면진시스템용 U형 강재댐퍼의 형상 개발에 대한 해석적 연구

An Analytical Study on the Shape Development of U-shaped Steel Damper for Seismic Isolation System

권 순 일[1] · 오 상 훈[2]† · 이 상 호[3]
Quan, Chun Ri *Oh, Sang Hoon* *Lee, Sang Ho*

요 약 : 면진기술은 건축물의 구조적 피해를 줄이고 진동에 민감한 구조물의 내진성능을 향상시키는 가장 효과적인 방법 중의 하나이다. 하지만 면진구조시스템에서 지진에너지를 흡수하는 댐퍼의 재료로서 자주 사용되었던 납의 환경오염문제가 대두되면서, 최근에는 친환경 재료인 강재를 사용하는 경우가 증가하고 있다. 본 연구에서는 면진시스템용 에너지흡수장치인 U형 강재댐퍼를 대상으로 비선형 유한요소해석을 수행하고 SS400 강재와 고인성강재를 사용한 댐퍼의 해석결과를 비교하여 사용강재의 재료적 특성의 차이가 댐퍼의 변형능력에 미치는 영향을 분석하며, 고인성강재를 사용한 댐퍼의 형상비, 두께, 폭에 따른 변형능력을 파악한다. 또한 고인성강재를 사용한 U형 강재댐퍼의 응력분포를 분석하여 응력분포에서 나타내는 문제점을 개선하기 위한 대책으로 댐퍼의 일부 구간에 개구부를 둔 새로운 형상을 제시하고 형상에 따른 변형능력, 내력특성 및 응력분포를 고려하여 최적형상과 설계식을 제안하고자 한다.

ABSTRACT : Seismic isolation is one of the most widely implemented and accepted seismic protection systems to limit or avoid damages from unforeseeable earthquakes. As an energy absorption device, however, the supplemental lead itself tends to pollute the environment. Consequently, it is predicted that the use of lead would be controlled. Considering the pollution caused by lead, several researchers are interested in the viability of using steel in place of lead. In this study, first, based on the results of a non-linear finite element analysis, the excellent deformation capacity of a very tough steel damper was demonstrated by comparing it with that of the SS400 damper and determining the effects of main parameters (the aspect ratio, thickness, and width) on the deformation capacity. Second, an optimum shape and design equation for a U-shaped damper with an opening based on stress distribution was suggested.

핵 심 용 어 : 면진시스템, 고인성강재, U형 강재댐퍼, 변형능력, 응력분포
KEYWORDS : seismic isolation system, high toughness steel, U-shaped steel damper, deformation capacity, stress distribution

1. 서 론

유라시아 판 내부에 위치하여 있는 우리나라는 지진의 직접적인 영향권에 있지 않아 지금까지 지진의 안전지대로 인식되어 왔다. 하지만 기상청에서 기록한 지진자료1)에 의하면 1978년부터 2007년까지 규모 4.0이상의 지진이 31회 발생하였고 지진발생의 총횟수는 80년대말부터 뚜렷하게 증가하는 추세를 보여왔으며, 역사지진 및 계기지진에 관한 연구결과2)에 따르면 우리나라에서도 인명피해와 재산손실을 가져다 줄 수 있는 지진이 발생할 가능성이 있다. 또한 최근에 발생한 중국의 쓰촨성지진은 전형적인 판내부 지진으로서 우리나라에서도 합리적인 지진대책의 필요성이 대두되고 있다.

지진에 의한 건축물의 피해를 줄이기 위하여 초기에는 일반적으로 부재의 강도를 증가시켰으나, 이와 같은 내진설계방법은 초기 건설비용이 상대적으로 많이 들고 규모가 큰 지진이 발생할 경우에는 건축물의 붕괴가 발생할 수 있다. 따라서 건축물이 규모가 작은 지진에 대해서는 탄성거동을, 규모가 큰 지진에 대해서는 연성거동을 통하여 지진에너지를 소산시키는 새로운 내진설계방법이 제기되었다. 이러한 방법으로 설계된 건축물은 보다 경제적으로 붕괴를 방지할 수 있었으나, 지진이 발생한 후에는 소성파괴가 발생한 부분에 대하여 보수가 용이

1) 동경대학교 공학계 연구과 건축학부, 박사과정(quancr@iis.u-tokyo.ac.jp)
2) 교신저자. 부산대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
(Tel. 051-510-1009, Fax. 051-514-2230, E-mail: osh@pusan.ac.kr)
3) 부산대학교 건축공학과 교수, 공학박사(sangho@pusan.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

하지 않다. 또한 내진구조에서는 지진이 발생하였을 때 건축물이 보유하고 있는 기능의 정지도 허용되었으나, 1995년 일본의 고베지진에서는 구조물이 붕괴되지 않는 것은 물론 지진 후에도 기능을 충분히 유지하는 것이 재난방지에 있어서 매우 중요하다는 것이 판명되었다. 따라서 구조적 피해를 줄이고 중요한 구조물에 대한 내진성능 향상이 요구되는 경우에 면진기술의 적용3)~6)이 매우 합리적인 대안으로 제시되고 있다.

면진구조에서는 일반적으로 면진층에서 지진에너지를 집중적으로 흡수할 수 있는 댐퍼를 설치함으로써 상부구조의 응답층간변위는 현저히 줄이고 각 층의 응답들은 거의 비슷한 값을 나타내게 된다. 면진구조에서는 주로 납댐퍼가 사용되었으나, 납은 환경오염 문제를 야기시킬 수 있어 최근에는 친환경 재료인 강재를 사용하는 경우가 증가하고 있다. 강재가 납에 비하여 변형능력이 떨어지는 것을 고려하여 루프(Loop)형으로 제작하여 변형능력을 향상시켰지만 제작과정이 복잡하고 설계식을 제안하기가 어렵다. 이 약점을 극복하기 위하여 일본에서는 구조용 강재를 사용하여 제작과정 및 설계식이 간단하고 변형능력도 우수한 U형 강재댐퍼7)~10)를 개발하여 그림 1과 같은 형태로 면진구조시스템의 면진층에 사용하고 있다. 그림 1에서와 같이 강재댐퍼는 주로 연직하중을 부담하는 적층고무와 함께 설치되며, 댐퍼는 수평력만을 부담하고 있다. 그림 1의 사진에서와 같이 U형 강재댐퍼만이 설치되는 경우가 있으나, 이 경우에도 U형 강재댐퍼는 수평력에만 역할을 하도록 설계되고 있다. 일본에서는 면진용 U형 강재댐퍼의 변형능력을 향상시키기 위하여 SS400 강재 대신에 SN490B 강재를 사용하고 있으나, 면진층에서의 대변형 발생에 대응하기 위해서는 변형능력에 한계가 있다. 따라서, 면진용 강재댐퍼의 구조 안전성 및 변형능력 확보를 위해 감쇠율과 연신율을 모두 향상시킨 고인성강재(High Toughness Steel, 이하: HTS)를 개발하여11), 본 연구의 강재댐퍼의 소재로 적용하였다.

본 연구에서는 SS400 강재와 HTS를 사용한 면진용 U형 강재댐퍼를 대상으로 비선형 유한요소해석을 수행하여 변형능력, 응력분포 등을 비교·분석함으로써 U형 강재댐퍼의 형상을 개발하는 동시에 설계식을 제안하고자 한다.

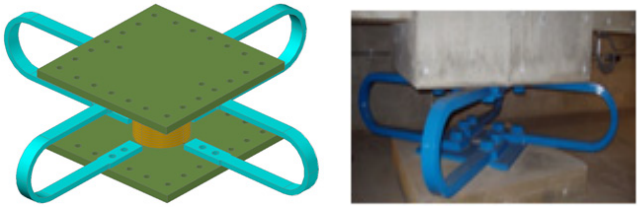


그림 1. U형 강재댐퍼의 설치예

2. 재료 및 하중방향에 따른 댐퍼의 변형능력

2.1 해석 개요

본 연구에서는 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS 9.011)을 사용하였고, 모델링 과정에는 3축 방향의 균열을 표현할 수 있어 철골 부재의 휨변형과 전단변형 효과를 동시에 고려할 수 있는 SOLID45 요소(그림 2)를 적용하여 실제 크기로 모델링을 실현하였다.

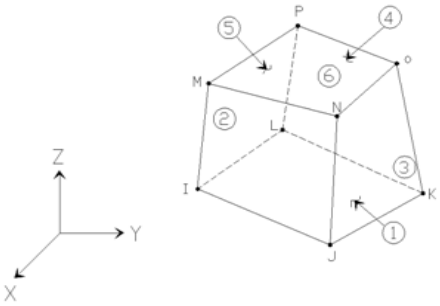
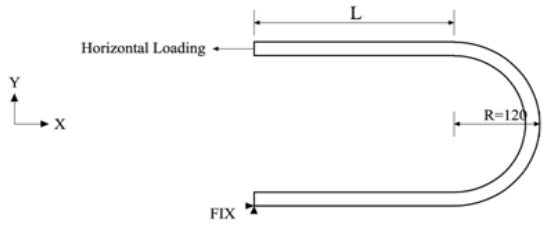


그림 2. 모델링에 사용된 SOLID45 요소

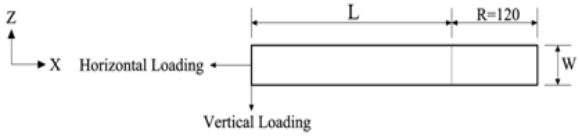
구조물의 기하비선형에서는 대변형 기준을 적용하고 재료의 비선형을 고려하기 위하여 소성관련 옵션에서 등방성 가공경화(Isotropic Hardening)법칙을 포함한 MISO(Multilinear Isotropic Hardening)를 사용하였으며, 재료의 항복조건으로는 von Mises의 항복조건12)~14)을 사용하였다.

실제 하중조건과의 동일성과 수렴성을 향상시키기 위하여 그림 3과 같이 댐퍼의 단부 평면에 위치한 노드(Node)를 커플링(Coupling)하고 마스터노드(Master Node)를 통한 변위제어 방식으로 한쪽 단부에서 평판부의 길이방향 또는 수직방향에 따라 하중을 작용시켰으며, 다른 한 단부의 경계조건을 고정(Fix)으로 두었다. 또한 U형 강재댐퍼의 제작과정에서 곡선부(Curve)에 생기는 소성변형이 자체의 강성과 변형능력에 미치는 영향을 고려하여 입력되는 재료의 물성치를 결정하였다.

해석변수로는 댐퍼의 평판부 길이(L)와 곡선부분 반지름(R)의 비 L/R(또는 형상비), 두께(T), 폭(W)이며, 면진장치에서 적층고무의 두께를 고려하여 곡선부 반지름(R)의 값은 120mm로 고정하였다. 또한 불확정적이고 불규칙적인 지진하중의 특성을 고려하여 두가지 종류의 하중작용방향에 따라 각각 해석을 수행하였다.



(a) 입면도 (단위: mm)



(b) 평면도 (단위: mm)

그림 3. 경계조건 및 하중의 작용방향

2.2 재료의 물성치

해석에 입력되는 재료의 물성치를 확정하기 위하여 각 재료마다 인장시험편 3개씩 제작하여 소재인장시험을 실시하고, 시험결과의 평균을 각각 표 1과 그림 4에 나타내었다. 인장시험은 KS B 080115)의 제4호 시험편(환봉시험편)을 기준으로 하였고 HTS의 연신율이 가력속도에 민감하게 반응하는 것을 고려하여 가력속도는 0.05mm/sec를 유지하였으며, HTS의 항복응력은 0.2% offset method로 결정하였다.

표 1. 재료의 역학적 특성의 비교

시험편	탄성계수 (MPa)	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	항복비 (%)	연신율 (%)
SS400	195,000	282	481	58.6	26.8
HTS	190,000	264	775	34.1	72.9

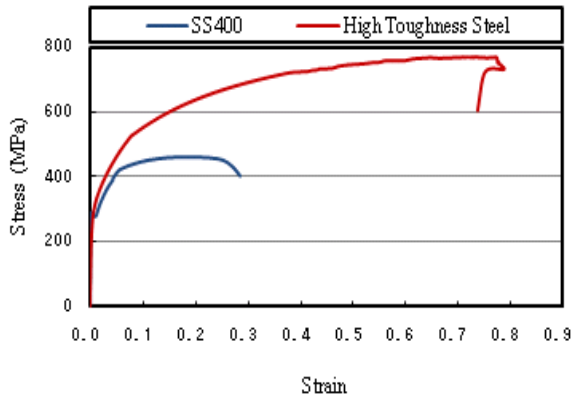


그림 4. 재료의 응력-변형률 관계

표 1에서 나타낸 것과 같이 HTS의 탄성계수와 항복강도는 SS400 강재에 비하여 약간 저하되지만 인장강도와 연신율은 훨씬 크게 나타났다. 또한 HTS의 항복비가 SS400 강재에 비하여 매우 낮은 값을 나타내었다. 그림 4에서와 같이 SS400 강재는 항복점이 매우 뚜렷하지만 HTS는 명확한 항복점이 관찰되지 않았는데 이는 대부분의 고인성강재가 가지고 있는 특징이기도 하다.

해석에서의 등방성 가공경화 법칙과 U형 강재댐퍼의 제작과정에서 곡선부(Curve)에 생기는 소성변형이 자체의 강성과 변형능력에 미치는 영향을 고려하고 위의 시험결과에 기초하여 해석에 입력되는 재료의 물성치는 표 2에 나타낸 것과 같이 응력-변형률 곡선을 파단 시까지 9개 구간으로 단순화하여 사용하였다.

2.3 댐퍼의 하중-변위 관계

표 2. 해석에 입력되는 재료의 물성치

구간	HTS		SS400	
	변형률	응력 (MPa)	변형률	응력 (MPa)
1	0	0	0	0
2	0.000079	150	0.000077	150
3	0.002774	527	0.002256	440
4	0.017552	544	0.031676	452
5	0.032202	560	0.059725	458
6	0.074842	600	0.064671	462
7	0.145482	650	0.071738	468
8	0.249412	700	0.079623	475
9	0.457522	750	0.085106	479
10	0.658862	775	0.110500	481
탄성계수 (MPa)	190,000		195,000	
프와송 비	0.3		0.3	

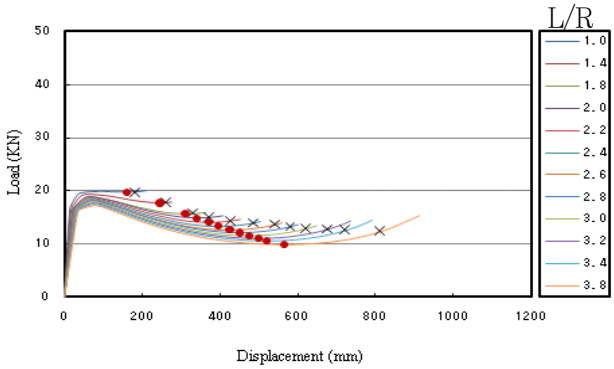
댐퍼의 형상비가 자체의 변형능력에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 먼저 댐퍼의 두께를 20mm, 폭을 50mm로 고정하고 형상비를 변수로 두어 앞에서 서술한 방법으로 비선형 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 5와 그림 6에 나타낸다.

재료의 경화가 발생하면 지진과 같이 반복적이고 불규칙하게 작용하는 하중에 의하여 댐퍼는 변형능력이 급격히 저하되면서 파단이 발생할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 댐퍼의 설계에 필요한 변형량을 한계변형량(δ_{lim})이라고 정의하고 댐퍼의 변형능력을 평가하는 기준은 다음과 같이 2가지로 분류한다.

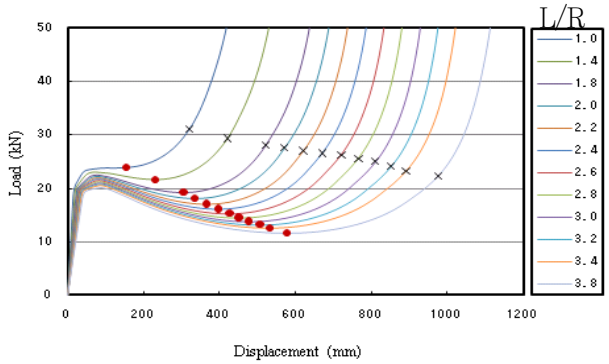
① 댐퍼에서의 최대응력이 재료의 인장시험에서 얻어진 최대응력의 85%에 도달하는 점 〔그림에서 ×로 표시〕

② 댐퍼의 하중-변위 곡선에서 재료가 항복된 이후에 나타나는 내력저하의 최대점(변곡점) 〔그림에서 ●로 표시〕

그림 5(a)와 그림 6(a)에 나타낸 것과 같이 SS400 강재를 사용한 댐퍼는 하중의 작용방향에 관계없이 ①경우와 ②경우의 한계변형량은 큰 차이가 없었다. 그림 5(b)와 그림 6(b)나타낸 것과 같이 HTS를 사용한 댐퍼일 경우에는 수직방향 하중에서는 ①경우와 ②경우의 한계변형량이 큰 차이는 없지만, 길이방향 하중에서는 비교적 큰 차이를 나타내었다. 지진과 같이 불규칙적인 하중이 작용할 때 ①경우는 이미 변형경화가 상당히 진행되었기 때문에 ②경우를 댐퍼의 설계에 적합한 한계변형량(δ_{lim})으로 보는 것이 타당할 것으로 판단되어진다. 또한 지진동의 방향을 미리 예측하기가 어려우므로, 본 연구에서는 ②경우의 한계변형량으로 댐퍼의 변형능력을 평가하되 길이방향 하중이 작용할 경우의 한계변형량과 수직방향 하중이 작용할 경우의 한계변형량 중에서 작은 값을 기준으로 한다.

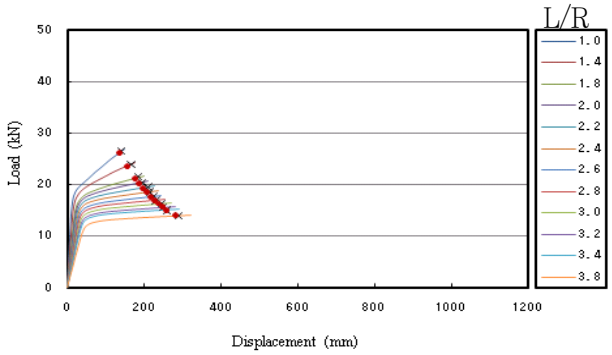


(a) SS400 강재를 사용한 경우

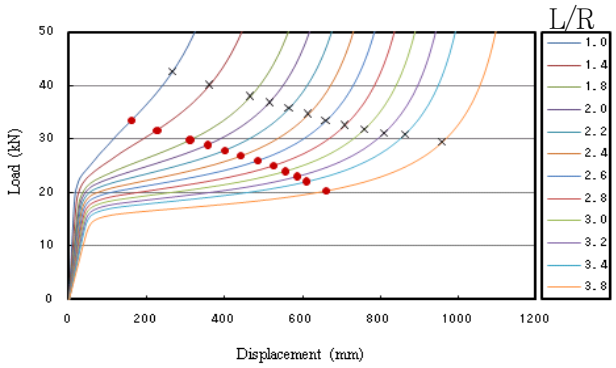


(b) HTS를 사용한 경우

그림 5. 길이방향 하중이 작용할 경우의 하중-변위 관계



(a) SS400 강재를 사용한 경우



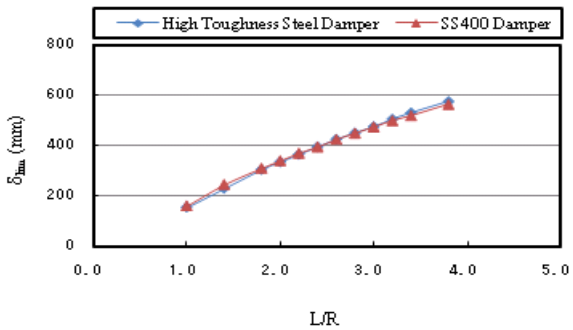
(b) HTS를 사용한 경우

그림 6. 수직방향 하중이 작용할 경우의 하중-변위 관계

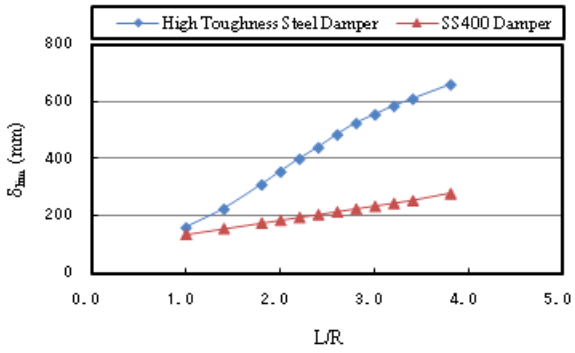
그림 5에 나타낸 것과 같이 댐퍼 평판부의 길이방향에 따라 하중이 작용할 경우, HTS를 사용한 댐퍼의 소성변형 구간은 비교적 길며 일정한 변형경화 구간을 걸친 후에 파단이 발생하지만, SS400 강재를 사용한 댐퍼는 변곡점 이후 짧은 구간에서 파단이 발생되었다. 또한 그림 6에서 나타낸 것과 같이 댐퍼가 평판부의 길이방향에 수직되는 하중을 받는 경우에도 HTS를 사용한 댐퍼의 소성변형 구간이 SS400 강재를 사용한 댐퍼보다 길지만 평판부의 길이방향에 따라 하중이 작용할 경우와는 달리 선명한 내력저하는 없었다.

2.4 사용재료에 따른 댐퍼의 변형능력

그림 5와 그림 6에서 결정된 형상비(L/R)에 따른 한계변형량(δ_{lim})을 그림 7에 나타내어 재료의 역학적 특성이 댐퍼의 변형능력에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 그림 7에서 나타낸 것과 같이 길이방향 하중일 경우 HTS를 사용한 댐퍼의 한계변형량은 SS400 강재를 사용한 댐퍼와 비슷하게 나타났지만, 수직방향 하중일 경우에는 HTS를 사용한 댐퍼의 한계변형량이 SS400에 비하여 약 20~130% 정도 크게 나타났으며, 형상비가 커짐에 따라 그 차이는 더욱 커졌다. 이는 재료의 연신율이 댐퍼의 변형능력에 직접적인 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

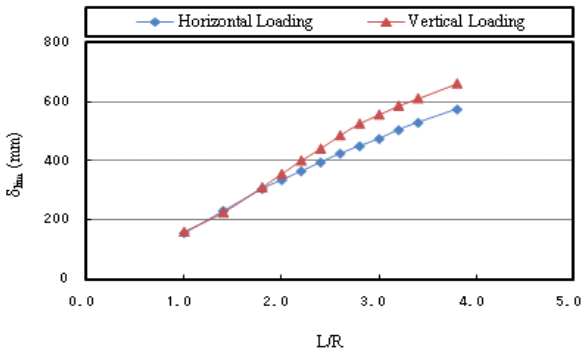


(a) 길이방향 하중일 경우



(b) 수직방향 하중일 경우

그림 7. 사용재료에 따른 한계변형량



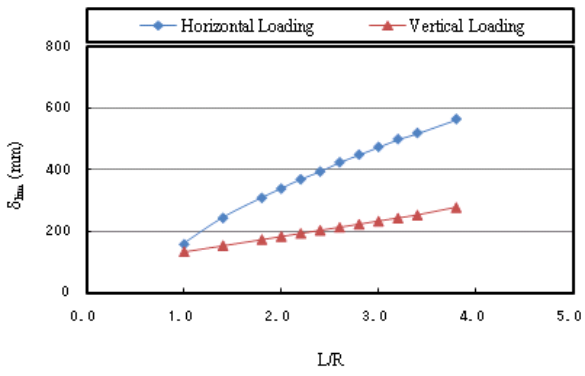
(b) HTS를 사용한 경우

그림 8. 하중의 작용방향에 따른 한계변형량

2.5 하중의 작용방향에 따른 댐퍼의 변형능력

서로 다른 하중조건에서 댐퍼의 변형능력을 비교하기 위하여 형상비에 따른 한계변형량을 하중의 작용방향에 따라 사용재료별로 그림 8에 나타낸다. 그림과 같이 HTS를 사용한 댐퍼는 하중의 작용방향에 관계없이 거의 비슷한 변형능력을 나타내지만 SS400 강재를 사용한 댐퍼는 길이방향 하중일 경우에 수직방향 하중을 받는 경우보다 우수한 변형능력을 나타냈으며 형상비가 커짐에 따라 그 차이도 더욱 커졌다. 이는 길이방향 하중일 경우에는 응력이 주로 단순인장과 휨모멘트에 의하여 발생하는 것과 달리 수직방향 하중일 경우에는 비틀림의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다.

앞에서 설명했듯이 강재댐퍼를 설계할 때 작용방향이 서로 다른 하중의 한계변형량 가운데서 작은 값을 기준으로 하기 때문에 SS400 강재를 사용한 댐퍼는 수직방향 하중일 경우의 한계변형량을 기준으로 하여야 하고 HTS를 사용한 댐퍼는 길이방향 하중일 경우의 한계변형량을 기준으로 하여야 한다. 이 때, HTS를 사용한 댐퍼의 한계변형량은 SS400 강재를 사용한 댐퍼의 한계변형량에 비하여 15~105% 크고, 그 차이는 형상비가 커짐에 따라 증가할 것으로 판단된다.

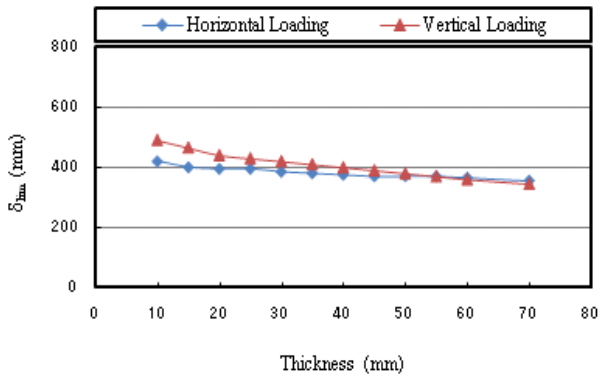


(a) SS400 강재를 사용한 경우

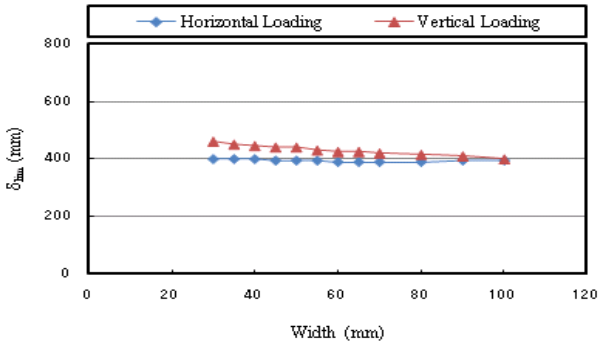
2.6 변수에 따른 댐퍼의 변형능력

HTS를 사용한 댐퍼의 형상을 제안하기 위하여서는 각 변수에 따른 댐퍼의 변형능력을 파악하여야 한다. 앞에서 이미 두께와 폭이 정해졌을 경우, 형상비에 따른 댐퍼의 변형능력을 파악하였다. 여기서는 형상비는 2.4, 폭은 50mm로 고정하였을 경우의 두께에 따른 댐퍼의 변형능력과 형상비는 2.4, 두께는 20mm로 고정하였을 경우의 폭에 따른 댐퍼의 변형능력을 파악하고자 한다. 따라서 앞에서와 같은 방법으로 비선형 유한요소해석을 수행하고 변곡점을 기준으로 한 한계변형량 (δ_{lim})의 값을 그림 9에 나타낸다.

그림에서 나타낸 것과 같이 형상비에 따른 한계변형량의 변화경향과는 반대로 두께 또는 폭이 커질수록 한계변형량은 오히려 작아지며 그 차이는 점차 감소하다가 나중에는 거의 같은 값을 가진다. 하지만 형상비를 변수로 할 경우와 마찬가지로 한계변형량은 하중의 작용방향에 관계없이 거의 비슷하게 나타났으며, 강재댐퍼를 설계할 때 작용방향이 서로 다른 하중의 한계변형량 가운데서 작은 값을 기준으로 하는 원칙에 근거하여 역시 길이방향 하중일 경우의 한계변형량을 기준으로 두께와 폭을 결정하여야 한다.



(a) 두께에 따른 한계변형량



(b) 폭에 따른 한계변형량

그림 9. 두께 및 폭에 따른 한계변형량

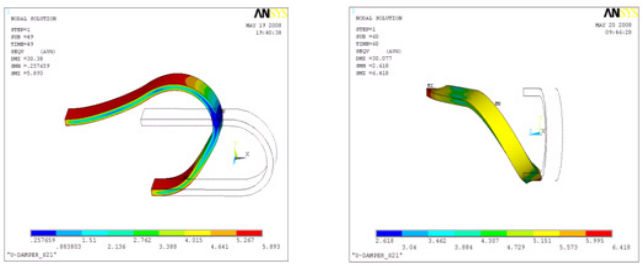
3. 고인성강재 댐퍼의 형상 및 설계식의 제안

3.1 개요

기존의 U형 강재댐퍼가 응력분포에서 나타내는 문제점을 파악하기 위해서는 형상비, 두께, 폭의 특정된 값을 설정하여야 한다. 본 연구에서는 댐퍼의 초기강성, 항복강도, 내력, 제작시의 굽힘가공과 열처리과정 및 면진설계에서 요구되는 한계변형량을 종합적으로 고려하여 형상비(L/R)는 2.4, 두께는 20mm, 폭은 50mm인 경우를 선택하여 앞에서와 같은 방법으로 비선형 유한요소해석을 수행하고 응력분포를 분석하여 개구부를 둔 새로운 형상을 제안하고, 각 형상별 변형능력과 응력분포를 비교하여 최적의 형상을 제시하고자 한다. 또한 최적의 형상에 대한 설계식과 설계도표를 도출하고자 한다.

3.2 응력분포에 따른 고인성강재 댐퍼 형상의 제안

기존의 U형 댐퍼는 형상의 특성상 평판부와 곡선부에서의 응력의 크기에 큰 차이가 있을 가능성이 크다. 하지만 그림 10에서 나타낸 것과 같이 같은 평면에서 폭의 방향에서는 응력의 크기가 거의 같은 것으로 나타났기 때문에, 그림 11에 나타낸 것과 같이 댐퍼의 바깥 표면에서 한 개의 U형 요소를 선택하여 이 선형요소에 대한 응력분포로서 댐퍼의 전체 구간에 걸친 응력분포를 대신한다.



(a) 길이방향 하중일 경우 (b) 수직방향 하중일 경우

그림 10. 변위 200mm일 경우의 응력분포

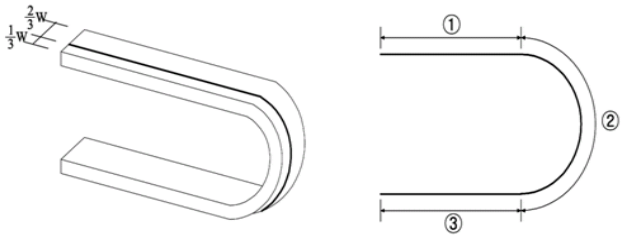
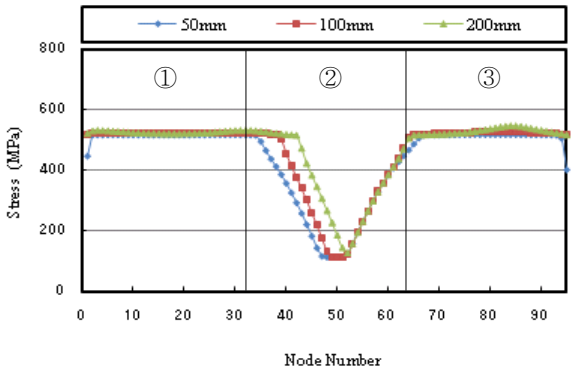
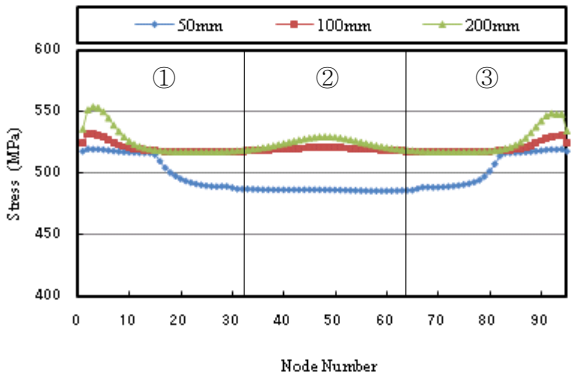


그림 11. 응력분포를 파악하기 위한 U형인 선형요소

변위가 각각 50, 100, 200mm일 경우의 U형 요소의 응력분포를 하중의 작용방향에 따라 그림 12에 나타낸다. 여기서 횡축은 해석에서의 노드(Node)번호에 해당한다. 그림에서 나타낸 것과 같이 길이방향 하중을 받을 경우에는 곡선부의 응력이 작고 평판부의 응력이 크게 나타났으며, 수직방향 하중을 받을 경우에는 평판부의 끝단부근에서 응력이 비교적 크게 나타났고 곡선부의 응력은 여전히 작게 나타났다. 또한 하중의 작용방향에 관계없이 변위가 커질수록 응력의 크기에는 약간의 변화가 있지만 거의 같은 분포경향을 나타낸다.



(a) 길이방향 하중일 경우

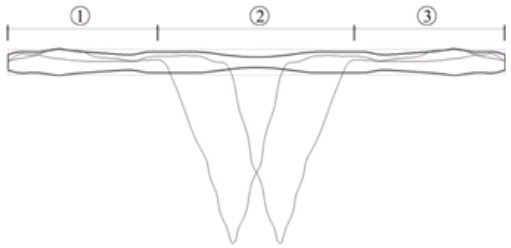


(b) 수직방향 하중일 경우

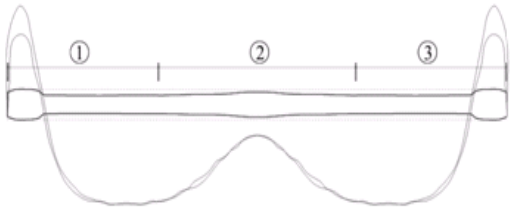
그림 12. U형 요소에 의한 기존 댐퍼의 응력분포

지진하중을 받을 경우, 예상하지 못한 파단을 방지하기 위해

서는 댐퍼의 단면적을 조절하여 전체 구간에 걸친 응력분포를 평준화하고 응력의 크기도 작게 할 필요가 있다. 즉 응력이 큰 부분에 대해서는 단면적을 증가시키고, 응력이 작은 부분에 대해서는 단면적을 감소시킬 필요가 있다. 그림 12의 응력분포에 기초한 단면조절의 예를 그림 13에 나타낸다. 그림에 나타낸 것과 같이 응력이 크게 나타나는 부분에 대하여 단면적을 증가시키거나 응력이 작은 부분에 대하여 단면적을 감소시키는 방법은 댐퍼의 제작과정을 복잡하게 하고 설계식을 제안하는데 큰 어려움을 주게 된다.



(a) 길이방향 하중일 경우



(b) 수직방향 하중일 경우

그림 13. 응력분포에 의한 기존 댐퍼의 단면조절 예

제작과정을 간단하게 하고 간편한 설계식을 도출하기 위해서는 외곽의 폭을 변화시키지 않는 전제하에서 응력이 작은 부분에 개구부를 두어 단면적을 감소시키는 방법이 보다 효과적인 것으로 판단된다. 그림 12를 보면 길이방향 하중을 받을 경우에는 곡선부의 응력이 비교적 작고 수직방향 하중을 받을 경우에는 평판부의 끝단에서 응력이 비교적 크게 일어나기 때문에 그림 14에 나타낸 것과 같이 3가지 유형의 개구부(Type 2~Type 4)를 둔 형상을 제안하고자 한다.

3.3 제안된 댐퍼 형상에 대한 해석결과 및 분석

3.3.1 댐퍼 형상에 따른 내력 및 변형능력의 비교

그림 14에 나타낸 것과 같이 개구부를 설치하면 댐퍼의 단면적이 감소하여 초기강성, 항복강도의 저하가 발생하기 때문에 단순하게 하중-변위 관계에 근거하여 댐퍼의 내력과 변형능력을 비교·분석하기에는 타당하지 않다고 판단된다. 따라서 그림 15에서와 같이 변위와 항복변위의 비(δ/δ_y)를 횡축으로, 하중과 항복강도의 비(P/P_y)를 종축으로 두어 형상에 따른 댐퍼의 내력저하를 비교함과 동시에 한계변형량($\delta_{\lim}$)과 항복변위(δ_y)의 비를 한계소성율(δ_{ly})로 정의(그림에서 ●로 나타냄)하고 정량적인 수치를 표 3에 나타낸다.

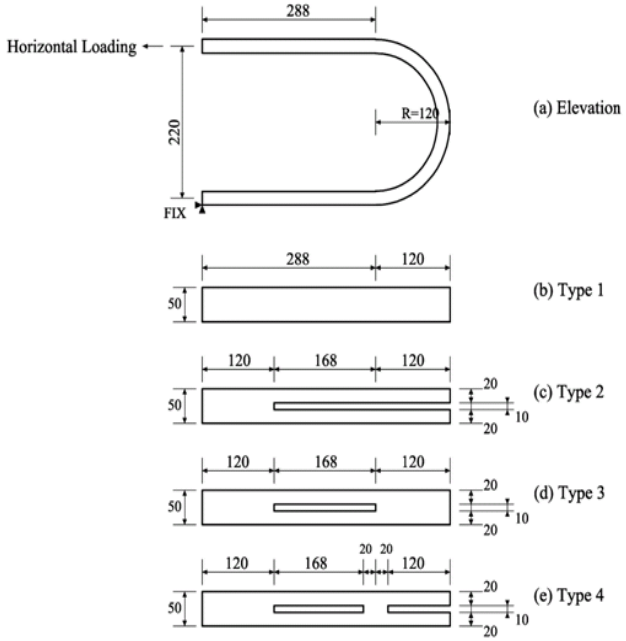
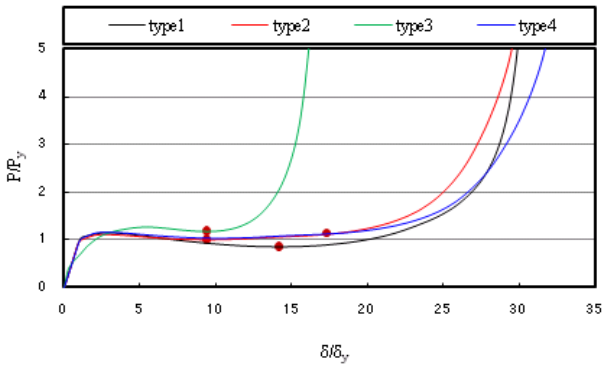
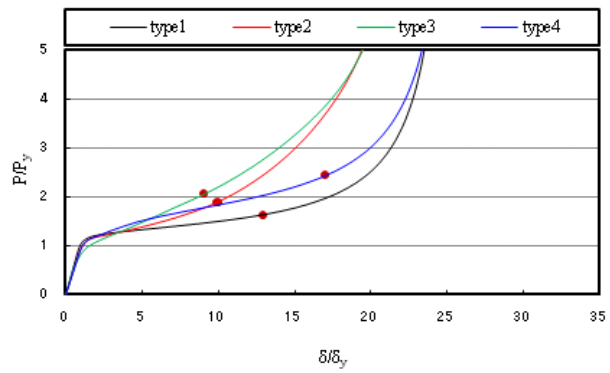


그림 14. 기존 댐퍼와 제안된 댐퍼의 형상 (단위: mm)



(a) 길이방향 하중일 경우



(b) 수직방향 하중일 경우

그림 15. 형상별 내력 및 변형능력의 비교

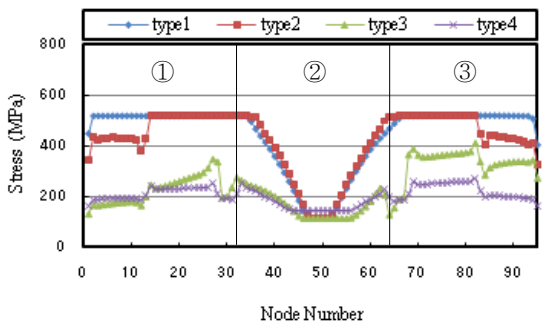
표 3. 형상에 따른 변형능력의 정량적 비교

댐퍼유형	길이방향 하중		수직방향 하중	
	δ_{ly}	type1과의 비교 (%)	δ_{ly}	type1과의 비교 (%)
type1	14.2	100.0	12.9	100.0
type2	9.5	66.9	9.9	76.7
type3	9.5	66.9	9.1	70.5
type4	17.3	121.8	17.1	132.6

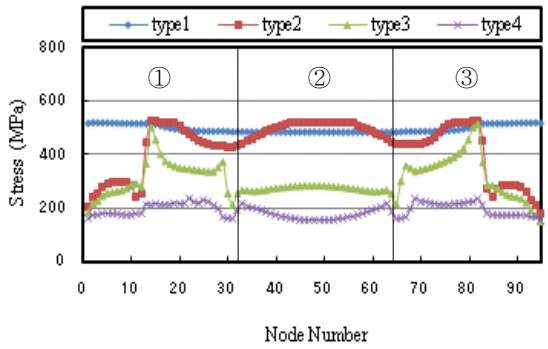
길이방향 하중을 받을 경우, type4가 내력저하도 적고 변형능력이 가장 우수하게 나타났으며, 개구부가 없는 type1에 비하여 21% 정도 증가하였다. 수직방향 하중을 받을 경우, type2와 type3에 비하여 type4의 내력은 작지만 변형능력은 가장 우수하며, type1에 비하여 유일하게 증가하였고 32% 정도의 증가율을 나타내었다.

3.3.2 댐퍼 형상에 따른 응력분포의 비교

하중의 작용방향에 관계없이 변위가 커질수록 응력의 크기에는 약간의 변화가 있지만 거의 같은 분포경향을 나타내기 때문에 여기서는 변위가 50mm인 경우의 응력분포에 대해서만 분석하기로 한다. 그림 16에 나타낸 것과 같이 길이방향 하중을 받을 경우, type2의 응력분포는 type1과 비슷한 경향을 나타내고 type3과 type4는 개구부가 시작되거나 끝나는 위치에서 약간의 응력집중이 발생하지만 type1에 비하여 응력의 크기가 훨씬 작아졌고 그 분포도 평균화되었으며, 그 중에서도 type4의 응력분포가 보다 평균적이고 응력의 크기도 작으며 type1의 30~40% 정도로 나타났다. 수직방향 하중을 받을 경우, type2는 평판부에서 개구부를 두지 않은 부분의 응력이 작게 나타났고 다른 구간에서는 type1과 거의 같은 값을 나타내는 반면에 type3과 type4의 응력은 댐퍼의 전체 구간에 걸쳐 type1의 응력보다 훨씬 작게 나타났으며, 그 가운데서 type4의 응력이 더욱 작고 type4의 30~40% 정도로 나타났다.



(a) 길이방향 하중일 경우



(b) 수직방향 하중일 경우

그림 16. 변위 50mm일 경우의 형상별 응력분포

3.4 제안된 댐퍼에 대한 설계식 및 설계도표의 제안

변형능력이 우수하고 응력분포가 비교적 일정한 type4의 설계식을 제안하기 위하여 형상비(L/R)를 1.8, 2.4, 3.0으로, 두께를 20, 40, 60mm로, 폭을 30, 50, 70mm로 두고 순차적으로 해석을 수행한다. 단, 여기서 개구부의 크기는 형상비가 2.4, 두께가 20mm, 폭이 50mm인 경우를 기준으로 각 변수의 크기에 따라 비례하게 결정한다. 앞에서 이미 설명하였듯이 하중의 작용방향에 관계없이 두께 및 폭에 따른 댐퍼의 한계변형량의 변화는 미미하며 모두 선형으로 변화하는 경향을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 두께와 폭이 댐퍼의 한계변형량에 대한 영향을 조합하여 폭(W)과 두께(T)의 3배의 합(W+3T)을 하나의 변수로 나타낸다.

3.4.1 길이방향 하중일 경우의 설계식과 설계도표

길이방향 하중을 받을 경우, 댐퍼의 한계변형량, W+3T 및 L/R의 관계를 그림 17에 나타낸다. 그림에서 나타낸 것과 같이 한계변형량과 W+3T는 선형관계를 이루고 관계식에서 기울기와 상수항은 L/R에 관계되기 때문에 간단한 설계식을 제안하기 위하여 기울기의 절대값을 A1, 상수항을 B1로 두고 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_{\lim} = -A_1 \cdot (W + 3T) + B_1 \qquad (1)$$

여기서, $\delta_{\lim}$: 한계변형량 (mm)

W: 폭 (mm)

T: 두께 (mm)

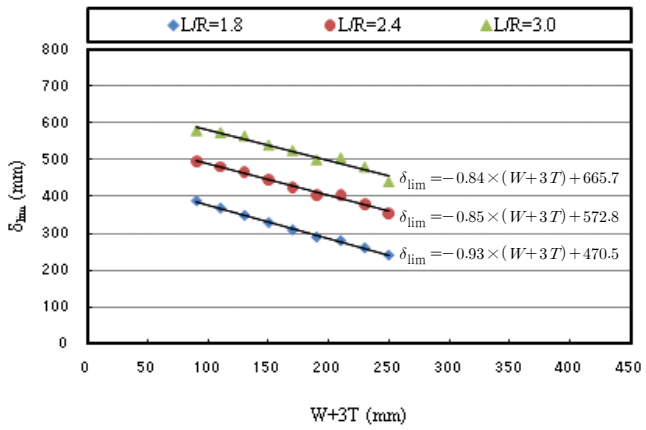


그림 17. 길이방향 하중일 경우의 한계변형량과 변수 관계

식 (1)에서 L/R과 기울기의 절대값 A1 및 상수항을 B1의 관계 파악하기 위하여 그림 17에 나타낸 추세선에서 기울기의 절대값과 상수항을 취하여 L/R의 관계를 각각 그림 18과 그림 19에 나타낸다.

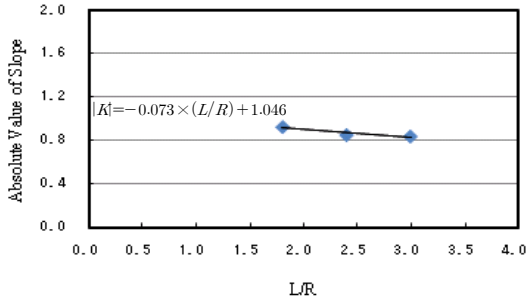


그림 18. 길이방향 하중일 경우 L/R과 기울기 절대값의 관계

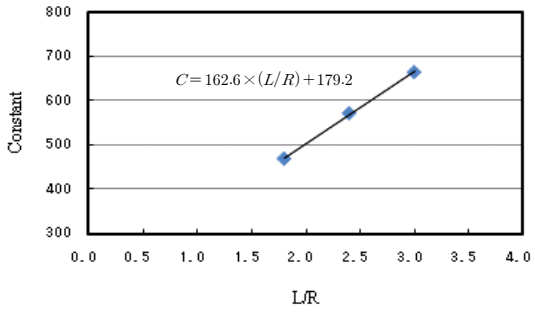


그림 19. 길이방향 하중일 경우의 L/R과 상수항 관계

그림 18과 그림 19에 나타낸 추세선에 근거하여 기울기의 절대값 A1과 L/R의 관계를 식 (2)에, 상수항을 B1과 L/R의 관계를 식 (3)에 나타낸다.

$$A_1 = -0.073\times(L/R)+1.046 \quad (2)$$

$$B_1 = 162.6\times(L/R)+179.2 \quad (3)$$

식 (1)~식 (3)은 HTS를 사용한 댐퍼가 길이방향 하중을 받을 경우, 요구되는 한계변형량과 두께 및 폭에 근거하여 최적의 형상비를 결정하는데 사용할 수 있다. 제안된 설계식을 사용하여 횡축을 W+3T로, 종축을 한계변형량으로 두고 선정된 몇 개의 형상비에 따른 설계도표를 그림 20에 나타낸다.

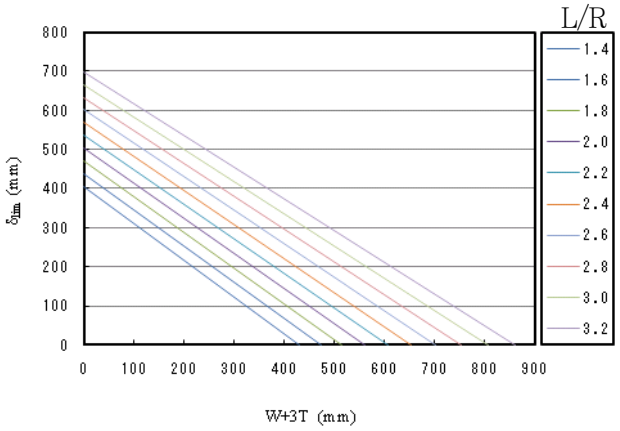


그림 20. 길이방향 하중일 경우의 댐퍼의 설계도표

3.4.2 수직방향 하중일 경우의 설계식과 설계도표

길이방향 하중을 받을 경우의 설계식의 유도방법과 같은 방법으로 그림 21~그림 23에 근거하여 수직방향 하중을 받을 경우의 설계식을 식 (4)~식 (6)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 길이방향 하중을 받는 경우와 구별하기 위하여 기울기의 절대값과 상수항을 각각 A2와 B2로 나타낸다.

$$\delta_{lim} = -A_2 \cdot (W+3T)+B_2 \quad (4)$$

$$A_2 = -0.093\times(L/R)+1.115 \quad (5)$$

$$B_2 = 260.9\times(L/R)+51.06 \quad (6)$$

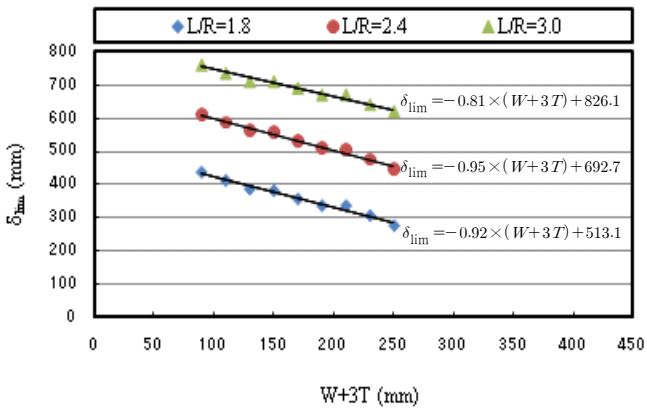


그림 21. 수직방향 하중일 경우의 한계변형량과 변수 관계

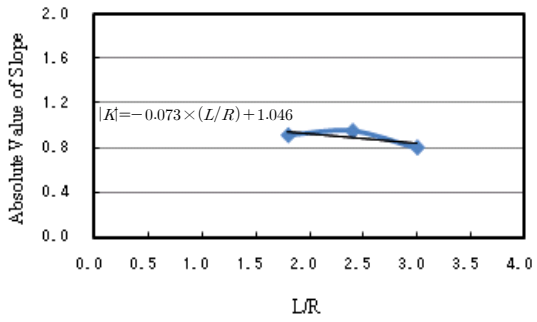


그림 22. 수직방향 하중일 경우의 L/R과 기울기 절대값 관계

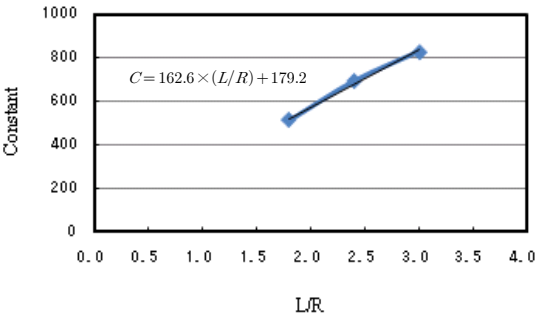


그림 23. 수직방향 하중일 경우의 L/R과 상수항 관계

접합수직방향 하중을 받는 경우에도 식 (4)~식 (6)을 사용하여 횡축을 W+3T로, 종축을 한계변형량으로 두고 선정된 몇 개의 형상비에 따른 설계도표를 그림 24에 나타낸다. 단, 그림 20과 그림 24를 사용하여 댐퍼를 설계할 경우에 한계변형량은 작은 값을 기준으로 하여야 한다.

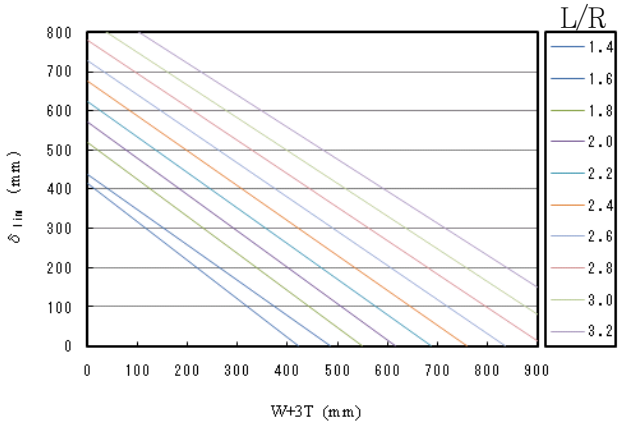


그림 24. 수직방향 하중일 경우 댐퍼의 설계도표

4. 결 론

본 연구에서는 SS400 강재와 HTS를 사용한 면진용 U형 강재댐퍼를 대상으로 비선형 유한요소해석을 수행하여 사용재료, 하중조건 및 변수(형상비, 폭, 두께)가 댐퍼의 변형능력에 미치는 영향을 파악하였고 변형능력과 응력분포를 종합적으로 비교·분석함으로써 구조적 성능이 우수하고 개구부를 둔 U형 고인성강재 댐퍼의 형상을 제안하는 동시에 형상 최적형상을 제시하였고 그에 따른 설계식을 제안하였다. 해석적 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) SS400 강재에 비하여 연신율이 150% 정도 증가된 HTS를 사용한 댐퍼의 한계변형량은 SS400 강재를 사용한 댐퍼의 한계변형량보다 15~105% 정도 크게 나타났으며 형상비가 커짐에 따라 그 차이는 더 크게 나타났다.

(2) 강재댐퍼의 변형능력은 형상비가 커짐에 따라 향상되었지만 폭 또는 두께가 커짐에 따라 저하되었다. 따라서 면진구조물의 거주성과 강재댐퍼의 변형능력을 고려하여 형상비를 1.4~3.2의 범위에서 설계할 필요가 있다.

(3) 댐퍼에 개구부를 두었을 경우, 평판부와 곡선부에 각각 개구부를 둔 강재댐퍼(type4)의 변형능력이 가장 우수하였으며, 기존의 개구부가 없는 강재댐퍼에 비하여 30~40% 정도 향상되었다.

(4) 댐퍼에 개구부를 두었을 경우, 평판부와 곡선부에 각각 개구부를 둔 강재댐퍼(type4)의 응력분포가 가장 평균적으로 나타났고 그 크기도 기존의 개구부가 없는 강재댐퍼 응력의 30~40% 정도로 나타났다.

(5) HTS를 사용하고 평판부와 곡선부에 각각 개구부를 둔 강재댐퍼(type4)에 대하여 제안된 설계식은 요구되는 한계변형량과 두께 및 폭에 근거하여 최적의 형상비를 결정하는데 사용할 수 있으며, 이러한 한계변형량은 길이방향 또는 수직방향 하중을 받는 경우에서의 작은 값을 기준으로 설계하여야 한다.

길이방향 하중일 경우:

$$\delta_{\lim} = -A_1 \cdot (W+3T) + B_1$$
$$A_1 = -0.073 \times (L/R) + 1.046$$
$$B_1 = 162.6 \times (L/R) + 179.2$$

수직방향 하중일 경우:

$$\delta_{\lim} = -A_2 \cdot (W+3T) + B_2$$
$$A_2 = -0.093 \times (L/R) + 1.115$$
$$B_2 = 260.9 \times (L/R) + 51.06$$

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 CTRM과제(06건설핵심 D13)로서, 이에 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부(1987) **건축물의 내진구조 및 방재기준에 관한 연구-우리나라의 지진위험도**, 제1권, 제1편, pp.59~135.

권순일, 이상호, 오상훈, 유홍식, 박진삼(2008) 면진장치용 강재댐퍼의 형상 최적화, **한국구조물진단유지관리공학회 봄학술발표대회 논문집**, 제12권, 제1호, pp.123~128.

기상청(2008) **국내 지진 발생 현황 및 추이**.

오상훈, 김영주, 최호정, 김정철, 김태훈(2007), Fe-Mn 방진합금의 재료적 특성에 관한 연구, **한국강구조학회 학술발표대회 논문집**, 제12권, 제1호, pp.433~436.

한국면진제진협회(2004) **처음 배우는 면진건축**, 구미서관.

한국산업규격(2003) KS B 0801-금속 재료 인장시험 방법.

ANSYS Inc. (2005) ANSYS NANUAL, Release 9.0.

Gere, J.M. (2004) *Mechanics of Materials 6th Edition,* Thomson Learning Academic Resource Center, USA.

Kato, A., Seki, M., Shirahama, K., and En, K. (1996) Seismic Safety Evaluation of Steel Damper for Base Isolation, World Conference on Earthquake Engineering, *New Zealand Society for Earthquake Engineering,* pp.807~815.

Kishiki, S., Ohkawara, Y., Yamada, S., and Wada, A. (2008) Experimental Evaluation of Cyclic Deformation Capacity of U-shaped Steel Dampers for Base-isolated Structures, *Journal of Structural and Construction Engineering,* Transactions of AIJ, Vol. 73, No. 624, pp.333~340.

Moteki, M., Ohtsuka, S., Hayakawa, K. and Nakae, A. (1995) The Experimental Study on Fatigue characteristics of Steel Damper Used for Seismic Isolation Device, Seismic, *Shock and Vibration Isolation, ASME,* pp.171~176.

Naeim, F. and Kelly, J.M. (1999) Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, Wiley, Chichester, England.

Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H. (1993) *An Introduction to Seismic Isolation,* Wiley, Chichester, England.

Suzuki, K., Watanabe, A. and Saeki, E. (2005) Development of U-shaped Steel Damper for Seismic Isolation System, Shinnittetsu Giho, *Nippon Steel Corporation,* No. 382, pp.53~57.

Taylor, A.W., Lin, A.N., and Martin, J.W. (1992) Performance of Elastomers in Isolation Bearings: A Literature Review, *Earthquake Spectra,* Vol. 8, No. 2, pp.279~304.

Ugural, A.C. and Fenster, S.K. (2003) *Advanced Strength and Applied Elasticity 4th Edition,* Prentice Hall, USA.

(접수일자 : 2009. 9. 12 / 심사일 2009. 9. 14 / 게재확정일 2009. 10. 25)