한국금형공학회지, 제13권 제3호, 2019
J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.13 No.3, 2019 ISSN 2092-9692

유동해석을 통한 MR fluid jet polishing 시스템의 재료제거 특성 분석

신봉철[1] · 임동욱[1] · 이정원[†]
인하대학교 기계공학과[1]
여주대학교 자동차과[†]

A study on material removal characteristics of MR fluid jet polishing system through flow analysis

Bong-Cheol Sin[1] · Dong-Wook Lim[1] · Jung-Won Lee[†]
Department of Mechanical Engineering, Inha University[1]
Department of Automotive, Yeoju University[†]
(Received August 05, 2019 / Revised September 26, 2019 / Accepted September 30, 2019)

Abstract: Fluid jet polishing is a method of jetting a fluid to polish a concave or free-form surface. However, the fluid jet method is difficult to form a stable polishing spot because of the lack of concentration. In order to solve this problem, MR fluid jet polishing system using an abrasive mixed with an MR fluid whose viscosity changes according to the intensity of a magnetic field is under study. MR fluid jet polishing is not easy to formulate for precise optimal conditions and material removal due to numerous fluid compositions and process conditions. Therefore, in this paper, quantitative data on the factors that have significant influence on the machining conditions are presented using various simulations and the correlation studies are conducted. In order to verify applicability of the fabricated MR fluid jet polishing system by nozzle diameter, the flow pattern and velocity distribution of MR fluid and polishing slurry of MR fluid jet polishing were analyzed by flow analysis and shear stress due to magnetic field changes was analyzed. The MR fluid of the MR fluid jet polishing and the flow pattern and velocity distribution of the polishing slurry were analyzed according to the nozzle diameter and the effects of nozzle diameter on the polishing effect were discussed. The analysis showed that the maximum shear stress was 0.45 mm at the diameter of 0.5 mm, 0.73 mm at 1.0 mm, and 1.24 mm at 1.5 mm. The cross-sectional shape is symmetrical and smooth W-shape is generated, which is consistent with typical fluid spray polishing result. Therefore, it was confirmed that the high-quality surface polishing process can be stably performed using the developed system.

Key Words: Flow Analysis, Magnetic Field MR Fluid Jet Polishing, Nozzle Diameter, Wall Shear Stress

1. 서 론

최근 급격한 IT산업 발달과 더불어 마이크로 광학부품과 같은 초정밀 부품에 대한 요구가 증가하고 있으며, 이에 따라 효과적인 초정밀 연마기술 개발에 대한 연구가 진행되고 있다[1]. 특히 비구면이나 자유곡면과 같이 복잡하게 설계되어진 광학부품, 금형 등에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 볼록한 형상(convex shape)을 가진 공작물의 경우에는 래핑, MR polishing등과 같이 다양한 접촉식 초정밀 연마방법의 적용이 가능하나, 급격히 경사가 변화하는 오목한 형상(concave shape)의 경우에는 공구와 가공물의 간섭에 의해 기존의 연마방법의 적용이 어렵다. 이러한 경우 연마재가 혼합된 유체를 분사하여 연마하는 fluid jet polishing 방법의 적용이 사용될 수 있다[2-4]. 이러한 유체분사 연마 방식에서는 분사되는 유체가 노즐을 떠나면서 집중성이 급격하게 약화되어 초정밀연마를 위한 안정적인 연마 spot의 형성이 어려워진다. 이러한 현

1. 인하대학교 기계공학과
† 교신저자: 여주대학교 자동차과
E-mail: jwlee@yit.ac.kr

상은 노즐과 가공물의 거리가 증가할수록 심화되며, 일정한 거리가 유지되지 않으면 안정적인 정밀한 연마가 불가능해지는 요인으로 작용한다.

이러한 문제의 해결을 위하여 최근 자기장의 세기에 따라 점성이 변화하는 MR fluid에 연마재를 혼합하여 노즐을 통해 분사시켜 연마를 수행하는 MR fluid jet polishing 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다[5]. 이러한 MR fluid의 특성을 활용한 분사연마 방법은 인가된 자기장의 영향으로 분사된 유체가 집중성을 유지하여 균일한 연마 spot의 생성이 가능하여 초정밀 연마에 적합한 것으로 평가되고 있다.

하지만 주요 가공 인자에 대한 분석이 미비해 다양한 형상을 가진 재료의 가공에서 고품위의 표면 개선뿐만 아니라 가공시간을 단축하고 원하는 결과를 얻기 위해 가공 특성 평가를 통하여 최적 가공 조건의 선정이 필수적이다. 많은 가공 변수와 가공 인자 간의 교호 작용의 영향 등으로 적절한 가공 조건을 선정하는 것은 매우 까다로운 작업이 아닐 수 없다. 특히 분사를 통한 연마 기술은 수많은 유체의 조성과 공정 조건으로 인하여 정확한 최적 조건과 재료 제거에 대한 식을 세우기가 쉽지 않다.

따라서 본 논문에서는 다양한 시뮬레이션을 이용하여 가공 조건에 유의한 영향을 미치는 인자들에 대한 정량적인 데이터를 제시하고 상관관계에 관한 연구를 수행하였다. 제작된 MR fluid jet polishing 시스템에 노즐 직경별 적용 가능성 검증을 위하여 유동해석을 통해 MR fluid jet polishing의 MR fluid와 연마슬러리의 유동 형태 및 속도분포를 분석하였으며 자기장 변화에 따른 전단응력을 예측하였다. 노즐 직경 변화에 따른 MR fluid jet polishing의 MR fluid와 연마슬러리의 유동 형태 및 속도분포를 분석하였으며 노즐 직경이 연마효과에 미치는 영향을 고찰하였다. 시편의 단면형상은 대칭형의 매끈한 W형상이 생성되어 전형적인 유체분사연마 결과와 일치함으로써 본 연구의 결과 개발된 시스템을 이용하여 고품위의 표면연마 공정이 안정적으로 가능함을 확인하고자 하였다.

2. MR fluid jet polishing 시스템 개요

본 연구에서 사용된 MR fluid jet polishing 시스템은 분사노즐, 전자석 모듈, 유체분사시스템 및 이송시스템 등으로 구성되어 있으며, 다음과 같이 설계 및 제작하였다.

1) 분사노즐 : 분사연마공정에서는 일반적으로 venturi nozzle과 straight bore nozzle이 많이 사용된다. 그러나 venturi nozzle의 경우에는 불안정한 유동을 형성하여 균일하고 정밀한 연마 spot을 형성하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 입력단과 출력단까지 내경의 변화가 없는 직선노즐(straight nozzle)을 선정하였으며, SM45C 소재로 ∅1.5의 내경으로 제작하여 사용하였다.

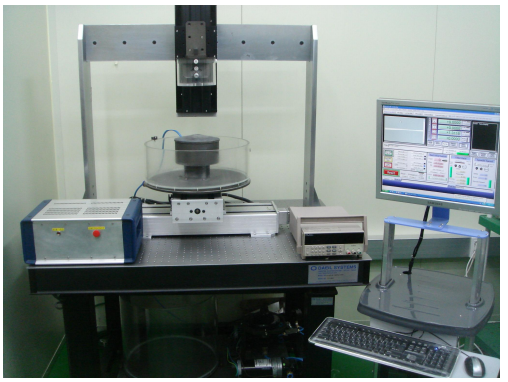


Fig. 1 A photograph of the used MR fluid jet polishing system.

2) 전자석 모듈 : 전자석 모듈은 분사되는 혼합유체의 점도를 변화시켜 분사되는 속도 및 재료제거율과 jet의 집중성에 영향을 주는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 권선수 1800의 전자석을 제작하여 1.5 A에서 약 1500 G의 자기장을 형성하도록 설계하여 제작하였다.

3) 유체이송 시스템 : 연마를 위해 MR fluid를 고압으로 분사할 수 있는 시스템은 토출압력 1.5MPa 이상인 diaphragm 펌프 2개를 병렬로 연결하여 사용하였으며, 흡입부와 토출부의 직경의 차이에 의하여 최대 20bar 이상의 압력을 발생되도록 설계하였다. MR fluid는 노즐에서 분사될 때 자기장의 영향으로 점성이 높아지게 되며 이로 인해 노즐내부의 압력이 증가하여 펌프에 과부하가 걸리는 현상이 발생하며, 불연속 유동에 의한 맥동현상이 발생할 수 있다. 본 시스템에서는 이를 방지하기 위해 check valve, relief valve, accumulator 로 구성되는 이송시스템을 설계하여 제작하였다.

3) 이송 스테이지 : 본 연구에 사용된 MR fluid jet polishing 시스템은 하단의 정밀 이송스테이지에 장착된 고압노즐과, 전자석 모듈에서 상단의 Z-axis에 장착된 재료 chucking 모듈로 MR fluid를 분사하는

방식으로 구성되었다. 이는 연마가 종료된 혼합유체가 가공물의 표면에 쌓여서 연마를 방해하는 현상을 방지하고, 사용된 혼합유체가 용이하게 재순환될 수 있도록 하기 위함이다. 스테이지의 이송제어와 chucking module의 제어에 의해 요구되는 다양한 형상의 연마가 가능하도록 구성되었다.

Fig. 1에 본 연구에 사용된 MR fluid polishing system의 사진을 나타내었으며, Table 1에 시스템의 사양을 나타내었다.

Table 1 Specification of the MR fluid jet polishing system.

Electromagnet system	Magnetic spec (Gauss)	1500 G at 1.5 A
	Size (mm)	∅70×120
Electromagnet system	Diameter (mm)	∅ 1.5, 1.0, 0.5
	Length (mm)	70
	Material	Carbon steel (SM45C)
Hydraulic system	Pump type	Diaphragm pump
	Max. pressure (bar)	15

3. 시뮬레이션 조건 분석

실험을 통한 재료의 제거량 및 가공면 형상의 결과만으로는 재료제거 매커니즘을 분석하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 ANSYS Fluent 6.0을 이용하여 MR fluid의 분사 시뮬레이션을 수행하여 MR fluid jet polishing에서의 연마 형상에 대하여 예측 및 특성 분석을 위한 연구를 수행하였으며, 측정된 spot의 형상과 simulation 결과를 비교하여 타당성을 검증하였다.

3.1. 유동해석을 위한 MR jet polishing 가공변수 도출

Fig. 2는 MR jet polishing의 연마 공정에 대한 개략도이며 Table 2는 MR jet polishing의 주요 가공 변수이다. 인가되는 자기장, 전자석 내의 노즐의 위치, 노즐 끝단의 각도는 유체의 점성 및 속도의 주요 변수로 작용하고, 유체가 분사될 때 작용하는 압력은 유체가 분사되는 속도에 영향을 미치게 된다. MR fluid의 점성 및 유속, 노즐 직경에 따른 분사 유체의 직경, stand-off distance는 공작물의 연마 형상과 재료제거율, 표면거칠기에 대한 주요 가공 변수로 작용한다. 이 때, stand-off distance는 일정 범위 내에서는 자기장이 인가됨에 따라 MR fluid가 응집되어 연마 spot 형성에 거의 영향을 미치지 않는다.

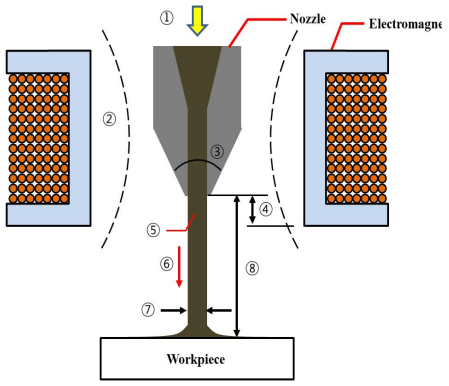


Fig. 2 Mechanism of MR fluid jet polishing.

Table 2 Main components fo MR fluid jet Polishing system

①	P : Pressure	②	B : Magnetic field
③	Θ : Angle of nozzle	④	d_1 : Position of nozzle
⑤	μ : Viscosity of MR fluid	⑥	V : Velocity of MR fluid
⑦	D : Diameter of MR fluid	⑧	d_2 : Stand-off distance

일반적인 jet 방식의 연마에서 재료제거는 연마입자의 충돌에 의한 Huching model과 유체와 벽면 사이에 작용하는 속도에 의한 Sheldon model에 의해 표현되어지며 다음 식과 같이 표현된다[6].

$$f(x,h) = f(x,h_I) + f(x,h_p)$$

$$= \frac{K_1(t) f_e f_W \eta(\nu) m_p u_0^2 \exp\left[-0.693\left(\frac{x}{b}\right)^2\right]}{\pi r}$$

$$\times \left(\frac{\rho}{\rho_p}\right)^{\frac{1}{2}} H^{\frac{3}{2}} E^{-\frac{1}{2}} K_c^{-2} + K_2(t)\left(\frac{\rho}{E}\right)^{\frac{2}{5}}$$

$$\times r\left[u_x(x) - u_K\right]^2 \qquad (1)$$

위 식에서 재료제거 예측 모델에 작용하는 변수는 Table 3과 같으며 연마 형상의 예측을 위해서는 유동해석으로부터 공작물에 작용하는 압력 및 속도 분포 결과를 필요로 한다.

이에 따라 본 논문에서는 전자석 내의 노즐 위치, 노즐 끝단 각도 및 stand-off distance를 고정하고 MR fluid의 점성계수 및 유속의 변화에 영향을 미치는

자기장의 세기에 따른 유동해석을 수행하였고, ∅0.5 mm, ∅1.0 mm, ∅1.5 mm에 대해 유체의 분사 직경에 따른 유동 해석을 수행하여 연마 특성을 분석하였다. 이 때 노즐의 직경이 변화함에 따라 자기장 및 압력을 조절하면 일정한 유속을 얻을 수 있으므로 분사되는 유체의 유속은 고정 변수로 설정하여 유동 해석을 수행하였다.

Table 3 Process parameters of MR fluid jet polishing(2)

m_p :	Mass of injection particles	E :	Workpiece Modulus of elasticity
η(ν):	Poisson's ratio	H :	Workpiece Hardness
ρ_p :	Density of abrasive particles in injection fluid	ρ :	Workpiece Density
u_0 :	Injection velocity of the abrasive particles	f_e :	Coefficients determined by experiment
K_1:	Huching model Coefficient	K_2:	Sheldon model Coefficient
K_c:	Fracture toughness	u_k:	Critical speed for the material removal

3.2. 유동해석을 위한 경계조건

Fig. 3과 같이 자기장의 변화에 따른 분사 시뮬레이션의 조건으로 mesh는 0.01 mm 크기로 Quad mesh를 사용하였고 노즐의 직경에 따라 유한요소모델을 설정하였다. 해석 모델은 노즐의 중심 부분을 기준으로 축대칭으로 2차원 평면 모델을 설정하였다.

MR fluid jet polishing은 일반 water jet polishing과는 달리 MR fluid에 연마입자가 혼합되어 분사된다. MR fluid의 물성은 기존 연구와 측정 자료를 바탕으로 밀도와 점도를 설정하였다. MR fluid의 구성은 식 2를 이용하여 밀도를 계산하였다.

$$\rho_{all} = \frac{m_{ci}}{m_{all}}\rho_{ci} + \frac{m_{slurry}}{m_{all}}\rho_{slurry} + \frac{m_{water}}{m_{all}}\rho_{water} + \frac{m_{stabilizer}}{m_{all}}\rho_{stabilizer} \quad (2)$$

위의 식에 의해 MR fluid의 밀도는 6,260 kg/m^{3}으로 구할 수 있다. MR fluid의 점성은 기존 연구에 의해 자기장이 1500 G일 때 MR fluid의 점도를 측정하여 0.00778 kg/m·s로, 2000 G일 때 0.0143 kg/m·s로 설정하였다[7]. 유동 해석의 초기 조건으로 제어영역(Control volume) 전체를 대기층(밀도: 1.225 kg/m^3, 점도: 1.7894×10^{-5}kg/m·s)으로 가정하였고 Inlet 부분에 MR fluid의 부피 분율(Volume fraction)을 1로 설정하여 해석을 진행하였다.

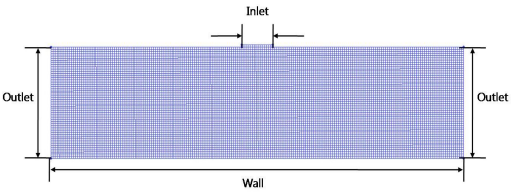


Fig. 3 Boundary condition of jet simulation

인가되는 자기장의 세기에 따라 노즐 내부에서 유동되는 MR fluid의 점성이 달라지기 때문에 연마입자의 분사속도도 변화하게 된다. 따라서 inlet 조건으로는 노즐 내부 유동 해석 결과와 자기장에 세기에 따른 MR fluid의 점도 값 측정 데이터를 바탕으로 MR fluid가 1500 G일 때 24 m/s, 2000 G일 때 12 m/s로 유속을 부여하였고 유체가 분사되는 수직면에 벽면 조건을 부여하였으며, 측면에 MR fluid가 흘러 나가도록 outlet 조건을 부여하였다.

4. 자기장 변화에 따른 재료제거 예측

4.1. MR fluid 분사에 따른 속도 분포 예측

Fig. 4는 MR fluid와 연마슬러리가 분사될 때 속도 분포를 나타낸 결과로 MR fluid와 연마슬러리의 분사는 유동 형태에 따라 세 가지 영역으로 나눌 수 있다. MR fluid와 연마슬러리가 벽면에 충돌하기 전까지 노즐의 분사 속도를 유지하는 Free jet region, 노즐의 중심 부분의 MR fluid가 벽면에 충돌되는 impingement region, 노즐의 중심을 기준으로 외각 부분에 벽면을 따라 반경방향(radial direction)으로 MR fluid가 흐르는 wall jet region으로 나타낼 수 있다.

유체가 벽면에 충돌되는 impingement region은 MR fluid가 충돌되면서 정체됨에 따라 유동 속도가 감소하여 중심부는 유동이 거의 흐르지 않음을 알 수 있다.

노즐의 중심부로부터 멀어짐에 따라 impingement region을 벗어나 wall jet region이 생성됨을 알 수 있는데, free jet region에서 벽면에 수직한 방향으로 흐르던 MR fluid가 벽면 충돌에 의해 생성된 정체 영역을 따라 유동 방향을 전환하게 되고 wall jet region에서 벽면과 평행한 방향으로 유동 방향이 전환되어 벽면을 따라 MR fluid가 흐르게 됨을 알 수 있다.

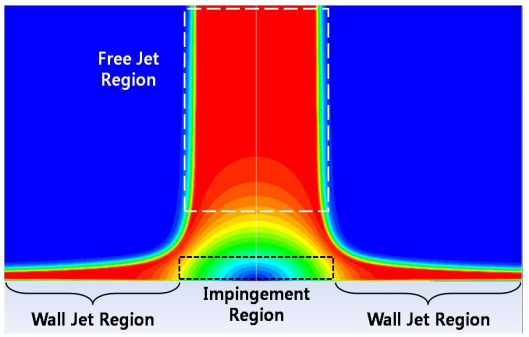


Fig. 4 Three regions of MR fluid jet polishing

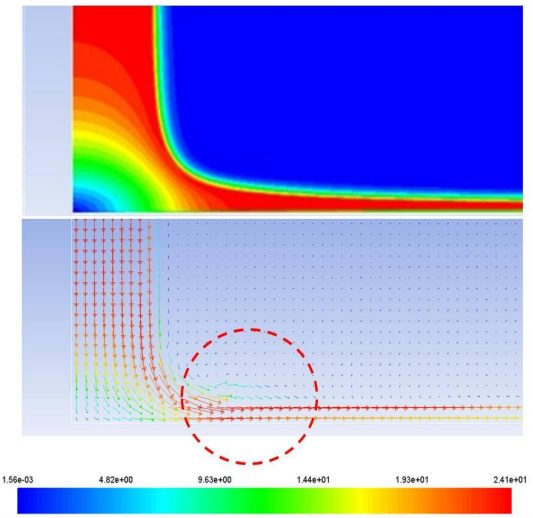


Fig. 5 Maximum velocity region.

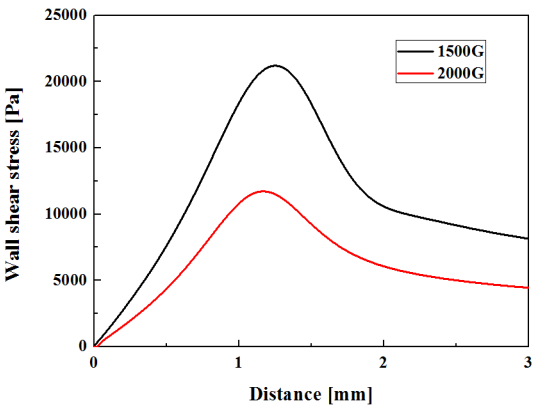


Fig. 6 Wall shear stress according to magnetic field.

4.2. MR fluid 분사에 따른 전단 응력 예측

Fig. 5는 대칭형태의 유동을 vector 형태로 나타내어 최대 연마 예측 지점을 표시한 것으로 유체가 정체되는 impingement region에서는 유속이 급격히 저하되는데 노즐 직경보다 넓은 영역으로 나타난다. 이 지점을 벗어나서 wall jet region에서 반경방향으로의 최대속도에 도달한 후 점진적으로 속도가 감소한다. 이 때 재료는 연마입자의 전단현상과 침식에 의해 제거되며, 전단 응력이 최대인 지점에서 최대 재료제거율을 나타내며, 연마된 spot의 단면형상은 W로 형성된다. 생성된 전단 응력 프로파일을 통하여 연마 특성을 예측할 수 있으며, 이 위치에서 재료 제거율이 최대가 될 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 6은 자기장 변화에 따른 벽면에 작용하는 전단 응력에 대한 시뮬레이션 결과로 노즐 중심부를 기준으로 전단 응력 분포를 나타낸 것이다. 자기장의 세기가 증가함에 따라 점도 값이 증가하게 되고 이는 MR fluid의 유속 저하로 나타나게 되는데, 이로 인해 벽면에 작용하는 전단 응력이 감소하게 된다.

또한 점도 값이 증가함에 따라 최대 연마 지점이 중심축에 가까운 지점에 형성되었는데 이는 점도가 증가함에 따라 유체의 응집성이 커져 유체가 퍼지지 않았기 때문으로 판단된다.

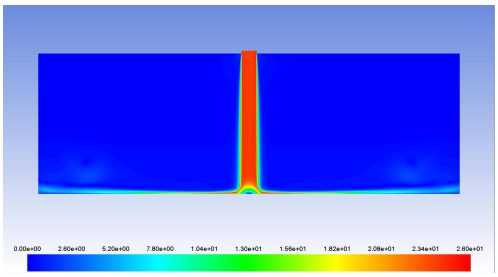
5. 노즐 직경에 따른 재료제거 예측

5.1. MR fluid 분사에 따른 전단 응력 예측

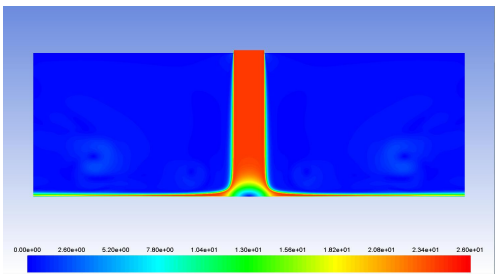
다음으로 노즐 직경에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 경계 조건은 노즐 직경 크기로 inlet을 설정하여 자기장이 1500 G일 때 점성 조건으로 해석을 수행하였다.

유동해석 결과 ∅0.5 mm, ∅1.0 mm, ∅1.5mm 노즐 직경에 대해 속도 분포는 동일한 경향을 나타내었으며 노즐을 기준으로 중심축 부분의 impingement region보다 wall jet region에서 재료 제거율이 최대가 됨을 확인할 수 있다.

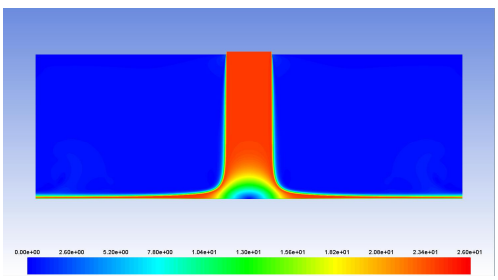
Fig. 7은 노즐 직경에 따른 유속 분포를 나타낸 것이다. MR fluid가 노즐에서 분사됨에 따라 벽면에 수직한 방향으로 유동이 형성됨을 알 수 있다. 이 때 노즐 직경이 ∅0.5 mm인 경우 작은 직경으로부터 유체가 분사되어 free jet region에서의 유동이 분산되었다. ∅0.5 mm와 ∅1.0 mm의 경우 중심 부분의 유속이 일그러짐을 보이는데 이는 해석 모델을 2차원 형태의 평면으로 설정한 후 축 대칭 조건을 부여하여 해석을 진행하면서 mesh의 tolerance에 의해 발생된 오차로 판단되나 벽면에 작용하는 압력과 전단 응력 값의 변화에는 영향을 미치지 않았다.



(a) ∅ 0.5 mm



(b) ∅ 1 mm

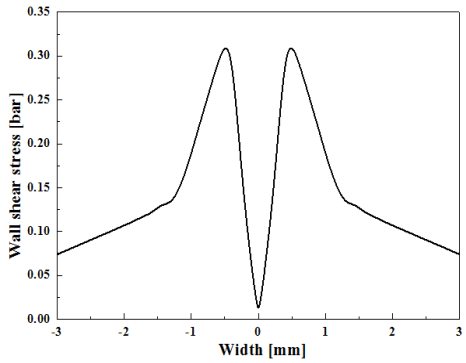


(c) ∅ 1.5 mm

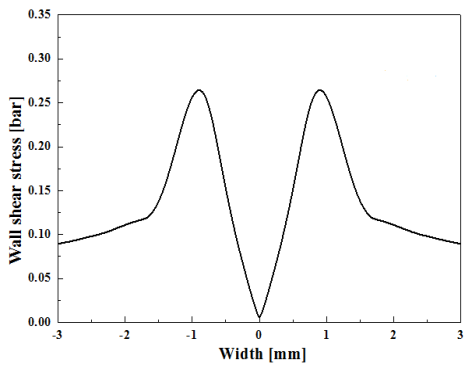
Fig. 7 Results of the fluid velocity distribution by nozzle diameters

5.2. 노즐 직경에 따른 전단 응력 예측

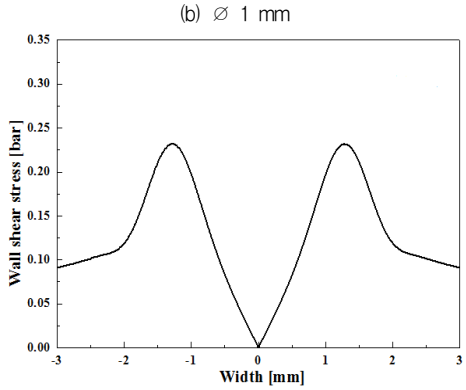
Fig. 8에서 보듯이 벽면에 작용하는 전단 응력의 경우 방사 방향의 유동 흐름에 의해 생성되며 노즐 중심부분에서는 0에 근접한 값을 가지고 중심으로부터 멀어짐에 따라 wall jet region이 시작되는 부근까지는 증가하다가 다시 감소하였다. 이는 wall jet region이 시작되는 부분의 벽면에서 유동 방향이 급격하게 변화하고 방사 방향의 유속이 증가하여 발생하는 전단 응력이 최대로 나타나는 것으로 판단된다. 전단 응력이 최대인 지점은 노즐 중심을 기준으로 직경이 ∅0.5 mm일 때는 0.45 mm, ∅1.0 mm일 때는 0.73 mm, ∅1.5 mm일 때는 1.24 mm로 나타났다. (실제 연마 지점 - ∅0.5 mm : 0.4 mm, ∅1.0 mm : 0.84 mm, ∅1.5 mm : 1.14 mm) 이는 전단 응력이 최대인 지점에서 재료 제거가 최대가 되어 연마 형상 프로파일이 W 형태를 가지게 되는 것으로 예상할 수 있다.



(a) ∅ 0.5 mm



(b) ∅ 1 mm



(c) ∅ 1.5 mm

Fig. 8 Wall shear stress distribution.

작용하는 전단 응력의 경우 노즐의 직경이 작을수록 단면적이 감소하여 최대 전단 응력 값이 증가하나 노즐 직경이 작은 경우, 최대 전단 응력 지점을 지나면서 전단 응력 값이 현저하게 저하되어 연

마 형상 프로파일이 급격하게 변하게 되고 이는 최대 연마 지점에서의 유동 흐름에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 전단 응력 분포 결과를 통해 연마 형상과 최대 연마 지점에 대한 예측할 수 있다. 그러나 실제 MR fluid는 ci particle를 포함하는 유체이나 유동 해석에서는 입자 성분이 고려되지 않아 유동 특성에 차이가 있다. 또한 벽면에서 발생하는 압력 분포의 영향과 연마 시간에 따른 형상 변화 및 유동 흐름 변화 등이 고려되지 않아 실제 연마 형상과는 차이가 발생될 것으로 판단된다.

6. 결론 및 토의

본 연구에서는 자기장의 인가에 의해 안정적이고 재료 제거 예측 가능이 가능하여 미소부품의 초정밀 연마에 적용이 가능한 MR fluid jet polishing을 통하여 유동해석을 통한 재료제거 예측에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) ANSYS FLUENT를 이용한 유동해석을 통하여 MR fluid jet polishing의 전단 응력의 분포와 유동속도, 압력의 분포를 도출하였다.

2) 유동해석을 통해 MR fluid jet polishing의 MR fluid와 연마슬러리의 유동 형태 및 속도분포를 분석하였으며 자기장 변화에 따른 전단응력을 예측하였다.

3) 노즐 직경의 변화에 따른 MR fluid jet polishing의 MR fluid와 연마슬러리의 유동 형태 및 속도분포를 분석하였으며 노즐 직경이 연마효과에 미치는 영향을 고찰하였다.

4) 향후 미세 부품의 초정밀 연마에 있어서 본 연구에서 제시된 연마 방법이 적용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1) Kim, D. G, and Sung, I. H, “A Closer Look at the Effect of Particle Shape on Machined Surface at Abrasive Machining”, Journal of the KSTLE, Vol. 26, No. 4, pp. 219-223, 2010.

2) Fahnle, O. W, Burg, H. V., and Franken, H. J, “Fluid Jet Polishing of Optical Surfaces”, Applied Optics, Vol. 37, No. 28, pp. 6771-6773, 1998.

3) 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.

4) Fang, H, Guo, P, and Yu, J, 2006, “Surface Roughness and Material Removal in Fluid Jet Polishing”, Applied Optics, Vol. 45, No. 17, pp. 4013-4019, 2006.

5) Kordonski, W, and Shorey, A, “Magnetorheological (MR) Jet Finishing Technological”, Journal of Intelligent Materical System and Structures, Vol. 18, No. 12, pp. 1127-1130, 2007.

6) Shi, C, Yuan, J, Wu, F, Hou, X, and Wan, Y, “Material Removal Model of Vertical Impinging in Fluid Jet Polishing”, Chinese Optics Letters, Vol. 8, No. 3, pp. 323-325, 2010.

7) J, W, Lee, Y, K, Cho, S, J, Ha, B, C, Shin, M, W, Cho, “Development of an Injection Nozzle and an Electromagnet Module for a MR Fluid Jet Polishing System”, J. Kor. Soci. Manu. Technol. Eng , Vol. 21, No. 5, pp. 767-772, 2012.