

Hydro-mechanical 펀칭공정의 유한요소 해석

윤종현¹⁾, 허훈¹⁾, 김승수²⁾, 박훈재²⁾, 최태훈²⁾, 이해진²⁾

¹⁾한국과학기술원(KAIST), ²⁾한국생산기술연구원(KITECH)

Finite Element Analysis of the Hydro-mechanical hole punching process

J.H. Yoon¹⁾, H. Huh¹⁾, S.S. Kim²⁾, H.J. Park²⁾, T.H. Choi²⁾, H.J. Lee²⁾

¹⁾Korea Advanced Institute of Science and Technology, ²⁾Korea Institute of Industrial Technology

요 약

This paper describes the characteristics of the hydro-mechanical punching process on developing. The process is investigated with the finite element analysis using the commercial code(ABAQUS). The hydro-mechanical punching process is divided by two stages. The First stage is the mechanical half piercing in which a upper punch goes down until the initial crack is not occurred. The next stage is the hydro punching stage where a lower punch goes up until the final fracture is occurred. In order to evaluate the fracture of material, the ductile fracture criteria such as the Cockcroft, Brozzo and Oyane are adopted. The value of ductile fracture criteria is calculated with VUMAT in ABAQUS Explicit. The hydro-pressure retards the initial crack on a blank and induces the another crack under a blank during the punching process. Then, the final fracture zone is placed on the middle surface of a blank to thickness direction. Therefore, the more clear shearing surface can be obtained with the process of hydro-mechanical punching than with the conventional one.

주요어: Hydro-mechanical punching, Ductile fracture criterion, Punching analysis Hydrostatic pressure

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. 펀칭 가공공정의 경우 펀치의 직경이 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 개발 중인 정수압을 이용한

홀 펀칭 공정(Hydro-Mechanical Hole Punching process)[1]을 소개하고 다양한 연성파괴기준(ductile fracture criterion)을 적용한 유한요소 해석을 이용하여 전체 공정을 해석한다.

일반적으로 성형 한계에 대한 이론적 조건식으로는 소성 불안정 조건에 의거하는 Hill-Swift 기준식과 Stören-Rice의 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 연성파괴기준(Ductile Fracture Criterion)을 적용하여 성형 한계를 예측하는 방법들이 있다. 정수압을 이용한 홀 펀칭 공정과 같이 압축과 인장이 반복되어 복잡한 변형경로를 갖는 성형가공의 경우 연성파괴기준을 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 연성파괴기준을 이용하여 소재의 초기 균열발생을 예측하고 파단 형상 등을 고찰한다.

2. Hydro-mechanical 홀펀칭 공정

정수압을 이용한 펀칭 공정은 기존의 펀칭 공정과 다르게 Fig.2와 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 1단계 공정에서 밀려나온 slug를 유체를 이용하여 반대 방향으로 밀어 올리는 공정이 된다. 이 과정에서 소재의 최종적인 펀칭이 이루어지게 되며 1단계 공정으로 인하여 캐비티 부의 소재와 바깥쪽 소재 사이에 형성된 잘룩한 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.

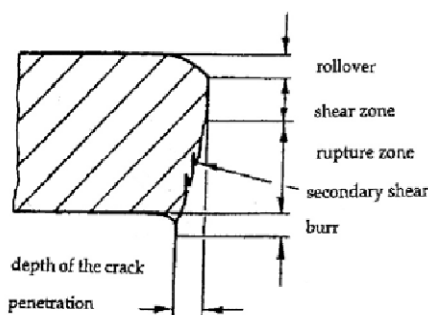


Fig. 1 Details of sheared surface

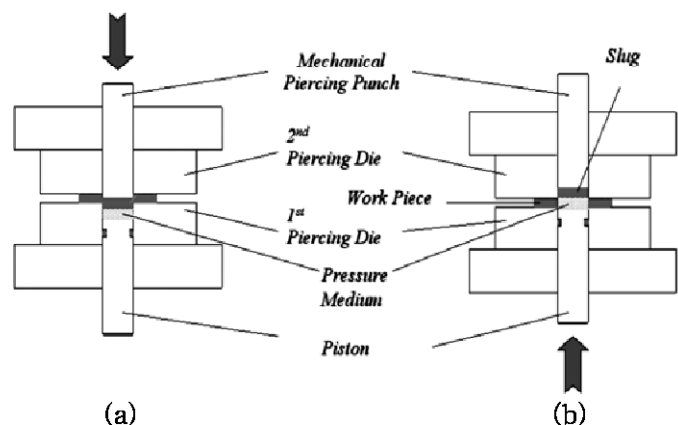


Fig. 2 Procedure of Hydro-Mechanical Punching:
(a) Mechanical Half Piercing; (b) Hydro-Punching

3. 유한요소 해석

3.1 해석 조건

해석은 탄소성 유한요소 프로그램인 ABAQUS Explicit을 사용하였다. 블랭크(blank)는 8700개의 axisymmetric 요소를 사용하여 모델링(Fig. 3) 하였으며 다이와 펀치, 스트립퍼는 각각 analytic die를 사용하여 모델링 하였다. 소재의 하단부에 작용하게 되는 유체는 Fig. 4와 같이 압력 경계조건을 선형적으로 증가하도록 부과함으로써 해석을 단순화 하였다. 펀치와 다이의 치수는 Table 1에 정리하였으며 사용된 강종은 초기 두께 1mm의 SAPH440으로 적용된 유동응력 식은 식(1)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 832.85(0.007751 + \bar{\epsilon}^p)^{0.18185} \text{MPa} \quad (1)$$

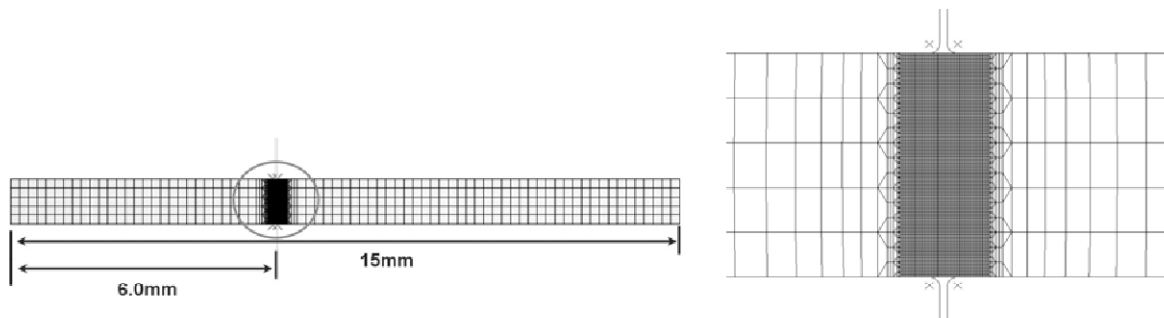


Fig. 3 Finite Element modeling

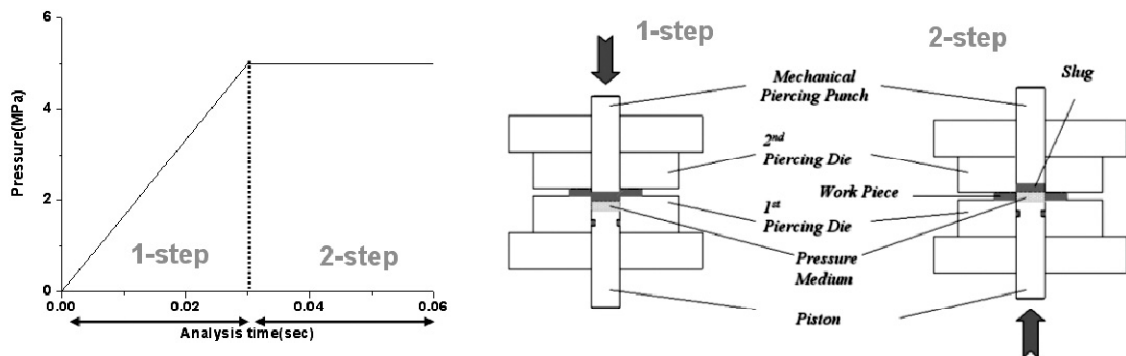


Fig. 4 Boundary condition for hydro-pressure

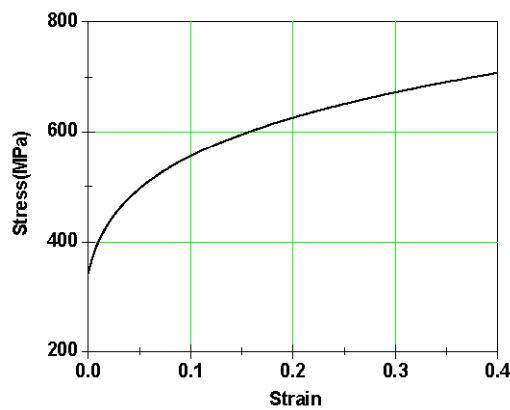


Fig. 5 Stress-strain curve for SAPH440

Table 1. Geometry of the punching process

Hole radius (mm)	Clearance (mm)	Radius of Die and Punch (mm)	Total blank length (mm)
6	0.03	0.04	15

Table 2. Constants for ductile fracture criteria

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 of the SAPH440

Fracture strain	
Uniaxial	Plane strain
0.7155	0.5686

3.2 연성파괴기준 (ductile fracture criterion)

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. $\bar{\sigma}$, σ_h , σ_m 은 각각 유효응력(effective stress), 정수압(hydrostatic stress), 최대주응력(maximum principal stress)을 나타내며, $d\bar{\epsilon}$, $\bar{\epsilon}_f$ 는 각각 유효변형률 증분과 파단변형률을 나타낸다. 연성파괴 기준을 적용하기 위한 상수 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 (Table 2)는 단순 인장시험과 평면변형률 시험으로부터 얻은 Table 3의 결과를 바탕으로 계산된다. ABAQUS Explicit에서 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 2단계로 구성되며 해석 도중 연성파괴기준 값이 1을 넘는 지점까지 상부펀치를 진행시킨 뒤 다시 하부펀치를 상승시켜 소재의 파단을 유도한다.

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

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

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

3.3 펀칭공정의 해석 결과

3.3.1 초기균열 예측

해석이 진행되는 동안 각각의 연성파괴기준식을 연속적으로 계산하여 기준 값이 '1'이 넘는 순간 전까지의 펀치 진행거리를 1단계 공정으로 정의한다. Table 4는 각 기준식에 따른 1단계 공정의 펀치진행 거리가 되며 Fig. 6에 변형형상을 도시하였다. Cockcroft와 Brozzo의 기준식에 따른 파단예측은 거의 비슷한 경향을 보이는 반면 Oyane의 기준 값은 비교적 크게 예측되어 일찍 파단을 예측하게 된다. 파단이 일어나기 전까지 1단계 공정이 완료되면 하부펀치가 상승하면서 소재의 최종파단(punching)을 유도하게 된다. 또한 파단이 일어나는 순간의 펀치와 소재의 접촉부를

살펴보면 Fig. 7과 같은 경향을 보이게 된다. 즉, 펀치와 소재에 맞는 부분의 연성파괴기준 값보다 바로 아래 부분의 값이 더 크게 예측되고 있다. 따라서 초기 균열은 연성파괴기준 값이 가장 큰 지점부터 펀치의 필렛(fillet) 부와 소재가 맞는 방향으로 진전하여 버(burr)를 발생시키게 된다.

Table 4. Punch stroke at the initial crack

Punch stroke at initial crack		
(Cockcroft)	(Brozzo)	(Oyane)
0.3084mm	0.30mm	0.185mm

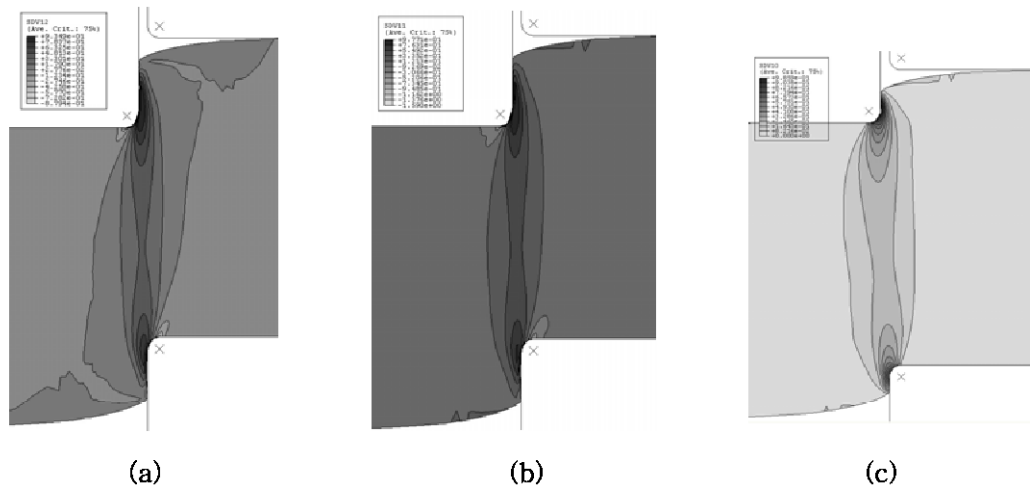


Fig. 6 Distribution of ductile fracture criteria: (a) Cockcroft; (b) Brozzo; (c) Oyane

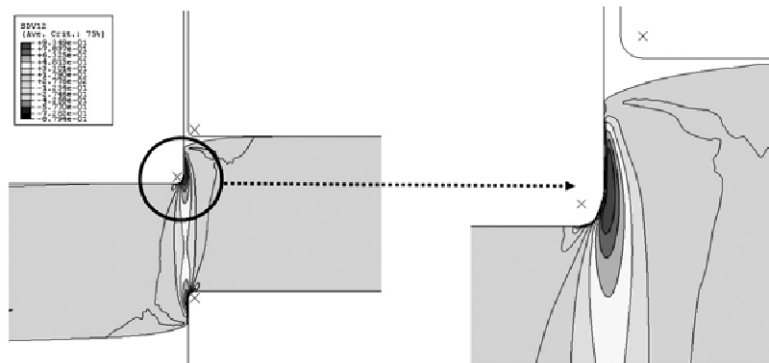


Fig. 7 The formation of burr generation (Cockcroft distribution)

3.3.2 정수압 효과

1단계 공정에서 상부 펀치가 진행함에 따라 소재의 하단부에 유체의 정수압이 증가하게 된다. 따라서, 1단계 펀치가 진행되는 동안 압력 경계조건이 선형적으로 증가한다고 가정하여 해석에 적용하였으며 0, 5, 25, 50(MPa)의 압력을 변화시키면서 그 효과를 살펴보았다. Fig. 8은 최종 파단이 일어나기 전의 변형 형상과 연성파괴기준 값의 분포를 나타낸다. 일반적인 펀칭 공정의 경우 (zero pressure) 소재 상단부에서 초기 균열이 발생하여 소재의 하단부 방향으로 균열이 진전한다. 그러나 압력이 증가함에 따라 소재 상단부의 초기 균열의 발생은 지연되며 하단부의 또 다른 균

열이 시작되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 압력이 증가함에 따라 소재의 최종 파단(편칭)이 소재의 두께 방향 중심부에서 발생하는 것을 알 수 있다. 그렇지만 압력이 급격히 증가할 경우(Fig. 8(d)) 압력조건을 부가하지 않은 경우와 반대로 초기 균열이 소재의 하단부에서 발생하여 균열이 소재 상단부로 진전하여 최종 파단되는 경향을 보이게 된다. 보다 정량적인 비교를 위하여 Fig. 9 과 같이 변형이 집중되는 영역에 두께 방향으로 데이터를 추출하여 압력에 따른 효과를 비교하였다. Fig. 10 (a), (b), (c)는 소재의 상단부에서 Cockcroft 값을 비교하였으며 Fig. 10 (d), (e), (f)는 소재의 하단부에서의 값을 비교하였다. 압력이 증가할수록 소재 상단부에서는 최대 50%까지 Cockcroft 값이 감소하는 것을 확인할 수 있어 초기균열의 발생이 지연되는 것을 알 수 있다. 또한 소재의 하단부에서는 압력의 증가에 따라 Cockcroft 값이 10%까지 증가하는 경향을 보여 하단부의 추가적인 균열이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 편칭공정 중에 소재에 부가되는 정수압은 편칭공정 시 발생하는 최종 파단면을 소재의 중심부에 위치시키도록 유도한다.

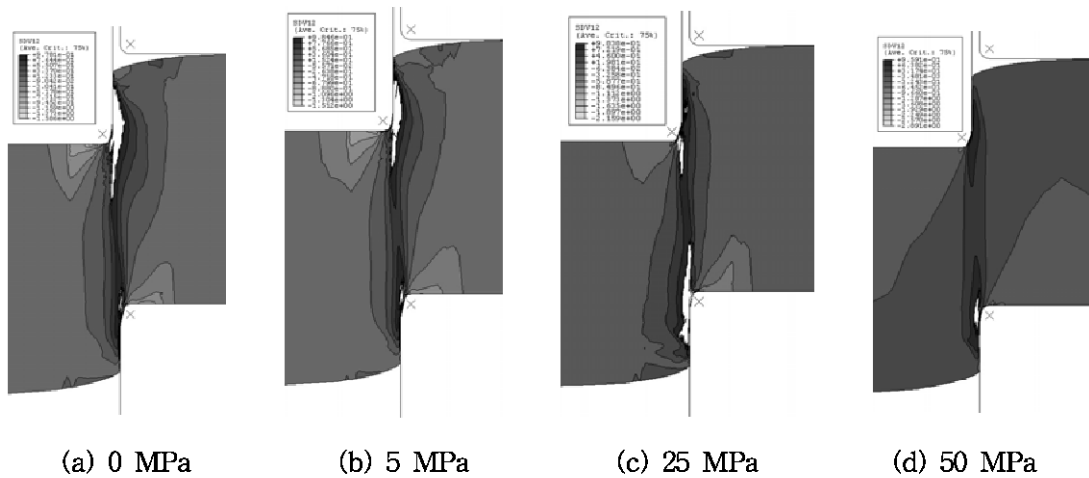


Fig. 8 The effect of hydro-pressure on final fracture position

Table 5. The final fracture position with respect to hydro-pressure

Pressure (MPa)	Punch stroke (mm)	Initial crack	Final fracture
0		0.2957(upper)	0.39
5		0.3084(upper)	0.39
25		0.3527(lower)	0.42
50	0.3447(lower)	0.39	

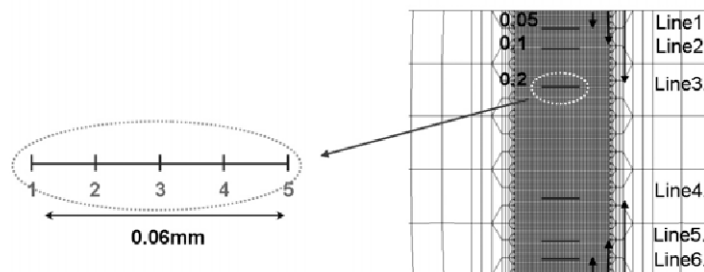
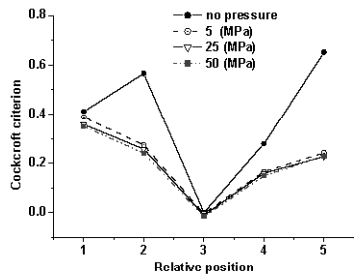
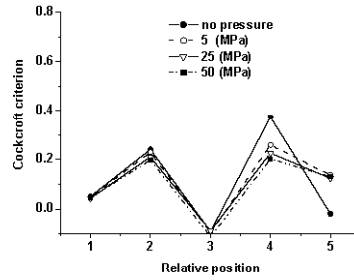


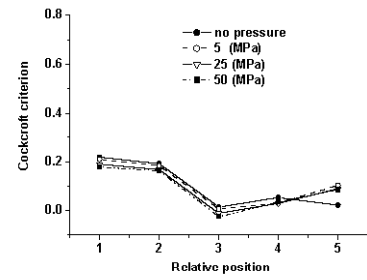
Fig. 9 Data extracting points



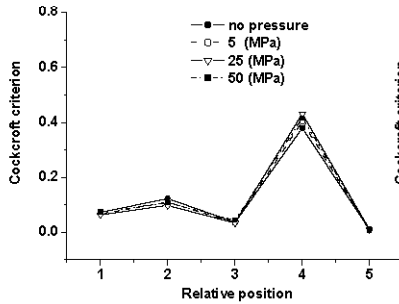
(a) Line 1.



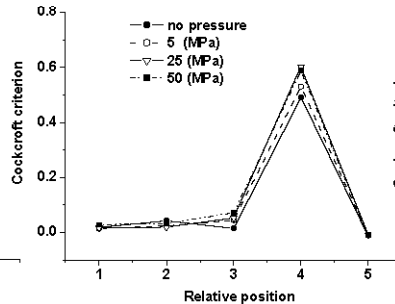
(b) Line 2.



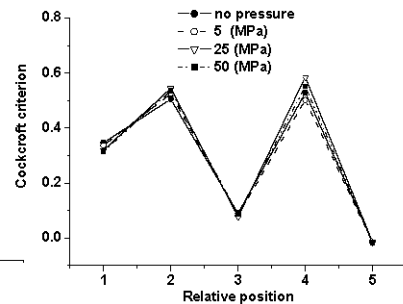
(b) Line 3.



(d) Line 4.



(e) Line 5.



(f) Line 6.

Fig. 10 comparison of Cockcroft value with respect to hydro-pressure

4. 결론

본 논문에서는 개발 중인 hydro-mechanical 펀칭 공정을 살펴보았으며 유한요소 해석을 이용하여 실제 펀칭공정에 영향을 미치는 공정변수의 효과를 알아보고 소재의 파단예측을 수행하였다. 정확한 파단예측을 위하여 일반적으로 많이 사용되고 있는 Cockcroft, Brozzo, Oyane의 연성파괴 기준을 적용하여 차이를 비교하였으며 펀칭과정에서 적용되는 정수압 효과를 분석하였다. 일반적인 펀칭공정에 비하여 hydro-mechanical 펀칭 공정을 수행할 경우 버의 발생이 줄어들고 보다 깨끗한 전단면을 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 또한 정수압의 크기가 증가할수록 최종 파단면의 위치가 소재의 두께방향 중심부에 위치되는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Milli-Structure 생산 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

- [1] 박훈재, 김승수, 최태훈, 김응주, 나경환, 정수압을 이용한 미세성형 (Hydro-Mechanical Hole Punching), 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 386~390, 2003
- [2] 윤종현, 허훈, 김승수, 박훈재, 최태훈, 이해진, "Hydro-mechanical 홀펀칭 공정의 유한요소

- 해석”, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 159~162, 2005
- [3] Azrin, M. and Backofen, W.A. , "The Deformation and Failure of A Biaxially Stretched Sheet", Metall. Trans., vol. 1, pp. 2857~2861, 1970
- [4] M. G. Cockcroft and D. J. Latham, "Ductility and workability of metals", J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33~39, 1968
- [5] P. Brozzo, B. DeLuca and R. Rendina, "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, 1972
- [6] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto and S. Shima, "Criteria for ductile fracture and their application", J. Mech. Work. Tech., Vol. 4, pp. 65~81, 1980
- [7] V. E. Saouma and I. J. Zatz, "An automated finite element procedure for fatigue crack propagation analysis", Eng. Fract. Mech., Vol. 20, No. 2, pp. 321~333, 1984
- [8] D. Brokken, W.A.M. Brekelmans, F.P.T. Baaijens, "Predicting the shape of blanked product: a finite element approach", J. Mater. Process. Tech. Vol. 103, pp. 51-56, 2000
- [9] A.M. Goijaerts, L.E. Govaert, F.P.T. Baaijens, "Evaluation of ductile fracture models for different metals in blanking", J. Mater. Process. Tech. Vol. 110, pp. 312-323, 2001
- [10] ABAQUS Version6.5 documentation