

〈논 문〉

축대칭 압출 및 인발공정 중의 금형마멸예측

김태형* · 김병민** · 최재찬**

(1995년 1월 13일 접수)

Prediction of Die Wear in Extrusion and Wire Drawing

T. H. Kim, B. M. Kim and J. C. Choi

Key Words: Die Wear(금형의 마멸), Wear Model(마멸모델), Cold Forming(냉간성형), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

In cold forming processes, due to high working pressure acting on the die surface, failure mechanics must be considered before die design. One of the main reasons of die failure in industrial application of metal forming technologies is wear. Die wear affects the tolerances of formed parts, metal flow and costs of process etc. The only way to control these failures is to develop methods which allow prediction of die wear and which are suited to be used in the design state in order to optimize the process. In this paper, the forming processes that involve cold forward extrusion and wire drawing were simulated by rigid plastic finite element method and its output were used for predicting die wear by Archard wear model. The simulation results were compared with the measured worn dies.

1. 서 론

최근 금속성형 산업에서 제품의 원가절감 및 후처리를 줄이는 방안으로서 정형가공에의 관심이 모아지고 있다. 일반적으로 냉간에서의 금속성형은 금형에 작용하는 압력이 매우 높으므로 금형의 설계시 파손 또는 마멸에 주의를 기울여야 한다.⁽¹⁾

냉간성형에서는 금형의 마멸, 응력집중 등이 국부적인 영역에서 발생하기 쉽고, 특히 금형의 마멸은 제품치수 불량에의 원인이 되며, 또한 재료유동 및 금형수명에도 영향을 미치기 때문에 실제 현장에서 제품의 정밀도, 금형의 신뢰성 및 경제성을 유지하고 적정한 금형교체시기를 예측하기 위해서는 금형의 마멸에 대한 연구가 요구된다.

마멸이론은 접촉상태에 따라 여러 가지로 분류될 수 있으나, 그 중 Archard의 마멸모델(Archard wear model)이 금형마멸 메카니즘에 가장 널리 적용되고 있다.

마멸이론은 Holm⁽²⁾에 의해 최초로 제안되었으며, 그는 전기접점용 재료의 마멸을 연구하기 위해 실험적 수식을 제안하였다. Holm은 두 재료의 접촉시 표면 원자간의 실접촉면적(real contact area)을 고려하여 두 재료의 접촉시 표면원자가 소멸되는 것을 마멸현상이라고 제시하였다. 그 후 Archard⁽³⁾는 Holm보다는 거시적인 모델을 제안하였으며 두 접촉물체 표면의 미세돌기들(asperities)의 접촉을 고려하여 미세돌기의 붕괴를 마멸현상이라고 제안하였다. Liou와 Hsiao⁽⁴⁾는 Holm의 마멸이론을 고속열간 압출공정에 적용하였으며 금형 온도에 따른 경도를 변수로 고려하여 금형의 마멸량을 계산하였다. Hansen과 Bay⁽⁵⁾는 Archard의

*부산대학교 대학원 기계설계공학과

**회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

마멸모델을 이용하여 업셋팅공정에서 금형의 마멸량을 계산하였으며 금형 표면거칠기가 커질수록 소재와의 미끄럼길이가 감소하므로 금형의 마멸량이 줄어든다고 제시하였다. Doege 등⁽⁶⁾은 금형의 마멸계산시 응착마멸이론 적용의 타당성을 실험적으로 입증하였다. Ali 등⁽⁷⁾은 금형의 부식마멸현상을 다루었으며 금형의 부식마멸은 금형과 소재간의 윤향상태, 접촉시간에 영향을 받는다고 지적하였다. 최근 Tronel과 Chenot⁽⁸⁾은 반구형 펀치로 사각블럭을 압입할 때 발생하는 펀치의 마멸을 유한요소 해석하였다.

본 연구에서는 냉간가공 중에서 마멸이 가장 심하게 발생하는 냉간압출공정과 선재 인발공정에 대해 Archard의 마멸모델을 적용하여 금형의 마멸을 해석하였으며, 변형중성 소재가 금형의 마멸에 영향을 미치는 인자인 수직압력 및 미끄럼속도 등을 구하기 위하여 변형공정을 유한요소해석하여 금형의 마멸을 예측하였다. 또한 해석결과를 실제 현장에서 선재 인발공정중 마멸된 금형과 비교하였다.

2. 이론해석

2.1 마멸이론

금속과 금속의 접촉시 마멸에 관계된 인자들은 접촉면의 온도, 접촉돌기의 분포, 접촉면의 거칠기 등의 접촉상태와, 금형재료의 경도, 금형에 작용하는 수직압력, 미끄럼길이, 윤향조건 등에 의해 결정된다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 이론해석이 간단하면서도 실제 마멸메카니즘에 널리 적용되고 있는 Archard의 마멸모델을 적용하였으며 그는 두 물체의 접촉시 마멸길이는 아래와 같다고 제안하였다.⁽³⁾

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

여기서, V 는 마멸깊이[mm]이며 k 는 마멸계수, P 는 수직압력[N/mm²], L 은 미끄럼길이[mm], h 는 금형의 경도[kg/mm²=9.81⁻¹N/mm²]이다. 일반적으로 금속성형공정에서 금형에 작용하는 압력은 공정의 진행과 함께 변하므로 식 (1)을 아래와 같은 형태로 적용하였다.

$$V = \sum_{i=1}^N \frac{k}{3h} (\sigma_n v_s \Delta t) \quad (2)$$

N 은 전체 성형중분 단계수이며, σ_n 은 수직압력, V_s 는 금형과 소재의 미끄럼속도이며, Δt 는 중분시간이다.

마멸거동을 해석하기 위한 가정은 다음과 같다.

- ① 유한요소해석 중 금형은 탄성변형이 없는 강체로 취급하고 마멸계산을 위하여 금형의 표면에서는 소성변형이 발생할 수 있다고 가정한다.
- ② 열발생으로 인한 압력변화 및 금형의 물성치 변화는 무시한다.
- ③ 공정 중의 마찰계수의 변화는 없다고 가정한다.

2.2 변형해석

소재의 변형해석은 강소성 유한요소법을 이용하였다. 변형해석에 사용된 재료는 AISI 1010으로 응력-변형률의 관계가 $\bar{\sigma} = 715.95 \bar{\epsilon}^{0.22}$ [N/mm²], 쿨롱마찰계수는 0.09이며, 각각의 공정조건은 Table 1과 같다. 초기소재의 치수는 압출공정은 높이와 직경이 각각 35.2 mm인 봉재를 이용하였으며, 인발공정은 입구 소재직경이 각각 4.7, 4.5 mm, 출구 소재직경이 각각 4.5, 4.0 mm이며 길이

Table 1 Process conditions of extrusion and wire drawing

Conditions	Process	Extrusion	Wire drawing	
			A	B
Half die angle (°)		45.0	6.5	6.5
Initial workpiece diameter (mm)		35.2	4.7	4.5
Final workpiece diameter (mm)		24.89	4.5	4.0
Length of die land (mm)		3.0	1.5	1.5
friction coefficient		0.09	0.09	0.09

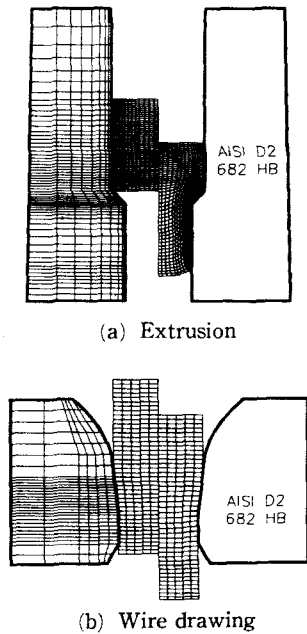


Fig. 1 Mesh systems of workpieces and dies

가 9.5 mm인 선재이다. 해석에 사용된 소재와 금형의 격자시스템을 Fig. 1에 나타내었다.

해석에 적용된 금형의 재질은 AISI D2이며, 탄성계수가 $6.8 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 경도가 682 HB이다. 변형의 최종단계에서 유효변형률의 분포를 Fig. 2에 나타내었으며 압출공정에서는 금형의 랜드부를 빠져나온 재료의 표면에서 약간 안쪽의 변형이 최대이며, Fig. 2(b)의 윗부분은 인발공정 A, 아랫부분은 인발공정 B에 해당하는 소재의 유효변형률의 분포이며 단면감소율이 더 큰 인발공정 B의 경우가 변형을 더 크게 받음을 볼 수 있다.

고정된 금형표면에 유동하는 소재가 미치는 압력, 미끄럼속도 등을 구하기 위하여 본 연구진이 제안한⁽¹⁰⁾ 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 경계절점에 작용하는 압력으로 보간하기 위한 기법은 본 연구진이 제시한 방법⁽¹⁰⁾을 이용하였다. Fig. 3의 P_w 는 소재의 경계에 있는 임의의 절점이며 E_D 는 금형의 경계에 있는 임의의 요소라고 할 때 P_w 가 영역 I ($\square abcd$) 또는 II (\square

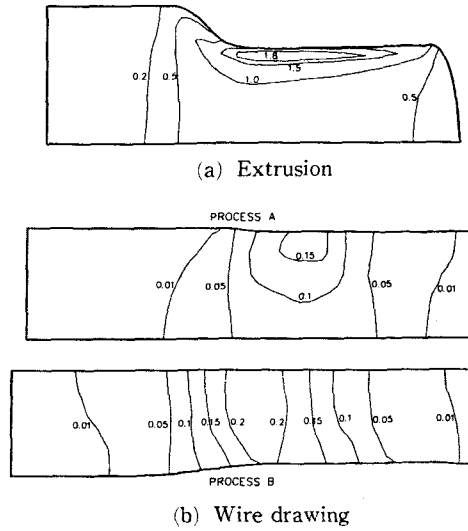


Fig. 2 Distribution of effective strain

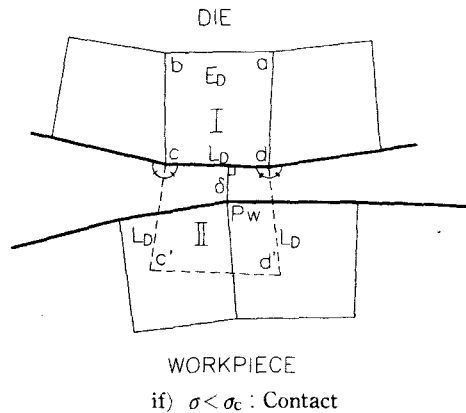


Fig. 3 Treatment of contact problem to transfer the nodal forces at the workpiece to the die

$ccc'd'$) 내에 있고 P_w 에서 금형에 내린 수선의 길이 σ 가 α 보다 작다면 P_w 는 금형요소 E_D 에 접촉하고 있다고 간주하고 E_D 에 접촉한 소재의 절점이 몇 개 있는 지를 위와 같은 절차에 따라 구한 후 형상함수를 이용하여 소재의 절점력을 금형에 작용하는 압력으로 보간한다.

앞서 설명한 방법을 이용하여 각 공정의 최종변형단계에서 소재의 절점력을 금형에 작용하는 압력으로 변환하였으며 그 분포는 Fig. 4와 같다. 최대 압력은 금형의 압출공정의 경우 성형부에서 발생하나 인발공정의 경우는 금형과 소재가 접촉하기 시작하는 지점의 약간 아래에서 발생하고 있음을 알

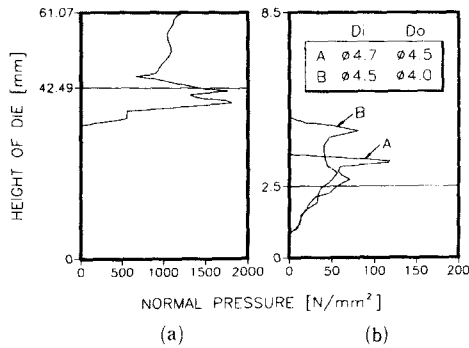


Fig. 4 Distribution of normal pressure along the die inner surface

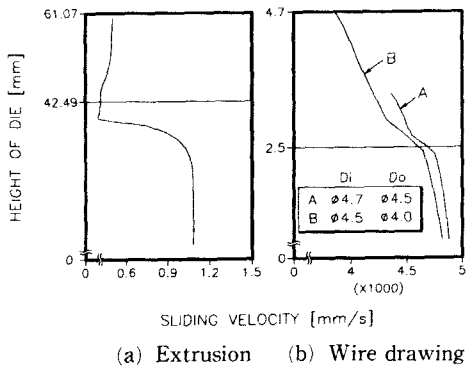


Fig. 5 Distribution of sliding velocity between the workpiece and the die surface

수 있다. 금형과 소재의 미끄럼속도의 크기를 Fig. 5에 나타내었으며 각 공정에서 알 수 있는 것은 랜드부를 빠져 나오면서 소재의 미끄럼속도가 증가함을 알 수 있다.

2.3 금형의 마멸량 측정 및 계산

변형해석으로 얻어진 결과를 이용하여 금형의 마멸량을 예측하기 위한 흐름도는 Fig. 6과 같다.

식 (2)에서 금형의 마멸에 미치는 주인자로는 수직압력, 미끄럼속도, 증분시간의 곱이며 이 값을 Fig. 7에 나타내었다. 금형의 마멸을 예측하기 위해서는 마멸계수 k 를 결정해야 한다. 일반적으로 마멸계수는 실제공정과 동일한 조건, 즉 동일한 재질, 하중상태, 윤활조건, 미끄럼속도, 습도 및 온도하에서 실험으로 구해야 한다. 그러나 실험적으로 동일한 냉각조건을 부여하기가 힘들기 때문에 본 연구에서는 인발업체에서 20개의 마멸된 금형의 형상을 측정한 후 식 (1)을 이용하여 평균마멸계수

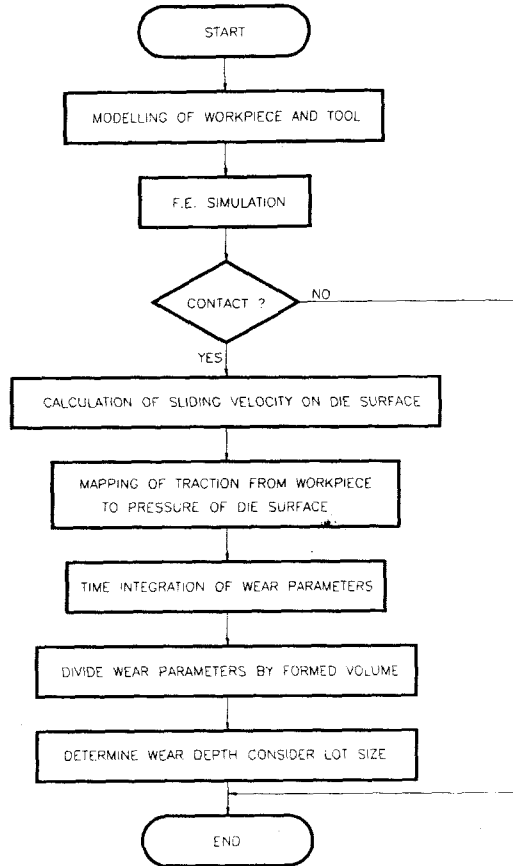


Fig. 6 Flow chart for predicting die wear during the forming processes

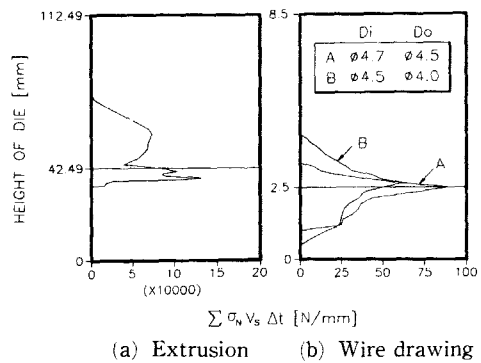


Fig. 7 Distribution of wear parameters along the die inner surface

를 구하였으며 약 6.0×10^{-6} 이었다. 공정중 금형의 마멸량을 구한 후 제품 생산량 또는 체적만큼 합산하면 근사적인 마멸량을 예측할 수 있으며 압출금형은 생산개수가 만개일 때 금형의 마멸량은 Fig.

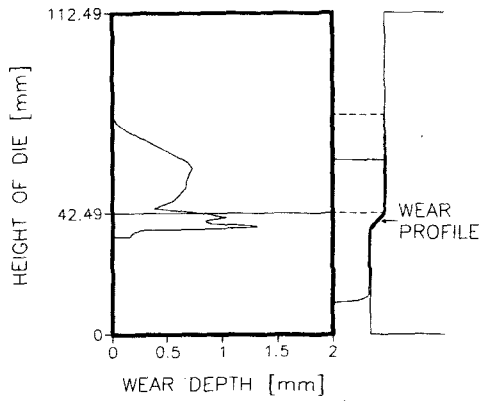


Fig. 8 Distribution wear depth along the die inner surface in extrusion

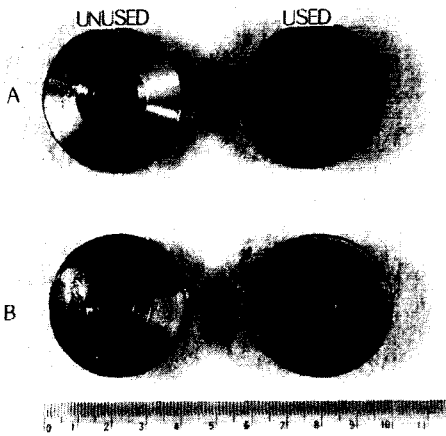


Photo 1 Photo of unused and worn wire drawing dies A B Unused Used



Photo 2 Photo of Cerro-117 alloy for measuring of drawing dies

8과 같다.

인발금형의 재질은 D2이며 사용하기 전의 금형과 선재 5톤을 생산한 후의 금형사진을 Photo 1에 나타내었다.

Photo 1의 각 금형치수를 측정하기 위하여 금형의 상단부에 직경 25 mm, 높이 15 mm인 치구를 장착하고 금형의 랜드 하부를 밀폐시킨 후 용접이 낮고 수축률이 적은 특성을 가진 Cerro-117합금을 용융시켜 부은 후 금형에 완전히 고정시킨 다음 뿔

Table 2 Mechanical properties of Cerro-117 alloy

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

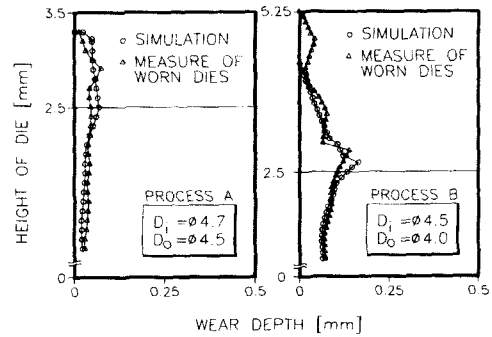


Fig. 9 Comparison of wear depth between simulated and measured values of wire drawing dies

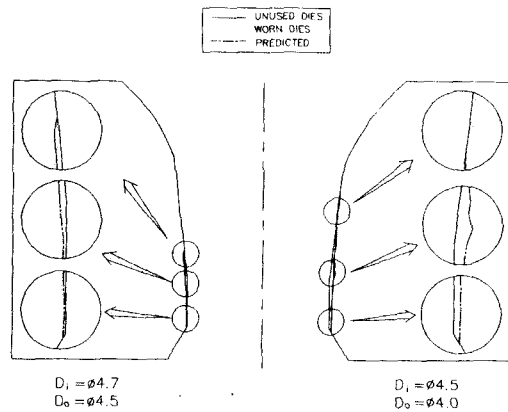


Fig. 10 Wear profile of wire drawing dies

아내어 30' 옴티칼 프로젝트(Rank Precision Industries, Inc)에서 20배 확대하여 측정하였다. Photo 2는 금형의 치수를 측정하기 위한 응고된 Cerro-117 합금을 나타낸 것이다. Cerro-117 합금의 물성치는 Table 2와 같다. 실제 인발금형으로부터 측정된 마멸량과 계산된 마멸량을 Figs. 9, 10에 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

금형의 마멸량을 예측하기 위하여 Archard의 마멸모델을 적용하였다. 변형해석결과를 이용하여 금형의 마멸량을 예측하기 위하여 금형을 격자로 분리하고 금형의 각 절점에서 발생하는 마멸량을 관측하였다.

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

변형해석으로부터 얻은 절점력을 Fig. 3에 제시된 기법을 이용하여 금형에 작용하는 압력으로 변환하였으며, 최대압력 작용점은 Fig. 4에서와 같이 압출공정에서는 금형의 성형부에서, 인발공정에서는 소재와 금형의 접촉시작점에서 소재 출구쪽으로 약간 떨어진 위치이며, Figs. 8, 9와 비교하여 볼 때 최대압력 작용점과 금형의 최대마멸량이 발생한 위치는 서로 일치하지 않음을 볼 수 있다. 변형소재와 금형사이의 미끄럼속도의 분포는 압출공정의 경우 Fig. 5(a)와 같이 성형부에서 랜드부쪽으로 빠져나오면서 미끄럼속도가 증가함을 알 수 있으며, 금형의 랜드부를 빠져나온 소재는 거의 일정한 미끄럼속도를 보여주고 있다. 인발공정에서의 금형과 소재간의 미끄럼속도 분포는 Fig. 5(b)와 같이 성형부에서 랜드부쪽으로 빠져나오면서 미끄럼속도가 증가하지만, 랜드부를 빠져나온 소재의 미끄럼속도는 압출공정의 경우와는 달리 일정하지 않음을 볼 수 있다. 이러한 현상, 즉 랜드부를 빠져나온 소재의 미끄럼속도가 증가하는 원인은 인장력에 의한 국부적 necking때문으로 분석된다. 변형해석결과로부터 예측된 금형의 최대마멸위치는 압출금형의 경우 성형부에서, 인발금형의 경우는 랜드부 근처에서 최대로 발생함을 알 수 있었다. 변형소재 내의 변형률분포를 Fig. 2에서 볼 수 있으며, Figs. 8, 9와 비교하여 볼 때 소재의 변형률이 최대인 위치에

해당하는 금형위치도 최대압력 작용점과 마찬가지로 최대마멸량이 발생한 금형의 위치와 서로 일치하지 않음을 볼 수 있다. 이러한 결과들로부터 금형의 마멸량은 금형에 작용하는 압력이나, 소재의 변형량만으로는 예측할 수 없음을 알 수 있었다.

변형해석결과로부터 구해진 금형에 작용하는 압력, 소재와 금형간의 미끄럼속도, 시간증분들로부터 계산된 금형의 마멸량을 Figs. 8, 9에 나타내었다. 이러한 마멸인자들로부터 예측된 금형의 마멸량의 타당성을 검증하기 위하여 동일한 치수의 두 가지 인발금형을 각각 2조씩 준비하여 한 조씩의 금형을 현장에서 사용토록 의뢰한 후, 5톤의 선재를 생산한 다음 금형을 회수하였으며, 마멸된 금형의 치수를 측정된 후, 계산된 마멸량과 비교하였다. 랜드부의 마멸량은 실제 금형으로부터 측정된 치수가 인발공정 A의 경우는 0.1388 mm, 해석결과는 0.1242 mm이고, 인발공정 B의 경우는 측정치가 0.0573 mm, 해석결과가 0.0466 mm로 비교적 일치하였으나, 최대마멸량이 발생하는 위치는 Figs. 8, 9와 같이 약간 다르게 나타남을 알 수 있었다. Fig. 10은 인발공정 A, B에 해당하는 금형의 마멸량을 이론치와 측정치를 비교하여 제시한 것으로 전체적인 마멸량은 비교적 일치함을 알 수 있었다.

4. 결론

냉간성형공정에서 금형의 마멸로 인한 파손을 예측하기 위하여 전방 압출공정 및 선재 인발공정을 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 냉간성형시 소재의 변형해석과 동시에 금형의 마멸량을 예측할 수 있는 기법을 제시하였다.

(2) 금형의 최대압력작용점 및 소재의 변형이 최대인 위치에 해당하는 금형 위치와 최대마멸위치는 일치하지 않는다.

(3) 예측된 마멸량과 실제 현장에서 성형 후 마멸된 금형의 마멸량을 비교하였으며, 최종제품의 치수를 결정하는 랜드부의 마멸량과 전체적인 마멸형상이 비교적 일치함을 알 수 있었다.

(4) 금형 마멸량의 예측은 현장에서 금형의 교체시기를 예측하는 데 많은 도움이 될 것이다.

(5) 제시된 해석기법은 다른 금속성형공정에 적용할 수 있으며 마멸로 인한 금형의 수명 및 제품정밀도를 예측할 수 있다.

후 기

본 연구는 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*, 1975, 8th ed., Vol. 10, ASM Handbook Committee, ASM, Metals Park, Ohio, p. 134.
- (2) Holm, R., 1946, *Electric Contacts*, Almgvist and Wiksells, Stockholm, p. 203
- (3) Archard, J. F., 1953, "Contacts and Rubbing of Flat Surfaces," *J. of Appl. Phys.*, Vol. 24, p. 981~988.
- (4) Liou, M. J. and Hsiao, H. S., 1989, "Prediction of Die Wear in High Speed Hot Upset Forging," ERC/NSM Report, No. 99~33, OSU.
- (5) Hansen, P. H., and Bay, P. H., 1990, "A Flexible Computer Based System for Prediction of Wear Distribution in Forming Tools," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 19~26.
- (6) Doege, E., Groche, P. and Bobke, Th., 1990, "Application of Adhesion Theory to Friction and Wear Processes in Hot Die Forging," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 27~32.
- (7) Ali, S. M. J., Rooks, B. W. and Tobias, S. A., 1971, "The Effect of Dwell Time on Die Wear in High Speed Hot Forging," *Proc. Inst. Mech. Engrs*, Vol. 185, p. 1171
- (8) Tronel, Y. and Chenot, J. L., 1992, "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.
- (9) *Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook*, 1981, 1st ed., Vol. 1, Pergamon Press, Fairview Park, N. Y., pp. 102~118.
- (10) 김태형, 김병민, 최재찬, 1995, "냉간단조품의 정밀도 향상을 위한 금형해석기법," 한국정밀공학회지, 제12권, 제1호, pp. 28~36.