

타이타늄 합금의 판재성형성에 미치는 공정변수의 영향

김정한¹ · 서상현¹ · 이영선¹ · 김영석² · 염종택¹ · 홍재근¹ · 박노광¹

Effect of processing parameters on the sheet forming of titanium alloy

Jeoung Han Kim¹, Sang Hyun Seo¹, Young Seon Lee¹, Young-Suk Kim², Jong Taek Yeom¹,
Jae Keun Hong¹, Nho Kwang Park¹

Abstract

This paper presents an experimental study of deep-drawing and rubber-pad forming process using titanium alloy sheet. The process and results of the work carried out to investigate the capability of the process and to optimize the process parameters to ensure a sound forming. Room and high temperature tensile tests were carried out at various process conditions and microstructural evaluation was investigated. The experimental investigation was done using 150 ton hydraulic press to produce a deep-drawn part. Both graphite lubricant and polyethylene sheet were essential for defect-free product. Regarding the rubber-pad forming, reasonable formability was obtained only for pure-Ti not for Ti-6Al-4V.

Key Words : Titanium, Deep drawing, Rubber-pad forming, Lubricant

1. 서론

최근들어 항공기의 타이타늄 또는 타이타늄 합금의 사용 비율은 점점 증가하는 추세이다. 일례로, 보잉 787 기에 사용되는 타이타늄 소재의 적용비율은 기존 민항기에 비해 2 배가까지 증가한 수치이다. 또한, F22 기에서는 알루미늄 소재보다 더 많은 양이 적용되었다 [1]. 이렇게 타이타늄 합금의 사용량이 증가는 500°C 까지 유지되는 높은 비강도와 뛰어난 내식성에 기인한다. 타이타늄 판재가 적용되는 주 부품은 Honeycomb core, Firewall, APU manifold 등으로 주로 초소성성형/접합(SPF/DB) 기술로 제작되고 있다. SPF/DB 기술은 국내에도 여러 대학과 연구소에서 많은 연구를 수행하여 상당한 성과를 얻은 바가 있다. 하지만, SPF/DB 기술은 기본적으로 고온/저속에서 운영되는 성형기술로서 생산성이 낮으며 주로 얇은 판재에만 적용된다는 단점이 있다. 또한, 성형집중 지역에서 *thinning* 과 소재내부의 공공

의 발생을 피하기 어렵다는 문제가 있다 [2].

한편, 기존의 디프드로잉(Dep drawing)과 러버포밍(Rubber-pad forming)등은 주로 알루미늄과 철강 소재에 많이 적용되었던 기술로서 타이타늄에는 적용이 어려웠다. 그 이유는 낮은 성형성으로 인해 충분한 양의 변형량을 얻기 어렵고, 집합조직 (Crystallographic texture)과 스프링백 (Spring back)의 영향을 많이 받아 형상제어 해석이 난해하기 때문이었다. 이러한 문제를 극복하기 위해 열간성형이 주로 이루어졌으며 최근 들어서는 타이타늄의 성형성을 향상시킬 수 있는 항온성형, 크리프 성형(Creep forming), 러버포밍(Rubber-pad forming)등의 기술이 개발되었다. 본 연구에서는 위에 열거한 디프드로잉과 러버포밍등을 통해 고강도 타이타늄 합금 판재를 성형해 보기로 하였다. 이를 위해 타이타늄 합금의 기본적인 기계적 특성을 평가해 보았다. 또한, 성형성 향상을 위해 다양한 공정변수 (운활, 하중조건, 온도)들을 변화시켜 그 효과를 관찰해 보았다.

1. 한국기계연구원, 재료연구소

2. 경북대학교, 기계공학부

교신저자: 재료연구소 E-mail: kjh1754@kims.re.kr

2. 실험 방법

2.1 타이타늄 합금 원소재

본 연구과제에 사용된 소재는 타이타늄 소재는 순 Ti 와 Ti-6Al-4V 합금소재로서 각각 두께는 0.4mm 와 1mm 였다. 각 소재는 압연 후 소둔처리 되었으며 합금 조성은 다음 표 1 과 같다.

Table 1 Chemical composition of experimental alloys.

Alloy	Al	C	Fe	V	O	N	H	Ti
CP-Ti	-	<0.10	<0.30	-	<0.20	<0.05	<0.02	Bal.
Ti-64	5.5- 6.75	<0.10	<0.40	3.4- 4.5	<0.20	<0.05	<0.01	Bal.

2.2 기계적 특성 평가

Ti-6Al-4V 합금의 성형특성을 조사하기 위해 인장 시험을 수행하였다. 인장시험 편들은 연신방향이 압연방향에 대해 0°, 45°, 90°의 각도를 가지도록 가공되었다. 시험조건은 상온, 500°C, 600°C, 700°C 였다.

2.3 판재성형 시험

순 Ti 와 Ti-6Al-4V 합금을 이용하여 성형을 수행하였다. 성형은 일반적인 디프드로잉과 러버포밍 방법을 이용하여 이루어졌다. 이를 위해 150 톤 유압프레스를 사용하였다. 또한, 변형속도, Blank holding 압력, 펀치 및 다이스 온도를 조절할 수 있는 금형셋을 제작·활용하였다 (그림 1).

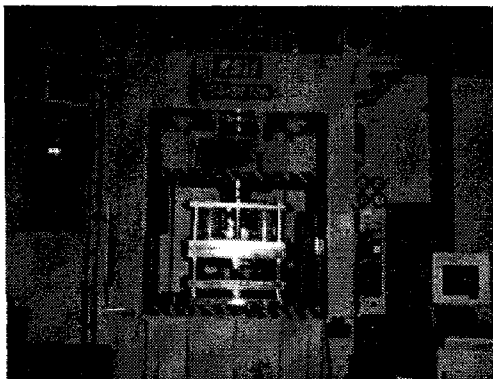


Fig. 1 150ton hydraulic press and deep-drawing dies.

한편, 러버포밍은 천연고무, 폴리우레탄, 실리콘 러버등의 소재를 사용해서 실험을 수행하였으며 사용된 금형의 형상은 다음 그림 2와 같다

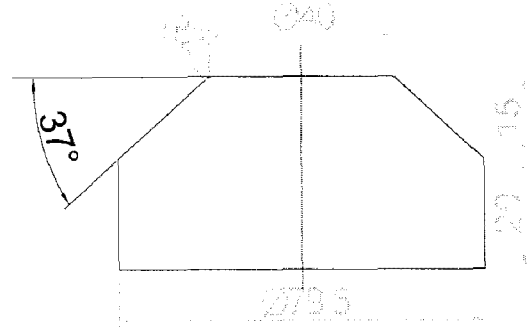


Fig. 2 Schematic design of die set for trapped-rubber forming.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 인장시험

그림 3 은 Ti-6Al-4V 합금의 인장방향에 따른 상온인장 특성의 변화를 보여주고 있다. 전반적으로 45° 방향으로 연실했을 때 강도는 낮고 연신율은 높게 나타났다. 이는 (0002) 집합조직이 판재에 수직한 방향에서 5°정도 기울어진 형태로 발달되어 있기 때문이다.

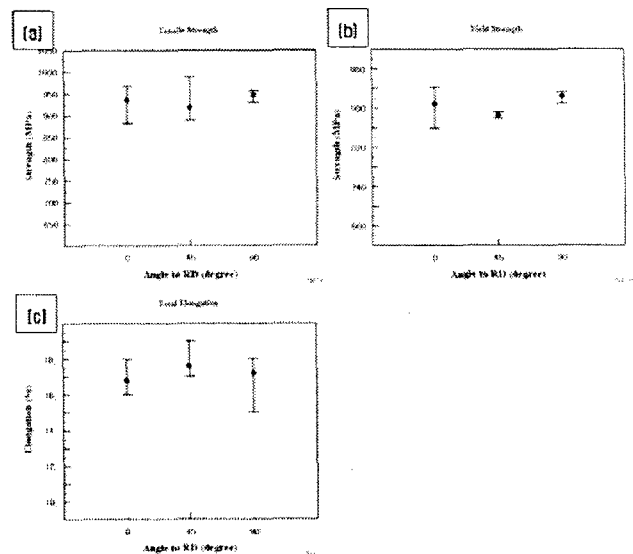


Fig. 3 Tensile test results of Ti-6Al-4V alloy: (a) tensile strength, (b) yield strength, and (c) tensile elongation.

한편 500°C, 600°C, 700°C 의 고온에서는 온도와 변형속도에 따라 강도와 연신율의 차이가 현격하였다 (그림 4). 온도의 증가와 변형속도의 저하에 따라 연성의 증가가 두드러지지만 최고 변형량은 40%를 넘지 못했다. 또한, 온도가 올라갈수록 하중방향에 따른 물성의 차이는 줄어들었는데, 이는 고온으로 갈수록 전위의 활주외에 확산과 관련된 변형기구가 발달하기 때문이다.

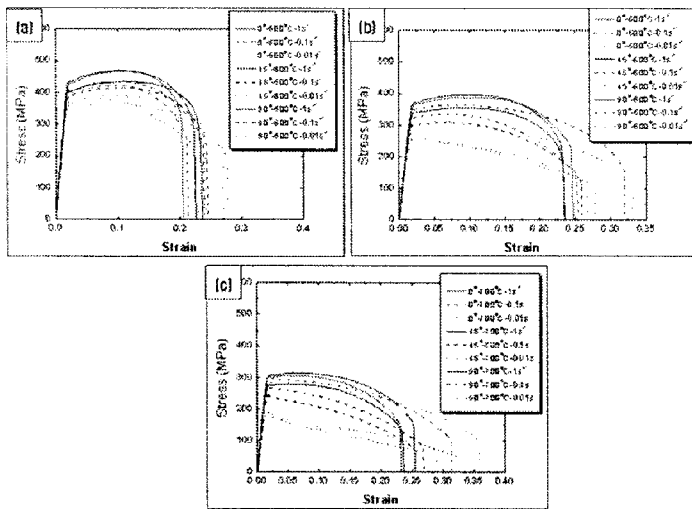


Fig. 4 High temperature tensile test results of Ti-6Al-4V alloy: (a) 500°C, (b) 600°C, and (c) 700°C.

3.2 디프드로잉 테스트

순 Ti 와 Ti-6Al-4V 합금을 이용해 디프드로잉 시험을 수행하였다. 성형성에 미치는 폴리에틸렌 슈트와 graphite 윤활제의 효과를 알아보았다. 그림 5 는 각각 폴리에틸렌 슈트와 graphite 윤활제를 동시에 사용한 것과 한쪽만 사용한 것, 그리고 무윤활 상태의 성형시험결과이다. 시험결과 폴리에틸렌 슈트와 graphite 윤활제를 동시에 사용해야만 건전한 성형을 할 수 있었다. 한편, 열간성형에서는 윤활제의 사용 없이도 높은 성형능이 보여졌다. 그림 6 은 400°C 까지 소재를 가열한 뒤 디프드로잉 시험을 수행한 결과로서 소재의 파단 없이 끝까지 성형된 것을 확인 할 수 있었다.

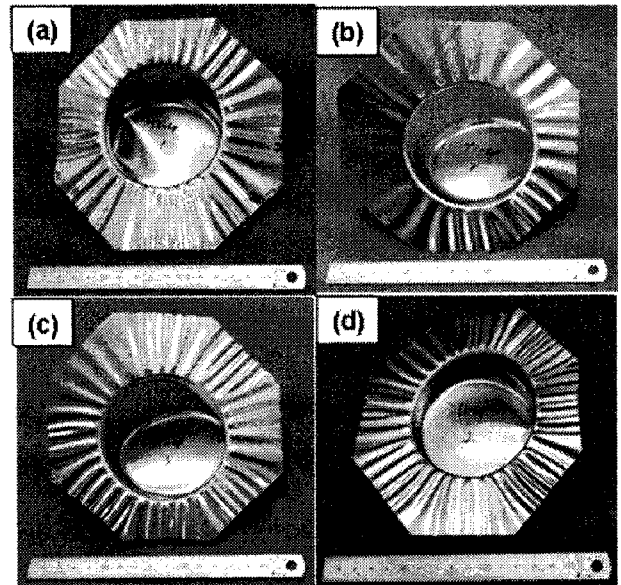


Fig. 5 Deep drawing test results of pure-Ti performed with (a) no lubricant, (b) polyethylene, (c) graphite lubricant, and (d) both polyethylene and graphite lubricant.

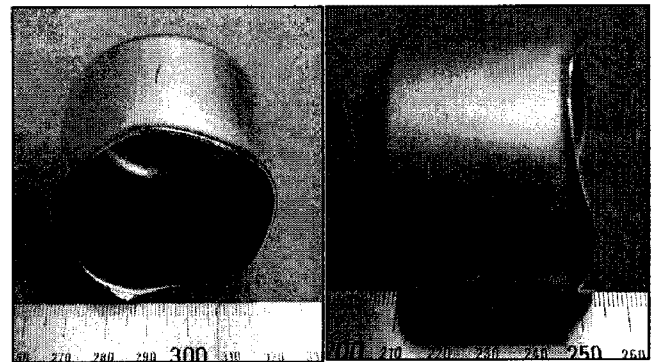


Fig. 6 Deep drawing test results of pure-Ti performed at 400°C without any lubricant.

Pure-Ti 에서 얻어진 정보를 바탕으로 Ti-6Al-4V 합금의 디프드로잉을 시험해 보았다. Ti-6Al-4V 판재의 직경은 300mm 이고 두께는 2.5mm 였다. 성형은 상온에서 이루어졌으며 폴리에틸렌 슈트와 윤활제를 동시에 사용하였다. 그림 7 은 성형결과를 보여주고 있으며 최대 성형 깊이는 39mm 였다.

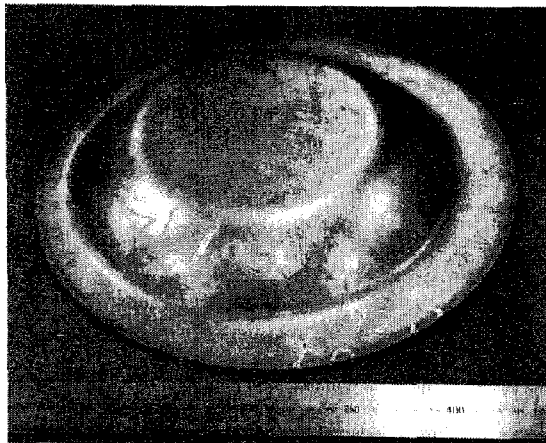


Fig. 7 Deep drawing test results of Ti-6Al-4V alloy performed with both polyethylene and lubricant.

3.3 러버포밍(Rubber-pad forming) 테스트

러버포밍은 상·하부의 금형 중 한 쪽만으로도 성형이 이루어지므로 금형 제작비용이 저렴해지고, 소재에 정수압 압력과 유사한 환경을 발생시켜 제품의 성형성을 높이는 장점이 있다. 또한, 스프링백을 줄이는 효과가 있어 타이타늄 소재의 가공에 적합할 것으로 기대된다[3]. 그러나, Ti-6Al-4V 합금의 경우 상온에서 복잡한 형상의 제품제조가 어렵기 때문에 열간성형이 주로 이루어지는데 이때 압력전달 매체로 사용되는 폴리머 재질의 열안전성 문제로 인해 산업체의 적용이 어려운 상황이다. 이에 천연고무, 폴리우레탄(Poly urethane), 실리콘러버(Silicon rubber)등의 소재를 이용해 성형성을 평가해 보았다. 냉간에서의 성형시에는 순 Ti 의 경우 과도한 주름(wrinkle)이 형성되었으며 Ti-6Al-4V 의 경우는 파단이 발생하였다. 성형온도를 500°C로 상승한 후에는 순 Ti 의 경우 비교적 건전하게 성형이 되었고, Ti-6Al-4V 의 경우는 Wrinkle의 형성과 함께 파단이 발생하였다(그림 8). 한편, 실리콘러버(Silicon rubber)를 사용하여 성형온도를 700°C 까지 상승한 경우는 좀 더 우수한 성형성이 얻어졌으나 여전히 주름(wrinkle)이 발생하였고 과도한 산화막이 형성되었다. 주름의 경우는 소재자체의 문제보다는 금형의 기하학적인 문제에 기인한 것으로 Marform 공정과 같이 유압으로 소재를 고정하는 것으로 해결이 가능할 것으로 보인다. 각 소재의 스프링백량은 CP-Ti 의 경우 스프링백 현상이 거의 없었으며 Ti-6Al-4V 의 경우 θ/θ_0 가 0.1 수준이었다.

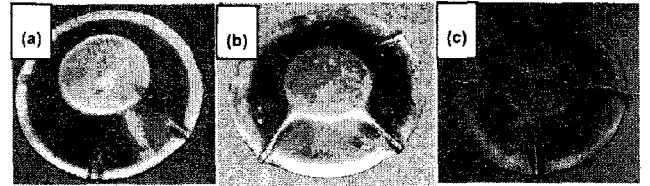


Fig. 8 Rubber-pad forming test results of (a) pure-Ti and (b) Ti-6Al-4V performed at 500°C, and (c) another Ti-6Al-4V performed at 700°C.

4. 결론

순Ti와 Ti-6Al-4V합금을 이용해 디프드로잉 및 러버포밍을 수행하였다. 냉간에서 디프드로잉 성형시 윤활조건외 선정이 매우 중요했음을 확인하였다. 러버포밍 공정에서는 다양한 폴리머소재를 활용해 성형온도를 높이기 위한 시도를 해 보았다. 그러나, Ti-6Al-4V합금의 경우 성형온도의 상승만으로는 만족할 만한 성형능을 확보할 수 없었다.

후기

본 논문은 2008년 지식경제부 항공우주 부품 기술개발 사업의 지원(항공기 기체구조용 Ti-6Al-4V합금판재 성형, 신고상접합 및 탄소복합소재 진공액상 성형기술 개발)을 받아 작성 하였습니다

참고 문헌

- [1] R.R. Boyer, K.T. Slattery, D.J. Chellman, H.R. Phelps, Recent Titanium Developments and Applications in the Aerospace Industry, Ti-2007 science and technology, pp 1255-1262 (2007).
- [2] M.W. Fu., S.Q. Lu, M.H. Huang, A new technology of sheet-metal flexible-die forming using a viscoplastic pressure-carrying medium, J. Mater. Proc. Tech., 52 pp.359-367 (1995).
- [3] ASM Handbook "Metal working:sheet forming", edited by S.L. Semiatin, Metal park ,Ohio 44073-0002, pp. 375-386.