

## 온도상승을 고려한 인발금형의 마모해석

김병민\*, 조해용,\*\* 김태형\*\*\*

### Analysis of die wear in wire drawing with temperature effect

B.M. Kim,\* H.Y. Cho,\*\* T.H. Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

In forming processes, die failure must be considered before die design. One of the main reasons of die failure in industrial application of metal forming technologies is wear. The die wear affects the tolerances of formed parts, metal flow and costs of processes etc. The only way to control these failures is to develop methods which allow prediction of the die wear and which are suited to be used in the design state in order to optimize the process. In this paper, wire drawing processes were simulated using the rigid-plastic finite element method and its results were used for predicting the die wear by Archard's wear model. The effects of the temperature rising on the wear profiles of die were also investigated. The simulation results were compared with the measured die profiles.

**Key Words** : Die Wear(금형의 마모), Wear Model(마모모델), Wire Drawing(인발공정), Finite Element Method(유한요소법).

#### 1. 서론

최근 금속성형 산업에서 제품의 원가절감 및 후처리를 줄이는 방안으로서 정형가공에의 관심이 모아지고 있다. 일반적으로 금속성형공정은 금형에 작용하는 압력이 매우 높으므로 금형의 설계시 파손 또는 마모에 주의를 기울여야 한다.<sup>[1]</sup>

금속성형공정에서는 금형의 마모, 응력집중 등이 국부적인 영역에서 발생하기 쉽고, 특히 금형의 마모는 제품 치수 불량률의 원인이 되며, 또한 재료유동 및 금형 수명에도 영향을 미치기 때문에 실제 현장에서 제품의 정밀도, 금형의 신뢰성 및 경제성을 유지하고 적절한 금형교체시기를 예측하기 위해서는 금형의 마모에 대한 연구가 요구된다. 마모현상은 Holm<sup>[2]</sup>이 두 물체의 접

\* 부산대 정밀정형 및 금형가공 연구센터

\*\* 충북대 정밀기계공학과

\*\*\* 부산대 대학원

속시 표면거칠기의 소멸이라고 제안하였으며 비슷한 식(1)에 Archard<sup>(3)</sup>가 두 접촉물체 표면의 미세돌기들 (asperities)의 접촉을 고려하여 미세돌기의 파괴를 마모현상이라고 제안하였다. Liou와 Hsiao<sup>(4)</sup>는 고속열간 업셋팅공정에서 금형의 온도에 따른 경도를 변수로 고려하여 금형의 마모량을 계산하였다. Hansen과 Bay<sup>(5)</sup>는 Archard의 마모모델을 이용하여 업셋팅공정에서 금형의 마모량을 계산하였으며 금형 표면거칠기가 커질수록 소재와의 미끄러짐길이 감소하므로 금형의 마모량이 줄어든다고 제시하였다. Doege 등<sup>(6)</sup>은 금형의 마모 계산시 응착마모이론 적용의 타당성을 실험적으로 입증하였다. Rooks 등<sup>(7)</sup>은 초기금형속도와 온도를 9.15m/s, 300℃로, 초기소재의 온도를 1000℃로 각각 설정하여 고속열간업셋팅 실험을 수행하였으며, 그들은 금형마모에 영향을 미치는 주인자는 금형-소재간의 상대속도임을 입증하였다. Ali 등<sup>(8)</sup>은 금형의 부식마모현상을 해석하였으며 금형의 부식마모는 금형과 소재간의 윤활상태, 접촉시간에 영향을 받는다고 지적하였다. 최근 Tronel과 Chenot<sup>(9)</sup>은 반구형 편치로 사각블럭을 압입할 때 발생하는 편치의 마모를 유한요소해석결과를 이용하여 예측하였다.

선재인발공정은 금형에 작용하는 압력은 낮은 반면 비교적 가공속도가 빠르며 작업이 연속적으로 이루어지므로 금형에는 국부적으로 높은 열이 발생하게 되며 이로 인해 금형은 경도가 저하되게 된다. 따라서 인발금형은 국부적인 영역에서 마모가 발생하게 되며 공정 중 작업자는 인발된 선재의 치수를 측정하여 금형의 교체 여부를 판단하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 냉간가공 중에서 마모가 가장 심하게 발생하는 선재인발공정에 대해 Archard의 마모모델을 적용하여 금형의 마모를 해석하였으며, 변형중인 소재가 금형의 마모에 영향을 미치는 인자인 수직압력 및 미끄러짐속도 등을 구하기 위하여 변형공정을 유한요소해석하였다. 또한 정상상태의 금형 온도분포를 해석하였으며 온도상승에 의한 금형의 경도변화를 고려하여 금형의 마모현상을 조사한 후 각각의 해석결과를 실제 현장에서 선재인발공정 중 마모된 금형의 형상과 비교하였다.

## 2. 이론해석

### 2.1 마모이론

금속과 금속의 접촉시 마모에 관계된 인자들은 접촉

면의 온도, 접촉돌기의 분포, 접촉면의 거칠기 등의 접촉상태와 금형재료의 경도, 금형에 작용하는 수직압력 미끄러짐길이 윤활조건 등에 의해 결정된다.<sup>(10)</sup> 본 연구에서는 이론해석이 간단하면서도 실제 마모메카니즘에 널리 적용되고 있는 Archard의 마모모델<sup>(3)</sup>을 적용하였으며 그는 두 물체의 접촉시 마모체적은 아래와 같다고 제안하였다.

$$V = \frac{kPA}{3h} \quad (1)$$

여기서 V는 마모체적이며 k는 마모계수, P는 수직압력, A는 접촉면적, h는 금형의 경도이다. 일반적으로 금속성형공정에서 금형에 작용하는 압력은 공정의 진행과 함께 변하므로 식(1)을 아래와 같은 형태로 적용하였다.

$$d = \sum_{i=1}^N \frac{k}{3h} (\sigma_{ni} v_i \Delta t) \quad (2)$$

여기서 마모로 발생하는 체적을 길이 단위로 환산하였으며, d는 마모깊이, N은 전체 성형중분 단계수,  $\sigma_n$ 은 수직압력,  $v_s$ 는 금형과 소재의 미끄러짐속도이며, t는 중분시간이다. 식(2)에서  $h=h(T)$ , 즉 금형의 경도를 온도에 대한 함수로 고려하였다.

마모거동을 해석하기 위한 가정은 다음과 같다.

- ① 유한요소해석에서 금형은 탄성변형이 없는 강체로 가정한다.
- ② 금형의 돌기부에서는 소성변형을 받는다고 가정한다.
- ③ 선재인발공정 중의 온도계산은 정상상태에서 수행되었다.

### 2.2 변형해석

소재의 변형해석은 강소성 유한요소법을 이용하였다. 강소성 유한요소식은 여러문헌<sup>(11,12)</sup>에 자세히 소개되어 있으므로 여기서는 생략한다. 변형해석에 사용된 재료는 AISI 1010으로 응력-변형률의 관계가  $\bar{\sigma} = 715.93 \bar{\epsilon}^{0.22}$  (N/mm<sup>2</sup>), 윤활재는 파우더이며 링압축 실험결과 마찰상수는 0.15로 나타났다. 각각의 인발공정조건은 Table. 1과 같다. 초기소재의 치수는 입구 소재 직경이 각각 4.7, 4.5mm, 출구 소재 직경이 각각 4.5, 4.0mm이며 길이가 9.5mm인 선재이다. 해석에 적용된 금형의 재질은 AISI D2이며, 탄성계수가  $6.8 \times 10^5$

Table 1 Process conditions of wire drawing

Conditions \ Process	A	B
Half die angle( )	6.5	6.5
Initial workpiece diameter(Di, mm)	4.7	4.5
Final workpiece diameter(Do; mm)	4.5	4.0
Reduction in area(%)	8.33	20.99
Length of die land(mm)	1.5	1.5
Wire drawing speed(mm/s)	5000	5000
Constant friction factor ( $0 \leq m \leq 1$ )	0.15	0.15

N/mm<sup>2</sup>. 경도가 682 HB이다.

해석에 사용된 소재와 금형의 격자시스템을 Fig. 1에 나타내었으며, 소재의 격자시스템은 강소성 유한요소 해석을 위한 것이며, 금형의 격자시스템은 금형의 마모량 계산을 위한 것이다. Fig. 2는 최종변형단계에서 유효변형률의 분포를 나타낸 것으로서 랜드부를 빠져나오는 부분에서 변형이 최대임을 볼 수 있으며 단면감소율이 큰 B공정의 경우가 최대유효변형률이 더 큼을 볼 수 있다.

고정된 금형표면에 유동하는 소재가 미치는 압력, 미끄럼속도 등을 구하기 위하여 본 연구진이 제안한<sup>[13]</sup> 접촉조건을 이용하였으며, 금형의 격자를 Fig. 1과 같이 구성하였다.

일반적으로 금형의 절점과 소재의 절점이 일치하지 않으므로 금형절점에 작용하는 압력을 구하기 위해서는 소재에 작용하는 절점력을 금형에 작용하는 압력으로 변환하여야 한다. 이러한 소재의 절점력을 금형의 경계 절점에 작용하는 압력으로 보간하기 위한 기법은 본 연구진이 제시한 방법<sup>[13]</sup>을 이용하였다.

각 공정의 최종변형단계에서 소재의 절점력을 금형에 작용하는 압력으로 변환하였으며 그 분포는 Fig. 3과 같다. 최대압력은 금형과 소재가 접촉하기 시작하는 지

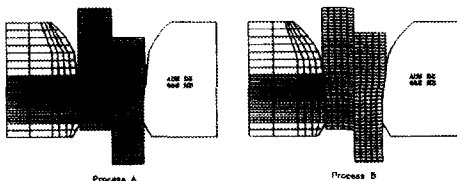


Fig. 1 Mesh systems for calculation of the deformation and the die wear

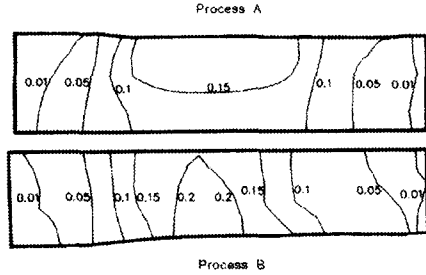


Fig. 2 Distribution of effective strain

점의 약간 아래에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 금형과 소재의 미끄럼속도의 크기를 Fig. 4에 나타내었으며 각 공정에서 알 수 있는 것은 랜드부를 빠져 나오면서 소재의 미끄럼속도가 증가함을 알 수 있다.

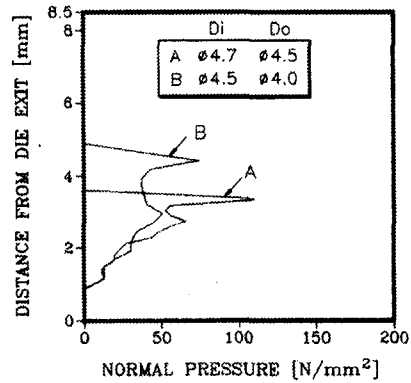


Fig. 3 Distribution of normal pressure along the die inner surface

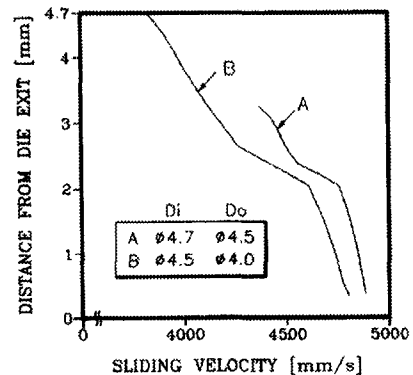


Fig. 4 Distribution of sliding velocity at the die-workpiece interface

### 2.3 인발공정중의 온도계산

축대칭 변형물체의 정상상태 온도장은 다음식과 같이 표현된다.

$$k \left[ \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \gamma \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right) + \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] - C\rho \left[ \frac{\partial}{\partial \gamma} (\gamma u T) + \gamma \frac{\partial}{\partial z} (v T) \right] + \gamma \dot{q}_D = 0 \quad (3)$$

여기서, T는 온도이며, k는 열전도율, C는 비열, 는 밀도,  $\dot{q}_D$ 는 단위체적당 열에너지, u는 반경방향의 속도, 그리고 v는 축방향 속도를 의미한다.

식(5)에서, 첫번째항은 열전도, 두번째항은 물질이동, 마지막항은 열발생을 의미한다.

형상함수를 이용하면 식(3)은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$k \left[ \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \gamma \frac{\partial NT}{\partial \gamma} \right) + \gamma \frac{\partial^2 NT}{\partial z^2} \right] - C\rho \left[ \frac{\partial}{\partial \gamma} (\gamma NuNT) + \gamma \frac{\partial}{\partial z} (NvNT) \right] + \gamma \dot{q}_D = 0 \quad (4)$$

여기서 N은 형상함수이다.

식(4)에 경계조건을 적용한 후 가중잔류법(weighted residual method)을 이용하면 연립방정식의 형태로 표현되며 이 연립방정식을 풀면 온도분포를 결정할 수 있다.

선재인발공정에서 발생하는 온도의 계산은 위의 방법

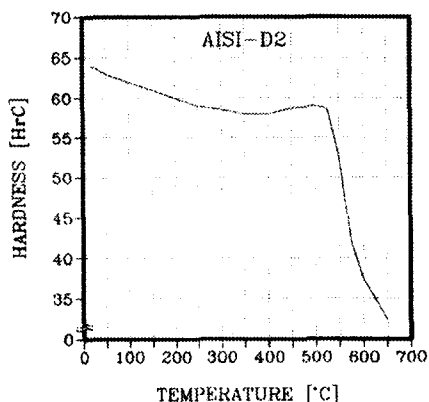


Fig. 5 Effect of temperature on hardness of die material(AISI D2)

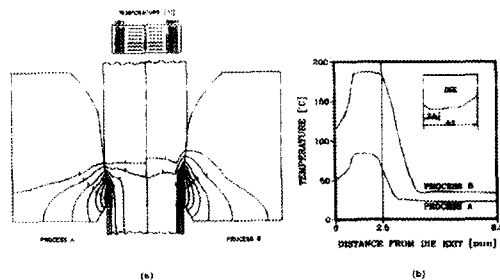


Fig. 6 Distribution of temperature in wire drawing processes. (drawing speed = 5m/s)

(a) Distribution of temperature in the work-piece and the die.

(b) Distribution of temperature along the die inner surface

을 이용하여 계산하였으며, 인발속도는 5m/s이다. 금형-소재의 접촉면에서 금형의 경도는 Fig. 5<sup>(15)</sup>와 같이 온도의 함수로 가정하였으며 선재인발공정에서 금형의 표면온도는 열전달 및 마찰에 의하여 온도가 급격하게 상승하였다. Fig. 6(a), (b)는 정상상태에서의 소재와 금형의 온도분포를 나타낸 것이다. 공정 A에서는 최대 온도가 85℃, 공정 B에서는 최대온도가 197℃이며 공정 B는 공정 A보다 금형-소재간의 접촉영역이 더 크므로 마찰열의 증가로 인하여 Fig. 6(a)와 같이 전체적인 온도가 더 높음을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 금형 내부의 온도분포를 나타낸 것으로 인발공정동안 금형은 랜드부 주위에서 높은 온도를 띄게되며 각 공정에서의 최대온도는 금형의 랜드부에서 발생함을 알 수 있었다.

### 2.4 금형의 마모량 측정 및 계산

변형해석으로 얻어진 결과를 이용하여 금형의 마모량을 예측하기 위한 흐름도는 Fig. 7과 같다. 금형의 마모를 예측하기 위해서는 마모계수 k를 결정해야한다. 일반적으로 마모계수는 실제공정과 동일한 조건, 즉, 동일한 재질, 하중상태, 윤활조건, 미끄럼속도, 습도 및 온도하에서 실험으로 구해야한다. 그러나 실험적으로 동일한 냉각조건을 부여하기가 힘들기 때문에 본 연구에서는 인발업체에서 20개의 마모된 금형의 형상을 측정 후 식(1)을 이용하여 평균마모계수를 구하였으며 약  $6.0 \times 10^{-6}$ 이었다. 식(2)에서 금형의 마모에 미치는 주인자로는 수직압력, 미끄럼속도, 증분시간의 곱이다. 인발 금형의 마모량은 변형공정에서 구해진 마모량에 생산량을 곱하면 구할 수 있다.

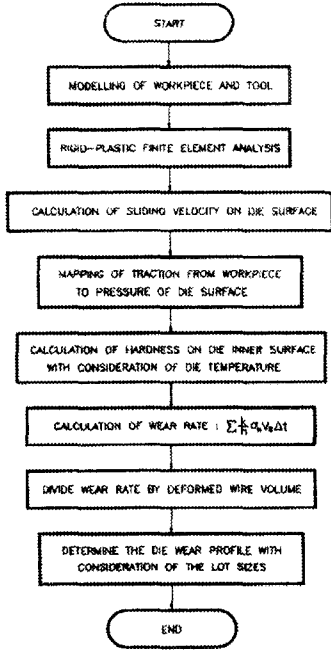


Fig. 7 Flow chart for predicting the die wear during the wire drawing processes

사용하기 전의 인발금형과 선재 5톤을 생산한 후의 인발금형 사진을 Photo. 1에 나타내었다. Photo. 1의 각 금형치수를 측정하기 위하여 금형의 상단부에 Photo. 2와 같이 직경 25mm, 높이 15mm인 원통형 링을 장착하고 금형의 랜드 하부를 밀폐시킨 후 응점이 낮고 수축률이 적은 특성을 가진 Cerro-117합금을 용융시켜 부은 후 금형에 완전히 고정시킨 다음 뽑아내어 30" 오퍼칼 프로젝트(Rank Precision Industries, Inc)에서 20배 확대하여 측정하였다. Photo. 2는 금형의 치수를 측정하기 위한 응고된 Cerro-117합금을 나

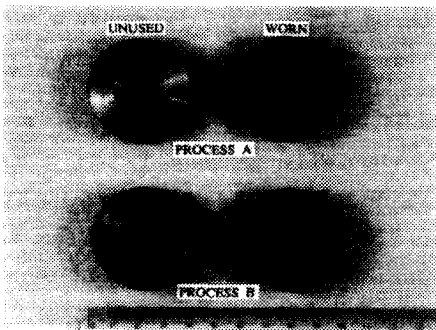


Photo 1 The unused and worn wire drawing dies



Photo 2 The solidified Cerro-117 alloys for measuring the wire drawing die profiles

Table 2 Mechanical properties of Cerro-117 alloy

Properties	Values
Brinell hardness(HB)	12
Coeff. of thermal expansion	0.000025 /°C
Melting temperature	47°C(about 117°F)

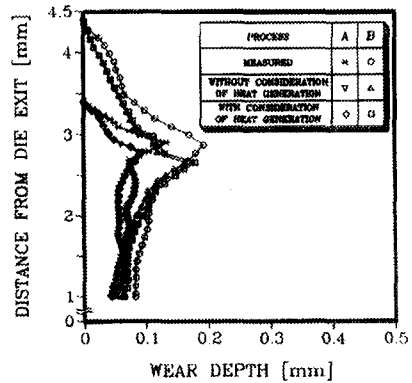


Fig. 8 Comparison of wear depth between the simulated and the measured values

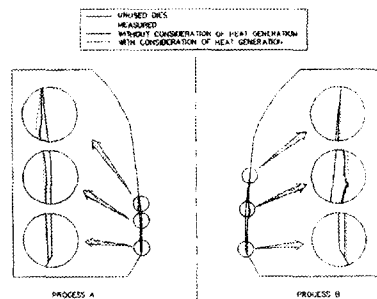


Fig. 9 Wear profile of the wire drawing dies

타낸 것이다. Cerro-117합금의 물성치는 Table 2와 같다. 실제 인발금형으로부터 측정된 마모량과 계산된 마모량을 Fig. 8, 9에 비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

금형의 마모량을 예측하기 위하여 Archard의 마모 모델을 적용하였다. 변형해석결과를 이용하여 금형의 마모량을 예측하기 위하여 금형을 격자로 분리하고 금형의 각 절점에서 발생하는 마모량을 관측하였다.

마모량을 예측하기 위하여 먼저 강소성 유한요소법을 이용하여 변형해석을 한 후 소재의 절점력, 미끄럼속도, 시간증분을 이용하여 금형의 마모량을 계산하였다.

변형해석으로부터 얻은 절점력을 금형에 작용하는 압력으로 변환하였으며, 최대압력 작용점은 Fig. 3에서와 같이 소재와 금형의 접촉시작점에서 소재 출구쪽으로 약간 떨어진 위치이며, Fig. 8과 비교하여 볼 때 최대 압력작용점과 금형의 최대마모량이 발생한 위치는 서로 일치하지 않음을 볼 수 있다. 변형소재와 금형사이의 미끄럼속도의 분포는 Fig. 4와 같이 성형부에서 랜드부 쪽으로 빠져나오면서 미끄럼속도가 크게 증가하지만, 랜드부를 빠져나온 소재의 미끄럼속도는 완만하게 증가함을 볼 수 있다. 랜드부를 빠져나온 소재의 미끄럼속도가 증가하는 원인은 인장력에 의한 국부적 네킹때문으로 분석된다. 변형해석결과로부터 예측된 금형의 최대마모위치는 랜드부 근처에서 최대로 발생함을 알 수 있었다. 변형소재 내의 변형률분포를 Fig. 2에서 볼 수 있으며, Fig. 8과 비교하여 볼 때 소재의 변형률이 최대인 위치에 해당하는 금형위치도 최대압력 작용점과 마찬가지로 최대마모량이 발생한 금형의 위치와 서로 일치하지 않음을 볼 수 있다. 이러한 결과들로부터 금형의 마모량은 금형에 작용하는 압력이나, 소재의 변형률만으로는 예측할 수 없음을 알 수 있었다.

변형해석결과로부터 구해진 금형에 작용하는 압력, 소재와 금형간의 미끄럼속도, 시간증분들로부터 계산된 금형의 마모량을 Fig. 8, 9에 나타내었다. 이러한 마모 인자들로부터 예측된 금형의 마모량의 타당성을 검증하기 위하여 동일한 치수의 두 가지 인발금형을 각각 2조씩 준비하여 한 조씩의 금형을 현장에서 사용토록 의뢰한 후, 5톤의 선재를 생산한 다음 금형을 회수하였으며, 마모된 금형의 치수를 측정한 후, 계산된 마모량과 비교하였다. 랜드부의 마모량을 표 3에 나타내었다. 최

Table 3. Comparisons of the increased mean diameter, (unit: mm)

Process	Increased mean dia. on die land		
	Measured	Without consideration of heat generation	With consideration of heat generation
A	0.1986	0.1602	0.1791
B	0.1380	0.1078	0.1113

대마모량이 발생하는 위치는 실제 측정치와 약간 다르게 나타났으나 전체적인 금형의 마모형태는 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

### 4. 결 론

선재인발공정에서 금형의 마모량을 예측하기 위하여 변형해석결과를 이용하여 금형의 마모량을 구할 수 있는 기법을 제시하였다. 해석에서 구한 금형의 마모형태를 실제금형에서 측정된 치수와 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 예측된 금형의 마모형태 및 마모량은 측정치와 잘 일치함을 알 수 있었다.
- 2) 선재인발공정의 온도상승을 고려한 경우는 온도변화를 무시하였을 경우에 비하여 마모량이 더 컸으며 측정치와 더 잘 일치함을 볼 수 있었다.
- 3) 금형 마모의 예측은 금형의 형상변화에 의한 제품의 치수정밀도를 예측할 수 있으며 현장에서 금형의 교체시기를 예측하는 데 많은 도움이 될 것이다.
- 4) 제시된 기법은 다른 금속성형공정에서 발생하는 금형의 마모량의 예측에 적용할 수 있다.

### 5. 후 기

본 연구는 1995년도 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC for NSDM)의 지원에 의하여 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. Failure Analysis and Prevention, Metals Handbook, 8th ed., Vol.10, ASM Hand-

- book Committee, ASM, Metals Park, Ohio, p.134, 1975.
2. R. Holm, Electric contacts, Hugo Gerbers Verlag, p.203, 1946.
  3. J. F. Archard, "Contacts and Rubbing of Flat Surfaces", J. of Appl. Phys., Vol.24, p.981, 1953.
  4. M. J. Liou, H. S. Hsiao, "Prediction of Die Wear in High Speed Hot Upset Forging", ERC/NSM Report, No. 99~33, OSU, 1989.
  5. P. H. Hansen, P. H. Bay, "A Flexible Computer Based System for Prediction of Wear Distribution in Forming Tools", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp.19~26, 1990.
  6. E. Doege, P. Groche, Th. Bobke, "Application of Adhesion Theory to Friction and Wear Processes in Hot Die Forging", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp.27~32, 1990.
  7. B. W. Rooks, "The Effect of Die Temperature on Metal Flow and Die Wear During High Speed Hot Forging", Proc. 15th Inter. MTDR Conference, Birmingham, England, No.4, pp.487~495, 1974.
  8. S. M. J. Ali, B. W. Rooks, S. A. Tobias, "The Effect of Dwell Time on Die Wear in High Speed Hot Forging", Proc. Inst. Mech. Engrs, vol. 185, p.1171, 1971.
  9. Y. Tronel, J. L. Chenot, "Prediction of Tool Wear using Finite Element Software for the Three-Dimensional Simulation of the Hot-Forging Process", J. of Mater. Proc. Tech, Vol. 31, pp.255~263, 1992.
  10. Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook, 1st ed., Vol.1, Pergamon Press, Fairview Park, N. Y., pp.102~118, 1981.
  11. O. C. Zienkiewicz, The Finite Element Method, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York, 1977.
  12. S. Kobayashi, S. I. Oh, T. Altan, Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press, 1989.
  13. 김태형, 김병민, 최재찬, "냉간단조품의 정밀도 향상을 위한 금형해석 기법", 한국정밀공학회지 제 12권 제 1호, pp.28~36, 1995.
  14. Y. Asada, K. Mori, K. Yoshikawa, K. Osakada, "Analysis of Temperature Distribution in Wire and Tube Drawing Processes by the Finite Element Method", JSTP in Japanese, Vol. 22, No. 244, pp.488~494, 1981.
  15. Engineering Properties of Steel, ASM, Metals Park, Ohio, p.452, 1982.