

니켈기 초합금의 접합특성에 미치는 브레이징 공정변수의 영향

Effect of Brazing Process Variables on joining Characteristics of Ni-based Superalloy

김경호*, 김광호*, 이민구*, 이호진*, 김홍희*, 김숙환**

* 한국원자력연구소 원자력재료기술개발부

** 포항산업과학연구소 용접연구센터

ABSTRACT The effects of the brazing temperature and homogenizing time for brazed specimens on the joint of Ni-based superalloys such as Haynes 230, Inconel 617 and Hastelloy-X were investigated. The brazing alloy is nickel base MBF 15. The foil had a thickness of $38\mu\text{m}$, which was used two sheets of that for the all experiments. The experimental brazing was carried out by a brazing process in a vacuum of approximately 2×10^{-5} Torr, an applied pressure of about 0.74MPa and the three kinds of brazing temperatures were 1100, 1150, and 1190 °C for a holding time of 5 to 1440 minutes. Microstructural observations were made on the cross-sectional samples by using an optical microscope(OM), scanning electron microscope(SEM), and electron probe X-ray microanalyzer(EPMA). The tensile tests were performed at room temperature with a cross head speed 1.5 mm/min according to ASTM E8M. The results show that excellent joint tensile strengths of as high as 788MPa were obtained when processed at 1190 °C for 5 minutes.

1. 서 론

니켈기 초내열합금은 고온에서 우수한 기계적 성질과 내식성을 가지고 있기 때문에 특히 Inconel 617, Haynes 230 그리고 Hastelloy-X 합금들이 약 950°C의 헬륨가스를 냉각재로 사용하는 고온 가스 냉각로의 중간열교환기 후보재료로 고려되고 있다. 중간열교환기는 일차 냉각시스템에서 이차 냉각시스템으로의 고온의 열을 전달하기 때문에 헬륨가스의 누설방지와 초기에 원자로에서 생성되는 트리튬의 침투방지가 무엇보다도 중요하다. 이를 해결하기 위해서는 고온냉각계통의 경우 재료의 건전성 확보와 접합기술개발이 핵심과제이다. 하지만 고온(950°C)을 요구하는 미래형 원자로에 대한 접합기술은 세계적으로 아주 초보적인 실험실적 규모로 연구가 수행 중에 있고,⁽¹⁾ 그나마 국내에서는 연구기반이 아주 미미한 상태이다.⁽²⁾ 따라서 본 연구에서는 3종의 니켈기 초내열합금 3종(Inconel 617, Haynes 230, Hastelloy-X)을 가지고 브레이징 공정 변수(접합온도, 균질화 처리 시간)에 대한 접합부와 접합계면에서의 접합특성을 알아보기 위해서 Ni기 삽입금속을 사용하여 진공브레이징을 수행하였다. 또한 광학현미경과

SEM을 이용하여 모재와 접합부 계면의 미세조직 관찰과 EPMA 분석을 통한 성분분석을, 그리고 접합강도측정으로는 경도와 인장시험을 각각 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 시편준비

본 연구에 사용된 재료는 니켈기 초내열 합금인 Inconel 617, Haynes 230 그리고 Hastelloy-X이며, 삽입금속으로는 브레이징 온도를 낮추기 위해 보론과 실리콘이 각각 2.8wt.%, 4.5wt.%가 첨가된 용융시 유동성이 우수한 주요성분이 모재와 유사한 상업용 MBF-15 foil를 사용하였다. 각각의 성분은 Table 1에 나타내었다. 시편은 각 모재로부터 직경 15mm, 두께 3mm의 디스크 형태와 직경15mm, 길이 20mm 의 환봉으로 가공하였다. 디스크 형태의 시편과 환봉형태의 시편의 접합면은 에머리 페이퍼로 #1200까지 연마한 후 에틸알콜에서 15분간 초음파 세척을 하였다.

2.2 브레이징 접합

브레이징 접합은 진공유도로를 이용하였으며, 이때 진공도는 2×10^{-5} torr를 유지함으로써 고온에

Table 1. Chemical compositions of Ni-based superalloys and MBF 15

Material	Compositions(wt.%)														
	Ni	Cr	Co	Mo	Fe	W	Al	Ti	C	Mn	Si	Cu	S	La	B
Haynes 230	Bal.	22	5	2	3	14	0.3	-	0.1	0.5	0.4	-	-	0.02	0.006
Inconel 617	Bal.	22	12.5	9	1.5	-	1.2	0.3	0.07	0.5	0.5	0.2	0.008	-	-
Hastelloy-X	Bal.	22	1.5	9	18.5	0.6	-	-	0.1	0.5	0.5	-	-	-	-
MBF 15	Bal.	13	-	-	4	-	-	-	0.03	-	4.5	-	-	-	2.8

서의 산화를 방지하였다. 이 때 디스크 형태의 두 모재 사이에 두께 $38\mu\text{m}$ 인 foil 형태의 삽입금속을 두 겹으로 하여 약 $78\mu\text{m}$ 로 간격을 유지하였다. 삽입한 후 접합부를 밀착시키기 위해 약 0.74 MPa의 압력을 가하여 실시하였다. 승온속도는 10°C/s 로 하였으며, 냉각은 노냉 처리하였다. 접합온도는 삽입금속의 용융 범위와 모재에 큰 영향을 주지 않는 온도를 고려하여 1100, 1150, 1190 $^\circ\text{C}$ 와 접합시간은 5분으로 실시하였다. 또한 균질화 처리시간 변화시험은 1190 $^\circ\text{C}$ 에서 5분간 접합한 시편을 가지고 1150 $^\circ\text{C}$ 에서 30분, 60분, 1440분간 유지시켰다.

2.3 미세조직 관찰 및 접합부 성분분석

Inconel 617, Haynes 230과 Hastelloy-X를 가지고 MBF-15 삽입금속으로 사용하여 접합하였을 때, 접합부 및 brazing affected zone(BAZ)의 미세조직 변화를 조사하였다. 접합 후 시편은 중심부를 따라 접합면에 수직으로 절단하여 단면을 연마 및 정마한 후, Kalling's reagent를 사용하여 etching한 후 광학현미경 및 SEM을 이용하여 단면의 미세조직을 관찰하였다. 미세조직 내의 상 분석 및 원소의 확산 관찰을 위해 EPMA 분석 방법을 이용하였다.

2.4 접합부 경도 및 인장강도 측정

브레이징 공정온도에 따른 접합부의 경도변화를 관찰하기 위해 micro-Vickers hardness tester(HMV 2000, Shimazu)를 이용하여 100gf의 하중에서 모재와 접합부 계면, 그리고 잔류용가재의 경도를 각각 측정하였다. 접합부의 인장강도시험은 표점거리 10mm, 폭 3mm, 두께 1mm인 미소시편을 가지고 Instron 4465(500kg)을 이용하여 상온에서 cross head speed 3mm/min으로 수행하였다. 인장시험 후 파단된 시편편의 파단모드를 확인하기 위하여 SEM으로 파단면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 접합온도 1190 $^\circ\text{C}$ 에서 접합한 Haynes 230의 접합부 및 BAZ 영역의 미세조직 변화를 나타낸 것이다. 접합부 내의 미세조직은 기지조직을 형성하고 있는 γ -상과 덩어리형태의 삽입금속 공정상이 혼합된 조직을 보이고 있다. 이러한 γ -상은 모재의 접합면이 용융된 후 수지상의 계면을 따라 고상이 에피택셜 성장(epitaxial growth)하면서 생성된 것이다. Fig. 1에 표시된 A 영역은 석출상이 불규칙적이며 submicron 크기로 혼합되어 석출되어 있다. 이 석출상들은 Cr-붕화물과 Ni-규화물로서 삽입금속의 용접저하 원소인 B와 Si성분이 모재로 이동하면서 모재의 Cr, Ni과 결합하여 생성된 것이다. 또한 모재의 결정립계를 따라 이동하던 B 원소는 모재의 Cr 성분과 반응하여 그림에 B로 표시된 것과 같이 결정립계를 따라 Cr-붕화물을 생성한다.

그림에서 C로 표시된 석출물은 모재의 석출강화기구인 NiCrFe-탄화물이다. 이러한 A, B, C 형태의 석출물 주변의 기지조직은 γ -Ni 상이었다. Fig. 2는 각각의 접합온도에서 용고 반응 완료 후 모재와 접합부의 성분 원소 분포를 알아보기 위해 EPMA line scanning 분석 결과를 나타낸 것이다. 접합부 내의 γ -Ni 기지는 모재에 비해 Ni와 Fe 성분이 많이 함유된 것으로 나타났다. 이에 비해 접합부 내의 공정상에는 Cr의 함량이 상대적으로 높게 나타났는데, 이것으로 보아 접합부 내의 공정상은 γ -Ni와 Cr-붕화물의 2원계 공정상으로 판단된다. 접합부 내의 Cr의 분포는 접합온도가 증가할수록 점차 모재의 함량과 같이 균일해지는 것을 볼 수 있다. Si 성분은 BAZ 영역에서 높은 함량을 보이고 있는데, 이는 삽입금속에서 모재 쪽으로 확산된 Si 성분이 BAZ 영역에서 Ni-규화물을 형성하였기 때문이다. Fig.3은 접합온도 변화에 따른 경도 특성을 나타낸 것이다. 접합부 내의 공정상은 경하면서 취성이 강하기 때문에 이러한 공정상이 가장 많이 생성된 접합온도 조건(1100 $^\circ\text{C}$)에서 가장 높은 경도를 나타내었고 접합온도가 증가함에 따라 공정상이 감소하면서 경도 또한 감소하였다. 접합온도가 1190 $^\circ\text{C}$ 조건에서는 모재와 원소 함량이 비슷하지만 접합부의 경도가 210HV로 모재(230HV)에 비해 감소한 것을 볼 수 있는데, 이

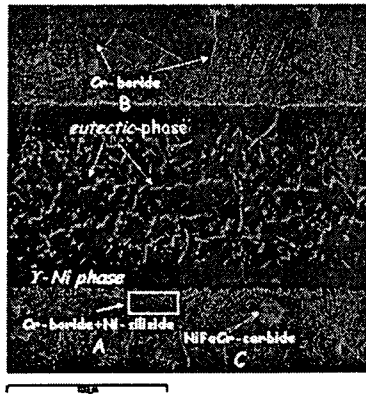


Fig. 1 Microstructure of a brazed joint and brazing affected zone(B.A.Z) of Haynes 230 at brazing temperatures

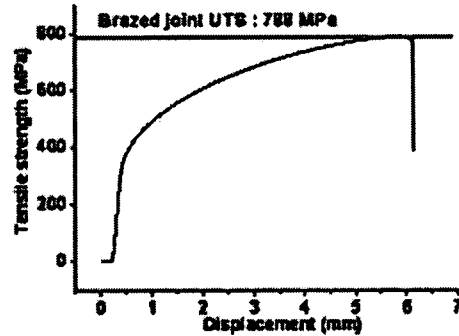


Fig. 4 Tensile strength of a brazed specimen at room temperature

4. 결 론

고온가스 냉각로의 중간열교환기 후보재료인 니켈기 초내열합금 Haynes 230, Inconel 617, Hastelloy-X를 가지고 MBF-15 삽입금속을 사용하여 접합하였을 때, 접합온도와 균질화 처리시간에 따른 접합부 및 brazing affected zone(BAZ)의 미세조직 및 경도 특성, 인장시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모든 시편 접합부 내의 미세조직은 공통적으로 γ -Ni 기지에 덩어리형태의 γ -Ni와 Cr-붕화물의 2원계 공정상이 석출된 형태를 보였다. 접합부 내의 공정상은 접합온도가 증가함에 따라 점차 감소하여 1190°C 조건에서는 관찰되지 않았다.
- 2) 접합부의 경도는 접합온도가 1100°C인 조건에서 가장 높았고 접합온도가 증가함에 따라 경도는 감소하였는데, 이는 낮은 온도에서 접합부 내에 석출된 공정상이 경하면서 취성이 강하기 때문이다.
- 3) 접합부의 인장강도는 788MPa로서 모재강도의 약 94%의 값을 나타냈으며, 접합부의 파단모드는 연성파괴와 취성파괴의 일종인 벽개파괴이었다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소 자체연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. T. Takeda, K. Kunitomi, T. Horie, K. Iwata : Nuclear Engineering and Design 168(1997), 11
2. 김경호, 김광호, 이민구, 김홍희, 김성욱, 김숙환 : 대한용접학회 '05 춘계학술발표대회 프로시딩, 제459권 (2005), 195

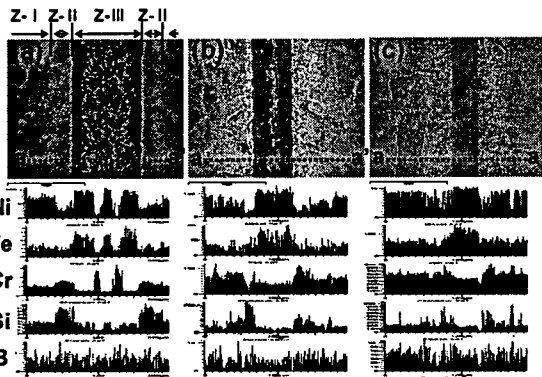


Fig. 2 Element distribution line scan across the brazed joint at brazing temperature (a) 1100°C, (b) 1150°C, and (c) 1190°C

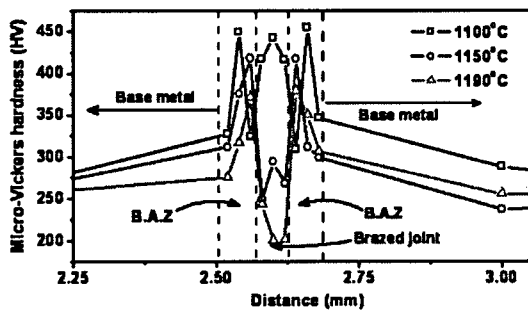


Fig. 3 Micro_Vickers hardness of a brazed joint as a function of brazing temperatures

는 모재부분의 γ -Ni 기지가 탄화물에 의해 석출경화 된 데 비해 접합부는 전체적으로 γ -Ni만 생성되었기 때문이다. Fig. 4는 Haynes 230에 대한 접합인장강도를 나타낸다. 모재인장강도의 약 94%인 788MPa 값으로 아주 건전한 접합이 이루어졌음을 알 수 있다.