

단결정 초내열합금의 액상확산접합현상에 미치는 Re첨가의 효과 (Effect of Rhenium Containing on Transient Liquid Phase Bonding Phenomena of Single Crystal Superalloys)

김 대업*, 우 유철*, 강 정윤**, 정 승부***, 이 병호****

* 현대우주항공(주) 중앙연구소, ** 부산대학교 금속공학과,
*** 성균관대학교 금속공학과, **** (주)비츠로테크 VI팀

1. 서론

前報¹⁾²⁾까지 단결정 초내열합금 CMSX-2의 접합성에 대하여 검토한 결과, 액상확산접합법을 적용함으로써 우수한 기계적특성을 가지는 접합이 가능하다는 것을 알았다. 본 연구에서는 Re를 첨가한 고성능 단결정 초내열합금 CMSX-4의 액상확산접합 적용성을 조사하기 위하여 CMSX-4의 액상확산접합현상을 조사하여 CMSX-2의 결과와 비교/평가함으로써 접합현상에 미치는 Re첨가의 효과를 검토하였다. 액상확산접합의 기초현상인 모재용융현상, 등온응고현상 및 합금원소의 균일화현상에 대하여 검토함과 동시에 접합부의 단결정화 상황에 대해서도 조사하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에 사용한 모재는 Cannon-Muskegon사가 개발한 단결정 전용합금인 CMSX-2 및 Re첨가의 고강도 지향합금인 CMSX-4를, 인서트 금속으로서는 Ni기 합금 비정질 박막인 MBF-80을 사용했다. 이들의 조성을 Table 1에 나타낸다. 접합방법은 양접합재의 결정방위를 일치시켜, 접합온도 1373~1523K, 유지시간 0~19.6ks, 가압력 2.3MPa의 조건에서 행하였다. 또, 액상폭을 일정하게 하기 위하여 직경 50 μ m의 tungsten spacer를 사용하였다. 접합부의 조직관찰 및 원소분석에는 SEM, EDX, EPMA를 사용하였으며, 모재 및 접합부의 결정방위는 EBSP(Electron Back Scattering Pattern)법에 의해 3차원적으로 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모재용융현상

Fig.1은 접합온도에 따른 모재용융현상을 CMSX-2와 CMSX-4에서의 결과와 비교하여 나타낸 것이다. CMSX-4의 모재용융거동은 CMSX-2와 동일한 경향을 나타내고, 접합온도가 높을수록 모재의 포화용융폭이 크고 포화용융시간이 짧아지는 것을 알 수 있다. 또한, CMSX-4의 인서트금속에 의한 모재용융현상은 Nernst-Brunner의 식에 따르고 있다는 것을 확인하였다. 모재용융과정에서 유지시간에 따른 모재용융폭의 변화로부터 모재용융과정에서의 활성화에너지를 Fig.2에 나타낸다. 동일한 MBF-80인서트금속을 사용하였을 때, CMSX-4에서의 활성화에너지는 460kJ/mol으로 CMSX-2(502kJ/mol)에 비해 약간 낮은 값을 나타내었다.

3.2 등온응고현상

Fig.3은 접합온도에 따른 등온응고현상을 나타낸 것이다. 등온응고과정에서 공정폭은 유지 시간의 평방근에 거의 비례해서 직선적으로 감소하였다. 접합온도의 상승에 따라 등온응고속도는 증가하고, 등온응고완료시간은 단시간축으로 이동함을 알 수 있다. 등온응고과정에서의 활성화에너지를 보면, **Fig.4**에서 보는 바와 같이 CMSX-4의 등온응고과정에서의 활성화에너지는 253kJ/mol으로, CMSX-2(266kJ/mol)에 비해 약간 낮았다.

3.3 합금원소의 균일화현상

접합부의 합금원소의 균일화 상황을 조사하기 위하여 접합부 근방에서 조직관찰, 원소분석, 미세경도측정을 행하였다. **Fig.5**는 접합상태(As-bonded)와 접합후열처리를 행한 후의 조직을 비교하여 나타낸 것이다. As-bonded상태에서는 접합부의 γ '상이 모재에 비해 약간 작고, 불균일해 보이나 균일화가 많이 진행된 것으로 보이며, 접합후열처리를 행한 후에는 접합부는 모재와 거의 유사한 조직을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한, 접합부의 원소분포 및 경도분포도 As-bonded상태에서는 약80%이상 균일화되어 있으며, 접합후열처리를 행하면 거의 모재와 균일하였다.

3.4 접합부 근방에서의 생성상의 거동

CMSX-4에 MBF-80 인서트금속을 사용해서 접합한 이음부의 조직을 관찰한 결과, 접합부에서는 접합계면에 인접한 모재에 생성하는 미세한 입상생성상 및 접합층내의 피상생성상의 2 종류의 생성상이 관찰되었다. EDX 및 EPMA에 의한 원소분석 결과, 이들은 Cr, W 및 Re계의 붕화물(Boride)으로 확인되었다. 접합층내의 생성상은 유지시간이 길어짐에 따라 생성상중의 Cr량은 감소하고 W함유량은 증가하는 경향이 있었으며, Co 및 Re량은 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

3.5 접합부의 단결정화 상황

Fig.6은 접합온도 1523K에서 등온응고완료후의 모재 및 접합부의 결정방위를 EBSD법을 사용해서 3차원적으로 해석한 결과이다. 각 부분에서 접합부에 수직인 면(LD), 접합부에 평행한 면(TD) 및 시료표면(ND)에 대해 스테레오 투영을 행한 결과, 모든 면에서 거의 한점에 plot되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서, CMSX-4를 액상화산접합하면 접합부는 모재와 동일한 결정방위를 가지는 단결정화가 달성된 것을 명확히 알 수 있다.

3.6 CMSX-4 접합현상에 대한 고찰

CMSX-4단결정에서의 모재용융과정은 Nernst-Brunner의 식에 따르고, 얻어진 모재용융의 활성화에너지가 CMSX-4와 큰 차이가 없기 때문에 CMSX-2의 용융거동과 유사한 것으로 사료된다. 등온응고과정에서의 접합현상 및 활성화에너지는 CMSX-2와 거의 동일하기 때문에 인서트금속중의 boron의 확산유출에 의해 을속되고 있는 것으로 사료된다. 또한, 등온응고 진행 과정에서 모재로 부터 고상이 에피탁탈 성장하기 때문에 접합부의 단결정화는 달성되었다고 말할 수 있다. 즉, CMSX-4의 액상화산접합현상은 CMSX-2의 접합현상과 유사하게 양호한 접합성을 가지고 있으며, Re을 함유한 생성상이 생성되는 것 이외에는 Re첨가가 접합성에 미치는 효과는 거의 없는 것으로 사료된다.

※ 참고문헌

- 1) 김 대업, 박 노광, 최 승주, 강 정윤 : Ni기 단결정 초내열합금 CMSX-2의 액상화산접합현상, 대한용접학회 춘계학술강연 및 발표개요집, Vol.29, p201~202
- 2) 김 대업, 우 유철, 강 정윤 : Ni기 단결정 초내열합금 CMSX-2 접합이음부의 기계적특성, 대한용접학회 추계학술강연 및 발표개요집, Vol.32, p213~215

Table 1 Chemical composition 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	-	-
	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	-	-	-	-	-	-	-	-

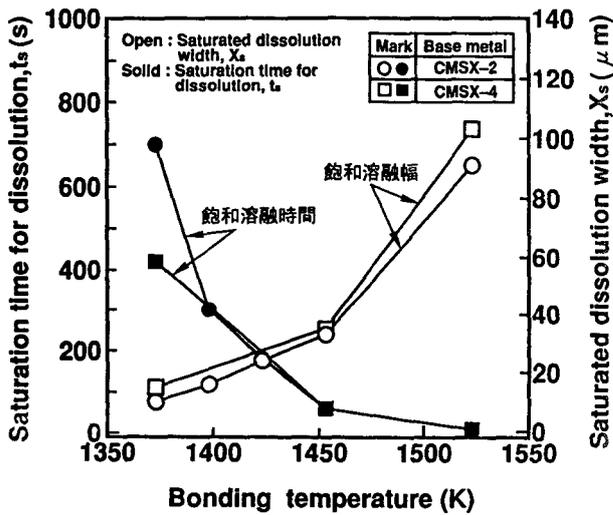


Fig.1 Relation among the saturation time for dissolution, the saturated dissolution width and the bonding temperature

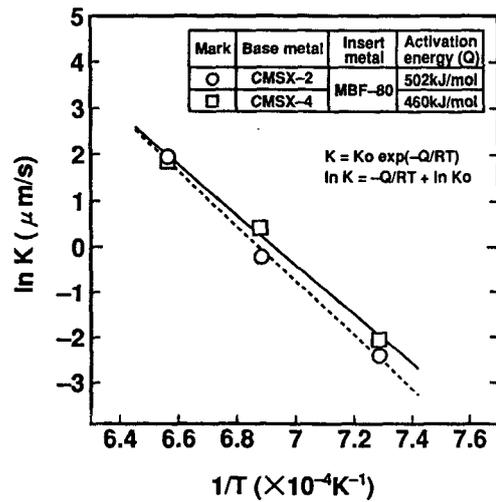


Fig.2 Arrhenius plots of dissolution rate for CMSX-2 and CMSX-4 joints

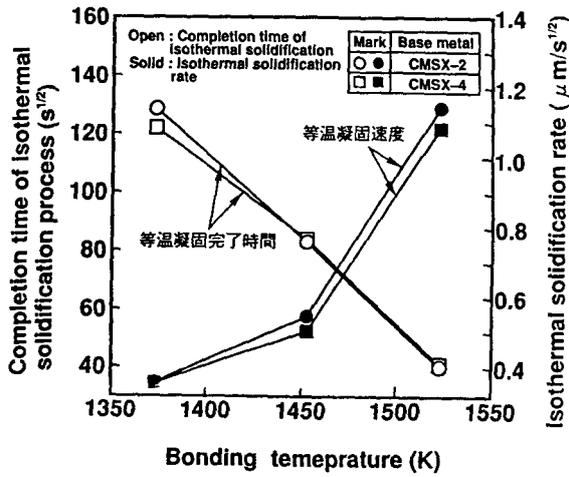


Fig.3 Relation among the completion time for isothermal solidification, the rate of isothermal solidification and the bonding temperature

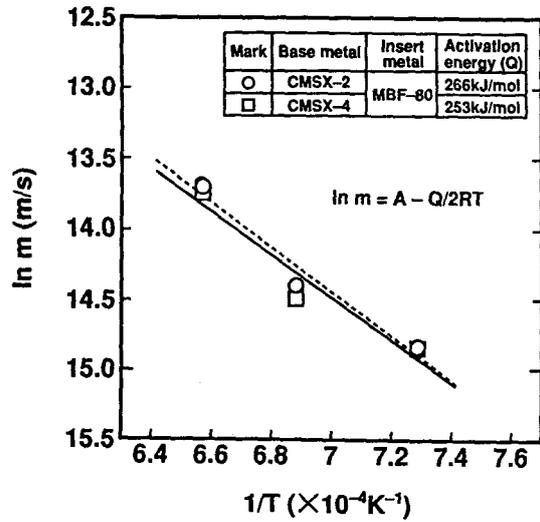


Fig.4 Arrhenius plots of isothermal solidification rate for CMSX-2 and CMSX-4 joints

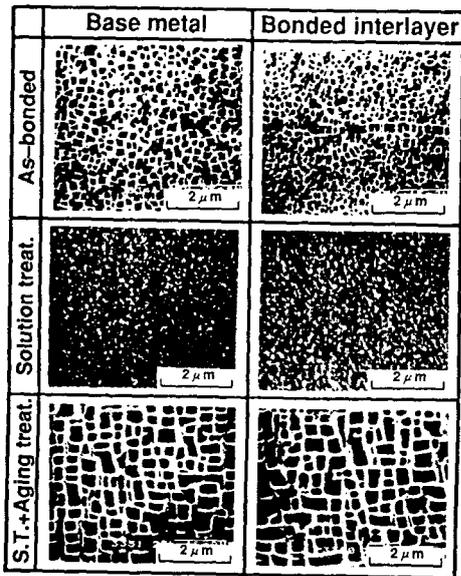


Fig.5 Microstructures of bonded interlayer for CMSX-4 joints

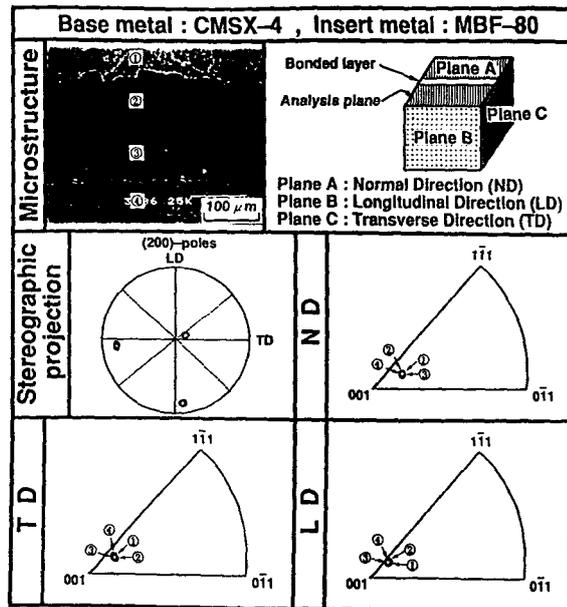


Fig.6 Crystallographic orientation analyzed using the EBSD method for CMSX-4 joint