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

극저온 가스와 MQL(minimum quantity lubrication)의 복합 분사를 위한 하이브리드 노즐 설계에 관한 전산유체역학 해석

송기혁[1] · 신봉철[1] · 윤길상[2] · 하석재[†]
인하대학교 기계공학과[1]
한국생산기술연구원 금형기술그룹[2,†]

Analysis of computational fluid dynamics on design of nozzle for integrated cryogenic gas and MQL(minimum quantity lubrication)

Ki-Hyeok Song[1] · Bong-Cheol Shin[1] · Gil-Sang Yoon[2] · Seok-Jae Ha[2,†]
Department of Mechanical Engineering, Inha University[1]
Molds & Dies Technology R&B Group, Korea Institute of Industrial Technology[2,†]
(Received September 17, 2019 / Revised September 26, 2019 / Accepted September 30, 2019)

Abstract: In conventional machining, the use of cutting fluid is essential to reduce cutting heat and to improve machining quality. However, to increase the performance of cutting fluids, various chemical components have been added. However, these chemical components during machining have a negative impact on the health of workers and cutting environment. In current machining, environment-friendly machining is conducted using MQL (minimum quantity lubrication) or cryogenic air spraying to minimize the harmful effects. In this study, the injection nozzle that can combined injecting minimum quantity lubrication(MQL) and cryogenic gas was designed and the shape optimization was performed by using computational fluid dynamics(CFD) and design of experiment(DOE). Performance verification was performed for the designed nozzle. The diameter of the sprayed fluid at a distance of 30 mm from the nozzle was analyzed to be 21 mm. It was also analyzed to lower the aerosol temperature to about 260~270K.

Key Words: CFD(computational fluid dynamics), Cryogenic gas, Integrated nozzle, MQL(minimum quantity lubrication), Spray behavior

1. 서 론

환경문제와 자원 부족은 보다 높은 에너지 효율에 대한 관심으로 이어졌으며 항공 산업의 경우 소재 경량화에 따른 비행거리 증가를 통해 단위 이동거리 당 소비되는 에너지 비용을 절감하기 위한 노력을 하고 있다[1,2]. 소재 경량화를 위해 사용되고 있는 소재 중 하나는 비강성이 매우 뛰어난 Ti-6Al-4V로 현재 사용 중인 모든 티타늄 합금의 50 % 이상을 차지한다[3]. 하지만 뛰어난 물리적 특성에도 불구하고 낮은 열전도 특성으로 인한 빠른 공구마모 등의 문제로 기계 가공이 어렵다[4-7].

일반적인 절삭가공에서는 절삭유를 이용하여 절삭부위에서 발생하는 마찰열을 냉각시키고 윤활작용을 통해 절삭에너지를 감소시켜 공구의 수명과 제품의 표면 품질을 증대 시킨다[8].

하지만 절삭유에는 성능 향상을 위해 방부제, 녹방지제, 산화억제제, 극압 첨가제 등의 20가지 이상의 화학합성물이 첨가되어 있으며 화학물질들은 흡입, 섭취 및 피부 접촉 등 다양한 경로를 통해 작업자에게 생물학적 피해를 입힐 수 있다. 또한 절삭유의 사용, 폐기 및 재활용 공정 과정에서 발생하는 누유로 인한 환경오염은 작업자의 작업환경 및 생태계에 나쁜 영향을 끼치고 있다[9-12].

최근 미국 국립산업안전보건 연구원 인 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and

1. 인하대학교 기계공학과
† 교신저자: 한국생산기술연구원 금형기술그룹
E-mail: sjha1103@kitech.re.kr

Health)에서는 대기 중 금속 작업유의 허용 노출 농도를 0.5mg/m^{3}로 제한하기 시작했으며 절삭유 사용의 최소화 또는 무사용을 요구하기 시작했다[10]. 따라서 절삭유 사용을 줄이기 위한 친환경 연구가 활발히 진행 중이며 가장 많은 연구가 이루어지고 있는 것은 Minimum Quantity Lubrication(MQL)과 Cryogenic방식이다. MQL은 미립화된 절삭유를 압축공기와 혼합하여 에어로졸 상태로 분사하는 방식이다. Fig. 1은 MQL에 대한 개념도이다.

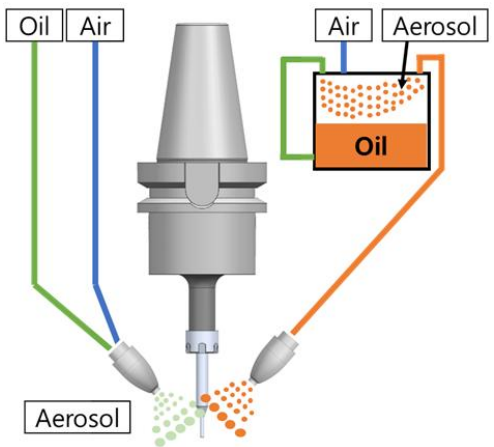


Fig. 1 Concept for minimum quality lubrication[13]

Cryogenic은 절삭 부위 또는 절삭공구에 CO_2 또는 액체질소(Liquid nitrogen)를 분사하여 가공 시 발생하는 열을 냉각시키는 방법이다. MQL과 Cryogenic은 전통적인 홍수방식에 비해 친환경 및 저비용적인 특징이 있지만 더 높은 효율을 얻기 위해 두 방식을 결합한 CryoMQL에 대한 연구가 진행되고 있다.

Pereira, O 등은 기존의 WET 방식을 대체하기 위해서는 윤활과 냉각효과가 동시에 필요하며 이를 위해 CryoMQL 기술이 기존의 습식 가공을 대체하기 위해 단기적으로 가장 적합한 대안임을 확인하였다. 또한 Cryogenic Gas로 사용되는 가스 중 LN2는 인체에 유해하여 CO_2가 환경에 유해하나 적절한 선택임을 확인하였다[14]. Qinglong An 등은 MQL에서 생성된 미스트를 vortex tube를 통과시켜 냉각시켰으며 Ti alloy 절삭 실험을 통해 공구 마모의 감소 효과를 확인하였다[15]. Octavio Pereira 등은 MQL과 Cyrogenic Gas를 결합한 CryoMQL 노즐을 설계하고 인코넬에 대한 절삭 실험을 통해 기존의 WET 가공 대비 93.5%의 공구 마모 저감 효과를 확인하였다[16].

본 연구에서는 절삭유의 사용량을 최소화하기 위해 분사 집중도를 높인 CryoMQL 노즐을 개발하였다. 이를 위해 Airfoil 형상과 에어커튼을 노즐에 적용하였으며 해석 프로그램을 통해 노즐의 형상 최적화를 수행하였다. 마지막으로 CFD를 통해 최적화된 노즐에 대한 검증 해석을 수행하였다.

2. CryoMQL 노즐 설계 방안

2.1. 코안다 효과를 이용한 노즐설계 방안

코안다 효과(Coanda effect)는 유체가 곡면의 벽을 지날 때 부착되어 흐르는 현상을 의미하며 이것은 20세기 초 Henri Coanda에 의해 실험적으로 설명되었으며 Bradshaw에 의해 무점성유동(Inviscid flow)을 기반으로 베르누이 정리를 이용하여 Coanda effect를 아래의 식으로 정의하였다[17,18].

$$p_o - p_\infty < \frac{\rho \cdot u^2 \cdot t}{R} \quad \text{(식)}$$

이 식은 단일 코안다 효과에 대해 설명할 때 주로 사용된다. 여기서 p_o는 surface pressure, p_∞는 external environment pressure, ρ는 유체 밀도, u는 접선에서의 속도, t는 Outlet의 단면두께, R은 곡면의 반지름이다. 노즐에서 분사된 유체에 의해 surface pressure는 낮아지며 surface pressure와 external environment pressure 사이에는 pressure gradient가 발생한다. 이로 인해 유체는 압력이 낮아진 표면으로 접촉하여 흐르게 된다. 표면에 접촉된 유체의 속도는 viscous effects 에 의해 점차 감소하게 되며 surface pressure는 증가한다. 이후 surface pressure와 external environment pressure가 같은 조건 즉 $p_o = p_\infty$ 시점이 되면 표면을 따라 흐르는 유체는 표면과 분리된다. 즉 표면의 점성 효과는 속도를 늦추게 되고 결국 표면으로부터 유체를 분리시키는 원인이 된다.

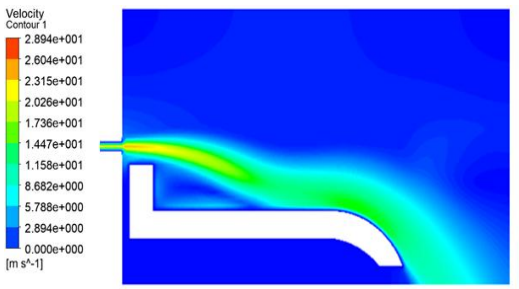


Fig. 2 Coanda effect

Fig. 2는 CFD를 활용하여 고속의 유체가 곡률을 가지는 물체 표면에 접선 방향으로 분사될 때 물체의 표면을 따라 흐르는 Coanda effect를 보여준다. Fig. 3은 CFD를 활용하여 동일한 형상을 기준으로 Inlet 유속에 따른 코안다 효과에 대한 결과로 유속이 작을수록 유동박리가 발생하는 거리가 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 즉, Bradshaw가 제안한 식에서 반지름과 유속을 통해 필요한 형태로 유동의 제어가 가능하다. 일반적으로 코안다 효과는 항공기 날개 형상인 Airfoil 형상에서의 유동을 설명하는데 필수적인 요소이다[19].

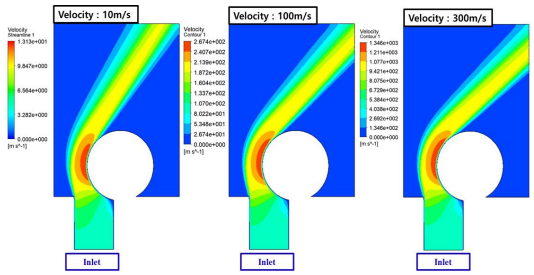


Fig. 3 Results of various a velocity

2.2. CryoMQL 노즐의 Air Curtain 설계방안

Air Curtain은 특정 영역과 외부 영영 사이에 인공적인 실드를 제공하여 두 영역간의 열 및 수분 교환을 차단해 준다. 에어 실드는 고속의 유체를 차단하고자 하는 위치에 고속으로 분사하여 생성하며 가장 큰 특징은 솔리드 형태의 실드가 생성되는 것이 아니기에 고속의 에어를 이길 수 만 있다면 침투도 가능하다는 것이다. 가장 많이 사용되는 곳은 슈퍼마켓의 오픈된 냉장 디스플레이 영역과 냉방 중인 건물의 입구이다. 일반적인 에어 커튼의 성능 제어 변수는 다음과 같다[20,21].

- the width and length of the air jet
- the initial jet velocity
- the jet initial turbulence
- the position and dimensions of the air return grille
- conditions of air on either side of the air curtain

3. CryoMQL 노즐의 개념 설계

본 논문에서는 분사 집중도를 향상시키기 위해 코안다 효과와 에어커튼을 적용한 하이브리드 타입의 CryoMQL 노즐을 설계하였다. 노즐의 기본 형상은 비행기의 날개 단면 형상인 Airfoil의 형상을 응용하였으며 공개 자료인 NACA2412를 적용하여 기본 설계를 수행하였다. Fig. 4는 설계된 하이브리드 노즐의 단면 형상이다. Inlet2를 통해 저온의 기체가 공급되면 두 방향으로 나누어져 흐르게 된다. 먼저 노즐 내부로 공급된 기체는 Coanda Effect에 의해 Outlet1로 빠르게 흐르게 되고 Airfoil 형상을 타고 전방으로 분사되며 주변을 냉각시킨다. 다른 방향의 기체는 Outlet2를 향해 빠르게 흐르며 노즐 중앙부에서 공급되고 있는 에어로졸과 Airfoil 형상을 타고 전방으로 분사되는 기체의 분사를 집중시키는 Air Curtain 역할을 하게 된다. Inlet1에서 공급되는 에어로졸은 Inlet2에서 공급되고 있는 저온의 기체에 의해 냉각되며 주변으로 퍼지지 않고 집중되어 분사된다.

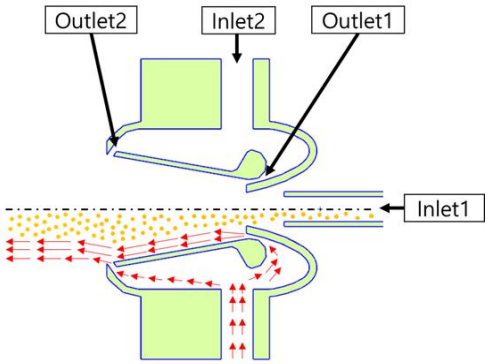


Fig. 4 Design of integrated CryoMQL nozzle(2D)

4. 전산유체해석을 통한 CryoMQL 노즐 설계

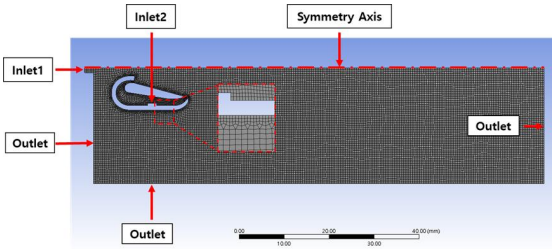


Fig. 5 Boundary condition for CFD

Computational Fluid Dynamics(CFD)와 Design of Experiment(DOE)를 이용하여 CryoMQL 노즐에 대한 형상 최적화를 수행하였다. 또한 유동 해석 모델은 난류 모델 중 K-e 모델을 적용하였다. CFD 해석 소프트웨어는 ANSYS Fluent를 사용하였으며 해석 조건은 Multi-Phase 조건 중 Volume Of Fluid(VOF)를

적용하였다. Fig. 5는 해석을 위한 Mesh 및 경계 조건을 나타낸다. 요소의 크기는 0.2mm 이며 요소의 개수는 107408개 이다. 노즐의 형상이 축 회전 대칭 형상이므로 2D 및 대칭 해석으로 진행하였다. Table1은 해석의 경계 조건을 나타내고 Table2는 해석을 위한 물성치를 나타낸다. 경계 조건은 실험에서 사용될 시스템의 분사 조건으로 Inlet2는 절대온도 216.65K의 CO_2 가스가 8bar의 조건으로 적용되었고 Inlet1은 절대온도 296.15K의 Air가 5bar의 조건으로 적용되었다. Inlet1에 에어로졸 대신 기체(공기)를 선택한 이유는 에어로졸의 Primary Phase가 air이고 에어로졸의 유동 특성 분석이 목적이기 때문이다.

Table 1 Boundary Condition

	Inlet1	Inlet2
Material	Air	CO_2
Pressure (bar)	5	8
Temperature(K)	296.15	216.65

Table 2 Material Properties

Material	Air	CO_2
Density (kg/m^3)	1.225	1.7878
Thermal Conductivity (w/m-k)	0.0242	0.0145
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05	1.37e-05

DOE 소프트웨어는 MINITAB을 사용하였으며 각 인자 조건에 따른 해석 결과를 기준으로 분석하였다. 형상 최적화의 목적 값은 실제 분사 노즐과 공구 사이의 거리인 30mm에서의 분사 집중도이며 Fig. 6과 같이 유체의 흐름을 분석 가능한 Velocity 해석 결과를 통해 분석하였다.

Fig. 7은 형상 최적화를 위한 인자를 나타낸다. 기초 형상은 Airfoil 형상(NACA2412)을 적용 하였으며 변경 가능한 제어 인자는 Outlet1 Gap(A), Outlet2 Gap(B), Air Curtain Angle(C) 및 Inlet Position(D)로 선정하였다. 목적치를 기준으로 4개의 요인의 영향을 분석하고 인자의 수준에서 최적 값의 존재를 확인 할 수 있는 곡률(Curvature)을 분석하기 위해 2수준 완전요인 분석을 수행하였다. 4인자 2수준의 실험계획이기 때문에 2^4의 실험 조건을 가지며 곡률 확인을 위한 블록 중앙점 1개를 추가하여 총 17개의 조건으로 실험계획을 하였다. Table 3은 각 요인의 수준표를 나타낸다.

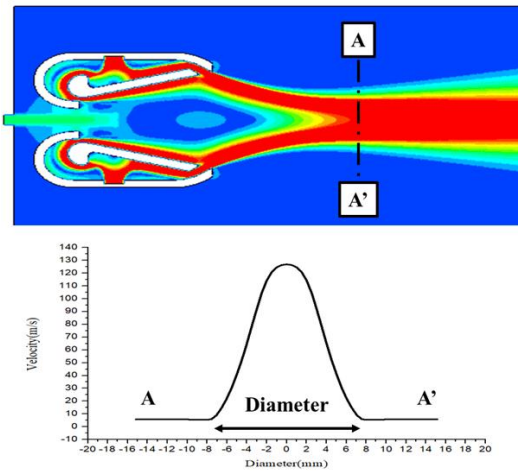


Fig. 6 Result of a velocity profile using CFD

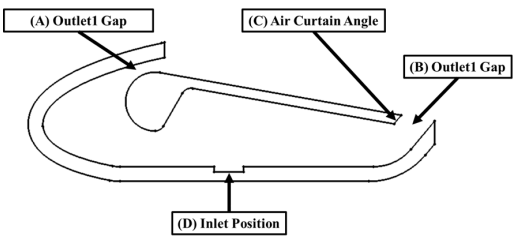


Fig. 7 Parameters for the design of experiment

Table 3 Factor&Level of Factorial desgin

Factor / Level	Design parameters			
	A(mm)	B(mm)	C(degree)	D(mm)
1	3	3.2	65	16
0	2	2.2	45	14
-1	1	1.2	25	12

Table 4 Analysis of variance(Diameter)

Source	DF	Adj SS	F-Value	P-Value
(A) Coanda.Gap	1	102.082	662.29	0.001
(B) Curtain.Gap	1	0.007	0.05	0.837
(C) Angle	1	147.051	954.04	0.001
(D) Inlet.pos	1	29.632	192.25	0.001
Coanda.Gap*Curtain.Gap	1	1.579	10.24	0.013
Coanda.Gap*Inlet.Gap	1	12.934	83.92	0.001
Curtain.Gap*Inlet.Gap	1	4.341	28.16	0.001
Curvature	1	6.655	43.18	0.001

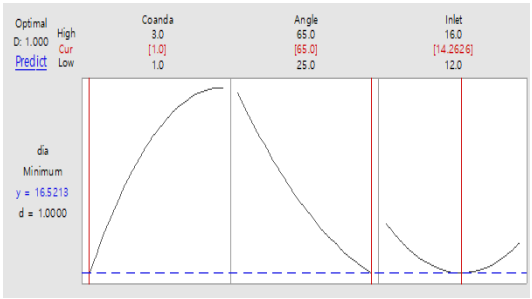
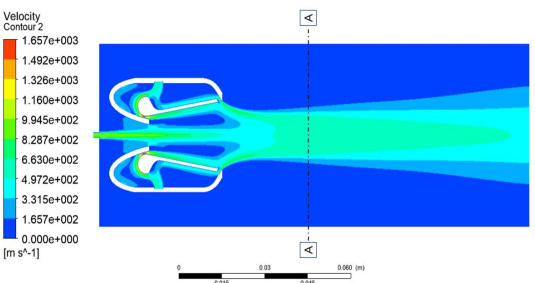


Fig. 8 Result of response surface method (RSM)

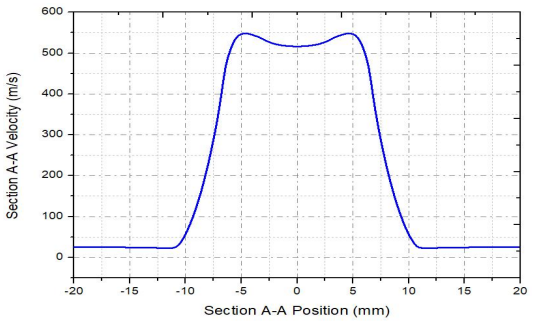
위의 실험 조건을 기준으로 총 17개의 노즐 디자인모델을 만들었으며 유동해석을 수행하였다. 또한 실제 분사거리인 30mm지점에서의 목적치(집중도)를 기준으로 분석을 수행하였다. Table 4는 집중도에 대한 요인 분석표다. 요인 B의 P-value 값이 0.05의 값을 초과하기 때문에 유의하지 않다고 분석되었다. 또한 인자의 수준 내에서 곡률(최적 값)이 존재하는 것으로 분석되었다. 요인분석의 결과를 기반으로 요인 B를 1.2mm의 값으로 고정하고 집중도에 대한 형상 최적 값을 찾기 위한 표면반응분석법을 수행하였다.

5. 설계된 CryoMQL 노즐 성능 분석

다상 유동 해석을 통해 최적화된 노즐 형상에 대한 성능을 분석 하였다. Fig. 9는 Velocity에 대한 해석 결과이다. Velocity 결과를 통해 Inlet2를 통해 공급되는 기체가 두 방향으로 분리되며 하나의 줄기는 코안다 효과에 의해 노즐 표면을 따라 전방으로 분사되고 다른 줄기는 에어 커튼 부를 통해 전방으로 분사되고 있음을 확인 할 수 있다. 노즐을 통해 분사되고 있는 기체의 분사 형상은 퍼지지 않고 집중되어 분사되고 있다. 또한 분사거리 30mm의 단면 Section A-A를 통해 분사 직경이 약 21mm 로 분석되었다.



(a) Result of velocity



(b) Cross section A-A

Fig. 9 Result of response surface method (RSM)

Fig. 10은 다상 해석 결과 중 Inlet2를 통해 공급되는 CO_2의 Volume Fraction 결과이다. 노즐을 통해 분사되는 CO_2 기체가 Air-curtain 역할을 하고 있음을 확인 할 수 있으며 이로 인해 Fig. 9의 결과에서 분사 집중도가 높아졌음을 확인 할 수 있다.

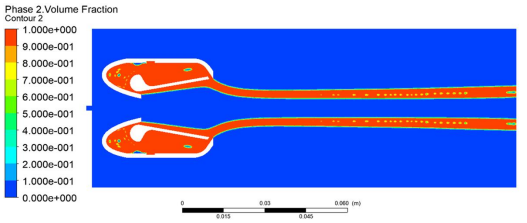
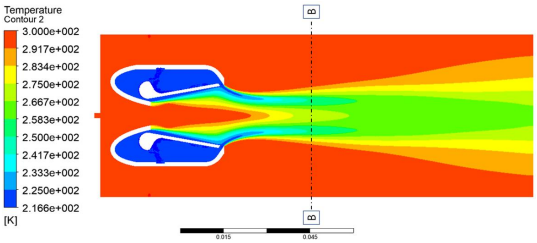
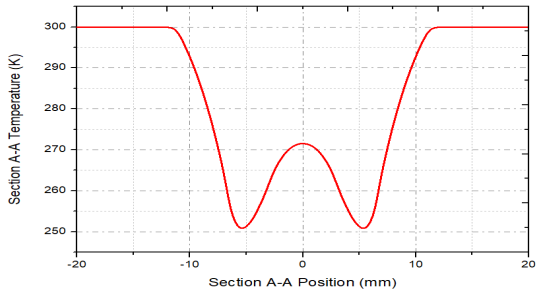


Fig. 10 Phase2(CO_2) voolume fraction result for optimization model



(a) Result of temperature



(b) Cross section B-B

Fig. 11 Result of response surface method (RSM)

Fig. 11은 온도 분포 결과이다. Inlet2를 통해 공급되는 CO_2의 온도는 CO_2의 액화 온도인 216.65K 이며 노즐 내부에서 저온을 유지하는 CO_2가 노즐 외부로 분사되며 온도가 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Inlet1에서 공급되는 에어의 온도는 상온 인 296.15K 이며 노즐을 통과하며 진행할수록 온도가 최대 260K 까지 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 에어커튼 역할을 하는 CO_2의 온도에 의해 열 교환이 발생한 것으로 분석된다. 또한 분사거리 30mm의 단면 Section B-B를 통해 분사 형상의 단면 온도가 W 형태이며 공구 분사 거리 인 30mm에서 CO_2와 에어의 완벽한 열 교환이 일어나지 않았음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 친환경 가공 기술 중 하나인 MQL 방식의 부족한 효과를 증대시킬 수 있는 CryoMQL nozzle을 설계하고 분사 집중도를 위한 형상최적화를 수행하였다.

1) Airfoil 형상(NACA2412)과 에어커튼을 적용하여 CryoMQL 노즐을 설계하였으며 분사집중도를 향상시키기 위해 DOE와 CFD를 이용한 형상 최적화를 하였다.

2) 노즐 형상 중 4개의 인자에 대한 완전요인 분석을 하였다. 목적치는 분사거리 30mm에서의 분사 집중도를 CFD의 Velocity 결과를 통해 분석하였으며 최적화 결과 요인 A는 1mm, B는 65°, C는 14.26mm 일 때 최적임을 확인할 수 있었다.

3) 최적 형상에 대한 검증을 위해 CFD 중 해석을 하였으며 해석 결과 분사거리 30mm에서의 분사 집중도는 20mm로 분석되었으며 Phase2(CO_2)에 대한 Volume Fraction 결과를 통해 에어커튼이 분사 집중도를 높여주는 것으로 분석되었다. 또한 분사거리 30mm에서 저온의 CO_2가 노즐 중앙에 공급되는 에어로졸의 온도를 약 260~270K 까지 낮추는 것으로 분석되었다.

후기

본 논문은 우수기술연구센터(ATC)사업 (극소피치(0.2㎜이하) BiTS를 위한 플라스틱 부품 제조기술 개발, 과제번호 10077292)의 일환으로 진행된 연구임.

참고문헌

1) M'Saoubi, R., Axinte, D., Soo, S. L., Nobel, C., Attia, H., et al., “High Performance Cutting of Advanced Aerospace Alloys and Composite Materials”, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 64, No. 2, pp. 557-580, 2015.
2) Veiga, C., Davim, J., and Loureiro, A., “Properties and Applications of Titanium Alloys: A Brief Review”, Journal Reviews on Advanced Materials Science, Vol. 32, No. 2, pp. 133-148, 2012.
3) Technological and Sustainability Implications of Dry, Near-Dry, and Wet Turning of Ti-6Al-4V Alloy
4) Klocke, F., Kramer, K., Sangermann, H., and Lung, D., “Thermo-Mechanical Tool Load during High Performance Cutting of Hard-to-Cut Materials”, Procedia CIRP, Vol. 1, pp. 295-300, 2012.
5) Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load, B. Denkena, A. Lucas, E. Bassett CIRP, 60, S. pp. 73-76, 2011.
6) Gerez, J.M.; Sanchez-Carrilero, M.; Salguero, J.; Batista, M.; Marcos, M., “A SEM and EDS based Study of the Microstructural Modifications of Turning Inserts in the Dry Machining of Ti6A14V Alloy”, AIP Conf. Proc., 1181, pp. 567–574, 2009.
7) Abele E, Fröhlich B., “High speed milling of titanium alloys”, Adv Prod Eng Manag 2008;3:131–40.
8) M. El Baradie Cutting fluids: Part I. characterisation J Mater Process Technol, 56 (1–4), pp. 786-797, 1996.
9) D. U. Park, C. S. Yoon, S. K. Lee, “Critical Review on Carcinogenicity of Metalworking Fluids”, Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 1, 2003.
10) U.S. Department of Health and Human Services, “Occupational Exposure to Metalworking Fluids”, NIOSH Publication, No. 98-102, 1998.
11) F. Meza, L. Chen, N. Hudson, “Investigation of respiratory and dermal symptoms associated with metal working fluids at an aircraft engine manufacturing facility”, Am J Ind Med, 56 (12) pp. 1394-1401, 2013.

12) A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman "Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids", Int J Mach Tools Manuf, 57, pp. 83-101, 2012.
13) V. P. Astakhov., "Ecological machining: near dry machining", Mechanics of machining: FEM simulation machining, pp. 195-223, 2009.14) Pereira, O., Rodriguez, A., Fernandez-Abia, A., Barreiro, J., and De Lacalle, L. L., "Cryogenic and Minimum Quantity Lubrication for an Eco-Efficiency Turning of AISI 304", Journal of Cleaner Production, Vol. 139, pp. 440-449, 2016.
15) Qinglong An1 · Jiaqiang Dang1 Cooling Effects of Cold Mist Jet with Transient Heat Transfer on High Speed Cutting of Titanium Alloy
16) Octavio Pereira, Adrián Rodríguez, Joaquín Barreiro, Ana Isabel Fernández-Abia, and Luis Norberto López de Lacalle Nozzle Design for Combined Use of MQL and Cryogenic Gas in Machining.
17) Bradshaw. P, "Effects of Streamline Curvature on Turbulent Flow", AGARDograph, AG-169; 7, 1990.
18) Michele Trancossi, Subhash Maharshi, Diego Angeli "MATHEMATICAL MODELLING OF A TWO STREAMS COANDA EFFECT NOZZLE", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition pp. 1-10 2013.
19) D. W. Lee, "A Study on the Flow Characteristics of Air Knife in Hot-Dip Galvanizing", Master's thesis, Kyungpook National University, 14pages, 2007.
20) J. G. Ahn, "Study on the Effect of Air-curtain Installed at the Entrance Door of Passenger Coach on the Blockage of Thermal Energy Transfer into the Cabin", Master's thesis, Seoul National University of Science&Technology, pp. 11-12, 2005.
21) Y.T. Ge, SA Tassou, "Simulation of the performance of single jet air curtains for vertical refrigerated display cabinets", Applied Thermal Engineering 21, pp. 201-219, 2001.