

마이크로 프레스에 의한 미세 펀칭 홀의 디버링 특성

윤종학*, 안병운⁺, 박성준⁺⁺

(논문접수일 2003. 12. 19, 심사완료일 2004. 2. 5)

A Deburring Characteristics of Small Punching Holes using Micro Press

Jong-Hak Yoon*, Byung-Woon Ahn⁺, Sung-Jun Park⁺⁺

Abstract

In micro hole punching process the burr occurs inevitably, but the burr must be minimized in order to improve the quality and accuracy of the product. In this study, magnetic field-assisted polishing technique is applied to remove the burr which exists in nozzles for ink-jet printer head and proved to be a feasible for deburring by experiment. The deburring characteristics of sheet metals was investigated changing with polishing time and magnetic abrasive size. After the deburring, the burr size has remarkably reduced and roundness of the hole also has improved.

Key Words: Magnetic Field-assisted Polishing(자기연마), Burr(버), Deburring(디버링), Micro Hole Punching(미세 홀 펀칭), Magnetic Abrasive(자성연마입자), Quill(공구)

1. 서론

최근 각종 제품이나 부품들이 점차 소형화를 넘어 미세화 되어가고 있으며, 이를 바탕으로 마이크로/나노 기술의 일부로서 각종 미세부품제작 기술에 대한 연구의 필요성이 점차 증가하고 있다^(1,2). 미세 부품 제작이 가능한 공정 중 한 가지 방법인 미세 펀칭을 이용한 미세 홀 가공은 여러 분야에서 활용 되고 있으며, 잉크젯 프린터 헤드의 노즐, IC 패키징에서 필요한 비아 홀, 연료분사 노즐, 각종 센서

와 필터에 사용하는 미세 홀 등이 대표적인 예이다.

이러한 미세 홀을 가공하는 방법으로는 미세 펀칭 공정 이외에도 마이크로 드릴가공, 레이저 가공, 마이크로 방전 가공, 마이크로 초음파가공 등, 여러 가공법이 있지만 생산성과 비용 절감 그리고 가공 홀의 형상 반복 정밀도의 관점에서 볼 때 미세 펀칭 기술은 큰 이점을 가지고 있다. 실제로 최근 산업 현장에서는 지름 100 μ m 이내 혹은 그 이상의 미세 홀이 펀칭 공정에 의해서 양산되고 있으며 지름 수십 마이크로미터 크기의 미세 홀 펀칭 기술 또한 연구되

* 서울산업대학교 기계공학과
+ 서울산업대학교 대학원 기계공학과
++ 교신저자, 연세대학교 나노과학기술연구원 (sjpark@yonsei.ac.kr)
주소: 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134

연구되고 있다⁽³⁾.

본 연구에서는 미세 펀칭 공정을 응용한 잉크젯 프린터 헤드 노즐 가공 공정의 간소화와 공정 시 필연적으로 발생되는 버를 제거하기 위한 연구를 진행하고자 한다.

잉크젯 프린터 헤드의 노즐은 크게 두 가지 방법으로 제조되고 있다. 노즐판을 일렉트로 포밍(electro-forming) 방법으로 성형과 동시에 노즐을 에칭하여 노즐의 토출구가 일정 길이로 직선부위가 형성될 수 있도록 하는 제조 방법과 박판으로 제작된 노즐판에 미세 펀칭과 버핑 또는 랩핑 공정에 의해 노즐 홀이 형성되도록 하는 방법이 사용된다.

에칭에 의한 노즐 형성법은 노즐판에 형성되는 노즐의 위치 공차가 거의 없게 하면서 간단하게 노즐을 형성시킬 수 있는 이점이 있지만, 노즐의 단면적이 상부에서부터 하부로 점차 좁아지게 되므로 하부의 토출구를 통한 잉크의 토출이 불규칙적으로 이루어지며 동시에 토출구의 진원도가 나빠 인쇄상태가 좋지않게 되는 등의 문제점이 발생한다. 반면에, 미세 펀칭과 피니싱에 의한 노즐 가공 공정은 노즐의 유입구측 단면적이 넓고 토출구측으로는 좁혀진 단면적이 일정 길이만큼 동일한 직선 구간을 갖도록 가공하여 잉크의 토출 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만 이를 위해서 펀칭 공정 후 필연적으로 발생되는 버의 제거를 위해 후 가공이 반드시 필요하며 이 공정에서 노즐 홀의 위치 공차가 커지게 되는 단점이 발생한다.

잉크젯 프린터 헤드의 노즐 제작 과정에서 발생하는 버의 상태와 표면가공의 결과는 제품의 성능을 크게 좌우하게 된다^(4,5). 따라서, 미세 펀칭을 응용한 노즐 제조 공정에서 나타나는 이러한 단점은 프린터의 성능과 바로 직결되는 아주 중요한 사항이다.

위와 같은 이유로 미세 펀칭 공정을 이용한 잉크젯 프린터 헤드 노즐 제작 과정에 결합된 기능성 자성연마입자를 이용한 초정밀 피니싱 공정⁽¹⁾을 적용하면 노즐의 형성과 버 제거를 동시에 해결할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 버 제거 공정에서 발생하는 문제인 위치공차 등 표면의 변화에 대해서도 해결할 수 있으며 노즐의 토출구 측 표면품질 향상으로 인한 성능 증가를 기대 할 수 있다.

2. 잉크젯 프린터 헤드 노즐

2.1 노즐 제작 과정

잉크젯 프린터 헤드의 노즐은 주로 일렉트로 포밍에 의한 에칭 공정과 미세 펀칭 공정으로 제작되고 있으며 본 연구에서는 대량 생산에 적합한 기술인 미세 펀칭을 이용한 노

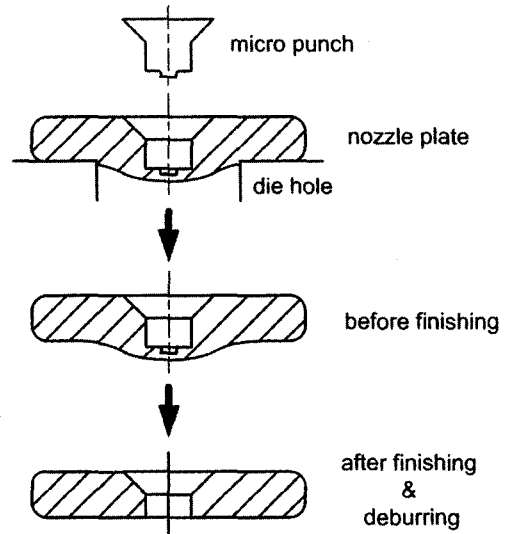


Fig. 1 The fabrication process of nozzle plate for ink-jet printer head

즐 제작 과정을 적용하였다.

미세 펀칭에 의한 제작 과정은 Fig. 1에 나타낸 것처럼 팁 지름 약 $32\mu\text{m}$ 의 노즐 모양의 미세 펀치와 지름 $70\sim 200\mu\text{m}$ 의 다이 홀을 이용하여 스테인리스 소재의 박판에 펀칭한다. 이때 펀치 팁 지름에 비하여 다이 홀 크기가 매우 크기 때문에 펀칭 공정에 의해 관통 홀이 가공되지 않는다. 하지만 미세 펀칭에 의한 노즐 형상이 박판에 모사된다. 노즐 형상이 모사되면서 노즐판의 아래 면은 변형하게 된다. 이 변형된 부분을 피니싱 공정을 통하여 제거하고 홀 주위에 남아있는 미세 버를 제거 후 세척하여 지름 $32\mu\text{m}$ 의 잉크젯 프린터 헤드 노즐을 제작할 수 있다.

여기서 지름 $32\mu\text{m}$ 의 미세 펀치와 지름 $70\sim 200\mu\text{m}$ 의 다이 홀의 정렬은 정밀 조립 금형에 의해서 가능하기 때문에 수십개의 노즐을 한 금형에서 가공할 수 있는 갭 타입 금형 제작이 가능하다.

2.2 버의 형상

마이크로 홀 펀칭은 지름 수십에서 수백 마이크로미터 크기의 미세 홀을 초정밀 미세금형을 이용하여 가공하는 기술이다. 그러나 미세 홀의 펀칭 공정시 다이 홀(die hole)과 접촉하고 있는 소재의 하부에서는 버가 발생하게 된다. 소재가 펀칭이 되면서 펀칭 공정의 가공 원리에 의하여 돔(dome)과 버의 발생하는 것은 당연한 결과이다. Fig. 2는

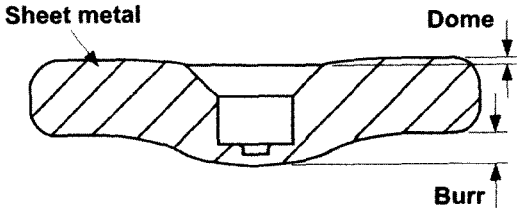


Fig. 2 Definition of dome and burr

잉크젯 프린터 헤드 노즐 제작 과정 중 미세 펀칭 공정 후 박판의 형상을 나타낸 것으로서 펀칭이 된 시편 윗면의 형상 왜곡을 뒀, 그리고 아랫면의 처짐을 버로 정의하였다.

3. 원리

3.1 Magnetic abrasive process

일반적으로 자화되기 쉬운 자성입자와 연마입자를 서로 혼합하여 소재를 폴리싱 하는 방법을 magnetic abrasive process라고 하며, 유도된 자기력에 의하여 연마입자를 구속하는 방식이다. 하지만, 자성입자와 연마입자가 서로 혼합되어 있는 경우에는 노즐 홀로 연마입자가 탈락할 가능성이 있기 때문에 본 연구에서는 이전 연구⁽¹⁾에서 개발한 결합된 자성입자를 사용하여 피니싱 공정에 적용하였다.

공정 기구에 대한 개략도는 Fig. 3에서 나타내었으며 실험장치에 대한 자세한 설명은 4절 실험장치에 서술하였다. 설계한 전자석을 이용하여 자기력을 발생하고, 전자석의 코어를 미세공구로 사용하였다. 공구와 공작물사이에 간극(gap)을 주고 그 사이에 자성연마입자를 슬러리 형태로 공급하게 되면 전자석에서 발생된 자기력에 의해 자화된 자

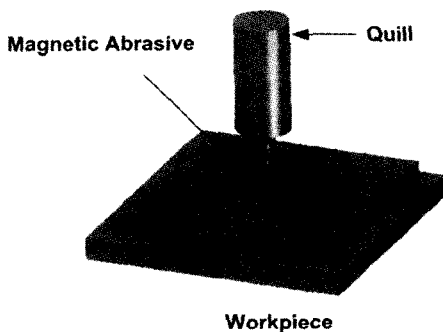


Fig. 3 Magnetic abrasive polishing mechanism

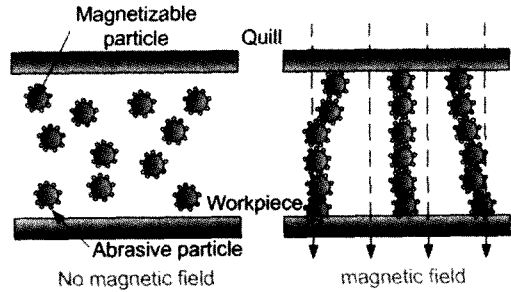


Fig. 4 Chain-like structure

성연마입자는 공작물까지 체인구조(chain-like structure)를 이루게 되며 유연성을 가진 연삭숫돌과 같은 역할을 하게 된다.

가공압력은 Fig. 4에 나타낸 것처럼 자기력에 의하여 자성연마입자가 체인 형태로 정렬되면서 공구와 공작물 사이의 간극과 발생된 자기력의 세기에 따라 가공압력이 생성되며 소재가 자성체일 경우 보다 높은 가공압력이 발생된다. 가공압력이 형성된 상태에서 공구가 회전하게 되면 자성연마입자가 전단력(shear load)을 접촉하고 있는 공작물에 가하게 되어 폴리싱을 하게 되는 구조이다.

3.2. Magnetic abrasive process의 적용

잉크젯 프린터 헤드 노즐 제작에 적용된 미세 펀칭 공정은 기계적 가공을 이용한 전단공정이라고 할 수 있다. 미세 펀칭공정에서 전단 가공 시 여러 변수들을 고려하여 소재의 변형과 버의 발생을 최소화 하려는 연구는 많이 수행되었으며 현재도 진행되고 있다. 이러한 결과로 인하여 펀칭 공정에서 버의 발생이 많이 감소되었지만 발생자체를 억제하는 것은 거의 불가능하다.

따라서, 본 연구에서는 미세 펀칭을 이용한 잉크젯 프린터 헤드 노즐의 제작 과정 중 펀칭 공정에 의해 발생한 소재 아랫면의 변형 및 버를 제거하기 위하여 magnetic abrasive process를 적용하였다. 또한, 폴리싱 성능의 우수성이 확인된 결합된 자성연마입자를 선정하였으며, 노즐 홀의 디버링 시 부품의 정밀도에 영향을 주지 않으며 미세 버를 제거할 수 있도록 입자의 크기와 연마특성을 고려하여 초기 실험조건을 선정 하였다. 가공 소재가 비자성체이므로 자성체에 비하여 가공압력이 약해지는 현상이 발생하는 것을 고려하였다.

기계적인 디버링 방법은 여러 형상의 버 제거 효율은 좋

으나 부품의 정밀도에 영향을 미칠 가능성이 크다. 부품의 정밀도에 영향을 주지 않으면서 소재의 변형 부분과 여러 형상의 버를 효율적으로 제거하며 표면을 개선하기 위하여 입자의 크기 및 가공조건을 달리 하였다. 초기에는 큰 입자를 사용하여 초기 구멍이 형성 되도록 하였으며, 차후 공정에서는 보다 미세한 입자를 사용하여 버의 제거와 노즐 홀 주변의 표면품질을 높일 수 있도록 하였다.

소재 하부의 변형과 여러 형상의 버 제거시 버의 높이와 노즐 홀의 크기를 기준으로 공정의 특성과 적용성을 파악하였다.

4. 실험장치

노즐 홀 디버링을 위한 피니싱 시스템의 대략적인 구조와 노즐판을 고정할 수 있는 지그의 형상은 Fig. 5에 나타내었다. 가공 시스템에 대하여 간단히 설명하면 설명하면 디버링 전용기계가 아닌 일반적으로 널리 사용되고 있는 머시닝 센터의 주축에 자기력을 발생할 수 있도록 개발한 전자석과 공구로 구성된 *magnetic field-assisted machining head*를 콜릿체에 고정하여 부착하였다. 또한 공구교환방식을 통하여 착탈이 용이하도록 설계하였다.

자기력의 세기를 충분히 높이기 위하여 구리 코일을 3200회 감고 100V, 5A의 전류를 부가할 수 있도록 전자석을 설계, 제작하였다. 개발된 전자석을 장시간 사용할 경우 부가된 전류에 의한 코일의 발열이 전자석의 성능 저하를 가져오기 때문에 압축 공기를 순환시켜 냉각시킬 수 있도록 시스템을 구성하였다.

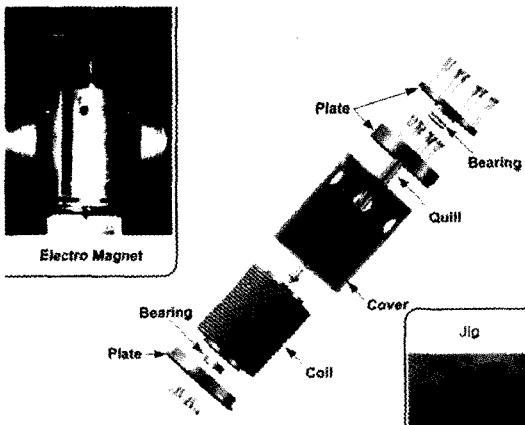


Fig. 5 Experimental set-up

전자석의 코어로 사용되는 것과 동시에 공구의 역할을 하는 quill은 SM45C로 제작하였고 기타 구성부품들은 비자성체인 Al2024를 사용하여 누설자장이 발생하지 않도록 고려하였다. 또한, 공구의 흔들림을 최소화하기 위하여 베어링으로 지지 하였으며 누설자장이 발생하지 않도록 하기 위하여 세라믹 재질을 사용하였다.

5. 특성 평가

예비실험 결과와 노즐의 지름과 버의 높이를 고려하여 노즐 부의 변형과 미소 버를 제거하기 위한 실험 조건을 결정하였으며, 이를 Table 1에 정리하였다.

퀵과 노즐판의 간극은 0.5mm로 일정하게 유지하였고, 회전속도는 1000rpm으로 선정하였다. 자성연마입자는 carbonyl iron과 다이아몬드 입자를 결합하여 사용하였다.

시편의 재질은 잉크젯 프린터 헤드 노즐판에 주로 사용되는 스테인리스이며 노즐 입구의 지름은 75 μ m이고 노즐 출구의 지름은 32 μ m이다. 노즐판은 44개의 홀이 2열로 배치되어 있는 구조이며 Fig. 6에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

gap (mm)	0.5
feed (mm/min)	20
quill rotation (rpm)	1000
magnetic flux strength (T)	0.6
workpiece	Stainless steel
magnetic abrasive (grit size)	CIP and diamond (25~75, 75~125, 125~200 μ m)

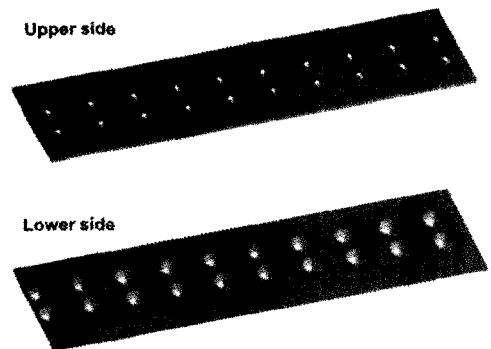


Fig. 6 Ink-jet printer head nozzle plate

5.1 입자 크기와 가공 시간에 따른 특성

본 절에서는 자성연마입자의 크기에 따른 디버링 특성을 펀칭 홀 크기인 32 μm 를 기준으로 가공 시간에 따른 노즐 홀 지름의 확장성과 버 제거율로서 평가하였으며 이를 기준으로 디버링 공정에서 사용할 자성연마입자의 크기 그리고 가공시간을 결정하였다.

실험에 사용한 자성연마입자는 carbonyl iron 입자와 다이아몬드입자를 바인더를 이용하여 결합한 것으로, 시험망의 크기를 세 가지 범위로 나누어 사용하였다. 각각의 입자 크기의 범위는 Table 1에 나타내었다. Fig. 7에는 디버링 시간에 따라 버의 높이와 노즐 홀의 지름이 변화하는 과정에 대하여 간략하게 나타내었으며, 입자 크기에 따른 노즐 홀 지름의 확장성과 버의 제거율을 디버링 시간을 기준으로 평가한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

그림에서 보듯이 디버링 시간이 증가할수록 버의 높이가 낮아지며 홀의 지름이 확장되고 있음을 알 수 있다. 시간이 증가 할수록 디버링 효과가 나타나는 것은 당연한 결과라고 할 수 있지만 자성연마입자의 크기에 따라 이러한 버의 높이와 홀의 확장성의 효과에 차이를 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 자성연마입자 크기에 따른 버 제거율을 디버링 시간에 따른 버 높이의 변화를 기준으로 평가한 결과이다. 그래프에서 알 수 있듯이 자성연마입자 크기가 작을수록 버 제거 효율이 떨어지고 있다. 입자가 작을수록 포화자화밀도가 낮아져 가공압력이 감소하고, 체인구조의 유연성 증가로 공작물에 가해지는 충격량이 작아지기 때문으로 해석할 수 있다. 또한, 버의 초기 높이에 비하여 입자가 작을 경우는 버의 표면만을 폴리싱 하는 현상이 나타난다. 버 제거율을 디버링 시간에 따른 높이의 변화를 기준으로 평가한 경우에는 125~200 μm 의 자성연마입자가 가장 높은 제거율을 보여주고 있다. Fig. 9는 같은 방법으로 노즐 홀 지름의 확장성을 평가한 결과이다. 홀 지름의 확장성을 평가한 경우에는 버 높이에 비하여 보다 뚜렷하게 자성연마입자의 크기와 밀접한 관계를 보여주고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9의 결과에 따르면 입자크기가 25~75 μm , 75~125 μm 인 경우에는 시간에 따라 버가 제거되기는 하지만 그 효과가 매우 작기 때문에 내부에 존재하는 노즐 홀이 드러나지 않는다. 반면에 크기 125~200 μm 인 자성연마입자는 빠른 시간 내에 높은 버 제거율을 나타내며 노즐 지름의 확장성이 우수함을 알 수 있다.

마이크로 프레스를 이용하여 노즐 형상을 펀칭 한 시편의

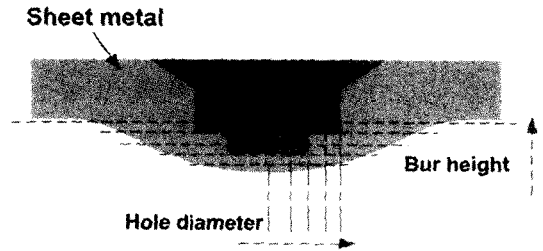


Fig. 7 The expansion of hole diameter and decrease of burr height

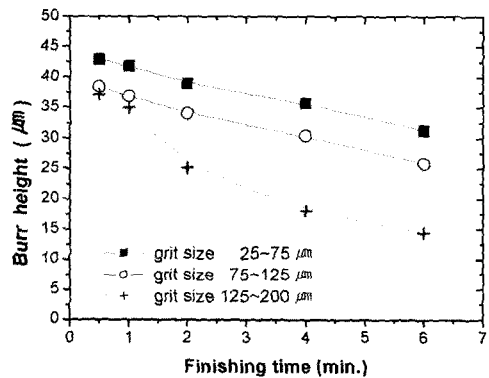


Fig. 8 Variation of burr height with abrasive size

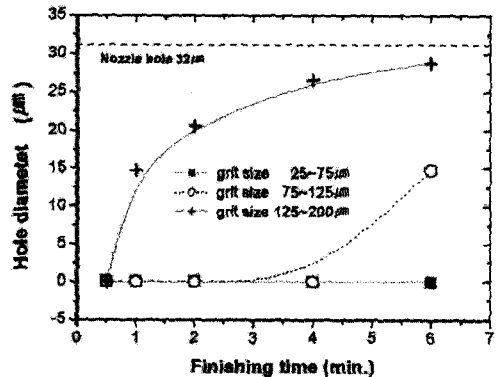


Fig. 9 Variation of hole diameter with abrasive size

형상을 주사전자 현미경(SEM)으로 측정한 결과는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 초기상태의 노즐 홀은 미세 홀 펀칭 공정에 의하여 노즐 하부의 변형과 버가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

예비실험결과를 바탕으로 125~200 μm 크기의 자성연마 입자를 이용하여 시간에 따른 노즐의 변화를 SEM으로 관찰한 결과는 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 12(a)와 (b)에서 알 수 있듯이 디버링 시간에 따라 버가 제거되면서 노즐 홀의 지름이 확장되고 진원도 또한

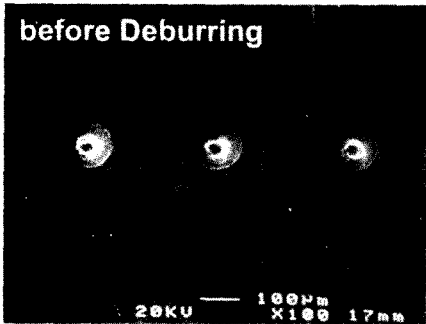


Fig. 10 SEM image of punched nozzle hole

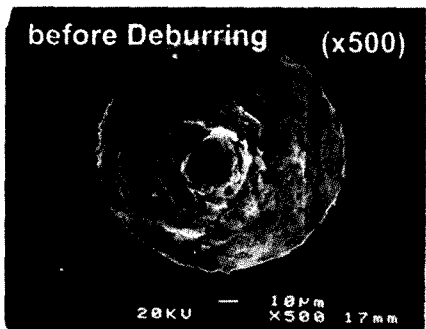


Fig. 11 Enlarged SEM image of nozzle hole

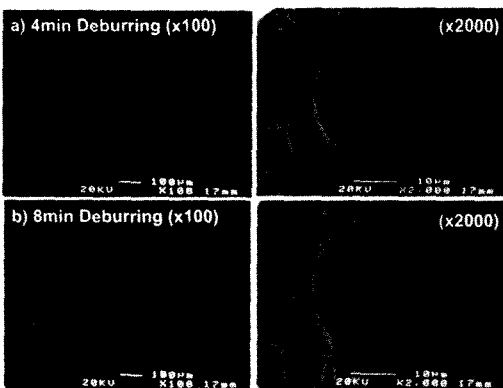


Fig. 12 SEM image after deburring

향상되어지는 것을 확인하였다. 하지만 크기가 비교적 큰 자성연마입자를 사용하여 홀 주위의 표면이 거칠게 나타나므로 개선이 필요하다.

5.2 마이크로 노즐 홀 제작

버 제거율이 뛰어난 125~200 μm 크기의 결합된 자성연마 입자를 사용하여 노즐 홀 지름의 확장을 기준으로 디버링 특성을 평가한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 피니싱 공정을 시작한 시간부터 4분대까지는 노즐 홀 지름의 확장이 급격히 이루어지고 있는 반면에 6~10분대에서는 느리게 확장되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 가공압력이나 자기력의 변화 등 기타 가공조건이 변화된 것이 아니라 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 펀치의 형상에 의한 결과이다.

그래프에서 보면 폴리싱 시간 10분이 경과하게 되면 노즐 홀의 지름이 펀치의 지름인 32 μm 보다 미소하지만 더 확장되고 있음을 알 수 있는데 이러한 결과는 디버링 시간이

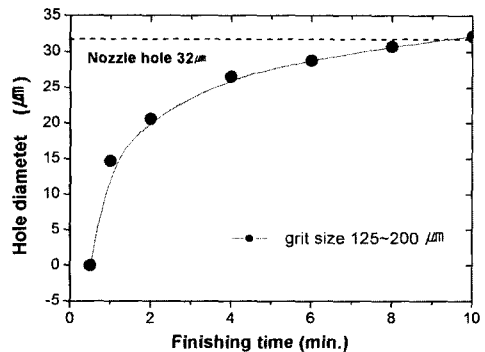


Fig. 13 Deburring result (hole diameter)

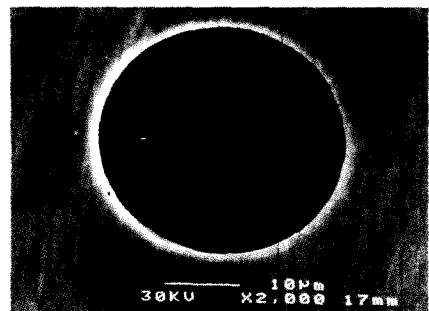


Fig. 14 Fabricated nozzle hole

적정시간을 초과하는 것으로 평가할 수 있다.

실험 결과로부터 노즐 홀 제작은 큰 입자를 사용한 노즐 하부 변형 및 버 제거와 미세한 입자를 사용한 표면품질 향상 의 두 단계로 진행하였다.

Fig. 13의 결과에 따라 큰 자성연마입자에 의한 디버링 시간을 8분으로 결정하였다. 이 공정은 주로 버를 제거하기 위한 목적으로 진행하며 8분간을 디버링한 후 노즐 홀 지름의 확장은 펀치 지름 대비 약 96% 정도이다. 노즐 홀 주위의 표면은 큰 입자에 의해 미세한 스크래치 등이 존재하며 약간의 버가 나타나는 것을 Fig. 12(b)를 통해 알 수 있다. 노즐 홀 주위 표면 품질을 향상시키기 위해 최종적으로 25~75 μm 크기의 미세한 자성연마입자를 이용하여 노즐 형상의 변형 없이 32 μm 의 크기의 노즐을 제작할 수 있었으며, 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

6. 결론

마이크로 프레스를 이용한 잉크젯 프린터 헤드 노즐 제작 과정은 생산성 등을 고려할 때 폭넓게 적용할 수 있다. 하지만, 펀칭 공정의 전단력에 의하여 반드시 돔과 버가 발생할 수밖에 없으며 펀칭공정에서의 조건 등을 분석하여 고려하여도 완전히 억제하기란 사실상 불가능하다.

본 연구에서는 잉크젯 프린터 헤드 노즐의 제작과정에서 피니싱 공정과 디버링 공정을 magnetic abrasive process 를 응용하여 하나의 공정으로 간소화하였으며 버 제거율과 노즐 홀 지름의 확장을 디버링 시간을 기준으로 평가하고 디버링 특성을 검증하여 적용 가능성을 파악하였다.

버 제거에 적합하도록 diamond 연마입자가 결합된 자성 연마입자를 사용하였으며, 초기 실험을 통하여 얻은 결과와 버의 크기를 고려하여 25~75 μm , 75~125 μm , 125~200 μm 범위의 입자크기를 가지는 자성연마입자를 디버링 공정에 적용하였다. 그 결과 125~200 μm 크기의 자성연마입자를 사용하여 8분간 디버링 하였을 경우 노즐 홀 지름이 펀치의 지름과 거의 일치하였다. 25~75 μm 크기의 미세한 자성연

마입자를 사용하여 최종적으로 펀치의 크기인 32 μm 크기의 노즐 홀을 제작하였으며, 부품의 성능에 영향을 미치는 홀 주위의 표면품질 또한 함께 향상시켰다.

본 연구를 통하여 마이크로 프레스를 이용한 잉크젯 프린터 헤드 노즐 제작 과정에서 공정 단축과 충분한 디버링 효과를 얻을 수 있으며 부품의 정밀도에도 영향을 주지 않는다는 것을 확인하였다.

후기

이 논문은 서울산업대학교 학술연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구진은 이에 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Park, S. J., Ahn, B. W., and, Yoon, J. H., 2003, "Development of Ultraprecision Finishing Technique using Bonded Magnetic Abrasives," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 12, No. 5, pp. 59~66.
- (2) Ahn, B. W., Park, S. J., Kim, W. B., and Lee, S. J., 2003, "Ultra Precision Polishing of Micro Die and Mold Parts using Magnetic Assisted Machining," *Proceedings of the KSPE*, pp. 1832~1835.
- (3) Oh, S. I., 2002, "Technical Development of Micro Hole Punching," *Journal of the KSME*, Vol 42, No. 6, pp. 36~41.
- (4) Ko, S. L., 1998, "A Study for an Efficient Burr Removal of Micro-burr which occurs in Blanking Processing," *Workshop on Precision Surface Finishing and Deburring Technology*, pp. 19.
- (5) Lee, Y. C., Lee, J. Y., Kim, J. H., Ahn, J. H., and Kim, J. S., 2003, "Machining Technology for the Micro-Burr Removal using Electro-Magnetic Field Effect," *Proceedings of the KSPE*, pp. 561~564.