

자기복구형 에너지소산 가새시스템을 적용한 종합병원의 내진보강효과

Seismic Retrofitting Effects of General Hospital Using Self-Centering Energy Dissipative Bracing System

김태원¹⁾ · 추유림^{2)*} · 번다리 디왈스²⁾

Kim, Taewan¹⁾ · Chu, Yurim^{2)*} · Bhandari, Diwas²⁾

¹⁾강원대학교 건축·토목·환경공학부 건축공학전공 교수, ²⁾강원대학교 건축공학과 박사과정

¹⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Kangwon National University, ²⁾Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

2016 Gyeongju and 2017 Pohang earthquakes led Koreans to acknowledge that the Korean peninsula is not an earthquake-free zone anymore. Among various buildings crucial to after-shock recovery, general hospital buildings, especially existing old ones, are very significant so seismic retrofitting of those must be an important issue. Self-centering energy dissipative(SCED) brace is one of retrofitting methods, which consists of tendon with restoring force and friction device capable of dissipating seismic energy. The strength of the SCED brace is that the tendon forces a structure to go back to the original position, which means residual drift can be negligible. The residual drift is a very important parameter to determine usability of general hospitals after shock. To the contrary, buckling-restrained braces(BRB) are also a very effective way to retrofit because they can resist both compressive and tensile, but residual drift may exist when the steel core yields. On this background, the seismic retrofitting effect of general hospitals reinforced with SCED braces was investigated and compared to that of the BRD in this study. As a result, although the floor acceleration cannot be reduced, the story drift and residual drift, and the shear demand of walls significantly decreased. Consequently, seismic retrofitting by SCED braces are very effective for domestic low-rise general hospitals.

Key words: Self-centering energy dissipative brace, Seismic retrofitting, Hospital, Nonlinear dynamic analysis, Seismic behavior

1. 서론

2016년 이후, 규모 5.0 이상의 유례없는 지진이 거듭 발생했던 경북 지역을 포함하여 한반도 및 인근 해역에서 크고 작은 지진이 계속되고 있다. 기상청의 발표에 따르면, 1978년부터 2015년까지의 국내에서 발생한 연도 별 규모 2.0 이상의 지진 발생은 2013년이 총 93건으로 가장 많았으나 2016년과 2017년 모두 200건 이상, 2018년에는 다소 줄었지만 약 100건으로 과거에 비해 크게 증가했다[1]. 특히 경주와 포항에서는 각각 16년과 17년에 발생했던 본진 이후 이어지는 여진 그리고 이와 별개로 최근 포항 인근 해역에서 주향이동단층 운동으로 인해 규모 4.1의 지진이 발생하는 등 한반도 전역의 지진활동이 잦아졌다. 우리나라에서는 이미 2009년 ‘지진

재해대책법’(현재 ‘지진 화재재해대책법’)을 제정하여 기존 시설물의 내진보강 기본계획 수립 및 추진에 대한 내용을 규정하고 있다[2]. 따라서 ‘지진 재해대책법’ 제 15조에 의거, 행정안전부 장관이 동법 제 14조에 따른 내진설계 대상 시설물 중 관련 법령이 제정되기 전에 설치된 공공시설물이나 관계 법령의 제정 이후 내진설계기준이 강화된 공공시설물의 내진성능 향상을 위해 5년마다 기존 공공시설물 내진보강 기본계획을 수립하여야 하며 관계 중앙행정기관에서는 이에 따라 소관 시설물에 대한 내진보강대책을 수립·추진하여야 한다(동법 제 16조). 1단계(2011~2015년) 기본계획은 완료되었고 현재는 2단계(2016~2020년) 기본계획을 시행 중이다. 여기에 규정된 공공시설물에는 ‘의료법’에 따른 종합병원·병원 및 요양병원도 포함되어있는데, 행정안전부 재난관리정책과의 발표에 따르면 2017년 말을 기준으로 국내 내진설계 대상 병원시설의 내진율은 60.7%인 것으로 조사되었다.

기존 건물을 내진보강 하는 것은 어떤 보강 효과를 의도하느냐에 따라 기존 부재를 보강하거나 새로운 부재를 추가하기도 하고 때로는 부재를 제

*Corresponding author: Chu, Yurim

E-mail: yurim92@kangwon.ac.kr

(Received March 4, 2019; Revised March 19, 2019; Accepted March 19, 2019)

거하는 등 그 방법이 매우 다양하다. 만약 부재의 강도, 강성이 부족하거나 변형능력이 부족할 때에는 개별 부재를 보강할 수 있지만 그 양이 많아지면 시스템 자체를 보강하여 횡력을 특정 부재가 집중 저항할 수 있도록 주요 횡력저항 부재를 신설하는 것이 더욱 경제적이다. 이때 경제성이나 공사기간 등을 고려하여 철골가새를 신설하는 방법이 많이 사용되고 있다. 이러한 보강 가새 중 일반 가새는 탄성 영역에서 작용하는 하중에 대해서는 구조적으로 매우 효과적이지만 하중의 크기가 커지면서 가새가 받는 압축력이 증가할 경우에는 좌굴이 발생하여 불안정한 거동을 보이는 것이 익히 알려져 있다[3]. 따라서 이와 같은 일반 가새의 불안정성을 개선한 비좌굴 가새(Buckling-Restrained Brace, BRB)가 개발되었고 활발히 이용되고 있다.

BRB는 강재로 구성된 심재(Steel core), 비부착 물질, 외부 보강재(Tube), 충전 모르타르로 이루어져 있다. 이때 외부 보강재가 압축력으로 인한 심재의 좌굴을 방지하는 효과가 있기 때문에 BRB 가새는 압축과 인장에 모두 저항할 수 있고 일반 가새에 비해 에너지 소산능력이 뛰어나다[4]. 그러나 BRB에 큰 인장력이 가해져 심재가 항복하게 되면 건물이 한쪽으로 치우치는 잔류변형(Residual drift)이 발생한다. 이러한 잔류변형이 종합병원에 발생할 경우, 단순히 건물의 사용성에 악영향을 끼치는 것뿐만 아니라 입원 중인 환자 및 보호자에게 심리적 불안감을 일으킬 수 있다. 또한 과도한 변형으로 인해 종합병원 내 각종 비구조재의 손상이 발생하면 종합병원이 제 기능을 수행하기 어려워질 수 있다.

이러한 BRB의 문제를 극복하기 위해 기존 연구자들은 자기복구(Self-centering) 기술을 연구 개발하였다. 특히 Christopoulos et al.[5]은 복원력을 가진 텐던(Tendon)과 마찰패드로 구성된 자기복구형 에너지소산(Self-Centering Energy Dissipative, SCED) 가새를 제안하였다. 이 가새는 구조물이 횡력을 받아 수평변위가 발생하더라도 텐던의 복원력에 의해 제자리로 돌아오게 되어 잔류변형을 크게 줄일 수 있으며, 이러한 과정에서 에너지소산장치가 지진에너지를 소산한다. 이와 관련한 기존 연구들[6-8]은 공통적으로 철골 모멘트 골조에 SCED 가새를 설치했을 때 층간변위 및 잔류변형이 크게 감소한다는 결과와 함께 보강 전 건물 또는 BRB를 설치한 건물에 비해 층 가속도 응답이 증가함을 보였다. 그러나 일반적인 국내 중층 종합병원은 철근콘크리트(RC) 벽-골조 건물이고, 선행연구인 Kim et al.[9]을 통해 현행 건축구조기준에 따라 종합 병원건물을 설계하더라도 벽체의 전단성능이 부족하며 수평철근을 추가 배근하거나 벽체를 추가하여 벽량을 늘리더라도 이 문제가 쉽게 해결되지 않는다는 것을 확인하였다. 또한 Kim et al.[10]에서 RC 벽-골조 형식 건물의 가속도 증폭은 층뿐만 아니라 벽체의 위치에 따라 달라질 수 있음을 밝혔다. 따라서 SCED 가새 보강으로 구조물의 변위가 감소하는 것과 더불어 이것이 벽체의 전단력, 층 가속도에 미치는 영향을 추가적으로 확인할 필요가 있다. 이밖에도 SCED 가새 시스템을 설치함으로써 기존의 부재들의 하중 경로나 분포 등이 변화할 수 있으므로 가새 주위의 기존 부재에 미치는 영향도 확인할 필요가 있다.

이러한 배경으로 본 연구에서는 일반적인 국내 중층 종합병원을 마찰형 에너지소산장치를 사용한 SCED 가새로 보강하고 이에 따른 내진보강효과를 해석적으로 조사하였다. 이때 3차원 비선형 동적해석을 수행하였다. 보강효과를 비교를 위해 동일한 대상 건물을 BRB로 보강한 것에 대해서도 같은 해석을 수행하여 보강하지 않은 건물과 함께 세 건물의 지진응답을 비교 및 분석하였다.

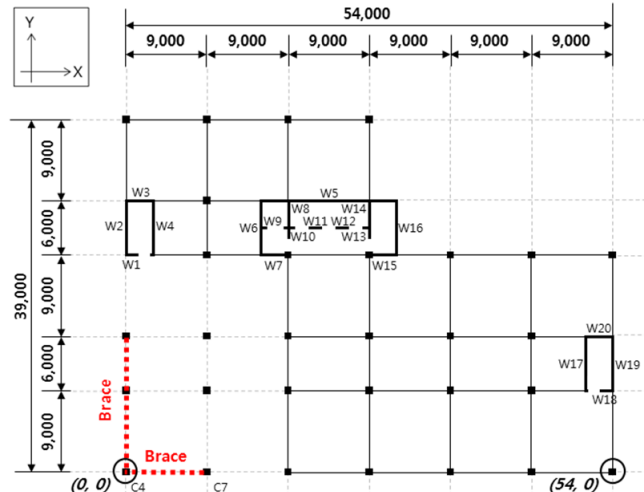


Fig. 1. Second floor plan of example building [9] (unit : mm)

2. 대상 건물

본 연구의 대상이 되는 건물의 2층 바닥 평면은 Fig. 1과 같다. 이 건물은 선행연구[9, 10]에서 다뤄진 건물로서 경간과 평면 계획 및 층구성, 중력하중 등을 결정하는 데에 실제로 운영 중인 국내 중층 종합병원이 참고되었다. 대상 건물의 층수는 총 6층이며 1층의 층고는 4.5 m, 2-6층의 층고는 4.2 m이다. 주요 횡력저항시스템인 벽체는 중앙코어 및 피난 계단에 해당하는, 평면의 중앙과 양 측면에 배치되어 있다. 평면에서 좌측 아래에 보 부재가 없는 이유는 일반적인 중층 종합병원의 로비가 갖는 복층 형태를 반영했기 때문이다. 3층부터 6층까지는 해당 부분에도 보 부재가 존재한다. 골조 및 벽체의 부재 크기와 철근 상세는 Kim et al.[9]에서 철근콘크리트 보통전단벽-골조상호작용시스템(R=4.5)으로 설계한 결과와 동일하다. 이때 철근의 항복강도는 400 MPa, 콘크리트의 압축강도는 24 MPa이 사용되었다. 설계된 벽체의 두께는 300 mm이며 수직 및 수평 철근비는 각각 1.72%와 0.56% 이내가 되도록 배근되었다. 구체적인 설계 과정과 결과는 Kim et al.[9]에서 확인할 수 있다. 보강 가새는 기존 벽체들로부터 가장 먼 위치 즉, Fig. 1에 표시된 (0, 0) 위치에서 X 방향으로 1 경간, Y 방향으로 2 경간 설치하였다. 설치된 가새의 배치를 보이기 위해 Fig. 2에 대상 건물의 입면을 나타내었다.

3. 해석모델

대상 건물을 3차원 해석모델로 구현하기 위해 PERFORM-3D[11]를 사용하였다. 보, 기둥 벽 부재의 휨 강성을 산정할 때에는 유효강성계수를 적용하였다. 따라서 콘크리트의 탄성계수, $E_c (=8500\sqrt{f_{ck} + 4}, \text{MPa})$ 에 보와 벽은 각각 0.35와 0.5를 곱했고 기둥은 축력비에 따라 0.3에서 0.7 사이의 값을 곱했다. 건물의 질량은 각 층의 질량중심점에 입력하였다. 중력하중조합은 1.1DL+0.275LL을 사용하였다. 이때 중력하중은 일반적인 종합병원의 층구성 및 실 용도 등을 반영하여 산정하였다[9]. 본 연구를 위해 작성한 해석모델은 총 세 가지이며 보강하지 않은 모델(Original), 자기복구형 에너지소산(SCED) 가새로 보강한 모델, 그리고 SCED 가새와 내진보

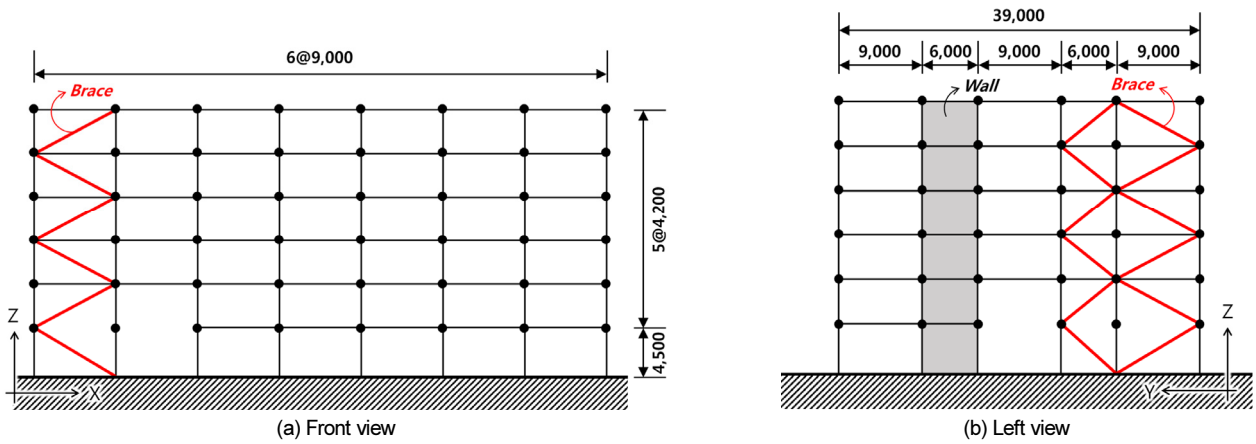


Fig. 2. Arrangement of the braces (unit : mm)

Table 1. Fundamental period of analytical models

Type	Mode No.	Period (sec)	Mass participation (%)	
			X-dir	Y-dir
Original	1	0.68	38.11	0.036
	2	0.53	0.036	73.11
	3	0.31	40.58	0.004
SCED Brace	1	0.57	24.68	28.37
	2	0.43	27.47	43.23
	3	0.29	25.99	0.022
BRB	1	0.65	38.40	0.012
	2	0.52	0.009	71.95
	3	0.31	39.01	0.001

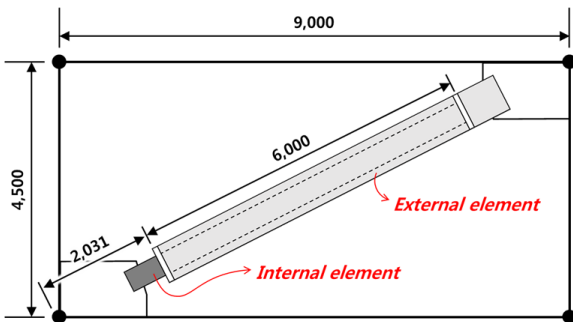


Fig. 3. Example of 1F SCED braced frame (unit : mm)

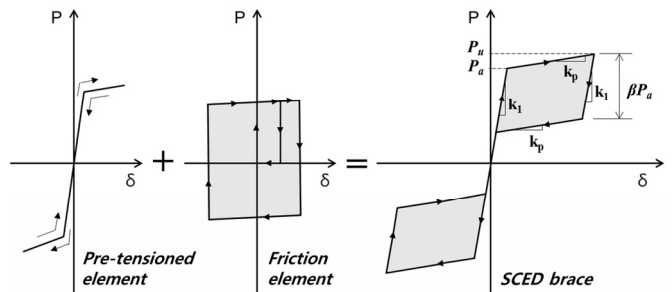


Fig. 4. Hysteretic behavior of SCED brace [5]

강효과를 비교하기 위해 비좌굴 가새(BRB)로 보강한 모델로 구분 할 수 있다. Table 1은 작성된 각 해석모델의 고유주기를 나타낸 것이다. 고유주기는 Original, BRB 보강, SCED 가새 보강 순으로 나타났으며 이는 SCED 가새가 BRB에 비해 초기 강성이 크기 때문이다.

3.1 가새

3.1.1 자기복구형 에너지소산 가새(Self-Centering Energy Dissipation Brace)

Christopoulos et al.[5]이 제안한 SCED 가새는 내·외부의 철골부재,

엔드 플레이트(End plate), 철골부재 사이의 마찰패드, 그리고 프리텐션을 가한 텐던(Tendon)과 앵커로 구성되어있다. 이 가새는 골조에 연결될 때, 한쪽 단부는 내부 부재가 연결되고 다른 단부는 외부 부재가 연결된다(Fig. 3). 따라서 구조물에 하중이 작용하면 내·외부 부재에서 상대변위가 발생하면서 두 부재 사이에 존재하는 마찰패드가 지진에너지를 소산시킨다. 이때 텐던에 초기 인장력이 가해져있기 때문에 더 큰 복원력을 갖게 되면서 원점으로의 복귀 즉, 셀프센터링이 가능해진다. 이러한 SCED 가새의 이력곡선은 초기 인장력이 가해진 텐던의 탄성거동과 에너지 소산 장치의 탄소성 거동이 결합되어 Fig. 4와 같은 깃발 형태(Flag-shaped)를 갖는다. 이때, 이력곡선은 Fig. 4에 표시한 바와 같이 다섯 개의 주요 변수로 나타낼 수 있다. 먼저 P_a 는 SCED 가새의 내·외부 철골부재 사이에서 상대변위가 발생하게

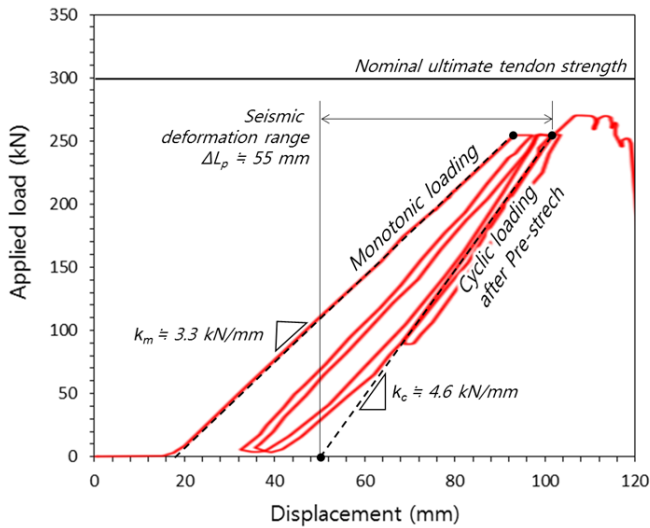


Fig. 5. Tensile force-deflection response of tendon

Table 2. Tendon properties

Parameter	Value
Nominal ultimate tendon strength (kN)	300
Number of tendons	4
Nominal diameter (mm)	17.8
Cross-sectional area, A_p (mm ²)	208.4
Effective cyclic young's modulus, E_p (MPa)	133
Tendon length, L_p (mm)	6000
Seismic deformation range, ΔL_p (mm)	55

Table 3. Hysteresis curve parameter of SCED brace system

Parameter	Value
Total tendon pretension force, T_{p0} (kN)	840
Total internal friction pad slip force, F (kN)	600
SCED activation load, P_a (kN)	1440
Energy dissipation capacity parameter, β	0.83
Initial stiffness, k_1 (kN/mm)	410
Tendon stiffness, k_p (kN/mm)	18

되는 하중으로 Activation load라고도 부른다. P_u 는 극한 내력이다. β 는 에너지 소산능력에 관한 변수로, 0.83을 사용하였다[12]. k_p 는 텐던의 축강성이며 $E_p A_p / L_p$ 로 구한다. 이때 E_p , A_p , L_p 는 각각 텐던의 탄성계수, 사용된 텐던의 총 단면적, 텐던의 길이이다. k_1 은 텐던의 축강성(k_p)과 내·외부 철골부재 축강성의 합이다. 즉, $k_1 = k_p + k_{si} + k_{se}$ 로 구하며 여기에서 k_{si} 와 k_{se} 는 각각 내부와 외부 철골부재의 축강성이다. 이것은 압축 영역에서도 동일하게 적용된다.

SCED 가새의 이력곡선을 해석모델에 반영하기 위해서는 앞서 언급한 다섯 개의 변수들이 정의되어야 한다. 이 중, P_a 는 텐던에 가한 초기 인장력(T_{p0})과 마찰패드 미끄러짐 하중(F)을 더한 것과 같다. T_{p0} 는 SCED 가새가 거동하는 동안에 텐던의 파단이 발생하지 않도록 적절히 설정하여야 하며 본 연구에서는 극한강도의 70% 수준으로 하였다. Fig. 5는 본 연구에

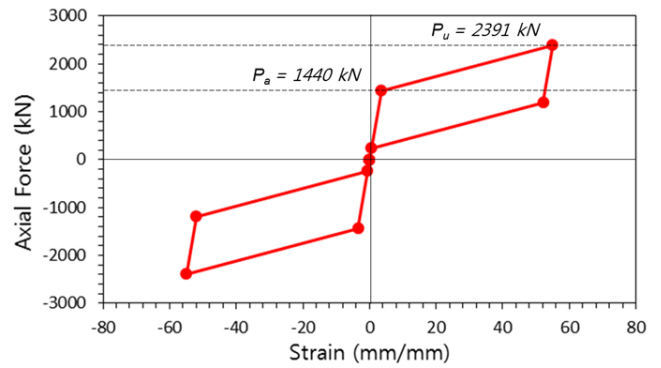


Fig. 6. Prediction of SCED brace response

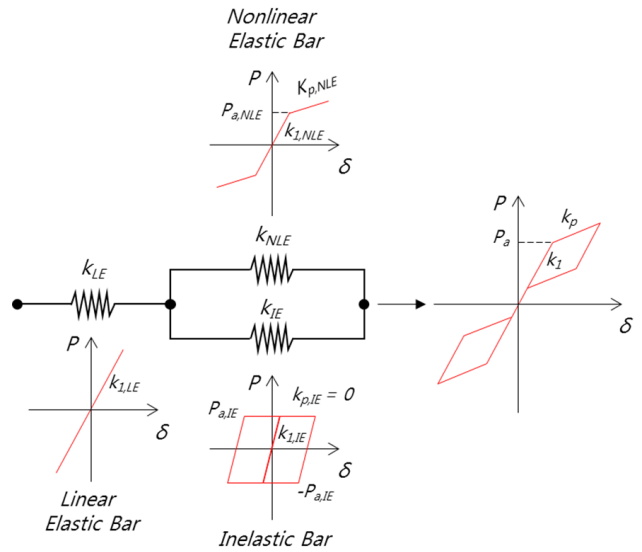


Fig. 7. Constructing a flag-shaped hysteresis [13]

서 고려한 텐던의 반복하중에 의한 하중-변위 관계를 나타낸 것이고 이 텐던의 주요 특성을 Table 2에 정리하였다. 이를 통해 알 수 있듯이, 텐던은 단조가력(Monotonic loading) 시의 강성(k_m)과 반복하중(Cyclic loading) 시의 강성(k_c)이 다르게 나타난다. SCED 가새의 텐던은 초기 인장력이 가해진 상태로 거동하기 때문에 이러한 텐던의 강성은 k_c 를 따르게 된다(즉, $k_c = k_p$). 마찰패드 하나의 미끄러짐 하중은 150 kN으로 하였다. SCED 가새의 텐던과 마찰패드는 각각 4개씩 사용된 것으로 가정하여 P_a 는 1440 kN으로 하였다. P_u 는 텐던의 변형 능력에 좌우되며 반복하중 하에서의 변형능력(Seismic deformation range)을 고려하여 산정하였다. k_1 은 앞서 언급했듯이 내·외부 철골부재 및 텐던 축강성의 합이다. 본 연구에서는 내부 철골부재는 □-200×200×8T, 외부 철골부재는 □-250×250×6T(SPSR 400)를 사용하는 것으로 가정하였다. SCED 시스템 자체의 길이는 6000 mm로 가정하였다. Table 3은 이러한 사항을 반영하여 결정한 SCED 가새 이력곡선 변수 값을 정리한 것이다. Fig. 6은 이 변수들을 적용하여 작성한 SCED 가새의 이력곡선이다. 이것을 해석모델에 구현하는 것은 Le Bec et al.[13]를 참고하였다. Le Bec et al.은 깃발 형태의 이력곡선을 구현하기 위해 두 개의 비선형 요소를 병렬 연결하고 이것을 하나의 선형 탄성 요소와 직렬 연결하는 방법을 사용하였다. 이 방법을 PERFORM-3D에서 실현하기 위해 사용한 요소와 각 요소의 이력형태 및 변수를 Fig. 7에 나타내었다.

각각의 변수들은 식(1)에서 식(5)를 이용하여 산정하였다.

$$k_{1,LE} = \frac{\alpha k_1}{\alpha - 1} \tag{1}$$

$$k_{1,NLE} = k_{1,IE} = \frac{\alpha k_1}{2} \tag{2}$$

$$k_{a,NLE} = \frac{\alpha k_1 k_p}{\alpha k_1 - (\alpha - 1)k_p} \tag{3}$$

$$P_{a,IE} = \frac{\beta P_a}{2} \tag{4}$$

$$P_{a,NLE} = P_a - P_{a,IE} \tag{5}$$

여기서 α 는 해석의 수치적 안정성을 위해 사용되는 계수로서, 20을 사용하였다[12].

3.1.2 비좌굴 가새 (Buckling-Restrained Brace)

앞서 언급했듯이 비좌굴 가새는 강재로 구성된 심재(Steel core), 비부착물질, 외부 보강재(Tube), 충전 모르타르로 이루어져있다. PERFORM-3D에는 BRB 요소가 내장되어 있으나 본 연구에서는 이를 사용하지 않고 좌굴이 없는 철근 재료모델(Inelastic steel material, Non-buckling) 및 Steel bar 요소를 이용하여 심재만을 모델링하였다. 심재의 항복강도와 인장강도는 각각 235 MPa, 410 MPa를 사용하였다. BRB의 항복강도는 SCED 가새와의 내진보강효과 비교를 위해 P_a 와 동일하도록 Steel bar의 단면적을 조정하였다.

3.2 철근콘크리트 보, 기둥 및 전단벽

대상 건물의 보, 기둥은 비선형 거동이나 손상이 부재의 양 단부에 집중되는 것으로 가정하여 FEMA Hinge 속성을 사용하였다. 이 속성은 비선형의 모멘트-회전각 관계로 입력하여야 한다. 따라서 각 부재별 휨 강도 및 변형능력을 산정하였으며 이러한 과정은 Kim et al.[9]에서 자세히 확인할 수 있다.

전단벽은 휨과 전단에 대한 속성을 각각 정의하였다. 휨에 대해서는 Fiber 요소를 사용하였으며 이를 위해 콘크리트와 철근의 비선형 응력-변형률 관계를 입력하였다. 이때 재료의 기대강도를 사용하므로 각 재료의 공칭강도에 대응하는 기대강도계수(철근-1.1, 콘크리트-1.1)를 구하여 공칭강도에 곱했다[14]. 전단 속성은 PERFORM-3D의 벽체 전단 재료 모델 중 삼선형의 비탄성 재료 모델을 사용하였다. 이 속성도 응력-변형률 관계로 정의하기 때문에 식(6)과(7)을 통해 벽체의 균열전단응력(τ_{cr})과 최대전단응력(τ_u)을 산정하였고 각각에 상응하는 전단 변형률(γ_{cr} , γ_u)은 식(8)과 식(9)에 따라 산정하였다[9, 15].

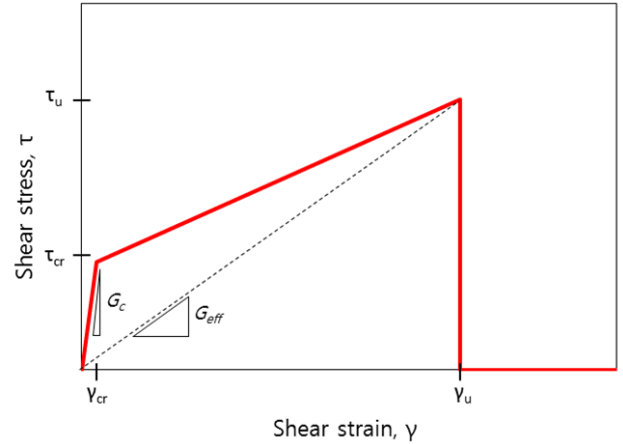


Fig. 8. Shear stress-strain relation for wall

$$\tau_{cr} = 0.4\tau_u \tag{6}$$

$$\tau_u = 0.167 \sqrt{f_{ck}} + \rho f_y \tag{7}$$

$$\gamma_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{G_c} \tag{8}$$

$$\gamma_u = \frac{\tau_u}{G_{eff}} \tag{9}$$

여기서, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, ρ 는 벽체의 수평철근비, f_y 는 철근의 항복강도, G_c 는 전단탄성계수($=0.4E_c$), G_{eff} ($=0.1G_c$)는 유효전단탄성계수이다. 본 연구에서는 벽체가 전단에 대한 저항력을 상실하면서 발생하는 하중재분배효과를 고려하기 위해 최대전단응력(τ_u) 이후 곧바로 응력이 0이 되도록 모델링하였다(Fig. 8). PERFORM-3D에서 이와 같이 모델링된 벽체의 전단속성은 τ_{cr} 에서 τ_u 사이의 기울기가 G_c 보다 작기 때문에 오히려 해석에 유리하게 작용할 수 있다. 따라서 에너지소산면적이 작아지도록 Cyclic degradation 계수를 조정하였다.

4. 비선형 동적해석

4.1 지진파

비선형동적해석은 1개의 지진파를 사용하여 수행하였다. 지진파는 Kim et al.[9]에서 구조체의 내진성능을 평가하기 위해 PEER Ground Motion Database[16]로부터 선정한 7개의 지진파 중, 해석모델의 고유주기 영역(약 0.5-0.7 sec)에서 응답스펙트럼가속도가 가장 큰 것을 선택하였다(Fig. 9). 이 지진파에 대한 정보는 Table 4에 정리하였고 두 개의 수평성분 시간 이력은 Fig. 10과 같다.

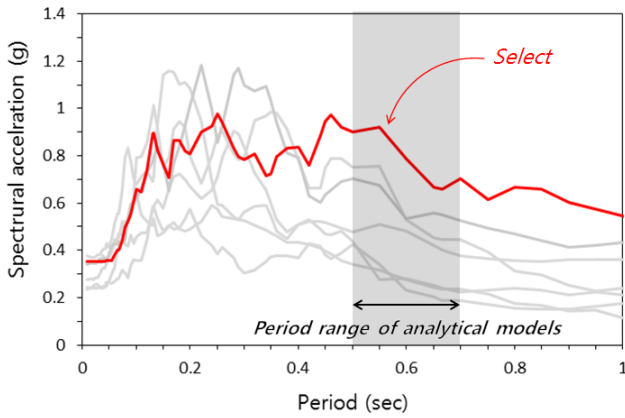


Fig. 9. Response spectrum of selected ground motion

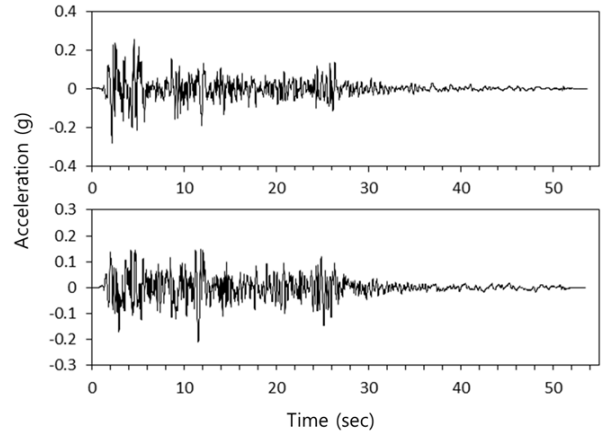


Fig. 10. Acceleration time histories of selected ground motion

Table 4. Summary of earthquake event data [16]

RSN	Earthquake				Recording Station			
	Name	Station	Year	M	R _{rup} (km)	V _{s30} (m/s)	Normalized and Scaled Motions	
							PGA (g)	PGV (cm/s)
6	Imperial Valley	El Centro Array	1940	6.95	6.1	213	0.310	42.2

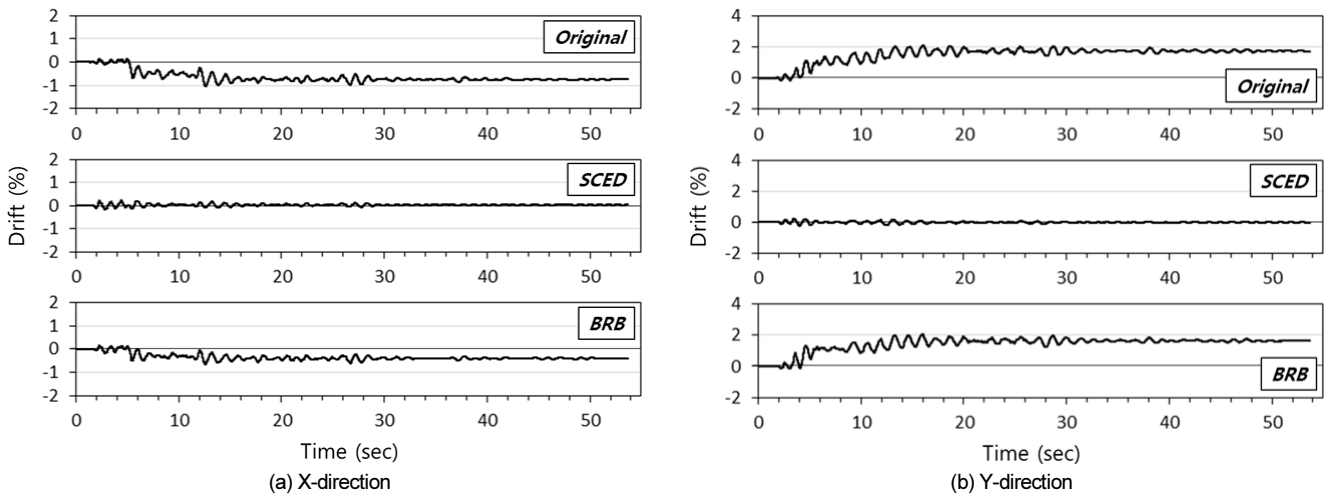


Fig. 11. Time histories of first story drift

4.2 비선형 동적해석 결과

4.2.1 층간변위각 및 잔류변형

Fig. 11에는 비선형 동적해석을 통해 얻은 Original, SCED 가새 보강, BRB 보강 건물에 대한 1층의 변위 시간이력을 나타내었다. 이것은 대상 건물 평면의 각 모서리 중 변위가 가장 크게 나타난 위치의 결과이다. 각각의 최대 변위 및 잔류변형 값은 Table 5에 정리하였다. Original의 최대 층간 변위각은 X 방향에서 각각 1.1%, Y 방향에서 2.1%로 나타나 벽체가 있음에도 불구하고 값이 큰 것을 알 수 있는데 이는 벽체의 전단 비선형 속성에서 에너지소산면적에 관한 계수를 매우 작게 설정했기 때문이다. BRB 보강 결과, X 방향의 최대 층간변위각은 Original에 비해 약 절반 정도 감소하였으나 Y 방향 응답은 Original과 크게 다르지 않았다. 이와 달리 SCED 가

Table 5. Values of peak story drift & residual drift

Type	Peak story drift (%)		Residual drift (%)	
	X	Y	X	Y
Original	1.1	2.1	0.76	1.73
SCED	0.2	0.2	0.04	0.02
BRB	0.6	2.1	0.40	1.64

새 보강은 방향에 상관없이 변위 응답이 동일하게 나타났으며 최대 층간 변위각은 X, Y 방향 모두 0.2%로 매우 작게 나타났다. 또한 Original과 BRB 보강은 양방향 모두 일정 시간이 지난 후 변위가 한쪽으로 치우쳐 잔류변형이 발생하는 데에 비해 SCED 가새 보강 결과는 원점(0)으로 돌아오는 것을 알 수 있다. 이것은 SCED 보강 가새와 BRB 가새의 이력곡선을 나타낸 Fig. 12에서도 확인할 수 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 SCED 가새 보

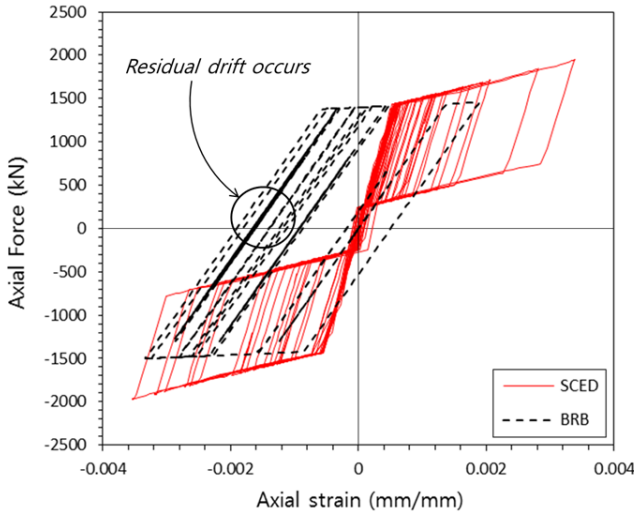


Fig. 12. Hysteresis of SCED brace & BRB

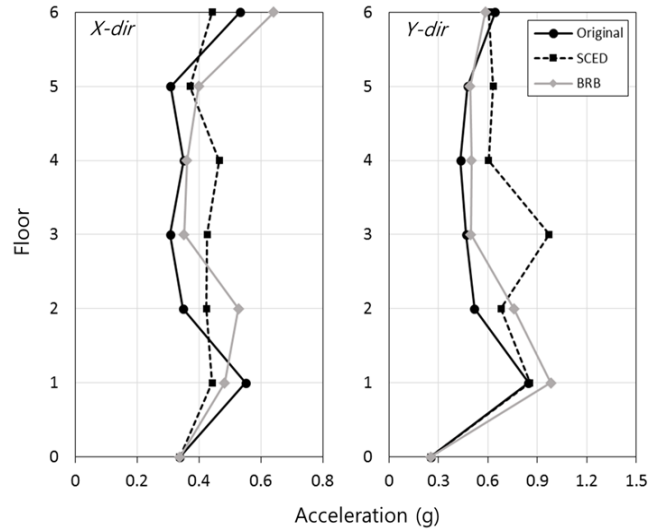


Fig. 13. Floor acceleration response of location at (54, 0)

Table 6. Demand-capacity ratio of walls

Wall ID	F _n (kN)	DCR		
		Original	SCED	BRB
W2	2993	1.00	1.00	1.00
W3	1811	0.99	0.80	0.96
W4	3053	1.00	0.95	1.00
W5	10901	0.98	0.97	0.98
W6	2934	1.00	0.98	1.00
W7	1885	1.00	0.97	1.00
W8	2284	1.00	0.99	0.98
W15	1888	1.00	0.97	1.00
W16	2930	1.00	0.91	1.00
W17	3846	1.00	0.85	1.00
W19	3949	1.00	0.88	1.00
W20	2550	0.99	0.92	1.00

강이 BRB 보강에 비해 층간변위각 및 잔류변형을 줄이는 데 효과적인 것으로 판단된다.

4.2.2 벽체 전단 DCR (Demand-Capacity Ratio)

서론에서 언급했듯이 본 연구의 대상 건물은 선행연구[9]를 통해 벽체의 전단 성능이 부족하며 이것은 벽체를 추가하거나 수평철근량을 늘리는 것으로도 쉽게 해결되지 않는 것을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서는 SCED 가새 보강과 BRB 보강이 대상 건물의 벽체에 미치는 영향을 확인하기 위해 Original, SCED 가새 보강, BRB 보강 건물의 벽체 전단 DCR을 비교하였으며 그 결과는 Table 6과 같다. 이때 길이 1.65 m 미만의 짧은 벽체는 평가에서 제외하였다. 벽체의 전단강도(F_n)는 건축물 콘크리트구조 설계기준[17]의 식을 이용하여 산정하였다. DCR이 0.99 이상이면 벽체의 전단력이 전단강도에 도달한 것으로 간주하였고 표에는 이에 해당하는 값을 회색 음영으로 표시하였다. 보강하지 않은 건물(Original)의 벽체들은 W5를 제외하고 모두 DCR이 0.99 이상으로 나타났다. 이에 비해 SCED

가새 보강 건물과 BRB 보강 건물에서는 DCR 0.99 이상인 벽체들이 줄어들었다. 단, BRB 보강은 큰 효과가 있다고 보기 힘든 수준이다. 그러나 SCED 가새 보강 건물에서는 W2와 W8을 제외한 모든 벽체의 DCR이 0.99 미만인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 SCED 가새가 BRB 가새에 비해 초기 강성이 더 크기 때문인 것으로 판단되며 횡력은 부재의 횡강성 크기에 따라 분담되므로 벽체에 물리는 횡력을 분담하기 위해서는 BRB 보다 SCED 가새로 보강하는 것이 더욱 유리하다는 것을 알 수 있다.

4.2.3 층 가속도

Fig. 13은 Original, SCED 가새 보강, BRB 보강 건물에 대한 층별 가속도를 나타낸 것이다. 층 가속도 값과 분포는 위치에 따라 다르게 나타나지만 전체적인 경향은 위치에 상관없이 동일하기 때문에 여기에서는 대표적으로 Fig. 1의 (54, 0) 위치에서의 결과를 나타내었다. 이를 통해 SCED 가새나 BRB로 보강했을 때의 층 가속도가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 3장에 언급한 바와 같이 Original에 비해 SCED 가새 보강 및 BRB 보강 해석모델의 고유주기가 짧아서 구조물에 가해지는 가속도가 증폭되는 것이 원인인 것으로 판단된다.

4.2.4 가새 주위 기존 기둥 부재의 축력

본 연구에서 고려한 가새 시스템은 일종의 철골 끼움가새이기 때문에 기존 RC 기둥은 가새의 단부에 발생하는 압축력 또는 인장력을 저항할 수 있어야 한다. 따라서 SCED 가새 보강과 BRB 보강 시 기존 RC 기둥에 작용하는 축력을 비교하였다. 이때 기존 RC 부재와 가새 시스템은 충분히 일체화되었으며 가새 단부의 접합부는 탄성상태를 유지하는 것으로 가정하였다. 또한 가새로부터 전단되는 축력은 모두 기존 RC 기둥이 저항하는 것으로 가정하였다. Table 7에는 Original, SCED 가새 보강, BRB 보강에 따라 기존 기둥 부재에 작용하는 압축력 및 인장력의 최댓값을 정리하였다. 이 결과는 Fig. 1에 나타낸 C4, C7 기둥의 1층 축력에 대한 것이다.

Table 7. Maximum axial force of the first story columns

Section	P _n (kN)		P _u (kN)		
			Original	SCED	BRB
C4	C ¹⁾	15212	1786	8023	6187
	T ²⁾	3406	-	3406	2273
C7	C	8050	2513	6307	4922
	T	2044	-	1764	840

¹⁾ Compression

²⁾ Tension

이 결과를 통해 SCED 가새와 BRB 보강으로 인해 기존 기둥에 압축력 뿐만 아니라 인장력도 상당히 발생함을 알 수 있다. 보강 후 기존 기둥이 받는 축력이 크게 증가했으며 BRB에 비해 SCED 가새로 보강했을 때가 압축과 인장 상관없이 더 크게 나타났다. 이는 Fig. 12에서 가새가 저항하는 축력의 차이에 기인한 당연한 결과이다. 각각의 축력을 축강도와 비교했을 때, 압축력은 압축강도를 초과하지 않은 반면, 인장력은 SCED 가새 보강 시 C4에서 인장강도에 도달하였다. 따라서 SCED 가새 보강을 사용할 때는 가새 주위 기둥의 축방향 저항능력을 충분히 고려해야 한다. 그 방안은 가새 보강을 여러 위치로 분산시키거나 가새 주위 기둥을 함께 보강하는 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 일반적인 국내 중층 종합병원의 평면 및 구조 형식을 반영한 대상 건물에 마찰형 에너지소산장치를 사용한 자기복구형 에너지소산(SCED) 가새와 비좌굴 가새(BRB)를 적용하고 가새로 보강하지 않았을 때와 함께 각각의 층간변위 및 잔류변형, 벽체 전단 DCR, 층 가속도 그리고 가새 주위의 기존 기둥에 작용하는 축력을 비교하였다.

그 결과, SCED 가새로 보강하는 것은 BRB 보강에 비해 1층의 층간변위를 크게 감소시켰으며 잔류변형도 매우 작게 나타났다. 특히 벽체에 집중되던 횡력을 분산시키는 데에 BRB 보강은 큰 효과가 없었던 것과 달리 SCED 가새 보강을 통해 대부분의 벽체 전단 DCR이 0.99 미만인 되었다. 이는 SCED 가새의 초기 강성이 BRB 보다 큼과 동시에 최대강도도 크기 때문이다. 그런데 이로 인해 구조물에 가해지는 가속도가 증폭되어 층 가속도는 오히려 증가하였다. 종합병원 내에는 의료장비나 유지관리 장비와 같은 가속도에 민감한 비구조 요소들이 존재하며 이 요소들은 병원의 기능을 유지하기 위해 필수적인 요소들이다. 따라서 SCED 가새 보강으로 인해 층 가속도가 증가하는 것은 가속도에 민감한 요소들에 있어서 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 그러나 이 문제는 해당 비구조 요소들을 앵커로 지지하는 등 다른 방법을 통해 일정 수준 해소할 수 있다.

결국 SCED 가새 보강을 통한 층간변위의 감소 및 잔류변형 방지는 종합병원의 또 다른 비구조 요소인, 변형에 민감한 요소들의 손상을 방지할 수 있다는 점, 그리고 층 가속도의 증폭으로 인해 구조물에 작용하는 지진력이 증가했음에도 불구하고 벽체에 물리는 전단력을 SCED 가새가 분담함으로써 기존 벽체의 전단 파괴 역시 방지할 수 있다는 점을 감안하면 국내 중층 종합병원에 대한 SCED 가새시스템의 내진보강효과는 충분한 것으로 사료된다. 다만 SCED 가새 설치로 인해 기존 기둥에 지나친 축력이 작용하지 않도록 SCED 가새 설계에 유의해야 한다. 또한 가새 설치 시 위치 선정

도 주의해야 한다. SCED 가새를 벽체와 나란히 설치하거나 가까이 설치하면 횡강성이 큰 SCED 가새에 의해 주변의 벽체 역시 큰 횡력이 가해질 수 있다. 따라서 보강하고자 하는 대상 건물의 기존 벽체를 고려하여 적절한 위치와 양을 결정해야 할 것으로 보인다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2016R1A2B4014186).

/ REFERENCES /

1. Korea Meteorological Administration, List of domestic earthquakes [Internet], [cited 2019 Feb 18]. Available from : http://www.weather.go.kr/weather/earthquake_volcano/domesticlist.jsp
2. KIPA, 2017 Winter KIPA News letter, The Korea Institute of Public Administration, Seoul, c2017.
3. Kim SD, Kim JK, Oh MH. Introduction and application of buckling-restrained brace. Review of Architecture and Building Science, 2005;49(8):124-126.
4. Black C, Makris N, Aiken I. Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained unbonded braces, Report No. PEER-2002/08: PEERC, University of California at Berkeley, California, c2002.
5. Christopoulos C, Tremblay R, Kim HJ, Lacerte M. Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures. Journal of Structural Engineering, 2008;134(1):96-107.
6. Tremblay R, Lacerte M, Christopoulos C. Seismic response of multistory buildings with self-centering energy dissipative steel braces. Journal of Structural Engineering, 2008;134(1):108-120.
7. Dong H, Du X, Han Q, Hao H, Bi K, Wang X. Performance of an innovative self-centering buckling restrained brace for mitigating seismic responses of bridge structures with double-column piers. Engineering Structures, 2017;148:47-62.
8. Kim JK, Choi HH. Inelastic seismic response of asymmetric-plan self-centering energy dissipative braced frames. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2008;12(4):35-44.
9. Kim TW, Chu YR, Kim SR. Seismic performance evaluation of a mid-rise general hospital. EESK J. Earthquake Eng. 2017 September; 21(5):245-254.
10. Kim TW, Kim SR, Chu YR, Bhandari D. Seismic performance evaluation of acceleration-sensitive medical and mechanical equipments in general hospitals. EESK J. Earthquake Eng. 2018 May; 22(4): 235-244.
11. CSI. Perform-3D, Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures, user guide version 6. Berkeley, CA: Computers and Structures Inc.
12. Erochko J. Improvements to the design and use of post-tensioned self-centering energy-dissipative (SCED) braces. Ph.D thesis.

- University of Toronto, c2013.
13. Le Bec A, Tremblay R, Erochko J, Christopoulos C. Modelisation du Comportement d'une Diagonale de Contreventement SCED avec le Logiciel d'Analyse Structurale SAP2000. (Rapport No. GRS SR10-02). Montreal: Ecole Polytechnique de Montreal, Departement des genies civil, geologique et des mines, (Publication No. 2010-05). Toronto: University of Toronto Department of Civil Engineering. c2010.
 14. EESK, Guidelines for seismic evaluation of existing buildings, c2018.
 15. Kim DH, Kim TW, Chu YR. Collapse probability of a low-rise piloti-type building considering domestic seismic hazard. EESK J Earthquake Eng. 2016 Dec;20(7):485-494.
 16. Pacific Earthquake Engineering Research(PEER) Center, Peer strong motion database [Internet]. Available from: <http://ngawest2.berkeley.edu>
 17. Korea Construction Standards Center (KCSC), KDS 41 30 00 : c2018.