

**냉간 단조 금형의 마멸 감소를 위한 예비성형체 설계방법**  
이진호\*(부산대원), 고대철\*\*(부산대 기계기술연구소), 김태형\*\*\* (삼성전기),  
김병민\*\*\*\*, 최재천\*\*\*\* (부산대 ERC/NSDM)

**Methodology of Preform Design for Reducing Tool Wear  
in Cold Forging**

J.H. Lee, D.C. Ko, T.H. Kim, B.M. Kim, J.C. Choi

**Abstract**

The die wear is one of the main factors affecting die accuracy and tool lifetime. It is desired to reduce die wear by developing simulation method to predict wear based on process parameters, and then optimize the process. Therefore, this paper describes design methodology of preform for minimizing wear of finisher die in multi-stage cold forging processes. The finite element method is combined with the routine of wear prediction and the cold forging process is analyzed. In order to obtain preform to minimize die wear, the FPS algorithm is applied and the optimal preform shape is found from iterative deformation analysis and wear calculation.

**Keywords** : Cold Forging(냉간단조), Die Wear(금형마멸), Preform Design(예비성형체 설계)

**1 서 론**

다단계 냉간 단조 공정에서는 결함이 없는 재료의 유동, 완전한 금형 내부의 충전, 플래쉬부로의 재료손실 최소화와 최종금형의 마멸감소 등을 위하여 예비성형체를 설계한다. 최근 제품의 정밀도에 관심이 집중되어 냉간 상태에서 완제품으로 성형하여 후속의 기계가공을 없애므로써 재료의 절약, 에너지 절감, 가공공정수의 단축 등 냉간 단조를 고부가가치 가공의 유력한 수단으로 응용하려는 추세에 있다. 이러한 경우 금형의 마멸은 제품치수 불량 의 원인이 되며 재료의 유동 및 금형수명에도 영향을 미치게 되므로, 기존의 예비성형체 설계에서 고려하지 않았던 최종금형의 마멸예측은 대단히 중요한 문제이다.

따라서 본 연구에서는 다단계 냉간 단조 공정에서 최종금형의 마멸량을 최소화하는 예비성형체의 설계방법을 제시하고자 한다. 냉간 단조 공정에서 재료의 유동해석은 강소성 유한요소법을 이용하였으며, 금형의 마멸량 예측을 위하여 Archard의 마멸모델<sup>[1]</sup>을 적용하였다. 또한 금형의 마멸량을 최소로 하는 예비성형체의 설계를 위하여 최적설계기법의 하나인 FPS(Flexible Polyhedron Search)법<sup>[2]</sup>을 적용하여 앞서 언급한 예비성형체 설계목적에 부합하는 최적의 예비성형체를 구하였다. 본 연구에서 제시한 예비성형체의 설계방법을 T형 스피커팁 제품의 성형공정에 적용해 보았다. 기존의 문헌에 제안된 예비성형체와 본 연구에서 제시한 방법에 의해 설계된 예비성형체를 이용하여 최종제품으로 성형하는 경우에 대하여 각각의 성형하중, 최종금형의 마멸량 등을 비교하여 본 연구에서 제시된 설계방법의 가능성과 유용성을 검토해 보았다.

**2 금형의 마멸해석**

두 물체가 접촉한 상태에서 상대운동을 일으키면 두 물체사이의 접촉면에는 마멸이 발생한다. 냉간 단조 공정에도 금형과 소재가 큰 하중이 주어진 상태 하에서 미끄럼 운동을 하게 되므로 금형에 마멸이 발생하게 된다. 이 경우 금형의 마멸에 영향을 미치는 인자는 금형 표면의 온도, 표면거칠기, 금형재료의 표면경도, 접촉면에서의 수직압력, 두 금속사이의 미끄럼 길이, 접촉면에서의 윤활조건, 접촉시간 등이 있다<sup>[3,4,5]</sup>. 본 연구에서는 마멸해석에 이미 널리 적용되고 있고<sup>[6,7,8]</sup>, 수치적 접근이 용이한 Archard의 마멸모델을 이용하여 금형의 마멸해석을 수행하였다. 즉,

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

여기서,  $V$  는 마멸체적이고,  $k$  는 재료와 접촉조건에 의존하는 상수,  $P$  는 접촉하중,  $L$  는 미끄럼 길이,  $h$  는 금형재료의 표면경도이다. 또한 본 연구에서는 식(1)의 마멸계수  $k$ 의 값은  $4.4 \times 10^{-6}$ 으로 두었다<sup>[4]</sup>.

### 3 최종금형의 마멸을 최소로 하는 예비성형체 설계방법

변형해석으로 얻어진 결과를 이용하여 금형의 마멸량을 예측하고 FPS법을 적용하여 예비성형체를 최적화시키기 위한 흐름도는 Fig. 1과 같다. 먼저 금형과 소재를 모델링 한 후, 고려한 성형공정에 대해서 공정변수를 선정한다. 주어진 공정변수에 대해서 강소성 유한요소법으로 변형해석을 수행하여 매 변형단계마다 소재와 금형의 접촉면에서의 수직응력과 미끄럼 길이를 구한다. 이로부터 식(1)을 이용하여 전체 변형과정 동안의 마멸량을 계산한다. 소재의 변형해석에서 금형표면의 마멸계산을 위하여 먼저 금형표면에 유한개의 마멸측정점을 정하고, 소재의 절점력 및 속도성분을 금형표면의 측정점으로 선형보간하여 계산하였다.

이와 같은 방법으로 각 마멸 측정점에서의 마멸깊이를 계산하여 금형면상에 마멸분포를 조사하고, 금형의 마멸량을 최소화 하는 공정변수를 구하기 위해 최적설계기법의 하나인 FPS법을 적용하여 예비성형체 형상을 개선하였다. 새로운 예비성형체에 대해서 다시 강소성 유한요소법으로 변형해석 및 마멸계산을 수행하고 이전의 마멸량과 비교함으로써 금형의 마멸량을 최소로 하는 예비성형체를 설계하였다.

본 연구에서 제시한 금형의 마멸량을 최소로 하는 예비성형체 설계방법의 가능성과 유용성을 검토하기 위해서 T형 스피커팁의 성형공정에 적용해 보았다. T형 스피커팁의 성형공정은 Fig. 2와 같다. T형 스피커팁 제품의 경우 축대칭이고 초기소재의 직경 대 높이비가 크므로 한번의 성형공정으로는 좌굴이 생길 우려가 높다<sup>[9]</sup>. 따라서 좌굴방지를 위해서 예비성형체 단계인 원추형상의 해당공정이 필요함을 알 수 있다. 본 연구에서는 최종제품의 정밀도와 금형의 수명에 큰 영향을 미치는 최종금형의 마멸량을 최소로 하는 최적의 예비성형체를 설계하기 위하여 Fig. 2(b)의 원추반각  $\alpha$ 와 안내부 길이  $a$ 를 설계변수로 선택하였다. 본 연구에서 제시된 설계방법에 의한 결과와 비교하기 위해서 좌굴현상의 방지를 위해 Table 1과 같이 문헌[9]에 제시된 설계방법에 의한 결과와 비교해 보았다. 본 연구에 이용한 소재는 AISI 1020이며, 해석에 사용한 기타조건들은 Table 2에 나타내었다.

### 4. 해석결과

앞서 제시한 설계방법을 이용하여 최종금형의 마멸량을 최소로 하는 예비성형체의 형상을 구한 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 FPS법의 반복회수가 증가함에 따라 최종금형의 마멸체적이 감소해 가는 것을 알 수 있으며, 반복회수 7회 이후에는 더 이상의 마멸체적 감소가 나타나지 않음을 볼 수 있다. Fig. 4는 FPS법에 의해 반복회수가 증가함에 따른 상·하부 금형의 마멸체적의 변화를 나타내고 있다. 마멸량이 많은 상부금형의 마멸량이 하부금형의 마멸량보다 더 빨리 감소하므로 최적의 예비성형체로 최종제품으로 성형하는 경우 상·하부 금형의 수명차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

해석결과의 비교를 위해서 초기치 및 문헌[9]에 제시된 예비성형체 설계에 대한 최종금형의 마멸량과 본 연구에서 제시한 예비성형체 설계방법에 의해 설계된 예비성형체를 이용하여 최종제품으로 성형하였을 때의 최종금형의 마멸량을 비교하여 Table 3에 나타내었으며, Fig. 5는 각각의 경우에 대한 최종금형의 마멸분포를 확대시켜 놓은 것이다. Table 3에서 볼 수 있듯이, 본 논문에서 제시한 설계방법을 이용하여 최종금형의 마멸감소를 위한 예비성형체를 설계한 결과, 최종금형의 마멸을 약 10%이상 감소시킬 수 있었으며, 이는 곧 10%이상의 금형수명연장과 최종제품의 정밀도유지를 가능하게 함을 알 수 있다. 또한 상·하부 금형의 마멸량 차이를 줄임으로써 상·하부 금형의 수명차이도 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그리고 최종금형의 마멸을 최

소로 하는 예비성형체 설계법에 의해서 제품의 최종성형하중이 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 5에 나타난 최종금형의 마멸형상을 살펴보면 본 연구에서 제시한 방법에 의한 결과가 금형면에 좀 더 균일한 마멸을 발생시키면서도 전체적으로는 마멸량을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 다단계 성형공정에 대하여 최종금형의 마멸량을 감소시킬 수 있는 새로운 예비성형체 설계방법을 제시하였다. 금형의 마멸량을 최소화 하는 예비성형체를 FPS법을 이용하여 반복적인 변형해석 및 마멸계산으로 구하였으며, 그 결과 최종금형의 마멸을 감소시키는 예비성형체 설계가 최종금형의 수명과 최종제품의 정도를 향상시킬 수 있다는 것을 알았다. 또한 최종금형의 마멸을 감소시킴으로써 성형하중을 감소시킬 수 있었고, 금형교체 시간의 예측을 가능케 함으로써 금형의 교체로 인한 다운타임도 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시한 예비성형체 설계방법은 제품의 정밀도, 금형의 수명향상 및 수명예측이 문제 시 되는 여러 가지 다른 다단계 금속성형공정에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- (1) J. F. Archard, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces", Journal of Applied Physics, Vol. 24, No. 3, pp.981-988, 1953
- (2) David M. Himmelbl, "Applied Nonlinear Programming", McGraw-Hill, 1972
- (3) I. V. Kragelsky (ed.), Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook, Vol. 1, Pergamon, New York, 1st edn., 1981
- (4) 김태형, 냉간 금속성형제품의 정밀도 향상을 위한 유한요소법의 활용, 1997
- (5) A.K. Singh, B.W. Rooks and S.A. Tobiab, "Factors Affecting Die Wear", Wear, Vol.25, pp.271-279, 1973
- (6) T.H. Kim, B.M. Kim, J.C. Choi, "Prediction of Die Wear in the Wire-Drawing Process", J. of Mat. Pro. Tech., Vol. 65, pp.11-17, 1997
- (7) O. Vardan, A. Bagchi, T. Altan, "Investigation of Die Wear in Upsetting Using FEM Code ALPID", Proceedings of NAMRC-XV, Bethlehem, PA, 1987
- (8) A.J. Black, E.M. Kopalinsky, P.L.B. Oxley, "Sliding Metallic Wear Test with In-Process Wear Measurement: A New Approach to Collecting and Applying Wear Data", Wear Vol. 200, pp.30-37, 1996
- (9) K. Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill, 1985
- (10) T. Altan, S. I. Oh, Harold L. Gegel, "Metal Forming Fundamentals and Applications", American Society for Metals, 1983

Table 1 Solid preform header<sup>19)</sup>

Upsetting Ratio $s/d_0$	Cone Angle $2\alpha$	Guide Length $a$	Length of Conical Portion of Preheader
2.5	15	0.6 $d_0$	1.37 $d_0$
3.3	15	1.0 $d_0$	1.56 $d_0$
3.9	15	1.4 $d_0$	1.66 $d_0$
4.3	20	1.7 $d_0$	1.56 $d_0$
4.5	25	1.9 $d_0$	1.45 $d_0$

Table 2 Simulation conditions for FE analysis

Billet Material	AISI 1020
Stress-Strain Relation <sup>10)</sup>	$\bar{\sigma} = 745.00358 \bar{\epsilon}^{0.2}$ (Mpa)
Friction	$\mu = 0.06$

Table 3 Comparison of wear volume and forming load

Preform	Variables	Half Cone Angle (deg)	Guide Length (mm)	Load (kN)	Wear Volume(mm <sup>3</sup> ) (1타 마멸깊이 x 500000)	
					Upper Die	Lower Die
Reference <sup>[9]</sup>		7.5	12	5025	7108	5185
Initial Value		9	11	4965	7593	5822
Optimal Preform		10.375	12.125	4940	6699	5204

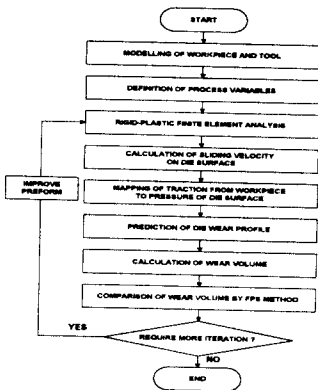


Fig. 1 Preform design for reducing die wear in cold forging process

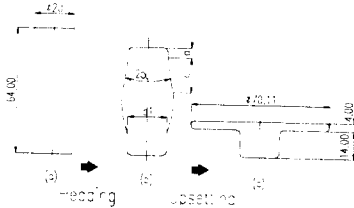


Fig. 2 Forming process of the T-type speaker tip

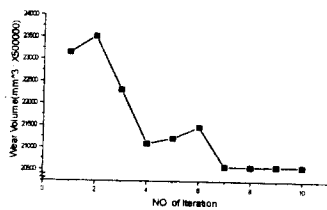


Fig. 3 Variance of wear volume with iterations

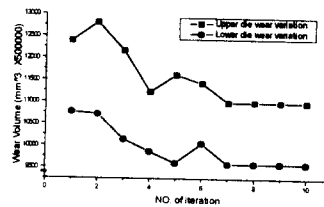


Fig. 4 Variation of upper and lower die wear with iterations

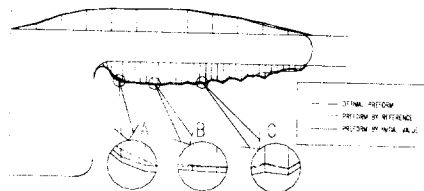


Fig. 5 Comparison of wear profile as finisher die applied to three different preforms(x 500000)