

본 연구는 1997년도 교육부 학술 연구조성비(기계공학 ME-97-E17)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

# 전단가공 금형의 재연삭시기 예측을 위한 해석기법 개발

고대철\*, 김병민\*\*

## Development of Analysis Scheme to Predict Regrinding in Shearing Process

Dae-Cheol Ko\*, Byung-Min Kim\*\*

### ABSTRACT

The objective of this study is to develop an analysis scheme in order to predict regrinding due to tool wear in shearing process. The analysis of material flow and fracture in shearing process should precede the prediction of tool wear. Thus the developed FE-program to analyze shearing process is used. In order to predict tool wear, the wear model is reformulated as an incremental form and then the wear depth of tool is calculated at each deformation path. Because the regrinding of shearing tool is determined on the basis of allowable size of burr, the analysis of shearing process is iteratively performed using the worn profile of tool. To show the effectiveness of the scheme the simulation result is compared with experimental one.

**Key Words** : Shearing Process(전단가공), Regrinding(재연삭), Tool Wear(금형마멸), Burr(버)

### 1. 서론

최근까지 대부분의 생산에 있어서 최대 관심사는 어느 정도의 정밀도를 지니고 있으면서 자동화에 의한 생산성 향상에 많은 관심과 노력이 집중되어 왔다. 그러나 점점 정밀도의 수준이 경쟁의 쟁점이 되면서 제품의 정밀도 및 내구성의 중요성을 인식하게 되었다. 최종제품의 치수 정밀도가 우수하고 제품의 호환성이 양호하여 대량생산에 적용되는 전단가공에서 제품의 정밀도는 펀치와 다이의 형상에 크게 영향을 받는다. 특히, 전단가공 제품의 대량생산 시에 마멸로 인한 금형의 형상변화는 펀치와 다이사이의 클리어런스 변화를 유발하게 되므로 최종제품의 치수 변화가 야기되

고 전단가공의 최종단계에서 나타나는 버도 커지게 된다. 이와같이 전단가공에서 발생하는 버는 모든 경우에 있어서 제품의 정밀도와 버 제거를 위한 효율성의 문제로 인하여 생산성에 큰 영향을 미치고 있다.

전단가공에서 발생하는 금형의 마멸량은 제품 생산에 적용되고 있는 금형을 직접 측정하는 것이 바람직하지만, 이것은 현실적으로 거의 불가능하므로 실제 현장에서는 작업자의 경험에 의존하거나 최종 제품의 버 크기를 측정하여 간접적으로 금형의 마멸정도를 파악한 후 금형의 재연삭시기를 결정하고 있는 실정이다. 그러므로 마멸로 인해 야기되는 금형의 교체 또는 재연삭시기의 예측이 절실히 요구되고 있다. 전단가공에서 금형의

\* 양산대학 메카트로닉스과

\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

마멸에 관한 이전의 연구들<sup>(1-5)</sup>은 공정 중 발생하는 금형의 마멸현상에 대하여 실험으로 관찰한 것들이 대부분이며 작업횟수에 따른 금형의 마멸현상을 해석적으로 관찰할 수 없었다.

따라서 본 연구의 목적은 일반적인 금속성형 공정의 마멸해석에 많이 사용되고 있는 Archard의 마멸모델<sup>(6)</sup>을 중분형태로 적용하여 마멸로 인한 금형의 재연삭시기를 예측하기 위한 해석기법을 개발하는데 있다. 본 연구에서 금형의 재연삭시기는 최종제품에 허용된 버 크기를 기준으로 결정되며, 이를 위해서는 변형공정의 최종단계에 나타나는 버의 크기를 예측하는 것이 필수적이다. 전단가공의 변형공정 해석은 이미 본 연구진이 개발한 전단가공 공정해석용 유한요소 프로그램<sup>(7,8)</sup>을 이용하여 수행된다. 마멸로 인한 금형의 형상변화 및 클리어런스의 변화는 전단면(sheared surface)에 발생하는 버의 크기에 영향을 미친다. 이를 고려하기 위하여 마멸모델과 개발된 유한요소 프로그램을 연계하여 마멸량, 마멸형상과 버의 크기를 수치계산하여 허용된 버의 크기로부터 금형의 재연삭시기를 결정하게 된다. 본 연구에서 적용할 Archard의 마멸모델에 포함되어 있는 파라미터의 값은 금형의 마멸에 지배적인 영향을 미치는 금형과 소재간의 접촉조건, 금형표면에 작용하는 수직압력, 미끄럼 속도, 금형의 경도 등을 고려한 마멸 특성실험을 통하여 결정된다. 또한 실제 현장의 실험결과와 시뮬레이션 결과를 직접 비교하여 본 연구에서 개발된 해석기법의 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 이론해석

### 2.1 강-열점소성 유한요소 정식화

변형해석을 위하여 강-점소성 유한요소법을 이용하였다. 이의 수식화 과정은 이미 많은 문헌<sup>(9,10)</sup>에 잘 알려져 있으므로 여기서는 간략하게 언급한다.

강-점소성 재료에 대한 범함수(functional),  $\pi$ 는 다음과 같다.

$$\pi = \int E(\dot{\epsilon}_{ij})dV - \int_{S_F} \bar{t}_i v_i dS \quad (1)$$

여기서,  $E$ 는 점소성 포텐셜,  $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률속도,  $\bar{t}_i$ 는 표면력,  $v_i$ 는 절점속도를 나타낸다.

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(penalty function),  $K$ 를 도입하면, 위의 식(1)에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서,  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\dot{\epsilon}$ 는 유효변형률속도,  $\dot{\epsilon}_V$ 는 체적변형률속도를 나타낸다.

위의 식(2)는 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법(direct method)을 이용하여 구한다.

변형공정동안 일어나는 소재 및 금형의 온도장은 다음과 같이 표현되는 에너지 방정식을 이용하여 구할 수 있다.

$$k_1 T_{,ii} + \dot{r} - \rho c \dot{T} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $k_1 T_{,ii}$ 는 열전달율,  $k_1$ 은 열전도계수,  $\dot{r}$ 는 열발생율,  $\rho c \dot{T}$ 는 내부에너지율이다.

위의 식(3)을 변분원리에 의해 정리하면 다음과 같다.

$$\int k_1 T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int \rho c \dot{T} \delta T dV - \int \kappa \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \quad (4)$$

여기서,  $T$ 는 온도,  $\dot{T}$ 는 온도변화율,  $\rho$ 는 밀도,  $c$ 는 비열,  $\kappa$ 는 총에너지가 열로 바뀌는 비율을 나타내는 상수,  $q_n$ 은 경계면,  $S_q$ 를 가로지르는 열유동을 나타낸다.

위의 식(4)를 유한요소 분할화한 뒤 유한차분 근사에 의해 선형화하여 온도장을 구한다. 또한 본 연구에서의 온도장은 변형해석의 결과와 연계(coupled)되어 계산된다.

### 2.2 크랙발생 및 전파의 해석

전단가공의 최종단계에 나타나는 버의 크기를 예측하기 위해서는 공정의 초기단계부터 최종단계까지의 해석을 수행하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 전단가공 공정동안 나타나는 전단밴드의 형성에 의한 파괴의 기본적인

유형과 전단면의 형성과정을 조사하기 위해서 연성파괴기준과 요소제거기법을 도입하였다.

전단가공 공정동안 일어나는 파괴를 예측하기 위하여 다양한 하중조건에 적용될 수 있고 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 Cockcroft-Latham<sup>(11)</sup>의 연성파괴기준을 이용하였으며, 여기서 전단가공 공정동안 주인장응력의 최대치가 일정하게 유지된다고 가정하면<sup>(12)</sup>, Cockcroft-Latham의 연성파괴 기준식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int \bar{\sigma}^r d\bar{\epsilon} \approx C \quad (5)$$

여기서,  $C$ 는 재료의 파괴 유효변형률이다. 따라서 본 연구의 시뮬레이션에서는 유효변형률이 재료의 파괴 유효변형률에 도달하면 파괴가 일어나는 것으로 고려하였다. 전단가공 공정에서 전단면의 형성과정을 수치적으로 접근하기 위하여 어떤 특정 요소의 유효변형률의 값이 파괴기준에 도달하면 이 요소에 대하여 요소제거기법을 적용하였다. 즉, 제거되는 요소의 강성 값에 감속인자(reduction factor)를 곱하여 강성 값을 매우 작게 만들어 다른 요소에 거의 영향을 미치지 못하도록 하였다. 이러한 해석기법은 파괴가 일어나는 변형의 각 단계에서 실제 파괴가 일어난 요소를 해석영역으로부터 제거하는 것이 아니므로 변형소재의 영역을 다시 정의할 필요가 없다. 따라서 격자 재구성에 소요되는 시간을 줄일 수 있으므로 해석에 소요되는 시간도 줄어든다. 이와 같은 해석방법을 적용하여 전단가공 공정을 시뮬레이션하면 파괴기준을 초과하는 요소들을 추적함으로써 전단가공에 나타나는 파괴의 기본적 유형과 전단면의 형성과정을 관찰할 수 있다.

### 2.3 금형의 마멸해석

금형의 마멸해석에서는 Archard의 마멸모델<sup>(6)</sup>을 적용하였으며, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\delta w = \frac{kPL}{h} \quad (6)$$

여기서,  $\delta w$ 는  $\delta$  동안 발생한 마멸깊이이며,  $k$ 는 마멸계수,  $P$ 는 접촉면에서의 수직압력,  $L$ 은 접촉면에서의 미끄럼길이,  $h$ 는 금형의 경도이다.

위의 식(6)에서 마멸계수와 금형의 경도가 공

정 중에 일정하다고 가정하고 증분해석에 적용하기 위하여 적분형태로 표현하면 마멸깊이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta w = \frac{k}{h} \int_0^{T_{tot}} \sigma_n \Delta v dt \quad \text{on } \partial\Omega^{tool} \quad (7)$$

식(7)에서  $\sigma_n$ 은 금형 면에 작용하는 수직응력,  $\Delta v$ 는 금형과 소재간의 접촉면에서 미끄럼속도,  $T_{tot}$ 는 전체 변형시간이다. 따라서  $t + \Delta t$ 에서의 마멸깊이는 식(7)로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta w_{t+\Delta t} = \delta w_t + \frac{k}{h} (\sigma_n \Delta v)_t \Delta t \quad \text{on } \partial\Omega^{tool} \quad (8)$$

여기서,  $\Delta t$ 는 증분시간이다. 금형마멸의 정량적인 해석을 위해서는 Archard 마멸모델의 마멸계수,  $k$ 를 실험으로 구해야만 한다.

이상과 같은 이론을 바탕으로 본 연구에서 제시하고자 하는 전단가공 금형의 재연삭시기를 예측하기 위한 해석기법은 Fig. 1과 같다. 전단가공의 유한요소해석을 통하여 형성된 전단면의 형상으로부터 버의 크기를 예측하고 금형의 마멸량을 계산한다. 예측되는 버의 크기가 허용된 버의 크기보다 작으면, 금형의 형상을 수정하여 계속적으로 해석을 수행하고 이에 반하여 허용되는 버의 크기보다 예측되는 버의 크기가 클 경우 이때를 금형의 재연삭시기로 결정한다.

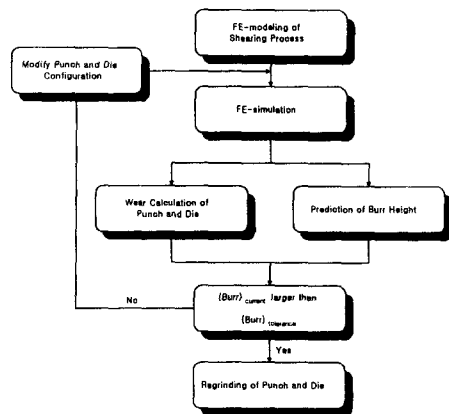


Fig. 1 Analysis scheme to predict regrinding of shearing tool.

### 3. 유한요소 모델링

전단가공 공정에서는 펀치와 다이사이의 국부적인 영역에서 큰 변형이 집중되는 국소화 현상으로 전단밴드가 형성되므로 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 전단밴드의 형성이 예상되는 부위에 매우 작은 크기의 격자를 집중적으로 구성하였다. 시뮬레이션에 사용되는 재료는 TV 브라운관의 전자총부품의 제조에 사용되는 판재이며, 금형의 재질은 초경이다. 판재 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다. Fig. 2와 같이, 본 연구의 시뮬레이션에서 판재의 두께는 0.3mm이고 펀치의 직경은  $\phi 2.5$ 이며, 다이의 직경은  $\phi 2.532$ 이다. 따라서 펀치와 다이사이의 편측 클리어런스는 5.3%t이다. 판재와 금형과의 접촉면에서의 마찰은 쿠울롬마찰로 가정하고 마찰계수는 0.1로 두었으며, 펀치의 속도는 실제 작업속도인 450spm(225mm/sec)이다. 소재와 금형의 초기온도는 각각 상온상태(25℃)로 가정하였으며, 기타 온도장의 계산을 위한 열전달계수들의 값과 유한요소 시뮬레이션을 위한 계산조건을 Table 2에 요약해 놓았다. 또한 전단가공은 빠른 가공속도에서 이루어지므로 온도장의 계산에서 금형과 소재사이의 열전달현상은 무시하였다.

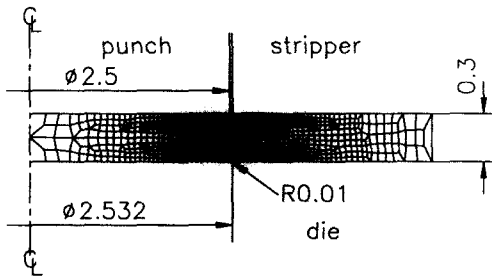


Fig. 2 Initial mesh system for finite element simulation.

시뮬레이션에 이용되는 판재에 대한 온도( $T$ ), 변형률속도( $\dot{\epsilon}$ ), 유동응력( $\sigma$ )의 상관관계와 연성 파괴에 대한 임계값을 구하기 위하여 먼저 고온 인장시험을 수행하였다. 실험장비는 전기로를 부착한 MTS를 사용하였으며, 재료는 박판 인장시험으로 가공하였다. 실험 온도의 범위는 25℃ ~ 250℃이며, 실험 변형률속도의 범위는  $2 \times 10^{-3} \sim$

$2 \times 10^2 S^{-1}$ 이다. Fig. 3에 고온 인장시험으로 구한 실험결과를 나타내었으며, 이로부터 변형률 속도 민감도 지수의 구성방정식 즉,  $\sigma = K(T)\dot{\epsilon}^n(T)$ 로 정량화하여 시뮬레이션에 이용하였다.

Table 1 Chemical composition of sheet metal.

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
Wt.%	0.03	0.62	1.60	0.021	0.004	14.13	15.97	bal.

Table 2 Computational conditions for finite element simulation of shearing process.

Thickness of sheet metal	0.3t
Clearance	5.3%t
Friction coefficient	0.1
Shearing speed	450spm(225mm/s)
Thermal conductivity	33.49N/mm <sup>2</sup> °C
Heat capacity	3.9N/mm <sup>2</sup> °C
Heat transfer coefficient	0.0

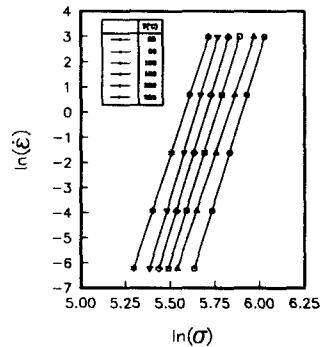


Fig. 3 Relationship of strain rate and flow stress for sheet metal.

## 4. 실험

### 4.1 Pin-on-Disk 마멸실험

금형과 소재사이의 마멸특성을 파악하고 마멸

을 해석을 위해 필요한 마멸계수의 값을 결정하기 위하여 Fig. 4와 같은 마멸시험기(TE92 Base Unit, PLINT Co., England)를 이용하여 Pin-on-Disk 방식의 마멸실험을 실시하였다. 핀과 디스크의 재질 및 열처리조건은 실제 생산에 이용되고 있는 금형과 소재의 재질 및 열처리조건과 동일하다. 금형의 경도는 1250HV이며, 실험 시 마찰되는 면의 표면 조도는 평균 0.065 $\mu$ m이다.

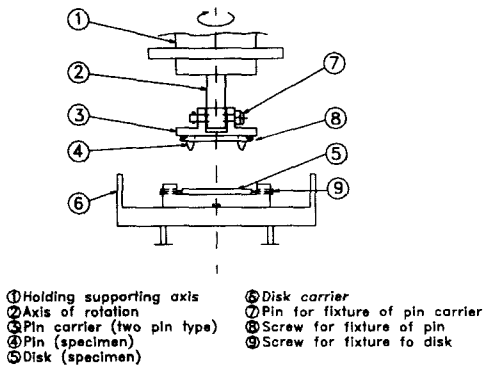


Fig. 4 Experimental apparatus for Pin-on-Disk wear test.

실험방법은 동일한 재질의 두 개의 핀을 1개 조로 하여 시험기 마운트에 수직으로 장착하여 수직방향으로 디스크 표면에 비운활상태로 미끄럼운동을 가하였다. 두 핀간의 거리는 40.07mm이다. 마멸량의 측정은 실험 전 핀의 길이와 무게는 마이크로 미터와 전자저울(Electronic Balance, Japan)을 이용하였으며, 실험 후 마멸분말을 털어내고 아세톤으로 초음파 세척을 한 후 동일한 방법으로 측정하였다. 실험에 사용된 프로그램은 마멸시험기 자체 프로그램을 이용하였으며, 핀을 고정시킨 마운트의 회전부하속도 및 하중변화는 정부하과정에서 핀과 디스크의 마운트의 고정 및 접촉을 거친 후 동부하상태에서부터 측정을 시작하였다. 실험 속도는 48rpm, 100rpm 두 가지로서 각각의 속도 조건에 대하여 하중을 300N, 400N로 변화시켜 실험을 수행하였다.

#### 4.2 실험결과 및 마멸계수의 결정

핀 마멸부위에 대해 SEM관찰 결과를 Fig. 5에

나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 핀의 재질이 초경인 경우 연삭마멸이 지배적으로 일어나 핀 표면에 마멸흔적이 넓게 존재함을 알 수 있다. 핀 표면의 입자 성분의 조사를 위하여 EDX분석을 하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 핀 마멸부위의 EDX분석결과 W가 다량으로 검출되었으며, Fe, Cr은 미소량이 검출되었다. 이러한 결과로부터 초경 핀은 핀 자체의 마멸이 지배적이며, 디스크 입자와의 응착은 거의 일어나지 않는다는 것을 알 수 있다.

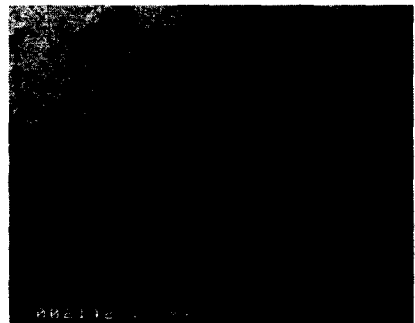


Fig. 5 SEM observations of worn surface on pin after wear test(velocity=100rpm, load=300N).

Pin-on-Disk 실험결과를 Table 3에 나타내었다. 마멸계수는 Archard의 마멸모델을 이용하여 실험 결과로부터 결정할 수 있었다. Table 3에서 볼 수 있듯이 마멸계수는 높은 속도와 높은 하중 하에서 마멸계수가 증가함을 알 수 있으며, 이러한 결과

는 기존의 연구결과<sup>(13)</sup>와도 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 7은 100rpm의 속도조건과 300N의 하중조건에 대해 마멸실험동안 핀의 마멸체적 변화를 도시한 것으로 서로 선형적 관계가 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 전단가공 중 금형의 마멸량이 제품의 생산량에 선형적이라 가정할 수 있음을 의미한다.

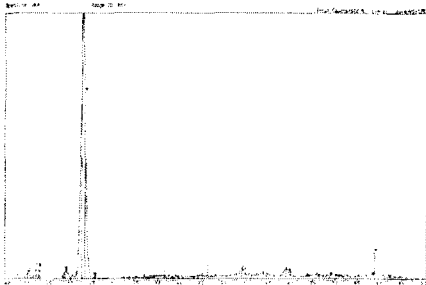


Fig. 6 EDX observations of worn surface on pin after wear test(velocity=100rpm, load=300N).

### 4.3 미소 버의 측정

박판의 전단가공에서 발생하는 버로 인한 금형의 재연삭시기를 결정하기 위해서는 기본적으로 버의 측정이 선행되어야 한다. 버의 측정을 위한

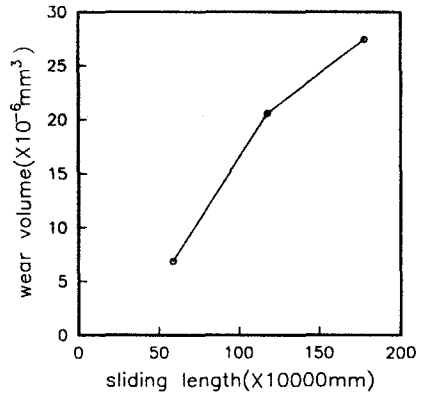


Fig. 7 Variation of wear volume of pin during wear test(velocity=100rpm, load=300N).

측정은 구멍부 주위의 4군데를 측정하여 평균값을 취하였다. 버의 측정결과는 Fig. 9와 같다.

## 5. 해석결과 및 고찰

펀치와 다이사이의 클리어런스가 5.3%인 공정에 대하여 개발된 유한요소 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 펀치 스트로크의 진행에 따라 완전히 파단된 재료의 변형상태는 Fig. 10과 같다. 전단밴드의 형성이 예상되는 부위 즉, 클리어런스 내의 재료는 심한 전단 변형을 받지만,

Table 3 Results of Pin-on-Disk wear test.

Disk material	Pin material	Velocity(rpm)	Load(N)	Sliding distance(mm)	Wear coefficient( $\times 10^{-6}$ )
Sheet Metal	Tool Material	48	300	1778680	0.657
			400	1792520	0.693
		100	300	2021630	0.848
			400	2031700	1.220

일반적인 방법은 크게 접촉식 측정방법과 비접촉식 측정방법이 있으며, 본 연구에서는 여러 가지 방법을 고려하여 소경의 촉침(probe)을 이용하여 버를 측정하였다. Fig. 8은 본 연구에서 고려되는 버의 형상을 SEM에 의해 관찰한 결과이며, 버의

그외 부분에서 재료의 변형은 거의 없다. 전단측의 재료는 회전하면서 아랫방향으로 유동함을 볼 수 있다. 또한 펀치와 다이의 측면에서 파괴가 발생한 후 점차 내부쪽으로 성장하여 펀치 스트로크 86.3%에서 완전히 파단된다. Fig. 10에 나타낸 변형

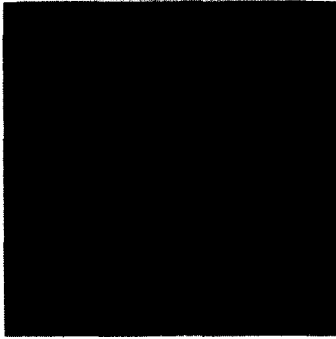


Fig. 8 SEM observation of burr( $\times 2000$ ).

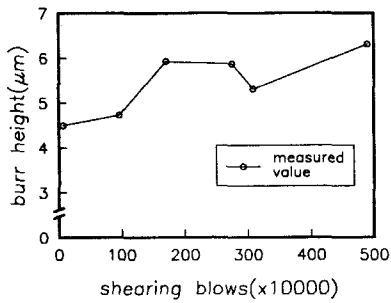


Fig. 9 Variation of burr height for shearing blows.

영역에서 온도의 상승을 관찰할 수 있다. 본 연구에서 클리어런스가 5.3%일때의 시뮬레이션으로부터 얻은 전단면의 최종 형상비 구분을 Table 4에 나타내었으며, 시뮬레이션으로 얻은 전단면은 Fig. 12의 실제 실험결과와 비교해 볼 때 두 결과가 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 중요시하고 있는 버의 크기는 실제 측정치(약 4.7  $\mu\text{m}$ )보다 작게 나타났다. 이러한 이유는 실제 측정이 약 10만타이후에 측정되었으며, 유한요소해석에 이용된 격자의 크기가 본 연구에서 다루는 버의 크기보다 다소 크고 소재와 금형과의 접촉면에 대한 정확한 모델링이 이루어지 않았기 때문에 나타난 결과라고 생각된다.

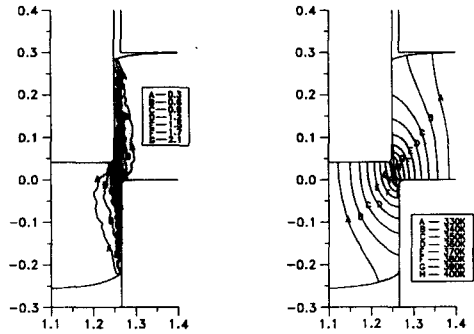


Fig. 11 Distribution of effective strain(left) and temperature(right).

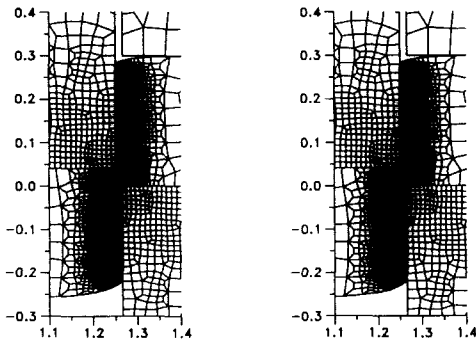


Fig. 10 Finite element simulation of shearing process(clearance: 5.3%).

상태에서 유효변형을 및 온도 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 파단이 진행되는 부위를 따라 변형이 집중되고 있음을 알 수 있으며, 변형이 집중되는



Fig. 12 Experimental observation of sheared surface.

편치행정에 따른 하중-스트로크 선도를 Fig. 13

에 나타내었다. 롤오버나 전단면이 생성되기 시작하면서 전단력이 상당히 증가함을 볼 수 있으며, 점차적으로 변형영역이 감소함에 따라 전단력이 감소함을 볼 수 있다. 또한 파단이 진행됨에 따라 하중은 급격히 감소한다.

Table 4 Results of finite element simulation.

	Simulation results	
Clearance	5.3%t	10%t
Burr	3.2 $\mu$ m	5.7 $\mu$ m
Rollover	6.37%t	7.1%t
Burnish	65.57%t	64.32%t
Fracture	26.07%t	28.59%t

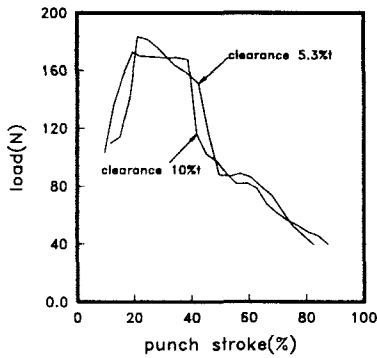


Fig. 13 Shearing force-punch stroke diagram.

유한요소 해석결과로부터 Archard의 마멸모형을 적용하여 전단가공 공정동안 펀치 및 다이에서 발생하는 마멸깊이를 계산해 보았다. 본 연구의 마멸계산에서는 앞서 실시한 Pin-on-Disk 실험으로 구한 마멸계수의 평균값을 사용하여 예측해 보았으며, 500만타 동안 마멸은 실험결과에서 추론되었듯이 생산량에 대해 선형적이라 가정하였다. 펀치와 다이부에서 발생하는 마멸깊이의 양상은 거의 유사하였으며, Fig. 14는 5.3%의 클리어런스에 대해 500만타 후에 나타난 펀치부의 마멸 깊이를 보여주고 있다. Fig. 14에서 볼 수 있듯이 큰 압력이

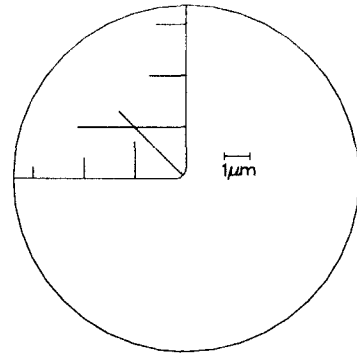


Fig. 14 Wear depth around punch edge after 5000000 blows(clearance: 5.3%t).

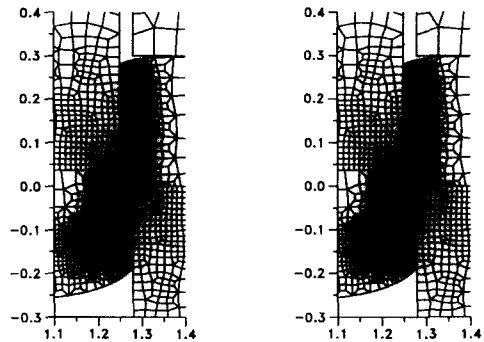


Fig. 15 Finite element simulation of shearing process(clearance: 10%t).

작용하는 펀치 곡률부 근처의 마멸이 지배적임을 알 수 있으며, 클리어런스가 5.3%일 경우에는 최대 약 4~5 $\mu$ m 정도의 마멸이 발생하였다. 펀치와 다이의 곡률부 및 측면부의 마멸은 곧 펀치 또는 다이의 형상변화와 클리어런스의 변화를 수반한다. 본 연구에서는 이와 같이 500만타 이후의 금형의 최대 마멸량은 약 10%의 클리어런스를 변화시킨다는 것을 관찰할 수 있었고, 마멸로 인한 금형의 형상변화를 클리어런스의 변화로써 고려하여 앞서 3절에서 언급한 시뮬레이션 조건과 동일하게 시뮬레이션을 수행하였다. 10%t의 클리어런스에 대한



시뮬레이션 결과를 Fig. 15와 Table 4에 5.3%의 클리어런스에 대한 결과와 비교하여 나타내었다. Table 4에서 볼 수 있듯이 500만타이후의 버 크기는  $5.7\mu\text{m}$ 로 예측되었으며, 이는 실제 측정된 버의 크기를 나타낸 Fig. 9의 실험결과( $6.3\mu\text{m}$ )의 결과와 상당히 유사한 결과를 나타내고 있다. 또한 Fig. 13에서 클리어런스 변화에 따른 하중-스크로크 선도의 특성이 일반적인 경향에 잘 따르고 있다는 것을 볼 수 있다. 따라서 이러한 해석결과로부터 본 연구에서 제시한 해석기법이 타당함을 알 수 있으며, 제품에 허용되는 버의 크기가 주어지는 경우 제시한 해석기법을 근거로 금형의 재연삭시기를 결정할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 최종 제품에 허용된 버 크기를 기준으로 전단가공 금형 즉, 펀치 및 다이에 발생하는 마멸로 인한 금형의 재연삭시기 예측을 위한 해석기법을 제시하였다. 이를 실제 생산공정에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 금형마멸의 정량적인 해석을 위하여 Pin-on-Disk 마멸실험을 수행하였으며, 이로부터 Archard의 마멸모델을 이용하여 마멸계수의 값을 결정할 수 있었다.
- (2) Pin-on-Disk 마멸실험 결과로부터 높은 속도와 높은 하중에 대해 마멸계수의 값은 증가하였으며, 펀치의 마멸체적은 미끄러짐길이에 대해 선형적으로 증가하였다. 이러한 실험결과로부터 금형의 마멸량은 생산수량에 대해 선형적이라고 가정하여 해석할 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 마멸실험결과와 개발된 유한요소 프로그램을 제시된 해석기법에 적용하여 제품에 허용되는 버의 크기를 기준으로 한 전단가공 금형의 재연삭시기를 결정할 수 있었다.
- (4) 제시된 해석기법을 이용한 시뮬레이션 결과를 실제 현장의 측정데이터와 비교해 봄으로써 본 연구에서 제시된 해석기법의 타당성을 검증할 수 있었다.
- (5) 본 연구에서 제시된 해석기법은 마멸로 인한 전단가공 금형의 재연삭시기를 결정하고 금형의 수명을 향상시키는 기술확립에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. Ymasaki, S., Ozaki, T., "Shearing of Inclined Sheet Metals," 일본기계학회논문집(C편), 제57권, 제541호, pp. 248-252, 1991.
4. Choy, C. M., Balendra, R., "Effects of Punch Wear on Blanking," Proc. the 10th National Conference on Manufacturing Research, pp. 582-586, 1994.
5. Aoki, I., Yakahashi, T., "Influence of Surface Topography of Punch on Blanking Forces and Tool Life," J. of JSTP, Vol. 36, No. 414, pp. 749-754, 1995.
6. Archard, J. F., "Contacts and Rubbing of Flat Surfaces," J. of Appl. Phys., Vol. 24, p. 981, 1953.
7. 고대철, 김철, 김병민, 최재찬, "요소제거기법에 의한 판재 전단가공의 유한요소 시뮬레이션," 한국정밀공학회, 제14권, 제11호, pp. 114-123, 1996.
8. 고대철, 김병민, "유한요소법에 의한 전단가공 금형의 마멸 예측," 한국정밀공학회, 제16권, 제1호, 1999.
9. Zienkiewicz, O. C., The Finite Element Method, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York, p. 450, 1977.
10. Kobayashi, S., Oh, S. I., Altan, T., Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press, p. 90, 1989.
11. Cockcroft, M. G., Latham, D. J., "Ductility and the Workability of Metals," J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33-39, 1968.
12. 정성훈, 강정진, 오수익, "유한요소법을 이용한 전단 메카니즘에 관한 연구," 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 211-223, 1995.
13. 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.