

열간단조시 금형과 소재간 계면열전달계수에 관한 연구

권진욱* · 이영선* · 권용남* · 이정환* · 배원병**

A study of interface heat transfer coefficient between die and workpiece for hot forging.

J. W. Kwon, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee 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 affected with the interface heat transfer coefficient. Therefore, the coefficient is necessary to predict the temperature changes of die and workpiece. In this study, the experimental and FE analysis were performed to evaluate the coefficient with a function of pressure, temperature, material, and etc. The sealed die upsetting was used to measure the coefficient on pressure over the flow stress. AISI1045, Al6XXX, and Pure-Copper were used to analyze effects according to the material. The coefficient was increased with step-up of pressure between die and workpiece. And, Al6XXX was larger than the AISI1045 and Pure-Copper up to the five times.

Key Words : Interface heat transfer coefficient(IHTC), Thermal conductivity, Pressure, Deform, Deformation.

1. 서론

일반적으로 열간단조 공정시 소재와 다이의 접촉표면에서는 마찰과 열전달이 일어난다. 이때 다이와 소재 접촉면의 온도차로 인한 Chilling 현상이 발생하는데 이는 표면에 유동응력을 증가시켜 소재 유동에 결함을 일으킨다. 이러한 Chilling의 양과 크기는 계면열전달계수, 변형율, 내부온도차등의 함수로 나타낼 수가 있다. 이 함수들 중 계면열전달계수는 특히 중요한 함수이다. 열전도도는 소재내부에서 나타나는 열전달 현상에 대한 것으로 소재의 고유물성치인 반면에 계면열전달계수는 계면에서의 열전달에 해당된다. 하지만 계면열전달계수는 재료고유의 물성치가 아닌 공정과 연계된 계수로 압력, 온도, 재료(Material),

유효조건, 변형, 변형율(Strain rate)의 함수로 표현된다. 이러한 함수들 중 압력과 온도는 계면열전달계수에 큰 영향을 미치는 함수이다. $12.7\text{W/m}^2\text{-K}$ - OFHC copper, $10.7\text{W/m}^2\text{-K}$ - 1042 steel, $41.7\text{W/m}^2\text{-K}$ - 304 S. steel 과 같이 재료에 따라 서로 다른 IHTC 값을⁽¹⁾ 가지나 이 값들은 압력과 온도의 조건에 따라 다르다. N. Bramley⁽²⁾는 순수접촉 상태일 때 $0.395\text{kW/m}^2\text{-K}$, 자유단조 일 때 높은 IHTC 값인 $7.79\text{kW/m}^2\text{-K}$ 구하였다. 하지만 구해진 IHTC 는 상수($7.79\text{kW/m}^2\text{-K}$)와 자유단조 상태의 시간을 10 등분하여 각 간격시간 마다 구한 IHTC 값을 시뮬레이션 한 결과 후자의 경우 실제 측정된 실험과 일치함을 알 수 있었다. 또한 T. A. Dean⁽³⁾은 Ti 합금 소재를 이용한 유효 조건, 변형율과 같이 계면 조건에 따른 영향을 분석하였고,

* 한국기계연구원 소성응용그룹

** 부산대학교 정밀기계공학과

T. Altan^(4,5)은 계면열전달계수에 주는 영향들 가운데 온도, 윤활, 압력조건등의 변수에 대한 분석을 위해 실험적 연구를 수행하였다. 나아가 R. Balendra⁽⁶⁾는 변형소재의 유동응력보다도 높은 압력 조건에서의 영향을 분석하고자 밀폐단조(sealed upsetting)상태에서의 계면 열전달 계수인 접촉열전도를 표면거칠기 값과 압력에 따른 계수 값이 기하급수적으로 증가하는 결과를 정리 하였다. 본 연구는 계면의 압력, 온도와 변형소재의 종류에 따른 영향을 실험을 통해 분석하고, FEM 해석을 통해 그 신뢰도를 평가하였다. 여러가지 업셋팅 실험으로 계면 열전달계수를 구하였다.

2. 세부 사항

2.1 접촉열전달계수

접촉된 소재와 다이 사이 열전달은 열전도이며 열전달계수로 알려진 열 접촉 전도식은 다음과 같이 정의된다⁽⁷⁾:

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

소재와 다이 계면에서의 온도차는 ΔT 이고, 열유속(Heat flux) q 는

$$q = \frac{d}{dA} \left(\frac{dQ}{dt} \right) \quad (2)$$

과 같다.

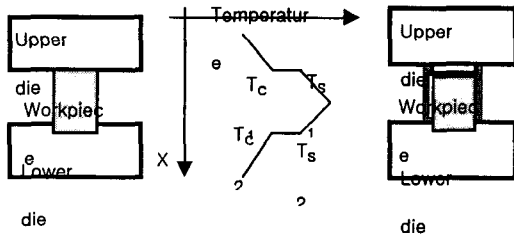


Fig. 1 Schematic diagram of temperature distribution

측정된 온도(T_{c2} , T_{s2})와 열유속 q 는 아래와 같이 각각 정의 된다.

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_{s2} - T_{c2} \\ q &= K_t \cdot m \end{aligned} \quad (3)$$

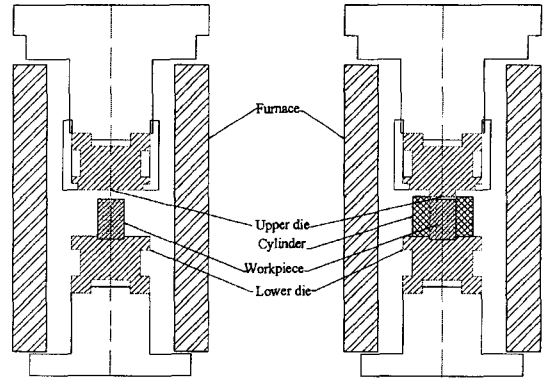
여기서 T_{c1} 과 T_{c2} 는 금형표면에서의 측정온도이고, T_{s1} 과 T_{s2} 는 소재표면에서의 측정온도 이다.

m 은 금형(Tool)의 온도기울기($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$)이며 K_t , 은 금형의 열전도도이다. 위의 (3)식을 (1)식에 대입한 후 구해진 접촉열전도식은 식(4)와 같다.

$$h = \frac{K_t \cdot m}{(T_{s2} - T_{c2})} \quad (4)$$

2.2 실험내용

정의된 접촉열전도식은 소재와 다이에서 측정된 온도로 구한다. 업셋팅 실험은 소재에 가해진 하중에 의해 변형이 있을 때와 없을 때 두 가지 실험을 하기 위해 각각의 상부 다이를 제작하였다. Fig 2 은 각각의 업셋팅 금형으로 (a)⁽⁷⁾는 자유단조(free upsetting) 및 순수접촉(contact) 금형이고 (b)는 밀폐단조 금형이다. 밀폐단조 금형의 경우 소재의 변형 없이 유동응력 이상의 높은 압력을 가할 수 있도록 설계하였다.



(a) Free upsetting die (b) Sealed upsetting die
Fig. 2 The upsetting die sets with furnace

다이의 소재는 열처리 한 AISI H-13 금형강이며, 증공실린더 또한 같은 재료를 사용하였다. 업셋팅시 소재의 위치가 다르면 정확한 온도 측정이 불가능 하기 때문에 지름 20mm, 깊이 2mm 의 구멍을 하부금형에 가공하여(Fig 3) 매 실험시 같은 곳의 측정온도 데이터를 얻을 수 있었다. 아울러 온도 측정은 Chrome-Alumel 선으로 되어있는 K-type 열전대(Thermocouple)를 사용하였으며 사용된 열전대는 지름이 1.6mm, 최고 1200 $^{\circ}\text{C}$ 까지 측정 가능하다. 열전대의 위치는 Table 1 에서 보듯이 하부다이 표면에서 1mm, 3mm 떨어진 깊이에 중심부와 중심부에서 4.5mm, 9mm 떨어진 곳에 세라믹본드를 사용 접지하여 온도를 측정하였다. 이

K-type 열전대의 신호는 8 채널에서 동시 저장 가능한 DAS(Data Acquisition System)를 사용하였다. 또한 입력된 신호는 DASY lab. 소프트웨어에서 데이터가 변환되어 ASCII 파일로 저장되었다.

Table 1 Thermocouple location in the bottom die

| No. | Location |
|------|---|
| 1 Ch | •Die center •Thickness distance of 1mm below the surface |
| 2 Ch | •Radial distance of 4.5mm from the die center •Thickness distance of 1mm below the surface |
| 3 Ch | •Radial distance of 9mm from the die center •Thickness distance of 1mm below the surface |
| 4 Ch | •Radial distance of 4.5mm from the die center •Thickness distance of 3mm below the surface |
| 5 Ch | •Radial distance of 9mm from the die center •Thickness distance of 3mm below the surface |
| 6 Ch | •Workpiece center •Distance of 12mm below the center T.C |
| 7 Ch | •Workpiece center •Center of workpiece |
| 8 Ch | •Workpiece center •Distance of 12mm upper the center T.C |

소재(W.P)에 열전대를 장착하여 온도를 측정하였으며, Fig 3 와 같은 높이에 중심부까지 홀을 뚫어 세라믹 본드로 열전대를 접지하였다. 사용된 소재의 재료는 열전도도가 다른 세 가지 종류 (Al6061, S45C, Pure Cu)를 선택하였으며, 그 크기는 지름 20mm, 높이 30mm 인 시편에 압축을 50%를 주었다. 이 시편을 압축하기 위해 UTM 200톤 유압프레스를 램속도는 6mm/min 으로 실험을 하였다. 성형시 윤활제는 사용하지 않았다.(Dry condition)

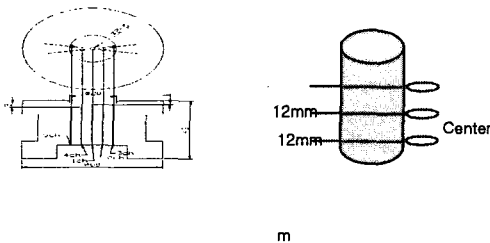
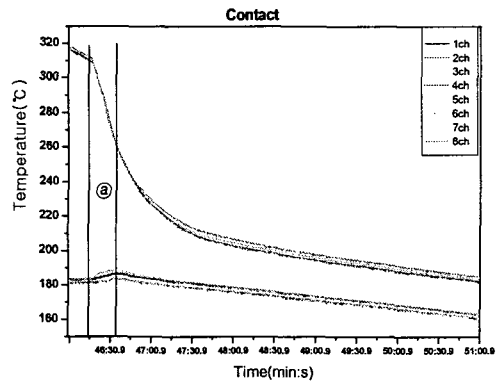


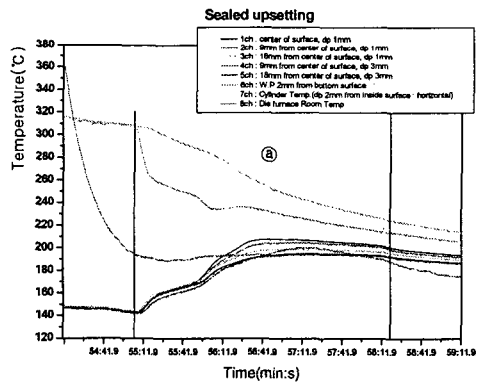
Fig. 3 Schematic representations of bottom die, workpiece and thermocouple positions

3. 실험결과

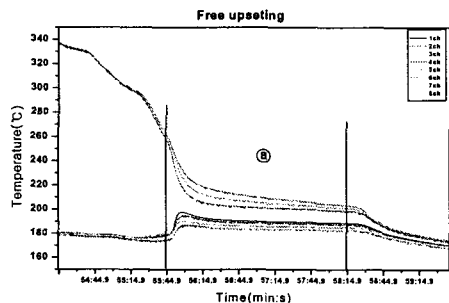
온도 초기조건은 다이 170℃, 소재 320℃ 온도에서 실험을 하였다. 소재와 다이는 각각 가열로에서 예열된 후 박스 로안에 소재를 삽입 가열 한 후 예열된 금형으로 이동 시킨 즉시 200 톤 유압프레스를 작동하여 압축을 시작하였다. 이후 A/D 보드를 통해 저장된 데이터는 Fig 4 에서 나타나



(a) Contact upsetting



(b) Sealed upsetting



(c) Free upsetting

Fig.4 Measurement of temperature at upset of Al6061

뜻이 압력에 따라 온도 기울기가 다르다. 첫번째 순수접촉의 ①구간은 하중 13kgf 이하로 유지하였고 두번째 밀폐단조는 수동하중제어로 최고 9톤의 하중을 가하였다(b). 자유단조는 속도 6mm/min으로 한 업셋팅(②) 실험이다. 또한 하중을 제거하였을 경우 소재에 비해 다이의 온도 하강 폭이 적다. 이는 하중이 가해질 때와 같이 해석 할 수가 있다. Fig 5는 소재와 금형의 같은 온도조건에서 실험한 결과를 나타낸 것으로서 계면열전달계수가 자유단조와 밀폐단조에 관계없이 선형적으로 증가 하나 같은 압력에서는 다른 계수값을 가진다. Fig 6은 여러 재료들을 밀폐단조 실험결과로써 접촉열전달계수는, Al6061이 가장 큰 값을 다음으로 순동 그리고 S45C 순으로 나타났다. 또한, 구해진 계면열전달계수(h)는 Table 2와 같이 압력(P)에 대한 함수식($h = \alpha P^\beta$)으로 정량화 시켰다.

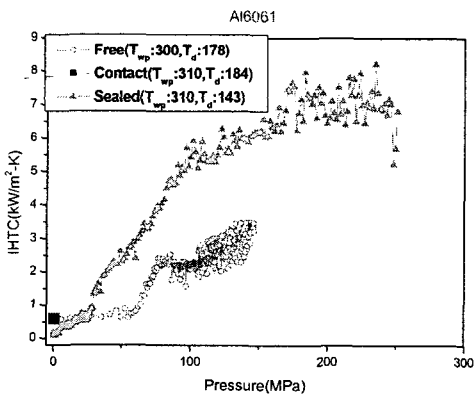


Fig. 5 Variation temperature of IHTC with pressure

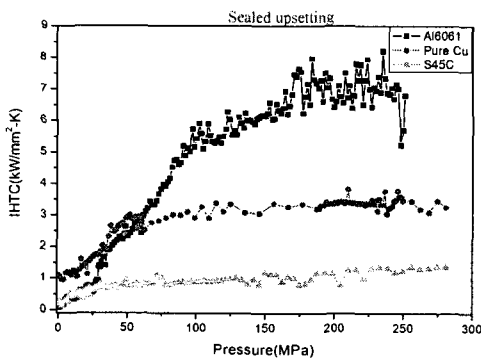


Fig. 6 Variation material of IHTC with pressure

Table 2 Functional values about IHTC and pressure in sealed upsetting of material

| $h = \alpha P^\beta$ | Al6061 | Pure Cu | S45C |
|----------------------|---------|---------|---------|
| α | 0.18122 | 0.8508 | 0.21919 |
| β | 0.69036 | 0.25881 | 0.30981 |

일반적으로 변형에 의한 에너지의 90%가 열에너지로 변환 되는 것으로 알려져 있지만, 이 또한 온도 변화 변수 가운데 하나이므로 해석시 영향을 분석하고자 하였다. 분석결과 변환 계수값이 90%가 아닌 85%, 95%의 경우로 가정할 경우에도 온도변화 차는 0.13℃ 정도로 매우 미소함을 FE 해석을 통해 확인 하였다.(Fig 7)

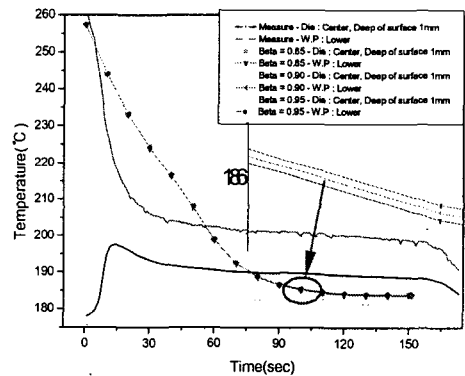


Fig. 7 Variation conversion factor of mechanical energy and heat energy

실험을 통해 분석된 결과의 신뢰도 입증을 위해, 안쪽 표면에서부터 3mm, 중간높이에서 온도 측정 한 중공실린더에 다양한 계면열전달계수 조건으로 FEM 해석을 수행한 결과(Fig 8) 측정된 실험값과 비교하여 볼 때 본 연구에서 구해진 접촉열전달 계수값($h=f(P)$, KIMM)이 가장 유사한 온도 분포를 나타내었다.

4. 결론

본 연구 결과 아래와 같은 결론에 도달하였다.

(1) 계면열전달계수는 압력과 온도에 함수이며, 압력이 증가함에 따라 계수 값도 점차적으로 증가하였다.

참 고 문 헌

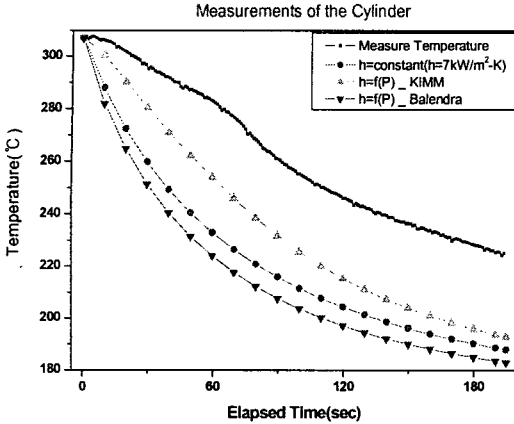


Fig. 8 FE simulation result of variation IHTC

(2) 재료에 대한 계면열전달계수는 Al6061 이 순동보다 2 배 , 순동은 S45C 보다 2.5 배 이상 큰 값을 나타내었다.

(3) 소성변형시 변형에너지와 열에너지 사이 변환 계수값은 시뮬레이션 결과 온도변화 폭이 0.13℃로 계면열전달계수에 비해 상대적으로 열전달에 미치는 영향이 미소하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구소(무절삭정밀단조연구소)사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

1. P. Dadras, W. R. Wells, 1984, "Heat Transfer Aspects of Nonisothermal Axisymmetric Upset Forging", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 106, pp. 187~195.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
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. M. Rosochowska, R. Balendra, K. Chodnikiewicz, 2003, "Measurements of thermal contact conductance", *JMPT*, Vol. 135, pp. 204~210.
7. 염종택, 임정숙, 박노광, 신태진, 황상무, 홍성석, 2003, "Ti-6Al-4V 합금의 열간성형에 대한 계면열전달계수의 결정 및 분석", *한국소성가공학회지*, 제 12 권 제 4 호, pp. 370~375