

## 튜브 액압성형품의 가공 경화 특성 연구

박현규<sup>1</sup> · 임홍섭<sup>1</sup> · 이해경<sup>1</sup> · 김광순<sup>2</sup> · 문영훈<sup>#</sup>

# Strain Hardening Behavior in the Tube Hydroforming

H. K. Park, H. S. Yim, H. K. Yi, K. S. Kim, Y. H. Moon

(Received August 21, 2008)

### Abstract

Strain hardening behavior during hydroforming has been experimentally investigated. The variation of flow stress was used as an index of strain hardening during respective processes and the flow stress was estimated from the relationship between flow stress and effective strain. The local hardness after hydroforming was also predicted by effective strain. By using the inter-relationships between hardness-flow stress-effective strain at variable pre-strains, the strain hardening behavior during hydroforming has been successfully analyzed. The comparison of predicted hardness with measured hardness confirmed that the methodology used in this study was feasible and the strain hardening behavior can be quantitatively estimated.

**Key Words** : Tube Hydroforming, Strain Hardening, Preforming, Pre-strain

## 1. 서 론

액압성형(hydroforming)은 관재나 판재를 일정한 형상의 금형에 고정된 후 정수압을 인가해 원하는 형상으로 성형하는 공법으로서[1~7] 부품 경량화 뿐 아니라 강성향상, 치수정도 향상 등의 이점이 있어 전세계적으로 사시부품, 차체부품 및 배기계 등에 활발히 적용되고 있다[8~9]. 액압성형품의 특성면에서 보면 액압성형 공정 시 축방향 압입, 내부 압력, 확장량, 튜브와 금형 간 마찰 등의 여러 공정 변수에 따라 소재의 성형성 및 가공경화 정도가 달라지게 된다[10]. 따라서 액압성형된 제품의 부위별 강도의 정확한 예측은 건전한 부품제조에 필수적으로 요구되는 항목이다.

본 연구에서는 액압성형시 변형부위의 가공경화정도를 정확하게 예측해주기 위해 실험적으로 구한 유동응력-경도-유효변형률의 상관관계를 이

용하여 변형에 따른 가공경화를 예측하고자 하였으며 실제 엔진크레들의 액압성형시 본 연구결과를 적용시켜 적용성과 타당성을 평가하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 변형률에 따른 경도 및 강도 측정

본 연구에서 사용한 소재는 HF370 과 HF440으로 원소재의 변형률에 따른 강도와 경도의 상관관계를 파악하기 위하여 각각의 소재에 대하여 5%, 10%, 20%의 변형률로 인장시험을 실시하였다.

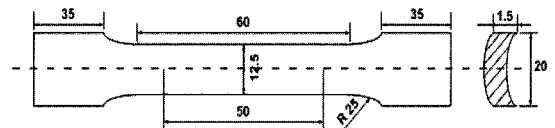


Fig. 1 Tensile test specimen

Unit : mm

1. 부산대학교 기계공학부  
2. 현대하이스코 기술연구소  
# 부산대학교 기계공학부, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

**Table 1 Mechanical properties of HF370, HF440**

Material	TS(Mpa)	YS(Mpa)	Total-EL(%)	Uniform-EL(%)
HF370	385	326	38.2	27.5
HF440	466	397	32.0	25.6

인장시험을 통해 일정 변형률로 변형된 시험편 으로부터 경도시험편을 채취하여 인장 변형후의 경도를 측정하였다. 변형률별로 측정된 경도값과 측정된 유동응력을 그래프로 나타내어 추세선을 작성한 다음 HF370과 HF440 강관의 경도와 강도의 상관관계를 구하였다. 실험에 사용된 소재는 외경 65mm, 두께 2.0mm 이며 HF370, HF440의 소재 특성을 Table 1에 나타내었다. 시험편은 강관의 압연방향으로 Fig. 1과 같이 KS규격 13-B호에 맞게 가공하여 실험 하였다.

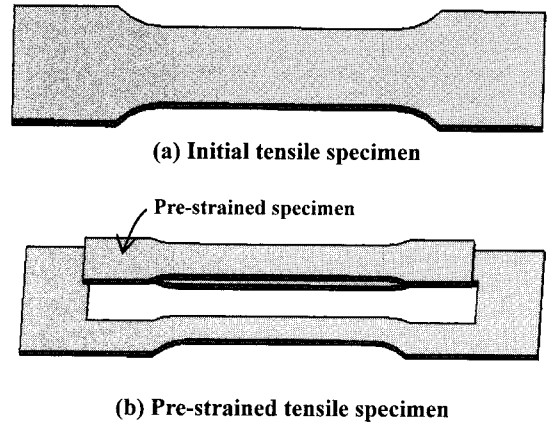
**2.2 예비변형률에 따른 경도 및 강도 측정**

엔진크래들의 액압성형은 최종제품이 되기까지 예비굽힘, 예비성형, 그리고 최종액압성형의 세가지 공정을 거치는 경우가 일반적이다. 따라서 액압성형품의 공정단계별 가공경화 특성을 분석하기 위해 예비 변형된 상태에서의 변형에 따른 경도와 강도의 상관관계를 분석할 필요가 있다.

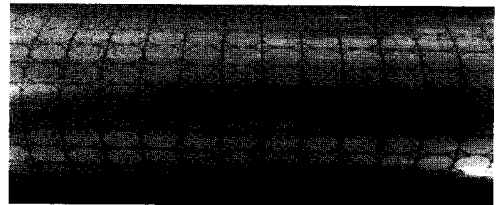
예비 변형된 상태의 시험편을 얻기 위해 Fig. 2(a)에 보인 바와 같이 표점부의 균일한 변형을 유도할 수 있는 시험편에 5%, 10%의 예비변형을 부과한 후 예비변형된 시험편을 이용하여 Fig. 2(b)와 같이 KS규격 13-B호에 맞게 와이어 방전가공을 이용하여 시험편을 제작하였다. 예비변형에 따른 경도와 강도의 상관관계를 분석하기 위해 '2.1'절과 동일한 절차를 거쳐 인장시험을 실시한 후 결과를 해석하였다.

**2.3 액압성형품의 공정별 유효변형 측정**

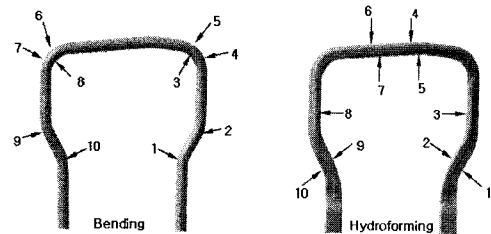
액압성형품 튜브가 각 공정을 거치는 동안 각 부위별 소재의 가공경화 분석을 파악하기 위하여, 먼저 예비굽힘 되기 전 튜브상태의 소재에 Fig. 3과 같이 그리드 예칭을 하고 Fig. 4와 같이 벤딩과 하이드로포밍 작업 시 주요 변형부위를 선정하여 변형률과 경도를 측정하였다. 이때 원주방향의 변형률을 주변형률로 설정하고, 튜브의 길이방향의 변형률을 부변형률로 설정하여 각각의 공정을 거치는 동안의 튜브의 변형률을 Fig. 5와 같이 나타내어 식(1)과 같이 계산하여 주변형률과 부변형률



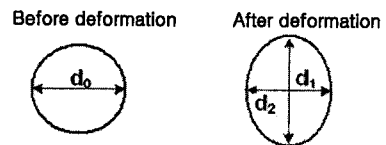
**Fig. 2 Schematic description of tensile specimens**



**Fig. 3 Circular grid technique of measuring strains**

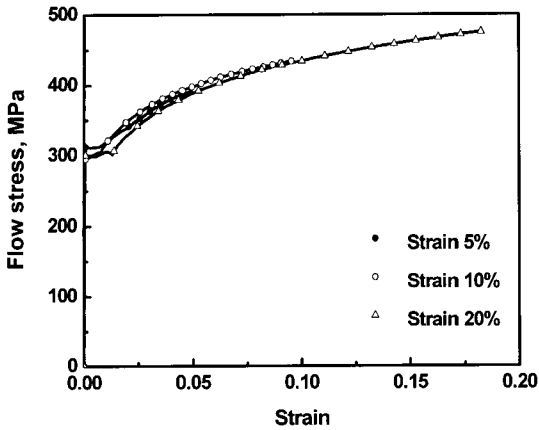


**Fig. 4 Measuring points for effective strain**

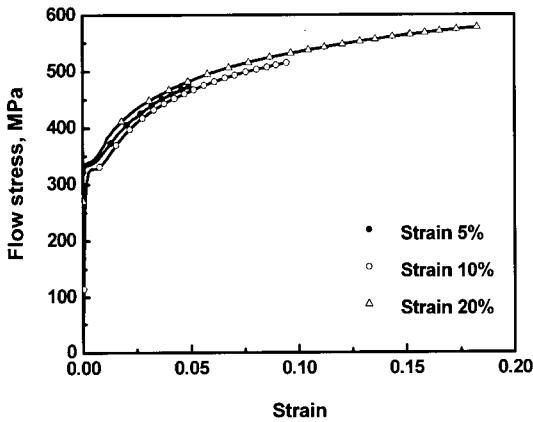


**Fig. 5 Calculation of strains from deformed grid**

의 조합으로 나타낸 다음 소성 변형률 증분 이론과 이방성 재료에 대한 Hill의 2차 항복함수로부터 유효 변형률을 구하였다. 이때 적용된 Hill의 2차 항복함수는 식(2)와 같다. 그리고 이때 변형률을 측정된 부분에서 제품 단면에 비커스 경도를 측정하여 변형률과 강도의 상관관계를 구하였다.



(a) Stress-strain curves of HF370



(b) Stress-strain curves of HF440

Fig. 6 Stress-strain curves according to strain conditions

$$\varepsilon_1 = \frac{d_1 - d_o}{d_o} \quad \varepsilon_2 = \frac{d_2 - d_o}{d_o} \quad (1)$$

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sqrt{d\varepsilon_1^2 + d\varepsilon_2^2 + \frac{2R}{R+1} d\varepsilon_1 d\varepsilon_2} \quad (2)$$

여기서 R은 소성변형비이며 본 연구에서는 R=1.1을 대입하였다.  $d\varepsilon_1$ ,  $d\varepsilon_2$ 는 각각 원주방향, 축방향의 변형률 증분이다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 변형률에 따른 가공경화 분석

예비변형이 없는 HF370과 HF440 시험재를 대상으로 변형률 5%, 10%, 20%까지 인장시험한 후

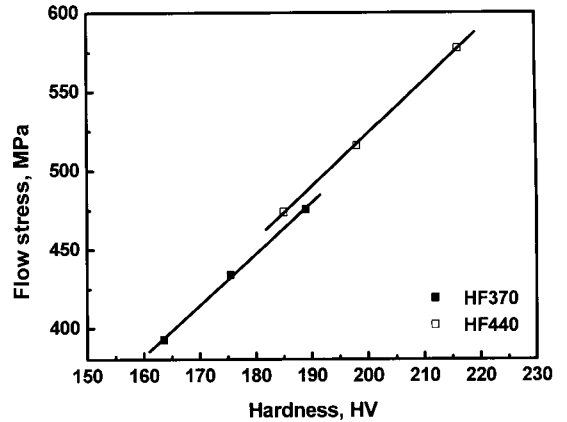


Fig. 7 Relationship between hardness and flow stress

얻어진 유동응력-변형률 선도를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 보인 바와 같이 변형률이 증가할수록 유동응력이 증가함을 알 수가 있으며 변형률별 유동응력과 변형시험편으로부터 측정된 경도를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7의 선형적 관계로부터 유동응력과 경도는 모두 가공경화의 척도로 상호 호환적으로 사용가능함을 알 수 있다.

예비변형이 없는 원소재 튜브의 변형에 따른 소재의 가공경화 특성을 해석할 수 있는 유효변형에 따른 유동응력 예측식을 식(3)과 식(4)에 나타내었다.

$$\text{HF370 : stress}(\sigma) = 830.82 * \bar{\varepsilon} + 350.95 \quad (3)$$

$$\text{HF440 : stress}(\sigma) = 1037.95 * \bar{\varepsilon} + 418.57 \quad (4)$$

#### 3.2 예비변형 효과에 따른 가공경화 분석

예비변형에 따른 가공경화 특성을 분석하기 위하여 5%, 10%의 예비변형을 부과한 시편을 이용하여 5%, 10%, 20%의 변형을 부과하는 인장시험을 수행하였고 이를 통하여 응력-변형률 선형을 부여하였을 때 변형률이 많은 시편의 경도가 증가함을 확인하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 경도가 증가함에 따라 유동응력이 선형적으로 증가하므로 예비변형하에서도 유동응력과 경도는 모두 가공경화의 척도로 상호 호환적으로 사용가능함을 알 수 있다.

예비변형이 있는 경우의 원소재 튜브의 변형에 따른 소재의 가공경화 특성을 해석할 수 있는 유효변형에 따른 유동응력 예측식을 식(5)-식(8)에

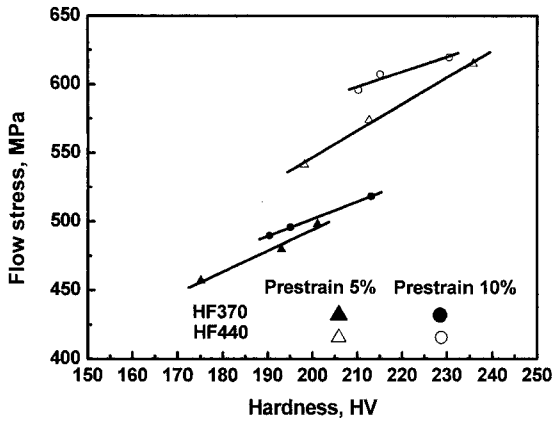


Fig. 8 Relationship between hardness and flow stress

나타내었다. 벤딩이나 프리포밍을 거쳐 하이드로포밍으로 넘어가는 단계의 가공경화 평가 단계에서는 위와 같은 식을 적용하여 가공경화 특성을 구할 수 있다.

$$\text{HF370-5\% : stress}(\sigma) = 297.03 * \bar{\epsilon} + 445.29 \quad (5)$$

$$\text{HF370-10\% : stress}(\sigma) = 141.17 * \bar{\epsilon} + 485.51 \quad (6)$$

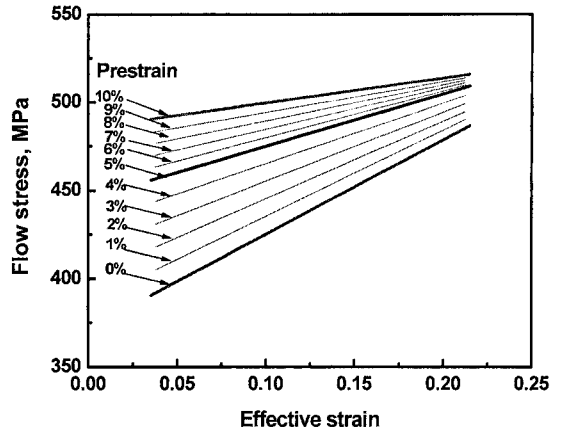
$$\text{HF440-5\% : stress}(\sigma) = 480.06 * \bar{\epsilon} + 520.72 \quad (7)$$

$$\text{HF440-10\% : stress}(\sigma) = 225.41 * \bar{\epsilon} + 584.61 \quad (8)$$

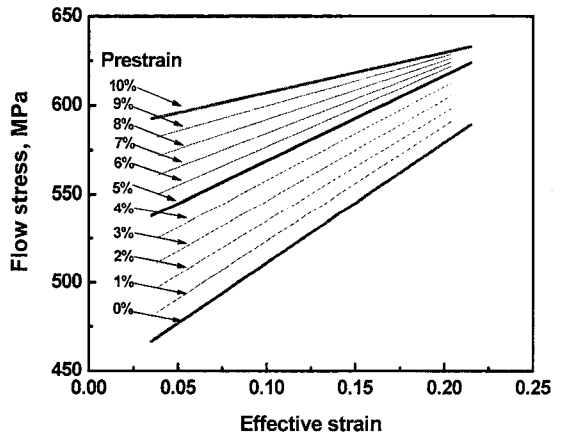
본 연구에서는 예비변형률이 5%와 10% 인 경우만 실험을 하였으므로 다양한 예비변형률에 따른 유동응력 및 강도의 예측을 하기 위해서는 연속적인 변형률에 따른 근사적 예측모델이 필요하다. Fig. 7과 Fig. 8의 선형적 관계와 예비변형률 상관관계로부터 다양한 예비변형에 따른 근사적 예측이 가능한 상관관계를 Fig. 9에 나타내었다. 예비변형률이 10% 이상 구간에서는 예비변형률 10% 상관관계식으로 수렴한다고 가정하여 예비변형률 10%와 동일하다고 가정하였다.

### 3.3 액압성형품의 공정별 가공경화분석

Fig. 9 에서 보인 유효변형률 유동응력 예측식을 이용하여 엔진크래들의 공정단계별 주요 변형부위의 가공경화후 강도(유동응력)을 구한 결과를 나타내었으며, Fig. 4에 가공경화 측정위치를 나타내었다. Table 2 에는 예비변형이 없는 강관의 벤딩 후 가공경화량을 나타내었으며 식(3)-(4)를 이용하여 예측한 결과이다.



(a) Flow stress for effective strain of HF370



(b) Flow stress for effective strain of HF440

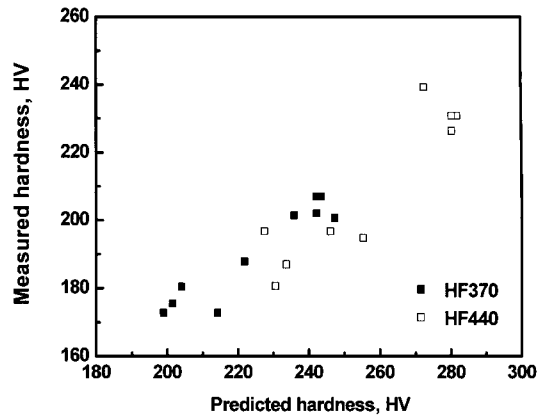
Fig. 9 Relationship between effective strain and flow stress

Table 2 Strain hardening after bending

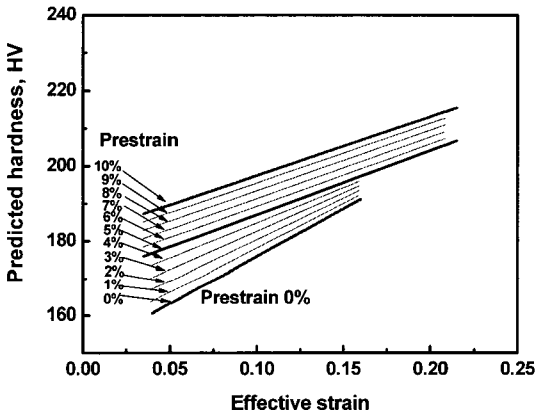
point	Pre-strain	Strain	Predicted $\sigma_{flow}$ (MPa)	
			HF370	HF440
1	0	0.17	462.51	558.72
2	0	0.25	505.23	613.25
3	0	0.20	478.53	579.17
4	0	0.32	542.60	660.96
5	0	0.36	563.96	688.23
6	0	0.37	569.30	695.04
7	0	0.32	542.60	660.96
8	0	0.19	473.19	572.35
9	0	0.31	537.26	654.15
10	0	0.22	489.21	592.80

**Table 3 Strain hardening after hydroforming**

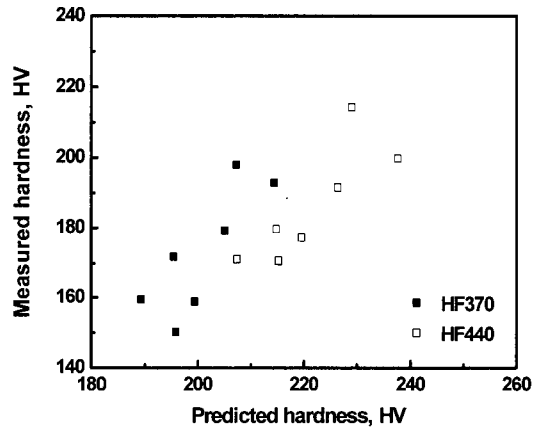
point	Pre-strain	Strain	Predicted $\sigma_{flow}$ (MPa)	
			HF370	HF440
1	0.04	0.16	486.41	590.56
2	0.03	0.10	454.41	545.18
3	0.05	0.05	459.34	543.43
4	0.06	0.15	492.58	597.78
5	0.03	0.09	450.78	539.89
6	0.04	0.21	502.04	614.66
7	0.05	0.09	471.04	562.34
8	0.07	0.11	487.37	588.94
9	0.10	0.05	492.68	596.05
10	0.08	0.07	483.90	583.17



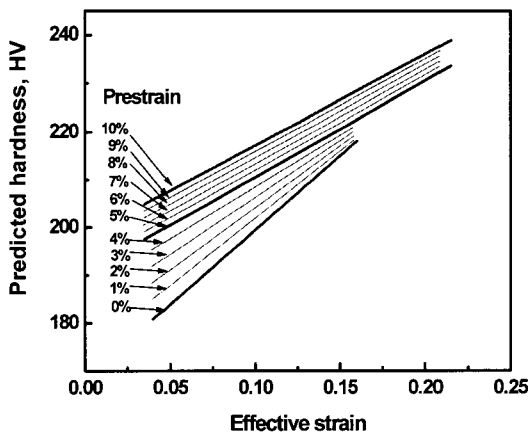
(a) Measured hardness vs predicted hardness of bending



(a) Predicted hardness for effective strain of HF370



(b) Measured hardness vs predicted hardness of hydroforming



(b) Predicted hardness for effective strain of HF440  
**Fig.10 Relationship between Effective strain and predicted hardness**

**Fig.11 Relationship between predicted hardness and experimental values**

Table 3 에는 밴딩후 액압성형된 경우의 가공경화량을 나타내었다. 그리드 에칭을 통해 밴딩(예비변형) 시 발생한 예비변형량과 액압성형후 변형량을 별도로 측정하여 최종 가공경화량을 나타내었으며 식(5)-(8)을 포함한 Fig. 9의 상관관계를 이용하여 예측한 결과이다.

### 3.4 가공경화 예측 타당성 검증

‘3.3’ 절의 예측 가공경화에 대한 예측정밀도의 검증을 위해 부위별 측정이 가능한 정도를 이용하여 예측 정도와 실측경도를 비교하였다. Fig. 9에서 보인 유효변형별 유동응력 예측식으로부터 변

환된 유효변형률 정도 예측식을 Fig. 10에 나타내었다.

Table 2 와 Table3 에 나타낸 위치를 기준으로 Fig. 10을 이용하여 예측된 정도와 실제 측정된 정도를 Fig. 11에 비교하였다. 실험을 통하여 측정된 정도값과 예측한 정도값을 비교하였을 때 높은 상관관계를 보임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 액압성형후의 가공경화 특성을 분석하기 위해 예비변형을 부여하지 않은 시험재와 예비변형을 부여한 시험재의 인장시험을 통하여 변형률에 따른 유동응력과 정도의 상관관계를 구하였고, 각 공정단계별, 성형위치별 유효변형량으로부터 액압 성형품의 가공경화 정도를 유동응력으로 예측하였다. 제한한 방법의 예측정밀도는 유동응력과 높은 상관성을 갖는 예측경도와 실측경도의 비교를 통해 검증되었으며 실험이나 실측을 통해 얻어진 유효변형률로 가공경화량을 정량적으로 예측할 수 있도록 하였다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구 센터사업의 연구비 일부지원으로 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] B. S. Levy, C. J. Van Tyne, J. M. Stringfield, 2004, Characterizing steel tube for hydroforming applications, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 150, pp. 280~289.
- [2] Jae-bong Yang, Byung-hee Jeon, Soo-Ik Oh, 2001, tube bending technology of a hydroforming process for an automotive part, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 111, pp. 175~181.
- [3] F. Dohmann, Ch. Hartl, 1977, Tube hydroforming – research and practical application, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp. 174~186.
- [4] Jae-Heon Park, Yi-Chon Choi, Kyung-Gi Kim, 2003, A Study on the Formability of Engine Cradle applied to Hydroforming according to Material Properties, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference Vol. 03, pp. 249~253.
- [5] Chung-seog Oh, Soon-Gue Kwon, Byung-Ik Choi, 2007, The variations of tensile and fatigue propertise in the Hydroforming Process, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, pp. 111~117.
- [6] Mike Jansson, Larsgunnar Nilsson, Kjell Simonsson, 2008, On strain localization in tube hydroforming of aluminium extrusions, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 195, pp. 3~14.
- [7] Kristoffer Trana, 2002, Finite element simulation of the tube hydroforming process-bending, performing and hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 127, pp. 401~408.
- [8] D. Daly, P. Duroux, M. Rachik, J. M. Roelandt, J. Wilsius, 2007 Modeling of the post-localization behaviour in Tube hydroforming of low carbon steels, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, pp. 248~256.
- [9] Heon Young Kim, Hee Taek Lim, Hyung Jong Kim, Dong Jae Lee, 2007, The Effective of Prebending on the Formability in the Tube Hydroforming Process of an Aluminum Rear Subframe, Metal and Materials International, Vol.13, pp. 87~92.
- [10] Soo-Ik Oh, Byung-Hee Jeon, Hyun-Yong Kim, Jae-bong Yang, 2006, Applications of hydroforming process to automobile parts, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 174, Issues 1-3, May 25, pp. 42~55.