한국소성가공학회 2005년도 춘계학술대회 논문집 pp. 138~143

온간 단조 공정에서의 열전달 계수

강종훈[1]· 고병호[1]· 제진수[2]· 강성수[3]

Heat transfer coefficients for F.E analysis in warm forging processes

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

Abstract

Finite Element analysis is widely applied to elevated temperature forging processes and shows a lot of information of plastic deformation such as strain, stress, defects, damages and temperature distributions. In highly elevated temperature deformation processes, temperature of material and tool have significant influence on tool life, deformation conditions and productivities. To predict temperature related properties accurately, adequate coefficients of not only contact heat transfer between material and dies but also convection heat transfer due to coolants are required. In most F.E analysis, too higher value of contact heat transfer coefficient is usually applied to get acceptable temperature distribution of tool. For contact heat transfer coefficients between die and workpiece, accurate values were evaluated with different pressure and lubricants conditions. But convection heat transfer coefficients have not been investigated for forging lubricants. In this research, convection heat transfer coefficients for cooling by emulsion lubricants are suggested by experiment and Inverse method. To verify acquired convection and contact heat transfer coefficients, tool temperature was measured for the comparison between measured tool temperature and analysis results. To increase analysis accuracy, repeated analysis scheme was applied till temperature of the tool got to be in the steady-state conditions. Verification of heat transfer coefficients both contact and convection heat transfer coefficients was proven with good accordance between measurement and analysis.

Key Words : Heat transfer coefficient, Lubricant cooling, Warm forging, Inverse Method, Finite Element Analysis

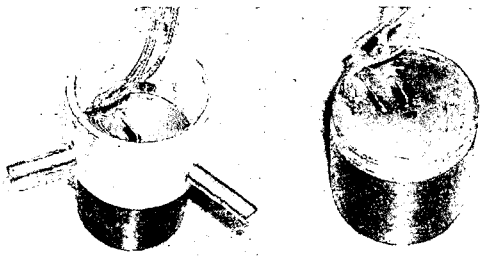
1. 서 론

소성가공 공정에서 열발생은 소성에너지가 열적 에너지로 변환되면서 필연적으로 발생한다. 특히 온•열간단조와 같이 고온상태의 공정에서 금형수명 결정인자는 마모, 열크랙, 피로 및 소성변형 등이다.[1~2] 이 중 온도에 의해 가장 많은 영향을 받는 것이 금형 마모와 열크랙 현상이다. 특히 마모의 경우, 금형 온도가 상승할수록 열연화에 의한 금형 경도 하락으로 수명이 급격히 저하되게 된다.[3~4] 고온 공정에서 금형수명에 영향을 미치는 온도 예측을 위하여 소재와 금형간의 계면 열전달 계수에 대한 연구가 진행되어왔다.[5~6] 정상상태 금형온도를 예측하기 위하여는 소재와 금형간의 계면열전달 계수 뿐만 아니라 성형 후 윤활제나 이형제에 의한 냉각 공정의 대류 열전

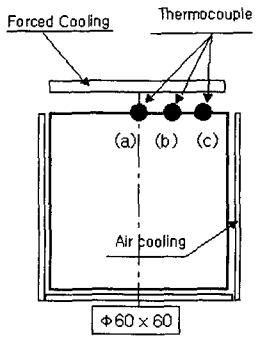
1. 발레오 전장 시스템㈜ jonghun.kang@valeo.com
2. 경상대학교 수송기계공학부
3. 부산대학교 정밀기계공학과

달 계수 또한 요구되지만 아직 계수화 되지 못하였다.

본 연구에서는 윤활에 의한 냉각 대류열전달 계수를 구하기 위하여 유화타입 윤활제인 Berulit 625 를 이용, 금형재의 냉각 곡선을 구하였다. 실험에서 구한 온도 구배를 역문제법(Inverse Method)을 이용하여 냉각에 따른 대류 열전달 계수를 수치화 하였다. 탄소성 해석용 프로그램인 MPL-HT를 이용하여 역문제법을 적용하였다.[9] 소재와 금형간의 열전달을 나타내는 계면 열전달 계수는 Monika, Jung 등이 실험적으로 제안한 값을 이용하였다.[5~6] 하지만 실험적으로 구한 계면열전달 계수는 일반적으로 해석에 적용되는 열전달계수에 비하여 현저히 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 일반적인 해석의 열전달 계수는 한번의 해석을 통하여 납득할 만한 해석결과를 얻기 위하여 취하여진 값이기 때문에 실제 실험값보다 높게 나타난다. 본 연구에서는 실험적으로 구한 열전달계수를 이용하여 금형온도가 정상상태에 도달 할 때까지 반복적으로 해석을 수행하였다. 해석 입력치인 열전달계수의 타당성을 검증하기 위하여 열전대가 부착된 금형에서 실제 작업이 진행되는 동안 온도데이타를 검출하였으며, 이를 해석적으로 구한 결과치와 비교해 봄으로써 입력값의 타당성을 검증하였다.



(a) Cooling experiment specimen



(b) Cooling experiment boundary conditions

Fig.1 Cooling specimen and boundary conditions

2. 냉각에 의한 대류 열전달 계수

2.1 냉각 시험

냉각 시험은 고온 성형용 금형강인 STD61 을 이용하여 퀜칭과 템퍼링을 실시한 후 200℃, 400℃, 600℃로 가열하고 25℃ 유화(Emulsion)타입 윤활제인 Berulit625 를 흐름방식으로 도포 하였다. 금형냉각은 Fig.1 과 같이 소재와 접하는 부위만 냉각될 수 있도록 시험을 진행하였으며, 측정 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 3 점에 열전대를 부착하였다. 또한 금형재의 균일한 온도를 위하여 5 분 동안 로내에서 유지시킨 후 윤활제로 냉각하였다. **온도 측정결과를 Fig.2 에 나타내었다.**

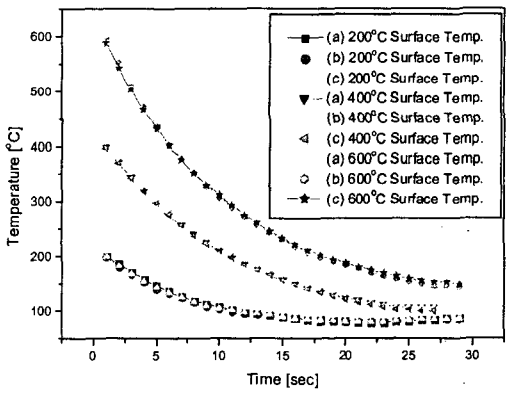


Fig.2 Temperature distribution of (a), (b), (c)

2.2 열전달 계수의 계산

냉각에 의한 대류 열전달 계수는 기계적 물성치가 아니라 조건에 따라 달라지는 값으로, 알려진 물성을 이용하여 미지의 값을 찾아내는 역문제법(Inverse Method)으로 구할 수 있다. 열전달 계수를 역문제법으로 구하기 위해서는 열전달해석과 최적화기법이 요구된다. 본 연구에서는 MPL-HT 프로그램과 Simplex 기법을 이용하였다. 해석에 필요한 STD61 강의 물성을 Table.1 에 나타내었고,[8] 각 지점의 해석결과의 편차가 0.5℃이하 일 때 수렴하는 것으로 판단하여 그 값을 대류 열전달 계수로 취하였다. Fig.3 에 역문제법을 적용하기 위한 흐름도를 나타내었다. [7~8]

Air Cooling Convection Coefficient [W/m·K]	Thermal Conductivity [W/m·K]	Specific Heat Capacity [N/mm^2·K]	Lubricant Temperature [℃]
0.02	28.6	3.54	25

Table.1 Material Properties of STD61

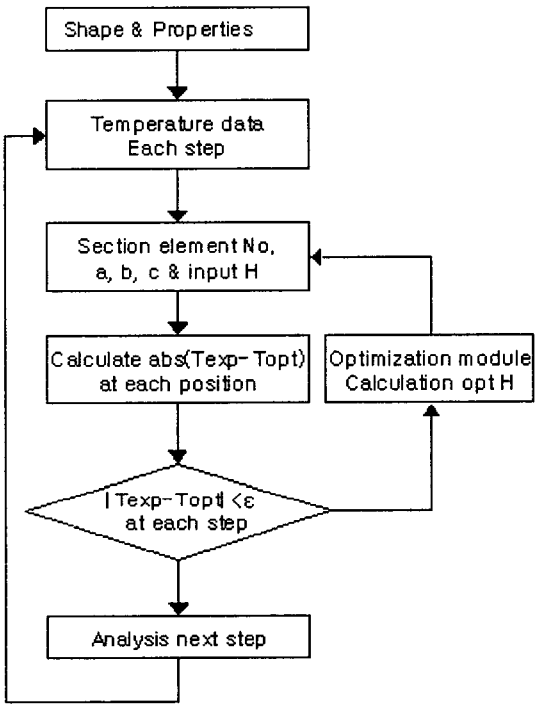


Fig.3 Inverse Method Algorithm

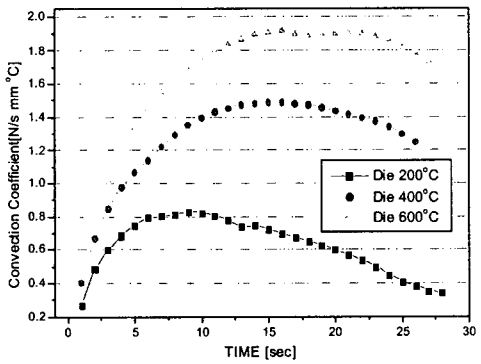


Fig.4 Cooling heat transfer coefficient in different tool surface temperature

역문제법을 이용하여 구한 냉각에 의한 대류 열전달 계수를 Fig.4 에 나타내었다.

열전달 계수는 냉각 초기단계에서는 금형 표면 공기막의 영향으로 열적 저항이 커 낮게 나타나고, 시간이 경과함에 따라 높은 냉각능을 나타내다가 다시 감소하게 된다. 또한 냉각 매질과 소재와의 온도차가 클수록 더 높은 냉각능을 나타냄을 확인 할 수 있다.[7]

30Spm 으로 작업되는 단조공정에서 냉각시간은 성형 후 냉각 및 이송시간으로 나누어 볼 때 약 1~2 초 내외 이므로 금형 표면 온도에 따라 평균치인 0.35 ~ 0.8[N/s mm℃]를 해석에 적용 할 수가 있을 것으로 판단된다.

3. 금형온도의 측정

본 연구에서는 자동차용 발전기에 사용되는 로타폴 제조공정 중, 가장 높은 가공도를 보이는 온간 2 차 측방압출 공정을 대상으로 하였다.

Fig.5 Warm forging process for Rotor Pole

Fig.5 에 온간단조 공정별 제품을 나타내고있다. 이 공정에서 금형수명을 결정짓는 주요인자는 마모에 의한 것으로 금형의 온도와 윤활유의 조건에 따라 상당한 수명차이를 보인다. 본 연구에서는 금형에 열전대를 설치하여 실제 작업중의 온도 변화를 측정하였다. 열전대는 금형표면과 가장 근접하도록 성형면에서 2mm 까지 방전가공한 후 프로젝션 용접으로 열전대를 부착하였고 Fig.6 에 이를 도시하였다. 열전대를 통하여 측정된 실제금형의 온도를 Fig.7 에 나타내었다. 표면에서 2mm 떨어진 400 초 동안의 평균온도는 98.3℃로 나타났다.

4. 단조 공정의 반복 해석

측정된 대류 열전달 계수와 선행 연구된 계면

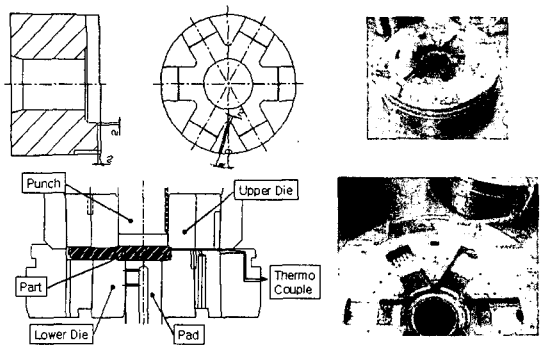


Fig.6 Thermocouple attached tools for temperature measurement

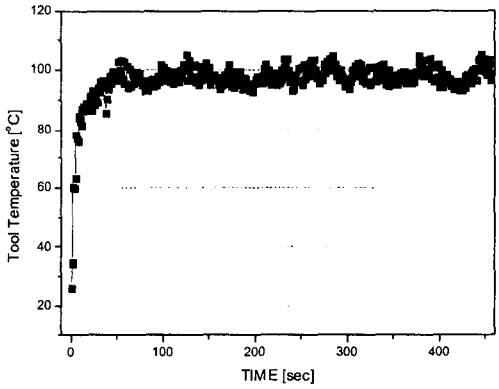


Fig.7 Measured temperature of active tool

열전달 계수의 타당성을 검토하기 위해 Deform 3D 를 이용하여 3 차원 열강소성 유한요소 해석을 실시하였다. 정상상태 금형온도는 각 공정간의 온도편차가 2℃ 이내가 될 때까지 반복 해석을 수행하였다. 금형 온도 측정 위치를 Fig.8 에 나타내었다. 펀치 속도계산을 위한 램 이동곡선을 Fig.9 에 나타내었고, 냉각해석을 위한 시간분석을 Table.2 에 나타내었다.

Fig.10 에서 계면 열전달 계수는 성형중 2.5, 단순열전달에 1.5[N/s mm℃]를 선정하였고,[7~8] 대류 열전달 계수는 0.46[N/s mm℃]으로 입력하여 해석을 수행하였다.

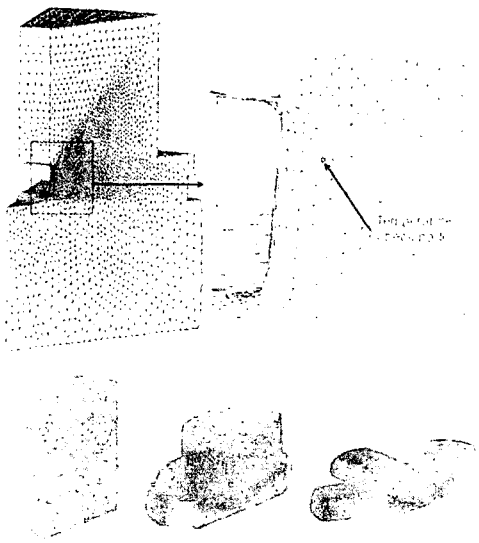


Fig.8 Temperature checking point and lateral extrusion deformation of material

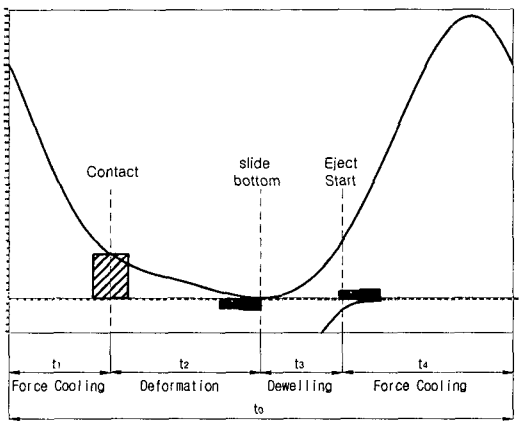


Fig.9 Ram Movement and Timing analysis for F.E Analysis

Table.2 Forging operation timing analysis

Spm	Cycle time (t0)	Forging time (t2)	Dwelling time (t3)	Cooling time (t1+t4+ t0)
38	1.579	0.470	0.256	2.432

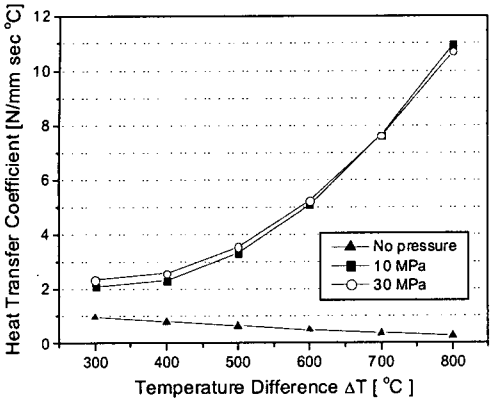


Fig.10 Contact heat transfer coefficients by pressure

해석과 실제 측정된 금형의 온도를 비교한 그림을 Fig.11 에 나타내었다.

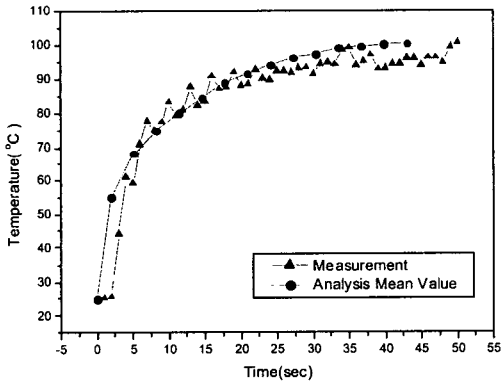


Fig.11 Comparison between F.E analysis and measurement

측정된 온도와 소성변형, 열전달, 금형냉각이 반복적으로 이루어진 해석결과가 잘 일치하고 있음을 확인 할 수 있다. 해석에 입력된 입력치를 정리한 것을 Table.3 에 나타내었다. 금형의 초기온도는 25℃, 소재의 초기온도는 800℃로 실제 작업과 동일하게 설정하였다. 소재와 금형의 열전도율 및 열용량 등은 온도에 따른 변수 값으로 Deform3D 의 데이터베이스를 활용하였다.

4. 결 론

온•열간단조 공정에서는 금형 및 공정설계 단계

Table.3 Input variable for thermo-mechanical analysis

Material	Contents	Value	Unit
Billet	Material	S6C	
	Emissivity	0.3	
	Temperature	800	℃
Punch	Material	SKD61	
	Emissivity	0.3	
	Initial Temperature	25	℃
Die	Material	SKD61	
	Emissivity	0.3	
	Initial Temperature	25	℃
Conditions	Friction Factor	0.15	
	Contact Heat Transfer Coefficient	2.5 1.5	N/sec·mm·℃
	Air Cooling Coefficient	0.02	N/sec·mm·℃
	Forced Cooling Coefficient	0.46	N/sec·mm·℃
	Forging Speed	38	SPM

에서 금형온도를 제어할 수 있는 정보가 필수적이다. 이를 위하여 성형공정 중의 소재와 금형간의 계면 열전달 계수와 냉각에 따른 대류열전달 계수의 선정이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 정도 있는 유한요소 해석을 위한 열전달 계수를 얻기 위하여 금형냉각시험, 금형온도 측정 및 반복해석을 통하여 다음과 같은 결론에 도달 하였다.

(1) 유화(Emulsion)타입의 윤활제를 이용하여 흐름방식으로 금형냉각을 실시할 경우, 냉각에 의한 열전달 계수는 온도와 냉각시간에 따라 0.35 ~ 0.8[N/s mm℃]정도가 적절하며, 본 연구에서는 0.46[N/s mm℃]를 취하였다.

(2) 유화(Emulsion)타입의 윤활제를 사용할 경우 금형과 소재간의 계면 열전달 계수값은 1.5 ~ 2.5[N/s mm℃]가 적절하며, 한번 해석으로 납득할 만한 결과를 얻기 위하여는 실제계수보다 높은값

이 필요하다.

(3) 열전대를 통하여 실제 작업중인 금형의 온도를 측정한 결과와 실험적으로 구한 열전달 계수를 활용한 유한요소 해설결과를 비교하여 제안된 열전달 계수의 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] M.Knoerr, Fatigue failure of cold foring tooling : causes and possible solutions through fatigue analysis, JMPT. 46(1996) 57.

[2] M.J.Liou, H.S. Hasiano, Predictioin of die wear in high speed hot upset forging, ERC/NSM Rep.99 (1989) 33.

[3] J.H. Kang, I.W. Park, A study on a die wear model considering thermal softening: (I) construction of the wear model' JMPT. 96 (1999) 53.

[4] J.H. Kang, I.W. Park, A study on a die wear model considering thermal softening: (II) Application of the suggested wear model, JMPT. 94 (1999) 183.

[5] G.D Monika, The effect of hardening layers and technological lubricants on heat exchange between workpiece and die, Comp. and. Struc. 72(1999) 165.

[6] D.J. Jeong, B.M, Kim, Effects of surface treatments and lubricants for warm forging die life, JMPT. 113 (2001) 544.

[7] S.Sen, B. Aksa kal, Transient and residual thermal stresses in quenched cylindrical bodies, Inter. J. Mech. Sci. 42(2000) 2013.

[8] M.H, Chin , Development of Themal deformation Predicting Model During Quencing Process , Transaction of Materials Processing Vol. 13. No. 5 (2004)

[9] J.U. Jang, "FE Program development for predicting thermal deformation in heat treatment, JMPT. 130(2002) 546