

MBF-30을 사용한 Inconel-625/Ni-201 브레이징 접합부의 인장성질에 미치는 접합조건의 영향

유정우* · 박상현** · 김창수*** · 강정윤*†

*부산대학교 하이브리드 소재솔루션 국가핵심연구센터(NCRC)

**부산대학교 재료공학부

***동화엔텍 열유체 연구소

Effect of Brazing Condition on Tensile Properties in Brazing Joints of Inconel-625/Ni-201 Using MBF-30

Jeong-Woo Yu*, Sang-Hyun Park**, Chang-Su Kim*** and Chung-Yun Kang*†

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

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

***Dong-hwa Entec R&D Center, Busan 618-270, Korea

†Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr

(Received November 29, 2012 ; Revised December 6, 2012 ; Accepted December 10, 2012)

Abstract

This study was carried out to investigate the effect of bonding temperature and holding time on microstructure and mechanical properties in brazing joints of Ni-base superalloy using MBF-30 (Ni-4.5Si-3.2B [wt.%]). The heating rate was 20°C/min to the bonding temperatures 1050°C, 1070°C, 1090°C under high vacuum condition. The holding times were 100s, 400s, 900s and 1600s.

Ni₃B phases and proeutectic Ni were observed in the interlayer of Ni-201. Then, Ni₃B and Ni₃Si were found in the middle region of brazing joint. Cr-boride phase appeared in the interlayer of Inconel-625.

Tensile strength and elongation were decreased at 1050°C-1600s, 1070°C-900s and 1090°C-400s. After observation the fracture specimens, There was Ni₃B which is very brittle phase in the grain boundary of Ni201.

Key Words : Heat exchanger, Ni201, Inconel625, MBF-30, Brazing, Microstructure, Mechanical properties

1. 서 론

Plate/Fin형 열교환기는 오랜 기간 동안 우주항공산업에 적용된 기술로 열교환기의 기능과 구조는 지난 30년이 넘게 꾸준히 발전해 오고 있다^{1,2)}. 판형열교환기는 얇은 판들로 구성되어 있는데 각각의 판과 판 사이에 유로가 형성되어있고, 이 유로를 통해 가열유체와 피가열 유체가 서로 교대하여 흐르게 되고, 그 제작에 있어서 각각의 열 판과 기기 몸체의 실링기술이 상당히 중요하며 수밀, 기밀, 내식성 등이 요구 된다³⁾.

판형 열교환기 구조체의 재료로는 내식성, 내열성, 강성이 뛰어난 오스테나이트계열의 스테인리스강^{4,5)}과 강도, 내식성, 열 피로 특성이 우수한 Ni기 초내열 합금⁶⁻⁸⁾이 주로 사용되고, 또한 핀 소재로는 염소가스와 수산화나트륨에 부식저항성이 우수한 Ni-201⁹⁾이 사용된다. 삽입금속은 유동성과 젖음성이 좋고, 용점강하원소인 B, Si가 첨가되어 있어 브레이징 온도를 낮춰 줄 수 있는 Ni기 비정질 포일이 주로 사용되고 있다¹⁰⁻¹²⁾.

일반적으로 판형 열교환기 제작 시, 진공 브레이징 기술이 주로 사용되는데, Fin/Plate의 모든 이음부위를 gasket을 사용하지 않고도 유로 사이의 밀봉이 아

주 확실하며, 교차점에서 접합이 이루어지기 때문에 기계적 강도 또한 우수한 특성을 나타내기 때문에 복잡한 형상의 판형 열교환기 제작에 있어 최적의 공정이라고 할 수 있다¹³⁾. 진공 브레이징에 관한 연구로는 주로 플레이트 소재와 핀 소재를 동일한 소재로 사용하고, 삽입금속으로는 BNi-2를 사용하여 미세조직 및 기계적 성질 비교에 관한 연구^{4-7,10,13-15)}가 대부분이다.

본 연구에서는 플레이트 소재인 Ni기 초내열합금 Inconel-625와 핀 소재로 순 Ni인 Ni-201을 아몰퍼스 합금인 MBF-30 삽입금속으로 브레이징하여 판형 열교환기의 조립공정 개발을 목적으로 수행되었으며, 본 논문에서는 브레이징 접합부의 기계적 성질에 미치는 온도와 유지시간의 영향에 대해 검토하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

본 연구에서 사용된 모재로는 인장강도가 930MPa, 연신율이 46%인 Plate type의 Inconel-625(t=1.0mm)와 인장강도가 340MPa이고 연신율이 25%인 Fin type의 Ni-201(t=50μm)을 사용하였고, 접합형태는 Fig. 1과 같다.

삽입금속으로는 용점이 985℃~1055℃인 MBF -30 (82μm)을 사용하였다. 합금의 화학조성 Table 1에 나타내었다.

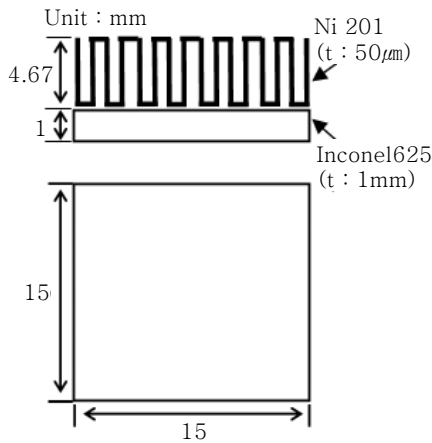


Fig. 1 Joint shape for brazing

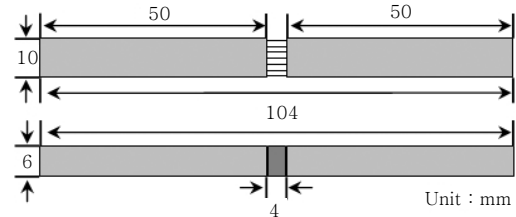


Fig. 2 Schematic view for tensile test

브레이징 접합은 5×10^{-5} torr의 고진공 분위기의 진공로에서 실시하였고, 승온속도는 20℃/min, 접합온도 1050, 1070, 1090℃와 유지시간 100, 400, 900, 1600으로 변화시키고, 로냉을 실시하였다.

미세조직은 연마 후 Mable's Reagent (Distilled water 50mL + HCl 5mL + Copper sulfate 10grams) 용액으로 부식하고 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였다. 상의 조성은 EPMA(Electron Probe Micro Analyzer)를 이용하여 측정하였다.

인장 시험을 위한 시험편은 Fig. 2와 같고, 크로스헤드속도(Cross-head speed)는 3mm/min로 인장시험을 수행하였다. 경도는 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 하중 25g, 유지시간 10초로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부 인장성질

Fig. 3은 브레이징 온도와 유지시간 변화에 따른 인장성질을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 4는 파단된 시험편의 형상을 분류한 전형적인 형상을 나타낸 것이다.

접합강도는 일정한 시간 이상 유지하면, 유지시간이 증가할수록 저하하는 경향이 있다. 즉 1050℃와 1070℃에서 900초 이상, 1090℃에서 400초 이상부터 인장강도가 약간 감소한다. 이 현상은 접합온도가 높을수록 강도 저하도 큰 것으로 볼 수 있다. 한편 연신율은 1050℃에서 1600초, 1070℃에서 900초와 1090℃조건에서 400초에서 급격히 저하하는 것을 볼 수 있다.

인장성질과 파단형태를 비교하여 보면, 인장강도와 연신율이 접합조건과 관계없이 일정한 높은 값을 갖는

Table 1 Chemical compositions of material(wt.%)

No.	Chemical composition (wt.%)													
	Ni	Cr	Fe	Mo	Cu	Nb	Mn	Co	Si	Ti	Al	C	B	Si
Inconel 625	Bal.	21.5	5	9	-	3.65	-	1	-	0.4	0.4	0.1	-	-
Ni201	Bal.	-	0.01	-	0.02	-	0.21	0.03	0.08	-	-	0.01	-	-
MBF-30	Bal.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	3.2	4.5

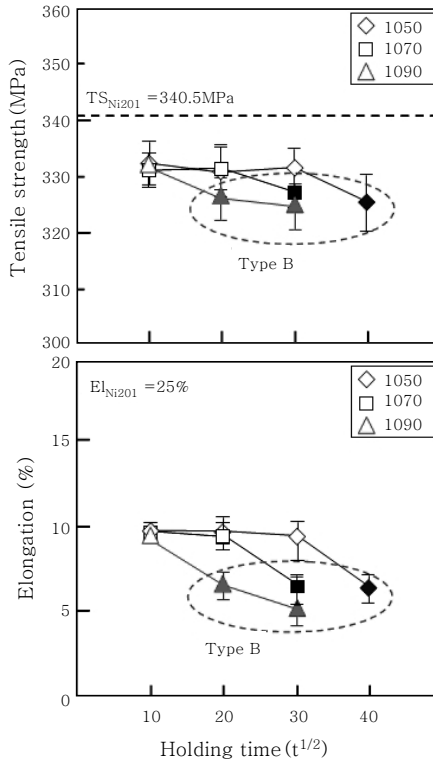


Fig. 3 Relation between tensile properties and holding time

시편의 파단형태는 A형이었고, 인장강도와 연신율이 저하하는 조건의 시편은 모두 B형이었다.

Fig. 5는 연신율-강도의 곡선을 나타낸 것으로, B형 파단은 넥킹 후에 순간적으로 파단하지만, A형은 넥킹 후에도 계속 연신이 일어나기 때문에 연신율이 높은 것을 알 수 있다.

파단형태에 따라 인장성질이 달라지는 원인을 파악하

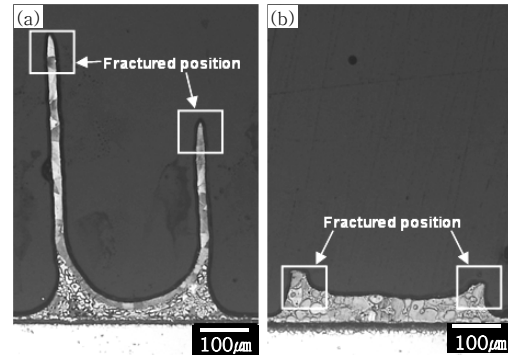


Fig. 4 Cross section of type A (a) and type B (b)

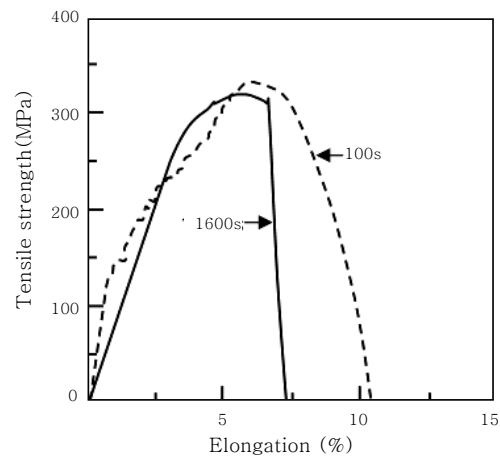


Fig. 5 Relation between tensile strength and Elongation

기 위해, 각각의 파단형태에 대한 특징을 SEM을 이용하여 비교 검토하였다. Fig. 6의 (a)는 Fig. 4의 (b)

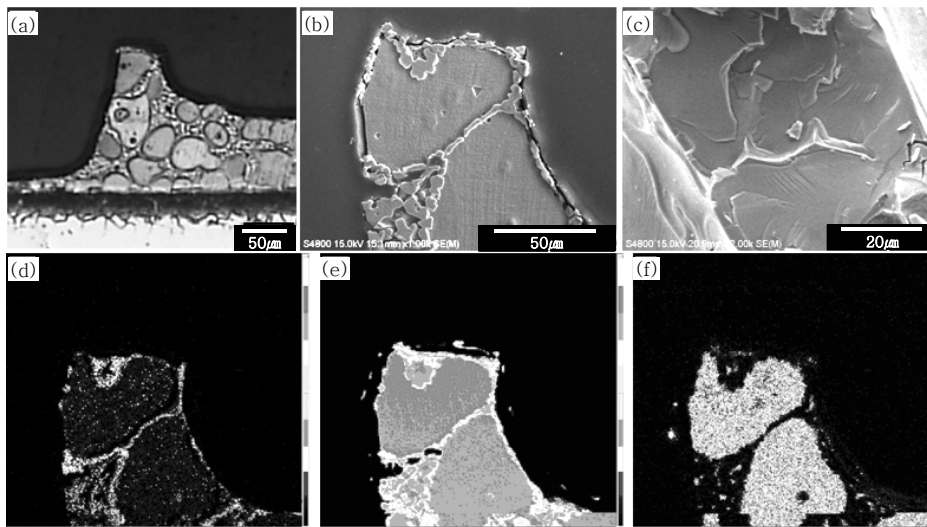


Fig. 6 Cross section (a) denoted as □ in (b) of Fig. 4, SEM micrograph (b), fractograph of Ni201(c) and EPMA mapping results showing distribution of element: (d) B, (e) Ni, (f) Si [brazing condition : 1050°C-1600s]

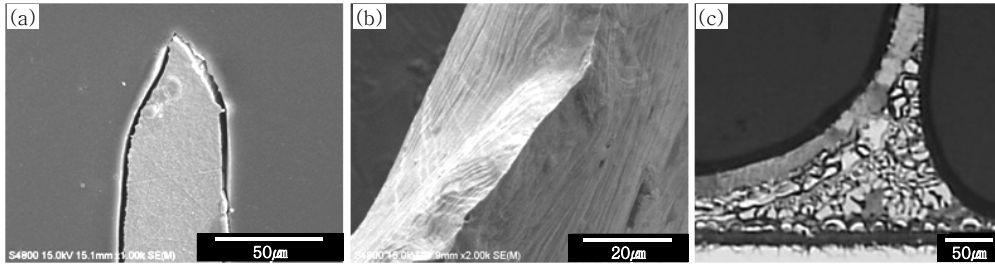


Fig. 7 SEM micrograph (a), fractograph of Ni201 (b) and cross section (c) denoted as □ in (a) of Fig. 4 (brazing condition : 1050°C-100s)

의 파단부 □를 확대한 사진이고, (b)와 (c)는 이 시편에 대하여 SEM으로 단면과 파면 조직을 관찰한 것이며, (d), (e)와 (f)는 EPMA를 이용하여 각각 B, Ni, Si의 면분석한 결과를 나타낸 것이다. 이들 결과로부터, B형 파단부는 Ni₃B상이 Ni-201 핀 소재의 결정립 전 영역에 걸쳐 형성되고, 이 상에 따라서 취성파괴((c)의 벽개파면)하는 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 7의 (a)와 (b)는 Fig. 4(a)의 파단부 □를 SEM으로 확대한 각각의 단면과 파면 사진이고, (c)는 B형 파단과 비교하기 위해 Fig. 4의 (a)에 대응하는 부위의 광학현미경 조직이다.

이 결과로부터, A형 파단은 핀 소재가 완전히 한 점으로 될 때까지 소성변형한 후 파단 됨을 볼 수 있고, 밑 부분은 접합시간이 짧아 액상 삼입금속이 핀 소재의 결정립계에 따라 완전히 관통하지 않아 핀 소재 중앙부에서 파단된 것으로 생각된다.

이상의 파면 분석으로부터 접합 입열이 과도하면 액상 삼입금속이 핀 소재 Ni-201 결정립내로 침투하여 결정립 주위를 취약한 금속간화합물인 Ni₃B로 둘러싸이게 되어 취성파괴하기 때문에 강도가 저하하고, 연성도 저하하는 것으로 생각된다.

3.2 인장성질과 미세조직과의 상관관계

3.1의 인장시험 결과에서 파단된 위치는 모두 핀 모재에서 파단되고, 이를 자세히 분류하면, 액상삼입금속과 반응한 핀 모재부(Fig. 4(b))와 반응하지 않은 핀부위(Fig. 4(a))에서 파단 되었으며 전자가 후자보다 강도가 낮았다. 이 이유를 규명하기 위하여 접합조건에 따른 필렛 부위와 접합부의 미세조직 차이를 살펴보았다. Fig. 8은 다양한 접합온도(1050°C, 1070°C, 1090°C)에서 100초와 1600초 동안 접합한 시편의 접합부와 핀의 형상을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 9는 접합온도와 유지시간의 변화에 따른 액상삼입금속과 반응한 핀부위만 확대한 광학현미경 조직을 나타낸 것이다. 이 부분은 핀 파단위치와 대응되는 부분이다. Ni-201과 삼

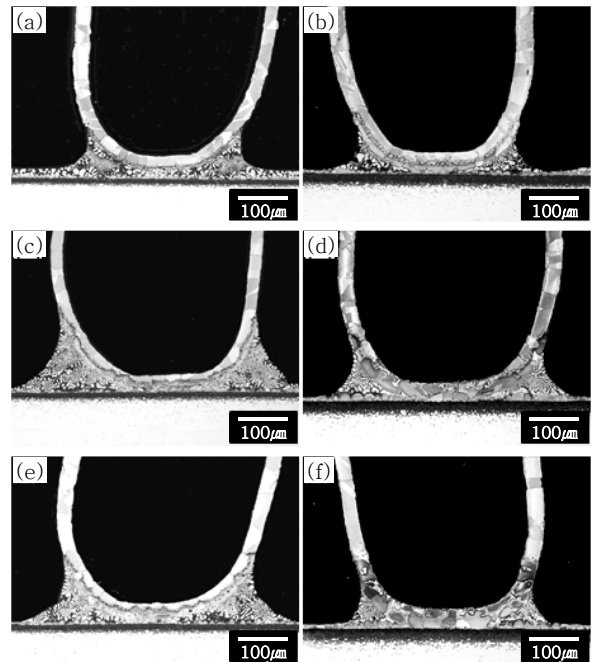


Fig. 8 Shape of joints with various brazing conditions [(a):1050°C-100s, (b):1050°C-1600s, (c):1070°C-100s, (d):1070°C-1600s, (e):1090°C-100s, (f):1090°C-1600s]

입금속의 반응하여 다양한 상들이 존재하는 것을 볼 수 있다.

우선 Inconel-625/Ni-201 접합부와 액상삼입금속과 반응한 핀부위에서 각각 형성된 상을 비교하기 위하여 1070°C에서 100초 동안 유지한 시편을 선택하여 조사하여 보았다. 그 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타낸다. Fig. 10의 (a)는 접합부의 저배율 조직이고, (b)~(d)는 (a)에 A, B 및 C로 표시된 영역을 확대한 SEM조직이고, Table 2은 각 상을 EPMA로 분석한 결과를 나타낸 것이다. 이것으로부터 원래 삼입금속 내부는 Ni-Si-B고용체(1, 3)와 Ni 붕화물(2)로 구성되어 있고, Ni-201/삼입금속 계면에서 Ni-201 쪽으로도 Ni 붕화물(4)이 형성되어 있음을 볼 수 있으며, 영역 5는 순 Ni의 조성에 가까운 것으로부터 원래 Ni-201

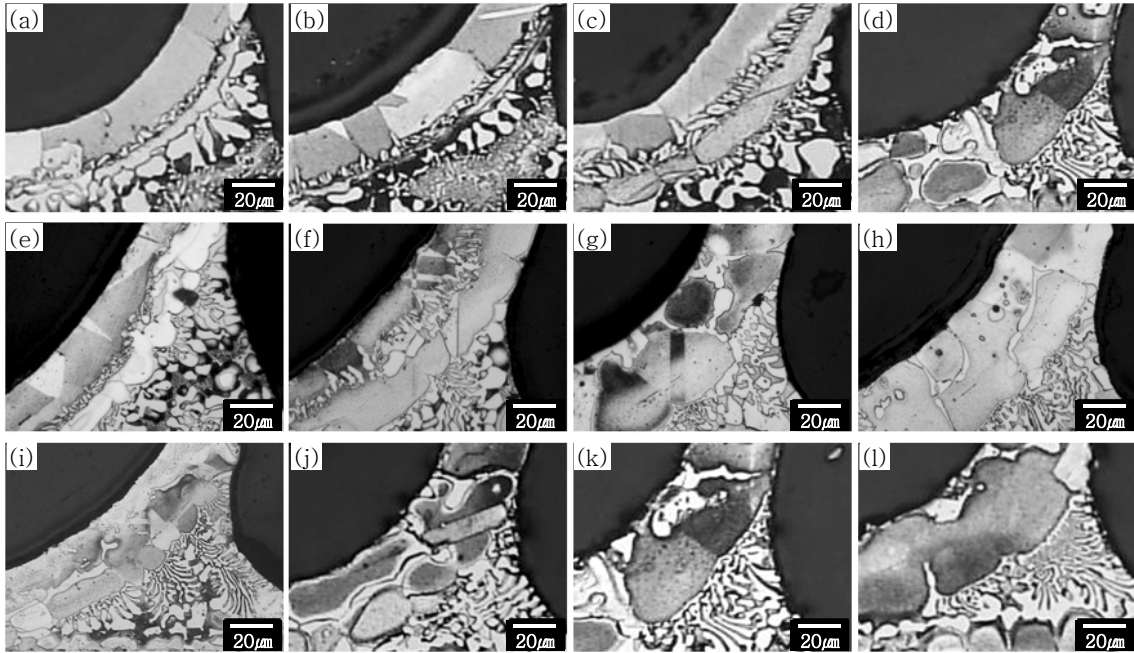


Fig. 9 Macrostructure of fillet with various brazing conditions [(a)~(d):1050°C-100s~1600s, (e)~(h):1070°C-100s~1600s, (i)~(l):1090°C-100s~1600s]

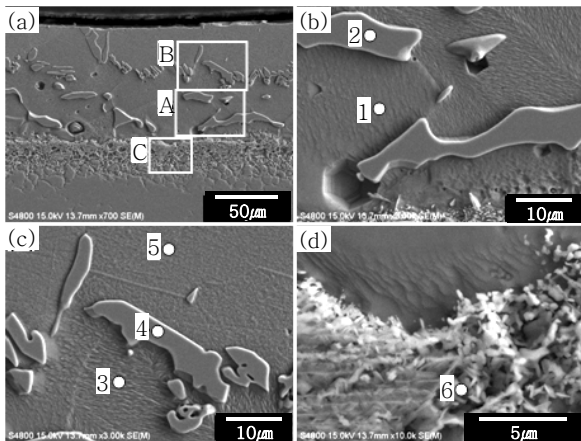


Fig. 10 SEM micrograph (a) and Microstructure (b), (c) and (d) at regions denoted as A, B and C in (a). [Brazing condition : 1070°C-100s]

Table 2 Chemical compositions at regions denoted as 1~6 in (b), (c) and (d) of Fig. 10

	Element composition (at.%)							phases
	Ni	Cr	Fe	Si	B	Mo	Nb	
1	90.42	-	-	9.18	0.40	-	-	Ni
2	72.02	-	-	4.08	23.89	-	-	Ni ₃ B
3	91.36	-	-	8.54	0.1	-	-	Ni
4	70.29	-	-	2.94	26.77	-	-	Ni ₃ B
5	99.03	-	-	0.05	0.02	-	-	Ni
6	28.21	21.65	1.74	0.21	39.65	6.97	1.57	Cr Boride

임을 알 수 있다. 또한 Inconel-625/삽입금속 계면 근처 Inconel-625 쪽에 미세한 입상들이 형성되어 있고, 성분분석 결과로부터 Cr을 주축으로 하는 붕화물임을 알 수 있다.

Fig. 11의 (a)는 접합부의 저배율 조직이고, (b)와 (c)는 (a)에 A와 B로 표시된 영역을 확대한 SEM조직이고, Table 3는 각 상을 EPMA로 분석한 결과를 나타낸 것이다.

이 결과로부터 순수 액상삽입금속인 A영역은 Ni 붕화물(1)과 Ni 규화물(2)로 이루어져 있고, 삽입금속과 Ni-201이 반응한 영역은 Ni-Si-B 고용체(3)와 Ni 붕화물(4)로 이루어져 있으며, 5영역은 반응하지 않은 순 Ni-201임을 알 수 있다.

Fig. 12의 (a)는 1070°C에서 1600초 동안 장시간 유지한 시편의 저배율 SEM조직이고, (b)와 (c)는 (a)에 A와 B로 표시된 영역을 확대한 SEM조직이며, Table 4는 각 상을 EPMA로 분석한 결과를 나타낸 것이다. 삽입금속인 A영역은 Ni 붕화물(1)과 Ni-Si-B 고용체(2)로 이루어져 있고, 원래 Ni-201 영역도 Ni-Si-B 고용체 (3과 5)와 Ni 붕화물(4)로 이루어져 있다.

각 상들의 마이크로 비커스 경도기로 측정(25g)하여 비교한 결과, Ni-201은 약 100Hv이었고, Ni-Si-B 고용체는 약 150Hv이었으며, Ni 붕화물은 약 450Hv이었다.

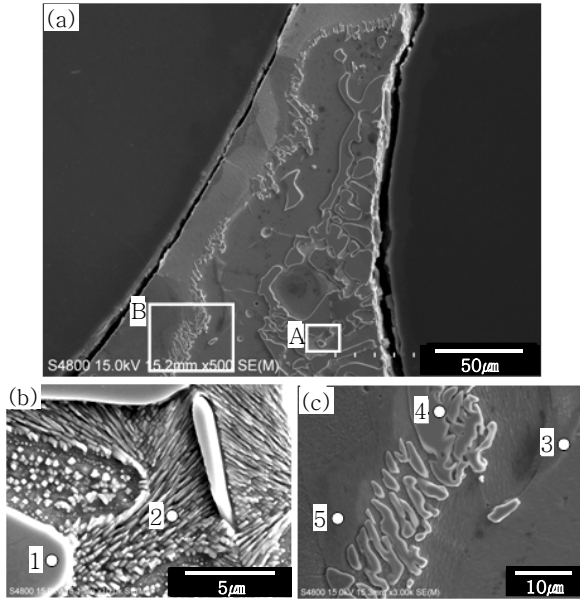


Fig. 11 SEM micrograph (a) and Microstructure (b), (c) at regions denoted as A, B in (a). [Brazing condition : 1070°C-100s]

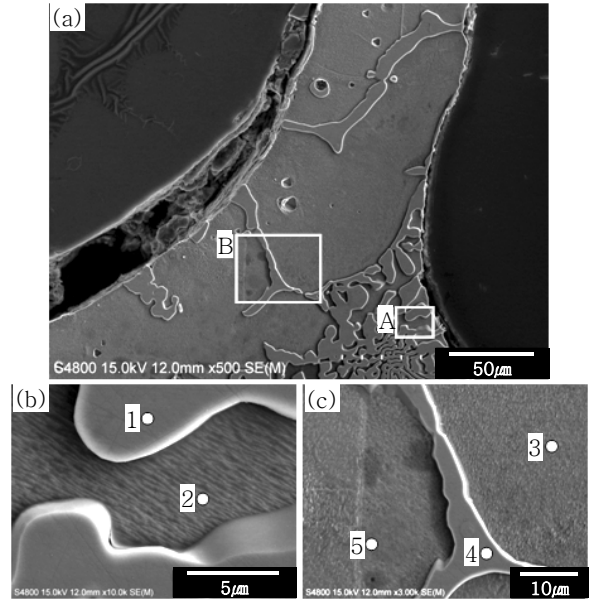


Fig. 12 SEM micrograph (a) and Microstructure (b), (c) at regions denoted as A, B in (a). [Brazing condition : 1070°C-1600s]

Table 3 Chemical compositions at regions denoted as 1~5 in (b), (c) of Fig. 11

	Element composition (at.%)			phases
	Ni	Si	B	
1	73.58	0.05	26.40	Ni ₃ B
2	78.68	20.66	0.40	Ni ₃ Si
3	89.31	9.48	1.21	Ni
4	72.37	0.04	27.50	Ni ₃ B
5	99.94	0.02	0.01	Ni

Table 4 Chemical compositions at regions denoted as 1~5 in (b), (c) of Fig. 12

	Element composition (at.%)			phases
	Ni	Si	B	
1	73.17	0.02	26.81	Ni ₃ B
2	92.17	7.81	0.02	Ni
3	91.48	8.35	0.17	Ni
4	72.34	1.24	26.42	Ni ₃ B
5	92.21	7.75	0.04	Ni

Fig. 11과 Fig. 12를 비교하여 보면, 1070°C에서 100초에서 액상 삽입금속과 Ni-201과 부분적으로 반응하지만, 1600초에서는 Ni-201 핀 모재 전체가 Ni-Si-B고용체와 Ni붕화물로 이루어지고, 특히 붕 화물은 결정립계에 주로 형성되어 있고, 이 입계 붕화물이 핀 소재 전체를 관통하고 있음을 알 수 있다.

한편 이러한 관점에서 Fig. 9의 미세조직을 자세히 관찰하여 보면, Ni 붕화물이 핀 소재 전체를 관통한 조건은 1070°C에서 1600초, 1070°C에서 900초, 그리고 1090°C에서 400초임을 알 수 있다. 이것은 온도가 높을수록 B와 Si의 확산속도가 빠르고, 특히 입계확산속도가 체확산 속도보다 빠르기 때문에 입계가 빠르게 관통되는 것을 알 수 있다.

Ni-201 입계에 Ni 붕화물로 둘러싸이고, 더욱이 이러한 입계 두께 방향으로 관통되는 조건과 Fig. 3과

Fig. 5에서 인장강도, 연신율 및 인장인성이 급격히 저하되는 조건과 잘 일치함을 볼 수 있다. 특히 붕화물로 둘러싸인 입계가 인장응력 방향과 대체로 수직으로 놓이게 되어, 낮은 응력에서 파괴될 뿐만 아니라, Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 입계와 취약한 붕화물 경계에서 취성파괴가 일어나는 것을 알 수 있다. 한편 입계 반응이 덜 일어나는 조건에서는, 모재 두께보다 반응부의 두께가 크므로, 모재에서 파괴가 일어나므로, 모두 강도가 거의 유사하지만, 온도가 높을수록 유지시간이 길어질수록 아주 근소하게 낮아지는 경향이 있다. 이것은 결정립 크기가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결 론

플레이트 소재인 Ni기 초내열합금 Inconel-625와 핀 소재로 순 Ni인 Ni-201을 아몰퍼스 합금인 MBF-

30 삽입금속으로 브레이징 한 경우, 접합조건에 따른 브레이징 접합부의 기계적 성질의 변화를 검토하고, 인장성질 저하의 원인을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인장시험 결과, 파단부위는 핀 모재에서 발생되었다. 하지만 일정한 유지시간(1050℃에서 1600초, 1070℃에서 900초, 1090℃에서 400초) 이상 유지했을 경우, 강도와 연신율이 저하하는 경향이 있었다. 인장강도와 연신율이 저하한 시편의 파면을 관찰하면 핀 소재인 Ni-201의 결정립 전 영역에 걸쳐 Ni₃B상이 형성되어 있고, 이 상에 따라서 취성파괴하기 때문에 강도가 저하하고, 연성도 저하하는 것으로 생각된다.

2) Inconel-625/Ni-201 접합부와 액상삽입금속과 반응한 핀 부위에 형성된 상을 관찰한 결과, 삽입금속 내부에는 Ni-Si-B고용체와 Ni 붕화물로 구성되어 있고, Ni-201/삽입금속 계면에서도 Ni 붕화물이 Ni-201 쪽으로 형성되어있다. 또한 Inconel-625/삽입금속 계면 근처에는 Inconel625 쪽으로 Cr 붕화물이 형성되어 있는 것을 알 수 있었다.

3) 유지시간이 짧은 100초 조건에서는 액상 삽입금속과 Ni-201이 부분적으로 반응하지만, 유지시간이 긴 1600초 조건에서는 Ni201 핀 모재 전체가 Ni-Si-B 고용체와 Ni 붕화물로 이루어져 있고, 특히 붕화물은 결정립계에 주로 형성되어 핀 소재 전체를 관통하고 있음을 알 수 있었다.

4) Ni 붕화물이 핀 소재 전체를 관통한 조건을 근거로 온도가 높을수록 B과 Si의 확산속도가 빠르고, 입계 확산 속도가 체확산 속도보다 빠르기 때문에 입계에 취약한 붕화물이 발생하는 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 (주)동화엔텍과 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-0200 4-0) 지원으로 수행 되었으며, 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, **17-3** (2007)
4. M. D. Bellware, Welding J, **37**, 683 (1958)
5. A. Rabinkin, E. Wenski and A. Ribaud, Welding J, **77(2)** 66 (1998)
6. J.R. Davis: ASM Handbook, Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, Materials Park, OH, 1990, 428-5
7. W.F. Smith: Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill Inc., New York, NY, 1993, 494-8
8. K. H. Kim, Effect of Brazing Temperature and Homogenizing Time to Joining Characteristics of Ni-based Superalloys, Proceedings of KWS, **46** (2006), 266-268 (in Korean)
9. C. B. ALCOCK, M. G. HOCKING and S. ZADOR, THE CORROSION OF Ni IN O₂+SO₂ ATMOSPHERES IN THE TEMPERATURE RANGE 500-750°C, Corrosion Science, 1969, **9**, 111-122
10. C. L. OU, R. K. SHIUE, Microstructural evolution of brazing 422 stainless steel using the BNi-3 braze alloy, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE **38** (2003) 2337-2346
11. C.Y. Kang, D.U. Kim, S.H. Kim, I.S. Woo, Brazing Technology of Aircraft and Aerospace Equipments, Journal of KWS, **17-2** (1999), 1-8 (in Korean)
12. C.Y. Kang, H.C. Hwang, I.B. Kim, D.U. Kim, I.S. Woo, Transient Liquid Phase Bonding of Directionally Solidified Ni Base Superalloy, Journal of KWS, **21-3** (2003), 78-84 (in Korean)
13. H.S. Ryu, Transaction of the KSME, **35(9)**, 794 (1995)
14. Wenchun Jiang, Effect of brazing temperature on tensile strength and microstructure for a stainless steel plate-fin structure, Materials and Design **32** (2011) 736-742
15. Wen-shiang chen, Brazing Inconel625 Using Two Ni/(Fe)-Based Amorphous Filler Foils, Metallurgical and materials transaction A, **43A** (2012) 2177-2182