

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터와 (주)효성중공업의 지원하에 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 요소제거기법에 의한 판재 전단가공의 유한요소 시뮬레이션

고 대철\*, 김철\*, 김병민\*\*, 최재찬\*\*

### Finite Element Simulation of Sheet Metal Shearing by the Element Kill Method

Dae-Cheol Ko\*, Chul Kim\*, Byung-Min Kim\*\* and Jae-Chan Choi\*\*

#### ABSTRACT

The major objective of the present paper is to establish analytical technique in order to closely understand and analyze the actual shearing process. First of all, isothermal and non-isothermal FE-simulation of the shearing process are carried out using finite element software DEFORM. Based on preliminary simulation using DEFORM, the finite element program to analyze two dimensional shearing process is developed. The ductile fracture criterion and the element kill method are also used to estimate if and where a fracture will occur and to investigate the features of the sheared surface in shearing process. It can be seen that the developed program combined with the ductile fracture criterion and element kill method has enabled the achievement of FE-simulation from initial stage to final stage of shearing process. The effects of punch-die clearance on shearing process are also investigated. In order to verify the effectiveness of the proposed technique the simulation results are compared with the known experimental data. It is found that the results of the present work are in close agreement with the published experimental results.

**Key Words** : Shearing Process(전단가공 공정), Ductile Fracture Criterion(연성파괴기준), Element Kill Method(요소제거기법), FE-simulation(유한요소 시뮬레이션), Clearance(클리어런스)

#### 1 서 론

블랭킹(blanking), 피어싱(piercing), 트리밍(trimming) 등과 같은 전단가공 공정은 펀치와 다이를 이용하여 판재로부터 원하는 형상을 절단하는 가공방법이다. 전

단가공은 경량의 제품 및 치수 정밀도가 우수한 형상의 제품을 얻을 수 있으며, 제품의 호환성이 높으므로 대량 생산에 적합하다. 또한 가공의 자동화를 이루기 쉽고 작업시 고도의 숙련을 요하지 않으며 가공시간 및 노동력이 적게 드는 장점이 있다. 따라서 최근 산업계의 경량화, 소형화 및 고속화의 추세와 더불어 전단가공이 생산분야에

\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

서 차지하는 역할과 그 이용범위는 비약적으로 증가하고 있다.

전단가공에서는 펀치와 다이사이의 국부적인 영역에서 비탄성 대변형(large inelastic deformation)이 일어나므로 큰 변형이 집중되는 국소화 현상(localization)으로 인해 전단밴드가 형성된다. 이러한 전단밴드 내의 국소화 현상은 급속한 기공의 성장(void growth)과 합체(coalescence)를 야기하므로 최종적으로 변형소재는 전단파괴(shear fracture)를 일으키게 된다. 이와 같은 전단가공 공정의 변형 메카니즘에 관한 과거의 연구는 많은 시간과 비용을 초래하는 실험적인 연구<sup>(1-7)</sup>가 대부분이며, 해석적인 접근<sup>(8-12)</sup> 또한 실제의 공정에 유용하게 적용되기에는 미흡한 점이 많다고 생각된다. 그러므로 보다 정확하게 전단가공 공정을 이해하고 해석할 수 있는 방법의 확립이 필요한 실정이다.

Biegel<sup>(1)</sup>은 스트레인 게이지를 이용하여 스템핑과 블랭킹 공정동안의 하중을 측정하였고, 그 결과를 근거로 클리어런스는 최대전단하중에 영향을 미치는 것이 아니라 요구되는 하중에 영향을 미친다고 제시하였다. Hugo<sup>(2)</sup>는 전단공구 형상의 여러가지 유형에 관하여 연구하였으며, 펀치와 다이사이의 클리어런스가 증가할 때 가공에너지는 감소한다고 제시하였다. 또한 여러 연구자들<sup>(3-5)</sup>은 실제 제조공정과 관련된 제품의 형상을 주로 연구하였으며, Jana 등<sup>(6)</sup>은 저속과 고속의 전단속도에 대해 펀치와 다이사이의 클리어런스와 재료의 경도가 제품의 표면정도 및 치수정도에 미치는 영향을 조사하였다. Lu 등<sup>(7)</sup>은 재료를 청열 취성 온도(blue shortness temperature) 영역까지 가열하고 여러가지 전단속도와 클리어런스에 대해 실험을 행하여 가열온도와 전단속도가 전단면의 정밀도에 미치는 영향을 연구하였다. 그러나 이상과 같은 실험에 의한 연구에서 재료내부의 응력 분포, 변형률 분포 및 시편 재료 특성의 영향과 전단가공의 변형 메카니즘 등을 정확히 파악하는 것은 상당히 어렵다. 따라서 전단가공 공정에 대한 수치해석이 필요하게 되었다. Ghosh 등<sup>(8)</sup>은 블랭킹 공정에서 소재의 변형에 대한 단순한 모델을 설정하여 전단공정의 중요한 파라메타들 사이의 이론적인 관계를 제시하고 이를 실험과 비교하였다. Popat 등<sup>(9,10)</sup>은 탄소성 유한요소법과 크랙시작의 판단기준을 이용하여 크랙이 시작되는 변형시점까지의 해석결과를 근거로 하여 최대하중에 대한 블랭킹 공정 파라메타의 영향과 펀치행정-하중 특성 등을 연구하였으며, 펀치와 다이사이의 최적 클리어런스를 결정하는 방법을 제시하였다.

또한 竹堀光家 등<sup>(11)</sup>은 탄소성 유한요소법으로 경사진 재료의 전단가공 초기 단계에서 경사각, 클리어런스, 마찰조건 등의 영향을 조사하였다. 최근에 Choy 등<sup>(12)</sup>은 마멸로 인한 공구의 형상변화가 파단의 시작, 버(burr)의 높이, 블랭킹 하중 등에 미치는 영향을 조사하였으며, 오수의 등<sup>(13)</sup>은 상용 유한요소코드인 DEFORM을 이용하여 전단가공 공정에서 전단면의 형성과정을 조사하였다. 이상에서 언급한 대부분의 수치해석적인 연구들은 전단가공 공정의 초기단계인 파괴시작시점까지의 해석결과만을 제시하고 있으므로 파괴시작 이후에 진행된 변형에 대해 그 결과를 적용하기에는 다소의 무리가 있다.

따라서 본 논문에서는 전단가공 공정을 보다 실제에 적합하게 해석하기 위한 수치해석기법을 확립하고자 한다. 이를 위하여 먼저 소성가공 문제의 해석에 널리 적용되고 있는 상용 유한요소코드인 DEFORM<sup>(14)</sup>을 이용하여 전단가공 공정을 등온 및 비등온 과정으로 가정하여 예비시뮬레이션을 수행하였다. DEFORM을 이용한 예비시뮬레이션 결과를 근거로 전단가공 공정을 해석하기 위한 유한요소 프로그램을 개발하였으며, 전단공정에서 변형소재의 파괴를 고려하고 전단면의 형성과정을 관찰하기 위하여 연성파괴기준과 요소제거기법<sup>(15)</sup>을 도입하였다. 개발된 프로그램을 적용하여 전단가공의 초기 단계에서 최종 단계까지 펀치 스트로크에 대한 재료의 변형거동을 수치해석하였으며, 전단가공에 있어서 중요한 공정변수 중의 하나인 펀치와 다이사이의 클리어런스를 달리하여 클리어런스의 영향을 조사하였다. 제시된 해석기법의 타당성을 검토하기 위하여 수치해석의 결과를 문헌상<sup>(16)</sup>에 제시된 실험 결과와 비교해 보았다.

## 2 유한요소 모델링

전단가공 공정에서는 펀치와 다이사이의 국부적인 영역에 큰 변형이 집중되는 국소화 현상으로 전단밴드가 형성되므로 이 부위의 집중적인 관찰이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 전단밴드의 형성이 예상되는 부위에 매우 작은 크기의 격자를 집중적으로 구성하였다. 시뮬레이션에 사용된 판재의 재료는 AISI 4340<sup>(17)</sup>이며, 전단공정동안에 일어나는 변형은 재료 폭 방향으로의 변형을 무시하여 평면변형을 문제로 가정하였다. 본 연구의 시뮬레이션에서 판재의 두께는 2mm이고 펀치로 전단되는 부분과 다이에 의해 지지되는 부분의 판재 길이는 각각 4mm이다. 또한 판재의 양쪽 끝단은 자유표면으로 가

정하였으며, 펀치와 다이는 각각 강체로 고려하였다. 실제 전단가공 공정과 유사하게 모델링하기 위하여 재료 오른쪽 아래에 펀치와 동일한 속도로 움직이는 가상의 다이를 고려하여 시뮬레이션하였다<sup>(12)</sup>. 소재와 공구 접촉면에서의 마찰은 쿨롬마찰로 가정하고 마찰계수는 0.1로 두었다. 클리어런스의 변화에 따른 전단가공의 특성을 관찰하기 위하여 펀치와 다이사이의 클리어런스를 판재 두께의 10%와 20% 즉, 10%t와 20%t인 경우에 대하여 시뮬레이션하였다. 전단가공 공정의 유한요소 시뮬레이션을 위한 공정조건은 Table 1과 같다.

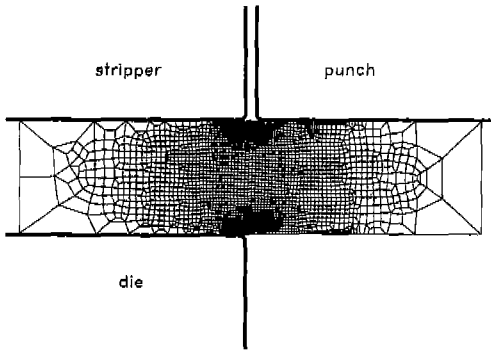


Fig.1 Initial mesh system

Table 1 Process conditions for FE-simulation of shearing process

Material	AISI 4340
Flow stress (MPa)	$\bar{\sigma} = \sigma_0(1 + \bar{\epsilon}/0.001)^{0.1} \bar{\epsilon}^{-0.006} e^{(-0.0013(T-T_0))}$
Friction Coefficient	0.1
Clearance	10%t, 20%t
Punch Speed	100mm/s
Thermal Conductivity	33.49N/mm <sup>2</sup> C
Thermal Expansion	3.94N/mm <sup>2</sup> C
Thermal Coefficient	0.0

### 3 예비 시뮬레이션

상용 유한요소 해석코드인 DEFORM을 이용하여 전단가공 공정을 등온 및 비등온 과정으로 가정하여 예비 시뮬레이션을 수행하였다. 펀치와 다이사이의 클리어런스는

10%로 두었으며, 가공속도의 영향을 관찰하기 위하여 펀치의 속도를 달리하여 해석하였다. DEFORM을 이용한 전단가공 공정의 시뮬레이션 조건 및 해석 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Simulation conditions and results using the DEFORM

Type	Problem	Punch Speed (m/s)	Rollover (%)
1	Non-isothermal FE-simulation	20	10.4
2	Non-isothermal FE-simulation	0.001	24.7
3	Isothermal FE-simulation	20	7.2
4	Isothermal FE-simulation	0.001	28.9

Type 1의 경우에 대한 격자왜곡의 정도, 유효변형률 분포 및 온도분포를 Fig. 2-4에 나타내었다. 펀치 스트로크가 45.5%일때의 격자왜곡을 나타낸 Fig. 2에서 클리어런스 내의 재료의 유동이 실제 전단가공 공정에서 관찰되는 것과 상당히 유사함을 알 수 있다. 또한 Fig. 3과 4의 유효변형률 분포와 온도 분포에서 변형이 집중되는 단열 전단밴드를 확인할 수 있으며, 단열 전단밴드 영역 내의 온도가 상온상태(25°C)보다 최대 약 450°C정도 상승하며 이로 인한 열적연화 현상을 관찰할 수 있었다.

Fig. 5, 6은 Type 2의 경우에 대한 해석결과를 나타낸다. 펀치 스트로크가 45.5%일때의 격자왜곡을 Fig. 5에 나타내었다. 펀치 스트로크가 진행됨에 따라 돌오버(rollover)가 과도하게 평가되는 현상이 나타났다. Fig. 6

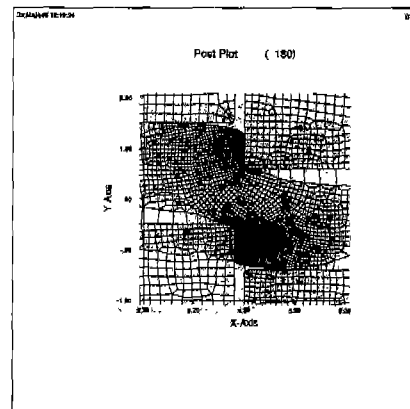


Fig.2 Deformed mesh for TYPE 1

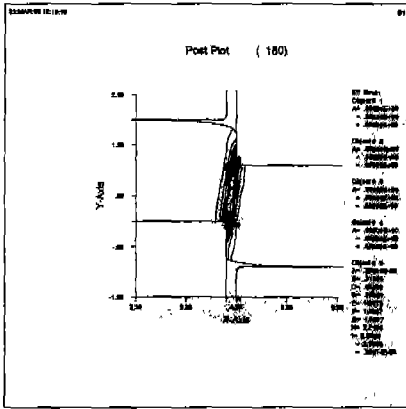


Fig. 3 Effective strain distribution for TYPE 1

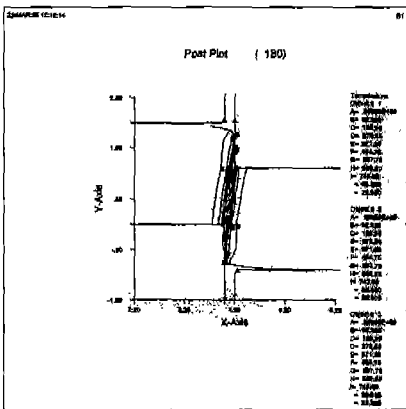


Fig. 4 Temperature distribution for TYPE 1

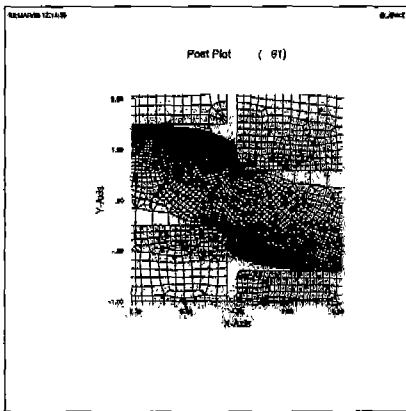


Fig. 5 Deformed mesh for TYPE 2

의 유효변형률 분포에서 앞서의 Type 1보다는 변형영역의 분포가 상당히 넓다는 것을 알 수 있으며, 온도의 상승은 거의 없었다. 이러한 결과는 이와같은 방법으로 시물레이션을 하는 경우 단일 전단밴드의 형성을 정확히 평가하지 못함을 제시해 준다.

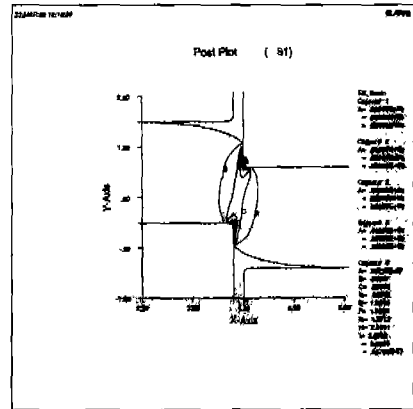


Fig. 6 Effective strain distribution for TYPE 2

Type 3의 경우에 대한 해석결과는 Fig. 7, 8과 같다. 편치 스트로크가 45.5%일때의 격자왜곡을 나타낸 Fig. 7과 유효 변형률의 분포를 나타내는 Fig. 8에서 Type 1의 경우와 변형의 양상이 대단히 유사하다는 것을 알 수 있다. 그러나 이 경우, 변형에 의한 온도 상승의 효과를 무시하므로 이로 인해 단일 전단밴드의 형성을 고려할 수 없다.

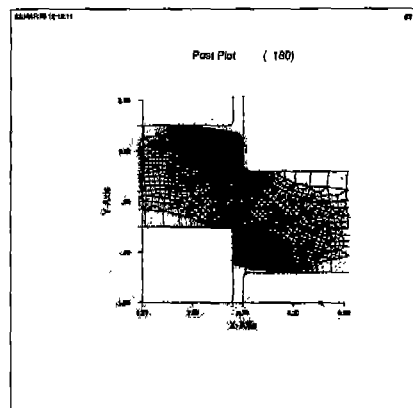


Fig. 7 Deformed mesh for TYPE 3

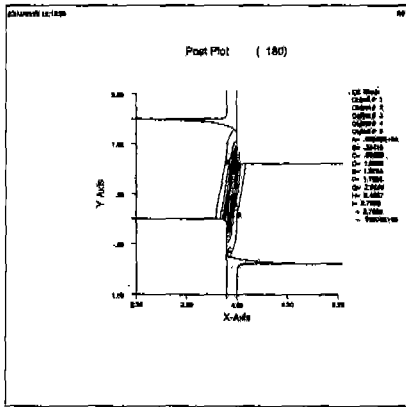


Fig. 8 Effective strain distribution for TYPE 3

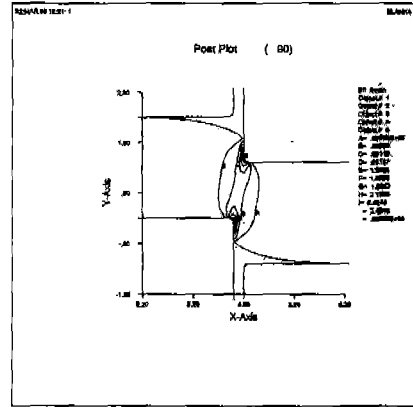


Fig. 10 Effective strain distribution for TYPE 4

Fig. 9, 10은 Type 4의 경우에 대한 해석결과를 나타낸다. 펀치 스트로크가 45.5%일때의 격자왜곡을 Fig. 9에 나타내었다. 펀치 스트로크가 진행됨에 따라 롤오버가 과도하게 평가되는 현상이 나타났으며, Fig. 10의 유효 변형률 분포에서 앞서의 Type 1, 3보다는 변형영역의 분포가 상당히 넓다는 것을 알 수 있다. 또한 전체적인 해석 결과는 Type 2와 유사하다는 것을 알 수 있다.

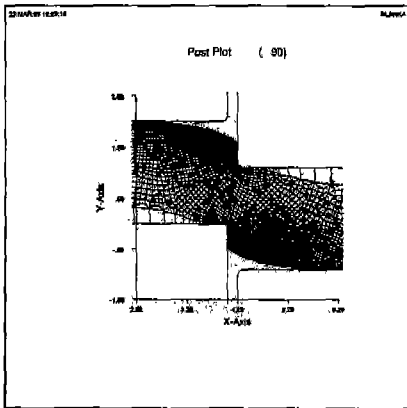


Fig. 9 Deformed mesh for TYPE 4

따라서 DEFORM을 이용한 예비 시뮬레이션 결과들은 보다 실제의 전단가공 공정에 맞게 시뮬레이션하기 위해서는 온도의 영향과 가공속도의 영향을 고려한 강-열점소성 유한요소 시뮬레이션이 유용하다는 것을 알 수 있게 한다.

#### 4 전단가공 공정의 해석을 위한 유한요소 프로그램의 개발

본 연구에서는 DEFORM을 이용한 예비 시뮬레이션 결과로부터 전단가공 공정의 해석을 위한 강-열점소성 유한요소 프로그램을 개발하였다.

##### 4.1 변형해석을 위한 유한요소 정식화

변형해석을 위하여 강-점소성 유한요소법을 이용하였다. 이의 수식화 과정은 이미 많은 문헌<sup>(18,19)</sup>에 잘 알려져 있으므로 여기서는 간략하게 언급한다.

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

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

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 표현할 수 있다.

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

여기서,  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\dot{\epsilon}$ 는 유효 변형률속도,  $\dot{\epsilon}_V$ 는 체적 변형률속도를 나타낸다.

위의 식(2)는 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도

가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴우톤-랩슨법 (Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

4.2 온도해석 방법

온도해석의 지배방정식은 다음과 같이 표현되는 에너지 방정식이다.

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

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

위의 식(3)을 변분원리에 의해 정리하면 다음과 같다.

$$\int_V k_1 T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \tag{4}$$

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

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

4.3 연성파괴기준과 요소제거기법

유한요소법을 이용하여 전단가공 공정동안 나타나는 전단밴드의 형성에 의한 파괴의 기본적 유형과 전단면의 형성과정을 조사하기 위해서는 파괴의 예측과 파괴의 전파를 효과적으로 고려해야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 연성파괴기준과 요소제거기법을 도입하였다.

전단가공 공정동안 일어나는 파괴를 예측하기 위하여 다양한 하중조건에 적용될 수 있고 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 Cockcroft-Latham<sup>(20)</sup>의 연성파괴기준을 이용하였다. 즉,

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C \tag{5}$$

여기서,  $\bar{\epsilon}_f$ 는 파괴시 유효 변형률,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형률,  $\sigma^*$ 는 주인장응력의 최대치이며,  $C$ 는 Cockcroft-Lath-

am상수이다.

여기서 전단가공 공정동안 주인장응력의 최대치가 일정하게 유지된다고 가정하면<sup>(13)</sup>, 위 식(5)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} d\bar{\epsilon} \approx C_1 \tag{6}$$

유한요소 해석에서 위 식(6)은 충분 개념으로 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n (\Delta \bar{\epsilon}_e)_i = C'_1 \tag{7}$$

여기서,  $n$ 는 스텝 수,  $\Delta \bar{\epsilon}_e$ 는 요소의 유효 변형률 증분이다.

위에서 언급한 재료상수 값은 실험적으로 결정되어야 하지만, 본 연구의 시뮬레이션에서는 기존의 연구결과<sup>(13)</sup>에서 제시하였듯이 식(6)의  $C'_1$ 의 값 즉, 유효 변형률이 2.0에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하였다.

전단가공 공정에서 전단면의 형성과정을 수치적으로 접근하기 위하여 어떤 특정 요소의 유효 변형률의 값이 파괴기준에 도달하면 이 요소에 대하여 요소제거기법을 적용하였다. 즉, 제거되는 요소의 강성 값에 reduction factor를 곱하여 강성 값을 매우 작게 만들어 다른 요소에 거의 영향을 미치지 못하도록 하였다. 이러한 해석 기법은 파괴가 일어나는 변형의 각 단계에서 실제 파괴가 일어난 요소를 해석영역으로부터 제거하는 것이 아니라 변형소재의 영역을 다시 정의할 필요가 없다. 따라서 오수의 동<sup>(13)</sup>이 제시한 방법보다는 격자 재구성에 소요되는 시간을 줄일 수 있으므로 해석에 소요되는 시간도 줄어든다. 이와 같은 해석방법을 적용하여 전단가공공정을 시뮬레이션하면 파괴기준을 초과하는 요소들을 추적함으로써 전단가공에 나타나는 파괴의 기본적 유형과 전단면의 형성과정을 관찰할 수 있다.

이상에서 언급한 연성파괴기준과 요소제거기법을 이용하여 전단가공 공정을 시뮬레이션하기 위한 유한요소 해석의 흐름도는 Fig. 11과 같다. 변형경로의 각 스텝에서 계산된 절점속도와 시간증분으로 절점좌표가 변화되고, 유효 변형률은 변형경로를 따라 적분된다. 변형경로의 각 스텝에서 변형률장은 연성파괴의 발생여부를 판단하기 위해 식(7)의 연성파괴기준식을 계산하는데 이용된다. 만약 파괴기준을 초과하는 요소가 나타나면, 그 요소에서 파괴가 일어난 것으로 간주하고 앞서 제시한 요소제거기

법을 이용하여 계속적인 시뮬레이션을 수행하게 된다. 또한 온도의 영향을 고려하기 위하여 변형해석의 결과는 온도장의 해석을 위해 연계된다.

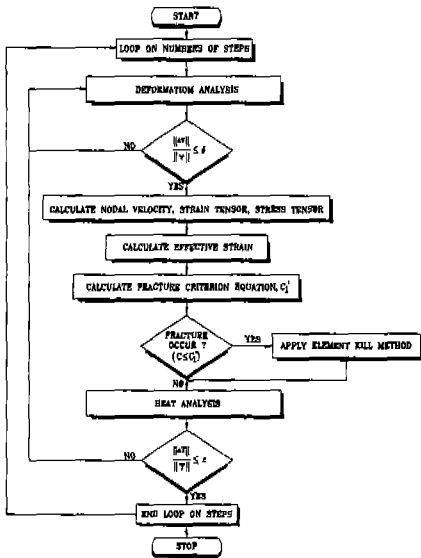


Fig. 11 Analysis procedure of shearing process

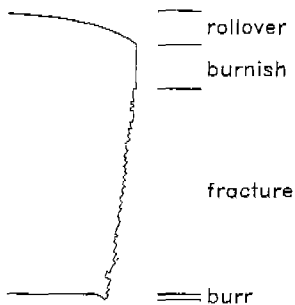


Fig. 12 Features of sheared surface

### 5 해석 결과 및 고찰

#### 5.1 전단 메카니즘

일반적인 전단가공 공정에서 나타나는 전단면의 형상은 Fig. 12와 같다. 펀치가 하강함에 따라 재료의 표면층과 펀치는 접촉하게 되고 이 때 재료는 압축작용을 받아서 변형하게 되므로 압축에 의해 자유표면에 물오버가 나타난다. 펀치가 계속적으로 하강함에 따라 펀치 및 다이의 측면에 의해 가공되어 광택이 있고 매끈한 부분인 버니쉬

(burnish)가 생기게 되며, 펀치 가장자리부에서 발생한 균열에 의해 표면이 거친 파단면(fracture)이 나타난다. 이러한 현상은 다이부에서도 비슷하게 일어나며, 최종적으로 공정이 완료되면 제품의 전단면에는 공구 가장자리부의 형상 또는 연성재료의 특성으로 예리한 돌출부인 버(burr)가 생기게 된다.

#### 5.2 수치해석 결과

펀치와 다이사이의 클리어런스가 10%t, 20%t인 전단 가공 공정에 대하여 Fig. 11에 제시된 해석절차를 따라서 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 클리어런스에 대하여 펀치 스트로크의 진행에 따른 재료의 변형상태와 내부 유동은 Fig. 13, 14와 같다. 전단밴드의 형성이 예상되는 부위 즉, 클리어런스 내의 재료는 심한 전단 변형을 받지만, 그외 부분에서 재료의 변형은 거의 없다. 전단층의 재료는 회전하면서 아래방향으로 유동함을 볼 수 있으며, 클리어런스가 증가하면 물오버가 더욱 크게 나타난다. 또한 펀치와 다이의 측면에서 파괴가 발생한 후 점차 내부 쪽으로 성장하여 각각의 클리어런스에 대해 펀치 스트로

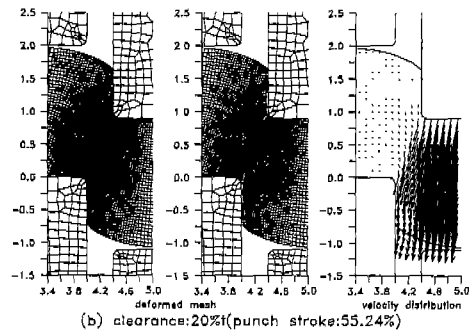
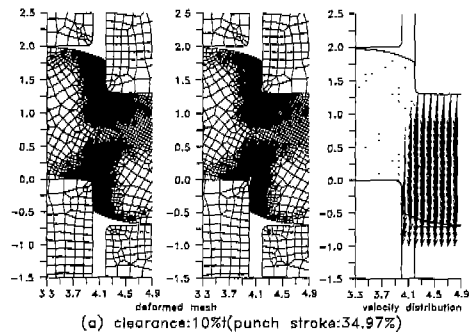


Fig. 13 Deformed mesh and velocity distribution at intermediate stage (Hatched elements refer killed element)

크 46.18%, 62.61%에서 완전히 파단된다. 또한 Fig. 13, 14의 결과로부터 파괴기준 유효변형률의 값을 초과하는 요소를 추적함으로써 전단가공 공정에 나타나는 파괴의 기본적 유형과 전단면의 형성과정을 조사할 수 있음을 알 수 있다.

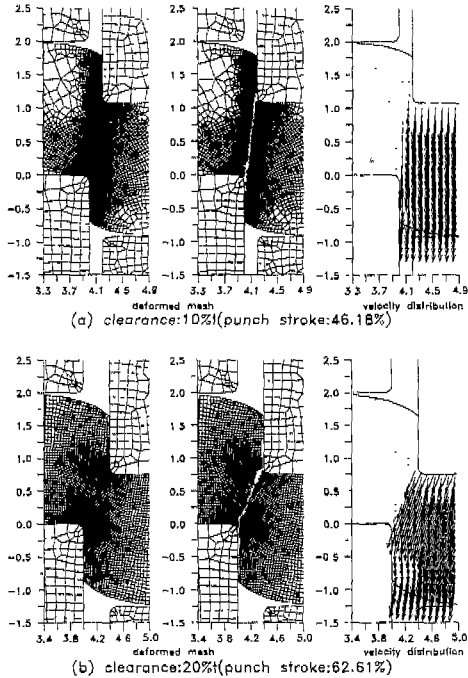


Fig.14 Deformed mesh and velocity distribution at final stage  
(Hatched elements refer killed element)

각각의 클리어런스에 대하여 Fig. 13, 14에 나타난 변형 상태에서 유효 변형률 및 온도 분포를 Fig. 15, 16에 나타내었다. 파단이 진행되는 부위를 따라 변형이 집중되고 있음을 알 수 있으며, 변형이 집중되는 영역에서 온도의 상승을 관찰할 수 있다. 또한 클리어런스가 작을수록 유효 변형률과 온도는 더욱 세밀하게 분포한다. 이러한 결과로부터 클리어런스가 작을수록 발달되는 전단밴드의 폭이 좁고 전단밴드 내의 온도상승이 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

각각의 클리어런스에 대해 본 연구의 시뮬레이션에서 얻은 전단면의 최종 형상비 구분을 Table 3에 최대경도 75HRB인 저탄소강판의 전단가공에서 얻은 결과<sup>(10)</sup>와 비교해 보았다. Table 3에서 알 수 있듯이 버니취와 파단면의 구분비에 약간의 차이가 있으며, 이는 실험과 시뮬

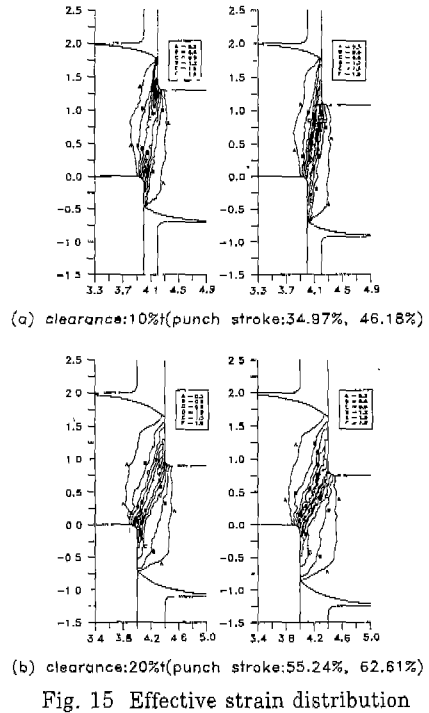


Fig. 15 Effective strain distribution

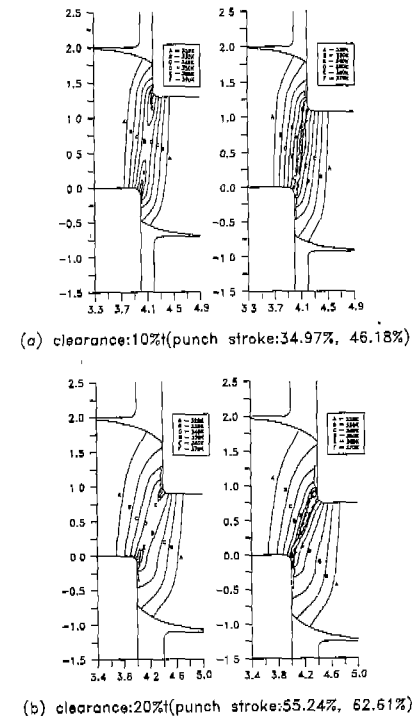


Fig.16 Temperature distribution



레이션에 사용된 재료의 차이와 본 연구의 시뮬레이션에서 파괴기준 유효 변형률 값을 가정함으로써 나타난 결과라고 생각된다. 그러나 Fig. 14에 제시된 두 가지 클리어런스에 대해 시뮬레이션한 전단면의 최종형상과 이를 정량적으로 나타낸 Table 3으로부터 본 연구에서 얻은 전단면의 형상은 실제 전단가공에서 나타나는 현상과 유사한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 따라서 파괴기준 유효 변형률 값을 실험으로 결정하고 동일한 재료에 대해 실험을 병행한다면 보다 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

또한 각각의 클리어런스에 대한 하중-스트로크 선도를 Fig. 17에 나타내었다. 클리어런스가 작을수록 최대 전단력은 더욱 크게 나타나며, 두 경우 모두 파단이 진행됨에 따라 하중이 감소함을 볼 수 있다. 이는 파단의 진행에 따른 변형영역의 감소와 전단밴드 내의 온도상승으로 인한 열적연화현상 때문이라 생각된다.

Table 3 Features of the sheared surface obtained from rigid-thermoviscoplastic FE-simulation

	This Study		Ref. [6]	
	Ref. [6]	Error Percentage	Ref. [6]	Error Percentage
Clearance	8-10%	10%	17-21%	20%
Flange Angle	7-11°	8.4°(0%)	14-16°	16.9°(0.9%)
Rolling	6-8%	11.9%(3.9%)	10-20%	18.1%(0%)
Strain	25-40%	15.5%(9.5%)	10-20%	17.4%(0%)
Fracture	50-60%	72.6%(12.6%)	70-80%	64.5%(15.5%)

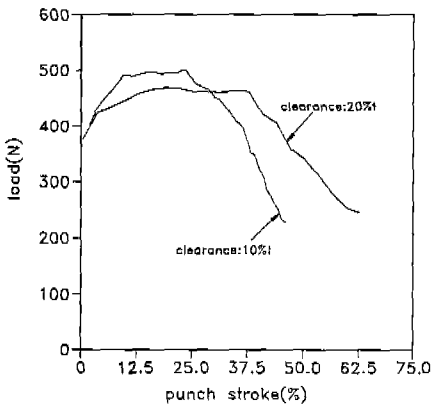


Fig. 17 Load-punch stroke diagram

### 6 결론

본 논문에서는 판재 전단가공 공정의 수치해석을 위하여 연성파괴기준과 요소제거기법을 도입한 유한요소 프

로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 전단가공의 초기 단계에서 최종 단계까지 유한요소 시뮬레이션을 수행할 수 있었으며, 파괴기준 유효 변형률의 값을 초과하는 요소를 추적함으로써 전단가공 공정에 나타나는 파괴의 기본적 유형과 전단면의 형성과정을 조사할 수 있었다. 유한요소 시뮬레이션을 통해 변형이 집중되는 부위에서 전단밴드가 형성됨을 관찰할 수 있었으며, 재료의 파단은 전단밴드를 따라서 진행됨을 알 수 있었다. 또한 전단가공 공정의 중요한 공정변수인 클리어런스 변화에 따른 전단가공의 특성을 조사할 수 있었다.

### 참고 문헌

1. J. E. Biegel, "Punch-die clearances-their effects on stamping forces", Tool Mfg. Engr., 48, 5, p.97, 1962.
2. H. H. Hugo, "Good stamping starts with the dies", Tron Age, 203, 21, p.72, 1969.
3. N. H. Cook, D. M. Gujral and V. A. Tipnis, "Higher speeds for punch processes", Tool Mfg. Engr., 48, 5, p.97, 1962.
4. K. Lange and H. Liebing, "Blanking and piercing without any burr", Annals CIRP, 27, 1, p.177, 1978.
5. D. F. Eary, "Press and die alignment - key to stamping efficiency", Tool Mfg. Engr., 49, 6, p.109, 1962.
6. S. Jana and N. S. Ong, "Effect of punch clearance in the high-speed blanking of thick metal using an accelerator designed for a mechanical press", J. Mat. Proc. Tech., 19, pp.55-72, 1989.
7. Y. Lu and M. Murakawa, "Effect of shearing temperature and speed on the sheared edge qualities and characteristics", 塑性と加工, 제31권, 제356호, pp.1142-1147, 1990.
8. A. Ghosh, V. Raghuram and P. B. Papat, "A new approach to the mechanics of the blanking operation : Theoretical model and experimental verification", J. Mat. Proc. Tech., pp.215-228, 1985.
9. P. B. Papat, A. Ghosh and N. N. Kishore,

- "Finite element analysis of the blanking process", *J. Mat. Proc. Tech.*, 18, pp.269-282, 1989.
10. P. B. Papat, A. Ghosh and N. N. Kishore, "Theretical investigation of optinum clearance in blanking", *J. Mat. Proc. Tech.*, 19, pp.251-259, 1989.
  11. 竹増光家, 尾崎龍夫, 山崎進, "板材の斜めせん断加工の弾塑性有限要素法による解析", 塑性加工春秋講演會, pp. 21-24, 1992.
  12. C. M. Choy and R. Balendra, "Simulation of the effect of tool geometry changes on blanking operations", *Proceedings of the 9th international cold forging congress*, Solihull, UK, pp.217-222, 1995.
  13. 정성훈, 강정진, 오수익, "유한요소법을 이용한 전단 메카니즘에 관한 연구", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 211-223, 1995.
  14. S. I. Oh, W. T. Wu, J. P. Tang and A. Vedhanayagam, "Capabilities and applications of FEM code DEFORM : Perspective of the developer", *J. Mat. Proc. Tech.*, 27, pp. 25-42, 1991.
  15. ANSYS user's guide, Revision 5.0 tutorials Volume III, Swanson analysis system, Inc., 1994.
  16. *Materials handbook*, 9th Edition, Forming and forging, ASM International, 1988.
  17. 유요한, 정동택, "단열 전단 밴드의 유한 요소 해석", 대한기계학회 논문집, 제16권, 제8호, pp.1519-1529, 1992.
  18. O. C. Zienkiewicz, "The finite element method", 3rd Edition, McGraw-Hill, 1977.
  19. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, "Metal forming and finite element method", Oxford University Press, 1989.
  20. M. G. Cockcroft and D. J. Latham, "Ductility and the workbility of metals", *J. Inst. Metals.*, Vol. 96, pp. 33-39, 1968.