

비 등은 유한요소해석을 위한 접면열전달계수의 결정

강연식*, 양동열
(한국과학기술원 기계공학과)

Abstract

In the temperature analysis, the heat transfer between the workpiece and the die has an important influence upon the temperature distribution. The accuracy of thermal analysis depends on the proper description of boundary conditions. At the contact surface of two materials with different temperature, this requires the knowledge of overall heat transfer coefficients. In order to evaluate the overall heat transfer coefficients, a technique is developed. This technique involves temperature measurement at the contact surface during hot upsetting operations and finite element computation to calculate the overall heat transfer coefficient.

1. 서론

열간공정의 해석에 있어서 온도해석은 필수적인 것중의 하나이다. 온도해석에 있어서 열전달은 온도 분포에 크게 영향을 준다. 따라서 온도해석에 있어서 열적 특성계수와 더불어 열전달 계수는 정확하게 알고 있어야 한다. 이 중에서도 해석상 중요하고도 기존의 연구결과에서 쉽게 구할 수 없는 것이 접면열전달계수(overall heat transfer coefficient)이다.

금형과 소재의 접면을 미시적으로 보면 Fig. 1과 같은 비연속적인 상태이다. 따라서 금형과 소재 사이의 열전달은 대류, 복사, 전도가 복합적으로 작용하게 되어 계산에 적용하기가 매우 어렵다. 그래서 각각의 열전달을 합하여 하나의 계수로 나타낸 것이 접면에서 열전달 계수이다.

접면 열전달 계수를 구하기 위한 실험은 윤환, 주조 등 여러 분야에서 다양하게 이뤄지고 있다. 소성가공 분야에서도 일찍부터 이에 대한 연구가 이뤄져 왔다. Dadras 등[1]은 유한차분법에 적용하기 위하여 시행오차법으로 몇가지 재료에 대하여 접면열전달계수를 구한바 있고 Semiatin 등[2]과 Burte 등[3]은 보정곡선을 사용하여 접면열전달계수를 구하였다. 최근에 들어서는 Malinowski 등[4]이 접면열전달계수를 온도 와 압력의 함수로써 표현하고자 한 연구등이 있다.

접면열전달계수는 공정조건과 소재에 따라 크게 변하고 기존의 자료에는 극히 일부의 소재에 대해서만 나와 있기 때문에 해석하고자 하는 각각의 소재에 대하여 구해야 한다. 접면열전달계수의 결정은 실험에서 측정된 온도값과 수치해석법으로 계산된 온도들을 비교하여 구한다. 본 연구에서는 접면열전달계수를 구하기 위하여 새로이 설계된 접면열전달계수 측정 장치를 제작하였다. 이에 의하여 온도를 측정하고 강-점소성 유한요소법으로 온도를 계산한 뒤 이들을 비교하여 접면열전달계수를 구하였다. 접면열전달계수를 구하는 과정은 Golden line search 알고리즘을 이용하였다. 본 논문에서는 열간압출에 널리 이용되는 Al 2014-T6를 선택하여 접면열전달 계수를

구해보았다.

2. 실험에 의한 온도측정

종전의 접면 열전달 계수의 정확한 측정을 위한 실험은 장비의 제작이 어렵고 실험이 힘들어 여러 재료에 대하여 접면열전달계수를 구하기가 힘들었다. 본 연구에서는 비교적 장비의 제작이 간단하고 실험하기가 용이하게 장비를 설계, 제작하였다. 본 연구에서 제작한 접면 열전달 계수의 측정 장비의 구조는 Fig. 2와 같다.

단열재는 열전도율이 400 °C에서 0.08이하이고 1300 °C까지의 단열이 가능한 고온 단열재를 사용하였다. 단열재의 설치는 충분한 단열을 보장하기 위하여 2~3중으로 설치하였다. 열발생 장치는 일정온도를 유지하도록 조정이 가능하게 제작하였다. 로안 공기 중에 삽입된 열전대(thermocouple)에 의해 온도를 측정하여 일정온도가 조정된다. 열전대는 피복(sheath)된 바깥지름이 1.0mm인 K형(K-type)을 사용하였다. 열전대의 지름은 온도측정의 지연시간을 줄이기 위하여 작게 제작된 것을 사용하였다. 열전대는 Fig. 3과 같이 금형과 펀치내 4곳과 소재내 3곳에 설치하였다. 또한 로안의 공기온도를 측정하기 위하여 별도의 열전대를 설치하였다. 열선과 접하는 하부금형에 사용된 열전대는 비교적 noise의 영향을 덜 받는 비접지형(unground type) 열전대를 사용하였다. 접면열전달계수의 측정에서 접면 가까이에서 온도변화가 중요하므로 접면 근처의 열전대는 가능한한 접면과 가까운 곳에 위치시켰다. 측정되는 온도를 정확하게 얻기 위하여 사용하고자 하는 온도구간내에서 정밀하게 보정하였다. 열선의 전류로 인한 noise를 없애기 위해 온도 측정시에는 전류를 차단하였다.

실험은 50ton 유압식 만능 시험기에 장치를 장착하여 수행하였다. 펀치의 하강속도는 1.293mm/sec이다. 로안의 공기온도는 370 °C인 상태에서 단순 업셋팅(upsetting) 실험을 수행하였다. 소재는 Al 2014-T6

이고 초기 크기는 $\phi 30 \times 60 \text{mm}$ 이다. 펀치와 금형의 재료는 AISI H13이다. 소재와 접하는 면은 연마하여 사용하였다. 펀치의 지름은 $\phi 100 \text{mm}$ 이다. 가공시 잔류응력을 없애기 위하여 T6열처리 온도보다 낮은 온도에서 풀림처리를 하여 사용하였다. 실험은 높이감소율이 30%가 될때까지 수행하였다. 펀치는 로가 가열되는 동안 단열된 로의 밖에 위치하여 있고 성형시에만 로안으로 들어가 성형하게 된다. 펀치의 이동거리와 하중은 만능시험기에서 측정하였으며 온도는 열전대에서 나오는 신호를 A/D 변환기를 통한 후 컴퓨터에서 읽어 들이게 하였다. 같은 실험을 3번 수행하여 평균값을 측정값으로 사용하였다.

3. 수치해법에 의한 온도 계산

수치해법에 사용되는 방법은 축대칭 강-점소성 유한요소법[5]이다. 변형해석에 사용되는 변분식은 다음과 같다.

$$\int_V \sigma \delta \epsilon dV + K \int_V \epsilon_v \delta \epsilon_v dV - \int_{S_f} f_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

온도해석에 사용되는 변분식과 경계조건은 다음과 같다.

$$\int_V k T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c T \delta T dV - \int_V k^* \sigma \epsilon \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \quad (2)$$

이 때 경계 조건은

i) 자유 표면에서

$$\text{대류열유량 } q_n^c = h(T_a - T_s)$$

$$\text{복사열유량 } q_n^r = \sigma \epsilon (T_a^4 - T_s^4)$$

ii) 금형과 소재의 접촉면에서

$$\text{전도열유량 } q_n^d = h_{lub}(T_1 - T_2)$$

$$\text{마찰열유량 } q_n^f = m \mu k_v \dot{\gamma} / J$$

여기서, h_{lub} 가 접면에서 열전달 계수이고 J 는 열의 일당량이다.

위와 같은 유한요소법으로 실험과 같은 공정조건을 대입하여 측정점에서의 계산온도를 구하였다. 계산에 사용된 열적특성과 열전달 계수를 Table. 1에 나타냈다. 계산에 사용된 유한요소격자를 Fig. 4에 나타냈다. 계산에 사용된 요소수는 펀치와 금형이 각각 224, 306개이고 소재의 경우는 329개이다.

4. 접면열전달계수의 산출

접면열전달계수의 산출은 기본적으로 임의의 접면열전달계수값을 가정하여 수치해법으로 온도를 계산한 후 실험치와 비교하여 접면열전달계수값을 변화시켜가면서 가장 차이가 적은 접면열전달계수값을 찾아내는 것이다. 접면열전달계수값을 찾아가는 방법으로는 초기에는 주로 시행오차법이 많이 이용되었으

나 이 방법은 필요이상의 많은 계산을 하게된다. 본 논문에서는 최적제어에서 사용되는 Golden line search 알고리즘[6]을 이용하여 접면열전달계수값을 찾는다. 접면열전달계수값을 찾기위하여 오차함수를 다음과 같이 규정하였다.

$$E(h_{lub}) = \sum_{i=1}^N [(T_C)_i - (T_M)_i]^2 \quad (3)$$

여기에서 T_C 는 유한요소법으로 계산되어지는 온도이며 T_M 는 실험에서 측정된 온도값이다. 첫 시간 스텝(time step)에서는 접면열전달계수의 초기 가정값을 충분히 작은 값으로 주고 다음 시간스텝에서부터는 전 단계에서 얻어진 접면열전달계수값을 근거로 초기 가정값을 주었다. 윗식의 오차함수가 허용값보다 작아지면 현 시간 스텝에서 접면열전달계수값으로 설정하고 다음 시간 스텝으로 넘어간다. 이와 같이 각 시간스텝마다 결정한 접면열전달계수로 계산한 온도곡선과 측정된 온도곡선을 Fig. 5에 비교하여 보았다. 비교적 측정치와 계산치가 잘 일치되고 있다. 이로써 본 논문에 사용한 알고리즘으로 접면열전달계수값을 적절하게 결정되어짐을 볼 수 있다.

접면열전달계수는 여러가지 조건에 따라 변화되지만 이 중에서 압력이 지배적인 인자[3]이므로 압력에 따른 접면열전달계수값을 Fig. 6에 나타내어보았다. 어느 압력을 넘어서면 접면열전달계수가 일정한 값을 유지하는데 이 현상은 Burte등[3]이 실험한 것과 같은 결과를 보이고 있다. 대부분의 소성공정에서는 이 임계값이상의 압력이 성형시에 작용하므로 성형 해석시에 일정한 값의 접면열전달계수를 사용하여도 될것이다.

5. 결론

본 논문에서는 접면열전달계수를 측정하기 위하여 설계, 제작된 장치를 이용하여 접면열전달계수를 구하여 보았다. 접면열전달계수를 구하는 과정에 Golden line search 알고리즘을 적용하여 계산의 효율성을 증가시켜 보았다. 산출된 접면열전달계수값으로 계산된 온도값은 측정치와 잘 일치함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초 연구과제의 일부로 수행되었습니다. 동 재단의 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. P. Dadras and W.R. Wells, Heat Transfer Aspect of Nonisothermal Axisymmetric Upset Forging, J. of Engineering for Industry, Vol.106, pp.187-195(1984)
2. S.L. Semiatin, E.W. Collings, V.E. Wood and T. Altan, Determination of the Interface Heat Transfer Coefficient for nOn-isothermal Bulk-Forming Processes, J. of Engineering for Industry, Vol. 109, pp.49-57(1987)
3. P.R. Burte, Y.T. Im and T. Altan, Measurement and

Analysis of Heat Transfer and Friction During Hot Forging, Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, Vol.112, Nov. pp.332-339 (1990)

4. Z. Malinowski, J.G.Lenard and M.E. Davies, A Study of the Heat-Transfer Coefficient as a Function of Temperature and Pressure, J. Mater. Shaping Technol., Vol. 41, pp.125-142(1994)
5. Y.S. Kang , C.Y. Park, J.R. Cho, and D.Y. Yang, Finite Element Analysis of Axisymmetric Hot Extrusion through Square Dies, KSME, Vol.16, No.2, pp.201-225(1992)
6. J. S. Arora, introduction to optimum design, McGraw-Hill, pp.295(1989)

| Coeff. | k | ρc_p | h |
|------------|------------|-------------------------|---------------|
| | N/(sec·°C) | N/(mm ² ·°C) | N/(sec·mm·°C) |
| H 13 | 28.4 | 3.7 | 0.0033 |
| Al 2014-T6 | 168.57 | 2.65 | 0.0033 |

Table 1 Thermal properties and heat transfer coefficients of Al 2014-T6 and H-13

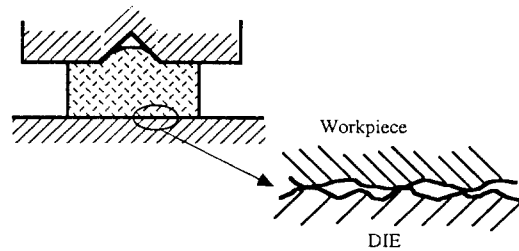


Fig. 1 Magnified view of two parallel surface with solid contact

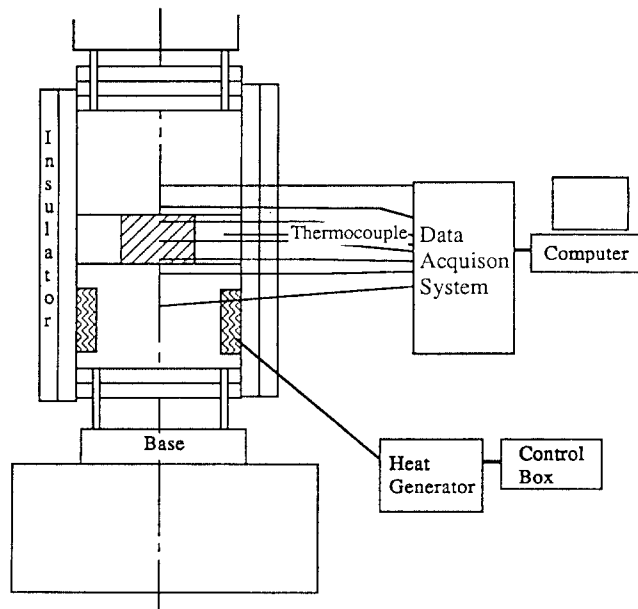


Fig. 2 Schematic of the experimental setup to determine the overall heat transfer coefficient

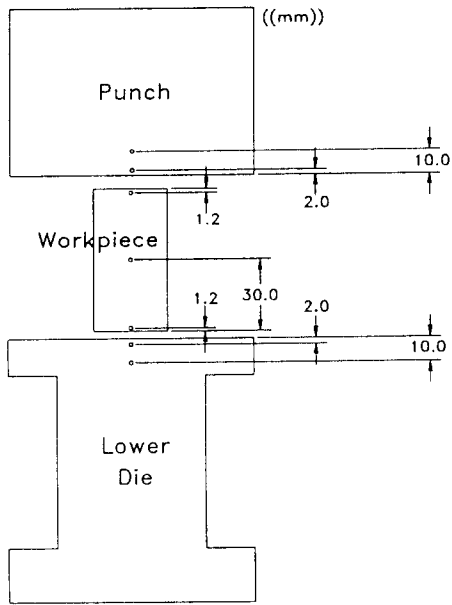


Fig. 3 Positions of the seven inserted thermocouples

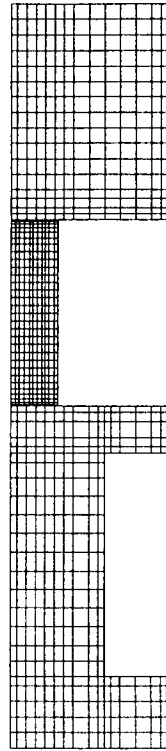


Fig. 4 Finite element mesh of the die and the billet

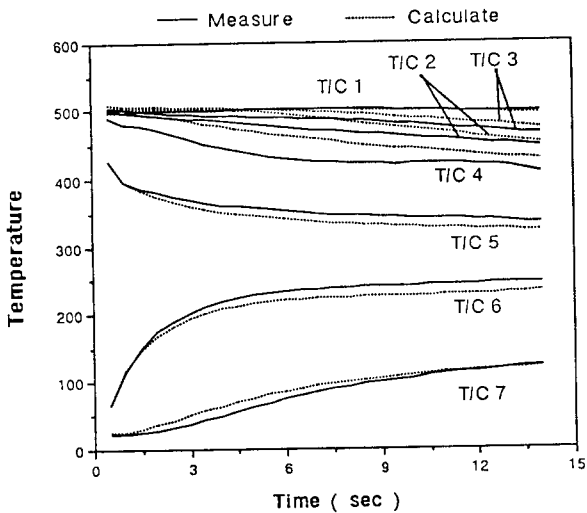


Fig. 5 Variation of calculated temperature and measured temperature with respect to time

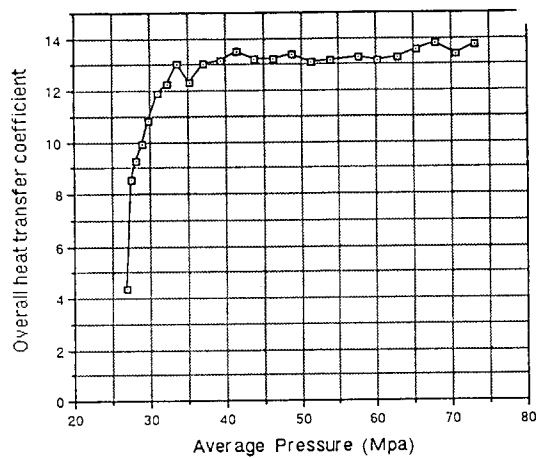


Fig. 6 Values of h_{lub} for Al-2014-T6 for various interface pressures.