

## 열간단조용 금형형의 수명에측기법 개발

이진호\* 김병민\*\*

\*부산대학교 대학원, \*\*부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

### The Development of Life Prediction Method for Hot Forming Dies

J. H. Lee, B. M. Kim

#### ABSTRACT

In this study, two kinds of life prediction method for hot forming die are developed. One is empirical method requiring some experiment that evaluate thermal softening of die material according to operating conditions. The other is analytical method that calculate wear quantity of die occurring during the forming process. Wear is a predominant factor as well as plastic deformation and heat checking. And, these methods are applied to predict tool life real die producing part for automobile. Thus, the applicability and the accuracy of the presented methods are investigated. Using the verified life prediction method above, optimal blocker die design minimizing the finisher die is done.

Key Words : life prediction(수명예측), hot forming(열간단조), thermal softening(열연화), wear(마멸)

#### 1. 서 론

형수명을 정량적으로 나타내는 것은 매우 곤란하지만 일반적으로는 다음과 같은 두 가지 측면으로 생각해 볼 수 있다.

- ① 품질면에서 결정하는 형수명
- ② 작업면에서 결정하는 형수명

전자는 치수정도, 표면거칠기 등이 판단기준으로 되며, 후자는 생산능률, 생산속행불능(파괴)등이 그 기준으로 된다. 그러나, 실제의 작업에서 형수명은 총비용에 의해 판정되어야 하고 특히 금형의 사용회수와 생산능률의 관계, 제품정도의 악화에 의한 후공정 필요공수 및 공정조건의 악화와 관계 고려해야 한다. 전자의 입장에서는 금형의 마멸량을 예측하여 금형의 마멸량이 임계마멸량에 이르면 결리는 시간을 예측함으로써 가능하며, 후자의 측면에서는 금형의 소성변형이 일어나는 시점이나 열피로에 의한 히트체킹의 파다발생에 의한 스폴링발생시점을 예측함으로써 가능하다. 그러나 이러한 각각의 관점은 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 소성변형 내지는 스폴링, 파괴로 인한 금형수명보다는 치수정밀도의 불량이나 파다한 후공정의 필요로 인해서 금형을 교체하는 경우가 발생하며, 반대의 경우도 발생할 수 있다.

따라서 열간단조용 금형의 수명을 예측하기 위한 기법은 다각적인 방법에서 개발되어야 하며, 각각의 공정과 제품의 요구사항에 맞도록 적용하여야 하며 어떤 측면에서 수명을 결정하여야 하는 가는 적용대상에 달려있다. 또한 이러한 수명예측을 통해서 수명인자의 영향을 감소 내지는 균일화시킬 수 있는 수명향상기법의 개발이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 열간상태에서의 시간과 온도에 대한 금형의 경도변화를 고려하기 위해서 실제 금형과 동일한 열처리 및 표면처리를 한 시편을 가공하여 열연화 실험을 수행하였으며 이를 통한 간단한 수명예측기법과 이러한 데이터를 근거로 하여 실제단조공정에 대한 성형공정 및 마멸해석을 수행하여 열간단조금형의 마멸수명을 예측하여

보았다.

## 2. 작업면에서 결정하는 형수명

열간성형공정중 금형의 표면온도는 약 700~800 °C정도까지 상승한다[1]. 따라서, 금형이 성형공정동안 소재로부터 고온의 열을 오랜 시간동안 받는 동안 경도의 변화를 겪게 된다. 이러한 경도의 분포를 파악하기 위해서 열연화 실험을 수행하여 시간과 온도에 따른 고온경도의 변화를 파악하였다. 열연화 실험을 통하여 얻을 수 있는 결과는 첫째, 유한요소법을 통한 성형시물레이션과 연계하여 금형의 사용시간에 따른 경도의 변화를 간접적으로 파악할 수 있으며, 둘째, 이러한 결과를 열간단조용 금형의 마멸해석에 적용함으로써 보다 실제 금형의 마멸분포와 가까운 마멸 분포를 얻을 수 있다[2]. 본 실험에서는 이온질화처리된 금형소재에 대해서 실험을 수행하여 질화층의 연화정도를 파악하였다. 열연화 실험에 사용된 시편은 Fig. 1과 같으며 Fig. 2와 같은 과정으로 실제금형과 동일한 사양으로 제작되었으며, 크기는 40×40×40(mm)이었다.

열연화실험을 수행하기 위해서는 먼저 성형해석이나 실제 작업공정에서 금형의 경계절점에서의 온도이력을 조사하여 금형이 받는 상당온도를 식(1)[2]에 의해서 약 550 °C ~ 650 °C 가 됨을 파악하고, 550 °C, 600 °C, 650 °C에 대해서 연화실험을 수행하여 경도변화를 측정하였으며, 결과는 Fig. 3과 같다.

$$T_{eq,i} = \frac{2 \times T_{max,i} + T_{min,i}}{3} \quad (1)$$

$T_{eq,i}$ ,  $T_{max,i}$ , and  $T_{min,i}$  are each equivalent temperature, maximum temperature and minimum temperature.

열연화 실험을 550°C ~ 650°C의 범위에서 수행한 것은 이 온도범위에서 금형의 경도가 급격하게 변하기 때문이다 [3,4]. 이상의 열연화 실험을 통해서 얻은 경도의 분포를 식(2)와 같은 템퍼링 파라메타 M[2]을 사용하여 주연화곡선 (Master Tempering Curve)를 구하면 Fig. 4와 같으며, Fig. 4를 통해서 실제금형의 시간과 온도에 따른 경도의 변화를 간접적으로 쉽게 파악할 수 있다. 즉, 시간과 온도에 따라 변하는 경도를 템퍼링 파라메타의 함수로 다음의 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$M = \frac{T \times (20 + \log_{10} t)}{1000} \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} T &= \text{Temperature ( } ^\circ\text{K )} \\ t &= \text{Time (Hr)} \end{aligned}$$

## 3. 품질면에서 결정하는 형수명

본 연구에서는 마멸해석에 이미 널리 적용되고 있고, 수치적 접근이 용이한 Archard의 마멸모델[5,6]을 이용하여 금형의 마멸해석을 수행하였으며, Archard의 마멸모델은 다음의 식(3)과 같다.

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

여기서,  $V$ 는 마멸체적이고,  $k$ 는 재료와 접촉조건에 의존하는 상수,  $P$ 는 접촉하중,  $L$ 는 미끄럼 길이,  $h$ 는 마멸이 발생하는 상태에서 금형의 표면경도로 정의 된다. 실제 성형공정중에는 하중과 미끄럼 거리가 시간에 따라 변하게 되므로 식(3)을 시간에 따른 증분의 형태로 나타내고 마멸깊이를 예측하기 위해서 식(4)와 같은 형태로 바꿀 필요가 있다. 즉, 원래의 Archard의 마멸모델식에서 금형과 소재의 접촉면에서의 접촉하중 ( $P$ )을 접촉면적으로 나

누어  $\sigma_n$ 을 얻을 수 있으며, 접촉면에서의 미끄럼길이(  $L$ )을 미끄럼속도(  $v_s$ )와 시간증분(  $\Delta t$ )의 곱으로 나타내어 유한요소해석에 적용할 수 있도록 하였다.

$$W = \frac{k}{3h} \sum_{i=1}^N (\sigma_n v_s \Delta t) \quad (4)$$

여기서,  $W$ 는 마멸깊이,  $N$ 은 스텝번호,  $\sigma_n$ 는 수직응력,  $v_s$ 는 미끄럼 속도,  $\Delta t$ 는 시간증분이다. 열연화 실험으로 구한 시간과 온도에 따른 금형의 고온경도값을 적용하기 위해 식(4)를 다음의 식(5)와 같이 수정하였다. Fig. 1의 시편에 대한 고온경도의 변화는 Fig. 5와 같다.

$$W = \frac{k}{3h(T, t)} \sum_{i=1}^N (\sigma_n v_s \Delta t) \quad (5)$$

시간과 온도에 따른 금형의 고온경도변화를 템퍼링 파라메타  $M$ 으로 나타내면 식(6)과 같다. Fig. 5의 실험결과에 대한 주연화곡선은 Fig. 6과 같다.

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

즉, 마멸해석에 필요한 경도를 템퍼링 파라메타  $M$ 으로 나타낼 수 있게 된다. 성형 시뮬레이션을 통하여 얻은 성형 데이터와 실험을 통하여 얻은 데이터를 식(6)을 통해 계산하면 결국 1회 성형공정동안에 발생하는 금형의 마멸량을 알 수 있다. 그러나, 마멸량이 증가하면서 금형의 표면층도 깎여져 나가게 되므로 깊이방향의 경도변화를 고려하여 식(6)을 다음의 식(7)과 같이 수정하여야 한다.

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

이상의 과정을 종합하여 나타내면 Fig. 7과 같다.

#### 4. 적용결과 및 고찰

열간단조용 금형의 마멸해석을 수행하기 위해서 열연화 실험, 깊이방향의 경도측정, 3차원 좌표측정기를 통한 마멸분포측정, 성형시뮬레이션을 통한 공정해석을 수행하였다. 실제로 12,000개의 제품을 생산하고 폐기된 Fig. 8(b)와 같은 피니셔금형에 대해서 열연화 실험을 통해서 예측해 낸 경도의 변화와 폐금형의 경도의 변화를 Table 1에 비교하고 이 때의 마멸분포의 결과를 Fig. 9에 비교하였다.

Fig. 9에서는 금형의 손상이 아주 심한 A, B 두 부분에 대해서 확대하여, 3차원 좌표측정기를 통해서 측정한 실제금형의 마멸분포와 열연화현상을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교해 보았다. A부분은 성형의 마지막부분에서 다이공동부를 채우고 남은 소재가 빠지나가는 플래시부분이고, B부분은 예비성형체와 금형이 처음부터 접촉하여 접촉시간이 가장 긴 부분이다. 실제금형에서 A, B 부분을 현미경으로 살펴본 Fig. 10에서도 알 수 있듯이 A 부분은 마멸이 주로 발생하고, 열연열이 아주 미소하게 발생한 부분이며, B 부분은 마멸과 함께 열연열이 심하게 발생한 부분이다. 마멸이 주로 발생한 A 부분은 실제 금형의 마멸분포와 해석에 의해서 예측된 마멸분포가 정량적으로, 정성적으로 유사한 결과를 보이고 있다. 그러나, 열연열과 마멸이 동시에 발생한 B 부분은 정량적으로 약간의 차이를 보이고 있다.

#### 5. 참고문헌

- [1] 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
- [2] 湯浅紘二, 岡本治郎, "温間鍛造用金型の寿命に対す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
- [3] 福田正淑, 浜小路正傳, "特殊鋼データシート-工具鋼編", p. 43, 1992
- [4] 山田富重, 清野次郎, "温・熱間工具表面硬化と型寿命", *塑性と加工*, Vol. 23, No. 261, p.998, 1982
- [5] J. F. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces", *Journal of applied physics*", Vol. 24, No. 3, pp. 981-988, 1953
- [6] M. Eriksen, "The influence of die geometry on tool wear in deep drawing", *Wear*, Vol. 207, pp. 10-15, 1997

Table 1 Result of die life prediction (Comparison between the predicted surface hardness and actual surface hardness)

Measuring point	Predicted surface hardness by master tempering curve	Actual surface hardness	Die life : 12,000 Cycle Cycle time : 13sec $12,000 * 13 / 3,600 = 43.3\text{Hr}$
A	40.148	38	$T_{eq,A} = 720 \text{ }^\circ\text{C}$
B	45.172	42.5	$T_{eq,B} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$



Fig. 1 Specimens for thermal softening experiment

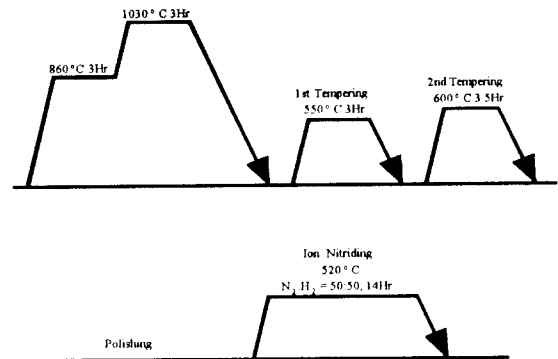


Fig. 2 Heat treatment condition of the die material

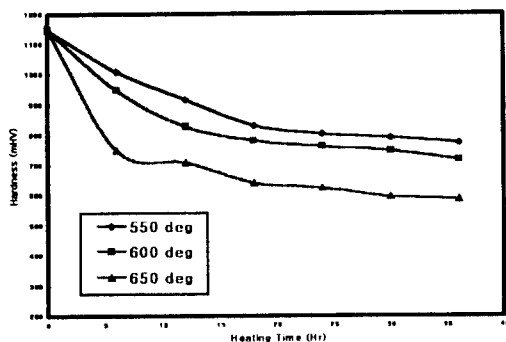


Fig. 3 Hardness variation of 14Hr ion-nitrided H13 : measured in room temperature

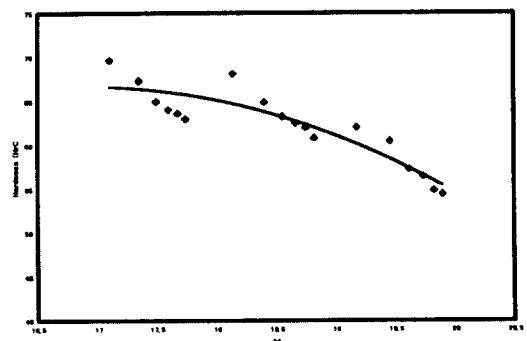


Fig. 4 Master tempering curve of 14Hr ion-nitrided H13

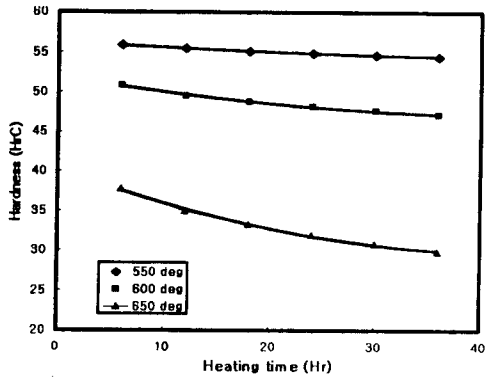


Fig. 5 Hardness variation of 14Hr ion-nitrided H13 : measured in elevated temperature

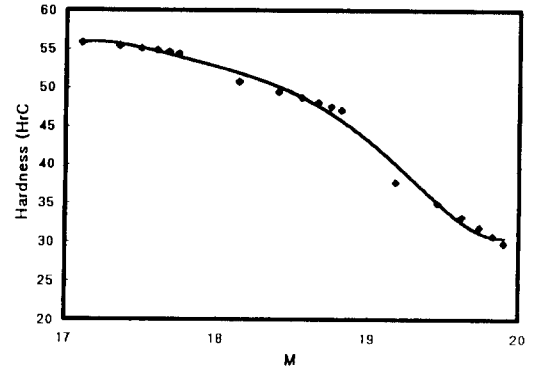


Fig. 6 Master tempering curve of 14Hr ion-nitrided H13

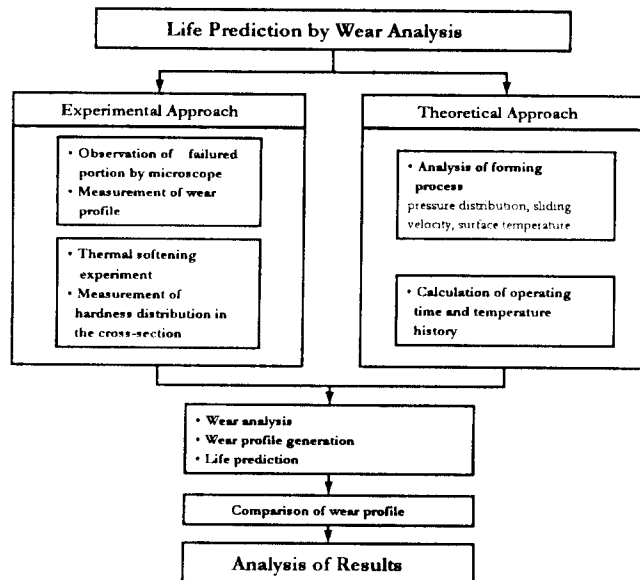


Fig. 7 Life prediction method by wear analysis

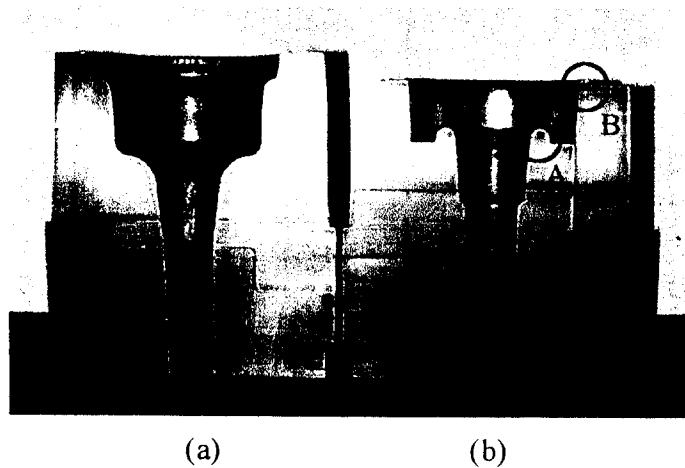


Fig. 8 (a) : Blocker die, (b) : Finisher die, 'A','B' : Damaged part

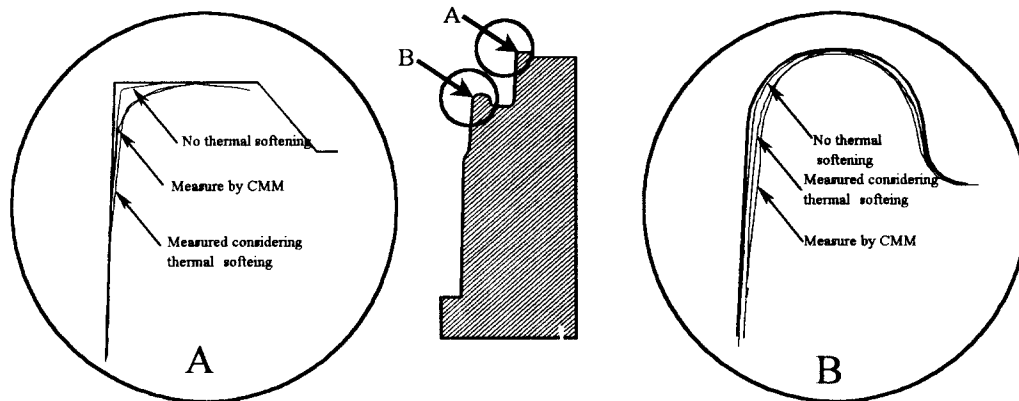


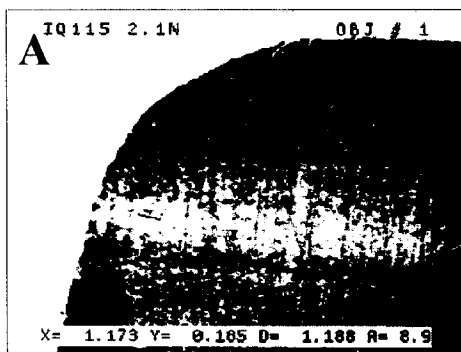
Fig. 9 Comparison of wear files at portion 'A', 'B'



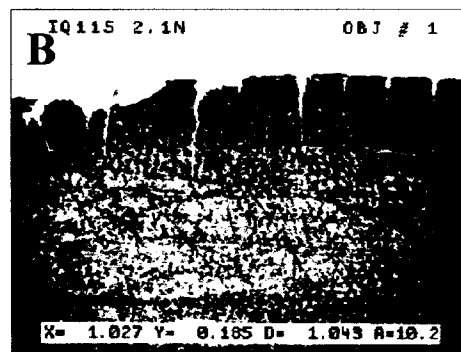
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10 Photographs of surface and cross-section of portion 'A', 'B'  
 (a) : Surface of portion 'A', (b) : Surface of portion 'B'  
 (c) : Cross-section of portion 'A', (d) : Cross-section of portion 'B'