

# TiAl 소재의 브레이징접합에 대한 최신 기술동향

유 호 천\*†

\*한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램 전문연구위원

## Recent Study of TiAl Brazing

Ho-Cheon Yoo\*,†

\*KISTI(Korea Institute of Science and Technology Information) ReSEAT Program

†Corresponding author : yooho278@reseat.re.kr

### 1. 서 론

TiAl(티타늄 알루미늄) 합금은 높은 비강도, 내산화 특성, 뛰어난 크리프강도, 고온에서 높은 강성을 나타내고 있으며, 감마( $\gamma$ )-TiAl로 분류되는 금속간 화합물이다. TiAl은 가벼운 질량과 열저항성으로 인해 가장 실용적인 재료로 주목을 받고 있다. 값비싼 니켈 등을 대체할 수 있는 내열강과 초내열합금(superalloy)에 대한 대체재료로 매우 전망이 밝으며, 약 40% 정도의 획기적인 무게감량을 기할 수 있으므로 특히 자동차 산업과 항공우주산업에의 적용에 상당히 활성화 될 것으로 예상하고 있다. 그러나 TiAl은 접합부에 취성을 형성하기 쉬워, 접합을 매우 어렵게 하고 있으나 브레이징 접합은 이러한 문제점을 피할 수 있는 가장 효과적인 기술로 인정받고 있다. TiAl소재의 접합에 대한 어려움을 해결하면 더욱 그 활용가치가 높을 것으로 예상되고 있다<sup>1,2)</sup>.

TiAl 소재의 브레이징접합에 대한 최신 기술동향을 분석하기 위해서는 NDSL, ScienceDirect, KIPRIS 등의 검색을 하였으며, 해외 및 국내의 TiAl 브레이징 접합관련 학술지와 특허자료를 입수하여 최근의 연구개발현황을 분석하였다.

TiAl의 브레이징성 향상을 위한 제조조건을 파악하기 위하여 우선 여러 가지 제조조건을 파악하였으며, 기본적으로 Ag계, Ti계 용가재(filler metal)의 제조조건을 분석하였으며, TiAl 소재의 브레이징 접합시 제조비용 절감을 위한 경제적 제조방법, 품질향상, 브레이징 온도의 감소기술 및 취성균열방지 기술을 분석하여 5~10년 후의 TiAl 소재의 브레이징 접합기술 및 확대될 수 있는 응용분야를 예측하고 향후 기술을 전망하고 방향을 제시하여 국내 TiAl 소재의 브레이징 접합기술의

향상과 경량 내열부품의 개발에 이바지할 수 있도록 하였다.

### 2. TiAl의 브레이징성 향상을 위한 제조조건

#### 2.1 TiAl 소재의 접합 특성

Ti-Al 소재의 접합에 GTAW, 브레이징, 레이저 용접, 전자빔용접과 같은 종래의 용융용접방법이 종종 사용되고 있다. 그러나 높은 잔류응력과 낮은 연성을 가진 이 소재는 높은 반응성으로 인하여 접합계면에 취성의 금속간 상과 산화물 상을 형성하기 쉬워 TiAl의 접합을 매우 어렵게 하고 있다. 그러나 고상접합기술은 이러한 문제점을 피할 수 있는 매력적인 기술로 각광받고 있다. 예를 들어, TiAl과 강은 브레이징(유도와 진공), 확산 접합과 마찰용접이 시도되고 있다<sup>3)</sup>.

TiAl합금을 접합하는데 브레이징기술은 가장 실현가능하고 경제적인 방법으로 각광받고 있다. 그러나 BAlSi-4, pure Ag와 BAg8를 이용한 브레이징은 500°C 이상의 온도에서는 낮은 내열성으로 인하여 사용상 어려움을 겪고 있지만, Ti과 Ni계 브레이징 합금은 고온에서 뛰어난 장점을 갖고 있다<sup>3)</sup>.

TiAl( $\gamma$ -TiAl계) 금속간화합물은 경량 내열재료로 초점이 맞추어져 왔다<sup>3)</sup>. 높은 매력을 가진 TiAl합금은 가장 중요한 고온 구조재료가 될 전망에 있다. 최근 TiAl합금의 성질은 합금설계와 미세조직의 조절로 현저히 개선되어 가스터빈과 자동차 엔진부품의 소재로도 수요가 기대되고 있다. 그러나 이 소재의 완전한 적용을 위해서는 브레이징 접합기술이 필수적이다.

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹은 안테나용 레이돔(radome)에 차세대 전파-투과(wave-transparent) 재료로 광범위하게 주

목받고 있으나 TiAl로 된 금속홀더와의 브레이징 접합 기술 개발연구<sup>5)</sup>에 시도되었다.

## 2.2 Carbon/Carbon 복합재료와 TiAl의 접합

낮은 밀도와 양호한 고온강도를 지닌 Carbon/Carbon 복합재료는 고체 로켓모터 노즐과 상부 엔진 노즐에 대해 매우 이상적인 재료이다. 그러나 C/C 복합재료 노즐의 실제적인 적용을 위해서는 금속홀더에 대한 접합 기술이 필요하다. 여기에 TiAl 금속간 화합물은 고온에서의 낮은 밀도, 높은 비강도와 크리프강도로 인하여, 항공기 터빈엔진 부품 내에서 노즐홀더에 기존의 Ni계 초내열합금 대신에 TiAl 소재로의 대체가 가능하다. 그래서 50vol.%C/C 복합재료를 함유하는 C/C-TiAl 부품의 적용은 순수한 TiAl 부품에 비해서 약 27%나 무게를 감량할 수 있어, 중량대비 높은 엔진추력을 발휘할 수 있는 장점이 있다<sup>45)</sup>.

최근 C/C 복합재료의 성공적인 브레이징 접합연구가 추진되었는데, 브레이징 접합부는 브레이징 합금의 낮은 용융점 때문에 고온에서 사용하는데 적합하지 못하였다. 아울러 브레이징 합금을 접합조립 하는데 상당히 복잡하고 접합부의 신뢰성을 떨어뜨리는 경향이 있었다. 그래서 J. Cao 등<sup>45)</sup>에 의해 C/C 복합재료와 TiAl의 직접 접합이 바람직하다. 두 물질의 확산접합은 고온에서 행해야 하고, 반응물은 비교적 낮은 온도에서 접화하여 동시에 연소합성할 수 있다.

매우 높은 고온에서 뛰어난 열 및 기계적 성질로 인하여 C/C 복합재료는 비행기 날개끝부분(wing edges), 원자력반응용기 및 디스크브레이크 등에 사용되고 있다. C/C 복합재료와 TiAl의 접합으로 인한 구조체는 응용분야를 확대할 수 있을 것이다.

## 2.3 자전연소고온합성법(Self-propagation High-temperature Synthesis, SHS)

TiAl 금속간화합물과 TiC서멧의 접합은 일반적인 접합기술로는 상당히 어렵게 인식되고 있으며, 브레이징과 확산접합은 대부분 진공 혹은 보호가스 중에서 행해지고 있고, 효율성이 매우 낮아 혁신적인 방법이 요구되고 있다. 분말 소결체의 자전 고온반응은 에너지의 급속한 연소가 일어나 재료를 접합할 수 있는 국부적인 열원으로 작용한다. 열은 열팽창계수의 차이로 인하여 계면에 국한되어 반응접합이 일어난다. 현재 티타늄, 스테인리스강, 내열합금을 비롯하여 질화실리콘 및 NiAl/FCD(구상흑연주철)에도 성공을 거두고 있다<sup>18)</sup>.

J. C. Feng 등<sup>18)</sup>은 TiAl 금속간화합물을 TiC서멧

에 SHS공법으로 접합하였다. Ti, Al, C 및 Ni 분말의 혼합물은 식  $[(1+m)Ti+mAl + C + Ni \rightarrow mTiAl + TiC + Ni]$ 의 과정으로 고온합성된다. Ti-Al-C-Ni계의 SHS반응에서는 Al의 용융점에서 점화되어 첫 번째 반응은 액체 Al과 고체 Ti 사이에 일어나 TiAl<sub>3</sub>로 형성되는데, 온도가 증가함에 따라 Ti는 C와 반응하여 TiC상으로 형성된다.

## 2.4 브레이징 합금의 종류

Nb함유 TiAl금속간화합물의 화학성분으로 Ti-Al-Cr-Nb계가 선정되고 있는데, J. Cao 등<sup>29)</sup>과 P. He<sup>34)</sup> 등은 Ti-48Al-2Cr-2Nb(at.%), L. I. Duarte 등<sup>14)</sup>은 Ti-45Al-2Cr-2Nb(at.%), Hua-Ping Xiong 등<sup>20)</sup>에 의해 Ti-47Al-2Cr-1Nb(at.%), Houqin Wang 등<sup>27)</sup>에 의해 Ti-46Al-2Cr-2Nb를 선정하였다. 특히 X. G. Song 등<sup>43)</sup>에 의해 고Nb함유 TiAl합금 [Ti-45Al-5Nb-(W,B,Y)(at.%)], T. Tetsui 등<sup>48)</sup>에 의해 Ti-47.1Al-7.8Nb-1.0Cr-0.5Si, 이 선정되었다. 아울러 TiAl계 합금, 특히 Chen<sup>4)</sup>에 의해 개발된 고Nb함유 TiAl합금 (Ti-46Al-5Nb)은 자동차산업에서 무게감량을 위해서 내열강과 초내열합금에 대한 매우 전망이 밝은 대체재료로 고려되고 있다.

Nb이 함유되지 않은 TiAl금속간화합물의 화학성분으로 X. G. Song 등<sup>43)</sup>에 의해 TiAl합금(Ti-42.5Al-9V-0.3Y(at.%))이 선정되었고, Peng He 등<sup>7)</sup>에 의해 Ti-46.5Al-9.03V-0.27Y(as cast)이 선정되었고, L. I. Hainxin 등<sup>26)</sup>에 의해 TiAl(52.82 Al-44.88Ti-1.20Cr-1.10V)이 선정되었다. 전체적으로 보아, TiAl금속간화합물의 화학성분으로 Ti-Al-V계가 주류를 이루고 있다.

T. Tetsui 등<sup>47-49)</sup>은 Ni계 초내열합금(Inconel 713C) 대신에 TiAl 소재로 대체하여 터보차저에 들어가는 TiAl 터빈 휠을 제조하였다. 특히 저Nb함유 TiAl (Ti-47.3Al-0.4Nb)보다 고Nb함유 TiAl(Ti-45.0Al-7.1Nb)은 더욱 우수한 내산화성(erosion)을 나타내었다.

## 3. 용가재의 기술개발동향

### 3.1 Ag계 용가재

Ag은 Ti 및 그 합금재료의 브레이징 접합에 사용되는 대표적인 삽입금속 재료이다. 이 Ag-Cu공정 삽입금속의 경우, 비교적 낮은 접합온도, 우수한 젖음성과 접합강도를 나타내는 장점이 있다. 또한 Ag-Cu-Ti계 합금의 경우, Ti의 활성으로 인하여 접합온도의 감소가 기대되는 삽입금속 재료이다. 구자명 등<sup>9)</sup>은 Ag-Cu-Ti

삽입금속을 사용하여, 접합시간에 따른 TiAl과 AISI 4140강을 접합특성을 관찰한 후 최적 접합조건을 확립하였다.

T. Tetsui 등<sup>48)</sup>에 의하면, BAg-8과 BAg-12 용가재는 TiAl (Ti-47.1Al-7.8Nb-1.0Cr-0.5Si)과의 젓음성, 미세조직 및 경도를 평가기준으로 볼 때, Ti, Ni, Pd 합금 용가재보다 더욱 우수한 특성을 나타내었다.

P. He 등<sup>34)</sup>은 TiAl계 금속간화합물( $\sigma_b$ : 559~668MPa)을 진공유도 브레이징법으로 Ag-Cu-Ni-Li 용가재를 이용하여 35CrMo강(Fe-0.35C-0.27Si-0.55Mn-0.1Cr-0.2Mo(wt.%))에 Fig. 1과 같은 방법으로 브레이징 접합하였다. 용가재는 50 $\mu$ m 두께의 Ag-27Cu-1Ni1-0.5Li(wt.%) foil( $\sigma_b$ : 340MPa, 용융점: 780~820 $^{\circ}$ C)로 선정되었다. 930 $^{\circ}$ C, 1분간 브레이징한 결과, 324MPa를 얻었다. 높은 온도 단시간이 낮은 온도 장시간보다 더욱 유리하였으며, 비평형 결정의 미세조직이 대부분 관찰되었다.

P. He 등<sup>33-36)</sup>에 의해 TiAl 금속간화합물과 35CrMo 강을 Ag-27Cu-1Ni-0.5Li 용가재와 Ag-35.2Cu-1.8Ti 용가재를 이용하여 진공 유도 브레이징한 연구내용을 Table 1에 종합하였다. 브레이징 열처리조건에서 높은 온도 단시간과 낮은 온도 장시간에 대한 차이점을 보이고 있다.

X. G. Song 등<sup>42)</sup>에 의해 브레이징 접합부의 전단강도를 향상시키기 위하여 Ag-Cu-Ti 용가재에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>p를 첨가한 영향을 조사한 결과, TiAl/AlCu<sub>2</sub>Ti반응층/Ag(s,s)+Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>p+TiNp/TiN+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>반응층/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 미세구조를 얻었으며, Fig. 2에서 보는 바와 같이 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>p함량이 3wt.%인 경우에 최고 전단강도를 나타내었다.

X. G. Song 등<sup>42)</sup>에 의해 비활성 AgCu 용가재를 이용하여 TiAl금속간화합물을 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹과의 접합을 시도한 결과, 접합계면의 미세구조는 TiAl/B<sub>2</sub>S/AlCuTi/AlCu<sub>2</sub>Ti/Ag(s,s)+AlCu<sub>2</sub>Ti/TiN+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>이었으며, 브레이징온도가 증가함에 따라 중심부의 입상 AlCu<sub>2</sub>Ti 금속간화합물의 분포가 변화였고, 질

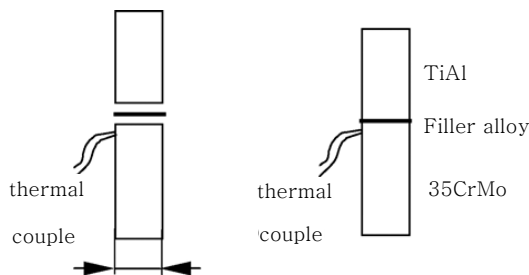


Fig. 1 Sketch map of the brazed TiAl/steel joint<sup>34)</sup>

Table 1 Brazing conditions of TiAl intermetallics and steel 35CrMo<sup>33-36)</sup>

Filler metal	Brazing temp.	Brazing time	Tensile strength	Optimal condition
Ag-Cu-Ni-Li	920~930 $^{\circ}$ C	1~2min.	324MPa	930 $^{\circ}$ C, 1min.
Ag-Cu-Ti	870~880 $^{\circ}$ C	4~6min.	320MPa	870 $^{\circ}$ C, 5min.

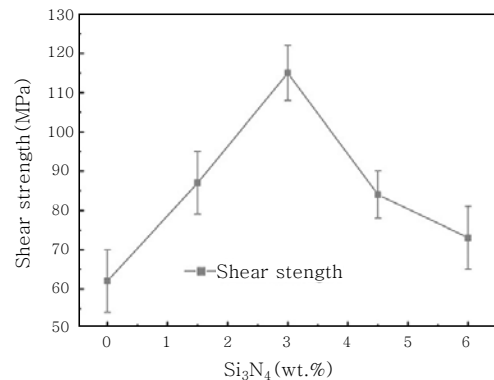


Fig. 2 Effect of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>p content on shear strength of brazed joints<sup>42)</sup>

화실리콘기판에 인접한 TiN+Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>층의 두께가 증가하였다. 860 $^{\circ}$ C에서 5분간 브레이징 하여 124.6MPa의 전단강도를 얻었으며, AlCu<sub>2</sub>Ti상의 석출을 위한 작은 Al<sub>3</sub>V 금속간화합물의 핵생성으로 인하여 접합부 품질특성을 향상시켰음을 확인하였다.

Yulong Li 등<sup>17)</sup>은 엔진터보부품인 터빈로터에 적용하기 위하여 TiAl과 42CrMo강을 Ag-Cu/Ti/Ag-Cu 용가재로 진공 브레이징하였다. 500 $^{\circ}$ C에서 5분간 브레이징한 경우, 347MPa과 229MPa의 상온 인장강도와 전단강도를 달성하였다.

Zhenwen Yang 등<sup>5)</sup>은 TiAl합금을 C/SiC 복합재료에 Ag-Cu용가재를 이용하여 진공브레이징한 결과, 브레이징 접합부의 품질은 TiC층과 AlCu<sub>2</sub>Ti상의 형성에 가장 큰 영향을 미쳤는데, 균열은 주로 Ag-rich상과 TiC층을 따라 진전하였다. 950 $^{\circ}$ C에서 10분간 진공 브레이징 시에 TiC층 두께가 4~5 $\mu$ m인 경우 85MPa의 최고 전단강도를 나타내었다.

Houqin Wang 등<sup>27)</sup>은 Ag-26.7Cu-4.6Ti 용가재를 이용하여 브레이징 하였으며, 또한 C/C표면에 구멍을 형성시키는 방법으로 infiltration 강화효과를 검토하였다. 이러한 구멍들은 0.8mm $\phi$ 의 바늘에 의해 드릴링 되었으며, 3mm폭의 4각형 구조로 배열시켰으며 1mm, 3mm의 깊이로 하였다. 펀치 후 구멍은 C/C 복합재료의 탄성회복으로 인한 작은 공간(gap)이 되었으며, 브레이징 동안에 용가재의 모세관 작용을 증진시켰다. 또

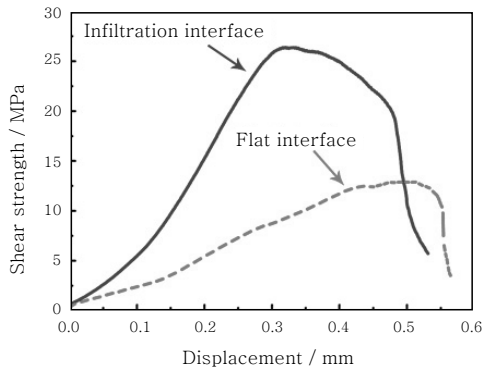


Fig. 3 Effect of interfacial shape on shear strength<sup>27)</sup>

한 infiltration 강화효과로 전단강도는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 획기적으로 향상시킬 수 있었다.

### 3.2 Ti계 용가재

TiAl금속간화합물을 브레이징 하는데 Wu 등<sup>9)</sup>은 Ti계, Ag계, Al계 용가재를 비교한 결과, Ti계 용가재는 더욱 양호한 고온 거동을 나타내었다. Ti계 용가재 포일은 기관의 형태가 복잡할 때에는 제한이 있으나 분말은 적용범위가 더욱 광범위하기 때문에 분말소재에 대한 활용도가 높다. 용가금속 분말을 제조하는 방법 가운데 기계적 밀링에 관한 제조법<sup>7)</sup>이 가장 선호되어 입자 미세화, 화학성분의 변화, 양호한 젖음성(wettability)의 관점에서 추진되어 왔다.

Ti-Ni용가재의 용융점은 수요가의 기대치보다 높아 용융점을 낮추기 위하여 Ti-Ni계 내에 Si첨가의 영향을 조사하였다<sup>8)</sup>. J. Cao 등<sup>8)</sup>은 Si첨가는 접합부의 중간에 Ti를 집합(aggregation)시키고 Ti<sub>3</sub>Al상을 형성시키는 역할을 함을 관찰하였다.

브레이징 온도를 낮추고 양호한 품질의 Ti-Al 금속간소재를 접합하기 위한 TiNi분말 용가재를 Peng He 등<sup>7)</sup>에 의해 개발되었다. 아르곤가스 분위기 중에서 120분 동안 기계적 밀링을 한 TiH<sub>2</sub>-50wt.%Ni 분말 합금을 용가재로 1180°C에서 15분 동안 진공 노(furnace) 브레이징 접합한 결과, 가장 높은 전단강도를 얻을 수 있었다.

L. I. Duarte 등<sup>14)</sup>은 용가재로서 Ti과 Al을 나노단위(2 $\mu$ m)의 층으로 교대로 적층하여 TiAl을 계면의 화학적인 불연속 없이 서로 접합(dcmagnetron sputtering)시킨 결과, 약 1000°C에서 결합이 없는 양호한 나노결정 조직을 얻을 수 있었다.

TiAl과 Ni계 합금에 대해 Tetsui 등<sup>22)</sup>은 Ag계 용가재로 브레이징 접합하였으나, 이 접합은 500°C 이상의 브레이징 용가재의 고온품질 부족으로 접합에는 만족하

지 못하였다. 이에 대비하여 FAN Kun<sup>23)</sup>, P. He<sup>24)</sup> 등에 의해 Ti-Ni계 용가재(942°C 이상의 용융점)가 개발되어 고온강도를 확보하였다. 특히 Duan Hui-ping 등<sup>25)</sup>에 의해 삽입금속으로 TiNi계 브레이징합금을 용가재로 이용하여 전이(transient) 액상 접합기술을 적용하여 TiAl과 Inconel 718을 접합하였는데 조직과 기계적 성질에 관한 세부적인 자료는 확보하지 못했다.

L. I. Hai-xin 등<sup>26)</sup>에 의해 TiAl(52.82Al-44.88Ti-1.20Cr-1.10V)와 GH99(57.29Ni-20.63Cr-7.46Co-5.44Al-3.03W-2.98Mo-1.96Ti)을 Ti박판(foil)을 이용하여 1000°C에서 10분간 브레이징한 결과, 최고 전단강도는 258MPa에 도달하였으나, 브레이징 온도가 높거나 시간이 더 길면 접합부 상의 조대화가 일어나 취성의 금속간 층이 형성되어 전단강도는 급격히 떨어졌다.

RIP(rapid isothermal process)의 일종인 매우 빠르고 값싼 적외선 접합방법을 사용하여 S. J. LEE 등<sup>37)</sup>은 아르곤분위기에서 1100~1200°C의 온도범위에서 30~60초 동안 TiAl을 적외선 접합하는데, Ti-15Cu-15Ni(wt%) foil을 이용하였다.

X. G. Song 등<sup>43)</sup>에 의해 고Nb함유 TiAl합금(Ti-45Al-5Nb-(W,B,Y)(at.%))에 대하여 TiNi-Nb공정 브레이징합금(40Ti-40Ni-20Nb(at.%))을 이용하여 진공아크 재용해법으로 브레이징 접합한 결과, O-Ti<sub>2</sub>AlNb와  $\tau_3$ -Al<sub>3</sub>(Ti,Nb)<sub>2</sub>Ni의 새로운 금속간 상을 관찰하였으며, 1220°C에서 10분간 열처리하여 308MPa의 상온 전단인장강도를 달성하였다.

X. G. Song 등<sup>46)</sup>에 의해 TiAl합금(Ti-42.5Al-9V-0.3Y(at.%))에 대하여 TiNi-V25(at.%)의 공정 브레이징합금을 이용하여 1220°C에서 10분간 열처리한 결과, 196MPa의 가장 높은 전단인장강도를 얻었다. 브레이징 접합부는 B2상과  $\tau_3$ -Al<sub>3</sub>Ni Ti<sub>2</sub> 금속간상은 취성으로 인한 접합부 성질에 해를 끼치는 것으로 확인되었다.

TiAl판은 가스터빈에 Ni합금과 강 대신에 TiAl판을 대체재로 적용하면 무게를 40%까지 절감할 수 있었다. I. C. Wallis 등<sup>44)</sup>은 Ti-Cu-Ni 브레이징합금을 용가재로 선정하여  $\gamma$ -TiAl을 접합한 결과, 양호한 품질의 고강도 접합부를 얻을 수 있었다.

Z. W. Yang 등<sup>11)</sup>에 의해 TiB 위스커(30%)로 강화된 C/SiC복합재료와 TiAl을 Ti-Ni-B브레이징합금 용가재로 하여 브레이징 용접하였다. 아크용융법으로 제조된 Ti-Ni-B브레이징합금(용융점 1120°C)의 강화요인은 TiNi, TiNi<sub>3</sub> 및 TiB<sub>2</sub> 상에 의한 것이며, TiAl과

C/SiC복합재료의 접합은 1160°C에서 10분간 열처리하여 브레이징접합한 결과, 상온과 600°C에서 평균 전단강도는 각각 90 MPa과 65MPa에 달하였다.

Hai-xin LI 등<sup>10)</sup>에 의해 TiAl계 금속간화합물과 Ni계 합금에 대하여 삽입층으로서 Ti계를 적용하여 1000°C에서 10분간 브레이징한 결과, 최고 전단강도는 258MPa을 나타내었으나, 브레이징온도가 높거나 시간이 길면 브레이징 심부에 상(phases)의 조대화를 일으켜 접합부의 전단강도가 크게 저하하였다.

R. K. Shiue 등<sup>6)</sup>에 의해 Ti-15Cu-(15~25)Ni 브레이징 합금을 이용하여 Ti50-Al50과 Ti-6Al-4V을 적외선 브레이징한 결과, 970°C, 10분 이상에서 가장 양호한 접합강도를 나타내었다. 접합부에는 주로 Ti-rich, Ti<sub>2</sub>Ni 및 계면에 Ti<sub>3</sub>Al상이 관찰되었는데, 특히 Ti<sub>2</sub>Ni상과 브레이징 냉각도중에 계면에 발생하는 Ti<sub>3</sub>Al상은 접합부의 전단강도를 해치는 것으로 확인되었다.

J. Cao 등<sup>29)</sup>은 Ti-Al-C 중간층을 이용하여 TiAl 금속간화합물을 반응제조하였다. Ti분말과 Al분말의 화학적 결합은 낮은 네거티브 엔탈피를 나타내지만 C분말의 첨가로 인하여 강한 발열반응을 일으켜 식  $[(m+1)Ti + mAl + C \rightarrow mTiAl + TiC]$ 과 같은 활성적인 화학양론적 반응으로 TiAl 금속간화합물이 생성된다. J. Cao 등<sup>29)</sup>은 TiAl금속간화합물을 분말혼합물 혹은 복합층 포일에 의해서 제조된 50Ti-(33~39)Al-(11~17)C(at.%)를 중간층으로 하여 단열(adiabatic) 온도를 이용하여 브레이징 접합하였다. 반응열이 증가함에 따라 접합부의 품질은 향상되었으나 반응열이 너무 높으면 접합부의 품질과 제품의 밀도는 오히려 감소되는 현상을 보였다. 단열온도가 2218°C인 경우 50Ti-35Al-15C(at.%) 합금에서 최고 접합강도를 얻을 수 있었다.

### 3.3 기타 용가재

H. P. Xiong 등<sup>19)</sup>은 TiAl금속간화합물에 순 알루미늄을 접합하는데 Si함유 Al계 브레이징합금을 용가재로 사용하였다. TiAl 표면에 Si이 강하게 확산되어 들어가 친화력을 상당히 크게 함으로써 내산화력향상에 크게 기여하였다.

## 4. 국내 연구현황

NDSL검색결과, 국내에서는 최근 10년간 95건이 게재되어 있어 TiAl 소재에 대한 연구는 매우 활성화되어 있으나 브레이징에 관한 연구실적<sup>9)</sup>이 1건 정도 게재되어 있어, 향후 국내에도 브레이징 접합연구의 활성화가

절실히 요구되고 있다. 구자명 등<sup>9)</sup>에 의하면, TiAl과 AISI 4040강의 접합 시에 Ag-Cu-Ti 삽입금속을 이용하여 800°C에서 60초간 브레이징한 결과, 모재강도의 70%인 296MPa의 최대 인장강도를 얻었다. 사용된 삽입금속은 Lucas-Milhaupt사의 두께가 100 $\mu$ m인 Cerametil 721로 선정되었으며, Ag-rich, Ti-rich, CuTi와 CuTi<sub>2</sub>로 이루어졌음이 관찰되었다.

## 5. 향후 기술전망

### 5.1 경제적 제조기술

브레이징 접합은 형상과 크기의 제한이 거의 없고 정밀한 접합이 가능하며, 상대적으로 낮은 접합온도에서, 한 공정으로 여러 접합부를 동시에 접합이 가능한 장점이 있다. 특히 TiAl의 응용범위를 확대하기 위하여 간단한 형상에서부터 복잡한 형상에까지 구분하여 경제적으로 생산할 수 있는 접합기술이 요구되고 있어 향후 국내에서도 이에 대한 연구가 활성화될 것이다.

TiAl과 관련된 접합기술들은 진공브레이징을 포함하는 브레이징 접합, 삽입금속을 이용한 적외선 용접, 마찰용접, 확산 붙임, 전자빔 용접과 같은 복합용접, 그리고 전기방전용접 등이 전개되고 있다<sup>41)</sup>. 이중 경제성과 품질이 복합된 최적의 방법을 찾아내는 것이 중요한 과제이다.

TiAl이 활성물질이기 때문에 진공상태에서 TiAl과 구조용강의 접합이 용이하게 실시되고 있으나, 특히 자동차산업에서 진공 브레이징은 높은 비용 때문에 비실용적이다. 그래서 향후 낮은 비용과 높은 강도를 얻는 기술을 개발하기 위하여, 열처리속도가 빠르고 효율성과 생산성이 높은 빠른 유도브레이징 기술이 활발하게 추진될 수 있을 것으로 예상된다.

적외선 브레이징법은 브레이징온도를 낮추고 시간을 절약할 수 있고, 적외선을 국부적으로 시편에 가열할 수 있고 로의 나머지부분에 대한 열량소비를 피할 수 있다. 따라서 적외선가열은 높은 에너지효율을 지닌 전망이 밝은 방법<sup>12)</sup>으로 내다보고 있다. 특히 사용에너지를 획기적으로 절감할 수 있으므로 향후 산업분야에 적용의 확대가 기대된다.

값비싼 Ag계 용가재 대신에 Ti계 용가재로 브레이징하는 연구가 활성화될 것으로 예상되며, 향후 다른 금속에 대한 브레이징 적용연구가 확대될 것으로 예상된다.

### 5.2 품질향상기술

TiAl 소재의 브레이징성을 향상시키기 위해서는 다음

과 같은 공법<sup>38)</sup>으로서 첫째, 접합되어야 할 재료 사이에 삽입되는 중간층의 형태(예, 분말, foil) 화학성분(예, Ag계, Ti계), 두께에 대한 최적의 종합적인 설계가 필수적이다. 둘째, 브레이징 시에 고온에서의 유지시간은 재료(모재 및 중간층), 요구되는 접합부 성질 등에 따라 몇분에서 몇시간이 걸릴 수 있다. 브레이징 온도의 높낮이를 조절하여 최적의 유지시간에 대한 설정연구가 활발히 전개될 것이다. 셋째, 확산브레이징의 경우에는 거시적 변형을 방지하기 위하여 보통 3~10MPa의 낮은 압력이 사용된다. 그러나 HIP(hot isostatic pressing)에서는 더 높은 압력(200MPa)이 사용된다. 이 경우 표면마무리가공 정도는 단축의 경우에서와 같이 결정적인 영향은 미치지 않으므로 유리한 측면이 있어, 이에 대한 연구개발이 선호될 수 있을 것이다. 넷째,  $\gamma$ -TiAl 합금의 고상 확산접합시 스퍼터링공법으로 Ti/Al복합층의 박막(foil)으로 나노결정구조를 형성시킨다. 이 방법은 접합되어야 할 표면의 확산도와 반응성을 높일 수 있는 효과가 있으며 중간층과 재료 사이의 불연속(disruption)을 피할 수 있는 장점이 있으므로 이러한 공법이 활성화 될 것이다. 다섯째, 삽입층으로 적용되는 금속 복합층의 발열특성은  $\gamma$ -TiAl 상에 대한 박막의 열발생에 대한 활용은 접합공정에 요구되는 에너지의 감소에 기여하므로 이에 대한 연구의 활성화가 예상된다.

TiAl 소재와 강과의 접합은 일례로, 미사일과 탱크엔진 터보부품의 접합에 적용할 수 있으나, 심한 고온균열의 발생경향과 취성의 금속간화합물을 형성으로 인하여 생산에 어려움이 있으므로 이에 대한 해결책이 모색될 것이다<sup>34)</sup>.

TiAl계 합금과 강은 Ag계 용가재를 이용하여 브레이징한 실적은 있지만 고강도를 제시할 수 있는 브레이징 접합부의 최적의 조건을 제시하는데 미흡하였다. 일례로 Ag-Cu/Ti/Ag-Cu 용가재로 시도하여 고강도의 접합부를 성취하였다.<sup>17)</sup> 향후 최적의 품질을 나타낼 수 있는 용가재를 개발하는 연구가 추진될 것이다.

기존의 확산접합 공정<sup>32)</sup>은 TiAl/강의 접합부 계면에 FeAl, FeAl<sub>2</sub> 및 TiC의 금속간화합물을 형성하여 최고 인장강도가 170~185MPa에 머물고 있으며, 종래의 진공브레이징법에서는 가열속도가 보통 50°C/min. 이하로 느려서 바람직하지 못한 것으로 판단된다. 이에 대비하여 유도 진공브레이징<sup>29-31)</sup>은 최고 가열속도가 3000°C/min.만큼 높아 대량생산이나 복잡한 부품의 생산에 매우 유리한 것으로 판단된다. 기존의 진공브레이징 기술을 탈피한 유도 진공브레이징 방식에 대한 연구가 활성화 될 것으로 예상된다.

TiAl 소재는 낮은 밀도를 가진 고온강도로 인하여 항공 및 자동차 재료로 각광을 받고 있으나 상온에서의 불충분한 연성과 800°C 이상에서의 내산화성이 충분하지 않다<sup>40)</sup>. 그래서 브레이징한 후에도 TiAl합금의 내산화성을 향상시키기 위하여 이온주입법, 마그네트론 스퍼터링, PVD, 플라즈마용사법, Siliconizing과 같은 표면개질에 관한 연구가 주로 시도될 수 있을 것이다.

### 5.3 브레이징 온도의 감소기술

브레이징온도가 높거나 시간이 길면 브레이징 심부이상(Phases)의 조대화를 일으켜 접합부의 전단강도가 크게 저하하므로<sup>10)</sup> 최적의 브레이징온도와 시간에 대한 설정연구가 필수적이다. 최고전단강도를 얻기 위해서는 가장 적당한 브레이징온도의 시간의 파악이 중요하다. 일례로 Ti-Ni 용가재에 Si를 첨가하여 용가재의 용융점을 낮추는 연구가 활성화될 것으로 예상된다.

브레이징 접합 시에 접합온도의 감소연구가 활발히 진행될 것이다. Ag-Cu 공정(eutectic) 삽입금속의 경우, 비교적 낮은 접합온도, 우수한 젖음성과 접합강도를 나타내는 장점이 있다. 예를 들면, Ag-Cu-Ti계 합금의 경우<sup>9)</sup>, Ti의 활성화로 인하여 접합온도의 감소가 기대되는 삽입금속 재료이다.

브레이징 온도와 유지시간이 낮을수록 전단강도가 낮다. 반면에 브레이징 시간이 증가할수록 두꺼운 입계층(interfacial layer)의 형성으로 전단강도가 급격히 감소하는 경향이 있어 최적의 브레이징 온도와 브레이징 시간의 파악이 품질향상에 중요한 부분을 차지할 것으로 사료된다<sup>8,10)</sup>.

종래의 일반적인 진공로 브레이징과 비교해서 적외선 진공브레이징은 3000°C/min.의 매우 빠른 열이력을 장점으로 하고 있다. 그러므로 브레이징 온도와 시간의 단축으로 인하여 계면반응의 감소, 예로전부식성의 저하, 모재금속 성질의 최소손실을 가져온다<sup>41)</sup>. 향후 적외선 진공브레이징 기술의 확대가 활성화될 것이다.

### 5.4 취성 및 균열 방지기술

TiAl계 금속간 합금은 심한 저온취성과 높은 균열감수성을 안고 있으므로 종래의 용융용접기술로서는 만족할만한 접합부를 얻을 수 없다. 건전한 접합부를 얻기 위해서는 초소성 성형/확산 접합, 반응유기 확산접합과 같은 고상 확산접합법<sup>21)</sup>으로 가능하다. 그러나 이러한 공정은 복잡하고 공정시간이 길고 고압이 요구되어 실제 생산에는 적합하지 않다. 그러나 확산접합<sup>16)</sup>, 브레이징<sup>15)</sup> 및 확산 브레이징<sup>14)</sup>과 같은 고상용접기술은

TiAl합금의 응고균열에 대한 문제를 해결할 수 있을 것이다.

TiAl과 구조용강에 적용되는 접합기술로서는 향후 진공 브레이징과 마찰용접이 주로 거론될 수 있을 것이다. 그러나 TiAl과 강과의 마찰용접은 접합 후의 냉각에서 구조용강의 마르텐사이트 변이에 의한 내부응력의 증가로 인해 접합부의 취성인 경계에서의 균열 때문에 어려움을 겪고 있어, 취성균열의 방지에 브레이징 접합 기술이 더욱 선호될 것이다.

진공브레이징 접합부의 품질은 TiC층의 형성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데, 균열은 주로 Ag-rich상과 TiC층을 따라 진전하므로, 균열의 방지에는 TiC층의 감소가 가장 중요한 인자로 고려되고 있다. 향후 이러한 인자들에 대한 관심은 취성균열 방지에 대한 도움이 될 수 있을 것이다.

### 5.5 응용분야의 확대

최근 TiAl의 용융용접, 확산접합, 브레이징, 마찰접합에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 브레이징 접합은 형상과 크기의 제한이 거의 없고 정밀한 접합이 가능하며 상대적으로 낮은 접합온도에서, 한 공정으로 여러 접합부를 동시에 접합이 가능한 장점이 있다. 일례를 들어서 TiAl과 강과의 접합은 우수한 내마모 특성과 인성을 부여함과 동시에 더 크고 더 복잡한 구조물을 제작하기 위하여 필수적인 공정이다.

TiAl 금속간 합금은 우주항공산업과 자동차 산업에서 터빈블레이드, 배기밸브 및 터보차저 로터와 같은 분야에 적용이 성공적으로 시도되고 있다. 향후 항공기 터빈엔진, 기체(airframe)과 자동차의 엔진과 같은 부분의 초내열합금에 대한 대체 가능성을 검토하고 한다. 특히 TiAl은 미래의 환경친화적 자동차용 고온 부품을 개발하기 위한 신소재로 자동차 내열부품의 개발에 이바지할 것이다.

최근 TiAl의 용융용접, 확산접합, 브레이징, 마찰접합에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 브레이징 접합은 형상과 크기의 제한이 거의 없고 정밀한 접합이 가능하며, 상대적으로 낮은 접합온도에서 한 공정으로 여러 접합부를 동시에 접합이 가능한 장점이 있다. 일례를 들어서 TiAl과 강과의 접합은 우수한 내마모 특성과 인성을 부여함과 동시에 더 크고 더 복잡한 구조물을 제작하기 위하여 필수적인 공정이다.

TiAl 금속간 합금은 우주항공산업과 자동차 산업에서 터빈블레이드, 배기밸브 및 터보차저 로터와 같은 분야에 적용이 성공적으로 시도되고 있다<sup>28)</sup>. 향후 항공기 터빈엔진, 기체(airframe)와 자동차의 엔진과 같은 부

분의 초내열합금에 대한 대체 가능성을 검토하여야 한다. 특히 TiAl은 미래의 환경친화적 자동차용 고온 부품을 개발하기 위한 신소재로 자동차 내열부품의 개발에 이바지할 것이다.

감마( $\gamma$ )-TiAl은 고강도, 낮은 밀도, 양호한 내산화성을 인하여 최고의 추진중량비(Thrust/weight)와 높은 사용온도에 대한 품질을 보증해야 하는 극초음속 비행체(hypersonic vehicle)에 적합한 소재, 즉, 극초음속 엔진 내에 있는 대형의 정적 구조체 부품으로 적합한 재료로 판명되고 있다. 향후 설계방법론(design methodology), 제조기술, 유한요소 분석 및 요구되는 재료의 특성에 대한 기술개발이 활성화 될 것이다<sup>13)</sup>.

## 6. 결 론

1) TiAl 소재는 높은 반응성으로 인하여 접합계면에 취성의 금속간 상과 산화물 상을 형성하기 쉬워 접합을 매우 어렵게 하고 있으나, 브레이징 접합기술은 이러한 문제점을 피할 수 있는 가장 실현가능하고 경제적, 효과적인 기술로 각광받고 있다.

2) TiAl 금속간화합물은 미래의 환경친화적 내열 신소재로 우주항공산업, 자동차산업 등에 적용이 활성화 될 것으로 예상된다. 이에 부응하여 TiAl의 브레이징성 향상을 위한 제조조건을 확립하기 위해서는 Ag계와 Ti계 용가재를 이용한 브레이징 접합기술의 국내기술의 정착이 시급한 과제로 대두되고 있다.

3) 국내에서는 TiAl 소재에 비해 브레이징접합에 관한 연구는 매우 부진한 실정에 있으므로 향후 국내에서도 브레이징 접합연구의 활성화가 절실히 요구되고 있다.

4) 5-10년 후 예측되는 기술로서 경제적 제조기술, 품질향상기술, 브레이징 온도의 감소기술, 취성 및 균열 방지기술이 있으며, 이에 대한 연구개발이 활성화될 것을 예상된다.

## 후 기

본 기술해설은 한국과학기술정보연구원이 교육과학기술부의 과학기술진흥기금으로 수행하는 ReSEAT 프로그램의 성과물입니다.

## 참 고 문 헌

1. A. Koscielna, W. Szkliniarz : Effect of cyclic heat treatment parameters on the grain refinement of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy, *Materials Characterization* **60** (2009) 1158
2. Y. W. Kim, A. Rosenberger, D. M. Dimiduk : Microstructural changes and estimated strengthening

- contributions in a gamma alloy Ti-45Al-5Nb pack-rolled sheet, *Intermetallics* **17** (2009) 1017
3. I. C. Wallis et al. : Brazed joints in  $\gamma$ -TiAl sheet: microstructure and properties, *Intermetallics* **12** (2004) 303~316
  4. R. K. Shiue, S. K. Wu, S. Y. Chen : Infrared brazing of TiAl using Al-based braze alloys, *Intermetallics* **11** (2003) 661~671
  5. Zhenwen Yang et al. : Microstructural evolution and mechanical properties of the joint of TiAl alloys and C/SiC composites vacuum brazed with Ag-Cu filler metal, *Materials Characterization* **62** (2011) 825~832
  6. R. K. Shiue et al. : Infrared brazing of Ti50Al50 and Ti-6Al-4V using two Ti-based filler metals, *Intermetallics*, **16** (2008) 1083~1089
  7. Peng He et al. : Effect of mechanical milling on Ni-TiH<sub>2</sub> powder alloy filler metal for brazing TiAl intermetallic alloy, *Materials Characterization* **60** (2009) 30~35
  8. J. Cao et al. : Mechanical milling of Ti-Ni-Si filler metal for brazing TiAl intermetallics, *Intermetallics* **19** (2011) 855~859
  9. Ja-Myoung Ku et al. : Brazing of TiAl and AISI4140 steel using an Ag-Cu-Ti insert metal, *Journal of the Korean Welding and Joining Society* (2004) May 45~47(in Korean)
  10. Hai-xin Li et al. : Microstructure and shear strength of reactive brazing joints of TiAl/Ni-based alloy, *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, **22** (2012) 324~329
  11. Z. W. Yang et al. : Interfacial structure and fracture behavior of TiB whisker-reinforced C/SiC composite and TiAl joints brazed with Ti-Ni-B brazing alloy, *Materials Science and Engineering A* **532** (2012) 471~475
  12. R. K. Shiue et al. : Infrared brazing of TiAl intermetallic using BAg-8 braze alloy, *Acta Materialia* **51** (2003) 1991~2004
  13. S. L. Draper et al. : Development and evaluation of TiAl sheet structures for hypersonic applications, *Materials Science and Engineering A* **464** (2007) 330~342
  14. L. I. Duarte et al. : Solid-state diffusion bonding of gamma-TiAl alloys using Ti/Al thin films as interlayers, *Intermetallics* **14** (2006) 1151~1156
  15. R. K. Shiue et al. : Infrared brazing of TiAl intermetallic using BAg-8 braze alloy, *Acta Materialia*, **51** (2003) 1991~2004
  16. H. J. Liu et al. : Interface structure and formation mechanism of diffusion-bonded joints of SiC ceramic to TiAl-based alloy *Scripta Materialia* **43** (2000) 49~53
  17. Yulong Li et al. : Interface structure and mechanical properties of the TiAl/42CrMo steel joint vacuum brazed with AgCu/Ti/Ag-Cu filler metal, *Scripta Materialia* **55** (2006) 171~174
  18. J. C. Feng, J. Cao, Z. R. Li : Microstructure evolution and reaction mechanism during reactive joining of TiAl intermetallic to TiC cermet using Ti-Al-C-Ni interlayer, *Journal of Alloys and Compounds* **436** (2007) 298~302
  19. H. P. Xiong, Q. Shen, J. G. Li, L. M. Zhang, R. Z. Yuan, *J. Mater. Sci. Lett.* **19** (2000) 989.
  20. Hua-Ping Xiong et al. : Formation of silicide coatings on the surface of a TiAl-based alloy and improvement in oxidation resistance, *Materials Science and Engineering* **391** (2005) 10~18
  21. G. X. Luo et al. : Diffusion bonding of laser-surface-modified gamma titanium aluminide alloy to nickel-base casting alloy, *Scripta Materialia*, **57** (2007) 521~524
  22. T. Tetsui et al. : Gamma Ti aluminides for non-aerospace applications, *Current Opinion Solid state & Materials Science*, **4** (1999) 243~248
  23. FAN Kun et al. : Present research status of brazing technology of TiAl-based alloy, *Welding Technology*, **33(1)** (2004) 35
  24. P. He et al. : Effect of mechanical milling on Ni-TiH<sub>2</sub> powder alloy filler metal for brazing TiAl intermetallic alloy, *Materials Characterization*, **60** (2009) 3035
  25. Duan Hui-ping et al. : Transient liquid phase bonding of TiAl and Inconel 718, *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, **30(10)** (2004) 984~988. (in Chinese)
  26. L. I. Hai-xin et al. : Microstructure and shear strength of reactive brazing joints of TiAl/Ni-based alloy, *Trans. Non-ferrous Met. Soc. China* **22** (2012) 324~329
  27. Houqin Wang et al. : Brazing mechanism and infiltration strengthening of CC composites to TiAl alloys joint, *Scripta Materialia* **63** (2010) 859~862
  28. T. Noda, Application of cast gamma TiAl for automobiles, *Intermetallics* **6** (1998) 709~713
  29. J. Cao et al. : Effect of reaction heat on reactive joining of TiAl intermetallics using Ti-Al-C interlayers, *Scripta Materialia* **57** (2007) 421~424
  30. R. K. Shiue, S. K. Wu, S. Y. Chen : Infrared brazing of TiAl intermetallic using BAg-8 braze alloy, *Acta Mater.* **51** (2003) 1991~2004
  31. H. Y. Chan, D. W. Liaw, R. K. Shiue, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* (2004) 27~33
  32. P. He, J. C. Feng, B. G. Zhang, Q. Yiyu : *Mater. Charact.* **50** (2003) 87~92
  33. P. He, J. C. Feng, W. Xu : Interfacial microstructure of induction brazed joints of TiAl-based intermetallics to steel 35CrMo with AgCuNiLi filler, *Materials Science and Engineering A* **408** (2005) 195~201
  34. P. He, J. C. Feng, W. Xu : Mechanical property and fracture characteristic of induction brazed joints of TiAl-based intermetallics to steel 35CrMo with Ag-Cu-Ni-Li filler, *Materials Science and*



- Engineering A **412** (2005) 214~221
35. P. He, et al. : Mechanical property of induction brazing TiAl-based intermetallics to steel 35CrMo using AgCuTi filler metal, Materials Science and Engineering A **418** (2006) 45~52
  36. P. He, et al. : Microstructure and kinetics of induction brazing TiAl-based intermetallics to steel 35CrMo using AgCuTi filler metal, Materials Science and Engineering A **418** (2006) 53~60
  37. S. J. LEE et al. : Infrared joining of TiAl intermetallics using Ti-15Cu-15Ni foil, Acta materialia **46(4)** (1998) 1283~1295
  38. A. S. Ramos et al. : Nanometric multilayers: A new approach for joining TiAl, Intermetallics **14** (2006) 1157~1162
  39. Won-Bae Lee et al. : Effects of copper insert layer on the properties of friction welded joints between TiAl and AISI 4140 structural steel, Intermetallics **12** (2004) 671~678
  40. Hua-Ping Xiong et al. : Liquid-phase siliconizing by Al-Si alloys at the surface of a TiAl-based alloy and improvement in oxidation resistance, Acta Materialia **52** (2004) 2605~2620
  41. T. Noda et al. : Inductive brazing of TiAl and steels, Materials Science and Engineering **A239-240** (1997) 613~618
  42. X. G. Song et al. : Effect of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-particles addition in Ag- Cu-Ti filler alloy on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiAl brazed joint, Materials Science and Engineering A **528** (2011) 5135~5140
  43. X. G. Song et al. : Brazing high Nb containing TiAl alloy using TiNi-Nb eutectic braze alloy, Intermetallics **22** (2012) 136~141
  44. I. C. Wallis et al. : Brazed joints in γ-TiAl sheet: microstructure and properties, Intermetallics **12** (2004) 303~316
  45. J. Cao et al. : Combustion synthesis of TiAl intermetallics and their simultaneous joining to carbon/carbon composites, Scripta Materialia **65** (2011) 261~264
  46. X. G. Song et al. : Brazing TiAl intermetallics using TiNi-V eutectic brazing alloy, Materials Science and Engineering A **551** (2012) 133~139
  47. T. Tetsui, S. Ono : Endurance and composition and microstructure effects on endurance of TiAl used in turbochargers, Intermetallics **7** (1999) 689~697
  48. Toshimitsu Tetsui : Effects of brazing filler on properties of brazed joints between TiAl and metallic materials, Intermetallics **9** (2001) 253~260
  49. Toshimitsu Tetsui : Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicle, Materials Science and Engineering, **331** (2002) 582~588



- 유호천
- 1951년생
- 한국과학기술정보연구원 전문연구위원
- 금속공학, 용접야금 및 공정, 정보분석
- e-mail : yooho278@resear.re.kr