

Al6061 열간단조시 계면열전달계수에 관한 연구

권진욱¹, 이영선¹, 권용남¹, 이정환¹

A study on interface heat transfer coefficient in hot forging of Al6061 by experiments and FE analysis.

J. W. Kwon, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee

Abstract

The temperature difference between die and workpiece has frequently caused various surface defects. The non-homogeneous temperature distribution of forged part should be analyzed to prevent the generation of various defects related with the temperature. The surface temperatures were mainly affected by the coefficient of thermal contact conductance. The precise coefficient is necessary to predict accurately the temperature changes of die and workpiece. The experiment is preformed to measure the temperature distribution of die and workpiece in closed die upsetting. And then, the coefficient is classified into function of pressure and confirmed by the comparison between experiments and FE analyses using the other model. The FE analysis to predict the temperature distribution is performed by commercial software DEFORM-3DTM. However, it might be impossible to measure directly the temperature distribution of forged part. Therefore, the comparisons between measured temperature and predicted values are performed with the hardness of Al6061-forged part.

Key Words : Interface heat transfer coefficient(IHTC), FEM, Al6061, Hardness.

1. 서론

열간단조 공정에서 금형과 소재 사이의 열전달은 불균일한 온도 분포를 가지고, 따라서 단조품의 질적인 면에서 중요한 역할을 한다. 소성변형에 의한 열발생, 마찰 그리고 열전달은 제품 형상에 따라 상이한 온도를 가지는 주요한 요인이다. 또, 금형과 접촉된 소재의 온도차로 인한 열전달 결과 소재 표면에 칠링(Chilling)이 발생하고, 이는 표면 유동응력을 증가시켜 다양한 표면 결함을 일으킨다. 칠링현상은 계면열전달계수, 금형과 소

재간의 온도차, 변형율 및 마찰등과 같은 다양한 단조 변수들의 함수로 표현된다. 계면열전달계수의 요인들 중 중요 변수의 하나인 열전달 양을 구하고, 더 나아가 정확한 계면열전달계수의 크기를 구하는 연구는 많은 연구자들과 엔지니어들의 관심을 가져왔다. 계면열전달계수를 연구하여 실제 유한요소해석에 사용함으로써 금형과 특히 단조품의 부위별 온도 분포를 정확히 예측하는 것은 칠링현상과 과열조직 방지를 비롯한 결함 방지에서부터 단조품의 조직 예측에 이르기까지 다양한 방면에서 단조품의 품질 향상에 실제적으로 이용될 것이다.

1. 한국기계연구원 소재성형연구센터

열전도도는 소재 내부에서 나타나는 열전달 현상으로써 재료의 고유물성치인 반면 계면열전달계수는 금형과 소재의 계면에서의 열전달로써 재료고유의 물성치가 아닌 공정과 연계된 계수로 압력, 온도, 재료, 변형율, 변형율속도등의 함수로 표현된다. 이들 함수들 중 압력과 온도는 계면 열전달계수의 큰 영향을 주는 인자로서 앞서 연구 [1-7]되어진 문헌에 잘 나타나 있다. 열전대(Thermocouple)를 이용한 소재의 내부 온도를 직접 측정하는 실험 방법은 신뢰성 높은 계면열전달계수 값을 측정할 수 있지만, 밀폐단조 실험대를 소재에 삽입하여 측정한다는 것은 거의 불가능하기 때문에 본 연구는 구해진 계면열전달계수를 유효요소해석하여 온도분포와 유동응력을 수행하였고 단조품의 경도(Hardness)를 측정함으로써 그 결과를 증명하였다.

2. 계면열전달계수의 정량분석

정상 상태의 열접촉전도 h 는 다음과 같이 정의한다.[7,8]

$$h = \frac{q}{\Delta T} \quad (1)$$

여기서 q 는 열유속(Heat flux), ΔT 는 소재와 다이 계면에서의 온도차이다. 열손실을 무시한다고 가정 한다면 열유속의 양은 다이와 소재간 접촉부에서의 상수로 남는다. 그러므로 계면열전달계수는 다음과 같다.

$$h = \frac{K_t \cdot m}{(T_{sj2} - T_{j2})} \quad m = \frac{(T_{i2} - T_{i1})}{(x_{i2} - x_{i1})} \quad (2)$$

T_{sj2} 와 T_{j2} 는 소재와 다이의 접촉면에서의 온도, $(T_{i2}-T_{i1})$ 은 다이의 측정 온도, $(x_{i2}-x_{i1})$ 는 금형에서 측정 온도의 거리, 그리고 K_t 는 금형의 열전도도(W/m-K)이다. 금형과 소재에 삽입된 열전대를 통하여 측정된 온도를 외삽에 의하여 접촉표면의 온도 T_{sj2} 와 T_{j2} 를 구하였다. 그 결과 금형의 온도 기울기(K/mm)인 m 를 구할 수 있었다.

본 실험에 사용된 실험장비들과 밀폐단조 실험 방법은 문헌[1]에서 자세히 언급한 바 있다. 사용된 시편 소재는 중실의 Al6061 이고 금형은 AISI H-13 금형강을 사용하였다. 시편을 320℃ 가열한 후 170℃로 예열된 금형에 안착 시킨 후 200 톤 유압 프레스로 가압 하였다. 실험은 윤활 없이

(Dry condition) 상온에서 시편을 최대 50% 까지 압축 하였다. 시편과 금형의 온도 데이터는 열전대를 통해 들어온 신호를 A/D 보드를 통해 컴퓨터에 실시간으로 저장 하였다. 실험으로부터 얻어진 시편과 금형의 온도 데이터를 Eq. (2)에 입력하여 Al6061 소재의 계면열전달계수를 구하였고, Fig. 1과 같이 압력에 대한 함수로써 나타내었다. 선행 연구자들[1,7]과 같이 계면열전달계수는 압력이 증가함에 따라 점차적으로 증가함을 보여준다. 더 나아가 상수의 계면열전달계수 값과 본 연구에서 구한 계수 값의 비교를 위해 윤활을 하지 않은 Al 합금의 계수 값($h=7.5kW/m^2 \cdot K$) [6]을 사용하였다. 이 상수의 계수 값은 본 연구에서 구한 최대 계수 값 보다 크고, 더불어 큰 상수의 계면열전달계수 값에 대한 온도 분포에 미치는 영향을 연구하고자 했다.

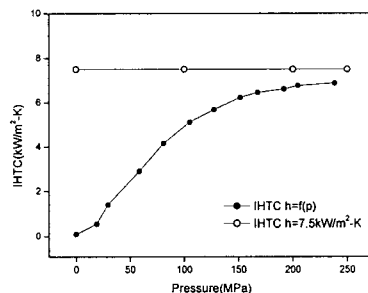


Fig. 1 The values of constant and pressure-dependent IHTC

3. 계면열전달계수의 신뢰성 입증

3.1 실험적 방법

플래쉬 두께에 따른 온도분포의 영향을 연구하고자 Fig. 2에서 보여지듯이 원주 방향으로 다양한 플래쉬 두께를 가지도록 설계 하였다. 이는 단조 공정시 플래쉬부에 가해지는 압력이 다르기 때문에 압력과 계면열전달계수의 관계를 보다 명확하게 알 수 있고, 또한 시편 부위에 따라 온도분포를 잘 비교 할 수 있다. Fig. 3은 테스트 할 상,하부 금형과 로(Furnace)로 구성된 도면이다. 시편과 금형을 각각 600℃와 400℃까지 로(Furnace)에 넣어 예열을 한 후 즉시 프레스로 이동을 하여 단조를 하였다. 단조를 한 후 시편을 물에 넣어 급냉을 시켰고 Fig. 4에 보여지듯이 단조된 시편의 단면을 잘라 각 부위에서의 비커스 경도(Vickers

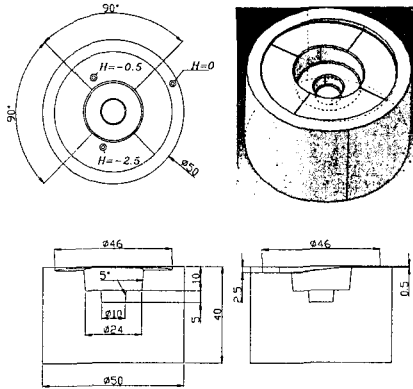


Fig. 2 Schematic representations of the die

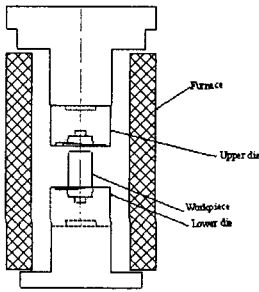


Fig. 3 The upsetting die set with furnace

hardness)를 측정하였다. 주목할 만한 경도 값의 차이는 없었으나 플래쉬 두께가 가장 얇은 오른쪽 끝부분에서의 경도가 다른 위치에서의 값들 보다 매우 낮았다. 밀폐단조 공정 동안 소재 내부에서의 직접적인 온도 측정은 불가능 하므로 다양한 온도 조건하에서 업셋팅 실험을 통해 구해진 표준 시편의 경도를 비교 함으로써 단조품의 온도 예측을 시도하였다. 실험에 사용된 동일소재로 다양한 온도 조건하에서 업셋팅 실험을 수행한 결과, Fig. 5에서 알 수 있듯이 온도가 증가 할수록 경도는 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 결과로써 단조 된 시편의 오른쪽 끝에서의 온도는 다른 곳에서 보다 높음을 추측 할 수 있다.

3.2 유한요소해석

상용 프로그램인 DEFORM-3D™ 로 유한요소해석 결과와 단조된 시편의 경도로부터 예측된 온도 분포를 비교 하였다. 소성변형에 의해 야기되는 열발생과 금형-소재 사이의 열전달 모두를 고려한 열-소성 해석을 수행하였고, 소성변형에너지

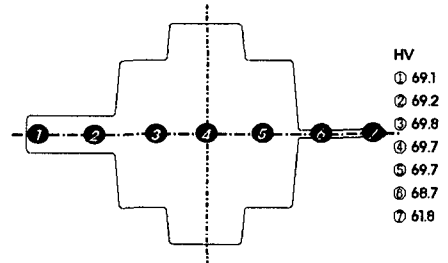


Fig. 4 Measurements of the hardness in the forged part

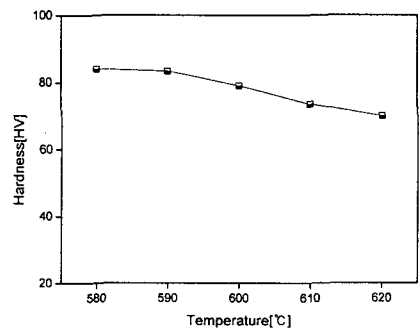
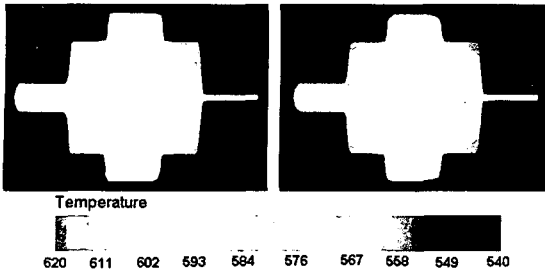


Fig. 5 Hardness variations with respect to temperature

가 열에너지로 변환될 때의 값인 0.85, 0.90, 0.95로 하여 유한요소 해석한 결과 온도차가 미소하여 일반적인 변환 값인 0.9 를 사용하였다[1]. 다른 해석 조건은 단조실험조건과 동일하게 입력하였다. Fig. 6 은 계수 값이 상수인 경우와 압력에 의존되는 경우의 계수를 입력하여 해석을 수행하여 온도분포로 표현 한 것이다. Fig. 7 은 경도를 측정 한 부위와 같은 곳의 수평방향으로 온도변화를 나타낸 것으로 전체적으로 상수의 계수 값이 본 연구에서 구한 계수 값보다 낮은 온도 분포를 나타내었다. 본 연구에서 구한 계수 값은 플래쉬가 얇은 쪽으로 갈수록 온도가 증가하나 상수인 계수 값의 경우는 반대의 경향을 보여준다. 후자의 경우 얇은 플래쉬 부위에서 소성변형에 의한 열 발생 보다 금형으로의 열전달이 더 크다는 것을 의미한다.

위의 두 결과를 증명하기 위해 Fig. 5 의 온도 범위에 따른 경도 값과 Fig. 7 에서의 시편의 위치에 따른 온도 데이터를 정리하여 Fig. 8 과 같이 예측 비교 할 수 있다. 본 연구에서 구해진 계수 값을 입력한 해석 값에서 얇은 플래쉬 끝단에서의 경도가 실험에서 측정된 경도 값과 같이 낮으며 그 경향이 같음을 보여준다.



(a) $IHTC=f(p)$ (b) $IHTC=7.5kW/m^2-K$
Fig. 6 Temperature distributions of forged part

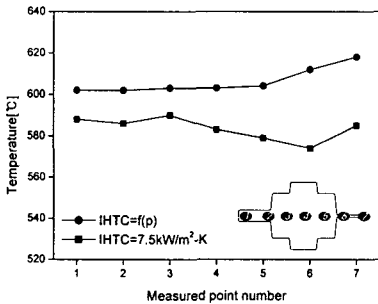


Fig. 7 Temperature variations in horizontal direction of the forged part

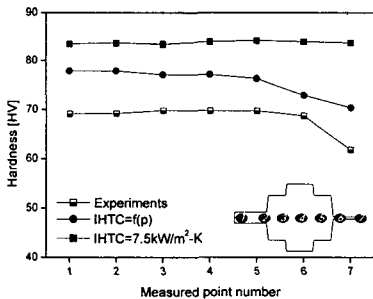


Fig. 8 Comparison of predicted and determined hardness

4. 결론

본 연구는 유한요소해석을 통해 여러 계면열전달계수 값과 플래쉬 두께에 따라 부위별 온도차를 단조 실험과 표준시편을 통한 경도를 비교한 결과 아래와 같은 결론에 도달 하였다.

(1) 금형과 소재 사이의 접촉압력은 열전달에 영향을 주며 압력에 의존되는 계면열전달계수는 온도, 응력과 변형율 속도를 예측하는데 더 적합하다.

(2) 큰 상수의 계면열전달계수는 낮은 접촉압력이 작용 할 때 성형 초기 단조공정에서의 열전달량이 지나치게 크게 예측하는 반면 계수 값이 작은 상수인 경우 성형이 끝나는 단계에서 반대의 경향을 보여준다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 권진욱, 이영신, 권용남, 이정환, 배원병, 2004, 열간단조시 금형과 소재간 계면열전달계수에 관한 연구, 한국소성가공학회 춘계학술대회, pp. 122~126.
- [2] P. Dadaras, W.R. Wells, 1987, Heat Transfer Aspects of Non-isothermal Axisymmetric Upset Forging, Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 187~195.
- [3] C.C. Chang, N. Bramley, 2002, Determination of the heat transfer coefficient at the die interface in forging, Proceeding of the 7th ICTP, Yokohama, Japan, pp. 775~780.
- [4] Z.M. Hu, J.W. Brooks, T.A. Dean, 1998, The interfacial heat transfer coefficient in hot die forging of titanium alloy, P.I.M.E., Vol. 212, pp. 485~496.
- [5] P.R. Burte, Y.T. Im, T. Altan, S.L. Semiatin, 1990, Measurement and analysis of heat transfer and friction during hot forging, J. Eng. Ind., Vol. 112, pp. 332~339.
- [6] S.L. Semiatin, E.W. Collings, V.E. Wood, T. Altan, 1987, Determination of the interface heat transfer coefficient for non-isothermal bulk-forming processes, Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, pp. 44~57.
- [7] M. Rosochowska, R. Balendra, K. Chodnikiewicz, 2003, Measurements of thermal contact conductance, JMPT, Vol. 135, pp. 204~210.
- [8] V.K. Jain, 1990, Determination of heat transfer coefficient for forging application, J. Mater. Shaping Technol., Vol 8, pp. 193-202.