

## 금속성형공정에서 연성과파괴예측

고 대철\*, 이 진희\*, 김 병민\*\*, 최 재찬\*\*

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계설계공학과

## Prediction of Ductile Fracture in Metal Forming Processes

D. C. Ko\*, J. H. Lee\*, B. M. Kim\*\* and J. C. Choi\*\*

\* Graduate School, Pusan National Univ.

\*\* Dept. of Mechanical Design Engineering, Pusan National Univ.

### ABSTRACT

This paper suggests the scheme to simultaneously accomplish prediction of fracture initiation and analysis of deformation in metal forming processes. The Cockcroft-Latham criterion is used to estimate whether fracture occurs during the deformation process. The numerical predictions and experimental results of simple upsetting are compared. The proposed scheme has successfully predicted the fracture initiation found experimentally.

### 1. 서 론

체적(bulk) 소재를 이용한 대부분의 금속성형공정에서 가공성(formability)은 연성과파괴의 시작으로 제한된다. 따라서 파괴를 일으킬 수 있는 변형소재 내부의 상태를 예측하는 것은 중요하며, 이는 성형공정을 재조정하여 정상적이고 신뢰성있는 제품을 생산할 수 있게 한다.

연성과파괴예측을 위한 기준은 실제 산업현장에서 적용되는 공정과 유사한 실험을 근거로 제시되었다. McClintock 등[1]과 Oyane 등[2]은 파괴가 일어나는 과정을 기공생성 및 성장에 근거를 두고 연성과파괴기준을 제시하였으며, Cockcroft와 Latham[3]은 파괴시 소성변형을 경로에 대한 최대 주인장응력의 영향을 고려한 연성과파괴기준을 제시하였다.

이러한 연성과파괴기준은 금속성형문제의 연구를 위해 최근에 개발된 유한요소법과 결합하여 보다 자세한 예측을 가능하게 했다. Oh 등[4]은 Cockcroft-Latham 기준과 수정된 McClintock의 기준을 이용하여 축대칭 압출과 인발공정에서 감소성 유한요소법으로 파괴를 예측하였다. Frater 등[5]은 유한요소 해석결과를 이용한 부가적 프로그램을 개

발하여 Cockcroft-Latham 기준으로 업셋팅 공정의 가공성을 해석하고, Lee와 Kuhn[6]의 파괴기준과 비교하였다. 또한 Sowerby 등[7]은 강소성 유한요소법을 이용하여 강의 업셋팅에서 결합축척을 예측하기 위하여 McClintock의 기공성장 모델을 적용하였다.

본 연구에서는 다양한 하중조건에 적용될 수 있는 Cockcroft-Latham의 파괴기준과 결합된 강소성 유한요소 프로그램을 이용하여 금속성형공정에서 변형해석 및 연성 파괴 예측을 동시에 수행할 수 있는 해석기법을 제시하고자 한다. 수정된 프로그램의 유용성을 조사하기 위하여 상용 알루미늄의 업셋팅을 해석 및 실험하였다. 고려된 모든 기하학적 형상비에 대하여 예측된 연성 파괴의 시작과 파괴시 소재의 변형 상태는 실험과 상당히 일치된 결과를 보였다.

## 2. 이 론

### 2.1 변형해석

본 연구에서는 강소성 유한요소법을 사용하였으며, 이의 수식화는 이미 많은 문헌 [8,9]에 잘 알려져 있다.

비압축성 조건을 위한 벌칙함수(penalty function),  $K$ 를 도입하면, 강소성 재료에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta \pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\bar{\sigma}$ 는  $\bar{\sigma} = \left( \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \right)^{\frac{1}{2}}$  로 정의되는 유효응력,  $\bar{\epsilon}$ 는  $\bar{\epsilon} = \left( \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right)^{\frac{1}{2}}$  로 정의

되는 유효변형률속도,  $\sigma'_{ij}$ 는 편차응력,  $\bar{t}_i$ 는 마찰력,  $v_i$ 는 절점속도,  $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률속도,  $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적변형률속도이다.

위 식은 일반적인 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴우튼-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

### 2.2 연성 파괴 예측

압출, 압연, 업셋팅 등과 같은 공정조건에 적용될 수 있고, 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 Cockcroft-Latham의 연성 파괴기준을 이용하였다. 즉,

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C \quad (2)$$

여기서,  $\sigma^* = \sup (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$

$\sigma_i$  = 주응력 성분

$\bar{\epsilon}_f$  = 파괴시 변형률

C = Cockcroft-Latham 상수이다.

유한요소 해석에서 위 식(2)는 증분 개념으로 다음과 같이 근사화된다.

$$\sum_{i=1}^n (\sigma_e^* \delta \bar{\epsilon}_e)_i = C' \quad (3)$$

여기서, n = 스텝 수

$\sigma_e^*$  = 요소 내부 적분점에서의 최대 인장응력

$\delta \bar{\epsilon}_e = \bar{\epsilon}_i - \bar{\epsilon}_{i-1}$

위 식(3)은 각 요소의 적분점에 대하여 계산되고,  $\sigma_e^*$ 는 모든 압축응력에 대해서는 영의 값이다. Fig. 1에 변형해석 및 연성파괴예측을 위한 유한요소 프로그램의 흐름도를 나타내었다. 변형 경로(deformation path)의 각 스텝에서 계산된 절점속도와 시간증분으로 절점좌표가 변화(update)되고, 유효변형률은 변형 경로를 따라 적분된다. 변형 경로의 각 스텝에서 응력장과 변형률장은 파괴 여부의 판단을 위해 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준을 계산하는데 이용된다. 변형의 전 공정동안 이 값은 누적되고, 이와 같이 누적된 값이 단축 인장시험으로 구한 Cockcroft-Latham 상수, C의 값을 초과했을 때 연성파괴가 일어나는 것으로 고려한다.

### 3. 실험

#### 3.1 Cockcroft-Latham 상수의 결정

실험에 사용된 재료는 상용 알루미늄으로 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 재료의 응력-변형률 관계를 구하기 위해 10개의 KS B 0801 제4호 인장시험시편을 사용하였고, 이 때 Cockcroft-Latham 상수, C의 값은 시험시편의 네크 영역에서 발생하는 3축응력을 Bridgman방법[10]으로 보정하여 계산된다. 재료의 응력-변형률 관계 및 Cockcroft-Latham 상수, C의 값은 Table 2에 제시되어 있다.

#### 3.2 업셋팅

200톤 유압프레스를 이용하여 상용 알루미늄의 업셋팅 실험을 행하였다. 직경이 30mm인 원통시편으로 직경 대 높이비(H/D)가 각각 0.75, 1.0과 1.25인 경우에 대하여 10개씩의 시험시편을 준비하였다. 윤활제는 그리스와 흑연을 동일한 체적비로 혼합하여 사용하였으며, 동일한 재료의 링 압축실험결과 마찰상수, m은 약 0.15였다.

Photo. 1~3은 각 형상비에 대한 업셋팅 실험결과를 나타낸다. Photo. 1에서 볼 수 있

듯이, H/D가 0.75인 경우는 높이감소율(H.R)이 56.22%일 때 자유표면에서 전단 크랙 (shear crack)에 의한 연성파괴가 일어났으며, 또한 H/D가 1.0, 1.25인 경우에 대한 Photo. 2, 3에서 H.R이 63.01%, 62.67%일 때 각각 연성파괴가 일어났다. Photo. 3의 (e), (f)에 H/D가 1.25인 경우의 Photo. 3(c), (d)에 대한 자유표면의 미소크랙 발생과 성장을 100배 확대하여 나타내었다.

#### 4. 해석결과 및 검토

동일한 재료에 대하여 실험과 같은 공정조건하에서 본 연구진이 제시한 해석기법을 이용하여 변형해석 및 연성파괴예측을 수행하였다. 축대칭 소재이므로 1/4만 해석하였으며, 각 형상비에 대한 최초의 연성파괴시점에서 격자왜곡상태 및 유효변형률 분포를 Fig. 2~4에 나타내었다.

Fig. 2에서 H/D가 0.75인 경우는 펀치 행정이 6.34mm일 때 자유표면의 중심에 위치한 요소에서 수치적으로 계산된 Cockcroft-Latham식의 값이 인장시험으로 구한 Cockcroft-Latham 상수, C값을 초과하였고 풀딩이 일어나는 부분에서 유효변형률의 값이 가장 크게 나타났다. H/D가 1.0, 1.25인 경우는 Fig. 3, 4에서 알 수 있듯이, 각각 펀치 행정이 8.5mm, 10.82mm일 때 자유표면의 중심에 위치한 요소에서 수치적으로 계산된 Cockcroft-Latham식의 값이 인장시험으로 구한 Cockcroft-Latham 상수, C값을 초과하였다. 또한 유효변형률의 값은 다이와 소재의 접촉면에서 중심부쪽으로 증가하였고, 풀딩이 일어나는 부분에서 가장 큰 값을 나타내었다. 결과적으로 파괴는 모든 형상비에 대해 자유표면의 중심에 위치한 요소에서 일어났으며, 이러한 결과들을 Table 3에 정량적으로 나타내었다.

Fig. 5~7은 최초의 파괴시점에서 변형이 더 진행된 상태의 격자왜곡상태 및 수치적으로 계산된 Cockcroft-Latham식의 분포를 나타낸다. Fig. 5~7에서 보듯이, 모든 형상비에서 자유표면쪽으로 분포된 Cockcroft-Latham식의 값이 큼을 알 수 있으며, 동일한 펀치 행정의 진행에 대하여 Cockcroft-Latham 상수, C값을 초과하는 재료내부의 범위는 형상비가 클수록 증가하였다.

실험 및 해석결과를 비교하여 Table 4에 나타내었다. 실험결과는 평균값이며 이론적으로 계산된 결과와 약간의 차이를 보여준다. 이러한 차이는 실험에서 가시적인 파괴가 일어날 때를 임계 높이감소율로 간주하였기 때문이다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 변형해석과 연성파괴예측을 동시에 수행할 수 있는 해석기법을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 해석기법을 이용한 연성파괴의 예측은 업셋팅 실험결과와 비교되었으며, 상당히 일치된 결과를 나타내었다.

이와 같은 해석기법은 다른 파괴기준식의 적용에 대한 융통성이 양호하고, 유사한 공정의 파괴예측 및 가공성 연구에 적용할 수 있다. 특히 복잡한 형상의 부품성형을 위한 다단계 금속성형공정에 요구되는 예비성형체설계에 본 해석기법이 유용하게 적용될 수 있다.

## 6. 참고 문헌

- [1] F. A. McClintock, "A criterion for ductile fracture by the growth of hole", J. Appl. Mech., p363, 1968.
- [2] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto and S. Shima, "Criteria of ductile fracture and their application", J. Mech. Work. Tech., p65, 1980.
- [3] M. G. Cockcroft and D. J. Latham, "Ductility and the workability of metals", J. Inst. Metals., p33, 1968.
- [4] S. I. Oh, C. C. Chen and S. Kobayashi, "Ductility fracture in axisymmetric extrusion and drawing, Part 2", J. Eng. Ind., p36, 1979.
- [5] J. L. Frater and B. R. Penza, "Predicting fracture in cold upset forging by finite element method", J. Meter. Shaping Technol., p57, 1989.
- [6] P. W. Lee and H. A. Kuhn, "Fracture in cold upset forging-A criterion and model", Metallurgical transactions, p969, 1973.
- [7] R. Sowerby, N. Chandrasekaran, N. L. Dung and Mahrenholtz, "The prediction of damage accumulation during upsetting tests based on McClintock's models", VDI-Forschung im Ingenieurwesen, p51, 1985.
- [8] O. C. Zienkiewicz, "The finite element method", 3rd Ed., McGraw-Hill, New York, 1977.
- [9] S. Kobayashi, S. I. Oh, and T. Altan, "Metal forming and the finite element method", Oxford University Press, 1989.
- [10] P. W. Bridgman, "Studies in large plastic flow and fracture", McGraw-Hill, New York, 1952.

**Table 1 Chemical composition of the Al alloy**

	Cr	Ti	Zn	Si	Fe	Mg	Mn	Cu	Al
wt %	0.004	0.008	0.04	0.21	0.55	0.70	0.77	1.61	bal.

**Table 2 Material parameters obtained from uniaxial tensile test**

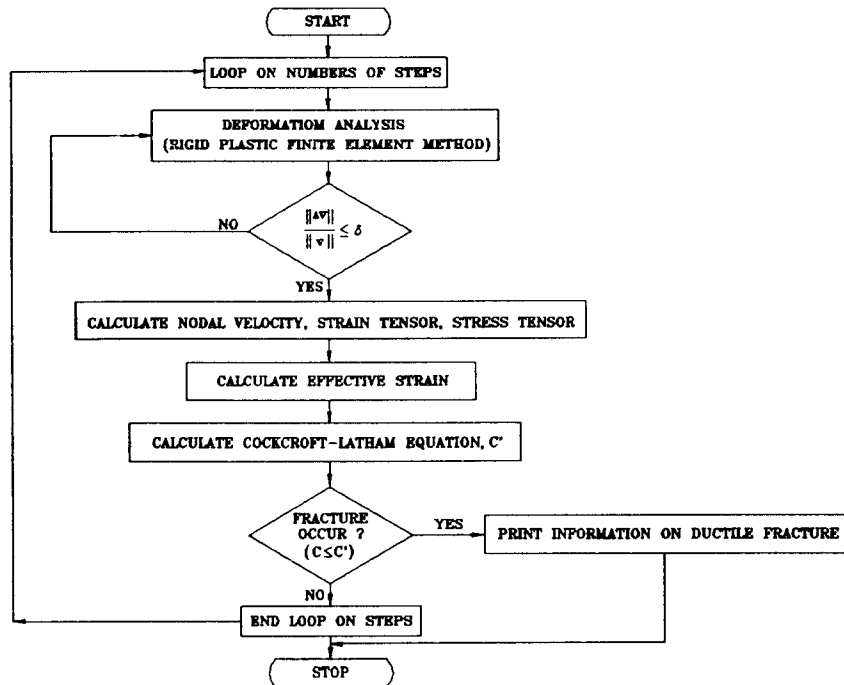
Material	Flow stress coefficient	Strain hardening coefficient	Cockcroft-Latham constant
Al alloy	346.49 N/mm <sup>2</sup>	0.173	22.61 N/mm <sup>2</sup>

**Table 3** Calculated critical reduction in height and value of Cockcroft-Latham equation for aspect ratios

Case	H/D	Height Reduction (H.R)	Accumulated $\sum_{i=1}^n (\sigma_e^* \delta \bar{\epsilon}_e)_i$ value
I	0.75	56.36%	22.81 N/mm <sup>2</sup>
II	1.00	56.67%	22.62 N/mm <sup>2</sup>
III	1.25	57.76%	22.72 N/mm <sup>2</sup>

**Table 4** Comparison between calculated and experimental critical reductions in height

Case	H/D	Critical reduction in height	
		Calculated value	Experimental value
I	0.75	56.36%	57.24%
II	1.00	56.67%	61.63%
III	1.25	57.76%	62.56%



**Fig. 1** Flow chart combined the finite element method with the fracture prediction

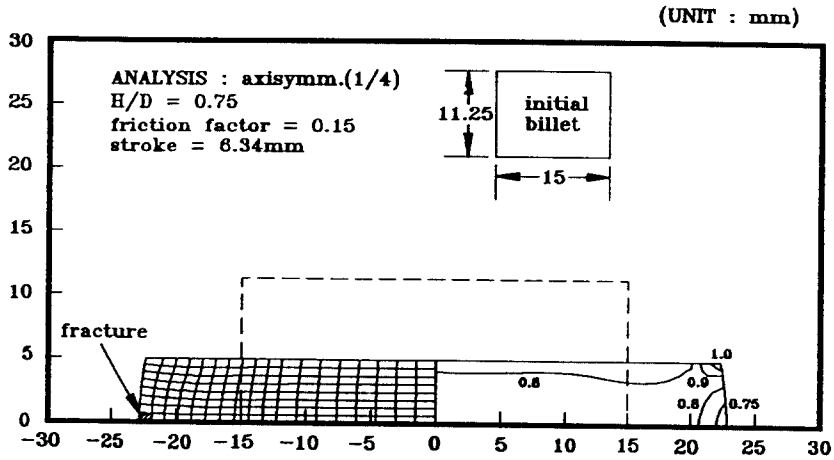


Fig. 2 Grid distortion and distribution of effective strain at the level of deformation at fracture(Hatched element refers to the fracture prediction site)

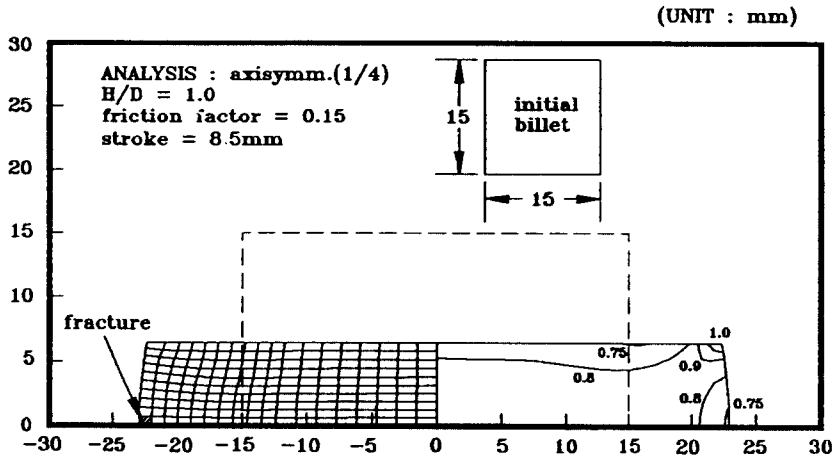


Fig. 3 Grid distortion and distribution of effective strain at the level of deformation at fracture(Hatched element refers to the fracture prediction site)

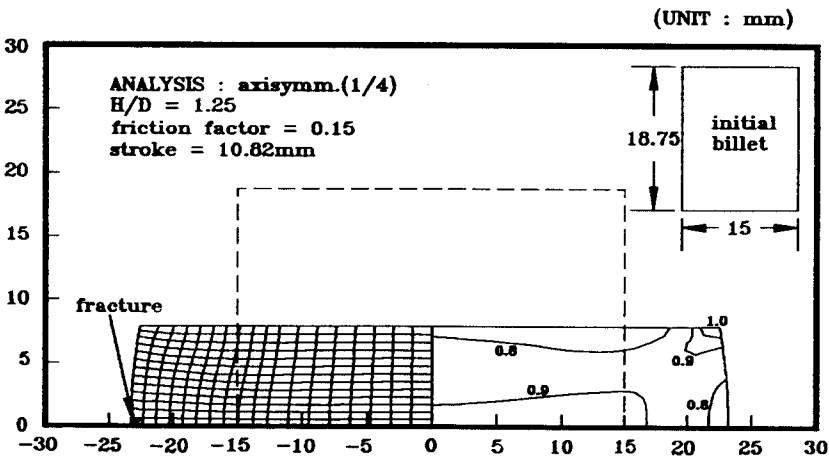


Fig. 4 Grid distortion and distribution of effective strain at the level of deformation at fracture(Hatched element refers to the fracture prediction site)

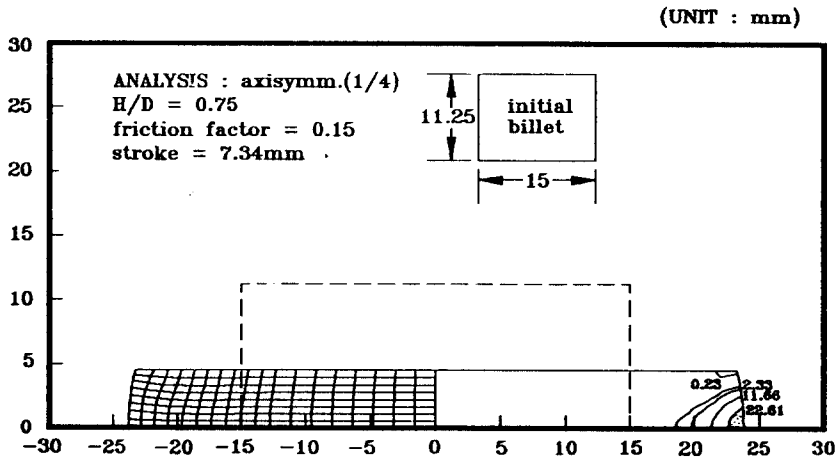


Fig. 5 Grid distortion and distribution of Cockcroft-Latham equation

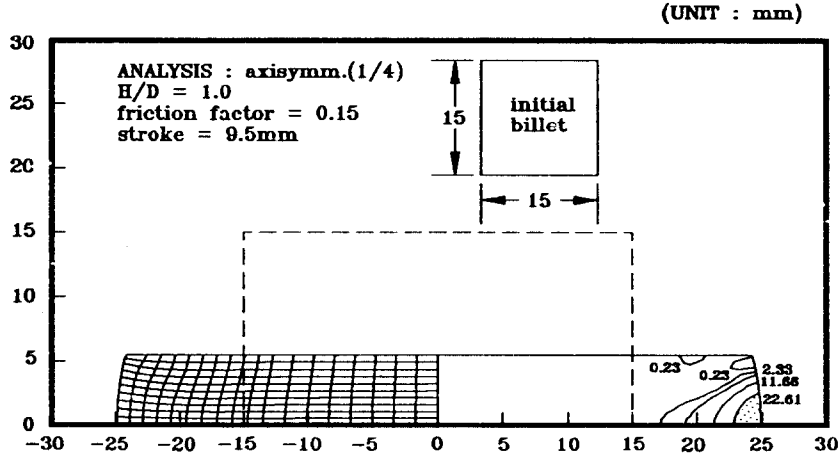


Fig. 6 Grid distortion and distribution of Cockcroft-Latham equation

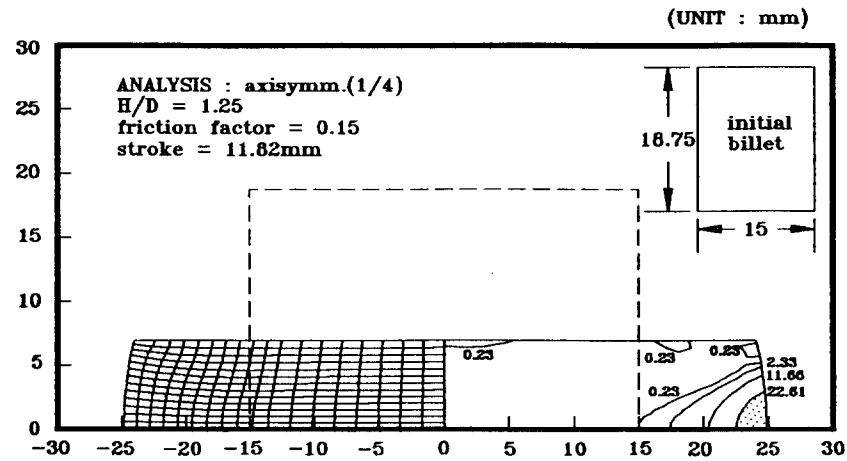


Fig. 7 Grid distortion and distribution of Cockcroft-Latham equation



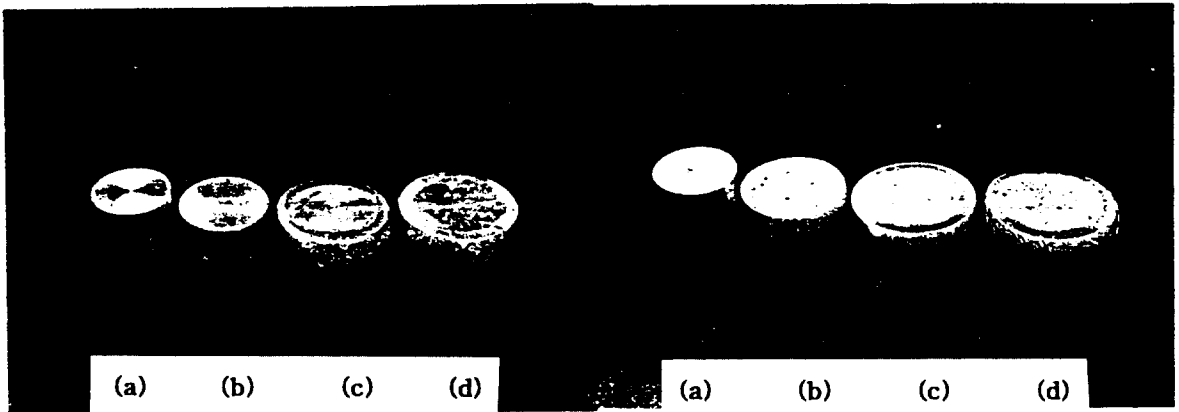


Photo. 1

Experimental results for  $H/D=0.75$   
 (a) original billet (b) H.R=30.44% (no fracture)  
 (c) H.R=56.22% (fracture) (d) H.R=58.22% (fracture)

Photo. 2

Experimental results for  $H/D=1.0$   
 (a) original billet (b) H.R=44.67% (no fracture)  
 (c) H.R=63.01% (fracture) (d) H.R=63.33% (fracture)

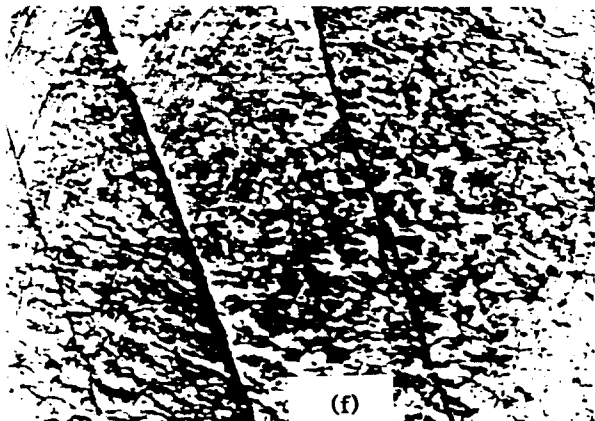
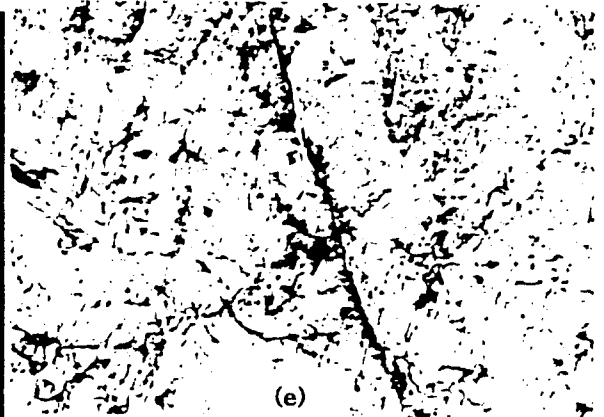
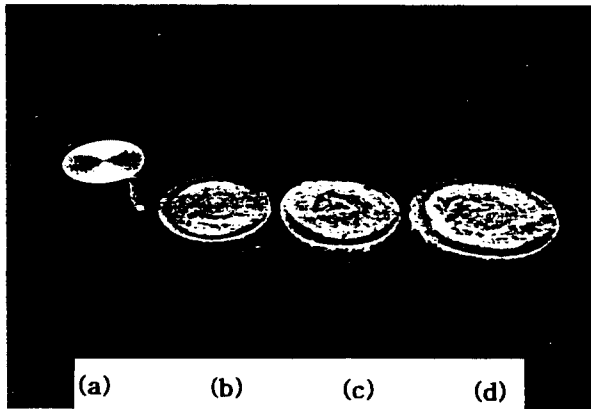


Photo. 3

Experimental results for  $H/D=1.25$   
 (a) original billet (b) H.R=58.67% (no fracture)  
 (c) H.R=62.67% (fracture) (d) H.R=72.53% (fracture)  
 (e) micrograph of region with fracture shown in (c) (100x)  
 (f) micrograph of region with fracture shown in (d) (100x)