

미세 홀 펀칭시 전단 파괴 거동 연구

유준환*·임성한*·주병윤*·오수익**

A Study on Fracture Behavior in Shear Band during Micro Hole Punching Process

J.H. Yoo, S.H. Rhin, B.Y. Joo and S.I. Oh

Abstract

In the micro hole punching, the size and shape of burr and burnish zone are very important factors to evaluate quality of micro holes which depend on punch-die clearance, strain rate, workpiece material and etc. To get micro holes with small burr and wide burnish zone for industrial demands, not only the parametric study but also a study on fracture behavior in shear band are necessary. In this study, 100 μm , 25 μm micro holes in diameter were fabricated on brass (Cu63/Zn37) and SUS 316 foils as aspect ratio 1:1, and the characteristics of micro holes was investigated comparing with macro holes over several mm by scanning electron microscopic views and section views. Like macro hole, micro hole is also composed of 4 portions, rollover, burnish zone, fracture zone and it shows similar fracture behavior in shear band, but? by high strain rate ($10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$) unlike macro hole fabrication and increment of relative grain size several different results are shown.

Key Words : Micro punching, Shear, Micro hole

1. 서 론

미세 홀 펀칭은 수십에서 수백 μm 의 미세 홀을 미세 펀치와 다이틀 이용하여 전단변형을 일으켜 홀을 가공하는 방법이며 잉크젯 프린터헤드 노즐, IC 패키징에 필요한 비아 홀(Via hole), 연료 분사 노즐, 각종 센서 등에서 미세 홀 가공에 사용된다. 펀칭 이외에도 미세 드릴 가공, 레이저 가공, 미세 방전 가공, 미세 초음파 가공 등의 다른 미세 홀 가공 방법이 있지만 미세 홀 펀칭이 다른 가공 방법들에 비해 가공 시간, 홀의 품질, 비용

등에서 큰 이점을 지니고 있으며,⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 실제로 산업 현장에서는 100 μm 이상의 미세 홀이 펀칭 공정에 의해서 양산되고 있다.

하지만 미세 홀의 직경이 수십 μm 에 이르게 되면 펀치, 다이 홀의 가공이 어렵고 수 μm 이내의 다이 간극 조건에서의 펀칭을 위해서 펀치의 진행 구간에서 수 μm 이내의 직진 정밀도와 펀치-다이 홀 위치 맞춤이 보장되어야 하며, 공구의 수명이 현저히 줄어 다른 가공 방법에 비하여 큰 경쟁력을 지니지 못하고 있는 실정이다. 하지만 제품의 소형화를 위하여 수십 μm 이하의 미세 홀

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
** 서울대학교 기계항공공학부

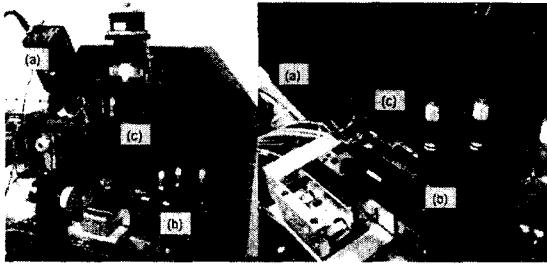


Fig. 1 Micro hole punching system :
 (a) vision part (b) punch-die alignment part
 (c) micro hole fabrication part

펀칭 기술에 대한 연구는 활발하게 이루어지고 있다.

양질의 미세 홀이란 일반적으로 버(burr)가 작고 전단 영역(burnish zone)이 넓은 홀을 의미하며, 다이 간극, 가공 소재 두께 대비 다이 간극의 비, 펀치와 다이 홀의 에지 품질 및 가공 면의 조도, 펀칭 속도, 가공 소재 등의 인자들이 홀의 형상을 결정한다^{(4),(5)}. 양질의 미세 홀을 얻기 위해서는 전단부의 변형 거동을 이해하는 것이 중요한데 시편의 두께가 수십 μm 에 이르고 상대적으로 다이 간극이 매우 작아지기 때문에 기존의 홀 가공 연구와 더불어 높은 변형 속도에서의 결정립의 크기에 따른 전단 변형 연구가 병행되어야 한다. 하지만 그에 앞서 미세 홀과 기존의 수 mm 이상의 홀과의 유사점, 차이점을 미세 홀의 크기와 가공 소재에 따른 홀 형상을 관찰하여 전단부의 변형을 이해하는 것은 중요하다.

2. 미세 홀 펀칭 실험 조건 및 방법

2.1 미세 홀 펀칭 실험 장비 및 조건

본 연구에서 실험에 사용된 펀칭 시스템은 Fig. 1 과 같이 세 부분으로 구성되어 있다. (a)는 영상 신호를 받아들이는 부분으로서 CCD 모니터와 연결되어 펀치 팁과 다이 홀을 동시에 보여주고, (b)는 펀치와 다이 홀의 위치 맞춤을 위하여 펀치 팁과 다이 홀의 겹친 이미지가 편광 큐브 빔 스플리터(polarizing cube beam splitter)와 편광 거울(mirror coated $\lambda/4$ phase retarder)에 의해서 만들어지는 부분으로 위치 정렬을 담당하며, 마지막으로 (c)는 스텝 모터와 크로스 롤러 베어링에 의해서 펀치가 상하 운동을 하여 미세 홀이 가공되는 부분이다.⁽⁶⁾ 이러한 미세 홀 펀칭 시스템은 0.5 μm 의 x-y 반복정밀도, 1 $\mu\text{m}/25$ mm 미만의 수직정밀도, 그리고 1 μm 미만의 위치 맞춤 정확도를 확보함으로써 25 μm 의 미세 홀 가공이

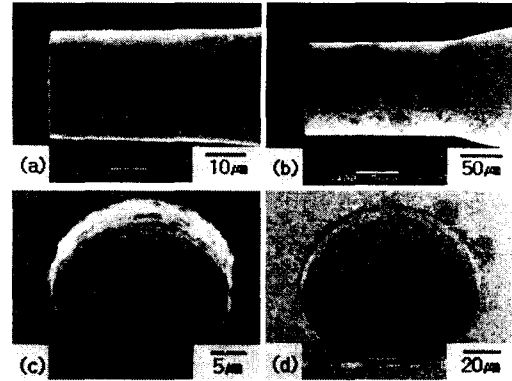


Fig. 2 Micro punching tools :
 (a) Φ 25 μm punch (b) Φ 100 μm punch
 (c) Φ 27 μm die hole (d) Φ 110 μm die hole

가능하다. 펀치는 황동(brass Cu63/Zn37)과 스테인리스 스틸(SUS 316)을 가공하기 위하여 설계되었으며 초경합금(Co 12 %, 0.7 μm)을 정밀 연삭 가공하여 제작하였다. 다이 역시 초경합금의 본체에 미세 방전에 의해 다이 홀을 가공(micro EDM)하여 사용하였다. Fig. 2 는 펀치와 다이 홀의 전자 주사 현미경으로 촬영된 사진이며 Fig. 2-(a), (c) 의 직경 25 μm 의 펀치, 직경 27 μm 의 다이 홀은 Fig. 2-(b), (d) 의 직경 100 μm , 110 μm 의 그것들에 비해 상대적으로 치수 정밀도, 형상 정밀도가 떨어지는 것을 확인할 수 있으며, 특히 직경 25 μm 펀치의 경우 약 1° 테이퍼 형상을 하고 있어 미세 홀의 형상에 영향을 주었다.

본 실험에서는 잉크젯 노즐 재료로 넓게 사용되는 황동(brass Cu63/Zn37), 스테인리스 스틸(SUS 316) 박판을 피가공재로 선정하여, 10 mm \times 10 mm 크기로 준비된 두께 25, 100 μm 시편에 약 5 %의 간극, 직경/두께 비 1, 펀칭 속도 10 %의 조건으로 펀칭 실험을 수행하였다. 황동과 스테인리스 스틸의 재료 특성은 Table 1 에 나와 있다.

2.2 미세 홀 관찰 방법

본 연구에서 가공된 미세 홀은 직경 25 μm , 100 μm 이며 일반적인 방법으로는 홀 형상의 특징을 관찰하기 힘들기 때문에 전자 주사 현미경(scanning electron microscope)으로 입체 영상을 얻고, 또한 자세한 미세 홀 내 벽면 관찰을 위하여 홀 가공된 시편을 정밀 전단(sectioning)한 다음 폴리싱(polishing)하여 관찰하였다. 시편 준비부터 관찰까지의 자세한 내용은 다음과 같다.

Table 1 Material properties of workpieces

Property	brass	SUS 316
Modulus of elasticity [GPa]	102	200
Tensile strength [MPa]	330	550
Brinell hardness	100	175
Melting point [K]	1200	1670

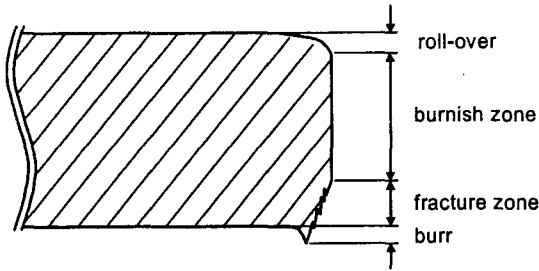


Fig. 3 Schematic view of edge profile

- (1) 미세 홀 가공된 시편을 고정액(epoxy resin)에 고정 (mounting)시킨다. 이때 고정액으로는 가공된 홀이 보이도록 투명한 수지를 사용한다.
- (2) 고정된 시편을 연삭하여 가공된 홀 중앙까지 정밀 전단한다.
- (3) 미세 홀의 전단면 윤곽선이 잘 드러나도록 폴리싱을 한다.
- (4) 광학 현미경으로 전단면과 내 벽면을 관찰한다.

가공된 미세 홀은 직경 수십 μm 로 매우 작기 때문에 사포로 홀의 중앙까지 연삭할 때 미세 홀이 사라지지 않도록 특별한 주의를 필요로 한다.

3. 실험 결과

3.1 미세 홀 구분

일반적으로 펀칭 가공이나 블랭킹 가공 같이 펀치와 다이에 의한 압축력으로 전단 변형이 일어난 소재는 Fig. 3 과 같이 롤오버(rollover), 전단 영역(burnish zone), 파단 영역(fracture zone), 버(burr) 이렇게 4부분으로 구분된다. 이상적인 홀은 가공시 100% 전단에 의해 롤오버, 파단영역, 버가 없이 전단 영역만 존재하는 홀이다. 하지만 펀칭 가공이 시작되면서 발생하는 탄성, 소성 변형은 롤오버와 버의 원인이 된다. 홀의 형상에 영향을 주는 인자들은 소재의 재료와 두께, 펀치-다이 간극, 공구 마모 정도, 펀칭 속도, 그리고 기하학적 조건

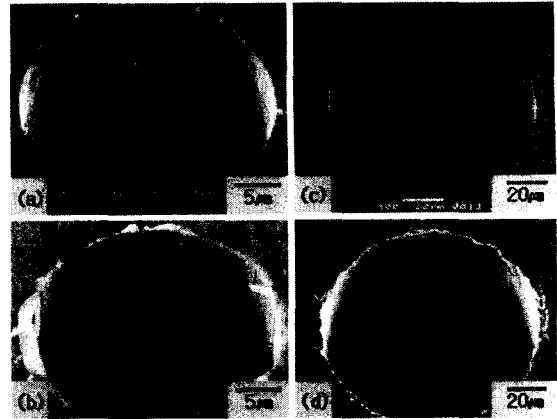


Fig. 4 SEM view of micro punched hole - Brass :
(a) Φ 25 μm upper side (b) Φ 25 μm lower side
(c) Φ 100 μm upper side (d) Φ 100 μm lower side

등이 있다.⁽²⁾

3.2 펀치 크기에 따른 미세 홀의 형상 변화

Fig. 4 는 황동 소재에 가공된 직경 25 μm , 100 μm 미세 홀의 주사 전자 현미경 사진이다. (a), (c) 는 미세 홀의 윗면, 그리고 (b), (d) 는 미세 홀의 아랫면의 모습을 보여주는데, 레이저 가공 등에 의한 미세 홀보다 훨씬 표면 조도가 낮고 진원에 가까운 모습이다. 모든 미세 홀의 롤오버가 매우 작아 무시할만하고 버도 좁고 낮게 형성 되어있다. 전단 영역은 미세 홀의 직경이 작아질수록 두 부분으로 확연하게 나누어지며, 특이할만한 점은 직경 25 μm 미세 홀의 밑면(Fig. 4-(d))에서는 파단 영역이 관찰되지 않는다.

Fig. 5 는 미세 홀의 자세한 관찰을 위하여 황동 시편을 정밀 절단하여 관찰한 사진이며 Fig. 5-(a), (c)는 미세 홀의 윤곽, Fig. 5-(b), (d) 는 미세 홀의 내 벽면을 보여준다. 직경 25 μm 미세 홀(Fig. 5-(a))을 보면 일반적인 홀들과 다르게 윗부분이 아랫부분에 비해서 넓고 롤오버가 존재하는 부분이 위쪽으로 올라간 것을 확인할 수 있는데 이것은 홀의 크기가 작아지면서 나타나는 현상이 아닌 펀치의 형상에 의한 결과라 생각된다. Fig. 2-(a)를 보면 직경 25 μm 의 펀치가 약 1° 테이퍼 형상을 하고 있다. Fig. 5-(c), (d)에서 직경 100 μm 미세 홀은 롤오버, 전단 영역, 파단 영역, 그리고 버가 명확하게 관찰되는 등, 수 mm 이상의 홀과 매우 비슷한 모습을 하고 있지만 Fig. 5-(a), (b)에서 직경 25 μm 미세 홀은 파단 영역이 관찰되지 않으며 슬립에 의한 전단 영역이 버

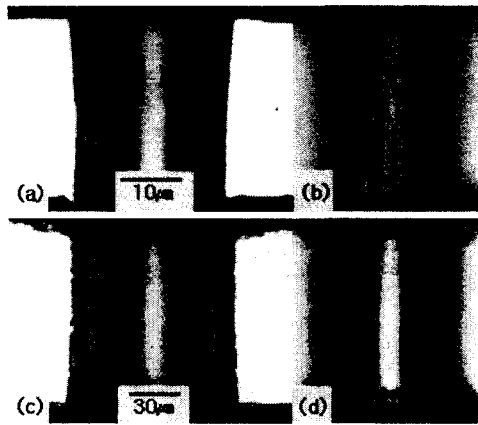


Fig. 5 Edge profile and wall shapes of brass :
(a)(b) Φ 25 μm (c)(d) Φ 100 μm

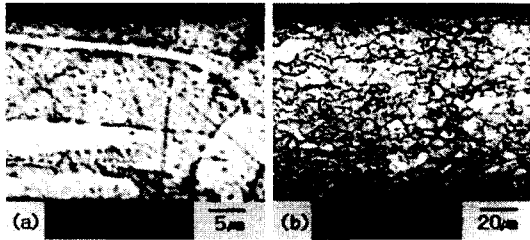


Fig. 6 Microstructure of brass :
(a) t 25 μm (b) t 100 μm

가 생성된 곳까지 넓게 나타나 있다. 또한 직경 100 μm 의 미세 홀의 경우 밑 부분의 직경이 파단에 의해서 다이 직경만큼 넓어진 것에 반해서 직경 25 μm 미세 홀은 밑 부분까지 수직으로 펀치 직경과 동일한 홀을 갖는데 이것은 파단이 발생하지 않고 스크랩이 분리될 때까지 전단 과정만 발생한 것을 의미한다. 이것은 변형 속도와 미세 결정 조직의 상대적 크기 차이에 의한 결과라 예상되어지며 앞으로 연구가 계속되어야 할 것이다. Fig. 6은 황동 소재의 미세 결정 조직을 보여주는데 두께 25 μm 황동 소재(a)의 경우 두께방향으로 평균 4개의 결정립이 존재하며 두께 100 μm 소재의 경우 평균 20개 이상의 결정립이 존재한다. 이러한 결정립의 상대적 크기 차이가 홀 형상에 영향을 준 것으로 예상된다.

3.3 소재에 따른 미세 홀의 형상 변화

소재를 제외하고 다른 모든 조건을 같게 하여서 미세 홀 펀칭 실험이 수행되었으며 Fig. 7-(a),(c)가 황동, Fig. 7-(b),(d)가 스테인리스 스틸 소재의 윗면, 아랫면

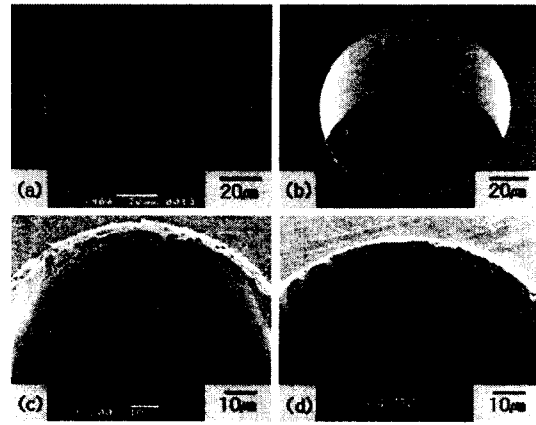


Fig. 7 SEM view of 100 μm micro punched hole :
(a) brass upper side (b) SUS 316 upper side
(c) brass lower side (d) SUS 316 lower side

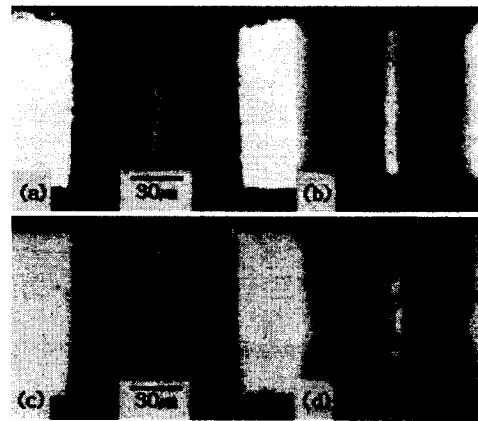


Fig. 8 Edge profile and wall shapes of 100 μm holes :
(a)(b) brass (c)(d) SUS 316

을 나타낸다. 황동은 스테인리스 스틸에 비하여 강도가 낮고 용융점이 낮은 금속 재료이며, 일반적으로 강도가 낮은 소재의 경우 소재의 파단이 늦게 시작되어 파단 영역이 더욱 좁게 나타나고 툴오버와 버는 크게 나타나는 것⁽⁶⁾과 같이 황동의 경우 스테인리스 스틸보다 버가 크고 파단 영역이 좁게 나타나는 것이 확인 된다.(Fig. 7-(c),(d)) 이러한 경향은 Fig. 8의 미세 홀 단면을 보면 잘 나타난다. 미세 홀의 두께를 100 %로 하여 각각의 영역을 수치로 나타내면, 황동의 경우 툴오버, 전단 영역, 파단 영역, 그리고 버가 차례로 7 %, 83 %(20+60), 10 %, 2 %이며, 스테인리스 스틸이 1 %, 75 %(27+48), 24 %, 2 %로 나타난다. (여기서 전단 영역은 충분한 온도 상승에 의한 슬립 라인이 관찰되는 부분과 그렇지



Fig. 9 Microstructure of 100 μm micro hole in diameter:
 (a) brass , 75 μm punch penetration
 (b) SUS 430 , 45 μm punch penetration

않은 부분으로 구분하였다.) 이것은 황동 소재의 경우 스테인리스 스틸에 비해서 펀칭 가공 시 전단 변형이 일어나기 까지 상대적으로 많은 소성 변형이 발생해 넓고 깊은 물오버가 형성되고, 전단이 시작되면서 슬립이 발생하기까지 적은 시간이 걸리며 파단은 더욱 늦게 발생하여 좁은 파단 영역을 형성하는 것을 의미한다.

4. 전단 파괴 거동 분석

3 절에서는 동일한 공정 조건하에 다양한 실험을 수행하여 미세 홀 형상의 기하학적인 관점에서 두 가지 분류 - (1) 홀의 크기에 따른 홀 가공 형상, (2) 소재의 재료에 따른 형상 - 에 의한 비교 작업을 하였다. 이 절에서는 간략하게나마 결정학적인 측면에서 홀 가공시의 전단 파괴 거동을 분석하고자 한다. 앞서 Fig. 3에 구분했듯이 홀 펀칭 가공 시 홀의 두께 방향으로 물오버 영역, 전단 영역, 파단 영역, 버의 네 부분으로 나누는 것이 일반적이므로 이를 기준으로 설명하고자 한다.

물오버 영역의 경우 전단되기 전 펀칭에 의해 소재에 가해지는 압축에 의해 전단부 좌우에 걸쳐 결정립이 연신되는 현상이 관찰되며 이는 황동, SUS 304, SUS 430에서 모두 확인된다. 다만 같은 스테인리스 스틸의 경우 오스테나이트 계열의 SUS 304가 페라이트 계열의 SUS 430보다 더 연신되는 것으로 나타난다. 이는 유기변태에 의해 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태하여 보다 좋은 연신율을 보이기 때문이다. 그러나 펀칭 가공이 더 진행되면 이러한 현상은 보이지 않게 된다. 높은 변형률 속도로 인해 전단 변형부의 온도가 단열 전단(adiabatic shear) 현상으로 상승하여 유기변태점(Md)보다 높아져 더 이상의 마르텐사이트 변태가 일어나지 않기 때문이며 이후로는 전단 파괴가 일어나 전단 영역으로 진행된다. 다만 전단 영역으로 진행되기 전에 나타난 결정립의 연신 현상과 더불어 발생한 연성파괴는 홀

의 상층부에 이로 인한 홈 -이는 연성 파괴의 원인인 기공이나 2차 석출물 등의 흔적으로 간주 된다 - 을 남기게 되며 이런 현상은 세 가지 소재 모두에서 보인다.

전단 영역에서는 황동과 스테인리스 스틸의 경우 다른 거동 양상을 보이며 같은 계열의 SUS 304와 SUS 430은 거의 유사한 기구로 전단이 관찰된다. Fig. 9에서 황동의 경우(a) 전단 영역이 시작되는 곳에 화이트 존(white zone)이 관찰되며 이는 황동이 반 용융 상태로 변했다는 증거로 전단부의 온도가 열적 연화(동적 재결정) 현상이 발생하는 $0.5 T_m$ 이상으로 상승했음을 의미한다 (물론 $0.5 T_m$ 이라는 재결정 시작 온도는 변형률 속도가 10^2 sec^{-1} 이하에서만 타당하게 받아들여지며, 그 이상의 변형률 속도에서는 재료와 공정 조건에 따라 달라지므로, 황동 실험의 경우에서도 재결정 온도가 $0.5 T_m$ 이하 혹은 이상일 수도 있다). 다만 화이트 존의 존재는 동적 재결정 핵의 생성보다는 펀칭 후 급냉(비슷한 공정인 절삭과정에서 $0.5 T_m$ 이상으로 상승한 온도가 상온으로 냉각되는 데 걸린 시간은 불과 수십 μs 이다⁷⁾)에 의한 전단부의 비결정질화로 받아들여진다. 반면 스테인리스 스틸의 경우(b)는 전단부의 온도 상승이 황동과 달리 $0.5 T_m$ 에 이르지 못하여 열적 연화 과정이 아닌 기하학적 연화 과정(소재의 집합조직의 변화로 인한 전단 방향으로의 슬립 현상의 용이화)에 의한 전단 파괴 거동을 보이는 것으로 관찰된다.

파단 영역의 경우도 황동과 스테인리스 스틸의 거동은 구별된다. Fig. 8에서 황동의 경우(b) 열적 연화 현상으로 대표되는 전단 영역의 특성으로 인해 파단 영역보다는 전단 영역이 홀의 아래 면까지 관찰된다. 반면 스테인리스 스틸의 경우(d) 아래 다이 접촉부에서도 소재의 위 부분에 나타나는 것과 유사한 연성 파괴가 진행되어 이 부분이 위 부분의 전단 영역과 맞닿게 되고 펀치와 다이의 직경 차에 해당하는 양만큼 파단이 발생하게 된다. 이 경우 연성 파괴라기보다는 크랙에 의한 파단으로 추정된다.

버는 세 가지 소재 모두에서 관찰되며 이는 앞서 언급한 바와 같이 홀의 위 부분에서와 같은 원리로 아랫부분에서도 연성파괴가 일어난 후 펀치에 의해 그 부분이 홀의 아래 외곽으로 다시 밀려나기 때문에 발생한다.

지금까지 설명한 재료에 따른 전단 파괴 거동은 50~100 μm 크기의 홀 가공 형상에 관찰된 것이고 25 μm 의 경우에는 전술하였듯이 결정립의 크기가 소재의 두께와 비슷해져 지금까지의 설명에 사용된 다결정체 이론과는 다른 설명이 요구되며 그 거동 양상은 많이 달라진다. 변형률 속도 또한 많이 증가하게 되어 열적 연화 현상이

더 중요한 기구가 되며, 이로 인해 황동의 경우 파단 영역이 거의 보이지 않게 된다. 다만 변형률 속도의 증가로 인해 앞서 적용된 고전적 의미의 열적 연화(동적결정) 현상이 아닌 새로운 재결정 모델이 적용되어야 할 것이다. 스테인리스 스틸의 경우는 여전히 열적 현상이 전단 기구로 작용하지 않았으나 두께 방향으로 두 세 개의 결정립이 분포하여 십여 개의 결정립이 분포했을 때보다 기하학적 연화 현상이 우세하게 되어 황동의 실험 결과와 마찬가지로 파단 영역을 거의 관찰되지 않았다.

5. 결론

직경 25 μm ~ 100 μm 의 미세 홀을 가공하여 높은 변형 속도 영역에서의 홀의 크기, 시편 재료에 따른 미세 홀 형상 변화를 관찰해 보았다. 3 절에서는 홀 형상의 기하학적인 측면에서 실험 결과물의 비교 작업을 수행하였고 4 절에서는 결정학적인 측면에서 미세 홀 전단 파괴 거동을 분석하였는데 내용은 다음과 같다.

- (1) 대부분의 미세 홀은 수 μm 이상의 기존의 홀과 유사하게 롤오버 영역, 전단 영역, 파단 영역, 버로 이루어져 있지만, 기존의 수 mm 이상의 홀에 비해 전단 영역이 넓게, 파단 영역은 좁게 나타나는 특징을 보여준다.
- (2) 직경 25 μm 미세 홀의 경우, 직경 100 μm 미세 홀과는 다르게 파단 영역이 관찰되지 않는데 이것은 빠른 가공 시간, 높은 변형 속도, 그리고 시편 두께에 상대되는 결정립 크기에 의한 영향으로 보인다.
- (3) 스테인리스 스틸보다 상대적으로 강도가 낮고 용융점이 낮은 황동 소재의 경우 롤오버와 보가 크게 나타나며, 전단 영역은 넓게, 파단 영역은 좁게 나타난다.
- (4) 황동의 경우 전단 영역에서 화이트 존이 관찰되는데 이는 황동이 반응용 상태로 변했다는 증거로 열적 연화 과정에 의한 전단 파괴가 발생함을 의미하며, 스테인리스 스틸의 경우 기하학적 연화 과정(소재의 집합조직의 변화로 인한 전단 방향으로의 슬립 현상의 용이화)에 의한 전단 파괴 거동을 보인다.

후 기

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.

참 고 문 헌

- (1) M. Samuel, 1998, "FEM simulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process", Journal of Materials Processing Technology, Volume 84, Issues 1-3, pp. 97-106
- (2) Etienne Taupin, Jochen Breitling, Wei-Tsu Wu and Taylan Altan, 1996, "Material fracture and burr formation in blanking results of FEM simulations and comparison with experiments", Journal of Materials Processing Technology, 59, pp. 68-78
- (3) S. K. Maiti, A. A. Ambekar, U. P. Singh, P.P. Date and K. Narasimhan, 2000, "Assessment of influence of some process parameters on sheet metal blanking", Journal of Materials Processing Technology, 102, pp. 249-256
- (4) K. Lange, 1985, "Handbook Of Metal Forming, Piercing and Blanking", McGraw-Hill, New York
- (5) Metal Handbook, 1988, "Forming and Forging", ASM, vol. 14
- (6) B. Y. Joo, S. I. Oh and B. H. Jeon, 2001, "Development of Micro Punching System", Annals of the CIRP, vol. 50, pp. 191-194
- (7) S.H. Rhim, 2002, "A Study on Dynamic Softening Process during Hot Work of Metal", Doctoral Thesis, Seoul National University