한국소성가공학회 2004년도 추계학술대회 논문집 pp. 226~229

열간단조시 계면열전달계수의 신뢰성 향상에 관한 연구

권진욱* · 이정환* · 이영선* · 권용남* · 배원병**

A study on the improvement of interface heat transfer coefficient for hot forging

J. W. Kwon, J. H. Lee, Y. S. Lee, Y. N. Kwon and W. B. Bae

Abstract

The temperature difference between die and workpiece has been frequently caused to various surface defects. The distribution and change for the temperature of forged part should be analyzed to prevent the generation of various defects related with the temperature. The surface temperature changes were mainly affected by the interface heat transfer coefficient. Therefore, the coefficient is necessary to predict the temperature changes of die and workpiece. The temperature calculated by FEM result might be well compared with the measured temperature. However, it is impossible to measure directly the temperature distribution of forged part. Therefore, the comparisons between measured temperature and predicted values are preformed by the microstructure in various temperature. Since the differences of microstructure could be obvious, the temperature criteria is set near by the incipient melting temperature. The predicted temperatures are well coincided with the measured values.

Key Words : Interface Heat Transfer Coefficient, Pressure, Critical Temperature, Deformation, Al6061.

1. 서 론

열간 단조공정에서 금형과 소재간 계면에서는 마찰과 열전달이 이루어진다. 이때 금형과 소재 접촉면의 온도차에 의해 칠링(Chilling) 현상이 발생하고 이는 제품의 결함을 일으킨다. 이 칠링의 영향을 주는 함수로는 변형율, 내부온도차, 계면 열전달계수(Interface heat transfer coefficient)등이 있다. 이러한 인자들 중 계면 열전달계수는 가장 중요한 함수 중 하나이며, 계면 열전달계수를 연구하여 실제 FEM 해석에 사용함으로써 금형과 특히 단조품의 부위별 온도 분포를 정확히 예측하는 것은 칠링현상과 과열조직 방지를 비롯한 결함 방지에서부터 단조품의 조직 예측에 이르기까지 다양한 방면에서 단조품의 품질향상에 실제적으로 이용될 것이다. 열전도도는 소재 내부에서 나타나는 열전달 현상으로써 재료의 고유물성치인 반면 계면 열전달계수는 금형과 소재의 계면에서의 열전달로써 재료고유의 물성치가 아닌 공정과 연계된 계수로 압력, 온도, 재료, 변형율, 변형율 속도등의 함수로 표현된다. 이들 함수들 중 압력과 온도는 계면 열전달계수의 큰 영향을 주는 인자로써 앞서 연구[1-7]되어진 문헌에 잘 나타내고 있다. 선행된 연구[1]에서 구해진 계면 열전달계수의 정량화와 신뢰성을 입증하기 위해 밀폐단조(Closed die upsetting) 실험을 수행 함으로써 유동응

* 한국기계연구원 공정연구부 소성응용그룹
** 부산대학교 정밀기계공학과

력 이상의 압력에서의 열전달계수를 구하였고 그 값의 정밀도를 분석하였다. 또한 위 실험으로 구해진 계면 열전달계수는 그 신뢰성 입증을 위한 방안으로 단조시 소재 내부온도를 직접 측정하는 것이 가장 좋은 방법이지만, 실제 그 실행은 곤란하므로 간접적인 측정을 위한 실험을 수행하였다. 간접 측정법으로 선택한 방법은 소재의 미세조직을 이용하는 것으로, 소재가 임계온도(Critical temperature), 즉 소재의 녹는점(Melting point)에 가까운 온도까지 올라가게 되면 소재의 결정립 경계(Grain boundary)에서 석출물이 녹아 결정립 경계에 녹아 들어간다. 이러한 현상을 조직화 하고 실험과 FEM 해석을 비교 분석 함으로써 소재 내부온도를 예측하고 본 연구에서 구해진 계면 열전달계수의 신뢰성을 확인 할 수 있다. 사용된 소재는 최근 자동차 구조부품용 소재로 이용이 활발해지고 있는 Al6061 연주봉재를 사용하였다.

2. 계면열전달계수의 정량 분석

접촉된 금형과 소재 사이 열전달은 열전도이며 열전달계수로 알려진 열 접촉 전도식은 식 (1)과 같이 정의된다.

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

위 식을 사용하여 아래와 같이 접촉열전달식 (2)가 구해진다.[1, 7]

$$h = \frac{K_t \cdot m}{(T_{s2} - T_{t2})} \qquad (2)$$

여기서 T_{t1},과 T_{t2} 는 금형표면에서의 측정온도이고, T_{s1} 과 T_{s2}는 소재표면에서의 측정온도 이다. m은 금형(Tool)의 온도기울기(℃/mm)이며 K_t 은 금형의 열전도도이다. 본 실험에 사용된 실험 장비들과 기본적인 밀폐단조 실험 방법은 문헌 (1)에서 자세히 언급한 바 있다. 정량 분석을 위해 사용된 밀폐단조에서 소재와 금형의 초기온도는 각각 255℃, 210℃로 가열 하여 실험하였다. 사용된 Al6061 소재는 유동응력(약 180MPa)의 3 배까지 가압 하였고, 이때 펀치속도를 0.1mm/sec, 0.05mm/sec으로 하였으며 소재와 금형 사이 윤활제를 사용하지 않았다. 위 실험에서 측정된 데이터를 구해진 계면열전달식[1]에 대입하여 압력에 따른 계면열전달계수를 구한 결과 Fig. 2 와 같이 나타났으며, 실험과 같은 조건을 입력하여 FEM 해석 (DEFORM-2D)한 결과를 같이 표현 하였다.

압력에 따른 계면열전달계수를 확인해 보면 유동응력까지의 계면열전달계수 값의 상승은 펀치속도에 따라 조금 달리 증가하였지만 높은 압력이 가해 질수록 두 계수 값은 점점 작게 증가 되어져 비슷하게 되는 것을 알 수 있다.

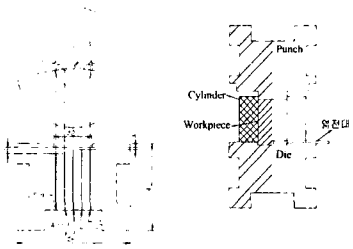
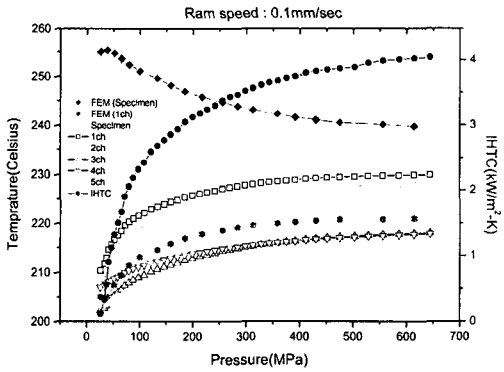


Fig. 1 Schematic representations of bottom die, workpiece and thermocouple positions

(a) Punch speed 0.1mm/sec



(b) Punch speed 0.05mm/sec

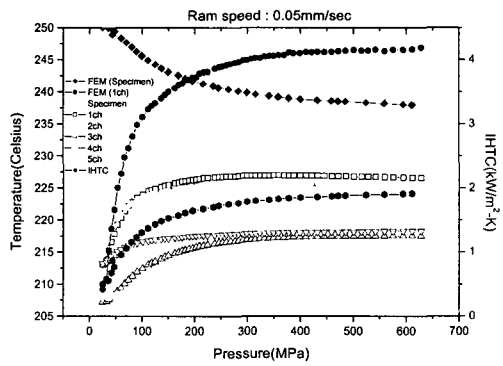


Fig. 2 Measured IHTC, predicted and measured temperature in die

3. 계면열전달계수의 신뢰성 입증을 위한 실험 및 해석

정량적으로 분석된 계면열전달계수의 신뢰성 입증을 위해 설계된 금형은 Fig. 3 에서 나타나듯이 소재를 임계온도까지 가열한 후 밀폐 금형에 안착시켜서 100mm/min 의 속도로 압축 실험을 하였다. 이때 금형의 예열 온도는 620℃며, 금형온도는 300℃ 이다. 소재의 압축율은 약 70%의 높은 변형을 주었다. 그 이유는 소재의 변형에너지에 의해 승온되는 속도와 계면열전달계수에 의한 금형과의 열전달의 상관관계를 분석하기 위한 것이다. 실제 단조에서는 소재의 온도를 측정하는 것

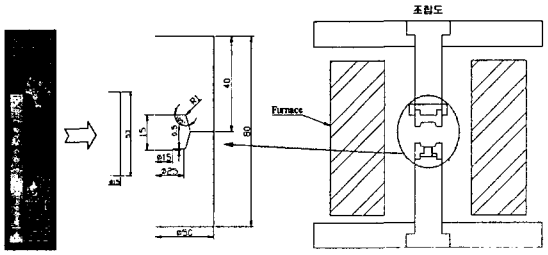
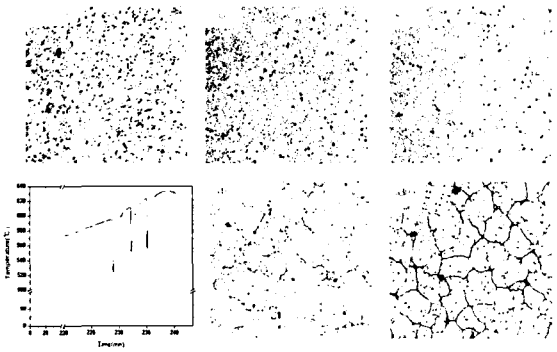
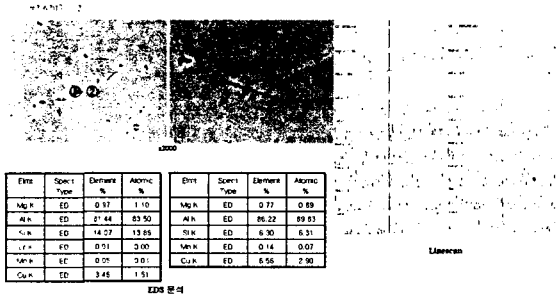


Fig. 3 Model for investigating the accuracy of IHTC



(a) Microstructure of Al6061 in various temperatures



(b) Analysis of SEM at 620℃

Fig. 4 Investigation of critical temperature of Al6061

이 불가능하기 때문에 임계온도에서 소재의 미세조직을 분석하고 이를 데이터 베이스화 하는 것은 중요하다. Fig. 4 (a)는 원소재와 각 온도별 소재의 내부 조직을 관찰한 것으로써 530℃에서는 원소재와 크게 차이를 보이지 않지만, 610℃에서는 입계 부분에 석출물들이 녹아 들어가 630℃일 때는 대부분의 석출물들이 녹아있다. Fig. 4 (b)는 620℃ 입계 부분을 SEM 분석을 한 것이다.

업셋팅 한 소재의 단면을 잘라 조직을 분석 한 결과와 FEM 해석 결과는 Fig. 5 와 Fig. 6 과 같다. 밀폐단조 후 소재의 표면에서는 결정립 안에 잔재해 있던 석출물들이 녹아 입계로 흘러 들어가는 조직들이 관찰 되었지만 소재 내부는 그렇지

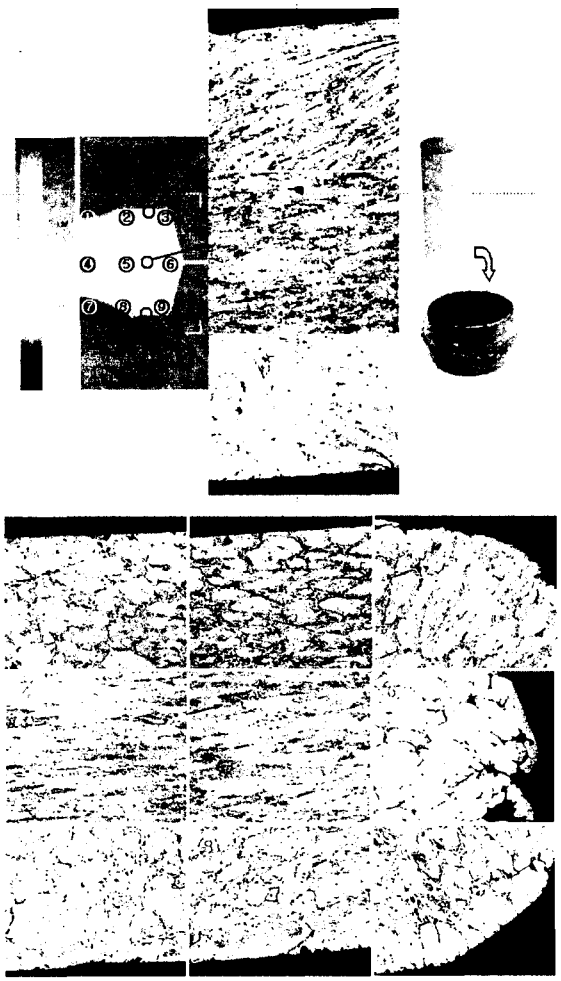
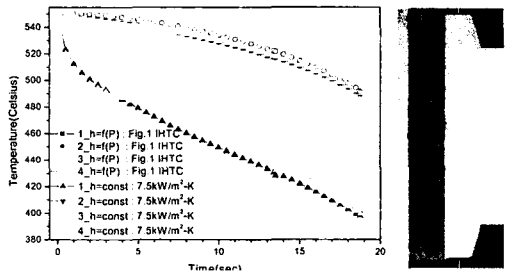


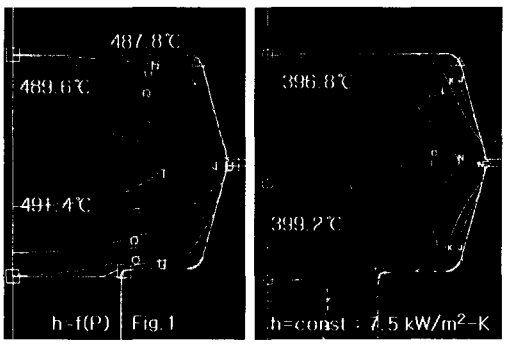
Fig. 5 Microstructure of Al6061 forged part at 620℃ forging temperature

않다. 그 이유는 소재에 압력이 가해져 변형이 시작되어 질 때 변형 에너지에 의한 소재 내부 온도 상승 보다 소재와 금형간의 열전달에 의한 열손실이 빠르기 때문이다. 소재의 각 부분별 온도 변화는 표면에서의 온도 하강이 소재의 중심부와 표면에서의 온도 하강보다 더 빨리 이루어짐은

Fig. 6(a)에 잘 나타나 있다. 또한 본 연구의 결과에 의해 분석된 열전달계수(압력에 대한 계수 변화)를 사용하는 것이 일정계수값을 사용하는 방법보다 정밀함을 분석한 결과는 그림 6 에서 보는 바와 같이 변형을 일으키는 순간부터 큰 온도차를 나타내었고, 단조 종료시점에는 내부 온도차가 최고 90℃까지 발생되었다.



Temperature(Celsius) : Specimen



(a)

(b)

Fig. 6 Comparisons of estimated temperature change according to the IHTC value

4. 결 론

본 연구 결과 아래와 같은 결론에 도달하였다.

(1) 본 연구에 사용된 연주봉인 Al6061 의 경우 국부적인 용융이 발생되는 임계온도는 620℃로 분석되었다.

(2) 프레스 속도가 저속일 경우 내부 변형에 의한 승온 속도 보다 계면에서의 열손실이 더 빨리 발생되었다.

(3) 유한요소 해석시 계면열전달계수가 상수(7.5kW/m^2-K)로 이용되면 온도에 대한 예측 결과의 정도가 저하되므로 주의해야 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(사업명 : 무절삭정밀단조연구실) 사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

(1) 권진욱, 이정환, 이영선, 권용남, 배원병, 2004, "열간단조시 금형과 소재간 계면열전달계수에 관한 연구," 한국소성가공학회 2004 춘계학술대회 논문집 pp. 122~126.

(2) P. Dadras, W. R. Wells, 1984, "Heat Transfer Aspectsof Nonisothermal 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 Part C, 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. 49~57.

(7) M. Rosochowska, R. Balendra, K. Chodnikiewicz, 2003, "Measurements of thermal contact conductance", JMPT, Vol. 135, pp. 204~210.