

연마재 워터젯 가공을 이용한 유리 미세 가공 성능 평가

Evaluation of Efficiency on Glass Precision Machining by using Abrasive Water-jet

박연경¹, 박강수², 김형훈¹, 신보성², 고종수¹, 고정상^{1,✉}
 Yeon Kyoung Bahk¹, Kang Su Park², Hyung Hoon Kim¹, Bo sung Shin², Jong Soo Ko¹
 and Jeung Sang Go^{1,✉}

1 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

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

✉ Corresponding author: micros@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3221

Manuscript received: 2009.10.26 / Revised: 2010.03.17 / Accepted: 2010.05.10

This paper presents an evaluation of efficiency on glass precision machining by using abrasive water-jet machine. In this study, problems of conventional water-jet machining are examined experimentally and are analyzed numerically. Especially, the reason of whitening on the machined surface of biochip glass is determined. It is found that the mass flow rate of abrasive input and transverse speed of water-jet are key parameters to control the direct machining of micro hole and channel on a glass substrate. Based on results of experimental analysis, possibility of direct fabrication of micro holes and channels on a glass substrate is successfully confirmed.

Key Words: Abrasive Water-jet (연마재 워터젯), Micro Channel Fabrication (미세 채널 가공), Micro Hole Fabrication (미세 홀 가공), Bioglass (바이오용 유리), Biochip (바이오 칩)

기호설명

D = distance between substrate and focusing nozzle

L = nozzle length

ma = mass flow rate of abrasive

1. 서론

유리는 상온에서 화학적으로 안정된 상태이며 기체, 박테리아, 유기체 등에 대한 내성이 좋고, 생체 시료나 화학 물질의 반응에 영향을 받지 않는다. 또한 무공성(Nonporosity) 및 빛의 투과 특성 때문에 광학적 측정이 가능한 장점을 가지고 있어 바이오 분야에서 일반적으로 사용되고 있다.¹

바이오 칩(Biochip) 제작을 위한 초정밀 유리

가공에는 화학적 습식 식각, 샌드 블라스트법 그리고 레이저 가공 등이 사용 가능하다. 그러나 화학적 습식 식각 및 샌드 블라스트법을 이용한 유리 가공은 2 차원 평면에 형상 제작을 위해 복잡한 노광 사진 공정(lithography)을 필요로 하고, 레이저 가공을 이용한 유리 가공은 가공부 주위의 열적 변형으로 인해 가공 정밀도가 떨어지는 단점이 있다.

연마재 워터젯 가공(Abrasive water-jet, AWJ)은 컴퓨터를 포함하는 조작부에서 캐드(CAD) 데이터를 이용하여, 가공 형상 및 위치의 수정이 용이하고 복잡한 형상의 가공이 자유로운 장점을 가지고 있다. 또한 워터젯 가공은 고압의 물에 의해 가속된 연마재를 가공 소재에 충돌시켜 가공하기 때문에 열에 의한 변형이나 뒤튐림 등이 발생하지 않

으며 또한 기계 가공 및 레이저 가공 등에 비해 가공 속도가 빠르고 후처리 공정이 비교적 간단하다.

현재 연마재 워터젯 가공은 금속 및 폴리머 뿐만 아니라 유리 소재의 가공에도 활용 되고 있다. 대부분 두꺼운 금속 소재나 일정 두께 이상의 유리 소재의 절단 등과 같이 정밀도를 요구하지 않는 가공분야에서 사용되고 있으나, 연마재 워터젯 가공기가 상용화되어 있어 새로운 장비의 구축 없이 응용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 기존 연마재 워터젯 가공의 장점을 이용하여 바이오 칩 제작을 위해 유리기판에 복잡한 형상의 마이크로 홀이나 채널 가공의 가능성을 평가하고자 한다.

2. 연마재 워터젯 가공 특성

연마재 워터젯은 펌프에서 공급되는 고압의 물과 가넷(Garnet) 등의 연마재를 이용하여 절단 또는 홀 가공을 하는 장치로써, 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 400 MPa 이상 고압의 물을 얻기 위한 고압 펌프, 캐드 데이터를 이용하여 가공 형상을 제어하는 조작부와 연마재가 혼합된 고속의 물을 분사하여 소재를 가공하는 구동부로 이루어져 있다. 특히, 구동부는 가공 폭에 영향을 미치는 노즐이 장착된 절단 헤드(Cutting head)와 연마재가 유입되는 입자 공급기로 구성된다.

연마재 워터젯 가공은 Fig. 1 에서 도시하였듯이 펌프에서 공급된 고압의 물이 절단 헤드의 오리피스(Orifice)를 거쳐 고속의 물로 바뀌고, 낮은 압력으로 인해 혼합 챔버(Mixing chamber)에서 연마재가 유입되어 섞인 후, 노즐을 통해 분사되어 소재를 가공한다. 실제 가공은 가속된 물과 연마재가 소재와 충돌하여 얻어진다.²

워터젯 가공의 가공성에 영향을 미치는 주요 요소들을 Table 1 에 정리하였다. 그 중에서도 가장 큰 영향을 미치는 요소는 물의 압력, 연마재의 크기 및 공급량, 이송 속도, 노즐 끝 단과 소재 사이의 거리를 나타내는 이격 거리(Standoff distance)와 노즐 길이 등이다.

일반적으로 공급되는 물의 압력이 높을수록, 연마재의 크기가 작을수록, 이송 속도가 낮을수록 표면 거칠기는 작아져 가공 정밀도를 높일 수 있다는 연구 결과가 알려져 있다.³ 또한, 노즐 길이가 길수록 워터젯의 분사 후 분산이 적고 충분

한 이격 거리를 확보할 수 있어 가공 정밀도가 높아진다. 이격 거리는 2 mm 전후 일 때 노즐 직경과 가공 폭의 차이가 작아진다. 또한 이격 거리가 2.5 mm 기준으로 증감되면 윗면과 아랫면의 가공 폭(Kerf width)의 차이인 테이퍼 비(Taper ratio)가 커지며, 이격 거리가 증가될 경우 테이퍼 비의 증가 폭이 더 크다.⁴

연마재 워터젯 가공은 연마재 공급 방식에 따라 노즐 혼합형 연마재 워터젯과 연마재 선 혼합형 워터젯 두 가지로 분류된다. 노즐 혼합형 연마재 워터젯은 고압수가 노즐을 통과하기 직전에 연마재가 공급되어 분사되는 방식으로 장치 구성은 비교적 간단하다. 반면에 워터젯 내부에서 연마재의 분포가 균일하지 못하여 가공 면의 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 연마재 선 혼합형 워터젯은 고압 발생부 직후에 연마재와 고압수가 혼합된

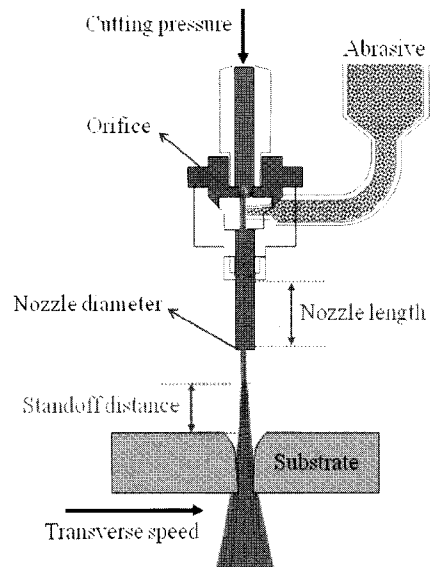


Fig. 1 Configuration of abrasive water-jet machining

Table 1 Important parameters of AWJ machining

Input Parameters				
Hydraulic	Abrasive	Nozzle	Cutting parameters	Work target material
Orifice diameter	Grit size	Diameter	Transverse speed	Ductility
Water-jet diameter	Abrasive flow rate	Length	Standoff distance	Fracture Strength
Water-jet pressure	Abrasive material	Material	Angle of attack	Hardness

후 노즐을 통해 분사되는 방식으로, 효율적인 면에서나 가공 정밀도 면에서 노즐 혼합형 연마재 워터젯에 비해 우수하나 고압 배관과 노즐의 마모가 심하며, 장치 구성이 복잡한 단점이 있다.⁵

3. 노즐 혼합형 워터젯 가공을 이용한 유리 기판 가공 시험 및 평가

우선 노즐 혼합형 연마재 워터젯을 이용하여 1.2 mm 의 두께를 갖는 유리 기판의 가공 특성에 대한 실험을 수행하였다. 특히, 가공 압력 변화에 따른 홀 가공 조건과 이격 거리 변화에 따른 절단 가공 조건을 중점적으로 비교 분석하였다. 유리 가공에서 홀 가공은 절단 가공 전 깨짐 방지를 위한 예비 가공으로도 이용되고 있어 매우 중요하다. 실험에는 0.5 mm 직경의 노즐을 사용하였으며, 약 60 ~ 65 μm 크기 분포를 갖는 메쉬 220 가넷 연마재를 사용하였다.

공급 압력 변화에 따른 유리 기판의 홀 가공 결과를 Fig. 2 에 도시하였다. 40 MPa 일 때 탭의 각도가 안정되고 아랫면의 깨짐 현상이 나타나지 않았다. 그리고 이격 거리에 따라 절단 가공한 실험 결과를 Fig. 3 과 Fig. 4 에 각각 나타내었다. 가공 정밀도를 비교하기 위해 이격 거리에 따라 윗면과 아랫면에서의 가공 폭을 비교하였으며, 이격 거리가 증가할수록 가공 폭이 노즐 직경의 약 두 배 정도 넓어짐을 확인하였다. 이 때 가공 압력은 가공 최대 압력인 380 MPa, 이송 속도는 500 mm/min 으로 고정하였다. 또한 Fig. 3 에 보였듯이 가공 면의 윗면과 아랫면에서 물결 무늬 형태가 나타났으며, 아랫면에서는 깨짐 현상이 심하게 나타났다. 이격 거리가 0.4 mm 미만일 때는 유체 저항으로 인하여 물이 역류하여 가공이 불가능하였다.

연마재 워터젯을 이용한 유리 소재 가공 시 연마재의 비산으로 인해 유리 표면이 Fig. 5 와 같이 불투명하게 변하는 백화 현상(Whitening effects)이 발생하였다. 광학 현미경을 이용하여 백화 현상이 발생한 위치에서 다수의 작은 흠들을 확인하였으며, Fig. 4 에 도시하였듯이 이격 거리가 0.4 ~ 2.6 mm 일 경우에는 백화 현상이 나타나지 않았으며, 그 이상일 경우에 백화 현상이 심화되어 나타남을 알 수 있었다.

연마재 워터젯 가공 시험을 통해 이격 거리가 짧을수록 가공성이 향상됨을 알 수 있으며, 유리 기판의 홀 가공은 40 MPa 에서 균일한 홀 가공이

가능함을 확인하였다. 또한 백화 현상을 최소화 하기 위해 0.4 ~ 2.6 mm 범위의 이격 거리로 가공을 해야 함을 확인하였다.

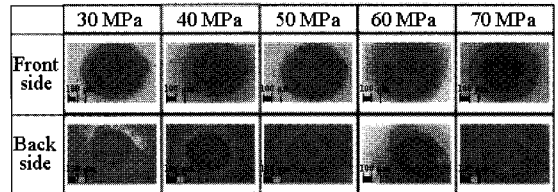
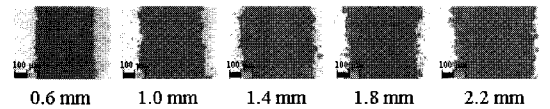
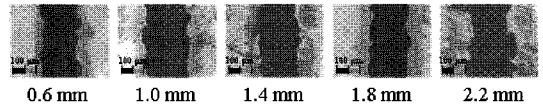


Fig. 2 Hole fabrication for various pressure conditions



(a) Front side of glass samples



(b) Back side of glass samples

Fig. 3 Cut machining results with changing of standoff Distance

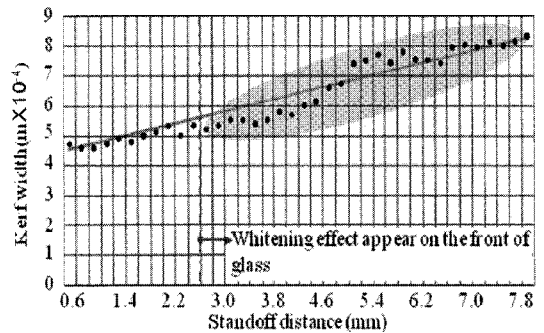


Fig. 4 Change in Kerf width for various standoff Distances

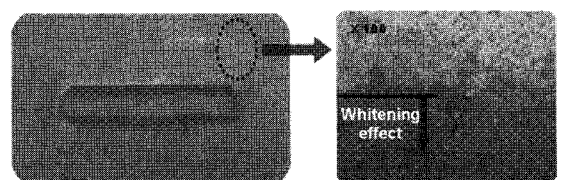


Fig. 5 Appearance of whitening on the front of glass due to flying abrasives

4. 연마제 워터젯의 가공 특성 해석

유리 가공 시에 나타난 문제점 중 백화 현상에 대한 원인을 규명하기 위해 실험에서 백화 현상과 관련성을 보인 이격 거리에 대한 가공 특성과 워터젯 내부에서의 연마제 입자의 거동에 대해 전산 해석 수행하였다. 전산 해석에는 상용 프로그램 (CFD-ACE)을 사용하였으며, 실험과 동일한 조건으로 이격 거리 변화에 따른 영향을 해석하였다. 이때 입구에서의 물의 압력은 실험과 동일한 조건인 380 MPa 로 고정하였으며, 연마제 입자에 대한 마이크로 입자 모델을 유동에 주입하여 거동을 관찰하였다.

노즐 직경 500 μm 노즐을 기준으로 하여 Fig. 6 과 같이 전산 해석 모델링을 하였고, 가공 소재는 벽으로 표현하여 워터젯 유동이 벽에 충돌하는 순간의 연마제 입자들의 거동을 분석하였다. 가공 소재인 벽의 위치를 이동시켜 이격 거리를 조절하였다.

워터젯의 가공 너비와 가공 정밀도에 영향을 주는 요소 중 백화 현상과 관련성을 보인 이격 거리의 워터젯 가공 대한 영향을 보기 위하여 Fig. 7 에서의 이격 거리, D 를 변화시키며 해석한 결과를 비교하였다. 가공성의 비교 척도로써 가공 소재와 0.5 mm 거리(Fig. 7 에서의 b 지점)에서의 워터젯 유동의 폭을 측정 하였다. 가공 소재와 충돌하기 전 워터젯 유동의 폭을 통해 이격 거리에 따른 가공 폭을 예측할 수 있다.

이격 거리를 각각 1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm 로 변화시키며 전산 해석을 수행한 결과는 Table. 2 와 같다. 이격 거리가 증가함에 따라 워터젯의 폭이 넓어지는 것을 확인하였다. 이격 거리가 증가함에 따라 가공 폭이 증가할 것임을 예측할 수 있었으며, 이는 실험 결과와 유사함을 알 수 있다.

Fig. 8 에서 볼 수 있듯이 전산 해석 결과 이격 거리가 약 3 mm 이상이 될 경우에 끝 단이 퍼지는 분산 현상을 확인하였다. 연마제 분포를 노즐 끝 단에 균일하게 위치시키고 전산 해석을 시행한 결과 분산으로 인해 연마제의 분포가 워터젯의 중심을 기준으로 불균일하게 분포됨을 알 수 있다. 또한 가공 폭 보다 넓게 퍼진 초기 분산이 발생한 끝 단에 분포하는 연마제로 인해 백화 현상이 발생됨을 예측할 수 있다.

전산 해석 결과 이격 거리 3 mm 를 기준으로 분산이 확연히 나타나 백화 현상이 심화됨을 알

수 있으며, 이는 Fig. 4 에서 이격 거리가 0.4 ~ 2.6 mm 에서 백화 현상이 최소화되는 실험 결과와 유사함을 알 수 있다.

Table 2 Calculation of water-jet width at point b for the changing input parameters

case	Standoff distance	Width of waterjet
1	1 mm	0.48 mm
2	3 mm	0.61 mm
3	5 mm	1.18 mm
4	7 mm	1.32 mm

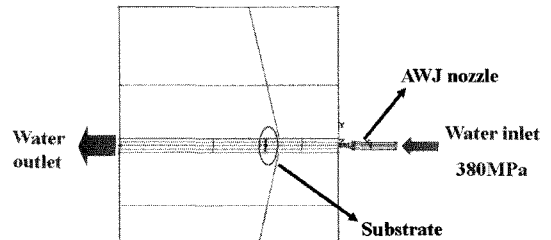


Fig. 6 Modeling of AWJ machining

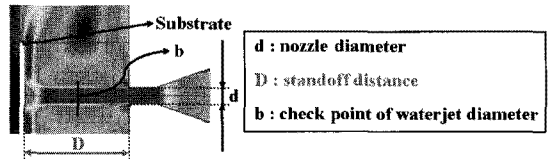


Fig. 7 Description of important parameters of AWJ CFD model

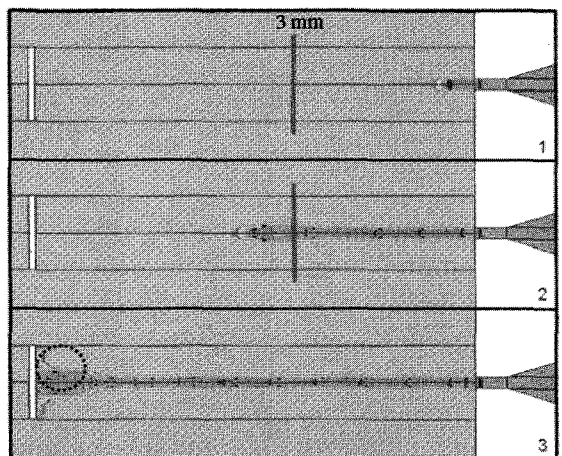


Fig. 8 Abrasive flying due to the dispersion of waterjet

5. 마이크로 채널 및 홀 가공 시험

연마재 워터젯 가공을 이용하여 유리 기판에 대한 마이크로 홀 및 채널 가공의 가능성을 평가하였다. 채널 가공에 앞서 유리 재료의 부분 가공 및 홀 가공 조건을 확인하기 위하여 가공 시간과 연마재의 공급량을 조절하였다. 이때 노즐 크기는 0.8 mm, 이격 거리는 1 mm, 공급 압력은 100 MPa, 연마재 입자의 크기는 메쉬 220 를 사용하였다. 사용된 유리 기판의 두께는 4.8 mm 이며, 실험은 가공 시간과 연마재 공급량 변화에 따른 가공 깊이 변화를 측정하였으며, 연마재 공급량은 0 ~ 40 g/min 내에서 조절하였다.

Fig. 9 에 도시하였듯이 가공 시간을 5 초로 고정한 후 연마재 공급량을 5 g/min 단위로 0 ~ 40 g/min 으로 변화를 시킨 결과 10 g/min 이하일 경우에는 가공이 되지 않고 깨짐이 발생하였다. 10 ~ 30 g/min 에서는 일정 깊이를 갖는 홈 가공이 얻어졌고, 30 g/min 이상일 경우에는 관통되는 홀 가공이 얻어진다. 그러나 40 g/min 이상일 경우에는 연마재 주입량이 많아 혼합 챔버에 들어오는 연마재 유입관의 막힘 현상이 발생하였다. 가공 시간을 15 초로 고정한 후 동일한 방법으로 실험을 한 결과 10 g/min 이하일 경우는 앞선 결과와 마찬가지로 깨짐이 발생하였으며, 10 ~ 25 g/min 의 범위에서는 관통되지 않고 일정 깊이의 홈 가공이 가능하여 채널 가공이 가능한 구간임을 확인하였다. 25 g/min 이상일 경우에 모두 관통하여 홀 가공이 가능한 구간임을 알 수 있었다.

위의 홈 가공 조건을 이용하여 유리 기판에 채널을 가공하였다. 노즐 크기와 이격 거리, 공급 압력, 연마재의 크기는 위와 동일하다. 가공 시간은 워터젯 가공기 구동부의 이송 속도 1000 mm/min 을 기준으로 하였다. 직선 가공의 경우 가속을 통해 1,000 mm/min 에 도달하였으며, 가공 방향이 바뀌는 모서리 가공 시에 500 mm/min 까지 감속 가공하였다. 연마재 공급량은 앞선 실험 결과를 바탕으로 20 g/min 으로 고정하였다.

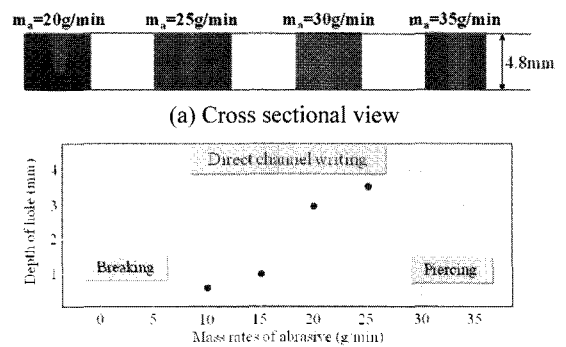
Fig. 10 에서 보는 것과 같이 앞서의 조건을 이용하여 마이크로 채널 가공이 가능함을 알 수 있다. 그러나 모서리 부분에서 이송 속도 감속 시에 가공 시간이 증가하여 가공 깊이가 깊어짐을 볼 수 있다. 부분적으로 채널의 깊이와 너비가 일정하지 않음을 확인하였다. 채널 가공 부분의 단면은 Fig. 10 에 도시하였으며, 채널 가공 너비는 400

~ 500 μm 이며 채널 가공 깊이는 500 ~ 600 μm 로 측정되었다.

실험을 바탕으로 연마재 워터젯 가공을 이용한 채널 가공의 가능성을 확인하였다. 같은 가공 속도에서 채널의 깊이와 너비의 차가 발생해 연마재의 공급량이 일정하지 않음을 확인하였으며, 가공 속도의 변화에 의해 채널 깊이가 일정하지 못함을 확인하였다. 균일한 마이크로 채널 가공을 위해 균일한 연마재의 공급과 가공 속도의 적절한 조절이 필요함을 할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 기존 연마재 워터젯 가공기를 이용한 유리 미세 가공의 성능을 평가하기 위하여 실험과 전산 해석을 통해 특성을 파악하였다. 그 결과 워터젯을 이용한 유리 가공은 유리 소재 표면에 백화 현상이 나타나 불투명해지는 문제가 있음을 확인하였다. 또한, 표면의 백화 현상의 원인



(b) Conditional fabrication results of AWJ machining
 Fig. 9 AWJ machining for different abrasive mass flow rates

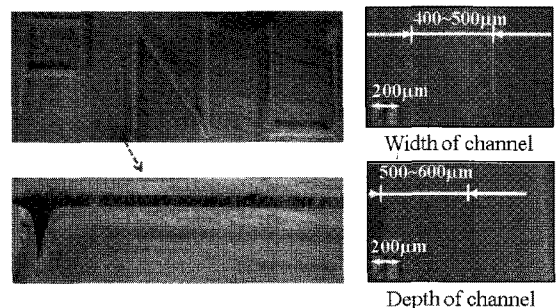


Fig. 10 Direct micro channel writing on glass by using the AWJ machining

이 워터젯의 분산으로 인한 것임을 실험과 전산 해석의 결과를 통해 알 수 있다. 백화 현상은 이격 거리를 조절함으로써 최소화 할 수 있었다.

가공 속도와 연마재 공급량을 조절하여 기존의 연마재 워터젯을 이용한 직접적인 마이크로 홀 및 채널 가공 가능성을 확인하였다. 하지만 현재 개발된 장비를 이용하면 연마재 주입량이 일정하지 못하고 연마재의 분포가 균일하지 않아 폭이나 깊이가 균일한 채널을 가공하기에는 무리가 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 연마재 워터젯 가공을 이용한 마이크로 가공 응용을 위한 유리 미세 가공에 대한 전반적인 성능을 평가하였다. 전산 해석과 실험을 통하여 연마재 워터젯 가공을 평가한 결과 향후 연마재 분포를 중심으로 집중 시켜주고 공급이 안정된 장비를 개발하면, 레이저 가공이나 복잡한 MEMS 가공을 대체할 수 있는 직접적인 마이크로 채널 및 홀 가공에의 응용이 기대된다.

후 기

본 논문은 중소기업청의 구매조건부 신제품 개발사업(20070679000)의 지원으로 수행된 연구임.

참고문헌

1. 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.
2. Kulekci, M. K., "Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 12, pp. 1297-1306, 2002.
3. Chena, L., Siores, E. and Wong, W. C. K., "Kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of ceramic materials," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 11, pp. 1201-1206, 1996.
4. Ramulu, M. and Arola, D., "Influence of abrasive waterjet cutting conditions on the surface quality of graphite/epoxy laminates," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. 3, pp. 295-313, 1994.
5. Kim, J. K., "Slotting of rock and concrete using an abrasive suspension water jet system," School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Master Degree, Graduate School of Seoul National University, 2006.
6. Miller, D. S., "Micromachining with abrasive waterjets," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, No. 1-3, pp. 37-42, 2004.
7. Khan, A. A. and Haque, M. M., "Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, pp. 404-407, 2007.
8. Chae, J. and Park, S. S., "High frequency bandwidth measurements of micro cutting forces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1433-1441, 2007.
9. Anantharamaiah, N., Tafreshi, H. V. and Pourdeyhimi, B., "Numerical simulation of the formation of constricted waterjets in hydroentangling nozzles effects of nozzle geometry," *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 84, No. 3, pp. 231-238, 2006.
10. Junkar, M., Jurisevic, B., Fajdiga, M. and Grah, M., "Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 7, pp. 1095-1112, 2006.
11. Rahman, M., Lim, H. S., Neo, K. S., Kumar, A. S., Wong, Y. S. and Li, X. P., "Tool-based nanofinishing and micromachining," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, No. 1-3, pp. 2-16, 2007.
12. Anantharamaiah, N., Tafreshi, H. V. and Pourdeyhimi, B., "A study on flow through hydroentangling nozzles and their degradation," *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, No. 14, pp. 4582-4594, 2006.
13. Behrens, B. A., Doege, E., Reinsch, S., Telkamp, K., Daehndel, H. and Specker, A., "Precision forging processes for high-duty automotive components," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, No. 1-3, pp. 139-146, 2007.
14. Azmir, M. A. and Ahsan, A. K., "Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, No. 1-3, pp. 122-128, 2008.

15. Babu, M. K. and Chetty, O. V. K., "A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining," *Wear*, Vol. 254, No. 7-8, pp. 763-773, 2003.