

통전소성을 이용한 티타늄 합금의 스프링백 제어 및 응용

정용하¹, 홍성태^{#2}, 소현우³, 정혜진⁴, 한흥남⁴

Electrically Assisted Springback Control of Titanium Alloys and its Industrial Application

Y.H. Jeong, S.T. Hong, H. W. So, H. J. Jeong, H. N. Han

(Received January 3, 2019 / Revised May 14, 2019 / Accepted May 17, 2019)

Abstract

Electrically assisted (EA) springback reduction of grade 2 titanium alloys is demonstrated through u-bending experiments. A single pulse of electric current having a short duration of less than 0.5 sec is applied to a specimen during u-bending. The effect of the electric current condition on the resultant springback is then evaluated. The experimental result shows that the springback of the selected grade 2 titanium alloy could almost be eliminated through application of electric current with a duration less than 0.5 sec prior to unloading. Lastly, an exemplary industrial application of EA springback control is presented.

Keywords : Titanium alloy, Springback, Electrically assisted

1. 서 론

최근 다양한 산업 분야에서 제품의 경량화, 고강성 제품의 구현 등을 위하여 티타늄 합금, 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 등의 경량 금속의 사용이 증가하고 있다. 비강도가 높고, 내부식성이 우수한 티타늄과 그 합금은 경량 고강도 부품의 소재로 다양한 산업 분야에서 높은 관심을 받고 있다[1-2]. 다른 고강도 금속 소재들의 경우와 마찬가지로 티타늄 합금의 판재 성형시에도 스프링백의 제어는 적절한 치수정밀도 구현을 위해서 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 스프링백 제어를 위해서 인장성형(stretch forming)[3-5], 스프링백 양을 고려한 금형 형상 보정[6-8], 온간/열간 성형[9], 점진적 성형(incremental forming)[10] 등의 방법들이 사용되고 있

으나 이러한 방법들은 공정 시간의 증가, 설비 비용의 상승, 제품의 품질 저하 등의 단점들을 발생시킨다[11-13].

금속 판재의 성형에서 스프링백을 저가의 비용으로 빠르게 제어하기 위한 방법으로 최근 통전소성 현상을 이용한 통전 스프링백 제어 기술(electrically assisted springback control)이 고려되고 있다[14]. 통전 스프링백 제어는 소성변형 중(혹은 후)의 금속에 전류를 가했을 때, 금속의 기계적 특성과 미세구조가 저항 발열에 의한 온도 효과 보다 더 현격하게 변하는 통전소성(electroplasticity) 현상을 이용하는 통전가공법의 일종이다. 통전가공법의 근간이 되는 통전소성 현상은 1960년대 Troitskii[15]에 의하여 처음 보고되었으며, 최근까지의 다양한 후속 연구들에 의하여 그 유효성이 검증되었다[16-22]. 특히 Kim 등[14]은 980 MPa 급 고장력강의 U-굽힘 실험에서 하중을 제거하기 전 매우 짧은 시간(0.5 초)의 통전으로도 소재의 스프링백을 거의 완전히 제거할 수

1. (재)울산테크노파크 자동차기술지원단
2. 울산대학교 기계공학부
3. LG전자 소재부품기술원
4. 서울대학교 재료공학부
Corresponding Author : E-mail:sthong@ulsan.ac.kr
ORCID ID: 0000-0003-2263-7099

있음을 보고하였다.

본 연구에서는 통전소성을 이용하여 티타늄 grade 2 합금의 판재 성형에서의 스프링백을 제어할 수 있음을 실험을 통하여 입증하고, 이의 상용기술에의 적용 가능성을 검증하고자 한다.

2. 시험방법

본 연구에서는 0.5 mm 두께의 티타늄 grade 2 판재를 사용하였다. Table 1은 선택된 티타늄 판재의 화학적 조성비를 나타낸다. U-굽힘 시험을 위하여 폭 12 mm와 길이 130 mm의 시편을 판재의 압연 방향을 따라 레이저로 절단하여 제작하였다(Fig. 1). 다양한 성형 조건에서의 U-굽힘 실험을 위하여 Table 2에 제시된 바와 같이 굽힘각 180°에 각기 다른 굽힘 반경(bend radius)을 가지는 5 종류의 U-굽힘 금형을 제작하였다. U-굽힘 중의 통전 스프링백 제어 실험 수행을 위하여, 모든 금형은 절연 소재인 베이클라이트(Bakelite) 소재를 이용하여 제작되었으며 금형들에는 통전을 위하여 한 쌍의 구리 전극이 삽입되었다(Fig. 2). U-굽힘을 위하여 최대 하중 30 kN의 만능 시험기(Daekyung Tech, South Korea)를 사용하였으며, 통전을 위하여 전류 제어가 가능한 Vadral SP-1000U welder (Hyosung, South Korea)를 사용하였다.

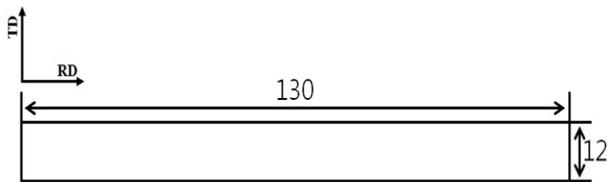


Fig. 1 Geometry of springback test specimen

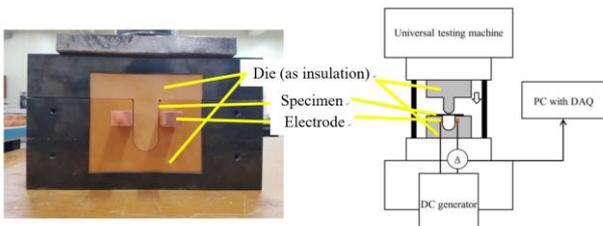


Fig. 2 U-bending fixture and experimental set-up

통전 스프링백 제어 실험은 시편의 U-굽힘이 완료된 후 하중 제거 전에 특정 전류 밀도(전류 방향에 수직인 시편 단면 단위 면적 당 전류 크기)를 0.5초간 가한 후 하중 제거 후 시편에 발생하는 스프링백의 크기를 측정하는 방식으로 진행되었으며, Table 2에 제시된 바와 같이 각각의 U-굽힘 금형에서 5 종류의 전류밀도 값들을 사용하여 실험을 진행하였다(모두 25개의 조합).

Table 1 Chemical composition of titanium grade 2 alloy (provided by the manufacturer)

Alloy	Alloying element (wt%)					Ti
	C	Fe	H	N	O	
Titanium grade 2 alloy	≤0.1	≤0.3	≤0.015	≤0.03	≤0.25	At balance

Table 2 Experimental parameters of springback test

Nominal current density, $\rho_{i,0}$ (A/mm ²)	Pulse duration, t_d (sec)	Bend radius (mm)	Control force (kN)
70, 85, 100, 115, 130	0.5	5, 10, 15, 20, 25	20

통전 스프링백 제어 기술의 상용 생산기술에의 적용 가능성을 검증하기 위하여, 티타늄 소재를 적용한 핸드폰 배터리 케이스의 성형성 제어 및 시제품 구현 실험을 실시하였다. 다만, 성형 후의 제품의 기능성을 고려하여, 상용 생산기술 검증 실험은 수요기업에서 제공한 0.3 mm 두께의 초탄성(super-elastic) 티타늄 합금 판재와 0.6 mm 두께의 초특성(super-property) 티타늄 합금 판재를 이용하여 진행되었다. 각 소재의 자세한 물성치와 조성은 수요기업의 요청에 의하여 본 논문에는 수록하지 않는다.



Fig. 3 Electrically assisted manufacturing die for titanium battery cover of mobile phone

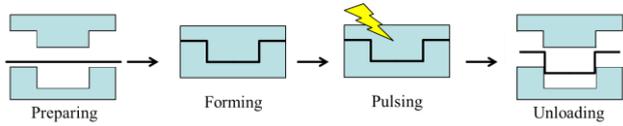


Fig. 4 Schematic procedure of electrically assisted forming of titanium battery cover

티타늄 배터리 케이스 성형 실험을 위하여 Fig. 3 과 같이 세라믹 형상부(punch)와 구리 전극이 삽입된 전용 금형을 제작하였다. 두 종류의 티타늄 합금을 사용하여 케이스 제작용 소재(blank)를 준비하였다(205 mm x 74 mm). 성형 실험은 통전 스프링백 제어 실험과 유사한 방식으로(Fig. 4), 소재를 금형에 삽입하고 목표 하중에 도달할 때까지 성형을 진행한 후 하중 제거 전 Table 3 에 제시된 통전 변수에 따라 전류를 가한 후 하중을 제거하는 순서로 진행하였다.

Table 3 Experimental parameters of EAM for titanium battery cover of mobile phone

Current (A)	Pulse duration, (sec)	Number of pulses	Control force (kN)
2,000	1	1 ~ 4	30
2,500			
3,000			

3. 실험결과

실험 결과는 통전 스프링백 제어 기법이 본 연구에서 선정된 티타늄 grade 2 합금의 판재 성형에도 적용이 가능함을 확실하게 보여준다(Fig. 5). 본 연구에서 사용된 5 가지 굽힘 반경 모두에서 전류밀도가 증가할 수록 하중 제거 후 발생하는 스프링백의 크기가 감소하였다(Fig. 6(a)). 일반 U-굽힘 실험(통전하지 않음 경우)결과로 표준화한 분석 결과는 통전에 의한 스프링백 감소효과가 적용된 굽힘 반경의 크기에 상관없이 전류밀도가 증가함에 따라 일정한 비율로 상승함을 보여준다(Fig. 6(b)). Fig. 6 에 제시된 바와 같이 5 가지 굽힘 반경들 모두에 대해서 전류밀도 130 A/mm², 통전시간 0.5 초의 조건 적용 시 스프링백이 거의 100% 제거되었다.

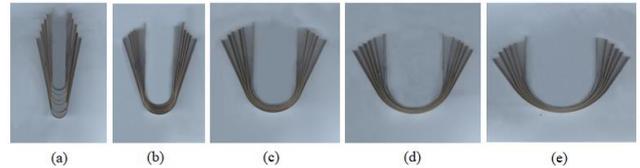
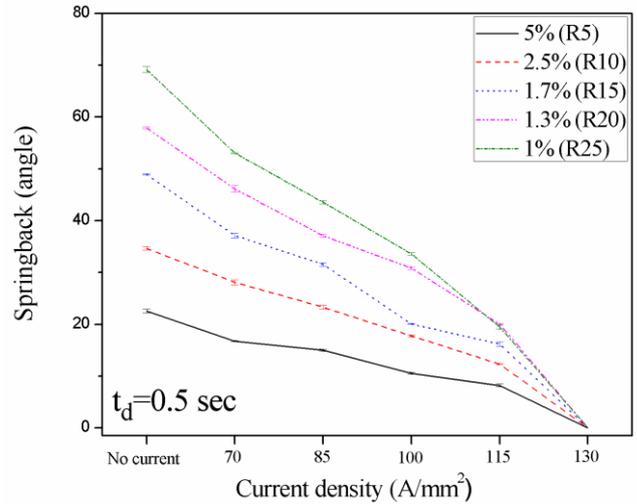
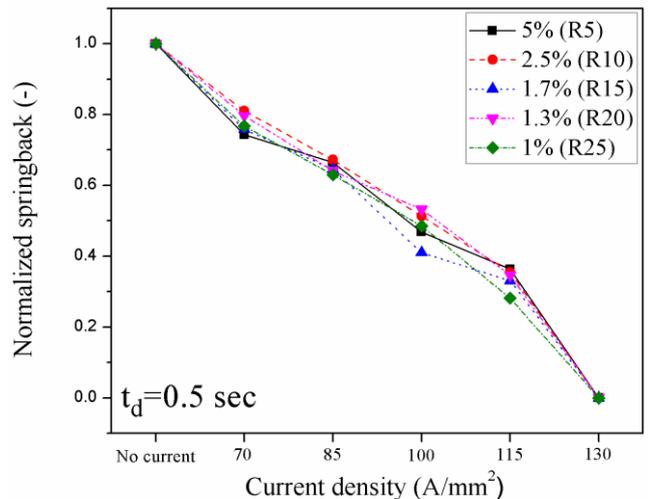


Fig. 5 The results of springback test in each bend radius: (a) R5, (b) R10, (c) R15, (d) R20, (e) R25

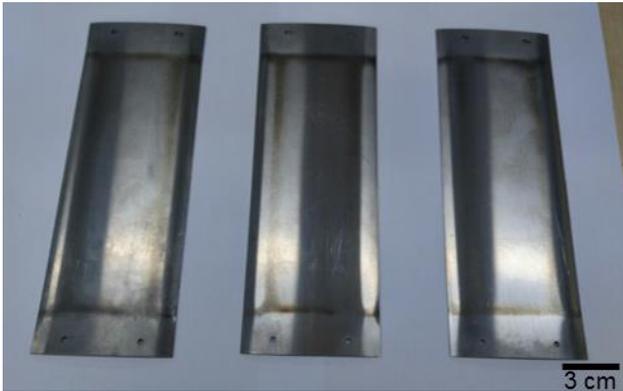


(a)



(b)

Fig. 6 Effect of electric current on the springback after U-bending of titanium grade 2 alloys: (a) springback angle, (b) normalized springback result



(a)



(b)

Fig. 7 Results of EA-forming of Ti battery cases: (a) super-property Ti alloy, (b) super-elastic Ti alloy



Fig. 8 Final product of Ti battery case (super-elastic)

배터리 케이스 제작 실험에서 전류를 가하지 않고 하중을 제거한 경우에는 두 소재 모두 100%에 가까운 탄성 복원이 발생하여 거의 성형이 이루어지지 않았으나, 통전 스프링백 제어 기법을 적용한 경우에는 스프링백이 감소되어 제품 형상이 구현되

었다(Figs. 7(a), (b)). Figure 8은 후처리 공정인 피어싱과 트리밍을 적용하여 구현한 최종 완제품(초탄성 티타늄 합금 적용)을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 티타늄 판재 성형 중 짧은 시간의 통전을 통하여 티타늄 합금의 스프링백 제어가 가능하다는 것을 실험적으로 확인하였다. 실험 결과는 선택된 굽힘 반경들에 대해서 적절한 통전 조건 적용 시 거의 100%에 가까운 스프링백 감소가 가능함을 보여준다. 이러한 통전 스프링백 제어 기법은 본 논문에서 예시한 바와 같이, 다양한 판재 성형 공정에서 효과적인 성형성 제어 기술로서 적용이 가능할 것으로 기대된다. 다만, 상용 기술로의 완성을 위해서는 통전 효과(electroplastic effect)로 인하여 가공 후 완제품의 기계적 특성과 미세구조에 발생하는 변화에 대한 심도 있는 분석이 필요할 것으로 여겨진다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부가 지원한 ‘혁신도시 공공기관연계 육성사업’으로 지원을 받아 수행된 연구 결과임[과제명: 전지·ESS기반 에너지산업 혁신생태계 구축사업]. 이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2015R1A5A1037627).

REFERENCES

- [1] ASM Int., 1990, ASM Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, ASM Int., Vol. 2.
- [2] Jr. Strunk, J. Matthew, 2000, Titanium: a Technical Guide 2nd ed., ASM Int.
- [3] W. D. Carden, L. L. Geng, D. K. Matlock, R. H. Wagoner, 2002, Measurement of Springback, Int. J. Mech. Sci. Eng., Vol. 44, No. 1, pp. 79~101.
- [4] J. H. Song, H. Huh, S. H. Kim, 2007, A Simulation-Based Design Parameter Study in the Stamping Process of an Automotive Member, J. Mater. Process. Technol., Vol. 189, No.1~3, pp. 450~458.

- [5] J. R. Cho, S. J. Moon, Y. H. Moon, S. S. Kang, 2003, Finite Element Investigation on Springback Characteristics in Sheet Metal U-Bending Process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 141, No. 1, pp. 109~116.
- [6] R. H. Wagoner, M. Li, 2007, Simulation of Springback: Through-Thickness Integration, *Int. J. Plast.*, Vol. 23, No. 3, pp. 345~360.
- [7] H. S. Cheng, J. Cao, Z. C. Xia, 2007, An Accelerated Springback Compensation Method, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 49, No. 3, pp. 267~279.
- [8] R. Lingbeek, J. Huetnik, S. Ohnimus, M. Petzoldt, 2005, The Development of a Finite Elements Based Springback Compensation Tool for Sheet Metal Products, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 169, No. 1, pp. 115~125.
- [9] J. Yanagimoto, K. Oyamada, 2005, Springback of High-Strength Steel after Hot and Warm Sheet Formings, *Cirp-Annals*, Vol. 54, No. 1, pp. 213~216.
- [10] Z. Zhang, H. Zhang, Y. Shi, N. Moser, H. Ren, K. F. Ehmann, J. Cao, 2016, Springback Reduction by Annealing for Incremental Sheet Forming, *Procedia Manuf.*, Vol. 5, pp. 696~706.
- [11] H. Yang, X. Fan, Z. Sun, L. Guo, M. Zhan, 2011, Recent Developments in Plastic Forming Technology of Titanium Alloys, *Sci. China Technol. Sci.*, Vol. 54, No.2, pp. 490~501.
- [12] S. Toros, F. Ozturk, I. Kacar, 2008, Review of Warm Forming of Aluminum-Magnesium Alloys, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 207, No. 1~3, pp. 1~12.
- [13] J. Hirsch, T. Al-Samman, 2013, Superior Light Metals by Texture Engineering: Optimized Aluminum and Magnesium Alloys for Automotive Applications, *Acta Mater.*, Vol. 61, No. 3, pp. 818~843.
- [14] M. -S. Kim, T. V. Nguyen, H. -H. Yu, S. -T. Hong, H. -W. Lee, M. -J. Kim, H. N. Han, 2014, Effect of electric current density on the mechanical property of advanced high strength steels under quasi-static tensile loads, *Inter. J. of Precis. Eng. and Manuf.*, Vol. 15, No. 6, pp.1207~1213.
- [15] O. Troitskii, 1969, Electromechanical Effect in Metals”, *ZhETF Pisma Redaktsiiu*, Vol. 10, pp. 18~22.
- [16] H. Conrad, 2000, Effects of Electric Current on Solid State Phase Transformations in Metals, *Mater. Sci. and Eng.: A*, Vol. 287, No. 2, pp. 227~237.
- [17] H. Conrad, 2000, Electroplasticity in Metals and Ceramics, *Mater. Sci. and Eng.: A*, Vol. 287, No.2, pp. 276~287.
- [18] W. A. Salandro, J. J. Jones, T. A. McNeal, J. T. Roth, S. -T. Hong, M. T. Smith, 2010, Formability of Al 5xxx Sheet Metals Using Pulsed Current for Various Heat Treatments, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 132, No.5, pp. 051016-1~11.
- [19] J. -H. Roh, J. -J. Seo, S. -T. Hong, M. -J. Kim, H. N. Han, J. T. Roth, 2014, The Mechanical Behavior of 5052-H32 Aluminum Alloys under a Pulsed Electric Current, *Int. J. Plast.*, Vol. 58, pp. 84~99.
- [20] S. -T. Hong, Y. -H. Jeong, M. N. Chowdhury, D. -M. Chun, M. -J. Kim, H. N. Han, 2015, Feasibility of Electrically Assisted Progressive Forging of Aluminum 6061-T6 Alloy, *CIRP Annals – Manuf. Technol.*, Vol. 64, No. 1, pp. 277~280.
- [21] N. T. Thien, Y. -H. Jeong, S. -T. Hong, M. -J. Kim, H. N. Han, M. -G. Lee, 2016, Electrically Assisted Tensile Behavior of Complex Phase Ultra-High Strength Steel, *Inter. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Technol.*, Vol. 3, No.4, pp. 325~333.
- [22] M. -J. Kim, K. Lee, K. H. Oh, I. -S. Choi, H. -H. Yu, S. -T. Hong, H. N. Han, 2014, Electric Current-Induced Annealing during Uniaxial Tension of Aluminum Alloy”, *Scr. Mater.*, Vol. 75, pp. 58~61.