

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

스테인리스강 압출금형의 마멸 감소를 위한 설계

김태형*, 김병민**, 최재찬**

Design of STS304 Extrusion Die for Wear Reduction

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

ABSTRACT

Using stainless steel as the cold forged parts especially the outer parts of automobile is gradually increasing because it can bear up against the erosion and the wear. During cold forging of the stainless steel the working pressure acting on die surface are very high therefore the wear on die surface can be greatly increased. In cold forging 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 forged 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 stage in order to optimize the process. In this paper, the rigid-plastic finite element method was combined with the wear prediction routine and then the forward extrusion process using stainless steel was analysed simultaneously. To minimize the die wear the FPS algorithm was applied and the optimal conditions of die configuration are suggested.

Key Words : Die Wear(금형의 마멸), Extrusion Die(압출금형), Finite Element Method(유한요소법), FPS Algorithm(다면체 탐색 알고리즘)

1. 서론

스테인리스강은 내식성, 내마멸성, 강도 등이 우수하며 특히 부식을 방지하기 위한 용도로 많이 사용되고 있다. 최근 들어 자동차 산업에서 고급 내·외장재가 주목받고 있으며 따라서 이러한 재료를 이용한 부품의 성형도 활발하게 진행되고 있다. 그러나 스테인리스강은 비교적 변형 저항이 크기 때문에 냉간 성형시 금형에 작용하는 압력이

대단히 높으므로 금형의 파손, 마멸 등을 고려하여 금형을 설계해야 한다. 소형 부품을 양산할 경우는 실제적으로 금형의 파손보다는 마멸로 인하여 금형의 수명이 좌우되는 경우가 더 일반적이며 또한 금형의 마멸은 최종 제품의 치수 정밀도에 영향을 미치게 되므로 공정의 설계, 선택시 금형의 마멸을 고려하는 것이 중요하다.

금속 성형 공정에서 금형의 마멸에 관한 연구는 공정 중 공구와 소재간의 접촉면에 대한 정보와 윤활제의 역할

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

에 관한 정보 등을 정확하게 예측하기가 어렵기 때문에 비교적 최근에 단순한 공정에서 실험적으로 금형의 마멸을 계산, 실험하려는 시도가 행해져 왔다. 마멸 현상은 Holm⁽²⁾이 두 물체의 접촉시 표면 원자의 소멸이라고 제안하였으며, 비슷한 시기에 Archard⁽³⁾가 두 접촉 물체 표면의 미세 돌기들(asperities)의 접촉을 고려하여 미세 돌기의 붕괴를 마멸 현상이라고 제안하였다. Liou와 Hsiao⁽⁴⁾는 고속 열간 업셋팅 공정에서 금형의 온도에 따른 경도를 변수로 고려하여 금형의 마멸량을 계산하였다. Hansen과 Bay⁽⁵⁾는 Archard의 마멸 모델을 이용하여 업셋팅 공정에서 금형의 마멸량을 계산하였으며 금형 표면 거칠기가 커질수록 소재와의 미끄럼 길이가 감소하므로 금형의 마멸량이 줄어든다고 제시하였다. Doege 등⁽⁶⁾은 금형의 마멸 계산시 응착마멸이론 적용의 타당성을 실험적으로 입증하였다. Rooks 등⁽⁷⁾은 초기 금형 속도와 온도를 9.15m/s, 300℃로, 초기 소재의 온도를 1000℃로 각각 설정하여 고속 열간 업셋팅 실험을 수행하였으며, 그들은 금형 마멸에 영향을 미치는 주인자는 금형-소재간의 상대 속도임을 입증하였다. Ali 등⁽⁸⁾은 금형의 부식 마멸 현상을 해석하였으며 금형의 부식 마멸은 금형과 소재간의 윤활 상태, 접촉 시간에 영향을 받는다고 지적하였다. Miles 등⁽⁹⁾은 열간 단조 공정에서 금형의 속도가 증가할수록 관성력이 금형의 마멸에 큰 영향을 준다고 지적하였다. Tronel과 Chenot⁽¹⁰⁾은 반구형 펀치로 사각블럭을 압입할 때 발생하는 펀치의 마멸을 유한요소해석결과를 이용하여 예측하였다. 최근 Kim⁽¹¹⁾ 등은 선제인발공정에서 금형에 발생하는 온도를 고려하여 금형의 마멸을 계산하였다.

본 연구에서는 Archard의 마멸 모델을 적용하여 금형의 마멸을 해석하였으며, 변형 중인 소재가 금형의 마멸에 영향을 미치는 인자인 수직 압력 및 미끄럼 속도 등을 구하기 위하여 변형 공정을 유한요소해석하였다. 또한 설계 변수를 금형의 곡률반경으로 두고 금형의 마멸량이 최소가 되는 공정을 찾기 위하여 최적화 알고리즘인 FPS(Flexible Polyhedron Search)방법을 적용하여 연계를 해석하였다.

2. 해석 대상 및 문제 정의

본 연구에서는 변형 해석과 금형의 마멸 계산 과정을 연계하여 수행하였다. 해석 대상은 Fig. 1과 같이 자동차 후면경용 부품이며 외부에 노출되어 있으므로 부식의 방

지 등을 목적으로 스테인리스강인 STS304를 이용하고 있다. Fig. 1의 각각의 공정은 우선 소재를 절단한 후 전방압출로서 단면을 감소시킨 후 제품의 상부를 헤딩(Heading)으로 플랜지를 성형한 다음 최종적으로 트리밍, 절삭으로 완제품을 만드는 공정으로 되어 있다. 이러한 공정 중 금형의 마멸이 가장 심한 공정은 압출공정이며 특히 금형의 랜드부 마멸로 인하여 부품의 치수가 변하게 되어 다음 공정의 작업이 곤란하게 되는 문제점이 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 전방압출공정에서 발생하는 금형의 마멸을 감소시켜 전체적인 공정에서 금형 수명의 조화를 이루게 하며 공정의 조기 중단 등을 방지하는 데 그 목적이 있다. 일반적으로 제품의 단가가 낮은 소형 단조품의 경우는 금형의 치수가 어느 정도 표준화되어 있으며 설계자의 요구에 따라 금형의 내면을 가공하여 사용하고 있다.

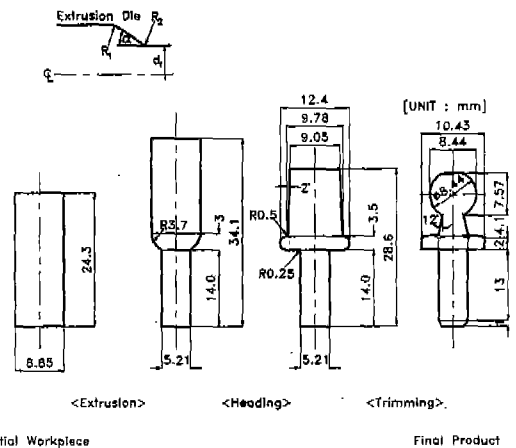


Fig. 1 A schematic representation of a STS304 forging process and the notations of design variables in extrusion die.

본 연구의 해석 대상에서 첫 번째 공정인 압출공정은 절단된 봉재를 비교적 단순한 형상으로 변화시키는 공정이므로 원추형 금형으로 성형하는 것이 보편적이며, 또한 제품 단가 절감의 측면에서 비교적 가공이 용이한 금형 설계가 바람직하다.

본 연구에서는 금형의 형상 중 압출금형의 반각이 고정되어 있는 경우로 금형의 곡률반경을 조절하여 금형의 마멸을 최소화하는 문제로 정의 할 수 있다.

Photo. 1은 각각의 공정에 의해 성형된 제품을 나타낸

것이다. Photo. 2는 초기 봉재를 압출할 때 사용한 금형을 나타낸 것으로서 인서트의 재질은 STD 11이며 보강 링을 SCM 4로 열박음한 금형이다. Photo. 3은 응고된 Cerro-117합금(STA-WARM Company, U.S.A)을 나타낸 것으로서 압출금형의 내부 치수를 측정하기 위하여 금형의 랜드 하부를 밀폐시킨 후 용점이 낮고 수축률이 적은 특성을 가진 Cerro-117합금을 용융시켜 부은 후 금형에 완전히 고정시킨 다음 뽑아 내어 30" 옴타칼 프로젝트(Rank Precision Industries, Inc)에서 20배 확대하여 측정하였다.

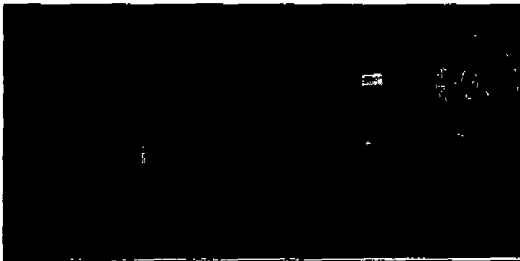


Photo. 1 Forging process using STS304

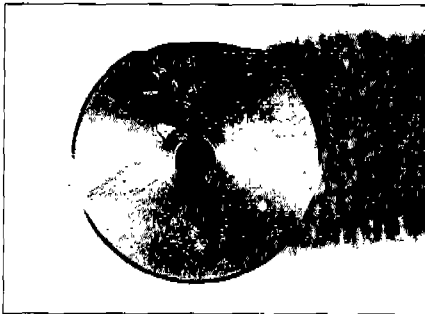


Photo. 2 Extrusion die(insert : STD11)

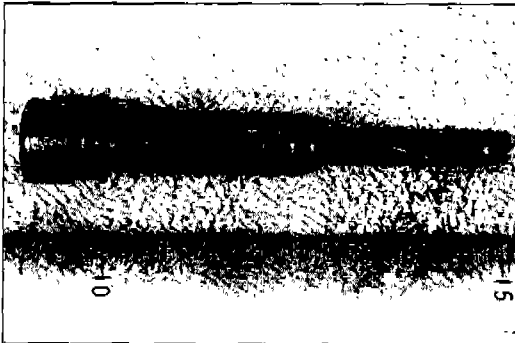


Photo. 3 The solidified Cerro-117 alloys for measuring the die profile

3. 변형 및 마멸 해석을 위한 정식화

소재의 변형 해석은 강소성 유한요소법을 이용하였으며 이의 정식화 과정은 여러 문헌⁽¹²⁻¹³⁾에 자세히 소개되어 있으므로 여기서는 간략히 언급한다.

변형 중인 소재의 관성력을 무시하면 강소성재료의 범함수는 다음과 같다.

$$\Pi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV - \int_{S_F} \bar{t}_i v_i dS \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}}$ 로 정의되는 유효 응력이며, 여기서 σ'_{ij} 는 편차 응력이다.

$\dot{\epsilon} = \sqrt{2/3\dot{\epsilon}'_{ij}\dot{\epsilon}'_{ij}}$ 로 정의되는 유효 변형률 속도 \bar{t}_i 표면력, v_i 절점 속도, $\dot{\epsilon}'_{ij}$ 변형률 속도이다.

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙 함수(penalty function), K를 도입하면, 식(1)에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta\Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta\dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_F} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (2)$$

식(2)에서 $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률 속도이며 벌칙 상수 K는 10^6 으로 두었다.

위의 식(2)는 일반적인 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴우튼-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구하였으며, 초기 속도장의 계산은 직접 반복법(direct iteration method)을 이용하였다.

금형의 마멸 계산에는 Archard의 마멸 모델⁽³⁾을 적용하였으며 그는 두 물체의 접촉시 마멸 깊이는 아래와 같다고 제안하였다.

$$\delta d = \frac{kPL}{3h} \quad (3)$$

여기서 δd 는 δt 동안 발생한 마멸 깊이이며, k는 마멸 계수, P는 접촉면에서의 수직 압력, L은 접촉면에서의 미끄럼 길이, h는 금형의 경도이다.

위의 식(3)에서 마멸 계수와 금형의 경도가 공정 중에서 일정하다고 가정하고 증분해석에 적용하기 위하여 적분 형태로 표현하면 마멸 깊이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta d = \frac{k}{3h} \int_0^{T_{tot}} \sigma_n \Delta v dt \quad \text{on } \partial \Omega^{tool} \quad (4)$$

식(4)에서 σ_n 은 금형 면에 작용하는 수직응력, Δv 는 금형과 소재간의 접촉면에서 미끄럼 속도, T_{tot} 는 전체 변형 시간이다. 따라서 시간 $t + \Delta t$ 에서의 마멸 깊이는 식(4)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta d_{t+\Delta t} = \delta d_t + \frac{k}{3h} [\sigma_n \Delta v]_t \Delta t \quad \text{on } \partial \Omega^{tool} \quad (5)$$

여기서 Δt 는 증분 시간이다.

본 연구에서의 목적함수는 금형의 랜드부에서의 마멸을 로서 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\text{Min } W = \int_0^{T_{tot}} \sigma_n \Delta v dt \quad \text{on } \partial \Omega^{die \text{ land}} \quad (6)$$

기하학적 구속 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s.t. : R_1, R_2 &\geq 0 \\ R_1 + R_2 &\leq \frac{0.5d_f(R-1)}{1-\cos\alpha} \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)의 R_1, R_2 는 각각 금형의 천이 영역, 랜드부의 곡률반경을 의미하며 R 은 압출비, d_f 는 최종 제품의 직경, α 는 금형의 반각이다. 마멸을 최소화하는 공정을 찾기 위한 R_1 및 R_2 의 변화는 FPS법의 절차, 즉, 반사(Reflection), 확장(Expansion), 수축(Contraction), 감소(Reduction)의 절차를 통하여 변화시켰다.⁽¹⁴⁾

위의 식(6)의 마멸율을 계산하기 위해서는 변형해석시 금형 표면에서의 수직응력, 소재와 금형의 접촉면에서의 미끄럼 속도, 시간증분을 계산해야 한다.

일반적인 최적 설계 문제에는 목적함수가 설계 변수의 향으로 표현되는 경우가 일반적이거나 본 해석 대상에서 금형의 마멸은 공구의 형상, 공정 조건에 따라 목적함수를 표현하기가 힘들기 때문에 목적함수를 설계 변수의 향으로 표현할 수 없는 경우에도 적용이 가능한 직접탐색법의 일종인 다면체 탐색알고리즘(Flexible Polyhedron Search; FPS)을 이용하였다. FPS법의 적용시 탐색 공간상의 최적값 부근에서 설계변수들내부의 면적 A_w 가 0에 가까운 값이 되는 성질을 이용하여 수렴 조건을 $A_w < \epsilon$ 으로 정하였으며 ϵ 은 0.001로 두었다. FPS법에서 설계 변수가 두개일 때 설계 공간상에서는 세점의 함수 값을

비교하게 되므로 각점을 p, q, r이라 하고 아래 식(8)에서 첫 번째 하침자는 설계 변수의 종류(R_1 또는 R_2), 두 번째 하침자는 각점의 위치(p, q, r)라고 하면 A_w 는 다음의 식으로부터 계산된다.

$$A_w = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$$

여기서 $s = \frac{1}{2}(a+b+c)$ 이며

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{(R_{1p} - R_{1q})^2 + (R_{2p} - R_{2q})^2} \\ b &= \sqrt{(R_{1q} - R_{1r})^2 + (R_{2q} - R_{2r})^2} \\ c &= \sqrt{(R_{1p} - R_{1r})^2 + (R_{2p} - R_{2r})^2} \end{aligned} \quad (8)$$

이다.

4. 금형의 마멸 감소를 위한 설계

본 연구에서는 소재의 변형 해석, 마멸 계산, FPS과정을 연계하여 해석을 수행하였으며 전체적인 계산 과정은 Fig. 2와 같다. 소재의 변형 해석 감소성 유한요소법을 이용하였으며, 식(6)의 마멸율의 계산에 필요한 금형과 소재의 접촉면에서의 수직응력, 상대 미끄럼 속도, 시간 증분량을 변형 해석을 통하여 구하였다. 소재의 변형해석시 금형은 탄성 변형이 없는 강체로 가정하였으나 마멸 계산을 위하여 소재와 접촉한 금형 표면의 돌기 부분에서는 소성변형을 받는다고 가정하였다.

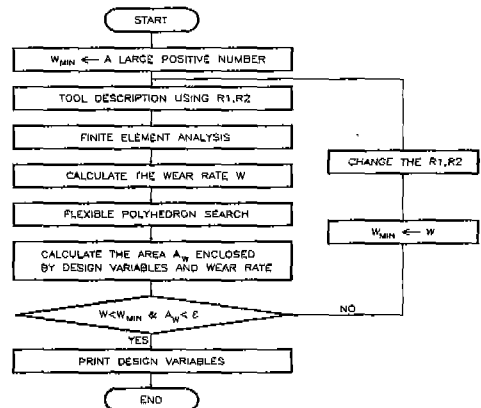


Fig. 2 Flowchart to analyse the forging process and to design extrusion die.

소재의 변형 해석에서 금형 표면에서의 마멸을 계산을 위하여 금형 표면에서의 측정점(monoring points)을 프로그램 내부에서 자동으로 생성하도록 하였으며, 소재의 절점력 및 속도를 금형 표면의 측정점으로 일차원 형상 함수를 이용하여 선형 보간하였다. 최종적으로 금형의 랜드부에서의 평균 마멸율을 계산하였으며 이 값이 최소가 되는 공정을 구하였다. 금형의 랜드부에서의 측정점은 10개로 등간격으로 분할하였다.

전방압출공정에 사용된 초기 소재의 치수는 직경과 길이가 각각 8.85, 24.3mm인 봉재로, 인산염 피막 처리를 하였으며 링업셋팅 실험으로 구한 마찰계수는 약 0.07 정도이다. 피가공 재료는 스테인리스강(STS304)으로 압축 실험으로 얻은 응력과 변형율의 관계는 Fig. 3과 같으며 최소자승법으로 $\bar{\sigma} = 1517.231\bar{\epsilon}^{0.421} [N/mm^2]$ 의 관계를 구하였다. 소재와 금형의 자세한 정보는 Table 1에 수록하였다.

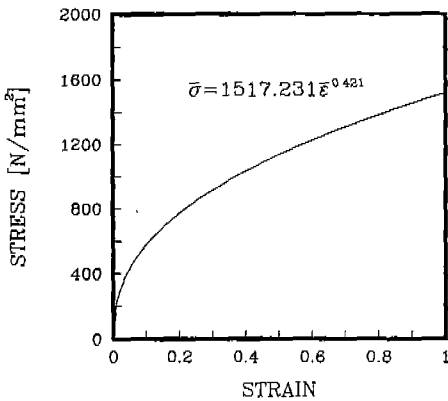


Fig. 3 Stress-strain relationship of STS304 material.

Table 1 Information of tool and workpiece

Workpiece	STS 304
Die insert	STD 11
Stress ring	SCM 4
Dimension of workpiece(D×L) [mm]	8.85×24.3
friction coefficient(μ)	0.07
Stress-Strain relation [N/mm^2]	$\bar{\sigma} = 1517.231 \bar{\epsilon}^{0.421}$
Half die angle(in degree)	34.4
Reduction in area(%)	66.11

변형 해석과 동시에 FPS법을 이용하여 랜드부의 평균 마멸율을 최소로 하는 공정을 구한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 금형의 랜드부에서의 평균 마멸율의 변화를 나타내었으며 반복 횟수가 증가할수록 초기설계치보다 평균 마멸율이 감소함을 볼 수 있으나 반복 횟수가 9회 이후에는 섭동이 나타나며 그 이상의 반복 계산에서는 더 이상의 마멸율의 감소가 나타나지 않음을 볼 수 있었다. 또한 FPS법의 사용시 최소값 근처에서는 설계 변수와 함수 값으로 계산되는 영역의 면적이 거의 0으로 된다는 성질을 수렴 조건으로 이용하였으며 설계 변수와 마멸 값으로 계산되는 영역 내부 면적의 변화를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 마멸율의 변화와 마찬가지로 반복 횟수가 9회 이후에는 목적함수의 감소가 나타나지 않으며 역시 섭동이 나타남을 볼 수 있다.

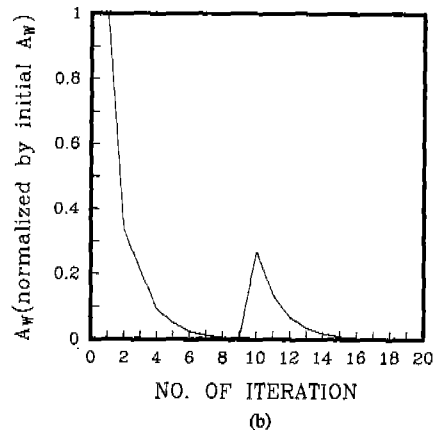
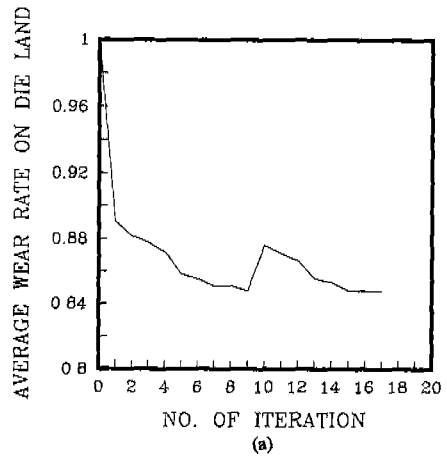


Fig. 4 Variation of average wear rate and the area A_w with the iterations.

이상의 결과에서 FPS법은 설계 문제 특히 금형의 마멸율을 최소화하기 위한 공정을 찾는 데 유용함을 볼 수 있었다. 마멸을 최소로 하는 공정에서의 마멸율은 초기 설계된 공정에서보다 약 15% 이상 감소하였음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 FPS법을 이용하여 설계 변수를 변화시켜 가면서 변형 해석한 결과를 보간하여 나타낸 것으로서 특정 설계 변수에서 전역적 최소값이 존재함을 볼 수 있다.

Fig. 6은 초기 설계된 압출공정(R1 = 3.5, R2 = 0.5)과 마멸을 최소로 하는 공정(R1 = 4.012, R2 = 1.494)에서의 금형 내면에서의 마멸을 분포를 나타낸 것으로서 초기 설계된 공정보다 마멸을 최소로 하는 공정에서의 전체적인 금형의 마멸율이 감소하였으며 특히 금형의 랜드부에서의 마멸율이 현저히 감소함을 볼 수 있다. 제품을 약 3600개 정도 생산한 후의 금형의 마멸량을 측

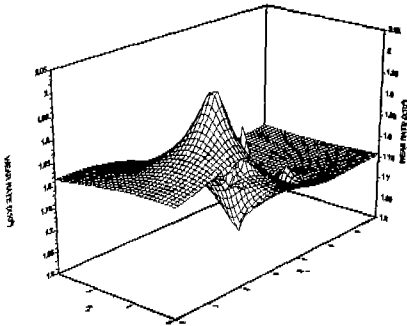


Fig. 5 Wear rate distribution with respect to the variation of design variables R1, R2.

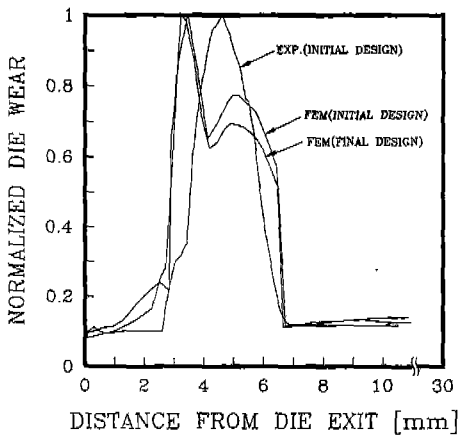


Fig. 6 Comparison of wear rate (normalized by max. wear rate)

정한 결과와 해석 결과를 비교하였으며 실제 금형의 마멸량은 천이 영역에서 최대임을 볼 수 있으며 최대 마멸 깊이는 약 0.31mm 정도임을 알 수 있었다. 본 연구에서는 마멸 계수를 포함하지 않은 마멸율을 계산하였지만 실제 공정에서 마멸 계수가 일정하다면 측정된 실제 금형의 마멸 형상과 이론 해석으로 구한 마멸율은 각각의 결과에서 최대 마멸 깊이로 나눈 값을 서로 비교할 수 있으며 이론 해석으로 계산한 마멸율과 측정으로 구한 마멸율을 비교하였을 때 그 경향이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

이러한 결과로부터 압출금형의 설계시 금형의 곡률반경의 크기는 소재의 유동 및 금형의 마멸량을 제어하기 위해서 고려해야 할 변수임을 알 수 있다. Fig. 7은 초기 설계된 공정과 FPS법을 이용하여 구해진 마멸을 최소로 하는 공정에서의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 두 가지 공정에서의 변형률의 크기를 비교하기 위해 아래와 같이 정의되는 평균 변형률을 계산하였다:

$$\bar{\epsilon}_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \bar{\epsilon}_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad V_i: \text{요소 } i \text{의 체적}, n: \text{요소 개수} \quad (9)$$

계산된 결과는 초기 설계의 경우 $\bar{\epsilon}_{ave} = 0.361$, 마멸을 최소로 하는 공정의 경우 $\bar{\epsilon}_{ave} = 0.348$ 이었다. 즉, 변형률 분포는 전체적으로 유사하지만 Fig. 7(b)와 같이 금형의 마멸이 작게 일어나는 공정에서의 변형률이 초기 설계된 공정의 경우인 Fig. 7(a)의 경우보다 약간 낮음을 볼 수 있다.

Fig. 8은 앞서 언급한 두 가지 공정에서의 압출하중을 나타낸 것으로 마멸이 작은 공정에서의 하중이 더 낮음을 볼 수 있다.

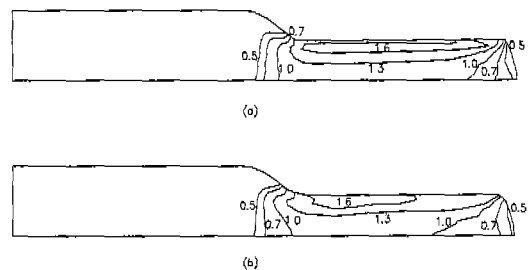


Fig. 7 Comparison of effective strain distribution after extrusion process
(a)Initial design (b) final design

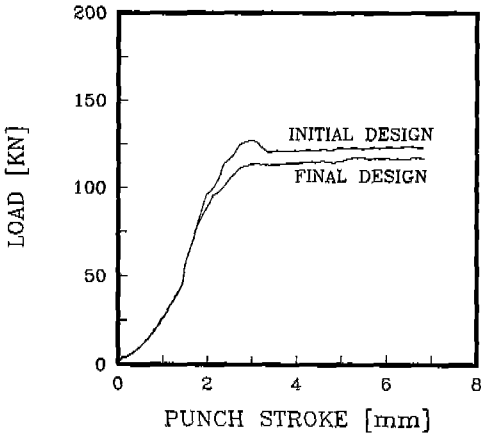


Fig. 8 Load vs. stroke during the extrusion process

비록 마멸을 최소화하는 공정일지라도 헤딩공정 후 제품의 플랜지부의 치수가 트리밍 여유가 있어야 하며 이러한 것을 확인하기 위하여 마멸을 최소화하는 공정에서의 헤딩공정을 해석하였다. Fig. 9는 초기 설계된 공정과 마멸을 최소로 하는 공정에서의 헤딩공정 후의 제품의 외형과 변형률 분포를 나타낸 것으로 각각의 경우에서 플랜지 부분의 직경이 트리밍 금형의 내경보다 크므로 후속의 트리밍공정이 가능함을 볼 수 있다. 각각의 공정에서 변형률의 분포는 거의 일치함을 볼 수 있었다. Fig. 10은 초기 설계 및 마멸이 최소가 되는 설계의 금형 형상을 비교한 것이다.

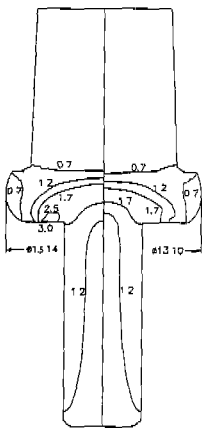


Fig. 9 Comparison of effective strain distribution during the heading process
(left half : initial design, right half : final design)

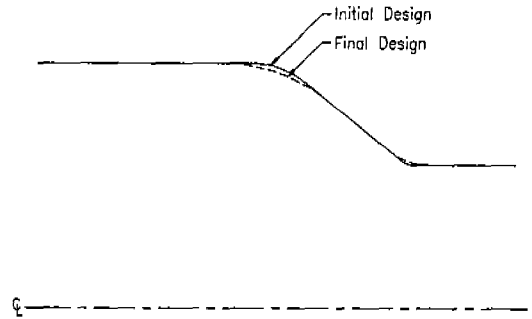


Fig. 10 Die geometry for initial and final design

5. 결론

실제 제조 공정에 적용되고 있는 압출금형의 마멸 감소를 위하여 금형 설계를 수행하였다. 강소성 유한요소법을 이용하여 소재의 변형 해석 수행하였으며, 금형의 마멸 해석을 동시에 연계 해석하였다. 마멸을 최소화하는 공정은 다면체탐색법을 이용하여 구하였으며 새로운 설계 변수를 이용하여 금형 형상을 재 정의한 후 반복적으로 변형해석을 수행하였다. 이상의 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공정 해석을 통하여 마멸을 최소화 할 수 있는 금형의 형상을 구하였다.
- 2) 본 연구에서 적용한 FPS방법은 마멸 감소를 위한 금형의 형상을 찾는데 유용함을 알 수 있었다.
- 3) 금형의 마멸량은 금형의 형상 변화로 제어할 수 있음을 알 수 있었다.
- 4) 금형의 마멸량이 작은 공정은 펀치 하중이 더 낮으며 소재 내부의 변형을 크기도 더 작음을 알 수 있었다.
- 5) 실험으로 구한 금형의 마멸 형상은 이론 해석으로 구한 마멸 형상과 비교적 잘 일치함을 볼 수 있었다.

참고 문헌

1. Failure Analysis and Prevention, Metals Handbook, 8th ed., Vol.10. ASM Handbook Committee, ASM, Metals Park, Ohio, p.134, 1975.
2. R. Holm, Electric contacts, Almqvist and Wiksells, Stockholm, 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. M. P. Miles, L. Fourment, J. L. Chenot, "Inertia Effects in Finite Element Simulation of Metal Forming Process", J. of Materials Processing Technology, vol. 45, p.19~24, 1994.
 10. 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.
 11. 김병민, 조해용, 김태형, "온도상승을 고려한 인발금형의 마모해석", 한국정밀공학회지 제 13권 제 1호, pp.116~122, 1996.
 12. Zienkiewicz, O. C., The finite element method, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York, 1977.
 13. Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., Metal forming and the finite element method, Oxford University Press, 1989.
 14. Himmelblau, D. M., Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill, pp.148~155, 1972.