

파인블랭킹 공정 시 클리어런스 및 V링 형상의 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Clearance and V-Ring Shape in a Fine Blanking Process

김 형 락* 박 증 연** 김 형 증***
Kim, Hyung-Rak Park, Jong-Yeon Kim, Hyung-Jong

Abstract

Fine blanking can be considered as a manufacturing process capable of producing sheet metal parts with completely smooth edges that may be hardly obtained by conventional shear-cutting procedures. This fact, together with the considerable economic advantages offered by this process, has been responsible for the rapid acceptance of fine blanking throughout the manufacturing industry all over the world, and the discovery of many new applications. This study was performed to investigate the effect of clearance and V-ring shape on the quality of sheared surface in a fine blanking process. The critical value needed to apply the normalized Cockcroft-Latham fracture criterion to the simulation of fine blanking is obtained by correlating the result of finite element analysis and that of experiment for the uniaxial tensile test. From finite element analysis of an axisymmetric fine blanking process, it has been found that punch load, die-roll depth, burnish zone size and shape of sheared surface are considerably influenced by clearance and V-ring shape.

키워드 파인블랭킹, 연성파괴조건, 유한요소해석

Keywords fine blanking, ductile fracture criterion, finite element analysis

1. 서 론

전단가공은 수많은 판형 기계부품의 대량생산에 광범위하게 사용되고 있는 소성가공법의 일종이다. 최근 자동차, 항공, 전자 부품들이 이전보다 훨씬 복잡한 형상을 가지면서도 높은 정밀도와 품질을

요구하고 있어 이에 필요한 프레스장비, 금형 설계 및 가공 기술, 피가공재 성형기술의 발전과 함께 품질 향상과 경제성 개고를 위한 많은 연구가 진행되고 있다[1, 2].

그중에서 파인블랭킹(fine blanking)은 한번의 공정으로 소개의 두께 전체에 걸쳐 후처리공정이 필요없는 깨끗한 전단면을 얻을 수 있는 방법이며, 카운터싱킹(counter sinking) 등 특수가공도 가능한 정밀 프레스가공 기술이다. 따라서 가공력 저하, 가공가능범위 확대, 계층경밀도 향상, 품질 안정, 생산비 절감 등의 효과를 얻을 수 있다[3].

일반 범용 프레스로 두께 0.5mm 이상의 소재를 전단가공하여 만든 제품의 전단면(sheared surface)을 관찰해 보면 표면경도가 우수한 전단면

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 석사과정

** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 박사과정, 인천기능대학 부교수

*** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사

역 외에도 상당한 파단영역과 버(burr)가 발생된다. 이 때문에 제품의 치수와 형상 정밀도가 낮아져 이를 개선하기 위한 후처리 공정이 추가로 필요하게 된다 결국 이로 인하여 제품 생산의 경제성이 떨어질 여지가 큰, 두께 0.5~15mm 정도의 제품이 파인블랭킹 공정을 적용하기에 가장 적절한 소재라고 할 수 있다[4].

파인블랭킹에 관한 이론 및 실험적 연구를 살펴보면, 우선 Lange[5]는 V링(V-ring)에 의해 발생하는 정수압응력이 파단을 억제하는 효과에 대해 연구하였다. Guanggi 등[6]은 범용프레스에서 파인블랭킹 가공을 실현하기 위해서 블랭크홀더력(blank holding force)과 카운터펀치력(counter punch force)력을 임의로 장착하여 약 25%의 대체효과를 거두었다. Lazarev와 Kocov[7]는 파인블랭킹 공정의 탄소성 유한요소 해석을 시도하여 최적 V링의 위치를 제안하였다. 국내에서는 김중호 등[8]이 간이 금형을 제작하여, 실험적으로 V링의 위치와 다이롤(die-roll)의 관계를 보였다.

파인블랭킹 제품에 영향을 주는 인자로는 카운터펀치의 하중, 펀치와 다이 모서리 반경 등 여러가지가 있다[9]. 그 중 펀치와 다이 사이의 간극, 즉 클리어런스(clearance)는 전단된 단면의 형상과 전단하중에 큰 영향을 미친다. 또한, 파인블랭킹 공정에서 정수압 응력을 작용시키기 위해서 설치한 V링의 역할도 매우 크며, 이에 대해 좀 더 자세한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 클리어런스와 V링을 변수로 선정하여, 강소성 유한요소해석을 통하여 이들 변수의 변화에 따른 펀치하중의 변화, 다이롤의 길이, 전단영역의 크기, 전단면의 형상 등에 미치는 영향을 분석하고자 한다

2. 파인블랭킹 공정

파인블랭킹 공정의 작동 원리는 피가공재의 응력집중부에 정수압 응력을 작용시킨 상태에서 전단을 일으킨다. 이때 피가공재의 연성을 극대화하므로 파단을 늦추어 유효 전단 영역을 크게 하는 것이다.

그림 1은 파인블랭킹의 작동원리를 나타낸 그림으로, 펀치 주변의 블랭크홀더가 다이 위에 있는 피가공재를 가압구속하여 블랭킹 공정 시 펀치 침입에 의한 굽힘을 방지한다. 한편 펀치 반대쪽의 카운터펀치는 펀치와 반대방향으로 압력을 가함으로써 피가공재에 압축력을 증가하게 한다. 즉, 펀치와 다이 날 끝에서 시작되는 균열에 의한 파단을 저지하여 단 한 번의 공정으로 깨끗한 전단 영역을 얻을 수 있다.

또한, 압축력을 효과적으로 작용시키고 피가공재를 좀 더 단단히 고정하기 위하여 블랭크홀더

와 다이면 중 한쪽 또는 양쪽 면에 전단 윤곽선을 따르는 V링을 붙여 피가공재 내에 충분히 압입되도록 한다. 클리어런스(clearance)는 피가공재 두께의 1%이하로 하여 인장에 의한 균열을 발생키지 않도록 한다. 다이 날 끝에서의 균발발생을 방지하기 위하여 다이 날 끝에 작은 반경을 주어 압출효과를 낸다.

이와 같이 파인블랭킹공정은 금형의 구조상 정수압 상태를 유지하기 위한 조건을 갖추므로써 피가공재의 연성이 증가되는 재료의 성질을 이용하는 방법이다

그림 2는 전형적인 전단면의 형상을 나타낸 것이다. 다이롤(die-roll), 파단영역(fracture zone), 버(burr) 등은 가급적 작게 발생하고, 대신 매끈한 전단영역(burnish zone)이 전단면의 대부분을 차지하도록 유도하는 것이 파인블랭킹의 핵심기술이라 할 수 있다.

3. 유한요소해석

3.1 연성파괴조건

전단 가공 중에 발생하는 피가공재의 전단 및 파단 현상은 일종의 파괴 현상이라 할 수 있으며, 대부분의 경우 피로파괴가 아닌 연성파괴(ductile fracture)이다.

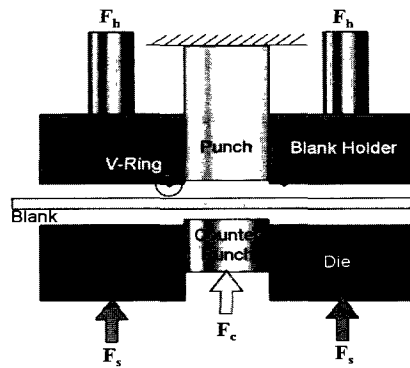


그림 1 파인블랭킹 공정의 개념도

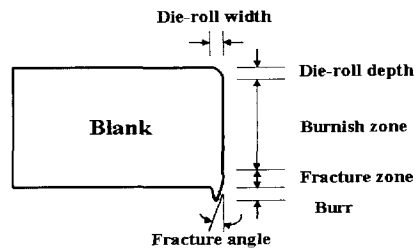


그림 2 전형적인 전단면의 형상

여러 연구자들은 피가공재에 이미 존재하고 있는 기공이 성장하여 균열 또는 파괴로 발전한다는 기공성장 모델을 제안하였다 McClintock[10]은 장축과 단축방향으로 변형하는 타원단면을 가진 원통형 기공이 규칙적으로 배열되어 있는 모델을 가정하고 해석하여 연성파괴조건을 제안하였다. Le Roy 등[11]은 실제현상에 가장 근접한 삼차원 기공성장 모델을 가정하여 해석하였다

또한 Cockroft와 Latham[12]은 소성변형일이 임계값에 도달하면 파괴가 발생한다는 소성변형에너지 개념에 근거하여 다음 식과 같은 연성파괴조건을 제안하였다

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C_0 \quad (1)$$

여기서, σ^* 는 최대인장응력, $\bar{\epsilon}_f$ 는 파괴 유효 변형률, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률이며, C_0 는 좌변의 적분값이 이 값을 초과하면 파괴가 일어나게 되는 임계값으로 가공공정에 의하여 변하지 않는 재료상수이다. 이 조건은 파괴가 변형과 인장응력에 의존함을 의미하고 있다. 즉 인장응력이 없다면 ($\sigma^*=0$)이 되므로 파괴가 일어나지 않는다는 것이다

기공성장 개념에 의하면 기공 크기가 임계값에 도달하면 파괴가 발생한다고 본다 Oh 등[13,14]은 이러한 McClintock의 기공성장 개념을 도입하여 식 (1)의 피적분항 σ^* 를 $\bar{\sigma}$ 로 나누어 무차원화시킨, 소위 'normalized Cockroft - Latham criterion'을 제안하였다 즉,

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_0 \quad (2)$$

식 (2)를 일반적인 응력상태에 광범위하게 적용할 수 있기 위해서는 재수정이 필요하다는 연구도 있으나[15], 지금까지 제안된 여러 가지 파괴조건 중 가장 효율적인 것으로 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 이 조건을 사용하였다.

3.2 임계값 선정

전단공정 해석을 하기 위해서는 앞에서 살펴본 연성파괴조건과 그에 따른 임계값을 필요로 한다 임계값은 재료마다 고유한 특성치로서 실험을 통하여 얻는 것이 타당하다

본 연구에서는 단축인장시험을 모델로 하여, 유한요소해석 모델의 과단 형상을 실험으로부터 얻은 인장시편의 과단 형상과 비교하여 가장 근사한 형상을 주는 임계값을 구하고자 하였다

인장시험에 사용된 시편의 소재는 두께가 4mm의 Ni-Cr-Mo 강(SNCM220)으로, 치수는 그림 3의 KS B 0801 5호 인장시편 규격에 따르도록 와이어 컷 EDM으로 가공하였다. 표 1에 이 재료의 화학성

분을 나타내었다. 인장시험으로 구한 응력-변형률 데이터는 다음 식으로 곡선근사(curve fitting)하여 해석에 사용하였다

$$\bar{\sigma} = 771 \bar{\epsilon}^{0.140} + 0.000067 \text{ (MPa)} \quad (3)$$

적절한 임계값을 찾기 위한 인장시험 시뮬레이션은 상용 유한요소 프로그램 DEFORM-3D[16]를 이용하여 수행하였다 연성파괴조건의 적용에 필요한 임계값은 0.5, 1.0, 1.5의 3가지로 하였고, 임계값에 도달한 요소들을 제거하는 방법(element deletion method)을 적용하였다 유한요소 모델링은 형상의 대칭성을 고려하여 그림 4와 같이 실제 시편 형상의 1/8만 해석 대상으로 하고 이에 따른 적절한 경계조건을 부여하였다

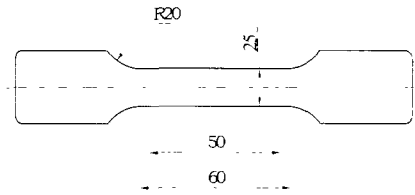
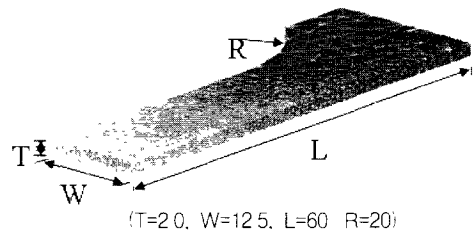


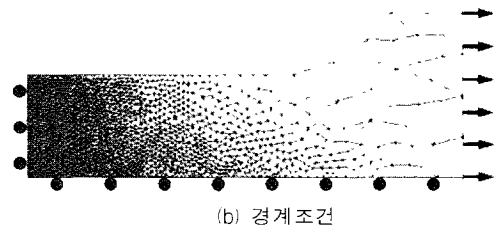
그림 3 KS B 0801 5호 인장시편 규격

표 1 SNCM220의 화학 조성

Component	wt %	Component	wt %
C	0.205	S	0.013
Si	0.251	Ni	0.717
Mn	0.713	Cr	0.479
P	0.010	Mo	0.154



(a) 유한요소 모델



(b) 경계조건

그림 4 인장시험 해석을 위한 유한요소 모델



(a) $C_0 = 1.0$



(b) $C_0 = 1.5$

그림 5 해석모델과 실험시편의 파단형상 비교

3 가지 임계값에 대한 인장 및 파단 해석 결과를 실제 인장시편의 파단형상과 비교한 결과, 임계값을 1.5로 입력한 경우가 가장 실제와 비슷한 파단형상을 나타내었다. 그림 5는 임계값이 1.0과 1.5 일 때 해석모델과 실제 시편 형상을 겹쳐서 비교한 것이다.

인장시험 시뮬레이션과 실험으로부터 얻은 최적 임계값 ($C_0 = 1.5$)과 'normalized Cockcroft-Latham criterion'을 파인블랭킹 공정해석에 적용하였다.

3.3 유한요소 모델링

파인블랭킹 공정해석은 2 단계로 나누어 진다. 1 단계는 소재를 고정하기 위하여 블랭크홀더를 하강시켜 V링을 피가공재 내에 압입, 구속시키는 동시에 블랭크홀더로 피가공재의 표면 전체를 압착하는 공정이며, 2 단계는 카운터펀치를 상승시켜 소재를 고정된 상태에서 펀치를 하강시켜 소재를 전단하는 과정이다.

본 연구는 V링의 형상과 클리어런스의 크기가 파인블랭킹 공정에서 전단하중과 전단면의 정밀도에 미치는 영향을 조사하는데 목표를 두었다. 이러한 변수연구를 위하여 지름 30 mm, 두께 3 mm인 원형제품을 전단하는 비교적 간단한 문제를 대상으로, 상용 프로그램 DEFORM-2D[17]을 사용하여 축대칭 해석을 수행하였다.

그림 6은 유한요소 모델과 경계조건을 나타낸다. 요소수는 4,000여 개, 가장 작은 요소크기는 0.02 mm이며, 자동 요소재구성 기능을 적용하였다. V링의 설치위치(전단면으로부터 2.1 mm)와 높이(0.6 mm)는 현장에서 통상 사용하는 규격표에 따른 것이다

그림 7은 V링의 중심각(θ , $^\circ$)에 따른 3 가지 모델을 비교한 그림이다. 클리어런스는 파인블랭킹에서는 소재두께의 1% 이내, 그리고 일반 블

랭킹에서는 10%까지 사용되는 점을 고려하여, 0~10% 범위의 6 가지 모델을 해석하였다

소재는 식 (3)의 응력-변형률 관계를 따르는 강소성 재료로 모델링하였으며, 이방성은 고려하지 않았다.

다른 공정변수들의 입력값은 표 2에 정리한 바와 같이 파인블랭킹 공정에서 일반적으로 사용하고 있는 값들을 취하였다. 특히, 블랭크홀더력(F_h)과 카운터펀치력(F_c)은 각각 전단하중(F_s)의 30% 및 20%를 보통 적용하고 있는데, 변수연구에 앞서 수행한 예비 해석에서 전단하중이 약 320 kN임을 확인하고, 이로부터 산정한 값을 입력하였다.

4. 결과 및 고찰

V링의 형상과 클리어런스의 크기를 변화시켜 가면서 유한요소해석을 수행하고, 클리어런스에 따른 펀치하중의 크기와 V-ring의 형상에 따른 펀치하중의 크기, 그리고 다이롤 및 전단영역의 크기의 변화 등에 대하여 분석하였다.

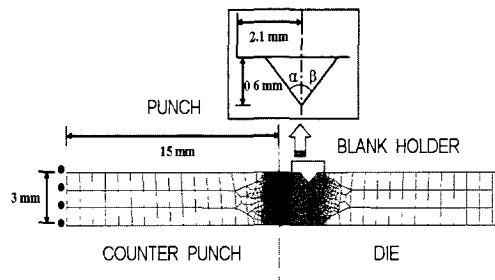
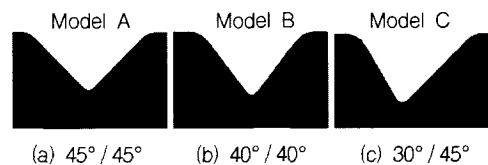


그림 6 파인블랭킹 해석을 위한 유한요소 모델



(a) 45°/45° (b) 40°/40° (c) 30°/45°

그림 7 V링의 중심각(θ , $^\circ$)에 따른 3 가지 모델

표 2 주요 공정변수의 입력값

Parameter	Symbol	Value
Punch Corner Radius	R_p	0.01 mm
Die Corner Radius	R_d	0.2 mm
Blank Holding Force	F_h	100 kN
Counter Force	F_c	65 kN

4.1 클리어런스의 영향

그림 8의 공정 중 펀치하중의 변화를 보면, 클리어런스와 관계없이 펀치변위 0.5mm 근처에서 최대하중을 나타내고 1.5mm (50%t) 정도에서 급격하게 감소한다. 또한, 클리어런스에 따른 펀치하중을 비교하면 1%t 내외에서는 최대하중의 차이가 미미하지만, 5%t 이상일 경우 최대하중이 눈에 띈 정도로 감소하는 것을 알 수 있다

그림 9로부터 전반적으로 클리어런스가 증가할수록 다이롤 깊이(die-roll depth)가 커지는 경향을 볼 수 있다. 파인블랭킹에서의 통상적인 클리어런

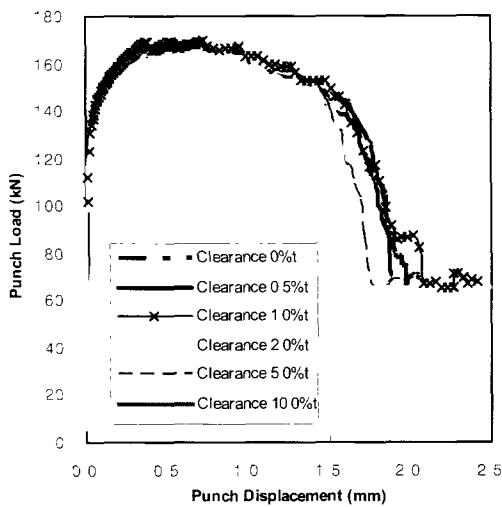


그림 8 클리어런스 변화에 따른 펀치하중

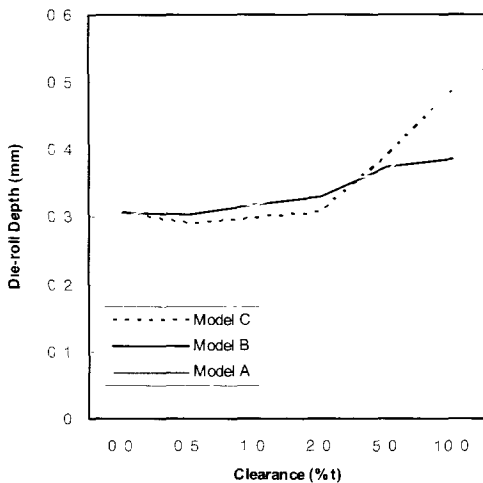


그림 9 클리어런스 변화에 따른 다이롤 깊이

스(1%t 이내)에 대하여 모델 C($\theta=30^\circ$, $\gamma=45^\circ$)의 경우가 다이롤이 가장 작은 값을 가지는 것으로 나타났다.

그림 10은 클리어런스가 클수록 전단영역이 감소하여 전단면이 거칠어진다는 일반적인 사실을 보여주고 있다. V링 형상에 따라서는, 모델 A는 클리어런스가 0.5~1%t일 때, 그리고 모델 C는 0~0.5%t일 때 각각 전단영역이 가장 크게 형성되고 그 이상에서는 감소한다. 또한, 다이롤의 경우와 마찬가지로 통상적인 클리어런스(1%t 이내)에 대하여 모델 C의 경우가 더 큰 전단영역을 나타냄을 확인할 수 있다.

그림 11은 각 V링 모델의, 클리어런스에 따른 전단면의 형상을 비교한 것이다. 클리어런스가 작을수록 전단면이 양호하고, V링 모델별로는 C의 경우가 전단면이 가장 매끈한 것으로 나타났다.

결국 다이롤 깊이와 깨끗한 전단영역의 크기, 전단면의 형상을 비교하면 최적의 클리어런스의 크기는 0.5~1%t임을 알 수 있다.

4.2 V-링 형상의 영향

V링은 파인블랭킹 가공 시에 소재 끝의 굽힘현상을 방지하기 위하여 제품 윤곽을 따라 소재 표면에 설치한다. V링의 설계 시에는 소재의 두께를 기준으로 하여 그 크기를 결정해야 한다.

그림 9에서 논의한 것처럼 최적의 클리어런스(0.5~1%t)의 경우, V링 형상은 대칭일 때(모델 A, B)보다는 비대칭일 때(모델 C) 다이롤 깊이가 작게 나타났다. 또한, 그림 10에서 확인한 바와 같이 비대칭 모델 C는 가장 큰 전단영역을 형성하였다.

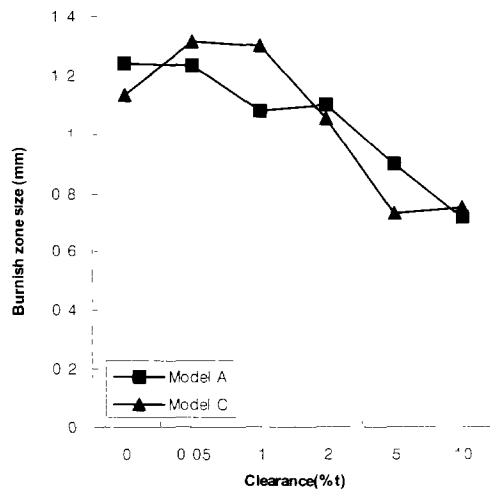
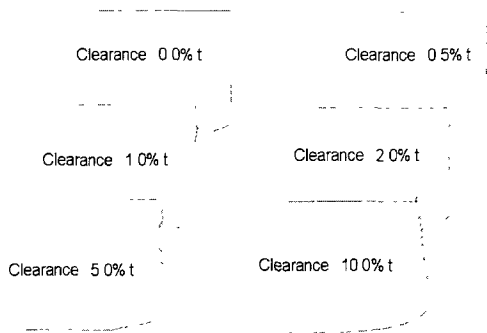


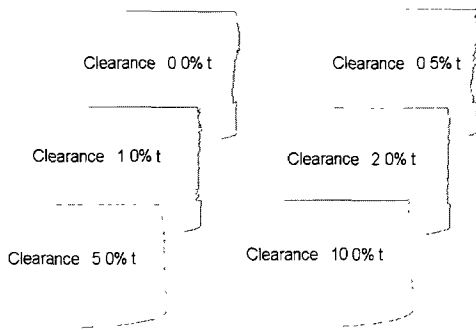
그림 10 클리어런스 변화에 따른 전단영역 크기

즉, 중심각 θ 와 γ 가 대칭인 경우보다 적절한 비대칭 조합인 경우에 더 좋은 전단 제품을 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

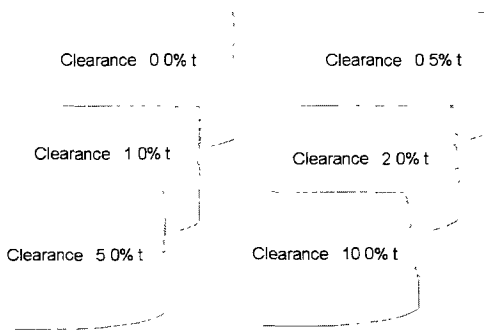
한편, 그림 12에서 보듯이 V링의 형상에 따른 펀치 하중의 변화는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.



(a) V링 모델 A ($\theta=45^\circ$, $\gamma=45^\circ$)



(b) V링 모델 B ($\theta=40^\circ$, $\gamma=40^\circ$)



(c) V링 모델 C ($\theta=45^\circ$, $\gamma=45^\circ$)

그림 11 클리어런스 변화에 따른 전단면 비교

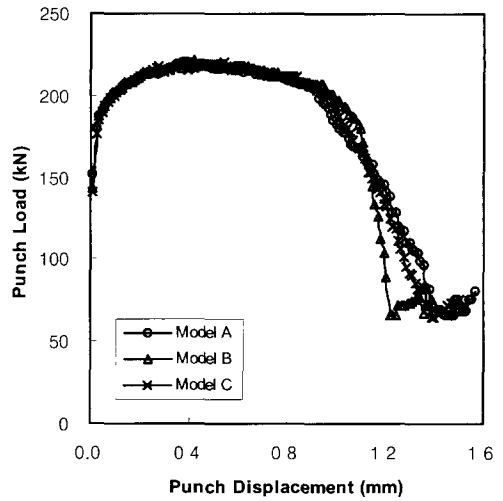


그림 12 V링의 형상에 따른 펀치하중

5. 결론

V링의 형상과 클리어런스의 크기를 변화시켜 가면서 축대칭 파인블랭킹 공정에 대한 강소성 유한요소해석을 수행하여, 이들 공정변수들이 펀치하중과 다이롤 및 전단영역의 크기 등 전단면 품질에 미치는 영향을 분석하였다. 그 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 단축인장시험에 대한 유한요소 시뮬레이션과 실험 결과의 비교를 통하여, 파인블랭킹 해석에 'normalized Cockroft & Latham criterion'을 적용하기 위한 최적 임계값으로 $C_0 = 1.5$ 를 채택하였다.

(2) 파인블랭킹 공정 중 펀치하중의 변화는 클리어런스 크기나 V링 형상에 관계없이 펀치변위 0.5 mm(16%) 근처에서 최대하중을 나타내고 1.5 mm(50%) 정도에서 급격하게 감소한다. 또한, 클리어런스가 5% 이상일 경우에 최대하중이 약간 감소하는 것을 제외하고는 클리어런스 크기나 V링 형상에 따른 펀치하중의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

(3) 다이롤 깊이와 전단영역의 크기, 전단면의 형상에 대한 전반적으로 비교 분석을 통하여 최적의 클리어런스는 통상 사용범위인 0.5~1% 임을 확인하였다.

(4) (3)항의 최적 클리어런스 조건에서, V링은 대칭 형상일 때보다 적절한 비대칭 형상일 때 더 양호한 전단면을 얻을 수 있는 것으로 나타났으며, 최적 V링 형상을 구하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 이종구, 오환섭, “범용 크랭크 프레스에 의한 정밀전단 특성에 관한 연구” *경희대학교 산학협력기술연구논문집*, 제2집, pp 1-. 1996.
- [2] 김중호, 류제구, 신경섭, 김대현, 장영도, 이종훈, “T형 제품의 파인 블랭킹 가공 특성에 미치는 스트리핑력과 카운터 펀칭력의 영향”, *한국정밀공학회지*, 제14권, 제6호, 1997
- [3] Edelstahlwerke Buderus AG, Feintool AG Lyss, “*Cold Forming and Fineblanking*”, pp 141-153, 1997.
- [4] 한규택, “파인블랭킹 가공제품에 미치는 재료 및 비팅의 영향”, *부경대학교 논문집*, 제3권, 제2호, pp. 147-153
- [5] Lange, K. “The Potential of the Fine Blanking Technique”, Feintool AG Lyss, Swiss, pp 1-6, 1978.
- [6] Guangqi, T. et al, “Recent Development of Fine Blanking Technology in China”, *Proc 4th ICTP*, Beijing, China, pp. 246-250, 1993
- [7] Lazarev J and Kocov, A., “Finite Element Analysis of the Stress-Strain Condition in the Process of Fine Blanking”, *Proc. of Int. Manufacturing Eng. Conf.*, UK, pp. 272-274, 1996
- [8] 김중호, 류제구, 최지수, 정완진, “간이 파인블랭킹 금형의 개발을 통한 범용 유압 프레스에서의 원형 정밀전단 가공성 연구”, *한국정밀공학회지*, 제13권, 제5호, pp. 157-163, 1996
- [9] 이종구, “파인블랭킹의 전단부 변형거동에 관한 연구”, *경희대학교 대학원*, pp. 49-53, 2000
- [10] McClintock, F. A., “A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes”, *Trans. ASME. J. of Applied Mechanics*, pp. 363-371, 1968
- [11] Le Roy, G., Emburay, J D., Edward, G and Ashby, M F, “A Model of Ductile Fracture Based on the Nucleation and Growth of Voids”, *Acta Metall.*, Vol 29, pp. 1509-1522, 1981
- [12] Cockroft, M. G and Latham, D J., “A Simple Criterion of Fracture for Ductile Metals”, *NEL Report*, No. 240, 1966.
- [13] Oh, S I, Chen, C C and Kobayashi, S., “Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing - Part 1”, *Trans. ASME. J. of Engineering for Industry*, Vol. 101, pp 23-35, 1979
- [14] Oh, S. I, Chen, C C and Kobayashi, S., “Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing - Part 2”, *Trans. ASME. J. of Engineering for Industry*, Vol 101, pp 36-44, 1979
- [15] 박종진, 이영석, “소성가공을 위한 연성 파괴 조건의 재고찰”, *대한기계학회논문집(A)*, 제 21권, 제7호, pp. 1021-1029, 1997.
- [16] SFTC, *DEFORMTM 3D Ver 5.0 User's Manual*, 2003
- [17] SFTC, *DEFORMTM 2D Ver 8.0 User's Manual*, 2003