

고장력볼트 T-인장이음의 피로거동에 관한 실험적 연구

이승용¹ · 최준혁^{2*}

¹교수, 한국교통대학교 토목공학과, ²교수, 부천대학교 토목과

An Experimental Study on the Fatigue Behavior of T-Type Tension Joints with High Tension Bolt

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

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, 27469, Korea

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Bucheon University, Bucheon, 14642, Korea

Abstract - In this paper, it was performed the fatigue test to examine the effect of cyclic loading for the simple T-joint. Axial force of bolt by clamping and the change of the force by applied load were measured in the joint. And the bolt force, the failure mode and the fatigue strength under cyclic loading were investigated. The parameters of the tension joint were set to be the flange thickness and the diameter of bolt to a different stiffness of the joint in response to the combination. From the fatigue test, failure mode of tensile joints under cyclic loading could be evaluated using a static ultimate load of the specific failure mode in EC3. The fatigue strength of the tension joints was considerably higher than the fatigue strength of the EC3(36) that does not consider a lever action. However, the additional axial force by lever action occurs to an increase in the axial force of the bolt it requires a careful evaluation of the fatigue strength.

Keywords - High tension bolt, Tension type joint, T-joint, Fatigue strength

1. 서론

여러 가지 볼트 이음에서 인장이음은 인장력을 직접 받는 이음 형식이다. 볼트에 축력이 도입된 축하중을 받는 단순 T-이음에서, 연결부재의 다른 변형이 없고 외부하중이 볼트에 도입된 축력보다 작다면 외부하중은 볼트의 축력에 영향을 거의 주지 않으며 볼트는 파단되지 않는다. 그러나 볼트의 연결부재에 변형이 발생하는 경우는 볼트에 외부하중에 의한 인장하중과 지레하중(prying force)에 의하여 볼트에 는 추가적인 축력이 발생하게 된다. 따라서 외부하중이 볼트

의 도입축력보다 크지 않더라도 연결부재의 지레작용에 의한 하중에 의해 볼트에는 도입축력보다 큰 하중이 발생할 수 있으므로 볼트나 연결부재의 파괴를 유발할 수 있기 때문에 설계시 신중한 검토가 필요하다.

볼트 인장이음에 대한 파괴형태와 볼트의 축력 및 지레작용에 관한 연구는 Struik(1969), Fisher(1973), Kulak(1987) 등에 의해 여러 가지 연구가 진행되어 왔다^{[1],[2],[3]}. 연구결과로는 인장이음의 파괴형태로서 볼트의 축력과 외부하중과의 관계, 플랜지의 변형을 가정한 소성모멘트의 계산, 플랜지 변형에 의한 지레작용력의 추정에 관한 계산식이 제안되었으며, 반복하중이 볼트의 축력과 이음의 피로강도에 미치는 영향 등이 제시되었다. 이러한 연구들의 대부분은 이음부의 지레작용의 해석과 그 작용력을 해석하는 것에 초점이 맞춰져 있다. 이는 이음부의 볼트의 축력 변화는 볼트와 연결부의 상대적인 강성에 따라 크게 달라지기 때문에 이음부의 정적강도와 피로강도를 정하기가 쉽지 않기 때문이다^{[4],[5],[6]}.

국내에서는 철골 구조의 경우 인장이음에 대한 구조상세

Note.-Discussion open until June 30, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 11, 2016; revised November 1, 2016; approved on November 1, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. cjunh@bc.ac.kr

가 적용되고 있으나 교량과 같은 토목구조물에서는 주부재에 인장이음 상세가 적용된 경우가 거의 없다. 또한 국내의 연구에서도 Split-Tee 접합부를 대상으로 인장내력과 구조 성능에 대해 이음특성 분석과 변수 영향, 설계식 등이 연구된 바^{[7],[8],[9]} 있으나 대상 구조상세는 철골구조의 이음 상세에 국한되어 있으며, 반복하중하에서의 이음부의 거동에 대해서는 연구가 전무한 실정이다.

본 연구에서는 인장이음에 대한 반복하중의 영향을 살펴보기 위하여 단순 인장이음을 대상으로 작용하중에 의한 볼트의 축력변화와 반복하중에 대한 인장 이음의 피로강도 및 그 영향을 분석하였다. 인장이음의 구조 상세 변수는 플랜지 두께와 고장력 볼트의 직경으로서 이들의 조합에 따라 볼트와 연결부의 강성이 달라지도록 하였다. 피로시험결과로부터 볼트의 축력에 따른 피로강도를 평가하고 외부하중 작용시 볼트에 도입된 축력의 변화를 조사하였다. 또한 피로하중에 의한 이음부재의 파괴양상과 반복하중에 대한 볼트 축력의 변화를 분석하여 인장이음의 피로거동에 대한 전반적인 거동을 제시하였다.

2. 인장이음의 파괴형태

단체결 형식의 고장력볼트 인장시험편의 파괴양상은 볼트와 플랜지의 강성의 상대적 차이에 따라 Fig. 1과 같이 크게 3가지 형태로 구분된다. 이러한 인장이음의 파괴형태를

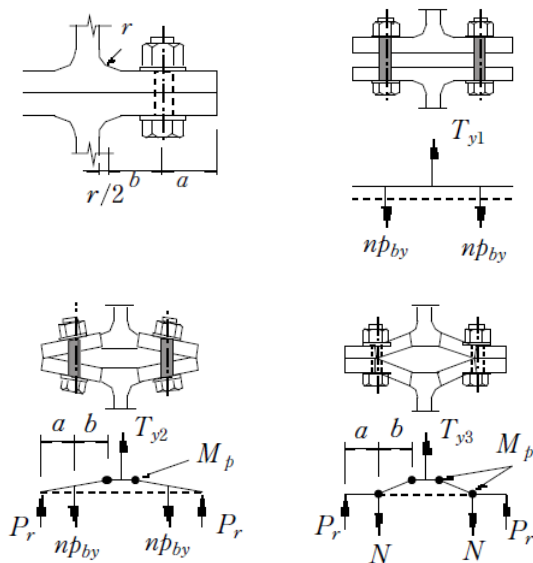


Fig. 1. Fracture type of tensile joint^[6]

예측하기 위해서 연결부에서의 볼트의 항복 또는 플랜지의 소성흔지 발생시의 극한하중을 계산하였다. 파괴형상에 따른 파괴시 극한하중은 파괴모드에 따라 식 (1)~(3)과 같이 계산될 수 있으며, 파괴형태는 극한하중 값들 중 가장 작은 값을 나타내는 극한하중의 파괴모드라고 할 수 있다. 각 파괴모드에서 인장하중 T_{y1} 은 고장력볼트만이 항복하는 경우이고, T_{y2} 는 볼트와 플랜지가 동시에 항복하는 경우, T_{y3} 은 플랜지만 항복하는 경우이다^[6].

$$T_{y1} = 2np_{by} \quad (1)$$

$$T_{y2} = 2 \frac{M_p + np_{by}a}{a+b} \quad (2)$$

$$T_{y3} = \frac{4M_p}{b} \quad (3)$$

여기서, n 는 플랜지 한쪽을 연결하는 볼트의 개수, a 는 고장력볼트 연단거리, b 는 한쪽 플랜지의 길이 ($a+r/2$)을 뺀 나머지 길이, r : 웨브 필렛의 반경이다. M_p 는 플랜지의 전 소성모멘트로서 $M_p = wt_f^2\sigma_y/4$, w : 플랜지의 폭, t_f : 플랜지의 두께, σ_y : 플랜지의 항복강도, p_{by} : 이간 내력 ($0.9N_0$ (N_0 : 설계볼트 장력)이다.

3. 피로시험

고장력볼트 인장이음의 피로시험에 사용된 시험체는 모두 6개로서 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2와 같으며, 각 시험체의 종류 및 제원은 Table 1에 나타내었다. 시험변수는 고장력볼트 직경과 플랜지 두께로서 볼트 직경은 M16, M22, M27, M30이고, 플랜지 두께는 16mm, 23mm이다. 볼트 위치는 플랜지 연단에서 볼트 중심축까지의 거리와 볼트 중심축에서 웨브면까지의 거리인 a 와 b 로 정의된다. 여기서, 거리 b 는 해석 모델에 따라 볼트 구멍의 내벽에서 웨브면까지의 거리로 정의하는 경우도 있으나 그 영향은 크지 않기 때문에 볼트 중심축을 기준으로 정하였다.

볼트에 작용하는 축력은 각 볼트의 볼트축의 양면에 변형률게이지를 부착하여 볼트 체결시부터 피로하중의 크기까지 하중을 작용시켜 측정하였다. 고장력볼트의 체결은 토크제

Table 1. Geometry of Specimens

Specimen	Bolts	Bolt diameter d (mm)	Flange thickness t_f (mm)	Web thickness w (mm)	a	b	Clamping force (kN)	Yielding strength of flange (MPa)	Plastic moment of flange (kN·m)
T16M16	M16×70	16	16	10	89	56	106	416	2.7
T16M22	M22×75	22	16	10	89	56	205	416	2.7
T16M30	M30×90	30	16	10	89	56	379	416	2.7
T23M22	M22×90	22	23	14	85	58	205	431	5.7
T23M27	M27×100	27	23	14	85	58	310	431	5.7
T23M30	M30×110	30	23	14	85	58	379	431	5.7

어법으로 예비체결과 본체결로 나누어 체결하였으며, 예비체결에서는 표준도입축력의 60%를 체결하고, 본체결에서 표준도입축력까지 체결하였다. 각 볼트에 대한 기계적 성질은 제조사에서 KS B 1010에 따라 샘플링으로 재료시험을 수행하였다. 고장력볼트 재질은 F10T(항복강도 1032MPa), 강재는 SM400이다. 피로시험은 1,000 kN 용량의 유압시험기(M&T Korea)를 사용하였다. 피로시험의 최소인장하중은

10kN이며, 재하속도는 2~3Hz로 일정진폭 반복하중하에서 실시하였다. Fig. 3은 시험체 셋팅 광경이다.

4. 시험결과

4.1 파괴양상

시험체에 대한 피로시험결과 총 6개의 시험체 중 5개의 시험체에서 피로파괴가 발생하였다. 인장이음의 파괴양상은 볼트와 플랜지의 강성, 볼트에 도입된 축력, 지레작용 등에 따라 달라지므로 매우 복잡하다. 인장이음부의 피로 파괴양상은 정적 파괴모드와 다른 면이 있지만 파괴모드의 구분을 위해서 2장에서 제시한 각 파괴모드에서의 인장하중을 Table 2에 나타내었다. 여기서 파괴모드는 각 인장하중에서 가장 작은 값을 나타내는 하중에서의 파괴모드이다.

각 시험체에서의 파괴모드를 보면 볼트의 직경에 비해 플랜지의 두께가 상대적으로 얇은 T16M22, T16M30, T23M30

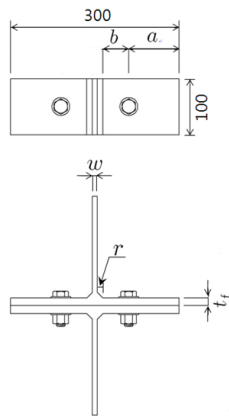


Fig. 2. Dimensions of specimen (unit : mm)

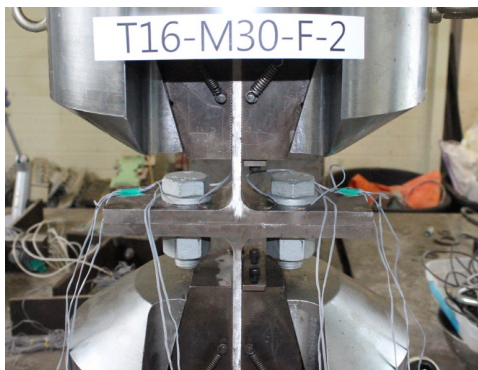
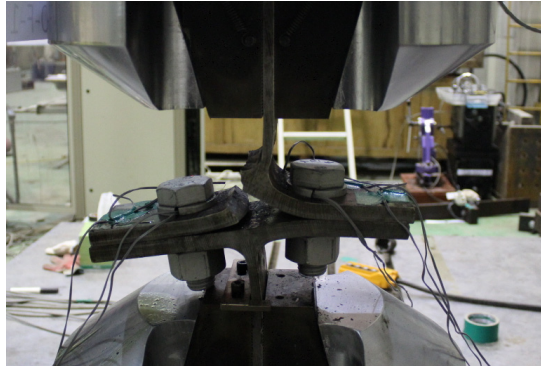


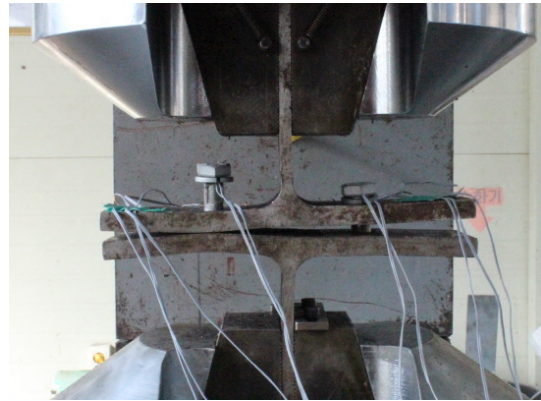
Fig. 3. Installation of the test specimen

Table 2. Ultimate load to the failure mode

Specimen	Ultimate load (kN)			Failure mode
	Bolt failure T_{y1}	Bolt and flange failure T_{y2}	Flange failure T_{y3}	
T16M16	190.8	166.5	236.7	Bolt-flange
T16M22	369.0	284.8	236.7	Flange
T16M30	682.2	492.8	236.7	Flange
T23M22	369.0	329.0	506.7	Bolt-flange
T23M27	558.0	452.5	506.7	Bolt-flange
T23M30	682.2	533.7	506.7	Flange



(a) Flange failure (T16M30)



(b) Bolt-flange failure(T23M22)

Fig. 4. Types of failure to test specimens

시험체에서는 플랜지 파괴 형태를 나타내며 다른 시험체는 볼트-플랜지 파괴형태이다. 이러한 결과는 Fig. 4(a)에서 보여지는 바와 같이 플랜지에서 큰 변형이 발생하여 파괴된 것과 Fig.4(b)의 볼트 및 플랜지의 변형에 의한 파괴 형태를 비교해 볼 수 있다. 따라서 시험체의 시험결과가 제한적이긴 하나 파괴모드별 극한하중 계산은 파괴시 모드를 예측할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있다.

4.2 피로강도

인장이음 시험체에 대한 피로강도를 평가하기 위해서 피로실험을 수행한 결과 얻어진 시험체별 응력범위에 대한 반복회수를 Table 3에 나타내었다. 여기서 인장이음의 응력범위는 부재 설계시 연결부재의 응력보다는 볼트의 축력이 인장이음의 강도를 결정하는 주요 응력이 되므로 볼트에 작용하는 응력을 기준으로 평가하였다. 그러나 볼트에 작용하는 응력은 연결부재의 강성에 따라 볼트의 응력도 달라지게 되므로 볼트의 응력을 정의하기가 매우 어렵기 때문에 볼트의 응력상태를 고려하여 다음 세 가지의 응력으로 정의하여 비교

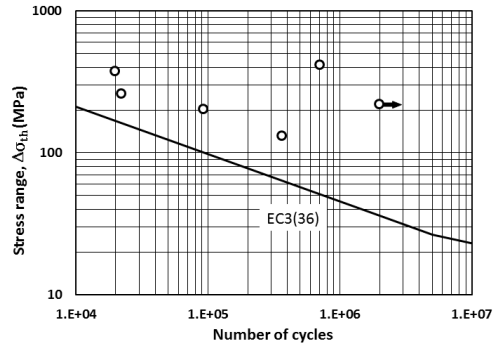


Fig. 5. Fatigue strength curve for theoretical stress range

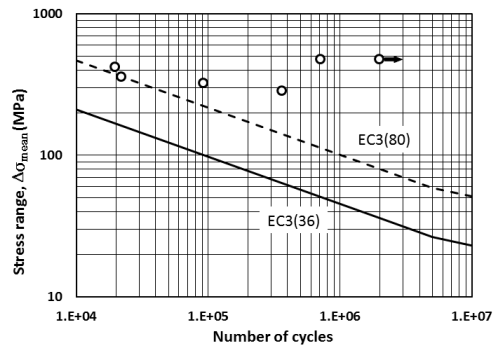


Fig. 6. Fatigue strength curve for the mean stress range

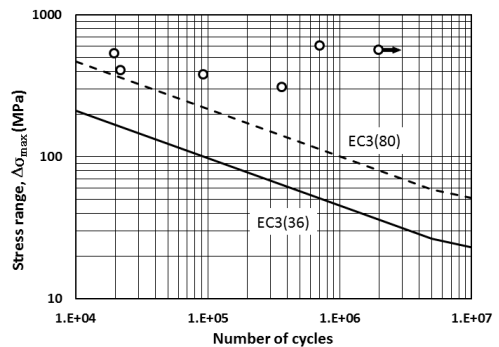


Fig. 7. Fatigue strength curve for the maximum stress range

하였다. 볼트의 이론적인 응력범위 $\Delta\sigma_{th}$ 는 작용하중을 볼트 단면적으로 나눈 값으로서 이음부의 지레작용이나 볼트의 휨 변형에 의한 응력증가가 고려되지 않은 이론적인 볼트의 응력 범위이다. 볼트의 평균응력 $\Delta\sigma_{mean}$ 는 볼트축에 부착한 게이지로부터 얻은 볼트의 변형률로부터 계산된 값으로서 볼트의 축력에 해당하는 응력범위이다. 또한, 볼트의 최대 발생응력 $\Delta\sigma_{max}$ 는 인장이음의 지레작용에 의하여 플랜지의 변형 및 볼트 축의 변형이 발생함에 따라 휨에 의한 응력 증가가 고려된 값으로서 볼트에 부착된 게이지로부터 계산된 값이다.

Table 3. Fatigue test results

Specimen	Applied load range ΔP (kN)	Theoretical stress range of bolt, $\Delta\sigma_{th}$ (MPa)	Mean stress range of bolt $\Delta\sigma_{mean}$ (MPa)	Maximum stress range of bolt $\Delta\sigma_{max}$ (MPa)	Number of cycles to failure	Note
T16M16	166	413	475	604	712,280	
T16M22	166	218	475	564	2,000,000	Not failure
T16M30	186	131	285	308	367,050	
T23M22	284	374	417	529	19,800	
T23M27	295	258	358	405	22,150	
T23M30	284	201	323	379	92,950	

인장이음에 대한 피로강도 곡선은 설계기준에 명확히 제시되어 있지 않다. 볼트의 부가 축력을 유발하는 지레작용을 고려하지 않을 경우 인장이음은 T-이음으로 정의될 수 있으며, EC3에서는 상세범주 36으로 정의된다. 따라서 시험체에 대한 피로강도의 검토에서는 EC3(36)^[6] 등급을 기준 강도로 정하였으며, 응력범위의 정의에 따른 피로강도의 수준을 Figs. 5~7에 나타내었다.

Fig. 5를 보면 이론적인 볼트의 축응력을 기준으로 평가한 이음의 피로강도는 EC3(36)보다 모두 높은 값을 나타내고 있다. 즉, 시험체의 대부분이 볼트-플랜지의 파괴형태임에도 불구하고 인장이음의 피로강도 기준인 EC3(36)은 보수적인 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6의 볼트의 평균응력으로 평가한 피로강도는 EC3(80)에 해당하는 피로강도를 보여준다. 즉, 시험체에 대한 피로강도는 EC3(36)에서 EC(80)에 해당하는 피로강도까지 적용할 수 있음을 나타낸다.

시험체의 볼트에 발생하는 최대응력을 기준으로 평가한 Fig. 7은 Fig. 6과 마찬가지로 EC3(80)의 적용이 가능함을 나타낸다.

이러한 결과로부터 인장이음 시험체에 대해서는 지레작용을 고려하지 않은 EC3(36)의 피로강도가 상당히 안전측인 결과를 제시하고 있음을 알 수 있다. 또한, 인장이음은 이음의 지레작용에 의한 부가축력으로 볼트의 축력의 변화가 크기 때문에 피로강도의 평가에서는 신중해야 할 것으로 판단되나 시험 결과로 볼 때 인장이음에 대한 피로강도의 조정에 대한 검토는 필요할 것으로 판단된다.

4.3 하중 작용에 의한 볼트의 축력 변화

인장이음은 이음에 작용하는 하중에 대해 1차적으로 볼트

에 도입된 축력에 의해 저항하고 볼트에 도입된 축력이상의 하중에 대해서는 볼트의 항복하중 또는 인장하중까지 추가로 부담하는 구조이다. 이러한 메카니즘은 플랜지의 변형이 없이 볼트의 인장력에 의해서만 저항하는 경우에 대한 것이며, 플랜지의 변형이 발생하는 경우는 달라지게 된다. 즉, 볼트의 강성에 비해 플랜지의 강성이 충분하지 못할 경우 플랜지의 변형이 발생하게 되고 플랜지의 끝단에서 지레작용을 유발함에 따라 볼트에 추가적인 하중을 유발하게 된다. 볼트와 플랜지의 강성 차이에 따른 볼트 축력의 변화를 분석하기 위하여 볼트의 초기 도입축력과 작용하중에 대한 볼트의 축력 변화를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 작용하중이 0일 때 볼트의 하중은 도입축력을 의미한다.

작용하중에 대한 볼트의 축력 변화를 보면, T16 시험체의 경우 볼트에 도입된 축력은 작용하중의 증가에 대해 약간 증가하였고, T23 시험체는 볼트의 도입축력이 작용하중이 증가함에 따라 크게 증가하는 양상을 나타내었다.

이는 T16시험체는 플랜지 두께가 비교적 얇아 볼트의 강

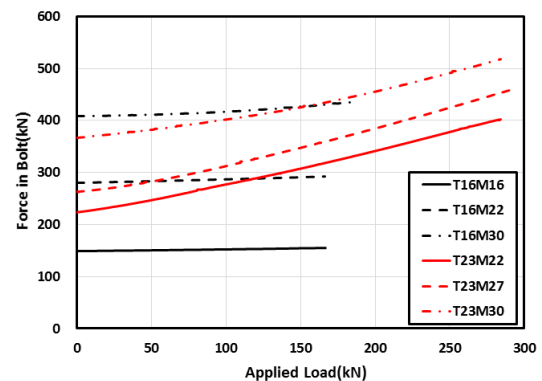


Fig. 8. Axial force in bolt to applied load

Table 4. Maximum bolt force for specimens

Specimen	Initial bolt force, B_0 (kN)	Applied load, T (kN)	Maximum bolt force, B (kN)	Yielding force of bolt, B_y (kN)	B/B_0	B/B_y
T16M16	149	166	155	207	1.04	0.75
T16M22	280	166	293	392	1.05	0.75
T16M30	404	186	436	731	1.08	0.60
T23M22	224	284	402	392	1.79	1.02
T23M27	264	295	462	590	1.75	0.78
T23M30	367	284	518	731	1.41	0.71

성보다 플랜지의 강성이 작기 때문에 이음부에 하중이 작용할 경우 볼트보다 플랜지의 변형이 쉽게 발생하였고 그 결과 상대적으로 볼트에는 축력의 변화가 크지 않은 것으로 판단된다. 반면, T23 시험체는 볼트의 강성과 플랜지의 강성 차이가 크지 않기 때문에 플랜지의 변형에 따라 지레작용이 발생하였고 볼트와 플랜지의 변형을 유발하였기 때문에 볼트의 축력의 증가를 가져왔다.

각 시험체의 초기 도입축력에 대한 최대 작용하중에서의 볼트 축력의 크기를 비교하여 Table 4에 나타내었다. 최대 하중 작용시 도입 축력에 대한 볼트의 축력은 T16시험체에서는 최대 1.08배 증가하였지만 T23 시험체에서는 최대 1.79배까지 증가하는 것으로 나타났다. 또한 항복하중에 대한 볼트의 하중은 T23M22 시험체를 제외하면 T16시험체와 큰 차이없이 볼트의 항복하중의 약 70%정도로 나타났다. 이러한 결과는 T23 시험체는 T16시험체에 비해 작용하중으로 인한 도입축력의 증가가 매우 큰 것으로 플랜지의 지레작용에 의한 영향이 매우 크다는 것을 나타낸다.

4.4 반복회수에 따른 볼트 축력의 변화

인장이음에 대한 반복하중의 재하과정에서 반복하중이 볼트의 축력에 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 특정

회수마다 최대하중까지 하중을 가하여 볼트의 축력 변화를 측정하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

반복회수는 파단 전의 대표 반복회수에서 측정하였다. 그 결과 각 시험체에서의 볼트 축력의 변화는 도입축력에 비하여 큰 차이가 없었다. 따라서 볼트에 도입된 축력은 이음부에 특정한 변형이 발생하지 않는다면 반복하중의 영향은 크지 않다고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 단순 인장이음을 대상으로 작용하중에 의한 볼트의 축력변화와 반복하중에 대한 인장 이음의 피로강도 및 그 영향을 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 반복하중을 받는 인장이음의 파괴모드는 제한된 시험결과이지만 EC3에서 제시하고 있는 정적 파괴모드별 극한하중을 이용하여 평가될 수 있다.
- (2) 시험체와 같은 인장이음의 피로강도는 지레작용을 고려하지 않은 EC3(36)의 피로강도보다 상당히 안전측인 결과로 나타났다. 그러나, 인장이음은 지레작용에 의한 부

Table 5. Change of bolt force to the number of cycles

Specimen	Maximum bolt force to number of cycles (kN)						
	N=10	100	1,000	10,000	100,000	300,000	500,000
T16M16	243	242	243	242	243	243	243
T16M22	429	429	429	429	429	429	429
T16M30	436	436	439	439	439	439	-
T23M22	405	407	410	411	-	-	-
T23M27	463	464	469	469	-	-	-
T23M30	538	538	540	542	-	-	-

가축력으로 볼트의 축력의 변화가 크기 때문에 피로강도의 평가에서는 신중해야 할 것으로 판단되며, 여러 가지 실험적 연구를 수행하여 피로강도의 조정에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

- (3) 축력이 도입된 인장이음에서 볼트와 플랜지의 강성차이에 따라 볼트의 축력변화가 크게 발생하였으며 이음 부재의 지레작용에 의한 영향이 매우 크다.
- (4) 볼트에 도입된 축력은 반복하중에 의해 축력이 감소되지 않고 파단시까지 유지되는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도 한국교통대학교 해외파견 연구교수 지원금을 받아 수행한 연구임.

참고문헌(References)

- [1] Struik, J.H.A. (1969) *Tests on Bolted T-stubs with Respect to a Bolted Beam-to-column Connections, Report 6-69-13*, Stevin Laboratory, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- [2] Fisher, J.W. and Struik, J.H.A. (1973) *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, John Wiley & Sons, pp.257-280.
- [3] Kulak, G.L., Fisher, J.W., and Struik, J.H.A. (1987) *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, pp.268-288.
- [4] AASHTO (1998) *AASHTO LRFD Bridge Design Specification*, Second edition, SI units.
- [5] AISC (1980) *Manual of steel construction, part 4, connections*, pp.4-88~4-93.
- [6] Eurocode (1992), *Design of steel structures*.
- [7] 최혜경, 최성모, 김진호(2003) 고력볼트 Split Tee 접합부의 인장내력, 한국강구조학회 논문집, 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).
- [8] 최성모, 이성희, 김진호(2004) 고력볼트 스플릿-티 인장접합부의 구조성능에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집, 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).
- [9] 양재근, 백민창(2013) 고력볼트로 체결된 T-sub의 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 : 본 연구에서는 인장이음에 대한 반복하중의 영향을 파악하기 위하여 단순 인장이음을 대상으로 피로시험을 수행하였다. 인장이음의 볼트체결에 따른 축력과 작용하중에 의한 축력의 변화를 측정하였고 반복하중에 의한 볼트의 축력과 파괴양상, 이음의 피로강도를 조사하였다. 인장이음의 구조 상세 변수는 플랜지 두께와 고장력 볼트의 직경으로서 이들의 조합에 따라 볼트와 연결부의 강성이 달라지도록 하였다. 피로시험결과, 반복하중을 받는 인장이음의 파괴모드는 EC3에서 제시하고 있는 정적 파괴모드별 극한하중을 이용하여 평가될 수 있었다. 인장이음의 피로강도는 지레작용을 고려하지 않은 EC3(36)의 피로강도보다 상당히 안전측의 결과로 나타났다. 그러나, 지레작용에 의한 부가축력은 볼트 축력의 증가를 일으키기 때문에 피로강도에 대한 신중한 평가가 필요하다.

핵심용어 : 고장력볼트, 인장이음, T이음, 피로강도