

습식 워터 젯 정밀 절삭 가공용 다이아몬드 오리피스 제조 및 응용

김연철* · 박희동 · 조재한 · 강석중^a

이화다이아몬드공업(주) 기술연구소, ^a한국과학기술원 신소재공학과

Manufacture and Application of Diamond Orifices in Abrasive Suspension Jet for Micro Machining

Youn Chul Kim*, Hee Dong Park, Jae Han Jho and Suk Joong L Kang^a

EHWA DIAMOND IND. CO., LTD, Osan-city, Kyungki-Do, 447-804, Korea

^aDepartment of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 545-090, Korea

(Received October 13, 2008; Accepted December 11, 2008)

Abstract High-pressure abrasive entrained jet have rapidly become important machining technology over the last two decades. However, suspension jet by high-pressure has been recently developed for packaging sawing. Ideally, diamond materials should be used for components in abrasive water-jet systems that are subject to high erosive conditions. Using the diamond orifices improve maintenance and extend wear part life. This paper gives insights to using an abrasive suspension jet with diamond orifice. The influences of orifice material and orifice design are evaluated.

Keywords : Abrasive, Suspension jet, Diamond, Orifice

1. 서 론

물과 연마재를 이용한 워터 젯 시스템은 1983년 이후에 두께 5~100 mm 범위의 알루미늄과 스틸 판재를 절단하는데 널리 사용되고 있다. 워터 젯 시스템의 장점은 다른 일반적인 가공에 비해 물을 사용하므로 저렴하고 피사재 적용 범위가 넓고, 가공 후 열영향부가 없는 것이라 할 수 있다.

통상 세척이나 코팅층 제거 목적으로 사용되는 워터 젯의 속도는 50~200 m/s 정도이고, 절단 가공이 가능한 고압 워터 젯은 700 m/s 이상으로 분류할 수 있다. 이러한 워터 젯 시스템의 [1-2] 기술적 발전은 석재 및 금속가공의 응용범위를 넘어 기술집약적 산업인 반도체 장비분야에까지 적용될 수 있는 수준으로 발전된 상태이다. 최근 반도체용 제품에 직선 및 곡선절단이 가능한 습식 워터 젯(Suspension jet) 방식이 개발되고 있으며, 물과 연마재의 혼합물이 고속

으로 분사되는 작업환경에서 적용이 가능한 내마모 공구도 개발이 진행되고 있다.

본 연구에서는 Flunt 3D 유동 해석을 이용하여 노즐 설계에 필요한 내부 구조를 예측하였다. 노즐 설계에 필요한 입구부 형상과, 노즐 내부의 각도, 다이아몬드 두께에 따른 최대유속과 직진성을 시뮬레이션을 통해 해석하고, 해석된 노즐 구조를 바탕으로 PCD(Poly crystal diamond)와 천연다이아몬드 노즐을 재료로 다이아몬드 노즐의 특성을 비교하였다. 본 연구를 통하여 습식 워터 젯 시스템에서 두 재료의 내마모성 차이를 비교하고 습식 워터 젯에 다이아몬드 노즐의 적용성을 검토하였다.

2. 실험방법

습식 워터 젯 시스템에 적용할 노즐 재료로는 일진다이아몬드社의 PCD제품을 사용하였다. PCD는

*Corresponding Author : [Tel : +82-31-370-9345; E-mail : younchul@ehwadia.co.kr]

다이아몬드 grain size 10 μm , 다이아몬드 함량 92%, 모델명 CM PCD를 사용하였으며, 천연 다이아몬드는 E6社의 직경 2 mm, 두께 1.5 mm 크기의 제품을 사용하였다.

다이아몬드 노즐 제조에 내부 설계를 결정하기 위해서 Fluent3D 유체해석 프로그램을 이용하여 순수 water 상태에서 입구부 형상, 오리피스 각도, 오리피스 두께를 변수로 해석하였다. 분석 영역을 만 개의 영역으로 분할하여 노즐 입구부에서 출구부의 50 mm 범위에 대하여 최대 유속과 속도 분포를 구하였다. 유체해석 결과를 바탕으로 각 설계변수에 따른 직진성과 최대 유속을 분석하여 노즐 구조 설계의 최적 조건을 도출한 후, 절단 시험을 위한 다이아몬드 노즐을 최적조건에 맞추어 제작하였다.

그림 1은 습식 워터 젯 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 연마재와 물이 혼합되어 있는 베셀(Vessel)에서 순환되어 고압 펌프를 통과하면 고속이 발생하게 되어 노즐의 직경 250 μm 을 통과할 때는 800 m/s 이상으로 분사하게 된다. 분사된 연마입자는 필터(Filter)를 통과하여 다시 베셀로 혼합되어 다시 분사할 수 있는 순환 구조로 제작되었다. 다이아몬드 노즐은 고압에서 분사되는 연마재와 물이 통과하는 외부로 분사되는 영역으로 내마모성 특성이 요구된다.

노즐의 홀 가공을 위한 공정 흐름을 그림 2에 나타내었다. 소결공정은 다이아몬드와 스테인레스 304 재질의 몰드를 사용하여 고주파 소결방식으로 1050°C에서 3 분간 소결을 실시하였다. 소결 후, 저 출력 Nd-YAG 레이저로 직경 150 μm 으로 가공한 후, 랩핑과 정밀 연마를 이용하여 250 μm 으로 확대하였다. 본 노즐 제작 공정 통하여 노즐을 제작하면, 직경 250 μm , 홀 공차 $\pm 5 \mu\text{m}$, 진원도 3 μm 이하

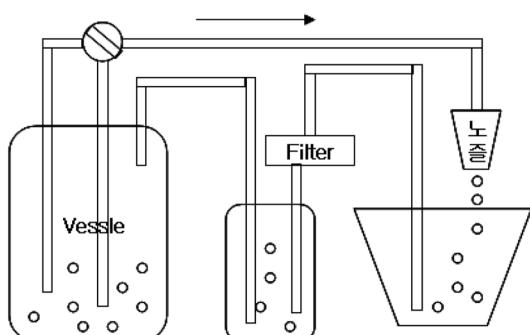


Fig. 1. A Schematic diagram of abrasive suspension jet.

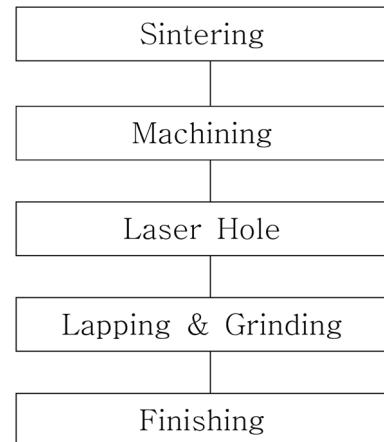


Fig. 2. Process of diamond nozzle.

Table 1. Test condition

Test machine	Abrasive Suspension Jet
Pressure (bar)	700
Abrasive	SiC (60 μm)
Abrasive Ratio (wt%)	10%
Flux (L/min)	1.5
Flux Velocity (m/s)	800
Cutting Speed (mm/s)	70~80
Nozzle Diameter	250 μm
Workpiece	Dummy Package (1.5 mm)

로 다이아몬드 노즐 제조가 가능하였다.

제작된 노즐은 쿠스코엘비이社의 습식 워터 젯 장비를 이용하여 절단 시험을 실시하였다. 피삭재로는 내부에 침을 포함하지 않는 두께 1.5 mm의 더미 패키지(Dummy package)를 이용하였다. 표 1에 습식 워터 젯 장비의 세부 절단 시험 조건을 설명하였다. 절단 후 피삭재 표면 상태를 확인하기 위하여 Kosaka 모델명 SE1200 측정 장비를 이용하여 표면 조도를 측정하였고, 절단 시험 후 사용된 노즐은 SEM(Scanning electron microscopy)을 이용하여 노즐 단면을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 노즐 유동 해석

고압에서 분사되는 물과 연마재의 혼합액은 노즐의 내부 구조에 따라 유체의 흐름이 달라진다. 따라

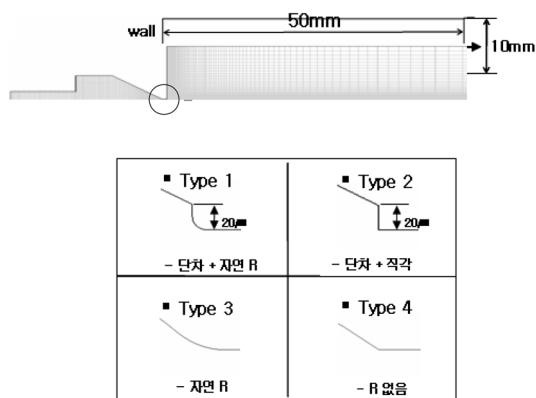


Fig. 3. Variables of orifice shape.

서 노즐 내부의 구조에 따라 노즐의 직진성과 최대 유속은 영향을 받게 된다[3-4]. 노즐 내부의 유동 해석 변수로는 오리피스의 입구 형상, 오리피스 각도, 오리피스의 두께로 선정하였다. 각 변수에 따라 최대 유속과 직진성의 변화를 예측하였다.

그림 3은 각각의 해석 변수 중 오리피스 형상에

따른 유동 해석 결과이다. 노즐 내부에서 다이아몬드 오리피스가 있는 입구 형상에 의한 영향으로서 유체가 고속이 발생하는 지역이다. 입구부 형상은 4종류로 분류하였다. 다이아몬드 오리피스가 있는 부위에서 단차가 존재하는 구조와 단차없이 노즐 내부에서 오리피스까지 연결되는 구조로 구분된다. 또한, 단차가 있는 경우는 직각형태이거나 미세한 R 형태로 구분하였다. 단차가 존재하지 않는 경우에는 곡선형태와 직선 형태의 두 종류로 구분하여 각각의 조건별로 최대유속을 도출하였다. 그림 4는 입구 형상별로 최대 유속과 출구부에서의 유속의 변화를 보여준다. 입구부에 단차를 갖고 있는 Type 1과 Type 2의 구조가 단차가 없는 Type 3나 Type 4에 비해 최대 유속이 빠른 것을 알 수 있다. 단차가 없는 경우에는 Type 3의 경우가 최대 유속이 낮았는데 이는 유선형상에 기인한 것으로 판단된다. Type 1의 경우 최대 유속은 가장 빠른 결과를 보이고 있으나, 최대 유속이 발생하는 위치가 노즐 중심부가 아닌 노즐 외부에서 발생하는 것으로 나타났다. 오리피스의 중심

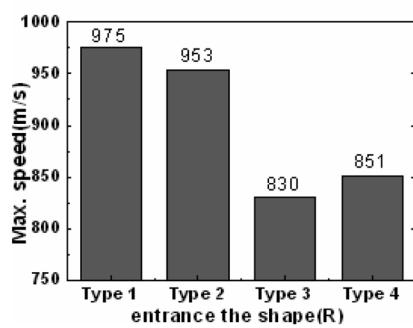


Fig. 4. Maximum flux & velocity magnitude with orifice shape.

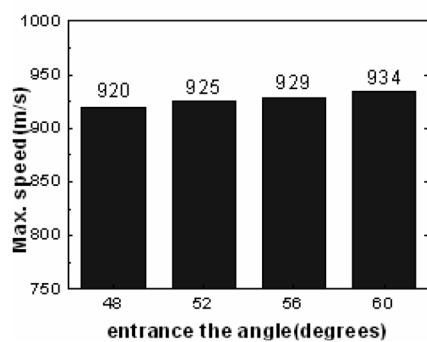
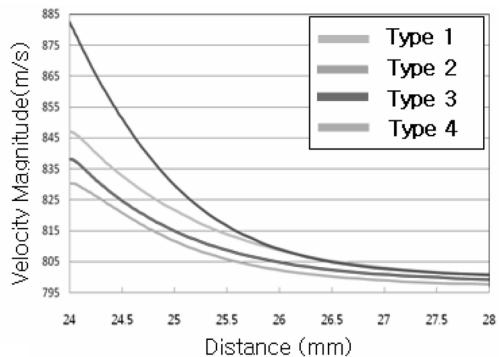
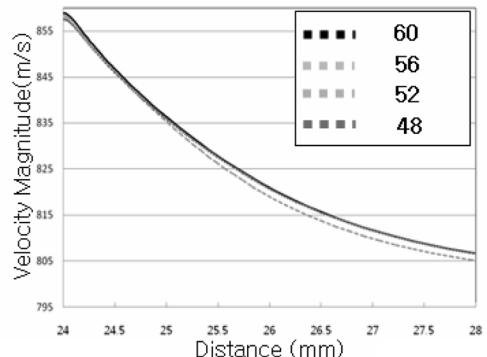


Fig. 5. Maximum flux & velocity magnitude with orifice angle.



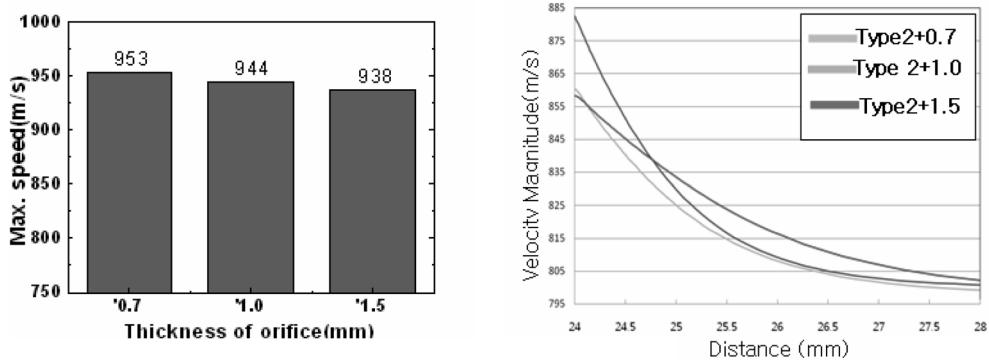


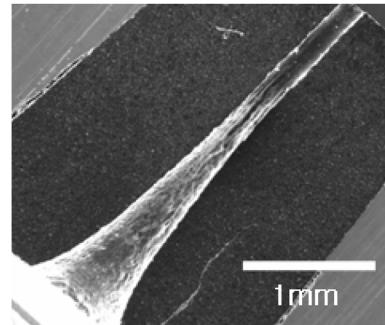
Fig. 6. Maximum flux & velocity magnitude with orifice thickness.

부가 아닌 외부에서 최대 유속이 발생하면 다이아몬드의 마모를 증가시키고, 유체의 직진성이 떨어지게 될 것이다. 따라서 입구부 설계는 최대 유속과 위치를 고려하여 Type 2가 가장 바람직한 것을 보여준다. 그림 5는 오리피스 각도에 의한 영향을 나타낸다. 각도가 증가할수록 최대 유속은 증가함을 알 수 있으나 최대 유속의 증가율은 크지 않음을 알 수 있다. 그림 6은 오리피스 두께에 의한 영향을 보여준다. 두께가 증가할수록 최대유속은 약간 감소하는 경향을 보였다. 그러나 유체의 직진성을 고려하면 오리피스 두께를 1.5 mm로 했을 경우 입구부로부터 가장 좋은 직진성을 유지하는 것을 알 수 있었다. 노즐 유동 해석을 바탕으로 노즐 구조에 따른 최대 유속과 직진성을 갖는 TYPE 2와, 각도 60도, 두께 1.5 mm로 노즐을 설계하고 절단 시험을 위한 시료를 제작하였다. 유동 해석 결과가 실제로 부합하는지에 대한 결과는 본 연구에서는 다루지 않았다.

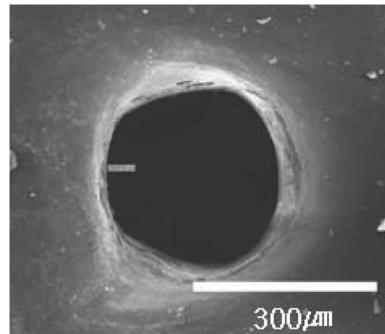
3.2. 절단 시험

다이아몬드 노즐 제조 공정과 유동 해석 결과를 바탕으로 PCD[5]와 천연 다이아몬드의 2종류의 다이아몬드 노즐을 제작하였고, 습식 워터 젯 장비를 이용하여 절단 시험을 실시하였다.

그림 7는 SiC 연마재와 물의 혼합액을 700 bar에서 분사한 후 사용된 노즐의 SEM 사진이다. 천연다이아몬드를 사용한 오리피스는 10 시간 사용 후 초기 직경 250 μm 보다 직경이 37 μm 커졌다. PCD 노즐과 비교하면 동일한 절단 조건에서 입구홀의 크기가 1 mm까지 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 천연다이아몬드는 단결정 형태로 다이아몬드



(a) Cross section of PCD nozzle



(b) Cross section of Natural diamond nozzle
Fig. 7. SEM micrographs of used diamond nozzles.

고유의 우수한 내마모특성 때문인 것으로 사료된다. PCD 노즐의 경우는 내부 성분이 92%의 미세한 다이아몬드와 Co 바인더 입자로 구성되어 고속 분사시 SiC 연마재에 의해 바인더 입자가 급격히 마모된 것으로 사료된다.

그림 8은 습식 워터 젯으로 절단한 피삭재와 동일한 피삭재를 다이아몬드 쏘와 레이저 가공 방식으로

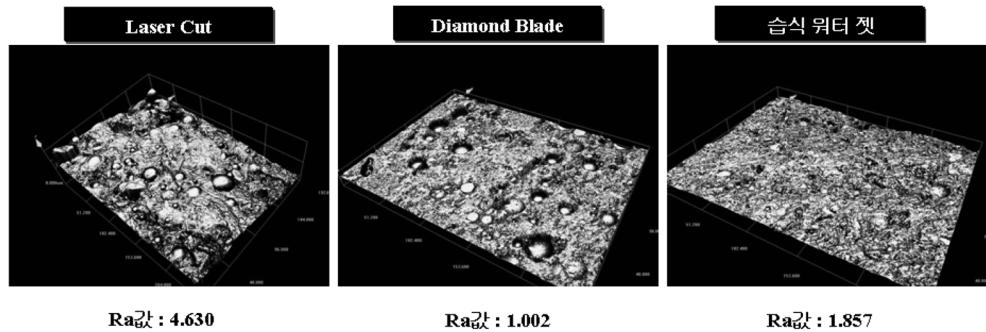


Fig. 8. Surface roughness with cutting methods in experiments.

절단한 후 표면조도를 측정한 결과이다. 습식 워터 젯 방식은 Ra $1.857 \mu\text{m}$ 로 레이저 절단 방식의 Ra $4.630 \mu\text{m}$ 에 비해 표면 조도가 매우 좋음을 알 수 있다. 다이아몬드 쏘의 경우는 Ra $1.002 \mu\text{m}$ 으로 표면 조도가 면에서 가장 좋은 결과를 나타내었다. 그러나 다이아몬드 쏘의 경우는 절단 방식의 구조상 직선 커팅만이 가능하여 곡선 커팅과 다양한 형상 가공이 불가능한 단점을 갖고 있다. 습식 워터 젯의 경우는 다이아몬드 쏘에 비해 표면 조도는 떨어지나 곡선 커팅과 프로그램 가공이 가능한 장점이 있다.

4. 결 론

고압의 물과 연마재가 혼합된 습식 워터 젯 (Abrasive suspension jet) 시스템에서 내마모성이 우수한 다이아몬드 오리피스의 적용가능성을 확인하였다. 천연다이아몬드를 이용하여 $250 \pm 5 \mu\text{m}$ 이내의 다이아몬드 오리피스가 가능하였다. 천연다이아몬드는 고압에서 10시간 사용 후 직경이 초기보다 $37 \mu\text{m}$ 정도 증가했으며, PCD 오리피스의 경우, 기지

조직의 Co, W 바인더의 마모로 인해 노즐 직경이 1 mm 이상 증가하여 내마모성이 떨어지는 것을 알 수 있었다.

습식 워터 젯 시스템을 이용하여 패키지 절단 시험을 실시한 결과, 표면 조도는 다이아몬드 블레이드, 습식 워터 젯, 레이저 순으로 우수하였다. 향후 건식 워터 젯 방식뿐만 아니라, 습식 워터 젯 장비에서 장비의 유지보수와 사용 수명 향상을 위해 내마모 용도로의 다이아몬드 사용이 커질 것으로 예상한다.

참고문헌

- [1] KMT Waterjet Systems, www.kmtwaterjet.com
- [2] A. M. Hoogstrate: The use of Diamond Orifice in Industrial Abrasive Entrainment Waterjet cutting Systems. Diamondatwork Conference 2008.
- [3] Kyung Am Park: The Korea Society of Mechanical Engineers, **18** (1994) 701.
- [4] Yoon Suk Choi: Korean Society of Computational Fluids Engineering, **12** (2007) 8.
- [5] Seung Moon Yang: Korea Patent No. 2003-0023948.