

후방 압출 펀치의 마멸 저감을 위한 펀치 형상 설계

김동환*, 이정민**, 김병민#

Design of Punch Shape for Reducing the Punch Wear in the Backward Extrusion

Dong Hwan Kim*, Jung Min Lee** and Byung Min Kim#

ABSTRACT

Die design to minimize the die wear in the cold forging process is very important as it reduce the production cost and the increase of the production rate. The quantitative estimation for the die wear is too hard because the die wear is caused by many process variables. So, in this paper, the optimal shape of the backward extrusion punch is newly designed through the FE-analysis considering the surface expansion and Archard wear model in order to reduce the rapid wear rate that is generated for the backward extruded products exceeding the forming limit. The main shape variables of the backward extrusion punch are the flat diameter, angle, and round of the punch nose part. As the flat diameter and angle of the punch nose are larger, the surface expansion is reduced and the wear rate is decreased according to the reduction of the punch round. These results obtained through this study can be applied to the real manufacturing process.

Key Words : Reduction of wear(마멸 저감), Punch shape (펀치 형상), Backward extrusion(후방 압출), Surface expansion(표면 확장), FE simulation(유한요소해석)

1. 서론

자동차 부품의 생산에 있어서 기계가공은 높은 치수정도 및 복잡한 형상의 제품을 생산할 수 있지만 제품 생산에 있어 생산성 저하 및 단가상승에 큰 영향을 미친다. 따라서 최근 소성가공에 있어서 기존의 기계가공에 의해 생산하던 제품을 재료의 손실량을 줄일 수 있고, 높은 생산성, 우수한 기계적 성질 및 양호한 치수정밀도를 얻을 수 있는 냉간단조 공법으로의 전환에 의한 고부가 가치화가 요구되고 있는 실정이다. 그러나 기존의 기계가공

부품을 냉간 단조로의 공법 전환에는 제품의 치수 불량 및 형상 불량 등의 많은 문제점을 나타낸다. 특히 냉간 단조는 여러 단계의 예비 성형공정이 필요하며, 각 작업에서는 이에 상응하는 금형이 필요하고 각 공정에서 가혹한 작업조건하에서 사용되어 지므로 금형의 손상이 심하여 금형의 수명저하가 발생한다. 이러한 수명저하는 금형의 비용증가에 그치지 않고 생산성 저하 및 품질관리 비용 등의 증가를 초래하므로 이를 고려하여 종합적으로 설계 되어야 한다. 최근 금형의 재질, 제작 기술, 보강 방법 및 열처리 기술 등의 발달로 인해 금형수명을

접수일 : 2004년 1월 27일; 게재승인일: 2004 년 8월 13일

* 진주국제대학교 자동차공학과

** 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

교신저자: 부산대학교 기계공학부

Email bmkim@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3074

지배하는 인자들 중에서 마멸은 금형수명을 결정하는데 중요한 인자가 되었다. 현재까지 성형 공정에서 마멸에 관한 연구는 공정 중 금형과 소재간의 접촉면에서의 정확한 정보와 윤활제에 의한 마찰조건에 관한 정보를 예측하기 어려울 뿐만 아니라 정량적 평가가 어렵기 때문에 비교적 단순한 공정에서 실험적으로만 공구의 마멸을 규명하려는 시도가 행해져 왔으며 공구형상에 대한 마멸 연구는 미비한 실정이다¹⁻³. 특히, 냉간 후방압출 공정에서는 성형속도가 빠르고, 펀치의 성형방향과 소재의 유동방향이 반대 방향으로 작용하기 때문에 마멸에 의해 펀치의 손실이 크게 작용한다.

후방압출 공정에서의 마멸 거동은 펀치의 형상에 따라 크게 작용하므로 펀치 형상에 대한 다양한 연구가 시도되어 왔다. Nozima⁴ 등은 실험을 통해 후방압출 성형 펀치 형상과 단면적 변화에 따른 펀치 압력의 변화에 대해 연구하였고, Mizuno^{5,6} 등은 후방압출 펀치 형상에 따라 표면적 확대 및 제품 내벽의 표면상태에 대해 연구하였으며, Bay⁷ 등은 펀치 형상에 따라 윤활제의 파손정도를 측정하기 위해 표면 확장률(surface expansion)에 대해서 연구하였다.

본 연구에서는 피스톤 핀, 브레이크 실린더 등과 같이 높은 치수 정도를 요구하고 압출 길이가 내경에 비해 상당히 길어 냉간 성형한계 이상의 후방압출 제품 생산 시 발생한 공구 마멸을 최소화할 수 있도록 펀치 설계를 위한 설계 변수를 파악하고, 설계변수의 변화에 대해 펀치의 연삭마멸 정도를 평가하였다. 또한 펀치 형상에 따라 소재의 표면 확장에 의한 윤활제 파손 정도를 유한요소해석을 통해 규명하였다. 이를 바탕으로 후방압출 성형 시 펀치 랜드부의 마멸 저감을 위한 최적의 펀치 형상설계를 수행하였다.

2. 성형 공정 및 마멸 해석

2.1 성형 공정 설계

본 연구의 대상 제품은 자동차 브레이크 오일 탱크의 아래에 설치되어 유압 피스톤 역할을 하는 브레이크 마스터 실린더로서 자동차의 안전에 중요한 역할을 담당하는 자동차 부품 중의 하나이다.

기존의 브레이크 마스터 실린더 제조 공정을 보면, 브레이크 마스터 실린더 본체는 플라스틱 사출 성형을 하고, 실린더 부분은 원형 봉 소재에 절삭

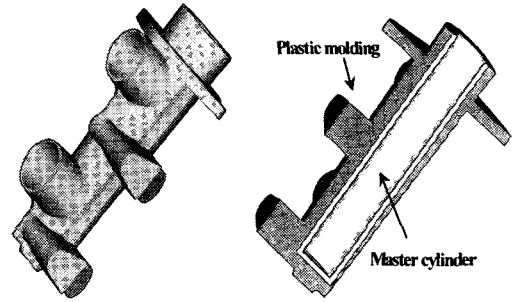


Fig. 1 Structure of a master cylinder manufactured and manufacturing process

가공으로 구멍을 내는 호빙(hobing) 공정으로 제조되었으나, 실린더 부분의 기계가공으로 인한 재료 손실 증가 및 생산율 감소로 인하여 실린더 부분만 후방압출 공정으로 전환이 요구되어졌다. Fig. 1은 브레이크 마스터 실린더의 형상과 단면을 나타내었다. 브레이크 마스터 실린더의 실린더 부분은 유압을 각 휠에 배분하므로 기밀 유지를 위해 내경의 동심도 및 표면정도가 양호해야 하고, 제품 내경 공차가 30 μm 이내의 높은 치수정도를 요구한다.

냉간 다단 성형의 경우에는 단 경계 부분에 성형자국이 남게 되어 제품 내경의 치수정밀도 및 기밀유지에 문제가 된다. 그러므로 이러한 제품의 높은 치수정밀도를 만족하기 위해서는 가능한 한 번의 후방압출 공정으로 제품의 성형이 필요하다. 또한, 펀치 랜드부의 마멸은 내경의 표면정도 및 생산성을 저하시키는 원인이 되므로 공정 및 금형 설

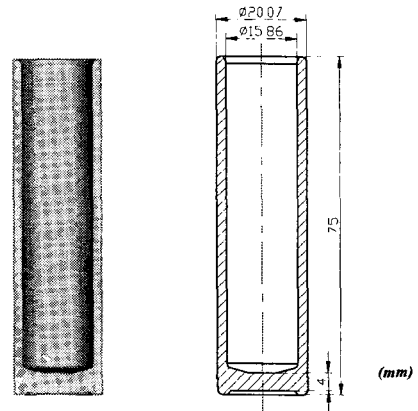


Fig. 2 Shape and dimensions of cylinder

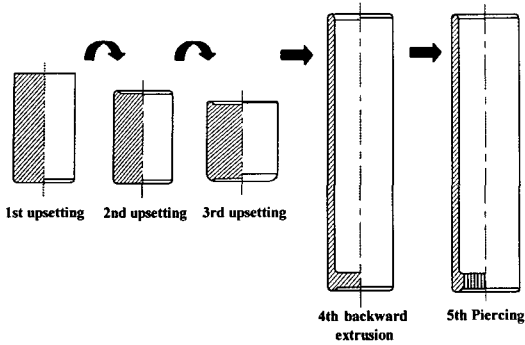


Fig. 3 Forging process sequence for cylinder

계에 중요한 변수로 작용한다. Fig. 2는 후방압출 공정으로 성형하는 브레이크 마스터 실린더의 실린더 제품 피어싱 전의 형상과 치수를 나타내었다.

브레이크 마스터 실린더의 소재는 SM10C 탄소강이며 압축시험을 수행하여 다음과 같은 응력-변형률 관계식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 715.6 \bar{\epsilon}^{0.22} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

소재와 금형간의 윤활제는 원소재를 인산염 피막처리 후 본드루베(bond rube) 처리 하였으며, 마찰상수 값(m)은 0.1이었다.

브레이크 마스터 실린더의 실린더 부분을 냉간 다단포머(multi-stage former)에 의해 후방압출 공정으로 성형하기 위한 공정순서는 Fig. 3 과 같다. 전체 공정은 펀치의 수명과 제품의 치수 정밀도 향상을 위해 절단결합을 없애는 1공정, 2공정 및 3공정에서의 예비업세팅 공정 그리고 실린더를 성형

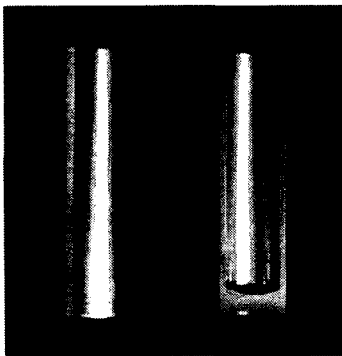


Fig. 4 Photograph of a product deformed

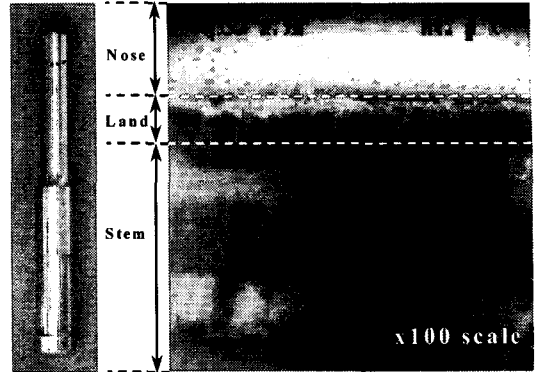


Fig. 5 Photograph of wear on punch land

하기 위해 4공정에서 후방압출공정을 수행한 다음 마지막 5공정에서 피어싱하여 최종 제품을 생산하도록 설계하였다. 그러나 제 4공정을 한 번의 후방압출공정으로 성형하면 제품 내경에 비해 압출 길이가 4.4배로 일반적인 2.5 ~ 3 배인 냉간 단조 성형한계를 벗어나고 이로 인한 펀치의 좌굴 및 제품의 벽 부분과 바닥 사이의 유동 결함에 의한 크랙 생성의 위험이 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저, 후방압출공정의 유한요소해석을 통한 펀치의 좌굴 및 크랙의 발생 유무를 예측하였고, 그 결과 유동 결함 및 금형의 강성에 문제가 발생하지 않아 설계된 후방압출 공정으로 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 4 와 같이 성형되는 제품의 내부 결합 및 성형 펀치의 강성에 대한 문제점은 발견되지 않았지만 펀치 랜드부가 다른 후방압출 제품에 비해 과도한 마멸이 발생하였다. Fig. 5는 생산수량 1,000개 이후의 펀치 랜드부에 발생한 마멸을 나타내었으며, 펀치의 랜드부에 TiCN 코팅층이 마멸된 것을 관찰할 수 있었다. 이는 제품의 치수 정밀도 및 금형 수명을 저하시키기 때문에 공구측면에서는 공구와 소재사이의 압력과 상대속도로 인한 연삭 마멸을 저감하는 설계 방안이 필요하며 소재측면에서는 소재의 국부적으로 과도한 표면 확장을 억제시킬 수 있는 펀치 형상의 재설계가 요구되어진다.

2.2 펀치의 연삭마멸 해석

금속간의 미끄럼운동 시에 발생하는 마멸과 관련된 인자들은 접촉면의 온도, 접촉돌기(asperity)의 분포 및 접촉면의 거칠기 등의 접촉상태와 펀치 재료의 경도, 펀치에 작용하는 수직압력, 미끄럼 길이

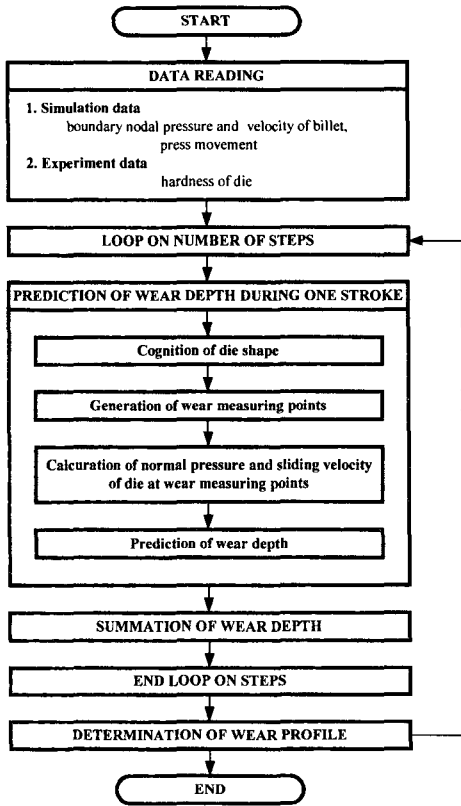


Fig. 6 Flow chart for predicting deformation behavior and tool wear

윤활조건 등이 있다. 이러한 마멸해석을 위해 실제 연삭마멸 해석에 널리 적용되고 있는 식(2)의 Archard⁸ 마멸모델을 이용하였다.

$$\delta w = \frac{kPL}{3h} \quad (2)$$

여기서, δw 는 마멸깊이, k 는 마멸계수, P 는 접촉면에서의 수직압력, L 은 접촉면에서의 미끄럼길이, h 는 펀치의 경도를 나타낸다. 이를 유한요소해석에 적용하면 금형 면에서의 시간 $t + \Delta t$ 에서 마멸 깊이는 다음과 같다.^{9,10}

$$\delta w_{t+\Delta t} = \delta w_t + \frac{k}{h} [\sigma_n \delta v]_t dt \quad (3)$$

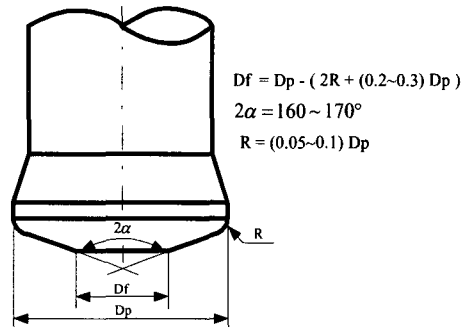


Fig. 7 The recommended punch shape by ICFG¹⁰

식(3)에서 σ_n 는 금형 면에 작용하는 수직압력이고, δv 는 금형과 소재접촉면에서의 미끄럼 속도를 나타낸다. Fig. 6은 펀치의 마멸을 예측하기 위한 유한요소해석의 흐름도이다.

본 연구의 후방 압출 펀치 재질은 SKH55이고 TiCN 코팅 처리를 하였다. 마멸 해석을 위해 경도 측정 및 Pin-on-Disk 마멸 실험을 한 결과, 표면 경도는 HRC를 기준으로 62이고, 마멸계수, k 는 2.98535×10^{-7} 이었다.

먼저, 마멸깊이가 최소로 하는 최적의 펀치 형상 설계를 위해 후방 압출 성형 시 마멸에 영향을 줄 수 있는 변수들로, 펀치 노즈(nose) 평탄부(Df), 펀치 노즈부 각도(2α)와 펀치 라운드(R)로 선정하였다. 후방 압출 성형에서 펀치의 설계 기준으로 사용되는 ICFG(International Cold Forging Group)¹¹에서 추천하고 있는 형상 설계 규칙(Fig. 7)을 적용하여, 본 제품에 대한 각 형상 변수의 범위를 선정하였다. 선정된 형상 변수의 범위는 Table 1과 같다. 실험한 기존의 펀치 형상 변수의 값(Df=4.5mm, $2\alpha=150^\circ$, R=1.0mm)을 기준으로 각 형상 변수의 값을 변화시켜 가면서 랜드부의 마멸깊이를 계산하였다. 생산수량은 10,000개로 설정하였으며, 수직압력과 미끄럼 속도는 유한 요소 해석을 통해 구하였다. 유한요소 해석은 상용 해석 코드인 DEFORM-2D¹² 를 사용하였다.

Table 1 The levels of punch shape parameters

	Df(mm)	2 α(°)	R(mm)
Min. level	4.5	150	0.5
Mid. level	6	160	1
Max. level	8	170	2

2.3 소재의 표면 확장률 해석

후방 압출 성형 시 표면 확장률은 소재의 마멸 해석 측면에서 중요한 인자로서, 과도한 소재의 표면 확장의 진행은 윤활막이 얇아지면서 결국 윤활막이 파손되어 급속 마찰을 유발시킬 수 있다. 이러한 윤활막의 파손에 따른 급형과 소재 급속간의 마찰은 급격한 펀치의 마멸을 발생시키고, 제품 정도를 저하시키는 원인이 된다. 따라서 표면 확장률이 적은 펀치 형상을 선정하면 윤활막 파손에 의한 마멸의 급격한 증가를 감소시킬 수 있다.¹³⁻¹⁵ 소재의 표면 확장을 평가하기 위한 표면 확장률(X)는 다음과 같이 정의된다.

$$X = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \quad (4)$$

여기서, A_0 는 표시된 절점 사이의 성형 전의 면적이고 A_1 는 성형 후의 절점 사이의 면적이다. 표면 확장률을 유한요소해석 하기 위해 상용 해석 코드인 DEFORM2D를 사용하여, 성형 전 예비성형체에 일정한 간격으로 1번부터 11번까지 절점을 나누어 표시하고 12개의 구간으로 나누어 성형 후 표시된 절점을 추적하였다. 각 절점 사이의 표면적을 계산하여, 식(4)에 따라 소재 표면의 확장률을 각 구간에 대하여 계산하였다(Fig. 8). 펀치 형상에 대해 소재 표면 확장률을 평가하기 위한 펀치의 형상 변수와 범위는 Table 1과 같이 연삭마멸 해석과 동일한 조건으로 해석을 수행하였다.

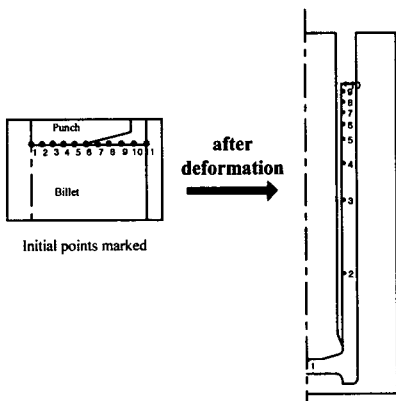
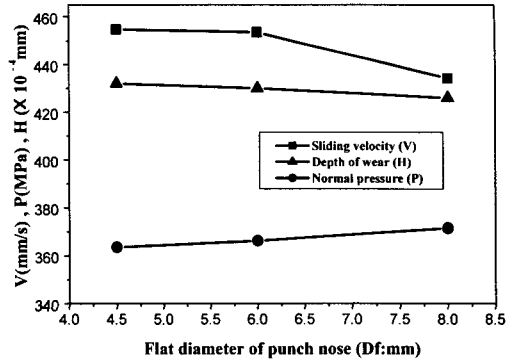
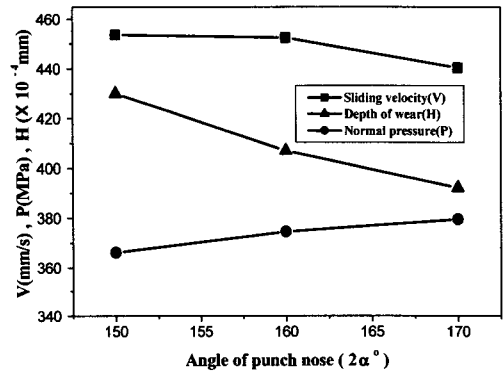


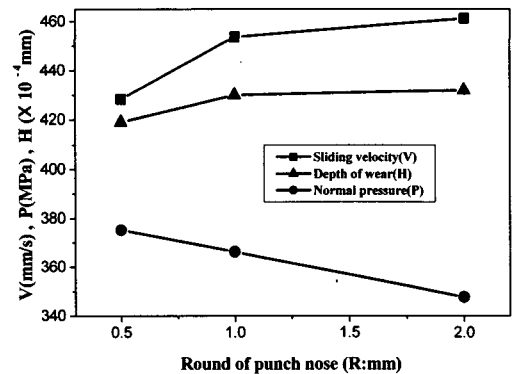
Fig. 8 Analysis method for a surface expansion using FE-simulation



(a) Influence of punch nose flat diameter



(b) Influence of punch nose angle



(c) Influence of punch round

Fig. 9 Abrasive wear according to punch shape

3. 결과 및 고찰

3.1 펀치의 연삭마멸 해석 결과

후방압출 공정 성형 시 펀치 형상에 따른 연삭 마멸 해석 결과는 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 펀치의 노즈부 평탄부의 지름의 변화에 대한 마멸이 가장 깊이 일어난 부분의 수직 압력과 미끄럼 속도, 마멸 깊이를 나타내었다. 펀치 노즈 평탄부가 펀치 형상 변수에 미치는 영향이 비교적 적게 나타났지만, 펀치노즈 평탄부가 증가할수록 마멸 깊이가 줄어들며, 그 부분의 미끄럼 속도는 노즈 평탄부가 증가할수록 커지고, 수직 압력은 작아지는 현상이 나타난다. 펀치 노즈 평탄부가 증가할수록 수직 압력보다 미끄럼 속도의 변화가 더 심하며 마멸 깊이는 수직 압력보다 미끄럼 속도의 감소의 의한 영향을 많이 받았다.

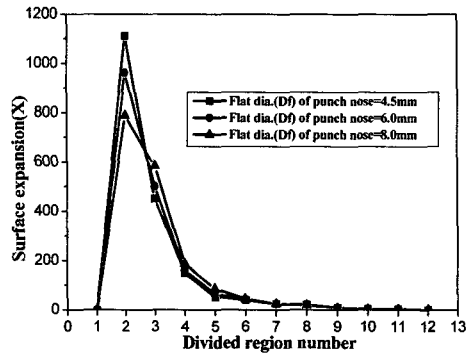
Fig. 9(b)는 펀치의 노즈 각도의 변화에 대한 마멸이 가장 깊이 일어난 부분의 수직 압력과 미끄럼 속도, 마멸 깊이를 나타냈다. 펀치 노즈 각도에 따라 마멸 깊이가 크게 영향을 받았으며, 노즈 각도가 증가할수록 마멸 깊이가 급속히 감소한다. 수직 압력은 완만하게 증가하는 반면 미끄럼 속도는 비교적 급격히 떨어지는 경향을 보였다. 펀치 노즈 각도의 증가에 따라 미끄럼 속도의 하락으로 마멸 깊이가 감소한 것을 알 수 있다.

Fig. 9(c)는 펀치 라운드의 변화에 대한 마멸이 가장 깊게 일어난 부분의 수직 압력과 미끄럼 속도, 마멸 깊이를 나타낸 것으로 마멸 깊이가 큰 변화를 보이고 있진 않지만, 펀치 라운드가 1.0mm미만인 구간에서는 변화가 크며, 마멸 깊이와 미끄럼 속도는 펀치 라운드가 감소할수록 감소하고, 수직 압력은 펀치 라운드가 증가할수록 감소한다.

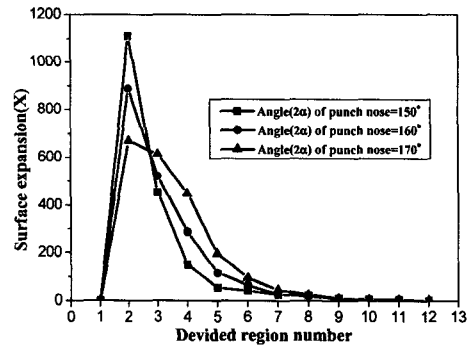
3.2 소재의 표면 확장을 해석 결과

Fig. 10은 펀치 형상 변수의 변화에 따른 소재의 표면 확장에 대한 해석 결과를 나타내었다. Fig. 10(a)는 펀치 노즈 평탄부의 변화에 대한 소재의 표면 확장률의 변화를 나타내었으며, 구간 2, 3에서 급격하게 소재의 표면 확장이 일어나는 것을 알 수 있었다. 이렇게 국부적으로 크게 발생하는 소재의 표면 확장은 펀치 노즈 평탄부의 지름이 클수록 감소하는 결과를 보였다. Fig. 10(b)는 펀치 노즈 각도 변화에 대한 표면 확장률의 나타내었으며, 펀치 노즈 각도에 대하여 표면 확장의 영향이 가장 크게

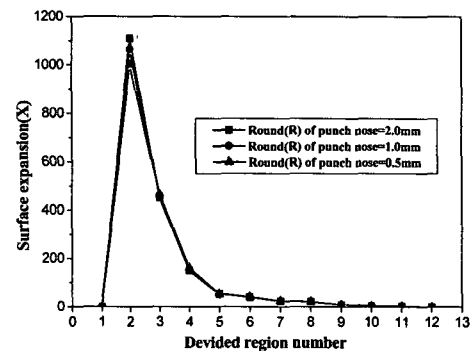
일어나는 것을 알 수 있었다. 펀치 노즈 각도가 클수록 소재의 국부적인 표면 확장의 증가량이 크게 감소하였다. 또한 Fig. 10(c)는 펀치 라운드의 변화에 대한 표면 확장률의 변화를 나타내었으며, 펀치



(a) Influence of punch nose flat



(b) Influence of punch nose angle



(c) Influence of punch round

Fig. 10 Surface expansion according to punch shape

라운드가 작을수록 최고점에서의 표면 확장률이 조금 작아지는 것을 알 수 있었으나, 펀치 라운드 변화에 대해 소재의 표면 확장률은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

3.3 최적 펀치 형상 설계

후방압출 공정 시 과도한 마멸의 발생을 감소시키기 위해 Archard의 연삭마멸 모델을 이용하여 성형 펀치 형상에 따라 연삭 마멸을 발생시키는 주요 변수인 소재와 금형면의 수직 압력과 미끄럼 속도를 유한요소해석을 통해 파악하고 이를 토대로 펀치 형상의 변화에 따른 연삭 마멸깊이를 파악하였다. 소재와 금형 면에서의 미끄럼 속도는 펀치 노즈 평탄부와, 노즈 각도가 증가하고, 펀치 라운드가 감소할수록 감소하였으며, 소재와 금형 면에서의 수직압력은 펀치 노즈 평탄부와 펀치 노즈 각도가 증가하고, 펀치 라운드가 감소할수록 증가하였다. 이러한 결과를 토대로 연삭마멸 모델에 의한 마멸깊이의 변화를 비교하면, 펀치의 연삭 마멸깊이는 수직 압력의 영향보다 펀치에 작용하는 미끄럼 속도의 변화에 더 크게 작용하였으며 이에 의해 펀치 마멸 깊이도 감소하였다.

소재의 측면에서 성형 중 소재의 국부 요소의 과도한 표면 확장에 의해 야기되는 마멸을 비교하기 위해 펀치 형상에 따른 소재의 표면 확장률을 평가하였다. 성형 시 나타나는 소재의 표면 확장은 펀치 노즈부 각도의 변화에 대해 변화가 가장 큰 것으로 나타났으며, 펀치 라운드의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 소재의 표면 확장률은 펀치 노즈 평탄부와 펀치 노즈 각도가 증가할수록 소재의 표면 확장률이 고르게 나타났으며, 이는 윤활제의 파손에 의한 마멸을 감소시킬 수 있다.

이상의 결과에 따라 브레이크 마스터 실린더를 후방 압출하기 위해 설계 기준 범위 내에서의 최적의 펀치 형상을 결정하였다. 펀치 랜드부의 마멸을 감소시킬 수 있는 최적의 펀치 형상은 펀치 노즈 평탄부는 8.0mm, 노즈 각도는 170°, 펀치 라운드는

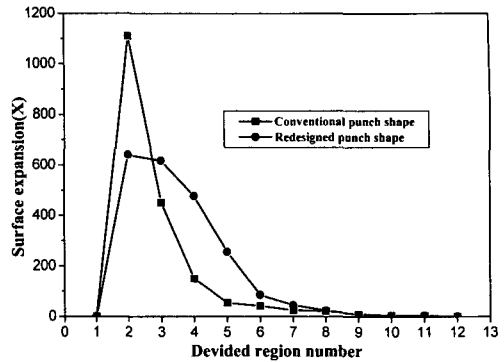


Fig. 11 Comparison with surface expansion on redesigned punch shape.

0.5mm로 나타났다. Table 2는 기존의 펀치 형상과 최적의 펀치 형상에 대한 10,000개 생산 후의 연삭 마멸깊이에 대하여 비교하였다. 재설계된 펀치의 연삭 마멸깊이는 0.0377mm로 기존 펀치의 연삭 마멸깊이 0.0430mm에 비해 약22% 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 소재의 표면 확장률에 대해서도 기존의 펀치에 비해 최적의 펀치 형상으로 성형했을 때 소재가 비교적 균일하게 표면 확장을 일으키는 것을 알 수 있었다(Fig. 11).

4. 결론

본 연구에서는 기계 가공공정으로 제조되는 자동차 브레이크 마스터 실린더 부품의 생산성 향상을 위한 후방압출공법을 제시하였다. 이를 위하여 성형 펀치와 소재의 설계 변수 파악을 통한 마멸 저감 설계 방안을 제시하였고, 유한요소해석을 통하여 펀치 마멸 깊이 감소 및 소재의 표면 확장을 저하시킬 수 있는 최적의 펀치 형상을 제시하였다. 본 논문의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 압출 길이가 긴 후방압출 공정에서는 성형펀치와 소재의 유동 방향이 상호 반대로 작용

Table 2 Comparison results for wear depth between conventional and optimal punch shape

Punch shape	Flat dia.(Df) of punch nose	Angle(2 α) of punch nose	Round(R) of punch nose	Depth of wear (after 10,000 blow)
Conventional	4.5mm	150	1.0mm	0.0430mm
Optimal	8.0mm	170	0.5mm	0.0377mm

하고, 금형과 소재의 접촉시간이 길기 때문에 연삭 마멸과 소재 표면 확장에 의한 윤활제 파손으로 펀치의 랜드부에 마멸이 크게 발생한다.

- (2) 유한요소해석을 통해 연삭 마멸깊이의 변화는 펀치와 소재 사이의 수직압력의 변화보다 미끄럼 속도의 변화에 따라 크게 변화하였으며, 펀치의 형상 변수에 대해서는 펀치 노즈 평탄부와 펀치 노즈 각도가 증가하고, 펀치 라운드가 감소할수록 펀치 마멸을 감소시키는 것을 알 수 있었다.
- (3) 후방압출 공정에서 압출부 길이가 길어지면 소재가 국부적인 표면 확장을 가져오고 이로 인해 윤활막이 파손되어 마멸이 가중된다. 이러한 펀치 형상에 따라 소재의 표면 확장의 변화를 유한요소해석을 통해 규명하였으며, 펀치 노즈 평탄부와 펀치 노즈 각도가 증가할수록 국부적인 표면 확장이 줄어드는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Doege, E., Groche, P. and Bobke, T., "Application of adhesion theory to friction and wear processes in hot die forging," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 27-32, 1990.
2. Rooks, B. W., "Effect of die temperature on metal flow and die wear during high speed hot forging," *Proc. 15th Inter. MTDR Conference*.
3. Liou, M. J. and Hsiao, H. S., "Prediction of die wear in high speed hot upset forging," *ERC/NSM Report*, No. 99-33, Ohio State University, 1989.
4. Nojima, H. and Saga, J., "Effects of punch geometry on punch pressure in cold backward extrusion," *JSTP*, Vol. 21, No. 234, pp. 635-641, 1980.
5. Mizuno, T., Kojima, Y., Zhu, W. and Kitamura, K., "Analysis of surface expansion in cold backward extrusion of cup-deformation and lubrication in cold cup extrusion II," *JSTP*, Vol. 26, No. 298, pp. 1096-1101, 1985.
6. Mizuno, T., Zhu, W., Kojima, Y. and Sugimoto, K., "Effects of punch profile on deformation behaviour in backward extrusion of mild steel cup-deformation and Lubrication in cold extrusion III," *JSTP*, Vol. 28, No. 321, pp. 1060-1066, 1987.
7. Bay, N., Lassen, S. and Pedersen, K. B., "Lubrication limits in backward can extrusion at low reduction," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 239-242, 1991.
8. Achard, J. F., "Contacts and rubbing of flat surfaces," *J. of Appl. Phys.*, Vol. 24, pp. 981, 1953.
9. Kim, D. H., Kim, B.M., Lee, Y., Yoo, S. J. and Joo, W. Y., "Adjustment of roll gap for the dimension accuracy of bar in hot bar rolling process," *J. of KSPE.*, Vol. 1, No. 1, pp. 1036-1041, 2001.
10. Ko, D. C., Kim, D. H. and Kim, B. M., "Finite element analysis for the wear of Ti-N coated punch in the piercing process," *Wear*, Vol. 252, pp. 859-869, 2002.
11. *General Recommendations for Design, Manufacture and Operational Aspects of Cold Extrusion Tools for Steel Components*, ICFG Doc. No. 6/82, Int. Cold Forging Group, Porcullis Press, 1983.
12. *DEFORM User's Manual V4.1*, 1995.
13. Bennani, B. and Bay, N., "Limits of lubrication in backward can extrusion: analysis by the finite-element method and physical modelling experiments," *J. of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 61, pp. 275-286, 1996.
14. Kuziman, K., Pfeifer, E., Bay, N. and Hunding, J., "Control of material flow in a combined backward can-forward rod extrusion," *J. of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 60, pp. 141-147, 1996.
15. Bennani, B. and Oudin, J., "Backward can extrusion of steels: effects of punch design on flow mode and void volume fraction," *Int. J. of Math. Tools Manufact.*, Vol. 35, No. 6, pp. 903-911, 1995.