

## 결함을 고려한 결정 재료의 밀리 성형에 관한 연구

김용일\* · 심경섭\* · 이용신\*\*

### A Study on the Milli-Forming of Crystalline Materials with Damage

Y.I. Kim, K.S. Sim, and Y.S. Lee

#### Abstract

Finite element analysis model is suggested for analysis of milli-forming process, which forms milli-size products. Since the size of workpiece in a milli-forming process ranges from a few hundred micrometers to a few millimeters, microstructural changes such as the growth of micro-voids and the development of preferred orientation in a grain become crucial factors for the success of milli-forming. This analysis model incorporates anisotropy from deformation texture and deterioration of mechanical properties due to the growth of micro-voids. Applications of the proposed modeling to milli-forming are given and the results are carefully examined to understand the deformation characteristics such as texture development and damage evolution during extrusion/drawing of a milli-bar.

**Key Words** : Crystal Plasticity, Damage, Finite Element Method, Milli-Forming

#### 1. 서 론

최근의 전자제품, 통신제품 및 정밀의료 부품 산업은 더욱 더 초소형화, 초정밀화 되며 발전하고 있다. 이러한 제품들은 마이크로 혹은 나노 미터 단위의 크기를 가지며 MEMS 기술이나 NEMS 기술에 의해 생산되고 있다. 마이크로 혹은 나노 부품들의 조립품이나 케이스 등은 밀리 단위의 크기를 이룬다. 본 연구에서는 이러한 수백  $\mu\text{m}$ 에서 수  $\text{mm}$ 에 이르는 밀리 단위의 미세 부품들을 밀리 부품이라 칭한다. (Fig. 1 참조) MEMS 기술이나 NEMS 기술에 대해서는 많은 연구가 수행되어지고 있지만 밀리 부품의 생산에 대해서는 연구가 많이 이루어지지 않은

실정이다. 최근 이러한 밀리 부품을 경제적으로 생산할 수 있는 밀리 성형에 대한 연구가 새롭게 높은 관심을 끌고 있다. 밀리 성형 공정에 대한 기본 개념과 기술은 기존의 통상적인 연속체 크기의 성형 방법과 유사하다. 전형적인 금속 결정은 크기가 수  $\mu\text{m}$ 에서 수  $\text{mm}$ 에 이르므로 밀리 부품의 성형 특성에 중요한 영향을 미친다. 따라서 밀리 성형 공정의 모델링에서는 소성 가공 중에 발생하는 미세 구조의 변화를 반영하는 해석 기법이 추가적으로 필요하다. 성형 해석 모델은 결정립과 밀리 부품의 상대적인 크기에 따라 세 가지로 분류된다. 첫 번째는 전형적인 다결정 해석 모델이며 두 번째는 하나의 결정립만으로 이루어진 단결정 모델이다. 마지막으로 세

\* 국민대학교 기계설계 대학원

\*\* 국민대학교 기계·자동차 공학부

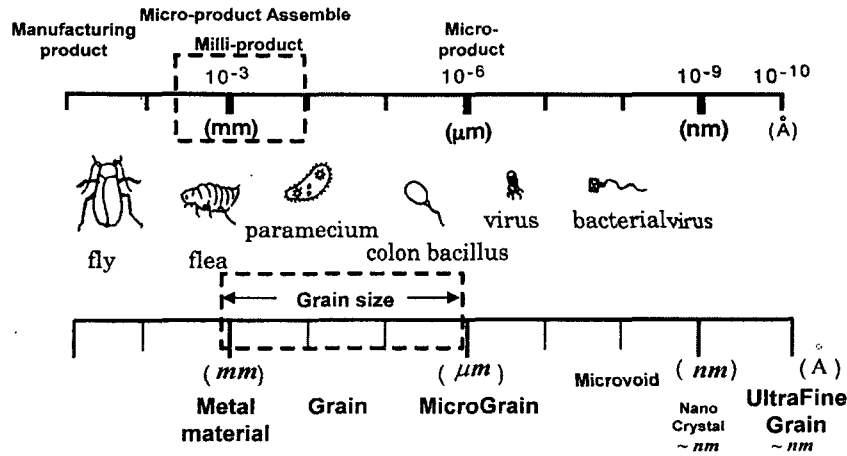


Fig. 1 Length Scale

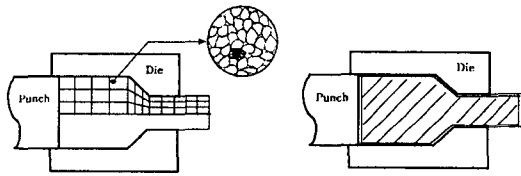


Fig. 2a Polycrystal analysis

Fig. 2b Single crystal analysis

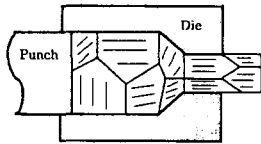


Fig. 2c Mezzoscopic analysis

번째는 몇 개의 결정립만이 존재하는 메조스코픽 (mezzoscopic) 모델이다. (Fig. 2 참조) 다결정 해석 모델은 Fig. 2a와 같이 크기가 매우 작은 결정립들-예를 들면 1 μm정도-로 이루어진 반경 2.5 mm의 밀리 봉의 경우이며, 이와 동일한 반경의 밀리 봉의 내부에 결정립의 크기가 약 1 mm인 경우 실제 결정립의 크기가 고려되어야 하므로 Fig. 2c와 같은 메조스코픽 해석 모델이 이용된다.

밀리 부품을 생산하는 밀리 성형 가공에서는 결정립의 크기 외에도 우선방위에 따라 성형 특성이 달라지게 되고, 결정립 경계나 내부에 존재하는 미세기공의 성장에 따라 기계적 성질의 열성화가 성형의 성공 여부를 좌우하는 중요한 요인으로 대두하게 된다. 본 연구에서는 다

양한 구조의 밀리 부품 소성가공을 결정소성학과 미세결합의 성장을 반영하여 해석하는 기술을 개발하고자 한다. 또한 제시된 해석 모델의 미세 인발/압출과 같은 밀리 성형 공정에서의 적용 예를 보여주고, 결정립 우선 방위와 미세결합 성장과 같은 변형 특성을 조사한다.

## 2. 이론

### 2.1 결합성장

본 연구에서 연성결합으로 정의되는 미세기공의 성장을 반영하는 기공률 발전식  $\dot{\phi}$ 는 Lee와 Dawson이 제안한 기공률 성장모델이 이용되었으며 유효변형률 속도, 기공률 그리고, 정수압 응력 ( $\sigma_m$ )을 변형경화를 모사하는 하드니스 ( $\sigma^*$ )로 나눈 비의 함수로서 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\dot{\phi} = C_1 \frac{\phi}{1-\phi} \text{Exp}(C_2 \frac{\sigma_m}{\sigma^*}) d_e \quad (1)$$

여기서, C1과 C2는 재료 고유의 상수이며, 상세한 설명은 참고문헌 (6)에 나타나 있다. 기공률의 성장은 정수압응력 자체보다는 소재의 소성변형에 대한 저항을 나타내는 하드니스와의 비에 지수함수로 비례하는 것으로 표현하여 소성유동이 작은 변형에서도 기공률의 성장을 정확히 예측할 수 있는 것이 특징이다.

## 2.2 결정소성학

금속내부의 슬립은 슬립면상에서 슬립방향으로 전단 변형을 일으키며, 여러 개의 작용 슬립시스템에 일어나고 있는 전단변형의 조합으로 외부의 거시적 소성변형이 나타난다.

슬립시스템의 구성방정식에 결정립의 변형률속도와 슬립시스템상의 전단변형과의 관계식과 결정립에 미치는 응력과 슬립시스템상의 전단 응력의 관계식을 적용하면 단결정에 대한 응력( $\sigma^{(a)}$ )와 변형률속도( $\dot{d}^{(a)}$ )의 관계식을 구할 수 있다.

$$\dot{d}^{(a)} = \left\{ \sum_{a=1}^N \frac{\dot{\alpha}^{(a)}}{\hat{\tau}^{(a)}} \left| \frac{\tau^{(a)}}{\hat{\tau}^{(a)}} \right|^{(1/m)-1} \right. \\ \left. P^{(a)} \otimes P^{(a)} \right\} \sigma^{(a)} \quad (2)$$

윗 식에서  $\dot{\alpha}^{(a)}$ ,  $\hat{\tau}^{(a)}$ 는 재료 상수이며,  $\tau^{(a)}$ 는 분해전단응력이다. 결정립 집합체의 거시적 소성변형은 각 결정립들의 미시적 점소성 변형의 중첩으로 나타난다. 본 연구에서는 Taylor가 제시한 바와 같이 각 결정립의 변형률속도텐서( $\dot{d}^{(a)}$ )는 다결정집합체의 변형률속도텐서( $\dot{d}$ )와 같은 것을 가정하여 결정립 집합체의 응력과 변형률 속도의 관계식을 구한다.

## 2.3 유한요소해석

집합조직의 발전과 결합성장을 고려한 정상상태 성형공정의 오일러리안 유한요소 해석을 위해서는 선형운동량 보존식 외에도 질량보존식을 고려해야한다. 가상일률의 정리를 적용하여 선형운동량 보존식을 유한요소 이산화하고, 소재의 체적변화는 단지 미세기공의 성장에 의한 것으로 가정한 질량 보존식을 압력으로 벌칙화하여 유한요소 이산화한 후에 절점에서의 속도  $\{U\}$ 에 대한 식으로 정리하면 다음의 유한요소 정식을 얻는다.

$$[[K_\mu] + [K_\lambda]]\{U\} = \{F_t\} \quad (3)$$

위와 같이 각 요소에서 구한 유한요소 정식은 전영역에 걸쳐 중첩되고 표면력 벡터, 속도 등의 경계조건을 적용시켜 반복법에 의해 비선형 해를 구하게 된다.

## 3. 응용

### 3.1 다결정 봉재의 인발/압출

다결정론과 결합 해석을 복합한 유한요소 해석을 시도하였다. 즉 결정립의 크기가 작아 반경방향으로 수백개의 결정립이 있는 경우이다. 반경 2.5mm 인 밀리봉을 다이 반각은 20°, 단면적감소는 51%가 되도록 똑같은 공정조건을 갖는 인발/압출 공정을 해석하였다. Fig. 3 에서는 성형된 봉재의 중심부와 표면에서의 집합조직과 축적된 결합을 비교하였다. 예측한 바와 같이 인발의 경우에는 [1 1 1] 방향이 소재의 축과 나란한 섬유상 집합조직이 주도적으로 나타나며, [0 0 1] 성분도 부수적으로 나타나고 있다. 표면에서는 전단 변형의 영향으로 [0 0 1] 성분이 흐트러짐을 알 수 있다. 또 인발공정에서는 인장 변형이 주도적으로 작용하여 결합도 압출공정에 비해 훨씬 크게 일어난다. 압출의 경우에는 인발과 같은 면적의 감소에도 불구하고 집합조직의 발달이 상대적으로 작으며, 그 양상도 인발의 경우와 다르게 압축이 주도적인 변형으로 결합의 성장이 훨씬 작게 나타났다.

	Extrusion	Drawing
Load(N)	2909.64	1344.48
Average damage rate of outlet	1.0012	1.1521
Maximum damage rate of outlet	1.0011	1.4483

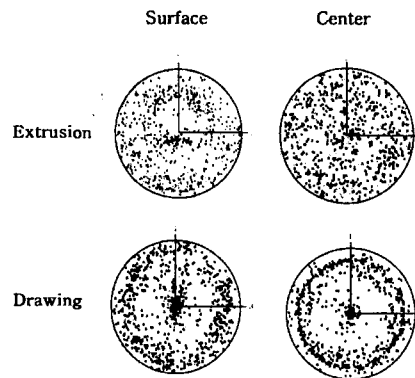


Fig. 3 Extrusion/Drawing of polycrystal milli-bar

### 3.2. 단결정 봉재의 압출

단결정으로 이루어진 알루미늄 밀리봉재의 압출공정을 시뮬레이션 하였다. 전질의 경우와 같이 미세봉의 반경은 2.5mm로 하였으며, 20°의 다이 반각 그리고 36%의 단면적 감소율의 범위에서 미세압출성형의 변형특성을 조사하였다. Case A와 B의 초기 극점도에서 소재의 [1 1 1] 방향이 압출방향과 일치하는 경우(Case A)와 압출방향과 15° 경사진 경우(Case B)를 시뮬레이션 하였다. Fig. 4에서는 미세압출에서의 Case A와 Case B의 결과를 비교하여 보여주고 있다. Case A의 경우, 표면의 유선을 따라 [1 1 1]극의 방향 변화는 변형구역의 중간 부분에서 가장 큰 회전(약 다이 반각 정도)을 겪고 다시 압출 방향으로 되돌아 오는 것으로 예측하고 있다. 압출 방향과 일치하는 중심부의 유선을 따라서는 예상한 바와 같이 극의 방향이 변화가 없었다.

Case B의 경우에 표면과 중앙부의 유선을 따라 [1 1 1]극이 이동하는 경로는 초기에 압출방향과 15°의 경사를 갖는 소재의 [1 1 1]방향이 변형구역을 지난 후에는 압출방향과 평행하게 되는 것으로 예측되었다. 이와 같은 현상으로부터 단결정의 압출은 소재의 [1 1 1]방향이 압출방향에 평행하게 될 때에 안정방위를 갖도록 하는 특성을 지닌 것으로 판단된다.

시뮬레이션은 Case A가 가장 작은 압출하중을 필요로 하는 것으로 예측하고 있는데, 이는 [1 1 1] 방향이 슬립시스템들 중에서 원자의 움직임이 가장 쉬운 방향으로 단결정 소재의 [1 1 1]극이 압출방향과 일치할 때에 요구되는 압출하중이 가장 작기 때문인 것으로 생각된다. 결합의 성장은 Case B가 중심부를 따라서 훨씬 큰 결합성장을 나타내었다.

단결정 밀리봉의 압출성형에서 탄성변형을 무시하면 소재의 회전은 모든 점에서 같아지게 되어야 한다. 따라서 평형조건을 만족시키는 앞의 해석은 결정립 회전에 관한 단결정 기구학을 위반하게 된다. 초기의 우선방위를 유지하는 경우에는 앞의 경우와 비교하여 압출하중, 결합의 분포 및 크기의 변화가 미미한 것으로 나타났다. 따라서 밀리봉의 해석에서는 초기의 우선방위가 가장 중요한 인자이고, 변형중에 우선방위의 회전을 고려한 해석은 그렇지 않은 경우보다 결합의 성장을 약간 작게 하는 것으로 판단된다.

### 3.3. 메조스코픽 해석

반경방향으로 몇 개의 결정립이 존재하는 알루미늄 밀리 봉재의 압출공정 해석을 통하여, 원 소재의 초기방위와 결정립 크기의 영향을 조사하였다.

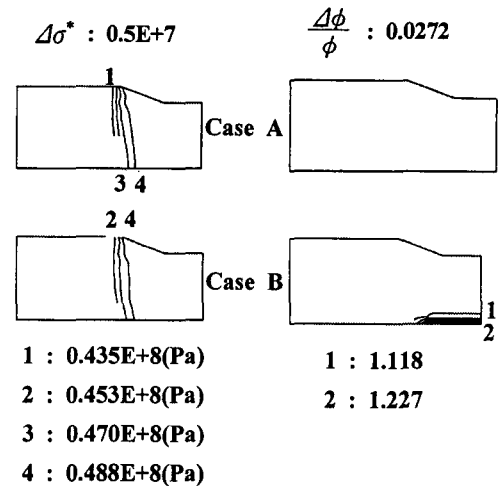


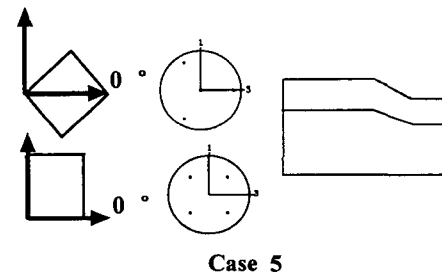
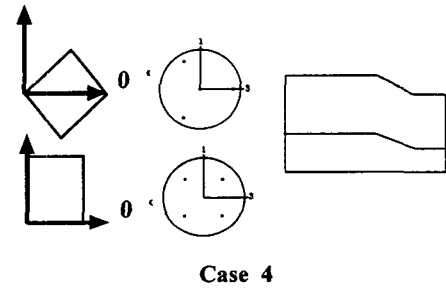
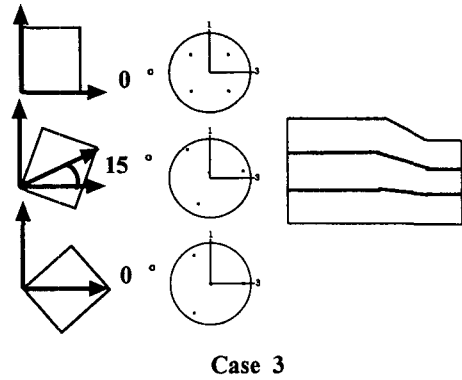
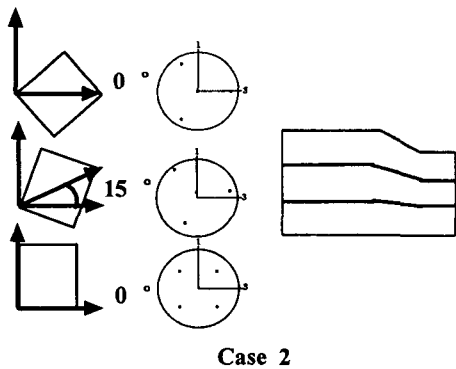
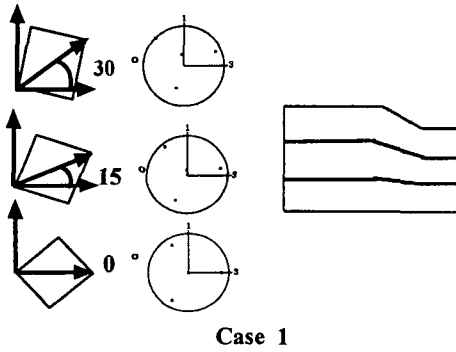
Fig. 4 Extrusion of a single crystal milli-bar

밀리봉의 반경은 2.5mm이며, 20°의 다이 반각, 36%의 단면적 감소율의 범위에서 변형 특성을 Fig. 5에서와 같이 여러 가지의 경우로 나누어 조사하였다. Case 1은 봉재의 중심에서는 결정립의 [1 1 1] 방향이 압출방향과 평행하지만 표면에 가까워질수록 가로축을 중심으로 압출방향과 각각 15°와 30° 경사진 경우이다. Case 2와 Case 3은 3개의 결정립층으로 나뉘어져 있는데, Case 2는 [1 0 0] 방향이 압출방향과 평행한 층이 중심부에 있으며, Case 3은 [1 1 1] 방향이 평행한 층이 중심부에 있는 경우를 나타내고 있다. 봉재의 중심 부분에서 [1 0 0] 방향이 압출방향과 평행한 결정립층이 얇고 표면의 [1 1 1]방향이 압출방향과 평행한 결정립층이 두꺼운 경우가 Case 4에 나타나 있으며, Case 4와 각각의 결정립층의 방향은 같으나 중심부분이 두꺼운 경우가 Case 5이다.

Fig. 6은 선택된 다섯 경우에 대한 변형경화 정도의 분포를 보여주고 있는데 초기의 방위와 결정립 크기가 다를 지라도 변형경화의 분포가 상당히 유사한 것을 예측하고 있다. 한편 다섯 경우의 결합 분포는 Fig. 7에 보여지는데, 초기의 방위에 따라 축적된 결합의 분포가 매우 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 전응력 성분은 결합성장에 직접 영향을 주는 인자로 응력의 분포가 다르다는 것을 의미한다. 이와 같은 경향은 여기에 보이지 않은 다른 경우에도 마찬가지로 나타나고 있었다. 초기 방위가 다른 소재의 밀리압출에서 변형률분포에는 크게 변화가 없으나, 응력의 분포는 큰 차이가 있음을 예측하고 있다. 이는 밀리 압출의 성형이 압출다이 내에서 소재

의 형태변화를 구속하고 있기 때문에 변형을 분포는 비슷하게 만들어지나, 소재 자체의 결정립 방위에 따라 전체 좌표계에서 응력-변형률 속도 관계식이 다르게 되어 좌표계에 대한 응력성분이 다르게 되는 것으로 분석되고 있다. 등방성 해석에서의 결함 성장과 비교하여 보면 결정립 방위에 따라 축적된 결함이 크게 되는 경우가 있어 공정설계에 결함예측이 반드시 고려되어야 할 것으로 분석된다.

결함성장이 이방성 발전에 미치는 영향을 조사하여 보면, 결함의 성장이 이방성의 발전에 미치는 영향은 미미한 것으로 분석되고 있다. 본 연구의 연성 결함 성장식이 등방성을 갖기 때문에 체적변화와 관계하는 전응력의 분포에는 영향을 주나, 결정립 방위 발전에 영향을 주는 전단변형에는 미미한 영향을 끼치는 것이 원인인 것으로 분석된다.



**Fig. 5 Definitions for the mezzoscopic analyses of 5 cases**

#### 4. 결론

밀리 부품의 입체성형공정을 해석하기 위하여 결정립 우선방위와 미세결합의 성장을 복합 반영하는 유한요소 정식화를 개발하고, 다결정 밀리봉의 인발/압출과 단결정 밀리봉의 압출, 메조스코픽 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다결정으로 이루어진 밀리봉의 인발/압출 공정에서는 통상의 거시적 인발/압출 공정에서의 특성을 그대로 유지한다. 즉 인발 공정에서는 인장이 주된 변형기구로 결합성장기 두텁하였고 [1 1 1] 방향이 소재의 축과 평행한 섬유상 집합조직이 발달하였으며 [0 0 1] 성분도 부수적으로 나타났으나, 압출 공정에서는 축방향 압축이 주된 변형기구로 결합성장기과 집합 조직의 발전이 미미하나 인발에 비해 상대적으로 큰 성형 하중을 요하였다.

(2) 단결정 밀리봉의 압출에서는 초기 소재의 [1 1 1] 방향과 압출 방향이 이루는 각도가 커질수록 압출 하중과 결합의 성장을 증가시키고, 초기 소재의 [1 1 1] 방향이 압출 방향과 평행할 경우에 압출 하중이 최소화되고 결합의 성장도 가장 작게 만드나 하드니스의 분포과 크기는 변화가 미미한 것으로 예측된다.

(3) 밀리봉의 메조스코픽 압출 해석에서는 결정립의 크기보다는 방향의 영향이 더 크게 예측되었으며, 평면 변형을 압축 집합조직의 방위([1 1 1] 방향)를 갖는 결정립이 재결정 집합조직의 방위([1 0 0] 방향)를 갖는 결정립보다 더 클 때 필요한 압출 하중이 큰 것으로 예측하고 있다. 또한 압출다이의 형상변화에 대한 구속으로 인하여 변형률분포는 초기 결정립 크기나 방위에 관계없이 비슷하여도 응력의 분포에는 크게 달라지고 따라서 결합성장에도 큰 영향을 주는 것으로 예측하고 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국생산기술연구원(밀리구조 생산기술 2단계 개발사업)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Taylor, G. I., 1938, "Plastic strain in metals", J. Inst. Metals., Vol. 62, pp. 307~324.
- (2) Kocks, U. F., 1958, Acta Metall., Vol. 6, pp. 85~94

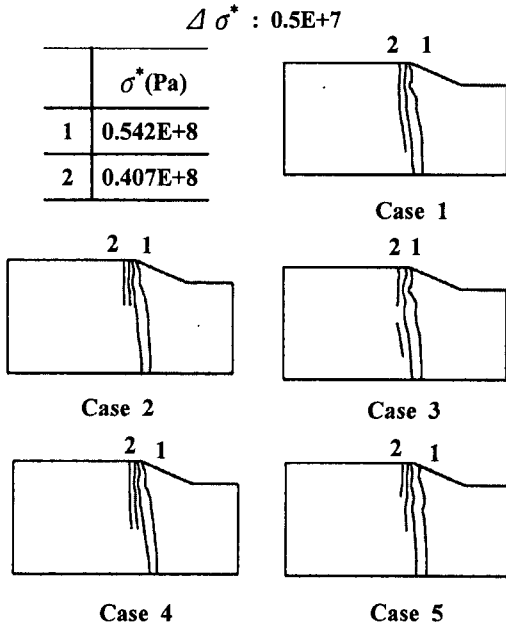


Fig. 6 Hardness distribution

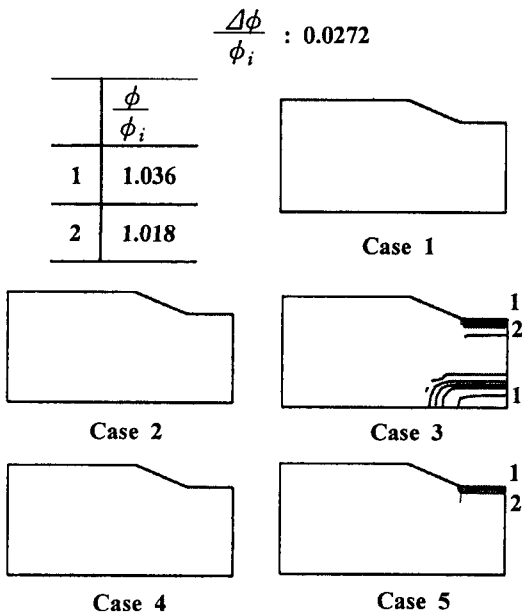


Fig. 7 Damage distribution

- (3) Mathur, K., Dawson, P. R., 1989, Int. J. Plast., Vol. 5, pp. 67~94.
- (4) Kim, E-Z and Lee. Y-S, 1996, Trans. of Materials Processing, Vol. 5, No. 4, pp. 297~304.
- (5) Asaro, R. J., 1983, "Crystal Plasticity", J. App. Mech., Vol. 50, pp. 921~934.
- (6) Lee. Y-S and Dawson, P. R., 1993, Mechanics of Materials, 15: 21~34
- (7) Kim. Y-I and Lee. Y-S, et. al., 2001, J. of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 70~74.