

## 연마제 워터젯을 이용한 복합재 미세가공의 백화현상에 대한 연구

박강수<sup>+</sup>, 박연경<sup>+</sup>, 고정상<sup>++</sup>, 신보성<sup>\*</sup>  
(논문접수일 2007. 6. 30, 심사완료일 2007. 8. 17)

### A Study on the Frosting Phenomena of Abrasive Waterjet Microcutting for Multi-Layered Materials

Kang-su Park<sup>+</sup>, Yeon-kyoung Bahk<sup>+</sup>, Jeung-sang Go<sup>++</sup>, Bo-sung Shin<sup>\*</sup>

#### Abstract

It is well known that abrasive waterjet(AWJ) was developed as a kind of high-density energy processing technologies. AWJ is used to obtain the better cutting quality of various materials such as metals, ceramics, glass and composite materials within a short manufacturing time because of the characteristics of heatless and noncontact processing. However, AWJ device still has some problems to obtain the high quality of thin workpiece. In this paper, we investigated the optimal microcutting conditions of AWJ, such as maximum pressure, cutting speed and standoff distance of thin multi-layered materials. The experimental results show that AWJ has possibilities and potential to apply to the microcutting of thin multi-layered materials for IT industrial applications.

**Key Words** : Abrasive waterjet(연마제 워터젯), Multi-layered materials(복합재), Microcutting(미세가공), PCB(인쇄회로기판)

## 1. 서론

워터젯(Water-jet) 가공기술은 Bridgman의 초고압 방법 제안 이후 거듭된 발전으로, 1970년 중반에 실질적인 초고압(약10Gpa) 워터젯이 최초로 상업화된 역사가 얼마 되지 않은 신기술 중 하나이다. 워터젯 기술 중 고압으로 압축된 물에 가넷(Garnet)이나 실리카 샌드(Silica sand)와 같은 연

마 입자들을 혼합하여 가공물에 고속으로 분사하는 빔 가공의 일종인 연마제 워터젯(Abrasive water-jet)이 도입되면서 현재는 기존의 순수 워터젯(Pure water-jet)을 비롯한 기존의 워터젯 가공의 취약점을 보완 발전 시켜 나가고 있는 추세이다<sup>(1)</sup>.

최근 가장 많이 연구되고 있는 분야는 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 Hashish M.과 Kovacevic R.의 노즐

\* 교신저자, 부산대학교 ERC/NSDM (bosung@pusan.ac.kr)  
주소: 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지  
+ 부산대학교 기계공학부 대학원  
++ 부산대학교 기계공학부

(Nozze)제작기술로 완전한 노즐 집합체(Focusing tube, Jewel, Nozzle) 연구이다. 이것은 고압으로 나오는 물에 연마제를 어떻게 혼합할 것인지에 대한 연구 방법이다<sup>(2)</sup>. 그리고 다른 하나는 Miller A.의 믹싱탱크(Mixing tank)에 대한 연구 방법이다. 이것은 앞에서 말한 연마제와 물이 노즐에 들어와서 혼합되는 방식과 달리 먼저 혼합된 상태로 노즐에 들어오는 방식을 말한다. 이러한 연구에서 보이는 것과 같이 연마제 워터젯의 발전은 고압의 물과 연마제의 혼합방법에 관심이 집중되고 있다<sup>(3)</sup>.

워터젯 가공은 유해가스와 증기 없이 가공이 가능하며, 제품의 설계 및 재료 변경이 유연하며, 동일한 공구로 천공 및 절단이 가능하여 가공 시간과 절단 비용을 줄여주는 등 여러 가지 장점이 있다. 그중에서 다른 가공법과 가장 비교되는 점은 발열을 수반하지 않고, 재료의 열변형, 변성, 가스화가 일어나지 않아 열변형에 약한 금속을 가공할 때 매우 유리하다는 점이다. 지금까지 워터젯은 주로 단층으로 이루어진 특정 금속 위주로 가공, 연구되어 왔지만, 최근에 0.1~1.0mm의 미세노즐과 수십  $\mu\text{m}$ 의 연마제 개발로 마이크로단위의 미세 가공까지 가능해졌다. 이러한 워터젯은 로봇(ROBOT), CNC(Computer numerical control), 지그(JIG) 등과 결합되어 가공의 생산성 및 정밀성을 높여 전자부품, 자동차 소재 가공, 건설, 기계/조선 분야에 적용되어, 산업 전반에 걸쳐 활용 범위가 급속도로 확장되고 있다<sup>(4)</sup>. 오늘날 전자제품에 사용되고 있는 PCB기판과 같이 얇은 복합층으로 이루어진 제품은 대부분 프레스 금형으로 가공되고 있다. 하지만 프레스 금형은 소품종 대량생산에는 유리하지만 지금과 같이 다품종 소량 생산에는 금형 틀 제작비용이나 정밀성에 한계가 발생한다. 이와는 반대로 워터젯 가공은 CNC를 이용하여 설계에 맞게 쉽게 디자인이 가능하며 금형틀이 필요하지 않아 비용절감에 큰 이득을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 이러한 워터젯의 장점을 이용하여 지금까지 주로 연구되어왔던 단층으로 이루어진 특정 금속 가공에서 벗어나, 여러 소재로 이루어져 있는 얇은 복합재의 가공성에 대해 연구하였다.

## 2. 실험 장비 및 방법

### 2.1 실험 장비

본 논문실험에 사용된 장비는 연마제 워터젯으로 Fig. 1과 같이 작업테이블(CNC table), 펌프부(Pump unit), CNC 컨트롤러 등 크게 3부분으로 나뉘어 있다. 워터젯 가공에서 초고압수가 나오는 과정은 Fig. 2와 같이 먼저 정수된 물이

Table 1 Abrasive waterjet specification

Max. pressure(MPa)	410
Max. flow rate( $\ell$ /min)	3.8
Max. feed rate(mm/min)	15,000
Working area( $\text{mm}^2$ )	500×500

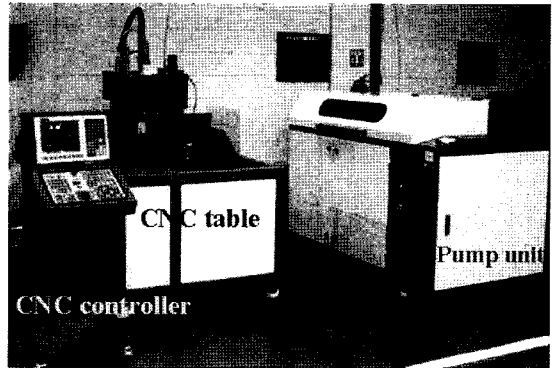


Fig. 1 Abrasive waterjet system

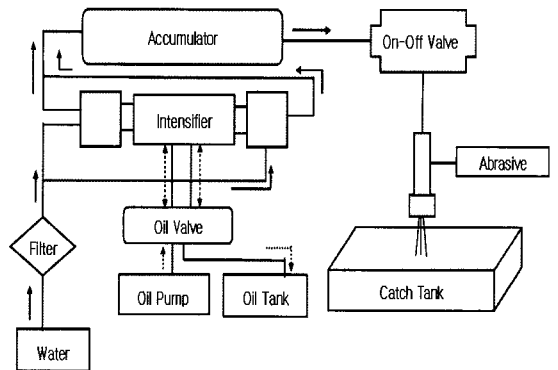


Fig. 2 Schematic diagram of abrasive waterjet

배관을 통해 증압기 펌프(Intensifier)로 보내져서 400MPa까지 가압된다. 가압된 물이 커팅헤드로 이동하기 위해서는 축압기(Accumulator)를 거친다. 이 축압기는 압력맥동을 완화시켜 커팅헤드로 물을 안정적이고 일관되게 분사시켜 준다<sup>(5,6)</sup>. 본 연구에 사용된 연마제 워터젯 사양은 Table 1과 같이 최대압력 410MPa, 토출 유량 3.8  $\ell$  /min, 최대가공속도 15,000mm/min 이다.

### 2.2 실험 방법

여러 가지 소재로 이루어진 복합소재를 연마제 워터젯을 이

No	Module	Thickness (μm)
1	PPG(Glass F/Epoxy)	50
2	Cu	12
3	PPG(Glass F/Epoxy)	100
4	Cu	12
5	(Middle) 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

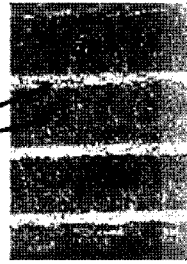


Fig. 3 Structure and formation of multi-layered material

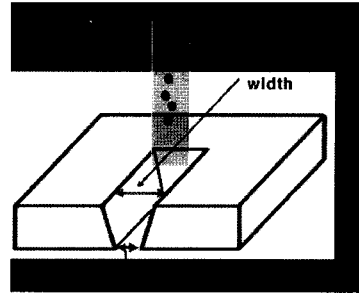


Fig. 5 Schematic of kerf geometry

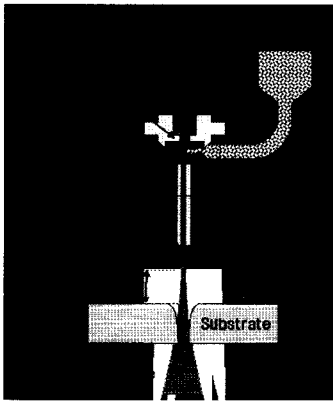


Fig. 4 Parameter of abrasive waterjet

용하여 최적의 절삭 조건을 찾기 위해 절삭 기초실험을 실시하였다. 시편은 Fig. 3과 같이 두께는 448 $\mu$ m의 구리(Copper), PPG(Glass F/Epoxy)로 이루어진 복합재를 사용하였다. 본 소재는 PCB(Printed circuit board)에 사용되고 있는 구성과 유사하게 제작된 소재이다.

연마재 워터젯의 가공파라미터는 Fig. 4와 같이 이격거리(Standoff distance), 가공속도(Cutting feed rate), 가공압력(Cutting pressure), 연마재(Abrasive) 종류와 크기, 절단각도(Cutting angle), 노즐(Nozzle), 오리피스(Orifice) 등이 있다. 이러한 파라미터에서 직경 0.5mm, 높이 50.4mm 크기 노즐과 0.2mm의 오리피스 그리고 연마제로는 가넷(Garnet)으로 일반 워터젯 가공에서 정밀한 가공 시에 주로 사용되는 #220의 크기를 사용하고, 절단각도는 90°를 기본조건으로 이격거리, 가공속도, 가공압력을 바꾸어 가며 가공성에 대해 연구하였다.

첫 번째 실험조건은 가공압력 150MPa, 가공속도 1,000 mm/min으로 고정하고, 노즐이격거리(Standoff distance)를 0.4mm~5.6mm까지 0.2mm씩 증가시키며 가공하였다.

두 번째 실험조건은 압력 150MPa, 초점거리 0.8mm를 기본 조건으로 가공속도를 200mm/min~3,000mm/min까지 증가시키며 소재를 절삭하였다.

세 번째 실험조건은 노즐이격거리를 0.8mm, 가공속도 1,000mm/min을 기본 조건으로 압력을 80MPa~320MPa까지 증가시키며 소재를 절삭하였다.

이러한 실험으로 가공된 시편의 가공이 시작되는 부분과 끝부분을 각각 제외하고, Fig. 5에서와 같이 시편에 가공이 시작되는 윗면의 너비(Entrance kerf width)와 워터젯이 소재에 관통하여 나가는 아랫면의 너비(Exit kerf distance)의 비율을 분석한 테이퍼비(Taper ratio)에 대해 노즐 이격거리, 가공압력, 가공속도에 따른 가공성을 실험 분석하였다. 그리고 앞에서 실험한 이격거리, 가공압력, 가공속도에 따른 표면 정밀도를 알파스텝퍼( $\alpha$ -stepper)를 이용하여 측정 분석하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 노즐 이격거리에 따른 가공성

가공압력과 가공속력을 일정하게 유지하고, 노즐의 이격거리를 0.4mm~5.6mm까지 0.2mm씩 증가시키는 방법으로 실험하였다. 노즐 이격거리가 0.4mm보다 작을 경우 노즐과 소재가 가까워 노즐이 막히는 경우가 종종 발생한다. 이러한 현상은 워터젯의 역류현상의 원인이 되어 가공이 불안정하다. 그리고 노즐과의 이격거리가 5.6mm를 넘을 경우 절삭폭이 1,000 $\mu$ m이상이 나오는데 이것은 사용된 노즐 직경의 두배가 넘는 치수이므로 실험에서 제외하였다. Fig. 6은 절삭폭이 노즐 이격거리에 정비례하며 증가하는 것을 나타낸다. 그리고 이격거리가 커질수록 분산되는 힘이 많아져 워터젯이 소재 밑부분까지 힘의 전달이 약해져 Fig. 7과 같이 테이퍼 비가 점점 커지게 나타난다. 일반적으로 두꺼운 소재를

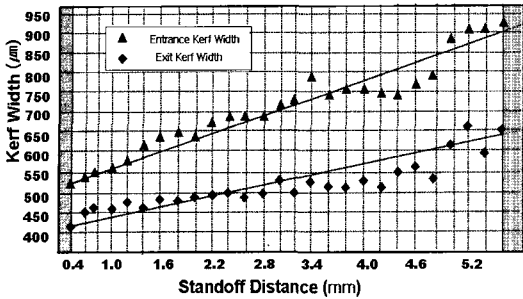


Fig. 6 Cutting kerf width with respect to standoff distance variation

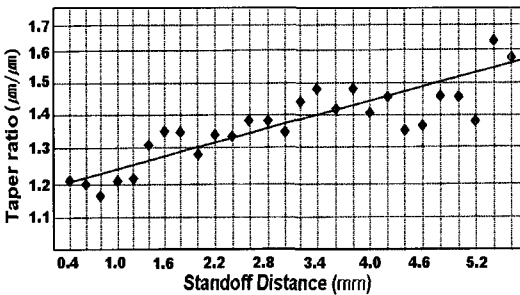
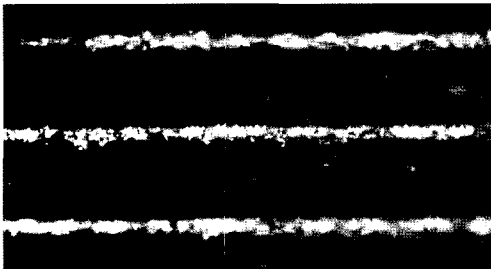


Fig. 7 Cutting taper ratio with respect to standoff distance variation



(a)



(b)

Fig. 8 Cross section view according to standoff distance variation at (a) 0.4mm, (b) 4.0mm

절단할 경우에는 이격거리가 2mm~3mm 사이가 가장 안정되며 가공성이 좋다<sup>(7,8)</sup>. 하지만 Fig. 8 같이 얇은 소재의 경우 노즐 이격거리가 짧을수록 절삭면이 깨끗하게 가공되는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 가공압력에 대한 가공성

가공 속도 1,000mm/min, 노즐 이격거리 1.0mm로 일정하게 유지하며, 가공압력을 80~320MPa까지 20MPa씩 증가시키며 실험을 하였다. 가공압력 80MPa보다 작을 때와 320MPa보다 클 경우 워터젯 장비 및 실험결과와의 불안정으로 실험 범위에서 제외하였다.

가공 결과 Fig. 9과 같이 가공압력이 커질수록 절삭 폭이 넓어지는 것을 나타낸다. 이는 수류의 압력이 높을수록 소재에 가하는 힘의 전달이 빨라지고, 동시에 힘이 많아지기 때문에, Fig. 10과 같이 워터젯이 소재의 아랫부분까지 힘이 전달이 잘되어 테이퍼 비도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11과 같이 가공압력이 약해지면 연마제에 의한 절단력이 약해져 가공성이 나빠지는 것을 확인할 수 있다.

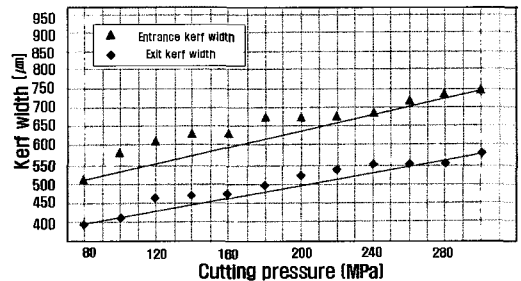


Fig. 9 Cutting kerf width with respect to pressure variation

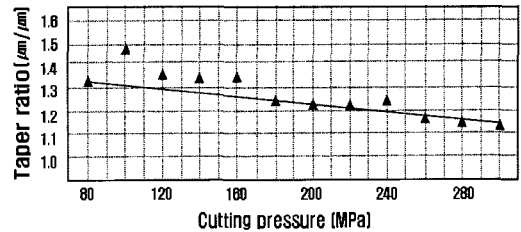
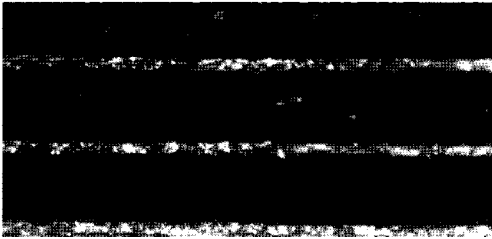


Fig. 10 Cutting taper ratio with respect to pressure variation

### 3.3 가공속도에 대한 가공성

노즐 이격거리 1.0mm, 가공압력 150MPa로 일정하게 유지하여 가공속도를 200~3,000mm/min까지 200mm/min씩



(a)



(b)

Fig. 11 Cross section view according to cutting pressure variation at (a) 300MPa, (b) 80MPa

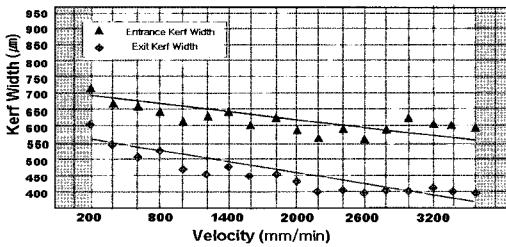


Fig. 12 Cutting kerf width with respect to velocity variation

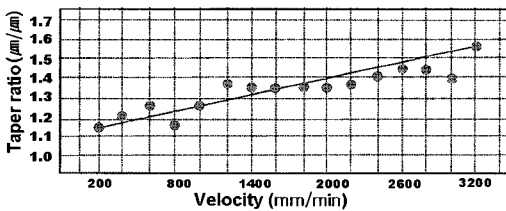


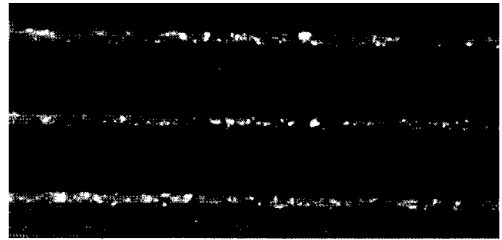
Fig. 13 Cutting taper ratio with respect to velocity variation

증가시키며 실험하였다. 그러나 속도 200mm/min이하의 경우 소재가 가공시간 동안 가공압력을 이겨내지 못하는 불안정한 공정이 발생할 수 있어 실험에서 제외하였다. 그리고 속도가 3,600mm/min보다 빠를 경우 소재가 완전 절삭되지 않아 실험에서 제외하였다.

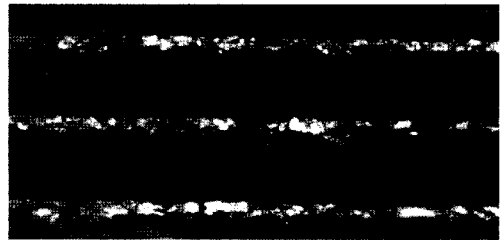
가공결과 Fig. 12와 같이 가공속도가 빨라질수록 절삭폭이 줄어들고, Fig. 13과 같이 테이퍼 비 역시 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 가공속도가 빨라 질수록 시편에 작용하는 연마제 입자가 줄어들어 소재에 가해지는 가공시간이 줄어들기 때문이다. 결국 속도가 빨라지면 Fig. 14와 같이 가공성이 나빠지며, 속도가 느리면 가공성이 좋아지는 것을 확인할 수 있다.

### 3.4 표면 거칠기 측정

위터젯 가공 파라미터 중 앞에서 실험한 내용인 노즐의



(a)

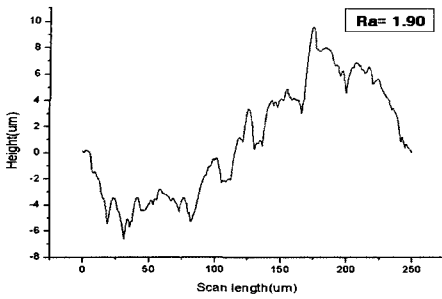


(b)

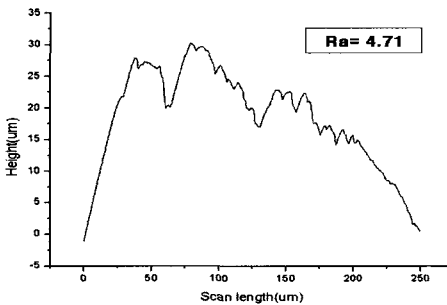
Fig. 14 Cross section view according to velocity variation at (a) 200mm/min, (b) 2,000mm/min



Fig. 15 α-stepper system

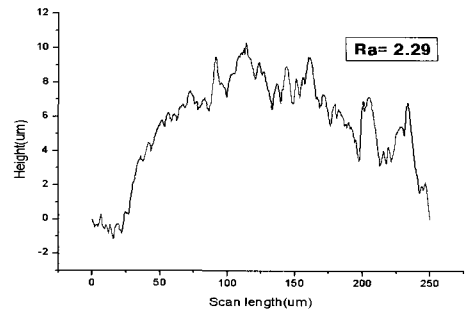


(a)

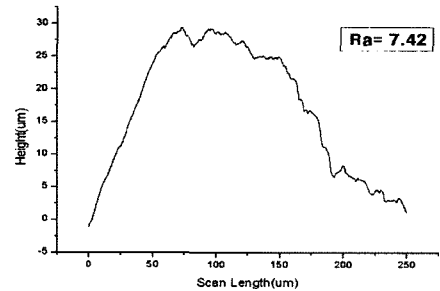


(b)

Fig. 16 Surface roughness with respect to standoff distance variation at (a) 0.4mm, (b) 4.0mm

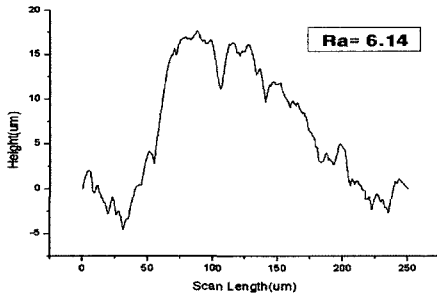


(a)

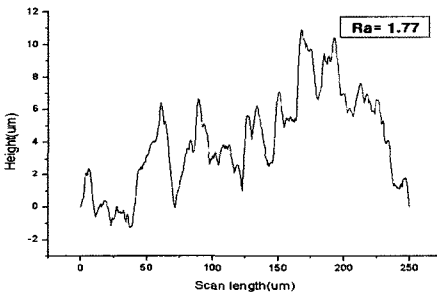


(b)

Fig. 18 Surface roughness with respect to velocity variation at (a) 200mm/min, (b) 2,000mm/min



(a)



(b)

Fig. 17 Surface roughness with respect to pressure variation at (a) 300MPa, (b) 80MPa

이격거리, 가공압력, 가공속도에 따른 표면 거칠기를 Fig. 15와 같은 알파스텝퍼를 이용하여 측정하였다.

첫째, 이격거리에 따른 표면 정밀도는 Fig. 16과 같이 노즐 이격거리가 커질수록 표면 거칠기가 1.90um에서 4.71um로 나빠진다.

둘째, 가공압력에 따른 결과는 Fig. 17과 같이 가공압력이 커질수록 거칠기는 6.14um에서 1.77um로 좋아진다.

셋째, 가공속도에 따른 표면 거칠기 결과는 Fig. 18과 같이 가공성이 나빠지며, 속도가 느리면 가공성이 좋아지는 것을 확인 할 수 있다.

### 3.5 백화현상(Frosting)의 전산 해석

연마재 워터젯 가공기술은 고압의 물이 포커싱노즐을 통과하는 과정에서 생기는 압력차를 이용해 연마재를 유입시킨다. 유입된 연마재는 노즐의 포커싱 부분에서 워터젯의 중심부로 포커싱 된다. 하지만 이러한 고압 고속의 워터젯에 연마재가 섞이는 과정에서 포커싱 길이가 짧거나 연마재유입량이 과도한 경우 등과 같은 영향으로 연마재의 일부가 워터젯의 중심으로 집중되지 않고 가장자리에 위치하게 된다. 이렇게 가장자리에 위치한 연마재는 워터젯 가공에 있어

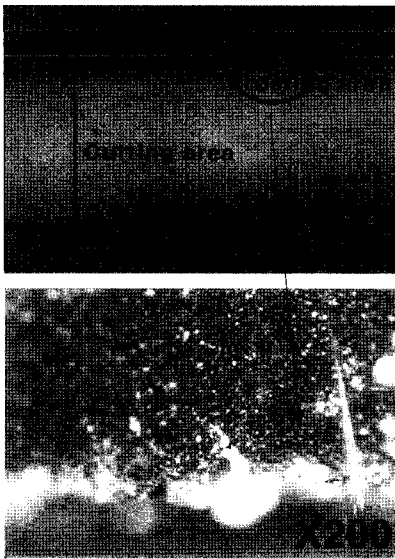


Fig. 19 Frosting phenomena around cutting edge

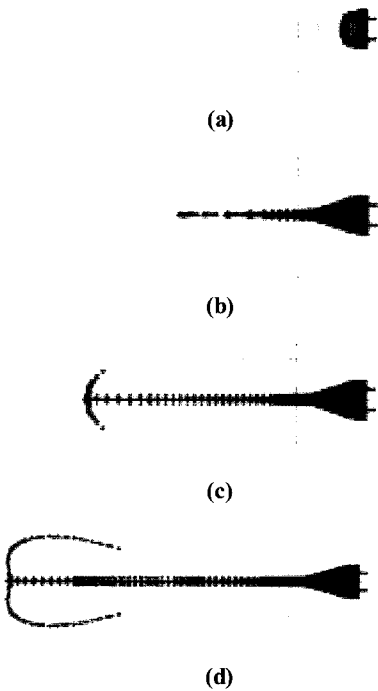


Fig. 20 Abrasive behavior of waterjet stream at (a) 1st stage, (b) 2nd stage, (c) 3rd stage, (d) final stage

서 절단면을 나쁘게 하거나 Fig. 19와 같이 가공부 주위가 하얗게 보이는 백화현상의 원인이 된다.

이러한 원인을 전산해석을 통하여 백화현상에 직접적인 영향을 미치는 요소를 확인해 보았다. 전산해석 프로그램으로는 상용 유체유동해석 프로그램인 ESI사의 CFD-ACE를 이용하였으며 연마재 커팅헤드 부분에서 고압의 물이 분사될 때의 연마재의 거동을 중점적으로 확인하였다.

그 결과 Fig. 20에서와 같이 처음 분사되는 워터젯의 끝단은 포커싱 노즐을 통과하는 순간부터 퍼지기 시작하여 이격거리가 멀어질수록 넓게 퍼지며, Fig. 20 (c) 이후에는 확실히 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 전산해석 결과와 같이 퍼진 워터젯의 끝단의 가장자리에 위치하는 연마재는 포커싱 노즐 폭보다 넓게 산란되며 가공 재료에 부딪히게 된다. 이러한 영향으로 백화현상과 같이 가공이 불안정한 부분이 발생하게 된다. 이러한 현상은 압력·속도·연마재 유입량 등 모든 가공조건에 영향을 받지만 그 중 고압의 물과 연마재가 혼합되어 소재와 만나는 시간 즉, 노즐의 이격거리에 영향을 많이 받는다. 따라서 노즐의 이격거리를 줄여 연마재가 분산되기 전에 소재와 만나면 이러한 현상을 줄일 수 있다. 하지만 노즐의 이격거리를 너무 줄이면 워터젯의 역류현상과 노즐 마모에 많은 영향을 주므로 가공조건에 맞추어 조절해야 한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 연마재 워터젯을 이용하여 에폭시, 구리, 유리 등 다양한 재질로 이루어진 얇은 복합재를 절삭하여 절삭시 노즐의 이격거리, 가공압력, 가공속도에 따른 가공성에 대해 분석하였다.

- (1) 노즐의 이격거리가 커질수록 절삭폭이 넓어지고, 연마재 분산으로 불안정한 가공현상이 많아지며, 테이퍼비가 커지는 등 가공성이 떨어진다. 하지만 노즐의 이격거리가 짧으면 가공성은 좋아지나, 너무 짧으면 역류현상 등 불안정한 공정의 원인이 된다.
- (2) 가공압력이 낮을수록 소재에 가해지는 힘의 전달속도가 느려져 가공성이 나빠진다. 그리고 가공압력이 높아지면 소재에 가해지는 힘의 전달속도가 빨라져 가공성이 양호해진다. 하지만 압력이 너무 강하면 노즐부의 마모에 영향을 미친다. 그리고 소재에 따라 고압의 힘을 이겨내지 못하고 소재가 파손되는 경우가 발생한다.
- (3) 가공속도가 빨라질수록 연마재의 영향을 덜 받게 되어

가공성이 나빠지며, 가공속도가 너무 느리면 오랜 시간 가공압력을 이겨내지 못하고 소재에 영향을 주어 가공성이 나빠진다.

- (4) 파라미터에 따른 가공성이 좋아질수록 표면조도 또한 양호해진다.
- (5) 노즐 직경 500um, 높이 50.4mm 크기 노즐을 사용하여 가공조건을 노즐 이격거리 0.6mm, 가공압력 200MPa, 가공속도 1,000mm/min으로 가공할 경우 노즐 직경보다 작은 480um의 가공폭을 얻을 수 있다.

이와 같이 워터젯은 가공 조건에 따라 가공성이 달라진다. 따라서 연마재 워터젯을 이용하여 PCB기판과 같은 얇은 복합소재의 미세가공에 대한 가공성을 확인하였으며, 향후 마이크로 워터젯에 대한 연구를 계속하여 더욱 미세한 가공이 가능할 수 있도록 연구할 예정이다. 가공이 가능할 수 있도록 연구할 예정이다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- (1) Kuleckci, M. K. 2002, "Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 12, pp. 1297~1306.
- (2) Kovacevic, R., Hashish, M., Mohan, R., Ramula,

- M., Kim, T. J. and Geskin, E. S., 1997, "State of the Art of Research and Development in Abrasive Waterjet Machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, No. 4/2, pp. 776~785.
- (3) Miller, A., King, L., G. W. and Savanick, G. A., 2001, "Waterjet Cleaning of Truck-Mounted Concrete Mixing Tanks," *Proceedings of the 2001 WJTA American Waterjet Conference*, Vol. 2, pp. 551~566.
- (4) Kwak, J. S. and Ha, M. K., 2004, "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.
- (5) Choi, B. M., Hong, S. K., Ryuh, B. S. and Park, S. M., 2001, "Development of PC-NC Water Jet System and Cutting of Titanium," *Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 53~60.
- (6) Arola, D. and Ramulu, M., 1993, "A Study of Kerf Characteristics in Abrasive Water-jet Machining of Graphite/Epoxy Composite," *ASEM - Publications - PED*, Vol. 66, pp. 125~151.
- (7) Ramulu, M. and Arola, D., 1994, "The Influence of Abrasive Waterjet Cutting Conditions on the Surface Quality of Graphite/Epoxy Laminates," *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 34, No. 3, pp. 295~313.
- (8) Kovacevic, R., Wang, L. and Zjang, Y. M., 1993, "Detection of Abrasive Waterjet Nozzle Wear Using Acoustic Signature," *Proceedings of the American Waterjet Conference*, Vol. 7, pp. 217~232.