

온간 단조에서의 냉각방법에 따른 금형 수명 예측

정연호* · 이현석* · 강종훈** · 제진수** · 강성수***

Prediction of Tool Life on Cooling System in Warm Forging

Y.H. Jung, H.S. Lee, J.H. Kang, J.S. Je and S.S. Kang

Abstract

The tool life is not long enough under sever forming condition in warm forging. The tool life is affected by wear, heat fatigue, plastic deformation and so on. Especially, wear is one of the most serious factors for tool life. To increase tool life, we should consider various factors like processing design, die design, die materials, lubrication and cooling system. This study design to obtain the steady state temperature of die by FEM analysis under several conditions of cooling. There are four cooling conditions in this study: no cooling, internal cooling, external cooling and both internal and external cooling. With above obtained temperatures, tool life is predicted using Archard's model that is considered softening of die. The effect of internal cooling system is better than that of externally cooled die. To predict the die life, the steady state temperature is calculated by using mean temperature of die. Considering only wear, the die life is much longer as the cooling effect is bigger. The more accurate die life will be predicted if we consider heat crack as well as wear.

Key Words : Warm forging, Tool Life, Wear model, Cooling System

1. 서론

한온간 단조는 열간 단조와 냉간 단조의 중간 영역의 온도 (600~900℃)의 영역에서 성형이 실시된다. 이 성형법은 냉간 단조와 비교할 때, 가공 온도가 높기 때문에 변형 저항이 낮아 변형능이 향상되어 복잡한 형상의 제

품과 고 탄소강이나 고 합금강의 가공도 가능한 장점이 있다. 또한 재료의 가공경화가 작기 때문에 중간 어닐링 없이 단순한 등온 가열에 의하여 단숨에 수 공정의 성형을 행할 수 있어, 성형 시간을 단축할 수가 있다. 그러나 소재를 고온으로 가열하여 작업을 수행하기 때문에 성형 공정 중에 발생하는 열과 소재의 상태가 성형 공구의 열

* 부산대학교 일반대학원 정밀기계공학과

** Valeo Electrical System

*** 부산대학교 기계공학부

연화를 가져와 경도가 저하되며, 열간 단조 공정에 비해 서 공구의 온도는 낮지만 높은 성형저항으로 인하여 마모에 의해 급격한 공구의 수명저하를 일으키게 된다.

온간 단조용 금형의 수명을 향상시키기 위한 공정 개발과 소재 개발 등 여러 가지 노력들이 이루어지고 있지만, 이는 초기 개발 단계에서 고려하여야 할 사항들이므로 이미 생산을 하고 있는 온간 단조 공정에서는 다양한 냉각 방법에 따른 효과로 금형 수명의 연장을 기대할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 네 가지 냉각 방법에 따른 온간 단조시의 금형의 온도를 예측하여 금형 수명을 평가하였다.

2. 금형 마멸 모델

일반적으로 고온 성형시의 금형 마멸을 예측하기 위해 서 금형의 경도가 온도만의 함수로 가정된 상태에서 제안된 Archard 모델을 적용되는데, 여기서는 Kang^[1,2] 등이 제안한 금형의 열연화를 고려한 모델을 이용하였다.

2.1 금형 마멸 모델

성형과정에서 나타나는 반복적인 열 영향에 의해서 금형의 경도는 하락이 일어나므로 금형의 경도를 시간과 온도의 함수로 나타내는 것이 가능하다. 따라서 Archard 모델은 다음과 같은 식으로 제안하는 것이 가능하다.

$$\delta d = \frac{kPL}{3H(T, t)} \quad (1)$$

식 (1)의 경도를 시간과 온도의 함수로 나타내면 식 (2)과 같이 된다.

$$\delta d = \frac{k}{3H(T, t)} \int_0^{T_{st}} \sigma_n \Delta v dt$$

$$\text{on } \partial \Omega^{\text{tool}} \quad (2)$$

식 (1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\delta d_{t+\Delta t} = \delta d_t + \frac{k}{3H(T, t)} [\sigma_n \Delta v]_t \Delta t$$

$$\text{on } \partial \Omega^{\text{tool}} \quad (3)$$

하지만 식 (3)을 적용하기 위해서는 유한요소해석을 반복적으로 수행해야 하기 때문에 이를 한번의 해석을 통하여 마멸에 의한 수명을 예측할 필요가 있다. 따라서 일반적으로 현장에서 허용 마멸량이 정해지므로 허용 마멸량을 상수로 가정하고, 한번의 해석을 통하여 성형회수를 예측할 수 있는 수식을 다음과 같이 다음과 같이 제안할 수가 있다.

$$d_{fin} = \int_0^{t_{fin}} \frac{kPL}{3H} \cdot \frac{H}{H(T, t)} dt \quad (4)$$

$$\text{on } \partial \Omega^{\text{tool}}$$

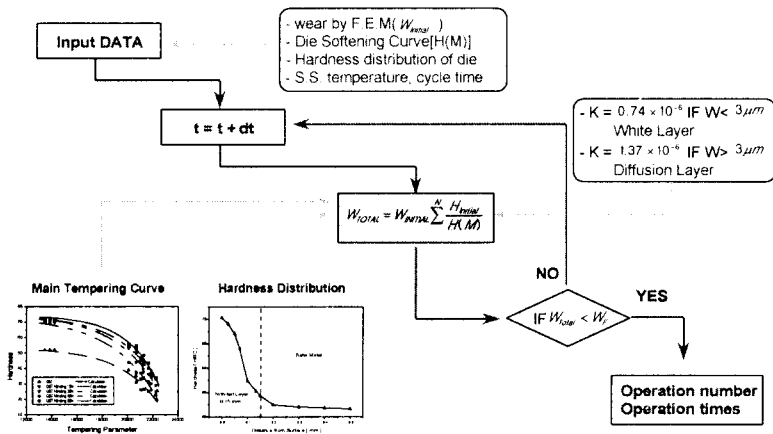


Fig. 1 Flow chart for calculation of final wear amount

H 는 금형의 정상상태온도의 경도

$H(T, t)$ 는 템퍼링 파라메타를 포함한 경도연화함수

d_{fin} 는 금형의 허용 마멸량

식 (4)을 정리하면 다음 식 (5)와 같이 된다.

$$d_{fin} = \sum_{i=1}^{n_{fin}} \frac{kPL}{3H} \cdot \frac{H}{H(T, t_{cycle} \times n_{fin})} \quad (5)$$

본 수식을 이용하여 오른쪽 적분항을 계속 더하여 나가면 실제 온간 단조에서의 작동시간을 추정할 수가 있다. 구하여진 시간을 성형 사이클 시간으로 나누면 성형 회수를 구할 수가 있다. 마멸량을 구하기 위한 순서도는 Fig. 1에 나타내었다.

3. 냉각 방법에 따른 금형의 온도와 수명

본 장에서는 네 가지의 냉각 방법을 선정하여 이를 유한/요소 프로그램인 DEFORM-2D를 사용하여 실제와 유사한 조건으로 해석을 수행하여 금형의 정상상태 영역에서의 온도를 구하여 금형 수명을 예측 하고자 한다.

3.1 냉각 방법의 검토

금형을 냉각하는 방법에는 여러 가지가 있으나 냉각에 따른 금형 수명에 대한 중요성을 인식하지 못했던 관계로 인해 냉각을 전혀 하지 않거나 금형에 직접 분사하는 방식이 사용되어져 왔다.

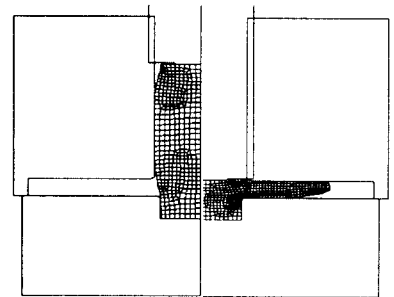
여기서는 (1) 냉각을 하지 않는 경우, (2) 금형에 직접 냉각수를 분사하는 경우, (3) 금형에 구멍을 뚫어 냉각수를 순환시키는 경우, (4) 냉각수를 분사하면서 동시에 냉각수를 순환시키는 경우의 극히 이상적인 네 가지 방법에 대해 해석을 수행하였다. 그리고 초기에 금형을 예열하는 방식과 예열하지 않고 성형하는 방식도 아울러 검증하고자 한다.

3.2 유한요소법의 적용

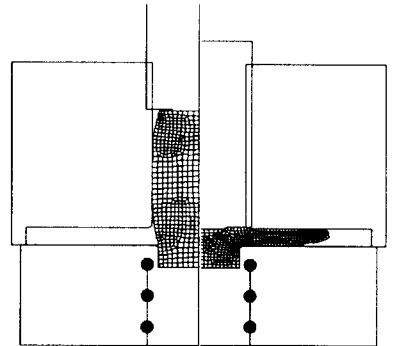
앞서 설명한 네 가지의 경우에 대해 금형의 온도 분포를 알아보기 위해 로타 폴에 대해 소재는 SM45C, 금형은 STD61로 두어 Fig. 2처럼 해석을 수행하였다. 실제의 현상과 거의 유사하게 해석하기 위해서 해석조건 중 대류계수를 자연 대류의 경우 0.00295 N/s/mm²/°C, 직접 냉각은 0.46 N/s/mm²/°C으로 선정하였다. 해석시 성형 시간은 0.8초, 냉각 시간은 3.2초로 두었으며, 성형 후의 온도와 냉각 후의 온도가 정상 상태에 접근 할 때까지

해석을 수행하였으며 정상 상태 온도는 그 평균값으로 하였다. 이 때 계산된 금형의 작동 수명은 허용 마멸량을 0.8mm로 가정하였을 때 얻어진 값이다.

Table 1에 금형을 예열하지 않고 성형하는 경우의 각각의 냉각 방법에 따른 정상 상태 온도와 금형의 작동 수명을 나타내었고, 금형을 400°C로 예열한 경우는 Table 2에 나타내었다.



(a) no hole



(b) hole

Fig. 2 FE analysis of rotor pole die

Table 1 Steady State Temperature and Die Life for Each Cooling Method (Initial Die Temperature = 27°C)

Cooling Method	Initial Die Temperature=Room Temp. (27°C)			
	Forming (°C)	Cooling (°C)	Steady State Temperature (°C)	Die Life (Hr, Blow)
None	680	470	575	16.5(14,814)
Spray	650	410	530	18.4(16,564)
Hole	640	340	490	19.8(17,809)
Spray +Hole	625	330	463	20.6(18,508)

Table 2 Steady State Temperature and Die Life for Each Cooling Method (Initial Die Temperature = 400 °C)

Cooling Method	Initial Die Temperature = 400 °C			
	Forming (°C)	Cooling (°C)	Steady State Temperature (°C)	Die Life (Hr, Blow)
None	745	615	680	7.0(6,296)
Spray	720	550	635	9.8(8,863)
Hole	660	390	525	15.2(13,669)
Spray + Hole	645	345	495	16.7(15,026)

3.3 결과 및 분석

온간 단조의 경우에는 금형이 부분적으로 함께 가열되기 때문에 열연화에 의한 금형의 마멸 및 합몰 그리고, 반복되는 가열, 냉각에 의한 열피로로 인해 열피로 파괴의 두 가지 경우로 크게 구분될 수 있다. 여기에서는 열피로에 의한 금형 수명은 검토하지 않았고 열연화에 의한 금형의 마멸만을 해석하기 위해서 온도 프로파일을 CAE 해석을 통해서 계산하였다. Fig. 3와 4에 금형의 초기 온도를 상온과 400°C로 하였을 때의 온도 분포를 도시하였다. 각각 정상 상태 온도를 기준으로 하여 금형 수명을 계산한 결과 예열을 했을 경우의 금형 수명이 훨씬 떨어짐을 알 수 있었다. 냉각 방법의 비교에서도 외부에서 분사하는 방식보다는 금형에 구멍을 뚫어 냉각수를 순환하는 방식이 금형 수명의 측면에서 더 유리함을 알 수 있었다. 이번에 수행한 해석은 극히 이상적인 경우에 한한 것이고 단순히 금형의 마멸에 의한 수명만을 논했기 때문에 현장에서의 수명과 차이가 있을 수 있는데, 이는 실제 현장에서의 수명에 미치는 인자인 열피로 균열을 고려하지 않은 결과이다. 차후, 마멸에 의한 수명과 더불어 열피로 균열에 의한 수명까지 고려하면 실제 금형 수명을 더욱 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

4. 결론

온간 단조 공정에서 금형 수명을 향상시키기 위하여 여러 가지 냉각 방법의 효과를 유한 요소 해석을 이용하여 알아보았으며 결과는 다음과 같다.

- (1) 온간 단조에서 네 가지 이상적인 냉각 방법에 따른 금형의 정상 상태 온도를 유한요소해석을 통하여 구

하였다.

- (2) 내부 순환에 의한 냉각이 외부 분사의 효과보다 좋게 나왔으며, 금형에 예열을 한 경우보다 하지 않은 경우가 수명이 길게 나왔다.
- (3) 계산된 수명은 마멸만을 고려한 것으로 보다 정확한 수명 예측을 위해서는 열 피로에 대한 정량화 필요하다.

참고 문헌

- (1) 강중훈 외3명, 1998, “열연화를 고려한 금형마멸 모델에 관한 연구(I)-마멸모델의 정립-”, 한국소성가공학회지, pp. 274~281.
- (2) 강중훈 외3명, 1998, “열연화를 고려한 금형마멸 모델에 관한 연구(II)-마멸모델의 적용-”, 한국소성가공학회지, pp. 282~290.

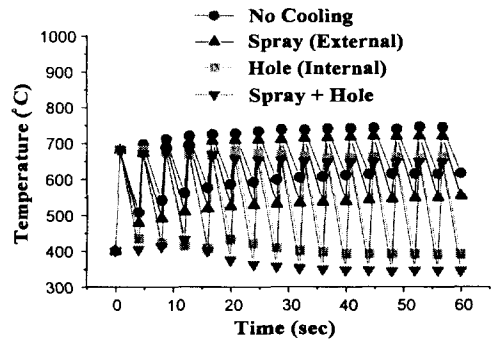


Fig. 3 Temperature distribution of die (Initial temperature = 400 °C)

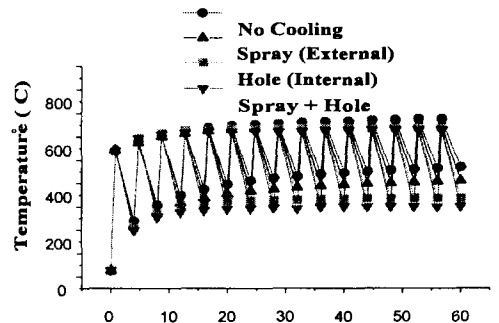


Fig. 4 Temperature distribution of die (Initial temperature = 27 °C)