

## 열간 단조 공정의 금형 수명 평가

이현철\*, 박태준(부산대학교 기계공학부 대학원), 고대철(양산대 메카트로닉스과),  
김병민(부산대 정밀정형 및 금형가공 연구소)

### Evaluation of die life during hot forging process

H. C. Lee, T. J. Park(Precision Eng. Dept. PNU), D. C. Ko(Mechatronics Dept., YSC),  
B. M. Kim(ERC for NSDM PNU)

#### ABSTRACT

Hot forging is widely used in the manufacturing of automotive component. The mechanical, thermal load and thermal softening which is happened by the high temperature die in hot forging. Tool life of hot forging decreases considerably due to the softening of the surface layer of a tool caused by a high thermal load and long contact time between the tool and workpieces. The service life of tools in hot forging process is to a large extent limited by wear, heat crack, plastic deformation. These are one of the main factors affecting die accuracy and tool life. It is desired to predict tool life by developing life prediction method by FE-simulation. Lots of researches have been done into the life prediction of cold forming die, and the results of those researches were trustworthy, but there have been little applications of hot forming die. That is because hot forming process has many factors influencing tool life, and there was not accurate in-process data. In this research, life prediction of hot forming die by wear analysis and plastic deformation has been carried out. To predict tool life, by experiment of tempering of die, tempering curve was obtained and hardness express a function of main tempering curve.

Key Words : Hot forging (열간 단조), Tool life prediction (금형 수명 예측), Plastic deformation (소성변형), Wear depth(마멸 깊이), Thermal softening (열연화), Tempering parameter (템퍼링 파라메타), Wear model (마멸 모델)

#### 1. 서론

열간 단조 공정은 부품생산에서의 양산성, 균일성 등의 이점으로 인해 생산 현장에 있어서 중요한 소성가공기술의 하나로 자리잡고 있으며, 실제로 자동차, 산업기계 등의 주요부품을 제조하고 있다. 특히 소재의 특징상 유동응력이 크거나 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 금형을 어떻게 저렴한 비용으로 정밀하게 제작하면

서 금형수명을 연장시키는가가 중요한 문제가 되고 있다.<sup>(1)</sup>

열간 단조용 금형의 수명을 결정하는 주된 요소는 소재와 금형의 접촉면에서 마찰에 의해서 발생하는 마멸과 열피로에 의해서 생기는 표면에서의 열균열(Heat crack), 금형의 강도가 소재의 유동응력을 따르지 못하여 발생하는 소성 변형 등이 있다. 이러한 금형 수명 감소 요소들은 서로 분리된 별개의 현상이 아니라 동시에 서로 영향을 미치면서 발생하며, 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 반대 일 수도 있다.<sup>(6)</sup>

본 연구에서는 소성 변형에 의한 금형 수명 평

가 방법 및 연삭 마멸에 의한 수명 평가 방법을 제시하였다. 그리고 자동차 기계 부품에 적용되는 튜브 후방 압출 제품의 단단 공정 중 최종 금형에 대해 제시된 금형 수명 평가 방법을 적용하여 생산 개수의 정량적인 비교를 통한 주 금형 수명 결정 요인을 파악하였다.

## 2. 열간 단조의 금형 수명 예측기법

금형 수명을 정량적으로 나타내는 것은 매우 곤란하지만 일반적으로 금형 수명 판단 기준은 작업 면에서 결정하는 금형 수명 측면과 품질면에서 결정하는 금형 수명 측면으로 나누어 진다. 전자는 생산능률, 금형의 파손 등이 판단기준으로 되며, 후자는 치수 정도, 표면거칠기 등이 그 기준으로 된다. 본 연구에서는 열간 단조의 정량적인 금형 수명 평가 방법으로 금형강도가 항복강도에 도달할 때까지의 경도 유지 시간으로 평가하는 소성 변형에 대한 금형 수명 평가 방법과 시간과 온도에 따른 금형의 고온에서 경도 변화와 표면층의 마멸량 증가에 따른 깊이 방향의 경도 변화를 고려한 연삭 마멸에 대한 금형 수명 평가 방법을 제시하였다.

### 2.1 열간 단조 금형의 소성변형에 대한 평가

열간 단조에서 금형의 소성변형의 원인은 열연화 현상으로 인한 점진적인 금형강도의 감소로 인해 금형의 국부적인 소성변형이 발생하게 된다.

금형은 템퍼링 과정을 거치면서 금형의 경도는 마르텐사이트 조직에서 고용된 탄소가 석출과정을 거치면서 경도는 다소 감소하나 인성은 증가하게 된다. 이러한 템퍼링 영향에 의한 경도하락은 성형 과정에서 나타나는 반복적인 열 영향에 의한 금형 경도의 하락과 동일한 기구를 이루고 있는 것으로 금형의 경도를 시간과 온도의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 열간 단조 금형의 소성변형에 대한 금형 수명 평가를 위해 고온에 의한 경도 변화를 평가할 수 있는 템퍼링 파라메타(M)를 적용하였다. 템퍼링 파라메타는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 식(1)을 통해서 금형재료의 시간과 온도에 따른 경도의 변화를 평가할 수 있다.

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

여기서 M은 템퍼링 파라메타, T는 절대온도, C는 재료에 의한 상수, t는 템퍼링 시간이다. 일반적으로 탄소강에 대해서 재료에 의한 상수 C는 20으로 주어진다. 또 실제 생산에 있어서는 금형은

단조성형에서부터 취출 되기까지 온도변화를 겪기 때문에 단조 1 사이클 동안의 금형의 온도를 나타내기 위해 상당온도( $T_{eq}$ )를 이용하였다.

상당온도는 근사적으로 식(2)로 나타낼 수 있다.

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

여기서  $T_{max}$ 는 온도 진폭 중 최고 온도,  $T_{min}$ 는 온도 진폭의 최저 온도이다.

소성 변형에 대한 금형 수명 평가를 위하여 템퍼링 파라메타 식(1)에서 템퍼링 시간 t를 성형 중 금형의 강도가 열연화에 의해 항복강도에 도달할 때까지의 경도 유지 시간  $t_h$ 로 바꾸어 식(3)과 같이 나타내어 금형 수명 평가를 하였다.

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

여기서  $t_h$ 는 경도 유지 시간,  $M_{yield}$ 는 항복강도에 도달했을 때의 M 값,  $T_{eq}$ 는 상당 온도이다. 주 템퍼링 곡선에서 경도와 항복강도와의 관계를 파악하면 재료가 완전 소성체일 경우 경도는 항복강도의 3 배로 나타낼 수 있다. 열연화 실험을 통해 STD61 열간 금형강의 상당온도, 경도, 항복강도의 상호 관계를 나타낸 주템퍼링 곡선은 Fig. 1과 같다. 실제 적용한 금형은 1030°C 담금질 된 후 550°C에서 3 시간 1 차 템퍼링, 600°C에서 3.5 시간 2 차 템퍼링한 Q.T.T 열처리 된 것으로 그 열 영향을 받을 경우의  $M_{yield}$ 의 값은 식(4)와 같다.

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

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

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

여기서  $t_1$ 는  $T_{eq}$  동안 1 차 M 값이 유지되는 시간이고,  $t_2$ 는  $T_{eq}$  동안 2 차 M 값이 유지되는 시간이다. 먼저 주 템퍼링 곡선에서 성형 해석을 통해 구한 항복강도와 상당온도 값을 읽어  $M_{yield}$  값을 구했다. 식(4)에서 구한 1 차, 2 차  $T_{eq}$  동안 대한 M 값이 유지되는 시간  $t_1, t_2$ 를 식(4)에 대입하여 경도 유지 시간  $t_h$ 를 구했다. 마지막으로 식(4)에서 구한 경도 유지 시간  $t_h$ 를 최종 금형의 1 사이클 시간 (cycle time)으로 나누어 생산 개수를 예측하였다.

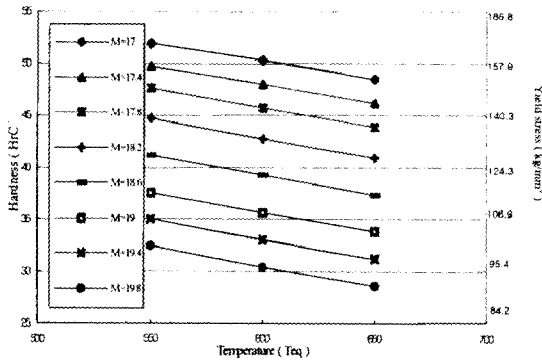


Fig.1 Master tempering curve of STD61

## 2.2 열간 단조 금형의 연삭 마멸에 대한 평가

물체가 상호 접촉한 상태에서 이들 중 한 물체를 다른 물체의 표면에 미끄럼운동이나 굴림 운동을 작용시키면, 상호 접촉한 표면에서 이와 같은 운동의 결과로서 표면으로부터의 재료손실, 즉 마멸이 초래한다. 마멸에 관계된 인자들은 접촉면의 온도, 접촉돌기의 분포, 접촉면의 거칠기 등의 접촉상태와, 금형 재료의 경도, 금형에 작용하는 수직압력, 미끄럼길이, 윤활조건 등에 의해 결정된다. 열간 단조 공정에서 금형의 마멸은 제품의 치수 정밀도 및 제품 표면정도에 문제가 된다.

열간 단조 금형 마멸 계산에는 두 물체의 접촉시 마멸 깊이를 식(5)와 같이 제안한 Archard 마멸 모델을 적용하였다.

$$V = \frac{kPl}{3h} \quad (5)$$

여기서  $V$  는 마멸 체적,  $k$  는 재료와의 접촉 조건에 의존하는 상수,  $P$  는 접촉하중,  $l$  은 미끄럼 길이,  $h$  는 마멸이 발생하는 상태에서 금형의 표면 경도를 나타낸다. 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(6)은 다음과 같다.

$$W = \frac{k}{3h(M, \text{weardepth})} \sum_{i=1}^N (\sigma_n^i v_s \Delta t) \quad (6)$$

먼저 제품의 성형 해석을 통하여 금형면에 작용하는 압력, 소재의 유동속도, 금형의 온도 분포를 구했다. 다음으로 금형재료에 대한 마멸 및 열연화

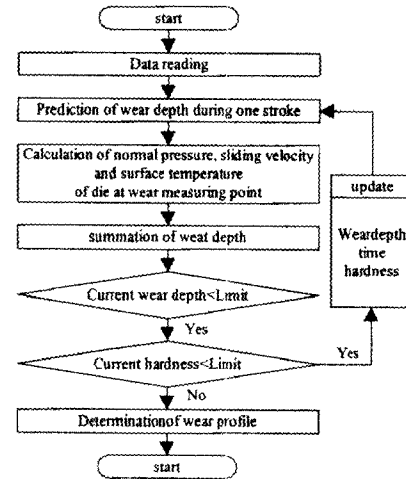


Fig. 2 Flow chart of wear analysis

실험을 통하여 얻은 한계 마멸량 및 한계 고온 온도 값을 수정 마멸 모델 식(6)에 대입하여 마멸 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 한 번의 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 한계치보다 작고, 온도 값이 한계 값 이상이면 금형의 형상을 마멸된 형상으로 변경하여 다시 마멸 해석을 수행하고 금형의 수명을 예측하였다. 최종 금형의 마멸 깊이를 허용 마멸 깊이로 나누어 생산 개수를 평가 하였다. 이상에서 제시한 마멸에 대한 금형 수명 평가 방법을 정리하면 Fig. 2 와 같다.

## 3. 금형 수명 해석 및 결과

본 연구에서 제시하고자 하는 수명 예측기법을 적용하기 위해서 Fig. 3 에서와 같은 열간 단조 제품을 선정하여 평가 하였다. 본 연구의 대상 제품은 자동차 기계 부품인 튜브 후방 압출 제품으로서 전형적인 열간 축대칭 제품이며, 블로커공정과 피니서공정의 두 단계로 이루어져 있다. 본 제품의 특징은 높이가 260 mm, 최대직경이 130 mm 이고, 긴 압출부를 가지고 있다. 외경이 2 단으로 이루어져 있으며, 최소의 기계가공이 작용할 수 있도록 밀폐 단조로 성형 되기 때문에 일반적인 단조에 비해 각 단의 곡률부 라운드의 치수 정밀도가 상당히 중요하다. 이 곡률부에 대하여 각각의 공정변수에 따라 금형 수명 평가를 수행하였다. Table 1 에 금형 수명 평가를 위한 각 공정 변수에 대한 성형 해석 조건을 나타내었다.

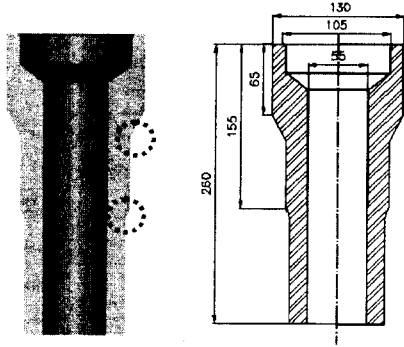


Fig. 3 Dimensions and measurement point of a product

Table 1 Conditions of process variation

| Initial Die temperature | Forging Velocity | Surface Treatment |
|-------------------------|------------------|-------------------|
| 200°C                   | 200mm/sec        | No treatment      |
| 300°C                   | 250mm/sec        | Ion nitride       |
| 400°C                   | 300mm/sec        | CNx nitride       |

### 3.1 금형 예열 온도에 따른 수명 평가

열간 단조 공정에서 성형 중에 소재에서 금형으로의 열전달이 일어나고 금형의 온도는 상승하게 된다. 또한 소재 내부에서는 변형열이 발생하여 온도가 상승하고 소재 외부에서는 접촉, 대류, 복사로 인한 열손실이 일어나 소재 내부와 외부와의 온도차가 발생하여 유동 양상이 달라지게 된다. 금형 예열 온도가 높을수록 소재 내부와 외부의 온도차가 작아 유동 양상은 좋아지나 금형의 표면 온도가 과다하게 상승하였을 때는 수명을 저하시킨다. 금형의 온도가 낮을 경우에는 금형과 접촉된 소재의 유동양상을 저하시켜 표면 결함을 유발하기 때문에 적절한 금형예열온도 선정이 필요하다.

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 증가 할수록 생산 개수는 감소하였다. 마멸 측면에서는 소성변형에 대한 생산 개수보다 높게 나타났으나 예열 온도가 증가할수록 역시 생산 개수가 감소하였다. Fig.4 에 금형 예열 온도에 따른 금형 수명 평가 결과를 나타내었다.

금형 예열 온도에 따른 금형 수명 평가 측면에서 금형 예열 온도가 증가 할수록 곡률부의 국부적인 온도 상승을 초래하여 열연화에 의한 금형경도가 낮아져 소성 변형, 마멸에 의한 금형 수명이 떨어졌다. 따라서, 금형 예열 온도에 따른 금형 수명은 마멸 보다 소성 변형에 의해 뚜렷하게 감소하는 것을 알 수 있었다.

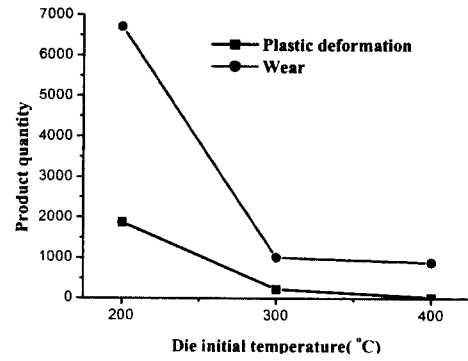


Fig.4 Result of die life about initial die temperature

### 3.2 성형 속도에 따른 수명 평가

성형 속도가 빠르면 제품 생산 시간을 단축할 수 있고 생산량을 높일 수 있다. 성형 속도가 빠를수록 금형의 미치는 성형 하중의 증가 및 금형과 소재의 접촉 압력을 높하게 된다. 이러한 성형 하중의 증가는 프레스의 용량에 한계를 주어, 원하는 제품 성형이 불가능하게 된다. 그리고 금형과 소재 사이의 높은 면압으로 인한 금형의 소성 변형은 제품의 치수 정밀도에 금형의 조기 파손을 일으킨다.

성형 속도에 따른 금형 수명 평가를 한 결과 소성 변형에 대한 금형 수명 평가 측면에서는 200, 250, 300 mm/sec 로 성형 속도가 증가할수록 금형 수명 향상을 가져 왔다. 그러나 마멸에 대한 금형 수명 평가 측면에서는 속도가 증가 할수록 금형 수명은 감소하였다. Fig.5 에 성형 속도에 따른 금형 수명 평가 결과를 나타내었다.

성형 속도가 200mm/sec 에서는 곡률부의 국부적인 온도 상승으로 인해 소성변형에 의한 금형 수명

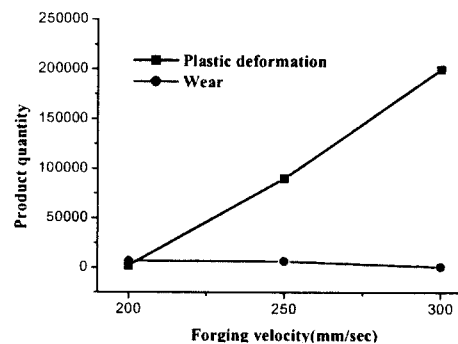


Fig. 5 Result of die life about forging velocity

감소가 주요인이었으나 속도가 증가 할수록 곡률부의 접촉시간이 짧아 온도가 낮아져 소성 변형에 의한 금형 수명은 증가하였다. 그러나 접촉면에서 소재와 금형과의 상대 속도의 증가로 연삭 마멸량이 증가하여 금형 수명은 감소하였다.

### 3.3 표면처리에 따른 수명 평가

열간 단조용 금형은 1100~1200 °C 정도의 높은 온도로 가열된 소재와 직접적으로 접촉하게 되므로 고온에서도 필요한 경도를 유지하고 마멸 및 열피로에 대한 저항성을 높이기 위하여 각종의 표면처리를 하고 있으며, 열간 단조용 금형재료로서 널리 쓰이고 있는 STD 61 과 같은 금형용 강에는 표면처리가 특히 널리 이용되고 있다. 따라서 표면 처리를 한 금형은 독특한 표면 특성을 가지므로 표면으로부터 깊이 방향으로 표면 층 깊이에 따라 다른 경도 분포를 가지게 된다. 그리고 고온 성형 공정시의 금형마멸 깊이를 정확하게 예측하기 위하여는 금형 표면처리에 따라 금형 층의 마멸계수와 온도 와 시간에 따른 열연화 곡선을 달리 적용하였다.

금형 표면처리에 따른 금형 수명 평가를 한 결과 소성 변형 측면에서는 무처리, 이온 질화 처리, 침탄 질화 처리 순으로 금형 수명은 높게 나타났고, 마멸에 대한 금형 수명 평가 측면에서는 금형 표면처리에 따라 소성 변형에서와 같이 무처리, 이온 질화 처리, 침탄 질화 처리 순으로 금형 수명 향상이 나타났다. 그 중에서 침탄 질화 처리가 수명이 제일 길게 나타났다. Fig.6 에 표면처리에 따른 금형 수명 평가 결과를 나타내었다.

침탄 질화 처리가 무처리, 이온 질화 처리에 비해 상대적으로 열확산계수 값이 커 성형 중 발생하는 열을 빨리 확산함으로써 해서 열에 의한 영향을 다른 표면처리보다 작게 받는다는 것을 알 수 있다.

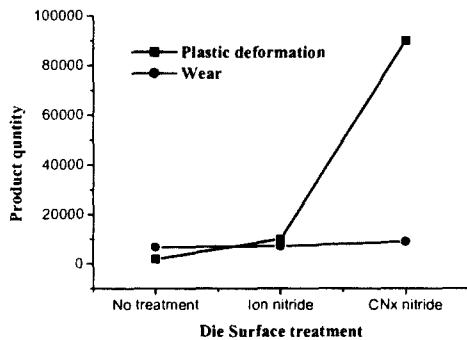


Fig. 6 Result of die life about surface treatment

## 4. 결론

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

- 1) 금형 예열온도 평가에서는 예열온도가 증가할수록 소성 변형과 마멸에 의한 수명이 감소했으며 소성 변형이 주 수명 감소 원인으로 나타났다.
- 2) 펀치 속도가 증가 할수록 곡률부의 접촉 시간이 감소하여 소성변형 측면에서는 수명 향상을 보였으나 연삭 마멸 측면에서는 수명 감소를 가져 왔다. 마멸이 주 수명 감소 원인으로 나타났다.
- 3) 표면처리 평가에서는 침탄 질화 처리 한 금형이 수명이 제일 좋은 것으로 나타났으며 마멸이 주 수명 감소 원인으로 나타났다.

## 후기

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

## 참고문헌

1. J. F. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces", *Journal of applied physics*, pp.981-988, 1953
2. 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
3. T. H. Kim, B. M. Kim, J. C. Choi, "Prediction of die wear in the wire-drawing process", *J. of Mat. Pro. Tech.*, Vol. 65, pp.11-17, 1997
4. A. K. Singh, B. W. Rooks, S. A. Tobias, "Factors affecting die wear", *Wear*, 25, p.271, 1973
5. 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
6. 湯淺紘二, 岡本治郎, "溫間鍛造用 金型の壽命におけるプレススライドモーションの影響についての考察", *塑性と加工*, Vol. 22, No.241, pp. 133-138, 1981
7. H. Saiki, Y. Marumo, A. Minami, T. Sonoji, "Effect of the surface structure on the resistance to plastic deformation of a hat forging tool", *Journal of materials processing technology*, Vol. 113, pp.22-27, 2001