

Pre-weld Vareststraint 시험을 이용한 CM247LC 초내열합금 보수용접부 액화균열 민감도 평가

정예선^{1,†} · 정진곤^{2,†} · 김세윤² · 배성환² · 이의종³ · 이형수⁴ · 서성문⁴ · 천은준^{1,*}

¹부경대학교 신소재시스템공학과

²경남대학교 신소재공학과

³두산중공업 GT소재기술팀

⁴한국재료연구원 고온재료연구실

Evaluation of Liquation Cracking Susceptibility of CM247LC Superalloy Repair Welds via Pre-Weld Vareststraint Test

Ye-Seon Jeong^{1,†}, Jingon Jeong^{2,†}, Se-Yun Kim², Sung-Hwan Bae², Uijong Lee³,
Hyungsoo Lee⁴, Seong-Moon Seo⁴, and Eun-Joon Chun^{1,*}

¹Department of Materials System Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

²Department of Advanced Materials Science and Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Republic of Korea

³Gas Turbine Materials Engineering Team, Doosan Heavy Industries and Construction, Changwon 51711, Republic of Korea

⁴High Temperature Materials Group, Korea Institute of Materials Science, Changwon 51508, Republic of Korea

Abstract: In this study, the liquation cracking susceptibility in the heat-affected zone of CM247LC superalloy gas turbine blades during repair welding was quantitatively evaluated using a newly developed pre-weld Vareststraint test method. The repair welding geometry was replicated through Vareststraint tests for the pre-weld bead. The liquation cracking susceptibility, that is, the liquation cracking temperature range (LCTR), could be evaluated through temperature visualization at the time of crack formation during the Vareststraint test. The LCTR of CM247LC alloy repair welds (heat-affected zone of the second layer weld) was 280 K. Compared to the LCTR of as-cast (620 K) and aged (65 K) CM247LC, metallurgical mechanisms for controlling the LCTR of repair welds were examined based on the microstructural characterization and Scheil's solidification calculations for the pre-weld. The LCTR of the CM247LC alloy repair weld was influenced by the MC carbide fraction and the segregated concentration of trace and impurity elements, such as B and S in pre-weld solidification path. A process design capable of reducing the fraction of MC carbides and solidification segregation of trace impurity elements is required. Based on the experimental and theoretical results, the proposed modified Vareststraint testing method for dissimilar welds is expected to analyze the solidification cracking behavior effectively in manufacturing high-soundness CM247LC superalloy welds.

(Received September 28 2021; Accepted November 8, 2021)

Keywords: CM247LC superalloy, repair welding, heat-affected zone, liquation cracking susceptibility, modified-vareststraint test

1. 서 론

CM247LC는 Mar-M247합금의 일부 성분을 조절하여 주

조 건전성 및 기계적 성질을 개선시킨 Ni계 초내열합금이며, 약 60%의 γ' 석출상이 우수한 고온 물성을 발현한다 [1-3]. 최근 국내에서는 CM247LC 합금의 가스터빈 블레이드 적용을 위한 소재 및 가공기술 국산화 연구가 진행중이다. 블레이드는 제조 최종 단계 및 재생과정에서 용접 및 접합공정을 필수적으로 수반하며, 용접부 건전성은 블레이드의 기계적, 화학적 성능과 직결된다고 할 수 있다. 하지만 난용접(non-weldable) 소재로 잘 알려진 CM247LC

- 정예선: 석사과정, 정진곤: 학사과정, 이의종 · 서성문: 책임연구원, 이형수: 선임연구원, 김세윤 · 배성환 · 천은준: 교수

*Corresponding Author: Eun-Joon Chun

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

[†]Ye-Seon Jeong and Jingon Jeong contributed equally to this work

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

초내열합금은 용접 [4-6] 및 적층제조 [7-9] 시 다양한 고온균열(응고, 액화, 연성저하 및 변형시효균열) 현상이 보고되고 있는 바, 각 균열 현상의 면밀한 제어 없이는 건전한 용접부 제조가 불가능하다. 이러한 관점에서 본 저자는 CM247LC 합금 터빈 블레이드 적용을 위한 용접부 응고균열 [10] 및 액화균열 [4,11,12] 민감도 저감기술 연구결과를 보고한 바 있으며, 해당 연구들은 주로 블레이드 제조 시의 단층(single pass)용접 공정에 초점을 맞추고 있다.

한편, 고온 고압의 가스터빈 가동 환경에 장시간 노출될 경우, 블레이드에는 열충격 및 피로 등에 의한 손상부가 발생하며, 손상 정도에 따라 신품 교체 또는 보수용접(repair welding)을 통한 재생 블레이드 적용 등이 검토될 수 있다. 특히 CM247LC 합금 용접부 액화균열은, 열영향부에 존재하는 γ/γ' 공정조직의 부분적 액상화 및 MC형 탄화물의 조성적 액상화에 의해 형성되는 것으로 판명되었으며 [4], 블레이드 단층용접 시에는 용접 전열처리에 의한 γ/γ' 공정조직 균질화 및 MC형 탄화물 저감을 통해 액화균열 발생이 억제 가능한 것으로 보고되고 있다 [12]. 하지만 그림 1에 설명한 다층(multi-pass) 보수용접 시에는, 장시간 열간노출에 의한 CM247LC 합금 미세조직 변화(과시효 등), 다층 용접과정의 재용융 및 복잡한 용접 열이력에 의해, 상기의 단층용접부 액화균열 민감도 평가결과에 기반한 용접공정 설계에 한계점이 존재할 수 밖에 없다. 따라서 CM247LC 합금의 무균열 보수 용접부 제조를 위해서는 다층 용접 열영향부를 재현한 모사실험 등 액화균열 거동에 대한 통해 면밀한 사전 검토가 필요하나, 이에 체계적인 국내 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 CM247LC 초내열합금 터빈 블레이드 보

수용접 시, 블레이드의 재용융이 발생하는 초층(1st layer) 이후, 그 중에서도 제2층(2nd layer) 열영향부 액화균열 거동에 초점을 맞추어 그 민감도를 정량 평가하였다(그림 1). 이를 위해 pre-weld Vareststraint 이라는 수정된 방식의 시험 과정을 고안하였으며, 평가 결과는 선행연구에서 보고한 단층 용접부의 액화균열 민감도와 비교 검토하였다. 비교 결과는 미세조직 변화분석 및 열역학적 계산을 통해 고찰함으로써, 보수용접부 액화균열 제어를 위한 야금학적 핵심인자를 제시하고자 한다. 최종적으로 도출된 결과들은 CM247LC 초내열합금 가스터빈 블레이드의 보수용접 공정 조건 최적화 및 제조에 활용하고자 한다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

표 1은 CM247LC 합금 화학성분을 나타낸다. Cannon Muskegon 사의 상용 모합금을 이용해 판재 형상으로 주조하였으며, 주조재는 용체화 열처리(1505 K - 120분) 및 시효 열처리(1145 K - 1200 분)를 실시하여 Vareststraint 시험편을 제작하였다.

2.2 Vareststraint 시험 및 가스터빈 아크용접

CM247LC 합금 보수 용접부(제2층 열영향부) 액화균열 민감도를 평가하기 위해 pre-weld Vareststraint 시험을 실시하였다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 (a)Vareststraint 시험장치 외관 및 (b)시험편 배치에 대한 모식도를 나타낸다. 그림 3은 본 연구에서 고안한 pre-weld Vareststraint 시험과정을 설명하고 있다. 시효 열처리된 CM247LC 합금 시험

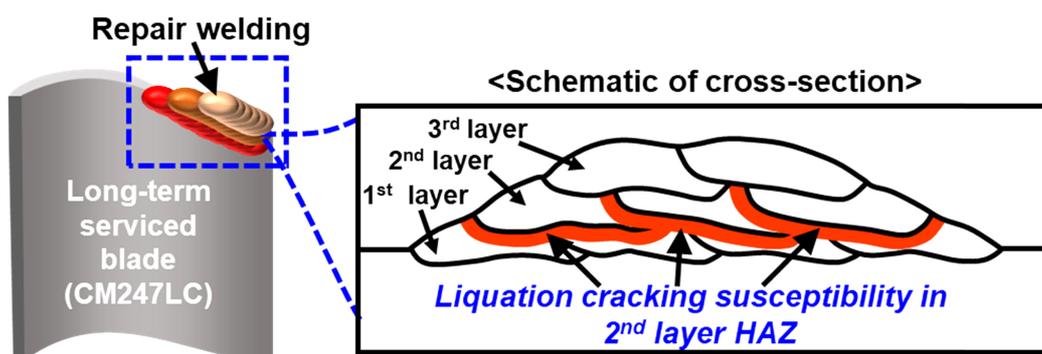


Fig. 1. Schematic description for repair welding of CM247LC alloy turbine blade and objective of this study (HAZ: heat-affected zone).

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

Material	Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Ta	Ti	Al	B	Zr	Hf	P	S
CM247LC	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

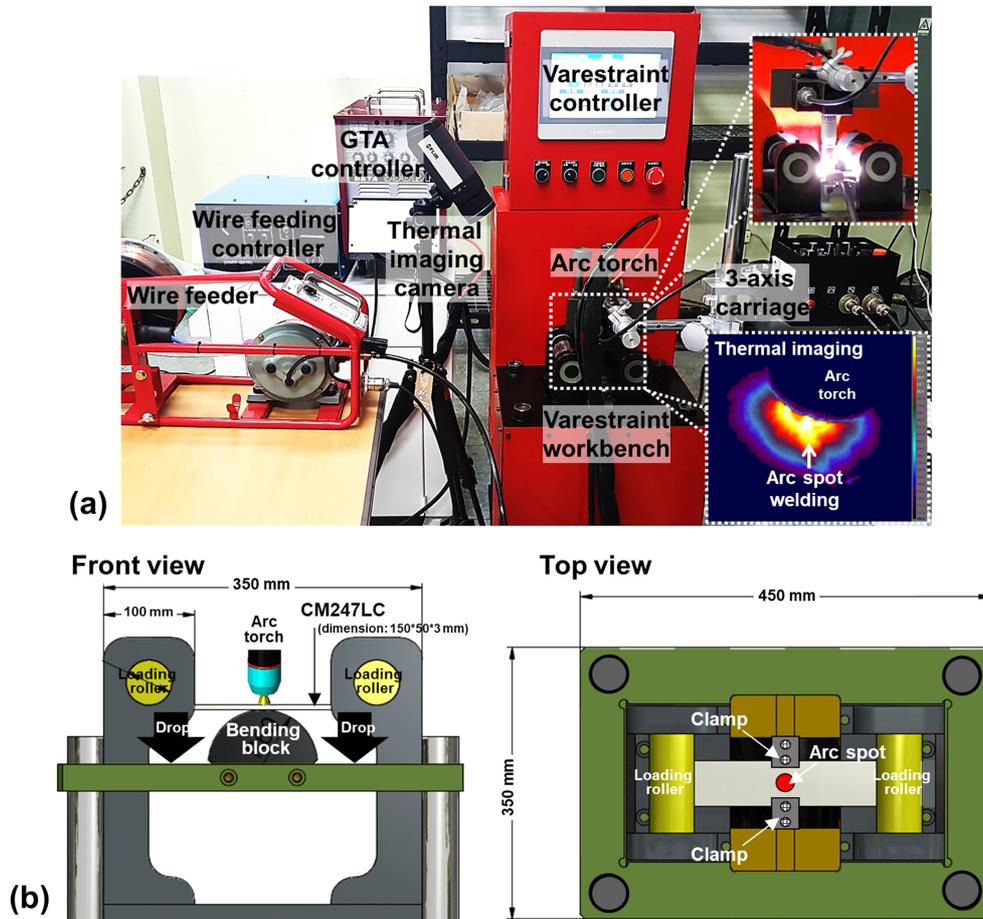


Fig. 2. (a) appearance and (b) schematic illustration of the Vareststraint test with GTAW.

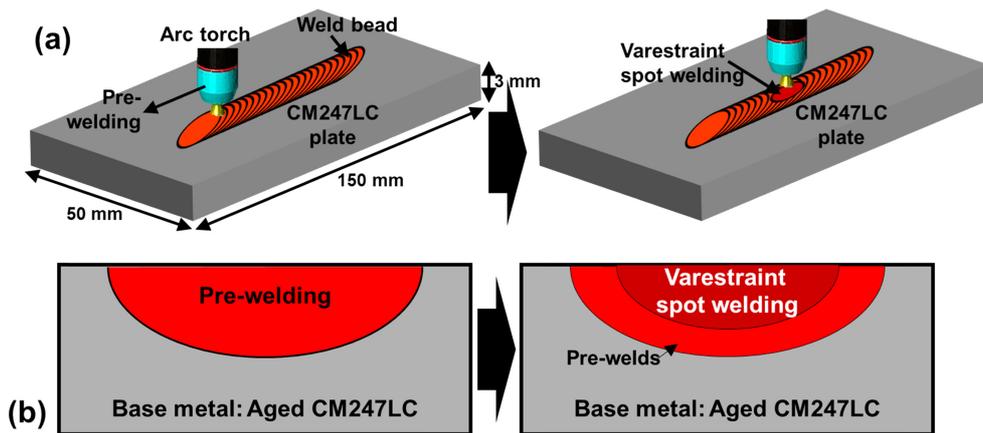


Fig. 3. Procedures of pre-weld Vareststraint test; (a) side and (b) cross-sectional view.

편(150 × 50 × 3 mm)에 가스텅스텐 아크용접(gas tungsten arc welding, GTAW)을 이용해 제1용접(이하 pre-welding) 하였고, 해당 비드 중앙부에 아크 점 용접(arc spot welding)을 이용한 Vareststraint 시험을 실시하였다. 시험과정 상의

pre-welding은 보수용접 초층, 아크 점 용접은 제2층부에 해당한다. Vareststraint 시험 시에는 그림 2(b)와 같이 아크 점 용접 종료와 동시에 400 mm/s 속도로 굽힘 변형을 부가하였고, 열영향부에 생성된 균열 길이로 보수용접부 액

Table 2. Conditions of the pre-weld Varestraint test.

Parameters	Conditions
Welding	Autogenous GTAW
Arc voltage	18 V
Arc current	100 A
Arc length	1 mm
Welding speed	1 mm/s
Shield gas	Argon (99.99% purity)
Welding	Spot GTAW
Arc voltage	18 V
Arc current	60 A
Arc length	2 mm
Welding time	10 s
Shield gas	Argon (99.99% purity)
Bending strain	0.5–3.0%
Bending rate	400 mm/s

Table 3. Specifications of the infrared-thermovision camera used.

Parameter	Conditions
Resolution	640 × 480 pixels at 50 Hz 640 × 240 pixels at 100 Hz 640 × 120 pixels at 200 Hz
Detector	Uncooled microbolometer
Minimum focus distance	0.25 m
Spectral range	7.5–14 (Long-wave infrared)
Temperature acquisition range	298–2273 K
Response time	< 8 ms
Temperature accuracy	±2 K
Emissivity	0.6

화균열 민감도를 평가하였다. Pre-welding 조건 및 부가 변형률 등의 Varestraint 시험 주요 조건은 표 2에 요약하였다. 생성된 균열길이는 실체현미경(ISM-PM200SB, Insize)으로 측정하였다. 액화균열 길이를 온도범위로 변환하기 위해 Varestraint 시험 균열 발생시점의 온도분포를 열화상카메라(A655sc, FLIR)로 가시화하였으며(그림 2(a)), 해당 결과를 이용해 보수용접부의 액화균열 발생온도범위

(liquation cracking temperature range, LCTR)를 도출하였다. 본 연구에서 사용된 고속 열화상카메라 사양은 표 3에 요약하고 있다. CM247LC 용접부의 미세조직 분석을 위해 GTAW를 실시하였으며 용접조건은 표 2의 pre-welding 조건과 동일하게 적용하였다.

2.3 미세조직 분석

용접부 및 Varestraint 시험부 미세조직은 전자탐침미세 분석기(Electron Probe Micro Analyzer, EPMA, JXA-8530F, JEOL) 및 후방산란전자회절(Electron Backscatter Diffraction, EBSD, Velocity Super, EDAX) 기법을 통해

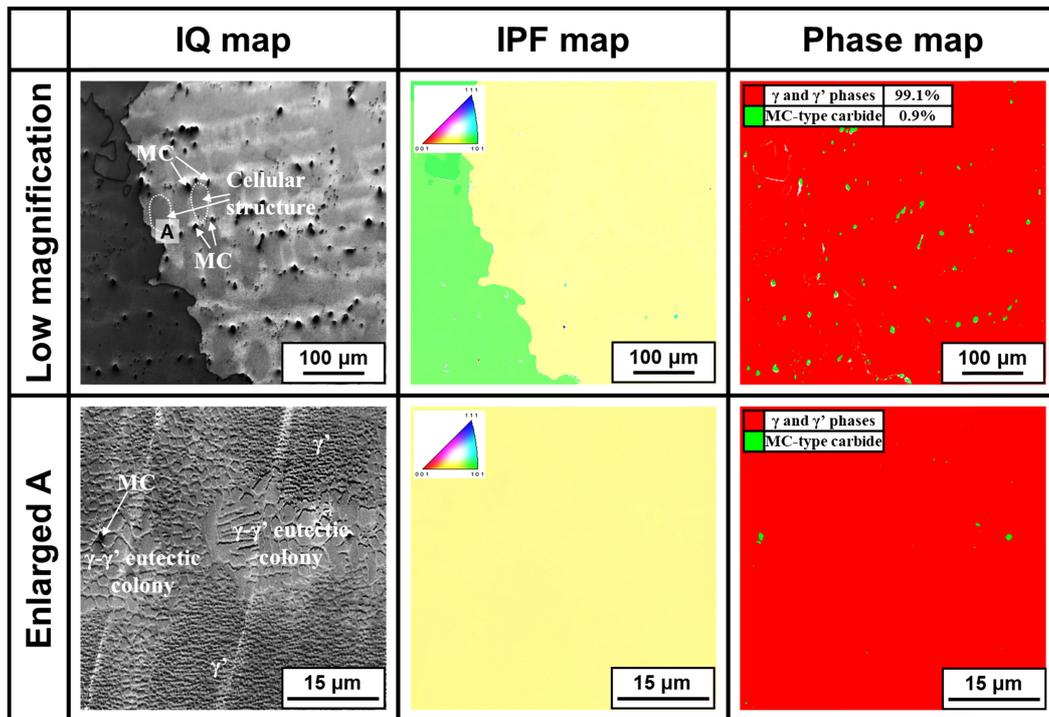


Fig. 4. Cross-sectional microstructure characterized via EBSD for CM247LC welds (IQ: image quality, IPF: inverse pole figure).

분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 CM247LC 초내열합금 용접부 미세조직

그림 4는 EBSD를 통해 분석한 CM247LC 합금 용접부 (pre-welding)의 대표적인 단면 미세조직을 나타낸다. “Image quality(IQ) map”에 나타내듯이, 셀 형태의 응고 결정립과 함께 결정립계에는 2차상들이 관찰되며, “Phase map”에 보이듯이 해당 2차상들은 MC형 탄화물인 것으로 동정되었다. 특히 저배율 이미지상의 “A” 영역을 확대분석한 결과 (“Enlarged A”), 결정립계에는 MC 탄화물뿐만 아니라 γ/γ' 공정 조직이 형성되었음을 관찰할 수 있으며,

결정립 내에는 γ' 석출상도 확인된다. CM247LC 합금 응고(주조, 적층 제조 등) 과정상의 주된 2차 조직들은 MC형 탄화물 및 γ/γ' 공정 조직인 것으로 잘 알려져 있으며 [3,9,11], 이러한 특징은 용접금속에서도 잘 확인된다. 그림 5는 그림 4 “A” 영역에 대한 EPMA 분석결과를 나타낸다. 용접 응고 시, MC 탄화물(M=Ti,Ta,Hf 등) 및 γ 상 형성원소 (Al)의 미세편석(microsegregation) 거동을 명확히 확인할 수 있으며, 따라서 결정립계에 존재하는 2차상들은 해당 형성원소들의 응고편석 거동과 연계된 결과로 사료된다.

3.2 CM247LC 초내열합금 보수용접부 액화균열 거동

그림 6은 pre-weld Varestraint 시험(부가 변형률: 3%)

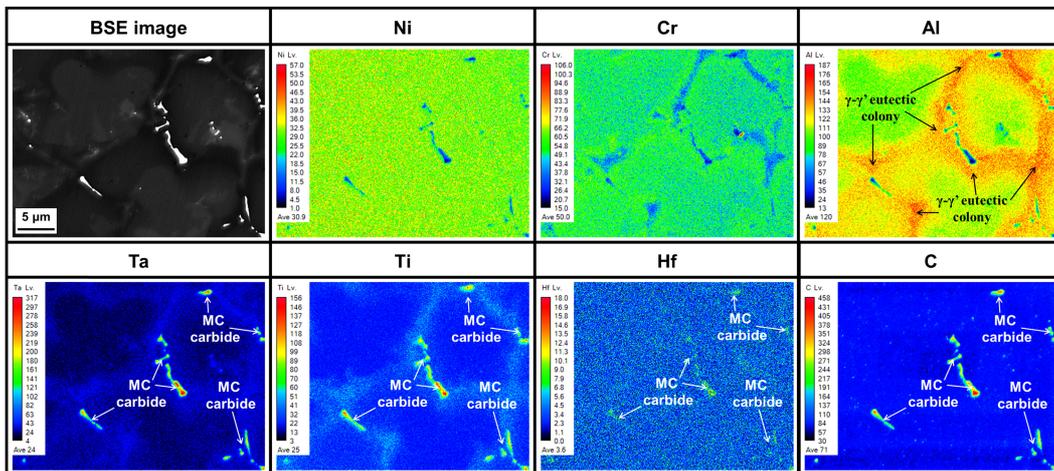


Fig. 5. Back-scattered electron (BSE) image and elemental distributions analyzed by EPMA at the fusion zone (region “A” denoted in Fig. 4) of CM247LC welds.

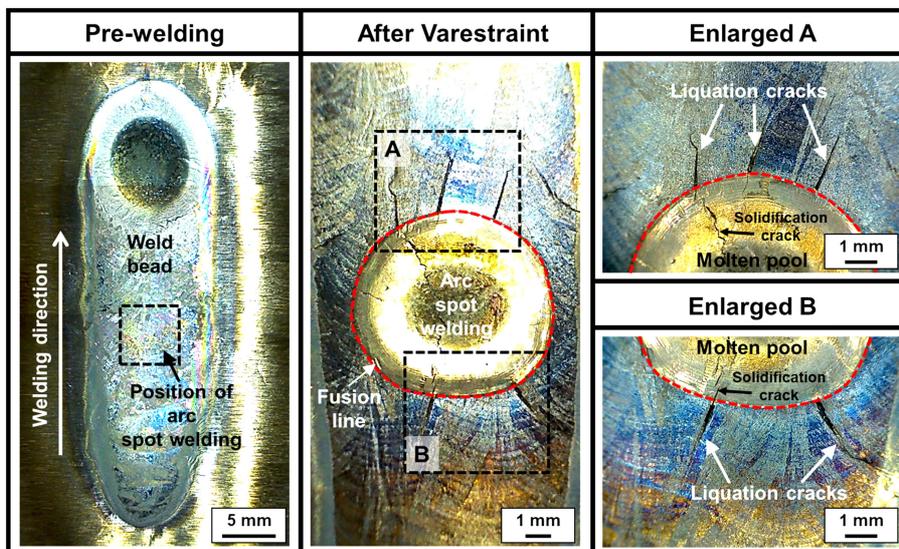


Fig. 6. Appearance and liquation cracking behavior after the pre-weld Varestraint test.

결과를 나타낸다. 아크 점용접부를 중심으로 고온균열 형성을 확인할 수 있으며 (“A” 및 “B” 영역), 형성 위치에 따라 용융지 경계선(fusion line) 내의 균열과 열영향부 균열로 구분 가능하다. 그림 7은 그림 6의 고온균열 파면 관찰 결과를 나타낸다. Vareststraint 시험 시의 용융지 경계선 내부에 형성된 균열은 응고균열로 판별되었고, 열영향부에

열로 구분 가능하다. 그림 7은 그림 6의 고온균열 파면 관찰 결과를 나타낸다. Vareststraint 시험 시의 용융지 경계선 내부에 형성된 균열은 응고균열로 판별되었고, 열영향부에

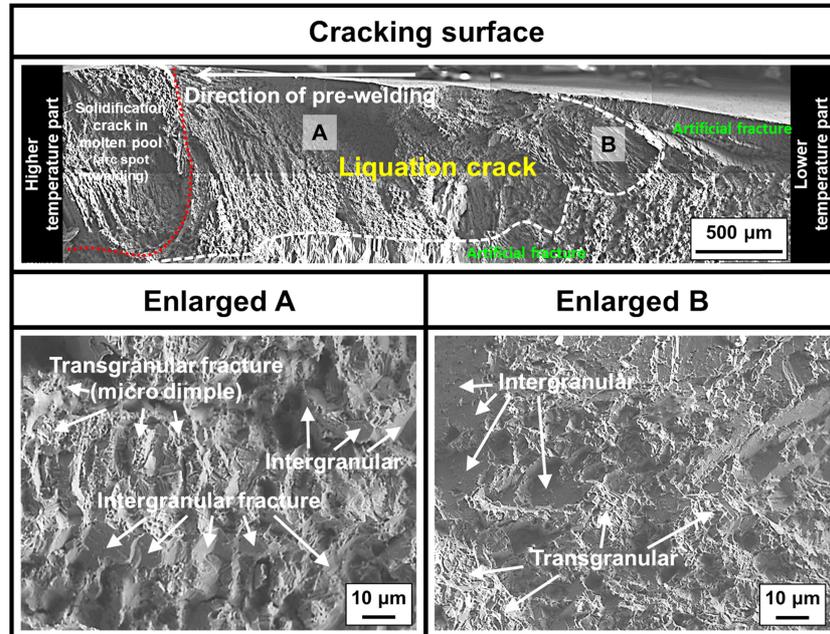


Fig. 7. Characterization of a liquation cracking surface after the pre-weld Vareststraint test.

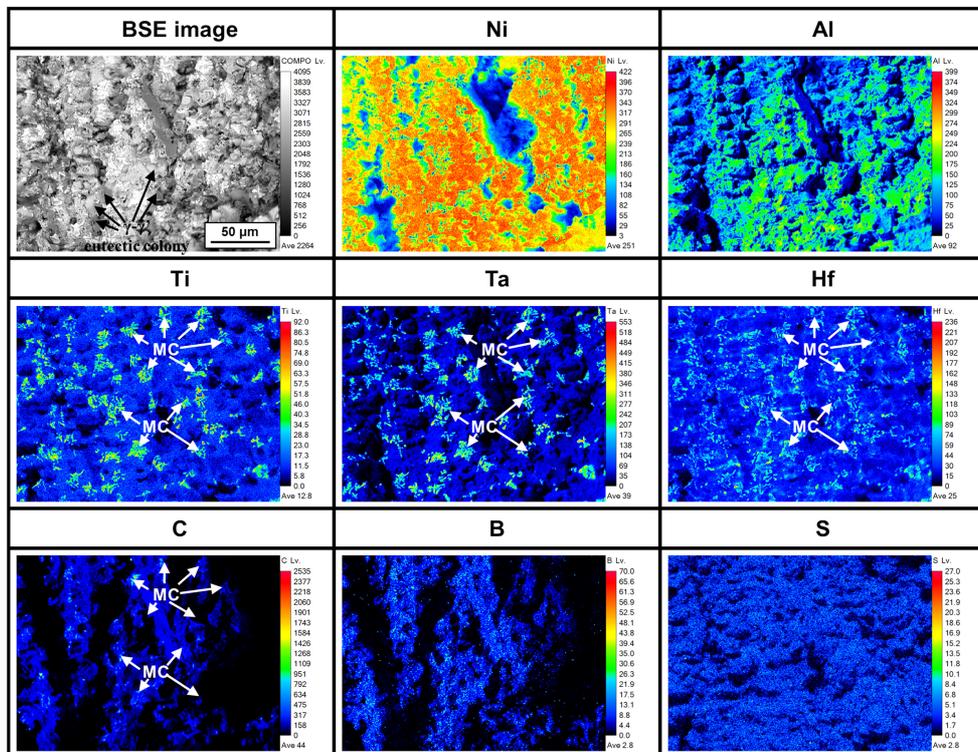


Fig. 8. Back-scattered electron (BSE) image and elemental distribution behavior at fracture surface of a liquation crack after pre-weld Vareststraint test.

형성된 균열은 입계파괴(intergranular)와 미세딴플 형상의 입내파괴(transgranular)가 혼재된 전형적인 액화균열 파면의 특징을 보이고 있다. 즉, Varestraint 시험에 의해 형성된 열영향부 고온균열(그림 6)은 모두 액화균열로 판별되었다.

그림 8은 그림 7의 액화균열 파면 “A” 영역에 대한 EPMA 분석결과이다. 선행연구 결과에 의하면, CM247LC 합금(주조재) 단층용접부의 액화균열 현상은 용접 승온과정에서 발생하는 γ/γ' 공정조직의 부분적 액상화 및 MC 탄화물 조성적의 액상화에 기인하는 것으로 보고되고 있다 [4,11,12]. Pre-weld Varestraint 시험 결과로부터 확인된 보수용접부 액화균열 또한, 그림 4,5에 나타난 pre-welding 미세조직 특징으로 인해 파면상에는 MC형 탄화물 및 γ/γ' 공정조직의 액상화 흔적이 명확히 확인되는 유사한 결과임을 확인할 수 있다.

3.3 CM247LC 합금 보수용접부 액화균열 발생온도범위

Pre-weld Varestraint 시험을 통해 형성된 최대균열길이를 통해 보수용접부 액화균열 발생온도범위(LCTR)를 도출하였다. 부가변형률에 따른 최대균열길이 평가 및 열화상카메라 관찰 시의 방사율 최적화 과정 등에 대해서는 CM247LC 합금 단층용접 시의 LCTR을 평가한 저자의 선행연구와 동일한 방법을 적용하였다 [4,12]. 그림 9는 보수용접부 LCTR을 나타내고 있으며, 선행 연구로부터 보고된 CM247LC 합금 단층용접부 LCTR을 함께 비교하고 있다 [4,11]. CM247LC 합금 보수용접부 LCTR 280 K은 주조재 단층용접부 LCTR(620 K) 보다는 약 55% 축소, 시효 열처리재의 단층용접부 LCTR (65 K) 대비 약 320% 확대된 결과임을 알 수 있다. 해당 연구로부터 CM247LC 합금 블레이드 제조 용접 시, 주조재에서 발생하는 상당량의 액화균열은 시효열처리에 따른 LCTR 최소화(주조재: 620 K → 시효열처리재: 65 K)를 통해 억제가능한 것으로 보고하고 있으나 [4,11], 보수용접부는 모재 재용융에 의한 LCTR 확대라는 새로운 정량 결과를 제시하고 있다. 본 결과는 블레이드 재생 공정에서는 각 열영향부의 액화균열 민감도 변화를 면밀하게 검토할 필요가 있음을 시사한다.

보수용접부의 고온균열 민감도를 평가하기 위한 다양한 선행연구 결과들이 보고됐지만, 대부분이 열간 노출에 의한 보수용접 초층 열영향부 고온균열 거동에 관한 내용들이다. 대표적으로 Nishimoto *et al.*은 Inconel 690 합금 다층 용접부를 재현하여, 용접부의 고온 시효정도가 보수용접 시의 연성저하균열 민감도에 미치는 영향을 검토하였

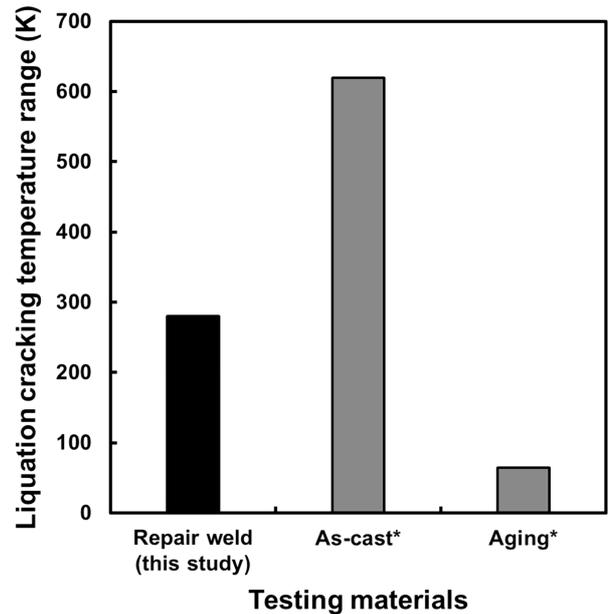


Fig. 9. Relationship between condition of testing materials and liquation cracking temperature range (*: adopted from Ref. 4,11).

고 [13], Chun *et al.* 또한 316FR 스테인리스강 용접부의 시그마상 취성거동 정도가 보수용접 시의 고온균열 거동에 미치는 영향을 검토하였다 [14]. 이러한 기존의 연구결과와 달리, pre-weld Varestraint 시험 및 해당 평가결과는 보수용접 제2층 열영향부의 고온균열 민감도를 체계적으로 제시하고 있는 바, 본 연구 결과는 기존의 평가절차와 함께 CM247LC 초내열합금 블레이드의 면밀한 보수용접성 검토에 잘 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

3.3.1 보수용접부 LCTR 변화 기구: MC 탄화물 분율과 LCTR 상관관계

CM247LC 합금 용접 승온 시 열영향부에 존재하는 2차상들 중, MC형 탄화물의 국부 액상화 시작온도가 타 조직 대비 가장 낮은 것으로 보고되고 있는 바 [11], 그림 9에 나타난 LCTR과 MC 탄화물 분율의 상관관계를 통해 보수용접부 LCTR을 고찰하였다. 그림 10은 EBSD로 분석한 MC 탄화물 분율과 LCTR의 관계를 그래프로 나타내고 있다. 그림 4에 나타내듯이, pre-welding부의 MC 탄화물 분율은 0.9%, CM247LC 합금 주조재 및 시효열처리재의 MC 탄화물 분율은 저자의 선행연구 결과값을 사용하였다 [4]. LCTR과 MC 탄화물 분율 사이에는 높은 상관관계가 확인되었으며, 따라서 본 연구에서 도출된 보수용접부 LCTR (280 K)가, 주조재 및 시효열처리재 LCTR과 차이를 보이는 것은, MC 탄화물 분율에 의존하는 결과로 판단된다.

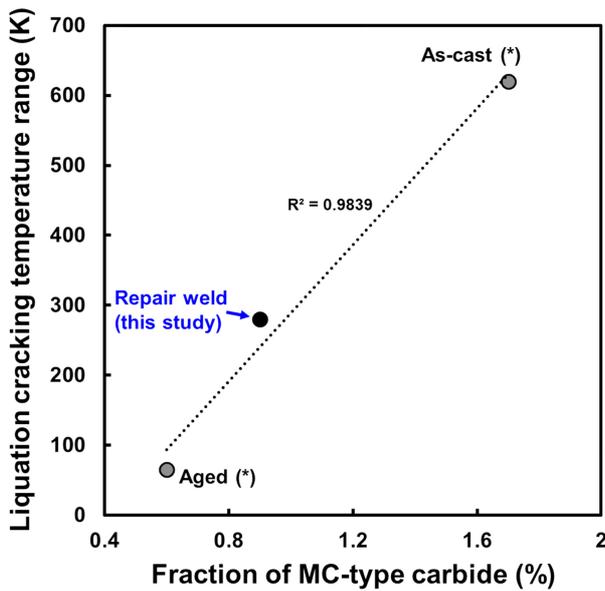


Fig. 10. Relationship between fraction of MC-type carbide and liquation cracking temperature range (*: adopted from Ref. 4).

3.3.2 보수 용접부 LCTR 변화 기구: 미량, 불순물원소 편석농도와 LCTR 상관관계

CM247LC 합금을 포함한 Ni계 초내열합금은, 결정립계에 존재하는 미량(B) 및 불순물 원소(S,P)가 $\gamma-\gamma'$ 및 γ -MC 등의 저융점 상 액상화 반응 시작온도를 저하시키고, 이는 용접 시 액화균열 민감도를 보다 심화시키는 것 (=LCTR 확대)으로 잘 알려져 있다 [12,15]. 그림 8에 나타난 보수용접부 액화균열 파면에서도 미량 및 불순물 원소(B,S)의 존재는 명확히 확인 가능하다. 특히, pre-welding부에 존재하는 상기 원소의 양은 응고과정 상의 미세편석 거동에 의존할 것으로 판단되는 바, 응고편석 거동 검토를 통해 보수용접부 LCTR을 추가적으로 고찰하였다. 이를 위해 주조재의 응고편석 거동도 함께 고려하였다. Pre-welding 및 주조 응고과정(solidification path)상의 미량, 불순물 원소 편석거동은 이론적으로 계산하였다. Thermo-Calc(데이터베이스: TCNI9)의 Scheil 모델을 토대로 계산하였고, 용접 및 주조 응고특성 반영을 위해 냉각

속도와 확산 제어가 가능한 속도론 데이터베이스(kinetic database: MOBNI5)를 적용하였다. 계산 시의 입력 변수는 표 4에 요약하였다. Pre-welding 시의 냉각속도는 본 저자의 선행연구에서 사용된 CM247LC 용접응고 냉각속도 측정값을 사용하였고 [10], 주조재 냉각속도는 CM247LC 합금을 포함한 Ni계 초내열합금 주조 응고 시의 이차수지상 간격 (secondary dendrite arm spacing)과 냉각속도에 대한 실험식을 기반으로 도출하였다 [3].

그림 11은 (a)B 및 (b)S 원소에 대한 응고편석 계산 결과를 나타낸다. 응고가 진행됨에 따라 기지상인 γ 내의 각 원소농도는 증가하는 추이를 보이며, 응고 완료시점(응고 진행률: 99.9%)의 최종 편석농도는 pre-welding (B: 0.0158 mass%, S: 1.94×10^{-6} mass%) 대비 주조재(B: 0.0170 mass%, S: 2.03×10^{-6} mass%)가 높은 것으로 확인되었다. 따라서 보수용접부의 LCTR은 MC 탄화물 분을 변화뿐만 아니라, pre-welding 시의 B, S 원소 응고 편석량에 함께 의존하는 것으로 판단된다.

즉, 280 K 라는 CM247LC 합금 보수용접부 LCTR은, 초층 용융에 의한 MC 탄화물 증가 및 B, S 원소의 응고 편석 발생으로 인해 시효처리재 단층용접부 LCTR 대비 245 K 증가하지만, 주조재 단층용접부 LCTR 대비 MC 탄화물 및 B, S 원소의 응고편석량 감소로 380 K 축소된 값을 가지는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 새롭게 고안한 pre-weld Varestraint 시험을 이용해 CM247LC 초내열합금 가스터빈 블레이드 보수 용접 시의 제2층 열영향부 액화균열 민감도를 정량 평가 하였다. 평가 결과는 pre-welding 시의 용접금속 미세조직과 열역학적 용접응고 계산을 연계하여 모재의 단층용접 액화균열 거동에 대한 선행연구 결과와 비교 고찰하였다. 아래와 같이 본 연구의 결론을 요약한다.

A. CM247LC 합금 pre-welding부에 대한 Varestraint 시험을 통해 보수용접 제2층 열영향부를 모사하였고, Varestraint 시험 균열 형성 시점의 온도가시화를 통해 액화

Table 4. Conditions of Scheil calculation by Thermo-calc (*: adopted from Ref. 10).

Input parameters		Values
CM247LC (Pre-welding)	Cooling rate	146.3 K/s (*)
	Solidification completion rate	99.9%
CM247LC (As-cast)	Cooling rate	2.8 K/s
	Secondary dendrite arm spacing	24.3 μm (measured)
	Solidification completion rate	99.9%

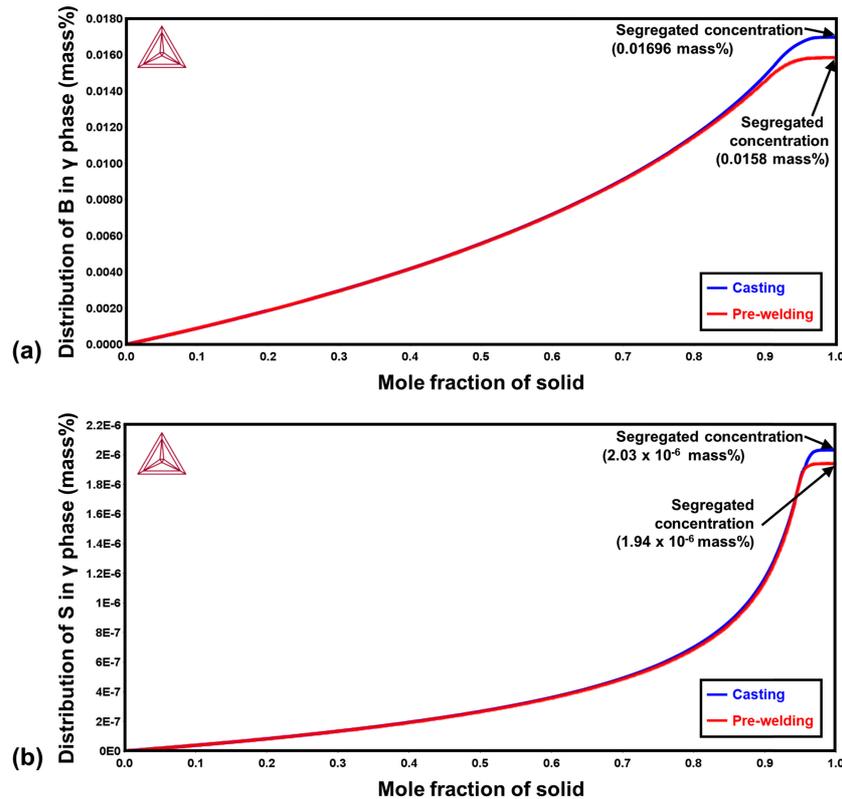


Fig. 11. Calculated solidification segregation behavior of (a) B and (b) S for the conditions of pre-welding and casting of CM247LC alloy.

균열 민감도, 즉 LCTR을 평가할 수 있었다. 그 결과 CM247LC 합금 보수용접부 LCTR은 280K로 평가되었다. 해당 결과는 CM247LC 합금 블레이드 단층 제조용접 시의 LCTR (주조재 620 K, 시효 열처리재 65 K)과 큰 차이를 보이며, 이는 모재의 균열 민감도와는 별도로 보수용접 시에는 열영향부 위치별 액화균열 거동을 면밀하게 검토할 필요가 있음을 시사한다.

B. 미세조직 분석 및 Scheil식 응고계산 결과, CM247LC 합금 보수용접부 LCTR은 pre-welding 과정의 MC 탄화물 분율과 B,S 미량 불순물 원소 응고편석량에 의존하는 것으로 판명되었으며, 즉 실제 보수용접 시에는 MC 탄화물과 해당 원소의 응고편석이 저감 가능한 공정 설계가 필요할 것으로 사료된다.

C. 상기 결과를 통해 본 연구에서 고안한 pre-weld Vrestraint 시험 평가 절차 및 해당 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었으며, 이는 향후 CM247LC 합금의 가스터빈 블레이드 보수용접 및 고건전성 용접부 제조에 있어 유효한 액화 균열 민감도 평가 방법으로 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원(전략핵심소재자립화기술개발사업(No.20011103), 기계산업핵심기술개발사업(No.20015063)) 및 한국에너지기술평가원(에너지인력양성사업(No.2021400000480))의 지원을 받아 수행되었음. 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(개인연구지원사업(No. 2019R1G1A1099607))의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

1. I. S. Kim, B. G. Choi, S. M. Seo, D. H. Kim, and C. Y. Jo, *Mater. Lett.* **62**, 1110 (2008).
2. P. Zhang, Y. Yuan, Z. H. Gao, Y. F. Gu, J. Li, J. B. Yan, X. F. Gong, J. T. Lu, X. B. Shi, and B. Q. Fu, *J. Alloys. Compd.* **862**, (2021).
3. S. M. Seo, H. W. Jeong, D. W. Yun, Y. K. Ahn, J. H. Lee, and Y. S. Yoo, *J. Korea Foundry Soc.* **33**, 193 (2013).

4. E. J. Chun, Y. S. Jeong, K. M. Kim, H. Lee, and S. M. Seo, *J. Adv. Join. Process.* **4**, (2021)
5. G. Bidron, A. Doghri, T. Malot, F. Fournier-Dit-Chabert, M. Thomas, and P. Peyre, *J. Mater. Process. Technol.* **277**, (2020).
6. K.T. Hsu, H.S. Wang, H.G. Chen, and P.C. Chen, *Metals.* **6**, 238 (2016).
7. S. Griffiths, H. Ghasemi-Tabasi, A. De Luca, J. Pado, S.S. Joglekar, J. Jhabvala, R.E. Logé, and C. Leinenbach, *Mater. Char.* **171**, 110815 (2021).
8. M. Gerstgrasser, M. Cloots, J. Stirnimann, and K. Wegener, *J. Mater. Process. Technol.* **289**, 116948 (2021).
9. J.H. Boswell, D. Clark, W. Li, and M.M. Attallah, *Mater. Des.* **174**, 107793 (2019).
10. 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).
11. Y. S. Jeong, K. M. Kim, U. Lee, H. Lee, S. M. Seo, and E. J. Chun, *Korean J. Met. Mater.* **58**, 875 (2020).
12. Y. S. Jeong, K. M. Kim, H. Lee, S. M. Seo, and E. J. Chun, *Korean J. Met. Mater.* **59**, 445 (2021).
13. K. Nishimoto, K. Saida, and H. Okauchi, *Sci. Technol. Weld. Joi.* **11**, 455 (2006).
14. E. J. Chun and K. Saida, *J. Nucl. Mater.* **505**, 212 (2018).
15. K. Nishimoto, I. Woo, K. Tanaka, and M. Shirai, *Quarterly Journal of Japan Welding Society* **17**, 534 (1999).