

워터젯 노즐의 길이와 내부 나선 구조 유무에 따른 유체거동에 관한 전산해석

곽청렬*, 신보성**,#, 고정상***, 김문정***, 유찬주*, 윤단희*

*부산대학교 대학원 첨단정밀공학협동과정, **부산대학교 광메카트로닉스공학과/
인지메카트로닉스공학과 대학원/ 3차원혁신제조센터, ***부산대학교 기계공학부

A Study on the Simulation Analysis of Nozzle Length and Inner Spiral Structure of a Waterjet

Cheong-Yeol Gwak*, Bo-Sung Shin**,#, Jeung-Sang Go***, Moon-Jeong Kim***, Chan-Ju Yoo*,
Dan-Hee Yun*

*Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, Pusan National University

**Department of Optics and Mechatronics Engineering, Department of Cogno-mechatronics
Engineering, Convergence Research Center of 3D Laser-aided Innovative Manufacturing Technology,
Pusan National University, ***Department of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received 30 June 2016; received in revised form 8 August 2016; accepted 13 September 2016)

ABSTRACT

It is well known that water jetting is now widely used in the advanced cutting processes of polymers, metals, glass, ceramics, and composite materials because of some advantages, such as heatless and non-contacting cutting different from the laser beam machining. In this paper, we proposed the simulation model of waterjet by lengths and the inner spiral structure of the nozzle. The simulation results show that the outlet velocity of the nozzle is faster than the inlet. Furthermore, we found rapid velocity reduction after passing through the outlet. The nozzle of diameter $\phi 500$ and length 70mm, shows the optimal fluid width and velocity distribution. Also, the nozzle with inner spiral structure shows a Gaussian distribution of velocity and this model is almost twice as fast as the model without spiral structure, within the effective standoff distance (2.5 mm). In the future, when inserting abrasive material into the waterjet, we plan to analyze the fluid flow and the particle behavior through a simulation model.

Key Words : Waterjet(워터젯), Fluid Behavior(유체 거동), Standoff Distance(이격거리), Inner Spiral Structure
(내부 나선 구조), Nozzle Length(노즐 길이), Fluid Velocity(유속), Simulation Analysis(전산해석)

1. 서 론

Corresponding Author : bosung@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-5787

연마제 워터젯 가공기술(Abrasive waterjet)은 레이저
가공기술과 함께 근래에 가장 급속한 발전을 보

이며 각광받고 있는 신기술 중에 하나이다. 고압으로 압축된 물에 가넷(Garnet)등의 연마재 워터젯 가공기술은 두꺼운 재료의 절단과 재귀반사물(Highly reflective materials) 등의 재료의 절단도 가능하여 레이저 가공기술을 보완해 준다. 또한 유리나 세라믹 등의 취성 재료의 가공도 가능하며, 열 변형이 없고 절단면이 우수하다.^[1]

연마재 워터젯 가공기술은 고압의 물이 포커싱 노즐을 통과하는 과정에서 생기는 압력차를 이용해 연마재를 유입시킨다. 유입된 연마재는 노즐의 포커싱 부분에서 워터젯의 중심부로 포커싱 된다. 하지만 고압 고속의 워터젯에 연마재가 섞이는 과정에서 포커싱 길이가 짧거나 연마재의 유입량이 과도한 경우 등에는 연마재의 일부가 워터젯의 중심으로 집중되지 않고 가장자리에 위치하게 된다. 이렇게 가장자리에 위치한 연마재는 유리 가공에 있어서 절단면을 나쁘게 하거나 백화현상을 나타나게 하는 원인이 되며, 2.5mm 이하의 이격거리에서 백화현상이 감소한다.^[2]

연마재 워터젯을 이용하여 Epoxy, Cu, Glass 등 다양한 재료로 이루어진 얇은 복합재를 절삭할 시 노즐의 이격거리, 가공압력, 가공속도는 가공에 중요한 요소들이다. 첫째, 노즐의 이격거리에 정비례하여 절삭 폭이 넓어진다. 둘째, 가공압력이 낮을수록 소재에 가해지는 힘의 전달속도가 느려져 가공성이 나빠진다. 셋째, 가공속도가 빨라질수록 연마재의 영향을 덜 받게 가공성이 나빠지며, 가공속도가 너무 느리면 소재에 따라 오랜 시간 가공압력을 이겨내지 못하고 소재의 파손을 유발한다.^[3]

최신 연구에서는 연마재 공급라인의 모니터링 시스템과 포커싱 튜브 마모를 감시하는 시스템에 대한 연구와^{[4],[5]} 노즐 끝단부에서의 유체 해석^[6]이 진행되었다.

본 연구에서는 그동안 진행해온 미세가공^[7], 정밀가공^[8], 다층소재 가공^{[9],[10]}, 절단공정해석^[11], 입자크기^[12]에 따른 선행 연구와 워터젯장치 특허^{[13],[14]}를 바탕으로 하여 연마재 워터젯 가공기술에서 연마재(Abrasive) 거동을 확인하기 위한 선행연구로서 노즐의 길이(10mm, 40mm, 70mm, 105mm, 140mm)에 따른 유체(Water) 거동과 노즐(70mm, $\phi 500 \mu\text{m}$) 내부 나선구조 유무에 따른 분사 후 유체의 거동과

속도 분포를 CFD를 이용한 전산해석을 실행하여, 향후 연마재 거동 해석 연구의 기초로 삼고자 한다.

2. 해석모델 및 조건

2.1 해석 모델

전산해석을 통하여 노즐 길이에 따른 유체거동을 직접적으로 확인하고자 하였다. 전산해석 프로그램으로는 상용 유체유동해석 프로그램인 Ansys Workbench CFX를 이용하였다.

노즐 입구에 고압의 물을 주입하는 방법으로 전산해석을 실시하였다. 이 때 입력부의 압력은 직경 $\phi 500 \mu\text{m}$ 에서 일반적으로 사용하는 3,000 atm (Table 1)으로 실행하였다. 노즐 출구에서 10mm 이내의 5면(Table 2)에서의 유속을 확인하고자 한다.

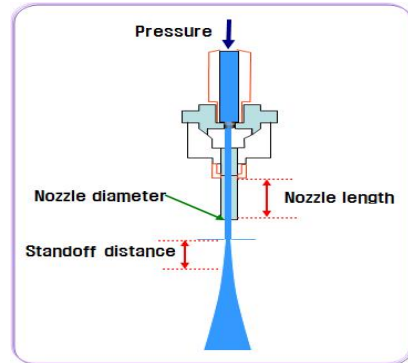


Fig. 1 Schematic diagram of waterjet

Table 1 Analytical conditions of waterjet

| Input condition | Deposition |
|-----------------------|------------------------|
| Input pressure | 3,000atm |
| Nozzle inner diameter | $\phi 500 \mu\text{m}$ |
| Fluid material | Water |

Table 2 Plane location from nozzle outlet

| Plane | A | B | C | D | E |
|----------|-----|-------|-----|-------|------|
| Location | 1mm | 2.5mm | 5mm | 7.5mm | 10mm |

Table 3 Simulation length of waterjet nozzle

| Type | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------|------|------|------|-------|-------|
| Nozzle length | 10mm | 40mm | 70mm | 105mm | 140mm |

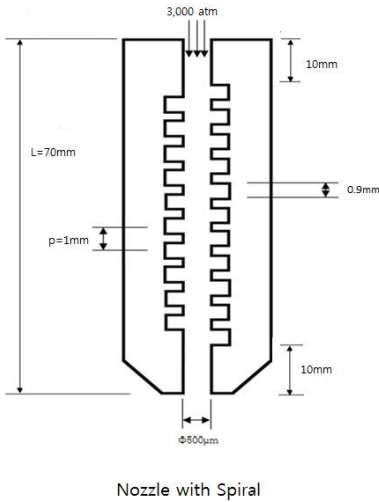


Fig. 2 Inner spiral structural nozzle

2.2 노즐 길이 변화

노즐 길이 조건을 달리하여 유체 거동을 확인하고자 한다. 노즐 길이는 Table 3와 같은 조건으로 수행하였다.

2.3 노즐 내 나선의 유무

노즐 내부의 나선 유무에 따른 유체 거동을 확인하고자 한다. 나선의 단면은 $\phi 0.09\text{mm}$ 반구이며, 피치는 0.1mm, 나선의 길이는 50mm이다. Fig. 2와 같은 조건으로 수행하였다.

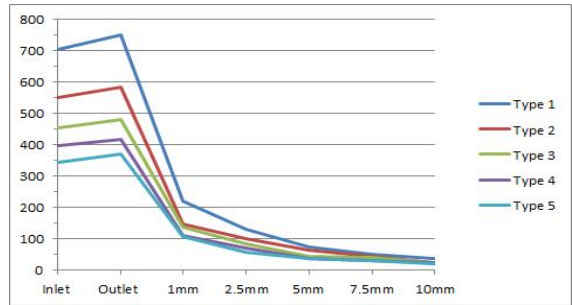


Fig. 3 Fluid maximum velocity change according to position(m/s)

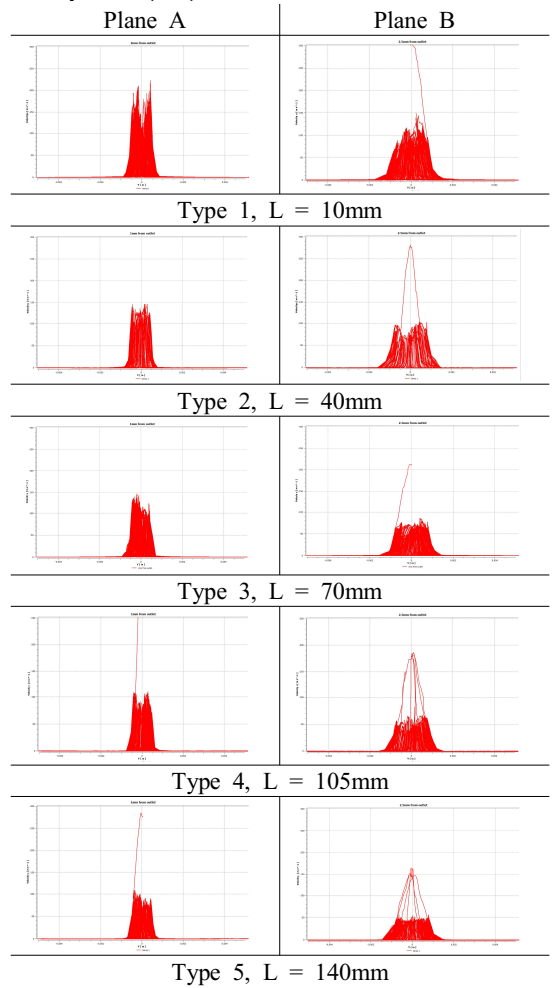


Fig. 4 Fluid velocity distribution according to position(m/s)

3. 해석결과 및 고찰

3.1 노즐 길이에 따른 전산해석 결과

직경 0.5mm에 각 길이 10mm, 40mm, 70mm, 105mm, 140mm의 노즐에 3,000atm의 압력으로 분사하는 전산해석을 한 결과는 Table 4와 Fig. 3과 같았다.

Table 4와 같이 노즐의 길이가 길어짐에 따라 노즐 내부와 외부 유속이 상대적으로 감소하며, 노즐 내부에서는 유속이 빨라짐을 확인 할 수 있다. 즉, 노즐 길이가 짧을수록 유속이 빠르며, 노즐 입구보다 출구의 속력이 빠르다.

Fig. 3에서 보면, 노즐 내부와 외부의 경계에서 속도가 급격히 감소하며, 커팅에 유효한 직경을 가지는 이격거리 2.5mm 이내에서도 노즐 길이가 짧을수록 높은 출력을 가짐을 알 수 있다.

3.2 노즐 내부 나선 구조의 유무에 따른 해석 결과

선행 연구를 통해 고압 고속의 워터젯에 연마재가 섞이는 과정에서 포커싱 길이가 짧게 되면 연마재의 일부가 워터젯의 중심으로 집중되지 않고 가장자리에 위치하게 된다는 것을 알고 있으며, 유효한 이격거리인 1mm(Plane A) ~ 2.5mm(Plane B) 구간을 Fig. 4를 통해 살펴보면 70mm(Type 3) 노즐에서 일정한 폭과 균일한 속도 분포를 가짐을 확인 하였다. 또한 산업현장에서 쓰이는 $\phi 500$ 노즐의 길이가 약 70mm임을 감안하여 다음의 해석을 실시하였다.

직경 0.5mm, 길이 70mm의 노즐에 대하여 해석한 결과 Table 5와 같은 결과를 보였다. 나선 구조를 가진 노즐이 나선 구조가 없는 노즐에 비해 노즐 입구, 내부, 출구에서 낮은 유속을 가지나, 외부 분사 이후 높은 유속을 가진다.

실제 가공에 유효한 이격거리인 2.5mm 내에서의 유속을 확인해보면, 나선구조의 노즐은 165m/s 이상의 최고속도를 나타내며, 나선이 없는 노즐은 80m/s 이상의 최고 속도를 가진다. 동일한 이격거리에서 약 2배의 최고 속도의 차이를 보인다.

Table 4 Fluid maximum velocity according to position(m/s)

| Type Location | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Inlet | 705 | 550 | 454 | 396 | 345 |
| Outlet | 750 | 585 | 480 | 418 | 370 |
| Plane A | 220 | 146 | 138 | 109 | 106 |
| Plane B | 130 | 102 | 85 | 70 | 58 |
| Plane C | 74 | 65 | 44 | 37 | 37 |
| Plane D | 50 | 43 | 40 | 32 | 30 |
| Plane E | 36 | 25 | 24 | 24 | 20 |

Table 5 Fluid maximum velocity according to position with spiral or not(m/s)

| Type Location | None | Spiral |
|------------------|------|--------|
| Inlet | 454 | 355 |
| Outlet | 480 | 366 |
| Plane A | 145 | 293 |
| Plane B | 80 | 165 |
| Plane C | 42 | 140 |
| Plane D | 36 | 71 |
| Plane E | 24 | 15 |

Fig. 5와 같이 나선이 없는 노즐은 내부와 외부의 경계에서 급격한 속도 감소를 보이나, 내부 나선이 존재하는 경우에는 경계에서 속도가 일정하게 감소하는 경향을 보인다. 즉, 나선이 존재하는 노즐은 속도가 선형적으로 감소한다.

Fig. 6에서 나선이 없는 노즐은 플랫 형태의 속도 분포를 보이며, 나선구조를 가진 노즐은 가우시안 형태의 속도 분포를 가진다.

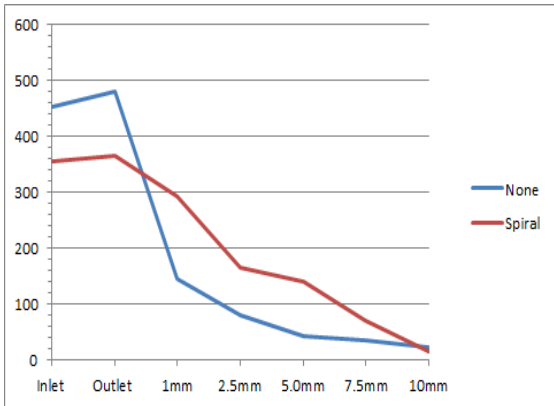


Fig. 5 Fluid maximum velocity change according to position with spiral or not(m/s)

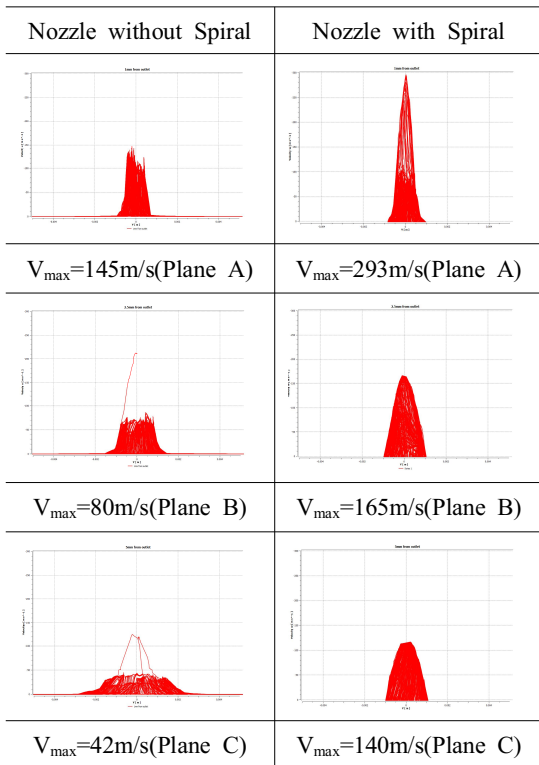


Fig. 6 Distribution of velocity according to length change according to position with spiral or not(m/s)

4. 결론

본 연구를 통하여 워터젯 노즐의 전산해석모델링을 제안하였고, 노즐길이 변화와 노즐 내부의 나선 유무에 따른 전산해석을 수행하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

직경 $\phi 500$ 의 노즐은 길이 70mm에서 균일한 폭과 속도로 분사가 이루어진다. 노즐 입구보다 출구에서 상대적으로 속도가 높으며, 유체가 노즐 출구를 지나면서 외부에서 급격한 속도 감소가 확인되었다.

내부 나선구조가 존재할 경우에 가우시안 형태의 속도 분포를 가지며, 유효한 이격거리(2.5mm)내에서 나선이 없는 노즐에 비해 약 2배의 속도 강화가 이루어진다.

향후에는 연마재 투입 시, 연마재 워터젯의 유체 거동과 입자 거동에 관한 전산해석을 연구하고자 한다.

후 기

“이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음”

REFERENCES

1. Miller, D. S., "Micromachining with abrasive waterjets", Journal of Material Processing Technology, Vol. 149, pp. 37-42, 2004.
2. Bahk, Y. K., Park, K. S., Shin, B. S., Go, J. S., "Experimental and numerical investigation of glass cutting by abrasive waterjet", J. of The Korean Society of Precision Engineers, pp. 263-264, 2007.
3. Park, K. S., Bahk, Y. K., Go, J. S., Shin, B. S., "A study on the frosting phenomena of abrasive waterjet microcutting for multi-layered materials", J. of The Korean Society for Precision Engineering, Vol. 16, pp. 183-190, 2010.

4. Han, B. J., Kang, M. C., "Development of Vacuum Pressure Monitoring System on Abrasive Delivery Line in Abrasive Waterjet", Proceeding of the KSMPE Autumn Conference, pp. 30, 2014.
5. Hwang, K. H., Kim, S. R., Kim, C. M., Kim, R. W., Kwon, H. J., "Monitoring of Focusing Tube Wear in Abrasive Waterjet Machining", Proceeding of the KSMPE Autumn Conference, pp. 112, 2015.
6. Kuk, Y. H., Choi, H. J., "Analysis of Fluid-Structure Interaction of Cleaning System of Micro Drill Bits", J. of The Korean Society for Precision Engineering, Vol. 15, pp. 8-13, 2016.
7. Park, K. S., Shin, B. S., Bahk, Y. K., Go, J. S., "A study on the microcutting of multi-layered material using abrasive waterjet", J. of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, pp. 261-262, 2007.
8. Bahk, Y. K., Park, K. S., Kim, H. H., Shin, B. S., Ko, J. S., and Go, J. S., "Evaluation of efficiency on glass precision machining by using abrasive water-jet", J. of The Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27, pp. 87-93, 2010.
9. Shin, B. S., Park, K. S., Bahk, Y. K., Go, J. S., "A study on the microcutting characteristics of multi-layered material by abrasive waterjet", J. of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, pp. 159-164, 2007.
10. Park, K. S., Bahk, Y. K., Lee, J. H., Lee, C. M., Go, J. S., Shin, B. S., "Experiment Investigations into the precision into cutting of high-pressured jet for thin multi-layered material", J. of The Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, pp. 44-50, 2009.
11. Park, K. S., Jeong, H. Y., Bae, Y. B., Shin, B. S., "Finite element analysis of abrasive waterjet cutting process by using commercial code", J. of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, pp. 197-198, 2007.
12. Park, K. S., Je, S. K., Lee, C. H., Shin, B. S., "Experimental study on waterjet cutting of copper sheet according to abrasive particle size", J. of Korean Society of Precision Engineering, pp. 443-444, 2008.
13. Shin, B. S., Go, J. S., "Water Jet Device", Patent, No. 10-1123565-0000
14. Shin, B. S., Go, J. S., "Water jet cutting device", Patent, No. 10-2007-0072839.