

## 구조물 내진보강법에 따른 저층 건축물의 내진성능평가

## Seismic Performance Evaluation of the Low-Rise Buildings with Different Seismic Retrofit Procedures

송민아<sup>1)</sup> · 이시철<sup>1)</sup> · 이기학<sup>1)\*</sup>Song, Min Ah<sup>1)</sup> · Lee, Sicheol<sup>1)</sup> · Lee, Kihak<sup>1)\*</sup><sup>1)</sup>세종대학교 건축공학과<sup>1)</sup>Department of Architectural Engineering, Sejong University

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

After an earthquake occurred in the Gyeongju, 2016, many low-story buildings have been questioned in terms of the seismic performance since mostly they have been exempted from the seismic design requirement since 1988. In this study, a 3-story moment resisting frame (MRF) building was analyzed and evaluated the seismic performance. Due to the insufficient seismic performance required for the seismic performance levels, three different seismic retrofit schemes were proposed and their seismic performances were re-evaluated. While steel brace and open shear wall retrofit systems mainly focused on the strength retrofit, the VES damper retrofit system is mainly to enhance the energy dissipation capacity of the system and results in the increased ductility. The original building and 3 retrofitted buildings were evaluated using the nonlinear static and nonlinear dynamic analyses and suggestions were proposed. Through the analysis of nonlinear time history and push-over using MIDAS/Gen program, damages of the building in terms of top story and average story drift and effect of reinforcement were analyzed.

**Key words:** Earthquake, Seismic performance evaluation, Steel brace, Open shear wall, VES damper, Seismic design, Nonlinear time history analysis

## 1. 서론

최근 전 세계에 걸쳐 빈번하게 발생하고 있는 지진과 그로 인한 인적, 물적 피해가 크게 증가하고 있다. 그 중 아시아 지역인 중국과 일본 등에서 발생하는 지진 피해는 한국에 인접한 관계로 큰 영향을 미칠 수 있다. 일본과 가까이에 위치한 우리나라도 판 경계로 지진의 위협으로부터 자유롭지 않은 실정이다. 특히 2016년에 발생한 경주 지진은 규모 5.8의 크기로 고주파 성분을 많이 포함하는 지반운동을 발생시켜 구조물의 주기가 단주기에 위치한 중·저층 건축물에 대한 내진대책의 중요성을 일깨워주었다. 1976년 중국 탕산에서 발생한 지진으로 인해 사망자는 242,419명에 이르렀고, 20세기 최대의 피해를 입어 큰 경제적 및 사회적 파장을 불러 일으켰다. 그 후

로 우리나라에서도 중·저층 교육시설의 내진설계 및 보강의 중요성을 인식하고 교육인적자원부가 학교 건물을 대상으로 내진 보강을 점차적으로 실시하는 추세이다. 그러나 1988년 국내 내진설계법(KS-1988에 의하여 1천 제곱미터 이상 공공시설, 6층 이상 숙박시설 및 오피스텔에 적용) 적용이 이루어졌기 때문에 대부분 중·저층 건축물인 국내 전체 학교 수의 약 14%만이 내진설계가 고려되었으며, 약 86%의 학교는 내진설계가 고려되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 실존하는 학교 건물을 대상으로 내진 보강 전과 후에 대한 성능평가를 실시하였다. 이를 위해 내진성능 향상에 대한 비내진 설계된 학교 건물의 영향을 평가하였고, 보강이 필요한 곳을 선정하여 실무에서 적용할 수 있는 3 가지 보강 방안으로 해석한 후 다시 내진성능을 평가하였다.

## 2. 대상 건축물의 개요

본 연구에 고려된 학교 대상 건축물은 경상북도 ○○군에 위치하고 있

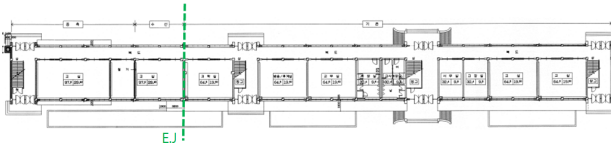
\*Corresponding author: Lee, Kihak

E-mail: kihaklee@sejong.ac.kr

(Received November 22, 2016; Revised December 5, 2016; Accepted December 13, 2016)



(a) Front view



(b) Floor plan

Fig. 1. Information of target building

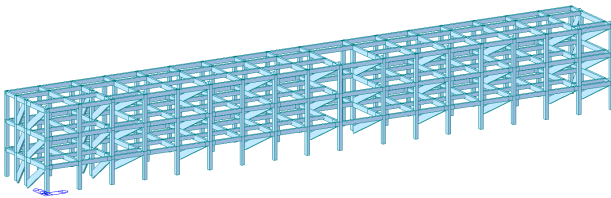


Fig. 2. Modeling of target building using MIDAS/Gen

으며, 지상 3층 규모로 1957년도에 준공된 철근콘크리트 모멘트 골조 건축물이다. 이 건축물은 연면적 1,209.6 m<sup>2</sup>의 A동과 연면적 2,264.4 m<sup>2</sup>의 B동이 신축이음으로 연결되어 있다. 본 연구에서는 B동을 대상으로 연구하였다. 이 건물의 층고는 3.5 m이고 전체 지상 높이는 10.5 m이다. 지질조사 보고서에 따라 지반종류는 S<sub>c</sub>로 결정하였다. 현장조사를 토대로 콘크리트 압축강도 18 MPa, 철근인장강도 300 MPa를 해석모델에 적용하였다. 대상 건물의 정보는 Fig. 1에 나타나 있다.

1980년도 이전에 지어진 학교건물은 대부분이 보통 모멘트 골조이며, 대다수의 학교건물의 평면은 일자형이고 보-기둥 철근콘크리트 구조로 이루어져 있다. 본 연구에 사용된 건물 또한 철근콘크리트 보-기둥 골조에 조적 채움벽이 설치되어 있는 구조 형태이다. 내부의 조적벽은 Fig. 2와 같이 모델링 시 대각 가새를 통해 구현하였다. 조적벽은 초기에 강성을 발휘할 때 학교 건축물의 강성을 증가시키나, 조적벽의 강도가 균열강도에 도달하면 파괴가 발생하여 더 이상 강도 기여가 없는 것으로 모델링 하였다.

### 3. 구조물 내진보강 방법의 개요와 특성

본 연구는 내진설계가 이루어지지 않은 대상 건축물의 구조물 안전성을 검토 하고, 내진성능 평가를 실시하였다. 이를 통해 내진등급을 판명하고 보강이 필요한 곳을 선정하여 실무에서 가장 많이 쓰이고 있는 3가지 방안으로 보강하였다. 3가지 방안은 Steel Brace, Open Shear Wall, VES Damper를 사용한 보강 방안이 고려되었다.



Fig. 3. Construction case of steel brace

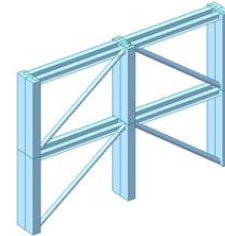


Fig. 4. Modeling of steel brace using MIDAS/Gen

#### 3.1 Steel Brace를 이용한 내진보강

Steel Brace 보강은 기존의 중 저층 철근콘크리트 건축물에 많이 사용되고 있는 전통적인 공법이다. 이 공법은 Open Shear Wall 보강에 비해 외부에 설치하기 때문에 공사 중에도 건물의 사용이 가능하고 보강부재의 설치위치가 기존 건물의 용도에 영향을 끼치지 않는다. 하지만 일반적으로 외부에 설치해야하기 때문에 공기가 지연될 우려가 크고, 창문 가림이 많아 조망권 확보에 불리하다. 또한 기존 기둥에 보강 기둥과 브레이스를 연결하기 위하여 다량의 앵커를 삽입하기 때문에 건물의 내력이 저하될 우려가 크다. 따라서 브레이스 보강 후 강재 부재 등의 증가로 인해 보강 부위 하부에 기초보강이 필요할 수 있다. Steel Brace 형상은 역V형과 V형이 주로 사용된다. Fig. 3은 Steel Brace의 시공사례를 나타낸다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 MIDAS/Gen을 사용하여 모델링을 하였다. 사용된 브레이스는 SS400강재를 이용한 P216.3×8 크기의 속이 빈 원형 강관이다. 브레이스를 연결하기 위해 보강기둥과 철골보를 추가 시공하였으며, 철골보는 SS400 강재를 이용한 H250×250×9/14 형강이 선택되었다.

#### 3.2 Open Shear Wall을 이용한 내진보강

Open Shear Wall은 바람이나 지진에 의한 수평하중에 대하여 구조물의 안전성을 확보하기 위하여 가장 보편적으로 사용되고 있는 내진 보강 구조시스템이다. 초고층건물에서는 코너나 엘리베이터 샤프트에 주로 전단벽-골조시스템으로 사용되고 있다. Open Shear Wall은 콘크리트 내력벽이기 때문에 강성이 높아서 지진 발생 시 안전성을 증대시킬 수 있다. 하지만 습식 공법이기 때문에 공사기간이 길고 자중이 증가할 수 있어 기존 건물에 적용할 때에는 기초 보강이 필요할 수도 있다. 또한 보강된 Shear Wall이 기존 건물과 일체화 되지 않을 경우에는 기대 성능에 미치지 못할 수도 있고, 콘크리트 타설로 인한 새집증후군이 발생할 가능성이 있다. Fig. 5는 Open Shear Wall이 기존 건축물에 설치된 시공사례이다.

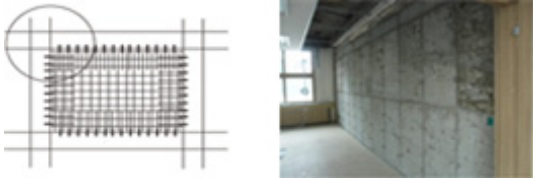


Fig. 5. Construction case of open shear wall

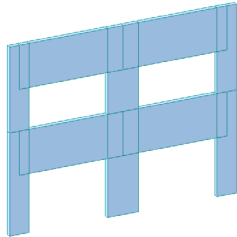


Fig. 6. Modeling of open shear wall using MIDAS/Gen



Fig. 7. Construction case of VES Damper

본 연구에서는 Open Shear Wall의 압축강도를 24 MPa, 두께는 200 mm 를 적용하였고, Fig. 6과 같이 MIDAS/Gen을 사용하여 모델링을 하였다.

### 3.3 VES Damper를 이용한 내진보강

#### 3.3.1 VES Damper의 기본 특성과 모델링

VES Damper은 건식공법으로 공기가 짧아 학교 건물의 경우 비교적 짧은 기간에 공사를 완료 시킬 수 있다. 또한 내부시공으로 교실과 복도 사이에 설치 가능하며 공장제작으로 품질과 성능이 일정하다. 이 보강안의 경우 건축물의 지진에너지를 댐퍼가 소산시켜 건물이 받는 지진하중을 줄이는 방안이다. VES Damper는 상당한 강성을 가진 강판에 고감쇠 고무가 부착된 형태로 기존 구조물의 층고에 맞춰 상하층간을 연결하는 구조이다. 따라서 필요한 만큼 요구되는 부분에 쉽게 설치 할 수 있다. Fig. 7은 본 연구에서 사용된 VES Damper의 시공사예이다.

본 연구에서는 VES Damper의 성능을 Pushover 해석 모델링을 통해 검토하였다. VES Damper는 허용전단변형이 300%, 극한전단변형이 400%를 채택하고 있으며 15 mm 점탄성체를 이용한 Damper는 최대 45 mm의 전단변형까지 안정적으로 견딜 수 있다. 실물 실험체를 통한 성능 실험을 통해 VES Damper의 하중-변위 곡선인 Fig. 8에서 보는 바와 같이 변위 45 mm일 때 전단력 약 700 kN을 받을 수 있는 것으로 확인되었다. Table 1에서는 VES Damper의 해석에서 고려된 등가강성특성이 나타나

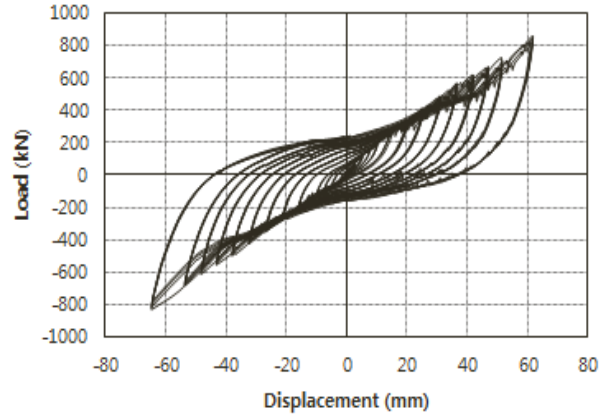


Fig. 8. Load-Displacement curve of VES Damper

Table 1. Property of VES Damper

Loading Frequency (Hz)	0.1
Horizontal Displacement (mm)	45
Shear Strain $\gamma$ (%)	3
Equivalent Shear Modulus $G_{wq}$ (Mpa)	0.407
Equivalent Damping Factor $\eta_{eq}$	0.278
Equivalent Stiffness $K_{eq}$	9,527.345
Effective Stiffness $\Delta K_{eq}$	2,083.144
Equivalent Damping Coefficient C	65,465.5

있다. 이를 토대로 초기강성을 계산하였으며 이를 통해 초기강성 값이 MIDAS/Gen에 스프링요소로 삼선형(trilinear)으로 모델링하여 Pushover 해석에 사용되었다.

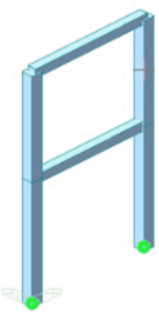
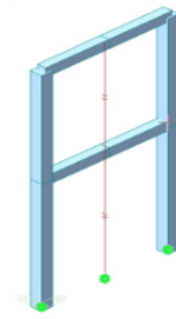
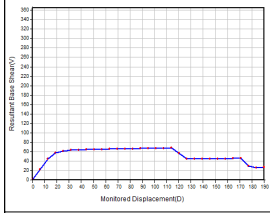
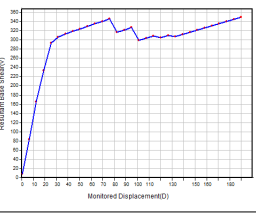
#### 3.3.2 2층 1경간 골조시스템을 통한 VES Damper 모델링 검증

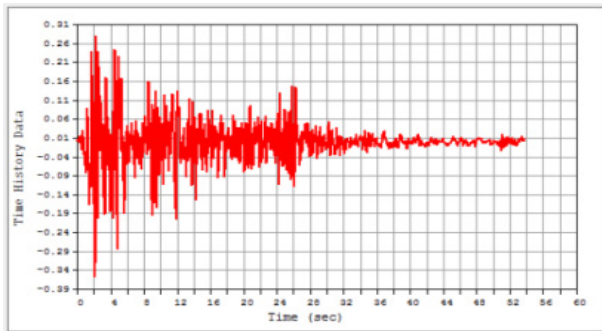
VES Damper 모델링 검증을 하기 위하여 2층 1경간 골조시스템에 대해 보강 전 골조시스템과 VES Damper로 1층과 2층에 각각 보강한 것으로 가정하여 모델링을 개발하고 이를 해석 수행하였다. 이를 통해 보강 전과 VES Damper 설치를 통한 보강 후 골조시스템의 내진성능에 대한 비교, 분석을 수행하였다.

보강 전 기존의 2층 1경간 골조시스템에 대해 1층과 2층에 2개의 VES Damper로 보강한 결과 성능점에서의 최대밀면전단력이 67kN에서 340kN으로 약 5배정도 최대강도가 증가하였다. Pushover 그래프를 통해 연성 또한 증가한 것이 확인되었다. Table 2의 결과를 통해 해석모델에서 VES Damper의 성능이 적절하게 모델링되어 역할을 수행하는 것을 볼 수 있다.

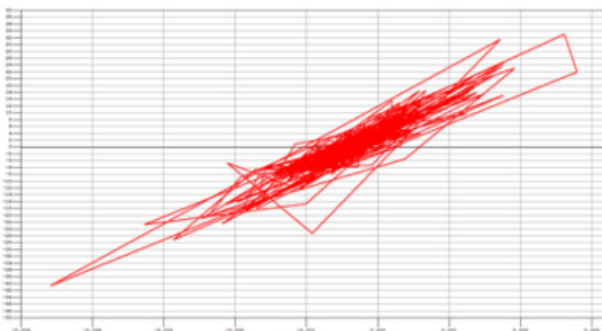
2층 1경간 예제 모델에 VES Damper로 보강을 한 후 Elcentro 지진을 적용하여 비선형시간이력해석을 수행하였다. Elcentro 지반운동에 대한 그래프는 Fig. 9에 나타나 있다. 그 결과 댐퍼하중-전단변형의 관계를 나타내는 이력곡선 그래프를 얻었다. 최대 40.6 kN의 수평 반력이 1층에 위치한 댐퍼 1기에 발생하였다. VES Damper의 이력곡선은 Fig. 10에 나타나 있다.

**Table 2.** Verification of VES Damper modeling effect on two-story 1 span frame system

	Original Frame	Frame with VES Damper
Modeling		
Pushover Analysis		
	Maximum Strength 67 kN Displacement 0.11 m	Maximum Strength 340 kN Displacement 0.18 m



**Fig. 9.** Time history data of Elcentro earthquake

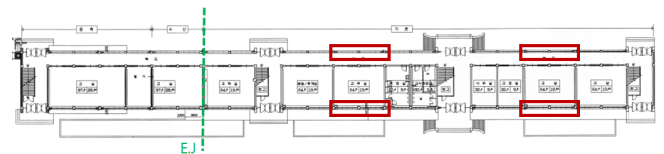


**Fig. 10.** Hysteresis curve of VES Damper (MAX : 40.6kN)

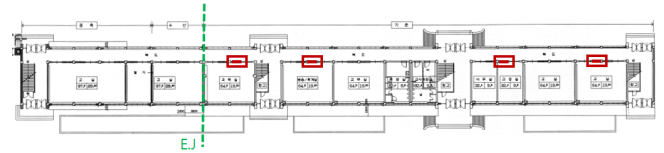
비선형시간이력해석 시 사용된 7개의 지반운동은 Table 3과 같이 Elcentro, San Fernando, Hollywood, Loma Prieta, Northidge, James RD, Parkfield이다. 해석에는 총 7개 지반운동의 평균을 사용하였다. 지반 운동 7개를 적용하였을 시 각 멤버가 받는 하중은 Table 3에 나타나있다.

**Table 3.** Horizontal reaction force of VES Damper (7 earthquake)

EARTHQUAKE	Force carried by VES Damper 1	Force carried by VES Damper 2
Eq. (1). Elcentro Site	340.5	323.9
Eq. (2). San Fernando	229.9	234.6
Eq. (3). Hollywood Storage	172.5	175.4
Eq. (4). Loma Prieta	337.6	334.3
Eq. (5). Northidge	390.4	367.8
Eq. (6). James RD	126.3	127.2
Eq. (7). Parkfield Cholame	282	284.5



**Fig. 11.** Retrofit location of Steel Brace & Open Shear Wall



**Fig. 12.** Retrofit location of VES Damper

VES Damper의 특성으로 300%까지 허용전단변형에서 최대 허용수평하중이 700 kN임을 고려한다면 Elcentro급 지진에서도 VES Damper는 안정적으로 지진에너지를 소산하는 것으로 판단된다.

### 3.4 보강 개소 선정

본 연구에서 고려된 내진 보강 방안에 따라 강도 보강을 목표로 하여 Steel Brace와 Open Shear Wall을 선택하였다. 대상건물은 X방향으로 외부 전단벽과 브레이스를 1층과 2층에 각각 4개씩 선정하였다. 점탄성댐퍼인 VES Damper는 X방향으로 1층에 4기를 설치하였다. Open Shear Wall과 Steel Brace의 보강 위치는 Fig. 11과 같고, VES Damper의 보강 위치는 Fig. 12와 같다.

## 4. 내진 성능 평가 및 해석절차

한국시설안전공단 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가 요령에 따라 내진성능 평가 절차는 예비평가 및 1단계 상세평가, 2단계 상세평가의 3단계로 구성되어 있다. Fig. 13은 내진성능 평가 해석절차를 나타내고 있다.

### 4.1 예비평가

기존 건물에 내진보강을 하기 위해서는 먼저 기존 건물이 현재 보유하고

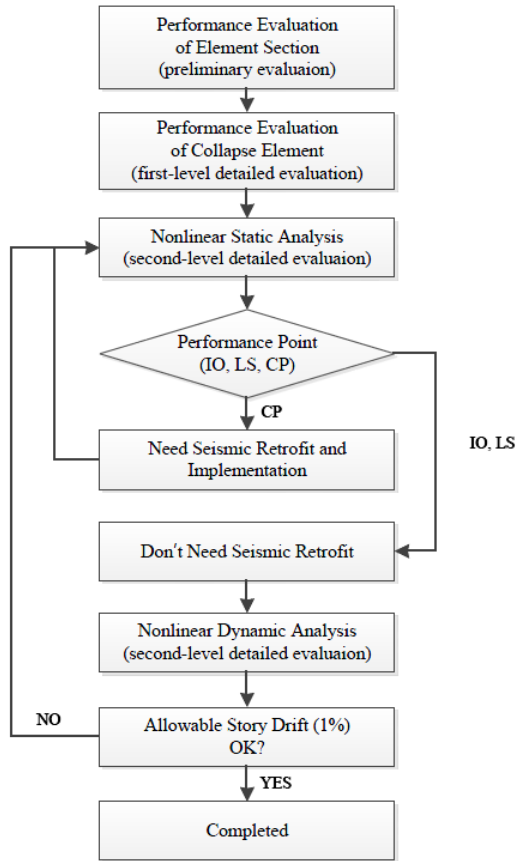


Fig. 13. Flowchart of seismic performance evaluation process

Table 4. Criteria for determining performance level of reinforced concrete frame

Range of Demand/Capacity Ratio	Performance Level
$DCR \leq 0.5$	IO
$0.5 < DCR \leq 0.75$	LS
$0.75 < DCR \leq 1.0$	CP
$1.0 < DCR$	C

있는 내진성능을 정확하게 평가할 필요가 있다. 이를 위해 예비평가와 상세 평가를 시행해야 한다. 예비평가는 내진성능 상세평가의 필요성을 판단하기 위하여 비교적 간단한 자료들로 이루어진다. 예비평가에서는 간단한 자료 및 약산식을 사용하여 산정된 강도를 통해 내진성능을 보수적으로 평가한다. 이 평가 방법은 약산식을 사용하므로 정형구조물에만 적용할 수 있으며, 예비평가에서 성능을 만족하지 못할 경우 상세평가를 실시하게 된다. 10층 이상의 비정형 건물일 경우에는 예비평가 없이 바로 상세평가를 수행한다. 정형구조물이란 KBC2016의 표 0306.4.4.와 표 0306.4.5.에 제시되지 않은 평면과 수직비정형성이 없는 구조물을 의미한다.

성능수준의 판정은 요구량(Demand)/저항능력(Capacity)의 비(DCR)에 의한다. 예비평가에서는 전단력의 저항여부를 중심으로 평가하므로 요구량은 평가기준 지진하중에 의한 층 전단력, 저항능력은 연직부재의 전단 저항능력의 합이다. 예비평가를 통해 판정된 성능수준은 지진 작용 시 지진력에 의해 발생한 구조물의 변형 혹은 손상을 의미한다. 성능수준은

Table 5. Description of the damage state

Damage State	Description
Immediate Occupancy level (IO)	No structural realignment is necessary for structural stability; however, the building may require adjustment and repairs to non-structural and mechanical components that are sensitive to the building alignments.
Life Safety level (LS)	Major structural realignment is required to restore margin of safety for lateral stability; however, the required realignment and repair of the structure may not be economically and practically feasible. The building does not collapse right away, but it requires maintenance and reinforcement.
Collapse Prevent (CP)	Residual drift is sufficiently large that the structure is in danger of collapse from earthquake aftershocks. (note : this performance point might be considered as equivalent to collapse but with greater uncertainty)
Collapse (C)	When an earthquake occurs, the vertical load resistance system loses its ability to resist vertical loads. So that partial collapse or full collapse occurs.

Immediate Occupancy Level(거주가능, IO), Life Safety Level(인명안전, LS), Collapse Prevention level(붕괴방지, CP), Collapse(붕괴, C)의 네 단계로 나뉜다. DCR 값에 따른 성능수준은 Table 4와 같다. 각각의 성능수준의 특성은 Table 5에 나타나 있다.

## 4.2 비선형 정적 해석

### 4.2.1 개요 및 설명

지진 시 대부분의 구조물이 비선형 거동을 보이므로 이를 평가하기 위해서는 비선형 해석이 필요하다. 비선형 정적해석(Nonlinear Pushover Analysis)은 구조물이 항복한 이후의 동적거동과 하중의 재분배를 고려한 시스템의 안정한계상태를 효과적으로 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 해석방법이다. 비선형 정적해석 결과는 일반적으로 밀면전단력과 최상층 횡변위의 관계로 나타난다.

비선형 정적 해석을 수행하기 위해서는 구조물의 탄성거동과 지진 발생 시 건물에 요구되는 최대변위인 성능점의 산정이 필요하다. 성능점을 얻기 위해 일반적으로 역량스펙트럼법과 변위계수법이 사용된다. 본 연구에서는 역량스펙트럼법을 사용하였다.

역량스펙트럼법은 1999년에 Chopra에 의해 처음 소개되었고 그 후 내진성능평가 방법으로 사용되고 있다. 구조물의 비탄성 변형능력을 나타내는 역량곡선과 5% 감쇠비에 대한 설계 지진 요구곡선의 교점인 성능점을 구하는 방법이다. Fig.14에서 역량스펙트럼법의 해석과정이 나타나 있다.

### 4.2.2 해석 결과

예비평가 결과, 보강 전 대상건물의 X방향에 대하여 내진성능평가점수는 94점으로 C등급(대규모피해)이며, Y 방향에 대해서는 내진성능평가점수 107점으로 B등급(중규모피해) 판정을 받았다. 따라서 X, Y방향 모두 1

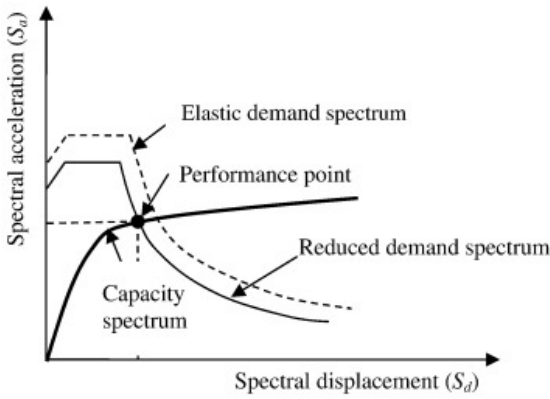


Fig. 14. Capacity Spectrum Method

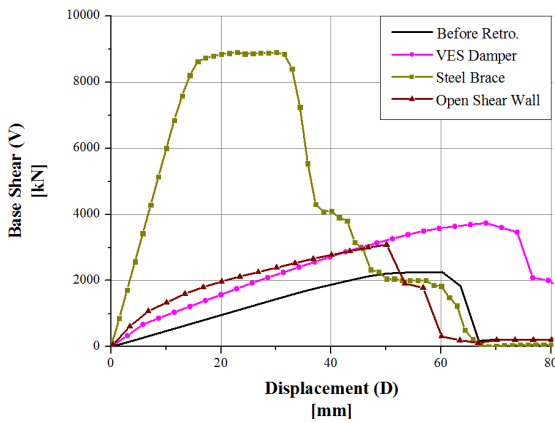


Fig. 15. Base Shear vs Displacement Curve of B building X-Dir about before and after retrofit

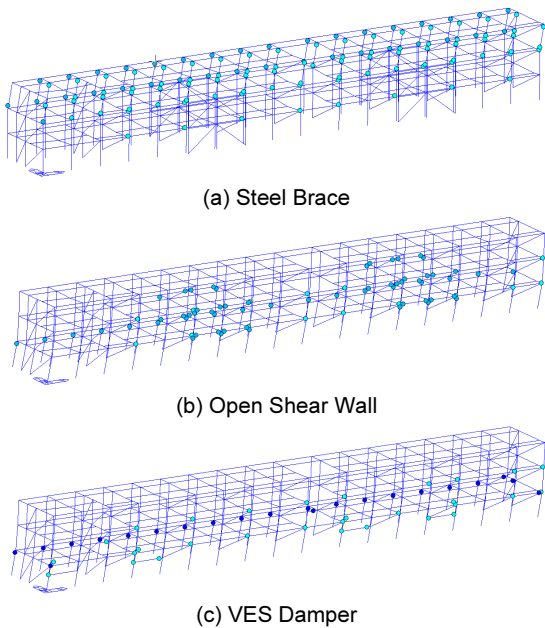


Fig. 16. Hinge status at the performance point

차 상세 평가를 실시하였다. 1차 상세평가를 실시한 결과, 보강 전 대상 건물은 X방향에 대하여 성능점이 형성되지 못하였고, 층간변위는 인명안전

(LS)을 만족하나 부재가 붕괴(C)수준으로 보강이 필요한 것으로 판단되었다. Y방향에 대해서는 성능점이 형성되었고, 인명안전(LS)수준을 만족하는 것으로 검토되어 보강이 필요 없는 것으로 판단되었다. X방향 보강안으로 Steel Brace와 Open Shear Wall을 대상 건물의 1층과 2층에 각각 4개 소씩 총 8개소 설치하였다. 보강 후 해석 결과 성능점이 형성되었으며, 부재의 성능이 붕괴(C)수준에서 거주가능(IO)성능을 만족하였다. VES Damper 보강 안의 경우 X방향으로 1층에 4기를 설치하였으며, 보강 후 해석 결과 부재의 성능이 붕괴(C)수준에서 거주가능(IO)성능을 만족하였다. 보강 전과 3가지 방안으로 보강한 건물의 Base Shear vs Displacement Curve는 Fig. 15에 나타나 있다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 성능점에서의 소성힌지 분포가 목표성능(인명안전,LS)수준을 만족하는 것을 볼 수 있다. 성능점에서의 층간변위는 허용 층간 변위인 1%를 초과하지 않는다. 따라서 3가지 보강 방안 모두 내진보강이 적절하다고 판단되었다.

### 4.3 비선형 동적 해석

#### 4.3.1 개요 및 설명

지진 재해 발생 시 구조물은 관성에너지에 의해 진동하게 된다. 비선형 동적 해석은 부재의 비선형 거동을 반영하므로 동적이력을 직접적으로 평가할 수 있는 해석법이다. 동적 해석 방법은 크게 응답스펙트럼해석법, 탄성시간이력해석법, 비탄성시간이력해석법 3가지로 나뉜다.

비선형시간이력해석은 건축물에 실제 시간이력 지진을 적용한다. 지진파의 특성이 직접적으로 건축물에 전달되어 건축물에 대한 영향을 그대로 반영할 수 있다. 또한 시간에 따른 이력거동(hysteresis loop)을 시각적으로 확인할 수 있기 때문에 보다 정확성이 높은 해석법이라 할 수 있다. 하지만 선정된 지진파의 특성에 따라 해석 결과의 산포도가 크기 때문에 합리적인 지진파 선정과 스케일링이 필요하다.

비선형시간이력해석은 지반운동을 최소 3개 이상 이용하여야 한다. 본 연구에서는 총 7개의 지반운동을 사용하여 해석하였다.

KBC2016의 0306.7.4.1에서는 개별 지반운동의 주기별로 제곱합제곱근(SRSS)을 취하여 제곱합제곱근 스펙트럼을 산정하며, 이 제곱합제곱근 스펙트럼들의 평균값이 설계대상 구조물 기본진동주기의 0.2배부터 0.5배 사이에 해당되는 주기에 대해서 설계스펙트럼의 1.3배보다 10%이상 작지 않도록 해야 한다고 나타나 있다. 본 연구에서는 총 7개의 지반운동을

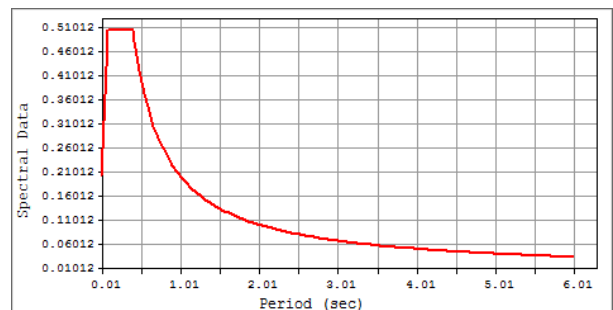
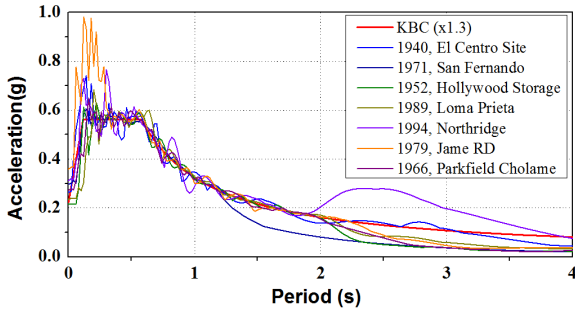


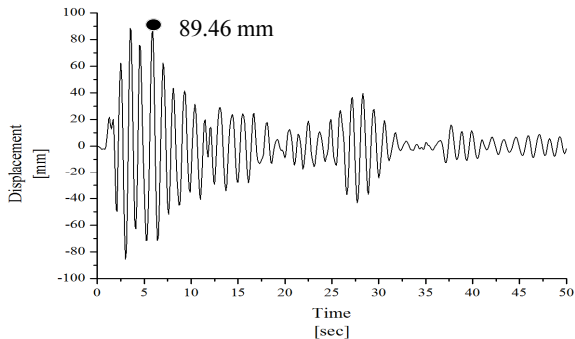
Fig. 17. KBC 2016 response spectrum

**Table 6.** Consider the kind of base architecture model and a natural periodicity

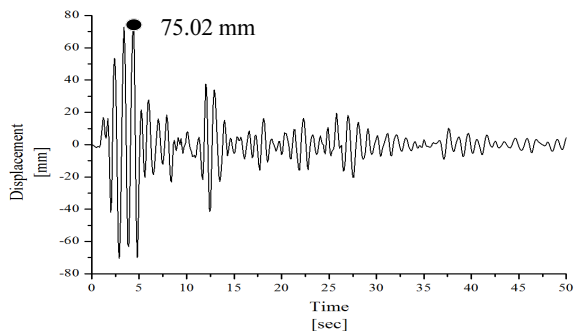
EARTHQUAKE	DATE	STATION	COMPONENT	RECORD TIME	MAGNITUDE	DEPTH	SCALE FACTOR
Eq. (1). Elcentro Site	1940/05/19	United States, Mexico	270	53.72 sec	6.9Mw	16 km	0.72
Eq. (2). San Fernando	1971/02/09	Greater Los Angeles Area Southern California United States	159	61.88 sec	6.5-6.7Mw	13 km	0.79
Eq. (3). Hollywood Storage	1952/07/21	Southern California United States	270	78.62 sec	7.3Mw	16 km	1.67
Eq. (4). Loma Prieta	1989/10/17	San Francisco Bay Area United States	270	39.98 sec	6.9Mw	19 km	0.5
Eq. (5). Northridge	1994/01/17	Greater Los Angeles Area Southern California United States	90	59.98 sec	6.7Mw	18.3 km	0.4
Eq. (6). James RD	1979/10/15	Baja California Southern California United States	220	37.68 sec	6.4Mw	8 km	0.4
Eq. (7). Parkfield Cholame	1966/06/28	United States, California	130	26.14 sec	6.0Mw	8.6 km	0.92



**Fig. 18.** Scaled earthquake using KBC 2016 response spectrum



(a) Original building



(b) VES Damper retrofit system

**Fig. 19.** Maximum displacement of roof floor about Elcentro earthquake

**Table 7.** Average maximum displacement of roof floor about before and after retrofit

EARTHQUAKE	BEFORE RETROFIT	AFTER RETROFIT (VES Damper)	REDUCTION RATIO
Eq. (1)	0.64%	0.54%	16.11%
Eq. (2)	0.50%	0.48%	4.30%
Eq. (3)	0.46%	0.32%	30.92%
Eq. (4)	0.43%	0.39%	10.21%
Eq. (5)	0.46%	0.52%	-13.69%
Eq. (6)	0.63%	0.33%	47.10%
Eq. (7)	0.27%	0.21%	22.11%
<b>AVG.</b>	<b>0.48%</b>	<b>0.40%</b>	<b>16.72%</b>

KBC2016의 스펙트럼(Fig.17)에 맞게 Second Match라는 컴퓨터용 프로그램을 사용하여 스케일링 후 비선형 동적 해석을 실시하였다. 스케일링 방법을 통한 7개 지반운동은 Table 6에 나타나 있다. 또한 해석에 사용된 스케일링에 따른 지반운동은 설계스펙트럼과 함께 Fig. 18에 나타나 있다.

#### 4.3.2 해석 결과

비선형 동적 해석은 지진에너지를 소산하는 VES Damper 보강 방안에 대해서만 실시하였다. Elcentro 지진을 적용하였을 때, 보강 전 대상건물의 지붕층 최대 변위는 89.46 mm이다. 대상 건물에 VES Damper로 보강한 후 지붕층 최대 변위를 구한 결과 75.02 mm로 약 16.11%가 감소하였다. Fig. 19는 Elcentro 지진을 적용시켰을 때 보강 전과 후의 지붕층 최대변위를 나타낸다. Table 7에서는 7개 지반운동을 적용하여 지붕층 최대변위의 평균을 구한 결과가 나타나 있다. 보강 전 평균 지붕층 최대변위는 67.35 mm이고 VES Damper 보강 후 평균 지붕층 최대변위는 56.12 mm로 약 16.72% 감소하였다.

## 5. 결론

대상 건물은 KBC2016 기준상 내진에 대한 보강이 필요한 것으로 검토되었고 이에 따라 내진 성능 평가를 실시한 결과 내진 보강이 필요한 것으로 검토되었다. 본 연구에서 제시한 3가지 보강 방안에 따라 내진 보강을 실시하여 해석 및 평가한 결과 구조물의 연성능력을 향상시키고 2400년 재현주기의 2/3의 지진에서도 목표성능(인명안전, LS) 수준에 부합된다고 판단되었다. 본 논문에서 최적의 보강 수량을 명확히 확보하기 위한 체계적인 연구가 차 후 필요할 것으로 생각된다. 본 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 대상건물은 비내진 설계된 건축물로 지진하중에 의한 검토 시 대부분의 부재가 내력을 초과하여 내진보강이 필요한 것으로 평가되었다. 이에 따라 3가지 보강 방안을 고려하여 이에 대해 내진성능을 평가하였다. Steel Brace와 Open Shear Wall System은 강도보강 측면에서 크게 유리하며 VES Damper System은 유입되는 지진에너지에 대해 고감쇠 고무의 전단변형을 통해 안정적으로 에너지의 소산을 통해 연성적인 측면에서 유리한 것으로 판단된다.
- 2) 구조설계와 시공현장의 상황에서 변화될 수 있지만 강도보강측면에서 유리한 Steel Brace와 Open Shear Wall 구조보강은 자중의 증가로 기초보강이 필요할 수 있으며 습식공법에 따라 공기가 연장될 수 있다. 반면에 VES댐퍼시스템은 공장제작을 통한 품질관리와 시방서에 따른 설계와 시공을 통해 보강을 할 수 있어 보강방안 중 유리한 점을 가지고 있는 것으로 판단된다.
- 3) 내진 안전성 평가 방법으로 3가지 보강 방안에 대하여 MIDAS/Gen을 통한 비선형 정적해석과 비선형 동적해석을 실시하였다. 층간변위비와 지붕층의 변위값 등이 주요 평가에 대한 고려사항이었다. 그 결과, 모든 보강 방안에 대하여 내진 목표성능인 인명안전(LS) 수준을 만족시킨 것으로 판단되었다.

## / 감사의 글 /

이 논문은 2016년도 정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원 기술촉진연구사업의 연구비지원(16CTAP-C115068-01)에 의해 수행된 연구임.

## / REFERENCES /

1. Architectural Institute of Korea, Architectural Structure Design Standards and Commentary. c2009.
2. Architectural Institute of Korea, Architectural Structure Design Standards and Commentary. c2016.
3. Federal Emergency Management Agency, FEMA-P965, Quantification of Building Seismic Performance Factors. FEMA. c2009.
4. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Seismic Performance Evaluation Method of Existing Structures. c2011.
5. Korean Educational Development Institute, Seismic Performance Evaluation and Seismic Retrofit Guidelines for School Structures. c2011.
6. Ministry of Construction & Transportation, Seismic Design Criteria Research(II). c1997.
7. Kim DH, Lee DK, Lee KH, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 15, No. 2, Structural Performance Evaluation of VES Damper System subjected to Cyclic Loadings (CST30). c2015.
8. Ahn CW, Yoon JH, Song DY, Shang BS, Min CG, EESK J Earthquake Eng. 17(6):293-303, The design considerations of steel braced frame for seismic retrofit through increasing the lateral strength of existing RC buildings. c2013.
9. Yi YS, Hong SG, Journal of the Korea Concrete Institute, Seismic Performance Evaluation of Shear Wall Retrofitted with FRP. c2013.
10. National Emergency Management Agency, Guidelines for evaluation of seismic performance of buildings. c2012.
11. Hong Juhee, Seismic performance evaluation of MRF building structures retrofitted using VES30 damper systems, Sejong University, c2016.
12. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. ATC-40.
13. Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings(FEMA 356).