

## 일방향응고 Ni기 초내열합금 천이액상확산접합부의 미세조직에 미치는 모재와 삽입금속 분말 혼합비의 영향

예창호\* · 이봉근\* · 송우영\* · 오인석\*\* · 강정윤\*

\*부산대학교 재료공학과

\*\*충남대학교 재료공학과, (주) 삼성테크윈

### The Mixing Ratio Effect of Insert Metal Powder and Insert Brazing Powder on Microstructure of the Region Brazed on DS Ni Base Super Alloy

Chang-Ho Ye\*, Bong-Keun Lee\*, Woo-Young Song\*, In-Seok Oh\*\* and Chung-Yun Kang\*

\*Dept. of Material Science and Engineering, Pusan University, Busan 609-735, Korea

\*\*Material Engineering, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea

\*\*Samsung Techwin.Co, LTD, Changwon 641-717, Korea

#### Abstract

The mixing ratio effect of the GTD-111(base metal) powder and the GNI-3 (Ni-14Cr-9.5Co-3.5Al-2.5B) powder on TLP(Transient Liquid Phase) bonding phenomena and mechanism was investigated.

At the mixing ratio of the base metal powder under 50wt%, the base metal powders fully melted at the initial time and a large amount of the base metal near the bonded interlayer was dissolved by liquid inter metal. Liquid insert metal was eliminated by isothermal solidification which was controlled by the diffusion of B into the base metal. The solid phases in the bonded interlayer grew epitaxially from the base metal near the bonded interlayer inward the insert metal during the isothermal solidification. The number of grain boundaries formed at the bonded interlayer corresponded with those of base metal. At the mixing ratio above 60wt%, the base metal powder melted only at the surface of the powder and the amount of the base metal dissolution was also less at the initial time. Nuclear of solids formed not only from the base metal near the bonded interlayer but also from the remained base metal powder in the bonded interlayer. Finally, the polycrystal in the bonded interlayer was formed when the isothermal solidification finished. When the isothermal solidification was finished, the contents of the elements in the boned interlayer were approximately equal to those of the base metal. Cr-W borides and Cr-W-Ta-Ti borides formed in the base metal near the bonded interlayer. And these borides decreased with the increasing of holding time.

\* Corresponding author : chye@sermatech.com

(Received November 7, 2005)

Key Words : Transient liquid phase bonding, Directionally solidified Ni base superalloy, GTD-111, Epitaxial growth, Powder, Microstructure, Isothermal solidification

#### 1. 서 론

최근 가스터빈의 핵심 부품인 버켓(Bucket)은 일방향응고 혹은 단결정 Ni기 초내열합금으로 주로 제조되고 있으며, 국내에는 G.E에서 개발한 일방향응고합금인 GTD-111 합금이 가장 많이 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 버켓

은 주로 고온 고압분위기에서 사용되므로, 열피로와 고온부식 등에 의한 미세 균열과 부분절단 등의 현상으로 파손되는 경우가 많다<sup>2)</sup>. 파손된 경우 가격 측면과 환경 문제 차원에서 보수하여 사용하려는 추세에 있다<sup>3)</sup>.

일방향응고 합금은 용접균열 감수성이 아주 클 뿐만 아니라, 특히 용접부의 다결정화에 의해 강화기구가 소실되어 집합부 강도가 저하되므로, 보수기술로서는 용

용융점보다 천이액상접합 (TLPB: Transient Liquid Phase Bonding)이 가장 적합한 접합법으로 생각되고 있다. 그러나, 본 연구에서 사용하고자 하는 일방향응고 Ni기 초내열합금의 천이액상확산접합에 관한 연구보고<sup>4)</sup>는 아주 드물다.

Kang등은 GTD-111 합금을 내로갭(Narrow gap)으로 TLP접합한 경우, 다른 Ni기 초내열합금과는 달리, 모재의 미세조직이 불안정하기 때문에, 접합온도에 따라서 모재의 용융 현상 및 액상소멸기구가 다르다는 것을 보고하고 있다<sup>5-7)</sup>.

한편, Ni기 초내열합금의 와이드갭(Wide gap) TLP 접합에 대한 연구 결과는 다소 있으나<sup>8-9)</sup>, 특히 GTD-111합금에 대한 연구는 거의 없다. 모재분말을 삽입금속 분말과 혼합하여 천이액상확산 접합에 사용할 경우 B의 양을 감소시켜 등온응고 시간을 단축시킬 수 있을 것으로 사료되며, 접합후  $\gamma$  생성원소인 Al 및 Ti을 모재부에서 접합부로 확산시키는 균질화처리 시간을 단축시킬 수 있을 것으로 사료되었다.

본 연구에서는 GTD-111합금의 와이드갭(200 $\mu$ m) 천이액상접합시, 접합공정과 균질화처리 시간을 단축시킬 목적으로 다량의 모재 분말과 Ni기 삽입금속을 혼합한 삽입금속을 사용하는 경우, 모재분말의 혼합비와 접합 조건에 따른 접합부의 미세조직 변화를 체계적으로 조사하여 접합 현상과 기구를 규명하는 것을 목적으로 수행하였다.

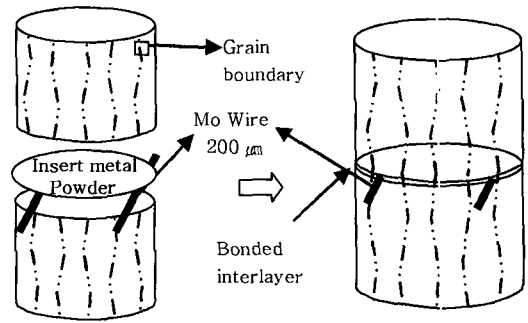
## 2. 사용재료 및 실험방법

Table 1은 모재와 삽입금속의 화학조성을 표시한 것이다. 시편은 가스터빈 버켓으로 사용되고 있는 Ni기 초내열 주조합금인 GTD-111을 15 $\phi$ mm  $\times$  300mm로 제조된 원소재를 사용하였다. 삽입금속은 15 $\mu$ m크기의 GTD-111과 GNI-3 혼합분말을 사용하였다. 혼합비에 따른 기호는 GNXX를 사용하였으며, XX는 GTD-111 분말의 첨가량을 나타낸다. 예를 들어 설명하면, GN40은 GTD-111 40wt%에 GNI-3 60wt%을 혼합한 분말이다. 삽입금속 혼합분말은 바인더를 사용하여 준비를 하였고, 용접저하 원소로서 B이 첨가되어 있다.

Fig. 1는 접합용 준비시편의 모식도를 나타낸다.

**Table 1** Chemical compositions of base metal and insert metal powder

	Element (wt%)									
	Cr	Ta	B	Co	Al	Ti	Mo	Ta	W	Ni
Base metal (GTD-111)	14	2.8	-	9.5	3.0	4.9	1.5	2.8	3.8	Bal
Insert metal (GNI-3)	14	-	2.5	9.5	3.5	-	-	-	-	Bal

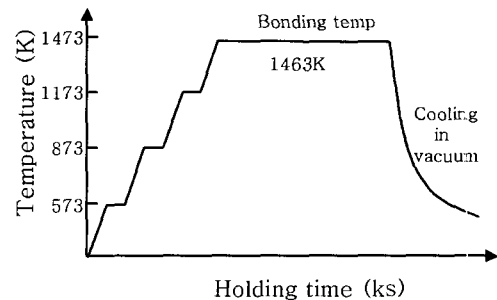


**Fig. 1** Schematic illustration of bonding specimen

일방향응고 시킨 시료를 10mm로 절단하고, 절단에 의한 다결정화 현상을 방지하기 위하여 피접합면을 200 $\mu$ m이상 연마한 후, 아세톤으로 초음파 세척하여 접합 시험편으로 사용하였다. 접합은 양 모재를 결정방향과 대응하도록 맞추고, 모재 사이에는 제조한 삽입금속을 도포하여 사용하였다. 접합간격은 200 $\mu$ m의 Mo선을 사용하여 간격을 유지하였다.

Fig. 2는 접합 열사이클을 나타낸 그림이다. 접합은 GTD111의 최대열처리 온도인 용체화 온도(1463K)에서 실시하였다. 접합은 진공소결로에 시험편을 장입한 후, 13.3mPa의 진공분위기 중에서 접합온도 1463K까지 분당 10 $^{\circ}$ C로 가열하였으며, 접합 후 냉각은 로냉 하였다.

미세조직 관찰을 위한 에칭은 Marble(CuCl<sub>2</sub> 12g + HCl 10ml + alcohol 10ml)용액으로 화학에칭 하였으며, 상분석 및 성분분석은 SEM, EPMA로 행하였다. 접합부 내의 입계의 형성 상황을 파악하기 위하여, 후방 산란전자 회절법 (EBSD : Electron Back-Scattered Diffraction)를 사용하여 결정방위 관계를 측정하였다. EBSD는 SEM에서 입사빔과 고각을 이루는, 후방으로 산란되는 기꾸지(Kikuchi) 회절도형으로 결정방위를 측정하는 방법이다<sup>10)</sup>. 측정하고자 하는 접합부 단면조직을 현출한 후, 분석 위치에서 얻어진 EBSD를 컴퓨터로 해석하여 대응하는 결정면을 매핑(Mapping)하여 시각적으로 보여줄 수 있다. EBSD에서 같은 색상은 같은 결정방위를 나타내게 된다. 이를 통해 모재와 접합부위의 결정방위 일치 여부를 확인하였다.



**Fig. 2** Transient liquid phase diffusion bonding heating cycle

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 분말혼합비에 따른 응고현상

모재 분말(GTD-111)과 Ni기 삽입금속(GNI-3)을 혼합하는 경우, 혼합비에 따라 혼합분말 삽입금속의 응점이 다르다. 혼합분말의 응점 변화를 시차주사열량분석기(DSC : Differential Scanning Calorimetry)를 이용하여 측정하였다. Table 2는 모재 분말의 혼합비에 따른 고상선 온도와 액상선 온도를 나타낸 것이다. 모재분말의 양이 증가함에 따라서 응점은 조금씩 증가하고 있다. 이 응점 측정 결과와 GTD-111의 용체화처리 온도를 고려하여, 접합온도를 용체화처리 온도인 1463K로 설정하였다.

Fig. 3은 삽입금속으로서 GN50을 사용하여 접합한 경우, 접합온도 1463K에서 유지시간에 따른 미세조직 변화를 나타낸 것이다. 또한 Fig. 4는 Fig. 3에 □로 표시한 부위를 SEM으로 확대한 것이고, (b)는 (a)에 □로 표시한 부위를 확대한 것이다. 0.9ks로 유지한 경우, 액상 삽입금속과 양모재가 반응하여 기존의 200 μm 폭에서 접합부(점선)가 넓어졌으며, 접합부 내부는 Fig. 4로부터 원래 삽입금속에서 나타나는 공정조직(A)과 모재에서 나타나는 v-v'공정조직(b)이 혼재하고 있음을 알 수 있다. 이것은 모재분말이 완전히 용융하고 혼합되어 모재의 응고조직과 삽입금속의 응고조직이

Table 2 Solidus and liquidus of the mixed powder

	GN40	GN50	GN60	GN70
Solidus(K)	1349.4	1359.5	1360.4	1361.2
Liquidus(K)	1431.9	1442.0	1450.2	1458.3

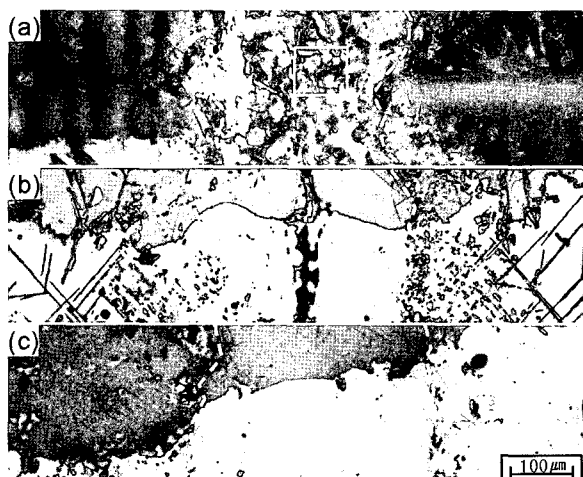


Fig. 3 Change of microstructures with the increasing of holding time at 1463K (GN50) (a) 0.9ks (b) 36ks (c) 72ks

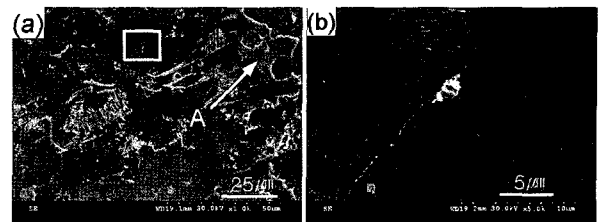


Fig. 4 SEM microstructures of the □ position on the Fig. 3 (a)

나타난 것을 의미한다. 36ks에서는 액상이 거의 소멸하여 접합부 중앙에만 조금 남아 있다. 유지시간을 길게 한 72ks에서는 완전히 액상이 소멸하고, 양모재의 입계가 접합부를 통해 서로 연결되어 있으며, 새로운 결정립은 찾아 볼 수 없다. 이것으로부터 접합부는 등온과정에서 양모재로부터 고상이 적층성장(Epitaxial growth)에 의해 이루어진 것으로 생각된다.

Fig. 5는 모재 분말 양이 많은 GN70의 경우, 유지시간에 따른 미세조직의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 6은 Fig. 5에 □로 표시한 부위를 SEM으로 확대한 것이고, (b)는 (a)에 □로 표시한 부위를 확대한 것이다. 0.9ks로 유지한 경우, 접합부의 조직은 GN50과 완전히 다르다는 것을 알 수 있다. 즉 모재의 용융부분이 아주 적고, Fig. 6(a)에서 알 수 있는 것처럼 모재분말

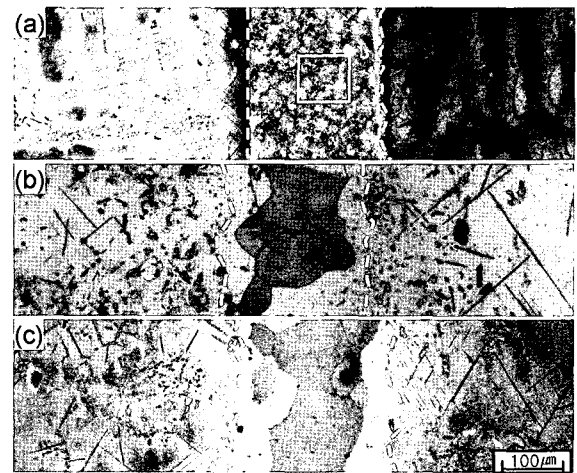


Fig. 5 Change of microstructures with the increasing of holding time at 1463K (GN70) (a) 0.9ks (b) 36ks (c) 72ks

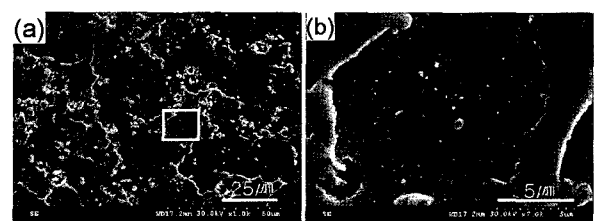


Fig. 6 SEM microstructure of the □ position on the Fig. 5 (a)

의 형상이 남아 있으며, 그 주위에 GNI-3 공정조직이 둘러싼 모양을 하고 있다. 이것으로부터 GN70의 경우 모재 분말의 양이 많고, 삽입금속의 양이 적어 모재 분말이 완전히 용융되지 않았음을 알 수 있다. 36ks 유지한 경우, 접합온도에서 액상이라고 여겨지는 공정조직이 관찰되지 않고, 접합부에 다각형 결정립이 형성되어 있다. 결국 3.6ks 유지하더라도 등온응고가 완료되었음을 의미한다. 72ks의 조건에서는 접합부 내부의 다각형 결정립이 성장하여 조대화된 것을 알 수 있다. 한편 삽입금속으로서 GN60을 사용한 접합부도 GN70과 거의 유사한 결과가 얻어졌다.

이상의 결과로부터 모재분말과 삽입금속의 혼합비에 따라 접합현상이 상이함을 알 수 있다.

Fig. 7은 삽입금속으로 GN50을 사용한 경우, 접합 시간에 따른 액상이라고 여겨지는 공정상의 평균 폭의 변화를 측정하여 유지시간과의 관계를 정리한 것이다. 공장상의 액상폭은 유지시간의 제곱근에 거의 반비례하는 것을 알 수 있다. 이것은 이미 알려진 용접저하원소인 B 등이 모재 쪽으로 확산함으로써 등온응고에 의해 액상이 소멸하는 것을 의미한다. 또한 등온응고 완료하는 시간은 약 72ks이었다.

한편 GN60과 GN70의 경우, 액상 삽입금속에 의한 모재 및 일부 분말이 용해한 액상으로부터 등온응고한 조직과 유지하는 동안 용체화처리 효과에 의해 공상 상태 분말에서  $v'$ 상이 고용한 조직과 뚜렷하게 구별하기 어렵기 때문에 등온응고과정의 정량화를 할 수 없었다.

등온응고과정에서 고상의 성장기구를 고찰하기 위하여, 완전히 등온 응고 완료한 조건인 1463K X 72ks의 조건으로 접합한 시편에 대해 접합부 내에 결정립 형성 상황을 조사하여 보았다.

Fig. 8은 분말의 혼합비에 따른 접합부 근방의 광학

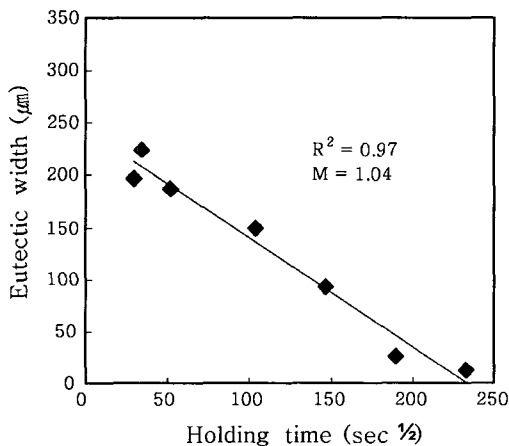


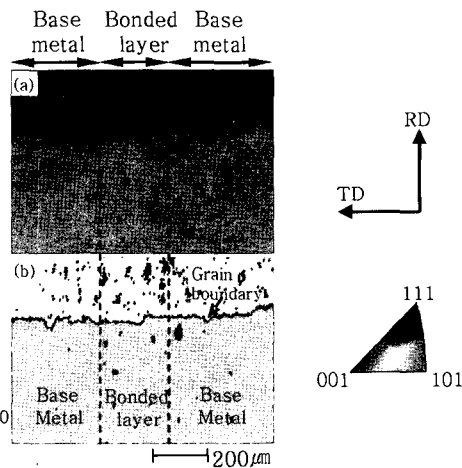
Fig. 7 Change of eutectic width with the increasing holding time at 1463K (GN50)

현미경 조직을 나타낸 것이다. GN50의 경우(a)는, 접합부 내부에 새로운 결정립을 관찰할 수 없지만, GN60과 GN70의 접합부에서는 새로운 결정립이 다수 관찰된다. 이것으로부터 GN60과 GN70을 삽입금속으로 사용한 경우, 모재 분말비가 과다하여, 액상삽입금속에 의해 모재분말이 완전히 용해되지 않고, 고상상태로 잔존하여, 고상상태인 미용해 분말로부터 접합과정 중에 고상이 성장하는 것으로 생각할 수 있다.

Ni기 삽입금속만을 사용한 내로갭(narrow gap) 천이액상확산접합부의 고상 성장 기구는 양모재 쪽에서 모재와 동일한 방향으로 적층성장(epitaxial growth)하는 것으로 잘 알려져 있다.<sup>5)</sup> 광학현미경 상으로는 GN50의 접합부도 적층성장에 의해 접합부의 고상 성장하는 것으로 추측된다. 이를 확인하기 위하여, GN50 접합부(1472K X 72ks)에 대해 EBSD 맵핑을 통해 양 모재 및 접합부의 결정방위를 조사하여 보았다. Fig. 9은 그 결과를 나타낸 것으로, (a)는 후방산란 전자현미경(BSE : Back Scattered Electron microscope) 이미지이고, (b)는 EBSD 맵핑(Mapping)결과를 나타낸 것이다. 여기서 접합부 전체에 대해 EBSD로 분석하였으나, 모두 동일하였으므로 대표적인 예만을 제시하였고 접합부에 수직방향(TD)과 접합부에 수평방향(RD)에 대해 측정하였으며, 결정방위가 15°이상 차이



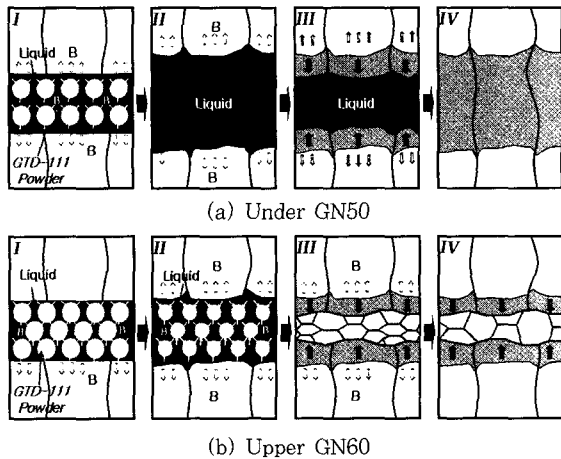
Fig. 8 Change of microstructures with the powder mixing ratio at 1463K X 72ks  
(a) GN50 condition (b) GN60 condition  
(c) GN70 condition



**Fig. 9** EBSD mapping result with GN50 at 1463K × 72ks  
 (a) BSE image on the bonded area  
 (b) EBSD result on the bonded area

가 나는 경우 색상이 변화하며 검은색의 경계가 나타나는 것이 특징이다. (a)에서 모재의 결정립계를 경계로 상부와 하부의 색상이 차이가 나는 이유는 결정방위가 상이함으로 에칭시에 화학적 반응성 차이 때문이다. (b)에서 양쪽 모재와 접합부가 모두 동일한 색상을 나타내고 있는 것으로 보아 15°이내의 결정방위 오차를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 접합부의 고상 성장 기구는 양 모재 결정방위와 동일하게 적층성장(Epitaxial growth)에 의한 것으로 확인되었다.

이상의 접합과정의 미세조직 변화에 대한 분석 결과로부터, 모재분말의 비율에 따른 접합기구를 모식적으로 정리하면 Fig. 10과 같이 표현할 수 있는 것으로 생각된다. 모재 분말량이 50%이하일 경우, Fig. 10 (a)와 같이 용융삽입금속(GNI-3)에 의해 모재분말과 모재 표면 일부가 용융되는 용해(Dissolution)과정(II)이 용점저하원소 B 농도가 접합온도에서 평형 농도에



**Fig. 10** Schematic illustration of solidification process

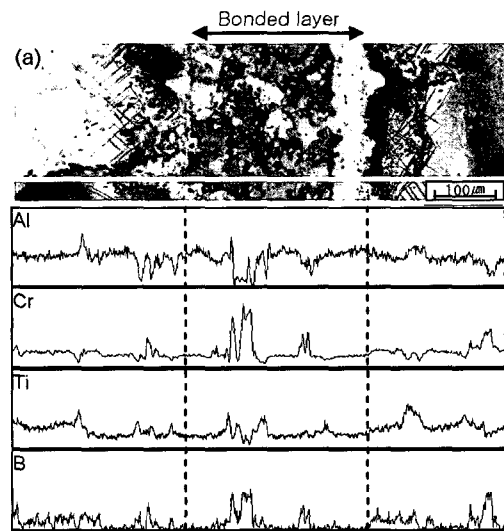
이를 때까지 계속되어, 접합부 폭(액상 폭)이 증가한다. 모재/접합부의 고액 계면에서 용점저하 원소가 모재 쪽으로 확산함으로써 양모재로부터 고상이 형성되는 등온응고과정(액상소멸과정(III))이 일어난다. 이때 고상은 모재의 결정방위와 동일한 방위로 성장하는 적층성장(Epitaxial growth)에 의해 형성되어, 모재/접합부 계면에 존재하는 모재의 입계와 접합부의 입계가 대응된다(IV).

한편 삽입금속 분말량이 60% 이상일 경우, Fig. 10의 (b)와 같이 액상 삽입금속(GNI-3)이 모재분말을 완전히 용융시키지 못하여, 미 용융된 고상상태의 분말과 액상 삽입금속이 혼합된 상태로 용융반응과정(II)이 완료된다. 등온응고과정(III)에서는 양모재로부터 고상이 형성될 뿐만 아니라, 잔존한 고상상태 분말로부터도 고상이 성장하여, 접합부에 모재와 결정 방위가 다른 새로운 다각형 결정립들이 형성된다. 이러한 결정립들은 접합과정 동안 성장하여 조대화 된다(IV).

**3.2 접합부의 조성 및 상 분석**

접합부가 다결정화 되지 않으면서, 다량의 모재성분을 가질 수 있는 GN50을 선정하여 접합부의 조성변화와 접합 근방에 형성된 상을 분석하여 보았다.

접합부가 모재와 동일한 미세조직과 기계적 특성을 얻기 위해서는 모재와 동일한 결정방위 뿐만 아니라 V'상의 분율이 모재 수준이어야 한다. 접합부의 V'상 분율은 Al과 Ti의 농도에 의존한다<sup>7)</sup>. 이를 평가하기 위해, EPMA를 사용하여, 선분석법으로 접합부 및 접합부 근방의 Al·Ti, Cr, B의 농도 변화를 조사하였다. Fig. 11 및 Fig. 12은 접합온도 1463K에서 유지시간



**Fig. 11** EPMA line result with GN50 at 1463K × 2.7ks in the bonded interlayer

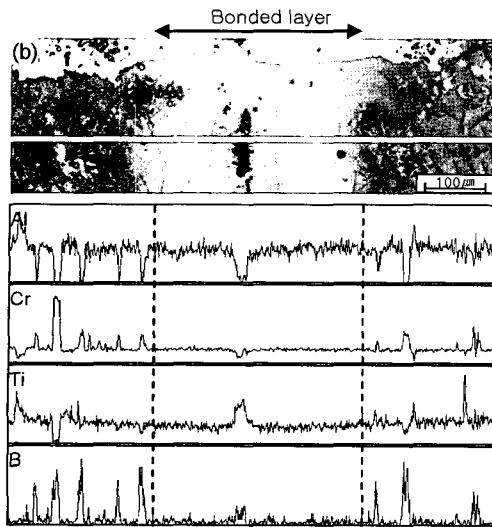


Fig. 12 EPMA line result with GN50 at 1463K x 54ks in the bonded interlayer

을 2.7ks와 54ks로 유지한 경우의 결과를 나타낸 것이다. 반응초기인 2.7ks에서는 접합부(점선내부)의 Cr, B 및 Ti 농도는 모재와 비교하여 다소 높지만, Al의 농도는 아주 낮음을 알 수 있다. 54ks 유지한 접합부(점선내부)의 경우, 잔류 액상을 제외한 등은 응고한 영역에서 모든 원소의 농도는 모재와 동일한 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 등은응고가 완료된 접합부에서는 모재와 거의 동일한 조성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 즉 이 프로세스에서는 접합부는 모재로부터 접합부위로 Al 및 Ti를 확산시키는 균질화처리가 필요하지 않다는 것을 알 수 있다.

접합과정 동안 접합부 근방에 형성되는 상에 대하여 분석하여 보았다. Fig. 13는 삽입금속으로 GN50을 사용한 경우, 접합부와 모재 계면 근방의 미세조직을 나타낸 것으로, (a)는 2.7ks, (b)는 54ks로 유지한 것이며, (c)와 (d)는 각각 A 및 B로 표시된 영역을 확

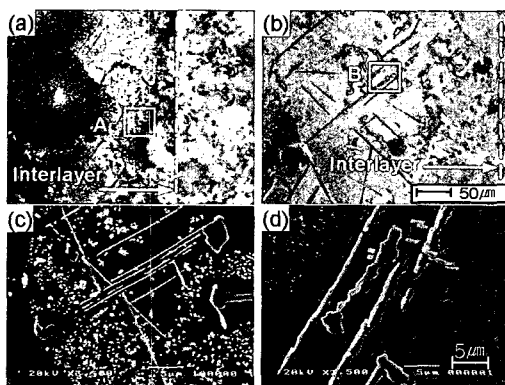


Fig. 13 Change of morphology on the base metal near the bonded interlayer at 1463K (GN50) (a)2.7ks (b)54ks (c)A of (a) (d) B of (b)

대한 것이다. 2.7ks로 유지한 접합 초기에는 계면의 모재 근방에서는 미세한 상과 침상이 관찰되고, 유지시간이 긴 54ks에서는 침상과 미세한 상이 함께 성장하여 조대화 되어 있는 양상을 볼 수 있다. 계면의 모재 근방에 형성된 상의 조성을 알아보기 위하여, Fig. 13의 (a)와 (b) 영역에 대하여 EPMA로 면분석 하여 보았다. 그 결과를 Fig. 14 및 Fig. 15에 나타낸다. 침상에서는 W, Cr 및 B의 농도가 높고, 구형으로 된 상들은 W-Cr-Ta-Ti과 B의 농도가 높은 것으로부터 이들 상은 붕화물임을 알 수 있다. 유지시간이 증가함에 따라서 체적율은 감소하였다. 이러한 붕화물을 완전히 고용시키기 위하여 접합 후 균질화 처리를 행하게 되면 소멸되는 것으로 보고되고 있다<sup>6)</sup>.

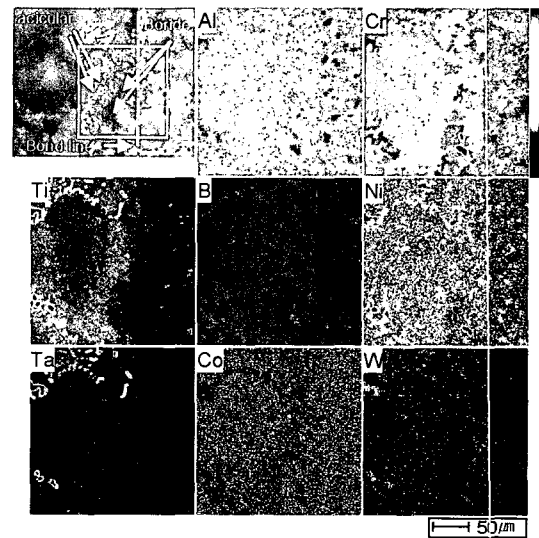


Fig. 14 EPMA mapping result with GN50 at 1463K x 2.7ks in near the bonded interlayer

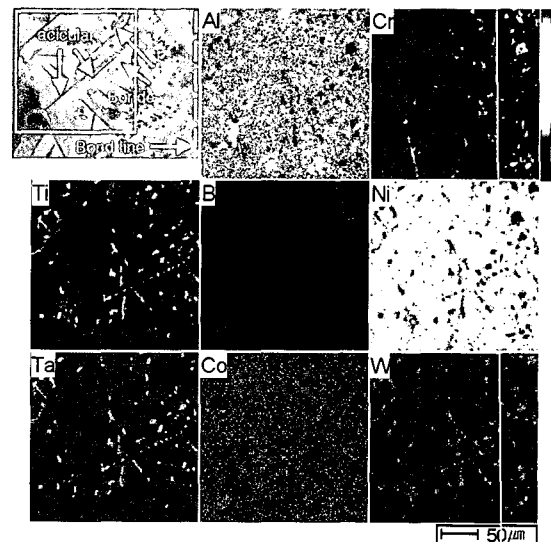


Fig. 15 EPMA mapping result with GN50 at 1463K x 54ks in near the bonded interlayer

#### 4. 결 론

삽입금속으로서 GNI-3(Ni-14Cr-9.5Co-3.5Al-2.5B) 분말과 모재(GTD-111)분말의 혼합분말을 사용하여 1463K에서 접합시간의 변화에 따른 접합부 미세조직 변화로부터 접합 현상과 기구에 대해 검토하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 모재분말의 양이 50%이하의 혼합분말을 삽입금속으로 사용한 경우, 접합초기에 액상 삽입금속(GNI-3)에 의해 모재분말이 완전히 용융되고, 모재도 다소 용융되어 혼합 액상을 이루었다. 유지시간의 증가에 따라서 용점저하 원소가 모재 쪽으로 확산됨에 따라서 액상이 소멸하였고, 이 때 고상은 양모재로부터 적층성장(Epitaxial growth)하여, 접합부의 결정방위는 모재와 동일 하였고, 접합 후 일방향응고 특성을 그대로 유지하였다.

2) 모재분말의 양이 60%이상인 경우, 접합초기에 액상 삽입금속에 의해 모재분말의 표면부만 용융되고, 모재도 아주 미미하게 용융되어, 액상과 고체상태인 모재분말로 이루어진 상태에서 등온응고가 발생하였다. 등온응고 과정에서 고상이 양모재와 접합부 내의 미용해 분말로부터도 성장하여, 접합부는 다결정화 되었다.

3) 50% 혼합분말을 삽입금속으로 사용한 접합 부근방에 대하여 EPMA로 조성변화를 검토한 결과, 등온응고 완료(1463K X 72ks) 후의 접합부 조성은 모재와 거의 동일하였다. 또한 접합계면의 모재 쪽에 Cr-W계 및 Cr-W-Ta-Ti계 붕화물이 형성되었으며, 유지시

간이 길어짐에 따라서 조대화 되고 있다. 따라서 접합 후 붕화물을 고용하기 위한 후열처리가 필요한 것으로 생각되었다.

#### 참 고 문 헌

1. J.A.Daleo and J.R.Wilson : *J of Engineering for Gas Turbine and Power*, **120**(1998), April, pp375
2. K.B.Gove : *Joining Technology*, (1989), June, pp341
3. DVS : *Brazing High Temperature Brazing and Diffusion Bonding*, 5th International Conference (1988.6), Achen, 192
4. C.Y. Kang, W.Y. Kim : *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, **32-11**(1994), pp1348
5. Chung-Yun Kang, In-Bae Kim, Dae-Up Kim, In-Su Woo, Min-Suk Kwon : *Journal of KWS*, **21-2**(2003), 211-218 (in Korea)
6. Chung-Yun Kang, Hyong-Chol Whang, In-Bae Kim, Dae-Up Kim, In-Su Woo : *Journal of KWS*, **21-2**(2003), pp.219-226 (in Korea)
7. Chung-Yun Kang, Hyong-Chol Whang, In-Bae Kim, Dae-Up Kim, In-Su Woo : *Journal of KWS*, **21-3**(2003), 334-340
8. H.Kokawa, C.H. Lee, T.H. North : *Metallurgical Transactions A*, **22A**(1991), pp. 1627-1631
9. C.Y. Su, C.P. Chou, W.J. Chang, M.H. Liu : *JMEPEG (ASM International)*, **9**(2000), 663-668
10. V. Randle : *Microtexture Determination and Its Application*, Inst. Mat. Bourne Press, Bournemouth, Great Britain (1992)