



액상확산접합용 인서트금속의 화학조성 최적화에 관한 연구

김 대 업* · 정 승 부** · 강 정 윤***

* 현대정공(주) 기술연구소
** 성균관대학교 금속재료공학부
*** 부산대학교 금속공학과

A Study on the Optimum Chemical Composition of Insert Metal for Liquid Phase Diffuse Bonding

Dae-Up Kim*, Seung-Boo Jung** and Chung-Yun Kang***

* Research Institute, Hyundai Precision & Industry Co., Yongin 449-910, Korea
** School of Metallurgical & Materials Engineering, Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea
*** Dept. of Metallurgical Engineering, Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea

Abstract

Effect of alloy elements on joinability of insert metal for liquid phase diffusion bonding of heat resistant alloys was investigated in this study. Also, optimum chemical composition of insert metal was explained using interpolation method. The insert metals utilized was commercial Ni-base amorphous foils and newly developed Ni-base filler metals with B, Si and Cr in this study. Melting point and critical interlayer width(CIW) decreased with increasing additional amount of B, Si and Cr, melting point lowering element of the insert metal. Optimized chemical composition of insert metal could be estimated by interpolation method. The optimum amount of B, Si, Cr addition into the insert metal were found to be about 3%, 4% and 3%, respectively. The measured characteristic values, melting point, microhardness in the bonded interlayer and CIW of the insert metals were the almost identical to ones of the calculated results by interpolation method.

(Received June 14, 2000)

Key Words : Heat resistant alloy, Liquid phase diffusion bonding, Insert metal, Optimum chemical composition, Interpolation method, Melting point

1. 서 론

재료의 실용적인 이용분야를 보다 확대시키기 위하여 적용되는 대표적인 접합방법으로서는 TIG용접 · 전자빔용접 · 레이저용접등의 용융용접법과, 마찰압접 · 브레이징 · 고상확산접합 · 액상확산접합등의 계면접합법 및 접착제와 같은 기계적 결합력을 이용한 접합법등을 들 수 있다. 용융용접법의 적용이 곤란한 초내열합금이나 신금속재료등에 대해서는 접합시 거시

적으로는 모재를 용융시키지 않는 계면접합법의 적용이 유효하다. 그중에서도 고상확산접합과 브레이징의 장점을 조합하여 접합시 재질열화가 적고 정밀한 접합이 가능한 액상확산접합에 관한 연구가 활발하게 행해지고 있다¹⁻⁵⁾. 초내열합금, 스테인리스강등의 동종 및 이종접합에 대한 조직학적 검토 및 기계적특성등에 관한 연구에 의하면, 인장강도는 모재와 동등한 수준의 강도를 나타내나, 연성이 낮고 크리프 특성이나 피로특성이 모재에 비해 낮다는 것이 문제점으로 지적되고 있다⁶⁻⁸⁾. 또한, 시판되고 있는 인서트금속을 사용하

여 접합한 경우, 모재와의 조성차에 의하여 접합후 장시간의 균질화처리가 필요하기 때문에 실시공면에서는 비효율적일 뿐만 아니라 모재의 성능을 열화시키는 원인이 된다. 이 때문에 고온기계적특성의 개선이나 접합후 균질화처리시간의 단축을 목적으로 하여 모재에 가까운 조성의 인서트금속이 개발되고 있다^{9~11)}.

액상확산접합에서 모재와 인서트금속의 적절한 조합은 접합후 접합부특성에 큰 영향을 미치나, 액상확산접합에 사용하는 인서트금속은 용점저하원소를 첨가한 시판의 인서트금속을 사용하는 것이 대부분이다. 인서트금속의 화학조성을 최적화하기 위하여 수리계획법을 적용한 합금설계에 대하여 보고된 예¹²⁾는 있으나, 각각의 모재에 대한 최적의 인서트금속의 합금설계를 통계적으로 검토한 연구사례는 거의 없다.

본 연구에서는 인서트금속의 화학조성을 최적화함으로써 접합부의 고온 기계적특성을 개선하는 것을 목적으로, 인서트금속의 접합성에 미치는 합금원소의 영향을 조사함과 동시에 내삽법¹³⁾을 이용한 수리계획법에 의해 인서트금속의 화학조성을 최적화하기 위한 합금설계에 대하여 검토를 행하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

본 실험에서 모재는 원심주조법에 의해 제조된 내열주강이며, 인서트금속으로는 시판되고 있는 Ni기 합금 비정질 박막을 사용하였다. Table 1에 이들의 조성을 나타내었다. 또한, 인서트금속의 화학조성 최적화를 위한 시험을 행하기 위하여 14종류의 인서트금속을 제조하였으며, Table 2에는 이들의 목표조성을 나타낸다.

2.2 인서트금속 제작방법

새로운 합금설계를 행한 인서트금속의 제작에는 순

Table 2 Nominal chemical compositions of newly manufactured insert metal (mass%)

Mark	B	Si	Cr	Ni
AM 1	2.0	4.0	3.0	Bal.
AM 2	2.0	4.0	6.0	Bal.
AM 3	2.0	6.0	3.0	Bal.
AM 4	2.0	6.0	6.0	Bal.
AM 5	4.0	2.0	3.0	Bal.
AM 6	4.0	2.0	6.0	Bal.
AM 7	4.0	4.0	3.0	Bal.
AM 8	4.0	4.0	6.0	Bal.
AM 9	4.0	6.0	3.0	Bal.
AM 10	4.0	6.0	6.0	Bal.
AM 11	6.0	2.0	3.0	Bal.
AM 12	6.0	2.0	6.0	Bal.
AM 13	6.0	4.0	3.0	Bal.
AM 14	6.0	4.0	6.0	Bal.

도 98%이상의 Ni, Si, Cr 순금속, Ni-B합금(B:15mass%)을 Ar분위기중에서 arc용해하여 보턴상으로 제조한 후 8mmφ×50μmt로 가공하여 사포 1500번까지 연마하여 사용하였다. CIW(Critical Interlayer Width)측정용 시험편은 제조된 보턴상합금을 Fig.1에 나타낸 바와 같이 썬기형태로 가공한 후 사포로 연마하여 사용하였다. 여기서 CIW란 생성상이 생성되지 않는 입계 접합부 폭을 의미한다.

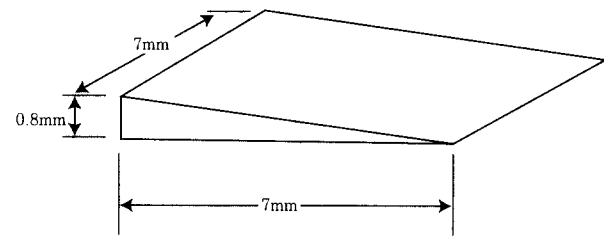


Fig. 1 Dimension of insert metal used for bonding of CIW specimen

Table 1 Chemical compositions of materials used (mass%)

Materials		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	Nb	B	P	Fe
Base metal	KHR35CW	0.45	1.78	0.4	35.0	26.7	0.42	0.64	1.26	-	-	Bal.
Insert metal	MBF-20	-	4.5	-	Bal.	7.0	-	-	-	3.2	-	3.0
	MBF-30	-	4.5	-	Bal.	-	-	-	-	3.2	-	-
	MBF-50	-	7.5	-	Bal.	19.0	-	-	-	1.5	-	-
	MBF-60	-	-	-	Bal.	-	-	-	-	-	11.0	-
	MBF-80	-	-	-	Bal.	15.0	-	-	-	4.0	-	-

2.3 액상확산접합방법

모재의 피접합면을 습식연마에 의해 사포 1500번까지 연마하고 인서트금속과 함께 아세톤으로 초음파세척한 후 접합시료의 사이에 인서트금속을 삽입하여 접합하였다. CIW 측정용 시험편은 Fig.2에 나타내는 썩기모양의 인서트금속 및 0.8mm²의 W 와이어를 삽입한 시험편을 사용하였다. 접합은 13.3mPa의 진공 분위기 중에서 소정의 온도까지 10K/s의 가열속도로 고주파유도 가열하였으며, 접합후에는 노냉하였다. 또한, 접합압력은 20MPa로 하였으며, CIW 측정용 시험편에는 접합압력을 부가하지 않았다.

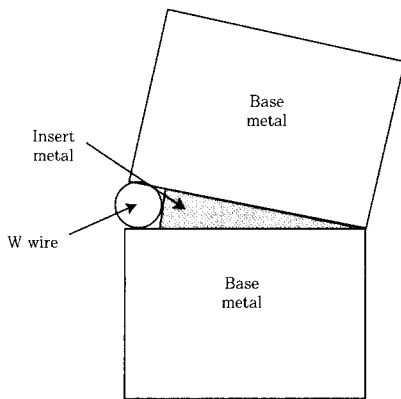


Fig. 2 Configuration of the specimen for measuring CIW

2.4 조직관찰 및 원소분석방법

접합부 조직은 10%수산수용액을 사용해서 전압 4V, 시간 15s의 조건으로 전해에칭하여 SEM으로 관찰하였다. 접합부 근방의 원소분석은 EDX 및 EPMA를 사용하여 행하였다. 또한, 생성상 량의 측정에는 접합부 중앙의 약 6mm에 걸쳐 접합층 및 생성상의 면적을 화상처리장치로 측정하여 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인서트금속 후보재의 선정

액상확산접합에 사용되는 인서트금속을 개발함에 있어, 인서트금속이 구비해야 할 조건은 ①모재보다 용점이 충분히 낮아야 한다 ②접합층내에 생성상이 생성되지 않아야 한다 ③접합부는 모재와 동등한 경도를 갖는다 ④접합시에 산화등의 영향을 최소화한다. 등을 들 수 있다. 여기서, 본 연구에서 사용한 모재인 내열주강의 액상확산접합에 사용하는 인서트금속의 조성

계는 양호한 접합특성을 나타낸다고 보고²⁾되고 있는 Ni기 합금으로 하였다. 우선, 인서트금속에 첨가되는 원소를 선정하기 위하여 시판되고 있는 Ni기 비정질 박막인 MBF-20, MBF-30, MBF-50, MBF-60 및 MBF-80을 대상으로 하여 예비적으로 접합부 조직관찰을 행하였다. Fig.3은 각 인서트금속으로 접합한 접합부 조직을 비교하여 나타낸 것이다. 접합은 각 인서트금속의 최적접합조건에서 행하였다. MBF-20 및 MBF-30의 접합부 조직은 대단히 유사하고, 양쪽 모두 접합층내에 생성상은 보이지 않았다. MBF-50 및 MBF-80의 접합부 조직도 MBF-20 및 MBF-30과 유사하나, 접합층내에 괴상의 생성상이 관찰되었다. 한편, MBF-60의 접합부 조직은 다른 접합부 조직과 명확히 다르고, 접합층내에 미세한 생성상이 다량으로 존재하였다. 그런데 본 모재는 고온 가열로용의 내열주강관으로 사용되기 때문에 요구되는 성능을 고려한 경우, 용점저하원소로서 P를 사용하는 것은 접합층내에 미세한 생성상이 다량으로 존재할 뿐만 아니라 내식성 면에서도 바람직하지 않다. MBF-20과 MBF-30을 비교할 때 접합부 조직에 큰 차이가 없는 것으로

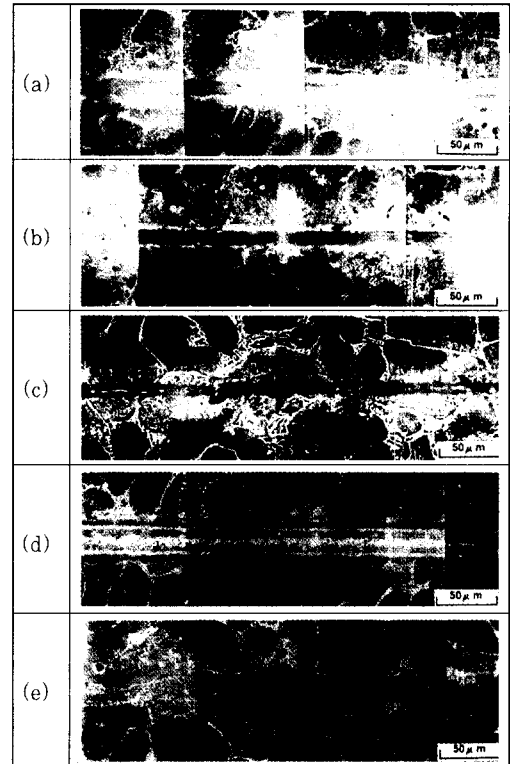


Fig. 3 SEM microstructures of bonded interlayer using various insert metals

(a) MBF-20, 1313K×600s (b) MBF-30, 1313K×600s (c) MBF-50, 1423K×600s (d) MBF-60, 1253K×600s (e) MBF-80, 1448K×600s

부터 Fe의 효과는 그다지 크지 않다고 생각된다. 또한, 인서트금속의 용점을 가능한 한 낮게 하기 위해서는 MBF-80과 같이 용점저하원소를 B 한 종류만 첨가하기에는 불충분하다고 판단된다.

이상의 사실로부터, 본 모재의 액상확산접합용의 인서트금속의 첨가원소로서 접합부의 내열성을 향상시키기 위하여 Cr, 용점저하원소로서 B 및 Si를 선택하여, 인서트금속의 화학조성의 최적화에 대해서 검토하기로 하였다.

3.2 인서트금속의 화학조성의 영향

3.2.1 접합층내 생성상

Ni-Cr-B-Si계 인서트금속으로 접합하였을 때 접합층내에 생성하는 생성상에 대해서 조사하였다. 대표적으로 Fig.4는 본 연구에서 제작한 인서트금속 중 AM1(Ni-2%B-4%Si-3%Cr)을 1423K에서 접합한 접합부의 조직 및 접합층내 생성상의 EDX분석결과를 대표적으로 나타낸 것이다. 접합층내 생성상은 접합층 중앙에 피상으로 생성하고 있고, EDX분석결과 이 생성상의 주요구성원소는 Cr임을 알 수 있다. 이들 생성상은 MBF-50의 접합부내 생성상인 $Cr_7(C,B)_3$ 의 EDX분석결과²⁾와 거의 유사한 것으로부터 M_7C_3 계의 생성상이라고 생각된다.

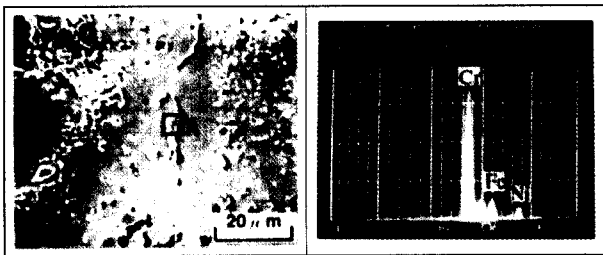


Fig. 4 Morphology of microconstituents in the bonded interlayer and its EDX spectrum

인서트금속의 화학조성을 최적화할 때 접합층내 생성상의 생성능은 접합부의 특성을 예측함에 있어 중요한 평가요소의 하나라고 말할 수 있다. 지금까지 접합부의 취성생성상의 생성거동을 정량적으로 취급하는 방법으로서 접합층의 형상을 썬기모양으로 하여 접합층 폭을 연속적으로 변화시켜, Fig.5에 나타낸 생성상이 생성하지 않는 접합부 폭(Critical Interlayer Width, 이하 CIW로 표기)을 가지고 평가하는 방법이 행해지고 있다. 예를 들면, E.Lugscheider는 스테인리스강의 액상확산접합에서 CIW를 측정하고, CIW이하의 인서트층 두께로 제어하여 접합을 행한 경우, 취

성생성상은 형성되지 않고 모재와 동등한 인장강도를 가지는 양호한 특성을 가지는 이음부가 얻어진다고 보고하고 있다¹⁴⁾. 또, Nakao등은 내열주강 HP40의 액상확산접합용 인서트금속을 개발할 때 평가요소로서 CIW를 이용하여 양호한 접합성을 가지는 인서트금속이 얻어지는 것을 보고하고 있다¹⁵⁾. Fig.6은 CIW측정용 시험편을 MBF-80을 사용하여 접합한 조직이다. 그림중의 A로 표시한 것이 접합부내 생성상이나, B부보다 접합층의 폭이 좁은 영역에서는 생성상이 관찰되지 않았다. 여기서, 본 연구에 있어서도 인서트금속의 화학조성을 최적화할 때 CIW를 접합층내의 생성상 생성능으로서 평가하였다.

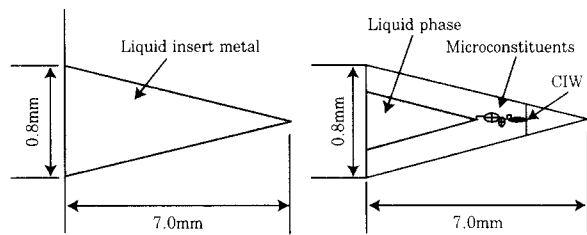


Fig. 5 Schematic illustration of CIW



Fig. 6 SEM microstructure of wedge type bonded interlayer

3.2.2 용점, 접합층의 경도 및 CIW의 변화

본 연구에서 액상확산접합용의 인서트금속을 개발함에 있어 내삽법을 적용하기 위한 평가요소의 데이터로 사용하기 위하여 B, Si 및 Cr의 첨가량을 다양하게 변화시킨 인서트금속에 대해서 용점, 접합후 접합층의 경도 및 CIW에 미치는 각 원소의 첨가량의 영향을 조사하였다. Fig.7의 (a)~(f)에는 Si 및 Cr의 첨가량을 일정하게 하고, B의 첨가량만을 다양하게 변화시킨 때의 용점, 접합층의 경도 및 CIW의 변화를 나타낸 것이다. 용점 및 CIW는 모두 B의 첨가량의 증가에 따라 감소하였다. 또한, B량이 4%인 동일조건에서 비교할 때 용점은 Si함유량이 많을수록 감소하고, CIW는 Si 및 Cr량이 많을수록 감소하는 경향을 나타내었다. 접합층의 경도에 있어서는 B의 첨가량에 따른 일정한 경향은 보이지 않았다. Fig.8의 (a)~(f)는 B 및 Cr의 첨가량을 일정하게 하고, Si의 첨가량만을 다양하게

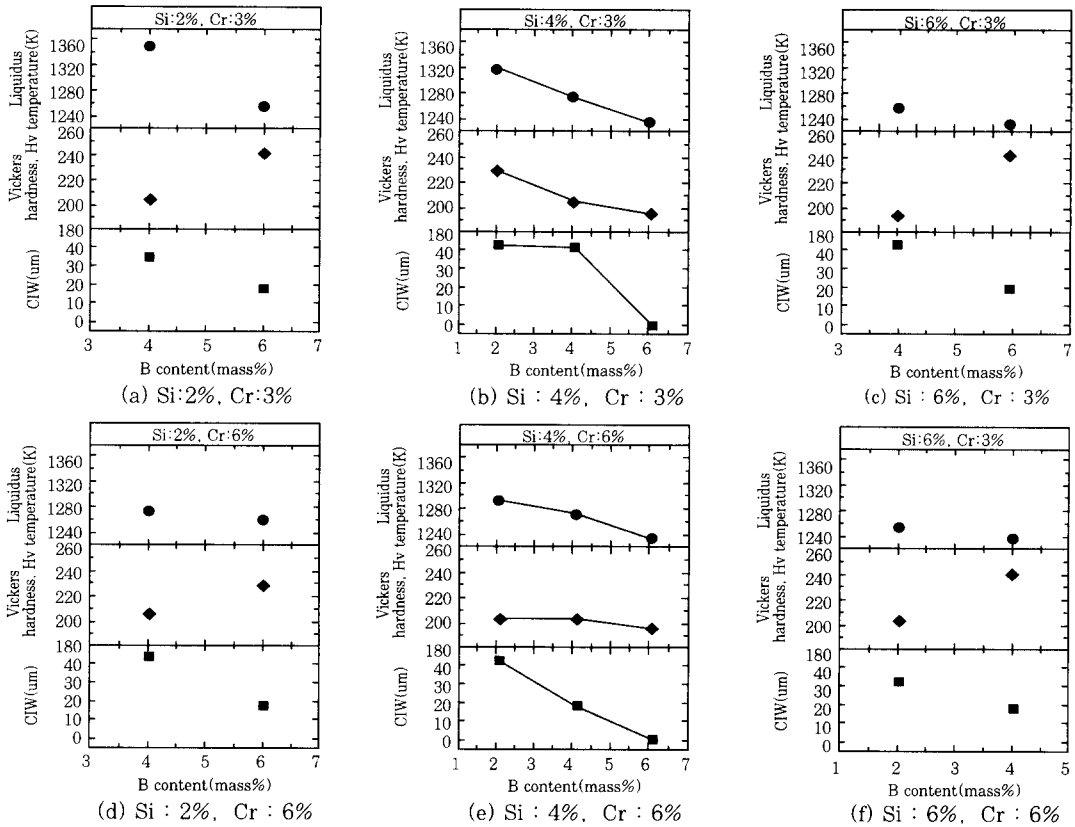


Fig. 7 Effect of boron content on the liquidus temperature, hardness of bonded interlayer and CIW

변화시킨 때의 용점, 접합층의 경도 및 CIW의 변화를 나타낸다. B의 첨가량에 따른 변화와 동일하게 용점 및 CIW 모두 Si의 첨가량의 증가에 따라 감소하였으며, 접합층의 경도는 Si의 첨가량에 따른 특별한 경향은 보이지 않았다. 또한, Si량이 4%인 동일조건에서 비교할 경우, 용점 및 CIW는 B량이 많을수록 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 B량이 6%일 때는 CIW가 0이었다. B 및 Si의 첨가량을 일정하게 하고, Cr의 첨가량만을 여러 종류로 변화시킨 때의 용점, 접합층의 경도 및 CIW의 변화를 Fig.9의 (a)~(g)에 나타낸다. 용점 및 CIW는 Cr량이 증가함에 따라 저하하는 경향을 나타내나, B 및 Si량에 따른 영향에 비해 그다지 차이가 없다. 접합층의 경도는 특별한 경향을 보이지 않았다.

이상으로부터, 용점저하원소인 B 및 Si은 인서트금속의 용점을 저하시키나, CIW도 동시에 저하시키기 때문에 B 및 Si량의 증가는 접합층내에 생성상이 생성하기 쉽게하는 효과가 있다는 것을 알 수 있다. Cr의 경우는 용점의 변화에 크게 기여하지 않으며, 첨가량의 증가에 따라 CIW가 약간 감소하고 있는 것으로부터, 접합층내에 생성상을 생성하기 쉽다고 판단되어진다.

3.3 인서트금속의 화학조성의 최적화

3.3.1 평가함수 및 목표값의 설정

일반적으로 인서트금속의 성능평가는 접합부의 강도 외에 내식성이나 작업효율성등 복수의 평가요소에 의해 이루어져야 하나, 여러개의 평가요소를 동시에 최적화하기는 곤란하다. 즉, 액상확산접합에서는 평가요소의 목적함수를 수치값으로 정량화하여 최적해를 논하기는 어렵다.

인서트금속의 개발에 내삽법을 적용함에 있어, 제어할 수 있는 인자를 변수로 한 요소를 평가함수로 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 평가함수를 $f_1(X)$: 용점, $F_2(X)$: 접합층의 경도, $f_3(X)$: CIW로 하여 최적의 인서트금속의 화학조성을 구하기로 하였다. 그러나, 성질이 다른 3개의 평가요소를 동시에 모두 최적화한 해를 얻는 것은 곤란하다. 여기서, 이 3개의 평가요소를 합리적으로 만족시키는 해를 얻기 위하여 목표 프로그램 수법을 적용하여 3개의 평가요소를 포함한 형태의 평가함수(Z)를 설정하였다. 평가함수(Z)는 식 (1)으로 표현할 수 있다^{13,15)}.

$$Z = \left(\sum_{i=1}^3 \left(\frac{f_i^* - f_i}{f_i^*} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

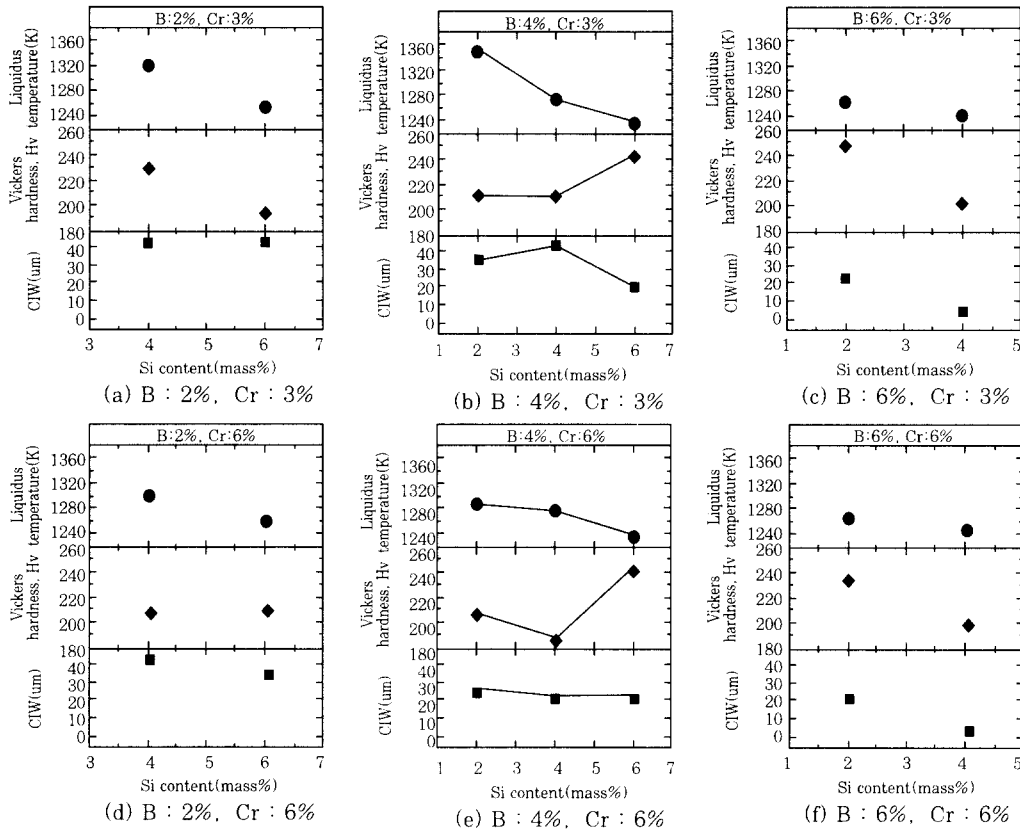


Fig. 8 Effect of Si content on the liquidus temperature, hardness of bonded interlayer and CIW

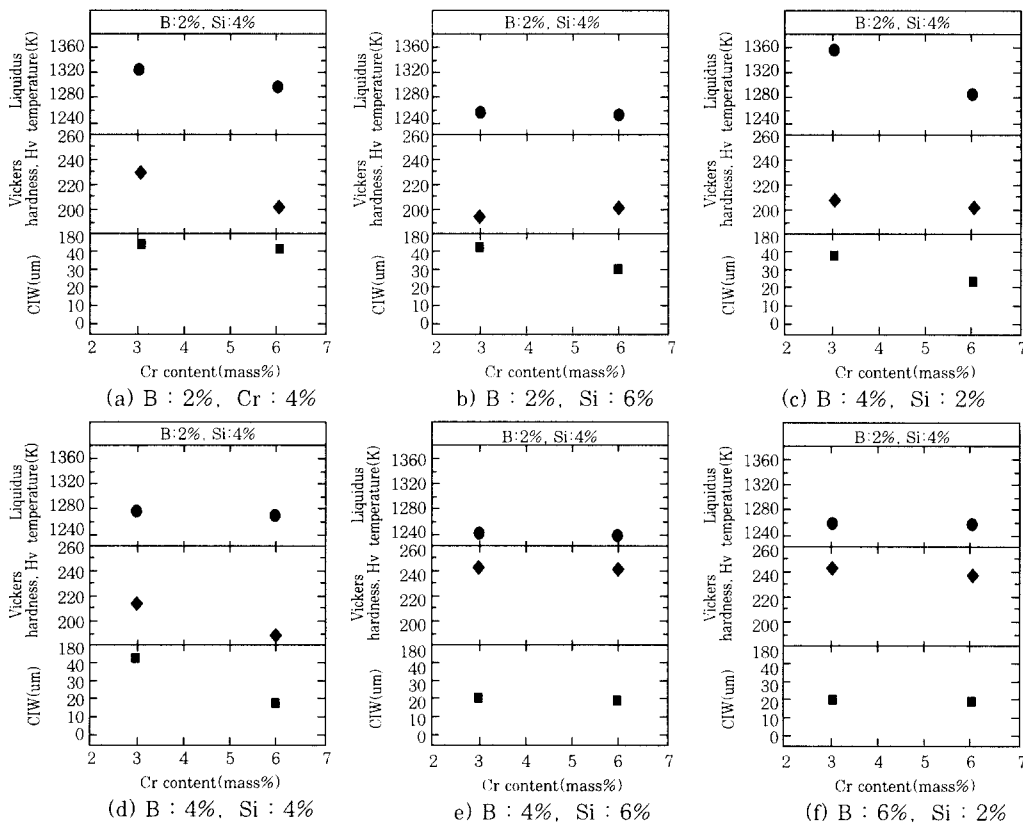


Fig. 9 Effect of Cr content on the liquidus temperature, hardness of bonded interlayer and CIW

여기서, f_i' 는 f_i 의 목표값이다. 식(1)으로부터, 탐색조성 영역내에서 각 요소 f_i 의 목표값 f_i' 를 결정할 수 있으면 f_i' 로부터의 거리가 최소로 되도록 X가 3개의 평가요소를 합리적으로 만족시킬 수 있는 답을 얻을 수 있다.

전술한 바와 같이, 인서트금속의 용점은 가능한 한 낮게 하고, 접합층내의 생성상의 생성을 억제하기 위하여 CIW는 크게 하는 것이 바람직하다. 여기서, 각 평가요소의 목표값은 탐색영역내에서 용점의 최소값 및 CIW의 최대값으로 하였다. 탐색영역내에서의 용점 및 CIW의 값은 본 연구에서 여러 조합으로 제작한 Ni-B-Si-Cr계의 인서트금속에서 측정한 데이터를 사용하여 내삽법에 의해 구한 추정값을 채용하였다. B 및 Si첨가량의 변화가 용점, 접합층의 경도 및 CIW에 많은 영향을 미치고 Cr에 의한 영향은 거의 없는 것으로부터, Cr량을 일정하게 하고 B 및 Si의 량을 변화시켜 등단면곡선을 얻었다. 이때 등단면곡선은 실험으로 구한 3개의 평가요소의 data를 사용하여 목표 프로그램 수법을 적용한 전용 프로그램을 이용하여 얻었다. Fig.10에는 내삽법을 적용하여 구한 용점 및 CIW의 목표값을 포함하여 등Cr첨가량 단면을 나타낸다. (a) 및 (b)는 Cr량을 3%로 하였을 때 용점 및 CIW의 단면을 각각 나타낸 것이다. 탐색영역에서 용점의 최소값 및 CIW의 최대값은 각각 1202K 및 83 μ m이었다. 접합층의 경도는 모재와 같은 정도인 것이 바람직하기 때문에 목표값은 모재의 정도와 동일값으로 하였다.

이상으로부터, 본 연구에서 구한 각 평가요소의 목표값은 용점 : 1202K, CIW : 83 μ m, 접합층의 경도 : Hv211로 하였다.

3.3.2 최적 인서트금속 화학조성의 결정

액상화산접합에 사용하는 인서트금속의 화학조성을 최적화하기 위하여 합금원소의 첨가량을 변수로 하여, 용점, 접합층의 경도 및 CIW의 3종의 평가요소를 평가함수(Z)를 이용해서 종합적으로 평가하여 합금원소의 최적첨가량을 예측하였다. 탐색은 탐색영역 전체에 균일하게 데이터가 존재하도록 하고 서서히 데이터 수를 증가시켜 가면서 행하였다. Fig.11에 데이터 수에 따른 평가함수(Z)의 최소값을 적용한 인서트금속의 화학조성과 Z의 최소값의 변화를 나타낸다. 데이터 수가 10점이하에서는 최소값을 적용한 화학조성, Z의 최소값 모두 크게 진동하고 있으나, 데이터 수가 11점이 되면서부터 집속되어 가는 경향이 나타나며, 데이터 수 12점이상에서는 화학조성, 평가함수(Z) 모두 일정한 값을 나타내었다. 이로부터, 데이터 수를 14점으로 한 경우, 내삽법에 의해 평가함수(Z)의 최소값을

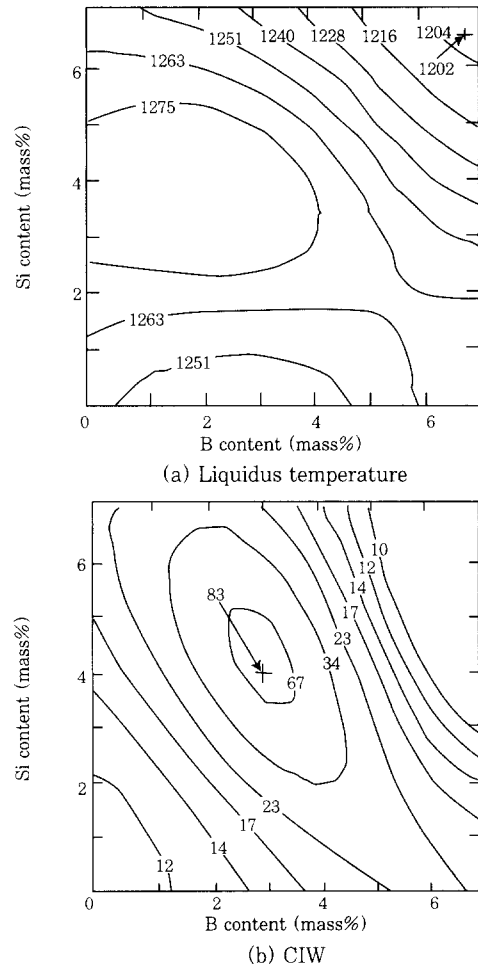


Fig. 10 Contour map of liquidus temperature and CIW of the insert metal

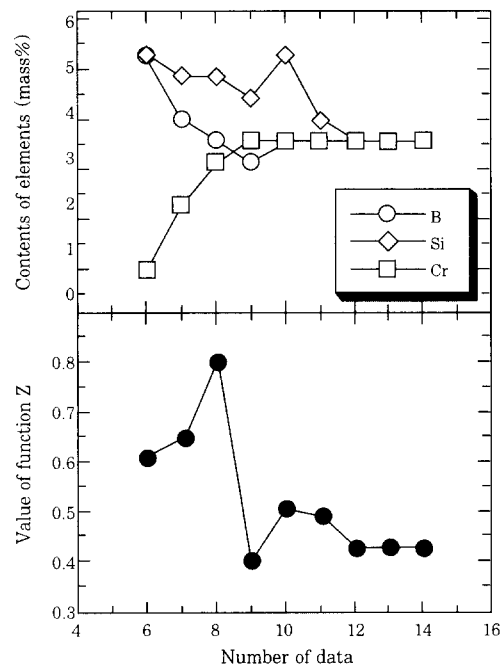


Fig. 11 Relation among number of data, value of function Z and the optimum composition

포함한 등Cr 첨가량 단면을 구하였다. 이를 Fig.12에 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 본 모재의 액상확산접합에 사용하는 인서트금속의 합금원소의 최적첨가량은 B : 3%, Si : 4%, Cr : 3%임을 알 수 있다. 이 최적화한 화학조성을 가지는 인서트금속을 실제로 제작하여 용접, 접합층의 경도 및 CIW를 측정하여 내삽법에 의한 계산치와 비교하였다. 내삽법에 의한 계산치는 용접 : 1299K, 접합층의 경도 : Hv220.3, CIW : 83 μ m이었으며, 실측치는 용접 : 1283K, 접합층의 경도 : Hv218.6, CIW : 78.2 μ m이었다. 이로부터, 화학조성을 최적화하여 실제로 제작된 인서트금속의 평가요소는 내삽법에 의해 얻어진 계산결과와 잘 대응하고 있는 것을 알 수 있으며, 내삽법에 의해 얻어진 계산결과는 타당성이 있는 것으로 판단된다.

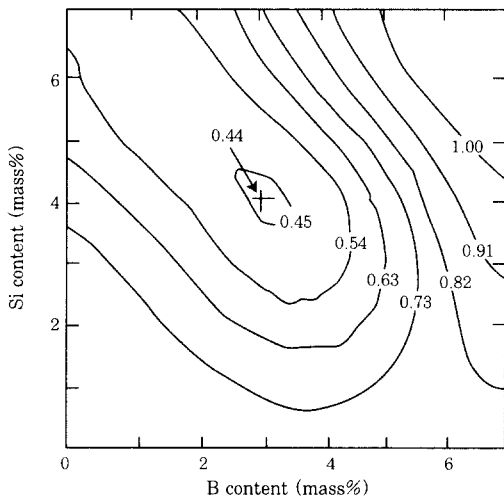


Fig. 12 Contour map of function Z of the insert metal

4. 결 론

본 연구에서는 내열주강에 액상확산접합을 행할 경우, 모재와 동등한 기계적특성을 가지는 접합부를 얻는 것을 목적으로, Ni기 인서트금속의 접합성에 미치는 합금원소의 영향을 조사함과 동시에 내삽법에 의해 최적화된 화학조성을 가지는 인서트금속을 개발하고자 검토하였다. 이론 및 실험을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 인서트금속의 화학조성에 따른 접합성에 대해 조사한 결과, 용점저하원소인 B, Si 및 Cr의 첨가량의 증가에 따라 용점 및 CIW는 저하하였으며, 접합층의 경도는 일정한 경향이 없었다.

2) 평가요소로서 용점, 접합층의 경도 및 CIW를 선정하여 내삽법을 이용한 수리계획법에 의해 인서트금속의 화학조성을 최적화한 결과, 인서트금속의 합금원소의 최적첨가량은 B : 3%, Si : 4%, Cr : 3%이었다.

3) 화학조성을 최적화하여 제작한 인서트금속의 용점, 접합층의 경도 및 CIW는 내삽법에 의해 얻어진 계산결과와 잘 대응하고 있는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. K.Nishimoto, K.Saida, D.Kim and Y.Nakao : Transient Liquid Phase Bonding of Ni-base Single Crystal Superalloy, CMSX-2, ISIJ International, 35-19(1995), p1298
2. 김대업 : Fe-35Ni-26Cr 주강 액상확산접합부의 고온기계적특성에 미치는 접합조건의 영향, 대한용접학회지, 18-4(2000) 게재예정
3. W.F.Gale and E.R.Wallach : Microstructural Development in Transient Liquid Phase Bonding, Metall. Trans., 22A(1991), p2451
4. 鈴木, 恩沢, 田村 : 鐵基耐熱合金A286의液相인서트擴散接合, 溶接學會誌, 50-7(1981), p686
5. 강정운, 박노식, 김우열, 박세운 : 304 스테인리스강과 구조용 탄소강의 천이액상확산접합에 관한 연구, 대한용접학회지, 9-4(1991), p28
6. 鈴木, 恩沢, 田村 : 各種Ni基超合金의TLP接合性の比較, 溶接學會誌, 49-7(1980), p462
7. D.S.Duvall, W.A.Owczarski and D.F.Paulonis : TLP Bonding : A New Method for Joining Heat Resistant Alloys, Weld. J., 53-4(1974), p203s
8. 金大業 : Ni基單結晶超合金의液相擴散接合에關する研究, 大阪大學學位論文, (1996)
9. 鈴木, 恩沢, 田村 : 液相擴散接合性に及ぼす인서트金屬의アモルファスの效果, 溶接學會論文集, 3-2(1985), p326
10. 中尾, 西本, 篠崎, 姜, 重田 : 合金粉末を用いた液相인서트金屬擴散接合法の開發, 溶接學會論文集, 9-4(1991), p550
11. 강정운, 김인배, 이상래 : Fe기 내열합금의 액상확산접합용 삽입금속의 개발에 관한 연구, 대한용접학회지, 13-3(1995), p291
12. 猪飼靖 : チタン用ろう材開發への内挿法の適用, 日本金屬學會春季大會一般講演概要, (1989), p146
13. I.P.Shagen : Interpolation in Two Dimension a New Technique, J. Institute Maths Applics, 23(1979), p53
14. E.Lugscheider : High Temperature Brazing of Stainless Steel with Nickel-Base Filler Metals BNi-2, BNi-5 and BNi-7, Weld. J., 62-6(1983), p160s
15. 中尾, 西本, 藤谷 : アロイ800の液相擴散接合用인서트金屬の開發, 溶接學會論文集, 12-4(1994), p539