

튜브 액압성형품의 공정단계별 가공 경화 특성 연구

박현규¹, 임홍섭¹, 이해경¹, 전동현², 문영훈[#]

A Study on the strain hardening of tube hydroforming according to process

H. K. Park, H. S. Yim, H. K. Yi, D. H. Jeon, Y. H. Moon

Abstract

In recent years, developments of light weight vehicle are one of the most important issues in automotive industry. It is important to know the variations of the mechanical properties in the hydro forming process for the safe and durable design purposes. Generally, tube hydroforming process consists of three main processes such as bending, preforming, and hydroforming. It means that the strain hardening histories of final products are nonlinear. In this study, strain hardening behavior during hydroforming has been investigated by hydroforming of engine cradle as a model process. The variation of mechanical properties such as local hardness and strength were used as an index of strain hardening during respective processes. The correlation between strength and hardness obtained from tensile test has been equivalently converted into correlation between hardness and measured strain.

Key Words : Hydroforming, Preforming, Pre-strain, Strain hardening,

1. 서론

차체의 경량화를 위해서 각국의 자동차 업체들은 오래 전부터 많은 노력과 시도를 진행하여 왔으며, 이에 따른 많은 가시적인 성과를 얻었다. 차체요구성능과 경량화라는 두 가지 요구에 부응하기 위해 소재분야에서는 기존의 강재(steel) 이외에도 알루미늄, 마그네슘, 복합재료 등의 적용이 시도되고 있으며, 기존의 판재를 잘라 붙이는 형태인 모노코크(monocoque or unibody) 타입의 차체구조에서 스페이스프레임(spaceframe) 구조로의 변형이 시도되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 공법 또한 기존의 판재 스탬핑 및 점 용접 방식에서 롤포밍, 하이드로포밍, 테일러드 블랭크, 레이저 용접, 전자기성형(EMF)등 여러 가지 공법의 적용이 시도되고 있

다. 상기한 공법중에 액압성형(hydroforming)은 1990년대 중반 이후부터 각광을 받기 시작한 기술로 테일러드 블랭크 기술과 함께 차량 경량화와 코스트 절감의 대표적 기술로, 기존의 하프셸(half shell) 방식에 비하여 여러 가지 측면의 장점을 가지고 있어 국·내외에서 급속히 확대 적용되고 있다. 기존의 하프셸 방식과 하이드로포밍 방식의 제작공정을 비교하면, 하프셸 방식은 강판을 부품별로 한 회 이상 프레스 성형하고 이들을 용접하여 제작하므로 많은 단계의 공정을 거치는데 반해 액압성형 방식은 프리포밍(preforming) 및 액압성형의 몇 개의 공정으로 완료된다. 따라서 하이드로포밍 방식은 하프셸 방식에 비해 용접공정이 필요없고, 금형수가 대폭 삭감되어 코스트 절감이 가능하다. 또한, 하이드로포밍 부품은 성

1. 부산대학교 기계공학부

2. 현대하이스코 기술연구소

부산대학교 기계공학부, E-mail:yhmoon@pusan.ac.kr

형 시 부품 전체에 걸쳐 가공 경화를 겪으므로 스프링백이 작아 부품의 정도가 높으며 같은 강도의 하프셀 부품에 비해 두께를 줄일 수 있어 경량화도 가능하며, 반대로 같은 두께에서 높은 강도를 가질 수 있다.

특히 액압성형은 차체경량화 뿐 아니라 강성향상, 품질정도 향상 등 많은 이점이 있어 전세계적으로 사시부품, 차체부품 및 배기계 등에 활발히 적용되고 있는 실정이다.⁽⁴⁾ 액압성형품의 특성면에서 보면 액압성형 공정 시 축방향 압입, 내부 압력, 확관량, 튜브와 금형 간 마찰 등의 여러 공정 변수에 따라 소재의 성형성 및 가공경화 정도가 달라지게 된다.⁽⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 액압성형품의 주요 변형 부위인 직선부, 굽힘부, 축방향 압입부의 경도를 측정하여 가공경화량 분석 등을 통해 액압성형 전과 후의 가공경화 정도를 평가하고자 한다. 분석된 가공경화특성의 정량화를 통해 액압성형부품의 강도의 최적화, 요구강도대비 원소재 적용의 최적화를 하고자 한다. 또한 해석에 반영함으로써 성형해석 정도를 향상시키도록 하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 판재의 인장시험

본 연구에서 사용한 소재는 HF370 과 HF440 으로 원소재의 변형률(strain)에 따른 강도와 경도의 상관관계를 파악하기 위하여 인장시험을 실시 하였다. 인장시험은 10 톤급 MTS 장비에 인장시험용 그립을 장착하고, 크로스헤드의 속도를 10mm/min 으로 하였다. 압연재는 압연방향으로 Fig. 1 과 같이 규격 13-B 호에 맞게 채취하여 실험하였고, 이때 변위에 따른 하중 곡선을 구하였다. 인장시험 시 변형률의 측정은 신뢰성 있는 응력-변형률 곡선을 얻기 위하여 매우 중요하다. 따라서 본 실험에서는 신뢰성 있는 변형률 측정을 위해서 연신율계(extenso-meter)를 사용하였다.

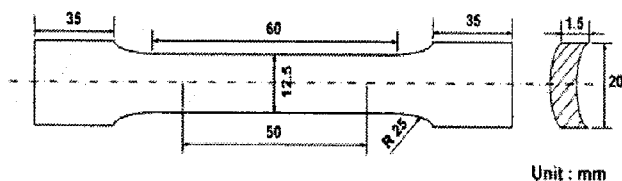


Fig. 1 Tensile test specimen

Table 1 Mechanical properties of HF370, HF440

Material	TS(Mpa)	YS(Mpa)	T-EL(%)	U-EL(%)
HF370	385	326	22.6	0.14
HF440	466	397	21.8	0.11

실험에 사용된 소재는 외경 65mm, 두께 2.0mm, 길이 2,686mm 이며 HF370, HF440 의 소재 특성을 Table 1 에 나타내었다.

2.2 변형량에 따른 경도 및 강도 측정

변형량에 따른 경도와 강도의 상관관계를 알아 보기 위하여 변형율을 압연방향으로 5%, 10%, 15%, 20%, 25% 의 인장변형을 받은 시편의 절단 단면의 경도를 측정하였다. 소재의 경도 측정은 마이크로 비커스 경도기를 사용하였다. 측정된 경도와 변형량에 따른 강도 값으로부터 변형량에 따른 경도와 강도의 상관관계를 분석 하였다.

2.3 튜브의 경도 및 강도 분석

튜브 액압성형품의 소재인 HF370 과 HF440 두 소재의 벤딩, 프리포밍, 하이드로포밍에 이르기까지의 각 공정 단계별 공정품에 대해 주요 변형부위의 가공경화량을 측정하기 위하여 Fig. 2 와 같이 엔진크래들(engine cradle)제품을 대상으로 벤딩 구간, 축 압입 구간, 직선 구간을 바탕으로 경도를 측정하였다. 소재의 경도는 열가소성 분말로 마운팅 시킨 후 연마 하여 3mm 간격으로 경도를 측정하였다. 경도 측정 위치는 Fig. 3 과 같고, 경도 측정은 마이크로 비커스 경도기를 이용하였다.

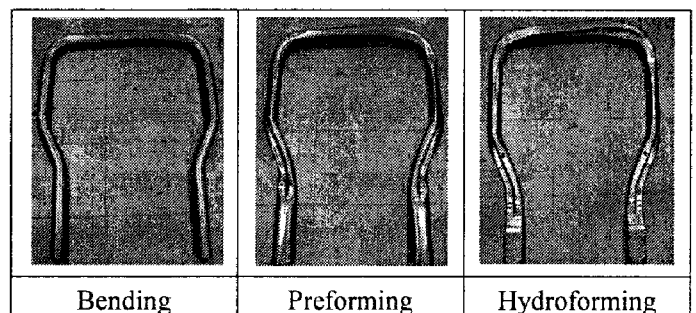


Fig. 2 Hydroforming process

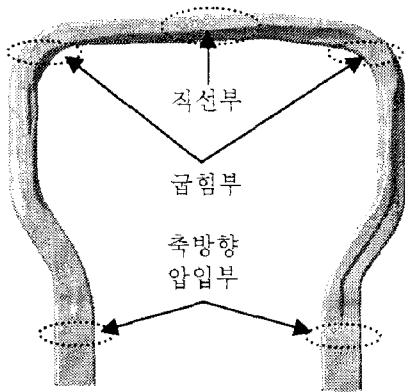


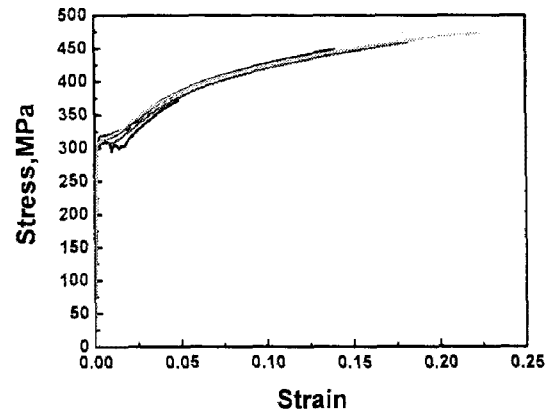
Fig. 3 Measuring for Vickers hardness

3. 실험 결과

3.1 변형량에 따른 가공경화 분석

HF370 과 HF440 원소재의 변형량에 따른 강도와 경도의 상관관계를 파악하기 위하여 인장시험을 실시 하였다. 변형량에 따른 인장강도를 알아보기 위하여, strain 5%, 10%, 15%, 20%, 25% 의 시편의 인장시험을 수행하였다. 인장시험 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 인장시험 결과에서 알 수 있듯이 원소재에 변형을 많이 줄수록 최대 인장강도가 증가함을 알 수가 있다. 또한 각 변형량에 따른 인장시험을 실시한 시편의 폭 방향으로의 경도를 측정 한 결과 변형량이 큰 시편의 경도값이 보다 큰 폭으로 증가함을 알 수가 있었다.

HF370 의 경우 5% 변형을 주었을 때 강도값은 372MPa, 10%의 변형을 주었을 때는 424MPa, 15%의 변형을 주었을 때는 449MPa, 20%의 변형을 주었을 때는 459MPa, 25% 변형을 주었을 때는 473MPa 강도를 나타내고 있으며, HF440 의 경우 5% 변형을 주었을 때 강도값은 457MPa, 10%의



(b) Strain-stress curves of HF440

Fig. 4 Strain-stress curves of HF370, HF440

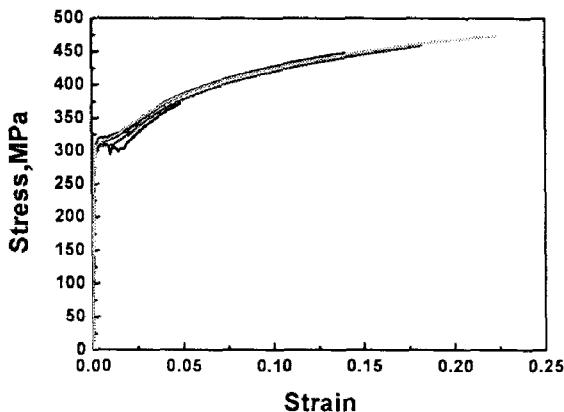
변형을 주었을 때는 523MPa, 15%의 변형을 주었을 때는 551MPa, 20%의 변형을 주었을 때는 573MPa, 25% 변형을 주었을 때는 582MPa 강도를 나타내고 있다.

특히, HF370 의 경우 25% 변형을 주었을 때 최대 인장강도 473.03MPa, 경도값은 194.73HV 로 초기치 대비 강도는 52%, 경도는 47%로 증가하였으며, HF440 의 경우 25% 변형을 주었을 때 최대 인장강도 581.74MPa, 경도값은 215.03HV 로 초기치 대비 강도는 47%, 경도는 50%정도 증가 한 것으로 나타났다.

HF370 과 HF440 의 판재 인장시험을 실시한 결과 Fig. 5 와 같은 경도와 강도의 상관관계를 나타내는 그래프를 얻을 수 있었으며, 측정 한 경도값으로부터 각 소재의 강도를 예측 할 수 있는 아래와 같은 경도 - 강도 변환식을 구할 수 있다.

$$\text{HF370 : TS(MPa)} = 2.55 * \text{HV} - 8.06$$

$$\text{HF440 : TS(MPa)} = 2.79 * \text{HV} - 6.58$$



(a) Strain-stress curves of HF370

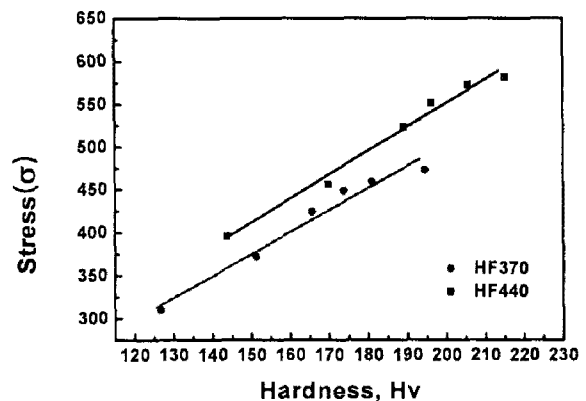


Fig. 5 Vickers hardness vs. tensile stress

3.2 공정별 튜브의 강도 변화

소재에 따른 주요 변형부위의 강도 분포를 Table 3 에 나타내었다. 벤딩, 프리포밍, 하이드로포밍 공정별 강도를 비교한 결과 벤딩 공정에서 일차적으로 비교적 큰 소성변형이 일어난 국부지점은 프리포밍이나 하이드로포밍 공정에서 가공경화가 상대적으로 작아서 프리포밍이나 하이드로포밍 가공 후일지라 하더라도 큰 차이의 강도 증가를 얻을 수는 없었다. 벤딩 공정에서 프리포밍을 거쳐 하이드로포밍 공정으로 진행되면서 강도의 증가가 나타나고 있으며, 특히 굽힘부의 영향을 받는 부분에서 강도가 가장 많이 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다.

었고, 각 공정품의 경도와 강도의 변화량을 계산하여 각 소재의 액압성형품의 강도를 예측하였다.

(1) HF370, HF440 의 판재 인장시험 결과 측정된 경도값 으로부터 각 소재의 강도를 예측할 수 있는 경도-강도 변환식을 얻을 수 있었다.

(2) 벤딩, 프리포밍, 하이드로포밍 공정별 강도를 비교한 결과 벤딩에서 먼저 변형이 일어난 부분에서는 프리포밍이나 하이드로포밍 공정을 거치더라도 가공 후 큰 차이의 강도 증가를 얻을 수는 없었다. 또한 직선부에서는 평균 4~5% 의 강도 증가가 나타나고 있으며, 특히 축압입 영향부는 하이드로포밍 공정에서 17~18% 정도의 확연한 강도증가를 나타내었다.

Table 3 Strain hardening according to process

		bending	Pre forming	Hydro forming
		Strength(MPa)		
Feeding area	HF370	371.62	379.79	434.69
		375.45	390.34	461.16
	HF440	441.54	446.42	523.38
		442.78	452.72	526.15
Bending area	HF370	452.56	462.01	469.50
		453.67	465.84	479.21
	HF440	544.07	554.28	565.27
		549.47	553.18	558.49
Straight area	HF370	372.05	398.45	432.15
		371.84	394.52	430.69
	HF440	441.22	460.47	494.78
		445.70	459.44	477.82

참 고 문 헌

- [1] G. Morphy, 1998, Hydroforming : Dimensional capability analysis of a high-volume automotive structural component production process, SAE Transaction, vol. 107, pp. 298-307.
- [2] Jae-bong Yang, Byung-hee Jeon and Soo-ik Oh, 2001, The 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] 박재현, 최이천, 김경기, 2003, 하이드로포밍을 적용한 Engine Cradle의 소재특성에 따른 성형성 고찰, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference Vol. 한국소성가공학회 03 춘계학술대회논문집, pp. 249-253.
- [5] 오충석, 권순규, 최병익, 2007, 하이드로포밍 공정 전후의 인장 및 피로 물성변화, 한국정밀공학학회지 제 24 권 12 호, pp. 111-118.

4. 결 론

본 연구에서는 액압성형품의 공정별 가공경화 특성 연구를 연구하고자 하였다. 소재의 경도와 강도의 상관관계를 알아보기 위하여 원소재에 strain을 부여하여 경도와 강도의 상관관계를 구하