

STS304 콤팩트 열교환기 고상확산접합부의 접합부 변형과 인장성질에 미치는 접합온도 및 접합압력의 영향

전애정* · 윤태진* · 김상호** · 김현준*** · 강정윤**,[†]

*부산대학교 하이브리드소재솔루션 국가핵심연구센터

**부산대학교 재료공학부

***(주)동화엔텍 에너지 환경기술연구소

Effect of Bonding Temperature and Bonding Pressure on Deformation and Tensile Properties of Diffusion Bonded Joint of STS304 Compact Heat Exchanger

Ae-Jeong Jeon*, Tae-Jin Yoon*, Sang-Ho Kim**, Hyeon-Jun Kim*** and Chung-Yun Kang**,[†]

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

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

***DongHwa Entec Co., Ltd. R&D Center, Busan 618-230, Korea

[†]Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr

(Received June 12, 2014 ; Revised July 29, 2014 ; Accepted August 12, 2014)

Abstract

In this study, the effect of bonding temperature and bonding pressure on deformation and tensile properties of diffusion bonded joint of STS304 compact heat exchanger was investigated. The diffusion bonds were prepared at 700, 800 and 900°C for 30, 60 and 90 min in pressure of 3, 5, and 7 MPa under high vacuum condition. The height deformation of joint decreased and the width deformation of joint increased with increasing bonding pressure at 900°C. The ratio of non-bonded layer and void observed in the joint decreased with increasing bonding temperature and bonding pressure. Three types of the fracture surface were observed after tensile test. The non-bonded layer was observed in diffusion bonded joint preformed at 700°C, the non-bonded layer and void were observed at 800°C. On the other hand, the ductile fracture occurred in diffusion bonded joint preformed at 900°C. Tensile load of joint bonded at 800°C was proportional to length of bonded layer and tensile load of joint bonded at 900°C was proportional to minimum width of pattern. The tensile strength of joint was same as base metal.

Key Words : AISI 304 stainless steel, Diffusion bonding, Tensile properties, Compact heat exchanger

1. 서 론

21세기 산업에서는 에너지 및 환경문제 해결을 위한 그린화와 안전성/편의성/효율/생산성 향상 등을 위한 스마트화가 요구된다. 특히 항공산업의 경우 기계, IT, 소재, 전자 등의 다양한 분야의 첨단기술이 결합된 산업으로 그린화와 스마트화 모두 중요성이 강조된다. 이에 따라 에너지 환경문제의 주요 관련 산업으로서 연비

향상, 온실가스 배출축소, 대체에너지 활용기술 개발 등 그린화를 위한 산업의 전반적인 기술력이 요구되고 있다. 그 중 배기가스 배출이 적고 열효율이 높은 가스터빈의 효율성을 극대화하여 연비 향상을 위해 가장 주목되는 기기가 열교환기이다¹⁾. 최근 열교환기의 고성능화, 소형화 및 경량화가 중요 과제로 대두되면서 열교환기 제작 기술 개발을 위하여 많은 연구가 진행되고 있다²⁻⁵⁾.

가스터빈용 중간냉각기, 배열회수기 그리고 냉각공기 냉각기를 위한 열교환기는 높은 압력과 온도에서도 제

기능을 유지해야 한다. 특히 배열회수기는 배기가스에 노출되기 때문에 산화와 부식이 일어나기 때문에 기존 열교환기 제작은 스테인리스강 계열 소재를 적용한 Plate-Fin 형태를 진공 브레이징 접합을 통해 제작하고 있다⁶⁻⁸⁾.

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, 모재와 접합부가 거의 동일한 조직과 성질을 가지게 되므로 극저온 또는 고온 환경에 대한 이종 금속간의 변형률 차이로 인한 문제가 발생하지 않는 장점이 있다⁹⁻¹²⁾.

금속분자의 확산으로만 접합이 이루어지는 고상확산 접합(diffusion bonding) 기술로 접합하여 열교환기를 제작하는 경우에는 극고온·극저온 및 극고압에도 적용이 가능한 고신뢰성 열교환기의 제작이 가능하므로 이에 대한 접합기술개발 연구가 필요하다. 또한 STS304의 판재와 판재 접합이 아닌 에칭된 판재의 적층 고상확산접합법에 대한 연구가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 화학에칭법을 이용하여 유로를 제작한 STS304 소재에 대한 접합압력, 접합온도, 유지시간 변화에 따른 고상확산접합부의 접합부 형상과 접합부 인장성질과의 상관관계를 검토하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 사용된 모재는 내식성이 우수한 STS304를 사용하였고, STS304소재의 유로제작은 포토에칭공정을 통하여 제작하였다. STS304소재의 화학조성 및 인장성질은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에 나타낸 것과 같이 접합시험편은 판재의 접합 면적이 동일하도록 절단하여(16.5mm × 16.5 mm) Fig. 1(b)와 같이 3-layer 적층 접합하였다. 접합은 20°C/sec의 승온 속도로 원하는 접합온도까지 고주파가열 유지한 후 공랭시켰다. 접합온도는 700°C, 800°C, 900°C와 유지시간은 30, 60, 90분, 접합압력은 3MPa, 5MPa, 7MPa로 변화시켰으며, 접합 분위기는 5×10^{-5} Torr의 고진공 분위기에 수행하였다.

Table 1 Chemical composition and tensile properties of STS304

Chemical composition(wt.%)										Tensile properties		
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	N	P	S	Y.S(MPa)	T.S(MPa)	El(%)
0.05	0.369	1.036	18.21	8.05	0.219	0.0013	0.0394	0.0294	0.0033	303	676	79.1

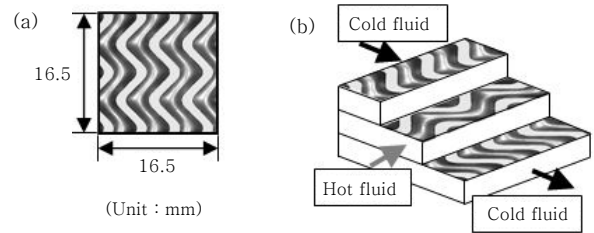


Fig. 1 Schematic diagram of (a) size of etched plate and (b) 3-layer joint

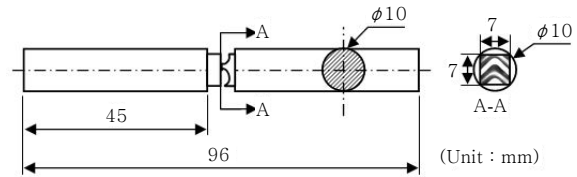


Fig. 2 Schematic diagram of tensile specimen

미세조직은 연마 후 HNO₃:HCl = 1:3 비율의 부식액에서 부식하였고, 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 인장시험은 크로스 헤드 속도(Cross-head speed)를 1mm/min로 인장시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 패턴형상 변화에 미치는 접합조건 영향

Fig. 3는 접합온도 변화에 따른 패턴형상변화를 파악하기 위해 유지시간과 접합압력을 각각 90분 7MPa로 고정한 상태에서 접합온도를 700°C(Fig. 3(a, b)), 800°C(Fig. 3(c, d)), 900°C(Fig. 3(e, f))로 변화시킨 접합부 단면 거시조직을 나타낸 것이며, (b), (d), (f)는 (a), (c), (e)에 M1~M3로 표시된 영역을 확대하여 나타낸 것이다. 접합온도가 700°C, 800°C인 조건에서는 접합부의 패턴형상(…선)과 거의 같은 형상을 가진다. 반면 접합온도가 900°C인 조건에서는 패턴형상 변화가 관찰된다. Fig. 3(g, h)는 접합온도가 900°C인 조건에서 접합압력이 낮은 경우 패턴형상 변화 여부를 파악하기 위하여 900°C, 90min, 3MPa 조건으로 접합한 시험편의 거시조직(g)과 Fig. 3(g)에 M4로 표시된 영역을 확대(h)하여 나타낸 것이다. 낮은 압력

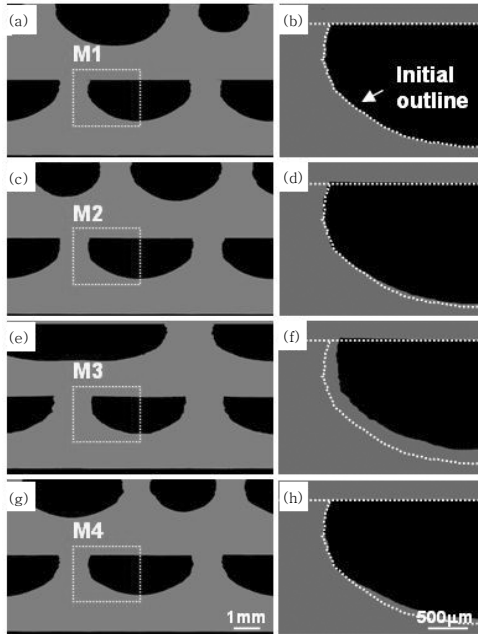


Fig. 3 Cross-section of diffusion bonded joints: (a, b) 700°C, 90min, 7MPa, (c, d) 800°C, 90min, 7MPa, (e, f) 900°C, 90min, 7MPa and (g, h) 900°C, 90min, 3MPa; the white dot line in fig. 3(b, d, f, h) showing the initial pattern outline

조건에서도 패턴형상이 변화한 것을 알 수 있다.

패턴형상 변화는 접합온도와 접합압력에 따라 변화정도가 다를 것으로 예상되어 접합조건에 따른 형상변화를 판재와 유로의 높이변화 및 폭변화, 패턴 단면의 폭변화를 기준으로 하여 정량적으로 검토하였다. Fig. 4은 접합압력과 접합온도 변화에 따른 판재와 유로의 높이변화(a)와 판재와 유로의 폭변화(b) 및 패턴 단면의 가장 좁은 폭(MPW, Minimum width of pattern)(c)을 측정된 결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 4의 (a), (b)로부터 접합온도가 800°C인 조건에서는 접합압력 변화에 따른 판재의 높이변화(ΔH_1), 유로의 높이변화(ΔH_2), 판재의 폭변화(ΔW_1), 유로의 폭변화(ΔW_2)는 관찰되지 않는다. 반면 접합온도가 900°C인 조건에서는 접합압력이 증가함에 따라 판재의 높이감소량(ΔH_1)과 유로의 높이감소량(ΔH_2)이 동일하게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 접합압력이 증가함에 따라 판재의 폭변화(ΔW_1)는 관찰되지 않았고, 유로의 폭감소량(ΔW_2)은 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4의 (c)는 패턴의 최소폭(MPW)을 측정된 결과를 나타낸 것으로 접합온도가 800°C인 경우, 패턴 최소폭은 접합압력의 증가에도 변화가 없지만, 접합온도가 900°C인 조건에서는 접합압력이 증가함에 따라서 패턴 최소폭이 증가한다.

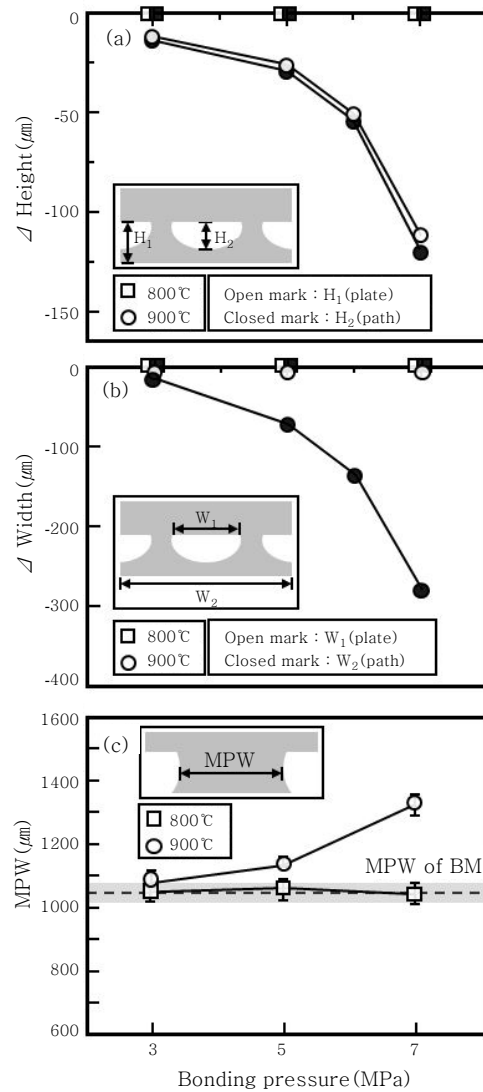


Fig. 4 Effect of bonding pressure and bonding temperature on (a) height change, (b) width change and (c) minimum pattern width change of diffusion bonded joint for 90min

접합온도가 900°C인 조건에서 판재의 높이(H_1)가 줄어든 길이만큼 유로의 높이(H_2)가 줄어든 것으로 보아, 접합압력이 증가함에 따라 판재의 아래 부분은 변화가 없고 패턴의 높이가 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한, 전체 판재의 폭(W_1)은 거의 변화가 없지만 유로의 폭(W_2)은 서서히 감소하고 패턴최소폭(MPW)은 증가하는 것으로 보아, 접합압력이 증가함에 따라 패턴폭이 증가하고 유로 단면적이 줄어드는 것으로 판단된다. 접합부 변형이 일어나는 과정을 검토하기 위해서 피접합면을 인위적으로 거칠게 하여 접합면에 형성되는 보이드의 이동으로 패턴 변형을 관찰하였다.

Fig. 5는 접합계면을 #200 SiC paper로 표면을 거칠게 연마 후 접합온도와 접합압력이 각각 800°C,

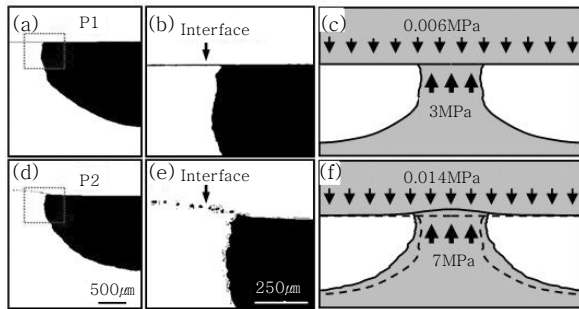


Fig. 5 Optical microstructure(a, b, d, e) and schematic illustration(c, f) of deformation with bonding condition: (a-c) 800°C, 90min, 3MPa and (d-f) 900°C, 90min, 7MPa

7MPa, 90분 조건(a)과 900°C, 7MPa, 90분 조건(d)에서 고상확산접합 후 접합부 단면의 광학현미경(Bright field) 이미지를 나타낸 것이며, (b)와 (e)는 (a)와 (d)에 P1과 P2로 표시된 영역을 확대하여 각각 나타낸 것이다. 800°C, 7MPa, 90분 조건에서는 직선의 계면이 존재하였으나, 900°C, 7MPa, 90분 조건에서는 곡선의 계면이 관찰되었고, 본 조건에서는 변형이 일어날 때 패턴이 판재를 밀고 올라간 것으로 판단된다.

Fig. 5(c)와 Fig. 5(f)는 접합계면을 관찰한 결과를 토대로 제작된 모식도이다. 접합계면이 판재 쪽으로 밀고 올라간 이유는 동일한 접합조건에서 동일한 접합하중이 가해질 때 비교적 면적이 넓은 판재보다 패턴에 더 높은 압력이 작용하게 되고, 또한 고온항복강도가 더 낮은 900°C 조건에서 소재의 높이 및 폭 변형이 더 잘 일어나는 것으로 판단된다.

한편, 접합조건 변화에 따라서 패턴 형상이 달라지면 접합계면의 접합률에 영향을 미칠 것으로 생각되어 접합조건에 따른 접합계면의 결합률 및 접합률을 검토하였다.

3.2 접합부 결합률에 미치는 접합조건 영향

Fig. 6는 접합온도 변화에 따른 접합부 가장자리의 접합여부를 파악하기 위하여 유지시간과 접합압력을 각각 90분, 7MPa로 고정한 상태에서 접합압력을 700°C(a), 800°C(c), 900°C(e)로 변화시켜 접합한 시험편의 접합부 단면 OM조직과 각 □영역을 확대한 SEM조직(b, d, f)을 나타낸다. 접합온도가 700°C 조건일 때 SEM조직(b)을 보면 시험편 양쪽 끝에 존재하는 검은 선은 판재와 패턴이 서로 전혀 접합되지 않은 미접합부임을 알 수 있고, 미접합부 바로 옆 타원형태의 검은 영역은 보이드인 것을 알 수 있다. 접합온도가 증가

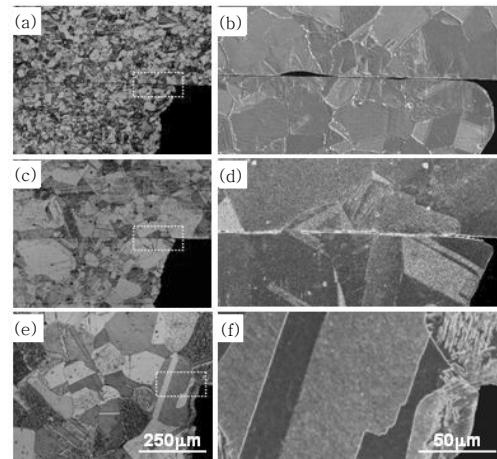


Fig. 6 Optical micrograph(a, c, e) and SEM images(b, d, f) of joint bonded for 90min in 7 MPa with bonding temperature: (a, b) 700°C, (c, d) 800°C, (e, f) 900°C

함에 따라 시편 가장자리의 미접합부의 길이와 보이드가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 접합온도가 900°C조건에서는 미접합부와 보이드가 관찰되지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 7의 (a)는 접합계면에 존재하는 미접합부와 보이드를 정의하기 위한 모식도를 나타낸 것으로, 미접합율은 접합부 전체 길이에 대한 미접합부의 길이, 보이드율은 접합부 전체 길이에 대한 보이드의 장축 길이로 정의하였다. 또한 접합된 길이는 접합부 전체 길이에서 미접합부와 보이드의 길이를 제외한 길이로 정의하여 그 결과를 각각 (b)와 (c)에 나타낸다. (b)의 미접합율과 보이드율의 경우 접합온도가 800°C 조건에서는 미접합율과 보이드율은 접합압력이 증가함에 따라 급격히 감소한다. 반면 접합온도가 900°C조건에서의 미접합율과 보이드율은 접합압력과 상관없이 모두 형성되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7(c)의 경우, 접합온도가 800°C 조건에서 접합된 길이와 접합률은 접합압력이 증가함에 따라 증가한다. 반면 접합온도 900°C 조건에서 접합된 길이는 접합 전 계면 전체의 길이(Interface of BM)보다 긴 것을 확인할 수 있으며, 접합률은 접합압력과 상관없이 모두 100%이다.

또한 접합된 길이는 접합온도가 800°C인 경우 3.1절에 전술한바와 같이 패턴형상의 변화가 없기 때문에 초기 피접합계면의 길이보다 낮다. 반면 접합온도가 900°C인 경우 접합된 길이는 접합압력이 증가함에 따라 패턴형상이 변화하여 접합부 전체길이가 증가하였으며, 미접합부와 보이드가 형성되지 않기 때문에 접합된 길이가 접합전 계면전체의 길이보다 긴 것으로 판단된다.

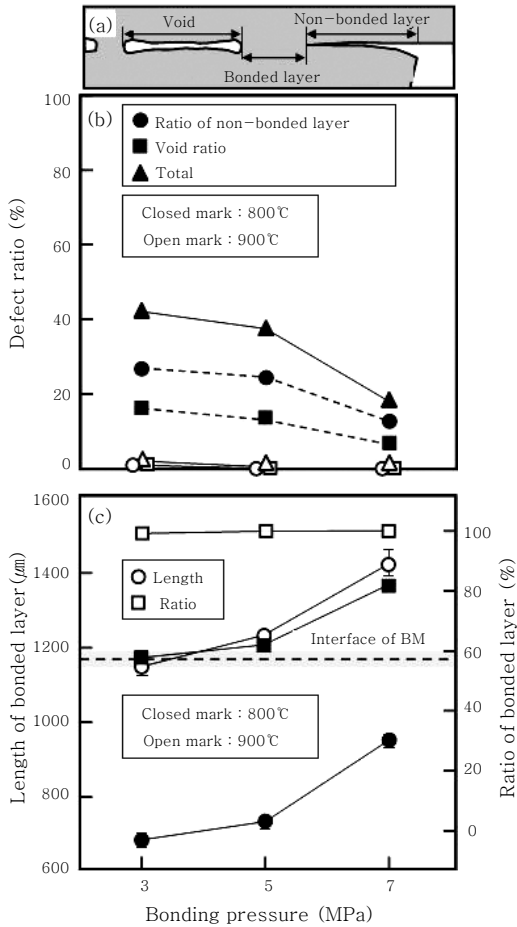


Fig. 7 Definition (a) of non-bonded layer, void and bonded layer; effect of bonding temperature and pressure on the (b) defect ratio and (c) the length and ratio of bonded layer

3.3 접합부 인장성질에 미치는 접합 조건의 영향

열교환기는 판재를 적층하고 확산접합으로 제조되므로, 통상의 인장시험편으로 인장시험을 할 수 없기 때문에, Fig. 2와 같이 접합하여 인장성질을 평가하였다. Fig. 8(a)는 유지시간을 90분으로 고정하였을 때, 접합온도와 접합압력 변화에 따른 접합부 인장하중의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 8(b)는 접합압력을 7MPa로 고정하였을 때, 접합온도와 유지시간을 변화시킨 경우, 접합부 인장하중의 변화를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 각 접합조건에 따라 접합된 길이가 다르고, 패턴의 형상(폭)도 변화하기 때문에 인장강도보다 인장하중으로 나타내었다.

Fig. 9은 파단된 시험편으로부터 대표적인 파단형태(위치)를 세 가지로 분류한 것이다. A형(Fig. 9(a, b))은 접합계면에 따라 파단된 형태이고, B형(Fig. 9(c, d))은 접합계면 근방 패턴 부분에서 파단된 형태이며, C형

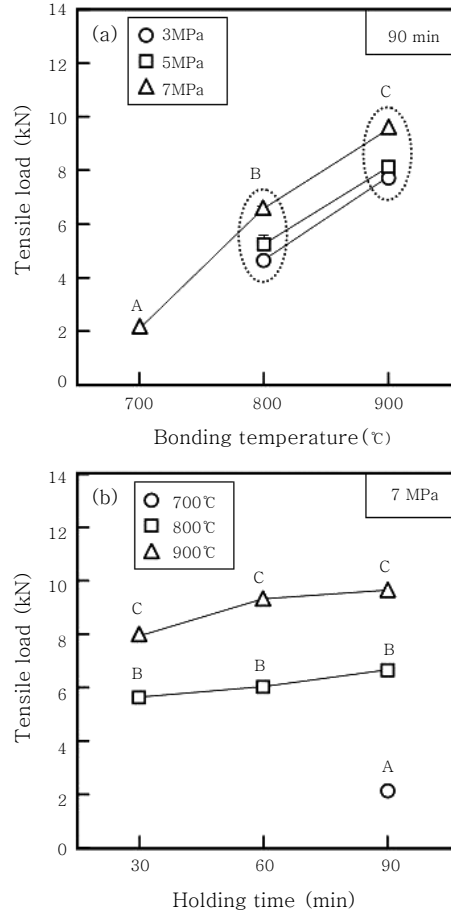


Fig. 8 Effect of (a) bonding pressure, (b) holding time and bonding temperature on the tensile load of diffusion bonded joint

(Fig. 9(e, f))은 접합계면이 아닌 패턴의 허리부분에서 파단된 형태이다. Fig. 8에 각 시험편의 파단형태를 병기하였다.

Fig. 8(a)로부터, 접합부의 인장하중은 접합온도와 접합압력이 증가할수록 증가하며, 접합온도가 접합압력보다 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 8(b)로부터 유지시간이 증가할수록 접합부 인장하중이 증가하지만 그 영향은 아주 적다.

한편 파단형태와 접합하중의 관계를 분석하여 보면, 900°C에서 접합한 시험편은 주어진 접합압력(3-7MPa)과 유지시간(30-90min)에 관계없이 모두 C형 파단형태이고, 접합하중이 약 7.7kN 이상인 것을 알 수 있다. 또한 800°C에서 접합한 시험편들은 모두 B형 파단형태임을 알 수 있다. 700°C에서 접합한 시험편은 A형 파단형태로 접합하중이 가장 낮다.

접합조건에 따른 인장성질 변화는 파단형태와 밀접한 관계가 있기 때문에, 각 파단형태의 파면을 검토하여 파단경로와 강도와의 관계를 검토하였다.

Fig. 10는 A형 파면을 관찰한 결과를 나타낸 것으로

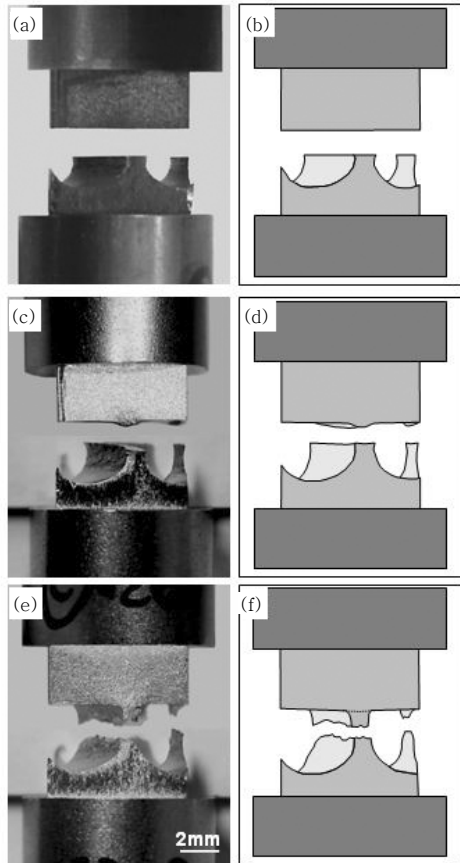


Fig. 9 Macro image of tensile specimens(a, c, e) and schematic diagram of fracture type(b, d, f) : (a, b) A-type, (c, d) B-type, (e, f) C-type

Fig. 10(a, b)로부터 접합된 흔적을 볼 수 있다. Fig. 10(b)의 A2를 확대한 파면(Fig. 10(c))에서, 접합된 영역이 인장시험으로 연신된 영역인 덤플(dimple) 파면(Fig. 10(e)의 D)과 전혀 접합이 이루어지지 않은 영역(Fig. 10(e)의 N)이 혼합된 파면임을 알 수 있다. 한편 Fig. 10(b)의 A3영역을 확대한 파면(Fig. 10(d))에서는 소성변형한 흔적이 없는 것으로부터 이 영역(Fig. 10(d)의 N)은 미접합부인 것으로 판단된다. 결국 A형 파단형태는 가장자리에 미접합부 영역이 넓고, 보이드율도 높기 때문에 이러한 파면이 형성되고 강도도 아주 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 11은 B형의 파면을 관찰한 결과를 나타낸 것으로 (a)와 (b)로부터 파단된 판재가 평평하지 않고 돌출되어 있다는 것을 알 수 있다. 돌출된 파면(b)의 B2를 확대하여 나타낸 (c)에서 왼쪽부터, 소성변형한 흔적이 없는 미접합부 영역((Fig. 11(c)의 N))과 돌출된 미접합부 영역, 한쪽으로 길게 늘어난 영역(B3), 보이드가 존재하는 덤플 파면 영역(B4)가 관찰된다. (c)에 표시한 B3, B4두 영역을 확대한 (d), (e)의 파면을 분석

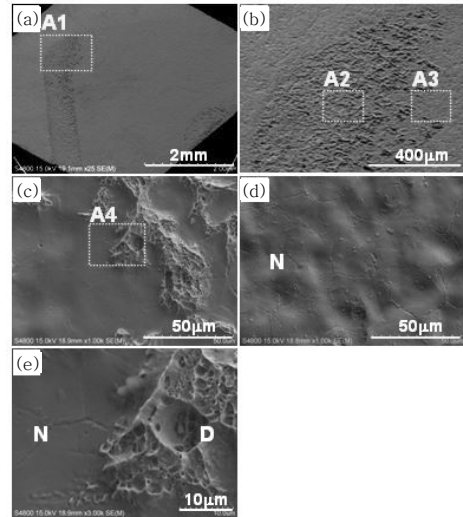


Fig. 10 Fracture surface of A-type (a) Macro SEM image of plate side; (b) A1 region in (a); (c) A2 region in (b), (d) A3 region in (b) and (e) A4 region in (c)

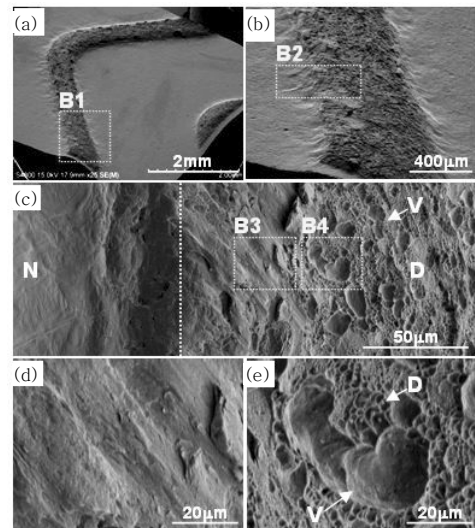


Fig. 11 Fracture surface of B-type (a) Macro SEM image of plate side; (b) B1 region in (a); (c) B2 region in (b); (d) B3 region and (e) B4 region in (c)

하면, (d)는 한쪽으로 길게 늘어난 형상이고, (e)는 약 25µm 크기의 보이드(Fig. 11(e)의 V)와 덤플 파면(Fig. 11(e)의 D)으로 구성되어 있다. A형 파단형태의 파면과 비교하면 접합면적이 훨씬 넓어진 것으로 판단된다.

Fig. 12은 B형 파단형태에서 판재가 평평하지 않고 돌출되며 파단된 원인을 파악하기 위해, B형 파단형태가 나타나는 접합조건인 800°C, 7MPa, 90분 조건에서 접합한 시험편의 인장시험 전((a)의 T₁시점)의 접합

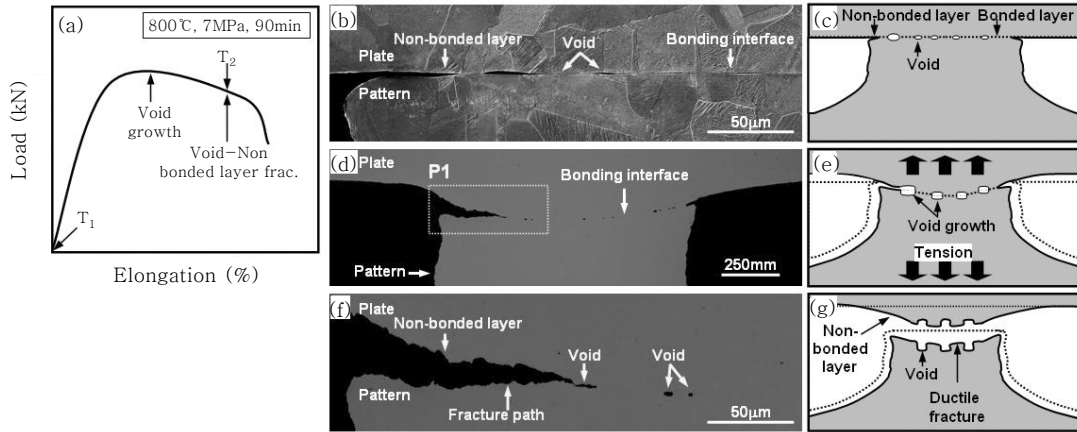


Fig. 12 Load-elongation curve (a) to failure; (b), (d), (f) microstructure of joints bonded at 800°C for 90min in 7MPa; (c), (e), (g) schematic illustration of B-type fracture procedure

부 단면(b)과 인장시험 도중에 강제 중단시킨((a)의 T₂시점) 시험편의 접합부 단면(d, f)을 나타낸 것이다. Fig. 12(b)로부터, 인장시험 전의 시험편 단면 미세조직에는 판재와 패턴의 접합계면에 미접합부와 보이드가 존재한다. Fig. 12(d)에 인장시험 도중에 강제로 중단시킨 시험편의 단면 조직사진을 나타내었다. 판재와 패턴의 접합계면을 살펴보면, 판재가 돌출되어 있고, 접합계면에 기공이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. P1을 확대하여 Fig. 12(f)에 나타내었다. 판재와 패턴의 미접합부를 기점으로 접합계면을 따라 보이드를 통과하며 파단되는 것을 알 수 있다. Fig. 12(c, e, g)는 이러한 현상을 바탕으로 B형 파단형태의 파단 과정을 모식도로 나타낸 것이다. 판재와 패턴의 접합계면에 존재하던 보이드는 인장시험이 진행되며 커지고, 미접합부를 기점으로 보이드를 통과하며 접합계면에서 파단된다. 따라서 보이드 주변 접합부에서는 파면에서 연성파면인 덤플(dimple)이 관찰된다.

Fig. 13는 C형 파단형태의 파면을 관찰한 결과를 나

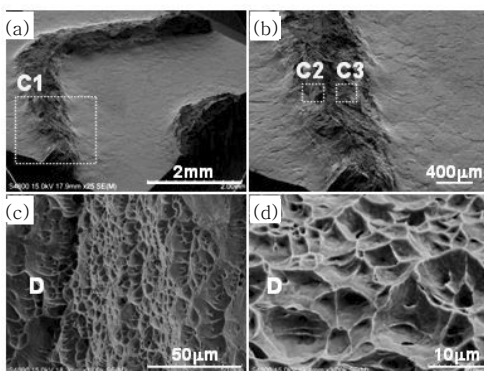


Fig. 13 Fracture surface of C-type (a) Macro SEM image of plate side; (b) C1 region in (a); (c) C2 region and (d) C3 region in (b)

타낸 것으로, (b)에서 패턴과 상판이 접합된 경계 영역이 심하게 소성변형하고, 접합부는 (c)와 (d)에서 알 수 있는 것처럼, 파면 전 영역에서 덤플 파면(D)을 나타내고 있는 것이 특징이다. 따라서 C형 파단형태의 인장하중 값은 패턴 모재의 인장성질인 것으로 판단된다.

접합부의 강도 변화는 파단형태 즉 파단위치에 따라 다르다. 즉 접합계면에서 파단되는 A형과 B형 파단형태는 접합률에 따라 변화할 것이고, C형 파단형태는 패턴의 변형 정도, 즉 최소 패턴 폭의 길이에 따라 변화할 것으로 예상된다.

따라서 B형 파단형태의 인장하중은 접합된 길이에 따라, C형 파단형태의 인장하중은 패턴 최소 폭의 길이에 따라 어떻게 변화하는지 상관관계를 검토하였다. 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 이 결과로부터 B형의 접합부 인장하중은 접합된 길이에 비례하고, C형의 인장하중은 패턴 최소 폭의 길이에 비례하는 것을 알 수 있다. Table 2는 접합된 길이와 패턴 최소 폭의 비를 나타낸 것이다. 접합된 길이(Length of bonded layer, BLL)를 패턴 최소 폭(Minimum width of pattern, MPW)으로 나눈 값이 1미만일 경우 B형 파단이 일어나고, 1이상일 경우 C형 파단이 일어날 것으로 예상된다. 접합된 길이 값을 이용하여 구한 접합면적으로 조건별 인장하중 값을 나누어 인장강도를 구해보면, as-received 모재의 인장강도(673 MPa)와 근사한 값(약 645 MPa)을 갖는다.

4. 결 론

포토에칭법으로 제작된 STS304소재에 대한 접합조건변화에 따른 고상확산접합부의 접합부 형상과 접합부의 기계적 성질과의 상관관계를 검토한 결과 다음과 같

Table 2 Effect of ratio of bonded layer length and minimum pattern width on tensile load

Fracture Type	B-Type					C-Type				
Bonding temperature(°C)	800					900				
Holding time(min)	30	60	90			30	60	90		
Bonding pressure(MPa)	7	7	3	5	7	7	7	3	5	7
Length of bonded layer, BLL(mm)	0.60	0.78	0.67	0.72	0.94	1.14	1.32	1.14	1.23	1.42
Minimum width of pattern, MPW(mm)	1.06	1.06	1.04	1.06	1.05	1.11	1.27	1.08	1.13	1.32
BLL/MPW	0.57	0.74	0.64	0.68	0.90	1.03	1.04	1.06	1.09	1.08
Tensile load(kN)	5.60	6.03	4.63	5.25	6.67	7.96	9.29	7.73	8.14	9.62
Tensile strength(MPa)	654	649	610	672	647	626	638	625	624	634

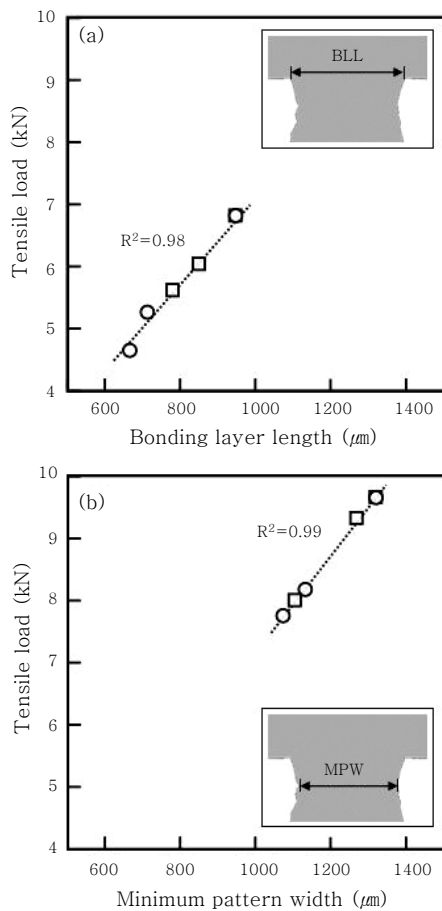


Fig. 14 Relationship between (a) bonded layer length and tensile load of B-type; (b) minimum pattern width and tensile load of C-type

은 결론을 얻었다.

1) STS304의 고상확산접합 시 접합온도가 800°C에서는 접합압력과 상관없이 모든 조건에서 시험편의 패턴형상에 변화가 발생하지 않았다. 반면 접합온도가 900°C 조건에서는 접합압력이 3MPa, 5MPa, 7MPa로 증가함에 따라서 시험편의 패턴이 높이가 감소하고 폭이 증가하였다. 이는 접합온도가 증가함에 따라

STS304소재의 고온항복강도가 감소하여 접합온도가 900°C조건에서 패턴의 변형이 발생하는 것으로 판단된다. 또한 접합하중이 가해질 때 비교적 면적이 넓은 판재보다 패턴에 더 높은 압력이 작용하게 되어 패턴의 높이 및 폭 변형이 일어나는 것으로 판단된다.

2) 접합계면의 경우 가장자리에는 미접합부가 내부에는 보이드가 존재하였고, 접합온도와 접합압력이 증가할수록 미접합부의 길이와 보이드율이 감소하였다. 또한 접합온도가 900°C조건에서는 접합압력과 상관없이 모든 조건에서 미접합부와 보이드가 관찰되지 않았으며, 접합된 길이가 접합전 계면의 길이보다 증가하였다.

3) 인장시험결과 파단형상은 접합온도가 낮은 700°C 조건에서는 미접합부가 많아 전형적인 계면파단형상이 나타나며, 접합온도가 800°C 조건에서는 접합부가 연신되어 판재가 돌출되고 미접합부를 기점으로 보이드를 통과하며 접합계면을 따라 파단된다. 한편 접합온도가 900°C 조건에서는 패턴의 허리부분에서 파단되었으며 파면은 전형적인 연성파면형상을 가졌다.

4) 접합온도에 따른 접합부 인장하중은 800°C 조건에서는 접합된 길이에 비례하고 900°C 조건에서는 패턴 최소 폭의 길이에 비례하였다. 또한 800°C 조건에서 접합압력과 유지시간이 증가함에 따라서 미접합율과 보이드율이 감소하고 접합하중이 커졌으며, 900°C 조건에서는 접합압력이 증가함에 따라서 패턴 최소 폭이 증가하여 모재 인장하중이 커졌으나, 강도로 계산해보면 모재의 인장강도(673 MPa)와 근사한 값(약 645 MPa)을 갖는다. 한편 접합된 길이(Length of bonded layer, BLL)를 패턴 최소 폭(Minimum width of pattern, MPW)으로 나눈 값이 1미만일 경우 B형 파단이 일어나고, 1이상일 경우 C형 파단이 일어날 것으로 예상할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부, 한국산업기술진흥원, 동

남지역사업평가원의 광역경제권 선도산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다. 또한, 이 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단-글로벌프론티어사업 (재) 하이브리드 인터페이스기반 미래소재연구단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2013M3A6B1078874).

References

1. G. M. Kang, A. J. Jeon, H. K. Kim, S. S. Hong, C. Y. Kang, Effect of Bonding Condition on the Tensile Properties of Diffusion Bonded Haynes230, *Journal of KWJS*, **31-3** (2013) 76-83 (in Korean)
2. M. D. Bellware, Fundamentals of Brazing for Elevated-temperature Service, *Welding Journal*, **37** (1958) 683-691
3. 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
4. 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
5. 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
6. Rabinkin, A., Wenski, E., Ribaud, A., Brazing Stainless Steel using a New MBF-series of Ni-Cr-B-Si Amorphous Brazing Foils, *Welding Journal*, **77-2** (1998) 66s-75s
7. W. F. Gale, D. A. Butts, Transient Liquid Phase Bonding, *Science and Technology of Welding and Joining*, **9-4** (2004) 283-297
8. 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, *Korean Journal of Materials Research*, **17-3** (2007) 179-183 (in Korean)
9. Osamu Ohashi, Yoshinari Kaieda, Hot Isostatic Pressing Treatment of Diffusion Welds in SUS 304 Stainless Steel, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, **6-4** (1988) 493-499 (in Japanese)
10. Osamu Ohashi, Practical Side of New Joining Method (1) Diffusion Bonding, *Journal of the Japan Welding Society*, **62-7** (1993) 512-517 (in Japanese)
11. W. H. Song, J. K. Kim, C. Y. Kang, The Effect of Bonding Condition on Tensile Properties of Diffusion Bonds of Graphite Cast Iron FCD60 to Cr-Mo Steel SCM440, *Journal of KWS*, **22-1** (2004) 77-82 (in Korean)
12. Osamu Ohashi, Diffusion Bonding Process, *Journal of the Japan Welding Society*, **82-5** (2013) 386-388 (in Japanese)