

Ti-6Al-4V 샌드위치 패널제작을 위한 초소성/확산접합 기술개발

Development of Superplastic Forming/Diffusion Bonding Technology
for Ti-6Al-4V Sandwich Panels

이 호 성*
Lee, Ho-Sung

윤 종 훈*
Yoon, Jong-Hoon

이 승 철**
Lee, Seung-Chul

박 동 규**
Park, Dong-Kyu

이 영 무*
Yeong-Moo Yi

ABSTRACT

Ti-6Al-4V alloy is a critical strategic metal used in aerospace structure due to the high specific strength, toughness, durability, low density, corrosion resistance. Examples of application of this alloy are airframe structural components, aircraft gas turbine disks and blades. Forming of this alloy is not easy due to its high strength and low formability. However, this alloy shows superplastic properties that allow for large plastic deformation under certain conditions. Combination of superplastic forming and diffusion bonding(SPF/DB) processes of this alloy has been widely used to replace mechanically fastened structures with reduced weight and fabrication costs. In this study, superplastic forming/diffusion bonding technology has been developed for fabricating lightweight sandwich panels with Ti-6Al-4V alloy. The experimental results show the forming of titanium lightweight sandwich structure is successfully performed from 3 and 4 sheets of Ti-6Al-4V.

주요기술용어(주제어) : Superplastic Forming(초소성성형), Diffusion Bonding(확산접합), Titanium(티타늄), Aerospace Parts(항공우주용 부품), Sandwich Panel(샌드위치패널)

1. 머리말

샌드위치 패널은 기존의 기체 외피/보강재(skin-stiffener)를 대체하며, 얇은 외피를 사용하여 휨없이 높은 응력을 견딜 수 있으므로 경량화가 요구되는 거

의 대부분의 항공우주 구조물에 사용되고 있다. 특히 초음속비행을 하는 비행체의 경우 기체표면의 온도가 높아서 알루미늄합금이나 고분자기지복합재료를 사용할 수 없으므로, 비강도가 높으며 고온에서 사용이 가능한 티타늄합금이 사용된다. 티타늄합금은 상온에서 가공하기가 어려워서 복잡한 형상을 얻기 어려운 단점이 있다. 그러나 우주항공용으로 대표적으로 사용하고 있는 Ti-6Al-4V 합금의 경우 일정조건에서 초소성(superplasticity) 특성이 있으므로, 우주항공 선진국에서는 이 특성을 이용하여 부품을 생산하고 있

† 2008년 4월 30일 접수~2008년 6월 5일 게재승인

* 한국항공우주연구원(KARI)

** (주)한일단조공업(HIFG)

주저자 이메일 : hslee@kari.re.kr

다^[1]. 특히 초소성성형/확산접합(SPF/DB) 기술을 이용하여 경량 샌드위치패널을 제작하여 제조비용과 무게를 절감할 뿐만아니라, 피로특성을 향상시키고 고온기류의 통로로도 사용하고 있다^[2]. 이 기술은 기존의 성형기술과 비교하면, 적은 비용으로 경량구조물을 제작할 수 있으므로 많은 군용기 및 민항기의 구조물 제작에 적용되고 있다.

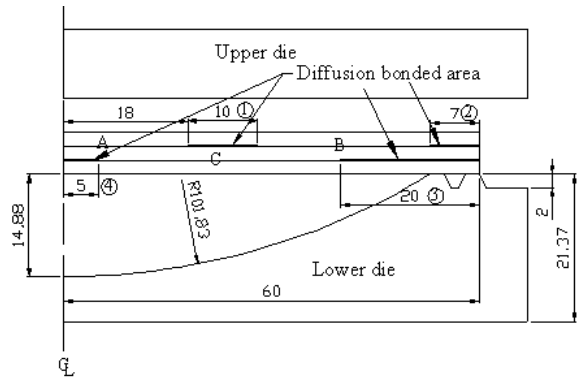
본 연구에서는 Ti-6Al-4V의 샌드위치패널을 제작하기 위하여 초소성/확산접합 기술을 개발하였다. 3장과 4장의 Ti-6Al-4V 판재를 사용하여 복잡한 형상의 보강재가 있는 샌드위치 경량패널을 제작하였는데, 유한요소해석법으로 성형거동을 예측할 수 있었고, 샌드위치구조물을 초소성성형/확산접합기술로 제작할 수 있었다.

2. 시험

본 연구에 사용한 티타늄합금의 화학성분은 Ti-6.05Al-3.89V-0.21Fe-0.11O-0.01C-0.007N(제조원 RTI International Metals, Inc., Niles, Ohio, U.S.) 이고 결정입자크기는 대략 10micron 이다. 초소성 특성은 1073K에서 1223K의 온도구간에서 3개의 서로 다른 변형률 속도로 측정하였다.

3장의 판재를 사용한 샌드위치의 경우, 모두 2.03mm 두께의 판재를 사용하였다. 그림 1에 성형치구의 단면이 나와 있다. 그림에서 A, B, 그리고 C는 각각 접합이 되지 않아야 할 부분이므로 이형(stop-off) 재료를 적용하여 고온에서 확산접합되는 것을 방지하였다. 이형 재료는 Alu-Stop LC25를 사용하였다. 그림 1과 같이 3장을 주의 깊게 하부치구에 장착한 후, 상부치구를 덮는다. 그림에서 A, B, 그리고 C는 접합되지 않고 기체압력에 의해 부풀려질 부분이다.

성형공정은 크게 3단계로 나눌 수 있다. 먼저, 3장 판재의 확산접합인데 그림 1과 같이 접합되어야 할 부분과 성형되어 보강재 역할을 할 부분을 구분하여 stop-off 패턴을 적용한다. 준비한 3장 판재를 치구에 장착한 후에 하부치구에서 불활성 기체(Ar)를 주입하여 접합을 시작한다. 이때의 온도 및 압력조건은 초소성특성 시험에서 얻은 결과를 활용하였다. 두 번째 단



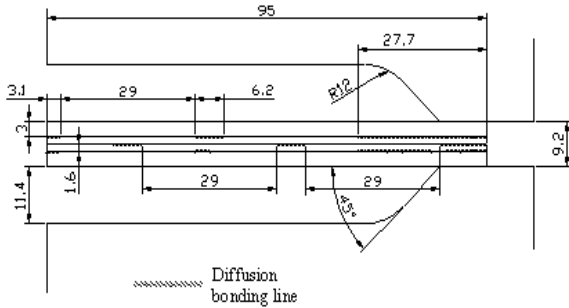
[그림 1] 3장 판재 샌드위치 패널 제작을 위한 치구 조립도

계는 3장 판재 내부에 기체압력을 주입하는 것이다. 그림 1의 경우에는 하부치구에 판재가 접촉할 때까지 압력을 증가하였다. 이때에 적용하는 압력은 유한요소해석에서 얻어졌다. 성형해석을 위한 유한요소해석은 MARC(MSC Software Corp.)를 사용하여 수행하였다. 경계조건은 3가지 조건이 사용되었는데 치구와 판재의 마찰조건, 성형압력, 그리고 중심선에서의 대칭조건이다. Shear friction model이 사용되었고 마찰계수는 0.3으로 가정되었다. 기체를 통한 성형압력은 stop-off를 바른 비접합공간에 가해졌는데 그림 1에서 A는 상위판재 및 중심판재사이에 18.0mm, B는 25.0mm, 그리고 C는 중심판재와 하부판재사이에 35.0mm의 공간이다. MARC를 이용한 해석은 axi-symmetric solid property를 가진 4-node quadrilateral element를 사용하였다. 본 해석에서 최적 압력선도를 얻을 수 있었다. 세 번째 단계는 확산접합이 완전하게 될 수 있도록 가스압력을 유지하는 것이다.

4장 판재 샌드위치 패널도 같은 방법으로 제작하였는데 가스주입구를 중앙이 아니고 측면에 장착하였다. 5개의 Cell 이 중심재에 형성 될 수 있도록 설계하였고, 상하 표면은 두께 3.0mm, 그리고 중심의 판재 두께는 1.6mm 두께의 판재를 사용하였다. 그림 2에 4장 판재 샌드위치 패널 제작을 위한 치구조립도가 나와 있다.

티타늄합금의 산화막은 보통 사용시에는 내식성을 높여주는 역할을 하지만, 확산접합시에는 접합을 방해하는 불순물로 작용하게 되므로 바람직하지 않다. 따

라서 표면조건이 중요하므로 본 연구에서는 ASTM D 2651-01^[3]에 따라 화학적으로 처리한 후에 다시 초음파세척하고, 확산접합 치구에 장착하기 전에 다시 세척하였다.



[그림 2] 4장 판재 샌드위치 패널 제작을 위한 치구 조립도

3. 3장 판재 샌드위치 패널 제작

초소성 특성시험 결과는 표 1에 나와 있는데 최대의 연신율은 1123K의 온도에서 $10^{-3}/\text{sec}$ 의 변형속도에서 얻어졌다. 변형 후 시편을 보면 1073K, 1123K, 그리고 1173K에서 모두 necking-free 현상을 보여주고 있으며 이 구간에서 초소성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 비슷한 결과가 $10^{-4}/\text{sec}$ 에서 얻어졌으나 고온에서 더 낮은 연신률을 보여주었다.

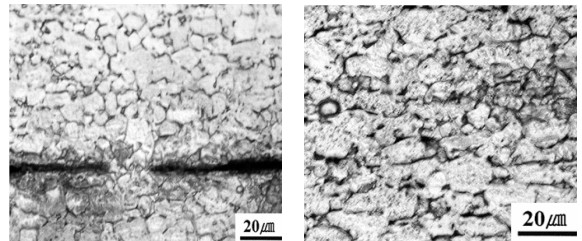
[표 1] 고온인장시험에서 얻은 연신율

Strain rate / Temperature	0.01/s	0.001/s	0.0001/s
1073K	727%	1229%	1232%
1123K	904%	1898%	1304%
1173K	900%	1458%	1270%
1223K	950%	760%	510%

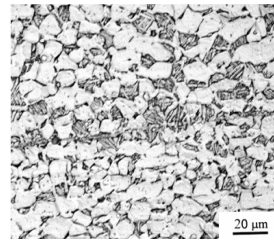
확산접합은 온도와 시간, 그리고 압축압력의 함수인데, 본 연구에서는 현장에서 사용이 가능하도록 시간을 1시간으로 제한하였다. 작업현장에서는 작업효

율이 중요하며, 또한 장시간 노출시에 티타늄합금의 미세조직변화가 예상되기 때문이다. 압력은 초소성형과 병행하기 위하여 40bar로 제한하고, 이 조건에 맞는 최적온도를 결정하였다.

그림 3에 확산접합경계면의 미세조직사진이 나와 있다.



(a) (b)



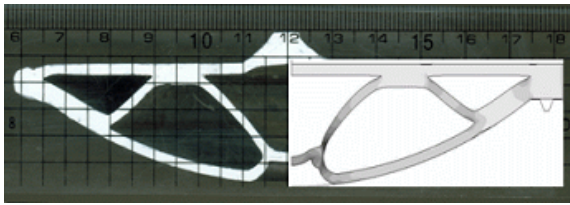
(c)

[그림 3] 확산접합부위의 미세조직 (a) 1123 K, (b)1148K, (c)1193K

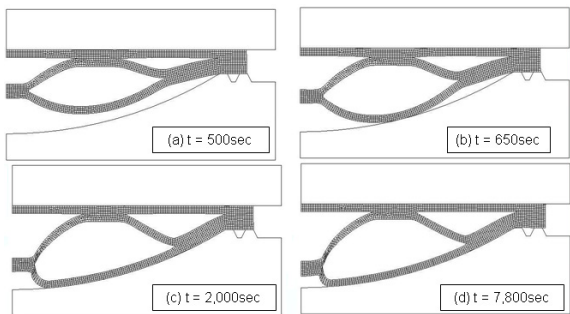
1123K에서의 조직을 보면 상하면이 서로 결합하기 시작하는 초기의 모습으로 물리적인 결합이 시작하고 있었으며, 다른 두 조건의 경우 모두 접합이 완료된 상태인 것을 알 수 있다. 1193K(c)에서 접합한 시편의 경우에는 1148K(b)에서와는 다른 상(phase)을 보여주는데 결정입자내의 이러한 바늘 같은 상(needle-like phase)은 alpha phase가 산소를 많이 함유하고 있다는 것을 뜻한다. 이 온도에서 산소가 쉽게 안정화 되어 결정립자내에 존재하게 되는데 따라서 이질적인 경계면을 형성하게 되어 바람직하지 않다. 따라서 본 연구에서는 최적 확산접합 조건을 1148K로 결정하였다.

첫 번째 단계에서 stop-off 재료를 적용하지 않은 부위는 확산접합된 것을 확인하였다. 확산접합공정에

서는 원자의 확산이 손쉽게 이루어지기 위하여 결정립크기가 작아야 한다. 조직이 미세할수록 결정립계 이동이 빨리 일어나고 creep 속도도 빠르기 때문이다. 그림 4에 성공적으로 성형된 3장 판재 샌드위치 패널의 단면이 나와 있다. 중앙의 pole 부위가 완전히 하부치구에 접촉하지 않은 것은 유한요소해석에서 이미 예측되었던 결과였다(그림 5). 그림 1의 하부치구형상 및 stop-off의 위치를 고려하면, 성형공정중에 주위부터 먼저 하부치구에 접촉하므로 제일 나중에 남은 중앙부분은 접촉할 수 없게 된다.



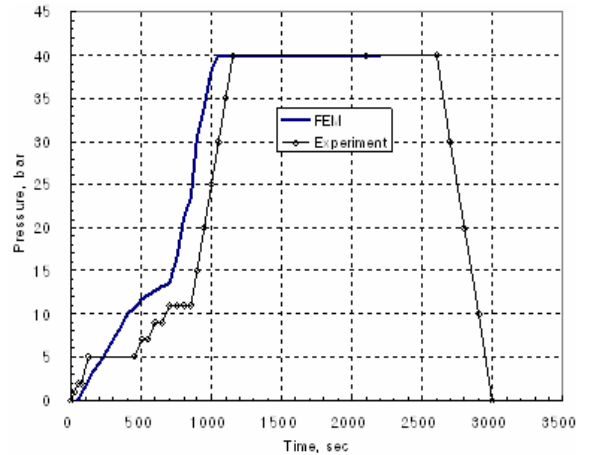
[그림 4] 성형된 3장 판재 샌드위치 패널의 단면



[그림 5] 유한요소해석으로 예측한 3장 판재 샌드위치 패널 성형

유한요소해석에서 얻은 압력선도는 그림 6과 같다. 이때에 실제 가압은 300초정도의 시간차를 두었는데 중앙의 판재내부에 골고루 압력이 전달할 시간을 주는 것이 필요하기 때문이다. 몇 번의 시행착오 끝에 이 정도의 시간차가 필요하다는 것을 알 수 있었다. 만약에 시간차를 두지 않는다면 제일 끝에 위치한 cell은 성형이 제대로 안 될 수도 있다. 확산접합 후 초소성성형이 이루어지는 것으로 3장의 판재중 상부판재 1장은 금형과 밀착되어 변형이 되지 않으므로 상부 2장을 해석하였으며, 성형공정 동안에 초소성 소

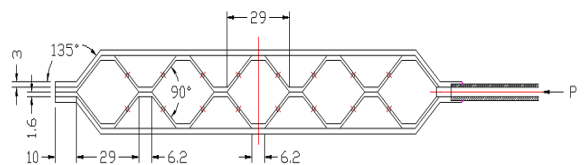
재의 변형률 속도를 일정하게 유지시키기 위하여 사용된 최적의 변형률 속도값 $\dot{\epsilon}_{opt} = 1.0 \times 10^{-3} / s$ 로 하였고, 변형률민감도는 0.4, 마찰계수 $\mu = 0.3$ 으로 계산하였다^[4]. 최대 압력 40 Bar는 변형률 속도를 최적 초소성특성을 유지하는 범위내에서, 고온에서 치구의 변형을 피하기 위하여 실험적으로 선정하였다.



[그림 6] 유한요소해석에서 얻은 이론적인 값과 실제 압력선도의 비교

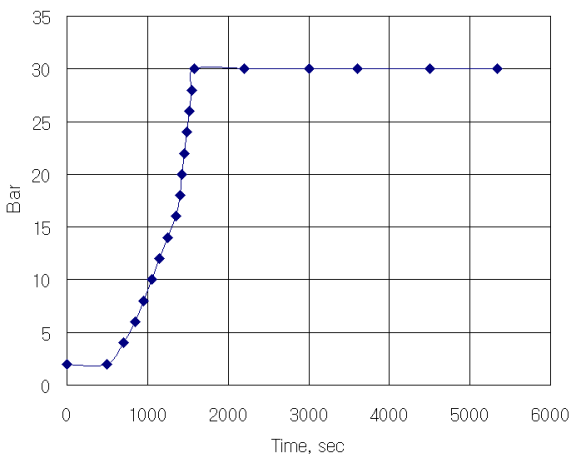
4. 4장 판재 샌드위치 패널 제작

그림 7에 4장 판재 샌드위치 패널 제작에 사용하는 치구의 조립도 단면이 나와 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 기체압력은 측면에서 주입하였으며 중심재의 내부 2sheet은 1.5mm의 홀을 가공하여 균일하게 가스압력이 전달 될 수 있도록 하였다. 6.2mm의 접합부위를 제외하고는 stop-off 재료를 균일하게 도포하여 정밀하게 접합되도록 하였고, 이형 재료가 가스 경로(gas path)를 방해하지 않도록 확인하였다.



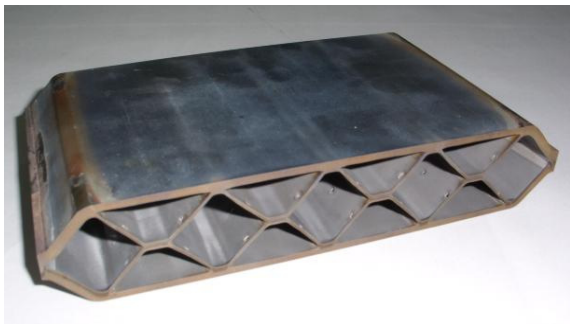
[그림 7] 4장 판재 샌드위치 패널 설계도

4장 판재 샌드위치 패널 제작을 위한 확산접합조건은 3장 판재 패널의 접합조건과 동일한 1148K, 40Bar, 그리고 접합시간은 1시간이다. 성형조건은 유한요소해석 결과에 따라 그림 8과 같은 압력선도를 얻을 수 있었다. 3장 판재 성형과의 다른 점은 최대 30Bar를 사용했다는 것이다. 형상이 복잡하여 초소성성형조건 내에서 성형을 하기 위하여 비교적 낮은 압력을 사용하였다. 성형시간은 중심재 판재의 완전한 성형을 위하여 5,300초가 필요하였다.



[그림 8] 4장 판재 샌드위치 성형을 위한 압력선도

초소성성형/확산접합 기술로서 제작한 4장 판재 샌드위치 패널이 그림 9에 나와 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 4장의 판재가 가스압력으로 완벽하게 성형되어 그림 7의 설계도와 동일하게 5개의 cell을 가진 샌드위치패널을 성공적으로 제작할 수 있었다.



[그림 9] SPF/DB로 제작한 4장 판재 샌드위치패널

5. 맺음말

초소성성형/확산접합 기술은 최첨단 항공기의 경량화를 위하여 사용되는 첨단 성형기술이다. 티타늄합금은 항공기 엔진부위나 전투기 구조물 등에 많이 사용하고 있으나 가공하기 어려우므로 복잡한 형상을 얻기 힘든 단점이 있다. 본 연구에서는 우주항공용으로 많이 사용하는 Ti-6Al-4V 합금을 사용하여 복잡한 형상의 보강재가 있는 샌드위치 경량패널을 제작하였다. 3장과 4장의 판재를 이용하여 샌드위치 패널을 제작하기 위한 초소성성형/확산접합 공정을 개발했으며 유한요소해석의 결과와 일치하는 결과를 얻었다. 확산접합조건은 1148K, 40Bar, 그리고 접합시간, 1시간을 사용했으며, 초소성성형조건은 최종형상에 따라 유한요소해석을 한 결과에서 얻을 수 있었다. 3장 판재의 샌드위치 성형에 사용한 최대압력은 40Bar였으며 4장 판재를 사용한 샌드위치 성형에는 최대압력 30Bar를 가하였다. 본 연구에서 개발한 초소성성형/확산접합 조건은 진공이 아니고 실제 작업현장에서 사용하기 쉬운 불활성분위기에서 얻은 조건이므로 더욱 실용적인 의미가 있다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소 민군겸용기술센터의 민·군겸용기술사업에서 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] D. G. Sanders, "The Current State-of-the-Art and the Future in Airframe Manufacturing Using Superplastic Forming Technologies", Materials Science Forum, Vol. 357, pp. 17~22, 2001.
- [2] R. Furlan, et. al., "Production of Ti6Al4V Components for a New Turbo-Fan Engine", Superplasticity and Superplastic Forming, Ed.

- by C. H. Hamilton and N. E. Paton, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), pp. 665~677, 1988.
- [3] Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding, ASTM D 2651-01, 2001.
- [4] J. H. Yoon, et. al., "Finite Element Analysis on Superplastic Blow Forming of Ti-6Al-4V Multi-Sheets", Materials Science Forum, Vols. 546~549, pp. 1361~1366, 2007.