

터어빈 블레이드용 단결정 초내열합금의 용접·접합현상

김대업

Joining Characteristics of Single Crystal Superalloys for Turbine Blade

Dae-Up Kim

1. 서론

항공기용 제트엔진이나 발전플랜트 등과 같이 고온·고압의 가혹한 조건에 사용되는 가스터어빈에서는 터어빈 입구온도가 추력이나 연소효율을 직접 결정하기 때문에 성능향상을 위해서는 보다 고온하에서 사용 가능한 터어빈 블레이드용 초내열합금의 개발이 절실하다. Ni기 초내열합금은 Fe기, Co기 초내열합금에 비해 고온에서의 기계적성질이나 내식성이 우수하기 때문에 가장 신뢰성이 높은 내열재료로서 주목받고 있다.

Ni기 초내열합금은 내열온도가 높은 재료의 필요성에 부응하기 위하여 보통주조 초내열합금(CC), 일방향응고 초내열합금(DS), 단결정 초내열합금(SC)의 순으로 개발되고 있으며, 현재는 일방향응고 초내열합금이 항공기용 가스 터어빈 엔진에 주로 사용되고 있다.²⁾

Ni기 단결정 초내열합금은 고온에서 장시간 사용시의 조직안정성, 내고온부식성, 내가속산화성 등이 우수하고, 저온에서도 우수한 연성을 나타낼 뿐만 아니라 고온에서의 기계적특성이 일반 초내열합금에 비해 상당히 향상되어 있다. 특히, 터어빈 블레이드에 요구되는 크리프-파단수명 및 고온저사이클 피로수명이 보통주조 초내열합금에 비해 수십배나 길다. 이렇게 Ni기 단결정 초내열합금은 실용적으로 우수한 특성을 가지는 내열재료이나, 이용분야를 보다 확대시키기 위해서는 단결정 초내열합금의 특성을 충분히 발휘시킬 수 있는 용접·접합기술의 확립이 불가결하다. 또, 단결정 재료의 접합은 금속재료의 접합과정 혹은 접합의 본질을 해명한다고 하는 관점에서도 학문적으로 흥미 깊다.

본 보고에서는 각종 단결정재료 중에서도 Ni기 단결정 초내열합금을 중심으로 하여 단결정 재료의 용접·

접합현상 및 문제점에 대해서 기술한다.

2. Ni기 단결정 초내열합금의 종류와 특성

Ni기 단결정 초내열합금의 개발역사를 Fig. 1에 나타낸다²⁾. Ni기 단결정 초내열합금은 1940년대 초에 보통주조 초내열합금인 Nimonic80이 개발된 후 1970년대에 들어서면서 개발되었다. 초기에는 Mar-M200 등의 기존 합금조성이 그대로 사용되었으나, 입계강화원소가 초기용융온도를 저하시켜 횡방향 연성이 우수한 정도로 단결정으로서 큰 이점은 거의 인정되지 않았다³⁾. 이 단점을 개선하기 위해 1976년 이후에 제1세대 단결정 초내열합금으로서 Mar-M200 및 Mar-M247에서 각각 입계강화원소로 Co를 제거한 NASAIR100⁴⁾ 및 Alloy444⁵⁾가 개발되었으며, 1980년대에 들면서부터는 기존합금과는 독립해서

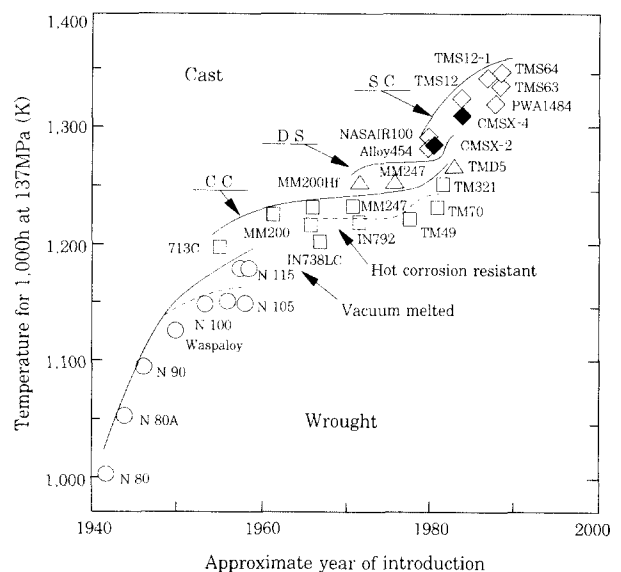


Fig. 1 Development history of Ni-base single crystal superalloy

Table 1 Chemical compositions of Ni-base single crystal superalloys

Generation	Alloy	Chemical composition (mass%)									Density (g/cm ³)
		Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Al	Ti	Others	
First generation	Alloy444	Bal.	8.6	-	-	12.0	-	5.0	2.0	-	6.70
	Alloy454	Bal.	10.0	5.0	-	4.0	12.0	5.0	1.5	-	8.70
	Alloy203E	Bal.	5.0	-	2.0	5.0	6.5	5.5	1.0	3.0Re, 0.5V	8.65
	NASAIR100	Bal.	9.0	-	1.0	10.5	3.3	5.8	1.2	-	8.52
	CMSX-2	Bal.	8.0	4.6	0.6	8.0	6.0	5.6	1.0	-	8.56
	CMSX-3	Bal.	8.0	4.6	0.6	8.0	6.0	5.6	1.0	0.1Hf	8.56
	CMSX-6	Bal.	10.0	5.0	3.0	-	2.0	4.8	4.7	0.1Hf	7.98
	PWA1480	Bal.	10.0	5.0	-	4.0	12.0	5.0	1.5	-	8.70
	SRR99	Bal.	8.0	5.0	-	10.0	3.0	5.5	2.2	-	8.56
	RR2000	Bal.	10.0	15.0	3.0	-	-	5.5	4.0	1.0V	7.87
TMS12	Bal.	6.6	-	-	-	12.8	7.7	5.2	-	8.65	
Second generation	CMSX-4	Bal.	6.5	9.0	0.6	6.0	6.5	5.6	1.0	3.0Re, 0.1Hf	8.70
	MXON	Bal.	8.0	5.0	2.0	8.0	6.0	6.0	-	-	8.60
	PWA1484	Bal.	5.0	10.0	2.0	6.0	9.0	5.6	-	3.0Re, 0.1Hf	8.95
	SC83K	Bal.	6.4	1.0	4.3	7.3	7.3	5.1	-	0.1Hf	8.86
	TMS26	Bal.	5.6	8.2	1.9	10.9	7.6	5.1	-	-	8.99
	TUT92	Bal.	10.0	-	0.8	2.3	2.1	12.0	1.5	0.25Re	8.64
	TUT101	Bal.	10.0	-	0.7	2.0	2.6	12.0	1.2	-	8.72
	TMS61	Bal.	11.4	-	5.9	-	0.9	5.0	2.1	1.9Nb	8.09
	TMS62	Bal.	7.9	-	6.9	-	-	5.8	0.9	2.4Nb	8.10
	TMS63	Bal.	6.9	-	7.5	-	-	8.4	5.8	-	8.48
TMS64	Bal.	6.5	-	-	8.4	1.0	6.7	5.8	-	8.48	

Alloy454⁶⁾, PWA1480⁶⁾, CMSX-2⁷⁾, SRR99⁸⁾ 및 TMS12²⁾ 등이 차례로 개발되었다.

또한, 내열온도를 한층 향상시키기 위해서 합금설계 프로그램을 이용하여 합금개발이 행해져 고강도 지향 합금인 제2세대 단결정 초내열합금이 개발되었다. 제2세대 합금 단결정 초내열합금으로는 제1세대 단결정 초내열합금의 기본조성에 Re, Hf, Nb, V 등을 첨가한 PWA1484⁶⁾, CMSX-4⁹⁾, SC83K¹⁰⁾, TUT92¹¹⁾ 및 이들 첨가원소가 없는 TMS26, TUT101 등이 개발되었다. 한편, 제2세대 단결정 초내열합금은 제1세대 단결정 초내열합금에 비해 비강도는 상승하나 동시에 비중도 증가하는 경향이 있고, 실용부품의 부하를 크게 하기 때문에 최근에는 TMS61~64¹²⁾ 등과 같이 비교적 저비중이면서 비강도가 큰 단결정 초내열합금이 개발되고 있다. 이와 같은 개발역사에 따라 Ni기 초내열합금 개발 이후, 50년간에 약 600K 이상의 내열온도 상승이 달성되고 있다. Table 1에는 지금까지 개발된 대표적인 Ni기 단결정 초내열합금의 비중 및 화학성분을 나타낸다^{2~13)}. 모든 Ni기 단결정 초내열합금에서는 고온에서의 용체화처리 및 2단계의 시효처리가 채용되고 있다. 최근, CMSX-4등을 대상으로 하여 국부용융을 방지할 수 있는 범위내에서 될 수 있는 한 고온에서 용체화처리를 행함으로써 고온강도를 향상시키기 위한 다단계의 용체화처리도 제안되고 있다¹³⁾.

3. 용접 · 접합현상

Ni기 초내열합금의 접합에 이용되고 있는 대표적인 접합방법으로는, TIG 용접법, 전자빔용접법, 레이저빔용접법 등과 같은 용융용접법과, 마찰압접법, 브레이징법, 고상확산접합법, 액상확산접합법과 같이 거시적으로는 모재를 용융시키지 않는 계면접합법 및 접착제와 같이 기계적 결합력을 이용한 접합법 등이 있다.

Ni기 초내열합금의 접합에 적용되고 있는 대표적인 접합방법을 압력, 입열 및 접합강도의 관점에서 분류하여 Fig. 2에 나타낸다.

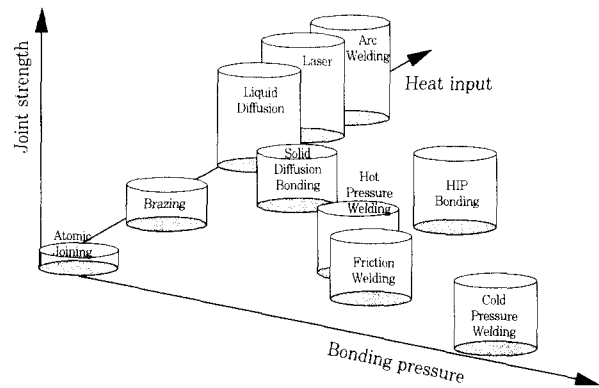


Fig. 2 Relation among the heat input, bonding pressure and joint strength for various joining techniques

3.1 용융용접법

용융용접법은 Ni기 초내열합금의 중요한 접합법으로서 현재에도 광범위하게 사용되고 있으나, 용접부 및 열영향부(HAZ)의 고온균열 및 용접후 열처리시에 발생하는 재열균열이 문제로 되어 있다¹⁴⁾. 단결정 합금에 용융용접법을 적용한 경우에는 용접부에 결정입계가 형성되고, 양호한 접합이음부를 얻는 것은 극히 곤란하다. Al 단결정에 TIG용접¹⁵⁾을, Mo 단결정 및 W 단결정에 전자빔용접¹⁶⁾을 적용한 경우의 조직 및 용접이음부의 기계적특성에 대해서 검토되어 있으나, 용접부와 비용접부의 경계를 따라 조대한 기공이 관찰되고, 용융·응고한 용접부에는 결정입계가 형성되는 것이 보고되고 있다¹⁶⁾. 따라서, 단결정재에 용융용접법을 적용할 경우, 용접부의 단결정화가 이루어지지 않아 단결정 본래의 강화기구가 용접부에서 유지될 수 없기 때문에 용융용접법의 적용은 본질적으로 곤란하다.

3.2 기계적 접합법

접착제는 항공·우주기기 분야에서 사용되는 금속 구조용 접착제의 경우, 박리강도, 전단강도는 상당히 높은 값을 나타내나, 그 대부분은 내열성이 최대 700~800K 정도이다. 현재까지 약 1,300K까지 견디는 접착내열성을 나타내는 반응형 접착제(무기접착제)도 개발되고 있으나, 내충격성, 내수·내습성 및 기공성에 있어서 문제로 남아 있다¹⁷⁾.

3.3 계면접합법

3.3.1 마찰압접법

마찰압접법은 burr의 발생, 접합계면에서 개재물에 의한 접합이음부 효율의 저하가 문제가 되고 있다. 단결정재의 접합에서는 최대 문제인 접합방위의 제어가 어렵기 때문에 접합부의 단결정화는 매우 곤란하며, 단결정재 접합의 적용에는 문제가 된다¹⁸⁾.

3.3.2 브레이징법

단결정재의 브레이징에 있어서는, 고융점 단결정재를 Pt, Pd-20%Ag, Au-8%Pd 등의 귀금속계 금속 및 V, Zr, Mo-40%Ru 등의 고융점 금속의 인서트금속을 사용해서 브레이징한 접합부의 조직, 기계적특성 등에 관해서 검토되고 있다^{19~21)}. Table 2는 Mo, W 등의 고융점 단결정의 브레이징에 대해서 실용적 혹은 실험적으로 사용되고 있는 각종 인서트금속을 나타낸 것이다¹⁹⁾.

Table 2 Filler metals used for brazing of single crystal

Chemical composition (mass%)		Melting point (K)	Bonding temperature (K)
Au-base	Au-8Pd	-	1573
Cu-base	Cu-10Ti	-	1223~1293
Co-base	Co-20Cr-15W-10Ni	1698	-
Mn-base	Mn-16Ni-16Co	1338	-
Mo-base	Mo-46.5Ni	-	1653~1673
	Mo-36Ru-10Ni	-	2053~2073
	Mo-40Ru	2221	2273~2313
Ni-base	Ni-7Si-5Cr-4Co-1W-1B	-	1523
	Ni-10Ti	-	1603~1673
Pd-base	Pd	1825	-
	Pd-20Ag	-	1773
	Pd-30Ag	-	1773
	Pd-40Ni	-	1573
	Pd-36Ni-10Cr	1643	-
Pt-base	Pt	2042	2073
	Pt-20Pd-5Au	1968	-
Ti-base	Ti	1941	-
	Ti-25Cr-3Be	1383	-
	Ti-49Zr-2B	1523	-
	Ti-8.5Si	-	1673
V-base	V	2173	2223
	V-30Cb-5Ta	-	2088
	V-25Cb-15Ta	-	2143
Zr-base	Zr	2125	2173
	Zr-30Mo	-	1793
	Zr-10Ti	-	1873~2073

Mo 단결정을 브레이징한 경우, 모재와 브레이징층의 경계근방에 σ 상, ϵ 상등의 금속간화합물이 생성되고, 브레이징후 열처리한 경우에도 금속간화합물 및 조대한 기공이 형성되는 것이 보고되고 있다^{20,21)}. 대표적으로 Mo단결정 브레이징부의 기계적특성을 보면, Fig. 3에 보이는 바와 같이, 모재에 비해 접합부의 파단 응력, 굽힘연성 모두 상당히 열화하는 것을 알 수 있고,

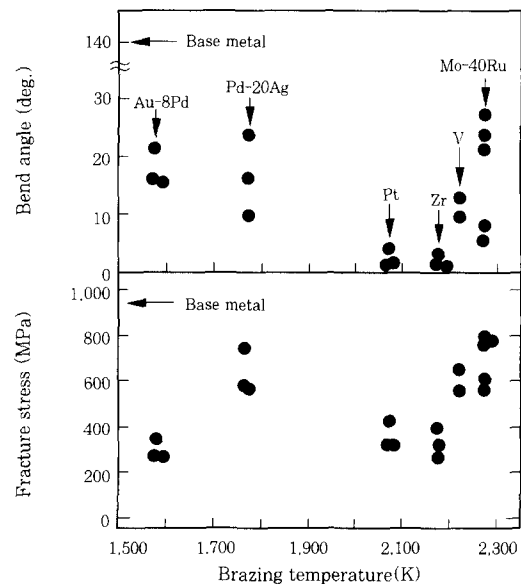


Fig. 3 Changes in bend angle and fracture stress with brazing temperature for the brazed joints of Mo single crystal

파단은 모두 브레이징 계면에서 일어난다고 보고되고 있다¹⁹⁾. 또한, 브레이징 온도가 비교적 높은 경우에는 브레이징중에 단결정재가 재결정하는 것, 인서트금속 자체의 고온강도가 단결정에 비해 떨어지는 것 혹은 브레이징후 사용중에 인서트금속과 모재의 반응에 의한 국부적인 재결정을 일으키는 것 등의 문제점이 지적되고 있다^{16,19)}. 따라서, 현재까지 단결정재의 브레이징에 있어서, 모재와 동등한 기계적특성을 가지는 접합이음부를 얻는 것은 곤란하다고 말할 수 있다.

3.3.3 고상확산접합법

고상확산접합법은 가열 및 가압에 의해 접합계면에 서 원소를 직접 고상확산시키는 것에 의해 접합하는 방법이기 때문에 단결정재의 접합에 관해서도 접합부의 단결정화를 포함하여 양호한 접합이 달성될 가능성이 높다.

Cu 단결정재를 고상확산접합한 경우, 접합한 상태에서는 접합계면이 일직선상으로 존재하나, 접합후 열처리에 의해 접합계면이 이동 혹은 소멸하여 접합부가 다결정체로 변화하게 되어 단결정 그대로 접합하는 것은 곤란하다고 되어 있다²²⁾. Mo 단결정에 고상확산접합을 행한 경우에는 접합면에서의 변형을 충분히 제거한 후 접합하면 접합부는 재결정이 일어나지 않게 접합이 가능하나, 접합면에서의 원자의 정합성이 접합이음부의 강도에 크게 영향을 미친다²³⁾. 또, Ni기 단결정 초내열합금인 TMS26의 고상확산접합에 대해서 보면, Mo 단결정에 비해 재결정의 가능성이 낮고, 용이하게 단결정으로 접합이 가능하나, 접합계면에는 산화물 및 석출물이 형성되어 접합이음부 특성이 저하한다는 보고도 있다²³⁾.

이와 같이, 일반적으로 단결정 합금의 고상확산접합에 있어서는 접합이음부의 기계적성질이 모재와 동일 레벨에 이르지 못하는 것이 현상이다. 또한, 피접합면의 표면조도가 엄격하게 요구되고, 높은 가압력에 의한 모재의 변형, 접합시간의 장시간화, 접합분위기의 정밀한 제어 등의 이유 때문에 실용부품에 적용하기에는 문제가 있다고 예상된다.

한편, 단결정재의 고상확산접합에서는 접합과정 및 접합부의 특성이 접합면에서의 결정방위관계에 의해 크게 좌우된다. Fig. 4에는 Mo 단결정에 고상확산접합을 행한 경우, 접합부 강도에 미치는 접합면에서의 결정방위의 영향을 나타낸다. 접합면이 (121)면 및 (025)면 모두 접합강도는 접합면의 회전각에 크게 의존하고, 회전각 10도 이내에서는 접합강도가 크나, 그 이상이 되면 접합강도는 매우 낮은 것을 알 수 있다.

접합후 열처리한 것에 의해 접합이음부의 강도는 향

상하는 것을 알 수 있다. 또한, (111)회전각을 가지는 Si쌍결정 및 회전입계 및 대칭경각입계를 가지는 Mo 쌍결정의 고상확산접합부에 있어서도 접합강도 및 입계강도는 회전각 및 대칭경각에 강하게 의존하는 결과도 보고되고 있다^{24,25)}.

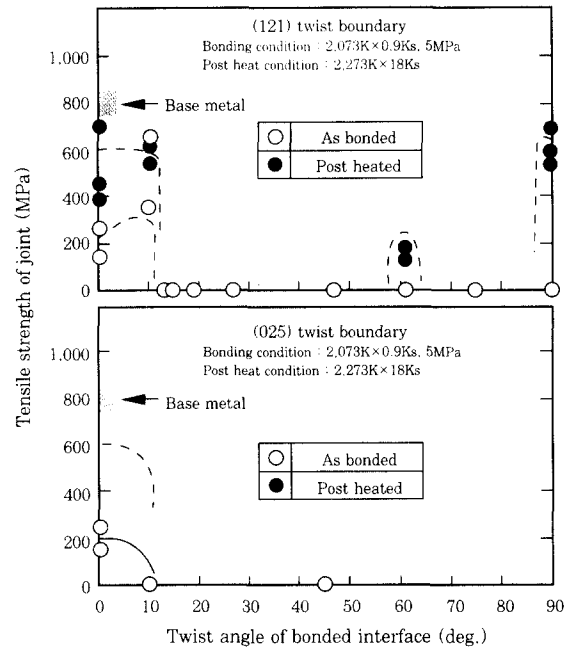


Fig. 4 Relation between twist angle and the tensile strength of diffusion bonded joints

3.3.4 액상확산접합법

액상확산접합법은 인서트금속중의 B, P, Si 등의 용점저하원소가 모재에 확산해서 등온응고하는 등온응고현상에 의해 브레이징 이음부에서 문제가 되는 취약한 금속간화합물이 형성되기 어렵고, 모재와 동일결정 방향의 고상이 정출하는 에피탁살 성장이 기대되기 때문에 단결정재의 접합시에 가장 중요한 접합부의 단결정화를 달성시킬 수 있는 가능성이 높다. 또한, 저압력, 소변형, 정밀접합이 가능하고, 접합후 균질화열처리에 의하여 모재와 동등한 접합강도를 가지는 고성능 이음부를 얻을 수 있다.

현재까지, Ni기 합금의 액상확산접합에 관해서는 HastelloyX, InconelX-750, 713C, Udimet500, IN738LC, TM49, Mar-M247, IN100, MA754 등의 Ni기 다결정 초내열합금을 중심으로 많은 연구가 정력적으로 행하여져 왔다. 지금까지의 연구에 의하면^{26,27)}, 접합부의 인장강도는 거의 모재 수준이나 접합부의 연성이 낮고, 크리프-파단특성 및 피로특성이 모재 레벨에 달하지 않는 것, 기계적특성에 편차가 나타나는 것으로부터 신뢰성의 보증이 문제가 되고 있다. 그 원인에 대해서는 접합부에 형성되는 접합결함이나 개

재물 혹은 불완전한 균일화처리에 의한 합금원소의 불균일성등이 관여하고 있는 것으로 예상된다. 액상확산 접합에 사용되는 대표적인 인서트금속의 화학조성을 Table 3에 나타낸다.

Table 3 Insert metals used for transient liquid phase bonding

Chemical composition (mass%)		Type	Melting point (K)
Ni-B-Cr	Ni-3.7B-15.5Cr	CA	1338
	Ni-4.0B-20.0Cr	DA	1302
	Ni-4.5B-21.8Cr	DA	1313
	Ni-4.5B-15.0Cr	P	1353
	Ni-3.2B-20.4Cr-7.1Ge	DA	1278
	Ni-2.5B-15.0Cr-15.0Co-5.0Mo	-	-
	Ni-4.0B-10.0Cr-23.0Co-7.0Mo-5.5Fe	CA	1330~1438
Ni-B-Si	Ni-3.0B-4.4Si	CA	1253~1313
	Ni-2.1B-7.5Si	CA	1233~1283
	Ni-4.1B-2.9Si	DA	-
Ni-B-Si-Cr	Ni-3.3B-2.9Si-21.4Cr	DA	1308
	Ni-2.9B-4.5Si-7.0Cr	P	1243~1274
	Ni-3.2B-4.5Si-14.0Cr-4.5Fe	CA	1243~1313
	Ni-3.2B-4.5Si-7.0Cr-3.0Fe	CA	1243~1273
Ni-B-Si-Co	Ni-2.7B-4.0Si-2.0Co-1.2Hf	CA	1253~1283
Base metal+B	Inconel 713C+4.0B	DA	-
	TM 49+2.8B	P	-
	Mar-M 247+2.6B	DA	-
	IN 939+2.2B	DA	-
Base metal+Si	Rene 80+2.2B	P	-
Base metal+B+Si	Inconel 713C+3.5B+0.1Si	P	-
	Inconel 713C+4.1B+0.1Si	DA	-
	Inconel 713C+4.5B+0.1Si	P	-
	Inconel 713C+3.0B+4.5Si	P	-

CA: Commercial amorphous foil, DA: Newly developed amorphous foil, P: Powder

한편, 단결정 초내열합금의 접합에서는, 접합부에 입계가 형성될 경우, 단결정 초내열합금은 입계강화원소가 함유되어 있지 않기 때문에 접합이음부의 기계적특성이 현저하게 저하한다. Fig. 5에 보이는 바와 같이, 단결정재에 재결정이 발생한 경우에는 그 수명저하가 현저하다. 따라서, 단결정재의 접합에서도 접합전처리 조건을 검토하고, 접합면의 재결정 방지책을 확립한 후에 접합을 행하는 것이 중요하다.

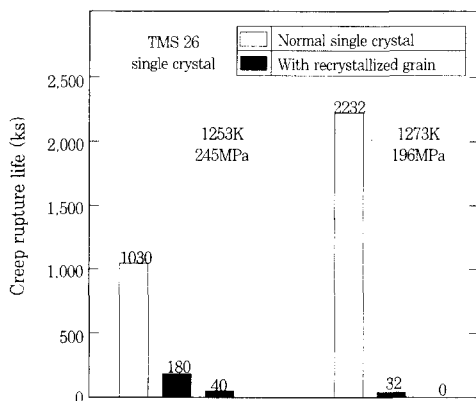


Fig. 5 Influence of the recrystallization on the creep rupture life

Ni기 단결정 초내열합금을 액상확산접합한 경우, 접합부와 모재의 경계근방에는 다양한 형태의 생성상이 정출·석출하여 접합부 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. NASAIR100 단결정 초내열합금을 Ni기 인서트금속으로 접합한 경우²⁸⁾, 접합한 상태에서는 접합부에 W주성분의 침상 석출물이 생성하여 인장 시험시 석출물을 따라서 파단이 일어나나, 접합후열처리를 실시하면 접합부에서의 석출물이 소멸하여 접합부 효율이 향상된다고 하고 있다. 또한, Ni기 단결정 초내열합금인 CMSX-2, CMSX-4의 액상확산접합에서는 양 접합 모재의 결정방위를 일치시킨 동방위 접합부에서는 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타낸 바와 같이, 고온인장특성, 크리프-파단강도, 고온저사이클 피로수명 등의 고온에서의 기계적특성이 모재와 동등한 우수한 접합부를 얻을 수 있다고 보고하고 있다^{29,30)}.

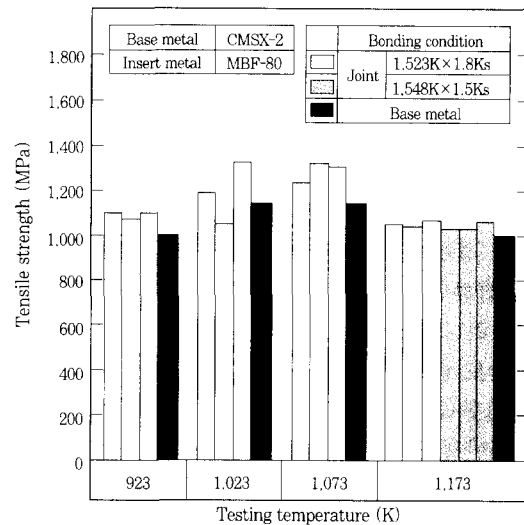


Fig. 6 Tensile strength of CMSX-2 TLP bonded joints

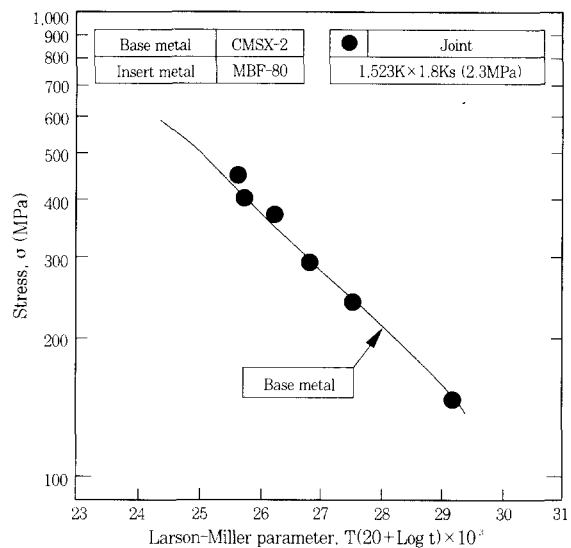


Fig. 7 Creep rupture strength of CMSX-2 TLP bonded joints

한편, 양 접합모재의 결정방위가 다른 이방위접합에서는 접합면에서의 회전각이 3도까지는 모재강도의 크리프-파단특성을 나타내나, 이후 회전각이 증가함에 따라 접합부 특성이 현저하게 저하한다고 한다³¹⁾(Fig. 8). 또한, 미국에서는 Ni기 단결정 초내열합금의 액상 확산접합에 의한 터어빈 날개의 조립접합에 관해 접합면에서의 X축, Y축, Z축의 각축에서의 방위의 합이 10도 이내, 하나의 축에 대해서는 5도 이내에서 접합하는 것이 바람직하다고 하는 특허도 신청되고 있다⁷⁾.

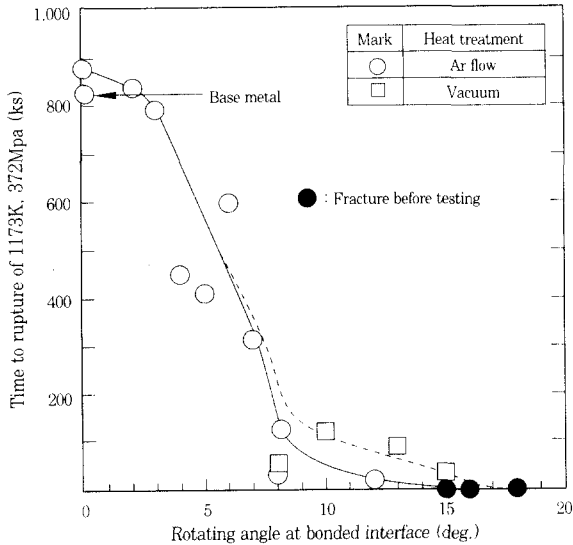


Fig. 8 Relation between the creep rupture time and the rotating angle at bonded interface

4. 결 론

항공·우주기기의 고온·고압부에 적용할 미래의 고온재료로서 각광을 받고 있는 Ni기 단결정 초내열합금은 향후 고성능화, 고효율, 고신뢰성을 가지는 용접·접합기술의 확립 및 그 활용이 절실히 요구된다.

단결정 초내열합금을 접합함에 있어서, 재료 본래의 특성을 그대로 유지하기 위해서는 접합부는 조직 및 조성 모두 모재와 동등한 것이 요구된다. 즉, 접합부의 단결정화는 대단히 중요한 과제이다. 따라서, 단결정재의 접합에 있어서는 접합에 따른 재결정화를 극소화할 수 있고, 정밀한 접합이 가능한 접합법, 즉, 브레이징법, 고상확산접합법, 액상확산접합법과 같은 계면접합법의 적용이 유효하다. 그 중에서도 액상확산접합법은 접합부의 단결정화 및 양호한 접합이음부 특성을 기대할 수 있는 가장 유효한 접합방법이라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. F.L.Versnyder, L.W.Sink and B.J.Pearcey: Modern Casting, 12(1967), p68
2. 原田, 横川, 大野, 山縣, 山崎: 耐熱金屬材料第 123 委員會研究報告, 34-3(1993), p303
3. F.L.Versnyder and M.E.Shank: Mater. Sci. Eng., 6 (1970), p213
4. 太田, 中川, 大友, 雜質: 日本金屬學會會報, 24-6(1985), p462
5. P.Caron, Y.Ohta, Y.G.Nakagawa, T.Khan: Proceedings of the 6th International Conference on Superalloys 1988(1988), p215
6. A.D.Cetel and D.N.Duhl: Proceedings of the 6th International Conference on Superalloys 1988, Pennsylvania, Sep. 18-22(1988), p215
7. A.F.Giamei and B.H.Kear: United States Patent, July 5(1977), 4033792
8. D.A.Ford and P.R.Arthey: Proceedings of the 5th International Symposium on Superalloys 1984, Pennsylvania, Oct. 7-11(1984), p115
9. D.J.Frasier, J.R.Whetstone, K.Harris, G.L.Ericson and R.E.Schwer: Proceedings of International Conference on High Temperature Alloys for Power Engineering 1990, Liege, Sep. 24-27(1990), p1281
10. 大野, 渡邊: 日立金屬技術, 6(1988), p9
11. 松本, 宮崎, 村田, 森永, 湯川: 鐵と鋼, 78-4(1992), p658
12. H.Harada, T.Yamagata, S.Nakazawa, K.Ohno and M.Yamazaki: Proceedings of International Conference on High Temperature Alloys for Power Engineering 1990, Liege, Sep. 24-27(1990), p1319
13. 太田, 中川, 大浜: 鐵と鋼, 76-6(1990), p940
14. M.H.Haafkens and J.H.G.Matthey: Welding Journal, 61-11(1982), p25
15. H.Nakagawa, M.Katoh, F.Matsuda and T.Senda: Trans. Japan Weld. Soc., 2-1(1971), p1
16. 平岡: 高溫學會誌, 20-1(1994), p4
17. 木村: 溶接學會誌, 53-2(1984), p86
18. J.R.Dole, P.A.Vozzella, F.J.Wallace and H.B.Dunthorne: Welding Journal, 48-11(1969), p514s
19. 平岡: 鐵と鋼, 6(1990), p44
20. Y.Hiraoka: Int. J. Refractory Met. & Hard Mater., 11 (1992), p303
21. Y.Hiraoka: Int. J. Refractory Met. & Hard Mater., 11 (1992), p89
22. 桃野, 井川: 日本金屬學會誌, 42-3(1978), p211
23. 大橋, 菅: 溶接學會論文集, 10-1(1992), P53
24. 佐藤, 宮崎, 幾原, 栗下, 吉永: 日本金屬學會誌, 53-5(1989), p536
25. 栗下, 大石, 久保, 吉永: 日本金屬學會誌, 47-7(1983), p546
26. D.S.Duvall, W.A.Owczarski and D.F.Paulonis: Welding Journal, 53-4(1974), p203s

27. 鈴村, 恩澤, 田村: 溶接學會誌, 49-7(1980), p462
28. 平根, 吉成, 森本, 舟本: 日本金屬學會秋期大會一般講演概要, 164(1985), p304
29. D.Kim, K.Nishimoto, K.Saida and Y.Nakao: ISIJ International, 35-10(1995), p1298
30. 김대업, 강정운: 대한용접학회지, 18-3(2000), p106
31. 金, 西本, 才田, 淺井, 古川: 日本溶接學會論文集, 18-1(2000), p133



- 김대업(金大業)
- 1965년생
- 현대MOBIS(주) 기술연구소
- 철강 및 비철재료 확산접합, 용접야금
- e-mail : aeupkim@mobis.co.kr