

## 소성변형 및 마멸에 대한 열간 단조 금형의 수명 평가

이현철\*, 김병민\*\*, 김광호\*\*\*

### Life Estimation of Hot Forging Die by Plastic Deformation and Wear

Hyun Chul Lee\*, Byung Min Kim\*\*, Kwang Ho Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

This paper describes about the estimation method of die life by wear and plastic deformation in hot forging process. The thermal load and the thermal softening are happened by the high temperature in hot forging process. Tool life decreases considerably due to the softening of the surface layer of a tool caused by high thermal load and long contact time between tool and billet. Also, tool life is to a large extent limited by wear, heat crack and plastic deformation in hot forging process. Above all, the main factors which affects die accuracy and tool life are wear and the plastic deformation of a die. The new developed technique for predicting tool life applied to estimate the production quantity for a spindle component and these techniques assist to improve the tool life in hot forging process.

**Key Words** : Hot forging (열간 단조), Tool life (금형 수명), Plastic deformation (소성변형), Wear depth(마멸 깊이), Thermal softening (열연화), Tempering parameter (템퍼링 파라미터)

#### 1. 서론

열간 단조 공정은 자동차, 산업기계 등의 주요 부품을 제조하는데 많이 이용되고 있다. 특히 복잡한 성형을 요구하는 경우, 또는 제품의 치수가 커서 높은 하중이 필요한 경우에 적용되고 있다. 열간 단조 공정에서 금형은 제조비용, 생산성, 그리고 정밀도에 크게 영향을 미치며, 성형중의 열 사이클, 과도한 금속유동 및 금형의 경도저하 등에 의해 냉간 단조 등 타 가공법보다 엄격한 조건에서 사용되기 때문에 금형수명이 상당히 짧다. 특히 원가절감, 재료비 감소가 절실히 요구되는 오늘날에는 이러한 금형수명의 연장은 매우 중요

한 문제이다.<sup>(1)-(5)</sup>

열간 단조용 금형의 수명을 결정하는 주요인은 소재와 금형의 접촉면 마찰에 의해서 발생하는 마멸과 열피로에 의한 표면 열크랙(Heat crack), 금형의 강도가 소재의 유동응력을 따르지 못하여 발생하는 소성 변형 등이 있다. 이러한 금형 수명 감소 요인들은 서로 분리된 별개의 현상이 아니라 동시에 서로 영향을 미치면서 발생되며, 각각의 공정 또는 제품이 요구하는 특성에 따라서 서로 다른 비중으로 전체적인 금형의 수명에 영향을 미치게 된다. 즉, 경우에 따라서는 금형이 소성 변형으로 인한 금형 수명 감소보다 마멸에 의한 금형 수명감소가 주 요인으로 나타날 수도 있고 그 반

2002년 8월 12일 접수

\* 부산대학교 일반대학원

\*\* 부산대학교 정밀 성형 및 금형가공 연구센터

\*\*\* 부산대학교 무기재료공학과

대 일 수도 있다.<sup>(6),(7)</sup>

본 연구에서는 열간 성형에서 지배적으로 발생하는 급형의 소성변형 및 연삭 마멸에 대한 수명 평가 방법을 제시하였다. 실제 현장에서 쉽게 제어 가능한 급형 예열 온도와 성형 속도 두개의 주 공정인자 변화에 대한 급형 수명을 최대 생산가능 개수로 나타내어 정량적 비교를 하였다.

## 2. 열간 단조의 급형 수명 예측기법

급형 수명의 정량적 표현은 매우 어렵지만 일반적으로 급형 수명 판단 기준은 작업면에서 결정하는 급형 수명 측면과 품질면에서 결정하는 급형 수명 측면으로 나누어 진다. 전자는 생산능률, 급형의 파손 등이 판단기준으로 되며, 후자는 치수 정도, 표면거칠기 등이 그 기준으로 된다. 본 연구에서는 열간 단조의 정량적인 급형 수명 평가 방법으로 급형강도가 항복강도에 도달할 때까지의 경도 유지 시간으로 평가하는 소성 변형에 대한 급형 수명 평가 방법과 시간과 온도에 따른 급형의 고온에서 경도 변화와 표면층의 마멸량 증가에 따른 깊이 방향의 경도 변화를 고려한 연삭 마멸에 대한 급형 수명 평가 방법을 제시하였다.

### 2.1 열간 단조 급형의 소성변형에 대한 평가

열간 단조 공정에서 급형은 열연화 현상으로 인한 점진적인 항복강도의 감소로 인해 어느 시점에 도달하면 급형의 국부적인 소성변형이 발생하게 된다.

열간 단조 급형은 템퍼링 과정을 거치면서 경도는 다소 감소하나 인성은 증가하게 된다. 이러한 템퍼링 영향에 의한 경도하락은 성형과정에서 나타나는 반복적인 열 영향에 의한 급형 경도의 하락과 동일한 특성을 나타내므로 급형의 경도를 시간과 온도의 함수로 표현할 수 있다. 따라서 열간 단조 급형의 소성변형에 대한 급형 수명 평가를 위해 고온에 의한 경도 변화를 평가할 수 있는 템퍼링 파라미터를 적용하였다. 템퍼링 파라미터 ( $M$ )는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 급형재료의 시간과 온도에 따른 경도 변화를 평가할 수 있다.<sup>(8)-(13)</sup>

$$M = T \times (C + \log_{10} t) \times 10^{-3} \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 템퍼링 온도 (K),  $C$ 는 재료 상수,  $t$ 는 템퍼링 시간이다. 일반적으로 탄소강의  $C$  값은 대략 20 이다. 또한 성형에서부터 취출 되기까지 급형의 온도변화에 대한 상당온도( $T_{eq}$ )를 근사적으로 식(2)으로 나타낼 수 있다.

$$T_{eq} = \frac{2T_{max} + T_{min}}{3} \quad (2)$$

여기서  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ 은 온도 진폭 중 최고 및 최저 온도이다.

소성 변형에 대한 급형 수명 평가를 위하여 템퍼링 파라미터 식(1)에서 템퍼링 시간  $t$ 를 성형 중 급형의 강도가 열연화에 의해 항복강도에 도달할 때까지의 경도 유지 시간  $t_h$ 로 바꾸어 식(3)과 같이 나타내어 급형 수명 평가를 하였다.

$$t_h = \exp \left( \frac{M_{yield} \times 1000}{T_{eq}} - C \right) \quad (3)$$

여기서  $M_{yield}$ 는 항복강도 도달시의  $M$  값이다. 열연화 실험을 통해 STD61 열간 급형강의 상당온도, 경도, 항복강도의 상호 관계를 나타낸 주템퍼링 곡선은 Fig. 1과 같다.<sup>(8)</sup>

실제 적용된 급형은 1030℃에서 담금질 된 후 550℃에서 3 시간 1 차 템퍼링, 600℃에서 3.5 시간 2 차 템퍼링 한 것이다. 급형 표면은 520℃에서 14 시간 동안 이온 질화 처리를 하였다.

따라서 급형 수명 평가를 위한  $t_h$  값은 1, 2 차 템퍼링 시간까지 고려하여 식(4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{yield} = T_{eq} (C + \log(t_h + t_1 + t_2)) \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$t_h = \exp \left( \frac{M_{yield} \times 1000}{T_{eq}} - C \right) - t_1 - t_2 \quad (5)$$

$$\text{where, } t_1 = 10 \exp \{ T_1 / T_{eq} \times (C + \log t_h) - C \}$$

$$t_2 = 10 \exp \{ T_2 / T_{eq} \times (C + \log t_h) - C \}$$

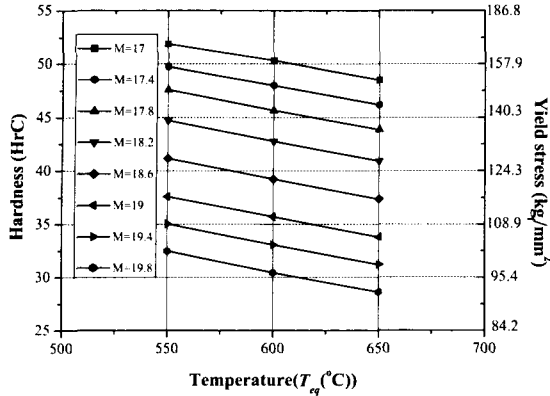


Fig. 1 Master tempering curves of STD61

여기서  $t_1, t_2$ 는  $T_{eq}$  동안 1, 2 차  $M_{yield}$  값이 유지되는 시간이다. 먼저 주 템퍼링 곡선에서 성형 해석을 통해 구한 항복강도와 상당온도 값을 읽어  $M_{yield}$  값을 구했다. 1 차, 2 차  $T_{eq}$  동안 대한  $M_{yield}$  값이 유지되는 시간  $t_1, t_2$  를 식(5)에 대입하여 온도 유지 시간  $t_h$  를 구했다. 마지막으로 식(5)에서 구한 온도 유지 시간  $t_h$  를 최종 금형의 1 사이클 시간(cycle time)으로 나누어 생산 개수를 예측하였다. 이상에서 제시한 소성변형에 대한 금형 수명 평가 방법을 정리하면 Fig. 2 와 같다.

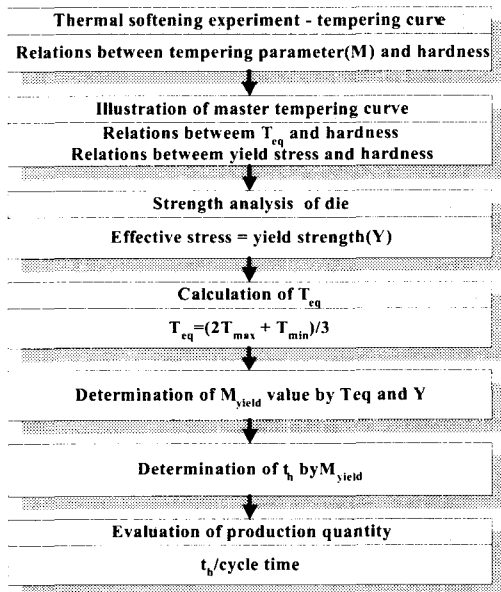


Fig. 2 Flow chart for plastic deformation analysis

## 2.2 열간 단조 금형의 연삭 마멸에 대한 평가

마멸 관련 인자들은 접촉면의 온도, 접촉돌기의 분포, 접촉면의 거칠기 등의 접촉상태와 금형 재료의 경도, 금형에 작용하는 수직압력, 미끄럼 길이, 윤활조건 등이며, 특히 열간 단조 공정에서 금형의 마멸은 제품의 치수 정밀도 및 제품 표면 정도에 문제가 된다.

열간 단조 금형 마멸 계산에는 두 물체의 접촉시 마멸 깊이를 식(6)과 같이 제안한 Archard 마멸 모델을 적용하였다.<sup>(14)</sup>

$$V = \frac{kPl}{3h} \tag{6}$$

여기서  $V$ 는 마멸 체적,  $k$ 는 마멸계수,  $P$ 는 접촉하중,  $l$ 은 미끄럼 길이,  $h$ 는 금형의 표면 경도를 나타낸다.

열간 단조 금형의 수명평가를 위해 시간과 온도에 따른 금형의 고온 경도 변화와 표면층의 마멸량 증가에 따른 깊이 변화와 마멸 표면층의 경도 변화를 고려한 수정 마멸모델 식(7)은 다음과 같다.<sup>(15)~(19)</sup>

$$W = \frac{k}{3h(M, \text{weardepth})} \sum_{i=1}^N (\sigma_n v_s \Delta t) \tag{7}$$

먼저 성형 해석을 통하여 금형면 접촉 압력( $\sigma_n$ ), 소재의 유동속도( $v_s$ ), 금형의 온도 분포를 구했다. 다음으로 마멸 및 열연화 실험을 통하여 얻은 허용 마멸량 및 한계 고온 경도 값을 수정 마멸 모델 식(7)에 대입하여 마멸 해석을 수행하였다.

해석 결과를 통해 1 회 성형 공정 동안 금형의 마멸량을 계산하고 이 마멸량에 해당하는 온도 값을 예측하였다. 이 값들을 한계 값들과 비교하여 한 공정에 대한 금형의 수명을 평가 하였다.

마멸량이 허용 값보다 작고, 온도 값이 한계 값 이상이면 금형의 형상을 마멸된 형상으로 변경하여 다시 마멸 해석을 수행하고 금형의 수명을 예측하였다.

마지막으로 최종 금형의 마멸 깊이를 허용 마멸 깊이로 나누어 생산 개수를 평가 하였다.

이상에서 제시한 마멸에 대한 금형 수명 평가 방법을 정리하면 Fig. 3 과 같다.

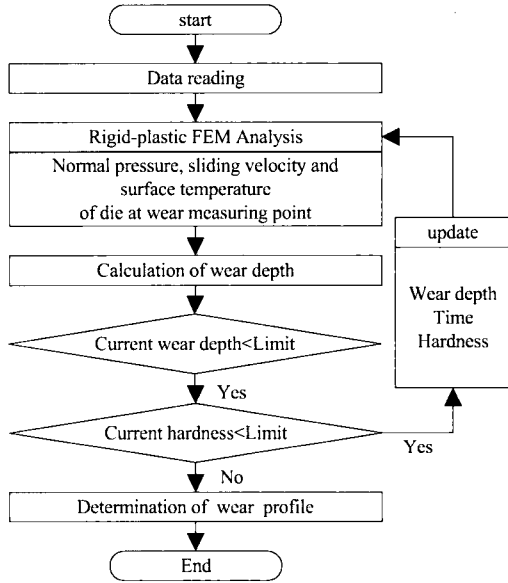


Fig. 3 Flow chart for abrasive wear analysis

### 3. 금형 수명 해석 및 결과

본 연구에서 제시된 수명 예측기법 적용을 위해 금형 수명에 가장 큰 영향을 주는 곡률부(point 1, 2)를 가진 Fig. 4 와 같은 열간 단조 제품을 선정하였다. 자동차 기계 부품인 후방 압출 제품으로서 전형적인 열간 축대칭 제품이며, Fig. 5 와 같이

Table 1 Process conditions for FE analysis

<b>Billet</b>	<b>Material</b>	SM 45C
	<b>Thermal conductivity</b>	74.93N/sec°C
	<b>Emissivity</b>	0.3
	<b>Heat capacity</b>	3.602N/mm°C
<b>Die</b>	<b>Material</b>	STD 61
	<b>Thermal conductivity</b>	28.6N/sec°C
	<b>Emissivity</b>	0.3
	<b>Heat capacity</b>	3.574N/mm°C
	<b>Surface treatment</b>	Ion-nitride
<b>Forging conditions</b>	<b>Friction factor (m)</b>	0.3
	<b>Heat transfer coefficient</b>	11.3N/secmm°C
	<b>Convection coefficient</b>	0.02N/secmm°C
	<b>Billet/die initial temp.</b>	1200,200°C
	<b>Forging velocity</b>	200mm/sec

Table 2 Variation conditions of process variables

<b>Process variables</b>	<b>Conditions</b>
<b>Initial die temperature</b>	200°C
	300°C
	400°C
<b>Forging velocity</b>	200 mm/sec
	250 mm/sec
	300 mm/sec

앞세팅 공정, 블로커 공정 및 피니쉬 공정의 세 단계로 이루어졌고 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM 을 사용하여 성형해석을 수행하였다. 제품의 특징은 높이가 320 mm, 최대직경이 131 mm 이고, 긴 압출부를 가지고 있다. 외경이 3 단으로 이루어져 있으며, 최소의 기계가공이 작용할 수 있도록 밀폐단조로 성형 되기 때문에 일반적인 단조에 비해 각 단의 곡률부 라운드의 치수 정밀도가 상당히 중요하다.

따라서 피니쉬 공정의 곡률부(Point1,2)에 대한 금형 수명 평가를 수행하여 생산개수가 작은 쪽을 최종수명으로 판단하였다. Table 1, 2 에 성형 해석 조건과 금형 수명 평가를 위한 초기 금형 온도와 성형 속도의 공정변수를 각각 나타내었다.

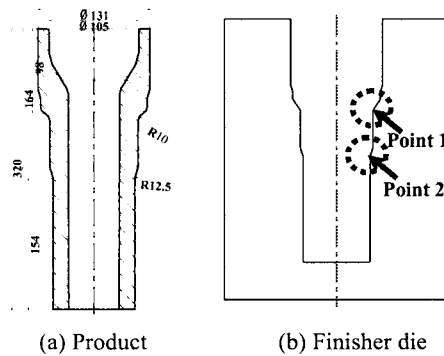


Fig. 4 Shape and dimensions of a product and finisher die

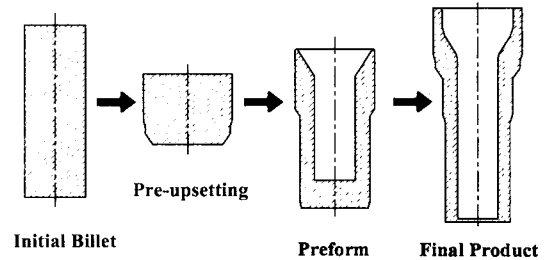


Fig. 5 Process design of a spindle product

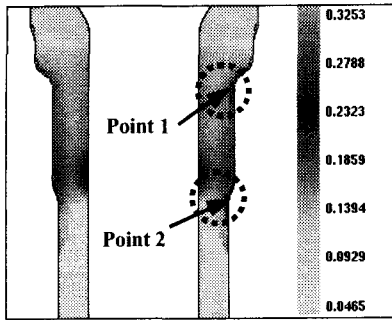


Fig. 6 Damage value of a final product

Fig. 6 은 피니쉬 공정에서 재료 내부의 Damage 분포를 나타낸 것으로서 각 단의 곡률부에서 상대적으로 높은 것을 볼 수 있는데, 이는 이에 대응하는 실제 손상이 가장 많이 된 금형 부위들과 일치하였다.

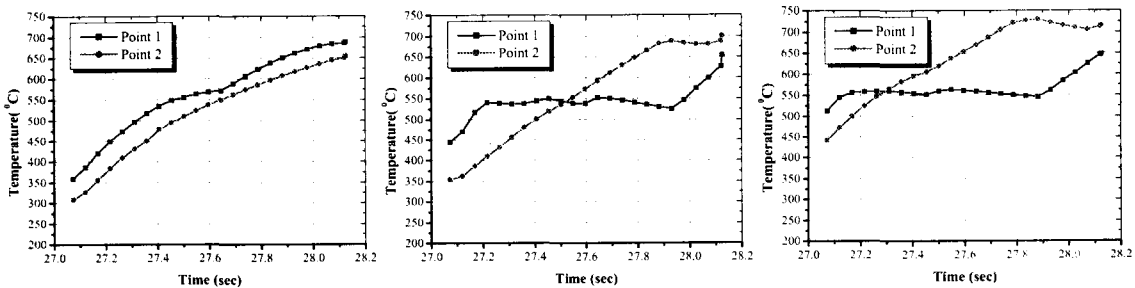
### 3.1 금형 예열 온도에 따른 수명 평가

열간 단조 공정에서 소재 내부와 외부의 온도차가 발생하게 되면 유동양상이 달라지게 된다. 금형 온도가 높을 수록 소재 내부와 외부의 온도차가 상대적으로 작아 유동양상은 좋아지나 금형의 표면 온도가 과다하게 상승하였을 때는 오히려 수명을 저하시킨다. 금형의 온도가 낮을 경우에는 금형과 접촉된 소재의 유동양상을 저하시켜 표면결함을 유발하기 때문에 적절한 금형 예열 온도 선정이 필요하다. 따라서 금형 예열 온도가 소성 변형 및 마멸에 대한 금형 수명에 미치는 영향을 알아보기 위해 온도 200, 300, 400°C 에 따른 피니쉬 공정 동안의 Point 1, 2 에서의 온도변화를 Fig. 7

에 나타내었다. 예열 온도 200°C 에서는 point1 에서 온도가 가장 높게 나타났지만 예열 온도 300, 400°C 에서는 point 1 에서 보다 point 2 에서 고온 소재와의 접촉시간이 길어 온도가 높게 나타났다. 금형 절점력과 속도 분포를 Fig. 8 에 나타내었다. 예열 온도가 증가할 수록 금형에 작용하는 절점력은 감소하였고, 곡률부에서 속도분포가 크게 나타났다. 금형 예열 온도에 따른 마멸 해석 결과와 금형 강도 해석 결과는 Fig. 9 에 나타내었다. 각각의 결과는 금형 수명이 가장 적은 곡률부 측정 지점에 대해 나타내었다. 초기 금형 온도가 400°C 인 경우에 point 2 에서의 마멸깊이( $\delta$ )는 200°C 일 때 보다 약 4 배 이상임을 알 수 있다.

금형 예열 온도에 따른 금형 수명 평가를 한 결과 소성변형에 대한 금형 수명 평가 측면에서는 200°C 에서 생산 개수가 가장 높게 나타났으며, 300, 400°C 로 금형 예열 온도가 증가할 수록 생산 개수는 감소하였다. 마멸에 대한 금형 수명 평가 측면에서는 소성변형에 대한 금형 수명 평가에서의 생산 개수보다 높게 나타났으나 예열 온도가 증가할 수록 역시 생산 개수가 감소하였다. Fig. 10 과 Table 3, 4 에 제시된 수명 평가 방법을 통해 평가된 금형예열온도에 따른 금형 수명 평가 결과를 각각 나타내었다.

금형 예열 온도가 증가할 수록 곡률부의 국부적인 온도 상승을 초래하여 열연화에 의한 금형경도가 낮아져 소성 변형, 마멸에 의한 금형 수명이 감소 하였다. 그리고, 금형 예열 온도에 따른 금형 수명은 마멸 보다 금형의 소성 변형에 의해 뚜렷하게 감소하는 것을 알 수 있었다.



(a) Initial die temperature : 200 °C (b) Initial die temperature: 300 °C (c) Initial die temperature: 400 °C

Fig. 7 Temperature distributions for the initial die temperature

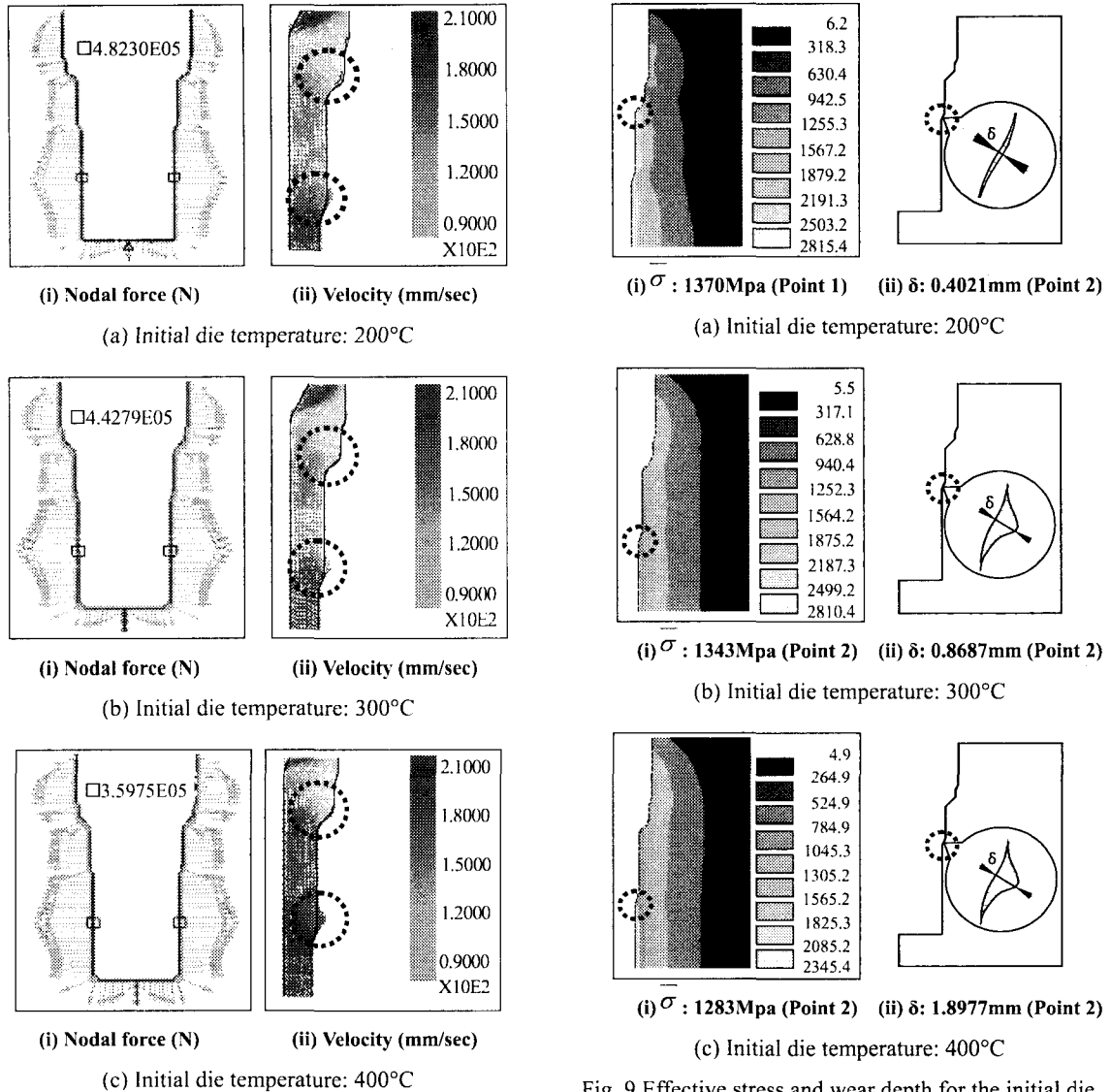


Fig. 8 Nodal force and velocity distributions for the initial die temperature

Fig. 9 Effective stress and wear depth for the initial die temperature

Table 3 Estimation of die life for the initial die temperature: Plastic deformation (forming velocity: 200mm/sec)

Initial die temperature	200°C		300°C		400°C	
	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2
Equal temperature (°C)	579	545	584	585	602	623
Effective stress (MPa)	1370	1443	1243	1343	1166	1283
Tempering parameter (M)	18.2	18.1	18.2	18.2	18.2	18.3
Life time (hr)	11.15	45.79	8.3	7.86	2.9	1.55
Product quantity (ea)	4462	18317	3330	3142	1194	620

Table 4 Estimation of die life for the initial die temperature: Abrasive wear (forming velocity: 200mm/sec)

Initial die temperature	200°C		300°C		400°C	
Measurement point	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2
Wear depth (mm)	0.1245	0.4021	0.2012	0.8687	0.5023	1.8977
Life time (hr)	58.22	18.02	36.02	8.34	14.43	3.82
Product quantity (ea)	23289	7211	14411	3338	5772	1528

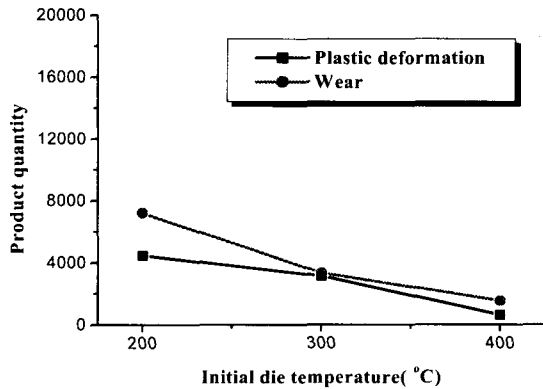


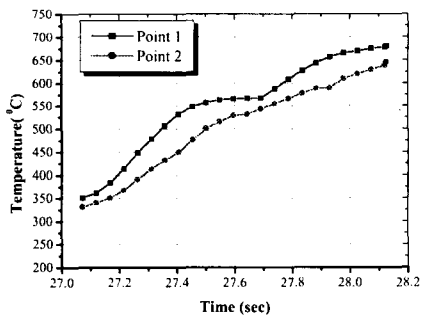
Fig. 10 Estimated results of the tool service life for initial die temperature

### 3.2 성형 속도에 따른 수명 평가

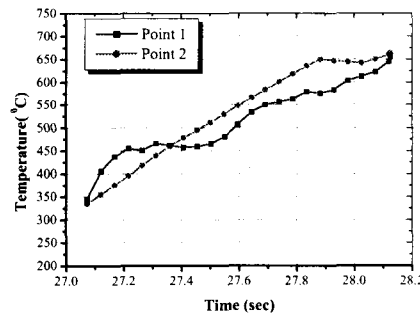
성형 속도가 빠르면 제품 생산 시간을 단축할 수 있으므로 생산량을 높일 수 있다. 그러나 성형 속도가 빠를 수록 성형 하중의 증가 및 금형과 소재의 접촉 압력을 높이게 된다. 때로는 이러한 성형 하중의 증가는 프레스의 용량에 한계를 주어 원하는 제품 성형이 불가능하게 된다. 성형 속도에 따른 금형의 소성변형 및 마멸에 대한 금형 수명 평가를 하기 위해 성형 속도 250, 300mm/sec 에

따른 피니쉬 공정 동안의 곡률부 측정 지점에서의 온도변화를 Fig. 11 에 나타내었다. 성형 속도 300mm/sec 에서는 성형 중에 point 1 에서 보다 point 2 에서 고온 소재와의 접촉 시간이 길어져 온도가 높게 나타났다. 금형 절점력과 속도 분포를 Fig. 12 에 나타내었다. 성형 속도가 빠를 수록 소재 내부의 온도 상승으로 변형률 속도 증가로 변형 저항이 감소하여 금형 절점력은 상대적으로 작아졌고, 곡률부에서 속도분포가 크게 나타났다. 성형 속도에 따른 마멸과 금형 강도 해석 결과는 Fig.13 에 나타내었다. 각각의 결과는 금형 수명이 가장 적은 곡률부 측정 지점에 대해 나타내었다. 성형 속도가 300mm/sec 일 때 point 2 에서의 마멸 깊이(δ)는 200mm/sec 일 때보다 약 3 배 정도임을 알 수 있다.

성형 속도에 따른 금형 수명 평가를 한 결과 소성 변형에 대한 금형 수명 평가 측면에서는 성형 속도가 200, 250, 300 mm/sec 로 증가할 수록 소성 변형에 대한 금형 수명은 증가하였으나 마멸에 대한 금형 수명은 감소하였다. Fig.14 와 Table 5, 6 에 제시된 수명 평가 방법을 통해 평가된 성형 속도에 따른 금형 수명 평가 결과를 각각 나타내었다.



(a) Forming velocity: 250mm/sec



(b) Forming velocity: 300mm/sec

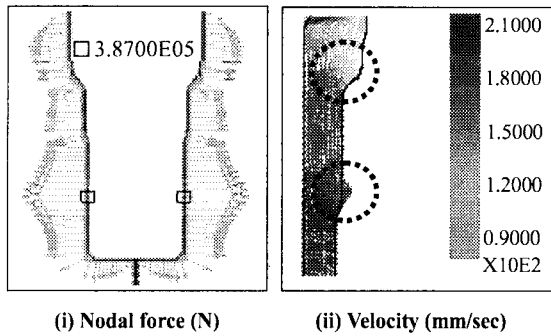
Fig. 11 Temperature distributions for forming velocity

Table 5 Estimation of die life for forming velocity: Plastic deformation (initial die temperature: 200°C)

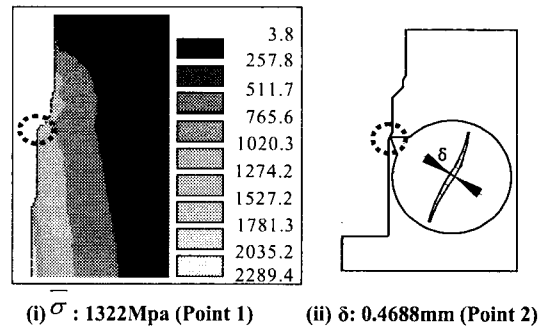
Forming velocity	200mm/sec		250mm/sec		300mm/sec	
Measurement point	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2
Equal temperature (°C)	579	545	570	540	535	553
Effective stress (MPa)	1370	1443	1322	1421	1362	1326
Tempering parameter (M)	18.2	18.1	18.4	18.1	18.5	18.4
Life time (hr)	11.15	45.79	47.28	63.08	427.43	134.64
Product quantity (ea)	4462	18317	18915	25235	170973	53854

Table 6 Estimation of die life for forming velocity: Abrasive wear (initial die temperature: 200°C)

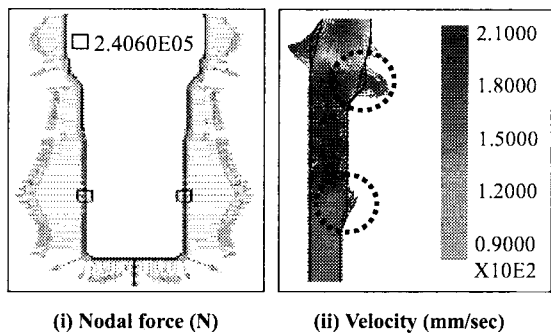
Forming velocity	200mm/sec		250mm/sec		300mm/sec	
Measurement point	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2
Wear depth (mm)	0.1245	0.4021	0.1602	0.4688	0.1874	1.2613
Life time (hr)	58.22	18.02	45.25	15.46	38.68	5.75
Product quantity (ea)	23289	7211	18099	6184	15472	2298



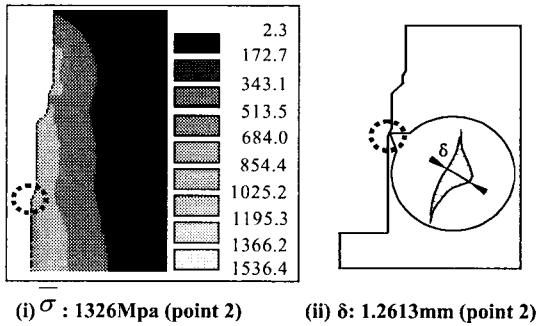
(a) Forming velocity: 250mm/sec



(a) Forming velocity: 250mm/sec



(b) Forming velocity: 300mm/sec



(b) Forming velocity: 300mm/sec

Fig. 12 Nodal force and velocity distributions for forming velocity

Fig. 13 Effective stress and wear depth for forming velocity



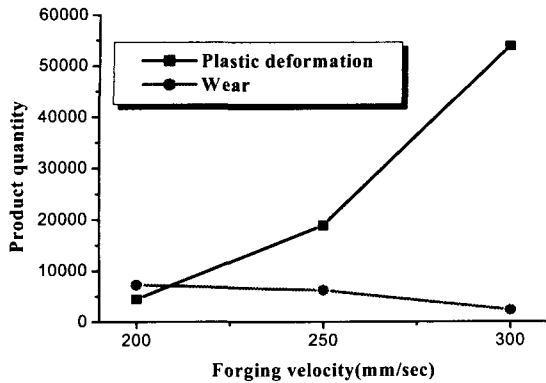


Fig. 14 Estimated results of the tool service life for forming velocity

성형 속도가 200mm/sec 에서는 곡률부의 국부적인 온도 상승으로 인해 소성변형에 의한 금형 수명 감소가 주요인 이었으나 속도가 증가할 수록 곡률부의 짧은 접촉시간에 온도가 낮아져 소성 변형에 의한 금형 수명은 증가하였다. 그러나 접촉 면에서 소재와 금형과의 상대 속도의 증가로 연삭 마멸량이 증가하여 금형 수명은 감소하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 소성변형, 연삭 마멸에 의한 열간 단조 금형의 수명 평가 방법을 제시하였고 생산 개수의 정량적인 비교를 통한 금형 수명 결정 요소인 소성변형과 마멸 중에 주 수명 감소 요인을 파악 하였다. 제시된 수명 평가 방법을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 소성변형에 의한 수명 감소는 국부적인 금형 온도 상승에 의한 금형의 열연화에 의해 나타났고 마멸에 의한 수명 감소는 소재와 금형과의 상대 속도차에 의해 크게 나타났다.
- 2) 금형의 예열온도가 증가할 수록 소성 변형과 마멸에 의한 수명이 감소했으며 특히 소성 변형이 주 수명 감소 원인으로 나타났다.
- 3) 펀치 속도가 증가할 수록 곡률부의 접촉 시간이 감소하여 소성변형 측면에서는 수명 향상을 보였으나 연삭 마멸 측면에서는 수명 감소

를 가져 왔다.

- 4) 제시된 금형의 수명 평가 방법은 열간 성형 공정의 금형 수명 향상을 위해 공정 및 금형설계 시에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀 정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금 및 과학기술부의 NRL 프로그램 지원에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

1. K. Lange, "Modern metal forming technology for industrial production," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp. 2-13, 1997.
2. T. Altan, S. I. Oh, H. L. Gegel, "Metal Forming: Fundamentals and Applications," ASM, Metals Park, 1983.
3. Olivier Brucelle, Gerard Bernhart, "Methodology for service life increase of hot forging tools," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, pp. 237-246, 1999.
4. 조해용, 이기정, 오병기, 이학규, "비대칭 레일 강으로부터 대칭 레일강으로의 열간단조 공정 설계," 한국정밀공학회 춘계발표논문집, 2002.
5. 최재찬, 김병민, 김성원, 김호관, "H-형상 단면의 축대칭 부품에 대한 열간단조 공정설계 및 금형설계," 한국정밀공학회 춘계발표논문집, 1993.
6. Hiroyuki Saiki, "Tribology in Warm and Hot Forming," JSTP International Seminar on Precision Forging, 1997.
7. K. Venkatesan, C. Subramanian, E. Summerville, "Three-body abrasion of surface engineered die steel at elevated temperatures," Wear, Vol. 203-204, pp. 129-138, 1997.
8. 湯淺紘二, 岡本治郎, "温間鍛造用 金型の壽命におけるプレススライドモーシヨンの影響についての考察," 塑性と加工, Vol. 22, No. 241, pp. 133-138, 1981.
9. H. Saiki, Y. Marumo, A. Minami, T. Sono, "Effect

- of the surface structure on the resistance to plastic deformation of a hot forging tool," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 22-27, 2001.
10. D.J. Jeong, D.J. Kim, J.H. Kim, B.M. Kim, T.A. Dean, "Effects of surface treatments and lubricants for warm forging die life," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 544-550, 2001.
  11. P.R. Burte, Y.T. Im, and T. Altan, "Measurement and Analysis of Heat Transfer and Friction During Hot Forging," *Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 112, pp. 332-339, Nov., 1990.
  12. S.L. Semiatin, E.W. Collings, V.E. Wood, and T. Altan, "Determination of the Interface Heat Transfer Coefficient for Non-isothermal Bulk-Forming Processes," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 109, pp. 49-57, 1987.
  13. T. A. Dean, T. M. Silva, "Die Temperatures During Production Drop Forging," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 101, pp. 385-390, 1979.
  14. J. F. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces," *Journal of applied physics*, pp. 981-988, 1953.
  15. P. H. Hansen, N. Bay, "A flexible computer based system for prediction of wear distribution in forming tools," *Advanced technology of plasticity*, Vol. 1, pp. 19-26, 1990.
  16. T. H. Kim, B. M. Kim, J. C. Choi, "Prediction of die wear in the wire-drawing process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 65, pp. 11-17, 1997.
  17. 이진호, 김동진, 김병민, 김호관, "열연화 현상을 고려한 열간 단조 금형의 마멸해석," *한국소성가공학회지*, Vol. 9, No. 1, pp. 43-51, 2000.
  18. J.H. Kang, I.W. Park, J.S. Jae, S.S. Kang, "A study on a die wear model considering thermal softening:(I) Construction of the wear model," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 96, pp. 53-58, 1999.
  19. J.H. Kang, I.W. Park, J.S. Jae, S.S. Kang, "A study on a die wear model considering thermal softening:(II) Application of the suggested wear model," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 94, pp. 183-188, 1999.