

티타늄 자전거의 다중 조인트 접합을 위한 초소성 하이드로포밍과 확산 접합 기술

유영훈¹ · 이상용^{2#}

Joining of Multi Nodes of a Titanium Bicycle by the Superplastic Hydroforming and Diffusion Bonding Technology

Y. H. Yoo, S. Y. Lee

(Received December 11, 2018 / Revised December 28, 2018 / Accepted January 10, 2019)

Abstract

The superplastic forming/diffusion bonding process has been developed to fabricate a core frame structure with joint nodes out of tubes, for the development of a titanium high performance bicycle. The hydroforming process has been applied for bulging of a tube in the superplastic condition before, and during the diffusion bonding process. In this experiment, a commercial Ti-3Al-2.5V tube was selected as raw material for the study. The forming experiment has been performed using a servo-hydraulic press with a capacity of 200 ton. Next, nitrogen gas was used to acquire necessary pressure for the bulging and bonding of the tubes to fabricate the joint nodes. The pertinent processing temperature was 870°C for the superplastic hydroforming/diffusion bonding (SHF/DB) process, using the Ti-3Al-2.5V tube. The bonding quality and the progress of bulging and diffusion bonding have been observed by the investigation of the joining interfaces at the cross section of the joint structure. The control of the nitrogen pressure throughout the SHF/DB process, was an important factor to avoid any significant defects in the joint structure. The whole progress stage of the diffusion bonding could be observed at a joint interface. A core structure with 5 joint nodes to manufacture a titanium bicycle could be obtained in a SHF/DB process.

Key Words : Multi joint node, Titanium bicycle, Superplastic hydroforming, Diffusion bonding, Interface microstructure.

1. 서론

항공우주 및 발전용 부품 소재로 활용되고 있는 티타늄 합금은 자동차 산업에의 적용과 함께 최근에는 자전거, 골프, 야구, 낚시와 같은 스포츠 용품으로도 응용이 확대되고 있다[1]. 자전거의 경우는 튜브 소재를 사용하여 용접에 의한 접합이 흔히 사용된다. 자전거 핸들에 연결되는 주축과, 바퀴 및 안장에 연결되는 축 시스템의 용접에 의한 연결부위는 운행 중에 높은 응력이 미치게 되며, 용접 결

함이나 용접 특성이 저하될 경우 운전자에게는 위험한 상황이 올 수 있다[2]. 이러한 응력 집중은 접합 방법과 접합 위치의 변경으로 완화할 수 있다. 티타늄의 강도를 균일하게 유지하기 위해 용접이 아닌 고상접합의 적용이 대안이 될 수 있다. 응력 집중에 의한 손상을 피하기 위해 모서리가 아닌 부위에서의 접합의 수행이 필요하다.

본 연구는 티타늄 자전거의 핵심 구조물이며 핸들-바퀴-안장을 연결하는 축 시스템을 여러 개의 튜브 소재 간의 접합으로 제조하는 공정 개발 연구이다. 티타늄 튜브 간의 접합에 고상접합인 확산접합을 적용하고, 튜브들 간의 접합부 위치를 모서리가

1. (주) 탈리스

2. # 국립안동대학교 공과대학 신소재공학부

Corresponding Author : Dept. of Advanced Materials Engineering,
Andong National University, E-mail: sylee@anu.ac.kr,
ORCID ID: 0000-0002-2346-5973

아닌 부위로 변경하고자 하였다. 즉 하나의 튜브의 변형을 크게 하여 다른 튜브의 내면과 확산접합 시키는 공정이다. 튜브의 변형량을 크게 증가 시키고 확산접합을 위해 티타늄의 초소성성형/확산접합을 적용하는 것이다. 초소성 조건에서 하이드로포밍으로 확산하는 초소성 하이드로포밍(superplastic hydroforming, SHF)으로 성형하고 확산접합(diffusion bonding, DB)이 연속적으로 진행되게 하는 SHF/DB 공정 개발이다. 자전거용 튜브 소재로는 Ti-6Al-4V 보다는 경제적이며 충분한 특성을 나타낼 수 있는 Ti-3Al-2.5V를 사용하였다[1]. Ti-6Al-4V의 초소성성형/확산접합은 많은 연구 및 개발이 되어 있다[3-6]. Ti-3Al-2.5V도 초소성 성형성에 대한 연구[7-9]는 일부 존재하나 튜브를 이용한 SHF/DB 공정 적용 예는 거의 없다. 본 연구에서는 Ti-3Al-2.5V 튜브의 SHF/DB를 위한 미세조직, 접합특성과 공정 조건의 연구를 수행하고 실제 시제품 제조까지 시도해보고자 하였다.

2. 공정 및 실험 방법

Fig. 1은 본 연구에서 개발하고자 하는 공정의 개요를 도식적으로 보여주고 있다. 단순 실린더 형상의 튜브(Tube-1)를 이용하여 초소성 조건에서의 하이드로포밍 공정을 통하여 연결이 필요한 부위들의 확산성형을 시키고, 확장된 부위가 다른 튜브(Tube-2, Tube-3)의 내벽과 확산접합을 통하여 자전거 주축 구조물을 제조하는 것이다. 용접이 아닌 고상접합의 적용과 접합부의 위치를 응력 집중 효과가 큰 부위를 피하는 것이 목표이다. 그림에는 도시하지 않았지만 한쪽이 접합된 튜브의 반대편 쪽의 접합도 동일한 공정을 적용하는 개념이다.

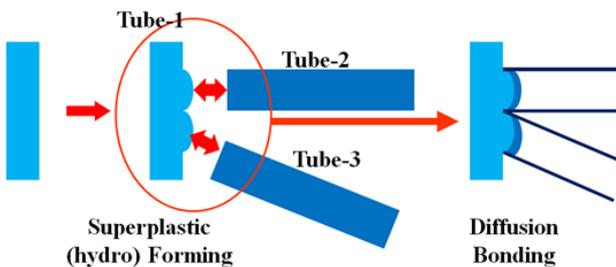


Fig. 1 Schematic of the superplastic hydroforming (SHF) and the diffusion bonding (DB) process

공정 개발에 사용된 튜브의 외경은 39mm로 같지만, 확산이 되는 쪽은 두께를 2mm로, 접합이 되는 상대 튜브의 두께는 0.9mm로 달리하였다. 튜브 소재로는 Ti-3Al-2.5V 합금을 적용하였다. Table 1에는 튜브의 조성을 ICP(Inductively Coupled Plasma)로 측정된 결과를 나타내었다.

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.

Fig. 2에는 Ti-3Al-2.5V 튜브와 미세조직을 보여주고 있다. 입체로 나타낸 SEM(scanning electron microscope) 조직에서 상부는 튜브의 표면을, 오른쪽은 수직 단면을, 정면은 튜브 길이 방향과 평행한 단면의 미세조직이다. 각 방향의 미세조직이 균일함을 볼 수 있다. 짙은 회색 바탕이 α 상으로 된 기지 조직이며 흰색 또는 밝은 회색 덩어리 형태로 분산되어 나타나는 것이 β 상이다. β 상은 α 상의 입자 경계에 분산되어 분포되어 있는 형태이다. 상분석에 의해 측정된 초기 상태의 Ti-3Al-2.5V 튜브 소재의 결정립 크기(grain size)는 평균 $5.7\mu\text{m}$ 였다.

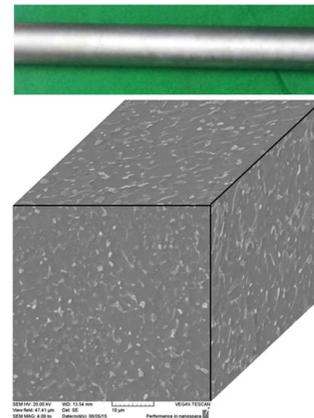


Fig. 2 The Ti-3Al-2.5V tube and SEM microstructure in as received state.

공정 개발과 시제품 성형은 유압프레스에서 수행되었다. Fig. 3에는 성형을 위해 유압프레스 하단에 장착된 가열로와 공정 단계에 따른 질소 압력 측정 곡선을 나타내었다. 가열로에서는 금형 설치 위치, 로 내부와 금형의 온도 제어, 질소 주입 제어 방법을 모식도로 보여주고 있다. 금형 온도는 SHF/DB 전체 공정 동안 등온을 유지하게 제어하였다. 함께

나타낸 질소 압력 곡선은 SHF/DB 공정에 대한 예비 실험 곡선이다. 튜브의 하이드로포밍 초기(1 단계)의 압력, DB 가 시작될 때의 2 단계, SHF/DB 를 마무리하기 위한 3 단계로 압력을 변화시켰음을 볼 수 있다. 시제품 성형에서는 2 단계와 3 단계의 시간은 크게 증가시켜야 한다.

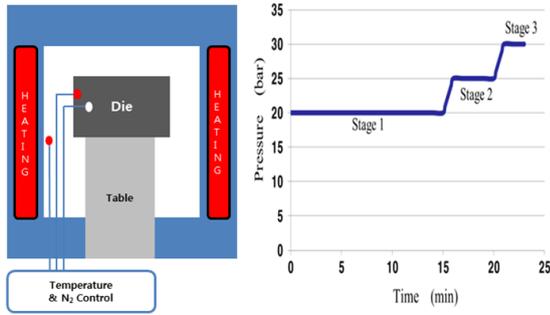


Fig. 3 The furnace system and a flow chart of N₂ pressure during SHF/DB forming to make a T-joint.

3. 결과 및 고찰

3.1 Ti-3Al-2.5V의 조직 및 성형성

티타늄 합금 튜브를 이용하여 초소성 하이드로포밍(SHF)을 수행하고 연속적으로 확산 접합(DB)을 수행하기 위해서는 고온에서의 장시간 유지가 필수적이다. 적절한 확산 접합이 얻어지기 위해서는 초소성 조건의 온도에서 적어도 1~3 시간 성형과 접합이 결함 없이 유지되어야 한다.

Fig. 4 에는 본 연구에 앞서 수행한 가열 온도에 따른 미세조직의 변화 실험의 결과 일부를 나타내었다. 주어진 온도에서 1 시간 가열하였으며, 초소성 성형에 적합한 균일하고 미세한 입자를 가지는 조직은 820~900℃ 범위에서 얻어졌다[10]. 910℃ 이상의 가열에서는 균일하게 구형의 α 기지 결정립계에 분산되어 분포하던 β 상들이 빠르게 한 방향으로 성장하여 입자의 균일성이 깨진다. 미세하고 균일한 입자가 아니면 초소성 성형성은 크게 나빠진다[1,11].

예비 성형 실험을 통해 870℃가 SHF/DB 에 적합한 것으로 판단하였다. 820℃도 가능하지만, 초소성 조건의 하한 온도 경계선이어서 공정 관리에 문제가 생길 가능성이 있으며, 900℃는 β 상의 성장으로 균일한 입자가 사라져 초소성 조건이 없어지는 상한 경계선이었다[10].

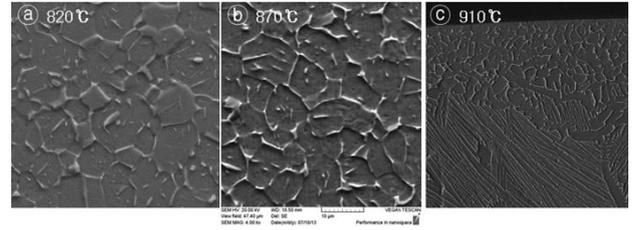


Fig. 4 SEM microstructures of the Ti-3Al-2.5V tube according to the heating temperatures.

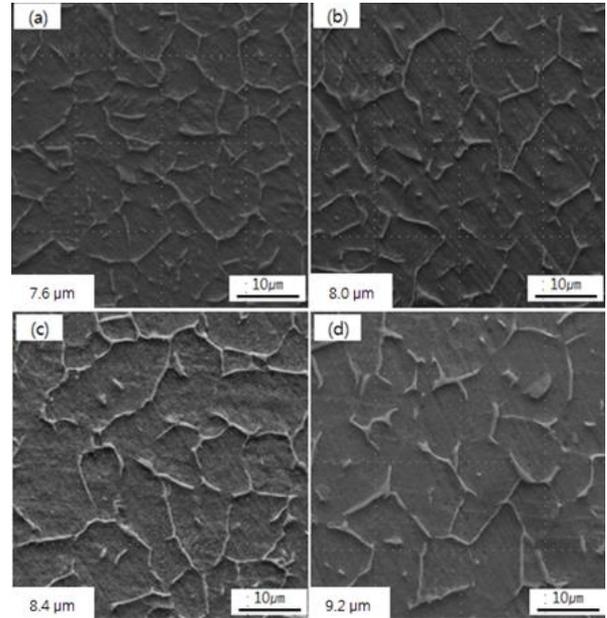


Fig. 5 SEM microstructures with values of mean grain sizes of the Ti-3Al-2.5V tube after heating at 870℃. The heating durations were (a) 1hour, (b) 2hours, (c) 3hours and (d) 4 hours.

Fig. 5 에는 870℃에서 1 시간에서 4 시간까지, 유지시간 변화에 따른 Ti-3Al-2.5V 튜브의 미세조직을 관찰한 결과를 나타내었다. 각 사진의 왼쪽 하단에는 사진의 조직에서 상분석을 통해 측정된 평균 입자 크기를 나타내었다. α 기지를 둘러싼 입계에 존재하는 β 상의 존재를 통해 입자가 구형에 가까운 형상임을 알 수 있다. 870℃에서 1 시간의 가열에서 입자 크기는 소재 입수 상태의 5.7μm 에서 7.6μm 로 성장하였고, 4 시간까지의 가열에서도 입자의 크기는 평균 9.2μm 까지 성장하였지만 α+β 로 이루어지는 조직 형상과, 각 입자들 간의 균일성은 잘 유지됨을 알 수 있다.

Fig. 6 은 870°C에서 수행한 Ti-3Al-2.5V 튜브의 초소성 하이드로포밍 및 확산 접합 예비 실험에서 측정된 부위별 미세조직과 변형률을 나타낸 것이다. 본 성형품이 얻어지는데 약 30 분(Fig. 3 의 압력-시간 곡선 참조)의 시간이 소요되었다. 그림에 삽입된 사진은 접합부 단면을 절단한 사진이다. 이 절단부의 왼쪽 반쪽을 확대하여 두께 그림을 얻은 후에, 두께 측정을 하였고, 이 두께 측정값으로부터 공칭 변형률 값을 환산하였다.

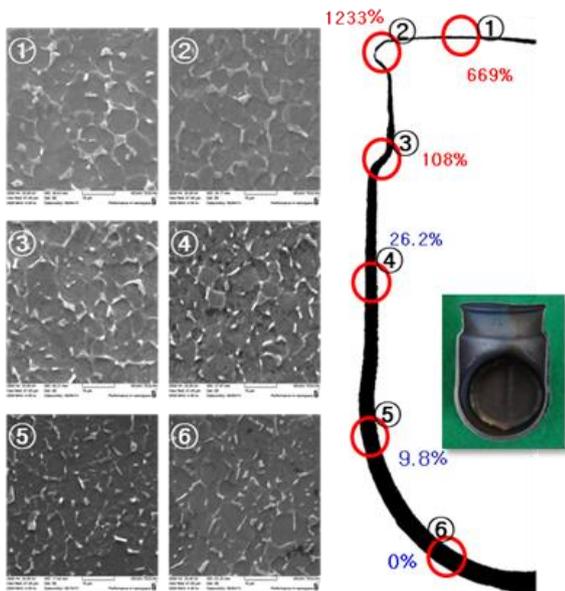


Fig. 6 Image tracing and strain measurements on the cross section (photo) of a T-joint fabricated by the SHF/DB process using two Ti-3Al-2.5V tubes and SEM microstructures at each measurement location.

사진과 투영도에 나타난 부위는 모두 하나의 튜브가 변형된 결과이다. 그림의 ②와③ 부위는 오른쪽으로 들어간 형태를 보이는데, 이 부위 바깥쪽에 금속 링으로 조이게 하여 확산 접합이 진행되게 한 구조이며, 사진에서 이 금속 링은 제거된 상태이다. ⑥의 위치는 변형률 값이 0%, 즉 변형이 되지 않은 초기 두께의 튜브와 같은 상태를 의미한다. ②의 위치가 최대 변형 진행된 부분임을 알 수 있다. 최대 변형률 값을 나타낸 위치를 포함하여 시편의 어느 부위에서도 찢어짐, 공동과 같은 결함이 관찰되지 않았다. 또한 표시된 각 부위의 SEM 미세조직은 변형률의 차이에도 불구하고 초기 조직의 형태

가 잘 유지되고 있어 이 재료의 초소성 성형성은 본 공정을 적용하기에 충분하다는 것을 확인 할 수 있었다.

3.2 초소성성형/확산접합(SHF/DB)공정

본 연구는 기본적으로 두 개의 축을 접합시키는 공정을 개발하는 것이다. 이에 대한 방안을 Fig. 7에 도식적으로 나타내었다. 그림에서 Tube-1과 Tube-2를 T형태로 맞대고, Ti-3Al-2.5V 합금의 초소성 성형 온도에서 질소 주입 압력을 통해 Tube-1을 Tube-2의 내부로 하이드로포밍(SHF)하여 Tube-2의 내부 적절한 깊이에 있는 칸막이(X)를 용접으로 설치하여, 칸막이와 Tube-2의 내벽에 확산접합(DB)이 되도록 하는 공정을 선택하였다. 칸막이(X)와 접촉이 되면서 DB 공정은 시작되며 공정의 종료 때까지 SHF와 DB는 연속적으로 또는 동시에 진행되는 것이 본 기술의 특징이다.

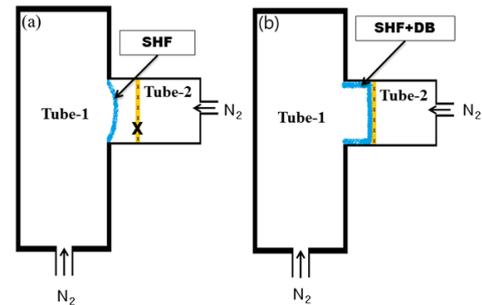


Fig. 7 Concept of a T-joint fabrication by the SHF/DB process using two Ti-3Al-2.5V tubes.

칸막이와의 접합에 필요한 배압(back pressure)을 제공하기 위해 Tube-2 내부에도 질소 가스를 사용하였다. 최대 가스 압력은 약 30bar 이었다. 모서리 부분까지 완전히 채워지며 접합이 되기 위해서는 좀 더 높은 압력의 적용이 필요하다는 것을 알 수 있다. SHF/DB를 위해서는 약 3시간이 소요되었으며, 전체 공정 중에 80% 이상의 시간이 SHF와 DB가 동시에 진행되는데 소요된 시간이었다.

Fig. 8은 Fig.7의 공정에 의해 제조된 T형 접합 구조물의 접합부에 대해 광학현미경을 이용하여 단면 접합부 전체를 관찰한 사진과 접합부의 Tube-1 쪽의 두께 변화 측정 결과를 나타내었다. 반으로 절단한 성형품과 이 성형품의 절단 단면부의 사진도 함께 볼 수 있다. ①~③으로 화살표로 표시된 위치에서

각각 Tube-1의 SHF/DB 후의 두께를 측정하여 그래프에 나타내었다. ④에서 ⑩번에 이르는 부분이 상부에 있는 Tube-2 칸막이와 확산 접합된 부분이다.

Tube-1의 성형 전 초기 두께는 2mm이다. SHF/DB 공정을 거친 후에는 ⑦번의 위치가 두께가 1.08mm로 가장 크게 나타났고 ③번과 ⑩번에서 약 0.4mm 정도로 가장 작은 두께로 측정되었다. ⑤번과 ⑩번의 위치에서 보이는 흰 부분은 접합이 되지 않은 곳이다. Tube-1에서 SHF 공정에 의해 확산된 부분이 우선 ⑦번 부위에 처음 접촉되기 시작하고, 이후의 확산은 Tube-2의 칸막이를 따라 ④와 ⑩으로 퍼지며 진행되고 마지막으로 Tube-2와 접촉된 Tube-1 부위는 ③과 ⑩부위이다. 이 결과는 SHF에 의한 확산과 DB에 의한 접합이 연속적 또는 동시에 진행될 때 요구되는 변형량과 압력의 수준을 시제품 성형에서 제어하는 유용한 기준이 되었다.

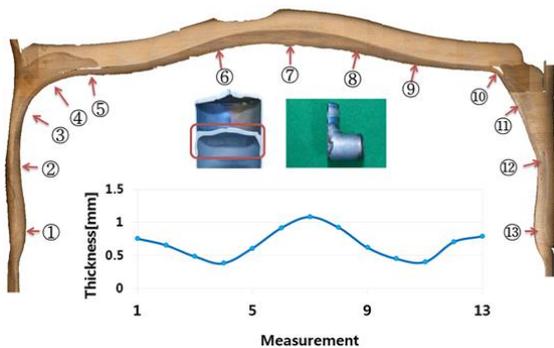


Fig. 8 Observation of bonding interface by optical microscopy and thickness measurement over cross section of a T-joint fabricated by the SHF/DB process using two Ti-3Al-2.5V tubes.

Fig. 9는 Fig.8의 ④와 ⑥사이의 부위에 나타나는 접합부 미세조직의 특징을 나타내었다. ①는 Tube-1, ②는 Tube-2이며, Tube-1이 SHF에 의해 늘어나서 Tube-2와 확산 접합된 결과이다. SEM 사진 (1)~(4)는 ④와 ⑥사이에서 관찰되는 서로 다른 위치에서의 접합부 미세조직이다. 이 네 사진은 마치 한 부위에서 시간에 따른 확산접합 과정을 보여주는 것과 같다. 즉, 접합 전, 접합 진행 중의 공동(void)만 남은 상황, 공동이 없어지고 Tube-1과 Tube-2의 접합부가 구별이 되지 않는 상태까지의 과정을 모두 볼 수 있다. 이것은 모식도로 제시된 전형적인 확산 접합의 진행과정과 같은 형태임을 보여준다[1].

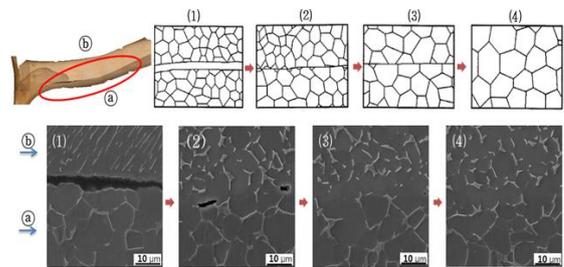


Fig. 9 SEM Microstructures of a part of T-joint bonded by SHF/DB process using two Ti-3Al-2.5V tubes and schematics showing the stages of diffusion bonding.

3.3 SHF/DB 시제품 성형

Ti-3Al-2.5V 합금 튜브의 초소성 성형 온도에서의 미세조직 및 성형성 연구와 T형 구조물 접합을 이용한 공정 적용 연구를 통해 얻어진 공정 조건을 응용하여 시제품 성형을 수행하였다. Fig. 10은 티타늄 자전거의 중심 구조물을 SHF/DB 공정으로 제조하는데 적용한 금형과 각각의 위치에 맞게 설치된 튜브 조합을 보여주고 있다. SHF/DB 공정을 적용하여 완성된 성형품도 금형 사진 아래에 나타내었다. 안장과 연결되는 수직축과 핸들과 연결되는 수직축을 연결되는 경사축의 접합이 2부위이다. 각 부위의 성형 전의 접합 준비 상태 및 성형후의 모습을 함께 볼 수 있다. 5개의 접합부에서 SHF/DB 공정이 동시에 진행되도록 하였다.

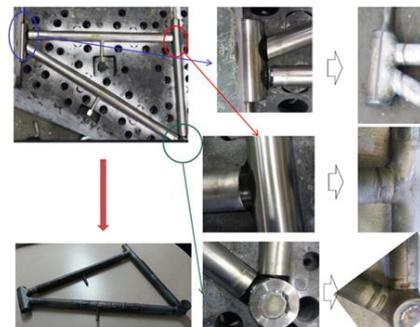


Fig. 10 Die system and products for the fabrication of 5 joints by the SHF/DB process using 4 Ti-3Al-2.5V tubes.

SHF/DB 공정의 적용에 의해 제조된 구조물을 이용하여 완성된 형태의 티타늄 MTB용 자전거를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10의 시제품의 특성 평가와 자전거 장착 후의 특성 평가는 향후에 진행하여 현재 개발되어 있는 Ti-3Al-2.5V 합금과 SHF/DB 공정을

이용한 티타늄 자전거 조인트 접합 구조물의 완성도와 특성을 향상 시킬 예정이다.



Fig. 11 Appearance of a titanium bicycle using a Ti-3Al-2.5V joint structure fabricated by the SHF/DB process.

4. 결 론

티타늄 자전거의 핵심 구조물 제조를 위해 여러 개의 Ti-3Al-2.5V 합금의 튜브를 이용하여 초소성 하이드로포밍(superplastic hydro-forming, SHF) 공정과 확산접합(diffusion bonding, DB)을 동시에 수행하는 SHF/DB 공정 기술을 개발하였다. 장시간이 예상되는 SHF/DB 공정 적용을 위해 Ti-3Al-2.5V 합금의 초소성 상태의 조직을 가열 실험을 통해 확인하여 870°C가 초소성 성형에 적합한 온도임을 확인하였다. 또한 최대 5시간까지의 가열에도 초소성 성형성을 유지시킬 수 있는 조직이 유지됨을 확인하였다. 두 개의 Ti-3Al-2.5V 튜브를 이용한 T형 구조물의 SHF/DB 공정에 의한 제조 연구를 통해 SHF와 DB 공정이 연속적 또는 동시에 수행하는 것이 가능하며, 한 개의 접합부 뿐 만 아니라, 여러 개의 접합부를 동시에 수행하는 시제품 성형에서 생산성 향상도 가능하다는 것을 확인하였다. SHF 공정에서는 질소를 이용하여 공정 중의 산화를 억제하고 확관에 필요한 적절한 가압은 약 30bar 이내였으며, 여러 부위의 동시접합에서는 접합부의 접합 정도에 따라 압력의 조절이 필요함을 확인하였다. 즉, 틸새 또는 기공이 없는 완전한 확산 접합부가 요구되지 않을 경우에는 확산 접합이 완료되는 공정 시간을 단축할 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2016학년도 안동대학교 연구비에 의하

여 연구되었습니다.

REFERENCES

- [1] C. Leyens, M. Peters, 2003, Titanium and Titanium Alloys, Wiley-VCH GmbH, Weinheim Germany, pp. 273~409.
- [2] B. H. Yoon, S. H. Kim, W. S. Chang, 2007, Recent trends of welding technology for Ti and Ti alloys, J. KWJS, Vol. 25, No.5, pp. 478~484.
- [3] A. K. Ghosh, C. H. Hamilton, 1979, Mechanical behavior and hardening characteristics of a superplastic Ti-6Al-4V alloy, Metall. Trans. Vol. 10, No.6, pp. 699~706.
- [4] J. S. Kim, Y. W. Chang, C. S. Lee, 1998, Mechanical and microstructural analysis on the superplastic deformation behavior of two-phase Ti-6Al-4V alloy, Met. Mater. Int. Vol. 4, No. 4, pp. 771~777.
- [5] Y. X. Xun, M. J. Tan, 2000, Applications of superplastic forming and diffusion bonding to hollow engine blades, J. Mater. Process. Technol., Vol. 99, No. 1~3, pp. 80~85.
- [6] H. W. Wenbo, Z. Kaifeng, W. Guofeng, 2007, Superplastic forming and diffusion bonding for honeycomb structure of Ti-6Al-4V alloy, J. Mater. Process. Technol., Vol. 183, No.2~3, pp. 450~454.
- [7] A. Salam, C. Hammond, 2000, Superplasticity in Ti-3Al-2.5V, J. of Mater. Sci. Letters, Vol. 19, pp. 1731~1733.
- [8] A. Salam, 2004, Role of connectivity of β -phase in the superplastic deformation of Ti-3Al-2.5V alloy, J. of Mater. Sci., Vol. 39, No. 23, pp. 7077~7079.
- [9] S. Gollapudi, I. Charit, K. L. Murtye, 2008, Creep mechanisms in Ti-3Al-2.5V alloy tubing deformed under closed-end internal gas pressurization, Acta Mater., Vol. 56, No.10, pp. 2406~2419.
- [10] G. S. Bae, S. Y. Lee, 2016, Microstructure of Ti-3Al-2.5V tube at heat treatments for the successive process of superplastic hydroforming and diffusion bonding, J. Kor. Soc. Heat Treatment, Vol. 29, No. 2, pp. 56~61.
- [11] C. H. Park, C. S. Lee, 2010, Enhanced superplasticity of two-phase titanium alloys by microstructure control, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No.1, pp. 5~10.