

액압성형공정을 적용한 엔진크레들의 가공 경화 특성 연구

박현규¹, 임홍섭¹, 이해경¹, 김광순², 문영훈[#]

A Study on the strain hardening behavior of hydroformed Engine Cradle

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

Abstract

It is important to know the variations of the mechanical properties in the hydroforming process for the safe and durable design purposes. 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 flow stress were used as an index of strain hardening during respective processes. 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

하이드로포밍(hydroforming)이란 복잡한 형상의 자동차 부품을 만들 때 여러 형태의 프레스로 따로 가공한 후 용접하는 기존 공법과 달리 관재나 판재를 일정한 형식의 금형에 고정된 후 정수압(hydrostatic pressure)을 인가해 원하는 형상으로 성형하는 공법이다.⁽¹⁻³⁾ 90년대 후반에 들어 자동차 부품생산 공법에 도입된 신기술로, 부품성형 과정에서 액압이 고르게 작용하기 때문에 부품의 형태가 복잡하더라도 두께와 강도를 최대한 균일하게 할 수 있고, 용접부위를 최소화 할 수 있어 부품 원가와 무게를 획기적으로 줄일 수 있는 공정이다. 또한 하이드로포밍 부품은 성형 시 부품 전체에 가공경화를 겪으므로 스프링백이 작아 부품의 정도가 높다. 자동차 엔진을 지탱하는 받침대인 엔진크레들(engine cradle)의 경우, 하이드로포밍 공정을 적용하면 원가는 약 15%, 무게는

30~40%까지 감소 하는 것으로 보고되고 있다.⁽⁴⁻⁵⁾

특히 액압성형은 차체경량화 뿐 아니라 강성향상, 품질정도 향상 등 많은 이점이 있어 전세계적으로 샤시부품, 차체부품 및 배기계 등에 활발히 적용되고 있는 실정이다.⁽⁶⁾ 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.⁽⁷⁾

본 연구에서는 액압성형시 변형부위의 가공경화 정도를 정확하게 예측해 주기 위해 실험적으로 구한 유동응력-경도-유효변형율의 상관관계를 이용하여 변형에 따른 가공경화를 예측하고자 하였으며 실제 엔진크레들의 액압성형시 본 연구결과를 적용시켜 적용성과 타당성을 평가하였다.

2. 연구내용 및 방법

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

2.1 변형율에 따른 경도 및 강도 측정

본 연구에서 사용한 소재는 HF370 과 HF440으로 원소재의 변형율(strain)에 따른 강도와 경도의 상관관계를 파악하기 위하여 각각의 소재에 대하여 5%, 10%, 20%의 변형율로 인장시험을 실시하였다.

인장시험을 통해 일정 변형율로 변형된 시험편으로부터 유동응력을 측정하였으며, 각각의 변형율로 변형된 시험편으로부터 경도시험편을 채취하여 인장 변형후의 경도를 측정하였다. 측정된 경도값과 유동응력을 그래프로 나타내어 추세선을 작성한 다음 HF370과 HF440 강판의 경도와 강도의 상관관계를 구하였다. 실험에 사용된 소재는 외경 65mm, 두께 2.0mm 이며 HF370, HF440의 소재 특성을 Table 1 에 나타내었다.

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

2.2 예비변형율에 따른 경도 및 강도 측정

엔진크래들의 액압성형은 최종제품이 되기까지 예비급힘, 예비성형, 그리고 최종액압성형의 세가지 공정을 거치면서 변형을 받게된다. 따라서 액압성형품의 공정단계별 가공경화 특성을 분석하기 위해 예비 변형된 상태에서의 변형에 따른 경도와 강도의 상관관계를 분석할 필요가 있다.

예비 변형된 상태의 시험편을 얻기 위하여 Fig.1(a)와 같이 표점부의 균일한 변형을 유도할 수 있는 시험편에 5%, 10%의 예비변형을 부과한

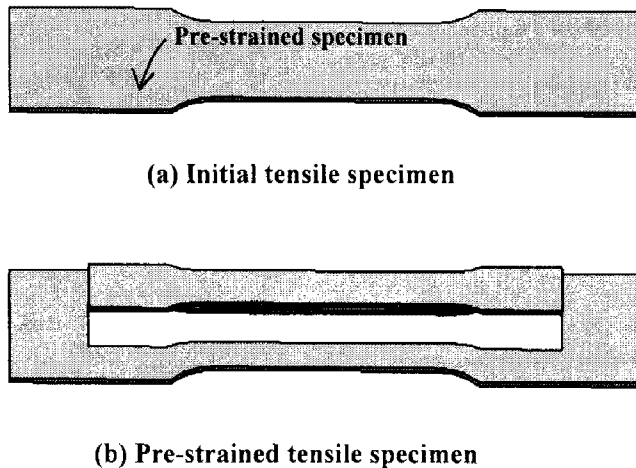


Fig. 1 Schematic description of tensile specimens

시험 시편을 이용하여, Fig. 1(b)와 같이 KS 규격 13-B 호에 맞게 와이어 방전가공을 이용하여 시험편을 제작하였다.

예비변형에 따른 경도와 강도의 상관관계를 분석하기 위해 '2.1' 절과 동일한 절차를 거쳐 인장시험을 실시 한 후 결과를 해석하였다.

2.3 액압성형품의 공정별 유효변형 측정

액압성형품 튜브가 각 공정을 거치는 동안 각 부위별 소재의 가공경화 분석을 파악하기 위하여, 먼저 예비급힘 되기 전 튜브상태의 소재에 Fig.2와 같이 그리드 에칭을 하고 Fig. 3과 같이 벤딩과 하이드로포밍 작업 시 주요 변형부위를 선정하여 변형율을 측정하였다. 이때 원주방향의 변형율을 주 변형율로 설정하고, 튜브의 길이방향의 변형율을 부변형율로 설정하여 각각의 공정을 거치는 동안의 튜브의 변형율을 Fig. 4 와 같이 나타내어 식(1)과 같이 계산하여 주변형율과 부변형율의 조합으로 나타낸 다음 소성 변형을 증분 이론과 이방성 재료에 대한 Hill의 2차 항복함수로부터 유효 변형율을 구하였다. 이때 적용된 Hill의 2차 항복함수는 식(2) 와 같다.

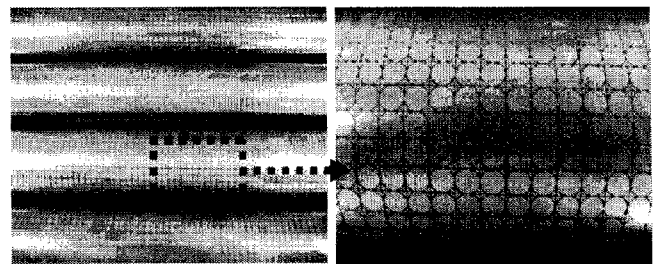


Fig. 2 Circular grid technique of measuring strains

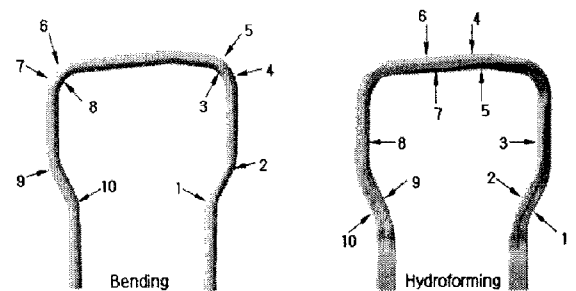


Fig. 3 Measuring points for effective strain

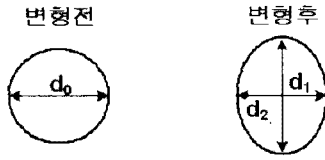


Fig. 4 Calculation of strains from deformed grid

$$\varepsilon_1 = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad \varepsilon_2 = \frac{d_2 - d_0}{d_0} \quad (1)$$

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

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

3. 실험 결과

3.1 변형율에 따른 가공경화 분석

예비변형이 없는 HF370 과 HF440 시험재를 대상으로 변형율 5%, 10%, 20% 까지 인장시험을 수행하였다. 각각의 변형율로 변형된 시험편의 유동응력을 측정하였다. 변형율별 유동응력과 변형 시험편으로부터 측정된 경도를 Fig.5 에 나타내었다. Fig.5 의 선형적 관계로부터 유동응력과 경도는 모두 가공경화의 척도로 상호 호환적으로 사용 가능함을 알 수 있다.

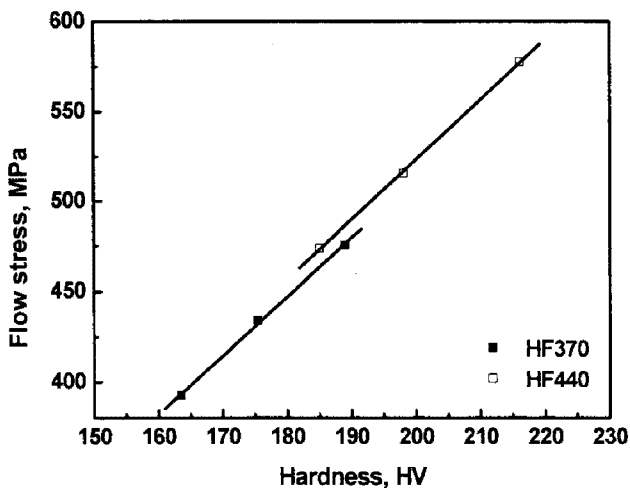


Fig. 5 Relation between hardness and flow stress

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

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

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

3.2 예비변형 효과에 따른 가공경화 분석

예비변형에 따른 가공경화 특성을 분석하기 위하여 5%, 10%의 예비변형을 부과한 시험편을 이용하여 5%, 10%, 20%의 변형을 부과하는 인장시험을 수행하였고 이를 통하여 응력-변형을 선도를 구하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 경도가 증가함에 따라 유동응력이 선형적으로 증가하므로 예비변형 하에서도 유동응력과 경도는 모두 가공경화의 척도로 상호 호환적으로 사용 가능함을 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 나타내었다. 밴딩이나 프리포밍을 거쳐 하이드로포밍으로 넘어가는 단계의 가공경화 평가 단계에서는 위와 같은 식을 적용하여 가공경화 특성을 구할 수 있다.

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

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

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

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

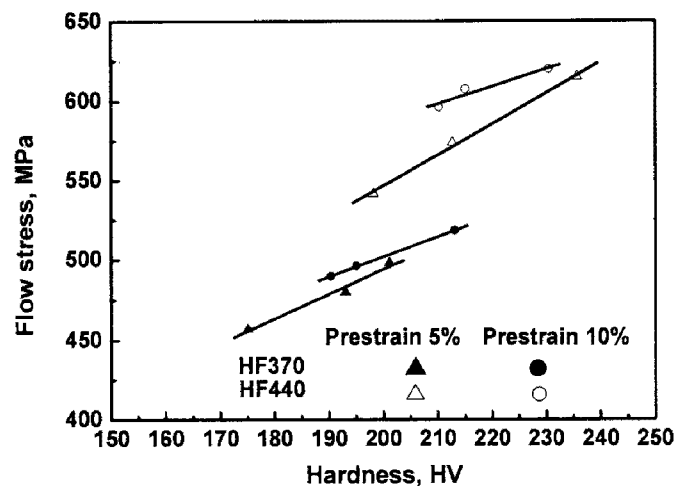
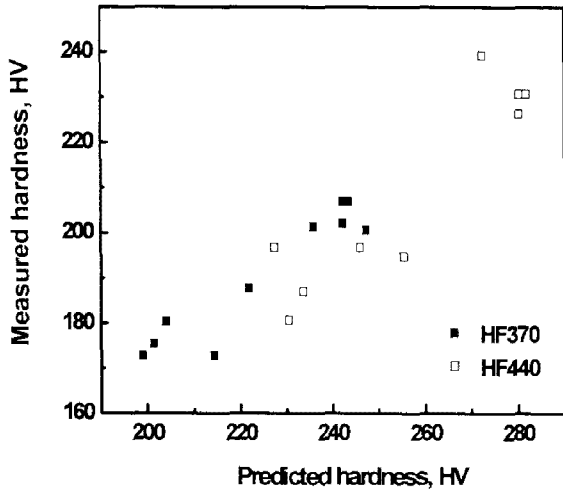


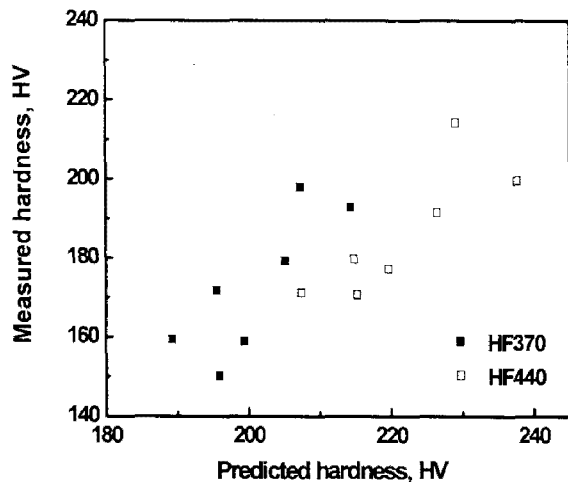
Fig. 6 Relation between hardness and flow stress

3.3 가공경화 예측 타당성 검증

예측 가공경화에 대한 예측정밀도의 검증을 위해 부위별 측정이 가능한 경도를 이용하여 예측경도와 실측경도를 비교하였다. 예측된 경도와 실제 측정된 경도를 Fig. 7에 비교하였다. 실험을 통하여 측정된 경도값과 예측한 경도값을 비교하였을 때 높은 상관관계를 보임을 알 수 있다.



(a) Measured hardness vs predicted hardness of bending



(b) Measured hardness vs predicted hardness of hydroforming

Fig. 7 Relation between predicted hardness and experimental values

4. 결론

본 연구에서는 액압성형후의 가공경화 특성을 분석하기 위해 예비변형을 부여하지 않은 시험재와 예비변형을 부여한 시험재의 인장시험을 통하여 변형률에 따른 유동응력과 경도의 상관관계를 구하였고, 제안한 방법의 예측정밀도는 유동응력과 높은 상관성을 갖는 예측경도와 실측경도의 비교를 통해 검증되었으며 실험이나 실측을 통해 얻어진 유효변형률로 가공경화량을 정량적으로 예측할 수 있도록 하였다.

참고 문헌

- [1] B. S. Levy, C. J. Van Tyne and 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 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] Jae-Heon Park, Yi-Chon Choi and 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] Mike Jansson, Larsgunnar Nilsson and Kjell Simonsson, 2008, On strain localization in tube hydroforming of aluminium extrusions, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 195, pp. 3-14
- [6] 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
- [7] D. Daly, P. Duroux, M. Rachik, J. M. Roelandt and 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