

볼트수의 변화가 더블앵글 접합부의 회전강성에 미치는 영향

The Effect of the Variation of the Number of Bolts on the Rotational Stiffnesses of Double Angle Connections

양재근* 김호근** 김기환**
Yang, Jae-Guen Kim, Ho-Keun Kim, Ki-Hwan

요약

저층 철골조의 시공에 있어서 더블앵글 접합부는 매우 효과적인 접합부의 한 형태로 취급된다. 더블앵글 접합부의 접합부 강성은 앵글의 두께, 볼트 게이지 거리, 볼트의 개수 등과 같은 여러 변수에 따라서 변화한다.

본 연구에서는 볼트수의 변화가 더블앵글 접합부의 모멘트-회전각 관계에 미치는 영향을 파악하기 위하여 세 개의 더블앵글 접합부 실험이 수행되었다. 각각의 실험결과에 근거하여 각 실험에 사용된 더블앵글의 회전강성은 회귀분석을 통하여 산정되었다. 회귀분석결과 더블앵글 접합부의 접합부 강성은 볼트의 개수가 증가함에 따라서 함께 증가한다는 결론을 얻었다.

핵심단어 : 더블앵글 접합부, 회전강성, 볼트의 수

Abstract

In the construction of row-rise steel buildings, double angle connection can be considered as one of most effective connection types. Its connection flexibility depends mainly on several parameters such as angle thickness, bolt gage distance, and number of bolts.

To establish the effect of the variation of the number of bolts on the moment-rotation relationship, three experimental tests have been conducted in this research. Based on the results of each experimental test, the rotational stiffness of each angle specimen can be calculated by performing regression analysis. Considering the results of regression analysis, we concluded that the more the number of bolts used in double angle connection, the higher the rotational stiffness as one can expected.

keywords : double angle connection, rotational stiffness, number of bolts

1. 서론

더블앵글 접합부의 회전강성은 일반적으로 앵글의 두께, 볼트 게이지 거리, 볼트의 수, 앵글의 길이 등의 변화에 의존한다^[1~7]. 이러한 여러 변수들 중에서 본 연구에서는 볼트 수의 변화가 접합부 회전강

성의 변화에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 이를 위하여 앵글 두께, $t = 7$ mm, 볼트 게이지 거리, $g_1 = 65$ mm인 L-125×75×7의 부등변 앵글을 선택하고, 장변의 앵글에 사용되는 볼트 수는 3개, 4개, 5개로 변화시키면서 접합부 실험을 수행한다.

접합부 실험을 통하여 얻은 모멘트-회전각 관계 곡선은 Richard가 제안한 식을 이용하여 회귀분석한다^[8,9]. 이로부터 접합부의 거동을 예측할 수 있는 초기강성, 소성강성, 참조모멘트, 곡선형태변수 등을 얻는다. 또한, 모멘트-회전각 관계 곡선을 Ang과

* 인하대학교 건축학부 조교수, 공학박사
Tel : 032-860-7588, Fax : 032-866-4624
E-mail : jyang@inha.ac.kr

** 인하대학교 건축공학과 석사과정
E-mail : metagon@hanmail.net
kizzang98@hanmail.net

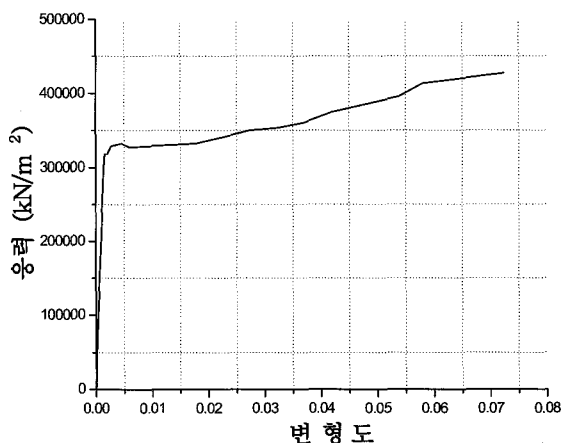
Morris가 제안한 식과 비교·검토함으로써 실험의 타당성을 입증하고, 볼트수-초기강성 사이의 관계를 예측한다^[10-12].

본 연구를 통하여 얻은 더블앵글 접합부의 회전강성 관련 자료는 접합부설계 뿐만 아니라 중·저층 골조의 처짐 및 골조가 저항할 수 있는 최대작용하중의 산정에 사용될 수 있다^[13-17].

2. 더블앵글 접합부 실험

사용된 앵글 시험편의 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801에 따른 금속재료 인장강도 시험을 수행하였다. 인장시험은 만능시험기(UTM)를 사용하여 수행하였고, $\sigma-\epsilon$ 관계 곡선을 <그림 1>과 같이 얻었다. 시험편의 역학적 성질은 <표 1>과 같다.

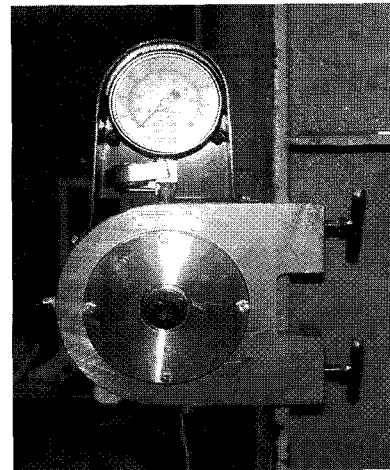
F10T-M20 볼트의 기계적 성질을 파악하기 위하여 볼트 축력계를 사용하여 축력 시험을 수행하였다. 볼트의 축에 직경 2 mm의 구멍을 뚫어 볼트 스트레인 게이지(BTM-6C)를 삽입한 후에 토크를 가하면서 $\sigma-\epsilon$ 관계를 파악하였다. <그림 2>와 같이 응력-변형도 곡선은 거의 선형적인 관계를 나타내다 급격한 응력감소를 보이며 파괴되었다. 볼트의 역학적 성질은 <표 2>에 정리하였다.



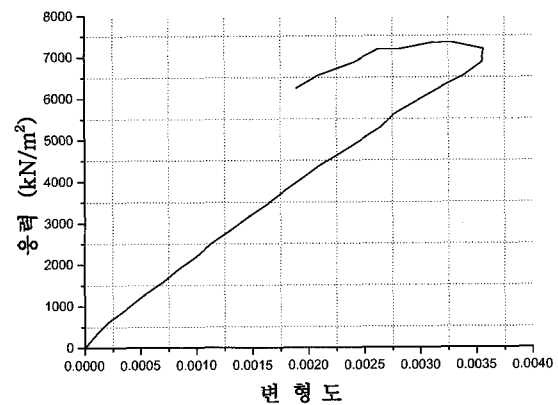
<그림 1> 앵글 시험편의 응력-변형도 곡선

<표 1> 앵글 시험편의 역학적 성질

탄성계수 (kN/m ²)	항복강도 (kN/m ²)	인장강도 (kN/m ²)
2,027,620	318,500	469,400



a) 볼트축력실험



b) 응력-변형도 곡선

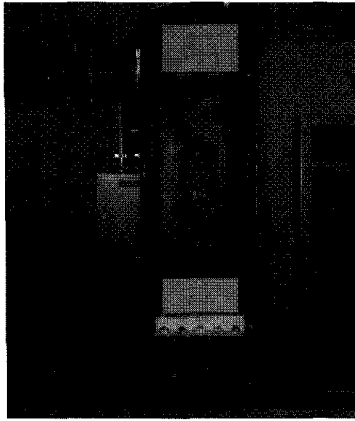
<그림 2> 사용된 볼트의 축력 실험 및 응력-변형도 곡선

<표 2> 사용 볼트의 역학적 성질

탄성계수 (kN/m ²)	항복강도 (kN/m ²)	인장강도 (kN/m ²)
1,934,520	6,860	7,350

볼트수의 변화에 따른 더블앵글 접합부의 회전강성을 획득하기 위하여 <그림 3>과 같이 캔틸레버 보 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 앵글의 기하학적 형상은 <표 3>과 <그림 4>에 정리하였다.

<표 3>의 볼트 게이지 거리, g_1 은 장변 앵글 볼트 구멍의 중심으로부터 앵글 모서리까지의 거리를 나타낸다. L-125×75×7 앵글의 장변은 각각 3개, 4개, 5개의 F10T-M20 볼트를 사용하여 수평으로 놓혀진 H-310×305×15×20 기둥 플랜지에 연결된다. 각각의 볼트는 KS B 1010에 의거한 토크관리법에 따라서



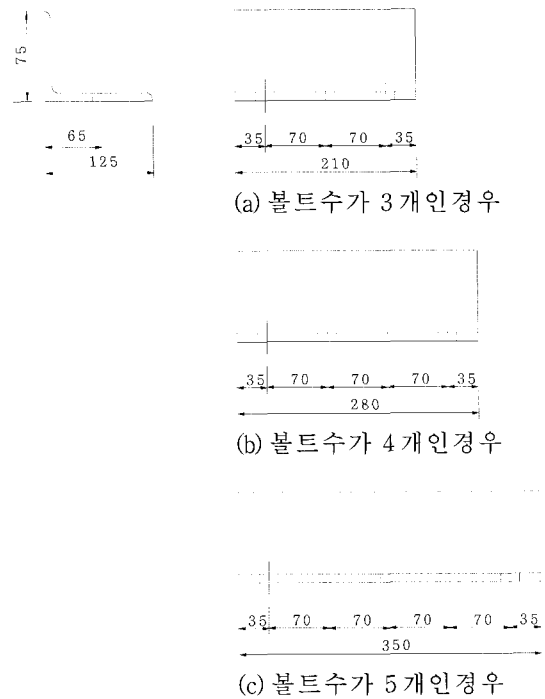
〈그림 3〉 Test set up

〈표 3〉 앵글의 기하학적 형상

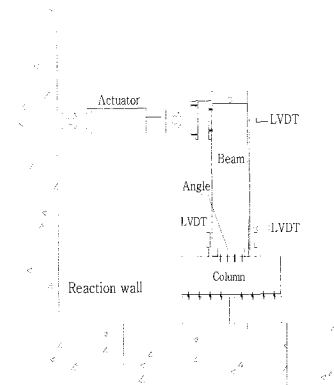
시험체	볼트수 (개)	앵글두께 (mm)	게이지거리 (mm)	앵글길이 (mm)
3BN-L-7-65	3	7	65	210
4BN-L-7-65	4	7	65	280
5BN-L-7-65	5	7	65	350

5,500 kg·cm에 상응하는 539 N·m의 토크값으로 완전 체결되며, 볼트 인장력으로 환산한 경우 약 147 kN에 해당하는 수치이므로 볼트의 축력실험 결과 볼트의 항복하중 216 kN보다 작은 값이므로 볼트의 탄성한계를 넘어서지 않는다. 볼트의 1차 체결 토크치는 M20, M22인 경우 약 1500 kg·cm이고, 이는 147 N·m에 해당한다. 그러므로 볼트의 1차 체결 토크치는 147 N·m이고, 그 다음 539 N·m로 완전히 체결하였다.

한편, 앵글의 단변은 모살용접을 통하여 수직으로 세워진 H-400×200×8×13 보 웨브에 연결된다. 하중은 수직으로 세운 보의 단부에 액츄에이터를 사용하여 1.5 mm/min 속도의 변위제어방식으로 정적인 수평하중을 가하였다. 가력시 발생할 수 있는 횡좌굴을 방지하기 위하여 실험체의 좌우에 원형구좌를 설치하였다. 실험값의 측정은 그림 5와 같이 수평과 수직으로 설치한 4개의 변위계(LVDT)를 설치하여 각 지점의 변위차를 이용하여 회전각을 측정하였으며 액츄에이터에 내장된 로드셀(load cell)을 이용하여 하중을 측정하였다.

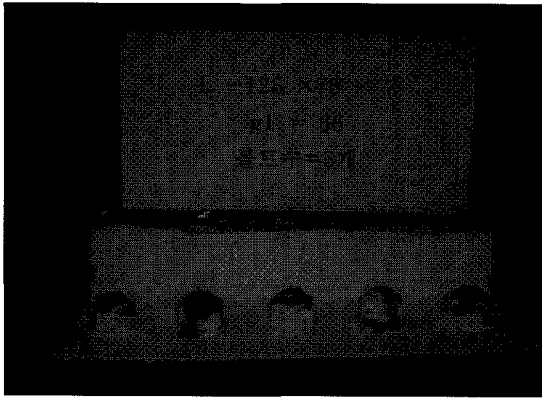


〈그림 4〉 실험에 사용된 앵글의 형상

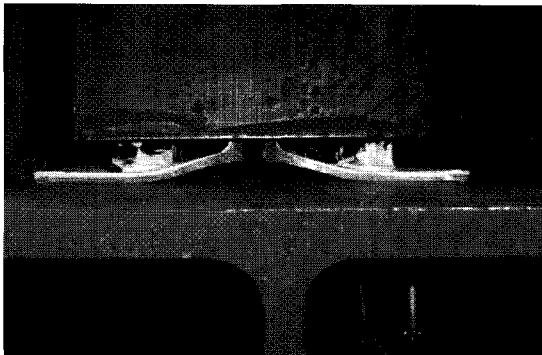


〈그림 5〉 변위계(LVDT) 설치 위치

하중이 증가함에 따라서 앵글의 윗부분이 서서히 기둥 플랜지로부터 떨어지고, 장변 앵글과 볼트 머리 부분이 만나는 부분과 앵글의 필렛 부분에 응력 집중 현상이 발생하기 시작한다. 하중이 더욱 증가하면 앵글의 모서리 부분이 보의 웨브 쪽으로 들어가고 최종적으로 앵글 상부 필렛 부분에 파단이 발생하여 더블앵글 접합부가 파괴된다. 이러한 파괴양상은 각각 볼트의 개수가 변하는 본 실험에서 모두 나타났고, Chen 및 Astaneh를 비롯한 여러 연구자



a) 횡 방향 변형



b) 종 방향 변형

<그림 6> 5BN-L-7-65 앵글의 변형 및 파괴양상

들의 해석과 실험을 통하여 얻은 파괴양상과 잘 일치한다^[1-7]. <그림 6>은 5BN-L-7-65 앵글 실험체의 변형 및 파괴양상을 나타낸다.

3. 더블앵글 접합부의 회전강성

실험을 통하여 볼트수의 변화에 따른 더블앵글 접합부의 모멘트-회전각 관계 곡선을 그림 7과 같이 얻었다. 이러한 곡선을 R. M. Richard가 제안한 식 (1)을 이용하여 회귀분석을 수행하면 더블앵글 접합부의 거동을 예측하는데 중요한 역할을 하는 여러 변수들을 표 4와 같이 얻을 수 있다. 곡선 형태 변수는 주어진 하중조건에서 곡선 기울기의 저감 비율을 조절하며, 이것은 접합부의 불완전성을 나타낸다.

$$M(\theta) = \frac{(K_e - K_p)\theta}{\left(1 + \left| \frac{(K_e - K_p)\theta}{M_0} \right|^n\right)^{1/n}} + K_p\theta \quad (1)$$

여기서, M : 모멘트

θ : 회전각

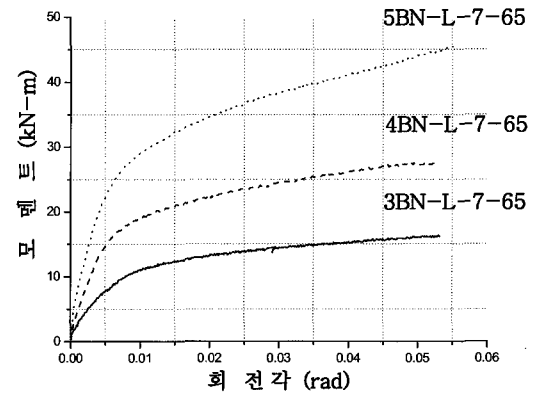
K_e : 초기강성(initial stiffness)

K_p : 소성강성(plastic stiffness)

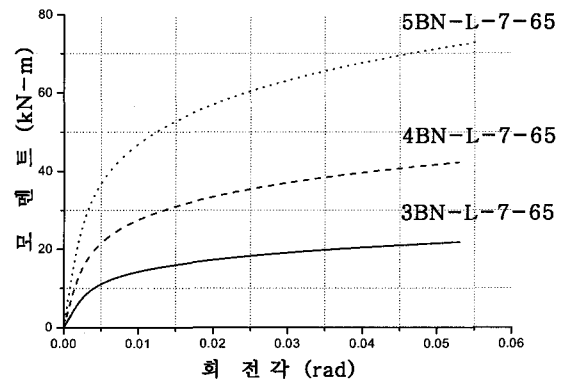
M_0 : 참조모멘트(reference moment)

n : 곡선형태변수(curve sharpness parameter)

<그림 7>의 볼트수의 변화에 따른 각 접합부의 모멘트-회전각 관계 곡선은 회전각이 대략 0.005 라디안에 접근하기 전까지는 곡선의 기울기가 급격히 증가하지만 이 후에는 곡선 기울기의 증가가 둔화됨을 보인다. 이러한 곡선 기울기 증가의 둔화는 볼트의 개수가 적을수록 현저하게 나타난다. 또한, 예측한 것과 같이 볼트의 개수가 증가함에 따라서 접합부의 초기강성 및 소성강성도 증가함을 나타낸다.



a) 모멘트-회전각 곡선(실험)



b) 모멘트-회전각 곡선(Ang-Morris 제안식)

<그림 7> 볼트수의 변화에 따른 더블앵글 접합부의 모멘트-회전각 곡선

〈표 4〉 더블앵글 접합부의 회귀분석 결과

시험체		K_e (kN·m/rad)	K_p (kN·m/rad)	M_0 (kN·m)	n
3BN-L-7-65	실 험	2,469	54	14	1.3
	Ang-Morris	3,775	124	16	1.4
4BN-L-7-65	실 험	4,802	136	21	1.5
	Ang-Morris	7,235	209	31	1.4
5BN-L-7-65	실 험	8,052	241	33	1.3
	Ang-Morris	12,250	282	53	1.2

표 4에 정리된 것과 같이 볼트의 개수가 3개(3BN-L-7-65)에서 각각 4개(4BN-L-7-65), 5개(5BN-L-7-65)로 증가하는 경우, 초기강성은 각각 1.94배, 3.26배로 증가하고, 소성강성도 각각 2.52배, 4.46배로 증가함을 나타낸다.

더블앵글 접합부의 볼트수의 변화가 접합부의 회전강성 변화에 미치는 영향을 파악하고, 수행된 실험의 타당성을 입증하기 위하여 inch-lbs 단위로 표현된 Ang-Morris가 제안한 식(2)와 비교·검토하였다[10~12]. Ang-Morris의 식은 곡선적합상수(curve-fitting constants)인 $(\theta_r)_0$, kM , n 과 표준화상수(standardization constant) k 를 사용하여 모멘트-회전각 관계를 승수모델(power model)로 표현한다. 표준화 상수 k 는 접합부 형태와 기하학적 형상에 의존하여 변화한다. Ang-Morris의 식을 SI단위로 변환하여 얻은 모멘트-회전각 관계 곡선을 회귀분석하여 표 4에 정리하였다. <그림 8>에 나타난 것과 같이 Ang-Morris의 식의 적용을 통하여 얻은 회귀분석 값들은 본 연구의 실험을 통하여 얻은 회귀분석 값들보다 큰 값을 제공한다. 하지만 모든 변수의 값들이 볼트의 개수가 증가함에 따라서 거의 선형적인 형태로 증가하는 양상을 나타낸다.

$$\frac{\theta}{(\theta_r)_0} = \frac{kM}{(kM)_0} \left[1 + \left(\frac{kM}{(kM)_0} \right)^{n-1} \right] \quad (2)$$

여기서, $k = d_a^\alpha t_a^\beta g^\gamma$

$$(\theta_r)_0 = 3.98 \times 10^{-3}$$

$$n = 4.94$$

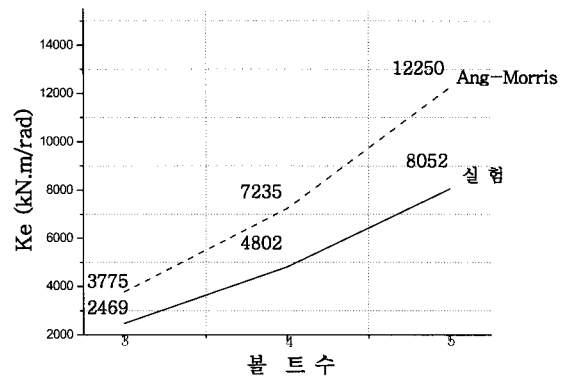
$$\alpha = -2.2, \quad \beta = 0.08, \quad \gamma = -0.28$$

$$g = 2g_1 + tw,$$

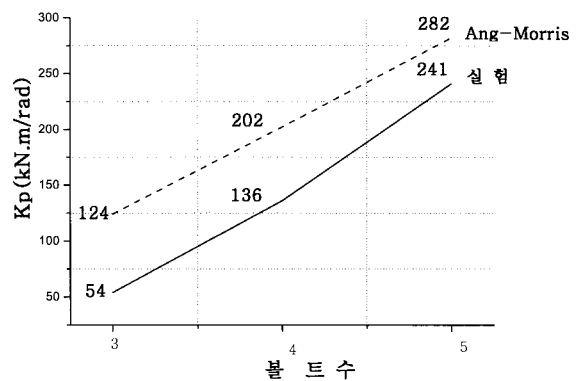
d_a : 앵글의 길이

t_a : 앵글의 두께,

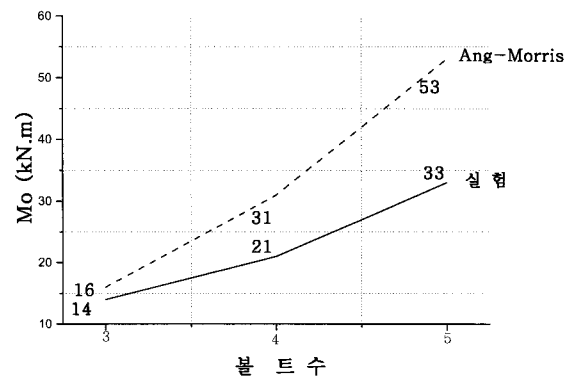
t_w : 보 웨브의 두께



a) 초기강성



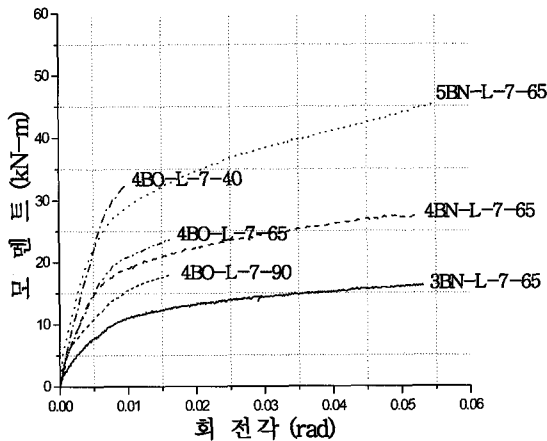
b) 소성강성



c) 참조모멘트

〈그림 8〉 회귀분석 결과 얻은 초기강성, 소성강성, 참조모멘트

본 연구에서 수행된 실험결과를 볼트 게이지 거리의 변화가 접합부의 회전강성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 이미 수행된 실험결과(앵글 두께, $t=7\text{ mm}$, 볼트의 개수, $n_{bolt}=4$, 볼트 게이지 거리, $g_1=40\text{ mm}$, 65 mm , 90 mm)와 비교하여 <그림 9>와 <표 5>에 정리하였다. 동일한 앵글두께, $t=7\text{ mm}$ 를 갖는 접합부의 경우, 접합부의 회전강성을 향상시키기 위해서는 볼트 게이지 거리를 감소시키는 것이 볼트의 개수를 증가시키는 것보다 효율적일 수 있다.



<그림 9> 볼트의 개수 및 볼트 게이지 거리 변화에 따른 모멘트-회전각 관계 곡선 비교

<표 5> 볼트의 개수 및 볼트 게이지 거리 변화에 따른 회귀분석 값 비교

시험체	K_c (kN·m/rad)	K_p (kN·m/rad)	M_o (kN·m)	n
3BN-L-7-65 ¹⁾	2,469	54	14	1.3
4BO-L-7-90 ¹⁾	4,552	261	15	1.3
4BN-L-7-65	4,802	136	21	1.5
4BO-L-7-65	4,841	333	20	1.6
5BN-L-7-65	8,052	241	33	1.3
4BO-L-7-40	5,576	1,058	27	1.9

4. 결론

본 연구에서는 볼트수의 변화가 더블앵글 접합부의 회전강성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 볼트의 수를 3개, 4개, 5개로 변화시키면서 접합부 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 모멘트-회전각 관계 곡선을 얻었고, 회귀분석을 통하여 회전강성을 산정하였다. 이러한 회귀분석 값을 기존의 Ang-Morris가 제안한 식을 통하여 얻은 회귀분석 값과도 비교·검토 하였다. 본 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 예측한 것과 같이 더블앵글 접합부에 사용된 볼트의 수가 증가함에 따라서 표 4와 그림 8에 정리된 것과 같이 초기강성, 소성강성, 참조모멘트 등도 선형적으로 증가하였다.
2. 모든 실험체가 하중이 증가함에 따라서 앵글의 필렛 부분에 응력집중 현상이 발생하고, 최종적으로 앵글 상부 필렛 부분에 파단이 발생하는 파괴양상을 나타내었다.
3. 더블앵글 접합부의 회전강성 향상을 위하여 볼트 수를 증가시키는 것보다는 볼트 게이지 거리를 감소시키는 것이 더 효율적인 것으로 나타났다.
4. Ang-Morris가 제안한 식을 통하여 얻은 회전강성 값들이 본 실험을 통하여 얻은 회전강성 값들보다 큰 값을 제공한다. 하지만 실험을 통하여 얻은 모멘트-회전각 관계 곡선들과 비교하면 매우 흡사한 거동양상을 나타낸다.

참고 문헌

1. De Stefano, M., Astaneh, A., Axial force-displacement behavior of steel double angles. J Construct Steel Res 1991; 20: 161-81.
2. Hong, K., Yang, J. G., Lee, S.K., Moment-rotation behavior of double angle connections subjected to shear load. Struct Eng 2002; 24: 125-32.
3. Hong, K., Yang, J. G., Lee, S. K., Parametric study of double angle framing connections subjected to shear and tension. J Construct

- Steel Res 2001; 57: 997-1013.
4. Kishi, N., Chen, W. F., Moment-rotation relationship of semirigid connections with angles. J Struct Engng 1990; 116: 1813-34.
 5. Owens, G. W., Moore, D. B., The robustness of simple connections. Struct Eng 1992; 70: 37-46.
 6. Thornton, W. A., Strength and ductility requirements for simple shear connections with shear and axial load. In: Proc of the AISC National Steel Construction Conference, AISC, Chicago, 1997: 38/1-38/17.
 7. Yang, J. G., Murray, T. M., Plaut, R. H., Three-dimensional finite element analysis of double angle connections under tension and shear. J Construct Steel Res 2000; 54: 227-44.
 8. Richard, R. M., Abbott, B. J., Versatile elastic-plastic stress-strain formula. J Eng Mech Div, ASCE 1975; 101(EM4): 511-5.
 9. Richard, R. M., Hsia, W. K., Chmielewicz, M., Derived moment rotation curves for double framing angles. Comput & Struct 1988; 30: 485-94.
 10. Chen, W. F., Joint flexibility in steel frames. Elsevier Applied Science, 1987.
 11. Chen, W. F., Kim, S. E., LRFD steel design using advanced analysis. CRC Press, 1997.
 12. Chen, W. F., Lui, E. M., Stability design of steel frames. CRC Press, 1991.
 13. Englekirk, R., Steel structures: controlling behavior through design. John Wiley & Sons, 1994.
 14. Galambos, T. V., editor. Guide to stability design criteria for metal structures, 5th ed. John Wiley & Sons, 1998.
 15. Lorenz, R. F., Kato, B., Chen, W. F., editors. Semi-rigid connections in steel frames. CTBUH. McGraw-Hill, 1992.
 16. Salmon, C. G., Johnston, J. E., Steel structures: design and behavior, 4th ed. Harper Collins, 1996.
 17. Smith, B. S., Coull, A., Tall building structures: analysis and design. John Wiley & Sons, 1991.