

금형냉각법에 따른 열간 단조 금형의 수명 평가

김병민* · 김동환**
(2003년 5월 15일 접수)

Estimation of Die Service Life for Die Cooling Method in Hot Forging

B. M. Kim and D. H. Kim

Abstract

Dies may have to be replaced for a number of reasons, such as changes in dimensions due to die wear or plastic deformation, deterioration of the surface finish, break down of lubrication and cracking or breakage. In this paper, die cooling methods have been suggested to improve die service life considering die wear and plastic deformation in hot forging process. The yield strength of die decreases at higher temperatures and is dependent on hardness. Also, to evaluate die life due to wear, modified Archard's wear model has been proposed by considering the thermal softening of die expressed in terms of the main tempering curve. It was found that the use of die with cooling hole was more effective than that of direct cooling method to increase the die service life for spindle component.

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

1. 서론

열간 단조 공정은 자동차, 산업기계 등의 주요 부품을 제조하는데 많이 이용되고 있다. 특히 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, 성형 중의 열 사이클, 과도한 금속유동 및 금형의 경도저하 등에 의해 상대적으로 냉간 가공법에 비해서 짧은 금형수명을 갖는다. 특히 원가 절감, 재료비 감소가 절실히 요구되는 오늘날에는 이러한 금형수명의 연장은 매우 중요한 문제이다.⁽¹⁻³⁾

열간 단조용 금형의 수명을 결정하는 주요인은 소재와 금형의 접촉면 마찰에 의해서 발생하는 마멸(wear)과 열 피로에 의한 표면 열크랙(heat crack), 금형의 강도가 소재의 유동응력을 따르지 못하여 발생하는 소성변형(plastic deformation) 등이 있다. 이러한 금형수명 감소 요인들은 서로 분리되어 발생되든지, 동시에 서로 영향을 미치면서 발생되며, 각각의 공정 또는 제품이 요구하는 특성에 따라서 이들 금형 파손 또는 손상의 인자가 바뀌게 되어 서로 다른 비중으로 전체적인 금형의 수명에 영향을 미치게 된다.⁽⁴⁻⁵⁾

열간단조에 있어서 소재의 온도를 1200~1240° C 로 연속성형을 할 경우, 금형의 온도는 500° C 이

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

** 진주국제대학교 자동차공학과

상이 되고, 템퍼링 온도를 넘어서 열연화 현상을 야기한다. 즉, 온도상승으로 인한 경도의 저하는 마멸, 금형의 소성변형, 그리고 반복되는 열 피로에 의한 열 피로 파괴 등 금형을 폐기 처분해야 하는 원인이 된다. 따라서 열간단조 금형 수명 향상을 위하여 냉각방법에 대한 정량화된 데이터가 절실한 실정이다. 지금까지 산업 현장에서는 냉각에 따른 금형수명 향상에 대한 중요성을 충분히 인식하지 못함으로 인해 냉각을 전혀 하지 않거나 금형에 직접 분사하는 방식이 사용되어져 왔다.⁽⁶⁻⁷⁾

본 연구에서는 금형에 직접 냉각수를 분사하는 냉각 방식과 금형에 구멍을 뚫어 냉각수를 순환시키는 냉각 방식의 이상적인 두 가지 방법에 대해 해석을 수행하고 제안된 금형수명 평가 방법⁽⁸⁾으로 자동차 축 제품의 열간단조 금형에 대해 수명 평가에 적용하여 열간단조 금형의 주 수명 감소 요인을 파악하였다.

2. 열간 단조 금형의 수명 평가

2.1 소성변형에 대한 열간 금형수명 평가

열간 단조 공정에서 금형은 열연화 현상으로 인한 점진적인 항복강도의 감소로 인해 어느 시점에 도달하면 금형의 국부적인 소성변형이 발생하게 된다. 열간 단조 금형은 템퍼링 과정을 거치면서 경도는 다소 감소하나 인성은 증가하게 된다. 이러한 템퍼링 영향에 의한 경도하락은 성형 과정에서 나타나는 반복적인 열 영향에 의한 금형경도의 하락과 동일한 특성을 나타내므로 금형의 경도를 시간과 온도의 함수로 표현할 수 있다. 따라서 열간 단조 금형의 소성변형에 대한 금형수명 평가를 위해 고온에 의한 경도 변화를 평가할 수 있는 템퍼링 파라메타(M)를 적용하였다.⁽⁹⁾

소성변형에 대한 금형수명 평가를 위하여 템퍼링 파라메타에서 템퍼링 시간을 성형 중 금형강도가 열연화에 의해 항복강도에 도달할 때까지의 경도 유지 시간 t_h 로 바꾸어 식(1)과 같이 나타내어 금형수명을 평가 하였다.

$$t_h = \exp\left(\frac{M_{yield} \times 1000}{T_{eq}} - C\right) \quad (1)$$

여기서, M_{yield} 는 항복강도 도달 시의 M 값이다. C 는 재료상수로 일반적인 탄소강의 C 값은 대략

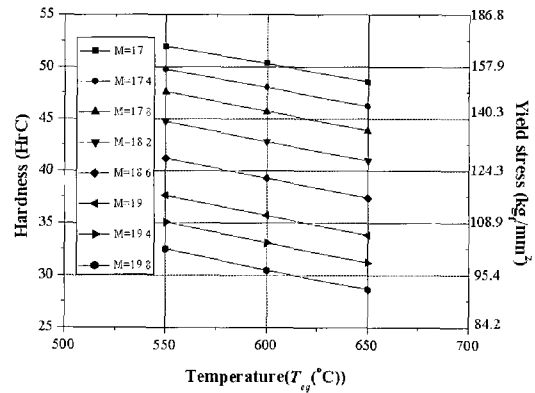


Fig. 1 Master tempering curves of STD 61

20 이다. 성형에서부터 취출 되기까지 금형의 온도 변화에 대해 상당온도(T_{eq})로 식 (2)와 같이 나타내었다.

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

여기서 T_{max} , T_{min} 은 온도 진폭 중 최고 및 최저 온도이다. 열연화 실험을 통해 STD 61 열간 금형강의 상당온도, 경도, 항복강도의 상호 관계를 나타낸 주템퍼링 곡선은 Fig. 1 과 같다. 먼저 주템퍼링 곡선에서 성형 해석을 통해 구한 항복강도와 상당온도 값을 읽어 M_{yield} 값을 구하고, 이를 식(1)에 대입하여 경도유지 시간 t_h 를 구했다. 마지막으로 식(1)에서 구한 경도 유지 시간을 최종 금형의 1 사이클 시간(cycle time)으로 나누어 생산 개수를 예측하였다.

2.2 연삭마멸에 대한 열간 금형수명 평가

마멸에 관계된 인자들은 접촉면의 온도, 접촉돌기의 분포, 접촉면의 거칠기 등의 접촉상태와 금형 재료의 경도, 금형에 작용하는 수직압력, 미끄럼길이, 윤활조건 등이며, 특히 열간 단조 공정에서 금형의 마멸은 제품의 치수 정밀도 및 제품 표면정도에 문제가 된다.⁽¹⁰⁻¹⁴⁾

열간 단조 금형 마멸 계산에는 두 물체의 접촉시 마멸 깊이를 수치적으로 계산할 수 있는 Archard 마멸 모델을 적용하였고 열간 단조 금형의 수명평가를 위해 시간과 온도에 따른 금형의 고온에서 경도 변화와 표면층의 마멸량 증가에 따른 깊이 방향의 경도 변화를 고려한 수정 마멸모델식(3)은 다음과 같다.

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

여기서 M 은 템퍼링 파라미터, $wear_depth$ 는 마멸깊이 그리고 h 는 템퍼링 파라미터와 마멸깊이에 따른 금형의 표면경도이다. N 은 스텝번호, σ_n 은 수직응력, v_s 는 미끄럼 속도, Δt 는 시간증분 그리고 k 는 재료와 접촉조건에 의존하는 상수로서 고온마멸실험을 통해 구해진다. 먼저 제품의 성형 해석을 통하여 금형면에 작용하는 압력과 소재의 유동속도 그리고 금형의 온도 분포를 구하고 다음으로 마멸 및 열연화 실험을 통하여 얻은 허용 마멸량 및 한계 고온 경도 값을 수정 마멸 모델식(3)에 대입하여 마멸 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 1 회 성형 공정 동안 금형의 마멸깊이를 계산하고 이 마멸깊이에 해당하는 경도 값을 예측하였다. 이 값들을 한계 값들과 비교하여 한 공정에 대한 금형의 수명을 평가하였다. 마멸깊이가 허용 값보다 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. 2 와 같다.

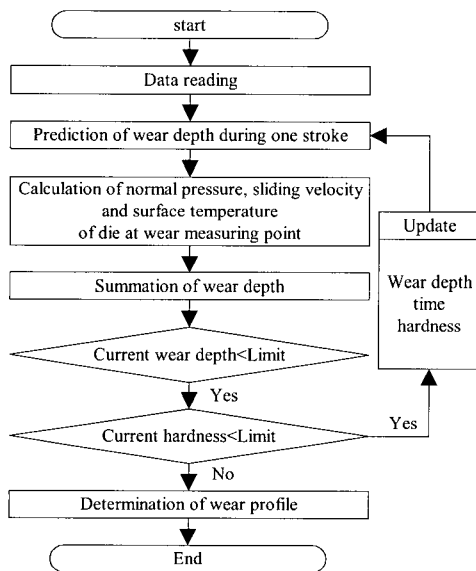


Fig. 2 Flow chart for abrasive wear analysis

3. 냉각 방법에 따른 금형수명 해석 및 결과

본 연구에서 제시된 수명 예측기법의 적용을 위해 금형수명에 가장 큰 영향을 주는 금형 곡률부(point 1,2)와 펀치 코너부를 가진 Fig. 3 과 같은 열간 단조 제품을 선정하였다. 본 연구의 대상 제품은 열간 축대칭 제품이며, Fig. 4 와 같이 예비열세팅(pre-upsetting) 공정, 예비성형(preform) 공정, 피니쉬 (finisher) 공정의 3 단계로서 실제 현장에서 제조 되고 있다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 본 제품의 특징은 높이가 320mm, 최대직경이 130mm 이고, 긴 압출부를 가지고 있다. 외경이 3 단으로 이루어져 있으며, 기계가공을 최소화할 수 있도록 밀폐단조로 성형되기 때문에 일반적인 단조에 비해 각 단의 곡률부 라운드의 치수 정밀도가 상당히 중요하다. 또한 성형 길이가 길어 펀치 코너부와 고온 소재와의 긴 접촉시간으로 펀치 코너부에서 열연화가 일어나 펀치 수명이 매우 짧다. 따라서 금형 곡률부 (Point 1,2)와 펀치 코너부(Point 3)에 대하여 공정 설계에 따라 금형수명 평가를 수행하였다. Table 1 에 성형해석 조건을 나타내었다.

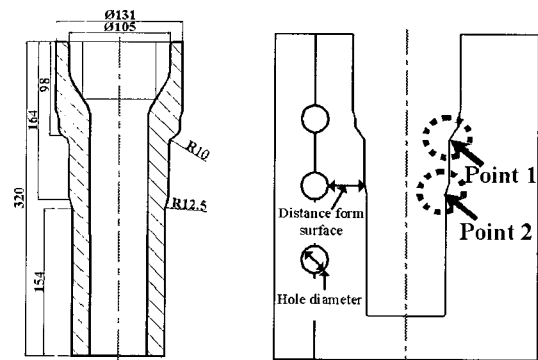


Fig. 3 Schematic representation of the product and estimated points of tool life

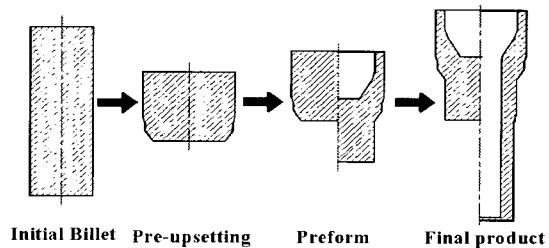


Fig. 4 Process design of a spindle product

Table 1 Process conditions for FE-analysis

Billet	Materials	SM45
	Thermal conductivity	74.93 N/sec°C
	Emissivity	0.3
	Heat capacity	3.60N/mm°C
Die	Materials	STD61
	Thermal conductivity	28.6N/sec°C
	Emissivity	0.3
	Heat capacity	3.57N/mm°C
Conditions	Surface treatment	Ion-nitride
	Friction factor	0.3
	Heat transfer coefficient	11.3N/sec mm°C
	Convection coefficient	0.02 N/sec mm°C
	Billet/die initial temp.	1200, 200°C
	Forging velocity	200mm/sec

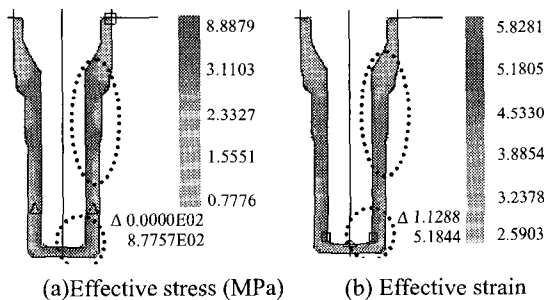


Fig. 5 Effective stress and effective strain of a final product for conventional hot forging process

열간 축대칭 제품을 성형하기 위해 각 공정에서 제품의 각 단을 성형하는 공정 설계로서 옆세팅 공정에서는 열간단조품의 첫째 단을 성형하고, 예비성형 공정에서는 둘째 단을 성형하고 마지막 최종 공정에서는 최종 제품 치수를 성형하는 공정으로 설계하여 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM 을 이용한 성형해석을 수행하였다. Fig. 4 는 현재 작업중인 스피들 부품의 각 단을 고려한 공정 순서도이다. 성형 해석 결과 예비성형 공정에 비해 최종 공정에서 변형률이 크게 나타나 금형에 큰 변형저항을 가하게 되고, 특히 Fig. 5 에서와 같이 금형 곡률부 와 펀치 코너부에서 국부적인 잔류응력의 집중 및 변형률이 집중적으로 작용하여 제품의 표면 결함 및 강도 저하를 야기키는 것으로 나타났다.

금형에 직접 분사하면서 냉각시키는 방법은 성형이 계속될수록 금형 온도는 계속 상승하여 결국 열연화 현상으로 인해 금형이 손상된다. 냉각

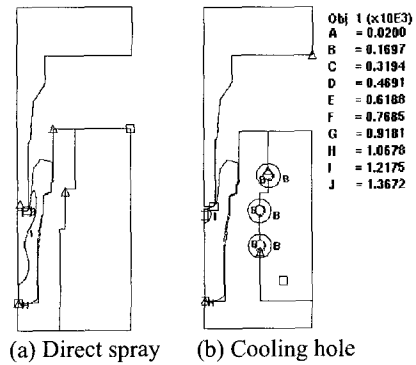


Fig. 6 Initial die temperature for die cooling system

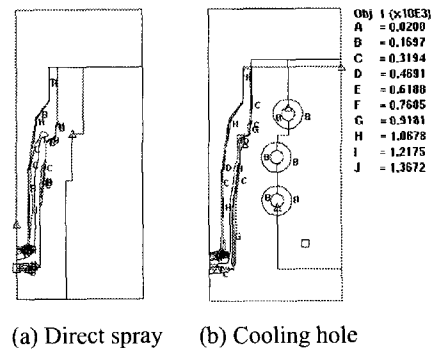


Fig. 7 Initial die temperature for die cooling system

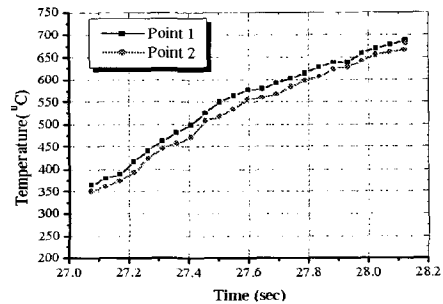


Fig. 8(a) Temperature on die surface for direct spray

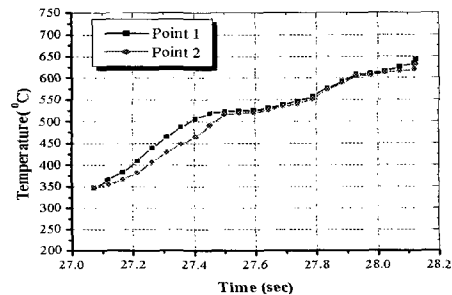


Fig. 8(b) Temperature on die surface for cooling hole

방법에 따른 금형수명 평가를 위해 직접 스프레이 분사형 냉각 방식과 냉각 홀을 이용한 냉각 방식을 비교하였다. 이때 냉각 홀은 3 개, 냉각 홀의 지름은 20mm 그리고 냉각 홀과 표면과의 거리는 금형 폭과 금형 강도를 고려하여 30mm 로 하였다. 직접 스프레이 분사형 및 냉각 홀을 이용한 냉각 방식에 따른 초기 성형에서 온도 분포와 최종 성형 단계에서 온도 분포를 Fig. 6 와 Fig. 7 에 각각 나타내었다.

최종 공정의 곡률부(Fig. 3, point 1, 2)에서의 온도 변화를 Fig. 8 에 나타내었다. 직접 스프레이 분사형 냉각 방식에 비해 냉각 홀을 이용한 냉각 방식에서는 금형 표면온도 하락이 소재 표면온도 하락에 영향을 주어 변형 저항이 증가되어 금형에 작용하는 절점력은 다소 증가하였고, 곡률부에서 속도분포는 작게 나타났다.(Fig. 9, 10)

Fig. 11 과 Fig. 12 에는 금형 냉각 방식에 따른 마멸 해석 결과와 금형 강도 해석 결과를 나타내었고, Table 2 에 직접 분사 방식과 냉각 홀 방식에 따른 금형수명 평가 결과를 나타내었다.

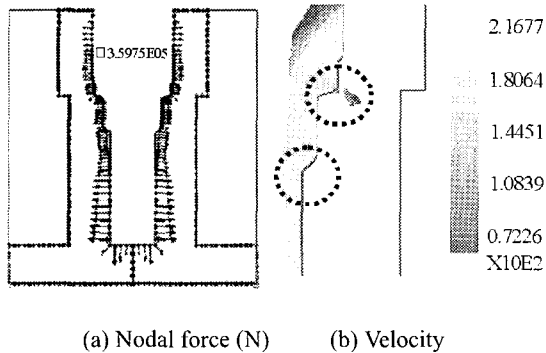


Fig. 9 Nodal force and velocity on die surface for direct spray cooling

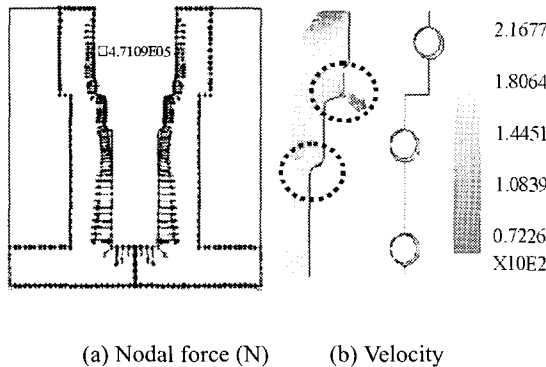


Fig. 10 Nodal force and velocity on die surface for cooling hole

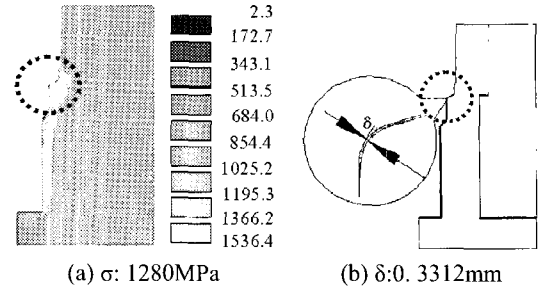


Fig. 11 Effective stress and wear depth for direct spray cooling at point 1 (Fig.3)

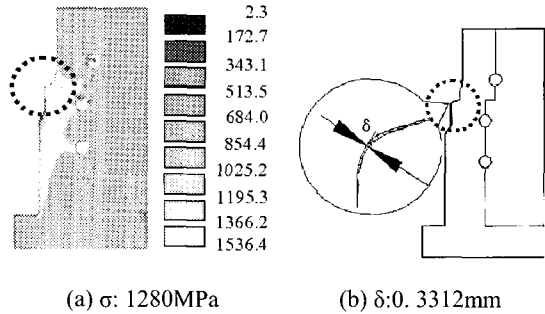


Fig. 12 Effective stress and wear depth for cooling hole at point 1 (Fig. 3)

Table 2 Estimation of die life for the cooling method considering plastic deformation (1) and wear (2)

Cooling method	Direct spray cooling		Cooling hole	
	Point 1	Point 2	Point 1	Point 2
Equivalent temperature (°C)	580	571	560	556
Effective stress (kg/mm ²)	128	136	138	139
Tempering parameter (M)	18.4	18.3	18.2	18.2
Life time (hr)	26.1	29.4	34.9	44.8
Product quantity (ea)	10420	11770	13982	17900
Wear depth (mm)	0.3312	0.3016	0.2240	0.2016
Life time (hr)	21.8	24.0	32.4	35.9
Product quantity (ea)	8755	9613	12944	14382

직접 스프레이 분사형 냉각 방식과 냉각 홀을 이용한 냉각 방식에 따른 금형수명 평가를 한 결과 소성변형에 대한 금형수명 평가 측면에서는 냉각 홀을 이용한 방식이 직접 스프레이 분사형 냉각 방식보다 향상 되었다. 직접 분사 냉각 방식에서는 금형 곡률부 온도가 높은 곳에서 수명이 현저히 감소하였고, 마멸에 대한 금형수명 평

가에서도 냉각 효율을 이용한 냉각 방식에서는 금형수명이 직접 스프레이 분사형 냉각 방식에서 보다 향상 되었다. 냉각 효율을 이용한 냉각 방식에서는 금형의 초기 예열 온도에 근접하게 지속적으로 금형 온도를 유지 해주면서 금형수명을 향상 시켰다.

4. 결 론

본 연구에서는 금형냉각법에 따른 열간단조 금형의 수명 향상을 위하여 소성변형과 연삭 마멸에 의한 수명 평가 방법을 제시하였고, 제시된 수명 평가 방법을 이용하여 소성변형과 마멸에 대한 수명 감소 요인을 금형 냉각 방법에 따라 분석하였다. 그 결과 냉각 효율을 이용한 냉각 방식이 직접 분사 냉각 방식 보다 금형 수명 향상에 효과적임을 알 수 있었고, 직접 분사 냉각 방식의 경우 금형 곡률부 온도가 높은 곳에서 금형 열연화로 인해 수명이 현저히 감소하였다. 제시된 금형 수명 평가 방법은 열간 성형 공정의 금형 수명 향상을 위한 공정 및 금형 설계 시 유용하게 적용 될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터의 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) Lange, K., 1985, "Handbook of Metal Forming," McGraw-Hill.
- (2) Archard, J. F., 1953, "Contact and rubbing of flat surfaces," *Journal of Applied Physics*, pp. 981~988.
- (3) Hansen, P. H. and Bay, N., 1990, "A flexible computer based system for prediction of wear distribution in forming tools," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol.1, pp. 19~26.
- (4) Saiki, H., 1997, "Tribology in Warm and Hot Forming," *JSTP International Seminar on Precision Forging*.
- (5) Saiki, H., Marumo, Y., Minami, A., and Sono, T., 2001, "Effect of the surface structure on the resistance to plastic deformation of a hot forging tool," *Journal of Material Processing Technology*, Vol.113, pp. 22~27.
- (6) Altan, T. Oh, S. I., and Gegel, H. L., 1983, "Metal forming: Fundamentals and Application," ASM, Metal Park.
- (7) 제진수, 2000, "온간단조에서의 냉각방식에 따른 금형수명의 영향," *프레스기술*, 제 10 호, pp. 130 ~137.
- (8) 이현철, 김병민, 김광호, 2003, "열간 단조 공정에서 금형 수명 향상을 위한 공정설계," *한국소성가공학회지*, 제 12 권 제 1 호, pp.18 ~ 25.
- (9) 湯淺紘二, 岡本治郎, 1981, "潤滑間鍛造用 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.
- (10) Singh, A. K., Rooks, B. W., Tobias, S. A., 1973, "Factors affecting die wear," *WEAR*, Vol. 25, p. 271.
- (11) Venkatesan, K., Subramanian, C., and Summerville, E., 1997, "Three-body abrasion of surface engineered die steel at elevated temperatures," *WEAR*, Vol. 203~204, pp. 129~138.
- (12) Kim, T. H., Kim, B. M. and Choi, J. C., 1997, "Prediction of die wear in the wire-drawing process," *Journal of Material Processing Technology*, Vol.65, pp. 11 ~ 17.
- (13) 이진호, 김동진, 김병민, 김호관, 2000, "열연화 현상을 고려한 열간단조금형의 마멸해석," *한국소성가공학회지*, 제 9 권, 제 1 호, pp. 43 ~ 51.
- (14) Kim, D.H., Lee, Y., Yoo, S.J, Choo, W.Y. and Kim, B.M., 2003, "Prediction of the wear profile of a roll groove in rod rolling using an incremental form of wear model," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol.217, pp. 111~216.
- (15) Kang, B.S., Lee, J.H., Kim, B.M. and Choi, J.C., 1995, "Process design in flashless forging of rib/web-shaped plane-strain components by the finite element method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.47, pp. 291~309.
- (16) Doege, E., and Bohnsack, R., 2000, "Closed die technologies for hot forging," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.98, pp. 165~170.
- (17) Vazquez, V. and Altan, T., 2000, "New concepts in die design-physical and computer modeling applications," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.98, pp. 176~181.