[논문] 열처리공학회지, 제31권 제2호(2018)
J. of the Korean Society for Heat Treatment.
https://doi.org/10.12656/jksht.2018.31.2.49

Ti-3Al-2.5V 튜브의 초소성 하이드로포밍과 확산접합으로 제조된 T형 구조물의 접합 특성 분석

유영훈** · 이상용*,†
*안동대학교 신소재공학부, **(주)탈리스

Analysis of Bonding Characteristics of a T-shape Structure Fabricated by Superplastic Hydroforming and Diffusion Bonding using two Ti-3Al-2.5V tubes

Y. H. Yoo, S. Y. Lee*,†**
**School of Advanced Materials Engineering, Andong National University, 1375 Gyeongdong-ro, Andong, Gyeongbuk 36729, Korea*
***Tallis Tech Co.,Ltd. 49, MTV 25-ro 20-gil, Siheung, Gyeonggi 15117, Korea*

Abstract A T-shape structure was manufactured by the superplastic forming and diffusion bonding process using two Ti-3Al-2.5V alloy tubes. A Ti-3Al-2.5V tube was prepared for the hydroforming in the superplastic condition until it reaches a surface area such as a roof welded in the hole of another Ti-3Al-2.5V tube. Afterward, the superplastic forming process and the diffusion bonding process were carried out simultaneously until the appropriate bonding along the interface area of two Ti-3Al-2.5V tubes was obtained. The bonding qualities were different at each location of the entire interface according to the applied process conditions such as strain, pressure, temperature, holding time, geometries, etc. The microstructures of bonding interface have been observed to understand the characteristics of the applied processes in this study.

(Received January 25, 2018; Revised February 9, 2018; Accepted February 14, 2018)

Key words : *Ti-3Al-2.5V, Superplastic hydroforming, Diffusion bonding, Interface microstructure*

1. 서 론

티타늄 합금은 고비강도, 고온강도, 내식성 등의 우수한 특성 때문에 항공우주 및 발전용 부품 소재로 가장 흔하게 사용되고 있다. 그러나 티타늄 합금은 낮은 성형성을 나타내기 때문에 복잡한 형상의 구조물을 제조하기 위해서는 고온에서의 성형이 필수적이다. 티타늄 합금의 초소성 특성이 처음 보고된 이후 많은 합금에 대한 연구를 통해 α+β의 2상 조직을 가지는 합금이 균일한 미세한 구형 입자를 가질 때 초소성 특성이 가장 효과적으로 발현된다는 것이 확인되었다[1-4]. Ti-6Al-4V이 대표적인 초소성 성형(superplastic forming, SPF) 합금으로 확산접합(diffusion bonding, DB) 기술과의 결합을 통한 SPF/DB 공정이 발전하여 항공 우주용 샌드위치 및 벌집 같은 복잡 형상 구조물 제조에 활용되고 있다[5-8]. 최근 레저 및 스포츠 산업의 발달로 티타늄은 자전거에도 사용된다. 자전거, 자동차와 같이 고온용이 아닌 활용 분야에서는 비용 절감을 위해 Ti-6Al-4V 대신 합금의 양을 반으로 줄인 Ti-3Al-2.5V의 활용이 경제적인 측면 뿐 만 아니라 충분한 초소성 특성도 나타내는 것으로 조사되었다[9-11]. 저가의 Ti-3Al-2.5V를 활용하더라도 SPF/DB와 같은 공정은 기본적으로 고비용 공정이기 때문에 일반 산업에서의 응용 확대를 위해서는 제조 공정비용 감축을 위한 기술 개발이 필수적이다[12, 13].

자전거의 경우 튜브와 같은 소재를 이용하여 용접과 같은 접합공정으로 가장 많은 힘을 받는 운전자

†Corresponding author. E-mail : sylee@anu.ac.kr
Copyright ⓒ The Korean Society for Heat Treatment

를 받치는 주축 시스템이 제조되고 있다. 자전거의 핸들과 연결된 헤드 축과 안장 및 바퀴로 연결되는 샤프트 시스템의 용접에 의한 접합 연결 부위는 가장 높은 응력이 미치는 모서리 부위에 있어 자전거 운행의 특성으로 용접 결함이나 용접 특성이 저하될 경우 운전자에는 치명적인 상황을 초래 할 수 있다. 이러한 문제점을 해소하기 위해서는 접합의 위치를 높은 응력 집중이 작용하는 모서리가 아닌 부위에의 접합 방법을 적용해야 한다. 튜브 형태의 소재를 접합하되 티타늄의 강도 특성을 균일하게 유지하기 위해 용접 아닌 고체 상태에서 접합하는 것이 필요하며, 티타늄의 확산접합 기술의 적용이 필요한 이유이다. 여러 개의 튜브의 확산접합을 모서리가 아닌 위치에서 수행하기 위해서는 적어도 하나의 티타늄 튜브에 많은 변형량이 필요하며, 초소성 성형과 확산접합 공정을 동시에 수행한다면 경제성을 높일 수 있다.

본 연구에서는 튜브 형태의 Ti-3Al-2.5V 소재를 초소성 조건에서 하이드로포밍 공정을 이용하여 확장변형(bulging) 시키면서 동시에 확산접합을 수행하였다. 위에 언급한 항공우주 분야의 샌드위치 또는 벌집 구조물 제작에 활용되는 초소성성형/확산접합 공정은 1단계에서 초소성 성형으로 확장변형을 완료시킨 후에 2단계로 확산접합을 수행하는 불연속 공정이라 한다면, 본 연구에서는 초소성 성형과 확산접합이 연속적으로 그리고 대부분의 공정에서 동시에 수행되도록 하는 것이 차별성이다. 또한 초소성 성형을 위해 튜브의 하이드로포밍 기술을 적용하였다. 따라서 기존의 기술인 SPF/DB와 구별하도록 본 논문에서는 초소성 하이드로포밍(superplastic hydroforming, 이하 SHF)과 확산접합(diffusion bonding, 이하 DB)의 연속 또는 동시 공정으로 SHF/DB로 명명하였다. 자전거 적용을 위한 기초 연구로써 두 개의 직선형 Ti-3Al-2.5V 튜브를 이용하여 SHF/DB 공정을 적용하여 T-형 구조물을 제작하는 실험을 수행하였다. 이 실험에서 얻은 T-형 구조물의 접합부의 분석을 수행하여 초소성 하이드로포밍을 위한 온도, 성형에 소요되는 시간과 필요한 확장성형의 범위와 압력, 확산접합에 필요한 온도, 압력, 시간에 대한 조건을 파악하고자 하였다. 접합의 품질도 접합부의 미세조직 분석으로 확인하고자 하였다.

Table 1. Chemical composition of the Ti-3Al-2.5V tube

Element	Al	V	Fe	C	Ti
wt.%	3.21	2.40	0.25	0.20	Bal.

2. 실험 방법

본 연구에서는 두 개의 직선형 튜브를 사용하여 SHF/DB 공정을 통해 하나의 T-형 구조물로 제조하고, 접합된 구조물의 접합부의 상태를 현상학적으로 분석하였다. 사용된 튜브 두 개는 모두 Ti-3Al-2.5V 합금으로 되어 있다. 초소성 하이드로포밍을 통해 다른 튜브(이하 튜브-II)와의 확산접합에 사용될 확장(bulging)성형 양을 제공할 하나의 튜브를 튜브-I으로 구별하였다. 튜브-I은 외경 39 mm, 두께 2 mm인 튜브의 양쪽 면을 동일한 소재의 판재로 용접하여 밀폐하였으며, 밀폐된 튜브-I의 한쪽 끝에는 SHF에 필요한 가스압력을 가하도록 소형관이 연결되게 하였다. 튜브-II는 외경은 튜브-I과 같지만 확산접합이 가해지는 부재로서 튜브-I보다 적은 하중을 받는 것을 고려하여 두께가 0.9 mm인 것을 사용하였다. 사용된 튜브의 조성은 ICP를 통해 분석하였으며 Table 1과 같다. 전체 SHF/DB 공정은 유압에 의한 속도 및 하중 제어가 가능한 200톤 서보제어 유압프레스에서 수행되었다. 두 개의 튜브를 성형용 금형에 설치하고 Ti-3Al-2.5V의 초소성 성형 온도인 870°C를 유지되도록 한 후에 SHF/DB 공정이 수행되었다. 튜브 성형온도를 위한 가열은 먼저 금형을 가열하여 목표 온도에 도달하도록 하고 열전대를 이용하여 공정이 진행되는 동안 성형온도가 유지되도록 금형온도를 제어하였다. 금형이 가열되는 동안 질소주입을 통해 튜브의 산화를 방지하도록 하였다. Ti-3Al-2.5V의 SHF에 적절한 온도 및 시간 조건은 예비 실험을 통해 선정되었다[14]. 튜브-I의 SHF에 필요한 압력은 질소 주입으로 이루어지며 10 bar, 20 bar, 30 bar로 단계적으로 증가시켰다. SHF/DB에 의해 제조된 T형 구조물은 절단하여 전체 접합부의 단면, 특히 전체 접합 부위의 관찰을 통해 분석하였다. 접합부 전체의 관찰을 위해 경면연마와 저배율 관학현미경이 사용되었다. 전체 접합면의 관찰 후에 선택된 부위에 대해 접합계면의 미세조직을 광학현미경과 SEM을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 두 개의 Ti-3Al-2.5V 튜브의 T형 접합을 위한 SHF/DB 공정

Fig. 1은 두 개의 Ti-3Al-2.5V 튜브를 이용하여 T형 구조물을 제조하는 공정의 모식도를 나타내고 있다. 그림에서 수직으로 놓여 있는 튜브-I은 SHF에 필요한 압력을 가하기 위해 제공되는 왼쪽의 가스주입구외에는 오른쪽 끝에 용접을 통하여 밀폐되게 제작되어 있다. 수평으로 T형의 기둥을 만들 튜브-II는 기본적으로 튜브-I과 같은 가스주입구를 오른쪽에 갖추고 있으나 왼쪽의 밀폐는 튜브-II의 끝단에서 약 30~50 mm 정도 오른쪽으로 위치하여, 내부에서 용접으로 고정된 칸막이(X)를 통하여 이루어지게 제작되었다. 따라서 튜브-I과 튜브-II는 칸막이에 의해 각각의 밀폐 공간이 분리된다. 두 개의 튜브를 이용한 T형 구조물 접합 공정은 다음과 같다. 튜브-I의 SHF가 먼저 수행되어 튜브-II 방향으로 확장변형(bulging)되며, 지속적인 가압에 의해 변형된 부위가 튜브-II의 칸막이에 닿게 된다(Fig. 1(b)). 칸막이에 닿는 순간에 튜브-II 공간에서는 질소에 의해 튜브-I에서와 같은 압력수준으로 배압(back pressure)이 가해지며, 따라서 튜브-1의 확장변형은 고정된 칸막이의 면을 따라 진행되어 접촉면이 증가하게 되고, 결국은 공간 A 내부의 모든 면적에서 튜브-I, 튜브-II 및 칸막이의 접합이 이루어지게 된다(Fig. 1(c)). 칸막이와 접촉이 시작되면서 DB 공정은 시작되며 공정의 종료 때까지 SHF와 DB 공정은 연속적으로 함께 진행되는 것이 본 기술의 특징이다. SHF/DB가 수행되는 온도는 870°C이며, 최대 가스 압력은

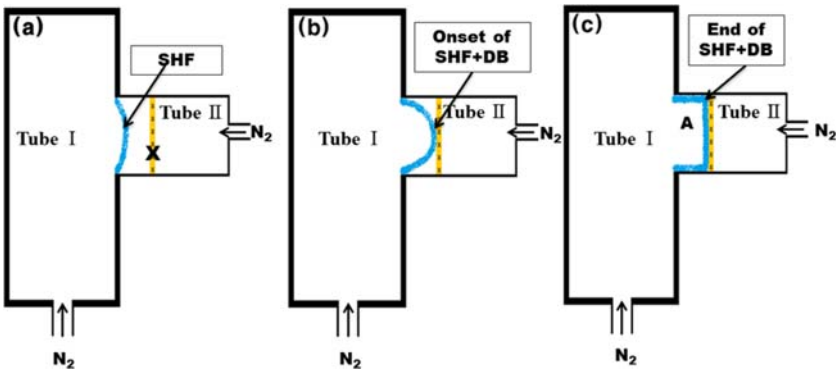

Fig. 1. Schematic expression of the superplastic hydroforming (SHF) and the diffusion bonding (DB) process to fabricate of a T-shape structure using two linear Ti-3Al-2.5V tubes.

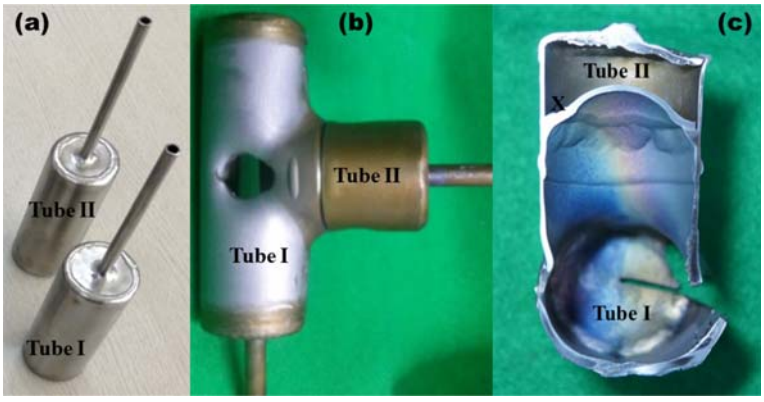

Fig. 2. Two Ti-3Al-2.5V tubes preforms (a), a T-shape sample (b) and a cross section (c) of the sample for the analysis of microstructures at the interface bonded by the SHF/DB process.

약 30 bar, 공정 시간은 150~200 min 범위로 수행되었다. 전체 공정 소요시간 중에서 약 80~85%의 시간이 SHF와 DB가 동시에 진행되는 시간이었다. 공정 조건은 참고 문헌에 상세하게 설명되어 있다[14].

Fig. 2에는 실험을 위해 준비한 튜브와 SHF/DB에 의해 접합된 Ti-3Al-2.5V T형 구조물의 예를 볼 수 있다. Fig. 2(a)에는 SHF/DB에 사용하기 위해 준비한 튜브-I과 튜브-II의 모습을 볼 수 있다. Fig. 1에서 설명한 바와 같이 튜브 양쪽 끝을 용접으로 밀폐한 것이며, 한쪽 끝에 질소 주입을 위한 관이 연결된 모습이다. 튜브-II를 접합부 위치 선정에 필요한 크기만큼 절단하여 사용한 것을 Fig. 2(b)에서 볼 수 있다. Fig. 2(b)의 샘플에서 수평방향으로 절단한 단면을 Fig. 2(c)에 나타내었다. Fig. 2(c)에서 튜브-I과 튜브-II의 사이에 X로 나타낸 것은 칸막이이다. 칸막이는 양쪽의 압력이 균형을 이루며 유지되어 변형이 일어나지 않아야 한다. 그러나 그림의 샘플의 경우에는 SHF/DB 접합이 진행되는 동안 튜브-I 쪽의 압력이 칸막이의 중심부에서 크게 증가해졌음을 말해준다. 이러한 현상은 칸막이의 가장자리, 단면으로 보면 모서리 부위를 채우기 위해 필요한 압력의 증가에 기인하며, 공정의 후반부에 발생이 가능한 상황이다. 이와 같은 압력의 불균형은 제어를 통해 조정이 가능하다.

3.2 SHF/DB 접합 계면 부위의 미세조직과 접합 특성

Fig. 3은 Fig. 2(b)에 나타나 있는 단면에 대해 경면 연마를 수행한 후에 에칭을 하지 않은 상태에서 광학현미경을 이용하여 단면 전체의 접합 상태를 관찰하는 것이 가능하도록 한 사진이다. X로 표시한 칸막이를 경계로 아래쪽이 튜브-I, 위쪽이 튜브-II 구역임을 표시하였다. ①~⑩으로 나타낸 것은 확대사진을 촬영한 부위의 번호이다. 이 번호는 아래에 설명될 SEM 사진의 위치를 확인하는 데에도 활용된다. ①, ②와 ⑨, ⑩은 튜브-I과 튜브-II가 직접 접합되는 왼쪽 및 오른쪽 측면의 접합부이며, ③과⑧은 왼쪽 및 오른쪽 모서리의 접합 상태를 보여주고 있고, ④~⑦은 튜브-I과 칸막이가 접합되는 부위이다. 여기에 나타낸 샘플에서 광학현미경 사진으로 분명하게 접합이 되지 않은 부위로 관찰되는 곳은 ①, ⑧ 및 ⑩ 부위로 나타났다. 이 부위들은 870°C에서 3시간 동안 SHF/DB를 수행하여도 접합이 되지 않은 경우가 발생할 수 있으며, 이것은 공정의 진행과정의 특성과 관련이 있다. 이 사진을 고려하면, 튜브-I이 공정의 초기에 아래쪽부터 확장변형(bulging)되어 올

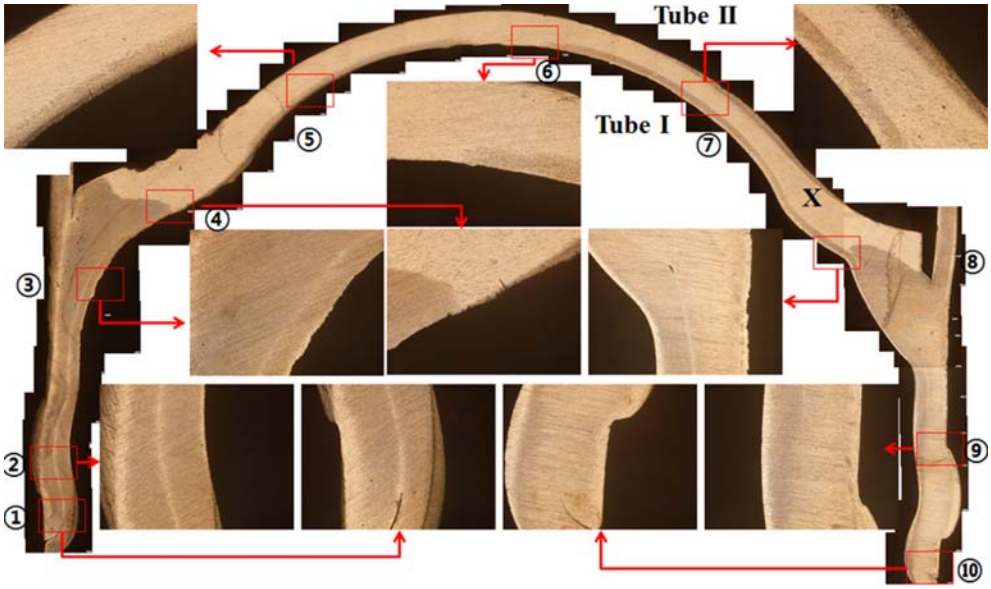

Fig. 3. The panoramic optical micrographs after polishing of a cross section showing the entire region of the bonded structure processed by SHF/DB.

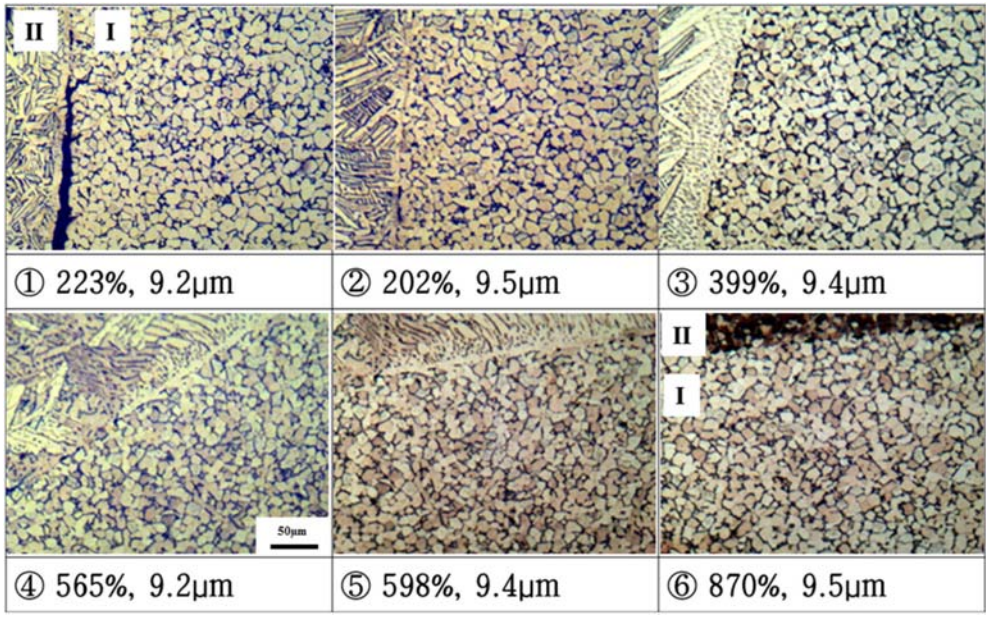

Fig. 4. The optical micrographs at different locations after etching of a cross section of the bonded structure with the values of the strain and the average grain size.

라오며, 튜브-II와의 첫 접촉은 ⑥의 칸막이에서 이루어지고, 이후 칸막이의 좌우로 확장변형되며 접촉하다가 ①, ⑩의 측면 아래 부위에 접촉되어 접합이 이루어지는 과정을 거친다. ③과⑧의 모서리 부분까지 접촉 및 접합이 이루어지기 위해서는 더 많은 확장변형이 필요하다. 여기에서 필요한 추가적인 확장변형은 변형량의 급격한 증가를 위한 압력이 요구되기도 하지만, 압력 증가의 필요성은 이미 접합된 부위는 변형량이 적기 때문에 모서리를 채우기 위한 곡률은 점점 작아지며, 모서리 곡률이 작아질수록 소요되는 압력은 크게 증가된다. 본 실험에서 모서리를 채우는 확장변형에 필요한 질소의 압력은 870°C의 온도 조건에서 약 30 bar가 적정한 것으로 실험되었다.

Fig. 4는 Fig. 3의 ①~⑥부위의 미세조직을 관찰하기 위해 에칭 후에 광학현미경으로 촬영한 사진을 나타내었다. 각각의 사진 아래에 기재된 숫자에서 %로 표시한 것은 해당 부위의 변형률 값을, μm로 나타낸 것은 해당 부위의 결정립의 직경이다. 사진에서 I로 표시된 부분은 튜브-I이며, II로 표시한 부분은 튜브-II(①~③)와 칸막이(④~⑥)이다. 변형률 값은 에칭 상태에서 구별되는 튜브-I의 이미지를 얻은 후에 해당 부위의 두께 측정값에서 2 mm의 초기 두께로부터의 감소율을 계산하여 얻은 것이며, 성형품의 변형률을 상대적으로 비교하기 위한 간접적인 측정값으로 사용하였다. ①~⑤의 II부위의 조직은 온도가 β상 영역임을 보여준다. 이러한 온도 조건은 접합용 튜브를 준비할 때에 칸막이를 튜브-II에 용접하는 과정의 열영향에 기인한 것으로 기술적으로 제어가 가능하며, 본 연구에서는 결과를 해석하는 데에는 문제가 없다. 용접 영향부에서 멀리 떨어진 ⑥의 II부위는 Ti-3Al-2.5V의 α+β의 균일한 미세조직을 볼 수 있다.

변형률 값을 보면, 칸막이 부위에서의 튜브-I의 변형량이 가장 크게 나타났다. 마지막에 변형되는 모서리(④)가 상대적으로 적은 이유는 칸막이 배압 조절의 이상으로 칸막이 부위에 대한 변형량이 많았기 때문으로 판단된다. 칸막이의 위치를 고정하도록 배압을 적절히 제어했을 경우 최대 변형률은 ④부위 근처에서 발생하는 것이 예상된다. 수백%의 변형률 값은 본 연구의 SHF/DB 공정이 전형적인 초소성 조건에서 진행되었음을 말해준다. 결정립 크기의 값과 결정립의 형상은 모든 성형 부위에서 균일하게 유지되고 있다는 것과 초소성 조건이 공정 기간 중에 잘 유지되고 있었음을 말해준다.

Fig. 5는 실험에 사용된 Ti-3Al-2.5V 튜브의 시편의 결정립 크기 변화 관찰을 위해 수행한 진공로를 이용한 열처리 실험 결과를 보여준다. 그래프 아래의 SEM 사진은 Ti-3Al-2.5V 튜브 원소재의 조직이며 평균 결정립 크기는 5.7 μm이다. 870°C에서는 5시간까지의 온도 유지에서도 균일한 구형의 α+β상의 조직을 유지하며 평균 입자크기는 평균 9.6 μm 정도까지 증가한다. 결정립의 증가는 가열의 초기에 비교적 빠르게 일어난 후에, 유지시간이 길어질수록 증가폭은 미미해지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에는 SHF/DB에 의해 접합된 접합부의 서로 다른 4개의 위치에서의 SEM 사진들과 접합 과정 변화의 모식도를 함께 나타내었다. 이 모식도는 전형적인 확산접합 과정을 설명하는 모식도로 흔히 활용된다[15]. Fig. 6의 (1), (2), (3) 및 (4)의 위치는 Fig. 3 및 4에서 찾을 수 있다. (1)은 Fig. 3 및 Fig. 4의 ①에 해당하고, (2)는 ④, (3)과 (4)는 ⑥부위에 해당한다. Fig. 6의 SEM 사진 안에 II과 I은 각각 튜브-II와 튜브-I이다. Fig. 4에서 설명한 바와 같이 접합부의 위치 또는 변형량의 증가에 따라 접합 상태의 진행 정도를 확인 할 수 있다. 확산 접합의 초기단계에 해당되는 (1)에서는 두 튜브 재료의 접합에 필요한 접촉이 이루어지지 못하였다. (2)에서는 두 튜브 재료의 접합부 전체가 소성변형을 통해 접촉이 된 후 소성변형과 확산접합이 진행되며 공동(void)이 길이 형태로 축소되는 것을 볼 수 있다. (3)은 확산이 지배적인 공정 단계로 접합이 계면 이동을 통한 공동의 축소 및 소멸 과정의 순간을 보여준다. (4)는 마지막 단계로 확산에 의해 접합 계면의 구분이 안 될 정도로 두 재료의 접합이 완성되었음을 알 수 있다. 이 사진의 의미는 본 연구에 적용된 SHF와 DB 공정이 연속적으로도 일어나지만, 동시에도 진행된다는 것과 Ti-3Al-2.5V의 확산접합 과정은 전형적인 확산접합의 형태를 따른다는 것을 확인한 것이다[16]. 확산과정의 사진에서도 볼 수 있듯이 본 연구의 공정에서는 접합의 품질에 영향을 미치는 산화피막의 영향은 없었다. 공정 중에 질소에

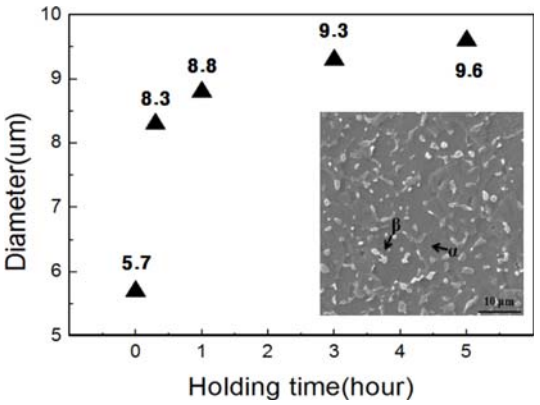

Fig. 5. The effect of holding time at 870°C on the average grain size of the specimen cut from an as-received tube of Ti-3Al-2.5V and a SEM image showing the as-received microstructure.

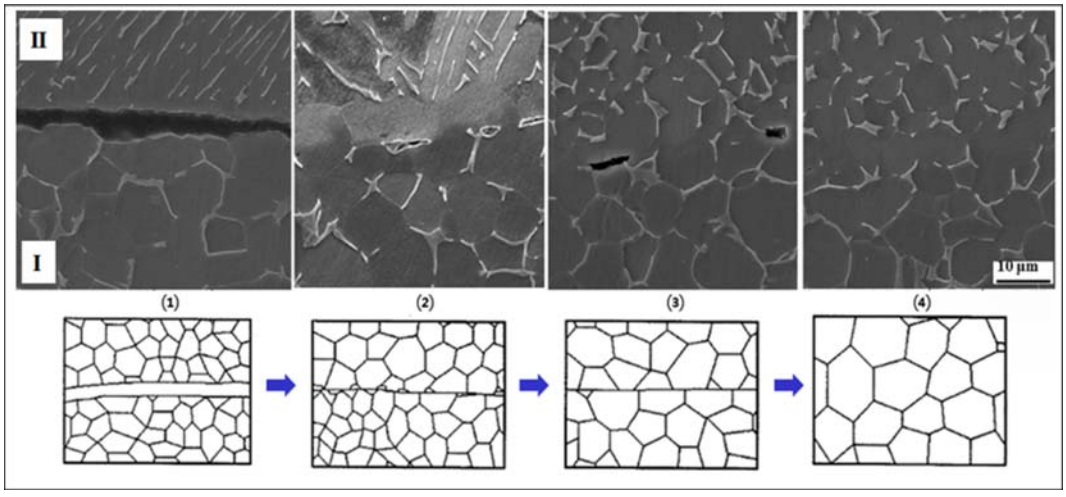

Fig. 6. The SEM micrographs at different locations of the bonding interface of two Ti-3Al-2.5V tubes processed by SHF/DB showing the development of the bonding processes as shown in the schematics.

의한 산화억제도 있지만 산화에 사용된 산소는 600~700°C에서는 Ti에 용해되는 것으로 알려져 있다[16]. 따라서 870°C에서 수행하는 본 공정에는 산화피막으로 인한 영향은 공정 기술 측면에서는 무시할 수 있다. 종합적으로 본 논문에서 제시한 870°C의 온도와 30bar의 압력 및 3시간 정도의 공정조건에서 재료의 결정립과 같은 미세조직은 초소성 성형 조건이 유지되고 있음을 확인해준다.

4. 결 론

두 개의 직선형 Ti-3Al-2.5V 튜브를 이용한 T형 접합 구조물의 제조에 초소성하이드로포밍(SHF)과 확산접합(DB)의 연속 및 동시 공정을 활용하였고, 구조물 접합부 단면 부위의 관찰 및 분석을 통하여 접합 공정 과정과 접합부 계면의 특성을 현상학적으로 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 접합에 필요한 변형은 하나의 튜브에서 초소성 하이드로포밍에 의한 확장변형(bulging)으로 얻어졌다. 확장변형이 진행되며 다른 튜브와의 접촉되고 확산에 의한 접합이 이루어지는 진행 과정을 단면의 관찰을 통해 확인할 수 있었다.

2. 두 튜브의 접합에 필요한 최초 접촉 부위는 확장변형(bulging)의 가운데 부위, 즉 본 실험의 경우 칸막이 중심 부위였으며 이후 확장변형과 확산에 의한 접합이 칸막이 면을 따라 동시에 진행되었다. 마지막으로 칸막이의 가장자리, 단면으로는 모서리 부위가 접합되는데 여기서 접합 결함이 쉽게 발생함이 확인되었다.

3. 관찰된 SHF/DB 접합 단면에서 최대 변형률은 870%로 측정되었고 칸막이 부위전체에서 측정된 변형률은 400~870% 였으며, 측면의 모서리부와 아래쪽의 접합 결함이 발생된 부위의 변형률은 200% 정도로 나타났다.

4. SHF/DB의 공정 온도와 소요시간은 각각 870°C와 약 3시간이었다. 관찰된 단면부의 전체에서 변형률의 차이와 접합시간의 차이에도 불구하고 미세조직은 균일하였으며, 입자의 크기는 9.2에서 9.5 μm의 범위로 거의 균일한 것으로 측정되었다. 이는 전체의 공정에서 초소성 성형 조건이 잘 유지되었음을 확인해 주었다. 또한 접합 단면에서 문헌에서 알려진 확산접합이 진행되는 모든 단계의 미세조직 상태를 관찰하는 것이 SEM 조직 관찰로 확인되었다.

5. 접합부의 관찰을 통해 SHF/DB 공정 수행에 필요한 적절한 공정 조건을 파악하는 것이 가능하였다.

후 기

이 논문은 2015학년도 안동대학교 학술연구조성비(연구교수)에 의하여 연구되었음.

References

1. D. Lee and W. A. Backofen : Trans. TMS-A.I.M.E **229** (1967) 1034.
2. A. K. Ghosh and C. H. Hamilton : Metall Trans. **10A** (1979) 699.
3. N. E. Paton and C. H. Hamilton : Metall Trans. **10A** (1979) 241.
4. M. T. Cope, D. R. Evetts and N. Ridley : J. Mat. Sci. **21** (1986) 4003.
5. A. K. Ghosh and C. H. Hamilton : J. Def. Sci. **36** (1986) 153.
6. D, G, Sanders and M. Ramulu : J. Mat. Eng. Perform. **13** (2004) 744.
7. Y. X. Xun and M. J. Tan : J. Mat. Process. Tech. **99** (2000) 80.
8. G. Q. Wu and Z. Huang : Scripta Mat. **45** (2001) 895.
9. A. Salam and C. Hammond : J. of Mat. Sci. Letters **19** (2007) 1731.
10. S. Gollapudi, I. Charit and K. L. Murtye : Acta Materialia **56** (2008) 2406.
11. A. Salam : J. of Material Science **39** (2004) 7077.
12. R. K. Rayudu, T. Arunkumar, S. S. Bhattacharya : Trans Indian Inst. Met. **66** (2013) 313.
13. P. Ray, B. J. Mac Donald, J. Mech. Sci. **47** (2005) 1498.
14. G. S. Bae, S. Y. Lee : J. of the Korean Soc. for Heat Treatment **27** (2016) 56.
15. AWS: Diffusion Welding and Brazing-Welding Handbook **37** (1980) 311.
16. F. A. Calvo, J. M. Gomez De Salazar, A. Urena, J. G. Carrion and F. Perosanz : J. of Material Science **27** (1992) 391.