

# Hydro-mechanical hole punching 공정의 유한요소 해석

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

## FE Analysis for hydro-mechanical Hole Punching Process

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

(Received Month Day, Year)

### Abstract

The milli-components for electronic and medical device etc. have been manufactured by conventional process. Forming and machining process for those milli-components need tremendous cost and time because products require higher dimensional accuracy than the conventional ones. For instance, conventional mechanical punching process has many drawbacks for applying to high accuracy products. The final radius of hole can be varied and burr which interrupting another procedure is generated. Hydro-mechanical punching process makes possible to reduce amount of burr and obtain the fine shearing surface using the operating fluid. Hydrostatic pressure retards occurrence of initial crack and induces to locate the fracture surface in the middle of sheet to thickness direction.

In this paper, Hydro-mechanical punching process is analyzed using finite element method and the effect of hydrostatic pressure is evaluated during punching process. The prediction of fracture is performed adopting the various ductile fracture criteria such as Cockcroft, Brozzo and Oyane's criterion using a user subroutine in ABAQUS explicit .

**Key Words** : Hydro-Mechanical Hole Punching Process, Ductile Fracture Criterion (연성파괴기준), User subroutine (사용자 입력프로그램), Punching analysis (편칭공정 해석), Hydrostatic pressure (정수압)

### 1. 서론

전자제품 및 통신기기 부품의 경량화, 초소형화 경향에 따라 각종 부품들은 기본적으로 고기능성을 유지하면서 보다 높은 정밀도와 미세한 가공, 생산공정을 필요로 한다. 이러한 밀리 단위의 미세 부품을 생산, 가공할 경우 정밀 금형을 제작하여야 할뿐만 아니라 표면력 등의 급격한 상승에 따라 치수에 비하여 과도한 성형 하중이 걸리게 된다. 따라서 높은 성형 정밀도 및 치수 정밀도를 요구하는 부품의 생산, 가공 시 막대한 시간과 비용이 들게 된다. 편칭 가공공정의 경우 편치의 직

경이 수 mm 단위로 내려가면 판재 두께에 비하여 롤오버(roll-over)의 양이 상대적으로 증가하거나 버(burr)의 크기가 증가하여 제품 성능을 떨어뜨리고 타 공정에 영향을 미쳐 이를 제거하기 위한 추가 공정이 발생하게 되는 단점이 있다. 본 논문에서는 개발중인 정수압을 이용한 홀 편칭 공정(Hydro-Mechanical Hole Punching process)[1]을 소개하고 다양한 연성 파괴기준을 적용한 유한요소 해석을 이용하여 전체 공정을 해석한다.

일반적으로 성형 한계에 대한 이론적 조건식은 소성 불안정 조건에 의거하는 Hill-Swift 기준식과 Stören-Rice 의 분기 조건식(bifurcation)이

있으며 노치(notch)를 만들어 국부적인 변형률을 유도하는 M-K(Marciniak-Kuczynski)[2] 이론이 있다. 또한 Cockcroft[3], Brozzo[4], Oyane[5] 등이 제안한 연성과파괴기준(Ductile Fracture Criterion)을 적용하여 성형 한계를 예측하는 방법들이 있다. 정수압을 이용한 홀 펀칭 공정과 같이 압축과 인장이 반복되어 복잡한 변형경로를 갖는 성형가공의 경우 연성과파괴기준을 적용하여 파단을 예측하는 방법이 비교적 정확한 것으로 알려져 있다. 이러한 성형 한계 기준들을 적용하여 재료의 파단을 유한요소 해석에서 묘사하는 방법으로는 절점을 분리하는 방법[6]과 해당 요소의 응력성분을 제거하여 해석상에서 요소를 제거하는 방법[7]이 있다.

본 논문에서는 현재 개발중인 hydro-mechanical hole punching 기술을 살펴보고 실제 펀칭 공정에 정수압이 미치는 효과를 알아본다. 또한 파단 예측을 위하여 일반적으로 가장 많이 쓰이는 기준식인 Cockcroft[3], Brozzo[4], Oyane[5]의 연성과파괴기준을 이용하여 소재의 초기 균열발생을 예측하고 파단 형상 등을 고찰한다.

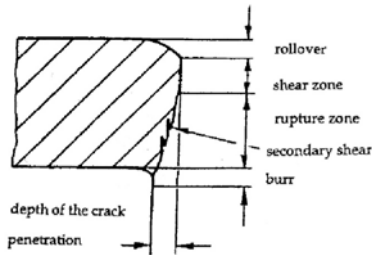


Fig. 1 Details of sheared surface

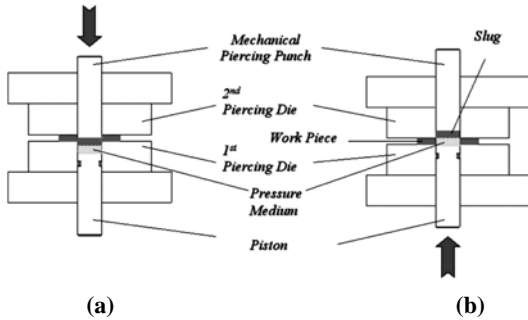


Fig. 2 Procedure of Hydro-Mechanical Punching: (a) Mechanical Half Punching; (b) Hydro-Punching

1. 한국과학기술원 기계공학과
  2. 한국생산기술연구원
- # 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과, hhuh@kaist.ac.kr

## 2. 정수압을 이용한 펀칭 공정

기존의 펀칭 공정과 다르게 정수압을 이용한 펀칭 공정은 Fig.2 와 같이 크게 두 단계로 나눌 수 있다. Mechanical Half Piercing 공정은 상부 펀치가 소재의 파단순간 전까지 하강하면서 소재를 다이의 캐비티(cavity) 안으로 밀어넣는 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 slug 를 유체를 이용하여 반대 방향으로 밀어올리는 공정이 된다. 이 과정에서 소재의 최종적인 펀칭이 이루어지게 되며 1 단계 공정으로 인하여 캐비티 부의 소재와 바깥쪽 소재 사이에 형성된 잘못된 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 펀칭 공정에서 발생하게 되는 버의 양을 줄일 수 있으며 보다 깨끗한 전단면을 얻을 수 있게 된다.

## 3. 유한요소 해석

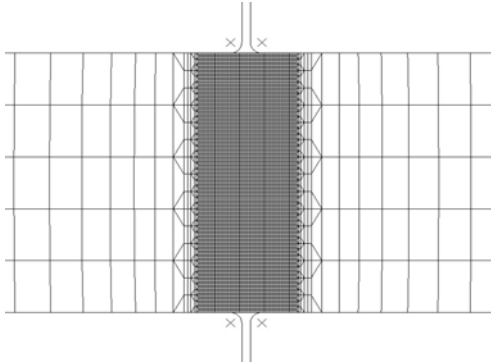
### 3.1 해석 조건

해석은 탄소성 유한요소 프로그램인 ABAQUS Explicit 을 사용하였다. 블랭크(blank)는 8500 개의 axisymmetric 요소를 사용하여 모델링(Fig. 3) 하였으며 다이와 펀치, 스트립퍼는 각각 analytic die 를 사용하여 모델링 하였다. 소재의 하단부에 작용하게 되는 유체는 압력 경계조건(5 MPa)을 선형적으로 증가하도록 부과함으로써 해석을 단순화 하였다. 펀치와 다이의 치수는 Table 1 에 정리하였으며 사용된 강종은 두께 1mm 의 SAPH440 으로 적용된 유동응력 식은 식(1)과 같다.

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

**Table 1 Specification of Dimension**

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



**Fig. 3 Initial Mesh Geometry for Punching analysis**

### 3.2 연성파괴기준식 적용

정수압을 이용한 펀칭 공정에서 소재의 초기 파단을 예측하고 전체 공정을 해석하기 위하여 식(2), (3), (4)와 같은 Cockcroft[3], Brozzo[4], Oyane[5]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. 상수  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ (Table 2)는 단순 인장시험과 평면변형률 시험으로부터 얻은 Table 3의 결과를 바탕으로 계산된다. ABAQUS Explicit 에서 지원하는 User Subroutine(VUMAT)을 구성하여 각 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 을 넘는 지점까지 상부펀치를 진행시킨 뒤 다시 하부펀치를 상승시켜 소재의 파단을 유도한다.

$$I_{Cockcroft} = \frac{1}{C_1} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

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

$$I_{Oyane} = \frac{1}{C_4} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left( \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} + C_3 \right) d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

**Table 2 Material Constants in ductile fracture criteria**

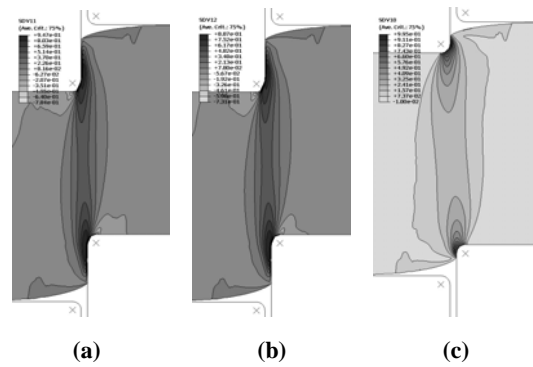
$C_1$ (Cockcroft)	$C_2$ (Brozzo)	$C_3$ (Oyane)	$C_4$ (Oyane)
0.7369	0.7955	1.9438	0.3831

**Table 3 Fracture Strain in Tensile Test**

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

**Table 4 Punch Stroke until Initial Crack Occurs**

Cockcroft	Brozzo	Oyane
0.34mm	0.32mm	0.14mm



**Fig. 4 Deformed Shape after 1-step process:**

(a) Cockcroft; (b) Brozzo (c) Oyane's criterion

### 3.3 펀칭공정의 해석결과

#### 3.1.1 균열 예측

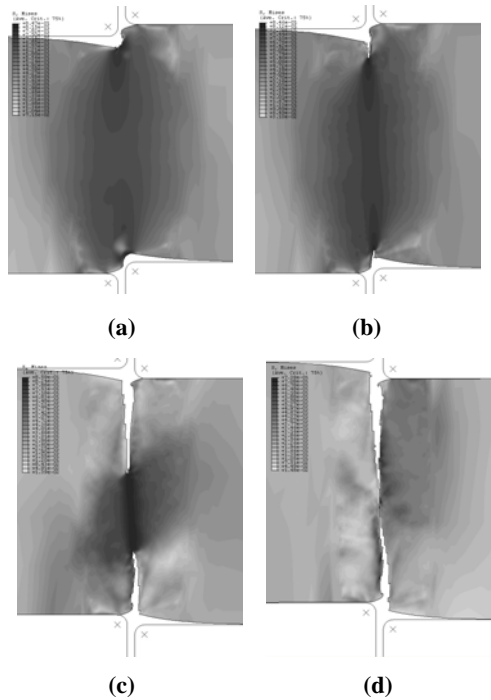
해석이 진행되는 동안 각각의 연성파괴기준식을 연속적으로 계산하여 기준값이 ‘1’이 넘는 순간까지를 1 단계 공정으로 정의한다. Table 4는 각 기준식에 따른 1 단계 공정의 펀칭진행 거리가 되며 Fig. 4 에 변형형상을 도시하였다. Cockcroft 와 Brozzo 의 기준식에 따른 파단예측은 거의 비슷한 경향을 보이는 반면 Oyane 의 기준값은 비교적 크게 예측되어 일찍 파단을 예측하게 된다. 파단이 일어나기 전까지 1 단계 공정이 완료되면 하부펀치가 상승하면서 소재의 최종파단(punching)을 유도하게 된다. 2 단계 공정이 시작되면 Fig. 5(b)와 같이 소재의 상, 하부에서 동시에 균열이 발생하여 진전되다가 소재의 두께 방향, 중간(Fig. 5 (c))에서 최종 파단이 일어나는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 개발중인 hydro-mechanical 펀칭 공정을 살펴보았으며 유한요소해석을 이용하여 실제 펀칭공정에 영향을 미치는 공정변수의 효과를 알아보고 소재의 파단예측을 수행하였다. 정확한 파단예측을 위하여 일반적으로 많이 사용되고 있는 Cockcroft, Brozzo, Oyane 의 연성과괴기준을 적용하여 차이를 비교하였으며 펀칭과정에서 적용되는 정수압 효과를 분석하였다. 일반적인 펀칭공정에 비하여 hydro-mechanical 펀칭 공정을 수행할 경우 버의 발생이 현저히 줄어들고 보다 깨끗한 전단면을 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 또한 정수압의 크기가 증가할수록 2 단계 펀칭공정에서의 균열 발생이 지연되어 보다 깨끗한 전단면을 얻을 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 박훈재, 김승수, 최태훈, 김응주, 나경환, 2003, 정수압을 이용한 미세성형 (Hydro-Mechanical Hole Punching), 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 386~390.
- [2] Azrin, M. and Backofen, W.A. , 1970, "The Deformation and Failure of A Biaxially Stretched Sheet", Metall. Trans., vol. 1, pp. 2857~2861.
- [3] M. G. Cockcroft and D. J. Latham, 1968, "Ductility and workability of metals", J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33~39.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] ABAQUS Version6.5 documentation



**Fig. 5 Deformed Shape according to Lower Punch Stroke: (a) 0.09mm; (b) 0.12mm; (c) 0.18mm; (d) 0.21mm**

**Table 5 Lower Punch Stroke at Final Fracture**

Pressure(MPa)	5	10	50	100
Stroke(mm)	0.39	0.42	0.45	0.45

#### 3.1.2 정수압 효과

1 단계 공정에서 상부 펀치가 진행함에 따라 소재의 하단부에 유체의 정수압이 증가하게 된다. 따라서, 1 단계 펀치가 진행되는 동안 압력 경계조건이 선형적으로 증가한다고 가정하여 해석에 적용하였으며 10, 50, 100(MPa)의 압력을 변화시키면서 그 효과를 살펴보았다. 압력이 50MPa 이상이 되면 거의 비슷한 시점에서 최종 파단이 발생하게 되며 압력이 증가함에 따라 2 단계 펀칭공정에서 균열의 발생이 지연되었다. 즉, 소재의 상, 하부에서 균열이 시작되는 시점이 지연되어 최종적으로 파단이 나는 면적이 줄어들어 깨끗한 전단면을 만들게 된다. Table 5 는 압력의 변화에 따른 최종 파단 시점을 표시하였다.