

2상 스테인리스강과 크롬동합금의 브레이징부 생성상의 생성기구에 관한 연구

김 대 업*

*현대모비스(주) 기술연구소

A Study on the Formation Mechanism of Microconstituents in Brazed Joint of Duplex Stainless Steel and Cr-Cu Alloy

Dae-Up Kim*

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

Abstract

The formation mechanism of microconstituents in brazed joints of duplex stainless steel and Cr-Cu alloy which is an essential process of rocket engine manufacturing was investigated using Cu base insert metal. SUS329J₃L and C18200 were used for base metal and AMS 4764 was used for insert metal. The brazing was carried out under various conditions. There were various phases in the joints, because of reaction between liquid insert metal and base metals. Since liquid insert metal reacts with duplex stainless steel, liquid Cu from insert metal infiltrated into the α/γ interface of duplex stainless steel. Through the process of Cu infiltration, isolated stainless steel pieces come into the liquid insert metal. Since liquid insert metal reacts with Cr-Cu alloy, Cr precipitates from C18200 come into the liquid insert metal. With increment of bonding temperature and holding time, amounts and sizes of phases increased, but Cr-Mn compounds decreased at 1303K for 1.2ks. and Mn-rich phases disappeared Fe-Cr compounds formed.

(Received June 3, 2001)

Key Words : Brazed joint, Duplex stainless steel, C18200, Microconstituent, Formation mechanism, Infiltration

1. 서 론

최근 혁명적 진보를 보이고 있는 반도체, 정보통신, 생명공학의 발전은 인공위성과 무중력 상태의 우주환경이 절실히 요구됨에 따라 많은 로켓들이 우주로 발사되고 있다¹⁻³⁾. 로켓개발기술은 21세기를 지향하는 우주시대의 핵심 우주기반기술이며 미래 지향적 기술로서 미국과 러시아를 축으로 하여 세계각국에서 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁴⁾. 우주용 로켓은 대기권내에서는 로켓표면에 활성기체의 고속흐름으로 마찰이 발생되어 고온접촉 현상이 발생되며, 대기권 밖에서는 고진공, 극고온, 극저온, 고속 고체입자와의 충돌 등의 악조건에 처하게 된다. 특히 로켓의 핵심부인 엔진

은 고온의 연소가스, 극저온의 추진제 환경과 부식성이 아주 강한 연소가스의 영향을 받게 된다. 따라서, 신뢰성 있는 로켓을 개발하기 위해서는 이러한 악조건에서의 영향이 고려된 신뢰성 있는 재료의 선정 및 접합기술이 적용되어야 한다.

로켓 제작기술의 핵심은 접합기술이며, 미국이나 일본 등에서는 엔진의 접합부에서 발생하는 문제로 인하여 개발에 상당한 난항을 거듭하였다^{4,5)}. 로켓 제작에 적용되고 있는 접합기술로는 TIG용접을 중심으로 MIG용접, 전자빔용접, 브레이징, 확산접합등이 최적화된 각종 요소에 적용되고 있다^{6,7)}. 특히, 브레이징은 복잡한 형상을 가지면서 정밀도가 요구되는 엔진의 연소실, 노즐 스커트 등의 조립에 적용되고 있으며⁸⁾, 로켓제작에서 가장 핵심기술이라 할 수 있다.

본 연구에서는 로켓의 가장 핵심부인 엔진 노즐스커트에 사용되고 있는 2상 스테인리스강과 크롬동 합금의 이종(異種) 브레이징에 대한 접합성을 검증하기 위하여, 조건 변화에 따른 접합부의 미세조직 및 생성상의 변화를 조사하고, 이들 결과를 바탕으로 접합부 근방에 생성되는 생성상의 생성기구에 대해서 고찰하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 실험에서 모재는 2상 스테인리스강인 SUS329J₃L과 크롬동 합금인 C18200을 사용하였다. SUS-329J₃L은 Cr과 Ni가 많이 함유되어 있고, 페라이트와 오스테나이트의 혼합조직을 가지고 있어 응력부식 저항성, 용접성, 가공성 및 수소취성 저항성 등이 우수하다. C18200은 우수한 전기전도도, 열전도도를 유지하면서 Cr석출물로 인해 높은 부식저항성, 크립저항성을 가지는 합금이다. 또한, 삽입금속으로는 Cu기 합금 박막인 AMS4764(두께 : 80 μ m)를 사용하였다. 이들의 조성을 Table 1에 나타낸다.

접합된 모재는 연마지 #1000까지 기계적 연마를 실시한 후 삽입금속과 같이 초음파 세척하였다. 접합시료 사이에 삽입금속을 삽입한 후 13.3mPa의 진공중에서 2K/s의 가열속도로 가열하여 접합온도에서 소정의 시간 유지후 실온까지 냉각하였다. 접합시의 열사이클은 Fig.1과 같다. 접합은 접합온도 1,243~1,303K, 유지시간 0~1.2ks로 변화시켰으며, 가압력은 4.9kPa의 일정조건에서 행하였다.

Table 1 Chemical composition of materials used (wt%)

Materials		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Fe
Base metal	SUS329J ₃ L	0.03	0.4	1.5	21.9	6.0	2.8	0.2	0.18	Bal.
	C18200	-	-	-	0.97	-	-	Bal.	-	0.04
Insert metal	AMS4764	-	-	38.0	-	9.5	-	Bal.	-	-

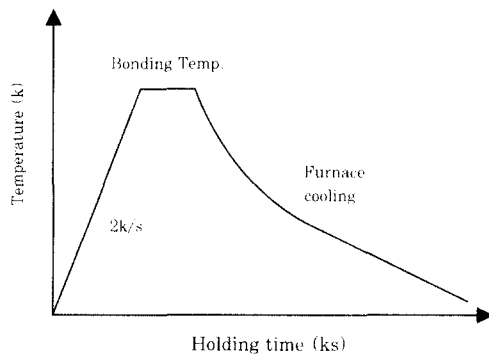


Fig. 1 Thermal cycle pattern used in brazing

접합부의 미세조직은 접합면에 수직방향으로 절단, 연마한 후, H₂SO₄(4ml) + K₂Cr₂O₇(1g) + H₂O(500ml)의 부식액으로 모재별로 에칭시간을 달리하여 분리 에칭하였으며, 공학현미경 및 SEM으로 관찰하였다. 또한, 접합부내 생성상은 EDX를 사용하여 선분석 및 점분석을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부의 조직

Fig. 2는 모재가 SUS329J₃L과 C18200인 이종재료를 AMS4764의 삽입금속을 사용하여 접합온도 및 유지시간을 변화시켜 브레이징한 접합부의 조직변화를 나타낸 것이다. 조직사진의 왼쪽이 SUS329J₃L이고, 오른쪽이 C18200이다. 1,243K×0ks의 조건에서는 삽입금속과 모재가 완전히 반응하지 못해서 미접합된 부분이 많이 관찰되었으나, 다른 조건에서는 양호한 접합부를 얻을 수 있었다. 한편, SUS329J₃L쪽의 접합계면에는 물결무늬 형태의 반응층이 형성되어 있으며, 접합부 중심부에는 검은띠 형태로 생성상이 집적한 부분이 관찰되었다. 1,243K 및 1,273K의 접합조건에서는 접합초기부터 검은띠 형태의 생성상이 형성되어 있고, 유지시간이 증가함에 따라 접합부의 생성상의 양이 증가하고 생성상의 층도 더욱 뚜렷해지는 것을 알 수 있다. 1,303K에서는 0.9ks까지는 유지시간의 증가에 따라 생성상의 양이 증가하나, 1.2ks이상 유지하면 생성상의 양이 감소하면서 검은띠 형태의 생성상도 사라지는 경향을 나타내고 있다. 또한, 접합부 전반

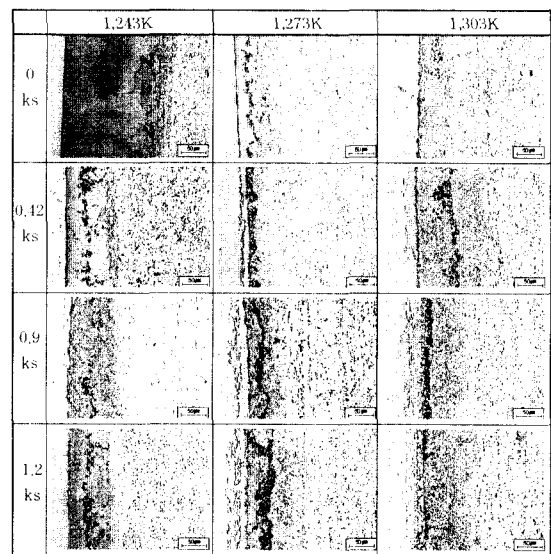


Fig. 2 Change in microstructures of brazed zone with various temperatures and holding times

에 걸쳐 C18200에 생성되어 있는 Cr 석출상과는 다른 미세한 점상의 생성상이 생성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 1,273K에서 브레이징한 접합부의 미세조직을 유지시간별로 나타낸 것이다. SUS329J₃L 근방의 접합부 미세조직을 보면, SUS329J₃L과 삽입금속의 반응에 의해 접합계면에서 SUS329J₃L쪽으로 침투층을 관찰할 수 있고, 이런 과정중에 SUS329J₃L로부터 분리된 점상의 조직이 관찰된다. 이 점상의 조직은 유지시간이 증가함에 따라 그 량이 증가하고, 접합부 중심으로 유입되는 경향을 나타내고 있다. 또한, 접합부에는 미세한 검은색 점상의 생성상들이 밀집한 층이 형성되어 있으며, C18200부근의 접합부에는 원래 모재에 형성되어 있는 Cr 석출상과는 다른 미세한 백색 생성상이 분산되어 있다.

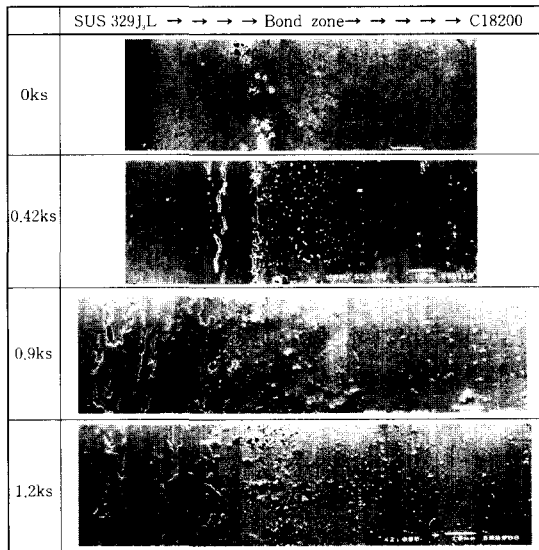


Fig. 3 Microstructures of joints brazed at 1273K

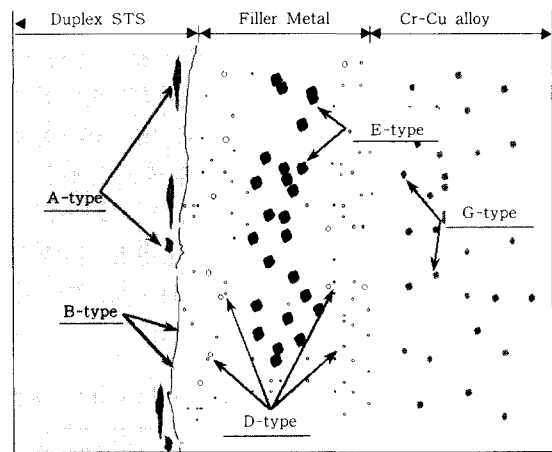
3.2 생성상의 분류

접합온도 및 유지시간 변화에 따라 브레이징한 2상 스테인리스강과 크롬동 합금의 이종재료 접합부의 미세조직 관찰 결과로부터, 접합부내에 존재하는 생성상을 분류하였다. 접합초기 단계에서 접합부에 생성된 생성상은 접합시간이 증가함에 따라 상변화를 일으키는 경향을 나타내고, 크게 접합초기단계와 후기단계로 대별할 수 있었다. Fig. 4는 SUS329J₃L과 C18200의 이종재료의 브레이징부에 생성되는 생성상을 생성위치 및 형상에 따라 분류한 모식도이다. 그림에서 A상은 접합계면에 인접한 스테인리스강 내에 물결무늬 형태로 파인 층이고, G상은 C18200 모재에 석출되어 있던 Cr상이다. 모재와 삽입금속 사이의 반응에 의해 접합부에 생성된 생성상은 B~F상들로 분류된다.

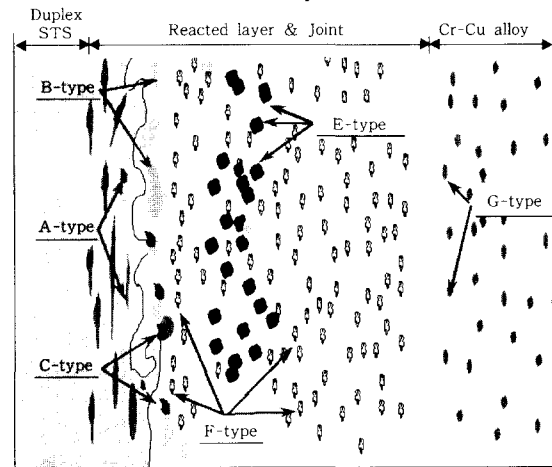
스테인리스강의 접합계면에 생성된 점상의 B상은 스테인리스강에서 분리된 상으로 예상된다. C상은 B생성상 내에 검게 존재하는 다른 상으로 접합초기에는 존재하지 않으나, 장시간 유지한 경우에 존재한다. D상은 접합부 전반에 걸쳐 생성된 미세한 백색의 점상이며, 접합초기단계에서만 관찰된다. E상은 접합부 중앙부에 검은띠 형태로 보였던 생성상이며, F상은 접합초기의 D상들이 유지시간의 증가에 따라 사라지고 꽃잎형태로 변화한 상이다. 접합초기 단계에서는 (a)에 나타낸 것처럼 접합부에 3종류의 생성상이 존재하나, 유지시간이 증가하고 접합온도가 상승함에 따라 접합초기에 생성된 미세한 점상의 상(D)은 소멸하고 C상과 F상이 추가로 생성되어 최종적으로는 (b)에 나타낸 것처럼 4종류의 생성상이 존재하였다.

3.3 생성상의 원소분석

Fig. 5는 A상 및 B상에 대하여 EDX분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다. EDX 선분석 결과를 보면, A



(a) Initial phases



(b) Latter phases

Fig. 4 Classification of phases in brazed zone

상은 용융한 삽입금속층의 Cu가 스테인리스강 쪽으로 침투한 것으로 보이며, B상은 그 성분이 스테인리스강과 비슷한 것으로 보아 스테인리스강에서 떨어져 나온 것으로 추측된다. 보다 더 정확하게 이 과정을 알아보기 위하여 스테인리스강의 가공방향에 수직하게 접합하여 조직을 관찰하였다. Fig. 6은 그 결과를 나타낸 것이다. Cu가 스테인리스강의 입계를 따라 침투하는 것으로 보이며, 이 과정에서 B상이 발생하는 것으로 볼 수 있다. 유지시간이 긴 경우 접합부 중심까지 B상들이 유입된 것도 관찰되었다.

C상 및 D상에 대한 EDX 분석결과를 Fig. 7에 나타낸다. C상은 접합초기에는 관찰되지 않고 유지시간이

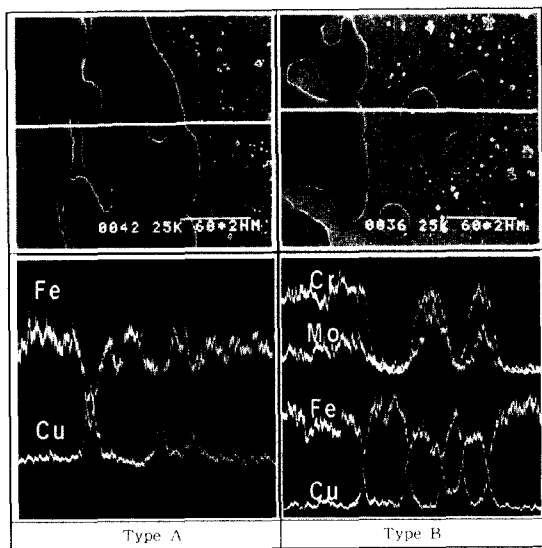


Fig. 5 Line profiles of elements on the A and B phases

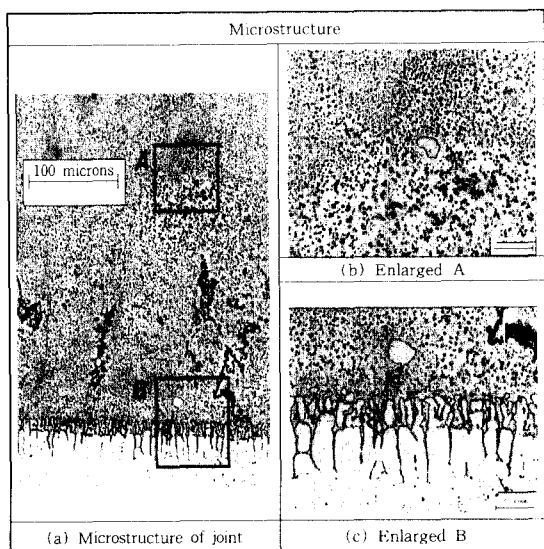


Fig. 6 Microstructures of brazed zone close to duplex stainless steel

긴 경우에 B상의 위에 생성한 생성상이고, 이 분석결과로부터 Cr 단상임을 알 수 있다. 접합초기에 접합부 전반에 걸쳐 생성된 D상은 성분분석 결과가 기지조직과 비슷하지만 상대적으로 Mn양이 높기 때문에 Mn-rich 상으로 생각된다. Fig. 8은 E상 및 F상의 EDX 선분석 결과를 나타낸 것이다. 이 분석 결과로부터, E상은 접합부 중앙부에 생성된 검은띠 형태의 생성상으로 Cr-Mn계 화합물이며, F상은 접합초기 생성상인 D상이 사라지고 접합후기에 나타난 꽃잎 형태의 생성상으로 Fe-Cr계의 화합물인 것으로 판단된다.

Table 2는 접합조건에 따라 접합부 근방에 생성되는 상의 종류를 정리한 것이다. 액상삽입금속의 Cu가 스테인리스강의 입계를 따라 침투한 층인 A상은 유지시간이 길어지고, 접합온도가 높아질수록 침투폭이 증가하고, 이 반응으로 인해서 발생하는 것으로 생각했던 B상은 침투층이 보이지 않는 접합 조건에서도 발생하나 그 크기가 유지시간과 접합온도가 증가할수록 커진다. C상은 유지시간과 접합온도가 높은 경우에

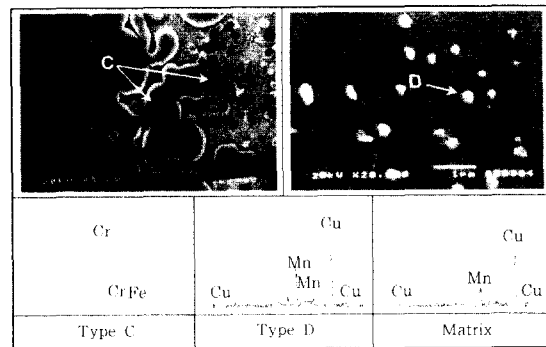


Fig. 7 EDX analysis on the C and D phases

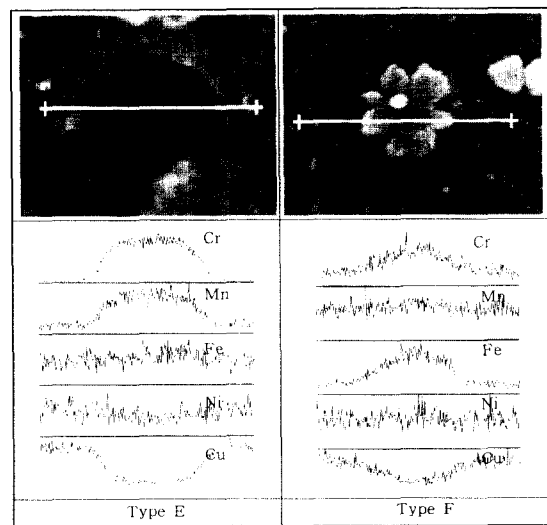


Fig. 8 Line profiles of elements on the E and F phases

Table 2 Analysis results of phases in brazed joints

Temp.	Time	A phase	B phase	C phase	D phase	E phase	F phase
1,243K	0.42ks	×	○	×	○	○	×
	0.9ks	○	○	×	○	○	×
1,273K	0ks	×	○	×	○	○	×
	0.9ks	○	○	○	×	○	○
1,303K	0ks	○	○	×	○	○	×
	0.9ks	○	○	○	×	○	○

발생하고, 접합온도와 유지시간이 짧은 경우인 접합초기에는 Mn-rich계 화합물이 발생하고, 이후 이 상이 없어지면서 F상인 Fe-Cr계의 꽃잎형태의 화합물이 접합후기에 나타난다. 접합초기부터 접합후기까지 계속해서 발생하는 E상은 그 크기가 계속 증가하다가 접합온도 및 유지시간이 길어질수록 감소하는 경향을 나타내었다.

3.4 생성상의 생성기구에 관한 고찰

재료를 브레이징할 경우, 브레이징 상태에서는 모재와 접합부의 계면 근방에 취약한 금속간화합물이나 계재물 등이 형성되고, 브레이징후 열처리를 실시한 경우에도 금속간화합물이나 조대한 기공의 형성 등이 문제되고 있다⁹⁻¹¹⁾. 본 연구에서 이종재료의 브레이징에서도 다양한 생성상들이 관찰되었다. 이와 같이 브레이징시 모재 및 접합부에 생성된 다양한 생성상들은 접합부의 기계적 특성을 저하시킬 가능성이 높은 것으로 예상된다. 따라서, 접합부 근방에 생성하는 생성상들의 분석결과에 기초하여 생성상의 생성기구에 대해서 고찰하였다.

브레이징시 접합온도와 유지시간이 증가하면서 접합부 내에 여러 가지 생성상들이 생성하는 것은 용융된 삽입금속과 모재와의 계면반응 및 확산반응에 의해 생성하는 것으로 보고되고 있다¹²⁾. Fig. 9는 2상 스테인리스강과 크롬동 합금을 브레이징한 경우, 접합부 근방에 생성하는 생성상의 생성기구를 유지시간의 증가에 따라 모식적으로 나타낸 것이다.

우선 용융된 삽입금속과 2상 스테인리스강의 접합계면을 보면, 삽입금속중 용융된 Cu가 2상 스테인리스강의 페라이트와 오스테나이트의 계면을 따라 침투하여 A상과 같이 물결무늬 형태로 파인 층이 생기고, 유지시간이 길어짐에 따라 이 침투층의 폭이 넓어진다. 용융된 삽입금속중의 Cu가 계면에서 스테인리스강의 입계를 따라 침투하는 과정에서 스테인리스강의 일부

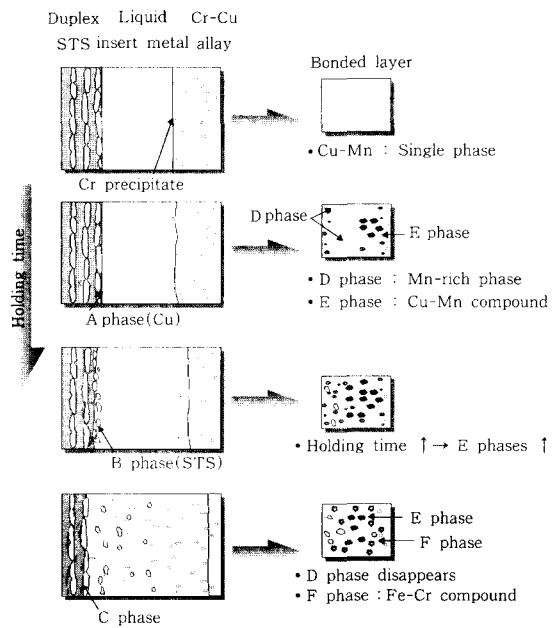


Fig. 9 Schematic illustration showing the formation of phases in the brazed zone

를 둘러싸고, 이 부분은 모재로부터 분리되어 접합부인 액상 삽입금속쪽으로 이동하여 조각상인 B상이 발생하게 된다. 이 B상 역시 유지시간의 증가에 따라 그 양이 증가하게 된다. 또한, 크롬동쪽의 접합계면에서는 용융된 삽입금속과 크롬동과의 용융반응으로 크롬동 모재에 석출되어 있는 Cr 석출상이 접합부내로 유입되어 들어오며, 그 양 역시 유지시간이 길어지면서 증가하게 된다.

이와 같이 접합초기에는 양쪽 모재와 용융된 삽입금속과의 반응으로 인해 스테인리스강 쪽에서는 Fe, Cr, Ni이, 크롬동 쪽에서는 Cr이 접합부내에 유입되면서 용융 삽입금속내에서 Mn의 고용도가 낮아지면서 Mn-rich상인 D상이 접합부 전반에 미세하게 정출한다고 생각된다. Cr-Mn계 화합물인 E상은 스테인리스강과 크롬동 쪽에서 점차적으로 유입되는 Cr과 용융 삽입금속 내의 Mn이 반응하여 화합물을 생성한 것으로 판단된다. 이후 유지시간이 길어지면 스테인리스강 쪽의 Fe, Cr과 크롬동 쪽의 Cr이 유입되어 들어오는 양이 증가하고, 용융 삽입금속내의 Mn은 모재로 확산하여 배출된다. 이 과정에서 Mn-rich상은 점차적으로 Cr-Mn계 화합물로 변화하게 되고, Fe-Cr계 화합물인 F상이 꽃잎 형태로 생성되면서 고용도가 증가하여 Mn-rich상은 소멸하는 것으로 판단된다. 한편, B상 내부에 있는 Cr 단상인 C상은 크롬동 모재내의 Cr 석출상이 용융 삽입금속내에서 부유하다가 스테인리스강의 계면까지 유입되어 발생한 것으로 생각된다.

4. 결 론

우주로켓용 엔진부품에 적용되는 2상 스테인리스강인 SUS329J₃L과 크롬동 합금인 C18200을 브레이징하여 접합조건에 따른 미세조직 변화 및 접합부 근방에 생성하는 생성상의 변화에 대하여 검토하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 용융삽입금속과 2상 스테인리스강과의 계면반응으로 삽입금속내의 Cu가 스테인리스강의 입계를 따라 침투하여 스테인리스강 조각상이 발생하였으며, 유지시간과 접합온도가 증가할수록 이 상의 양과 크기가 증가하였다.

2) 접합부내에는 Mn계 화합물, Fe-Cr계 화합물, Cr-Mn계 화합물이 발생하였으며, 이들 상은 용융삽입금속과 크롬동 모재와의 용융반응으로 유입된 Cr석출상과 접합부내에 유입된 스테인리스강 조각상들의 성분이 서로 반응하여 생성된 것으로 판단되었다.

3) 유지시간과 접합온도가 증가하면서 Mn계 화합물은 사라지고 Fe-Cr계 화합물이 발생하였으며, Cr-Mn계 화합물은 계속해서 양과 크기가 증가하다가 1,303K에서 20분동안 유지하였을 때 감소하였다.

참 고 문 헌

1. D.L.Hallum : Aluminum GMAW launches the delta rocket, Weld. Des. Fabr., 66-5 (1993), 44
2. R.P.Jewett and J.A.Halchak : The use of alloy 718 in the space shuttle main engine, superalloys 718, 625, Var. Deriv.(1991), 749
3. 幅島 : H-II 로켓 1단 엔진의開發-LE7 엔진과 溶接技術, 溶接學會誌, 64-7: (1995), 526
4. W.A.Gaubatz : Single stage rocket technology, IAF-92-0854(1992)
5. NASDA : 로켓과 로켓엔진について, 宇宙開發workshop(1999)
6. D.Gutow and M.Smith : Sensors guide shuttle welding, Weld. Des. Fabr., 63-5(1990), 27
7. K.Yonesawa : Welding of Titanium and Titanium Alloys, Weld. Res. Abroad,34-11(1988), 20
8. 김대업 외 : 액체로켓의 재료와 용접·접합기술, 대한용접학회지, 18-6(2000), 4
9. N.Bredcz and H.Schwartzbart : Metallurgy of Bonding in Brazed Joints, Weld J.,37(1958), 493
10. 鈴木, 恩澤, 田村 : 各種Ni基超合金의TLP接合性の比較, 溶接學會誌, 49-7(1980),462
11. 강정운 : 브레이징 불량, 대한용접학회지, 18-6(2000), 1
12. 김대업 : Ni기 초내열합금의 액상확산접합부 생성상의 금속조직학적 검토,19-1(2001), 75