

## 연소기 노즐확장부 외피구조물 성형치구 설계

유철성\* · 이금오\* · 최환석\*

### Forming Tool Design of Outer Shell Structure of Nozzle Extension for Thrust Chamber

Chulsung Ryu\* · Keumoh Lee\* · Hwanseok Choi\*

#### ABSTRACT

Forming tool design is carried out for a manufacturing a outer shell structure of the nozzle extension of regenerative cooling thrust chamber. The method which manufactures outer shell structure of nozzle extension is a metal forming process using thin plate. Because the configuration of outer shell structure is changed after forming process by springback effect ,the outer shell structure can't be exactly formed with the same forming tool as configuration of the nozzle extension. Therefore forming tool design considering springback effect is necessary for manufacturing the outer shell structure of the nozzle extension. In this study, new designed forming tool configuration was generated to decrease the errors between nozzle contour and formed structure. The analysis results show that the errors between nozzle contour and formed structure is significantly decreased using the new designed forming tool.

#### 초 록

연소기 재생냉각 챔버 노즐확장부의 외피구조물 제작을 위한 성형치구 설계에 대한 연구를 수행하였다. 연소기 챔버에서 두께가 얇은 외피구조물은 판재의 성형을 이용하여 제작한다. 노즐확장부 외피구조물의 성형에서 노즐확장부와 동일한 형상의 치구로 성형하면 성형 후 구조물의 형상이 노즐확장부와 일치하지 않고 탄성복원에 의하여 그 형상이 변화한다. 따라서 노즐확장부 형상과 동일한 형상으로 성형을 완성하기 위해서는 탄성복원을 고려한 성형치구의 설계가 필요하다. 본 연구에서는 초기 성형 후 탄성복원에 의한 노즐형상과 실제 구조물의 형상과의 오차를 없애기 위하여 오차를 보정한 새로운 성형치구용 형상을 생성하였다. 구조해석 결과 설계 수정된 성형치구로 성형하면 노즐형상과 성형된 구조물과의 형상 오차가 매우 작게 감소함을 확인할 수 있었다.

Key Words: Thrust Chamber(연소기), Nozzle Extension(노즐확장부), Forming Process(성형공정)  
Forming Tool(성형치구)

\* 한국항공우주연구원 연소기팀

† 교신저자, E-mail: csryu@kari.re.kr

발사체(launch vehicle)에 사용되는 액체로켓 연소기의 무게를 감소시키는 것은 발사체의 성능을 향상시키는 매우 중요한 요소이다. 재생냉각 연소기 챔버는 고온의 연소가스로부터 열적 손상을 방지하기 위하여 내측에는 냉각채널이 있는 구조물과 연소가스의 높은 압력에 챔버가 구조적으로 안정하게 작동되도록 하는 외피구조물로 구성되고, 이 두 구조물은 브레이징과 용접을 통하여 조립으로 된다. 이 연소기 챔버에서 노즐확장부는 노즐목 이후 압력이 급격하게 떨어지는 영역이기 때문에 연소실부와 달리 연소실 압력으로부터 구조적으로 안정하게 하는 외피구조물의 두께가 상대적으로 얇게 설계/제작된다. 따라서 연소기 재생냉각 챔버의 노즐확장부 외피구조물 제작에는 얇은 판재를 사용하고, 성형공정을 이용하여 설계된 노즐확장부 형상으로 제작한다. 일반적으로 판재를 성형하면 탄성복원 현상이 발생하여 성형 후 형상이 변화한다 [1,2]. 노즐확장부 외피구조물의 성형에서도 이와 같은 탄성복원 현상이 발생되어 성형 후 노즐형상과 구조물의 형상이 일치하지 않는 현상이 발생한다. 본 연구에서는 연소기 재생냉각 챔버에서 노즐확장부의 외피구조물을 성형공정을 이용하여 성형할 때 나타나는 구조물의 탄성복원 특성을 고려하여 성형치구를 설계하는 방법에 대하여 연구하였다..

## 2. 본 론

### 2.1 재료특성

본 연구에서 사용된 재료는 냉간압연된 재료로 UNS S31803이다. 냉간압연된 재료는 그 제작공정상의 특성에 따라서 일반적으로 이방성을 특성을 갖는다. 이 이방성 특성을 파악하고자 판재의 길이 방향(rolling direction)과 길이방향에 대하여 45°, 90° 방향으로 시편을 제작하고, 스트레인 게이지를 부착하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험 시편의 제작 및 시험은 ASTM E8M[3]에 따라 수행하였다. 인장시험 결과 0.2% 오프셋(offset) 항복응력의 경우 0° 방향을 기준으로

Table 1. Uniaxial tensile test results for the three different directions with respect to rolling direction of the sheet metal

Angle	0.2% Offset Yield Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio
0°	686.5	213	0.23
45°	655.7	190	0.32
90°	723.8	216	0.27

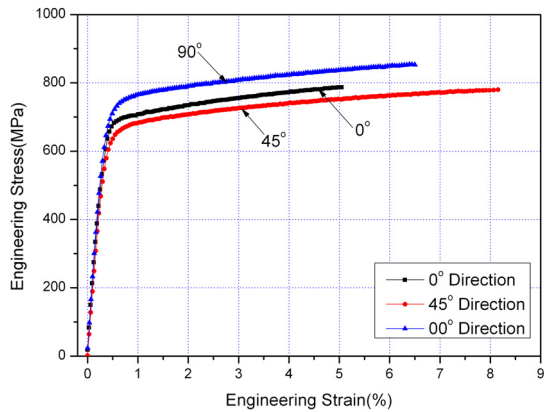


Fig. 1 Uniaxial tensile test in various direction

45° 방향이 4.5% 작게 나타났으며, 90° 방향은 5.4% 더 크게 나타났다. 탄성계수도 동일한 경향을 보여주었으며, 프와송의 비는 45° 방향이 가장 크고, 다음으로 90°와 0° 방향 순으로 나타났다. 이러한 결과들은 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 45° 방향의 인장시편의 항복응력과 유동응력이 0°와 90° 방향의 시편에 비하여 낮은 값을 보여준다. 이러한 경향은 재료가 냉간압연으로 생성되어 나타나는 재료의 이방성 특성에 기인한다.

### 2.2 연소기 노즐확장부 외피구조물

Figure 2에 일반적인 재생냉각 방식의 액체로켓 연소기 형상을 나타내었다. Fig. 2에서 판재를 이용하여 노즐확장부 외피구조물을 제작하는 부분은 2차 노즐부(2nd section nozzle)이다. 이 부분은 연료공급 매니폴드를 기준으로 연소기 헤드부 쪽은 전단부(front)이며, 노즐 쪽은 후단

부(rear)로 구분하여 제작된다. 이 전단부와 후단부를 판재를 이용한 성형으로 제작하기 위해서는 먼저 노즐확장부의 전단부나 후단부 형상으로 제작될 수 있는 판재를 선정한 후 전단부와 후단부 제작에 필요한 전개도를 판재에 생성한다. 이 전개도는 용접을 통하여 콘 형상으로 제작한다. 제작된 콘 형상의 구조물을 성형치구를 이용하여 노즐확장부 형상으로 성형하기 위해서는 콘 구조물에서 직경이 큰 부분을 고정할 수 있도록 해야 한다. Fig. 3에서 Fix는 판재를 이용하여 제작된 콘 형상의 구조물과 이 콘 형상의 구조물에서 직경이 큰 부분을 성형공정에서 고정할 수 있도록 만든 형상을 보여준다. 전단부와 후단부는 그 크기는 다르지만 형상이 비슷하기

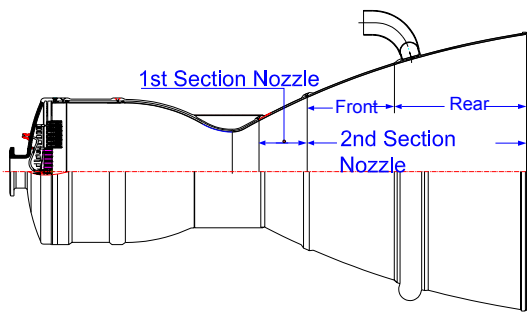


Fig. 2 Configuration of nozzle extension of regenerative cooling thrust chamber

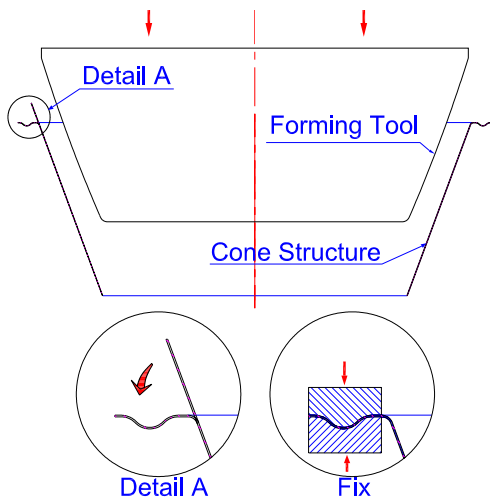


Fig. 3 Forming process and cone structure

때문에 본 연구에서는 전단부의 성형을 위한 성형치구의 설계방안에 대하여 연구를 수행하였다.

### 2.3 연소기 노즐확장부 외피구조물의 성형

연소기 재생냉각 챔버에서 노즐확장부 외피구조물을 Fig. 3과 같이 판재를 이용한 성형공정으로 제작하기 위해서는 성형치구(forming tool)가 필요하다. 성형치구의 형상은 크게 두 가지 방법으로 결정할 수 있다. 첫 번째 방법은 성형치구를 노즐확장부와 동일한 형상으로 제작하는 방법이다. 두 번째 방법은 구조물의 성형 후 탄성복원을 고려하여 노즐확장부 제작용 성형형상을 결정하는 방법이다. 본 연구에서는 먼저 노즐확장부와 동일한 형상의 성형치구를 이용한 성형공정에 대하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 상용유한요소해석 프로그램인 Marc[4]를 사용하였다. 노즐확장부 외피구조물이 축대칭 형상이기 때문에 축대칭 형상으로 모델링하여 구조해석을 수행하였으며, 구조해석에 사용된 재료의 물성 값은 0° 방향의 인장시험 결과를 사용하였다. 판재로 제작된 콘 형상의 구조물을 성형치구로 성형한 후 생성된 구조물이 노즐확장부의 전단부나 후단부 형상과 일치하는지, 일치하지 않으면 어느 영역에서 얼마만큼의 오차를 갖고 있는지 확인해야 실제 연소기 노즐확장부 외피구조물 제작에 사용되는 성형치구를 정확하게 설계할 수 있다. 성형된 구조물과 노즐확장부 형상과의 오차를 확인하기 위해서는 먼저 노즐확장부 형상과 구조해석 결과로 얻은 성형된 구조물과의 형상 오차를 계산하기 위한 기준이 되는 위치가 필요하다. 본 연구에서 이 기준점을 3곳으로 선정하였다. 각각의 기준위치는 노즐확장부 형상에서 직경이 가장 작은 위치(reference1), 직경이 가장 큰 위치(reference2), 그리고 변형이 가장 많이 발생하는 위치(reference3)로 선정하였다. 본 연구에서 위의 3곳을 기준으로 성형 후 콘 구조물의 형상과 노즐확장부 형상을 비교하였다.

Figure 4는 노즐확장부 형상에서 직경이 가장 작은 위치를 기준으로 노즐확장부 형상과 구조해석 결과로 얻은 성형 후 외피구조물의 형상과

의 오차를 비교한 결과를 보여준다. 노즐확장부의 직경이 가장 작은 위치와 성형된 구조물에서 노즐확장부의 직경이 가장 작은 값을 갖는 위치를 기준으로 하였기 때문에 노즐확장부의 축방향 위치 0에서 오차는 영(zero)이며, 직경이 증가하면서 오차가 점점 커진 후 직경이 가장 큰 끝단부에서 오차가 감소하는 경향을 보여준다. 구조해석 결과와 노즐확장부 형상과의 최대 오차는  $-0.769\text{ mm}$ 로 나타났다. Fig. 5는 변형이 가장 큰 곳을 기준으로 구조해석 결과와 노즐확장부 형상과의 오차를 보여준다. 큰 구조물을 노즐확장부 형상으로 성형시켰을 때 변형이 가장 많이 발생하는 영역은 노즐확장부의 중간 위치이다. 이 중간 위치를 기준으로 형상오차를 계산하였기 때문에 이 기준 위치보다 직경이 더 작은 영역과 큰 영역에서 오차가 발생됨을 알 수 있다.

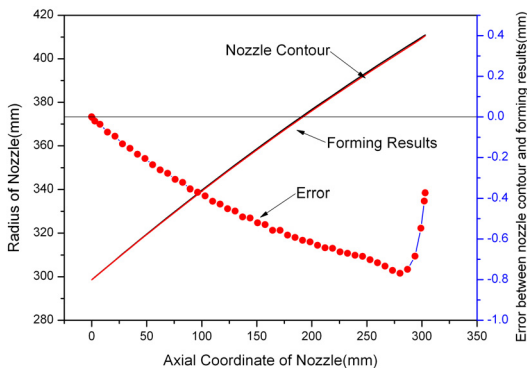


Fig. 4 Errors between nozzle extension contour and formed structure using reference1

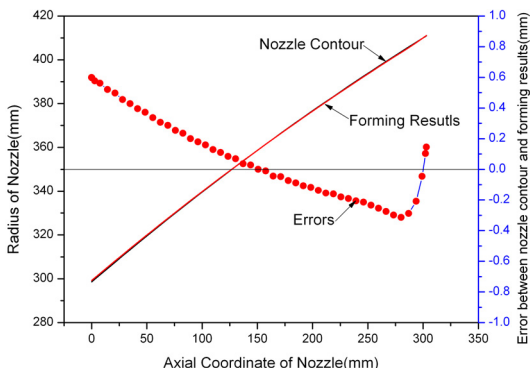


Fig. 5 Errors between nozzle extension contour and formed structure using reference3

변형이 가장 큰 중간 위치를 기준으로 오차를 구하였을 때 가장 큰 오차는 노즐직경이 가장 작은 곳에서 나타났으며, 그 값은  $-0.314\text{ mm}$ 로 나타났다. 노즐확장부에서 직경이 가장 큰 곳을 기준으로 하는 구조해석 결과와 노즐확장부 형상과의 오차를 구할 수 없었다. 구조해석 결과에서 노즐확장부의 가장 큰 직경과 동일한 값을 갖는 위치가 나타나지 않았다. 즉 큰 구조물을 노즐확장부와 동일한 형상의 성형치구로 성형하여 얻은 가장 큰 직경이 노즐확장부의 가장 큰 직경보다 작게 나타나기 때문에 직경이 가장 큰 위치를 기준으로 오차를 구할 수 없었다. 이러한 결과들은 노즐확장부와 동일한 형상의 치구로 성형한 후 재생냉각 챔버를 제작하기 위하여 내피구조물과 조립하면 직경이 큰 쪽에서 성형된 큰 구조물이 노즐확장부 형상보다 작기 때문에 노즐확장부 내피구조물과 조립되지 않음을 알 수 있다.

#### 2.4 3차 수정된 성형치구를 이용한 구조해석 결과

두 번의 설계수정을 거친 성형치구를 이용한 구조해석 결과에서 성형된 구조물과 노즐확장부 형상과의 오차가  $-0.036\text{ mm}$ 과  $0.047\text{ mm}$ 로 감소하였지만 직경이 가장 작은 위치를 기준으로 한 경우와 변형량이 가장 큰 위치를 기준으로 한 경우 모두 직경이 가장 큰 위치에서 다른 영역에 비하여 오차가 크게 발생하였다. 이 오차를 감소시키기 위하여 2차 수정된 성형치구를 적용한 구조해석 결과로 얻은 오차를 반영하여 3차 수정된 성형치구 형상을 생성하고, 이 성형치구로 구조해석을 수행하였다. 구조해석 결과 직경이 가장 작은 위치를 기준으로 생성한 성형치구로 얻은 최대오차가  $-0.036\text{ mm}$ 에서  $-0.014\text{ mm}$ 로 감소하였으며, 성형된 구조물의 모든 영역에서 오차가 매우 작은 범위에 존재하였다. 변형량이 가장 큰 위치를 기준으로 생성한 성형치구를 이용하여 수행한 구조해석 결과 2차 수정된 성형치구로 얻은 최대 오차가  $0.047\text{ mm}$ 에서  $0.018\text{ mm}$ 로 감소하였으며, 성형된 구조물의 대부분의 영역에서 오차가 매우 작은 값을 나타내고 있다. Fig. 6은 직경이 작은 위치를 기준으로 생성한

성형치구들의 형상을 수정함에 따라 노즐확장부 형상과 성형된 구조물과의 오차가 감소하고 있음을 보여준다. 앞서 언급하였듯이 초기 노즐확장부와 동일한 형상의 치구를 사용하여 성형하였을 때 오차가 크게 발생하였으나, 1차와 2차, 그리고 3차의 설계 수정된 성형치구를 사용하면 노즐확장부 형상과 성형된 구조물과의 오차를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 변형량이 가장 큰 위치를 기준으로 생성한 성형치구들의 수정에 따른 구조해석 결과를 보여준다. 앞의 결과와 마찬가지로 성형치구를 3회 수정함으로써 성형된 외피구조물과 노즐확장부 형상과의 오차가 매우 작은 범위에서 분포하고 있음을 알 수 있다.

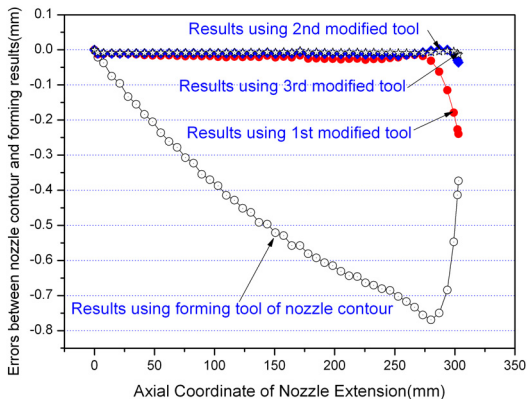


Fig. 6 Comparison of the errors of nozzle extension contour and formed structure using reference1

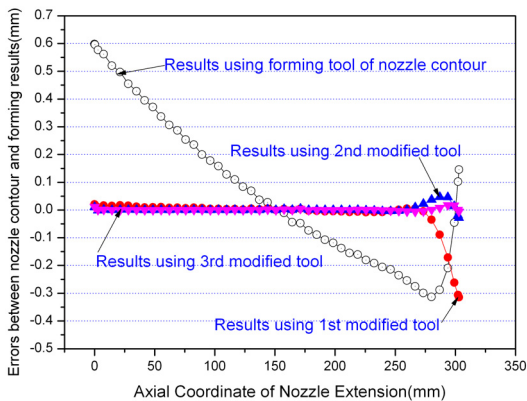


Fig. 7 Comparison of the errors of nozzle extension contour and formed structure using reference3

### 3. 결 론

연소기 노즐확장부의 외피구조물의 성형치구 설계에 대한 연구를 수행하였다. 판재로 제작된 콘 형상을 구조물을 노즐확장부와 동일한 형상의 성형치구로 성형하면 성형 후 구조물에 나타나는 탄성복원과 성형공정에서 필요한 콘 구조물의 고정으로 성형 후 구조물의 형상이 노즐확장부 형상과 다르게 성형됨을 알 수 있었다. 이러한 노즐확장부 형상과 성형된 구조물과의 형상 오차를 없애기 위하여 노즐확장부와 동일한 형상의 성형치구를 이용하여 구조해석을 수행하고, 그 결과로부터 얻은 오차를 반영하여 반복적으로 성형치구 형상을 수정함으로써 성형 후 노즐확장부 형상을 얻을 수 있는 성형치구를 설계할 수 있었다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 향후 국내에서 개발하는 액체로켓 연소기의 노즐확장부 외피구조물의 성형치구 설계에 활용될 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

1. Mehmet Firat, Bilgin Kaftanoglu and Orhan Eser, "Sheet metal forming analyses with an emphasis on the springback deformation," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 196, 2008, pp.135-148
2. M. Samuel, "Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bending of anisotropic sheet metals," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 105, 2000, pp.382-393
3. Standard Test Method for Tension Testig of Metallic Materials[Metric] (ASTM E 8 M)
4. MARC General Purpose Finite Element Program, MARC Analysis Research Corporation, Vol. A-D, 2008