

고강도 열연판재의 홀 플랜징시 파단특성연구

김정운* · 김봉준* · 문영훈*

(2001년 4월 20일 접수)

Fracture Analysis of Hole Flanging Process for High Strength Steel Sheets

J. W. Kim, B. J. Kim and Y. H. Moon

Abstract

Hole flanging experiments are performed on flat circular plates with a hole in the center and the flangeability and fracture behaviors of TRIP steels and Ferrite-Bainite duplex steels were examined. In the hole flanging, deformation by lip and petalling occurs when plates are struck by punches of various shapes and high circumferential strains induced in the target material cause radial cracking and the subsequent rotation of the affected plate material in a number of symmetric petals. In all cases, failure of the plate was due to lip fracture that results from multiple localized neckings that take place around the hole periphery where straining is most severe and a somewhat regular pattern was observed in a fracture shape. The neck characteristics in flange formation and the transition from the lip to petal mode at which fracture occurs were compared with two materials.

Key Words : Hole Flanging, Lip, Petal, Crack, Necking, Fracture Behavior

1. 서론

홀 플랜징(Hole Flanging)은 판재의 프레스 가공에서 광범위하게 사용되고 있는 공정으로써 원통형이나 원뿔형의 목이나 플랜지를 형성하기 위해 판재의 가장자리 홀 부분에 금형을 이용하여 재료를 변형시키는 성형기법이다⁽¹⁾(Fig. 1,2). 홀 플랜징 공정에서의 성형전 시편과 성형 후 시편의 형상은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 홀

가장자리에서 형성된 플랜지로 나타나며 이때 발생하는 균열은 대부분 플랜지의 가장자리부에서 일어난다.

열연강재는 내부 hole을 punching, drilling 또는 shearing으로 가공하기 때문에 플랜지 경계부에서 균열이 쉽게 발생되며 홀 플랜징성은 주로 플랜지 경계부에서의 노치(notch) 감수성과 연성에 의존한다⁽²⁾. 홀 플랜징시 시편의 홀 가장자리부에 대한 강재의 변형은 굽힘

* 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공연구센터

(bending)과 스트레칭(stretching)의 조합으로 관찰되며, 플랜지부에서의 변형은 인장시험과는 달리 균일 변형을 초과하는 극단적인 변형이며 특히 플랜지 길이방향의 변형율과 두께방향의 변형율보다는 원주방향의 변형율이 변형의 가장 큰 요소로 작용한다. 이러한 원주방향의 변형은 플랜지의 가장자리에서 발생하며 때로는 네킹이나 티어링에 의한 파단을 야기시키기에 충분한 원인을 만든다⁽³⁾. 이 때 가혹한 변형을 갖는 홀의 가장자리에서 발생하는 국부적인 네킹 현상의 결과로 홀 플랜징 공정에서의 파단 형상의 하나인 페탈(petal)을 형성하며 다소 규칙적인 형상을 나타낸다. Richards⁽⁴⁾의 실험적 연구에서는 홀 플랜징시 목(neck)

형상의 기본적인 변형을 립(lip)과 페탈(petal)형성으로 관찰하고 있다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 고강도 자동차용 소재로 부각되고 있는 TRIP(Transformation Induced Plasticity)강과 페라이트-베이나이트 복합조직(Ferrite-Bainite Duplex Microstructures:F+B)강^(6,7)을 이용하여 홀 플랜징에 있어서 목부분의 성형성을 조사하였으며 두가지 파단양상인 립과 페탈의 변형을 알아보았다.

2. 실험 방법

실험적인 장치는 최대용량이 50ton인 복동식 유압프레스를 사용하였으며 Nitrogen Gas Spring으로 제어하는 블랭크홀더력(Blank Holder Force)은 Table. 1에 나와 있는 바와 같이 인장시험의 결과를 토대로 하여 플랜지 성형에 영향을 주지 않는 범위를 고려하여 6.7ton으로 고정하였다. 펀치와 금형은 HRC 60을 가지는 STD11로 제작하였고 클리어런스는 20%로 설정하였다. 시험편은 외경이 170mm인 원판형 시편으로 Wire cutting기를 사용하여 가공하고 펀치가 맞는 원판의 중심부에는 홀을 가공하였는데 이때 홀의 표면상태는 펀치의 크기 및 형상과 함께 홀 플랜징시 미소크랙 및 파단의 발생에 주요 변수가 되므로 drilling가공만으로 홀부분의 표면을 균일하게 가공하여 시편의 가공조건을 동일하게 하였으며 홀가공후 버어를 제거하기 위해 연마지 #1500으로 연마하였다. 소재에 따른 시험편의 종류와 성형변수를 Table. 2에 정리하였다. 미세조직은 연마지 #2000 까지 연마하여 폴리싱 클로스로 미세 연마하였으며 5% Nital(95%)

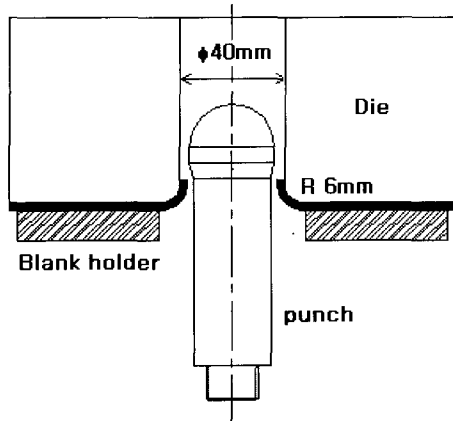


Fig. 1 Schematic process diagram of hole flanging test

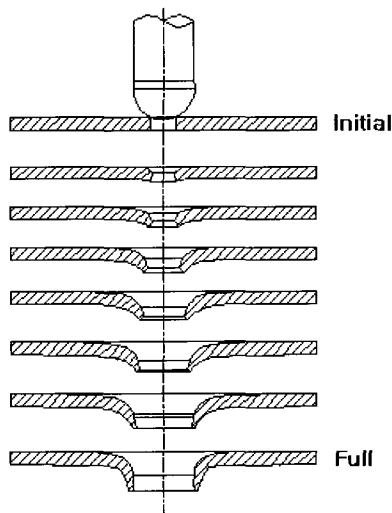


Fig. 2 Progressive punching of petals : sectional views of deformed plates with lip

Table 1 Tentile properties

Material	Yield strength (kgf/mm^2)	Tensile strength (kgf/mm^2)	Elongation (%)
F+B	48.3	58.0	13.7
TRIP	59.6	77.9	17.9

Table 2 Material used in the test

Materials	Hole Diameter:Hd (mm)	Thickness (mm)
TRIP Steel	ϕ 12.5, ϕ 14, ϕ 16, ϕ 18, ϕ 20, ϕ 22,	1.0, 2.0, 3.1
F+B Steel	ϕ 24, ϕ 26, ϕ 28, ϕ 30, ϕ 32, ϕ 34	

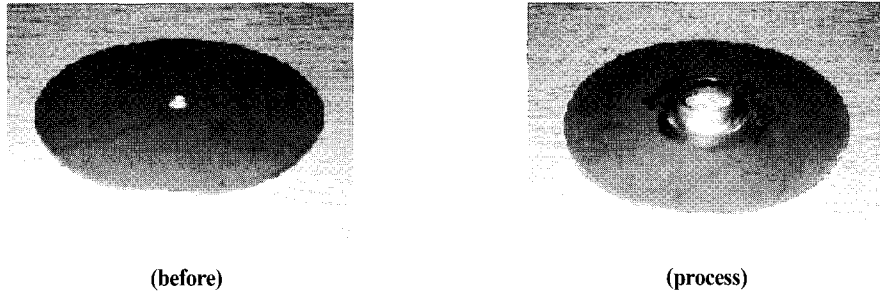


Fig. 3 Specimen shape before and after hole flanging

Methyl Alcohol+5% Nitric Acid)에 에칭하여 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 성형시 실험에 통해 얻어진 변위에 따른 하중곡선으로써 성형 중 파단 과정을 도식적으로 나타내고 있다⁽⁸⁾. 처음 펀치가 시편에 닿게 되면서 하중은 급격히 증가하게 되고 홀 가장자리에서는 굽힘 과정이 진행된다. 이때 굽힘 과정과 함께 홀은 원주방향으로 팽창하게 되며 최대성형하중에 도달하게 된다. 소재는 한계성형하중에 도달하면서 성형가능한 홀 직경에서는 립이 형성되고 그 보다 작은 임계 홀 직경을 넘어서게 되면 플랜지부의 가장자리에서 반경방향으로 크랙이 발생하여 파단이 발생하게 된다. 결국엔 플랜징시 파단형상의 하나인 페탈이 형성되면서 성형하중은 급격히 감소하게 된다. 페탈은 일반적으로 펀치보다 훨씬 작은 홀 직경을 가질 때 일어나는 국부적인 네킹 현상의 결과이며 Chitkara⁽⁸⁾ 등의 연

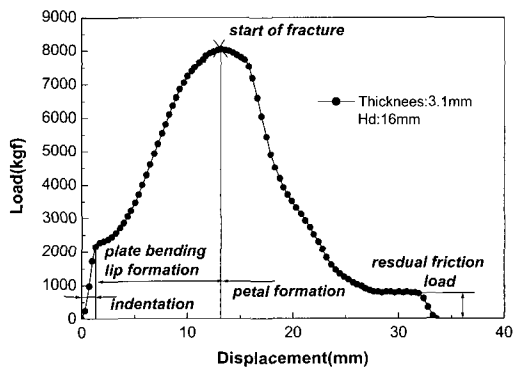
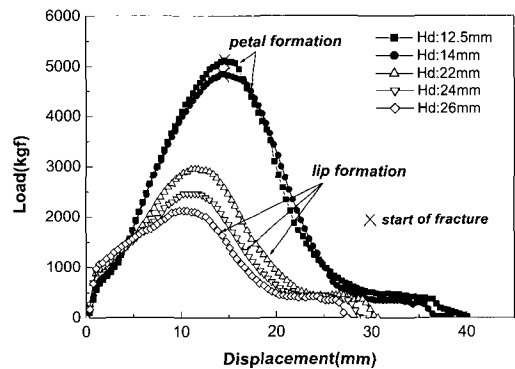


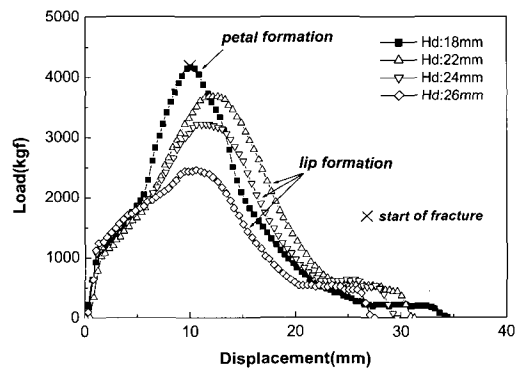
Fig. 4 Progressive perforation of steel plates for variation of punch load with displacement

구에서는 이러한 홀 가장자리부에서의 파단이 소재의 압연방향과 홀의 성형 중 기하학적인 변형에 의해 영향을 받는다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 5는 성형후 두 소재에 대해 플랜지 가장자리에서의 소성변형모드를 립과 페탈로 구분하여 나타내고 있



(a)



(b)

Fig. 5 Variation of punch load with displacement :(a) F+B Steel (b) TRIP Steel. Plate thickness 2.0mm

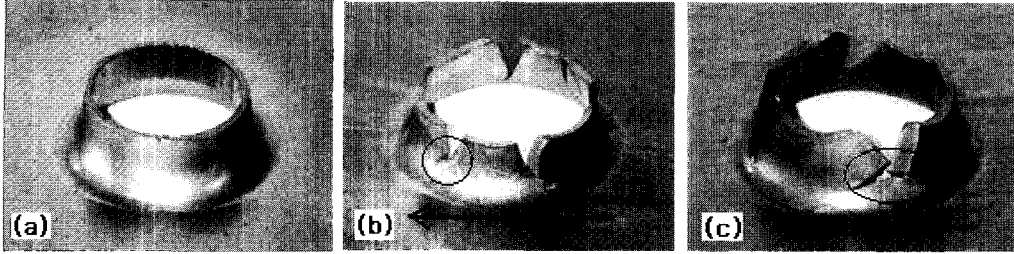


Fig. 6 Deformed specimens. (a) lip(Hd:24mm) and (b) petal(Hd:12.5mm), (c) petal(corner fracture, Hd:11mm), (\leftarrow :rolling direction). TRIP Steel

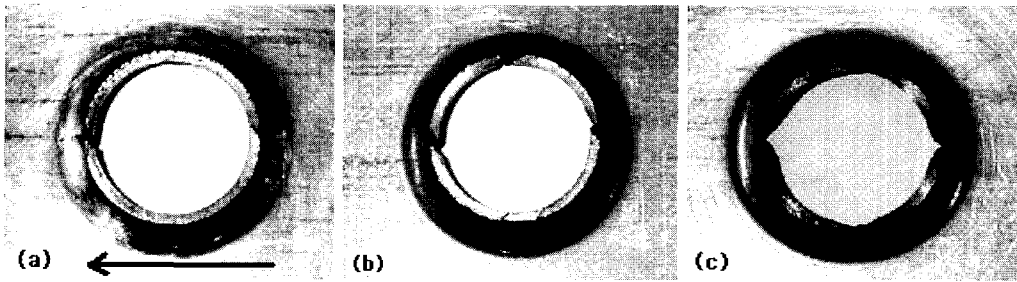


Fig. 7 The phenomena of fracture on the rolling direction of the flange in the hole flanging process. (a) 0° (Hd:18mm), (b) 90° (Hd:16mm), (c) four petals(Hd:11mm). TRIP Steel showing start and finish of fracture with petal formation

Thickness ,mm	(a)	(b)	(c)
1.0			
	(d)	(e)	(f)
2.0			

Fig. 8 Deformed shape of TRIP Steel with respect to reduction of hole diameter
hole diameter: (a) 24mm, (b) 18mm, (c) 14mm, (d) 18mm, (e) 14mm, (f) 12.5mm

다. 시편의 두께 2.0mm에서 두 소재는 모두 홀 직경이 감소함에 따라 높은 성형하중을 나타내고 있으며, 이러한 경향은 성형 중 편치의 직경에 비해 홀 직경이 작을 수록 홀 가장자리에서의 반경방향에 대한 변형량이 증가

하게 되므로 성형하중도 증가하게 되는 것이다. 동일 홀 직경에서 립을 형성한 두 소재를 비교해 볼 때 성형하중은 TRIP 강이 F+B 강에 비해 높게 나타났다. 이러한 결과는 홀 직경이 작아지면서 TRIP 강은 F+B 강에 비

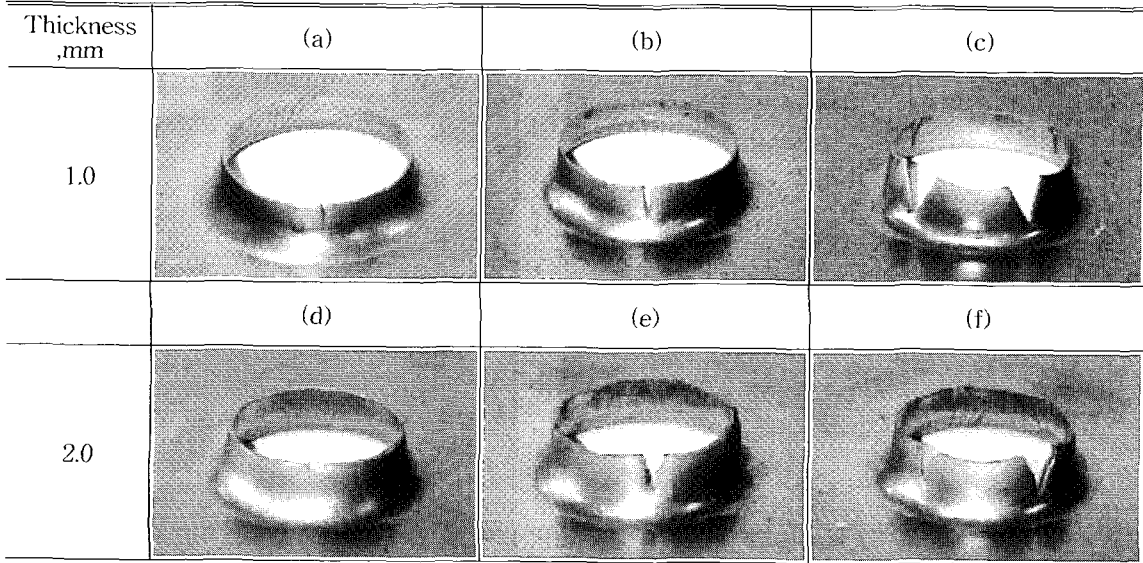


Fig. 9 Deformed shape of F+B Steel with respect to reduction of hole diameter
hole diameter:(a) 20mm, (b) 14mm, (c) 12.5mm, (d) 18mm, (e) 14mm, (f)12.5mm

해 성형시 플랜지변형에 요구되는 변형량이 적다는 것을 나타낸다. Fig. 6와 7은 최초 홀 직경의 변화에 따른 플랜징 후 시편의 형상을 나타내고 있다. Fig. 6의 (a)에서는 성형된 립의 형상을 보이고 있고 (b)와 (c)에서는 파단 후 형성된 페탈을 나타내고 있다. 파단은 최초 홀 가장자리 끝부분에서 반경방향으로 발생하여 길이방향으로 진행하다가 파단선 끝부분에서는 다시 압연방향을 따라 양쪽으로 갈라지는 현상을 나타내고 있다. 이러한 파단 양상은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 최초 압연방향을 따라 크랙이 발생하여 이후 압연방향에 대하여 90도 방향으로도 크랙이 진행되어 결국 네 방향의 페탈을 형성하면서 압연방향이 성형 중 파단에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. Fig. 8과 9에서는 실제 시편의 파단 형상을 홀 직경을 감소시켜가며 나타내었다. F+B 강의 경우, 최초 미소크랙이 발생하여 파단을 일으킬 때 시편의 두께에 관계없이 공통적으로 네갈래의 페탈을 형성시키는 다소 규칙적인 양상을 나타내고 있는 반면에, TRIP 강은 두께에 따라 여러 갈래로 페탈을 형성한 것을 볼 수 있으며 최초 미소크랙이 발생한 시편에서 F+B 강이 하나의 크랙을 형성한 반면에, TRIP강은 미소크랙의 분포가 불균일하게 형성된 것을 알 수 있었다.

두 소재에 대한 미소크랙의 형상을 광학전자현미경으로

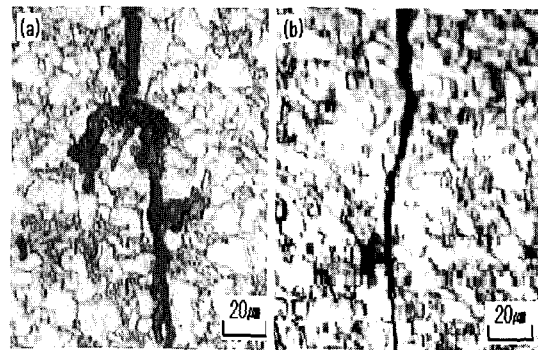


Fig. 10 Optical micrographs showing surface cracks into the interior (a)TRIP Steel and (b)Ferrite-Bainite Duplex Steel

관찰하여 Fig. 10에 나타내었다. TRIP강의 경우, 최초 크랙이 발생한 홀 가장자리에서 미세균열의 전파가 가지모양의 방향성을 가지는 것으로 나타났으나 F+B 강의 경우는 한방향으로 파단이 일정하게 진행되는 형상을 나타내었다. 따라서 이러한 TRIP 강의 미세구조는 가지모양의 미세 균열의 전파가 성형시 홀 가장자리에서의 미세균열의 생성 및 전파를 억제시키는 역할을 하기 때문에 결과적으로 F+B 강에 비해 성형하중이 훨씬 높음으로 나타났다.

4. 결 론

고강도 열연판재의 홀 플랜징 변형특성연구결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 홀 플랜징 공정에서 재료의 변형은 플랜지 가장자리에서의 원주방향의 인장력에 의한 국부응력집중으로 인하여 최초 크랙발생은 홀 가장자리에서 발생하였다.

성형 후 홀 가장자리에서는 립(lip)과 페탈(petal)이 형성되었으며 립을 형성할 때의 성형하중은 최대하중에 도달한 후 원만하게 감소한 반면에 페탈을 형성할때는 립의 성형하중에 비해 높은 성형하중을 나타내며 파단후의 성형하중이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

(2) 소재의 홀 직경을 감소시켜가며 파단 양상을 관찰한 결과, 최초 시편의 압연방향으로 크랙이 발생하였으며 이후 압연방향에 대하여 90도 방향에서도 크랙을 야기시키며 결국 페탈(petal)을 형성하였다.

(3) 각 소재의 두께변화에 관계없이 홀 가장자리부에서 TRIP강은 미소크랙의 분포가 다소 불규칙하게 형성된 반면에 F+B 강은 한군데만 형성되었다. 페탈의 개수에서는 F+B 강에 비해 TRIP 강에서 다소 많은 양의 페탈이 관찰되었다. 이것으로 플랜지성은 원주방향의 변형량이 큰 F+B 강이 훨씬 우수하다는 것을 알 수 있었다.

(4) 두 소재의 파단시편에 대해 미소크랙의 거동을 미시적인 관점에서 관찰한 결과, TRIP 강은 가지모양으로 크랙이 전파하는 양상을 나타낸 반면에 F+B 강은 한방향으로 일정하게 전파하였다. 따라서 미소균열의 진행양상이 홀 가장자리에서의 성형성에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

후 기

연구에 도움을 주신 POSCO(주)의 박성호, 조열래 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) T, Kumagai., 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. Strijbos., R. Boesenkool., June 1996 "Hole Expansion in Hot Rolled Steels", 19th IDDRG Biennial Congress., Eger, 10-14, pp. 459~466.
- (3) 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.
- (4) Richards, W., 1955, "The production of components with extruded necks", Machinery London., 86, 289, 586, 1301 and 87, 679, 1432.
- (5) W, Johnson., A, G, Mamalis., 1978 "The Perforation of Circular Plates with four-sided Pyramidally-Headed Square-Section Punches", Int. J. Mech. Sci., Vol. 20, pp. 849~866.
- (6) Y. R. Cho., J. H. Chung., H. H. Ku. and I. B. Kim. 1999 "A Study on the Stretch-flangeability of Hot-Rolled High Strength Steel with Ferrite-Bainite Duplex Microstructures", Kor. J. Mat. Res., Vol. 9, No. 12, pp. 1252~1262.
- (7) Y. R. Cho., J. H. Chung., H. H. Ku. and I. B. Kim., 1999 "Effect of Controlled Cooling on the Formability of TS 590MPa Grade Hot-rolled High Strength Steels", Metal and Materials., Vol. 5, No. 6, pp. 571~578.
- (8) N, R, Chitkara., W, Johnson., 1974 "Hole flanging and piercing of circular plates", Sheet Metal Industries., October, pp. 635~640.