

2개의 볼트를 갖는 고강도 알루미늄 합금 일면전단 볼트접합부의 내력

강현식¹ · 김태수^{2*}

¹교수, 경남과학기술대학교, 건축공학과, ²교수, 한밭대학교, 건축공학과

Strength of High Strength Aluminum Alloys Single Shear Bolted Connections with Two Bolts

Kang, Hyun Sik¹, Kim, Tae Soo^{2*}

¹Professor, Dept. of Architectural Engineering, GyeongNam National University of Science and Technology, Jinju, 52725, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

Abstract - This study is aiming at investigating the ultimate behaviors and curling influence on the ultimate strength in high strength aluminum alloys (7075-T6) single shear two-bolted connections using finite element analysis. The validation of finite element analysis for predicting the ultimate behaviors was verified through the comparison between previous test results and analysis predictions. Strength reduction due to curling occurrence was estimated quantitatively. Parametric analyses with extended variables were conducted and the conditions of curling occurrence according to end distance and edge distance were suggested. Finally, modified equation was suggested considering curling influence on the ultimate strength of aluminum alloys 7075-T6 bolted connections.

Keywords - Aluminum alloys, Bolted connection, Ultimate strength, Curling, Finite element analysis, Design specification

1. 서론

알루미늄 합금(Aluminum alloys)은 처음에는 건축용 구조부재 중 외장재로 사용되기 시작했다. 1960년대에 알루미늄 합금의 압출성형기술의 발전과 건축물에 커튼월이 도입됨에 따라 알루미늄합금 시장은 급속한 성장을 해왔다^[1]. 알루미늄 합금은 재료측면에서는 탄소강에 비해 고가이나 다양한 합금원소를 혼합시켜 탄소강과 유사한 강도를 확보할 수 있으며, 단위중량이 강재의 1/3정도여서 건물전체의 중량을 줄일 수 있다. 또한 가공성, 내식성이 우수하여 생애기간 동안 건물의 유지관리비용(LCC)을 줄일 수 있다. 미국,

유럽, 일본 등에서는 알루미늄 합금을 건축구조용 재료로 인정하여 그에 따른 구조설계기준이 마련되어 다양한 분야에서 적용되고 있고 국내에서도 커튼월의 지지구조, 대공간 구조물의 지붕구조시스템 등에 사용되고 있다. 그러나, 한국건축구조기준(KBC)^[2]에 알루미늄 합금이 구조용 재료로 지정되어 있지 않아서 국내 알루미늄합금의 구조설계 기준은 대부분 미국알루미늄협회(AAA)^[3]의 설계기준을 준용하고 있다.

본 연구는 국내 알루미늄합금의 구조재료지정과 설계기준을 위한 알루미늄합금의 구조거동에 관한 기초연구의 일환으로 수행되었다. 구조용으로 가장 많이 사용되고 있는 알루미늄 합금인 6061-T6(Al-Mg-Si 합금)으로 제작된 일면전단 볼트접합부의 구조적 거동에 관한 실험적 및 해석적 연구로 하중직각방향으로 발생하는 볼트의 지압에 의한 판의 국부 좌굴 일종인 면외변형(Curling)의 영향을 조사하였다^{[1],[4]}. Cho *et al.*에 의한 연구결과, 일면전단과 이면전단 볼트접합부의 전단접합 형태에 따른 구조거동을 비교하였을 때 면외변형 발생으로 일면전단 볼트접합부의 내력이 4~30% 저하되었다^[5]. 6061-T6에 비해 고가이고 용접성은 좋지 않음

Note.-Discussion open until October 31, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on January 30, 2018; revised March 14, 2018; approved on March 14, 2018.

Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-42-821-1121 Fax. +82-42-821-1590

E-mail. tskim@hanbat.ac.kr

나, 항복강도와 인장강도가 약 2배 높은 고강도 알루미늄 합금인 7075-T6(Al-Zn-Mg-Cu 합금)을 사용한 일면전단 볼트접합부의 구조거동과 알루미늄 합금의 기계적 성질에 따른 거동 차이를 조사하기 위해 기존의 6061-T6 일면전단 볼트접합부의 실험결과와 비교하였다^[6]. 알루미늄 합금 6061-T6 볼트접합부는 면외변형 발생후 내력이 저하되고 볼트간 인장파단이 발생하여 실험이 종료되었으나 고강도이고 연신율이 낮은 알루미늄 합금 7075-T6의 볼트접합부는 면외변형 발생·진전과 함께 볼트간 인장파단이 거의 동시에 발생해서 최대내력이 결정되는 결과가 나타났다.

본 연구에서는 Cho and Kim^[4]에 의해 수행된 유한요소해석을 이용한 6061-T6의 일면전단 볼트접합부의 최대내력 평가에 관한 연구에서와 같이 고강도 알루미늄 합금 7075-T6 볼트접합부에서 내력에 미치는 면외변형의 영향을 조사하기 위해 Kim and Cho^[6]에 의해서 수행된 알루미늄 합금(7075-T6)의 볼트접합부 중 2행 1열의 볼트배열에 대한 실험결과를 바탕으로 유한요소해석을 실시하고자 한다. 유한요소해석법의 타당성을 토대로 하중직각방향 및 하중방향연단거리에 추가적인 변수해석을 통해 볼트접합부의 최대내력 및 구조적 거동을 분석하고, 면외변형의 발생이 최대내력에 미치는 영향을 조사한다. 또한 해석결과 내력과 현행설계기준식에 의한 예측내력을 비교하여 면외변형의 영향을 고려한 2행 1열 고강도 알루미늄 합금(7075-T6)의 일면전단 볼트접합부에 관한 수정내력식을 제안하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 2행 1열 볼트접합부 실험결과

Kim and Cho^[6]에 수행된 고강도 알루미늄합금(7075-T6)으로 제작된 2열 1열 볼트배열의 일면전단 볼트접합부의 하중방향 연단거리를 변수로 갖는 박판 볼트접합부(공칭두께 2.0mm)의 실험결과인 최대내력(P_{uc}), 면외변형(Curling, Out-of-plane deformation) 발생여부와 파단형태(FM)를 Table 1에 정리한다. 실험종료시점에서 촬영된 파단형태와 하중-변위곡선을 각각 Figs. 1과 2에 나타낸다. 예를 들어 실험체명 AL2TE24에서 'AL'은 알루미늄 합금, '2'는 볼트 개수(2행 1열이므로 2개), 'E24'는 하중방향연단거리($e=24$ mm)을 의미한다.

볼트접합부에서 볼트의 전단파단이 아닌 접합평판의 블록전단파단(Block Shear fracture, BS)을 유도하기 위하여

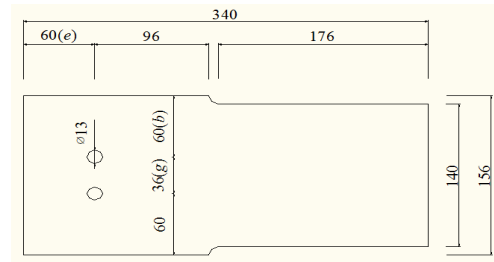


Fig. 1. Geometry of specimen



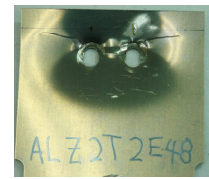
(a) Shear fracture (ALZ2T2E24)



(b) Curling+Tensile crack (ALZ2T2E30)



(c) Curling+Tensile crack (ALZ2T2E36)



(d) Curling+Tensile crack (ALZ2T2E48)

Fig. 2. Representative fracture shapes at test end

하중직각방향연단거리($b=60$)를 충분히 길게 계획하였고, 하중방향연단거리(e)를 24~60mm(2.0d, 2.5d, 3.0d, 4.0d, 5.0d)의 범위로 설정하였다. 평판두께(t)는 2.0mm, 볼트직경(d)는 12mm, 볼트구멍직경(ϕ)은 13mm, 게이지(g)는 볼트구멍직경의 3배인 36mm로 고정하였다(Fig. 1).

하중방향연단거리(e)가 상대적으로 작은 접합부인 AL2TE24 실험체에서는 Fig. 2(a)와 같이 종전단파단(Shear fracture, E)이 발생되었고, 최대내력 이후 미소한 면외변형이 관찰되었다. 그 외 실험체들에서는 하중방향 연단거리가 증가함에 따라 볼트간 인장파단이나 볼트지압에 의한 면외변형(Curling, C)이 동시에 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 2(b)~(d)). 현행설계기준에서 블록전단파단(BS)은 볼트간 인장파단과 하중방향 전단파단의 조합으로 정의되고 있으며, 볼트간 인장파단과 볼트지압에 의해 하중방향으로 전단파단선을 따라 응력이 집중되었지만, 하중방향으로의 전단파단의 발생하지 않고 평판두께방향으로 면외변형이 발생하였다. 현행기준식에서는 이러한 파단형태가 규정되어 있지 않고 볼트간 인장파단과 하중방향 전단응력집중이라는 개념을 토대로 Table 1에서 실험종료시점에서 파단형태를 블록전단파단(BS)

Table 1. Test results

Specimens	End distance e (mm)	Ultimate strength P_{ue} (kN)	Curling	Fracture mode at test end (FM)
AL2T2E24	24	51.35	○	E
AL2T2E30	30	51.35	○	BS
AL2T2E36	36	51.55	○	BS
AL2T2E48	48	53.70	○	BS
AL2T2E60	60	52.72	○	BS

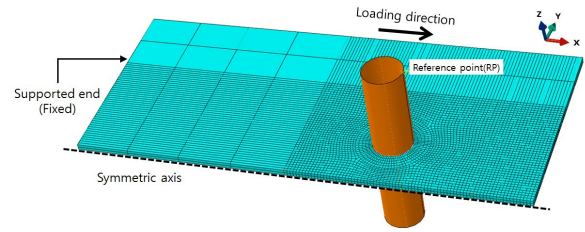
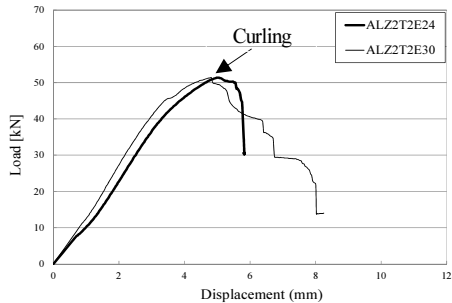


Fig. 4. Finite element modeling conditions

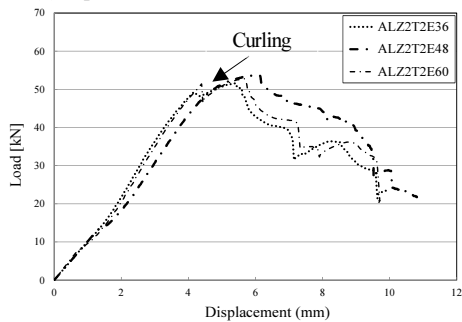
3.1 해석조건 및 적용요소

볼트접합부 해석모델은 해석 단계에서 면외변형과 같은 기하비선형을 고려하기 위해 대변형기능을 설정하였다. 적용요소(Element) 전단잠김현상을 방지하고 휨에 대한 해석에 적합한 8개의 절점을 가진 비적합모드(Incompatible mode) 요소인 C3D8I를 사용하였다.

2행 1열 볼트접합부에 대한 해석모델 및 제반조건을 Fig. 4에 표시한다. 접합부 길이는 최대내력과 파단형태에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 해석시간을 단축할 수 있는 150 mm로 설정하였다^{[7],[8],[9]}. 볼트의 전단파단에 대해서는 고려하지 않는 것으로 하여 강제요소(Rigid cylindrical body)로 한다. 너트와 와셔에 의한 볼트구멍 주위의 두께방향 변위 구속효과를 고려하여 볼트구멍 벽을 판두께방향 변위(U_3)를 고정하였다. 평판의 메시는 볼트구멍 주변의 30mm 영역을 판 두께(t)를 기준으로 두께방향에 대해서는 3등분하고, 표면에 대해서는 1.0mm 메시크기로 분할하였다.



(a) Specimens with short end distances



(b) Specimens with long end distances

Fig. 3. Load-displacement curves of test results

으로 가정하였다. Fig. 2는 실험결과로부터 얻은 하중-변위곡선이며 하중방향연단거리가 짧은 실험체에서는 최대내력시점전후에서 면외변형이 발생하였고(Fig. 3(a)), 하중방향연단거리가 긴 실험체에서는 면외변형 발생으로 일시적인 내력과 강성저하가 관찰되었고 다시 내력이 상승되었다(Fig. 3(b)).

3. 유한요소해석

본 연구에서는 2장의 기존 실험결과를 바탕으로 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS로 다음과 같이 해석모델을 구축하여 해석을 진행하였다.

3.2 재료모델

기존의 7075-T6의 재료시험결과^[6]중에 Table 2에 정리한 ALZ-2를 대상으로 다음과 같이 재료모델을 입력하였다. Fig. 5의 알루미늄합금(7075-T6)에 대한 응력도-변형도 곡선으로부터 알 수 있듯이 탄소강과 달리 뚜렷한 항복구간이 존재하지 않고 탄성영역을 지나 소성영역에서 재료의 비선형성이 나타나고 있다. 이러한 재료의 비선형성을 해석모델에 반영하기 위해 von Mises 항복기준 및 등방경화법칙(Isotropic hardening rule)이 적용되는 탄소성재료모델을 채택하였다^{[4],[7]}. 해석모델의 재료데이터는 Fig. 4와 같이 ALZ-2 인장시험편의 시험결과로 얻어진 공칭응력도-공칭변형도(Nominal stress-strain, $\sigma_n - \epsilon_n$)값을 식 (1)과 (2)을 적용하여 진응력도-진변형도(True stress-strain, $\sigma_t - \epsilon_t$) 값으로 변환하였다. 그리고 탄성영역 이후의 소성거동은 식 (3)에

Table 2. Material properties of 7075-T6 aluminum alloys^[6]

Coupon	Plate thickness t (mm)	Elastic modulus E (GPa)	Yield stress (0.2%offset) σ_y (MPa)	Tensile stress σ_u (MPa)	Yield ratio σ_y/σ_u YR (%)	Elongation EL (%)
ALZ-2	2.00	66.35	499.83	547.46	91.30	14.20

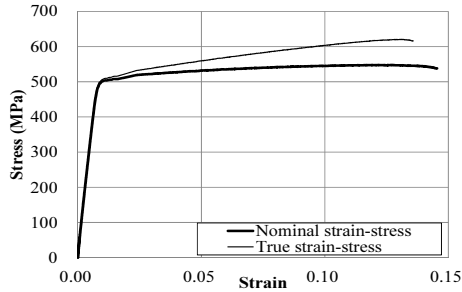


Fig. 5. Strain-stress curves of 7075-T6 aluminum alloys

따라 전체변형도(ϵ_t)에서 탄성변형도(ϵ_{et})를 공제한 소성변형도(ϵ_{pl})를 입력하였다^[10].

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

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

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

3.3 해석결과 검증

3.1절과 3.2절의 절차에 따라 유한요소해석을 실시하였고 그 결과를 Table 3에 2장의 기존 실험결과와 해석결과의 최대내력(P_{ue} , P_{ua}), 파단형태(FM), 면외변형 발생여부, 최대내력비(P_{ua}/P_{ue})를 정리하였다. Fig. 6에 실험체 AL2T2E24와 AL2T2E60의 파단형태와 해석결과로부터 얻어진 최대내력시점의 미세스 응력분포를 나타내었다. 하중방향으로 평판의 종전단파단(E)된 AL2T2E24의 경우 해석결과에서도 우측의 볼트구멍 앞부분에 응력집중이 관찰되었다(Fig. 6(a)). 면외변형과 볼트간 인장파단에 의해 최대내력이 결정된 AL2T2E60은 Fig. 6(b)의 응력분포와 같이 하중직각방향의 볼트간 인장영역에서 응력집중이 관찰되었고 면외변형도 발생하였다. 실험최대내력에 대한 해석최대내력의 내력비(P_{ua}/P_{ue})는 평균 0.97과 변동계수 0.053로 비교적 양호한 대응을 보였다.

Table 3. Comparison of strength and fracture mode between test and analysis results

Specimens	Test result			Analysis result			Strength ratio P_{ua}/P_{ue}
	P_{ue} (kN)	FM	Curling	P_{ua} (kN)	FM	Curling	
AL2T2E24	51.35	E	○	49.12	E	○	0.96
AL2T2E30	51.35	BS	○	52.97	BS	○	1.03
AL2T2E36	51.55	BS	○	51.76	BS	○	1.00
AL2T2E48	53.70	BS	○	49.03	BS	○	0.91
AL2T2E60	52.72	BS	○	48.76	BS <td ○	0.92	
Average							0.97
COV							0.053

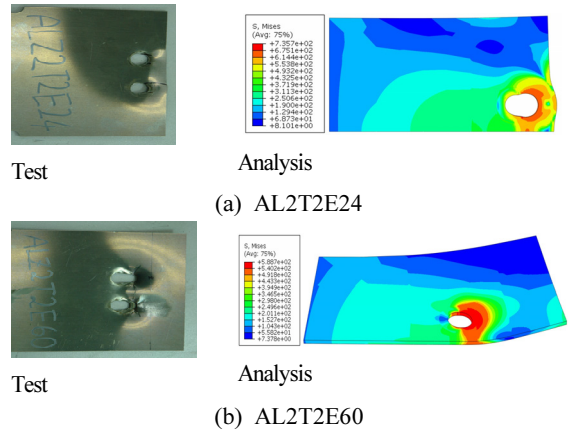


Fig. 6. Comparison of fracture and deformed shapes

종합하면, 7075-T6 일면전단 볼트접합부에 대한 해석결과와 실험결과와 유사한 파단형태와 면외변형이 발생하였고 상기 제시된 유한요소해석모델로 최대내력을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 3.4절에서는 볼트접합부의 최대내력을 평가하기 위해 유한요소해석 모델의 타당성을 토대로 하중직각방향 연단거리(b)를 확장한 변수해석을 실시하고자 한다.

3.4 추가변수해석

Table 1의 실험체에서 주요변수인 하중방향연단거리(e)를 24mm에서 60mm까지 변화시켜 제작하였고, 하중직각

방향연단거리(b)는 60mm로 고정하였다. 본 절에서는 하중 방향연단거리뿐만 아니라 하중직각방향연단거리의 변화에 따른 7075-T6의 일면전단 볼트접합부의 면외변형 발생 여부, 파단형태, 최대내력에 미치는 영향을 조사하기 위해 30mm, 36mm, 48mm의 하중직각방향연단거리를 추가하여 유한요소 해석을 실시하였다. 또한, 면외변형의 발생에 의한 최대내력 저하정도를 정량적으로 평가하기 위해 Fig. 3의 대칭축(Symmetric axis)과 고정단(Fixed end)을 제외한 두면의 판두께방향의 변위(U_3)를 구속시킨 모델에 대해서도 해석을 수행하여 Table 4에 정리하였다. P_{ua} 는 면외변형을 구속하지 않은 해석모델의 최대내력이고, P_{uaR} 은 두께방향의 면외변형을 구속한 해석모델의 최대내력이다.

해석모델명은 Table 3에서는 하중직각방향연단거리(b)가 60mm로 동일하여 별도로 표시하지 않았지만 Table 4에서의 해석모델명은 하중직각방향연단거리를 고려하여 재설정하였다. 예를 들어, AL2TE24B30에서 'AL'은 알루미늄 합금, '2'는 볼트개수(2행 1열이므로 2개), 'E24'는 하중방향연단

거리($e=24$ mm), 'B30'은 하중직각방향연단거리($b=30$ mm)를 나타낸다.

3.4.1 최대내력과 파단형태

면외변형을 구속하지 않은 모델(Free edge)에 대해서는 하중방향연단거리(e)가 24mm인 AL2TE24 시리즈의 해석 모델에서는 Fig. 7(a)와 같이 우측의 볼트 지압측으로 응력이 집중되는 종전단파단(E)이 발생하였고, 그 외 하중방향연단거리(e)가 30mm 이상인 AL2TE30 시리즈 해설모델은 볼트 간 인장파단과 면외변형이 발생하였다(Fig. 7). 최대내력의 경우, Table 4에서 종전단파단된 AL2TE24 시리즈는 하중직각방향연단거리가 증가해도 최대내력에는 큰 변화가 없었고, 하중방향연단거리가 AL2TE24 시리즈보다 6mm증가한 AL2TE30 시리즈의 접합부에서는 3.85~4.17kN 내력이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 하중방향연단거리가 30mm 이상인 접합부에서는 면외변형의 영향으로 하중방향연단거리가 60mm까지 증가해도 큰 내력상승은 없거나 오히려 내

Table 4. Influence of curling on ultimate strength

Specimens	Free edge			Restrained curling		Strength ratio P_{ua}/P_{uaR}
	Ultimate strength P_{ua} (kN)	Curling	FM	Ultimate strength P_{uaR} (N)	FM	
AL2T2E24B30	48.12	○	E	48.18	E	1.00
AL2T2E30B30	52.29	○	BS	52.43	BS	1.00
AL2T2E36B30	52.76	○	BS	55.57	BS	0.95
AL2T2E48B30	51.90	○	BS	60.53	BS	0.86
AL2T2E60B30	52.37	○	BS	60.20	BS	0.87
AL2T2E24B36	48.57	○	E	48.65	E	1.00
AL2T2E30B36	52.47	○	BS	52.60	BS	1.00
AL2T2E36B36	52.69	○	BS	55.78	BS	0.94
AL2T2E48B36	51.16	○	BS	61.33	BS	0.83
AL2T2E60B36	51.51	○	BS	60.89	BS	0.85
AL2T2E24B48	48.97	○	E	49.06	E	1.00
AL2T2E30B48	52.75	○	BS	52.94	BS	1.00
AL2T2E36B48	53.69	○	BS	56.21	BS	0.96
AL2T2E48B48	51.73	○	BS	61.58	BS	0.84
AL2T2E60B48	51.60	○	BS	61.44	BS	0.84
AL2T2E24B60	49.12	○	E	49.17	E	1.00
AL2T2E30B60	52.97	○	BS	53.17	BS	1.00
AL2T2E36B60	51.76	○	BS	56.56	BS	0.92
AL2T2E48B60	49.03	○	BS	61.72	BS	0.79
AL2T2E60B60	48.76	○	BS	61.41	BS	0.79

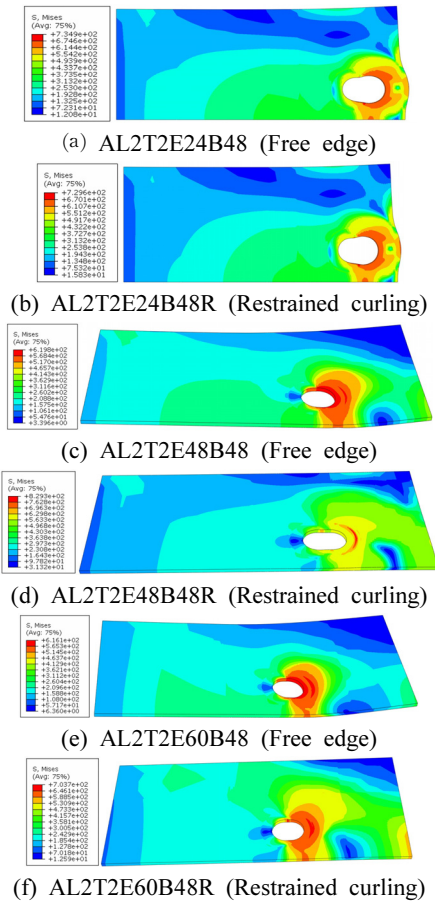


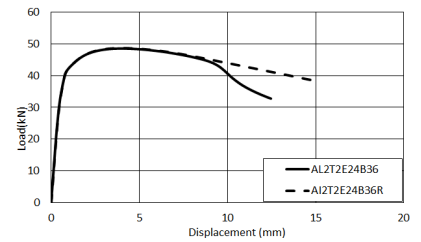
Fig. 7. Stress distribution of analysis results for specimens with end distance ($b=48\text{mm}$)

력이 작아지는 사례도 관찰되었다.

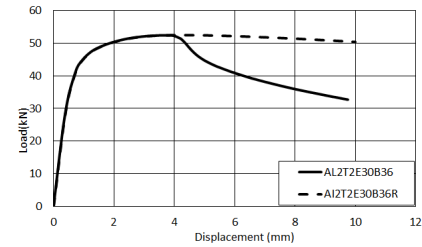
면외변형을 구속한 모델(Restrained curling)에서는 전형적인 종전단파단(E)과 블록전단파단(BS)이 관찰되었다. 종전단파단된 접합부는 면외변형을 구속하지 않은 모델과 유사하게 하중직각방향연단거리가 증가와 관계없이 최대내력은 48.18~49.12kN의 범위를 나타냈다. 블록전단파단된 접합부에서는 하중직각방향연단거리는 최대내력의 증가에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났고, 하중방향연단거리가 30mm에서 48mm로 증가한 경우에는 내력이 증가하는 경향을 나타낸 반면 60mm인 접합부는 48mm인 접합부보다 0.14~0.44kN의 범위로 오히려 감소하는 경향을 보였다.

3.4.2 면외변형의 영향과 발생조건

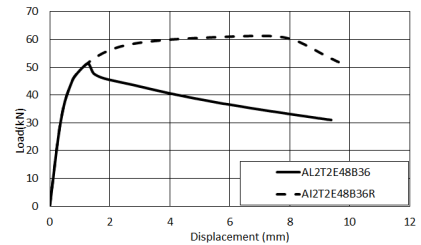
면외변형이 접합부의 최대내력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 연단에서 두께방향의 변위(U_3)를 구속시킨 모델(면외변형이 발생하지 않는 모델)을 대상으로 추가적인 해석을



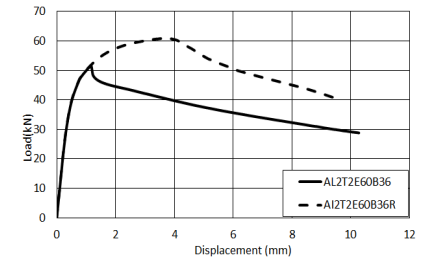
(a) AL2T2E24B36, AL2T2E24B36R



(b) AL2T2E30B36, AL2T2E30B36R



(c) AL2T2E48B36, AL2T2E48B36R



(d) AL2T2E60B36, AL2T2E60B36R

Fig. 8. Load-displacement curve comparison for specimens with end distance (b) 36mm

수행하였다. 두께방향 변위를 구속한 최대내력(P_{uaR})에 대한 면외변형이 구속되지 않은 해석모델의 최대내력비(P_{ua}/P_{uaR})를 Table 4에 정리하였다. 최대내력비(P_{ua}/P_{uaR})는 0.79~1.00범위로 나타났고 하중방향연단거리(e)가 증가할수록 내력저하가 상승하였다. 하중방향연단거리가 24mm, 30mm인 AL2TE24 시리즈와 AL2TE30 시리즈의 최대내력비(P_{ua}/P_{uaR})는 1.00으로 면외변형에 의한 내력저하가 없는 것으로 나타났고(Fig. 8(a), (b)). AL2T2E36 시리즈는 내력저하정도가 4~8%로 낮았지만 면외변형이 내력저하에 영향을 미치는 것으로 판단하였고, AL2T2E48 시리즈와 AL2T2E

60시리지는 내력저하정도가 14~21%의 범위로 Fig. 8(c)~(e)의 하중-변위 곡선에서 보는 바와 같이 면외변형 발생에 의한 내력저하가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

면외변형에 의한 접합부의 최대내력저하되는 하중직각방향연단거리(b)와 하중방향연단거리(e) 조건은 각각 30mm 이상, 36mm 이상인 것으로 나타났다.

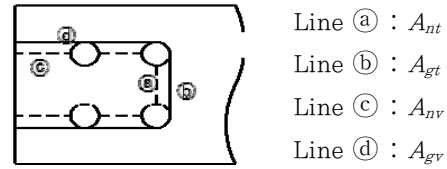


Fig. 9. Fracture lines of typical block shear fracture

4. 현행기준식 및 예측내력 비교

4.1 현행기준식

4.1.1 AISI S100-2012: 냉간성형 탄소강

냉간성형 탄소강에 대한 미국철강협회(AISI)^[11]기준에서는 다음과 같이 종전단파단(E), 지압파단(B)과 블록전단파단(BS)에 대한 내력식을 제안하고 있다.

① 종전단 파단

$$P_{ut} = e_1 t \sigma_u \tag{4}$$

$e_1 = \min(e, p - \phi/2)$, e = 하중방향 연단거리

② 지압파단

볼트구멍의 변형이 설계에 고려되지 않을 경우,

$$P_{ut} = m_f C d t \sigma_u \tag{5}$$

m_f (수정 계수) = 1.0(양면에 와서 두 개 사용한 일면전단접합),
 C (지압계수, $d/t < 10$) = 3.0

③ 블록전단파단

$$P_{ut} = A_{nt} \sigma_u + 0.6 A_{gv} \sigma_y \tag{6}$$

$$P_{ut} = A_{nt} \sigma_u + 0.6 A_{nv} \sigma_u \tag{7}$$

4.1.2 AAA(2010): 알루미늄 합금

미국알루미늄협회(AAA)^[3]에서는 볼트접합부의 내력평가식을 다음과 같이 규정한다.

① 종전단파단

$$P_{ut} = t e \sigma_u \tag{8}$$

② 지압파단

$$P_{ut} = 2 d t \sigma_u \tag{9}$$

여기서, d 는 볼트직경, t 는 평판두께이다.

③ 블록전단파단: AISC LRFD 1993^[12] 준용

$$\begin{aligned} \sigma_u A_{nt} &\geq 0.6 \sigma_u A_{nv} \text{ 일 때,} \\ P_{ut} &= A_{nt} \sigma_u + 0.6 A_{gv} \sigma_y \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \sigma_u A_{nt} &< 0.6 \sigma_u A_{nv} \text{ 일 때,} \\ P_{ut} &= A_{gt} \sigma_y + 0.6 A_{nv} \sigma_u \end{aligned} \tag{11}$$

여기서, σ_y, σ_u 는 각각 모재의 항복강도와 인장강도이며 $A_{nt}, A_{gt}, A_{nv}, A_{gv}$ 는 Fig. 9에 나타난 위험파단선의 단면적이다.

4.2 해석결과와 현행기준식에 의한 내력비교

Table 2의 평균항복강도($\sigma_y = 499.83\text{MPa}$)와 인장강도($\sigma_u = 547.46\text{MPa}$)를 적용하여 4.1절에서 제시된 현행설계기준식을 바탕으로 볼트접합부의 최대내력을 해석에서 결정한 파단형태에 해당되는 기준식에 의한 최대내력(P_{ut})을 산정하여 해석결과의 최대내력(P_{ua})과 비교하여 Tables 5와 6에 각각 정리하였다.

해석결과와 최종파단형태와 동일한 파단형태로 조건에 맞는 식을 적용하여 면외변형에 의한 내력저하가 발생되지 않는 것으로 가정한 해석모델에 대해서 최대내력 비교결과를 Table 5에 정리하였다. AISI와 AAA기준식의 최대내력비(P_{ut}/P_{ua})는 각각 1.06~1.09(평균 1.07), 1.06~1.17(평균 1.12)로 약간 과대평가하는 경향을 나타냈다.

또한 면외변형에 의한 접합부의 최대내력이 저하된 것으로 판단된 해석모델에 대해서 최대내력의 비교결과를 Table 6에 정리하였다. AISI와 AAA기준식의 최대내력비(P_{ut}/P_{ua})의 평균값은 각각 1.55, 1.64로 면외변형에 의한 내력저하가 발생한 접합부에 대해 현행기준식 AISI와 AAA는 각각 55%, 64% 과대평가하는 것으로 나타났다. 현행기준식의 블록전단

Table 5. Strength comparison between analysis and design prediction for specimens with no strength reduction by curing

Specimens	Analysis		Design prediction and strength ratio			
	P_{ua} (kN)	FM	AISI (2012)		AAA (2010)	
			(kN)	P_{ut}/P_{ua}	P_{ut} (kN)	P_{ut}/P_{ua}
AL2T2E24B30	48.12	E	52.56	1.09	52.06	1.08
AL2T2E30B30	52.29	BS	56.06	1.07	61.17	1.17
AL2T2E24B36	48.57	E	52.56	1.08	52.06	1.07
AL2T2E30B36	52.47	BS	56.06	1.07	61.17	1.17
AL2T2E24B48	48.97	E	52.56	1.07	52.06	1.06
AL2T2E30B48	52.75	BS	56.06	1.06	61.17	1.16
AL2T2E24B60	49.12	E	52.56	1.07	52.06	1.06
AL2T2E30B60	52.97	BS	56.06	1.06	61.17	1.15
Average				1.07		1.12
COV				0.010		0.045

Table 6. Comparison of bearing strength by current design specimens and proposed strength

Specimens	Analysis result		Design prediction				Bearing strength, strength ratio				Bearing factor, C	Proposed strength P_{utp} (kN) $C=1.85$	P_{utp}/P_{ua}
	P_{ua} (kN)	FM	AISI(2012)		AAA(2010)		AISI(2012)		AAA(2010)				
			P_{ut} (kN)	P_{ut}/P_{ua}	P_{ut} (kN)	P_{ut}/P_{ua}	P_{ut} (kN)	P_{ut}/P_{ua}	P_{ut} (kN)	P_{ut}/P_{ua}			
AL2T2E36B30	52.76	BS	63.94	1.21	68.75	1.30	78.83	1.49	52.56	1.00	2.01	48.61	0.92
AL2T2E48B30	51.90	BS	79.71	1.54	84.52	1.63	78.83	1.52	52.56	1.01	1.98	48.61	0.94
AL2T2E60B30	52.37	BS	95.48	1.82	100.28	1.91	78.83	1.51	52.56	1.00	1.99	48.61	0.93
AL2T2E36B36	52.69	BS	63.94	1.21	68.75	1.30	78.83	1.50	52.56	1.00	2.01	48.61	0.92
AL2T2E48B36	51.16	BS	79.71	1.56	84.52	1.65	78.83	1.54	52.56	1.03	1.95	48.61	0.95
AL2T2E60B36	51.51	BS	95.48	1.85	100.28	1.95	78.83	1.53	52.56	1.02	1.96	48.61	0.94
AL2T2E36B48	53.69	BS	63.94	1.19	68.75	1.28	78.83	1.47	52.56	0.98	2.04	48.61	0.91
AL2T2E48B48	51.73	BS	79.71	1.54	84.52	1.63	78.83	1.52	52.56	1.02	1.97	48.61	0.94
AL2T2E60B48	51.60	BS	95.48	1.85	100.28	1.94	78.83	1.53	52.56	1.02	1.96	48.61	0.94
AL2T2E36B60	51.76	BS	63.94	1.24	68.75	1.33	78.83	1.52	52.56	1.02	1.97	48.61	0.94
AL2T2E48B60	49.03	BS	79.71	1.63	84.52	1.72	78.83	1.61	52.56	1.07	1.87	48.61	0.99
AL2T2E60B60	48.76	BS	95.48	1.96	100.28	2.06	78.83	1.62	52.56	1.08	1.86	48.61	1.00
Average				1.55		1.64		1.53		1.02	1.96		0.94
COV				0.183		0.174		0.028		0.028	0.028		0.028

파단식(식 (6), (7), (10), (11))에서 하중방향연단거리(e)가 증가함(즉, 전단저항순단면적: A_{nv} , 전단저항총단면적: A_{gv} 가 증가함)에 따라 최대내력이 증가하는 것으로 예측할 수 있지만, 해석결과에서는 면외변형에 따른 내력저하로 하중방향연단거리가 증가함에도 불구하고 최대내력이 증가하지 않았기 때문에 현행 두 기준식에 의해 접합부의 최대내력이 과대평가된 것으로 사료된다.

추가적으로, 3.4절에서 제시된 면외변형에 의한 내력저하조건인 하중직각방향연단거리 30mm 이상 하중방향 연단거리 36mm 이상인 해석모델은 최대내력시점에서 파단형태가 볼트지압에 의한 면외변형이 발생하여 최대내력이 결정되었기 때문에 두 기준(AISI, AAA)에서 제시한 지압파단(Bearing fracture)식에 의한 예측내력과 비교하였다.

4.3 지압계수

현행설계기준식은 면외변형의 영향을 고려하지 않고 있기 때문에 볼트지압에 의해 판의 면외변형이 발생한 것으로 판단하여 면외변형이 내력저하에 영향을 미치는 해석모델의 최대내력과 AISI와 AAA기준식에 의한 평균 지압판단 최대내력비(P_{ut}/P_{ua})는 각각 1.53, 1.02로 나타났다. AISI기준식 (5)과 AAA기준식 (9)에서 지압계수(C)는 각각 3.0, 2.0이며, 현행기준의 지압판단식은 면외변형에 의해 내력저하된 접합부의 내력을 과대평가하는 경향을 보였다. 두 기준에서 제시하는 지압계수는 모두 면내에서 발생하는 지압판단에서 유추한 것으로 본 연구에서 관찰된 볼트지압에 의한 판의 면외변형의 양상을 충분히 고려하지 못해 과대평가되는 것으로 볼 수 있다.

면외변형과 볼트간 인장판단이 알루미늄 합금 7075-T6 일면전단 볼트접합부의 최대내력의 결정에 영향을 미치기 때문에 면외변형을 동반한 지압판단개념을 적용하여 식 (12)와 같이 별도의 지압계수를 산정하였고, 식 (1)에 의한 최대내력 비교결과를 Table 6에 정리하였다. 식 (12)에 의해 계산된 지압계수(C)는 Table 6에 제시한 바와 같이 1.86~2.04의 범위이며 접합부의 구조안정성을 고려하여 1.85로 제시하였다.

$$C = \frac{P_{ua}}{dt\sigma_u} \quad (12)$$

$$P_{utp} = 1.85dt\sigma_u \quad (13)$$

식 (13)에 의해 제안된 내력평가식의 최대내력비(P_{utp}/P_{ua})는 0.91~1.00의 범위로 평균값은 0.94이며 AISI와 AAA의 현행기준식에 의한 예측내력보다 구조안전측면에서 양호한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 고강도 알루미늄 합금 7075-T6로 제작된 2행 1열 일면전단 볼트접합부(공칭평판두께 2.0mm, 볼트직경 12mm, 피치와 게이지 36mm)의 기존실험연구결과를 토대로 유한요소해석모델을 구축하고 해석의 타당성을 검증하였다. 하중방향연단거리와 하중직각방향연단거리를 추가변수로 하여 해석을 수행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 유한요소해석결과 실험결과에서 관찰된 판두께방향(하중직각방향)의 면외변형이 발생하였고 면외변형에 의한 내력저하도 발생하는 것으로 나타났다.
- (2) 하중직각방향 연단거리(b)를 기존실험의 60mm이외에 30mm, 36mm, 48mm를 추가하여 변수해석을 실시하였고 면외변형에 의한 내력저하조건을 제시하였다(하중방향 연단거리가 36~60mm의 범위와 하중직각방향연단거리가 30~60mm의 범위를 만족하는 경우). 볼트지압에 의한 평판의 면외변형에 의한 내력저하는 4~21%로 나타났다, 연단거리가 증가함에도 불구하고 내력상승효과는 없었다.
- (3) 면외변형에 의한 내력저하가 발생한 접합부에 대해 미국철강협회(AISI)와 미국알루미늄협회(AAA)기준식에 의해 예측한 블록전단판단내력은 평균 55%, 64% 과대평가하였고, 지압판단내력은 평균 53%, 2%과대평가하였다.
- (4) 전형적인 블록전단판단식에 의해 내력을 평가할 수 없으며, 볼트의 지압에 의한 평판의 면외변형(일종의 국부좌굴)과 볼트간 인장판단에 의해 최대내력이 결정되었으므로 볼트의 지압개념과 기존의 지압판단식을 활용하여 지압계수를 제안($C=1.85$)했으며, 예측정도가 개선되었다.

감사의 글

이 연구는 2017년도 경남과학기술대학교 대학회계연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

참고문헌(References)

- [1] 김태수(2013) 박판 알루미늄 합금(6061-T6) 볼트접합부의 구조적 거동에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 구조계 논문집, 대한건축학회, 제29권, 제6호, pp.49-56.
Kim, T.S. (2013) An Experimental Study on Structural Behaviors of Single Shear Bolted Connections with Thin-Walled Aluminum Alloys (6061-T6), *Architectural Institute of Korea*, Vol.29, No.6, pp.49-56 (in Korean).
- [2] 대한건축학회(2016) 한국건축구조기준(KBC2016), 대한건축학회.
Architectural Institute of Korea (2016) *Korea Building Code (KBC2016)*, AIK, Korea.
- [3] Aluminum Association, *Aluminum Design Manual*, Wa-

- shington (DC): The Aluminum Association, 2010.
- [4] Cho, Y.H. and Kim, T.S. (2016) Estimation of Ultimate Strength In Single Shear Bolted Connections with Aluminum Alloys (6061-T6), *Thin-Walled Structures*, Vol.101, pp. 43-57.
- [5] 조용현, 최윤철, 김태수(2013) 알루미늄 합금(6061-T6) 전단접합 방법에 따른 볼트접합부의 구조거동의 비교, 대한건축학회 구조계논문집, 대한건축학회, 제29권, 제11호, pp.13-20.
Cho, Y.H., Choi, Y.C., and Kim T.S. (2013) A Comparison on the Ultimate Behavior of Bolted Connections with Aluminum Alloys (6061-T6) according to Bolt Shear Loading, *Architectural Institute of Korea*, Vol.29, No.11, pp. 13-20 (in Korean).
- [6] Kim, T.S. and Cho, Y.H. (2014) Investigation on Ultimate Strength and Failure Mechanism of Bolted Joints in Two Different Aluminum Alloys, *Materials and Design*, Vol. 58, pp.74-88.
- [7] 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, pp.407-421.
- [8] Kim, T.S., Kim, M.S., and Cho, T.J. (2018) Parametric Study on Ultimate Strength of Four-bolted Connections with Cold-formed Carbon Steel, *International Journal of Steel Structures*, Vol.18, No.1, pp. 265-280.
- [9] 김지훈, 김태수, 강현식(2013) 페라이트계 스테인리스강 2행 2열 일면전단 볼트접합부의 최대내력평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제55권, 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.
- [10] ABAQUS (2003). Analysis User's Manual. Ver. 6.4. ABAQUS Inc., Pawtucket, 18-4, USA.
- [11] American Iron and Steel Institute (AISI), (2012) *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, AISI S100-12, USA
- [12] American Institute of Steel Construction (AISC), (1993) *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel*, Chicago, IL, USA.

요 약 : 본 연구는 유한요소해석을 적용하여 고강도 알루미늄 합금(7075-T6)의 2개 볼트로 구성된 일면전단 볼트접합부의 구조거동과 면외변형에 의한 최대내력에 미치는 영향을 조사하는 것을 연구목적으로 한다. 볼트접합부의 구조거동을 예측하는데 있어 기존실험결과와 해석결과의 비교를 통해 유한요소해석의 타당성을 검증하였다. 면외변형 발생으로 볼트접합부의 내력저하정도를 정량적으로 평가하였다. 연단거리에 대한 추가적인 변수해석이 수행되었고 하중방향연단거리와 하중직각방향연단거리에 따른 면외변형 발생조건을 제시하였다. 최종적으로 알루미늄 합금 7075-T6 볼트접합부에 대한 면외변형의 영향을 고려한 수정내력식을 제안하였다.

핵심용어 : 알루미늄합금, 볼트접합부, 최대내력, 면외변형, 유한요소해석, 설계기준
