로 피하는 방식의 수동적인 개념을 도입하여 설계를 한다. 지진 응답 스펙트럼(Response spectrum)에서 지진 가속도는 단자유도에서 단주기의 성분은 강하고 장주기의 성분은 약한 특성을 보여주고 있다(Jangid and Kelly, 2001; Hu, 2015). 대체로 면진 시스템은 지반과 구조물 사이에 고무와 같은 유연한 절연체를 설치하여 지반으로부터 전달되는 에너지 및 가속도를 구조물에 크게 전파되지 않도록 진동 흡수를 통한 충격완화와 구조물의 고유 주기(fundamental period)를 길게 하여 구조물에 입력되는 지진력의 크기를 줄이는 방식으로 활용된다(Providakis, 2008). 비교적 고유주기가 짧은 저층 건물과 교량에 대해 지반과 구조물의 연결부에 지진동을 격리하는 받침(isolation bearing) 형태로 설치하여 강제적으로 고유주기를 늘리는 원리로 현장에서 사용되어 왔다. 지진 피해를 저감하기 위하여 기존에 구조물 설계시 적용되어온 내진 보강 및 제진 시스템과 비교하여 면진 시스템은 구조물 일부분에 설치하여 경제적이면서

도 지진 피해를 효율적으로 저감할 수 있는 성능적인 측면에서 우수한 장점을 보유하고 있다.

현대의 도심에서의 건물과 교량이 점차적으로 초고층화 및 초대형화 되면서 구조물 전체를 떠받치는 받침으로 활용되는 면진 시스템은 전체의 자중을 건디어내기에는 성능과 용량에 한계를 보여주고 있어 건설 현장에 실용화에 있어서 제한적이라는 문제점을 가지고 있다. 또한 면진 시스템이 적용된 구조물은 지진동에 대하여 고유주기가 길고 유연하기 때문에 지진 발생시 많이 흔들리고 구조물의 변위가 커지는 단점을 보유하고 있다. 무엇보다도 구조물 하부의 면진 시스템이 과도한 지진 하중으로 인하여 용량을 초과하고 전달 파괴가 발생한다면 다른 시스템과 비교하여 막대한 보수 비용이 소모되며 심지어 구조물 전체를 철거해야 하는 불상사를 발생할 우려가 높은 편이다(Mazza and Vulcano, 2009; Mazza et al., 2012). Fig. 1에서 보이는 바와 같이 건물의 변위제어와 진동에너지 소비하는 감쇠(damping) 장치를 추가로 설치하기도 하여 단점을 보완하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 기존에 주로 사용되었던 면진 시스템을 고층 빌딩 및 대형 교량과 같은 현대적인 구조물에 사용하는 데 발생하는 문제점을 해결하고 스마트한 재료를 활용하여 지진에 대한 성능 향상에 주안점을 두고자 한다. 이를 실현하기 위하여 납 적층 고무 받침(lead-rubber bearing, LRB)에 효율적인 지중분산, 전단하중에 대한 저항력 증대, 복원성 확보를 통한 구조물의 잔류변위를 감소시킬 목적으로 개장 장치의(retrofit device) 역할을 하는 초탄성 형상기억합금(superelastic shape memory alloy)으로 제작된 제어봉을 추가적으로 설치한다.

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 형상기억합금은 오스테나이트(Austenite) 상변위(Phase transformation) 발생 온도에서( $A_f$ ) 상당량의 소성 변형을 가하더라도 하중 제거(unloading)시 응력 제거만으로도 별도의 열처리 없이 원형으로 스스로 복원되는 초탄성적인 거동을 보여준다. 주로 널리 사용되고 있는 형상기억합금은 니켈과 티타늄이 동일한 비율로 섞어서 제작한 니티놀(nitinol)이며



(a) Isolator Failure due to Large Deformation



(b) Isolator Protection by Damper Devices

Fig. 1. Failure Configuration and Existing Protection Methodology of Base LRB Isolators

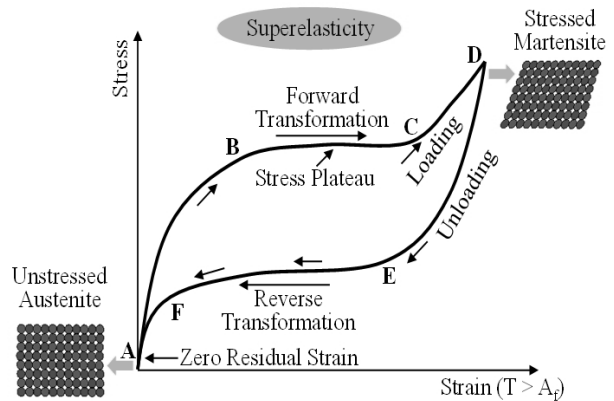


Fig. 2. Stress and Strain Curve for Superelastic SMA Materials

과학기술의 발달로 영하에서도 초탄성적인 거동을 보유했던 소재를 부품의 소재와 기계 장치 제작에 활용하고 있다(Hu and Leon, 2011; Hu et al., 2011). 하중 제거 후 마르텐사이트(Martensite)에서 오스테나이트 결정으로 전환되는 역방향 상변위 과정 동안에 잔류 변형을 발생하지 않고 원형을 유지하기 위하여 재료 내에서 복원력(recentering force)을 생성 시킨다. 이러한 소재를 구조물에 소성 변형이 집중하는 연결부(connection)와 구속재(restrainer) 제작에 활용한다면 복원력에 의하여 구조물 전체의 영구 변형을 상당량 감소 시키는 효과를 기대할 수 있다(Hu et al., 2011). 또한 순방향 상변위 과정 동안에 응력 슬립으로 인하여 상당량의 변위를 허용하면서 상당량의 에너지의 소산이 가능한 재료적 특성 때문에 충격과 진동을 흡수하는 감쇠 장치로도 활용 가능하다. 이외에도 초탄성 형상기억합금은 부식에 대한 내구성이 우수하고 반복적인 하중에 대한 피로파괴에 대한 저항성이 매우 탁월한 장점을 가지고 있다(Hu et al., 2011).

따라서 스마트한 재료의 우수한 성질을 활용하여 새로운 면진 시스템 장치를 개발하고 새로운 장치에 대한 지진저항(seismic resistance) 성능을 입증하고자 수치해석 방법을 통하여 거동을 재현하고 기존에 사용된 면진 장치의 성능과 비교 평가하고자 한다. 본 연구에서 제안된 시스템은 빌딩 하부에 설치되는 지진동 격리용 면진 받침에 적용하며 등가의 단자유도(single degree of freedom, SDOF) 스프링 모델로 모형화한다. 실제로 발생한 지반 가속도 데이터를 가지고 비선형 동적 해석을 수행하여 거동을 재현한다. 해석의 결과를 토대로 최대 및 잔류 변위량, 극한 전단 저항력, 에너지 소산 능력과 복원성 등을 분석하여 기존 제품 대비 새로운 장치에 성능에 대한 우수성을 검증하고자 한다.

## 2. 기존의 면진 받침

Fig. 3에서는 지진동 격리용 면진 장치로서 가장 널리 활용되고 있는 납 적층 고무 받침의 개요도를 보여주고 있다. 이러한 면진 받침은 상부 구조물을 지반과 분리하고자 구조물의 자중을 지탱하면서 기둥 하부에 설치를 하며 지진 발생시 횡하중에 대하여 유연성과 부가적인 감쇠 능력을 제공한다(Mazza et al., 2012). 지진

발생시 중앙부 코어에 위치하는 납은 운동에너지에 의해 열이 발생되고 그로 인해 결정이 소결된 후 상변위 현상이 발생하며 시스템 내에서 약간의 복원력을 발생시킨다. 또한 중앙 코어의 납이 항복하는 동안에 상당량의 에너지를 소산하며 면진 받침이 등가의 점탄성(viscous) 감쇠 계수가 최대 30%까지 가지도록 공헌한다. 이에 반하여 고무는 탄력과 유연성을 제공하며 구조물 전체에 고유 주기를 강제적으로 연장시키는데 기여를 한다. 일반적인 고무만으로 구조물 전체를 지지하는 데 다소 무리가 있기에 판형으로 제작된 고무 층(layer) 사이로 강재(steel) 판들을 적층하여 엘라스토머(elastomer) 형태로 제작하고 외력에 대하여 탄성 상태를 유지시킨다. 이러한 면진 받침은 상당량의 전단 변형을 수용하며 실제로 적층된 고무판 높이(h) 이상으로 측면 변위를 허용한다(Jangid, 2007). 특히 지진동에 대해서는 단주기에서 지진 응답 가속도가 매우 높고 장주기에서 급격하게 감소하는 단층(fault) 주변에서 발생하는 지진파에 대해서 매우 효율적으로 활용 가능하다. 적층된 고무판과 중앙에 있는 코어 형태의 납은 위아래로 설치한 표지판(cover plate)에 볼트로 고정된다.

본 연구에서는 실제 현장에서 사용하고 있는 3가지의 납 적층 고무 면진 받침을 선별하여(C1, C2, C3 모델, Table 1 참고) 면진 받침의 규격을 결정하는 치수들을(Fig. 3 참고) 포함하여 전단 하중-변위 거동을 재현하기 위하여 역학적인 파라미터(parameters)들을 Table 1에서 정리하였다. 각각의 면진 받침 모델에 대한 전단 하중-변위 거동은 Table 1에서 정리한 파라미터를

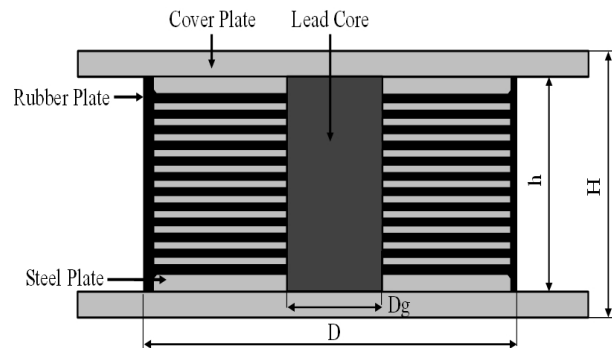


Fig. 3. Typical LRB Isolator Devices

Table 1. Basic Properties for Presented LRB Models (Unit: kN and mm)

LRB Model	$\Delta_{all}$	Fv	F1	F2	$\Delta_1$	$\Delta_2$	Q	Ke	Kp	Keff	$\lambda_{eff}$	Dg	D	H	h	Te
C1	100	3630	106	162	8	83	100	13.25	0.75	1.94	35.74	500	110	247	197	100
C2	100	9190	129	223	8	83	119	16.13	1.25	2.68	30.77	650	120	260	200	102
C3	100	13190	155	267	10	83	140	15.50	1.53	3.20	29.44	800	130	283	223	128

$\Delta_{all}$ : Allowable Maximum Displacement Limit (mm), Fv: Maximum Allowable Vertical Force (kN),  $\lambda_{eff}$ : Effective Damping (%), Te: Total Thickness of Rubber Plate Layers (mm)

사용하여 Fig. 4에서 도식화 하였다. 면진 받침의 거동은 두 개의 선형 기울기로 도식할 수 있으며 항복변위( $\Delta_1$ ), 항복하중( $F_1$ ), 임의의 설계변위( $\Delta_2$ ) 및 설계하중( $F_2$ ) 등의 파라미터들을 가지고 용량과 규모를 정의할 수 있다. 초기의 강성( $K_e$ ), 유효 강성( $K_{eff}$ ) 및 항복 이후의 강성은( $K_p$ ) 아래의 식으로 각각 나타낸다.

$$K_e = \frac{F_1}{\Delta_1} \quad (1)$$

$$K_{eff} = \frac{F_2}{\Delta_2} \quad (2)$$

$$K_p = \frac{F_2 - F_1}{\Delta_2 - \Delta_1} \quad (3)$$

하중을 나타내는 축에 변위가 0 일 때 면진 받침의 특징적인 강도( $Q$ )는 항복 이후에 강성을 사용하여 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = F_1 - K_p \cdot \Delta_1 \quad (4)$$

면진 받침의 소산되는 에너지의 양은 이력곡선의 면적을 의미하며 Eq. (4)에서 언급한 특징적인 강도를 사용하여 아래의 식을 사용하여 계산한다.

$$E = 4Q \cdot (\Delta_2 - \Delta_1) \quad (5)$$

유효 감쇠 계수는 소산되는 에너지의 양에 비례하지만 반대로 유효 강성과 해당 변위의 제곱에 반비례하며 아래의 식으로 나타낸다.

$$\lambda_{eff} = \frac{E}{2\pi K_{eff} (\Delta_2)^2} \quad (6)$$

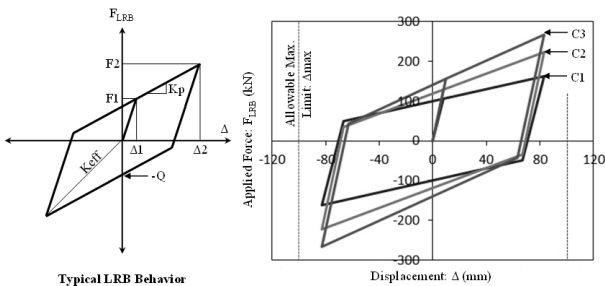


Fig. 4. Force and Displacement Curves for LRB Model Cases

위에서 언급된 수식을 활용하여 Table 1에서 언급된 특징적인 강성, 강도, 에너지 및 유효 감쇠 계수들의 값들을 각 모델 별로 산정하였다.

본 연구에서 채택된 면진 받침 모델의 최대 허용 변위( $\Delta_{all}$ )는 모두 100mm이며 이 범위를 초과할 경우 Fig. 1(a)에서 보이는 대로 전단 파괴가 발생한다. C1 모델의 경우 강판을 적층한 고무판의 높이( $T_e$ )와 최대 허용 변위가 일치함을 알 수 있다. C3 모델은 중앙의 납 코어와 고무판의 직경이 나머지 모델과 비교하여 가장 큰 규격으로 설계되었으며 이로 인하여 이력곡선의 같은 변위에서 가장 큰 강도와 강성을 보여주고 있다. 또한 건물에서 전달된 하중에 대하여 가장 큰 저항 성능을 보여주지만 유효 감쇠 계수는 Table 1에서 제시된 바와 같이 가정 적은 값을 보여준다.

### 3. 제안된 면진 받침

본 연구에서는 기존에 주로 사용된 면진 받침 장치에서 전단 및 수직 하중에 추가적인 보강 작용과 시스템 내에서 복원력을 제공하여 잔류 변형을 감소시키기 위하여 초탄성 형상기억합금을

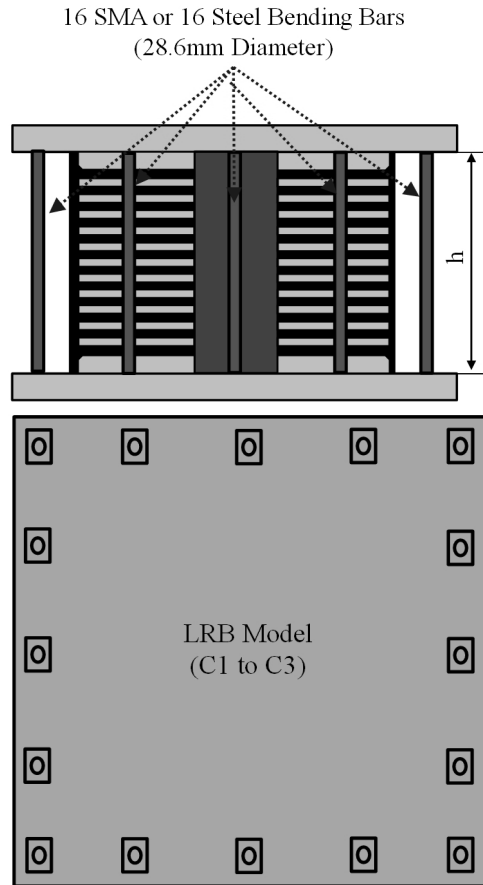


Fig. 5. LRB Models with Bending Bars used for Seismic Restrainers

사용한다. 초탄성 형상기억합금으로 제작한 제어 장치를 Fig. 5와 같이 설치하는 것을 제안하였다. 이러한 제어 장치는 28.6mm의 직경을 가진 원형 봉 형태로 제작되어 한 모델당 총 16개씩 대칭으로 면진 받침 주변에 상부판과 하부판 사이를 너트로 체결하여 고정한다. 비록 이러한 제어 장치는 면진 받침에 추가적인 강성을 제공하여 시스템의 고유 주기를 일부 단축시키는 역할을 하지만 비교적 탄성 계수가 작은 재료를 사용한다면 설계 시 지진 응답의 증가는 일정 수준으로 억제하며 보강 작용과 복원 효과를 극대화 시킬 수 있다. 원형 봉은 초탄성 형상기억합금 혹은 기존에 사용된 강재로 제작하며 해석을 수행한 이후에 원형 봉의 재질에 따라서 거동의 결과를 비교하도록 한다. 원형 봉을 너트로 고정하여 용접 접합의 방식을 대신하였기 때문에 열에 의한 재료의 성질 변화를 피할 수 있다. 원형 봉의 유효 길이는 상판과 하판 사이의 높이를 (h) 기준으로 산정을 한다. 이러한 원형 봉은 측면으로부터 발생하는 전단력에 저항하여 휨 변형을 발생하며 양단이 고정된 보(Beam)의 형태로 가정한다. 따라서 일정한 개수와 직경을 가지고 원형 봉을 면진 받침에 설치하는 경우에는 면진 받침의 높이에 따라서 강성이 달라지고 이로 인하여 복원력에도 상당한 영향을 미친다.

기존에 형상기억합금과 결합한 납 적층 고무 면진 받침에 대한 선행 연구가 일부 과학자들에 의하여 수행되었다(Choi et al., 2005; Alam et al., 2012; Bhuiyan and Alam, 2013). 하지만 본 연구에서 제안하는 면진 시스템과 비교하여 형상기억합금의 적용과 설계적인 측면에서 뚜렷한 차이점을 보여주고 있다. 기존의 선행 연구에서는 초탄성 형상기억합금을 와이어 형태로 제작하여 긴장력을 작용 시키고 훅(hook)에 고정하는 방식으로 적용하였다. 이러한 방식은 보강과 복원력이 오로지 일축 방향으로만 적용되는 시스템이다. 지진 하중이 와이어가 설치된 부분에 면외(Out-of-plane) 방향이나 주축 방향에서 벗어난 방향으로 발생된다면 형상기억합금 와이어 장치의 성능을 제대로 발휘할 수 없는 단점을 가지고 있다. 하지만 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 원형 모양의 봉을 면진 받침 주변에 설치하여 하중의 방향성과 무관하게 작용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Fig. 6은 본 연구에서 제안한 초탄성 형상기억합금으로 제작한

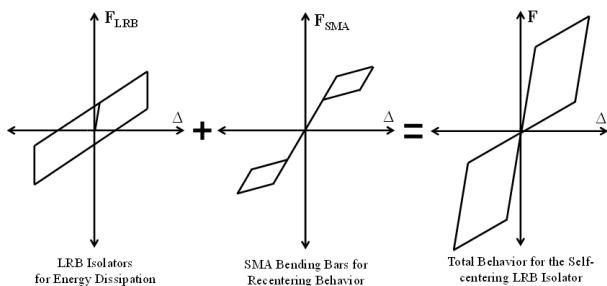
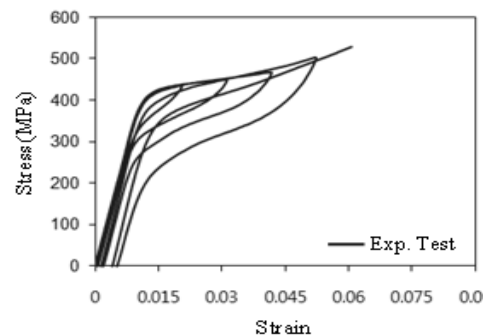


Fig. 6. Response Mechanism of Recentering LRB Isolators

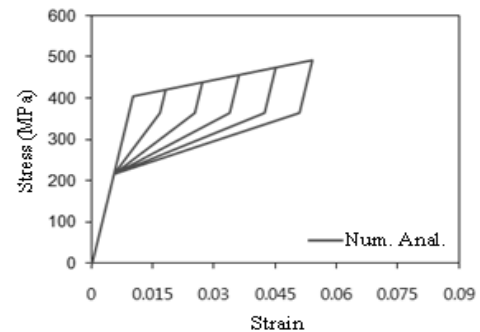
원형 봉을 설치하여 원형 복원이 가능한 납 적층 고무 받침의 역학적 거동에 대한 원리를 보여준다. 면진 받침은 전단력에 저항하는 동안에 전단 변형을 발생하며 항복 이후에 변형률 경화비를 가지고 평형사변형 모양의 이력곡선으로 거동을 한다. 반면에 초탄성 형상기억합금 재질의 원형 봉은 전단력에 의하여 휨 변형을 발생하며 하중 제하시 시스템에 복원력을 제공하는 깃발 모양의 이력곡선으로 거동을 한다. 면진 받침과 원형 봉의 구성적인 거동들이 직렬(Parallel)로 결합하여 원형 봉으로 보강된 새로운 면진 받침의 전체적인 거동을 형성한다. 따라서 면진 받침에 추가로 설치된 원형 봉에 의하여 강도의 증대뿐만 아니라 복원력에 의한 잔류 변형의 감소 효과를 기대할 수 있다. 아울러 원형 봉의 설치 개수와 직경을 적절하게 선택하여 복원력을 조절한다면 전체적인 거동에서 에너지 소산 능력을 최대화하고 동시에 잔류 변형의 발생을 최소화하는 최적화된 모형의 설계가 가능하다.

#### 4. 해석모델

지진 발생시 빌딩 구조물 하부에 설치된 면진 받침의 비선형 동적 거동은 질량과 스프링 요소들로 구성된 단자유도(single degree-of-freedom, SDOF) 모델에 의하여 재현 가능하다. 건물의 자중은 등가의 집중 질량으로 환산하며 면진 받침의 각각의 구성



(a) Experimental Pullout Test Curve



(b) Analytical Simulation Curve

Fig. 7. Stress and Strain Curves for Superelastic SMA Materials

요소들은 비선형 스프링(spring)으로 모형화하여 해석 모델을 완성한다. 모델 내에서 납 적층 고무 받침과 강제 혹은 초탄성 형상합금으로 제작된 원형 강봉은 모두 등가의 스프링 요소들로 변환되었다. 아울러 해석 모델은 거동의 기하학적인 대변형을 포함하여 재료에 물성치에 있어서도 탄성 이외에 소성 영역을 포함하는 비선형성을 고려하여 제작하였다. 해석 모델의 제작과 실제 지진 데이터를 가지고 수행하는 비선형 동적 해석은 미국 캘리포니아 주립대에서 개발한 OpenSEES 프로그램을 사용하여(Mazzoni et al., 2006) 실시하였다.

Fig. 7에서는 재료 실험을 통하여 얻어진 초탄성 형상기억합금의 이력 거동 곡선과 실험 데이터를 기반으로 확보된 파라미터를 사용하여 수치해석적 방법으로 재현된 그래프를 비교한다. 본 연구에서 제시된 재료 실험은 조지아 공과 대학에서 수행하였으며 시편은 28.6mm의 직경을 가진 원형 강봉을 사용하여 축방향으로 반복 하중을 가하여 실시하였다. 재료 실험에서 얻어진 응력-변형률 (Stress and Strain) 선도의 결과 데이터를 기반으로 재료 물성치를 정의하는 주요 파라미터들의 입력 값은 다음과 같이 산정하여 해석에 적용한다.

$$E_{SMA} = 55,000 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$\epsilon_L = 7\% \quad (8)$$

$$\sigma_s^{SA} = 420 \text{ MPa} \quad (9)$$

$$\sigma_f^{SA} = 520 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$\sigma_s^{AS} = 310 \text{ MPa} \quad (11)$$

$$\sigma_f^{AS} = 240 \text{ MPa} \quad (12)$$

여기서,  $E_{SMA}$ 는 초탄성 형상기억합금의 탄성 계수를 나타내며  $\epsilon_L$ 은 Fig. 2에서 변형률 슬립이 발생하는 BC 구간의 길이를 의미한다. 재료에 하중을 가하는 동안에 마르텐사이트의 상변위가 시작되거나 완료된 시점의 응력을 Fig. 2에서 각각 B와 C의 지점으로 정의하며 이에 상응하는 응력을  $\sigma_s^{SA}$ 와  $\sigma_f^{SA}$ 로 나타낸다. 반대로 하중을 제거한 후에 역방향 상변위 과정에서 오스테나이트 상변위가 시작되거나 완료된 시점의 응력을 각각 E와 F의 지점으로 정의하며 이에 상응하는 응력을  $\sigma_s^{AS}$ 와  $\sigma_f^{AS}$ 로 표시한다. 이러한 재료 물성치의 입력 값을 사용하여 Auricchio and Hu의 연구들을 기반으로 OpenSEES 프로그램 내에서 완성된(Auricchio and Sacco, 1997) 사용자 정의 재료(user-defined material, UMAT) 모델을

사용하여 응력-변형률 선도를 수치해석적으로 재현하였다. 해석에 의하여 재현된 그래프의 경우에는 재료의 상변위의 거동에 따라 일련의 직선으로 이상화하여 원형으로 완벽하게 복원되고 잔류 변형이 없는 깃발 모양의 이력곡선으로 재현하였다. 다만 하중을 제거한 이력곡선에서 수치해석적 재현이 실험결과 곡선과 비교하여 다소 비대칭 경향이 있다. 항복 이전에 초기의 탄성 기울기가 하중 제거 후에 역방향 상변위가 시작되는 지점까지의 기울기를 동일하게 간주하여 모델링 하였기 때문에 이러한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 8은 납 적층 고무 받침에서 추가로 설치된 강제 혹은 초탄성 형상기억합금 원형 봉의 전단 하중과 변위를 모사하기 위하여 볼트에 의하여 양단의 구속된 형태의 보 요소를 사용하여 한쪽 고정단에 반복하중을 가하여 거동을 재현하였다. 휨 변형을 받는 원형 봉의 유효 길이를 C1 모델에서 상판과 하판 사이에서의 높이 ( $h=197\text{mm}$ )로 산정하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 강제 혹은 초탄성 형상기억합금으로 제작된 원형 봉들의 전단 하중-변위 선도는 재료의 물성치에 의하여 좌우됨을 알 수 있다. 따라서 강제로 제작된 원형 봉인 경우에는 일반 강제의 응력-변형률 선도와 비슷한 모양으로 등방형 변형률 경화(isotropic strain hardening)를 가지고 바우싱거 효과(Bauschinger Effect)를 보여주는 이력곡선으로 모사된다. 이러한 경우에는 강제에 항복에 의하여 많은 양의 에너지를 소산하지만 하중의 반복 횟수가 증가할수록 거동 내에서 상당량의 영구 변위를 발생시킨다. 반면에 초탄성 형상기억합금으로 제작

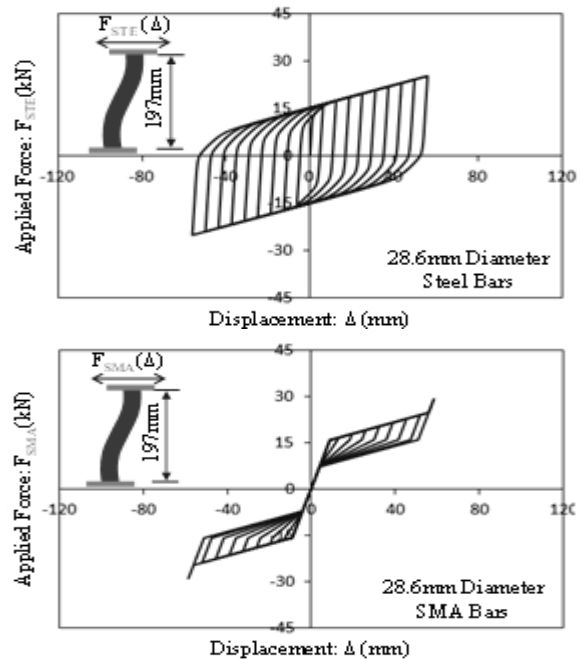


Fig. 8. Simulated Force and Displacement Curves for Fixed-End Supported Bending Bars

된 원형 봉의 경우에는 전단 하중에 대한 휨 변위는 본 재료의 대표적 거동으로 상징되는 깃발 모양의 이력곡선을 모사하며 하중 제거시 완벽하게 원형으로 복원되는 현상을 보여주고 있다. 양단이 지지된 형태의 원형 봉들은 등가의 비선형 스프링 요소로 치환되어

해석을 위한 모델 내에 설치된다.

Fig 9에서는 원형 봉이 설치된 납 적층 고무 면진 받침에 대하여 스프링 요소들로 구성된 해석 모델과 각 스프링 요소들의 거동에 대한 메커니즘을 설명하고 있다. 면진 받침과 원형 봉들은 등가의

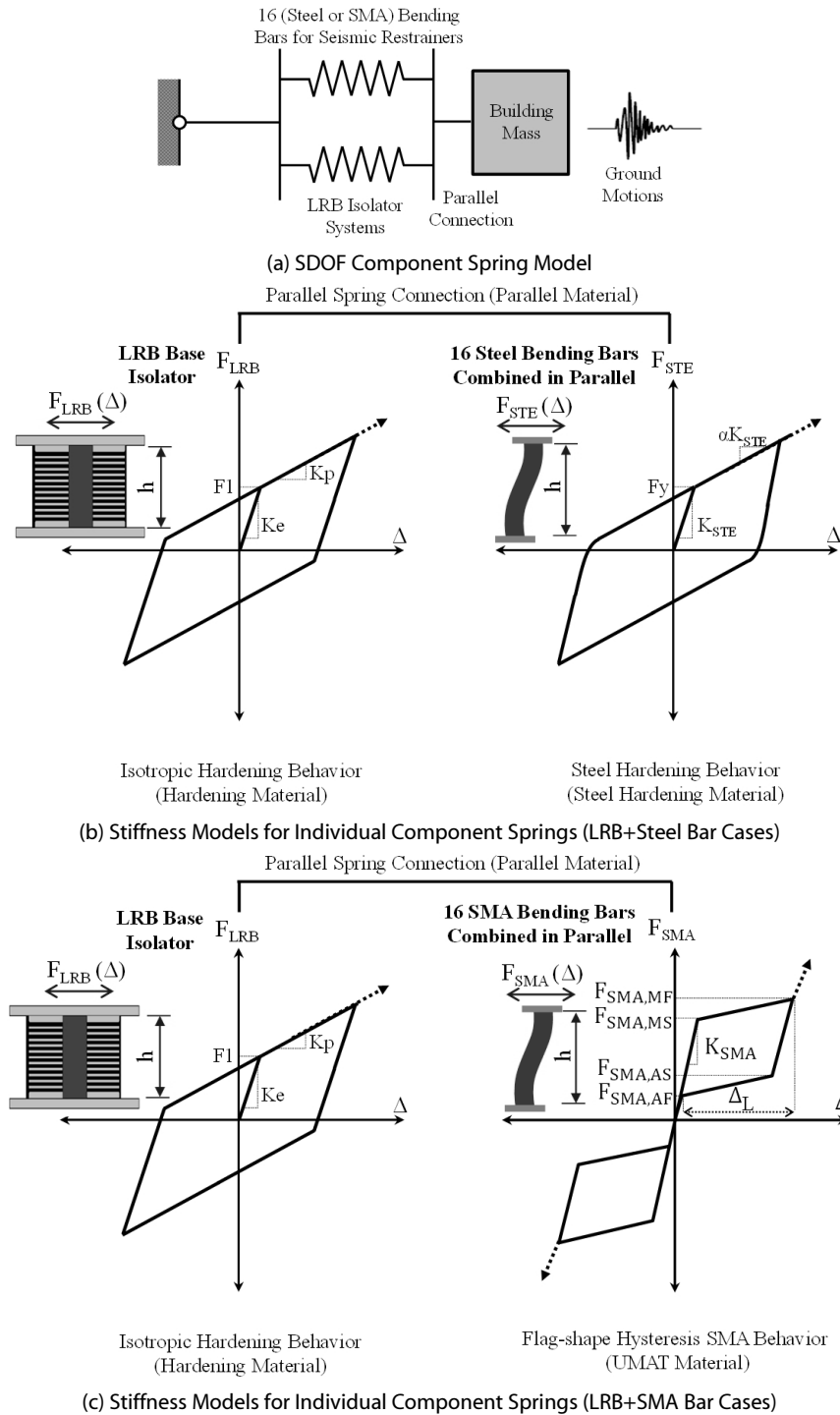


Fig. 9. Modeling Attributes for Nonlinear Dynamic Analyses

스프링 요소로 모형화되어 직렬로 결합하고 한쪽 지점의 경계를 고정시킨다. 동시에 빌딩의 하중을 집중 질량으로 환산하고 반대쪽 절점에 설치하여 단자유도의 해석 모델로 제작한다(Fig. 9(a) 참고). 요소들의 거동은 강성으로 대변되는 일련의 직선들로 이상화하여 나타낸다(Figs. 9(b) and 9(c) 참고). 납 적층 고무 받침의 거동은 Fig. 4에서 언급한대로 등방성 변형을 경화를 가진 평형사변형 모양의 이력곡선으로 정의되며 이러한 거동은 프로그램 내에서 경화 재료(hardening material) 모델에 의해서 재현 가능하다. 강재 원형 봉의 거동은 재료의 물리적 성질을 고려하여 강재 경화 모델에 의해서 재현한다. 초탄성 형상기억합금의 경우에는 프로그램에서 제공하는 모델이 부재하기 때문에 C++ 프로그램 언어에서 서브루틴(subroutine)으로 작성된 사용자 정의의 재료 모델을 OpenSEES 프로그램과 연결하여 재현한다. 각각의 스프링 요소들은 해당되는 거동 물성치를 포함하고 있으며 고정된 변위에서 요소들의 하중은 병렬로 조합하여 전체 면진 시스템의 통합적인 하중-변위 이력곡선을 재현한다. OpenSEES 프로그램에서 제공하는 Rayleigh 명령어를 사용하여 Table 1에서 제시된 감쇠 계수를 동적 해석에 적용하였다.

Table 2에서는 비선형 동적 해석에 사용되는 모델명과 각 스프링 요소들의 거동에 있어서(Fig. 9 참고) 주요한 파라미터들의 물성치를 요약정리 하였다. 모델명에서 첫 번째 부분에 C1, C2 및 C3 등은 사용된 납 적층 고무 받침을 의미하여 자세한 사항은 Table 1에서 정리하였다. 원형 봉의 설치여부와 재질은 두번째 괄호에서 나타내며 원형 봉을 설치하지 않는 모델의 경우에는 두번째 괄호에 LRB로 표시하며 강재와 초탄성 형상기억합금의 원형 봉을 설치한 경우에는 각각 LRBSTE와 LRBSMA로 명명한다. 마지막 괄호는 면진 받침이 놓여진 구조물의 층 높이를 의미하여 모든 모델들은 6층 높이의 프레임 빌딩 하부에 설치된 것으로 가정하여 설계하였다. 예를 들면 C2-LRBSMA-6S 모델명은 C2 모델의 납 적층 고무 면진 받침에 16개의 초탄성 형상기억합금 원형 봉을 설치하고 6층 프레임 빌딩의 하부에서 약 2,195kN의 하중을 지지하는 것을 의미한다. Table 2에서 W는 면진 받침이 지지하는 빌딩 구조물의 무게를 의미하며 해석 모델에서는 집중 질량으로 환산된다.

### 5. 비선형 동적 해석

비선형 동적 해석을 수행하기 위하여 FEMA/SAC 프로젝트에서(Somerville et al., 1997) 제공하는 실제로 단층(Fault) 주변에서 발생하여 측정되었던 2개의 가속도 데이터(NF01 and NF02 ground motion data, 1978 Tabes earthquake record)를 사용하였다. 단층 주변에서 발생된 지반 가속도는 주기가 짧은 구조물에 상당량에 지진 응답 가속도를 전달하기 때문에 이에 대한 피해를 저감하기 위해서는 구조물의 주기를 늘려주는 면진 받침의 설치 요구된다. 이러한 지반 가속도들은 50년내 10% 확률로 발생하는 설계 하중 수준의 지진 강도에 상응하며 리히터(Richter) 스케일로 진도 7.0 규모로 환산된다. Fig. 10에서는 비선형 동적 해석에 사용된 지반 가속도 데이터를 보여주고 있다. 2개의 지진 데이터는

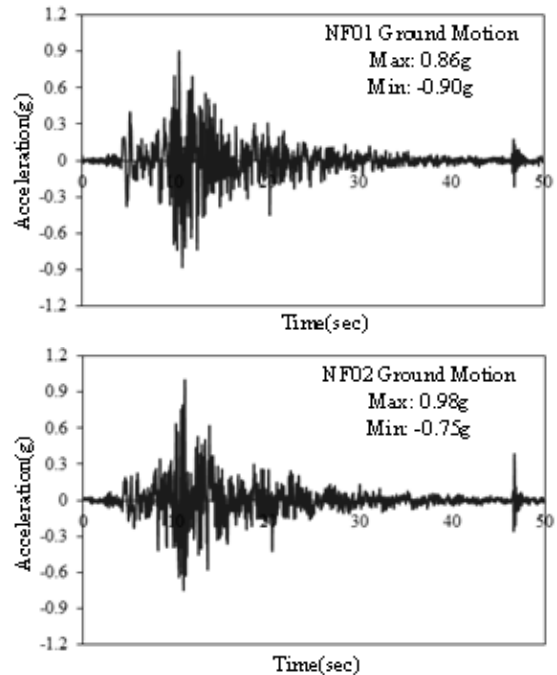


Fig. 10. Ground Motion Data for Nonlinear Dynamic Analyses

Table 2. Additional Information on Stiffness Parameters to Simulate the Behavior of Steel or SMA Bending Bars

Model ID	Q/W (6S)	***K <sub>SMA</sub>	***F <sub>SMA,MS</sub>	***F <sub>SMA,MF</sub>	***F <sub>SMA,AS</sub>	***F <sub>SMA,AF</sub>	***Δ <sub>L</sub>	***Q/F <sub>SMA,AF</sub>	****K <sub>STE</sub>	****F <sub>y</sub>	****α
C1-(*)-(**) **	4.6%	28.5 kN/mm	256.0 kN	400.0 kN	257.6 kN	116.8 kN	42.0 mm	0.86	9.91 kN/mm	11.4 kN	0.015
C2-(*)-(**) **	5.4%	27.8 kN/mm	249.6 kN	392.0 kN	254.4 kN	115.2 kN	43.6 mm	1.03	9.25 kN/mm	11.1 kN	0.015
C3-(*)-(**) **	6.4%	20.5 kN/mm	220.8 kN	352.0 kN	232.0 kN	107.2 kN	54.7 mm	1.30	6.35 kN/mm	10.6 kN	0.015

\*(LRB)=As-built LRB isolator systems \*(LRBSMA)=LRB isolator systems with 16 SMA bending bars \*(LRBSTE)=LRB isolator systems with 16 steel bending bars

\*\* (6S)=Isolator systems installed on the 6-story building \*\* (9S)=Isolator systems installed on the 9-story building

\*\*\* Stiffness parameters to simulate the behavior of 16 SMA bending bars combined in parallel

\*\*\*\* Stiffness parameters to simulate the behavior of 16 steel bending bars combined in parallel



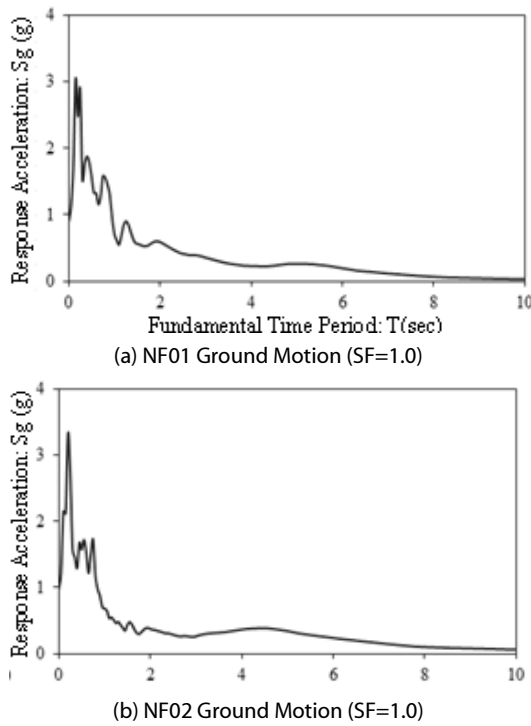


Fig. 11. Spectral Response Acceleration vs. Fundamental Time Period Curves

각각 0.9g와 0.98g의 최대 지반 가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 가지고 있으며 10초 근방에서 발생하고 50초의 지속 시간을 보유하고 있다.

Fig. 11에서는 구조물의 주기에 따라서 구조물에 직접 전달되는 가속도를 산정하기 위하여 지반 가속도를 지진 응답 가속도로 변환된 스펙트럼을 보여주고 있다. 일반적으로 지진 응답 가속도는 5%의 감소율을 적용하여 표현하고 있으며 본 스펙트럼도 같은 감소율을 적용하여 변환하였다. 저층 빌딩 규모의 비교적 주기가 짧은 구조물에서는(약 0.5초 미만) 지진 응답 가속도가 최대 지반

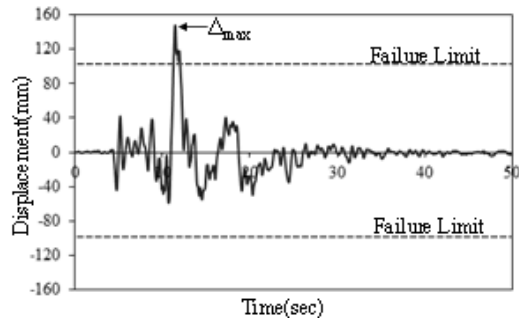
가속도 이상인 3.0g에 근접한 응답 가속도를 본 스펙트럼에서 확인할 수 있다. 단층 주변에 발생하는 이러한 지반 가속도는 단주기에서 강한 지진 응답 가속도를 발생시키며 1초 이상의 주기에서는 지진 응답 가속도가 급격하게 줄어든다. 따라서 주기를 연장하고 구조물에 전달되어 증폭되는 가속도를 효율적으로 감소시키는 방안으로 면진 시스템을 빌딩 설계에 활용하는 것이 반드시 필요하다.

각 모델 별로 중량비와 시간주기 및 지진 응답 가속도를 Table 3에 정리하였다. 추가적인 강성으로 인하여 원형 봉으로 보강된 모델들은 보강하지 않은 모델과 비교하여 주기가 단축되었다. 초탄성 형상기억합금의 원형 봉을 사용한 모델(LRBSMA series)은 일반적인 강재의 원형 봉으로 보강된 모델(LRBSTE series)과 비교하여 주기가 덜 감소됨을 살펴볼 수 있다. 이는 일반적인 강재의 경우 200GPa의 탄성계수를 가지고 있지만 초탄성 형상기억합금의 경우에는 40GPa의 탄성계수를 가지고 있어 재료에 유연성으로 인하여 주기의 단축이 상대적으로 적게 나타났다. 강재의 원형 봉으로 보강된 면진 받침 모델은 상대적으로 강성이 증가되어 최대 변위를 효율적으로 감소시키지만 상대적으로 구조물에 전달되는 지진 응답 가속도는 상당량 증가되고 작용 하중도 커지게 되어 상부 구조물의 막대한 피해를 입히는 결과를 초래한다. 초탄성 형상기억합금의 원형 봉을 설치한 모델의 경우에는 원형 보강이 없는 납 적층 고무 받침의 모델과 비교하여 주기는 감소되지만 지진 응답 가속도의 증가는 미미하거나 오히려 감소됨을 Table 3에서 확인할 수 있다.

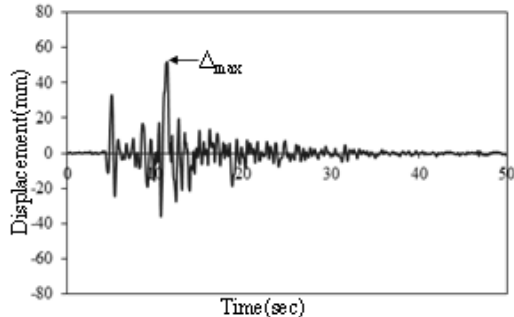
Fig. 12에서는 비선형 동적 해석을 통하여 각 모델 별로 얻어진 시간대 변위량의 그래프를 보여주고 있다. NF01 가속도 데이터를 사용하여 최대 지반 가속도의 약 0.9배 강도로 단자유도 스프링 모델에 지진 하중을 가하였다. 공통적으로 최대 변위( $\Delta_{max}$ )는 최대 지반 가속도가 지나간 직후에 약간의 시간차를 두고 발생된다. 보강용 원형 봉을 설치하지 않은 모델(C1-LRB-6S Model)의 경우 NF01 지반 가속도에 0.9배의 규모에서도 이미 최대 변위가 100mm

Table 3. Summary of Response Spectral Accelerations (Sg) and Fundamental Time Periods (T) for Individual Model Cases

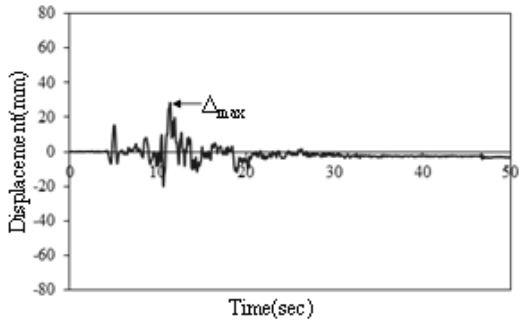
Model	Q/W(%)	T(sec)	Sg(NF01) PGA=0.90g	Sg(NF02) PGA=0.98g
C1-LRB-6S	4.56	0.82	1.50	1.17
C1-LRB SMA-6S	4.56	0.46	1.74	1.67
C1-LRB STE-6S	4.56	0.23	2.68	3.02
C2-LRB-6S	5.42	0.75	1.58	1.72
C2-LRB SMA-6S	5.42	0.45	1.78	1.68
C2-LRB STE-6S	5.42	0.23	2.68	3.02
C3-LRB-6S	6.36	0.76	1.57	1.62
C3-LRB SMA-6S	6.36	0.5	1.58	1.57
C3-LRB STE-6S	6.36	0.28	2.08	2.05



(a) C1-LRB-6S Model



(b) C1-LRB SMA-6S Model

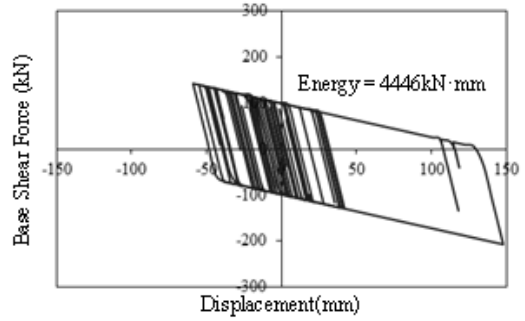


(c) C1-LRB STE-6S Model

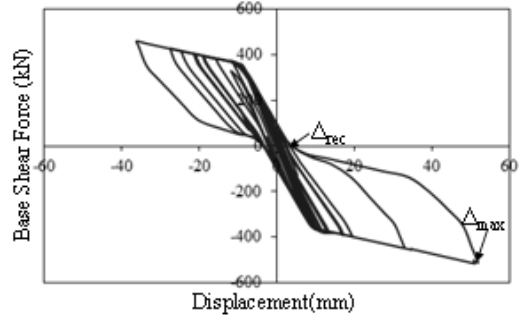
Fig. 12. Displacement vs. Time Curves for Base Isolator Models Under the NF01 Ground Motion with SF=0.9

의 허용 범위를 초과하여 면진 받침에 심각한 손상이 발생되었다고 간주할 수 있다. 최대 지반 가속도가 발생한 시점에서의 진폭의 경우에도 가장 큰 폭의 변화를 보여주고 있다. 원형 붕을 설치한 모델의 경우에는 최대 변위가 모두 허용 범위 이내로 감소함을 그림에서 확인할 수 있다. 강제 원형 붕을 설치한 모델의 경우에는 해석 시 발생하는 최대 변위량이 약 25mm로 다른 모델들과 비교하여 가장 작은 값을 가지고 있다.

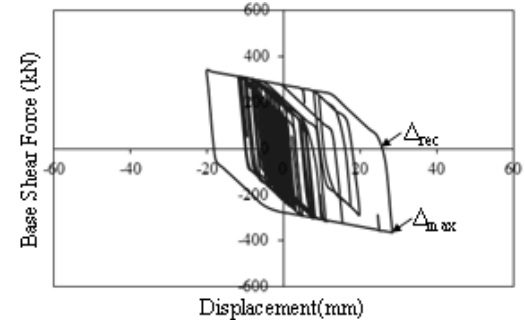
단자유도 스프링 모델에 지진 하중이 가해지는 동안에 고정된 절점에서 반력의 측정이 가능하며 이러한 반력(=reaction force) 면진 받침에 작용하는 전단력과 동일한 작용을 한다. Fig. 13에서는 모델 별로 측정된 변위와 전단 하중에 대한 그래프 선도를 보여주고 있다. 그래프의 거동은 Fig. 9에서 언급한 대로 스프링 요소들의



(a) C1-LRB-6S Model



(b) C1-LRB SMA-6S Model



(c) C1-LRB STE-6S Model

Fig. 13. Base Shear Force vs. Displacement Curves for Base Isolator Models Under the NF01 Ground Motion with SF=0.9.

변위-하중 응답에 대한 메커니즘을 반영한다고 판단된다. 원형 붕의 보강이 없는 순수한 납 적층 고무 받침 모델의 경우에는 그래프 거동이 Fig. 4에서 제시한 면진 받침의 물성치와 거의 일치함을 살펴볼 수 있다. Fig. 13(b)에서는 초탄성 형상기억합금의 영향으로 최대 변위 발생 이후의 경로에서 뚜렷한 복원 현상이 그래프 거동에서 관찰되며 상당량의 변위( $\Delta_{rec}$ )가 회복되어 잔류 변형이 상당량 감소됨을 알 수 있다. 강제의 원형 붕을 설치한 경우에는 최대 변위의 발생량을 상당히 줄여주는 역할을 하지만 강제에서 발생하는 소성 변위가 전체 시스템에 발생하는 잔류 변위의 양을 도리어 증가시키는 작용을 한다. Fig. 13(b)에서는 최대 변위의 발생시 탄성력에 의한 복원력만 존재할 뿐 소성 영역에서는 원형 복원이 거의 발생하지 않음을 보여주고 있다.

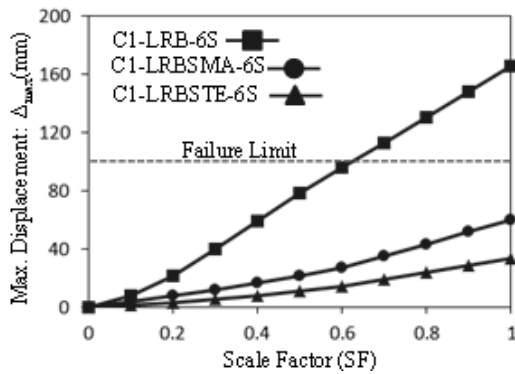
## 6. 해석 결과 분석 및 평가

본 연구에서는 2개의 지진 가속도의 크기를 일정 비율로 증가 시켜서 비선형 동적 해석을 수행한 후 얻어진 결과를 바탕으로 각 모델 별로 성능의 차이점을 비교 평가하고자 한다. 해석의 결과를 바탕으로 최대 처짐과 잔류 변형 및 복원성과 같은 평가 요소들을 산출하고 검토하여 성능의 우수성을 입증하고자 한다. Fig. 14에서는 지진 가속도의 크기(scale factor, SF)의 증가에 따른 면진 받침 모델들의 최대 처짐을 조사한 결과를 나타내는 그래프를 보여주고 있다. 본 그래프에서는 서로 비교 대상인 모델들은 지진 가속도의 규모가 커질수록 공통적으로 최대 변위가 증가된다. 원형 봉을 설치하지 않은 모델(C1-LRB-6S model)의 경우에는 최대 지반 가속도의 0.6배의 규모에 이르러 최대 허용 변위에 다다름을 확인할 수 있다. 반면에 원형 봉을 설치한 다른 두 모델의 경우에는 최대 지반 가속도가 발현하더라도 최대 변위가 100mm의 허용 변위 이내에 있어 파괴가 발생하지 않는다고 판단할 수 있다. 다만 강재로 제작된 원형 봉을 사용하는 경우 초탄성 형상기억합금 재질의 원형 봉과 비교할 때 항복 이전에 강성이 높기 때문에

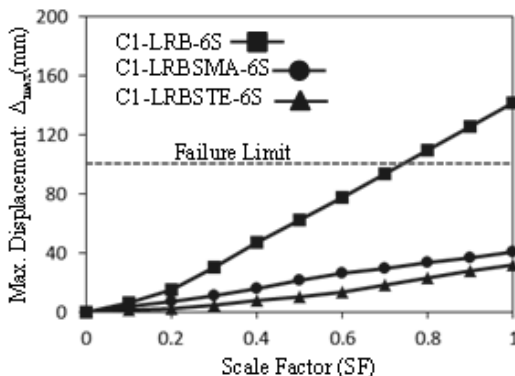
최대 변위를 일정 비율로 더 줄여줌을 본 그래프에서 확인할 수 있다. 반면에 최대 변위에서 하중 제거로 인한 회복 후 발생하는 잔류 변형은( $\Delta_{rec}$ ) 초탄성 형상기억합금의 원형 봉으로 보강된 모델이 가장 적게 발생하였다(Fig. 15 참고). 이러한 모델은 지진 하중의 규모에 거의 영향을 받지 않고 일정 비율의 잔류 변형을 유지한다는 것을 Fig. 15에서 살펴볼 수 있다. 반면에 강재의 원형 봉을 사용한 경우에는 지진 하중의 규모가 커짐에 따라 잔류 변형도 점진적으로 증가됨을 살펴볼 수 있다. Fig. 14에서 보여진 면진 받침 모델들의 이력 거동을 바탕으로 최대 변위에서 원형으로 회복되는 복원성을 아래의 수식으로 정의한다.

$$RR(\%) = \frac{(\Delta_{max} - \Delta_{rec})}{(\Delta_{max})} \times 100 \quad (13)$$

무보강 면진 받침 모델(LRB series models)들과 초탄성 형상기억합금 혹은 강재의 원형 봉으로 보강된 모델(LRBSMA or LRBSTE series models)들의 위의 수식으로 정의된 복원성을 하중의 규모를 점진적으로 증가시키면서 해석을 통하여 하였고 그 결과를 Fig.

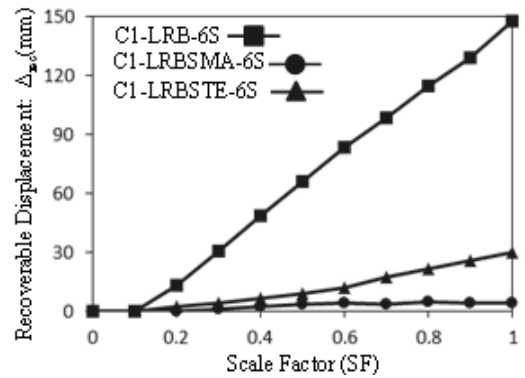


(a) NF01 Ground Motion

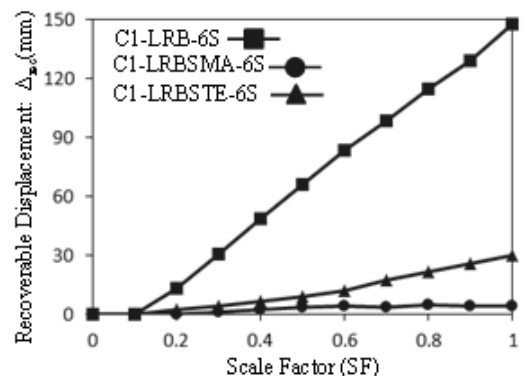


(b) NF02 Ground Motion

Fig. 14. Maximum Displacements for Three Representative Model Cases According to Increasing Scale Factors



(a) NF01 Ground Motion



(b) NF02 Ground Motion

Fig. 15. Maximum Recoverable Displacements for Three Representative Model Cases According to Increasing Scale Factors

16에서부터 Fig. 18까지 나타내었다. 대부분 작은 규모의 지진 하중에서는 잔류 변형이 없는 100%의 복원성을 보여주지만 이는 모두 탄성영역에서의 회복을 의미한다. 초탄성 형상기억합금으로 보강된 모델들을 제외하고는 하중의 규모가 증대되고 시스템에 항복이 발생하기 시작하면서 복원성이 급격하게 감소된 후 1.0

하중 규모에 도달하면서 복원성이 20% 이하로 수렴하는 양상을 보여주고 있다. 하지만 초탄성 형상기억합금으로 보강된 면진 받침 모델에서는 0.2 하중 규모까지는 탄성에 의한 100%의 복원이 가능하며 하중 규모가 증가 되면서 복원성이 다소 떨어지는 경향을 보이고 있으나 3개의 모델이 평균적으로 80% 이상의 복원성을

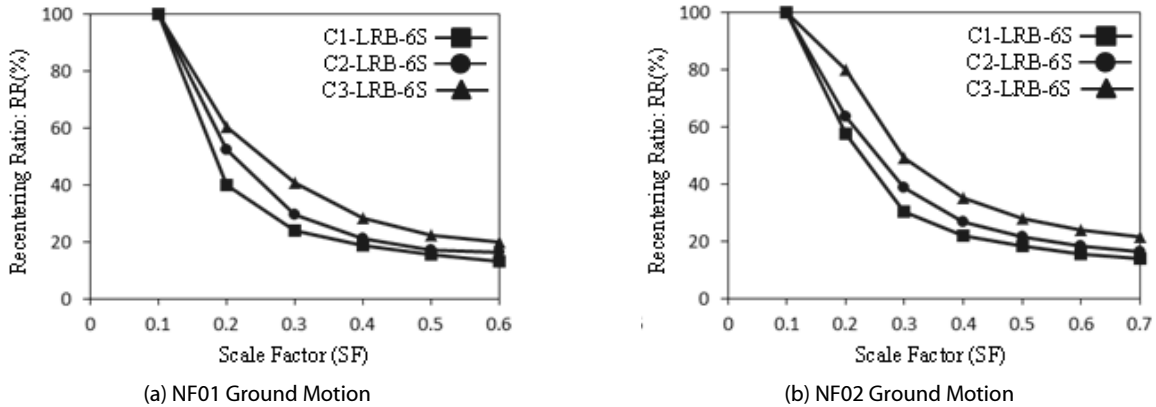


Fig. 16. Recentering Ratios for Three LRB Model Cases According To Increasing Scale Factors

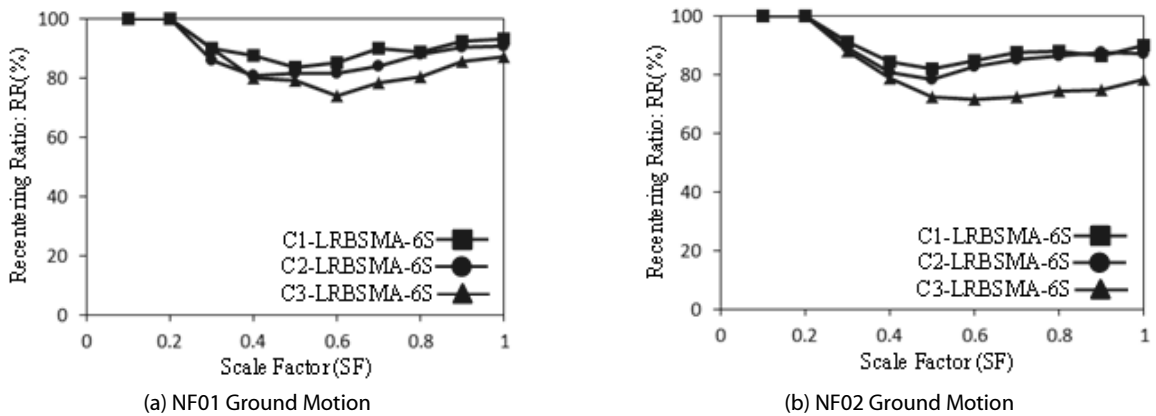


Fig. 17. Recentering Ratios for Three LRBSMA Model Cases According to Increasing Scale Factors

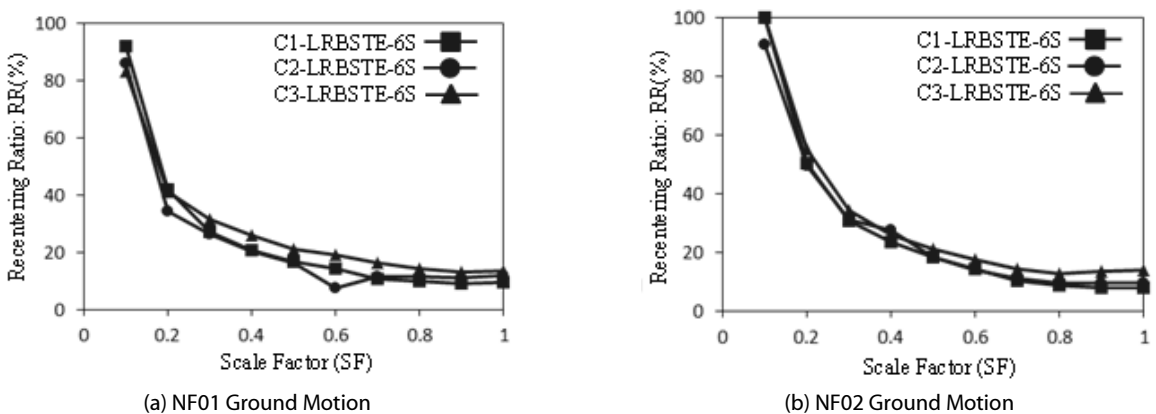


Fig. 18. Recentering Ratios for Three LRBSTE Model Cases According to Increasing Scale Factors

보여주고 있다. 1.0 하중 규모에 도달하면서 다시 복원성이 증가되고 평균적으로 90%에 육박하는 복원성을 보여주고 있다. 따라서 초탄성 형상기억합금의 원형 붕에서 제공하는 복원력이 시스템 전체의 잔류 변형을 감소시키고 원상태로 복원하는데 매우 효과적이라는 결론을 내릴 수 있다.

## 7. 결론

본 연구에서는 기존에 주로 사용되어 온 납 적층 고무 받침에 저항력 증대에 의한 전단 변위의 감소와 자동 복원으로 인한 잔류 변위를 감소시킬 목적으로 초탄성 형상기억합금의 원형 붕을 추가로 설치한 새로운 면진 시스템 받침 장치를 제안 하였다. 제안된 시스템이 지진 하중에 대한 저항력과 성능의 우수성을 입증하고자 스프링 요소 모델로 모형화하고 비선형 동적 해석을 수행하여 얻어진 결과를 바탕으로 다른 면진 시스템 받침들의 거동들과 비교 및 평가를 수행하였다. 단주기 구조물에 취약한 단층 주변에 발생하는 지진파를 사용하여 해석을 수행하였으며 해석 결과 기존에 납 적층 고무 받침만 사용한 모델의 경우 최대 변위가 허용 변위 한계를 초과하여 파괴가 발생하였다. 강재의 원형 붕을 추가로 설치한 경우에는 최대 변위를 상당량 감소시키는 역할을 담당한다. 하지만 강성의 증가로 주기가 단축되어 구조물에 전달되는 응답 가속도가 상당히 증가되며 복원성이 감소되는 문제점을 해석 결과에서 확인 하였다. 반면에 초탄성 형상기억합금의 원형 붕을 추가로 설치한 모델의 경우에는 일정 부분 구조물의 주기를 단축시키지만 응답 가속도는 무보강 납 적층 고무 받침 모델들과 비교하여 단지 소폭 증가되었다. 무엇보다도 최대 변위는 허용 범위 이내로 상당량 감소하였고 보강재에서 제공하는 복원력에 의하여 잔류 변형을 상당량 감소시키며 또한 시스템의 복원성도 향상 시켰다. 따라서 본 연구에서 제안된 시스템은 지진 하중에 대한 전단 저항력을 향상시키고 자동 복원이 가능하여 구조물의 안정성 확보와 성능 향상 측면에서 매우 우수한 시스템이라고 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구(중견 연구자 지원) 사업이며(과제 번호: 2013R1A2A2A01068174) 이러한 연구 지원에 깊은 감사를 드립니다. 아울러 국토교통부 국토교통기술혁신연구사업의 연구비 지원에(14CTAP-C078944-01) 의해 일부분 수행되었습니다. 본 연구 지원에 대해서도 깊은 감사를 드립니다.

## References

- Alam, M. S., Bhuiyan, A. R. and Billah, A. H. M. M. (2012). "Seismic fragility assessment of SMA-bar restrained multi-span continuous highway bridge isolated with laminated rubber bearing in medium to strong seismic risk zones." *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 10, No. 6, pp. 1885-1909.
- Auricchio, F. and Sacco, E. (1997). "A one-dimensional model for superelastic shape-memory alloys with different properties between martensite and austenite." *Int. Journal Non-Linear Mech*, Vol. 32, No. 6, pp. 1101-1114.
- Bhuiyan, A. R. and Alam, M. S. (2013). "Seismic performance assessment of highway bridges equipped with superelastic shape memory alloy-based laminated rubber isolation bearing." *Eng. Struct.*, Vol. 49, pp. 396-407.
- Choi, E., Nam, T. H. and Cho, B. S. (2005). "A new concept of isolation bearings for highway steel bridges using shape memory alloys." *Canadian Journal Civil Eng.*, Vol. 32, No. 5, pp. 957-967.
- Hu, J. W. (2015). "Response of seismically isolated steel frame buildings with sustainable lead-rubber bearing (LRB) isolator devices subjected to Near-Fault (NF) ground motions." *Sustainability*, Vol. 7, pp. 111-137.
- Hu, J. W. and Leon, R. T. (2011). "Analysis and evaluations for composite-moment frames with SMA PR-CFT connections." *Nonlinear Dyn.*, doi: 10.1007/s11071-010-9903-3.
- Hu, J. W., Choi, E. and Leon, R. T. (2011). "Design, analysis, and application of innovative composite PR connections between steel beams and CFT columns." *Smart Mater. Struct.*, doi: 10.1088/0964-1726/20/2/025019.
- Jangid, R. S. (2007). "Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions." *Eng. Struct.*, Vol. 29, pp. 2503-2513.
- Jangid, R. S. and Kelly, J. M. (2001). "Base isolation for near-fault motions." *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 30, pp. 691-707.
- Mazza, F. and Vulcano, A. (2009). "Nonlinear response of RC framed buildings with isolation and supplemental damping at the base subjected to near-fault earthquakes." *Journal Earthq. Eng.*, Vol. 13, pp. 690-715.
- Mazza, F., Vulcano, A. and Mazza, F. (2012). "Nonlinear dynamic response of RC buildings with different base isolation systems subjected to horizontal and vertical components of near-fault ground motions." *Open Constr. Build. Technol. Journal*, Vol. 6, pp. 373-383.
- Mazzoni, S., McKenna, F. and Fenves, G. L. (2006). *Open SEES Command Language Manual v. 1.7.3.*, Department of Civil Environmental Engineering, University of California: Berkeley, CA, USA.
- Providakis, C. P. (2008). "Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations." *Eng. Struct.*, Vol. 30, pp. 1187-1198.
- Somerville, P. G., Smith, N., Punyamurthula, S. and Sun, J. (1997). *Development of Ground Motion Time Histories for Phase 2 of the FEMA/SAC Steel Project*, SAC Joint Venture: Sacramento, CA, USA.