

플레이트형 에너지 흡수장치를 가지는 기둥-보 접합부에 관한 연구

오 상 훈¹⁾ · 박 해 용^{2)*}

¹⁾ 부교수, 부산대학교, 건축공학과 ²⁾ 박사과정, 부산대학교, 건축공학과

A Study on Beam-to-Column Connections with Plate Type Energy Absorption System

Oh, Sang Hoon¹⁾ Park, Hae Yong^{2)*}

¹⁾ Associate Professor, Dept. of Architecture, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

²⁾ Ph.D. Student, Dept. of Architecture, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

ABSTRACT : Recently, there is a growing interest on sustainable connection system that makes it possible to reuse of main structural members by concentrating most of the damage in the frame caused by strong horizontal force, such as earthquake, to damper. In this study proposed a new type of damage-controlled connection system applying these concepts and analysed the major structural performance of the proposed system through the full-scale cyclic loading test and nonlinear finite element analyses. According to the result, it derived the optimal damper/beam strength ratio that minimize the damage of main members and satisfy at least the fully plastic moment of the beam. And it was to verify the possibility of applying as seismic connection details.

KEYWORDS : seismic connection, damage-controll, damper, strength ratio, plastic moment

1. 서 론

건축구조물에서의 접합부는 부재와 부재간의 이음이 발생하는 부분으로서 특히 기둥-보 접합부는 골조의 주요구성부재인 기둥과 보의 긴결을 통해 구조체에 작용하는 대부분의 외력을 기초로 전달하는 핵심요소이다. 하지만 기둥-보 접합부는 접합형식에 따라 가장 큰 응력이 작용하는 부분이기도 하며 구조설계가 복잡하고 접합상세 선택에 주의를 요한다. 강구조 접합방식의 경우 근래에 이르기까지 주부재들을 강접합한 철골모멘트저항골조(Steel Moment-Resisting Frames) 방식이 연성능력이 뛰어난 접합방식으로 간주되어 주로 사용

되어 왔다. 하지만 1990년대 미국의 노스리지 지진과 일본의 효고현 남부 지진을 경험하면서 보 부재와 접합되는 기둥 외주면의 열영향부(HAZ)에서의 취성과단이라는 구조적 결함을 인지하게 되었고 미국의 SAC Joint Venture, 일본건축학회를 중심으로 보 부재에 발생하는 소성힌지의 위치를 열영향부가 아닌 보 내부로 유도가 가능한 접합상세들에 대한 다방면의 연구가 이루어져 왔다^{(1),(2),(3),(4),(5),(6)}.

최근에 들어 외력에 의한 최대응력을 특정위치 혹은 장치에 유도하여 주부재의 손상방지 및 내진성능을 향상시키고자 하는 접합상세에 대한 연구가 시작되었다. 특히 이들 접합상세는 지진 등의 수평력에 의해 구조체가 피해를 받은 이후에도 주부재의 손상을 방지할 수 있으며 해체가 가능함에 따라 부재레벨의 리유스(Reuse)가 가능한 친환경 건축구조시스템이라 할 수 있다. 또한 건설시장의 추세가 보다 대형화, 장스팬화 됨에 따라 점차적으로 고강도 부재 적용빈도가 증가하고 있는 현 시점에서 높은 항복비를 가지는 고강도강 부재를 사용할 경우에도 주부재의 손상을 줄이면서 연성접합부를 구현할 수 있는 최적의 접합상세로 자리매김할 수 있을 것으로

Note.-Discussion open until August 31, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 19, 2012; revised December 31, 2012; approved on January 30, 2013.
© KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-51-510-7608 Fax. +82-51-514-2230
E-mail: haeyong2610@hanmail.net

기대되고 있다^{[7],[8],[9],[10],[11]}.

본 연구에서는 상기 언급한 손상제어형 접합부의 개념을 가지는 새로운 형상의 접합상세를 제안하였으며 반복이력실험, 비선형해석을 실시하여 제안한 상세의 구조성능 검토 및 최적 댐퍼/보 내력비 도출, 리유스가 가능한 내진상세로서의 가능성을 분석하였다.

2. 기존연구결과

2004년 Kishiki 등은 보 부재 하부플랜지에 손상제어장치를 설치한 접합부에 대한 실험적 연구를 진행하였다^[12]. 접합형태는 보 부재의 상하부 플랜지만 볼트접합으로 각형강관 기둥에 접합되어있는 형태이며 하부플랜지에 손상제어 목적의 강재댐퍼가 부착되어있다. Fig. 1(a)는 제안된 접합부 형상과 실험결과를 나타낸 것이다. 실험결과 손상은 하부강재댐퍼에 집중되었으며 접합부의 전체거동은 안정적인 이력특성을 나타내었으나 특수모멘트 접합부로서의 사용가능성을 검증할 수 있는 변형까지는 실험이 이루어지지 못하였다.

국내에서는 2006년 오상훈 등은 보의 상부측은 기존의 스플릿티를 고력볼트로 연결하여 접합부의 회전중심의 기능을 하고 보의 하부측은 슬릿플레이트를 고력볼트접합하여 골조에 발생하는 변형을 보 하부 플랜지의 접합요소에 집중하게 하는 접합부 시스템을 제안하였다(Fig. 1(b) 참조). 실험결

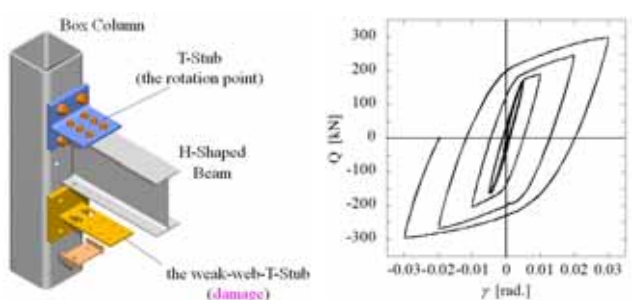
과 손상은 슬릿플레이트에 한정되어 보 부재가 탄성에 머무른 상태에서도 충분한 소성변형을 발휘하였다. 또한 합성보를 대상으로 한 추가실험결과에서도 슬래브효과와 상관없이 우수한 연성거동을 할 수 있음을 밝혔다.

상기 언급한 국내외 지속가능형 접합상세의 경우 공통적인 특징으로 접합부가 부담하는 대부분의 손상을 보 부재 하부에 설치된 손상제어장치에 국한시키면서 보 부재의 소성변형을 최소화하고 단부의 취성파단없이 우수한 내진성능을 보유하고 있음을 입증하였다. 하지만 이러한 접합부 시스템은 보의 웹접합없이 플랜지접합만으로 소정의 목표달성을 기대하는 시스템이며 접합부의 종국거동시 댐퍼부 파단이 발생할 경우 수직전단력에 대한 저항능력에 문제가 발생할 가능성이 크다.

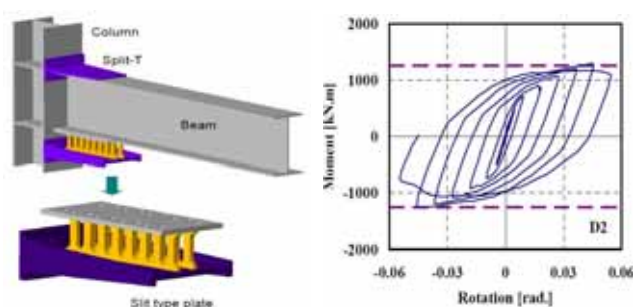
3. 신형상 기둥-보 접합상세

3.1 형상 및 거동패턴

본 연구에서 제안하는 기둥-보 접합상세의 형상 및 거동패턴을 Fig. 2, Fig. 3에 나타내었다. 전체적으로 T-stub접합 방식으로 이루어져 있으며 하부 접합요소는 댐퍼와 수직전단력에 대한 저항기구역할을 동시에 할 수 있는 형태로 설계하였다. 즉, 수평력에 의한 휨재의 회전거동 발생시 상부의 T-stub 접합요소는 회전축의 역할을 하며 보 부재에 작용하는 모멘트를 하부 접합장치내에 존재하는 댐퍼의 축방향 인장/압축력으로 저항할 수 있도록 구성하였다. 또한 댐퍼의 기둥 외주면 방향으로 댐퍼에 비해 큰 면적을 가지는 수평 플레이트판은 슬릿구멍을 천공하고 표준장력의 50%이하로 보 부재와 볼트접합하여 대변형 이전에서는 접합부의 내력에 기여하지 않은 채로 슬라이딩만 발생하도록 고려하였으며 플레이트 아래에 소요전단력에 충분히 저항할 수 있는 수직리브를 보강하였다. 이는 대변형에 의한 댐퍼부의 파단 이후 보 부재와 하부 접합장치의 분리를 방지하면서 보 부재에 작용하는 수직 전단력을 기둥부재에 원활히 전달시키기 위함이다. 댐퍼부의 경우 압축력 발생시 면외좌굴에 의하여 구조성능이 상실될 수 있으며 이를 위하여 댐퍼의 아랫부분에는 압축좌굴 방지를 목적으로 하는 플레이트를 대어 보 부재와 볼트접합하였다. 본 제안상세의 경우 실제 건축물에 적용시 슬래브 합성효과를 고려한 상세이며 취성파단에 의한 주요파괴 지점이 기둥외주면의 보 하부 플랜지에서 발생하기 때문에 이하에서 기술되는 부분은 우선적으로 댐퍼의 인장력에 의한 거동을 중심으로 언급하였다.



(a) Connections with Damage-Controlled System^[12]



(b) Connections with Slit Plate Dampers^[10]

Fig. 1 Existing Damage-Controlled Systems

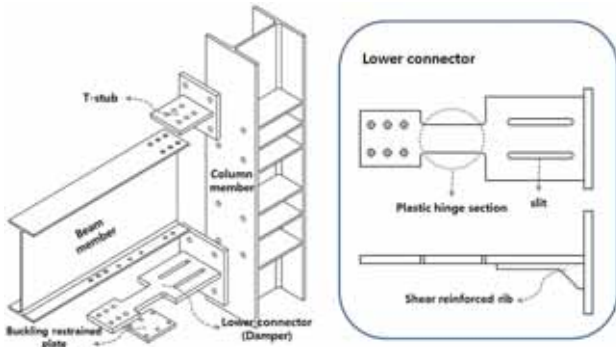


Fig. 2 New Beam-to-Column Connection Detail

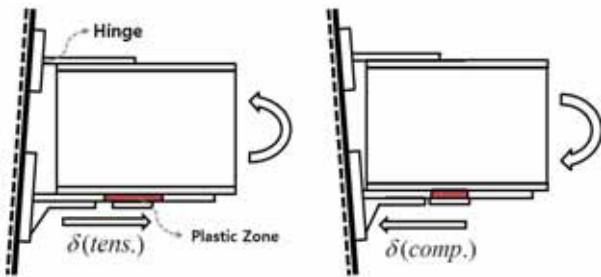


Fig. 3 Proposed Connection Behavior Pattern

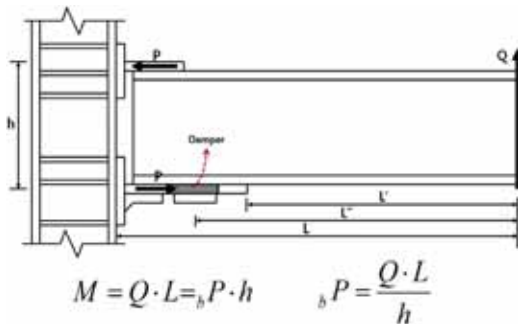


Fig. 4 External Force Condition

3.2 댐퍼 설계

제안한 접합부의 경우 보 부재에 작용하는 전단력에 의해 보 단부에는 휨모멘트가 발생하고, 이에 따라 보의 상하 플랜지에는 압축 및 인장에 의한 축방향력이 작용하게 된다. 댐퍼는 하부플랜지의 보 길이방향으로 설치되므로 댐퍼는 압축 및 인장에 의한 축방향력에 저항하게 된다. 따라서 제안한 접합부의 설계시 댐퍼의 단면적에 대한 설계가 핵심사항이 된다. 본 상세의 붕괴메커니즘은 소성힌지 역할을 하는 댐퍼의 위치가 보 부재의 하부에 설치되며 일반적으로 보 항복형 메커니즘으로 분류될 수 있다. 이에 따라 기둥-보 접합부를 구성하는 다른 요소들은 강기둥, 강패널존으로 설계되어야 하며 상대적으로 작은 강도를 가지는 보와 댐퍼의 내력비를 검토

하여 전체 접합부 설계를 진행하여야 한다. 이때 댐퍼의 내력이 보 부재의 내력에 비해 강할 경우 보 부재가 먼저 항복하여 주부재의 손상을 방지할 수 없게 되며 댐퍼의 설계내력이 지나치게 작을 경우 접합부 전체의 내력이 소요강도를 만족시킬 수가 없다. 따라서 본 접합상세를 제안하기에 앞서 소요강도 이상을 만족하며 주부재의 손상을 최소화할 수 있는 최적 댐퍼/보 내력비 도출이 필요하다.

기둥-보 접합부의 회전거동시 외력상태를 Fig. 4에 나타내었다. 댐퍼/보 목표설계내력비를 X 라 두면 댐퍼의 항복내력을 식 (1)로 표현할 수 있다. 또한 접합부의 항복내력과 최대내력은 식 (2), 식 (3)으로 나타낼 수 있다^[13].

[댐퍼의 항복내력]

$${}_dP_y = {}_dF_y {}_dA = X({}_bM_y/h) \quad (1)$$

[접합부 항복내력]

$${}_TM_y = {}_dF_y {}_dA h = X {}_bM_y \quad (2)$$

[접합부 최대내력]

$${}_TM_{\max} = \min \left[{}_dF_u {}_dA h, \frac{L}{L'} {}_bM_p \right] \quad (3)$$

여기서, ${}_dF_y$: 댐퍼의 소재항복강도

${}_dF_u$: 댐퍼의 소재인장강도

${}_dA$: 댐퍼의 축방향 단면적

${}_bM_y$: 보 부재의 설계항복강도

${}_bM_p$: 보 부재의 전소성모멘트

X : 목표 댐퍼/보 내력비

식 (3)에 표현하였듯이 제안접합부시스템의 최대내력은 댐퍼의 최대내력과 보의 춤에 의한 우력모멘트와 보의 전소성모멘트(${}_bM_p$)중 작은 값을 취하는 것으로 산정할 수 있다. 하지만 댐퍼의 축력에 의한 우력이 보의 ${}_bM_p$ 보다 클 경우 보 부재의 손상정도는 커질 수 밖에 없으며 따라서 댐퍼/보 내력비의 상한을 아래 식 (4)로 결정할 필요성이 있다.

$$X_{\max} = \left(\frac{{}_bM_p}{{}_bM_y} \right) \left(\frac{{}_dF_y}{{}_dF_u} \right) \quad (4)$$

일반적인 H형강 보, 연강댐퍼를 적용할 경우 (${}_bM_p/{}_bM_y$)는 1.1~1.2, (${}_dF_y/{}_dF_u$)는 0.6~0.7정도의 범위에 있으며 이때 한계 댐퍼/보 내력비($X_{\max}$)는 대략 0.70~0.85의 범위로 나타난다.

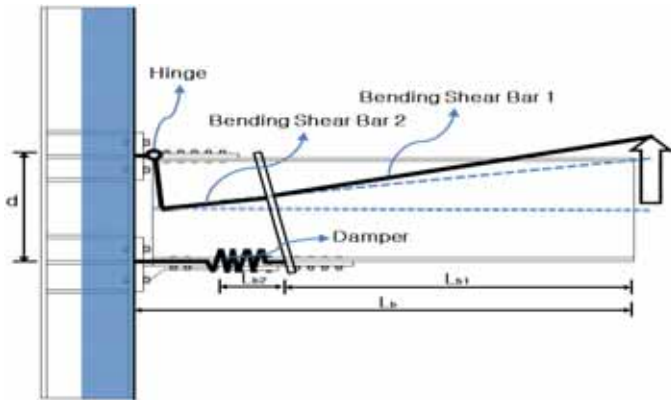


Fig. 5 Analytical Model of Proposed Connection

- 휨전단봉1: 휨의 전단면이 유효한 단면2차모멘트 ($_{b1}I$), 전단은 보웨브의 단면만이 유효($_{wA}$)
- 휨전단봉2: 휨은 보의 상부플랜지만 유효한 단면2차모멘트($_{b2}I$), 전단은 보웨브의 1/2단면만이 유효($_{wA}/2$)
- 접합부의 강성: T-Stub 플랜지의 면외강성($_{st}K$), 댐퍼의 축방향 강성($_{dK}$)

3.3 탄성강성 평가

웹접합없이 상하부 플랜지에 T-stub에 의해 볼트체결된 접합부의 경우 T-stub의 플랜지가 충분한 두께를 가지고 볼트체결간격이 긴밀하다면 강접합(Rigid Connections)으로 사용가능함이 선행연구들을 통해 밝혀진바 있다^{[14],[15],[16]}.

본 절에서는 T-stub접합의 개념을 가지는 제안접합상세의 탄성강성 근사식에 대하여 기술하였다. 하부플랜지에 손상제어장치를 가지는 접합부의 탄성강성 계산값의 산정은 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 간단한 접합부 모델로서 평가가능하다(Kishiki, 2004). 보의 가력지점에서 하부접합요소내의 댐퍼부 시작점까지를 유효길이(L_{b1})로 하는 휨전단봉 1, 댐퍼부길이(L_{b2})를 휨전단봉 2로 모델링하였으며 접합부는 T-stub의 면외방향 강성, 댐퍼의 축강성을 고려하였다. 접합부 강성요소의 경우 T-stub는 양단고정인 보의 중앙에 집중하중이 작용하는 것으로 모델화하였고 댐퍼의 경우는 접합부에서의 보 부재의 수직변위에 대하여 축방향력으로 저항하는 것으로 모델화하였다. 각 요소의 접합부 수직변위에 대한 강성은 직렬로 저항하므로 직렬강성의 합으로 전체 접합부의 탄성강성을 표현할 수 있다. 접합부 전체의 탄성강성 평가를 위한 각 모델의 강성산정식은 다음과 같다.

[전체탄성강성(K)]

$$K^{-1} = \frac{1}{_{b1}K} + \frac{1}{_{b2}K} + \frac{1}{_cK} \quad (5a)$$

[휨전단봉 1의 강성($_{b1}K$)]

$$_{b1}K^{-1} = \frac{L_{b1}^3}{3E_b I_{b1}} + \frac{L_{b1}}{_w A G_b} \quad (5b)$$

[휨전단봉 2의 강성($_{b2}K$)]

$$_{b2}K^{-1} = \frac{L_{b2}(L_{b1}^2 + L_{b1}L_{b2} + L_{b2}^2)}{3E_b I_{b2}} + \frac{2L_{b2}}{_w A G_b} \quad (5c)$$

[접합부분의 강성($_cK$)]

$$_cK = \left(\frac{1}{_{st}K} + \frac{1}{_dK} \right) \left(\frac{d}{L_b} \right)^2 \quad (5d)$$

여기서, E_b : 보 부재 사용재료의 탄성계수

G_b : 보 부재 사용재료의 전단탄성계수

$_{st}K$: T-stub의 면외방향

강성($_{st}K = 192E_{st}I_{st}/_{st}L$)

$_dK$: 댐퍼의 축방향 강성($_dK = E_d A_d / _dL$)

4. 구조성능평가 실험

4.1 실험계획 및 방법

본 연구에서 제안한 접합상세의 구조성능 검증을 위하여 실험대형 반복가력 실험을 실시하였다. 실험변수는 댐퍼/보 항복내력비로서 항복내력비 0.4, 0.6을 가지는 2개의 T형 접합부 실험체를 제작하였다. 각 실험체명은 TDC-댐퍼/보 내력비로 표기하였다. 보와 기둥의 단면사이즈는 각각 H-600×200×11×17, H-400×400×20×25를 사용하였다. 보 부재의 경우 사용재료는 SM490강재의 물성치를 사용하였으며 기둥 부재의 경우 최근 국내에서 개발된 인장강도 800MPa급 고강도강(HSA800)을 사용하여 강기둥, 강패널존을 구현할 수 있도록 하였다. T-stub와 하부접합장치의 경우 SS400강재의 물성치를 사용하였다. 각 사용강종의 공학적 응력-변형도 관계와 재료실험결과를 Fig. 6, Table 1에 나타내었다. 실

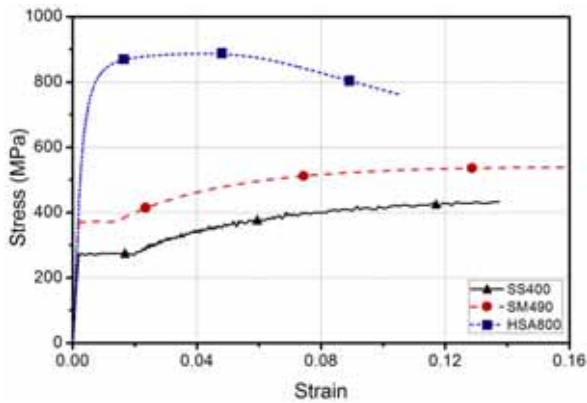


Fig. 6 Stress-Strain Relationships

Table 1. Steel Material Characteristics

Steel	Young's Modulus E (MPa)	Yield Strength σ_y (MPa)	Tensile Strength σ_u (MPa)	Yield Ratio σ_y/σ_u	Elongation (%)
SS400	187,235	274	427	0.642	32
SM490	190,953	368	538	0.684	26
HSA800	199,958	739	884	0.836	21

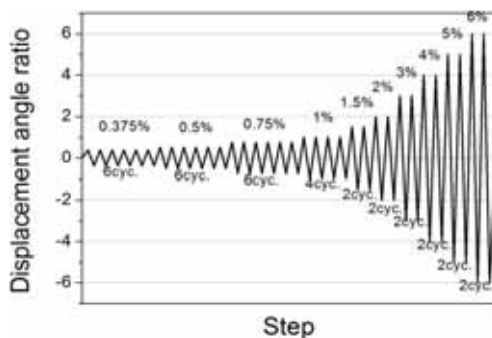


Fig. 7 Cyclic Loading Pattern(FEMA 350)

험체 셋팅도와 실험전경을 Fig. 8, Fig. 9에 나타내었다. 반복가력을 위하여 3,000kN용량의 정적 Actuator를 사용하였으며 가력패턴은 FEMA에서 제시된 접합부 반복재하절차를 사용하였다(Fig. 7 참조).

4.2 실험결과

실험결과에 따른 모멘트-회전각 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 또한 그래프 내에 각 실험종국상황을 표시하였다. 2개의 실험체에 대하여 T-stub와 댐퍼부의 보 부재 접합부에서 볼트슬립에 의해 이력곡선이 다소 함몰된 형태를 나타내었으나 총 재단회전각 4%이상을 상회하는 우수한 변형능력을 나타내었다. TDC-0.6실험체의 경우 접합부 회전각 0.04rad

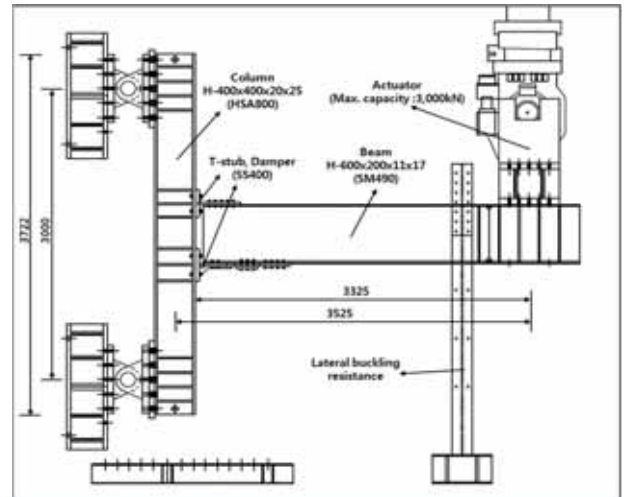


Fig. 8 Elevaton View



Fig. 9 Test Setup

시까지 보의 전소성모멘트의 80%이상을 만족하며 FEMA 350, KBC 2009에서 제시하고 있는 특수모멘트골조의 요구 성능을 만족하는 것으로 판단된다. 또한 모든 실험체에 대하여 내력저하시점은 댐퍼부의 파단 및 크랙발생에 의하여 결정되었다.

Fig. 11은 TDC-0.6 실험체의 누적회전각에 대한 보 부재 최대 인장응력 작용지점과 댐퍼부의 계측변형도를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 변형은 댐퍼부에서 집중적으로 발생한다. 반복이력에 의한 보 부재의 변형도는 1.7% 이하의 범위에 머무르며 접합부 종국거동시까지 탄성거동을 하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 본 접합상세는 궁극적인 목적인 부재레벨의 재사용이 가능한 상세임을 알 수 있다.

4.3 에너지 분담률 분석

반복하중에 의해 접합부에 유입되는 누적흡수에너지를 접

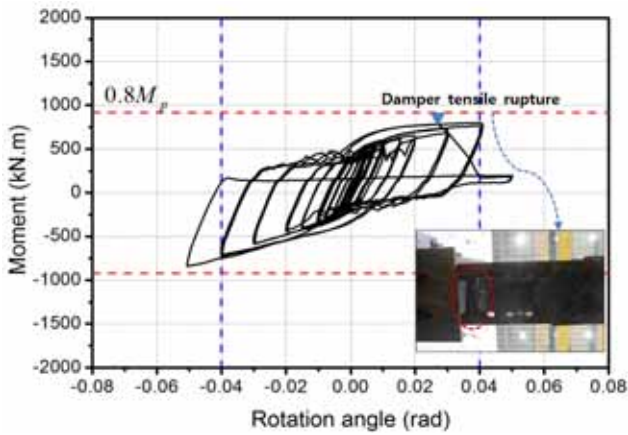


Fig. 10(a) Moment-Rotation Angle Relationships (TDC-0.4)

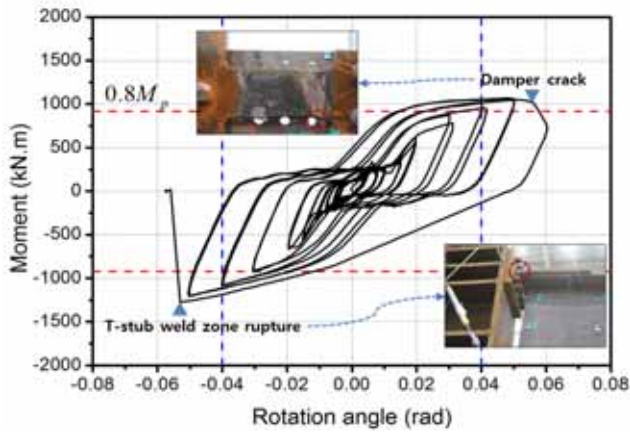
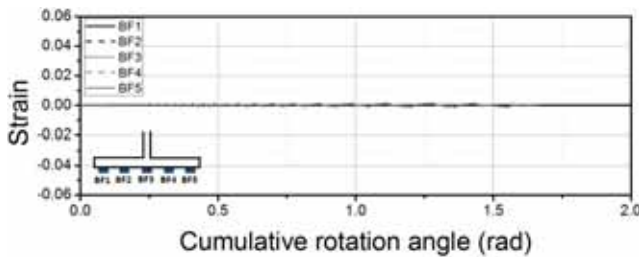
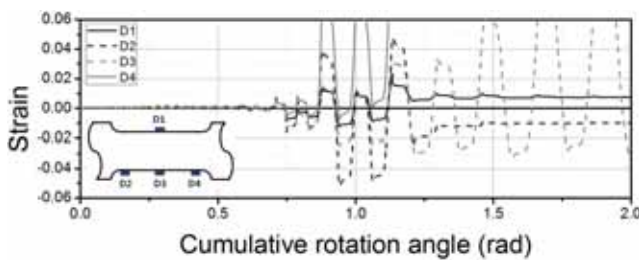


Fig. 10(b) Moment-Rotation Angle Relationships (TDC-0.6)



(a) Beam Flange(Maximum Stress Point)



(b) Damper

Fig. 11 Strain-Cumulative Rotation Angle Relationships (TDC-0.6)

하부의 각 요소의 분담률로 표시하여 Fig. 12(a)에 나타내었다. 가로축의 수치는 각 실험체의 에너지절대치를 나타낸 것이다. 2개의 실험체에서 전체 누적에너지의 경우 댐퍼의 에너지 분담률은 90% 이상을 나타내었으며 접하부의 거동에 지배적인 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 또한 부재의 분담률은 각각 5.2%(TDC-0.4), 7.6%(TDC-0.6), 기둥과 패널존의 부담률은 0.6% (TDC-0.4), 0.4%(TDC-0.6)으로 나타났다. 강기둥, 강패널존으로 제작된 설계의도가 적절하게 반영되었음을 보여준다. Fig. 12(b)는 실험체가 흡수하는 총 에너지에서 탄성에너지를 제외한, 즉 소성변형에너지를 각 요소별로 나타낸 것으로 대부분의 소성에너지가 댐퍼부에 집중하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 유한요소해석

5.1 해석계획 및 방법

해석사용프로그램은 ANSYS(ver.11.0)을 사용하였다. 해석요소는 강재해석에 효과적이고 3축 방향의 응력상태를 표현할 수 있는 SOLID45요소를 사용하였다. 해석모델은 실물 크기로 모델링하였으며 Von Mises항복조건을 사용하여 부재의 소성변형까지 고려할 수 있는 비선형 해석을 실시하였다. 해석모델의 형상은 T자 형태의 기둥-보 접합부를 모델링하였으며 해석시간 절약 및 댐퍼부의 거동을 명확히 관찰하기 위하여 슬릿구멍에 긴결되는 볼트들을 제외한 실제 표준

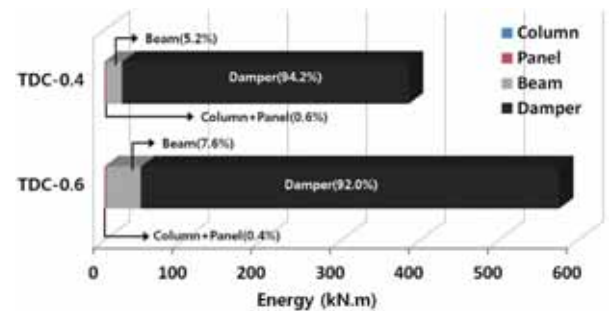


Fig. 12(a) Energy Distribution Ratio(Whole Energy)

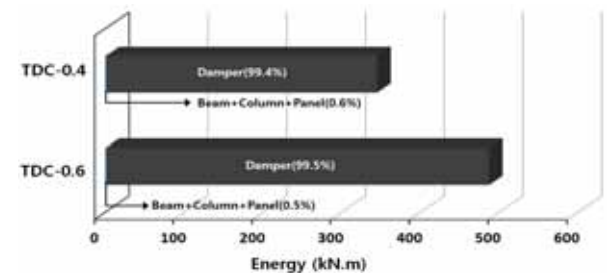


Fig. 12(b) Energy Distribution Ratio(Plastic Energy)

장력으로 체결되는 볼트군의 모델링은 생략하였으며 그 외의 부분은 제안상세를 그대로 모델링하였다. 또한 해석에 의한 제안접합부의 구조성능을 비교·분석하기 위하여 종래의 1/4 원형의 용접접근공을 가지는 전용접방식의 기둥-보 접합부를 대조군으로 설정하여 추가모델링하였다. 보와 기둥의 단면사이즈 및 강종은 실험의 경우와 동일하다. 해석을 위한 메시형상을 Fig. 13에 나타내었다.

재료물성치는 선행재료실험결과를 토대로 실제재료물성치를 진응력-로그변형도로 치환하여 적용하였으며 재료의 경화역(hardening condition)까지 충분히 고려하였다.

경계조건은 기둥부재의 일정길이 상하부를 고정하고 보의 자유단에서 상향으로 200mm($\approx 0.06\text{rad}$)의 강제변위를 적용하였다. 해석모델의 요소 중 제안접합상세모델의 경우 댐퍼와 보 플랜지, 좌굴방지 플레이트의 맞닿는 부분에서 접촉에 대한 경계조건 설정이 필요하며 상기 기술한 요소들의 마찰력에 의한 영향은 크지 않다고 판단되므로 contact 기법을 사용하여 마찰계수를 0.1로 설정하였다.

Table 2에 해석모델일람을 나타내었다. 해석변수는 접합상세의 차이와 댐퍼/보 내력비가 되며 댐퍼/보 내력비의 경우 0.2~1.2까지 0.2 간격으로 총 6개의 제안접합상세모델로 구성하였다. 해석모델명 WC는 Welded Connections를 의미하여 TDC는 Turner Damper Connections를 의미한다. 제안상세모델명 오른쪽 숫자는 댐퍼/보 내력비를 뜻한다.



(a) Welded Connection (b) Proposed Connection

Fig. 13 Finite Element Analysis Models

Table 2. List of Analysis Models

Analysis Models	Damper/Beam Strength Ratio(X)	Thickness of Damper (mm)	Connection Details
WC	-	-	Welded
TDC-0.2	0.2	10	Proposed Detail
TDC-0.4	0.4	20	
TDC-0.6	0.6	30	
TDC-0.8	0.8	40	
TDC-1.0	1.0	50	
TDC-1.2	1.2	60	

5.2 해석결과

비선형 해석결과에 따른 모멘트-회전각 관계 및 주요구조 성능을 Fig. 14, Table 4에 나타내었다. 그림 상의 수평파선은 보 부재의 전소성모멘트(M_p)를 표시한 것이다.

해석결과 제안한 접합상세모델의 경우 전용접 접합부에 비해 전체적으로 초기강성이 크게 나타났으며 댐퍼/보 내력비

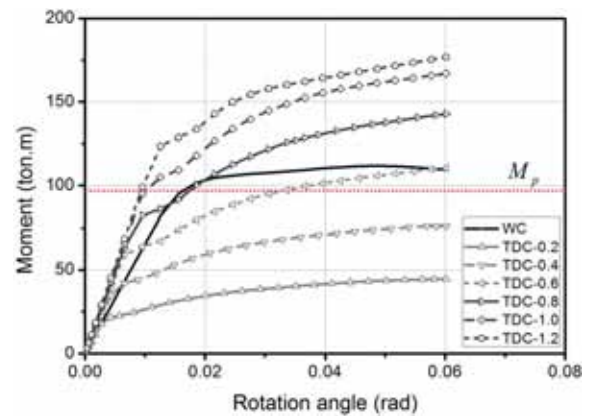


Fig. 14 Moment-Rotation Angle Relationships (FEM)

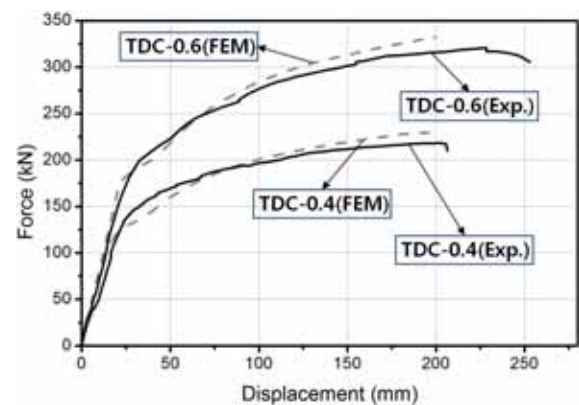


Fig. 15 Comparison of Skeleton Curves and Analysis Results

Table 3. Comparison of Test and Analysis Results

Specimen	Division	K_i (N/mm)	δ_y (mm)	P_y (kN)	P_{max} (kN)
TDC-0.4	Test	6708.76	21.12	141.68	218.01
	FEM	7457.36	18.25	136.12	229.21
TDC-0.6	Test	7736.70	26.74	206.90	321.02
	FEM	8267.35	25.22	208.48	332.32
Error(%)		6.5~10.0	5.6~13.6	0.7~3.9	3.4~4.9

* Case of analysis results, maximum force is the force at 0.06rad rotation angle.

* Yield point was calculated using the General yield point method.

의 증가에 따라 접합부의 초기강성 및 강도가 증가됨을 알 수 있다. 하지만 댐퍼/보 내력비가 0.8이상일 경우 접합부의 강도는 댐퍼의 면적에 따라 비례적으로 증가하지 않으며 이는 전체 접합부의 내력이 보 부재의 전소성모멘트보다 커지게 되는 시점부터 댐퍼가 부담하는 저항력이 차츰 보 부재로 전달되기 때문인 것으로 판단된다. 해석결과에 따른 전용접합부모델의 항복내력에 대한 제안상세모델의 항복내력의 비는 설계 댐퍼/보 내력비와 양호한 대응을 보이며 본 연구에서 제안한 댐퍼내력 산정식 및 예상 항복메커니즘의 신뢰성이 우수함을 확인할 수 있다.

반복하중에 의한 이력곡선은 골격곡선부(Skeleton)와 바우싱거부(Bauschinger), 탄성제하부(Unloading)로 이루어져 있으며 골격곡선부의 경우 일방향 가력에 의한 하중-변형의 이력곡선과 궤도가 거의 일치함을 많은 연구에 의하여 증명된 바 있다(秋山 宏, 1990)^{[17],[18],[19]}. 이에 실험결과에

의한 이력곡선에서 정방향(댐퍼부의 인장력을 유발하는 방향) 골격곡선부를추출하여 해석에 의한 단조가력 이력곡선을 비교하여 Fig. 15와 Table 3에 나타내었다. 비교결과 항복변위의 경우 10%이상의 차이를 보였으나 초기강성 및 항복/최대내력의 경우 대부분 10%이내의 오차를 가지며 해석결과와 신뢰성 확보가 가능한 수준인 것으로 사료된다.

5.3 응력분포도

해석모델별 총회전각 0.04rad시 Von Mises응력분포도를 Fig. 16에 나타내었다. 제안상세모델의 경우는 동일시점에서의 하부접합장치의 응력분포도를 전체접합부 응력분포도와 함께 도식화하였다. 전용접합부모델의 경우 모멘트구배에 따라 보의 자유단에서 기둥외주면으로 갈수록 응력의 크기가 커지며 최대응력지점은 보 단부의 기둥외주면에 발생하는 것

Table 4. Analysis Results

Analysis Models	Elastic Stiffness (kN/mm)	Yield Rotation Angle (rad)	Yield Strength (ton · m)	Damper/Beam Strength Ratio		Maximum Moment (ton · m)
				Target	Analysis Results	
WC	5.94	0.0144	92.8	-	1	109.5
TDC-0.2	5.86	0.0030	19.5	0.2	0.21	44.6
TDC-0.4	7.46	0.0045	37.4	0.4	0.40	76.3
TDC-0.6	8.27	0.0065	59.6	0.6	0.64	110.5
TDC-0.8	8.84	0.0080	78.3	0.8	0.84	142.9
TDC-1.0	9.18	0.0096	97.3	1.0	1.05	167.0
TDC-1.2	9.21	0.0119	122.2	1.2	1.32	176.9

* Maximum force is the force at 0.06rad rotation angle.

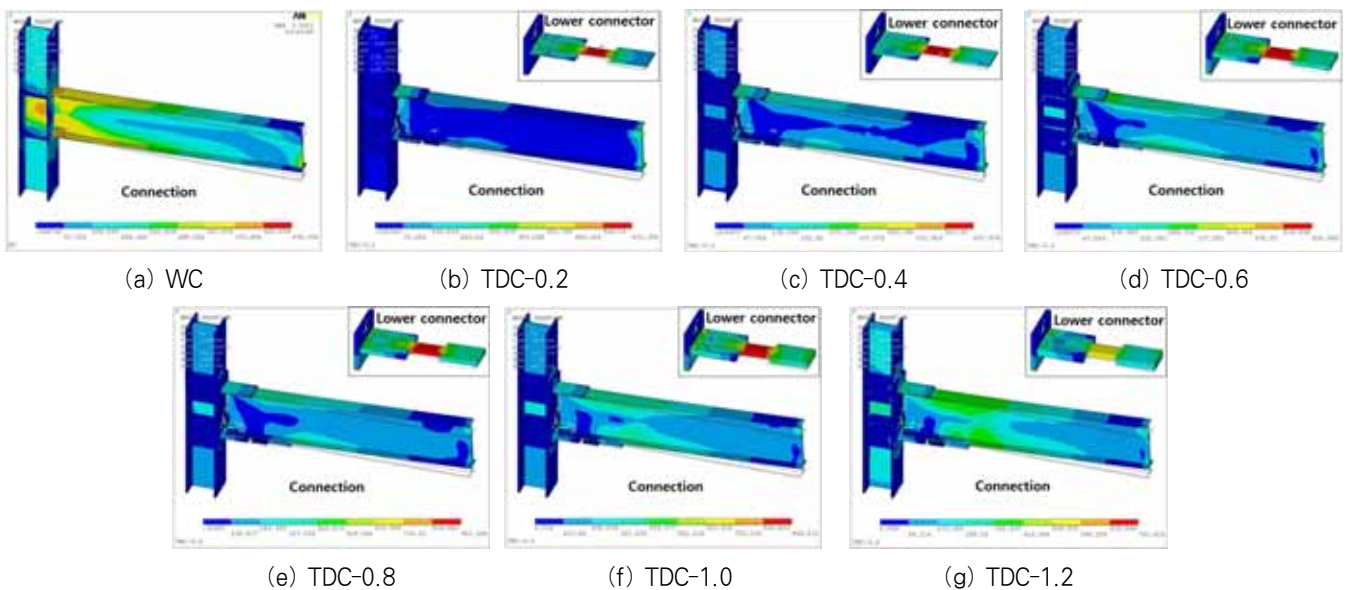


Fig. 16 Von-Mises Stress Distribution(at 0.04rad Rotation Angle)

을 알 수 있다. 제안상세모델의 경우는 대부분 댐퍼부에서 최대응력지점이 발생하며 댐퍼/보 내력비가 작아질수록 주부재에 작용하는 응력의 크기는 확연히 줄어드는 것을 볼 수 있다. TDC-1.2모델의 설계 댐퍼/보 내력비는 1.0이상으로 설정되어 있으며 0.04rad거동시까지 보 부재에 상당한 응력이 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

5.4 변형능력 및 내력상승을 분석

내진용 접합부의 실험을 위해서는 소성변형능력 즉, 시스템의 항복 이후의 변형능력 확보가 무엇보다 중요하며 항복 이후의 최대내력까지의 내력증진은 안전마진의 측면에서 중요하다. 이에 일본의 한계상태설계법에서는 접합부의 인성평가 기준을 누적소성배율($\mu = (e\delta_u - e\delta_p) / e\delta_p$)의 경우 1.8 이상, 내력비(eP_u / eP_p)의 경우 1.15이상을 만족하기를 요구하고 있다^[2].

본 절에서는 해석모델별 소성배율, 내력상승율을 계산하여 대조군 모델(WC)을 기준으로 제안상세 모델의 변형능력 및 내력상승율을 분석하였으며 그 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 결과를 통하여 제안상세 모델은 종래의 용접상세와 비교

하여 대략 평균적으로 소성배율의 경우 2.4배, 내력상승율의 경우 1.6배로 나타났으며 조기항복으로 인해 초기강성 확보가 유리하며 안정성 마진이 크고 소성변형능력이 우수한 것으로 판단된다.

5.5 변형도 분석

Fig. 18은 각각 보 부재와 하부접합장치 내의 댐퍼부의 최대인장응력지점에서의 접합부 회전각 증가에 따른 변형도 분포를 해석모델별로 나타낸 것이다. 앞 절에서 기술하였듯이 종래의 전용접상세 모델은 보와 기둥이 접합되는 보 하부플랜지 단부에서, 제안상세 모델의 경우는 댐퍼부에서 최대인장응력지점이 발생하였다. 또한 제안상세 모델의 보 부재에서의 최대인장응력발생지점은 보 하부플랜지의 하부접합장치와의 접합이 끝나는 지점에 나타났다. 해석상의 물성치 적용에 사용된 재료의 인장실험결과 보 부재의 사용재료인 SM490강의 한계탄성변형율은 0.0017, 댐퍼부에 사용된 SS400강의 한계탄성변형율은 0.0019로 나타났다. 우선 전용접상세를 가지는 WC모델의 경우 회전각의 증가에 따라 보 부재가 적극적으로 소성거동을 한다. 특히 총회전각 0.03rad 거동시에는 인장변형도가 0.04까지 증가하게 되는데 용접상세를 가지는 접합부 선행실험결과들에 따르면 열영향부의 취성파단이 발생할 때의 변형도는 대략 0.04 정도로 추정하고 있으며 강재의 파단발생을 명확히 확인하지 못하는 해석과는 달리 실제 실험 및 실무에 적용되었을 경우 이와 같은 결과는 비탄성거동에 대하여 상당한 위험성을 수반하고 있다는 것을 반증한다. 이에 반해 제안상세 모델의 경우 보 부재에 비하여 댐퍼부에서 선행적으로 소성화가 이루어지며 댐퍼/보 내력비 0.6이하에서는 보 부재가 탄성범위에 머무르고 있다는 것을 확인할 수 있다. 댐퍼/보 내력비 0.8 이상에서는 상대 내력비의 증가에 따라 보 부재의 손상이 심화되며 본 연구의 목적인 부재의 재사용이 가능하기 위한 최적의 댐퍼/보 내력비는 대략 0.6정도를 취하는 것이 타당하다고 판단된다.

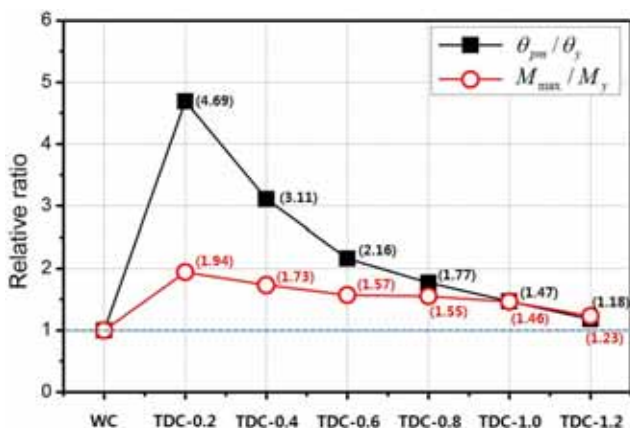


Fig. 17 Deformation Ratio and Strength Increasing Ratio

Table 5. The Elastic Stiffness Calculation value

Analysis Models	Bending-Shear bar 1 (kN/mm)	Bending-Shear bar 2 (kN/mm)	T-stub (kN/mm)	Damper (kN/mm)	Joints (kN/mm)	Total (kN/mm)	Analysis Result (kN/mm)	Error (%)
TDC-0.2	15.68	24.33	2.43×108	564.57	18.38	6.27	5.86	7.1
TDC-0.4	15.68	24.33	2.43×108	1129.13	36.77	7.57	7.46	1.5
TDC-0.6	15.68	24.33	2.43×108	1693.70	55.15	8.13	8.27	1.7
TDC-0.8	15.68	24.33	2.43×108	2258.27	73.53	8.44	8.84	4.5
TDC-1.0	15.68	24.33	2.43×108	2822.83	91.91	8.64	9.18	5.9
TDC-1.2	15.68	24.33	2.43×108	3387.40	110.30	8.78	9.21	4.7

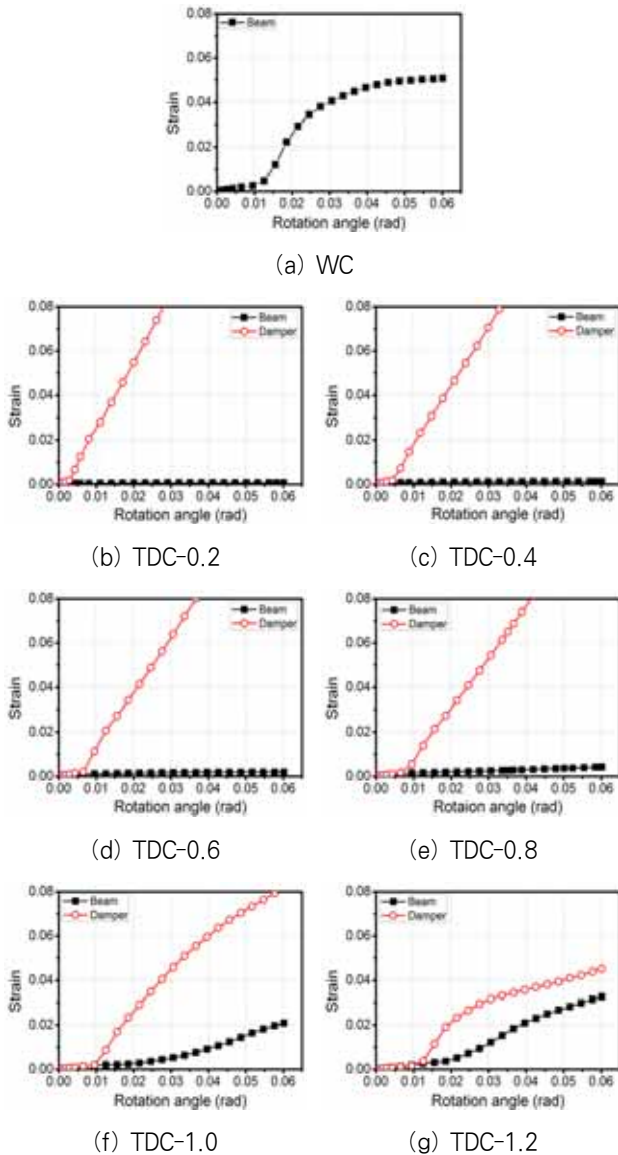


Fig. 18 Strain Profiles at Beam Flange and Damper

5.6 초기탄성강성 비교

해석결과에 따른 초기강성의 경우 제안상세의 모델은 댐퍼/보 내력비 0.2모델이 5.86kN/mm로서 전용접합상세 모델의 초기강성 5.94kN/mm와 대등한 수치를 나타내었고 그 외 모든 모델이 그 이상의 수치를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 제안한 접합상세의 경우 강접합 구현이 가능할 것으로 사료된다. 또한 제안상세 모델의 초기강성을 앞 장에서 기술한 탄성강성 산정식의 결과와 비교하여 Table 5에 나타내었다. 전체적인 비교오차에서 10%이내의 근소한 차이를 가지고 있으며 향후 본 접합상세 적용시 댐퍼면적 산정 이후 이에 따른 초기강성 근사치는 수정 · 제안된 탄성강성 산정식으로 간략하게 확인가능할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 지속가능형 접합상세의 개념을 가지는 새로운 형태의 손상제어형 기동-보 접합상세를 제안하였으며 실험 및 해석적 방법을 통하여 제안상세의 구조성능을 확인하였다.

- (1) 지진 및 수평력에 의한 손상을 보 부재의 하부플랜지와 접합되는 댐퍼장치에서 효과적으로 제어할 수 있으며 부재의 재사용이 가능한 새로운 접합상세를 제안하였으며 이를 위한 접합부의 내력, 강성 및 댐퍼의 설계식을 제시하였다.
- (2) 실험결과를 통하여 본 접합상세의 댐퍼/보 내력비 0.6 실험체의 경우 내력 및 변형능력의 측면에서 FEMA 350에서 제시된 특수모멘트골조의 요구조건을 만족하는 것으로 나타났으며 종국거동시까지 보 부재의 변형도가 탄성범위에 머무르며 부재의 재사용이 가능한 접합상세인 것으로 나타났다.
- (3) FEM해석결과 제안상세는 댐퍼부의 선행소성화로 인해 손상을 효과적인 제어할 수 있는 시스템임을 확인하였으며 제시한 설계식의 신뢰성을 검증하였고 변형도 분석을 통하여 최적의 댐퍼/보 항복내력비(≈ 0.6)를 도출하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2012년도 첨단 도시개발사업의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌(References)

- [1] 日本建築學會(2002) 鋼管構造設計施工指針·同解説, 日本建築學會.
AIJ (2002) *Steel Pipe Construction Manual*, Architectural Institute of Japan.
- [2] AISC (2005) *Steel Construction Manual, 13th Edition*, American Institute of Steel Construction, USA.
- [3] 오상훈, 김영주, 문태섭(2004) 바닥슬래브에 의해 구속된 철골 모멘트접합부의 내진보강에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제2호, pp. 247-255.
Oh, S.H., Kim, Y.J., and Moon, T.S. (2004) Experimental Study on Seismic Retrofit of Steel Moment Connections Considering Constraint Effect of the Floor Slab,

- Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 16, No. 2, pp.247-255 (in Korean).
- [4] 오상훈, 김영주(2008) 철골모멘트접합부의 내진보강에 관한 해석적 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제3호, pp.445-454.
- Oh, S.H. and Kim, Y.J. (2008) Analytical Study for Seismic Retrofit of SMRFs Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 3, pp.445-454 (in Korean).
- [5] 김영주, 오상훈(2008) RHS기둥-H형강보 접합부의 내진 보강설계, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제4호, pp.529-537.
- Kim, Y.J. and Oh, S.H. (2008) Seismic Retrofit Design of RHS Column-to-H Beam Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 4, pp.529-537 (in Korean).
- [6] 오상훈, 최영재, 윤성기, 이동규(2010) SN강재가 사용된 강구조 용접모멘트 접합부의 내진성능평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제3호, pp.271-280.
- Oh, S.H., Choi, Y.J., Yoon, S.K., and Lee, D.G. (2010) Evaluating Seismic Performance of Steel Welded Moment Connections Fabricated with SN Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 22, No. 3, pp.271-280 (in Korean).
- [7] Oh, S.H., Kim, Y.J., and Ryu, H.S. (2009) Seismic performance of steel structures with slit dampers, *Engineering Structures* 2009:31, Elsevier
- [8] Oh, S.H. and Ryu, H.S. (2007) Sustainable Structural System Using Passive Energy Absorption Devices, *The 9th KCJ Symposium on Structural Steel Construction*, Structural Steel Construction.
- [9] 오상훈, 김영주(2005) 슬릿플레이트 댐퍼를 가진 기둥-보 접합부 이력거동, 대한건축학회논문집 구조계, 대한건축학회, 제21권, 제12호, pp.101-108.
- Oh, S.H. and Kim, Y.J. (2005) Hysteretic Behavior of Beam-to-Column Connections with Slit Plate Dampers, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 21, No. 12, pp.101-108 (in Korean).
- [10] 오상훈, 김영주, 유홍식, 강창훈(2006) 보의 하부플랜지에 에너지 흡수요소를 가지는 기둥-보 접합부의 이력특성, 대한건축학회논문집 구조계, 대한건축학회, 제22권, 제8호, pp.29-36.
- Oh, S.H., Kim, Y.J., Ryu, H.S., and Kang, C.H. (2006) Hysteretic Characteristics of Beam-to-Column Connections with Energy Absorption Elements at Beam Bottom Flanges, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 22, No. 8, pp.29-36 (in Korean).
- [11] 박해용, 오상훈(2012) 손상제어가 가능한 접합부시스템에 관한 해석적 연구, 2012년도 학술대회 발표집, 한국강구조학회, pp.153-154.
- Park, H.Y. and Oh, S.H. (2012) An Analytical Study on Damaged Controlled Connection System, *Proceedings of Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.153-154 (in Korean).
- [12] Kishiki, S., Yamada, S., Takeuchi, T., and Wada A. (2009) *New ductile moment-resisting beam-column connection based on Damage-Controlled design*, Proceedings 5th International Symposium on Steel Structures, KSSC, pp.329-334.
- [13] 대한건축학회(2009) 건축구조설계기준 및 해설(KBC 2009), 기문당.
- AIK (2009) *Korea building code and commentary - structural*, Architectural Institute of Korea (in Korean).
- [14] 이명재(2006) T-stub를 이용한 접합부의 초기강성 평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제6호, pp.805-813.
- Lee, M.J. (2006) Initial Stiffness Evaluation of T-stub Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 18, No. 6, pp.805-813 (in Korean).
- [15] 양재근, 김윤, 박재호(2012) 상·하부 스플릿 T 접합부의 초기회전강성 예측모델, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제3호, pp.279-287.
- Yang, J.G., Kim, Y., and Park, J.H. (2012) Prediction Model for the Initial Rotational Stiffness of a Double Split T Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 3, pp.279-287 (in Korean).
- [16] 양재근, 김주우, 김윤(2012) 상·하부 스플릿 T 접합부의 휨강도 설계식, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제5호, pp.511-520.
- Yang, J.G., Kim, J.W., and Kim, Y. (2012) Design Formula for the Flexural Strength of a Double Split Tee Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 5, pp. 511-520 (in Korean).
- [17] 松本由香 (1998) 鋼構造剛接骨組における梁端破壊と終局耐力性に關する研究, 東京大學博士學位論文.
- M. Moto (1998) A Study on Both ends Failure and Ultimate resistibility of Steel Structural Frames, Paper of masters degree in Tokyo University, Japan.
- [18] Akiyama, H., Takahashi, M., and Shi, Z. (1995) Ultimate Energy Absorption Capacity of Round-Shape Steel Rods Subjected to Bending, *J. Struct. Constr. Eng.*
- [19] Kato, B. and Akiyama, H. (1973) Predictable Properties of Material under Incremental Cyclic Loading, *Preliminary Publication Lisbon*, IABS.

요 약: 최근 지진동과 같은 강한 수평력 작용시 골조에 작용하는 대부분의 손상을 댐퍼부에 집중시키며 주부재의 재사용을 가능하게 하는 지속가능형 접합부 시스템에 관한 관심이 커지고 있다. 본 연구에서는 이러한 개념을 적용한 새로운 형태의 손상제어형 접합부 시스템을 제안하고 실험대 반복이력실험 및 비선형 유한요소해석을 통하여 제안 시스템의 주요 구조성능을 분석하였다. 분석결과를 통하여 주부재의 손상을 극소화하면서 보의 전소성모멘트 이상을 만족하는 최적의 댐퍼/보 내력비를 도출하였으며 내진접합상세로서의 적용가능성을 확인하였다.

핵심용어: 내진접합부, 손상제어, 댐퍼, 내력비, 소성모멘트
