

# 선순환 습식 워터젯 노즐의 내부 구조 최적화 연구 A Study on Optimization of Internal Structure for Virtuous Circle of Abrasive Suspension Water Jet

\*박재량<sup>1</sup>, #이찬기<sup>1</sup>, 손성모<sup>1</sup>, 김연철<sup>1</sup>, 신길호<sup>2</sup>

\*Jae Layng Park<sup>1</sup>, #Chan Gi Lee(cglee@iae.re.kr)<sup>1</sup>, Sung-Mo Son<sup>1</sup>, Youn Shul Kim<sup>1</sup>, Guil Ho Shin<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>고등기술연구원 신소재공정센터, <sup>2</sup>(주)캠시스

Key words : Abrasive suspension water jet, Nozzle, Orifice, Flow analysis, Diamond

## 1. 서론

건식 워터젯(Abrasive Injection Water Jet, AIWJ) 방식은 공기의 영향 때문에 높은 압력 조건에서 가공이 가능하며 가공 후 절단면이 불균일하여 미세가공이 어려운 단점이 있다. 이와 비교하여, 습식워터젯(Abrasive Suspension Water Jet, ASWJ) 방식은 건식 워터젯 방식에 비하여 낮은 압력에서도 높은 가공성을 얻을 수 있으며, 작은 크기의 연마재 사용이 가능하여 미세가공에 적합하다.<sup>1)</sup>

습식 워터젯 노즐은 연마재와 물의 혼합물을 열린 공간으로 뿜어내는 관으로써 유체의 압력에너지를 속도에너지로 변환하여 유체 속력이 음속을 초과할 정도의 고압으로 분출되므로 노즐은 이러한 엄청난 압력에 견딜 수 있는 경도와 내마모성을 가져야 한다. 노즐의 재료로 극히 높은 경도를 갖는 보론 카바이드, 텅스텐 카바이드, 알루미늄 및 자연산 다이아몬드가 사용된다. 현재 국내에서 생산되고 있는 노즐은 주로 보론 카바이드를 사용하고 있다. 보론 카바이드 노즐은 샌드블라스팅(Sand blasting)등의 용도로 사용하기에는 큰 문제가 없으나, 습식 워터젯 시스템에서는 신뢰성(수명) 측면에서 상당히 미흡하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 재료의 원가가 높지만, 수명이 높은 자연산 다이아몬드를 사용하여 노즐을 제작하였다.

본 연구에서는 습식 워터젯 노즐의 내부구조 최적화를 위해 오리피스입구형상, 노즐 팁의 두께, 오리피스 입구 각도를 선정하고, Fluent 3D 유동해석 프로그램을 이용하여 내부구조의 최적 설계조건을 도출하였다. 또한, 유동해석 결과의 검증에 위해 선정된 노즐 구조로 제작하여 절삭 특성을 연구하였다.

## 2. 습식 워터젯 노즐 유동해석

다이아몬드 노즐의 내부 구조를 결정하기 위해서 Fluent 3D 유동해석 프로그램을 이용하여 순수 물 상태에서 오리피스 입구부 형상, 오리피스 팁 두께, 오리피스 각도를 변수로 노즐 입구부에서 출구부의 50mm 범위에서의 최대 유속과 속도 분포를 해석하였다. 입구부의 최대 유속은 Table 1과 같은 결과를 나타내었다.

노즐 내부의 구조는 노즐의 직진성과 최대 유속에 영향을 준다.<sup>2)</sup> 오리피스의 입구부는 노즐 내부에서 유속이 최고로 높게 발생하는 부분이다. 다이아몬드 오리피스가 있는 부위에서 20 $\mu$ m 단차가 있는 구조와 단차 없이 노즐 내부에서 오리피스까지 연결되는 구조로 변수를 설정한 후, 단차가 있는 경우는 미세한 R형태(Type 1)이거나 직각 형태(Type 2)와 단차가 없는 경우는 곡선(Type 3)과 직선 형태(Type 4)로 나누어 해석하였다. 단차가 있는 구조가 단차가 없는 구조 보다 유속이 빠른 것을 확인 할 수 있다. 또한, Type 3의 경우가 가장 낮은 최대유속을 나타내는 것은 유선형상에서 기인한 것으로 판단된다.

다이아몬드 팁 두께 변화(0.7, 1.0, 1.5t)에 따른 속도 변화를 노즐 입구부에서부터 2mm 떨어진 지점의 최대 유속으로 확인하였다. 노즐 두께가 1.5t의 조건에서 가장 빠른 유속을 나타내었다. 이 결과 오리피스의 팁 두께가 증가 할수록 절삭 지점에서 가공성이 좋을 것으로 예측 할 수 있다.

마지막으로 노즐 (48, 52, 56, 60 $\phi$ )를 변수로 하여 유속의 변화를 측정하였다. 내부 각도가 증가할수록 최대 유속은 증가하나, 최대유속의 증가율은 크지 않음을 알 수 있다. 노즐 내부 각도의 변화는 유속에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

Table 1 Maximum flux with orifice shape

Internal Structure	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Max. Speed (m/s)	975	953	830	851
<b>Thickness of orifice (mm)</b>	<b>0.7</b>	<b>1.0</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>
Max. Speed (m/s)	953	944	938	938
<b>Entrance the angle (degrees)</b>	<b>48</b>	<b>52</b>	<b>56</b>	<b>60</b>
Max. Speed (m/s)	920	925	929	934

### 3. 습식 워터젯 노즐의 절삭 특성

Fluent 3D 유동해석 결과를 검증하기 위하여 노즐 내부 구조 변수에 따른 4종류와 노즐 팁 두께에 따른 4종류(0.7, 1.0, 1.5, 3.0)의 노즐을 제작하였다. 고주파 소결 방식으로 900℃에서 3분간 다이아몬드와 스테인리스(STS 303)를 소결하였다. 저 출력 Nd-YAG 레이저로 직경 200 $\mu$ m로 가공 후, 램핑과 정밀 연마를 이용하여 250 $\mu$ m로 확대하였다. 본 노즐 제작 공정을 통하여 제작한 노즐은 직경 250 $\mu$ m, 홀 공차  $\pm 5\mu$ m, 진원도 3 $\mu$ m 이하이다. 절삭 평가는 펌프압력 650bar에서 60 $\mu$ m급 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 연마재를 사용하여 실시하였다.

테이퍼법<sup>3)</sup>을 이용하여 내부구조 Type 별 절삭 성능을 확인하였다. SOD(Stand-off Distance)가 0.2 mm 일 때 Type 2의 형상 노즐이 가장 작은 홀(hole)을 형성하였고, type 4의 노즐이 가장 큰 홀을 형성하였다.

습식 워터젯 시스템을 이용한 Type 1~4의 노즐 절삭 시편의 위, 아래 면의 절단 폭의 측정 결과, Type 2 노즐의 절삭 폭 및 절삭 각이 가장 좁게 나타났다. 절삭 폭 및 절삭 각이 좁다는 것은 노즐에서 나오는 혼합물(물+연마재)의 직진성이 좋다는 것을 의미한다. 유동해석 결과에서도 Type 2의 배부 유속이 노즐 중심부에서 집중성을 보이고 유속이 빨랐을 때 가공성이 좋다는 것을 확인하였다.

Type 2의 노즐 팁 두께 변화에 따른 절삭 후 시편의 위, 아랫면의 절단 폭의 측정 결과 값을 Fig.1에 나타내었다. 노즐 팁의 두께가 0.7t에서 3.0t로 두꺼워 짐에 따라 절삭으로 인해 제거된 폭이 좁아지며 절단 각도 좁아지는 것을 확인 할 수 있다. 유동 해석에서 노즐 팁의 두께가 길어지면

유속이 증가한다는 결과를 실험을 통해 증명하였다.

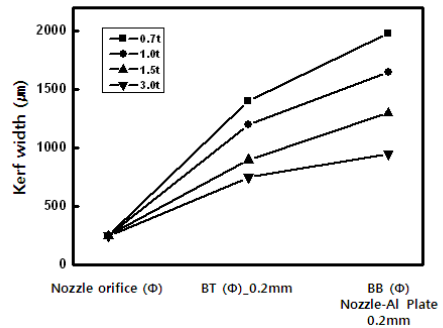


Fig. 1 Test result in nozzle tip thickness, SOD 2.0mm

### 4. 결론

Fluent 3D 유동해석과 습식 워터젯 시스템을 이용하여 노즐 구조에 따른 절삭 특성 연구를 수행한 결과, 노즐 내부에서 오리피스까지 직각의 단차가 존재하는 형상이 가장 높은 최고 유속을 나타내며 가공성이 좋다는 것을 확인하였다. 오리피스 팁의 두께가 증가 할수록 절단 폭이 좁아지고, 절단 각이 작아진다.

### 후기

본 연구는 지식경제부에너지기술개발사업 박막 강화유리 절삭공정의 산화알루미늄 연마재 회수 및 정밀가공 기술개발(2011-5020-100090)의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Kovacevic, R., Hashish, Mohan, R., M., Kim, T. J. and Geskin, E. S, "State of the Art of Research and Development in Abrasive Waterjet Machining", Journal of Manufacturing Science and Engineering, 199, 776-785, 1997.
2. Park, K. A., "Effects of Inlet Shapes of Critical Sonic Nozzles On Discharge Coefficients", The Korea Society of Mechanical Engineers, Number 18, 701-706, 1994.
3. Ramulu, M. and Arola, D., "Water Jet and Abrasive Water Jet Cutting of Undirected Graphite/epoxy Composite", Composites, 24, 299-308, 1993.