

유한요소법을 이용한 전단 메카니즘에 관한 연구

정성훈, 강정진, 오수익
서울대학교 기계설계학과

A study on shearing mechanism by FEM

S.H. Jeong, J.J. Kang and S.I. Oh
Department of Mechanical Design and Production Engineering
Seoul National University

ABSTRACT

The purpose of the present study is to examine shearing mechanism through rigid-plastic finite element analysis. Difficulties arise in simulating shearing process due to the narrow shear band formation and lack of proper fracture resolve these difficulties by using adaptive mesh generation criterion. The simulation results are obtained for various punch clearances and these are compared with existing experimental results. It is shown that FEM simulation technique can be used to further understand the shearing mechanism.

KEYWORDS : Shearing Mechanism, Rigid-Plastic FEA, Fracture, Shear Band

1. 서론

비탄성 대변형 (large inelastic deformation)에서는 전단으로 인하여 해당 부위에 원 재료의 재질과 구별되는 띠가 종종 관찰됨을 알 수 있다. 이러한 띠를 흔히 전단 밴드 (shear band)라고 한다[1].

한편 이 형성된 밴드를 자세히 들여다 보면, 밴드 내의 보이드 성장(void growth)으로 인한 재질의 파괴(fracture)가 일어남을 관찰할 수가 있다. 즉 파단면은 전단 밴드를 따라서 형성하고 발달하는 것이다[2]. 그리고, 이러한 전단 밴드의 성장은 최대전단 변형률(maximum shear strain) 방향으로 형성하여 발달하는 것으로 알려져 있다[3]. 전단 밴드에 집중화된 대변형률(large localized strain)에 대한 해석은 재료의 앞으로 있을 파괴를 예측하는데 중요한 단서가 되며, 파괴가 일어나는 현상을 규명하는데 중요한 메카니즘(mechanism)을 제공한다. 이에 대한 전단 밴드의 실험적인 연구는 1944년 Zener와 Hollomon이 처음으로 관찰하여 학계에 보고한 이후 꾸준히 연구되어져 왔고, 1987년에 Duffy와 Hartley, 그리고 Hawley[4] 등이 적외선 복사량을 측정하여 온도 분포를 파악하려고 시도하였다. Merchand와 Duffy[5]는 Kolsky 비틀림을 이용하여 밴드 내의 온도와 변형률장에 대해 정리한 바 있다. 그의 실험적인

연구는 최근까지 상당한 노력이 이루어져 왔다.

한편, 이에 대한 수치 해석적인 연구 시도는 최근에 몇몇 있어 왔다[3][6][7][8]. 그 중 유한요소법과 정동태[8]의 익스플리시트 유한 요소 해석 코드(explicit FEA code)를 이용하여 전단 밴드의 형성을 연구한 바가 있다. 그러나, 파괴를 고려하지 않은 점에서 변형이 상당량 진행된 이후의 결과의 타당성에 무리가 있는 듯하다.

본 논문에서는 이 부분에 관심을 갖고 소성 가공 해석에 상용으로 널리 쓰이는 강소성 유한 요소 해석 코드(rigid-plastic FEA code)인 DEFORM[12]을 이용하여 전단 밴드를 추적하고 파괴를 고려하여, 파괴 기준을 설정하고 이에 따라 해당 요소를 제거하는 기법을 이용하여 파단면의 형성을 관찰하고자 한다. 단, 파괴 기준으로는 오수익 등[13]이 McClintock 등[14]과 Cockroft와 Latham[15]이 제안한 파괴 기준을 수정하여 사용한 것을 참조하였다. 또한 전단 가공시 중요한 고려 대상인 다이와 펀치의 틈새(clearance)에 변화를 주어 이에 따른 재료의 파단면 형성을 관찰하여 대체적인 파단면 형성 경향과 비교하고자 한다[10]. 한편 전단 밴드의 폭은 대략 수 내지 수십 마이크로 미터이기 때문에 전단 과정 관찰을 위한 요소 크기(element size), 적절한 요소의 개수의 선택 등을 고려하여야 하므로 프로그램을 수행하기 위한 시간이 상당히 많이 소요된다.

2. 유한 요소 해석

2.1. 유한 요소 해석을 위한 모델 선정

모델의 선정은 전단 밴드가 일어날 것으로 예상되는 지점의 집중적인 관찰만이 필요하고, 그 외 부분은 사실상 얻고자 하는 해석 결과에서는 불필요하다. 따라서 밴드가 형성될 것으로 예상되는 부위의 관찰을 고려하여 그림 1과 같은 모델을 선정하였다. 재료가 깊이 방향으로 길다고 가정하여 평면 변형을 문제로 다룬다. 왼쪽의 위, 아래 다이는 고정되어 있으며, 오른쪽의 위쪽, 아래쪽의 두 개의 다이(펀치)는 동일한 속도로 하측 방향으로 진행한다. 그리고, 재료의 좌우 양쪽 끝단은 자유표면(free surface)로 가정하였다. 중앙에 전단이 가해지는 판재의 두께는 2mm이며, 다이와 펀치의 코너 반경은 0.1mm로 한다[10]. 실제 전단 공정에서는 왼쪽 위 다이와 오른쪽 아래쪽 다이가 없는 경우가 있으나, 유한 요소 해석시에 이들이 없는 경우에는 재료의 뒤틀림 현상이 정도 이상으로 심해지고, 재료가 강제 회전하게 되어 실제 공정과 유사한 모델로 간주하기 어렵게 된다. 이것은 제한된 영역에서 모델을 선정하여야 하는 유한 요소 해석의 한계성으로부터 재료의 양 끝단을 자유면으로 가정한 데 기인한다. 따라서, 왼쪽 위 다이와 오른쪽 아래쪽 다이를 셋팅함으로써 실제 공정을 근사하게 시뮬레이션할 수 있도록 하였다.

판재의 재료는 AISI 4340을 선택하였고, 유동 응력(flow stress)은 온도, 변형률, 변형률 속도의 함수[8]로 보았으며, 그 관계를 그림 2에 도시하였다. 한편 다이와 펀치(우측 다이)는 강체(rigid body)로 가정하였다. 기타 계산을 위한 전단 공정 조건들은 표 1과 표 2에 정리하였다. 요소망의 총 요소수는 4300여개로 하였으며, 변형이 집중적

으로 일어나는 부위, 즉 다이와 펀치의 틈새 0.2mm(틈새를 판재 두께의 10%로 할 때) 구간에 틈새 방향으로 요소가 15개에서 20개 정도 분포하도록 하여 폭이 수 내지 수십 마이크로 미터인 전단 밴드의 형성을 근사하게 시뮬레이션할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 요소망을 재구성할 때마다 재료 내부에서 변형률이 큰 영역, 온도가 높은 영역, 그리고 외곽선의 곡률이 큰 부근에 요소망이 집중하도록 하는 것이 필요한데, 이는 요소망 재구성 인자를 조정함으로써 가능케하였다.

2.2. 파괴 기준(fracture criterion)

오수익 등[13]은 McClintock 등[14]과 Cockroft와 Latham[15]이 제안한 파괴 기준을 수정하여 축대칭 압축 문제와 축대칭 인발 문제에 적용함으로써 연성 파괴와 가공 공정의 성형 한계성을 예측하였다. 참고문헌[13]에서 수정하여 사용한 파괴 기준 중 Cockroft와 Latham이 제안한 것은 다음과 같다.

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

여기서, $\bar{\epsilon}^f$ 는 최종 유효 변형률, $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형률, $\bar{\sigma}$ 는 유효 응력, σ^* 는 인장응력의 최대치이며, C 는 재료 상수이다. 즉, 식(1)의 좌변의 적분치가 C 에 도달하면 파괴가 일어난다고 본 것이다. McClintock 등이 제안한 식도 적당한 구속에 의하여 식(1)과 동등하게 표현된다[13]. 전단 공정에서 일어나는 변형은 전단 밴드가 형성되면서 그 부근에 변형이 집중되는 만큼 단순하다. 전체적인 변형 양상은 순수하게 전단(pure shear)으로 볼 수 있으며, 인장응력의 최대치, σ^* 와 유효 응력, $\bar{\sigma}$ 의 비율이 일정하게 유지된다고 가정할 수 있다. 따라서, 식(1)은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} d\bar{\epsilon} \approx C^* \quad (2)$$

여기서, C^* 는 $C/(\sigma^*/\bar{\sigma})$ 이다. 식(2)에 근거하여 본 전단 공정 해석 문제에서는 유효 변형률이 일정값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정한다.

다이와 펀치 사이의 틈새가 판재 두께의 10%(이후의 %에 관한 수치는 특별한 언급이 없는 한 판재의 두께에 대한 비율을 나타낸다.)일 때 파괴 기준 유효 변형률 값을 2.0과 3.5로 하여 가상 실험을 진행하여 보았다. 파괴 기준 유효 변형률이 3.5인 경우는 전체 스트로크가 90%에 도달했을 때 완전 파단이 일어난 반면 2.0인 경우에는 전체 스트로크가 57.4%일 때 완전 파단이 일어났다. 이 결과 그림 3에서 볼 수 있듯이 전자의 경우는 파괴면이 약 25% 정도이고 후자는 68.7%에 이르러, 대체적인 형상구분인 표 3[10]을 참조하면 파괴 기준 변형률 값이 2.0인 경우가 전단의 대체적인 경향과 비교하여 보다 적합하다고 여겨져 이 값을 파괴기준으로 정하여 다이와 펀치의 틈새

가 2%, 20%인 경우에도 가상 실험을 수행, 관찰하여 보았다. 즉 변형률이 2.0에 도달했을 때 파괴가 일어난다고 가정한다. 이 값은 실험적으로 구한 것이 아니지만, 이러한 기준으로 전단 공정을 근사하게 보여줄 수 있다면 그 의미는 있다고 볼 수 있다.

2.3. 요소 제거 기법과 요소망 재구성

어떤 특정 요소의 유효 변형률 값이 파괴 기준에 일치하면 수치 해석적으로 이 요소를 제거함으로써 전단 공정의 파괴 현상을 진행시켜 나갔다. 이는 물리적으로 특별한 의미를 갖지는 않으며 파괴 현상을 수치 해석적으로 구현하는데 있어 가장 간편하기 때문에 이러한 방법을 선택하였다. 제거되는 요소의 크기는 10마이크로미터 정도로 매우 작아 전체 해에 미치는 영향은 거의 없다고 할 수 있으며, 오히려 응력 집중 현상을 가속화하여 파괴 현상을 효과적으로 구현하는데 촉진제 역할을 한다고 볼 수 있다.

요소 제거 기법의 전체적인 과정은 표 3와 같다. 즉 한 스텝이 진행되었을 경우 데이터 베이스에서 유효 변형률값을 추출하여 해당 기준을 초과하는 요소를 선정한 뒤 이 요소는 파괴(fracture)가 일어난 것으로 간주하여 제거하고 다시 제거 후의 기하학적인 형상(geometry)을 그려낸 뒤 여기서 다시 요소망을 재구성하여 가상 실험을 진행하였다. 여기서 요소망은 네거티브 자코비안(negative Jacobian)이 발생하지 않도록 온도, 변형률 그리고 변형률 속도 등에 가중치를 변화시키면서 재구성하였고, 관찰하고자 하는 부위에 집중적으로 요소망이 모이도록 하였다.

2.4. 요소 제거 수행시 나타난 문제점들의 해결

요소 제거 기법을 사용하여 가상실험을 수행하던 중 몇가지 문제점이 발견되어 다음과 같은 방법으로 조처 시행하였다.

첫 번째, 그림 4의 빗금친 부분에서 볼 수 있는 바와 같이 제거한 요소가 제거되지 않은 요소에서 둘러 쌓인 경우가 상당히 자주 발생하였다. 이 경우 요소망 재구성시 문제가 발생하여 좌측 또는 우측의 요소의 변형률 값을 추출한 뒤 큰 쪽을 택하여 제거하여 파단면이 연결되도록 하였다. 즉, 이 때의 제거되는 요소의 유효 변형률 값들은 대략 파괴 기준에 가까워 근사적으로 제거하였다. 두 번째, 그림 5의 빗금 친 부분에서 볼 수 있듯이 요소가 절점(node) 한 개로 연결되어 튀어 나온 경우 이 때에는 요소망 재구성시 역시 에러가 발생하여 결과와 크게 영향을 미치지 않는다는 판단하에 제거하였다. 세 번째, 그림 6에서 보여지는 바와 같이 분리된 좌,우 요소망이 접혀서 나타나는 경우가 있는데 이는 해석 프로그램에서 자체 접촉은 고려하지 않는데 기인한다. 하지만, 이미 파단이 일어난 면이 서로 간섭하는 정도가 얇고 전체 변형 양상에 미치는 영향이 미미하다고 가정하면, 가상 실험을 계속 진행하는데 큰 무리가 없다고 본다.

3. 유한 요소 해석의 결과

3.1. 파괴 경향

그림 7에 전단면의 형상을 도시하였다. 전단면은, 펀치가 파고 들어갈 때에 표면층의 인장에 의하여 높이가 낮아지고 압하가 되어 나타난, 굽힘에 의한 자유 표면의 부분인 롤오버(rollover), 공구측면으로 가공되어 광택이 있고 깨끗한 부분인 버니쉬(burnish), 균열이 생겨 파단되어 결정입면이 나타나 표면이 거친 파단면(fracture, break), 공구 끝의 형상으로 인하여 또는 연성 재료의 특성상 발생하는 버(burr)로 구성된다[10]. 다음 절에서 롤오버, 버니쉬, 파단면, 버 영역에 대한 대체적인 경향을 유한 요소 해석 결과를 바탕으로 기술한다.

3.2. 수치 해석 결과

전단에 대한 수치 해석은 다이와 펀치와의 틈새를 각각 판재 두께의 2%, 10% 그리고 20%하여 수행하였다. 각 전단 공정 조건은 앞에서 서술한 바와 같다. 이 때 최초의 파단은 틈새 2%, 10%, 20%인 경우 스트로크가 각각 21.4%, 22.4% 그리고 35.7%일 때 발생하여, 완전 파단은 각각 49.7%, 57.4%, 62.9%에서 이루어 졌다. 전단가공시 대체적인 파단면 형상 구분은 표 4[10]에서 나타내었고, 본 논문에서의 수치해석결과는 표 5에서 나타내었다. 이에 대한 비교는 다이와 펀치와의 틈새가 10%, 20%인 경우는 버니쉬(burnish)와 파단(fracture)의 구분비가 대체적으로 비슷하였으나, 틈새가 2%인 경우는 상당히 차이가 남을 알 수 있다. 이의 이유는 틈새가 작을 때는 재료의 아랫부분이 튀어나와 펀치에 의해 재차 깎이는 롤오버-버니쉬-파단-버니쉬-파단-버의 순서로 2차전단[11]이 일어나지만 본 해석에서는 이를 예측하지 못한 까닭이다. 한편 파괴각도(fracture angle)를 살펴보면 2%인 경우 거의 각도가 나타나지 않았으며, 10%인 경우 약 12° 이고 20%인 경우는 약 20° 정도로 나타나 각각의 경우 전체의 경향과 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있다.(표 4, 5 참조) 그림 8에서 다이와 펀치의 틈새별로 요소망의 구성 모습을 나타내었다. 유한 요소 해석 코드인 DEFORM에서는 관성효과가 없으므로 전체 파괴면의 진행 발달은 대칭으로 나타나야 하지만, 해석 결과에서는 완벽한 대칭 형상은 나타나지 않았다. 이는 수치 해석상의 문제로 요소망의 대칭적 구성의 불가능, 요소망 구성 방법의 한계성 등에 기인한다. 그림 9는 유효 변형률값의 분포를 나타내며, 이 그림에서 파괴는 유효 변형률이 집중된 부위를 따라서 성장 파괴됨을 알 수 있다. 즉 전단 밴드를 따라서 형성하고 발달하는 것이다. 그림 10은 유효 응력(effective stress)을 틈새별로 나타내었으며 이 때 미약하지만 온도 상승에 의해 응력이 주위 부분보다 감소하는 열적 연화(thermal softening)현상을 관찰할 수 있었다. 그림 11은 유효 변형률 속도(effective strain rate)를 나타내는데 각각의 경우 역시 유효 변형률 속도 방향으로 파괴가 진행됨을 확인할 수 있다. 그림 12는 온도의 분포를 보여주며 각각의 경우 최고 온도의 값이 267°C , 228°C 그리고 227°C 로서, 틈새가 클수록 온도가 낮아지는 경향을 보였다. 그림 13은 힘-스트로크 곡선을 나타낸 것인데 파단이 진행될 수록 점점 전단력이 줄어들음을 관찰할 수가 있다. 즉 볼록한 형태로 곡선이 나타난다. 특히 각각의 경우 파괴가 시작되면서 급속히 전단력이 감소하는데, 변형이 집중된 전단 밴드에서의 온도 상승에 의한 재료의 열적 연화와 파괴에 의

한 변형 영역의 감소에 그 원인이 있다고 볼 수 있다.

4. 결론과 향후 과제

본 논문에서는 유한 요소 해석을 이용한 2차원 가상 실험 수행시 파괴 단면을 예측할 수 있도록 요소 제거 기법을 이용하여 수치 해석을 수행하였다. 그 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 변형이 집중되는 부분에서 전단밴드가 형성 발달함을 관찰할 수 있었다. 여기서 파괴기준을 유효 변형률로 정한 바 파단은 전단밴드를 따라 형성 발달함을 관찰할 수 있었다.
2. 파괴 기준 유효 변형률을 2로 선택하였을 때, 그 값이 3.5일 때보다 전체적인 경향과 보다 부합하는 결과를 얻을 수 있었다. 물론, 이것은 실험적으로 뒷받침이 되지 않았기 때문에 수치 해석시 사용할 수 있는 적절한 값으로 수렴하는 정도로 그쳐야 할 것이다.
3. 응력 분포에 있어서 미약하나마 열적 연화 현상이 일어남을 관찰할 수 있었다.
4. 전단 밴드의 폭이 대략 50 마이크로미터안팎으로 형성됨을 관찰할 수가 있었다.

그리고 본 연구에서는 앞서 밝힌 바와 같이 틱새가 작을 경우 일어나는 2차 전단현상을 예측하지 못하였다. 이는 분리된 재료의 기하학적인 형상을 다시 추출하여 요소망을 재구성, 계속적으로 전단을 해나가면 충분히 예측할 수 있을 것이다. 그리고 같은 재료를 사용하고 실험과 병행하여 파괴면 구분에 대한 데이터를 얻어 유한요소해석 결과와 비교한다면, 파괴기준 유효 변형률값을 보다 실제와 가까운 값을 얻을 수 있을 것이고, 보다 정확한 유한요소해석 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 보다 정밀한 해석은 다음의 과제로 남겨둔다.

또 전단 가공은 일반적으로 대량생산에 의해서 이루어지는 것이 보통이기 때문에, 위의 결과를 이용하여 대량생산에서 중요한, 버(burr)가 없는 전단면 가공 등 정밀 전단면 가공에 수치해석적인 접근이 가능할 것이다.

5. 참고 문헌

1. S.P.Timothy, "The Structure of Adiabatic Shear Band in Metals : Critical Review", Acta Metall., Vol.35, No.2, pp.301-306(1987)
2. H. C. Rogers, "Adiabatic Plastic Deformation", Ann.Rev.Mater.Sci., Vol.9, pp.283-311(1979)
3. R.C.Batra and D.S. Liu, "Adiabatic Shear Banding in Plane Strain Problems", Trans.ASME.J.Appl.Mech., Vol.56, pp.527-534(1989)
4. K.A.Hartley, J.Duffy and R.H.Hawley, "Measurement of the Temperature Profile during Shear Band Formation in Steels

- Deformation at High Strain Rates", J.Mech.phys.solids., Vol35., No3., pp.283-301(1987)
5. A.Marchand and J.Duffy, "An Experimental Study of the Formation Process of Adiabatic Shear Bands in Structure Steel.", J.Mech.Phys.Solids, Vol.36, No.3, pp.251-534(1989)
 6. A.Needleman, "Dynamic Shear Band Development in Plane Strain", Trans.ASME.J.Appl.Mech., Vol.56, pp.527-534(1989)
 7. T.W.Wright and J.W.Walter, "On Stress Collapse in Adiabatic Shear Bands", J.Mech.Phys.Solids, Vol.35, No.6, pp.701-720 (1987)
 8. 유요한, 정동택, "단열 전단 밴드의 유한 요소 해석", 대한기계학회 논문집 제16권 제8호, pp.1519-1529(1992)
 9. S.Kobayashi, S.I.Oh and T.Altan, "Metal Forming and the Finite-Element Method", Oxford University Press(1989)
 10. Metals Handbook, 9th edition, Volume 14 Forming and Forging, ASM International(1988)
 11. 김 동 원, "기계 공작법", 청문각(1991)
 12. S.I.Oh, et.al., "Capabilities and Applications of FEM code DEFORM : Perspective of the Developer", J.Mat.Proc.Tech.,1991
 13. Oh, S. I., Chen, C. C., and Kobayashi, S., "Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing, Part 2: Workability in Extrusion and Drawing", Trans.AMSE, J.Engr.Ind., Vol.101, pp.36-(1979)
 14. McClintock, F.A., "A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes", ASME Journal of Applied Mechanics, pp.363-(1968)
 15. Cockroft, M.G., and Latham, D.J., "A Simple Criterion of Fracture for Ductile Metals", National Engineering Laboratory, Report No. 240, July 1966

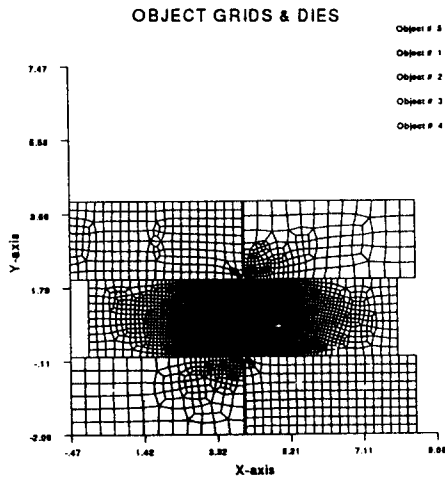


그림 1. 전단을 위한 유한 요소 해석에서의 초기 세팅

Workpiece material : AISI 4340		
Flow stress	$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$ [Figure 2]	
Thermal conductivity	33.49 N/msec ² C	
Heat capacity	3.938816 J/mm ³ C	
Process definition : - Incremental - Non-isothermal - Plane-strain		
Irradiation controls : Newton-Raphson		
Velocity convergence error limit	0.05	
Force convergence error limit	0.001	
Process condition		
Error limits in geometry handling	Relative error limit in tangential direction	0.1×10^{-6}
	Relative error limit in normal direction	0.1×10^{-3}
Interface penalty constant	0.1×10^{11}	

표 1. process conditons for FEM analysis 1.

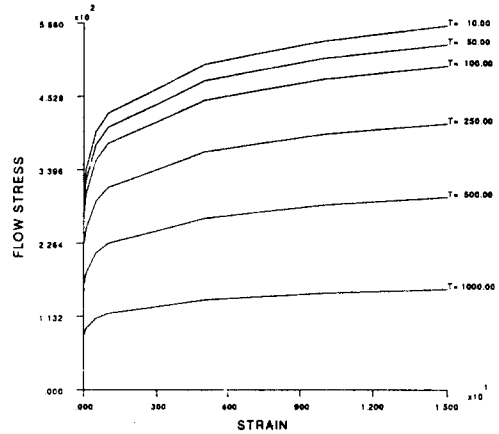
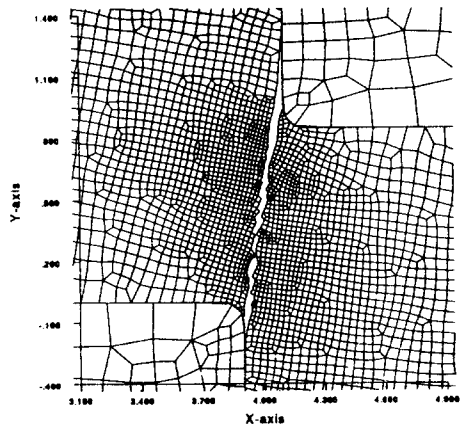


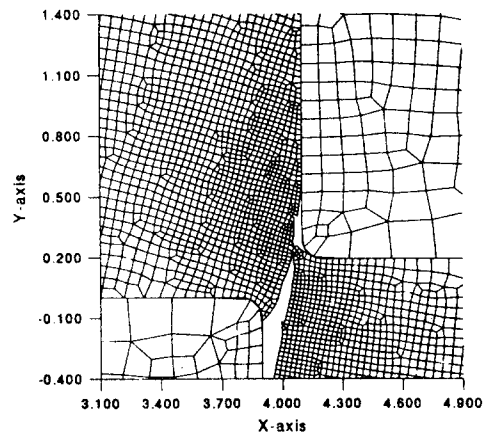
그림 2. 변형률 속도가 200,000일 때 변형률, 온도에 따른 유동 응력(flow stress)

Move control			
Punch speed	20 m/sec		
Angle	-97°		
Object 5 (Workpiece) characteristics			
Clearance	2%	10%	20%
Average strain rate	500,000	100,000	50,000
Limiting strain rate	5,000	1,000	500
Penalty constant to enforce the volume constancy	1	10	10
Inter object data			
Friction coefficient	0.1		
Interface heat transfer coefficient	0		
Simulation controls			
Maximum allowable strains increment of the punch per time step	0.01		
Total step size	200		
Total mesh number	About 4000		

표 2. process conditons for FEM analysis 2.



(a) 파괴 기준 변형률값이 2인 경우



(b) 파괴 기준 변형률 값이 3.5인 경우

그림 3. 다이와 펀치의 공차가 10%인 경우 파괴 기준 변형률 값에 따른 최종 형상

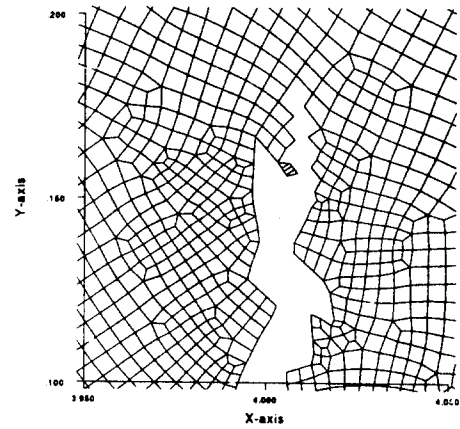
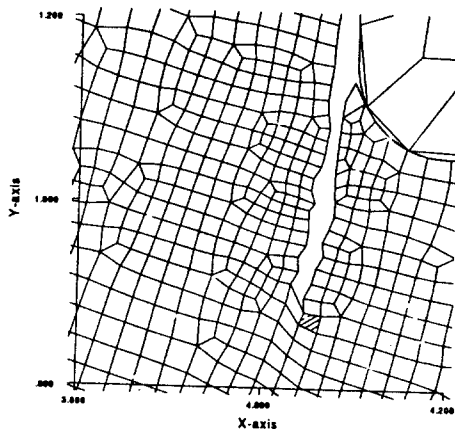


그림 4. 제거된 요소가 주위의 요소들에 둘러 쌓인 경우 그림 5. 제거된 요소가 주위의 요소와 결점 1개로 연결된 경우

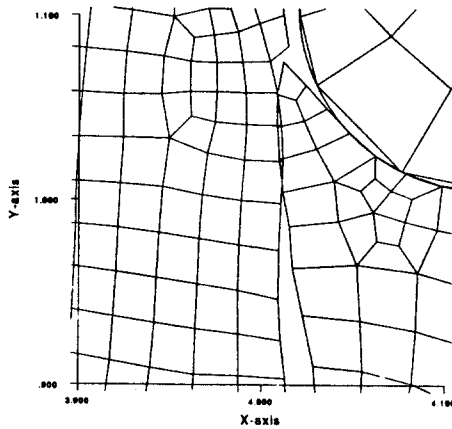


그림 6. 분리된 요소망이 서로 접힌 경우

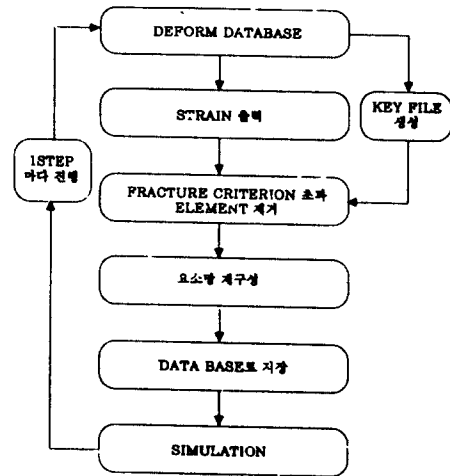


표 3. 파괴기준 변형률값 초과 요소 제거 작업 순서

clearance	17-21%	8-10%	1-2%
fracture angle	14-16	7-11	—
rollover	10-20%	6-8%	2-5%
burnish	10-20%	25-40%	50-70%
fracture	70-80%	50-60%	25-45%

표 4. 전단 가공에 있어서 공차에 따른 일반적인 파단면 영역 구분

	공차가 2%인 경우	공차가 10%인 경우	공차가 20%인 경우
rollover	9.3%	14.0%	21.5%
burnish	15.3%	16.7%	17.3%
fracture	75.3%	69.7%	61.3%
fracture angle	—	12°	20°

표 5. 유한요소 해석에서 나타난 공차에 따른 파단면 영역 구분

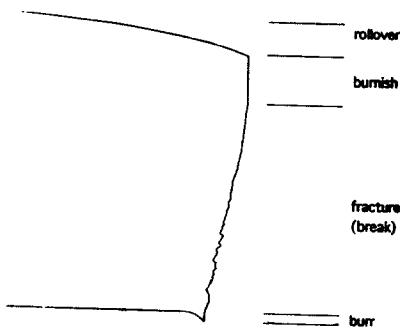
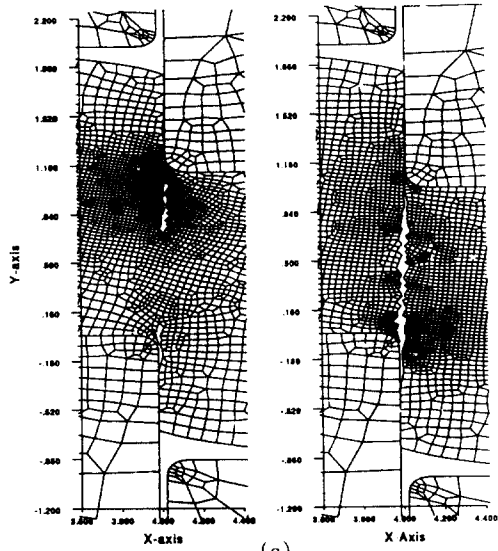
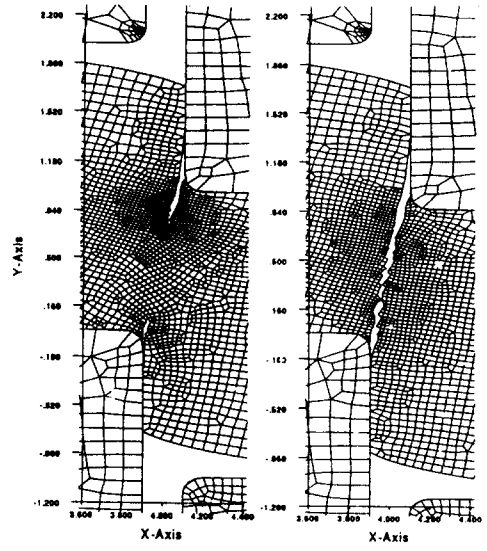


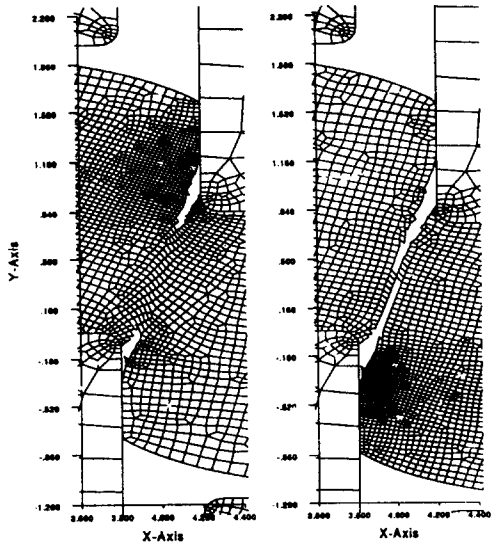
그림 7. 전단 가공후 나타난 형상의 구분



(a)



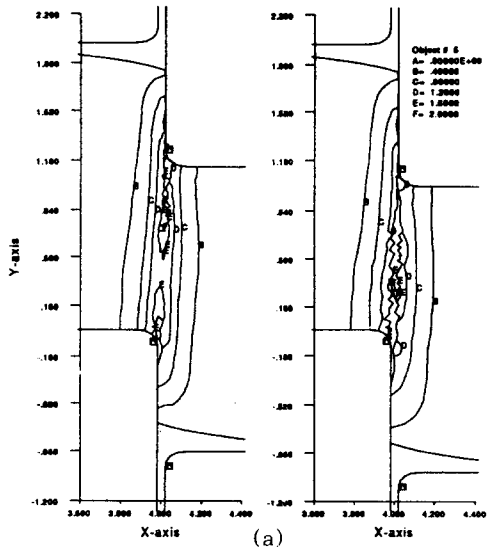
(b)



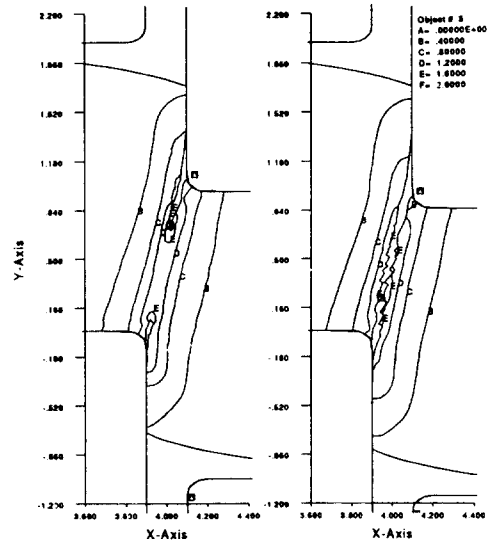
(c)

그림 8. 요소 제거 방법을 이용하여 가상 실험한 공차에 따른 스텝별 요소망 구성

- (a) 공차가 2%인 경우
- (b) 공차가 10%인 경우
- (c) 공차가 20%인 경우



(a)



(b)

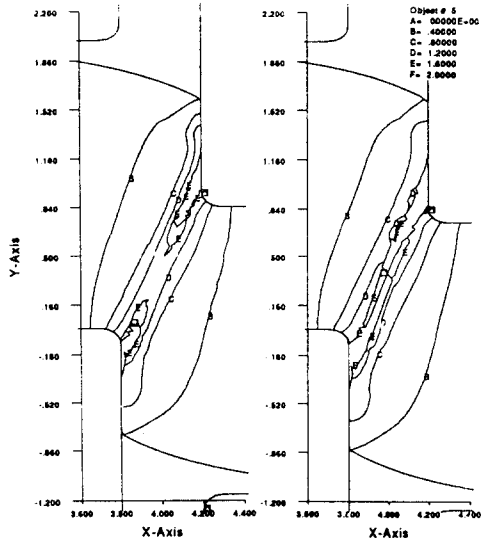
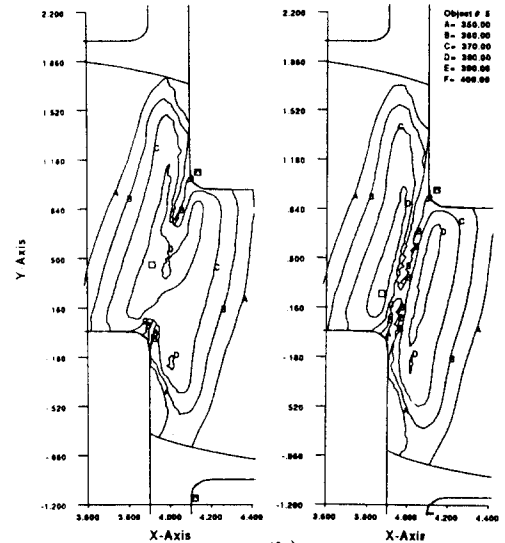
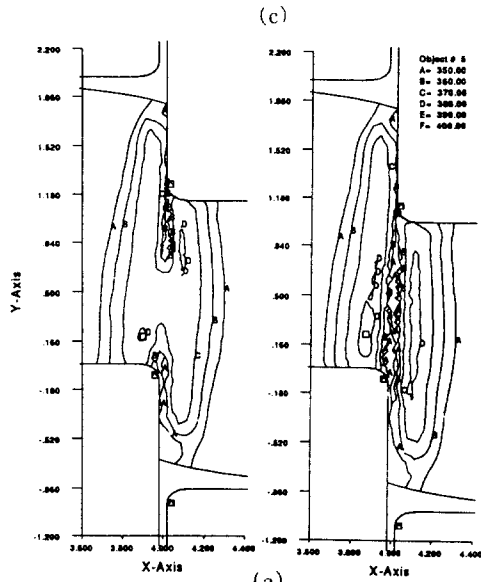


그림 9. 파단 직전에 있어서의 유효 변형률 등고선

- (a) 공차가 2%인 경우
- (b) 공차가 10%인 경우
- (c) 공차가 20%인 경우



(c)

(a)

(b)

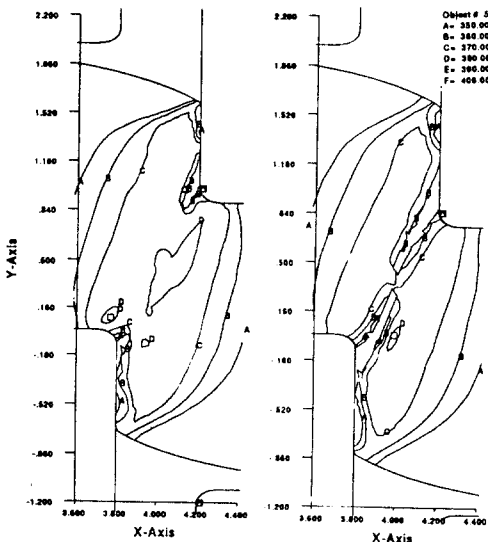


그림 10. 파단 직전에 있어서의 유효 응력 등고선

- (a) 공차가 2%인 경우
- (b) 공차가 10%인 경우
- (c) 공차가 20%인 경우

(c)

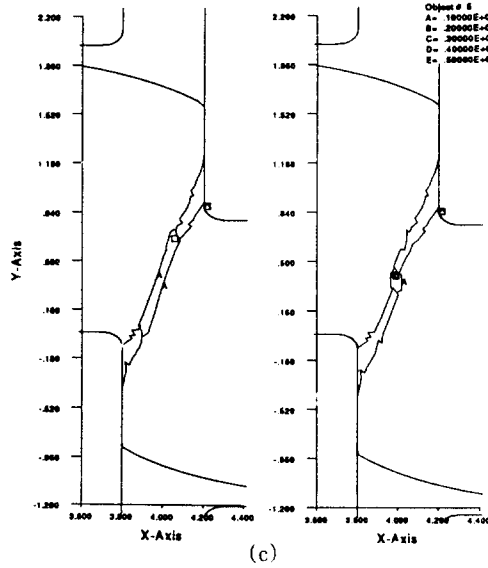
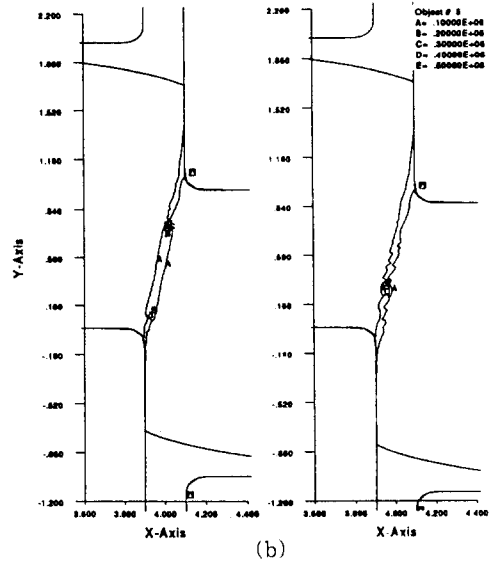
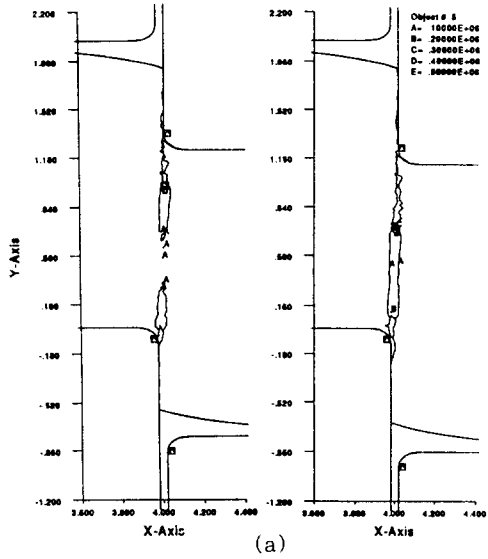
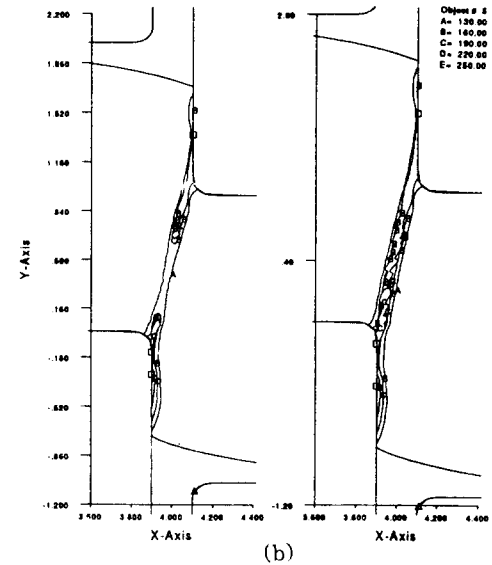
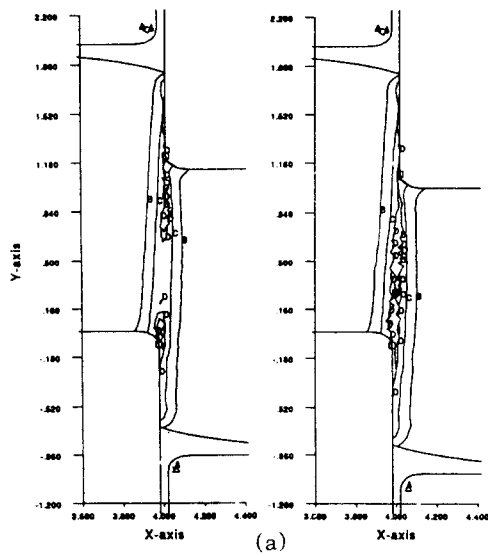


그림 11. 파단 직전에 있어서의 유효 변형률 속도 등고선

(a) 공차가 2%인 경우

(b) 공차가 10%인 경우

(c) 공차가 20%인 경우



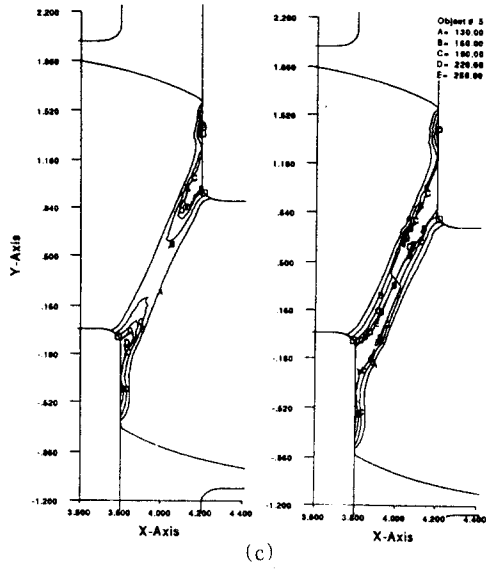


그림 12. 파단 직전에 있어서의 온도 등고선

(a) 공차가 2%인 경우

(b) 공차가 10%인 경우

(c) 공차가 20%인 경우

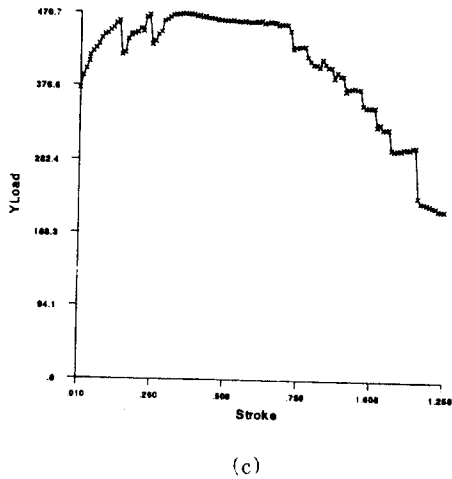
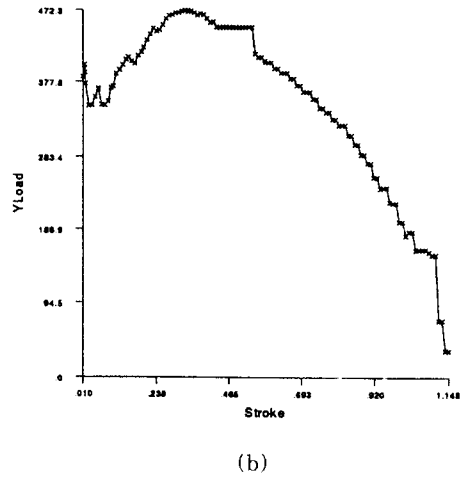
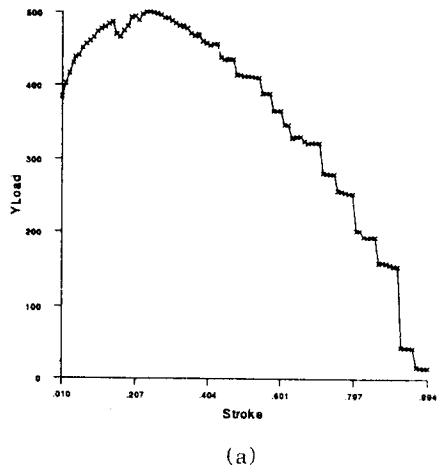


그림 13. 파단 직전까지의 힘-스트로크 곡선

(a) 공차가 2%인 경우

(b) 공차가 10%인 경우

(c) 공차가 20%인 경우