



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

건식 박판 금속 성형을 위한

휘발성 윤활제의 분사 특성 연구

A Study on the spray characteristics of  
volatile lubricants for dry metal forming

울산대학교 대학원

기계자동차공학과

김 진 철

건식 박판 금속 성형을 위한  
휘발성 윤활제의 분사 특성 연구

지도교수 홍성태

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2024 년 02 월

울산대학교 대학원

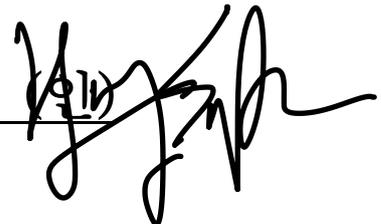
기계자동차공학과

김진철

김진철의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 천두만 (인) 

심사위원 김동 (인) 

심사위원 홍성태 (인) 

울산대학교 대학원

2024 년 02 월

국 문 요 약

## 건식 박판 금속 성형을 위한

## 휘발성 윤활제의 분사 특성 연구

A study on the spray characteristics of  
volatile lubricants for dry metal forming

울산대학교 대학원

기계자동차공학과

김진철

본 논문에서는 액체 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )의 윤활 성능에 대한 연구를 위해 다양한 마이크로 홀 형상(Confusor, Straight, Diffuser)을 가진 적층 제조된 노즐의 분사 특성 분석이 수행되었다. 분사 과정에서 액체  $\text{CO}_2$ 는 Joule-Thomson 효과로 인해 분사 노즐 출구에서 드라이 아이스로 전환된 후 대기압 및 대기 온도 조건에서 기체로 증발한다.

분사 노즐 출구에서 생성된 드라이 아이스는 성형 소재와 금형을 분리해주는 역할로 윤활을 함과 동시에 기화하는 과정에서 열을 흡수하여 소재를 냉각시키게 된다. 실험 결과는 액체  $\text{CO}_2$ 의 윤활 및 냉각이 마이크로 홀 형상에 크게 의존하는 것이 확인되었다. 특히, confusor 형상의 마이크로 홀은 straight, diffuser 형상보다 분사 폭 및 드라이 아이스 생성 면적이 크다는 결과가 나타났다. 냉각 속도 또한 confusor 형상의 마이크로 홀에서 나오는 분사 및 드라이 아이스 면적이 가열된 시트의 냉각에 효과적인 냉각을 기여하며, AA6061-T6의 고용체 처리를 위한 냉각 속도인  $-66\text{ }^\circ\text{C/s}$ 보다 2.24 배 높은 냉각 속도를 보였다. 본 연구는 마이크로 홀 형상을 최적화함으로써 액체  $\text{CO}_2$ 의 윤활 및 냉각 성능이 쉽게 향상될 수 있음을 증명되었다.

# 목 차

국문요약 .....	i
목차 .....	ii
List of tables .....	iv
List of figures .....	iv
1. 서 론 .....	1
1.1. 연구배경 .....	1
1.2. 알루미늄(Al: Aluminum) .....	2
1.3. 알루미늄 성형 공법 .....	6
1.4. 알루미늄 핫스탬핑(Aluminum Hot Stamping) .....	7
1.5. 건식 금속 성형(DMF: Dry Metal Forming) .....	9
2. 실험방법 .....	11
2.1. Micro hole 분사 노즐 .....	11
2.2. 분사 특성 분석 .....	14
2.3. 냉각 속도 분석 .....	20
2.4. 분사 영향 면적 분석 .....	24

3. 실험결과.....	26
3.1. 분사 특성 분석.....	26
3.2. 냉각 속도 분석.....	30
3.3. 분사 영향 면적 분석.....	31
4. 결론.....	34
5. References.....	36

## List of tables

Table. 1 Classification of aluminum alloy .....	11
Table. 2 Classification according to heat treatment .....	11
Table. 3 Additive manufacturing condition .....	11
Table. 4 Chemical composition of aluminum 6061-T6 alloy (provided by manufacturer) .....	13

## List of figures

Fig. 1 Conventional aluminum hot stamping process .....	7
Fig. 2 Aluminum hot stamping process using volatile lubrication .....	9
Fig. 3 Additive manufacturing micro hole nozzle .....	12
Fig. 4 Micro hole nozzle shape (a) straight (b) confuser (c) diffuser .....	5
Fig. 5 AMed micro hole (a) straight (b) confuser (c) diffuser .....	13
Fig. 6 Shadowgraph experiment setup .....	14
Fig. 7 Experimental setups for spray width and spray angle analysis .....	15
Fig. 8 Schematic of the experiment for spray width and spray angle .....	16
Fig. 9 Image processing sequence for analysis of liquid and solid CO <sub>2</sub> regions .....	17

Fig. 10 Deformation the pixel using gray scale .....	18
Fig. 11 Analyze the Image for threshold arrangement, including the gas phase .....	18
Fig. 12 Analyze the Image for threshold arrangement without the gas phase .....	19
Fig. 13 (a) Schematic of cooling rate experiment (b) Cooling rate experiment setup .....	20
Fig. 14 Experiment setup for cooling rate experiment.....	20
Fig. 15 Thermal imaging camera measurement area.....	22
Fig. 16 Cooling rate measurement experimental process .....	23
Fig. 17 Experiment setup for dry ice area analysis .....	24
Fig. 18 Image processing for measurement dry ice area.....	25
Fig. 19 Shadowgraph results according to nozzle shape (a) Confusor (b) Straight (c) Diffuser .....	26
Fig. 20 Spray width and height (a) including the gas phase CO <sub>2</sub> (b) without the gas phase CO <sub>2</sub> .....	27
Fig. 21 (a) Average of 1000 images about each micro hole shape (b) Micro hole shape distance using python openCV .....	27
Fig. 22 The temperature history with AMed nozzles in different shapes .....	30
Fig. 23 Dry ice area measurement by time consuming (a) Confusor (b) Straight (c) Diffuser.....	32
Fig. 24 Comparison of dry ice area by nozzle shape .....	33

## I. 서론

### 1.1 연구 배경

미세먼지, 기후 변화 등에 따라 자동차의 제작 및 운행에 대한 연비향상과 국내외 환경 규제는 점차 강화되고 있다. 대표적인 환경규제로는 유럽연합(EU)이 2014년부터 실시하고 있는 유로 6(자동차 배출가스 규제)가 있다. 이로 인해 국내·외 자동차 산업에서는 배기가스 배출 저감과 연료 효율 개선을 위해 경량 소재를 적용한 수소 및 전기자동차의 부품 비중을 증가시키고 있다. 현재, 미국과 유럽 등 주요 자동차 제조사들은 전기자동차 생산 및 대중화를 시작했고, 국내 자동차 제조사 역시 전기자동차 및 수소자동차 시장 진입에 나서고 있으나, 배터리 등 친환경차 전용부품들은 무거운 중량으로 인해 내연기관차에 비해 중량을 증가시키는 요인으로 작용되고 있다. 자동차의 편의/안전에 대한 요구 증가로 중량이 증가되고 있으므로 충돌안전 규제 대응 및 중량이 무거워질수록 에너지 효율성이 떨어지기 때문에 미래 자동차 시장에서 차량의 고강도화 및 경량화 기술은 매우 중요한 과제로 부각되고 있으며, 이를 가장 우선적으로 해결해야 하는 과제이다.

일반적으로 차량에 적용되는 경량화 소재는 초고강도강판, 알루미늄, 마그네슘, 탄소섬유 등 경량소재로 변화가 되고 있으며, 최근 자동차의 차체 BIW에 적용되는 소재의 적용 동향을 살펴보면 고강도강판과 알루미늄의 적용 비중이 높다. 특히 해외 자동차 제조사에서는 올 알루미늄 바디(all aluminum body)를

고급형 양산차량에 적용함으로써 신 경량 차체 플랫폼 설계 제조기술을 확보하였으며, 국내에서는 그동안 차량가격 경쟁력 확보를 위해 스틸 베이스 차체 구조에서 탈피하지 못하고 있었지만 최근 EV 용 신 경량 차체 플랫폼 개발이 시작되면서 고급형 양산차량에 알루미늄 차체부품을 적용하는 이중재(Al-steel) 차체 모듈 사용화 기술 개발이 진행되고 있다. 전기 자동차의 차체를 알루미늄으로 대체하여 중량이 감소하면 배터리를 비롯한 관련부품의 사이즈를 줄일 수 있기 때문에 배터리를 포함한 전체 비용이 줄어드는 효과가 있으며, 전기차의 무게가 20% 줄면 항속 거리는 20% 늘어나고, 일반 내연기관도 알루미늄 비율을 10% 높이면 연비는 5~7% 개선되는 효과가 있다. 그러나 알루미늄은 대표적인 경량소재임에도 성형성이 낮아 열간 성형을 많이 하지만, 성형을 위한 소재의 특성 데이터가 부족하고, 성형 중 마찰에 의해 소재가 금형에 늘어붙는 sticking 현상이 많이 발생된다.

## 1.2 알루미늄(Al: Aluminum)

최근 친환경 자동차 분야를 중심으로 자동차 부품의 전 분야에 걸쳐 경량화, 내구성 증대 그리고 생산비용 절감의 필요성이 매우 빠른 속도로 증가되고 있다. 특히, 다양한 경량 소재들 중 비철 경량 소재인 알루미늄 합금이 최근 크게 주목을 받고 있으며, 그 활용도가 빠르게 늘고 있는 추세이다. 알루미늄 합금(aluminum alloy)은 경우 비중이 철의 1/3 수준으로 경량성이 탁월하며 내식성, 우수한 열 및 전기전도성이 우수하며, 상대적으로 높은 강도 등 다양한 특성을

지니고 있다. 또한, 90% 이상 자원재활용이 가능한 알루미늄 합금은 자원 고갈과 환경오염 문제를 해결할 수 있는 소재이다. 이러한 알루미늄 합금의 특성으로 인해 에너지 저감에 대한 수요와 연료의 효율성 증대의 필요성이 높아지는 현재 상황에 부합하는 경량 금속인 알루미늄 합금에 대한 관심이 증가하고 있다. 자동차 산업에서는 환경 보호를 위한 연비와 배기가스 규제가 강화되고 있으며, 가장 효과적인 연비 개선 및 배기가스 배출 감소를 위한 방안으로 차량의 경량화가 뽑히고 있다. 따라서, 기존 철강 소재대비 약 65% 수준의 비중을 가지고 알루미늄 합금이 차량 구조재로 주목받고 있으며, 알루미늄 합금의 차체 적용 비율은 지속적으로 증가하고 있다.

알루미늄 합금의 경우 Table. 1 과 같이 최종 제품에 대한 요구 및 성질에 따라 가공용 합금과 주조용 합금으로 나뉘고, 열처리 여부에 따라 비열처리형 합금과 열처리형 합금으로 분류된다. 열처리형 합금은 Table. 2 와 같이 열처리 상태에 따른 기호로 표시된다.

알루미늄 합금은 강도를 증가시키기 위한 목적으로 석출경화를 통해 열처리를 수행한다. 알루미늄 합금의 열처리는 고용체화 처리, 인공시효처리와 풀림 처리와 같이 단독 또는 두 가지 이상의 열처리를 시행한다. 고용체화 처리는 완전한 고용체가 되는 온도까지 가열했다가 급랭하여 조직체를 과포화의 고용체로 만드는 방법이며 과포화의 고용체를 120~200°C로 가열하여 과포화 성분을 석출시키는 방법이 인공시효 처리이다. 풀림 처리는 처리 온도와 인공시효 온도의 중간 온도까지 가열하여 석출된 미립자를 응집시키고, 잔류응력을

제거하여 재질을 연하게 하는 열처리 방법이다. 비열처리형 알루미늄 합금은 성형성이 우수하므로 주로 내판 등 높은 성형성이 요구되는 부분에 적합하다.

Table. 1 Classification of aluminum alloy

<b>알루미늄 합금</b>			
<b>가공용 합금</b>		<b>주물용 합금</b>	
<b>비열처리형 합금</b>	<b>열처리형 합금</b>	<b>비열처리형 합금</b>	<b>열처리형 합금</b>
순알루미늄 (1xxx 계열)	Al-Cu 계 합금 (2xxx 계열)	순알루미늄	Al-Cu 계 합금 (AC1X, AC5A)
Al-Mn 계 합금 (3xxx 계열)	Al-Mg-Si 계 합금 (6xxx 계열)	Al-Si 계 합금 (AC7A, ADC5, 6)	Al-Si-Cu-Mg, Al-Si-Mg 계 합금 (AC2X, AC4X, ADC3, 10, 12)
Al-Si 계 합금 (4xxx 계열)	Al-Zn-Mg 계 합금 (7xxx 계열)		
Al-Mg 계 합금 (5xxx 계열)			

Table. 2 Classification according to heat treatment

기호	상태
<b>F</b>	열간가공 상태, 주조한 상태
<b>O</b>	가장 낮은 템퍼링 강도를 얻기 위해 어닐링한 가용용 제품에 적용되고 연성 및 치수 안정성을 개선시키기 위해 어닐링한 주조 제품에 적용
<b>H1x</b>	냉간가공 한 상태
<b>H12</b>	O상태와 H14질별의 1/2의 인장강도를 같도록 냉간가공한 상태
<b>H14</b>	O상태와 H18질별의 1/2의 인장강도를 같도록 냉간가공한 상태
<b>H16</b>	H14와 H18질별의 1/2의 인장강도를 같도록 냉간가공한 상태
<b>H</b>	<b>H18</b> Dir 75% 냉간가공한 상태
	<b>H19</b> H18 질별의 인장강도보다 더 큰 인장강도를 갖도록 냉간가공한 상태
	<b>H2x</b> 냉간가공 후 부분적으로 어닐링한 상태
	<b>H3x</b> 냉간가공 후 저온에서 안정화 처리한 것
<b>W</b>	용체화 처리 후 자연시효 처리하여 안정화시킨 상태
	<b>T1</b> 높은 온도에서 가공 후 냉각하고, 자연시효 처리하여 안정화시킨 상태
	<b>T2</b> 높은 온도에서 가공 후 냉각하고, 다시 냉간가공한 후 자연시효 처리하여 안정화시킨 상태
	<b>T3</b> 용체화 처리 후 냉간가공하고 자연 시효한 상태
<b>T</b>	<b>T4</b> 용체화 처리한 후 자연 시효처리하여 안정화시킨 상태
	<b>T5</b> 높은 온도에서 가공하고 냉각한 다음 인공 시효한 상태
	<b>T6</b> 용체화 처리한 후 인공시효한 상태
	<b>T7</b> 용체화 처리한 후 과시효에 의해서 안정화시킨 상태
	<b>T8</b> 용체화 처리한 후 냉간가공하고 인공시효한 상태
	<b>T9</b> 용체화 처리한 후 인공시효하고 냉간가공한 상태
	<b>T10</b> 고온가공 온도에서 냉각하고 냉간 가공한 다음, 인공시효한 상태

본 연구에서 사용한 A6xxx계열 알루미늄 합금의 성질은 다음과 같다.

#### - Al-Si-Mg 계 (A6xxx 계열 알루미늄) 합금

A6000계열 알루미늄 합금에 첨가되는 원소 중 마그네슘(Mg: Magnesium)은 상온에서도 어느정도 고용도가 있어 A5xxx계열에서와 같이 고용경화 효과를 준다. 또한 규소(Si: Silicon)는 다량의 함량은 주조성을 좋게 하며, A6xxx와 같이 소량일 경우 Mg과 화합하여  $Mg_2Si$ 를 형성하여 강도를 높이는 역할을 한다.

A6xxx계열 알루미늄 합금은 중간정도의 강도를 갖고 있으며, 내식성과 용접성이 양호하여 대표적인 구조재로 알려져 있다. 압출 가공면에서는 복잡한 형태의 가공성과 좋은 생산성, 압출시 강제 공냉이 가능하다. 충분한 기계적 성질, 양호한 가공성(벤딩, 펀칭, 소성가공 등)과 양호한 내식성을 가지고 있어 가장 보편적인 합금으로 차량, 선박, 건축 등 여러가지의 용도로 가장 많이 사용되는 합금이다.

### 1.3 알루미늄 성형 공법

석출 경화형 알루미늄 합금인 AA6061 은 높은 비강도, 우수한 내식성 및 높은 전기 전도성으로 인해 많은 산업 분야에서 경량 대안으로 널리 사용하고 있다. 냉간 성형, 온간 성형 및 열간 성형은 알루미늄 합금의 성형에 사용되는 주요 방법으로 알려져 있다. 그러나 냉간 성형은 생산 주기가 짧아 생산성 면에서 장점이 있으나, 실온에서는 연성이 낮아 고강도 알루미늄 합금 소재의 경우 복잡한 난 형상의 성형에 한계가 있다 [1,2]

Kleineret et al. [3] 및 Kurukuriet et al. [4]는 알루미늄 합금의 성형성을 향상시키기 위해 150 °C ~ 300 °C 사이의 온도 범위에서 온간 성형 기술을 도입했다. 이를 통해 부품의 성형성과 형상 정확도를 향상시킬 수 있음을 확인했다. 그러나 온간 성형 공정은 실온 성형과 비교하였을 때 표면 품질의 저하 및 생산 비용 증가와 같은 특정 제한 사항을 가질 수 있다는 문제점이 지적되었다 [5].

알루미늄 합금의 성형성을 향상시키기 위해 온간 성형의 대안으로 열간 성형 기술이 Lin et al. [6]으로부터 처음 도입되었다. 열간 성형은 재결정 온도 이상에서 이루어지며 이 과정에서 전위 축적 및 회복과 함께 재결정 및 결정립 성장의 미세 조직 과정이 발생한다[7]. 이러한 과정은 유동 응력 및 연성의 국부적 변화를 초래하여 성형성에 영향을 준다[8]. 특히 Hot stamping 은 Spring back 을 감소시켜 성형성을 증가시키기 때문에 금속 부품 제조에 효율적인 공정이다[9].

#### 1.4 알루미늄 핫스탬핑(Aluminum hot stamping)

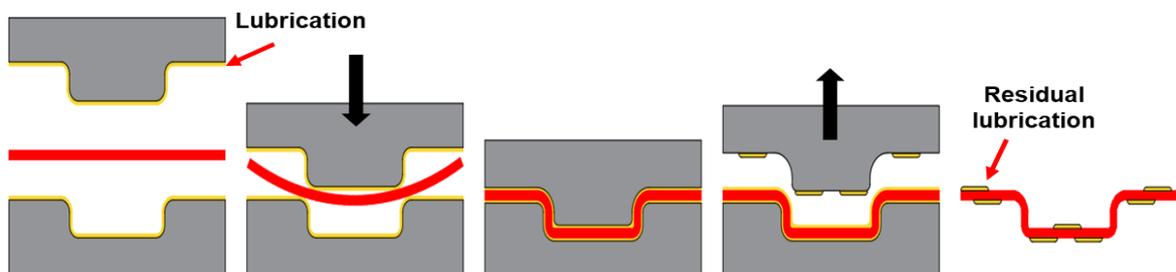


Fig. 1 Conventional aluminum hot stamping process

고강도 알루미늄 합금 소재의 경우, 일반적인 프레스를 이용한 냉간 성형을 통한 제조공법으로는 복잡한 난형상의 성형에 어려운 문제가 있다. 이러한

문제점을 보완하기 위해, 열간 성형을 이용한 프레스 성형 공법의 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적인 알루미늄 합금의 단점은 강철에 비해 실온 성형성이 낮다는 것이다. 이러한 문제점을 극복하기 위해, 성형 후 석출 경화 또는 인공 시효를 통해 고온에서 석출 경화를 하는 핫스탬핑 공법이 제안되었다. 기존의 핫스탬핑은 블랭크를 가열로에서 고용체 온도까지 가열한 이후 목표 형상으로 스탬핑을 한 후 인공 시효를 위해 과포화 고용체로 성형 다이 내에서 담금질을 한다. 핫스탬핑에서 담금질은 성공적인 성형 후 인공 시효를 위해 과포화 고용체를 달성하는 중요한 단계이다.

알루미늄 핫스탬핑의 문제점은 성형 단계 중 계면에 심한 소착(seizure)이 발생한다. 심한 소착은 제품의 품질 저하와 성형 도구의 손상을 발생시킨다. 성형 도구와 블랭크 사이의 고착을 방지하기 위해 일반적으로 윤활제가 사용이 되지만, 오일 윤활제는 고온에서 빠르게 증발하기에 핫스탬핑에서 사용하기엔 적합하지 않다. 오일 윤활제의 대안으로 흑연과 같은 고체 윤활제가 핫스탬핑에서 사용된다. Maenoet al. [10]는 흑연이 AA6061 의 핫스탬핑에 좋은 윤활제임을 입증하였다. 그러나 흑연은 높은 계면 마찰로 인해 핫스탬핑 성형 단계 중 쉽게 지워지게 된다. 따라서, 핫스탬핑 중 윤활을 유지하기 위해 접촉면에 흑연을 자주 추가해야 하는데 이는 경제적이지 않다. 또한, 기존의 오일/고체 윤활제는 성형 후 성형된 제품과 성형 도구에 남아 있는 잔류 윤활제를 제거하기 위한 추가적인 세척 단계가 필요로 하여 공정의 효율이 감소하게 된다.

### 1.5 건식 금속 성형(DMF: Dry Metal Forming)

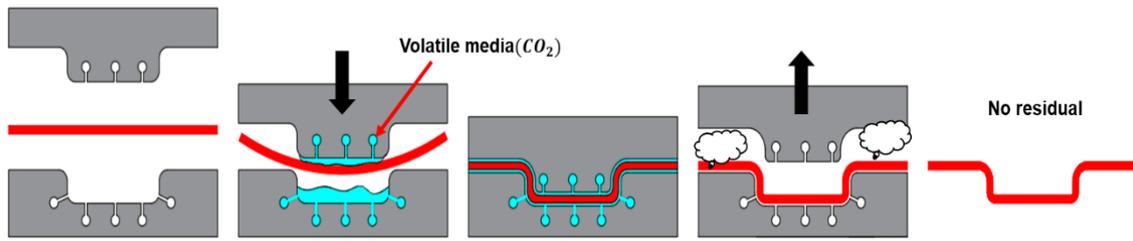


Fig. 2 Aluminum hot stamping process using volatile lubrication.

건식 금속 성형(DMF)은 윤활 및 냉각을 동시에 함과 동시에, 성형 후 잔류물이 남지 않아 세정 또는 건조 단계 없이 성형 공정을 마무리하는 특징을 갖고 있으며, 기존 알루미늄 핫스탬핑에 주로 사용되는 윤활제(오일 기반 및 고체 윤활제)를 대체하기 위한 새로운 녹색 기술이다. 현재까지 공구의 코팅 및 Tailored 표면, 휘발성 윤활제(VL)[11,12]를 포함한 DMF 을 위한 여러가지 방법이 개발되었다. 이러한 여러 건식 금속 성형 방법들 중 공구 코팅 및 Tailored 표면 방식은 고강도 가공물을 성형시 마모로 인한 불안정한 윤활 및 열악한 공구 수명의 뚜렷한 단점을 갖고 있다. 반대로, 휘발성 윤활제를 사용한 금속 성형 방식은 금속 성형시 마이크로 홀이 있는 성형 공구에 지속적인 윤활유를 공급하여 접촉영역에 지속적으로 도포되어 안정적인 윤활을 달성할 수 있다. 또한, 도포된 윤활제를 통해 윤활 및 냉각을 동시에 진행하며, 휘발성 윤활제의 특성으로 인해 성형 후 곧바로 기화하여 잔류물이 남지 않아 별도의 세척 공정이 필요하지 않다. 따라서, 휘발성 윤활제는 건식 금속 성형에서 가장 유망한 윤활제이다.

현재까지 고려되고 있는 휘발성 윤활제는 액체 CO<sub>2</sub> 와 기체 N<sub>2</sub> 두 가지 매체가 있다. Liewald et al. [13]은 액체 CO<sub>2</sub> 가 수직력, 레이저 드릴링된 마이크로 홀의 수 및 형상에 관계없이 Drawing 공정에서 기체 N<sub>2</sub> 보다 낮은 마찰 계수를 나타냈다고 보고되었다. Drawing 공정에서 액체 CO<sub>2</sub> 가 기체 N<sub>2</sub> 보다 낮은 마찰 계수를 띤 이유는 액체 CO<sub>2</sub> 의 상변화 특성에 있다. Micro hole 을 통해 분사될 때 노즐 출구에서 Joule-Thomson 효과로 액체 상에서 고체 상의 드라이 아이스와 기체 상의 CO<sub>2</sub> 로 전환되어 작업물과 공구를 분리하는 이형제 역할을 하여 마찰을 줄일 수 있다. 따라서, 액체 CO<sub>2</sub> 는 기체 N<sub>2</sub> 보다 우수한 윤활력을 가지고 있다. Cai et al. [14]는 Pull-out test 를 통해 흑연, 액체 CO<sub>2</sub> 와 비교하여 액체 CO<sub>2</sub> 의 윤활 성능이 흑연보다 높다는 결과가 입증되었다.

액체 CO<sub>2</sub> 는 윤활뿐만 아니라 냉각도 액체 CO<sub>2</sub> 에 의해 진행될 수 있다 [15]. 냉각 효과는 드라이아이스에서 기체 CO<sub>2</sub> 로의 열 흡수에 기인된다. Cai et al. [16]은 냉각 테스트 (Quenching test) 에서 10 bar 로 액체 CO<sub>2</sub> 를 분사하였을 때 AA6061 의 고용체 처리를 달성하기 위한 충분한 냉각 속도를 갖고 있음을 보고하였다. 또한, 그들은 액체 CO<sub>2</sub> 윤활 및 냉각과 핫스탬핑을 적용한 최초의 연구였다. 그들의 결과는 액체 CO<sub>2</sub> 윤활 및 냉각이 핫스탬핑에서 흑연 윤활과 간접 물 냉각의 종래의 조합을 완전히 대체할 수 있음을 보여준다.

액체 CO<sub>2</sub> 에 의한 단순 윤활 또는 냉각 효율, 액체 CO<sub>2</sub> 에 의한 복합 윤활 및 냉각의 효율 등이 여러 연구자들에 의해 보고된 바 있지만, 마이크로 홀 형상에 따른 액체 CO<sub>2</sub> 의 세부 분사 특성은 연구된 바가 없다. 본 연구에서는 액체

CO<sub>2</sub>의 분사 특성을 분석하기 위해 세 가지 마이크로 홀 형상(출구 직경 및 높이가 고정)으로 Confusor, Straight, Diffuser 형상이 채택되었다. 마이크로 홀 형상을 기반으로 한 분사 및 드라이아이스 영역의 분사 결과를 제시하였다.

## II. 실험방법

### 2.1 Micro hole 분사 노즐

Micro hole 형상을 결정하기 위한 이론적 배경으로 질량 보존법칙은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = A_1 V_1 \rho_1 = A_2 V_2 \rho_2 \quad (1)$$

A가 노즐 직경으로부터 계산된 면적인 경우  $V$ ,  $\rho$  및  $\dot{m}$ 의 매개변수는 액체 CO<sub>2</sub>의 속도, 밀도 및 질량을 나타낸다. 본 연구에서 값이 주어지면 Eq.(1)을 통해 속도 간의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{V_1}{V_2} = 1$$

$$V_1 = V_2$$

베르누이 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = \text{constant} \quad (2)$$

p가 액체 CO<sub>2</sub>의 압력을 나타내며, g는 중력 가속도이다. 따라서, p는 Eq.(2)로부터 계산될 수 있다.

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho(V_2^2 - V_1^2)$$

$$p_1 = p_2$$

본 식을 기반으로 출구의 지름과 형상의 높이를 0.6mm, 10mm 로 고정시킨 후 입구의 지름을 각각 0.4mm, 0.6mm, 1.2mm 로 Diffuser, Straight, Confusor 형상을 설정하여 적층 제조(AM: Additive Manufacturing)를 활용하여 노즐을 제작하였다.

각 형상 별 액체 CO<sub>2</sub>의 분사 특성을 분석하기 위해 모든 마이크로 홀 형상은 Table.3 에 나열된 매개변수를 갖는 Tool steel 1.2709 분말을 사용하여 적층 가공 공정 중 선택적 레이저 용융(SLM: Selective Laser Melting)에 의해 제작되었다.

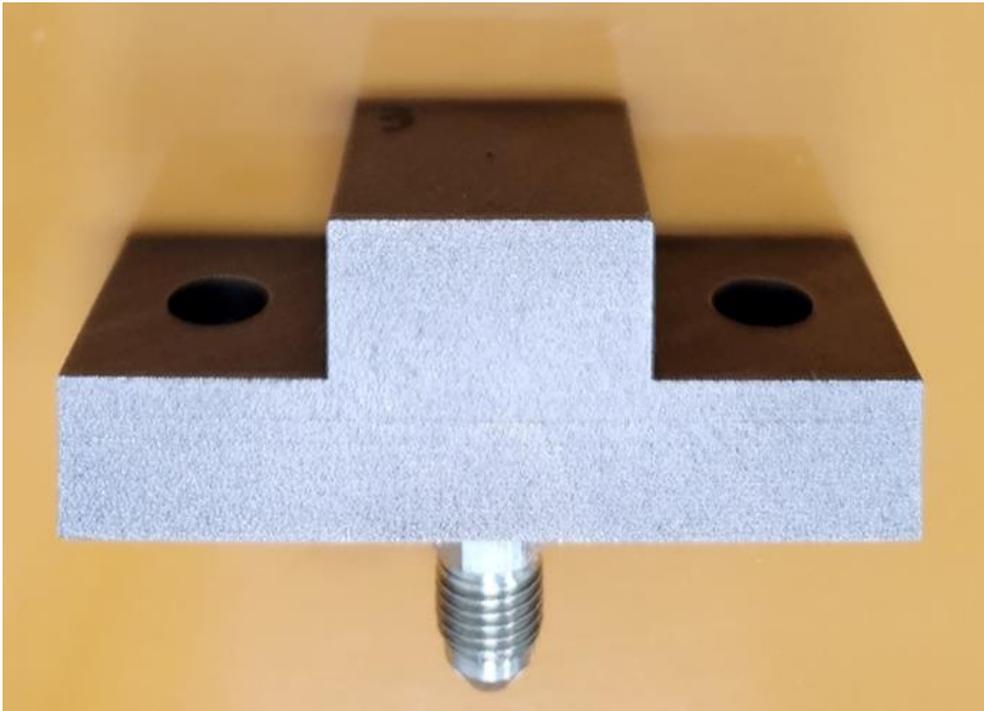


Fig.3 Additive manufacturing micro hole nozzle

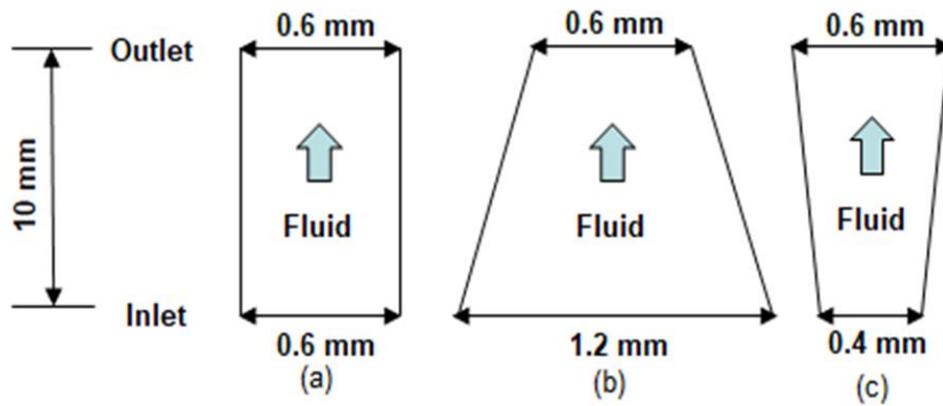


Fig.4 Micro hole nozzle shape

(a) Straight (b) Confusor (c) Diffuser

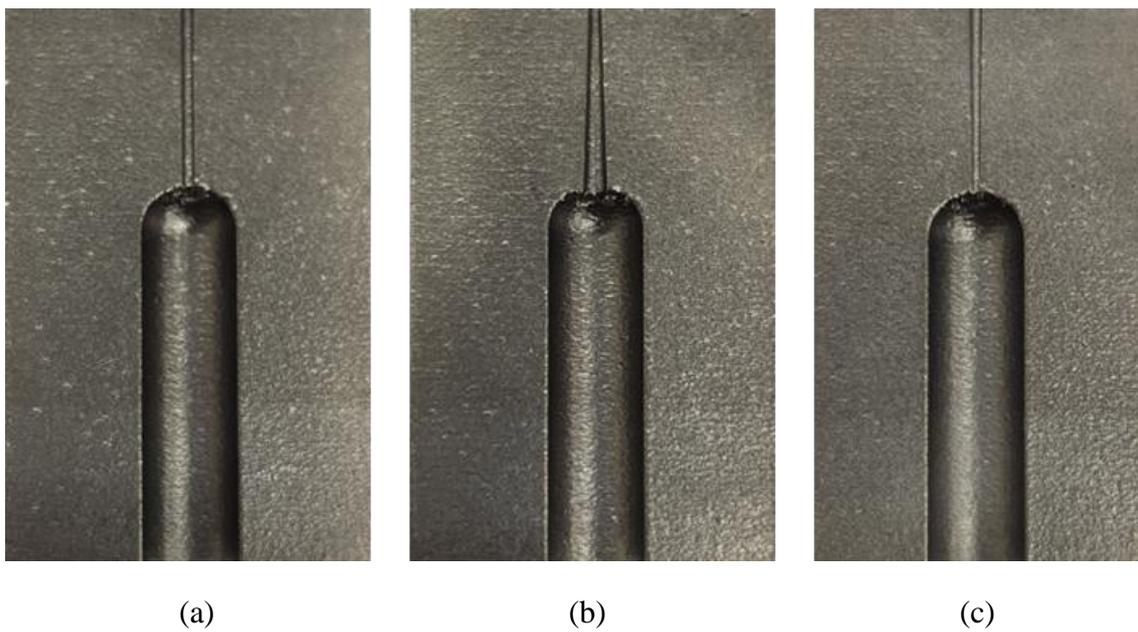


Fig. 5 AMed micro hole inner shape

(a) Straight (b) Confusor (c) Diffuser

Table. 3 Additive manufacturing condition

Material	Scanning method	Laser power (W)	Layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	Scanning speed (mm/s)
Tool steel 1.2709	67° rotate scanning	180	30	940

## 2.2 분사 특성 분석

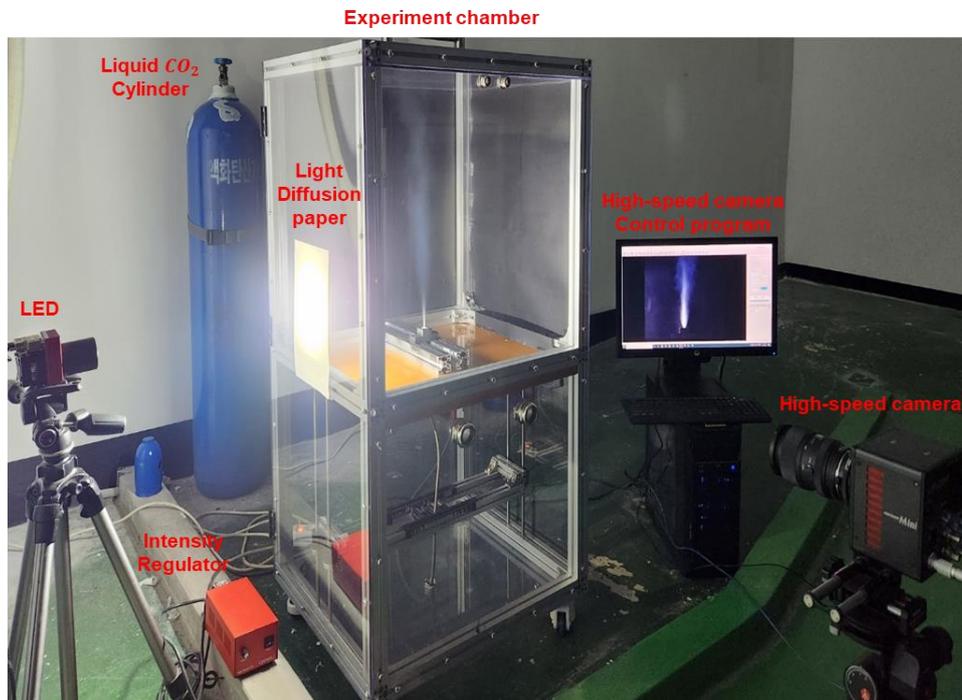


Fig. 6 Shadowgraph experiment setup

먼저, 액체 CO<sub>2</sub> 의 거시적인 분사 형태를 분석하기 위해 유동 가시화 분야에서 주로 사용되는 Shadowgraphy 가 사용되었다. 분사 영상을 얻기 위해 백색

LED(Super Bright 2way LED light, KOMI, South Korea)와 초고속 카메라(FASTCAM Mini AX 200 Type 900K-M-32GB, KORVIS, 대한민국)를 사용하여 영상이 촬영되었다. 초고속 카메라의 초당 프레임 수는 1000 FPS 로 설정하여 촬영이 되었으며, Micro hole outlet 기준으로 1.5 m 떨어진 거리에 백색 LED 가 배치되어, LED 의 세기 10 으로 설정되었다. 또한, 백색 LED 에서 나오는 빛을 고르게 분포시키기 위해 광학산지 (Light diffusion paper)를 사용하여 물체의 경계와 그림자를 선명하게 나타내었다.

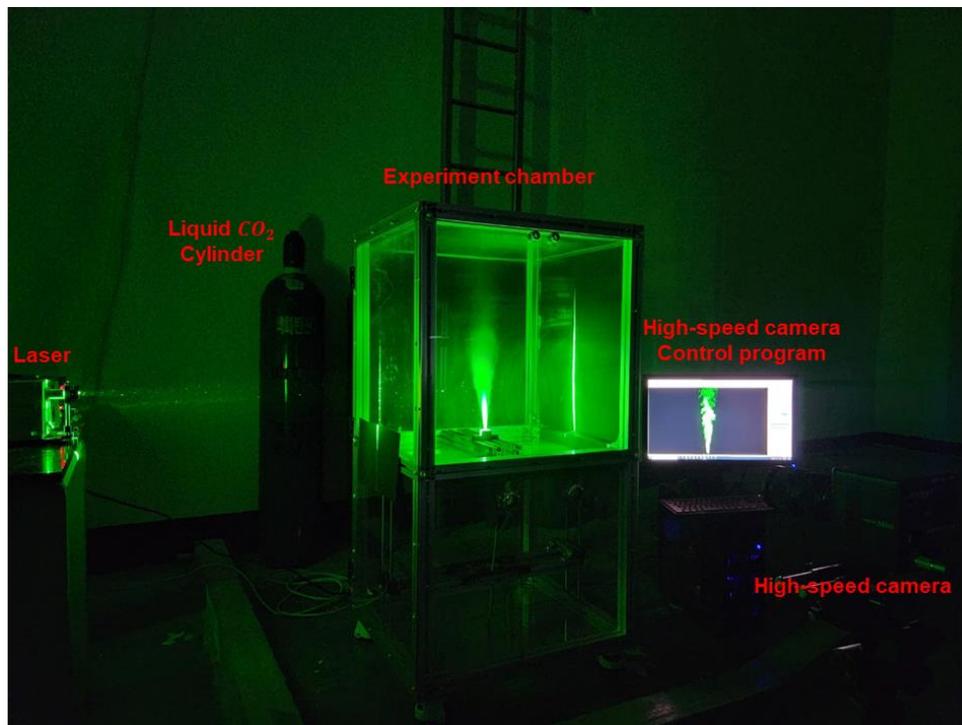


Fig. 7 Experimental setup for spray width and spray angle analysis

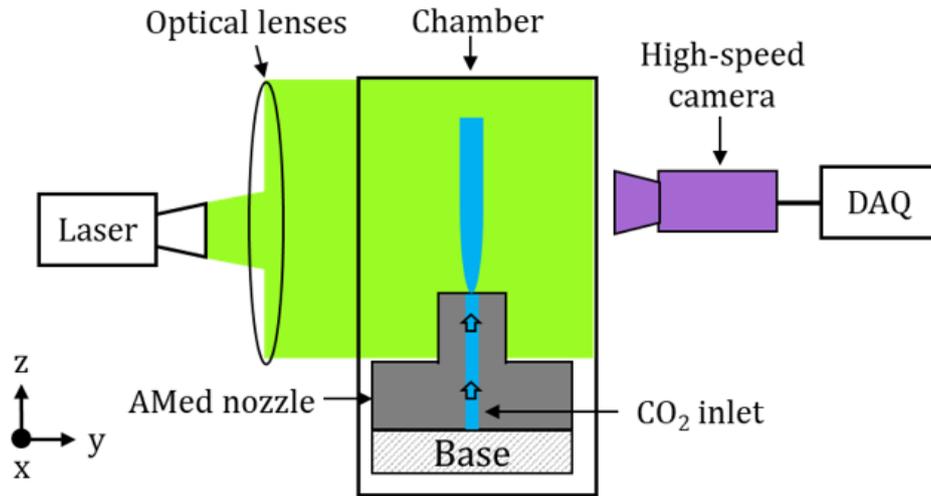


Fig. 8 Schematic of experiment for spray width and spray angle

Shadowgraph 로 거시적인 분사 형태를 확인하였다면, 분사 폭 및 분사 각을 수치적으로 분석할 수 있도록 Fig.7 과 같이 백색 LED 장비 대신 532 nm 10W DPSS Laser(RN-G1000-532, Intech, South Korea)의 녹색 Laser 를 사용하였다. 정확한 수치적인 분석을 위해 2 차원 형태의 영상을 얻기 위해 원통형 렌즈 (초점거리: -25 mm)와 구형렌즈 (초점거리: 1000 mm)의 광학 렌즈를 혼합하여 얇은 직사각형 형상의 레이저를 형성하였으며, Micro hole 출구 (outlet)에서 1 m 떨어진 위치에서 10.1 W (9.31 A)의 출력으로 4000 FPS 의 초당 프레임 수에서 1024 x 256 의 해상도로 촬영이 진행되었다.

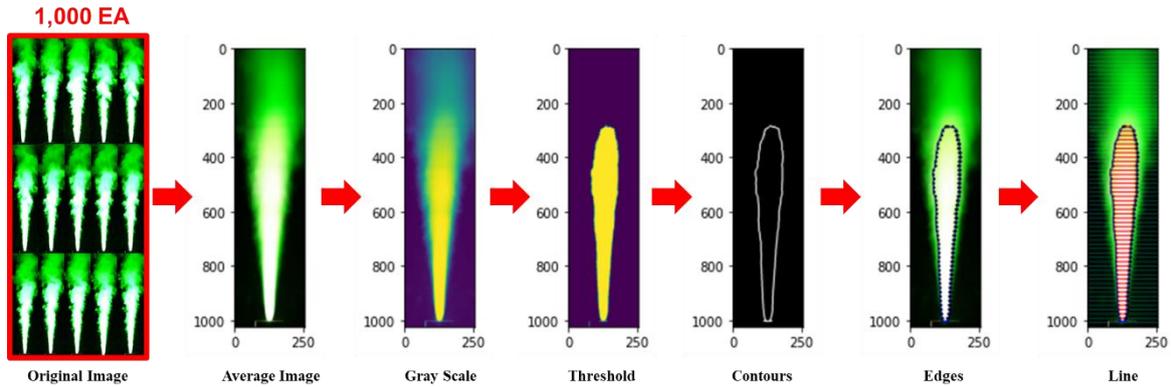


Fig. 9 Image processing sequence for analysis of liquid and solid CO<sub>2</sub> regions

Fig.7 를 통해 얻어진 이미지는 이미지 후처리 과정을 거친 후 분석이 진행되었다. Figure. 9 는 초고속 카메라로 촬영된 이미지를 Python 오픈 라이브러리 소스인 openCV 를 통한 이미지 후처리 과정을 보여준다. 각 형상마다 정상상태(Steady state)에서 취득한 1000 개의 이미지를 평균화한 이미지로 변환하여 각 픽셀당의 값을 분석하기 위해 Gray scale 로 이진화를 하였다. Gray scale 된 이미지는 Figure. 10 과 같이 각 pixel 마다 색상에 대한 값을 갖게 된다. 이 고유의 값은 0 ~ 255 의 값을 갖게 되고, 값이 0에 가까울수록 색상은 어두운 색(검은색)을 띄고, 255 값에 가까울수록 밝은 색(흰색)을 띈다.

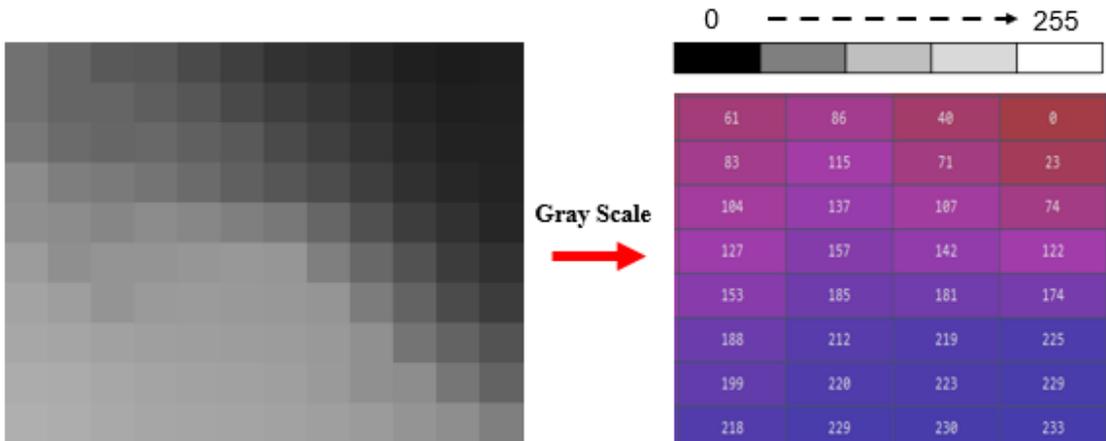


Fig. 10 Deformation the pixel using gray scale

이후 분사 폭 분석을 위한 범위를 지정하기 위해 Image histogram 을 분석하여, 가스 상태의 CO<sub>2</sub> 를 포함한 Threshold 범위와 가스 상태의 CO<sub>2</sub> 를 제외한 드라이아이스 영역 Threshold 범위를 Figure. 11, 12 와 같이 지정되었다.

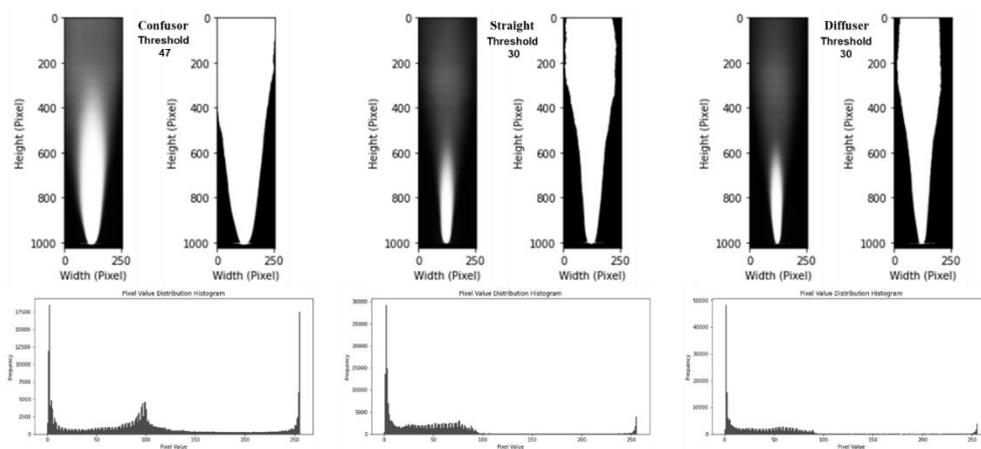


Fig. 11 Analyze the image for Threshold arrangement, including the gas phase

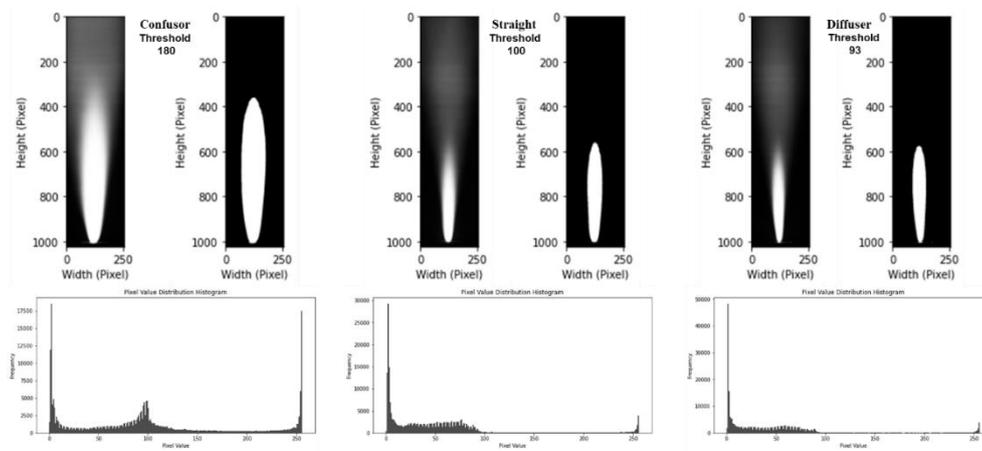


Fig. 12 Analyze the image for threshold arrangement without the gas phase

Threshold 된 이미지에 Contour 를 한 후 5 mm 당 분사 폭을 분석하기 위해 이미지에 5 mm 마다 interval 한 후에 Contour 지점과 겹치는 부분에 점을 추출하였다. 추출된 점에 선을 생성하여 선의 길이를 측정하는 방식으로 분사 폭이 분석되었다.

### 2.3 냉각 속도 분석

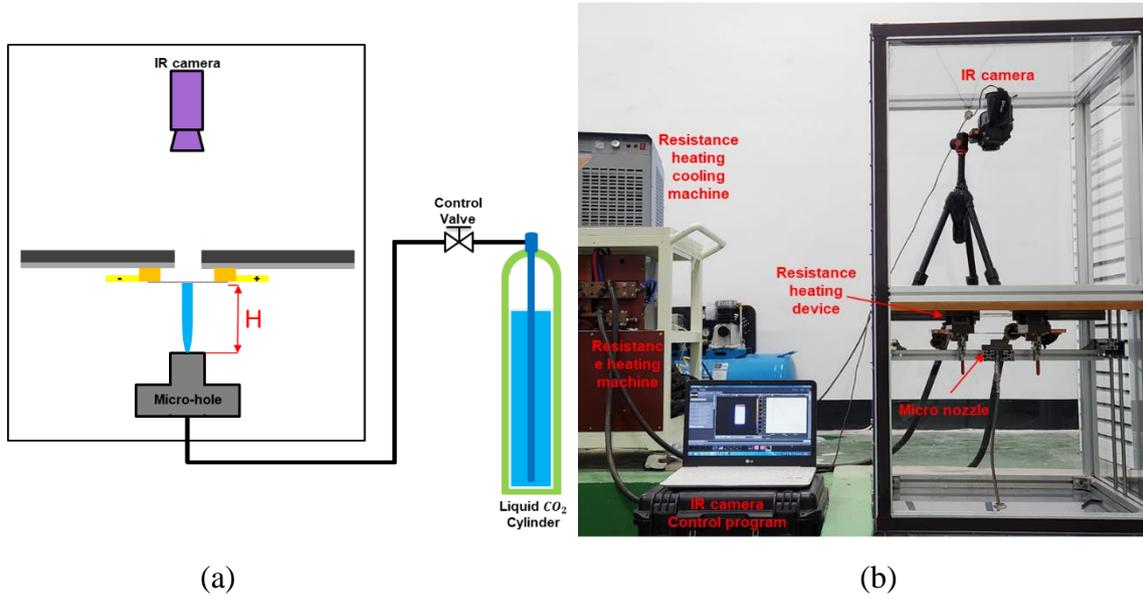


Fig. 13 (a) Schematic of cooling rate experiment (b) Cooling rate experiment setup

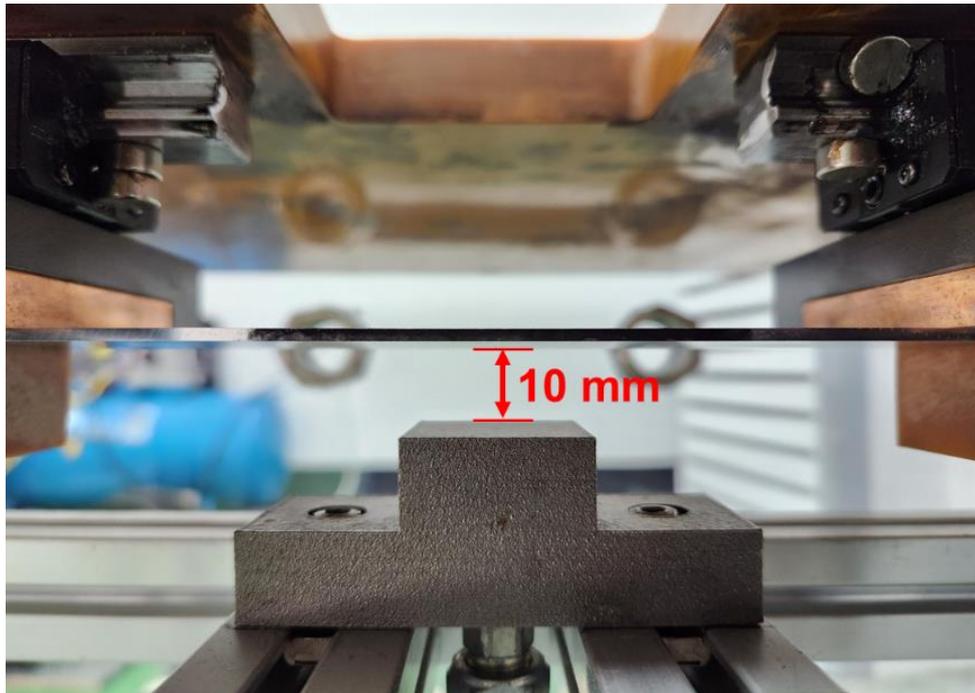


Fig. 14 Experiment set up for cooling rate experiment.

냉각 매체로서 액체 CO<sub>2</sub>의 냉각 성능을 평가하기 위해 Fig. 13과 Fig. 14와 같이 10 mm 높이에서의 분사 폭을 분석한 결과를 토대로 길이 150 mm, 폭 8 mm, 두께 2 mm 의 AA6061-T6 소재 (RD = 0)로 냉각 성능 측정이 진행되었다. AA6061-T6 소재의 화학적 조성표는 Table. 4 와 같다.

Table. 4 Chemical composition of aluminum 6061-T6 alloy (provided by the manufacturer)

Alloy	Alloying element (wt%)						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
6061-T6	0.4	0.7	0.15	0.15	0.8	0.04	0.25

AA6061-T6 소재를 고용체 온도까지 가열하기 위해 저항 가열 기술이 이용되었다. 저항 가열은 전류 발생기(Vadal SP-1000U, Hyosung, South Korea)에 연결된 한 쌍의 전극을 사용하여 진행되었다. 시간 변화에 따른 소재의 온도 변화를 측정하기 위해 적외선 열화상 카메라(FLIR-T440, FLIR, OR, USA)로 온도 변화를 모니터링 하였으며, 테스트 진행에 앞서 소재의 온도 모니터링은 비접촉식으로 진행이 되기 때문에 방사율로 인한 측정의 오차를 줄이기 위해 Fig. 15 와 같이 소재의 온도 모니터링 영역에 검은색 열 페인트가 소재의 중간에 30 mm x 8 mm 의 크기로 도포되었다.

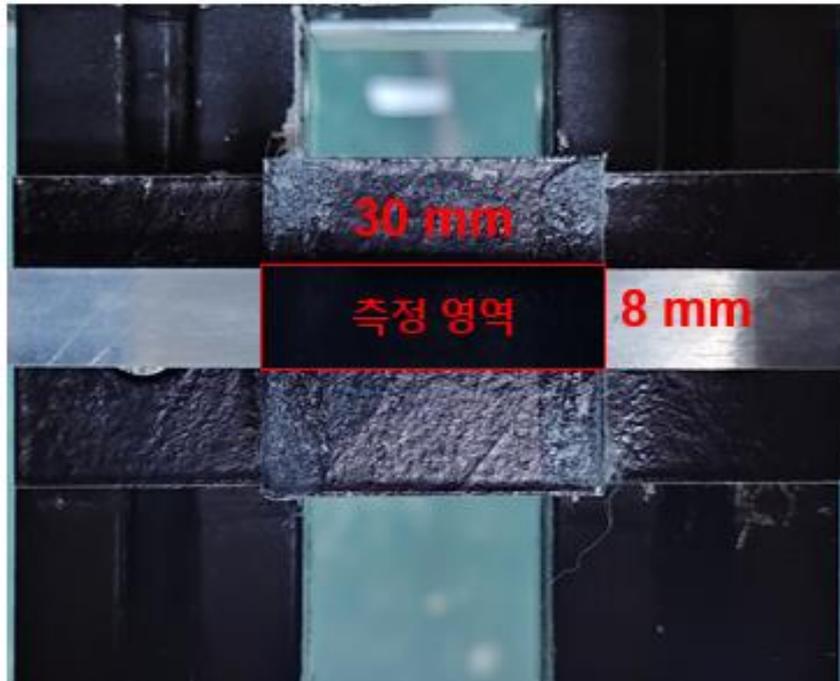


Fig. 15 Thermal imaging camera measurement area

액체 CO<sub>2</sub> 냉각 테스트는 Fig. 16 와 같이 저항 가열과 액체 CO<sub>2</sub> 분사 단계로 구성이 된다. 저항 가열 단계에서는 저항가열(1.13 kA, 5 초)을 통해 소재의 고용체 온도 (530 °C)까지 가열한 후, Micro hole outlet 로부터 10 mm 떨어진 소재에 40 bar 의 압력으로 액체 CO<sub>2</sub> 를 분사하여 대기 온도를 달성할 때까지 냉각이 진행되었다. 취득한 데이터는 최고 온도인 530 °C에서 100 °C까지의 냉각 속도 분석을 진행하였다.

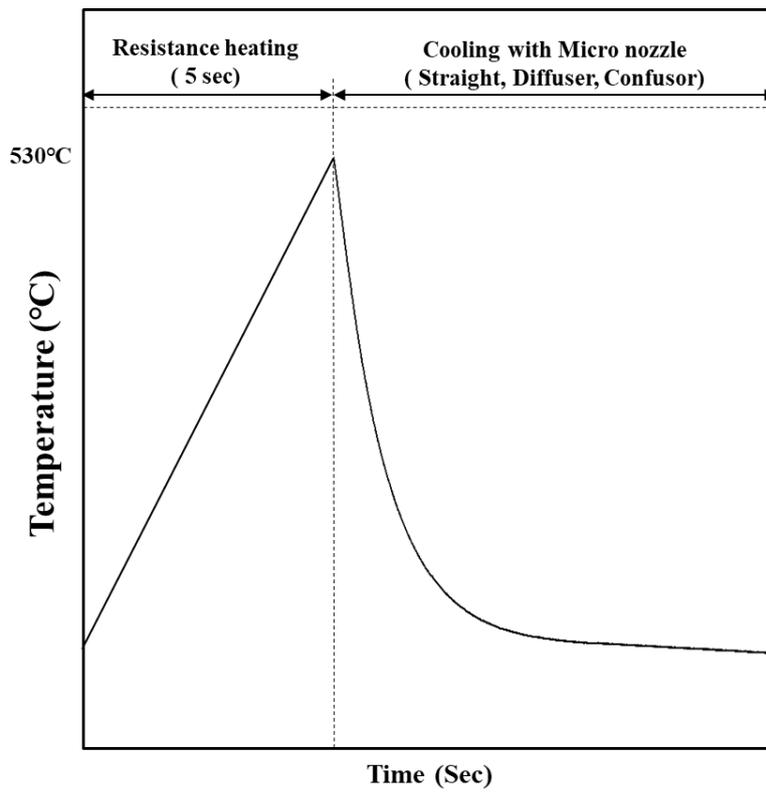


Fig.16 Cooling rate measurement experimental process

## 2.4 분사 영향 면적 분석

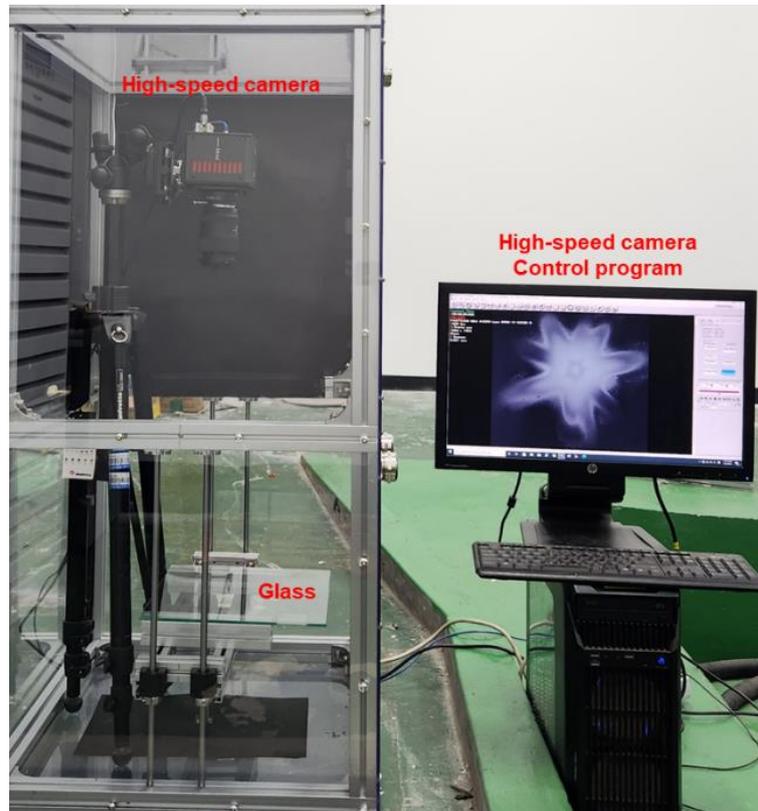


Fig. 17 Experiment setup for dry ice area analysis

휘발성 매체인 액체  $\text{CO}_2$  를 이용한 알루미늄 핫 스탬핑에서 드라이 아이스를 통해 공구와 재료가 분리되어 소착을 방지하고, 마찰계수를 줄여 성형성을 높이는 동시에 냉각을 해주는 핵심 요소 중 하나이다. 따라서, Fig. 17과 같이 시간 변화에 따른 드라이 아이스의 생성 면적에 대해 분석하였다. 고압 실린더에 저장된 액체  $\text{CO}_2$  는 유연한 호스를 통해 40 bar 의 압력으로 Micro hole outlet 에서 10 mm 떨어진 유리판에 직접적으로 분사가 되었다. 액체  $\text{CO}_2$  가 분사될 때 초고속 카메라를 사용하여 1000 FPS 로 20 초간 촬영이 되었다. 이렇게 촬영된

영상은 분사 폭 및 분사 각 분석과 동일하게 Python 에서 오픈 라이브러리 소스인 openCV 를 통해 이미지 후처리가 진행되었으며, Contour 기능을 통해 드라이 아이스 형상의 경계를 도출하였다. 또한, 1 Pixel 당 길이를 도출하여 Calibration factor 로 0.24mm/px 값으로 드라이 아이스의 생성 면적이 계산되었다.

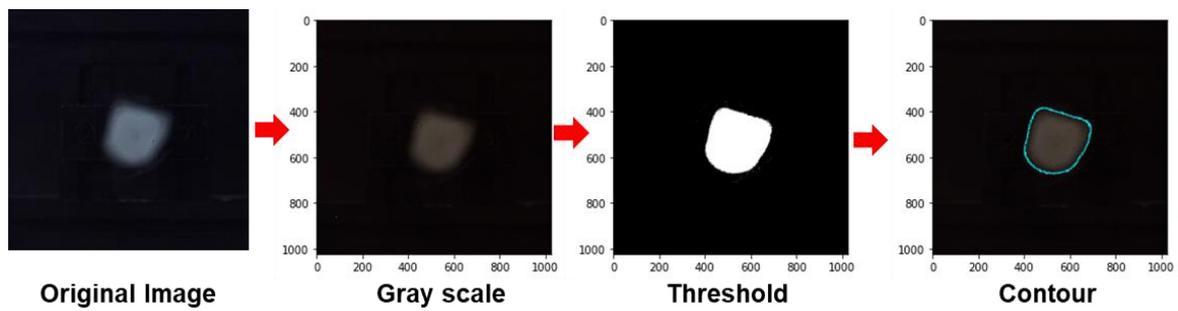


Fig. 18 Image processing for measurement dry ice area

### III. 실험결과

#### 3.1 분사 특성 분석

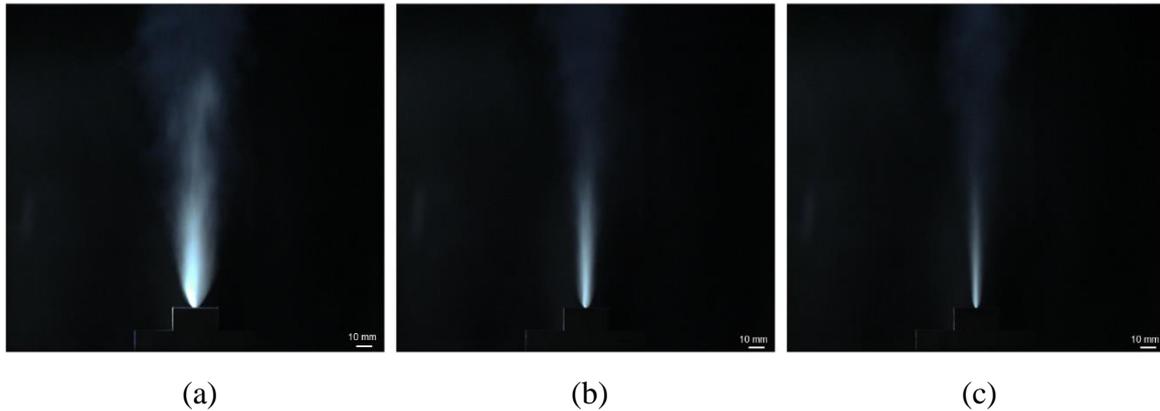


Fig. 19 Shadowgraph results according to nozzle shape  
(a) Confusor (b) Straight (c) Diffuser

Fig. 19 는 Shadowgraph 를 이용한 Micro hole 형상에 따른 액체 CO<sub>2</sub> 의 거시적 분사 형태를 보여준다. 거시적인 분사 형태의 결과 3 가지의 형상(Confusor, Straight, Diffuser) 중 Confusor 형상이 가장 많은 양의 액체 CO<sub>2</sub> 가 분사되었으며, 다음으로 Straight, Diffuser 순서로 액체 CO<sub>2</sub> 의 분사 량이 많음이 확인되었다. 거시적으로 나타낸 분사 형태를 수치적으로 분석하기 위해 Laser 를 활용한 광학 기법을 활용하여 취득한 영상 및 이미지를 토대로 Python 의 오픈 라이브러리 소스인 openCV 를 활용하여 이미지 분석을 진행한 결과는 Figure. 19, 20 을 통해 보여준다.

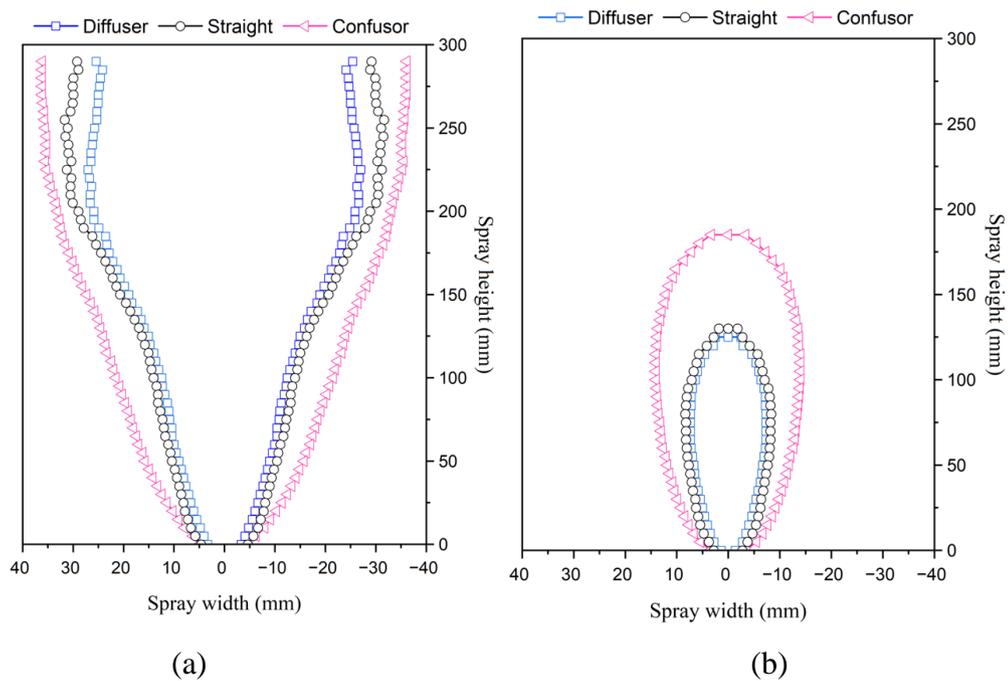


Fig. 20 Spray width (a) including the gas phase CO<sub>2</sub> (b) without the gas phase CO<sub>2</sub>

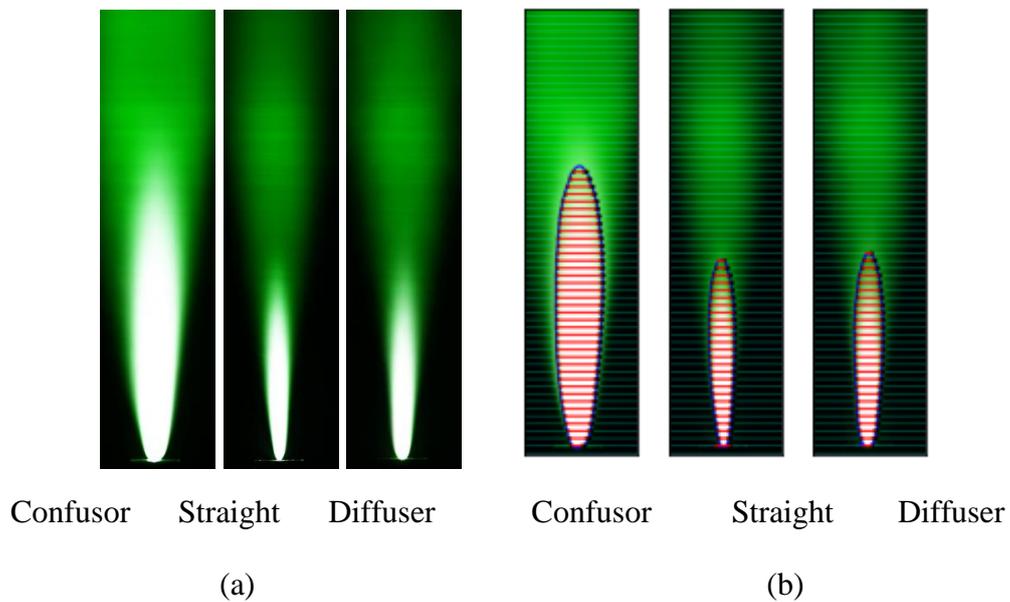


Fig. 21 (a)Average of 1000 images about each micro hole shape

(b)Micro hole shape distance using python openCV

먼저, 액체 CO<sub>2</sub> 를 분사 시 가스상을 포함한 CO<sub>2</sub> 의 분사 폭을 분석하였다. Confusor 의 경우 Micro hole outlet 으로부터 0 mm 높이에선 9.83 mm, 5mm 높이에선 12.43 mm, 10 mm 높이에선 15.89 mm 로 측정되었으며, 평균적으로 5mm 마다 1.08mm 씩 증가하는 경향을 보였으며, 290 mm 분사 높이에선 72.25 mm 의 분사 폭이 측정되어 다른 마이크로 홀 형상보다 가장 큰 분사 폭이 측정되었다.

반대로, Diffuser 형상의 경우 다른 형상에 비해 가장 낮은 분사 폭이 측정되었다. 마이크로 홀 outlet 으로부터 0 mm 높이에선 6.65 mm, 5 mm 높이에선 8.09 mm, 10 mm 높이에선 9.54 mm 의 분사 폭이 측정되었으며, 290 mm 의 분사 높이까지 평균적으로 분사 높이가 5 mm 증가할 때마다 0.76 mm 씩 증가하여 50.86 mm 으로 분사 폭이 측정되었다.

마지막으로, Straight 형상의 경우 분사 폭이 Diffuser 형상보다 약간 증가하였다. Micro hole outlet 으로부터 0mm 에서 분사 폭은 9.25 mm 로 측정되었으며, 5 mm 의 높이에선 11.56 mm, 10 mm 의 높이에선 13.29 mm 의 분사 폭이 측정되었다. 이후로 290 mm 의 분사 높이까지 5 mm 마다 평균 0.85 mm 씩 증가하는 경향을 보였으며, 290 mm 의 높이에선 28.38 mm 의 분사 폭이 측정되었다.

다음으로, 액체 CO<sub>2</sub> 를 분사 시 Gas 상을 제외한 Dry ice 영역에서의 분사 폭을 분석하였다. Dry ice 영역 역시 Confusor 형상이 가장 큰 분사 폭이 측정되었다. Confusor 형상의 경우 Micro hole outlet 으로부터 0 mm 높이에서의 분사 폭은 6.95 mm 가 측정이 되었으며, 5 mm 에선 10.84 mm, 10 mm 에선 13.34 mm 의 분사 폭이 측정되었다. 분사 높이 100 mm 까지 5 mm 마다 1.06 mm 씩 분사 폭이 증가하였으며, 분사 높이 100 mm ~ 115 mm 까지 28.08 mm 로 일정한 분사 폭을 보이다가 120 mm 부터 185 mm 까지 5 mm 마다 1.97 mm 씩 드라이 아이스의 분사 폭이 감소하는 경향을 보였다. Dry ice 의 영역이 측정되어 다른 형상에 비해 가장 넓은 분사 폭과 높은 분사 높이가 측정이 되었다.

Diffuser 형상의 경우 다른 형상에 비해 가장 적은 분사 폭과 낮은 분사 높이가 측정되었다. Micro hole outlet 으로부터 0 mm 높이에선 2.78 mm 의 분사 폭이 측정되었으며 5 mm 는 5.56 mm, 10 mm 는 6.95 mm 로 측정되었고, 65 mm 까지 5 mm 마다 0.92 mm 씩 분사폭이 증가하는 경향을 보였다. 이후 65 mm ~ 80 mm 까지 14.73 mm 으로 일정한 분사 폭이 측정되고, 85 mm 부터 125 mm 까지 - 1.61 mm 씩 분사 폭이 감소하는 경향을 보였다.

Straight 형상은 Micro hole outlet 에서 0 mm 의 분사 높이에선 5.56 mm, 5 mm 는 7.51 mm, 10 mm 에서는 9.45 mm 의 분사 폭을 보였으며, 65 mm 까지

0.83 mm 분사 폭이 증가하였으며, 이후 분사 높이 75 mm 까진 16.4 mm 로 분사 폭이 일정한 경향을 보였다. 분사 높이 80 mm 부터 130 mm 까지 1.31 mm 씩 분사 폭이 감소하는 경향을 보였다.

### 3.2 냉각 속도 분석

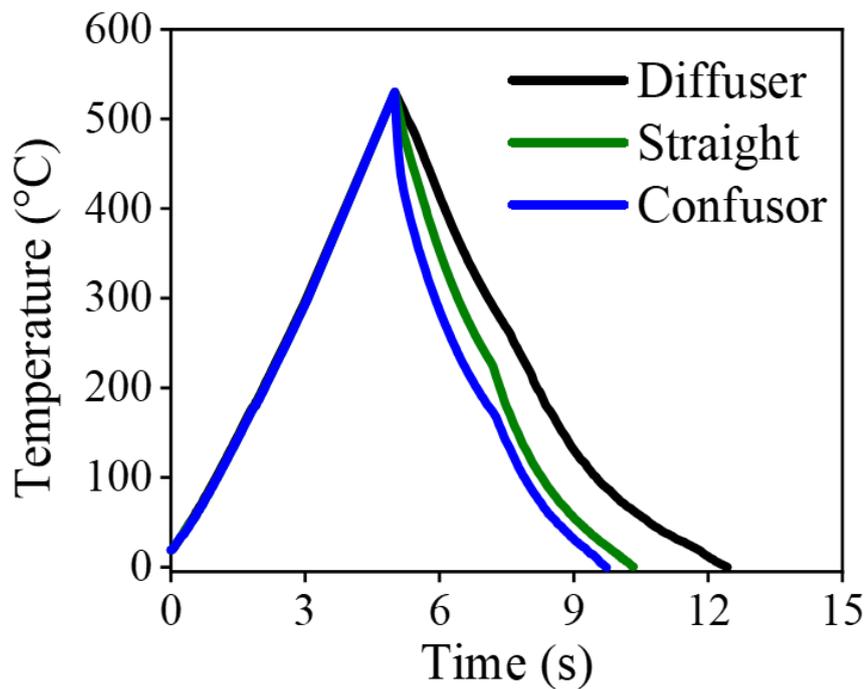


Fig. 22 The temperature history with AMed nozzles in different shapes

Fig. 22는 AA6061-T6소재의 중간 표면에 대한 각 Micro hole 형상에 따른 냉각 속도 결과를 보여준다. 상단 표면에서 AA6061-T6 소재가 가열과정 중 도달한 최고온도는 530 °C로 관찰되었다. 냉각 과정이 시작되면 접촉 지점부터 시작하여

온도가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 먼저, Confusor형상의 경우 530 °C에서 100 °C까지의 냉각 속도는 -148 °C/s로 다른 형상에 비해 가장 우수한 냉각 속도를 보여주었다. 그 다음으로 Straight 형상은 -130 °C/s의 냉각 속도를 보여주었으며, Diffusor 형상은 -95 °C/s로 다른 형상들에 비해 가장 낮은 냉각 속도를 보여주었다.

### 3.3 분사 영향 면적 분석

Fig. 23, 24은 각 Micro hole 형상 별 액체 CO<sub>2</sub>를 40 bar로 분사할 때 드라이아이스 면적을 분석한 결과를 보여준다. 먼저 모든 형상에서 0초 구간에서는 드라이아이스를 관찰할 수 없었다. Confusor 형상의 경우 1초간 분사하였을 때 132.12 mm<sup>2</sup>, 2초간 분사하였을 때 422.34 mm<sup>2</sup>, 3초간 분사 시 590.96 mm<sup>2</sup>, 4초간 분사 시 827.03 mm<sup>2</sup>, 5초간 분사 시 1042.42 mm<sup>2</sup>의 드라이아이스 면적을 보였으며, 1초마다 드라이아이스 면적이 평균적으로 156.61 mm<sup>2</sup>/s씩 드라이아이스 면적 증가 형태를 보였으며, 최종 20초간 분사하였을 경우 3107.79 mm<sup>2</sup>의 드라이아이스 면적을 형성하였다.

그 다음으로 Straight 형상의 경우 1초간 분사하였을 때 22.56 mm<sup>2</sup>, 2초간 분사하였을 때 123.41 mm<sup>2</sup>, 3초 분사 시 298.46 mm<sup>2</sup>, 4초 분사 시 467.03 mm<sup>2</sup>, 5초 분사 시 607.50 mm<sup>2</sup>의 드라이아이스 면적을 보였으며, 드라이아이스의 면적이

점차 면적이 평균적으로 1초당 86.63 mm<sup>2</sup>/s의 드라이 아이스 면적이 증가하여 최종 20초간 분사하였을 때 1669.51 mm<sup>2</sup>의 드라이 아이스 면적을 보였다.

마지막으로 Diffuser 형상의 경우 1초간 분사하였을 땐 11.04 mm<sup>2</sup>, 2초간 분사 시 77.10 mm<sup>2</sup>, 3초 분사 시 137.85 mm<sup>2</sup>, 4초 분사 시 332.146 mm<sup>2</sup>, 5초 분사 시 447.89 mm<sup>2</sup>의 드라이 아이스 면적이 형성되었으며, 1초가 지남에 따라 평균적으로 81.78 mm<sup>2</sup>/s씩 드라이 아이스 면적이 증가하여 최종으로 20초간 분사하였을 때, 1564.88 mm<sup>2</sup>의 드라이 아이스 면적을 형성하였다.

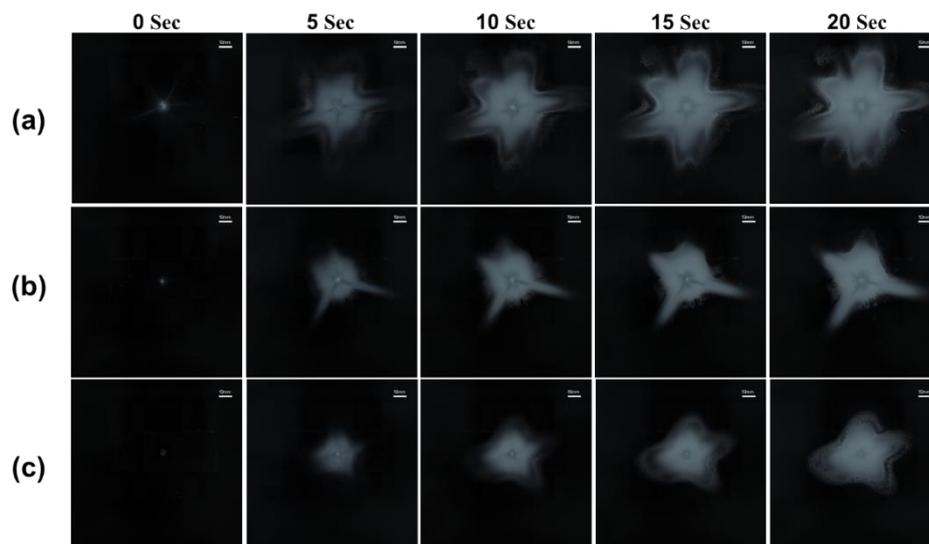


Fig. 23 Dry ice area measurement by time consuming  
 (a) Confusor (b) Straight (c) Diffuser

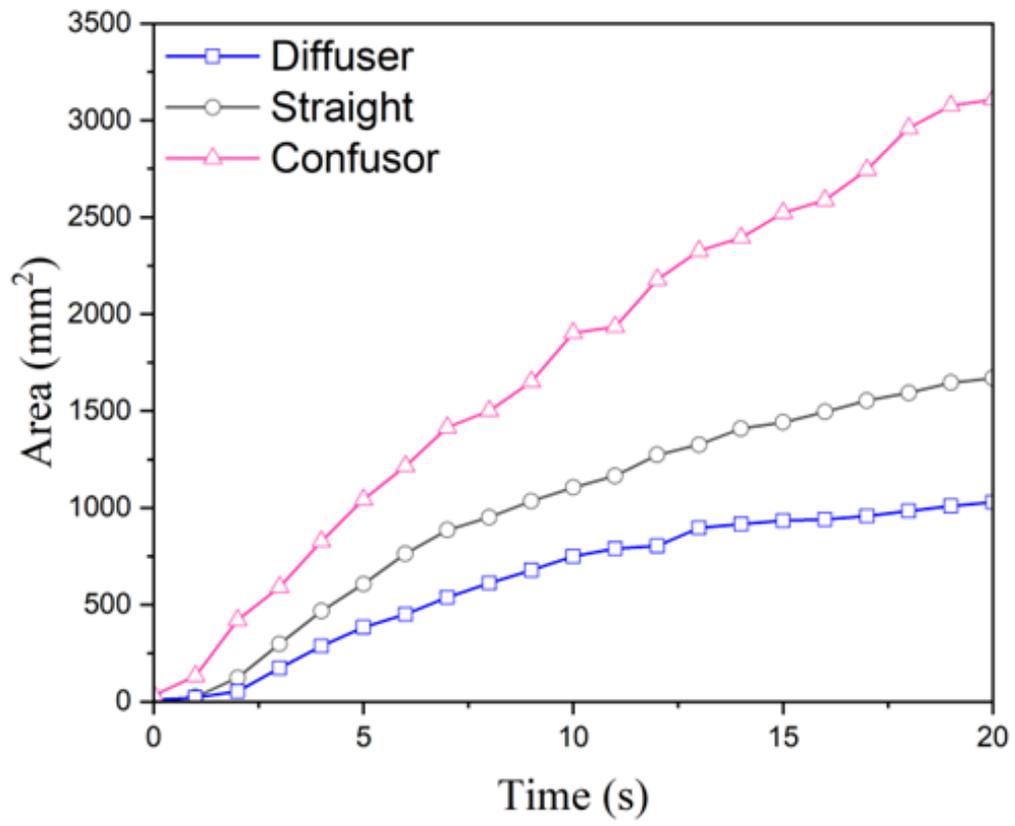


Fig. 24 Comparison of dry ice area by nozzle shape

#### IV. 결론

본 연구에선 휘발성 매체를 사용한 알루미늄 핫 스탬핑을 위해 액체 CO<sub>2</sub>의 분사 특성에 대해서 분석을 하였다. 휘발성 매체를 사용한 알루미늄 핫 스탬핑은 액체 CO<sub>2</sub>를 Micro hole로 분사 시, Joule-Thomson효과로 인해 생성된 드라이 아이스는 윤활 및 냉각을 동시에 할 수 있게 해주어 중요한 요소가 된다. 드라이 아이스 생성량은 Micro hole 형상에 의존되기 때문에 Micro hole 형상은 중요 요소가 된다. 따라서, Confusor, Straight, Diffuser 형상에 대해 분사 폭, 냉각 속도, 분사 영향 면적, Pull-out 시험 결과 모든 시험에서 Confusor 형상이 Straight, Diffuser 형상보다 성능이 좋았다.

Confusor 형상은 Micro hole outlet으로부터 0 mm 높이에서의 분사 폭은 6.95 mm가 측정이 되었으며, 5 mm에선 10.84 mm, 10 mm에선 13.34 mm의 분사 폭이 측정되었다. 분사 높이 100 mm까지 5 mm 마다 1.06 mm씩 분사 폭이 증가하였으며, 분사 높이 100 mm ~ 115 mm까지 28.08 mm로 일정한 분사 폭을 보이다가 120 mm 부터 185 mm까지 5 mm 마다 1.97 mm씩 드라이 아이스의 분사 폭이 감소하는 경향을 보였다. 이는 소재와 접촉면인 0 mm의 분사 높이에서 Confusor형방이 Straight, Diffuser 형상보다 1.25배, 2.5배 성능이 좋았으며, 5 mm 마다 드라이 아이스 폭 증가량 또한 Straight, Diffuser 형상보다 2배의 차이가 있

었다.

분사 영향 면적에서도 Confusor 형상이 Straight, Diffuser 형상보다 드라이 아이스 생성 면적이 약 1.9배 넓었다.

분사 폭 및 분사 영향 면적 분석 결과는 Confusor 형상이 Straight, Diffuser 형상보다 냉각 속도, Pull-out 시험 결과에 대해 입증이 된다. 휘발성 윤활제를 이용한 알루미늄 핫스탬핑 공정에서 드라이 아이스는 윤활 및 냉각에 큰 영향을 주는 요소이다. Confusor 형상이 Straight, Diffuser 형상보다 드라이 아이스 생성량이 약 2배가량 많기에 냉각 속도 및 윤활 성능이 뛰어남을 알 수 있었다. 또한, AA6061-T6에 대한 고용체 처리를 달성하는 냉각 속도는  $-66\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 로 알려져 있다. 흥미롭게도 Confusor 형상에 의해 유도된 냉각속도는  $-148\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 로 AA6061-T6가 고용체 처리에 필요한 냉각 속도보다 훨씬 더 높았다.

이러한 결과를 바탕으로 액체  $\text{CO}_2$ 를 이용한 알루미늄 핫스탬핑에서 Confusor 형상으로 제작을 할 경우 최적의 윤활 및 냉각 성능을 얻을 것으로 예상된다.

## References

- [1] G. Palumbo and L. Tricarico, *J. Mater. Process. Technol.* 184, 115 (2007).
- [2] Sotirov N, Simon P, Waltenberger T, Uffelmann D and Melzer C 2011 Verbessertes Umformverhalten von höchstfesten 7xxx-Aluminiumblechen durch Halbwarmumformen HTM J. Heat Treatm. Mat. 66 pp 37-43.
- [3] M. Kleiner, M. Geiger, and A. Klaus, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 52, 521 (2003).
- [4] S. Kurukuri, A.H. van den Boogaard, and A. Miroux, *J. Mater. Process. Technol.* 209, 5636 (2009).
- [5] H.J. Bong, F. Barlat, D.C. Ahn, H.-Y. Kim, and M.-G. Lee, *Int. J. Mech. Sci.* 75, 94 (2013) / Y.H. Moon, S.S. Kang, J.R. Cho, and T.G. Kim, *J. Mater. Process. Technol.* 132, 365 (2003)
- [6] H. Laurent, J. Coer, P.Y. Manach, M.C. Oliveira, and L.F. Menezes, *Int. J. Mech. Sci.* 93, 59 (2015).
- [7] T. Lin, H.W. Song, S.H. Zhang, M. Cheng, W.J. Liu, Y. Chen, Microstructure, mechanical properties, and toughening mechanisms of a new hot stamping-bake toughening steel, *Metall Mater Trans*, 46 (9) (2015), pp. 4038-4046
- [8] Raabe, D. Recovery and recrystallization: Phenomena, physics, models, simulation. In *Physical Metallurgy*, 5th ed.; Laughlin, D.E., Hono, K., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014; pp. 2291–2397.
- [9] B-A Behrens, S Hubner and H Vogt Formability of 7000 aluminum alloys in warm and hot forming condition
- [10] K. Mori, Y. Okuda, (2010), Tailor die quenching in hot stamping for producing ultra-high strength steel formed parts having strength distribution, *CIRP Annals*, 59 (1) 291-294.
- [11] T. Maeno, K.-I. Mori, M. Fujimoto, (2015), Improvements in productivity and formability

by water and die quenching in hot stamping of ultra-high strength steel parts, CIRP Annals, 64 (1) 281–284.

[12] Geng, M., Cai, L., Kim, J.-C., Choi, H.-S., Hong, S.-T., 2023. Recent Development of Dry Metal Forming. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 24, 309–324.

[13] Vollertsen, F., Schmidt, F., 2014. Dry metal forming: Definition, chances and challenges. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 1, 59–62.

[14] Liewald, M., Wörz, C., Riedmüller, K. R., 2021, Characterization of a Novel Aerostatic Lubrication System for Deep Drawing Processes, CIRP Annals, 70/1:239-242.

[15] Cai L, Zhang S, Gao K, Tran VL, Geng M, Chung K-H, Hong S-T (2023) Integrated Lubrication and Quenching Using a Volatile Medium and Additive Manufactured Die in Hot Stamping of Precipitation Hardening Aluminum Alloy. CIRP Annals 72(1): 217-220.

[16] Zahedi, E., Woerz, C., Reichardt, G., Umlauf, G., Liewald, M., Barz, J., Weber, R., Graf, T., 2018. Lubricant-free deep drawing using CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> as volatile media injected through laser-drilled microholes. MATEC Web of Conferences 190, 14007.