

고강도 열연재의 Hole Flanging시 성형특성과 파단에 관한 연구

김정운* · 공성락* · 김봉준* · 문영훈*

Hole Flangeability and Fracture Behaviors of Circular Flanges of High Strength Hot Rolled Steels

J. W. Kim, S. R. Gong, B. J. Kim and Y. H. Moon

Abstract

The hole flanging experiments are performed on a flat circular plates with a hole in the center and the flangeability and fracture behavior of TRIP steel and ferrite-bainite duplex steel were examined.

Over the ranges of conditions investigated, the flangeability of ferrite-bainite duplex steel is better than TRIP steel and the term 'hole flanging capacity' introduced in this study.

Fracture behavior of TRIP steel and ferrite-bainite duplex steel was characterized by petal formation at the edge of flange. In case of crack propagation, crack tip diversion that is supposed to be responsible for flangeability occurs more severely on HSLA Steel.

Key Words : Hole Flanging, High Strength Steel, Fracture behavior, Crack, Necking

1. 서 론

Hole flanging은 판재의 프레스 가공에 광범위하게 사용되고 있는 공정으로써 원통형이나 원뿔형의 목이나 flange를 형성하기 위해 판재의 가장자리 홀부분에 금형을 이용하여 재료를 변형시키는 성형기법이다⁽¹⁾(Fig. 1). hole flanging에서 발생하는 균열은 대부분 플랜지의 가장자리부에서 일어난다. 열연강재는 내부 hole을 punching, drilling 또는 shearing으로 가공하기 때문에 flange

boundary에서 균열이 쉽게 발생되며 hole flangeability는 주로 flange boundary에서의 notch 감수성과 연성에 의존한다⁽²⁾. hole flanging시 시편의 hole주변에 대한 강재의 변형은 bending과 stretching의 조합으로 관찰되며 원주방향의 변형은 성형후 생성된 플랜지의 가장자리에서 일어난다. 이러한 원주방향의 변형은 necking또는 tearing에 의해 플랜지의 파단을 일으키게 한다. Hole flanging시 재료의 파단은 플랜지의 파단형상의 하나의 Petal을 형성하며, 가혹한 변형을 갖는 홀의 가장자리에

* 부산대학교 정밀기계공학과

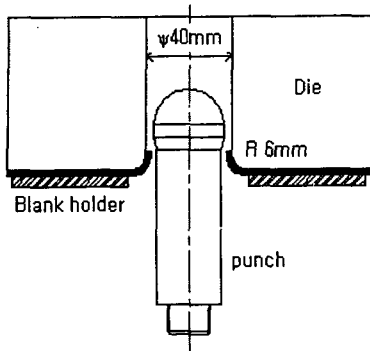


Fig. 1 Schematic process diagrams of hole flanging test

서 발생하는 국부적인necking 현상의 결과로 다소 규칙적인 형상을 나타낸다⁽³⁾.

따라서, 본 실험에서는 고강도 자동차용 소재로 부각되고 있는 TRIP(Transformation Induced Plasticity)강과 페라이트-베이나이트 복합조직강(Ferrite-Bainite Duplex Microstructures:F+B Steel)을 대상으로 hole flanging 시험을 행하여 hole flangeability에 영향을 미치는 인자를 파악하여 성형성을 평가하고 홀플랜징공정에서 flange 시편에 대한 파단거동을 관찰하여 파단양상을 조사하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 홀 플랜징 실험

Hole flanging에 사용된 실험장비는 최대용량이 50ton인 복동식 유압프레스로서 Nitrogen Gas Spring으로 제어하는 블랭크 홀더력은 플랜지 성형에 영향을 주지 않는 범위를 고려하여 7ton으로 고정하였다. clearance는 20%로 고정하여 소재의 두께에 따라 펀치의 직경은 각각 37.6mm, 35.2mm, 32.56mm로 제작하였으며 형상은 반구형으로 설정하였다. 금형은 STD11로 제작하였으며 Hole flanging 시험중 ram speed는 480mm/min로 설정하였다. 시편은 바깥지름이 170mm인 원판형 시편이며 punch가 맞닿는 원판의 중심부에 hole을 가공하였다. 시편의 홀직경(Hole Diameter:Hd)은 $\phi 12.5\text{mm}$, $\phi 14\text{mm}$ ~ $\phi 34\text{mm}$ 까지 2mm간격으로 설정하였고 시편의 두께는 1.0mm, 2.0mm, 3.1mm로 가공하여 성형후 홀직경에 따른 두소재의 두께별 홀 플랜징성을 구하였다.

2.2 홀 플랜징성 평가

일반적으로 플랜징성을 측정하기 위한 parameter로 사용하는 구멍확장시험(hole expansion test)을 통한 구멍확장율(Hole Expansion Ratio, HER)을 본 실험에 적용하여 hole 끝단부의 변형정도를 평가하기 위해 hole flanging capacity(HFC)를 다음과 같이 정의하고 소재와 두께변화에 따른 성형하중과 HFC를 비교하였으며, 또한 홀플랜징을 평가하기 위하여 HFC*를 정의하였다⁽⁴⁾.

$$HFC = (d_2 - d_1) / d_1 \times 100(\%) \quad (1)$$

$$HFC^* = (d_2 - d_1^*) / d_1^* \times 100(\%) \quad (2)$$

d_1 = 성형전 홀의 반경

d_1^* = 성형가능한 최소홀직경

d_2 = 성형후 홀의 가장자리까지의 거리
= punch의 반경

2.3 파단양상

홀 플랜징시 파단된 시편의 파단양상을 보기위해 홀 직경을 감소시키면서 최초 크랙이 발생한 시편에서부터 파단에 이르기까지의 시편에 대하여 파단거동을 조사하였으며 파단시편의 일부를 채취하여 미세균열의 진행방향을 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 실험 결과

3.1 홀 플랜징의 성형성 평가

본 연구에서는 홀플랜징성에 대한 두 소재의 성형성을 평가하기 위해 Hole Flanging Capacity (HFC)를 정의하여 두께별로 홀직경에 따른 성형하중과 HFC의 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 두께 1.0mm에서는 두 소재가 다소 차이가 없지만 두께가 증가할수록 TRIP 강은 HFC가 증가함에 따라성형하중이 연속적으로 증가하며 F+B 강에 비해 HFC의 증가에 대한 성형하중의 변화율이 큰 것을 알 수 있다. Fig. 3은 두께의 증가에 따른 최대성형하중과 HFC의 변화를 나타낸 것으로써 TRIP 강은 두께증가에 비해 HFC가 약50%를 넘지 않는 반면 F+B 강은 두께가 1mm일 때 HFC가 75%이상이며 이후 두께가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 양상을 나타내었다. 즉 이것은 두께의 증가가 TRIP 강의 경우 F+B 강에 비해 홀 플랜징성에 대한 영향이 적다는 것을 나타낸다.

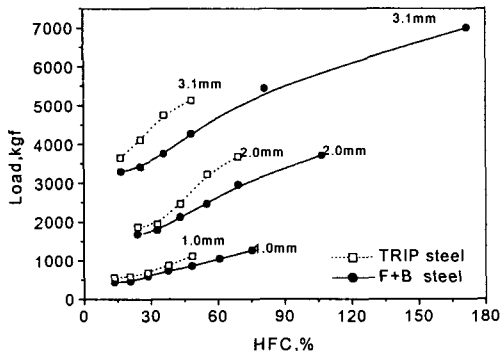


Fig. 2 Comparison of forming load with respect to the HFC

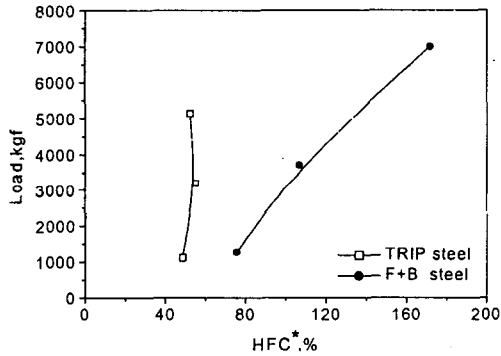


Fig. 3 Comparison of forming load with respect to the HFC

이와 같은 결과는 성형한계의 측면에서 F+B 강이 TRIP 강에 비해 연신율은 낮으나 플랜징성이 우수하다는 것을 보여주고 있다.

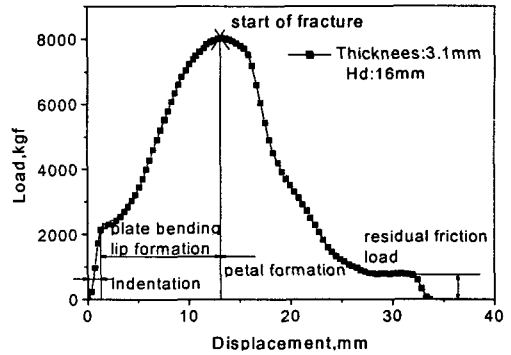


Fig. 4 Progressive perforation of steel plate for variation of punch load with punch travel

3.2 파단양상

hole flanging시 플랜지부의 변형은 인장시험과는 달리 균일변형을 초과하는 변형이며 특히 flange 길이방향의 변형율과 두께방향의 변형율보다는 원주방향의 변형율이 변형의 가장 큰 요소로 작용한다. Fig. 4는 성형시 변위에 따른 하중곡선으로써 성형 중 파단 과정을 도식적으로 나타내고 있다. 처음 펀치가 시편에 닿으면서부터 굽힘 과정이 진행되어 lip의 형성이 시작되고, 이때 소재의 한계성형하중을 넘으면서 파단이 시작되어 결국엔 플랜징시 파단형상의 하나인 petal이 형성되는 과정을 나타내고 있다. Fig. 5는 홀플랜징시 일반적으로 압연방향에 따라 파단이 형성되는 과정을 실제 시편의 형상으로 보여주고 있다. 최초 홀가장자리에서 시편의 압연방향에 크랙이 발생하여 이후 압연방향에 대하여 90도 방향으로도 크랙이 발생되어 결국 네갈래의 petal을 형성하면서 파단되었다. 홀플랜징시 파단에서의 주된 소성변형양상은 압흔(indentation), 밴딩변형 및 lip형성(plate bending

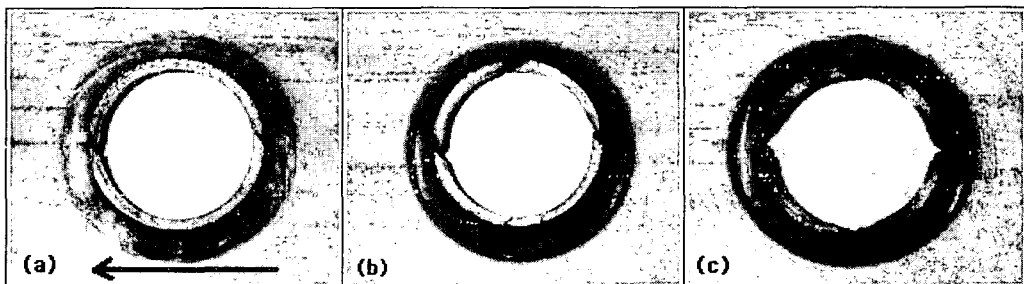


Fig. 5 The phenomena of fracture on the rolling direction of the flange in the hole flanging process (a) 0° (b) 90° (c) four petals TIRP Steel showing start and finish of fracture with petal formation

4. 결론

(1) HFC를 홀플랜지성의 평가기준으로 하여 홀 플랜지성을 평가한 결과 두께가 증가함에 따라 HFC가 증가하였고, TRIP 강은 두께에 따른 HFC의 변화가 거의 없는 반면에 F+B 강은 두께가 증가함에 따라 HFC도 증가하였다. 따라서 TRIP 강에 비해 페라이트-베이나이트 복합조직강의 홀플랜지성이 우수하였다.

(2) 홀플랜징 공정에서의 재료의 변형은 플랜지 가장자리에서의 원주방향의 인장력에 의한 국부응력집중으로 인하여 최초 크랙발생은 홀가장자리에서 발생하였다. 파단은 최초 시편의 압연방향에 크랙이 발생하여 이후 압연방향에 대하여 90도 방향에서도 크랙이 형성되어 결국 petal을 형성하면서 파단되었다.

(3) 두 소재의 파단 시편의 미소크랙의 거동에서 TRIP강은 최초 크랙이 발생하여 크랙이 끝나는 지점에서는 가지모양의 크랙양상을 나타내었으며, F+B 강 경우에는 한방향으로 크랙이 일정하게 진행되는 양상을 나타내었다.

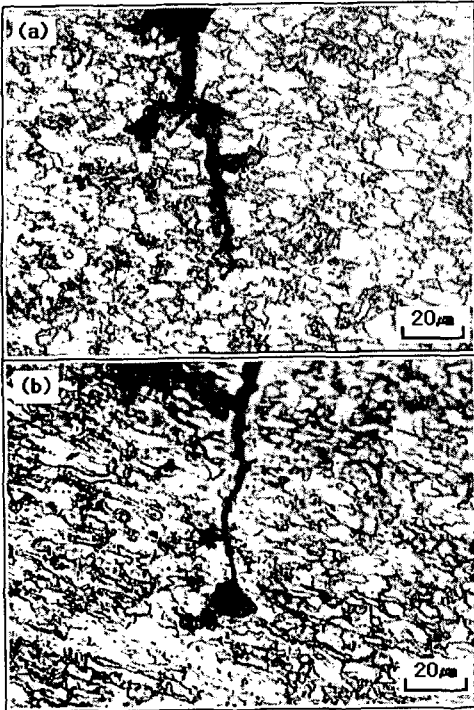


Fig. 6 Optical micrographs showing surface cracks into the interior (a)TRIP Steel and (b)Ferrite Bainite Duplex Steel

참고 문헌

- (1) T. Kumagai. and H. Saiki., 1998, "Deformation Analysis of Hole Flanging with Ironing of Thick Sheet Metals", Metal and Materials., Vol. 4, No. 4, pp.711~714.
- (2) G. H. Stribos., R. Boesenkool., June 1996, "Hole Expansion in Hot Rolled Steels", 19th IDDRG Biennial Congress., Eger, 10-14, pp.459~466.
- (3) W. Johnson., N. R. Chitkara., H. V. Minh., August 1977, "Deformation Modes and Lip Fracture During Hole Flanging of Circular Plates of Anisotropic Materials", ASME, pp.738~748.
- (4) N. M. Wang. and M. L. Wenner., 1974, "An Analytical and Experimental Study of Stretch Flanging", Int. J. Mech. Sci., Vol. 16, pp.135~143.

and lip formation), 페탈형성(petal formation)의 과정을 거친다.

두강재에 대한 미소크랙의 형상을 광학현미경으로 관찰하여 Fig. 6에 나타내었다. TRIP 강의 경우, 최초 크랙이 발생하여 한방향으로 진행하다가 끝나는 지점에서 크랙이 양방향으로 갈라지는 양상을 보이고 있으나 F+B 강 경우에는 한방향으로 파단이 일정하게 진행되는 형상을 나타내었다. TRIP 강은 F+B 강에 비해 균열의 끝부분이 가지모양의 형상을 나타내었으며, 성형시 홀 가장자리에서 미소균열의 생성 및 전파가 억제된다는 것을 알 수 있었다.