

탄성충돌을 이용한 운동량 보존형 마이크로 펀치 시스템의 개발

장인배*** · 장현철* · 최근형** · 김병희*** · 김현영***

(2003년 2월 3일 접수)

The Development of Momentum Conservation Type Micro Punch System using Elastic Collision

I. B. Chang, H. C. Jang, G. H. Choi, B. H. Kim and H. Y. Kim

Abstract

In this study, the momentum conservation type punching mechanism for micropunching system was developed to avoid the punch failure in the misaligned status between the punch and die. The punching energy can be precisely controlled by the falling height of the projectile mass and the intermediata mass, which contacts with the punch, transmit the energy to the punch with the same contact condition. The potential energy of the projectile mass is converted to kinetic energy at the light weight punch that the projection speed into the sheet metal workpiece can be accelerated. The burr formation characteristics for the alignment conditions and for the projection speeds are investigated to verify the feasibility of the proposed punching mechanism.

Key Words : Micro Punch, Momentum Conservation, Burr, Misalignment

1. 서 론

최근 들어 MEMS에 관련된 기술의 급격한 진보는 다양한 마이크로-메조(meso) 스케일의 기기들을 도출하고 있다. 하지만 대부분의 MEMS관련기기들은 실리콘(Si) 재료의 취성 때문에 그 수명의 한계를 안고 있어 운동이나 강성이 필요한 부품에서는 여전히 금속 박판을 모재로 사용하고 있으므로 금속 박판의 마이크로 펀치에 대

한 관심은 그 어느 때보다 높은 상황이다.⁽¹⁻²⁾ 일반적으로 마이크로 펀칭 시 부정렬(misalignment)은 공구 파손의 주요 인자로, 고가의 펀칭 공구 손실을 초래하고 새로운 공구 세팅에 많은 시간이 소요된다.⁽³⁾ 기존의 펀칭 방식은 직선이송 시스템 등을 사용하여 펀치를 다이 방향으로 단순 이송을 하여 펀칭을 수행하기 때문에 부정렬 발생 시 공구의 파손을 초래하게 된다. 본 연구에서는 제안된 운동량 보존식 마이크로 펀칭 시스템에서는

* 강원인력개발원 치공구설계과
** 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학과
*** 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

강구를 낙하시켜 매개질량에 충돌시켜 위치에너지를 운동에너지로 전환시키고, 매개질량은 일정한 접촉조건 하에서 이 에너지를 다시 펀치에 전달하는 새로운 마이크로 펀칭 메커니즘을 제안하였다. 이 펀칭방식의 타당성을 검증하기 위하여 펀치와 다이 사이의 정렬조건 변화와 펀치의 입사속도 변화 등의 펀칭조건 변화에 따른 금속 박판에서의 버(burr) 형성 특성 변화를 고찰하였다.

2. 마이크로펀치 제작

2.1 마이크로 펀치 이론

펀칭 가공 후에 발생하는 버는 자동화된 생산라인에서 제품의 정밀도를 지배하는 주요 인자로, 버 발생의 최소화는 펀칭 공정에서 가장 중요한 가공 품질의 척도라 할 수 있다.⁽⁴⁾ 특히, 전자부품이나 의료기기용 부품의 경우, 대부분 박판 스테인리스와 같은 연성이 강한 난삭재이기 때문에 버 형성이 활발하게 이루어진다.⁽⁵⁾ 박판 성형시 형성된 버는 다음과 같은 몇 가지 특징을 갖게되는데, 첫째, 박판의 크기가 얇을수록 강구와 다이 사이의 간극이 작아짐으로서 소성 변형량이 작아지고 이로부터 발생하는 버의 크기도 매우 작아지게 된다.⁽⁶⁾ 0.1mm 두께의 판재 펀칭 시 펀칭 공구와 다이 사이의 간극이 박판 두께의 10% 정도인 경우 간극은 대체로 10 μ m 이하의 수준이며, 따라서 버의 크기도 대체로 이 값보다 작은 것으로 예측된다.

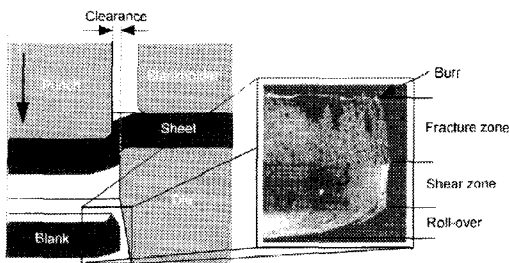


Fig. 1 The blanking process with an indication of the different zones determining the product shape⁽³⁾

두 번째로 전단 가공의 결과 판재의 단면은 Fig. 1에 서와 같이 처짐(roll over), 전단(shear zone), 파단(fracture surface) 및 버(burr)의 네 부분이 형성되며 특히, 버의 단면은 파단면 아래에 위치하므로 거칠고 불규칙한 파단면의 특성상 매우 불규칙하고 거친 면을 나타낸다. 세 번째로 파단면의 특성상 버는 매우 예리하고 취약한 특성을 갖는다.^(5,8) 급형의 수명을 결정하기 위하

여 주로 제품에서 발생하는 버의 크기를 인자로 사용하기 때문에 버의 발생 정도는 강구의 가격이 고가이고 펀치 다이간 정렬의 중요성이 다른 어느 펀칭공정에서보다 중요하다. 중요한 마이크로 펀칭의 경우에도 버의 생성 정도와 그 크기는 펀칭 공정의 양호성을 판정하는 매우 중요한 판단 인자이다. 따라서, 버의 크기 측정을 위한 다양한 시도가 수행되고 있다.^(6-7,9) 본 연구에서는 펀치와 다이 사이의 정렬조건 변화와, 펀칭 속도에 따른 버의 생성 특성을 고찰하였다.

2.2 마이크로 펀치의 펀칭력 전달

박판의 마이크로 펀칭에는 매우 미소한 전단력 만이 소요되기 때문에 일정한 전단력을 펀치에 가하는 것은 펀치의 좌굴을 방지하면서 안정적으로 펀칭을 수행하기 위한 기본 조건이다. Fig. 2 에서와 같이 높이 h에서 자유낙하 하는 질량 m인 강구의 위치 에너지는 $m \cdot g \cdot h$ 로 주어진다. 이는 정지해 있는 질량 m_1 인 매개 질량(intermediate mass)에 속도 v로 충돌하게 된다. 이 때

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1)$$

의 관계를 갖는다. 자유낙하 된 강구와 질량이 m_1 인 매개질량의 충돌은 다음의 식에 지배를 받는다.

$$m \cdot v = \eta_1 \cdot m_1 \cdot v_1 \quad (2)$$

양자간의 충돌을 완전 탄성충돌로 가정한다면 충돌 효율 $\eta_1=1$ 이나 실제적으로는 매개질량을 유도하고 있는 가이드와의 마찰력이나 재료 감쇠 등에 의하여 손실이 발생하게 된다.

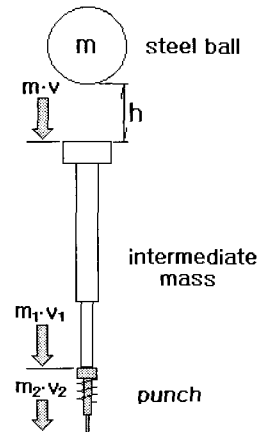


Fig. 2 The punching force transmission mechanism

펀치와 펀치 가이드 사이에는 약한 스프링이 설치되어 펀치와 매개질량 사이에 접촉조건을 형성한다. 자유낙하된 강구에 의하여 운동량을 전달받은 매개질량은 낙구와 펀치 사이에서 순간적으로 펀치에 운동량을 전달하게 된다. 스프링의 예하중을 무시하고 펀치와 매개질량 사이에 단순히 운동량의 전달만이 발생한다고 가정하면 질량이 m_2 인 펀치의 초기 펀칭속도 v_2 는 다음 식에서 구할 수 있다.

$$m_1 \cdot v_1 = \eta_2 \cdot m_2 \cdot v_2 \quad (3)$$

따라서 매개질량이 강제인 경우, 매개질량은 강구의 위치에너지를 운동에너지로 변환시켜 펀치에 전달하는 역할을 수행함을 알 수 있다. 에너지의 손실을 최소화하기 위하여 매개 질량을 매우 작게 만들어 단순히 강제 충돌 요소로만 사용하기도 한다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

2.3 마이크로 펀칭 시스템의 구성

매개 질량을 통해 강구의 운동량을 펀치에 전달하는 운동량 전달방식의 펀칭 메커니즘을 활용하기 위해서 항상 일정한 높이에서 안정적으로 강구를 낙하시킬 수 있는 낙하기구와 약한 예압 하에서 자유질량과 펀치가 상호 접촉을 유지할 수 있는 메커니즘, 그리고 시편에 예압을 가하여 시편의 휨을 방지하기 위한 펀치 패드와 다이 사이의 이송 메커니즘, 그리고 펀치와 다이의 미세 얼라인먼트 조절 메커니즘 등을 구현하였다.

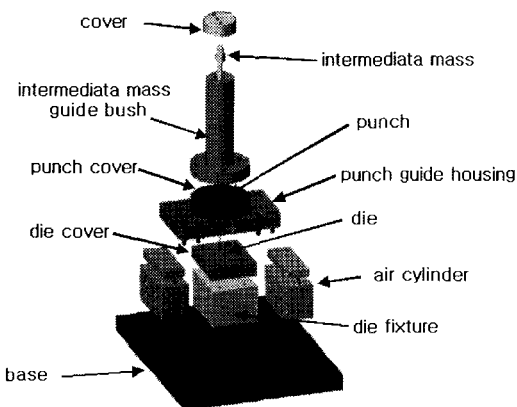


Fig. 3 Schematics of the micro punching system

펀칭 시스템은 Fig. 3에서와 같이 매개질량과 펀치 및 이들을 가이드 하는 부시, 그리고 펀치와 다이 사이를 여닫을 수 있는 공압 실린더를 이용한 이송 시스템 등으로 구성되어 있다.

강구와 매개질량, 펀치 및 박판 금속사이의 펀칭에너지 전달관계는 Fig. 4의 펀칭 시스템 단면도에서 설명되어 있다. 낙구는 매개질량의 상부 머리 부분을 타격하여 낙구의 위치에너지를 매개질량의 운동 에너지로 변환시킨다. 펀치와 펀치 가이드 부시 사이에는 경하중 스프링이 설치되어 펀치 상단과 봉 형상인 매개질량의 하단 사이에 접촉조건이 유지되도록 한다. 따라서, 낙구의 펀치와 매개질량 사이에서의 운동 에너지 전달시 항상 일정한 전달조건이 유지된다. 펀치와 매개질량을 가이드하는 블록은 일체로 되어 하부 다이에 대해 상하로 이동이 가능하며, 둘 사이에 펀칭용 박판 시편을 위치시킬 수 있다.

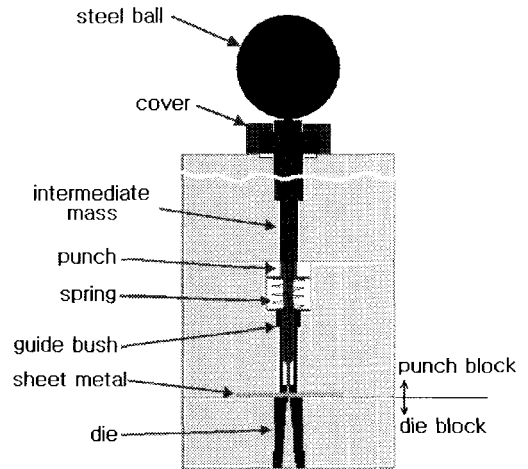


Fig. 4 The crosssection of the punch and die elements

실험을 위해 사용된 펀치는 펀치부 직경이 500 μ m인 Mitsumi 사의 초경블록 펀치를 사용하였고 다이는 내경 520 μ m인 버텐다이를 사용하였다. 따라서 펀치와 다이사이의 반경방향 간극은 10 μ m로 비교적 큰 값을 사용하였으며 일반적으로 마이크로 펀칭 시 반경방향 간극은 수 미크론 이하의 매우 작은 값이므로, 펀칭 시 발생하는 버의 측정이나 버 발생 경향의 관찰 등이 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서 제안하는 운동량과 탄성력 전달특성의 변화에 따른 버 형성특성의 변화양상을 관찰하기 위해서는 실제 마이크로 펀칭 과정에서보다 간극이 큰 다이를 채용해야만 한다.

펀치 블록을 수직으로 이동하여 판재를 고정/추출하기 위해서 Fig. 5에 도시된 것과 같은 한 쌍의 가이드블록이 공압 실린더를 사용하였다. 펀치와 다이 사이의 정렬조절을 위해서 Fig. 6에서와 같이 펀치 하우징의 x-y 방향에 불

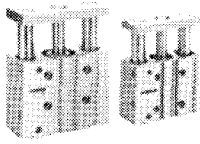


Fig. 5 Air cylinder with guide

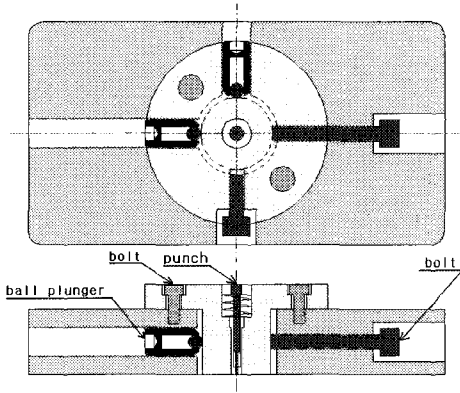


Fig. 6 Schematics of the Alignment adjust mechanism

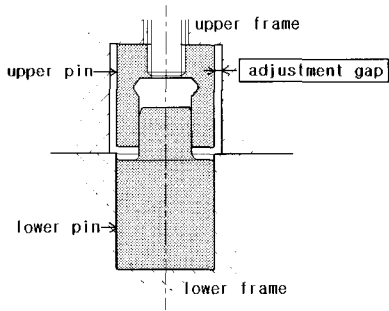


Fig. 7 Locating straight pin set

플런저와 볼트로 이루어진 수평이송 및 고정 시스템을 설치하여 하단 펀치 다이에 대해서 상단 펀치부를 상대적 이동시켜 정렬조절을 수행하였다. 공압 실린더에 의해서 상단 펀치 부분은 수직 왕복운동을 하게되는데, 수직방향이송의 반복 위치 정밀도를 확보하기 위하여 Fig. 7에서와 같이 동심도가 3 μ m인 Locating straight pin 의 상하 조합을 이용함으로써 수직왕복운동 시 반복 정밀도를 확보할 수 있었다.

2.4 마이크로 펀칭 시스템의 구동

마이크로 펀칭 시스템은 크게 구동부와 제어부로 나눌

수 있으며, 제어부는 Fig. 8에서와 같이 낙구의 제어를 위한 한 쌍의 전자석, 무접점 릴레이, 그리고 마이크로프로세서로 이루어진다. 무접점 릴레이를 사용하여 솔레노이드 밸브를 제어하여 공압실린더를 구동하므로 서 펀치 블록의 상/하 이송을 구동한다. 낙구의 낙하와 회수를 위해서는 솔레노이드 코일을 사용하였고 전체 공정은 PIC16C74 마이크로컴퓨터를 사용하여 제어하였다.

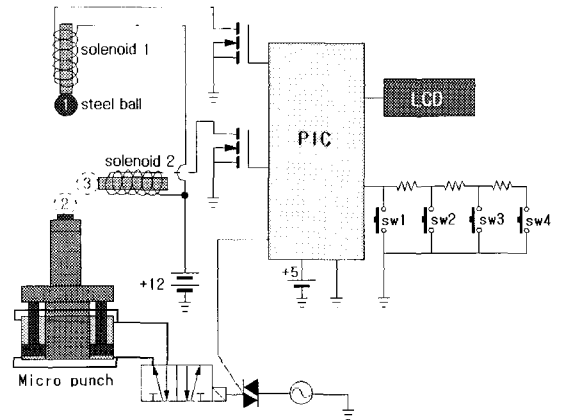


Fig. 8 Schematics of solenoid driving circuit

펀칭 공정에서 낙구가 매개질량의 상단에 충돌한 후 되튀겨 재충돌하는 것을 방지하기 위하여 낙구의 낙하 높이에 따라 1번 솔레노이드가 낙구를 떨어트리고 일정한 지연시간이 경과한 후 2번 솔레노이드를 작동시키도록 솔레노이드 제어 알고리즘을 구성하였다.

3. 펀칭 실험과 결과의 고찰

3.1 정렬조건 변화에 따른 펀칭 특성 변

펀치와 다이 사이의 정렬이 완벽하게 조절되었을 때 판재의 펀칭에 소요되는 에너지는 최소화이며, 양자간의 정렬이 어긋나기 시작하면서 펀칭에 소요되는 에너지는 점차로 증가하게 된다. 이를 검증하기 위하여 우선, 다양한 방법으로 펀치와 다이 사이의 정렬조절을 수행하여 버 발생이 원주방향으로 균일하게 발생하는 위치를 찾아내었다. 그리고 낙구의 낙하 높이를 점차로 줄여 펀칭이 가능한 최소 높이를 도출하였다. 마지막으로, 약간의 부정렬 조건 하에서도 펀칭이 가능하도록 하기 위하여 낙구의 높이는 최소 낙하 높이에서 상향 조절한 후 다음의 정렬조건 실험을 수행하였다.

정확한 운동량의 산정을 위해서는 낙구와 매개질량 및

펀치 사이에서의 에너지 전달 효율을 정화하게 도출할 수 있어야만 한다. 그러나 본 논문에서 구성한 시험기는 이러한 작동효율을 측정할 수 있는 수단이나 방법에 대한 고려가 없으므로, 일단, 100%의 위치에너지가 운동 에너지로 변환되어 펀치로 전달된다고 가정하여 작동속도를 추산하였다. 따라서, 계산된 펀칭 속도는 단지 상대적인 크기 비율만이 의미가 있을 뿐이다. 예를들면, 200mm 높이에서 직경이 25.4mm 인 강구를 낙하시켜 펀치를 구동한 경우 위치 에너지가 모두 운동에너지로 전환된다면 (4) 식에서와 같이 펀치의 입사 속도는 1.98m/s가 얻어진다. Fig. 9~Fig. 13에서 펀치의 입사속도를 표시하기 위하여 (4) 식을 사용하였다.

$$mgh = 0.068(kg) \times 9.81(m/s^2) \times 0.200(m) = 0.133(J)$$

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.200} = 1.98(m/s) \quad (4)$$

매개질량 및 펀치는 가이드에 의해 유도되며, 경량이기 때문에 에너지의 변환과정에서 다량의 손실이 발생할 것으로. 예상되므로, 실제 운동에너지로 변환되는 효율은 매우 떨어질 것으로 예상되며, 이에 대해서는 향후,보다 상세한 고찰이 필요하다.

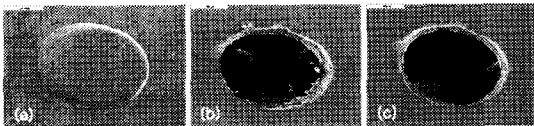
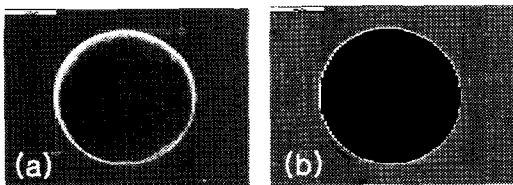


Fig. 9 Relationship between the alignment and burr formations (h=200mm, v=1.98m/s)



(a) misaligned state (b) aligned state

Fig. 10 Alignment and punched shapes at the smallest punching energy (h=21mm, v=0.642m/s)

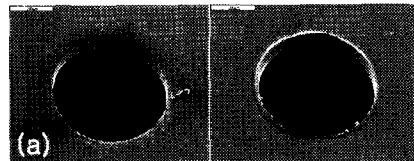
Fig. 9 (a)는 펀치와 다이 사이의 정렬 조절을 수행하기 전 상태로, 타공에 실패하였고, Fig. 9 (b)는 약간의 부정렬이 존재하여 한 쪽 방향으로 버가 치우쳐 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9 (c)의 경우, 펀치와 다이 사이의 정렬이 잘 맞아 버의 발생이 전체적으로 균일하고, 펀치와 다이 사이의 간극이 다이에 의해 눌린 자국도 원주 방향

으로 균일하게 발생하였다.

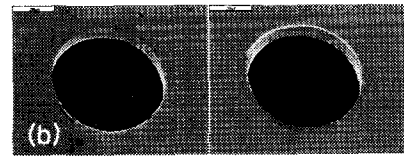
Fig. 10은 펀칭이 가능한 낙구의 최소 낙하높이인 21mm에서 펀칭실험을 수행한 결과이다. Fig. 10 (a)는 부정렬이 존재하여 타공이 실패한 경우의 시편 눌림 형상을 보여주는데, +y -x 방향으로 부정렬이 존재하므로 다이를 -y, +x 방향으로 이동함으로써 Fig. 10 (b)와 같이 정렬상태의 조절이 수행되어 타공에 성공하였으며, 버 형성도 최소화 할 수 있었다.

3.2 타격속도 변화에 따른 펀칭 특성 변화

낙구의 낙하높이 변화에 따라 나타나게 되는 타격 속도가 버의 발생량에 밀접한 관계가 있으며 Fig. 11에서와 같이 속도가 낮을 때보다 높을 때 물오버와 버의 발생량이 감소함을 실험을 통해서 확인 할 수 있었다.



(a) low punching speed (h=22mm, v=0.657m/s)

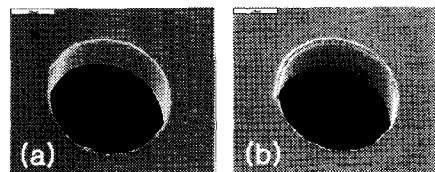


(b) high punching speed (h=200mm, v=1.98m/s)

Fig. 11 The front and rear shapes of the punched hole according to the punching speed variation

3.3 박판 재료와 두께에 따른 펀칭특성 변화

Fig. 12에서는 동일한 두께인 알루미늄과 구리 박판을 사용하여 펀칭실험을 수행하였는데 구리 박판 보다 알루미늄 박판에서 다소 작은 버의 발생과 매끈한 전단면의 형상을 보여주었다.



(a) aluminum(0.2mm) (b) copper(0.2mm)

Fig. 12 The burr formation characteristics according to the material variation (h=200mm, v=1.98m/s)

Fig. 13에서는 두께 0.05(mm), 0.1(mm), 0.2(mm)의 3가지 동판시편에 대한 타공 실험을 통하여 판재의 두께 변화가 버 형성에 끼치는 영향을 살펴보았는데, 판재 두께가 두께위 질수록 버 발생이 현저히 감소하며, 두께 0.2(mm)인 경우 버 발생이 최소화 됨을 발견하였다. 따라서 펀칭 가공 시 판재 두께에 따라 펀치와 다이 사이의 상대적인 간극 조절이 필요함을 알 수 있었다.

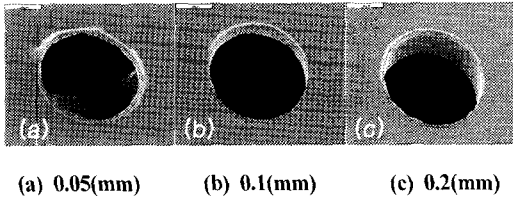


Fig. 13 The burr formation characteristics according to the sheet thickness(Copper, h=200mm, v=1.98m/s)

4. 결론

본 논문에서는 탄성충돌을 이용한 운동량 보존방식의 마이크로펀칭 시스템을 제안하였으며, 마이크로 펀치를 사용한 펀칭 공정의 실험적 연구를 통하여 제안된 방법의 타당성을 고찰하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 펀칭 시 필요한 최소한의 운동에너지만을 운동량의 형태로 공구에 전달하여 박판의 펀칭 가공을 수행할 수 있는 마이크로 펀칭 기구를 제안하였다.
- (2) 펀칭속도가 낮을 때보다 높을 때 버의 발생량이 감소함을 관찰하였다. 따라서, 버의 발생을 감소시키기 위하여 펀칭속도의 증대는 필수적이지만, 특정 속도 이상으로의 증가는 펀칭공정의 정밀도 개선보다는 공구의 파손을 초래할 수 있다.
- (3) 펀칭재료에 따른 버 발생특성 실험결과, 알루미늄이 구리보다 다소 좋은 전단면을 보여주면서 버의 발생도 작음을 확인 할 수 있었다.
- (4) 구리박판의 두께 변화에 따른 버 발생특성 실험결과 박판의 두께에 대한 펀치와 다이 사이의 간극비가 가공인자와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원 차세대 신기술 개발사업 중 Milli-Structure 생산기술개발사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) F. Yang, J. C. M. Li, 1995, "Impression creep by an annular punch", *Mechanics of Materials*, 21, pp. 89~97.
- (2) L. C. Chan, T. C. Lee, B. J. Yu, W. M. Cheung, 1998, "Experimental study on the shear behaviour of fine blanking versus bar cropping", *Journal of Material Processing Technology*, 80-81, pp. 126~130.
- (3) T. A. Kals, R. Eckstein, 2000, "Miniaturization in sheet metal working", *Journal of Material Processing Technology*, 103, pp. 95~101.
- (4) B. Y. Joo, S. I. Oh, B. H. Jeon, 2001. "Development of Micro Punching System", *Annals of the CIRP*, Vol. 50/1, pp. 191~194.
- (5) 전기찬, 1993. "박판급속의 성형 이론과 실제", 반도출판사.
- (6) 고성립, 1998. "블랭킹시 발생하는 미소 버의 효율적 제거를 위한 연구", 정밀표면가공 및 디버링 기술 워크샵(BEST K '98), pp. 19~45.
- (7) 홍남표, 김병희, 장인배, 김현영, 오수익, 2002. "마이크로 NCT에 의한 대칭형상 구멍의 전단 특성", 한국소성가공학회 2002년도 급형가공 심포지엄, pp. 285~291.
- (8) 최인수, 이상덕, 신관수, 이상석, 김철수, 2000. "기계공작법", 북두출판사.
- (9) 홍남표, 신용승, 최근형, 김병희, 장인배, 김현영, 오수익, 2001, "미세박판가공을 위한 마이크로 NCT 제작에 관한 연구", 한국정밀공학회 2001년도 추계 학술대회논문집, pp. 300~304.
- (10) X. Bao, Z. Chang, S. Sherrit, B. P. Dolgin, Y. B. Cohen, D. S. Pal, S. Du, T. Peterson, 2002, "Analysis and simulation of the ultrasonic/sonic driller/corer(USDC)", *Proceedings of SPIE Smart Structural Material Symposium*, pp. 4701~36.
- (11) S. Sherrit, B. P. Dolgin, Y. B. Cohen, D. Pal, J. Kroh, T. Peterson, 1999, "Modeling of Horns for sonic / ultrasonic applications", 1999 IEEE Ultrasonic Symposium, pp. 647~651.
- (12) S. Sherrit, X. Bao, Z. Chang, B. P. Dolgin, Y. B. Cohen, D. Pal, J. Kroh, T. Peterson, 2000, "Modeling of the ultrasonic/sonic driller / corer : USDC", *IEEE Ultrasonic symposium*, pp. 691~694.