미세 홀 펀칭 기술 개발

• 오 수 익 ▌서울대학교 기계항공공학부, 교수
e-mail : sioh@snu.ac.kr

이 글에서는 본 연구실에서는 개발하고 있는 직경 25㎛의 미세 홀 펀칭 기술을 소개하고자 한다.

미세 홀 펀칭(micro hole punching) 기술은 직경 수십에서 수백 마이크론의 미세 홀을 초정밀 미세 금형을 이용하여 가공하는 기술이다. 미세 펀칭을 이용한 홀 가공은 여러 산업 분야에서 응용되는데 잉크젯 프린터 헤드, 노즐, IC 패키징에서 필요한 비아 홀(via hole), 연료 분사 노즐, 각종 센서와 필터 등의 미세 홀 등이 대표적인 예이다. 이러한 미세 홀을 가공하는 방법은 미세 홀 펀칭 기술 이외에도 미세 드릴 가공, 레이저 가공, 미세 방전 가공, 미세 초음파 가공 등 여러 가공법이 있지만 생산성과 비용 절감 그리고 가공 홀의 형상 반복 정도 등에서 볼 때 미세 홀 펀칭 기술은 큰 이점을 갖고 있다. 실제로 최근 산업 현장에서는 직경 100㎛ 내외 혹은 그 이상의 미세 홀이 펀칭 공정에 의해서 양산되고 있고 직경 수십 마이크론의 미세 홀 펀칭 기술 또한 활발히 연구되고 있다. 본 연구실에서는 직경 25㎛의 미세 홀 펀칭 기술을 개발하고 있고 이를 소개하고자 한다.

기술 개요 및 개발 방향 설정

홀 펀칭 가공법은 펀치를 다이 홀과 동심으로 정확히 정렬(alignment)한 후 가공물에 펀치를 하강하여 홀을 가공하는 전단 가공이다(그림 1 참고). 이때 펀치 반경과 다이 홀 반경은 다이 클리어런스(die clearance)만큼 차이가 난다. 일반적으로 펀칭 가공된 홀의 에지 형상은 롤오버(roll-over), 전단면(shear), 파단면(fracture), 버어(burr)로 나뉜다. 펀칭 홀 품질에 영향을 미치는 인자는 가공 소재 두께 대비 다이 클리어런스의 비, 펀치와 다이의 에지 품질 및 면 조도, 펀칭속도, 가공 소재, 블랭크 홀딩력 등 여러 인자들이 있고 가공하고자 하는 홀의 특성에 따라 적절히 선택되어야 한다.

파인 블랭킹(fine blanking) 공정에서는 소재 두께 대비 다이 클리어런스의 비(c/t)가 약 0.5% 근방에서 결정된다. 만약 두께 25㎛의 미세 박판 소재에 직경 25㎛의 홀을 파인 블랭킹 조건으로 펀칭 가공하기 위한 다이 클리어런스는 약 0.1㎛이다. 그러나 0.1㎛의 다이 클리어런스를 만족

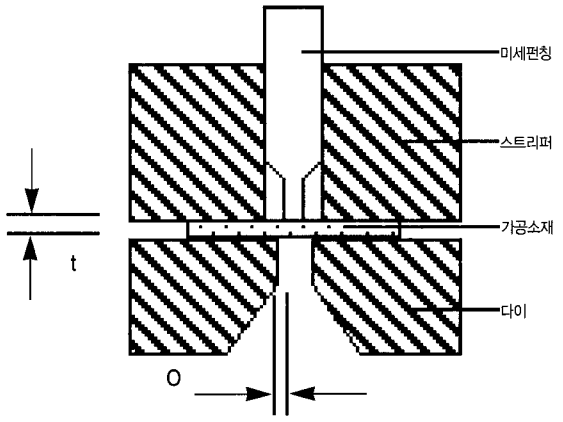


그림 1 미세 홀 펀칭 개념도

하는 홀 펀칭 시스템의 구현은 기술적으로 매우 어렵기 때문에 본 연구실에서는 일반 블랭킹(standard blanking) 조건에서 직경 25㎛의 미세 홀을 펀칭 가공할 수 있는 시스템을 개발하기 위해 노력하였다. 일반 블랭킹에서는 c/t가 5~10%에서 결정되며, 본 연구실에서는 c/t를 5%로 결정하였다. 이 경우 직경 25㎛의 미세 홀 펀칭시 다이 클리어런스는 약 1㎛이고 본 연구실에서 개발된 미세 홀 펀칭 시스템은 이를 만족시키기 위해서 세심히 설계되고 제작되었다.

25㎛이란 굵기는 사람 머리카락(평균 직경 약 100㎛)의 사분의 일 정도로서 육안으로 확인이 불가능한 매우 작은 굵기이다. 더욱이 펀치와 다이 홀 사이에 있을 수 있는 1㎛ 크기의 먼지와 홀 펀칭시 발생할 수 있는 금형의 열변형은 펀칭 홀의 품질에 악영향을 끼칠 수도 있다.

본 연구실에서 직경 25㎛의 홀 펀칭을 하기 위해 필요하다고 판단된 기술 및 정밀도를 생각해보면 다음과 같다. 첫째, 초정밀 미세 금형가공 기술이 확보되어야 한다. 금형재로 많이 쓰이고 있는 초경 합금과 같은 고 경도 소재에 대하여 치수 허용 공차 ±1㎛ 혹은 그 이하로 가공할 수 있는 초정밀 미세 금형 가공 기술이 요구된다. 둘째, 미세 펀치의 직진 정밀도 오차는 1㎛/25mm가 요구된다. 여기서 25mm가 결정된 이유는 펀치 팁과 다이 홀의 동심 정렬을 위해 본 연구실에서 개발한 상하 영상 획득 시스템 적용시 펀치 팁과 다이 홀 사이의 최소한의 거리이기 때문이다. 셋째, 펀치와 다이 홀의 동심 정렬 정확도가 1㎛ 이내에서 만족되어야 한다. 넷째, 반복 정도 1㎛ 이내의 정밀 이송장치가 필요하다. 마지막으로 미세 홀 펀칭 공정은 청정 환경에서 수행되어야 한다.

직경 100㎛ 내외의 홀 펀칭 금형에서는 펀치 수직운동시의 직진 정밀도 및 펀치와 다이 홀의 동심 정렬 정확도 보장을 위해서 스트리퍼(stripper) 금형이 쓰이고 있다. 스트리퍼의 역할은 홀 펀칭 전후에 가공물을 스프링력으로 고정함으로써 펀치의 삽입과 이탈을 용이하게 하고 스트리퍼 홀 내경과 펀치의 외경 치수 공차를 수 마이크론 이하로 관리함으로써 스트리퍼 홀 안으로 펀치를 정밀하게 가이드 해주는 것이다. 또 스트리퍼 플레이트와 다이 플레이트를 겹쳐놓고 스트리퍼 홀과 다이 홀을 동시에 가공하거나 스트리퍼 부싱과 다이 홀 부싱을 삽입하는 부싱 타입 금형을 가공하고 정밀하게 조립함으로써 펀치와 다이 홀의 고정도 동심 정렬을 확보할 수 있다. 이런 식으로 여러 개의 홀을 동시 펀칭할 수 있는 갱(gang) 타입의 금형을 제작하고 초정밀 가이드 포스트와 서브가이드 포스트를 채용하여 여러 개의 미세 홀을 가공할 수 있다. 그러나 직경 25㎛ 미세 홀 펀칭에서는 금형 조립 후 미세 펀치 수직운동의 직진 정도와 미세 펀치와 다이 홀의 동심 정렬 정확도 등 요구되는 정도를 보장하기가 매우 어렵다고 판단했다. 만약 이것이 가능하다 하더라도 홀 펀칭시 발생할 수 있는 금형의 열 변형이 문제가 될 수 있다. 따라서 본 연구실에서는 직경 25㎛ 홀 펀칭을 위해서 복잡한 갱 타입 금형을 피하고 하나의 미세 펀치와 다이 홀로 이루어진 단일 홀 펀칭 시스템을 개발하였다. 이 시스템에서는 초정밀 선형 가이드에 의해서 미세 펀치를 수직운동시키고 다이 홀이 가공되어 있는 다이 플레이트의 위치를 초정밀 이송장치에 의해서 수평방향으로 보정하여 펀치와 다이 홀을 능동적으로 정렬함으로써 시스템의 유연성이 극대화되었

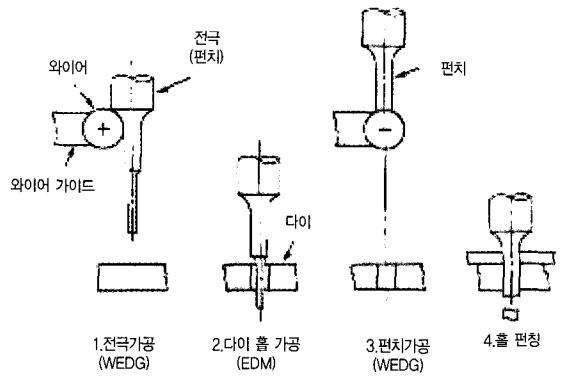


그림 2 마이크로 방전 가공에 의한 미세 홀 펀칭
(SME technical paper, MS90 - 307, 1990)

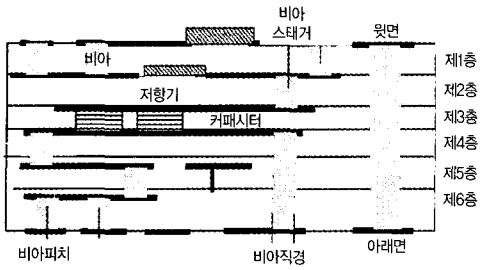


그림 3 저온동시소성세라믹 기술(LTCC)

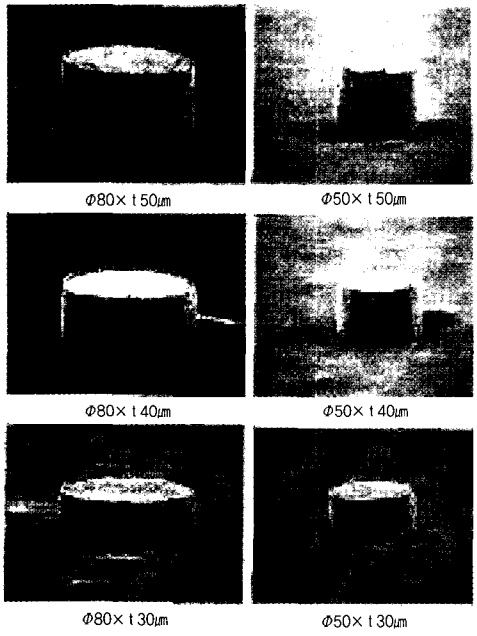
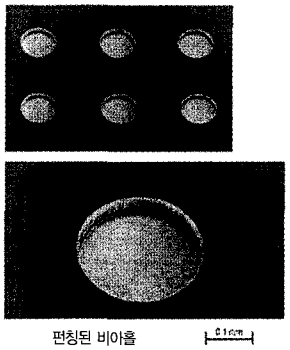


그림 4 미세 홀 펀칭에 의해 성형된 솔더 범프 디스크(18th IEEE/CPMT International, 1996, pp. 117~120)

다. 또 펀치의 정밀 가이드와 펀칭 전후 가공 소재를 고정하기 위해서 스트리퍼 금형을 이용하였다.

해외 기술 동향

그림 2는 일본 동경대학의 Masuzawa 교수에 의해서 연구된 미세 홀 펀칭 시스템을 보여 주고 있다. 이 시스템은 미세 방전 가공(micro EDM)기술을 이용하여 펀치 모양의 전극을 만들고 이를 이용하여 다이 홀을 방전 가공한 후 박판 소재를 삽입하고 펀치 모양의 전극을 이용하여 미세 형상을 펀칭 가공할 수 있다. 또 최근 일본 나고야 대학에서는 직경 14㎛의 실리콘 카바이드(SiC) 파이버를 펀치로 이용하고 중심부 두께 약 25~40㎛의 교각 모양의 구조강 다이 플레이트에 실리콘 카바이드 파이버를 단순히 하강하여 다이 홀을 피어싱(piercing)한 후 두께 8~17㎛의 금속 필름에 직경 14㎛의 홀 펀칭을 수행하였다. 위 두 방법은 펀치를 이용하여 다이 홀을 가공하기 때문에 펀치와 다이 홀의 동심 정렬이 정확히 보장되는 이점이 있다. 그러나 마이크로 방전 기술을 이용한 방법은 미세 홀을 펀칭하기 위해서 금형 교체시 펀치와 다이 홀을 마이크로 방전 가공으로 가공해야 하는 번거로움이 있고 SiC 파이버 펀치를 이용한 방법은 펀치를 하강하여 관통된 다이 홀을 만



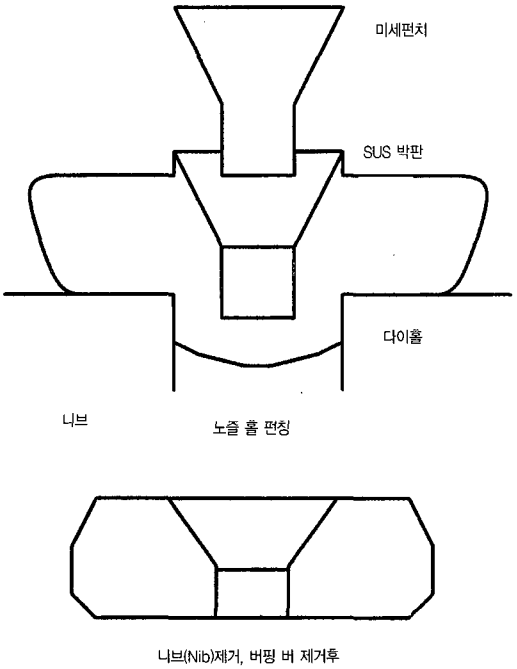


그림 5 미세 프레싱에 의한 잉크젯 프린터헤드 노즐 가공 (Method and apparatus for producing a nozzle plate of and ink-jet head printer, European patent application, EP 0 858 893 A2)

들어야 하므로 다이 재질이 구조강 같이 비교적 무른 재료에 국한되기 때문에 금형의 마모에 매우 취약할 수 있다.

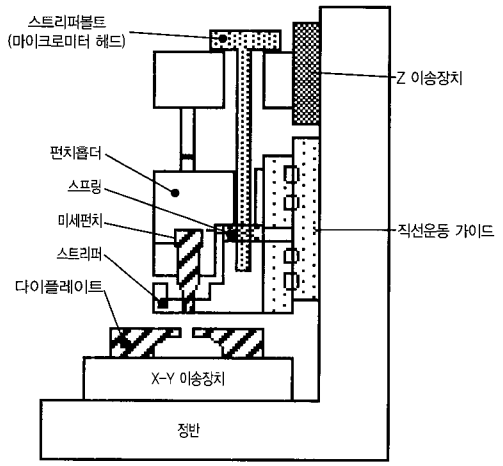
세계적으로 UHT, Yamato Seiko, Schneider & Marquard, Baccini 등의 장비 메이커들은 그들만의 기술과 노하우를 가지고 미세 홀 펀칭 기계를 제작하고 있다. 상업적으로 판매되는 미세 펀칭기의 많은 수가 비아 홀(Via hole)을 가공하는 용도로 제작되고 있다. 한 예로 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 최근 수동소자 집적화 기술에서 각광받고 있는 LTCC(low temperature co-fired ceramic, 저온동시소성세라믹) 기술에서 비아 홀은 각 층간 연결 통로에 해당됨을 알 수 있다. 현재 업계에서는 직경 100㎛ 내외 혹은 수백 마이크론의 미세 비아 홀이 세라믹 그린 시트(green sheet)에 펀칭 가공으로 양산되고 있다.

또 일본 NEC에서는 플립-칩 패키징(flip-chip interconnection)에서 마이크로 펀칭을 이용하여 솔더 범프 디스크(solder bump disk)를 성형하는 기술을 개발하였다. 다이 플레이트 밑에 모재를 위치시키고 펀칭가공 소재로 솔더를 사용하여 모재 위에 펀칭에 의한 부산물인 스크랩(scrap)을 떨어뜨림으로써 체적 정확도가 매우 높은 솔더 범프 디스크를 매우 저렴하고 효율적으로 얻을 수 있다. 그림 4는 미세 홀 펀칭에 의해서 형성된 솔더 범프 디스크의 여러 예이다.

한편 일본 후지쓰에서는 미세 프레싱(micro pressing)에 의해 잉크젯 프린터 헤드 노즐을 대량 생산할 수 있는 기술을 개발하였다. 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 팁 직경 약 30㎛의 노즐 모양의 미세 펀치와 직경 70~200㎛의 다이 홀을 이용하여 스테인리스 스틸 박판에 펀칭 한다. 펀치 팁 직경에 비해 다이 홀 크기가 매우 크기 때문에 프레싱에 의해 관통 홀이 가공되지 않지만, 미세 펀치에 의한 노즐 형상이 소재에 모사된다. 스테인리스 스틸 박판의 위, 아래 면을 갈아내고 버핑(buffing)하고 세척하여 직경 30㎛의 잉크젯 프린터 헤드 노즐을 가공할 수 있다. 여기서 직경 30㎛의 미세 펀치와 직경 70~200㎛의 다이 홀의 정렬은 정밀 조립 금형에 의해서 가능하기 때문에 수십 개의 노즐을 한 금형에서 가공할 수 있는 갱(gang) 타입 금형 제작이 가능하다.

미세 펀치와 미세 다이 홀 가공

미세 홀 펀칭 기술에서는 가공하고자 하는 홀의 직경과 동일한 크기의 미세 펀치와 그것보다 수에서 수십 마이크론 큰 직경의 다이 홀이 필요하다. 일반적으로 초미세 금형의 재질로 텅스텐 카바이드(WC) 초경 합금 소재가 많이 쓰이는데 이는 금형이 미세화됨에 따라 금형의 강성 및 내마모성이 중요하기 때문이다. 초경 합금 소재는 일반 기계 가공이 불가



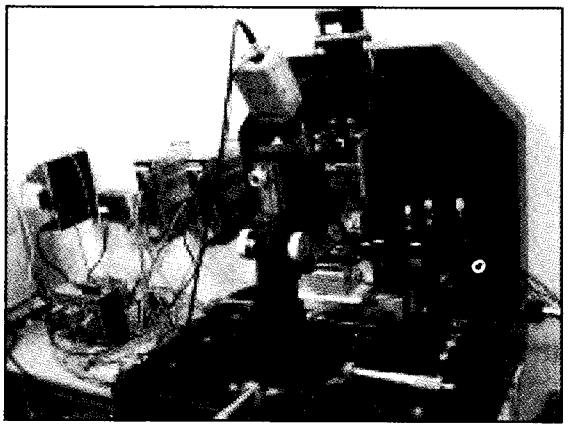
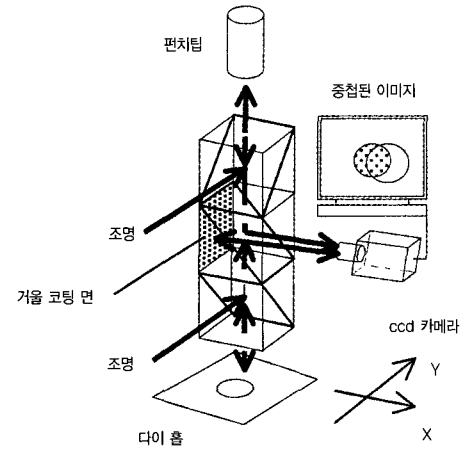
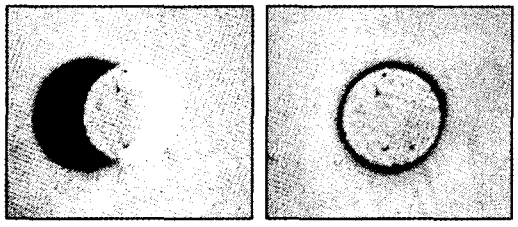


그림 6 개발된 미세 홀 펀칭 시스템

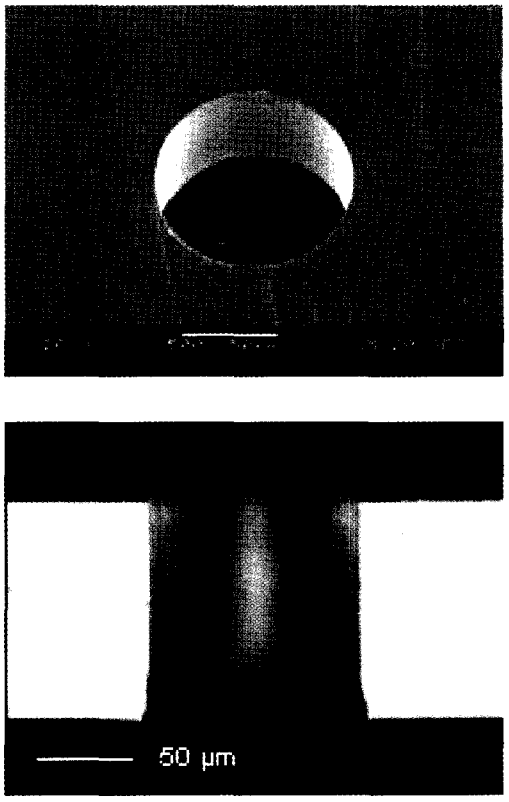


상·하 동시 영상 획득 시스템



정렬 전　　정렬 후

그림 7 상·하 영상 획득 시스템을 이용한 미세 펀치-다이 정렬 예



소재 : 스테인리스 스틸 (두께 100㎛)
펀칭 속도 : 150mm/sec
펀치 직경 : 100㎛
다이 직경 : 110㎛

그림 8 펀칭된 미세홀

능한 고경도 소재이다.

직경 수십 마이크론의 미세 홀 펀칭을 위한 미세 펀치는 단(step)이 있는 이경동심 형상이다. 미세 펀치의 첫째 단인 펀치 팁은 홀 가공을 위한 부분이고 둘째 단은 스트리퍼 홀에 의한 가이드 부분이고 셋째 단은 펀치 고정을 위한 펀치 머리 부분이다. 미세 펀치 팁 길이는 펀칭시 발생할 수 있는 펀치 하중에 대한 임계 좌굴(buckling) 길이보다 작게 설계하여야 한다. 초경 합금 미세 펀치는 다이아몬드 공구를 이용한 센터리스 그라인딩 공정으로 가공되고 있고 세계적으로 최소 직경 5㎛의 미세 펀치 팁을 가공할 수 있다고 보고되고 있다. 한편 마이크로 미세 축 방전 가공(wire electro discharge grinding)이나 전기 화학적 가공(electro chemical machining) 등을 이용하여 미세 펀치를 가공하는 것도 가능하다. 특히 전해 가공 개념의 전기 화학적 가공을 이용한 직경 수십 마이크론의 미세 축 가공은 기계 가공에 비해 매우 저렴하고 대량으로 미세 펀치를 가공할 수 있는 가능성이 있기 때문에 최근 들어 활발히 연구되고 있다. 본 연구실에서는 팁 직경 25㎛, 팁 길이 50㎛의 미세 펀치가 센터리스 그라인딩에 의해 제작되었고 펀치 재질은 텅스텐-카바이드 초경 합금이 사용되었다.

직경 25㎛의 미세 홀을 펀칭하기 위해서는 초경 합금 다이 플레이트에 직경 27㎛의 다이 홀을

가공해야 한다. 일반적으로 직경 100㎛ 이상의 초경 합금 다이 홀은 기존 방전 가공에 의해서 가공될 수 있다. 즉 방전 드릴로 홀을 관통하고 와이어 방전 가공으로 홀을 정밀하게 가공할 수 있다. 그러나 초경 합금 소재에 직경 수십 마이크론의 미세 다이 홀을 가공하는 것은 매우 어려운 일이다. 이를 위하여 마이크로 방전 가공이 쓰이는데 우선 미세 축 방전 가공에 의해서 미세 축을 가공하고 이를 전극으로 이용하여 직경 수십 마이크론의 미세 홀을 가공하는 방법이다. SARIX, Panasonic, 마이크로 리서치 등의 장비 메이커들은 이러한 개념의 마이크로 방전기를 시판하고 있다. 본 연구에서는 서울대학교 기계항공공학부 정밀공학실험실에서 마이크로 방전으로 가공된 직경 27㎛의 초경 합금 다이 홀이 사용되었다. 또 다이 홀 에지의 날카로운 정도(sharpness)를 향상시키기 위해서 마이크로 방전 가공 후 다이 홀 윗면을 폴리싱하였다.

개발된 미세 홀 펀칭 시스템

본 연구실에서는 두께 25㎛의 금속 박판 소재에 직경 25㎛의 마이크로 홀을 펀칭 가공할 수 있는 미세 홀 펀칭 시스템을 개발하였다(그림 6 참고). 미세 펀치는 초정밀 선형 가이드와 초정밀 이송 장치에 의해서 수직운동(z 방향)만을 시키고 다이 홀이 가공되어 있는 다이 플레이트의 위치를 초정밀 이송장치에 의해서 수평 방향(xy 방향)으로 보정할 수 있다. 또 펀치의 정밀 가이드와 펀칭 전후 가공 소재를 고정하기 위해서 스트리퍼 금형을 이용하였다. 미세 펀치의 수직 운동을 위해서 사용된 선형 가이드는 직진 정밀도 1㎛/25mm의 크로스 롤러 선형 가이드가 사용되었고 초정밀 이송장치의 반복 정밀도는 서브 마이크론 수준이다.

미세 펀치와 다이 홀의 정렬을 위해 본 연구실에서는 5×5×5 mm의 큐브 타입 빔 스플리터(beam splitter)를 이용한 상하 영상 획득 시스템(two-way imaging system)이 개발되었다. 한 면이 거울 코팅된 영상용 빔 스플리터와 상, 하 조명용 빔 스플리터를 나란히 접합하고 광 파이버를 이용하여 펀치 팁과 다이 홀을 각각 조명하여 펀치 팁과 다이 홀을 동시에 관찰할 수 있다. 그림 7은 본 연구실에서 개발된 상-하 영상 동시 획득 시스템 원리와 실제 이 방법을 사용하여 직경 50㎛ 미세 펀치 팁과 직경 55㎛의 미세 다이 홀을 관찰하고 다이 홀의 수평 방향 위치를 보정하여 펀치-다이 정렬을 수행한 예이다. 펀치-다이 홀 정렬 여부는 영상 처리 기술을 이용하여 판별하였다.

개발된 미세 홀 펀칭 시스템을 이용하여 황동(Cu63/Zn37)과 스테인리스 스틸(SUS316)의 금속 박판에 직경 25, 50, 100㎛의 미세 홀이 성공적으로 펀칭 가공되었다. 그림 8은 펀칭 가공된 직경 100㎛ 홀 사진이다. 펀칭 홀의 윗면은 깨끗하고 진원의 구멍을 얻을 수 있다. 그러나 펀칭 홀의 아래 면에서는 수 마이크론 크기의 미세 버(burr)가 관찰된다. 이러한 미세 버를 제거하기 위해서 전해 가공을 이용한 버 제거에 관한 연구도 현재 진행 중이다.

맺음말

미세 홀 펀칭 기술은 홀 가공의 생산성과 비용절감, 가공 홀의 형상 반복 정도 등에서 큰 이점을 갖고 있고 현재 산업현장에서 직경 100㎛ 내외 혹은 그 이상의 미세 홀 가공 시 널리 쓰이고 있는 기술이다. 본 연구실에서는 직경 25㎛의 미세 홀을 펀칭 가공할 수 있는 미세 홀 펀칭 시스템을 개발하였다.

향후 미세 홀 펀칭 기술은 생산성을 높이는 방향으로 연구가 수행되어야 한다. 즉 여러 개의 홀을 빠른 시간에 정확히 가공해야 한다. 이를 위하여 미세 홀 펀칭 시 여러 개의 홀을 동시에 가공할 수 있는 방안이 연구되어야 하며 펀칭 가공 속도의 증가에 따른 동적 효과 역시 고려되어야 한다. 또 미세 펀치와 다이의 수명 향상을 위한 소재 선정 및 소재 개발에 대한 연구도 진행되어야 한다. 한편 미세 홀 펀칭시 소재 두께 대비 다이 클리어런스, 펀칭 속도, 금형 마모 등 여러 펀칭 조건 등이 펀칭 가공된 미세 홀 품질에 끼치는 영향에 대한 체계적인 연구도 수행되어야 한다.