



고장력볼트 T-인장이음의 정적내력에 관한 실험적 연구

이승용¹ · 최준혁^{2*} · 김경태³

¹교수, 한국교통대학교, 토목공학과, ²교수, 부천대학교, 토목과, ³박사, 한국교통대학교, 토목공학과

An Experimental Study on the Static Load Capacity of T-Type Tension Joints with High Tension Bolt

Lee, Seung Yong¹, Choi, Jun Hyeok^{2*}, Kim, Kyong Tae³

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Bucheon University, Bucheon, Korea

³Ph.D, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea

Abstract - The tension type joint is a mechanically very efficient connection method, as it directly uses the load capacity of base metal or high tension bolt, the reduction of the number of drilling hole and fastening and the fatigue resistance. It is applied to the joint of girder and cross beam, horizontal joints of towers, beam to column joints, the secondary member joints of deck floor ends, and brackets. In this paper, static load tests for the T-type tension joint were conducted to investigate the structural behavior of the joint. The parameters were bolt diameter, flange thickness, and the reduction of clamping force of the joint. The failure modes and load capacity of joints and the effects of flange thickness, bolt diameter and clamping force were investigated.

Keywords - High tension bolt, Tension type joint, T joint, Static load capacity

1. 서론

강교량에서 부재의 이음은 하중 전달 방향에 따라 고장력 볼트에 의한 마찰이음과 용접이음이 주로 사용된다. 마찰이음은 이음부의 접촉면에 발생하는 마찰력이 하중을 부담하는 것으로 마찰력의 작용 방향과 하중 작용 방향이 다를 경우 적용하기가 어렵다. 이러한 경우 이음은 주로 용접이음을 사용하지만 이음부에는 면외변형이나 피로 등에 의한 손상의 발생 가능성이 높아진다.

강교량 부재 이음부에서 하중의 작용 방향과 부재 접촉면이 직각을 이루는 경우는 Fig. 1과 같은 교량의 거더와 가로

보의 이음부, 주탑의 수평이음, 바닥판 단부의 2차부재 연결부, 브라켓 등이 있다. 이들 이음부에서 하중을 효과적으로 전달하기 위해서는 마찰이음이나 용접이음을 적용하는 것 대신 고장력 볼트를 이용한 인장이음을 적용하는 것이 효과적일 수 있다^[1].

고장력 볼트에 의한 인장이음은 하중의 작용 방향이 고장력 볼트의 축방향과 같으므로 인장하중을 직접적으로 전달할 수 있으며, 각각의 고장력 볼트의 인장내력을 최대한으로 활용할 수 있으므로 마찰이음에 비해 축력의 변동이 적고 효율이 높다고 할 수 있다. 또한, 볼트구멍의 가공수나 체결수의 감소로 경제적으로도 유리하고, 용접이음의 용접부에 내제되어 있는 결함요소도 배제할 수 있으므로 피로 저항성도 높다고 할 수 있다.

인장이음의 이러한 장점을 고려하여 외국에서는 보-기둥 연결부를 중심으로 여러 가지 연구가 진행되었다^{[2],[3]}. 최근에는 이음부의 내력과 강성 예측을 위한 개선된 해석모델이 제시되었으며^{[4],[5],[6],[7],[8]}, 일부 상세에 대해서는 설계 지침도 개발되었다^{[9],[10],[11],[12]}. 그러나 국내에서는 고장력 볼트

Note.-Discussion open until August 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 29, 2014; revised November 12, 2014; approved on November 17, 2014.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-32-610-3311 Fax. +82-32-610-3224

E-mail. cjunh@bc.ac.kr

와 부재와의 강성 차이에 따른 역학적 거동, 지레작용 등에 의한 고장력 볼트와 부재간의 상호작용으로 이음부의 해석 및 설계가 복잡하고 기초적인 연구결과가 부족하다는 이유로 적극적으로 활용되지 못하고 있다.

인장이음에 대한 국내의 연구는 주로 건축구조물의 보-기둥 연결부에 관한 것으로 인장이음 부재의 인장내력과 설계 변수의 영향 등에 대해 연구되었으며^{[13],[14]}, 최근에는 스프링 모델을 이용한 반복하중과 비선형 해석 연구도 제시되었다^{[15],[16],[17]}.

강교량의 부재 이음부에는 보-기둥 연결부의 Split-T 이음, L 이음, 앵글이음 등의 형식이 적용될 수 있으나 부재의 강성이 비교적 크고 주부재의 변형이나 동적하중을 받는 경우가 많기 때문에 기존의 보-기둥 연결부의 역학적 거동과 강교량의 거동 특성을 고려한 인장이음의 적용에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 인장이음의 장점이라 할 수 있는 고장력 볼트 또는 인장재 내력의 효율적 활용, 제작 및 가설단계에서의 가공 및 체결 개소의 감소에 따른 경제성 향상 그리고 이음부의 피로저항성 향상 등을 활용하고 인장이음이 강교량 이음 형식의 하나로 적용될 수 있도록 함을 목적으로 하고 있다.

이를 위한 인장이음의 기초적인 연구데이터의 확보를 위하여 인장이음의 기본 형식인 고장력 볼트 T 인장이음을 대상으로 인장이음의 내력과 거동 분석을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 시험변수는 강교량에서 일반적으로 적용되는 부재의 두께와 고장력 볼트의 직경이며 시험여건을 고려하여 선정하였다. 인장이음의 내력은 기존의 T 인장이음에 대한 연구결과^[6]를 기초로 이론적으로 구하였으며, 실험결과와 비교, 분석하였다.

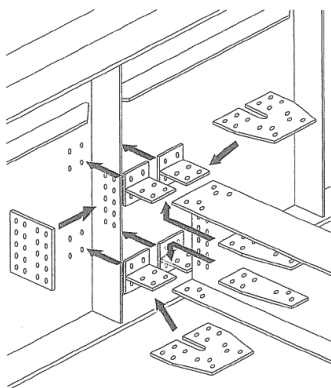


Fig. 1. Example of tensile joints for bridge^[1]

2. 인장이음부의 내력

인장이음은 이음부의 플랜지의 강성과 고장력볼트의 인장강도, 플랜지에 작용하는 지레(prying)작용 효과에 의해 파괴양상이 달라진다. 지레작용에 관한 해석모델 중 가장 많이 사용되는 모델은 Struik and de Back(1969)에 의해 제안된 모델이다.

이 모델에서 지레작용과 하중과 관련된 변수들은 Fig. 2와 같이 정의한다. 고장력 볼트에 작용하는 하중은 볼트 머리에 의한 하중 전달의 영향을 고려하여 볼트 몸통의 중심에서 안쪽에 작용하는 것으로 가정한다.

지레반력 Q 는 플랜지 끝단에서 발생되고 이음부에 작용하는 하중을 $2T$, 고장력 볼트에 작용하는 축력을 B 라고 할 때, 파괴모드에 따른 극한하중은 식 (1)~(3)과 같이 계산될 수 있으며, 파괴모드는 각각 Fig. 3과 같다. 식 (1)은 플랜지의 소성 메카니즘 발생(Fig. 3(a)), 식 (2)는 플랜지와 고장력 볼트의 복합적 파괴(Fig.3(b)), 식 (3)은 고장력 볼트의 인장파괴(Fig.3(c))시 극한하중을 나타낸다. 이들 중 T-인장이음의 내력은 식 (1)~(3)의 인장력 중 가장 작은 값이다.

$$T_1 = \frac{(1+\delta)}{4b'}(p \times F_y \times t_f^2) \tag{1}$$

$$T_2 = \frac{B \times a'}{a' + b'} + \frac{p \times F_y \times t_f^2}{4(a' + b')} \tag{2}$$

$$T_3 = B \tag{3}$$

여기서, F_y 는 플랜지 강재의 항복강도, t_f 는 플랜지의 두께

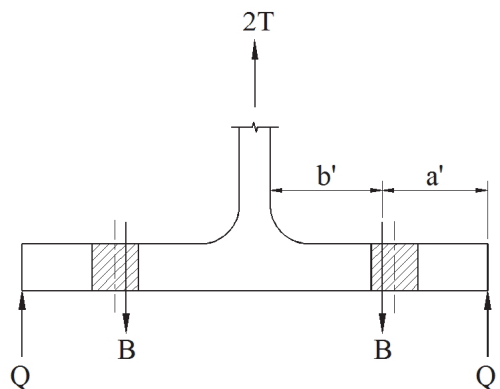


Fig. 2. Prying model of struik and de back^[2]

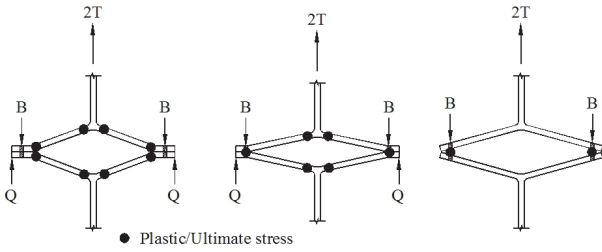


Fig. 3. T-Stub failure modes; (a) Flange plastic mechanism, (b) Combined bolt/flange mechanism, (c) Bolt mechanism

이다. δ 는 플랜지의 총 단면적에 대한 고장력 볼트 중심선에서의 플랜지의 순단면적의 비로서 식 (4)와 같다.

$$\delta = 1 - \frac{d_h}{p} \tag{4}$$

여기서, d_h 는 고장력 볼트 구멍의 지름, p 는 고장력 볼트 열이 부담하는 폭으로서 단면의 길이방향 폭을 나타낸다.

3. 정적실험

정적실험은 부재 두께와 고장력 볼트 직경에 따른 인장이음의 파괴모드와 내력 그리고 내력 예측식의 적용성을 분석하기 위해 수행되었다. 고장력 볼트 인장이음 시험체의 제원을 Table 1에 나타내었다. 시험변수는 고장력 볼트 직경과 T이음의 플랜지 두께로서, 플랜지 두께는 16mm, 23mm, 28mm에 대해 각각 고장력 볼트의 직경을 M16, M22, M27, M30로 달리하여 시험 변수를 설정하였다. 시험체의 플랜지 폭은 300mm, 부재 축방향의 길이는 100mm이다. 시험체는 플랜지 두께 T와 고장력볼트 직경 M을 기호로 구분하여 명명하였다. 시험체 중 LT로 명명된 시험체는 고장력볼트의 도입 축력을 목표값의 60%로 도입한 시험체이다.

고장력볼트의 직경과 플랜지 두께에 따른 인장이음의 내력을 분석하기 위해서 고장력볼트의 축력, 플랜지 변형 및 상하 이음간의 이간변위를 측정하였다. 고장력볼트의 축력은 볼트축의 양면에 변형률게이지를 부착하였으며, 이음판의 플랜지에는 플랜지 상하면 연단에 변형률게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. T이음 사이의 이간변위는 이음

Table 1. Geometry of specimens

Specimens	Bolts	Bolt diameter d_b (mm)	Web thickness t_w (mm)	Flange thickness t_f (mm)	a' (mm)	b' (mm)	p (mm)	δ
T16-M16-1	M16×70	16	10	16	53.0	92.0	100	0.84
T16-M16-2	M16×70	16	10	16	53.0	92.0	100	0.84
T16-M22-1	M22×75	22	10	16	56.0	89.0	100	0.78
T16-M22-2	M22×75	22	10	16	56.0	89.0	100	0.78
T16-M22-LT-1	M22×75	22	10	16	56.0	89.0	100	0.78
T16-M27-1	M27×85	27	10	16	58.5	86.5	100	0.73
T16-M30-1	M30×90	30	10	16	60.0	85.0	100	0.7
T23-M16-1	M16×80	16	14	23	53.0	90.0	100	0.84
T23-M16-2	M16×80	16	14	23	53.0	90.0	100	0.84
T23-M22-1	M22×90	22	14	23	56.0	87.0	100	0.78
T23-M27-1	M27×100	27	14	23	58.5	84.5	100	0.73
T23-M30-1	M30×110	30	14	23	60.0	83.0	100	0.7
T28-M16-1	M16×90	16	16	28	53.0	89.0	100	0.84
T28-M22-1	M22×100	22	16	28	56.0	86.0	100	0.78
T28-M22-LT-1	M22×100	22	16	28	56.0	86.0	100	0.78
T28-M27-1	M27×110	27	16	28	58.5	83.5	100	0.73
T28-M30-1	M30×115	30	16	28	60.0	82.0	100	0.70

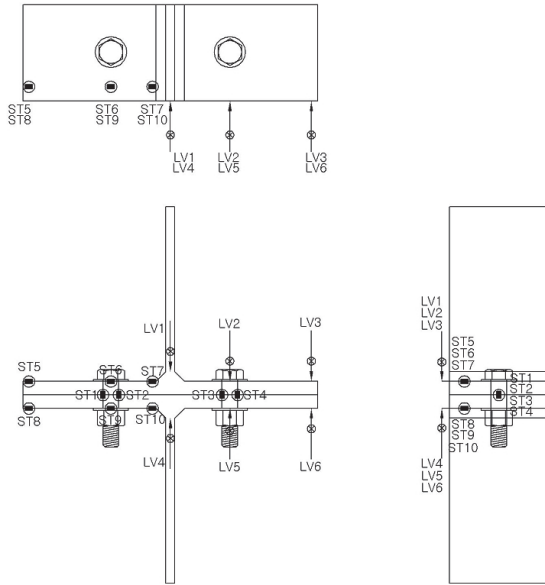


Fig. 4. Gage positions of specimen

판 한쪽 면에 강판을 부착하여 측정지지대를 만들고 여기에 변위계를 부착하여 측정하였다. Fig. 4은 측정위치를 나타낸 것이다.

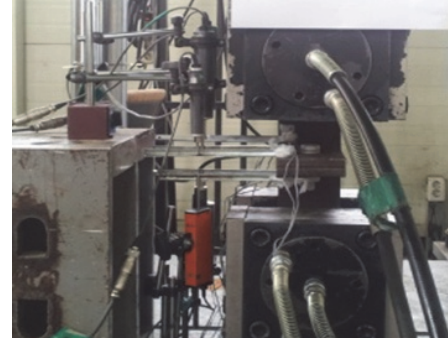


Fig. 5. Installation for the test

고장력볼트의 체결은 토크제어법으로 예비체결과 본체결로 나누어 체결하였으며, 예비체결에서는 표준도입축력의 60%를 체결하고, 본체결에서 표준도입축력까지 체결하였다. 각 고장력 볼트에 대한 기계적 성질은 제조사에서 KS B 1010에 따라 샘플링으로 재료시험을 수행하였다. 고장력볼트 재질은 F10T, 강재는 SM400이다. Table 2는 각 시험체별 체결력, 체결토크, 항복강도 및 인장강도를 나타낸 것이다. 정적 인장시험은 1,000kN 용량의 유압시험기(M&T Korea)를 사용하였다. Fig. 5는 시험체 설치 전경이다.

Table 2. Mechanical properties of bolts and clamping force

Specimens	Diameter of bolt (mm)	Nominal area of bolt (mm ²)	Design Clamping Force (kN)	Object Clamping Force (kN)	Coefficient of Torque	Clamping Torque (N·m)	Yielding Force of bolt (kN)	Tensile Force of bolt (kN)
T16-M16-1	16	201	106	117	0.133	249	211.7	223.5
T16-M16-2	16	201	106	117	0.133	249	211.7	223.5
T16-M22-1	22	380	205	225	0.135	668	392.2	416.5
T16-M22-2	22	380	205	225	0.135	668	392.2	416.5
T16-M22-LT-1	22	380	205	135	0.135	401	392.2	416.5
T16-M27-1	27	572	310	341	0.140	1,289	600.6	646.9
T16-M30-1	30	708	379	417	0.131	1,639	715.8	768.9
T23-M16-1	16	201	106	117	0.166	311	211.7	223.5
T23-M16-2	16	201	106	117	0.166	311	211.7	223.5
T23-M22-1	22	380	205	225	0.134	663	392.2	416.5
T23-M27-1	27	572	310	341	0.140	1,289	600.6	646.5
T23-M30-1	30	708	379	417	0.135	1,689	715.8	768.9
T28-M16-1	16	201	106	117	0.166	311	211.7	223.5
T28-M22-1	22	380	205	225	0.136	673	392.2	416.5
T28-M22-LT-1	22	380	205	135	0.136	404	392.2	416.5
T28-M27-1	27	572	310	341	0.140	1,289	600.6	646.5
T28-M30-1	30	708	379	417	0.134	1,676	715.8	768.9

4. 실험결과

4.1 파괴양상

인장시험편의 파괴형태는 플랜지의 두께와 고장력 볼트의 직경에 따라 달라진다. Fig. 6(a)는 플랜지의 두께가 크고 고장력 볼트 직경이 작은 경우 고장력 볼트가 먼저 파괴되는 경우이다. 즉 플랜지는 충분한 강성을 확보하고 있기 때문에 큰 변형이 발생되지 않지만 고장력 볼트가 항복에 이르러 파괴되는 형태이다. 사진에서 한쪽의 볼트가 없는 것은 파단으로 떨어져 나간 모습이다.

Fig. 6(b)는 고장력 볼트와 플랜지가 같이 변형되면서 파괴되는 경우로서 플랜지 변형과 더불어 고장력 볼트에 휨변형이 발생하는 경우이다. 파괴형태는 플랜지의 변형 및 상하



(a) Type of bolt fracture



(b) Type of bolt and flange fracture



(c) Type of flange fracture

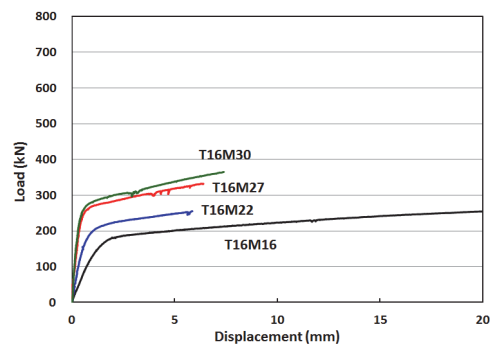
Fig. 6. Fracture types of specimens

이름 사이의 이간이 크게 발생하고 고장력 볼트가 휘어져 있다.

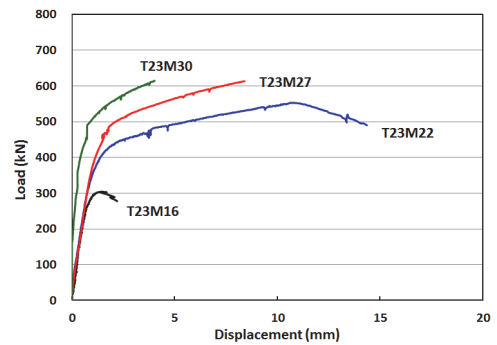
Fig. 6(c)는 플랜지가 파괴되는 경우로서 고장력 볼트의 직경이 크고 플랜지 두께가 작아 플랜지가 먼저 파괴에 도달하는 경우이다. 플랜지 변형에 따라 고장력 볼트에도 변형이 발생하지만 그 크기는 상대적으로 작으며, 고장력 볼트가 항복에 이르기 전에 플랜지에 큰 변형이 발생한다.

4.2 하중-변위 곡선

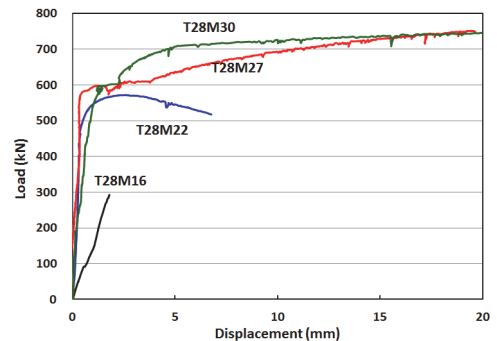
Fig. 7은 하중재하에 따른 시험체 중앙부에서의 이간변위를 나타낸 것이다.



(a) Load-displacement curve for $t_f = 16mm$



(b) Load-displacement curve for $t_f = 23mm$



(c) Load-displacement curve for $t_f = 28mm$

Fig. 7. Load-displacement curve for the specimens

Fig. 7(a)는 플랜지 두께 16mm 시험체의 하중-변위 곡선으로 M16 시험체가 하중초기부터 변위가 크게 발생하였고 최종변위도 크게 발생하였다. 고장력 볼트의 직경이 커질수록 내력도 커지는 것으로 나타났으나, M27 및 M30 시험체에서는 초기변위나 내력의 차이가 크지 않았다. 이는 고장력 볼트의 강성이 플랜지에 비해 상대적으로 커 플랜지에 큰 변형이 발생하였음을 나타낸다.

Fig. 7(b)는 플랜지 두께 23mm 시험체의 하중-변위 곡선이다. M16 시험체는 다른 시험체에 비해 최대내력과 최대변위가 작고 발생 변위도 작아 플랜지의 변형보다는 고장력 볼트의 변형이 크음을 알 수 있다. M22 M27 및 M30 시험체는 이음의 강성이 커짐에 따라 내력이 점차 커지는 양상을 보여 준다.

Fig. 7(c)는 플랜지 두께가 비교적 두꺼운 28mm 시험체의 하중-변위 곡선이다. M16 시험체는 플랜지 강성에 비해 고장력 볼트의 강성이 낮은 시험체로 비교적 낮은 하중에서 고장력 볼트가 파단되었다. M27 및 M30 시험체는 고장력 볼트의 직경의 차이에 따라 파괴양상이 다소 차이는 있지만

최대내력은 큰 차이가 없다. 이는 플랜지와 고장력 볼트가 동시에 하중에 저항하고 있는 것을 나타낸다.

4.3 인장이음의 내력

인장이음 시험체에 대한 정적인장시험 결과 얻어진 시험체의 내력과 변위, 그리고 식 (1)~(3)에 의해 얻어진 이론적 내력을 Table 3에 나타내었다. 여기서 최대내력은 이음부가 받을 수 있는 최대하중이고, 항복내력은 고장력 볼트의 한쪽 면이 고장력 볼트의 항복강도에 도달했을 때의 하중이며, 인장내력은 고장력 볼트의 한쪽 면이 고장력 볼트의 인장강도에 도달했을 때의 하중이다. 또한, 이론식에 의해 예측된 인장이음의 내력은 각 파괴모드에 대한 내력 중 가장 작은 값이다.

Table 3에서 예측된 이음부의 내력은 플랜지의 파괴모드에 해당하는 T_1 의 값이 가장 작아 본 연구의 시험체는 플랜지에 소성메카니즘이 발생하는 것으로 나타났다. 이론적 인장 내력과 실험에 의한 최대 내력의 비(A/B)를 보면 T28-M16-1을 제외하고는 모두 1.0보다 큰 값으로 실험에 의한 내력이 더 크게 나타났다.

Table 3. Results of the test and prediction of load capacity

Specimens	Experiment						Prediction				
	Max. Load (kN) (A)	Max. Displ. (mm)	Yielding Load (kN)	Yielding Displ. (mm)	Tensile Load (kN)	Tensile Displ. (mm)	T_1 Eq.(1) (kN)	T_2 Eq.(2) (kN)	T_3 Eq.(3) (kN)	Capacity (kN) (B)	A/B
T16-M16-1	134.5	27.22	101.45	5.41	102.3	5.67	60.2	184.1	223.5	60.2	2.23
T16-M16-2	109.1	-	97.8	3.06	98.65	3.07	60.2	184.1	223.5	60.2	1.81
T16-M22-1	149.6	14.54	135.1	9.52	140	9.8	60.2	342.4	416.5	60.2	2.49
T16-M22-2	160.0	-	140.6	3.28	141.7	3.29	60.2	342.4	416.5	60.2	2.66
T16-M22-LT-1	146.3	-	135.4	7.78	136.45	8.06	60.2	342.4	416.5	60.2	2.43
T16-M27-1	219.4	3.4	192.7	3.42	193.4	3.4	60.2	542.8	646.9	60.2	3.65
T16-M30-1	222.2	3.51	218.7	3.51	219.8	3.52	60.2	657.1	768.9	60.2	3.69
T23-M16-1	157.5	3.36	156.3	3.82	157.45	3.36	127.1	209.1	223.5	127.1	1.24
T23-M16-2	152.3	5.36	146.7	5.54	148.9	5.5	127.1	209.1	223.5	127.1	1.20
T23-M22-1	276.4	4.46	230.75	1.34	232.6	1.2	127.2	369.7	416.5	127.2	2.17
T23-M27-1	339.0	6.49	272.6	2.21	275.15	2.07	127.3	572.8	646.9	127.3	2.66
T23-M30-1	336.6	3.47	303.7	1.62	306.15	1.81	127.3	688.7	768.9	127.3	2.64
T28-M16-1	146.2	0.29	146.15	0.29	146.15	0.29	190.5	231.7	223.5	190.5	0.77
T28-M22-1	285.9	1.48	284.95	1.64	284.3	1.82	190.7	393.4	416.5	190.7	1.50
T28-M22-LT-1	287.6	3.06	281.6	2.21	281.85	2.33	190.7	393.4	416.5	190.7	1.51
T28-M27-1	375.7	3.51	356	5.12	358.65	5.39	190.9	597.9	646.9	190.9	1.97
T28-M30-1	382.0	5.52	378.45	4.82	381.25	5.13	191.0	714.6	768.9	191.0	2.00

이는 플랜지가 파괴내력에 도달하여 소성 메카니즘이 발생하더라도 플랜지의 경화 현상으로 인해 추가 하중을 부담할 수 있으며 이는 내력의 증가를 가져온다. 그 결과 실험에 의한 최대 내력의 값이 이론값보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

T28-M16-1은 파괴모드가 플랜지의 파괴로 나타났지만 플랜지의 파괴내력(T_1)과 고장력 볼트의 파괴내력(T_3)의 차이가 크지 않아 플랜지 또는 고장력 볼트가 거의 동시에 파괴내력에 도달할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 실제로는 플랜지의 경화현상으로 하중의 증가가 발생하고 고강도강인 고장력 볼트에는 그로인한 취성파괴가 발생한 것으로 판단된다.

실험에 의한 최대 내력과 이론적 내력과의 차이에 대해서는 플랜지의 경화현상 외에 해석모델상의 가정과 지레작용의 비선형성, 기하학적 변수 등의 영향이 고려될 수 있으므로 추후 이에대한 추가 연구가 필요하다.

Fig. 8과 Fig. 9은 인장시험 결과 시험체별 최대내력과 항복내력을 나타낸 것이다. 여기서 인장이음의 인장내력은 고

장력볼트의 인장강도가 항복강도에 거의 근접하기 때문에 나타내지 않았다.

Fig. 8로부터 인장이음의 최대내력은 M16 시험체에서는 플랜지 두께에 따라 차이가 크지 않다. M22 시험체에서는 플랜지 두께가 16mm인 경우에는 M16 시험체와 거의 동일한 내력을 나타내고, 플랜지 두께 23mm에서는 16mm의 시험체와 큰 내력의 차이를 나타낸다. M27 및 M30 시험체에서는 플랜지 두께가 증가할수록 최대내력도 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 고장력 볼트의 직경이 M16이거나 플랜지 두께가 16mm 이하인 경우 최대내력은 플랜지의 강성과 고장력 볼트의 강성이 비슷한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 고장력 볼트의 항복내력을 나타낸 것으로 T16 또는 M16 이하의 시험체에서는 거의 동일한 내력을 나타내지만, M22 고장력 볼트 이상의 시험체에서는 고장력 볼트 직경과 플랜지 두께의 증가에 따라 이음부의 내력이 증가함을 알 수 있다.

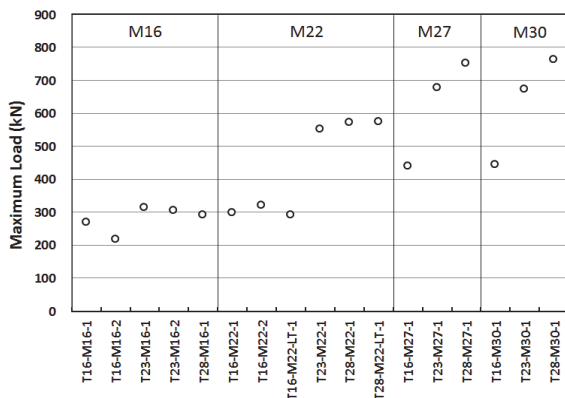


Fig. 8. Maximum load capacity for specimens

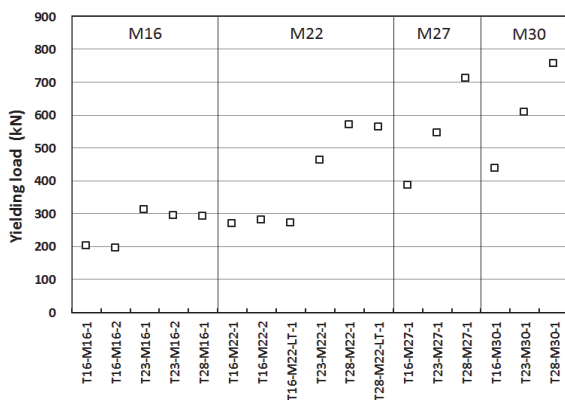


Fig. 9. Yielding load capacity for specimens

4.4 고장력 볼트의 직경 및 플랜지 두께의 영향

Fig. 10는 인장이음 시험체의 플랜지 두께 및 고장력 볼트의 직경의 영향을 파악하기 위해서 시험체의 항복내력을 플랜지 두께별로 정리한 것이다. M16 시험체의 경우 플랜지 두께별로 뚜렷한 차이는 없다. 그러나, M22 이상의 시험체에서는 판두께별로 거의 선형적으로 증가하며, 고장력 볼트 직경의 크기에 대해서도 내력의 증가폭이 거의 비례적으로 증가한다. 따라서 인장이음의 항복내력은 플랜지 두께와 고장력 볼트 직경에 대해 비례함을 알 수 있다.

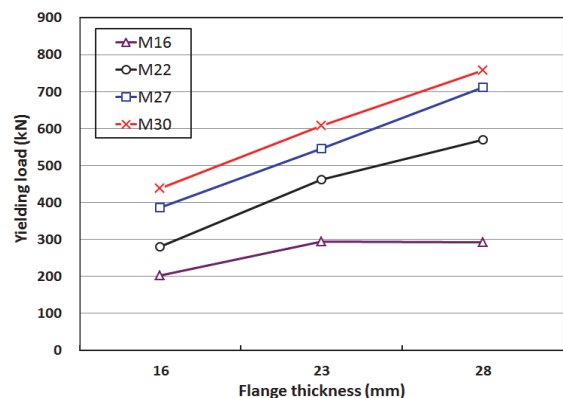


Fig. 10. Comparison yielding load capacity to the flange thickness and the bolt diameter

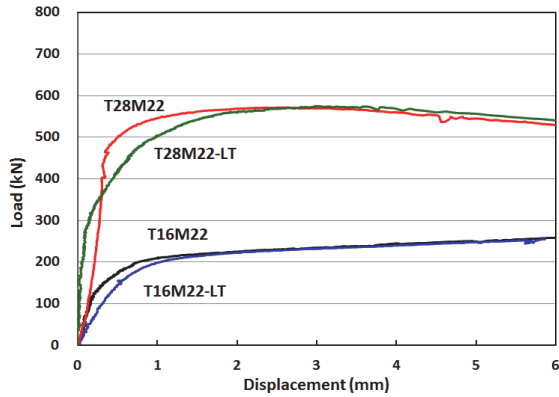


Fig. 11. Load-displacement curve for the LT specimens

4.5 도입 체결력 감소의 영향

고장력볼트 체결시 도입축력을 표준도입축력의 60%로 체결한 경우(시험체명에 LT 표시) 하중-변위 곡선을 Fig.11에 나타내었다. M16-LT 및 M28-LT 시험체가 재하초기에 곡선의 기울기가 상대적으로 낮은 경향을 보이거나 최대내력에 있어서는 표준도입축력으로 체결한 시험체의 내력과 동일한 값을 나타낸다. 이는 인장이음의 내력은 최대하중 단계에서 고장력 볼트 또는 플랜지가 최대내력에 도달하는 형태이기 때문이다. 즉 인장이음에서 초기의 고장력 볼트 도입축력은 이음의 성능에 큰 영향을 주지 않으며, 이음의 내력은 플랜지 또는 고장력 볼트의 강성에 의존함을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 고장력볼트 T형식의 인장이음에 대해 플랜지 두께와 고장력볼트 직경을 변수로 하여 정적인장실험을 실시하였으며, 이로부터 인장이음의 내력을 분석하였다. 그 결과 얻어진 결론을 정리하면 아래와 같다.

- (1) 정적 인장실험 결과 인장이음의 파괴형태는 플랜지의 두께, 고장력 볼트의 직경에 따라 플랜지 파괴, 플랜지와 고장력 볼트의 파괴, 고장력 볼트의 파괴의 형태로 나타남을 확인하였다.
- (2) 기존의 T-이음에 대한 내력 예측식으로부터 이음부의 내력을 예측한 결과 실험에 의한 최대 내력이 이론식에 의한 예측값보다 크게 나타났다. 이는 플랜지가 파괴내력에 도달하여 소성 메카니즘이 발생하더라도 플랜지의

경화 현상으로 인해 하중의 증가가 발생하였고 그 결과 최대 내력이 증가한 것이 하나의 원인으로 판단된다.

- (3) T16 또는 M16 이하의 시험체에서 최대내력 및 항복내력은 고장력 볼트 및 플랜지 항복에 의해 거의 동일한 것으로 나타났으나, M22 이상의 시험체에서는 고장력 볼트 직경과 플랜지 두께의 증가에 따라 이음부의 내력이 증가하는 것으로 나타났다.
- (4) 고장력볼트 체결시 도입축력을 표준도입축력의 60%로 체결한 경우, 최대내력에 있어서는 표준도입축력으로 체결한 시험체의 내력과 동일한 값을 나타내었다. 따라서 인장이음에서 초기의 고장력 볼트 도입축력은 이음의 성능에 큰 영향을 주지 않으며, 플랜지와 고장력 볼트의 내력을 최대한으로 활용할 수 있다.

감사의 말

이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2012 R1A1A2003527)

참고문헌(References)

- [1] 日本鋼構造協會(2004) 橋梁用高力ボルト引張接合部設計指針(JSS IV 05-2004).
Japanese Society of Steel Construction (2004) *Recommendation for Design of High Strength Tensile Bolted Connections for Steel Bridges* (JSS IV 05-2004), Japan (in Japanese).
- [2] Struik, J.H.A. (1979) *Test on Bolted T-Stub with Respect to Bolted Beam-to-Column Connections*, Report No. 6-69-13, Stevin Laboratory (Delft University of Technology), Netherlands.
- [3] Kulak, G.L., Fisher, J.W., and Struik, J.H.A. (1987) *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints* (2nd Ed.), John Wiley & Sons, USA, pp.268-288.
- [4] Swanson, J.A., and Leon, R.T. (2001) Stiffness Modeling of Bolted T-Stub Connection Components, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.5, pp.498-505.
- [5] Piluso, V., Faella, C., and Rizzano, G. (2001) Ultimate Behavior of Bolted T-Stubs. I: Theoretical Model, *Jour-*

- nal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.6, pp.686-693.
- [6] Swanson, J.A. (2002) Ultimate Strength Prying Models for Bolted T-Stub Connections, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.39, No.3 pp. 136-147.
- [7] 김지훈, 김태수, 강현식(2013) 페라이트계 스테인레스강 2행 2열 일면전단 볼트접합부의 최대내력평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제6호, pp.659-669.
- Kim, J.H., Kim, T.S., and Kang, H.S. (2013) Ultimate Strength Estimation of Ferritic Stainless Steel Single Shear Bolted Connections Fastened with Four Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.6, pp.659-669 (in Korean).
- [8] 최선규, 유정환, 박재우(2014) 편심전단을 받는 단일판접합부의 경사연단거리를 고려한 볼트군의 설계법, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제1호, pp.43-53.
- Choi, S.K., Yoo, J.H., and Park, J.W. (2014) Design Methods for Eccentrically Loaded Bolt Groups for the Single Plate Connections Considering Sloped Edge Distance, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.26, No.1, pp.43-53 (in Korean).
- [9] American Institute of Steel Construction (1993) *Load and Resistance Factor Design of Structural Steel Buildings*, USA.
- [10] Canadian Institute of Steel Construction (1997) *Handbook of Steel Construction* (7th Ed.), CISC, Canada.
- [11] American Association of State Highway and Transportation Officials (1998) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (2nd Ed.), USA.
- [12] European Committee for Standardization (2003) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Joints, Stage 49 Draft* (prEN 1993-1-8: 2003), Belgium.
- [13] 최혜경, 최성모, 김진호(2003) 고력볼트 Split Tee 접합부의 인장내력, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제5호, pp.541-549.
- Choi, H.K., Choi, S.M., and Kim, J.H. (2003) Structural Tensile Capacities of Split-Tee Connection with High Strength Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.15, No.5, pp.541-549 (in Korean).
- [14] 최성모, 이성희, 김진호(2004) 고력볼트 스플릿-티 인장접합부의 구조성능에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제6호, pp.737-745.
- Choi, S.M., Lee, S.H., and Kim, J.H. (2004) An Experimental Study on the Structural Characteristics of Tension Joints with High-Strength Bolted Split-Tee Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.6, pp.737-745 (in Korean).
- [15] 양재근, 김윤, 박재호(2012) 상·하부 스플릿 T 접합부의 초기회전강성 예측모델, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제3호, pp.279-287.
- Yang, J.G., Kim, Y., and Park, J.H. (2012) Prediction Model for the Initial Rotational Stiffness of a Double Split T Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.3, pp.279-287 (in Korean).
- [16] 허종완(2013) 반복하중을 받는 볼트 연결부에 대한 역학적 고등해석 모델의 개발, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제33권, 제1호, pp.101-113.
- Hu, J.W. (2013) Development of Advanced Mechanical Analysis Models for the Bolted Connectors Under Cyclic Loads, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.33, No.1, pp.101-113 (in Korean).
- [17] 양재근, 백민창(2013) 고력볼트로 체결된 T-Stub의 지레작용력 및 부재 접촉력 예측모델, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.409-419.
- Yang, J.G., and Baek, M.C. (2013) Prediction Models for the Prying Action Force and Contact Force of a T-Stub Fastened by High-Strength Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.409-419 (in Korean).

요 약 : 인장이음은 고장력 볼트의 체결력과 모재 그리고 고장력 볼트의 내력을 직접적으로 활용하고, 볼트구멍의 가공수나 체결개소의 감소, 피로저항성 등에 있어 유리하며 때문에 역학적으로 매우 효율적인 연결이다. 이러한 인장이음은 교량의 거더와 가로보의 이음, 주탑의 수평이음, 보-기둥 연결부, 바닥판 단부 2차부재 연결부, 브라켓 등에 적용될 수 있다. 본 연구에서는 인장이음의 역학적 거동을 파악하기 위해서 T-인장이음에 대한 정적실험을 수행하였다. 시험변수는 고장력 볼트의 직경, 플랜지 두께 및 체결력 감소이며, 인장이음의 파괴양상과 내력, 플랜지 두께와 고장력 볼트의 직경의 영향, 체결력의 영향에 대해 분석하였다.

핵심용어 : 고장력볼트, 인장이음, T이음, 정적내력