패널존 강도가 RBS 철골모멘트접합부의 내진거동에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

Numerical Study of PZ Strength Effects on Cyclic Seismic Performance of RBS Steel Moment Connections

이철호* 김재훈** 김소연***
Lee, Cheol Ho Kim, Jae Hoon Kim, So Yeon

ABSTRACT

Effects of panel zone (PZ) strength on cyclic seismic performance of the RBS connections was studied based on the validated finite element analysis. High-profile cyclic correlation of finite element model with the full-scale test results based on the material and geometric nonlinear post-buckling analysis was among the most significant consideration in this study. Numerical response results as affected by the panel zone strength reproduced the experimentally observed results quite reasonably. The finite element modeling capability of this study can be used to supplement or to replace in part the costly full-scale connection testing.

1. 서 론

1994년 미국의 노스리지 및 1995년 일본의 고베 지진당시 보-기둥 용접 모멘트접합부에 조기 취성파괴가 발생하여, 수 백동의 철골조 건물에 막대한 피해를 입혔다. 양 지진에서 노출된 용접 모멘트접합부의 문제점을 해결하기 위해 다양한 상세의 고연성 접합부가 제시되었는데, 그 중에서 RBS (Reduced Beam Section, dogbone) 접합부는 매우 비용효과적인 상세로서 단연 주목을 받았고 여러 연구자들에 의해 수행된 수많은 실물대 실험을 통하여 뛰어난 연성능력이 지속적으로 입증되었다 (Chen 1996; Plumier 1996; Zekioglu 등 1997; Engelhardt 등 1998, 2000; Tsai-Chen 2000; Yu 등 2000; Chi-Uang 2002; Jones 등 2002; Lee 등 2005). 그러나 RBS 접합부는 좀 더 검토해야 할 설계상의 몇몇 문제가 아직 남아있다. 특히 철골모멘트 접합부의 패널존의 적정강도와 관련된 문제는 수십 년간 논란이 되어온 이슈이다. 최근 Lee 등(2005)은 패널존 강도가 RBS 접합부의 내진거동에 미치는 영향을 타 연구자가 수행한 다양한 실험결과까지 광범위하게 분석한 후, 실험적 관측에 기초한

* 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수
** 서울대학교 건축학과 박사과정
*** 서울대학교 건축학과 석사과정

RBS 접합부의 균형패널존(balanced PZ)의 강도기준을 제시한 바가 있다. 본 논문에서는 반복재하 실물대 실험결과와 잘 부합하는 유한요소해석 모델을 우선 정립한 후 다양한 수치해석을 통하여 Lee 등(2005)에 의해 수행된 연구결과를 보충하고자 하였다. 또한 오늘 날의 강력한 유한요소 해석 기법을 활용하여 고비용의 실물대 접합부 실험의 보완 및 부분적 대체 가능성도 다각도로 평가하고자 하였다.

2. 실험적으로 관측된 패널존 강도의 영향

이하에서는 Lee 등(2005)의 연구를 토대로 실험적으로 관측된 접합부 거동에 미치는 패널존 강도의 영향을 약술하고자 한다. 그림 1은 RBS 접합부 실물대 시험체 일부의 상세를 보여주고 있다. 그림 1에서 각 시험체를 명명하는데 쓴 약어의 의미는 다음과 같다: S= 강한패널존, M= 중간강도 패널존, W= 보 웨브 용접접합. 그림 2는 전형적 테스트 셋업으로 기둥 외주면에서 2.5 m의 위치에 횡지지가 설치되었음을 보여주고 있다.

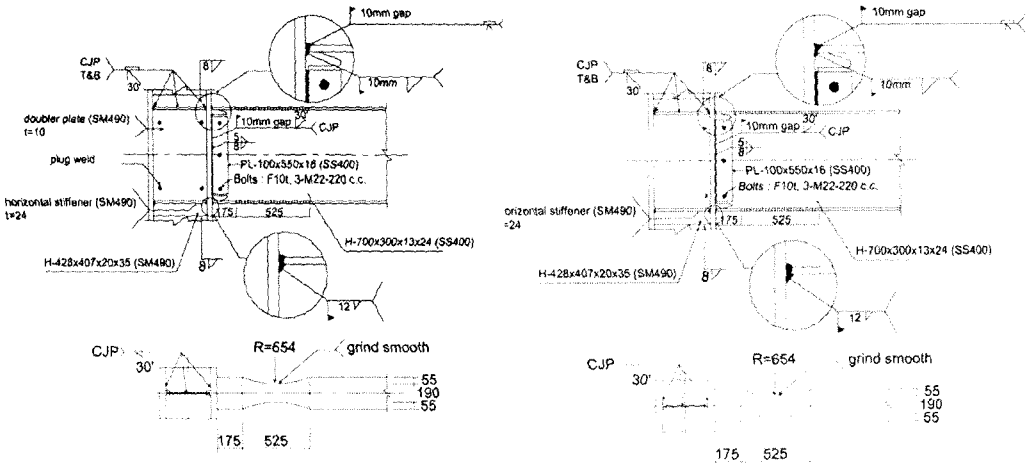


그림 1. 패널존 강도에 따른 시험체 접합 상세: (a) DB700-SW; (b)DB700-MW (Lee 등 2005)

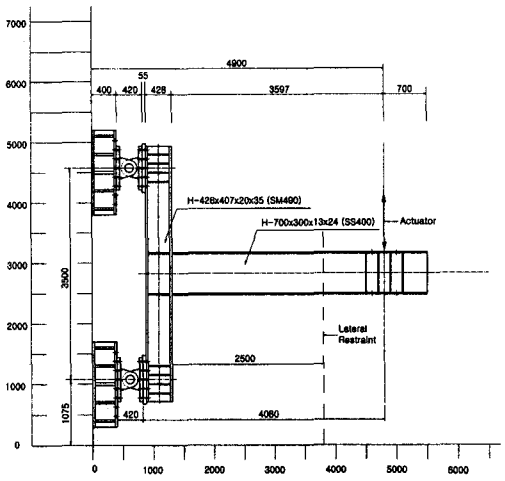
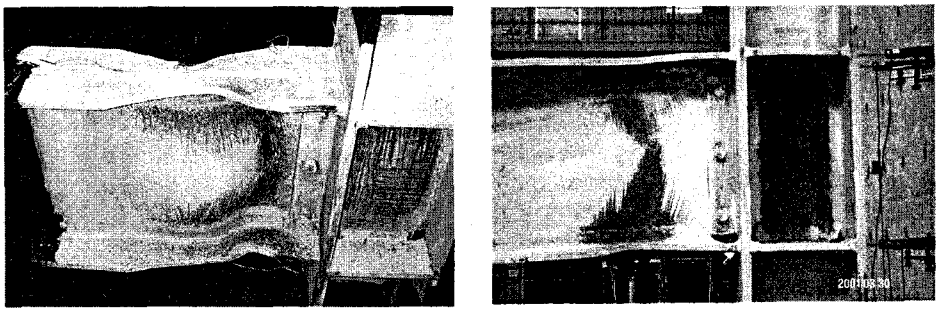


그림 2 테스트 셋업

그림 3은 강한 패널존과 중간강도 패널존으로 설계된 시험체의 접합부 소성힌지의 패턴을 보여주고 있다. 그림 2에서 보듯이 패널존 항복이 허용된 DB700-MW 시험체의 경우 상당한 패널존 항복을 시사하는 심한 회칠의 탈락을 볼 수 있다. 반면 강한 패널존 시험체 DB700-SW는 패널존 항복은 줄어들었으나 보 소성힌지부에서 좌굴현상이 현저히 증가되었음을 볼 수 있다.



(a) (b)

그림 3 패널존의 강도에 따른 접합부 소성화 패턴 비교 : (a) DB700-SW; (b) DB700-MW

그림 4은 4% 층간변위에서의 횡비틀림좌굴(Lateral Torsional Buckling, LTB)의 진폭을 정리한 것이다. 강한 패널존으로 설계한 시험체들은 접합부에 요구되는 소성변형의 대부분을 보에서 수용해야 하므로 상대적으로 횡비틀림좌굴의 진폭이 컸다. 이러한 경향은 패널존이 강하게 설계된 다른 연구자들의 경우에서도 공통적으로 관측되었다(Engelhardt 등 2000; Jones 등 2002; Chi-Uang 2002). 패널존이 강하게 설계되었을 경우 대부분의 에너지 소산이 보에 집중되어 상대적으로 취약한 부위인 RBS 부에 매우 큰 횡비틀림좌굴을 유발되었다. 이러한 횡비틀림 좌굴이 기둥의 비틀림까지 이어지는 경우에는 접합부 전체의 연성이 급격히 저하되는 현상도 발생했다. 강한 패널존에서 기인하는 이러한 문제는 패널존이 항복하도록 설계하면 다소 완화시킬 수 있을 것이다. 그러나 패널존이 지나치게 약하게 설계된 경우에는 패널존 부분의 과다 항복으로 패널존 구석의 기둥 플랜지에 킨크(kink)

가 발생하여 보 플랜지의 파단하는 거동을 보이는 경향이 있다.

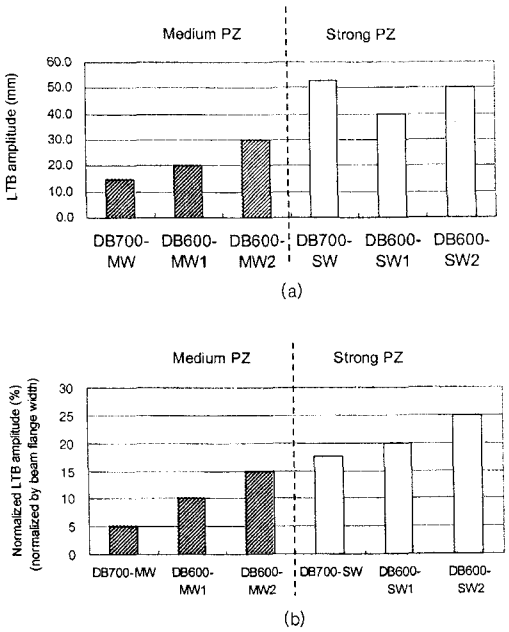


그림 4 패널존 강도에 따른 횡비틀림좌굴의 진폭 비교

따라서, Lee 등(2005)은 강하거나 약한 패널존 설계가 야기할 수 있는 문제점을 우회할 수 있도록 과거의 여러 실험결과를 종합적으로 분석하여 다음 식 (1)과 같은 균형 패널존 강도를 제안하였다.

$$0.70 \leq \frac{V_{RBS,P}}{V_P} \leq 0.90 \tag{1}$$

$$\text{여기서, } V_p = (0.6F_{yc}d_c t_p)\left[1 + \frac{3b_{cf}t_{cf}^2}{d_b d_c t_p}\right] \tag{2}$$

단, F_{yc}= 기둥의 항복강도, d_b= 보 춤, d_c= 기둥춤, t_p= 패널존의 두께, b_{cf}= 기둥 플랜지 폭, t_{cf}= 기둥 플랜지 두께.

$$V_{RBS,P} = \left(\frac{M_{RBS,P}}{d_b}\right) \times \left(\frac{L_b/2 + d_c/2}{L_b/2 - e}\right) \times \left(1 - \frac{d_b}{H_c}\right) \tag{3}$$

단, $M_{RBS,P}$= 계측된 항복응력도에 기초하여 산정된 RBS부 소성모멘트, H_c= 기둥의 높이(나머지 기호는 그림 5 참조).

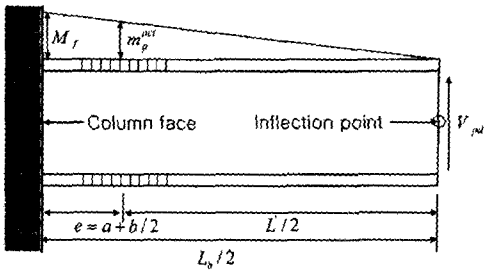


그림 5 RBS 보 스팬의 주요치수

(1)식의 설정논리는 다음과 같다: 패널존 강도비가 (1)식의 범위에 있으면 패널존은 보 플랜지 그루브 용접부에 유해한 영향을 미치지 않고 0.01 radian의 소성회전각을 무난히 발휘할 수 있다. 강한 패널존 설계에 비해 고비용의 패널존 보강판의 비용도 줄일 수 있음은 물론이다. 또한 이 정도 크기의 패널존 소성변형을 허용하면 강한 패널존 시험체에 비해 횡비틀림좌굴의 진폭을 절반 정도로 줄일 수 있다. 이는 보 플랜지의 저사이클 피로에 의한 파단 가능성을 줄여주고 보의 영구변형도 감소시켜서 지진 내습 이후의 보수비용의 절감도 가능케 하는 장점이 있다.

3. 유한요소해석 모델링 및 검증

우선 다양한 파라미터해석을 수행하기에 앞서 실물대 실험결과를 토대로 본 연구에서 사용할 유한요소 모델링의 타당성을 검증하고자 하였다. 해석결과에 영향을 미치는 요소들은 다양하기 때문에, 하나의 시험체를 통한 검증에 그치지 않고 보 부재의 크기와 패널존의 강도에 따라 총 4개의 실물대 시험체(DB700-MW, DB700-SW, DB600-MW1, DB600-SW1)의 실험결과를 토대로 검증을 시도하였다. 위의 4가지 시험체를 ABAQUS (2001) 의 4절점 쉘요소(S4R)로서 3차원 모델링하였다. 보와 기둥의 플랜지 및 웨브의 항복강도와 인장강도는 인장시험결과를 사용하였다. 비선형 등방적/운동학적 변형경화 모델(nonlinear isotropic/kinematic hardening model)의 초기변형경화계수 및 변형경화감소율은 Kaufmann 등(2001)의 자료를 사용하여 도출하였다. 시험체의 테스트 셋업과 동일한 3차원 유한요소모델을 구성한 후, 실험에 사용한 SAC(2000) 철골접합부 내진실험용 반복재하 변위제어 프로그램에 따라 폰 미세스 항복조건 및 Riks알고리즘에 의해 반복재하 탄소성 해석을 수행하였다. Riks 알고리즘은 소위 호장법(arc length method)에 기초한 것으로서 뉴튼-랩슨법으로는 수렴이 되지 않는 강성저하 또는 제하(unloading) 영역까지 구조거동의 추적이 가능하므로 사용하였다. 반복하중을 받는 접합부에 발생하는 국부좌굴(FLB, WLB) 및 횡비틀림좌굴(LTB)를 모사하기 위해 고유치해석을 수행한 다음 1차좌굴모드를 기하학적 초기불완전(initial geometric imperfection)으로 도입한 후 변위제어 재료적/기하학적 비선형 후좌굴해석을 수행하였다.

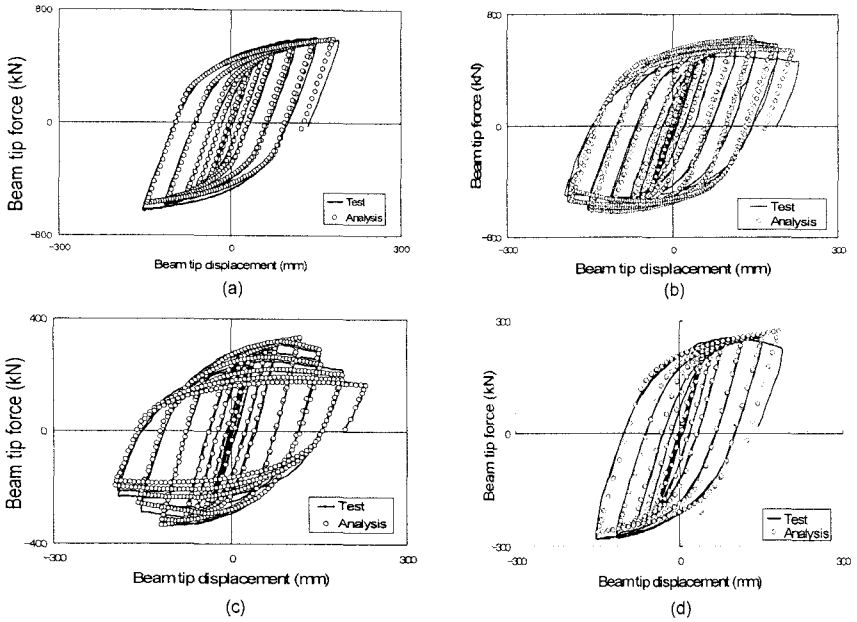


그림 6 해석 및 실험에 의한 이력곡선 비교: (a) DB700-MW; (b) DB700-SW; (c) DB600-SW1; (d) DB600-MW1

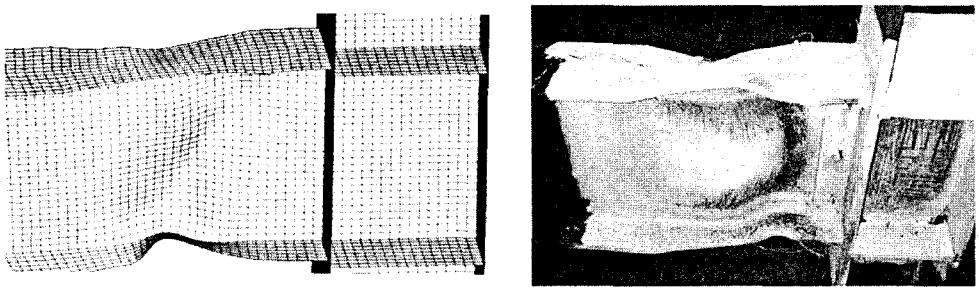


그림 7 DB700-SW 시험체의 해석 및 실험에 의한 좌굴형상 및 소성힌지부

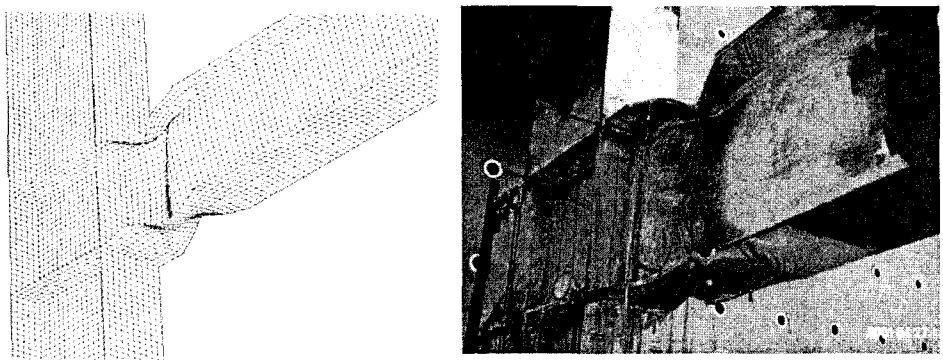


그림 8 DB600-SW1 시험체의 해석 및 실험에 의한 좌굴형상 및 소성힌지부

그림 6는 실험에서 얻어진 보 단부변위 대 보 단부하중 이력곡선과 본 연구의 해석결과 얻어진 이력곡선을 비교한 것으로 매우 뛰어난 정합성을 보여주고 있다. 본 연구에서 구성한 유한요소 모델이

반복재하의 진행에 따른 항복면 확장 및 바우싱거 효과까지를 실제에 가깝게 반영할 수 있음을 확인해 주고 있다. 또한 국부좌굴(FLB, WLB) 및 횡비틀림좌굴(LTB)에 의한 강도저하도 아주 만족스럽게 잘 모사하고 있다. 그림 7 및 8은 각각 DB700-SW, DB600-SW1 시험체의 해석 및 실험에 의한 좌굴형상 및 소성힌지 성상을 보여주는 것으로 상당 부분 비슷한 패턴이 해석으로서 재현되고 있다. 보 단부하중 대 보 단부 변위 이력곡선의 비교와 더불어, 보/패널존/기둥에서 발생한 소성회전각, 접합부 영구변형, 에너지소산량, 보플랜지 국부좌굴(FLB), 보웨브 국부좌굴(WLB), 횡비틀림좌굴(LTB) 등 실험에서 계측된 다양한 물리량과의 비교해서 본 연구의 유한요소 모델링 기법의 신뢰도를 다양한 각도에서 평가하고자 하였다 (표 1 참조). 보/패널존/기둥에서 발생한 소성회전각, 접합부 영구변형 등은 실험 및 해석결과가 매우 잘 일치하고 있다. 보플랜지 국부좌굴(FLB), 보웨브 국부좌굴(WLB), 횡비틀림좌굴(LTB)의 경우 강한 패널존 모델에서는 역시 뛰어난 일치를 보여주고 있다. 반면 중간 패널존 모델의 경우는 해석값이 실험값보다 작게 나오고 있다 (실제 실험의 횡지지대는 시험체 설치 목적상 5~10 mm 정도의 갭이 존재하지만, 해석모델은 갭이 없는 완벽한 횡지지로 모델링한 것도 하나의 원인이 될 수 있다). 총에너지 소산량 역시 해석과 실험결과가 매우 잘 일치하고 있다. 보, 패널존 사이의 에너지 소산비율은 시험체 DB600-SW1 외에는 만족스런 일치를 보이는 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합적으로 고려할 때, 본 연구의 해석모델은 반복하중을 받는 접합부의 중요한 응답량을 전반적으로 만족스럽게 모사하고 있는 것으로 판단된다.

표. 1 실험 및 해석결과의 비교 (4% 사이클 종료기준)

		DB700-MW		DB700-SW		DB600-SW1		DB600-MW	
		Test	Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis
총 소산에너지 (kJ)		787.5	749.5	900.4	855.2	443.1	417.0	384.0	388.0
성분별 에너지 소산 (kJ)	보	459.8 (58%)	386.3 (51%)	720.3 (80%)	689.3 (80%)	354.5 (80%)	409.0 (98%)	266.1 (70%)	225.9 (58%)
	패널존	327.3 (41%)	382.5 (51%)	180.1 (20%)	166.2 (19.4)	88.6 (20%)	22.1 (5%)	122.8 (32%)	197.6 (51%)
	기둥	-	-	-	-	-	-	-	-
소성회전각 (rad)	보	0.017	0.014	0.026	0.023	0.021	0.023	0.018	0.014
	패널존	0.012	0.014	0.0003	0.005	0.010	0.01	0.013	0.014
	기둥	0.0002	0.0004	0.0001	0.0003	0.0003	0.00002	0.0002	0.0005
접합부 영구변형		0.03	0.027	0.03	0.026	0.03	0.026	0.03	0.027
LTB (cm)		1.5	almost zero	5.0	4.3	4.0	4.5	0.5	almost zero
FLB (cm)		not available	almost zero	not available	0.7	5.0	4.3	3.0	almost zero
WLB (cm)		2.0	almost zero	5.3	4.8	7.0	6.0	3.0	almost zero

4. 수치해석에 의한 패널존 강도의 영향 분석

본 연구에 사용된 유한요소해석기법의 타당성을 확인한 후 강한 패널존, 균형패널존, 약한 패널존 모델에 대해 유한요소해석을 실시하였다. 그림 9 및 표 2 그리고 그림 10과 표 3은 각각 DB700 시리즈와 DB600 시리즈의 해석결과를 정리한 것이다. 모두 실험결과와 일치하는 경향을 볼 수 있다. 즉 강한 패널존 모델은 거의 대부분의 에너지를 보에서 소산하는 대신 상당한 FLB, WLB, LTB가 발생하여 종국적으로는 RBS 소성힌지에서 보의 저사이클 피로에 의한 파단 가능성이 높아진다. 특히 플랜지의 폭-두께비가 한계치에 근접한 N-DB600S 모델의 경우 극심한 보의 강도저하를 수반한다 (그림 11 참조). 반면 표 2 및 3에서 보듯이 약한 패널존 시험체의 경우 거의 대부분의 에너지를 패널존 그리고 일부를 기둥에서 소산한다: 강한 기둥-약한 보 조건을 충분히 만족해도 패널존이 약하면 패널존 코너 부분의 기둥 플랜지가 일부가 항복할 위험성이 있다. 균형 패널존 모델의 경우 RBS 소성힌지에서 FLB, WLB, LTB 등이 거의 발생치 않으며 에너지소산과 소성회전을 보와 패널존이 거의 반씩 분담하여 구조손상이 분산되는 바람직한 거동을 보인다.

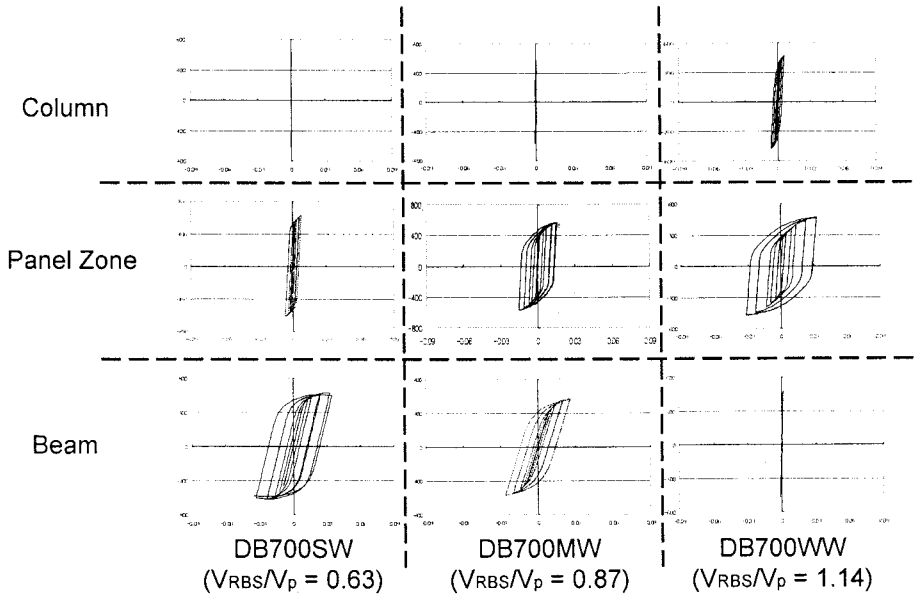


그림 9. DB700 계열의 패널존 강도에 따른 접합부 구성요소의 응답

표 2 DB700계열의 파라미터 해석결과 (4% 사이클 종료 기준)

		N-DB700S ($V_{RBS,P}$/ V_P=0.63, Strong PZ)	N-DB700M ($V_{RBS,P}$/ V_P=0.87, Balanced PZ)	N-DB700W ($V_{RBS,P}$/ V_P=1.14, Weak PZ)
총 소산 에너지(kJ)		857.62	781.10	722.79
성분별 에너지 소산 (kJ)	보	689.3 (80%)	386.3 (50%)	1.28
	패널존	166.2 (20%)	382.5 (50%)	632.3 (87%)
	기둥	2.12	12.3	89.21 (13%)
소성회전각 (rad)	보	0.023	0.014	0.0003
	패널존	0.005	0.014	0.028
	기둥	0.0003	0.0004	0.004
접합부 영구변형		0.027	0.026	0.028
LTB (cm)		4.3	Negligible	Negligible
FLB (cm)		0.7	Negligible	Negligible
WLB (cm)		4.8	Negligible	Negligible
강도저하 (%)		0.96	1.0	1.0

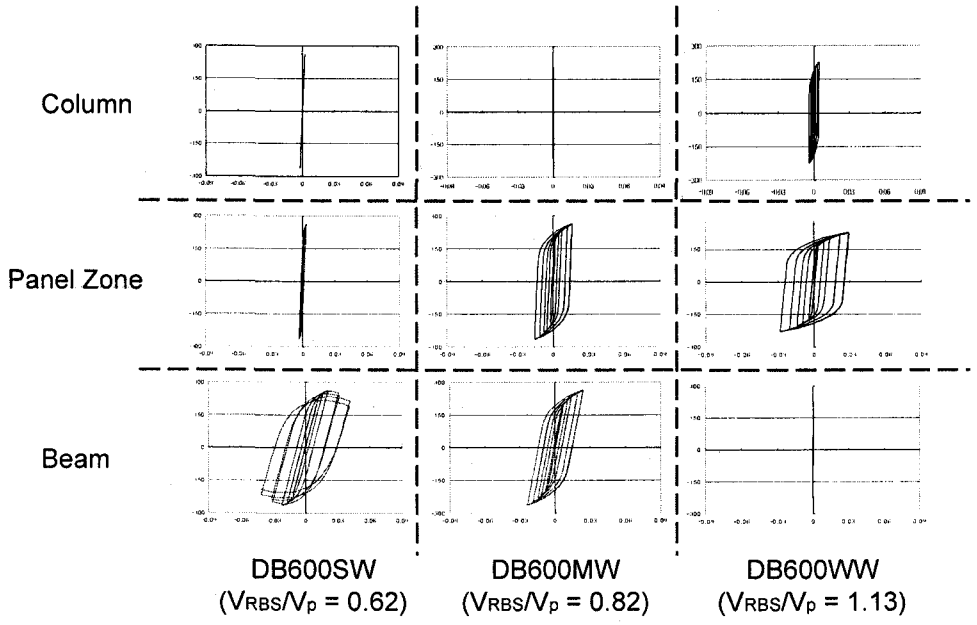


그림 10 DB600 계열의 패널존 강도에 따른 접합부 구성요소의 응답

표 3 DB700계열의 파라미터 해석결과 (4% 사이클 종료 기준)

		N-DB600S ($V_{RBS,P}$/ V_P=0.62, Strong PZ)	N-DB600M ($V_{RBS,P}$/ V_P=0.82, Balanced PZ)	N-DB600W ($V_{RBS,P}$/ V_P=1.13, Weak PZ)
총 소산 에너지(kJ)		433.13	431.32	357.79
성분별 에너지 소산(kJ)	보	409.0 (94%)	225.9 (52%)	2.69
	패널존	22.1 (6%)	197.6 (48%)	305.9 (85%)
	기둥	2.03	7.82	49.2 (15%)
소성회전각(rad)	보	0.024	0.014	0.0003
	패널존	0.0009	0.014	0.028
	기둥	0.0002	0.0005	0.004
접합부 영구변형		0.026	0.026	0.026
LTB(cm)		4.5	0.0000014	0.0000008
FLB(cm)		4.3	0.0000015	0.0000011
WLB(cm)		4.7	0.0000017	0.0000013
강도저하		0.83	1.0	1.0

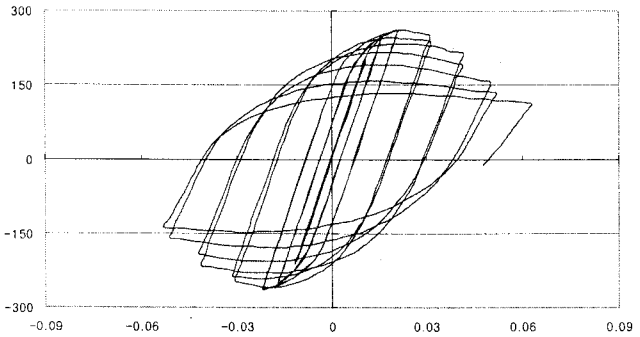


그림 11 DB600SW 모델의 보 강도저하 양상

5. 요약 및 결론

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 보/패널존/기둥에서 발생한 소성회전각 , 접합부 영구변형, 에너지소산량, 보플랜지 국부좌굴(FLB), 보웨브 국부좌굴(WLB), 횡비틀림좌굴(LTB) 등 실험에서 계측된 다양한 물리량과의 비교해서 본 연구의 유한요소 모델링 기법의 신뢰도를 다양한 각도에서 확인하였다

(2) 검증된 유한요소해석모델을 활용하여 패널존 강도변화에 따른 접합부 거동 시뮬레이션 결과는

실험에서 관측되는 제반 거동지표를 잘 재현하였다.

(3) 이상의 결과를 고려할 때 본 연구의 유한요소 모델링 방안은 고비용의 실물대 실험을 부분적으로 대체하거나 또는 실험을 통한 계측으로는 파악하기 어려운 응답이나 거동을 파악하는데 다양하게 활용될 수 있을 것이다. 향후 이런 방향으로 후속연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국 지진공학연구센터(KEERC) 의 지원에 따른 것으로 이에 감사드립니다(과제번호: R11-1997-045-11004-0).

참고 문헌

1. Chen, S. J., Yeh, C. H., and Chu, J. M. (1996). "Ductile steel beam-to-column connections for seismic resistance." J. Struct. Engrg., ASCE, 122(11), 1292-1299
2. Plumier, A. (1997). "The dogbone: back to the future." Engrg. J. 34(2), 61-67
3. Zekioglu, A., Mozaffarian, H., Chang, K. L., and Uang, C.-M. (1997). "Designing after Northridge." Modern Steel Constr., 37(3), 36-42
4. Engelhardt, M. D., Winneberger, T., Zekany, A. J., and Potyraj, T. J. (1998). "Experimental investigations of dogbone moment connections." Engrg. J., 35(4), AISC, Fourth Quarter, 128-139
5. C. H. Lee, S. W. Jeon, J. H. Kim, C. M. Uang, (2005), "Effects of Panel Zone Strength and Beam Web connection Method on Seismic Performance of Reduced Beam Section Steel Moment Connections" ASCE, Vol. 131, No. 12, pp. 1854-1865
6. Iwankiw, N. (1997). "Ultimate strength consideration for seismic design of the reduced beam section (internal plastic hinge)." Engrg. J. 34(1), AISC, First Quarter, 3-16
7. SAC (2000). Seismic design criteria for new moment-resisting steel frame construction, Report No. FEMA 350, SAC Joint Venture, Sacramento, Calif.
8. Engelhardt, M. D., Venti, M. J., Fry, G. T., Jones, S. L., and Holliday, S. D. (2000). Behavior and design of radius cut reduced beam section connections, SAC/BD-00/17, SAC Joint Venture, Sacramento, Calif.
9. Chi, B. and Uang, C.-M. (2002). "Cyclic response and design recommendations of reduced beam section moment connections with deep column." J. Struct. Engrg., ASCE, 128(4), 464-473
10. Choi, J. H., Stojadinovic, B., and Goel, S. C. (2000). Development of free flange moment connection, Technical Report UMCEE 00-15, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich.
11. Jones, S. L., Fry, G. T., and Engelhardt, M. D. (2002). "Experimental evaluation of cyclically loaded reduced beam section moment connections." J. Struct. Engrg., ASCE, 128(4), 441-451
12. HKS(2001). ABAQUS User's Manual, Version 6.2 Hibbit, Karlson & Sorenson, Inc
13. Kaufmann, E. J., Metrovich, B., and Pense A. W. (2001). "Characterization of cyclic inelastic strain behavior on properties of A572 Gr. 50 and A913 Gr. 50 rolled sections." Final Report to American Institute of Steel Construction, ATLSS , Leigh University, PA