

볼트로 접합된 인장 이음부의 거동

The Behavior of Tension Splices Fastened with Bolted Connections

최 병 정*

Choi, Byong-Jeong

Abstract

The paper presented results of the strength distributions and tension failure behaviors of splices subjected to tension forces. The bolting patterns in the tension splices are regular and staggered patterns in the research. The finite element analyses were carried out to examine the experimental results and evaluated the stress distribution patterns. The yield stresses, maximum tension stresses, stress distribution ratios, and effective net areas were analyzed through the tension experiments.

요 지

본 연구는 인장력을 받는 인장이음의 응력분포 및 인장파괴거동의 결과를 제시하였다. 본 연구에서 이음부의 볼트 배열방식은 정열배치와 엇모배치를 사용하였다. 실험값의 검증에 위해서 유한요소 해석을 실시하여 응력분포패턴을 파악하였다. 인장실험을 통해서 이음재의 항복 및 최대인장응력, 응력의 분포비, 유효단면적의 검토를 비교하여 차이점을 분석하여 보았다.

Keywords : Tension failures, staggered pattern, regular pattern, net section area, net section efficiency

핵심 용어 : 인장파괴, 엇모배치, 정열배치, 순단면적, 순단효율

* 정희원, 경기대학교 건축학부 교수

E-mail : bjchoi@kyonggi.ac.kr 031-249-9727

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2005년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 연구 배경 및 목적

본 연구는 인장력을 받는 스플라이스의 인장파괴를 유도하여 인장파괴단면의 응력분포거동을 관찰한 논문이다. 유효폭에 관한 연구는 Cochrane (1922)에 의해서 먼저 연구되었다. Gaylord, Salmon 은 엇모배치된 볼트의 유효폭을 $s/4g$ 로 제안했다(Gaylord et al., 1992 ; Salmon et al., 2003). Davis 등은 (Davis et al., 1939) 조인트의 수, 리벳의 줄수(rows of rivets), 탄소강과 망간강의 상대적 거동, 플레이트 조인트의 거동, 리벳의 줄에 미치는 하중의 영향(비율), 유효 순단면 거동 등을 연구하였다. Brady (1953)는 단면의 최소 및 최대의 가능성을 놓고 많은 실험을 하였다. 미국에서는 인장부재의 설계가 AISC(1961)에 반영되었다. 리벳과 볼트를 이용한 조인트의 순단면적 설계에 관한 실험은 Munse (1963)에 시작되었다. 순단면의 파괴 및 인장부재에서의 가셋플레이트의 거동에 대한 연구 및 응력의 예측에 관하여 연구가 진행되어 왔다(Hardash et al., 1985; Bennet et al., 1987 ; Kato, 2003).

본 연구에서는 인장 이음판이 정열배치와 엇모배치의 볼트로 각각 배열되었을 때의 인장파괴단면에서의 응력분포거동을 비교하여 살펴보고자 한다. 유한요소의 해석모델을 통해서 응력의 분포상황을 검토하였다. 실험을 통해 응력분포 및 인장파괴패턴을 검토하였다. 실험에 근거하여 미끄럼계수를 파악하고 Gaylord에 의해 제시된 공식을 실험값과 비교하여 추후 자료로 사용하고자 한다.

2. 해석 및 실험계획

2.1. 유한요소해석

유한요소해석은 인장 이음판(스플라이스)의 응력분포를 파악해보기 위해 실시하였다.

유한요소해석 프로그램은 범용프로그램인 STRAND 7 V.2.5를 사용하였다(Strand 7, 2001). 거동의 정확성을 높이기 위해서 8절점의 Solid를 사용하였고, 각 절점의 자유도 및 변위방향은 Fig. 1과 같다.

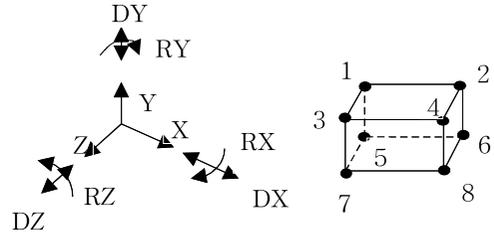


Fig. 1 8절점의 solid element

유한요소해석을 위해서 3D Continuum Element Group, Solid Continuum Element Subgroup, 6 Degree of Freedoms를 사용하였다. 이음부의 마찰계수는 0.45를 가정하였다. 만약 표면거칠기 50 이상의 blast 먼치리는 미끄럼계수가 0.45이상인 것으로 알려져 있다 (김상철, 2003). 접촉면의 마찰은 point contact element를 사용하여 이음판의 접촉을 고려하였다 (Fig. 2).



Fig. 2 정열배치 접촉면의 포인트콘택 요소

탄성-소성해석(Elastic-plastic analysis) 을 위해서 von Mises's 항복조건을 사용하였고, 응력-변형도는 소재시험에서 얻은 항복값인 294MPa를 사용하였고 포이슨비(Poisson's ratio)는 0.3을 사용하였다. 고장력볼트는 beam element를 사용하였고, 기준에 따라 표준볼트축력(1174.7 KN)을 도입하였다. Fig. 3에 정열배치와 엇모배치의 메쉬를 정리하였다.



Fig. 3 정열배치 및 엇모배치의 메쉬

2.2 소재시험

실험체 제작에 사용된 강재의 기계적 특성을 파악하기 위해서 쿠펜테스트를 실시하였다. 인장실험은 KS B 0801의 5호 실험편을 사용하였다. 사용한 스플라이스 두께는 4 mm 이다. 연신률, 항복강도 및 항복비는 모두 적절한 것으로 나타났다. Table 1에 소재 실험결과를 정리하였다. 고장력볼트의 축력은 여러 조건에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다(김진호, 1994 ; 김상섭, 1994, 김상섭 외2, 2000). 또한 과대슬롯의 여부에 따라 강도에 차이가 있는 것으로 연구된 바 있다 (노원경, 김진호, 최성모, 2004). 본 연구에서는 위의 영향은 고려하지 않았고, 볼트는 너트 회전조임을 하였다.

Table 1 강재의 인장강도 실험결과

강재, SS400	F _y	F _u	F _u /F _y	연신률
이음판, MPa	294.2	353.0	0.85	34.5

2.3 실험체의 형상

실험체의 가력은 981 KN의 만능 UTM을 사용하였다. 계측을 위해서 TDS-303을 이용하여 변형을 측정하였다. UTM에서 가력된 하중은 컴퓨터를 통해서 자동 계측되고, 변형은 동시에 TDS-303을 통해서 자동 계측된다. 천공은 숙련된 기능공을 통하여 정밀하게 천공하였다. 정열배치(regular pattern)와 엇모배치(staggered pattern) 실험체의 형상 및 규격을 Fig. 4과 Fig. 5에 나타냈다.

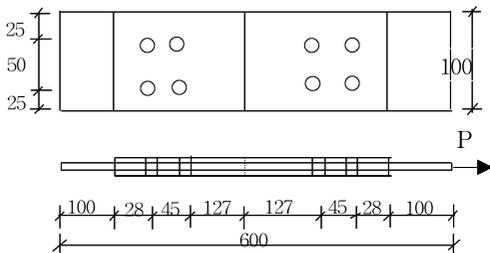


Fig. 4 정열배치 실험체의 형상

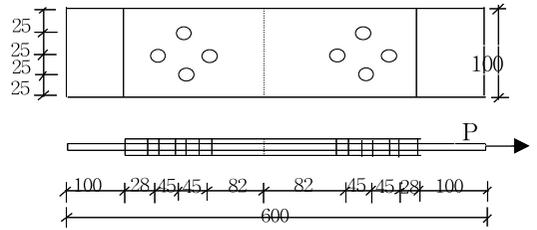


Fig. 5 엇모배치 실험체의 형상

실험체의 폭은 100 mm x 600 mm 폭으로 조정하였다. 미끄럼 하중은 다음의 식을 이용하여 산출한다.

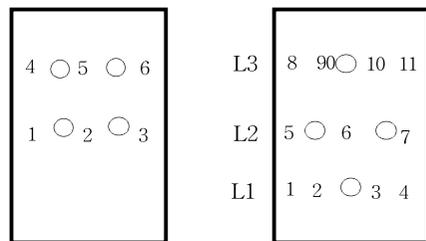
$$P_s = \frac{P_{slip} f}{n A V_f} \quad (1)$$

여기서, P_s:미끄럼 하중, n: 마찰면의 수, N_i: 볼트의 초기도입축력, u: 마찰계수 이다. 순단면비율은 Munse가 제시한 85%를 넘지 않도록 82%로 하였다. 정열배치와 엇모배치의 실험체의 호칭은 Table 2에 수록한 바와 같다.

Table 2 실험체의 호칭

볼트배치	Line	게이지번호	실험체 호칭
정열배치 (R1,R2,R3)	L2	1,2,3	R1L2, R2L2, R3L2
	L3	4,5,6	R1L3, R2L3, R3L3
엇모배치 (S1,S2,S3)	L1	1,2,3,4	S1L1, S2L1, S3L1
	L2	5,6,7	S1L2, S2L2, S3L2
	L3	8,9,10,11	S1L3, S2L3, S3L3

등분포하중방향(▲)



(a) 정열배치

(b) 엇모배치

Fig. 6 게이지의 부착위치, 번호, 하중방향

실험체는 이면전단을 받는 조건이고 게이지는 상부의 좌측하단에 부착하였다(Fig. 6). 하중은 등분포하중을 단부에 균등하게 점증가력 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석의 관찰

볼트의 배치형식에 따른 인장과괴거동을 살펴보기 위해서 유한요소 해석을 통해 전반적인 거동을 파악하였다.

유한요소해석의 결과를 Fig. 7에서 Fig. 10에 걸쳐 각각 도해하였다. Fig. 7에서 나타난 것과 마찬가지로 정열배치의 응력은 볼트주변에서 하중방향과 수직인 횡방향(transverse direction)에서 응력이 큰 것으로 나타났고 응력은 L3에서 약 371MPa에서 425MPa 정도로 나타났다. 이는 실험에서 얻은값과 유사한 값으로 파악되었다. 또한 L2에서는 게이지2의 위치에서 336MPa로 나타났다.

정열배치의 변형도(strain)값은 Fig. 8에 수록하였다. L3에서의 값은 약 0.0532에서 0.0960에 이르는 값으로서 실험값과 매우 유사한 값을 얻었다.

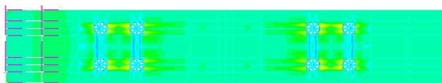


Fig. 7 정열배치의 Stress

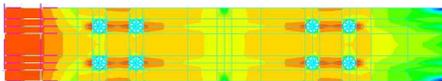


Fig. 8 정열배치의 Strain



Fig. 9 엇모배치의 Stress

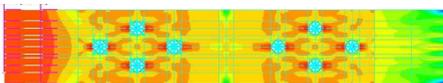


Fig.10 엇모배치의 Strain

Fig. 9는 엇모배치된 이음판의 응력분포를 설명해주고 있다. L3에서의 응력범위는 약 386MPa에서 475MPa의 범위에 있었다. Fig.10은 엇모배치 시험체의 변형도 분포를 나타내주고 있다. 변형도값은 L2에서 0.076에서 0.1176의 범위의 값으로서 실험값에 근접한 결과를 보였다. 유한요소의 해석에서는 엇모배치모델의 경우 유효순단면적이 적은 L2에서 큰 응력이 분포되는 합리적인 결과를 나타냈다.

3.2 시험체의 응력-변형도 거동

1) 정열배치의 응력-변형도 거동

정열배치의 각 실험체별 응력-변형도와와의 관계를 Figs. 11, 12 and 13에 각각 도해하였다. 실험결과 정열배치의 응력의 변화는 탄성구간에서는 선형적으로 증가하다가 항복후에 짧은 소성구간을 거친 후 변형도의 변화 구간이 길게 나타난 후 급격한 종국파괴를 일으키는 패턴을 나타냈다. Fig. 11에서 나타난 것처럼 R1의 항복강도는 358 MPa에서 항복하는 것으로 나타났고 최대응력은 약 481 MPa로 나타났다.

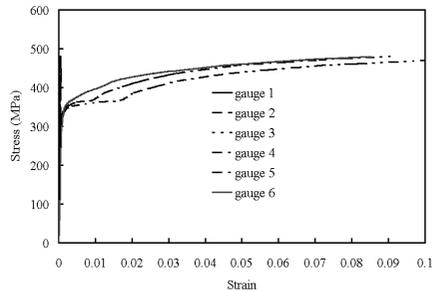


Fig. 11 R1실험체의 응력-변형도

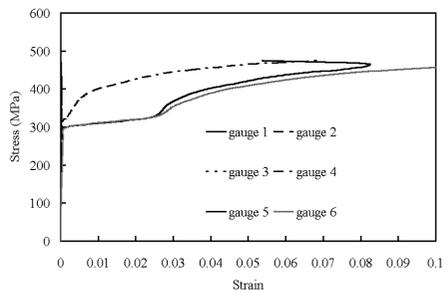


Fig. 12 R2 실험체의 응력-변형도

Fig. 12에서 항복응력은 약 307 MPa로 나타났고, 최대인장응력은 약 476MPa로 나타났다. Fig. 13에 R3의 결과에 의하면 항복응력은 약 378 MPa에서 발생하였고, 최대인장응력은 약 481MPa로 나타났다. 세 개의 정열배치 시험체의 L3에서의 평균 응력-변형도의 값을 Table 3에 정리하였다.

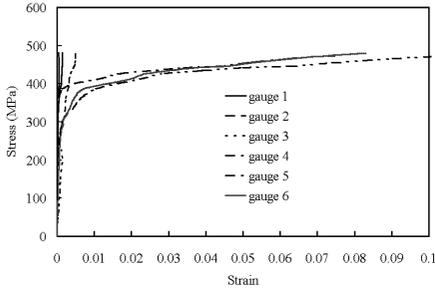


Fig. 13 R3 시험체의 응력-변형도



Photo 1 시험체의 파괴전후

파괴모드의 관찰에서는 지압파괴가 발생하지 않도록 시험체를 준비하였으므로 지압파괴는 어느 시험체에서도 발생하지 않았다.

Table 5 정열배치 시험체의 각 게이지 번호에서의 평균 응력, L3 (MPa)

시험체 및 게이지번호	R1	R2	R3	평균
	g4	g4	g4	
	g5	g5	g5	
	g6	g6	g6	
항복강도, F_y	353	316	383	348
	353	302	373	
	368	302	378	
인장강도, F_u	481	476	481	481
	481	476	481	
	481	476	481	

2) 엇모배치의 응력-변형도 거동

엇모배치의 형태로 볼트접합된 인장부재의 접합거동은 Fig. 14부터 Fig. 16까지 수록하였다. 엇모배치 시험체의 평균 항복강도는 374.60 MPa로 나타났고 평균 최대 인장강도는 552.10 MPa로 나타났다. 엇모배치의 L1, L2, L3에서의 평균응력-변형도 관계는 시험체 S1과 S2에서도 비슷한 거동을 나타냈다. 볼트가 엇모배치로 접합된 부재의 인장과피로거동도 L3에서의 순단면 파괴로 이어짐을 확인하였다. 이는 이론상으로는 순단면이 작은 L2보다는 비록 순단면이 크더라도 하중이 먼저 전달되는 하중경로 L3가 먼저 파단된 경우로 보인다.

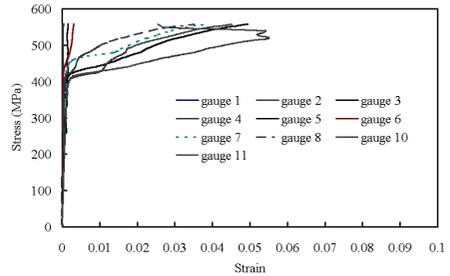


Fig. 14 S1 시험체의 응력-변형도 거동

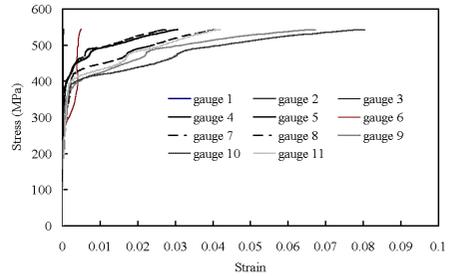


Fig. 15 S2 시험체의 응력-변형도

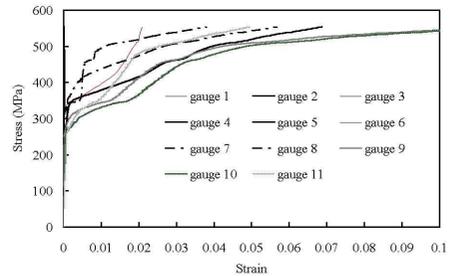


Fig. 16 S3 시험체의 응력-변형도

3.3 시험체의 응력분포비의 관찰

S1, S2, 및 S3의 시험체에서 나타난 공통적인 특성중의 하나는 응력의 분포비이다. Davis의 결과에서 보면 가까운 볼트(L3)에 응력이 먼저 전달되고 하중 면에서 먼 볼트(L1)일수록 본 실험에서는 하중에 대한 응력분포비가 낮아진다는 사실이다.

Table 4는 정열배치 R2 시험체의 예이다. 정열배치의 평균응력은 하중이 우선적으로 전달되는 게이지(4,5,6)에서 나타난 L3의 평균 응력값을 의미한다. L3의 응력을 L3의 응력 값으로 나누어서 무차원화시켰다(normalization). 파괴시 L3에 100%의 응력이 전달될 때 L2에는 약 2.27%(L2평균응력/L3평균응력)의 응력만이 전달되었음을 알 수 있다. Table 5는 엇모배치의 S2 시험체를 정리해 보았다. 엇모배치의 평균응력은 하중이 우선적으로 전달되는 게이지(8,9,10,11)에서 나타난 L3의 평균 응력값을 의미한다. L2 및 L3에 각각 60% 및 11%의 응력만이 전달됨을 알 수 있다(Table 5). 이는 Davis의 경우처럼 값은 다르지만 분포패턴은 점점 줄어드는 같은 유형이었다.

Table 4 정열배치시 R2의 평균 응력분포

하중, MPa	L3	L2
파괴시, (481)	100%	2.27%

Table 5 엇모배치시 S2의 평균응력분포

하중, MPa	L3	L2	L1
인장 파괴시, (554)	100%	60%	11%

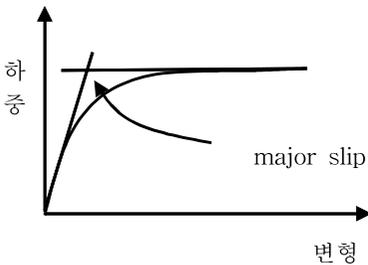


Fig. 17 미끄럼 하중의 추정

3.4 미끄럼계수의 관찰

일반적인 강재에서 미끄럼(slip)이 시작하는 미끄럼 하중은 식(1)을 이용하여 실험체별로 정리하였다. Fig. 17은 미끄럼하중을 bilinear를 이용해서 구하였다.

정열배치(Table 6)와 엇모배치(Table 7)의 평균 마찰계수는 0.61과 0.64로서 엇모배치 실험체의 마찰계수가 약간 높게 평가되었다.

3.5 Efficiency의 검토

인장이음에서 평균응력이 항상 파괴응력과 유사하게 나타나지는 않는다. 즉 응력감소가 나타나게 되는데 이를 순단면의 효율(Net section efficiency)라고 한다. 순단면효율에 영향을 미치는 계수는 강재의 연성(K1), 흠을 만드는 방법(K2), 파스너직경에 대한 게이지 비율(K3), 베어링비(순단면적/파스너의 베어링지압면적)(K4) 및 다른연결부재에 대한 총단면적의 분배 등 이다.

유효면적은 따라서 다음과 같이 약산할 수 있다 (Gaylord, 1992).

$$A_e = K1K2K3K4A_n \quad (2)$$

Table 6 미끄럼계수(정열배치)

항목	미끄럼하중, MPa (KN)	미끄럼계수, μ
R1L3	358(143.2)	0.62
R2L3	307(122.8)	0.54
R3L3	378(151.2)	0.66
평균	348(139.2)	0.61

Table 7 미끄럼계수(엇모배치)

항목	미끄럼하중, MPa (KN)	미끄럼계수, μ
S1L3	401(160.4)	0.7
S2L3	392(156.8)	0.68
S3L3	309(123.6)	0.54
평균	375(150.0)	0.64

K1은 $0.82+0.0032R$ (단면감소율, R)이고, K2는 드릴을 이용하였으므로 1.0이다. K3는 1.6~70% (A_1/A_2)를 사용하였다. K4는 $1-(x/L)$ 로 구할 수 있다. Gaylord가 제시한 이론식에 비추어 봤을때 실험값과 이론값에 의한 유효단면적을 검토한 결과 정열배치 (Table 8) 및 엇모배치 (Table 9) 모두에서 실험에 의한 유효단면적은 낮은 것으로 평가 되었다.

Table 8 유효단면적비교 (정열배치)

항목	K				$A_{b,f}$	$A_{b,f}$	
	K1	K2	K3	K4		식(2)	$\frac{T_u}{F_u}$ 실험
R1L3	0.832	1.0	1.152	0.7	2.56	2.482	1.817
R2L3	0.832	1.0	1.152	0.7	2.56	2.482	1.798
R3L3	0.832	1.0	1.152	0.7	2.56	2.482	1.816
평균	-				-	2.482	1.810

Table 9 유효단면적비교 (엇모배치)

항목	K				$A_{b,f}$	$A_{b,f}$	
	K1	K2	K3	K4		식(2)	$\frac{T_u}{F_u}$ 실험
S1L3	0.081	1.0	1.026	1.0	3.28	2.763	2.114
S2L3	0.081	1.0	1.026	1.0	3.28	2.763	2.0983
S3L3	0.081	1.0	1.026	1.0	3.28	2.763	2.085
평균	-				-	2.763	2.099

4. 결론

본 연구에서는 정열배치와 엇모배치로 배열된 인장부재의 인장실험에 대한 응력-변형도 거동을 연구하였다. 본 실험체의 경우 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 유효요소해석을 통해서 분석한 결과 해석의 응력분포와 실험의 응력분포는 유사하게 나타났다.
- 2) 본 실험조건에서 나타난 응력을 고려한 관찰결과 같은 개수의 볼트를 사용하되 볼트의 배치형식을 달리한 경우 엇모배치 실험체의 응력이 약간 높게 나타난 것으로 조사되었다. 항복강도를 기준으로 약 7%의 응력차이가 발생하였다.

- 3) 응력의 분포비의 조사결과 하중에 인접한 볼트이음부에서 먼저 인장과괴는 결과를 나타냈듯이 L3, L2, L1의 순으로 응력이 전달되는 것을 파악하였다.
- 4) 미끄럼계수의 평가결과 정열배치와 엇모배치가 비슷한 결과이였지만, 엇모배치의 실험체가 약간 높은 값 (약 4.6%의 차이)을 나타내었다.
- 5) Gaylord에 의한 유효단면적 이론식과 실험의 분석결과, 본 실험의 경우 엇모배치의 이론값이 실험값보다 더 높게 평가(약 13%)된 것으로 보인다.

연구의 한계

본 연구에서는 예산과 실험의 많은 미비점으로 인하여 보다 광범위한 실험을 하지 못하였다. 따라서 볼트 간격, 볼트열의 수, 볼트의 접합방식, 케이지의 폭, 등을 종합적으로 고려한 많은 실험이 이루어 져야 한다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2002학년도 경기대학교 학술연구비 지원 (과제번호 2002-089)에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김상철, 철골공사 공장제작, 강구조학회지, Vol. 15, No.4, December 2003, pp. 20-33.
2. 김진호, "고력볼트의 마찰접합에 관한 기초적 연구", 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 1994. 10.
3. 김상섭, 고력볼트 및 T/S 볼트시공지침, 동부건설 연구소, 1994.2.
4. 김상섭, 김영호, 김규석, "고력볼트의 여유나사길이에 따른 조임력평가연구", 대한건축학회논문집, 구조계, 16권 5호, 5월호 2000, pp.11-18.
5. 노원경, 김진호, 최성모, "과대구멍 또는 슬롯구멍을 갖는 고력볼트 마찰이음부의 거동에 관한 실험적 연구", 한국강구조학회 학술발표논문집, 제15권1호, 2004, pp. 138-114.
6. Cochrane, V.H., "Rules for Rivet Hole Deductions in Tension Members", Engineering News-Record,

-
- No. 89, 1922, pp. 847-848.
7. Gaylord, E.H., et al., Design of Steel Structures, Third Edition, Mc. Graw Hill, 1992. p.131.
 8. Salmon, C.G. and Johnson, J.E. Steel Structures, Haper Collins, 2003. p. 76.
 9. Davis, Raymond E., Woodruff, Glenn B., and Davis, Harmer E., "Tension Tests of Large Riveted Joints", American Society of Civil Engineers, ASCE, May, 1939. pp. 805-857.
 10. Brady, Gordon W., and Drucker, Daniel C., "Investigation and Limit Analysis of Net Area in Tension", No. 296, 1953. pp.1133-1154.
 11. AISC, Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings, AISC, 1961.
 12. Munse, W. H., and Chesson, Jr. E., "Riveted and Bolted Joints: Net Section Design", Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ST13, 1963. pp. 107-125.
 13. Hardash, S. G. et al., "New Design Criteria for Gusset Plates in Tension", Engineering Journal, AISC, 2nd Quarter, 1985.
 14. Bennet, R. M and Shima Najem-Clark F., "Reliability of Bolted Steel Tension Members", Journal of Structural Engineering, ASCE, No. 109, 1987. pp. 1865-1872.
 15. Kato, Ben, "Unified Strength Evaluation of Bolted Joints of Shapes", International Journal of Steel Structures, Volume 3, Number 3, September 2003. pp.145-154.
 16. Strand 7, Strand 7 Program Manual, V.2.5., 2001.

(접수일자 : 2004년 6월 8일) (금행)