

Ti-6Al-4V 합금의 열간성형공정에 대한 계면열전달계수의 결정

염종택*, 임정숙*, 나영상*, 박노광*, 신태진**, 황상무**, 심인옥***

Determination of the interface heat transfer coefficient for hot-forming process of Ti-6Al-4V

J.T. Yeom*, J.S. Im*, Y.S. Na*, N.K. Park*, T.J. Shin**, S.M. Hwang** and I.O. Shim***

Abstract

The interface heat transfer coefficient was measured for non-isothermal bulk forming of Ti-6Al-4V. FE analysis and experiments were conducted. Equipment consisting of AISI H13 die was instrumented with thermocouples located at sub-surface of the bottom die. Die temperature changes were investigated in related to the process variables such as reduction, lubricant and initial die temperature. The calibration approach based on heat conduction and FE analysis using an inverse algorithm were used to evaluate the interface heat transfer between graphite-lubricated die and glass-coated workpiece. The coefficients determined were affected mainly by the contact pressure. The validation of the coefficients was made by the comparison between experimental data and FE analysis results.

Key Words : Interface Heat Transfer Coefficient, Ti-6Al-4V, Inverse Algorithm

1. 서론

일반적으로 열간성형시 소재와 다이사이의 온도차이로 인해 소재의 chilling이 발생하고, 소재의 표면과 중심의 유동응력이 상이하게 나타나 소재유동 결함을 일으킬수 있다. chilling의 양과 범위는 계면열전달, 마찰, 변형속도, 초기 온도차이 등의 함수로 표현될 수 있으며, 특히 계면 열전달은 열간성형공정 설계시 상당히 중요한 함수이다. 계면 열전달에 미치는 인자로는 금형과 시편의 표

면정도, 압력, 시간, 윤활조건 등을 들 수 있으며, 여기에 실제 열간성형시 소성변형으로 인한 소재의 열발생, 대류 및 복사, 시편과 금형의 마찰 등이 상호 연계되어 영향을 미치기 때문에 순수한 계면 열전달계수를 실험적으로 얻어내는 상당히 어려운 일이다. 최근 열간성형공정을 최적화하기 위한 전산모사기술이 발달함에 따라 이러한 계면열전달계수를 정량화하기 위한 노력이 이루어지고 있으며, 특히 티타늄합금과 같이 온도의존성 높은 합금의 열간성형시 발생될 수 있는 성형결함과 미세조직적

* 한국기계연구원, 공정연구부
** 포항공과대학교, 기계공학과
*** 국방과학연구소, 기술연구본부

변화에 대한 신뢰할 수 있는 해석결과를 제시하기 위해서는 정확한 계면열전달계수가 필수적으로 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 Ti-6Al-4V의 열간성형의 FE해석 시 필수적으로 요구되는 소재와 다이사이의 계면열전달에 대한 실험적 측정방법과 함께 실험적으로 얻어진 온도변화 데이터를 이용하여 계면열전달계수를 결정하기 위한 수학적 방법론이 다루어 졌다.

2. 실험방법

계면 열전달계수를 측정하기 위한 Ti-6Al-4V은 equiaxed α 상 조직을 가지는 합금으로, 시험편은 높이 30mm, 지름 20mm의 원통형 시험편으로 제작하였고, 열손실과 표면산화를 최소화하기 위해 Deltaglaze 151 glass 코팅을 하였다. 상·하부의 다이소재로는 AISI H13 금형강을 이용하였고, 성형전에 다이에는 흑연 윤활제를 도포하였다. 금형과 소재사이의 온도변화를 측정하기 위해서 그림 1에 나타낸 바와 같이 하부다이의 다섯 부위에 지름 1.6mm K-type 열전대를 삽입하였다. 특히, 하부다이의 경우 시험편의 장입시 열전대가 위치된 부위에 시험편이 놓일 수 있도록 두께 1mm의 홈을 가공하였다.

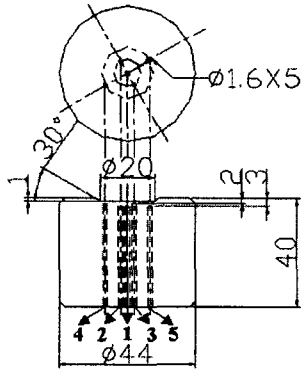


Fig. 1 Schematic representations of the bottom die and thermocouple positions

온도 측정을 위한 열전대는 금형중심을 기준으로 반경 방향으로 4.5mm, 9mm 떨어진 부위에 위치하도록 하였고, 하부다이를 관통하여 소재에 직접적으로 열전대가 삽입될 경우 성형시 열전대의 손상을 입을 것으로 판단되어 두께 방향으로 1mm, 2mm 떨어진 부위를 측정할 수 있도록 하여 열전대를 삽입하였다. 계면열전달을 측정하기 위한 성형장치로는 150톤 유압프레스로 10mm/s의 램 속도로 성형하였고, 실험조건은 다이온도 300℃, 500℃,

압축율 10, 30, 50%로 변화하여 압축시험되었다. 이때 온도측정과 함께 하중과 변위가 같이 측정되도록 하여 정확한 성형시점을 파악하였다.

3. 계면열전달계수 측정을 위한 방법론

3.1 열전달식을 이용한 보정곡선 활용방법

계면에서의 윤활조건, 계면층의 두께, 성형압력 등에 따라 계면열전달은 달리 나타날 수 있으며, Klafs, Kellow⁽¹⁾ 등과 같은 연구자들은 몇가지 가정과 함께 다음과 같은 열전달 관계식을 도출하였다.

$$\frac{T_1 - T_{10}}{T_{20} - T_{10}} = \frac{b_2}{b_1 + b_2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{K_1 t}} \right) \right\} - \left\{ \exp \left(\frac{Zh_0 x}{b_1 \sqrt{K_1}} + \frac{Z^2 h_0^2 t}{b_1^2} \right) \right\} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{2K_1 t}} + \frac{Zh_0 \sqrt{t}}{b_1} \right) \right\} \quad (1)$$

여기서, 각각의 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$b = \sqrt{k\rho c}$, c = specific heat, ρ = density, K = thermal diffusivity ($k/\rho c$), $Z = 2.0$ (for Klafs's analysis), t = time, sec, T_{10} , T_1 = initial and instantaneous die temperature, °C, T_{20} , T_2 = initial and instantaneous workpiece temp., °C, x = axial coordinate, h_0 = heat transfer coefficient, $\text{kW/m}^2\text{°C}$, k = thermal conductivity, $\text{W/m}^2\text{°C}$

결국, 식(1)을 이용하여 계면열전달과 관계된 보정곡선을 얻을 수 있으며, 계면에서의 온도측정결과와 비교함으로써 계면열전달계수를 얻을 수 있다.

3.2 Inverse algorithm을 이용한 FE해석 활용방법

Inverse algorithm⁽²⁾은 계면에서 소재와 다이사이의 열전달에 의한 온도변화에 대해 FE해석과 실험으로 얻어진 두 결과사이의 차이를 최소화하는 최소사승법의 원리를 이용한 것이다. 이러한 inverse algorithm에서 FE해석 온도와 측정온도간의 오차를 최소화하는 계면열전달계수 증가분은 다음과 같은 결과식으로 표현된다.

$$\Delta h = \frac{\sum_{time\ position} (T_c - T_m) \frac{dT_c}{dh}}{\sum_{time\ position} \left(\frac{dT_c}{dh} \right)^2} \quad (2)$$

여기서, T_c 와 T_m 은 각각 FE해석에서의 온도와 측정된 온도를 나타내며, dT_c/dh 는 알려지지 않은 값으로 두 개의 가정된 h 값들(h_1, h_2)를 입력하여 얻은 온도계산 결과들로부터 얻을 수 있다. 즉,

$$\frac{dT_c}{dh} = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{h_1 - h_2} \quad (3)$$

여기서, T_{c1} 과 T_{c2} 는 각각 h_1 과 h_2 를 입력한 후 FE해석된 온도계산 결과들이다. 이 방법을 이용할 경우 1%정도의 차이를 가지는 h_1 과 h_2 를 입력한 FE해석결과가 초기에 요구되며, $h+\Delta h$ 로 증분하여 반복계산을 수행한 후 $\Delta h < 0.01$ 를 만족할 경우 최종 h 값을 결정하게 된다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 하부다이 온도변화 측정결과

초기 금형온도 500°C, 압축율 50% 조건에서의 하부다이의 온도측정결과를 그림 2에 나타내었다. 이때 부위별 channel 번호는 그림 1에 표시된 열전대의 위치에 따라 명명되었다. 열전대의 삽입깊이가 소재와 가까운 1mm에 위치한 경우가 2mm인 경우 보다 높은 온도상승을 나타내고 있으며, 소재의 중심에서 가까운 위치(4.5mm)에 열전대가 삽입된 경우가 먼 위치(9mm)에 위치한 경우에 비해 더 높은 온도상승을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 경향은 초기 금형온도 300°C인 경우에도 같은 경향을 나타냈으며, 시간에 따른 온도변화는 크게 4단계로 나누어짐을 알 수 있다. 즉, 4단계는 소재이동(transfer), 하중이 가하지 않는 코팅된 소재와 윤활제를 도포한 하부다이와의 접촉(pre-forming), 압축(forming), 하중제거(post-forming)이다.

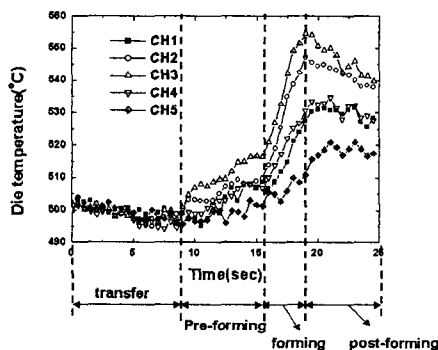


Fig. 2 Die temperature changes measured at the condition, 300 °C and 50%

한편, 초기 다이온도 300°C조건에서는 압축율 10%에서 50%로 상승함에 따라 온도상승폭에 상당한 차이를 나타내는 반면 초기 다이온도 500°C의 경우 10%에서 50%로 압축율이 상승함에 불구하고 온도상승폭이 큰 차이를 보이지 않고 있었고, 온도상승폭 또한 300°C인 경우가 더욱 높음을 알 수 있었다. 이는 초기 다이온도 500°C인 경우가 300°C에 비해 소재의 chilling 효과가 상대적으로 감소함을 나타내는 간접적인 증거이다. 이러한 각 부위별 초기 다이온도별 시간에 따른 하부다이 온도변화결과들을 토대로 계면열전달계수의 변화에 하중, 접촉면적, 윤활조건 등이 영향을 미친 것으로 판단된다.

4.2 계면열전달계수의 결정

본 연구에서 측정된 하부다이의 온도변화 data를 이용하여 계면열전달계수를 결정하기 위한 방법으로, 앞서 언급된 바와 같이 열전달식을 이용한 보정곡선 활용방법과 inverse algorithm을 이용한 FE해석방법을 이용하였다. 먼저, 열전달식을 이용한 보정곡선을 활용한 방법으로 성형변수별 계면열전달계수를 얻었으며, 그림 3에 초기 하부다이온도 300°C, 두께방향으로 1mm 떨어진 위치에서 측정된 결과와 보정곡선을 비교한 그래프를 나타내었다.

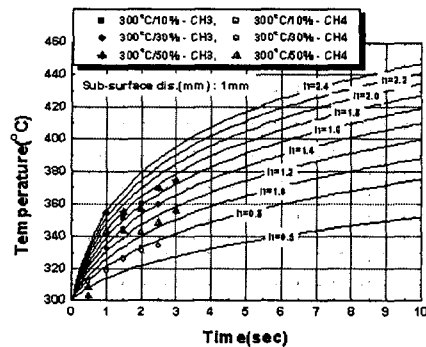


Fig. 3 The comparison of heat transfer calibration curve and experimental data

그림에서 보는 바와 같이 압축율이 증가함에 따라 열전달계수값이 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 특히, 50% 압축율에서 계면열전달계수값이 10%, 30%에 비해 크게 증가하는 것을 알 수 있으며, 하중측정결과 10%와 30% 압축율의 경우 각각 4.5톤과 5.5톤으로 거의 비슷한 반면, 50%의 경우 14톤정도의 하중을 나타내었다. 이것은 열전달계수가 여러 가지 요인에 의해 영향을 받지만, 특히 하중에 크게 영향을 받는다는 것을 의미한다. 이러한 방법에 의해서 얻어진 계면열전달계수는 pre-forming 단계에서 0.04-0.07kW/m²°C로 거의 일정한 계수값을 나타

내었고, forming단계에서 0.5-1.4kW/m²℃로 압축을 및 하중이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 이러한 방법에 의한 계면 열전달계수 결정은 윤활제, 소재의 변형열, 대류 및 복사 등의 영향을 무시한 것이기 때문에 이 계면열전달계수를 이용하여 FE해석을 수행한 경우 많은 오차를 나타내었다.

한편, inverse algorithm을 이용한 FE해석에 의해 계면 열전달계수를 구하기 위해서는 실제 실험조건과 동일한 FE해석이 이루어져야 한다. 앞서 언급된 4단계중 하중제거(post-forming)단계를 제외한 3단계에 대한 변형 및 열전달해석이 다음과 같이 수행되었다.

- (1) transfer단계 : 가열로에서 소재를 꺼내 다이까지 이동하는 동안 대기로 빼앗기는 열손실을 감안하여 대기온도를 20℃로 설정하고, 초기 온도 970℃에서 5 초간 대기에 노출되었을 때의 열전달해석
- (2) pre-forming단계 : 금형과 소재가 접촉되는 해석을 위해 transfer단계에서 해석된 소재의 부위별 온도에 대한 정보를 그대로 이용하고, 무하중상태에서 금형과 소재가 접촉된 상태에서의 열전달해석
- (3) forming단계 : 실제 압축을 10, 30, 50%에 대한 압축변형 및 열전달해석

이렇게 해석된 FE해석결과와 실험결과를 기초로 inverse algorithm에 의해서 각 온도 및 압축율에 따른 계면열전달계수를 얻었으며, 그림 4는 초기 하부다이온도 300℃, 압축을 50%에서의 온도변화에 대한 해석결과와 실험결과를 비교한 것이다. 해석결과는 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

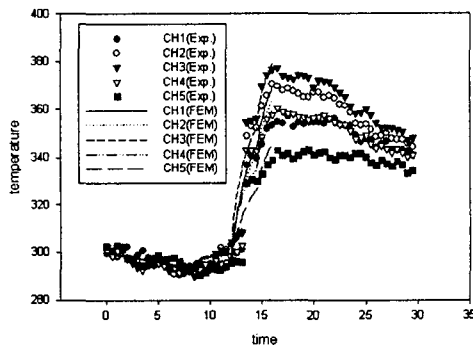


Fig. 4 The comparison of FE prediction and die temperature measured at 300℃ and 50%

Inverse algorithm에 의해서 얻어진 계면열전달계수는 pre-forming단계에서 0.11-0.23kW/m²℃로 결정되었으며, forming단계에서 1.09-2.23kW/m²℃로 결정되었다. 이러한 결과는 앞서 언급된 보정곡선을 통해서 얻어진 값에

비해 높은 계수값을 보이고 있으며, 이것은 소재의 변형열, 대류 및 복사 등의 영향을 FE해석시 고려하였기 때문으로 판단된다. 또한, 이러한 방법으로 결정된 계면열전달계수는 기존에 Ti-6Al-4V합금의 성형해석에 이용되어 오던 20-40kW/m²℃정도의 계면열전달계수값⁽³⁾에 비해 1/10정도 낮은 값을 나타내고 있음을 알수 있는데, 이는 일반적으로 티타늄합금의 산화방지를 위해 사용된 glass코팅의 영향인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 비등온 열간성형시 성형변수(초기 다이온도, 윤활, 압축율 등)에 따른 하부다이의 온도변화를 측정하고 열전달식을 이용한 보정곡선을 활용한 방법과 inverse algorithm을 활용한 FE해석방법으로 계면열전달계수를 결정하였다. 측정된 온도변화에 대한 분석에서 계면열전달에 미치는 가장 큰 인자는 하중임을 알수 있었고, 보정곡선을 통한 계면열전달계수는 pre-forming단계에서 0.04-0.07kW/m²℃로 거의 일정한 계수값을 나타내었고, forming단계에서 0.5-1.4kW/m²℃로 압축을 및 하중이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 inverse algorithm에 의해서 얻어진 계면열전달계수는 pre-forming단계에서 0.11-0.23kW/m²℃로 forming단계에서 1.09-2.23kW/m²℃로 결정되었으며, 결정된 계면열전달계수를 입력하여 얻어진 FE해석을 통한 온도변화는 실험결과와 비교시 상당히 잘 일치함을 알수 있었다.

후기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) M.A.Kellow, A.N.Bramley and F.K.Bannister, 1969, "The measurement of temperatures in forging dies", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.9, pp239-260
- (2) W.Nshama, J.Jeswiet, P.H. Oosthuizen, 1994, "Evaluation of Temperature and Heat Transfer conditions at the Metal Forming Interface", J. Mater. Process. Technol. 45, pp637-642
- (3) DEFORM users manual, 1995, Version7.0, Scientific Forging Technologies Cooperation, Columbus, OH