

# 다층박판재료의 초고압 젯 정밀가공에 대한 실험적 연구

## Experimental Investigations into the Precision Cutting of High-pressured Jet for Thin Multi-layered Material

박강수<sup>1</sup>, 박연경<sup>1</sup>, 이정환<sup>2</sup>, 이채문<sup>3</sup>, 고정상<sup>1</sup>, 신보성<sup>4,✉</sup>  
Kang Su Park<sup>1</sup>, Yeon Kyeong Bahk<sup>1</sup>, Jung Han Lee<sup>2</sup>, Chae Moon Lee<sup>3</sup>, Jeung Sang Go<sup>1</sup>  
and Bo Sung Shin<sup>4,✉</sup>

1 부산대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

2 ㈜마이크로홀 (Microhole Inc.)

3 삼성전기 HDI 팀 (Samsung Electro-Mechanics HDI)

4 부산대학교 정밀정형및금형가공연구소 (ERC/NSDM, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: bosung@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2787

Manuscript received: 2008.12.4 / Accepted: 2009.3.31

*High-pressured jetting is now widely used in the advanced cutting processes of polymers, metals, glass, ceramics and composite materials because of some advantages such as heatless and non-contacting cutting. Similarly to the focused laser beam machining, it is well known as a type of high-density energy processes. High-pressured jetting is going to be developed not only to minimize the cutting line width but also to achieve the short cutting time as soon as possible. However, the interaction behavior between a work piece and high-velocity abrasive particles during the high-pressured jet cutting makes the impact mechanism even more complicated. Conventional high-pressured jetting is still difficult to apply to precision cutting of micro-scaled thin work piece such as thin metal sheets, thin ceramic substrates, thin glass plates and TMM (Thin multi-layered materials). In this paper, we proposed the advanced high-pressured jetting technology by introducing a new abrasives supplying method and investigated the optimal process conditions of the cutting pressure, the cutting velocity and SOD (Standoff distance).*

Key Words: TTM (다층 박판재료), High-pressured Jet (초고압 젯), Precision Cutting (정밀 절단), Line Width (선폭), Abrasives (연마재)

### 1. 서론

초고압 젯팅(High-pressured jetting)이란 물의 압력을 400 MPa 이상으로 증폭시키는 초고압 펌프(Intensifier)를 이용하여 수백 마이크로 직경의 노즐(Nozzle)을 통해 약 1,000m/s 의 빠른 속도로 분사시켜 물리적으로 가공소재를 절단하는 기술이다. 초고압으로 압축된 물이 좁은 직경의 오리피스(Orifice)를 통과하면서 혼합 챔버(Mixing chamber)

내의 마이크로 연마재(Abrasives)를 흡입하여 함께 고속으로 공작물에 충돌시킴으로써 가공능력을 향상시킨다. 가공에 사용되는 연마재의 종류로는 경질재료로써 석류석(Garnet), 규사(Silica sand), 산화알루미늄(Alumina) 및 탄화규소(Silicon carbide)등이 주로 사용되고 있다.<sup>1-3</sup> 지금까지 알려진 바와 같이, 초고압 젯 가공기술은 물을 주로 사용하기 때문에 환경친화적이며, 비접촉 가공기법이기 때문에 공구마모와 파손없이 동일한 크기의 천공(Punching)

및 절단(Cutting)이 가능하고, 기존의 가공방법에서 발생하는 발열 문제를 근본적으로 해결함으로써 특히 열에 취약한 물질의 가공에 뛰어난 장점들을 가지고 있다. 최근에는 수백  $\mu\text{m}$  미세노즐과 수십  $\mu\text{m}$  의 연마재 개발로 마이크로 가공 및 미세가공에도 많은 연구가 시도되고 있다.<sup>4,6</sup> 그러나 이러한 시도는 가공 속도가 느려서 여전히 실험실 수준에서 연구되는 실정이다. 또한, 기존 초고압 젯 절단 가공방법의 문제점은 가공선 주위에 연마재 분산으로 인한 백화현상(Frosting phenomena)으로 인하여 가공선폭(Line width)을 줄이는데 기술적인 한계가 있었다.<sup>7,8</sup>

본 논문에서는 이러한 백화현상을 줄이기 위해 새로운 연마재 공급방법을 제안하고, 최적의 정밀 절단 가공조건을 찾기 위하여 가공압력(Cutting pressure), 절단속도(Cutting velocity) 및 이격거리(SOD, Standoff distance) 등의 가공변수에 따른 PCB 기판의 주요소재인 구리(Copper), PPG(Glass F/Epoxy)로 여러 겹으로 이루어진 다층 박판소재(TMM, Thin Multi-layered Materials)을 대상으로 실험적인 방법으로 최적의 절단 가공 조건을 규명하고자 한다.

## 2. 이론적 접근

집중노즐(Focusing nozzle)에서 초고압으로 분사되는 젯의 속도는 유체역학의 기본 방정식인 베르누이 방정식으로부터 계산된다. 즉, 노즐내의 좁은 직경의 오리피스를 빠져 나오는 젯의 운동에너지가 가공재질의 충격점에서 정체압력(Stagnation pressure)으로 전환된다. 이 때 압력 P는 젯의 초기 속도  $V_0$ 와 물의 밀도  $\rho$ 를 사용하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>7,9</sup>

$$P = \frac{1}{2} \rho V_0^2 \quad (1)$$

이때, 혼합 챔버(Mixing chamber) 내에서는 물, 공기 및 연마재가 빠른 시간 동안 섞이면서 모멘텀 전달(Momentum transfer)에 의해 초기의 정지 상태의 연마재 입자가 가속된다. 이때 혼합 물질은 연마재, 물, 공기이며 이들간의 모멘텀 전달은 모멘텀 보존의 법칙으로부터 정리하면 다음과 같다.<sup>9,10</sup>

$$\begin{aligned} m_A V_{A,0} + m_w V_{w,0} + m_{air} V_{air,0} \\ = m_A V_{A,1} + m_w V_{w,1} + m_{air} V_{air,1} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $m_A, m_w, m_{air}$ 는 각각 연마재, 물, 공기의 질량을 나타내고,  $V_{A,0}, V_{w,0}, V_{air,0}$ 는 각각 연마재, 물, 공기의 초기 속도이며,  $V_{A,1}, V_{w,1}, V_{air,1}$ 는 각각 연마재, 물, 공기의 최종속도를 나타낸다. 그리고 연마재와 물과 공기가 분사될 때, 부피 비는 물과 연마재가 98% 이상을 차지하며 공기가 2% 내외이므로, 공기와 연마재 초기속도에 대한 값을 0으로 두고, 연마재의 최종 가공속도  $V_{A,1}$ 과 물의 최종속도  $V_{w,1}$ 이 같아지면 연마재의 속도는 식(3)과 같다.

$$V_{A,1} = \frac{m_w}{m_w + m_A} V_{w,0} \quad (3)$$

한편, 기존의 초고압 젯의 연마재 공급방식은 연마재가 공기와 혼합되어 공급되는 방식(Air-driven abrasives supplying type)은 Fig. 1과 같다. 본 연구에서 제안하는 새로운 연마재 공급방식은 공기 대신 물을 이용하여 연마재를 공급하는 방식(Water-driven abrasives supplying type)으로 Fig. 2와 같다. 이때 물, 연마재 및 연마재 공급하는 물의 모멘텀 전달관계식은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} m_A V_{A,0} + m_w V_{w,0} + m_w V_{w',0} \\ = m_A V_{A,1} + m_w V_{w,1} + m_w V_{w',1} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $V_{w,1}$ 과  $V_{w',1}$ 은 Water-driven 방식에서 물의 초기속도와 최종속도를 의미한다. 식(4)에서  $V_{A,0}$ 과  $V_{w,0}$ 은 0이고,  $V_{A,1}, V_{w,1}, V_{w',1}$ 이 분사될 때 같은 속도를 가진다면 식(5)와 같이 유도된다.

$$V_{A,1} = \frac{m_w}{m_w + m_A + m_w'} V_{w,0} \quad (5)$$

(5)을 살펴보면 식(3)와 달리  $m_w'$ 의 양이 증가할수록  $V_{A,1}$ 의 속도가 감소됨을 알 수 있다. 즉 연마재의 최종속도는 식(3)에서는  $m_A$  값에만 영향을 받지만, 식(5)에서는  $m_A$  뿐만 아니라  $m_w'$ 의 값에도 크게 영향을 받게 된다는 것을 알 수 있다.

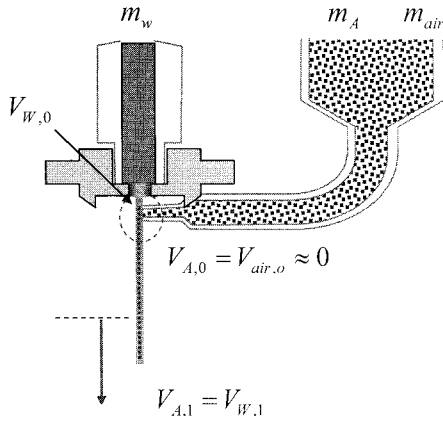


Fig. 1 Schematic diagram of high-pressure jetting with conventional air-driven type

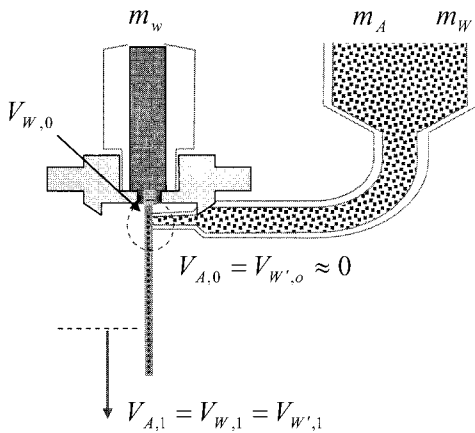


Fig. 2 Schematic diagram of high-pressure jetting with proposed water-driven type

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치 및 시편

Fig. 3 에서 보는 바와 같이, 실험장비는 X-Y 테이블(X-Y table)부, 증압기(Intensifier)와 축압기(Accumulator)의 고압펌프(High pressure pump)부, CNC 컨트롤러(Controller)부, 절단노즐(Cutting nozzle) 부 등의 크게 4 부분으로 구성된다. 장비사양은 최대압력 400MPa, 최대 토출유량 3.8ℓ/min, 최대 이송속도 15,000mm/min 이다. 가공시편은 Table 1 과 같이 총 두께는 448 μm의 Cu, PPG(Glass F/Epoxy)로 총 9 층으로 이루어진 다층 박판 구조를 가지는 TTM 를 실제로 제작하여 본 실험에 사용하였다.

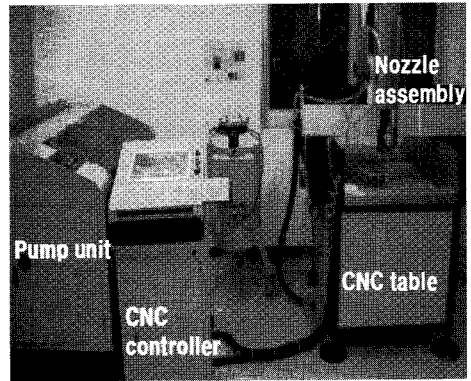


Fig. 3 Experimental system for high-pressure jet cutting

Table 1 Structures and thickness dimensions of TMM

No	Module	Thickness[μm]
1	PPG(Glass F/Epoxy)	50
2	Cu	12
3	PPG(Glass F/Epoxy)	100
4	Cu	12
5	PPG(Glass F/Epoxy)	100
6	Cu	12
7	PPG(Glass F/Epoxy)	100
8	Cu	12
9	PPG(Glass F/Epoxy)	50
Total Thickness		448

#### 3.2 실험방법

가공압력, 가공속도, SOD, 연마재 종류와 크기, 집중노즐의 직경 및 길이 그리고 오리피스스의 형상과 직경 등이 있다. 본 논문에서는 이들 중에서 가공압력, 가공속도, SOD, 연마재 공급량에 따른 가공성을 연마재 공급방식을 Air-driven 와 Water-driven 방식을 적용함으로써 비교 분석하였다. Water-driven 방식은 기존의 Air-driven 방식과는 달리 물과 연마재 만이 유입되는 특징을 가지고 있다. 연마재는 물보다 무겁기 때문에 물과 연마재가 일정하게 혼합되게 하기 위하여 전기식 교반기로 회전시켜 혼합하는 방법을 사용하였다. 그리고, 가공압력 150MPa, 가공속도 400mm/min, SOD 2.0 mm, 절단각도 90°, 연마재 공급량 40g/min, 노즐직

경 0.8mm, 노즐길이 76mm, 오리피스 직경 0.254 mm 을 기본 실험 조건으로 설정하고, 가공압력 범위는 100~250MPa, 가공속도 범위는 200~800mm/min, SOD 범위는 1.0~4.0mm 로 변화시키면서 가공 결과를 측정하였다. TTM 시편의 가공성을 평가하는 항목으로 절단 테이퍼(Taper of cut)를 측정하여 비교 분석하였다. 테이퍼는 가공 윗면 절단선폭 너비( $B_T$ )와 가공 아랫면 절단선폭 너비( $B_B$ )의 비로 정의하였다. 또한, 고속카메라(High-speed camera)를 사용하여 본 연구에서 제안한 Water-driven 고압수의 유체거동을 고속 카메라(Model: SR-Ultra-C)로 촬영함으로써, 연마재 공급방식에 따른 초고압 젯의 거동형상을 비교하였다.

Table 2 Experiment conditions

	Cutting pressure(Mpa)	Cutting feed rate(mm/min)	Stand Off Distance(mm)
1	100	200	1
2	150	400	2
3	200	600	3
4	250	800	4

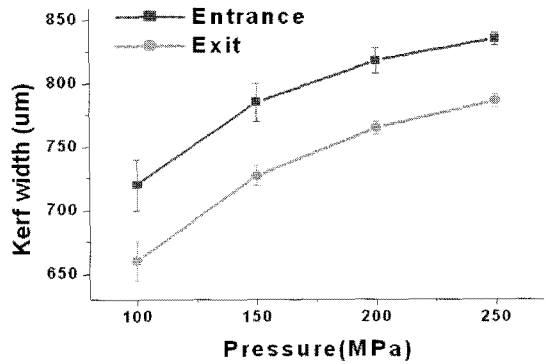
4. 실험결과 및 고찰

4.1 가공압력에 따른 가공성 분석

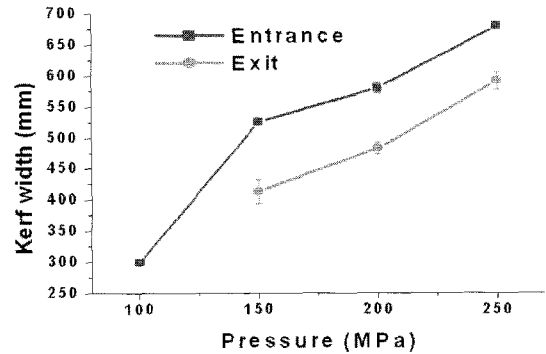
가공속도 400mm/min, 이격거리 2.0mm 로 일정하게 유지하며 가공압력을 100MPa~250MPa 까지 50MPa 씩 증가시키며 실험하였다. 가공압력이 100 MPa 보다 작거나 250MPa 보다 클 경우 초고압수 젯 장비 및 실험결과와 불안정으로 실험 범위에서 제외하였다. 가공 결과 Fig. 4 와 같이 가공 압력이 커질수록 Air-driven 방법과 Water-driven 방법 모두 절삭폭이 넓어지는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5 와 같이 압력이 커질수록 테이퍼비가 감소한다. 이것은 가공 압력이 높을수록 가압된 연마재가 소재에 가해지는 힘의 전달이 빨라지고, 동시에 힘이 고르게 전달 되기 때문이다. 또한 가공압력이 커질수록 소재에 가해지는 연마재의 충격력이 커져 소재의 아랫부분까지 힘의 전달이 잘되어 테이퍼 비가 감소한다는 것을 알 수 있다.

4.2 가공속도에 따른 가공성 분석

이격거리 2.0mm, 가공압력 150MPa 로 일정하게 유지하여 가공속도를 200~800mm/min 까지 200



(a) Air-driven type



(b) Water-driven type

Fig. 4 Effect of kerf width with respect to cutting pressure

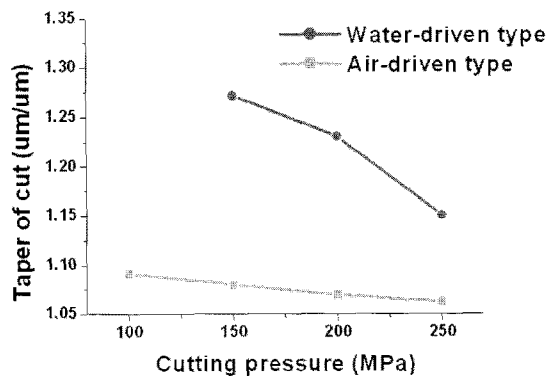
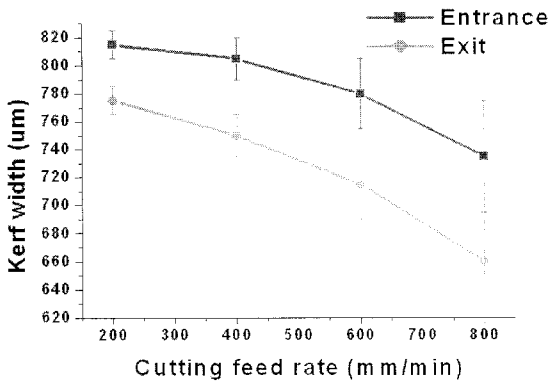


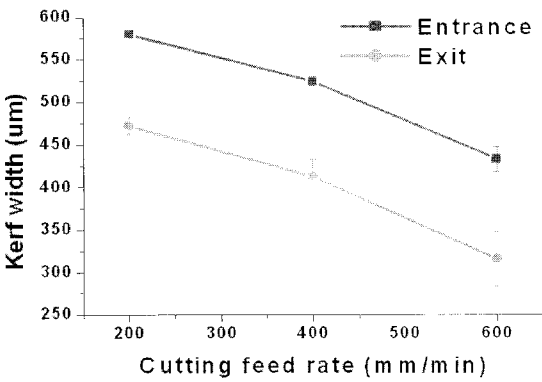
Fig. 5 Effect of taper with respect to cutting pressure

mm/min 씩 증가시키며 절단 실험을 수행하였다. 가공속도가 200mm/min 이하일 경우는 배제하였고, 800mm/min 이상일 경우 절단이 완벽히 되지 않았다. 이것은 가공속도가 빨라질수록 소재에 가해지는 연마재의 양이 적고, 연마재에 전달되는 힘이 줄어 소재의 아랫부분까지 전달이 잘 되지 않기

때문이다. 가공 결과 가공속도가 빨라질수록 Fig. 6 과 Fig. 7 과 같이 절삭폭이 줄어들고, 두가지 방식 모두 테이퍼 비는 증가하지만, 특히, Water-driven 방식은 테이퍼 비가 1.0 에 가까운 값을 보여주는 결과를 확인하였다.



(a) Air-driven type



(b) Water-driven type

Fig. 6 Effect of kerf width with respect to cutting feed rate

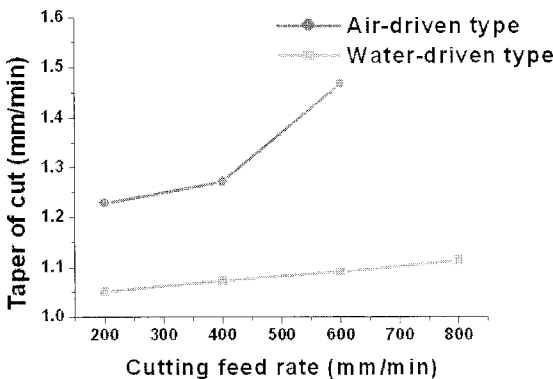
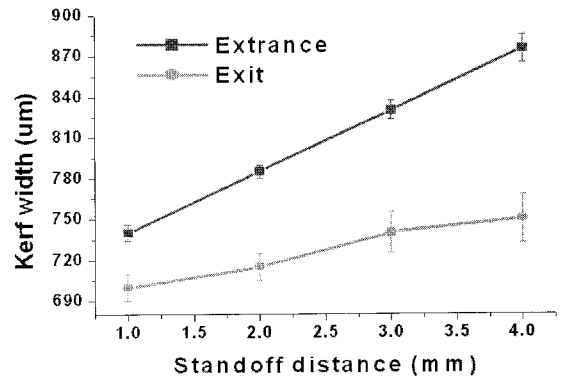


Fig. 7 Effect of taper with respect to cutting feed rate

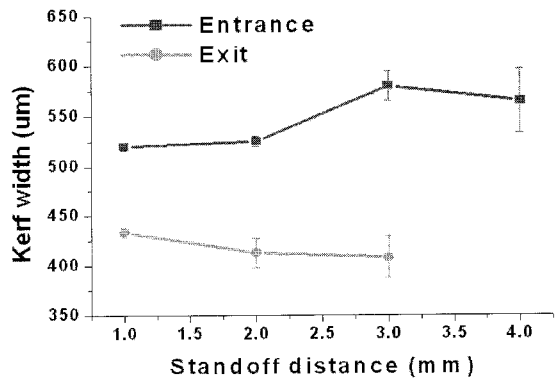
### 4.3 이격거리에 따른 가공성 분석

가공압력 150 MPa, 가공속도 400mm/min 으로 일정하게 하고 이격거리를 1~4mm 까지 1mm 씩 증가 시켰다. 이격거리가 1mm 보다 작을 경우 노즐과 소재가 가까워 서로 붙는 경우가 발생한다. 이것은 고압수 젓의 역류현상의 원인이 되기도 한다. 그리고 이격거리가 4mm 이상일 경우 절단 폭이 노즐의 직경보다 커져 실험 조건에서 제외하였다. Fig. 8 과 같이 이격거리가 커질수록 Air-driven 방식과 Water-driven 방식 모두 윗면의 절단폭이 증가하였다. 이것은 이격거리가 멀어질수록 연마재의 분산이 증가하기 때문에 소재 윗면의 절단폭이 넓어지기 때문이다.

그러나 힘의 분산이 커짐으로 인해 연마재 충돌량도 상대적으로 적어지고, 소재의 아랫면까지 전달되는 힘 또한 줄어든다.



(a) Air-driven type



(b) Water-driven type

Fig. 8 Effect of kerf width with respect to standoff distance

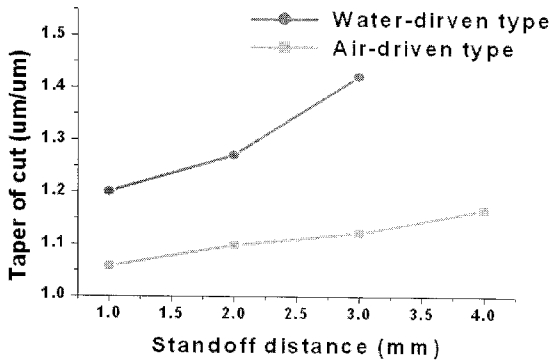


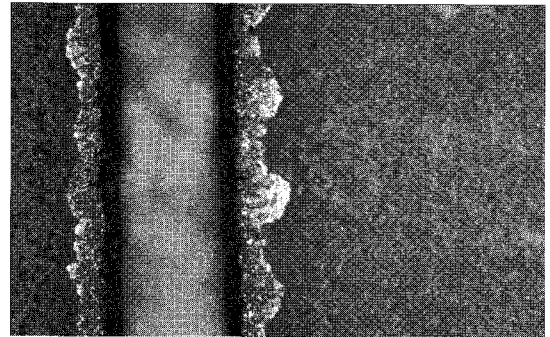
Fig. 9 Effect of taper with respect to standoff distance

따라서 가공소재의 아랫면도 좁아짐으로 테이퍼 비가 증가한다는 것을 알 수 있다. Fig. 9 는 이 격거리에 따른 테이퍼 비의 변화를 나타낸 것이다.

4.4 가공표면 및 고속카메라 촬영 결과

앞 절에서 살펴본 가공결과로부터 Air-driven 방식에서는 가공시편의 윗면 785  $\mu\text{m}$ , 아랫면 723  $\mu\text{m}$ 의 가공선폭을 얻어짐을 알 수 있었다. 이에 반해 Water-driven 방식에서는 윗면의 가공선폭이 525  $\mu\text{m}$ , 아랫면 가공선폭은 413  $\mu\text{m}$ 였다. 또한 각각의 가공 공차는 15  $\mu\text{m}$ 와 8  $\mu\text{m}$ 였다. 이를 통해 알 수 있듯이 Water-driven 방식에서 가공선폭이 Air-driven 방식에 비해 약 30%정도 감소되었다. 이에 대한 주된 이유로서는 연마재가 공급될 때 공기가 없기 때문으로 판단된다.

Fig. 10 은 가공 표면을 촬영한 사진으로 Water-driven 방식이 Air-driven 방식에 비해 가공면 주위에 발생하는 백화현상이 현저히 감소한 것을 확인할 수 있다. 이것은 Water-driven 방식이 Air-driven 방식에 비해 연마재 집중효과가 월등히 개선되었

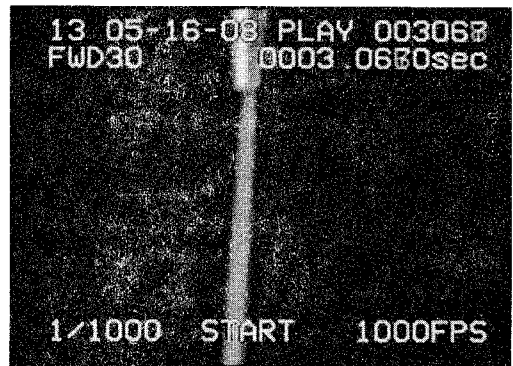


(b) Water-driven type

Fig. 10 Cutting entrance edge of TMM

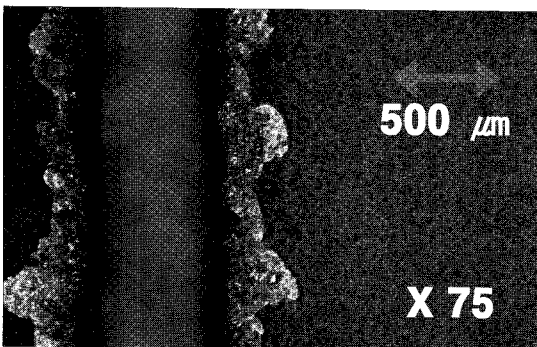


(a) Air-driven type



(b) Water-driven type

Fig. 11 High-speed camera photos of the jet at the end of nozzles



(a) Air-driven type

다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과를 유체거동학적으로 규명하기 위해 고속카메라로 노즐 끝단의 유체흐름을 촬영하여 비교하였다.

Fig. 11 은 고속카메라를 이용하여 연마재 공급 방식에 따른 초고압수 젯의 거동을 1 초당 1,000 프레임으로 촬영한 결과이다. Air-driven 방식에 비

해 Water-driven 방식에서의 고압수 젓 직경이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Water-driven 방식의 젓이 Air-driven 방식에 비해 맑은 색을 보이는데 이것은 고압수 젓 내부에 공기 함유량이 적기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 초고압수 젓을 이용하여 PPG, 구리로 이루어진 TMM 을 대상으로 정밀 절삭실험을 행하였다. 가공변수로는 가공압력, 가공속도, 이격거리, 연마재 공급량이며, 연마재 공급 방법에 따라 Air-driven 방식과 Water-driven 방식으로 가공성을 비교평가 하였다. 실험결과들을 정리하면 다음과 같다.

1) 가공 압력이 낮을수록 소재에 가해지는 힘의 전달속도가 느려 절단폭이 좁아지고, 가공성이 저하되었다. 반대로, 가공압력이 커지면, 소재에 가해지는 힘의 전달속도가 빨라져 절단폭이 넓어지고, 가공성이 증가해지는 경향을 보였다.

2) 가공속도가 빠를수록 소재에 가해지는 연마재의 가공시간이 줄어 절단폭이 좁아지고, 가공성이 저하되었다. 반대로 가공속도가 느리면 연마재의 영향을 많이 받게 되어 가공폭은 넓어지지만, 테이퍼 비는 줄어드는 결과를 얻었다.

3) 이격거리가 멀어질수록 연마재의 분산이 커져 절삭폭이 넓어지고, 테이퍼 비가 커졌고, 반대로 이격거리가 좁아지면 가공폭은 줄고 테이퍼 비는 줄어들었다.

4) 연마재의 공급방식을 Water-driven 방식으로 바꾸면, 고압수 젓의 분산 폭이 감소하였으며, 그 결과 절단폭도 작아진다. 하지만 소재의 아랫면까지 전달되는 연마재의 가공력 또한 저하되어 테이퍼 비가 Air-driven 방식보다 더 크게 나타나는 경향을 보여주었다.

향후 본 연구의 실용화를 위해서는 보다 다양한 박판소재의 종류 및 두께에 따른 기초실험 데이터가 추가 보완되어야 하며, 새로운 연마재 공급방식에 대한 보다 안정화 기술 개발이 필요하다고 사료된다.

## 후 기

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Ryan, A. and Lewis, H., "Manufacturing an environmentally friendly PCB using existing industrial processes and equipment," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 23, No. 6, pp. 720-726, 2007.
2. Lovacevic, R., Hashish, M., Mohan, R., Ramulu, M., Kim, T. J. and Geskin, E. S., "State of the art research and development in abrasive waterjet machining," *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 118, No. 4B, pp. 776-785, 1997.
3. Brattberg, T. and Chanson, H., "Air entrapment and air bubble dispersion at two dimensional plunging water jet," *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, No. 24, pp. 4133-4127, 1998.
4. Kuleckci, M. K., "Processes and apparatus developments in industrial waterjet application," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 12, pp. 1297-1306, 2002.
5. Kwak, J. S. and Ha, M. K., "Effects of traverse speed on dimensional error in abrasive water-jet," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 1-7, 2004.
6. Prakash, E. S., Sadashivappa, K., Joseph, V. and Singaperumal, M., "Nonconventional cutting of plate glass using hot air jet," *Mechatronics*, Vol. 11, No. 6, pp. 595-615, 2001.
7. Wang, J., "Abrasive Waterjet Machining of Engineering Materials," *Trans. Tech. Publications*, pp. 62-63, 2003.
8. Bahk, Y. K., Park, K. S., Shin, B. S. and Go, J. S., "Experimental and numerical investigation of glass cutting by abrasive waterjet," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 259-260, 2007.
9. Arola, D. and Ramula, M., "A study of kerf characteristics in abrasive waterjet machining of graphite/epoxy composite," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 118, No. 2, pp. 256-265, 1996.
10. Momber, A. W. and Kovacevic, R., "Principles of abrasive waterjet machining," *Springer*, pp. 7-9, 195-197, 1998.