

하이드로 메카니컬 펀칭공정의 전단 메커니즘

김승수*, 김창훈#

Shearing Mechanism in Hydro-Mechanical Punching Process

Seung-Soo Kim*, Chang-Hoon Kim#

ABSTRACT

Hydro-mechanical punching was developed for preventing burr formation. Circular hole punching and Finite element method(FEM) analysis were conducted to investigate shearing characteristics of this process in comparison with conventional and mechanical counter punching. In this process hydrostatic pressing with appropriate medium was utilized instead of counter punch, which resulted in the delay of the point that the fracture is initiated and clean shearing surface was obtained. FEM analysis was utilized to find out optimum processing parameters and shearing mechanism for burr-free hole punching

Key Words : Hydro-mechanical Punching, Counter Punching, Burr, Fracture, Hydrostatic Pressure, Finite Element Analysis

1. 서 론

판형 소재를 이용한 제품생산에 있어 전단공정은 필수적이며 전단공정에 있어 버의 생성은 피할 수 없는 문제점으로 남아있다^[1]. 최근 소형화, 고집적화 등의 추세로 모든 제품이 고정밀·고품질을 요구하고 있어 버의 최소화 기술 개발과 더 나가서는 버 제거공정이 필요 없는 버-프리 전단기술 개발이 요구되고 있다.

판재 펀치 및 블랭킹 공정에 있어서 버의 발생의 억제하고 버니쉬 면을 최대화함과 동시에 롤오버 영역을 최소화하기 위해서는 중요 공정변수가 어떤 것인지, 각 중요변수의 최적값이 무엇인지 밝혀내는 과정

이 필요하다. 실험, 관찰과 분석의 반복을 통한 점진적 개선이 보다 효율적으로 수행되기 위해서는 이론 해석이 병행되어야 한다. 유한요소법 등을 이용할 경우 변형양상의 연속적인 모사뿐만 아니라 실험으로 측정될 수 없는 상태변수들의 변화를 예측할 수 있으므로, 보다 근본적인 변형과 전단 메커니즘에 대한 이해가 가능하다^[2].

컨벤셔널 펀칭, 메카니컬 카운터 펀칭과 새로운 하이드로 메카니컬 버-프리 펀칭공정의 전단 특성과 전단 변형 메커니즘을 규명하기 위하여 원형 홀 펀칭실험과 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였다^[3].

2. 하이드로 메카니컬 버-프리 펀칭

기존의 펀칭공정은 소재에 비해 경도가 상대적으로 높은 펀치와 다이의 날을 이용하여 소재를 전단시키

* 한국생산기술연구원 생산공정기술본부

교신저자 : 한국부품소재산업진흥원 기술개발본부
kch@kmac.or.kr

는 방식으로, 그 전형을 Fig. 1에서 볼 수 있다^[4]. 이러한 펀칭공정을 통해 생성되는 홀에는 Fig. 2와 같은 버가 남게 된다. 다이와 펀치사이의 간극과 두 공구 날의 예리한 정도가 버 생성에 중요한 인자가 되며, 적절한 간극과 예리한 금형을 사용할 경우 버의 크기를 줄일 수 있으나 근본적으로 버의 발생을 막을 수는 없다.

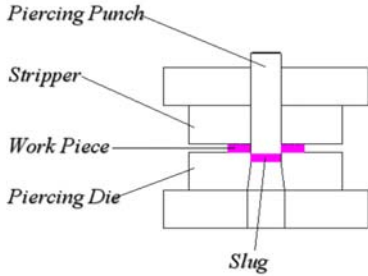


Fig. 1 Conventional punching process

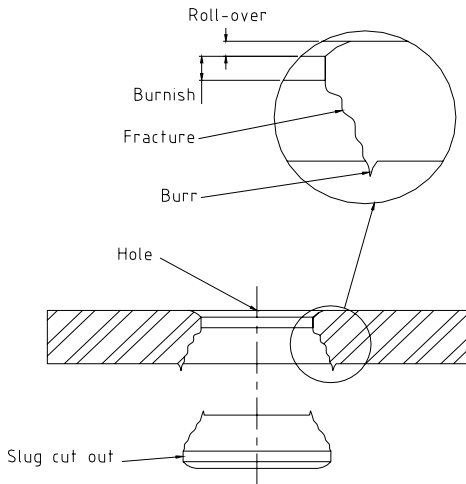


Fig. 2 A typical profile of punched surface

표면에 버가 발생하는 것을 막기 위한 방법으로써 일회 타격으로 슬러그나 블랭크를 밀어내는 대신에 Fig. 3과 같이 슬러그나 블랭크를 위아래로 반복적으로 변형시켜 전단을 일으키는 방법을 고려할 수 있다^[5].

이러한 카운터 펀칭은 버가 표면에 생성되는 것은 막을 수 있으나 홀 내부로 버가 옮겨갈 가능성이 있으며, 파단면을 줄일 수 없고 오히려 버니쉬 면이 손상되는 단점이 있다.

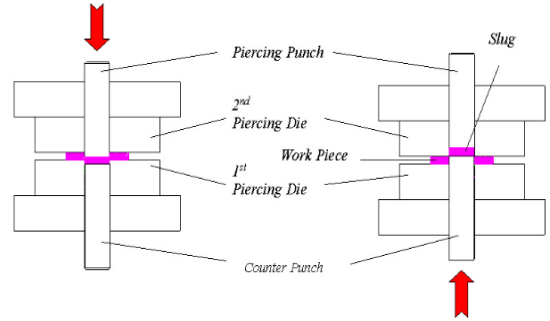


Fig. 3 Mechanical counter punching process

상하 교번 하중을 가하는 카운터 펀칭 방식을 발전시켜 카운터 펀치 대신에 유압 매체를 사용하는 것이 새로이 고안된 하이드로 메카니컬 펀칭 방식이다.

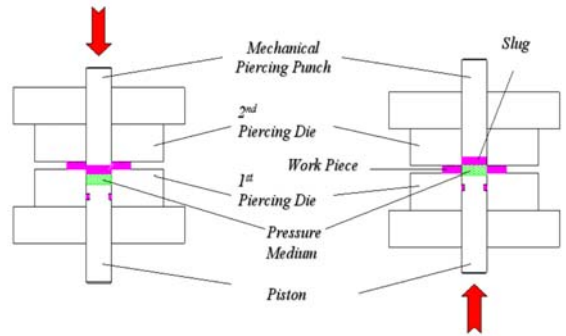


Fig. 4 Hydro-mechanical burr-free punching

압력 매체를 통하여 높은 압력이 판재에 가해지면 높은 정수압 압력이 전단 구역에 유지되고, 정수압 압력의 증가는 파단이 발생하는 시점을 지연 시킬 수 있다. 파단이 발생하는 것을 지연시킴으로써 전단변형면의 비율을 늘릴 수 있게 되므로 보다 깨끗한 전단면을 얻을 수 있게 된다^[6].

3. 전단 메카니즘 분석을 위한 손상 모델

일반적인 판재 절단면은 롤오버, 버니쉬, 파단, 버 구간으로 구성된다. 버니쉬 면은 전단변형에 의해 형성된 매끈한 면으로 크랙이 발생하는 시점 직전까지 만들어 진다. 일단 크랙이 발생하면 펀치에 의해 가해

지는 하층은 크랙을 성장시켜 거친 파단면을 만들게 된다. 버니쉬 면과 파단면의 비율을 최대화하기 위해서는 손상의 성장을 반영하는 해석이 필수적이다. 금속판재의 파단은 결합성장에 의한 연성과괴로 볼 수 있으며 이러한 현상을 모사하기 위한 이론적인 연구들이 많이 행해져 왔다. 일반적인 형태의 손상 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int F(s_1, s_2, \dots) d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

공정변수들(s_i)의 함수로서 손상 F 를 정의하고 이 값들을 변형 이력에 따라 적분하여 누적된 손상 값이 임계값 C 에 도달하면 파괴가 일어나는 것으로 가정한다. 여기서 $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률이다. 최근에 이르기까지 여러 가지 손상 모델들이 제시되어왔으나 실험적 검증을 통해 비교적 정확한 것으로 알려진 Cockroft and Latham 모델이 널리 쓰이고 있다.

Modified Cockroft and Latham's criterion

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

여기서 σ^* 는 최대 주응력, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력을, ϵ_f 과 단 변형률을 나타낸다. 즉, Cockroft-Latham 모델에서는 손상의 성장이 인장방향의 최대 주응력에 따라 성장하며 그 값이 일정한 한도에 도달하면 파괴가 일어나는 것으로 간주한 것이다^[7,8].

4. 공정별 성형 특성 비교

컨벤셔널 펀칭, 메카니컬 카운터 펀칭과 하이드로 메카니컬 펀칭공정의 전단 메커니즘을 파악하고 각 공정의 특성을 비교하기 위하여 홀 펀칭 실험과 유한 요소 해석을 수행하였다. 비교 대상 공정은 원형 홀 펀칭으로 펀치의 외경이 12.06mm, 다이의 내경은 12.10mm로 간극 0.02mm가 되도록 하였으며 소재는 두께 1mm의 STS304 판재를 이용하였다.

컨벤셔널 펀칭, 메카니컬 카운터 펀칭과 하이드로

메카니컬 펀칭공정의 전단 특성을 파악하기 위한 홀 펀칭공정 해석에서는 축대칭의 2차원 문제로 단순화된 모델을 사용하였다. 펀치와 스트리퍼, 다이를 강체로 보았고, 판재만을 변형체로 가정하였다. 판재는 약 2000개의 선형 사각형 요소를 이용하여 분할하되, 전단변형이 발생하는 부위의 요소밀도를 높게 하여 계산의 효율성과 정확성의 향상을 도모했다. 계산은 1스텝 당 펀치가 0.01mm 진행하도록 하였다. 각 급형과 소재간에 마찰력이 작용하는 것으로 보았으며 일정 전단 요소(constant shear factor) 값 0.1을 적용하였다. 초기 판재는 전혀 결함을 갖지 않는 것으로 가정하였다.

소재의 응력-변형률 관계는 다음과 같이 지수함수 꼴을 갖는 물성모델(power law 모델)을 이용하였다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (3)$$

($K = 1450\text{MPa}$, $n = 0.6$ for STS 304)

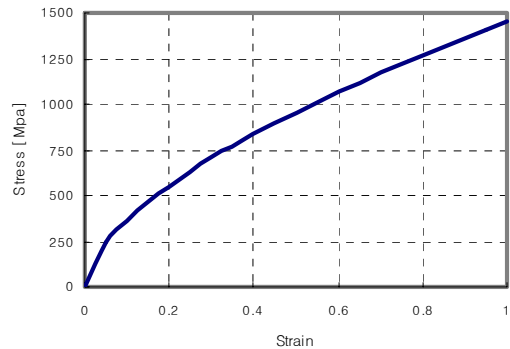


Fig. 5 Flow stress curve for STS304

이 때 탄성변형은 무시할 정도로 작다고 가정하여 강소성 모델을 이용하였다. 위 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 스테인레스 강은 급격히 가공경화를 일으키는 특성을 갖고 있으며 이러한 성질은 변형에 영향을 받은 구간이 가공경화지수가 작은 소재에 비해 상대적으로 넓게 확대되는 결과를 가져오게 된다. 유한요소해석을 하는 과정에서 요소의 변형이 심해진 경우 다시 유한요소 격자망을 구성한 후 다음단계의 계산을 진행시켜 나갔다. 요소의 효율적인 사용을 위해 변형률과 변형률 속도, 외형의 곡률이 큰 곳에 요소의 밀도를 높게 유지하였다.

4.1 컨벤셔널 펀칭

Fig. 6는 기존 펀칭 법을 이용한 성형실험 결과로 롤오버, 버니쉬, 파단과 버가 구성된 전형적인 전단면을 관찰할 수 있었다. 또한 홀은 아래쪽이 넓은 형상을 나타낸다. 펀치의 이동방향과 나란하게 직경이 확대될 뿐만 아니라 버가 표면 아래로 밀려 나오고 있다. 상대적으로 넓은 부분의 측면에 파단면 성장 흔적이 나타나고 있음에 주목할 필요가 있다.

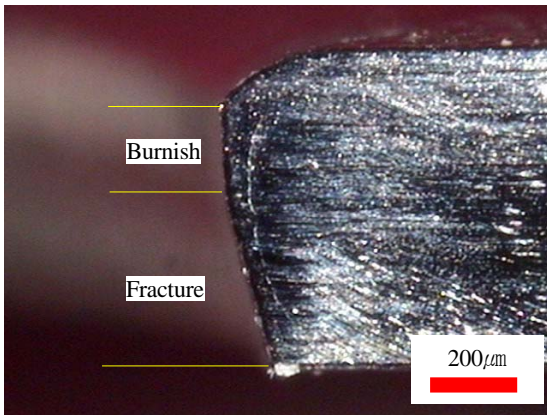


Fig. 6 Section of conventionally punched hole

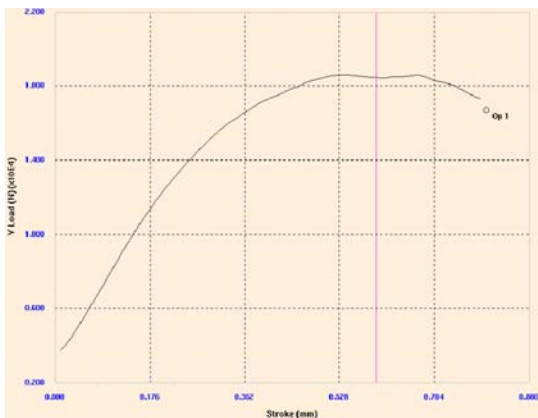


Fig. 7 Stroke-load curve during the half-piercing stage

펀치의 일회 가격으로 소재를 끊어내는 컨벤셔널 펀칭공정을 앞에서 설명한 해석 모델을 이용하여 해석하였다. 성형하중은 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 펀치가 하강함에 따라 점진적으로 증가하다가, 일정한

스트로크에서 최대치에 도달한 후 감소한다. 하중이 최대값에 도달한 후에는 더 이상의 하중증가 없이도 변형이 진행되는 불안정 상태(unstable condition)에 접어들게 된다. 이러한 상태에서는 급격하게 연결 부위가 좁아지며 파괴로 이어지게 된다. 재료 인장시험시 네킹이 발생할 때와 유사한 상태에 놓이게 되는 것이다. 짧은 하중 감소 구간에서 네킹이 진행됨과 동시에 크랙이 성장하여 파단에 이르게 된다.

성형 하중이 최대값에 도달한 순간의 형상과 결합 분포는 Fig. 8과 같다. 관찰의 편의를 위해 전단 변형 부위만을 확대하여 나타내었다.

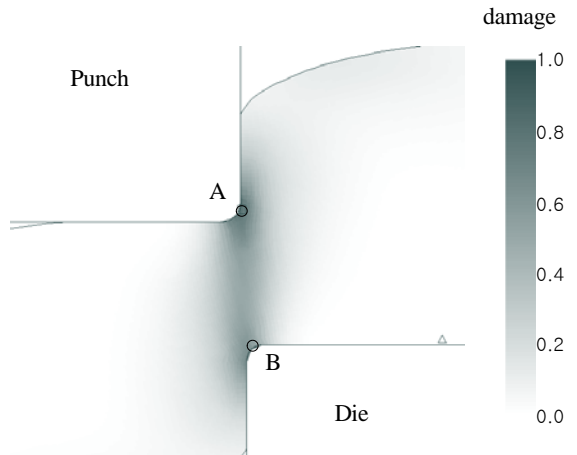


Fig. 8 Normalized Cockroft and Latham's damage value distribution in the conventional punching

위 그림에서 보이는 바와 같이 상부 블랭크 홀더와 접해있던 모서리가 안으로 굽으면서 롤오버현상이 나타났다. 또한 하부 슬러그가 다이를 통하여 압출되어 나가고 있으며 펀치와 닿는 부분의 홀은 수직의 매끈한 전단면을 형성하고 있다. 펀치와 다이의 모서리에 닿아 있는 부분에서 손상 값이 제일 높게 나타나며 하중 감소 구간에서 두점 A, B를 잇는 파단면이 형성될 것을 예측할 수 있다. 손상이 높게 나타나는 부분의 길이가 길고 폭이 넓어 추후에 파단면의 면적이 넓고 거칠게 나타날 것을 예상할 수 있으며 이것은 컨벤셔널 펀칭 실험과 일치하는 결과이다.

4.2 카운터 펀칭

최대 하중 발생점을 크랙이 생성되는 시점으로 보고, 최대 하중에 도달했을 때 하프 피어싱 펀치의 전진을 중단시킨 후 카운터 펀치를 반대 방향으로 움직이도록 하였다. 카운터 펀치가 상승하는 동안 하프 피어싱 펀치에도 일정한 하중을 부과하여 슬러그가 위로 볼록하게 부풀어 오르는 것을 막아 전단부에 굽힘 변형이 생기지 않도록 하였다. 두개의 펀치를 이용하여 첫 단계에서 네칭 직전까지 펀치가 소재로 파고들게 한 뒤 슬러그를 반대 방향으로 밀어 올려 절단해낸 카운터 펀칭 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

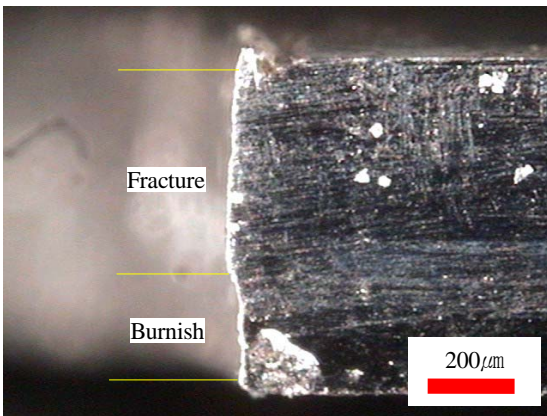


Fig. 9 Section of counter punched hole

카운터 펀칭의 경우 펀치와 다이의 동심도와 함께 상하 펀치 사이의 동심도가 중요한 변수로 작용하였다. 펀치와 다이의 동심도가 나빠질 경우 Fig. 9와 같이 홀의 중심부에서 시작된 버가 표면까지 겹치면서 올라가는 양상을 보였으며, 상부 펀치와 하부 펀치의 동심도가 떨어질 때에는 원주상에서 일부는 위쪽으로 다른 부분은 아래쪽으로 버가 발생하기도 하였다. 또한 크랙이 성장하여 생성된 파단면 구간이 여전히 넓어 홀의 면이 매끄럽지 못하였다.

카운터 펀칭공정의 유한요소해석을 통해 얻은 형상과 손상 분포의 변화를 Fig. 10에 나타내었다.

공정 초기에는 전단변형부가 플라스틱 힌지처럼 작용하여 아래로 볼록하게 굽어있던 슬러그가 들어 올려졌다. 슬러그가 곧게 펴지면서 두 펀치사이에 물린 직후에는 전 단계에서 홀 상부에 생겼던 큰 곡률의 물

오버 부위가 스트리퍼의 평면 쪽으로 밀착되면서 점차 감소하여 곡률도 줄어들었다. 카운터 펀칭 과정에서 손상이 축적된 부위의 너비가 소폭 증가하여 거친 파단면과 중심부에 버가 발생할 가능성을 보이나, 파단면이 생성될 두 점사이의 거리는 컨벤셔널 펀칭에 비하여 감소하여 파단면 구간이 감소할 것을 예측할 수 있다.

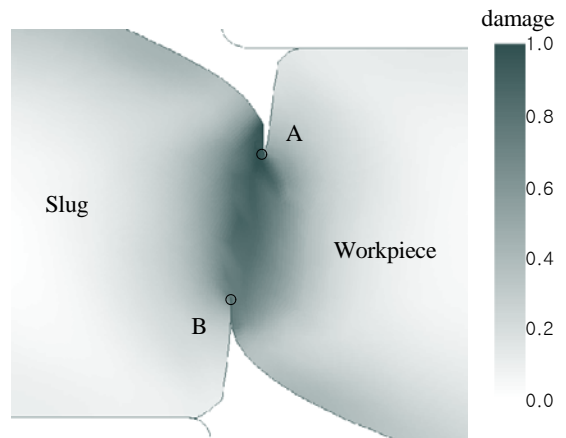


Fig. 10 Normalized Cockcroft and Latham's damage value distribution in the counter punching

4.3 하이드로 메카니컬 버-프리 펀칭

하이드로 메카니컬 펀칭에서는 고체 펀치를 이용한 하프 피어싱 단계에 이어 성형되어 밀려 나온 소재 표면에 정수압을 가하여 펀칭을 완료하였다. 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 홀의 표면과 중심부에서 버가 전혀 발생되지 않았음을 확인할 수 있다. 파단면의 발생을 완전히 막지는 못하였지만 최소화 되어 측면부의 중간에 좁은 파단면이 존재하게 된다. 컨벤셔널 펀칭과 비교되는 특징은 정수압이 가해졌던 소재 하부의 직경이 상부의 직경보다 작다는 것으로 컨벤셔널 펀칭시에는 반대의 형상이 얻어진다. 반면 홀이 완벽한 원통도를 유지하지 못하고 있으며, 유체로 가압한 부분의 롤오버 반경이 커졌다.

하이드로 메카니컬 펀칭공정의 유한요소해석을 통해 얻은 형상과 손상 변화를 Fig. 12에 나타내었다. 압력 매체의 압력이 점진적으로 올라감에 따라 전 단계에서 밀려 나왔던 슬러그가 밀려 올라가게 되고 이로

인해 슬러그와 판재 사이에 목이 점점 좁아지게 된다. 카운터 펀칭에 비하여 지연되기는 하지만 최후에는 양쪽 표면에서 크랙이 발생하여 만나게 된다.

공정 초기에는 전단변형부가 플라스틱 한지처럼 작용하여 아래로 볼록하게 굽어있던 슬러그가 들어 올려 졌다. 전 단계에서 홀 상부에 생겼던 큰 곡률의 롤 오버 부위가 스트리퍼의 평면 쪽으로 밀착되면서 짐차 감소하여 곡률도 줄어들었다. 이번에는 반대로 홀 하부에 롤오버가 발생하였다.

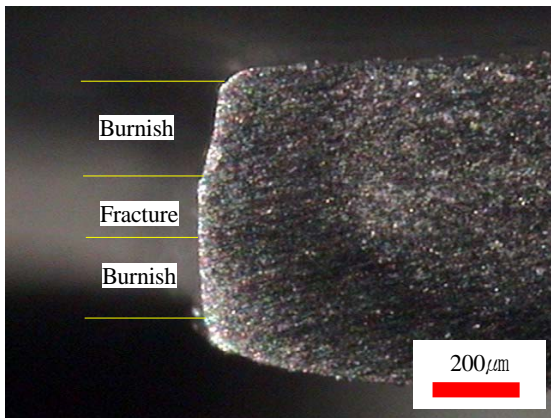


Fig. 11 Section of hydro-mechanically punched hole

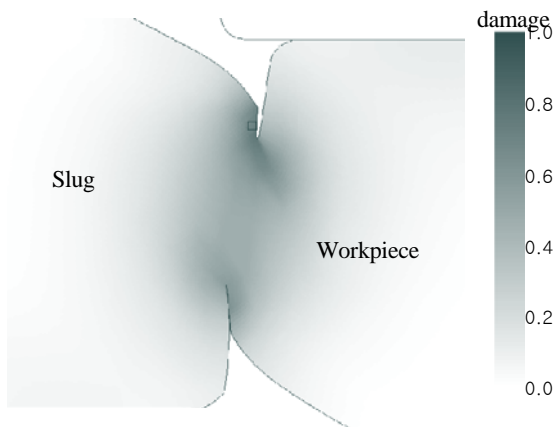


Fig. 12 Normalized Cockcroft and Latham's damage value distribution in the hydro-mechanical punching

하프 피어싱 공정에서 다이 쪽으로 압출되어 나왔던 원통부위가 펀치처럼 작용하며 전단 부위를 파고

들어감을 알 수 있다. 압출되는 과정에서 가공경화를 겪은 이 부위가 다이와 펀치에 구속된 상태에서 소재 쪽으로 파고 들어가는 것이다. 전 단계에서 수직으로 성형되었던 피어싱 면이 카운터 펀칭이 진행됨에 따라 벤딩에 의한 전단 부위의 회전으로 인해 위쪽이 넓은 형태의 경사면을 이루게 되었다.

정수압력에 의해서 카운터 펀칭에 비하여 손상 성장이 지연되어 상대적으로 그 깊이가 낮게 유지되었고, 축적 부위의 너비가 좁아서 버가 최소화된 매끈한 전단면을 형성할 조건을 만족시키고 있다.

세 가지 서로 다른 방식의 punching 실험에서 적용한 공정 조건과 성형 하중을 비교하면 Table 1과 같다.

Table 1 Comparison of the process parameters

Process	Conventional	Counter		Hydro-Mechanical	
		down	up	down	up
Punch speed (mm/s)	3	3	3	3	3
Load (kN)	17	34	34	24	6.4

최대한 유사한 조건 아래에서 성형이 일어나도록 공정 속도, punch sharpness, die corner 반경 등을 일치 시킨 상태에서 실험하였다. Counter punching의 상향/하향 단계와 Hydro-mechanical punching 공정의 하향 단계에서는 맞은편 punch에 의한 배압으로 하중이 높게 유도된 것이다. Hydro-mechanical punching 공정 최종 단계인 상향 성형시에는 성형 하중이 매우 작음을 알 수 있다.

5. 결 론

새로운 버-프리 하이드로 메카니컬 펀칭공정을 개발하고 컨벤셔널 펀칭, 메카니컬 카운터 펀칭과 전단 특성을 비교 분석하기 위하여 원형 홀 펀칭실험과 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였다.

슬러그를 위아래로 반복하여 성형함으로써 표면에서 발생하는 버를 방지할 수 있었다. 압력매체를 통하여 정수압력을 카운터 펀치 대신에 사용함으로써 파단이 시작되는 시점을 지연시킬 수 있었으며 이로 인

해 깨끗한 전단면을 얻을 수 있었다.

카운터 펀칭의 경우 금형의 정렬(alignment) 정밀도를 버의 크기 이하로 유지하기가 어려움을 감안할 때 버 발생을 악화시킬 수 있음을 확인하였다.

버가 없는 깔끔한 홀을 얻기 위해서는 손상이 상대적으로 높게 나타난 부위의 폭을 최소화 시키면서, 동시에 전단변형부의 연장선상에 발생하도록 하여야한다. 또한 홀의 원통도를 향상시키기 위해서는 전단면의 회전을 최소화 시켜야 한다. 이러한 공정 조건을 찾는 과정에서 유한요소해석 기법이 효과적으로 활용될 수 있었다.

펀칭에서 관찰된 결과는 버-프리 블랭킹 공정의 개발에도 활용될 수 있을 것이다.

표면 버의 발생 억제와 파단면 최소화에는 하이드로 메카니컬 펀칭이 효과적이었지만 홀 원통도의 향상과 롤오버 반경 최소화를 위해서는 첫 단계에서의 침입깊이와 간극 등에 대한 연구가 더 필요하다.

참고문헌

1. Donald F., Eary, "Techniques of Press working sheet metal," Prentice-Hall, pp. 1-55, 1974.
2. 김창훈, 김시영, "냉간 전방 압출금형의 최적구조설계에 관한 연구," 한국동력학회지, Vol. 3, No. 1, 1999.
3. Eary, Donald F., Techniques of Pressworking sheet metal, pp 1-55, Prentice-Hall, 1974.
4. Lange, Kurt, Handbook of metal forming, chap. 24, McGraw-Hill, 1985.
5. Liebing, H., "Counter blanking - A shearing process for producing blanks without any burr," Int. MTDR, pp. 369-375, 1978.
6. Kim, S. S., Han, C. S., Lee, Y. S., "Development of a new burr-free hydro-mechanical punching," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 162-163, pp. 524-529, 2005.
7. Cockroft, M.G., Latham, D.J., National Engineering Lab. Report No. 240, 1966.
8. Kobayashi, Shiro, Metal forming and the finite element method, Oxford university Press, 1989.