

전자기-열전달 연동 해석과 Ti-6Al-4V 합금 고주파 유도가열 실험에 대한 비교 분석에 관한 연구

배진기¹, 최진규¹, 조민구¹, 이석순^{1,†}

^{1,†}경상대학교 대학원 기계공학부, ERI

Comparative Study on the Electromagnetic-Heat Transfer Co-simulation Analysis and High Frequency Induction Heating of Ti-6Al-4V Alloy

Jinki Bae¹, Jinkyu Choi¹, Mingoo Cho¹, Seoksoon Lee^{1,†}

^{1,†}School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, ERI

Abstract

Demand for Ti-6Al-4V alloy is increasing in various industries because of its superior strength to weight and high-temperature strength properties. However, due to its low formability at room temperature, it is formed at high temperature, where its productivity and efficiency are low. The current high-temperature forming method has many limitations because it involves heating the specimen by heating the lower mold. It is expected that a process using high frequency induction heating, which can locally heat the product, can improve its productivity. In addition, time and cost can be saved if the process is simulated in advance with a reliable analysis. In this paper, we verified the reliability of the analysis by comparing the result of heating the specimen to 850 °C by high frequency induction heating and the temperature obtained through the co-simulation analysis.

초 록

Ti-6Al-4V 티타늄 합금은 무게 대비 우수한 강도와 고온 강도 특성 때문에 수요가 증가하고 있지만 상온에서 낮은 성형성 때문에 고온으로 성형을 해야 한다. 현재 진행된 고온 성형 연구는 하부 금형을 가열하여 시편을 가열하는 방식이기 때문에 제약이 많다. 기존 고온 성형 방식과 다르게 제품을 국부적으로 가열할 수 있는 고주파 유도가열을 적용한다면 가공의 효율성을 높일 수 있을 것으로 예상된다. 또한 공정 기술 개발 시 신뢰도 높은 해석 기법으로 미리 공정을 시뮬레이션한다면 시간과 비용을 절약할 수 있다. 본 논문에서는 고주파 유도가열을 이용하여 Ti-6Al-4V 합금을 가열하였고 실험 결과와 전자기-열전달 연동 해석 결과를 비교하여 해석의 신뢰도를 판단하였다.

Key Words : High frequency induction heating(고주파 유도가열), Ti-6Al-4V(Ti-6Al-4V), Co-simulation(연동 해석), Series RLC circuit (직렬 RLC 회로),

1. 서 론

티타늄 합금은 알루미늄이나 철강 재료와 비교하여 무게 대비 우수한 강도와 내식성, 고온 강도 특성으로

인해 철강 재료 대비 가격이 고가이지만 항공기 부품, 인공 보철물, 모터사이클의 배기 시스템, 헬리콥터의 모터 헤드 등 티타늄 합금의 특성을 잘 살릴 수 있는 부품에 사용이 확대되고 있다[1]. 티타늄 합금은 상용의 순수 티타늄 β상 티타늄과 α-β상으로 분류되는데, 대표적인 α-β 티타늄 합금으로는 Ti-6Al-4V가 있다. 우주항공부품에 고강도 경량 소재로 널리 사용되는 Ti-6Al-4V 합금 판재는 상온에서 고강도($\sigma_y = 1000$ MPa)이면서 파단 연신율(EI=12%)과 탄성계수(E=120 GPa)가 작아 상온에서 성형성이 낮다. 이러한 문제를

Received: Oct. 15, 2020 Revised: Aug. 29, 2021 Accepted: Aug. 30, 2021

† Corresponding Author

Tel: 055-772-1622, E-mail: leess@gnu.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

해결하기 위해 부품 제조 시 고온 단조 750 ℃ 이상에서 변형률 속도를 $10^{-4}/s \sim 5 \times 10^{-3}/s$ 정도로 매우 작게 하여 결정립 슬립(grain boundary sliding)을 도모하여 큰 변형을 얻는 초소성 가공(superplastic forming)을 한다. 최근 높아지는 고강도 티타늄 부품의 수요에 대비하기 위해서 생산성과 효율성을 높일 수 있는 공정 기술 개발이 요구되고 있다[2].

현재 Ti-6Al-4V 합금의 고온 성형에 관한 연구는 Lee 등에 의해 진행된 Forming Limit Diagram(FLD) test를 통해 고온 물성치를 얻고, 유한요소 해석을 이용하여 고온 사각 Deep drawing 및 U-bending 공정 해석을 수행하고 고온 성형성 평가를 진행했다[3]. Bae 등은 hecker의 돔 장출 실험을 이용하여 Ti-6Al-4V 합금 판재의 고온에서의 성형 특성과 성형 한계도를 평가하였으며[4], Shin 등은 Ti-6Al-4V 판재를 이용한 온간 딥 드로잉 성형의 가능성을 확인했으며 공정 조건의 영향을 도출하기 위해 유한요소해석을 통해서 블랭크 크기, 하부 금형과 펀치 사이의 간격 등을 예측하였다[5]. 하지만 앞서 진행된 모든 연구에서는 하부 금형을 가열하여 시편을 가열하는 방식으로 빠른 가열을 위해 두께 약 1 mm의 시편을 사용한 것을 알 수 있다. 이러한 한계를 극복하고자 고주파 유도가열(High frequency induction)을 이용하여 Ti-6Al-4V의 고온 성형에 대한 연구를 진행하려고 한다.

고주파 유도가열은 가열 코일인 도체에 고주파 전류를 인가할 때 코일 속의 시편에 생성되는 와전류(Eddy current)를 이용하여 급속으로 가열하는 기법이다. 기존 고온 성형은 제품을 가열 장비에 통해 전체를 가열 원하는 온도까지 가열 시킨 후 공정을 진행하였다면 고주파 유도가열은 코일만 수정한다면 원하는 부분만 국부적으로 피 가열체에 와전류를 발생시켜 짧은 시간에 급속 가열한 뒤 바로 성형이 가능하기 때문에 고주파 유도가열을 적용한다면 기존의 공정보다 높은 효율성과 생산성이 예상된다. 또한 전기만 공급하면 되기 때문에 기름이나 가스를 사용하는 것보다 경제적인 효과를 볼 수 있다[6].

공정 기술 개발에는 공정 조건의 영향을 도출하기 위해 유한요소해석(FEM)을 통한 공정 결과 예측이 필요하며, 정확한 결과 예측을 위해서는 온도에 따른 물성치 검증이 필요하다.

본 연구에서는 가열 코일에 흐르는 전류를 계산을 통해 구한 후 상용프로그램 ABAQUS를 이용한 유한요소해석을 통해 유도가열 해석을 먼저 진행하였다. 이후 고주파 유도가열 실험을 통하여 측정된 온도값과 해석으로 얻은 온도값을 비교 분석함으로써 유도가열 해석 방법을 정립하였다.

2. 고주파 유도가열 기초 이론

도체에 고주파 교류 전류가 흐를 경우 전류밀도가 단면의 외주 근방에 집중하는 현상이 발생하는데, 이를 표피효과(Skin effect)라 한다. 표피 효과에 의해 전류가 표면의 36.8%만큼 감소하는 침투 깊이(Penetration depth, δ)는 Eq. 1과 같이 정의되며, 주파수가 높으면 침투 깊이는 감소하는 경향을 보인다[7].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (1)$$

여기서 σ 는 도체의 전기전도도(Electric conductivity), f 는 주파수, μ_0 와 μ_r 은 각각 진공의 투자율(Permeability) 및 피가열체의 상대투자율(Relative permeability)에 해당한다.

고주파 유도가열을 해석하기 위해서는 일차적으로 유도전류에 의한 전자기장(Electromagnetic field)을 계산한다. 전자기장 분포에 관한 지배방정식은 Maxwell 방정식을 사용하여 Eq. 2와 Eq. 3과 같이 표현한다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

여기서 E 는 전자장의 세기(Electric field intensity), H 는 자기장의 세기(Magnetic field intensity), D 는 전속 밀도(Electric flux density), ρ 는 전하 밀도(Charge density), B 는 자속 밀도(Magnetic flux density), J 는 전류 밀도(Current density)이다. 전기장의 세기와 전속 밀도, 자기장의 세기와 자속 밀도와의 관계는 각각 유자율 ϵ 과 투자율 μ 를 사용하여 Eq. 6과 Eq. 7과 같이 표현된다.

$$D = \epsilon E \quad (6)$$

$$B = \mu H \quad (7)$$

고주파 영역에서 Eq. 3의 변위전류항을 무시할 수 있으며, 이때 Eq. 8의 옴의 법칙을 Eq. 3에 대입하여 정리하면 Eq. 9와 같다.

$$J = \sigma E \quad (8)$$

$$\nabla \times H - \sigma E = 0 \quad (9)$$

한편 자기 벡터 포텐셜 A 와 전기 스칼라 포텐셜 V 를 도입하면 자속 밀도와 전기장의 세기는 Eq. 10과 Eq. 11과 같이 표현된다.

$$B = \nabla \times A \quad (10)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (11)$$

고주파 유도가열의 경우 교류 전원에 대한 해석이므로 전기 스칼라 포텐셜 V 를 무시할 수 있다. 이 때 Eq. 7, Eq. 10, Eq. 11을 Eq. 9에 대입하면 아래와 같이 자기 벡터 포텐셜 A 에 대한 수식으로 정리된다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

3. 유한요소 해석

3.1 고주파 유도가열 전류 계산

고주파 유도가열 유한요소 해석을 하기 위해서는 유도가열 시 코일에 흐르는 전류를 구해야 한다. 하지만 코일의 전류를 직접적으로 측정할 수 없어서 유도가열 시 발생하는 전압을 오실로스코프를 이용하여 CT-Box에서 측정하였다. Fig. 1은 CT-Box 측정 지점을 나타냈으며 C→D, A→C, A→B 3구간을 측정하였으며 측정 결과는 Table 1과 같다.

(1) 구간은 코일에 흐르는 전압을 측정하였으며 148 V이다. (2), (3)구간은 인덕턴스에 흐르는 전압이며 각각 26 V이다. (4)구간은 캐파시터에 흐르는 전압이며 148 V로 측정됐다.

CT-Box의 회로도도 Fig. 2와 같은 직렬 RLC 회로 (Series RLC Circuit) 이다. 본 연구에서 사용된 유도가열 시스템은 직렬 공진의 원리를 이용했기 때문에 직렬 RLC 회로 공진 시 발생하는 코일에서 발생하는 리액턴스 X_L 와 캐파시터에서 발생하는 리액턴스 X_C 이 같고 코일에서 발생하는 전압 V_L 과 캐파시터에서 발생하는 전압 V_C 의 차가 0이 되는 성질을 이용하여 전류를 구했다. 직렬 RLC 회로 공진 시 캐파시터의 리액턴스 X_C 는 Eq. 13과 같고, 캐파시터에 흐르는 전압 V_C 는 Eq. 14로 나타낼 수 있다. Eq. 13을 Eq. 14에 대입하여 정리하면 회로에 전류 I 는 Eq. 15와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 주파수 f 는 93.5 kHz이며 캐파시

턴스 C 는 5 μ F이다. 캐파시터에 흐르는 전압 V_C 는 앞서 측정한 148 V를 대입하여 회로에 흐르는 전류를 계산하였다. 이후 계산된 전류값을 ABAQUS에 적용하여 유한요소해석을 진행하였다.

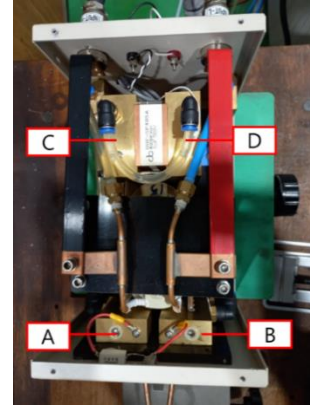


Fig. 1 CT-Box Measurement point

Table 1 Measurement Results of CT-Box

	Measure point	Frequency(kHz)	Voltage(V)
(1)	C→D	93.5	200
(2)	A→C	93.5	26
(3)	D→B	93.5	26
(4)	A→B	93.5	148

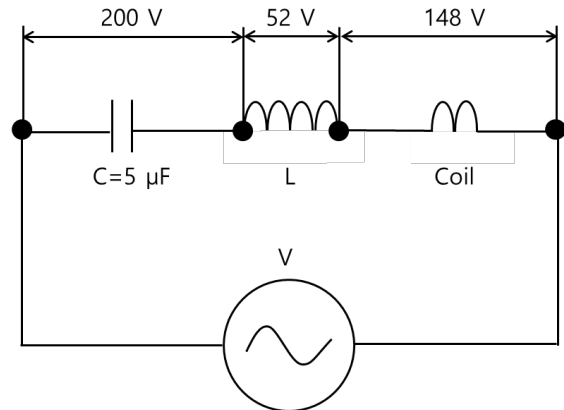


Fig. 2 Series RLC Circuit

At resonance $X_L = X_C, V_L - V_C = 0$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (13)$$

$$V_C = I \times X_C \quad (14)$$

$$I = V_c \times 2\pi f C \quad (15)$$

3.2 고주파 유도가열 유한요소 해석

해석 모델은 3D 모델링 프로그램 CATIA를 이용하여 Fig. 3와 같이 Specimen, Coil, Air를 모델링 하였으며, 시편의 크기는 가로 20 mm, 세로 150 mm, 두께 2.5 mm이다.

Air와 Coil의 전자기적 물성치는 Table 1에 나타내었다. 원래 Air의 전기전도도는 0에 가까우나 값을 지정해주지 않으면 해석이 진행되지 않으므로 1000 S/m을 지정해 주었고 이 값은 해석 결과에 전혀 영향을 끼치지 않는다[9]. Coil은 구리이므로 구리의 물성치를 적용하였다.

Ti-6Al-4V의 온도에 따른 비열, 열전도도는 Fig. 4, Fig. 5의 그래프를 활용하여 물성치를 입력했으며 전기전도도는 Fig. 6을 활용하였다. 모든 그래프에서 약 1000 °C에서 물성치가 변하는데 이유는 Ti-6Al-4V 합금의 α 상이 882 °C이상이 되면 β 상으로 변하는데 α 상이 모두 β 상으로 변해서 물성치의 변화가 발생하였다.

전자기 해석 시 요소의 종류는 EMC3D4를 총 206,623개 사용하였으며, 열전달 해석 시 DC3D8 요소를 총 48,000개 사용하였으며 앞에서 계산한 전류를 적용하여 전자기-열전달 연동 해석(Co-simulation)을 진행하였다.

전자기-열전달 연동 해석은 코일의 자기장에 의한 피가열도체에 유도된 와전류로 생성된 줄열(Joule heat)을 계산하고, 이 줄열을 열 유속으로 변환하여 도체에 열전도가 발생한다. 이때, 가열 시간 동안 발생하는 증분을 실시간으로 매핑(Mapping) 하는 방법이다.

연동 해석 결과로 얻은 시편의 온도 분포다. Ti-6Al-4V 티타늄 합금 시편이 750 °C이상 가열하는데 필요한 시간은 32초로 확인됐고 이후 유도가열 실험에 적용하였다.

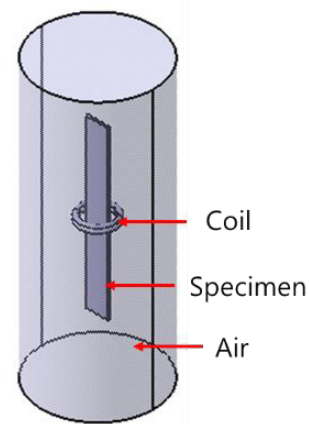


Fig. 3 3D modeling of experiment

Table 2 Material property of air and coil

	σ , Electrical conductivity (S/m)	μ , Magnetic permeability (H/m)
Air	1×10^3	1.26×10^{-6}
Coil	5.8×10^7	1.26×10^{-6}

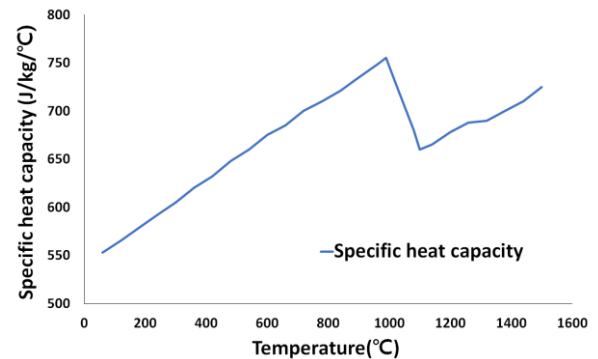


Fig. 4 Ti-6Al-4V Specific heat capacity[8]

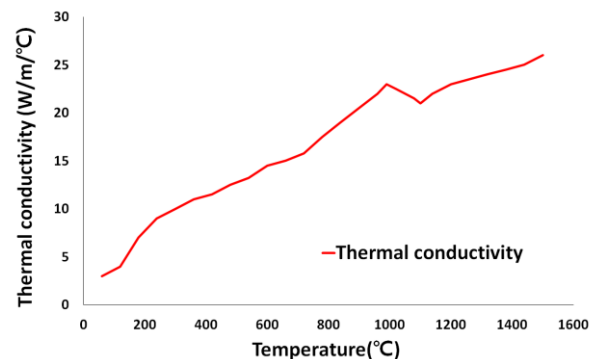


Fig. 5 Ti-6Al-4V Thermal conductivity[8]

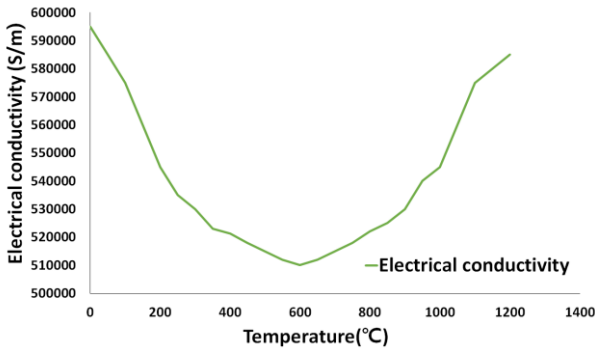


Fig. 6 Ti-6Al-4V Specific electrical conductivity[8]

4. 유도가열 실험

주파수는 약 93.5 kHz, 입력 전력은 총 10 kW로 유도가열 실험을 진행하였다. Ti-6Al-4V 티타늄 합금 시편을 초기 온도 약 3 °C에서 해석과 동일한 시간 32 초 동안 가열하였으며 이후 Fig. 7과 같이 Fluke사의 Ti450pro 모델 비접촉식 온도계를 사용하여 온도를 측정했으며 비접촉식 온도계는 빛의 파장을 이용하여 온도를 측정하기 때문에 측정 오차가 발생할 수 있다. 실험에 사용된 온도계의 정밀도는 25 °C에서 ±2%이다. 총 8번의 실험을 진행하였으며 코일에 의해 가열되는 부분을 측정하였다. Fig. 8은 시간에 따른 가열 부분의 최고 온도 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

시편의 크기는 해석과 같은 크기인 가로 X 세로 150 mm X 20 mm이며 두께는 2.5 mm이다. 코일은 2 턴 구리 코일을 사용했다.



Fig. 7 Temperature measurement

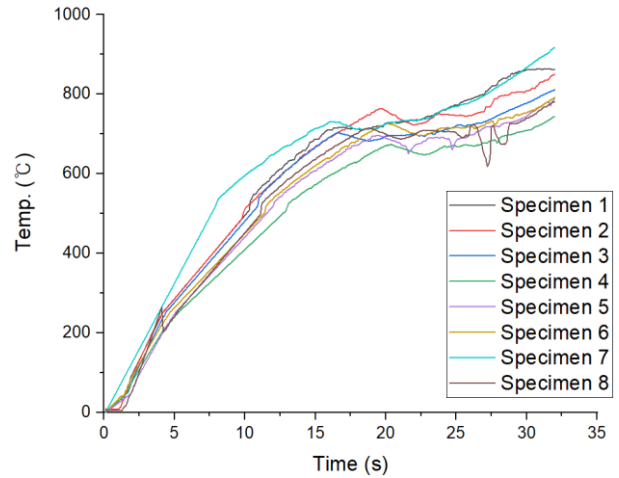


Fig. 8 Experiment results of high frequency induction heating

5. 실험 및 해석 결과 비교 분석

실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 실험값은 시편 8개의 측정 온도의 평균값을 사용하였다. 실험 결과와 해석 결과의 오차율은 Eq. 16을 사용하여 정의하였다. 이때 실험 결과와 해석 결과의 차이의 크기만 보기 위하여 절대값을 사용하였다. 결과는 최대 4.5%의 오차율로 해석의 신뢰성을 확인할 수 있다.

$$\text{Error}(\%) = \frac{|f_{\text{Experiment}} - f_{\text{Analysis}}|}{f_{\text{Experiment}}} \quad (16)$$

Table. 3은 실험 결과와 해석 결과의 차이가 상대적으로 큰 온도에서의 결과를 정리한 표이다. Fig. 9의 그래프에서 막대의 상단은 8개 시편 측정 결과 최대값이며, 하단은 최소값을 나타낸다. 그리고 시편 8개 값의 평균값을 점으로 표현하여 해석 결과와 비교하였다. 이 결과로부터 실험 결과와 해석 결과가 잘 일치함을 보인다.

Table 3 Temperature comparison

Time(s)	Analysis(°C)	Experiment(°C)	Error (%)
4	234.8	227.3	3.3
8	414.0	400.2	3.4
16	638.9	668.8	4.5
20	680.3	711.3	4.4
24	702.7	719.8	2.4

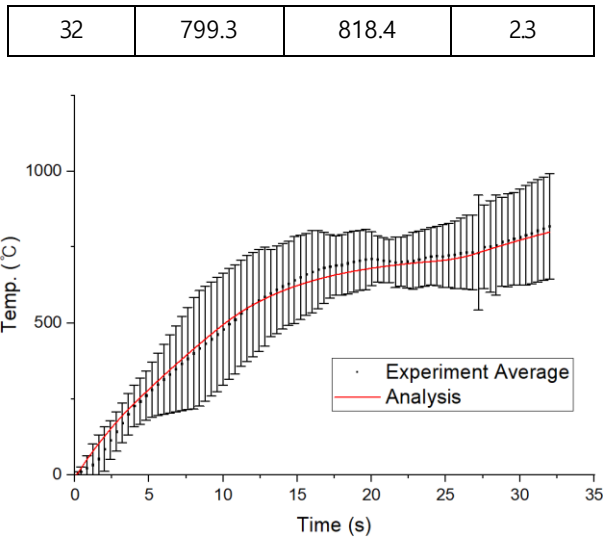


Fig. 9 Comparing experiment and analysis results of high frequency induction heating

6. 결 론

본 연구에서는 항공 우주 부품에서 많이 사용되고 있는 Ti-6Al-4V 합금에 대한 유한요소 해석 결과와 온도 측정 결과를 비교하였다. 고주파 유도가열 실험을 전자기-열전달 연동 해석을 통하여 Ti-6Al-4V 합금 시편의 유도가열 과정을 해석하였고, 비접촉식 온도계를 통해 온도를 측정하였다. 해석 결과로부터 얻은 온도와 실험을 통해 얻은 온도를 비교하여 해석 결과를 검증하였다.

온도 변화 그래프를 보면 기울기가 일정하지 않고 변한다. 이는 Fig. 6과 Fig. 9를 비교하면 전기전도도의 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6에서 500 °C 전까지 전기전도도가 급격히 감소하고 500~600 °C에서 감소 폭이 줄어들면서 전기 전도도가 최저가 된다. 그 후 750 °C에서 다시 전기 전도도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9를 보면 온도 상승이 500°C까지 점점 감소하고 500~600 °C에서 온도 상승 폭이 가장 작으며, 이후 약 750 °C에서 다시 온도 상승 폭이 커지는 것을 확인할 수 있다.

측정 결과 평균값과 해석 결과를 Table 3에서 비교하였으며 최대 오차율은 4.5%이다. 이 결과 실험 결과와 측정 결과가 잘 일치함을 보인다.

현재 Ti-6Al-4V 합금은 항공 우주 부품 이외에도 다양한 산업분야에서 수요가 점점 늘어나고 있지만, 상온에서 낮은 성형성 때문에 가공이 힘들어서 고온에서 소성 가공을 진행하고 있다. 현재 고온 성형에 대한 연구가 이루어지고 있지만 하부 금형을 가열하는 방식으로만 진행되어 빠른 가열을 위해 두께가 약 1

mm의 시편에서 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 한계를 극복하고자 유도가열을 도입하였고 유도가열을 이용한 고온 성형 실험 전 본 연구 내용을 요약하자면 다음과 같다.

- 1) 상대적으로 두꺼운 2.5 mm의 시편을 850 °C까지 가열하는데 걸리는 시간은 32 초로 시편이 두꺼워도 빠르게 가열되는 것을 확인했다.
- 2) 실험 결과를 바탕으로 해석 결과를 검증했다. 최대 4.5%의 오차로 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

향후, 이 연구를 바탕으로 유도가열을 이용하여 Ti-6Al-4V 합금을 국부가열 시킨 후 고온에서 성형성에 대한 실험 및 해석을 진행할 예정이다.

후 기

이 연구는 2021학년도 경상대학교 연구년제 연구교수 연구비 지원과 한국산업기술진흥원의 WC300 프로젝트 R&D 지원 사업의 진원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] C. Veiga, J. P. Davim and A. J. R. Loureiro, "Properties and applications of titanium alloys: A brief review," *RAMS*, vol. 32, no. 2, pp. 133-148, 2012.
- [2] J. G. Park, N. K. Park and Y. S. Kim, "Evaluation of Press Formability for Ti-6Al-4V Sheet at Elevated Temperature," *Transaction of Materials Processing*, vol. 19, no. 4, 2010.
- [3] M. K. Bae, J. G. Park, J. H. Kim, N. K. Park and Y. S. Kim, "Evaluation of press formability for Ti-6Al-4V sheet at elevated temperature," *Proceedings of the Korean Society for Technology of Plastic Conference*, pp. 152-157, 2009.
- [4] G. S. Shin, J. G. Park, J. H. Kim, Y. S. Kim, Y. H. Park and N. K. Park, "Effect of Processing Condition on the Deep Drawability of Ti-6Al-4V Sheet at Warm Temperatures," *Proceedings of the Korean Society for Technology of Plastic Conference*, pp. 158- 163, 2009.
- [5] J. G. Park, J. H. Kim, N. K. Park and Y. S. Kim, "Plastic deformation characteristic of titanium alloy sheet(Ti-6Al-4V) at elevated temperature," *Proceedings of the Korean Society for Technology of Plastic Conference*, pp. 158-163, 2009.
- [6] J. K. Choi, K. S. Nam, J. K. Kim, H. M. Choi, S. H. Yeum and S. S. Lee, "Study on Hardening Depth by Induction Hardening Analysis of Sprocket Using FEA and Experiment Results," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 33, no. 5, pp. 393-400, May 2016.

- [7] I. Y. Lee, S. M. Tak, I. S. Pack and S. S. Lee, "Comparative Study on Numerical Analysis using Co-simulation and Experimental Results for High Frequency Induction Heating on SCM440 Round Bar," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering* 2010, Vol. 11, no. 3, pp. 1-7, 2017.
- [8] Abaqus 6.12 Documentation, Theory Manual, 13/02/2012 edition
- [9] M. Boivineau, C. Cagarn, D. Doytier, V. Eyraud, M. H. Nadal, B. Wilthan and G. Pottlacher, "Thermophysical Properties of Solid and Liquid Ti-6Al-4V(TA6V) Alloy," *International Journal of Thermophysics*, Vol. 27, no. 2, p, March 2006.
- [10] S. M. Tak, J. W. Park, M. K. Kang, D. J. Park, J. S. Lee and S. S. Lee, "Transient heat transfer analysis of inertial measurement devices by outside frictional heat," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, Vol. 4, no. 1, pp. 32-37.
- [11] S. Y. Kim, "Study on the Manufacturing of the Titanium-Alloyed Eyerim," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 12, no. 3, pp. 1058-1062, 2011.
- [12] W. I. Kim and S. J. Heo, "A Study on the Surface Roughness Influenced by SM45C Hardness in high Frequency Induction Hardening," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 6, no. 1, pp. 1-8, 1993.
- [13] G. H. Ryu, D. J. Kim, D. J. Kim, B. M, and G. H. Kim, "Process Design of the Hot Pipe Bending Process Using High Frequency Induction Heating," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 18, no. 9, pp. 110-121, 2001.