

## 강구조 복앵글 전단 접합부의 구조적 거동에 관한 실험적 연구

이 도 형\* · 김 석 중\*\*

### An Experimental Study on the Structural Behavior of Double-Angle Shear Connections in Steel Structures

Lee, Do-Hyung\* · Kim, Seok-Jung\*\*

#### ABSTRACT

Shear connections in steel structures should satisfy dual criteria of shear strength and rotational flexibility and ductility. The connection should be strong enough to transfer the shear reaction of the beam, and should have sufficient rotational flexibility and ductility to rotate easily and supply the end rotation demand of the beam.

This paper is concerned with the behavior of double-angle shear connections where the parameters are numbers of high strength bolts, bolt pitch, the length of angle leg, and connection method.

An experimental investigation of shear connection was conducted by testing 12 beam-to-column joint specimens. Based on experimental and analytical study, the failure modes are developed and proposed design formulas.

#### 1. 서 론

철골구조물의 접합부 형식은 하중에 의해 발생되는 접합부의 회전특성에 따라 단순접합(simple connection), 반강접합(semirigid connection), 강접합(rigid connection)으로 분류되며, 실제 구조물에서는 완전 강접합이나 완전 단순접합은 실현되기 어렵기 때문에 모멘트와 회전각의 관계를 고려하여 완전 모멘트저항이 발휘할 수 있는 모멘트 비율에 따라서 단순접합은 0~20%, 반강접합은 20~90%, 강접합은 90% 이상으로 분류한다.

단순접합은 보단부 회전에 대하여 구속이 없는 자유단으로 쉽게 회전할 수 있는 충분한 회전적인

휨강성(flexibility)과 연성(ductility)의 확보와 기둥과 같은 지지부재에 보의 전단반력을 충분히 전달되도록 요구되기 때문에 전단접합(shear connection)이라고도 한다.

복앵글 전단접합(double-angle shear connection)은 다른 전단접합부와 비교할 때 편심하중이 작용되지 않고 볼트의 2면 마찰로 접합부 지지능력이 크며 앵글다리의 들림현상(separation of the top of angle)으로 회전능력이 우수하며, 시공시 접합방법을 다양하게 선택할 수 있는 장점들이 있다. 그러나 복앵글 전단접합부의 응력패턴은 접합방법과 앵글의 크기에 따라 전단과 모멘트의 커플링작용과 접합부의 비탄성으로 매우 복잡하다.

전단접합부의 구조설계는 접합부를 단순지지의 상태로 가정하여 보의 단부에 전달되는 전단력을 각각의 고력볼트가 균등히 부담하는 것으로 설계

\* 나라구조 소장

\*\* 강원대학교 건축공학과 교수

하고 있다. 그러나 전단접합부의 단순지지 가정은 접합부를 구성하는 전단연결재의 요소 즉, 조임볼트의 수 및 배치방법, 전단연결재의 종류와 형상 및 두께, 접합클리어런스, 접합방법 등에 따라 보의 단부 모멘트에 대한 회전저항능력이 변화되고, 또한 전단접합부의 전단내력도 고력볼트의 마찰 및 전단 저항, 연결재의 전단 및 휨 저항, 용접부 저항 등에 따라 변화된다.

더블앵글 전단접합부에 관한 지금까지의 연구는 주로 단부모멘트 분배, 모멘트와 회전과의 관계, 단부모멘트와 전단력의 관계 등에 관한 실험과 이론해가 있으나, 구조설계를 위해서는 접합변수에 따른 실제적인 구조거동에 관한 연구와 구조성능을 향상시키는 접합방법의 개발도 필요하다.

본 연구는 복앵글을 이용한 보-기둥 전단접합부의 휨 및 전단거동에 관하여 볼트수, 볼트피치, 앵글다리의 길이, 복앵글의 접합방법을 실험변수로 휨 및 전단실험을 하였다. 복앵글 전단접합부의 회전성은 휨실험결과를 분석하여 전단접합부로서 요구되는 모멘트와 회전관계를 검토하였고, 전단거동은 실험변수에 따라 전단실험결과를 비교 검토하였으며, 파괴모드를 고려하여 접합부의 전단내력식을 제안하였다.

## 2. 복앵글 전단접합부의 거동

복앵글 전단접합부의 거동은 보에서 전달되는 외력에 의해 기둥쪽 앵글 부분을 세개의 영역으로 구분할 수 있다.

앵글 상단부분은 티행거(Tee-Hanger) 영역으로 인장력을 받고, 지지재로부터 앵글이 분리되어 접합부의 회전능력 분담을 하며, 가운데 부분은 전단보(shear beam)의 영역으로 접합부의 대부분을 차지하며 앵글에 전달되는 전단력을 부담한다. 그리고, 앵글의 하단 부분은 압축력을 받는 기둥과 같은 영역으로 접합부 하단의 짧은 길이에 분포하고 있다.

### 2.1 휨거동

복앵글 전단접합부의 모멘트에 대한 회전성은 단순보의 부재항복시 단부에 발생하는 회전각 이상의 회전능력을 쉽게 발휘할 수 있다면 충분한 휨강성과 연성을 갖는 것으로 고려된다.

따라서 복앵글 전단접합부의 회전성은 단순보의 단부회전각을 이용하여 정량화할 수 있는데, 단순보의 춤-스팬의 비를 가정하여 (1)식과 같이 유도하였다.

$$\theta_y = \left( \frac{16 I \sigma_y}{22 h^2} \right) \cdot \left( \frac{20.17 h^2}{EI} \right) = \frac{14.67 \sigma_y}{E} \dots \dots \dots (1)$$

따라서, SS400 강재를 사용한 경우 복앵글 전단접합부의 회전각은 0.017rad. 이 된다.

### 2.2 전단내력

복앵글 전단접합부의 전단내력은 접합부를 구성하는 전단연결재인 앵글형상 및 치수, 고력볼트, 용접 등의 영향과 상호관계에 따라 결정된다.

각 요소들의 전단내력은 실험결과 나타난 파괴모드를 검토하여, 전단연결재인 앵글이 고력볼트 접합선에서 집중하중을 받는 캔틸레버로 가정하여 구하였다. 그리고 전단내력의 제안값은 전단요소들의 상호관계와 구조설계시 안전측을 고려하여 최소값으로 (2)식과 같이 제안하였다.

$$V_e = \min ( V_s , V_{bf} , V_w ) \dots \dots \dots (2)$$

$V_s$  ,  $V_{bf}$  ,  $V_w$  는 다음과 같이 유도된다.

가. 앵글 다리판의 전단 항복( $V_s$ )

앵글다리판의 전단항복시 전단내력은 볼트선상에 작용되는 전단력과 전단연결재의 단면에 의해 (3)식과 같다.

$$V_s \leq \frac{A_g \cdot \sigma_y}{1.5\sqrt{3}} \dots \dots \dots (3)$$

$A_g$ : 앵글 총 단면적  $d$ : 앵글의 길이  $t_w$ : 앵글 두께

나. 고력볼트의 마찰항복( $V_{bf}$ )

보의 웨브와 전단연결재를 긴결하는 고력볼트는 마찰항복시 접합부의 전단내력이 조임볼트수, 마찰계수, 볼트장력에 의해 (4)식과 같다.

$$V_{bf} \leq \frac{n \cdot n_b \cdot u \cdot T}{k \cdot d_b} \dots \dots \dots (4)$$

$n$ : 마찰면수  $u$ : 마찰계수  $T$ : 토크  
 $n_b$ : 긴결 볼트수  $k$ : 토크계수  $d_b$ : 볼트의나사 바깥지름

다. 용접부 항복 ( $V_w$ )

기둥 플랜지에 전단연결재가 용접접합된 경우 용접부는 전단력과 휨모멘트를 받게 된다. 용접부

의 전단내력은 조합응력을 받는 모살용접 이음매 설계법을 이용하면 (5)식과 같다.

$$V_w = \frac{2.857 \cdot s \cdot \sigma_y \cdot l_p^2}{\sqrt{(21.21e)^2 + (3.5l_p)^2}} \dots\dots\dots (5)$$

s : 모살사이즈     $\sigma_y$  : 항복응력  
 $l_p$  : 용접길이    e : 용접선에서 볼트선까지의 거리

### 3. 실험

#### 3.1 실험 계획 및 시험체

시험체는 복앵글에 의해 전단접합되는 실대형 보-기둥 접합부를 계획하였다. 시험체의 시험변수는 볼트수, 볼트 피치, 앵글다리길이, 접합방법으로 하였으며, 총 12개의 시험체를 제작하였다.

시험체의 치수 및 형상은 표1.과 같다.

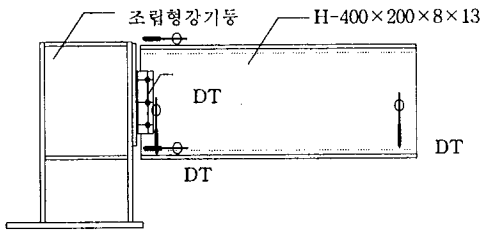


그림 1. 시험체 형상

표 1. 시험체 명칭 및 치수

시험변수	시험체명	볼트수	앵글치수 (mm)	앵글길이 (mm)	피치 (mm)
볼트수	DB-2-A	2	75x75x6	140	80
	DB-3-A	3		220	
	DB-4-A	4		300	
볼트간격	DP-3-A6	3	75x75x6	180	60
	DP-3-A10			260	100
앵글다리길이	DS1-3-A	3	100x100x7	220	80
	DS2-3-A		75x100x7		
	DS3-3-A		50x100x7		
접합방법	DC-3-A(1)	3	75x75x6	220	80
	DC-3-A(2)	3			
	DC-3-B	3			
	DC-0-C	0			

주) 시험체명 : □□ - □ - □  
 □□ - □ - □ : 접합방법  
 □ : 볼트수(개)  
 □ : 시험변수 B : 볼트수변수,  
 P : 피치변수  
 S : 앵글다리길이,  
 C : 접합방법변수  
 복앵글 접합

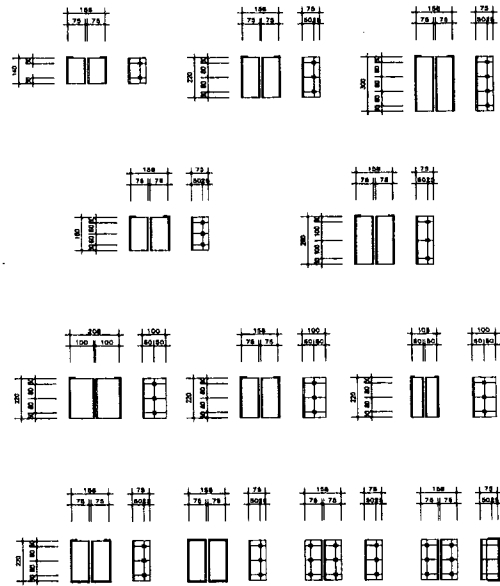


그림 2. 앵글다리 형상 및 치수

#### 3.2 실험방법

휨실험은 켈테레버형 시험방법을 사용하여 기둥 면에서 1100mm 떨어진 곳에서 회전각이 0.017rad. 이상이 될 때까지 변위제어로 가력하였다.

전단실험은 접합부 볼트선 상단 보 플랜지에서 집중하중을 파괴시까지 가력하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 휨실험

휨 실험결과 각각의 시험체변수에 따른 모멘트 (M)-회전각(θ) 관계는 그림 3~6과 같다.

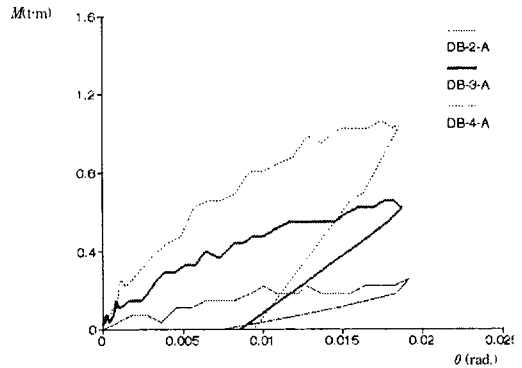


그림 3. 볼트수 시험체 M-θ 관계

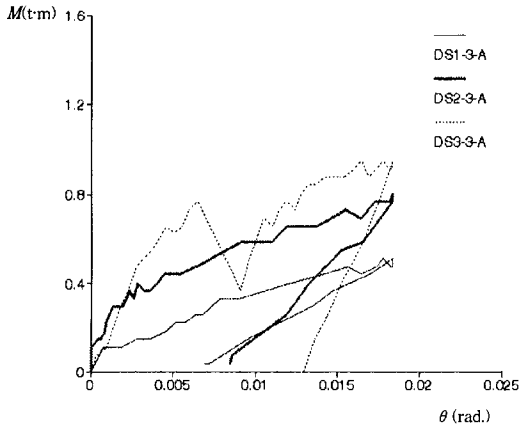


그림 4. 볼트피치 시험체 M-θ 관계

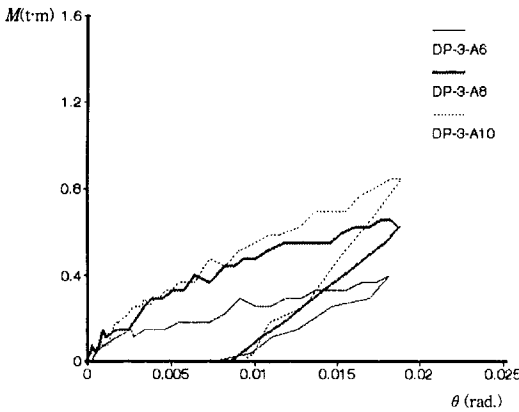


그림 5. 앵글다리길이 시험체 M-θ 관계

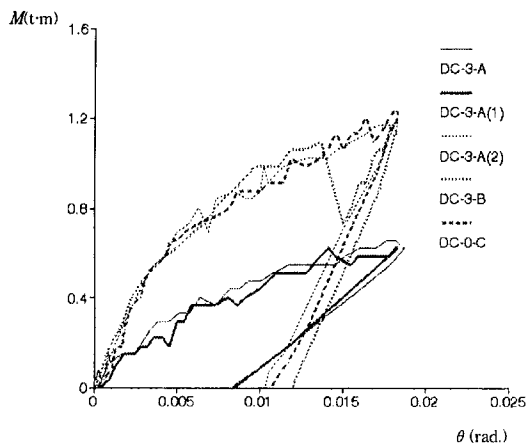


그림 6. 접합방법 시험체 M-θ 관계

#### 4.2 복앵글 전단 접합부 휨성능 결과

그림 7은 전단접합부의 휨실험 결과와 AISC 규준의 모멘트-회전 관계를 비교한 것이다.

AISC 규준에서 단순접합은 완전강접 접합일 경우에 접합부에서 저항할 수 있는 모멘트 저항값에 대하여 약 20% 이하의 저항모멘트를 갖는 접합 형식이다.

그림에서와 같이 복앵글 전단접합부의 실험결과 실험값은 실험변수에 관계하지 않고 휨모멘트 저항값이 단부회전값 0.017 rad. 일 때 약 3.7%의 저항모멘트를 갖는 정도로 AISC 규준과 이론값의 단순접합 조건을 만족하는 회전 특성을 갖는 것으로 나타났다. 복앵글 전단접합부의 우수한 회전성과 연성은 기둥쪽 앵글다리의 들림현상 때문으로 고려된다.

볼트수 시험체의 실험결과 회전중심이 전단연결재의 5/6되는 아래의 위치에서 나타났고, 뚜렷한 항복점을 보이지 않았다. 그리고 볼트수의 증가는 접합부의 휨강성을 증가시켜 보의 회전성을 떨어지게 하였다.

볼트피치 시험체에서 피치의 증가는 앵글 사이즈를 증가시켜 접합부 회전강성을 크게 하였다. 따라서 피치는 요구되는 전단력에 충분히 저항할 수 있다면 작게 하는 것이 유리하다고 판단된다.

앵글다리길이 시험체에서 맞댐앵글의 응력부담은 앵글다리의 길이가 감소함에 따라 커지는 것으로, 접합부의 휨강성이 기둥쪽 앵글다리길이의 증가와 반비례하였다.

접합방법 시험체에서 앵글의 하부면을 용접하는 것은 휨성능면에서 양 모서리면만을 용접하는 경우와 큰 차이가 없었다. 또한, 기둥쪽에 용접접합된 시험체가 볼트체결된 시험체보다 보다 높은 휨강성을 갖는 것으로 조사되었다.

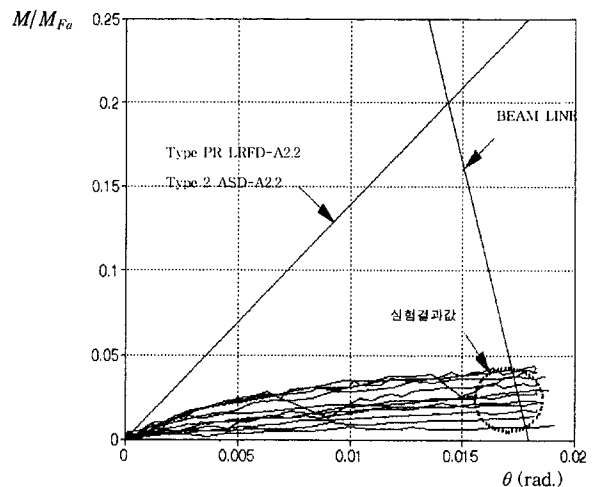


그림 7. 실험결과와 AISC 규준과의 비교

### 4.3 전단실험

전단실험결과 전단력과 보의 단부 처짐과의 관계는 그림 8~11와 같고 주요 결과값은 표 2와 같다.

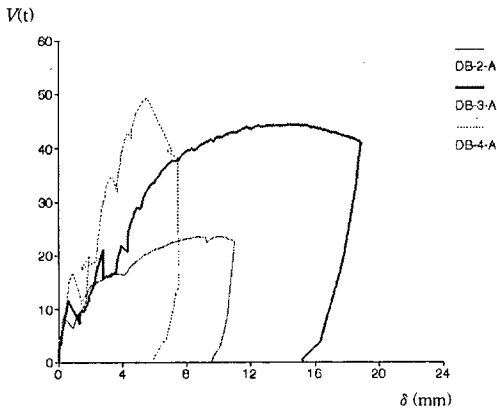


그림8. 볼트수 시험체의  $v-\delta$ 관계

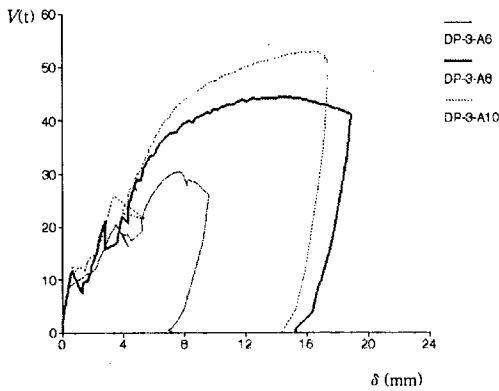


그림9. 볼트피치 시험체의  $v-\delta$  관계

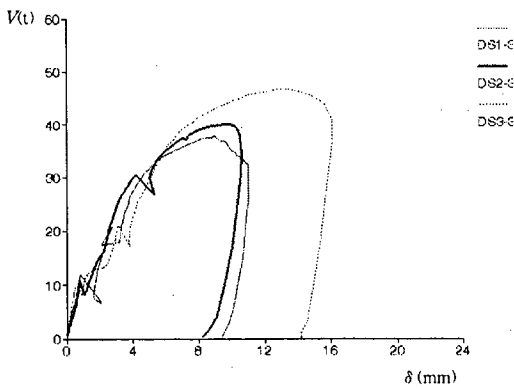


그림10. 앵글다리걸이 시험체의  $v-\delta$  관계

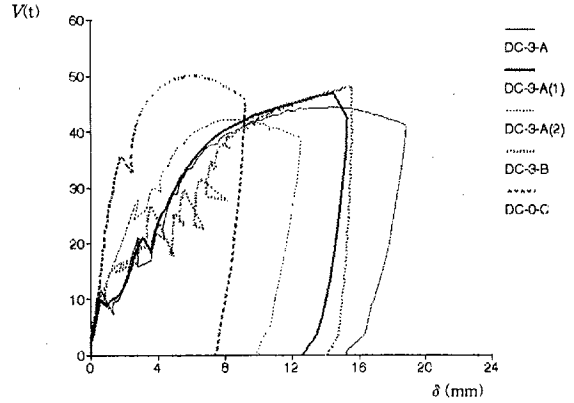


그림11. 접합방법 시험체의  $v-\delta$  관계

표 2. 전단실험 결과

실험체명	$P_m$	$V_j$	$\delta_j$	$V_{max}$	$\delta_{max}$	$V_{TH}$	파괴형태
DB-2-A	24.73	8.04	0.44	23.51	10.26	6.9	지압, 용접부 파괴
DB-3-A	49.70	11.66	0.62	44.33	14.52	12.72	지압, 용접부 파괴
DB-4-A	55.03	16.89	0.84	49.18	5.60	16.96	용접부 파괴
DP-3-A6	31.60	8.82	0.52	30.35	7.64	10.80	지압, 용접부 파괴
DP-3-A10	59.20	12.68	0.68	52.86	16.38	12.72	보웨브 국부 좌굴
DS1-3-A	42.77	11.92	0.84	37.75	8.98	12.72	지압, 용접부 파괴
DS2-3-A	44.90	10.82	0.78	40.08	9.50	12.72	지압, 용접부 파괴
DS3-3-A	51.97	9.93	0.54	46.69	13.18	12.72	지압, 용접부 파괴
DC-3-A(1)	52.67	9.92	0.60	47.08	14.52	12.72	지압, 용접부 파괴
DC-3-A(2)	47.10	11.82	0.64	42.32	8.72	12.72	지압, 용접부 파괴
DC-3-B	54.13	10.58	0.40	48.43	15.60	12.72	지압
DC-0-C	57.37	36.04	1.80	50.20	6.04	12.72	보웨브 국부 좌굴

여기서  $P_m$ : 최대하중(t)  $V_j$ : 전단항복시 하중(t)

$\delta_j$ : 전단항복시 변위(mm)  $V_{max}$ : 전단최대 하중(t)

$\delta_{max}$ : 최대내력시 변위(mm)  $V_{TH}$ : 항복 이온값(t)

#### 가. 볼트수 시험체

그림 12는 볼트수변화에 따른 실험값과 이론값 관계를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 초기항복( $V_j$ )은 볼트수에 따라 직선비례 하였고, 볼트의 마찰항복내력값( $V_f$ )과 일치하였다. 그러나 최대내력은 볼트수 증가에 따라 비례증가하지 않고 용접부의 파괴로 인하여 떨어졌으며 연성률도 적었다.

복앵글 전단접합부에서 용접부의 파괴는 가장 일반적인 파괴모드이고 접합부의 최대내력을 결정하는 주요한 요소로 정확한 평가가 요구되었다.

그림 13.은 실험결과 용접부의 모멘트와 전단력의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험값은 탄성해석에 의한 용접강도곡선(C\_d) 및 소성해석에 의한 상관곡선(C\_u)을 상회하는 것으로 나타났다.

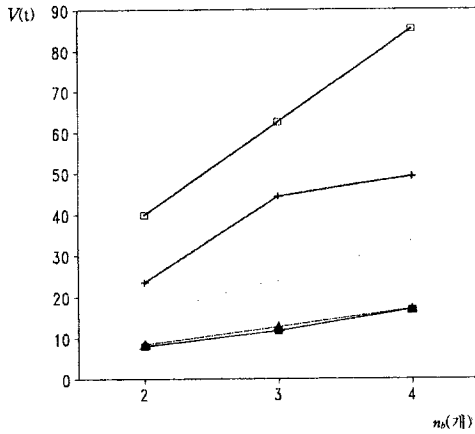


그림 12. 볼트수 시험체  $V-n_b$  관계

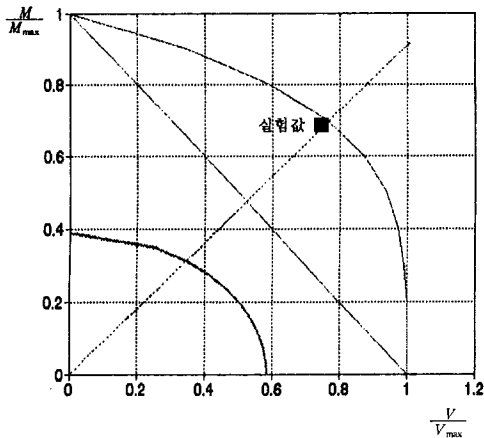


그림 13. DB-3-A의  $M/M_{max}-V/V_{max}$  관계

#### 나. 볼트피치 시험체

볼트피치 변수에 따른 전단거동은 볼트피치( $\rho_b$ )의 증가에 따라 초기강성과 항복후의 강성이 증가하였고, 앵글의 들림은 최대하중의 60~70% 부근에서 현저히 증가했으며, 특히 접합부 길이가 짧은 시험체에서 더 큰 양이 조사되었다.

그림 14, 15는 볼트피치 시험체의 실험값과 이론값 및 연성률의 관계를 나타낸다. 항복값( $V_y$ )은 피치의 변화에 큰 영향을 받지 않고 최대내력값( $V_{max}$ )은 피치가 증가함에 따라 높은 값이었다.

이는 볼트 피치가 볼트의 마찰내력 및 용접저항에 영향을 주지않고 앵글의 전단저항에 영향을 주어 접합부의 최대내력을 결정하였다.

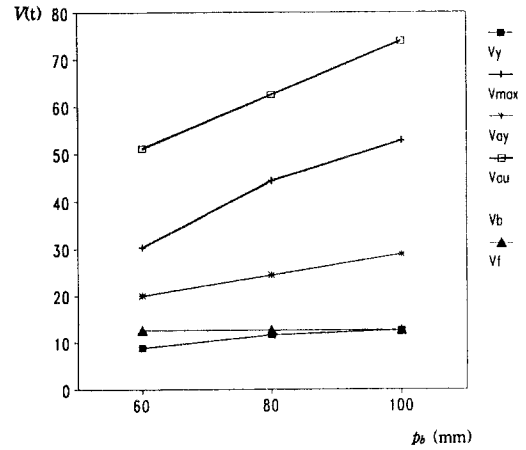


그림 14. 볼트피치 시험체  $V-\rho_b$  관계

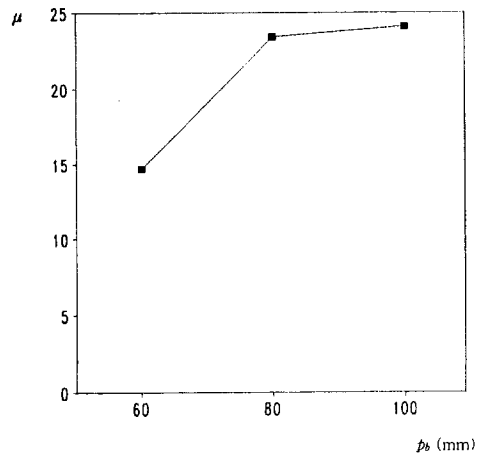


그림 15. 볼트피치 시험체  $\mu-\rho_b$  관계

#### 다. 앵글다리길이 시험체

실험결과 그림 16, 17과 같이 전단항복값은 앵글의 다리길이에 관계없이 거의 일정하게 나타났고, 최대내력값과 연성률은 앵글의 다리길이가 감소함에 따라 증가하였다.

이는 접합부의 초기항복이 볼트의 마찰항복으로 결정되었기 때문에 항복값이 일정하게 되고, 최대값과 연성률은 앵글의 다리길이가 짧아짐에 따라 용접부의 면외편심이 감소하기 때문으로 고려된다.

그러므로 복앵글 전단접합부에 있어서 앵글의 다리길이는 접합부의 회전에 대한 연성을 좌우하고, 전단내력에 대해서는 큰 변화가 없다는 것을 알 수 있다.

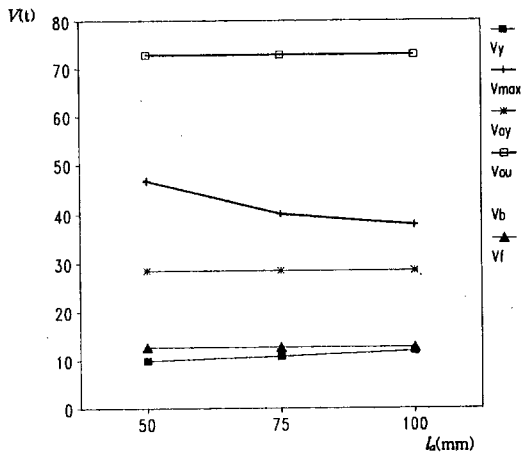


그림 16. 앵글다리길이 시험체  $V-l_a$

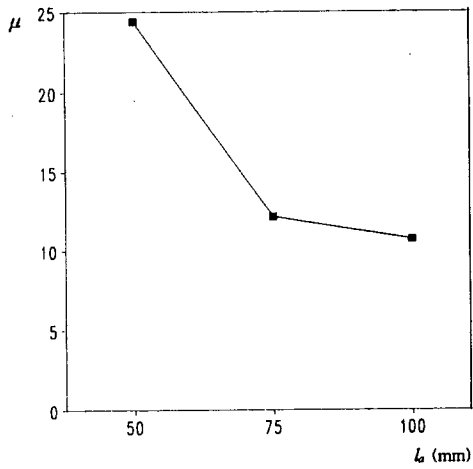


그림 17. 앵글다리길이 시험체  $\mu-l_a$

변형능력을 나타냈다. 특히 볼트-볼트 집합의 경우는 양쪽 볼트의 슬립으로 비교적 높은 연성률을 나타냈다.

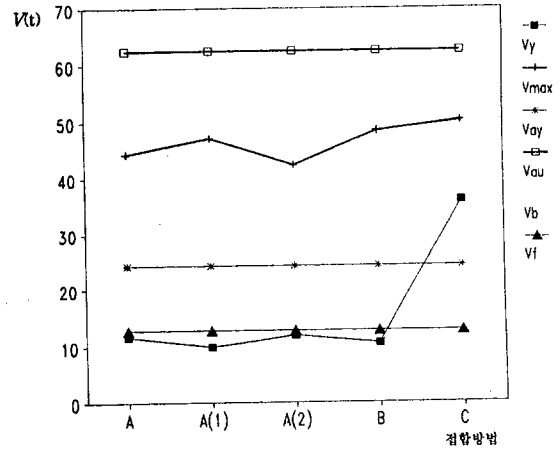


그림 18. 접합방법 시험체 실험값과 이론값

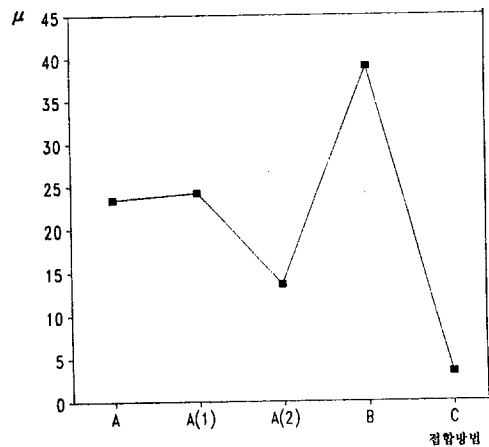


그림 19. 접합방법 시험체 연성률

라. 접합방법 시험체

그림 18, 19는 접합방법 시험체의 실험값과 이론값 및 연성률의 관계를 나타낸 것이다.

용접형태를 변수로 하는 시험체에서 전단항복값과 최대전단내력값은 동일한 결과값을 나타냈는데, 이는 용접부 상단의 파괴가 주된 파괴였기 때문으로 앵글의 하단용접과 온둘레 용접은 접합부의 전단내력에 큰 영향을 미치지 않았다.

볼트-용접 시험체의 항복값은 다른 시험체와 비교해서 약 3배 이상으로 증가 하였는데, 이는 기둥 쪽의 볼트마찰이 항복값으로 결정되었기 때문으로 기둥의 볼트접합은 용접접합보다 높은 강도를 나타냈다.

보의 볼트접합은 용접접합과 비교해서 우수한

## 5. 결 론

복앵글 전단접합부의 거동에 관하여 휨실험과 전단실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 복앵글 전단접합부는 접합부의 회전각이 0.017rad.일 때 휨모멘트의 저항값이 약 3.7% 정도로 이론값과 AISC 규준의 단순접합 조건을 만족하는 모멘트 저항과 회전특성을 갖는 것으로 고려된다.
2. 복앵글 전단접합부의 휨성능은 전단연결재 요

소의 변화에 따른 요인보다 기둥쪽 앵글다리의 들림현상으로 접합부의 회전특성이 결정되었다.

3. 복앵글 전단접합부의 전단내력은 볼트수와 볼트 피치의 변화에 대해서 직선비례 관계를 보였으나, 기둥쪽 앵글다리길이의 변화에 따라서는 영향이 적었다.

4. 복앵글 전단접합부의 일반적인 파괴모드는 용접부 상단의 파괴였고, 실험결과와 용접부 강도는 탄성해석 및 소성해석에 의한  $M-V$  상관 관계식을 상회하는 값으로 나타나 안전축임을 알 수 있었다.

5. 용접접합 방법에서 앵글의 측면과 하부면을 모두 용접한 복앵글 전단접합부는 앵글의 측면만을 용접한 경우와 비교하여 휨성능이나 전단내력 면에서 거의 동일하였다.

6. 복앵글 전단접합부의 접합방법에서 보의 볼트접합은 용접접합과 비교하여 접합부의 휨성능 및 연성을 크게 하였고, 기둥의 볼트접합은 용접보다 구속력이 우수하여 접합부의 전단항복내력 및 전단 최대내력을 높게 하였다.

7. 실험값과 제안값을 비교할때 실험값은 항복하중에서 약 5%, 최대하중에서는 약 45%의 높은 값으로 나타났다.

9. Reidar Bjorhovde, Jacques Brozzetti, Andre Olson, "Connection in Steel Structures", Elsevier Applied Science, 1988.

10. K.M.McMullin, Abolhassan Astaneh, "Analytical and Experimental Studies of Double-Angle Framing Connections", U. of California at Berkeley, 1988.

## 참 고 문 헌

1. 강구조 설계규준 및 해설, 대한 건축학회, 1983
2. 김규석, 김석중, 심종석, 이춘호, "강구조 Tee 전단 접합부의 실험적 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 제12권, 제12호, 1992.10
3. 이춘호, "강구조 전단 접합부의 역학적 거동에 관한 실험적 연구", 강원대학교 대학원, 1993.2
4. 권호상, "강구조 플레이트 전단 접합부의 역학적 거동에 관한 실험적 연구", 강원대학교 대학원, 1994.2
5. 박수진, "강구조 단일앵글 전단 접합부의 역학적 거동에 관한 실험적 연구", 강원대학교 대학원, 1995.2
6. 김석중, "강구조 보-기둥 전단 접합부의 거동과 설계", 대한건축학회 논문집, 제13권, 제6호, 1997년 6월
7. AISC, Manual of Steel Construction LRFD, Second edition, Chicago, Illinois, 1994.
8. W. F. Chen, D. J. Han, "Plasticity for Structural Engineers", Springer-Verlag New York Inc., 1988.