

# 연성파괴 이론을 적용한 튜브 온간액압성형의 성형한계 예측

이혜경<sup>1</sup>, 문영훈<sup>1</sup>, 이정환<sup>2</sup>, 이영선<sup>#</sup>

## Prediction for Forming Limit of Tube Warm Hydroforming Based on the Ductile Fracture Criteria

H. K. Yi, Y. H. Moon, J. H. Lee, Y. S. Lee

(Received December 19, 2006)

### Abstract

Hydroformability and fracture criteria of FE analysis based on ductile fracture were investigated in warm hydroforming of Al6061 tube. To evaluate the hydroformability, uni-axial tensile test and bulge test were performed at room temperature and 200°C. The measured flow stresses were used as input parameters for FE analysis. The damage values were calculated by FE analysis based on ductile fracture criteria at maximum radius of free bulged tubes. Damage values were compared of hexagonal shaped hydroformed parts. As a result, the formability by critical damage value for extruded tube is lower than that of full annealed tube up to 0.5.

**Key Words** : Warm Hydroforming, Ductile Fracture, Free Bulge Test, Forming Limit

### 1. 서론

알루미늄이나 마그네슘 합금과 같은 경량금속은 차체 경량화를 목적으로 자동차 업계에서는 매우 중요한 전략적 기술로 개발되고 있다. 현재 전 세계적으로 알루미늄 자동차 부품의 제조에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 현가, 조향장치 그리고 배가장치를 중심으로 고강도 Al 합금 부품을 적용하고자 하는 노력들이 가속화되고 있다. 최근에는 일체형 성형기술이 차체구조 단순화와 경량화 수단으로 많은 연구가 진행되고 있는데 이러한 일체형 성형기술로서 주목 받고 있는 액압성형 기술은 공정상 재료의 높은 성형성 요구로 인해 현재까지 주로 철계 소재에 국한되어왔다[1]. 반면, 우수한 비강도로 현재 대표적인 경량

재료로 사용되고 있는 알루미늄은 상온에서 낮은 성형성을 보여 액압성형 적용에는 한계가 있었다. 이러한 문제를 보완하여 고강도 알루미늄 합금에 대한 액압성형 적용 가능성을 높이는 방법으로 온간액압성형 방법을 고려할 수 있다[2]. 성형온도 상승에 따른 기계적 특성 저하는 사전에 열처리를 통해 보완하고 온도상승에 따라 알루미늄의 성형성도 증가하여 액압성형의 적용이 가능할 것으로 기대된다. 온간액압성형 시 튜브의 성형 한계는 일축 인장시험에서 얻을 수 있는 변형저항과 연신율이 기초 데이터의 하나이지만 실 형상 제품을 성형하는 데는 일축 인장 상태에서의 성형성보다 그 이상의 기준이 필요하다. 일반적으로 판재의 성형한계를 나타내는 FLD(Forming Limit Diagram)는 주변형률과 부변형률이 인장상태와 압

1. 부산대학교 정밀정형 및 금형가공센터  
2. 한국기계연구원 소재성형센터  
# 교신저자: 한국기계연구원 소재성형센터,  
E-mail: lsy1668@kmail.kimm.re.kr

축 상태에 대한 데이터를 모두 이용하여 정리하게 되는만큼 튜브 액압성형에서 이를 효과적으로 구축하고 이용하는 것은 어려운 점이 많다. 특히, 주변형율과 부변형률 모두 인장 상태에 대한 데이터를 구축하는 것은 현실적으로 곤란한 항목이다. 따라서 본 연구에서는 Al 6061 튜브를 온간액압성형 공정에 적용함에 있어서 연성 파괴 이론을 적용한 유한요소해석을 통해 결함 발생의 정량적인 기준을 마련하고자 하였다. 먼저 튜브의 일축 인장시험과 자유확관시험을 통해 액압성형성에 대해 고찰하였고, 자유확관시험 결과와 연성 파괴 이론을 적용한 유한요소해석을 통해 결함, 즉, 데미지(Damage) 지수를 계산하였다. 그리고 본 연구에서 제안한 육각형 확관 모델의 액압성형품을 통해 데미지 지수를 이용한 액압성형의 성형한계 예측의 신뢰성을 확인하였다.

## 2. 실험 및 유한요소해석

### 2.1 실험방법

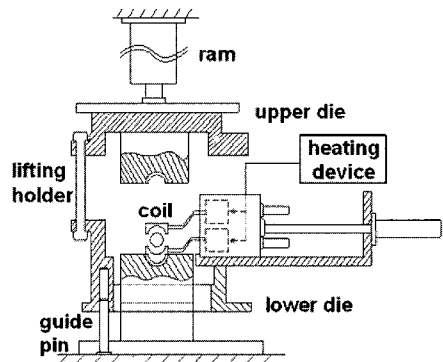
연구에 사용된 Al6061 튜브는 무접점 간접압출(Seamless indirect extrusion) 공정에 의해 제조된 것으로 크기는 외경 50.8mm, 두께 5mm 이다. 열처리 조건에 따른 영향을 분석하기 위해 성형 전 소재를 완전 풀림(full annealing) 처리와 T6 처리 하였고, 열처리 조건을 Table 1에 나타내었다. 일축 인장시험을 위한 인장시험편은 ASTM E8 규격을 따랐으며, 사용된 시험기는 승온에 따른 변형특성 평가를 위해 외부에 가열 챔버(Chamber)를 부착하였다. 승온 속도는 0.3°C/s 이며 시험편은 각각의 시험 온도에서 시험 온도 편차를 줄이기 위해 20분간 유지하였다. 온도와 변형률속도에 따른 변형거동을 평가하기 위해 상온~300°C에서 0.1/s, 0.01/s, 0.001/s로 각각 시험을 수행하였다.

실제 액압성형은 파단 시 확관율을 알아보기 위한 비구속형태의 자유확관시험과 성형한계 데미지 지수의 신뢰도를 확인하기 위한 구속형태의 육각형확관시험으로 이루어졌다. 이 때, 튜브의 효율적인 가열을 위해 30kHz, 10kw 사양의 유도 가열 장치를 사용하였고, 유도 가열기를 이용한 액압성형 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 정량적인 데미지 지수는 상용 수치해석 프로그램인 DEFORM-2D™를 이용하여 계산하였다. 이때, 자유확관 액압성형 시 측정된 파단 시의 확관율과 동일한 확관율에서의 유한 요소 해석 데미지 지

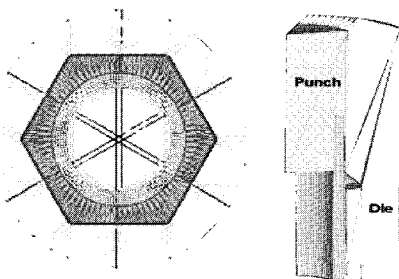
**Table 1 Heat treatment conditions of Al 6061 tube (AMS2770E)**

Full annealing	413°C/1hr, furnace cooling to 260°C, air cooling
T6 treatment (Artificial aging after solution treatment)	solution treatment (529°C/ 50min) artificial aging (177°C/ 8hrs)

수를 성형한계값으로 산출하였다. 아울러 Fig. 2 과 같은 육각형 형상의 확관모델을 자체 설계하여 유한요소해석을 통해 데미지 지수의 분포를 나타내고, 실제 시제품을 제조하여 해석과 비교/분석 함으로서 결함발생의 예측을 위해 산출된 데미지 지수에 대한 신뢰성을 확인하였다. 이와 같은 과정을 거치면서 실험과 해석을 연계하여 연성 파괴 이론을 적용한 데미지 이론을 기초로 Al 6061 합금의 온간액압 성형 공정에서의 결함 발생 기준을 도출하였다.



**Fig. 1 Schematic drawing of induction heating hydroforming system**



**Fig. 2 Hexagonal shaped hydroforming model for FE analysis**

## 2.2 연성과파괴 이론에 의한 파괴(Bursting) 기준

튜브의 터짐 현상은 튜브 소재의 파괴 가운데 하나이기 때문에 터짐현상은 연성과파괴 이론에 의해 설명되고 예측될 수 있다. 연성과파괴이론은 재료의 최대 데미지 지수가 임계 데미지값을 초과하면 발생된다는[9]것으로 균질 소재의 경우 재료의 물성치에 해당된다. 연성과파괴 이론은 Rice & Tracey, Oyane, Osakada 등 많은 연구자들에 의해 제안되어 다양한 기준이 있는데 본 연구에서는 Cockcroft and Latham 의 기준을 이용하였다. 이 식은 인장응력에 의해 축적된 에너지가 임계값을 초과하면 파괴된다는 이론으로서 실제 적용에 대한 신뢰도가 가장 좋은 것으로 보고되고 있다. 식 (1)은 Cockcroft and Latham 의 데미지 이론식을 나타내고 있다. 여기서,  $\sigma^*$ 는 최대 인장응력,  $\sigma$ 는 유효응력,  $C_b$  는 임계 데미지를 나타내고 있다[9~10]. 전술한 바와 같이 데미지 값은 소재의 물성치에 해당되므로 실험에 의해 그 신뢰도가 입증되는 것이 바람직하다. 따라서, 본 연구에서는 Al6061 소재에 대해 실험과 해석을 통해 정량적인 지수값을 선정하였다. 해석은 변형속도의 영향을 고려하기 위해 강점소성 이론을 이용하였으며 데미지 값이 요소크기에 영향을 받으므로 요소 크기를 최대 0.7mm 이하로 작게 유지하도록 하였다. 열전달 해석을 위한 열물성치는 DEFORM-2D<sup>TM</sup>에서 제공하는 값을 이용하였다.

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

## 3. 결과 및 고찰

Al 6061 튜브의 열처리에 따른 성형성을 평가하기 위해 온간인장시험을 수행한 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 열처리 조건은 경제성과 성형성 그리고 기계적 특성을 고려하여 압출 후 미열처리, 완전풀림(full annealing), 그리고 T6 처리의 세가지 종류로 이루어졌다. 각 종류 별로 열처리 된 튜브에 대해 성형온도인 200℃에서의 변형거동을 살펴보면 완전풀림된 튜브의 경우, 미열처리된 튜브에 비해 가공경도지수가 매우 낮은 것으로 나타났고, 항복강도 또한 50MPa 이상 낮은 것으로 나타났다. 일반적으로 소재의 유동응력이 낮을수록 변형저

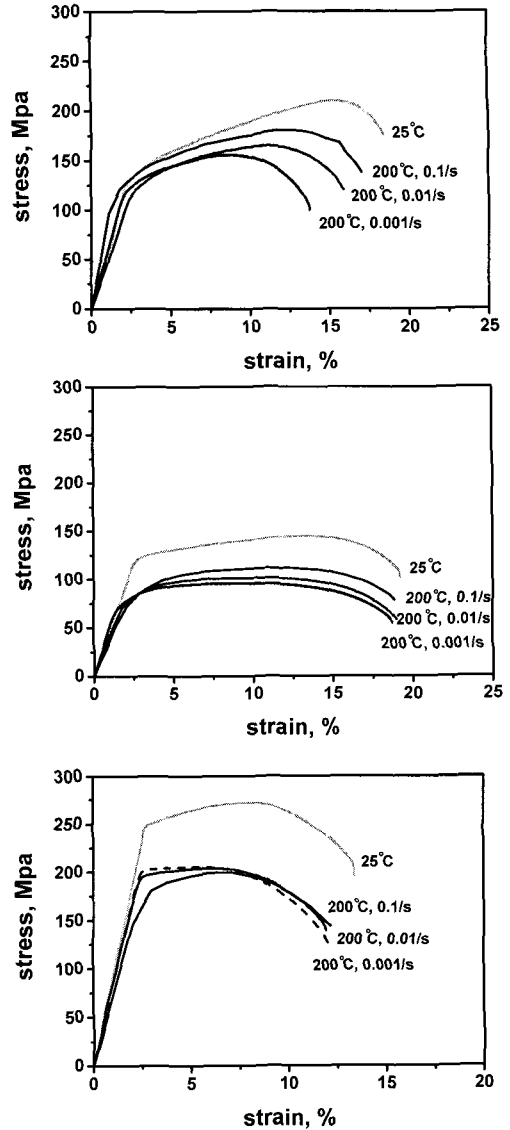


Fig. 3 Flow stresses of Al 6061 tubes with various pre-heat treatments

항이 작고, 소성안정영역 즉 소재가 변형에 대한 안정화를 유지할 수 있는 영역에서의 변형율인 균일 연신율이 클수록 성형성이 좋은 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 성형성 측면에서는 완전풀림된 튜브가 미열처리된 튜브에 비해 상대적으로 우수한 온간변형거동을 보이는 것으로 판단된다. 반면 T6 열처리된 튜브의 경우 Fig. 3의 (c)에서 보는 바와 같이 성형온도인 200℃에서 아주 높은 항복강도와 더불어 심한 연화현상을 보이는 것

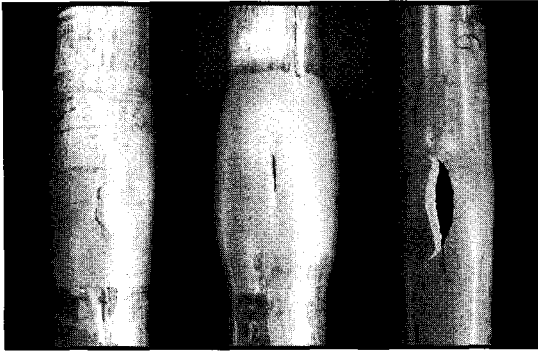
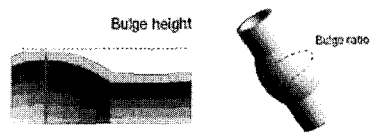


Fig. 4 Bulge tested tubes with various heat-treatments (a) as extruded (b) Full annealed (c) T6-treated tube

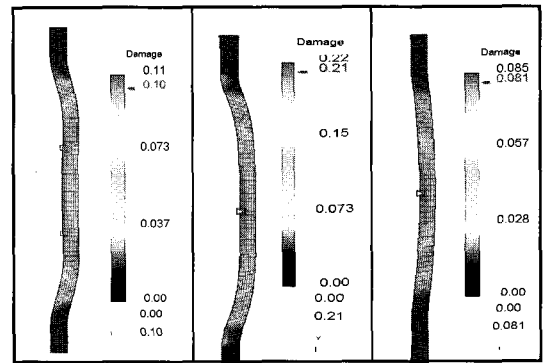
로 나타나 매우 낮은 성형성을 갖는 것으로 판단되지만 그다지 높은 성형성을 요구하지 않는 부품에 적용될 경우에 성형 후 후열처리공정을 줄여줄 수 있다는 잇점이 있다고 하겠다. 두께가 얇은 튜브의 액압성형의 경우, 성형 후에 T6와 같은 후열처리 공정을 거치게 되는 동안 성형품의 형상이 변형되거나 치수가 달라질 수 있기 때문에 그러한 측면에서는 T6처리된 튜브가 아주 유용하게 이용될 것으로 판단된다. 한편, 튜브의 액압성형의 경우 소성변형을 일으키는 응력이 원주방향과 길이방향의 응력으로 2축변형이 일어나게 된다. 따라서 일축인장시험결과만으로는 액압성형성을 적절하게 평가하기 곤란하므로 자유확관 액압성형 시험을 수행하였고, 성형온도 200℃에서 자유확관시험을 통해 파단에 이른 튜브를 Fig. 4에 나타내었다. 튜브는 액압을 가함에 따라 확장되고 최대반경에 이른 후 길이 방향으로 파단되었다. 파단 시 최대반경은 완전풀림된 튜브가 30.6mm로 가장 높게 나타났고, 미열처리 튜브가 29.1mm 그리고 T6처리된 튜브가 27.8mm로 나타나 각 소재의 온간인장거동에서의 연신율 차이와 유사한 경향을 나타내었다. Fig. 4의 확관 튜브에서 보는 바와 같이 완전풀림된 튜브가 미열처리된 튜브에 비해 확관율이 높을 뿐 아니라 균일한 변형이 일어났음을 알 수 있다. 반면, T6 처리된 튜브는 확관율도 좋지 않을 뿐 아니라 가장 불균일한 변형 형태를 보이는 것으로 나타났다.

일반적으로 소성가공 시 파단은 소재에 가해지는 변형이 소재의 변형한계를 초과하게 될 경우 발생한다. Al 6061의 액압성형 시에는 주로 인장에 의한 변형이 소재의 변형한계를 초과할 때 파

Table 2 Geometric parameters of bulge tested tubes



	Bulge height (mm)	Bulge Ratio (%)
As extruded	29.13	14.6
Full annealed	30.60	20.5
T6 treated	27.83	9.6



(a) As extruded (b) Full annealed (c) T6 treated  
Fig. 5 Damage values calculated by FE analysis

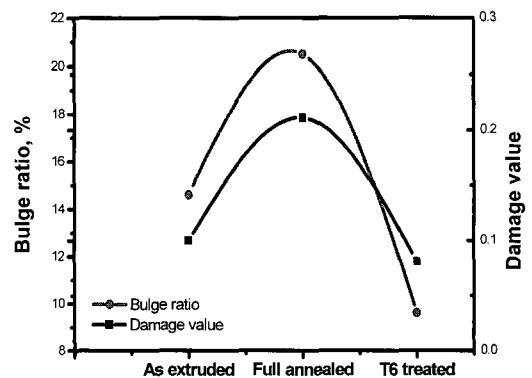


Fig. 6 Bulge ratios and damage values with various heat treatment conditions

단이 발생하게 되고 이러한 특성은 소성한계가 임계치에 도달하면 파괴가 발생한다는 소성변형 에너지 개념에 근거한 연성파괴조건인 Cockcroft-Latham 식에 잘 적용된다고 할 수 있다[4].

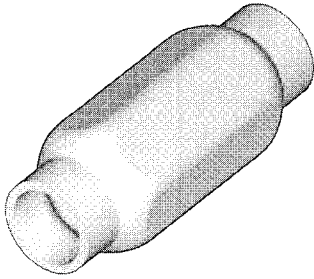


Fig. 7 Hexagonal shape hydroforming model

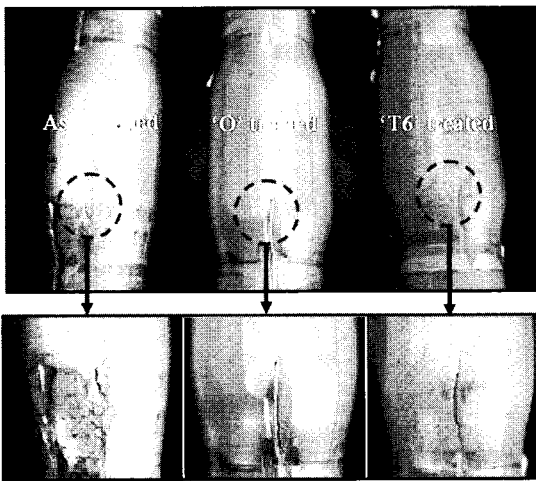
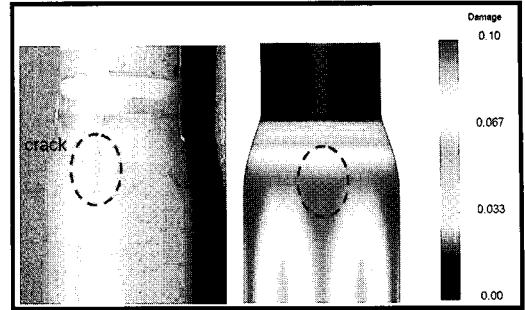
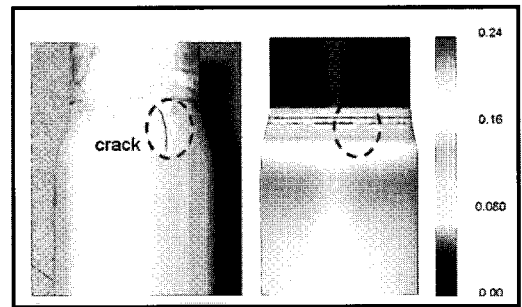


Fig. 8 Hexagonal shaped hydroformed parts

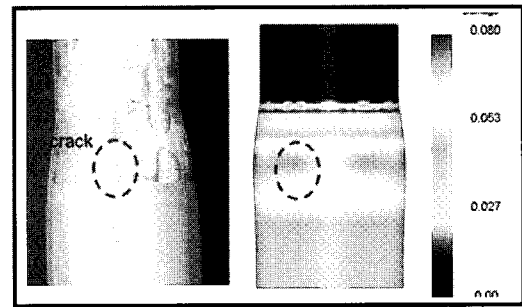
본 연구에서는 A16061 튜브의 온간액압성형에서 성형한계를 평가하기 위하여 온간인장시험에서 구한 각 소재의 응력-변형률 곡선을 DEFORM-2DTM의 소재 물성으로 활용하고 각 열처리 조건에 따른 튜브의 자유확관시험을 수행하여 파단시 확관율을 구하였다(Table 2). 그리고 Fig. 5에 나타난 것과 같이 각 열처리 조건에 대해 실제 자유확관시험에서 구한 확관율과 동일한 확관율에서의 데미지 지수를 산출하였다. 산출된 데미지 지수는 완전풀림된 튜브가 0.2로 가장 높았고, 미열처리된 튜브, T6처리된 튜브가 각각 0.1, 0.08로 확관율 변화와 유사한 경향을 나타내었다(Fig. 6). 해석에서 산정한 데미지 지수의 신뢰성 확인을 위해 Fig. 7에 나타난 것과 같은 육각형상의 모델을 자체적으로 설계하여 먼저 FE 해석을 수행하였다. DEFORM-3DTM를 이용하여 각 열처리 조건에 대해 실제 시험과 같은 성형조건을 입력하고 연성파괴 조건을 적용한 데미지 지수 분포를 나



(a) As extruded tube



(b) Full annealed tube



(c) T6 treated tube

Fig. 9 Comparison of experiment and FE analysis

타내었다. 다음으로 같은 모델의 실제 시제품을 액압성형하였다. 액압성형 후 파단된 튜브를 열처리 별로 Fig. 8에 나타내었다. 열처리 조건에 따라 파단 위치와 형태가 조금씩 다르게 나타남을 알 수 있다.

육각 확관 액압성형 후 파단이 일어난 튜브와 FE 해석을 비교한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 보는 바와 같이 확관형상이 유사할 뿐만 아니라 실제 파단이 일어난 부위가 앞서 자유확관시험을 통하여 도출한 한계 데미지 지수가 나타난 부위와 동일한 위치와 성형량에 도달하고 있다.

구체적으로 (a)의 압출상태에서는 데미지 지수가 0.1에 도달했을 때, (b)의 완전풀림상태에서는 0.24에 도달했을 때 파괴되고 있으며 (c)의 T6상태에서는 0.08로 확산시험에서 얻은 결과와 동일한 값의 임계데미지 지수를 적용하는 것에 대한 타당성을 입증해주고 있다. 따라서, 온간 액압성형 공정에서 연성파괴 조건을 적용한 데미지 지수로 성형한계 예측이 가능한 것으로 판단되었다.

#### 4. 결론

(1) 열처리 별 튜브의 온간인장시험 결과 완전 풀림된 튜브가 상대적으로 유동응력은 낮고 균일 연신율은 높아 액압성형성이 가장 높은 것으로 나타났고, 반면 T6 처리된 튜브는 높은 항복강도와 심한 연화현상을 나타내었다.

(2) 자유확관 액압성형 시험과 연성파괴 이론을 적용한 FE 해석을 통하여 액압성형한계 값으로 데미지 지수를 산출하였다.

(3) 육각확관 액압성형 시험과 FE 해석을 통하여 앞서 산출된 한계 데미지 지수가 나타나는 부위와 실제 파단이 일어나는 부위가 아주 유사하게 나타나 AI 6061 튜브의 액압 성형 시 파단 발생 가능성을 예측할 수 있는 것으로 확인되었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Novotny, P. Hein, 2001, J. Mater. Proc. Tech. Vol. 115, p. 65.
- [2] S. Novotny, M. Geiger, 2003, J. Mater. Proc. Tech. Vol. 138, p. 594.
- [3] M. Y. Lee, S. M. Sohn, C. Y. Kang, D. W. Suh, S. Y. Lee, 2004, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 155-156, p. 1337.
- [4] D. J. Latham, M. G. Cockroft, Feb, 1966, The effect of stress system on the workability of metals, NEL Report No. 213.
- [5] R. E. Reedhill, R. Abbashian, 1992, Physical Metallurgy Principles(PWS-KENT).
- [6] D. Li, A. Ghosh, 2003, Mat. Sci. & Eng. Vol. A352, p. 279.
- [7] Y. V. R. K. Prasad, S. Sasidhara, 1997, Hot Working Guide(ASM International).
- [8] 박종진, 이영석, 1997, 소성가공을 위한 연성 파괴조건에 대한고찰, 대한기계학회논문집(A), 제 21 권 제 7 호, pp. 1021~1029.
- [9] T. Altan, H. Kim, M. Yanmanaka, 1995, Proceeding of The NAMRC Society of Manufacturing Engineers, Houghton, MI, p. 63.
- [10] C. Maccormack, J. Monaghan, 2001, J. of Materials Processing Technology, Vol. 117, p. 209.