[논문] 열처리공학회지, 제29권 제2호(2016)
J. of the Korean Society for Heat Treatment.
http://dx.doi.org/10.12656/jksht.2016.29.2.56

초소성 하이드로포밍과 확산 접합의 연속 공정을 위한 Ti-3Al-2.5V 튜브의 열처리 미세조직

배근수 · 이상용†
안동대학교 신소재공학부

Heat-Treated Microstructures of Ti-3Al-2.5V Tube for the Successive Process of Superplastic Hydroforming and Diffusion Bonding

Geun-Soo Bae, Sang-Yong Lee†
Dept. of Advanced Materials Engineering, Andong National University,
1375 Gyeongdong-ro, Andong, Gyungbuk 760-749, Korea

Abstract Heating experiments using the Ti-3Al-2.5V tube materials in a vacuum furnace have been performed to investigate a pertinent range of working temperatures and holding times for the development of the successive or simultaneous operation of superplastic hydroforming and diffusion bonding. The specimens were heated at 820°C, 870°C and 920°C respectively. Holding times at each temperature were varied up to 4 hours. Holding times longer than 1 hour were selected to consider the diffusion bonding process after or during the hydroforming process in the superplastic state. Grain sizes were varied from 5.7 μm of the as-received tube to 9.2 μm after heating at 870°C/4 hours. Homogeneus granular microstructures could be maintained up to 870°C, while microstructures at 920°C showed no more granular type.

(Received January 21, 2016; Revised January 29, 2016; Accepted February 5, 2016)

Key words : *Ti-3Al-2.5V tube, Superplastic hydroforming, Diffusion bonding, Microstructure*

1. 서 론

타이타늄 합금은 고비강도, 우수한 고온에서의 기계적 안정성, 우수한 내식성과 내화학성, 생체친화성 등의 특성을 앞세워 항공우주용 부품, 고성능 수송기기 부품, 발전설비 부품, 화학 산업설비 부품, 의료용 소재 등으로 확대되고 있다. 다양한 타이타늄 합금 가운데 가장 많은 응용과 개발이 된 합금은 Ti-6Al-4V이라 할 수 있다. 최근 해양, 레져/스포츠, 풍력 등의 분야와 같이 고온 특성이 불필요하지만 타이타늄 합금의 장점이 필요한 고부가가치 및 고성능 부품산업에 Ti-6Al-4V 대신 Ti-3Al-2.5V을 적용하고 정형제조기술을 적용하여 경제성을 높이는 것이 산업체에서 요구되고 있다[1-3].

본 연구는 Ti-3Al-2.5V 합금을 이용한 타이타늄 MTB 자전거 제조 기술 개발과 연관이 있다. 자전거의 핸들과 연결된 헤드 축과 안장 및 바퀴로 연결되는 샤프트 시스템의 연결 부위는 일반적으로 용접에 의해 접합되고 있다. 용접에 의한 접합 부위는 가장 높은 응력이 미치는 모서리 부위에 있어 부품의 강도 조건에 중요한 영향을 미칠 수밖에 없다. 본 연구에서는 초소성 성형을 통해 헤드 축의 부분을 샤프트 쪽으로 이동시킨 후 확산접합에 의해 모서리가 아닌 부위에서 헤드와 샤프트를 접합하는 것을 목표로 한다. 궁극적으로는 이와 같은 공정이 모든 연결 부위에서 동시에 수행되도록 하는 것이다. 따라서 모든 부위에서 복잡한 성형 조건이 발생되게 됨은 물론이고, 하나의 연결 부위에서도 위치에 따라 초소성 변형률과 확산접합 조건에 차이가 있게 되는 어려움을 극복해야 하는 조건이다. 이를 위해서는 다양한 조건에서의 성형 및 접합 상태, 즉 온도, 시간, 압력, 변형률 등에 대한 해석이 가능한 미세조직 데

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

이터가 필요하다. 그러나 이에 적용할 체계적인 자료는 매우 미흡한 실정이다[4-8].

본 연구에서는 튜브 형태의 Ti-3Al-2.5V 소재를 초소성 성형과 확산접합의 연속작업 또는 동시작업을 통해 용접부위가 없는 조인트 구조물의 정형 제조를 위한 미세조직 분석을 수행하였다. 온도와 유지시간의 변화를 변수로 한 열처리 실험을 통해 Ti-3Al-2.5V 튜브 소재의 적절한 초소성 성형 조건을 조사하고, 초소성 성형/확산접합 부품 제조 공정 기술에 적용이 가능한 미세조직의 특징을 분석하고자 하였다. 열처리 실험의 미세조직 조건은 실제 성형품의 미세조직과 비교하였다.

2. 실험 방법

본 연구는 초소성성형/확산접합 기술을 적용하는 타이타늄 자전거 개발을 위한 기초연구로 수행되었다. 실험용 원소재로는 상용으로 제공되는 튜브를 구입하여 사용하였다. 소재의 성분에 대해서는 일반적으로 알려진 ASTM Grade 9 조성의 Ti-3Al-2.5V 튜브임을 ICP 분석을 통해서 확인하였다. 원소재 튜브의 치수는 두께 2 mm, 내경 39 m로 측정되었으며 타이타늄 자전거의 핸들과 연결된 헤드 축에의 적용을 고려하여 적절하다고 판단하였다.

원소재 튜브를 이용한 열처리 실험조건, 즉 가열온도와 유지시간은 초소성 성형과 확산접합을 수행할 것을 고려하고 문헌[4-6]과 예비 성형 실험, 상태도를 참고하여 선정하였다. 가열온도는 870°C를 기준으로 50°C씩 변화를 주어 820°C, 870°C, 920°C로 결정하였다. 상태도 기준으로 진공분위기에서 β상 변태온도는 935 ± 15°C이다[3]. 각각의 가열온도에서의 유지시간은 목표온도에 도달한 시점을 기준으로 1 min, 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h로 변화시켰으며, 로냉 한 후 미세조직을 SEM으로 관찰하였다.

열처리에는 10^{-5} Torr까지의 진공도를 나타내는 진공로를 사용하였으며 목표온도까지의 가열 속도는 5°C/min로 동일하게 유지하였다. 진공로를 사용하고 가열속도를 결정한 이유는 열처리 동안의 산화를 방지하는 목적도 있지만, 아울러 실제 부품의 초소성 성형에서 금형시스템의 가열에 매우 많은 시간이 소요되는 것을 고려하여 시편의 가열시간을 실제 부품 성형과 유사하게 맞추고자 함에 있다.

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

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

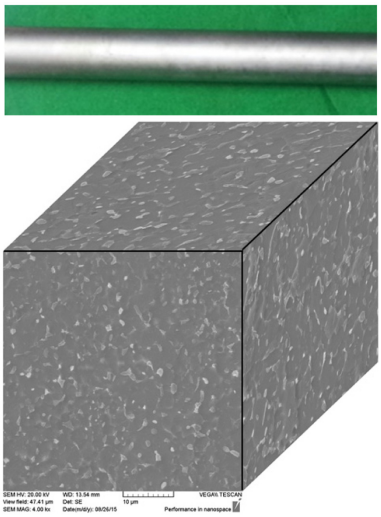

Fig. 1. As-received tube and its SEM micrographs.

열처리 실험과 더불어 870°C에서 하이드로포밍 공정으로 직선의 Ti-3Al-2.5V 튜브를 T자 형태로 초소성 조건에서 성형하였다. 하이드로포밍을 위해 질소가 사용되었고 압력은 20 bar에서 시작하여 30 bar로 증가시켰으며 성형시간은 약 30 min이었다. 성형품의 조직은 870°C 열처리 조직과 비교하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 열처리 미세조직

Table 1과 Fig. 1은 원소재 Ti-3Al-2.5V 튜브의 성분과 외관 및 미세조직을 보여준다. SEM으로 관찰한 미세조직에서 정면은 튜브 두께 방향 단면이며 상부는 튜브의 길이 방향과 평행한 부위의 내부조직을 대표한다.

모든 방향에서 균일한 조직의 형태를 가지며 이 소재가 어닐링 상태임을 나타낸다. 조직에서 밝은 색의 입자는 β상이며 α의 기지 조직에서 주로 입계를 따라 형성되어 있는 전형적인 α+β 조직을 보여준다. 상분석 프로그램을 통해 측정한 평균 입자의 크

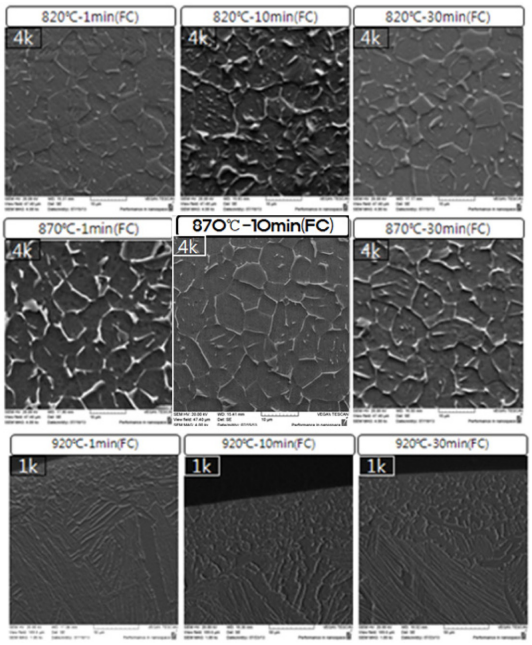

Fig. 2. SEM micrographs of the Ti-3Al-2.5V tube according to temperatures and holding times up to 30 min.

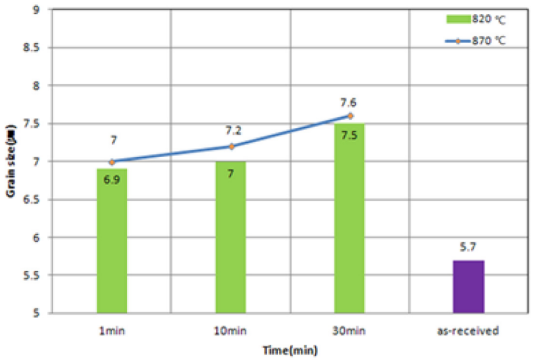

Fig. 3. Grain sizes of the Ti-3Al-2.5V tube specimen according to temperatures and holding times up to 30 min.

기는 약 5.7 μm이다.

Fig. 2는 Ti-3Al-2.5V 튜브 시편을 진공분위기에서 온도와 시간에 따라 열처리 후 로냉한 상태의 미세조직이다. 820°C, 870°C에서의 미세조직은 그림의 관찰 크기에서는 뚜렷한 변화를 보이지는 않는다. α 기지의 입자가 구형의 결정립 형태를 유지하고 있고 입자의 경계에 β상이 분포하는 양상이 유지되고 있다. 그러나 920°C에서는 이 온도에 도달한 직후 냉각된 시편에서 대부분의 구형 입자가 판상 형태의 β상으로 변태함을 관찰할 수 있다.

Fig. 3에는 상분석 프로그램을 이용하여 측정한 결정립의 크기를 온도와 유지시간에 따라서 비교하였다. 920°C에서는 구형의 입자가 대부분 존재하지 않기 때문에 820°C와 870°C에서의 결과만 의미가 있다. 열처리 전의 초기 입자크기(5.7 μm)도 함께 표시하였다. 820°C와 870°C 모두에서 가열을 통해 5.7 μm에서 7 μm로 입자가 크게 증가한 후 유지시간에 따라 미세하게 증가하는 경향을 보였다. 입자크기가 열처리 전보다 비교적 크게 증가하는 것은 800°C 이상까지 가열에 약 3시간 정도가 소요되어 가열 중에도 입자크기의 변화가 일어나기 때문으로 판단된다. 각각의 유지시간에서 870°C에서의 입자는 820°C의 입자보다 크게 나타났지만 이 차이는 미세하며 측정 오차 범위로 유사하게 나타났다.

미세조직의 관점에서는 초소성 성형을 870°C보다 낮은 온도인 820°C에서 수행해도 무방함을 의미한다. 성형 온도가 낮을수록 생산성 측면에서 비용이 절감되며 성형품의 품질은 향상되기 때문이다. 그러나 낮은 온도에서의 가능한 변형율의 감소와 실제 성형에서 발생이 가능한 부위별 금형온도의 차이를 고려하는 것이 적절한 초소성 성형 온도 선정에 중요하다.

상기의 열처리에서 유지시간을 30분까지 수행한 실험은 초소성 성형만을 수행한 경우를 가정한 것이다. 즉, 타이타늄 합금의 초소성 성형을 위한 적정 변형률 속도 범위인 10^{-4}~10^{-3}(1/sec)를 실제 성형에 적용하는 것을 고려한 것이다. 따라서 초소성 성형을 수행한 후의 미세조직은 상기한 열처리에서 얻은 미세조직과 비교하는 것이 타당하다.

그러나 초소성 성형과 확산접합을 연속적으로 또는 동시에 수행하는 경우에는 30분의 유지시간으로는 매우 부족하다. 접합이 수행되는 표면적에 좌우되지만 적어도 2~3시간 정도의 시간이 필요한 것으로 알려져 있다[8]. 이와 같은 사례를 근거로 본 연구에서 최대 4시간까지의 유지시간을 열처리에서 수행하였다. 더 긴 시간도 가능하지만 기술적 및 상업적으로 의미가 없는 것으로 판단하였다. 유지시간을 1~4시간으로 변화시키는 실험은 870°C에서만 수행하였다. 앞에서 고찰한 바와 같이 920°C에서는 짧은 가열시간에도 적합하지 않은 미세조직이 나타나기 때

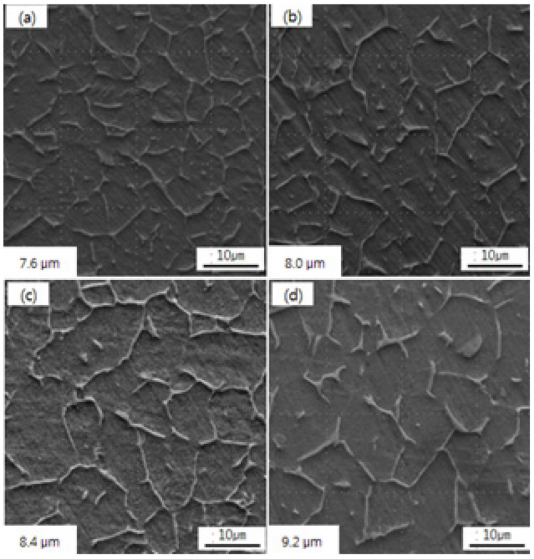

Fig. 4. SEM microstructures with grain sizes of the Ti-3Al-2.5V tube according to holding times at 870°C: a) 1 hr, b) 2 hrs, c) 3 hrs and 4) 4 hrs.

문에 의미가 없으며, 820°C에서는 더 높은 온도인 870°C의 결과를 참고로 하는 것이 가능하기 때문이다.

Fig. 4에 870°C에서 수행한 장시간의 유지시간이 미세조직에 미치는 영향을 관찰한 사진을 나타내었으며 입자크기 측정결과도 함께 보여주고 있다. α상을 기지로 하고 β상으로 경계가 구분되는 결정입자는 유지시간이 증가함에도 비교적 균일한 형태로 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 입자의 크기는 상분석 측정에 의해서 확인하였으며 약 7.6 μm에서 9.2 μm로 증가하였다. 비록 입자의 크기는 증가하였지만 입자의 형태로 보면 870°C에서 4시간의 가열에서도 초소성 성형과 확산접합의 수행은 가능한 것으로 판단된다.

Fig. 5에는 원소재 Ti-3Al-2.5V를 820°C, 870°C, 920°C에서 3시간 가열한 후 상온에서 인장시험을 수행한 후 얻은 응력-변형률 곡선들을 비교하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 인장시험은 파단이 일어날 때까지 기록되었다. 각각의 곡선위에 인장강도 값을 나타내는 곳은 큰 점으로 표시하였다. 820°C, 870°C, 920°C에서 인장강도(MPa)/연신율(%)은 각각, 623/16, 640/18, 682/14였다. Ti-3Al-2.5V의 어닐링 상태에서 인장강도/연신율은 약 620 MPa/15% 정도이다[2]. 820°C, 870°C에서는 유사한 값을 나타내고

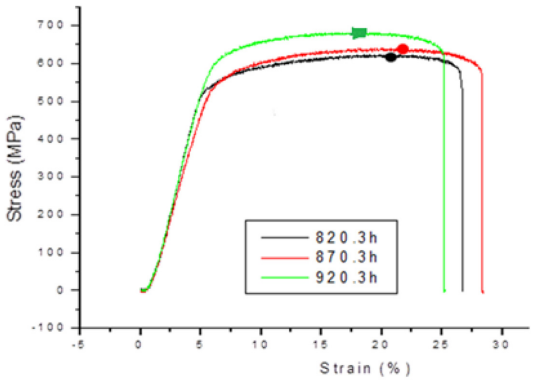

Fig. 5. Stress-strain curves of the Ti-3Al-2.5V tube after holding for 3 hours at 820, 870 and 920°C.

있으나 920°C의 경우는 β상의 증가로 강도는 증가하나 연신율은 뚜렷이 감소하는 것을 알 수 있다. 강도와 연신율 측면에서 870°C에서 가장 좋은 특성을 나타내었다. 이와 같은 실험 결과를 바탕으로 실제 샘플을 이용한 초소성 성형/확산접합에 870°C가 적합한 온도로 판단되었다.

3.2 초소성 하이드로포밍과 성형전후 미세조직

본 연구에서는 여러 개의 Ti-3Al-2.5V 소재로 된 튜브들을 이용하여 초소성 조건에서 성형을 수행하면서 연속적으로 또는 초소성 성형이 진행되면서 동시에 확산접합 공정을 통해 부품을 제조하는 기술개발을 목적으로 하고 있다. Fig. 6에 본 연구에서 수행하고자 하는 목표와 성형시스템 및 성형품의 예를 사진과 그림으로 나타내었다.

Fig. 6(a)는 기술개발의 대상이며 타이타늄 MTB 자전거의 핸들과 연결된 헤드 축과 안장 및 바퀴로 연결되는 2개의 샤프트 시스템의 핵심 연결 부위이다. 그림에서 보듯이 3개의 튜브 형태의 부재가 모두 코너 부위에서 용접에 의해 접합이 되어 있다. 이 코너 부위의 용접 접합 부위를 본 연구에서는 Fig. 6(e)에서 볼 수 있듯이 초소성 성형에 의해 높은 쐐기 강도가 미치지 않는 부위로 이동시키고 이 부위에서 용접에 의한 접합보다는 확산접합을 통해 샤프트와 헤드를 연결시키도록 하였다.

Ti-3Al-2.5V 튜브의 초소성 조건에서의 성형법으로는 하이드로포밍 공정을 적용하였으며 개략적인 공정 시스템을 Fig. 6(b)와 (c)에서 볼 수 있다. 아르곤

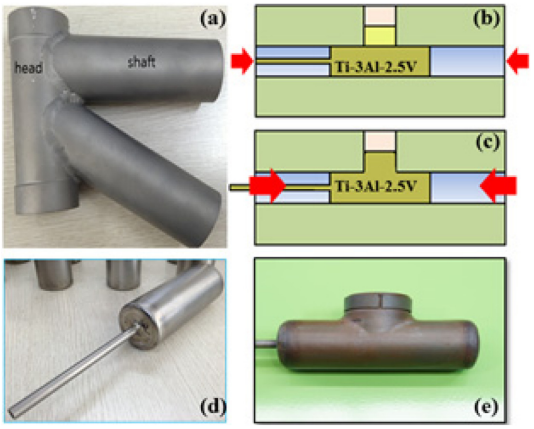

Fig. 6. Superplastic hydroforming of the Ti-3Al-2.5V tube: a) objective of technology development, b) die system before hydroforming, c) die system after hydroforming, d) tube preform for hydroforming, e) superplastically hydroformed product.

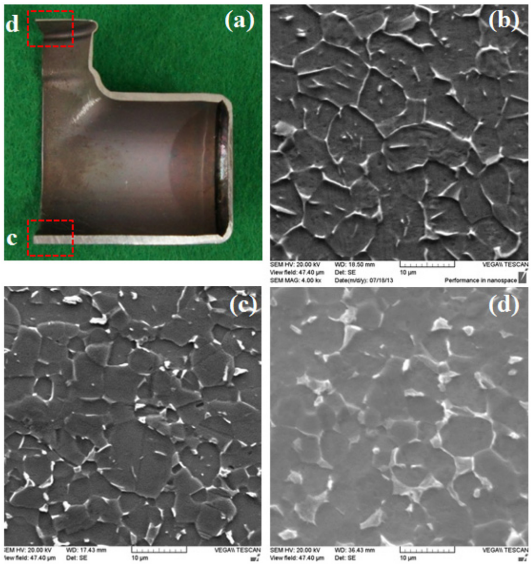

Fig. 7. A sample after superplastic hydroforming at 870°C and microstructures of a Ti-3Al-2.5V tube: a) sample cross section after forming at 870°C, b) microstructure after heating for 30min at 870°C, c) microstructure of location "c" in the sample, d) microstructure of location "d" in the sample.

분위기에 있는 금형을 초소성 성형 온도로 가열한 후 금형 내에 변형시키고자 하는 밀폐된 튜브를 준비하여 장착한다. 다음 튜브에 연결된 빨대 형상의 가스주입구를 이용하여 질소가스를 주입하여 튜브 재료의 변형에 필요한 압력을 가해주며, 이 가스압력에 의해 튜브는 변형되며 금형으로 제한되지 않은 공간으로 성형되는 공정이다. Fig. 6(d)는 성형을 위해 준비된 튜브와 가스주입을 위해 빨대형태 부위를 연결한 예비성형체(preform)이다. Fig. 6(e)에 일자형태의 튜브에서 T자 형태로 하이드로포밍 공정에 의해 초소성 성형이 완료된 상태를 볼 수 있다. 이 그림에서 상부의 링 형태가 연결된 부위가 잠재적인 확산접합 부위가 된다.

Ti-3Al-2.5V 튜브 시편에 대한 열처리 실험으로 온도와 시간에 따른 미세조직의 변화를 관찰하고 얻은 초소성 성형/확산접합을 조건의 타당성을 확인하고자 실제의 초소성 성형과 비교하였으며 결과를 Fig. 7에 요약하여 나타내었다. Fig. 7(a)는 직선 형태의 Ti-3Al-2.5V 튜브에 대해 Fig. 6의 방식과 같이 870°C에서 T 형태로 하이드로포밍 공정을 적용하여 초소성 성형한 후 미세조직 관찰을 위해 절단된 단면 사진을 보여준다. 사진에 표시된 "c"와 "d"는 미세조직 사진 Fig. 7(c) 및 (d)의 채취 부위이다. 샘플의 "c" 부위는 초소성 성형이 진행되는 동안에도 둘러싼 금형에 의해 하이드로포밍 변형이 제한되는 위치이며 성형이 끝난 후의 측정에서도 변형량은 무시할 수준이다. 그러나 이 부위도 초소성 성형이 진행되는 시간, 즉 870°C의 성형 온도에 적합하게 가열된 금형에 장착된 이후 초소성 성형이 완료될 때까지의 시간 동안 유지된 상태이다. 샘플의 "d" 부위는 하이드로포밍의 종료근처에 해당되며 측정된 변형률은 약 700% 정도이다. 가장 높은 변형률을 가지며 완료 직전에 해당되는 부위는 샘플에서 볼 때 "d"의 오른쪽 모서리 부위이며 변형률은 약 1000% 정도의 초소성 성형이 이루어졌다.

초소성 성형품의 미세조직과 비교를 위해 Fig. 7(b)에 진공로에서 870°C, 30분의 열처리된 시편의 조직을 함께 나타냈다. 모든 미세조직에서 α상의 기지와 입계에 존재하는 β로 구분되는 입자의 형태는 구형에 가까운 균일한 상태가 유지되었다. 초소성 가열 전의 입자크기는 5.7 μm로 초소성 성형의 조건에서는 약 7 μm로 미세하게 증가하였으나 균일한 형태를 유지하였고, 확산접합이 수행되는 3~4시간의 가열에서도 약 9 μm 정도의 입자크기를 가지며 균일한 구형을 유지하였다. 따라서 열처리 실험을 통해

얻은 온도와 시간에 따른 미세조직 분석에 대한 결과는 실제 부품의 초소성 성형에 적용해도 무방함을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 수행한 초소성 성형/확산접합을 고려하여 수행된 4시간까지의 실험결과도 실제의 공정에 적용이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

Ti-3%Al-2.5%V(wt.%) 튜브의 온도 및 유지시간에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였으며, 이를 토대로 초소성 성형품을 제조하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 나타내었다.

1. 온도 및 유지시간 에 따른 진공 분위기에서의 열처리 실험을 통한 Ti-3Al-2.5V 튜브의 미세조직 관찰 결과 초소성 성형을 위한 적합한 온도는 870 °C로 나타났다.

2. 초소성 성형/확산접합을 고려한 열처리 실험에서 870°C를 기준으로 4시간까지의 유지시간에서도 초소성 성형에 필요한 균일한 입자의 미세조직이 유지되었다. 유지시간이 증가할수록 결정입자의 크기가 증가하는 경향을 보였지만 결정입자의 크기는 10 μm 이하로 유지되었다.

3. 열처리 실험에서 얻은 미세조직과 초소성 성형으로 제조된 성형품에서 얻은 미세조직의 양상은 동일한 것으로 확인되었고 따라서 초소성 성형의 조건과 확산접합을 위한 공정조건에 참고자료로 적용이 가능하다는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2015학년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구되었습니다.

References

1. R. R. Boyer, O. N. Senkov and F. H. Froes : Recent Titanium Developments, The Minerals, Metals & Materials Society, (1999) 21.
2. F. H. Froes : Titanium, ASM Int. (2015) 353.
3. R. R. Boyer and E. W. Collings : Materials Property Handbook, (1993).
4. A. Salami and C. Hammond : J. of Mat. Sci. Letters **19** (2007) 1731.
5. S. Gollapudi, I. Charit and K. L. Murtye : Acta Materialia, **56** (2008) 2406.
6. A. Salam : J. of Material Science, **39** (2004) 7077.
7. F. A. Calvo, J. M. Gomez De Salazar, A. Urena, J. G. Carrion and F. Perosanz : J. of Material Science, **27** (1992) 391.
8. R. K. Rayudu, T. Arunkumar and S. S. Bhattacharya : Trans Indian Inst. Met., **66** (2013) 313.