

새로운 연성파괴기준을 이용한 허브홀 확장과정에서의 파단 예측

고윤기¹, 이종섭¹, 허 훈[#], 김흥기², 박성호²

Prediction of fracture in hub-hole expansion process using new ductile fracture criterion

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

Abstract

A hole expansion process is an important process in producing a hub-hole in a wheel disc of a vehicle. In this process, the main parameter is the formability of a material that is expressed as the hole expansion ratio. The hub-hole expansion process is different from conventional forming processes or hole flanging processes from the view-point of its deformation mode and forming of a thick plate. In the process, a crack is occurred in the upper edge of a hole as the hole is expanded. Since prediction of the forming limit by hole expansion experiment needs tremendous time and effort, an appropriate fracture criterion has to be developed for finite element analysis to define forming limit of the material.

In this paper, the hole expansion process of a hub-hole is studied by finite element analysis with ABAQUS/standard considering several ductile fracture criteria. The fracture mode and hole expansion ratio is compared with respect to the various fracture criteria. These criteria do not predict its fracture mode or hole expansion ratio adequately and show deviation from experimental results of hole expansion. A modified ductile fracture criterion is newly proposed to consider the deformation characteristics of a material accurately in a hole expansion process. A fracture propagation analysis at the hub-hole edge is also performed for high accuracy of prediction using the new fracture criterion proposed.

Key Words : Hole expansion process (홀 확장공정), Ductile fracture criterion (연성파괴기준), Hole expansion ratio (홀 확장비)

1. 서 론

자동차 휠 디스크(wheel disc)의 제작과정에 있어 홀 확장공정으로 제조되는 허브홀(hub-hole)은 휠의 피로 성능과 차량 안전에 많은 영향을 미치는 부분이다. 일반적으로 허브홀은 판재의 펀칭(punching) 공정 후에 홀 확장(hole expansion) 성형을 통하여 제작된다. 이러한 공정으로 인하여 발생하는 홀 주위의 결함은 휠의 성능을 급격히 저

하시킬 뿐만 아니라 수명을 단축시키게 된다. 따라서 홀 확장공정 도중에 발생하는 재료의 파단을 정확히 예측하고 성형한계를 결정하는 것은 휠의 성능을 향상시킬 수 있으며 차량 안전설계를 가능하게 한다. 일반적으로 성형해석 과정에서 파단을 예측하기 위한 방법으로는 단순 인장시험에서 얻은 시편의 파단변형률을 이용하는 방법, 소성 불안정 이론에 근거하여 한계변형률을 이용하는 방법, 연성파괴기준(ductile fracture criterion)을

1 한국과학기술원 기계공학과

2 POSCO 기술연구소

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과, hhuh@kaist.ac.kr

적용한 방법[1]이 제시되고 있다. 특히 기존의 연성파괴기준들은 일반적인 성형공정이나 홀 플랜징 공정에 대하여 재료의 파단을 예측하는데 있어 비교적 높은 정확성을 보였다[2]. 그러나 허브홀 확장과정은 파단이 발생하는 홀의 옆면에 구속이 없고 옆면에서 파단이 진행되기 때문에 일반적인 성형과정과 다르며, 비교적 두꺼운 판재를 성형하기 때문에 얇은 판재를 성형하는 홀 플랜징 과정과는 차이가 있다. 그러므로 허브홀 확장 과정에 기존의 연성파괴기준을 적용하여 정확성을 검증하고 시험과의 비교를 통하여 보다 정확한 연성파괴기준의 제시가 필요하다.

2. 허브홀 확장시험 및 유한요소해석

2.1 허브홀 확장시험

POSCO 기술연구소에서 수행한 허브홀 확장시험의 금형과 시편은 Fig. 1에 제시되어 있으며, 사용된 강종은 SAPH440 이다. 3 개의 코일에 대하여 각각 8 개의 시편을 채취한 후 홀 확장시험을 수행하였다. 홀 확장비(hole expansion ratio, HER)는 홀 확장과정 중 판재의 최종 파단 시점에서 식 (1)과 같이 계산되며 각 코일에 대하여 최소와 최대값을 제외한 6 개 시편의 홀 확장비를 평균하여 Table 1에 정리 하였다.

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

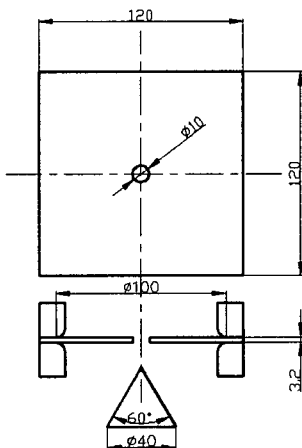


Fig. 1 Specimen and tool of hole expansion test

Table 1 Result of HER test

Coil 1	137.0 %
Coil 2	204.7 %
Coil 3	162.1 %
Average	167.9 %

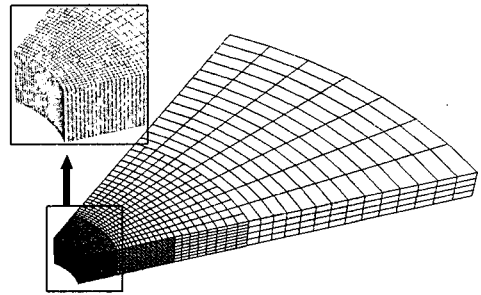


Fig. 2 Finite element model of blank for hole expansion analysis

2.2 유한요소해석 조건

유한요소해석을 위하여 구성된 시편의 모델링은 Fig. 2에 도시하였다. 홀 확장시험에서 재료의 유입을 방지하기 위하여 블랭크의 가장자리 변위를 고정시켰으며 모델의 대칭성과 해석시간을 고려하여 시편을 1/8로 모델링 하였다. 본 논문에서는 홀 확장시험에 기계가공된 시편을 사용하여 초기균열을 제거하였으며, 시편의 유한요소 모델도 초기 균열을 고려하지 않고 모델링을 수행하였다. 그리고 유한요소해석은 탄소성 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/standard를 사용하였으며 적용된 재료(SAPH440)의 유동응력 식은 $\sigma = 832.85(0.0078 + \bar{\epsilon}_p)^{0.182}$ MPa와 같다. 펀치의 이송거리는 50mm를 초과하여 재료가 성형한계 이상으로 변형하도록 하였다.

3. 연성파괴기준의 개선 및 적용

3.1 연성파괴기준의 개선

Brozzo[3], Cockcroft 등[4]에 의하여 제안된 기존의 연성파괴기준을 유한요소 해석에 적용한 결과는 실제 홀 확장시험 결과와 큰 차이를 보인다[5]. 본 논문에서는 홀 확장 과정 중 발생하는 파단을 정확하게 예측하기 위해 연성재료의 특성인 연성곡선(ductility curve)과 홀 확장과정에서의 변형특성을 고려하여 연성파괴기준을 개선하였다. 일반적으로 연성재료의 파단변형률은 식 (2)와 같이 정

의되는 삼축방향성비(triaxiality ratio, TR)에 영향을 받으며 파단변형률과의 관계는 Fig. 3 과 같이 나타낼 수 있다[6]. Fig. 4 는 유한요소해석 결과로 얻은 홀 옆면 요소의 변형률 경로로서 홀 확장과정 중 홀 주위의 변형이 단순인장 상태로 근사될 수 있음을 나타내고 있다. TR 의 효과를 고려하기 위해 Brokken 등[6]이 제안한 연성파괴기준과 홀 확장과정의 변형 특성인 최대주응력의 효과를 고려하기 위해 Cockcroft 등이 제안한 연성파괴기준을 참고하였다. 이 두 인자를 고려하여 최종적으로 본 논문에서 제안한 연성파괴기준은 식 (3)에 나타내었다.

$$TR = \frac{\sigma_m}{\sigma} \quad (2)$$

$$I_{New} = \frac{1}{C_{new}} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\sigma} \left\langle 1 + 3 \frac{\sigma_m}{\sigma} \right\rangle d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

$$\text{where } \langle x \rangle = 0 \text{ for } x \leq 0$$

$$\langle x \rangle = x \text{ for } x > 0$$

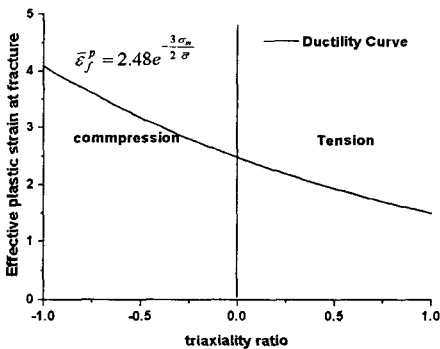


Fig. 3 Ductility curve of common ductile material

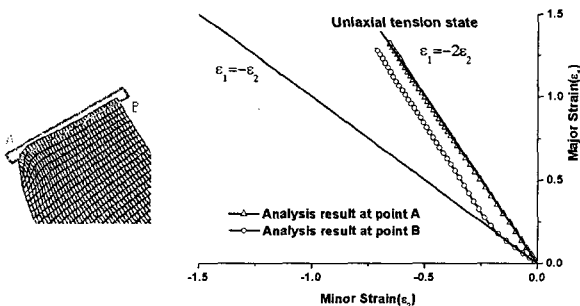


Fig. 4 Strain path around the hole edge

Table 2 Fracture strain in the tensile direction of the material

ϵ_f (uniaxial)	0.7156
ϵ_f (plane strain)	0.5686

Table 3 Coefficients of ductile fracture criteria

C_1	C_2	C_{new}
0.7955	0.7369	1.7512

3.2 연성파괴기준의 적용

홀 확장과정 중에 재료의 파단을 예측하기 위하여 제안된 연성파괴기준을 ABAQUS/standard (UMAT)에 적용하고, 해석과정에서 매 해석단계마다 연성파괴기준 값이 계산되도록 하였다. 식 (4), 식 (5)에 나타낸 Brozzo, Cockcroft 등의 연성파괴기준식과 본 논문에서 제안한 연성파괴기준식을 홀 확장 해석에 적용하였으며 각 연성파괴기준식에 대해서 재료의 파단 조건은 기준 값이 '1'에 도달했을 때로 하였다. Table 2 은 POSCO 기술연구소에서 수행한 SAPH440 의 단순 인장시험과 평면변형을 시험의 결과를 나타내며 이를 이용하여 계산된 각 기준식에 대한 상수 값은 Table 3 에 나타내었다.

$$I_{Brozzo} = \frac{1}{C_1} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2}{3} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_m - \sigma_n} \right) d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

$$I_{Cockcroft} = \frac{1}{C_2} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\sigma} d\bar{\epsilon} \quad (5)$$

4. 연성파괴기준을 적용한 해석 결과

4.1 파단 전파의 고려

실제 홀 확장과정에서 판재의 최종 파단은 홀 옆면의 윗단에서 아랫단으로 파단이 완전히 전파되는 시점으로 한다. 본 논문에서는 유한요소해석에서 파단이 전파되는 과정을 묘사하기 위하여 절점분리법(node separation method)[7]을 적용하였다. 해석에 적용된 연성파괴기준 값이 '1'이 넘는 절점에 대하여 이 절점을 분리하였고 이 과정을 반복 수행하여 홀 옆면의 두께 방향으로 모든 절점이 분리되는 시점을 판재의 최종 파단으로 가정하였다.

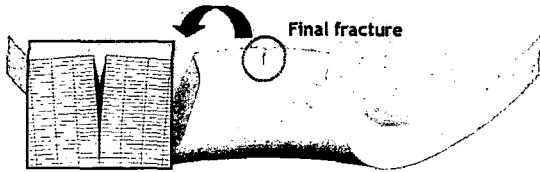


Fig. 5 Deformed shape of specimen at final fracture

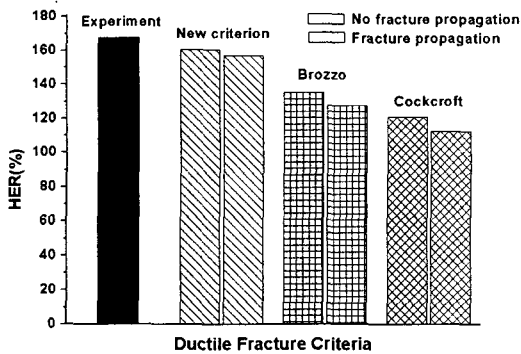


Fig. 6 HER result for fracture condition

4.2 유한요소해석 결과

유한요소해석으로부터 얻은 판재의 최종 파단 형상은 Fig. 5에 도시하였고, 기존의 연성파괴기준 및 본 논문에서 제안한 새로운 연성파괴기준에 대하여 최종 파단시 계산된 HER 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 전체적으로 파단 전파에 의한 응력 집중의 효과로 인하여 HER 값이 파단 전파를 고려하지 않았을 때 보다 작게 예측되었다. 기존의 연성파괴기준은 HER 값에 대하여 시험 결과와 큰 차이를 보였으며 본 논문에서 제안한 연성파괴기준은 파단경향과 HER 결과에 대하여 비교적 정확하게 시험 결과를 예측하면서 다른 연성파괴기준에 비하여 정확도가 높은 예측치를 보이고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 유한요소해석에 연성파괴기준을 적용하여 홀 확장과정에서 재료의 파단을 예측하고 이를 시험 결과와 비교하였다. 허브홀 확장과정과 같은 복잡한 성형공정의 경우 기존의 연성파괴기준은 시험 결과와 차이를 보이고 있었으며 이를 개선하기 위하여 연성재료의 파단특성과 홀

확장과정의 변형특성을 고려하여 새로운 연성파괴기준을 제안하였다. 유한요소해석은 실제적인 공정을 묘사하기 위하여 절점분리법을 이용한 파단 전파과정을 고려하여 수행되었다. 제안된 새로운 파괴기준은 시험결과와 비교하여 기존의 기준식보다 높은 정확성을 나타내었다.

실제 휠 디스크의 허브홀 제조과정에서 정확한 홀 확장성을 예측하기 위해서는 초기 홀을 제조하는 펀칭과정에 의한 초기 균열 효과의 고려와 홀 옆면의 초기 균열에 대한 유한요소모델링이 수반되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] P. Brozzo, B. DeLuca and R. Rendina, 1972, "A new method for the prediction of formability limits in metal sheets", Proceedings of the 7th biennial conference of the international deep drawing research group.
- [4] M. G. Cockcroft and D. J. Latham, 1968, "Ductility and workability of metals", J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33~39.
- [5] 고운기, 이종섭, 허 훈, 김홍기, 박성호, 2004, "연성파괴기준을 이용한 허브홀 확장과정에서의 파단 예측", 한국소성학술대회 논문집, pp. 160~163.
- [6] 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.
- [7] V. E. Saouma and I. J. Zatz, 1984, "An automated finite element procedure for fatigue crack propagation analysis", Eng. Fract. Mech., Vol. 20, No. 2, pp. 321~333.