https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.6.415

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

## 분산상 모드를 이용한 1채널 최소 절삭유 가공 시스템의 미스트 포집 챔버 내 액화 현상 해석

최영재<sup>a</sup>, 박거락<sup>a</sup>, 신주혜<sup>b</sup>, 이창수<sup>b</sup>, 이득귀<sup>b</sup>, 박영창<sup>b</sup>, 허 진<sup>b</sup>, 권형진<sup>b</sup>, 김건우<sup>c</sup>, 심동하<sup>a\*</sup>

## Analysis of Liquefaction in the Mist Collection Chamber of a One-Channel Minimum Quantity Lubrication System Using a Discrete Phase Model

Youngjae Choi<sup>a</sup>, Georak Park<sup>a</sup>, Juhye Shin<sup>b</sup>, Chang Soo Lee<sup>b</sup>, Deuk Kwi Lee<sup>b</sup>, Young Chang Park<sup>b</sup>, Jin Hur<sup>b</sup>, Hyung Jin Kwon<sup>b</sup>, Gunwoo Kim<sup>c</sup>, Dongha Shim<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Manufacturing Systems and Design Engineering (MSDE), Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech) <sup>b</sup> R&D Center, HansungGT

<sup>c</sup> Research Institute of Nano Manufacturing System, Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech)

#### ARTICLE INFO

Article hist	tory:		
Received	11	October	2022
Revised	7	November	2022
Accepted	8	November	2022

#### Keywords:

Minimum quantity lubrication (MQL) Computational fluid dynamics (CFD) Liquefaction Discrete particle model (DPM) Wall-film model

#### ABSTRACT

The minimum quantity lubrication (MQL) system, which minimizes the use of a coolant, has recently been in the spotlight as a new machining system to overcome environmental problems. However the liquefaction of the oil mist at the collection chamber should be overcome. This study analyzes the oil mist liquefaction of the one-channel internal lubricant feed MQL system using computational fluid dynamics (CFD) and proposes the shape of the mist collection chamber that can reduce mist liquefaction. A discrete phase model (DPM) is used to simulate mist liquefaction, and the air and oil flow rates used in an actual MQL system are applied. After analyzing the reference model, a parametric study is conducted to derive the trend between the shape of the mist collection chamber and the liquefaction of the mist. The study results confirmed that the liquefaction can be reduced by changing the shape of the mist collection chamber.

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 배경 및 목적

최근, 공작기계의 기술 개발은 제조업 전반의 공장자동화 추세로 고속, 고정밀성, 고신뢰성을 추구한다. 정밀 가공 분야에 사용되는 신소재나 경량 합금재료들의 개발 및 사용이 증가하면서 공작기계 주축의 고속화가 지속적으로 이루어지고 있다<sup>[1,2]</sup>. 고속 주축을 사 용하는 정밀 가공에서 공작기계의 수명과 양질의 공작물을 위한 윤활 시스템은 필수적이나, 윤활유 및 절삭유의 처리비용과 환경 오염 문제는 현대 가공 산업이 해결해야 할 중요한 문제로 다루어 진다. 이러한 공작기계 기조의 변화에 따라 기존 절삭 가공 과정을 대체할 가공 시스템의 일환으로 최소 절삭유 가공(minimum quantity lubrication; 이하 MQL) 시스템으로의 전환이 급속히 이 루어지고 있다.

MQL 시스템은 절삭유와 압축 공기를 혼합하여 5~10 um의 작 은 미스트 입자를 생성하고 이를 분사하여 가공 공구와 피삭재 사

<sup>\*</sup> Corresponding author. Tel.: +82-2-970-7287

E-mail address: dongha@seoultech.ac.kr (Dongha Shim).

이의 윤활 및 냉각작용을 하는 기술이다. 기존 습식 절삭 가공시 평균적으로 시간당 30,000~60,000 mL의 절삭유가 사용됨에 반 해 MQL 시스템은 시간당 평균 5~80 mL의 절삭유를 사용하여 절삭유 사용량을 획기적으로 줄일 수 있다<sup>[3]</sup>.

위처럼 매우 적은 양의 절삭유를 사용한다는 점은 다양한 이점 이 있다<sup>(4)</sup>. 먼저, 비용적인 측면에서 매우 경제적이며, 공작 기계 부품의 오염과 부식을 방지함으로써 궁극적으로 기계의 수명을 연 장시킬 수 있다. 또한, 가공 후 피삭재의 건조 및 세척 작업이 불필 요하기 때문에 가공 시간을 단축할 수 있으며, 이는 생산성의 향상 으로 이어진다. 게다가 MQL 시스템에서 사용하는 절삭유는 식물 성 오일로 구성되기 때문에 인체 및 환경에 무해하며, 잔류 오일의 양이 매우 적어 추가적인 배출 정화 시스템을 필요로 하지 않는다.

MQL 시스템은 급유 방식에 따라 내부, 외부 급유 시스템으로 나뉘고, 미스트 생성 위치에 따라 1채널, 2채널 시스템으로 나뉜 다. 외부 급유 시스템은 가공 시 공구 외부에서 MQL 절삭유 미스 트를 분사하는 방식이다. 반면에 내부 급유 시스템의 경우, 공구 내부에서 직접 피삭재에 미스트를 분사한다. 이는 외부 급유 시스 템에 비해 분사된 미스트의 손실이 거의 없고 절삭유의 양 조절에 유리하다는 장점이 있다. 내/외부 급유 시스템에 대한 도식은 Fig. 1에 나타나 있다. 1채널 시스템의 경우, 미스트 생성 챔버 내부에 서 하나의 튜브를 통해 미스트가 생성 후 분사된다. 2채널 시스템



Fig. 1 External (left) and internal (right) lubricant feed systems



Fig. 2 1-channel(upper) and 2-channel(lower) MQL systems



Fig. 3 Schematic of internal feed and 1-channel MQL system

의 경우 절삭유와 공기가 분리된 튜브를 통해 가공 공구 말단까지 운반 후 분사 직전 미스트를 생성한다. 별도의 미스트 생성 챔버를 필요로 하지 않지만, 1채널 시스템에 비해 미스트의 크기와 품질의 조절이 어렵다는 단점이 있다. Fig. 2는 1채널 시스템과 2채널 시 스템에 대한 도식을 보여준다. 본 연구는 내부 급유형 1채널 MQL 시스템에 대하여 진행되었다.

내부 급유형 1채널 MQL 시스템은 최초 미스트 생성 후 미스트 가 포집 챔버로 분사되는 과정과 분사 후 포집 챔버 벽면과 충돌하 는 과정에서 Fig. 3에 모사된 것과 같이 미스트가 응집되어 바닥에 고이는 액화 현상이 발생한다는 문제점이 있다. 이러한 액화 현상으 로 인해 MQL 시스템은 장시간 사용을 위해 포집 챔버의 부피를 증가시켜야 하고, 액화된 절삭유를 다시 절삭유 보관 탱크로 운반하 기 위한 추가적인 부품과 시스템을 요구한다. 이는 생산성과 경쟁력 하락을 초래할 수 있다. 본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 Discrete Phase Mode (이하 DPM)을 이용한 미스트 입자와 챔버 와의 충돌로 인한 액화량 확인을 통해 액화 현상을 해석하고, 액화 량을 감소시킬 수 있는 미스트 포집 챔버 형상을 제안하고자 한다.

#### 1.2 선행 연구 및 연구 진행 방향

현재까지 MQL 시스템에 대한 유체 해석은 다양하게 이루어졌 다. L.L. De Lacalle et al.은 기존 emulsion 기법과 비교하여 MQL 시스템의 효율성을 Computational Fluid Dynamics(이하 CFD)와 실험을 통해 입증하였다<sup>[5]</sup>. A.S.S. Balan et al.과 J.N. Robit et al.은 MQL 연삭 및 절삭 가공시 최적의 가공을 위한 CFD 모델을 개발하는 연구를 진행하였다<sup>[6,7]</sup>. 이외에도 대부분의 연구는 각 가공방식 및 가공물의 물질 특성에 따라 유량과 압력을 최적으로 설정하는 방향 등 주로 MQL 시스템의 미스트 토출구에 서의 분사 결과에 대한 해석이 진행되었다. 그러나 내부 급유형 MQL 시스템의 가공 성능에 영향을 주는 챔버 내 미스트 분사에 대한 해석은 다루어지지 않았다. MQL 시스템의 챔버 내 미스트 분사 거동 및 성능을 확인하는 가장 좋은 방법은 실험을 통해 정량적인 비교를 하거나, 초고속 카메라, 레이저 등을 활용하여 분사 순간의 거동을 촬영 및 확인하는 것이다. 하지만 실험을 통한 정량적 비교의 경우 미스트 액화량을 간접적으로 확인할 수 있으나 분사 형상, 액화에 영향을 끼치는 인자 등의 확인이 어렵고 시간과 비용 측면에서 불리하다. 초고속 카메라와 레이저 등을 활용한 방법의 경우 미스트 입자가 매우 작기 때문에 포착이 힘들다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 실험과 촬영을 대신하여 시간과 비용의 측면, 그리고 거동 확인에 유리한 CFD 해석을 통해 액화량을 도출 및 확인하는 방법을 이용한다.

MQL 시스템을 가장 정확하게 모사하기 위해서는 계면을 추적 하여 절삭유의 분열 과정을 계산하는 방법인 Volume of Fluid (이하 VOF) 해석이 진행되어야 하지만, VOF 해석의 경우 고사양 의 CPU와 많은 양의 메모리 자원을 필요로 하기 때문에 많은 해석 시간이 소요된다. 따라서, 본 연구에서는 간략화한 해석을 위해 DPM 해석을 사용하였다. 미스트의 크기와 질량이 미스트를 운반 하는 유체에 비해 굉장히 작기 때문에 미스트가 분열이 일어나지 않는다고 가정하였으며, 이러한 가정을 바탕으로 여러 연구에서 DPM 방식을 이용한 해석이 충분히 유의미한 결과를 도출하는 것 이 보고되었다<sup>[8-10]</sup>.

#### 2. 해석조건

#### 2.1 해석 방법과 경계 조건

1.2절에서 언급된 것과 같이 VOF 대신 DPM 해석 방법이 연구 에 적용되었다. DPM 해석은 오일러 기술법(Eulerian method)으 로 표현되는 연속상(continuous phase)의 유동장 내에서 라그랑 지 기술법(Lagrangian method)으로 표현되는 분산상(discrete phase)의 위치를 추적하는 CFD 다상 유동(multiphase flows) 해 석 방식 중 하나이다.

해당 MQL 시스템과 유사한 경계 조건 적용을 위하여 실제 가공 현장에서 사용하는 MQL 시스템의 유량이 측정 및 계산되었다. 이를 바탕으로 노즐을 통과하여 챔버로 나가는 공기와 절삭유의 mass flow rate (inlet boundary condition)를 각각 3.06×10^-4 kg/s, 1.10×10^-5 kg/s로 설정하였다. 해석에 사용한 절삭유는 AccuLube사의 LB-6000로 지정하였고 Table 1에 LB-6000의 물 질 특성이 상세히 기술되어있다. 분사된 오일 미스트의 절삭 공구 로의 이송을 위한 챔버 내 미스트 토출구의 경우 pressure outlet (outlet boundary condition)으로 설정되었다. 실제 MQL 시스템 의 경우 절삭 공구의 끝단에 작용하는 압력이 대기압이고 절삭 공구 까지 이송되면서 마찰 등에 의해 손실되는 압력을 고려하여 미스트 토출구의 압력 조건을 설정해 주어야 하지만, 본 연구는 챔버 내

Table 1 Material	properties of LB-6000
Viscosity	8.85 [cst]
Flash point	214 [°C]
Pour point	- 40 [°C]

0.93

미스트의 액화 경향을 판단하는 것이 주목적이기 때문에 토출구에 서의 게이지 압력을 모두 대기압으로 일정하게 가정하였다.

Specific gravity

해석 시 시간에 따른 분사 형상이나 액화량을 파악하기 위해서 는 과도해석(time transient analysis)을 진행하는 것이 적합하지 만, 실제 MQL 시스템에서는 가공량과 가공 종류에 따라 미스트 생성 및 분사 시간이 일정하지 않고 미스트 포집 챔버 형상에 따른 미스트 액화량의 경향 비교가 본 연구의 목적이기 때문에 정상상 태해석(steady state analysis)이 진행되었다. 해석 시 적용한 iteration 수는 1600이며, 레이놀즈 수 계산을 통해 본 연구에서 사용하는 모델이 난류 유동임을 확인하여 realizable k- $\varepsilon$  모델이 적용되었다.

액화량을 파악하기 위해 가장 중요한 부분은 미스트 액화의 모사를 위한 벽면 경계 조건(wall boundary condition) 설정이다. 본 연구에 서 사용한 상용 전산유체해석 프로그램인 ANSYS Fluent에서는 DPM 해석 모델 사용 시 다양한 벽면 경계 조건을 제공한다. 이 중 미스트 입자의 액화 모사가 가능한 경계 조건은 Trap과 Wall Film이다. Trap 경계 조건의 경우, Fig. 4(a)와 같이 입자가 벽면에 충돌 시 벽면에 갇히는 것으로 가정하는 경계 조건이다. 이는 모든 입자가 충돌 시 부착을 제외한 다른 거동은 모사하지 않지만, 부착된 (trapped) 모든 입자가 액화된 것으로 간주하여 다소 보수적인 경계 조건으로 볼 수 있다. 반면에 Wall Film 경계 조건의 경우, Fig. 4(b)와 같이 입자가 벽면에 충돌 후 Rebound, Stick, Spread 그리고 Splash와 같은 다양한 거동을 모사할 수 있다. 위 거동은 Fig. 5의



Fig. 4 Schematic of wall boundary condition



Fig. 5 Simplified decision chart for wall interaction criterion of wall film model<sup>[11]</sup>

기준에 따라 ANSYS Fluent의 자체적인 충돌 에너지 계산을 통해 모사된다<sup>[11]</sup>. Wall Film에서는 Stick과 Spread와 같은 거동이 일어 났을 때 미스트가 액화되었다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 위의 두 벽면 경계 조건 중 현실과 가까운 모사가 가능한 Wall Film 경계 조건을 사용하여 해석이 진행되었다.

#### 2.2 가정 조건

본 연구에서 사용된 해석을 위해 절삭유의 분열은 없다고 가정 되었다. 실제로는 미스트 입자의 표면장력에 비해 더 큰 힘이 입자 의 표면에 작용하게 되면 미스트 입자는 더 작은 크기의 입자로 분열되어야 한다. 실제 MQL 시스템에서도 노즐을 통과하는 유체 의 압력과 속도가 매우 높기 때문에 위 현상이 일어나야 하지만 해석의 복잡성과 시간효율을 고려하여 본 해석은 절삭유의 분열이 없다고 가정되었고, 따라서 Wall Film 경계 조건에서 또한 입자의 거동 계산 시 splash calculation 기능을 사용하지 않았다.

스프레이 분사 시 입자 크기 분포를 알기 위해서는 VOF 해석이 진행되어야 한다. 하지만 본 연구는 본문 1.2절에서 언급된 것과 같이 DPM 해석을 진행하기 때문에 정확한 입자 크기의 분포를 알 수 없다. 따라서 절삭유 미스트의 크기는 Rosin - Rammler 입도 분포를 따른다고 가정하였다. Table 2는 DPM 해석시 적용 된 Rosin - Rammler 입도 분포의 값이다.

또한, 해석의 간략화를 위해 공기의 압축성을 무시하였고 공기와 절삭유의 분사 시 열에너지의 교환을 무시하였다.

#### 2.3 유한요소모델

Fig. 6은 본 연구에서 사용된 모델의 미스트 분사 노즐과 미스트 포집 챔버의 간략화된 형상과 이를 바탕으로 생성된 유체 형상이

Minimum	Maximum	Averaged	Distribution
diameter	diameter	diameter	variable
1 µm	15 µm	8.56 µm	2.73



Fig. 6 Mist collection chamber and nozzle geometry



Fig. 7 Finite element model of fluid domain

다. 미스트 분사 노즐의 경우 일반적인 삼각형 슬릿 분사 노즐이 사용되었고, 미스트 포집 챔버의 경우 원기둥 형태의 챔버가 사용 되었다.

Fig. 7는 CFD 해석을 위해 생성된 유한요소모델(finite element model)이다. 사용된 메쉬는 4절점 사면체 메쉬(tetrahedron mesh)이 며, 총 1,659,343개의 element와 294,627개의 node가 사용되었다. 메쉬 생성시 element size control을 통해 노즐과 토출구를 중심으로 조밀한 메쉬가 생성되었다. 격자 품질 검증의 경우, orthogonal quality check와 skewness check를 통해 이루어졌다. Minimum orthogonal quality가 0.17467로 0.1을 넘었으며, maximum skewness가 0.82533으로 0.9를 넘지 않는 것으로 확인되어 생성된 유한요소모델을 해석에 사용할 수 있는 것으로 판단되었다. 격자 품질 검증의 결과는 Table 3에 상세히 기술되어있다.

#### 3. 수치 해석

#### 3.1 기준 모델 해석

본문 2절에서 기술된 내용을 바탕으로 기준 모델(reference model)에 대한 DPM 해석이 진행되었다. DPM 해석을 바탕으로 기설정된 경계 조건에서 절삭유 미스트 입자는 총 331,200개가

	^ •	<b>^</b>
	Orthogonal quality	Skewness
Minimum	0.17467 (>0.1)	4.0×10^-8
Maximum	0.99625	0.82533 (<0.9)
Average	0.77919	0.21995

Table 3 Element quality check report



Fig. 9 Particle distribution at 200<sup>th</sup> iteration

분사되었고 분사 시간 대비 입자의 분포는 Fig. 8에 나타나 있다. 분사된 입자 중 챔버와의 충돌로 인하여 액화되었다고 간주할 수 있는 입자는 벽면에 Film을 형성한 입자로 볼 수 있고, ANSYS Fluent의 Report 기능을 이용하여 확인한 결과 in film 항목에 있 는 입자 수는 총 91,868개로 확인되었다. 즉, 기준 모델의 경우 분사된 입자 중 약 27.74%의 입자가 액화되었다.

미스트 입자와 포집 챔버와의 충돌로 인한 액화를 감소시키는 조건을 확인하기 위해 최초 미스트 입자 분사 후 입자의 분사 형상 의 파악이 진행되었다. Fig. 9은 전체 해석 중 iteration 200일 때 의 입자 분포이다. 기준 모델에서 사용된 삼각형 슬릿 분사 노즐의 특성 때문에 노즐을 기준으로 미스트 입자가 높은 압력과 속도로 노즐 슬릿 방향(Z축)으로 뻗어나가는 비등방성이 강한 분사 형상 을 확인할 수 있다. 이러한 비등방성은 챔버 벽면에 충돌하는 미스 트의 수를 증가시켜 액화량의 증가를 유발할 수 있다. 이를 감소시 키기 위해서는 노즐의 구조를 변경하여 분사 형상을 바꾸는 방법 이 있지만, 노즐의 경우 외부 상용 제품을 장착하여 양산하는 방법 이 대부분이고 구조 변경과 제작이 쉽지 않고 제품에 곧바로 적용 하기가 힘들다. 그에 반해 미스트 포집 챔버의 경우 구조 변경과 제작이 쉽고 제품에 빠른 적용이 가능하다. 따라서 분사 형상을 고려하여 미스트 포집 챔버의 형상 변경에 따른 액화량 비교를 위



(a) Schematic of parameter (b) Parametric model; a/b=2Fig. 10 Description of parametric model

		<b>A</b>	
a / <b>h</b>	а	b	S
a / 0	[mm]	[mm]	$[mm^2]$
1.0 (reference)	50.00	50.00	
1.2	54.77	46.54	
1.4	59.16	42.26	7853.98
1.6	63.25	39.53	
1.8	67.08	37.27	
2.0	70.71	35.36	

Table 4 Detailed values of parameter	Table 4 Detailed	values	of	parameter
--------------------------------------	------------------	--------	----	-----------

한 매개 변수 연구(parametric study)가 진행되었다.

#### 3.2 매개 변수 연구

매개 변수 연구(parametric study)를 위한 미스트 포집 챔버 형 상은 본문 3절에서 확인된 비등방성이 강한 미스트 분사 형상을 고려하여 노즐 슬릿 방향의 벽면까지의 거리를 증가시킨 타원 모 양 단면의 챔버로 설정되었다. 벽면과 충돌하는 미스트 입자 개수 의 경향을 충돌하는 벽면 사이의 거리를 변화시키며 비교하였다. 챔버 단면의 모양 외 다른 변수의 유지를 위해 챔버의 높이와 단면 의 넓이, 그리고 분사 노즐 및 토출구의 형상과 위치는 일정하게 유지되었다. Fig. 10와 Table 4는 매개 변수 연구와 관련된 도식과 설정된 변수값을 보여준다.

매개 변수 연구 결과, 미스트 포집 챔버 단면의 타원도가 증가할 수록 Film을 형성한 입자의 개수가 줄어드는 것이 확인되었다. 기 준 모델(a/b=1.0)의 경우 91,868개 (27.74%)인 반면, 가장 큰 타 원도로 설정된 모델(a/b=2.0)은 69,444개 (20.38%)로 Film을 형 성한 입자가 약 7.36% 감소하였다. 결과적으로 미스트 포집 챔버 의 형상 변경만을 통해 챔버 벽면과 충돌하는 미스트 입자의 개수 를 감소시켜 미스트 액화량의 감소 효과를 볼 수 있음이 확인되었 다. 챔버 단면의 타원도에 따른 액화량은 Fig. 11과 Table 5에 기 술되어있다.



Fig. 11 In film particles with respect to the ellipticity

a / b	Injected particles	In film particles	In film particles (%)
1.0 (reference)	331,200	91,868	27.738
1.2	331,200	83,377	25.17
1.4	331,200	84,828	25.61
1.6	340,800	75,356	22.11
1.8	340,800	69,494	20.39
2.0	340,800	69,444	20.38

Table 5 Detailed values from parametric study

## 4.결론

본 연구는 내부 급유형 1채널 MQL 시스템의 미스트 생성 및 포집 챔버로의 분사 과정 중 발생하는 미스트 액화 현상을 파악하 고 이를 완화하기 위한 방법을 제시한다. 절삭유 미스트의 분사 경향과 액화 현상을 파악하기 위해서는 실험과 촬영 등이 진행되 어야 한다. 하지만 비용과 시간 그리고 편리성 측면에서 불리하므 로 이를 대신하여 CFD DPM 해석이 활용되어 문제 상황이 모사 되었다. 수치 해석에 의해 확인된 미스트 분사 경향을 통해 매개 변수 연구가 진행되었고, 그 결과 미스트 포집 챔버의 형상 변경만 으로 액화 현상을 감소시킬 수 있음이 확인되었다. 기존 MQL 시 스템에서 미스트 포집 챔버는 형상의 변경과 교체가 용이하므로, 본 연구의 결과를 활용한다면 저비용으로 높은 생산성과 경제성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산

업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0002092, 2022년 산업혁신인재성장지원사업).

#### References

- Park, D. G., Choi, J. Y., Choi, C. H., Lee, C. M., 2012, The Technical Trend and Future Development Direction of Machine Tools Spindle System by Patent Analysis, J. Korean Soc. Precision Eng., 29:5 500-505, https://doi.org/10.7736/ KSPE.2012.29.5.500.
- [2] Park, B. Y., Kim, J. G., 1992, Development of High Speed Machine Tool Spindle Regarding Vibration Characteristics, J. Korean Soc. Precision Eng., 9:3 149-156.
- [3] Walker, T., 2013, The MQL Handbook, Unist Inc.
- [4] Boswell, B., Islam, M. N., Davies, I. J., Ginting, Y. R., Ong, A. K., 2017, A Review Identifying the Effectiveness of Minimum Quantity Lubrication (MQL) during Conventional Machining, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 92 321-340, https://doi.org/ 10.1007/s00170-017-0142-3.
- [5] Lopez de Lacalle, L. N., Angulo, C., Lamikiz, A., Sanchez, J. A., 2006, Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Spray Cutting Fluids in High Speed Milling, J. Mater. Process. Technol., 172:1 11-15, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec. 2005.08.014.
- [6] Balan, A. S. S., Kullarwar, T., Vijayaraghavan, L., Krishnamurthy, R., 2017, Computational Fluid Dynamics Analysis of MQL Spray Parameters and their Impact on Superalloy Grinding, Int. J. Machining Science and Technology, 603-616, https://doi.org/10.1080/10910344.2017.1365889.
- [7] Rohit, J. N., Kumar, K., Sura Reddy, N., Kuppan, P., Balan, A. S. S., 2018, Computational Fluid Dynamics Analysis of MQL Spray Parameters and Its Influence on MQL Milling of SS304, Simulations for Design and Manufacturing, 45-78, https://doi.org/10.1007/978-981-10-8518-5\_2.
- [8] Park, H. B., Yoon, S. S., Heister, S. D., 2005, A Nonlinear Atomization Model for Compution of Drip Size Distributions and Spray Simulation, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 48:11 1219-1240, https://doi.org/10.1002/fld.972.
- [9] Fergusson, A. A. M., 2011, Numerical Simulation of a Fuel Nozzle's Spray, Master Thesis, Ryerson University Toronto, Ontario, Canada.
- [10] Isa, K. M., Osman, K., Yahya, A., Ghaffar, Z. A., Hamid, A. H. A., Kasolang, S., 2019, Studies on the Spray Characteristics of

Pressure-Swirl Atomizer for Automatic Hand Sanitizer Application, J. Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 55:1 51-64.

[11] ANSYS, 2013, ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS Inc.



## Youngjae Choi

Graduate student in the Department of MSDE, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Manufacturing, Design, and Computer Aided Engineering. E-mail: cyjzzang95@gmail.com



# Georak Park

Graduate student in the Department of MSDE, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Manufacturing, Design, and Computer Aided Engineering. E-mail: aszx6465@gmail.com



## Juhye Shin

Staff at HansungGT. Her research interest is Machine tool and computer-aided engineering. E-mail: jhshin@hansungs.co.kr



#### Chang Soo Lee

Deputy general manager at HansungGT. His research interest is Machine tool and computer-aided engineering. E-mail: cslee@hansungs.co.kr



### Deuk Kwi Lee

Young Chang Park

General manager at HansungGT. His research interest is Machine tool. E-mail: dk5533@hansungs.co.kr



# Deputy general manager at HansungGT. His research interest is Machine tool. E-mail: plan@hansungs.co.kr



Jin Hur Director at HansungGT. His research interest is Machine tool. E-mail: hur0513@hansungs.co.kr



Hyung Jin Kwon CEO of HansungGT. His research interest is Machine tool. E-mail: hjkn6848@hansungs.co.kr



#### Gunwoo Kim

Research Engineer at Research Institute of Nano Manufacturing System, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Mechanical and Automotive Engineering. E-mail:superman2824@naver.com

#### Dongha Shim



Professor in the Department of MSDE, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is the Modeling, Simulation and Design Engineering for multi-disciplinary systems.

E-mail: dongha@seoultech.ac.kr