

원형강관 플랜지 이음에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Circular Flange Joints in Tubular Structures

신 창 훈*

한 덕 전**

Shin, Chang-Hoon

Han, Duck-Jen

Abstract

This paper presents a study of the behaviour of bolted circular flange joints in tubular structures. In the tests on nine circular flange joints, different tension forces was applied to the joints and bolt strains, displacements and strains in the joints have been measured. Bolt strain, contact force(prying force) between flanges and stress distribution in a joint have been studied. Different methods used for the design of circular flange joints are described.

요 지

본 연구의 목적은 강관구조물에서 고력볼트로 인장접합되는 플랜지 이음의 거동을 연구하는데 목적이 있다. 9개의 플랜지 이음 실험체의 실험을 수행하였으며, 실험시 고력볼트의 변형율과 이음부의 변형율 그리고 변위를 측정하였다. 고력볼트의 변형율, 플랜지 사이에서 발생하는 지레반력 그리고 강관과 플랜지 판의 응력 분포를 연구하였다. 원형강관 플랜지 이음 설계에 사용되는 기준식을 비교 분석하였다.

keywords : Flange Joint, High Strength Bolt, Tension Force, Circular Hollow Section (CHS), Flange Plate

1. 서 론

폐쇄형 단면인 강관은 좌굴과 비틀림에 대한 성능이 개방형단면보다 우수하기 때문에 최근 강구조물에 많이 도입·적용되고 있다.

그러나 장스팬이나 대공간 구조물에 대하여 강관구조는 운송 및 제작상의 문제로 분할기법으로 제작되기 때문에 현장접합이 필연적이다. 현장접합에서 일반적으로 사용되는 방법은 플랜지 판을 고력볼트로 접합하는 플랜지 이음이다.

* 서일대학 건축과 교수

** 서일대학 건축과 교수

본 논문은 2000년도 서일대학 교내연구비에 의하여 연구되었음.

E-mail : chshin28@seoil.ac.kr 02-490-7428

•본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2003년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

플랜지 이음은 일반적으로 축력을 받는 부재로 설계되므로 압축외력이나 인장외력의 작용하에 있다. 이때 압축외력은 접합부의 지압으로 전달된다. 그러나 인장외력은 고력볼트에 의하여 전달되므로, 부재 설계시 인장외력에 대한 플랜지 판 치수 및 고력볼트 개수의 결정이 필요하다. 고력볼트 개수 및 플랜지판의 치수 결정시 강관의 바깥지름(D), 강관 두께(t), 플랜지 판 두께(h), 플랜지 판 지름($2a$), 볼트피치 지름($2e$) 등에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 인장실험을 통하여 플랜지 판 두께(h), 플랜지 판 지름($2a$), 볼트피치 지름($2e$)에 따른 거동 특성을 분석하는데 목적이 있다.

2. 각국의 설계기준 및 고찰

2.1 각국의 설계기준

(1) Stelco Inc.(1981)⁽³⁾ & CIDECT(1984)⁽⁹⁾

$$h_1 \geq \sqrt{k \frac{T}{\sigma_{yt}}} \quad (1)$$

여기서,

h_1 : 플랜지판 두께(mm)

k : 플랜지의 편심 계수비

T : 작용 인장력

σ_{yt} : 플랜지판의 항복강도

(2) 한국⁽¹⁾, AISC⁽⁴⁾, CISA⁽⁵⁾, CIDECT(1992)⁽⁶⁾

$$h_2 \geq \sqrt{\frac{2T}{\pi \sigma_{yt} f_3}} \quad (2)$$

$$n \geq \frac{T}{T_r} \left[1 - \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_3 \ln(a/e)} \right] \quad (3)$$

여기서,

T : 작용 인장력

T_r : 볼트의 계수 인장내력

σ_{yt} : 플랜지판의 항복강도

f_3 : 무차원화한 붕괴하중

이 식에서 치수 a , e 는 Fig. 1에서 나타내었다.

(3) BS8100 Part 3(1999)⁽⁷⁾

Table 1 플랜지, 강관 및 볼트의 관계 (BS 8100-3 :1999)

플랜지판의 형상	플랜지 판과 강관의 두께비(h/t)					
	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5
플랜지 이음	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0
유공 플랜지 이음						
강관의 소요강도와 인장강도의 비	볼트 지레형 계수 (k)					
	1.0	1.2				
0.9	1.1	1.2				
0.8	1.0	1.1	1.2			
0.7	1.0	1.0	1.1	1.2		
0.6	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	
0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2

2.2 고찰

플랜지 이음 설계는 주어진 강관의 크기와 작용 인장력에 대하여 플랜지 판의 두께와 볼트의 직경 및 개수를 결정하게 된다. BS 8100에서 플랜지 판의 두께 및 지레형 계수(prying factor)는 강관의 두께에 의하여 결정하고, 캐나다의 Stelco 매뉴얼과 국내기준에서 제안하고 있는 설계식은 강관에 작용하는 작용 인장력에 의하여 결정한다.

여기서 지레형 계수는 볼트에 작용하는 축력과 강관에 작용하는 작용 인장력의 비를 의미한다. 각국의 기준식을 비교하기 위하여, 강관의 직경 및 두께 그리고 작용인장력에 따라 플랜지 판의 두께 및 지레형 계수를 산정하였다. 그 결과 Stelco 매뉴얼에 의한 플랜지 판 두께는 국내 기준식에 의한 플랜지 판 두께 보다 약 1.5배 크게 나타났다. 또한 BS8100에 의한 플랜지 판 두께보다 약 2배 크게 산정되었다. Stelco 매뉴얼에서는 볼트 설계에 대한 내용이 없으므로 BS8100과 국내기준식을 비교하였다.

BS8100의 볼트 지레형 계수는 1.20인 반면 국내 기준식에 의한 볼트 지레형 계수는 1.52~1.55로 나타났다. 이로 미루어 각각의 설계법은 많은 차이가 있음을 알 수 있었다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 원형강관 플랜지 이음의 실험체 형상 및 기호를 나타낸 것이다. 실험체는 $\phi 165.2 \times 5\text{mm}$ (SPS400)의 강관을 사용하였고, 플랜지 판은 16~22mm(SS400)을 사용하여 제작하였다. 플랜지 판의 접합은 F10T M20(A종) 고력볼트 6개를 사용하여 접합하였다. 실험체는 플랜지 판 두께에 따른 거동을 분석하고자 Table 2와 같이 볼트피치 지름과 플랜지 판 지름을 동일하고, 플랜지 판 두께를 변화시킨 3개의 실험체를 계획하였다. 여기서 B-8 실험체는 강관구조설계기준 제5장 접합부 설계에 제시된 설계식에 따라 제작된 실험체이다.⁽¹⁾ 또한, Table 3과 같이 B-7 실험체를 기준으로 플랜지 판 지름 및 볼트 피치 지름을 각각 30mm씩 변화시킨 6개의 실험체를 계획하였다.

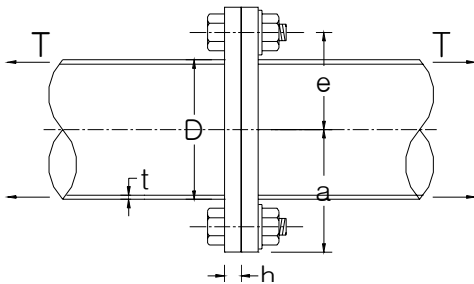


Fig. 1 실험체의 형상 및 기호

Table 2 플랜지 판 두께에 따른 실험계획

실험체명	플랜지 판 (mm)		
	볼트피치지름 ($2e$)	판 지름 ($2a$)	판 두께 (h)
B-7	230	290	20
B-8	230	290	16
B-9	230	290	22

Table 5 볼트피치 지름 및 플랜지 판 지름에 따른 실험계획

$2e$ \ $a-e$	30 (mm)	45 (mm)	60 (mm)
230 (mm)	230-290 (B-7)	230-320 (B-14)	230-350 (B-10)
260 (mm)	260-320 (B-13)	260-350 (B-12)	-
290 (mm)	290-350 (B-11)	-	290-410 (B-15)

주) $2e$: 볼트피치 지름

$a-e$: 고력볼트 중심부터 플랜지 판 외단까지 거리
(Fig. 1 참조)

괄호안은 실험체명

3.2 실험 방법

실험체 가력은 Photo 1과 같이 유압식 만능시험기 (용량 200t U.T.M)을 사용하여 단순 인장가력하였고, 이음부의 축방향변위를 측정하기 위해서 변위계를 설치하였다.

강관과 플랜지 판의 변형률 분포를 측정하기 위해 강관과 플랜지 판에 Fig. 2와 같이 스트레인 게이지를 부착하였다. 또한 고력볼트의 변형율을 측정하기 위해서 Fig. 3과 같이 고력볼트에 2mm 구멍을 드릴로 천공하여 볼트게이지(BTM-6C type)를 부착하였다.



Photo 1 실험체의 설치 전경

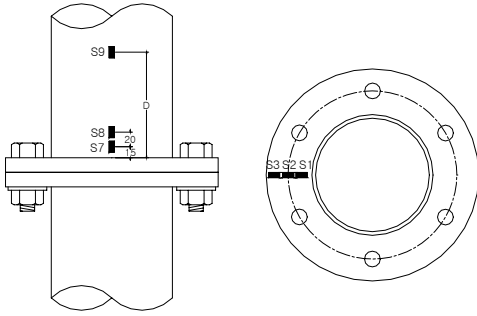


Fig. 2 스트레인 게이지 부착위치

고력볼트 체결은 1차조임 후 고력볼트에 부착된 볼트 게이지의 변형율을 측정하면서, 건축공사 표준시방서(KASS) 제8장 철골공사에 제시된 표준볼트장력(설계볼트장력의 1.1배)까지 토크렌치로 체결하였다.

3.3 소재실험 결과

플랜지 이음 실험체에 사용되는 강재의 기계적 특성을 파악하기 위해 KS B 0801 “금속재료 인장시험편”에 따라 시험편을 채취하여, KS B 0802 “금속재료의 인장시험방법”에 따라 인장시험을 실시하였다. 그러나 고력볼트는 플랜지 이음 실험용 고력볼트와 동일한 로트의 시험성적서에 제시된 값을 사용하였다.

Table 4는 고력볼트의 시험성적서에 제시된 값 및 강재의 인장시험결과를 나타낸 것이다. 토크계수값 시험은 플랜지 이음 실험용 고력볼트와 동일한 로트에서 길이별로 3개씩 시험체를 선정하여 상온에서 실시하였다. 토크계수값 시험결과는 평균치가 0.141, 변동계수(C.O.V)가 0.022로 나타났다. 따라서 토크계수값은 비교적 변동폭이 작고 안정된 것으로 판단된다.

Table 4 고력볼트 및 강재의 기계적성질

종 류	항복강도 (kg/mm ²)	인장강도 (kg/mm ²)	연신율 (%)
강관 (SPS400)	33.1	41.1	33.0
플랜지 판 (SS400)	28.5	41.5	21.7
고력볼트 (F10T)	104.0	113.0	19.0

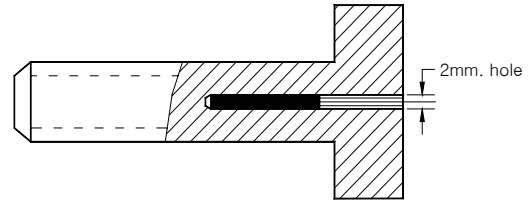


Fig. 3 볼트 게이지 부착위치

4. 실험 결과

4.1 인장하중과 고력볼트 변형율

플랜지 이음에 있어 지레작용(prying action)의 연구는 플랜지 이음의 거동 분석에 있어서 매우 중요하다. 플랜지 이음에서 지레반력($P-B-T$)은 고력볼트 축력(B)과 작용인장력(T)을 측정하여 구할 수 있다. 본 실험에서는 고력볼트 축력을 측정하기 위해 각 실험체별로 6개의 고력볼트중 2개씩 선정하여 Fig. 3과 같이 볼트 게이지를 부착하여 고력볼트의 변형율을 측정하였다. Fig. 4, 5, 6은 볼트 게이지로부터 측정된 변형율의 평균값으로 나타난 것이다.

4.1.1 플랜지 판 두께

Fig. 4는 플랜지 판 지름과 볼트피치 지름은 동일하고 플랜지 판 두께 변화에 따른 고력볼트 변형율을 나타낸 것이다. Table 5에서 접선기울기는 이간 후에 선형적으로 증가하는 고력볼트 변형율의 기울기를 의미한다.

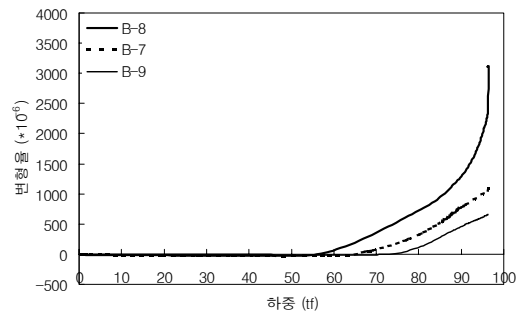
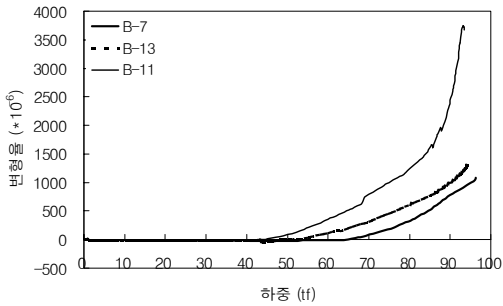


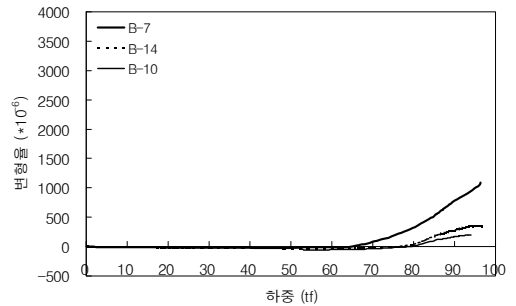
Fig. 4 플랜지 판 두께에 따른 고력볼트 변형율

Table 5 실험체 이간하중 및 경사각

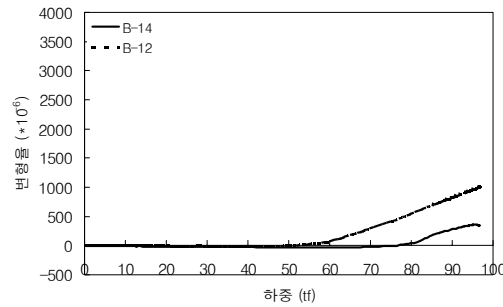
	B-7	B-8	B-9	B-10	B-11	B-12	B-13	B-14	B-15
	(1)	(2)							
이간하중 (tf)	64.86	57.07	72.96	78.73	43.20	50.02	48.50	76.90	46.11
(2)/(1)	1.00	0.88	1.12	1.21	0.67	0.77	0.75	1.19	0.71
접선기울기	31.49	33.33	27.30	17.03	34.92	19.54	23.59	22.09	18.74
(2)/(1)	1.00	1.06	0.87	0.54	1.11	0.62	0.75	0.70	0.60



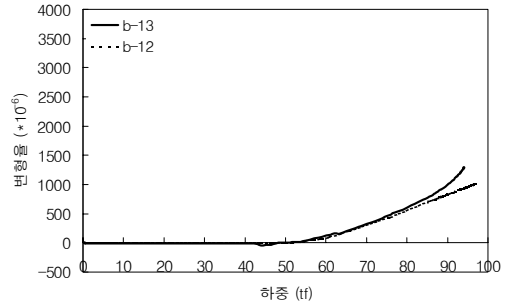
(a) 고력볼트 중심부터 플랜지 판 외단까지 거리 : 30mm



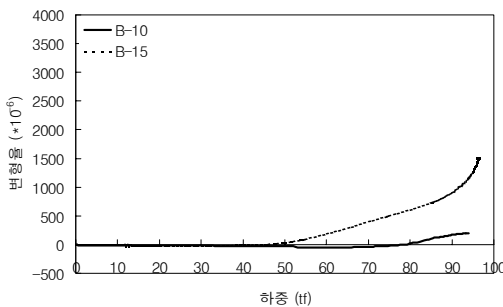
(a) 볼트피치 지름 : 230mm



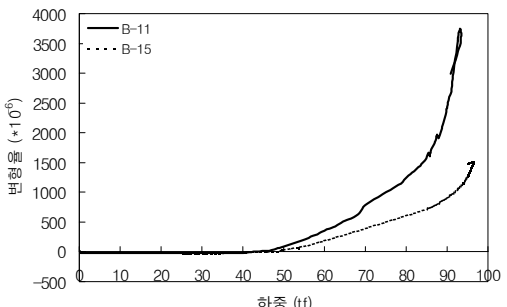
(b) 고력볼트 중심부터 플랜지 판 외단까지 거리 : 45mm



(b) 볼트피치 지름 : 260mm



(c) 고력볼트 중심부터 플랜지 판 외단까지 거리 : 60mm



(c) 볼트피치 지름 : 290mm

Fig. 5 볼트피치 지름에 따른 고력볼트 변형율

Fig. 6 플랜지 판 지름에 따른 고력볼트 변형율

Fig. 4, 5, 6 에서 고력볼트의 변형율은 작용 인장력이 작은 경우, 체결시 도입된 축력과 작용인장력은 평형을 이루기 때문에 변형율의 변화는 매우 작다. 그러나 작용 인장력이 점점 증가함에 따라 이간이 발생하고, 이간 후 고력볼트의 변형율은 거의 선형적으로 증가한다. 이러한 고력볼트의 거동은 고력볼트 인장접합의 사용성 한계상태와 강도 한계상태의 설계에 있어서 중요한 의미를 갖고 있다. 다시 말해, 고력볼트의 사용성 한계상태 설계는 이간하중이 설계 대상이고, 강도 한계상태 설계에서는 지레작용에 의하여 이간 후 발생하는 접선기울기(이간 후에 볼트에 부가되는 축력의 변화율)가 설계 대상이기 때문이다.

Fig. 4와 Table 5에서 B-7과 B-8 실험체를 비교하면, 플랜지 판 두께가 20% 감소함에 따라 이간하중은 12% 감소한 반면 접선기울기는 6% 증가하였다. 그러나 B-7과 B-9 실험체와 같이 플랜지 판 두께가 10% 증가함에 따라 이간하중은 12% 증가하고 접선기울기는 13% 감소하였다. 이와 같이 플랜지 판의 두께 변화는 이간하중과 이간 후에 볼트에 부가되는 축력의 변화율에 영향을 미치는 중요한 인자라고 판단된다.

4.1.2 플랜지 판 지름 및 볼트피치 지름

Fig. 5는 플랜지 판 두께와 고력볼트 중심부터 플랜지 판 외단까지의 거리는 일정하고, 볼트피치 지름의 변화에 따른 고력볼트 변형율을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 6은 플랜지 판 두께와 볼트피치 지름은 일정하고, 고력볼트 중심부터 플랜지 판 외단까지 거리 변화에 따른 고력볼트 변형율을 나타낸 것이다.

Table 5와 Fig. 5에서 B-7, B-13, B-11 실험체의 이간하중을 비교하면, B-7 실험체보다 B-13, B-11 실험체의 이간하중은 각각 25%, 33% 감소하였다. 반면에 접선기울기는 B-13 실험체는 감소하였지만 볼트피치 지름이 60mm가 큰 B-11 실험체는 11%로 증가하였다.

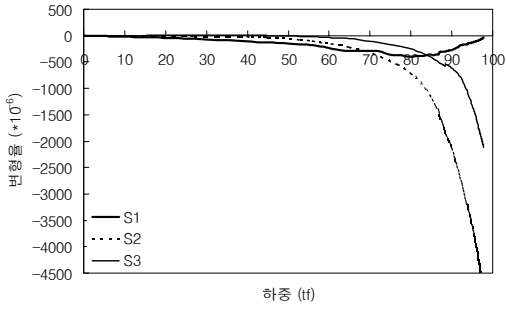
또한 Table 5와 Fig. 5 (b), (c)에서 볼트피치 지름이 30mm 증가된 B-12 실험체의 이간하중은

B-14 실험체보다 35% 감소하였고, 볼트피치 지름이 60mm 증가된 B-15 실험체의 이간 하중은 41% 감소하였다. 반면에 B-15 실험체의 접선기울기는 약 10% 증가하였다. Table 5와 Fig. 6(a)에서 볼트피치 지름은 230mm로 일정하고 고력볼트 중심부터 플랜지 판 외단까지의 거리가 15mm 증가함에 따라, 고력볼트의 이간하중은 B-7 실험체 보다 각각 19% (B-14), 21%(B-10) 증가하였다. 반면 접선기울기는 B-7 실험체보다 30%(B-14), 46%(B-10) 감소하였다. 또한 피치지름이 260mm인 B-13과 B-12 실험체의 경우, 고력볼트 중심부터 플랜지판 외단까지의 거리가 15mm 더 큰 B-12 실험체의 이간하중은 약 3%정도 증가하였고, 기울기는 약 14% 감소하였다.

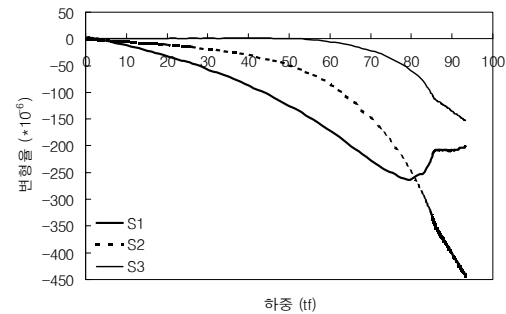
그리고 피치지름이 290mm인 B-11과 B-15 실험체도 같은 경향을 보이고 있다. 따라서 볼트피치 지름과 플랜지 판 지름(고력볼트 중심부터 플랜지 판 외단까지의 거리)은 이간하중과 이간 후 지레반력과 관련 있는 접선기울기에 영향을 미치는 중요한 인자로 판단된다. 그리고 플랜지 판 지름과 볼트피치 지름에 따른 이간하중을 비교하였을 때, 플랜지 판 지름은 상대적으로 볼트피치 지름보다는 효과가 작은 것으로 판단된다.

4.2 플랜지 판 및 강관의 최대 휨응력

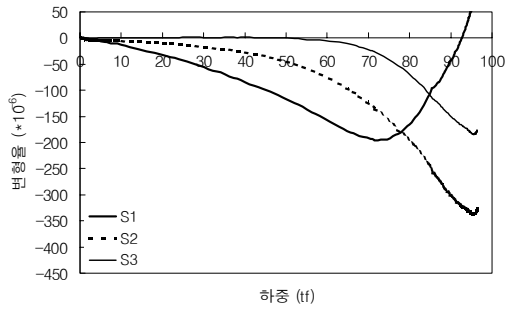
플랜지 판의 설계에서 최대 휨응력은 중요한 의미를 갖고 있다. 그러나 스트레인 게이지를 정확하게 최대 휨응력이 발생하는 영역에 부착하기는 대단히 어렵기 때문에 실험에 의하여 최대 휨응력을 측정할 수는 없다. 그러나 개략적인 강관과 플랜지 판의 응력 분포를 파악하기 위하여, Fig. 2와 같이 플랜지 판의 S1은 강관으로부터 10mm 떨어진 곳에, S2는 볼트피치 라인 그리고 S3은 볼트피치 라인과 플랜지 판 외단의 중심에 스트레인 게이지를 부착하여 플랜지 판의 변형율을 측정하였다. 그리고 강관의 S7, S8 및 S9는 각각 플랜지 판으로부터 각각 15mm, 35mm, 165mm(강관 바깥지름) 떨어진 곳에 부착하였다.



(a) B-8 실험체



(b) B-7 실험체

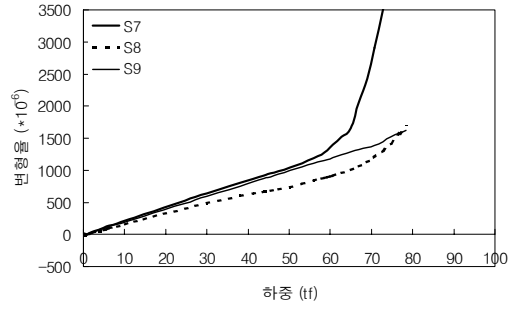


(c) B-9 실험체

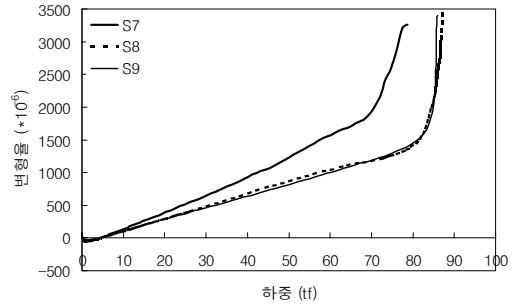
Fig. 7 플랜지 판의 하중-변형률 관계

Fig. 7과 8은 각각 플랜지 판 두께에 따라 강관 및 플랜지 판의 변형율을 측정된 실험 결과이다.

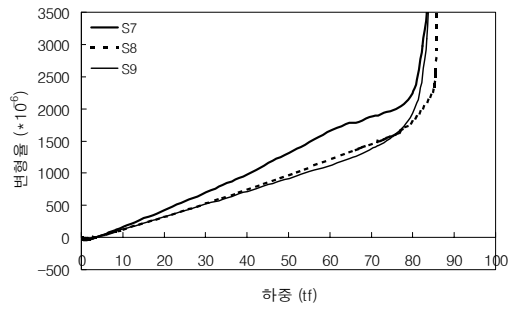
“강관구조 설계기준 및 해설”에서 『플랜지 이음의 봉괴기구는 볼트 연직의 플랜지 판에 소성흔지가 형성되는 기구』로 제시하고 있다.⁽¹⁾ 그러나 Fig. 7의 플랜지 판 변형율을 보면 하중이 70t 이하의 경우, 플랜지 판에서 최대 휨응력은 강관과 플랜지 판의 접합부



(a) B-8 실험체



(b) B-7 실험체



(c) B-9 실험체

Fig. 8 강관의 하중-변형률 관계

에서 발생하고, 70~80t 이상인 경우, 최대 휨 응력은 볼트피치 라인(볼트 연직의 플랜지 판)에서 발생함을 알 수 있다. 따라서 플랜지 판의 최대 휨응력은 강관과 플랜지 판의 접합부 또는 볼트피치 라인 위치에서 일어난다는 것을 알 수 있었다. 국내의 기준식에서 채택하고 있는 Igarashi의 제안식^{(2),(8)}은 해석시 강관과 플랜지판 사이의 휨모멘트가 무시되고 있다.

그러나 실험결과 강관과 플랜지 판의 접합부에 인접한 S7의 변형율이 가장 크게 나타나고 있다. 이는 강관과 플랜지 판 사이의 휨모멘트에 의한 것으로 판단된다. 따라서 설계식에서 강관과 플랜지 판의 휨모멘트를 무시할 수 없음을 의미한다.

대부분 강관의 파괴는 강관 중앙부의 과도한 변형으로 파괴되었다. 그러나 Fig. 8에서 강관의 변형율은 강관과 플랜지 판의 접합부에서 최대임을 알 수 있다. 또한 강관과 플랜지 판의 변형율을 비교하면, 강관의 변형율이 플랜지 판의 변형율보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 이로 미루어 이음부의 실제적인 파괴는 플랜지 판과 강관 접합부의 강관 항복에 의해서 일어난다는 것을 알 수 있다.

4.3 파괴성상

Fig. 9는 실험체의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 실험체의 대부분은 강관 중앙부의 과도한 변형으로 파괴되었다(B-8 실험체). 그러나 B-7 실험체의 경우, 강관과 플랜지 판의 용접부에서 파괴되었다. 그리고 B-11 실험체의 경우, 고력볼트의 파단에 의해서 실험체가 파괴되었다. 이처럼 파괴성상에 따라서 이들 실험체의 항복하중 또는 최대하중에는 큰 차이를 보이지 않으나, 실험체의 전체변위는 큰 차이를 보이고 있다.

이로 미루어 플랜지 판의 변형(강도)은 이음부 강도에 있어서 중요한 영향을 미치지 않는지만, 플랜지 판의 변형은 이음부 전체변위에 있어서는 중요한 의미를 갖고 있다. 따라서 플랜지 판은 플랜지 판의 변형을

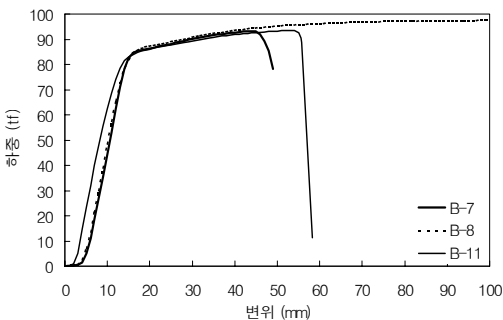


Fig. 9 하중-변위 곡선

감소시킬 수 있을 정도로 충분히 강해야 할 것이다. 이는 플랜지 판이 강하면, 이음부의 지레반력을 감소시킬 수 있기 때문이다.

5. 결론

이상과 같이 원형강관 플랜지 이음에 대한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 플랜지 판의 두께, 볼트피치 지름 그리고 플랜지 판 지름은 이간하중과 이간 후에 볼트에 부가되는 지레반력(접선기울기)에 영향을 미치는 중요한 인자라고 판단된다.
- 2) 플랜지 판 지름과 볼트피치 지름에 따른 이간하중을 비교하였을 때, 플랜지 판 지름은 상대적으로 볼트피치 지름보다는 효과가 작은 것으로 판단된다.
- 3) 플랜지 판의 최대 휨응력은 강관과 플랜지 판의 접합부 또는 볼트피치 라인의 위치에서 일어난다는 것을 알 수 있었다.
- 4) 강관의 최대응력은 강관과 플랜지 판의 접합부에서 일어나고, 이음부의 실제적인 파괴는 플랜지 판과 강관 접합부의 강관 항복에 의해서 일어난다는 것을 알 수 있다.
- 5) 플랜지 판의 변형은 이음부 강도에 있어서 중요한 영향을 미치지 않는지만, 플랜지 판의 변형은 이음부 전체변위에 있어서는 중요한 의미를 갖고 있다. 이는 플랜지 판이 강하면, 이음부의 지레반력을 감소시킬 수 있기 때문이다.
- 6) 본 연구에서는 플랜지 판 사이에서 발생하는 지레반력과 강관 및 플랜지 판의 응력분포를 연구하였으며, 향후에는 기준식에서 무시된 강관과 플랜지 판 사이의 휨모멘트를 고려한 이론적 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 대한건축학회 “강관구조 설계기준 및 해설” 기문당, 1998.
2. 日本建築學會, 鋼管構造設計施工指針 同解説, 1990.

-
3. Stelco, Inc., Hollow Structural Sections Design Manual for Connections, 2nd Ed., Hamilton, Canada, 1981.
 4. AISC, Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, IL, 1993.
 5. Packer, J. A., and Henderson, J. E., Design Guide for Hollow Structural Section Connections, Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, Canada, 1992.
 6. Wardenier, J., Kurobane, Y., Packer, J. A., Dutta, D., and Yeomans, N., Design Guide for Circular Hollow Section (CHS) Joints under Predominantly Static Loading, CIDECT(ed) and Verlag TUV Rheinland GmbH, Koln, Germany, 1991.
 7. British Standards Institution, BS 8100 Lattice Towers and Masts, London, UK, 1999.
 8. Igarashi, S., Wakiyama, K., Matsumoto, T., and Murase, Y., "Limit Design of High Strength Bolted Tube Flange Joints (Part 1)," Trans. of A.I.J., No.354, 1985.
 9. CIDECT, Construction with Hollow Steel Sections, British Steel Corporation, Corby, UK, 1984.
 10. European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, ENV 1993-1-1:1992E, London, UK, 1992.
 11. Rockey, K. C., and Griffiths, D. W., The Behaviour of Bolted Flange Joints in Tension, Conference on Joints in Structures, University of Sheffield, England, 1970.

(접수일자 : 2002년 6월 10일)