

단조 금형의 윤활, 표면처리 및 금형 수명 평가

김병민

(부산대학교 기계공학부)

Evaluation of Tool Life for Forging Die Due to Lubricants and Surface Treatments

Byung Min Kim

Abstract

The mechanical and thermal load, and thermal softening occurring by the high temperature of die, in warm and hot forging, cause wear, heat cracking and plastic deformation, etc. This paper describes the effects of solid lubricants and surface treatments for warm forging die. Because cooling effect and low friction are essential to the long life of dies, optimal surface treatments and lubricants are very important to hot and warm forging process. The main factors affecting die hardness and heat transfer, are surface treatments and lubricants, which are related to heat transfer coefficient, etc. To verify the effects, experiments are performed for heat transfer coefficient in various conditions - different initial billet temperatures and different loads. Carbonitriding and ionitriding are used as surface treatments, and oil-base and water-base graphite lubricants are used. The effects of lubricant and surface treatment for warm and hot forging die life are explained by their thermal characteristics, and 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, Cold Forging, Lubricant, Surface Treatment, Tool Life

1. 서론

소성 가공 공정에서 재료는 금형에 의해 작용된 압력에 의해 유동하여 금형의 형상으로 변형하게 된다. 따라서 금형과 소재의 마찰 조건은 소재 유동에 큰 영향을 주며, 제품의 형상, 내부 결함, 금형에 작용하는 응력 및 성형 하중에 영향을 준다.⁽¹⁾ 일반적으로 소성 가공에서 마찰의 종류로는 첫 번째 무윤활 상태로 소재와 금형 사이의 접촉면에 윤활제를 사용하지 않고 산화막 만이 금형과 소재 사이에서 분리층으로 존재하여 윤활 역할을

하게 된다. 이 경우 높은 마찰 상수 값을 가지기 때문에 열간 평판 압연, 알루미늄 열간 압출 등의 제한된 공정에만 사용된다. 두 번째 유체 동역학적 상태로 얇은 층의 액체 윤활제가 소재와 금형 사이에 있으며, 마찰 조건은 윤활제의 점성과 금형과 소재 사이의 상대 미끄럼 속도에 의해 결정된다. 윤활제의 점성은 온도가 증가함에 따라 급격히 감소하기 때문에 사용하는 공정에 제한이 있다. 마지막으로는 경계 윤활로 대부분의 소성 가공 공정에서 사용한다.⁽²⁾

온·열간 단조에서는 큰 하중, 심한 마멸, 반복되는 열

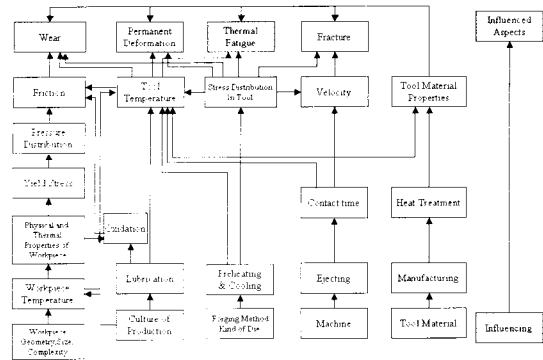


Fig. 1 Parameter relative to Die Life during Hot forging

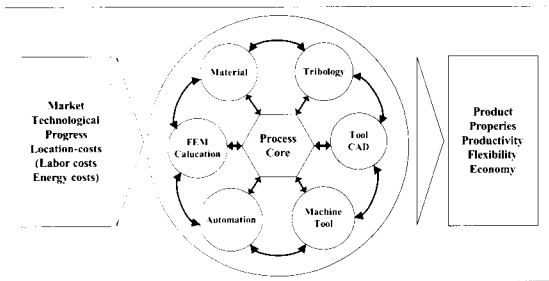


Fig. 2 Interactin of metal forming process with various components

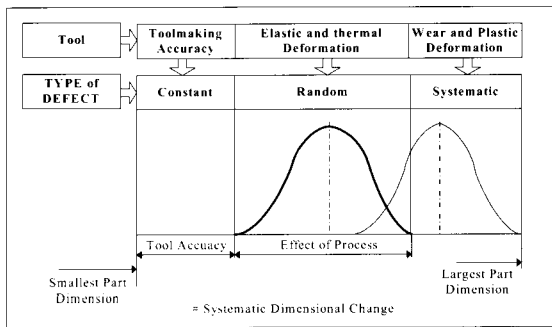


Fig. 3 Effect of the tool on product accuracy

피로 등에 의해 상대적으로 냉간단조보다 짧은 금형 수명을 가진다. 이런 단점을 개선하기 위한 연구는 계속되어지고 있다. 일반적으로 열간·온간 금형의 수명을 단축시키는 주된 원인으로는 마멸(wear), 히트체킹(heat checking), 소성변형(plastic deformation) 등이 있다.⁽³⁾

Fig.1에 공구수명과 공구수명에 영향을 미치는 공구수명 인자를 나타내었다. 그리고 Fig.2,3에 소성가공 공정에서의 다양한 요소들의 상호 작용과 제품 치수 정밀도에 대한 공구의 영향을 나타내었다. 금형수명 감소 요인들은 주로 금형과 소재의 마찰과 그로 인한 열에 의해서 발생되어지게 된다. 온·열간단조 중에 반복되는 공정에 의한 금

형에 발생하는 소성변형은 열연화현상에 의해 발생한다. 이러한 소성변형의 원인이 되는 공정 중에 발생하는 열전달을 파악하는 것이 중요하다. 실제 공정에서 금형과 소재사이의 열전달은 금형 표면처리와 윤활제에 따라 크게 좌우된다. 즉, 적합한 금형의 표면처리와 윤활제의 선택은 금형의 수명에 크게 영향을 미칠 수 있다. 따라서 윤활제와 금형의 표면처리의 종류에 따른 열적특성을 파악하여 금형과 소재사이의 열전달의 차이 정도를 비교하였다.⁽⁵⁾

이를 위해서 고체 윤활제인 유용성, 수용성의 두 그라파이트를 사용하여 윤활제와 금형 표면 처리에 따른 열전달의 양을 비교하는 실험을 수행하였다. 이러한 실험을 통하여 금형표면처리와 윤활제의 열적 특성을 파악함으로써 금형에 주는 영향을 파악하였다. 그리고 금형 수명 평가 방법을 제시하였다.

2. 링 압축 시험을 통한 윤활제의 마찰 상수 측정

2.1 열간 링 압축 시험

열간 단조에 있어서는 금형의 윤활 정도에 따라 제품을 성형하는데 많이 차이가 난다. 열간 단조 성형시 금형에 윤활 정도가 나쁘면 금형에 마멸이 집중되어 상대적으로 금형 수명을 단축시키고 제품의 성형길이가 짧게 되어 성형 불량 원인이 된다. 또한 소재와 금형 사이에 높은 마찰에 의해 제품을 금형으로부터 취출(ejecting)하기 어렵기 때문에 윤활 특성을 파악하는 것이 상당히 중요하다. 따라서 열간 링 압축 시험을 통해 윤활제의 열간 마찰 특성을 파악하였다. 열간 링 압축 시험에 사용된 장비는 150ton 프레스이며, 금형은 열간 단조용 공구강인 STD61을 사용하였다. 소재는 SM45C를 사용하였으며 시험온도는 800℃로 설정하였다. 링 소재를 가열하기 위해서 전기 가열로를 사용하였다. 금형은 상·하부에 전기 저항 열선을 각 2개씩 장착하여 예열 하였으며, 균일한 온도 제어를 위하여 금형 상·하부에 열전대를 삽입하였다. 시험전 상·하부 금형 예열 온도는 300℃로 하였다. 시험에 사용된 윤활제는 열간 단조에 주로 사용되고 있는 흑연계 유용성 윤활제로 미강유+흑연과 Acheson사의 Oildag, 수용성 윤활제로는 Acheson사의 Deltaforge #31, Renite사의 S-26-X 및 수용성 백색계 코팅제인 Acheson사의 Deltaglaze #151을 사용하였다. 시험에 사용된 윤활제에 대한 규격 및 밀도를 Table 1에 나타내었다.

시험은 높이 감소율이 20%, 30%, 40%, 50% 및 60%가 되도록 압축하였고, 각 윤활제를 시편에 윤활하기 위

Table 1 Comparison of lubricants

	Soy Bean Oil + Graphite	Oildag	Delta-forge #31	Renite S-26-X	Delta-glaze #151
Fluid Comp.	oil	oil	water	water	water
Lubricant	graphite	graphite	graphite	graphite	glass frit
Density (Kg/Liter)	0.92	-	1.08	1.08	1.414
Ratios	1:1	100%	1:3(water)	1:3(water)	1:3(water)

해 상부 금형과 하부 금형에 스프레이를 이용하여 균일하게 윤활하였다. 성형하는 동안 변형률 속도를 일정하게 하여 시험을 수행하였다.

2.2 링 압축 시험 결과

마찰 보정 곡선(calibration curve)을 얻기 위하여 강소성 유한요소해석을 실시하였다. 보정 곡선은 각 20°C와 800°C 응력-변형률 식을 사용하여 강소성 유한 요소 해석 코드인 DEFORM-2D를 사용하여 작성하였다. 유한 요소 해석을 실시하는 동안 전단 마찰 상수 값은 일정하다고 가정하였다. 각 온도별 유한 요소 해석 결과로부터 각각의 전단 마찰 상수 값에 대해 높이 감소율에 따른 내경 감소율을 측정하여 마찰 보정 곡선을 작성하였다.

열간 링 압축 시험 결과는 윤활제별로 전단 마찰 상수 값이 큰 차이를 나타내었다. 최소 값을 갖는 윤활제는 미강유+흑연과 Deltaforge #31 윤활제가 동일하게 전단

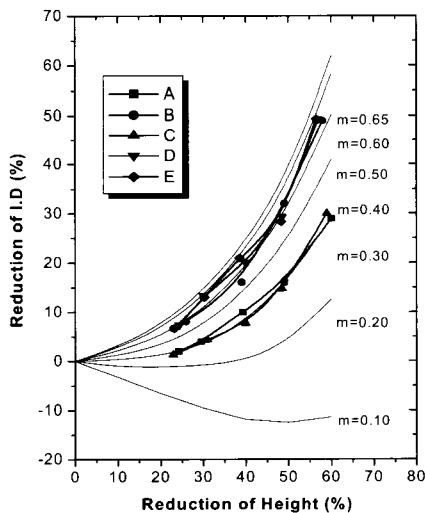


Fig. 4 Theoretical calibration curves and experimental results for hot ring compression (A)Soy Bean Oil + Graphite, (B) Oildag, (C) Deltaforge #31, (D) Renite S-26-X, (E) Deltaglaze #151

마찰 상수값 0.30을 갖는 결과를 보였으며, Oildag, Renite 및 Deltaglaze #151 윤활제 모두 전단 마찰 상수 값이 0.60으로 열간 단조에서 윤활 특성이 떨어지는 것으로 나타났다. 시험 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

3. 금형의 표면처리에 따른 열특성 평가

3.1 표면처리에 따른 계면 열전달계수 측정

열간압출 공정에서 열발생과 열전달은 금형 수명과 단조품의 품질에 매우 중요한 인자중의 하나로 인식되고 있다. 고온의 소재로부터 금형으로의 열전달량에 따라 금형의 온도를 결정 짓는다. 금형의 온도가 상승하면 금형의 항복강도가 저하되고 연삭마멸에 의한 강도가 떨어지게 되므로 금형 수명을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 금형의 표면처리에 따른 내열효과에 대한 특성을 파악하는 것이 중요하다. 표면처리에 따른 계면열전달계수를 파악하기 위해 사용된 금형의 표면처리는 무처리, 이온질화 처리, 침탄질화 처리를 사용하였으며, 표면처리에 따라 윤활제도 유용성 윤활제와 수용성 윤활제를 사용하여 계면열전달계수를 측정하였다. 소재의 재료는 SM45C를 사용하였으며, 금형은 STL61을 사용하였다. 또한 가열온도는 소재는 650, 850°C로 가열하였으며, 금형 온도는 300°C로 가열하였다. 가열된 소재를 각각의 온도에서 0, 3, 6ton의 하중을 가하여 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 장비는 25ton MTS(Material Test System)를 사용하였으며, Fig. 5에 시험장치의 개략도를 나타내었다. 시험은 300°C로 가열된 금형에 스프레이로 윤활제로 윤활하고 650, 850°C로 가열된 소재를 윤활된 면에 올려놓고, 0, 3, 6ton으로 하중을 부하 하여 시험 시작으로부터 20초 동안의 온도를 열전대로 측정하였다. 시험의 신뢰성을 확보하기 위해 시험 조건마다 4회 반복적으로 온도를 측정하였다.

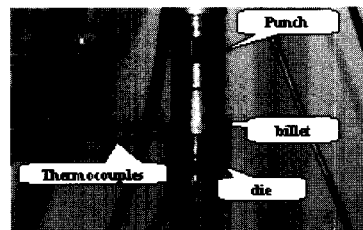
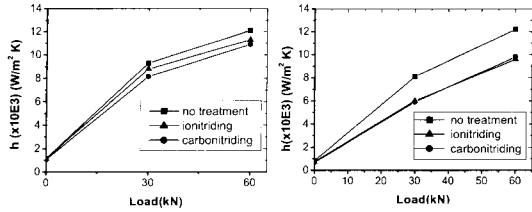
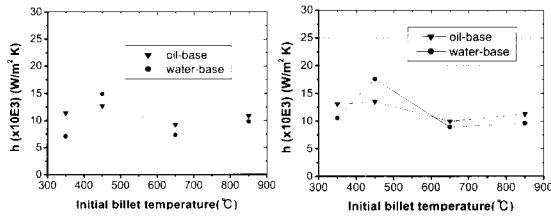


Fig. 5 The outline of experiment for heat transfer coefficient



(a) Oil-base graphite (b) Water-base graphite

Fig. 6 Heat transfer coefficient, when initial billet temperature is 850 °C



(a) Carbon nitride (b) Ion nitride

Fig. 7 Heat transfer coefficient, when load is 60(kN)

3.2 표면처리에 따른 계면열전달 계수 측정 결과

각 윤활제에 대한 열전달계수를 값을 살펴본 결과, Fig. 6에서 하중을 부하 할수록 열전달 계수가 높은 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있었으며, 650°C보다 850°C에서 계면 열전달계수가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 유용성 윤활제가 650°C에서 계면 열전달계수가 낮은 것으로 나타났으나 온도가 850°C에서는 수용성 윤활제가 유용성 윤활제보다 계면열전달계수가 작아져 열전달 특성이 우수한 것으로 나타났다. 표면처리에 따라 전체적으로 침탄질화 처리가 계면열전달계수가 가장 작은 것으로 나타났으며, 이온질화 처리가 무처리한 금형에 비해 열전달 계수가 낮은 것으로 나타났다. 하중에 따른 계면 열전달 계수의 상승폭이 무처리한 금형에서 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. Fig. 7에서는 소재의 실험 초기 온도에 따른 유용성과 수용성 윤활제의 계면열전달계수를 비교한 것이다.

3.3 금형 표면처리

금형의 내마모성, 내소부성을 향상시키기 위하여, 소재는 현재 사용하고 있는 다이재 또는 저품위의 다이재를 적극적으로 바꾸어 공구의 표면을 경화하여, 저비용, 고성능을 목표로하는 여러 가지 표면 경화법이 개발되었

다. 대표적인 것을 열거하면 Table 2와 같다.

Table 2 Characteristics about surface treatments

Type	Plating		soft-nitriding	Discharge nitriding	CVD TiC	PVD TiC	TD PROCESS			WC	Tool steel
	Cr	Ni-P					VC	NbC	Cr-C ₂		
Hardness	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wear resistance	O	O	O	O						O	-
Sticking resistance	O	O	O	O							-
Impact resistance	X	X	X	X							X
Separation resistance	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	-
Deform resistance	X	X		O	O	O	O	O	O	O	-

※ △Standard ◎Excellent O Good X Poor

4. 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. 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 금형 수명에 영향을 미친다. 즉, 경우에 따라서는 금형이 소성변형으로 인한 금형 수명감소보다 마멸에 의한 금형 수명감소가 주 요인으로 나타날 수도 있고 그반대일 수도 있다. Fig. 8에 제품 품질을 위한 전체 소성 공정과 모든 요구조건들을 나타내었다. Fig. 9에 냉간 단조에 있어서 대표적인 공구 결함에 대해 나타내었으며, Fig. 10에는 열간 단조에서 공구 결함에 대해서 나타내었다.

본 연구에서는 열간 단조의 정량적인 금형 수명 평가 방법으로 금형강도가 항복강도에 도달할 때까지의 경도 유지 시간으로 평가하는 소성변형에 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.

4.1 소성변형에 대한 금형 수명 평가 방법

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

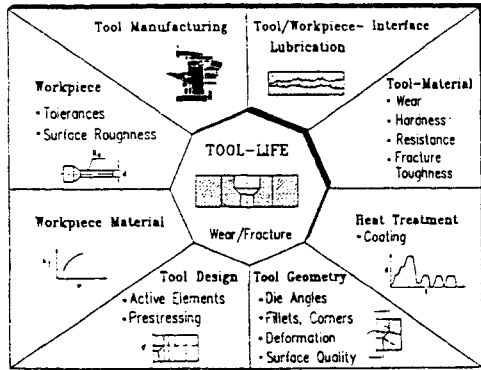


Fig. 8 Different aspects of tool, workpiece and forming process, determining tool life by affecting wear and fracture behaviour of the tool

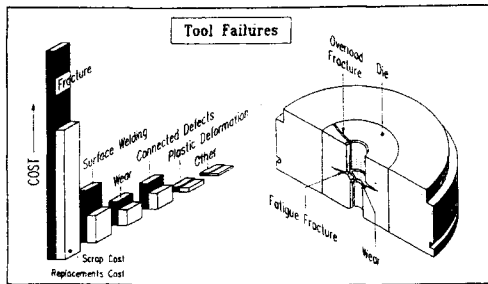


Fig. 9 Typical tool failures in cold extrusion

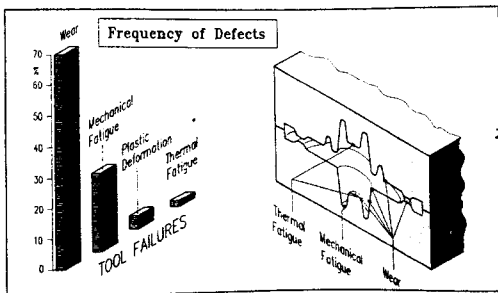


Fig. 10 Typical locations of various modes of die failure encountered in hot forging

금형은 템퍼링 과정을 거치면서 금형의 경도는 마르텐 사이트 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.⁽⁴⁾

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

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.

4.2 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, 접촉물기의 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 템퍼링 효과에 의한 열연화도 겪게 된다.⁽⁶⁻⁹⁾

열간 단조 금형 마멸 계산에는 두 물체의 접촉 시 마멸 깊이를 식(4)와 같이 제안한 Archard 마멸 모델을 적용하였다.

$$V = \frac{kPl}{3h} \quad (4)$$

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(2)는 다음과 같다.

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

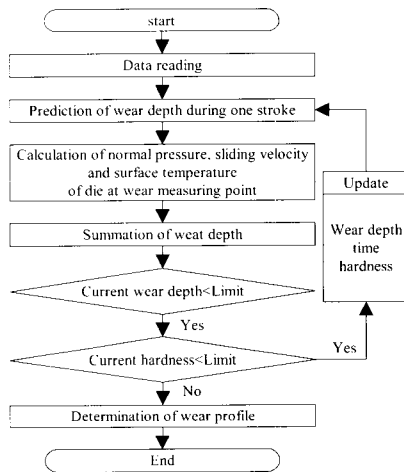


Fig. 11 Flow chart of wear analysis

먼저 제품의 성형 해석을 통하여 금형면에 작용하는 압력(σ_n), 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(5)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. 11과 같다.

참 고 문 헌

- (1) T.Altan, S.oh, H.Gegel, "Metal forming," ASM, Metal Park, PH44073, 1993.
- (2) J.A.Schey, "Metal deformation processes: Friction and lubrication," Marcel Dekker, New York, 1970.
- (3) Hiroyuki Saiki, "Tribology in Warm and Hot Forming," JSTP International Seminar on Precision Forging, 1997.
- (4) 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ソの影響についての考察," 塑性と加工, Vol. 22, No.241, pp. 133~138, 1981.
- (5) 김중호, 김동진, 정덕진, 김병민, "윤활제와 표면처리에 따른 열간 단조 금형의 열적특성 평가," 한국정밀학회 춘계학술대회, pp.833~836, 2000.
- (6) J. F. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces," Journal of applied physics, pp. 981~988, 1953.
- (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) 이진호, 김동진, 김병민, 김호관, "열연화 현상을 고려한 열간 단조 금형의 마멸해석," 한국소성가공학회, Vol. 9, No. 1, pp. 43~51, 2000.