

## 생산수량에 따른 Ti-N 코팅 펀치의 마멸해석

황상홍\*, 고대철\*\*, 김병민\*\*\*

### Wear Analysis of the Ti-N Coated Punch in Piercing According to the Volume of Production

Sang-Hong Hwang\*, Dae-Cheol Ko\*\*, Byung Min Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

Tool wear in the shearing process such as blanking, piercing and trimming is very important, because it has great effects on the dimensional accuracy, working efficiency and economy. Most of tools in the shearing process have the coated layer at surface for good wear and corrosion resistance. When the surface of tool is coated, the wear phenomena of coated surface layer and inner layer may be different. This paper describes a computer modelling technique by the finite element method in order to investigate the wear mechanism and to predict the wear profile of Ti-N coated tool in piercing process according to the volume of production. Wear coefficients of the coated layer and inner layer are obtained through Pin-on-Disk wear test, respectively. To verify the effectiveness of the suggested technique, the technique is applied to wear analysis in piercing process of piston pin and simulation results are compared with experimental ones.

**Key Words** : Wear analysis(마멸 해석), Ti-N coated punch(Ti-N 코팅된 펀치), Piercing process(피어싱 공정), Finite element method(유한요소법)

#### 1. 서론

전단가공 공정은 펀치와 다이틀 이용하여 원하는 형상을 절단하여 얻는 가공방법이다. 전단가공은 경량의 제품 및 치수 정밀도가 우수한 형상의 제품의 얻을 수 있으며, 제품의 호환성이 높으므로 대량생산에 적합하다. 따라서 최근 산업계의 경량화, 소형화, 고속화 추세와 더불어 블랭킹, 피어싱, 트리밍 등과 같은 전단가공의 비중이 증대되고 있다. 전단가공 중 피어싱 공정은 재료의 국부적 변형과 탄성 대변형과 재료의 파단을 동시에 고려해야

하므로 변형공정의 해석이 어려울 뿐만 아니라 두꺼운 재료를 전단하는 공정일 경우에는 이러한 공정에서 공구의 마멸도 중요한 문제가 된다. 금속성형공정에서 공구의 마멸에 대한 연구는 공구와 소재간의 접촉면에 대한 정보와 윤활제의 역할에 관한 정보 등을 정확히 예측하기 힘들기 때문에 비교적 단순한 공정에서 실험적으로 공구의 마멸을 규명하려는 시도가 행해져 왔다.<sup>(1-7)</sup> 최근에는 자동차, 전자제품의 제조에 전단가공이 널리 적용되고 있으며, 전단가공 부품의 기계적 정밀도가 제품의 성능과 품질에 직접적인 영향을 미치므로 이에 대

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 양산대학 메카트로닉스과

\*\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

한 연구가 활발히 진행중에 있다. Takaishi<sup>(8)</sup>는 스테인리스 강판의 전단가공 시 클리어런스에 따른 펀치 및 다이의 마멸량을 측정하였으며, Choy<sup>(9)</sup> 등은 블랭킹 공정에서 마멸로 야기되는 펀치의 형상변화를 펀치 모서리의 상당곡률 변화로 표현하여 마멸현상을 해석하였다. Aoki<sup>(10)</sup>는 판재 전단공정에서 냉간가공용 공구강 및 초경합금인 경우의 금형재질에 대한 마멸현상을 실험으로 관찰하였다. 그러나 전단가공의 경우 재료변형과 공구의 마멸현상이 매우 복잡하므로 이를 해석적으로 접근한 연구는 드문 실정이다. 또한 다단 냉간 단조공정의 마지막 단계인 전단공정에서 펀치의 마멸로 인한 공구 교환이 전 공정의 작업시간 및 품질에 직접적인 영향을 미치게 되므로 펀치의 마멸예측은 대단히 중요하다. 특히, 코팅된 공구를 사용하는 전단가공의 경우 코팅층과 모재의 마멸계수가 다르기 때문에 앞서 수행된 대부분의 연구<sup>(6,11,12)</sup>에서 적용한 방법과 같이 마멸계수를 공정 중에 일정하다고 가정하면 실제 공정중에 일어나는 마멸을 정확하게 예측할 수 없게 된다.

따라서 본 연구에서는 전단공정의 코팅된 펀치에 대한 마멸해석을 위해 Pin-on-Disk 시험으로부터 미끄럼길이에 따른 마멸계수의 변화 값을 측정하였으며, 마멸계수 값이 변화되는 특정 생산수량에서 마멸로 인한 펀치의 형상 변화를 고려하여 최종적인 마멸현상을 예측하였다. 또한 재료가 완전히 전단된 이후에도 펀치의 행정은 계속되므로 펀치와 파단면의 접촉이 펀치의 마멸에 미치는 영향을 파악하여 마멸해석에 고려하였다. 전단가공의 공구 마멸해석에 대한 이전의 해석방법과 본 연구의 해석방법과의 차이점을 비교하여 Table 1에 나타내었다. 제시된 해석방법을 자동차 부품으로 사용되고 있는 피스톤 핀의 성형공정에 적용하여 변형공정 해석 및 코팅된 공구의 마멸해석을 수행하고 이를 실험결과와 비교하여 제시된 해석기법의 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 전단가공의 시뮬레이션 및 공구마멸해석

### 2.1 전단가공의 유한요소해석

전단가공 전용 유한요소해석 프로그램<sup>(12,13)</sup>을 이용하여 변형해석을 수행하였다. 피어싱 공정동안 나타나는 파괴의 기본적 유형과 전단면의 형성과정을 조사하기 위해서는 변형소재에 발생하는 파괴의

예측과 파괴의 전파를 효과적으로 고려해야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 연성과단기준과 요소제거기법을 도입하였으며, 전단가공 공정동안 일어나는 파단을 예측하기 위하여 수정된 Cockcroft-Latham<sup>(14)</sup>의 연성과파괴기준을 이용하였다.

Table 1 Comparison between conventional and new wear analysis

| Factor \ Wear Analysis | Conventional Wear Analysis | New Wear Analysis                                      |
|------------------------|----------------------------|--|
| Wear Coefficient       | Constant                   | Variable   |
| Volume of Production   | No Consideration           | Consideration  |
| Punch Movement         | Only Shearing(down)        | Shearing(down), Additional Stroke(down) & Ejection(up) |
| Worn Punch Profile     | No Geometrical Update      | Geometrical Update                                     |

즉,

$$\int_0^{\epsilon_f} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

위 식 (1)에서  $\epsilon_f$ 는 파괴시 유효변형률,  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률,  $\sigma^*$ 는 주응력의 최대 성분이며, C는 재료의 파단상수값이다. 위의 식(1)은 변형경로를 따라 적분되며, 적분된 값이 그 재료의 파단상수값, C에 도달했을 때 파단이 일어나는 것으로 가정하였다. 또한 피어싱 공정동안 전단면의 형성과정을 수치적으로 접근하기 위하여 연성 파괴기준을 만족하는 특정 요소에 대해 요소제거기법을 적용하였다.

### 2.2 공구의 마멸해석

금속간의 미끄럼운동 시에 발생하는 마멸과 관련된 인자들은 접촉면의 온도, 접촉돌기의 분포 그리고 접촉면의 거칠기 등의 접촉상태와 공구 재료의 경도, 공구에 작용하는 수직압력, 미끄럼길이, 윤활 조건 등이 있다.

본 연구에서는 공구의 마멸해석을 위해 실제 마멸해석에 널리 적용되고 있는 Archard<sup>(15)</sup>의 마멸모

델을 이용하였으며, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\delta w = \frac{k P L}{3 h} \quad (2)$$

위의 식 (2)에서  $\delta w$ 는 마멸 깊이,  $k$ 는 마멸계수,  $P$ 는 접촉면에서의 수직압력,  $L$ 은 접촉면에서의 미끄럼길이,  $h$ 는 공구의 경도를 나타낸다. 마멸계수와 공구의 경도가 공정중에 일정하다고 가정하여 유한요소 해석에 적용하면 시간  $t + \Delta t$ 에서 마멸깊이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

식 (3)에서  $\sigma_n$ 은 금형면에 작용하는 수직응력,  $\Delta v$ 는 금형과 소재접촉면에서의 미끄럼 속도,  $\partial \Omega^{\text{tool}}$ 은 금형면을 나타낸다.

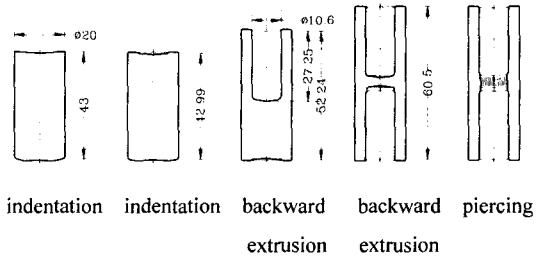
### 3. 피스톤 핀의 성형공정 및 유한요소 모델링

피스톤 핀은 보스부의 구멍(피스톤 핀 베어링)에 삽입하여 피스톤을 커넥팅 로드와 소단부에 연결하는 역할을 하며, 이를 생산하는 방법들은 다양하지만 본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같이 실제 현장에서 대량생산용으로 적용하고 있는 방법으로 소재를 절단한 후 두 단계의 압입공정과 두 단계의 후방압출을 수행하고 마지막으로 피어싱을 행하는 공정을 선택하였다. 피스톤 핀의 소재는 SCM 415H이며, 압축시험에 의한 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

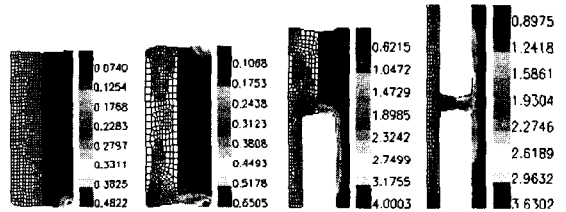
$$\bar{\sigma} = 768.06 \bar{\epsilon}^{-0.139} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4)$$

편치의 재질은 SKH 51이며 편치와 소재사이의 마찰계수,  $\mu$ 는 0.06으로 가정하였다. 피어싱 공정을 시뮬레이션하고 편치의 마멸을 예측하기 위한 유한요소 해석의 흐름도는 Fig. 2와 같다. 강소성 유한요소법으로 변형공정을 해석하였으며, 피어싱 공정동안에 일어나는 파단을 예측하기 위해 연성과 파괴기준을 도입하였다. 또한 파단의 전파를 효과적으로 수치해석하기 위하여 어떤 요소의 변형률이 임계 파괴변형률을 초과하면 그 요소에 대하여 요소 제거기법을 적용하였다.<sup>(12,13)</sup> 각 변형단계에서 공구의 마멸 예측을 위해 Archard의 마멸모델을 이용하였다. 일반적으로 편치와 접촉하고 있는 소재의

경계절점은 일정한 위치에 있지 않으므로 편치표면에 유한개의 마멸 측정점을 설정하고, 이 측정점에서의 수직응력과 미끄럼 속도성분은 경계절점의 값을 선형보간하여 사용하였다.<sup>(6,12)</sup>



(a) forming process



(b) simulation results

Fig. 1 Multi-Stage forming process and simulation results of piston pin

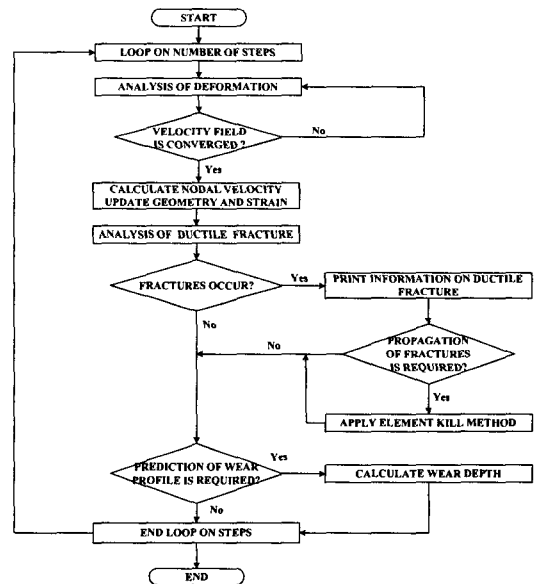


Fig. 2 Analysis procedure to predict deformation behavior and tool wear

### 4. 마멸해석

#### 4.1 코팅된 공구의 마멸실험

마멸계수를 구하기 위해 Fig. 3과 같은 마멸시험기(Model name ; TE92 base unit, Plint Co., UK)를 이용하여 Pin-on-Disk 방식의 마멸실험을 실시하였다. 핀과 디스크의 재질 및 열처리 조건은 Table 2, 3과 같이 실제 제품생산에 사용되는 펀치와 소재의 재질 및 열처리조건과 동일하게 선정되었다. 코팅층의 마멸효과를 관찰하기 위해 핀의 표면에 Ti-N 코팅된 시편과 코팅하지 않은 시편 두 종류에 대해 마멸실험을 수행하였다. 실험조건은 유한요소해석에서 구한 평균압력값과 동일한 값을 가지도록 하중 200N을 가한 후 속도 418.87mm/s로 미끄럼 길이를 달리하여 실험하였다.

실험으로 구한 마멸계수의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Ti-N 코팅된 시편의 경우 step I 영역에서는 코팅층이 마멸될 때 까지는 마멸량이 상당히 적었으며, step II 영역에서 코팅층이 벗겨진 후에는 마멸계수가 급격히 상승하는 것을 알 수 있다. 또한 step III 영역에서 코팅층이 완전히 마멸된 후에는 코팅되지 않은 시편과 유사한 마멸계수를 나타냄을 볼 수 있으며, 코팅층과 모재의 마멸계수가 약 10배 정도의 차이가 있음을 볼 수 있다. 따라서 코팅된 공구의 마멸해석 시에 이전의 연구와 같이 마멸계수를 일정하다고 가정하여 해석하는 것은 적절하지 못하며, 마멸계수의 천이시점을 근거로 마멸계수의 변화를 고려하여 마멸해석을 수행하는 것이 보다 타당하다고 생각된다.

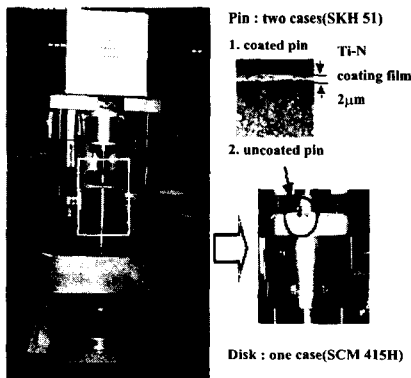


Fig. 3 Wear experimental set up

Table 2 Chemical composition(%) of pin and disk

| Comp. (material) | C    | Si   | Mn   | Cr   | W    | Mo   | V    | P    | S    |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pin (SKH 51)     | 0.85 | 0.25 | 0.35 | 4.15 | 6.50 | 5.30 | 2.05 |      |      |
| Disk (SCM 415H)  | 0.15 | 0.19 | 0.73 | 1.03 |      | 0.18 |      | 0.01 | 0.02 |

Table 3 Hardness and heat treatment conditions of pin and disk

| (Material)      | Hardness | Heat treatment condition  |
|-----------------|----------|---|
| Pin (SKH-51)    | 760Hv    | Preheating: 500°C, 180min<br>850°C, 5min<br>1160°C, 2.5min<br>Quenching: 500°C, 5min<br>Tempering: 550°C, 180min<br>30sec(air cooling) 3 times<br>580°C, 180min |
| Disk (SCM 415H) | 175Hv    | Quenching: 850°C, 60min<br>Tempering: 440°C, 90min air cooling  |

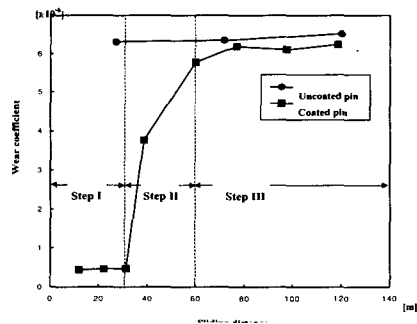


Fig. 4 Variation of wear coefficient k of pins during wear test

#### 4.2 코팅된 공구의 마멸해석기법

대부분의 전단가공 공정에 적용되는 공구는 강도증가와 마멸 및 부식저항성을 높이기 위해 코팅된 공구를 사용하므로 마멸로 인한 공구수명을 예측하기 위해서는 공구의 코팅층을 고려한 정량적인 마멸해석이 필요하다. Fig. 4의 마멸실험 결과로부터 펀치 코팅층의 마멸계수와 공구 모재의 마멸계수가 다르며, 그 차이가 약 10배 정도임을 알 수 있

었다. 이는 코팅된 공구의 마멸해석을 기존의 연구 (6.11,12)와 같이 생산수량에 대해 마멸계수가 일정하다고 가정하여 해석할 경우 실제현상과 상당히 차이가 있음을 예측할 수 있다. 따라서 생산수량에 따른 코팅된 공구의 마멸해석 및 마멸형상의 예측을 위해서 마멸계수가 변화되는 시점을 기준으로 마멸계수를 달리 적용하여 해석하여야 한다. 또한 피어싱 공정에서의 마멸은 공구가 소재를 전단시킬 때 소재와 공구의 접촉으로 인해 1차적으로 일어나고 재료가 완전히 파단된 이후에도 공구행정은 어느 정도 계속되므로 공구와 파단면의 접촉에 의한 2차적인 마멸이 일어나게 되며 최종적으로 공구가 취출될 때도 공구와 파단면의 접촉으로 인해 마멸이 일어나게 된다. 그러므로 단계별 영역의 마멸을 고려한 해석이 필요하며, 이러한 단계별 마멸해석 영역을 Fig. 5에 도식적으로 나타내었다. 또한 생산수량에 따른 마멸해석을 위해 앞서 언급한 바와 같이 마멸계수의 변경시점을 기준으로 마멸계수를 달리 적용하여 마멸해석을 수행하였다. Fig. 4의 마멸실험 결과로부터 마멸계수가 변경되는 구간을 세 구간(step I, II, III)으로 나누고 각 구간의 마멸계수는 실험결과의 평균값을 취하여 마멸해석에 적용하였다. 생산수량에 따른 마멸형상을 예측하기 위해 각 구간내에서의 마멸은 생산수량에 대해 선형적이라 가정하였으며, 마멸계수가 변화되는 시점을 기준으로 마멸로 인한 공구의 형상변화를 고려하여 생산수량에 대한 마멸량 및 마멸형상을 해석적으로 구하였다. 이상에서 언급된 마멸해석 기법은 다음과 같다.

- I. 피스톤 핀의 다단계성형공정에 대한 유한요소해석을 수행한다.
- II. 피스톤 핀의 최종단계인 피어싱 공정에 대한 유한요소 해석을 수행한다.
- III. Pin-on-Disk 마멸실험으로부터 마멸계수를 결정한다.
- IV. 각 단계별 마멸해석영역(전단, 파단, 취출)에 대한 마멸해석을 수행한다.
- V. 코팅된 공구의 마멸형상을 예측한다.
- VI. 생산수량에 따른 마멸형상 예측을 위해 마멸된 공구형상을 이용하며 II단계부터 VI단계까지 반복적으로 수행한다.
- VII. 총 생산수량에 따른 마멸형상을 예측한다.

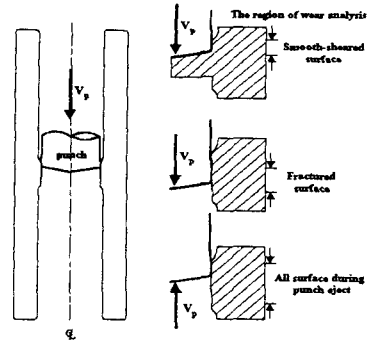


Fig. 5 Wear analysis of each step in piercing process

## 5. 해석결과 및 고찰

### 5.1 피스톤 핀의 다단계 성형공정

피스톤 핀의 제조공정에 대한 유한요소 시뮬레이션이 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 1(b)와 같다. 두 단계의 압입 공정에서는 소재 절단후 성형을 위한 소재의 평탄화 작업과 첫 번째 후방압출시 소재 유동을 양호하게 하기 위하여 하부에 약간의 단차를 성형한다. 두 단계의 후방압출 공정으로 중공형상의 제품을 성형하며 핀의 중앙 웹부분과 코너반경부분에 변형이 심하게 일어남을 볼 수 있다. 시뮬레이션으로 구한 펀치하중을 실제 다단 포머의 Piezo sensor를 이용한 Barankamp 3040-5 Monitoring system에서 측정된 최대하중과 비교하여 Fig. 6에 나타내었으며, 각 단계의 성형하중이 시뮬레이션으로 예측된 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

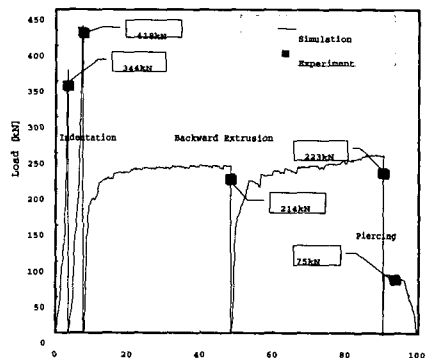


Fig. 6 Variation of load for multi-stage forming process of piston pin

## 5.2 피스톤 핀의 피어싱 공정

피어싱 공정에서 피어싱 펀치와 마크된 소재 사이의 클리어런스는 전단 두께의 10%이고 피어싱 펀치의 코너반경은 0.3mm이다. 또한 랜드부의 길이는 1mm이며 펀치 안면각은 10°이다. 피어싱 공정에서 크랙의 발생을 예측하기 위해서는 식 (1)의 연성과괴값, C를 실험적으로 결정해야 된다. 그러나 피스톤 핀의 웨브 부분은 이전의 변형경로에 따른 가공경화를 고려하여 실험적으로 임계 파괴기준값을 결정하여야 하므로 이것은 실제 대단히 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 제품의 전단면을 관찰하여 여러 가지 임계 파괴기준 값을 고려한 시뮬레이션을 반복적으로 수행하여 실제와 가장 유사한 결과를 얻을 수 있는 임계값을 구하였다.<sup>(16)</sup> 피어싱 공정에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 피어싱 공정에서 소재의 안쪽으로 크랙이 전파되는 것을 방지하기 위해 후방압출 공정중 성형한 마크부에 의해 크랙이 마크에서 시작되어 피어싱 펀치의 곡률반경부로 전파되어감을 볼 수 있다. Fig. 8은 실제 생산된 피스톤 핀과 중앙 웨브의 피어싱된 표면의 전단면과 파단면 형상을 모니터링 현미경으로 관찰한 결과이며, Fig. 7(d)와 Fig. 8의 시뮬레이션 결과와 실험결과에서 피어싱된 표면의 전단면 및 파단면의 구분비가 잘 일치함을 볼 수 있다.

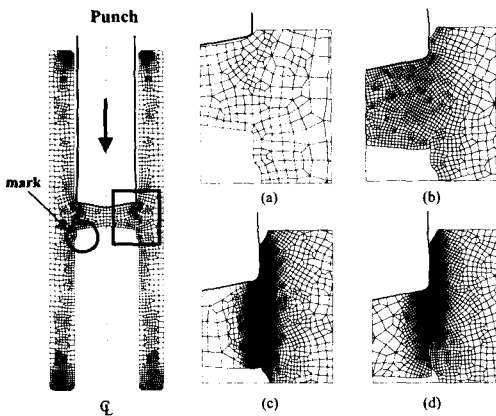


Fig. 7 FE-simulation of piercing process  
(a) initial state (b) stroke:1mm (c) stroke:2mm,  
(d) stroke:2.6mm

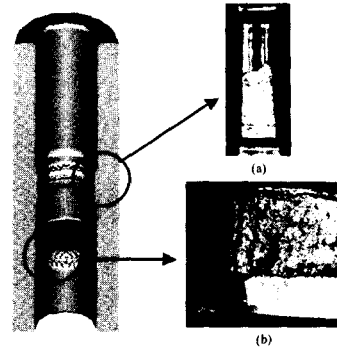


Fig. 8 Magnified view of piercing surface(×50)

## 5.3 피어싱 공정의 마멸해석

일반적으로 피어싱 공정에서는 재료의 파단이 일어난 이후에도 공구는 추가적인 행정이 계속된다. 따라서 전단면에서 일어나는 마멸과 전단이 완료된 이후 파단면의 형상에 의해 추가적인 마멸이 일어난다. 본 연구에 적용된 피스톤 핀의 경우에는 피어싱 공정에서 중앙 웨브가 파단된 이후에도 펀치행정이 계속되면 펀치와 파단면 사이의 접촉에 의해 마멸이 복합적으로 일어남을 알 수 있다. Fig. 9는 완전 파단 이후 펀치행정에 따른 파단면과 펀치의 접촉에 의한 파단면의 변형을 나타낸 것이다. 재료의 완전파단 이후에 진행된 펀치행정에 따른 파단면의 변형 해석결과로부터 파단면이 펀치곡률부 및 측면과 접촉하면서 약간의 부가적인 변형을 받게되고 이러한 결과로부터 펀치의 측면부와 파단면과의 접촉은 공구 측면의 마멸을 보다 진전시킴을 알 수 있다. 따라서 피어싱 펀치의 마멸은 실질적인 피어싱 공정동안의 펀치와 소재의 접촉에 의해 일어나는 마멸과 재료가 완전히 파단된 이후에 계속되는 펀치행정으로 펀치와 파단면 사이의 접촉에 의해 발생하는 마멸이 복합적으로 진행된다고 생각된다.

## 5.4 생산수량에 따른 공구의 마멸형상

Fig. 4의 마멸실험에서 나타난 것과 같이 공구의 표면에 코팅층이 있는 경우 코팅층과 모재의 마멸계수가 각각 다르게 나타나므로 이를 고려하기 위해 마멸실험에서 공구의 코팅층이 벗겨질 때까지의 마멸계수와 공구 모재의 마멸계수를 이용하여

이를 생산수량과 연계시켜 해석을 수행하였다.

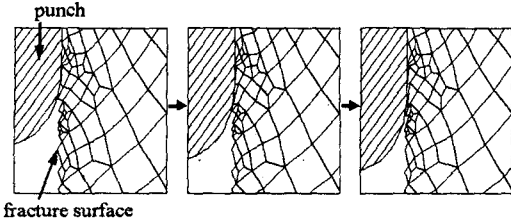


Fig. 9 FE-simulation considering contact of piercing punch and fracture surface after full separation

Fig. 4에서 마멸계수가 변화하는 약 30000mm의 미끄럼 길이는 피스톤 핀의 중간 웨브 두께가 약 6mm이므로 약 5000개의 생산수량에 해당한다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 step I 즉, 생산수량이 5000개 미만인 영역에서는 마멸계수의 값이 상당히 작으므로 이는 코팅층이 마멸되고 있는 영역이라고 볼 수 있다. 미끄럼 길이가 약 60000mm까지인 step II 즉, 생산수량이 5000~10000개까지의 영역에서는 코팅층과 모재가 거의 동시에 마멸되는 구간임을 알 수 있다. 마지막으로 step III은 생산수량이 10000~50000개인 구간으로 코팅층의 마멸이 완료되고 모재가 마멸되는 구간이며 펀치의 수명이 다하는 구간으로 볼 수 있다. 이를 마멸해석에 적용하기 위해 각 구간에 대한 마멸계수를 달리하여 마멸해석을 수행하였다. step II 영역의 경우에는 마멸계수를 평균한 값을 이용하여 마멸해석을 수행하였다. 또한 각 구간의 마멸해석이 끝난 후 펀치형상을 마멸된 형상으로 바꾸어 다음 구간에 대한 마멸해석을 수행하였다. 이는 펀치가 마멸된 경우 마멸형상이 달라 소재의 변형정도가 다르기 때문에 이를 고려하기 위해 복잡한 마멸형상을 직선과 곡선으로 수직하여 다음의 구간에 대한 마멸해석을 수행하였다. 마멸해석의 결과는 Fig. 10과 같으며, 기존의 마멸계수를 일정하게 하였을 때의 마멸형상과 제시된 방법을 이용한 각 타수후의 마멸 형상을 실제 3차원 형상측정기로 측정된 실험 데이터와 비교하여 나타내고 있다. Fig. 10(a)에 나타난 것처럼 마멸계수가 일정할 때에는 마멸이 곡률부위에만 선행적으로 일어나게 된다. 이는 실제 펀치의 마멸형상과

비교하였을 때 곡률부위의 마멸은 어느 정도 예측할 수 있지만 측면부위의 마멸량은 예측하기 어렵다. Fig. 10(b)는 생산수량 10000타까지의 마멸형상을 나타낸 것으로 기존 5000타까지의 생산에서 펀치의 코팅층이 마멸된 것으로 가정하고 그 이후의 형상변화를 나타내었다. 추가적인 펀치의 행정에 따른 파단면과의 마멸은 크게 일어나지 않음을 알 수 있다. 또한 최종적인 펀치마멸형상은 Fig. 10(c)에 나타내었다. 생산수량 10000타까지 마멸된 형상으로 바꾸어 펀치의 마멸해석을 수행한 결과이다. 펀치와 파단면과의 접촉에 의한 마멸이 step I과 step II에 비하여 상당히 증가함을 알 수 있다. 위의 결과로부터 마멸에 의해 펀치의 형상이 바뀔 경우 마멸양상이 달라짐을 알 수 있다. Fig. 11은 각 타수후의 마멸된 펀치부위를 확대하여 나타내었다. 실제 펀치의 경우에도 마찬가지로 5000타 이후에는 코팅층이 그대로 남아 있지만 10000타의 경우 펀치의 곡률 부위가 심하게 마멸된 것을 볼 수 있다. 15000타 이후에는 펀치의 곡률 및 랜드부위가 완전히 마멸된 것을 볼 수 있으며, 이는 Fig. 10의 해석 결과와도 잘 일치하고 있다. 따라서 코팅된 펀치의 마멸해석 시에는 마멸계수의 변화와 마멸로 인한 펀치의 형상변화를 고려한 마멸해석이 보다 타당함을 알 수 있다.

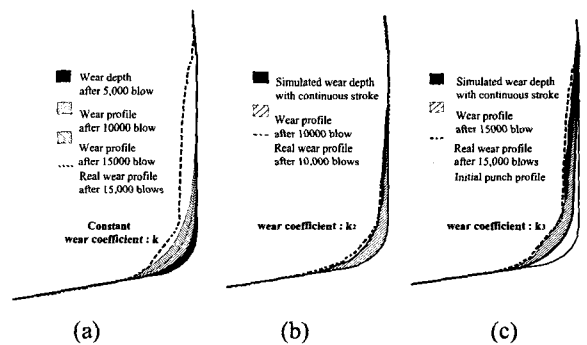


Fig. 10 Comparison of the predicted wear profile by the previous method using constant wear coefficient and the proposed method (a) constant wear coefficient (b) after 10000 blows (c) after 15000 blows

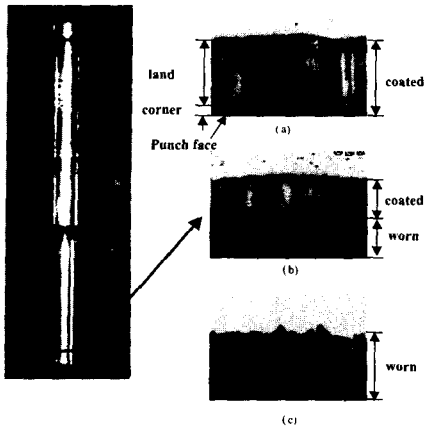


Fig. 11 Magnified view of worn surface in piercing punch( $\times 50$ )  
 (a) after 5000 blows (b) after 10000 blows (c) after 15000 blows

## 6. 결론

본 연구에서는 코팅된 공구의 마멸에 대한 유한 요소해석을 수행하여 공구의 마멸 양상을 규명하고 생산수량에 따른 펀치의 마멸형상을 예측하였으며, 구체적인 결과는 다음과 같다.

- (1) 펀치가 코팅된 경우 코팅층과 모재의 마멸계수가 다르므로 마멸계수를 각각의 구간으로 나누어 적용하는 마멸해석 방법을 제시하였으며, 마멸로 인한 펀치의 형상변화는 성형공정에 영향을 미치므로 각각의 구간에 대해 펀치형상을 바꾸어 생산수량에 따른 펀치의 마멸형상을 예측하였다.
- (2) 제시된 해석방법을 자동차 부품에 사용되고 있는 피스톤 핀의 성형공정에 적용하여 변형공정의 해석 및 펀치 마멸해석을 수행하여 해석결과와 실험결과를 비교해 봄으로써 피어싱 공정에서 공구의 마멸양상 및 제시된 해석방법의 타당성을 규명할 수 있었다.
- (3) 대부분의 전단가공은 그 변형 메카니즘이 유사하므로 제시된 해석방법은 전단가공의 펀치 마멸해석을 위한 방법으로 유용하게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 참고문헌

1. Rooks B. W., 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.
2. Failure Analysis and Prevention, Metals Handbook, 8th ed., Vol. 10, ASM Handbook Committee, ASM, Metals Park, Ohio, pp. 134, 1975.
3. Hansen P. H., Bay H. P., A Flexible Computer Based System for Prediction of Wear Distribution in Forming Tools, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 19-26, 1990.
4. Liou M. J., Hsiao H. S., Prediction of Die Wear in High Speed Hot Upset Forging, ERC/NSM Report, No. 99-33, Ohio State University, 1989.
5. Ali S. M., Rooks B. W., Tobias S. A., The Effect of Dwell Time on Die Wear in High Speed Hot Forging, Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 185, p. 1171, 1971.
6. 김병민, 조해용, 김태형, 온도상승을 고려한 인발 금형의 마모해석, 한국정밀공학회지, 제13권 제1호, pp. 116-122, 1996.
7. Doege E., Groche P., 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.
8. Takaishi K., Wear Characteristics of the Tools for Perforating Small Holes in Stainless Steel Stripes, J. of JSTP, Vol. 29, No. 330, pp. 695-700, 1988.
9. Choy C. M., Balendra F., Effects of Punch Wear on Blanking, Proceeding of the 10th national conference on manufacturing research, pp. 582-586, 1994.
10. Aoki I., Tool Wear in Shearing of Amorphous Alloy Foils: Shearing of Amorphous Alloy Foils II, J. of JSTP, Vol. 27, No. 308, pp. 1078-1083,



- 1986.
1. Tronel Y., Chenot J. L., 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.
  12. 고대철, 김병민, 유한요소법에 의한 전단가공 금형의 마멸예측, 한국정밀공학회지, 제16권 제1호, pp. 174-181, 1999.
  13. 고대철, 김철, 김병민, 최재찬, 요소제거기법에 의한 판재 전단가공의 유한요소 시뮬레이션, 한국정밀공학회, 제13권, 제11호, 1996.
  14. Cockcroft M. G., Latham D. J., Ductility and the Workability of Metals, J. Inst. Metals., Vol. 96, pp. 33-39, 1968.
  15. Archard J. F. , Contacts and Rubbing of Flat Surfaces, J. of Appl. Phys., Vol. 24, p. 981, 1953.
  16. Ttaupin E., Breitling J., Wu W. T., Altan T., Material Fracture and Burr Formation in Blanking; Results of FEM Simulation and Comparison with Experiments, J. of Mater. Proc. Tech., Vol. 59, pp. 68-78, 1996.