연 구 논 문

일방향응고 Ni기초내열합금 GTD-111의 천이액상확산접합(II)
- 접합공정에서 모재조직의 변화 -

강정윤* · 황형철* · 김인배* · 김대업** · 우인수***

*부산대학교 공과대학 재료공학부
**현대모비스
***POSCO 기술연구소

Transient Liquid Phase Bonding of Directionally Solidified Ni Base Superalloy, GTD-111(II) - Microstructural Change of Base Metal during Bonding Process -

Chung-Yun Kang*, Hyong-Chol Hwang*, 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 change of microstructures in the base metal during transient liquid phase bonding process of directionally Ni base superalloy, GTD-111 was investigated. Bonds were fabricated using a series of holding times(0~7.2ks) at three different temperatures(1403, 1418 and 1453K) under a vacuum of 13.3mPa

In raw material, γ-γ' eutectic phases, platelet η phases, MC carbide and PFZ were seen in interdendritic regions or near grain boundary and size of primary γ' precipitates near interdendritic regions were bigger than core region. The primary γ' precipitates in dendrite core were dissolved early in bonding process, but γ' precipitates near interdendritic regions were dissolved partially and shape changed. The dissolution rate increased with increasing temperature.

Phases in interdendritic regions or near grain boundary continually changed with time at the bonding temperature. In the bonding temperature of 1403K, eutectic phases had not significantly changed, but η phases had transformed from platelet shape to needle morphology and PFZ region had widened with time.

The interdendritic region and near grain boundary were liquated partially at 1423K and fully at 1453K by reaction of η phases and PFZ. In the bonding temperature of 1453K, interdendritic region and near grain boundary were liquated and then new phases which mixed with η phases, PFZ and MC carbide crystallized during cooling. Crystallized η phases transformed from rod shape to platelet shape with increasing holding time.

(Received January 15, 2003)

Key Words : Directionally solidified Ni Base Superalloy, GTD-111, Transient liquid phase bonding, Temperature, Holding time, Base metal, Dendrite boundary, Dendrite core, Microstructure, Grain boundary liquation

1. 서 론

최근 가스터빈의 핵심 부품인 버켓(Bucket)은 일방향응고 혹은 단결정 Ni기 초내열합금으로 주로 제조되고 있으며, 국내에는 GE에서 개발한 일방향응고합금인 GTD-111 합금이 가장 많이 사용되고 있다. 버켓은 주로 고온 고압분위기에서 사용되므로, 열피로와 고온부식 등에 의해서 미세 균열과 부분절단 등으로 파손되는 경우가 많다[1]. 파손된 경우 가격 측면과 환경문제 차원에서 보수하여 사용하려는 추세에 있다[2].

일방향응고합금은 용접균열 감수성이 아주 클 뿐만 아니라, 특히 용접부의 다결정화에 의해 강화기구가 소실되어 접합부 강도가 저하되므로, 보수기술로서는 용융용

접보다 천이액상확산접합(Transient Liquid Phase Bonding)이 가장 적합한 접합법으로 생각되고 있다. 그러나, 본 연구에서 사용하고자 하는 Ni기초내열 일방향 응고합금의 천이액상확산접합에 관한 연구보고[3]는 아주 드물다.

특히 GTD-111 합금은 다른 Ni기 초내열합금과 달리 Ti 함유량이 높아, 천이액상확산접합 온도 범위에서 입계가 액화하고, 입계액화 온도보다 높은 온도에서 접합하는 경우, 모재의 용융 현상 및 액상소멸기구가 다르고, 접합현상이 타 합금과 상이하고, 모재의 미세조직도 불안정하다는 사실을 발견하였다[4]. 한편, 이 합금의 고온에서 미세조직 불안정성에 대한 연구로서는 주로 버켓 사용 온도인 1173K에서 사용한 버켓을 채취하여 미세조직과 기계적 성질 변화에 대해 조사한 결과[5,6]가 있으나, 이 온도보다 높은 접합온도 1400K 이상에서 미세조직의 불안정성에 대한 연구는 없다.

그래서 본 연구에서는 GTD-111합금의 천이액상접합시, 접합온도와 유지시간에 따른 모재조직의 변화를 체계적으로 검토하고자 하였다.

2. 실험방법

모재는 산업용 가스터빈의 버켓으로 주로 사용되고 있는 Ni기초내열주조합금인 GTD111을 14Φ×200mm로 일방향응고 시킨 합금을 사용하였다. 삽입금속은 두께 약 40μm인 Ni기 비정질합금 MBF-50을 사용하였다. Table 1은 모재와 삽입금속의 화학조성을 표시한 것으로, GTD-111합금은 다른 Ni기 초내열합금보다 Ti량이 Al보다 많은 것이 특징이다. MBF-50은 융점저하 원소로서 B과 Si이 첨가되고, MBF 시리즈 중에서 B량이 가장 적은 것이 특징이다.

일방향응고 시킨 시료를 10mm로 절단하고, 절단에 의한 다결정화 현상을 방지하기 위하여 피접합면을 200㎛이상 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 4K/s의 가열속도로 접합온도 까지 고주파 가열 유지하여 행하였다. 접합 후 냉각은 공랭하였고, 접합압력은 1.76 MPa로 하였다. 온도계측 및 온도제어는 접합부 근방에 CA 열전대를 퍼커션용접하여 행하였다.

미세조직 관찰을 위한 에칭은 마블(marble : CuC_{l2} 12g + HCl 10㎖ + alcohol 10㎖)용액으로 화학에칭하거나, 10%과염소산알콜로 전해 에칭하였다. 접합부에 형성된 상의 성분분석은 EDX, EPMA로, 동정은 XRD로 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 원소재의 미세조직

Fig. 1은 원모재를 XRD로 분석한 결과를 나타낸 것으로, GTD 111합금은 기지인 γ와 γ'상, M(Ti,Ta)C 탄화물로 주로 구성되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 원모재의 마크로조직(a)과 덴드라이트 경계 혹은 입계 근방에서 공통적으로 존재하는 대표적인 미세조직(b)을 나타낸 것이다. (a)에서 덴드라이트의 경계는 어둡게, 중심부는 밝게 나타나므로, 덴드라이트 모양을 뚜렷하게 구별할 수 있다. (b)는 덴드라이트 경계에 존재하는 상을 나타낸 것으로, 다양한 상들이 존재하는 것을 알 수 있다.

우선 덴드라이트 경계와 중심의 명암 차가 나타나는 원인을 파악하기 위하여, γ'상의 석출 상황을 비교하여 보았다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 덴드라이트 중심부와 경계부에 존재하는 석출 γ'상을 비교한 것으로, 중심부의 γ'상은 사각형이지만, 경계부의 것은 형상이 불규칙하고, 아주 조대한 것이 특징이다.

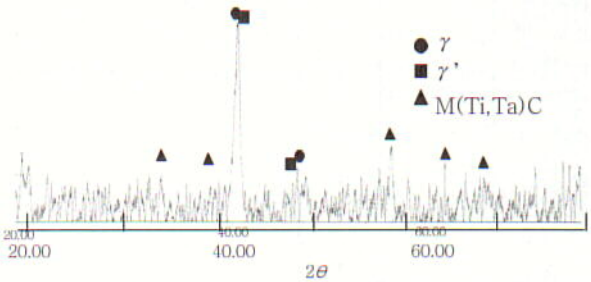

Fig. 1 Result of XRD analysis on raw base metal

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.

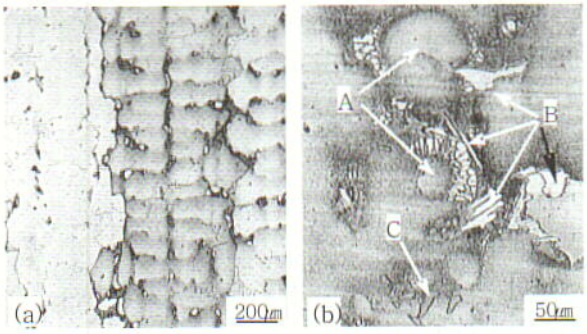

Fig. 2 Macrostructure of raw material(a) and micro sturcture near dendrite boundary(b)

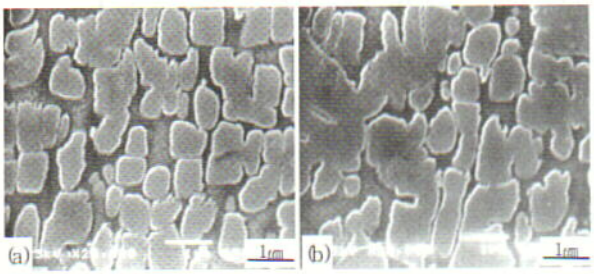

Fig. 3 γ'phases at dendrite core(a) and boundary(b)

Fig. 4는 덴드라이트 경계에 형성되어 있는 상의 종류를 파악하기 위하여, Fig. 1의 (b) 부분을 EPMA로 성분 분석한 결과를 나타낸 것이다. A로 표시된 공정상의 경우, 가장자리의 γ'상은 중심부의 것과 비교하여 아주 조대하고, Ti 및 Al의 농도가 높고, Ni, Cr, Co, Al의 농도가 낮은 경향이 있다. 공정상 주변에 존재하는 B로 표시된 판상은 조대 γ'상의 성분과 유사하지만, Ti의 농도가 높고, Al의 농도가 낮다. 이 결과로부터, 이 상은 Ti 함유량이 높은 GTD-111 합금 등에서 잘 나타나는 Ni과 Ti을 주성분으로 하는 Ni_3Ti인 η상[8]으로서, HCP 구조를 가지며, γ'상의 고용도 이상으로 Ti이 함유된 합금의 주조상태에서 생성되는 것으로 알려져 있다[7,8]. 또한 γ-γ'공정상과 η상의 주변에 검게 보이는 부분은 Ni, Al, Ti의 농도가 기지보다 낮지만, Cr과 Co가 농축되어 있음을 알 수 있다. 이 부분을 확대하여 보면, γ'이 존재하지 않은 무석출대인 것으로 확인되었다. 한편 C로 표시된 상은 Ti과 C의 농도가 높은 것으로부터, MC 탄화물임을 알 수 있으며, Fig. 4에는 나타내지 않았지만, Ta의 농도도 높았다.

이상의 결과로부터, 원모재의 덴드라이트 경계에는 γ-γ'공정상, η상, MC 탄화물이 형성되어 있으며, 공정상과 η상 주변에는 γ'무석 출대로 형성되어 있음을 알 수 있다. 또한 덴드라이트 경계와 중심에 존재하는 γ'의 형상과 크기가 차이가 있음을 알 수 있다.

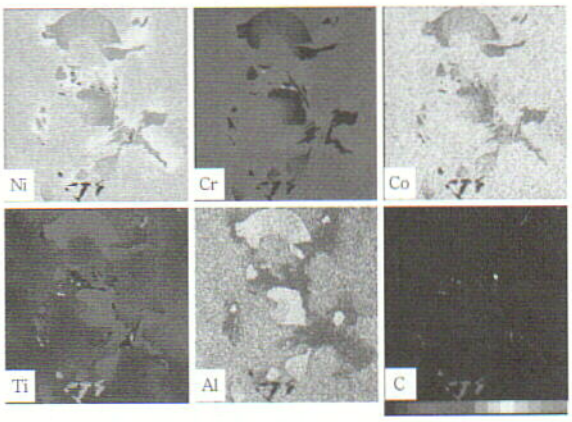

Fig. 4 Results of EPMA analysis on phases near dendrite boundary

3.2 접합조건에 따른 모재 미세조직 변화

천이액상확산접합공정은 액상 삽입금속이 등응응고에 의해 소멸하고, 등온응고 완료 시간은 접합온도와 삽입금속의 두께에 따라 달라진다. 이 합금의 접합에서는 일반적으로 1403K~1453K 온도 범위에서 주로 실시하므로, 이 온도 범위에서 유지시간에 따른 모재 조직의 변화를 체계적으로 검토하여 보았다. Fig. 5는 접합온도와 유지시간에 따른 모재 조직의 변화를 나타낸 것이다. 가열온도에 따라 조직의 차가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 1403K의 경우, 원모재 조직인 Fig. 2와 비교하여, 유지시간에 따라서 덴드라이트 중심부와 경계부에서 명암 차이가 생기는 것으로부터, 1차 석출 γ'상의 고용과

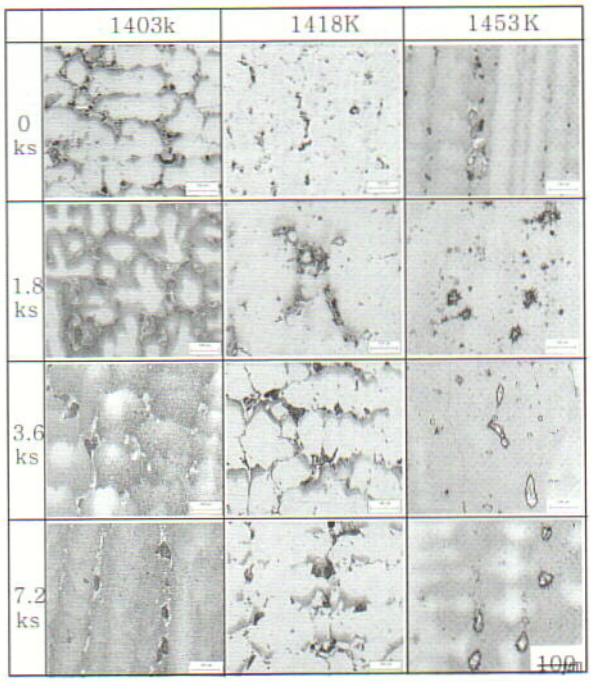

Fig. 5 Change of microstructures with temperature and holding time

재석출 현상이 일어난 것을 예상된다. 1418K의 경우, 1403K보다 덴드라이트 중심부에서는 1차 석출 γ'상이 빠르게 고용되고, 장시간에서도 재석출 현상이 일어나지 않는 것으로 보이고, 덴드라이트 경계에서는 공정상과 η상이 새로운 상으로 변화한 것을 알 수 있다. 1453K의 경우, 짧은 유지시간에도 불구하고 덴드라이트 모양이 소멸되고, 덴드라이트 경계에 존재하였던 공정상과 η상들이 새로운 상으로 변화하고, 1차 석출 γ'상의 분포도 변화하는 것을 볼 수 있다.

3.2.1. γ'상의 변화

먼저 접합조건 및 위치에 따른 γ'상의 변화를 조사하여 보았다. Fig. 6 및 Fig. 7은 각각 접합온도 및 유지시간에 따른 덴드라이트 중심부와 경계부의 γ'상의 크기 및 분포를 나타낸 것이다. 덴드라이트 중심부의 γ'상 크기, 형상 및 분포에 대해서 Fig.3(a)의 원모재와 Fig. 6의 1403K에서 접합한 시편과 서로 비교하여 보면, 1403K에서 0~3.6ks까지 유지한 것은 원모재의 1차 석출 γ'상이 사라지고, 냉각 시에 석출한 아주 미세한 γ'상만이 존재한다. 7.2ks 유지한 것은 미세한 γ'상 이외에 접합온도에서 재석출한 조대한 γ'상이 형성되어 있다. 1418K에서 3.6ks까지 유지한 것은 1403K와 동일하게 1차 석출 γ'상이 사라지고, 냉각 시에 석출한 아주 미세한 γ'상만이 존재하고, 7.2ks로 유지한 것은 재석출한 γ'상이 보이지만, 그 양이 1403K보다 적다. 한편 1453K에서 0~3.6ks까지 유지한 것은 미세한 γ'상만이 존재하지만, 7.2ks 유지한 것은 약간 성장한 것을 볼 수 있다.

덴드라이트 경계부에 대해서 Fig. 3(b)의 원모재와 Fig. 7의 접합시편과 비교하여 보면, 1403K의 경우, 유지시간에 관계없이, 1차 석출 γ'상과 미세 γ'상이 혼재하고 있지만, 원모재의 것과 비교하여 1차 석출 γ'상의 크기가 작아지고, 그 체적률도 감소하는 것을 알 수 있다. 중심부에서는 1차 석출 γ'상이 완전히 고용되지만, 경계부에서는 부분적으로 고용되는 것을 알 수 있다.

1418K의 경우, 미세 γ'상과 1차 석출 γ'상이 혼재하고, 1차석출 γ'상의 형상이 구형으로 변화하며, 체적률이 1403K보다 감소한 것을 알 수 있다. 한편, 1453K로 접합한 경우, 0ks로 유지한 것은 형상이 정사각형으로 변화한 1차 석출 γ'상과 미세 γ'상이 혼재하고 있으나, 3.6ks 유지한 것은 아주 미세 γ'상이 존재하며, 7.2ks 유지한 것은 약간 성장한 γ'상이 존재한다.

이상의 실험결과로부터, 덴드라이트 중심부와 경계부가 온도와 유지시간에 따라서 γ'상 '의 크기 및 형상 변화가 상이한 것을 알 수 있다. 즉, 유지시간이 짧을 경우, 덴드라이트 중심부의 1차 석출 γ'상은 고용하며, 유지시간이 길어지면 재석출하는 현상이 발생한다. 덴드라이트 경계에서는 유지시간이 증가에 따라서 1차 석출 γ'상이 고용되는 양이 증가하고, 온도가 높을수록 고용량이 증가하는 것을 알 수 있다.

접합 조건에 따른 γ'상의 변화가 덴드라이트 중심부와 경계부에서 차이가 나는 이유로는 γ'상 형성 원소인 Ti 및 Al의 편석현상 때문일 것으로 예상된다. 그래서 EPMA로 덴드라이트 경계부와 중심부의 Al, Cr, Ti,

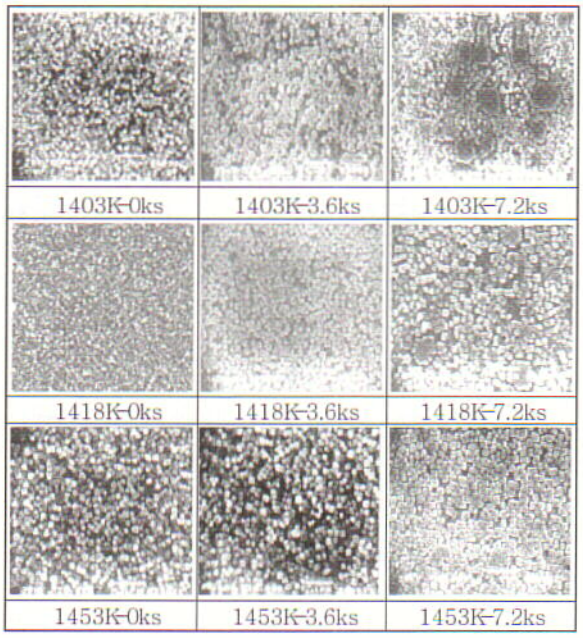

Fig. 6 Change of γ' phase at the dendrite core with temperature and holding time

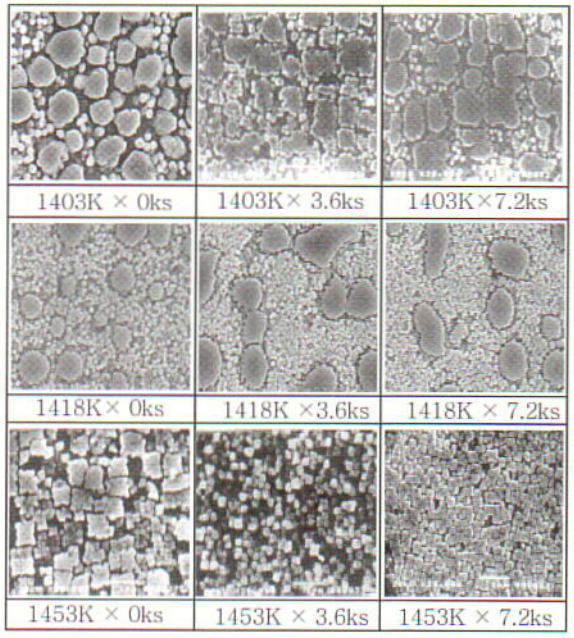

Fig. 7 Change of γ' phase at the dendrite boundary with temperature and holding time

Ni의 원소분포를 조사하여 보았다. Fig. 8은 분석 결과를 나타낸 것으로, 원모재는 덴드라이트 경계부가 특히 Ti 농도가 현저히 높은 것을 알 수 있다. Ni기 초내열합금에서 Ti+Al의 농도가 높을수록 γ'상의 고용 온도가 상승하고, 고온일수록 고용한이 높은 것으로 알려져 있다[9]. 따라서 Ti 농도가 낮은 덴드라이트 중심부는 1403K~1453K로 가열되면, 1차 석출 γ'상이 완전히 고용된다. 그러나, Ti 농도가 높은 경계부는 온도가 낮은 1403K에서 일부분만 고용되지만, 온도가 증가할수록 고용도가 증가하기 때문에, 1418K 및 1453K에서는 1차 석출 γ'상의 고용되는 량이 증가한다.

한편, 1403K 및 1418K에서 7.2ks로 장시간 유지한 시편에서 나타나는 γ'상의 재석출 현상은 장시간 유지하는 동안, Fig. 8의 (c)에서 알 수 있는 바와 같이 Ti의 농도가 높은 경계부에서 낮은 중심부로 확산이 일어나, 중심부에서도 Ti 농도가 상승하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 1453K에서는 1403K보다 Ti의 확산량이 많지만, 고용한이 높기 때문에 석출 구동력이 낮아, 크기가 작은 γ'상이 재석출이 일어나는 것으로 생각된다.

접합온도에 따라서 γ'상의 형상이 변화하는 이유를 고찰하면 다음과 같다. γ'상의 형상 변화 γ/γ'상의 격자정수 차와 관계가 있고, 격자정수 차이가 0~0.2%이면 구형으로, 0.5~1.0%이면, 정사각형으로, 1.25%이상이면 판상으로 석출되는 것으로 알려져 있다[10]. 또한 합금조성(Ti과 Al의 농도 비)에 따라서 격자정수가 차이가 발생하는 것으로 보고[11]되고 있다. 따라서 주조 시 발생한 편석현상 때문에 덴드라이트 경계부와 중심부에서 합금원소 농도 차이가 생기므로, γ'상의 형상이 다르다. 또한 접합하는 동안 상호확산이 일어나지만, 접합조건에 따라서, 확산되어 균질화 되는 정도가 달라지므로, 조성도 다르게 되기 때문에 γ'상의 형상이 변화하는 것으로 사료된다.

3.2.2 입계 및 덴드라이트 경계부에서 상변화

결정입계 및 덴드라이트 경계부의 미세조직 변화를 자세히 알아보기 위하여 고배율로 관찰하고, 각 상을 EPMA로 분석하여 보았다. Fig. 9는 1403K에서 유지시간에 따른 덴드라이트 경계부의 조직 변화를 나타낸 것이다. 유지시간이 증가함에 따라서 무석출대의 영역은 확장되어 가는 경향이 보이고, 판상인 η상(흰색)은 감소하여, 3.6ks에서 거의 소멸되고, 그 대신 공정상 주위와 내부에 새로운 침상이 형성되는 경향이 있다. 또한 입계에서 상변화도 거의 같은 경향이 있음을 확인되었다.

Fig. 10과 Fig. 11은 1403K에서 각각 0ks와 7.2ks로 유지한 시편의 덴드라이트 경계부를 EPMA로 분석한 결과를 나타낸 것이다. 이들 분석 결과와 원모재의 결과와 비교하여 보면, 0ks에서는 상의 종류 및 형상의 변화가 없고, 성분 분포도 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 한편, 7.2ks에서 형성된 침상은 Ti과 Ni 농도가 높은 것으로부

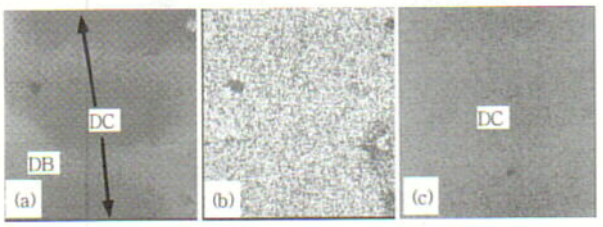

Fig. 8 Distribution of Ti and Al element near dendrite (a) Ti of raw material (b) Al of raw material and (c) Ti of specimen bonded with condition of 1403K × 3.6ks

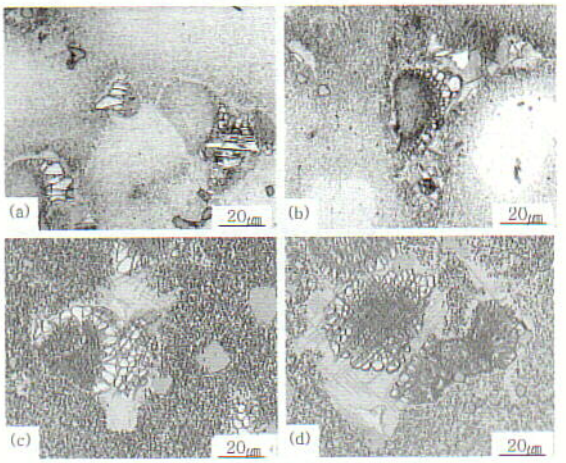

Fig. 9 Change of microstructures near dendrite boundary with holding time(1403K) (a) 0ks, (b) 1.8ks, (c) 3.6ks and (d) 7.2ks

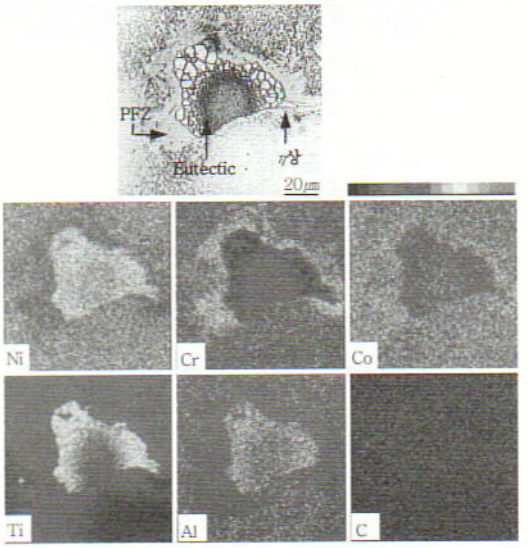

Fig. 10 Results of EPMA analysis for phase near dendrite boundary of base metal made at 1403K for 0ks

터 η상임을 알 수 있고, 원모재와 0ks의 것과 비교하여, 무석출대의 Co 함유량이 저하하는 대신 공정상 내에 조대 γ'상의 Co 농도가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 1418K에서 유지시간에 따른 덴드라이트 경계부의 미세조직 변화를 나타낸 것이다. 1403K와 비슷한 양상을 보이고 있으나, 침상 η상이 초기에 나타나고 3.6ks 이상에서 막대상으로 변화하며, γ'상의 크기가 성장하는 경향이 있다.

Fig. 13은 1453K에서 유지시간에 따른 덴드라이트 경계부의 미세조직 변화를 나타낸 것이다. 1453K에서 유지된 것은 1403K와 1418K의 것과 전혀 다르게, 공정상, η상, 무석출대 등이 사라지고, 새로운 상들로 변화한 것으로 보인다. 0ks로 유지한 SEM 조직(e)을 보면, 내부에는 다양한 상들이 혼재하고 있으며, 이 상의 주변에 γ'상이 형성되어 있다. 유지시간이 증가함에 따라서, 특히 막대상은 점점 두꺼운 판상으로 변화하고 있는 것을 볼 수 있다. 결정입계 근방에서 상 변화 경향도 동일하였다

Fig. 14 및 Fig. 15는 1453K에서 각각 0ks 및 7.2ks로 유지한 결정입계 근방에 존재하는 혼합상을 EPMA로 성분 분석한 결과를 나타낸 것이다. 0ks의 혼

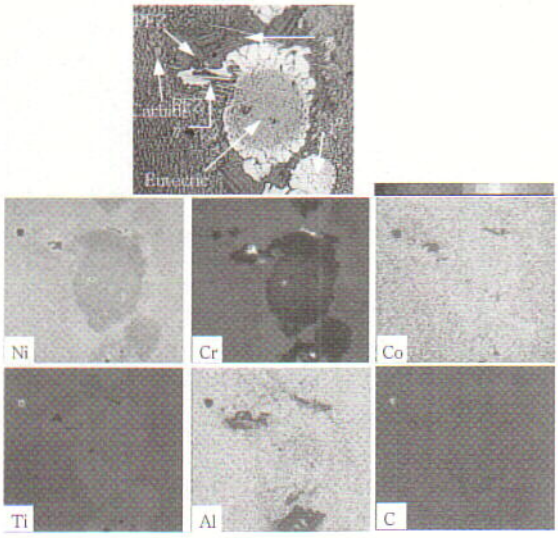

Fig. 11 Results of EPMA analysis for phase near dendrite boundary of base metal made at 1403K for 7.2ks

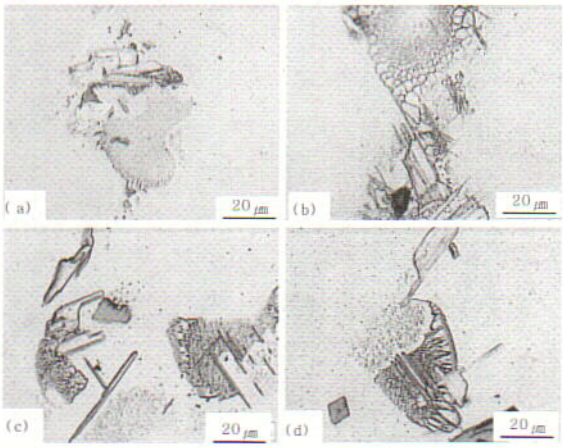

Fig. 12 Change of microstructures near dendrite boundary with holding time(1418K) (a) 0ks (b) 1.8ks (c) 3.6ks and (d) 7.2ks

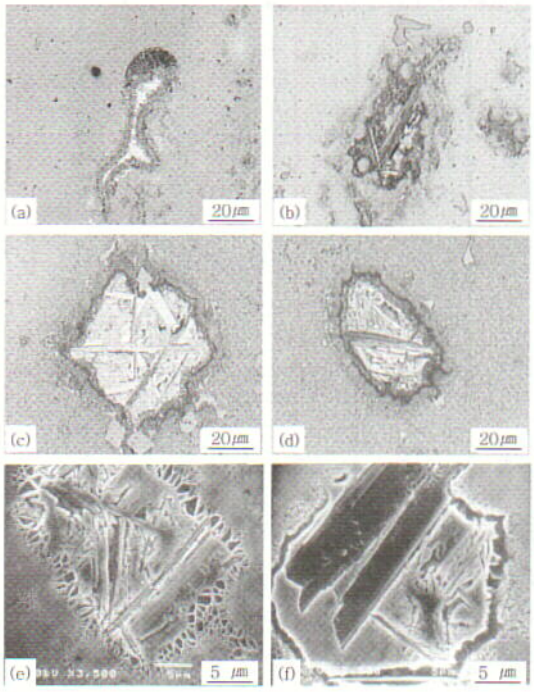

Fig. 13 Change of microstructures near dendrite boundary with holding time(1453K) (a) 0ks (b) 1.8ks (c) 3.6ks (d) 7.2ks (e) 0ks(SEM) and (f) 7.2ks(SEM)

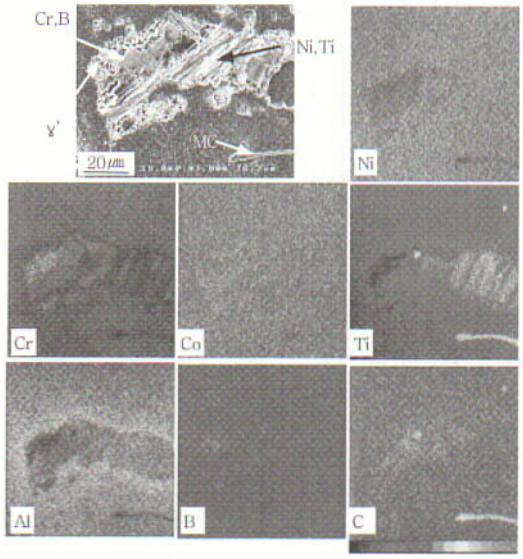

Fig. 14 Results of EPMA analysis for phase near dendrite boundary of base metal made at 1453K for 0ks

합상은 Ni, Ti, Al의 농도가 높은 막대형상인 η상, M(Ti, Ta)C 탄화물, Co, Cr의 농도가 높은 PFZ와 Ni, Cr, Co, Al의 농도가 높은 상으로 이루어져 있고, 더욱이 Cr계 보라이드도 존재함을 알 수 있다. 7.2ks의 혼합상의 경우, Ni과 Ti의 농도가 아주 높고, 여기에 Al이 함유된 판상의 η상, Cr, Co의 농도가 높은 PFZ와 Ni, Al, Co, Ti의 농도가 높은 상으로 이루어져 있음을 알 수 있다.

덴드라이트 경계 및 결정입계에 존재하던 공정상 및 η상이 혼합상으로 변화하는 이유를 검토하기 위하여, 1403K에서 1453K까지 가열한 후 즉시 급랭하고, 온도에 따른 조직의 변화를 관찰하여 보았다. Fig. 16은 그 결과를 나타낸 것이다. 1403K와 1413K에서는 원모재와 거의 변화가 없으나, 1423K에서는 공정상의 형체가 희미해지고, η상 근처에서 새로운 흑색 상이 형성된다. 1433K에서는 입계가 액화되어 균열이 발생하고, 공정상과 η상이 존재하였던 부분에 새로운 상이 형성되어 있다. 이 검은 상은 Fig. 12의 혼합상과 동일한 상이었다. 1443K에서는 입계 근방의 상이 완전히 액화되고, 액화된 부분이 표면장력에 의해 표면적을 줄인 형상으로 변화하고 있다.

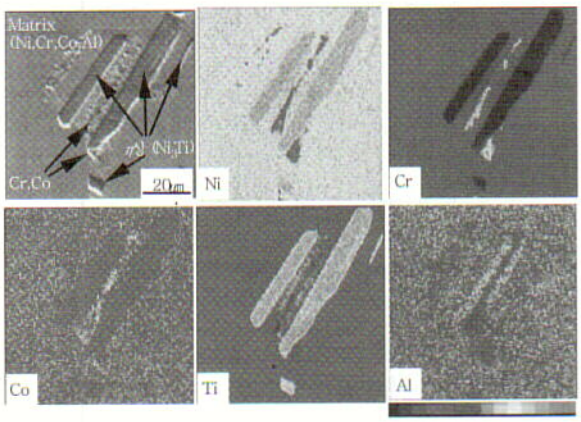

Fig. 15 Results of EPMA analysis for phase near dendrite boundary of base metal made at 1453K for 7.2ks

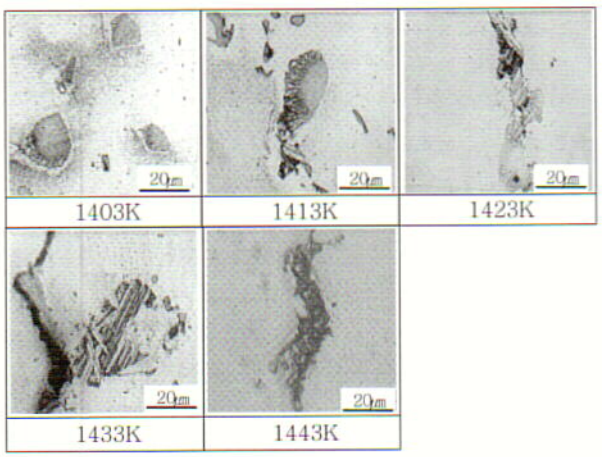

Fig. 16 Microsructures at dendrite or grain boundary after water quenching at each temperature

이상의 결과로부터 덴드라이트 경계 및 결정입계는 1423K에서 액화가 부분적으로 발생하고, 1433K에서 완전히 액화가 일어나는 것으로 판단된다. 따라서 1453K에서 접합한 모재의 덴드라이트 경계 및 결정입계에서 보이는 혼합상은 접합온도에서 액화된 부분이 냉각 시에 정출함으로써 형성되는 것으로 생각된다. 또한 Fig. 14에서 삽입금속의 성분인 B을 함유한 Cr계 보라이드가 형성된 것은 결정입계가 액화되어, 액상삽입금속과 서로 연결되고, 성분이 혼합됨으로써 형성된 것으로 생각된다. 모재의 액화기구에 대해서는 앞으로 체계적으로 검토할 예정이다.

4. 결 론

GTD-111합금의 천이액상접합 과정에서 모재 미세조직의 변화를 검토하기 위하여, 1403K~1453K 온도범위에서 접합한 접합시편을 대상으로 유지시간에 따른 상 변화를 조사한 결과, 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

1) 일방향응고 GTD-111합금은 결정입계 및 덴드라이트 경계에 γ-γ'공정상, 판상인 η상, M(Ti, Ta)C 탄화물이 존재하였고, 공정상과 η상 주변에 PFZ가 형성되어 있었다. 또한 덴드라이트 경계부는 중심부보다 Ti의 편석으로 γ'의 크기가 컸다.

2) 덴드라이트 중심부에서는 원모재의 1차 석출 γ'상이 접합온도에서 유지하는 동안 고용하고, 장시간 유지하면 오히려 재석출 하였다. 경계부에서는 Ti의 편석으로 부분적으로만 고용하고, Ti과 Al의 농도가 변화함에 따라서 형상이 변화하였다. γ'상의 고용속도는 온도가 높을수록 고용한이 증가하므로 빨랐다.

3) 각 접합온도로 가열하여 즉시 급랭처리하여 미세조직을 조사한 결과, 1423K에서 덴드라이트 경계부 혹은 결정입계에 존재하는 η상과 무석출대가 서로 반응하여, 액화가 부분적으로 일어나고, 1433K에서 완전히 액화되었다.

4) 결정입계 혹은 덴드라이트 경계에 존재하는 상은 접합온도에 따라서 변화하는 양상이 아주 달랐다. 액화가 발생하지 않은 1403K에서 유지하는 경우, 공정상은 거의 변화하지 않지만, η상은 판상에서 침상으로 변화하고, PFZ의 영역은 증가하였다. 1418K의 경우, 1403K와 비슷한 양상을 보이고 있으나, 판상의 η상이 침상, 막대상으로 변화하고, 공정상 내의 γ'상의 크기가 성장하였다. 그러나 액화온도보다 높은 1453K의 경우, 액

화현상으로 초기부터 원조직과 전혀 다른 막대상의 η 상, PFZ, MC 및 Cr계 보라이드가 혼합된 정출상이 나타나고, 장시간 유지하면, 아주 큰 판상인 η 상과 PFZ로 변화하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. K.B.Gove : Joining Technology, (1989), June, 341
2. DVS: Brazing High Temperature Brazing and Diffusion Bonding, 5th International Conference (1988.6), Achen, 192
3. C.Y. Kang, W.Y. Kim : Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, 32-11(1994),1348
4. C.Y.Kang :Journal of the Korean Welding Society, to be published
5. J. A. Daleo and J. R. Wilson : J of Engineering for Gas Turbine and Power, **120**(1998), April, 375
6. J.A. Daleo, K.A.Ellison : J of Engineering for Gas Turbine and Power, **121-1**(1999) 129
7. J.R. Davis : Heat-resistant Materials, ASM, pp225)
8. Loomis,W : Met. Trans. 1972, 3 p988
9. C.T. SIMS : The Superalloys(1972), John Wiley & Sons, 48
10. G.K. Bouse : Superalloys, TMS(1996), 163