

## 요소제거기법을 이용한 전단가공 공정의 유한요소 시뮬레이션 (Finite Element Simulation of Shearing Process Using the Element Kill Method)

고 대 철\*, 김 병 민\*\*, 최 재 찬\*\*

\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

### Abstract

The major objective of the present paper is to establish finite element simulation technique in order to further analyze the shearing process. For this the ductile fracture criterion and element kill method are used in the present work. It is postulated that a fracture initiation is based on the magnitude of local effective strain. The features of sheared surface are easily observed by the element kill method. The simulation results are compared with existing experimental results. It is found that the results of the present work are in close agreement with the existing results.

**Key words :** Shearing Process(전단가공 공정), Finite Element Simulation(유한요소 시뮬레이션), Ductile Fracture Criterion(연성파괴기준), Element Kill Method(요소제거기법)

### 1. 서 론

블랭킹(blanking), 퍼싱(piercing), 트리밍(trimming) 등과 같은 전단가공 공정은 펀치와 나이프를 이용하여 판재로부터 원하는 형상을 전단하는 가공방법이다. 전단가공은 경량의 제품 및 저수 질밀도가 우수한 형상의 제품을 얻을 수 있으며, 제품의 호환성이 높으므로 대량생산에 적합하다. 또한 가공의 자동화를 이루기 위해 작업시 고도의 속도를 요하지 않으며 가공시간 및 노동력이 적게 드는 장점이 있다. 따라서 최근 산업계의 경쟁력, 소형화 및 고속화의 주제와 더불어 전단가공이 생산분야에서 차지하는 역할과 그 이용범위는 비약적으로 증가하고 있다.

전단가공에서는 펀치와 나이사이의 일부적인 영역에서 비탄성 대변형(large inelastic deformation)이 일어나므로 변형이 집중되는 구조화 현상(localization)으로 인해 전단벤드가 형성된다. 이러한 전단벤드내의 구조화 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[1-7]가 대부분이며, 해석적인 접근[8-12]. 또한 실제의 공정에 유용하게 적용되기에에는 미흡한 점이 많다고 생각된다. 그러므로 보다 정확하게 전단가공 공정을 이해하고 해석할 수 있는 방법의 확립이 필요한 실정이다.

Biegel[1]은 스텝레인 계이지를 이용하여 스템핑과 블랭킹 공정동안의 하중을 측정하였고, 그 결과를 근거로 클리어런스(clearance)는 최대전단하중에 영향을 미치는 것이 아니라 요구되는 하중에 영향을 미친다고 제시하였다. Hugo[2]는 전단공구 형상의 여러 가지 유형에 관하여 연구하였으며, 펀치와 나이사이의 클리어런스가 증가할 때 기공에너지라는 감소한다고 제시하였다. 또한 여러 연구자들[3-5]은 실제 제조공정과 관련된 제품의 형상을 주로 연구

하였으며, Jana 등[6]은 저속과 고속의 전단속도에 대해 펀치와 나이사이의 클리어런스와 재료의 경도가 제품의 표면질도 및 치수정도에 미치는 영향을 조사하였다. Lu 등[7]은 재료를 정열취성온도(blue shortness temperature) 영역 까지 가열하고 여러 가지 전단속도와 클리어런스에 대해 실험을 행하여 가열온도와 전단속도가 전단면의 경밀도에 미치는 영향을 연구하였다. 그러나 이상과 같은 실험에 의한 연구에서 재료내부의 응력 분포, 변형률 분포 및 시편재료 특성의 영향과 전단가공의 변형 메카니즘 등을 정확히 파악하는 것은 상당히 어렵다. 따라서 전단가공 공정에 대한 수치해석이 필요하게 되었다. Ghosh 등[8]은 블랭킹 공정에서 소재의 변형에 대한 단순한 모델을 설정하여 전단공정의 중요한 파라메타를 사이의 이론적인 관계를 제시하고 이를 실험과 비교하였다. Popat 등[9-10]은 단소성 유한요소법과 크래시 시자의 판단기준을 이용하여 크래시 시작되는 변형시점까지의 해석결과를 근거로 하여 최대하중에 대한 블랭킹 공정 파라메타의 영향과 펀치행정-하중 특성 등을 연구하였으며, 펀치와 나이사이의 최적 클리어런스를 결정하는 방법을 제시하였다. 또한 竹增光家 등[11]은 단소성 유한요소법으로 경사진 재료의 전단가공 초기 단계에서 경사각, 클리어런스, 마찰조건 등의 영향을 조사하였다. 최근에 Choy 등[12]은 마멸로 인한 공구의 형상변화가 파단의 시작, 버(burr)의 높이, 블랭킹 하중 등에 미치는 영향을 조사하였으며, 정성준 등[13]은 상용 유한요소코드인 DEFORM을 이용하여 전단가공 공정에서 전단면의 형성과정을 조사하였다. 이상에서 언급한 대부분의 수치해석적인 연구들은 전단가공 공정의 초기단계인 파괴 시작 시점까지의 해석결과만을 제시하고 있으므로 파괴 시작 이후에 진행된 변형에 대해 그 결과를 적용하기에는 다소의 무리가 있다.

따라서 본 논문에서는 전단가공 공정을 보다 실제에 적

합하게 해석하기 위한 수치해석기법을 확립하고자 한다. 이를 위하여 소성가공 문제의 해석에 널리 적용되고 있는 유한요소법을 이용하였으며, 변형소재의 파괴를 고려하고 전단면의 형성과정을 관찰하기 위하여 연성파괴기준과 요소제거기법(element kill method)[14]을 도입하였다. 해석기법의 유용성을 검토하기 위하여 개발된 유한요소 프로그램을 이용한 전단가공 공정의 해석결과를 문헌상[15]에 제시된 전단면 형상의 대략적인 결과와 비교해 보았다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 유한요소 모델링

전단가공 공정에서는 편치와 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 격자(수십 마이크로미터 정도)를 집중적으로 구성하였다. 판재의 재료는 강소성 유한요소해석의 경우 AISI 1010[16]을 사용하였고, 접소성 및 열접소성 유한요소해석의 경우에는 AISI 4340[17-18]을 사용하여 시뮬레이션하였다. 전단공정동안에 일어나는 변형은 재료속 방향으로의 변형을 무시하여 평면변형률 문제로 가정하였으며, 본 연구의 시뮬레이션에서 판재의 두께는 2mm이고 편치로 전단되는 부분과 다이에 의해 지지되는 부분의 판재 길이는 4mm이다. 또한 판재의 양쪽 끝단은 자유표면으로 가정하였으며, 편치와 다이의 각각 강재로 고려하였다. 실제의 공정을 보다 근사적으로 시뮬레이션할 수 있는 기법을 확립하기 위하여 강소성, 접소성 및 열접소성 유한요소 시뮬레이션을 행하였다.

### 2.2 연성파괴기준과 요소제거기법

유한요소법을 이용하여 전단가공 공정동안 일어나는 전단밴드의 형성에 의한 파괴의 기본적 유형과 전단면의 형성과정을 조사하기 위해서는 파괴의 예측과 파괴의 진파를 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[19]의 연성파괴기준을 이용하였다. 즉,

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

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

여기서 전단가공 공정동안 주인장응력의 최대치가 일정하게 유지된다고 가정하면, 위 식(1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_t} d\bar{\epsilon} \approx C_1 \quad (2)$$

유한요소 해석에서 위 식(2)는 충분 개념으로 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n (\Delta \bar{\epsilon}_e)_i = C_1 \quad (3)$$

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[13]에서 제시하였듯이 식(3)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 값을 reduction factor를 곱하여 강성 값을 매우 작게 만들어 다른 요소에 거의 영향을 미치지 못하도록 하였다. 이러한 해석 기법은 파괴가 일어나는 변형의 각 단계에서 변형소재의 영역을 다시 정의할 필요가 없기 때문에 정성화 등[13]이 제시한 방법보다는 격자 재구성 횟수가 대단히 감소하므로 해석에 소요되는 시간도 줄어든다. 연성파괴기준과 요소제거기법을 이용하여 전단가공 공정을 시뮬레이션하기 위한 유한요소해석의 흐름도는 Fig. 2와 같다. 변형경로의 각 스텝에서 재산된 접점속도와 시간증분으로 접점좌표가 변화되고, 유효변형률은 변형정보를 따라 적분된다. 변형경로의 각 스텝에서 변형률장은 연성파괴의 발생여부를 판단하기 위해 식(3)의 연성파괴기준을 계산하는데 이용된다. 만약 파괴기준을 초과하는 요소가 나타나면 그 요소에서 파괴가 일어난 것으로 간주하고 앞서 제시한 요소제거기법을 이용하여 계속적인 시뮬레이션을 수행하게 된다. 또한 온도의 영향이 고려될 경우 변형해석의 결과는 온도장의 해석을 위해 인계된다.

## 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 3.1 강소성 유한요소 시뮬레이션

일반적인 전단가공 공정에서 전단면의 형성과정을 간략히 언급하면 다음과 같다. 편치가 하강함에 따라 재료의 표면층과 편치는 접촉하게 되고 이 때 재료는 굽힘작용을 받아서 변형하게 되므로 굽힘에 의해 자유표면에 롤오버(rollover)가 나타난다. 편치가 계속적으로 하강함에 따라 편치 및 다이의 충면에 의해 가공되어 광택이 있고 매끈한 부분인 버니쉬(burnish)가 생기게 되며, 편치 가장자리부에서 발생한 균열에 의해 표면이 거친 파단면(fracture)이 나타난다. 이러한 현상은 다이부에서도 비슷하게 일어나므로 최종적으로 공정이 완료되면 제품의 전단면에는 예리한 돌출부인 비가 생기게 된다.

이상에서 언급한 변형 메커니즘의 수치해석을 위해 앞서 제시한 요소제거기법을 이용하여 편치 강소성 유한요소 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션에 이용된 재료는 AISI 1010이며, 편치와 다이사이의 클리어런스는 편체 두께의 10% 즉, 10%t로 두었다. 강소성 유한요소 시뮬레이션을 위한 공정조건은 Table 1과 같다.

Fig. 3은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 편치 스트로크가 28.8%일때 편치 가장자리 균처에 위치한 요소에서 최초의 파단이 일어났으며, 요소제거기법을 이용하여 계속적으로 시뮬레이션을 수행하면 편치 스트로크가 28.9%일때 다이 가장자리부에 위치한 요소에서 두 번째 파단이 일어남을 알 수 있었다. Fig. 3(a), (b)에 편치 스트로크가 78.2%일때 제거된 요소(해칭된 부분)와 완전파단된 형상을 나타내었

다. 강소성 유한요소 시뮬레이션 결과에서 얻은 전단면의 형상 구분을 Table 2에 문현상의 결과와 비교해 보았다. Table 2에서 풀오비와 베니쉬의 구분비가 문현상의 결과와 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다. 이는 판재 재료의 유통 양식을 변형률만의 함수로 가정함으로써 실제 전단가공에서 일어나는 단일 전단밴드의 형상을 고려하지 못한 것과 위치와 다이사이에서 재료의 강체 회전의 영향으로 인한 것이라 생각된다. 또한 Fig. 3(c)에서 유효변형률의 분포는 폐단면을 따라서 상당히 높다는 것을 알 수 있으며, 변형 양의 분포가 상당히 넓음을 볼 수 있다.

### 3.2 접소성 및 열접소성 시뮬레이션

앞서의 강소성 유한요소 시뮬레이션 결과를 근거로 하여 보다 실제의 전단가공 공정에 맞게 해석을 수행하기 위한 방법을 확립하기 위하여 소성가공 공정의 해석에 사용으로 널리 쓰이는 유한요소 해석코드인 DEFORM[17]을 이용하여 전단가공 공정을 접소성 및 열접소성으로 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 사용된 재료는 AISI 4340이며, 위치와 다이사이의 클리어런스는 10%로 두었다. 또한 가공속도의 영향을 관찰하기 위하여 위치의 속도를 단리하여 해석하였고, 재료의 강체회전으로 인한 효과를 피하기 위해 재료 위쪽 위에 고정된 다이(스트리퍼)와 재료 오른쪽 아래에 위치와 동일한 속도로 움직이는 가상의 다이를 고려하여 시뮬레이션하였다[13]. 시뮬레이션 조건 및 해석 결과는 Table 3과 같다.

Case 1의 경우에 대한 격자왜곡의 정도, 유효변형률 분포 및 윤도분포를 Fig. 4-6에 나타내었다. 편치 스트로크가 50.5%인 때의 격자왜곡을 나타낸 Fig. 4에서 다이 및 편치의 부풀부풀 따라 재료의 유통이 실제와 조금 달리 일어나고 있으나, 이는 격자의 수를 늘리므로써 해결될 수 있다. 또한 Fig. 5와 6의 유효변형률 분포와 윤도 분포에서 변형이 집중되는 단일 전단밴드를 확인할 수 있으며, 단열 전단밴드 영역내의 윤도가 상온상태(25°C)보다 최대 약 450°C정도 상승하며 이로 인한 열적연화 현상을 관찰할 수 있었다.

Fig. 7, 8은 Case 2의 경우에 대한 해석결과를 나타낸다. 편치 스트로크가 53%인 때의 격자왜곡은 Fig. 7에 나타내었다. 편치 스트로크가 진행됨에 따라 풀오비가 과도하게 평가되는 현상이 나타났으며, Fig. 8의 유효변형률 분포에서 앞서의 Case 1보다는 변형영역의 분포가 상당히 넓다는 것은 알 수 있다. 또한 윤도의 상승은 거의 없었으며, 이러한 결과는 이와 같은 방법으로 시뮬레이션을 하는 경우 단일 전단밴드의 형성을 정확히 평가하지 못함을 제시 준다.

Case 3의 경우에 대한 해석결과는 Fig. 9, 10과 같다. 편치 스트로크가 51.1%인 때의 격자왜곡은 Fig. 9와 유효변형률의 분포를 나타내는 Fig. 10에서 Case 1의 경우와 변형의 양상이 대단히 유사하다는 것을 알 수 있다. 그러나 이 경우, 변형에 의한 윤도 상승의 효과를 무시하고 이로 인해 단일 전단밴드의 형성을 고려할 수 없다.

Fig. 11, 12는 Case 4의 경우에 대한 해석결과를 나타낸다. 편치 스트로크가 45.3%인 때의 격자왜곡을 Fig. 11에 나타내었다. 편치 스트로크가 진행됨에 따라 풀오비가 과도하게 평가되는 현상이 나타났으며, Fig. 12의 유효변형률 분포에서 앞서의 Case 1, 3보다는 변형영역의 분포가 상당

히 넓다는 것을 알 수 있다. 또한 전체적인 해석결과는 Case 2와 유사하다는 것을 알 수 있다.

따라서 이러한 결과들은 보다 실제의 전단가공 공정에 맞게 시뮬레이션하기 위해서는 온도의 영향과 가공속도의 영향을 고려한 열접소성 유한요소 시뮬레이션이 유용하다는 것을 알 수 있게 한다.

### 3.3 개발된 프로그램에 의한 시뮬레이션

강소성 및 DEFORM을 이용한 시뮬레이션 결과를 근거로 전단가공 공정을 비동온공정으로 가정하여 시뮬레이션하기 위하여 인성파괴기준과 요소제거기법을 도입한 열접소성 유한요소 프로그램을 개발하였다. 앞서 언급한 Fig. 2의 흐름도를 따라 시뮬레이션 하였으며, 이용된 재료는 AISI 4340이다. 기타 시뮬레이션을 위한 공정조건은 Table 4와 같다.

Fig. 13은 편치 스트로크가 54.5%, 70.5%인 때 제거된 요소(해친된 부분)와 폐단원 형상을 나타낸다. 본 연구의 시뮬레이션에서 얻은 전단면의 최종 형상구분을 Table 5에 문현상의 결과와 비교해 보았다. 베니쉬와 폐단면의 구분비에 약간의 차이가 있으나 대체적으로 비슷함을 알 수 있다. Fig. 13의 변형 상태에서 재료의 유효변형률과 온도의 분포는 Fig. 14, 15와 같다. 폐단이 진행되는 부위를 따라 변형이 집중되고 있음을 알 수 있으며, 변형이 집중되는 영역에서 온도의 상승을 관찰할 수 있다. 즉, 폐단은 유효변형률이 집중되는 단일 전단밴드를 따라서 진행됨을 알 수 있다. 하중-스트로크 선도를 Fig. 16에 나타내었다. 폐단이 진행됨에 따라 하중이 감소함을 볼 수 있다. 이는 폐단의 진행에 따른 변형영역의 감소와 단일 전단밴드내의 온도 상승으로 인한 열적연화 현상 때문이라 생각된다.

## 4. 결 론

본 논문에서 인성파괴기준과 요소제거기법을 고려한 유한요소 시뮬레이션으로 전단가공 공정의 시뮬레이션 기법을 확립하였으며, 이와 같은 기법을 이용하여 전단가공 공정을 해석하면 파괴기준 유효변형률의 값은 초과하는 요소를 추적함으로써 전단가공 공정에 나타나는 폐괴의 기본적 유행과 전단면의 형성과정을 조사할 수 있다. 유한요소 시뮬레이션을 통해 변형이 집중되는 부위에서 전단밴드가 형성됨을 관찰할 수 있었으며, 재료의 폐단은 전단밴드를 따라서 진행됨을 알 수 있었다.

보다 정확한 해석을 위해서는 폐괴기준 유효변형률의 값을 설정으로 결정해야 하며, 고속의 전단가공을 해석하기 위해서는 판성의 효과를 고려한 수치해석이 필요하다고 생각된다. 또한 이러한 해석기법을 이용하면 전단가공의 공정에 영향을 미치는 중요한 인자들, 즉 클리어런스, 가공속도, 판재의 두께 및 재료 물성지 등의 영향을 정량적으로 규명할 수 있으며, 버가 없는 정밀 제품의 제조에 관한 수치해석적인 접근을 도모할 수 있으므로 이에 대한 자주적인 연구가 필요하다고 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [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. material processing technology, 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. Popat, "A new approach to the mechanics of the blanking operation : Theoretical model and experimental verification", J. material processing technology, pp.215-228, 1985
- [9] P. B. Popat, A. Ghosh and N. N. Kishore, "Finite element analysis of the blanking process", J. material processing technology, 18 , pp.269-282, 1989
- [10] P. B. Popat, A. Ghosh and N. N. Kishore, "Theoretical investigation of optimum clearance in blanking", J. material processing technology, 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] 정성호, 강정진, 오수익, "유한요소법을 이용한 전단 배기나짐에 관한 연구", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 211-223, 1995
- [14] ANSYS user's guide, Revision 5.0 tutorials Volume III, Swanson analysis system, Inc., 1994
- [15] 손양인, 이재성, 이종안, 이진식, 최대주, 홍승언, "금형설계", 성안당, 1990
- [16] 이호락, 김태형, 김병민, 강병수, 최재찬, "비구속 압출 공정의 성형성에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 822-825, 1993
- [17] 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
- [18] 유효한, 정동택, "단열 전단 배드의 유한 요소 해석", 대한기계학회 논문집, 제16권, 제8호, pp.1519-1529, 1992
- [19] M. G. Cockcroft and D. J. Latham, "Ductility and the workability of metals", J. Inst. Metals., Vol. 96, pp. 33-39, 1968

Table 1 Process condition in rigid-plastic FE-simulation

material	AISI 1010
flow stress	$\bar{\sigma} = 226.5(1 + \bar{\varepsilon}/0.0054)^{0.23}$
friction coefficient	0.1
clearance	10% <i>t</i>

Table 2 Features of the sheared surface obtained from rigid-plastic FE-simulation

	ref.[15]	FE-simulation
clearance	8-10% <i>t</i>	10% <i>t</i>
fracture angle	7-11°	16°
rollover	6-8% <i>t</i>	48.9% <i>t</i>
burnish	25-40% <i>t</i>	0.5% <i>t</i>
fracture	50-60% <i>t</i>	45.7% <i>t</i>

Table 3 Simulation conditions and results using DEFORM

case	problem	punch speed (m/s)	rollover (%)
1	thermovisco-plastic FEM	20	10.4
2	thermovisco-plastic FEM	0.001	24.7
3	visco-plastic FEM	20	7.2
4	visco-plastic FEM	0.001	28.9

Table 4 Process condition in thermo-visco plastic FE-simulation

material	AISI 4340
flow stress	$\bar{\sigma} = \sigma_0(1 + \bar{\varepsilon}/0.001)^{0.1} \bar{\varepsilon}^{0.06} e^{(-0.003(T - T_0))}$
friction coefficient	0.1
clearance	20% <i>t</i>
punch speed	0.1m/s
thermal conductivity	33.49N/mm°C
heat capacity	3.94N/mm°C
heat transfer coefficient	0.0

Table 5 Features of the sheared surface obtained from thermo-visco plastic FE-simulation

	ref.[15]	FE-simulation
clearance	17-21% <i>t</i>	20% <i>t</i>
fracture angle	14-16°	20°
rollover	10-20% <i>t</i>	15.7% <i>t</i>
burnish	10-20% <i>t</i>	27.4% <i>t</i>
fracture	70-80% <i>t</i>	56.5% <i>t</i>

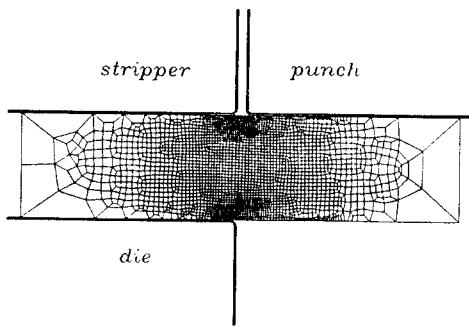
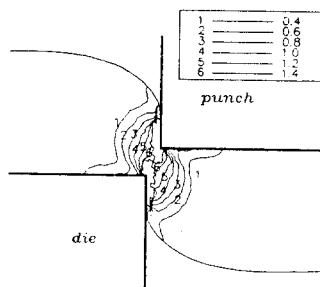


Fig. 1 Initial mesh system



(c) Distribution of effective strain

Fig. 3 Results of rigid-plastic FE-simulation

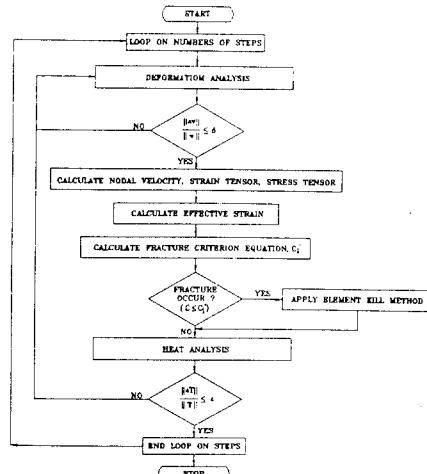
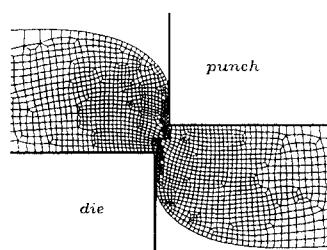
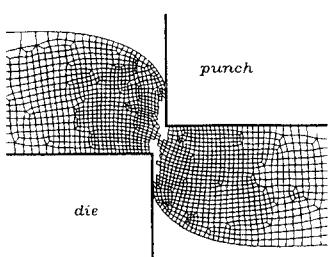


Fig. 2 Flow chart for analysis of shearing process



(a) Grid distortion at final deformation  
(Hatched elements refer killed elements)



(b) Configuration of sheared surface

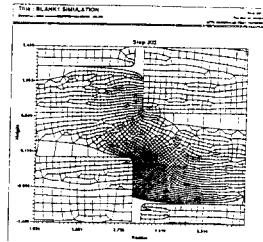


Fig. 4 Grid distortion for Case 1

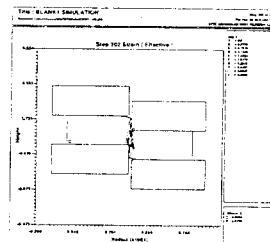


Fig. 5 Distribution of effective strain for Case 1

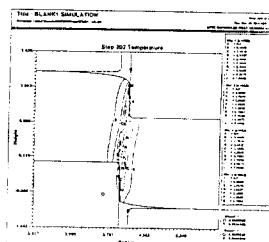


Fig. 6 Distribution of temperature for Case 1

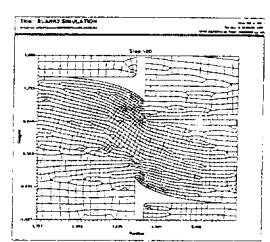


Fig. 7 Grid distortion for Case 2

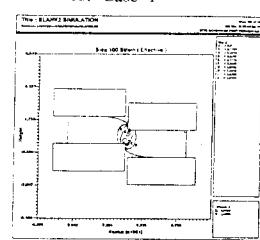


Fig. 8 Distribution of effective strain for Case 2

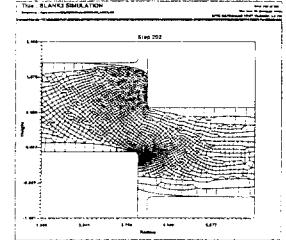


Fig. 9 Grid distortion for Case 3

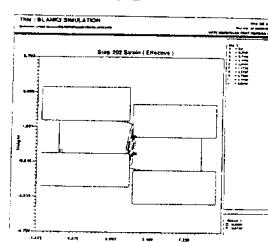


Fig. 10 Distribution of effective strain for Case 3

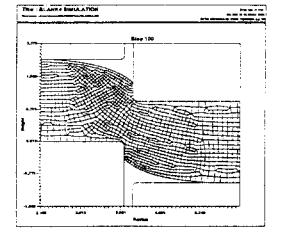


Fig. 11 Grid distortion for Case 4

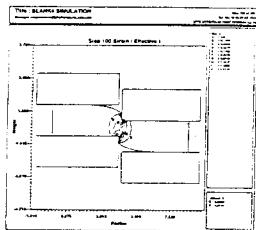
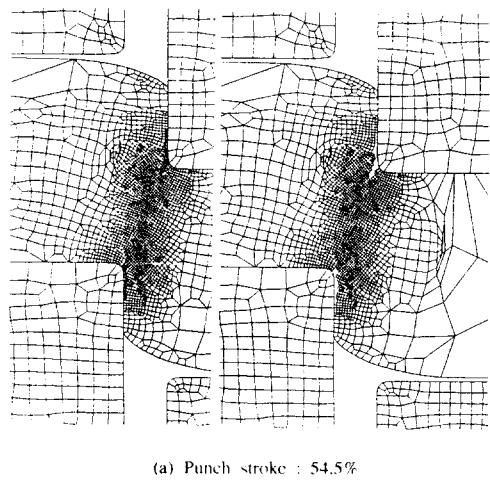
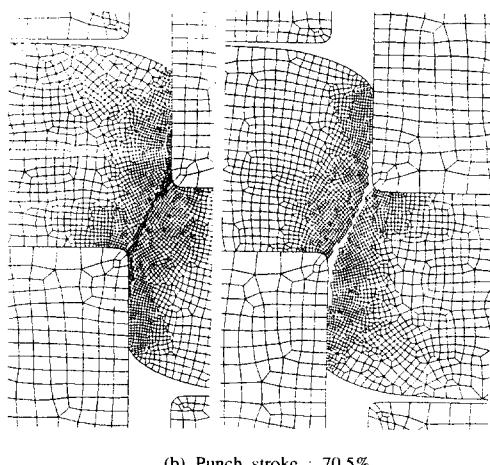


Fig. 12 Distribution of effective strain  
for Case 4

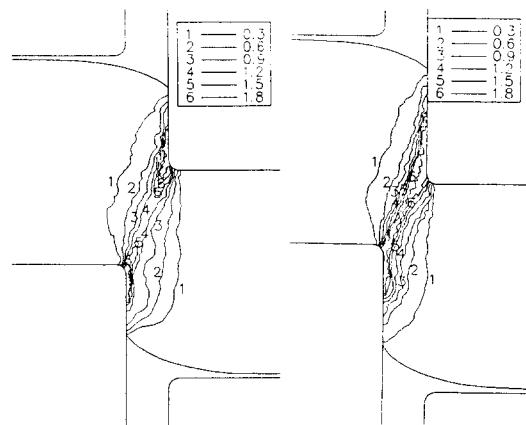


(a) Punch stroke : 54.5%



(b) Punch stroke : 70.5%

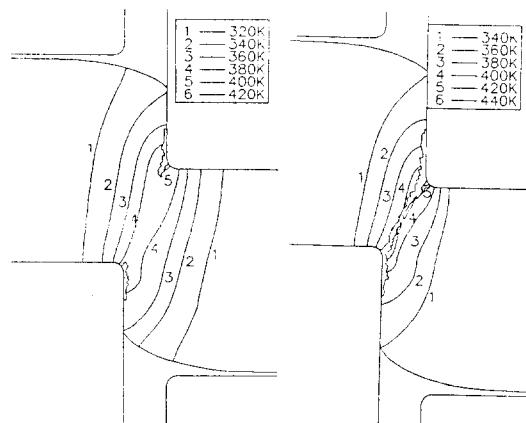
Fig. 13 Grid distortion for punch stroke in FE-simulation  
(Hatched element refers killed elements)



(a) Punch stroke : 54.5%

(b) Punch stroke : 70.5%

Fig. 14 Distribution of effective strain for punch stroke in FE-simulation



(a) Punch stroke : 54.5%

(b) Punch stroke : 70.5%

Fig. 15 Distribution of temperature for punch stroke in FE-simulation

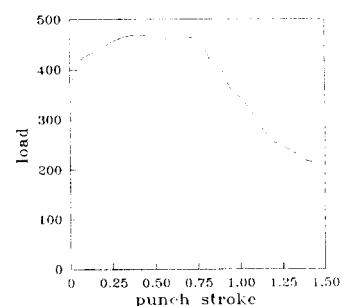


Fig. 16 Variation of the load with punch stroke