

## 열간 단조 공정에서 금형 수명 향상을 위한 공정 설계

이현철\* · 김병민\*\* · 김광호\*\*\*

(2002년 8월 22일 접수)

### Process Design for Improving Tool Life in Hot Forging Process

H. C. Lee, B. M. Kim and K. H. Kim

#### Abstract

This paper explains the process design for improving tool life in the conventional hot forging process. The thermal load and the thermal softening are happened by contact between the hotter billet and the cooler tools in hot forging process. Tool life decreases considerably due to the softening of the surface layer of a tool was caused by a high thermal load and long contact time between the tools and the 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 affect die accuracy and tool life are wear and the plastic deformation of a tool. The newly developed techniques for predicting tool life are applied to estimate the production quantity for a spindle component and these techniques can be applied to improve the tool life in hot forging process.

**Key Words** : Hot Forging, Tool Life, Wear, Plastic Deformation, Thermal Softening, Tempering Parameter, Preform Design

#### 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,

성형 중의 열 사이클, 과도한 금속유동 및 금형의 경도 저하 등에 의해 상대적으로 냉간 가공법에 비해서 짧은 금형수명을 갖는다. 특히 원가 절감, 재료비 감소가 절실히 요구되는 오늘날에는 이러한 금형수명의 연장은 매우 중요한 문제이다.<sup>(1~3)</sup>

열간 단조용 금형의 수명을 결정하는 주요인은 소재와 금형의 접촉면 마찰에 의해서 발생하는 마멸(wear)과 열

\* 부산대학교 일반대학원

\*\* 부산대학교 정민 정형 및 금형가공 연구소

\*\*\* 부산대학교 무기재료공학과

피로에 의한 표면 열크랙(heat crack), 금형의 강도가 소재의 유동응력을 따르지 못하여 발생하는 소성변형(plastic deformation) 등이 있다. 이러한 금형수명 감소 요인들은 서로 분리되어 발생되든지, 동시에 서로 영향을 미치면서 발생되며, 각각의 공정 또는 제품이 요구하는 특성에 따라서 이들 금형 파손 또는 손상의 인자가 바뀌게 되어 서로 다른 비중으로 전체적인 금형의 수명에 영향을 미치게 된다.<sup>(4-5)</sup>

본 연구에서는 열간 성형에서 지배적으로 발생하는 금형의 소성변형 및 연삭 마멸에 의한 수명 평가 방법을 제시하였다. 그리고 제시된 금형 수명 평가 방법을 적용하여 실제 현장에서 생산중인 스펀들 부품의 피니쉬 공정에 대해 금형수명을 생산갯수로 계산하고 기존 공정설계를 수정하여 금형수명이 향상된 새로운 공정순서를 제시하였다.

## 2. 열간 단조 금형의 수명 평가

본 연구에서는 열간 단조의 정량적인 금형수명 평가 방법으로 금형이 열연화 되어 항복강도에 도달할 때까지의 경도유지시간으로 평가하는 소성변형에 대한 금형수명 평가 방법과 시간과 온도에 따른 금형의 고온에서 경도 변화와 표면층의 마멸량 증가에 따른 깊이 방향의 경도 변화를 고려한 연삭 마멸에 대한 금형수명 평가 방법을 제시하였다.

### 2.1 소성변형에 대한 열간 금형수명 평가 방법

열간 단조 공정에서 금형은 열연화 현상으로 인한 점진적인 항복강도의 감소로 인해 어느 시점에 도달하면 금형의 국부적인 소성변형이 발생하게 된다. 열간 단조 금형은 템퍼링 과정을 거치면서 경도는 다소 감소하나 인성은 증가하게 된다. 이러한 템퍼링 영향에 의한 경도 하락은 성형과정에서 나타나는 반복적인 열 영향에 의한 금형경도의 하락과 동일한 특성을 나타내므로 금형의 경도를 시간과 온도의 함수로 표현할 수 있다. 따라서 열간 단조 금형의 소성변형에 대한 금형수명 평가를 위해 고온에 의한 경도 변화를 평가할 수 있는 템퍼링 파라메타(M)를 적용하였다.<sup>(6)</sup>

소성변형에 대한 금형수명 평가를 위하여 템퍼링 파라메타(M)에서 템퍼링시간 t를 성형 중 금형의 강도가 열연화에 의해 항복강도에 도달할 때까지의 경도 유지 시간 t<sub>h</sub>로 바꾸어 식(1)과 같이 나타내어 금형수명 평가를 하였다.

$$t_h = \exp\left(\frac{M_{yield} \times 1000}{T_{eq}} - C\right) \quad (1)$$

여기서, M<sub>yield</sub>는 항복강도에 도달 시의 M값이다. 성형에서부터 취출 되기까지 금형의 온도 변화에 대해 상당 온도(T<sub>eq</sub>)로 나타내었다. C는 재료상수로 일반적인 탄소강의 C값은 대략 20이다. 열연화 실험을 통해 STD61 열간 금형강의 상당온도, 경도, 항복강도의 상호 관계를 나타낸 주템퍼링 곡선은 Fig. 1과 같다.

실제 적용한 금형은 1030℃ 담금질 뒤 550℃에서 3시간 1차 템퍼링, 600℃에서 3.5시간 2차 템퍼링한 것이다. 금형 표면은 520℃에서 14시간 동안 이온 질화 처리를 하였다. 따라서 금형수명 평가를 위한 t<sub>h</sub> 값은 1, 2차 템퍼링 시간까지 고려하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{yield} = T_{eq} \{C + \log(t_h + t_1 + t_2)\} \times 10^{-3} \quad (2.1)$$

$$t_h = \exp\left(\frac{M_{yield} \times 1000}{T_{eq}} - C\right) - t_1 - t_2 \quad (2.2)$$

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

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

여기서 t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>는 T<sub>eq</sub>동안 1, 2차 M값이 유지되는 시간이다. 먼저 주 템퍼링 곡선에서 성형 해석을 통해 구한 항복강도와 상당온도 값을 읽어 M<sub>yield</sub> 값을 구했다. 1, 2차 T<sub>eq</sub>동안 M값이 유지되는 시간 t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>를 식(2.2)에 대입하여 경도 유지 시간 t<sub>h</sub>를 구했다. 마지막으로 식(2.2)에서 구한 경도 유지 시간을 최종 금형의 1사이클 시간(cycle time)으로 나누어 생산 개수를 예측하였다.

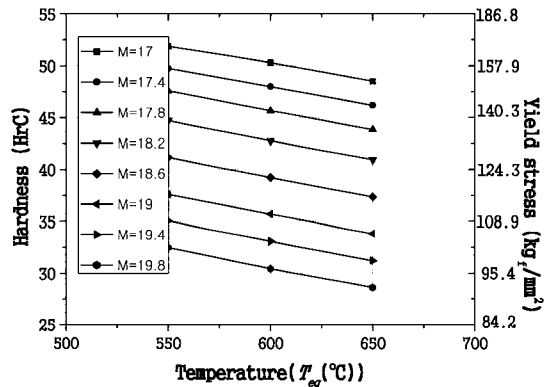


Fig. 1 Master tempering curves of STD61

### 2.2 연삭마멸에 대한 금형수명 평가 방법

마멸에 관계된 인자들은 접촉면의 온도, 접촉돌기의 분포, 접촉면의 거칠기 등의 접촉상태와 금형 재료의 경도, 금형에 작용하는 수직압력, 미끄럼길이, 윤활조건 등이며, 특히 열간 단조 공정에서 금형의 마멸은 제품의 치수 정밀도 및 제품 표면정도에 문제가 된다.<sup>(7~10)</sup>

열간 단조 금형 마멸 계산에는 두 물체의 접촉 시 마멸 깊이를 수치적으로 계산할수 있는 Archard 마멸 모델을 적용하였고 열간 단조 금형의 수명평가를 위해 시간과 온도에 따른 금형의 고온에서 경도 변화와 표면 층의 마멸량 증가에 따른 깊이 방향의 경도 변화를 고려한 수정 마멸모델 식(3)은 다음과 같다.

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

여기서  $W$ 는 마멸깊이,  $h$ 는 금형의 표면경도,  $M$ 은 템퍼링 파라메타,  $N$ 은 스텝번호,  $\sigma_n$ 은 수직응력,  $v_s$ 는 미끄럼 속도,  $\Delta t$ 는 시간증분,  $k$ 는 재료와 접촉조건에 의존하는 상수로서 고온마멸실험을 통해 구했다. 먼저 제품의 성형 해석을 통하여 금형면에 작용하는 압력( $\sigma_s$ ), 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(3)에 대입하여 마멸 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 1회 성형 공

정 동안 금형의 마멸깊이( $W$ )을 계산하고 이 마멸깊이에 해당하는 경도 값을 예측하였다. 이 값들을 한계 값들과 비교하여 한 공정에 대한 금형의 수명을 평가하였다. 마멸깊이가 허용 값보다 작고, 경도 값이 한계 값 이상이면 금형의 형상을 마멸된 형상으로 변경하여 다시 마멸 해석을 수행하고 금형의 수명을 예측하였다.

최종 금형의 마멸 깊이를 허용 마멸깊이로 나누어 생산 개수를 평가하였다. 이상에서 제시한 마멸에 대한 금형수명 평가 방법을 정리하면 Fig. 2와 같다.

### 3. 금형수명 해석 및 결과

본 연구에서 제시된 수명 예측기법의 적용을 위해 금형수명에 가장 큰 영향을 주는 금형 곡률부(Point 1,2)와 펀치 코너부(Point 3)를 가진 Fig. 3과 같은 열간 단조 제품을 선정하였다. 본 연구의 대상 제품은 열간 축대칭 제품이며, Fig. 4와 같이 예비설정(pre-upsetting) 공정, 예비성형(preform) 공정, 피니쉬 (finisher) 공정의 3 단계로서 실제 현장에서 제조 되고 있다.

본 제품의 특징은 높이가 320mm, 최대직경이 130mm 이고, 긴압출부를 가지고 있다. 외경이 3단으로 이루어져 있으며, 기계가공을 최소화할 수 있도록 밑폐단조로 성형되기 때문에 일반적인 단조에 비해 각단의 곡률부 라운드의 치수 정밀도가 상당히 중요하다. 또한 성형 길이가 길어 펀치 코너부와 고온 소재와의 긴 접촉시간으로 펀치 코너부에서 열연화가 일어나 펀치 수명이 매우 짧다. 따라서 금형 곡률부(Point 1,2)와 펀치 코너부(Point 3)에 대하여 공정 설계에 따라 금형수명 평가를 수행하였다. Table 1에 성형해석 조건을 나타내었다.

#### 3.1 현 공정의 금형수명 해석

다단 열간 단조 공정 설계를 하기 위한 공정 단계는 예비설정(pre-upsetting) 공정, 예비성형(preform) 공정과 최종 제품을 성형하는 피니쉬(finish) 공정으로 나누어진다.<sup>(11~13)</sup>

열간 축대칭 제품을 성형하기 위해 각 공정에서 제품의 각 단을 성형하는 공정 설계로서 앞세팅 공정에서는 열간단조품의 첫째단을 성형하고, 예비성형 공정에서는 둘째단을 성형하고 마지막 최종 공정에서는 최종 제품 치수를 성형하는 공정으로 설계하여 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM을 이용한 성형해석을 수행하였다. Fig. 4는 현재 작업중인 스피들 부품의 각단을 고려한 공정 순서도이다. 성형 해석 결과 예비성형 공정에 비해 최종 공정에서 변형률이 크게 나타나 금형에 큰 변형저

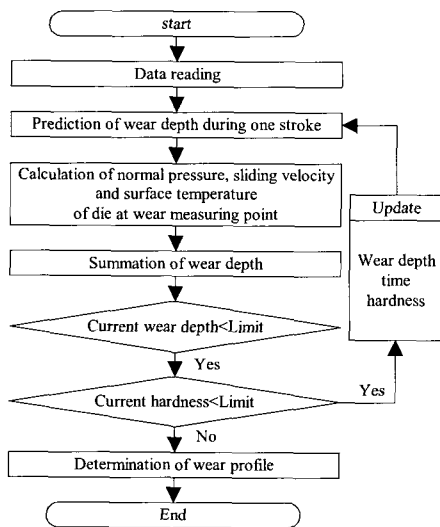


Fig. 2 Flow chart for abrasive wear analysis

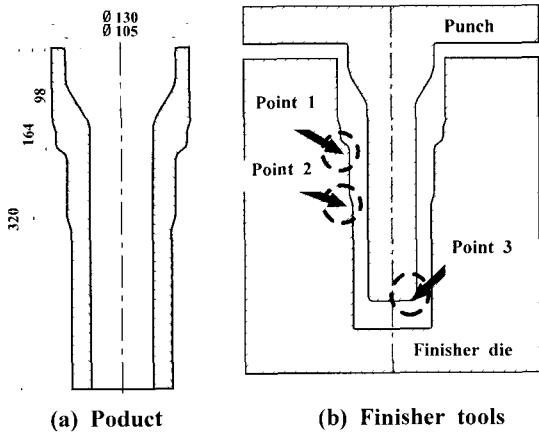


Fig. 3 Shape and dimensions of a product and finisher tools

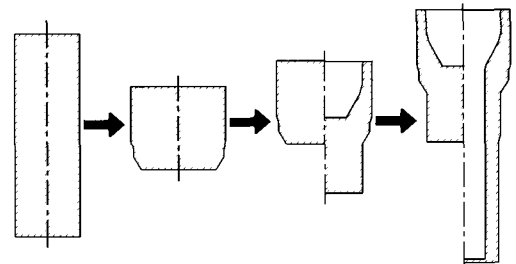
Table 1 Process conditions for Mechanical analysis

Billet	Material	SM45C
	Thermal conductivity	74.93N/sec
	Emissivity	0.3
	Heat capacity	3.602N/mm <sup>2</sup> C
Tools	Material	STD61
	Thermal conductivity	28.6N/sec <sup>2</sup> C
	Emissivity	0.3
	Heat capacity	3.574N/mm <sup>2</sup> C
	Surface treatment	Ion nitride
Forging conditions	Friction factor(m)	0.3
	Heat transfer coefficient	11.3N/secmm <sup>2</sup> C
	Convection coefficient	0.02N/secmm <sup>2</sup> C
	Initial billet temp.	1240 <sup>o</sup> C
	Initial die temp.	250 <sup>o</sup> C
	Forging velocity	250mm/sec

항을 가하게 되고, 특히 Fig. 5에서와 같이 급형 곡률부와 펀치 코너부에서 국부적인 잔류응력의 집중 및 변형률이 집중적으로 작용하여 제품의 표면 결함 및 강도

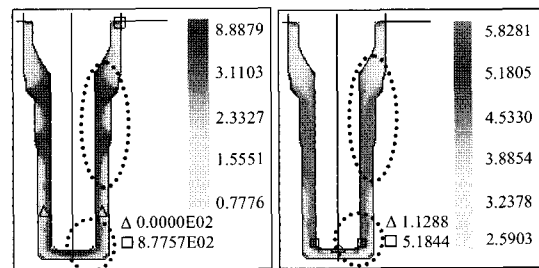
저하를 야기키는 것으로 나타났다. 현 공정의 급형수명에 지배적인 영향을 주는 소성변형 및 마멸에 대한 수명 평가를 하기 위해 피니쉬 공정 동안의 곡률부 측정 지점에서의 온도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 최종 공정에서의 성형 길이(220.85mm)가 길어 고온 소재와 급형과의 긴 접촉시간으로 펀치 코너부와 급형 곡률부에서 높은 성형 온도를 보였다. 현 공정에 대한 마멸 해석 결과와 급형 강도 해석 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 급형 곡률부보다 펀치 코너부에서 소재 표면 온도가 높아 펀치 코너부의 유동응력은 급형 곡률부에 비해 낮게 나타났다. 펀치 코너부 Point 3에서의 마멸깊이( $\delta$ )는 급형 곡률부 Point 2에서 보다 약 3배 정도 높음을 알 수 있다.

현 공정에 대한 피니쉬 다이 수명 측면에서는 최종 공정 단계에서의 많은 재료유동에 의해 접촉시간이 길어 곡률부의 온도가 증가함으로써 급형수명이 짧게 나타났다. 또한 펀치 수명 측면에서도 최종 단계에서의 펀치 성형길이가 길어 긴 접촉시간으로 펀치 코너부의 온도 상승을 가져와 수명 감소를 가져왔다. Table 2, 3에 현 공정에서의 급형수명 평가 결과를 나타내었다.



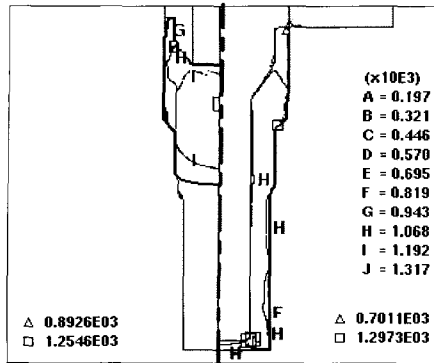
Initial Billet Pre-upsetting Preform Final Product

Fig. 4 Process sequence for conventional hot forging process

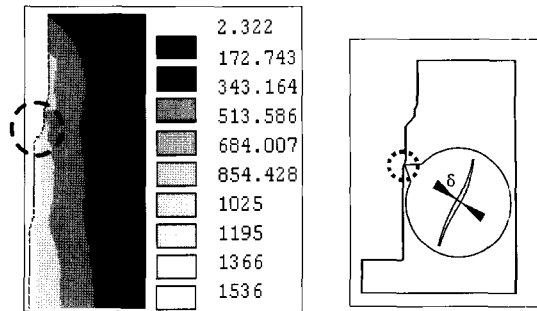


(a) Effective stress (MPa) (b) Effective strain

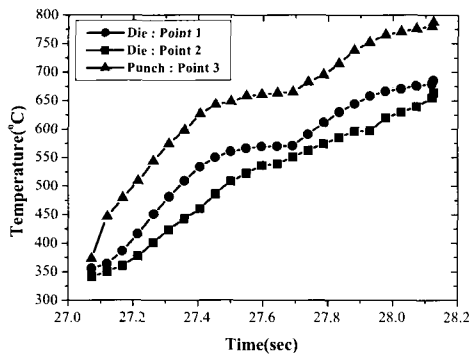
Fig. 5 Effective stress and effective strain of a final product for conventional hot forging process



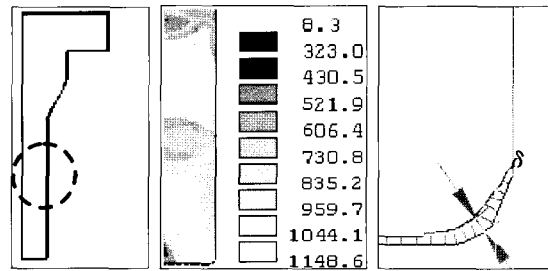
(a) Billet



(a) Die



(b) Tools



(b) Punch

Fig. 6 Temperature distributions for conventional hot forging process during finisher process

Fig. 7 Effective stress and wear depth for conventional hot forging process

Table 2 Estimation of tools life for conventional hot forging process considering plastic deformation

Tool	Die		Punch
	Point 1	Point 2	Point 3
Measurement point			
Equal temperature(°C)	575	556	649
Effective stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	134.2	141.1	102.4
Tempering parameter (M)	18.2	18.2	19.2
Life time (hr)	14.13	44.75	6.37
Product quantity (ea)	5650	17900	2548

Table 3 Estimation of tools life for conventional hot forging process considering abrasive wear

Tool	Die		Punch
	Point 1	Point 2	Point 3
Measurement point			
Wear depth (mm)	0.4100	0.6988	1.6075
Product quantity (ea)	7071	4149	1803

### 3.2 수정된 공정설계에 대한 금형수명 해석

현재 공정 순서에서 피니쉬 공정에서 압출길이를 길게 하므로써 금형수명이 짧았던 결과를 토대로 셋째단 시작점 부근의 응력 집중을 피하고 제품 품질을 향상시키기 위해 예비성형 공정에서 길이 방향으로 충분히 압출을 시키고, 첫째단의 형상을 마지막 단계에서 성형하는 공정으로 수정하였다. 특히 최종 성형시 최적의 단면적 감소율이 성형되기 위해 예비성형체를 최종 성형에서 단면적 감소율이 50%가 되도록 설계하였으며, 최종 성형시 변형률을 줄이기 위해 첫째단 성형 체적만큼 체적을 분배시켜 예비성형체를 설계하였다. Fig. 8은 펀치 성형 길이를 고려한 수정된 공정순서를 나타내고 있다.

성형 해석 결과 Fig. 9를 보면 제품 성형시 불안정한 재료유동에 의한 유동 결함은 발견되지 않았다. 또한 전체적인 변형률 분포가 균일하고, 국부적인 응력집중은 제품 끝단에서 나타났지만 응력집중 크기가 작아 제품성형에 향상을 가져왔다.

수정된 공정설계에 대한 소성변형 및 마멸에 대한 수명 평가를 하기 위해 피니쉬 공정 동안의 곡률부 측정 지점에서의 온도 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 최종 공정의 성형 길이(179.9mm)가 짧아져 고온 소재와 금형과의 접촉시간이 감소하여 펀치 코너부와 금형 곡률부에서 성형 온도가 낮아졌다.

수정된 공정설계에 대한 마멸 해석 및 금형 강도 해석 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 금형 곡률부와 펀치 코너부에서의 유효응력은 현 공정에 비해 낮게 나타났다. 펀치 코너부 Point 3에서의 마멸깊이( $\delta$ )는 금형 곡률부 Point 2에서 보다 약 2배 정도 높음을 알 수 있다. Table 4. 5에 펀치 성형 길이를 고려한 공정에서의 금형수명 평가 결과를 나타내었다. Fig. 12는 현재 작업 중인 공정과 수정된 공정에 대한 금형수명을 비교한 것으로서 펀치 성형 길이를 고려한 공정에서는 금형수명 측면에서는 예

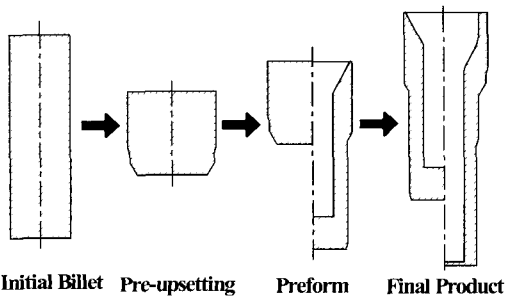


Fig. 8 Process sequence for redesigned hot forging process

성형체에서 최종 제품 형상으로의 변화가 작아 곡률부에 영향을 덜 미쳐 온도 상승을 적게 가져와 금형수명은 향상되었다. 펀치수명 측면에서는 2공정에서 압출부로의 펀치 성형길이를 충분히 하여 최종 공정에서의 금형수명은 향상되었다.

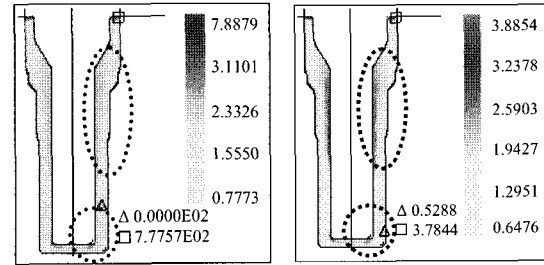


Fig. 9 Effective stress and effective strain of a final product for redesigned hot forging process

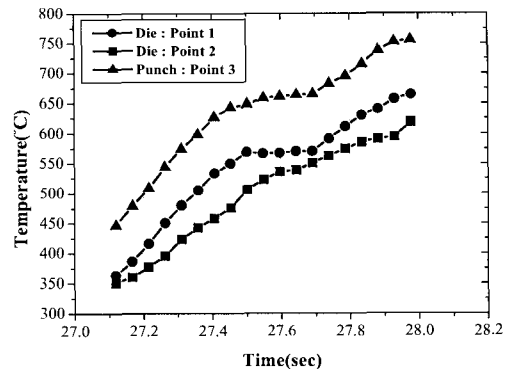
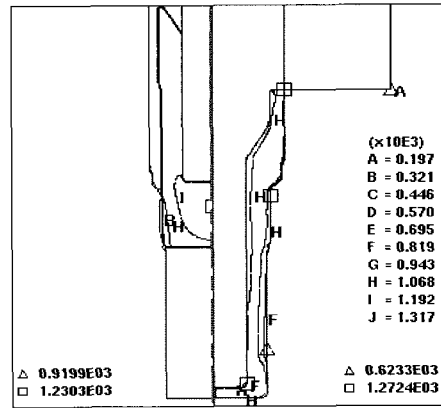


Fig. 10 Temperature distributions for redesigned hot forging process during finisher process

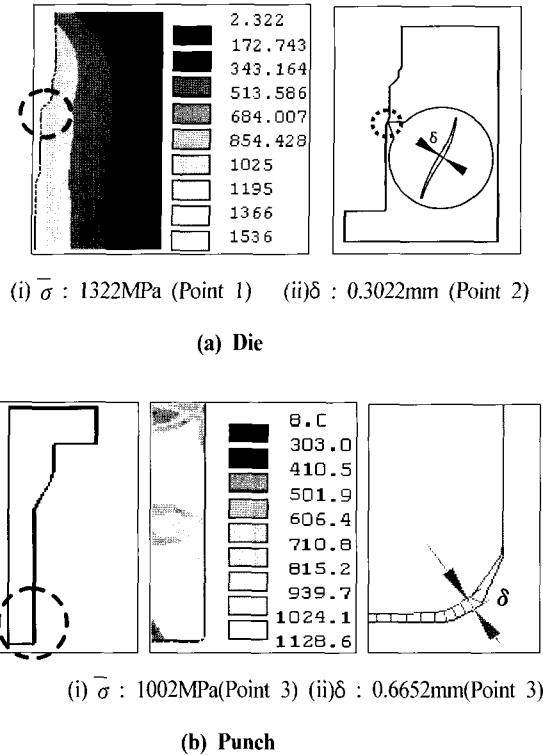
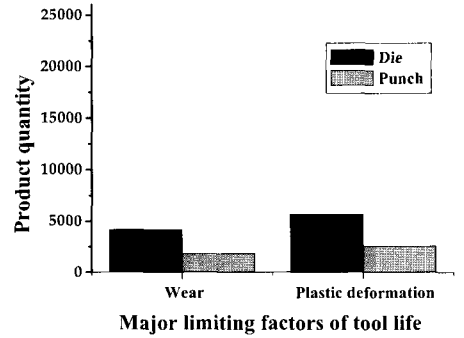
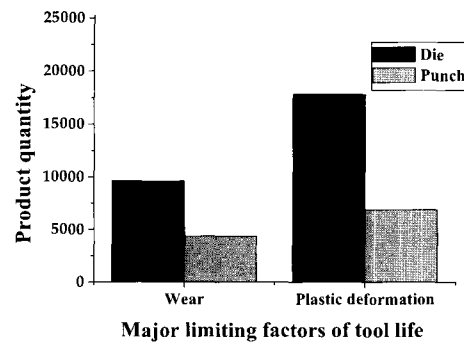


Fig. 11 Effective stress and wear depth for redesigned hot forging process



(a) Conventional hot forging process



(b) Redesigned hot forging process

Fig. 12 Estimated results of tools lif

Table 4 Estimation of tools life for redesigned hot forging process considering plastic deformation

Tool	Die		Punch
	Point 1	Point 2	Point 3
Measurement point			
Equal temperature(°C)	560	540	635
Effective stress (kg/mm <sup>2</sup> )	132.2	138.1	100.2
Tempering parameter (M)	18.4	18.2	19.4
Life time (hr)	44.52	61.14	17.26
Product quantity (ea)	17809	24457	6903

Table 5 Estimation of tools life for redesigned hot forging process considering abrasive wear

Tool	Die		Punch
	Point 1	Point 2	Point 3
Measurement point			
Wear depth (mm)	0.1988	0.3022	0.6652
Product quantity (ea)	14585	9595	4358

#### 4. 결 론

본 연구에서는 소성변형에 의한 금형수명 평가 방법 및 연삭 마멸에 의한 수명 방법 평가를 제시하였고 생산 개수의 정량적인 비교를 통한 금형수명 결정 요소인 소성변형과 마멸 중에 주 수명 감소 요인을 파악하였다. 열간 단조 금형의 수명 예측 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제품 각단을 고려한 순차적 공정에서의 다이 수명 측면에서는 최종 공정 단계에서의 다이 곡률부에서 국부적인 잔류응력 및 변형률이 집중적으로 작용하여 곡률부의 온도 상승이 크게 되므로써 다이 수명은 짧게 나타났고 마멸이 주 수명 감소 원인으로 나타났다.

(2) 제품 각단을 고려한 순차적 공정에서의 펀치 수명 측면에서는 최종 단계에서의 펀치 성형길이가 길어 고온 소재와의 접촉시간이 길어 높은 온도 상승을 가져와 다이 수명에 비해 상당히 짧게 나타났고 마멸이 주 수명 감소 원인으로 나타났다.

(3) 펀치 성형 길이를 고려한 수정된 공정에서의 다이 수명 측면에서는 예비성형체에서 최종 제품 형상으로의 변화가 적어 다이 곡률부에 상대적으로 낮은 온도 상승을 가져와 다이 수명은 향상되었고 마멸이 주 수명 감소 원인으로 나타났다.

(4) 펀치 성형 길이를 고려한 공정에서의 펀치 수명 측면에서는 2공정에서 압출부로의 펀치 성형길이를 충분히 하여 최종 공정에서의 펀치 성형 길이가 순차적인 성형을 고려한 공정에 비해 짧아 펀치 수명은 순차적인 성형을 고려한 공정보다 향상되었고 마멸이 주 수명 감소 원인으로 나타났다.

(5) 제시된 금형수명 평가 방법은 열간 성형 공정의 금형수명 향상을 위해 공정 및 금형설계 시에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

(1) Kurt Lange, "Handbook of Metal Forming," McGraw

Hill, 1985.

- (2) J. F. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces," Journal of applied physics, pp. 981~988, 1533.
- (3) 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.
- (4) Hiroyuki Saiki, "Tribology in Warm and Hot Forming," JSTP International Seminar on Precision Forging, 1997.
- (5) 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 Material Processing Technology, Vol. 113, pp. 22~27, 2001.
- (6) 湯淺紘二, 岡本治郎, "溫間鍛造用 金型の壽命におけるフレックスライドモーショソの影響についての考察," 塑性と加工, Vol. 22, No.241, pp. 133~138, 1981.
- (7) A. K. Singh, B. W. Rooks, S. A. Tobias, "Factors affecting die wear," WEAR, 25, p. 271, 1973.
- (8) 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.
- (9) T. H. Kim, B. M. Kim, J. C. Choi, "prediction of die wear in the wire-drawing process," Journal of Material Processing Technology, Vol. 65, pp. 11~17, 1997.
- (10) 이진호, 김동진, 김병민, 김호관, "열연화 현상을 고려한 열간 단조 금형의 마멸해석," 한국소성가공학회, Vol. 9, No. 1, pp. 43~51, 2000.
- (11) B.S. Kang, J.H. Lee, B.M. Kim, J.C. Choi, "Process design in flashless forging of rib/web shaped plane-strain components by the finite element method," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 47, pp. 291~309, 1995.
- (12) E. Doege, R. Bohnsack, "Closed die technologies for hot forging," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 98, pp. 165~170, 2000.
- (13) V. Vazquez, T. Altan, "New concepts in die design-physical and computer modeling applications," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 98, pp. 176~181, 2000.