



# 레이저 급속 표면용융에 따른 일방향응고 247LC 초내열합금의 에피택셜 성장 및 응고균열 억제 방안

김경민 · 천은준\*

부경대학교 신소재시스템공학과

## Method of Suppressing Solidification Cracking by Laser Surface Melting and Epitaxial Growth Behavior for Directionally Solidified 247LC Superalloy

Kyeong-Min Kim and Eun-Joon Chun\*

Department of Materials System Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

**Abstract:** In this study, the relationship between solidification cracking and epitaxial growth behavior with the high-speed laser surface melting of a directionally solidified 247LC superalloys was fundamentally and metallurgically investigated, to develop a successful welding procedure for the next generation of gas turbine blades. Under typical laser surface melting conditions (scan speed: 50 mm/s, heat input: 40 J/mm), severe solidification cracking phenomena occurs. The key metallurgical factors of solidification cracking have been identified as solidification segregation-assisted pipeline diffusion behavior at the solidification grain boundary, and in the randomly formed polycrystalline melting zone microstructure. In addition, under extremely low heat input and high-speed laser beam scan conditions (scan speed: 1000 mm/s, heat input: 2 J/mm), an effective surface melting zone can be obtained within a single directionally solidified grain under a relatively high-energy beam density (65 J/mm<sup>2</sup>) using the characteristics of single-mode fiber lasers. Results reveal that the laser melting zone successfully shows a 99.9% epitaxial growth achievement ratio. Because of the superior epitaxial growth ratio within the laser surface melting zone, and the rapid solidification phenomena, formation of a solidification grain boundary and solidification segregation-assisted pipeline diffusion behavior can be suppressed. Finally, a solidification crack-free laser melting zone can thus be achieved.

(Received 9 December, 2022; Accepted 28 December, 2022)

**Keywords:** directional solidification, 247LC superalloy, laser surface melting, epitaxial growth, solidification cracking

### 1. 서 론

일방향응고 및 단결정 니켈 초내열합금은 우수한 고온 기계적 성질이 요구되는 발전터빈 및 항공기엔진의 핵심 고온부품(블레이드, 베인 등)에 적용되고 있으며, 해당 부품의 제조 및 유지보수 시에는 다양한 목적으로 용접 및 적층제조 공정이 사용될 수 있다. 하지만 해당 초내열합금 대부분이 5mass% 이상의 Al + Ti 함량을 가진 난용접성(difficult-to-weld) 소재이며, 특히 빈번한 용접 고온균열 발생이 문제 시 되는 것으로 잘 알려져 있다 [1]. 해당 소재

들의 건전한 용접 및 적층제조부를 얻기 위해서는 각 고온 균열 거동의 면밀한 검토와 야금학적 억제방안 도출이 전제되어야 한다. 특히, 일방향응고 및 단결정 초내열합금의 경우, 용접부와 적층제조부에서도 모재의 결정방위 특성을 유지시킬 수 있는 에피택셜(epitaxial) 성장기술이 요구되는 경우가 많아, 고온균열(특히 응고균열)과 에피택셜 성장거동을 동시에 고려한 최적 공정 설계는 필수적이라 할 수 있다. 이러한 관점에서 Nishimoto et al.은 CMSX-4 합금 가스터빈 블레이드의 재생부품 제조를 목적으로 René 142 용가재를 이용한 레이저 클래딩을 고안하였으며, 주상-등축 천이(Columnar to Equiaxed Transition) 이론을 기반으로 다층 클래드부의 단결정 성장 기술에 대해 보고한 바 있다 [2]. Zhou et al.은 Re 저감형 니켈 초내열합금의 DED(Direct Energy Deposition) 적층제조 건전성을 검토

- 천은준: 교수, 김경민: 석사과정

\*Corresponding Author: Eun-Joon Chun

[Tel: +82-51-629-6379, E-mail: ejchun@pknu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

**Table 1.** Chemical composition of material used (mass%).

Material	Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Ta	Ti	Al	B	Zr	Hf	P	S
247LC	Bal.	0.07	8.1	9.2	0.5	9.5	3.2	0.7	5.6	0.015	0.015	1.4	<0.0006	<0.0002

하였으며, 특히 단결정 성장 시 레이저빔의 스캔조건(에너지 밀도, 레이저빔 이송속도 등)에 따른 응고조직의 변화 및 고온균열 발생과의 상관관계에 대해서 보고한 바 있다 [3]. 그리고 Lu et al. 또한 CMSX-10 합금의 DED 적층 제조 시 단결정 성장 특성에 대해 검토한 바 있으며, 특히 응고결정립 간의 방위차에 따른 고온균열 발생거동을 심도 있게 고찰하였으며, 7° 이상의 방위차를 가진 결정립계에서 우선적으로 고온균열이 발생할 수 있음을 제시한 바 있다 [4]. 이와 유사한 결과는 Chen et al. 에 의해서도 보고되고 있다 [5]. 이처럼 응고균열과 에피택셜 성장에 대한 선행 연구들은 대부분이 단결정 초내열합금에 초점을 맞추고 있으며 [6], 일방향응고 초내열합금에 대한 선행연구 결과는 비교적 부족한 실정이다 [7-9]. 본 저자진은 일방향응고용 247LC 초내열합금 용접부에서 문제 시 되는 응고 [10,11] 및 액화균열 [12-16]에 대해 균열 민감도와 저감방안을 기초적으로 보고한 바 있으나, 이 또한 247LC 합금의 다결정 주조재를 대상으로 한 검토 결과들로, 일방향응고 소재에 적용하기 위해서는 각 고온균열 거동과 에피택셜 성장의 상관관계 및 무균열 용접 공정 조건의 도출이 추가적으로 필요한 실정이다.

한편, 응고 과정에서 완전한 에피택셜 성장을 얻기 위해서는 무작위의 결정방위를 가진 등축 텐드라이트, 즉 스트레이 결정(stray crystal) 성장의 억제가 필요하며, 이를 위해서는 저입열 용융 공정의 적용이 필요한 것으로 알려져 있다 [2]. 이러한 관점에서 전술한 에피택셜 성장에 대한 선행 결과들을 포함한 다양한 연구들이 레이저를 비롯한 저입열 공정을 적용하고 있다 [6]. 최근의 에피택셜 성장과 관련된 용융공정의 입열량은 대략 20–50 J/mm 범위를 사용하고 있으나 [6], 에피택셜 성장과 응고균열 억제에 대한 보다 심도있는 검토를 위해서는 추가적인 입열량 저감이 필요한 실정이다. 하지만 기존 선행 연구들에서 사용된 레이저 빔전파계수( $M^2$ )는 5 이상으로, 이는 추가적인 입열량 저감 시 불충분한 에너지 밀도로 인한 유효 용융부 확보에 한계점이 존재할 수밖에 없다.

따라서 본 연구에서는, 247LC 일방향응고 초내열합금 가스터빈 블레이드 제조시의 건전한 용접부 확보를 목적으로, 급속 레이저 표면용융 적용성을 검토하고자 한다. 특히 선행연구에서 고려되지 않았던 고에너지밀도 레이저 및 초저입열 급속용융을 적용하여, 247LC 합금 일방향응고 미

세조직 특성과 에피택셜 성장거동, 그리고 응고균열 발생의 상관관계를 규명하였으며, 최종적으로 일방향응고 247LC 초내열합금 블레이드의 무균열 용접부 확보 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 247LC 초내열합금

다결정주조 및 일방향응고 주조된 상용 247LC 초내열합금을 사용하였으며, 화학성분은 표 1에 기재하였다. 본 논문에서는 각각을 247LC-CC 및 247LC-DS로 명명한다. 주조재는 용체화 (1505 K – 120분) 및 시효 열처리(1145 K – 1200분)를 적용하였다. 열처리된 소재는 150 × 50 × 3 mm으로 가공하여 최종 시험편을 제작하였다.

### 2.2. 레이저 표면용융

싱글모드 파이버 레이저(YLS-2000-SM, IPG)를 이용해 표면용융처리를 실시하였다. 그림 1은 이를 위한 레이저 장치 및 실험과정을 나타낸다. 본 레이저 발전기는 최대출력 2 kW, 파장 1070 nm, 그리고 1.05의  $M^2$  값을 가지며, 원경 스캐너(intelliSCAN20, Scanlab)와 연동하여 정초점 조건에서 38  $\mu$ m의 빔 직경을 가지도록 설정하였다. 표 2는 대표적인 레이저 용융 조건을 나타낸다.

표면 용융에는 직선(linear) 및 원형워블(wobble)의 빔 스캔방식을 적용하였고, 레이저 출력은 2 kW로 고정하였다. 특히 직선 스캔 시에는 레이저빔 스캔속도 50–1000 mm/s 및 입열량 2–40 J/mm에서 비초점거리를 0, +5, +10 mm으로 다변화시켜, 65–1341 J/mm<sup>2</sup> 범위의 에너지 밀도를 적용 및 검토하였다. 원형워블 시에는 빔스캔속도 1000 mm/s, 입열량 2 J/mm, 비초점거리 +10 mm 조건하에서 진폭 0.1 mm, 진동수 15000 Hz를 적용하였다.

### 2.3. 미세조직 분석 및 경도 평가

레이저 표면용융부에 대해 성분분포 및 상분석을 실시하였다. 성분분포 분석에는 전자탐침미세분석기(Electron Probe Micro Analyzer, EPMA; JXA-8530F, JEOL)를 사용하였다. 미세 상분석에는 후방산란전자회절(Electron Backscatter Diffraction, EBSD; Velocity Super, EDAX) 및 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy,

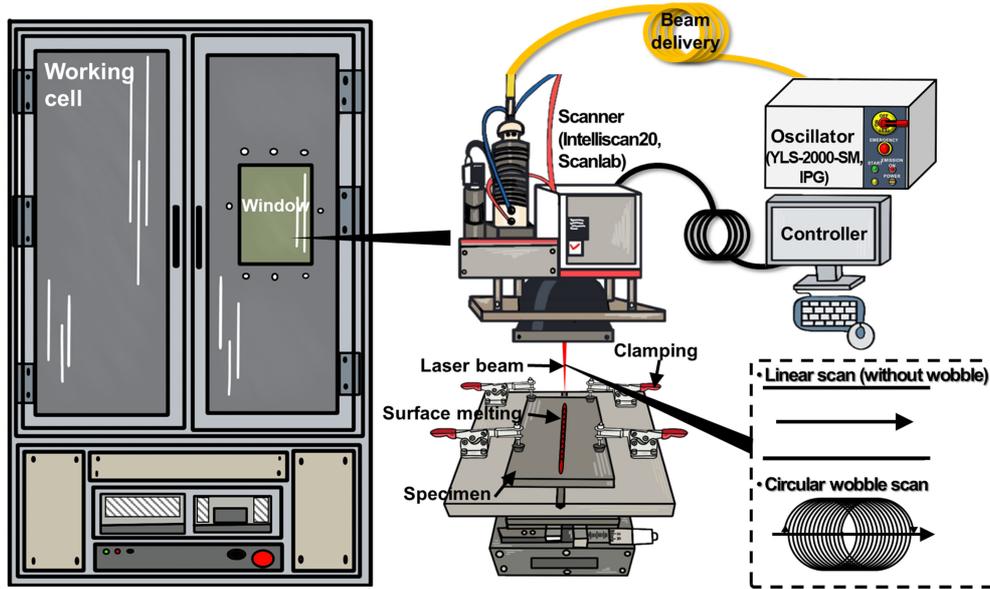


Fig. 1. Schematic description of single-mode fiber laser facility and surface melting experiment.

Table 2. Conditions of laser surface melting by single-mode fiber laser.

Linear scan (without wobble)				
Laser power (kW)	2			
Scan speed (mm/s)	50	1000		
Heat input (J/mm)	40	2		
Defocusing distance (mm)	0	0	+5	+10
Energy density (J/mm <sup>2</sup> )	1341	67	66	65
Circular wobble scan				
Laser power (kW)	2			
Scan speed (mm/s)	1000			
Defocusing distance (mm)	+10			
Wobble amplitude (mm)	0.1			
Wobble frequency (Hz)	15000			
Wobble speed (mm/s)	9420			
Energy density (J/mm <sup>2</sup> )	6.90			

TEM; Talos F200X, Thermo Fisher Scientific)을 사용하였으며, TEM 분석 시에는 에너지분산형분광분석기(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)를 이용한 상의 성분분석도 동시에 수행하였다. TEM 분석을 위한 샘플은 집속이온빔 장치(Focused Ion Beam, FIB; Scios2, Thermo Fisher Scientific)를 이용해 채취하였다. 레이저 용융부의 기계적 성질 평가를 위해 비커스 경도(HV100, Mitutoyo)를 평가하였다. 시험은 하중 1 kgf, 하중 유지시간 5 초의 조건에서 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 다결정 용융부의 미세조직 및 응고균열 발생거동

그림 2는 에너지밀도 1341 J/mm<sup>2</sup>(스캔속도 50 mm/s)의 레이저 빔 조사조건을 적용한 직선 용융부 표면의 EBSD 분석결과를 나타내고 있으며, (a)는 247LC-CC, (b)는 247LC-DS 합금에 대한 결과이다. IQ(Image Quality) 분석결과에 나타난 바와 같이, 두 소재 용융부에는 응고균열 발생이 확인되며, 대부분의 응고균열은 열영향부의 액화균열로 연결되는 양상을 보인다. 각 소재의 IPF(Inverse Pole Figure) 결과를 보면, 용융부의 대부분은 무작위의 결정방위를 가지는 다결정 미세조직을 나타내며, 응고균열 발생 위치는 용융부 경계선 부근 일부 존재하는 에피택셜 성장된 결정립계로 확인된다. 특히 해당 결정립계는 20° 이상의 방위차를 갖는 것으로 측정된 바, 다결정 용융부의 주된 응고균열 발생 위치는 응고결정립계(Solidification Grain Boundary)로 판단되었다 [17].

그림 3은 그림 2(b)에서 확인된 247LC-DS 레이저 용융부 응고균열 특성에 대한 EPMA 분석결과를 나타낸다. 후방산란전자(Backscattered Electron, BSE) 이미지를 통해 응고결정립계에서 발생한 응고균열은 용융부 경계선을 중심으로 액화균열과 연결된 양상을 명확히 확인할 수 있으며, 용융부에서 응고편석된 용질원소(Hf, C, B)가 연속적으로 분포함을 확인할 수 있다. 해당 용질원소는 247LC 합금의 응고 시 응고편석되어 고상액상 공존온도 범위를 확대시키고, 최종적으로 응고균열 발생을 촉진시

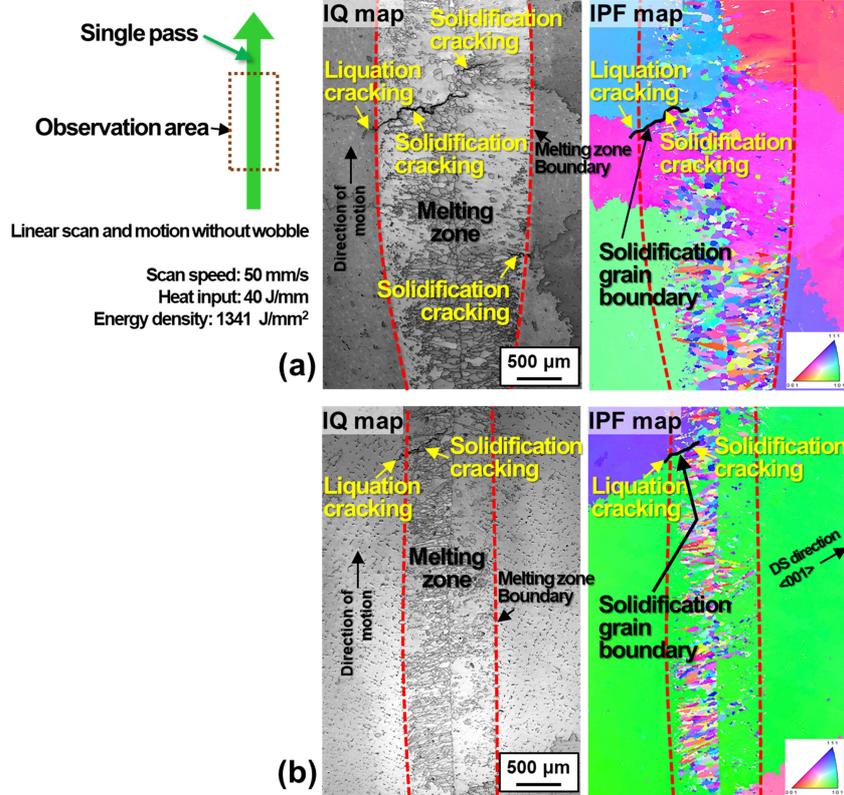


Fig. 2. EBSD images of single-pass laser melting surface for (a)247LC-CC and (b)247LC-DS specimens. \* IQ: image quality, IPF: inverse pole figure, DS: directional solidification

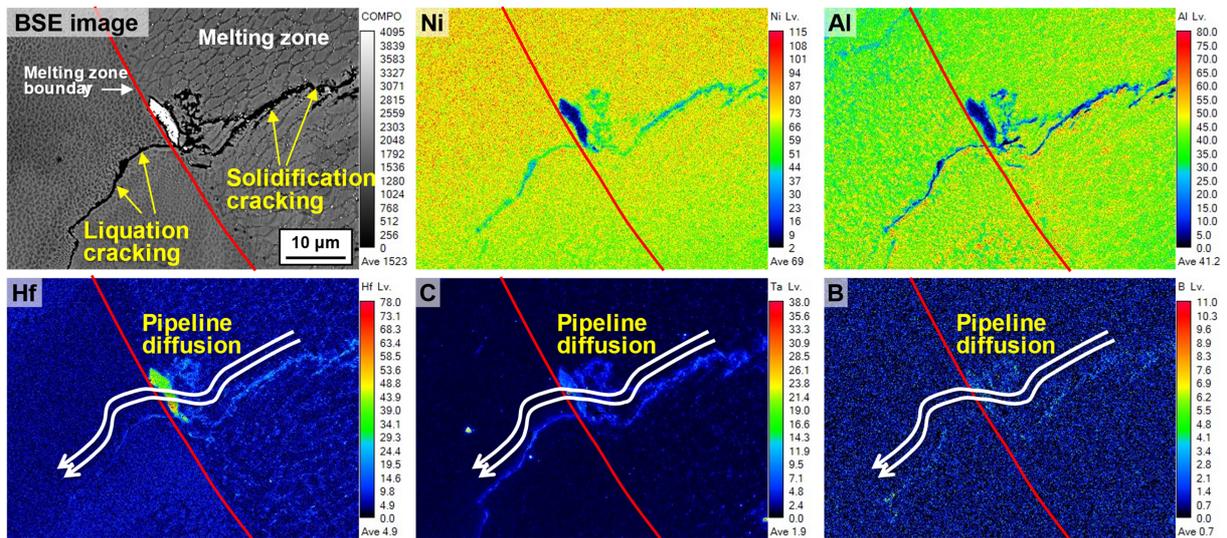


Fig. 3. Element distribution of laser melted surface for 247LC-DS specimen analyzed by EPMA. \* BSE: backscatter electron

키는 것으로 알려져 있다 [1]. 이러한 응고결정립계 상의 연속적인 편석거동은 파이프라인 확산(pipeline diffusion)으로 잘 알려져 있어[17], 247LC 합금 레이저 용융부의

응고균열을 저감시키기 위해서는 응고결정립계의 형성, 유해 원소 응고편석 및 파이프라인 확산 거동 억제에 필요함을 시사한다.

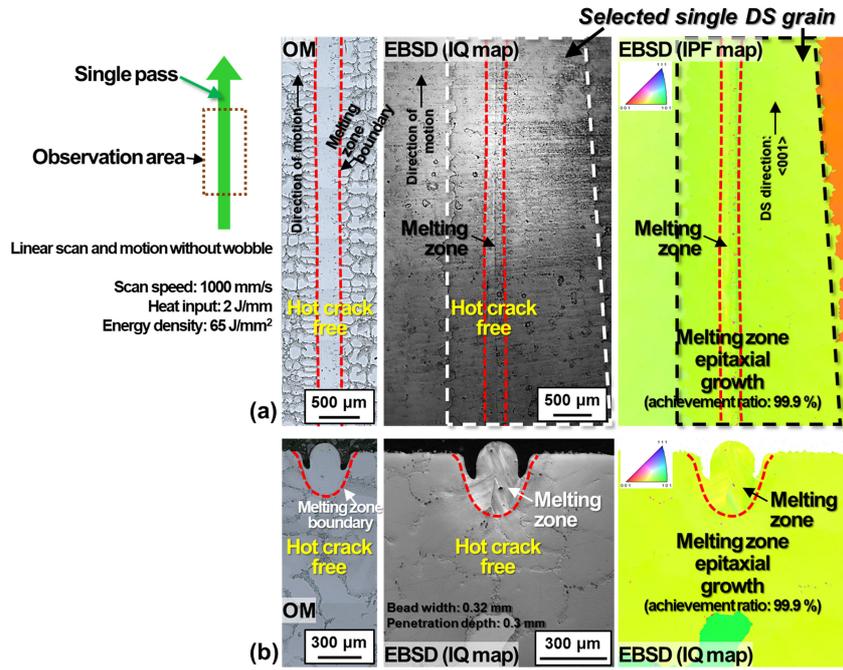


Fig. 4. OM, EBSD images of single-pass laser melting (a) surface and (b) cross-section for 247LC-DS specimen.

### 3.2. 급속용융에 따른 일방향응고 결정립의 에피택셜 성장 및 응고균열 저감 상관관계

응고결정립계 상의 파이프라인 확산 및 그에 따른 응고균열 발생 억제 방안으로, 단일 결정방위를 갖는 일방향응고 결정립 내에 레이저 빔을 조사하여, 레이저 용융부의 에피택셜 성장 거동과 응고균열 발생의 상관관계를 검토하였다. 그림 4는 247LC-DS 합금 싱글패스(single-pass) 레이저 용융부의 대표적인 (a)표면, (b)단면 미세조직 분석결과를 나타낸다. 65 J/mm<sup>2</sup> 에너지밀도(스캔속도 1000 mm/s, 입열량 2 J/mm)의 레이저 빔 조사 조건 하에서, 용융부는 단일 일방향응고 결정립 내에 형성시킬 수 있었고(용융부 폭: 약 0.32 mm, 용융부 깊이: 약 0.3 mm), IPF 분석결과 99.9%의 용융부는 모재의 결정방위와 동일한 에피택셜 성장거동을 나타내는 것으로 확인되었다. 즉, 그림 2의 레이저 용융 조건 대비 급속용융 및 초저입열 조건을 적용한 결과, 전체 용융부를 에피택셜 성장시킬 수 있었다. 결과적으로 OM, IPF 결과에서 확인할 수 있듯이, 표면 및 단면에서 응고균열 발생은 완전히 억제되었음을 알 수 있다.

그림 5는 247LC-DS 합금에 더블패스(double-pass) 레이저 용융을 적용한 표면 미세조직 분석 결과를 나타낸다. 단일 레이저 빔 조사조건은 그림 4와 동일하다. IPF 분석 결과로부터 더블패스 용융부에서도 98.3%의 높은 에피택

셜 성장률을 확인할 수 있으며, GB(Grain Boundary)분포 이미지로부터는 각 패스의 용융부 경계선을 제외하면 용융부 내에서는 고각 결정립계 형성 또한 상당히 억제되었음을 확인할 수 있다. 결과적으로, IQ 분석 이미지와 같이 레이저 용융부 응고균열 발생은 완전히 억제된, 그림 4와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 결과는, 일방향응고 247LC 초내열합금 블레이드 실제 텅용접 시 용접부 응고균열 억제를 위해서는, 용접부 전체의 에피택셜 성장 확보에 따른 고각 응고결정립계 형성 및 파이프라인 확산 거동의 억제가 필수적임을 시사하며, 일방향응고 블레이드의 결정방위 특성과 용접부 전체가 에피택셜 성장될 수 있는 용접 공정의 적용이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

한편 블레이드 제조용접 시에는 원형 또는 타원형 용접 경로에 대한 고려가 필요하며, 따라서 그림 4, 5에서 얻어진 응고균열 억제 방안의 해당 용접경로 적용 가능성에 대해 검토할 필요가 있다. 그림 6은 그림 5의 조건을 적용한 247LC-DS 합금의 트리플패스(triple-pass) 레이저 용융부 표면 분석결과를 나타내며, (a)는 원형, (b)는 타원형 경로를 부여한 결과이다. 세부적인 용융부 치수(곡률)는 그림 6에 함께 기재하였다. 직선 경로의 레이저 용융과 달리 곡률이 부가됨에 따라 용융부에는 무작위한 결정방위의 다 결정립 및 상당량의 저각 및 고각결정립계 형성을 확인할 수 있으며, 에피택셜 성장률은 69.0%(그림 6(a) 원형 경로

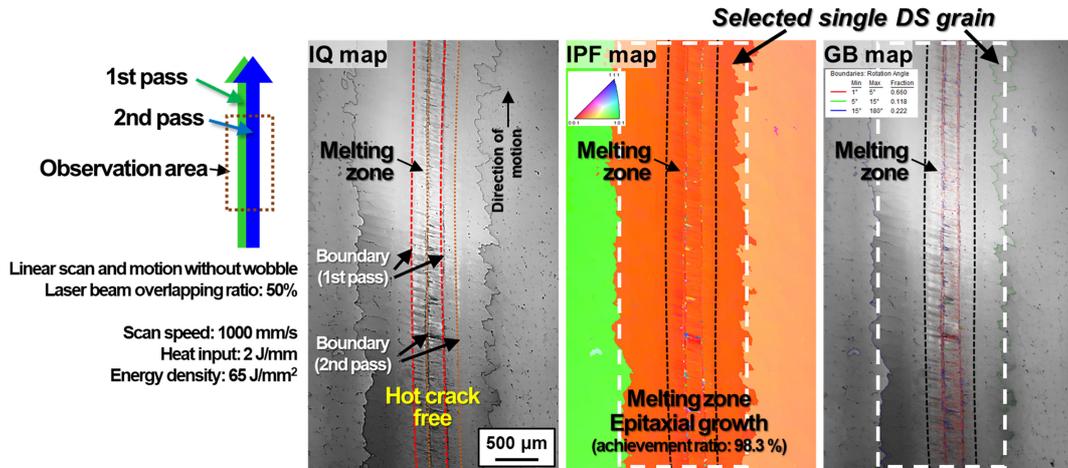


Fig. 5. EBSD images of double-pass laser melting surface under linear scan for 247LC-DS specimen. \*GB: grain boundary

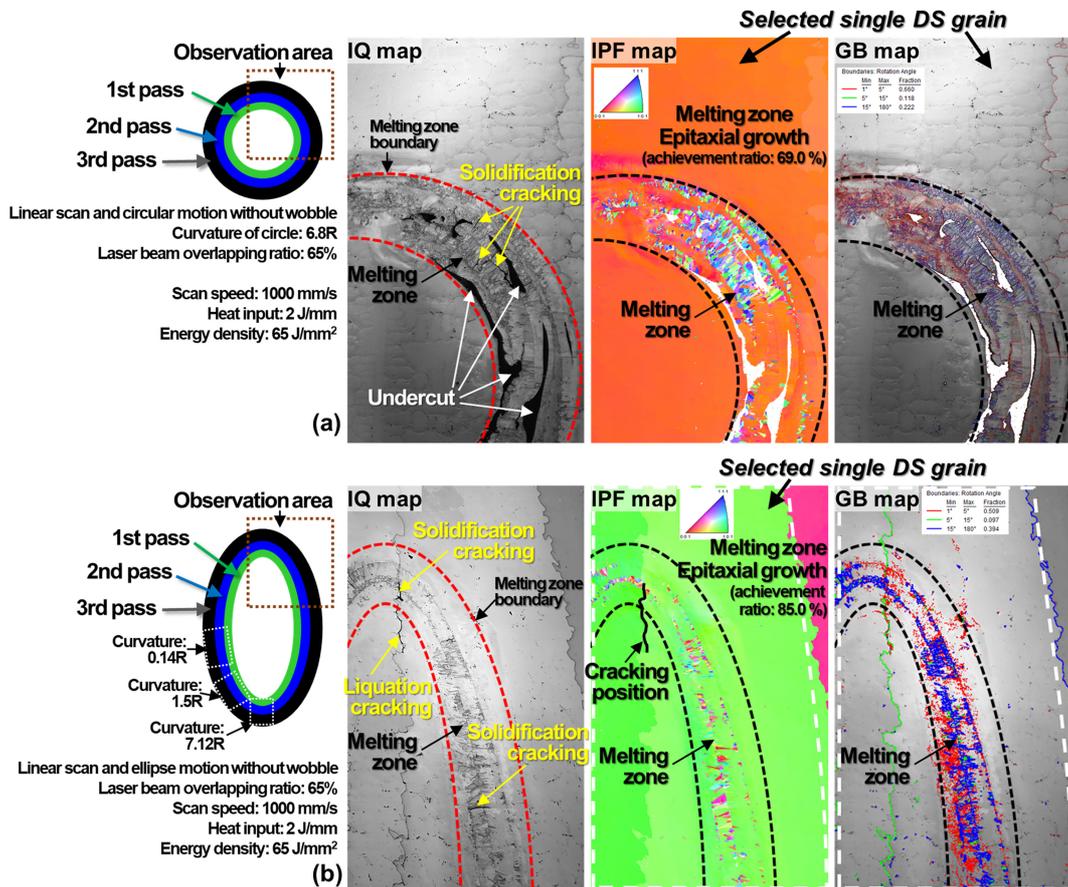


Fig. 6. EBSD images of triple-pass laser melting surface under (a) circular and (b) ellipse motion for 247LC-DS specimen.

) 및 85.0%(그림 6(b) 타원형 경로)로 측정되었다. 그 결과 상당량의 응고균열 발생이 확인되었으며, 특히 타원형 경로에서는(그림 6(b)) 가장 곡률이 큰 (7.12R)위치에서, 5°의 비교적 낮은 방위치를 가지는 결정립계에서도 파이프라

인 확산에 기인한 응고균열 발생을 관찰할 수 있었다.

이러한 현상을 고찰하기 위해, 원형위블 스캔을 이용한 레이저 용융을 실시하였으며, 그림 7은 대표적인 결과를 나타낸다. 위블과 같은 열원의 오실레이션(oscillation)은 응

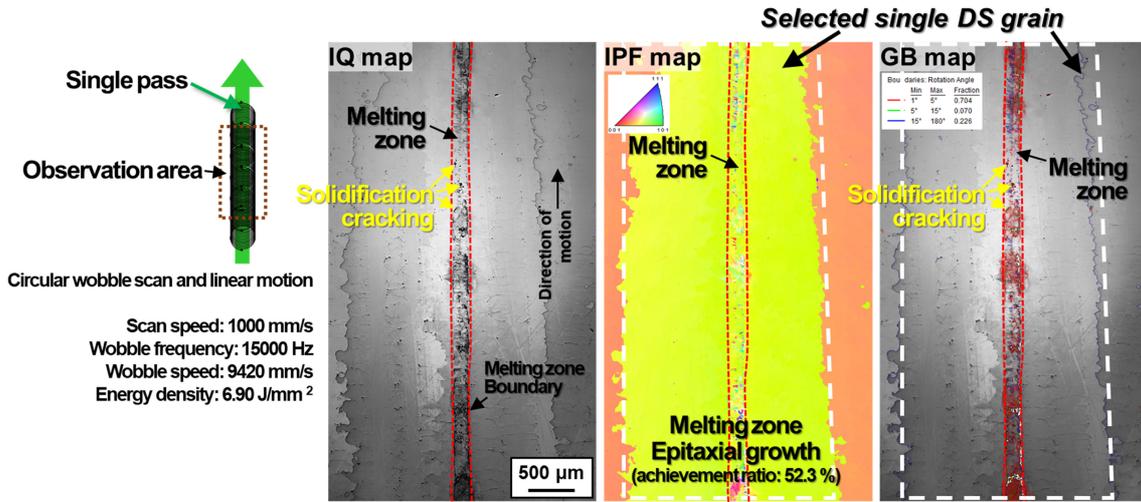


Fig. 7. EBSD images of single-pass laser melting surface under circular wobble scan for 247LC-DS specimen.

고시의 국부적인 응고속도와 온도구배 변화를 야기하며, 그 결과 무작위한 결정립 형태 및 결정방위를 갖게 하는 것으로 잘 알려져 있다 [10]. 이러한 현상은 그림 7에서도 확인 가능하다. 무작위한 다결정 미세조직(IPF 이미지) 및 낮은 에피택셜 성장률(52.3%)의 낮은 값을 보이며, 결과적으로 용융부 내에 형성된 고각결정립계를 중심으로(GB 이미지) 응고균열 발생(IQ 이미지)과 이어지는 양상을 보인다. 즉, 원형경로 적용 또한 일시적인 위블 스캔의 조건에 해당될 수 있으므로, 실제 블레이드 용접 시에는 직선 경로를 기반으로 한 공정설계 또는 곡률 경로 상의 에피택셜 성장 방안에 대한 사전 고려가 필요함을 시사한다.

### 3.3. 무균열 레이저 용융부의 미세조직과 경도

3.2절에서 제시한 응고균열이 완전 억제된 247LC-DS 초내열합금 용융부 확보 결과는, 동일 소재에 대한 유사한 최근 선행 연구 상에도 보고되지 않았던 새로운 결과물로 [18,19], 해당 미세조직에 대한 대표적인 결과를 함께 제시할 필요가 있다. 그림 8은 그림 5의 더블패스 레이저 표면 용융부 (a)EPMA 및 (b)TEM 분석 결과를 나타낸다. 그림 8(a) BSE 이미지로부터 셀(cell) 간격 약 1 μm 수준의 미세한 셀 응고조직을 관찰할 수 있으며, 셀 경계에는 합금원소 Ta, Hf 및 C의 응고편석 및 백색 상의 형성이 관찰되었다.

그림 8(b)에 나타난 TEM 분석결과, 해당 백색상은 Ta, Hf 및 C로 구성된 MC 탄화물로 판단되었고, 레이저 용융부 상의 분율은 약 0.3%로 측정되었다. 이는 247LC 합금의 주조재 및 아크용접부에서 측정된 MC 탄화물 분율 대비 상당량 저감된 값을 알 수 있다 [13,16]. 셀 경계에

존재하는 247LC 합금의 MC탄화물은 응고 최종단계에서 응고편석과 연계되어 형성되는 것으로 알려져 있다 [11,13,16]. Thermo-calc 소프트웨어(2021a, TCNi9)로부터 도출한 Ni-Ta, Ni-Hf, Ni-C 2원계 상의 평형분배계수( $k_{eq}$ )는 각각 0.88, 0.05, 0.22이며, Aziz가 제안한 응고속도의존형 분배계수( $k_v$ ) 계산과정을 고려할 때 [20], 본 연구에서 확인된 급속 레이저 용융부의 낮은 MC 탄화물 분율은 급속응고 시의 Ta, Hf, C의 분배계수 증가 효과에 따른 응고편석 저감에 의한 결과로 사료된다. 더불어 그림 3에 나타난 바와 같이, 응고균열 발생에는 용융부에서 응고편석된 용질원소(Hf, C 등)의 파이프라인 확산이 큰 영향을 미치는 바, 그림 5에서 확인된 급속용융부 응고균열 억제 현상은 에피택셜 성장에 따른 응고결정립계 형성억제 뿐만 아니라, 급속용융 적용에 따른 해당 용질원소의 응고편석 저감과 그에 따른 응고균열 민감도 감소의 영향도 일부 존재할 것으로 추정된다.

그림 9는 그림 5에 나타난 247LC-DS 합금의 무균열 레이저 용융부의 경도평가 결과를 나타낸다. 경도측정 위치는 용융부 표면 OM 이미지에 나타내었다. 레이저 용융부 전체는 약 330 HV의 경도를 나타내며, 이는 247LC 모재와 동등수준에 해당하는 값을 확인할 수 있다. 더불어 초저입열 레이저 조사 조건 적용을 통해, 국부적인 경도 저하 등의 열영향부 형성 또한 억제되었음을 추가적으로 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 확보한 레이저 표면용융 조건은 급속응고 효과에 따른 응고편석 및 고온균열의 억제뿐만 아니라 기계적 성질 관점에서도 유의미한 공정조건으로 사료된다.

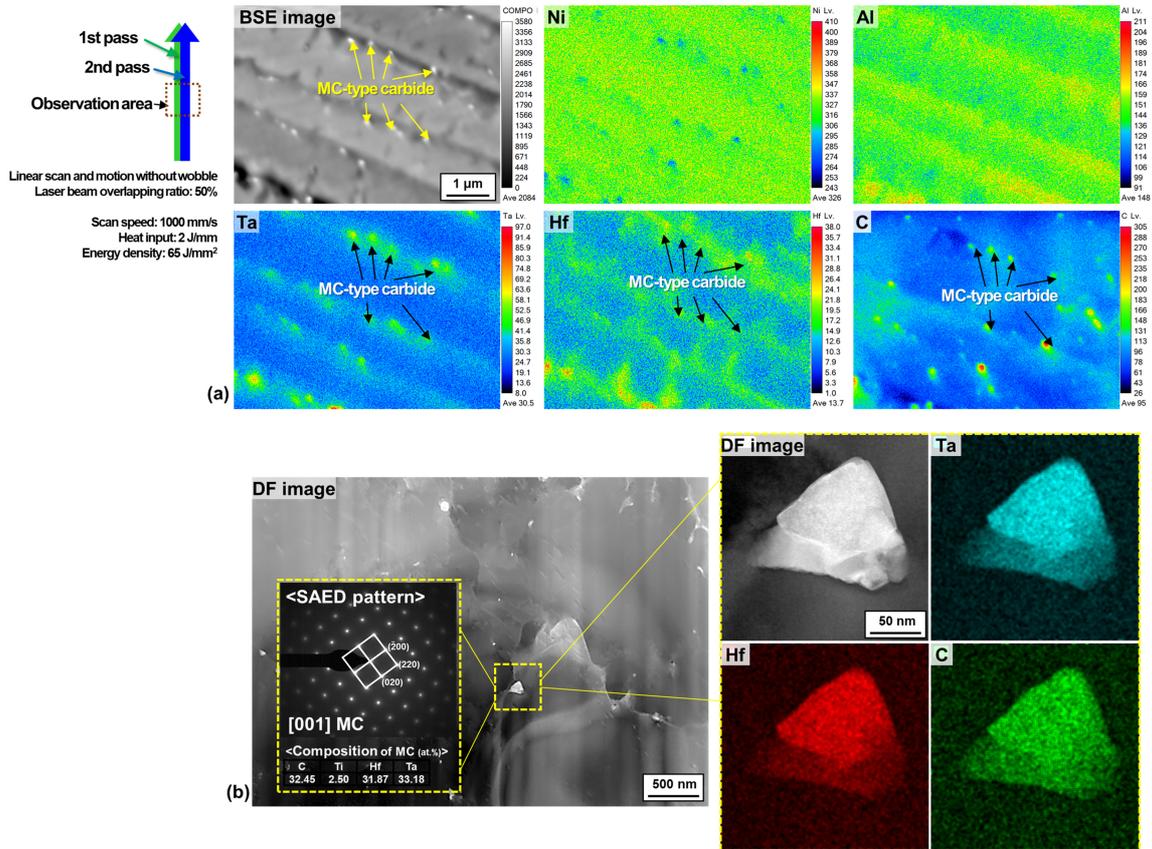


Fig. 8. Representative microstructure of hot crack-free laser melting zone of 247LC-DS specimen; (a) element distribution of the melting zone and (b) phase characterization by EPMA and TEM. \*DF: dark field

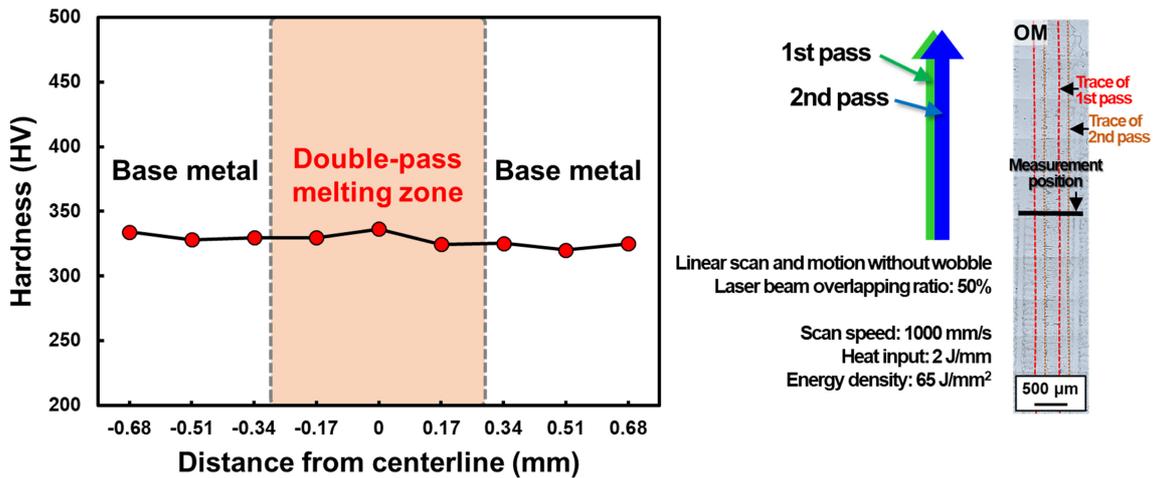


Fig. 9. Hardness distribution of hot crack-free laser melting zone of 247LC-DS specimen.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 난용접성 247LC 일방향응고 초내열합금이 적용된 가스터빈 블레이드의 건전한 팁용접부 확보를

위해, 싱글모드 파이버 레이저 급속용융부의 야금학적 응고균열 억제방안에 대해 기초적으로 검토하였다. 아래와 같이 본 논문의 결론을 요약한다.

247LC 초내열합금 레이저 표면용융부(스캔속도: 50 mm/s,

입열량: 40 J/mm, 에너지 밀도: 1341 J/mm<sup>2</sup>)에서 문제 시 되는 응고균열은 고각의 방위차를 갖는 응고결정립계 상의 용질원소(Hf, Ta, C 등) 응고편석 및 파이프라인 확산에 기인하는 것으로 확인되었다.

단일 일방향응고 결정립 내의 레이저 급속용융(스캔속도 : 1000 mm/s, 입열량: 2 J/mm, 에너지밀도: 65 J/mm<sup>2</sup>)을 통해 전체 용융부의 에피택셜 성장 거동을 확보할 수 있었고, 에피택셜 성장에 따른 고각 응고결정립계 형성 억제, 급속응고 효과에 따른 응고편석 (Hf, C 등) 및 파이프라인 확산 저감을 통해, 완전히 응고균열이 억제된 무균열 레이저 용융부를 얻을 수 있었다.

곡률이 부가된 레이저 용융경로를 적용할 시, 무작위한 다결정방위를 나타내며, 최저 69.0%까지 에피택셜 성장률이 낮아짐을 확인할 수 있었다. 결과적으로 응고균열 발생은 재차 심화되는 양상을 보였다. 따라서, 급속용융 및 급속응고 적용을 통한 응고편석 저감효과가 수반되더라도, 실제 블레이드 팁용접 시에는 우수한 에피택셜 성장을 확보에 유리한 정밀한 용접경로 설계가 필요할 것으로 사료되었다.

## 감사의 글

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원(전략핵심소재자립화기술개발사업(No.20011103), 기계산업핵심기술개발사업(No.20015063))의 지원을 받아 수행된 연구 결과물임.

## REFERENCES

1. J. N. Dupont, J. C. Lippold, and S. D. Kiser, *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys*, pp.157–254, John Wiley & Sons, New Jersey (2009).
2. K. Nishimoto, K. Saida, and Y. Fujita, *Weld. World* **52**, 64 (2008).
3. Z. Zhou, Q. Lei, Z. Yan, Z. Wang, Y. Shang, Y. Li, H. Qi, L. Jiang, Y. Liu, and L. Huang, *Mater. Design* **198**, 109296 (2021).
4. N. Lu, Z. Lei, K. Hu, X. Yu, P. Li, J. Bi, and S. Wu, *Addit. Manuf.* **34**, 101228 (2020).
5. Z. Chen, W. Li, L. Wang, X. Wei, and Z. Liu, *J. Alloys Compd.* **931**, 167436 (2023).
6. Y. Li, X. Liang, Y. Yu, D. Wang, and F. Lin, *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers* **1**, 100019 (2022).
7. Z. Lei, N. Lu, and X. Yu, *J. Manuf. Process* **42**, 11 (2019).
8. G. Liu, D. Du, K. Wang, Z. Pu, and B. Chang, *Vacuum* **181**, 109563 (2020).
9. G. Liu, D. Du, K. Wang, Z. Pu, and B. Chang, *J. Alloys Compd.* **853**, 157325 (2021).
10. K. M. Kim, U. Lee, H. Lee, S. M. Seo, and E. J. Chun, *Met. Mater. Int.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01250-4>
11. K. M. Kim, H. E. Jeong, Y. S. Jeong, U. Lee, H. Lee, S. M. Seo, and E. J. Chun, *Korean J. Met. Mater.* **59**, 698 (2021).
12. Y. S. Jeong, K. M. Kim, U. Lee, H. Lee, S. M. Seo, and E. J. Chun, *Korean J. Met. Mater.* **58**, 875 (2020).
13. E. J. Chun, Y. S. Jeong, K. M. Kim, H. Lee, and S. M. Seo, *Journal of Advanced Joining Processes*, **4**, 100069 (2021).
14. Y. S. Jeong, K. M. Kim, H. Lee, S. M. Seo, and E. J. Chun, *Korean J. Met. Mater.* **59**, 445 (2021).
15. Y. S. Jeong, J. Jeong, S. Y. Kim, S. H. Bae, U. Lee, H. Lee, S. M. Seo, and E. J. Chun, *Korean J. Met. Mater.* **60**, 272 (2022).
16. E. J. Chun, Y. S. Jeong, S. M. Seo, and H. Kang, *Sci. Technol. Weld. Join.* (2022). <https://doi.org/10.1080/13621718.2022.2122246>
17. J. C. Lippold, *Welding Metallurgy and Weldability*, pp.9–83, John Wiley & Sons, New Jersey (2015).
18. A. Senger, T. Jokisch, S. Olschok, U. Reisgen, and T. Fischer, *Procedia CIRP* **94**, 632 (2020).
19. A. Alhuzaim, S. Imbrogno, and M. M. Attallah, *Mater. Design* **211**, 110123 (2021).
20. M. J. Aziz, *J. Appl. Phys.* **53**, 1158 (1982).