

## 연성 파괴 기준을 이용한 허브 홀 확장 과정에서의 파단 예측

고윤기\* · 이종섭\* · 허 훈\* · 김흥기\*\* · 박성호\*\*

### Prediction of fracture in hub-hole expansion process using ductile fracture criteria

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

#### Abstract

The hub hole in a wheel of vehicles usually formed with hole expansion process. Formability of material, especially the hole expansion ratio, is important to produce a fine hub hole. The hub hole expansion process is different from general forming process or bore expansion process in the viewpoint of forming a thick plate. In the hole expansion process of the plate with a hole, as the hole being expanded, the crack is occurred to outward direction at the boundary of a hole. Therefore, it is need to apply the fracture criterion in the hub hole expansion process. In this paper, the hub hole expansion process is simulated with commercial elasto-plastic finite element code, LS-DYNA3D considering some ductile fracture criteria. Fracture mode and hole expansion ratio is compared with respect to the fracture criteria. Analysis results demonstrate that only the effective plastic strain is not adequate to predict the fracture mode in the hub hole. And the analysis results also indicate that the ductile fracture criteria properly predict the fracture mode but hole expansion ratio is different with the result of each other because of their different characteristics.

**Key Words** : Ductile Fracture Criterion (연성 파괴 기준), Hole Expansion Process (홀 확장 공정), Hole Expansion Ratio (홀 확장비)

#### 1. 서론

자동차 휠(wheel)의 제작에 있어 홀 확장 과정으로 얻어지는 허브 홀(hub hole)은 휠의 피로 성능 등에 많은 영향을 미치게 된다. 일반적으로 허브 홀은 판재의 블랭킹(blanking) 공정에 이은 홀 확장(hole expansion) 성형을 통해 제작된다. 이 홀 확장 성형 과정에서 허브 홀의 경계에 일어나는 파단을 예측하기 위한 몇 가지 기준들, 단순 인장 실험에서 얻은 시편의 파단 두께를

이용하는 방법, 소성 불안정 상태에서 얻은 한계 변형률을 이용하는 방법<sup>(1)</sup> 및 홀 확장 과정에 연성 파괴 기준(ductile fracture criterion)을 적용한 방법<sup>(2)</sup>들이 제시되어 왔다. 특히 홀 확장 과정에서 적용된 연성 파괴 기준은 일반적인 성형 과정에서 몇 가지 방법이 사용되었으며 파단 예측의 정확도 또한 높다.<sup>(3-4)</sup> 허브 홀 확장에서는 비교적 두꺼운 판재를 사용하며 변형 과정에서 하중 상태가 일반적인 성형 과정과 차이가 있다. 특히 파단이 발생하는 홀의 경계에 구속이

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 포스코 기술연구소

없으며, 이 부분에서 파단이 진행하기 때문에 허브 홀 확장 과정에서 기존의 연성 파괴 기준이 일반적인 성형 과정에서처럼 파단 예측의 정확도가 높지 않다.

그러므로 허브 홀 확장 과정에 이러한 연성 파괴 기준을 적용하여 파단을 예측한 후 정확도를 평가하고 이를 개선하기 위한 방법을 제시할 필요가 있다.

## 2. 허브 홀 확장 실험 및 유한요소 해석

### 2.1 허브 홀 확장 실험

포스코 기술 연구소에서 실시한 허브 홀 확장 실험에 사용된 시편과 공구는 Fig. 1 과 같다. 실험에 사용된 강종은 SAPH440 이다.

같은 강종의 3 개의 코일(coil)에 대하여 각각 8 개의 시편을 채취한 후 홀 확장 실험하였다. 식 (1)과 같이 정의되는 홀 확장비를 계산하여, 각 코일에 대해서 최소, 최대치를 제외한 6 개의 값을 평균한 결과를 Table 1 에 정리하였다.

$$HER = \frac{D_{deformed} - D_{undeformed}}{D_{undeformed}} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

Table 1 Result of HER test

Coil 1	137.0 %
Coil 2	204.7 %
Coil 3	162.1 %

### 2.2 유한요소 해석 조건

유한 요소 해석을 위하여 구성된 시편과 펀치의 모델은 Fig. 2 와 같다. 허브 홀 확장 실험에서 블랭크 홀딩력은 블랭크의 인입을 방지하기 위하여 충분한 크기를 부과하기 때문에 본 논문에서는 블랭크 홀더를 모델링하지 않고, 블랭크의 가장자리 변위를 고정시켰다. 그리고 모델의 대칭성을 고려하여 축 대칭모델을 사용하였다. 홀 주위의 거동이 중요하기 때문에 상대적으로 많은 요소를 홀 주위에 사용하였다.

유한 요소 해석은 탄소성 해석 프로그램인 LS-DYNA3D 를 사용하였으며 적용된 재료의 유동 응력식은 식 (2)과 같다. 펀치의 속도는 2 m/sec, 해석은 펀치의 이송거리 50mm 까지 해석

을 수행하였다.

$$\bar{\sigma} = 832.85(0.0078 + \bar{\epsilon}_p)^{0.182} \text{ MPa} \quad (2)$$

### 2.3 연성 파괴 기준의 적용

본 논문에서는 홀 확장 과정 중에 파단을 예측하기 위하여 일반적인 판재 성형 해석에서 파단의 기준으로 사용되는 연성 파괴 기준 중 Oyane 등<sup>(5)</sup>과 Brozzo 등<sup>(6)</sup>이 제안한 연성 파괴 기준을 적용하였다. 그 판재는 각각 식 (3)과 (4)에 나타내었다.

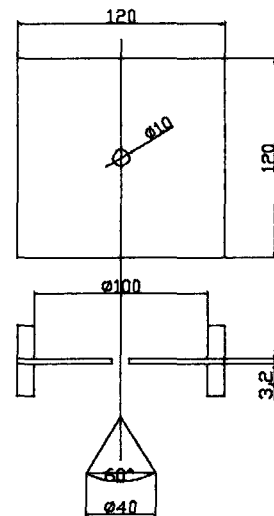


Fig. 1 Specimen and tool of hole expansion test

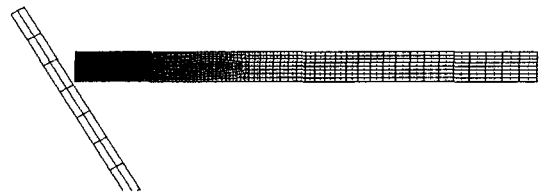


Fig. 2 Finite element model of punch and blank for hole expansion analysis

$$I_{Oyane} = \frac{1}{C_2} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left( \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} + C_1 \right) d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

$$I_{Brozzo} = \frac{1}{C_3} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2}{3} \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_m - \sigma_h} \right) d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

여기서  $\bar{\sigma}$ ,  $\sigma_h$ ,  $\sigma_m$  은 각각 유효 응력, 등방응

력(hydrostatic stress), 최대 주응력을 나타낸다. 그리고  $d\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{\epsilon}_f$ 는 각각 변형률 증가분과 파단이 발생할 시점의 변형률이다.  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 는 재료 특성에 의해 결정되는 상수로써 단순인장 실험과 평면 변형률 실험을 통해서 얻은 결과를 바탕으로 결정한다. 재료의 파단은 각 기준에 대해서 각 기준값이 '1'을 만족하는 시점으로 판단한다.

본 논문에서는 연성 파괴 기준을 적용하기 위하여 LS-DYNA3D 결과로부터 얻은 매 시간 단계의 변형률과 응력값을 이용하여 식 (4), (5)가 이 근사하여 각 기준값을 계산하였다. 포스코 기술연구소에서 실험한 단순 인장 실험과 평면 변형률 실험 결과와 이를 이용하여 얻은 각 기준에 대한 상수 값은 Table 3, 4에 나타내었다.

$$I_{Oyane} = \frac{1}{C_2} \sum \left\{ \left( \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} + C_1 \right) \Delta \bar{\epsilon} \right\} \quad (4)$$

$$I_{Brozzo} = \frac{1}{C_3} \sum \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_m - \sigma_h} \right) \Delta \bar{\epsilon} \quad (5)$$

**Table 3 Fracture strain in the tensile direction of the material**

$\epsilon_f$ (uniaxial)	0.7156
$\epsilon_f$ (plane strain)	0.5686

**Table 4 Coefficients of ductile fracture criterion**

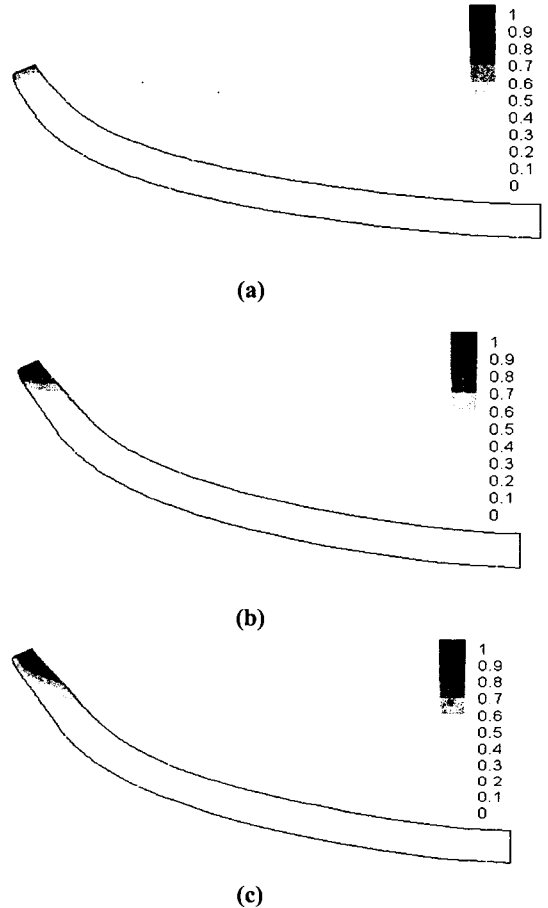
$C_1$	$C_2$	$C_3$
1.852	1.617	0.7955

### 3. 파괴 기준을 적용한 유한요소 해석 결과

#### 3.1 유한요소 해석 결과

실제 허브 홀 확장 실험에서는 홀 경계의 편치가 접촉하는 반대 부분에서 파단이 발생되는 경향을 보인다. Fig. 3(a)는 시편의 최종 변형 형상과 유효 변형률(effective strain)의 분포이다. 편칭이 진행되면서 시편의 접촉부에 압축력으로 인한 변형이 집중되기 때문에 유효 변형률 분포는 편칭과 접촉부에 가장 높은 값을 나타낸다. 그러므로 유효 변형률 분포는 실제 홀 확장 과정에서 일어나는 홀 주위의 파단 경향을 예측하지 못한다.

한편 Fig. 3(b), Fig. 3(c)는 각각 유한요소 해석



**Fig. 3 Distribution of the field variable: (a) effective strain; (b) Oyane's criterion; (c) Brozzo's criterion**

결과를 이용해서 얻은 Oyane와 Brozzo의 연성 파괴 기준 값의 분포이다. 이 분포는 홀의 바깥쪽 경계에서 높은 값을 갖는다. 이는 허브 홀 확장 과정에서 시편의 홀 경계의 편치가 닿지 않는 부분부터 파단이 발생하는 실제 파단의 양상을 잘 묘사하고 있다. 최종 파단은 홀 경계의 절점에서 계산된 연성 파괴 기준 값이 두께 방향 모든 절점에서 '1'이상 되는 시점으로 판단한다.

#### 3.2 연성 파괴 기준의 분석

Fig. 4는 각 연성 파괴 기준값을 홀 확장 실험 결과와 비교한 결과이다. Oyane와 Brozzo의 연성 파괴 기준 모두 홀 확장 과정에서의 파단양상은 잘 표현하고 있지만 홀 확장비는 실험에서 얻은 결과의 평균치에 미치지 못하고 있다. Fig. 5는

유한 요소 해석 과정으로부터 홀의 경계 요소에서 얻은 변형률 경로이다. 주변형률(major strain)은 원주방향(circumferential)의 변형률이며, 소변형률(minor strain)은 시편의 길이 방향의 변형률이다. 이 변형경로가 단순 인장 상태의 변형률 경로로 근사되기 때문에 홀 주위에서 변형이 단순 인장 상태와 비슷한 거동을 한다고 볼 수 있다. 홀 확장 과정에서 홀 경계의 최대 주응력 방향, 즉 원주방향의 응력 상태가 파단을 결정하는데 매우 중요한 인자가 된다.

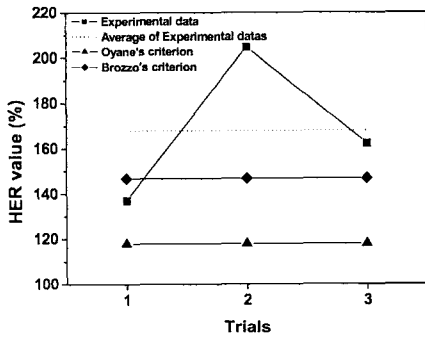


Fig. 4 Comparison of HER with experimental data

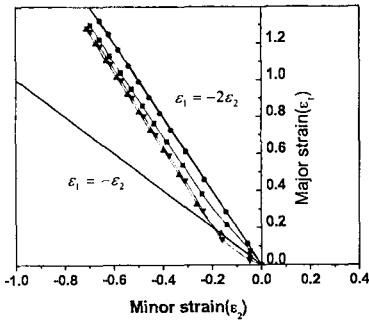


Fig. 5 Strain path at hole edge

한편, Oyane의 연성 파괴 기준은 등방응력에 의한 재료 내부의 공극(void)의 확장의 효과를 고려하고 있을 뿐 최대 주응력에 대한 효과를 고려하지 못하기 때문에 파단의 예측이 정확하게 이루어지지 않고 있다. Brozzo의 기준은 최대 주응력의 효과를 고려하고 있으며 등방응력에 의한 공극의 확장 효과도 묘사하고 있다. Oyane의 기준에 비해 좀 더 좋은 정확도를 보이며 분포가 큰 실험 결과에 대해서 홀 확장비의 하한을 비교적 정확하게 예측하고 있다.

#### 4. 결론

허브 홀 확장 실험에서 재료의 파단을 연성 파괴 기준을 유한 요소 해석에 적용하여 홀 주위의 파단과 홀 확장비를 예측하고 해석 결과를 실제 실험 결과와 비교하였다. 홀 확장 시 유효 변형률만으로 홀 주위의 파단을 예측할 수 없으며 연성 파단 기준을 적용하였을 때 그 파단 경향을 예측할 수 있다. 그러나 예측된 홀 확장비는 실험 결과와 오차가 있으며 연성 파단 기준의 특성에 따라 오차가 있다. 홀 확장시 발생하는 파단의 정확한 예측을 위하여 홀 확장 과정의 응력 상태에 대한 더 많은 고찰이 필요하며, 기준의 정밀한 검증을 위하여 시편의 파단을 측정하는 방법 등의 개선을 통한 실험 기법의 향상이 요구된다.

#### 참고 문헌

- (1) C. T. Wang, G. Kinzel and R. Altan, 1995, "Failure and wrinkling criteria and mathematical modeling of shrink and stretch flanging operation in sheet-metal forming", J. Mater. Process. Tech., Vol. 53, pp. 759~780.
- (2) H. Takuda, K. Mori, H. Fujimoto and N. Hatta, 1999, "Prediction of forming limit in bore-expanding of sheet metals using ductile fracture criterion.", J. Mater. Process. Tech., Vol. 92~93, pp. 433~438.
- (3) S. E. Clift, P. Hartley, C. E. N. Sturgess and G. W. Rowe, 1990, "Fracture prediction in plastic deformation process", Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, pp. 1~17.
- (4) H. Takuda, K. Mori, H. Fujimoto and N. Hatta, 1997, "Fracture prediction in stretch forming using finite element simulation combined with ductile fracture criterion", Arch. Appl. Mech., Vol. 67, pp. 143~150.
- (5) 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.
- (6) P. Brozzo, B. Deluca and R. Rendina, 1972, "A new method for the prediction of formability limits in metal sheets", Proceedings of the 7<sup>th</sup> biennial conference of the international deep drawing research group.