

2단 슬릿 댐퍼형 에너지 흡수장치를 가지는 대형 H형 보-기둥 접합부에 관한 해석적 연구

오상훈¹ · 김윤혁^{2*} · 김영주³ · 유홍식⁴ · 박해용⁵

¹교수, 부산대학교, 건설융합학부, ²석사과정, 부산대학교, 건축공학과,

³대표, 한국건축구조연구원, ⁴전문연구원, POSCO 기술연구원 구조연구그룹,

⁵책임연구원, 부산대학교 지진방재연구센터

An Analytical Study on the Deep H-Shaped Beam-to-Column Connections with Double Slit Damper Type Energy Absorption System

Oh, Sang Hoon¹, Kim, Youn Hyeok^{2*}, Kim, Young Ju³, Ryu, Hong Sik⁴, Park, Hae Yong⁵

¹Professor, Dept. of Construction and Convergence Studies, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

²Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

³CEO, Korea Institute of Structural Engineering & Consulting, Busan, 46241, Korea

⁴Principal Researcher, POSCO Steel Solution Laboratory Structure Research Group, Incheon, 21985, Korea

⁵Senior Researcher, Earthquake Disaster Research Center, Pusan National University, Yongsan, 50612, Korea

Abstract - In this study, a new detail and a design formula are proposed which can theoretically overcome problems that a conventional damage control system with an energy absorber installed at a beam end can have in a situation of 750 mm or more of the beam depth. Nonlinear Finite Element Analysis for derived Optimum Design variable, compared with existing details, verification proposed equation and possibility of proposed as detail for seismic beam-to-column connections 750 mm or more of beam depth is verified.

Keywords - Beam-to-column connection, Damage-control, Slit-damper, Strength ratio, Deep beam

1. 서론

강구조 건축물에서의 기둥-보 접합부는 기둥과 보 부재를 접합하는 부분으로서 건물에서 발생하는 하중뿐만 아니라 외부 요소로 인해 발생하는 외력을 전달하는 중요한 요소이며 강구조 건물 전체의 내진성능은 접합부의 상세에 따라 크게 좌우된다. 건설기준코드 KDS 41에서는 보-기둥 접합부의 내진성능에 따라 철골 보통, 중간, 특수모멘트골조 3등급으로 분류를 하며 접합부 등급에 따라 건물 설계 시 반

응수정계수(R)를 차등 적용하도록 규정하고 있다. 높은 등급의 모멘트골조를 사용할 경우 반응수정계수에 의하여 지진 발생 시 층별로 입력되는 밀면 전단력이 감소하여 건축물 전체의 강재 물량을 감소시킬 수 있으며 우수한 연성능력을 보유한 보-기둥 접합상세를 사용함으로써 실질적으로 건축물의 내진성능을 향상시킬 수 있다.

건설기준코드에서 철골 중간, 특수모멘트 골조는 보 춤이 750 mm를 초과하지 않도록 제안하고 있다. 이러한 접합부의 보 춤과 관련된 제한규정의 수립 배경은 보의 춤에 비례하여 동일한 층간변위각의 상황에서 보 단부에서 발생하는 접합부 소재의 국부변형이 증가하며 보춤 750 mm 이상의 종래의 용접접합상세를 사용할 경우 보 내부에서 발생하는 소성형지로 인하여 낮은 층간변위각에서 조기 취성파단 발생의 위험을 우려하여 보통모멘트골조로 사용하도록 제한하고 있다. 다만 실험실 실험을 통하여 그 성능이 중간, 특수모멘트접합부 기준을 만족하는 것이 입증되었을 경우 해

Note.-Discussion open until August 31, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 04, 2019; revised December 02, 2019; approved on December 10, 2019.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-7608 Fax. +82-51-514-2230

E-mail. powerseismic@gmail.com

당 등급을 사용할 수 있도록 규정하고 있다. 이러한 규정으로 인하여 장스팬 건물의 경우 보의 강성확보를 위하여 보의 춤이 깊어지며 종래의 용접접합상세를 사용할 경우 위의 보춤과 관련된 규정에 의하여 특수모멘트접합부 상세를 적용하는것이 제한된다.

한편 외력에 의한 손상을 특정 위치 혹은 장치로 유도하여 주부재의 손상을 방지할 수 있으며 간편하게 해체가 가능함에 따라 부재 레베의 리유스(reuse)가 가능한 건축구조시스템이 국내외 연구진들의 주도로 개발되어져왔다^{[1][6]}. 이러한 손상제어구조시스템은 보가 아닌 단부에 설치되는 에너지 흡수장치에서 소상흔지가 발생하므로 보춤과 관계없이 보-기둥 접합부의 연성능력을 확보하는 것이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 상기 언급한 손상제어구조시스템을 보춤 750 mm를 초과하는 보(이하 대형보)에 적용하였을 때 발생할 수 있는 문제점을 이론적으로 검토하였으며 해당 문제들을 극복하기 위한 대형보 전용 접합 상세를 제안하였다. 제안 상세의 유한요소해석을 실시하여 제안한 상세와 기존 상세의 비교평가, 제안한 상세의 구조성능 검토 및 최적 댐퍼/보 내력비 도출, 리유스가 가능한 내진 상세로서의 대형보 적용 가능성을 분석하였다.

2. 기존연구결과

2.1 기존접합상세 실험결과

2006년 Oh *et al.*은 기둥-보 접합부의 기둥플랜지, T-stub, 보 상부 플랜지를 고력볼트로 체결하여 접합부의 회전중심의 기능을 하고 기둥플랜지, 슬릿플레이트, 보 하부 플랜지를 고력볼트로 체결하여 골조에서 발생하는 변형에너지를 하부 접합 요소(이하 댐퍼부)에 집중하는 접합부 시스템을 제안하였다(Fig. 1 참조). 실험 결과 설계 의도와 같이 댐퍼부에 대부분의 변형에너지가 집중되고 기둥, 보 등 주요 골조는 탄성에 머무는 상태에서 0.04 rad를 초과하는 층간변형각을 발휘하였다. 또한 합성효과를 고려한 추가 실험 결과에서도 우수한 연성거동이 가능한 접합 상세임을 밝혔다^[4].

한편 국내외 해외에서는 용접접합된보-기둥 접합상세와 더불어 보춤 750 mm의 대형보에 대한 연구가 진행되어 왔으며 이러한 연구의 접합상세는 공통적으로 보 단부를 보강하거나 RBS 형상으로 절취하여 응력집중을 보 단부에서 보 내부로 옮긴 형상이다. 그러나 이러한 상세는 소성흔지가 보 내부에서 발생하므로 용접부에서의 취성파단의 위험이 여

전히 존재하거나 단면절취로 인한 조기내력 저하의 문제점이 존재한다^{[4][18]}. 한편 앞서 언급한 손상제어구조시스템과 같이 보 단부에 댐퍼가 설치된 상세의 경우 소성흔지가 댐퍼에서 발생하기 때문에 취성파단의 위험이 적고, 댐퍼의 용량을 조절함으로써 변위가 증가함에 따라 보의 전소성모멘트를 상회하는 내력을 발휘하는 것이 가능하다.

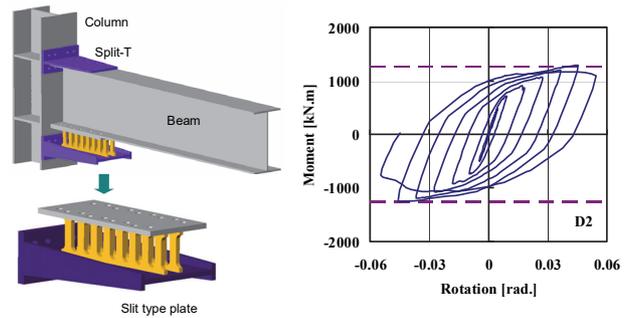


Fig. 1. Existing damage-controlled system^[4]

2.2 기존접합상세 분석

한편 보춤 600 mm의 실험에서는 기존 접합상세가 우수한 연성능력을 보였으나 보가 대형화할 경우 다음 몇 가지의 문제점이 예상된다. 첫째로 보의 대형화로 인하여 동일한 층간변형각을 보유하기 위하여 댐퍼부에서 더 많은 변형능력을 보유하여야 한다. 둘째로 변위에 따른 슬릿 댐퍼의 거동 특성이다.

Fig. 2와 같이 보춤이 커지게 되면 상부 T-stub가 회전중심이 되는 접합상세 특성상 동일한 층간변형각일 경우 댐퍼부에서 발생하는 변위도 보 춤에 비례하여 증가하게 된다. 보춤이 600 mm일 경우와 보춤이 1,000 mm일 경우의 댐퍼부에서의 변위는 층간변형각 0.06 rad에서 최대 1.47배까지 증가하며 보가 대형화될수록 해당 접합상세는 접합부의 연성능력을 확보하기 위해 댐퍼부의 우수한 변형능력이 요구되는 것을 알 수 있다.

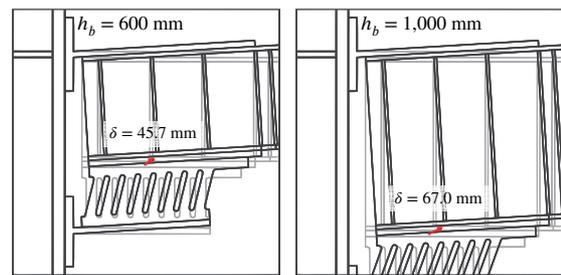


Fig. 2. Displacement of slit damper at 0.06 rad drift by beam height

한편 기존 접합상세의 댐퍼부에 적용된 슬릿 댐퍼는 발생하는 변위에 대하여 전단거동 및 휨거동을 통한 에너지 흡수를 목적으로 설계되었으며 일정한 변위 이하에서는 이러한 설계의도를 잘 반영한 거동을 보인다. 하지만 변위가 증가함에 따라 슬릿 댐퍼는 기하학적 특성에 따라 길이방향의 변위가 발생하고 이는 슬릿 댐퍼에 인장력을 발생시킨다 (Fig. 3 참조). 슬릿 댐퍼의 인장력 발생은 슬릿 댐퍼가 소산할 수 있는 변형에너지를 조기에 소진하여 접합부의 연성능력을 저하시키는 요인이 된다.

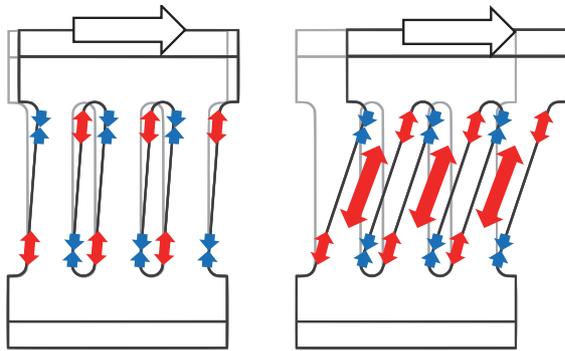


Fig. 3. Stress according to displacement of slit damper

이러한 기존 댐퍼가 가진 구조적 특성은 댐퍼의 형상을 변경하거나, 댐퍼에 적용된 강종을 저항복점, 저항복비를 가진 댐퍼용 강재를 사용하는 등의 방법으로 대형보에서의 적용성을 확보하는 것이 가능하다.

3. 신형상 기둥-보 접합상세

3.1 형상 및 거동패턴

앞절에서 언급한 슬릿 댐퍼의 거동특성은 Fig. 4와 같이 슬릿 댐퍼를 직렬로 다단 배치하여 한계를 극복할 수 있다. 그러나 Fig. 4와 같은 형상을 보 단부에 설치할 경우 실제 사용 가능한 천정고 대비 층고가 과도하게 높아지는 문제점이 발생한다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 원리를 이용하여 슬릿 댐퍼의 한계를 극복함과 동시에 부재를 소형화하여 접합부의 연성능력과 천정고를 동시에 확보를 하는 기둥-보 접합상세의 형상을 Fig. 5와 같이 제시한다. 기존 접합상세와 동일하게 보의 상부 플랜지와 기둥을 T-stub으로 볼트 접합하며 하부 플랜지와 기둥을 댐퍼부로 볼트 접합하는 형상이다. 상부 T-stub는 수평력에 의한 접합부의 회전거동 발생 시 회전중심이 되며 보 부재에서 발생하는 모멘트를 댐퍼부

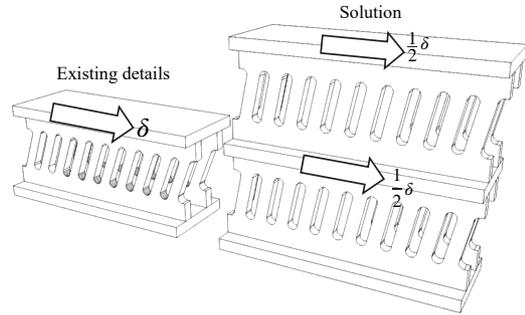


Fig. 4. Solution of existing details

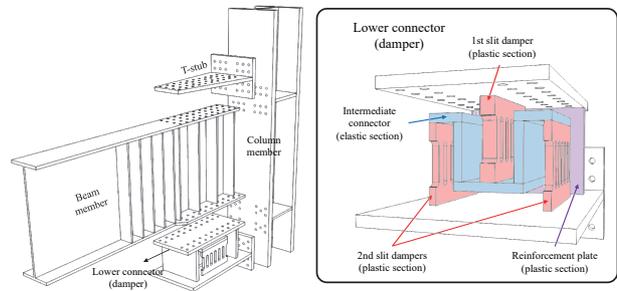


Fig. 5. New beam-to-column connection detail

의 슬릿 댐퍼의 축 방향 인장/압축력 및 중간연결재의 탄성 범위 내의 면외방향 휨거동으로 저항할 수 있도록 구성하였다. 댐퍼부는 2단 직렬형 슬릿 댐퍼와 보강판재 2개 요소로 구성되어있으며 2단 직렬형 슬릿 댐퍼는 1개의 1차 댐퍼와 2개의 2차 댐퍼, 1차 댐퍼와 2차 댐퍼를 연결하는 중간연결재로 구성되어있다. 1차 댐퍼와 2차 댐퍼는 서로 직렬 관계, 2차 댐퍼는 서로 병렬 관계로 1차 댐퍼와 2차 댐퍼의 구조적 성능이 동일하게 설계하여 수평력에 의한 접합부의 회전 거동 시 1차 댐퍼와 2차 댐퍼가 동일한 거동을 보인다. 댐퍼의 총 변위는 기하학적으로 1차 댐퍼, 2차 댐퍼 각각의 변위의 합이 되기 때문에 앞서 언급한 대변위에서의 슬릿 댐퍼의 취약점을 보완하였다. 1차 댐퍼와 2차 댐퍼의 구조적 성능이 동일하게 설계하기 위하여 각 댐퍼의 형상을 통일하고 2차 댐퍼의 두께는 1차 댐퍼의 절반으로 설계하였다. 중간연결재는 대변위에서 1차 댐퍼와 2차 댐퍼 간 위상 차이에 의해 발생하는 모멘트와 댐퍼에서 발생하는 수직 방향 인장력을 비틀림과 면외방향 휨거동을 통해 하중을 소산시켜주며 대변형에 의한 거동에도 탄성 상태를 유지할 수 있도록 충분한 두께를 보유하여야 한다. 해당 댐퍼 형상은 보에서 발생하는 수직 방향 전단력으로 인하여 중간연결재의 면외방향 휨 거동과 실제 부재 제작 시 발생할 수 있는 재료적, 기계적 오차로 인하여 편심이 발생할 수 있으며 이는 2차 댐퍼에서의 균일한 거동을 방해하는 요소가 될 수 있다. 보강판재는

보에서 발생하는 수직 방향 전단력에 대하여 축 방향으로 저항하여 댐퍼에서 발생할 수 있는 면외방향 거동을 분담하며 슬릿 댐퍼가 순수한 전단거동을 할 수 있도록 보조하는 역할을 한다. 본 접합상세는 취성파단에 의한 주요 파괴 지점이 기둥 외 주변의 보 하부 플랜지 및 댐퍼부에서 발생하기 때문에 이하에서 기술되는 내용은 슬릿 댐퍼와 보강판재를 중심으로 기술하였다.

3.2 기존 상세와의 비교해석

제안한 2단 직렬 슬릿 댐퍼 접합상세의 대변위에서의 적용성을 검토하기 위해 유한요소해석을 실시하였다. 해석 모델링은 제안한 접합 상세(new detail, ND), 제안한 접합상세와 동일한 내력을 가진 기존 상세(damper length 120,

DL12), 제안한 접합상세의 높이에서 최대한 댐퍼의 순길이를 늘려 변형 능력을 확보한 형태(damper length 200, DL20) 총 세 모델링을 실시하였다. 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(Ver. 6.14-1)을 사용하였으며 C3D8R 요소를 사용하여 축 방향으로 단조 가력하였다. 슬릿 댐퍼 자체의 성능 및 특성을 확인하기 위하여 댐퍼부만을 설계하여 해석을 진행하였다. 해석 모델링의 댐퍼 형상과 기호를 Fig. 6에 나타내었으며 모델링별 상세 구조성능을 Table 1에 나타내었다. 각 모델링이 보춤 1,000 mm의 보 단부에 설치되었다는 가정 하에 층간변위각 0.04 rad에 해당하는 변위에서의 Von mises Stress 분포를 Fig. 8에 나타내었으며 모델링별 변위에 따른 Max PEEQ index를 Fig. 7에 나타내었다. Max PEEQ index는 소성발생 이후 부재의 손상도를 판단하기에 적절한 지표이며 자세한 내용은 4.1장에 기술하였다.

Table 1. Detail of modeling

Name	Yield strength [kN]	Number of damper [EA]	True length [H]	Fillet radius [r]	Damper width [B]	Damper thickness [t]
DN	1,275.9	16	120	15	60	15
DL12	1,275.9	16	120	15	60	15
DL20	1,277.2	16	200	15	60	25

Material property: SN355B

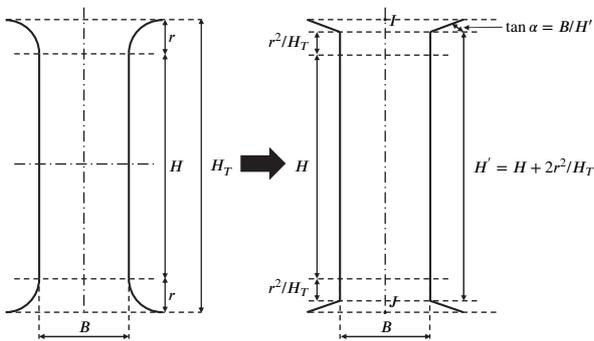


Fig. 6. Damper detail and symbol definition^[7]

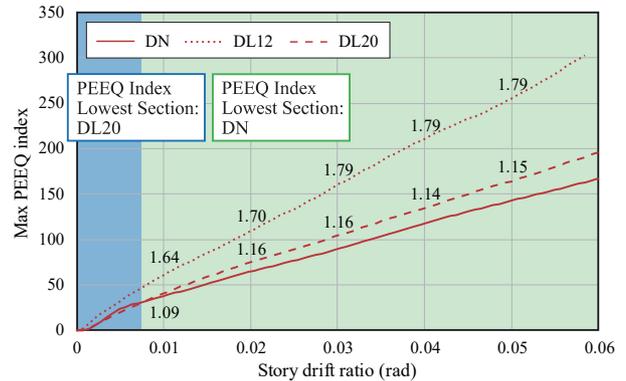


Fig. 7. Max PEEQ index by damper FEM result

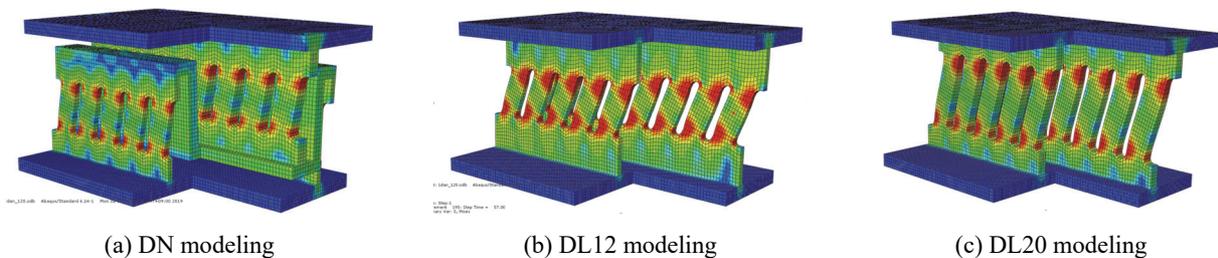


Fig. 8. Von Mises stress distribution by modeling

모델링별 Von Mises stress 분포는 제안형상인 ND에서 가장 낮은 응력 집중을 보였으며, DL20, DL12 순으로 응력 집중이 크게 발생하는것을 확인하였다. PEEQ index 분석 결과 제안 형상인 DN 모델링은 PEEQ index가 DL12 모델링 대비 0.55-0.60, DL20 모델링 대비 0.86-0.87배 정도로 분포하고 있으며 이는 즉 신규 상세가 기존 상세보다 슬릿 댐퍼의 손상을 저감할 수 있음을 의미한다. 결론적으로 제안하는 신규 상세는 기존의 상세 대비 대형보에서 발생하는 대변위에 적합한 것으로 분석된다. 다만 해석상으로는 재료적 및 제작 간 발생하는 오차에 의한 편심, 우력 등이 고려되지 않으므로 보강판재를 추가하여 면외거동 및 축력에 의한 손상을 분담시켜준다. 이를 위하여 보강판재는 축력에 저항하여야 하므로 충분한 두께로 설계하여야 한다.

3.3 항복내력 설계

제안한 접합부의 경우 보 부재에 작용하는 전단력에 의하여 상하부에서 축 방향의 인장 및 압축력이 발생하고 보 단부에서 발생한 휨 모멘트가 댐퍼부를 통하여 기동으로 전달된다. 댐퍼부에서 발생하는 축 방향 전단력에 대하여 댐퍼의 강성이 보강판재에 비하여 크기 때문에 더 많은 전단력을 슬릿 댐퍼에서 분담하고, 댐퍼부에 발생하는 수직력에 대하여서는 슬릿 댐퍼보다 보강판재의 강성이 더 크기 때문에 더 많은 수직력을 보강판재에서 분담하게 된다. 본 상세의 붕괴 메커니즘은 댐퍼부가 보 하부에 설치되어 소성거동을 하므로 보 항복형 메커니즘으로 분류될 수 있다. 이에 따라 댐퍼부를 제외한 접합부를 구성하는 다른 요소들은 보 항복형 메커니즘을 구현하기 위해 강기동, 강패널존으로 설계되어야 하며 기동에 비해 상대적으로 작은 강도를 가진 보와 댐퍼부의 내력비를 검토하며 접합부 설계를 진행하여야 한다. 댐퍼부의 내력비가 보에 비하여 지나치게 클 경우 보에서 먼저 항복이 발생할 우려가 있으며 주부재의 손상을 방지할 수 없다. 또한 댐퍼부의 내력비가 낮을 경우 접합부의 충분한 강성 확보가 어렵기 때문에 목표 성능에 따라 적정 댐퍼부/보 내력비로 설계해야 한다.

기동-보 접합부의 회전 거동시 외력 상태를 Fig. 9에 나타내었다. 목표 댐퍼부/보 내력비를 X로 두었을 경우 슬릿 댐퍼의 항복내력을 식 (1)으로 나타내었으며^[7] 보강판재의 항복내력을 식 (2)로 나타내었다. 또한 댐퍼부 항복내력을 식 (3)에, 접합부 전체의 최대내력은 식 (4)에 나타내었다.

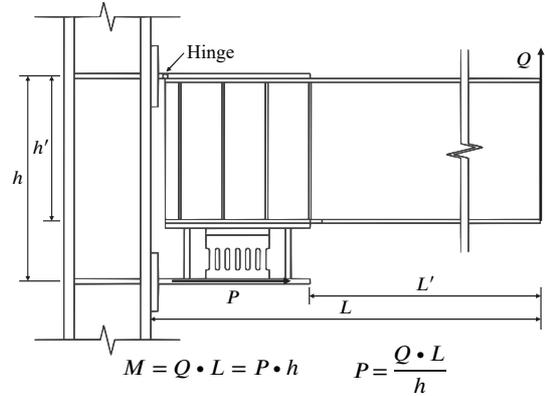


Fig. 9. External force condition

- 슬릿 댐퍼의 항복내력
$${}_dP_y = \min({}_{db}P_y, {}_{ds}P_y) \quad (1)$$

$${}_{ds}P_y = n \frac{2f_y t B}{3\sqrt{3}}, {}_{db}P_y = n \frac{f_y t B^2}{2H'}$$

- 보강판재의 항복내력
$${}_pP_y = \min({}_{pb}P_y, {}_{ps}P_y) \quad (2)$$

$${}_{ps}P_y = n \frac{2f_y t B}{3\sqrt{3}}, {}_{pb}P_y = n \frac{f_y p' t_p^2 B}{2_p(h-t)}$$

- 댐퍼부 항복내력
$${}_T M_y = ({}_dP_y + {}_pP_y)h = X_b M_y \quad (3)$$

- 접합부 최대내력
$${}_T M_{\max} = \min \left[{}_dF_u ({}_dA + {}_pA)h, \frac{L}{L''} {}_bM_p \right] \quad (4)$$

여기서, ${}_bP_y$: 요소의 휨저항 항복내력

${}_sP_y$: 요소의 전단저항 항복내력

n : 2차댐퍼 개수

t : 2차댐퍼 두께

${}_dF_y$: 슬릿 댐퍼의 소재 항복강도

${}_dF_u$: 슬릿 댐퍼의 소재인장강도

${}_dA$: 2차댐퍼의 축방향 단면적

${}_bM_y$: 보 부재의 설계항복강도

${}_bM_p$: 보 부재의 전소성모멘트

X : 목표 댐퍼부/보 내력비

식 (1)과 식 (2)와 같이 슬릿 댐퍼와 보강판재의 항복내력은 각 요소의 전단저항 항복내력과 휨저항 항복내력 중 작은 값을 취하는 것으로 산정할 수 있으며 슬릿 댐퍼와 보강

판재 항복내력의 합에 의하여 댐퍼부의 항복내력이 산정된다. 또한 식 (4)에 표현하였듯이 접합부의 최대 내력은 댐퍼부의 최대내력과 보의 춤에 의한 우력모멘트를 고려한 보의 전소성모멘트중 작은 값을 취하는 것으로 산정할 수 있다. 한편 댐퍼부의 축력에 의한 우력이 보의 전소성모멘트보다 클 경우 보부재의 손상이 발생할 가능성이 있으며 따라서 댐퍼부/보 내력비의 최댓값의 제한이 필요하다. 선행연구에 의하면 기존 제안 상세의 경우 보부재의 손상을 최소화하며 댐퍼부에서 손상에너지를 최대한 흡수할 수 있는 적정 댐퍼부/보 내력비는 0.6-0.8로 보고되어 있다⁶⁾.

3.4 초기탄성강성 설계⁴⁾

모멘트저항골조형 기둥-보 접합부는 수평력 발생 시 부재 간 충분한 모멘트를 전달하여야 하며 일반적으로 강접합(rigid connections)에 가까울수록 모멘트 전달 능력이 우수한 것으로 볼 수 있다. 볼트 접합의 경우 전 단면 용접접합 상세에 비하여 강성은 다소 떨어지나 T-stub의 플랜지가 충분한 두께를 가지고 접합부 간 긴밀한 볼트 체결이 이루어

졌다면 강접합으로 사용 가능하다고 선행연구들을 통해 보고된 바 있다^{8),10)}. 제안한 접합부의 탄성강성의 이론식은 Fig. 10과 같은 접합부 모델로 평가하였다. H형 강보는 가력 지점으로부터 상하부 접합물 끝단 위치까지를 유효 길이 (L_{b1})로 하는 휨전단봉1과 댐퍼 끝단에서부터 접합부 단부까지 거리를 유효 길이(L_{b2})로 하는 휨전단봉2로 모델링하였으며 접합부는 T-stub의 면외휨강성과 슬릿 댐퍼의 강성을 평가하여 직렬스프링으로 모델링하였다. 댐퍼부의 중간 연결재는 수직하중에 의한 휨거동, 댐퍼 축 전단력에 의한 전단 거동 및 비틀림 등 복합적인 거동이 발생하는 부재이나 초기 탄성강성 평가에서는 축 방향 전단강성만을 평가하였다. 상부의 T-stub는 회전중심인 핀으로 모델화했다. 또한 댐퍼의 면외거동에 의해 발생하는 수직방향 변위를 환산하여 수직방향강성(K_{opb})을 평가하여 접합부시스템 전체 탄성강성 평가에 반영하였다. 기둥 플랜지의 면외휨강성은 강체로 설정하여 모델을 간략화하였으며 기존의 연구결과를 바탕으로 초기 탄성강성을 유도하였다^{4),5),7),11)}. 각 요소별 강성평가식의 기호를 Fig. 11에 나타내었으며 각 모델의 강성평가식은 Table 2와 같다.

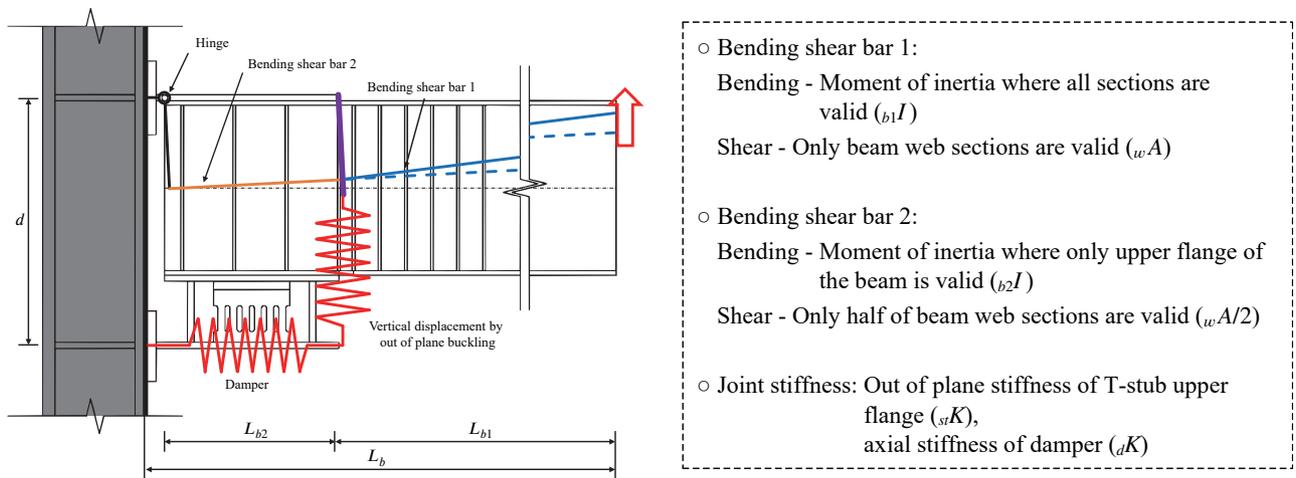


Fig. 10. Analytical model of proposed connection

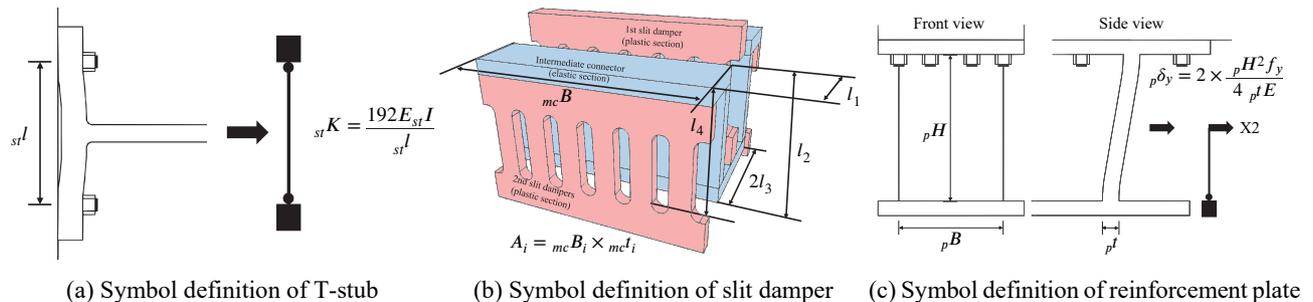


Fig. 11. Symbol definition of members

Table 2. Elastic stiffness design equation

Elastic stiffness equation for ...	Equation	Associated figure
Beam-to-column connection K_T	$K_T^{-1} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{opb}}$	Fig. 10
Out-of-plane buckling K_{opb}	$K_{opb} = \frac{opb P_y}{opb \delta_y}, opb P_y = n \frac{f_y t^2 B}{2H}, opb \delta_y = \frac{(l_1 + l_3) l_4 f_y}{2tE}$	Fig. 11(b)
Column K_c	$K_c = \frac{6E_c I_c}{dl^2}$	Fig. 10
Beam systems K_b	$K_b^{-1} = \frac{1}{b_1 K} + \frac{1}{b_2 K} + \frac{1}{c K}$	Fig. 10
Bending shear bar 1 $b_1 K$	$b_1 K^{-1} = \frac{L_{b1}^3}{3E_b I_{b1}} + \frac{L_{b1}}{u A G_b}$	Fig. 10
Bending shear bar 2 $b_2 K$	$b_2 K^{-1} = \frac{L_{b2}^3(L_{b1}^2 + L_{b1}L_{b2} + L_{b2}^2)}{3E_b I_{b2}} + \frac{2L_{b2}}{u A G_b}$	Fig. 10
Whole connection part $c K$	$c K = c k \left(\frac{d}{L_b}\right)^3, c k^{-1} = \frac{1}{s_t K} + \frac{1}{bc K}$	Fig. 10
T-stub $s_t K$	$s_t K = \frac{192E_s I}{s_t l}$	Fig. 11(a)
Damper part $bc K$	$bc K = d K + p K$	Fig. 11(b)
Whole damper $d K$	$d K^{-1} = \frac{2}{s_{d1} K} + \frac{1}{2m_c K}$	Fig. 11(b), Fig. 6
Reinforced plate $p K$	$p K = \frac{p P_y}{p \delta_y}, p \delta_y = \frac{p H^2 f_y}{2p t E}$	Fig. 11(c)
1st, 2nd damper $s_{d1,2} K$	$s_{d1} K = \frac{d P_y}{d \delta_y}, d \delta_y = \frac{1.5 d P_y H_T}{n E t B} \left[\left(\frac{H'}{B}\right)^2 + 2.6 \right]$	Fig. 11(b), Fig. 6
Intermediate connector $m_c K$	$m_c K^{-1} = \frac{1}{m_c K_1} + \frac{1}{m_c K_2} + \frac{1}{m_c K_3}, m_c K_i = \frac{A_i G_i}{l_i}, (i = 1, 2, 3)$	Fig. 11(b)

여기서, A_i : 중간연결재 i 강판의 축방향 전단면적
 G_i : 중간연결재 i 강판의 전단탄성계수
 l_i : 중간연결재 i 강판의 유효길이

또한 유한요소해석을 통하여 얻은 모멘트-변위 그래프를 무차원화시켜 등가면적치환법에 의한 이력거동 이상화를 통하여 normal bi-linear model 형태의 제안 보-기둥 접합상세의 이력특성을 Fig. 12와 Table 3과 같이 제안한다.

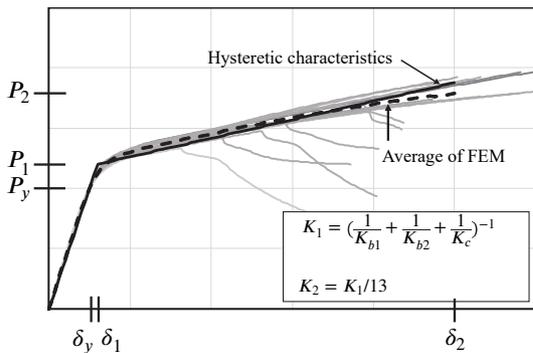


Fig. 12. Hysteretic characteristics of proposal details

Table 3. Hysteretic characteristics symbol

Symbol	Equation
P_1	$1.2P_{y,T}$
P_2	$(F_{u,d}/F_{y,d})P_{y,T} \approx 1.88P_{y,T}$
δ_1	$P_1/K_1 = 1.2\delta_y$
δ_2	$\delta_1 + (P_2 - P_1)/K_2 = 10\delta_y$

4. 최적 설계 변수를 위한 유한요소해석

4.1 유한요소해석 일반사항 및 손상평가방법

제안한 접합 상세는 보와 댐퍼부가 직렬로 연결되어 거동을 하는 상세이기 때문에 최초 손상이 발생하기 시작한 부재에 모든 손상 에너지가 집중되는 상세이다. 그러나 슬릿 댐퍼의 경우 항복 이후 파단이 발생하기까지 지속적으로 내력이 상승하는 특징이 있기 때문에 댐퍼부의 구조성능에 따라 대변위에서 보의 손상이 발생할 우려가 있다. 따라서 본 절에

서는 접합부 전체의 최적 설계를 위한 설계 변수를 확인하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다. 해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(Ver. 6.14-1)을 사용하였으며 3차원 solid 해석을 할 수 있는 C3D8R 요소를 이용하였다. Dynamic implicit 옵션을 이용하여 동적 해석을 실시하였으며 단조 가력을 실시하여 각 부재에서 발생하는 손상을 검토하였다. 본 해석에서는 부재의 손상 정도를 해석하고 비교 분석하는 것이 주목적이므로 소성등가변형률(plastic equivalent strain, PEEQ)을 항복변형률로 나누어 무차원화시킨 PEEQ index로 손상 정도를 평가하였다. 본 연구는 실험 진행 전 선행적으로 이루어진 해석적 연구이므로 직접적인 모델링의 신뢰성 검증이 제한된다. 그러나 선행연구를 통하여 해당 접합상세와 동일한 조건 하에 이루어진 보-기둥 접합상세의 모델링의 신뢰성을 검증하였으므로 간접적으로 해당 모델링의 신뢰성을 확보하였다고 판단하며 선행연구의 모델링 신뢰성 검증 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 해당 선행연구에 의하면 PEEQ와 PEEQ index는 효과적으로 소성상태의 부재 손상 정도를 판단할 수 있다고 보고되어 있으며, PEEQ 및 PEEQ index를 식 (5)에 나타내었다.^[12]

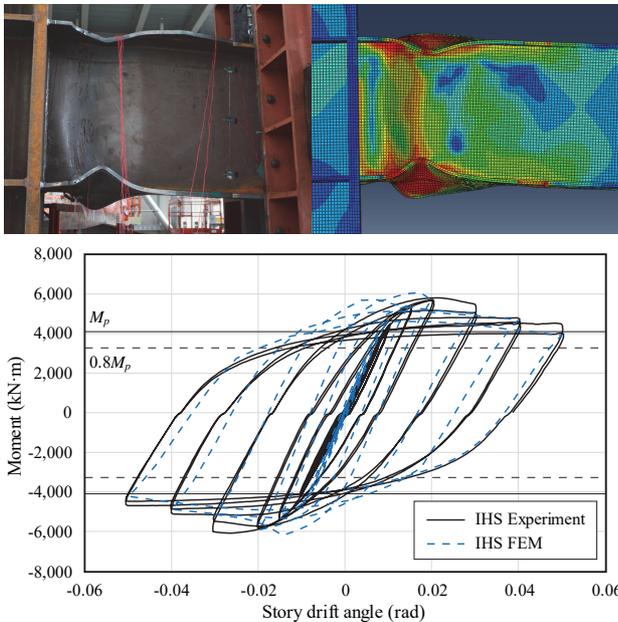


Fig. 13. Reliability verification of analytical modeling in pre-study

$$PEEQ = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij}} \quad (5a)$$

$$PEEQ \text{ index} = \frac{PEEQ}{\epsilon_y} \quad (5b)$$

여기서 ϵ_{ij} : i, j 방향의 소성변형도

ϵ_y : 항복변형도

유한요소해석 후 부재별 PEEQ index의 최댓값을 추출하여 층간변위각별 부재의 탄성 여부 및 손상 정도를 비교 분석하였으며 제시한 항복 내력 및 초기 강성 설계식을 검증하였다.

4.2 모멘트접합부 유한요소해석

제안 상세는 보-기둥 접합부 특성상 모멘트 전달 능력이 중요할뿐 아니라 보의 손상을 제어하는 목적이 있으므로 보의 손상 여부도 중요한 검토 요인이다. 두 요인을 검토하여 보와 댐퍼부간의 최적 설계 변수 도출을 위하여 변수 해석을 실시하였다. 보와 댐퍼부는 서로 직렬 관계이다. 직렬 관계의 부재는 어느 한 부재가 손상이 발생하면 더욱 손상이 해당 부재에 집중하는 특성이 있으므로 보의 re-use를 위하여 댐퍼부의 항복 내력의 상한을 제한할 필요가 있으며 댐퍼부의 내력이 지나치게 낮을 경우 보가 보유한 전소성 모멘트 대비 접합부의 모멘트 전달 능력이 현저히 떨어질 수 있기 때문에 상한선을 넘지 않는 수준에서 최대 내력을 보유하여야 한다. 댐퍼부/보 최적 내력비 도출을 위한 변수는 식 (3)의 X와 같으며 해석 모델링별 상세를 Table 4에 나타내었다.

해석 변수가 되는 댐퍼부/보 내력비를 0.5부터 0.1 간격으로 1.2까지 해석을 실시하고 대조군으로 상하부 플랜지 및 웨브를 용접으로 접합한 용접 접합부를 모델링하였으며 댐퍼부의 슬릿 댐퍼와 보강강판의 내력비는 모든 모델링을 1.1로 통일하여 모델링하였다. 강기둥 약보를 구현할 수 있도록 기둥과 보의 내력비를 설계하였으며 모델링의 구속 조건과 접촉 조건, 가력 방법 및 PEEQ index 추출 지점을 Fig. 14에 나타내었다. 지진에 의한 수평하중 발생 시 부재에 발생하는 모멘트를 모사할 수 있는 “+” 실험체로 모델링하였으며 기둥의 양단은 핀으로 거동할 수 있도록 하였다. 기둥, 보, T-stub, 댐퍼부 각 부재 간 접합 부분은 요소간 일체화를 구현할 수 있는 tie 옵션을 이용하였으며 보의 최소 좌굴 길이마다 면외좌굴방지지지대를 모사할 수 있도록 Rx, Ty, Tz의 자유도를 부여하였다. 각 모델링별 정방향과 부방향으로 층간변형각 0.06 rad까지 가력하였으며 댐퍼부와 보에서 발생하는 PEEQ index를 추출하여 특수모멘트 접합부 조건 중 하나인 층간변형각 0.04 rad를 기준으로 각 부재별 손상도를 확인하였다.

해석 결과 모멘트-변위 그래프를 Fig. 15에 나타내었으며

Table 4. Detail of modeling for beam to column connection

Name	X	Column	Beam	Lower connector yield force [kN]	Slit damper yield force [kN]	Reinforcement plate yield force [kN]
BCC-0.5	0.5	H-600×600×50×70 Yield moment 7,500.9 kN·m	H-1,000×300×16×25 Yield moment 3,343.2 kN·m	1,177.2	560.6	616.6
BCC-0.6	0.6			1,412.6	672.7	740.0
BCC-0.7	0.7			1,648.1	784.8	863.3
BCC-0.8	0.8			1,883.5	896.9	986.6
BCC-0.9	0.9			2,119.0	1,009.0	1,109.9
BCC-1.0	1.0			2,354.4	1,121.1	1,233.3
BCC-1.1	1.1			2,589.8	1,233.3	1,356.6
BCC-1.2	1.2			2,825.3	1,345.4	1,479.9
WC	-			-	-	-

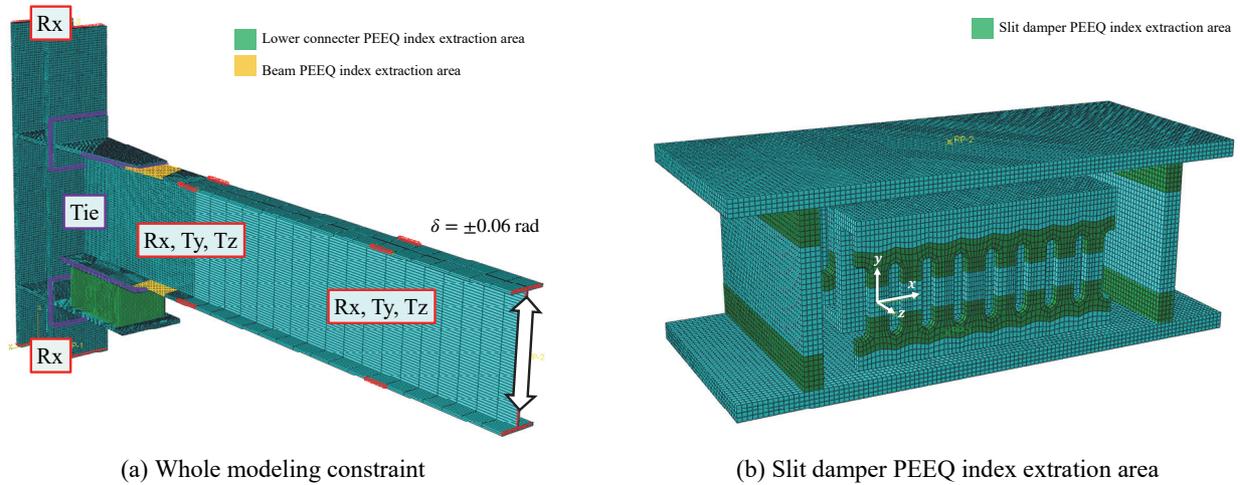


Fig. 14. Beam to column connection modeling constraint

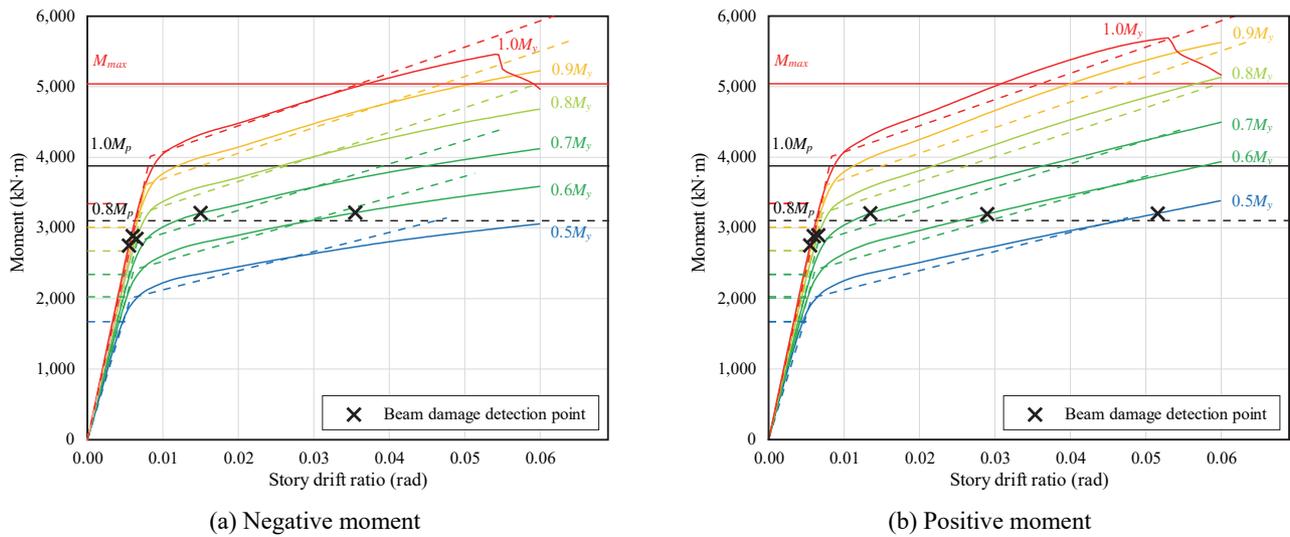


Fig. 15. Moment–displacement graph by beam to column connection modeling

댐퍼부와 보의 내력비 별 PEEQ index를 Fig. 17에 나타내었다. 그래프의 실선은 FEM 해석 결과이며 가로점선은 설계내력, 사선점선은 제안한 복원력 특성이다. Fig. 15의 그래프는 각 모델링별 모멘트-변위 그래프와 보의 전소성모멘트($1.0M_p$) 및 $0.8M_p$ 를 도식하였으며 보의 손상이 발생한 시점을 각 모델링별로 도식하였다. 해석 결과 내력비 0.5 모델링은 0.04 rad에 도달하기까지 내력상승이 보의 전소성모멘트에 미치지 못하였으며 내력비 0.6 이상의 모델링은 보의 전소성모멘트를 초과하는 내력을 발휘하는 것으로 확인되었다. 한편, 보의 내력비 0.8 이상의 모델링에서 심각한 손상이 발생하였으며 내력비 0.7 이하의 모델링에서는 허용 가능한 수준의 경미한 손상이, 내력비 0.5 모델링은 완전탄성상태를 유지하였다. 0.04 rad까지 보가 완전탄성상태를 유지한 내력비 0.5 모델링, 허용가능한 수준의 손상이 발생한 내력비 0.6 모델링, 심각한 손상이 발생하기 시작한 내력비 0.8 모델링의 PEEQ 분포를 Fig. 16에 나타내었다. 제안 상세는 상부접합물과 댐퍼가 접합되는 단부에서 응력집중이

발생하여 손상이 최초로 발생하는 것으로 확인되었다. 제안 접합상세는 보-기둥 접합부의 모멘트 전달능력뿐만 아니라 보 부재의 re-use를 위한 상세이므로 보 부재의 손상여부도 중요 고려사항이다. 두 가지 요인을 종합하여 검토한 결과를 Table 5에 나타내었다. 접합부의 모멘트 전달능력을 고려한다면 내력비 0.6 이상으로 설계하여야 하며 보 손상제어능력을 고려한다면 내력비 0.7 이하로 설계하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 제안 접합상세의 적정 설계 댐퍼/보 내력비를 0.6-0.7으로 제안한다.

4.3 제안 설계식 검증

해석 결과를 통하여 앞서 제시한 접합부의 항복 내력 및 초기 강성 설계식을 검증하였다. BCC-0.5 - BCC-1.0 모델링 해석 결과를 general yield point method를 통하여 초기 탄성 강성, 항복 내력 등을 확인하였으며 제안한 설계식과 비교하였다. 해석 결과와 제안식의 비교 결과를 Table 6에 나타내었다.

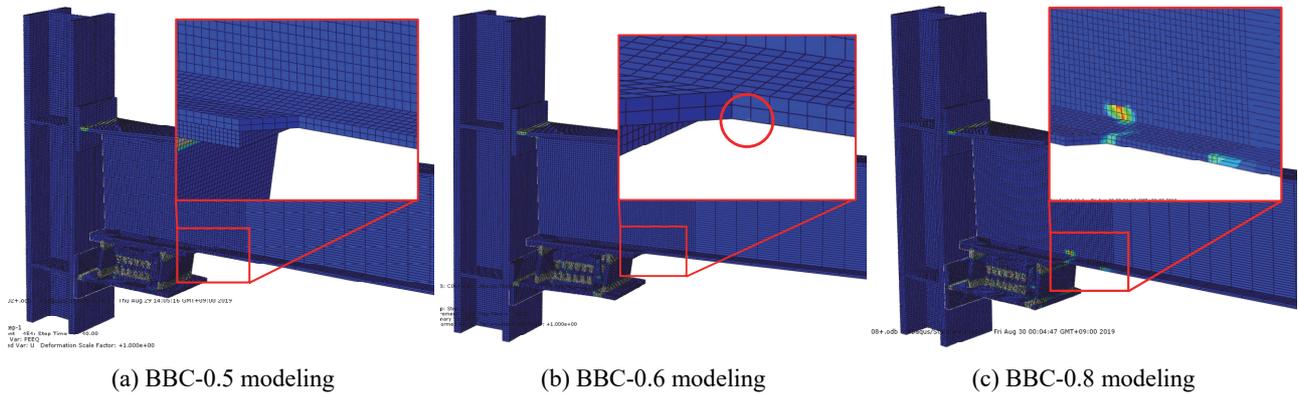


Fig. 16. PEEQ distribution by modeling in 0.04 rad story drift ratio

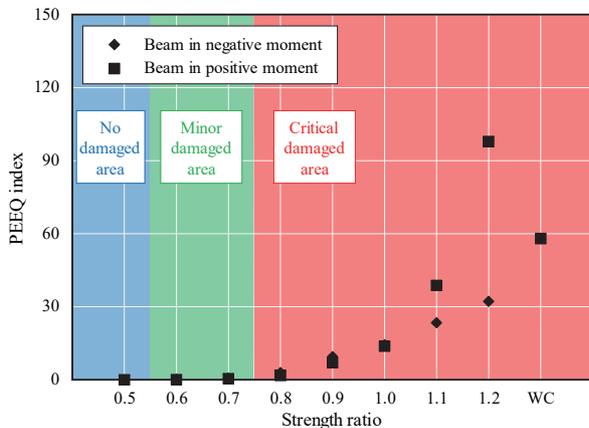


Fig. 17. PEEQ index distribution by beam to column connection modeling in story drift ratio 0.04 rad

Table 5. Appropriate damper/beam strength ratio

Modeling	Strength ratio M_{Damper}/M_{Beam}	Beam damage	Moment capacity	Remarks
BBC-0.5	0.5	O.K.	N.G.	
BBC-0.6	0.6	Say O.K.	O.K.	Appropriate strength ratio
BBC-0.7	0.7	Say O.K.	O.K.	
BBC-0.8	0.8	N.G.	O.K.	
BBC-0.9	0.9	N.G.	O.K.	
BBC-1.0	1.0	N.G.	O.K.	
BBC-1.1	1.1	N.G.	O.K.	
BBC-1.2	1.2	N.G.	O.K.	

Table 6. Calculation of elastic stiffness and yield strength

Name	Yield strength			Initial elastic stiffness						
	FEM [kN·m]	Calculation [kN·m]	Error [%]	Calculation					FEM [kN/mm]	Error [%]
				Bending shear bar 1 [kN/mm]	Bending shear bar 2 [kN/mm]	Whole damper [kN/mm]	Displacement by out of plane [kN/mm]	Beam-to-column connection [kN/mm]		
BCC-0.5	1,787.3	1,764.0	-1.3	38,515.2	98,539.6	833.1	392.33	11.3	12.2	-7.8
BCC-0.6	2,167.5	2,116.6	-2.3	38,515.2	98,539.6	994.9	392.33	12.5	13.2	-4.8
BCC-0.7	2,595.0	2,488.6	-4.1	38,515.2	98,539.6	1,166.5	392.33	13.7	13.9	-1.5
BCC-0.8	2,990.3	2,854.8	-4.5	38,515.2	98,539.6	1,334.4	392.33	14.5	14.8	-1.5
BCC-0.9	3,331.5	3,224.5	-3.2	38,515.2	98,539.6	1,503.2	392.33	15.4	16.0	-4.0
BCC-1.0	3,621.8	3,610.3	-0.3	38,515.2	98,539.6	1,677.4	392.33	16.3	16.4	-0.8

검증결과 제안식에 대한 유한요소해석 결과의 오차가 항복내력 및 탄성강성 모두 10 % 이하이므로 제안식을 활용하여 설계 단계에서 접합부 구조성능을 간략하게 확인할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 기존에 제안되었던 손상 제어형 기둥-보 접합상세가 대형보에서 가지는 한계를 분석하고 이를 보완한 새로운 형태의 기둥-보 접합 상세를 제안하였으며 해석적 방법을 통하여 제안 상세의 구조성능 및 설계 변수를 확인하였다.

- (1) 기존의 손상 제어형 기둥-보 접합 상세는 기하학적 형태에 의하여 보가 대형화될 경우 낮은 보출의 접합부보다 슬릿 댐퍼가 더 많은 변형 능력을 보유하여야 하며 본 논문에서는 새로운 댐퍼형상을 개선한 접합 상세를 제시하였다.
- (2) 제안한 접합 상세의 상세 설계를 위한 접합부의 내력, 강성 및 댐퍼의 설계식을 제시하였으며 유한요소해석을 통하여 해당 설계식의 검증을 실시하였다. 해당 제안식은 항복내력 최대오차 4.5 %, 초기탄성강성 최대 7.8 %의 오차로 제안 상세의 설계식으로 적합한 것을 확인하였다.
- (3) 기둥-보 접합부 FEM 해석결과 제안상세는 댐퍼부의 선행 소성화로 인해 보부재의 손상을 제어할 수 있는 시스템임을 확인하였다. 보부재의 손상을 최소화하며 보의 전소성 모멘트 수준의 접합부의 모멘트

전달 능력을 확보할 수 있는 항복 내력비(= 0.6~0.7)를 도출하였다.

본 연구에서는 접합부 해석을 단조 가력으로 실시하였으며 반복 가력의 경우 슬릿 댐퍼의 2차 강성에 의하여 단조 가력에 비해 더 높은 내력을 확보할 수 있으므로 후속 연구로서 접합부 해석의 반복 가력 상황에서의 검토가 필요하다.

또한 본 연구에서는 2단 댐퍼 간의 소재 특성을 동일하게 하여 해석이 진행되었으나 실제 상황에서는 동일 소재를 사용하더라도 소재 두께별 항복강도의 오차로 인하여 두 댐퍼가 상이한 구조성능을 보유할 가능성이 있으며 이로 인하여 접합부에 끼치는 영향에 대하여 후속 연구가 필요하다.

참고문헌(References)

- [1] Oh, S.-H., Kim, Y.-J., and Ryu, H.-S. (2009) Seismic Performance of Steel Structures with Slit Dampers, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.31, No.9, pp.1997-2008.
- [2] Oh, S.-H., and Ryu, H.-S. (2007) Sustainable Structural System Using Passive Energy Absorption Devices, *Proceedings of the 9th China-Korea-Japan Symposium on Structural Steel Construction*, China Steel Construction Society, pp.38-48.
- [3] 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 - Structure & Construction*, AIK, Vol.21, No.12, pp.101-108 (in Korean).

- [4] 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 - Structure & Construction*, AIK, Vol.22, No.8, pp.29-36 (in Korean).
- [5] Oh, S.H., and Park, H.Y. (2012) A Study on Beam-to-Column Connections with Plate Type Energy Absorption System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.1, pp.103-114 (in Korean).
- [6] Oh, S.-H., and Park, H.-Y. (2017) Evaluation of Strength and Stiffness of the Damper Installed at Beam End for Damage-Controlled Structures, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.33, No.2, pp.27-36 (in Korean).
- [7] Benavent-Climent, A. (2010) A Brace-Type Seismic Damper Based on Yielding the Walls of Hollow Structural Sections, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.32, No.4, pp. 1113-1122.
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] Yuka, M. (1999) *A Study on Both Ends Failure and Ultimate Resistibility of Steel Structural Frames*, Ph.D. Dissertation, Tokyo University, Japan (in Japanese).
- [11] Benavent-Climent, A., Oh, S.-H., and Akiyama, H. (1998) Ultimate Energy Absorption Capacity of Slit-Type Steel Plate Subjected to Shear Deformations, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Architectural Institute of Japan, Vol.63, pp.139-147.
- [12] Shin, K.J., and Kwon, Y.R. (2002) Tensile Behavior Analyses of Tubular Column to H-Beam Connections with T-Stiffeners, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.14, No.1, pp.69-78 (in Korean).
- [13] Architectural Institute of Korea (2016) *Korean Building Code and Commentary*, Chapter 7: Steel Structure, Kimoondang, Korea (in Korean).
- [14] Roeder, C.W., and Foutch, D.A. (1996) Experimental Results for Seismic Resistant Steel Moment Frame Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.122, No.6, pp.581-588.
- [15] Ricles, J.M., Mao, C., Lu, L.-W., and Fisher, J.W. (2002) Inelastic Cyclic Testing of Welded Unreinforced Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.122, No.6, pp.429-440.
- [16] Zhang, X., and Ricles, J.M. (2006) Experimental Evaluation of Reduced Beam Section Connections to Deep Columns, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.132, No.3, pp.346-357.
- [17] Lee, M.-J., Yang, J.-K., Kim, J.-W., Oh, S.-H., Cho, H.-S., Kim, S.-S. (2014) An Experimental Study on Performance Evaluation and Development of Seismic Connection Details with SHN Steel of Deep H Type Beam, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.30, No.3, pp.29-37 (in Korean).
- [18] Morrisison, M.L., Schweizer, D.Q., and Hassan, T. (2016) Seismic Enhancement of Welded Unreinforced Flange-Bolted Web Steel Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.142, No.11, 04016102.
- [19] Oh, S.H., and Park, H.Y. (2014) Seismic Performance of High Strength Steel(HSA800) Beam-to-Column Connections with Improved Horizontal Stiffener, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.4, pp.361-373 (in Korean).
- [20] Oh, S.H., and Park, H.Y. (2014) A Study on Deformation Capacity of High Strength Steel Beam-to-Column Connections According to Welding Detail at Beam End, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.4, pp.335-348 (in Korean).
- [21] Oh, S.-H., and Park, H.-Y. (2016) A Study to Enhance the Deformation Capacity of Beam-to-Column Connections Using High Strength Steel Having High Yield Ratio, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.16, No.1, pp.73-89.

요약: 본 연구에서는 기존의 보단부에 에너지흡수장치가 설치된 손상제어 시스템이 보춤 750 mm 이상의 상황에서 가질 수 있는 문제점을 이론적으로 검토하고 이를 극복할 수 있는 신규상세와 설계식을 제안하였다. 기존 상세와 비교, 최적설계변수 도출 및 제안식 검증에 위하여 비선형 유한요소해석을 실시하였으며 보춤 750 mm이상의 내진 보-기둥접합부 상세로서의 적용 가능성을 확인하였다.

핵심용어: 보-기둥 접합부, 손상제어, 슬릿 댐퍼, 내력비, 대형보