

소성변형 및 마멸을 고려한 열간 단조 금형의 수명 평가

이현철* · 김동환** · 김병민***

Tool life Evaluation of Hot Forging about Plastic Deformation and Wear

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

Abstract

Hot forging is widely used in the manufacturing of industry machine component. The mechanical, thermal load and thermal softening which 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 a high thermal load and long contact time between the tool and billet. Also, tool life is to a large extent limited by wear, heat crack and plastic deformation in hot forging process. These are one of the main factors affecting die accuracy and tool life. That is because hot forging process has many factors influencing tool life, and there was not accurate in-process data. In this research, life prediction of hot forging tool by wear and plastic deformation analysis considering tempering parameter has been carried out for automobile component. The new developed technique in this study for predicting tool life can give more feasible means to improve the tool life in hot forging process.

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

1. 서 론

열간 단조 공정은 부품생산에서의 양산성, 균일성 등의 이점으로 생산 현장에 있어서 주요한 소성가공기술의 하나로 자리잡고 있으며, 실제로 자동차, 산업기계 등의 주요부품을 제조하고 있다. 특히 소재의 특징상 유동용력이 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 냉간단조 등 타 가공법보다 엄격한 조건에서 사용되기 때문에 금형수명이 상당히 짧다. 특히 절감, 재료비 감소가 절실히 요구되는 오늘날에는 이러한 금형을 어떻게 저렴한 비용으로 정밀하게 제작하면서 금형수명을 연장시키는가가 중요한 문제가 되고 있다.^{(1)~(3)}

* 부산대학교 대학원 기계공학과
** 부산대학교 정밀 정형 및 금형가공 연구소
*** 부산대학교 기계공학부

열간 단조용 금형의 수명을 결정하는 주된 요소는 마멸과 열피로에 의해서 생기는 표면에서의 열균열(heat crack), 금형의 강도가 소재의 유동응력을 따르지 못하여 발생하는 소성변형 등이 있다. 이러한 금형수명 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.^{(4)~(5)}

본 연구에서는 소성 변형에 의한 금형수명 평가 방법 및 연삭마멸에 의한 금형수명 평가 방법을 제시하였다. 그리고 자동차 부품에 적용되는 열간 단조품의 다단 공정 중 최종 금형에 대해 제시된 금형수명 평가 방법을 적용하여 생산 개수의 정량적인 비교를 통한 주 금형수명 결정 요인을 파악하였다.

2. 열간 단조 금형의 수명 평가

금형수명을 정량적으로 나타내는 것은 매우 곤란하지만 일반적으로 작업면에서 결정하는 금형수명 판단기준은 생산능률, 금형 파손 등이 판단 기준으로 되며, 품질면에서 결정하는 금형수명 판단기준은 치수 정도, 표면 거칠기 등이 그 기준으로 된다.

본 연구에서는 열간 단조의 정량적인 금형수명 평가 방법으로 시간과 온도에 따른 금형의 고온에서 경도 변화와 표면층의 마멸량 증가에 따른 깊이 방향의 경도 변화를 고려한 연삭마멸에 대한 금형수명 평가 방법과 금형강도가 항복강도에 도달할 때까지의 경도 유지 시간으로 평가하는 소성 변형에 대한 금형수명 평가 방법을 제시하였다.

2.1 소성변형에 대한 열간 금형수명 평가 방법

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 성형과정에서 나타나는 반복적인 열 영향에 의한 금형경도의 하락과 동일한 기구를 이루고 있는 것으로 금형의 경도를 시간과 온도의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 열간 단조 금형의 소성변형에 대한 금형수명 평가를 위해 고온에 의한 경도 변화를 평가할 수 있는 템퍼링 파라메타를 적용하였다. 템퍼링

파라메타는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 식(1)을 통해서 금형재료의 시간과 온도에 따른 경도의 변화를 평가할 수 있다.⁽⁶⁾

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

여기서 M 은 템퍼링 파라메타, T 는 절대온도, C 는 재료에 의한 상수, t 는 템퍼링 시간이다. 일반적으로 탄소강에 대해서 재료에 의한 상수 C 는 20으로 주어진다. 또 실제 생산에 있어서는 금형은 단조성형에서부터 취출되기까지 온도변화를 겪기 때문에 단조 1사이클 동안의 금형의 온도를 나타내기 위해 상당온도(T_{eq})를 이용하였다. 상당온도는 근사적으로 식(2)로 나타낼 수 있다.

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

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

소성변형에 대한 금형수명 평가를 위하여 템퍼링 파라메타 식(2)에서 템퍼링 시간 t 를 성형 중 금형의 강도가 열연화에 의해 항복강도에 도달할때까지의 경도 유지 시간 t_h 로 바꾸어 식(3)과 같이 나타내어 금형수명 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 3배로 나타낼 수 있다. 열연화 실험을 통해 STD61 열간 금형강의 상당온도, 경도, 항복강도의 상호 관계를 나타낸 주템퍼링 곡선은 Fig. 1과 같다. 실제 적용한 금형은 1030℃ 담금질된 후 550℃에서 3시간 1차 템퍼링, 600℃에서 3.5시간 2차 템퍼링한 Q.T.T 열처리 된 것으로 그 열 영향을 받은 경우의 M_{yield} 의 값은 식(4)와 같다.

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

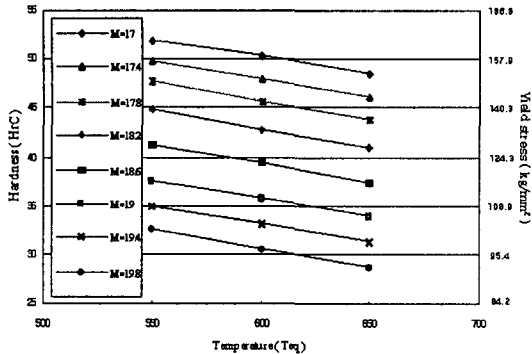


Fig. 1 Master tempering curve of STD61

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 1차 M 값이 유지되는 시간이고, t_2 는 T_{eq} 동안 2차 M 값이 유지되는 시간이다. 먼저 주 텀퍼링 곡선에서 성형 해석을 통해 구한 항복강도와 상온도 값을 읽어 M_{yield} 값을 구했다. 식(4)에서 구한 1차, 2차 T_{eq} 동안 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 1사이클 시간 (cycle time)으로 나누어 생산 개수를 예측하였다.

2.2 연삭마멸에 대한 금형수명 평가 방법

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 단조에서 금형의 마멸은 제품의 치수 정밀도 및 제품 표면정도에 문제가 된다. 열간단조용 금형재료는 고온의 작업환경에 의해서 재료자체가 온도에 의해서 경도의 변화를 받게 되며, 또한 지속시간에 따라서 경도가 감소하는 시간의존성 특성을 나타내는 텀퍼링 효과에 의한 열연화도 겪게 된다.⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾

열간 단조 금형 마멸 계산에는 두 물체의 접촉 시 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.

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

먼저 제품의 성형 해석을 통하여 금형면에 작용하는 압력(σ_s), 소재의 유동속도(v_s), 금형의 온도 분포(Δt)를 구하고, 다음으로 금형재료에 대한 마멸 및 열연화 실험을 통하여 얻은 한계 마멸량 및 한계 고온 경도 값을 수정 마멸 모델 식(6)에 대입하여 마멸 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 한 번의 성형 공정 동안 금형의 마멸량(W)을 계산하고 이 마멸량에 해당하는 경도 값을 예측하였다. 이 값들을 한계 값들과 비교하여 한 공정에 대한 금형의 수명을 평가하였다. 마멸량이 한계치보다 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.

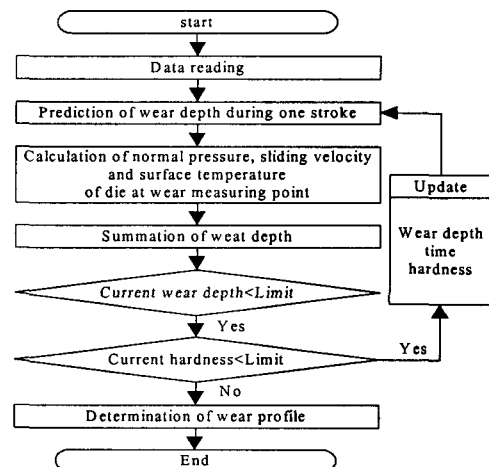


Fig. 2 Flow chart of wear analysis

3. 금형수명 해석 및 결과

본 연구에서 제시하고자 하는 수명 평가 방법을 적용하기 위해서 Fig.3에서와 같은 열간 단조 제품을 선정하여 평가하였다. 본 연구의 대상 제품은 자동차 부품에 적용되는 열간 단조품으로서 전형적인 열간 축대칭 제품이며, 블로커공정과 피니셔공정의 두 단계로 이루어져 있다. 본 제품의 특징은 높이가 250mm, 최대직경이 120mm이고, 긴압출부를 가지고 있다. 외경이 2단으로 이루어져 있으며, 최소의 기계가공이 작용할 수 있도록 밀폐단조로 성형되기 때문에 일반적인 단조에 비해 각단의 곡률부 라운드의 치수 정밀도가 상당히 중요하다. 이 곡률부에 대하여 공정 방식에 따라 금형수명 평가를 수행하였다. 또한 동력축으로 사용되기 때문에 강도와 중심축의 동심도 유지가 중요하게 작용한다. 따라서 제품의 강도 유지를 성형 시 재료 유동에 의한 표면 결함과 내부 결함의 발생이 없도록 공정설계가 이루어져야 한다. 제품성형 환경이 열간에서 이루어지기 때문에 금형과 소재의 접촉에 의해 금형의 표면온도가 과도하게 상승되었을 경우에는 금형수명을 저하시키고, 금형의 온도가 낮을 경우에는 금형과 접촉된 소재의 유동양상을 저하시켜 표면 결함을 유발하기 때문에 성형 중에 금형과 소재의 접촉 시간을 적절하게 조절해야 한다. Fig. 3에 금형 수명평가를 위한 제품과 치수를 나타내었다.

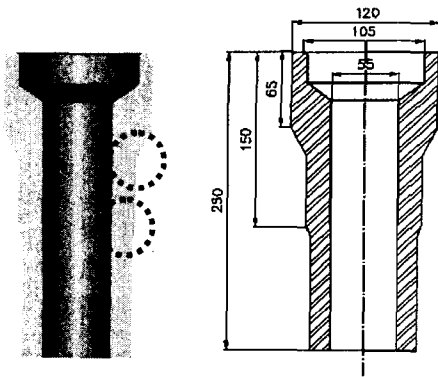


Fig. 3 Dimensions and measure point of product

3.1 공정 설계

다단 열간 단조 공정 설계를 하기 위한 공정 단계는 예비업세팅(pre-upsetting) 공정, 예비성형(preforming) 공정과 최종 제품을 성형하는 피니셔(finisher) 공정으로 나누어진다. 1단계 예비업세팅 공정은 초기 소재 절단

결합에 의한 성형중의 편심 및 초기 소재와 금형 사이의 클리어런스로 인하여 펀치 좌굴 및 유동 불안정을 방지하기 위한 공정이고, 2단계 예비성형 공정은 최종 공정에서 발생할 수 있는 미충진 및 표면 결함 등의 방지와 피니셔 금형의 수명을 향상시키는 중요한 역할을 하는 공정이다. 피니셔 공정은 최종 제품을 성형하는 공정으로 겹침(overlap), 미충진(unfilling), 균열(crack)등의 결함이 발생하지 않도록 공정설계가 이루어져야 한다.

3.1.1 펀치 성형길이를 고려한 밀폐 단조 공정

예비성형체는 최종제품의 유동결합을 방지하고, 성형시 미충진 보완하도록 설계되어져야 하며, 응력집중에 의한 금형의 손상을 줄여 금형수명을 향상시킬 수 있어야 한다. 제시된 열간 단조품을 성형하기 위해 둘째단 시작점 부근의 응력 집중을 피하여 제품 품질을 향상시키기 위해 예비성형 공정에서 길이방향으로 충분히 압출을 시키고, 첫째

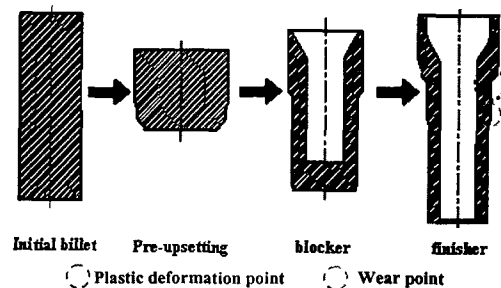


Fig. 4 Process about closed die process

단의 형상을 마지막 단계에서 성형하는 공정이 고려되었다. 특히 최종 성형 시 최적의 단면적 감소율로 성형되기 위해 예비성형체를 최종 성형에서 단면적 감소율이 50%가 되도록 설계하였으며, 최종 성형 시 변형률을 줄이기 위해 첫째단 성형 체적만큼 체적을 분배시켜 예비성형체를 설계하였다. Fig. 4에 펀치 성형길이를 고려한 밀폐 단조 공정설계 방식과 마멸과 소성 변형에 의한 금형수명이 가장 적게 나타나는 곡률부를 나타내었다.

펀치 성형 길이를 고려한 밀폐단조 공정에서는 금형수명 측면에서는 예비성형체에서 최종 제품 형상으로의 변화가 커 곡률부에 큰 영향을 미쳐 온도 상승을 가져와 금형수명은 짧게 나타났다. 펀치 수명 측면에서는 2공정에서 압출부로의 펀치 성형길이를 충분히 하여 최종 공정에서의 수명은 순차적 성형을 고려한 개방 단조 공정에 비해 좋게 나타났다. Fig. 5에 밀폐형 단조 방식에 대

한 소성변형, 마멸에 대한 금형수명 평가 결과를 나타내었다.

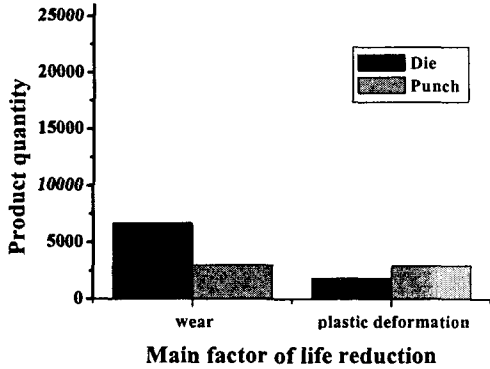


Fig. 5 Result of tool life about closed type process

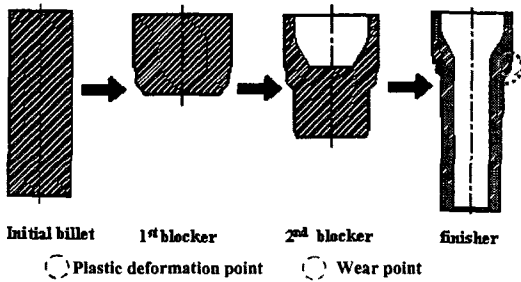


Fig. 6 Process about open die process

3.1.2 순차적 성형을 고려한 개방 단조 공정

개방형 단조 방식으로써 각 공정에서 제품의 각 단을 성형하는 공정 설계로서 옆세팅 공정에서는 열간단조품의 첫째단을 성형하고, 예비성형 공정에서는 둘째단을 성형하고 마지막 최종 공정에서는 최종 제품 치수를 성형하는 공정으로 설계하여 성형해석을 수행하였다. Fig. 6에 순차적 성형을 고려한 개방 단조 공정설계 방식과 마멸과 소성 변형에 의한 금형수명이 가장 적게 나타나는 곡률부를 나타내었다.

순차적 성형을 고려한 개방 단조 공정에서는 금형수명 측면에서는 최종 공정 단계에서의 변형량이 작아 곡률부의 온도 상승은 작게 되어 금형수명 향상을 가져 왔다. 그러나 펀치 수명 측면에서는 최종 단계에서의 펀치 성형길이가 길어 펀치 도입부의 온도 상승을 가져와 펀치 성형 길이를 고려한 밀폐단조 공정에 비해 수명 감소를 가져왔다. Fig. 7에 개방형 단조 방식에 대한 소성변형, 마멸을 고려한 금형수명 평가 결과를 나타냈다.

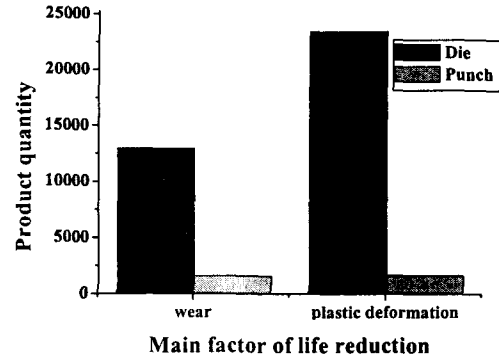


Fig.7 Result of tool life about opened type process

4. 결론

본 연구에서는 소성변형에 의한 금형수명 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 파악하였다. 열간 단조 금형의 수명 예측 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단면 감소율을 고려한 밀폐형 성형 공정에서의 금형수명 측면에서는 예비성형체에서 최종 제품 형상으로의 변화가 커 곡률부에 큰 영향을 미쳐 온도 상승을 가져와 금형수명은 짧게 나타났다.

(2) 단면 감소율을 고려한 밀폐형 성형 공정에서의 펀치 수명 측면에서는 2공정에서 압출부로의 펀치 성형길이를 충분히 하여 최종 공정에서의 펀치 성형 길이가 순차적 성형을 고려한 개방 단조 공정에 비해 짧아 펀치 수명은 순차적 성형을 고려한 개방 단조 공정에 비해 좋게 나타났다.

(3) 순차적인 개방형 성형 공정에서의 금형수명 측면에서는 최종 공정 단계에서의 변형량이 작아 곡률부의 온도 상승은 작게 되어 금형수명 향상을 가져 왔다.

(4) 순차적인 개방형 성형 공정에서의 펀치 수명 측면에서는 최종 단계에서의 펀치 성형길이가 길어 펀치 도입부의 온도 상승을 가져와 펀치 성형 길이를 고려한 밀폐단조 공정에 비해 수명이 감소하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀 정형 및 금형가공연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것

입니다.

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. Sonoi, "Effect of the surface structure on the resistance to plastic deformation of a hat forging tool," J. of Mat. Pro. Tech., Vol. 113, pp.22~27, 2001.
- (6) 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) 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," J. of Mat. Pro. Tech., 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.