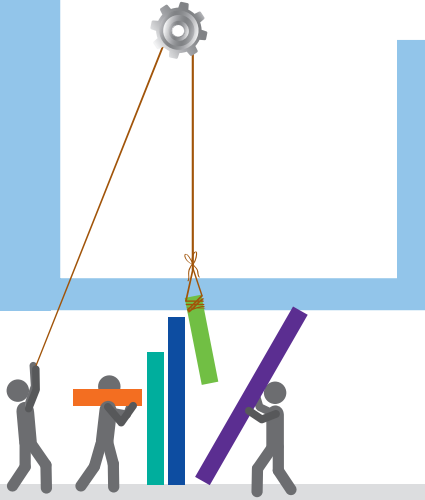


볼트접합부의 블록전단파단내력

Block Shear Fracture Strength of Bolted Connections under Shear



SCIENTIFIC ARTICLE

1. 서론

단순인장력을 받는 지압형 볼트접합부에서 발생할 수 있는 종국형태는 볼트의 전단파단, 전단면 항복, 순단면인장파단, 종전단파단, 지압파단, 블록전단파단으로 분류할 수 있다. 상대적으로 파단이나 과도한 변형으로 종국상태가 명확한 볼트전단파단과 전단면 항복에 관련된 내력평가식에는 큰 변화가 없었으나, 볼트배열, 전단면수(일면과 이면), 접합부재형태(평판, Γ 형강, Υ 형강, H형강), 판두께, 볼트직경, 연단거리(하중방향과 하중직각방향), 피치, 게이지 등에 따라 순단면인장파단, 종전단파단, 블록전단파단의 내력평가식은 많은 국가의 연구자들의 연구결과에 의해 수정·보완되어 왔다.

특히, 하중직각방향 인장파단(또는 인장항복)과 하중방향의 전단파단(또는 전단항복)의 조합으로 발생하는 블록전단파단(Block shear fracture)의 경우는 가장 최근에 발견된 파단형태로 상기 언급한 변수에 따라 내력식이 꾸준히 개선되고 있다. 열간압연강에 대해서는 Birkemoe 등(1978년), Ricles 등(1983년), Hardash 등(1985년)에 의해 처음으로 발견되고 관련 연구를 통해 내력식이 제안되었고, 이러한 연구결과가 1993년 출판된 미국강구조학회(AISC) 설계기준에 반영되었다. AISC2005에서는 1993년 이후 추가로 제안된 블록전단내력식을 토대로 수정되었고, AISC2010에는 변화가 없었다. 유럽에서도 1993년 EC3, 일본에서는 일본건축학회(AIJ) 강구조설계기준(2010)에서 AISC와는 다른 형태의 블록전단내력식이 제정되었다. 냉간성형강 인장볼트접합부에서는 1996년 Seleim 등이 블록전단파단에 관한 연구결과를 제시했다. 미국철강협회기준 AISI-2007과 호주/뉴질랜드기준AS/NZS-2001는 AISC(2005) 기준과 동일하게 블록전단내력식을 규정하였다.

블록전단파단을 구성하는 인장부분과 전단부분의 파단(또는 항복)산정



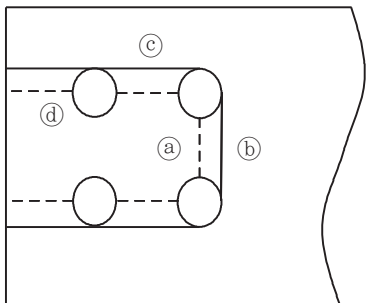
김 태 수 Kim, Tae Soo
한밭대학교 건축공학과 교수
tskim@hanbat.ac.kr

단면선, 파단(또는 항복)순서, 판두께(열간압연, 냉간성형), 강종 등에 따라 지금까지도 많은 연구자들에 의해 실험 및 해석적 연구가 진행되어 오고 있다. 본 기사에서는서 현행설계기준과 기존연구자들에 의해 제시된 블록전단파단내력식에 대해서 정리하고 고찰해 보고자 한다.

2 지압형 볼트접합부의 블록전단파단 내력

2.1 블록전단파단의 개요

이미 언급한 바와 같이 지압볼트접합부에서 볼트배열에 따라 접합판의 파단형태는 순단면파단(Tensile net-section fracture), 종전단파단(Shear-out fracture), 지압파단(Bearing fracture)과 블록전단파단(Block shear fracture)으로 나뉘어져 있다. 이 중에서 블록전단파단은 1978년에 앵글 coped 보 접합부에서 처음으로 관찰되었고, 그 이전까지는 인장볼트접합부에서 블록전단파단에 대해 고려되지 않았다. 블록전단은 그림 1과 같이 평판 볼트접합부에 대한 인장파단(또는 인장항복)과 종전단파단(또는 종전단항복)의 조합된 종국형태를 나타내며 내력은 인장파단(또는 인장항복)내력과 전단파단(또는 전단항복)내력의 합으로 산정된다. 그림 2와 그림 3에서는 γ 형강과 coped 보에서는 블록전단파단선을 나타낸다. 그림 4는 실험결과 나타난 평판, γ 형강(앵글)과 Γ 형강(채널)의 볼트접합부에서 블록전단형태이다.



- Line (a) : A_{nt}
- Line (b) : A_{gt}
- Line (c) : A_{gv}
- Line (d) : A_{nv}

여기서, A_{nt} 는 인장저항 순단면적으로 점선으로 나타낸 Line(a), A_{gt} 는 인장저항 총단면적으로 실선으로 나

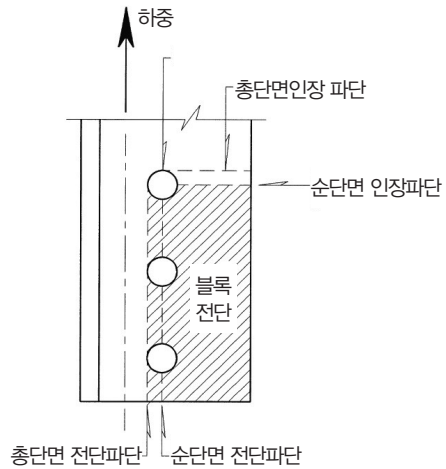


그림 1. 블록전단 파단(또는 항복) 산정단면선

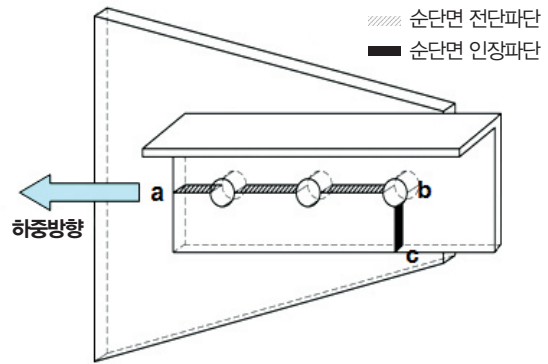
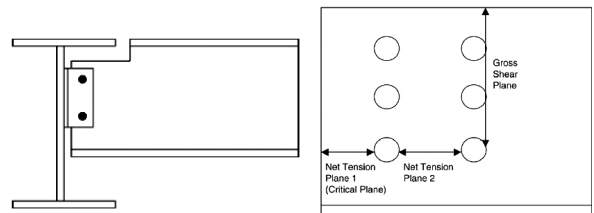


그림 2. γ 형강(앵글)의 블록전단 파단선



(a) Coped 보 형상 (b) 웨브의 블록전단파단선

그림 3. Coped 보 형상 및 블록전단 파단선

타낸 Line(b), A_{gv} 는 전단저항 총단면적으로 실선으로 나타낸 Line(c), A_{nv} 는 전단저항 순단면적으로 점선으로 나타낸 Line(d)이다.

2.2 블록전단파단내력식

현행기준식과 연구자들에 의해 제시된 블록전단파단 내력은 인장순단면파단, 인장순단면항복, 인장총단면파단, 인장총단면파단, 전단순단면파단, 전단순단면항

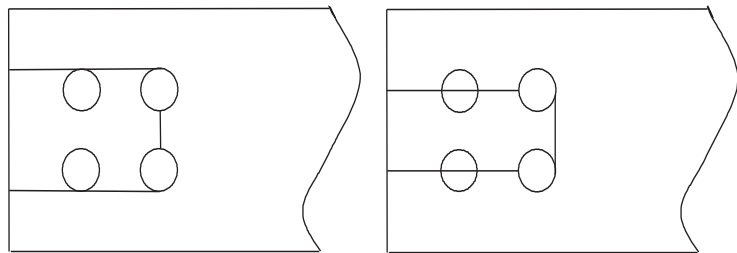


그림 4. 볼트접합부의 전형적인 블록전단파단 형태

복, 전단충단면파단, 전단순단면 항복의 조합으로 표현할 수 있다. 예를 들어, 그림 5(a)는 인장저항 순단면적 파단(또는 항복)후 전단저항 충단면적파단(또는 항복)의 블록전단파단 형상을 나타내고 있으며, 그림 5(b)는 인장저항 충단면적 파단(또는 항복)후 전단저항 순단면적 파단(또는 항복)의 블록전단파단 형상을 나타낸다. 이와 같은 파단선의 종류, 파단의 발생순서 및 전단응력계수 등에 따라 블록전단파단내력식이 제안되고 개정되어 오고 있다.

현행 강구조설계기준인 AISC(2001), AISC(2010), AIJ(2002), AISI-NAS(2010), EC3(1-8, 2005)등 각국의 설계기준에서 규정하고 있는 단순인장력을 받는 지압형 볼트접합부에 대한 블록전단파단 내력식을 정리하면 다음과 같다.

- AISC(2001), KBC2009 ; 열간압연강



(a) 인장순단면파단(항복)+전단충단면파단(항복) (b) 인장충단면파단(항복)+전단순단면파단(항복)

그림 5. 발생가능한 블록전단파단 형상

AISC1993부터 AISC2001에서는 그림 6과 같이 인장부분의 내력이 전단부분의 내력보다 크면 그림 6(a)와 같은 형태의 파단(식 1)이, 전단부분의 내력이 크면 그림 6(b)와 같은 파단형태의 블록전단파단(식 2)이 발생한다고 가정하고 내력을 산정한다. 국내의 건축구조기준인 KBC2009에서는 AISC2001의 블록전단파단내력식을 준용하고 있고, KBC2016에서는 AISC2005기준식(식 (3), 식(4))을 따른다.

$F_u A_{nt} \geq 0.6 F_u A_{nv}$ 일 때,

$$R_n = A_{nt} F_u + 0.6 A_{gv} F_y \quad (1)$$

$F_u A_{nt} < 0.6 F_u A_{nv}$ 일 때,

$$R_n = A_{gv} F_y + 0.6 A_{nt} F_u \quad (2)$$

여기서, F_y 는 재료의 항복강도, F_u 는 재료의 인장강도이다.

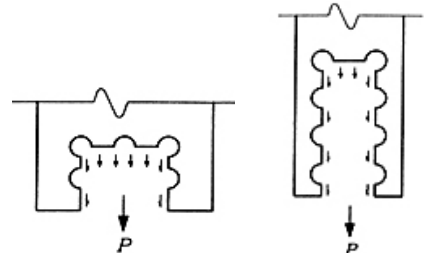
- AISC(2005, 2010, 열간압연강), AISI-NAS(2010, 냉간성형강); , 다음 중 최솟값 사용

상기 기준과 AISC2001에 비교하여 상이한 것은 블록전단파단의 조합 중 식(2)의 인장충단면항복($A_{gv} F_y$)이 없어졌고, 공통사항으로 인장순단면파단($A_{nt} F_u$)이 포함되었다.

$$R_n = U_{bs} A_{nt} F_u + 0.6 A_{gv} F_y \quad (3)$$

$$R_n = U_{bs} A_{nt} F_u + 0.6 A_{nt} F_u \quad (4)$$

여기서, U_{bs} 는 인장응력계수로, 균일인장력이 작용



(a) 큰 인장력 + 작은 전단력 (b) 큰 전단력 + 작은 인장력

그림 6. 인장력 및 전단력 크기에 따른 블록전단파단 형태

하면 1.0, 그렇지 않은 경우는 0.5를 적용한다.

볼트접합부 실험 및 해석 연구결과, 블록전단파단이 발생하기 위해서는 먼저 볼트간 순단면인장파단이 선행되어야 종전단부분에서 항복이나 파단이 발생할 수 있으므로 AISC2001에서 제시하는 식(2)의 총단면 인장 항복 메커니즘은 발생불가능 하다는 내용이 지적되었고, AISC2005의 식(4)로 수정되었다.

● EC3(1993, 2005); 열간압연강, 냉간성형강

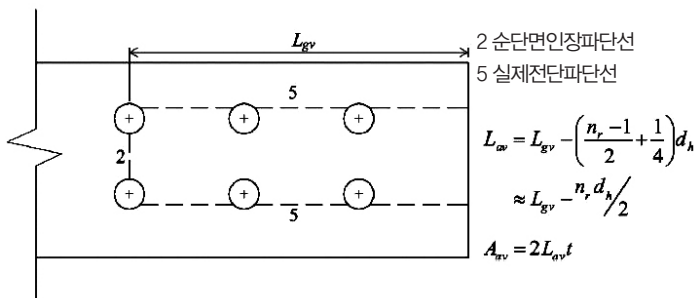
1993년의 Eurocode 3에서의 블록전단파단내력식은 순단면 인장파단($A_m F_u$)과 종전단 총단면파단($A_{gv} F_u$)의 조합으로 구성되어있었으나, 2005년 기준에서는 전단 파단부분에 대해 폰 미세스 von Mises 항복이론(전단응력계수를 미국의 0.6대신 $1 / \sqrt{3}$ 로 함)을 적용하여 식(5)와 같이 순단면 인장파단($A_m F_u$)과 종전단 순단면항복($A_m F_y$)의 조합으로 식이 수정되었다.

$$R_n = F_u A_m + \frac{1}{\sqrt{3}} F_y A_{nv} \quad (5)$$

● AIJ(2010); 열간압연강

일본건축학회에서는 강구조한계상태 설계법이 적용되었고, 볼트간 순단면 인장파단과 종전단 총단면파단의 조합(그림 5(a))에 의해 하나의 블록전단파단내력식을 규정하고 있고, 미국과 유럽의 설계식과 다른 점은 전단파단부분의 전단응력계수를 0.6대신 실험결과로부터 제시된 0.5를 사용하고 있다.

$$R_n = (A_m + 0.5 A_{gv}) \cdot F_u \quad (6)$$



평판 및 앵글볼트접합부에 관련한 지속적인 연구결과로 AISC-2010에서 제시되는 U_{bs} 는 볼트간 간격과 직경의 관계에 따라 기본값이 1.0에서 저감된 계수값이 제시되고 있고, 전단응력계수도 일본의 기준과 유사하게 각 형태 및 강종에 따라 다양한 값이 제안되어왔다. 2004년 Cem Topkaya는 연단거리, 볼트수, 피치, 항복 강도에 대한 인장강도비(F_u / F_y), 볼트직경을 주요변수로 한면만 접합된 앵글볼트접합부에서 발생하는 블록전단파단에 대해 변수를 고려한 수정된 내력식(식(7)과 식(8))을 제안하였다. 한면만 볼트에 의해 연결되어 응력집중에 의한 전단지연효과로 평판보다 작은 전단응력계수가 제시되었다.

$$R_n = A_m F_u + (0.2 + 0.35 \frac{F_u}{F_y}) A_{gv} F_y \quad (7)$$

$$R_n = A_m F_u + 0.48 A_{gv} F_u \text{ (단순식)} \quad (8)$$

2012, 2013년 L.H. Teh은 높은 항복비, 즉 낮은 F_u / F_y (=1.04, 1.09)를 갖는 강종(G450)으로 제작된 평판 볼트 접합부에 대해 아래 그림 7과 같이 볼트직경과 볼트간 거리(게이지)를 고려한 인장응력계수와 실제 전단파단선의 면적을 제안한 내력식을 다음과 같이 제시하였다.

$$R_n = A_m F_u (0.9 + 0.1d / p_2) + 0.6 A_{av} F_y \quad (9)$$

$$R_n = A_m F_u (0.9 + 0.1d / p_2) + 0.6 A_{av} \left(\frac{F_u + F_y}{2} \right) \quad (10)$$

여기서, A_{av} 는 볼트구멍과 볼트직경의 차이로 발생되는 실제 지압외곽선을 의미하는 파단단면선 5를 나타낸다. p_2 는 볼트간 간격인 게이지거리임.

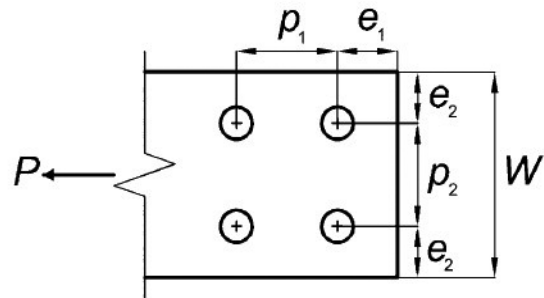


그림 7. 볼트접합부의 형상 및 실제 전단파단선

3. 맺는말

지압형 볼트접합부에서 볼트전단파단이 아닌 판재의 파단형태중에서 최근에 발견되던 블록전단파단 내력평가식이 많은 연구자에 의해 수정완료되어지고 있다. 블록전단파단설계강도는 접합단면 형태, 전단접합형태,

강재의 항복강도, 인장강도, 연신율, 판두께, 볼트배열, 연단거리, 피치, 게이지, 볼트직경 등에 따라 내력평가식이 달라질 수 있다. 각국의 평가식 개념이 통일되어 있지 않고 이에 따라 블록전단파단 내력평가식이 다르므로 상기 언급한 변수를 고려한 통합설계식 제안이 필요하다. ■

● 참고문헌 references ●

- 1 대한건축학회, 건축구조기준 및 해설(KBC2009), 기문당, 2009.
- 2 대한건축학회, 건축구조기준 및 해설(KBC2016안), 기문당, 2016(예정).
- 3 한국강구조학회(KSSC), 강구조설계, 2011.
- 4 일본건축학회(AU), 강구조한계상태설계지침 · 동해설, 2010.
- 5 일본건축학회(AU), 경강구조설계시공 지침 · 동해설, 2002.
- 6 대한건축학회(AIK), 냉간성형강 구조설계 기준 및 해설, 1999.
- 7 AISC, MANUAL OF STEEL CONSTRUCTION : Load and Resistance Factor Design, 2001.
- 8 AISC, STEEL CONSTRUCTION MANUAL, 2005.
- 9 AISC, Steel construction manual. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA., 2010.
- 10 AISI, North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2007.
- 11 AISI S100-10, North American specification for the design of cold-formed steel structural members. American Iron and Steel Institute, Washington D.C., USA., 2010.
- 12 AS/NZS 4673, Cold-formed stainless steel structures. AS/NZS 4673, Australian Standard/New Zealand Standard Australia, Australia, 2010.
- 13 Cem Topkaya, Finite element modeling of block shear failure in coped steel beams, Journal of Constructional

- Steel Research 63, 2007, 544-553
- 14 Topkaya C. A, finite element parametric study on block shear failure of steel tension members. Journal of Constructional Steel Research, 2004;60, 1615-3165.
- 15 Ricles JM, Yura JA, Strength of double-row bolted-web connections. ASCE Journal of Structural Engineering, 1983;109(1), 126-142.
- 16 Drew D. A. Clements and Lip H. Teh,, Active Shear Planes of Bolted Connections Failing in Block Shear, Journal of Structural Engineering, 2013,139, 320-327.
- 17 Birkemoe, P. C., and Gilmor, M. I., Behavior of bearing-critical double-angle beam connections, Eng. J. AISC, 1978, 15(3), 109-115.
- 18 Hardash, S. G., and Bjorhovde, R., New design criteria for gusset plates in tension, Eng. J. AISC, 1985, 22(2), 77-94.
- 19 Teh, L. H., and Clements, D. A., Block shear capacity of bolted connections in cold-reduced steel sheets, J. Struct. Eng., 2012, 138(4), 459-467.
- 20 Teh, L. H., and Gilbert, B. P., Net section tension capacity of bolted connections in cold-reduced steel sheets." J. Struct. Eng., 2012, 138(3), 337-344.
- 21 EC3(EN 1993-1-3), Design of Steel Structures, Part 1-3 : General rules, Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, 2005.