

# 연성파괴기준을 이용한 허브홀 확장과정에서의 파단 예측

고윤기<sup>1</sup> · 이종섭<sup>1</sup> · 허 훈<sup>#</sup> · 김흥기<sup>2</sup> · 박성호<sup>2</sup>

## Prediction of Fracture in Hub-hole Expansion Process Using Ductile Fracture Criteria

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

(Received March 9, 2005)

### 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. 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 are 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, Ductile Fracture Criterion, Hole Expansion Ratio

### 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 저하시킬 뿐만 아니라 수명을 단축시키게 된다. 따라서 홀 확장공정 도중에 발생하는 재료의 파단

을 정확히 예측하고 성형한계를 결정하는 것은 휠의 성능을 향상시킬 수 있으며 차량 안전설계를 가능하게 한다. 홀 확장시험을 통한 재료의 성형한계 예측은 다양한 허브홀의 성형조건과 강종에 따라 달라질 수 있으므로 시간과 비용의 측면에서 실험을 통한 접근이 어렵다. 유한요소해석을 이용한 파단예측은 성형조건 및 재료를 결정하는데 효율적이며 다양한 파괴기준의 적용이 용이하게 된다.

일반적으로 성형해석 과정에서 파단을 예측하기 위한 방법으로는 단순 인장시험에서 얻은 시편의

1 한국과학기술원 기계공학과

2 POSCO 기술연구소

# 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hhuh@kaist.ac.kr

파단변형률을 이용하는 방법, 소성 불안정 이론에 근거하여 한계변형률을 이용하는 방법[1], 연성과 파괴기준(ductile fracture criterion)을 적용한 방법[2]이 제시되고 있다. 특히 기존의 연성과파괴기준들은 일반적인 성형공정이나 홀 플랜징 공정에 대하여 재료의 파단을 예측하는데 있어 비교적 높은 정확성을 보였다[3]. 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 확장과정에 기존의 연성과 파괴기준을 적용하여 정확성을 검증하고 시험과의 비교를 통하여 보다 정확한 연성과파괴기준의 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 식 (1)과 같이 계산되며 각 코일에 대하여 최소와 최대값을 제외한 6 개 시편의 홀 확장비를 평균하여 Table 1에 정리 하였다.

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

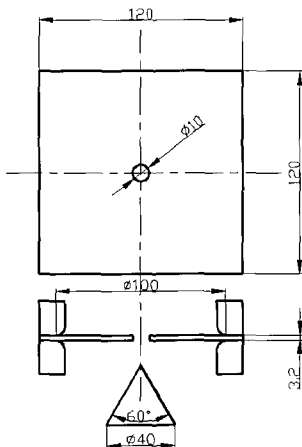


Fig. 1 Specimen and tool of hole expansion test

Table 1 Result of HER test

Coil	HER (%)
Coil 1	137.0 %
Coil 2	204.7 %
Coil 3	162.1 %
Average	167.9 %

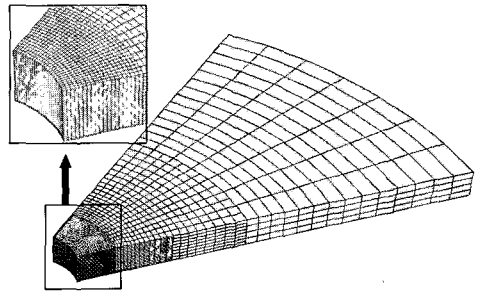


Fig. 2 Finite element model of blank for hole expansion analysis

### 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. 그리고 홀 끝단에 상대적으로 많은 요소를 할당하여 홀 주위의 응력 상태가 정밀하게 계산되도록 하였다. 실제 허브홀 제조공정에서는 휠 디스크에 홀을 만들기 위한 펀칭 공정으로 인하여 홀 옆면에 균열이 발생하게 된다. 그러나 본 논문에서는 홀 확장시험에 기계가공된 시편을 사용하여 초기 균열을 제거하였으며, 시편의 유한요소 모델에서도 초기 균열을 고려하지 않고 모델링을 수행하였다. 유한요소해석은 탄소성 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/standard를 사용하였으며 적용된 재료의 유동응력 식은  $\sigma = 832.85(0.0078 + \bar{\epsilon}_p)^{0.182}$  MPa와 같다. 펀치의 이송거리는 50mm를 초과하여 재료가 성형한계 이상으로 변형하도록 하였다.

### 2.3 연성과파괴기준의 적용

홀 확장과정 중에 파단을 예측하기 위하여 Oyane[4], Brozzo[5], Cockcroft[6] 과 Rice 등[7]이 제안한 연성과파괴기준을 ABAQUS/standard (UMAT)에 적용하고, 해석과정에서 매 해석단계마다 각 기준값이 계산되도록 하였다. 그 기준식은 각각 식 (2), (3), (4), (5)와 같다.

**Table 2 Fracture strain in the tensile direction of the material**

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

**Table 3 Coefficients of ductile fracture criteria**

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
1.9438	2.3831	0.7955	0.7369	0.9418	0.9794

$$I_{Oyane} = \frac{1}{C_2} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left( \frac{\sigma_{mean}}{\bar{\sigma}} + C_1 \right) d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

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

$$I_{Cockcroft} = \frac{1}{C_4} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

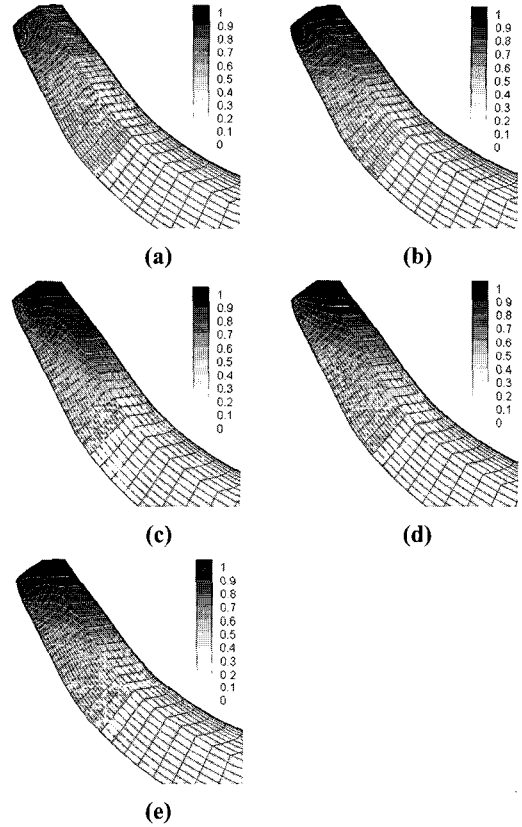
$$I_{Rice} = \frac{1}{C_6} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} e^{C_5 \frac{\sigma_{mean}}{\bar{\sigma}}} d\bar{\epsilon} \quad (5)$$

이때,  $\bar{\sigma}$ ,  $\sigma_{min}$ ,  $\sigma_{max}$  은 각각 유효응력(effective stress), 평균응력 (mean stress), 최대주응력 (maximum principle stress)을 나타내며,  $d\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{\epsilon}_f$  는 각각 유효변형률 증분과 파단변형률을 나타낸다. 상수  $C_1 \sim C_6$  은 단순 인장시험과 평면변형률 시험으로부터 얻은 결과를 바탕으로 계산되며, 재료의 파단조건은 각 기준 값이 '1'에 도달하였을 때로 한다. Table 2 은 POSCO 기술연구소에서 수행한 SAPH440 의 단순 인장시험과 평면변형률 시험의 결과를 나타내며 이를 이용하여 계산된 각 기준식에 대한 상수 값은 Table 3 에 나타내었다.

### 3. 연성파괴기준을 적용한 해석 결과

#### 3.1 유한요소해석 결과

실제 허브홀 확장시험에서는 홀 옆면의 윗단에서 파단이 발생하는 경향을 보인다. Fig. 3(a)는 시편의 최종 변형형상과 유효변형률(effective strain)의 분포로서 펀치가 진행하면서 시편과의 접촉부에 압축력에 의한 변형이 집중되기 때문에 높은 값을 나타내고 있다. 그러므로 유효변형률 분포만으로는 실제 홀 확장과정에서 일어나는 파단경향을 정확하게 예측할 수 없다. Fig. 3(b)~(e)는 각각



**Fig. 3 Distribution of the field variable: (a) effective strain; (b) Oyane criterion; (c) Brozzo criterion; (d) Cockcroft criterion; (e) Rice criterion**

**Table 4 HER result for ductile fracture criteria**

Experiment	Oyane	Brozzo	Cockcroft	Rice
167.9%	106.9%	135.6%	120.9%	106.9%

유한요소해석 결과를 이용하여 얻은 연성파괴기준 값의 분포를 나타낸다. Oyane, Rice 등이 제안한 기준값의 분포는 홀 옆면의 아래 부분에서 높은 값을 보이면서 실제의 파단경향과 차이를 보이고 있으며, Brozzo, Cockcroft 등이 제안한 기준 값의 분포는 홀 옆면의 윗단에서 높은 값을 나타내면서 파단경향을 예측하고 있다. 본 논문에서 시편의 최종 파단은 홀 옆면의 요소에서 계산된 연성파괴기준 값이 두계방향의 모든 요소에서 '1' 이상인 시점으로 판단하였다. Table 4 에 각 연성파괴기준 식을 적용하여 최종 파단시 계산된

HER 결과를 비교하였다. 각 연성파괴기준 값에 따라 예측한 HER 값은 시험 결과인 167.9 %와 많은 차이를 보이고 있으므로 허브홀 확장과정에 적합한 새로운 연성파괴기준의 제시가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 연성파괴기준의 개선

##### 4.1 연성곡선(ductility curve)의 고려

연성곡선은 재료의 파단변형률의 변화를 나타내는 곡선으로서 식 (6)과 같이 삼축방향성비(triaxiality ratio, TR)를 계산하여 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다[8]. 연성재료에 양의 평균응력이 부과되면 재료 내에 공극의 확장으로 파단변형률이 감소하게 되며, 음의 평균응력은 공극을 수축시켜 파단변형률을 증가시키게 된다. 따라서 TR 영향에 의한 파단변형률의 변화는 연성파괴기준에서 반드시 고려하여야 할 인자이다.

$$TR = \frac{\sigma_{mean}}{\bar{\sigma}} \quad (6)$$

##### 4.2 홀 확장과정의 변형특성 고려

유한요소해석으로부터 홀 옆면의 요소에서 얻은 변형률 경로를 Fig. 5에 나타내었다. 주변형률(major strain)은 원주 방향의 변형률이며, 소변형률(minor strain)은 시편의 반경 방향의 변형률이다. 그림에 나타난 홀 옆면 요소의 변형률 경로가 단순 인장상태의 변형률 경로로 근사되기 때문에 홀 주위에서 변형이 단순인장 상태에 있음을 알 수 있다. 따라서 홀 확장과정에서 홀 옆면의 최대 주응력 방향, 즉 원주방향의 응력상태가 파단을 결정하는 중요한 인자가 된다.

##### 4.3 새로운 연성파괴기준의 제안

삼축방향성비에 의한 연성재료의 파단특성과 홀 확장과정에서의 홀 옆면에서의 변형특성을 고려하기 위하여 식 (7)과 같은 형태의 연성파괴기준을 제안하였다.

$$I_{New} = \frac{1}{D_2} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} f(\sigma) w\left(\frac{\sigma_{mean}}{\bar{\sigma}}\right) d\bar{\epsilon} \quad (7)$$

이 식은 홀 확장과정의 변형 특성을 고려한  $f(\sigma)$  항과 삼축방향성비를 고려하여 가중치를 주는 함수  $w(\sigma_{mean}/\bar{\sigma})$ 로 구성된다. 전자는 식 (8)과

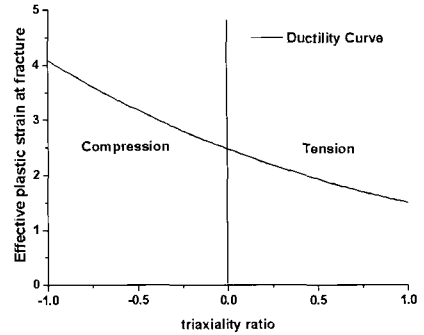


Fig. 4 Ductility curve of common ductile material

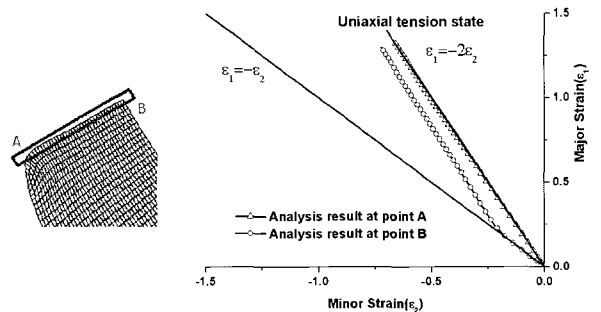


Fig. 5 Strain path around the hole edge

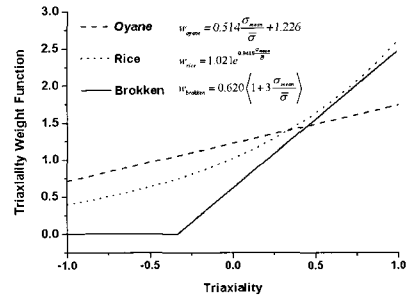


Fig. 6 Weight functions for ductile fracture criterion

같이 Cockcroft 등이 제안한 연성파괴기준식을 참고하여 최대주응력에 의한 손상도를 고려하였으며, 후자는 Oyane, Rice 그리고 Brokken 등[8]에 의하여 제안된 연성파괴기준을 고려하였다.

$$f(\sigma) = \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} \quad (8)$$

재료의 상수값을 고려한 각 가중치 함수의 형태는 Fig. 6에 나타내었다. 특히 Brokken의 가중치 함수는 가중치가 음의 값이 되어 재료에 축적된

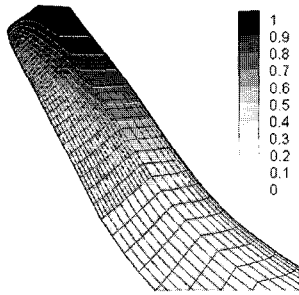


Fig. 7 Distribution of the new ductile fracture criterion

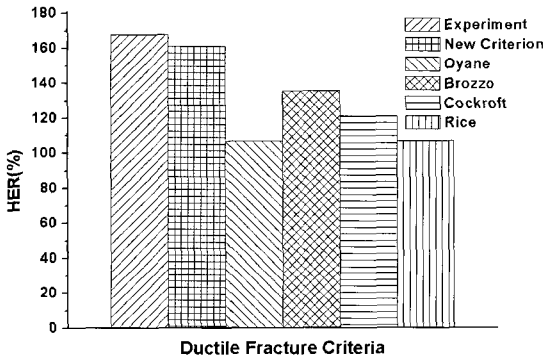


Fig. 8 HER result for ductile fracture criteria

손상도가 작아지는 현상을 방지한다. 본 논문에서는 가중치 함수로서 Brokken 에 의하여 제안된 식을 적용하였으며, 최종적으로 제안된 새로운 연성파괴기준은 식 (9)에 나타내었다.

$$I_{New} = \frac{1}{C} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} \left( 1 + 3 \frac{\sigma_{mean}}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon} \quad (9)$$

where  $C = 1.7512$

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

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

이를 적용하여 유한요소해석을 수행한 결과를 Fig. 7에 도시하였으며 재료가 최종파단 되었을 때 각 연성파괴기준에 의하여 측정된 HER 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 본 논문에서 제안한 연성파괴기준은 홀 옆면의 윗단에서 파단이 진행되는 실제 경향을 잘 묘사하였으며 홀 확장시험으로부터 얻어진 HER 결과인 167.9 %와 비교하여 높은 정확성을 보였다.

## 5. 파단 전파를 고려한 유한요소해석

### 5.1 유한요소해석 조건

판재는 홀 확장과정 중에 홀 옆면에서 단축인장 상태에 놓이기 때문에 파단이 두께방향으로 일정한 경로로 전파된다고 가정하였으며 적용된 연성파괴기준 값이 '1' 이 넘는 절점을 분리하여 파단의 전파를 묘사하였다. 파단 전파를 고려한 유한요소해석 과정에는 실제의 파단경향을 예측한 Brozzo 등과 Cockcroft 등의 연성파괴기준 식과 본 논문에서 제안한 식 (9)의 새로운 연성파괴기준식을 적용하였다.

### 5.2 파단 전파를 고려한 해석 결과

펀치가 진행되는 동안 파단 기준값이 '1' 이 넘는 홀 옆면의 윗단의 절점부터 파단이 발생하여 아래 부분의 절점으로 전파된다. 본 논문에서는 절점분리법(node separation)[9]을 적용하여 파단의 전파 과정을 고려하였으며, 최종파단은 홀 옆면에서 두께방향으로 모든 절점이 분리되었을 때로 가정하였다. 유한요소해석 과정에서 수행된 절점분리 과정은 Fig. 9에 나타내었다. 유한요소모델에 사용된 MPC-TIE 옵션은 ABAQUS/Standard 에서 지원하는 기능으로서 두개의 절점 중 한 개의 절점을 나머지 절점에 구속시켜 한 개의 절점으로 행동하도록 한다. 초기 해석으로부터 MPC-TIE 옵션이 부가된 절점에 대해서 각 해석단계마다 연성파괴기준 값을 조사한다. 조사된 절점에서 계산된 기준값이 '1' 에 도달하면 해당 절점에 부과된 MPC-TIE 옵션을 제거하고 이 해석단계에서 모든 상태변수 값을 저장하여 재해석을 수행하고 이 과정을 최종파단 시점까지 반복 수행한다. 절점분리과정을 통하여 얻어진 홀 확장과정에서의 최종

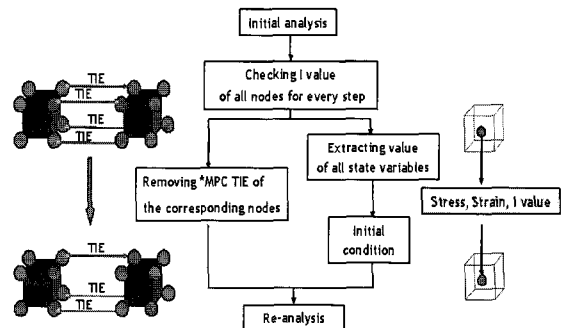


Fig. 9 Scheme of fracture propagation analysis

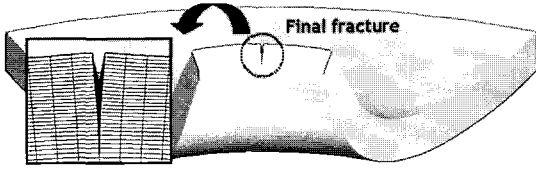


Fig.10 Deformed shape of specimen at final fracture

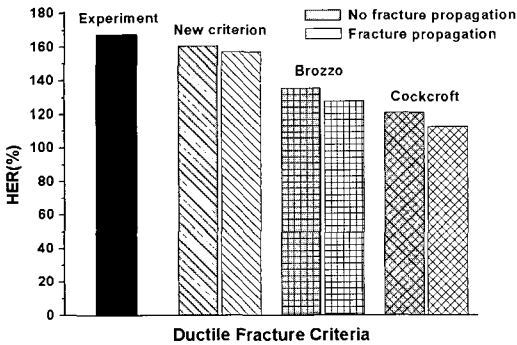


Fig.11 HER result for fracture condition

파단 형상은 Fig. 10 에 도시하였고, 기존의 연성파괴기준 및 본 논문에서 제안한 새로운 연성파괴기준에 대하여 최종 파단시 HER 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. 전체적으로 파단 전파에 의한 응력집중의 효과로 인하여 HER 값이 파단 전파를 고려하지 않았을 때 보다 작게 예측 되었다. 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.

## 6. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석에 연성파괴기준을 적용하여 홀 확장과정에서 재료의 파단을 예측하고 이를 시험 결과와 비교하였다. 허브홀 확장공정과 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 파

단 전과과정을 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.

## 참 고 문 헌

- [1] C. T. Wang, G. Kinzel, T. 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, 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, G. W. Rowe, 1990, Fracture prediction in plastic deformation process, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 32, pp. 1~17.
- [4] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima, 1980, Criteria for ductile fracture and their application, *J. Mech. Work. Tech.*, Vol. 4, pp. 65~81.
- [5] P. Brozzo, B. DeLuca, 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.*
- [6] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and workability of metals, *J. Inst. Metals*, Vol. 96, pp. 33~39.
- [7] J. R. Rice, D. M. Tracey, 1969, On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 17, pp. 201~217.
- [8] D. Brokken, W. A. M. Brekelmans, F. P. T. Baaijens, 1998, Numerical modeling of metal blanking process, *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 83, pp. 192~199.
- [9] V. E. Saouma, I. J. Zatz, 1984, An automated finite element procedure for fatigue crack propagation analysis, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 20, No. 2, pp. 321~333.