

## 금형냉각방법에 따른 열간단조 금형의 수명 평가

김병민\* · 김동환\*\*

### Estimation of Die Service Life for Die Cooling Method in Hot Forging

B.M. Kim, D.H. Kim

#### Abstract

This paper explains the die cooling method for improving tool life in the hot forging process. In continuous forming operation such as hot forging process, performed at high speeds, temperature increases of several hundred degrees may be involved. Die hardness was reduced due to thermal softening. Factor of die fracture are wear and plastic deformation of die due to hardness reduction by high temperature. Because die service life was reduced due to this phenomenon during hot forging, quantified data for optimal die cooling method is required. The new developed techniques for predicting tool life 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, Die cooling method

#### 1. 서 론

열간단조에 있어서 소재의 온도를 1200 ~ 1240°C로 연속성형을 할 경우, 금형의 온도는 500°C 이상이 되고, 템퍼링 온도를 넘어서 열연화 현상을 야기한다. 즉, 온도상승으로 인한 경도의 저하는 마멸, 금형의 소성변형, 그리고 반복되는 열 피로에 의한 열 피로 파괴 등 금형을 폐기 처분해야 하는 원인이 된다. 따라서 열간단조 금형 수명 향상을 위하여 냉각방법에 대한 정량화된 데이터가 절실한 실정이다. 지금까지

산업 현장에서는 냉각에 따른 금형수명 향상에 대한 중요성을 충분히 인식하지 못함으로 인해 냉각을 전혀 하지 않거나 금형에 직접 분사하는 방식이 사용되어져 왔다.<sup>(1,2)</sup>

본 연구에서는 금형에 직접 냉각수를 분사하는 냉각 방식과 금형에 구멍을 뚫어 냉각수를 순환시키는 냉각 방식의 이상적인 두 가지 방법에 대해 해석을 수행하고 제안된 금형수명 평가 방법으로 자동차 축 제품의 열간단조 금형에 대해 수명 평가에 적용하여 열간단조 금형의 주 수명 감소 요인을 파악하였다.

\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

\*\* 진주국세대학교 자동차공학과

## 2. 열간단조 금형의 수명 평가

### 2.1 소성변형에 대한 열간 금형수명 평가

본 연구에서는 열간단조 공정에서 금형의 소성변형을 고려한 금형수명 평가를 위해 고온에 의한 경도 변화를 평가할 수 있는 템퍼링 파라메타( $M$ )를 적용하였다.<sup>(3)</sup> 소성변형에 대한 금형수명 평가를 위하여 템퍼링 파라메타에서 템퍼링 시간을 성형 중 금형 강도가 열연화에 의해 항복강도에 도달할 때까지의 경도 유지 시간  $t_h$ 로 바꾸어 식(1)과 같이 나타내어 금형수명을 평가 하였다.

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

여기서,  $M_{yield}$ 는 항복강도 도달 시의  $M$  값이다.  $C$ 는 재료상수로 일반적인 탄소강의  $C$  값은 대략 20이다. 성형에서부터 취출 되기까지 금형의 온도 변화에 대해 상당온도( $T_{eq}$ )로 식 (2)와 같이 나타내었다.

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

여기서  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ 은 온도 진폭 중 최고 및 최저 온도이다. 열연화 실험을 통해 STD 61 열간 금형강의 상당온도, 경도, 항복강도의 상호 관계를 나타낸 주템퍼링 곡선은 Fig. 1과 같다. 먼저 주 템퍼링 곡선에서 성형 해석을 통해 구한 항복강도와 상당온도 값을 읽어  $M_{yield}$  값을 구하고, 이를 식(1)에 대입하여 경도 유지 시간  $t_h$ 를 구했다. 마지막으로 식(1)에서 구한 경도 유지 시간을 최종 금형의 1사이클 시간(cycle time)으로 나누어 생산 개수를 예측하였다.

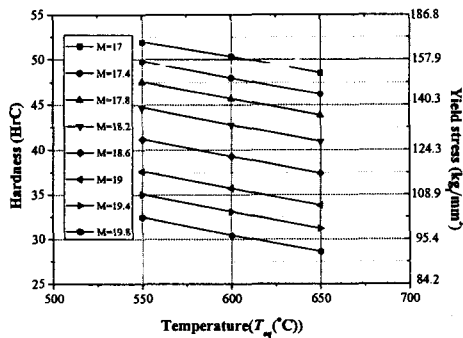


Fig. 1 Master tempering curves of STD61

### 2.2 연삭마멸에 대한 열간 금형 수명 평가

열간단조 금형 마멸 계산에는 두 물체의 접촉 시 마멸 깊이를 수치적으로 계산할 수 있는 Archard 마멸 모델을 적용하였고, 열간단조 금형의 수명 평가를 위해 시간

과 온도에 따른 금형의 고온 경도 변화와 표면층의 마멸량 증가에 따른 깊이 방향의 경도 변화를 고려한 아래의 수정된 마멸 모델을 적용하였다.<sup>(4,5)</sup>

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

여기서  $W$ 는 마멸깊이,  $h$ 는 금형의 표면경도,  $M$ 은 템퍼링 파라메타,  $\sigma_n$ 은 수직응력,  $v_s$ 는 미끄럼 속도,  $\Delta t$ 는 시간증분,  $k$ 는 재료와 접촉조건에 의존하는 상수로서 고온 마멸 실험을 통해 구해진다. 마멸에 대한 금형 수명 평가 방법은 Fig. 2와 같다.

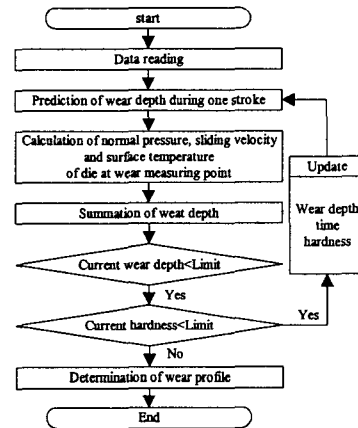
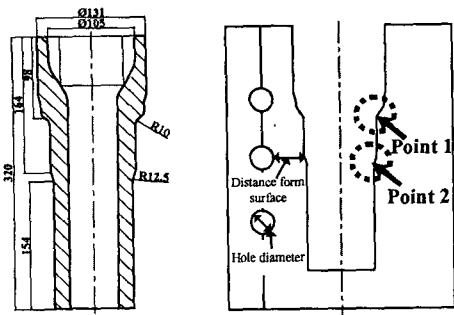


Fig. 2 Flow chart for abrasive wear analysis

## 3. 냉각 방법에 따른 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. 3과 같은 열간단조 제품을 선정하였다. 본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM을 이용하여 자동차 기계 부품인 후방 압출 제품을 대상으로 옆세팅 공정, 블로커 공정 그리고 최종(finish) 공정의 세 단계 (Fig. 4)에 대한 성형해석을 수행하였다.

금형에 직접 분사하면서 냉각시키는 방법은 성형이 계속될수록 금형 온도는 계속 상승하여 결국 열연화 현상으로 인해 금형이 손상된다. 냉각 방법에 따른 금형수명 평가를 위해 직접 스프레이 분사형 냉각 방식과 냉각 물을 이용한 냉각 방식을 비교하였다. 이때 냉각 물은 3개, 냉각 물의 지름은 20mm 그리고 냉각 물과 표면과의 거리는 금형 폭과 금형 강도를 고려하여 30mm로 하였다. 직접 스프레이 분사형 및 냉각 물을 이용한 냉각 방식에 따른 초기 성형에서 온도 분포와 최종 성형 단계에서 온도 분포를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.



(a)Product(mm) (b)Estimated points of die life  
 Fig. 3 Schematic representation of the product and estimated points of tool life

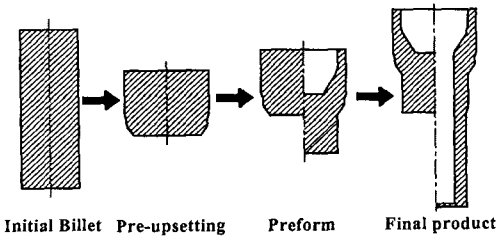
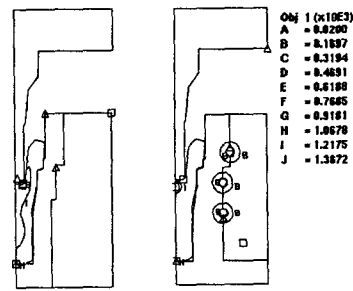


Fig. 4 Process design of a spindle product

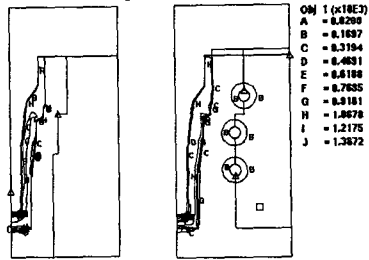
	Materials	SM45
Billet	Thermal conductivity	74.93 N/sec°C
	Emissivity	0.3
	Heat capacity	3.60N/mm°C
	Materials	STD61
Die	Thermal conductivity	28.6N/sec°C
	Emissivity	0.3
	Heat capacity	3.57N/mm°C
	Surface treatment	Ion-nitride
Condi- tions	Friction factor	0.3
	Heat transfer coefficient	11.3N/sec mm°C
	Convection coefficient	0.02 N/sec mm°C
	Billet/die initial temp.	1200, 200°C
	Forging velocity	200mm/sec

최종 공정의 곡률부(Fig. 3, point 1, 2)에서의 온도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 직접 스프레이 분사형 냉각 방식에 비해 냉각 홀을 이용한 냉각 방식에서는 금형 표면온도 하락이 소재 표면온도 하락에 영향을 주어 변형 저항이 증가되어 금형에 작용하는 절점력은 다소 증가하였고, 곡률부에서 속도분포는 작게 나타났(Fig. 8.9).

Fig. 10 과 Fig. 11 에는 금형 냉각 방식에 따른 마멸 해석 결과와 금형 강도 해석 결과를 나타내었고, Table 2 에 직접 분사 방식과 냉각 홀 방식에 따른 금형수명 평가 결과를 나타내었다.



(a)Direct spray (b)Cooling hole  
 Fig. 5 Initial die temperature for die cooling system



(a)Direct spray (b)Cooling hole  
 Fig. 6 Final die temperature for die cooling system

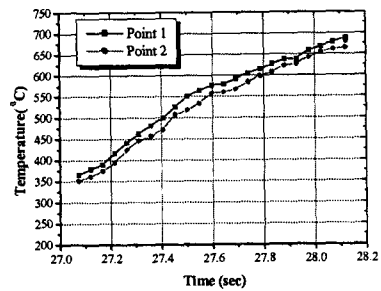


Fig. 7(a) Temperature on die surface for direct spray

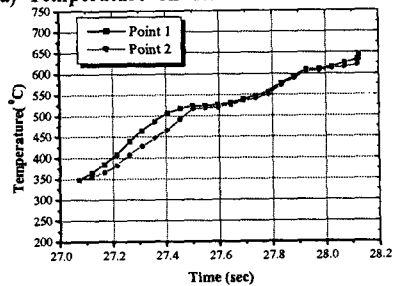


Fig. 7(b) Temperature on die surface for cooling hole

직접 스프레이 분사형 냉각 방식과 냉각 홀을 이용한 냉각 방식에 따른 금형수명 평가를 한 결과 소성변형에 대한 금형수명 평가 측면에서는 냉각 홀을 이용한 방식이 직접 스프레이 분사형 냉각 방식보다 향상 되었다. 직접 분사 냉각 방식에서는 금형 곡률부 온도가 높은 곳에서 수명이 현저히 감소하였고, 마멸에 대한 금형수명

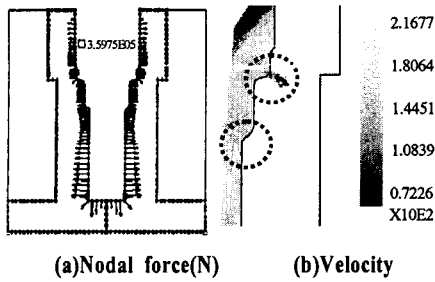


Fig. 8 Nodal force and velocity on die surface for direct spray cooling

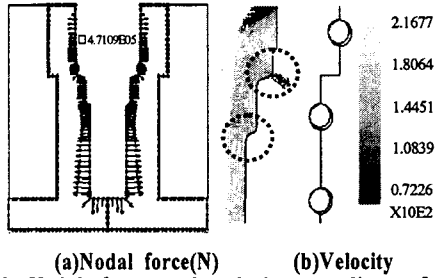


Fig. 9 Nodal force and velocity on die surface for cooling hole

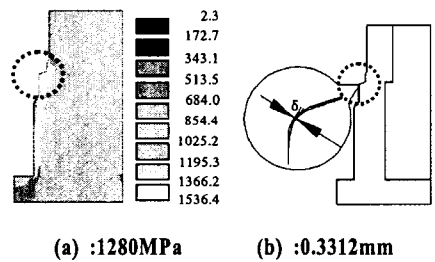


Fig. 10 Effective stress and wear depth for direct spray cooling at point 1(Fig. 3)

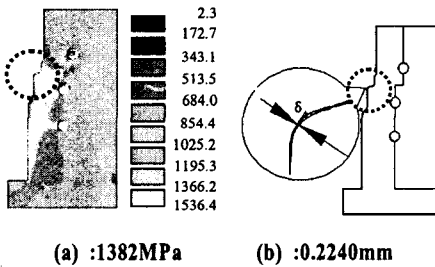


Fig. 11 Effective stress and wear depth for cooling hole at point 1(Fig. 3)

평가에서도 냉각 홀을 이용한 냉각 방식에서는 금형수명이 직접 스프레이 분사형 냉각 방식에서 보다 향상 되었다. 냉각 홀을 이용한 냉각 방식에서는 금형의 초기 예열 온도에 근접하게 지속적으로 금형 온도를 유지 해주면서 금형수명을 향상 시켰다.

Table 2 Estimation of die life for the cooling method considering plastic deformation(1) and wear(2)

Cooling method	Direct spray cooling		Cooling hole	
	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2
Equivalent temperature (°C)	580	571	560	556
Effective stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	128	136	138	139
Tempering parameter(M)	184	183	182	182
Life time (hr)	26.1	29.4	34.9	44.8
Product quantity (ea)	10420	11770	13982	17900
Wear depth (mm)	0.3312	0.3016	0.2240	0.2016
Life time (hr)	21.8	24.0	32.4	35.9
Product quantity (ea)	8755	9613	12944	14382

#### 4. 결론

본 연구에서는 금형 냉각 방법에 따른 열간단조 금형의 수명 향상을 위하여 소성변형과 연삭 마멸에 의한 수명 평가 방법을 제시하였고, 생산 개수의 정량적인 비교를 통한 소성변형과 마멸에 대한 수명 감소 요인을 금형 냉각 방법에 따라 분석 하였다. 그 결과 냉각 홀을 이용한 냉각 방식이 직접 분사 냉각 방식 보다 금형 수명 향상에 효과적임을 알 수 있었고, 직접 분사 냉각 방식의 경우 금형 곡률부 온도가 높은 곳에서 금형 열연화로 인해 수명이 현저히 감소하였다. 제시된 금형 수명 평가 방법은 열간 성형 공정의 금형 수명 향상을 위한 공정 및 금형 설계 시 유용하게 적용 될 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- (1) Altan, T., Oh, S.I., H.L.Gegel, 1983, "Metal forming : Fundamentals and Application", ASM, Metal Park
- (2) 제진수, 2000, "온간단조에서의 냉각방식에 따른 금형수명의 영향", 프레스 기술, Vol. 10, pp.130-137.
- (3) H.Saiki, 1997, "Tribology in warm and hot forming", JSTP Int. Seminar on Precision Forging.
- (4) J.F.Archard, 1953, "Contact and rubbing of flat surface", J. of Applied physics, pp.981-988.
- (5) D.H. Kim, Y. Lee, S.J. Yoo, W.Y. Choo, B.M. Kim, 2003, "Prediction of the wear profile of a roll groove in rod rolling using an incremental form of wear model", Proc. Instn Mech. Engrs., Vol. 217, pp.111-126.