

F10T 고장력 볼트를 이용한 T-형 플랜지형 구조물의 Prying Action에 따른 정적강도 해석

박명균[†] · 이종원* · 구본성**

명지대학교 기계공학과 · *명지대학교 기계공학과 대학원 · **S&T 중공업
(2008. 4. 17. 접수 / 2008. 7. 31. 채택)

The Static Strength Analysis of Prying Action for T-flange Shape Structure Using F10T High Strength Bolt

Myung Kyun Park[†] · Joong Won Lee* · Bon Sung Koo**

Department of Mechanical Engineering, Myongji University

*Graduate School of Department of Mechanical Engineering, Myongji University

**S&T Dynamics

(Received April 17, 2008 / Accepted July 31, 2008)

Abstract : This paper presents and discusses the experimental results on the F10T high strength bolts used in the T-flange joint structure. The experimental works were carried out for the parameters which are flange web thickness, the distance between bolts, prying ratio. The results show that the working stress imposed to bolts decreases as the flange web thickness increases on the other hand the imposed stress to the bolts increases as the distance between two bolts increases. In other words the strength of the T-flange joint increased as the web flange thickness increases and the distance between two bolts decreases. The prying ratio is increased as the distance between two bolts increases and as the flange web thickness decreases. However, the degree of stress decrease in flange thickness variation is not that high as the distance variation between two bolts. Finally the equation for predicting the failure stress in T-flange joint structure using F10T high strength bolts was suggested.

Key Words : high strength bolt, split tee(T-stub), prying action, T-flange

1. 서론

일반적으로 강 구조물은 공장이나 제작소에서 가설이 가능한 크기로 제작된 후, 이 부재들을 현장에서 최종 구조물로 만든다. 이 과정에서 강재나 부재들을 절단하고 용접, 볼트, 리벳이음 등의 방법으로 구조물을 제작한다. 볼트 접합은 작업조건이 용접작업에 적합하지 않거나 불가능할 경우, 또는 리벳이음에서 리벳의 코킹(Caulking)에서 강도가 현저히 저하될 때 많이 사용된다. 이는 용접에 비해 열을 가하지 않아 열 잔류응력이 발생하지 않고 기본적인 공구를 통해서 기후의 영향을 받지 않고 쉽게 작업이 용이한 장점이 있다. 현재는 대형 구조물용 고강도의 부재가 많이 사용되고 있으며

구조적 안정성을 향상시키기 위해 F8T, F10T급의 고장력 볼트를 사용하고 있다. 최근에는 새로이 개발된 F13T급의 초고장력 볼트가 사용되고 있다. 고장력 볼트를 사용한 프라잉 작용의 영향을 받는 인장접합부의 연결방법은 Hanger Connection, Beam-to-Column Connection, Diagonal Connection 등이 있다. 이들 연결부에서는 작용하중 및 굽힘 모멘트에 의해서 플랜지 상부 또는 하부에 인장력이 작용한다. Fig. 1과 같이 T형 부재의 플랜지에 설치된 볼트가 하중을 지지하기 위해서 직접적인 인장력을 받게 되는 경우 플랜지가 변형되면서 볼트 체결점 외측 지점에서 지렛대 역할을 하여 볼트에는 작용하중에 의한 직접적인 인장력 외에 볼트 체결점 외측 플랜지 접촉점의 반력이 추가 된다. 이와 같은 작용을 프라잉 작용(Prying Action-지렛대 현상)이라고 한다. 이 형태를 다른 이름으로 T-형 플랜지

[†] To whom correspondence should be addressed.
pmk@mju.ac.kr

(T-flange)라고도 하며 이 T-형 플랜지 접합부에서는 T-형 플랜지가 휘어지면서 프라잉 힘이 발생하고, 그 결과 T-형 플랜지를 접합한 볼트의 작용력은 증대되어 접합부의 내력은 감소하게 된다. 따라서 프라잉 힘의 특성을 파악하는 것은 T-형 플랜지 접합의 거동을 검토하는데 있어서 가장 중요하다.

T-형 플랜지 접합에서 작용하는 외력은 T-web를 통해 T-형 플랜지에 전달되어, T-형 플랜지가 굽힘저항을 일으키며 고장력 볼트에 전달된다. 이 프라잉 작용은 구조물의 형상이나 볼트의 위치 등 여러 가지 요인의 영향을 받으며, 이는 볼트 자체의 파손뿐만 아니라 구조물 자체의 강도의 저하요인이 된다. 하지만 이에 관련된 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 프라잉 작용에 영향을 미치는 플랜지 두께와 볼트너트 체결부의 위치에 따른 인자를 프라잉 거동 비로 정의하고 이에 따른 정적 강도 해석을 하였다.

2. 관련이론

T-형 플랜지 연결부에서는 작용하중 및 굽힘 모멘트에 의해서 플랜지 상부 또는 하부에 인장력이 작용한다. Fig. 1과 같이 T형 부재의 플랜지에 설치된 볼트가 하중을 지지하기 위해서 직접적인 인장력을 받게 되는 경우 플랜지가 변형되면서 볼트 체결점 외측 지점이 지렛대 역할을 하게 되어 볼트에는 작용하중에 의한 직접적인 인장력 이외에 볼트 체결점 외측 플랜지 접촉점의 반력이 추가 된다. 이와 같은 프라잉 작용의 영향은 볼트에 작용하는 인장하중과 플랜지의 볼트간 거리, 그리고 플랜지의 두께의 변화에 따라 달라진다.

이외에도 볼트의 형태와 크기, 연결부의 기하학적 형태에 따라 영향을 받게 된다. Fig. 1의 상관만

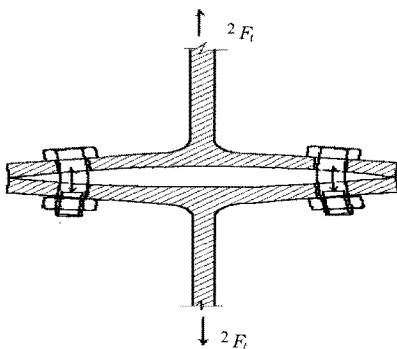


Fig. 1. Prying action of T-flange connection.

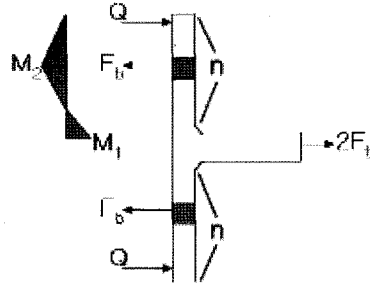


Fig. 2. Analytical model of prying action at split-t.

을 고려하여 도형화하여 각 지점에 걸리는 하중과 반력, 모멘트를 고려한 해석적 모델을 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 힘의 평형 방정식은

$$F_b = Q + F_t \tag{1}$$

여기서, Q : 프라잉 힘

F_b : 볼트의 인장력

F_t : 볼트에 작용하는 외부하중

이다.

또한, 볼트 중심에서 플랜지 끝단까지의 모멘트는

$$M_2 = Q \cdot n \tag{2}$$

이다.

T-형 플랜지에서 플랜지 복부와 볼트에서 모멘트 평형방정식은 다음과 같다.

$$M_1 + M_2 - F_t \cdot m = 0 \tag{3}$$

여기서 모멘트 M_1 은 플랜지의 전단면(Gross cross section)에 작용하고, 모멘트 M_2 은 플랜지의 순단면(Net cross section)에 작용한다. 식 (1)과 (3)은 평형방정식을 만족해야 한다. T-형 플랜지 단면에서 볼트의 위치에 따른 간격의 비율을 $\gamma = \text{순단면 간격} / \text{전단면 간격}$ 으로 나타내면 모멘트 M_2 는 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$M_2 = M_2 \left(\frac{\gamma M_1}{\gamma M_1} \right) = \left(\frac{M_2}{\gamma M_1} \right) \gamma M_1 = \zeta \gamma M_1 \tag{4}$$

여기서, $\zeta = \frac{M_2}{\gamma M_1}$, ($0 \leq \zeta \leq 1$)

식 (4)에 의하면 M_1 과 M_2 의 사이에서 만약 $\zeta = 1$

이면 M_1 과 M_2 는 소성힌지에 위치해 있고 프라이밍 힘은 최대가 된다. 또한 $\zeta=0$ 이면 프라이밍 힘은 발생하지 않는다. 식 (4)를 식 (2), (3)에 대입하면 식 (5) 와 (6), 2개의 방정식을 얻을 수 있다.

$$M_1 = \frac{F_t \cdot m}{1 + \zeta\gamma} \quad (5)$$

$$M_1 = \frac{Q \cdot n}{\zeta\gamma} \quad (6)$$

또한 식 (5), (6)을 연립하면 M_1 을 소거할 수 있으며 Q 에 관한 식으로 정리하면 식 (7)과 같다.

$$Q = F_t \cdot \frac{m}{n} \left(\frac{\zeta\gamma}{1 + \zeta\gamma} \right) \quad (7)$$

식 (7)에서 Q 를 F_t 로 나눈 비를 프라이밍 비($\frac{Q}{F_t}$)라 한다. 이는 T-형 플랜지와 같은 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치는 인자가 된다.

또한, AASHITO LRFD 2004 Spec.에 규정하고 있는 프라이밍 비에 대한 실험적 계산식은 다음과 같다.

$$Q_u = \left[\frac{3m}{8n} - \frac{t^3}{328} \right] F_t \quad (8)$$

여기서 Q_u : 외부 하중으로 인한 볼트의 프라이밍 힘
 F_t : 외부 하중에 의한 볼트의 인장력
 n : 볼트 중심에서 연단까지 거리(M_2/Q)
 m : 볼트의 중심에서 연결부의 용접단까지의 거리($M_1 + M_2/F_t$)
 t : 플랜지 두께(cm)

3. 시편 및 실험방법

시험 재료는 KS B 1010에 기술된 F10T M20 토크계수 값이 0.15인 A급 고장력 볼트를 사용하였다. 시험 체는 SM 490 선박 및 교량용 극 후판 재료를 절단하여 사용하였으며 시험체와 볼트의 분리를 최소화하기 위하여 하부는 밀링처리 하였다. 시험장비는 MTS 100 ton 피로 시험기를 사용하였으며 시험체의 형상은 Fig. 3과 같다.

본 연구에서는 프라이밍 힘에 영향을 주는 2가지 인자를 정하고 이에 따른 정적 시험을 시행하였다. 시험시의 모습은 Fig. 4와 같다.

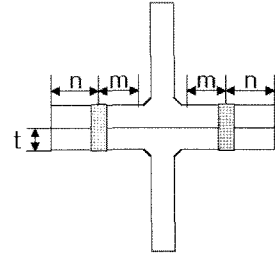
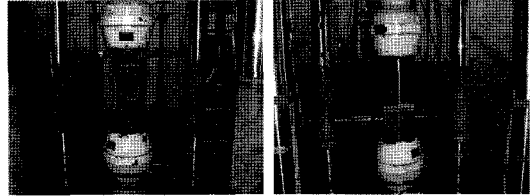


Fig. 3. Configuration of prying action static test specimen.



(a) Front (b) Side

Fig. 4. Picture of prying action static test.

Table 1. Dimension of prying action static test specimen

Test method	Test symbol
Change flange thickness	T-20-75-75
	T-24-75-75
	T-28-75-75
Change bolt distance	T-24-75-75
	T-24-60-90
	T-24-50-100

시험은 플랜지의 두께를 변화시키는 방법과 볼트의 위치를 변화시키는 방법 두 가지로 시행하였으며 볼트의 체결토크는 두 시험 모두 67.5kgf·m를 적용하였고 초기 인장응력은 182MPa를 적용하였다. 시험에 사용된 형상조건은 Table 1과 같으며 시험체는 치수에 따라 [T-t-n-m]의 기호를 사용하였다. 여기서 T는 시험체 일련기호이며 t는 플랜지의 두께, n은 볼트중심부터 플랜지 끝단까지의 거리, m은 볼트중심부터 플랜지 용접 단까지의 거리를 의미한다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1. 볼트의 거동

T-형 플랜지형 구조물에서 프라이밍 작용이 일어날 경우 볼트의 거동형태를 알아보기 위하여 플랜지를 접합하는 두볼트 내측의 인장부분과 외측의 압축부분에 각각 2개씩 총 4개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 이를 통해, 주어진 외부응력(작용응력, Working stress)에 의해 프라이밍 작용이 발생할 경우

볼트에 걸리는 응력을 산출하였다. 작용 이란 볼트 단면이 받는 외부 하중을 의미한다. 응력 외부응력에 따라 플랜지 두께가 다를 경우의 볼트에 걸리는 하중을 Fig. 5에 나타내었으며 볼트의 간격을 증가시킬 경우 볼트에 걸리는 하중은 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 5로부터 플랜지의 두께를 20mm부터 28mm까지 증가시키며 외부응력을 적용했을 때 볼트에 걸리는 응력의 변화를 알 수 있다. 외부응력의 변화에 의한 두께변화에 따른 볼트에 걸리는 응력은 플랜지 두께가 20mm보다 28mm일 경우가 작게 나타난다. 이는 동일 작용 응력에서는 플랜지 두께가 두꺼울수록 볼트에 걸리는 응력은 플랜지 두께가 20mm보다 28mm일 경우가 작게 나타난다. 이는 동일 작용 응력에서는 플랜지 두께가 두꺼울수록 볼트에 걸리는 하중이 작음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6로부터는 동일 두께 하에서 작용응력을 변화시켰을 때 두 체결볼트 사이의 간격이 증가함에 따라 볼트에 걸리는 응력(Bolt stress)의 변화를 알 수 있다. Fig. 6에서는 Fig. 5와는 다르게 작용응력의 변화가 크고 두 볼트사이의 간격이 클수록 작용응력이 감소함을 알 수 있다. 볼트의 응력변화 산출 후에 두볼트의 응력-변형률 선도를 나타내었다. Fig.

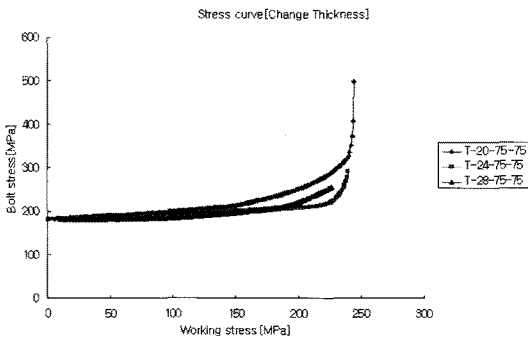


Fig. 5. Stress distribution in bolts for various flange thickness.

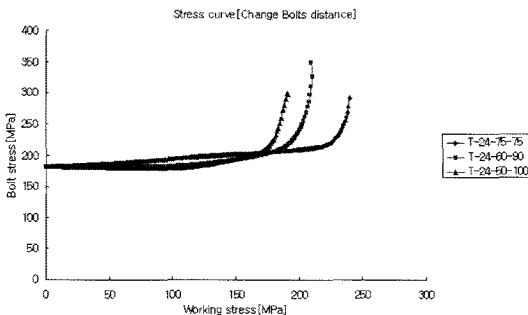


Fig. 6. Stress distribution in bolts for various bolt distance.

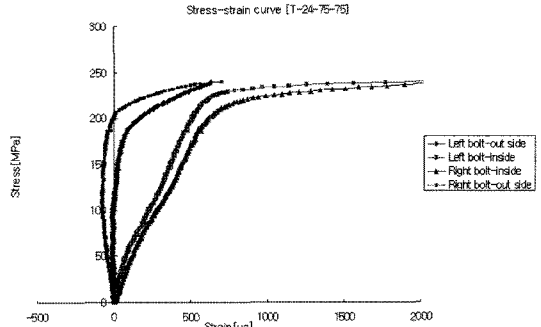


Fig. 7. Stress-strain curve in bolts for T-24-75-75.

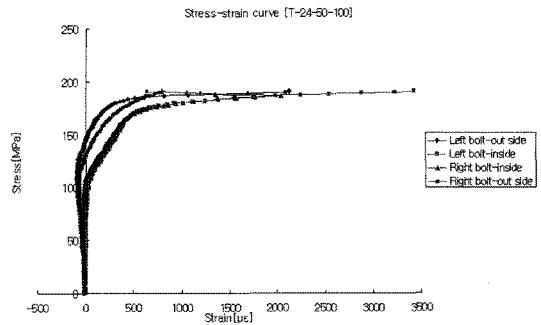


Fig. 8. Stress-strain curve in bolts for T-24-50-100.

7은 T-24-75-75의 응력-변형률 선도이며 Fig. 8은 T-24-50-100의 응력-변형률 선도이다.

Fig. 7과 8은 T-형 플랜지형 구조에서 두 개의 플랜지가 볼트로 접합되었을 때 플랜지에 작용하중을 가했을 경우 볼트의 변형률을 나타낸 것이다. 두볼트에 내측과 외측의 변형율의 차이가 발생함을 알 수 있다. 이는 볼트 내측의 경우 플랜지의 힘에 따라 인장을 받기 때문에 양의 축에서 거동을 하지만 볼트 외측의 경우 볼트가 힘에 따라 압축을 받아 변형율의 거동이 음의 축에서 거동한다.

이러한 볼트의 거동을 통해 T-형 플랜지의 구조에서 플랜지에 외부응력이 가해지면 플랜지를 접합하고 있는 볼트는 프라이밍 작용을 받는 것을 알 수 있다.

4.2. 프라이밍 작용의 거동

플랜지 웹의 두께 변화에 따른 시험과 플랜지 끝단에서 볼트의 위치를 변화한 두 가지 시험에 대한 결과는 Table 2와 같다.

정적 프라이밍 거동시험 결과에 의하면 플랜지 웹의 두께를 변화시켰을 때는 두께가 두꺼워 질수록 파괴하중이 증가함을 알 수 있다. 이는 웹의 두께가 증가하면서 작용응력이 감소되어 그에 따라 견딜

Table 2. Prying action static test result

Test method	Test symbol	Failure stress [MPa]	Prying Ratio (Q/Ft)
Change flange thickness	T-20-75-75	206.4	0.3861
	T-24-75-75	223.1	0.3008
	T-28-75-75	236.75	0.2891
Change bolt distance	T-24-75-75	223.1	0.3008
	T-24-60-90	187.75	0.3470
	T-24-50-100	179.75	0.3851

수 있는 응력범위가 증가되기 때문에 파괴응력이 증가하게 된다. 이를 프라잉 비의 변화와 비교해 보면 두께가 증가 할수록 프라잉 비가 감소함을 알 수 있으며 프라잉 비가 감소함에 따라 파손에 소요되는 하중은 증가함을 알 수 있다. 즉 플랜지 두께가 두꺼워 질수록 강성이 증가되어 반력인 프라잉 힘(Q)이 줄어들게 되므로 프라잉 비가 감소하게 되는 것이다. 그러나 볼트의 위치변화에서는 웹 끝단에 가까워질수록 파괴하중이 줄어들고 프라잉 비는 증가함을 알 수 있다. 이는 T-형 플랜지구조의 경우 볼트의 위치에 따라 프라잉력이 증가함을 알 수 있다. 그러므로 볼트 결합 시 두께를 증가하고 볼트 간격을 좁게 하면 구조체의 안정성을 꺾할 수 있다.

또한 본 연구의 프라잉 비의 시험 값과 이론값을 비교하기 위하여 식 (8)로부터 구한 결과 값을 Table 3에 나타내었다. 여기서 이론에 의한 프라잉 비는 기하학적 형상만을 고려한 식 (8)의 우변에 의해 계산된 값을 의미하며 시험적 프라잉 비는 파단 될 때의 하중 F_t 를 측정하여 다음 식 (8)을 사용하여 F_t 와 Q 를 나누어준 비를 의미한다.

Table 3에서는 두 가지의 결과를 확인할 수 있다. 첫 번째는 두께를 변화시켜 시험한 결과 프라잉 비의 값은 시험 값과 이론값이 크게 차이가 없음을 알 수 있으며 두 번째는 볼트의 위치를 변화한 경우 이론적인 프라잉 비와 실험적인 비는 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 3. Prying ratio comparison experiment with theory

Test method	Test symbol	Theory prying ratio	Experiment prying ratio
Change flange thickness	T-20-75-75	0.351	0.3861
	T-24-75-75	0.333	0.3008
	T-28-75-75	0.308	0.2891
Change bolt distance	T-24-75-75	0.333	0.3008
	T-24-60-90	0.520	0.3470
	T-24-50-100	0.708	0.3851

볼트간격이 증가함에 따라 이론데이터와 시험 데이터의 차이가 약 2배 이상 차이가 있음을 알 수 있다. m/n 의 비율이 1일 경우는 이론값과 시험 값의 차이는 없으나 1이상인 될 경우 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 3의 결과를 토대로 종합하면 T-형 플랜지의 구조에서 두께를 변화시킬 경우 기하학적 형상인(m/n) 및 플랜지 두께로부터 계산된 프라잉 비는 사용할 수 있으나 두께를 일정하게 하고 m/n 의 비가 1 이상인 경우, 즉 플랜지 중심으로부터 볼트까지의 거리가 볼트부터 플랜지 끝단까지 거리보다 긴 경우는 이론에 의한 프라잉 비를 사용하는 것은 무리가 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 두 볼트간격에 따른 플랜지 웹의 두께 t 에 대한 프라잉 비를 구하는 곡선이다. 실제 시 Fig. 9를 이용하여 각 두께와 볼트사이의 거리를 알 경우 Fig. 9를 이용하여 프라잉 비를 쉽게 산출할 수 있다.

본 연구에서 시행한 시험결과를 토대로 프라잉 비에 따른 파손응력 예측식을 나타내었다. 파손응력 예측식은 다음과 같다.

$$S_t = S_u(-433.8R + 355.2) \tag{9}$$

여기서 S_u : 볼트종류에 따른 계수(F10T M20일 경우 = 1)

R : 프라잉 비

Fig. 10에서는 프라잉 비에 따른 파괴응력의 변화를 알 수 있다. 프라잉 비에 따른 파괴응력은 프라잉 비가 증가함에 따라 파괴응력이 감소하는 경향을 나타내었다. Fig. 10의 시험결과는 F10T급 강도의 M20 고장력 볼트와 SM 490의 구조물을 사용한 경우에 적용할 수 있다. 즉 구조물에서 체결

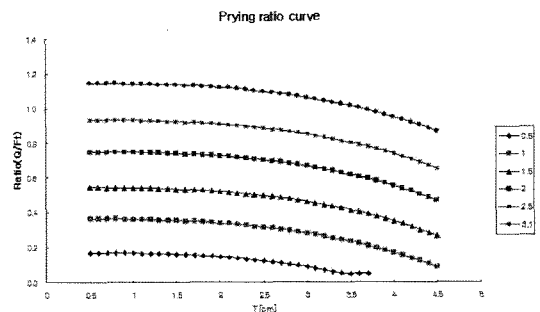


Fig. 9. Prying ratio curve according to flange thickness and bolt distance ratio.

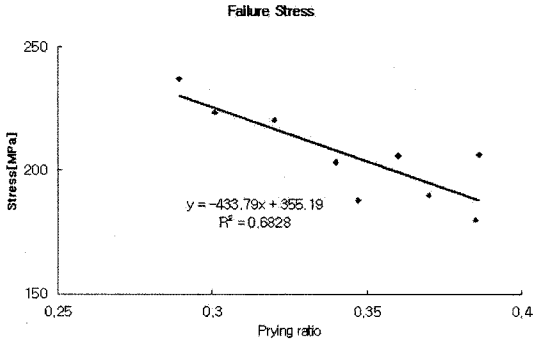


Fig. 10. Failure stress according to prying ratio.

볼트와 강재의 종류에 따라서 Fig. 10의 프라잉 비에 따른 파괴강도는 달라질 수 있다. 예측식 (9)에서는 S_a 의 값을 달리하여 볼트종류에 따른 강도예측을 할 수 있다.

5. 결론

T-형 플랜지 구조에 따른 피로강도 해석연구를 통해 내린 결론은 다음과 같다.

- 1) T-형 플랜지의 구조에서 볼트에 작용하는 응력의 변화를 확인한 결과 플랜지의 두께가 증가할 때 응력이 작음을 알 수 있다.
- 2) 볼트에 작용하는 응력 변화의 민감도는 플랜지 두께 변화보다는 볼트 사이의 거리가 더 민감하게 반응함을 알 수 있다.
- 3) Split-t의 정적시험 결과 플랜지 웹의 두께가 두꺼워질수록 강도가 증가함을 알 수 있으며 프라잉 비는 감소함을 알 수 있다.
- 4) T-형 플랜지의 볼트간격을 조정한 결과, 볼트의 간격이 증가함에 따라 파손응력이 감소한다. 즉 볼트의 간격이 증가함에 따라 강도는 현저히 감소하며 이에 해당하는 프라잉 비는 증가한다.
- 5) T-형 플랜지의 구조에서 두께를 변화시킬 경우 기하학적 형상인(m/n) 및 플랜지 두께로부터 계산된 프라잉 비는 사용할 수 있으나 두께를 일정하게 하고 m/n 의 비가 1 이상인 경우, 즉 플랜지 중심으로부터 볼트까지의 거리가 볼트부터 플랜지

끝단까지 거리보다 긴 경우는 이론에 의한 프라잉 비를 사용하는 것은 무리가 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) H.K. Choi, S.M. Choi, "Structural Tensile Capacities of T-flange Connection with High Strength Bolts", Journal of KSSC, pp. 541 ~ 549, 2003.
- 2) D.H. Lee, J.T. Hwang, "Development of Beam-to-Column Connection Details with Horizontal Stiffeners in Weak Axis of H-shape Column", Journal of KSSC, Vol. 16, pp. 641 ~ 652, 2004.
- 3) J. Shen, A. Astaneh-Asl, "Hysteretic behavior of bolted-angle connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 51, pp. 201 ~ 218, 1999.
- 4) K.S. Murty, "Prying action in bolted steel circular flange connections", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 33, pp. 497 ~ 500, 2006.
- 5) S.M. Choi, S.H. Lee, and J.H. Kim, "An Experimental study on the Structural Characteristics of Tension Joints", Journal of KSSC, pp. 737 ~ 745, 2004.
- 6) S. Willibald, J.A. Packer, "Experimental Study of Bolted HSS Flange-Plate Connections in Axial Tension", Journal of American Society of Civil Engineers, Vol. 128, pp. 328 ~ 336, 2002.
- 7) D.C. Hennie, "Prying Action in Bolted Connections Steel Deserves More Attention", Journal of SAISC, Vol. 28, pp. 30 ~ 32.
- 8) H. Hadavinia, A.J. Kinloch, "The Prediction of Crack Growth in Bonded Joints under Cyclic-fatigue Loading II. Analytical and Finite Element Studies", International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 23, pp. 463 ~ 471, 2003.
- 9) G. Srinivasan, Terry. F. Lehnhoff, "Bolt Head Fillet Stress Concentration Factors in Cylindrical Pressure Vessels", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 123, pp. 381 ~ 386, 2001.
- 10) Akbar R. Tamboli, "Handbook of Structural Steel Connections: Design and Details", Technology, pp. 159 ~ 167, 1998.