

열연화를 고려한 금형마멸모델에 관한 연구(Ⅱ) -마멸모델의 적용

강종훈* · 박인우** · 제진수*** · 강성수****

(1998년 1월 9일 접수)

A study on Die Wear Model considering Thermal Softening(Ⅱ) -Application of Suggested Wear Model

Jong Hun Kang, In Woo Park, Jin Soo Jae and Seong Soo Kang

Abstract

In bulk metal forming processes prediction of tool life is very important for saving production cost and achieving good material properties. Generally the service life of tools in metal forming process is limited to a large extent by wear, fracture and plastic deformation of tools. In case of hot and warm forging processes, tool life depends on wear over 70%. In this study finite element analyses are conducted to warm and hot forging by adopting suggested wear model. By comparison of simulation and real profile of die, suggested model is verified.

Key Words : Hot Forging(열간단조), Warm Forging(온간단조), Wear Model(마멸모델), Tool Life(금형수명), Tempering Parameter(템퍼링파라메타), Die Heat Softening(금형열연화), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서론

고온 성형공정에서 금형수명은 제품의 정도와 생산성 측면에서 중요한 변수로 작용하게 된다. 금형수명에 영향을 미치는 요소로는 금형의 피로, 금형의 소성변형, 마멸 등이 있다. 수명에 영향을 미치는 변수들 중 온간 및 열간 공정에서 가장 많은 영향을 미치는 요소는 금형의 마멸이다. Lange⁽¹⁾에 의하면 온간 및 열간 금형의 마멸에 의한 금형수명의 영향이 70%이상 되는 것으로 보고되었다. 이러한 마멸에 대한 연구는 Holm에 의하여 접촉하는 두 물

체사이의 마멸기구가 제품표면에서의 원자의 소멸현상으로 정의되었고, Archard⁽²⁾는 마멸을 접촉하는 두 물체사이의 미소한 거친 부분의 파괴라 가정하였으며, Holm은 마멸이론을 거시적인 마멸모델로 제안하였다. Liou와 Hsiao⁽³⁾는 열간업세팅 공정에서 금형의 경도를 온도의 함수로 두어 Holm의 이론을 적용하여 유한요소해석을 수행하였다. Hansen과 Bay⁽⁴⁾는 거친 금형표면에 의하여 나타나는 높은 마찰계수는 소재의 유동을 제한하여 마멸량을 감소시킨다고 주장하였다. Doege⁽⁵⁾는 열간단조공정에서 마멸에 있어 교차마멸모델이 타당함을 실험적으로 검

* (주)센트랄
** 부산대학교 대학원
*** (주)만도기계
**** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

증하였고, Rooks⁽⁶⁾는 금형의 속도를 9.15 m/sec, 소재의 온도 1000℃, 금형의 온도 300℃의 조건으로 열간 업계팅실험을 행하여 금형의 마멸을 일으키는 가장 중요한 요인은 소재와 금형 사이의 상대속도임을 밝혔다. Ali등⁽⁷⁾은 금형의 마멸은 금형과 소재사이의 윤활에 의하여 영향을 받는다는 것을 주장하였다. Sobis와 Engel⁽⁸⁾은 금속성형 공정에서 마멸해석에서의 금형과 소재의 실제 접촉면적의 금형마멸에 대한 이론적인 연구를 진행하였고, Tronel과 Chenot⁽⁹⁾은 소재의 압축공정에서의 펀치의 마멸을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. Painter와 Shivpuri⁽¹⁰⁾는 열간 압축공정에서의 마멸을 상용 Code인 DEFORM을 이용하여 해석하고 실험과 비교하였다. 근래에 김태형과 김병민등⁽¹¹⁾은 냉간 드로잉공정에서 마멸을 유한요소법을 이용하여 해석하고 이를 실험결과와 비교하였다.

이러한 일련의 마멸해석은 마멸계수의 값을 상수로 가정하거나, 금형의 경도를 냉간의 경우 상수, 고온의 경우 온도의 함수로 가정하여 적용하고 이를 단순하게 적용하여 마멸량을 구하였다. 실제 마멸에 영향을 미치는 인자는 상당히 많지만 Archard에 의하여 제안된 모델을 주로 적용하고 있고, Archard모델에 의하면 마멸에 영향을 미치는 주인공은 금형과 소재의 마멸계수, 금형이 받는 면압, 금형과 소재의 상대이동거리로 규정되어진다. 하지만 면압과 금형의 상대이동거리는 성형사이클에 따라 일정하게 반복되게 되지만 금형의 경도는 금형온도와 작업시간에 따라 연화과정을 거치게 된다. 본 연구에서는 열간 허브, 온간 로타폴 금형에 대하여 제안된 마멸모델을 유한요소법에 적용하고 이를 실제 마멸된 금형의 작업시간, 작업횟수, 마멸깊이를 비교하여 제안된 마멸모델의 타당성을 입증하였다.

2. 마멸모델의 도입

기존의 금형마멸모델은 금형의 열연화를 고려하지 않고 금형의 경도가 온도만의 함수로 가정한 상태에서 제안된 Archard모델을 적용하고 이를 성형횟수 만큼 더하여 나가는 형태로 적용되는 것이 일반적이다. 하지만 금형의 경도는 고온상태의 성형조건에 의하여 성형시간에 따라 감소하게 된다. 따라서 금형연화곡선을 도입하여 금형마멸모델에 시간과 온도에 의하여 경도가 결정되도록 하는 과정이 필요하다. 또한 일반적인 금형은 열처리를 거치면서 경도와 강도가 상승하게 되는데 이때 표면처리에 의하여 금형은 여러층으로 나타나게 되고, 그 화학적인 조성에 따라

금형마멸계수가 다르게 나타나게 된다. 이런 조건을 충족시키기 위한 마멸모델은 식(1)과 같다.

$$d_{fin} = \int_0^{t_{fin}} \frac{kPL}{3H} \cdot \frac{H}{H(T,t)} dt \text{ on } \partial\Omega^{tool} \quad (1)$$

여기서, H 는 금형의 정상상태온도의 정도, $H(T,t)$ 는 템퍼링파라메타를 포함한 경도연화함수, d_{fin} 는 금형의 허용 마멸량이다.

한번의 유한요소해석을 거치고 최종의 마멸값을 구하기 위하여는 식(1)을 식(2)와 같이 수정할 필요가 있다.

$$d_{fin} = \sum_1^{n_{fin}} \frac{kPL}{3H} \cdot \frac{H}{H(T, t, w_{initial})} \quad (2)$$

이때 마멸이 표면처리층을 넘어서게 되면 그 아래층의 마멸계수를 대입하여 $w_{initial}$ 값이 마멸계수비로 나타나게 된다.

3. 유한요소해석

열간단조로 생산되고 있는 자동차용 허브의 열간 공정을 Table 1과 같은 조건으로 유한요소 해석을 수행하였다. 초기소재는 1300℃까지 승온후, 1차 업계팅을 거치고 2차 성형공정의 2단 공정으로 이루어져 있다. 성형시간과 소재이송시간을 합하여 약 4초 정도의 사이클 타임을 가진다. 금형의 냉각은 수용성 HML-NGFA 윤활유를 사용하며, 성형후 플래쉬는 트리밍과정을 거치면서 단조품의 성형공정은 마무리된다. 유한요소 해석을 위한 입력 데이터는 Table 2에 정리하였다. 자동차용 허브의 소재는 SM45C로써 압축실험에서 구한 SM45C의 온도, 변형률 속도에 따른 구성방정식을 Table 3에 정리하였다.

유한요소법은 실제 성형을 근사화 하기 위하여 이송에 따른 소재의 열전달해석을 1초동안 실시하고, 성형이 끝난 경우에도 금형과 소재의 열전달해석을 실시 하였다. 또한 소재의 성형에 따른 열발생은 소성일의 90%로 가정하였다. 실제 열간 금형은 높은 온도와 성형시의 충격으로 인하여 금형수명이 상당히 낮은 것으로 나타나고, 본 연구에 적용된 열간금형은 수명이 3000~5000번의 성형을 거치면 마멸되어 재가공을 실시한다.

온간단조로 생산되고 있는 로타 폴의 온간 공정은 Table 1과 같이 행하여 진다. 현재 생산되고 있는 로타 폴의 재질은 SM10C로 되어있으나 본 연구에서는 고온에

Table 1 Forging condition of hot and warm forging

Forging Method Data	Hot Forging	Warm Forging
Product	Hub	Inner Race Pole
Material	SM45C	SM10C
Working Temperature	1200℃	780℃
Cycle Time (sec)	4	4
Stage	2	2
Lubricant	Water-based HML-NGFA	Bairute 625 White Lubricant

Table 2 Input data of hot and warm forging analyses

Forging Method Data	Hot Forging	Warm Forging
Incompressible Condition	Lagrangian Multiplier	Lagrangian Multiplier
Friction Treatment	Coulomb friction scheme	Coulomb friction scheme
ζ	10^{-3}	10^{-4}
k [$W/mm^{\circ}C$]	0.0319	0.0263
ρc [$Wsec/mm^3C$]	0.005228	0.005152
h [W/mm^2C]	396.83E-16	396.83E-16
$\sigma\epsilon$ [W/mm^2C^4]	0.295E-5	0.295E-5
Friction Coefficient	0.3	0.25
Ram Speed	100 mm/sec	100 mm/sec

서의 연강의 거동은 거의 유사하다는 가정하에 SM45C의 구성방정식을 적용하였다.

2번의 스트로크로 한 싸이클을 이루고 있고, 프레스는 40SPM으로 작동함으로 한 싸이클은 20SPM이다. 1번의 스트로크에서 0.97초동안 성형한다. 성형후 자동이송 장치에 의하여 이송된다. 유한요소 해석을 위한 입력 데이

터는 Table 2에 나타내었다. 소재 이송시 1초동안 이송에 따른 열전달을 실시하였다.

금형의 온도는 초기 열간의 경우 600℃로 가정하였고, 온간단조의 경우 400℃로 가정하였다. 실제 성형과정에서 성형후 냉각에 따른 순간적인 금형의 온도하락을 고려하고자 하였다.

Table 3 Constitutive equations considering phase transformation

Phase	Constitutive Equation
α phase	$\sigma = \frac{1}{\alpha} \text{Ln} (P + \sqrt{P^2 + 1})$ $P = \left\{ \epsilon \exp \left[\frac{\left(\frac{14.4232}{\epsilon^{1.0821}} + 308.171 \right)}{RT} - \left(\frac{2.4921}{\epsilon^{1.0886}} + 45.284 \right) \right] \right\}^{(1/\frac{0.0341}{\epsilon^{1.0821}} + 5.008)}$
γ phase	$\sigma = \frac{1}{\alpha} \text{Ln} (P + \sqrt{P^2 + 1})$ $P = \left\{ \epsilon \exp \left[\frac{\left(\frac{0.0114}{\epsilon^{2.4283}} + 157.47 \right)}{RT} - \left(\frac{0.0343}{\epsilon^{1.788}} + 18.2 \right) \right] \right\}^{(1/\frac{0.24}{\epsilon^{0.111}} + 4.07)}$
$\alpha + \gamma$ phase	$\sigma = \sigma_{st} \left(\frac{\epsilon}{0.1} \right)^{0.1175} \frac{A(T)}{109.6}$ $A(T) = 114353.7 - 455.7 T + 0.605 T^2 - 0.00027 T^3$ <p>σ_{st}: stress at 725°C, strain rate 0.1/s</p>

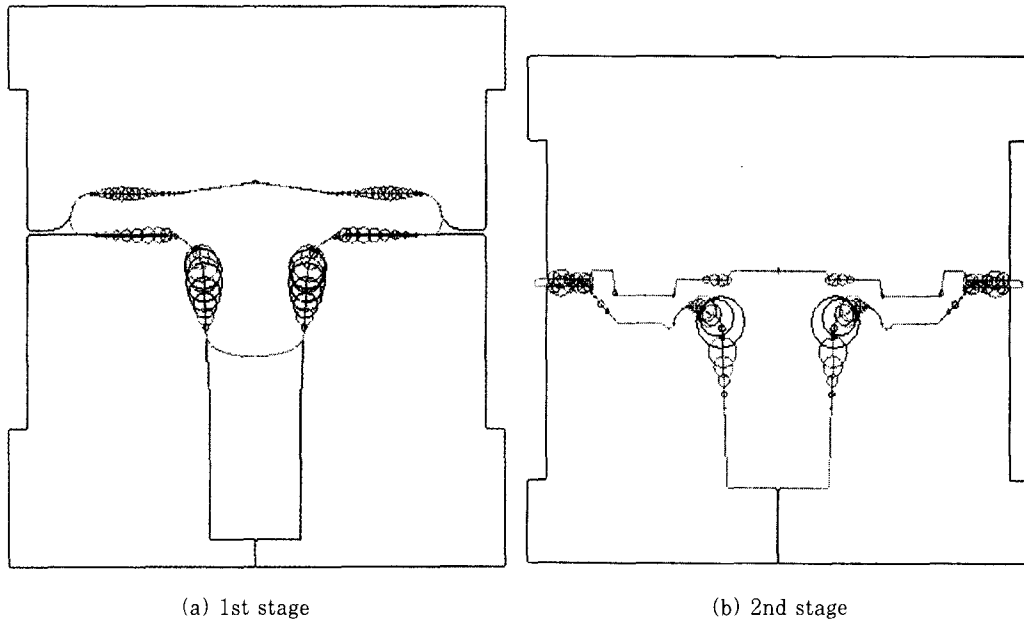
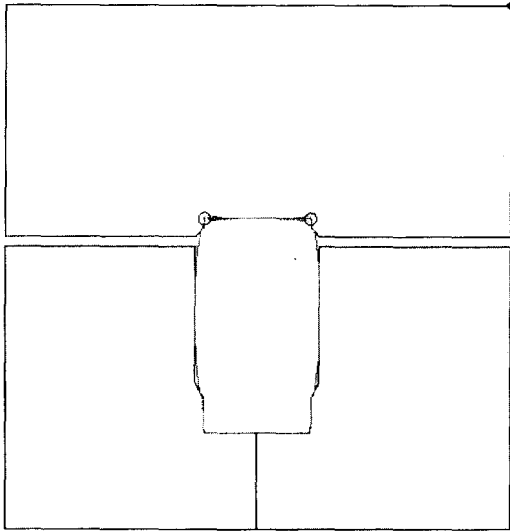
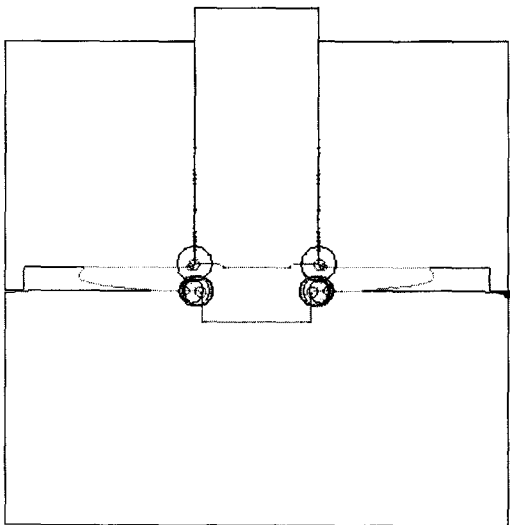


Fig. 1 Wear distribution from analysis of Hub die



(a) 1st stage



(b) 2nd stage

Fig. 2 Wear distribution from analysis of rotor pole die

금형의 마멸이 가장 심한 부위는 상대움직임이 가장 많은 코너부임을 마멸 해석결과인 Fig. 1, 2에서 알 수가 있다. 한번의 해석을 수행한 결과 온간금형의 경우 Fig. 2의 코너부에서 최대마멸량 $1.30 \times 10^{-4} \text{mm}$ 을 얻었다. 유한요소 해석은 자동격자생성과 열해석이 가능한 AFDEX⁽¹²⁾ 를 이용하였다.

4. 제안된 마멸모델의 적용

유한요소해석에서 구한 마멸량을 제안된 마멸모델에 적용하기 위하여 금형의 열처리 이력, 금형의 초기 경도분포, 금형마멸계수, 정상상태 온도 등이 필요하게 된다. 금형의 초기경도분포를 Fig. 3, 4에 나타내었다.

본 연구에서 적용된 금형의 정상상태 온도를 열간단조의 경우 750°C , 온간단조의 경우 550°C 으로 가정하고 해석을 수행하였다. 금형의 재질은 열간단조의 경우 퀸칭과 1, 2, 3차 템퍼링후의 24시간 질화처리된 열간 허브용강과 퀸칭과 1, 2차 템퍼링후 10시간 질화처리된 온간단조용 로타폴 금형이 적용되었다. 마멸계수^(13,14)는 실험결과를 이용하였고, Table 4에 정리하였다. 금형연화경도는 퀸칭과 1, 2차 템퍼링을 실시한 후 15시간 질화처리한 금형용강의 연화곡선을 이용하였고, 금형마모해석을 위한 입력값은 Table 5와 같다.

한번의 유한요소해석에서 구한 마멸결과와 실제 단조금형의 경계조건을 입력하여, 현장에서 금형교환시기로 규

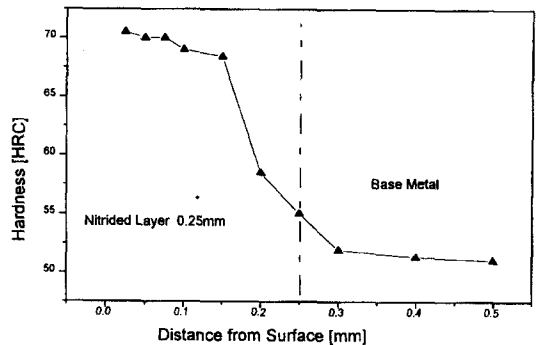


Fig. 3 Hardness distribution from surface for hub die

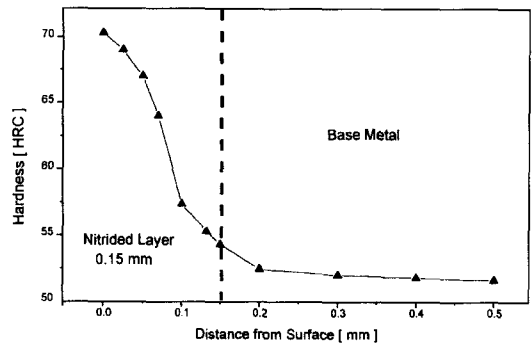


Fig. 4 Hardness distribution from surface for rotor pole die

Table 4 Wear coefficients from test

Pin	Length(mm)		Weight(g)		Area ($\times 10^2 \text{mm}^2$)		K ($\times 10^{-6}$)
	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	
A	14.30	14.00	4.3707	4.3641	2.0854	28.375	1.37
B	14.28	14.1	4.3763	4.3726	2.9634	1.5525	0.74
C	14.29	14.2	4.3636	4.3618	2.5052	7.626	0.27
D	14.26	14.15	4.3530	4.3501	3.9951	9.66	0.62
E	14.28	14.20	4.3646	4.3632	2.9634	6.879	0.27
F	14.29	14.20	4.409	4.4104	2.5052	7.2475	0.86

Table 5 Input data for wear analyses for hot and warm forging

Variables	Hot Forging	Warm Forging
Steady State Temperature	750°C	550°C
Dies Conditions	Q&T 25hr Nitriding	Q&T 10hr Nitriding
Wear Coefficient for White Layer	0.74×10^{-6}	0.74×10^{-6}
Wear Coefficient for Diffusion Layer	1.37×10^{-6}	1.37×10^{-6}
H(M)	$H = -0.00296 \exp[1.0928 \times (M \times 0.001)^{0.702}] + 74.09$	$H = -0.01311 \exp[0.8191 \times (M \times 0.001)^{0.745}] + 72.62$

정하는 마멸깊이까지의 작업횟수와 시간을 구하는 계산흐름도를 Fig. 5에 나타내었다.

초기 금형의 경도에서 성형회수가 증가함에 따라 금형의 경도는 감소하게 되고, 또한 금형이 마멸되어져가면, 제안된 식(1)에서 초기경도 값인 H가 낮아짐으로 이를 고려하여 계산하여야 한다. 이에 대한 흐름도를 Fig. 6에 나타내었다.

또한 Table 4에 나타낸 바와 같이 금형의 표면처리에 따라 나타나는 금형층의 마멸계수의 차를 고려하기 위하여 금형이 마멸되어 34 μm 이상되면 $\frac{kPL}{3H}$ 에서 k 값만을 변경하여 초기 해석에 의한 금형마멸값을 조정할 수 있다.

본 연구에서 온간금형의 경우 최대 허용 마멸량을 0.8 mm로 하여 계산을 실시하였다. 해석결과 수명은 17 hr로 나타났고, 이는 실제 금형수명 15시간에 상당히 근접하는 결과이다.

해석결과와 실제 금형의 마멸상태를 비교하기 위하여 온간금형용 로타폴금형을 Talor Hopson 표면조도기를 이용하여 마멸프로파일을 구하였고, Fig. 7에 3차원으로 나타내었다. 마멸부를 광학현미경으로 10배 비율로 나타내면 Fig. 8과 같다. Fig. 7에 나타난 마멸량에 대하여 최대마멸부의 마멸프로파일과 로타폴을 2차원으로 해석하고 Fig. 5, 6의 계산과정을 거친 마멸프로파일을 비교하면 Fig. 9와 같다.

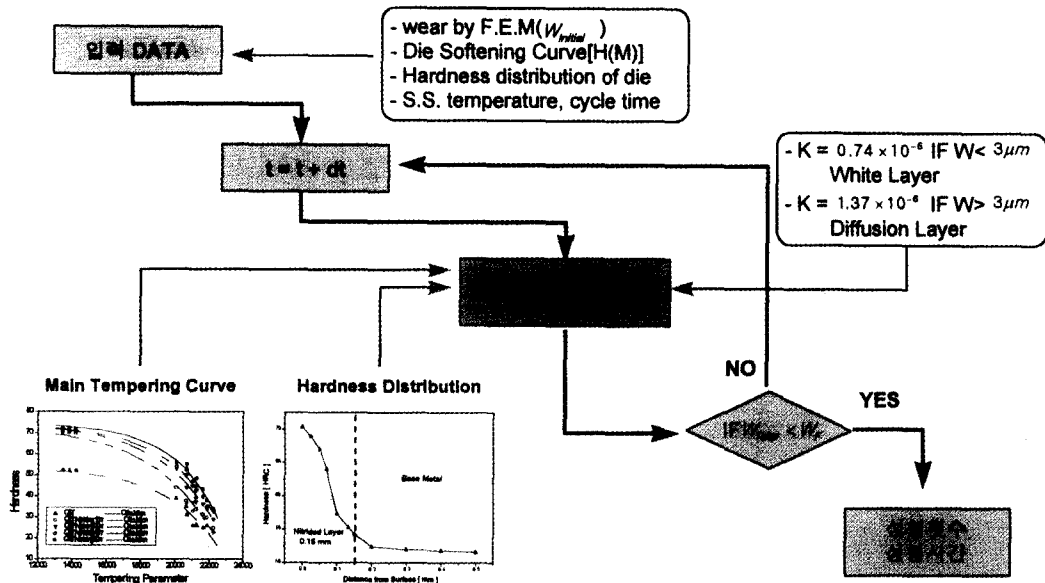


Fig. 5 Flow chart for calculation of final wear amount

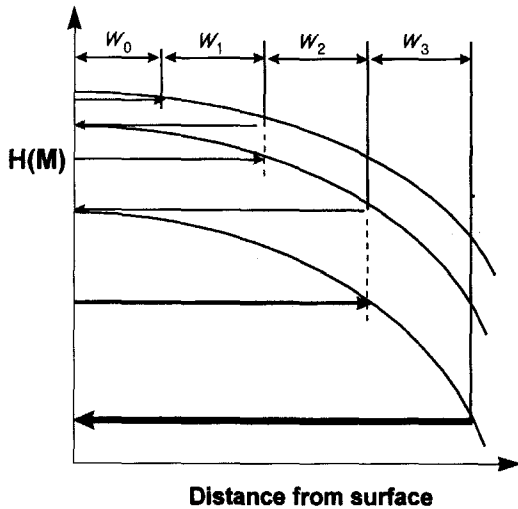


Fig. 6 Flow chart for calculation of die hardness distribution

5. 고 찰

초기 유한요소해석에서는 금형의 경도를 실제 금형의 가정된 정상상태 경도로 입력하고, 최표면의 금형마멸계수를 백색층의 금형마멸계수값으로 입력하였다. 실제 금형은 표면처리에 따라 금형재의 조성이 조금씩 다르게 나타나므로 본 연구에서 적용된 마멸실험결과, 열처리조건

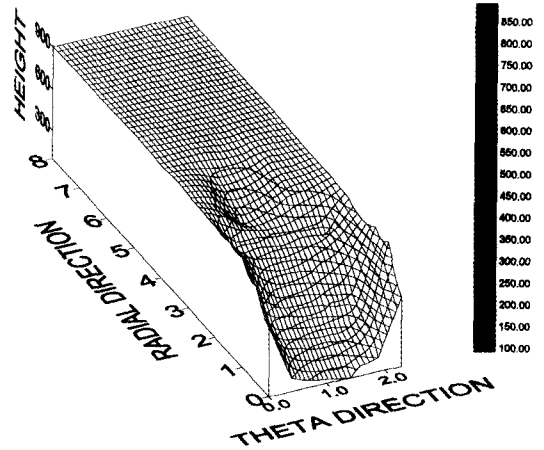


Fig. 7 Wear profile of rotor pole after 10,000 forging

에 의하여 백색층이 생성된 이온열처리금형과 백색층이 생성되지 않은 시편의 마멸값은 2배 정도의 차이를 나타내고 있다. 이는 백색층에서의 마멸계수는 0.74×10^{-6} 를 적용하여야 하고, 마멸이 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 이상 진행되면 금형 내부의 확산층이 소재와 접촉하게 되고, 따라서 마멸계수는 1.37×10^{-6} 를 적용하여야 한다.

또한 금형의 마멸이 진행되면 초기에 소재와 직접 접하고 있는 금형은 백색층의 경도를 유지하고 있지만, 후에는



Fig. 8 The Worn rotor pole die

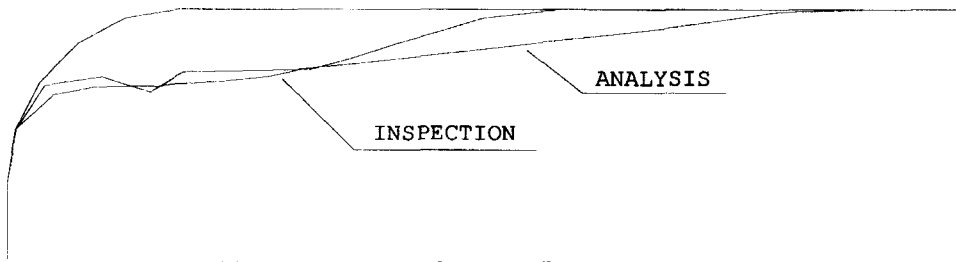


Fig. 9 Comparison between calculated wear profile and real wear amount

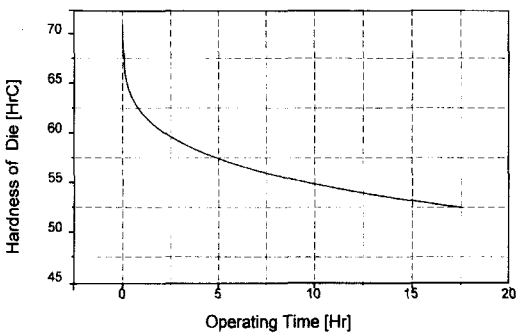


Fig. 10 Die hardness softening for maximum worm portion

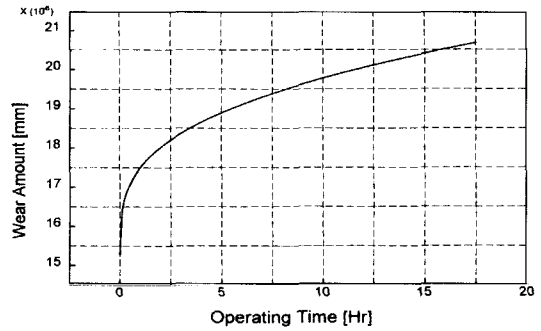


Fig. 11 Wear amount for unit time for calculation

확산층이 소재와 접하게 된다. 따라서 금형의 경도는 열처리 때 따른 금형 표면부로부터의 경도분포인 Fig. 3,4를 이용하여 작업시간에 따라 열적으로 금형이 연화되어가는 과정을 Table 5에 나타낸 주템퍼링곡선으로 정확하게 파악

할 수가 있다.

위의 과정을 거쳐서 구한 금형표면 경도저하곡선과 단위시간당 금형마멸량은 Fig. 10, 11과 같다. 이는 본 연구에서 초기에 가정된 금형경도가 작업시간에 따라 저하

한다는 것과 금형마멸량이 단순히 작업횟수만큼 더하여 가는 것이 아니라, 금형경도와 마멸계수에 따라 작업시간의 함수로 나타난다는 것을 보여주고 있다.

6. 결 론

금형 열연화와 열처리에 따른 표면층의 마멸계수변화를 고려한 금형마멸모델을 유한요소법을 이용하여 한번의 해석을 실시하고, 제안된 계산과정을 거쳐 금형마멸량을 계산함으로써 다음과 같은 결과에 도달하였다.

- (1) 실제 마멸된 금형의 형상과 계산에 의한 금형형상을 비교하여 상당히 근사한 결과를 얻을 수 있었다.
- (2) 본 연구에서 온, 열간금형수명예측은 순수한 마멸에 의한 경우로 제안된 것이지만 제안된 모델에 의하여 구한 결과가 실제 금형형상과 상당히 근사함을 알수가 있고 온, 열간금형수명에 미치는 마멸의 영향 정도를 알수가 있었다.
- (3) 유한요소법으로 초기상태의 금형마멸량을 계산하고, 계산 흐름도에 따른 결과를 실제 마멸된 금형과 비교하여 제안된 마멸모델의 타당성을 입증하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) L. Cser, M. Geiger, K. Lange, 1993, "Tool Life and tool quality in bulk metal forming", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 207, pp. 223~239.
- (2) J. F. Archard, 1953, "Contacts and Rubbing of Flat Surfaces", Journal of Applied Physics, Vol. 24, pp. 981~988.
- (3) M. J. Liou, H. S. Hsiano, 1989, "Prediction of Die Wear in High Speed Hot Upset Forging", ERC/NSM Report, No. 99, pp. 33~39.
- (4) P. H. Hansen, N. Bay, 1990, "A Flexible Com-

puter Based System for Prediction of Wear Distribution in Forming Tools", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 19~26.

- (5) E. Doege, P. Groche, 1990, "Application of Adhesion Thoery to Friction and Wear Processes in Hot Die Forging", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 27~32.
- (6) B. W. Rooks, 1974, "The Effect of Die Temperature on Metal Flow and Die Wear During High Speed Hot Forging", Proc. 15th Inter. MTDR Conference, Birmingham, England, No. 4, pp. 487~495.
- (7) S. M. J. Ali, B. W. Rooks, S. A. Tobias, 1971, "The Effect of Dwell Time on Die Wear in High Speed Hot Forging", Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 185, p. 1171.
- (8) T. Sobis, U. Engel, M. Geiger, 1992, "A theoretical study on wear simulation in metal forming processes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 34, pp. 233~240.
- (9) Y. Tronel, J. L. Chenot, 1992, "Prediction of Tool Wear Using Finite Element Software for the Three-Dimensional Simulation of the Hot-Forging Process", J. of Mater. Proc. Tech., Vol. 31, pp. 255~263.
- (10) B. Painter, R. Shivpuri, T. Altan, 1996, "Prediction of diw wear during hot- extrusion of engine valves", J. of Mater. Proc. Tech., Vol. 59, pp. 132~143.
- (11) T. H. Kim, B. M. Kim, J. C. Choi, 1997, "Prediction of die wear in the wire-drawing process", J. Matr. Proc. Tech., Vol. 65, pp. 11~17.
- (12) 전만수, 1997, "AFDEX User Manual", 경상대학교.
- (13) 김태형, 1997, "냉간 금속 성형제품의 정밀도 향상을 위한 유한요소법의 활용", 부산대학교 박사학위논문, pp. 80~110.
- (14) 제진수, 1997, 3, "단조용 유한요소해석 프로그램 개발", 부산대학교-만도기계 산학협동 최종보고서.