

비 등온 유한요소해석을 위한 접면열전달계수의 결정

강 연 식* , 양 동 열*

Determination of the Overall Heat Transfer Coefficient for Non-Isothermal Finite Element Analysis

Yeon-Sick KANG*, Dong-Yol YANG*

ABSTRACT

In the temperature analysis of hot metal forming process, the heat transfer conditions between the work-piece and the tool have important influences upon the temperature distribution. The accuracy of thermal analysis depends on the proper description of boundary conditions including heat transfer. At the contact surface of two materials with different temperatures, this requires the knowledge of the overall heat transfer coefficient. In order to determine the overall heat transfer coefficient, a technique is developed. The technique involves temperature measurement by using thermocouples during hot upsetting operations and finite element computation. The overall heat transfer coefficient is determined using a non-linear optimization technique.

Key Words : Overall Heat Transfer Coefficient(접면열전달계수), Finite Element Analysis(유한요소해석), Golden Section Search(황금분할탐색)

1. 서 론

열간 성형공정을 해석하고자 할 때 온도해석은 필수적인 것 중의 하나이다. 온도해석에 있어서 열전달은 온도 분포에 크게 영향을 준다. 온도분포가 달라지면 소재의 변형거동이 변하고 마찰조건등에도 영향을 준다. 따라서 열전달을 고려한 정확한 온도해석이 필요하다. 이를 위해서는 소재와 금형의 열적 특성계수와 더불어 열전달 계수를 정확하게 알고 있어야 한다. 이 중에서도 해석결과에

크게 영향을 미치고 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 접촉점에서 고체간의 열전도와 접촉부의 빈공간에 있는 유체를 통한 열전도의 기구에 의해 일어난다⁽¹⁾. 접면에서 열전달은 대류, 복사, 전도가 복합적으로 작용하게 되어 계산에 적용하기가 매우 어렵다. 그래서 접면에서

* 한국과학기술원 기계공학과

각각의 열전달을 통합하여 하나의 계수로 표현하고자 한 것이 접면열전달계수이다.

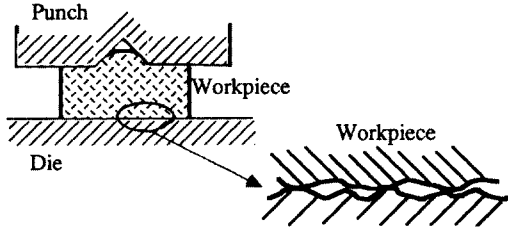


Fig.1 Magnified view of two parallel surface with solid contact

접면열전달계수를 구하기 위한 실험은 윤활, 구조 등 여러 분야에서 다양하게 이뤄지고 있다. 소성가공 분야에서도 일찍부터 이에 대한 연구가 이뤄져 왔다. 초기에는 주로 유한차분법(finite different method)에 적용하기 위하여 시행오차법으로 접면열전달계수를 구하였다. 1980년대에 들어서는 Dadras 등⁽²⁾이 시행오차법으로 금형이 AISI H13(SKD61)이고 소재가 OFHC, 1042강, 304S강인 경우에 대하여 접면열전달계수를 구한 바 있다. Semiatin 등⁽³⁾과 Burte 등⁽⁴⁾은 보정곡선(calibration curve)을 사용하여 AISI A1 2024-O의 소재에 대하여 접면열전달계수를 구하였다. 최근에 들어서 Nshama 등⁽⁵⁾은 유한요소법에 적용하기 위하여 AISI A1 6061-O의 소재에 대하여 오차함수를 최소화 시키는 방법으로 접면열전달계수를 구하였다. Malinowski 등⁽⁶⁾은 AISI 304S 강에 대하여 접면열전달계수를 온도와 압력의 함수로써 표현하고자 시도한 바 있다. 그러나 실제 접촉면의 조건은 매우 복잡하기 때문에 다양한 경우에 대하여 접면열전달계수를 예측할 수 있는 만족할 만한 이론이나 실험식은 아직 존재하지 않는다.

접면열전달계수는 공정조건에 따라 다르고 소재와 금형의 조합에 따라 크게 변하고 기존의 자료에는 극히 일부의 경우에 대해서만 나와 있기 때문에 해석하고자 하는 각각의 소재와 금형에 대하여 구해야 한다. 접면열전달계수의 결정은 실험에서 측정된 온도 값과 수치해석적으로 계산된 온도 값들을 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 최적제어에서 많이 이용되는 황금분

할탐색(Golden section search) 알고리즘을 이용하였다. 본 논문에서는 소재와 금형의 조합을 열간압출에 널리 이용되는 AISI A1 2014-T6와 H13을 선택하여 접면열전달 계수를 구해보았다.

2. 실험에 의한 온도측정

접면열전달계수가 기존의 자료에 없는 경우를 해석하고자 하면 그때마다 소재와 금형의 조합에 대해 실험에서 측정된 온도 값이 필요하다. 본 논문에서는 비교적 장치의 제작이 간단하고 실험하기가 용이하게 장치를 설계, 제작하였다. 본 연구에서 제작한 접면열전달계수의 측정 장치의 구조는 Fig. 2와 같다.

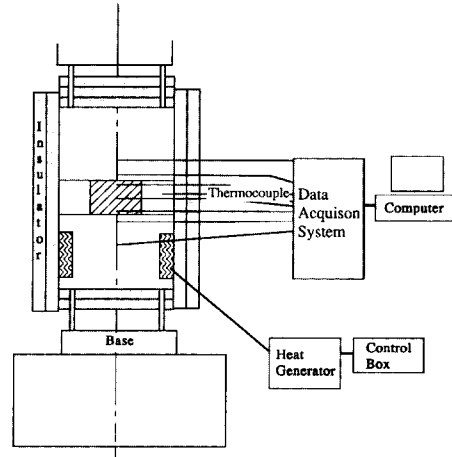


Fig. 2 Schematic of the experimental setup.

단열재는 내열성과 내화성을 갖고 축열이 작아야 하며 낮은 열전도율을 가져야 한다. 본 논문에서 사용한 단열재는 열전도계수(thermal conductivity)가 400 °C에서 0.08(W/m°C)이하이고 1300 °C까지의 단열이 가능한 고온 단열재를 사용하였다. 단열재의 설치층은 충분한 단열을 보장하기 위하여 2~3층으로 설치하였다. 단열재의 외부는 성형시 형상을 유지하기 위하여 단단한 세라믹으로 피복하였다. 열발생 장치는 일정온도를 유지하도록 조정이 가능하게 제작하였다. 하부 금형에 삽입된 열전대(thermocouple)에 의해 온도를 측정하여 일정온도가 조정된다.

접면열전달계수를 구하기 위하여 사용되는 온도는 열전대를 Fig. 3과 같이 금형과 펀치내 4곳과 소재내 3곳에

설치하여 측정하였다. 또한 로(furnace)안의 공기온도를 측정하기 위하여 별도의 열전대를 설치하였다. 열전대는 피복(sheath)된 바깥지름이 $\phi 1.0\text{mm}$ 인 K형(K-type)을 사용하였다. 열전대의 지름은 온도측정의 지연시간을 줄이기 위하여 작게 제작(Korea Sensor Tech Co.)해 사용하였다. 열선과 접하는 하부금형에 사용된 열전대는 비교적 잡음(noise)의 영향을 덜 받는 Fig. 4(c)와 같은 비접지형(ungrounded type) 열전대를 사용하였다. 피복된 열전대를 사용하므로써 Fig. 4(a)와 같은 접합점이 노출되어 열전대를 금형과 소재의 구멍에 삽입시 접합점이 파괴되거나 손상되는 것을 줄이고자 하였다. 열전대를 삽입한 후에는 각각의 열전대에 대하여 온도를 측정하여 손상되었는지를 검토하였다. 접면열전대개수의 결정에서는 접면 가까이에서 온도변화가 중요하므로 접면 근처의 열전대는 가능한 한 접면과 가까운 곳에 위치시켰다. 금형의 경우 접면에서 열전대 구멍의 중심까지 2.0mm가 되게 하고 소재의 경우는 접면에서 구멍의 중심까지 1.2mm가 되게 가공하였다. 열전대는 측정되는 온도를 정확하게 얻기 위하여 사용하고자 하는 온도 구간내에서 정밀하게 보정하였다. 열선의 전류로 인한 잡음을 줄이기 위해 온도 측정 시에는 전원을 차단하고 실험하였다.

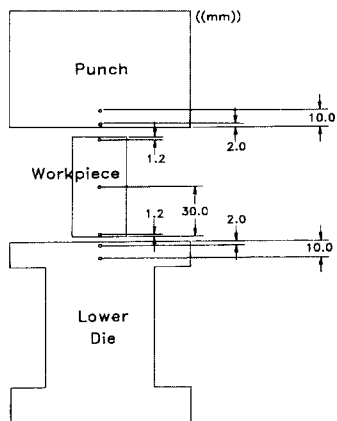


Fig. 3 Positions of the seven inserted thermocouples

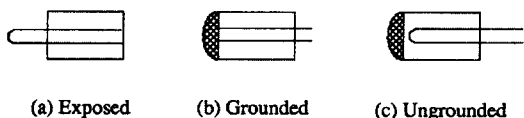


Fig. 4 Various types of thermocouples with respect to hot junction

실험은 50ton 유압식 만능시험기(Shimadzu Co.)에 장치를 장착하여 수행하였다. 펀치의 하강속도는 1.293mm/sec이다. 로안의 공기온도는 370 °C인 상태에서 단순 업셋팅(simple upsetting) 실험을 수행하였다. 소재는 AISI A1 2014-T6이고 초기 크기는 $\phi 30 \times 60\text{mm}$ 이다. 펀치와 하부금형의 재료는 AISI H13이다. 소재와 접하는 금형과 펀치면은 연마하여 사용하였다. 펀치와 금형의 지름은 $\phi 100\text{mm}$ 이다. 소재 가공시 잔류응력을 없애기 위하여 T6열처리 온도보다 낮은 온도에서 풀림처리(annealing)를 하여 사용하였다. 풀림처리는 415°C에서 2시간동안 수행하였다. 실험은 높이감소율이 30%가 될 때까지 수행하였다. 펀치는 로가 가열되는 동안 단열된 로의 밖에 위치하여 있고 성형 시에만 로안으로 들어가 성형하게 된다. 따라서 하부금형에서 펀치 방향으로 온도의 구배를 주어 온도변화가 주어진 시간 내에 측정점에서 많이 일어나게 하였다.

실험시 얻어지는 자료는 Fig. 5와 같이 받아 들였다. 펀치의 이동거리와 하중의 측정은 만능시험기내의 측정 장치를 이용하였다. 온도는 열전대에서 나오는 신호를 A/D 변환기를 통한 후 컴퓨터에서 읽어 들이게 하였다. 실험의 신뢰성을 보장하기 위하여 같은 실험을 3번 수행하여 평균값을 취해 측정값으로 사용하였다.

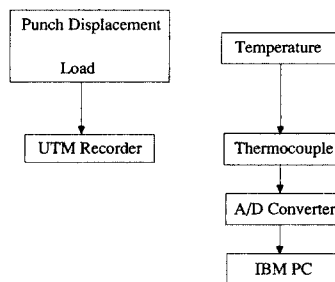


Fig. 5 Schematic diagram for experimental data acquisition

3. 수치해법에 의한 온도 계산

수치해법에 사용되는 방법은 축대칭 강-점소성 유한요소법⁽⁷⁾이다. 변형해석에 사용되는 변분식은 다음과 같다.

$$\int_v \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K^* \int_v \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon} dV - \int_{s_f} f_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

온도해석에 사용되는 변분식과 경계조건은 다음과 같다.

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

이 때 경계 조건은

i) 자유 표면에서

$$q_n^c = h(T_a - T_s)$$

$$q_n^r = \sigma \epsilon (T_a^4 - T_s^4)$$

ii) 금형과 소재의 접촉면에서

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

$$q_n^f = m_f k_y v / J$$

여기서, h_{lub} 가 접면열전달계수이고 J는 열의 일당량이다. 위와 같은 유한요소법을 이용하여 실험과 같은 공정조건을 대입해 측정점에서의 계산온도를 구하였다. 계산에 사용된 열적특성과 열전달 계수⁽⁸⁻⁹⁾를 Table 1에 나타냈다. 온도에 따른 유동응력관계⁽¹⁰⁾를 Table 2에 나타냈다. 마찰상수는 무윤활 조건을 고려해 0.8⁽⁴⁾을 사용했다. 계산에 사용된 초기의 유한요소격자를 Fig. 6(a)에 나타냈다. 계산에 사용된 요소수는 펀치와 금형이 각각 224, 306개이고 소재의 경우는 329개이다. 높이감소율이 30%일때 소재의 격자를 Fig. 6(b)에 나타냈다. 일반적인 업셋팅 해석결과와 달리 이 경우는 아래 쪽이 벌지(bulge)된 형상을 나타내었다. 소재에서 금형과 접하는 아래 부분의 온도가 Fig. 7과 같이 다른 부분보다 높으므로 이 부분의 변형저항이 낮아졌기 때문이다.

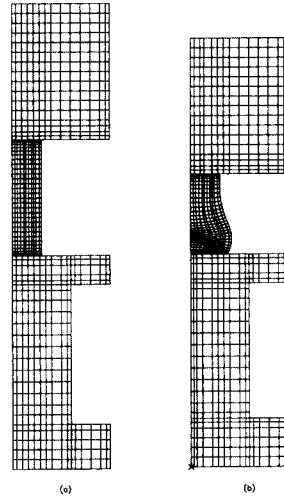


Fig. 6 Finite element mesh of the die and the billet

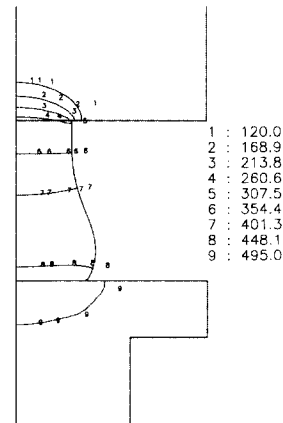


Fig. 7 Temperature distribution at 30% height reduction

Table 1. Thermal properties and heat transfer coefficients of Al 2014-T6 and H13

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

Table 2 Stress-strain rate properties of Al 2014-T6 given with respect to the temperature

Flow stress: $\bar{\sigma} = C(T)^m$

temp	C	m
300 °C	101.60	0.084169
400 °C	53.60	0.08258
500 °C	26.87	0.081507

4. 접면열전달계수의 산출

기본적으로 접면열전달계수의 산출은 임의의 접면열전달계수값을 가정하여 수치해법으로 온도를 계산한 후 실험치와 비교하여 접면열전달계수값을 변화시켜가면서 가장 차이가 적은 접면열전달계수값을 찾아내는 것이다. 접면열전달계수값을 찾아가는 방법으로는 초기에는 주로 시행오차법이 많이 이용되었으나 이 방법은 필요 이상의 많은 계산을 하게된다. 본 논문에서는 최적제어에서 많이 사용되는 황금분할탐색 알고리즘⁽¹¹⁾을 이용하여 접면열전달계수값을 찾는다. 접면열전달계수를 구하

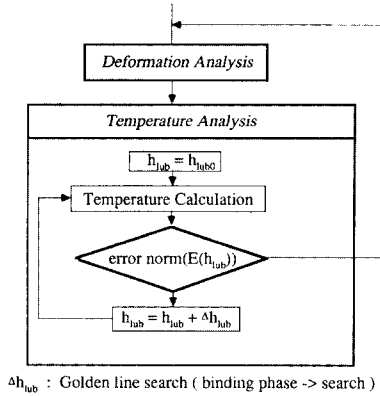


Fig. 8 Flow chart for the searching procedure

는 전체적인 과정을 Fig. 8에 나타냈다.

접면열전달계수값을 찾기 위하여 오차함수를 다음과 같이 규정하였다.

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

여기에서 T_c 는 유한요소법으로 계산되어지는 온도이며 T_M 은 실험에서 측정된 온도값이다. 첫 시간스텝(time step)에서는 접면열전달계수의 초기 가정값을 충분히 작은 값으로 주고 다음 시간스텝에서부터는 전 단계에서 얻어진 접면열전달계수값을 근거로 초기 가정값을 주었다. 윗식의 오차함수가 임계값보다 작아지거나 분할된 구간의 간격이 충분히 작아지면 현 시간 스텝에서 접면열전달계수값으로 설정하고 다음 시간 스텝으로 넘어간다. 본 논문에서 사용한 오차함수의 임계값은 1.0이고 구간 간격의 임계값은 0.001로 선택하였다. 접면열전달계수가 탐색하는 구간이다. 구간의 임계값이 0.001이라는 것은 탐색에서 얻을 수 있는 접면열전달계수의 알고리즘상 오차값을 0.001 이하로 잡았다는 것이다. 이와 같이 각 시간스텝마다 결정한 접면열전달계수로 계산한 온도곡선과 측정된 온도곡선을 Fig. 9에 비교하여 보았다. 비교적 측정치와 계산치가 잘 일치되고 있다. 본 논문에 사용된 알고리즘으로 접면열전달계수값을 적절하게 결정되어짐을 볼 수 있다.

접면열전달계수는 여러가지 조건에 따라 변화되지만 이 중에서 압력이 지배적인 인자⁽⁵⁾이므로 압력에 따른 접면열전달계수값을 Fig. 10에 나타내어보았다. 어느 압력을 넘어서면 접면열전달계수가 일정한 값을 유지하는데 이 현상은 Burte등⁽⁴⁾이 실험한 것과 같은 결과를 보이고 있다.

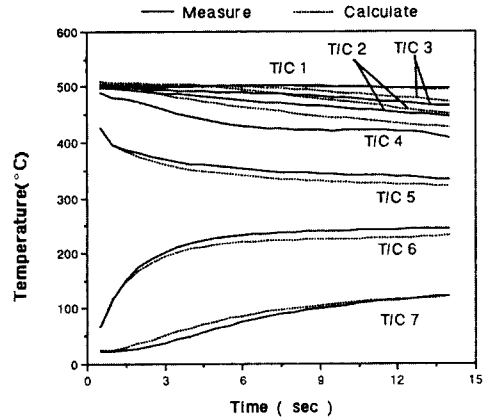


Fig. 9 Variation of calculated temperature and measured temperature with respect to time

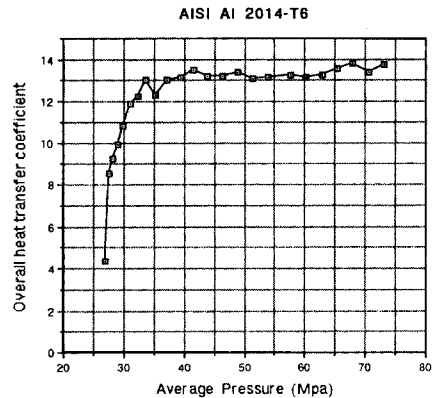


Fig. 10 Values of overall heat transfer coefficients for various interface pressures.

5. 결론

본 논문에서는 접면열전달계수를 측정하기 위하여 설계, 제작된 장치를 이용하여 접면열전달계수를 구하여 보았다. 접면열전달계수를 구하는 과정에 황금분할탐색 알고리즘을 적용하여 계산의 효율성을 증가시켜 보았다. 산출된 접면열전달계수값으로 계산된 온도값은 실험에서 측정된 온도값과 잘 일치함을 알 수 있었다. 산출된 접면열전달계수값은 37MPa 이상의 압력에서는 13~14(N/sec/mm²/°C) 사이의 일정한 값을 갖는다. 대부분의 소성공정에서는 이 임계값이상의 압력이 성형시에 작용하므로 성형해석시에 일정한 값의 접면열전달계수를 사용하여도 될것이다.

개발된 장치와 산출방법은 다른 금형과 소재 조합의 접면열전달계수 산출에도 유용하게 사용될 것이다 .

후기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초 연구과제(과제번호: 93-0200-06-01-3)의 일부로 수행되었습니다. 동재단의 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Holman, J.P., Heat Transfer, McGraw-Hill, Chap. 2, 1986.
2. Dadras, P. and Wells, W.R., "Heat Transfer Aspect of Nonisothermal Axisymmetric Upset Forging", J. of Engineering for Industry, Vol.106, pp.187-195, 1984.
3. Semiatin, S.L., Collings, E.W., Wood, V.E. and Altan, T., "Determination of the Interface Heat Transfer Coefficient for Non-isothermal Bulk-Forming Processes", J. of Engineering for Industry, Vol. 109, pp.49-57, 1987.
4. Burte, P.R., Im, Y.T. and Altan, T. , "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.
5. Nshama, W., Jeswiet, J. and Oosthuizen, P.H., "Evaluation of Temperature and Heat Transfer Conditions at the Metal Forming Interface", J. Mater. Process. Technol., Vol.45, pp. 637~642, 1994.
6. Malinowski, Z., Lenard, J.G. and Davies, M.E., "A Study of the Heat-Transfer Coefficient as a Function of Temperature and Pressure", J. Mater. Shaping Technol., Vol. 41, pp.125-142, 1994.
7. 강연식, 박치용, 조종래, 양동열, "평금형을 이용한 축대칭 열간 압출의 유한요소해석", 대한기계학회논문집, 16권, 2호, pp.201-225, 1992.
8. Metals Handbook, 10th Edition, American Society for Metals, Metals Park, 1990.
9. ASME Pressure Vessel Code, 1986-Edition, pp. 98~106, 1986.
10. Altan, T., Oh, S.I., and Gegel, H.L., Metal Forming: Fundamentals and Applications, Americal Soc. for Metals, chap.4 , 1983.
11. Arora, J. S., Introduction to optimum design, McGraw-Hill, pp.295, 1989.