

# 직사각형 댐퍼의 비선형 해석 및 설계

## Nonlinear Analysis and Design of Rectangular Damper

엄 승 현<sup>1)</sup> · 김 원 기<sup>2)</sup>  
Eom, Seung Hyeon Kim, Won Ki

요 약 : 본 연구에서는 외부프레임이 직사각형일 때 적절한 댐퍼의 형태를 결정하였다. 댐퍼의 형태는 외부프레임과 같은 비율로 직사각형이다. 설계의 기본은 지정된 내진성능을 가진 사각형 댐퍼로 충격에너지를 소산하는 것이다. 본 논문의 내용에서 비선형 해석 데이터와 실험 데이터 각각의 강도와 에너지 소산을 하중-변위 곡선을 통하여 비교하였다. 반복하중 실험을 해석하기 위한 ANSYS 유한요소법 소프트웨어의 접근방법을 제시하였다. 본 논문의 궁극적인 목적은 효율적인 직사각형 인장 가새용 댐퍼의 형태를 연구하는데 있다. 우수한 가공성을 적용하여 개발된 직사각형 댐퍼의 안전성을 검토하였다.

ABSTRACT : In this study, the proper shape of dampers was determined when the outside frame formed a rectangle. The proper shape of dampers is rectangular, having the same ratio as the outside frame. The design was based on the impact energy dissipated by the seismic performance of the mainly rectangular dampers. This study sought to compare both strength and energy dissipation between nonlinear analysis data and experimental data through load-displacement curves. The use of the ANSYS FEM software was suggested to analyze the nonlinear behavior of rectangular dampers subjected to cyclic loading. The target of this study was to determine what shape was efficient for rectangular tensile brace dampers. The safety of the developed rectangular dampers was also checked for better fabrication.

핵 심 용 어 : 직사각형, 세장가새, 댐퍼, 비선형 해석, 에너지 소산

KEYWORDS : Rectangle, Slender Brace, Damper, Nonlinear Analysis, Energy Dissipation

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경

저층 철골조 구조물(창고, 공장 등), 특히 장 스패인 경우 횡력저항시스템은 가새골조이다. 필요한 양의 횡력에 저항할 가새의 단면은 적게 요구되므로 인장력만 저항하는 세장가새로 설계한다. 가새는 X형으로서 횡력 방향에 따라 1개 가새는 인장력에 저항, 다른 가새는 세장하므로 압축내력을 무시하여 설계한다.

일본의 경우 강진이 발생한 경우 세장X형 가새골조는 가새 부분에서 좌굴을 일으키며 파괴되었다. 그 이유는 인장력만 받는 X형 세장가새로 된 구조물은 반복하에 대하여 편칭현상을 보이며, 에너지 소산능력이 적다.

결국, 강진에 저항하는 X형 가새골조는 압축력에도 저항하

는 콤팩트단면이어야 하는 것이 현재 실정이다. 그러나 세장한 X형 가새, 즉 인장가새 교차부분에 적절한 구조체의 댐퍼를 설치하여 에너지 소산능력을 확대시켜 강진에 저항하는 것이 필요하다. 국내에도 장차 내진 설계가 강화될 것에 대비하여, 저층 건축물의 경우 콤팩트 단면가새보다는 경제적인 이점이 있는 구조체를 개발할 필요가 있다.

압축 가새용 댐퍼는 그림 1과 같이 연구가 있으나 에너지 소산이 충족된 인장 가새용 댐퍼의 연구가 전혀 없다.

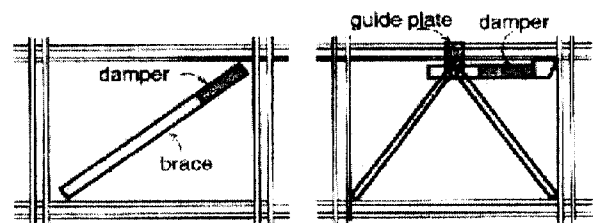


그림 1. 압축 가새용 댐퍼의 종류

1) 정회원, 호서대학교 건축학과, 박사과정  
(Tel.041-540-5233, Fax.041-548-5126, E-mail:nsheom@korea.com)  
2) 정회원, 호서대학교 건축학과 교수, 공학박사(wonkikim@dogsuri.hoseo.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

## 1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 강한 지진 하에서 세장가새를 그대로 유지하고 교차부에 강제 댐퍼를 설치한 경우에 일반적인 세장가새 골조보다 직사각형 댐퍼들이 내진성능이 우수함을 확인한다. 적절한 댐퍼의 단면형상을 결정하며 용접 댐퍼와 비용접 댐퍼의 에너지 소산능력을 비교한다. 비선형 해석 결과값과 실험 결과값을 비교 분석하여 직사각형 댐퍼의 크기를 구하고 실험체의 크기가 커질수록 에너지 소산능력이 증가됨을 규명한다. 궁극적으로 생산, 설치되어야 하는 직사각형 인장가새용 댐퍼 모델의 내진성능을 증명하고 제품을 개발하는데 있다.

## 2. 직사각형 댐퍼의 형태 개발

### 2.1 형태결정

외부프레임을 구성하는 보와 기둥의 길이가 달라서 외부프레임의 형태가 직사각형인 경우이다. 그림 2는 직사각형 댐퍼의 단면력과 치수를 나타낸 것이다. 내부댐퍼의 형태는 외부프레임과 닮은꼴 형태를 하여야 한다.

그 이유는 그림 2에서  $M_1 = M_2$ 가 되어야 하기 때문이다. 동일한 모멘트 값을 발생시켜 소성모멘트가 동시에 발생하여야만, 에너지 소산량이 극대화되기 때문이다.

직사각형의 내부보조 철물의 형태 역시 가로 : 세로 = 3 : 2의 비율을 맞추어서 제작되었다. 그 이유 역시 가로와 세로의 파괴예상 지점인 용접접합부에서의 최대모멘트 값을 동일하게 만들기 위함이었다.

그림 2에서 파괴예상지점인 가로 용접부 1지점과 세로 용접부 2지점의 모멘트 크기가 같음을 다음 식으로 살펴본다.

<기호정리>

$B$  : 댐퍼 단면의 폭

$t$  : 댐퍼 단면의 두께

$N_B$  : 가새에 작용하는 축력(tf)

$V_1$  : 댐퍼 1위치에 발생하는 전단력(tf)

$V_2$  : 댐퍼 2위치에 발생하는 전단력(tf)

$M_1$  : 댐퍼 1위치에 발생하는 모멘트(tf·cm)

$M_2$  : 댐퍼 2위치에 발생하는 모멘트(tf·cm)

$L_{x1} : L_{y1} = 3 : 2$ 로 가정하면,

$$\sin\theta = \frac{2}{\sqrt{13}}, \cos\theta = \frac{3}{\sqrt{13}}$$

$$V_2 = \frac{N_B}{2} \times \cos\theta = \frac{N_B}{2} \times \frac{3}{\sqrt{13}}$$

$$V_1 = \frac{N_B}{2} \times \sin\theta = \frac{N_B}{2} \times \frac{2}{\sqrt{13}}$$

$$V_2 : V_1 = 3 : 2 \quad \therefore V_2 = \frac{3}{2} V_1$$

$$M_1 = V_1 \times \frac{L_{x1}}{2}$$

$$M_2 = V_2 \times \frac{L_{y1}}{2} \quad (1)$$

$V_2 = \frac{3}{2} V_1$  와  $L_{y1} = \frac{2}{3} L_{x1}$  를 (1)에 대입하면

$$M_2 = \frac{3}{2} V_1 \times \frac{2}{3 \times 2} L_{x1} = V_1 \times \frac{L_{x1}}{2}$$

$$\therefore M_1 = M_2$$

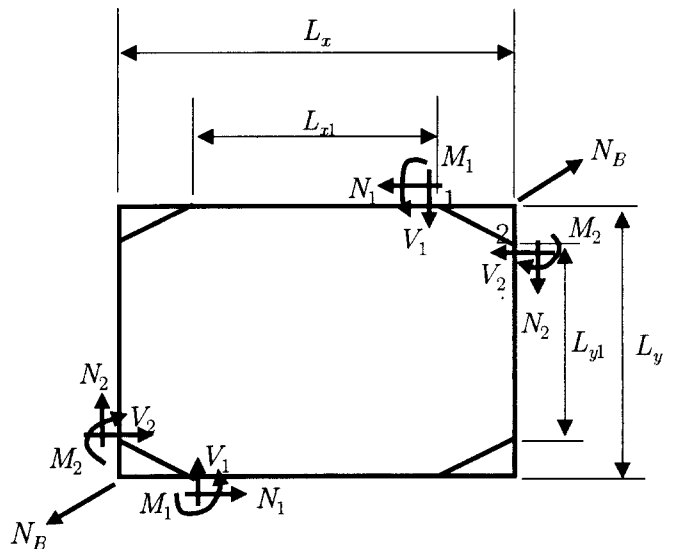


그림 2. 댐퍼의 단면력

### 2.2 실험체 치수결정

모든 실험체는 강제 SS400 사용하였고, LSD 기준에 준하여  $F_y = 2.4tf/cm^2$ 이다. 직사각형 댐퍼의 모멘트 크기는 다음과 같다.

$L_x : L_y = 3 : 2$  ( $\therefore$ 외부프레임 비율)이므로 그림 2의 모멘트  $M_2$  값은 아래 식과 같다.

$$M_2 = \left(\frac{N_B}{2} \cdot \sin\theta\right) \times \frac{L_{x1}}{2}$$

$$\text{단, } \sin\theta = \frac{L_{y1}}{\sqrt{L_{x1}^2 + L_{y1}^2}}$$

세장가새의 항복응력도의 70%일때 실험체가 전소성 상태에 도달하게 설계하면, 세장가새의 인장력  $N_B=4.76\text{tf}$ 이다.

$M_2=23.06\text{tf} \cdot \text{cm}$ 로 가정하고  $\sin\theta = \frac{2}{\sqrt{13}}$  값을 대입하여  $L_{x1}$  값을 구하면 34.93cm이다.

$L_{y1}$  값은  $L_{x1}$  값의 2/3이므로 23.29cm가 된다.  $L_{y1}$ 의 길이 계산은 비례식을 사용하지 않고,  $L_{x1}$ 을 구할 때 사용한 방법으로 해도 같은 결과가 나온다. 그러므로 직사각형 댐퍼 ( $L_x \times L_y \times t \times B$ )는 536x357x16x100이다. 이상의 부재가 댐퍼 쪽에서 파단이 일어나는지 검증하면, 가정에서 댐퍼 판 요소의 휨모멘트( $M_2$ )는 23.06 tf·cm이고  $M_2$ 의 70%일 때 댐퍼의 판요소가 전소성 상태가 되어야 하므로 판요소의 소성모멘트( $M_{p2}$ )는 16.14 tf·cm이다.

직사각형 판요소의 소요판두께( $t$ )는

$$\therefore t \leq \sqrt{\frac{4M_{p2}}{B \cdot \sigma_{yD}}} \text{ cm이다.} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_{yD}$ 는 댐퍼의 항복응력도이다.

댐퍼의 치수  $B = 10\text{cm}$ 라고 가정하고 항복응력도( $\sigma_{yD}$ ) 값 2.4tf/cm<sup>2</sup>를 식 (2)에 대입하면,  $t \leq 1.64\text{cm}$ 이다.  $t$ 가 1.6cm이므로 조건을 만족한다. 실험체 407x271x12x100 역시 같은 방법으로 구하였다.

### 2.3 실험체 종류

그림 3과 같이 4종류의 실험체를 제작하여 실험하였다.

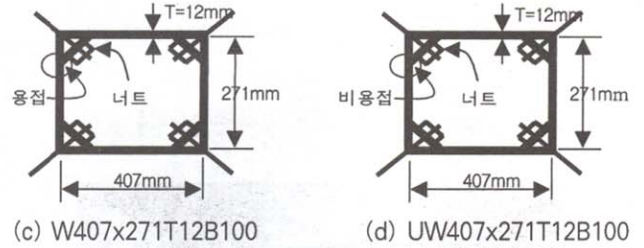
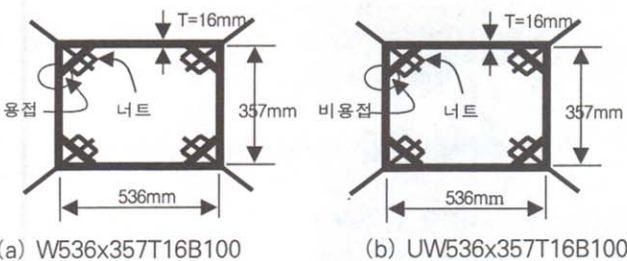


그림 3. 댐퍼 실험체 종류

표 1은 그림 3의 실험체의 부재치수를 나타낸 것이며, W는 용접을 표시하고 UW는 비용접을 나타낸다.

표 1. 댐퍼 실험체의 부재치수

실험체종류(직사각형)	B (mm)	T (mm)
W536x357T16B100	100	16
UW536x357T16B100	100	16
W407x271T12B100	100	12
UW407x271T12B100	100	12

본 실험체의 가력이전에 선행하여 현재의 실험 시스템에서 로드셀을 통하여 기둥으로 가력한 힘이 가새로 잘 흘러가는지 세장가새에 스트레인게이지를 설치하여 확인하였으며, 지름16mm 강재봉으로 파단실험을 병행하여 수행하였다. 그림 4는 실험체의 설치 전경을 나타낸 것이다.

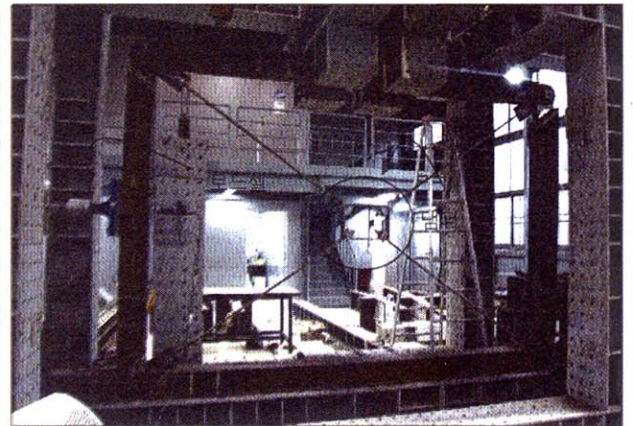


그림 4. 댐퍼 실험체 설치 전경

하중의 패턴은 AISC, "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings"의 S6. 하중이력에 준하여 정하였다. +X 과 -X방향으로 로드셀 및 유압펌프를 사용하여 반복하중을 부여하였고, 항복변위의 값은 ANSYS 해석을 이용하여 산출한 결과를 사용하였다.

## 2.4 실험 결과

그림 5는 반복하중을 +X, -X으로 부여하여 실험시 변형되는 직사각형 댐퍼의 변형모드를 보여준 것이다.



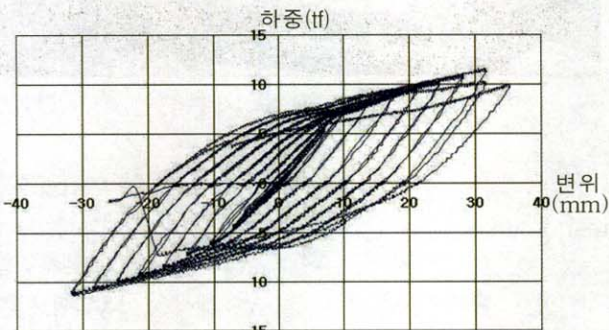
(a) -X방향으로 가력시 댐퍼변형



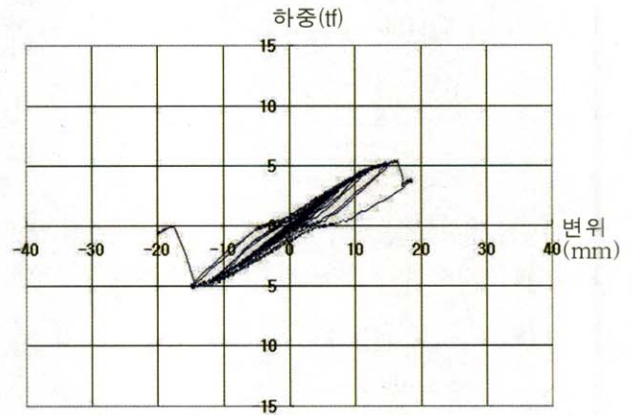
(b) +X방향으로 가력시 댐퍼변형

그림 5. 실험체의 변형모드

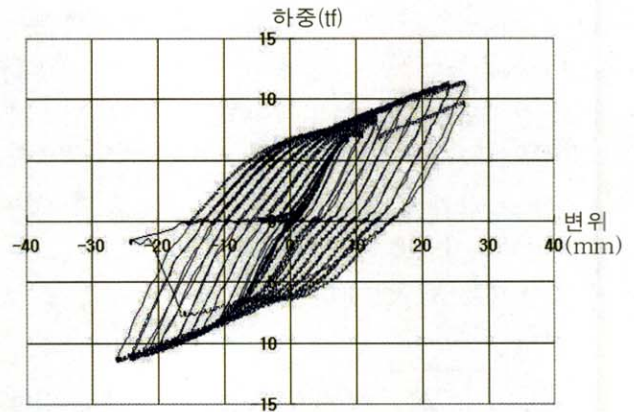
그림 6은 가력점에서의 하중-변위 이력곡선이다. (a) W536x357T16B100의 최대변위값이 제일 큰 것을 알 수 있으며 세장가새에서 보이는 편칭거동이 없어진 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구의 용접 댐퍼들을 설치한 골조가 일반적인 세장가새 골조보다 내진성능이 더 우수하다는 것을 보여 준다. (b) UW536x357T16B100가 (d) UW407x271T12B100 값보다도 적게 나오는 것은 제작할 때 절곡작업의 영향으로 모서리 부분이 약해졌기 때문이며, 표준화 작업을 하게 되면 자연스럽게 소멸되는 문제점이라 판단된다.



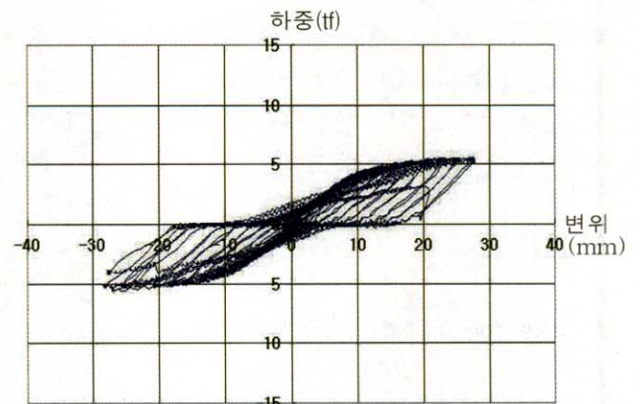
(a) W536x357T16B100



(b) UW536x357T16B100



(c) W407x271T12B100



(d) UW407x271T12B100

그림 6. 실험체의 하중-변위 이력곡선

표 2는 그림 6의 하중-변위 곡선을 정리한 것이다. 여기서, 최대변위는 파괴시의 변위이다.

표 2. 실험체의 하중-변위 실험값

종 류	하중방향 (+X)			하중방향 (-X)		
	최대 하중 (tf)	최대하중 시변위 (cm)	최대 변위 (cm)	최대 하중 (tf)	최대하중 시변위 (cm)	최대 변위 (cm)
W536x357	11.32	3.16	3.52	11.10	3.16	3.16
UW536x357	5.47	1.64	1.64	5.12	1.49	1.49
W407x271	11.36	2.65	2.65	11.27	2.64	2.64
UW407x271	5.37	2.78	2.78	5.10	2.82	2.82

표 2에서 보는 것과 같이 실험 결과 직사각형 실험체에서도 작은 크기의 407x271 댐퍼 보다는 큰 크기인 536x357 댐퍼에서 그래프가 크게 그려지고 있다. 이력 특성상 용접의 경우는 댐퍼의 크기가 커질수록 곡선의 내부면적이 더 커진다. 가새보다 댐퍼 쪽에서 에너지가 선행해서 소산되어야 하기 때문에 크기가 중요한 요소이다.

동일한 크기의 실험체에서 용접과 비용접을 비교해 보면 용접 실험체가 비용접 실험체 보다 내진성능이 우수한 것을 알 수 있다. 비용접의 경우는 지름 16mm 강재 봉으로 실험한 세장한 가새골조 모델과 비슷한 편칭의 경향을 가지는 이력특성을 보인다.

### 3. 비선형 해석

#### 3.1 개요

본 해석에서는 ANSYS 프로그램을 사용하여 기하학적 비선형성 및 재료 비선형성을 적용하였으며, 반복하중이 시간에 따라 변하는 실험의 특성을 해석에서 구현하기 위하여 Transient Analysis를 선정하였고 그 결과를 분석하였으며 반복하중에 대한 해석방법을 제시하였다.

$$\begin{aligned}
 [K]\{U\} &= \{F\} \\
 \{U\} &= [K]^{-1}\{F\}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

주어진 하중벡터 {F}를 이용하여 미지수인 변위벡터 {U}를 구하는 것이다. 이 식에서 [K]는 강성행렬(Stiffness Matrix)이며, 구조물의 형상을 기본으로 하여 몇 단계를 거쳐 구해지는 행렬이다. 식 (3)에서 [K]<sup>-1</sup>의 값이 0이 되면 Error가 발생할 수 있다. 그림 7에서 [B]그림이 비선형을 나타내는 그래프이다. 비선형 해석상에서 유의 깊게 살펴볼 점은 2가지로 첫 번째는 그림 7 [C] 탄성구간에서는 문제가 없

으나 [D]점 즉 [K]=0이 되는 점과 [E]구간 [K]<sup>-1</sup>=(-)가 되는 곳에서의 해석여부의 검토이고 두 번째는 FEM Solver의 사용에 있어서 Nonlinear Analysis 방정식의 선택 및 관련조건 설정으로 좌굴, Large Displacement 옵션의 사용여부 검토이다.

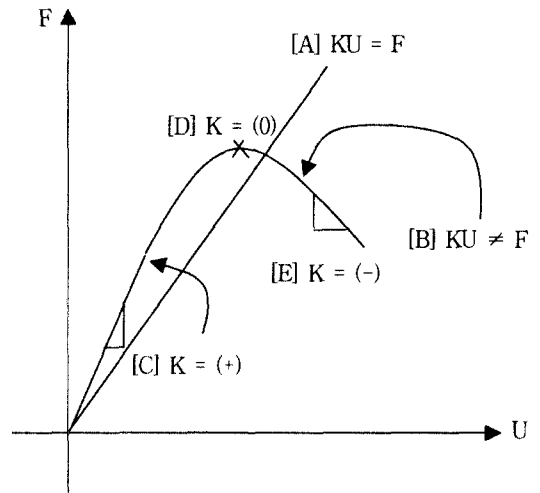


그림 7. 하중, 강성, 변위 관계

#### 3.2 ANSYS Transient Analysis의 처리

Transient Analysis란 시간에 따라 변하는 하중에 대하여 임의 절점의 절점변위 등을 계산하는 것으로 시간에 대한 수치적분의 수행을 통해 절점 변위를 계산하게 되는데, 정확한 해석을 위하여 하나의 하중구간 내에서의 여러 개의 구간으로 나누어 적분을 수행하는 것이 필요하다.

##### 3.2.1 ANSYS에서 처리 가능한 비선형 거동

구조물의 비선형 해석이 크게 3가지로 분류될 수 있는 이유는 강성행렬 [K]를 변화시키는 요인이기 때문이다.

###### 1) 기하학적 비선형성

대변형(Large Displacement), 대변형도, 대회전등으로 인해 각 절점이 미소변위(small displacement)를 일으킨다는 가정을 더 이상 사용할 수 없는 경우이며, 본 해석의 경우에도 이 효과를 적용시키기 위하여 NLGEOM 명령어를 사용하였다.

###### 2) 재료 비선형성

상대적으로 큰 외력이 작용하게 되면 구조물은 항복을 일으키게 되고, 이후에는 소성변형을 일으키게 된다. 즉, 항복점 이후에는 탄성계수(E)만을 적용할 수 없으므로 인해 강성행렬 [K]가 변화하게 되는 것이다. 이 효과를 구현하기 위해

Nonlinear Material Property Table을 사용하게 된다. 아래와 같이 크게 3가지 Data Table Type이 사용되어진다.

첫째는, BKIN(Bilinear Kinematic Hardening Plasticity) 모델로서 아래 그림 8의 형태(2개의 point)의 경우에 적용된다.

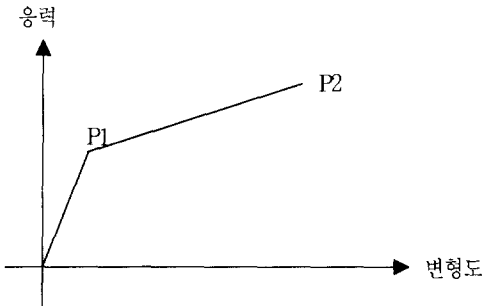


그림 8. BKIN에 적용되는 응력-변형도

둘째는, MKIN(Multilinear Kinematic Hardening Plasticity) 모델이다.

셋째는, KINH(Nonlinear Kinematic Hardening Plasticity) 모델로서 ANSYS의 대변형 문제에 있어서 KINH를 사용이 적합하며, 본 해석에서도 이 모델을 채택하였다.

### 3.2.2 Transient Analysis 의 해석방법

하중이 변하는 지점의 사이를 하나의 하중단계로 볼 수 있기 때문에 기본적인 해석절차는 다단계 해석 방법의 절차에 따랐으며, "일반적인 다중해석방법"과 "하중단계 파일을 이용한 일괄해석 방법"의 2가지 다단계 해석 방법 중 본 해석에서는 "일반적인 다중해석방법"을 채택하였다.

다단계 해석 방법을 수행시 중요한 사항은 하중단계(Load Step)설정을 중요시 다루어야 한다. 각 하중단계에서 계산된 해석결과를 중첩할 수 있는 기능을 제공하므로 각각의 하중 단계만 적용한 해석을 수행하고 해석 후 하중의 중첩으로 보고자 하는 결과를 다양하게 구하였다.

하중구간 (Load Step)의 설정을 지정하여야 한다. 하중구간은 유압펌프로 가력시 하중의 방향이 변하는 지점까지를 설정하였다. 동일한 반복하중이 최소 2번 이상 가해지고 있기 때문에 하나의 하중구간에 해당하는 시간을 지정해야 한다. 변위제어에서 원위치로 돌아오는 것을 1사이클로 설정되므로 0.5 사이클의 반복하중이 하중구간으로 설정되었다.

부구간(Substep)을 설정하여야 한다 하중구간의 설정이 결정되고 나면 정의한 하중구간 내에서의 적분구간의 개수 또는 크기를 지정해야 한다. Substep의 설정은 Load Step,

Time, Material Table과 밀접한 관계를 가지고 있으며 정확히 설정되지 않으면 해석이 중도에서 멈추는 상황도 초래한다. 본 해석에서는 0.5sec로 설정하였다.

하중의 형태는 경사하중(Ramped Load)을 선정하여야 한다. 경사하중은 선형적으로 변하는 하중을 말하며, 실제 실험에서도 로드셀 및 유압펌프로 이루어진 가력시스템에 의해 시간에 따라 가력양이 변한다.

하중의 부여는 변위제어로 하였다. 하중구간의 종료시점의 하중의 크기를 가지는 하중을 적용하여야 하는데, 실제 실험에서 가력한 변위를 하중으로 부여하였다.

탄성구간에서는 아직 항복이 일어나지 않으므로 해석상에서 3회의 반복가력을 1회로 줄여서 수행하였다.

마지막 단계로 정의한 하중구간에 대해서 해석을 수행하거나 또는 하중단계 파일로 저장하여야 한다.

### 3.2.3 가력패턴의 적용방법

위의 내용은 0.5사이클 단조하중의 경우 Transient 해석을 한 경우이고 위의 내용에 반복하중을 구현하는 과정을 \*Do 명령어를 이용하여 삽입될 수 있다.

사이클 하중을 구현하기 위해서는 하중에 대한 테이블을 작성하여야 한다. 하중의 테이블은 \*DIM 명령어를 이용하여 작성되었으며 본 해석에서는 항복변위의 4배 즉, 4델타까지만 구현하였다.

그림 9는 적용된 반복하중을 그래프로 나타낸 것이다.

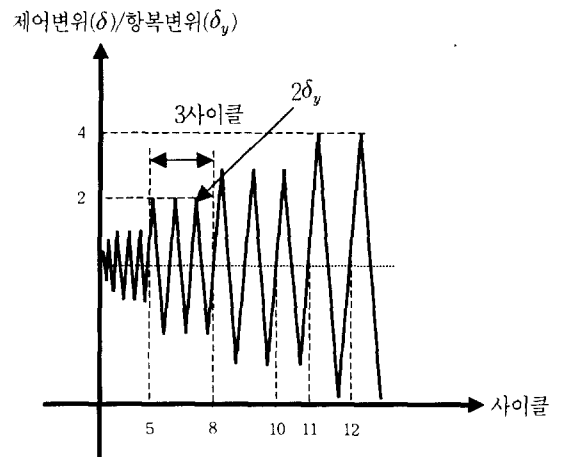


그림 9. 536x357 댄퍼 변위제어 와 해당 사이클

### 3.3 모델 Element 선정

그림 10은 비선형 해석시 적용한 요소의 종류를 나타낸 것이다.

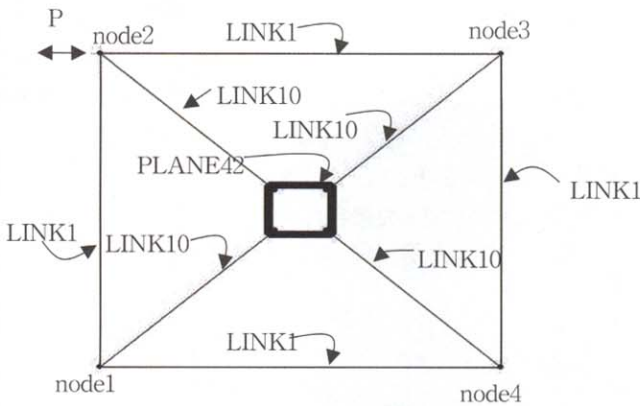


그림 10. 비선형 해석시 사용된 요소Type

여기서, LINK1 : 외부프레임 (요소번호 1)  
 PLANE42 : 댐 퍼 (요소번호 42)  
 LINK10 : 가 새 (요소번호 10), Tension-only  
 가새의 요소선정은 현재의 연구의 특성이 인장만 받는 댐 퍼라는 특성을 잘 반영해 주어야 하는 상황이어서 매우 중요하다. 즉, 인장가새 댐퍼의 특성상 가새가 인장력만 받는 요소를 선정해야만 했다. 그래서 LINK10번을 선정하였고 인장력만 받게 처리하였다.

그림 11은 댐퍼의 비선형 해석시 사용한 상세모델과 응력 측정부위를 나타낸 것이다.



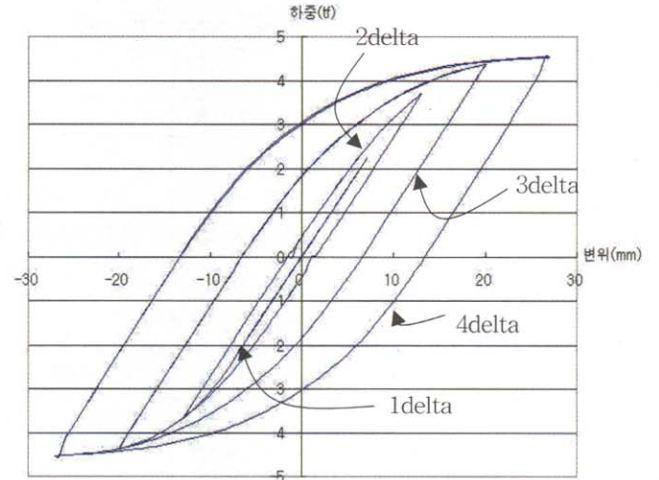
그림 11. 536x357 댐퍼의 ANSYS 상세모델

기둥과 가새의 접합부위(그림 13 node1, 2, 3, 4)는 핀 접합으로 처리되어 있으며 해석상 Z방향의 변위는 구속시키는 것을 좋다. 댐퍼의 크기가 작아지면 구속시키는 것이 더욱 효율적이다.

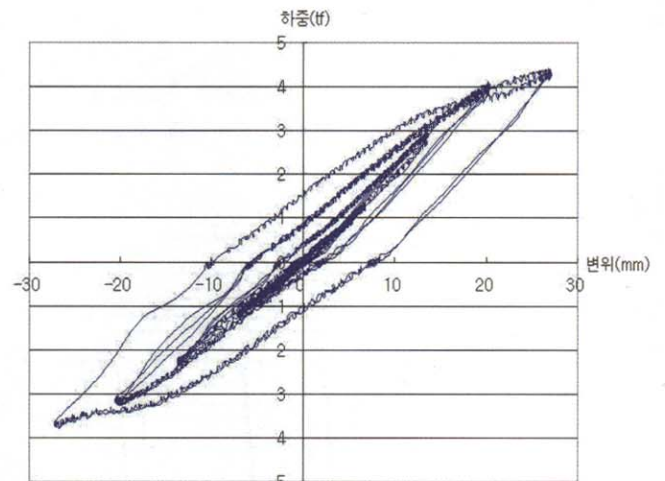
### 3.4 비선형 해석 결과

그림 12는 그림 10의 node2번에서 구한 X방향 변위를 x

축으로 하고 그때의 node2번에서의 가력하중을 node1,4번에서 반력으로 계산하여 합산한 값을 y축으로 하여 그려진 그래프이다.



(a) 해석결과



(b) 실험결과

그림 12. 용접 536x357 댐퍼의 하중-변위 이력곡선

그림 12를 분석해 보면, 용접 실험체의 결과는 세장한 가새골조에서 나타나는 펀칭거동이 사라지고, 내부소산 능력도 큰 것으로 나타났다.

표 3은 용접 536x357 댐퍼를 비선형 해석한 결과값이고, 표 4는 실험에서 측정한 결과값이다. 표 3에서 변위 제어한  $\Delta_{max}$  값이 배수로 설정되어져 있지 않는 이유는 실제 실험시 가력장치에 의한 가력지점이 기둥의 높이의 13/25지점이기 때문에 실험시 적용한 가력점에서의 항복하중의 변위값을 배수로 하여 그 값을 node2번에 적용할 때는 값이 비례적으로

환산되었기 때문이다.

표 4의 값 역시 표 3과 같이 가력점에서의 측정된 하중, 변위값을 node2번 위치로 환산하여 정리한 것이다.

표 3. 비선형 해석 결과 하중-변위값 (node 2번 위치)

실험체 종류	반복하중	$P_{max}(tf)$	$\Delta_{max}(mm)$
536x357	1	2.22, -2.20	7, -7
	2	3.69, -3.68	13, -13
	3	4.38, -4.38	20, -20
	4	4.53, -4.53	27, -27

표 4. 실험 결과 하중-변위값 (node 2번 위치)

실험체 종류	반복하중	$P_{max}(tf)$	$\Delta_{max}(mm)$
536x357	1	1.41, -1.25	7, -7
	2	2.88, -2.26	13, -13
	3	4.01, -3.22	20, -20
	4	4.26, -3.74	27, -27

그림 13은 그림 11에서 표시된 응력 측정부분에서 구한 결과이다. Y축은 응력을 표시하였고 X축은 (탄성+소성)변형도를 나타낸 것이다. 중첩의 원리로 탄성값과 소성값을 더하여 구한 그래프이다.

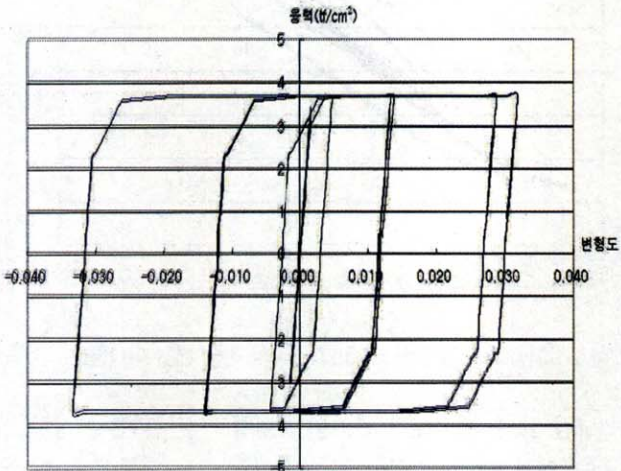


그림 13. 용접 536x357 댐퍼 응력-변형도 그래프

## 4. 2층 철골 공장동에 직사각형 댐퍼의 적용

### 4.1 해석 모델

「한계상태설계기준에 의한 강구조설계 예제집」에 있는 공

장건물에 댐퍼를 적용하여 안정성을 분석하였다. 변형된 부분은 실험시 적용된 프레임의 가로(X방향길이):세로(1층높이)의 비율이 3:2 이므로 공장동의 평면에서 가새가 설치된 부분의 가로폭을 5m에서 6m로 증가하여 가로 : 세로 = 3 : 2가 되도록 하였다.

전체 공장동 3D 모델은 그림 14와 같은 정정구조물(2D 모델)로 변형하여 쉽게 수계산 및 전산해석이 가능하다.

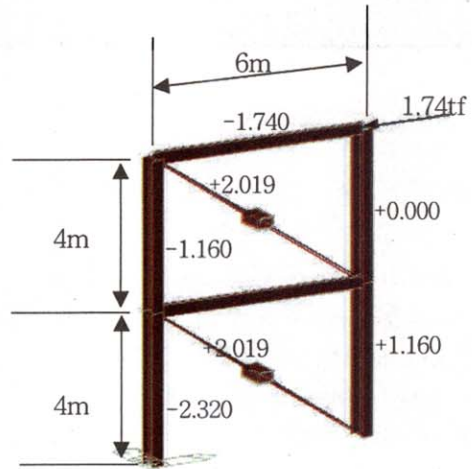


그림 14. 가새골조의 2D 모델과 부재력 (단위 : tf, m)

### 4.2 부재단면 검토

부재단면의 검토는 강도 측면과 사용성 측면 2가지로 하였다. 먼저 수계산으로 관계식을 유도하고 그 식을 이용하여 부재를 가정하여 그림 14 모델로 해석을 수행하여 최대변위를 검토하였다. 수계산으로 강도 측면으로 먼저 계산식을 구하면 다음과 같다.

댐퍼 판요소에 작용하는 전단력( $V_y$ )는

$$V_y = \frac{N_B}{2} \cdot \sin\theta$$

여기서,  $N_B$  : 가새에 걸리는 인장력 (단위 : tf)

$$\sin\theta = \frac{L_y}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

$L_x$  : 프레임 가로길이,  $L_y$  : 프레임 높이

댐퍼에 작용하는 모멘트의 크기( $M_D$ )는

$$M_D = \frac{N_B}{2} \cdot \sin\theta \cdot \frac{L_{x1}}{2}$$

댐퍼 판요소의 내력소성모멘트를  $M_{pD}$ 라고 하면,  $M_D \leq M_{pD}$  이고 댐퍼 크기의 관계식을 아래와 같이 구할 수 있다.



$$\therefore L_{x1} \leq \left( \frac{\sigma_{yD}}{N_B \cdot \sin\theta} \right) \cdot bt^2 \quad (4)$$

$$\therefore L_{y1} = \frac{2}{3} L_{x1}$$

다음으로 사용성 검토 가정을  $\delta_{\max}$ (최대변위)  $\leq \frac{H}{180}$

로 하여 아래 식을 이용하여 유도하면 식 (5)를 얻는다.

$$\sigma = \left( \frac{P}{A} + \frac{M}{S} \right) = E \cdot \frac{\delta_{x1}}{L_{x1}}$$

$\frac{P}{A}$  를 무시하고 X방향의 변위식을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_x = \left( \frac{M}{S} \right) = E \cdot \frac{\delta_{x1}}{L_{x1}}$$

$$\delta_{x1} = \frac{M}{S} \cdot \frac{L_{x1}}{E}$$

$M = \frac{N_B}{2} \cdot \sin\theta \cdot \frac{L_{x1}}{2}$  을 대입하면

$$\delta_{x1} = \frac{N_B}{2} \cdot \sin\theta \cdot \frac{L_{x1}^2}{2E} \cdot \frac{6}{bt^2}$$

$$\delta_{x1} \leq 70\% \cdot \frac{H}{180}$$

$$\frac{N_B}{2} \cdot \sin\theta \cdot \frac{L_{x1}^2}{2E} \cdot \frac{6}{bt^2} \leq 0.7 \cdot \frac{H}{180}$$

$$\therefore L_{x1} \leq \sqrt{\frac{4E}{N_B \cdot \sin\theta} \cdot \frac{bt^2}{6} \cdot \left( 0.7 \cdot \frac{H}{180} \right)} \quad (5)$$

댐퍼의 가로x세로의 치수는 위의 식 (4)와 (5)에서 작은 값에 의하여 지배를 받는다.  $t = 1.6\text{cm}$ 와  $t = 2.0\text{cm}$ 를 대입하여 두 식을 비교 분석해 보면 식 (4)이 식 (5)에 비하여 상대적으로 매우 작은 값을 보인다. 따라서 식 (4)로 설계를 해도 무방하다고 판단된다.

그림 14의 해석모델에 식 (4)를 사용하여 구한 값으로 댐퍼를 모델링 하고 선형해석을 수행하여 사용성을 검토( $\delta_{\max} \leq \frac{H}{180}$ )하면, 모두 작은 값으로 만족하게 된다.

### 5. 에너지 소산식을 이용한 내진성능 평가

아래의 에너지 소산식을 이용하여 실험체의 내진성능을 평가할 수 있다.

에너지 소산의 합 :

$$E_D = \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_{(i+1)} + P_i}{2} \right) (\Delta_{(i+1)} - \Delta_i)$$

에너지 소산 지표 :  $E_y = 0.5 P_y \Delta_y$

여기서,  $P_y =$  항복하중

$\Delta_y =$  항복변위

에너지 소산율 :  $D = \frac{E_D}{E_y}$

실험에서 얻어진 하중-변위 그래프를 표 5에서 정리하였다. 표 5에서 비용접 댐퍼보다는 용접 댐퍼가 내진성능이 더 우수함을 알 수 있다. 그리고 댐퍼의 크기가 클수록 에너지 소산능력이 더 큼을 보여준다.

표 5. 실험체 에너지 소산능력표

실험체 종류	항복 하중 [tf]	항복 변위 [cm]	에너지 소산의합 [tf·cm]	에너지 소산지표 [tf·cm]	에너지 소산율
W536*357T16B100	4.02	0.35	446	0.70	637
UW536*357T16B100	4.02	0.35	27	0.70	39
W407*271T12B100	3.10	0.23	409	0.36	1136
UW407*271T12B100	3.10	0.23	151	0.36	419

### 6. 결 론

외부프레임이 직사각형일 경우 내부에 들어가는 댐퍼의 형태 및 내진성능 검토를 비선형 해석의 접근방법과 에너지 소산식을 통해 살펴본 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 댐퍼의 가로와 세로부분의 소성모멘트가 동시에 발생하여 에너지 소산량을 극대화 시키려면, 댐퍼의 형태는 외부프레임과 닮은꼴이어야 한다.
- (2) 용접 댐퍼가 비용접 댐퍼보다 에너지 소산능력이 우수하다.
- (3) 직사각형 용접댐퍼의 크기는( $L_{x1}$ )는

$$L_{x1} \leq \left( \frac{\sigma_{yD}}{N_B \cdot \sin\theta} \right) \cdot bt^2 \text{이다.}$$

- (4) 댐퍼의 크기는 클수록 내진성능이 다소 커진다. 추가적인 실험을 수행한다면, 큰 댐퍼에서 에너지 소산이 클 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 중소기업청 산·학·연 공동 기술개발컨소시엄사업으로 수행되었으며, 협력기관인 (주)영화엔지니어링의 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

대한건축학회, (1998), 강구조 한계상태 설계기준 및 해설  
대한건축학회, (2000), 한계상태설계기준에 의한 강구조설계 예제집  
이명재, (1988), 철골구조의 내진성능, 대한건축학회지 32권 2호  
ANSYS Manual Release 5.3 (1996)  
POS-MIDAS GENw 4.2.2 Manual, (2000)

AISC, (1997), Seismic Provisions for Structural Steel Building  
Michel Bruneau, (1998), Ductile Design of Steel Structures  
Minoru Wakabayashi (1986), Design of Earthquake-Resistant Buildings  
Robert Trembly, (2001), Seismic Behavior and Design of Concentrically Braced Steel Frames, Engineering Journal, AISC, Third Quarter, Volume 38, No.3  
Wonki Kim, (1991), Seismic-Response Analysis And Design of Composite Building Structures, Ph.D. Dissertation.

(접수일자 : 2003. 5. 9 / 심사일 2003. 5. 20 /  
심사완료일 2003. 6. 5)