

가공조건에 따른 강판의 구멍확장성 평가

이종섭¹, 고윤기¹, 허 훈^{1#}, 김홍기², 박성호²

Evaluation of Hole Flangeability of Steel Sheet with respect to the Hole Processing Condition

J. S. Lee, Y. K. Kim, H. Huh, H. K. Kim and S. H. Park

Abstract

In this paper, hole expanding tests are carried out in order to identify the effect of the hole process condition on the hole expanding ratio. Specimens with two different hole conditions are prepared: one is produced with punching process; and the other is reamed after punching to get smoother hole surface. The experimental results show that the fracture mechanism and the hole expanding ratio are quite different with respect to the hole condition. The hole expanding ratio of a punched specimen is much smaller than that of a reamed one due to the difference of surface roughness and internal defects. For the thorough investigation of those effects, tensile tests of a specimen with a hole are performed. The fracture strain is obtained with different hole conditions and a finite element analysis of the hole flanging process carried out. The experimental results are confirmed and reevaluated by finite element analysis of the hole flanging process with ductile fracture criterion proposed.

Key Words : Hole Flangeability (구멍확장성), Hole Expanding Ratio(구멍확장비), Ductile Fracture Criterion(연성과괴기준), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서 론

홀플랜징(hole flanging)공정은 박판의 구멍에 인장 및 굽힘 변형을 부과하여 플랜지를 만드는 공정이다. 홀플랜징 공정 중 과도한 변형은 플랜지 주위에 인장에 의한 찢어짐을 발생시킨다. 이러한 파단을 예방하기 위하여 재료의 구멍확장성(hole flangeability)을 예측, 평가하는 기술이 필요하다. 구멍확장성은 기존의 단순한 인장시험에 의한 파단변형률만으로는 예측이 어려우며, 구멍확장실험(hole expanding test)과 같은 추가적인 실험이 필요하다. 재료의 구멍확장성을 나타내는 척도로는 구멍확장실험에 의하여 얻어지는 구멍확장비(hole expanding ratio, HER)가 사용된다. 실험을 통하여 재료의 구멍확장성을 평가하는 것은 추가적인 노력을 필요로 하므로, 유한요소법을 이용한 HER

값은 예측이 요구되어왔다.

소성 가공에 따른 재료의 파단은 주로 연성과괴(ductile fracture)의 특징을 가지며 이를 예측하기 위하여 유한요소법에 연성과괴기준(ductile fracture criterion)을 적용한 연구가 수행되었다.⁽¹⁾ 연성과괴기준은 재료내의 기공(void)의 확장에 의한 파단을 예측하는 방법으로 많은 형태로 제안되었다.^{(2), (3), (4), (5)}

한편, 구멍 가공조건에 따른 HER 값을 평가하기 위하여 편칭으로 제작된 경우와 편칭 후 리밍을 통하여 표면의 결함을 제거한 경우에 대하여 구멍확장실험을 수행한 바 있다. 일반적으로 HER 값은 구멍조건에 따라서 많은 차이를 보이며, 편칭으로 제작된 구멍보다, 리밍(reaming) 공정을 통하여 표면의 결함(burr)를 제거한 경우가 더 높은 HER 값을 보인다.

1. 한국과학기술원 기계공학과
2. POSCO 기술연구소
교신저자: hhuh@kaist.ac.kr

표면의 결함이 없는 구멍의 HER 값을 유한요소법을 이용하여 예측하는 연구는 진행되었으나 실제 공정에서 주로 사용되는 펀칭으로 제작된 구멍의 경우에는 연구가 미비한 실정이다.

본 논문에서는 구멍의 가공 조건에 따른 HER 값을 유한요소법에 의하여 예측하기 위한 연구를 수행하였다. 구멍확장실험의 고찰을 통하여, 노치(notch)를 가지는 시편의 인장실험을 제안하여 수행하였으며 인장실험의 결과를 유한요소법에 적용하여 구멍조건에 따른 구멍확장성을 평가해보았다.

2. 노치를 가진 시편의 정적 인장실험

2.1 노치를 가지는 정적 인장시편

구멍가공조건이 HER 값에 미치는 효과를 정량적으로 파악하기 위하여 그림 1 과 같은 두 개의 노치를 시편의 중앙부에 가지는 인장시편을 제작하였다. 시편은 평판에 두 개의 구멍을 가공한 후에 그 평판을 그림 1 과 같이 가공하여 만들었다. 사용된 재료와 구멍의 가공조건은 표 1 과 같다.

FB590 과 CT440 은 SAPH440 과 같은 일반 강에 비하여 구멍확장성이 개선된 재료이다.

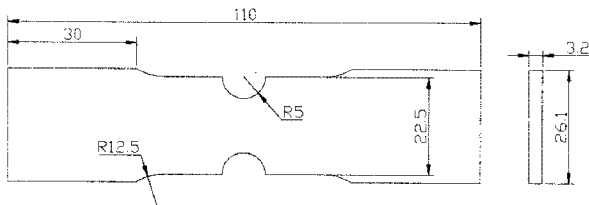


Fig. 1 Drawing of tensile specimen with two notch at the center

Table 1 Material and specimen condition

Material	Hole Processing Condition	Punching Clearance (%)
FB590	Punching	8
		16
CT440	Punching	8
		16
SAPH440	Punching	8
		16
	Reaming	-

2.2 실험결과

그림 2 는 각 강종에 대한 하중-변위곡선을 나타낸 그래프이다. 이 그래프로부터 리밍가공을 하여 구멍주위에 결함을 제거한 경우에는 펀칭으로만 제작한 경우보다 총연신량(total elongation)이 더 큰 결과를 보이며, 그 값의 편차도 적음을 확인할 수 있다. 각 강종의 구멍제작조건에 따른 총연신량의 평균값과 격자를 이용하여 측정한 파단연신률(fracture strain)을 그림 3 의 그래프들로 정리하였다. 일반적으로 총연신량은 리밍가공을 한 경우가 펀칭가공을 한 경우보다 더 크며, 펀칭클리어런스의 총연신량에 미치는 영향은 미미하다고 볼 수 있다. 강종에 따라서는 구멍확장성이 좋은 FB590 과 CT440 가 구멍가공조건에 따른 총연신량의 민감도가 감소하고, 그 값의 편차 또한 적음을 확인할 수 있다. 그림 4 와 5 는 각각 SAPH440 과 FB590 의 파단형상을 각 구멍 제작조건에 따라 나타낸 그림이다.

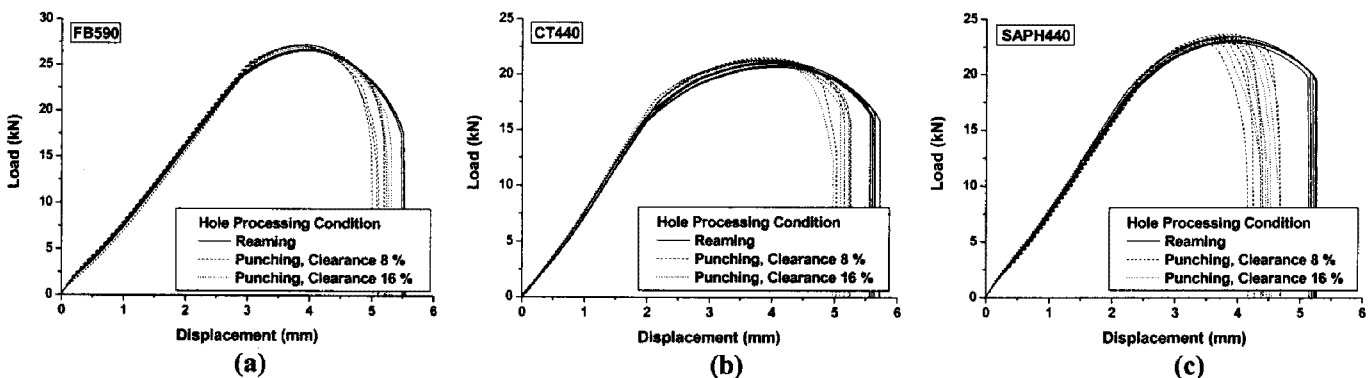


Fig. 2 Load-displacement curves of tensile specimen with notch: a) FB590; b) CT440; c) SAPH440

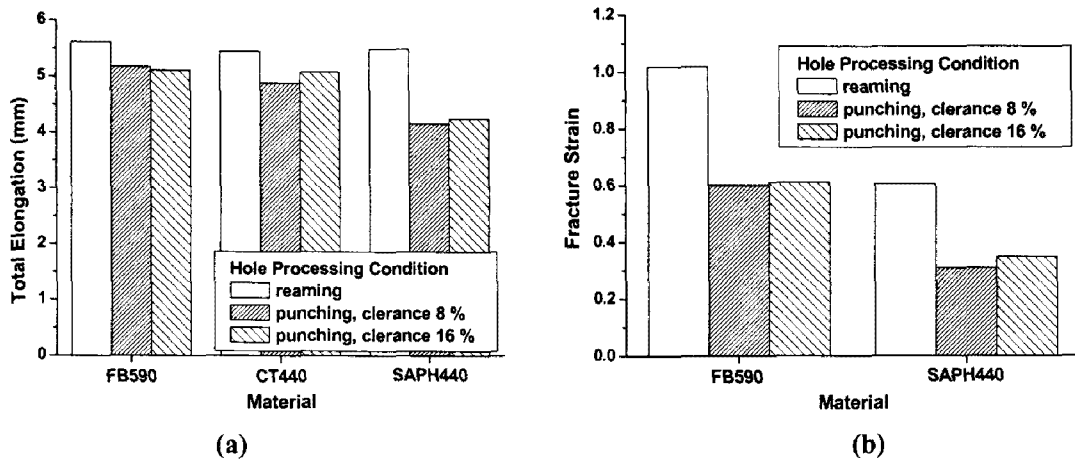


Fig. 3 Experiment Results of each material with respect to the hole processing condition: a) total elongation; b) Fracture strain measured by grid on the specimen

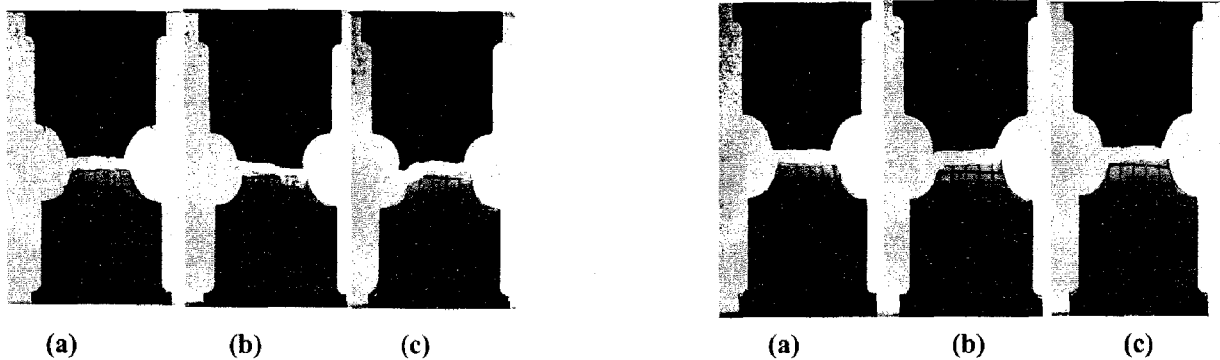


Fig. 4 Fracture shape of SAPH440: a)reaming ; b)punching, Fig. 4 Fracture shape of FB590: a)reaming ; b)punching, clearance 8%; c)punching, clearance 16%

3.1 연성파괴기준의 적용

재료의 구멍확장성을 평가하기 위하여 유한요소해석에 적용된 연성파괴기준은 식 (1)과 같다.

$$I_{New} = \frac{1}{C} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} \left\langle 1 + 3 \frac{\sigma_{mean}}{\bar{\sigma}} \right\rangle d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

where $\langle x \rangle = 0$ for $x \leq 0$
 $\langle x \rangle = x$ for $x > 0$

식(1)은 Oynaе⁽⁴⁾와 Brokken⁽⁶⁾의 파괴기준을 수정한 것으로 구멍 주위의 결함이 없는 경우에 대하여 정확한 예측 값을 보인다. ⁽¹⁾ 구멍조건에서의 재료 상수는 표 2와 같다.

Table 1 Material Constant for FB590 and SAPH440

FB590			SAPH440		
Reaming	8%	16%	Reaming	8%	16%
1.2086	0.6168	0.6958	2.0366	1.2020	1.2210

플은 시편의 새겨진 격자를 통하여 얻을 수 있다.

구멍확장실험의 유한요소해석을 통하여 구멍확장비를 예측하여 보았다. 유한요소해석에 사용된 tool 은 ABAQUS/standard 이다. 해석을 위하여 사용된 재료는 SAPH440 과 FB590 이며 그 유동응력은 그림 6과 같다.

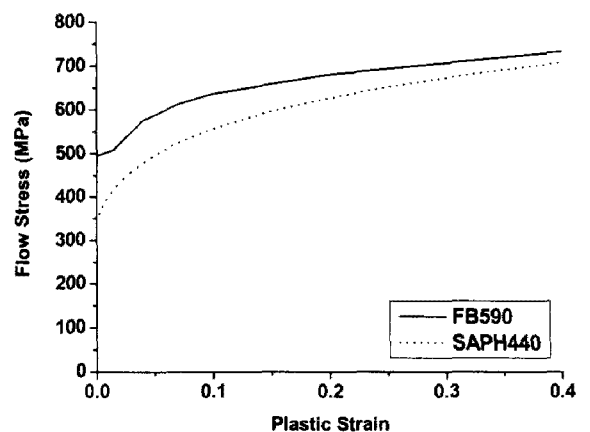


Fig. 4 Flow stress curve of FB590 and SAPH440

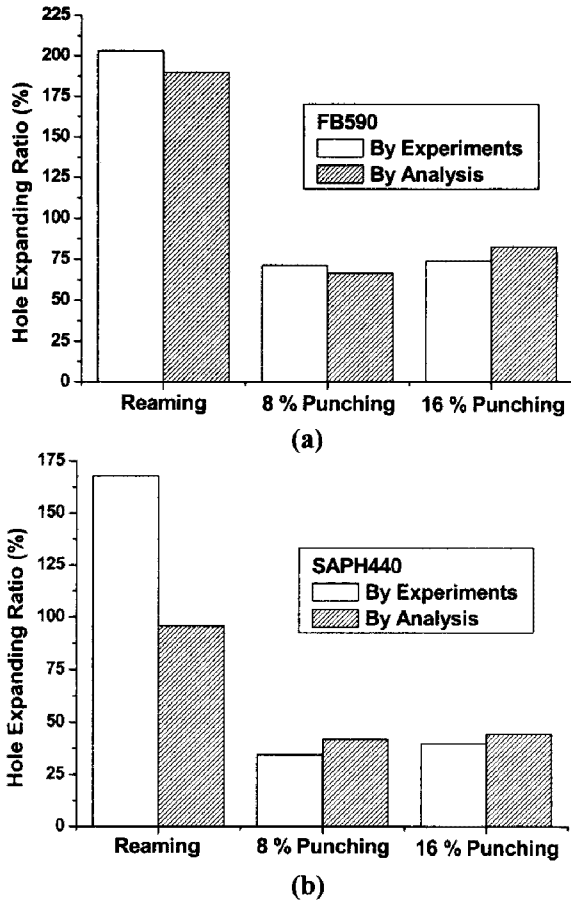


Fig. 7 Comparison of hole expanding ratio between experiment and finite element analysis with respect to the hole processing condition: a) FB590; b)SAPH440

그림 7은 실험으로 얻어진 FB590과 SAPH440의 구멍제작조건에 따른 HER 값과 해석을 통하여 예측한 값과 비교한 그래프이다. SAPH440의 리밍 가공 조건을 제외하고는, 모든 부분에서 정확한 예측 값을 보인다.

기존의 유한요소해석만으로는 펀칭에 의하여 구멍 주위에 존재하는 결함을 고려하기 어려웠다. 단순인장실험의 파단변형률과 연성파괴기준을 적용한 유한요소해석만으로는 펀칭가공 조건의 구멍확장성을 평가하기 어려우므로 구멍가공조건을 고려한 노치를 가지는 시편의 인장실험의 수행이 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 구멍가공조건에 따른 강판의 구멍확장성을 평가하기 위하여, 노치를 가지는 시편

의 인장시험과 그 결과를 적용한 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 사실을 확인하였다.

(1) 구멍의 제작조건에 따라 파단연신률이 변화하지만 최대하중은 변화가 없다.

(2) 파단연신률의 변화경향은 HER 값의 경향과 유사하며, 펀칭가공조건의 경우가 그 값의 산포가 크며 파단 면의 형상도 불규칙하다. 이는 구멍주위에 존재하는 결함의 영향이다.

(3) 인장시험으로부터 얻어진 파단연신률을 유한요소해석에 적용하여 구멍확장성을 평가한 결과, 모든 가공조건에 대하여 정확한 HER 값을 예측할 수 있었다.

(4) 펀칭으로 제작된 구멍의 HER 값의 예측을 위하여는 단순인장실험과 유한요소해석만으로는 불가능하며, 추가적인 실험을 통하여 구멍가공조건에 구멍확장성에 미치는 영향을 고려하여야 한다.

참고 문헌

- [1] Y. K. Ko, J. S. Lee, H. Huh, H. K. Kim and S. H. Park, 2005, "Prediction of fracture in hub-hole expansion process using ductile fracture criteria", Trans. KSTP, Vol. 14, No. 7, pp. 601-606,
- [2] A. L. Gurson, 1977, "Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I- yield criteria and flow rules for porous ductile media" Trans. ASME, J. Eng. Mat. Tech., Vol. 99, No. 1, pp. 2-13.
- [3] J. Lemaitre, 1985, "A continuous damage mechanics model for ductile fracture", Trans. ASME, J. Eng. Mat. Tech., Vol. 107, No. 1, pp. 83-89.
- [4] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto and S. Shima, 1980, "Criteria for ductile fracture and their application", J. Mech. Work. Tech., Vol. 4, pp. 65~81.
- [5] D. Brokken, W. A. M. Brekelmans and F. P. T. Baaijens, 1998, "Numerical modeling of metal blanking process", J. Mater. Process. Tech., Vol. 83, pp. 192~199.
- [6] J. S. Lee, Y. K. Ko, H. Huh, H. K. Kim and S. H. Park, 2005, "Development of the technique for prediction of hub-hole crack with the punching effect", fall conference of KSTP, pp. 362-365.