

일방향 초내열합금 GTD-111DS에서 삽입금속 분말에 따른 천이액상확산접합부의 접합강도 특성

오인석* · 김길무* · 문병식**

*충남대학교 재료공학과

**삼성테크윈(주)

The Bonding Strength Characteristic of the Filler Metal Powder on the TLP Bonded Region of Superalloy GTD-111DS

In-Seok Oh*, Gil-Moo Kim* and Byeong-Shik Moon**

*Dept. of Material Science and Engineering, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea

**Samsung Techwin.Co., Ltd. Changwon 641-717, Korea

Abstract

The Ni-base superalloy GTD111 DS is used in the first stage blade of high power land-based gas turbines. Advanced repair technologies of the blade have been introduced to the gas turbine industry over recent years. The effect of the filler metal powder on Transient Liquid Phase bonding phenomenon and tensile mechanical properties was investigated on the GTD111 DS superalloy. At the filler metal powder N series, 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 filler metal powder was eliminated by isothermal solidification which was controlled by the diffusion of B into the base metal. The solids in the bonded interlayer grew from the base metal near the bonded interlayer inward the insert metal during the isothermal solidification. The bond strength of N series filler metal powder was over 1000 MPa. and γ' phase size of N series TLP bonded region was similar with base metal by influence of Ti, Al elements.

At the insert metal powder M series, the Si element fluidity of the filler metal was good but microstructure irregularity on bonded region because of excessive Si element. Nuclear of solids formed not only from the base metal near the bonded interlayer but also from the remained filler metal powder in the bonded interlayer. When the isothermal solidification was finished, the content of the elements in the bonded interlayer was approximately equal to that of the base metal. But boride and silicide formed in the base metal near the bonded interlayer. And these boride decreased with the increasing of holding time. The bond strength of M series filler metal powder was about 400 MPa.

*Corresponding author : iso.oh@samsung.com

(Received May 28, 2007)

Key Words : Transient liquid phase bonding, Directionally solidified Ni base superalloy, GTD-111DS, Wide-Gap, Bonding strength, Microstructure, Isothermal solidification

1. 서 론

일방향응고 Ni기 초내열 주조합금 GTD-111DS는 발전용 가스터빈의 1단 블레이드로 많이 사용되고 있다¹⁾.

블레이드는 고가의 부품이기에 사용 중 손상된 블레이드를 수리하여 재사용 한다. 이를 재생 수리하기 위하여 열처리 및 많은 용접 수리기술이 개발되어 적용되고 있다. Ni기 초내열 주조합금이나 일방향응고 합금 및 단결정 합금과 같은 고강도 합금은 용융용접이 어렵고, 브

레이징이나 고상확산접합법은 접합부위의 기계적 특성이 모재 수준의 기계적 성질에 미치지 못한다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 접합법을 개발하기 위한 많은 노력의 결과로 1974년 미국의 D.S. Duvall에 의해서 천이액상확산접합법(TLP Bonding: Transient Liquid Phase Bonding)이라는 새로운 접합법이 개발 되었다. 이 접합법은 모재와 유사한 조성의 용점을 저하시키는 B, P, Si 과 같은 원소를 첨가한 금속재료를 모재 사이에 삽입하여 접합온도로 가열, 유지하면 삽입금속의 용점 저하원소가 모재로 확산하면서 모재와 접합부 사이에 상호확산이 촉진되어 접합부와 모재를 일체화시키는 방법이다. 천이액상확산접합법은 고상확산 접합법과 비교하여, 접합면에 일시적으로 액상이 형성되기 때문에 비교적 용이하게 금속결합을 얻을 수 있고, 정밀한 표면가공이 필요 없다는 장점이 있다. 또한, 브레이징 접합법과 달리 금속간화합물이 형성되지 않게 등온에서 응고가 완료되어 접합이 이루어지므로 취약한 금속간화합물의 생성도 방지할 수 있는 장점이 있다. 결국, 이 접합법은 종래의 고상확산접합법과 브레이징 접합법의 장점만을 조합시킨 접합법이기 때문에, 원리적으로 모재와 거의 같은 정도의 물리적, 화학적, 기계적 성질을 갖는 접합부를 얻을 수 있다. 뿐만 아니라, 3차원적으로 두 물체를 연결하므로 이제까지의 선용접인 TIG, MIG, EBW 방법보다도 고효율적인 접합법이라고 할 수 있고, Ni기 초내열합금의 용접상의 문제점을 해결할 수 있는 접합법이라고 사료된다. 블레이드는 주로 고온 고압분위기에서 사용되므로, 열 피로와 고온부식 등에 의해서 미세균열이나 부분손실 등에 의해 파손되는 경우가 많다²⁾. 파손된 경우 가격 측면과 환경문제 차원에서 보수하여 사용하려는 추세에 있고,³⁾ 다결정 주조합금에는 해외 몇 업체에서 베인(Vane)이나 기타부품에 천이액상확산법을 이용하여 재생수리에 일부 사용하고 있으나 일방향 주조합금에서는 천이액상확산접합 현상인 모재의 용융 현상 및 등온응고 기구에 결정입계가 큰 영향을 미치는 것으로 보고⁴⁻⁶⁾ 되고 있고 아직 연구개발 수준이다. 따라서 국내에서도 산업용 가스터빈의 블레이드 재료로 많이 사용되고 있는 일방향응고 합금의 재생수리를 위하여 접합에 대한 이론 및 기술 구축이 필요한 실정이다. 한편, Ni기 초내열합금의 와이드 갭(Wide Gap) TLP 접합에 대한 연구 결과는 일부 있지만 GTD-111합금에 대한 연구는 거의 없는 실정이다⁷⁻⁸⁾. 본 연구에서는 GTD-111DS 합금의 와이드 갭 수리를 위한 방법으로 천이액상확산접합을 이용하여 접합 수행 후, 삽입금속분말의 원소가 접합강도에 미치는 영향을

분석 관찰하였다. 균질화 열처리처리 시간을 단축시킬 목적으로 모재와 유사한 Ni기 삽입금속분말을 제조하여 사용하였으며, 삽입금속분말의 조성 및 접합조건에 따른 접합부의 기계적 특성 및 미세조직 영향을 분석하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 시험에 사용된 모재의 화학조성은 Table 1에서 보여주는 바와 같이 Ni기 초내열 합금이며, 봉상 형태로 크기 $\Phi 15 \times 300\text{mm}$ 로 일방향 주조시킨 시편을 사용하였다. 미세조직관찰용은 10mm, 인장시험용 시편은 80mm로 절단하여 사용하였다. 인장시험은 ASTM E8과 E21에 준하여 수행되었다. 모재 인장강도 평가는 온도 20°C에서 870°C까지 수행하였고, 접합 후 삽입금속분말의 종류에 따라 모재를 천이액상확산법으로 접합한 시험편은 상온에서 인장 시험을 수행하였다. 접합강도가 우수한 N계열 삽입금속분말로 접합한 시료에 대해서 고온인장강도를 평가하여 모재대비 접합강도 수준을 비교하였으며 삽입금속분말의 조성에 따라 접합강도에 영향을 주는 인자를 규명하였다.

접합수행 시 접합부에 존재하는 B의 확산 이동시간 및 접합 후에도 접합부내에 충분한 γ' 상을 생성시키기 위해 필요한 성분인 Ti 및 Al의 농도를 얻기 위해 장시간의 균질화 열처리 시간이 소요된다. 따라서 삽입금속분말에 B의 함량을 낮추어 접합 완료까지 필요한 확산 시간을 단축시킨다⁹⁾. Si, Ti 및 Al이 첨가된 삽입금속분말을 사용하여 접합 수행 시 삽입금속분말의 유동성, γ' 상 형성 및 접합 후에 접합부의 접합강도에 미치는 영향을 연구하기 위하여 삽입금속분말을 제작하여, TLP 접합을 수행하였다. 접합 열처리온도는 1190°C에서 수행하였으며, 실제 블레이드의 손상균열의 경우 150 μm 내외의 폭을 가지고 있어 충분한 갭(Gap)으로 생각되는 200 μm 로 접합을 실시하였다. 삽입금속분말 조성은 Table 2와 같다. 삽입금속분말은 15 μm 크기의 혼합분말을 사용하였고, 바인더를 이용하여 삽입금속분말을 혼합한 후 접합을 하였다.

Fig. 1는 접합된 인장시험편의 시편가공 전 사진이다. 시료를 절단하고, 절단에 의한 다결정화 현상을 제거하기 위하여 피 접합면을 200 μm 이상 연마한 후, 아세톤으로 초음파 세척하여 접합 시험편으로 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions of base metal

Metal	Element (Wt%)									
	Cr	Si	Co	Al	Ti	Mo	Ta	W	Fe	Ni
GTD 111DS	14	0.3	9.5	3.0	4.9	1.5	2.8	3.8	0.5	Bal

Table 2 Chemical compositions of insert metal

Insert Metal	Ni	Cr	B	Ti	Al	Si
M1	Bal.	14	1.26	0.49	0.3	6.75
M2	Bal.	14	1.12	0.98	0.6	6.00
M3	Bal.	14	0.98	1.47	0.9	5.25
M5	Bal.	14	0.7	2.45	1.5	3.75
M7	Bal.	14	0.42	3.43	2.1	2.25
N2	Bal.	14	2.00	0.98	3.4	0
N3	Bal.	14	1.75	1.47	3.35	0
N5	Bal.	14	1.25	2.45	3.25	0
N7	Bal.	14	0.75	3.43	3.15	0



Fig. 1 Photo of bonded specimen

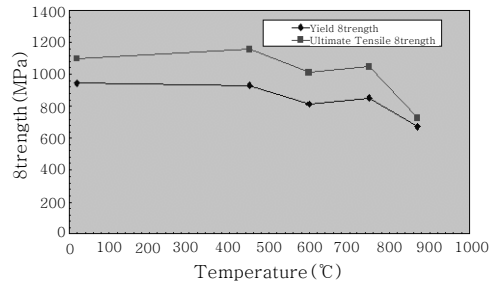
접합은 양 모재를 결정방향과 대응하도록 맞추고, 중간에 제조한 삽입금속분말을 충전 하여 사용 하였다. 접합 간격을 유지하기 위하여 200 μ m의 Mo선을 이용하여 간격을 유지하였다.

접합온도는 GTD-111DS 주조합금의 최대열처리 온도인 용체화 온도 1190 $^{\circ}$ C에서 실시하였다. 접합 방법은 진공로에 시험편을 장입한 후, 13.3MPa의 진공분위기 중에서 10 $^{\circ}$ C/분 의 가열속도로 가열하고 유지하였다. 접합부 인장시험은 MTS 만능시험기를 사용 하였다.

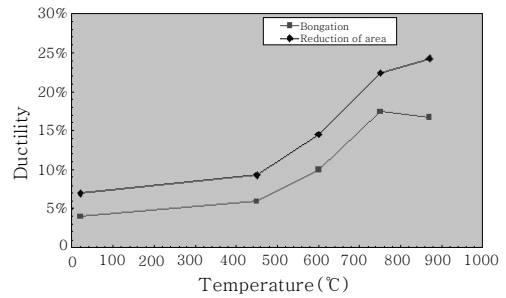
3. 실험결과 및 고찰

3.1 모재의 기계적 특성

Fig. 2는 GTD-111 DS 모재의 인장시험을 상온에서 부터 870 $^{\circ}$ C 까지 수행한 결과를 나타내었다. 인장강도는 상온에서 1100 MPa, 항복강도는 956 MPa이고, 일반적인 γ' 석출강화 초내열합금과 유사하게 약 750 $^{\circ}$ C까지는 강도가 유지되나, 그 이상의 온도에서는 강도가 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다. 연성특성의 경우는 연신율과 단면수축률은 750 $^{\circ}$ C까지 온도가 상승함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다.



(a) Tensile strength



(b) Elongation and reduction of area

Fig. 2 Mechanical properties of GTD111 DS

3.2 삽입금속에 따른 접합부의 기계적 특성

접합열처리 조건(1190 $^{\circ}$ C \pm 14 $^{\circ}$ C 에서 20 시간동안 유지하고, 아르곤 퀘칭 및 3단 시효 열처리)에서 접합 후, 삽입금속분말의 종류에 따른 상온에서의 접합강도를 측정 분석한 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. N계열 삽입금속분말의 강도가 M계열의 삽입금속분말의 강도보다 우수한 특성을 나타내었다. 시험에 사용된 삽입금속분말의 조성을 비교분석한 결과 M계열의 삽입금속분말에 유동성을 위하여 첨가된 Si성분이 강도측면에서 고려할 때 접합강도를 약화 시키는 원인으로 사료되었다. N2, N3, N5의 순서로 N 계열 삽입금속분말은 모재수준 이상의 높은 접합강도를 얻을 수 있었다. N2, N3, N5 삽입금속분말은 초내열합금의 주요 강화요소인 γ' 상을 생성시키기 위해 필요한 성분인 Ti 및 Al의 함량이 다르기 때

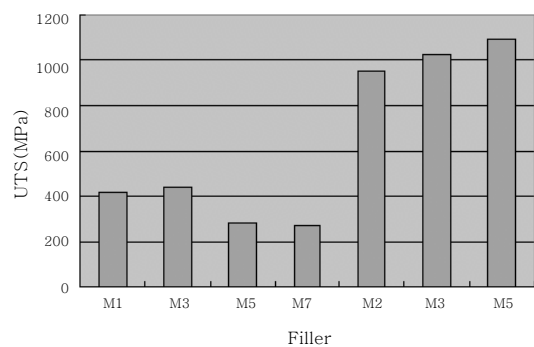


Fig. 3 Bonding tensile strength of fillers

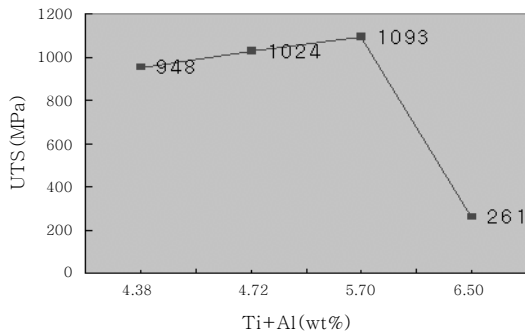


Fig. 4 Effect of Ti, Al elements on bonding tensile strength

문에, 삽입금속분말에 첨가된 Ti, Al의 함량에 따른 관점에서 접합강도를 Fig. 4에 비교하였다. Ti, Al 원소의 함량이 증가함에 따라 접합강도가 증가하였다. 그러나 Ti, Al 원소의 함량이 6.5wt% 인 N7 삽입금속분말에서는 접합강도가 261MPa로 급격히 떨어졌다. 이는 삽입금속분말의 용융점(액상온도; 1361°C, 고상온도; 1185°C)이 천이액상 확산접합 온도(1190°C)에 비교하여 높기 때문에 삽입금속분말이 충분히 용융되지 않아 나타난 현상으로 판단되었다. N5 삽입금속분말을 이용하여 천이액상 확산 접합 하였을 때 접합부의 상온 인장강도가 1070MPa, 항복강도는 952MPa로 우수 하였으며, 750°C에서의 인장강도는 1049 MPa로 GTD-111DS 모재와 유사한 결과를 얻었다.

3.3 접합부의 미세조직

접합부의 기계적인 특성 차이의 원인을 분석하기 위해 접합부의 미세조직을 관찰 하였다. 접합부는 200μm 폭(Wide Gap)을 유지하고 있기 때문에 모재와 동일한 미세조직과 기계적 특성을 얻기 위해서는 모재와 동일한 결정방위 뿐만 아니라 γ'상의 분율이 모재 수준이어야 한다. 접합부의 γ'상 분율은 Al과 Ti의 농도에 의존한다⁶⁾. 이를 평가하기 위해, EDS 선 분석법으로 접합부 근방의 Al, Ti, Cr, Si의 농도 변화를 조사하였다. Fig. 5는 M5 삽입금속분말로 천이액상 확산접합 후, 접합부와 모재성분의 농도 변화를 나타낸 것이다. 접합부에서 Ti, Al 원소의 농도는 모재보다 낮고, Si 원소의 농도는 모재보다 높게 관찰 되었다. Cr, Ni 원소의 농도는 모재와 비교하여 접합부의 농도가 유사하고, 균일하게 분포되어 있으나 Si원소는 접합 경계부위에서 불균일하게 분포되어있는 것이 관찰 되었다. 따라서 M계열 삽입금속분말은 천이액상 확산접합 후 Si원소의 잉여로 인하여 확산되지 못한 Si원소가 잔류되어 실리사이드(Silicide)

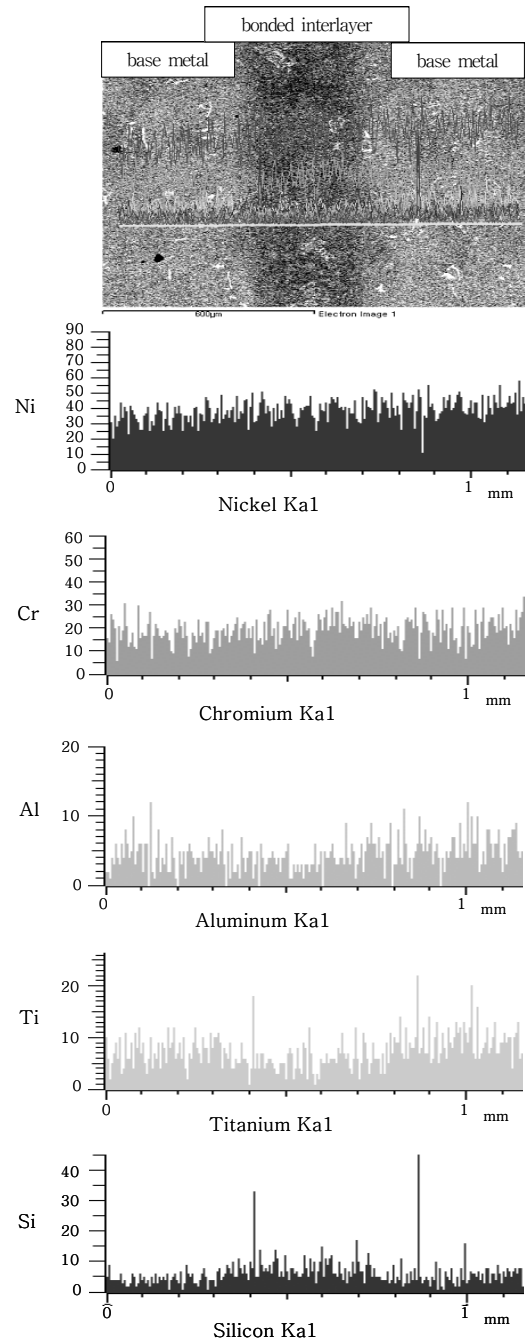


Fig. 5 EDS line result with M5 filler in bonded interlayer

가 생성되어 접합부의 접합강도 저하에 영향을 미치는 것으로 사료되었다. N5 삽입금속분말로 천이액상 확산 접합 후, 성분의 농도 변화를 Fig. 6에 비교하였다. 접합부 일부 Cr 및 Ti 원소에서 이상 피크가 나타나지만 전체적으로 Ti, Al 및 Cr, Co, Ni 원소의 농도는 모재와 비교하여 접합부의 농도가 유사하고, 균일하게 분포되어 있었다. M계열 삽입금속분말에 비하여 Al 과 Ti원소 함량이 증가되고, 용점강하 원소인 Si를 첨가하지 않은 N계열 삽입금속분말이 M계열 삽입금속분말보다 우수한

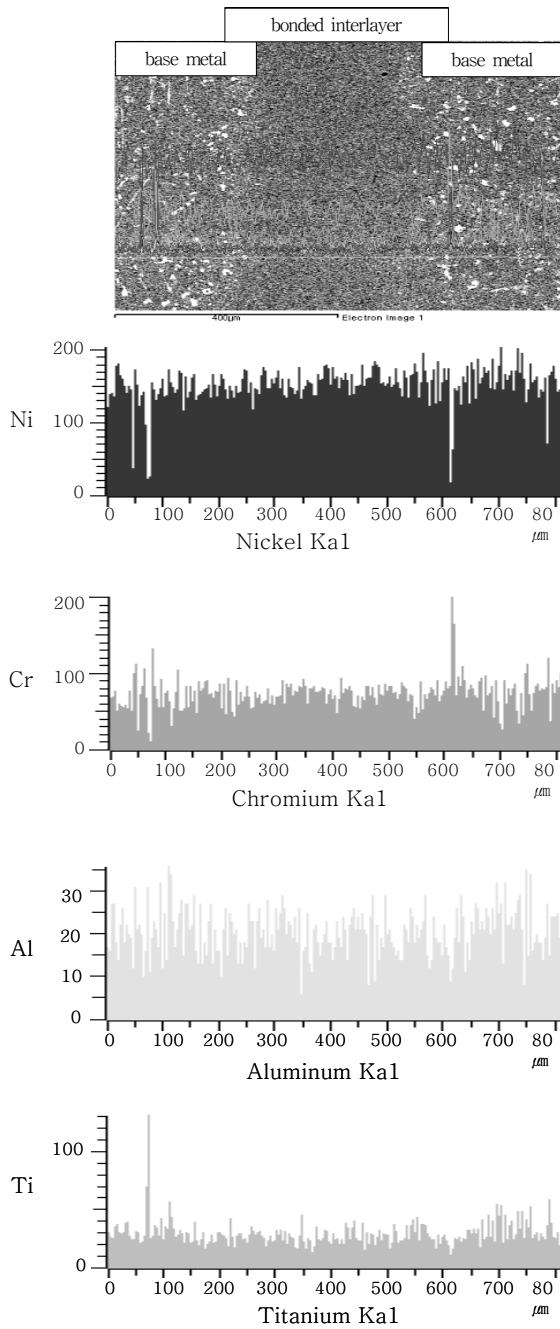


Fig. 6 EDS line result with N5 filler in bonded interlayer

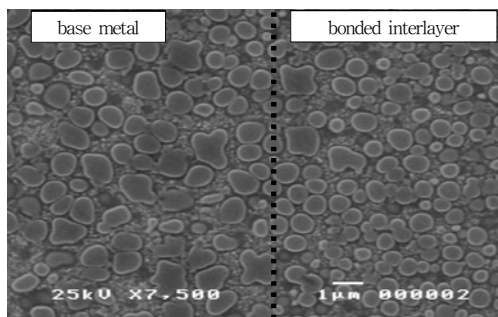


Fig. 7 γ' phase with N5 filler in bonded interlayer

기계적 특성을 나타낸 것은 접합부내에 Si 원소가 존재하지 않고, 접합부의 Al 과 Ti원소 농도가 모재와 유사하기 때문인 것으로 사료 된다. N5 삽입금속분말의 γ' 상 형상을 관찰한 결과 Fig. 7과 같이 모재와 유사한 γ' 상을 가지고 있었다.

4. 결 론

다양하게 조합된 삽입금속분말을 사용하여 GTD-111 DS 합금에 200 μ m 폭(Wide Gap)을 유지하여 천이액상확산접합 방법으로 접합 후 각 삽입금속분말의 접합강도 비교 및 강도에 미치는 미세조직 현상을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) GTD-111 DS 모재의 인장강도는 상온에서 1100 MPa, 항복강도는 956 MPa이고, 750 $^{\circ}$ C 까지는 강도가 유지되다가 그 이상의 온도에서는 강도가 감소하는 경향을 나타내었다

2) Ti 및 Al원소가 N계열 삽입금속분말 대비 미량이며, Si 가 함유된 M 계열 삽입금속분말을 이용한 천이액상확산접합 후 접합부의 상온 인장강도는 400 MPa 수준으로 모재 대비 낮은 접합강도를 나타내었다.

3) Ti 및 Al원소가 모재와 유사한 N계열 삽입금속분말을 이용한 천이액상확산접합 후 접합부의 접합강도를 측정된 결과, 모재와 유사하게 1000 MPa 수준 이었다. 특히 N5 삽입금속분말을 이용하여 천이액상확산 접합하였을 때 접합부의 상온 인장강도가 1070 MPa, 항복강도는 952 MPa 이었고, 750 $^{\circ}$ C에서의 인장강도는 1049 MPa 로 우수 하였다

4) N5 삽입금속분말(Ni-14Cr-2Ti-3Al)은 천이액상확산접합 후, 접합부에서 성분원소의 농도가 모재와 유사 하였다.

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. 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)
5. Chung-Yun Kang, Hyong-Chol Whang, In-Bae Kim, Dae-Up Kim, In-Su Woo : Journal of KWS, 21-2 (2003), 219-226 (in Korea)
6. Chung-Yun Kang, Hyong-Chol Whang, In-Bae Kim, Dae-Up

- Kim, In-Su Woo : Journal of KWS, 21-3 (2003), 334-340
7. H.Kokawa, C.H. Lee, T.H. North : Metallurgical Transactions A, 22A(1991), 1627-1631
8. C.Y. Su, C.P. Chou, W.J. Chang, M.H. Liu : JMEPEG(ASM International), 9(2000), 663-668
9. Chang-Ho Ye, Bong-Keun Lee, Woo-Young Song, In-Seok Oh, Chung-Yun Kang.: Journal of KWS, 23-6(2005), 99-105 (in Korea)