

Ni기 초내열합금의 액상화산접합부 생성상의 금속조직학적 검토

김 대 업*

* 현대 MOBIS(주) 기술연구소

Metallurgical Study of Microconstituents in Transient Liquid Phase Bonded Joints of Ni Base Superalloy

Dae-Up Kim*

* Research Institute, Hyundai MOBIS Co., Yongin 449-910, Korea

Abstract

The metallurgical study of microconstituents in transient liquid phase bonded joints of Ni-base single crystal superalloys, CMSX-2 and CMSX-4 was investigated employing MBF-80 insert metal. TLP bonding of specimens was carried out at 1,373~1,523K for 0~19.6ks in vacuum. Three types of microconstituents (needle-like constituent, dot-like constituent and abnormal shape constituent) were formed in the bonded interlayer during TLP bonding operation. All these microconstituents were identified as boride. Microconstituents contain a large percentage of Cr in the early stage of bonding. As increasing the holding time, the amount of Cr was decreased and the amount of W, Co and Re were increased. From the analysis results of electron diffraction pattern by TEM, composition of elements in microconstituents were turned into MB→M₂B₃→M₃B type with the increased in holding time. It can be explained by the fact that the relative amount of boron in microconstituents was decreased when the holding time was increased.

(Received August 23, 2000)

Key Words : Ni-base single crystal, CMSX-2, CMSX-4, TLP bonding, Boride, Microconstituent

1. 서 론

항공기용 제트엔진이나 발전용 플랜트와 같이 고온·고응력의 가혹한 조건에서 사용되는 부품의 구조재료에는 크리프-파단특성 및 피로특성이 우수한 Ni기 초내열합금이 널리 사용되고 있으며, 보다 내열온도가 높은 재료개발의 필요성에 부응하기 위해 보통주조합금→일방향응고합금→단결정합금의 순으로 계속 개발되어 왔다¹⁻³⁾. 이러한 고성능 첨단재료의 실용화를 위해서는 재료 본래의 특성을 발휘할 수 있는 접합기술의 확립이 절실하다.

Ni기 초내열합금을 접합한 경우, 접합부의 인장강도는 거의 모재 수준이나, 접합부의 연성이 낮고, 크리프-파단특성 및 피로특성이 모재수준에 달하지 않는

문제점이 남아 있다. 이는 접합부에서의 금속간화합물이나 산화물 등과 같은 계재물의 생성이 주요원인으로 지적되고 있다^{4,5)}. Ni기 단결정 초내열합금인 NASAIR100의 접합부에서는 모재와 접합부 계면근방에 W를 주성분으로 하는 침상석출물이 생성하여 인장시험시 석출물을 따라 파단하여 접합강도는 모재에 비해 상당히 낮다고 보고하고 있다⁶⁾. 또한, TMS26 접합부에서는 접합계면에 산화물 및 석출물이 형성되어 접합부 특성이 저하한다고 보고되고 있다⁷⁾. 지금까지의 연구에 의하면, Ni기 초내열합금의 접합부에서는 접합조건에 따라서 모재 및 접합층내에 생성상이 생성되어 접합부의 기계적특성에 크게 영향을 미칠 것이 용이하게 예상된다⁸⁻¹⁰⁾.

본 연구에서는, Ni기 단결정 초내열합금을 대상으로 하여 액상화산접합을 행하여, 접합부 근방에 생성하는

생성상의 원소분석 및 동정을 행함과 동시에 접합온도 및 유지시간에 따른 생성상의 생성상황에 대해서 조사하였다. 또한, 이들 결과에 기초하여 접합부 근방에 생성되는 생성상의 생성기구에 대해서 고찰하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 실험에 사용한 모재는 Cannon-Muskegon사가 개발한 단결정 전용합금인 CMSX-2 및 Re첨가의 고강도 지향합금이라 불리는 고성능 단결정 초내열합금인 CMSX-4를 사용하였다. 또, 인서트금속으로서 시판되고 있는 Ni기 합금 비정질 박막인 MBF-80(두께:40 μ m)를 사용하였다. 이들의 조성을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of materials used (mass%)

Materials	Ni	B	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Ta	Re	Hf
Base metal CMSX-2	Bal.	-	8.0	4.6	0.6	8.0	1.0	5.6	6.0	-	-
Base metal CMSX-4	Bal.	-	6.5	9.0	0.6	6.0	1.0	5.6	6.5	3.0	0.1
Insert metal MBF-80	Bal.	3.7	15.5	-	-	-	-	-	-	-	-

2.2 접합방법

단결정 모재측면에는 길이방향으로 3개의 직선을 방전가공으로 표시한 후, 접합시의 양 모재의 결정방위를 확인할 수 있도록 하였다. 접합시료 사이에 인서트 금속을 삽입하고 양 시료의 접합방위가 동일하게 되도록 배치해서 접합하였다. 13.3mPa의 진공중에서 고주파 유도가열장치에 의해 가열속도 10K/s로 가열하고,

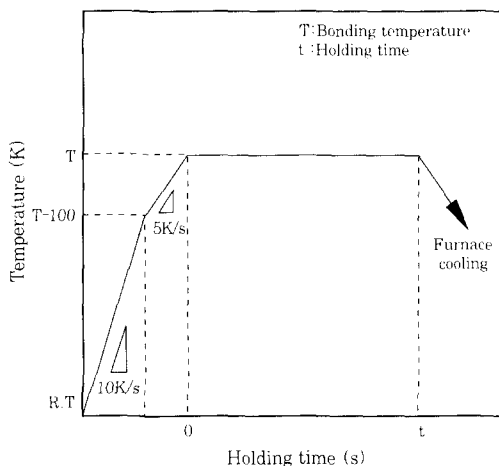


Fig. 1 Temperature profile in bonding

접합온도에서 소정의 시간 유지 후 진공챔버내에서 냉각하였다(Fig. 1). 접합은 접합온도 1,373~1,523K, 유지시간 0~19.6ks, 가압력 2.3MPa의 조건에서 행하였다.

2.3 접합부의 조직 및 생성상의 조사방법

접합부의 미세조직은 10%염산알코올으로 전압3V, 시간10초의 조건에서 전해부식을 행해 SEM으로 조직을 관찰하였으며, 원소분석에는 EDX 및 EPMA를 사용하였다. 생성상의 동정에는 석출 replica를 이용해 TEM을 사용해서 행하였다. 또, 생성상의 구성원소비를 반정량적으로 측정하기 위해 SEM 화면중에서 임의의 20개의 생성상에 대해 EDX점분석을 행하여, 분석대상원소의 K각에서의 피크를 측정하여 그 높이의 비를 구성원소의 비로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부 조직 및 생성상의 분류

Fig. 2는 CMSX-2에 대해 1,373K \times 19.6ks의 등온응고완료조건에서 접합한 접합부 및 그 근방에 생성하는 생성상의 조직을 나타낸 것이다. 접합층내에는 공정조직과는 형태가 다른 괴상의 생성상의 존재가 관찰된다. 접합부 부근을 상세히 관찰하면, 생성상은 생성하는 장소 및 형상에 따라 3종류로 분류된다. 즉, 접합면에 인접한 일정영역의 모재에 생성하는 침상생성상(A) 및 미세한 입상생성상(B) 및 접합층내에 생성하는 괴상생성상(C)이다.

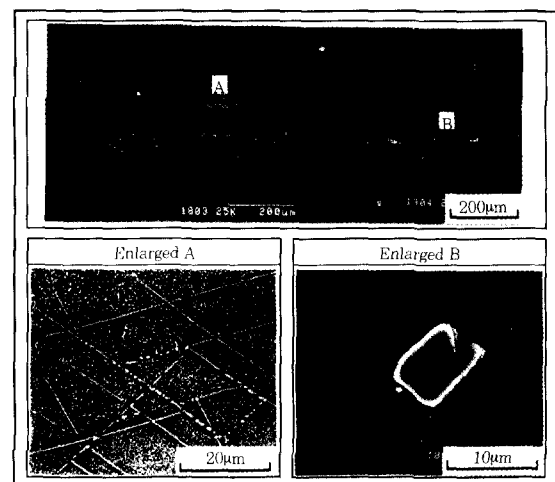


Fig. 2 Microstructures of bonded interlayer and microconstituents for CMSX-2 joint

한편, CMSX-4에 대하여 등온응고가 완료하는 1.453K×6.6ks의 조건에서 집합한 집합부의 조직을 Fig. 3에 나타낸다. 전체적으로 집합부 조직은 CMSX-2 집합부와 유사하나, 집합부 부근에는 2종류의 생성상이 관찰된다. 즉, 침상생성상은 보이지 않고 접합면에 인접한 모재에 생성하는 미세한 입상생성상(A) 및 집합층내의 과상생성상(B)의 2종류의 생성상만 관찰되었다.

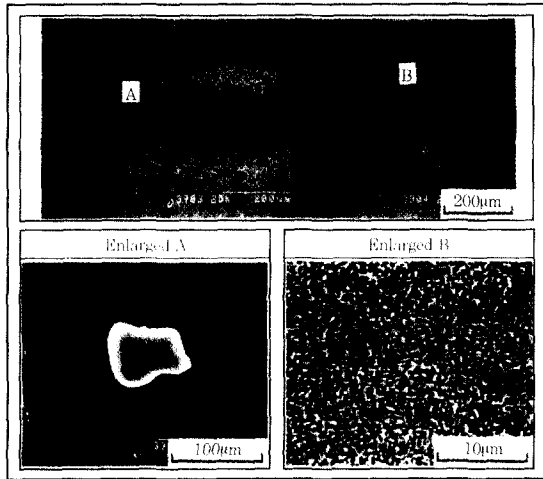


Fig. 3 Microstructures of bonded interlayer and microconstituents for CMSX-4 joint

3.2 생성상의 원소분석

Fig. 4는 CMSX-2 집합부에서 집합층 부근의 모재에 생성하는 침상생성상 및 미세한 입상생성상에 대해 EDX 및 EPMA 분석을 행한 결과를 나타낸 것이다.

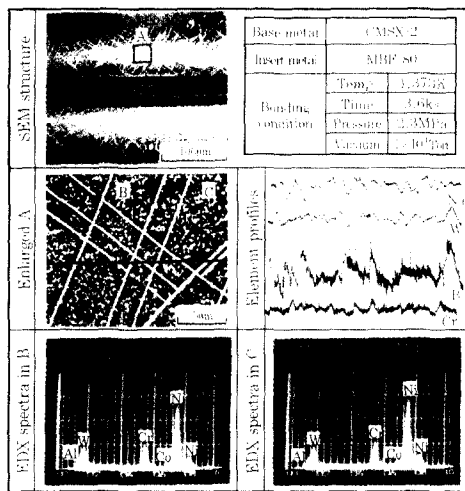


Fig. 4 Microstructures of bonded interlayer, EDX spectra of microconstituents and elements profiles of analyzed by EPMA

EDX 점분석 결과를 보면, 침상 및 입상생성상 모두 Cr, W 및 Ni의 존재가 인정된다. 또, EPMA 선분석 결과에서는 Cr, W 및 B이 생성상에서 상승하고 있고, Ni이 matrix에 비해 저하하고 있다.

접합층내 과상생성상의 원소분석결과를 각각 Fig. 5에 나타내었다. EDX 결과를 보면, 모든 생성상에서 Cr, W 및 Ni의 존재가 확인되었으나, 등온응고도중의 생성상에서는 Cr량이 많이 함유되어 있는 반면에 등온응고완료후의 생성상에서는 W이 많이 함유되어 있다. EPMA 선분석 결과를 보면, 미세한 침상생성상 및 입상생성상의 결과와 유사하게 과상생성상에서도 Cr, W 및 B이 상승해 있고, Ni이 주위에 비해 저하하고 있다. 이들 결과로부터, 침상생성상, 입상생성상 및 접합층내 과상생성상의 주요구성원소는 Cr, W 및 B이고, Cr 및 W계의 붕화물(boride)일 가능성이 시사된다.

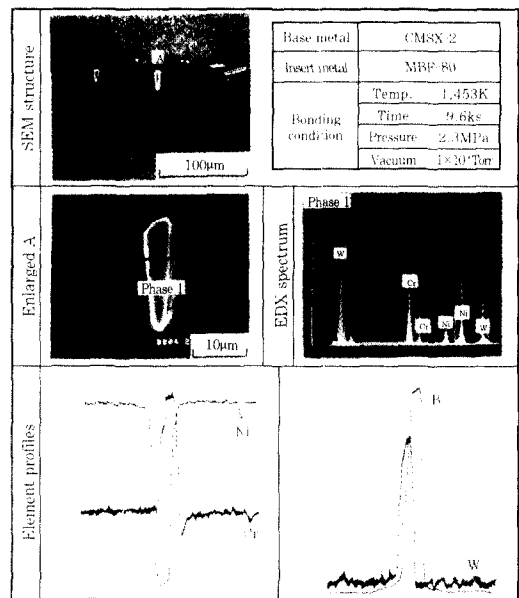


Fig. 5 Microstructures of bonded interlayer, EDX spectrum of microconstituent and elements profiles of analyzed by EPMA

Fig. 6은 CMSX-4 집합부에 생성하는 과상생성상의 EDX 및 EPMA 분석결과를 나타낸 것이다. EDX 분석에서는 생성상에서 Cr, W 및 Co의 존재가 확인되었으며, EPMA 선분석 결과에서는 Cr, W, Re 및 B이 생성상에서 상승하고 있다. 이로부터, CMSX-4집합부내에 생성하는 생성상은 생성상의 구성원소가 Cr, W, Co, Re인 붕화물(boride)로 판단된다. 또한, 입상생성상에서도 과상생성상과 유사한 결과가 얻어졌다.

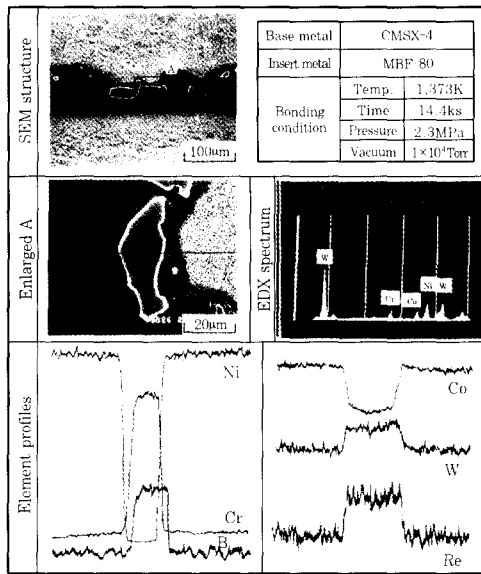


Fig. 6 Microstructures of bonded interlayer. EDX spectrum of microconstituent and elements profiles of analyzed by EPMA

3.3 생성상의 조사

CMSX-2 및 CMSX-4 접합부에 생성한 생성상들에 대하여 보다 상세한 조사를 하기 위하여 TEM을 이용하여 생성상을 조사하였다. 생성상의 전자선 회절패턴으로부터 해석을 행한 결과, 패턴의 면간격(d) 및 평균 오차를 4% 이내로 하면 동일한 접합층내에서도 유사한 조성을 가진 수 종류의 분화물이 분석되었다. Fig. 7에는 CMSX-2 및 CMSX-4 접합부에 생성한 생성상들의 TEM조직, 전자선 회절패턴 및 해석결과의 대표적인 예를 나타낸 것이다. CMSX-2 및 CMSX-4 접합

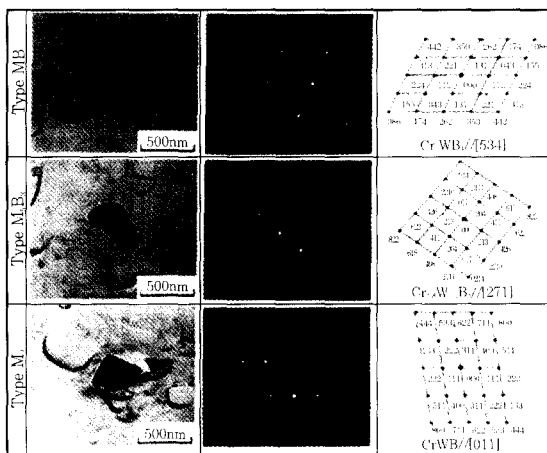


Fig. 7 TEM microstructures, its electron diffraction patterns and diagrams of microconstituents (a) MB type (b) M₃B₃ type (c) M₂B type

부에서 생성된 생성상의 분석결과를 각각 Table 2 및 Table 3에 나타내었다. 표중의 MxBy는 화학식중의 Cr, W 및 Re의 수의 합을 x₁으로 하고, B의 수를 y₁으로 하여 x₁:y₁=x:y로 하는 최소의 정수 x, y를 사용하여 생성상의 구성원소인 W, Cr, Co를 더하여 M으로 표시한 것이다. CMSX-2 접합부에서는 M을 (Cr,W)으

Table 2 Results of identification of microconstituents in bonded interlayer for CMSX-2 joints

Type of constituent	No.	Substance	MxBy	Crystal system	Error(%)				
					d	θ			
Needle-like constituent	1	CrB(δ)	MB	Orthorhombic	1.5	4.0			
		Cr ₂ WB ₃		Orthorhombic	3.3	3.5			
		Cr ₃ WB ₄		Orthorhombic	2.8	3.6			
		Cr ₃ W ₂ B ₅		Orthorhombic	3.8	3.3			
		Cr ₁ WB ₂		Orthorhombic	2.5	3.6			
		Cr ₅ WB ₁₀		Orthorhombic	1.9	3.9			
	2	M ₂ B	W ₂ B	Tetragonal	2.9	3.9			
			Cr ₂ B-2	Orthorhombic	2.8	1.1			
			Cr ₃ WB ₅	Tetragonal	3.4	1.9			
			Cr _{1.8} W _{3.2} B ₃	M ₅ B ₃	Tetragonal	3.3	2.0		
2	M ₃ B	W ₂ B	Tetragonal	2.6	0.9				
		CrWB	Tetragonal	2.0	0.9				
		Cr ₃ WB ₂	Tetragonal	3.7	1.1				
		Cr ₁ W ₂ B ₃	Tetragonal	2.9	1.1				
		Cr ₆ W ₃ B ₅	Tetragonal	2.4	0.9				
		Cr _{1.8} W _{3.2} B ₃	M ₅ B ₃	Tetragonal	1.1	2.5			
Dot-like constituent	1	CrWB ₂	MB	Orthorhombic	2.4	4.0			
				Orthorhombic	3.4	4.0			
				Orthorhombic	4.0	4.0			
		W ₂ B	M ₃ B	Tetragonal	2.8	1.8			
				Tetragonal	3.8	1.7			
				Tetragonal	4.0	1.7			
	2	M ₅ B ₃	Cr ₃ B ₃	Tetragonal	3.8	1.6			
			Cr ₃ B ₃ -2	Tetragonal	2.9	1.1			
Constituent in bonded interlayer	1	Cr _{1.8} W _{3.2} B ₃	M ₅ B ₃	Tetragonal	1.5	2.2			
				Tetragonal	4.0	0.0			
				WB(δ)	MB	Tetragonal	3.1	2.5	
						W ₂ B	Tetragonal	3.4	1.2
						CrWB	Tetragonal	2.7	1.2
						Cr ₃ WB ₂	Tetragonal	1.0	2.5
	2	M ₂ B	Cr ₁ W ₂ B ₃	Tetragonal	3.2	1.2			
			Cr ₃ W ₄ B ₅	Tetragonal	2.9	1.2			
			Cr ₃ W ₂ B ₅	Tetragonal	3.6	1.2			
			Cr ₅ WB ₃	Tetragonal	3.9	1.2			
2	M ₅ B ₃	Cr ₂ B ₃	Tetragonal	2.0	1.2				
		Cr ₃ B ₃ -2	Tetragonal	1.8	1.2				
2	Cr _{1.8} W _{3.2} B ₃	M ₅ B ₃	Tetragonal	2.8	3.9				
2	Cr _{1.8} W _{3.2} B ₃	M ₅ B ₃	Tetragonal	2.5	0.4				

Table 3 Results of identification of microconstituents in bonded interlayer for CMSX-4 joints

Type of constituent	No.	Substance	MxBy	Crystal system	Error(%)	
					d	θ
Dot-like constituent	1	CrB-2	MB	Orthorhombic	2.3	1.1
		WB		Orthorhombic	3.0	3.9
		Cr ₂ WB ₃		Orthorhombic	1.8	1.4
		Cr ₂ WB ₃	M ₂ B	Tetragonal	1.4	1.2
		W ₂ B ₃		Tetragonal	2.8	0.5
		Cr ₃ W ₄ B ₅		Tetragonal	1.8	0.1
		CoWB		Orthorhombic	1.0	2.1
		Cr _{1.8} W _{3.2} B ₃	M ₅ B ₃	Tetragonal	1.2	0.9
		CoW ₂ B ₂	M ₃ B ₂	Orthorhombic	0.7	1.5
	2	Cr ₇ WB ₄	M ₂ B	Orthorhombic	2.3	1.6
		CoWB		Orthorhombic	0.9	1.4
		Cr ₆ WB ₅		Tetragonal	1.3	1.9
		Cr _{1.8} W _{3.2} B ₃	M ₅ B ₃	Tetragonal	3.2	0.5
W ₂ B ₃ -2	M ₂ B ₅	Hexagonal	2.9	1.8		
CrB ₂	MB ₂	Hexagonal	2.4	2.5		
Constituent in bonded interlayer	1	Cr ₂ WB ₄	MB	Orthorhombic	2.9	2.7
		CrWB ₂		Orthorhombic	2.8	2.2
		Cr ₄ WB ₅		Orthorhombic	3.2	1.3
		Cr ₉ WB ₁₀		Orthorhombic	2.6	1.2
		CrWB	M ₂ B	Tetragonal	0.4	0.8
		Cr ₈ W ₂ B ₅		Tetragonal	1.0	1.4
		CoWB		Orthorhombic	1.9	1.4
		Cr _{1.8} W _{3.2} B ₃	M ₅ B ₃	Tetragonal	1.5	1.2
	CrB ₄	MB ₄	Orthorhombic	2.1	0.8	
	WB ₄		Hexagonal	2.8	1.4	
	2	CrB(ζ)	MB	Orthorhombic	2.5	0.7
		CoWB		Orthorhombic	3.6	1.3
		Cr _{1.8} W _{3.2} B ₃	M ₅ B ₃	Tetragonal	1.0	1.8
Cr ₃ B ₃		Tetragonal		1.6	2.6	
Cr ₃ B ₄ -2		Tetragonal		3.5	0.8	
CoW _{3.2} B ₃	M ₃ B ₂	Orthorhombic	2.1	0.6		

로 한 MB형, M₅B₃형 및 M₂B형의 3종류의 생성상이 분석되었다. 한편, CMSX-4 접합부의 경우에는 M중의 원소가 (Cr,W,Co)으로 변화하고, CMSX-2 접합부에서와 유사한 3종류의 붕화물 및 그 이외에 MB₄형, M₂B₅형 및 MB₂형, M₃B₂형의 7종류의 생성상이 분석되었다. 또한, 모든 접합부에서 M₅B₃형의 Cr_{1.8}W_{3.2}B₃ 생성상이 공통적으로 분석되었다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 접합부에서 조사된 생성상의 존재빈도를 나타낸 것이다. 조사는 생성상이 가장 많이 생성하는 1,373K×3.6ks의 조건에서 접합한 시험편을 대상으로 하였다. CMSX-2의 접합부에서는 침상 생성상, 입상생성상 및 접합층내 괴상생성상 모두 MB

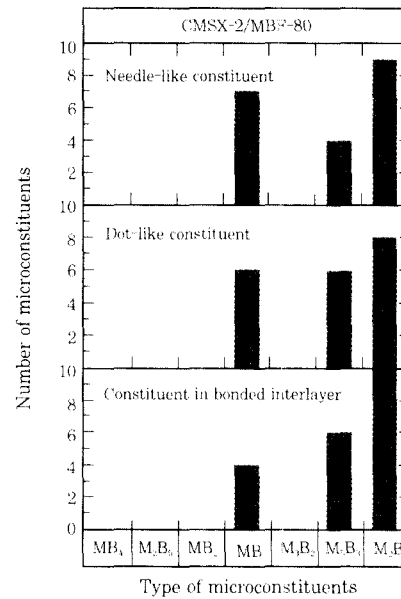


Fig. 8 Frequency of microconstituents type for CMSX-2 joint

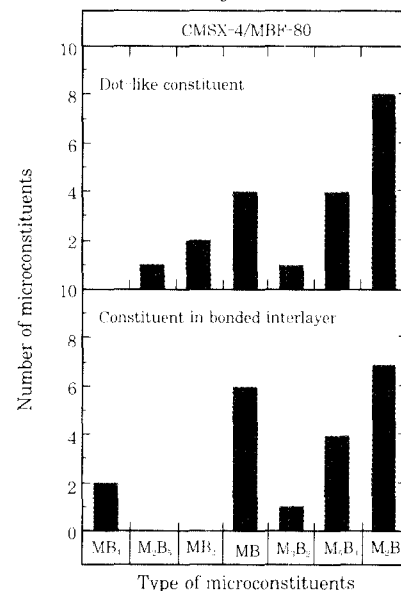


Fig. 9 Frequency of microconstituents type for CMSX-4 joint

형, M₂B형 및 M₅B₃형의 3종류의 붕화물이 분석되었으나, 그 중에서도 M₂B형의 물질이 공통적으로 많이 분석되어 있는 것을 알 수 있다. 한편, CMSX-4 접합부의 생성상에 대해서 보면, M₂B형의 생성상이 많이 분석되었으나, CMSX-2접합부에 비해 많은 종류의 물질이 분석되었다. 이것은 생성상 구성원소가 Cr, W 이외에 Co가 존재하고, CMSX-2 접합부에 비해 생성상의 구조가 복잡하게 되어 있기 때문이라고 판단된다.

3.4 생성상의 구성원소의 변화

TEM에 의해 생성상의 분석을 행한 결과, 동일 접합

층내에서 수종류의 붕화물이 분석된 사실로부터, CMSX-2접합층내에서 20개의 생성상을 선택하여 유지시간의 변화에 따른 각 붕화물의 존재비율을 조사하였다. Fig. 10에 의하면, 모든 집합조건에서 M_2B 형의 생성상이 많이 분석되었으며, 유지시간의 증가에 따라 생성상의 종류가 개략적으로 MB형→ M_3B_3 형→ M_2B 형으로 변화하고 있는 경향이 있었다. 즉, 생성상중에서의 B량이 상대적으로 감소하는 경향이 인정되었다.

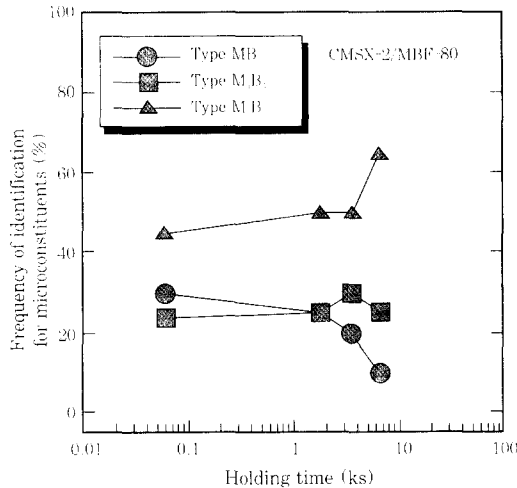


Fig. 10 Relation between holding time and the frequency of identification for microconstituents in bonded interlayer for CMSX-2 joints

접합온도 및 유지시간 따른 생성상의 구성원소의 변화를 조사하기 위하여 EDX 점분석에 의한 원소분석을 행하였다. Fig. 11은 CMSX-2 접합부의 접합층내 생성상에 대하여 유지시간에 따른 생성상의 구성원소비의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, 구성원소비는 W과 Cr의 비로서 평가하였다. 접합초기단계에서는 생성상중에 Cr이 많이 함유되어 있고, Cr과 W의 비도 거의 변화하지 않고 일정하다. 유지시간이 길어짐에 따라 생성상중에 포함된 Cr의 양은 감소하고, W의 양이 증가하고 있다. 등온응고완료시간에는 생성상중의 Cr의 양은 감소하고, W의 양이 급격히 증가하여, W/Cr의 비는 더욱 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 동일한 유지시간에서 접합온도가 높을수록 생성상중의 W/Cr의 비는 증가하는 경향을 나타낸다. 이로부터, 접합부에서 생성하는 생성상은 유지시간의 증가에 따라 구성원소의 종류는 그다지 변하지 않으나, 생성상중의 구성원소의 비가 변화해가고 있는 것을 알 수 있다.

한편, CMSX-4 접합부에 대해, 접합층내 생성상을 EDX 점분석을 행하여 유지시간에 따른 생성상의 조성변화를 Fig. 12에 나타내었다. CMSX-2의 경우와 동일하게 유지시간이 길어짐에 따라 생성상중의 Cr량

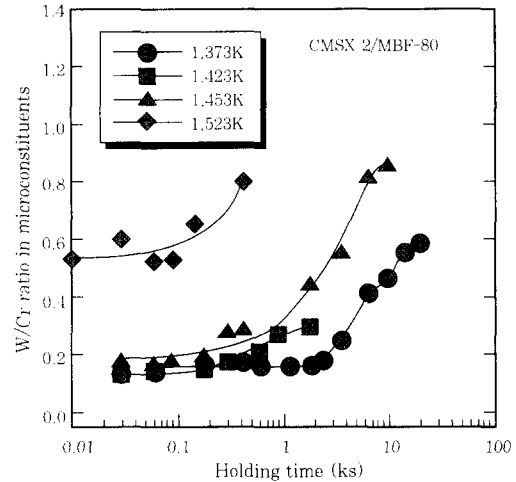


Fig. 11 Relation between holding time and W/Cr ratio within microconstituents in bonded interlayer for CMSX-2 joints

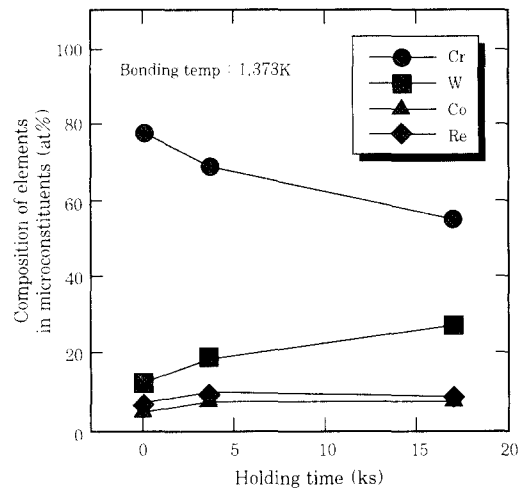


Fig. 12 Effect of holding time on the comparison of microconstituents in bonded interlayer for CMSX-4 joints

은 감소하고, W함유량은 상대적으로 증가하는 경향이 인정된다. 또, 생성상중의 Co 및 Re량은 유지시간이 길어짐에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

3.5 생성상의 생성기구에 관한 고찰

본 연구에서 CMSX-2 액상확산접합부에서는 접합층 근방의 모재에는 침상생성상 및 입상생성상이, 접합층내에는 괴상생성상이 관찰되었으며, Cr 및 W을 주성분으로 하는 붕화물이었다. 또한, CMSX-4 액상확산접합부에서는 입상생성상 및 괴상생성상이 관찰되었으며, Cr, W, Co 및 Re을 주성분으로 하는 붕화물이었다. 이들 생성상중에서 접합부의 기계적특성에 가장 큰 영향을 미친다고 생각되는 접합층내 괴상생성상의 생성기구에 대하여 고찰하였다.

생성상의 생성기구에 대해 보면, 용융한 인서트금속이 접합온도로부터 냉각에 의해 봉화물이 정출 혹은 석출할 가능성, 혹은 등온정출에 의해 생성하는 두가지의 가능성을 생각할 수 있다. 그러나 생성상의 형태가 괴상인 점이나 등온응고완료후에도 동일한 형태로 잔존하는 것을 고려하면 생성상은 등온정출에 의해 생성되었을 가능성이 높은 것으로 추측된다. 즉, 인서트금속이 용융한 직후에는 접합층내는 균일한 액상이 되고, 고상인 생성상은 존재하지 않는다. 그러나, 모재용융단계에서 액상중에 모재가 용융해서 모재의 구성원소가 유입되면 Cr, W, Co 혹은 Re이 인서트금속중의 용점저하원소인 B과 반응해서 액상중에 고상의 봉화물이 생성하는 것으로 생각된다. 이것은 모재용융단계에서 용융 인서트금속의 조성이 변화하고, 액상 단상으로부터 고액공중영역으로 상변화하는 등온정출을 의미하고 있다.

일반적으로 이원계 합금의 액상화산접합에서는 등온응고과정에서 액상농도는 변하지 않는다고 생각된다. 그러나, 이론적으로는 다원계에서 액상상태를 유지하고 있으면 등온응고과정에서는 액상농도가 반드시 일정하게 될 필요는 없다. 지금까지의 연구에 의하면, 등온응고과정은 인서트금속중의 용점저하원소의 확산유출에 의해 진행된다고 보고되고 있다^{11,12)}. 본 연구에서 유지시간의 증가에 따라 생성상이 MB형→M₅B₃형→M₂B형으로 변화하고 있는 것을 고려하면, 등온응고과정에서 용융 인서트금속중에서 모재측으로 B이 확산유출하는 것에 의해 용융 인서트금속의 조성이 변화하고, 이것과 평형하는 생성상중의 B함유량이 감소한 것이라고 생각된다. 이 때문에 생성상은 보다 B량이 적은 봉화물로 변화하고, 최종적으로는 분해·소멸한다고 생각된다. 그러나, 생성상의 생성 및 소멸기구는 대단히 복잡하고, 실험적, 이론적 검증을 포함한 상세내용에 대해서는 추후 연구되어야 할 과제이다.

4. 결 론

Ni기 단결정 초내열합금인 CMSX-2 및 CMSX-4에 MBF-80 인서트금속을 사용해서 액상화산접합을 행하여 접합부 근방에 생성하는 생성상에 대하여 금속조직학적으로 검토함과 동시에 생성상의 생성기구에 대하여 고찰하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) CMSX-2 접합부에서는 접합조건에 따라 접합층 근방의 모재에 생성하는 침상생성상, 입상생성상 및 접합층내의 괴상생성상의 3종류의 생성상이, CMSX-4 접합부에서는 입상생성상 및 접합층내 괴상생성상의 2종류의 생성상이 생성하였다.

2) 접합부 근방에 생성하는 생성상들은 CMSX-2 접합부에서는 Cr, W을, CMSX-4 접합부에서는 Cr, W, Co 및 Re을 주성분으로 하는 봉화물이었다.

3) 접합초기에는 생성상중에 Cr이 많이 함유되어 있고, 유지시간이 길어짐에 따라 생성상중에 포함된 Cr의 양은 감소하고, W, Co, Re의 양은 급격히 증가하였다. 또한, 접합온도가 높을수록 생성상중의 W/Cr의 비는 증가하였다.

4) 접합층내 생성상은 유지시간의 증가에 따라 MB형→M₅B₃형→M₂B형으로 변화하여 생성상중에서의 B량이 상대적으로 감소하였다.

5) 접합층내 생성상은 등온정출에 의해 생성되고, 등온응고과정에서 B의 확산유출에 의해 생성상은 B량이 적은 봉화물로 변화하고 최종적으로는 분해하여 소멸하는 것으로 생각되었다.

참 고 문 헌

1. 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
2. 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
3. 原田, 横川, 大野, 山縣, 山崎: 合金設計プログラムによる單結晶超合金の組織と特性の解析, 耐熱金屬材料第123委員會研究報告, 34-3(1993), p303
4. D.S.Duvall, W.A.Owczarski and D.F.Paulonis: TLP Bonding: A New Method for Joining Heat Resistant Alloys, Welding Journal, 53-4(1974), p203s
5. 鈴木, 恩澤, 田村: 各種Ni基礎合金의 TLP接合性の比較, 溶接學會誌, 49-7(1980), p462
6. 平根, 吉成, 森本: Ni基礎合金單結晶의 液相擴散接合界面, 鐵と鋼, 72-13(1986), pS1607
7. 大橋, 日黒, 山縣: Ni基單結晶耐熱合金 TMS26의 擴散接合部に及ぼすねじり角の影響, 日本金屬學會誌, 59-3(1995), p319
8. 김대업, 강정운: 단결정 액상화산접합부의 생성상 거동, 대한용접학회 춘계학술발표개요집, 33(1999), p57
9. 김대업, 정승부, 강정운: 액상화산접합용 인서트금속의 화학조성 최적화에 관한 연구, 대한 용접학회지, 18-5(2000), p90
10. 강정운, 박노식, 김우열, 박세윤: 304 스테인리스강과 구조용 탄소강의 천이액상화산접합에 관한 연구, 대한용접학회지, 9-4(1991), p28
11. 中尾, 西本, 篠崎, 姜: 液相インサート金屬擴散接合における等温凝固過程の解析, 溶接學會論文集, 7-2(1989), p213
12. D.Kim, K.Nishimoto, K.Saida, S.Asai, Y.Furukawa, Y.Nakao: Bonding phenomena and joint properties of transient liquid phase bonding of Ni-base single crystal superalloys, Welding in the World, 41-2(1998), p121