

AWJ에서 혼합챔버 형상이 절단성능에 미치는 영향

이효렬*, 곽용길⁺, 김화영⁺, 안중환⁺, 여명헌⁺⁺

(논문접수일 2011. 03. 04, 수정일 2011. 05. 27, 심사완료일 2011. 08. 11)

Effects of Mixing Chamber Shape on Cutting Performance in AWJ

Hyo-Ryeol Lee*, Yong-Kil Kwak⁺, Hwa-Young Kim⁺, Jung-Hwan Ahn⁺, Myeong-Heon Yeo⁺⁺

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 cutting quality of various materials such as metal, ceramics, glass and composite materials within a short manufacturing time because of the characteristics of heatless and noncontact processing.

However, surface roughness and dimension error like round, burr, taper vary severely according to the processing conditions such as pressure, cutting speed, orifice diameter, stand off distance and abrasive flow rate. In this paper, the effect of the shape of mixing chamber on surface quality is studied. Three types of mixing chamber - round, parabolic, elliptical - are suggested and each performance is compared to that of cylindrical mixing chamber experimentally. From the result, is proved to be the optimal mixing chamber in the aspect of surface quality the parabolic one.

Key Words : AWJ(Abrasive Waterjet, 연마제 워터젯), Cutting Head(커팅헤드), Mixing Chamber(혼합챔버), Taper Angle(테이퍼 각), Surface Roughness(표면거칠기)

1. 서론

연마제 워터젯(Abrasive Water Jet, 이하 AWJ) 절단은 2,000~4,000bar 정도로 압축된 고압의 물을 노즐을 통해 음속의 2~3배의 속도로 분사시켜 피삭재를 절단하는 기술이다. 이는 기존의 레이저, 플라즈마 절단 등과 같이 임의의 점에서 시작하여 정해진 형상가공이 가능하기 때문에 피삭재 절감의 장점이 있다. 또한 가스절단기, 플라즈마 절단기, 레이저 절단기, 와이어 커팅 등은 가열에 의한 산화와 용융을 이용한 방식으로 이러한 열을 이용하는 절단 가공 방식은 열전도성이 낮고 저융점을 가진 재료에는 절단가공이 불가능하다는 단점을 가지고

있다. 하지만 연마제 워터젯을 이용한 절단은 상온에서 절단이 이루어지므로 열에 의한 변형이 없어 자동차, 전자관련 산업뿐만 아니라 IT부품 및 반도체, 의료, 항공우주, 로봇 관련 산업분야 등 고부가 가치 부품들에 적용되고 있다⁽¹⁾.

AWJ 절단가공에 있어서 절단비용의 상당부분을 연마제가 차지하므로 절단속도가 빠를수록 절단비용은 줄어든다. 하지만 절단속도가 너무 빠르면 테이퍼, 피삭재의 미절단이 발생하여 절단면의 품질이 나빠진다. 피삭재의 절단면의 품질을 유지하며 절단비용을 낮추기 위한 방법 중 물과 연마제가 혼합되는 혼합챔버의 혼합효율을 향상시키는 방법이 있다.

* 부산대학교 기계공학부 대학원 (hong30140@pusan.ac.kr)

주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산 30번지

+ 부산대학교 기계공학부

++ (주)TOPS

혼합 효율에 영향을 주는 혼합챔버의 설계변수로는 연마제 공급구 단면 형상과 각도, 오리피스 출구에서부터 연마제 공급구까지의 거리, 혼합실의 길이 대 직경 비, 혼합실의 형상이 있으며 본 논문에서는 혼합챔버의 혼합실 형상에 따른 AWJ의 절단성능 변화를 피삭재의 테이퍼와 표면 거칠기를 측정하여 비교하였다.

2. AWJ시스템 구성 및 혼합챔버의 설계

2.1 AWJ시스템 구성

Fig. 1은 AWJ 절단 매커니즘의 개념도를 나타낸 것이다. AWJ는 크게 고압의 물을 만들어내는 증압기(Intensifier) 부분과 고압의 물과 연마제를 혼합하고 이를 분사하여 피삭재를 절단하는 커팅헤드의 두 부분으로 이루어져있다⁽²⁾. 먼저 증압기는 크게 필터를 거쳐 불순물이 제거된 저압의 물을 고압을 물로 가압시키는 증압 펌프와 고압수의 압력 맥동을 완화해 압력을 일정하게 유지시켜주는 축압기로 구성된다.

증압기로부터 생성된 고압의 물이 유입되는 고압 관로(Extension tube)를 통하여 커팅헤드로 공급되며, 커팅헤드의 구조는 Fig. 2와 같다. 고압의 물은 오리피스(Orifice)의 작은 구멍을 통과하면서 고속으로 바뀌게 되고, 혼합챔버(Mixing chamber)에서는 연마제 주입구(Abrasive inlet tube)를 통해 유입된 연마제와 오리피스를 통과하여 고속으로 바뀐 물을 혼합해준다. 이렇게 혼합된 물과 연마제는 노즐(Nozzle)을 통과하는 동안 가속되어지며, 직진성이 보장된 상태로 분사된다. 이렇게 노즐을 통해 고속으로 가속된 연마제 입자가 피삭재와 충돌하여 피삭재를 침식시켜 절단한다.

AWJ절단에서 절삭력에 영향을 끼치는 절단변수로는 수리적 변수, 절삭변수, 혼합 및 가속변수, 연마제 변수의 4가지로 분류되며 각각의 변수는 다음과 같다. 수리적 변수에는 펌프의 압력(Cutting pressure)과 오리피스의 직경(Orifice diameter)이 해당되며, 절삭 변수에는 노즐의 절단속도(Feed rate)와 이

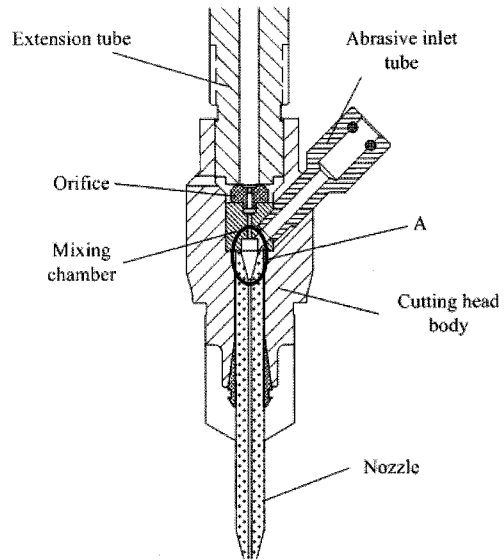


Fig. 2 Structure of cutting head

격거리(Stand off distance), 절단각도가 있다. 그리고 혼합 및 가속 변수에는 노즐의 직경(Nozzle diameter)과 노즐의 길이(Nozzle length)가 해당되며, 연마제 변수로는 연마제 유량(Abrasive flow rate), 연마제 입자의 입도(Mesh), 경도(Hardness), 형상(Shape factor)이 있다. 이외에도 절삭 대상물에 대한 물성변수인 피삭재의 재질, 강도, 인성, 연성, 취성등이 있으며 일반적으로 절삭력은 펌프의 압력이 높고, 절단속도가 느리며, 연마제 유량과 오리피스의 직경이 클수록 증가하는 경향이 있다⁽³⁾.

2.2 혼합챔버의 설계

Fig. 3은 혼합챔버에서 물과 연마제, 공기가 혼합되는 과정을 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX를 사용하여 가시화 한 결과이며, 해석에 사용된 혼합실의 형상은 현재 상용화되어 있는 실린더 형상이다.

가시화 결과를 살펴보면 연마제 주입구에서 유입된 연마제의 일부는 오리피스를 거쳐 고속으로 변환된 물에 즉시 혼합되어 노즐로 보내지며, 나머지 일부는 고속의 물로 인해 혼합실과 노즐입구 부분에서 형성된 보텍스로 인해 연마제 입자가 혼합실의 외벽을 따라 이동하여 고속의 물이 유입되는 부분에서 물과 혼합되어 노즐로 보내지는 것을 알 수 있다. 또한 혼합실이 실린더 형상일 경우 외벽을 따라 이동하는 연마제 입자의 이동속도가 $-x$ 방향의 이동속도에 비해 $-y$ 방향의 속도가 느려 연마제 입자가 원활히 공급되지 못하여 y 축과 평행한 혼합실 외벽 및 모서리에 집중되어 있으며 이는 혼합효율을 저감시킨다.

기존의 실린더 형상 혼합실에서 모서리부분에 라운드를 추가하였을 때와 혼합실 외벽의 단면 형상이 직각이 아닌 완만한 곡선의 형태 일 때 혼합효율의 변화를 알아보기 위해 4가지 혼

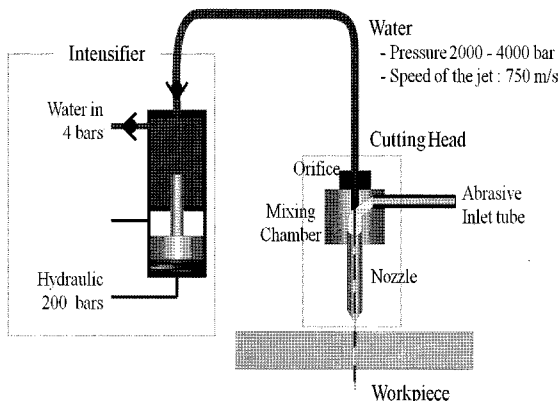


Fig. 1 Configuration of AWJ machining

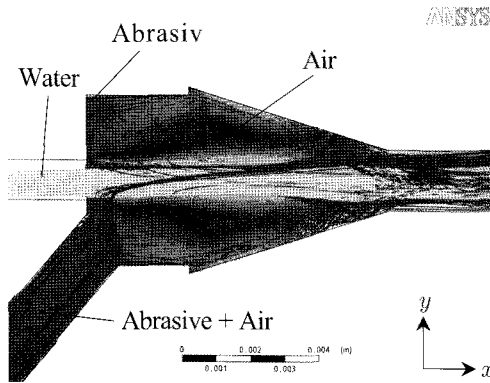


Fig. 3 Mixing of water, air, abrasive inside the mixing chamber⁽⁴⁾

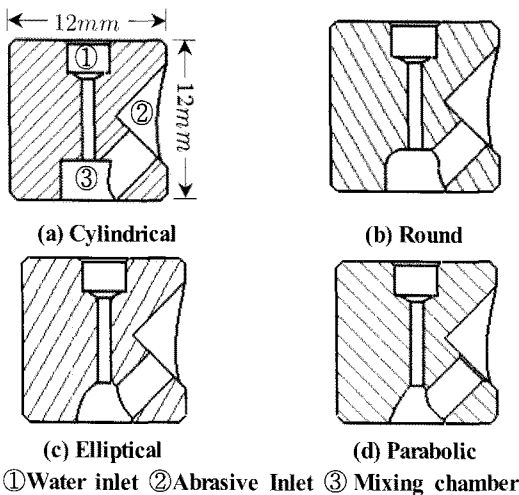


Fig. 4 Different types of mixing chamber shape

합실의 형상을 Fig. 4와 같이 설계하였다. 라운드 형상은 실린더 형상의 모서리에 라운드($R = 1\text{mm}$)를 추가하였으며, 타원 형상은 장축의 길이가 6mm, 단축의 길이가 4.2mm인 타원의 절반으로, 포물선 형상은 $y = 0.68x^2$ 의 이차방정식 형태로 나타나는 포물선 곡선으로 설계하였으며, 혼합실의 출구 폭과 높이는 전 형상에서 각각 4.2mm, 3mm로 동일하게 설계하였다.

3. AWJ의 절단 특성 실험

3.1 실험조건

혼합챔버의 혼합실 형상 변화에 따른 물과 연마제의 혼합 효율 개선을 연마제 입자가 노즐에서 분사될 때 기존의 실린더 형상에 비해 물줄기의 중심부분에 집중된다는 관점에서 실험 조건을 피삭재의 완전절단으로 선정하였으며, 혼합실 형상 변화에 따른 AWJ 절단성능 변화를 알아보기 위해 절단 변수 중 압력, 오리피스 직경, 노즐 직경과 길이 및 이격 거리, 연마제의 종류와 입도를 고정값으로 두고, 연마제 유량, 절단속도,

Table 1 Experimental Conditions

| Parameters | Conditions |
|---------------------------|---|
| Cutting pressure(bar) | 3800 |
| Abrasive flow rate(g/min) | 230, 300, 430 |
| Abrasive | garnet(#80) |
| Feed rate(mm/min) | 90, 180 |
| Stand off distance(mm) | 1.2 |
| Orifice diameter(mm) | 0.33 |
| Workpiece material | Al, SUS |
| Workpiece thickness(mm) | 12 |
| Nozzle diameter(mm) | 1.01 |
| Nozzle length(mm) | 76.2 |
| Mixing Chamber Type | Cylindrical, Elliptical Round, Parabolic |

피삭재의 재질, 혼합챔버의 혼합실 형상을 변화시키면서 절단 실험을 실시하였으며 구체적인 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

3.2 측정방법

일반적으로 AWJ를 사용하여 피삭재를 절단하는 과정을 Fig. 5에 나타내었다. 절단 깊이가 얇은 입구부에서는 노즐을 통해 분사된 물줄기가 피삭재와 90°의 각도를 이루지만 절단 깊이가 깊어지는 출구부로 갈수록 물줄기가 절단방향의 반대 방향으로 굴곡되며 이러한 현상은 노즐의 절단속도가 빠를수록 커진다. 이러한 물줄기의 굴곡은 절단면에 형성되는 절단무늬(Jet lag)의 생성에 밀접한 관계가 있으며, 이는 표면 거칠기 및 테이퍼(Taper)값이 증가하여 절단표면 정밀도에 악영향을 끼친다⁽⁵⁾. 이를 바탕으로 물줄기가 굴곡되지 않아 절단무늬가 생성되지 않는 상단 부분과 물줄기의 굴곡으로 인해 절단무늬가 생기는 하단 부분의 표면 거칠기 및 테이퍼를 측정하여 혼합챔버에 따른 절단성능을 비교하였다.

테이퍼는 피삭재를 절단하는 과정에서 연마제 입자가 피삭재의 하단부로 갈수록 입자의 운동 에너지 감소로 인한 피삭재

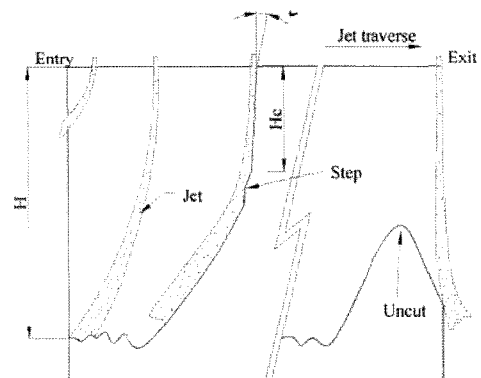


Fig. 5 Cutting mechanism in AWJ

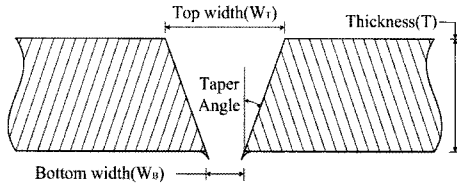


Fig. 6 Definition of taper

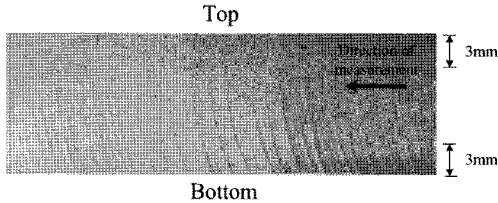


Fig. 7 Cutting surface and measurement direction

제거율 감소로 발생하며, 일반적으로 절단속도와 노즐의 이격 거리가 증가함에 따라 테이퍼 값이 증가하며, 절단면의 테이퍼의 형상을 Fig. 6에 나타내었다⁽⁶⁾. 테이퍼 값은 절단 입구 폭 (W_T)과 출구 폭 (W_B)을 필러게이지를 이용하여 측정된 값과 피삭재의 두께(T)를 이용하여 식 (1)을 통해 구했다⁽⁷⁾.

$$\text{Taper angle} = \tan^{-1}\left(\frac{W_T - W_B}{2T}\right) \quad (1)$$

표면 거칠기 측정 위치는 피삭재의 상단에서 3mm 부분과 하단에서 3mm 부분이며, 측정 방향은 피삭재의 절단방향과 동일한 방향이며, 이를 Fig. 7에 나타내었다. 측정 조건은 측정 길이 12.5mm, 컷오프길이 2.5mm 조건으로 Mitutoyo사의 표면 조도 측정기 SJ-301모델을 사용하여 3회 측정하여 평균값을 구하였다.

4. 실험결과

4.1 테이퍼

Fig. 8은 피삭재가 SUS일 때 테이퍼 각도이며, 나머지 실험 조건에 따른 테이퍼 값을 Table 2에 나타내었다. 절단 변수에 따른 테이퍼 값의 변화를 살펴보면 동일 절단속도에서 연마제 유량이 증가하면 테이퍼가 감소하며, 절단속도가 증가하면 테이퍼 값은 증가한다. 이는 절단속도가 빠를수록 출구 부분의 절단폭이 줄어들고, 동일 피삭재 면적에 작용하는 연마제 입자 수가 줄어들며 피삭재가 연마제의 영향을 받는 가공시간이 줄어들기 때문이다⁽⁸⁾. 피삭재의 경도에 따른 테이퍼 값의 변화는 SUS에 비해 경도가 약한 알루미늄에서 테이퍼가 작게 발생하는 것을 알 수 있으며, 이는 피삭재의 경도가 클수록 절단 과정에서 연마제입자의 운동에너지 감소량이 커져 출구 부분의 절

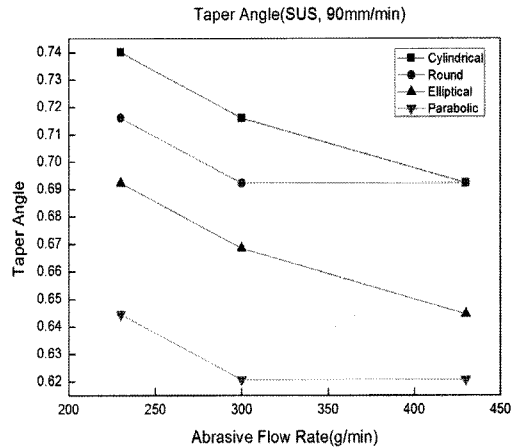


Fig. 8 Result of taper angle(SUS)

Table 2 Result of taper angle(°)

| Mixing Chamber | Feed Rate | Cylindrical | | Round | | Elliptical | | Parabolic | |
|----------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) |
| A L S I V E | 230 (g/min) | 0.143 | 0.549 | 0.358 | 0.573 | 0.239 | 0.358 | 0.0955 | 0.286 |
| | 300 (g/min) | 0.119 | 0.549 | 0.334 | 0.549 | 0.143 | 0.334 | 0.0477 | 0.286 |
| | 430 (g/min) | 0.0955 | 0.549 | 0.286 | 0.525 | 0.0239 | 0.334 | 0.0239 | 0.286 |
| S U S | 230 (g/min) | 0.740 | 1.193 | 0.716 | 1.193 | 0.692 | 1.170 | 0.644 | 1.026 |
| | 300 (g/min) | 0.716 | 1.146 | 0.692 | 1.145 | 0.668 | 1.122 | 0.621 | 1.003 |
| | 430 (g/min) | 0.692 | 1.122 | 0.692 | 1.098 | 0.645 | 1.098 | 0.621 | 0.979 |

단폭이 줄어들기 때문이다. 혼합챔버에 따른 테이퍼 값은 전 실험조건에서 포물선 타입의 혼합챔버를 사용하였을 때 테이퍼가 작게 발생하며, 다음으로는 타원타입의 혼합챔버가 테이퍼가 작게 발생한다. 포물선타입의 혼합챔버를 사용했을 때의 테이퍼 값과 기존에 사용되고 있는 실린더 타입의 혼합챔버를 사용했을 때 테이퍼 값의 차이를 피삭재 별로 살펴보면, 알루미늄일 때 테이퍼 값이 최대 0.262°만큼 감소하였고, SUS의 경우 테이퍼 값이 최대 0.1432°만큼 감소하였다.

4.2 표면 거칠기

Fig. 9와 Fig. 10는 피삭재가 SUS일때 측정 위치에 따른 표면 거칠기를 나타내며, 나머지 실험 조건에 따른 표면 거칠기의 평균 값을 Table 3, Table 4에 나타내었다. 표면 거칠기의 측정 결과값을 살펴보면 동일 절단속도에서 연마제 유량이 증가하

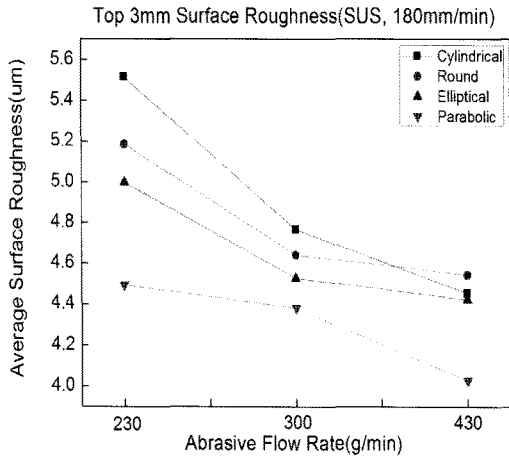


Fig. 9 Result of surface roughness(SUS, Top 3mm)

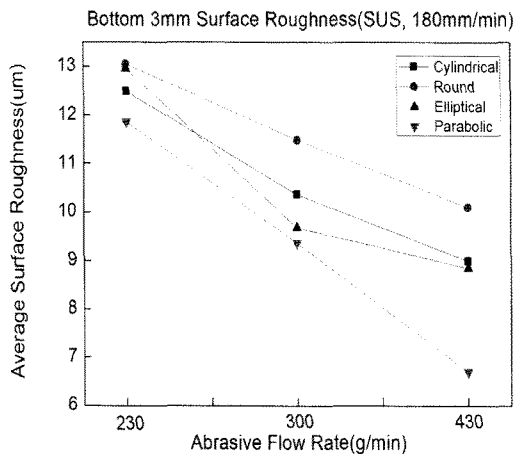


Fig. 10 Result of surface roughness(SUS, Bottom 3mm)

면 표면 거칠기가 감소하며, 이는 동일 가공 시간에 피삭재의 절단에 관여하는 연마제 입자수가 증가하여 연마제 입자에 의한 연마효과가 커지기 때문이다. 또한 동일 연마제 유량에서 절단속도가 증가하면 표면 거칠기가 증가하며, 상단 3mm 지점과 하단 3mm 지점의 증가폭을 비교하였을 때 상단부분보다 하단부분이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 말한대로 절단속도가 증가 할수록 상단부와 하단부의 피삭재 제거율이 달라져 발생하는 물줄기의 굴곡현상으로 인해 피삭재의 하단부분에 절단무늬가 생성되기 때문이다. 또한 동일 가공시간에 피삭재에 영향을 주는 연마제 입자수가 감소하여 연마제 입자의 연마 효과가 감소하기 때문이다. 혼합챔버 별 표면 거칠기 변화는 포물선 타입의 혼합챔버를 사용하였을 때 표면 거칠기가 가장 양호하며, 다음으로는 타원 타입의 혼합챔버를 사용하였을 때 표면 거칠기가 양호한 경향을 보인다.

이와 같이 테이퍼 및 표면 거칠기 측정결과 실린더형상, 라운드형상, 타원형상, 포물선형상 순서로 절단면의 표면거칠기와 테이퍼가 양호해지는 경향을 보이며 이는 혼합실의 외벽 모서

Table 3 Result of Surface Roughness(Top 3mm, μm)

| Mixing Chamber | Cylindrical | | Round | | Elliptical | | Parabolic | | |
|--------------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------|
| | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | |
| A b r a s i v e | 230 (g/min) | 5.63 | 6.25 | 4.53 | 5.16 | 4.61 | 5.35 | 4.60 | 5.24 |
| | 300 (g/min) | 5.24 | 5.93 | 4.40 | 5.11 | 4.34 | 5.28 | 4.22 | 5.15 |
| | 430 (g/min) | 5.19 | 5.85 | 4.11 | 4.56 | 4.04 | 4.77 | 4.02 | 5.02 |
| S U S | 230 (g/min) | 3.99 | 5.52 | 3.90 | 5.19 | 3.89 | 5.00 | 3.83 | 4.49 |
| | 300 (g/min) | 3.84 | 4.77 | 3.84 | 4.64 | 3.68 | 4.52 | 3.54 | 4.38 |
| | 430 (g/min) | 3.80 | 4.45 | 3.20 | 4.54 | 3.61 | 4.42 | 3.34 | 4.03 |

Table 4 Result of surface roughness(Bottom 3mm, μm)

| Mixing Chamber | Cylindrical | | Round | | Elliptical | | Parabolic | | |
|--------------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------|
| | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | 90 (mm/min) | 180 (mm/min) | |
| A b r a s i v e | 230 (g/min) | 6.19 | 8.21 | 6.19 | 8.05 | 6.14 | 7.32 | 6.04 | 7.29 |
| | 300 (g/min) | 5.93 | 7.34 | 5.90 | 7.53 | 5.86 | 6.75 | 5.66 | 6.52 |
| | 430 (g/min) | 5.91 | 6.86 | 5.22 | 6.75 | 5.50 | 6.39 | 5.05 | 6.28 |
| S U S | 230 (g/min) | 6.64 | 12.49 | 6.03 | 13.05 | 6.41 | 12.95 | 6.29 | 11.86 |
| | 300 (g/min) | 5.49 | 10.37 | 5.26 | 11.49 | 5.26 | 9.68 | 5.57 | 9.36 |
| | 430 (g/min) | 5.06 | 8.99 | 4.88 | 10.10 | 4.68 | 8.85 | 4.91 | 6.7 |

리 부분을 제거하고 곡선 형태로 완만하게 해줌으로써 Fig. 3의 해석결과에서 혼합실의 외벽을 타고 이동하는 연마제 입자가 오리피스를 통과한 고속의 물에 즉시 혼합되므로 실린더형상에 비해 혼합효율이 증가하여 절단성능이 향상되기 때문이다.

5. 결론

- (1) 테이퍼 수치와 표면 거칠기를 측정하여 비교한 결과 포물선 타입의 혼합챔버를 사용하였을 때 절단 성능이 가장 좋다. 이는 기존 실린더 타입의 혼합챔버 모서리 부분을 완만하게 해줌으로써 연마제와 물의 혼합이 잘되지 않는 문제점이 개선되어 혼합효율이 증가했기 때문이다.
- (2) 절단 변수 중 연마제 유량보다 절단 속도의 변화가 피삭재

의 절단면에 끼치는 영향이 더 크다. 절단 속도는 연마제 입자가 피삭재에 영향을 끼치는 시간을 결정하며, 절단 속도가 빠를 수록 물줄기의 굴곡되는 현상이 심해져 표면 거칠기와 테이퍼를 증가시킨다.

- (3) 피삭재의 경도에 따른 혼합챔버 별 절단면의 테이퍼 값을 비교해보면, 상대적으로 경도가 강한 피삭재인 SUS에서 혼합챔버 별 테이퍼 값의 차이가 뚜렷하게 나타난다.

참 고 문 헌

- (1) Jin, Y. H., Chung, N. Y., and Kim, K. H., 2004, "Characteristics of Cut Surface by Abrasive Waterjet Cutting of Titanium Alloy," *2004 KSAE Annual Conference*, pp. 1441~1447.
- (2) Park, Y. K., Park, K. S., Kim, H. H., Shin, B. S., Ko, J. S., and Ko, J. S., 2010, "Evaluation of Efficiency on Glass Precision Machining by using Abrasive Water-jet," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 7, pp. 87~93.
- (3) Lee, J. k., Ye, S. D., Jea, W. S., Oh, H. O., Choi, H. T., and Min, B. H., 2006, "A Study of Optimal Cutting Condition of Abrasive Water-jet According to the Taguchi Method," *Proceedings of the KSME 2006 Spring Annual Meeting*, pp. 1455~1460.
- (4) Mostofa, Md. G., Kwak, Y. K., and Ahn, J. H., 2010, "Computational Fluid Analysis of Abrasive Waterjet Cutting Head," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 249~252.
- (5) Kwak, J. S., and Ha, M. k., 2004, "Effect 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.
- (6) Seo, Y. W., and Shin, Y. S., 2009, "Abrasive Waterjet Machining Characteristics of Aluminum Matrix Composites," *Proceedings of the KSME 2009 Spring Annual Meeting*, pp. 433~438.
- (7) Wang, J., 1999, "Abrasive Waterjet Machining of Polymer Matrix Composites - Cutting Performance, Erosive Process and Predictive Models," *The International Journal of Advanced manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 10, pp. 757~768.
- (8) Park, K. S., Bahk, Y. K., Go, J. S., and Shin, B. S., 2007, "A Study on the Frosting Phenomena of Abrasive Waterjet Microcutting for Multi-layered Materials," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol.16, No. 5, pp. 183~190.