

페라이트계 스테인리스강 2행 2열 일면전단 볼트접합부의 최대내력평가

김지훈¹⁾ · 김태수^{2)*} · 강현식³⁾

¹⁾ 사원, 금성백조, 공사팀 ²⁾ 부교수, 한밭대학교, 건축공학과 ³⁾ 정교수, 경남과학기술대학교, 건축공학과

Ultimate Strength Estimation of Ferritic Stainless Steel Single Shear Bolted Connections Fastened with Four Bolts

Kim, Ji Hun¹⁾ Kim, Tae Soo^{2)*} Kang, Hyun Sik³⁾

¹⁾ Engineer, Construction Team, Kumsung Baekjoe, Seongnam, 463-440, Korea

²⁾ Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

³⁾ Professor, Department of Architectural Engineering, GyeongNam National University of Science and Technology, Jinju, 660-758, Korea

ABSTRACT : The purpose of this study is to investigate the ultimate strength and curling influence using finite element analysis based on the previous test results of ferritic stainless steel bolted connections. Results obtained from finite element analysis (FEA) were compared with those of test results and the validity of numerical modeling was verified. The conditions of curling occurrence for edge/end distance were investigated and ultimate strength reduction ratio caused by curling was estimated quantitatively. Moreover, the ultimate behaviors such as fracture mode and ultimate strength by FEA were compared with those predicted by current design specifications such as AISC, KBC2009, AIJ and AISI.

KEYWORDS : ferritic stainless steel, bolted connection, curling, ultimate strength, design code, finite element analysis

1. 서론

1950년대 중반 열간압연강 스테인리스강과 Johnson & Winter^[1]의 냉간성형(박판) 스테인리스강에 대한 연구를 시작으로 많은 연구가 진행되고 있다. AISI(미국철강협회)에서는 냉간성형 스테인리스강 구조부재의 설계기준을 최초로 제정^[2]하고, 그 이후 많은 연구자들에 의해 각국의 설계기준이 개정·보완되었으며, 그 결과로 각국에서 냉간성형 스테인리스강의 설계기준이 제정되었다. 특히, Kuwamura 등^{[3],[4]}은 하중직각방향 연단거리를 고정시키고, 볼트배열, 하중방향 연

단거리, 판두께 및 전단전합종류를 변수로한 평판의 전단접합부 단순인장 실험을 실시하였다. 이후 Kuwamura 등의 실험 결과를 바탕으로 Kim 등^[5]에 의해 박판 볼트접합부의 구조적 거동, 면외변형의 발생 메카니즘 및 면외변형이 접합부의 내력에 미치는 영향을 조사하는 연구가 수행되었고, 경량건축물에 주로 사용되는 탄소강을 바탕으로 2행 2열 볼트접합부 최대내력과 면외변형이 일면전단 볼트접합부의 구조적 거동에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험도 수행되었다^[6]. 김민성 등^[7]은 오스테나이트계 스테인리스강 앵글볼트 접합부의 내력에 관한 실험적 연구가 수행되었고, 면외변형이 발생한 접합부에 대해 하중방향 연단거리 제한치를 두는 수정내력식을 제안하여 내력예측정도가 개선되었다. 또한, 김태수 등은 페라이트 스테인리스강 이면전단 볼트접합부에 있어 볼트배열에 따른 블록전단파단내력식을 제안하였다^[8].

본 연구에서는 김민성 등에 의해 수행된 박판 페라이트계 스테인리스강(니켈이 함유되지 않은 저가형) 일면전단 볼트 접합부에 관한 기존실험결과^{[9],[10]}를 바탕으로 유한요소해석

Note.-Discussion open until June 30, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 19, 2013; revised November 24, 2013; approved on November 26, 2013. © KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-42-821-1121 Fax. +82-42-821-1590
E-mail: tskim@hanbat.ac.kr

법을 이용하여 페라이트계 스테인리스강의 2행 2열 볼트접합부의 최대내력과 면외변형의 영향을 조사하자한다. 우선, 접합부의 종국거동을 예측하기 위한 유한요소해석법의 타당성을 검증하고, 하중직각방향 및 하중방향 연단거리에 대한 변수해석을 실시해 해석결과를 비교, 검토한다. 하중방향 연단거리와 하중 수직방향 연단거리에 따른 면외변형 발생 조건을 조사하고, 면외변형에 따른 내력저하정도를 평가한다. 또한, 해석결과로 얻어진 접합부의 내력과 현행설계기준식에 의한 내력을 비교하여 설계식의 적용성을 고찰한다.

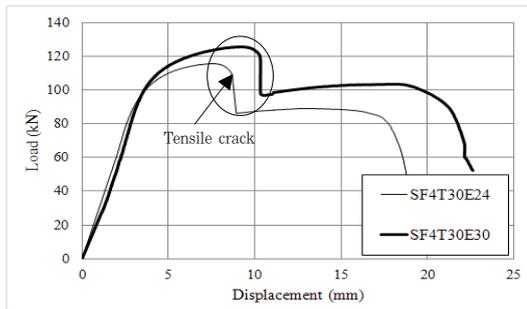
2. 기존연구의 실험개요

페라이트계 김민성 등⁽⁹⁾에 의해 수행된 페라이트계 스테인리스강(STS430) 2행 2열 볼트배열의 일면전단 볼트접합부의 하중방향 연단거리를 변수로 갖는 박판 볼트접합부의 최대내력과 면외변형에 관한 실험적 연구결과를 Table 1에 정리하였다. 페라이트계 스테인리스강(STS430) 일면전단 볼트접합부의 최대내력과 면외변형의 발생여부를 조사하기 위해 실시된 실험은 하중방향 연단거리(e)에 따른 볼트접합부의 파단양상과 면외변형 영향에 대해 고찰되었다. 접합 평판의 블록전단파단 형태의 접합부를 유도하기 위하여 하중직각방향의 연단거리($b=60\text{mm}$)를 충분히 길게 계획하였다. 접합부 평판두께(t)는 3.0mm , 볼트직경(d)는 12mm , 볼트구멍직경(ϕ)은 13mm , 피치(p)와 게이지(g)는 볼트구멍직경의 3배인 36mm 로 고정시켰다. 주요 변수인 하중방향 연단거리(e : 볼트직경 d 의 배율)를 Table 1과 같이 변화시켜 실험체를 제작하였다.

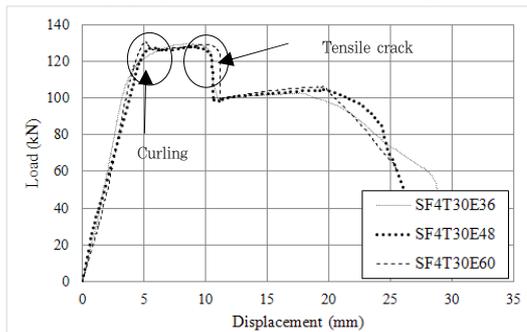
면외변형이 발생하지 않은 블록전단 파단된 실험체에서는 하중방향 연단거리(e)가 증가함에 따라 내력(P_{ue})도 증가한 반면(Fig. 1(a)참조), 면외변형이 관찰되고 최대내력이 면외변형에 의해 결정된 실험체에서는 파단형태와 무관하게 하중방향 연단거리가 증가함에 따라 내력에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(Fig. 1(b)참조).

Table 1. Specimen list and test results

Specimen	End distance [mm] e	Ultimate strength P_{ue} [kN]	Curling	Fracture mode at ultimate strength	Fracture mode at test end
SF4T30E24	24	115.84	-	Tensile crack	Block shear fracture
SF4T30E30	30	125.83	-	between two bolts	
SF4T30E36	36	129.36	○	Curling	
SF4T30E48	48	127.79	○		
SF4T30E60	60	129.85	○		



(a) Specimens without curling



(b) Specimens with curling

Fig. 1 Load-displacement curves of test results

3. 유한요소해석

접합부에서 발생한 면외변형에 의한 영향을 검토하기 위해 추가실험이 아닌 수치해석 모델을 적용한다. 비선형해석프로그램인 ABAQUS를 사용하여, 페라이트계 스테인리스강(STS430) 2행 2열 볼트접합부에 대한 유한요소해석모델을 구축하고, Kim 등⁽⁵⁾에 의해 수행된 연구를 참고하여, 접합부의 거동과 동일한 거동특성을 나타내기 위해서 다음과 같은 해석조건 및 모델링 방법을 토대로 볼트접합부의 본 해석 연구를 수행한다.

3.1 접합부 모델링

유한요소해석모델은 기하비선형을 고려하고, 8개의 절점을 가진 저감적분(Reduced Integration)요소인 C3D8R을 적용하였다. 해석모델은 Fig. 2와 같이 모델을 설정하였다. 길이는 최대내력과 파단모드에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 해석시간을 단축할 수 있는 150mm 로 하였다. 볼트의 파단에 대해서는 고려하지 않는 것을 가정하여 변형이 발생하지 않는 강제요소(rigid cylindrical body)로 한다. 너트와 와서의 구속효과를 고려하여 볼트구멍 벽을 판 두께방향 변위를 구속한다. 평판의 매쉬는 볼트 구멍 주변 30mm 영역을 판 두께(t)를 기준으로 두께방향에 대해서는 3등분하고, 표면에 대해서는 1.0mm 메쉬 크기로 분할한다.

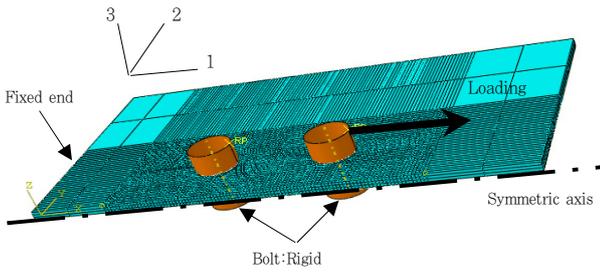


Fig. 2 Analysis model and conditions

3.2 재료모델

기존실험^[9]으로 얻어진 Fig. 3의 페라이트계 스테인리스강(STS430)의 응력도-변형도 곡선으로부터 알 수 있듯이 탄성구간을 지나 소성구간에서는 재료의 비선형을 나타내는 것을 알 수 있다. 해석모델의 재료데이터는 인장시험편의 실험결과로 얻어진 공칭응력도-공칭변형도($\sigma_n - \epsilon_n$) 값을 식 (1)과 식 (2)을 이용하여 하중 및 하중직각방향의 인장시험편의 단면적의 변화가 고려된 진응력도-진변형도($\sigma_t - \epsilon_t$) 값으로 변환한다. 그리고 탄성영역이후의 소성거동은 식 (3)에 따라 전체변형도(ϵ_t)에서 탄성변형도(ϵ_{et})를 공제한 소성변형도(ϵ_{pl})를 입력한다.

$$\sigma_t = \sigma_n (1 + \epsilon_n) \quad (1)$$

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_n) \quad (2)$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_t - \epsilon_{et} = \ln(1 + \epsilon_n) - \frac{\sigma_t}{E} \quad (3)$$

재료인장시험으로부터 얻어진 강재의 탄성계수(E), 항복강도(F_y), 인장강도(F_u) 등의 기계적 성질은 Table 2에 정리한다.

3.3 경계조건

Fig. 2의 평판모델의 좌측단부는 고정단으로 하고, 해석시간을 고려해 2행 2열 접합부의 절반만 모델링 하고 1-3면에 대칭경계조건을 지정한다. 볼트요소에 동일한 강제변위와 구속조건을 지정하기 위해 강재요소에 기준점을 설정하고, 볼트의 회전 및 기울어짐을 방지하기 위하여 하중방향 변위(U1)만을 허용한다.

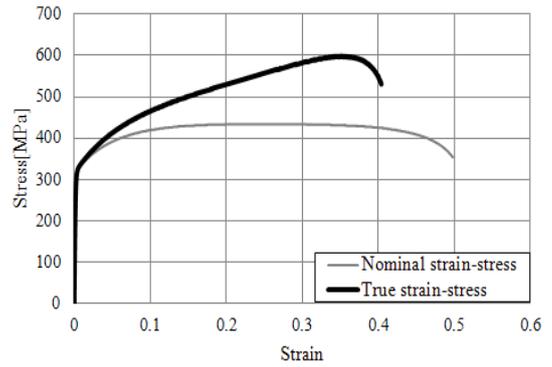


Fig. 3 Stress-strain curves for ferritic stainless steel (STS430)

Table 2. Tensile coupon test results for STS430 material

Plate thickness t [mm]	Young's modulus E [GPa]	Yield stress σ_y [MPa]	Tensile stress σ_t [MPa]	Yield ratio σ_y/σ_u YR [%]	Elongation EL [%]
3.0	163.63	304.73	433.81	70.25	38.00

3.4 면외변형 및 변형도 측정

기존의 실험결과로부터 면외변형은 박판 볼트접합부의 내력저하에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 기존 실험에서와 같은 Fig. 5와 같이 해석에서도 볼트중심으로부터 하중방향 연단거리 방향으로 30mm 떨어진 지점에 참조점을 설치해서 그 지점의 3축방향의 변형(평판 두께방향)을 측정한다.

4. 실험결과와 유한요소해석결과의 비교

유한요소해석법을 이용하여 페라이트계 스테인리스강(STS430) 일면전단 볼트접합부의 파단형태 및 최대내력을 예측하기 위해 Table 1의 실험체를 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. 실험 중에 하중-변위 곡선상에서 관측된 최대내력(P_{ue}) 부근의 인장파단형상과 실험종료시점에서의 전형적인 블록전단파단 및 면외변형양상과 해석결과로부터 얻어진 응력분포 및 면외변형을 Fig. 4에 나타낸다.

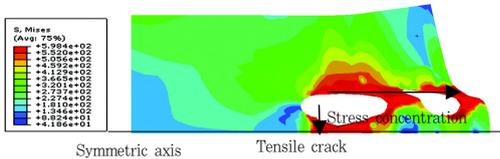
4.1 최대내력과 파단형태

기존 실험결과와 해석에 의한 결과의 최대내력, 파단형태, 면외변형 발생여부를 비교한 것을 Table 3에 정리하였다. 실험의 최대내력에 대한 해석의 최대내력비(P_{ua}/P_{ue})는 0.93 ~ 1.04범위를 나타냈고, 평균치는 0.97로 양호한 대응을 보여주고 있다.

하중방향 연단거리(e)가 30mm이하의 경우 전형적인 블록전단파단(Fig. 4(a), Fig. 4(b))이 발생하였고, 48mm이상일 경우는, 면외변형(Fig. 4(c), Fig. 4(d))이 동반된 것을 알 수 있었다. 하중방향 연단거리가 36mm인 경우 실험 결과에서는 면외변형 후 볼트 간 인장파단이 일어났지만, 해석 결과에서는 면외변형이 일어나지 않고 블록전단파단이 발생한 것을 알 수 있었다.



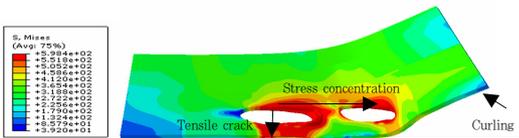
(a) at ultimate strength point / at test finishing point (SF4T30E24)



(b) SF4T30E24 (at ultimate strength point, $P_{ua}=109.41$)



(c) at ultimate strength point / at test finishing point (SF4T30E60)



(d) SF4T30E60 (at ultimate strength point, $P_{ua}=134.86$ kN)

Fig. 4 Fracture shape and stress distribution of test and analysis

Table 3. Comparison of previous test results and analysis results

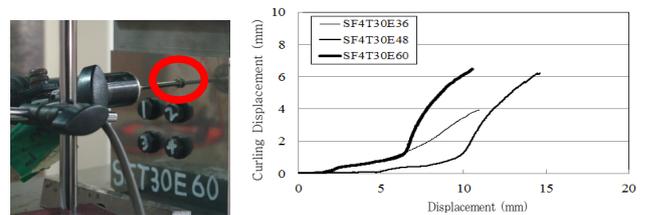
Specimen	Test			Analysis			Strength ratio P_{ua}/P_{ue}
	P_{ue} [kN]	Fracture mode	Curling	P_{ua} [kN]	Fracture mode	Curling	
SF4T30E24	115.84	BS	-	109.41	BS	-	0.94
SF4T30E30	125.83	BS	-	117.03	BS	-	0.93
SF4T30E36	129.36	BS	○	124.82	BS	-	0.96
SF4T30E48	127.79	BS	○	122.81	BS	○	0.96
SF4T30E60	129.85	BS	○	134.86	BS	○	1.04
Average							0.97
COV							0.04

전형적인 블록전단파단이 발생한 실험체는 볼트 사이의 순단면 인장파단으로 최대내력이 결정되었으며, Fig. 4와 같이 해석결과의 최대내력시점의 응력분포로부터 하중연단으로부터 멀리 있는 볼트사이와 하중방향으로 볼트게이지 라인상에 응력집중이 발생 하는 것을 알 수 있다. Fig. 4(a)에서 좌측 실험체 파단형상은 실험의 최대내력시점 직후($P_{ue}=115.84$ kN) 실험도중 촬영된 하중직각방향의 볼트사이에 인장파단 양상이며, Fig. 4(b)는 해석에서의 최대내력시점($P_{ua}=129.85$ kN)의 인장파단 및 볼트 게이지 라인상에 응력집중이 발생한 형상을 나타낸다.

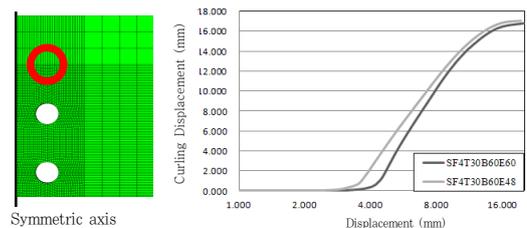
4.2 면외변형 및 변형도 변화

Fig. 4(c)는 실험에서 SF4T30E60 실험체의 최대내력시점($P_{ue}=129.85$, Fig. 1 (b)참조)과 실험종료시점에서의 파단형상이다. 최대내력시점에서 면외변형 발생이후 최대내력이 결정되었고, 그 이후, 강제변위를 계속 증가시켰을 때 볼트사이에서 인장파단이 나타났다. Fig. 4(d)는 SF4T30E60 실험체의 최대내력시점의 해석결과의 응력분포 형상이다. 실험결과와 같이 최대내력시점에서 면외변형이 발생한 후, 연단에서 멀리 있는 볼트사이의 인장파단이 발생하였다.

면외변형의 크기를 측정하기 위해 Fig. 5(a)와 5(b)에서 좌측 그림에 표시된 부분(볼트 중심에서 연단거리방향의 30mm 위치)의 판두께 방향으로 증가하는 변위를 측정하였다. Fig. 5(a)에서 실험에서 강제변위가 증가함에 따라 면외변형량이 증가하는 것을 알 수 있고, Fig. 5(b)의 해석결과에서도 강제변위의 증가에 따라 면외변형 크기가 증가하였다.



(a) test



(b) analysis

Fig. 5 Measuring location of curling and displacement-curling relationship

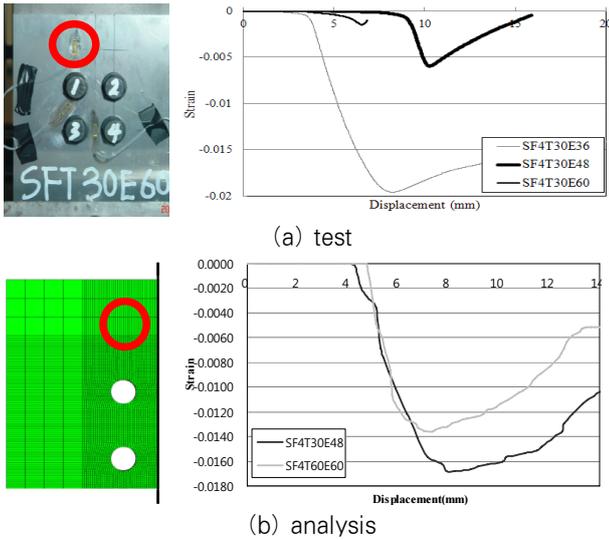


Fig. 6 Measuring location of strain and displacement-strain relationship

해석결과에서 하중방향 연단거리 36mm인 접합부에서는 면외변형이 발생하지 않았고, 해석과 실험 모두에서 면외변형이 발생한 실험체 SF4T30E48과 SF4T30E60의 결과를 비교하였다. Fig. 5(a)와 5(b)에서 하중방향 연단거리가 48mm에서 60mm로 증가할수록 평판이 두께방향으로 더 많은 양의 면외변형이 발생하고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 6(a)와 6(b)는 실험과 해석에서 각 좌측 그림에 표시된 부분(볼트 중심에서 하중방향 연단거리방향에서 30mm 떨어진 위치)에 변형도값을 측정하였고, 강재변위- 변형도 관계를 나타낸다. 실험과 해석결과에서 초기에 압축변형도가 증가하다가 면외변형이 발생한 이후 압축변형도가 감소하는 경향을 보였다. 또한, 하중방향 연단거리가 증가할수록, 면외변형이 조기에 발생하여 낮은 압축 변형도를 나타내고 있다.

5. 연단거리에 대한 변수해석

볼트접합부의 최대내력 및 구조거동을 실험 이외의 연단거리에 대해 조사하기 위해 Table 4와 같이, 하중방향 연단거리 ($e=24\sim60\text{mm}$)와 하중직각방향 연단거리($b=36\sim60\text{mm}$)를 변수로 하여 추가적인 유한요소해석을 실시하였다. 그리고, 면외변형이 발생한 해석모델에 연단에서 두께방향의 변위(U3)를 구속시켜 해석을 수행하여 두께방향변위를 고정시키지 않은 해석모델과의 최대내력을 비교하여 면외변형이 접합부의 최대내력에 미치는 영향을 조사하였다.

5.1 최대내력과 파단형태

해석결과로부터 얻어진 최대내력 및 파단형태를 Table 4

에 정리한다. 최대내력은 하중 변위 곡선상에서 하중의 최대값이고, 파단형태의 표시는 순단면파단(Net-section fracture: N), 블록전단파단(Block shear fracture: BS)으로 표시한다. 실험체명의 끝에 R이 붙는 실험체는 유한요소해석시 평판 두께방향(U3)의 변위를 고정(면외변형 미발생)한 것이다.

하중직각방향 연단거리(b)가 36mm인 것 중 하중방향 연단거리(e)가 30mm이상의 해석모델에서는 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이, 순단면파단(N)이 발생하였고, 하중직각방향 연단거리(b)가 42mm인 것 중 면외변형이 발생한 실험체에서 두께방향의 변위(U3)를 고정시킨 모델과의 파단형태를 비교하였을 때 Fig. 7(b), 7(c)에서 보는 바와 같이 파단형태가 상이했다. 하중직각방향 연단거리(b)가 48, 56mm인

Table 4. Parametric analysis results

Analysis model (Specimen)	e (mm)	b (mm)	Ultimate strength P_{ua} (kN)	Curling	Fracture mode at ultimate strength	Fracture mode at test end	
SF4T30B36E24	24	36	104.02	X	Tensile crack between two bolts	BS	
SF4T30B36E30	30		108.77	X		N	
SF4T30B36E36	36		110.30	X		N	
SF4T30B36E48	48		110.92	X		N	
SF4T30B36E60	60		111.03	X		N	
SF4T30B42E24	24	42	105.734	X	Tensile crack between two bolts	BS	
SF4T30B42E30	30		113.66	X		BS	
SF4T30B42E36	36		115.47	O	Curling	BS	
SF4T30B42E48	48		119.14	O		BS	
SF4T30B42E60	60		115.91	O		BS	
SF4T30B42E36R	36	48	119.99	X	Tensile crack between two bolts	N	
SF4T30B42E48R	48		125.70	X		N	
SF4T30B42E60R	60		130.92	X	N		
SF4T30B48E24	24		54	106.98	X	Tensile crack between two bolts	BS
SF4T30B48E30	30			114.8	X		BS
SF4T30B48E36	36	122.04		O	Curling	BS	
SF4T30B48E48	48	121.46		O		BS	
SF4T30B48E60	60	120.36		O		BS	
SF4T30B48E36R	36	60	122.6	X	Tensile crack between two bolts	BS	
SF4T30B48E48R	48		140.39	X		N	
SF4T30B48E60R	60		135.02	X	N		
SF4T30B54E24	24		60	107.04	X	Tensile crack between two bolts	BS
SF4T30B54E30	30			115.56	X		BS
SF4T30B54E36	36	124.2		O	Curling	BS	
SF4T30B54E48	48	125.59		O		BS	
SF4T30B54E60	60	131.19		O		BS	
SF4T30B54E36R	36	60	124.28	X	Tensile crack between two bolts	BS	
SF4T30B54E48R	48		139.35	X		BS	
SF4T30B54E60R	60		150.54	X	N		
SF4T30B60E24	24		60	109.41	X	Tensile crack between two bolts	BS
SF4T30B60E30	30			117.03	X		BS
SF4T30B60E36	36	124.82		X	Curling	BS	
SF4T30B60E48	48	122.81		O		BS	
SF4T30B60E60	60	134.86		O		BS	
SF4T30B60E36R	36	60	124.55	X	Tensile crack between two bolts	BS	
SF4T30B60E48R	48		139.60	X		BS	
SF4T30B60E60R	60		154.01	X	BS		

것 중 하중방향 연단거리(e)가 36mm의 경우 종국상태에서 Fig. 7(d)에서와 같이 볼트간 인장파단이 일어난 후, 면외변형이 발생하여 최대내력에 영향을 주지 않았고, Fig. 7(e)에서와 같이 면외변형후에 볼트간 인장파단이 발생하여 면외변형이 최대내력에 영향을 미친 두가지 형태의 파단형상을 나타냈다.

5.2 면외변형과 발생조건

볼트접합부의 주요변수인 하중방향 및 하중직각방향 연단 거리에 따라 면외변형의 발생양상이 상이하다는 것을 실험

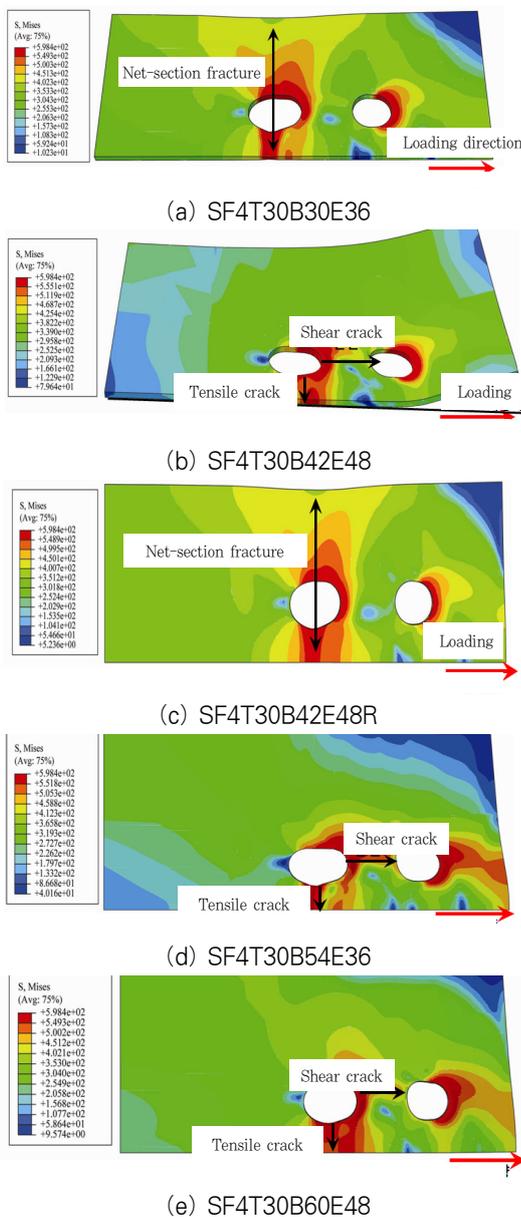


Fig. 7 Stress distribution of analysis results at ultimate strength point

및 해석결과의 분석을 통해 파악할 수 있었다. 그래서, 본 절에서는 발생한 면외변형이 접합부의 최대내력에 미치는 영향을 조사하기 위해 면외변형이 발생한 실험체의 두께방향 변위(U3)를 구속시킨 해석모델을 상정하고, 두께방향 변위가 고정되지 않은 해석모델의 최대내력과 비교하였다.

평판 두께방향 변위(U3)를 구속모델의 해석결과($PuaR$)를 Table 5에 정리하였다. 면외변형이 구속되지 않은 해석 최대내력(Pua)을 두께방향 변위(U3)를 구속한 최대내력($PuaR$)으로 나누어 최대내력비($Pua/PuaR$)로 나타냈다. B42, B48, B54, B60계열의 경우는 최대내력비($Pua/PuaR$)가 0.87~0.96의 범위로 전체적으로 하중방향 연단거리(e)가 증가함에 따라 면외변형에 의한 내력저하폭이 증가하였다. 하중방향 연단거리(e)가 36mm인 실험체의 경우, 면외변형에 의한 내력저하정도가 0%~4%로 미비하였지만, e 가 48mm이상의 실험체들은 5%~13%로 면외변형에 의한 내력저하정도가 높았다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 두께방향변위가 고정된 해석모델(면외변형 미발생)의 하중-변위곡선과, 두께방향 변위가 고정되지 않은 해석모델의 하중-변위곡선에서 초기에는 동일한 하중-변위 곡선을 나타내고 있다. 그러나, 면외변형이 발생한

Table 5. Ultimate strength of analysis result and curling influence

Analysis model (Specimen)	Ultimate strength Pua (kN)	Curling	Fracture mode at ultimate strength	Fracture mode at test end	Strength ratio $Pua/PuaR$
SF4T30B36E24	104.02	X	Tensile crack between two bolts	BS	-
SF4T30B36E30	108.77	X		N	-
SF4T30B36E36	110.30	X		N	-
SF4T30B36E48	110.99	X		N	-
SF4T30B36E60	111.03	X		N	-
SF4T30B42E24	105.73	X		BS	-
SF4T30B42E30	113.66	X	BS	-	
SF4T30B42E36	115.47	O	Curling	BS	0.96
SF4T30B42E48	119.14	O		BS	0.95
SF4T30B42E60	115.91	O		BS	0.89
SF4T30B48E24	106.98	X	Tensile crack between two bolts	BS	-
SF4T30B48E30	114.80	X		BS	-
SF4T30B48E36	122.04	O		BS	1.00
SF4T30B48E48	121.46	O	Curling	BS	0.87
SF4T30B48E60	120.36	O		BS	0.89
SF4T30B54E24	107.04	X	Tensile crack between two bolts	BS	-
SF4T30B54E30	115.56	X		BS	-
SF4T30B54E36	124.20	O		BS	1.00
SF4T30B54E48	125.59	O	Curling	BS	0.90
SF4T30B54E60	131.19	O		BS	0.87
SF4T30B60E24	109.41	X	Tensile crack between two bolts	BS	-
SF4T30B60E30	117.03	X		BS	-
SF4T30B60E36	124.82	X		BS	-
SF4T30B60E48	122.81	O	Curling	BS	0.88
SF4T30B60E60	134.86	O		BS	0.88

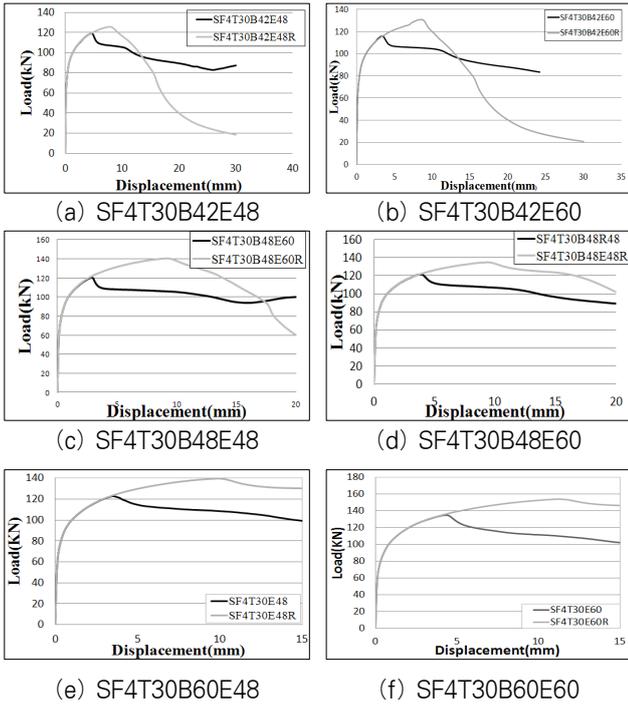


Fig. 8 Load-displacement of analysis results

Table 6. Conditions of curling occurrence with strength reduction

Bolt array (row × column)	Conditions of curling occurrence	
	End distance <i>e</i> (mm)	Edge distance <i>b</i> (mm)
2 × 2	4.5 <i>d</i> (48) ≤ <i>e</i>	3.5 <i>d</i> (42) ≤ <i>b</i>

시점에서부터 두께방향 변위를 구속하지 않은 해석모델은 내력이 저하되는 것을 알 수 있다. 이러한 해석결과로부터 평판 두께 3.0mm로 제작된 페라이트계 스테인리스강 2행 2열 볼트접합부의 최대내력을 예측하는데 있어서 면외변형을 고려해야 할 하중방향 연단거리(*e*)와 하중직각방향 연단거리(*b*)의 조건을 Table 6에 정리하였다.

6. 현행기준식 및 이론에 의한 내력고찰

볼트접합부의 최대내력(P_{ut})에 대해 한국건축구조기준 KBC(2009)^[11], 미국강구조협회 AISC(2001, 2005)^[12],^[13], 일본건축학회 AIJ(2002)^[14], 미국철강협회 AISI NAS(2007)^[15]은 다음과 같이 파단형태별 설계내력식이 규정되어 있다. 해석결과 얻어진 최대내력과 비교하여 현행 기준식의 타당성을 검증하고, 면외변형이 내력에 미치는 영향에 관해 고찰한다.

6.1 설계 기준식

6.1.1 AISC(2001)^[12], KBC(2009)^[11]; 열간압연 탄소강

(a) 순단면파단(Net section tensile fracture, N)
AISC(2001)기준에서는 접합부의 순단면(A_n)에서 인장 파괴가 발생하는 파단형태로 내력산정식은 다음과 같다.

$$P_{ut} = A_n \cdot \sigma_u \tag{4}$$

여기서, A_n 은 볼트구멍의 단면결손을 제외한 인장저항 순단면적이고, σ_u 는 모재의 인장강도이다.

(b) 종전단파단(Shearout, fracture, S) 및 지압파단(Bearing fracture, B)

KBC(2009)기준에서는 식 (5), (6)과 같이 종전단파단과 지압파단을 동시에 만족하도록 설정하고 있다.

볼트구멍의 변형이 설계에 고려될 경우,

$$P_{ut} = 1.2L_c t \sigma_u \leq 2.4dt \sigma_u \tag{5}$$

볼트구멍의 변형이 설계에 고려되지 않을 경우,

$$P_{ut} = 1.5L_c t \sigma_u \leq 3.0dt \sigma_u \tag{6}$$

여기서, L_c : 하중방향 순간격, 구멍의 끝과 피접합재의 끝 또는 인접구멍의 끝까지의 거리(mm) = $Min(e - \phi/2, p - \phi)$

(c) 블록전단파단(Block shear fracture, BS)

$$\sigma_u A_{nt} \geq 0.6 \sigma_u A_{nv} \text{ 일 때} \\ P_{ut} = A_{nt} \sigma_u + 0.6 A_{gv} \sigma_y \tag{7}$$

$$\sigma_u A_{nt} < 0.6 \sigma_u A_{nv} \text{ 일 때} \\ P_{ut} = A_{gt} \sigma_y + 0.6 A_{nv} \sigma_u \tag{8}$$

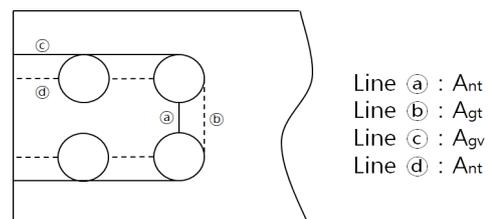


Fig. 9 Fracture section line of block shear fracture

여기서, A_{nt} 는 인장저항 순단면적, A_{gt} 는 인장저항 총단면적, A_{gv} 는 전단저항 총단면적, A_{nv} 는 전단저항 순단면적(Fig. 9 참조). α 는 모재의 항복강도이다.

6.1.2 AIJ(2002)^[14]; 열간압연 탄소강

일본건축학회 기준에서 순단면과단식은 AISC(2001), KBC(2009)의 식 (4)과 동일하고, 종전단과단과 지압과단은 별도로 구분하지 않고, 식 (9)의 단일식으로 규정하고 있다.

(a) 종전단과단, 지압과단

$$P_{ut} = e_1 \cdot t \cdot \sigma_u \tag{9}$$

여기서, $e_1 = \text{Min}(e, p)$, t : 판두께이다. 단, AIJ기준(냉간성형강, 허용응력도 설계법이나 일반적으로 σ_y 를 σ_u 로 치환)에서 연단거리가 판두께의 13배를 초과하는 경우 최대연단거리(e) 13 t 로 규정하고, p 는 하중방향 볼트간 중심간격이다.

(b) 블록전단과단

$$P_{ut} = (A_{nt} + 0.5A_{gv}) \cdot \sigma_u \tag{10}$$

6.1.3 AISI (2007)^[15]; 냉간성형 탄소강

(a) 순단면과단

순단면과단 내력산정식 이외에 볼트수와 배치(판폭 또는 게이지)를 고려해 응력집중에 대한 영향을 고려하는 AISI NAS기준에서는 와셔의 사용여부에 따라 식 (11), (12)과 같이 내력식을 분리하여 적용하고 있다.

- 양면에 두 개 와셔 사용시, 1행 1열, 1열 볼트배열

$$P_{ut} = \left(0.1 + \frac{3d}{s_1}\right) A_n \cdot \sigma_u \leq A_n \cdot \sigma_u \tag{11}$$

- 하중방향으로 평행한 다중 볼트배열

$$P_{ut} = A_n \cdot \sigma_u \leq A_n \cdot \sigma_u \tag{12}$$

여기서, d :볼트 직경, s_1 :판의 폭/볼트의 수(동일한 열)

(b) 종전단과단

$$P_{ut} = e_2 \cdot t \cdot \sigma_u \tag{13}$$

여기서, $e_2 = \text{Min}(e, p - \phi/2)$ 이다.

(c) 지압과단

볼트구멍의 변형이 설계에 고려되지 않을 경우,

$$P_{ut} = Cdt\sigma_u \tag{14}$$

볼트구멍의 변형이 설계에 고려될 경우,

$$P_{ut} = (4.64\alpha t + 1.53)dt\sigma_u \tag{15}$$

여기서, C (지압계수, $d/t < 10 = 3.0$), α (단위 변환계수, SI단위) : 0.0394

(d) 블록전단과단 : 다음 중 최소값 사용 AISC(2005)^[13]와 동일한 식을 사용한다.

$$P_{ut} = U_{bs}A_{nt}\sigma_u + 0.6A_{gv}\sigma_y \tag{16}$$

$$P_{ut} = U_{bs}A_{nt}\sigma_u + 0.6A_{nv}\sigma_u \tag{17}$$

여기서, U_{bs} 는 감소계수이고, 하중이 등분포로 작용하는 경우는 1.0으로 한다.

6.2 최대내력 비교

6.1절에서 제시된 현행의 설계기준식을 바탕으로 각 설계기준식의 최대내력(각 과단형태의 내력중 최소값을 최대내력으로 정의함)과 과단형태를 Table 7에 정리하였다.

Fig. 4(a)와 4(b)에서 보여지는 바와 같이 면외변형이 발생하지 않은 실험체의 전형적인 블록전단은 하중직각방향 볼트간 순단면 인장과단과 하중방향 전단저항 총단면과단의 조합에 의해 발생하는 것을 알 수 있었다. 이에 상응하는 블록전단과단의 과단단면은 Fig. 9에서 Line ㉔와 Line ㉕의 조합으로 정의되며, AISC(2001)기준에서는 식 (7), AIJ기준에서는 식 (10) 및 AISC(2005)기준에서는 식 (16)의 블록전단과단선이 일치한다.

해석결과로 부터 얻어진 과단형태는 Table 7에서 보는 바와 같이, AISC(2001)과 AISC(2005)에 의해서는 2개,

AIJ기준에 의해서는 7개를 제외한 예측파단형태가 일치하는 것으로 나타났다. 하중방향 연단거리(e)가 24mm인 일부실험체는 기준예측 블록전단파단선(식 (8)에서는 Line ⑥와 Line ⑩의 조합, 식 (17)에서는 Line ①와 Line ④)이 해석결과와 일치하지 않았다. Table 7에서 해석결과의 최대내력에 대한 AISC(2001), AIJ, AISC(2005)의 기준식에 대한 최대내력비(Pua/Put)는 각각 1.07, 0.96, 1.07로 나타났다. 면외변형의 영향이 없는 실험체에 대해서 AISC기준은 대체로 접합부의 최대내력을 과소평가하는 경향을 보였고, AIJ기준에 의해서는 과대평가되었다.

각 기준식에 의해 예측된 해석결과와 동일파단형태 및 파단선을 갖는 최대내력을 비교하기 위해, 면외변형이 내력에 영향을 미치지 않는 모델과 면외변형이 내력에 영향을 미친 모델로 분류해 Table 8과 Table 9에 정리하였다. 면외변형이 발생하지 않거나 발생했다고 내력에 영향을 미치지 않은 접합부에 대해서 AISC기준에 의해 최대내력이 평균 10% 정도 과소평가 되었으나, AIJ기준에 의해서는 평균 최

대내력비가 1.0으로 양호한 대응을 보였다. 따라서, 면외변형의 영향이 없는 볼트접합부의 블록전단파단내력은 AIJ의 식 (10)에 의해 평가하는 것이 추천된다.

면외변형이 내력에 영향을 준 모델의 평균 최대내력비(Pua/Put)는 Table 9에서와 같이 AISC에 의해서 0.97, AIJ에의해서는 0.84로 나타났다. 즉, 면외변형의 영향이 없는 접합부에 있어서 AIJ기준은 최대내력을 양호하게 평가했지만, 면외변형에 의해 내력이 저하된 접합부에 대해서는 AIJ기준에 의해 평균 16% 과대평가되었다. Fig. 1과 Table 4에서 알 수 있듯이, 면외변형이 최대내력에 영향을 미친 접합부에 대해서는 면외변형 발생자체에 의해 최대내력이 결정되었고, 추후, 볼트간 인장파단이 발생하였다. 본 연구에서는 실험이 종료된 시점에서 관찰된 블록전단을 최종파단형태로 간주하여 기준식에 의한 최대내력과 해석결과를 비교하였지만, 최대내력 결정측면에서는 볼트지압에 의한 판의 면외변형(일종의 국부좌굴)이라는 파단양상을 고려한 내력식이 필요하다고 판단된다.

Table 7. Fracture mode and ultimate strength by design manual

Specimen	AISC(2001), KBC(2009)		AIJ		AISC(2005), AISI NAS(2007)		Analysis result		Strength ratio Pua/Put		
	Put (kN)	Fracture mode(FM)	Put (kN)	FM	Put (kN)	FM	Pua , (kN)	FM	AISC(2001), KBC(2009)	AIJ	AISC(2005), AISI NAS(2007)
SF4T30B36E24	95.00	BS(5)	107.09	N	93.51	BS(14)	104.02	BS	1.09	0.97	1.11
SF4T30B36E30	101.50	BS(4)	107.09	N	101.50	BS(13)	108.77	N	1.07	1.02	1.07
SF4T30B36E36	107.09	N	107.09	N	107.09	N	110.30	N	1.03	1.03	1.03
SF4T30B36E48	107.09	N	107.09	N	107.09	N	110.99	N	1.04	1.04	1.04
SF4T30B36E60	107.09	N	107.09	N	107.09	N	111.03	N	1.04	1.04	1.04
SF4T30B42E24	95.00	BS(4)	108.40	BS	93.51	BS(14)	105.73	BS	1.11	0.98	1.13
SF4T30B42E30	101.50	BS(4)	116.23	BS	101.50	BS(13)	113.66	BS	1.12	0.98	1.12
SF4T30B42E36	107.99	BS(4)	122.76	N	107.99	BS(13)	115.47	BS	1.07	0.94	1.07
SF4T30B42E48	120.98	BS(4)	122.76	N	120.98	BS(13)	119.14	BS	0.98	0.97	0.98
SF4T30B42E60	122.76	N	122.76	N	122.76	N	115.91	BS	0.94	0.94	0.94
SF4T30B48E24	95.00	BS(4)	108.40	BS	93.51	BS(14)	106.98	BS	1.13	0.99	1.14
SF4T30B48E30	101.50	BS(4)	116.23	BS	101.50	BS(13)	114.80	BS	1.13	0.99	1.13
SF4T30B48E36	107.99	BS(4)	124.07	BS	107.99	BS(13)	122.04	BS	1.13	0.98	1.13
SF4T30B48E48	120.98	BS(4)	138.43	N	120.98	BS(13)	121.46	BS	1.00	0.88	1.00
SF4T30B48E60	133.98	BS(4)	138.43	N	133.98	BS(13)	120.36	BS	0.90	0.87	0.90
SF4T30B54E24	95.00	BS(4)	108.40	BS	93.51	BS(14)	107.04	BS	1.13	0.99	1.14
SF4T30B54E30	101.50	BS(4)	116.23	BS	101.50	BS(13)	115.56	BS	1.14	0.99	1.14
SF4T30B54E36	107.99	BS(4)	124.07	BS	107.99	BS(13)	124.20	BS	1.15	1.00	1.15
SF4T30B54E48	120.98	BS(4)	139.74	BS	120.98	BS(13)	125.59	BS	1.04	0.90	1.04
SF4T30B54E60	133.98	BS(4)	154.10	N	133.98	BS(13)	131.19	BS	0.98	0.85	0.98
SF4T30B60E24	95.00	BS(4)	108.40	BS	93.51	BS(14)	109.41	BS	1.15	1.01	1.17
SF4T30B60E30	101.50	BS(4)	116.23	BS	101.50	BS(13)	117.03	BS	1.15	1.01	1.15
SF4T30B60E36	107.99	BS(4)	124.07	BS	107.99	BS(13)	124.82	BS	1.16	1.01	1.16
SF4T30B60E48	120.98	BS(4)	139.74	BS	120.98	BS(13)	122.81	BS	1.02	0.88	1.02
SF4T30B60E60	133.98	BS(4)	155.41	BS	133.98	BS(13)	134.86	BS	1.01	0.87	1.01
Average									1.07	0.96	1.07
COV									0.068	0.059	0.071

Table 8. Strength comparison of specimens without curling effect

Specimen	Strength ratio Pua/Put			Analysis
	AISC(2001) KBC(2009)	AIJ	AISI(2006) NAS(2007)	
	Eq.(7) for block shear		Eq.(16) for block shear	
SF4T30B36E24	1.09	0.96	1.09	BS
SF4T30B36E30	1.02	1.02	1.02	N
SF4T30B36E36	1.03	1.03	1.03	N
SF4T30B36E48	1.04	1.04	1.04	N
SF4T30B36E60	1.04	1.04	1.04	N
SF4T30B42E36	1.07	0.93	1.07	BS
SF4T30B48E24	1.13	0.99	1.13	BS
SF4T30B48E30	1.13	0.99	1.13	BS
SF4T30B48E36	1.13	0.98	1.13	BS
SF4T30B54E24	1.13	0.99	1.13	BS
SF4T30B54E30	1.14	0.99	1.14	BS
SF4T30B54E36	1.15	1.00	1.15	BS
SF4T30B60E24	1.15	1.01	1.15	BS
SF4T30B60E30	1.15	1.01	1.15	BS
SF4T30B60E36	1.16	1.01	1.16	BS
Average	1.10	1.00	1.10	
COV	0.046	0.028	0.046	

Table 9. Table 8. Strength comparison of specimens with strength reduction by curling effect

Specimen	Strength ratio Pua/Put			Analysis
	AISC (2001) KBC (2009)	AIJ	AISI (2006) NAS (2007)	
	Eq.(7) for block shear		Eq.(16) for block shear	
SF4T30B42E48	0.98	0.85	0.98	BS
SF4T30B42E60	0.87	0.75	0.87	BS
SF4T30B48E48	1.00	0.87	1.00	BS
SF4T30B48E60	0.90	0.77	0.90	BS
SF4T30B54E48	1.04	0.90	1.04	BS
SF4T30B54E60	0.98	0.84	0.98	BS
SF4T30B60E48	1.02	0.88	1.02	BS
SF4T30B60E60	1.01	0.87	1.01	BS
Average	0.97	0.84	0.97	
COV	0.062	0.063	0.062	

7. 결 론

본 연구에서는 박판 페라이트계 스테인레스강의 일면전단 볼트접합부의 실험연구를 통해 얻은 결과를 기초로 유한요소 해석을 통해 얻은 결과를 비교하였다. 연단거리를 변수로 추가적인 해석을 수행하여 현행 설계기준식에 의한 최대내력과 해석결과를 비교하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유한요소해석을 통해 얻어진 접합부의 최대내력을 실험 최대내력과 비교한 결과, 평균 최대내력비가 0.97로 양

호한 대응을 나타냈고, 면외변형 발생여부 및 파단형태 예측에 대한 타당성을 검증하였다.

- (2) 하중방향 연단거리(b)가 42~60mm 계열에 있어서 면외변형을 고정된 접합부의 내력으로 면외변형이 구속하지 않은 접합부내력을 나눈 최대내력비($Pua/PuaR$)가 0.87~0.96의 범위로 나타났으며, 하중방향 연단거리(e)가 증가함에 따라 면외변형에 의한 내력저하폭이 증가하였다. 하중방향 연단거리(e)가 36mm인 실험체의 경우, 면외변형의 의한 내력저하정도가 0%~4%로 미비하였지만, 48mm이상의 실험체들은 5%~13%로 면외변형에 의한 내력저하정도가 높았다.
- (3) 면외변형의 영향이 없는 블록전단파단된 모델에 대해서 AISC 기준식은 최대내력을 다소 과소평가하는 경향이 보였고, AIJ 기준식에 의한 내력이 해석결과와 내력과 양호한 대응을 보였다. 또한, 실험결과 및 해석결과와 블록전단 파단선은 AIJ기준에서 제시하는 내력의 파단선과 일치하였다.
- (4) 면외변형이 발생한 모델에 대해서는 현행기준식에 의해서 대체로 내력을 과대평가하는 경향을 보였다. 이는 블록전단파단내력의 전단파단의 경우 하중방향 연단거리에 비례하여 내력이 증가하는 것으로 보고 있고, 면외변형에 의한 내력저하를 고려하지 못하고 있기 때문으로 사료된다.
- (5) 일면전단 볼트접합부에 있어서 면외변형에 의한 내력저하를 발생하는 연단거리 조건을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 2012년 한밭대학교 교내학술연구비와 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : 2005-0049406, 2013023394).

참 고 문 헌(References)

- [1] Johnson, A.L. and Winter, G. (1996) Behavior of stainless steel columns and beams, *Journal Structural Division, ASCE*, Vol. 92, No. 10, pp.97-118.
- [2] American Iron and Steel Institute (1968). *Specification for the design of light gage cold-formed stainless steel structural members*, AISI.
- [3] Kuwamura, H. and Isozaki, A. (2001) *Experimental Report on Strength of Bolted Connections in Thin-walled Plates*, Tokyo, Steel Structure Laboratory, The University of Tokyo (in Japanese).

- [4] Kuwamura, H. and Isozaki, A. (2002) Ultimate Behavior of Fastener Connections of Thin Stainless Steel Plates, *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 6, No. 556, pp.159-166 (in Japanese).
- [5] Kim, T.S. and Kuwamura, H. (2007) Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static shear, *Thin-Walled Structures*, Vol. 45, No. 4, pp.407-421.
- [6] 이용택, 김태수, 정하영, 김승훈(2009) 평판두께와 연단 거리를 변수로 갖는 박판탄소강 볼트접합부의 종국거동에 관한 실험적 연구, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제21권, 제5호, pp.527-536.
- Lee, Y.T., Kim, T.S., Jeong, H.Y., and Kim, S.H. (2009) An Experimental Study on Ultimate Behavior of Thin-walled Carbon Steel Bolted Connections with Varying Plate Thickness and End Distance, *Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 21, No. 5, pp.527-536 (in Korean).
- [7] 김민성, 김태수, 김승훈, 이용택(2011) 오스테나이트계 스테인레스강(STS304) 앵글 볼트 접합부의 구조적 거동에 관한 실험적 연구, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제23권, 제1호, pp.29-39.
- Kim, M.S., Kim, T.S., Kim, S.H., and Lee, Y.T. (2011) An Experimental Study on Structural Behavior of Bolted Angle Connections with Austenitic Stainless Steel, *Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 1, pp.29-39 (in Korean).
- [8] 김태수, 김민성(2013) 페라이트계 스테인리스강(STS430) 일면전단 볼트접합부의 구조거동에 관한 실험적 연구, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제25권, 제5호, pp. 463-474.
- Kim, T.S., and Kim, M.S. (2013) An Experimental Study on Structural Behaviors of Double Shear Bolted Connections Fabricated with Ferritic Stainless Steel (STS430), *Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 25, No. 5, pp.463-474 (in Korean).
- [9] 김민성, 김태수, 김승훈, 이용택(2010) 페라이트계 스테인레스강(STS430) 박판 볼트접합부의 종국거동에 관한 실험적 연구, *대한건축학회 추계학술대회 논문집*, 대한건축학회, 제30권, 제1호, pp.141-142.
- KIM, M.S., KIM, T.S., KIM, S.H., and Lee, Y.T. (2010) An Experimental Study on Ultimate Behavior of Bolted Connections with Thin-walled Ferritic Stainless Steel, *Proceedings of Annual Conference Architectural Institute of Korea*, AIK Vol. 30, No. 1, pp. 141-142 (in Korean).
- [10] 김지훈, 이용택, 김승훈, 김태수(2012) 페라이트계 스테인레스강 볼트접합부의 연단거리에 대한 변수 해석, *대한건축학회 추계학술대회논문집*, 대한건축학회, 제32권, 제2호, pp.459-460.
- KIM, J.H., Lee, Y.T., KIM, S.H., and KIM, T.S. (2012) Parametric Analysis on End/Edge distance of Ferritic stainless Bolted Connections, *Proceedings of Annual Conference Architectural Institute of Korea*, AIK Vol. 32, No. 2, pp.459-460 (in Korean).
- [11] 대한건축학회 (2011) 건축구조기준 및 해설(KBC2009), 기문당, 2011.
- Architectural Institute of Korea (2011) *Korean Building Code and Commentary (KBC2009)*, Kimoon dang (in Korean).
- [12] American Institute of Steel Construction. (2001) *Manual of Steel Construction-Load and Resistance Factor Design*, AISC, Chicago, IL, USA.
- [13] American Institute of Steel Construction (2005) *Specification for Structural Steel Buildings*, AISC, Chicago, IL, USA.
- [14] Architectural Institute of Japan (2002) *Recommendation for Limit State Design of Steel Structures*, AIJ, Tokyo, Japan.
- [15] American Iron and Steel Institute (2007) *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, AISI S100-07, Washington D.C., USA.

요 약: 본 연구는 페라이트계 스테인리스강 일면전단 볼트접합부의 구조거동에 관한 기존실험연구를 바탕으로 유한요소해석법을 이용하여 접합부의 최대내력과 면외변형에 대해 조사하는 것을 목적으로 한다. 유한요소해석결과와 실험결과와의 비교를 통해 접합부의 구조거동을 예측하는데 있어 해석의 타당성을 검증하였다. 면외변형에 의해 유발되는 접합부의 연단거리 조건을 조사하고 최대내력저하정도를 정량적으로 평가하였다. 또한, 변수해석을 통해 얻어진 해석결과와 최대내력과 현행기준식인 AISC, KBC2009, AIJ 및 AISI에 의해 예측된 내력과 비교하여 그 적용성을 검토하였다.

핵심용어: 박판 페라이트계 스테인리스강, 볼트접합, 면외변형, 최대내력, 설계기준, 유한요소해석