

## 열연화를 고려한 금형마멸모델에 관한 연구( I ) -마멸모델의 정립

강종훈\* · 박인우\*\* · 제진수\*\*\* · 강성수\*\*\*\*

(1998년 1월 9일 접수)

## A study on Die Wear Model considering Thermal Softening( I ) -Construction of Wear Model

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

### Abstract

The service life of tools in metal forming process is to a large extent limited by wear, fatigue fracture and plastic deformation. In elevated temperature forming processes wear is the predominant factor for tool operating life. To predict tool life by wear, Archard's model is generally applied. Usually hardness of die is considered to be a function of temperature. But hardness of die is a function of not only temperature but also operating time of die. To consider softening of die by repeated operation it is necessary to express hardness of die by a function of temperature and time. By experiment of reheating of die, die softening curve was obtained and applied to suggest modified Archard's Model in which hardness is a function of main tempering curve.

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

### 1. 서 론

일반적으로 소성가공에 있어서 금형 파단의 요인은 갑작스런 파괴, 과도한 소성변형, 그리고 마멸에 의한 치수 정밀도의 감소 등으로 나누어볼 수 있다. 갑작스런 파괴는 마멸의 측면에서 보면 관계가 없는 것으로 보이지만, 점진적인 마멸기구와 관계가 있고, 따라서 서로 상관지어 생각해야 한다. 갑작스런 파괴나 과도한 소성변형에 의한 파괴는 금형의 적절한 설계와 적절한 재료의 선택, 금형 사용의 한계를 지정함으로써 상당히 제어할 수가 있지만, 금형

마멸에 의한 수명저하는 소재와 금형이 접촉함으로써 나타나는 것으로 제어하기가 상당히 어렵다.

이러한 금형마멸에 의한 수명저하를 줄이기 위하여 금형마멸을 예측함으로써 공정변화 등으로 금형수명을 최적화하려는 연구가 진행되어 왔다. 금형수명에 미치는 인자들은 작동 온도에 따라 영향정도가 틀리게 나타나는데 냉간성형의 경우 갑작스런 파괴나, 소성변형 등에 의한 수명저하가 현저하고, 열간이나 온간의 고온 성형시에는 금형의 마멸에 의한 수명저하가 70%를 넘는 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup>

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

일반적으로 고온 성형시 금형마멸현상을 예측하기 위하여 Archard 모델<sup>(2)</sup>이 주로 적용되는데 이때 많은 연구자들이 금형의 경도를 냉간의 경우 상수로, 열간 및 온간단조의 경우 온도만의 함수로 나타냄으로써 해석적인 면에서 수명 예측의 한계를 보였다.<sup>(3),(4),(5)</sup> 또한 표면처리에 따른 마멸계수의 변화를 고려해야 함에도 일반적으로는 이를 상수로 두어 해석하는 예가 많아 해석의 결과는 정성적으로는 일치하지만 정량적으로는 상당한 차이를 보이게 된다.

따라서 고온 성형 공정시의 금형마멸량을 정확하게 예측하기 위하여는 금형표면처리에 따른 금형층의 마멸계수를 달리 측정해야하고, 온도와 시간에 따른 금형연화곡선<sup>(6)</sup>을 구할 필요가 있다. 본 연구에서는 널리 열간 및 온간 금형용강으로 적용되고 있는 STD61금형용강에 대하여 각기 다른 열처리를 적용한 경우의 마멸계수를 측정하고, 열처리후 재가열에 의한 금형연화과정을 주템퍼링곡선으로 정량화하여 Archard 모델의 경도항을 시간과 온도의 함수로 수정하여 새로운 마멸모델을 제안하였다.

## 2. 실험

열처리에 따른 금형의 마멸계수와 금형연화곡선을 측정

하기 위하여 STD61종 금형용강을 적용하여 실험하였다.

### 2.1 금형 마멸 실험

금형마멸계수를 측정하기 위하여 실제 현장에서 열간성형용 공구강으로 가장 널리 적용되고 있는 STD61 금형용강을 핀(pin)으로, SM10C를 디스크(disk)로 제작하여 Pin-on-Disk 형태로 마멸실험<sup>(7,8)</sup>을 실시하였다. STD61 금형용강과 SM10C의 화학성분은 Table 1과 같고, 실험조건은 Table 2와 같다. 실험은 전기로의 온도를 500℃로 하여 금형의 온도와 유사성을 가지게 하였으며, 시험편의 규격은 Fig. 1과 같다.

실제 현장에서 적용되고 있는 열처리조건에 대하여 마멸계수를 측정하기 위하여 6종류의 열처리를 실시하여 마멸실험을 하였다. 적용된 6가지 열처리를 Table 3에 정리하였고, 열처리 사이클을 Fig. 2에 나타내었다. 일반적으로 질화처리를 하게 되면 Fig. 3과 같이 표면에서부터 백색층, 확산층, 모재의 순으로 층이 생성되게 되고, 각 층마다 조성이 다르기 때문에 마멸계수도 다르게 된다. 따라서 Table 3의 A, B는 동일한 열처리를 실시한 것이지만 백색층의 유,무가 다른 것이다. 각각의 열처리에 따른 마멸실험 결과를 근거로 하여 핀(pin)의 무게를 측정하여

Table 1 Chemical composition of STD61 and SM10C steels

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V
STD61	0.32~ 0.42	0.80~ 1.20	≤0.50	≤0.03	≤0.03	1.30~ 2.0	4.50~ 5.50	1.00~ 1.50	0.50~ 1.00	0.80~ 1.20
SM10C	0.08~ 0.13	0.15~ 0.35	0.30~ 0.60	≤0.03	≤0.03	-	-	-	-	-

Table 2 Experimental condition for wear test

Operating Variables	Movement	Sliding
	Normal Force	300 (N)
	Velocity	50 (mm/sec)
System Structure	Pin	STD61
	Disk	SM10C
	Atmosphere	Air
	Temperature	500℃
	Lubrication	None

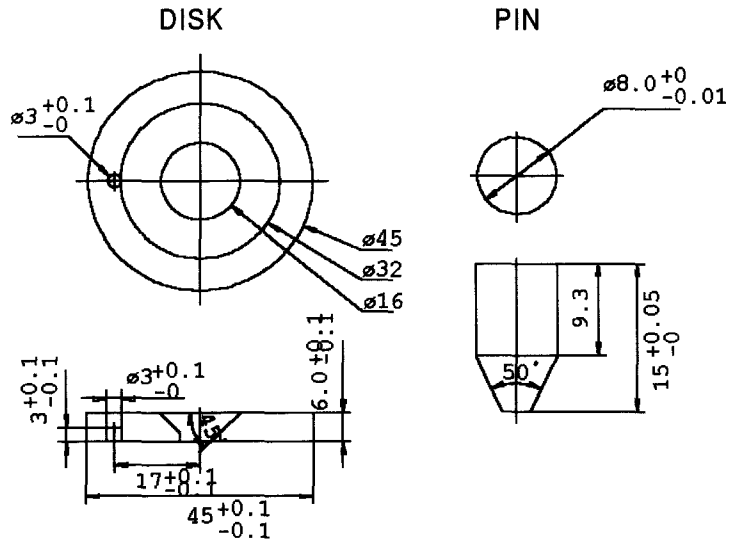


Fig. 1 Dimensions of disk and pin for wear test

Table 3 Heat treatment of STD61 steel for wear test

Pin	Quenching (1Hr)	1st Tempering (°C) × 1Hr	2nd Tempering (°C) × 1Hr	Post Heat Treatment	White Layer (μm)	Diffusion Layer	Hardness (HRC)
A	1030°C	530	520	Ion Nitriding	0	0.2	54~
B	1030°C	530	520	Ion Nitriding	2~4	0.2	54~
C	1030°C	530	520	Gas Nitriding	2~4	0.2	54~
D	1030°C	580	570	Ion Nitriding	2~4	0.2	48~50
E	1030°C	580	570	Gas Nitriding	2~4	0.2	48~50
F	1030°C	530	520	Complex Treatment	2~4	0.2	60~

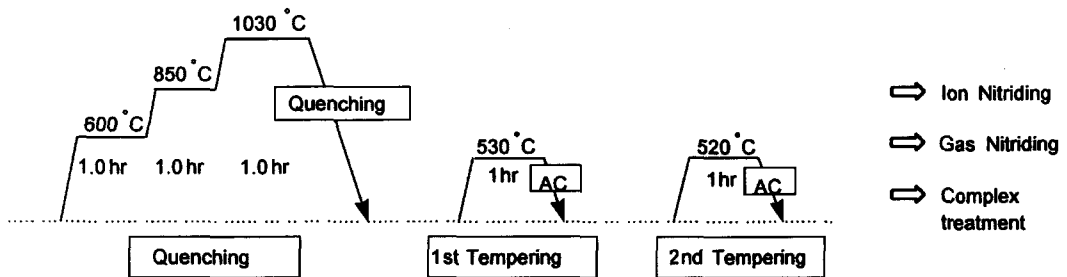


Fig. 2 Heat treatment process for wear test

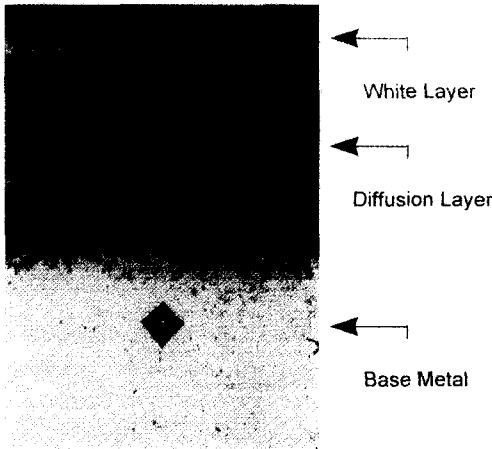


Fig. 3 Layers of nitrided die

구한 열처리별 마멸계수(k)를 Table 4에 정리하였다. 마멸계수(k)는 Archard의 마멸모델식을 이용하여 계산하였다. 이 결과를 열처리에 따라서 정리하면 Fig. 4와 같다.

Table 4에서 백색층이 없는 A의 경우가 동일한 열처리를 하였지만 백색층이 존재하는 B의 경우보다 1.83배 마멸계수가 높게 나타났고, 가스질화보다 이온질화가 마멸계수가 높은 것으로 나타났다. 이는 충격하중이 작용치 않을 경우 가스질화가 이온질화보다 내마멸성이 높다는 이유를 잘 설명하고 있다. F의 복합열처리의 경우 마멸계수가 이온, 가스질화보다 높은 것으로 나타나고 있어 시험결과에 따르면 복합열처리가 금형마멸에 의한 수명이 기존

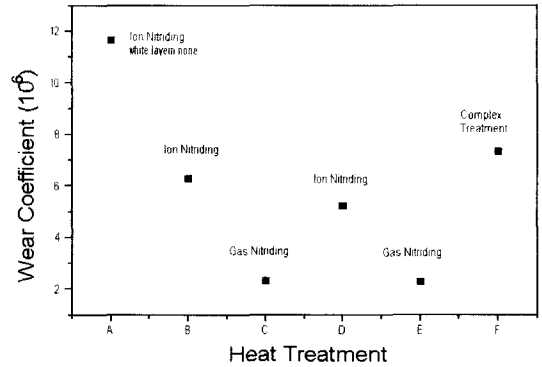


Fig. 4 Acquired wear coefficients from wear test

의 질화층에 비하여 낮게 나타난다는 것을 의미하고 있지만, 실제 현장 적용후의 결과는 기존의 질화층재에 비하여 200~500% 까지 수명향상을 기할수 있다고 보고되고 있다.<sup>(8)</sup> 이것은 복합열처리가 확산층이나 백색층의 질화층에 중점을 두지 않고 모재의 경도를 높이는 데 주안점을 두고 있기 때문으로 판단된다.

### 2.2 금형 연화 실험

STD61종 금형에 대하여 주로 적용되는 열처리에 대한 금형연화곡선을 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 열처리를 실시하였다.

퀵칭(Quenching), 템퍼링(Tempering)된 STD61금형과 그 후 15, 30, 45, 60시간 동안 질화처리한 금형을 600, 625, 650℃로 재가열하고, 20, 40, 60시간동안 템

Table 4 The result of wear test

Pin	Length(mm)		Weight(g)		Area ( $\times 10^{-2}mm^2$ )		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

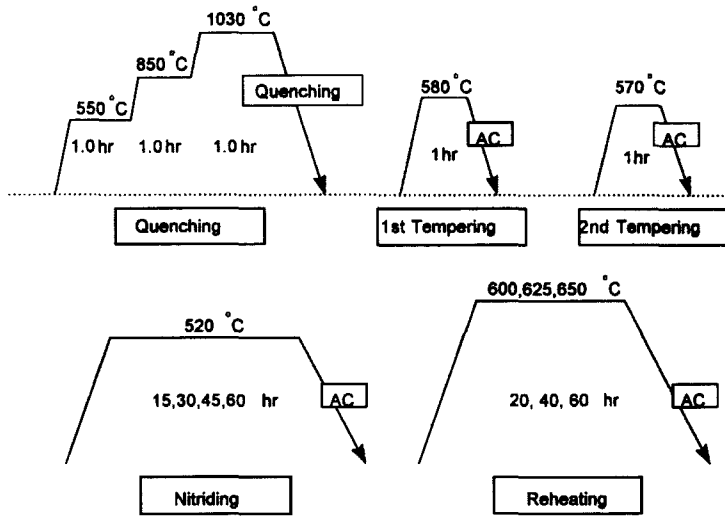


Fig. 5 Heat treatment process for obtaining die softening curve

퍼링하였다. 이는 금형의 연화를 고려할 때 실제 성형에 따른 하중과 열적피로를 금형을 로내에 장시간 유지하면서 조직적 변화에 따른 연화로 모델링하여 연화과정을 측정하는 것이다. 시간과 온도에 따른 금형연화를 비이커스 경도기를 이용하여 측정하고, HRC 단위로 환산하여 나타내었다. 금형연화과정에 대한 실험결과를 Table 5에 정리하였다. 경도하락에 의한 재가열 온도와 시간에 따른 경도를 Fig. 6~8에 나타내었다.

Fig. 6~8로부터 열처리에 따른 템퍼링파라메타(M)을 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6,9,10)</sup>

$$M = T(20 + \log t) \tag{1}$$

여기서, t는 템퍼링시간(hr), T는 템퍼링 절대온도(K)이다.

재가열에 의한 연화곡선을 식(1)과 같이 나타낸 템퍼링 파라메타를 이용하여 주템퍼링곡선(Main Tempering Curve)으로 나타낼 수 있다. 주템퍼링곡선은 템퍼링파라메타와 경도와의 관계를 열처리 조건에 대하여 하나의 수식으로 근사한 것으로 온도와 시간에 대한 금형의 연화정도를 구할 수 있다. 주템퍼링연화곡선은 식(2)와 같이 근

Table 5 Result of hardness softening of die steel after reheating time

Heat Treatment	Hardness (HRC)								
	20hr			40hr			60hr		
	600℃	625℃	650℃	600℃	625℃	650℃	600℃	625℃	650℃
1030℃ × 60min 580, 570℃ (Q&T)	39	35	26.5	31	26.5	26	26	25.5	23
Q&T, 15hr Nitriding	44	37.7	26.5	37	30	33	33	31.5	25
Q&T, 30hr Nitriding	53	50	33.7	44.5	34	37.5	37.5	36.3	29
Q&T, 45hr Nitriding	54	52.5	39.5	50.5	35	45	45	40	33
Q&T, 60hr Nitriding	56	53	42.5	55	38	47	47	43.5	34

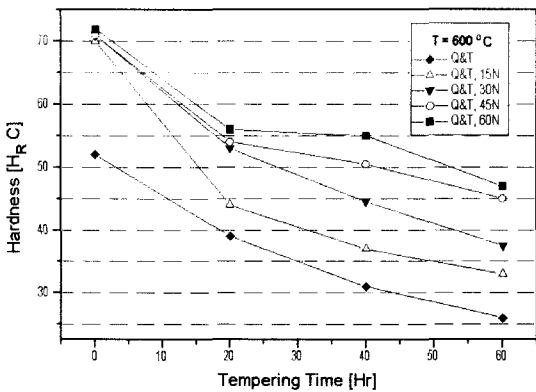


Fig. 6 Hardness softning of 600°C reheating temperature

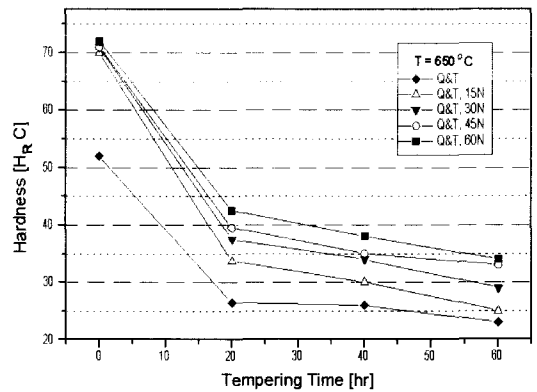


Fig. 8 Hardness softning of 650°C reheating temperature

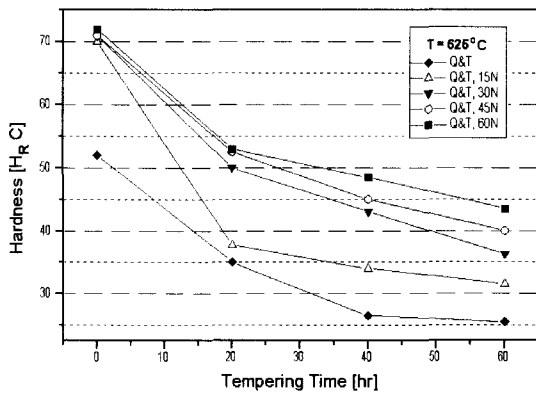


Fig. 7 Hardness softning of 625°C reheating temperature

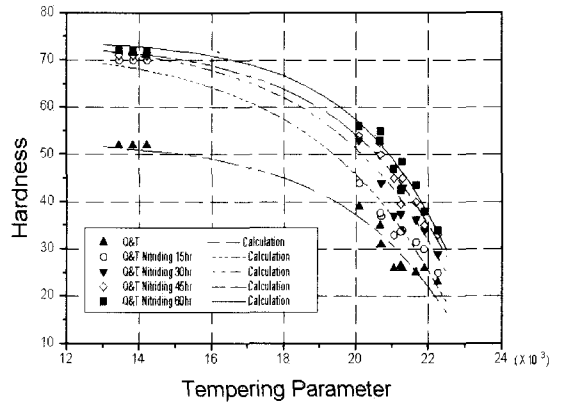


Fig. 9 Relationship between tempering parameter and hardness for various heat treatment and temperature

사화할 수 있다.

$$H = A \exp(B \times (M \times 0.001)^C) + D \quad (2)$$

여기서, H는 경도, M은 템퍼링파라메타, A, B, C, D는 열연화에 따른 상수이다.

템퍼링파라메타를 이용하여 구한 경도저하식 (2)의 계수는 경도저하과정을 템퍼링파라메타로 나타낸 식(1)과 Fig. 6~8의 실험결과로부터 얻을 수 있다. 구하여진 계수를 이용하여 횡축을 템퍼링파라메타, 종축을 경도로 나타내면 Fig. 9와 같다.

### 3. 마멸모델의 제안

기존의 금형마멸모델은 금형의 열연화를 고려하지 않고 금형의 경도를 온도만의 함수로 가정한 상태에서 제안된

Archard 모델을 적용하고, 이를 성형횟수만큼 더하여 나가는 형태로 적용되는 것이 일반적이다. 하지만 금형의 경도는 마르텐사이트 조직에서 고용된 탄소가 석출과정을 거치면서 경도는 다소 감소하나 인성은 증가하게 된다. 이러한 템퍼링의 영향에 의한 경도하락은 성형과정에서 나타나는 반복적인 열영향에 의한 금형경도의 하락과 동일한 기구를 이루고 있는 것으로 가정하였다. 또한 금형의 경도를 작업시간과 온도의 함수로 나타내는 것이 마멸에 의한 금형수명을 예측하는데 필수적인 요소가 되고, 이에 대하여 앞절에서 금형의 연화과정을 템퍼링파라메타를 이용하여 정량화하였다. 앞절에서 구한 금형의 경도변화를 Archard 모델에 대입하면 식(3)과 같다.

$$\delta d = \frac{kPL}{3H(T, t)} \quad (3)$$

여기서,  $\delta l$ 는 마멸깊이,  $k$ 는 마멸계수,  $P$ 는 수직하중,  $L$ 은 미끄럼 길이,  $H(T, t)$ 는 온도와 시간의 함수로 표현되는 경도이다.

식(3)을 유한요소해석을 하기 위한 적분형태로 나타내면 식(4)와 같다.

$$\delta l = \frac{k}{3H(T, t)} \int_0^{t_{tot}} \sigma_n \Delta v dt \quad \text{on } \partial\Omega^{tool} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_n$ 은 수직응력,  $\Delta v$ 는 다이와 소재 사이의 상대속도이다.

식(4)는 다음과 같이 정리된다.

$$\delta l_{t+\Delta t} = \delta l_t + \frac{k}{3H(T, t)} [\sigma_n \Delta v]_t \Delta t \quad \text{on } \partial\Omega^{tool} \quad (5)$$

하지만, 식(5)를 적용하기 위하여는 유한요소해석을 반복적으로 수행해야 하기 때문에 이를 한번의 해석을 통하여 마멸에 의한 수명을 예측할 필요가 있다. 따라서 일반적으로 현장에서 허용 마멸량이 정해지므로 이를 상수로 가정하고, 한번의 해석을 통하여 성형회수를 예측할 수 있는 식(6)을 제안할 수가 있다.

$$d_{fin} = \frac{H}{H(T, t)} \cdot \int_0^{t_{fin}} \frac{kPL}{3H} dt \quad \text{on } \partial\Omega^{tool} \quad (6)$$

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

식(6)을 간단하게 정리하면 식(7)과 같이 된다.

$$d_{fin} = \sum_1^{n_{fin}} \frac{kPL}{3H} \cdot \frac{H}{H(T, t_{cycle} \times n_{fin})} \quad (7)$$

식(7)에서 고려하지 않은 것은 초기금형의 표면의 경도 분포로써, 이는 금형이 조금씩 마멸되어 가는 과정에서 초기표면의 경도를 마멸된 후의 경도로 가정하고 성형된 시간에 따른 템퍼링파라메타에 의한 경도저하를 정확하게 기술하는 것이 요구되기 때문에 최종적인 마멸모델은 식(8)과 같이 제안할 수 있다.

$$d_{fin} = \sum_1^{n_{fin}} \frac{kPL}{3H} \cdot \frac{H}{H(T, t \times w_{initial})} \quad (8)$$

식(8)을 이용하여 오른쪽 적분항을 계속 더하여 나가면 실제 열간 및 온간단조에서의 작업시간을 추정할 수가 있다. 구하여진 시간을 성형사이클 시간으로 나누면 성형회수를 구할 수가 있다. 하지만 제안된 수식은 금형의 온도

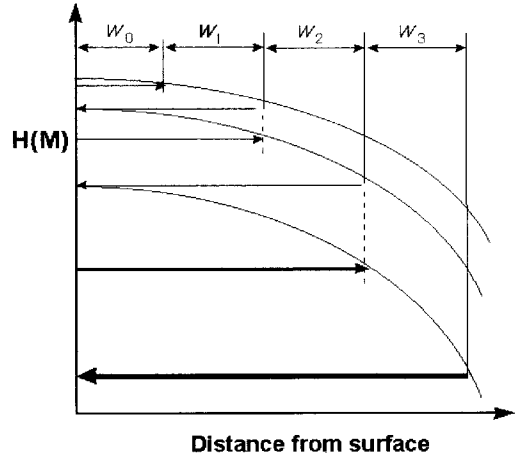


Fig. 10 Flow chart for calculation of die hardness distribution

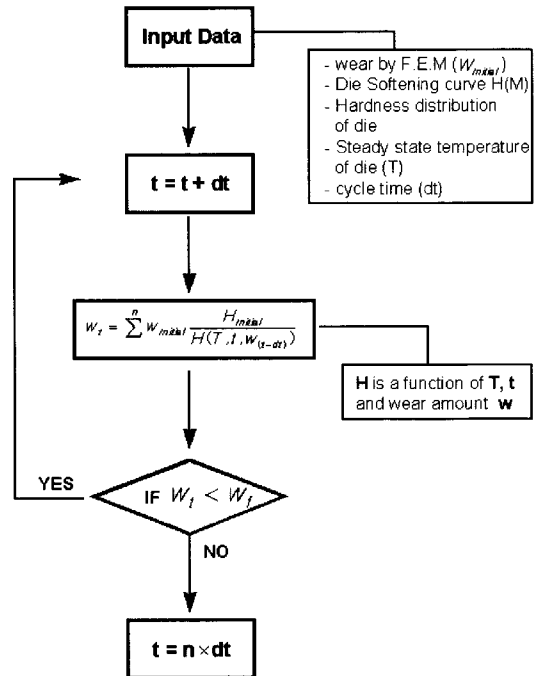


Fig. 11 Flow chart for calculation of final wear amount

가 정상상태영역에 들어갔을 때 제안될 수 있는 것으로써 정상상태의 온도를 얻을 수 있는 초기입력 온도의 가정이 중요한 변수로 나타나게 된다.

금형이 마멸되어 백색층이 없어지고 확산층이 소재와 접하게 되면 마멸계수값은  $0.74 \times 10^{-6}$ 에서  $1.37 \times 10^{-6}$ 로 전환되어야 한다. 이를 초기 해석결과에서 두 마멸계수의 비 1.83을 곱하면 확산층에서 금형마멸량을 구할수 있다. 이와 병행하여 작업진행에 따른 경도저하도 고려해야 하므로 Fig. 10과 같이 마멸된 부위의 초기경도에서 작업시간에 따른 템퍼링파라메타의 증분을 고려하여 경도값을 구하게 되고, 구한 경도값에서 식(8)을 통하여 단위시간 당의 마멸값을 구한다. 이를 이전 단계의 마멸값과 합하여 마멸부위의 초기경도를 구하여 앞의 계산과정을 반복하게 된다. 앞의 내용을 정리하여 최종마멸량을 구하는 흐름도를 나타내면 Fig. 11과 같다.

#### 4. 결 론

실제 열간 및 온간단조의 금형수명을 정밀하게 예측하기 위해서는 금형과 소재의 특성에 따라 마멸량이 다르게 나타나는 것을 고려해야 한다. 또한 성형횟수가 반복됨에 따라 금형의 표면경도도 다르게 나타나고, 금형의 초기 열처리후 표면으로부터의 경도분포를 고려하여 마멸되어 나간 부위의 경도와 열연화를 동시에 고려해 줄 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 사항들을 고려하여 실험을 수행하고, 새로운 마멸모델을 제안하였다. 본 연구의 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 산업현장에서 널리 적용되는 STD61 금형용강의 마멸계수를 열처리에 따라 구하여 기존의 마멸계수를 상수로 두는 문제를 표면부에서 마멸되어 가는 정도에 따라 마멸계수를 선택적으로 적용할 수 있도록 표면열처리층에 따른 마멸계수를 측정하였다.

(2) 금형의 경도를 일반적으로 온도의 함수로 두는 문제를 시간에 따른 연화과정과 온도를 동시에 고려하기 위하여 금형의 템퍼링파라메타를 도입하고, 템퍼링파라메타와 경도와의 관계를 주템퍼링곡선으로 나타내었다.

(3) 초기마멸을 유한요소해석으로 구하고, 이를 일률적으로 더하지 않고, 성형시간, 성형온도, 초기 금형의 경도, 마멸후의 열연화를 고려한 금형의 경도 등을 입력값으로 하여, 작업시간이 증가할수록 금형의 경도 저하에 의하여 마멸량이 증가함을 정량화시킬 수 있는 마멸모델을 제안하였다.

#### 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) P. H. Hansen, N. Bay, 1990, "A Flexible Computer Based System for Prediction of Wear Distribution in Forming Tools", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 19~26.
- (3) Doege, E., Groche, P., 1990, "Application of Adhesion Thoery to Friction and Wear Processes in Hot Die Forging", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 27~32.
- (4) 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.
- (5) T. H. Kim, B. M. Kim, 1997, "Prediction of die wear in the wire-drawing process", J. Matrl. Proc. Tech., Vol. 65, pp. 11~17.
- (6) A. Minami, H. Saiki, 1996, "Effect of Surface Hardening by Nitriding on thermal softening and Deterioration of Dies in Warm and Hot Forming", Advanced Tech. Plasticity, pp. 389~392.
- (7) 김태형, 1997, "냉간 금속 성형제품의 정밀도 향상을 위한 유한요소법의 활용", 부산대학교 박사학위 논문, pp. 80~110.
- (8) 채진수, 1997, 3, "단조용 유한요소해석 프로그램 개발", 부산대학교-만도기계 산학협동 최종보고서.
- (9) 山田富重, 野次郎, 1982, "溫, 熱間鍛造工具の表面硬化と型壽命", 塑性と加工, 제23권, 제261호, pp. 997~1004.
- (10) 湯淺雄二, 岡本治郎, 1982, "溫熱間鍛造金型の壽命に對して Press-Slide 舉動について考察", 塑性と加工, 제22권, 제241호, pp. 133~138.