

유막 코팅 노즐의 유동특성에 관한 CFD해석

정세훈* · 안승일** · 신병록***†

CFD Analysis on Flow Characteristics of Oil Film Coating Nozzle

Se-Hoon Jung*, Seung-Il Ahn**, Byeong Rog Shin***†

Key Words : Multi-stage nozzle(다단 노즐), Cutting fluid supplying apparatus(절삭유 공급장치), Jet flow(분류유동), Mixed fluid(혼합유체), Numerical analysis(수치해석)

ABSTRACT

Metal cutting operations involve generation of heat due to friction between the tool and the pieces. This heat needs to be carried away otherwise it creates white spots. To reduce this abnormal heat cutting fluid is used. Cutting fluid also has an important role in the lubrication of the cutting edges of machine tools and the pieces they are shaping, and in sluicing away the resulting swarf. As a cutting fluid, water is a great conductor of heat but is not stable at high temperatures, so to improve stability an emulsion type mixed fluid with water and oil is often used. It is pumped over the cutting site of cutting machines as a state of atomized water droplet coated with oil by using jet. In this paper, to develop cutting fluid supplying nozzle to obtain ultra thin oil film for coating water droplet, a numerical analysis of three dimensional mixed fluid jet through multi-stage nozzle was carried out by using a finite volume method. Jet flow characteristics such as nozzle exit velocity, development of mixing region, re-entrance and jet intensity were analyzed. Detailed mixing process of fluids such as air, water and oil in the nozzle were also investigated. It is easy to understand complex flow pattern in multi-stage nozzle. Important flow information for advance design of cutting fluid supplying nozzle was drawn.

1. 서론

금속 및 비철금속의 절삭 가공 시 칩이 발생하고 높은 열과 압력이 절삭 공구와 재료 금속사이에 발생

하게 된다.^(1~2) 이때 냉각을 위해 절삭유를 사용하게 되는데 이러한 절삭유 사용에 의한 환경오염뿐만 아니라 피부염, 호흡기 장애, 발암성 질병 등의 많은 문제 점을 일으키고 있다.⁽³⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위해 다단 노즐을 통하여 물 입자에 유막을 형성하는 초미량 절삭유 코팅기술을 이용한 절삭유 공급 장치가 개발되었다. 이런 절삭 유체 공급 장치의 노즐에서 분출하는 유동은 분류(jet)이고,⁽⁴⁾ 신뢰성 있는 고성능 절삭

* 창원대학교 기계공학과 대학원

** 한택 기연(주)

*** 창원대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail : brshin@changwon.ac.kr

유체 공급 장치의 기술 개발에 있어서 분류의 유체역학적 검토는 무엇보다도 중요하다.⁵⁾ 본 연구에서는 환경오염을 줄이기 위해 개발된 초미량 유막 코팅 절삭유 공급 장치의 개발을 위하여, 절삭유가 흐르는 다단 노즐의 3상 혼합 작동유의 복잡한 관내 분류 유동을 열·유체 해석 프로그램인 ANSYS-CFX⁶⁾를 사용하여 해석한다.

우선 다단 노즐 형상이 단순한 선단부 노즐(top nozzle (Fig.1))의 계산을 실시하여 단순 원형 노즐의 유체역학적 거동을 살펴본 후, 이를 토대로 다단 노즐 전체의 복잡한 유동장에 대하여 계산하고, 절삭유와 공기 물의 혼합 상태를 예측하기 위한 절삭유 공급 장치 노즐의 유체역학적 특성 및 유동을 살펴본다. 또한 다단 노즐에서의 분류 유동의 특성과 유동 형태를 나타내었으며 이는 절삭유 공급 장치의 설계 및 개선에 유용하다.

2. 수치해석

본 연구에서는 노즐 내의 난류 유동을 표준 $k-\epsilon$ 난류 해석 모델을 이용하여 해석하였다. Fig. 1에 한택기연(주)에서 설계한 다단 노즐의 개략도를 나타낸다.

본 다단 노즐의 유동 방향은 개략도 왼쪽에서 오른쪽이며, 3개의 유입부에서 각각 공기 물 그리고 기름이 유입된다. air inlet에서 공기가 유입되어 oil spray nozzle에서 분무 상태로 공급된 오일과 함께 oil forming chamber를 통과한다. 이것이 water spray nozzle에서 공급되는 물방울과 함께 water drop chamber로 들어오면서 물방울이 얇은 기름 막으로 코팅되고, 최종적으로 유막 코팅된 액적이 공기와 함께 top nozzle 을 지나 절삭부위에 분사된다.

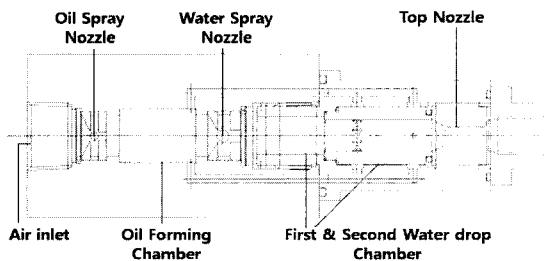


Fig. 1 Schematic diagram of multi-stage nozzle

2.1 계산 격자

Fig. 2는 절삭유 공급 장치에 있어서 절삭부위에 직접 절삭유를 제공하는 선단부 노즐의 유동 계산을 위한 계산 격자를 나타낸다. Fig. 2의 좌측은 절삭유의 분출강도와 분산성을 고려하여 설계한 노즐을 나타내고, 우측 챔버(chamber)는 분류의 발달과정 및 노즐출구 속도 분포 등을 확인하기 위한 자유분출 영역을 나타낸다.

Fig. 3은 물과 오일의 작동유체가 노즐 내부로 유입되는 주요 부분의 비 정렬 형태의 계산 격자를 나타낸다. 각 유체의 유입부에서는 초미량의 오일이 필름 코팅될 수 있도록 링 형상 유로를 통해 유체가 사방에서 노즐 내부로 유입되는 매우 복잡한 유로형상을 가지고 있다.

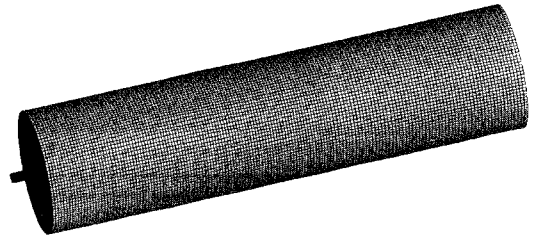


Fig. 2 Computational grid of top nozzle

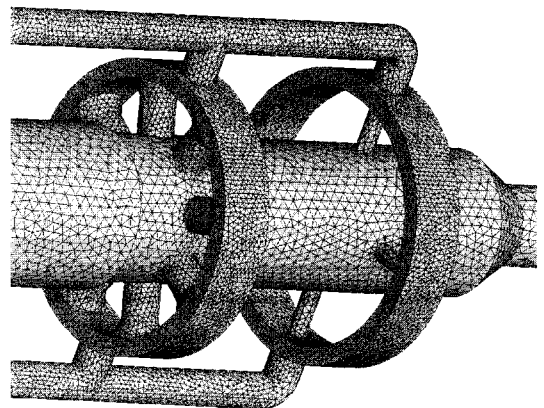


Fig. 3 Computational grid near re-inflow region in multi-stage nozzle

2.2 경계 조건

선단부 노즐은 작동매체가 대기압과 같은 공간에 자유 분류(free jet flow)하는 것으로 하고, 노즐의 출구 속도가 설계속도 범위에 들도록 입구속도를 고정하여 계산하였다.

다단 노즐의 경계 조건으로는 기존 제품의 작동 조건, 즉 공기 입구에는 3cm/s, 물 입구에 4cm/s, 오일 입구에 1.8cm/s의 속도를 주었으며, 다단 노즐의 출구 부에는 대기압을 주었다. 그러나 작동유체는 모두 25℃의 물을 사용하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 선단부 노즐의 유동해석

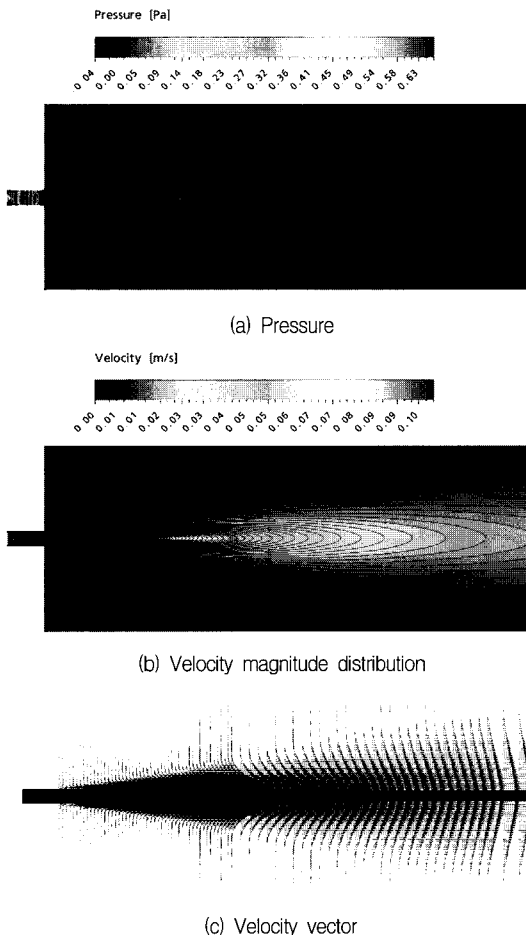


Fig. 4 Computational results for the top nozzle

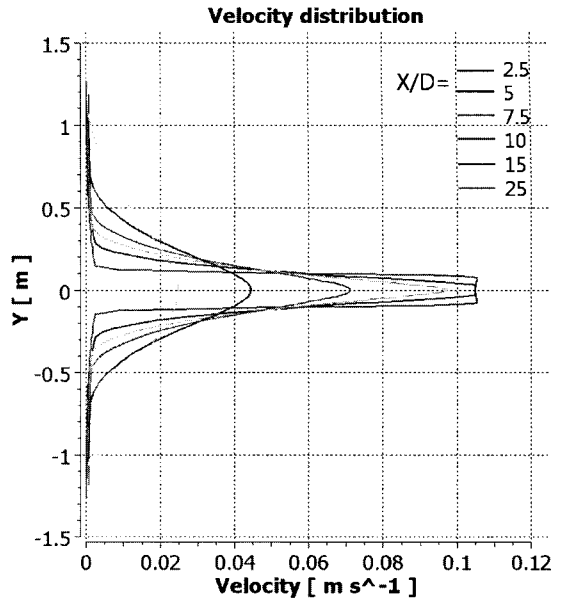


Fig. 5 Velocity distribution at nozzle outlet

Fig. 4는 Re수 22000인 자유분류에 대하여 수치해석을 통하여 해석한 선단부 노즐 주변의 압력분포 및 속도 벡터를 나타낸다. 노즐 내부의 압력(계기압) 분포 Fig. 4(a)는 절삭유의 비산방지와 압력회복을 위하여 마련한 확대부를 통과하면서 대기압하의 공간에 자연스럽게 분출 되고, 이 때 속도의 크기(Fig.4(b)) 또한 하류로 진행할수록 감소되어 가는 모양이 잘 묘사되어 있다. Fig. 4(c)의 속도 벡터에서는 자유 분류의 코어부 및 주변 영역의 속도분포, 분류의 발달과정이 잘 시뮬레이션 되어있다.

Fig. 5는 노즐출구의 속도분포를 나타낸 것이다. 여기서 D는 노즐 직경을 나타내며, X는 노즐로부터 하류방향으로의 거리를 나타낸다. 유체 점성의 영향으로 주변 유체와의 사이에 커다란 속도구배가 형성되며, 분류 폭을 넓혀가면서 하류방향으로 유동한다. 천이영역의 거리는 6D에서 7D사이로 2차원 노즐에 대한 실험값으로 알려진 6D에 가깝게 예측되었다.⁽⁷⁾ 경계층의 발달, 출구속도 분포 등, 절삭유 공급 장치의 노즐에 필요한 원형 노즐의 유체역학적 기초 특성이 잘 나타나 있다.

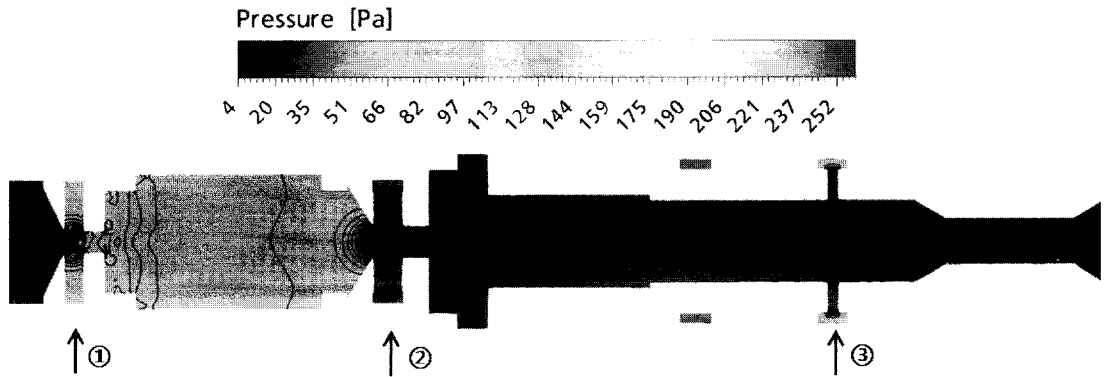
3.2 다단 노즐의 유동해석

Fig. 6은 oil spray nozzle을 지나는 단면에서 본 유

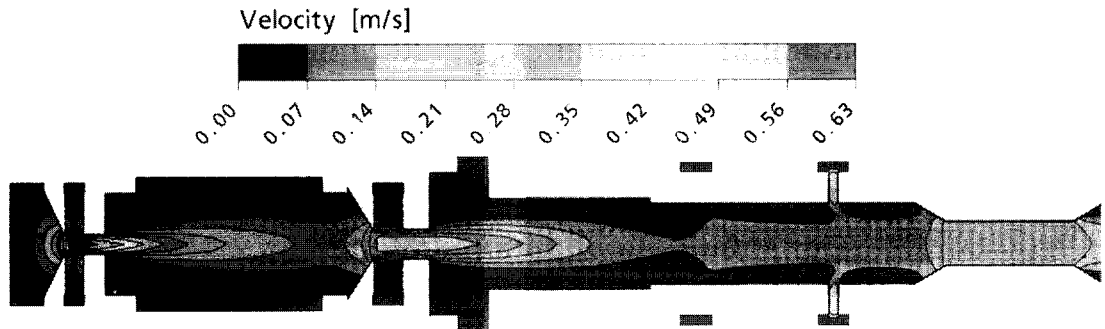
유막 코팅 노즐의 유동특성에 관한 CFD해석

동해석 결과로 압력(계기압), 속도벡터를 나타내며, 이를 통해 오일 유입부에서 유입된 유체의 거동을 상세히 관찰할 수 있다. 대부분의 유체는 노즐의 중심을 통해 하류로 이동되며, Fig. 6(c)에서 오일이 main

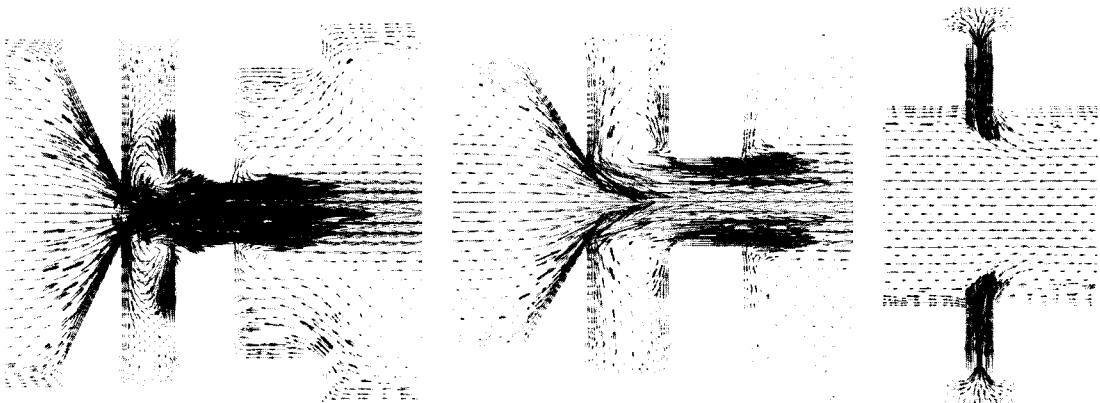
housing 통로로 유입되기 전, 오일관에서 비교적 큰 순환 영역이 존재하며, 이 순환으로 인해 적은 양의 오일이 공기와 혼합된다. 또한 별도로 마련된 노즐 옆 좁은 관을 통해 흐르는 유체는 water spray nozzle 내



(a) Pressure



(b) Velocity magnitude distribution



(c) Details near oil spray nozzle(1), water spray nozzle(2) and re-inflow passage(3)

Fig. 6 Computational results in middle section along the oil spray nozzle

부의 속도가 완만한 만큼 순환영역 없이 유입되어 절삭유체의 혼합과 유동을 원활하게 한다.

양 단면에서의 압력 분포, 속도크기 분포, 속도벡터를 나타낸다. 유동은 좌측에서 우측으로 흐르며, 압력 분포는 oil spray nozzle부와 water spray nozzle부에서

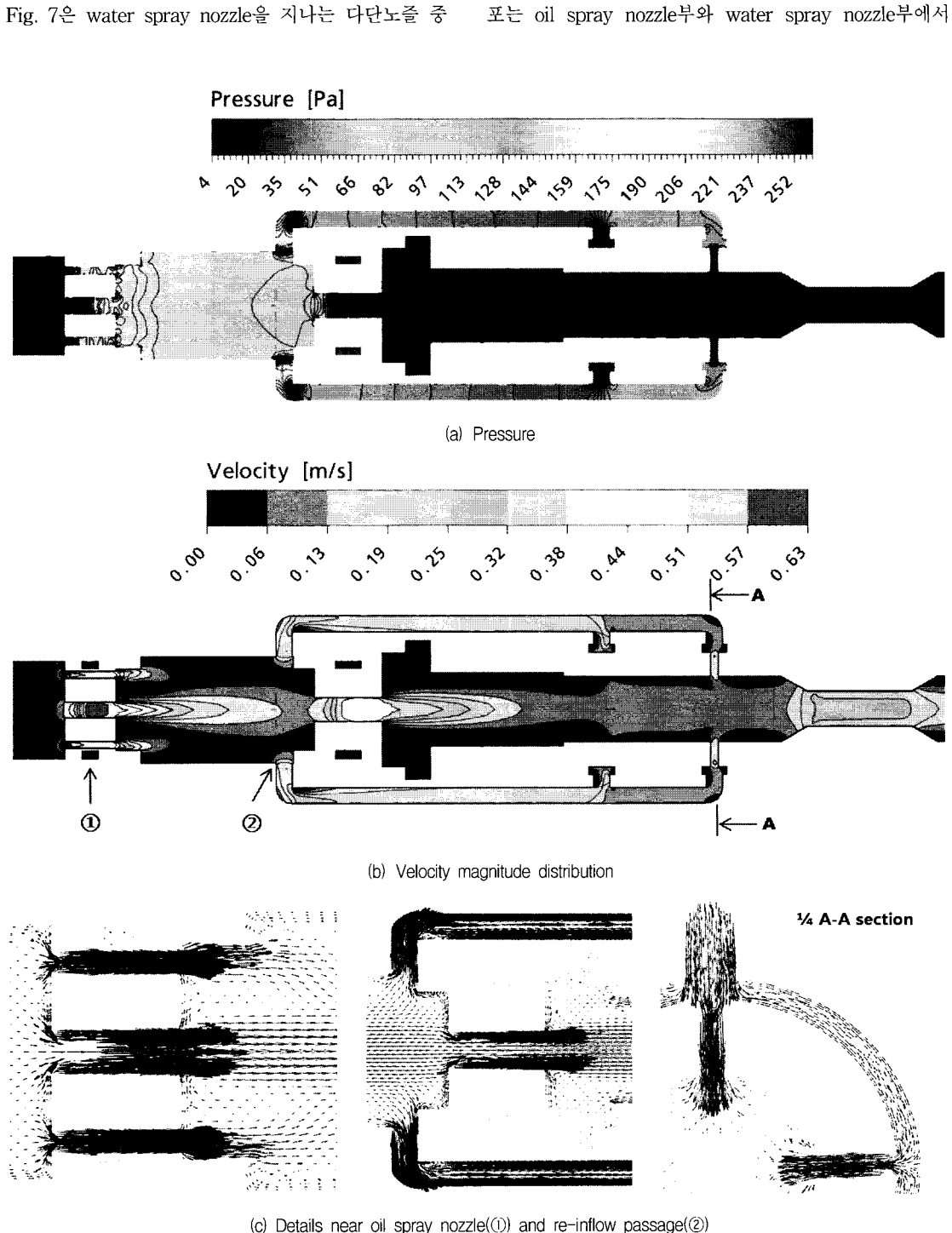


Fig. 7 Computational results in the middle section along the water spray nozzle

유막 코팅 노즐의 유동특성에 관한 CFD해석

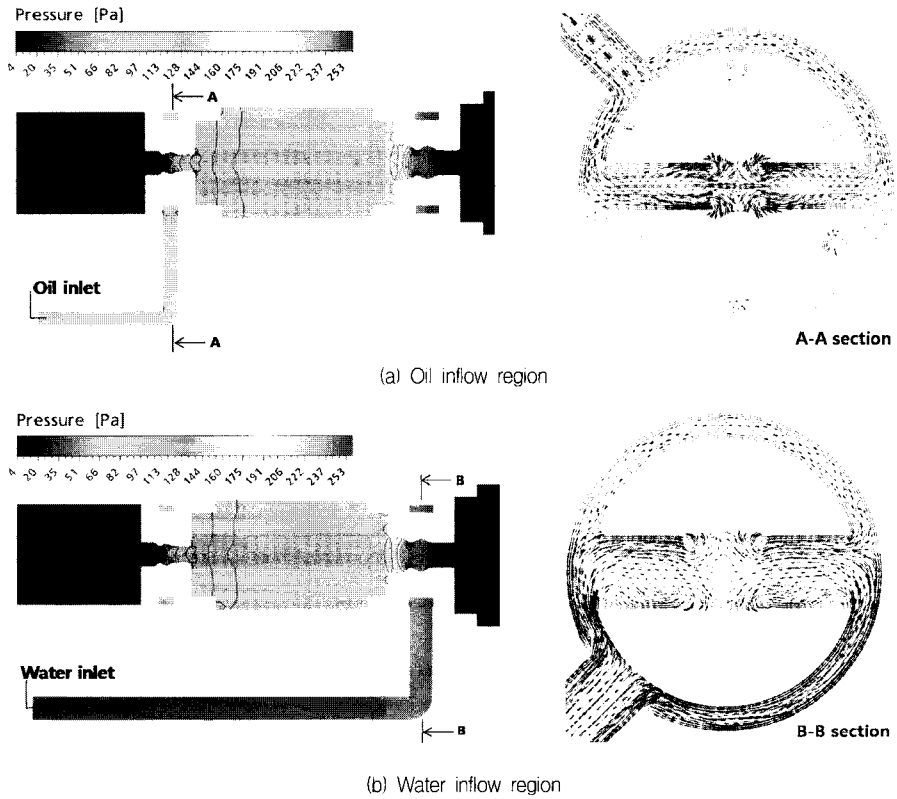


Fig. 8 Computational results of pressure, velocity vectors at water and oil inflow sections

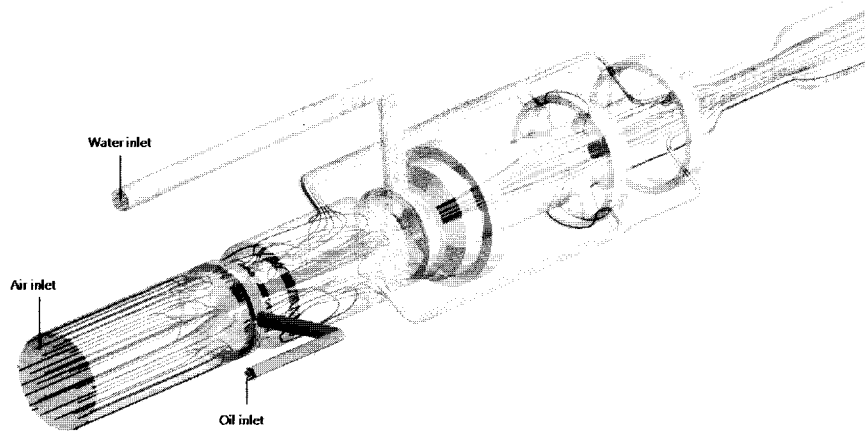


Fig. 9 Streamlines of the multi-stage nozzle

유로단면적의 감소로 인해 급격한 압력 강하를 보인 후 하류로 흘러갈수록 낮은 압력을 타나내고 있다. 속도분포는 oil spray nozzle을 통과하는 유체가 다소 빠르게 흘러 water forming nozzle 부근까지 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이로 인해 oil spray nozzle을

통해 유입된 유량 대부분이 water spray nozzle부로 흘러가며, 이는 실제 유동에 있어서 필름 코팅을 유리하게 한다. 또한 노즐의 출구 근방에서는 다시 유로 단면적의 감소로 인해 속도가 증가한다. Fig. 7(c)는 작동유체 각 유입부의 상세를 나타낸 것으로, 상부 공

기 유입 노즐과 oil spray nozzle의 빠른 유속으로 인해 유입부 상하 확대 영역에 작은 순환 영역이 존재한다. 또한, water spray nozzle이 있는 부분의 속도 벡터에서는 상부 노즐을 통해 유입된 유량이 대부분 곧바로 하류로 흘러들어가며, 나머지 오일은 별도로 마련된 노즐 옆 좁은 관으로 유입되고 링 형상의 2차 재유입로를 통하여 다시 water drop chamber로 공급된다. 이것이 물과 기름의 혼합 상태를 양호하게 한다. 이 때, 별도의 관을 통해 유입된 유체 유동은 배관 형식의 특성상 순환 영역이 없이 다시 노즐 내부로 재유입되고, water spray nozzle을 통해 유입된 유체와 함께 노즐 출구로 흘러간다.

Fig. 8은 다시 물과 오일의 유입부의 단면에서 본 결과로 압력과 속도벡터를 나타낸다. 본 유막코팅 노즐의 경우 이 단면에서도 각 작동유체의 공급이 무리 없이 원활하게 공급되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 입구부에서 출구까지의 다단 노즐 내부 전체 유동장의 유선을 나타낸다. 계산 여건상 비록 단상 매체로 가정하여 해석하였지만 매체간의 원활한 혼합을 위한 순환 영역과 각 작동유체의 유입, 유출의 유동경로 등 다단 노즐의 복잡한 유동 구조 및 혼합 과정을 알 수 있다. 실제로 이와 같은 유동구조를 갖는 노즐을 제작하여 실험한 결과에서 절삭유 of 재이용율, 물 및 절삭유 of 교체주기, 가공물의 거칠기, 대기오염 및 수질 오염 등의 평가 항목에 대하여 우수한 성능을 보여⁸⁾ 본 해석의 타당성을 뒷받침한다. 그러나 아직 계산상의 어려움으로 물방울 입경의 크기, 코팅된 유막의 두께를 예측하기는 어렵다.

4. 결론

본 연구는 유막 형성을 위하여 여러 유로 통로로 구성된 복잡한 형상의 유막 코팅 노즐 내부의 유동을 상용 전산 열 유체 해석 코드인 ANSYS -CFX를 이용하여 해석을 하였다. 해석결과 전체적으로 노즐의 각 챔버 및 입, 출구 관내 유동이 잘 묘사되었으며, 노즐 내부의 복잡한 유동현상을 쉽게 이해할 수 있다.

본 연구의 절삭유 공급 장치의 다단 노즐의 유동형태는 필요한 곳에 압력변동 및 재순환 영역이 적절히 배치되어 있어 미세 물방울에 유막코팅을 위한 혼합장

치로 적합함을 알 수 있다. 그러나 복잡한 유동장에 대하여 상용코드를 최대한 활용하여 계산하였다 하더라도 아직 물방울의 입경크기 코팅된 유막의 두께, 공기-물-오일에 해당하는 매체간의 공간적 혼합 비율 등을 예측하기가 어렵다. 따라서 더 객관적이고 정확한 코팅 여부 등의 유막 코팅 노즐의 성능을 알기 위해서는 2상 3매체 유동을 고려한 계산이 필요하며, 정량적으로 비교가 가능한 실험적인 정보가 필요하다.

후 기

이 논문은 2006년도 창원대학교 연구교수연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Byers, Jerry P., 1994, "Metalworking Fluids," Marcel Dekker, Inc.
- (2) Kalpakjian, S., 1991, "Manufacturing Processes for Engineering Materials," 2nd. ed., Addison-Welsley.
- (3) Bennett E. O., 1983, "Water based cutting fluids and human health," Tribology international.
- (4) Yoshimura, H., Itoigawa, F., Nakamura, T. and Niwa Kosaburo, 2005, "Development of Nozzle System for Oil-on-Water Droplet Metalworking Fluid and Its Application to Practical Production Line," JSME Int'l J., Ser. C, Vol. 48, pp. 723~729.
- (5) Yueti, Y., et al., 2004, "Character and Behavior of Mist Generated by Application of Cutting Fluid to a Rotating Cylindrical Workpiece, Part 1: Model Development," ASME, J. of Manuf. Sci. Eng., Vol. 126, pp. 417~425.
- (6) ANSYS Inc., 2007, "ANSYS CFX Documentation," Ver. 11, <http://www.ansys.com>
- (7) Shakouchi, T., 2004, "Jet Flow Engineering," Morikita Pub.
- (8) 안승일 외 7인, 2006, "초미량 오일 필름 코팅기술을 이용한 절삭 유체 공급 장치 개발," 산업기술 개발 사업 보고서, 산업 자원부.