

액압성형공정을 적용한 엔진크레들의 변형률에 따른 강도변화의 실험적 연구

이성문¹· 박현규¹· 임홍섭¹· 김광순²· 문영훈^{1,#}

Experimental estimation of effective strain on strength of hydroformed engine cradle

S. M. Lee, H. K. Park, H. S. Yim, K. S. Kim, Y. H. Moon

Abstract

본 연구에서는 하이드로포밍 공정을 적용한 엔진크레들 제품에 대해 최종 제품의 강도를 평가하고자 하였다. 먼저 적용 판재인 370과 440 소재에 대해 인장시험을 수행하여 소재의 경도와 강도의 상관관계를 분석하여 경도와 강도의 변환식을 도출하였다. 그런 다음 예비굽힘, 예비성형, 최종성형된 제품의 각 공정에 따른 유효변형률을 측정하고 같은 위치에서의 경도를 측정하였다. 측정된 경도는 앞서 도출한 경도와 강도의 변환식에 대입하여 각 공정을 마친 제품의 강도를 예측하고 결국 하이드로포밍된 엔진 크레들 제품의 유효변형률에 따른 강도를 예측식을 실험으로 도출하였다. 그 결과 예비굽힘, 예비성형, 최종성형을 마친 엔진 크레들 제품에 대해 유효변형률이 24~72%로 변하였고 이때 HF370의 경우에는 유동응력값이 375~500MPa로 증가하여 원소재에 비해 성형 후 25~66%의 강도증가량을 보였고, HF440의 경우에는 470~565MPa로 증가하여, 원소재에 비해 17~41%로 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 이와 같은 변화값을 이용하여 유효변형률과 강도의 상관관계를 도출하였다.

Key Words : Tube Hydroforming, Engine Cradle, Strain-Stress Curve, Effective Strain,

1. 서 론

하이드로포밍이란 복잡한 형상의 자동차 부품을 만들 때 여러 형태의 프레스로 따로 가공한 후 용접하는 기존 공법과 달리 강판을 튜브 형태로 만들어 프레스 밖으로 금형을 장착하고 튜브를 얹힌 다음 튜브 안으로 물과 같은 액체를 강한 압력으로 밀어 넣어 내부 압력에 의해 원하는 형상으로 성형하는 공법이다. 90년대 후반에 들어 자동차 부품생산 공법에 도입된 신기술로, 부품성형 과정에서 액압이 고르게 작용하기 때문에 부

품의 형태가 복잡하더라도 두께와 강도를 최대한 균일하게 할 수 있고, 용접부위를 최소화 할 수 있어 부품 원가와 무게를 획기적으로 줄일 수 있는 공정이다. 하이드로포밍 가공강재 시장은 매년 유럽에서는 15%, 미국에서는 20% 이상 성장하고 있으며, 국내의 경우 시장 진입 초기 단계로 일부 차종에만 적용되고 있으나 향후 안전성과 경제성을 바탕으로 급속히 늘어날 것으로 기대되고 있다. 자동차 엔진을 지탱하는 받침대인 엔진크레들(engine cradle)의 경우, 하이드로포밍 공정을 적용하면 원가는 약 15%, 무게는 약 30~40%까지 감소

1. 부산대학교 기계공학부

2. 현대하이스코(주) 기술연구소

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

하는 것으로 보고되고 있다. 그러나 하이드로포밍 된 엔진크레들의 경우 제품의 형상의 제약상 최종 제품의 강도를 측정하기는 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 하이드로포밍 공정을 적용한 엔진 크레들 제품에 대해 최종 제품의 강도를 평가하고자 먼저 적용 판재에 대해 인장시험을 수행하여 변형률에 따른 경도와 강도의 상관관계를 분석하여 경도와 강도의 변환식을 도출한 다음 하이드로포밍된 제품의 각 공정에 따른 유효변형률을 측정하고 같은 위치에서의 경도를 측정하였다. 측정된 경도는 앞서 도출한 경도와 강도의 변환식에 대입하여 강도를 예측하고 결국 하이드로포밍된 엔진 크레들 제품의 유효변형률에 따른 강도를 예측식을 실험으로 도출하였다.

2. 실험 방법

2.1 판재의 경도와 강도의 상관관계 도출

본 연구에 사용된 소재는 HF370 과 HF440 강판으로 두께는 모두 2mm이다. 각각의 소재에 대해 판재의 인장시험을 수행하였다. 이 때 최대 인장강도 이하의 변형률에서 5, 10, 15, 20, 25%의 변형률이 되었을 때 시험을 중단한 다음 각각의 변형률로 인장된 시험편의 유동응력을 측정하였다. 그리고 각각의 변형률로 인장된 시험편을 절단하여 그 단면의 경도를 측정하였다. 측정된 경도와 유동응력을 그래프로 나타내어 추세선을 작성한 다음 HF370과 HF440 강판의 경도와 강도의 상관관계를 도출하였다.

2.2 제품의 변형률에 따른 경도 변화 측정

엔진크레들 제품은 최종제품이 되기까지 총 예비급힘, 예비액압성형, 그리고 최종액압성형의 세가지 공정을 거치게 된다. 이 때 예비급힘 되기 전 튜브상태의 소재에 Fig. 1과 같이 직경 mm인 원형의 그리드 에칭을 한 다음 앞서 말한 세가지 공정을 거친 후의 변형률을 측정하였다. 이 때

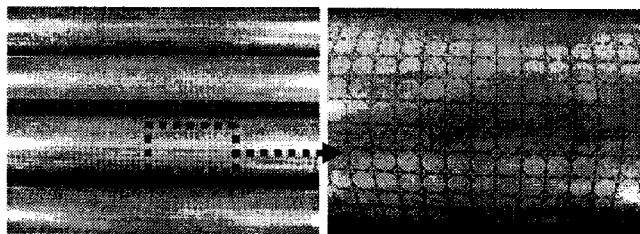


Fig. 1 Circular grid technique of measuring strains

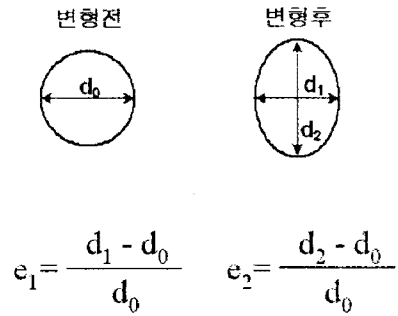


Fig. 2 Calculation of strains from deformed grid

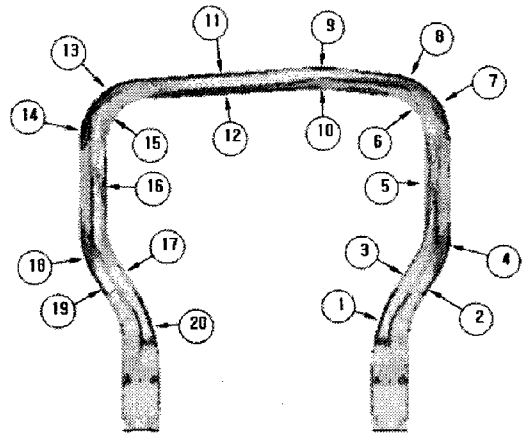


Fig. 3 Strain and hardness measuring point of engine cradle

원주방향의 변형률을 주변형률로 설정하고, 튜브의 길이방향의 변형률을 부변형률로 설정하여 각각의 공정을 거치는 튜브의 변형률을 Fig. 2와 같은방법으로 계산하여 주변형률과 부변형률의 조합으로 나타내었다. 그리고 이 때 변형률을 측정 한 같은 부분에서의 제품의 단면의 비커스 경도를 측정하였다. 이때 측정된 20부분을 Fig. 3에 나타내었다.

2.3 제품의 유효변형률에 따른 강도 변환식 도출

앞서 예측된 주변형률과 부변형률을 소성변형률중분 이론과 이방성재료에 대한 Hill의 2차항복함수에 적용시켜 세가지 공정을 거치는 제품의 유효 변형률을 구하였다. 그리고 측정된 경도는 앞서 도출한 경도와 강도의 환산식에 대입하여 강도로 변환하였다. 결국 세가지 공정을 거치는 동안의 제품에 대해 유효변형률에 대한 강도변화를 그래프로 나타내어 추세선을 작성한 다음 엔진크레들 제품의 유효변형률-강도변환식을 도출하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 판재의 경도와 강도의 상관관계 도출

본 연구에 사용된 소재는 HF370 과 HF440 강판으로 두께는 모두 2mm이다. 각각의 소재에 대해 판재의 인장시험을 수행하였다. 이 때 최대 인장강도 이하의 변형률에서 5, 10, 15, 20, 25%의 변형률이 되었을 때 시험을 중단한 다음 각각의 변형률로 인장된 시험편의 유동응력을 측정하였다. 그리고 각각의 변형률로 인장된 시험편의 인장된 부분을 절단하여 그 단면의 경도를 측정한 결과를 Table 1에 나타내었다. 그리고 이때 측정된 강도와 경도 값을 그래프로 나타내어 추세선을 작성한 것을 Fig. 4에 나타내었다. 보는 바와 같이 HF370 보다 HF440 판재에서 강도값이 같은 변형률에 대해서는 85~114MPa 정도 높게 나타났고, 같은 경도값에 대해서는 약 50MPa 높게 나타났다.

Table 1 Measured hardness and flow stress at different strain of HF370, HF440 sheet

HF370			HF440		
Strain %	Stress MPa	Hardness HV	Strain %	Stress MPa	Hardness HV
0%	310.20	126.70	0%	396.20	143.73
5%	372.07	151.17	5%	456.57	169.83
10%	424.31	165.70	10%	523.07	189.07
15%	448.82	173.73	15%	551.32	196.30
20%	459.10	181.13	20%	573.17	205.60
25%	473.03	194.73	25%	581.74	215.03

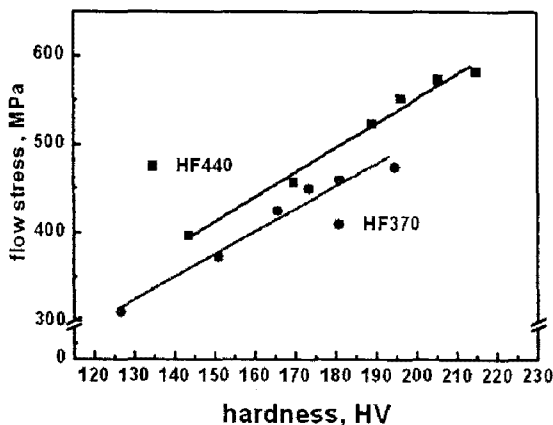


Fig. 4 Relation of hardness and flow stress

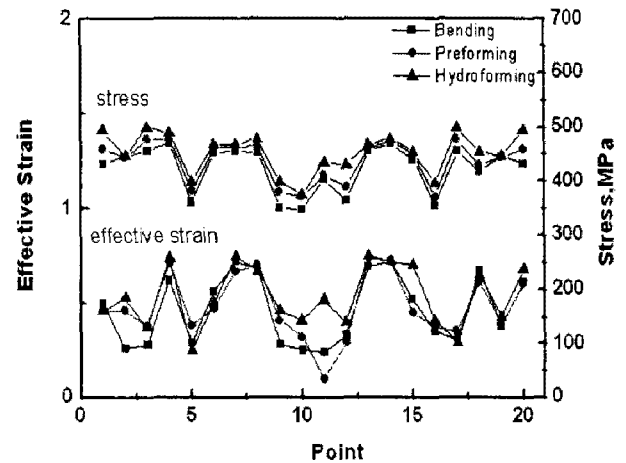
그림 4에서 보는 바와 같이 경도가 증가함에 따라 강도는 증가하는 것으로 나타났고, 그 증가분을 계산하여 추세선을 작성한 다음 도출된 강도와 경도의 변환식은 다음과 같다.

$$\text{HF370 : stress}(\sigma) = 2.55 * \text{HV} - 8.06 \quad (1)$$

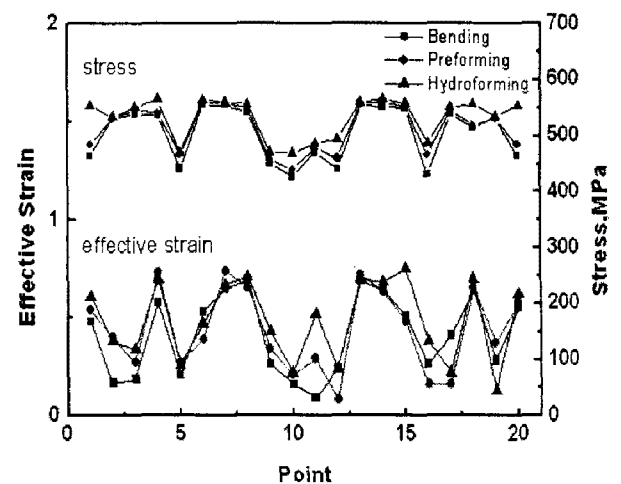
$$\text{HF440 : stress}(\sigma) = 2.79 * \text{HV} - 6.58 \quad (2)$$

3.2 엔진크레들의 유효변형률에 따른 강도 변화

엔진크레들 제품은 최종제품이 되기까지 예비 굽힘, 예비액압성형, 그리고 최종액압성형의 총 세 가지 공정을 거치게 된다. 이때 각 공정을 거치는 동안의 제품에 대해 변형률을 측정하여 주 변형률과 부변형률로 나타낸 다음 Hill 2차 항복함수에 적용시켜 각 제품의 유효변형률을 구하였다.



(a) effective strain and stress of HF 370



(b) effective strain and stress of HF 440

Fig. 5 Effective strain and stress at different point

이때 적용된 Hill의 2차항복함수는 다음과 같다.

$$d\bar{\epsilon} = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sqrt{d\epsilon_1^2 + d\epsilon_2^2 + \frac{2R}{R+1} d\epsilon_1 d\epsilon_2} \quad (3)$$

그리고 각 제품의 유효변형률을 측정된 20부분에 대해 경도값을 측정하고 그 경도값을 앞서 도출한 식(1)과 (2)에 적용시켜 강도 값을 환산하였다. 이 때 HF370과 HF440 소재에 대해 유효변형률과 유동응력의 변화값을 Fig. 5에 나타내었다. 보는 바와 같이 유효변형률이 증가함에 따라 강도값은 증가하는 것으로 나타났고, 특히 Fig. 3의 번호로 볼 때 1번과 20번인 축방향 압입의 영향부에서는 HF370d의 경우 강도가 494MPa, HF440인 경우에는 553MPa로 나타나 원소재의 강도값에 비해 HF370인 경우에는 38%, HF440인 경우에는 64%증가한 것으로 나타났다. 또, 예비굽힘 시 인장응력을 받는 부분인 4,7,13,18번의 경우에는 HF370의 경우에는 455~489MPa로 51~63% 증가하였고, HF440의 경우에는 556~565MPa로 나타나 39~41% 증가한 것으로 나타났다. 그외 5,9,10,11,12,16,17,19번의 직선부에서는 유효변형률이 24~38%로 변화함에 따라 HF370인 경우에는 398~500MPa, HF440인 경우에는 470~535MPa로 나타났다. 이와 같이 원소재 튜브를 하이드로포밍 공정을 적용하여 엔진크레들을 제조하는 공정에서 예비굽힘, 예비성형, 최종성형에 이르기까지 HF370인 경우에는 유동응력이 최대 494MPa로 증가하여 64%의 증가하였고, HF440인 경우에는 최대 553MPa로 증가하여 38%증가한 것으로 나타났다. 이때 나타난 유효변형률과 강도의 상관관계를 Fig. 6에 나타내었고, 그 식은 다음

과 같다.

$$\text{HF370 : stress}(\sigma) = 248.08 * \epsilon + 296.54 \quad (4)$$

$$\text{HF440 : stress}(\sigma) = 160.45 * \epsilon + 444.42 \quad (5)$$

4. 결론

(1) 엔진크레들에 적용되는 HF370, HF440 판재에 대해 인장시험을 통해 변형률에 따른 강도와 경도를 측정하여 경도와 강도의 변환식을 도출하였다.

(2) 예비굽힘, 예비성형, 최종성형의 세 단계를 거치는 엔진크레들의 제품에 대해 직선부, 굽힘부, 축방향 압입의 영향부로 나누어 유효변형률을 측정하고 그 때의 경도값을 측정하여 각 제품의 유효변형률과 강도의 상관관계를 구하였다..

참고 문헌

- [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.
- [6] M.Koc, T.Altan, 2001, "An overall review of the tube hydroforming technology", J. of Materials Processing Technology 108, p.384-393

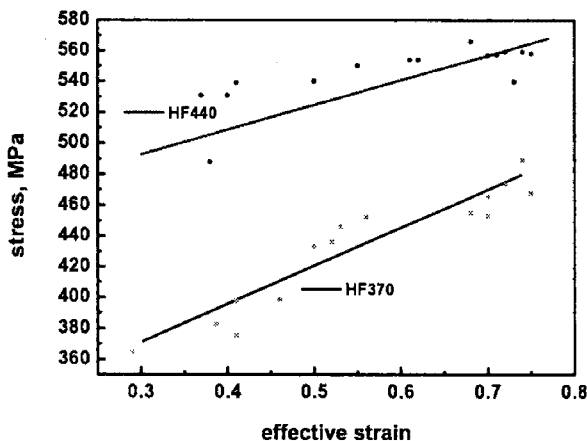


Fig. 6 Effective strain and stress of engine cradle