

# 강재 모멘트 골조의 비선형 지진 해석을 위한 부등단면 보 요소 II: 모델의 검증

## Non-Prismatic Beam Element for Nonlinear Seismic Analysis of Steel Moment Frames II: Verification of Model

황 병 국\* / 전 충 하\*\* / 김 기 동\*\*\* / 고 만 기\*\*\*\*

Hwang, Byoung Kuk / Cheon, Chung Ha / Kim, Kee Dong / Ko, Man Gi

### Abstract

This is the second of two companion papers that describe non-prismatic beam element for nonlinear seismic analysis of steel moment frames. Described in a companion paper is the formulation of a non-prismatic beam element to model the elastic and inelastic behavior of steel beams, which have reduced beam sections(RBS). This study describes the determination of yield surfaces, stiffness parameters, and hardening (or softening) rule parameters for RBS beam element. Analytical results of the RBS beam element show good correlation with test data and Finite Element Method(FEM) results.

**key words** : RBS Steel Beam, Nonlinear Seismic Analysis, Plastic Hinges, Inelastic Behavior

### 요 지

본 연구는 강재 모멘트 골조의 비선형 지진 해석을 위한 부등단면 보 요소에 관한 두 개의 동반논문 중에서 두 번째 논문이다. 동반논문에서는 지진운동 하의 단면감소(RBS) 강재 보의 탄성 및 비탄성 거동을 정의하기 위한 부등단면 보(RBS 보) 요소를 제시하였고 본 연구에서는 RBS 보 요소에 대한 항복면, 강성 변수, 그리고 경화(혹은 연화) 법칙 변수의 결정과정을 기술하였고 RBS 보 요소의 해석결과를 실험 및 유한 요소 해석(FEM) 결과와 비교하였다. RBS 보 요소의 해석결과는 실험 및 FEM 결과와 좋은 상관관계를 보였다.

**핵심용어** : RBS 강재 보, 비선형 지진해석, 소성힌지, 비탄성거동

### 1. 서 론

본 연구는 지진 하중을 받는 강재 모멘트 골조의 비선형 해석을 수행하기 위하여 RBS (Reduced Beam Section) 보 요소를 개발하고, 이를 검증하기

위한 것이다. 동반논문 (황병국 등, 2007)에서는 강재 모멘트 골조의 비선형 지진 해석을 위한 RBS 보 요소를 제시하였고 본 논문에서는 RBS 보 요소에 대한 항복면, 강성 변수, 그리고 경화(혹은 연화) 법칙 변수를 결정하고 RBS 보 요소의 해석결과를 실험 및 FEM(Finite Element Method) 결과와 비교하여

\* 신화엔지니어링(주) 상무이사 (E-mail : hwangbyoungkuk@hotmail.com)

\*\* 공주대학교 건설환경공학부 석사과정

\*\*\* 정희원 · 공주대학교 방재연구센터, 건설환경공학부 교수

\*\*\*\* 공주대학교 방재연구센터, 건설환경공학부 교수

RBS 보 요소에 대한 검증을 수행하였다.

RBS 보 요소를 이용하여 RBS 보의 비탄성 거동을 모델하기 위해서는 RBS 보 요소의 구성요소의 하나인 분포 소성 보조-요소의 소성힌지 특성이 정의되어야 한다. 본 연구에서는 소성 힌지의 특성을 등가 캔틸레버 보 방법을 사용하여 결정하였다. 지진하중을 받는 RBS보는 역대칭 모멘트분포를 갖기 때문에 RBS보의 항복은 감소 보 단면 구역(RBS)에 집중되고 부재 단부에도 일정부분 발생할 수 있다. 등가 캔틸레버 보 방법에 따라 위의 항복거동을 모델하는 경우에는 각 항복영역(부재 단부와 RBS)의 비탄성 거동을 정의할 수 있는 소성힌지가 상응하는 위치에 하나씩 놓여야 한다. 따라서 부재단부에 위치한 소성힌지의 특성을 결정하기 위해서는 부재단부에 비탄성 거동이 집중되는 등가 캔틸레버 보가 사용되고 RBS에 위치한 소성힌지의 특성을 결정하기 위해서는 RBS에 비탄성 거동이 집중되는 등가 캔틸레버 보가 사용되어야 한다.

소성힌지의 특성은 각 항복면에 상응하는 항복 모멘트( $M_{yi}$ )와 소성 강성 ( $k_{pi}$ )을 결정함으로 정의되는데 임의의 주기거동을 모델할 수 있도록 초기 비탄성 단조거동과 안정화된 비탄성 주기거동에 대하여 각각 결정되어야 한다. 또한, 초기 단조거동에서 안정화된 주기거동으로 전이하는 과정의 항복면의 크기 변화와 소성강성의 변화를 고려하기 위하여 경화(혹은 연화) 법칙 변수가 결정되어야 한다. 그리고 이러한 소성힌지 특성은 상응하는 등가 캔틸레버 보에 대한 실험 및/혹은 FEM 해석 결과와 대조(calibration)하여 결정된다.

## 2. 비탄성 단조거동

본 연구에서는 균일 단면 보와 그림 1에 보이는 RBS 보의 절반을 나타내는 등가 캔틸레버 보에 대한 FEM 해석결과와 RBS 보 요소의 해석결과를 대조(calibration)하여 부재단부와 RBS에 위치한 소성힌지의 초기 비탄성 단조거동에 상응하는 항복 모멘트 ( $M_{yi}$ )와 소성강성( $k_{pi}$ )을 결정하였다. 해석에 사용된 보의 단면은 W36X150이고 길이는 4.5m(15')이다. 균일 단면과 4개의 다른 RBS 제원을 갖는 5개의 캔틸레버 보에 대하여 각각 A36과 A572 Gr.50 강종을 사용하여 총 10개의 캔틸레버보가 해석되었다. 해석 모델에 적용된 RBS 제원은 표 1에 나타나있다. 표 1의 RBS 제원은 FEMA350 (FEMA, 2000)에 제시되어 있는 RBS 제원의 범위를 고려하여 결정되었다.

FEM 해석모델은 그림 2와 같이 8절점 6면체 블록 요소를 사용하여 이루어졌고 요소의 수는 가능한 정확한 해석결과를 얻을 수 있도록 결정되었다. FEM 해석은 유한 요소 프로그램 ABAQUS (Hibbit 등, 1996)를 사용하여 수행되었고, 그림 3에 나타나있는 응력-변형률 관계와 탄성 계수 200GPa 그리고 푸와송비 0.3이 FEM해석에 사용되었다. 하중은 캔틸레버 보 자유단 웹의 요소 절점에 균등하게 분산하여 재하 하였고 웹 자유단 요소 절점들의 처짐 평균값을 자유단 처짐으로 고려하였다.

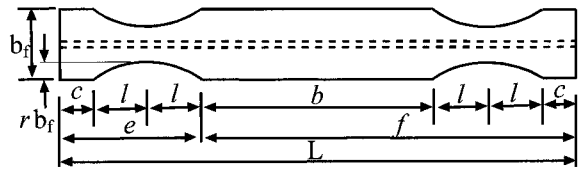


그림 1. RBS를 갖는 부등 단면보

그림 4에는 FEM해석에 의해 결정된 캔틸레버 보의 단조 거동이 나타나 있다. 이 그림에서 C1, C2 및 C3 RBS 제원에 대한 보의 거동이 유사하고, C3와 C4 RBS 제원에 대한 보의 거동을 비교해보면 상당한 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 감소 보 단면 구역 (RBS) 길이 2*l*의 변화는 보의 비탄성 거동에 크게 영향을 미치지 않으나 보 단면 감소율 (2*r*)의 변화는 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

표 2에는 부재단부와 RBS구역에 위치하는 소성힌지에 대한 각 항복면에 상응하는 항복모멘트와 소성강성이 나타나있다. 이러한 항복모멘트와 소성강성은 그림 4에 보이는 FEM 해석결과에 대조하여 결정되었다. 부재단부에 위치한 소성힌지의 경우는 보 길이에 걸쳐 균일한 단면을 갖는 보의 해석결과(C0)와 RBS 구역에 위치한 소성힌지는 상응하는 RBS를 갖는 보의 해석결과와 대조하여 결정되었다. 부재단부 힌지에 대한 소성모멘트와 소성강성은 강재 모멘트 저항 골조의 기동과 보의 연결 중에서 용접 플랜지-용접 웹 연결에 관한 것이다. 용접 플랜지-볼트 웹에 관한 단부 힌지의 소성모멘트와 소성강성의 결정은 다음 장에서 설명될 것이다.

그림 5에는 표 2의 소성힌지 항복모멘트와 소성강성을 사용한 RBS 보요소의 해석결과와 FEM 해석 결과의 비교가 나타나있다. 이 그림으로부터 RBS 보 요소가 초기 항복단계를 제외하고 FEM 결과와 상당히 좋은 상관관계를 보인다는 것을 알 수 있다. RBS 보 요소의 주요한 목적이 강진 발생시 나타나는 주기거동의 큰 소성변형을 모델하는 것이기 때문에 RBS 보 요소가 초기항복단계를 약간 과다 평가하는 것은 큰 문

제가 아닐 것으로 판단된다. 표 2에는 40%와 50%의 보 단면감소에 따른 소성힌지의 항복모멘트와 소성강성이 나타나 있는데 그 외의 단면감소율에 대해서도 표 2의 값을 보간(interpolation)하여 결정할 수 있다.

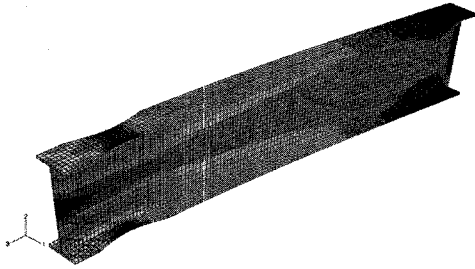


그림 2. RBS 보의 FEM 모델

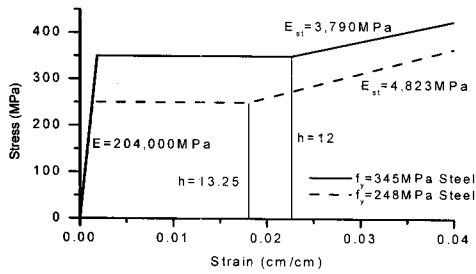


그림 3. 응력-변형률 관계

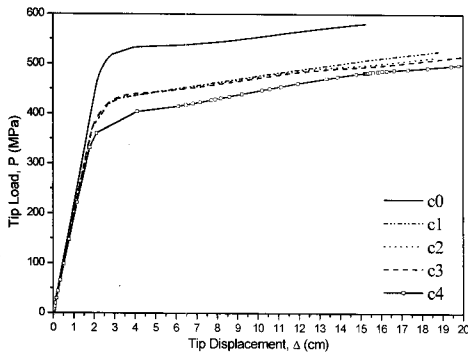
표 1. 감소 보 단면 (RBS)의 제원

RBS 제원	c	2l	2r
C0	0	0	0
C1	0.75b <sub>f</sub>	0.65d	0.4
C2	0.75b <sub>f</sub>	0.75d	0.4
C3	0.75b <sub>f</sub>	0.85d	0.4
C4	0.75b <sub>f</sub>	0.85d	0.5

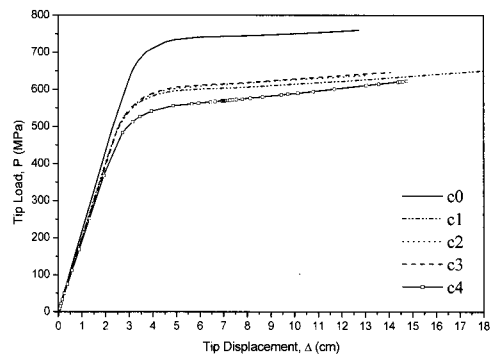
표 2. 단조거동에 대한 소성힌지의 항복모멘트와 소성강성

부재단부 힌지	$M_{y1}/M_p^{2)}$	$M_{y2}/M_p$	$M_{y3}/M_p$	$K_{p1}/K_e$	$K_{p2}/K_e$	$K_{p3}/K_e$	
$F_y^{1)} = 248, 345$	1.0	1.1	1.2	0.02	0.01	0.001	
RBS 구역 힌지	$M_{y1}/M_p^{r3)}$	$M_{y2}/M_p^r$	$M_{y3}/M_p^r$	$K_{p1}/K_e$	$K_{p2}/K_e$	$K_{p3}/K_e$	
$F_y = 248$	2l=0.4	1.0	1.1	1.2	0.025	0.02	0.02
	2l=0.5	1.0	1.1	1.2	0.03	0.035	0.02
$F_y = 345$	2l=0.4	1.0	1.1	1.2	0.015	0.015	0.015
	2l=0.5	1.0	1.1	1.2	0.03	0.025	0.025

1)  $F_y$  = 항복응력 (MPa), 2)  $M_p$  = 보 단면의 소성모멘트,  
3)  $M_p^r$  = RBS 중앙의 소성모멘트

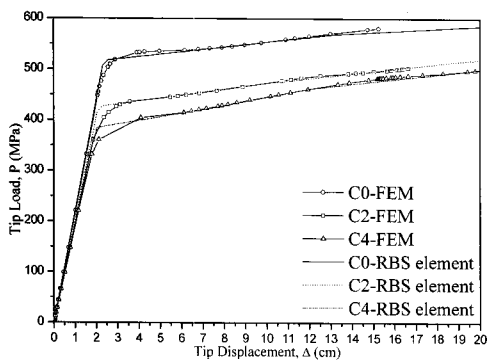


(a) 항복강도 248MPa

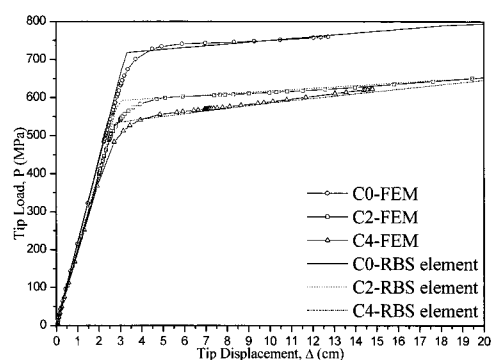


(b) 항복강도 345MPa

그림 4. 캔틸레버 보의 단조거동에 대한 FEM 해석결과



(a) 항복강도 248MPa



(b) 항복강도 345MPa

그림 5. 캔틸레버 보의 단조거동에 대한 RBS 보요소와 FEM 해석결과의 비교

### 3. 비탄성 주기거동

안정화된 비탄성 주기거동에 대한 단부에 위치한 소성힌지의 항복 모멘트( $M_{yi}$ )와 소성 강성( $k_{pi}$ )은 그림 6에 보이는 시험체에 대한 실험결과와 대조하여 결정되었다. 그림 6에 보이는 시험체의 부재 단면과 재료특성은 문헌(Ricles 등, 2000)에 자세히 나타나 있고 이 시험체의 보-기둥 연결은 FEMA350 (FEMA, 2000)의 사전 검증된 용접 플랜지-용접 웹 연결이다. FEMA350의 사전 검증된 용접 플랜지-용접 웹 연결은 기존의 용접 플랜지-용접 웹 연결에 비하여 용접재료와 용접 홈(access hole) 상세를 개선하여 지진 발생시에 요구되는 소성변형을 발현할 수 있도록 한 연결이고, RBS없이 SMF(special moment frame)에 독자적으로 사용될 수 있는 연결이다. RBS를 사용하는 경우의 보-기둥 연결은 용접 플랜지-용접 웹 연결과 용접 플랜지-볼트 웹 연결이 사용될 수 있다.

표 3에는 부재 단부에 위치하는 소성힌지의 안정화된 주기거동에 대한 각 항복면에 상응하는 항복모멘트와 소성강성이 나타나 있다. 이러한 항복모멘트와 소성강성은 그림 7에 보이는 실험결과와 대조하여 결정되었다. 그림 7에는 표 3의 소성힌지의 항복모멘트와 소성강성을 사용한 RBS 보요소의 해석결과와 실험결과의 비교가 나타나 있다. 실험 및 해석결과는 보 단부 모멘트와 단부 회전각과의 관계이다. 이 그림으로부터 RBS 보요소가 국부좌굴 발생 전까지 실험결과와 상당히 좋은 상관관계를 보인다는 것을 알 수 있다.

표 3의 단부 소성힌지에 대한 항복모멘트와 소성강성이 시험체에 따라 일부 다르게 나타났는데 그 주요 원인은 같은 강종 일지라도 시험체에 따라 재료의 역학적 특성이 상당히 차이가 나기 때문인 것으로 판단

된다. 하나의 고정된 힌지 특성을 사용하여 다양하게 나타나는 재료의 역학적 특성을 모두 정확히 고려하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 모멘트 저항 골조를 모델 할 때 일반적으로 각 부재에 대하여 실험데이터나 재료 역학적 특성이 주어지지 않기 때문에 정확성이 일부 손상되더라도 주어진 강종에 대하여 하나의 고정된 힌지 특성을 결정할 필요가 있다.

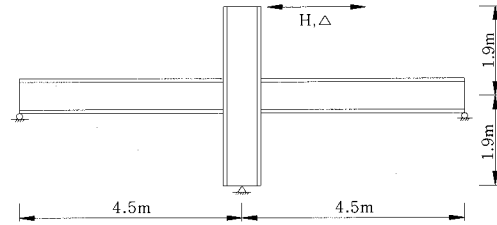
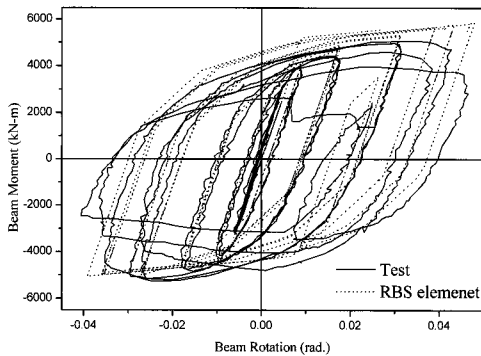


그림 6. 단부 소성힌지의 거동에 대한 C-시리즈 시험체 제원

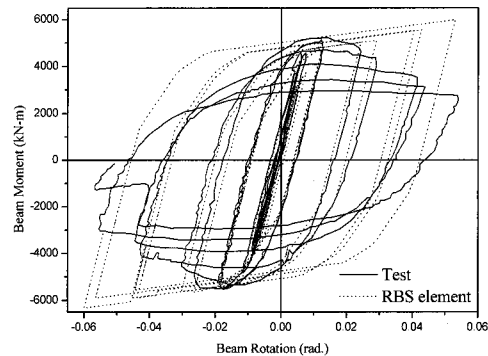
표 3. 주기거동에 대한 부재단부 소성힌지의 항복모멘트와 소성강성

시험체	$M_{y1}/M_p$	$M_{y2}/M_p$	$M_{y3}/M_p$	$K_{p1}/K_e$	$K_{p2}/K_e$	$K_{p3}/K_e$
C1	0.8	1.1	1.25	0.3	0.1	0.03
C2	0.9	1.2	1.3	0.35	0.15	0.03
C3	0.9	1.25	1.33	0.35	0.15	0.03
C4	0.9	1.25	1.33	0.35	0.15	0.03

그림 8에는 표 3의 C1에 대한 힌지특성을 하나의 고정된 힌지특성으로 사용한 C2-C4 시험체에 대한 해석결과와 실험결과의 비교가 나타나 있다. 그림 8로부터 국부좌굴 발생 전까지 두 결과의 적절한 상관관계를 볼 수 있다. 그러나 각 시험체와 대조하여 결정된 힌지특성을 사용한 그림 7의 상관관계보다는 정확도가 떨어진다는 것을 알 수 있다.

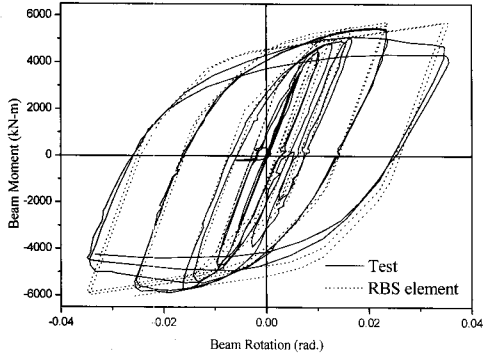


(a) 시험체 C1

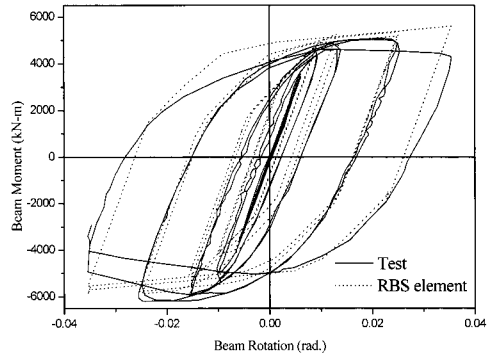


(b) 시험체 C2

그림 7. C-시리즈 시험체에 대한 보 단부 모멘트-회전각 관계의 실험 및 해석 결과 비교

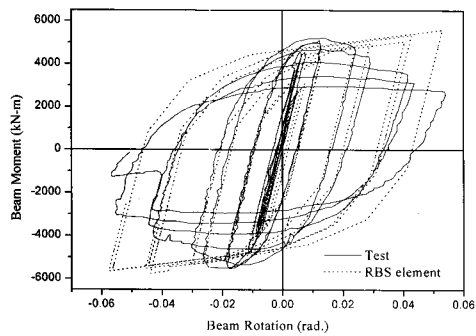


(c) 시험체 C3

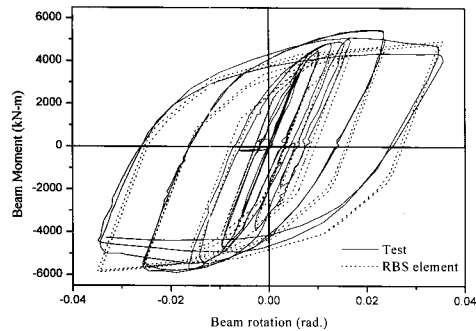


(d) 시험체 C4

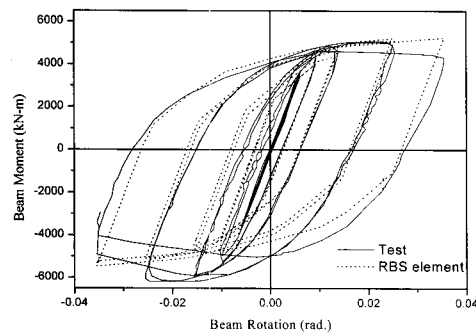
그림 7. C-시리즈 시험체에 대한 보 단부 모멘트-회전각 관계의 실험 및 해석 결과 비교(계속)



(a) 시험체 C2



(b) 시험체 C3



(c) 시험체 C4

그림 8. 고정 힌지 특성을 사용한 해석과 실험 결과 비교

그림 9에는 제원과 재료의 역학적 특성이 같으나 보-기둥 연결부가 서로 다른 2개의 보에 대한 비탄성 주기 거동이 나타나있다. 이 그림으로부터 용접 플랜지-볼트 웹 연결의 경우에 용접 플랜지-용접 웹 연결보다 강도가 상당히 작게 나타난다는 것을 알 수 있는데 그 이유는 볼트로 연결된 웹 부분이 모멘트를 적절히 저항할 수 없기 때문이다. 보의 최대 모멘트 저항능력에 대한 웹의 모멘트 분담 비율이 용접 플랜지-볼트 웹 연결부의 강도 감소에 중요한 역할을 하고, 용접 플랜지-볼트 웹 연결에 대한 단부 힌지의 항복 모멘트  $M_{yi}^{bw}$ 는 웹 모멘트 분담 비율의 함수로 표현되는 식 (1)로 정의될 수 있다.

$$M_{yi}^{bw} = \left(1.6 \frac{Z_f}{Z} - 0.2\right) \cdot M_{yi}^{fw} \leq M_{yi}^{fw} \quad (1)$$

여기서  $M_{yi}^{fw}$  = 표 2와 3에 보이는 완전 용접 연결에 대한 단부힌지의 항복모멘트;  $Z_f$ =플랜지의 소성단면계수;  $Z$ =단면전체의 소성단면계수.

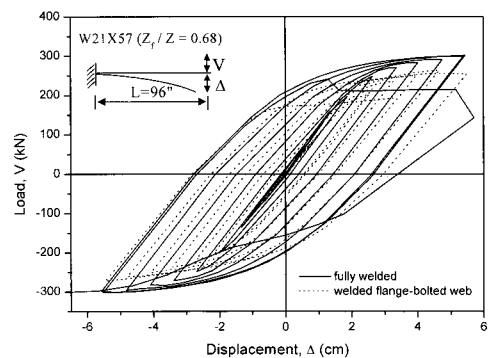


그림 9. 2개의 보-기둥 연결부의 실험결과 비교(Engelhardt 1992)

그림 10에는 용접 플랜지-볼트 웹 연결부를 갖는 보에 대한 실험결과와 RBS 보 요소의 해석결과와의 비교가 나타나었는데 이 그림으로부터 해석결과와 실험 결과의 상관관계가 상당히 좋다는 것을 알 수 있다. 용접 플랜지-볼트 웹 연결부의 거동에 관한 보다 자세한 사항은 문헌(Kim, 1995)에서 찾아 볼 수 있다.

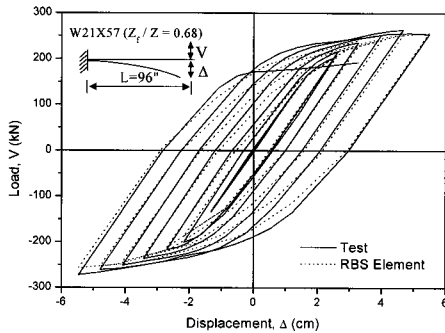


그림 10. 용접 플랜지-볼트 웹 연결부에 대한 실험과 해석 결과의 비교

RBS 구역에 위치한 소성힌지의 주기거동에 대한 항복 모멘트( $M_{yi}$ )와 소성 강성 ( $k_{pi}$ )은 그림 11에 보이는 시험체에 대한 실험결과로부터 결정되었고 시험체의 부재 단면과 재료특성은 문헌 (Engelhardt 등, 1996; Engelhardt 등, 2000)에 나타났다. 표 4에는 시험체에 적용된 감소 보 단면 구역(RBS)의 제원이 나타났다. 시험체의 보-기둥 연결은 DB-시리즈 (Engelhardt 등, 1996)와 DBWW (Engelhardt 등, 2000)의 경우 용접 플랜지-용접 웹 연결이고 DBBW와 DBBWC (Engelhardt 등, 2000)의 경우는 용접 플랜지-볼트 웹 연결이다. 실험에서 DB2-DB4 시험체의 경우 비탄성거동이 보에 집중되었고 DB5의 경우에는 비탄성거동이 패널 존에 25% 그리고 보에 75% 발생하였다. DBBW, DBBWC, DBWW 시험체의 경우에는 DB5의 경우와 유사한 패널 존 비탄성거동이 발생하였다. 패널 존에 항복이 발생하는 시험체의 해석모델에 사용된 패널 존 요소 (Kim 등, 2002)에는 비탄성거동을 적절히 정의하도록 패널 존의 실험결과와 대조(calibration)하여 결정된 모델변수가 사용되었다. 표 5에는 실험에서 결정된 보 단부와 RBS에서 발생한 최대모멘트가 상응하는 소성모멘트의 비로 나타났다. 이 표로부터 DB4와 DB5 시험체의 경우에 RBS구역에서 변형을 경화 현상이 상당히 크게 나타나고 보 단부에 항복이 크게 발생하였다는 것을 알 수 있다. 그리고 DBBWC 시험체의 경우에는 콘크리트 슬래브의 영향으로 같은 플랜지 감소율을 갖는

DBBW 시험체에 비하여 RBS 구역에서 보다 큰 항복이 발생하였다. DBBW와 DBWW 시험체의 경우에는 보 단부에 항복이 아주 작게 나타났다.

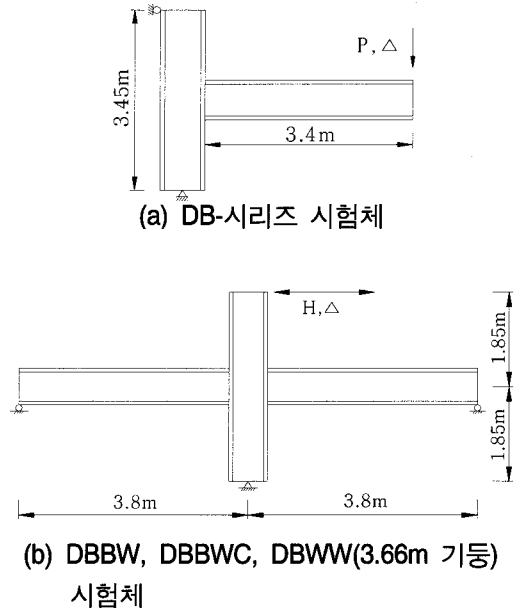


그림 11. RBS 구역 소성힌지에 대한 시험체 제원

표 4. 감소 보 단면(RBS)의 제원

시험체	단면	c (mm)	2l (mm)	$r_b b_f$ (mm)
DB2	W36×150	228.6	685.8	60.325
DB3	W36×170	228.6	685.8	60.325
DB4	W36×194	228.6	685.8	58.674
DB5	W36×148	127	635	50.8
DBBW	W36×150	228.6	685.8	76.2
DBBWC	W36×150	228.6	685.8	76.2
DBWW	W36×150	228.6	685.8	76.2

표 5. 보 단부와 RBS에 발생한 최대 보 모멘트

Ratio	DB2	DB3	DB4	DB5	DBBW	DBBWC	DBWW
$1) M_{max}/M_p$	0.95	0.92	1.13	1.01	0.77	0.96	0.81
$2) M_{max}^r/M_p^r$	1.07	1.05	1.27	1.22	0.96	1.21	1.01

- 1)  $M_{max}$  = 보 단부의 최대모멘트,
- 2)  $M_{max}^r$  = RBS 중앙의 최대모멘트

표 6에는 RBS 구역에 위치하는 소성힌지의 안정화된 주기거동에 대한 각 항복면에 상응하는 항복모멘트와 소성강성이 나타났다. 이러한 항복모멘트와 소성강성은 그림 12-15의 실험결과와 대조(calibration)하여 결정되었다. 또한 그림 12-15에는 표 6의

소성힌지의 항복모멘트와 소성강성을 사용한 RBS 보 요소의 해석결과가 나타나있다. 실험 및 해석결과는 하중-변위 관계와 보 단부 모멘트-단부 회전각 관계이다. 이 그림으로부터 RBS 보 요소가 국부좌굴 발생 전까지 실험결과와 상당히 좋은 상관관계를 보인다는 것을 알 수 있다.

**표 6. 주기거동에 대한 RBS 구역 소성힌지의 항복모멘트와 소성강성**

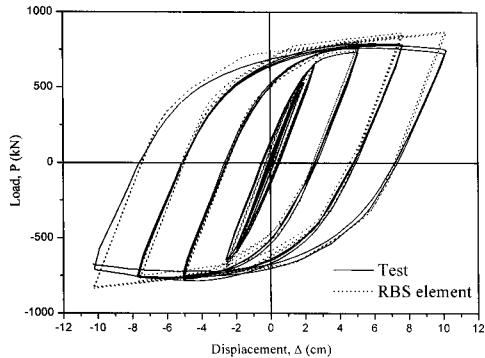
시험체	$M_{y1}/M_p^r$	$M_{y2}/M_p^r$	$M_{y3}/M_p^r$	$K_{p1}/K_e$	$K_{p2}/K_e$	$K_{p3}/K_e$	
DB2	$2r=0.4$	0.7	0.9	1.05	0.5	0.2	0.03
DB3	$2r=0.4$	0.7	0.9	1.0	0.4	0.2	0.03
DB4	$2r=0.4$	0.93	1.2	1.45	0.5	0.2	0.03
DB5	$2r=0.4$	0.9	1.1	1.15	0.4	0.2	0.03
DBBW	$2r=0.5$	0.7	0.8	1.0	0.3	0.1	0.03
DBBWC	$2r=0.5$	0.7	0.95	1.1	0.4	0.2	0.03
DBWW	$2r=0.5$	0.7	0.8	1.0	0.3	0.1	0.03

표 6의 소성힌지에 대한 항복모멘트와 소성강성이 시험체에 따라 다양하게 나타났는데 그 이유는 같은 강종 일지라도 시험체에 따라 재료의 역학적 특성이 매우 다르게 나타나기 때문이다. 40%의 보 플랜지 감

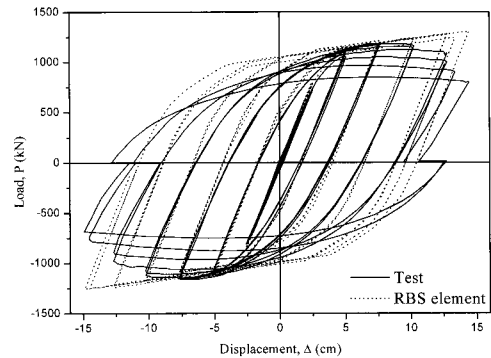
소를 갖는 DB-시리즈 시험체중에서 DB4와 DB5 시험체에 대한 소성힌지의 항복모멘트는 DB2와 DB3 시험체에 대한 소성힌지의 항복모멘트보다 상당히 크게 나타났는데 그 이유는 DB4와 DB5 시험체의 RBS 구역에서 변형을 경화현상이 상당히 크게 진전된 것으로 판단된다.

50%의 보 플랜지 감소를 갖는 시험체중에서 DBBWC 시험체의 경우 다른 시험체보다 소성힌지의 항복모멘트가 크게 나타났다. DBBWC 시험체의 경우 슬래브 두께는 89mm 이고 W36x150의 단면높이는 912mm 이다. 강재 보의 단면 높이가 비교적 크기 때문에 콘크리트 슬래브로 인한 강도증가는 약 8% 정도이다. 따라서 콘크리트 슬래브로 인한 국부좌굴의 지연현상과 약간의 강도 증가를 고려하기 위하여 슬래브가 없는 시험체에 비하여 보다 큰 소성힌지의 항복모멘트가 필요하게 되었다.

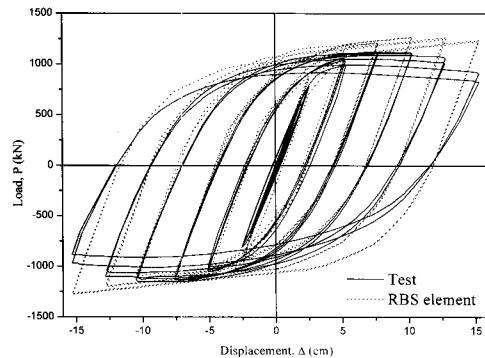
재료 역학적 특성의 변화와 RBS 구역의 다양한 체원으로 인하여 다양하게 나타나는 RBS 보의 비탄성 거동을 하나의 고정된 힌지 특성을 사용하여 모두 정확히 고려하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 모멘트 저항 골조를 모델 할 때 일반적으로 각 부재에 대하여 실험데이터나 재료 역학적 특성이 주어지지 않



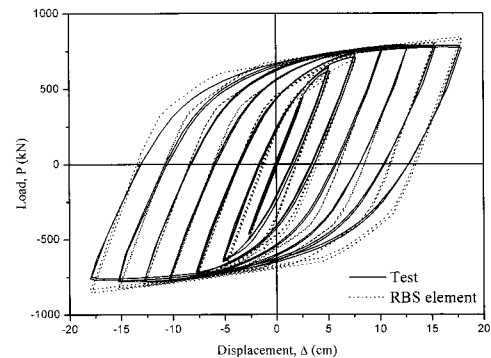
(a) DB2



(b) DB3

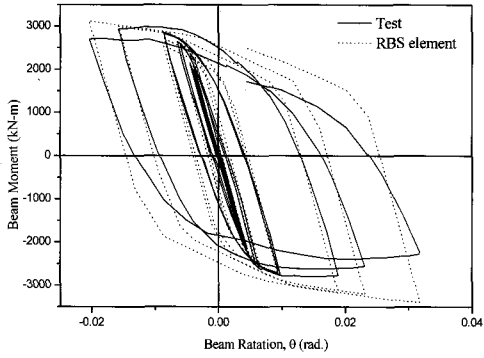


(c) DB4

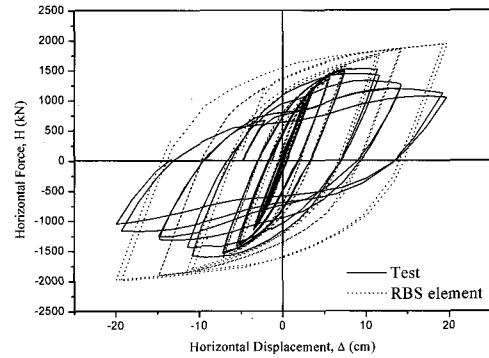


(d) DB5

**그림 12. DB-시리즈 시험체에 대한 실험과 해석결과의 비교**

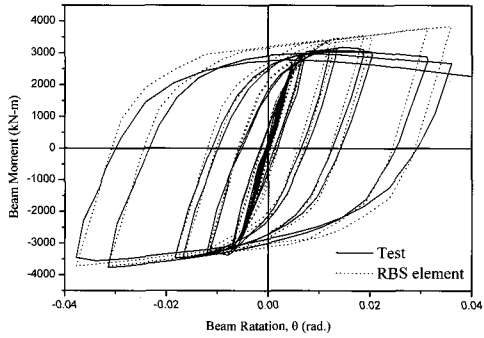


(a) 보 단부 모멘트-단부 회전각 관계

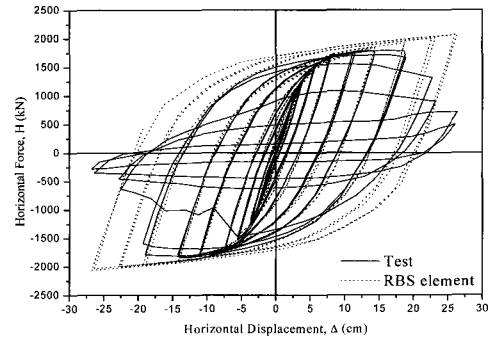


(b) 횡 하중-횡 변위 관계

그림 13. DBBW 시험체에 대한 실험과 해석 결과의 비교

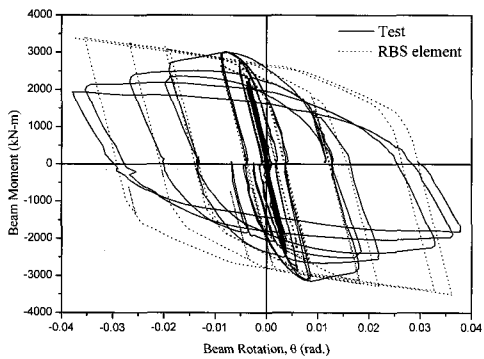


(a) 보 단부 모멘트-단부 회전각 관계

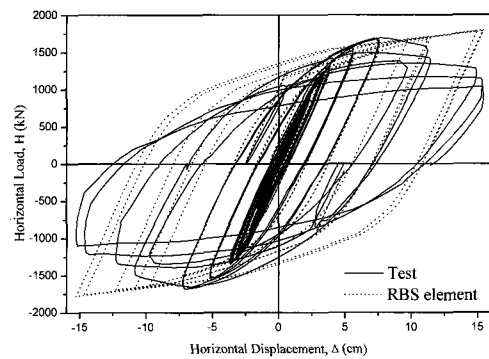


(b) 횡 하중-횡 변위 관계

그림 14. DBBWC 시험체에 대한 실험과 해석 결과의 비교



(a) 보 단부 모멘트-단부 회전각 관계



(b) 횡 하중-횡 변위 관계

그림 15. DBWW 시험체에 대한 실험과 해석 결과의 비교

때문에 정확성이 일부 손상되더라도 주어진 강종과 보 플랜지 감소율에 대하여 하나의 고정된 힌지 특성을 결정할 필요가 있다. 표 6의 DB3와 DBBW에 대한 소성힌지 특성을 각각 40%와 50% 보 플랜지 감소율을 갖는 RBS 구역의 소성힌지에 대한 고정된 힌지 특성으로 사용한다면 앞에서 설명한 단부 힌지에 대한 경우와 유사한 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

그림 16에는 초기 단조거동에서 안정화된 주기거동으로의 전이과정에 대한 가중함수를 결정하기위한 방

법이 나타나있다. 그림 16의 경로 O-P-Q-R-A를 따라 하중이 증가하다 점 A에서 하중저감(unloading)이 발생할 때 경로 A-B-C에 대한 가중함수  $\omega_1$ 은 식 (2)와 같이 결정된다.

$$\omega_1 = \omega_1^p \cdot \left(1 - e^{-\delta_a/\delta_{in}}\right) \quad (2)$$

여기서  $\omega_1^p$  = 경로 O-P-Q-R-A에 대한 가중함수;  
 $\delta_{in}$  = 항복 시작점 P와 bound line (Dafalias, 1975)



사이의 거리;  $\delta_a$ =하중저감 발생점 A와 bound line 사이의 거리. RBS 보 요소의 해석결과와 실험결과와의 상관관계가 국부좌굴 발생 전까지 상당히 좋게 나타났다는 것으로부터 위의 가중함수  $\omega_1$ 이 적절하다는 것을 알 수 있다.

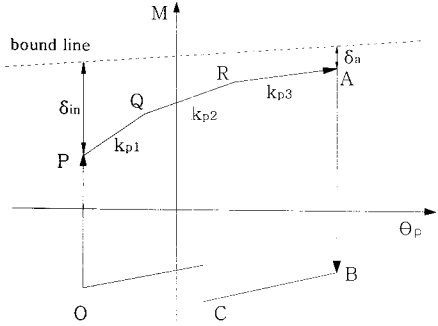


그림 16. 전이과정 가중함수 결정 방법

국부좌굴이 발생하여 항복면의 크기가 감소하는 현상을 고려하기 위한 가중함수  $\omega_2$ 는 실험결과와 대조하여 경험적으로 식 3과 같이 결정되었다.

DB-시리즈 시험체 (플랜지 감소율 40%) :

$$\omega_2 = 1 - \frac{-6200 \cdot \Sigma \theta_p + 475}{M_{y1}^s} \quad (3a)$$

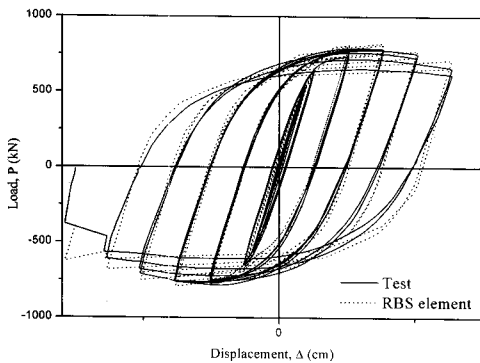
DBBW 시험체 (플랜지 감소율 50%) :

$$\omega_2 = 0.5 + \frac{0.5}{1 + e^{(\Sigma \theta_p - 0.243)/0.215}} \quad (3b)$$

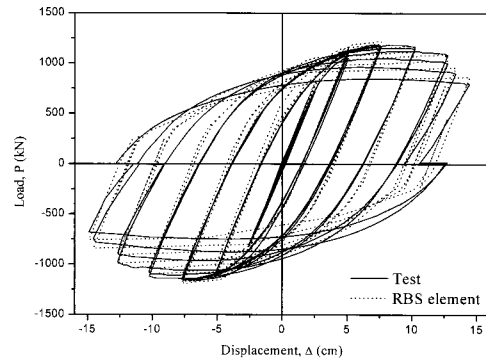
DBBWC 시험체 (플랜지 감소율 50%와 콘크리트 슬래브) :

$$\omega_2 = 0.1 + \frac{0.9}{1 + e^{(\Sigma \theta_p - 0.763)/0.3}} \quad (3c)$$

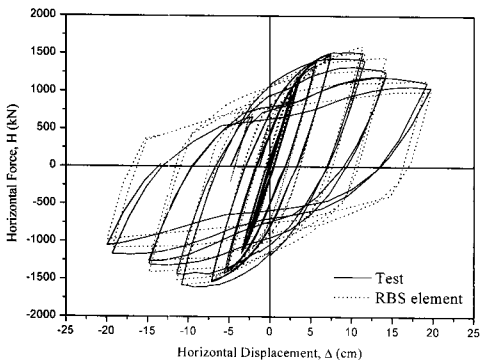
여기서  $\Sigma \theta_p$  = 누적 소성회전각;  $M_{y1}^s$  = RBS구역의 소성힌지의 주기거동에 대한 첫 번째 항복모멘트. 국부좌굴이 시작되는 누적 소성회전각  $\beta$ 는 DB-시리즈 시험체의 경우 0.15 이고 DBBW는 0.001, DBBWC는 0.1이 적정한 것으로 나타났으며 국부좌굴 발생 후의 소성강성을 결정하기 위하여 사용되는 상수  $\alpha$ 는 5가 적정하였다. 재료 역학적 특성의 변화와 RBS 구역의 다양한 제원 그리고 단면 요소의 폭-두께 비의 변화 등의 원인으로 국부좌굴이 발생하는 시기와 국부좌굴의 정도가 매우 다양하게 나타나기 때문에 플랜지 감소율과 콘크리트 슬래브의 유무에 따라서 가중함수  $\omega_2$ 와  $\beta$ 가 결정되었다.



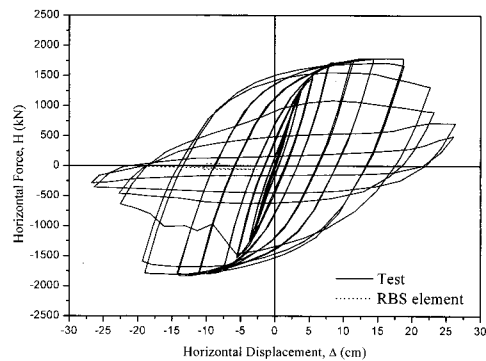
(a) DB2 시험체



(b) DB3 시험체



(c) DBBW 시험체



(d) DBBWC 시험체

그림 17. 국부좌굴을 고려한 해석결과와 실험결과와의 비교

그림 17에는 가중함수를 사용하여 국부좌굴을 고려한 해석결과와 실험결과의 비교가 나타나있다. 이 그림으로부터 해석과 실험결과가 상당히 좋은 상관관계를 보인다는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 결과는 한정된 실험결과에 근거하여 결정된 가중함수  $\omega_2$ 와  $\beta$ 를 상응하는 시험체에 적용하여 얻어진 것이기 때문에 국부좌굴을 발생시키는 주요 요인이 다른 경우에는 위의 가중함수  $\omega_2$ 와  $\beta$ 의 적용성이 떨어질 것이다. 따라서 보다 다양한 국부좌굴 현상을 정의하기 위해서는 광범위한 조사와 연구가 필요하다고 판단된다. 그러나 보다 나은 대안이 없는 상황에서는 RBS 보의 국부좌굴이 모멘트 저항 골조의 지진거동에 미치는 영향을 정성적으로 파악하는데 식 (3)의 가중함수가 유용하게 이용될 수 있다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 동반논문에서 제시된 RBS 보 요소를 실험 및 FEM결과와 비교하여 RBS 보 요소의 거동을 검증하고자 하였다. RBS 보 요소는 RBS 보의 단조거동과 임의 주기거동 그리고 국부 좌굴 거동을 정의 할 수 있는 경화 규칙을 갖추고 있다. 단조 거동의 경우 초기 항복단계를 제외하고 RBS 보 요소의 해석 결과가 FEM결과와 상당히 좋은 상관관계를 보였고 주기 거동의 경우에도 국부 좌굴이 발생하기 전까지 실험결과와 좋은 상관관계를 보였다. 또한 국부좌굴을 고려한 해석결과도 실험결과와 합리적인 상관관계를 보였다. RBS 보의 비탄성 거동이 모멘트 저항 골조의 지진거동에 미치는 영향을 정성적으로 파악하는데 RBS 보 요소가 유용하게 이용될 수 있다고 판단된다.

#### 참 고 문 헌

황병국, 전성민, 김기동, 고만기 (2007) 강제 모멘트 골조의 비선형 지진 해석을 위한 부등단면 보 요소. I: 요소개발. 한국 방재학회 논문집, 제7권, 제5호, pp. 27-35

Dafalias, Y. F. (1975) *On Cyclic and Anisotropic Plasticity: I) A General Model Including Material Behavior Under Stress Reversals, II) Anisotropic*. Ph.D. Thesis, Dept. of Civ. Engrg., University of California, Berkeley.

Engelhardt, M.D. (1992) *Cyclic Tests on Large Scale Steel Moment Connections*. Report No. PMFSEL-92-2, University of Texas, Austin, Texas.

Engelhardt, M.D, Fry, G.T, Jones, S. Venti, M. and Holliday, S. (2000) *Behavior and Design of Radius-Cut Reduced Beam Section Connections*. Report No. SAC/BD-00/17, SAC Joint Venture, Sacramento, California.

Engelhardt, M.D, Winneberger, T, Zekany, A.J, and Potyraj, T.J. (1996) *The Dogbone connection: Part II*. Modern Steel Construction, 36(8), AISC, Chicago, Illinois.

Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000) *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings*. FEMA 350, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Hibbit, Karlsson, and Sorenson, Inc., (1996) *ABAQUS user's manual-Vers. 5.6*. Pawtucket, R.I.

Kim, K.D. and Engelhardt, M.D. (1995) *Development of analytical models for earthquake analysis of steel moment frames*. Report No. PMFSEL-95-2, University of Texas, Austin, Texas.

Kim, K.D. and Engelhardt, M.D. (2002) Monotonic and Cyclic Loading Models for Panel Zones in Steel Moment Frames. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, No. 5-8, pp. 605-635.

Lee et al. (2002) *Column Stiffener Detailing and Panel Zone Behavior of Steel Moment Frame Connections*. Report No. ST-01-3.2, University of Minnesota.

Mroz, Z. (1967) An attempt to describe the behavior of metals under cyclic loads using a more general work hardening model. *Acta Mechanica*, Vol. 7, No. 2-3, pp. 199-212.

Ricles, J. M., C., Lu, L.W., and Fisher, J. W. (2000) *Development and evaluation of improved ductile welded unreinforced flange connections*. Report No. SAC/BD-00/24, SAC Joint Venture, Sacramento, California.

© 논문접수일 : 2007년 08월 29일  
 © 심사의뢰일 : 2007년 08월 30일  
 © 심사완료일 : 2007년 09월 29일