

온간단조 공정의 계면열전달계수

강종훈[#]· 고병호¹· 제진수²· 강성수³

Contact Heat Transfer Coefficient for Finite Element Analysis in Warm Forging Processes

J. H. Kang, B. H. Ko, J. S. Jae, S. S. Kang

(Received March 21, 2005)

Abstract

Heat transfer coefficients have great influence on finite element analysis results in elevated temperature forging processes. Experimentally calculated contact heat transfer coefficient is not suitable for one-time finite element analysis because analyzed temperature will be appeared to be too low. To get contact heat transfer coefficient for one-time finite element analysis, tool temperature in operation was measured with thermocouple and repeated finite element analysis was performed with experimentally calculated contact and cooling heat transfer coefficient. Surface temperature of active tool was obtained comparing measurement and analysis results. Contact heat transfer coefficient for one-time finite element analysis was achieved analyzing surface temperature between repeated finite element analysis and one-time finite element analysis results.

Key Words : Contact Heat Transfer Coefficient, Cooling Heat Transfer Coefficient, Lubricant Cooling, Warm Forging, Finite Element Analysis

1. 서 론

소성가공 공정에서 열발생은 소성에너지가 열적 에너지로 변환되면서 필연적으로 발생한다. 온간과 온간단조에서는 금형의 온도가 금형수명에 직접적인 영향을 미친다[1~4]. 고온 공정에서 금형수명에 영향을 미치는 온도 예측을 위하여 소재와 금형간의 계면열전달계수에 대한 연구가 진행되었다[5~7]. 하지만 실험적으로 구한 계면열전달계수는 상용해석 프로그램이나 선행연구에서 채택한 계면열전달계수에 비하여 상당히 낮은 값을 나타낸다. 이는 일반적으로 적용되는 계면열전달 계수값이 $11.5\sim30[\text{N}/\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^\circ\text{C}]$ 정도로 한번의

유한요소 해석을 통하여 납득할 만한 해석 결과를 얻기 위해 실제 계면열전달계수에 비하여 높은 값을 적용했기 때문이다[8~10].

본 연구에서는 유한요소해석을 한번 수행했을 때 결과가 실제 금형의 정상상태 온도에 가장 근접할 수 있는 계면열전달계수를 구하고자 하였다.

이를 위하여 첫째, 유한요소해석 결과와 실제 금형의 정상상태온도를 비교할 목적으로 열전대가 부착된 금형을 이용하여 실제작업 조건에서의 금형온도를 측정하였다.

둘째, 금형의 정상상태 온도는 소성가공열의 계면열전달 뿐만 아니라 금형의 냉각조건에 따라 차이가 발생한다. 윤활제에 의한 냉각 특성을 대

1. 발레오 전장 시스템㈜

2. 경상대학교 수송기계공학부

3. 부산대학교 정밀기계공학과

교신저자 : 발레오 전장 시스템㈜

E-mail : jonghun.kang@valeo.com

류 열전달계수로 표현하기 위하여, 윤활제를 금형 시편에 흐르게 하는 냉각 시험을 실시한 후 역문제법으로 냉각 시간별 열전달계수를 구하였다.

셋째, 금형과 소재간의 계면열전달계수는 Monika [5]와 Jeong[6]등이 실험적으로 제안한 값을 이용하여 금형온도 측정부위에서 유한요소해석의 온도가 정상상태가 될 때까지 반복 해석하였다.

넷째, $8.0\sim11.5[\text{N/s}\cdot\text{mm}\cdot\text{°C}]$ 의 계면열전달계수를 입력하여 유한요소해석을 한번 수행한 결과와 반복해석 결과를 비교함으로써 에멀젼(emulsion) 윤활제를 흐름방식(flowing type)으로 사용할 경우 온간 단조 공정에 적합한 계면열전달계수를 제안하였다.

2. 냉각에 의한 대류열전달계수

냉각 시험은 STD61 을 200°C , 400°C , 600°C 로 가열한 후 25°C 에멀젼 윤활제인 Berulit625 를 흐름방식으로 도포하여 시험을 진행하였다. 시편의 형상은 Fig. 1 과 같다. 실제 단조작업의 조건과 유사하게 소재와 접하는 면만이 냉각되도록 제작하였다.

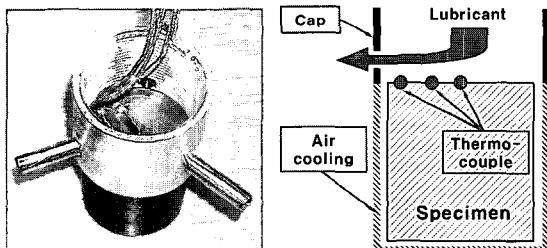


Fig. 1 Cooling specimen and boundary conditions

측정 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 등간격으로 열전대를 용접하여 부착하였다. 열전대로부터 측정된 금형 표면온도를 Fig. 2 에 나타내었다.

측정된 온도구배를 이용하여 윤활제에 의한 냉각 특성을 대류열전달계수로 나타내기 위하여 역문제법[11~12]을 이용하였다. 역문제법을 위한 열전달 해석은 MPL-HT[13], 최적화는 Simplex 법을 활용하였으며, 열전달 해석을 위한 STD61 금형강의 물성[12]을 Table 1 에 나타내었다.

각 지점의 해석 결과의 편차가 0.5°C 이하 일 때 수렴하는 것으로 판단하여 그 값을 대류열전달계수로 취하였다. Fig. 3 에 역문제법을 적용하기 위한 흐름도를 나타내었다.

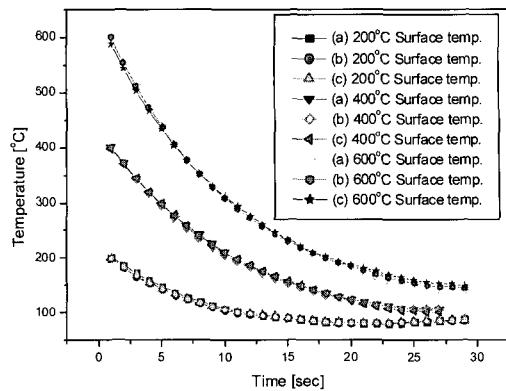


Fig. 2 Temperature change at point (a), (b), (c) by lubricant cooling test

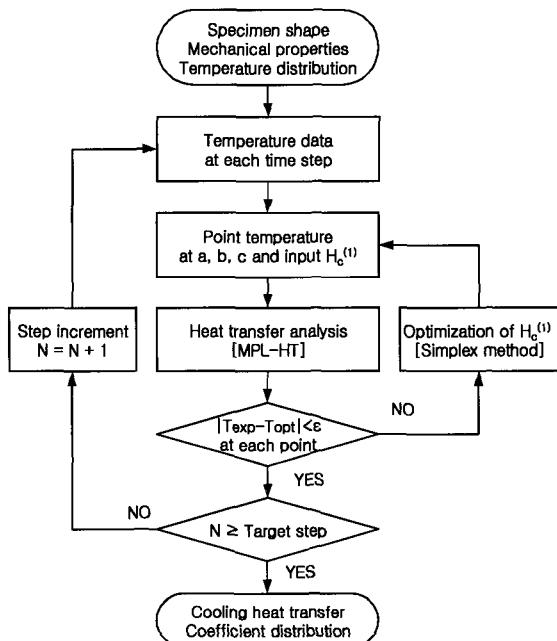


Fig. 3 Inverse method algorithm

Table 1 Material properties of STD61

Air cooling convection coefficient [N/mm ² ·s·°C]	Thermal conductivity [N/s·°C]	Specific heat capacity [N/mm ² ·°C]	Lubricant temperature [°C]
0.002	28.6	3.54	25

(1) H_c : Cooling heat transfer coefficient

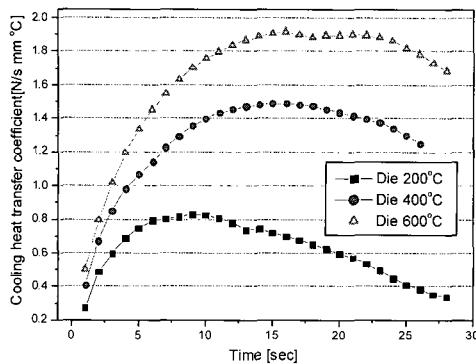


Fig. 4 Cooling heat transfer coefficient in different surface temperature of the tool

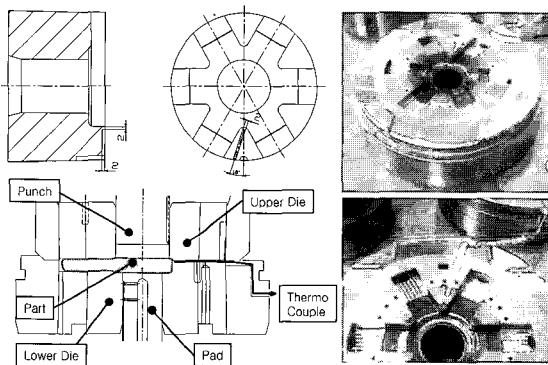


Fig. 5 Thermocouple attachment location on tool for temperature measurement

역문제법을 이용하여 구한 윤활제에 의한 냉각 대류열전달계수를 Fig. 4에 나타내었다. 대류열전달계수는 냉각조건과 시간에 따라 달라지는 값으로 금형의 온도가 200°C는 0.22, 400°C는 0.31, 600°C는 0.45[N/s·mm·°C]의 초기값에서 시간이 경과함에 따라 점차 증가한 후 다시 감소한다.

3. 금형온도의 측정

금형의 온도 측정은 자동차용 발전기에 사용되는 로타폴 제조공정 중, 가장 높은 가공도를 보이는 온간 2차 축방압출 금형을 대상으로 하였다.

열전대는 금형표면과 가장 근접하도록 성형면에서 2mm 까지 방전 가공한 후 프로젝션 용접으로 열전대를 부착하였으며, 이를 Fig. 5에 도시하였고 열전대를 통하여 측정된 실제금형의 온도를 Fig. 6에 나타내었다. 표면에서 2mm 떨어진 지점의 400초 동안 평균온도는 98.3°C로 나타났다.

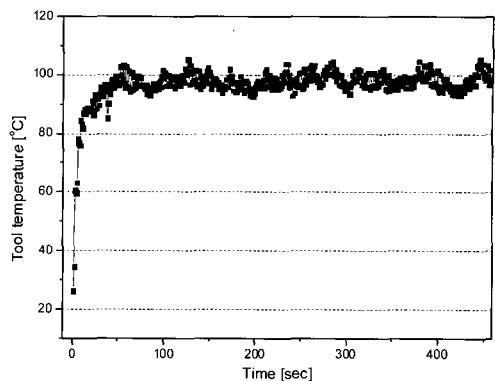


Fig. 6 Temperature measurement of active tool in operation with thermocouple

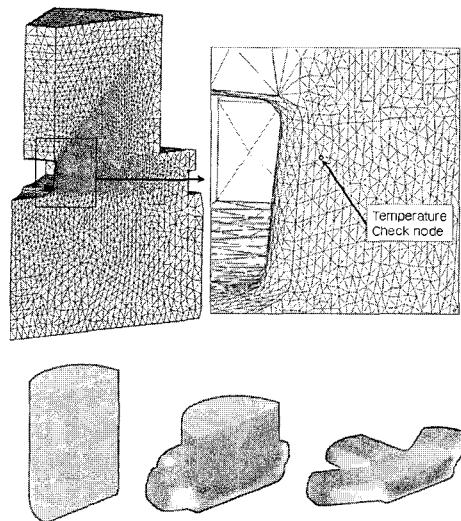


Fig. 7 Temperature tracing point of the tool and lateral extrusion deformation process of material

4. 유한요소 해석을 위한 열전달계수

4.1 반복해석을 통한 정상상태 온도

시험을 통하여 구하여진 대류열전달계수와 선형 연구된 계면열전달계수의 타당성을 검토하기 위해 Deform3D를 이용하여 3 차원 강열소성 유한요소해석을 실시하였다. 정상상태 금형온도는 각 공정간의 온도편차가 2°C 이내가 될 때까지 반복해석을 수행하였다.

해석된 금형온도 검증은 Fig. 7과 같이 실제 금

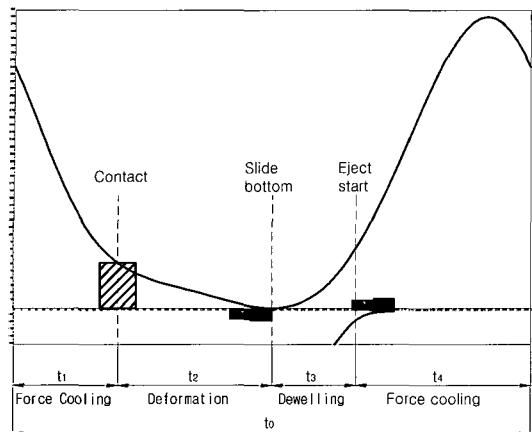


Fig. 8 Ram movement and timing analysis for finite element analysis

Table 2 Timing analysis of forging operation

spm	Cycle time (t_0)	Forging time (t_2)	Dwelling time (t_3)	Cooling time ($t_1+t_4+t_0$)
38	1.579	0.470	0.256	2.432

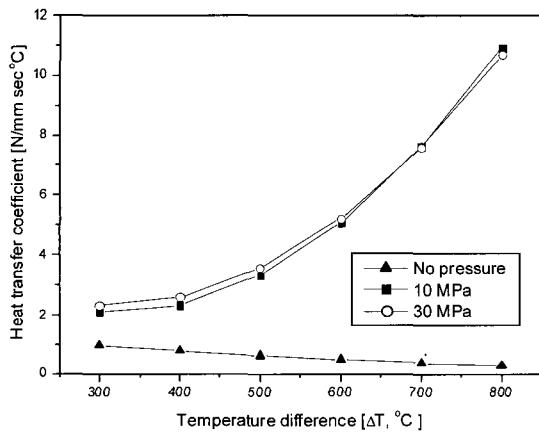


Fig. 9 Contact heat transfer coefficient according to contact pressure change

형에서 성형 중 온도를 측정한 곳과 동일한 위치에서 수행되었다. 상금형의 속도계산을 위한 램곡선을 Fig. 8에 나타내었고, 냉각해석을 위한 시간분석을 Table 2에 각각 나타내었다.

계면열전달계수는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 소

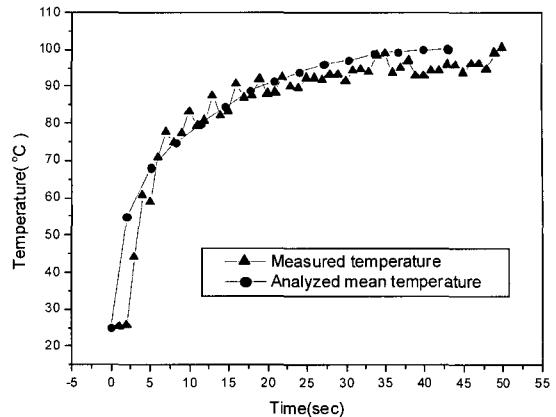


Fig. 10 Temperature comparison between finite element analysis and measurement

재와 금형 계면에서 작동하는 압력에 따라 달라지게 되는데[7~8], 금형과 소재간의 온도차를 약 400~450°C로 가정하여 성형 중 2.5[N/s·mm·°C], 단순 열전달에 1.5[N/s·mm·°C]를 선정하였고, 대류열전달계수는 냉각시간 2.43초를 고려하여 0.46[N/s·mm·°C]으로 입력하고 반복적인 유한요소해석을 수행하였다.

반복해석을 통하여 얻어진 온도변화를 최고온도와 최저온도의 평균온도를 계산하여 측정된 금형온도와 비교한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

4.2 절점 온도비교를 통한 열전달계수

반복해석을 통하여 얻어진 금형 표면온도를 이용하여 온간단조 유한요소해석에 적합한 계면열전달계수를 추적하였다. 반복해석과 한번 수행된 해석에서의 금형 표면온도 차이를 비교하기 위하여 가장 높은 마모현상이 발생하는 두 점을 선정하여 Fig. 11에 나타내었다.

반복해석을 통하여 구한 (a), (b) 지점의 온도 변화를 Fig. 12에 나타내었다. (a), (b) 지점 모두 성형이 완료된 후 최고 온도를 나타내고, 성형이 완료되고, 금형에서 취출되기 전까지 금형으로 단순 열전달이 발생하면서 서서히 온도가 저하된 후, 강제냉각으로 온도가 급격히 저하된다. 각 지점의 정상상태 최고 온도를 비선형 최소자승법을 이용하여 구하면 302.1°C와 264.3°C임을 확인 할 수 있다.

동일한 조건으로 계면열전달계수를 8.0~11.5[N/s·mm·°C]까지 0.5[N/s·mm·°C]씩 증가시키면서 한번의 성형 해석을 실시하여 구한 (a), (b) 지점의

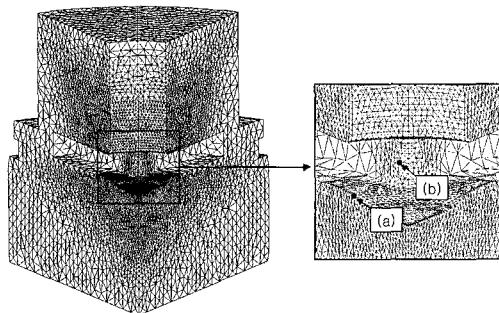


Fig.11 Tracing node for steady-state temperature

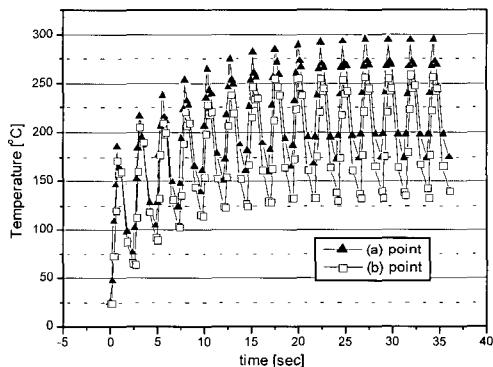


Fig.12 Temperature distribution at (a), (b) point by repeated finite element analysis

Table 3 Nodal temperature at (a), (b) according to contact heat transfer coefficient

Thermal coefficient [N/s·mm·°C]	Temperature at (a) position [°C]	Temperature at (b) position [°C]
Repeated analysis	302°C	264°C
8.0	290°C	313°C
8.5	299°C	332°C
9.0	310°C	348°C
9.5	316°C	352°C
10.0	325°C	364°C
10.5	333°C	378°C
11.0	340°C	391°C
11.5	348°C	401°C

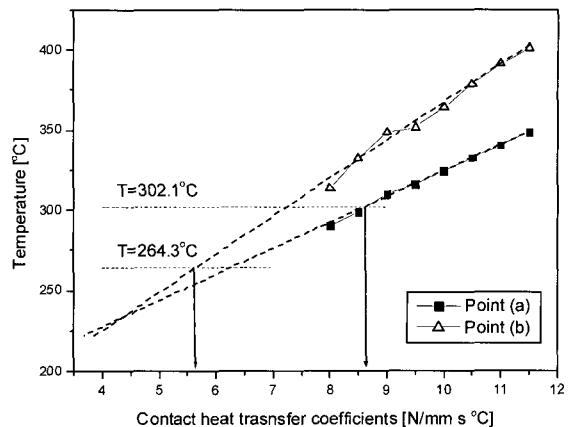


Fig.13 Contact heat transfer coefficient calculation

온도와 반복해석된 온도를 비교하여 정리하면 Table 3 과 같다.

계면열전달계수의 변화에 따른 (a), (b) 지점의 온도변화를 비교해 보면 Fig. 13과 같고, 8가지 조건의 계면열전달계수별 온도 추이곡선과 반복된 해석결과가 일치하는 지점을 나타내면 각 지점에서 유효한 계면열전달계수를 얻을 수 있다. (a) 지점의 경우 $8.7[N/s\cdot mm\cdot ^\circ C]$, (b) 지점의 경우 $5.8[N/s\cdot mm\cdot ^\circ C]$ 을 나타내고 있으며, 두 점에서 계면열전달계수의 차이는 한번해석에서는 금형형상에 의한 냉각효과의 영향을 고려할 수 없기 때문이다. (a)지점은 냉각에 의한 열적에너지 손실이 한면에서만 발생하고, (b)지점의 경우는 선단부 양측에서 동시에 냉각됨으로 열손실이 많은 것으로 판단된다.

5. 결 론

온, 열간단조 공정에서는 금형 및 공정설계 단계에서 금형온도를 제어할 수 있는 정보가 필수적이다. 본 연구에서는 정도 있는 유한요소 해석을 위한 열전달계수를 얻기 위하여 금형냉각시험, 금형온도 측정 및 반복해석을 통하여 다음과 같은 결론에 도달 하였다.

(1) 애밀젼 윤활제를 이용하여 흐름방식으로 금형냉각을 실시 할 경우 냉각에 의한 열전달계수는 온도와 냉각시간에 따라 $0.2\sim 0.8[N/s\cdot mm\cdot ^\circ C]$ 가 적절함을 역문제법을 이용하여 구하였다.

(2) 애밀젼 윤활제를 사용할 때 금형과 소재간의 계면열전달계수는 $1.5\sim 2.5[N/s\cdot mm\cdot ^\circ C]$, 냉각에

의한 대류열전달계수는 냉각시간을 고려하여 0.46 [N/s·mm·°C]을 입력한 경우가 반복적인 해석결과와 실제 금형에서 측정된 온도가 가장 근접한 결과를 나타냄을 확인하였다.

(3) 한번 해석을 통하여 금형의 정상상태 온도와 가장 유사한 결과를 얻기 위한 계면열전달계수는 온간 단조에 있어서 6~9[N/s·mm·°C]가 적절함을 반복 해석과 계면열전달계수값을 0.5[N/s·mm·°C] 단위로 변경해 가면서 실시한 한번 해석의 결과를 비교함으로써 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. Knoerr, 1996, Fatigue failure of cold forging tooling : causes and possible solutions through fatigue analysis, JMPT, Vol. 46, pp. 57~71.
- [2] M. J. Liou, H. S. Hasiano, 1989, Prediction of die wear in high speed hot upset forging, ERC/NSM Report, No. 99, pp. 33~39.
- [3] J. H. Kang, 1999, A study on a die wear model considering thermal softening: (I) construction of the wear model, JMPT, Vol. 96, pp. 53~58.
- [4] J. H. Kang, 1999, A study on a die wear model considering thermal softening: (II) Application of the suggested wear model, JMPT, Vol. 94, pp. 183~188.
- [5] G. D. Monika, 1999, The effect of hardening layers and technological lubricants on heat exchange between workpiece and die, Comp. and. Struc., Vol.72, pp. 165~172.
- [6] D. J. Jeong, B. M. Kim, 2001, Effects of surface treatments and lubricants for warm forging die life, JMPT, Vol. 113, pp.544~550.
- [7] 권진숙, 이영선, 2005, Al6061 열간단조시 계면 열전달계수에 관한 연구, 한국소성가공학회 춘계학술대회, pp. 219~222.
- [8] H. Grass, 2003, 3-D Simulation of hot forming and microstructure evolution, Comp. Mat. Sci., Vol. 28, pp. 469~477.
- [9] Victor Vaquez, 2000, Die design for flashless forging of complex parts, JMPT, Vol.98, pp. 81~89.
- [10] Veronique Garat, 2004, Influence of design and process parameters on service life of nut hot forging die, JMPT, Vol.147, pp. 359~369.
- [11] S. Sen, B. Aksakal, 2000, Transient and residual thermal stresses in quenched cylindrical bodies, Inter. J. Mech. Sci., Vol.42, pp. 2013~2029.
- [12] 진민호, 강성수, 2004, 냉간단조용 SCM420 강의 웨칭 시 열전달 예측모델 개발, 한국소성가공학회지, Vol.13, No.5. pp. 441~448.
- [13] J. U. Jang, 2002, FE Program development for predicting thermal deformation in heat treatment, JMPT, Vol.130, pp. 546~550.