

## 정수압을 이용한 홀 펀칭공정의 유한요소 해석

윤종현<sup>1</sup> · 허 훈<sup>#</sup> · 김승수<sup>2</sup> · 김응주<sup>2</sup> · 박훈재<sup>2</sup> · 최태훈<sup>2</sup> · 이해진<sup>2</sup>

### Finite Element Analysis of the Hydro-mechanical Punching Process

J. H. Yoon, H. Huh, S. S. Kim, E. J. Kim, H. J. Park, T. H. Choi, H. J. Lee

(Received October 21, 2005)

#### Abstract

This paper investigates the characteristics of a hydro-mechanical punching process. The hydro-mechanical punching process is divided into two stages: the first stage is the mechanical half piercing in which an upper punch goes down before the initial crack is occurred; the second stage is the hydro punching in which a lower punch goes up until the final fracture is occurred. Ductile fracture criteria such as the Cockcroft, Brozzo and Oyane are adopted to predict the fracture of sheet material. The index values of ductile fracture criteria are calculated with a user material subroutine, VUMAT in the ABAQUS Explicit. The hydrostatic pressure retards the initiation of a crack in the upper region of the blank and induces another crack in the lower region of the blank during the punching process. The final fracture zone is placed at the middle surface of the blank to the thickness direction. The result demonstrates that the hydro-mechanical punching process makes a finer shearing surface than the conventional one as hydrostatic pressure increases.

**Key Words :** Hydro-mechanical Punching, Ductile Fracture Criterion, Punching Analysis, Hydrostatic Pressure

#### 1. 서 론

전자제품 및 통신기기 부품의 경량화, 초소형화 경향에 따라 각종 부품들은 기본적으로 고 기능성을 유지하면서 보다 작은 치수와 높은 정밀도를 요구하게 된다. 이러한 밀리(mm) 단위의 미세 부품을 생산, 가공할 경우 고가의 정밀 금형을 제작하여야 할뿐만 아니라 표면력의 급격한 상승에 따라 치수에 비하여 과도한 성형 하중이 걸리게 된다. 따라서 밀리 부품의 생산과 가공을 위한 효과적인 미세 공정의 개발이 필요하다[1]. 미세 부품의 가공에 많이 응용되는 펀칭공정의 경우 홀(hole)의 직경이 수 mm 단위로 내려가면 판재 두

께에 비하여 롤오버(roll-over)의 양과 버(burr)의 크기가 상대적으로 증가하는 단점이 있다. 따라서 미세 부품의 가공 시 치수 정밀도를 높이는 효과적인 펀칭공정의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 개발 중인 정수압을 이용한 홀 펀칭공정을 소개하고 유한요소 해석을 이용하여 공정변수를 살펴본다. 또한 펀칭공정 시 소재의 파단을 예측하기 위하여 연성과파괴 기준식을 적용하여 클리어런스(clearance)와 정수압(hydrostatic pressure)등의 공정 변수의 변화에 따라 펀치 진행거리와 파단 시점을 예측하여 최적의 공정 조건을 찾는다.

일반적으로 성형 한계 및 파단에 대한 이론적 조건식으로는 소성 불안정 조건에 의거하는 Hill-Swift

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. 한국생산기술 연구원

# 교신저자 : 한국과학기술원 기계공학과

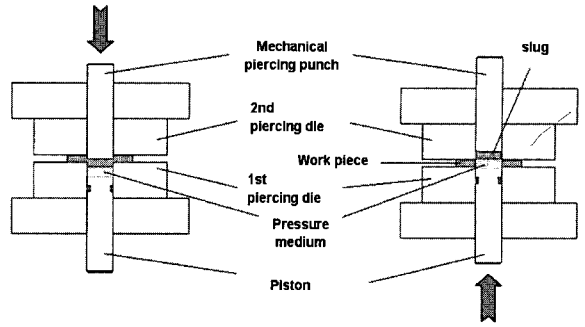
E-mail : hhuh@kaist.ac.kr

기준식과 Stören-Rice 의 분기 조건식(bifurcation)이 있으며 노치(notch)를 만들어 국부적인 변형률을 유도하는 M-K(Marciniak-Kuczynski) 이론이 있다. 또한 Oyane[2], Cockcroft[3], Brozzo 등이 제안한 연성파괴기준(ductile fracture criterion)식을 적용하여 성형한계 및 파단을 예측하는 방법들이 있다. 정수압을 이용한 홀 펀칭 공정과 같이 압축과 인장이 반복되어 복잡한 변형경로를 갖는 성형가공의 경우 연성파괴 기준식을 적용하여 파단을 예측하는 방법이 비교적 정확한 것으로 알려져 있다. 또한 이러한 성형 한계 기준식 들을 적용하여 재료의 파단을 유한요소 해석에서 묘사하는 방법으로는 절점을 분리하는 방법과 파단이 일어난 해당 요소의 응력성분을 제거하여 해석상에서 요소를 제거하는 방법(element deletion technique)이 있다.

본 논문에서는 유한요소 프로그램인 ABAQUS /Explicit을 사용하여 정수압을 이용한 홀 펀칭 공정을 해석하며 VUMAT(User Material Subroutine)을 구성하여 연성파괴 기준 값을 계산한다. 계산된 연성파괴 기준 값은 소재의 파단을 예측하는 지표가 되며 소재의 파단 시 요소 제거 방법을 적용하여 펀칭공정을 묘사하였다. 일반적인 펀칭공정과 다르게 정수압을 이용한 홀 펀칭공정에서는 소재 하부에 작용하는 정수압과 클리어런스(clearance)의 크기에 따라 펀칭 결과가 달라질 수 있으므로 이러한 영향인자에 대한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

## 2. 정수압을 이용한 홀 펀칭공정

기존의 펀칭공정과 다르게 정수압을 이용한 펀칭공정은 Fig. 1과 같이 크게 두 단계로 나눌 수 있다. Mechanical half piercing 공정은 상부 펀치가 소재의 파단순간 전까지 하강하면서 소재를 다이의 캐비티(cavity) 안으로 밀어 넣는 공정으로서 파단면의 최종 형상을 매끄럽게 유지하기 위하여 소재 하단부에 유압 매체를 위치시켜 펀치가 진행되는 동안 소재 표면에 정수압을 가하게 된다. 이러한 정수압의 효과는 소재의 파단을 지연시킴으로써 전단변형면(burnish)의 증가를 가져와 최종 전단면을 매끄럽게 한다. Hydro punching 공정은 1 단계 공정에서 밀려나온 홀 부분의 소재를 유체를 이용하여 반대 방향으로 밀어 올리는 공정이 된다. 이 과정에서 소재의 최종적인 펀칭이 이루어지게 되며 1단계 공정으로 인하여 캐비티 부의



(a) Mechanical half piercing (b) Hydro punching  
**Fig. 1 Procedure of the hydro-mechanical punching process**

소재와 바깥쪽 소재 사이에 형성된 잘록한 목에 균열이 발생하여 진전하게 된다. 하부 펀치가 상승함에 따라 균열이 발전하여 소재 두께 방향의 중심 부분에서 최종 파단이 일어나게 된다. 이러한 펀치의 하강, 상승 작용에 의하여 펀칭공정에서 발생하게 되는 버의 양을 줄일 수 있으며 보다 깨끗한 전단면을 얻을 수 있게 된다.

## 3. 유한요소 해석

### 3.1 해석 조건

유한요소 해석을 위하여 초기 블랭크(blank)는 Fig. 2 와 같이 8500 개의 축대칭 요소를 사용하여 모델링 하였으며 다이와 펀치, 스트립퍼는 각각 analytic die 를 사용하였다. Table 1 은 펀치와 다이의 반경 및 공구의 필렛(fillet) 반경과 클리어런스의 크기를 나타내었다. 소재의 하단부에 작용하게 되는 유체는 Fig. 3 과 같이 5MPa 의 압력 경계조건을 부가 하였다. 1 단계 공정에서는 펀치의 진행에 따라 압력이 선형적으로 증가하고 2 단계 공정에서는 압력을 유지한 채로 하부펀치가 상승하므로 Fig. 3 과 같은 압력 경계조건을 이용하여 해석을 단순화 하였다. 사용된 강종은 두께 1.0mm 의 SAPH440 와 SPCC 이며 적용된 유동응력 식은 식 (1), (2)와 같다. 해석은 탄소성 유한요소 프로그램인 ABAQUS/Explicit 을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = 832.85(0.0078 + \bar{\epsilon}_p)^{0.182} \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = 493.37(0.00325 + \bar{\epsilon}_p)^{0.223} \quad (2)$$

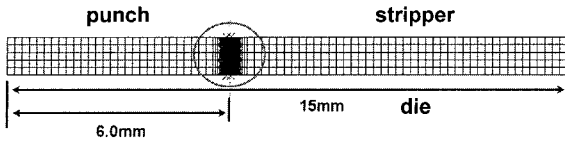


Fig. 2 Finite element modeling

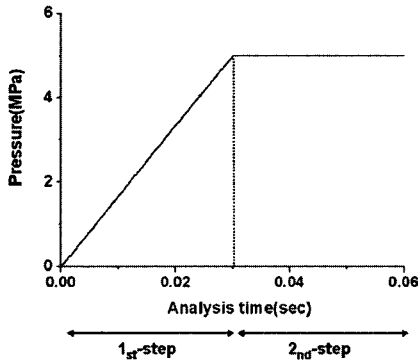


Fig. 3 Pressure boundary condition

Table 1 Specification of dimension

Die Cavity	Total Length of Workpiece	Radius of Die/Punch	Clearance
6mm	15mm	0.04mm	0.03mm

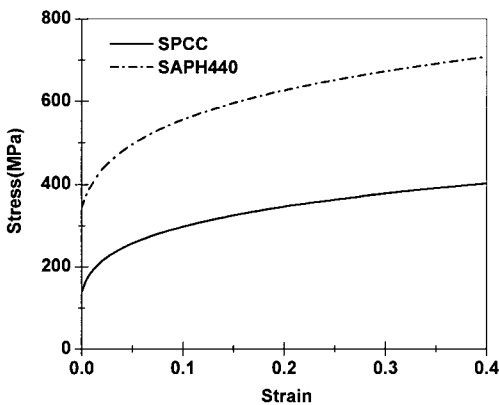


Fig. 4 Stress-strain curve for SAPH440 and SPCC

### 3.2 연성파괴기준(ductile fracture criterion)

정수압을 이용한 펀칭공정에서 소재의 초기 파단을 예측하고 전체 공정을 해석하기 위하여 식 (3), (4), (5)와 같은 Cockcroft, Brozzo 그리고 Oyane

Table 2 Fracture strain in tensile test (SAPH440)

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

Table 3 Material constants in ductile fracture criteria (SAPH440)

$C_1$ (Cockcroft)	$C_2$ (Brozzo)	$C_3$ (Oyane)	$C_4$ (Oyane)
0.7369	0.7955	1.9438	0.3831

Table 4 Fracture strain in tensile test (SPCC)

$\epsilon_f$ (uniaxial)	0.72
$\epsilon_f$ (plane strain)	0.46154

Table 5 Material constants in ductile fracture criteria (SPCC)

$C_1$ (Cockcroft)	$C_2$ (Brozzo)	$C_3$ (Oyane)	$C_4$ (Oyane)
0.6815	0.85	1.5437	1.2744

의 연성파괴기준 식을 적용하였다.  $\bar{\sigma}$ ,  $\sigma_h$ ,  $\sigma_m$  은 각각 유효응력(effective stress), 정수압 (hydrostatic stress), 최대주응력을 나타내며,  $d\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{\epsilon}_f$  는 각각 유효변형률 증분과 파단변형률을 나타낸다. 소재 SAPH440 와 SPCC 에 대하여 상수  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  는 단순 인장시험과 평면변형률 시험으로부터 얻은 Table 2 의 시험 결과를 바탕으로 계산된다[4], [6]. ABAQUS Explicit 에서 지원하는 User Subroutine (VUMAT)을 구성하여 연성파괴기준 값을 계산하게 되며 이 값이 '1'을 넘게 되는 순간을 파단으로 간주하여 요소제거 방법(element deletion)을 이용하여 균열의 진전을 묘사하게 된다. 해석은 총 2 단계로 구성되며 해석 도중 연성파괴기준 값이 1 에 도달하는 순간까지를 1 단계의 펀치 진행거리로 정의하고 하부 펀치를 상승시켜 최종파단이 일어날 때까지를 2 단계 펀치 진행거리로 정의한다.

$$I_{\text{Cockcroft}} = \frac{1}{C_1} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

$$I_{\text{Brozzo}} = \frac{1}{C_2} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2}{3} \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_m - \sigma_h} \right) d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

$$I_{\text{Oyane}} = \frac{1}{C_4} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left( \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} + C_3 \right) d\bar{\epsilon} \quad (5)$$

Table 6 Punch stroke until initial crack occurs

	Cockcroft	Brozzo	Oyane
SAPH440	0.308mm	0.30mm	0.185mm
SPCC	0.33mm	0.33mm	0.228mm

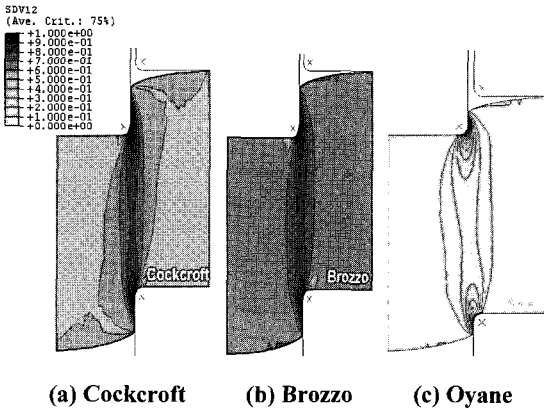


Fig. 5 Distribution of index value of the ductile fracture criterion

### 3.3 펀칭공정의 해석결과

#### 3.1.1 초기파단 예측

해석이 진행되는 동안 각각의 연성과파괴 기준식을 연속적으로 계산하여 기준 값이 '1'이 넘는 순간까지를 1 단계 공정으로 정의한다. Table 6 은 각 기준식에 따라 초기 파단에 도달하는 펀치 진행 거리를 나타내며 Fig. 5 에는 초기파단 직전의 변형형상과 세가지 연성과파괴기준 값의 분포를 나타내었다. Cockcroft 와 Brozzo 의 기준식에 따른 파단예측은 거의 비슷한 경향을 보이는 반면 Oyane *et al.*의 기준 값은 비교적 크게 예측되어 일찍 파단을 예측하게 된다. 또한 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 펀칭공정 중에 연성과파괴 기준 값은 펀치와 소재가 맞닿는 영역의 바로 아래 부분에서 최대 값을 갖게 된다. 따라서 소재의 초기 파단은 이 영역에서 펀치의 필렛 부분으로 발생하여 버의 발생을 유도하게 된다.

#### 3.1.2 정수압 효과

정수압의 크기에 따른 효과를 살펴보기 위하여 5, 25, 50 MPa 의 압력을 변화시키면서 변형형상 및 파단양상을 살펴보았다. 압력이 낮을 경우 일반적인 펀칭 공정과 비슷하게 초기 파단이 상부펀치와 소재가 맞닿는 영역에서 발생하여 소재 하부

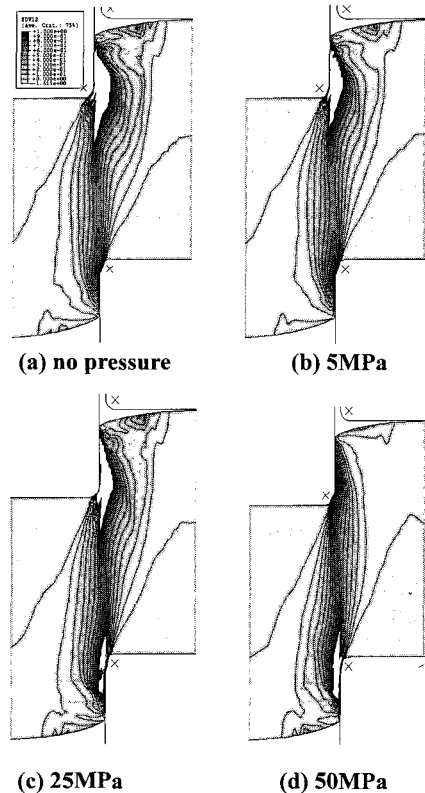


Fig. 6 Distribution of the Cockcroft value with respect to the various hydrostatic pressures at the final fracture punch stroke (SAPH440)

방향으로 진전하여 최종 파단이 발생하게 된다. 정수압이 증가함에 따라 소재 상부에서 발생하는 초기 파단의 시점이 지연되고 소재 하부에서 추가적인 파단이 시작되어 최종적인 파단면이 소재의 두께 방향 중심부에 발생하게 된다. SAPH440 소재의 경우 Fig. 6에서 보는 바와 같이 25MPa의 정수압이 가해질 경우 소재 상부에서 발생된 초기 파단이 소재 하부로 진전되기 전에 소재 하부에서 추가적인 파단이 발생하게 되어 최종적인 파단면이 소재 중심부에 발생하게 된다. 그렇지만 정수압이 급격히 증가하여 50MPa 이상이 되면 초기 파단이 소재의 하부에서 발생하여 소재 상부로 진전되는 반대되는 양상을 보이게 된다. 이러한 효과를 정량적으로 살펴보기 위하여 Fig. 7과 같이 두께 방향으로 변형이 집중되는 영역에서 연성과파괴 기준 값을 추출하였다. Fig. 8의 그래프를 살펴보면 position 1, 2, 3는 소재의 상부 영역의 데이터를 의미하고 position 4, 5, 6은 소재의 하부 영

역에서 추출한 데이터를 보여준다. 펀치의 진행거리가 0.21mm 일 때의 연성파괴 기준 값(Cockcroft)을 다양한 정수압이 가해졌을 경우에 대하여 도시하였다. 소재 상부의 position 1, 2, 3에서 연성파괴 기준 값은 정수압이 증가함에 따라 최대 16.7% 까지 감소하였으며 하부 영역인 position 4, 5, 6에서는 정수압이 증가함에 따라 연성파괴 기준 값이 최대 0.2415에서 0.3646로 51%까지 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 따라서 소재 하부에 가해지는 정수압의 효과에 의하여 소재 상부의 파단은 지연되었으며 소재 하부의 파단은 가속화 되었다.

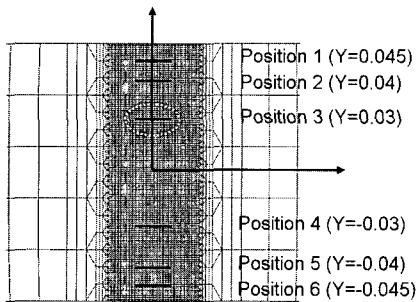


Fig. 7 Data extracting points

그러므로 소재에 가해지는 정수압의 효과에 따라 최종 파단면이 두께 방향으로 소재 중심부에 발생하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.1.2 클리어런스 효과

펀칭공정에서 클리어런스는 펀치와 다이 사이의 간격을 의미한다. 본 연구에서는 클리어런스를 zero에서 0.15mm(15%) 까지 변화시키면서 최종 파단에 미치는 효과를 관찰하였다. Fig. 9은 클리어런스의 크기에 따라 최종 파단이 발생하기 직전의 변형 형상을 도시한 그림이다. 클리어런스가 증가함에 따라 파단면이 기울어지는 효과를 관찰할 수 있으며 연성파괴 기준 값의 분포가 상대적으로 좁게 나타나는 것을 볼 수 있다. 극단적으로 클리어런스가 존재하지 않는 Fig. 9의 경우에는 연성파괴 기준 값의 분포가 반경 방향으로 넓게 분포하여 최종 파단 후에 전단면이 깨끗하지 않음을 알 수 있다. 클리어런스가 0.05mm 일 경우 파단면이 크게 기울어지지 않으면서 반경방향으로 연성파괴 기준 값의 분포도 좁게 나타났다. 클리어런스의 변화에 따른 소재의 최종파단까지의 펀치 진행거리를 살펴보면 클리어런스가 0.05mm 일 경우 최종 파단까지의 펀치 진행거리가 가장 작게

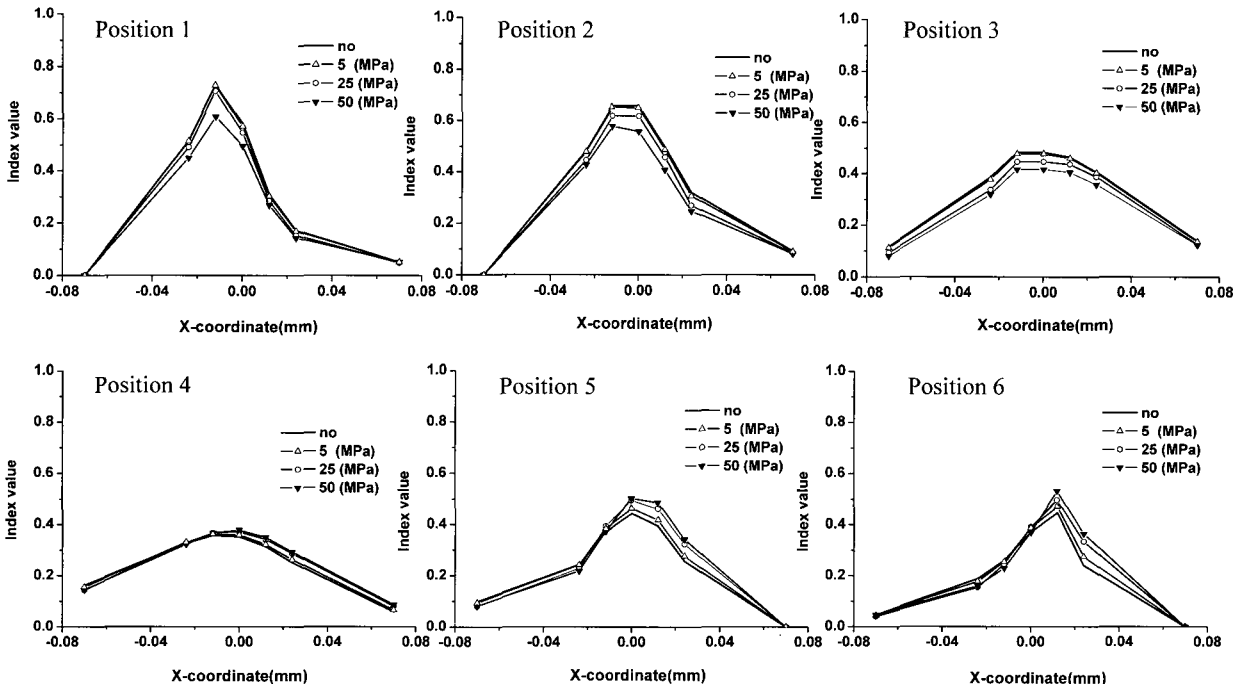


Fig. 8 Comparison of the Cockcroft values with respect to hydrostatic pressure

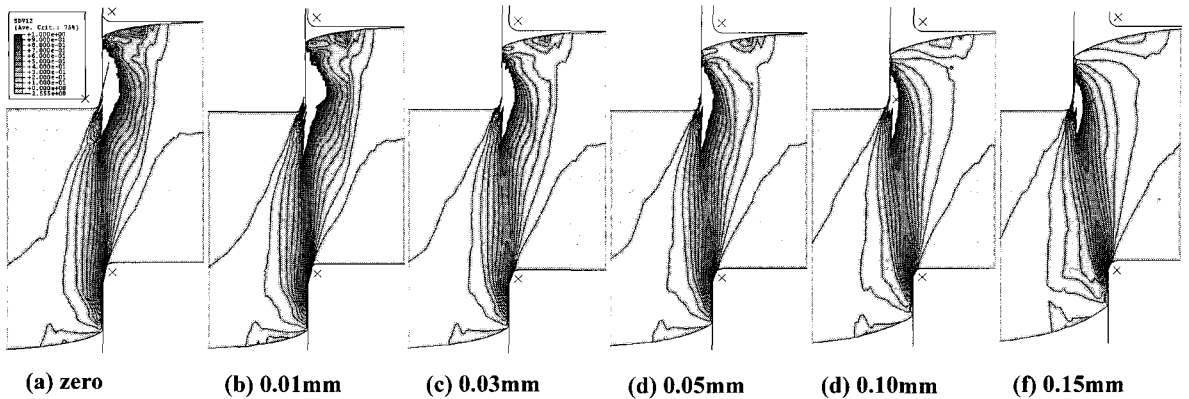


Fig. 9 Distribution of the index value of ductile fracture criterion with respect to the clearance

나타나 미세 정밀펀칭에 유리한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 개발중인 정수압을 이용한 홀 펀칭공정을 유한요소해석을 이용하여 분석하였다. 소재의 파단예측을 위하여 Cockcroft, Brozzo, Oyane 의 연성파괴기준 식을 적용하여 각 기준식의 경향을 비교하였다. 또한 실제 펀칭공정에 영향을 미치는 공정변수를 찾고 그 효과를 알아보기 위하여 정수압과 클리어런스의 크기를 변화시키면서 최종형상 및 파단형상을 비교하였다. 일반적인 펀칭공정에 비하여 정수압을 이용한 홀 펀칭공정은 정수압의 효과에 의하여 소재 상부의 초기 파단은 지연되고 소재 하부의 추가적인 파단이 발생하여 최종적인 파단면이 소재의 두께방향 중심부에 발생하게 된다. 따라서 버의 발생이 현저히 줄어들고 보다 깨끗한 전단면을 얻을 수 있다. 그러나 정수압의 크기가 급격히 증가할수록 초기 파단이 소재 하부에서 발생하여 상부로 진행되는 반대 경향을 보이게 됨을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관

하고 있는 Milli-Structure 생산 기술 개발 사업의 세부과제이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 박훈재, 김승수, 최태훈, 김응주, 나경환, 2003, 정수압을 이용한 미세성형, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 386~390.
- [2] 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.
- [3] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and workability of metals, J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33~39.
- [4] H. Takuda, K. Mori, N. Hatta, 1999, The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals, J. Mater. Process. Tech., 95, pp. 116~121.
- [5] D. Brokken, W. A. M. Brekelmans, F. P. T. Baaijens, 2000, Predicting the shape of blanked products: a finite element approach, J. Mater. Process. Tech., 103, pp. 51~56.
- [6] 고윤기, 이종섭, 허훈, 김홍기, 박성호, 2005, 연성파괴기준을 이용한 허브홀 확장과정에서의 파단예측, 한국소성가공학회지, 제 14 권 제 7 호, pp. 601~606.