

研究論文

Fe기내열합금의 액상확산접합용 삽입금속의 개발에 관한 연구

姜晶允* · 金仁培** · 李相來*

A Study on Development of Insert Metal for Liquid Phase Diffusion Bonding of Fe Base Heat Resistance Alloy

Chung-Yun Kang*, In-Bae Kim** and Sang-Lae Lee*

Key Words : STS-310S, Incoloy-825, Liquid Phase Diffusion Bonding(액상확산접합), Insert Metal(삽입금속), Microstructure(미세조직), Tensile Property(인장성질), Homogenizing Treatment(균질화처리)

Abstract

The change of microstructure in the bonded interlayer and tensile properties of joints were studied for liquid phase diffusion bonding using STS-310 and Incoloy-825 as base metal and base metal+B alloy as insert metal. Main experimental results obtained in this study are as follows.

- 1) The optimum amount of B addition into the insert metal was found to be about 4mass%.
- 2) When isothermal solidification was completed, the microstructure in the bonded interlayer was the same with that of the base metal because of the grain boundary migration in the bonded interlayer.
- 3) All of the tensile specimen fractured at base metal and joints bonded at optimum condition exhibited tensile properties in excess of base metal requirements.
- 4) It was determined that fine car-borides and borides such as $M_{23}(C,B)_6$, Cr_3B , and CrB in STS-310S and TiB in Incoloy-825 exist at the grain boundary around bonded interlayer. These precipitates almost disappeared after homogenizing treatment at 1373K for 86.4ks.

1. 서 론

천이액상확산접합(Transient Liquid Phase Diffusion Bonding : TLP Bonding)은 모재보다 용점이

낮은 삽입금속을 양모재 사이에 삽입하고 가열하면, 삽입금속이 용융하고, 용융삽입금속과 모재가 반응하여 모재 표면의 일부가 용해한 후, 용접처 하 원소가 모재 쪽으로 확산함으로써 등온응고가 일어나 접합이 이루어지는 방법이다. 이 접합법은

* 정회원, 부산대학교 금속공학과

** 비회원, 부산대학교 금속공학과

1970년 후반 D. S. Davall에 의해 개발되었다¹⁾. 종래의 고상확산접합법과 Brazing의 장점만을 조합시킨 접합법이라고 할 수 있다. 따라서, 모재와 거의 같은 정도의 물리적, 화학적, 기계적 성질을 갖는 접합이음부를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 3차원적으로 두 물체를 연결하므로 선용접인 TIG, MIG 등과 같은 용융용접법 보다 효율이 높은 것이 특징이라고 할 수 있다.

그동안 용융용접이 곤란한 초내열합금, 신금속 재료에 대하여 많은 연구가 이루어졌고, 철강재료 중에서 고가인 스테인레스강, 내열강에 대한 연구도 다소 있다²⁻¹¹⁾.

철강재료의 접합에 사용한 삽입금속은 시판되는 Ni가 비정질합금인 Ni-B, Ni-Cr-B, Ni-P가 주류를 이루고 있다¹⁰⁾. 이와같은 합금을 삽입금속으로 사용하면, 조성이 모재와 아주 다르므로 모재에 필적하는 접합이음부를 얻기 위해서, 고온에서 장시간 균질화 열처리가 필요하다는 보고^{8,9)}가 있다. 그러나 고온에서 장시간의 열처리는 모재를 열화시킬 가능성이 있을 뿐만 아니라, 또 다른 문제점을 유발할 것으로 예상된다.

만약, 모재성분에 용접저하원소를 첨가하여 삽입금속을 제조하여 사용하면, 등온응고가 완료한 시점에 접합부의 조성이 모재와 거의 동일하므로, 균질화처리가 필요 없다는 점을 착안하여, 본 연구에서는 모재에 용접저하 원소로서 B를 첨가한 삽입금속의 조성을 개발하고 그 접합성을 검토하여 보았다. 내열·내식재료로 사용되는 STS-310S 및 Incoloy-825를 모재로 선택하여, 적정 B 함유량, 접합성, 접합현상을 검토하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 모재 및 삽입금속의 제조에 사용한 B분말의 화학조성을 Table 1에 표시한다. 모재 성분에 용접저하 원소로서 B를 첨가하여 새로운 삽입금속을 제조하였고, 사용한 B는 비정질 분말이고, 입도는 200mesh이다.

삽입금속은 모재인 STS-310S 및 Incoloy-825에 일정한 양의 B분말을 첨가한 500g을 26.6MPa의 진공중에서 고주파 진공 용해로 용해하여, $\phi 10 \times 100$ mm의 잉고트를 제조한 후, 이 잉고트로부터 채취한 10g의 시료를 급냉응고법으로 폭이 약 10mm, 두께가 약 80-90 μm 의 테이프 형태로 제조했다. 급냉응고는 단롤(single roll)을 사용하였고, Ar분위기 중에서 행하였다.

조직관찰용 시험편은 $\phi 10 \times 10$ mm의 크기로, 인장 시험편은 $\phi 10 \times 35$ mm 크기로 절단하여, 피접합면을 사포로써 1500번까지 연마하고, 삽입금속과 함께 아세톤으로 초음파 세척하여 접합에 사용하였다. 13.3mPa의 진공분위기 중에서 소정의 온도까지 5 K/s의 가열속도로 고주파 가열하여 접합을 행하였다. 접합압력은 1.76MPa로 하였다. 또한, 접합층의 간격을 일정하게 유지하기 위하여 30 μm 의 W 스페이서(spacer)를 삽입금속과 함께 삽입하여 접합을 행하였다.

균질화처리는 관상로를 이용하여 Ar분위기중에서 1373K로 가열하고 일정한 시간 동안 유지한 후 수냉하였다.

액상소멸과정을 정량적으로 측정하기 위하여 접합부의 횡단면에 잔존하는 공정의 폭으로 평가하였다. 공정조직의 평균폭은 SEM을 사용하여 배율 2000배 조직의 20시야에 나타나 있는 공정조직의 면적을 총측정길이(1시야: 120×160 mm)로 나눈 값을 취하였다.

생성상의 성분분석은 EDX 및 EPMA를 이용하

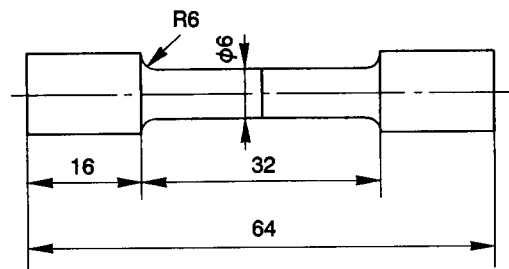


Fig. 1 Configuration of specimen for tensile test

Table 1. Chemical composition of base metal and amorphous B powder(mass%)

Materials	Fe	Ni	Cr	C	Si	Mn	Ti	Al	Cu	others
STS 310S	Bal.	19.97	24.89	0.04	1.39	1.46	-	-	-	
Incoloy 825	Bal.	31.97	20.55	0.074	0.35	1.55	0.46	0.36	0.34	0.013
B powder		B : 95.51,		H ₂ O : 0.76,		Mg : 0.63,			- βH_2 : 0.11	

여 행하였고, 생성상의 동정은 replica를 만들어 TEM을 사용하여 행하였다. 인장시험편의 형상은 Fig.1과 같고, 인장시험은 크로스 헤드의 속도를 0.167 mm/s의 조건으로 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 삽입금속의 B량 선정

적정한 B의 첨가량을 선정하기 위하여, 모재에 B를 2, 4, 6mass% 첨가하여 용점 변화를 조사하였다. Fig.2는 STS-310S(a) 및 Incoloy-825(b)에 B를 2, 4, 6mass%로 첨가하여 용해한 주괴의 일부분을 시료로 채취하여, 가열과정에서의 액상선온도(T_L) 및 고상선온도(T_S)를 DTA로 측정된 결과를 나타낸 것이다.

STS-310S의 경우는 B를 2mass% 정도로 첨가할 때 T_L 및 T_S 는 급격히 저하하지만, 2mass% 이상에서는 서서히 저하한다. 반면에 Incoloy-825 경우는 4mass%까지는 같은 경향을 보이지만, 6mass% 첨가하면 약간 상승하는 것이 특징이라고 하겠다.

등온용고과정 및 균질화처리 시간을 고려하면 B

량이 적은 것이 좋다. 이러한 점과 용점을 고려하면, 가장 적당한 B의 첨가량은 4mass%라고 생각된다. 이후의 실험에서는 4mass%의 B를 첨가한 합금만을 삽입금속으로 선정하여 실험하였다.

3.2 액상화산접합현상

삽입금속의 용점보다 수십도 위의 온도인 1483, 1523 및 1553K를 접합온도로 정하고, 액상화산접합의 주과정인 액상소멸과정 동안 접합시간의 증가에 따른 접합부 조직의 변화를 검토하였다. Photo.1은 STS-310S를 1523K에서 접합하였을 때 유지시간에 따르는 접합부 조직의 변화를 나타낸 것이고, Photo.2는 Incoloy-825를 1483K에서 접합하였을 때 유지시간에 따른 접합부 조직의 변화를 나타낸 것이다.

두 합금 모두 0ks로 유지한 경우는 모재와 접합부의 계면을 뚜렷이 구별할 수 없지만, 접합부라고 생각되는 부분에는 공정조직으로 채워져 있다. 이 공정조직은 접합온도에서 액상이다. 공정조직은 유지시간이 증가함에 따라서 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 접합초기에는 거의 직선적인 계면이지만, 시간이 증가함에 따라서 입계 이동이 일어나

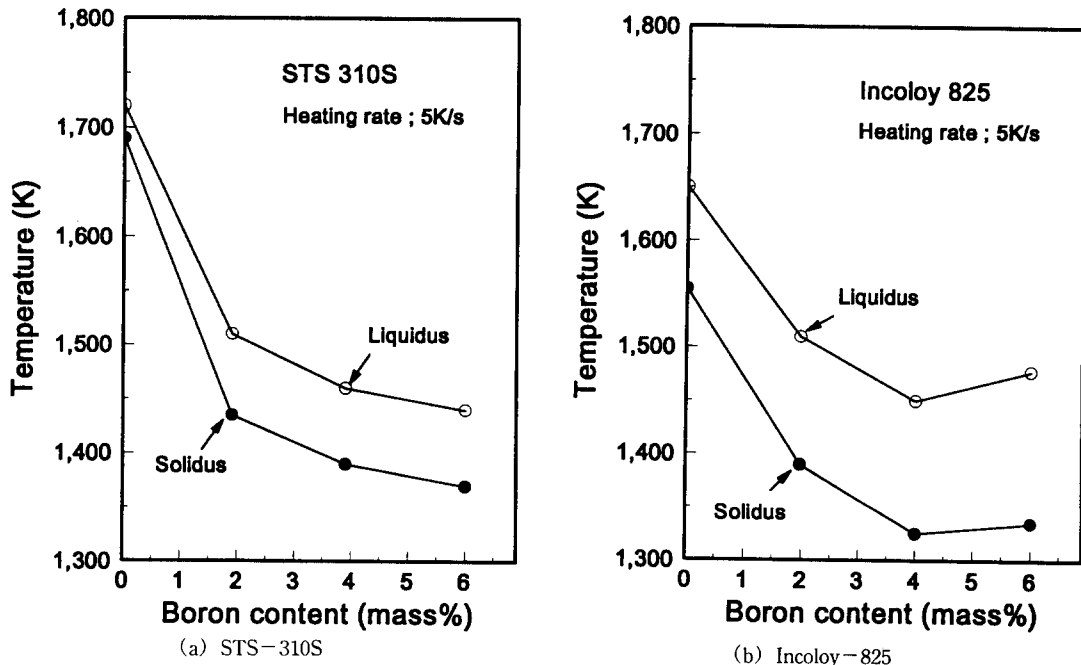


Fig. 2 The effect of B content on melting point

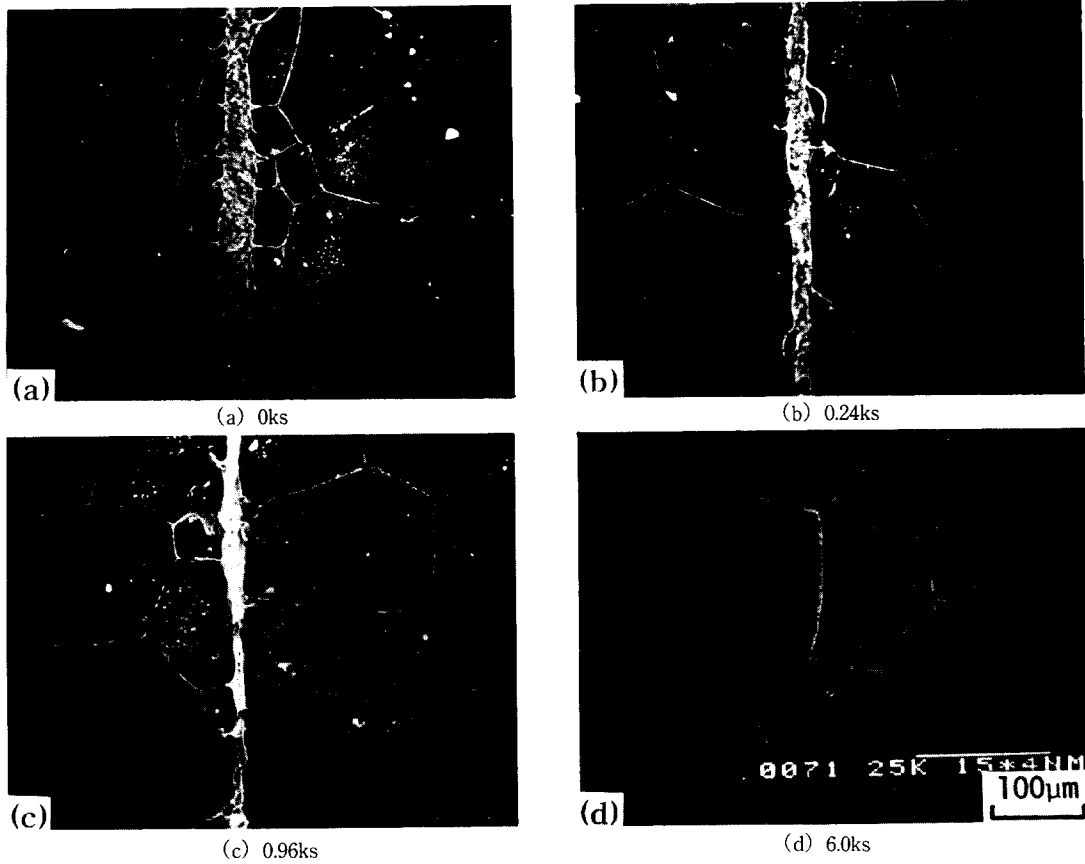


Photo. 1 SEM microstructures of STS-310S bonded at 1523K

최후에는 모재와 접합부가 전혀 구별되지 않는 것을 알 수 있다.

액상소멸과정을 반정량적으로 다루기 위하여, 유지시간의 증가에 따른 접합부내에 존재하는 평균 공정조직폭의 변화를 조사하였다. Fig.3은 접합온도에서 유지시간의 평방근과 평균 공정조직폭과의 관계를 조사한 결과이고, (a) 및 (b)는 각각 STS-310S 및 Incoloy-825를 모재로 한 것이다. 공정조직의 폭은 어떤 온도에서나 시간의 증가와 더불어 감소하고, 그 감소속도는 접합온도가 높을수록 큰 것을 알 수 있다. 이 경향은 두 모재 모두 같다.

STS-310S의 경우, 공정조직의 폭은 1523K 및 1553K에서 각각 8.64ks 및 6.0ks 유지에 의하여 0으로 된다. 한편, 접합온도 1483K에서는, 8.64ks로 유지하여도 공정조직이 존재하는 것으로부터, 등

온응고가 완료하기 위해서는 8.64ks보다도 길게 유지하여야만 되는 것을 알 수 있다. Incoloy-825의 경우, 공정조직의 폭은 1483K와 1523K에서 6.0ks로 유지함에 따라 0으로 된다. 여기서 공정조직이 완전히 소멸하였다는 것은 액상이 완전히 소멸하여 등온응고가 완료하였다는 것을 의미한다. 접합온도에서 유지하는 동안에 등온응고가 일어나는 것은 응집저하 원소인 B이 모재 쪽으로 확산에 의한 것으로 잘 알려져 있다¹⁹⁾.

이상의 결과로부터, STS310S에서는 1523K×8.64ks 혹은 1553K×6.0ks의 조건으로 접합하면 접합이 완료되고, Incoloy-825의 경우는 1483K×6.0ks 혹은 1523K×6.0ks의 조건으로 접합하면 접합이 완료되는 것을 알 수 있다.

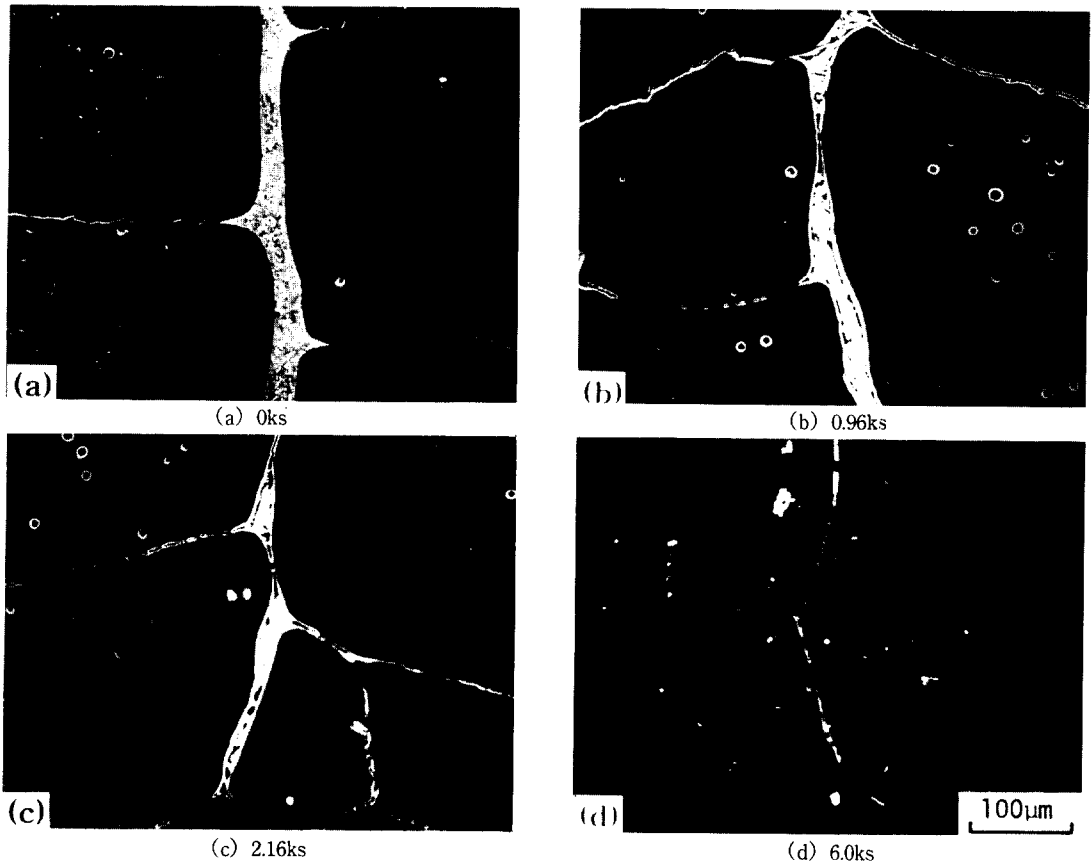


Photo. 2 SEM microstructures of Incoloy-825 bonded at 1483K

3.3 접합이음부의 인장성질

Table 2는 모재로서 STS-310S, 삽입금속으로 STS-310S+4mass%B를 사용하여 1523K×8.64ks와 1553K×6.0ks의 조건으로 접합한 접합재의 인장시험 결과이다. 1523K에서 접합한 접합재의 인장강도, 항복강도, 연신율, 단면수축은 모두 모재의 요구치에 만족하고 있지만, 1553K에서 접합한 접합재의 인장강도는 모재의 요구치보다 낮았다. 인장성질의 편차가 적은 것으로 보아 접합의 신뢰성면에서도 양호한 것으로 판단된다.

또한, 파단면을 조사한 결과, 파단은 모두 모재에서 일어났고, 주변부에서 shear lip형상을 가지는 연성적인 파면을 나타내고 있었다.

한편, 1553K×6.0ks 접합조건의 접합재에서는 1523K×8.64ks의 접합재와 비교하여 연성은 충분히

Table 2. Tensile properties of STS-310S joints.

Bonding condition	No.	YS (MPa)	TS (MPa)	E (%)	RA (%)
1523K × 8.64ks	1	216	607	54	72
	2	215	580	50	68
	3	214	580	52	70
	Av.	215	589	52	70
1553K × 6.0ks	1	195	417	41	82
	2	203	483	45	84
	3	202	485	53	83
	Av.	200	462	46	83
BMR*		200 ↑	520 ↑	30 ↑	50 ↑

BMR* : Base metal requirements(from JISG4303)

얻었지고 있지만, 인장강도는 현저히 저하하고 있다. 그래서 각 인장시험편과 같은 접합조건의 시료로부터 모재의 결정입경을 선분석법으로 측정하여 비교한 결과, 1553K에서는 420 µm이었고, 1523

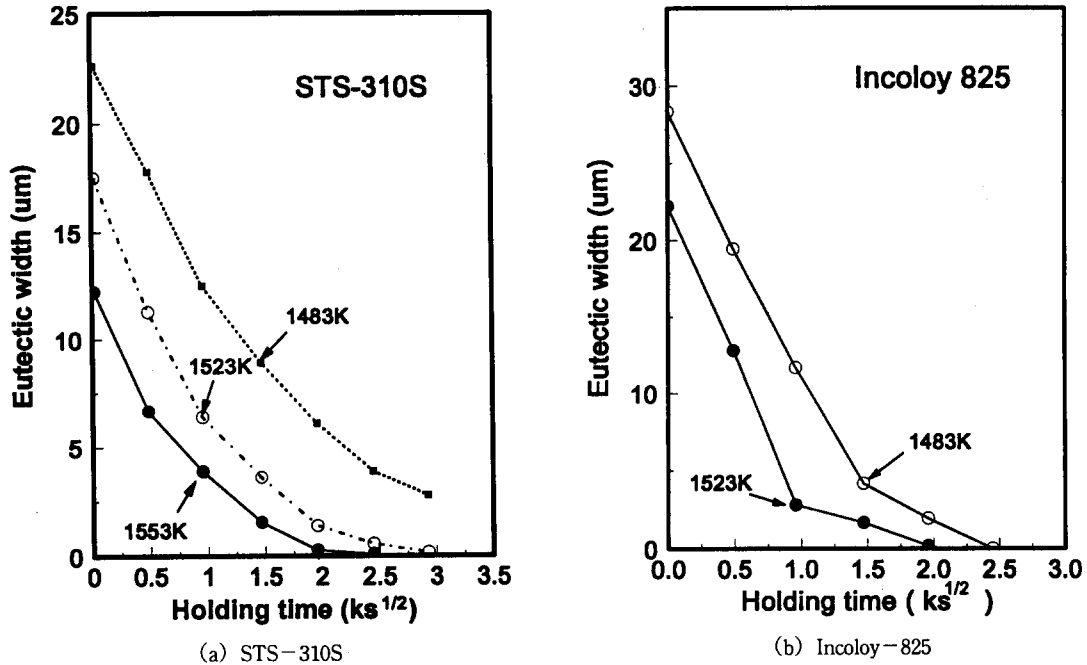


Fig. 3 The effect of holding time on eutectic width of bonded interlayer

K에서는 285 μm이었다. 이것으로부터 고온에서 접합한 접합재의 인장강도가 낮은 이유는 모재의 결정립이 조대화되기 때문인 것으로 생각된다.

Table 3은 Incoloy825를 1523K×6.0ks의 조건으로 접합한 접합재의 인장시험 결과이다. 모든 인장성질은 모재의 요구치에 만족하고 있다. 이것도 역시 모재에서 파단하였다.

이상의 결과로부터, 모재+4mass%B 조성을 갖는 삽입금속으로 접합하면, 균질화처리를 하지 않아도 모재에 필적하는 인장성질을 얻을 수 있는 것으로 확인되었다.

3.4 균질화처리에 따르는 입계생성물의 거동

본 실험에서 개발된 모재+4mass%B의 삽입금속은 모재와 필적하는 인장성질을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 균질화처리를 생략할 수 있기 때문에 접합공정 시간을 단축시키는 데에 매우 효과적인 삽입금속인 것이 이미 확인되었다.

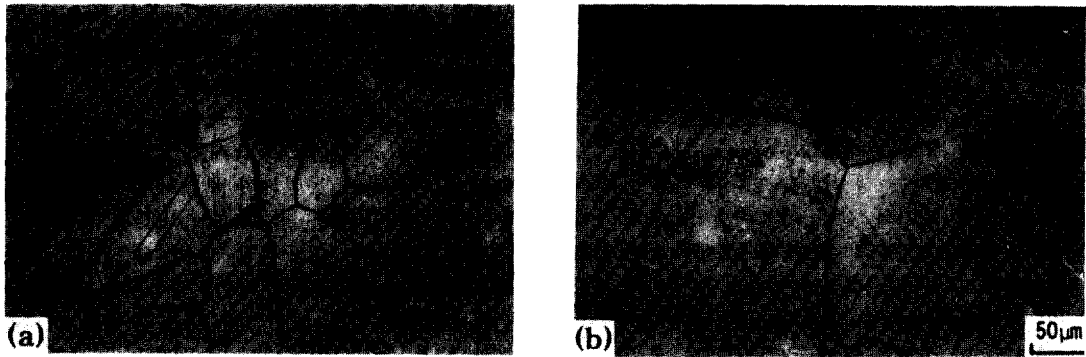
한편, 小若 등의 보고¹⁰⁾에 의하면, 스텐레스강종에서 입계에 M₂₃(C,B)₆, CrB 및 Cr₂B 등과 같은 붕탄화물 혹은 붕화물 등과 같은 조대한 석출물이 존재하면 내식성을 상당히 저하하는 것으로 알려져 있다. 본 실험에 사용한 STS-310S 및 Incoloy-825는 대부분은 내식성이 요구되는 부품 등에 사용됨으로 이와같은 점을 감안할 필요가 있고, 특히 삽입금속에 B이 4mass% 첨가되어 있기 때문에 접합부 근방에 붕화물 등이 생성할 가능성이 많다.

그래서, 등온응고를 완료시킨 시험편에 대해서 접합부 근방의 미세조직을 자세히 관찰하여 보았다. Photo.3의 (a)는 STS310S를 1523K×8.64ks의

Table 3. Tensile properties of Incoloy-825 joints.

No.	YS (MPa)	TS (MPa)	E (%)	RA (%)
1	230	594	45	63
2	232	602	49	65
3	235	599	45	67
Av.	232	595	46	65
BMR	220 ↑	580 ↑	40 ↑	50 ↑

BMR : Base metal requirements
(fom Nisshin Steel Co. Ltd)



(a) STS 310S, 1523K×8.64ks

(b) Incoloy 825, 1523K×6.0ks

Photo. 3 Optical microstructures of joints after isothermal solidification

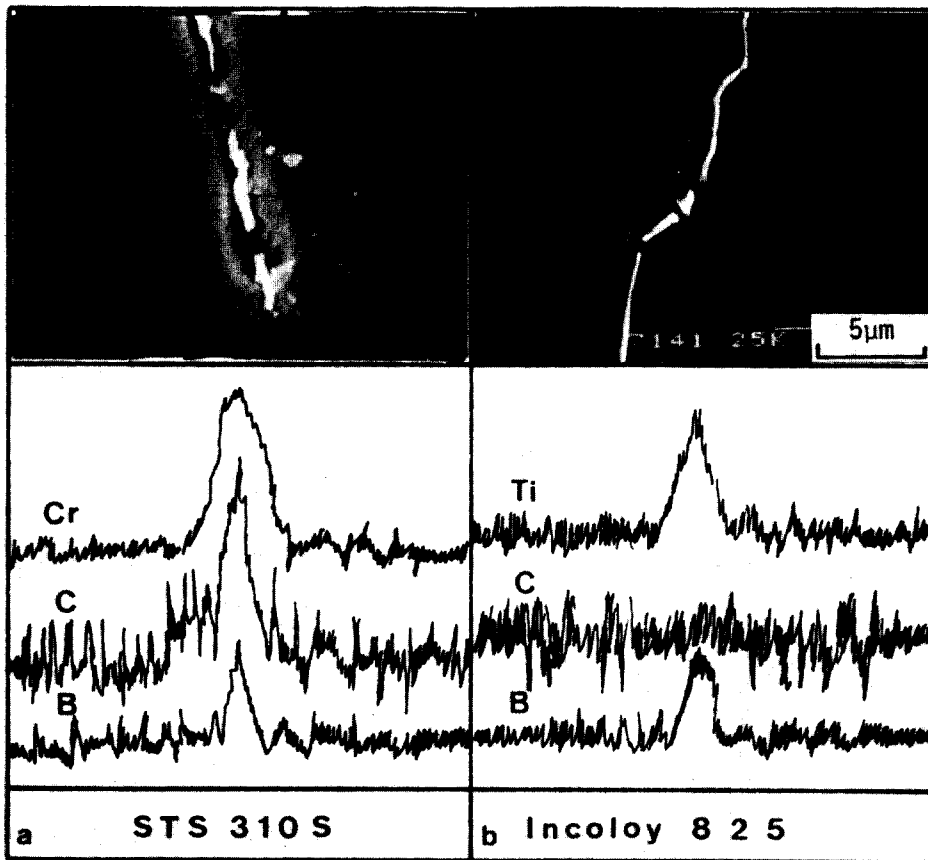


Photo. 4 SEM microstructure of precipitate at grain boundary of bonded interlayer and the result of their line analysis by EPMA

조건으로, (b)는 Incoloy825를 1523K×6.0ks의 조건으로 접합하여 등온응고를 완료시킨 시험편에 대한 접합부 근방의 광학현미경 조직이다. 입계가 깊이 부식되어 있고, 입계에 석출물일 것으로 추정되는 미세한 상이 존재하는 것을 볼 수 있다.

입계에 존재하는 생성상의 형상과 성분을 조사하기 위하여 상기와 같은 시험편을 SEM을 사용하여 관찰하고 EDX 및 EPMA로 분석하여 보았다. Photo.4는 그 결과를 정리하여 나타낸 것이다. STS-310S 접합재에서는 입계에 막대상의 생성상이 존재하고, 이 상들을 EDX 및 EPMA로 분석한 결과, 생성상은 Cr, C, B의 피크가 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. Incoloy825에서는 필름상의 생성상이 존재하고, Ti과 B 피크가 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 접합부 근방의 입계에는 생

성상이 존재하고, STS-310S의 생성상은 Cr을 주체로 하는 붕화물 혹은 붕탄화물, Incoloy-825의 생성상은 Ti계 붕화물일 것으로 추측된다.

각각의 생성상의 정확한 조성을 확인하기 위하여 단면조직으로부터 추출레프리카를 만들어서, TEM을 사용하여 동정하여 보았다. Photo.5의 (a) 및 (b)는 STS-310S 및 Incoloy-825의 접합부 근방에서 나타나는 대표적인 생성상의 TEM 조직, 회절반점을 나타낸다. 전자선회절을 해석한 결과, STS-310S의 입계 생성상은 Cr을 주체로 한 $M_{23}(C,B)_6$ 으로 동정되었고, Incoloy-825의 입계 생성상은 TiB_2 로 동정되었다. 한편, STS-310S 시료 20개를 동정한 결과, 반수 이상이 $M_{23}(C,B)_6$ 인 것으로 확인되었지만, CrB 및 Cr_2B_3 도 간혹 동정되었다.

입계생성상이 존재하는 영역의 폭을 STS-310S 접합재에 대해서 측정된 결과, 접합부 중심에서 약



(a) STS-310S

(b) Incoloy-825

Photo. 5 TEM microstructure of precipitates at grain boundary of bonded interlayers and selected area diffraction pattern taken from precipitate



5 mm 거리까지 존재하였다. 입계에 존재하는 생성상의 폭은 다음과 같이 측정하였다. 접합부에 수직 방향으로 0.5 mm 간격으로 SEM을 관찰하여 step조각이 나타나는 최대 길이의 평균치를 생성상이 존재하는 폭으로 생각하여 측정하였다. 입계에 생성상이 존재하는 폭이 접합시의 액상폭보다도 아주 넓다는 사실은 냉각과정에서 석출된다는 것을 의미한다.

또한, 입계생성상은 탄붕화물과 붕화물이기 때문에, 그 석출에는 접합부의 B의 분포상태가 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 접합과정중에 용융삽입금속에 의한 입계침식(erosion)현상과 B의 입계확산에 의해서 접합부 근방의 입계에 B이 농축되고, 접합 완료 후 고용한 이상의 B농도를 가지는 영역에서는 냉각 도중에 붕화물이 석출할 것으로 생각된다.

균질화처리를 행하면, 접합부에 농축하고 있는 B은 모재측으로 확산이 일어나기 때문에 입계 석출물의 석출량을 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 그래서, 입계석출물의 석출량을 감소시키기 위하여 1373K로 균질화처리를 행하였다.

Fig. 4는 STS310S를 1523K×8.64ks의 조건으로

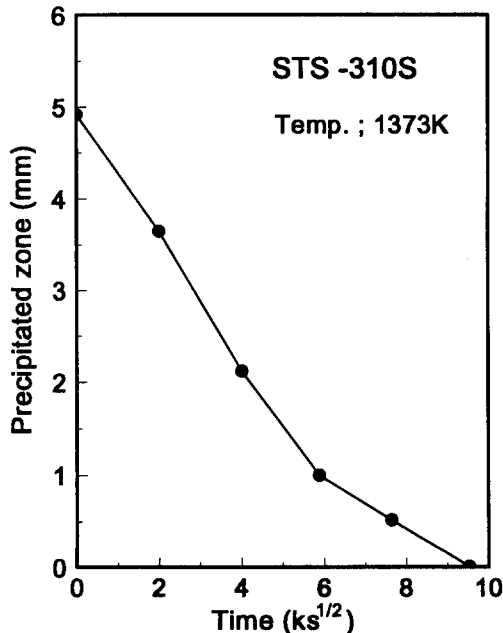


Fig. 4 The effect of homogenizing time on the width of zone which precipitate exist in the grain boundary

접합한 시험편에 대해서, 균질화처리 시간의 증가에 따른 입계석출물의 존재영역 폭의 변화를 나타낸 것이다. 이것으로 부터, 균질화처리 시간이 증가함에 따라 입계석출물이 존재하는 영역의 폭은 감소하고, 86.4ks동안 유지하면 입계석출물은 거의 존재하지 않는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, 모재+4mass%B을 삽입금속으로 사용하여 접합한 후, 1373K×86.4ks의 조건으로 균질화처리하면, 입계에 붕탄화물이나 붕화물이 존재하지 않는 우수한 접합이음부를 얻을 수 있음을 알았다.

한편, 두께가 38 μm 인 Fe-6%Ni-15.7%Cr-2.8%B을 삽입금속으로 사용한 경우에는 모재 및 삽입금속 중의 Ni, Cr, B등의 농도를 균질화하기 위해서는 1453K에서 약 86.4ks 동안 균질화 열처리가 필요하고, 두께가 38 μm 인 Ni-15%Cr-4%B을 사용하는 경우에는 3600ks의 장시간 열처리가 필요하다고 보고하고 있다¹⁰⁾. 여기서 균질화처리는 단지 모재 및 삽입금속의 성분 원소를 균질화하는 것을 의미하고, 본 연구에서 문제점으로 대두된 탄화물의 석출과 같은 국부적인 조성의 불균일성을 없애기 위한 처리가 아니다. 또한 이들 보고에서 접합부 근방의 석출에 대한 언급이 없기 때문에, 비교가 곤란하다.

그러나 본 연구에서 제조한 모재+4%B의 삽입금속은 B만을 확산시키면 모재 및 삽입금속의 성분 균질화는 이루어진다. 따라서 모재+4%B의 삽입금속은 균질화처리를 생략할 수 있을 뿐만 아니라, 모재에서 파단하는 인장성질을 얻을 수 있다는 점으로부터 철강재료의 액상확산접합용 삽입금속으로 적당하다는 것을 알 수 있다. 단 내식성이 요구되는 부품을 접합하는 경우, 접합부 근방의 입계에 석출되는 $M_{23}(C,B)_6$, Cr_2B , CrB, 및 TiB과 같은 탄붕화물 및 붕화물을 고용하기 위한 균질화처리가 필요하다.

4. 결 론

STS-310S 및 Incoloy-825 합금의 액상확산접합시, 균질화처리 공정을 생략할 수 있는 새로운 삽입금속의 조성을 개발할 목적으로, 모재+B 합금을 제조하여, 적정 B량을 선정함과 동시에 개발된 삽입금속의 접합성을 검토하였다. 얻어진 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 용접 측정의 결과로부터, 모재+B 합금인 삽입금속의 적정 B 첨가량은 STS-310S 및 Incoloy-825 합금 모두 약 4mass%임을 알 수 있었다.

(2) STS-310S 및 Incoloy-825 합금을 모재+4mass%B인 삽입금속으로 접합한 경우, 등온응고가 완료한 시점에서, 조직상으로는 접합부와 모재와 구별이 곤란할 정도로 완전한 접합이 이루어졌다.

(3) STS-310S 및 Incoloy-825를 등온응고가 완료하는 조건인 1523K×8.64ks 및 1523K×6.0ks로 접합한 접합체는 모두 모재에서 과단하였고, 인장성질은 모재의 요구치에 만족하였다. 그러나 STS-310S를 1553K×6.0ks의 조건으로 접합한 접합체는 모재에서 과단하였지만, 인장강도는 모재의 요구치보다 낮았다. 이것은 결정립의 조대화 때문이라고 판단된다.

(4) 접합부근방의 입계에서 STS-310S의 경우 $M_{23}(C,B)_6$, Cr_2B 및 CrB 이, Incoloy-825의 경우는 TiB 이 석출되어 있기 때문에 내식성이 저하할 것으로 예상되었지만, 1373K×86.4ks의 조건으로 균질화 열처리하면 거의 소멸하였다. 이 균질화처리 조건은 다른 삽입금속을 사용한 경우에 비하여 상당히 단축된 것으로 확인되었다.

(5) 본 연구에서 개발된 삽입금속인 모재4mass%B합금은 양호한 액상확산접합성을 가지면서도 균질화처리 시간을 상당히 단축시킬 수 있음을 알 수가 있었다.

후 기

이 연구는 1994년도 고려제강 문화재단의 연구비에 의해 수행되었기에 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

1. D.S.Duvall, W.A Owczarski and D.F. Paulions : WeldJ., 53-4(1974) 203s
2. 鈴木曉南, 恩澤忠南, 田村博 : 日本溶接學會論文誌, 3-2(1985) 326
3. 丹本孝雄, 小倉慧, 和知弘, 加藤光雄, 志田朝彦 : 日本溶接學會論文誌, 2-4(1984) 594
4. 鈴木曉南, 恩澤忠南, 田村博 : 日本溶接學會誌, 49-7(1980) 440
5. 丹本孝雄, 小倉慧, 和知弘, 加藤光雄, 志田朝彦 : 日本溶接學會論文誌, 5-3(1987) 373
6. 平根輝夫, 森本壓吾 : 鐵と鋼, 70-12(1984) 339
7. 姜晶允, 中尾嘉邦 : 日本溶接學會論文誌, 6-4(1988) 519
8. 姜晶允, 中尾嘉邦 : 日本溶接學會論文誌, 7-2(1989) 36
9. 姜晶允, 中尾嘉邦 : 日本溶接學會論文誌, 7-3(1989) 367
10. 上野泰弘 : 鐵と鋼, 73-5(1987), 272
11. 三浦實 : 日本溶接學會講演概要, 41(1987) 39
12. 井川, 中尾, 以西 : 日本溶接學會誌, 47-7(1978) 440
13. 姜晶允 : 大韓溶接學會誌講, 7-2(1989) 12
14. 小若實 : 日本溶接學會誌, 50(1981) 326