

고상확산접합된 Haynes230의 인장성질에 미치는 접합조건의 영향

강길모* · 전애정** · 김홍규*** · 홍성석*** · 강정윤*†

*부산대학교 재료공학부

**부산대학교 하이브리드소재솔루션 국가핵심연구센터

***국방과학연구소

Effect of Bonding Condition on the Tensile Properties of Diffusion Bonded Haynes230

Gil-Mo Kang*, Ae-Jeong Jeon**, Hong-Kyu Kim***, Sung-Suk Hong*** and Chung-Yun Kang*†

*Dept. of Material Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**National Core Research Center(NCRC), Pusan National University, Busan 609-735, Korea

***Agency for Defense Development, Daejeon 305-600, Korea

†Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr

(Received May 28, 2013 ; Revised June 17, 2013 ; Accepted June 25, 2013)

Abstract

This study investigated the effect of bonding temperature and holding time on microstructures and mechanical properties of diffusion bonded joint of Haynes230. The diffusion bonds were performed at the temperature of 950, 1050, and 1150°C for holding times of 30, 60, 120 and 240 minutes at a pressure of 4MPa under high vacuum condition. The amount of non-bonded area and void observed in the bonded interface decreased with increasing bonding temperature and holding time. Cr-rich precipitates at the linear interface region restrained grain migration at 950°C and 1050°C. However, the grain migration was observed in spite of short holding time due to the dissolution of precipitates to base metal in the interface region at 1150°C. Three types of the fracture surface were observed after tensile test. The region where the coalesce and migration of grain occurred much showed high fracture load because of base metal fracture whereas the region where those did less due to the precipitates demonstrated low fracture load because of interface fracture. The expected fracture load could be derived with the value of fracture area of base metal (A_{BF}) and interface (A_{IF}), $Load=201A_{BF}+153A_{IF}$. Based on this equation, strength of base metal and interface fracture were calculated as 201MPa and 153MPa, respectively.

Key Words : Ni-base superalloy, Haynes230, Diffusion bonding, Tensile properties, microstructure, Bonding condition

1. 서 론

지난 수십 년간 우주항공산업, 플랜트 산업 등 고온의 환경에서 작동하는 장비 및 설비의 열교환 효율을 높이기 위하여 열교환기 제작 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{1,2)}. 열교환기는 얇은 판들로 구성되어 있으며 각각 판과 판 사이에 유로를 형성하고 이 유로를 통해 장비 및 설비에서 가열된 고온의 유체와 피

가열 유체가 서로 교대로 흘러 냉각 시키는 장치이다. 이러한 열교환기 제작에서 가장 중요한 기술은 각각 열판과 기기 몸체의 실링, 수밀, 기밀 등의 기술이 요구되며, 소재자체의 경우도 높은 내식성, 고온 특성이 요구된다³⁾.

기존 SUS계열 소재를 적용한 열교환기의 고온 특성 한계를 극복하기 위하여 최근에는 Ni기 초내열합금을 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다⁴⁻¹¹⁾. 특히 Ni-Cr-W-Mo합금으로 구성된 Haynes 230 Ni기 초

내열합금은 우수한 고온강도와 부식 환경에서의 탁월한 부식저항성을 가지며, 다른 고온 합금들에 비하여 낮은 열팽창 특성을 가지고 있어 고온형 열교환기 제작에 적합한 소재로 각광받고 있다¹²⁻¹⁵⁾.

열교환기 제작은 주로 진공 브레이징 접합을 통해 제작하고 있다^{4,16-19)}. 브레이징 접합은 삽입금속이 확산됨에 따라 확산층을 생성하거나 접합경계면에 금속간화합물이 형성될 수 있어 모재보다 낮은 열적, 기계적 성질을 가져 접합부 파단이 발생하는 단점이 있다. 반면 고상확산접합의 경우 두 모재간의 직접적인 접합으로 인해 접합부에 확산층 및 경계층이 생성되지 않으며, 접합부가 모재와 동일한 조직으로 구성되기 때문에 접합부 특성이 모재의 특성과 비슷한 성질을 가지는 장점이 있다^{6,7,10)}.

열교환기용 초내열합금의 고상확산접합에 관한 선행 연구결과로 Takeshi⁷⁾와 Sia K.⁸⁾은 각각 Inconel 617과 Hestelloy XR을 이용하여 고상확산접합 후 제작된 열교환기의 leak test를 진행하여 기밀성에 관한 연구결과를 보고한 바 있고, Zhang⁹⁾과 A.A. Shirzadi²⁰⁾ 등은 Inconel 718에 대하여 인장성질과 크립시험 특성에 미치는 석출상에 관한 연구 결과를 발표하였다. 이상의 선행 연구결과로부터 Inconel과 Hestelloy XR 등의 고상확산접합에 관한 연구 결과는 있지만, 고온강도와 부식성이 우수한 Haynes 230 Ni기 초내열합금의 고상확산접합에 관한 연구가 부족한 실정이다. 특히, Haynes230 소재는 Cr과 W 원소가 다량 함유되어 모재에 Cr-rich, W-rich 상이 존재하여 고상확산접합부의 계면이동에 영향을 미칠 것으로 예상되지만 이에 대한 체계적인 연구결과는 없다.

따라서 본 연구에서는 Haynes230 소재를 이용하여 접합온도와 유지시간을 변화시켜 고상확산접합 한 경우 접합부 계면조직을 검토 한 후 미세조직과 인장성질 사이의 상관관계를 체계적으로 검토하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 사용된 모재는 초내열합금인 Haynes 230을 사용하였고, 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 조직관찰용 접합시험편은 10mm × 10mm 크기로 기계적 연마를 통하여 마이크로까지 연마하여 사용하였다.

접합은 20°C/sec의 승온 속도로 원하는 접합온도까

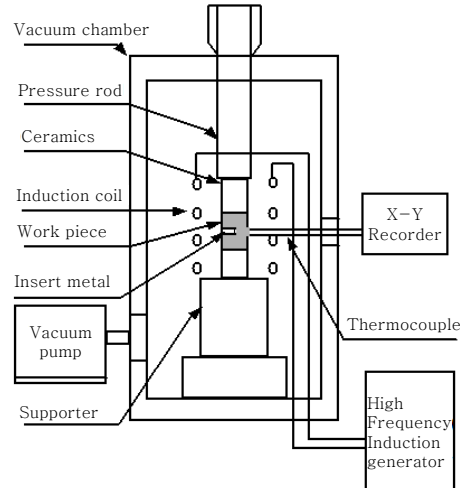


Fig. 1 Schematic illustration of bonding apparatus

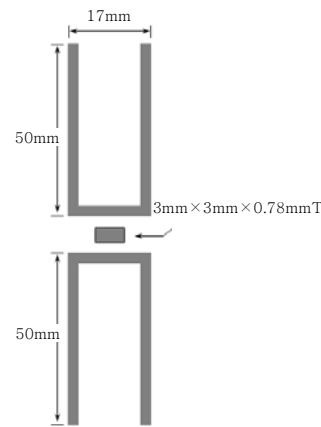


Fig. 2 Schematic illustration of tensile specimen

지 고주파 가열 유지한 후 공랭시켜 행하였다. 접합온도는 시험편의 접합계면 바로 직하에 열전대를 피커션 용접으로 부착하여 제어하고 측정하였다. 접합온도는 950°C, 1050°C, 1150°C와 유지시간은 30, 60, 120, 240분으로 변화시켰으며, 접합 분위기는 5×10^{-5} Torr의 고진공 분위기에서 접합압력을 4MPa로 가압하여 접합하였다. 본 실험에 사용한 접합 장치의 모식도를 Fig. 1에 나타낸다.

미세조직은 연마 후 Distilled water 30mL + HCl 20mL + H₂O₂ 3mL 액으로 부식하고 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였다. 인장 시험을 위한 시험편은 Fig. 2에 나타내었고, 크로스 헤드속도(Cross-head speed)는 1mm/min로 인장시험을 수행하였다.

Table 1 Chemical composition of Haynes 230

Material	Ni	Cr	W	Fe	Mo	Co	Mn	Si	Al	C	La	B
Haynes 230	Bal.	22.0	14.0	3.0	2..0 Max	5.0 Max	0.5	0.4	0.3	0.10	0.02	0.015~5.0

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합조건에 따른 보이드율의 변화

Fig. 3는 접합온도와 유지시간에 따른 접합부 가장자리의 접합 여부를 파악하기 위하여 관찰한 각각의 단면 거시조직과 (a)에 A부분을 확대한 SEM조직(g)을 나타낸다. 접합계면 왼쪽 가장자리에서부터 긴 검은 선이 끝나는 경계 A영역을 확대한 SEM조직(g)을 보면 검은 선은 양 모체가 전혀 접합되지 않은 미접합부임을 알 수 있다. 접합온도가 낮을수록 접합시간이 짧을수록,

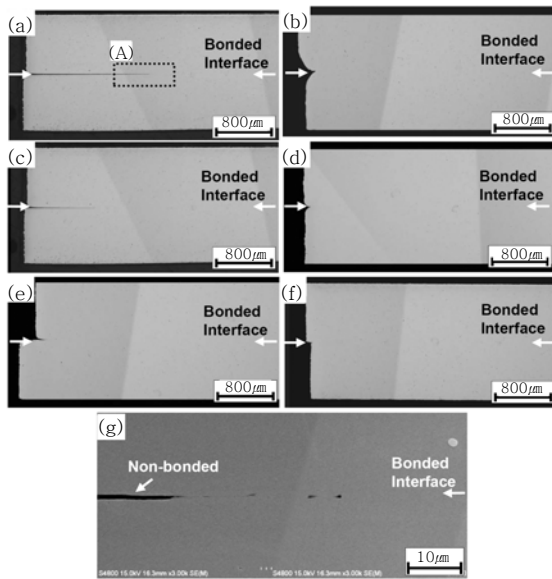


Fig. 3 Optical micrograph of bonded interface with bonding temperature and holding time. (a) 950°C-30min, (b) 950°C-240min, (c) 1050°C-30min (d) 1050°C-240min, (e) 1150°C-30min (f) 1150°C-240min, SEM micrograph (g) denoted as □ in (a)

시편 가장자리에 미접합부의 길이가 긴 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 접합온도와 유지시간에 따른 접합 계면에 형성된 보이드의 분포를 나타낸 것이고, 이들 사진은 에칭하지 않은 상태에서 관찰한 결과이다. 접합온도가 가장 낮은 950°C에서 유지시간이 60분 이하의 시편 계면((a), (b))에서는 긴 직선상의 보이드가 존재하지만, 120분(c)에서는 구형으로 존재하고, 보이드 비율도 감소하는 경향이 보인다, 240분 (d)에서는 보이드가 관찰되지 않는다. 1050°C에서 30분 유지한 시편 (e)의 경우에도 가는 직선상의 보이드가 존재하지만, 60분 유지한 시편 (f)에서는 보이드가 존재하지 않는다. 그리고 1150°C에서 30분 (g)와 그 이상 (h)의 유지시간에서 보이드는 관찰되지 않는다.

Fig. 5의 (a)와 (b)는 각각 미접합부의 점유율과 접

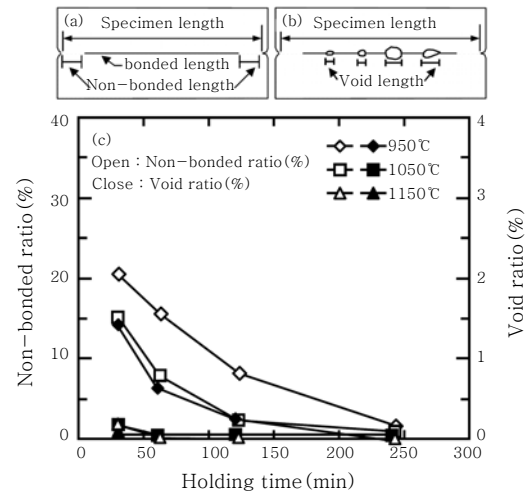


Fig. 5 Effect of bonding temperature and holding time on the non-bonded ratio and void ratio

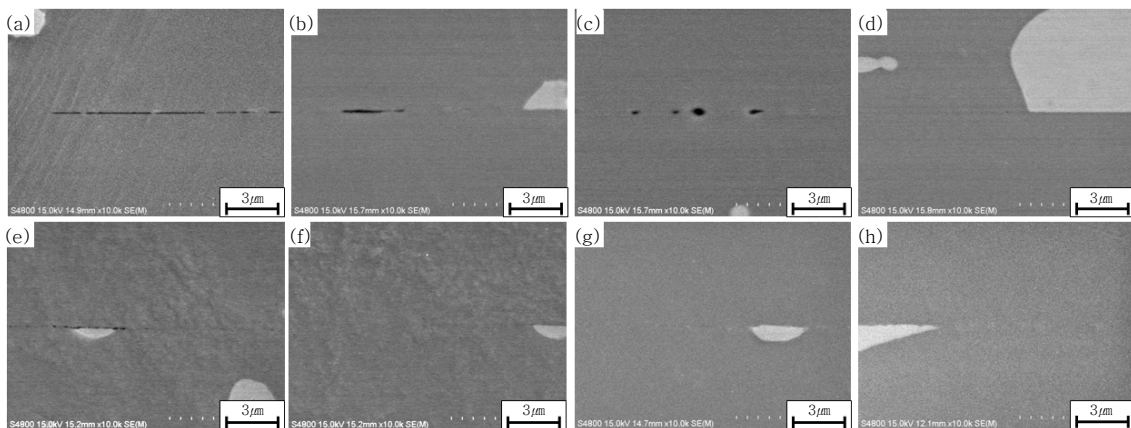


Fig. 4 SEM micrograph of bonded interface with bonding temperature and holding time. (a) 950°C-30min (b) 950°C-60min, (c) 950°C-120min (d) 950°C-240min, (e) 1050°C-30min (f) 1050°C-60min, (g) 1150°C-30min (h) 1150°C-60min

합계면에 존재하는 보이드율을 정의하기 위한 모식도를 나타낸 것으로, 측정 길이(시편 길이)에 대한 미접합부의 길이와 보이드의 장축 길이의 비로 정의하였고, 측정된 결과를 (c)에 나타낸다. 미접합 점유율 (open mark)은 온도가 높을수록 급격히 감소하고, 1150°C에서는 60분 이상 유지하면 존재하지 않는다. 한편 보이드율 (close mark)은 접합온도가 낮은 950°C에서만 많이 형성되고, 유지시간이 길어짐에 따라 급격히 감소한다. 1050°C 이상에서는 보이드가 거의 형성되어 있지 않음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 접합온도가 높을수록, 미접합부와 보이드율은 감소하고, 1150°C에서는 60분 이상 유지하면 미접합부와 보이드와 같은 결함이 존재하지 않는 접합부를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.2 접합조건에 따른 미세조직의 변화

Fig. 6는 접합온도와 유지시간에 따른 접합 계면의 SEM 미세조직 변화를 나타낸 것이다. 접합온도가 가장 낮은 950°C에서 (a), (b)는 유지시간에 관계없이 직선상의 접합계면이 존재한다. 반면 1050°C-240분 (d) 조건에서는 화살표로 표시된 영역에서 입계이동의 흔적이 미약하게 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 1150°C, 30분 (e)의 짧은 유지시간에서도 직선의 입계가 사라지고 계면이동이 발생하고, 유지시간이 240분으로 길어짐에 따라 증가하는 경향이 나타난다.

Fig. 7은 접합조건에 따른 계면이동률(%)을 나타낸 것이다. 여기서 계면이동률(M)은 모식도(a)에 나타낸 것처럼, 접합계면 전체 길이에 대한 계면이동한 계면의 길이(황축)의 비로 정의 하였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 950°C와 1050°C에서 유지시간의 증가에 따른

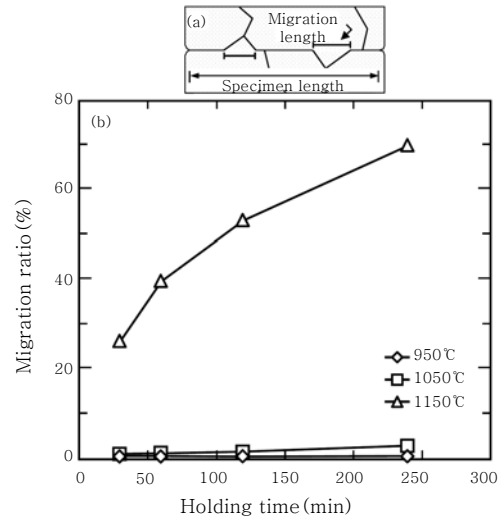


Fig. 7 Effect of bonding temperature and holding time on the migration ratio

계면이동률의 변화가 아주 미미하지만, 접합온도가 높은 1150°C에서는 짧은 유지시간에도 계면이동이 많이 일어나고, 유지시간이 길어짐에 따라 급격히 증가함을 볼 수 있다. 한편 Fig. 6에서 계면이동 영역과 일어나지 않은 영역의 미세조직을 비교로부터 접합계면에서 계면 이동은 석출상과 상관관계가 있음을 볼 수 있다. 우선 이들 석출상이 무엇인지를 알아보기 위하여, 각 온도에서 30분 동안 유지한 시편을 선택하고, EDX로 성분 분석하여 보았다.

Fig. 8은 Fig. 6 (a), (c)와 (e)의 조직 사진에서 □로 표기된 영역을 확대한 SEM 조직 사진이고, Table 2는 EDX로 각 상의 성분을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 이 결과로부터, 접합계면에 존재하는 미세한 흰색 상들(1~3)은 Cr을 주축으로 하는 탄화물인 것으로 추측되고, 이들 상들은 모재의 결정립계에 존재

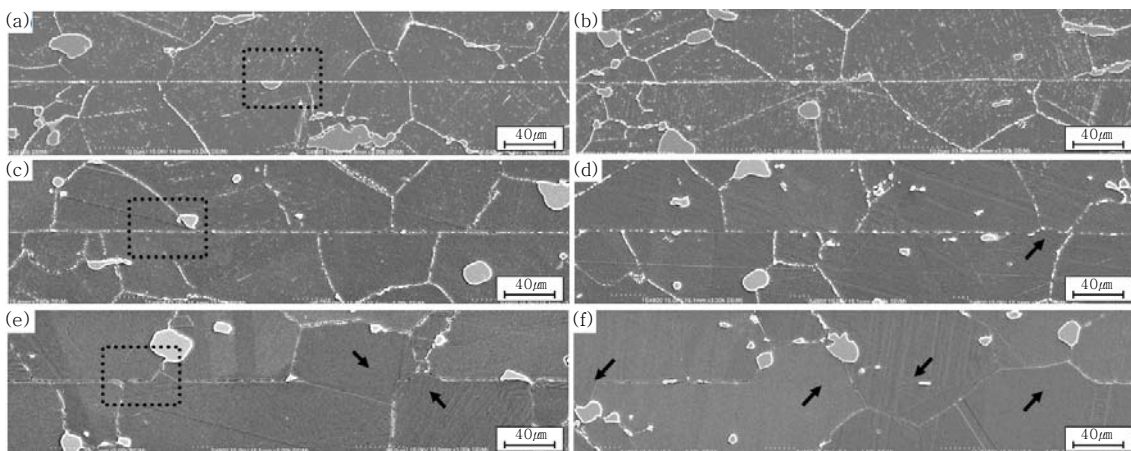


Fig. 6 SEM micrograph of the bonded interface with bonding temperature and holding time (7MPa) (a) 950°C-30min, (b) 950°C-240min (c) 1050°C-30min, (d) 1050°C-240min, (e) 1150°C-30min, (f) 1150°C-240min

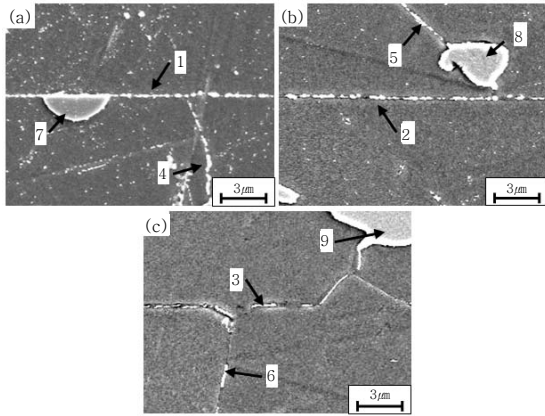


Fig. 8 SEM micrograph of bonded interface with bonding temperature at 30min : (a) 950°C, (b) 1050°C, (c) 1150°C

Table 2 EDX analysis result pointed at Fig. 7

NO	Element Composition(at%)				Phase
	Ni	Cr	W	C	
1	8.9	54.3	6.4	30.4	Cr-rich
2	10.6	49.1	5.1	36.2	Cr-rich
3	13.1	50.1	5.6	36.8	Cr-rich
4	9.3	51.4	6.5	32.8	Cr-rich
5	5.3	56.7	6.7	31.3	Cr-rich
6	12.6	48.1	3.1	36.2	Cr-rich
7	22.5	18.2	37.1	22.2	W-rich
8	25.9	15.6	34.9	23.6	W-rich
9	24.2	16.2	32.5	27.1	W-rich

한 미세한 상들(4~6)과 동일한 상임을 알 수 있다. 조대한 석출상들(7~9)은 W를 주축으로 하는 탄화물인 것으로 추측된다. 또한 접합계면 혹은 결정립계에 존재하는 Cr계 탄화물은 접합온도가 증가함에 따라서 감소하는 경향이 있고, 또한 유지시간이 증가함에 따라서 감소하는 경향이 있다.

이 결과로부터, 950°C와 1050°C에서 유지시간을 증가시켜도 Cr계 탄화물의 고용이 거의 일어나지 않고, 석출물은 입계를 고착화시켜 계면(입계)이동을 어렵게 하기 때문에 입계 이동률이 아주 낮은 것으로 생각된다. 그러나 1150°C에서 짧은 유지시간에도 석출물이 고용되어, 계면 이동의 방해 작용이 없어지기 때문에 계면 이동이 활발히 일어나는 것으로 생각된다.

일반적으로 등온에서 결정립 성장은 실험적으로 (1) 식으로 표현되는 것으로 알려져 있다²¹⁾. 여기서 D는 결정립의 크기이고, k는 상수이며, t는 시간이다. n값은 대체로 0.5보다 적은 값이다. 이 식을 계면이동에

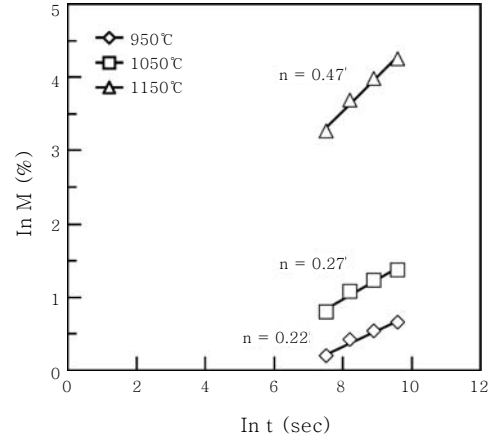


Fig. 9 Effect of bonding temperature and holding time on the migration ratio

적용하면, (2)식과 같이 된다. 여기서 M은 계면이동률이다.

$$D = kt^n \tag{1}$$

$$M = kt^n \tag{2}$$

Fig. 9는 (2)의 양변에 ln값을 취한 ln t와 ln M의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 n값은 직선의 기울기이다. 일반적으로 입계성장이 확산율속에 의해 일어나는 경우, n값은 0.5이다. 950°C와 1050°C에서 각각 0.22와 0.27로 매우 낮은 값을 갖는다. 이것은 Cr계 탄화물에 의한 계면 이동이 방해되었기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 1150°C의 n값은 0.47로 거의 0.5에 가깝다. 이것은 Cr계 탄화물에 의한 계면이동 방해 작용이 거의 해소되었기 때문인 것으로 생각된다.

3.3 접합조건에 따른 인장성질

열교환기는 박판과 박판의 접합으로 제조되고, 이러한 접합부의 인장강도를 측정하기가 어렵기 때문에, Fig. 2와 같이 접합하여 평가하였다.

Fig. 10는 접합온도와 유지시간을 변화시킨 경우, 접합부의 파단하중의 변화를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 11은 파단된 시편의 파면과 파면을 분류한 모식도를 나타낸 것이다. 파면은 크게 3가지로 분류되고, Fig. 10에서 접합온도와 유지시간이 증가함에 따라 파단하중이 증가하는 경향이 나타났고, 모재파단부, 계면파단부, 미접합부의 면적에 따라 파단하중의 차이가 발생하였다. 강도가 아주 높은 것(S)은 거의 모재 파면이고, 강도가 아주 낮은 것(W)은 미접합부 파면의 면적이 넓고, 중간 정도의 강도를 가진 시편(M)은 모재+

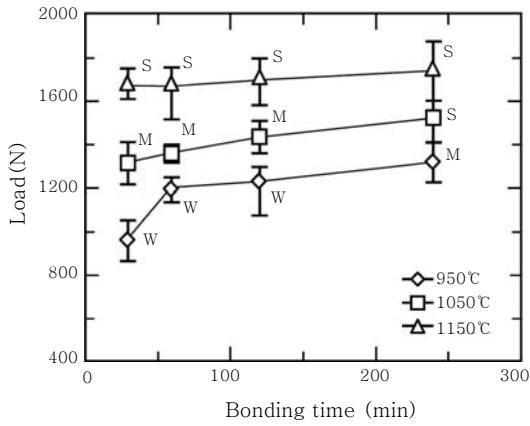


Fig. 10 Load with bonding condition

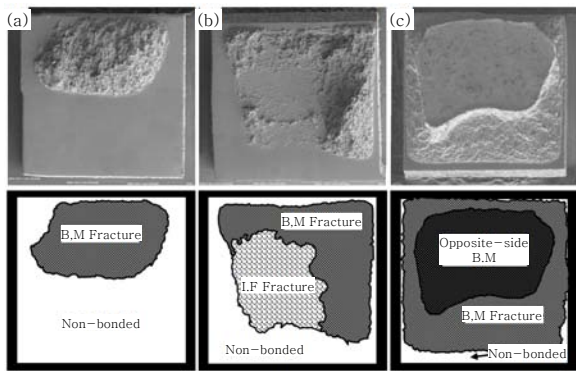


Fig. 11 Fractograph of fractured specimens (a) W-type, (b) M-type, (c) S-type

계면 파면이 혼합되어 있음을 볼 수 있다.

이와 같은 접합조건에 따라 인장성질이 차이가 나는 이유를 고찰하기 위하여 파면과 단면과의 상관관계를 검토하고자, 모재와 접합계면 근처에서 파단된 파면을 갖는 시편(950°C-240분)을 Ni 코팅한 후, 절단하고, 연마와 에칭하여 단면조직을 현출한 후, 코팅층을 박리시킨 시편에 대하여 SEM으로 파면과 단면을 대응시켜 관찰하였다.

Fig. 12의 (a)는 파면과 단면을 대응시킨 SEM사진이고, (b)~(d)는 파면의 SEM 조직을 나타낸 것이다. 모재에서 파단된 파면(b)은 딴플(dimple) 파면인 것으로부터 연성파괴 한 것을 알 수 있다. (c)는 미접합부에서 파단된 파면으로 접합 전의 표면 상태와 동일하며, (d)는 접합계면 근처에서 파단된 파면으로, 얇은 딴플(shallow dimple)파면과 미접합부 파면이 혼재되어 있는 것을 볼 수 있다.

한편 접합부의 강도 혹은 파단하중은 (모재의 강도 x 모재파단부 면적) + (접합계면 강도 x 접합계면 파단부의 면적)로 나타낼 수 있다. 그러나 접합계면의 강도

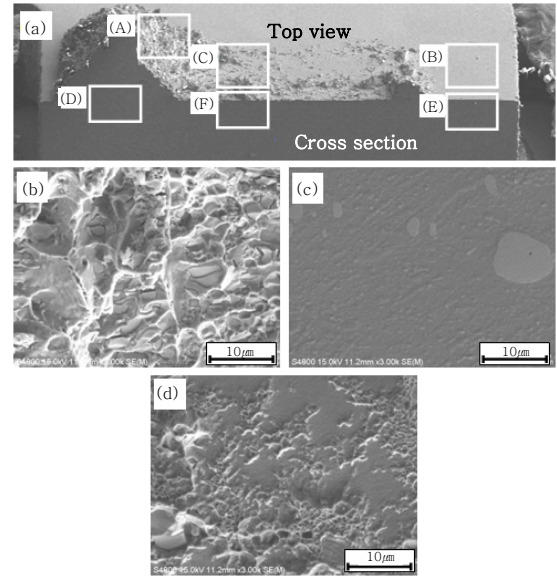


Fig. 12 SEM Micrograph (a) and fractograph (b), (c) and (d) at regions denoted as A, B and C in (a), respectively [bonding condition : 950°C, 240min]

를 알 수 없기 때문에 모재에서 일어난 파단부의 면적과 계면에서 일어난 면적과 파단하중 사이의 상관관계를 다중회귀분석으로 접합부 하중을 구하는 식을 도출한 결과, 수식 (3)와 같이 얻어졌다.

$$Load = 201A_{BF} + 153A_{IF} \tag{3}$$

여기서, Load는 접합 하중이고, A_{BF} 는 모재파단부 면적이고, A_{IF} 는 계면파단부 면적이다.

Fig. 13은 수식 (3)로 계산한 하중치와 실험치 사이의 상관관계를 나타낸 것으로 결정상수가 0.92인 것으로부터 서로 대응관계가 아주 양호함을 알 수 있다.

한편 수식 (3)에서 A_{BF} 와 A_{IF} 앞의 상수는 하중에

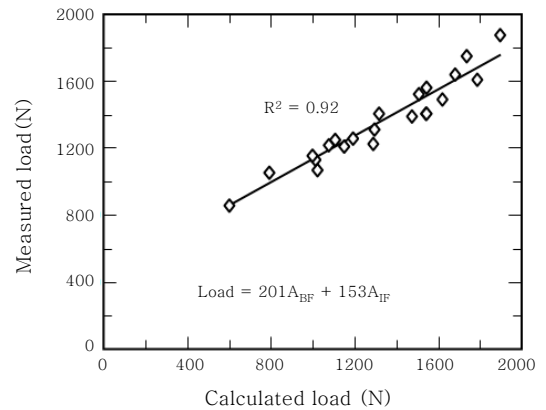


Fig. 13 Correlation between measured load and calculated load

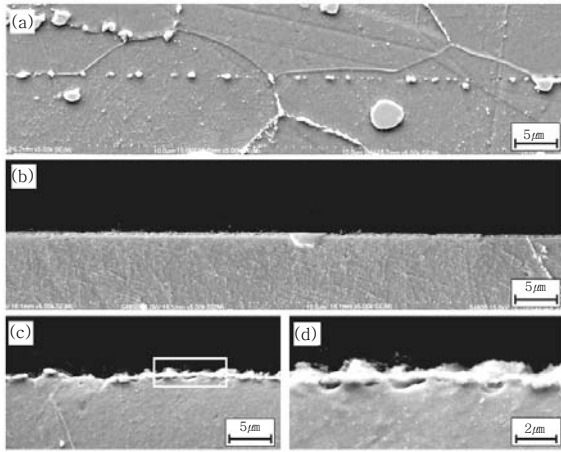


Fig. 14 Cross section (a), (b) and (c) regions denoted as D, E and F in (a) of Fig. 12, respectively and (d) denoted as □ in (c) [bonding condition : 950°C, 240min]

기여하는 각각의 강도를 나타낸 것으로 계면 근처에서 파단된 부위의 강도(153)가 모재의 것(201)보다 낮음을 알 수 있다. 따라서 계면파면과 모재파면이 발생한 영역의 단면을 비교하면, 각각의 파면에 따라 왜 강도 차이가 나는가를 알 수 있을 것으로 예상되어, 파면과 단면조직 사이의 상관관계를 검토하고, 강도와 상관을 고찰하여 보면, 다음과 같다.

Fig. 14은 Fig. 12 (a)에서 D~F로 표시된 □ 영역을 확대한 단면 SEM조직이다. (a)의 조직으로부터, 모재에서 파단된 영역의 계면 미세조직의 특징은 계면에 평행한 직선 입계가 없고, 대부분 양모재의 결정립이 서로 합체되고, 입계이동이 진행되어 있음을 볼 수 있다. 반면에 미접합부의 단면조직 (b)는 변형이 없는 것으로부터, 원모재 표면 상태와 같은 것으로 생각된다. 접합부 계면 근처에서 파단된 것은 (c)와 (d)로부터, 계면 이동이 아주 미소하게 일어나고, 특히 Cr계 탄화물들이 연속적으로 계면에 존재함을 볼 수 있다. 이것은 계면 파단의 원인은 Cr계 탄화물이고, 이로 인하여 거의 소성변형 없이 파단되는 것으로 생각된다.

이상의 파면과 단면의 대응 관찰과 분석으로부터, 접합계면에서 양쪽 결정립의 합체가 일어나고, 계면이동이 많이 일어난 영역은 모재에서 파단되고, 계면에 석출물의 존재로 계면이동이 미약하게 일어난 영역은 석출물과 모재 사이에서 일어나는 것을 알 수 있었다.

따라서 인장응력에 수직으로 놓인 입계를 갖는 영역(입계이동이 적게 일어난 영역)은 강도가 낮기 때문에 입계 근처에서 파단이 일어나 접합하중이 낮은 것으로 생각된다. 그러나 입계이동이 충분히 일어난 영역에서

는 계면강도가 높아 모재에서 파단이 일어나 접합 강도가 높은 것으로 생각된다.

4. 결 론

Ni계 초내열합금 Haynes230의 고상확산접합 한 경우, 접합조건에 따른 고상확산접합부의 기계적 성질 변화를 검토하고 인장성질과 미세조직의 상관관계를 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Haynes230의 고상확산접합 시 접합부 가장자리에 미접합부가 존재하였고, 접합온도와 유지시간이 증가할수록 미접합부의 길이는 감소하였다. 또한 접합계면에 보이드가 관찰되었고, 950°C에서 240분, 1050°C에서 60분, 1150°C 30분 이상 유지한 시편에서는 보이드가 관찰되지 않았다.

2) 접합조건 변화에 따른 계면조직은 950°C와 1150°C에서 유지시간에 관계없이 직선상의 접합계면에 Cr-rich의 석출상이 많이 존재하여 입계이동을 방해시켜 계면이동이 거의 일어나지 않았다. 그러나 1150°C 조건에서는 접합계면의 석출상이 모재에 고용되어 유지시간이 짧음에도 불구하고 입계이동이 활발히 일어났다.

3) 인장시험 결과, 파면은 크게 모재 파면, 모재+계면파면과 미접합부 파면이 관찰되었고, 결정립 합체와 계면이동이 많이 일어난 영역에서는 계면강도가 높아 모재에서 파단이 일어나 접합하중이 높았고, 석출물의 존재로 계면이동이 미약하게 일어난 영역에서는 계면파단이 일어나 접합하중이 낮았다.

4) 접합하중(Load)과 모재파단부 면적(A_{BF}), 접합계면 파단부의 면적(A_{IF}) 사이의 상관관계로부터, 접합하중 예측식을 구한 결과, $Load = 201A_{BF} + 153A_{IF}$ 의 식으로 얻어졌고, 계산한 값과 실험값이 양호한 상관관계(결정상수 : 0.92)를 가졌다.

후 기

본 연구는 2012년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (한국연구재단-2012R1A5A1048294) 또한, 본 연구는 국방과학연구소의 용역프로그램(UE115132GD)에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C.F. McDonald, Gas turbine recuperator technology advancements, ASME, 1972, 72-GT-32
2. C.F. McDonald, Gas turbine recuperator technology advancements, in: Proceedings of Institute of Metals

- Conference on Heat Exchanger Materials, UK, 1995, 337-369
3. Y. W. Lee, J. H. Kim, Influence of Brazing Temperature on Strength and Structure of SUS304 Stainless Steel Brazed System with BNi-2 Filler Metal, Kor. J. Mater. Res. (2007), 17-3, 179-183
 4. K. H. Kim, Effect of Brazing Temperature and Homogenizing Time to Joining Characteristics of Ni-based Superalloys, Proceedings of KWJS, **46** (2006), 266-268 (in Korean)
 5. Xiuqing Li, David Kininmont, Renaud Le Pierres and Stephen John Dewson, Alloy 617 for the High Temperature Diffusion-Bonded Compact Heat Exchangers, Proceedings of ICAPP '08, **1** (2008), 282-288
 6. Widodo Widjaja Basuki, Oliver Kraft, Jarir Aktaa, Optimization of solid-state diffusion bonding of Hastelloy C-22 for micro heat exchanger applications by coupling of experiments and simulations, Materials Science and Engineering A, **538** (2012), 340-348
 7. Takeda, T., Kunitomi, K., Horie, T., Iwata, K., Feasibility study on the applicability of a diffusion-welded compact intermediate heat exchanger to next-generation high temperature gas-cooled reactor, Nuclear engineering and design, **168** (1997), 11-21
 8. Mylavarapu, S.K., Sun, X., Christensen, R.N., Unocic, R.R., Glosup, R.E., Patterson, M.W., Fabrication and design aspects of high-temperature compact diffusion bonded heat exchangers, Nuclear Engineering and Design, **249** (2012), 49 - 56
 9. Guoge, Z., Chandel, R.S., Pheow, S.H., Hoon, H.H., Effect of Bonding Temperature on the Precipitation of δ Phase in Diffusion Bonded Inconel 718 Joints, Materials and Manufacturing Processes, **21-5** (2006), 453 - 457
 10. Denis E. Clark, Ronald E. Mizia, Michael V. Glazoff, Michael G. McKellar, Diffusion-Welded Microchannel Heat Exchanger for Industrial Processes, Journal of Thermal Science and Engineering Applications, **5** (2013), 1-12
 11. Xiuqing li, Tim Smith, David Kininmont and Stephen John Dewson, Materials for nuclear diffusion-bonded compact heat exchangers, Proceedings of ICAPP '09, **1** (2009), No.9058
 12. F. Meyer-Olbersleben, N. Kasik, B. Ilschner, and F. Rezai-Aria, The thermal fatigue behavior of the combustor alloys in 617 and HAYNES 230 before and after welding, Metallurgical and Materials Transactions A, **30-4** (1999), 981-989
 13. Factor, M.J., Wenzel, J.E., Lee, S., Use Of Haynes Alloy 230 For Supercritical Water Reactors, American Institute of Chemical Engineers AIChE, (2007), No.74094
 14. Gossé, S., Alpettaz, T., Chatain, S., Guéneau, C., Chromium Activity Measurements in Nickel Based Alloys for Very High Temperature Reactors: Inconel 617, Haynes 230 and Model Alloys, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, **131-6** (2009), No.062901
 15. Klarstrom, D L, The development of HAYNES 230 alloy, Materials Design Approaches and Experiences, **4-8** (2001), 297-307
 16. M. D. Bellware, Fundamentals of Brazing for Elevated-temperature Service, Welding J, **37** (1958), 683-691
 17. Rabinkin, A., Wenski, E., Ribauda, A., Brazing stainless steel using a new MBF-series of Ni-Cr-B-Si amorphous brazing foils, Welding Journal, **77-2** (1998), 66
 18. J.R. Davis: ASM Handbook, Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, Materials Park, **2** (1990), 774
 19. W.F. Smith: Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill Inc., New York, NY, 1993, 494-8
 20. A. A. Shirzadi and E. R. Wallach, New method to diffusion bond superalloys, Science and Technology of Welding and Joining, **9-1**(2004), 37
 21. Robert E. Reed-Hill, Physical metallurgy principles, fourth edition, 245-253