

일방향응고 Ni기초내열합금 GTD-111의 천이액상확산접합(I)

- 접합현상과 접합기구 -

강정윤* · 권민석* · 김인배* · 김대업** · 우인수***

*부산대학교 공과대학 재료공학부

**현대모비스

***POSCO 기술연구소

Transient Liquid Phase Bonding of Directionally Solidified Ni Base Superalloy, GTD-111(I) - Bonding Phenomena and Mechanism -

Chung-Yun Kang*, Min-Suk Kwon*, In-Bae Kim*, Dae-Up Kim** and In-Su Woo***

*School of Materials Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Hyundai MOBIS, Kyonggi-Do 449-910, Korea

***Pohang Iron & Steel Co. Ltd, Pohang 790-785, Korea

Abstract

The bonding phenomenon and mechanism in the transient liquid phase bonding(TLP Bonding) of directionally solidified Ni base superalloy, GTD-111 was investigated.

At the bonding temperature of 1403K, liquid insert metal was eliminated by isothermal solidification which was controlled by the diffusion of B and Si into the base metal and solids in the bonded interlayer grew epitaxially from mating base metal inward the insert metal. The number of grain boundaries formed at the bonded interlayer was corresponded with those of base metal.

The liquation of grain boundary and dendrite boundary occurred at 1433K. At the bonding temperature of 1453K which is higher than liquation temperature of grain boundary, liquids of the insert metal were connected with liquated grain boundaries and compositions in each region mixed mutually. In joints held for various time at 1453K, phases formed at liquated grain boundary far from the interface were similar to those of bonded interlayer. With prolonged holding time, liquid phases decreased gradually and liquids of continuous band shape divided many island shape. But liquid phases did not disappeared after holding for 7.2ks at 1453K. Isothermal solidification process at the bonding temperature which is higher than the liquation temperature of the grain boundary was controlled by diffusion of Ti to be result in liquation than B or Si. in insert metal.

(Received January 15, 2003)

Key Words : Directionally solidified Ni Base Superalloy, GTD-111, Transient liquid phase bonding, Temperature, Holding time, Microstructure, Isothermal solidification, Grain boundary liquation, Epitaxial growth.

1. 서 론

최근 고효율 열병합발전소 건설이 급증함에 따라서 가스터빈의 사용이 확대되고, 산업용 가스터빈의 고성능 및 고효율화를 위해, 주요 부품인 버켓(Bucket)은 일반 Ni기 초내열 주조합금에서 모두 일방향 응고합금

혹은 단결정합금으로 교체되고 있다. 현재 버켓용 Ni기 일방향 초내열합금은 GE에서 개발한 GTD-111 합금이 많이 사용되고 있다¹⁾.

가스터빈은 고온 고압분위기에서 사용되므로, 핵심 부품인 버켓은 열피로와 고온부식 등에 의해서 미세 균열과 부분절단 등으로 파손되는 경우가 많다²⁾. 그러나 일방향 응고합금 및 단결정 합금은 고가이고, 환경문제

Table 1 Chemical compositions of base metal and insert metal used

Base metal	Element (wt%)													
	Cr	Co	Ti	Al	Mo	W	Ta	Fe	Mn	Si	C	Cu	B	Ni
GTD111	14.0	9.5	4.9	3.0	1.5	3.8	2.8	0.5	0.2	0.3	0.1	0.1	0.012	bal.
MBF-50	19.3	0.01	0.01	0.01	-	-	-	0.05	-	7.19	0.019	-	1.2	bal.

를 고려한 리사이클 차원에서 신제품으로 대체하는 것보다 수리하여 사용하는 것이 바람직하므로, 최근 유럽을 중심으로 버켓의 보수기술에 대한 연구가 활발히 전개되고 있다. 보수기술로는 용융용접, 브레이징 및 천이액상접합이 적용 가능할 것으로 예상되고 있다.

M.H. Haafkens가 제안한 Ni기 초내열합금의 용접균열 감수성평가에 대한 도표³⁾을 이용하여, GTD-111합금의 용접균열감수성을 평가하여 보면, 용접균열 감수성이 아주 높아, 일반 용융용접 기술로는 보수가 곤란하다. 그래서 일반 주조합금을 용융용접으로 보수하는 경우, 예열온도를 1173K인 아주 고온에서 실시하고 있다. 그러나, 결정제어합금인 일방향응고합금 및 단결정합금에 용융용접을 적용하는 경우, 용접부가 다결정화 하여 원래의 강화기구를 소실하기 때문에 접합부 강도가 저하될 것으로 예상된다. 따라서 이러한 합금들은 용융용접보다, 천이액상접합(Transient Liquid Phase Bonding)이 주로 사용된다. 일반 주조합금의 천이액상접합에 대한 연구는 이미 오래 전부터 수행되어 현재 JT 9D제트엔진의 터빈 벤(Turbine Vane)⁴⁾, 일부 가스터빈 부품 중에서 저온 영역에 장착되는 부품의 제조⁵⁾ 및 수리 기술⁶⁾로도 이용되고 있다. 그러나, 본 연구에서 사용하고자 하는 Ni기 초내열 일방향응고합금의 천이액상화산접합에 관한 연구보고⁷⁾는 거의 찾아 볼 수 없는 실정이다.

일방향응고합금의 천이액상접합에서 고려하여야 할 점은 접합부에서 다결정화하면 모재의 강화기구를 소실하여 접합강도가 크게 저하할 우려가 있으므로, 접합부의 결정방위가 모재와 동일한지 여부와 고상의 성장기구를 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 Ni기 초내열합금 중에서도 Ti 함유량이 높은 GTD-111합금의 천이액상접합 시, 접합조건에 따른 미세조직 변화를 체계적으로 검토하여 접합현상을 파악하고, 등온응고기구와 고상성장기구를 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

모재는 산업용 가스터빈의 버켓으로 주로 사용되고

있는 Ni기초내열주조합금인 GTD111을 14φ×200mm로 일방향응고시킨 합금을 사용하였다. 삽입금속은 두께 약 40μm인 Ni기 비정질합금 MBF-50을 사용하였다. Table 1은 모재와 삽입금속의 화학조성을 표시한 것으로, GTD-111합금은 다른 Ni기 초내열합금보다 Ti 량이 Al보다 많은 것이 특징이다. MBF-50은 용접저하 원소로서 B와 Si이 첨가되고, MBF 시리즈 중에서 B량이 가장 적은 것이 특징이다.

일방향응고 시킨 시료를 10mm로 절단하고, 절단에 의한 다결정화 현상을 방지하기 위하여 피접합면을 200 μm이상 연삭한 후, 아세톤으로 초음파 세척하여 접합 시험편으로 사용하였다.

접합은 양 모재를 결정방향과 대응하도록 맞추고, 중간에 초음파 세척한 삽입금속을 삽입하여, 진공접합장치 내에 장착한 후, 13.3mPa의 진공분위기 중에서 4 K/s의 가열속도로 접합온도 까지 고주파 가열 유지하여 행하였다. 접합 후 냉각은 공랭하였고, 접합압력은 1.76MPa로 하였다. 온도계측 및 온도제어는 접합부 근방에 CA열전대를 퍼커션용접하여 행하였다.

미세조직 관찰을 위한 에칭은 마블(marble : CuCl₂ 12g+HCl 10ml+alcohol 10ml)용액으로 화학에칭하거나, 10%과염소산알콜로 전해 에칭하였다. 접합부에 형성된 상의 성분분석은 EDX, EPMA로, 동정은 XRD로 행하였다.

접합부내 입계의 형성 상황을 파악하기 위하여, EBSP(Electron Back Scattering Pattern)로 모재 및 접합부의 결정방위 관계를 측정하였다.

EBSP법은 결정에 따른 전자선회절현상을 응용한 것으로, 전자선회절의 입사각으로부터 얻어진 기구지선(Kikuch line)을 이용한 결정방위 해석 방법이다. 측정하고자 하는 접합부 단면조직을 현출한 후, 각 분석위치에서 얻어진 EBSP를 컴퓨터로 해석하여 대응하는 결정면의 지수를 결정할 수 있다. 본 실험에서는 접합부와 이곳과 접합 양쪽 모재에 대하여 종방향(Transverse Direction, TD), 횡방향(Longitudinal Direction, LD) 및 수직 방향(Normal Direction, ND)의 결정방위를 해석하여 모재와 접합부의 결정방위 일치 여부를 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합조건에 따른 접합부 미세조직 변화

Fig. 1 및 Fig. 2는 1403K에서 접합한 경우, 유지 시간에 따른 접합부의 미세조직 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2의 (a)는 모재의 입계 혹은 덴드라이트 경계에 접한 접합부, (b)는 모재의 덴드라이트 중심부에 접한 접합부의 SEM조직을 비교한 것으로 입계 및 덴드라이트 경계에 접한 부분의 접합부 폭이 넓은 것을 볼 수 있다. 이것은 덴드라이트 경계부와 입계에 용점이 낮은 원소가 편석되어 있으므로, 액상삼입금속에 의한 모재의 용융반응이 많이 일어나기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 3은 그림 2(b)의 A와 B로 표시된 상들을 EDX로 분석한 결과이다. MBF-50을 용해한 시편을 XRD로 분석한 결과, γ , $Ni_{31}Si_{12}$, Cr_2B , Ni_3B 로 구성되어 있었다. 이것으로부터 A상은 Ni과 Ni- $Ni_{31}Si_{12}$ 의 공정조직이고, B상은 Cr_2B 인 것으로 사료된다.

이상의 결과로부터, 유지시간 0ks에서는 접합부 중앙

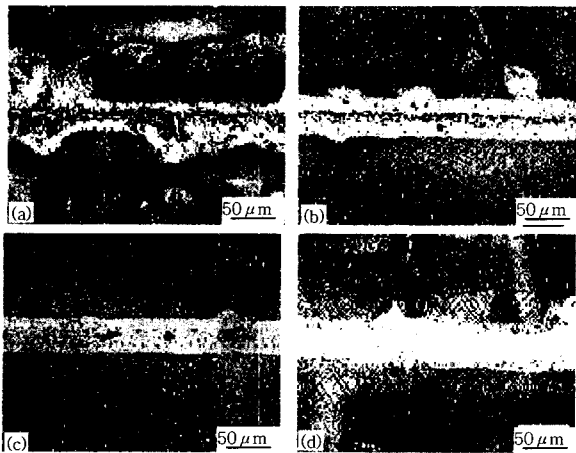


Fig. 1 Microstructures in joints bonded at 1403K. (a) 0ks, (b) 1.8ks, (c) 3.6ks and (d) 7.2ks

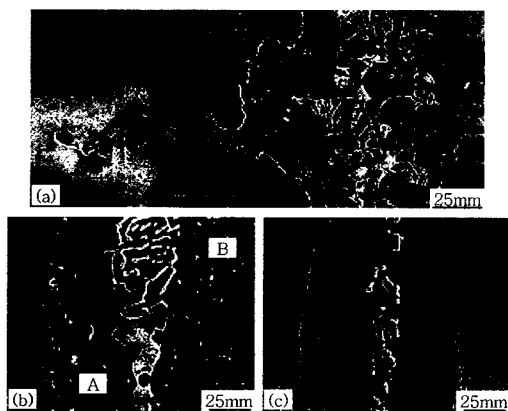


Fig. 2 SEM structures in joints bonded at 1403K. (a) and (b) 0ks and (c) 1.8ks

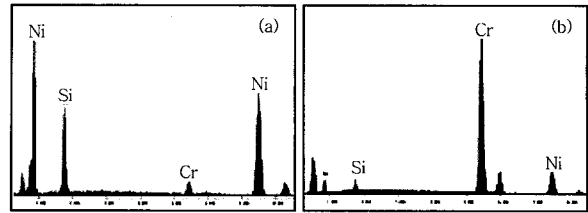


Fig. 3 Results of EDX analysis on (a) A phase and (b) B phase indicated in (b) of Fig. 2

부에 삼입금속의 공정조직과 Cr보라이드의 혼합상인 정출상이 띠 형태로 존재하지만, 유지시간이 길어짐에 따라서 정출상의 양이 감소하고, 특히 공정상이 우선적으로 사라지면서, Cr보라이드만이 남는다. 또한 유지시간 7.2ks에서는 정출상이 완전히 소멸되는 것을 볼 수 있다. 이러한 액상소멸현상은 이미 알려진 TLP 접합공정에서 나타나는 등온응고가 일어나기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 4는 1453K에서 접합한 경우, 유지시간에 따른 접합부의 미세조직 변화를 나타낸 것이다. 1453K의 접합부 미세조직 변화는 1403K의 변화와 완전히 다르다는 것을 확연히 알 수 있다. 특히 모재의 덴드라이트 및 입계 부근에서 액상삼입금속에 의한 모재의 용융현상이 심하게 일어나고, 접합부와 입계가 연결되는 현상이 일어나는 모습이 보이고, 3.6ks로 유지하여도 접합부와 모재의 입계가 서로 연결된 상태로 존재하는 것을 볼 수 있다. 또한 7.2ks 유지하여도 액상이라고 생각되는 상(A)이 존재하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5의 (a)와 (b)는 1453K×0ks 조건으로 접합한 경우, 각각 접합부와 접합부 근방 모재의 입계 SEM조직이고, (c)와 (d)는 1453K×1.8ks의 조건으로 접합한 경우, 각각 접합부와 접합부 근방 모재의 조직이다. (c)와 (d)의 미세조직을 비교하여 보면, 접합부의 조직은 접합조건과 관계없이, 여러 상이 혼재하고, 형상도 거의 유사한 것을 알 수 있으며, 접합부에 존재하는 상과 입계에 존재하는 상의 종류와 형상도 거

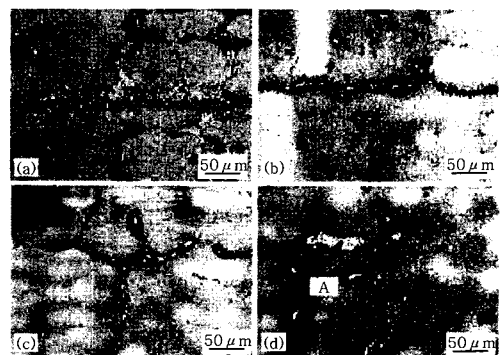


Fig. 4 Change of microstructures with holding time in joints bonded at 1453K (a) 0ks, (b) 1.8ks, (c) 3.6ks and (d) 7.2ks

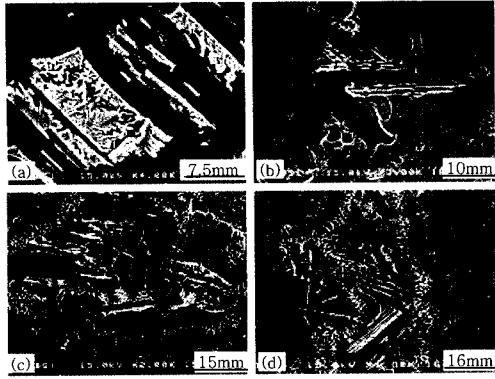


Fig. 5 SEM structures in joints bonded at 1453K. (a) bonded interlayer(0ks) (b) grain boundary (0ks), (c) bonded interlayer(1.8ks) (d) grain boundary (1.8ks)

의 유사한 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 각각 Fig. 5(a)의 상을, Fig. 7은 Fig. 5 (b)의 상을 EPMA로 성분 분석한 결과와 이것을 정리한 것을 나타낸 것이다. 이 분석결과로부터, 접합부는 Ni과 Ti의 농도가 높은 막대상과 Si, Ni 및 Ti의 농도가 높은 공정조직이 주류를 이루고 있으며, 이 외에 Cr과 B의 농도가 높은 피상과 ν 기지로 구성되어 있음을 알 수 있다. 또한 모재의 입계에 존재하는 상은 접합부와 거의 유사하나, 단지 막대상의 성분에서 접합부 보다 Al의 농도가 높은 것이 특징이다

전술한 바와 같이 MBF-50은 ν , $Ni_{31}Si_{12}$, Cr_2BNi_3B 로 구성되어 있다. 또한 모재를 XRD로 분석한 결과, ν, ν' 상(Ni_3Al 혹은 Ni_3AlTi), 판상 η 상(Ni_3Ti) 및

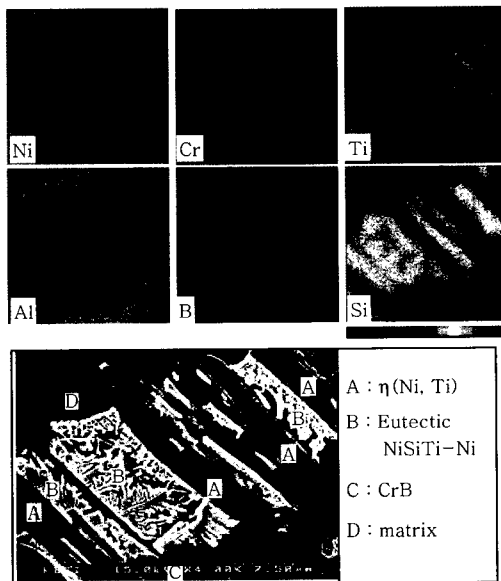


Fig. 6 EPMA element mapping in bonded interlayer of joint bonded at 1453K

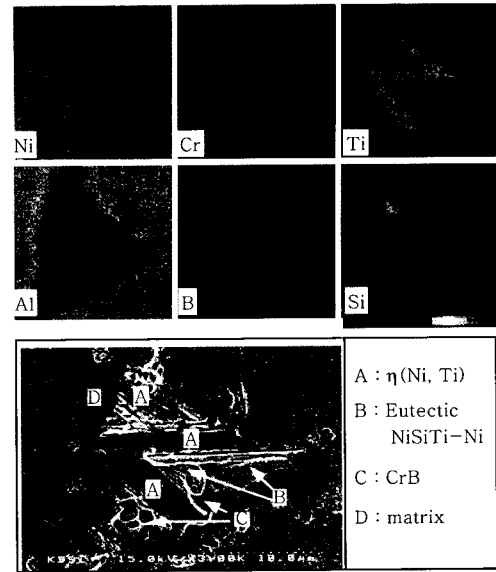


Fig. 7 EPMA element mapping in grain boundary adjacent to interface of joint bonded at 1453 K for 0ks

$M(Ti, Ta)C$ 의 상이 존재하였다. 이것을 참고로 하면, 막대상은 η 상이고, 공정상은 $\nu + Ni_{31}Si_{12}$ 의 공정조직이며, Cr과 B의 농도가 높은 피상은 Cr_2B 일 것으로 생각된다.

Fig. 8은 Fig. 5(c)의 상을 EPMA로 성분 분석한 결과와 이것을 정리한 것을 나타낸 것이다. 1.8ks의 접합부의 조직도 0ks의 것과 동일하게 Ni과 Ti의 농도가 높고 막대 형상인 η 상과 Si, Ni 및 Ti의 농도가 높은 공정상이 주류를 이루고 있으며, 이 외에 Cr과 B의

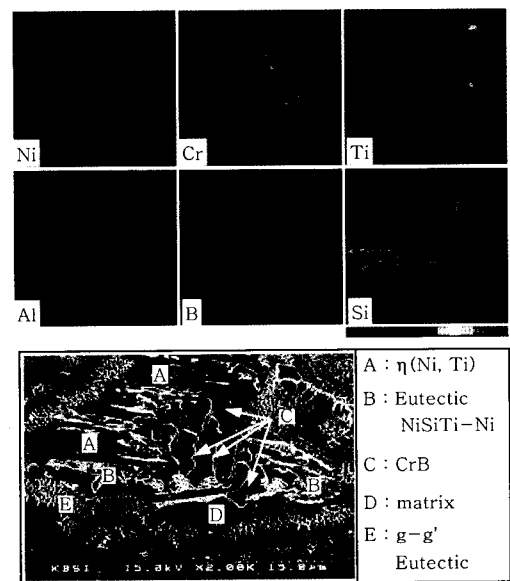


Fig. 8 EPMA element mapping in bonded interlayer of joint bonded at 1453K for 1.8ks

농도가 높은 피상인 Cr보라이드로 구성되어 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, 1453K에서 접합한 경우, 접합조건과 관계없이 접합부의 조직과 입계에 존재하는 조직이 유사한 것을 알 수 있다.

3.2 1403K의 접합기구

천이액상화산접합에서 액상소멸은 접합온도에서 유지하는 동안 용점저하 원소인 B, Si 등이 모재 쪽으로 확산함으로써 등온응고에 의해 일어나는 것으로 알려져 있다⁸⁾. 1403K에서 액상소멸과정을 검토하기 위하여, 유지시간에 따른 정출상의 변화를 정량적으로 분석하여 보았다. Fig. 9는 접합시간에 따른 공정상의 평균 폭의 변화를 측정하여 시간의 제곱근($s^{1/2}$)으로 정리한 것이다. 접합온도에서 액상이었던 것으로 여겨지는 공정상의 폭이 $s^{1/2}$ 에 반비례하여 직선적으로 감소하고 있다. 이것은 이미 알려진 용점저하원소인 B, Si 등이 모재 쪽으로 확산함으로써 등온응고에 의해 액상이 소멸하는 것을 의미한다. 등온응고 완료하는 시간은 약 5.0ks임을 알 수 있다.

등온응고 시에 고상의 성장기구를 고찰하기 위하여, 완전히 등온 응고 완료한 조건인 1423K × 7.2ks의 조건으로 접합한 시편에 대해 접합부 및 모재의 결정립 대응관계를 조사하여 보았다. Fig. 10은 접합부 근방의 미세조직(a)과 형성된 결정입계의 모식도(b)를 동시에 나타낸 것이다. 이것으로부터 접합부에는 다결정화 현상이 나타나지 않지만, 접합부에 형성된 입계가 굴곡되는 현상을 볼 수 있다. 입계가 굴곡된 것은 접합 시 양 모재 배열의 미스매치(mismatch)로 인하여 발생하는 것으로 생각된다.

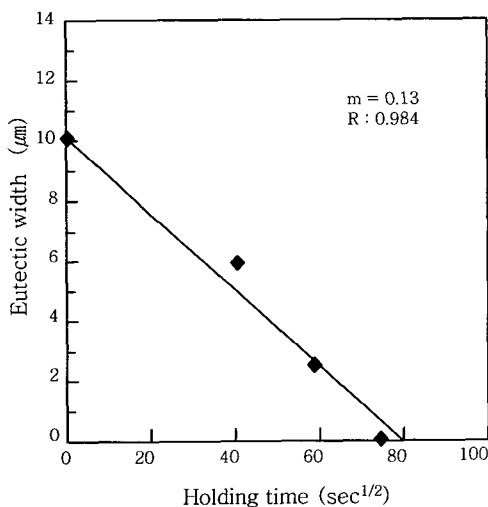


Fig. 9 The relation between eutectic width and the square root of holding time at 1403K

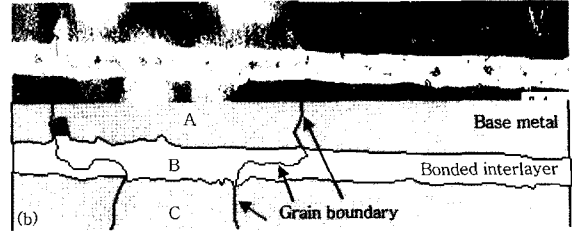


Fig. 10 Grain boundary feature(a) formed at bonded interlayer of joint held at 1403K for 3.6 ks and its schematic diagram(b)

또한 접합부 10mm 내에 존재하는 결정립계 수와 접합계면 모재에 존재하는 결정립계 수를 측정하여 비교한 결과, 접합계면 근방 양쪽 모재의 총결정립 수는 각각 4개이고, 접합부 내의 결정립 수도 4개로서, 접합부의 결정립과 모재의 결정립이 1:1 대응관계가 있음을 알 수 있었다.

모재와 접합부의 결정방위 관계를 알아보기 위하여 EBSP법으로 검토하여 보았다. Fig. 11은 삼입금속으로 MBF-50을 사용하여 1423K×7.2ks의 조건으로 접합한 접합부의 미세조직인 Fig.10에 표시한 각 A, B, C 위치에서 EBSP의 패턴을 나타낸 것이고, Table 2는 EBSP의 패턴으로부터 사진에 표시된 각 위치에서 횡방향(TD), 종방향(LD) 및 수직방향(ND)의 결정방위를 해석한 결과를 나타낸 것이다. 접합부의 결정방위는 모재와 약 1.0~1.4°의 차이가 있으나, 이것은 오차 범위인 것으로 생각된다. 따라서 접합부와 모재는 동일한 결정방위를 가지는 것으로 판단된다.

이상의 실험결과로부터 접합온도에서 유지하는 동안, 등온응고현상에 의해 액상이 소멸되면서, 고상의 성장은 일방향응고합금인 양쪽 모재의 결정방위가 같기 때문에, 접합계면에서 같은 방위를 가지고 성장하므로, 양 모재의 새로운 입계가 형성되지 않는 것으로 생각된다.

3.3 1453K의 접합기구

앞에서 1453K의 접합과정은 1403K와 다르다는 것을 발견하였다. 즉 접합온도에 따라 TLP접합과정인 용

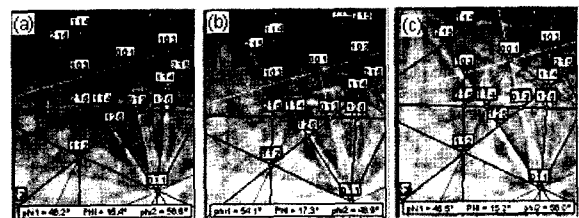


Fig. 11 The EBSP pattern obtained from regions indicated as A, B and C in Fig. 3

용삼입금속에 의한 모재의 용융반응과 액상소멸과정이 상이한 것을 알 수 있었다. 이러한 이유에 대하여 고찰하여 보았다. Fig. 12는 1473Kx0ks의 조건으로 접합한 시편의 접합부와 미세조직을 나타낸 것으로, (a)는 A로 표시된 접합부의 상, (b)는 계면에서 멀리 떨어진 모재의 결정립계에 존재하는 B상, (c)는 모재의 덴드라이트 경계에 존재하는 C상을 각각 EPMA로 성분 분석하여 비교한 것이다. 접합계면에 존재하는 상과 모재의 결정립계의 상들은 서로 연결되어 있는 반면, 덴드라이트 경계에 존재하는 상은 접합계면 상들과 단절되어 있다. 또한 EPMA 분석 결과를 비교하면, 접합부와 모재의 결정립계에 존재하는 상은 B(보론)과 C(탄소) 피크가 높지만, 모재의 덴드라이트 경계에 존재하는 상은 B의 피크가 나타나지 않고, C의 피크만이 높은 것이 특

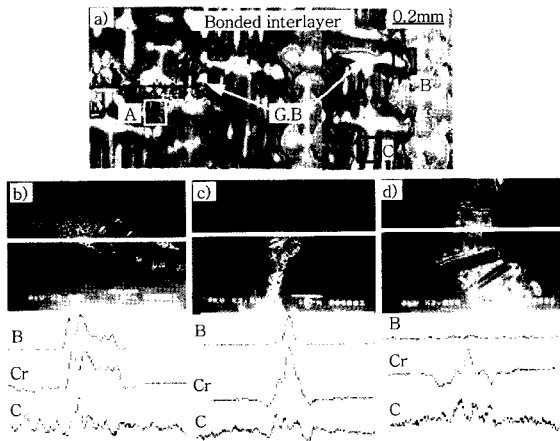


Fig. 12 Optical microstructure(a) of joint bonded for 0ks at 1453K and EPMA line analysis for phases in bonded interlayer(b), grain boundary(c) and dendrite boundary(d) away far from interface

징이다. 접합부로부터 약 1.5mm 떨어진 곳(B영역)에서 B 피크가 나타나는 것은 1473K로 가열하는 동안 삼입금속의 성분인 B이 계면에서 1.5mm까지 이동하였다는 것을 의미하고, 이것은 접합부와 결정립계가 어떤 현상에 의해서 연결되어, 액상삼입금속과 결정입계의 상이 서로 반응하였기 때문인 것으로 생각된다. 한편 모재의 덴드라이트 경계부에서는 B이 나타나지 않고, 상변태가 일어났다는 것은 접합온도로 가열하는 동안 액상 삼입금속과 이곳에 존재하는 상과 서로 반응하지 않고, 이들 상 자체가 변태하였다는 것을 시사한다. 그래서 모재를 접합조건과 같은 가열속도인 5K/s로 1423K~1473K 온도범위로 가열하고, 즉시 급랭(W.Q)한 후, 결정입계 및 덴드라이트 경계부의 상변화를 조사하여 결정입계의 액화 여부를 검토하여 보았다.

Fig. 13은 가열온도에 따른 미세조직 변화를 나타낸 것이다. 이것으로부터 1423K에서 입계에 존재하는 상들이 액화되어, 입계에서 균열이 발생 하는 것을 알 수

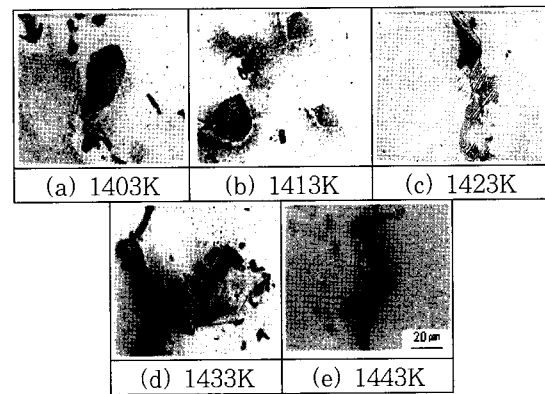


Fig. 13 Change of microstructures at grain boundary after water quenching at each temperature

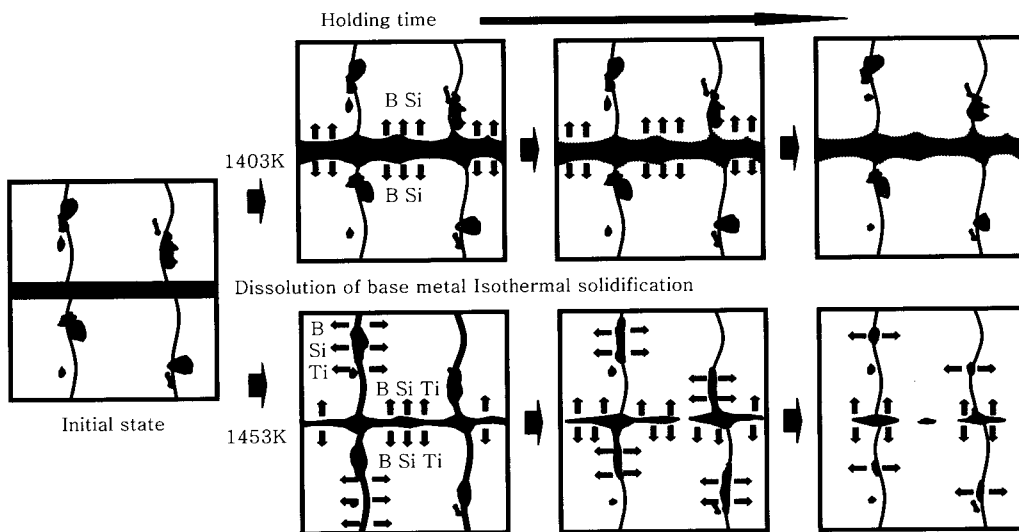


Fig. 14 Schematic diagram of the bonding process with the bonding temperature

있다. 따라서 1453K로 접합한 시편에서 접합계면으로부터 멀리 떨어진 입계에 존재하는 상이 원모재에 없었던 원소인 B이 존재하고, 접합부에 존재하는 상과 형상이 동일한 것은 가열 도중에 모재의 결정입계가 액화되어 액상삽입금속과 서로 연결되고, 액상상태에서 서로 혼합되기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 결과를 토대로, GTD-111을 천이액상확산접합하는 경우, 접합온도별로 접합과정을 정리하면, Fig. 14와 같이 나타낼 수 있다. 1403K의 경우, 접합초기에 액상삽입금속에 의해 모재의 일부가 용융하고, 유지시간의 증가에 따라서 용점저하원소인 B, Si 성분이 모재 쪽으로 확산됨으로써 등온응고하여 액상삽입금속이 감소하고, 소멸하여 접합이 완료된다.

1453K에서는 접합온도로 가열되는 동안 삽입금속이 용융되고, 모재의 입계에서도 액화가 발생하므로, 액상삽입금속과 액화된 입계의 액상이 서로 연결되면서, 액상상태에서 상호확산이 일어나고 반응한다. 모재의 액화현상에 대한 검토 결과⁹⁾에 의하면, γ - γ' 공정상 중에서 가장자리에 있는 Ti함유량이 높은 γ' 상 혹은 π 상과 무석출대와 반응하여 액화되는 것으로 확인되었다.

또한 모재의 Si과 B의 함유량은 아주 낮아, 액상과 주변의 농도 차가 아주 크므로, 확산이 빠르게 일어날 가능성이 많다. 그러나 Ti은 용융반응이 일어난 액상과 주위의 고상과의 농도 차가 적어, 확산 구동력이 낮기 때문에 확산속도가 느릴 것으로 생각된다. 이것을 감안하면, 접합초기에는 액상소멸현상은 유지시간이 증가함에 따라서 확산속도가 빠른 B, Si 등의 3차원적인 확산에 의해 율속되고, 접합후기의 액상소멸현상은 Si과 B보다 모재 액화에 간여하는 원소인 Ti도 확산에 의해 율속될 것으로 생각된다.

4. 결 론

Ni기 초내열합금 중에서도 Ti 함유량이 높은 GTD-111합금의 천이액상접합 시, 접합조건에 따른 미세조직 변화를 조사하여, 접합현상, 등온응고기구와 고상성장기구를 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 1403K에서 접합한 경우, 액상삽입금속은 용점저하원소인 B과 Si이 모재 쪽으로 확산에 의해 등온응고에 의해 소멸하고, 접합부의 고상은 모재의 결정방위와

에 의해 소멸하고, 접합부의 고상은 모재의 결정방위와 동일한 방위로 성장하는 에피택셀 성장에 의해 형성되었다.

2) 1453K에서 접합한 경우, 모재의 입계에서 액화가 일어나, 액상삽입금속과 액화된 입계가 서로 연결되고, 액상상태로 서로 확산하고, 반응하므로, 계면에서 아주 떨어진 입계에서도 접합부와 동일한 조직이 형성된다. 유지시간에 증가에 따라서, 접합부 및 액화된 입계의 액상은 감소하지만, 7.2ks 유지하여도 액상이 존재한다.

3) GTD-111합금은 다른 Ni기 초내열합금보다 Ti의 함유량이 높아 1423K에서 입계액화가 발생하고, 이로 인하여 접합온도가 입계액화 온도보다 높은 경우에는 이제까지 알려진 액상소멸현상과 다른 기구로 일어나는 것을 알았다. 즉, 액상소멸현상은 접합초기에 B, Si과 같은 삽입금속의 용점저하원소의 확산에 의해 과정이 율속되지만, 후기에는 입계 액화 원소인 Ti의 확산에 의해 율속되는 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00223-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. J.A.DAleo and J.R.Wilson : J of Engineering for Gas Turbine and Power, **120**(1998), April, 375
2. K.B.Gove : Joining Technology, (1989), June, pp341
3. M.H.Haafkens : W.J., **61-11**(1982), 25
4. Nakao : Welding Technique, 35-7(1987), 64
5. W.A Owcazarski : Physical Metallurgy of Metal Joining, The Metallurgical Society of AIME,(1980), 166
6. K.H. Richter : Brazing High Temperature Brazing and Diffusion Welding, DVS, 1998, 1
7. C.Y. Kang, W.Y. Kim : Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, **32-11**(1994), 1348
8. Nakao, C.Y Kang : Quarterly Journal of the Japanese Welding Society, **7-2**(1989), 213
9. C.Y.Kang : Journal of the Korean Welding Society, to be published