

연소기 노즐확장부 외피구조물의 성형 특성

유철성* · 이금오* · 김종규* · 한영민* · 최환석*

Forming Characteristics of Outer Shell Structure for Thrust Chamber Nozzle Extension

Chulsung Ryu* · Keumoh Lee* · Jonggyu Kim* · Yeoungmin Han* · Hwanseok Choi*

ABSTRACT

A study on the forming characteristics of outer shell structure for thrust chamber nozzle extension has been performed. In order to identify anisotropy of cold rolled sheet metal, three types of tensile specimens according to the direction to the sheet rolling axis were prepared and tested, and Lankford's values were obtained using the results and applied to structural analysis. Forming characteristics of the outer shell structure of the nozzle extension are investigated through manufacturing and forming of the full scale outer shell structures, and strain values obtained by the forming processes are compared to the numerical analysis results. The results obtained by this study will be utilized to design forming tools and processes for manufacturing other outer shell structures which have a bigger expansion area ratio.

초 록

연소기 챔버 노즐확장부 외피구조물의 성형특성에 대한 연구를 수행하였다. 노즐확장부 외피구조물의 제작에 사용되는 냉간압연 판재가 갖는 이방성 특성을 확인하기 위하여 세 가지 방향의 시편을 제작하여 인장시험을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 Lankford 값을 얻어 구조해석에 적용하였다. 실물형 연소기에 사용될 노즐확장부 외피구조물의 제작 및 성형공정을 통하여 외피구조물의 성형특성을 확인하였으며, 성형으로 얻은 변형률들을 구조해석 결과들과 비교하였다. 본 연구에서 얻은 결과들은 확대비가 더 큰 노즐확장부 제작을 위한 치구 및 성형공정의 설계에 활용될 예정이다.

Key Words: Liquid Rocket Thrust Chamber(액체로켓 연소기), Nozzle Extension(노즐확장부), Lankford Value(Lankford 값), Forming Process(성형 공정)

1. 서 론

고온, 고압의 환경에서 작동되는 연소기 챔버에서 압력이 높은 연소실부는 고압의 연소가스

로부터 구조적인 안정성을 갖기 위하여 외피구조물의 두께가 노즐확장부에 비하여 매우 두껍게 설계/제작된다. 따라서 이 실린더부의 외피구조물을 제작하기 위해서는 두께가 두꺼운 실린더 형상이나 봉 형상의 재료를 설계된 연소기 챔버 형상으로 가공하여 사용한다. 그러나 노즐확장부는 노즐목 이후 압력이 급격하게 떨어지

* 한국항공우주연구원 연소기팀
연락처, E-mail: csryu@kari.re.kr

는 영역이기 때문에 연소실부와 달리 연소실 압력으로부터 구조적으로 안정하게 하는 외피구조물의 두께가 상대적으로 얇게 설계/제작된다. 또한 연소기 챔버에서 노즐확장부는 실린더부와 노즐목부보다 크기가 상대적으로 크다. 따라서 실린더부를 제작하는 방식으로 노즐확장부의 외피구조물을 제작하기 위해서는 매우 큰 실린더 또는 봉 형상의 재료가 필요하고, 두께가 얇은 구조물로 제작하기 위해서는 많은 가공시간이 필요하며, 재료손실이 또한 매우 크다. 이러한 이유로 연소기 재생냉각 챔버의 노즐확장부의 외피구조물은 얇은 판재를 사용하고, 성형공정을 이용하여 설계된 노즐확장부 형상으로 제작된다. 본 연구에서는 연소기 재생냉각 챔버에서 노즐확장부의 외피구조물을 성형공정을 이용하여 성형할 때 나타나는 구조물의 성형특성에 대하여 고찰하였다.

2. 노즐확장부 외피구조물의 성형

2.1 재료시험

본 연구에서 사용한 연소기 재생냉각 챔버의 노즐확장부 외피구조물은 냉간압연된 얇은 판재를 이용하여 제작하였다. 이 판재의 두께는 0.78 mm이며, 폭 1000 mm, 길이 3500 mm이다. 일반적으로 냉간압연 판재는 압연공정을 통하여 생성될 때 반복적인 압연과 소둔(annealing) 과정을 거치면서 방향성을 갖게 된다. 이러한 판재의 특성을 고려하여 압연방향(rolling direction)과 압연방향에서 45°, 90°방향으로 시편을 제작하고, 인장시험을 수행하여 사용되는 판재의 기계적인 재료특성 및 이방성 특성을 확인하였다. 시편의 인장시험에서 판재의 이방성계수를 얻기 위하여 2축 스트레인 게이지를 부착하였으며, 인장강도와 연신율을 얻기 위하여 익스텐소미터(extensometer) 또한 부착하여 시험하였다. 인장시험에 사용된 시편은 ASTM E 8M 규격에 따라 제작하였다[1]. 시편의 제작에 사용된 판재는 UNS S31803재료로 그 조성은 Table 1에 나타내었다. 인장시험 결과 0.2% 항복응력은 45° 방향

이 가장 작은 657 MPa이며, 압연 방향인 0°는 688 MPa로 45° 방향의 항복응력보다 4.8% 크게 나타났다. 90° 방향은 730 MPa으로 가장 큰 값을 나타내었으며 45° 방향보다 11.1% 크게 나타났다. 재료의 인장응력과 탄성계수 또한 0.2% 항복응력과 동일하게 45°, 0°, 그리고 90° 순으로 크게 나타났으며, 연신율은 그 반대의 경향으로 나타나서 45° 방향이 가장 크게 나타났다. Table 2와 Fig. 1에 인장시험 결과를 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of UNS S31803

Components	C	Si	Nn	P	S
Contents(%)	0.19	0.39	1.47	0.018	0.001
Components	Cr	Ni	Mo	N	
Contents(%)	22.6	5.8	3.19	0.171	

Table 2. Uniaxial tensile test results for the three different directions with respect to rolling direction of the sheet metal

Angle	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Elastic Modulus (MPa)	0.2% Yield Strength (MPa)
0°	882.2	36.1	188.7	687.9
45°	840.2	39.7	182.3	656.7
90°	908.4	33.5	214.3	729.6

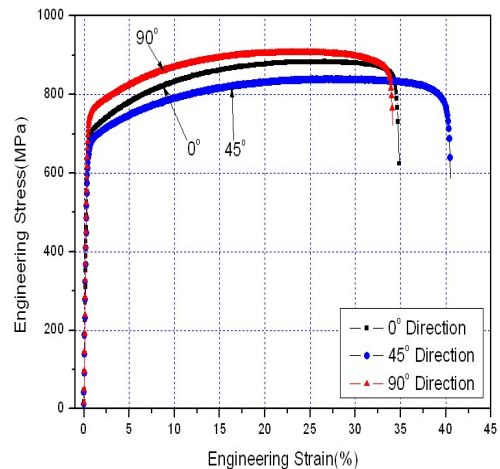


Fig. 1 Uniaxial tensile test in various direction

2.2 재료의 이방성 특성

냉간압연된 판재의 경우 두께 방향에 따라 재료특성이 변화하는 수직이방성(normal anisotropy) 특성뿐만 아니라 판재의 평면내 방향에 따라서도 재료 특성이 변화하는 평면이방성(planar anisotropy) 특성을 나타낸다. 이러한 특성은 주로 냉간 압연에 의하여 많은 소성변형이 발생하는 동안에 발달된 그레인(grain)들의 우선방위(preferred orientation)에 기인한다. 이러한 판재의 이방성을 나타내는 척도는 Lankford의 이방성 계수(anisotropy parameter) 또는 r 값(r -value)이다. 냉간압연된 판재에서 압연방향으로부터 임의의 각 θ 방향의 Lankford 값은 이 방향의 시편에서 폭과 두께 방향의 소성변형률 비로 정의된다[2]. 재료가 평면 이방성 특성을 갖는 경우에 r_θ 값은 변화하며, 많은 금속재료들에서 이 r_θ 값은 0° 에서 45° 방향으로 변화함에 따라 감소하고 45° 에서 90° 로 변화함에 따라 증가한다[3]. 그러나 본 연구에서 사용된 판재의 r_θ 값은 0° 에서 45° 방향으로 증가하고 다시 90° 까지 감소하는 경향을 보여주었다. 이러한 경향은 고강도 저합금강(HSLA steel)에서도 나타난다[4]. Table 3에 본 연구에서 사용한 재료의 인장시편으로 얻은 r_θ 값을 나타내었다.

Table 3. Comparison of Lankford coefficients

Angle(θ)	0	45	90
r_θ	0.384	1.033	0.705

2.3 노즐확장부 외피구조물 성형

연소기 챔버의 노즐확장부는 연료공급부를 기준으로 연소기 헤드부 쪽은 전단부(Front), 노즐 쪽은 후단부(Rear)로 구분할 수 있다. 본 연구에서 사용된 노즐확장부 외피구조물은 전단부와 후단부로 나누어 제작하였다. 연소기 챔버의 노즐확장부에서 이 전단부와 후단부의 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 이 노즐확장부 외피구조물 제작을 위하여 먼저 냉간압연 판재를 콘(cone) 형상

으로 제작하였다. 제작된 콘 형상의 노즐확장부

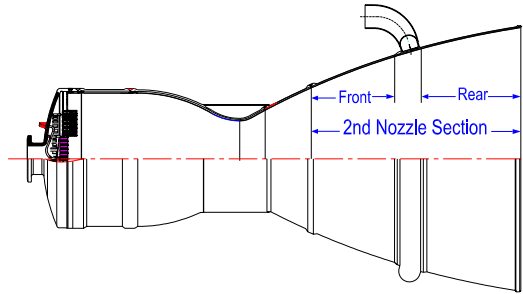


Fig. 2 Configuration of nozzle extension of thrust chamber

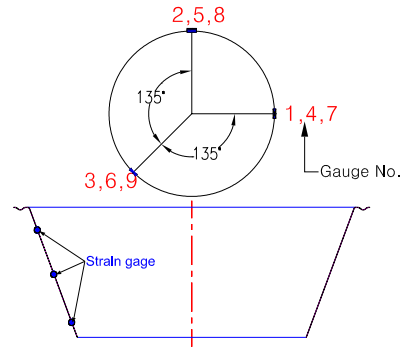


Fig. 3 Configuration of outer jacket and location of strain gage before forming process



Fig. 4 Forming process of outer jacket

외피구조물에는 성형하는 과정에서 발생하는 변형량을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 부착하였다. 스트레인 게이지 부착은 축 방향으로 외피구조물의 상부, 중간부 그리고 하부에 부착하였으며, 원주방향으로 각각의 축방향 위치에서

0°, 90°, 그리고 225° 위치에 부착하였다. 스트레인게이지는 게이지 길이가 2.5 mm, 저항은 120 Ω인 3축 스트레인 게이지를 사용하였다. Fig. 3에 성형 전 콘 형상의 외피구조물의 형상과 스트레인 게이지 부착위치를 나타내었다. 판재를 이용하여 성형 전 콘 형상의 구조물로 제작한 노즐확장부 외피구조물은 노즐형상으로 제작하기 위하여 노즐형상의 치구를 사용하여 성형하였다. 성형공정은 열처리를 기준으로 2단계로 나누어 진행하였다. 1차 성형 후 변형된 외피구조물을 열처리하여 잔류응력을 제거하였으며, 2차 성형으로 설계된 노즐확장부 형상으로 제작을 완료하였다. Fig. 4는 노즐확장부 후단부에 사용되는 외피구조물의 성형과정을 보여준다. 본 연구에서 노즐확장부 외피구조물의 성형에 사용된 프레스기(press machine)는 최대하중이 800 톤인 장비를 사용하였다.

3. 성형 및 구조해석 결과

3.1 성형 결과

Figure 5는 전단부의 1차 성형공정에서 발생된 변형률을 외피구조물에 부착된 스트레인 게이지를 이용하여 측정한 결과들을 보여준다. 1차 및 2차 성형공정에서 성형치구를 콘 형상의 구조물에 삽입하여 성형하고, 성형치구를 분리한 후 성형된 외피구조물을 90°씩 회전시켜 동일하게 재성형을 수행하는 방식으로 총 360° 회전시켜 성형공정을 완료하였다. 전단부와 후단부의 1차 성형결과 성형 전 콘 형상의 구조물이 벨(bell) 형상의 구조물로 변형되기 때문에 구조물의 중간에 부착된 스트레인 게이지 변형률 값이 상부와 하부의 스트레인 게이지 값에 비하여 상대적으로 크게 나타났으나, 절대적인 변형률은 크지 않다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 성형 후 성형치구를 외피구조물에서 분리하면 외피구조물에 탄성복원(spring back) 현상이 발생하여 1차 성형을 완료한 후 최종적인 변형상태로 중간부에서 약 0.2%의 소성변형이 발생하고, 상부와 하부에서는 소성변형이 매우 작게 존재하고 있음을 알

수 있다. Fig. 6에 전단부의 2차 성형에서 발생하는 변형률을 나타내었다. Fig. 6에서도 나타내었듯이 2차 성형에서 노즐확장부 형상으로 완전히 성형한 후 성형치구를 분리하면 구조물의 탄성복원으로 총변형률이 1.47%에서 1.10%로 감소하는 현상을 보여준다. 성형결과 전단부의 경우 최대로 성형한 후 치구를 제거하였을 때 총변형률에 대한 탄성복원 양은 상부에서 34%-42%, 중간부에서 26%-29%, 그리고 하부에서 31%-37%의 값을 보여주었다. 후단부의 성형에서는 상부에서 60%-64%, 중간부에서 43%, 그리고 하부에서 54%-73%를 보여주어 전단부에 비하여 탄성복원 양이 더 크게 나타났다. 후단부에서 탄성복원 양이 전단부에 비하여 더 크게 나타난 이유는 성형으로 인한 전체적인 구조물의 변형률이 전단부에 비하여 작기 때문에 탄성변형과 소성변형의 합인 총변형률에서 탄성 변형률의 값이 크기

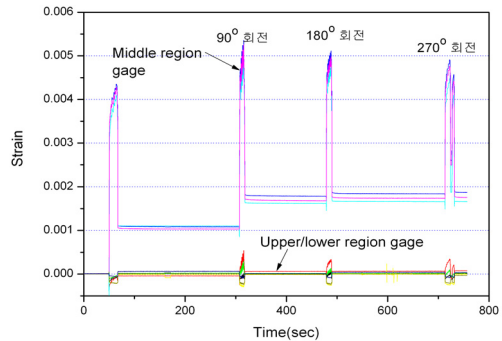


Fig. 5 Circumferential stain of front part for 1st step forming process

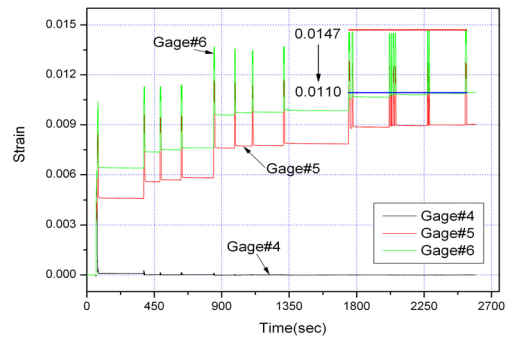


Fig. 6 Circumferential stain of front part for 2nd step forming process

때문이다. 실물형 노즐확장부 외피구조물에 대한 성형공정을 수행하여 얻은 변형률 측정결과들에서 알 수 있듯이 큰 형상의 구조물을 노즐확장부 형상으로 변형시킨 후 성형치구를 분리하면 구조물에서 탄성복원 양이 크게 나타나기 때문에 성형을 완료한 후 정확한 형상의 노즐확장부 형상의 구조물을 얻기 위해서는 탄성복원을 고려한 성형치구의 설계가 요구된다.

3.2 구조해석

본 연구에서 구조해석은 실물형 노즐확장부의 성형을 통하여 얻은 결과와 구조해석 결과를 비교하여 향후 더 큰 노즐확장부 외피구조물의 성형치구와 성형공정을 성공적으로 설계하기 위하여 수행하였다. 판재는 제작과정에 의한 특성상 압연방향에서 압연에 수직한 방향까지 각각의 방향에 따라서 서로 다른 기계적인 재료특성을 갖는다. 이러한 특성을 고려하여 비록 구조물이 축대칭 형상이지만 구조해석은 2차원 축대칭 모델을 사용하지 않고 이방성 특성을 고려할 수 있는 3차원 모델을 사용하여 수행하였다. 판재의 이방성 특성은 Hill의 항복 함수를 사용하여 소성변형에서 나타나는 판재의 이방성 특성을 고려하였다. Table 4에 전단부 외피구조물에서 Fig. 3에 나타낸 스트레인 게이지 #3, #6, #9에 대한 구조해석 결과와 측정결과를 나타내었다. 구조해석 결과와 측정결과를 비교하였을 때 변형정도가 중간부와 하부에 비하여 작은 상부에서 스트

Table 4. Comparison of strain gage value and analysis results of gage #3, # 6, #9 for the front outer shell structure

게이지 위치 및 오차(%)	스프링 백 전		스프링 백 후	
	해석 값	게이지 측정 값	해석 값	게이지 측정 값
상부	1.00E-02	9.93E-03	6.63E-03	6.51E-03
	오차	0.76	1.86	
중간부	1.78E-02	1.47E-02	1.43E-02	1.09E-02
	오차	20.80	31.02	
하부	1.32E-02	1.08E-02	9.84E-03	7.30E-03
	오차	22.00	34.80	

레인 게이지의 측정결과와 구조해석 결과가 작은 차이를 보여주었지만 변형정도가 상대적으로 큰 중간부와 하부에서 구조해석과 측정결과의 오차는 성형치구를 분리하기 전 최대 22.9%이며, 스프링 백 후 최대 34.8% 오차가 나타나는 결과를 보여주었다. 따라서 향후 직경확대비가 더 큰 노즐확장부 외피구조물의 성형치구를 정확하게 설계하기 위해서는 오차를 발생시키는 원인에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

연소기 챔버 노즐확장부 외피구조물의 성형특성에 대한 연구를 수행하였다. 판재가 갖는 이방성 특성을 확인하기 위하여 세 가지 방향으로 인장시험을 수행하였으며, 실물형 연소기에 사용될 노즐확장부 외피구조물의 제작 및 성형을 수행하였다. 성형결과 성형 후 구조물에서 탄성복원량이 종변형량에 비하여 크게 발생되어 설계된 노즐확장부 형상으로 성형하기 위해서는 구조물의 탄성복원을 고려하여 성형치구를 설계하는 것이 중요함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Standard Test Method for Tension Testig of Metallic Materials[Metric] (ASTM E 8 M)
2. William F. H. and Robert M. C., Metal forming: Mechanics and metallurgy, Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs.
3. Prakash M. D., and Uday S. D., Modeling of metal forming and machining processes, Spriner
4. Mehmet F., Bilgin K., and Orhan E., "Sheet metal forming analyses with an emphasis on the springback deformation," Journal of Material Processing Technology, Vol. 196, 2008, pp. 135-148