

냉간 단조품의 표면 및 내부에서의 연성과괴 해석

김태형*, 고대철*, 김병민**, 최재찬**

Ductile Fracture Analysis on the Surface and Internal Fracture of Cold Forged Products

Tae-Hyung Kim*, Dae-Cheol Ko*, Byung-Min Kim** and Jae-Chan Choi**

ABSTRACT

This paper presents an investigation of the ability of the scheme to simultaneously accomplish both prediction of fracture initiation and analysis of deformation in cold forged products. The Cockcroft-Latham criterion which is successfully applied to a variety of loading situations is used in the present investigation to estimate if and where surface and internal fracture occur during the deformation process. The numerical predictions and experimental results of two types of fundamental cold metal forming process taken into account are compared. Finite element simulation combined with fracture criterion has successfully predicted the site of surface or internal fracture initiation and corresponding to level of deformation observed experimentally.

Key Words : Ductile Fracture(연성과괴), Cold Forged Products(냉간 단조품),
Cockcroft-Latham Criterion(Cockcroft-Latham 연성과괴기준),
Finite Element Simulation(유한요소 시뮬레이션)

1. 서론

최근 냉간성형 기술수준의 전반적인 향상과 더불어 결함이 없는 제품의 생산에 관심이 높아지고 있다. 결함의 발생은 설계된 공정조건의 성형성을 제한하며, 냉간성형 공정에서의 성형한계는 주로 연성과괴의 시작에 의해 결정된다. 이러한 성형한계는 제품의 품질에 영향을 미치는 결정적 요인이 되므로, 공정설계 단계에서 연성과괴로 인

한 결함의 발생을 예측하여 신뢰성있는 제품을 생산할 수 있도록 공정의 재조정이 필요하다. 그러나 실제 산업현장에서는 결함 발생의 방지를 위해 숙련된 설계자의 경험 또는 시행착오에 의존하고 있으므로, 제품 생산에 따른 그 비용의 증가가 심각한 문제로 대두되고 있다. 따라서 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 연성과괴로 인한 결함의 발생을 예측하고 방지하는 것은 대단히 중요하다.

연성과괴 예측을 위한 기준은 실제 산업현장에서 적용

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

되는 공정과 유사한 실험을 근거로 제시되었다. 연성파괴의 시작은 응력과 변형을 경로에 좌우되므로, 대부분의 연성파괴 기준식은 응력과 변형률의 적분형태로 표현된다. 또한 이와 같이 적분된 값이 임의의 값에 도달했을 때, 연성파괴가 시작되는 것으로 고려한다.

McClintock⁽¹⁾은 파괴가 일어나는 과정을 기공생성 및 성장에 근거를 두고 연성파괴기준을 제시하였으며, Oyane 등⁽²⁾은 다공질 재료에 대한 연성파괴기준을 제시하였다. Cockcroft와 Latham⁽³⁾은 파괴시 소성변형을 경로에 대한 최대 주인장응력의 영향을 고려한 연성파괴기준을 제시하였고, Osakada와 Mori⁽⁴⁾는 비틀림시험 결과를 이용하여 연성파괴 예측을 위한 파괴기준식을 유도하였다.

이러한 연성파괴기준은 금속성형문제의 해석을 위해 널리 적용되고 있는 유한요소법과 결합하여 보다 자세한 예측을 가능하게 했다. Oh 등⁽⁵⁾은 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준과 수정된 McClintock의 연성파괴기준을 이용하여 축대칭 압출과 인발공정에서 강소성 유한요소법으로 연성파괴를 예측하였다.

Frater와 Penza⁽⁶⁾는 유한요소 해석결과를 이용한 부가적 프로그램을 개발하여 옆셋팅 공정의 가공성을 해석하고, 그 결과를 Shah와 Kuhn⁽⁷⁾의 파괴기준과 비교하였다. Yoshida 등⁽⁸⁾은 모델재료를 이용하여 옆셋팅 공정에서 발생하는 자유표면의 파괴를 예측하였다. 그러나 이전에 제시된 연구결과들은 연성파괴의 예측과 파괴를 일으키는 변형의 상태를 명확히 규명하는 데에는 약간 미흡하다고 생각된다.

본 연구의 목적은 앞서 발표된 연구결과⁽⁹⁾에서 제시한 해석기법으로 냉간 단조품의 변형해석과 연성파괴 해석을 동시에 수행하여 변형소재의 연성파괴 발생여부 및 발생위치 그리고 그에 대응하는 변형의 상태를 강소성 유한요소 시뮬레이션을 통해 예측하는 데 있다.

개발된 유한요소 프로그램을 냉간성형공정의 기본적인 가공방법인 옆셋팅과 압출공정에 적용해 보았다. 또한 결과의 타당성을 확인하기 위하여 상용 알루미늄을 이용한 실험을 수행하였고, 그 결과를 해석결과와 비교해 보았다.

2. 강소성 유한요소 정식화

본 연구에서는 소재의 변형해석을 위하여 강소성 유한요소법을 이용하였다. 이의 정식화 과정은 이미 많은 문

헌^(10,11)에 잘 알려져 있으므로 여기서는 간략하게 언급한다.

강소성 재료에 대한 범함수(functional), Π 는 다음과 같다.

$$\Pi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV - \int_{S_F} \bar{t}_i V_i dS \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 $\sqrt{3/2\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}}$ 로 정의 되는 유효응력, $\dot{\epsilon}$ 는 $\sqrt{2/3\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}}$ 로 정의 되는 유효변형률속도, σ'_{ij} 는 편차응력, \bar{t}_i 는 표면력, V_i 는 절점속도, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률속도이다.

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(penalty function), K 를 도입하면, 위의 (1)에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적변형률속도이다.

위의 식(2)는 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 구하였다.

변형해석과 동시에 변형소재의 연성파괴 예측을 위하여 압출, 압연, 옆셋팅 등과 같은 다양한 하중조건에 적용될 수 있고, 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준을 이용하였다. 즉,

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C \quad (3)$$

여기서 σ^* 는 $\sup(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, σ_i 는 주응력 성분, $\bar{\epsilon}_f$ 는 파괴시 변형률, C 는 Cockcroft-Latham상수이다. 유한요소 해석에서 위 식(3)은 중분 개념으로 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n (\sigma_e^* \Delta \bar{\epsilon}_e)_i = C' \quad (4)$$

여기서, n 는 스텝 수, σ_e^* 는 요소 내부 적분점에서의 최대 인장응력, $\Delta \bar{\epsilon}_e$ 는 요소의 유효변형률 증분이다.

위 식(4)는 변형소재의 전 영역에 대하여 각 요소의 적

분점에서 계산되고, σ_e^* 는 모든 압축응력에 대해서는 영의 값으로 대체된다. Fig. 1에 냉간 단조품의 변형해석과 표면 및 내부의 연성파괴 예측을 동시에 수행하기 위한 유한요소 프로그램의 흐름도를 나타내었다.

변형경로의 각 스텝에서 계산된 절점속도와 시간증분으로 절점좌표가 변화되고, 유효변형률은 변형경로를 따라 적분된다. 변형경로의 각 스텝에서 응력장과 변형률장은 연성파괴의 발생여부를 판단하기 위해 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준식을 계산하는데 이용된다. 변형의 전 공정동안 식(4)의 값은 누적되고, 이와 같이 누적된 값, C'가 단축 인장시험으로 구한 Cockcroft-Latham 상수, C의 값을 초과했을 때 연성파괴가 일어나는 것으로 가정하였다. 또한 본 연구에서 크랙의 전파현상은 고려하지 않으므로, 시뮬레이션 중 변형소재에 연성파괴가 발생하면 유한요소 해석은 중단하게 된다.

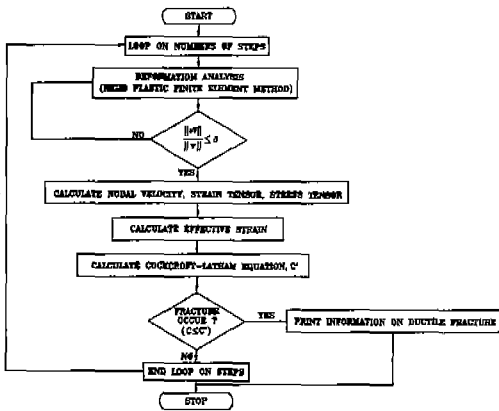


Fig. 1 Flow chart for accomplishing both prediction of fracture initiation and analysis of deformation

3. 실험절차

3.1 인장시험

실험에 사용된 재료는 상용 알루미늄이며, 이 재료의 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다. 재료의 응력-변형률 관계 및 Cockcroft-Latham 상수의 값을 구하기 위해 KS B 0801 제4호 인장시험시편을 이용하여 단축 인장시험을 행하였다. 인장시험으로 구한 이 재료의 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 346.49 \bar{\epsilon}^{0.173} [N/mm^2] \quad (5)$$

식(3)에 나타낸 바와 같이 Cockcroft-Latham 상수, C는 본 연구의 해석을 수행하는데 있어서 중요한 파라메타이며, 재료의 성형한계를 좌우한다. 본 연구에서 Cockcroft-Latham 상수의 값은 단축 인장시험 시편의 넥 영역에서 발생하는 3축 응력상태를 Bridgman방법⁽¹²⁾으로 보정하여 계산하였으며, 사용된 재료의 Cockcroft-Latham 상수의 값은 22.61 [N/mm²]이다.

Table 1 Chemical composition of commercial aluminum

Component:	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

3.2 옆셋팅 실험

옆셋팅 실험을 위하여 Tokyo Testing Machine MFG. CO. LTD.의 200톤 유압프레스를 사용하였다. 다이와 소재 접촉부의 윤활은 그리스와 흑연을 동일한 체적비로 혼합한 윤활제를 사용하였으며, 동일한 재료의 링 압축시험결과 마찰상수, m은 약 0.15였다. 또한 전 실험 동안 램 속도는 2mm/min으로 일정하게 유지하였다.

옆셋팅 실험에 사용된 초기 시편은 직경이 30mm이고, 직경 대 높이비(H/D)가 0.75, 1.0과 1.25인 경우에 대하여 각각의 시험시편을 준비하였다.

각 형상비에 대하여 편치진행에 따른 소재의 형상변화를 Fig. 2~4에 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, H/D가 0.75인 경우는 높이감소율(H.R = ΔH/H)이 56.2%일 때 자유표면에서 전단크랙(shear crack)에 의한 연성파괴가 관찰되었다. 또한 H/D가 1.0, 1.25인 경우에 대한 Fig. 3, 4에서 H.R이 63.1%, 62.7%일 때 각각 연성파괴가 일어났다.

각 형상비에 대한 상용 알루미늄의 옆셋팅 실험에서 연성파괴를 관찰할 수 있었던 변형의 범위를 Fig. 5에 나타내었다. H/D가 0.75인 경우는 약 56.2~62.3%의 H.R에서 연성파괴를 관찰할 수 있었으며, H/D가 1.0, 1.25인 경우는 H.R이 약 61.1~67%, 62.5~73.5%에서 자유표면에 연성파괴가 나타났다. 또한 전체적인 실험결과를 살펴보면 Fig. 5에 제시된 변형을 초과하는 H.R에서도 연성파괴는 일어날 것으로 판단된다.

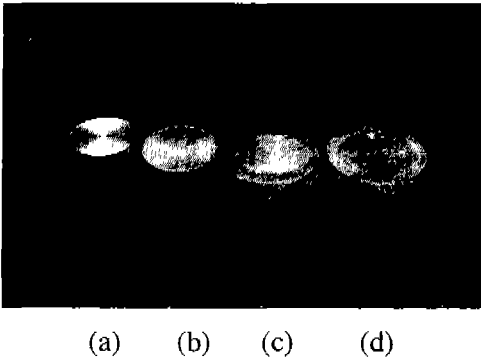


Fig. 2 Experimental results for upsetting (H/D=0.75)
 (a)initial billet (b)H.R=30.4%(no fracture)
 (c)H.R=56.2%(fracture)
 (d)H.R=58.2%(fracture)

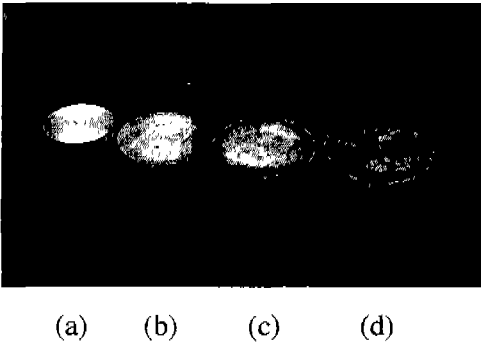


Fig. 3 Experimental results for upsetting(H/D=1.0)
 (a)initial billet (b)H.R=44.7%(no fracture)
 (c)H.R=63.1%(fracture) (d)H.R=63.3%
 (fracture)

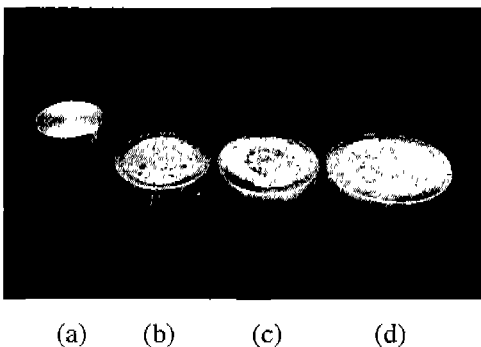


Fig. 4 Experimental results for upsetting(H/D=1.25)
 (a)initial billet (b)H.R=58.7%(no fracture)
 (c)H.R=62.7%(fracture) (d)H.R=72.5%
 (fracture)

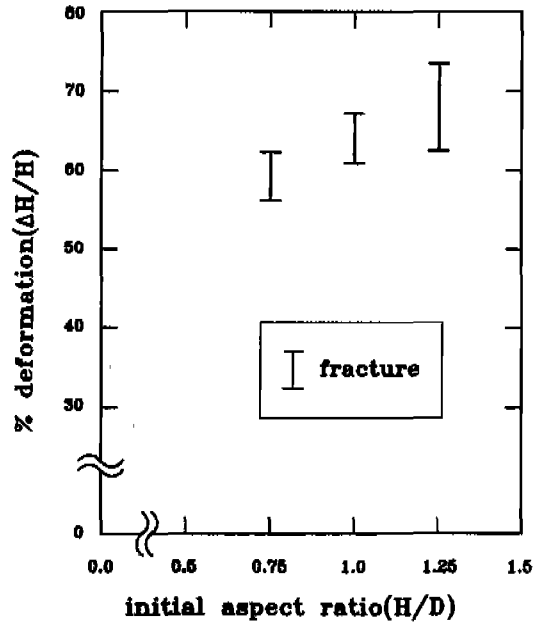


Fig. 5 Experimental levels of deformation at fracture for various aspect ratios in upsetting

3.3 압출 실험

압출실험을 위하여 다이 반각이 30°, 단면적 감소율이 20%인 원추형 다이를 이용하였다.

다이와 펀치의 재질은 열처리한 SKD 11이고 컨테이너와 다이홀더는 SCM 4이다. 압출용 시편은 직경이 30mm, 높이가 60mm이고, 특히 소재 내부의 결함 발생 여부를 관찰하기 위하여 소재의 단면을 길이방향으로 절단하여 결합한 후 실험을 행하였다.

압출실험에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 압출공정에서는 제품표면에 크랙이 생기는 표면결합과 중심과열과 같은 내부결합 등이 발생한다^(13,14,15,16). 본 연구의 실험에서 원추형 다이를 이용한 경우에 표면결합은 발견되지 않은 반면에, 내부결합은 Fig. 6과 같이 초기 시편의 체적에 대한 압출체적량($V.R = \Delta V/V$)이 17.2%일 때 소재 중심축 선상에 V자 모양의 결함이 최초로 발생하였다.

또한 이러한 결합은 압출공정이 진행됨에 따라 주기적으로 나타났다.



Fig. 6 Experimental result for extrusion

4. 해석 결과 및 고찰

변형해석과 연성파괴 해석을 동시에 수행하여 변형소재의 연성파괴 발생여부 및 발생위치 그리고 그에 대응하는 변형의 상태를 연성파괴기준과 결합된 강소성 유한요소 시뮬레이션을 통해 예측하기 위하여 기본적인 냉간성형 가공방법인 엷셋팅과 압출공정을 해석하였다. 실험과 동일한 조건하에서 시뮬레이션하였으며, 축대칭 소재이므로 엷셋팅의 경우는 1/4, 압출의 경우는 1/2만 모델링하였다. 엷셋팅, 압출공정에서 흔히 나타나는 표면결합과 내부결합의 발생을 예측하기 위하여 식(4)로 표현되는 Cockcroft-Latham식은 변형소재의 전 요소에 대해 계산된다.

H/D가 0.75, 1.0인 엷셋팅 공정을 해석하기 위한 초기 격자 시스템과 연성파괴시점에서 격자왜곡 상태를 Fig. 7(a), (b)에 나타내었다. 빗금친 요소는 유한요소 시뮬레이션을 통하여 변형 중에 최초의 연성파괴가 예측되는 위치를 나타낸다.

Fig. 7에서 H/D가 0.75, 1.0인 경우 펀치 행정이 각각 6.34mm(H.R=56.4%), 8.5mm(H.R=56.7%)일

때, 자유표면의 중심에 위치한 요소에서 수치적으로 계산된 Cockcroft-Latham식의 값이 인장시험으로 구한 Cockcroft-Latham 상수값을 초과하였다.

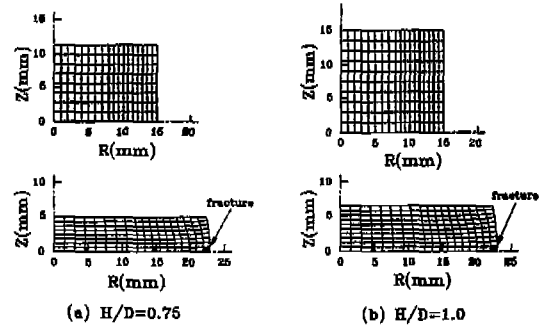


Fig. 7 Undeformed and deformed finite element meshes up to the level of deformation at fracture

H/D가 1.25인 경우 연성파괴를 일으키는 변형소재 내부의 상태를 관찰하기 위하여 초기 격자 시스템, 격자왜곡 상태, 유효변형률과 최대 주응력의 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 앞서의 경우와 같이 펀치 행정이 10.82mm(H.R=57.8%)일 때 자유표면의 중심에 위치한 요소에서 연성파괴가 일어남을 예측할 수 있다. 유효변형률의 분포는 다이와 소재의 접촉면에서 중심부쪽으로 증가하였고, 풀딩이 일어나는 부분에서 가장 큰 값을 나타내었다. 또한 최대 주응력의 분포에서 변형소재 내부의 대부분은 압축응력이 존재하고 있음을 볼 수 있으며, 자유표면의 중심부에 인장응력의 최대값이 존재한다는 것을 알 수 있다. Fig. 8(a)의 소재 내부 임의의 요소에 대한 Cockcroft-Latham식의 값의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 자유표면의 중심에 위치한 요소 G는 변형이 진행됨에 따라 Cockcroft-Latham식의 값이 급격히 증가하는 반면에 변형소재의 중심부에 위치한 요소들은 그 값의 변화가 거의 없다. 또한 자유표면의 중심에 위치한 요소 G에서 일단 연성파괴가 일어난 후, 파괴의 방향은 소재 내부쪽 보다는 원주면 상에 위치한 요소 H쪽으로 전파한다는 것을 예측할 수 있다.

결과적으로 최대 인장 주응력 성분과 비교적 높은 유효변형률이 자유표면의 중심에 존재하기 때문에 초기 시편의 형상비에 상관없이, 엷셋팅에서는 자유표면의 중심에

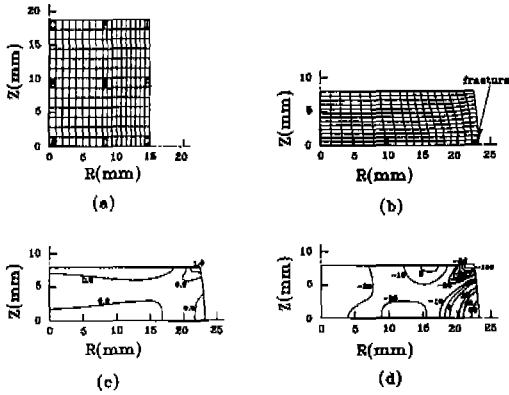


Fig. 8 Results of upsetting simulation(H/D=1.25)
 (a) Undeformed and (b) deformed finite element meshes
 (c) effective strain and (d) maximum principal stress distribution at the level of deformation at fracture

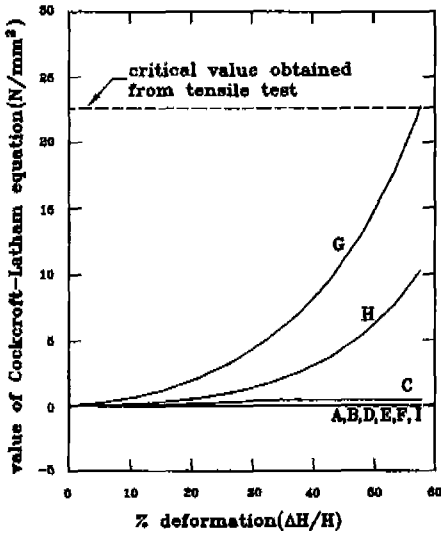


Fig. 9 Variation of Cockcroft-Latham equation up to level of deformation at fracture

위치한 요소에서 연성파괴가 예측됨을 알 수 있다. 또한 상대적으로 내부결합이 발생할 가능성은 대단히 희박하다는 것도 알 수 있다.

다이 반각이 30°, 단면적 감소율이 20%인 실험과 동일한 공정조건의 압출공정을 해석하기 위한 초기 격자 시스템과 격자왜곡 상태 및 유효변형률, 최대 주응력과 정수

압 응력의 분포를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10(a)에서 알 수 있듯이, 편치 행정이 8.55mm (V.R=14.3%)일 때, 소재 중심축 선상에 위치한 요소에서 수치적으로 계산된 Cockcroft-Latham식의 값이 인장시험으로 구한 Cockcroft-Latham 상수값을 초과하였다. 이러한 결과는 변형해석과 연성파괴 예측이 동시에 수행 가능한 유한요소 시뮬레이션을 이용함으로써 변형소재의 표면에 발생하는 연성파괴 뿐만아니라 소재 내부에 발생하는 연성파괴도 예측 가능하다는 것이다.

소재 내부에 발생하는 이와 같은 결함은 가시적으로 확인할 수 없기 때문에 결함이 발생한 재료를 사용함으로써 초래되는 기계 요소의 사고나 고장은 심각한 문제이다. 따라서 시뮬레이션을 통해 이러한 결함의 발생을 예측하는 것은 상당히 중요하다.

연성파괴를 일으키는 변형소재 내부의 상태를 알아보기 위하여 소재의 변형률과 응력의 분포를 조사하였다. 유효 변형률과 최대 주응력의 분포를 나타낸 Fig. 10(b),(c)에서 유효변형률은 소재 반경방향으로 그 값이 증가함을 알 수 있으며, 최대 주응력의 분포에서 최대 인장 주응력은 소재의 중심축 선상에 존재하고 최대 압축 주응력은 단면적 감소부에 나타남을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 비록 소재 중심축 선상의 유효변형률은 비교적 적으나, 상대적으로 대단히 큰 최대 인장 주응력의 영향으로 인하여 소재의 중심에 위치한 요소에서 연성파괴가 최초로 발생함을 알 수 있다. 또한 다이 반각, 단면적 감소율과 마찰 상수 등의 공정조건 조합에 따라 소재 중심축 선상에 정수압 인장응력이 존재하면 변형소재는 내부결합의 발생이 예측된다는 여러 문헌의 보고^(14,15,16)가 있었다. 이전에 제시된 결과와 본 논문의 해석결과를 비교하기 위하여 Fig. 10(d)와 같이 소재 내부의 정수압 응력 분포를 조사하였다.

연성파괴가 예측되는 변형수준에서 소재 중심축 선상에 정수압 인장응력이 존재함을 볼 수 있으며, 파괴가 예측되는 요소 부근에서 그 최대값이 존재함을 알 수 있다. 그러나 정수압 응력의 분포에 근거한 파괴판단기준은 공정변수 조합에 대하여 파괴의 발생 가능성은 예측할 수 있으나, 파괴가 예측되는 위치 및 그에 대응하는 변형의 상태를 정확히 예측하기는 어렵다.

Fig. 10(a)의 소재 내부 임의의 요소에 대한 Cockcroft-Latham식의 값의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 소재 중심축 선상에 위치한 요소 D는 소재가 다이 출구부를 빠져 나옴에 따라 Cockcroft-Latham식의 값이 급

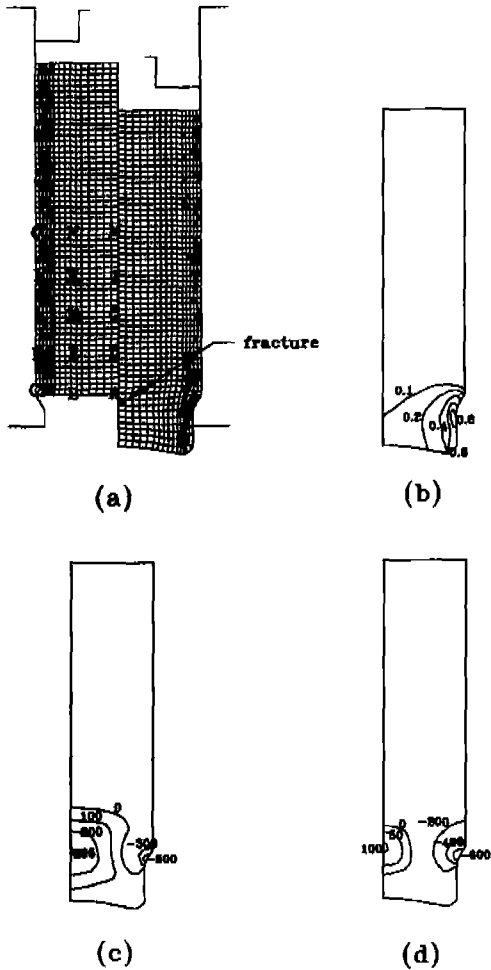


Fig. 10 Results of extrusion simulation
 (a) Undeformed and deformed finite element meshes
 (b) effective strain, (c) maximum principal stress and (d) hydrostatic pressure distribution at the level of deformation at fracture

격히 증가한다. 또한 단면적 감소부 내에 존재하는 다른 요소들(A, B, C, E, F)은 그 값이 증가하고 있으나 상당한 변형이 더 진행되어야 연성파괴가 발생할 가능성이 있으며, 그 외 강체영역에 존재하는 요소들은 그 값의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

엷셋팅과 압출공정의 실험 및 해석결과를 비교하여 Table 2에 나타내었다.

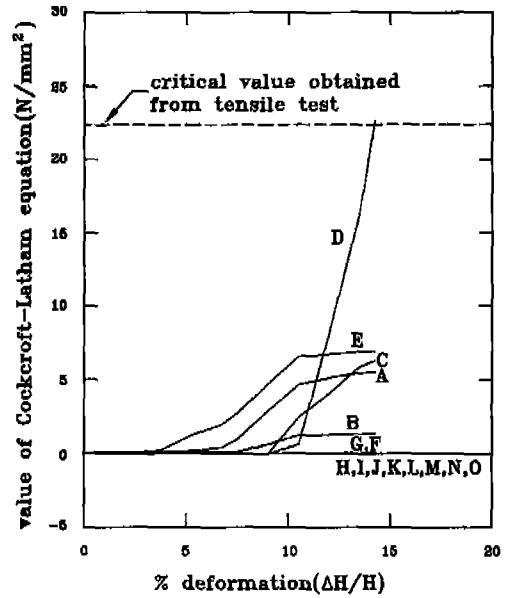


Fig. 11 Variation of Cockcroft-Latham equation up to level of deformation at fracture

여러번의 반복적인 실험으로 평균값을 취한 실험결과를 유한요소 시뮬레이션으로 예측되는 결과와 비교적 잘 일치하나 미소한 양의 차이가 있음을 볼 수 있다.

이와 같은 차이는 실험에서 가시적으로 관찰되는 파괴는 발견되기 전에 이미 작은 양으로 전파되기 때문이라고 판단된다.

Table 2 Comparison between experimental and theoretical levels of deformation at fracture

Specimen	Experimental % def. at fracture	Theoretical % def. at fracture	Accumulated $\sum(\sigma_i \Delta \epsilon_i)$ value (N/mm ²)
Upsetting:			
H/D=0.75	57.2	56.4	22.81
H/D=1.0	61.6	56.7	22.62
H/D=1.25	62.6	57.8	22.72
Extrusion	17.2	14.3	22.67

5. 결 론

본 연구에서는 냉간 단조품의 변형해석과 표면 및 내부의 연성파괴 해석을 동시에 수행하여 변형소재의 연성과 파괴 발생여부 및 발생위치 그리고 그에 대응하는 변형의 상태를 강소성 유한요소 시뮬레이션을 통하여 예측해 보았다. 개발된 유한요소 프로그램을 냉간성형공정의 기본적인 가공방법인 열셋팅과 압출공정에 적용해 보았으며, 유한요소 시뮬레이션을 통하여 실험결과와 상당히 일치되는 해석결과를 얻을 수 있었다.

이와 같이 연성파괴기준과 결합된 유한요소 시뮬레이션을 이용함으로써 유사한 다른 냉간 단조품의 표면 및 내부에서 발생 가능한 연성파괴를 예측할 수 있으며, 냉간 성형공정의 가공한계를 결정할 수도 있다. 또한 결합이 없는 복잡한 형상의 제품성형을 위하여 다단계 금속성형 공정에서 요구되는 예비 성형체의 설계에도 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. McClintock, F. A., "A criterion for ductile fracture by the growth of hole", J. Appl. Mech., Vol. 35, pp. 363-371, 1968.
2. Oyane M., Sato T., Okimoto K. and Shima S., "Criteria of ductile fracture and their application", J. Mech. Work. Tech., Vol. 4, pp. 65-81, 1980.
3. Cockcroft, M. G. and Latham, D. J., "Ductility and the workability of metals", J. Inst. Metals., Vol. 96, pp. 33-39, 1968.
4. Osakada, K. and Mori, K., "Prediction of ductile fracture in cold forging", Annals of CIRP, Vol. 27, No. 1, pp. 135-139, 1978.
5. Oh, S. I., Chen, C. C. and Kobayashi, S., "Ductile fracture in axisymmetric extrusion

- and drawing, Part 2", J. Eng. Ind., Vol. 101, No. 1, pp. 36-44, 1979.
6. Frater, J. L. and Penza, B. R., "Predicting fracture in cold upset forging by finite element method", J. Meter. Shaping Technol., Vol. 7, No. 1, pp. 57-62, 1989.
7. Shah, J. J. and Kuhn, H. A., "An empirical formular for workability limits in cold upset-ting and bolt heading", J. Applied metal-working, Vol. 4, No. 3, pp. 255-261, 1986.
8. Yoshida, F. and Wanheim, T., "The prediction of surface cracking based on the model material technique", Annals of CIRP, Vol. 36, No. 1, pp. 165-168, 1987.
9. 고대철, 이진희, 김병민, 최재찬, "금속성형공정에서 연성파괴예측", 한국소성가공학회지, 제3권, 제2호, pp. 167-177, 1994.
10. Zienkiewicz, O. C., "The finite element method", 3rd Ed., McGraw-Hill, New York, 1977.
11. Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., "Metal forming and the finite element method", Oxford University Press, 1989.
12. Bridgman, P. W., "Studies in large plastic flow and fracture", McGraw-Hill, New York, 1952.
13. Avitzur, B., "Metal forming: Process and analysis", McGraw-Hill, New York, 1968.
14. Chen, C. C., Oh, S. I. and Kobayashi, S., "Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing, Part 1", J. Eng. Ind., Vol. 101, No. 1, pp. 23-35, 1979.
15. Tanaka, M., Ono, S., Tesumeno, M. and Iwadate, T., "An analysis of void crushing during flat die free forging", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, pp. 1035-1042, 1987.
16. 김태형, 이진희, 권혁홍, 김병민, 강범수, 최재찬, "유한요소법을 이용한 전방 압출공정의 내부 결합에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제1권, 제1호, pp. 66-74, 1992.