

〈 논문 〉

하이드로포밍 부품의 성형성 평가기준 적용 연구

허성찬* · 송우진** · 구태완*** · 김 정*** · 강범수†

(2006년 8월 31일 접수, 2007년 7월 19일 심사완료)

Study on Application of Forming Limit Criteria for Formability on Hydroforming Parts

Seong-Chan Heo, Woo-Jin Song, Tae-Wan Ku, Jeong Kim and Beom-Soo Kang

Key Words : Tube Hydroforming(관재액압성형), FLSD(응력기반성형한계선도), Formability(성형성)

Abstract

In tube hydroforming process, several defective products could be obtained such as bursting, wrinkling, folding, buckling. Because, especially, bursting is most frequently occurred failure among the well known failures, it is mostly important to predict the onset of bursting failure on tube hydroforming process. For most sheet metal forming processes, strain based forming limit diagram(FLD) is used often as a criteria to estimate the possibility of onset of the failures proposed above. However, FLD has a shortcoming that it is dependent on strain path while stress based diagram is independent on strain history. Generally, tube hydroforming consists of three main processes such as pre-bending, pre-forming, and hydroforming and it means that the strain histories of final products are nonlinear. Therefore, forming limit stress diagram(FLSD) is more suitable to predict forming limit for hydroforming parts. In this study, FLSD is applied to estimate bursting failure for an engine cradle of an automobile part. Consequently, it is proved that application of FLSD to predict forming limit is available for tube hydroforming parts.

1. 서 론

관재하이드로포밍(tube hydroforming) 기술은 최근 들어 경량화 부품에 대한 수요가 증가함에 따라 자동차 부품 분야에서 경량화를 위한 신가공 공정기술로서 폭 넓게 이용되고 적용범위를 넓혀가고 있는 소성가공 기술이다.⁽¹⁾ 하이드로포밍 기술은 부품의 경량화 이외에도 기존의 공정을 대

체하는 동시에 공정을 간소화하여 부품의 일체화를 구현할 수 있다. 이와 같은 부품의 일체화는 무게 감소와 더불어 강도의 향상을 만족시킬 수 있기 때문에 원자재 이용량의 절감 등의 효과도 아울러 기대할 수 있다. 그리고 하이드로포밍 공정은 부품 생산시간이 적게 소요되므로 대량 생산에 의한 생산성 향상에도 기여하는 기술이다.

그러나 하이드로포밍 기술은 확관을 위해 부가되는 압력(internal pressure)과 과도한 두께감소를 방지하기 위한 축방향의 소재 유입(axial feeding)이 동시에 수행되는 하중의 조합에 의한 성형기술이므로 하중경로/loading path)가 성형성에 미치는 영향이 크다. 이는 Fig. 1과 같이 성형조건이 부적절한 경우에 좌굴(buckling), 주름(wrinkling),

† 책임저자, 회원, 부산대 항공우주공학과

E-mail : bskang@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2310 FAX : (051)513-3760

* 부산대 항공우주공학과 대학원

** 부산대 산학협력단

*** 부산대 항공우주공학과

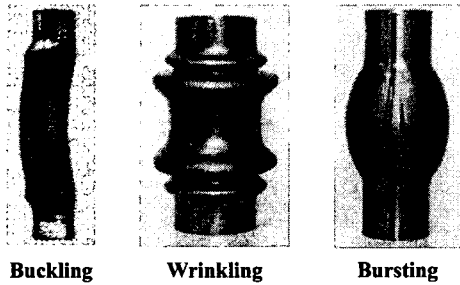


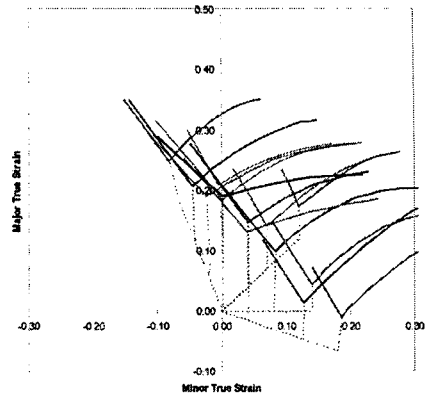
Fig. 1 General failure modes in tube hydroforming process

터짐(bursting) 등의 성형불량이 발생할 수 있다⁽²⁾. 좌굴은 공정초기의 과도한 소재의 유입으로 인하여 발생하는 성형불량으로 예측이 쉬우며, 주름은 공정 도중에 유입된 소재의 양이 많을 경우 발생하지만 이는 주름이 발생하기 시작할 때 관내의 압력을 증가시킴으로써 제거할 수 있다⁽³⁾. 이에 반하여 터짐은 소성불안정(plastic instability) 현상인 네킹(necking)의 발생에 이어서 짧은 시간 내에 일어나기 때문에 터짐과 네킹을 같은 현상으로 가정할 수 있다. 이는 또한 하이드로포밍 공정에서 가장 빈번히 발생하며⁽⁴⁾ 좌굴이나 주름과 비교할 때 회복이 불가능한 불량이므로⁽⁵⁾ 터짐에 의한 성형한계를 예측함으로써 하이드로포밍 부품의 성형성을 평가할 수 있다.

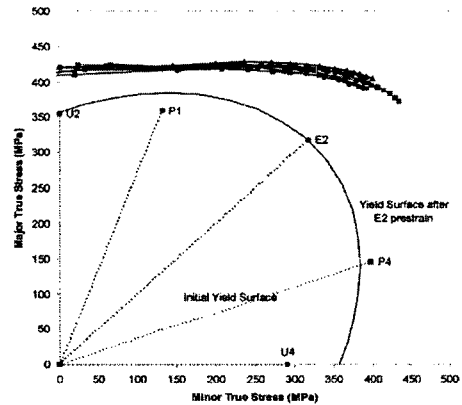
이에 본 연구에서는 하이드로포밍 공정 중에 발생 할 수 있는 터짐 현상을 예측하기 위한 이론적 근거로 변형률 경로(strain path)에 대하여 무관한 응력기반의 성형한계선도(forming limit stress diagram)를 제안하였으며, 이를 하이드로포밍 부품의 성형성 예측에 적용하였다.

2. 성형한계선도의 변형률 경로 의존성

변형률기반성형한계선도(strain based forming limit diagram)는 판재성형 공정의 성형한계 판별 시 이용되는 성형한계 기준이다. 그러나 변형률기반성형한계선도는 Fig. 2(a)와 같이 변형률 경로에 의존적인 성질을 가진다. Fig. 2(a)는 2축 인장(equi-biaxial), 단축인장(uniaxial), 평면변형률(near-plane-strain) 상태의 초기변형률(pre-strain) 경로를 가지는 변형률기반성형한계선도를 주변형률



(a) FLD



(b) FLSD

Fig. 2 Forming limit diagram and forming limit stress diagram for initial strain⁽⁶⁾

평면에 각각 도시하고 있다. 이러한 변형률기반성형한계선도는 Fig. 2(a)에서와 같이 변형률 경로에 따라 성형한계선도의 위치 및 형상이 확연히 다르게 나타남을 보인다.⁽⁶⁾

이와는 달리 Fig. 2(b)는 응력기반성형한계선도(forming limit stress diagram)를 보여주고 있으며 이는 변형률과 응력과의 관계식을 이용하여 Fig. 2(a)의 각 성형한계선도를 응력평면에 도시한 것이다. Fig. 2(b)에서 알 수 있듯이 응력기반성형한계선도는 변형률기반성형한계선도와 달리 변형률 경로에 대해 무관하게 하나의 선도로 수렴하고 있다. 이는 변형률 경로가 비선형적인 소성가공 공정에 대한 터짐 현상을 예측함에 있어서 응력을 기반으로 한 성형한계선도가 더욱 적합함을 의미한다.⁽⁷⁾ 특히 하이드로포밍 공정에 이용되는

예비성형체(preform)는 일반적으로 굽힘(bending) 및 예비성형(preforming) 공정을 거친 소재로서 비선형적인 초기변형률을 가진다. 그러므로 하이드로포밍 부품에 대한 터짐을 예측함에 있어 응력기반성형한계선도를 이용하는 것이 더욱 적합하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 소성불안정이론을 근거로 한 응력기반성형한계선도를 도출하여 이를 하이드로포밍 부품의 성형한계 예측에 이용하였다.

3. 응력기반성형한계선도

3.1 하이드로포밍 관재 물성모델

소재의 물성모델은 소성가공 해석과 성형성 평가의 정확도를 결정함에 있어 중요한 요소이다. 하이드로포밍에 이용되는 관재는 판재와 다른 물

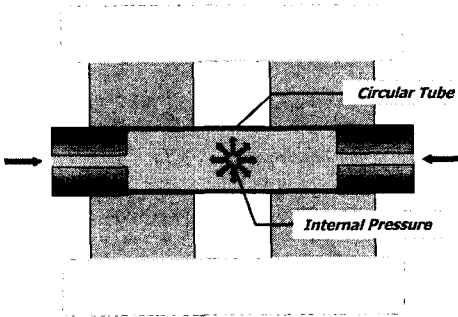


Fig. 3 Schematic view of free bulge test process to obtain material properties for tube

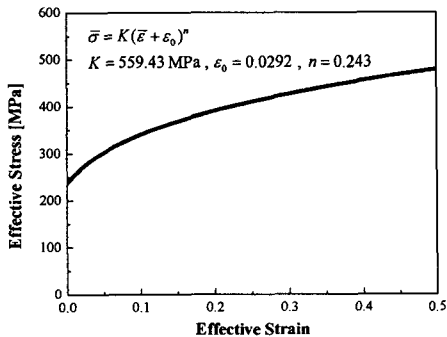


Fig. 4 Work-hardening model of tubular preform material for hydroforming

성모델을 갖는데 이는 관재의 조판 시 롤링(rolling), 용접(welding), 사이징(sizing) 등의 공정을 거치기 때문에 원래의 모재와 화학적 조성이 같더라도 판재(sheet)와는 다른 소성거동을 보이는 것이다.⁽⁸⁾ 즉, 판재와 판재의 응력, 가공경화 및 항복응력 등과 같은 물성치는 차이가 있다. 이에 하이드로포밍용 관재의 물성모델 도출을 위하여 Fig. 3과 같은 자유확반시험(free bulge test)을 수행하여 Fig. 4와 같이 초기변형률을 고려한 하이드로포밍용 관재의 가공경화모델을 도출하였다.

3.2 소성불안정조건 및 응력기반성형한계선도

Fig. 5와 같이 내압(p)과 축 방향의 압축력(F)을 받고 있는 길이가 l 이고 두께(t)가 반경(r)에 비해 얇은 관재($t \ll r$)를 고려하면 두께방향의 응력 성분은 매우 작다고 볼 수 있으므로 이를 평면응력(plane stress) 상태로 가정하였다. 또한 재료가 수직이방성(normal anisotropy) 거동 특성을 보인다고 가정하고 식 (1)과 같은 Hill의 2차형 항복함수를 이용하여 성형한계선도 도출에 이용하였다.^(3,7)

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (1)$$

먼저 Hill이 제안한 국부네키징조건⁽⁹⁾에 대한 소성불안정조건식은 식 (2)와 같으며

$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} \leq \frac{(1+\alpha)(2-\rho)}{2(1-\alpha\rho + \alpha^2)^{1/2}} \quad (2)$$

Swift의 확산네키징에 대한 소성불안정조건식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{1}{Z_D} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} \leq \frac{\alpha(2\alpha - \rho)^2 + (2 - \alpha\rho)^2}{4(1 - \alpha\rho + \alpha^2)^{3/2}} \quad (3)$$

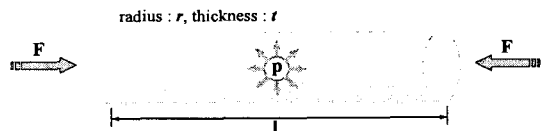


Fig. 5 Analytical model of tube hydroforming

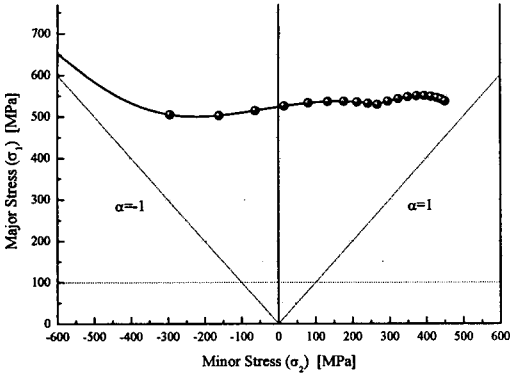


Fig. 6 Forming limit stress diagram for given tubular material

여기서 하이드로포밍 공정에 이용되는 관재를 초기변형률을 갖는 n 승 경화식 $\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n$ 을 따른다고 가정하여 적용하면 성형한계응력 성분을 식 (4)와 같이 얻을 수 있다. 따라서 자유확관 시험에서 획득한 계수 $K=559.43\text{MPa}$, $n=0.243$, $\epsilon_0 = 0.0292$ 를 이용하면 주어진 관재에 대한 응력기반성형한계선도를 Fig.6과 같이 얻을 수 있다.

$$\sigma_1^c = \frac{(1+R)^2}{1+2R} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \left[\epsilon_1^c + \frac{R}{1+R} \epsilon_2^c \right] \quad (4)$$

$$\sigma_2^c = \frac{(1+R)^2}{1+2R} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \left[\epsilon_2^c + \frac{R}{1+R} \epsilon_1^c \right]$$

4. 하이드로포밍 부품의 성형해석 및 FLSD를 이용한 성형성 평가

본 연구에서는 하이드로포밍에 대한 성형성 평가 적용을 위하여 대형 승용차용 engine cradle에 대한 하이드로포밍공정 해석을 수행하였으며 해석결과와 응력기반성형한계선도를 이용한 성형성 평가를 수행하였다. 해석에는 Explicit Code를 이용하는 ANSYS LS-DYNA가 사용되었으며 해석 모델의 구성은 Fig.7과 같다. 금형은 상형과 하형으로 구분되어 있고 편치는 양쪽 끝단에 평행하게 위치하고 있다. 관재는 앞서 제시한 n 승 강소성 재료 모델을 가정하였다. 그리고 예비성형체의 초기 두께는 직관일 때 $2.0t$ 이며 직경은 65mm

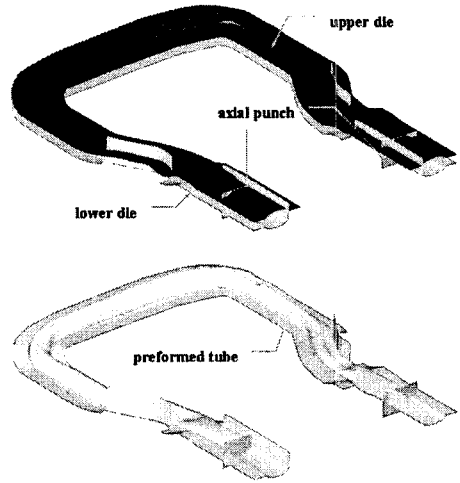
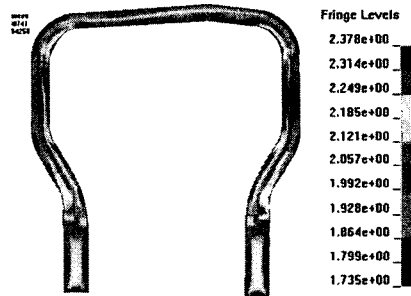
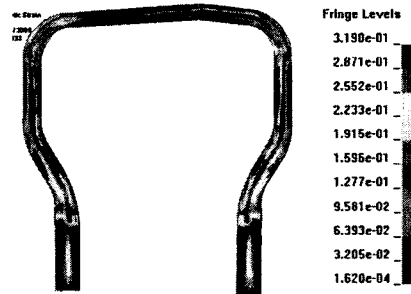


Fig. 7 3D model for finite element analysis



(a) Initial thickness distribution



(b) Initial strain distribution

Fig. 8 Initial state of preformed tube

이다. 하이드로포밍 공정에 이용된 예비성형체 모델은 20,000개의 4-node 셸 요소(shell element)

로 구성되어있고, 굽힘과 예비성형공정에서 발생한 변형을 고려하기 위하여 부위마다 다른 초기 두께와 변형률을 갖도록 Fig.8과 같이 모델링하였다. 마찰계수는 상형, 하형과 관재 사이는 0.05, 관재 끝단과 펀치 사이는 0.1로 두었다.

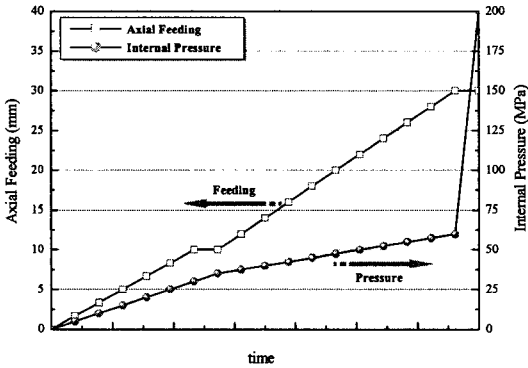
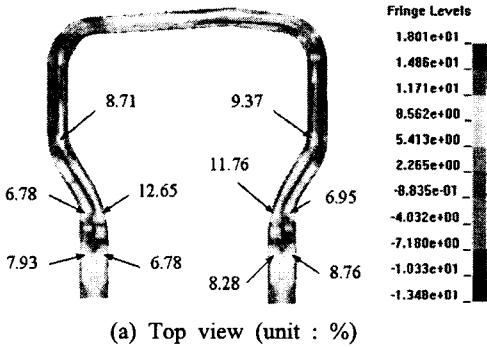
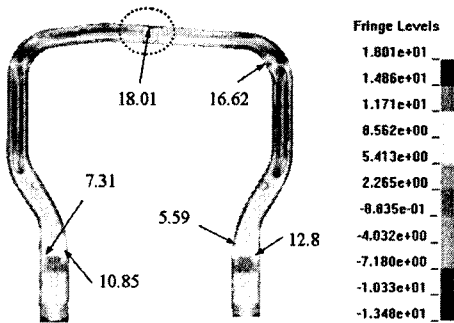


Fig. 9 Loading path for hydroforming process of an engine cradle



(a) Top view (unit : %)

Max. thinning : 18.01%



(b) Bottom view (unit : %)

Fig. 10 Thinning distributions of the final product

하이드로포밍 공정은 금형이 닫힌 후 관재 내부의 압력과 관재의 양 끝에 동일한 양의 피딩이 가해진다. 여기서 부여된 하중조건은 Fig. 9와 같으며 최대 압력과 피딩량은 각각 200MPa, 30mm이다. 이 하중조건에 대한 engine cradle의 하이드로포밍 공정해석 결과는 Fig. 10에 도시한 것과 같으며, 직관적으로 변형이 국부적으로 크게 발생하지 않고 고르게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 최대두께감소율은 engine cradle의 아래면 중앙부에서 약 18%정도의 감소율이 발생할 것으로 예상된다. 하지만 이는 하중조건의 수정을 통한 성형성 개선보다는 예비성형체의 재설계에 의한 개선이 이루어져야하는 부분이며 아울러 이 부분에서 예측되는 두께감소율은 최대두께감소율 20%(최소 두께 1.6t)의 요구조건을 만족시키는 것이므로 최종 성형제품에서 발생하는 문제는 없을 것으로 판단할 수 있다.

그러나 두께 감소율을 이용한 성형성 평가는 이론적 근거가 다소 부족한 측면이 있다. 이에 본 연구에서는 하이드로포밍 부품의 성형성 판별에 대한 이론적 근거로서 3장에서 제시한 응력기반성형한계선도를 이용하였으며 이를 위해 해석된 결과로부터 모든 요소(element)의 주응력 값을 주응력평면상에 Fig.11과 같이 도시하였다. Fig.11에서 알 수 있듯이, engine cradle은 제한된 하중조건에서 성형 후 응력상태가 응력기반성형한계선도의 아래의 안전영역에 분포하고 있으며, 이는 본 연구에서 적용한 성형조건이 터짐에 대하여 안전함을 의미한다. 또한 주응력 분포를 살펴보면 축방향 압축력을 받는 관재 끝단에 해당하

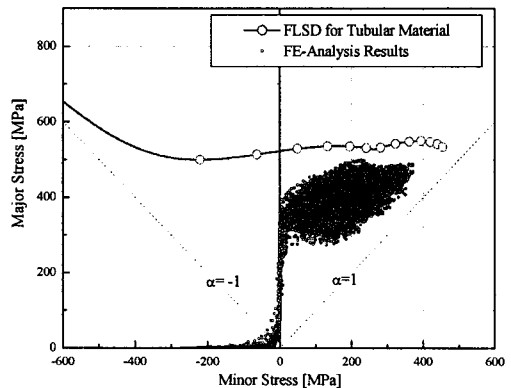


Fig. 11 Prediction of bursting failure for an engine cradle part using FLSD

는 영역에서는 압축응력 상태가 존재하나 대부분의 영역에서 양의 분포를 보이고 있으므로 주로 확관에 의한 2축 인장 변형이 발생하고 있음을 알 수 있다. 아울러 성형한계선도와 응력상태간의 최근접거리의 차이를 살펴보면 약 50MPa 정도의 여유가 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 적용된 engine cradle은 터짐 발생 없이 가공될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 관재를 이용한 하이드로포밍에서 빈번히 발생하는 터짐현상을 예측하고 판별하는 예측 기준을 소성불안정이론에 근거하여 제시하였다. 또한, 일반적인 성형한계선도로 많이 이용되는 변형률기반성형한계선도가 갖는 변형률 경로에 대한 의존성을 보완하는, 변형률 경로에 무관하게 동일한 경향을 보이는 응력기반성형한계선도를 이용하였다. 이를 적용 및 검증하기 위하여 engine cradle 부품의 하이드로포밍 공정 해석을 수행하였으며 해석 결과를 제시한 성형한계선도에 적용하여 성형성 평가를 수행하여 제품의 안정성을 검증하였다.

그러므로 하이드로포밍 공정을 비롯한 다단계 드로잉(multi stage deep drawing), 코킹(caulking)에 의한 기계적 체결 공정 등과 같이 다단계 성형공정을 거치면서 비선형적인 변형률경로를 갖는 소성가공 부품에 대한 성형성을 예측할 경우에는 변형률기반성형한계선도를 이용하는 것보다 본 연구에서 제안된 응력기반성형한계선도를 이용하는 것이 좀 더 정확한 성형한계를 예측할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업과 최우수실험실지원사업의 연구결과입니다. 또한 본 연구는 2단계 BK21사업, 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15-2006-022-02002-0)의 지원에 의하여 수행

되어졌으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lücke, H.-U., Hartl, Ch. and Abbey, T., 2001, "Hydroforming," *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol. 115, pp.87~91.
- (2) Dohmann, F. and Hartl, Ch., 1996, "Hydroforming - a Method to Manufacture Light-Weight Part," *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol. 60, pp.669~676.
- (3) Kim, S.W., Kim, J., Park, H.J. and Kang, B.S., 2004, "A Prediction of Bursting in Tube Hydroforming Process Based on Necking Criteria," *Transactions of Materials Processing*, Vol 13. No. 7, pp.629~634.
- (4) L.P. Lei, J. Kim and B.S. Kang, 2002, "Bursting Failure Prediction in Tube Hydroforming Processes by Using Rigid Plastic FEM Combined with Ductile Fracture Criterion," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp. 1411~1428.
- (5) Thiruvarduchelvan, S., Seet, G.L. and Ang, H.E., 1996, "Computer-Monitored Hydraulic Bulging of Tubes," *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol. 57, pp.182~188.
- (6) Stoughton, T.B. and Zhu, X., 2004, "Review of Theoretical Models of the Strain-Based FLD and Their Relevance to the Stress-Based FLD," *International Journal of Plasticity*, Vol. 20, pp.1463~1486.
- (7) Kim, S.W., Kim, J., Lee, J.H. and Kang, B.S., 2005, "Forming Limit Prediction in Tube Hydroforming Processes by Using the FEM and FLSD," *Transactions of Materials Processing*, Vol 14. No. 6, pp.527~532.
- (8) Fuchizawa, S. and Narazaki, M., 1993, "Bulge Test for Determining Stress-Strain Characteristics of Thin Tubes," in: Proceedings of the 4th International Conference on Technology of Plasticity. *Advanced Technology of Plasticity*, pp.488~493.
- (9) Hill, R., 1983, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford University Press, New York.