

풍하중 및 지진에 의한 건물 진동 저감을 위한 점탄성 댐퍼의 특성

김 두 훈

1. 서 론

지진 및 풍하중의 외부하중에 의한 건물이나 토목구조물의 진동을 저감하기 위해 점탄성 댐퍼를 이용한 많은 연구가 진행되어 왔으며,^{1,2,3} 이는 건물의 진동변형에 따른 에너지를 소산능력이 뛰어난 점탄성 재료를 가세 형태로 건물에 설치함으로써 건물의 감쇠능력을 향상시켜 건물의 진동응답을 줄이는 방법이다. 점탄성 댐퍼에 사용되는 재료로는 전단변형에 의한 전단강성과 에너지 소산능력이 있는 실리콘 합성 재료 또는 자연 및 합성고무가 널리 이용되고 있다. 그러나 기존의 방진고무로 사용되는 천연고무 및 합성고무(Polynorborene; PNR) 등은 산업기계의 방진이나 흡진 효과를 위해 많이 쓰이나 에너지 소산능력이 있어서 한계가 있으며, 고층 건물의 진동응답을 줄이기 위해서는 에너지 소산능력이 뛰어난 재료의 개발이 요구된다. 국외에서는 진동에 대한 감쇠 효과가 탁월하고 장시간의 진동뿐만 아니라 순간적인 큰 변형에도 에너지 흡수능력이 뛰어난 물질의 개발이 이루어진 상태로 고층빌딩의 진동 저감을 위하여 점탄성 댐퍼를 적용하였으며, World Trade Center, Columbia Center, The Two Union Square 빌딩에는 1만개 이상이 설치되어 있다. 한편 국내에서는 점탄성 댐퍼로서 감쇠 효과가 높은 재료개발이 널리 이루어지지 않고 있으나, 현재 유니슨산업(주)에서 개발중인 아크릴 방진고무의 실험결과 기존 고무보다 감쇠

효과가 탁월한 것으로 결과가 나왔다.

본 고에서는 점탄성 댐퍼의 기본 개념 및 동특성에 대해 설명하고, 현재 개발중인 아크릴 방진고무의 특성 및 기존 방진고무와 아크릴 방진고무의 감쇠능력을 비교 평가하고자 한다. 끝으로 점탄성 댐퍼의 설치사례를 소개하였다.

2. 점탄성 댐퍼 개념 및 특성

풍하중으로 인한 미진동 또는 지진시 대변위에 의한 건물의 진동을 흡수하기 위해 사용되는 점탄성 재료는 전단 변형이 발생할 때 에너지를 소산하는 메카니즘을 갖고 있다. 일반적으로 점탄성 댐퍼는 스틸판과 점탄성 소재를 적층한 형태를 사용하며, 점탄성 댐퍼의 형상은 그림 1과 같다. 건물에 적용시 그림 2에서



김두훈

1978~ 서울대학교 공과대학, 기계
1982 설계, 학사
1982~ 한국과학기술원, 기계공학,
1984 석사
1984~ 대우 중공업(주) 선박설계부
1987 (대리)
1987~ 호주 MONASH University,
1991 기계공학, 박사
1992~ 호주 MONASH University,
1992 기계공학과(연구원)
1993~ (주) 대우기획조정실 (차장)
1994
1994~ 유니슨산업(주) 기술연구소
현재 (소장)

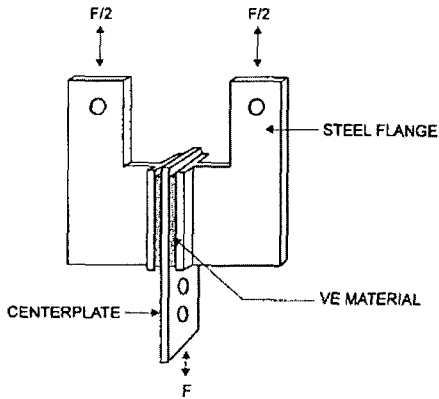


그림 1. 점탄성 댐퍼 형상

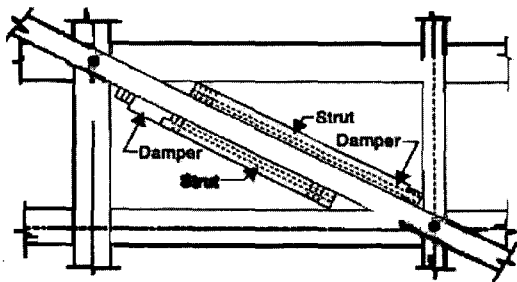


그림 2. 점탄성 댐퍼의 설치 형상

와 같이 건물에 가세 형태로 설치되고 구조물의 진동으로 인해 점탄성 댐퍼의 중앙판과 스틸 플랜지 사이의 상대 변위가 발생하여 전단 거동을 하게 되고 에너지를 소산하게 된다.

2-1 점탄성 댐퍼 기본 특성

2-1-1 저장계수 및 소산계수

외부 조화 하중에 의하여 점탄성 재료에서 발생하는 응력과 변형률간에는 그림 3에서와 같이 위상차가 발생하게 된다. 전단 변형률 $\gamma(t)$ 는 점탄성 재료의 한층 두께에 대한 길이 방향의 변위이며, 전단응력은 재료 한층에 작용하는 전단력을 면적으로 나눈 값이다. 점탄성 재료에 주기적으로 작용하는 동적 응력과 변형률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin \omega t, \quad \tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \dots \dots (1)$$

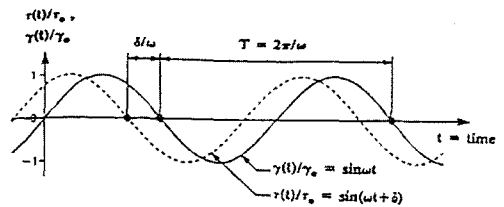


그림 3. 시간에 대한 응력 및 변형률의 관계

여기서 γ_0 는 최대 전단 변형률, τ_0 는 최대 전단 응력이며, ω 는 회전 각속도(rad/sec), δ 는 지연 각(rad)이다. 식 (1)로부터 $\tau(t)$ 는 다음 식과 같이 표현되며,

$$\tau(t) = \tau_0 (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \dots \dots (2)$$

여기서 G' 은 저장계수, G'' 은 소산계수로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$G' = (\tau_0/\gamma_0) \cos \delta, \quad G'' = (\tau_0/\gamma_0) \sin \delta \dots \dots (3)$$

한편, 식 (2)의 우측 첫째 항은 $G' \gamma(t)$ 이므로, 식 (2)는 $\cos \omega t = (\tau(t) - G' \gamma(t))/(G'' \gamma_0)$ 로 나타낼 수 있고, 삼각함수의 관계식으로부터 $\gamma(t) - \tau(t)$ 평면의 타원 방정식을 아래의 식 (4)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\tau(t) = G' \gamma(t) \pm G'' \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma(t)^2} \dots \dots (4)$$

그림 4에는 식 (4)의 타원 방정식으로부터 변형률 $\gamma(t)$ 와 응력 $\tau(t)$ 의 이력특성을 나타내었다. 점탄성 댐퍼의 이력(hysteresis)은 탄성 영역을 나타내는 직선 $\tau(t) = G' \gamma(t)$ 와 에너지 소산 영역을 나타내는 타원 $\tau(t) = \pm G'' \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma(t)^2}$ 의 조합으로 표현되며, 저장계수 G' 과 소산계수 G'' 은 각각 점탄성 댐퍼의 강성과 에너지 소산능력을 나타낸다.

2-1-2 손실계수

점탄성 댐퍼의 댐핑은 일반적으로 1사이클의 이력동안 소산된 에너지를 최대 변위에서의 저

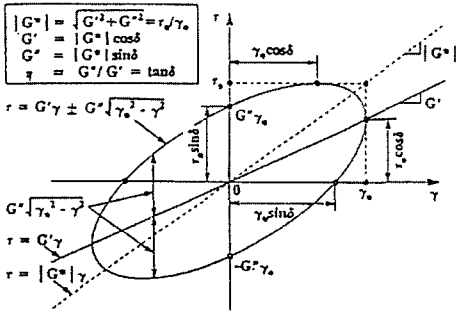


그림 4. 변형을 대 응력 : 이력 특성 곡선

장변형에너지의 4π 배로 나눈 등가 점성 댐핑 비로 표현된다. 그림 4로부터 1사이클 동안 소산된 에너지는 타원의 면적인 $\pi G'' \gamma_0^2$ 이며, 최대 변위에서의 저장변형에너지는 $4\pi(G' \gamma_0^2/2)$ 임을 알 수 있다. 따라서 등가 댐핑 비(ζ)는 $G''/(2G')$ 이며, 손실계수(η) 또는 $\tan \delta$ 는 저장계수에 대한 소산계수의 비로 주어지고, 식 (5)와 같이 표현 된다.

$$\eta = \frac{G''}{G'} = \tan \delta = 2\zeta \dots \dots \dots (5)$$

또한, 손실계수는 그림 3에서 보듯이 지연 각 δ 와 직접적인 연관이 있음을 알 수 있다.

2-1-3 주파수 및 온도특성

일반적으로 점탄성 댐퍼는 외부 가진 주파수의 영향뿐만 아니라 하중 작용시 에너지 소산으로 인한 재료 내부 온도가 변하므로 온도에 대한 영향도 크게 받는다. 그림 5, 6에는 점탄성 댐퍼의 저장계수 및 손실계수의 온도와 주파수에 대한 영향을 나타내었다. 저장계수는 가진 주파수가 증가함에 따라 증가하며, 온도가 증가할수록 작아지는 경향을 알 수 있다. 한편 재료의 댐핑 성능인 손실계수는 저장계수와 같은 경향을 보이거나 주파수 및 온도에 대한 영향이 저장계수보다 비교적 적음을 알 수 있다.

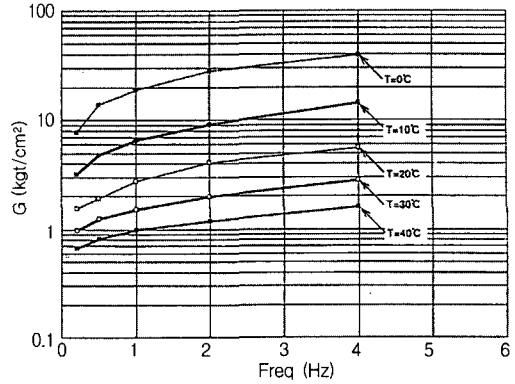


그림 5. 온도 및 주파수에 따른 저장계수

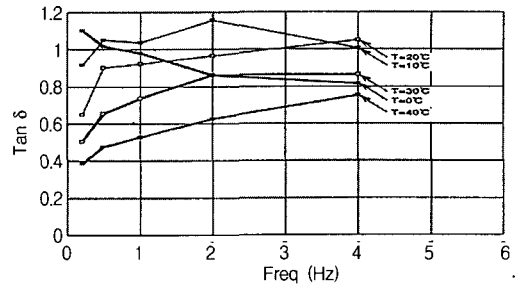


그림 6. 온도 및 주파수에 따른 손실계수

3. 점탄성 소재 (Viscoelastic Material)

아크릴계 고무는 변형에 대한 열 흡수력이 좋으며 진동에 대한 감쇠 효과가 탁월하여 장시간의 진동뿐만 아니라 순간적인 큰 변형에도 에너지 흡수능력이 뛰어난 물질로 화학적으로는 아크릴 고무 (Acrylic Rubber) 계통으로 고분자의 유리전이온도(Glass Transition Temperature ; T_g)가 아주 낮아 진동시 소산에너지가 커서 점탄성 댐퍼 원료고무로 적합하며, PNR, NR, CR 보다도 내노화성이 우수한 것이 특징이다. 현재 개발 중인 소재는 외국에서 개발된 점탄성 재료(VEM)와 유사한 목표 손실계수 0.8 이상의 소재를 개발 목표로 삼고 있다. 우선 소재의 특성을 파악하기 위해 레오메터를 이용하여 분석하였다. 그림7은 점탄성 재료(VEM)의 댐핑 성능을 분석한 결과로 손실계수가 $\eta=0.8\sim 1.3$ 범위로 에너지 소산능력이 우수함을 알 수 있다.

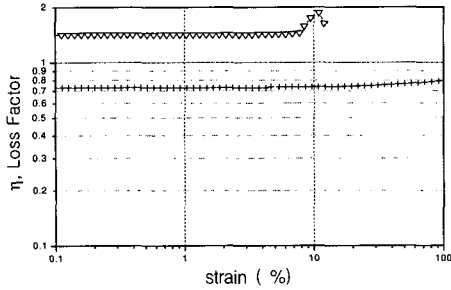


그림 7. 점탄성 재료(VEM)의 손실계수

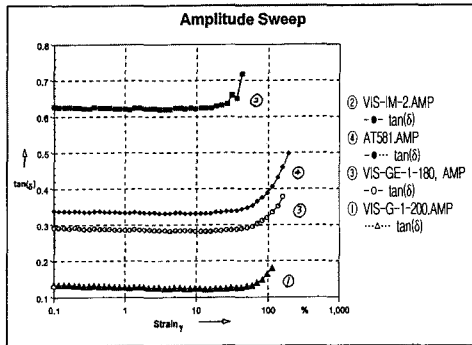


그림 8. 아크릴계 고무의 손실계수

또한 현재 개발 진행 중인 여러 가지 아크릴 방진고무의 특성을 그림 8에 나타내었는데 가장 성능이 우수한 경우 손실계수가 약 0.6 정도의 성능을 가졌다.

4. 점탄성 댐퍼의 동적 특성

4-1 동특성 실험

개발 중인 점탄성 신소재의 성능을 파악하고자 실험용 댐퍼를 제작하여 성능 실험을 수행하였다. 점탄성 재료로는 1차 연구 개발 소재인 아크릴계 방진 고무를 사용하였다. 또한 점탄성 재료의 면적은 $290 \times 180\text{mm}$ ($A=522\text{cm}^2$)이며, 재료의 한층 두께는 5mm로 스틸판과 점탄성 소재를 2개 층으로 제작한 적층 형태이다. 시편의 댐핑 성능 시험은 유니슨산업(주) 기술연구소의 구조 실험동에 설치되어 있는 50 Tonf 용량의 Dynamic Fatigue 시험기로 최대 변위



그림 9. 점탄성 댐퍼 실험

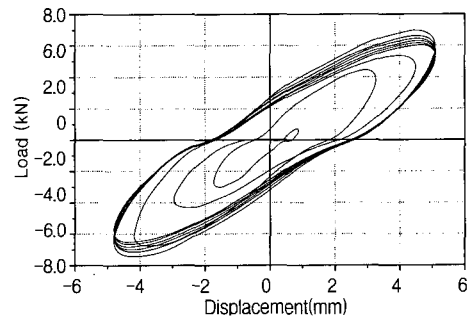


그림 10. 100% 변형율에서의 이력특성(1 Hz)

$\pm 200\text{mm}$, 최대속도 150mm/sec의 성능을 발휘한다. 실험은 점탄성 댐퍼를 50 Tonf 액츄에이터에 수직으로 설치하고(그림 9), 가진 주파수 0.5, 1, 2 Hz에 대하여 변위 조절 방식을 이용하였다. 그림 10에는 1 Hz로 가진시 100%(5mm) 변위량에서 힘과 변위의 이력 특성곡선을 나타내었다.

4-2 가진 주파수에 대한 동특성

점탄성 댐퍼의 강성과 댐핑 특성인 저장계수 G' 과 손실계수 η 는 가진 주파수에 영향을 받는다. 그림 11에는 변위량과 주파수에 따른 저장계수 및 손실계수의 특성을 나타내었다. 실험 결과 점탄성 댐퍼의 저장계수와 손실계수는 가진 주파수가 증가함에 따라 증가하고, 변위가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

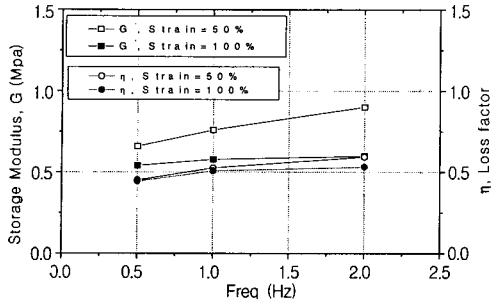


그림 11. 변형을 및 주파수에 따른 강성과 손실 계수

4-3 기존 방진고무와의 비교

아크릴 방진고무와 기존 방진고무인 천연고무 및 PNR 재료의 감쇠 특성을 비교하기 위해 개발 이전 단계에서 기존 방진고무(PNR)로 제작한 점탄성 댐퍼의 특성을 사용하였고, 재료 면적은 $450 \times 150 \text{mm}$ ($A = 675 \text{cm}^2$)으로, 고무 한 층의 두께는 6mm이다. 그림 12는 아크릴 방진고무와 기존 방진고무의 손실계수를 비교한 것으로 아크릴 방진고무의 손실계수가 약 2배 정도 우수한 것을 알 수 있었고, 그림 13에는 재료별 이력 특성을 나타내었는데 기존 방진고무를 사용한 댐퍼의 경우 아크릴 방진고무보다 면적이 약 30% 크고, 변위도 약 17% 큼에도 불구하고 에너지 소산 능력인 이력 곡선의 면적이 아크릴 방진고무를 사용한 댐퍼의 경우보다 작음을 알 수 있어 개발중인 아크릴 방진고무의 감쇠효과가 기존의 고무보다 탁월한 것을 알 수 있었다.

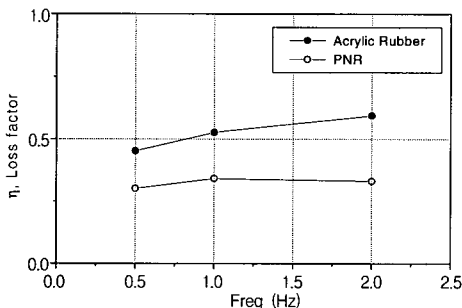


그림 12. PNR 고무와 아크릴계 고무의 손실계수

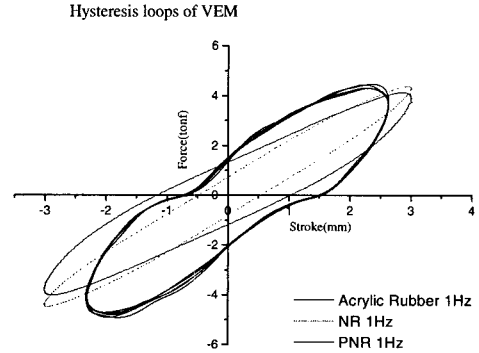
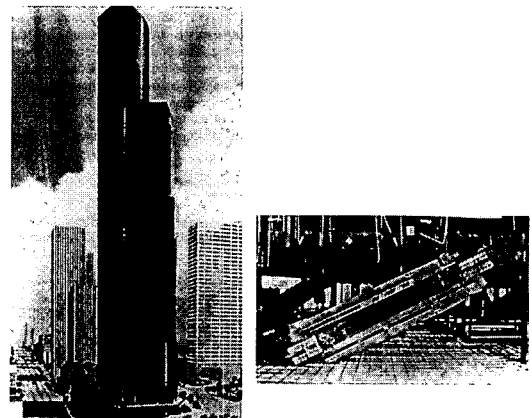


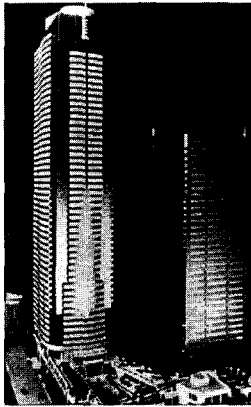
그림 13. PNR과 아크릴계 고무의 이력 특성

5. 점탄성 댐퍼의 적용사례

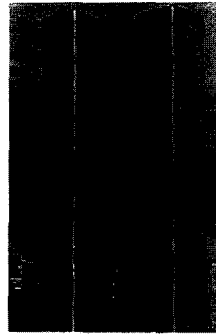
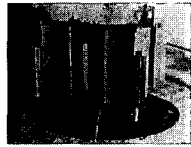
점탄성 댐퍼의 적용사례로는 1969년에 뉴욕시에 위치한 The World Trade Center Towers에 층 바닥을 지지하는 트러스의 연결부에 적용되었으며, 10층에서 110층의 층 바닥에 10,000개의 댐퍼가 설치되었다. 1982년에는 시애틀의 The Columbia SeaFirst 빌딩에는 260개의 댐퍼가 주가세 부재(main diagonal braces)에 평행하게 설치되어 있다. 또한 1988년에 시애틀에 위치한 The Two Union Square 빌딩의 1층의 4개 주 기둥에 적용되었다(그림 14). 표 1에는 지진 또는 풍하중으로 인한 빌딩의 진동 저감을 위해 점탄성 댐퍼를 설치한 사례를 소개하였다.⁴



(a) The Columbia SeaFirst 빌딩



(b) The Two Union Square 빌딩



(c) The World Trade Center, NY

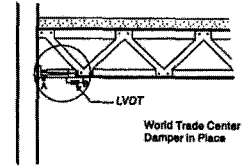


그림 14. 점탄성 댐퍼 적용 사례

표 1. 점탄성 댐퍼 적용 사례

Name and Type of Structure	Location	Type and Number of Dampers	Date of Installation	Load	Additional Information
World Trade Center Tubular steel frame, twin towers 110 stories	NY/ New York City	Viscoelastic Dampers Total : approx. 20,000 Evenly distributed from 10th-110th floor	1969	Wind	Damping ratio with dampers : 2.5-3%
Columbia SeaFirst Bldg. Composite concrete columns with steel frame 76 stories	WA/Seattle	Viscoelastic Dampers Total : 260	1982	Wind	New construction
Two Union Square Bldg. Steel frame 60 stories	WA/Seattle	Viscoelastic Dampers Total : 16	1988	Wind	New construction
School Bldg. 2 stories	AZ/Phoenix	Viscoelastic Beam/ Column Connections	1992	Seismic	New construction
Santa Clara County Bldg. Steel frame 13 stories 51m×51m plan Constructed in 1976	CA/San Jose	Viscoelastic Dampers Total : 96	1993	Seismic	Retrofit Damping ratio in fundamental mode Original: less than 1% Upgrade: approx. 17%
Navy Office/Supply Bldg. Nonductile concrete 3 stories 121ft×365ft plan	CA/ San Diego	Viscoelastic Dampers Total : 64	1996	Seismic	Upgrade
Hall of justice and Records 8-story steel frame Constructed in mid-1960's	CA/ Redwood City	Viscoelastic Dampers Total : 44	1996	Seismic	Upgrade
Los Angeles Police Dept. Recruit Training Center 4-story steel frame	CA/ Los Angels	Viscoelastic Dampers	1997	Seismic	Upgrade
3M Mexico Steel/Concrete Frame 8 stories	Mexico City, Mexico	Viscoelastic Dampers Total : 21	1998	Seismic	New construction

6. 결 론

건물의 진동 저감을 위한 점탄성 댐퍼의 적용 사례 및 기본 특성을 살펴봤으며, 점탄성 댐퍼는 진동에 대한 감쇠 효과가 탁월하고 에너지 흡수능력이 뛰어나다는 것을 알 수 있었다.

현재 점탄성 댐퍼용 소재로 개발 중인 아크릴계 방진고무는 기존의 방진고무로 사용되는 천연고무 또는 PNR보다 손실계수가 약 2배 커 에너지 소산 능력이 우수함을 성능 실험을 통해 알 수 있었다. 점탄성 댐퍼의 동특성인 강성과 손실계수는 가진 주파수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였고, 강성은 변위가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으며 손실계수는 변위에 상관없이 대체적으로 일정한 경향을 나타내었다. 추후 소재의 성능 향상을 위한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. K.C. Chang, M.L. Lai, T.T. Soong, D.S. Hao and Y.C. Yeh, "Seismic Behavior and Design Guidelines for Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers", Technical Report NCEER-93-0009, 1993.
2. R.F. Lobo, J.M. Bracci, K.L. Shen, A.M. Reinhorn and T.T. Soong, "Inelastic Response of Reinforced Concrete Structures with Viscoelastic Braces", Technical Report NCEER-93-0006, 1993.
3. R. H. Zhang and T.T. Soong, "Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications", *Journal of Structural Engineering*, **118**, 1375 (1992).
4. Michael C. Constantinou, Tsu T. Soong and Gary F. Dargush, "Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit", MCEER, Appendix A, pp. 252-253.