

구멍확장시험의 변형특성 및 활용성 연구

한수식^{1#} · 이현영²

Study on Deformation Characteristics of Hole Expansion Test and Its Applicability

S. S. Han, H. Y. Lee

(Received January 24, 2019 / Revised March 27, 2019 / Accepted April 1, 2019)

Abstract

The hole expansion tests using conical punch, flat punch or hemispherical punch are widely used for stretch flangeability verification of HSS. In this study, we investigate the strain distribution on the shear edges of the hole expansion test using grid marking and a projector. A small crack at the edge is distributed, resulting in a large gap between the HER and the crack strain. The strain distribution at the edges is irregular due to anisotropy of sheet metal. While an edge perpendicular to the rolling direction indicate a lower strain level compared to an edge parallel to the rolling direction, edge cracks occur at the edge perpendicular to the rolling direction. To predict the manifestation of edge cracks in FE analysis, the result of the hole expansion test with a crack strain measurement may well be a better tool than FLD. In this case, the level of strain and the direction of the edge relative to the rolling direction should be well considered.

Key Words : Stretch Flanging, Edge Crack, Mechanical Fibering, Formability

1. 서 론

자동차 차체의 충돌 안정성을 확보하고 경량화를 이루기 위하여 고강도 강판의 사용은 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 고강도 강판이 갖고 있는 높은 강도와 낮은 연성은 고강도 강판을 자동차 부품에 적용하는데 가공 크랙, 스프링백 그리고 엣지 크랙(edge crack)과 같은 여러 가지 해결해야 할 과제를 제공하고 있다. 이들 중에서 특히 신장플랜지 변형이 이루어지는 성형 제품의 엣지에서 발생하는 엣지 크랙은 고강도 강판의 적용 확대를 위해서는 해결되어야 할 필수적인 과제로 대두되고 있어 고강도 강판의 신장플랜지 성형성 향상과 이에 관한 영향인자들에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[1~4].

엣지 크랙 발생에 대한 저항성을 나타내는 판재의 신장플랜지 성형성을 평가하는 방법으로 구멍확장 시험법(Hole Expansion Test)이 주로 사용된다. 구멍확장 시험법은 원형으로 천공된 시편을 원추형, 원통형 또는 반구형 등의 펀치를 이용하여 시편의 엣지에서 두께를 관통하는 크랙이 발생할 때까지 구멍을 확장 성형하는 시험법이다. 시험 후 구멍의 크기를 측정하고 초기의 크기와 비교하여 구멍확장비(Hole Expansion Ratio, $HER = \text{Initial Hole Size} / \text{Final Hole Size} \times 100\%$)를 산출하고 이 HER 값으로 대상 시편의 신장플랜지 성형성을 평가한다. 그러나 구멍확장 시험법으로 평가된 HER 값은 소재들 상호간의 신장플랜지 성형성을 비교하는 수단으로 주로 사용되고 있으며 엣지 크랙의 발생을 판정하는 수단 등으로는 사용되지 않고 있다.

본 연구에서는 판재의 신장플랜지 성형성을 평가

1. 금오공과대학교 기계공학과

2. POSCO 철강솔루션연구소 성형연구그룹

Corresponding Author : Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, E-mail: sshan@kumoh.ac.kr

하는 시험법으로 일반적으로 사용되고 있는 구멍확장 시험법에 대하여 엿지부분의 변형 특성을 실험을 통하여 측정하고 이들과 HER 값과의 관계에 대하여 분석하였다. 이러한 구멍확장 시험법을 통하여 측정된 크랙 부분의 변형률을 성형 해석시 엿지 크랙의 발생을 예측할 수 있는 수단으로서 활용이 가능한지의 여부에 대하여 연구하였다.

2. 구멍확장 시험

고강도 강판에 대하여 구멍확장 시험을 실시하고 엿지 부분의 변형률 분포를 측정하는 실험을 수행하였다. 일반적으로 구멍확장 시험은 10mm 직경의 구멍을 펀치를 이용하여 천공하고 꼭지각 60°의 원추형 펀치를 사용하여 실시한다. 그러나 이 경우 구멍의 크기가 너무 작아서 엿지의 변형률을 측정하기에는 적당하지 않다. 그래서 본 연구에서는 직경 40mm의 펀치를 이용하여 구멍을 천공하고 구멍확장에는 반구형 펀치를 사용하였다. HER 평가결과는 다이간극에 따른 전단면의 품질에 의하여 영향을 받기 때문에 일반적으로 HER 평가에 사용되는 다이간극 조건을 사용하여 시험을 실시하였다. Table 1 에는 시험에 사용된 소재와 전단 조건에 대하여 나타내었으며 구멍확장 시험의 개략도는 Fig.1 에 나타내었다.

Table 1 Test material and punching condition

Material	CHSP80DP		
	Thickness	1.2 mm	
Total elongation	22.3%		
Punch condition	Die clearance	12.5%	
	Punch diameter	40.0 mm	
	Die diameter	40.3 mm	

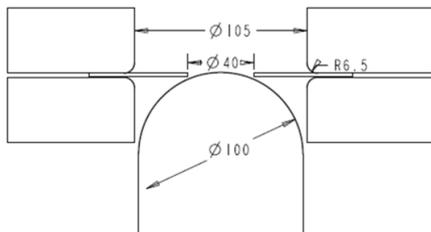


Fig.1 Schematic diagram of hole expansion test

구멍확장 시험 후 시편의 엿지부분 변형률을 측정하기 위하여 Fig.2 에 나타난 바와 같이 레이저 마킹 장비를 이용하여 그리드를 방사상으로 마킹하였다. 이때 레이저의 강도가 너무 크면 마킹된 부위가 노치의 역할을 하여 크랙이 마킹한 부위를 따라서 발생할 우려가 있기 때문에 레이저의 강도는 마킹을 육안으로 확인이 가능할 수 있을 정도의 최소 값으로 설정하여 마킹하였다. 시편의 버어가 있는 면에 마킹을 실시하였다. 버어가 편치와 접촉하지 않는 방향으로 시편을 설치하여 구멍확장 시험을 실시하였다. 크랙의 발생 여부는 육안으로 관찰하여 판단하였으며 두께를 통과하는 크랙이 발생하면 시험을 중단하였다. Fig.3 은 구멍확장 시험을 실시한 시편의 형상을 나타내었다. 크랙은 모두 압연 0도 방향에 위치한 엿지에서 발생하였다. 블랭크 홀더력을 20ton 으로 하고 펀치 속도를 10mm/min 로 설정하여 매우 저속으로 시험하고 크랙이 관찰되는 즉시 시험을 중단하였음에도 불구하고 크랙의 크기는 비교적 크게 나타났다. 사용한 소재의 강도가 높아서 탄성 회복 비교적 크기 때문에 이러한 현상이 발생한 것으로 판단된다. 시험은 동일 조건에서 3회 실시하였다.

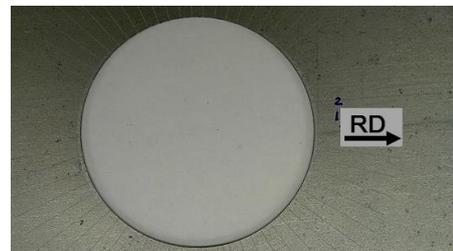


Fig.2 Marked sheared edge with laser

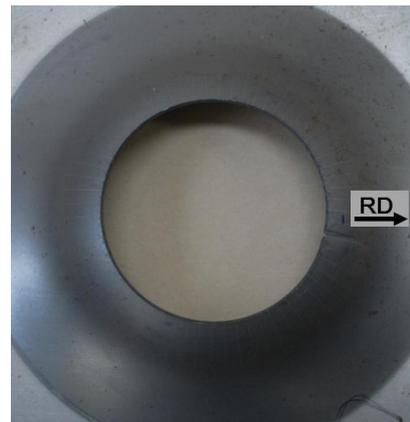


Fig.3 Specimen after hole expansion test

구멍확장 시험 이후 HER 값은 일반적으로 사용되는 방법인 압연 0도 방향과 압연 90도 방향으로의 구멍 지름을 각각 측정하여 그 평균값을 취하는 방법으로 결정하였다.

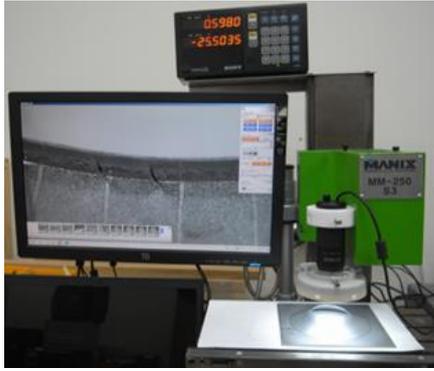


Fig.4 Device for grid measurement

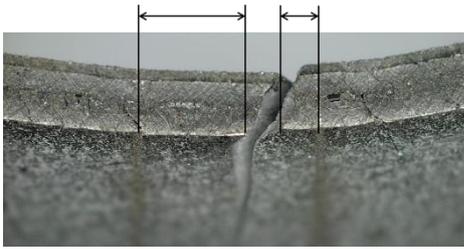


Fig.5 Measurement method of a grid with edge crack

엣지에 마킹된 그리드의 간격은 Fig.4 에 나타난 화상투영기를 이용하여 측정하였다. 엣지 크랙이 발생한 부위의 그리드 간격은 Fig.5 에 나타난 것과 같은 방법으로 측정하여 크랙 크기의 영향을 제거하였다. 각각의 시험에 대하여 HER 값과 크랙 부분의 변형률 그리고 펀치 행정을 측정하여 Table 2 에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 HER 값이 크랙의 변형률보다 큰 값을 가지며 그 차이 또한 매우 큰 것을 알 수 있다.

Table 2 Hole expansion test results

Test	HER(%)	Crack Strain(%)	Δ (=HER-Crack Strain)	Punch Stroke(mm)
#1	29.38	23.17	6.21	19.89
#2	26.48	18.78	7.70	19.12
#3	28.48	20.18	8.30	19.81
Average	28.10	20.71	7.43	19.61



Fig.6 Appearance of edge after hole expansion test

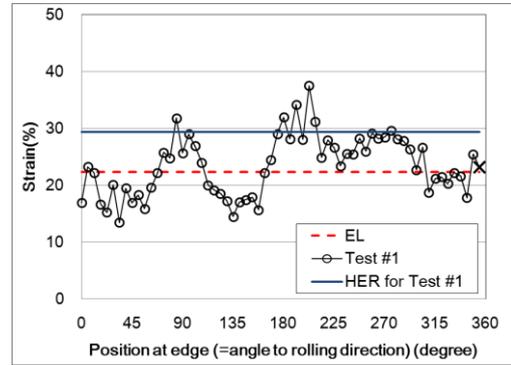


Fig.7 Strain distribution at after hole expansion test #1

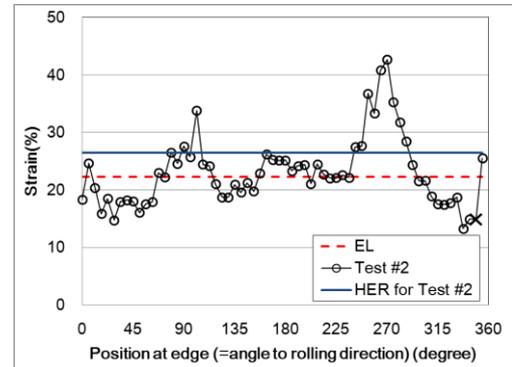


Fig.8 Strain distribution at after hole expansion test #2

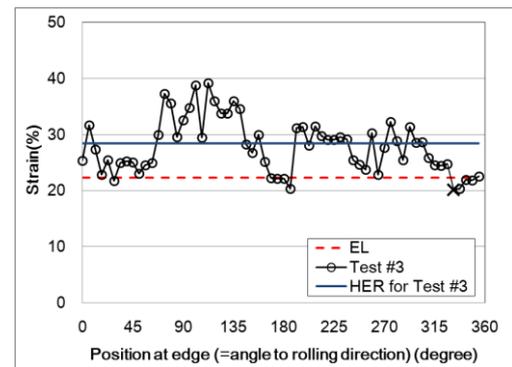


Fig.9 Strain distribution at after hole expansion test #3

Fig.6 에 나타낸 것과 같이 구멍확장 시험에서 두께를 가로 지르지 않는 작은 크기의 크랙들이 거의 엣지 부분 전체 영역에서 고르게 발생한다. HER 값과 크랙의 변형률 사이에 큰 차이가 나타나는 것은 HER 값에는 이러한 작은 크랙들의 크기도 포함되어 있기 때문으로 판단된다. 그리고 HER 값은 소재의 연신율보다 높은 값을 나타내고 있으며 크랙의 변형률은 연신율 근처의 값을 나타내고는 있으나 전체적으로는 연신율보다 낮은 값을 나타내고 있다.

Fig.7 에서 Fig.9 까지는 각 회차별 구멍확장 시험에 대하여 시험후 엣지부분의 변형률 분포를 압연 방향과 이루는 각도에 대하여 나타내었다. X 로 표시된 것은 크랙이 발생한 부분의 변형률을 나타낸 것이다. 엣지의 변형률 분포는 균일하지 않으며 압연 0 도 방향에 위치한 엣지와 압연 90 도 방향에 위치한 엣지에서의 변형률이 압연 45 도 방향에 위치한 엣지의 변형률에 비하여 크게 나타났다. 최대 변형률은 압연 90 도 방향에 위치한 엣지에서 발생하였으나 크랙은 압연 0 도 방향에 위치한 엣지에서 발생하였다. 이러한 변형률 분포를 나타내는 이유는 소재가 갖고 있는 이방성 때문으로 판단된다. 크랙이 최대 변형률이 발생하는 압연 90 도 방향에 위치한 엣지에서 발생하지 않고 그보다 변형률이 작은 압연 0 도 방향에 위치한 엣지에서 발생한 것은 냉간 압연으로 발생하는 소재 내부의 기계적 섬유화(mechanical fibering) 때문으로 판단된다.

3. 유한 요소 해석

구멍확장 시험으로부터 측정된 HER 값과 크랙 변형률등을 사용하여 신장플랜지 변형에 대한 유한 요소 해석시 크랙 발생을 판정하는 수단으로서의 적용 가능성을 확인하기 위하여 본 연구에서 실시한 구멍확장 시험에 대하여 상용 해석프로그램 Pamstamp 2G V2012.2 를 사용하여 성형 해석을 수행하였다. 성형해석에 사용된 소재의 기계적 성질을 Table 3 에 나타내었다.

크랙의 발생 여부를 판단하는 수단으로 FLD, HER 평균값 그리고 엣지의 크랙 변형률 평균값들을 각각 사용하였다. 유한 요소 해석에서 응력과 변형률에 관한 정보는 모두 적분점에 대하여 계산한 값을 나타낸다. 신장플랜지 변형은 엣지 부분에서 소재

내부로의 변형률 구배가 비교적 큰 것이 그 특징이다. 따라서 엣지에서의 크랙 발생 여부를 판단하기 위하여 필요한 변형률에 대한 정보를 유한 요소 해석에서 제공하는 적분점의 변형률을 사용하는데는 무리가 있다. 크랙 발생 판정 수단으로 HER 평균값과 크랙 변형률 평균값을 사용하는 경우에 필요한 엣지 변형률에 대한 정보는 성형 해석된 유한 요소 격자망의 엣지에 위치한 절점들 사이의 거리 변화로부터 직접 계산하여 구하였다.

Table 3 Material properties for FE analysis

Material	CHSP80DP, 1.2t	
Flow curve	$\bar{\sigma} = 1.24455(0.0008 + \bar{\epsilon})^{0.1361} [GPa]$	
R-Value	r_0	0.473
	r_{45}	0.875
	r_{90}	0.602
Friction coefficient	0.12	

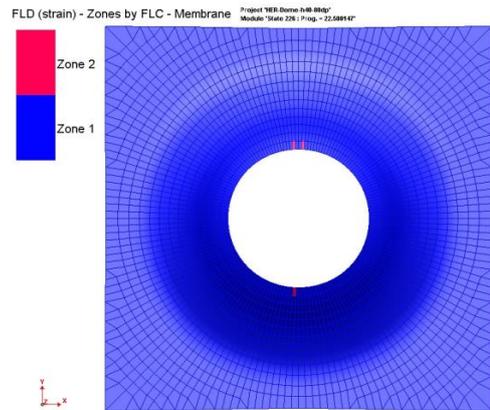


Fig.10 Crack occurrence position predicted with FLD

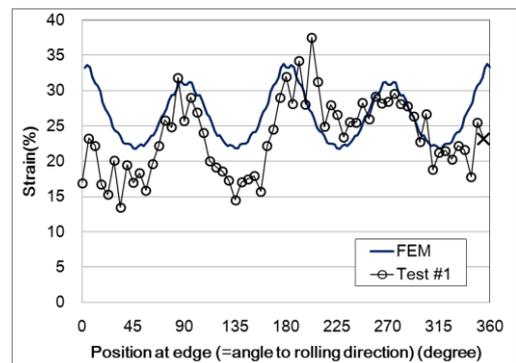


Fig.11 Strain distribution at edge predicted by FEA for hole expansion test

Fig.10 은 유한 요소 해석에서 FLD 를 이용하여 크랙 발생을 예측한 결과를 나타내었다. 크랙은 압연 90도 방향에 위치한 엿지에서 발생하는 것으로 나타났다. Fig.11 에는 크랙이 발생한 시점의 유한 요소 격자망의 가운데 엿지 부분에 위치한 절점들 사이의 거리로부터 변형률을 계산하여 시험 결과와 함께 나타내었다. 변형률 분포는 시험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 최대 변형률은 시험 결과와 마찬가지로 압연 90도 방향에 위치한 엿지에서 발생하는 것으로 나타났다. 그 결과, FLD 를 사용할 경우 이 부분에서 크랙이 먼저 발생하는 것으로 예측하게 된 것이다. 그러나 구멍 확장 시험에서는 압연 0도 방향에 위치한 엿지에서 크랙이 발생하였다.

Fig.12 에는 각각의 크랙 발생 판단 수단을 사용하여 예측한 파단 발생 펀치 높이를 시험결과와 함께 나타내었다. HER 평균값과 크랙 변형률 평균값을 사용하여 크랙 발생을 예측한 경우는 압연 0도 방향에 위치한 엿지의 변형률을 엿지 절점 거리로부터 계산하여 두 값과 그 크기를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 성형 가능 펀치 높이에 대한 시험 결과는 FLD나 HER 평균값을 사용한 경우보다 낮게 나타났다. 이것은 신장플랜지 변형에서 크랙 발생이 FLD로 예측한 경우보다 일찍 발생한다고 부품 설계자들 사이에 알려져 있는 사항과도 유사한 결과이다. 이상의 결과로부터 신장플랜지 변형 부분의 크랙 발생 판단 수단으로 엿지의 크랙 변형률을 직접 측정하여 사용하는 것이 타당한 것으로 생각되며 이때 압연 방향에 대한 엿지의 방향도 함께 고려되어야 한다.

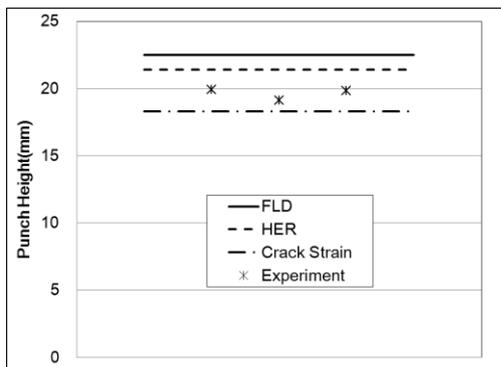


Fig.12 Strain distribution at edge predicted by FEA for hole expansion test

4. 결론

고강도 강판에 대하여 구멍확장 시험을 실시하고 엿지 부분의 변형률 분포를 분석하고 그 결과를 유한 요소 해석에 활용하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구멍확장 시험시 엿지 부분은 소재의 이방성으로 인하여 균일한 변형률 분포를 나타내지 않으며 압연 방향에 대한 위치에 따라 다른 값을 나타내었다.

(2) 판재의 신장플랜지 성형성을 나타내는 HER값과 실제 측정된 엿지의 크랙 변형률은 큰 차이를 나타내고 있다. 이것은 엿지에 산재해있는 작은 크랙들이 HER값의 측정에 반영되어 있기 때문이다.

(3) FLD 와 구멍확장 시험으로부터 구한 HER 평균값과 크랙 변형률 평균값 등을 크랙 발생 예측 수단으로 하여 구멍확장 시험에 대한 성형해석을 수행한 결과 신장플랜지 변형부의 크랙 예측에는 구멍확장시험으로 구한 값들이 FLD보다 효과적인 크랙 예측 수단을 제공해 줄 것으로 판단되었다.

(4) 신장플랜지 변형부의 엿지 크랙 발생에는 변형률 크기뿐만 아니라 엿지 방향과 소재 압연 방향의 관계도 매우 중요한 것으로 나타났다. 엿지 크랙 발생 여부를 판정할 경우 엿지의 방향과 변형률을 함께 고려할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

REFERENCES

- [1] J. I. Yoon, J. Jung, H. S. Kim, 2018, Factor governing stretch-flangeability of sheet metals, Kor. Soc. Tech. Plast., pp.116~117.
- [2] J. H. Kim, K. Lee, Y. J. Kwon, C. S. Lee, 2017, Correlation between Uniaxial Tensile Properties and Hole Expansion Ratio of Sheet Materials, Kor. Soc. Tech. Plast., pp.102~103.
- [3] X. Chen, H. Jiang, Z. Cui, C. Lian, C. Lu, 2014, Hole expansion characteristics of ultra high strength steels, T Procedia Engineering, Vol.81, pp.718~723.
- [4] K. Mori, Y. Abe, Y. Suzui, 2010, Improvement of stretch flangeability of ultra high strength steel sheet by smoothing of sheared edge, J. Mater. Process. Technol., Vol. 210, No. 4, pp. 653~659.