

연소기를 위한 전후방 유동성형에서의 성형력 비교

남경오* · 조천휘** · 홍성인***

Comparison of Forming Force on Forward and Backward Flow Forming for Combustion Chamber

Kyoungso Nam* · Cheonhwey Cho** · Sungin Hong***

ABSTRACT

The flow forming has been used to produce long thin walled tube parts, with reduced forming force and enhanced mechanical for a good finished part, compared with other method formed parts. Especially, the flow forming is suitable for making high precision thin walled cylinders, such as rocket motor cases, combustion chamber, hydraulic cylinders and high-pressure vessels and so on. In this paper, finite element analysis of three-roller forward and backward flow forming for combustion chamber is carried out to study effects of forming depth and feed rate on forming force. The axial and radial forming forces of forward flow forming on several forming depth and feed rate conditions are compared with those of backward flow forming.

초 록

두께가 얇고 길이가 긴 튜브 제품을 생산하기 위한 방법으로 유동성형 공정이 많이 이용되고 있으며 이는 다른 가공방법에 비해 성형력이 작고 유동성형에 의해 가공된 제품의 기계적인 강도가 우수하기 때문이다. 특히 유동성형은 로켓 모터 케이스, 연소기, 유압 실린더 그리고 고압용기 등과 같은 고정밀도의 두께가 얇은 실린더 제품을 생산하기 위한 적합한 공정이다. 본 논문에서는 3개의 롤러를 가지는 전후방 유동성형에 대한 유한요소해석을 통해 가공깊이와 가공속도가 성형력에 미치는 영향을 살펴보았다. 다양한 가공깊이와 가공속도 조건에서 얻어진 전후방 유동성형에서의 축방향과 반경방향의 성형력을 비교하였다.

Key Words: Flow Forming(유동성형), Forming Force(성형력), Combustion Chamber(연소기), Finite Element Analysis(유한요소해석), Forming Depth(가공깊이), Feed Rate(가공속도)

† 2006년 7월 25일 접수 ~ 2006년 10월 12일 심사완료

* 학생회원, 충남대학교 기계공학과

** 정회원, (주) ACT

*** 정회원, 충남대학교 기계공학과

BK21 메카트로닉스 사업단

연락처, E-mail: namko@cnu.ac.kr

1. 서 론

얇은 두께를 갖는 튜브형상의 부품을 생산하기 위한 공정 중 유동성형 공정은 다른 금속성

형 기술과 비교할 경우 가장 효과적인 방법으로 알려지고 있다. 이는 가공이나 성형공정 중 칩의 발생이 없으며 롤러와 소재의 접촉 면적이 작기 때문에 다른 가공이나 성형공정에 비해 상대적으로 작은 성형력으로도 성형이 가능하고 성형 기계도 비교적 간단한 구조를 가지기 때문이다. 일반적으로 유동성형 공정은 항공우주, 자동차, 방위산업 등에 널리 이용되고 있다. 특히 각종 미사일의 추진기관용 연소관 같은 구조적인 강도와 높은 치수정밀도를 요하는 제품 생산에 많이 이용되고 있다.

1960년대 이후 많은 실험적인 접근과 상계해법, 유한요소법 등을 이용한 수치해석 모델을 통해 소재의 거동, 응력과 변형률의 분포 그리고 소재의 결합 등에 대한 연구가 진행되었다[1-6]. 그러나 대부분의 유동성형 및 스피닝의 연구동향은 주로 소재의 응력분포 및 변형과 같은 재료의 유동에 중점을 두었기 때문에 실제 유동성형 기기제작을 위한 기초적인 자료가 미비할 뿐만 아니라 성형력에 관한 자료는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 전후방 유동성형에 대한 3차원 강소성 유한요소해석을 통해 성형력에 가장 큰 영향을 주는 가공깊이와 가공속도의 변화에 따른 축방향 및 반경방향의 성형력 변화를 고찰하고 계산된 성형력을 비교하였다. 본 연구를 위해 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 사용하여 전후방 유동성형에 대한 3차원 강소성 유한요소해석을 수행하였다.

2. 이론 및 해석 조건

2.1 이론적 배경

추진기관용 연소기의 유동성형은 다른 소성변형과 마찬가지로 재료의 대변형을 수반하기 때문에 기하학적인 소재의 비선형을 포함하게 된다. 특히 소재와 롤러와의 접촉에 의한 소재의 소성변형량이 탄성변형량보다 충분히 큰 값을 가진다고 가정할 경우 강소성 유한요소해석으로

도 큰 오차가 없을 것으로 판단된다. 먼저 각 방향에 대한 선형 운동량 보존의 법칙은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_{jk}}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

강소성 유한요소해석에 적용되는 적합조건과 구성방정식은 다음과 같다.

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$$D_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\epsilon^e}{\sigma^e} \sigma'_{ij} \quad (3)$$

여기에서 ϵ^e (effective plastic strain rate), σ^e (effective stress), σ'_{ij} (deviatoric stress tensor)는 다음과 같다.

$$\epsilon^e = \sqrt{\frac{2}{3}} (D_{ij} D_{ji})^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\sigma^e = \sqrt{\frac{3}{2}} (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \quad (6)$$

강소성 유한요소해석의 특징은 탄성변형을 무시하기 때문에 전 변형률은 소성변형률과 동일하다. 따라서 소성변형과 탄성변형을 고려한 전체 변형률 텐서 D_{ij} (strain rate tensor)는 소성변형률 텐서 D_{ij}^p (plastic strain rate tensor)와 동일하게 된다.

가상일(virtual work)의 원리에 따른 범함수(functional)는 다음과 같다

$$\pi = \int_V \sigma^e \epsilon^e dV - \int_{S_f} F_i u_i dS \quad (7)$$

여기에서 F_i 는 surface traction vector를 나타낸다. 그리고 여기에 penalty 상수를 적용한 범함수의 변분(variation)을 취하면 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \sigma^e \delta\epsilon^e dV + K \int_V \epsilon_v \delta\epsilon_v dS - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS \quad (8)$$

여기에서 K 는 penalty 상수를 나타낸다.

2.2 해석모델

전후방 유동성형 모델은 3개의 롤러가 120°의 간격으로 배치되어 있고, 롤러는 팁(tip)을 전후로 전면(front face)은 소재의 변형을 결정하는 리드각(lead angle)을 가지며, 후면(rear face)은 표면 거칠기를 결정하는 다듬각(smooth angle)을 갖는다. 롤러와 소재의 형상 및 치수는 Fig. 1 그리고 Table 1과 같다. 맨드릴의 외경은 소재의 내경과 동일하다. 가공깊이는 초기 두께에 대한 감소된 두께의 비로, 가공속도는 소재의 회전에 대한 롤러의 이동거리로 정의된다.

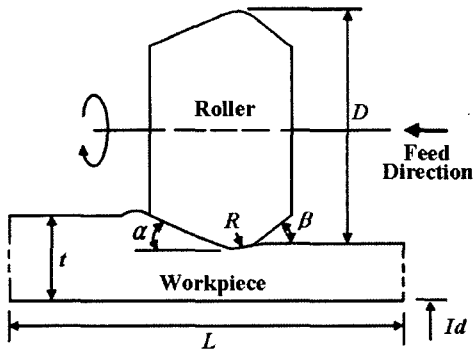


Fig. 1 Geometry of Roller and Workpiece

Table 1. Dimensions of Roller and Workpiece

Workpiece	
Inner diameter(mm) : Id	60
Wall thickness(mm) : t	6
Initial length(mm) : L	44
Roller	
Diameter(mm) : D	264
Tip radius(mm) : R	5
Lead angle(°) : α	30
Smooth angle(°) : β	10

Table 2. Conditions of FE Analysis

Type	Backward
	Forward
Feed rate(mm/rev)	1.5
	1.2
	1.0
Thickness reduction(%)	40(2.4 mm)
	30(1.8 mm)
	20(1.2 mm)
coulomb friction coeff.	0.2
Workpiece material	Al 5052
Roller, Mandrel	Rigid body
RPM(rev/min)	60(6.28 rad/sec)

2.3 해석조건

성형 중 롤러의 진행방향과 소재의 유동방향이 동일한 경우를 전방(forward) 유동성형이라고 하고 서로 반대인 경우를 후방(backward) 유동성형이라고 한다. 해석조건은 Table 2와 같으며, 롤러는 축을 따라 30 mm의 이동거리를 가진다. 실제 유동성형은 회전하는 소재에 롤러가 축방향으로 이동하게 되나 해석상의 편리를 위해 소재는 고정되어 있고 롤러가 축을 중심으로 회전하면서 이동하도록 하였다. 소재는 Al 5052를 사용하였으며 항복강도는 200 MPa이다. 소재와 맨드릴사이의 마찰은 쿨롱마찰계수 0.2를 사용하였다. 롤러와 소재 사이의 마찰열에 의한 효과는 고려하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 후방 유동성형 해석결과

가공깊이와 가공속도에 따른 축방향 및 반경방향의 성형력 비교를 위해 각각의 가공속도 1.0, 1.2, 1.5 mm/rev 조건에서 20, 30, 40%의 가공깊이에 대한 후방 유동성형 해석을 수행하였다. Fig. 2는 가공속도가 1.0 mm/rev인 경우에서의 가공깊이별 성형력을 비교한 그래프로 축방향의 경우 가공깊이가 깊어지면서 성형력도

증가하는 비례적인 관계를 보였다. 이는 가공깊이가 증가함에 따라 소재와 롤러의 접촉면적 증가에 따른 성형력 증가로 판단된다. 반면에 반경방향의 성형력은 가공깊이가 깊어지더라도 큰 변화는 없었다. 이는 가공깊이의 증가가 접촉면적 변화에 영향을 주지 않기 때문이다. 또한 가공속도 1.2, 1.5 mm/rev에서도 유사한 경향을 보였다. Fig. 3은 가공깊이가 20%인 경우에서의 가공속도별 성형력을 비교한 그래프로 마찬가지로 축방향의 성형력은 가공깊이와 비례관계를 보였으나 반경방향의 성형력은 가공깊이의 변화에도 크게 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다. 가공깊이 30, 40%에서도 유사한 경향을 보였다.

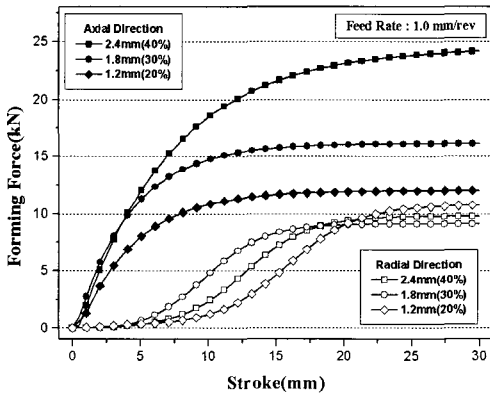


Fig. 2 Forming Force at Feed Rate 1.0 mm/rev on Backward Flow Forming

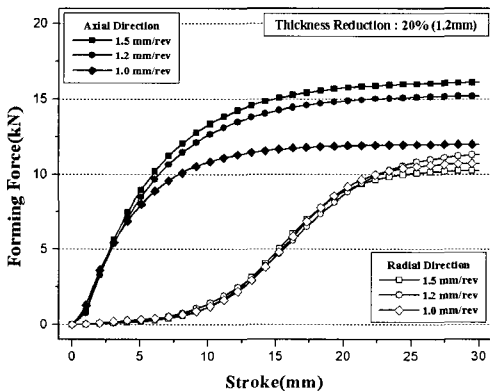


Fig. 3 Forming Force at Forming Depth 20% (1.2 mm) on Backward Flow Forming

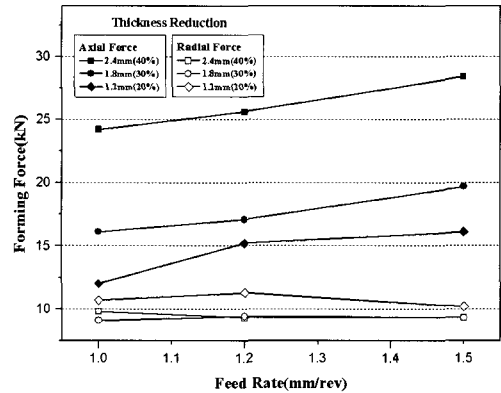


Fig. 4 Comparison of Forming Force in the case of Backward Flow Forming

Figure 4에서 보는바와 같이 후방 유동성형에서 가공깊이와 가공속도의 변화는 축방향의 성형력과 비례관계를 갖지만 반경방향의 성형력은 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3.2 전방 유동성형 해석결과

후방 유동성형 해석과 동일한 해석 조건으로 전방 유동성형 해석을 수행하고, 축방향과 반경방향의 성형력을 비교하였다. Fig. 5는 가공속도가 1.0 mm/rev인 경우에서의 가공깊이별 성형력을 비교한 그래프로 후방 유동성형 결과와 유사하게 가공깊이가 깊어짐에 따라 축방향의 성형력은 비례하는 경향을 보였고, 반면에 반경방향의 성형력은 가공깊이의 변화에도 크게 영향을 받지 않았다. 그러나 가공깊이가 낮은 조건에서는 축방향보다 반경방향의 성형력이 더 컸다. 가공속도 1.2, 1.5 mm/rev에서도 유사한 경향을 보였다. 또한 Fig. 6에서도 후방 유동성형과 마찬가지로 가공속도의 변화에 따라 축방향의 성형력은 비례관계를 가지는 반면 반경방향의 성형력은 크게 변하지 않았다. 가공깊이 30, 40%에서도 유사한 경향을 보였다. 그러나 대부분의 후방 유동성형 해석 결과에서는 축방향의 성형력이 반경방향의 성형력보다 큰 값을 가졌으나 전방 유동성형에서는 가공깊이와 가공속도가 낮은 조건에서 오히려 반경방향의 성형력이 축방향의 성형력보다 큰 값을 가지는 경향을 보였다.

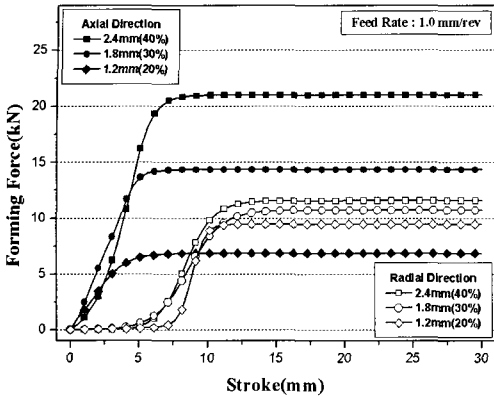


Fig. 5 Forming Force at Feed Rate 1.0 mm/rev on Forward Flow Forming

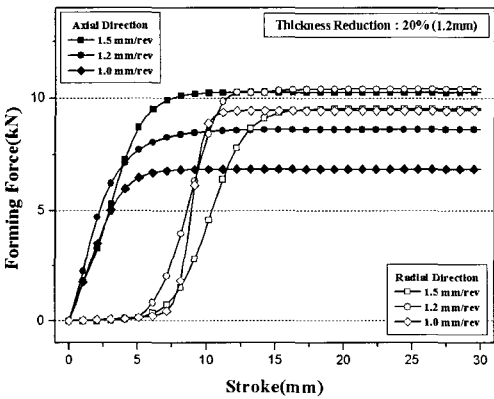


Fig. 6 Forming Force at Forming Depth 20%(1.2 mm) on Forward Flow Forming

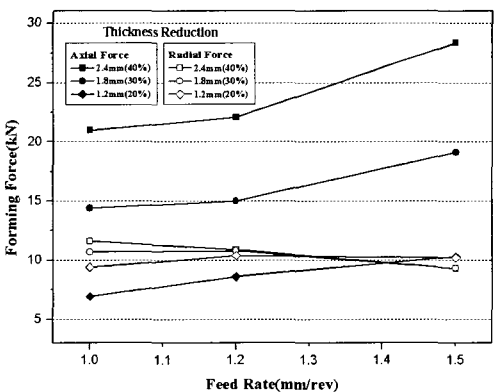


Fig. 7 Comparison of Forming Force in the case of Forward Flow Forming

3.3 전후방 유동성형에서의 성형력 비교

Figure 8과 9는 전후방 유동성형에서 각각의 해석조건에 따른 축방향과 반경방향의 성형력을 비교한 그래프다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 축방향의 성형력은 전후방 유동성형 모두에서 가공깊이와 가공속도에 비례하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 Fig. 9에서 반경방향의 성형력은 전후방 유동성형에서 가공깊이와 가공속도의 변화에 큰 변화 없이 유사한 수치를 보였다. 이 결과에서 축방향의 성형력이 반경방향의 성형력보다 가공깊이와 가공속도의 변화에 민감하게 반응함을 알 수 있다.

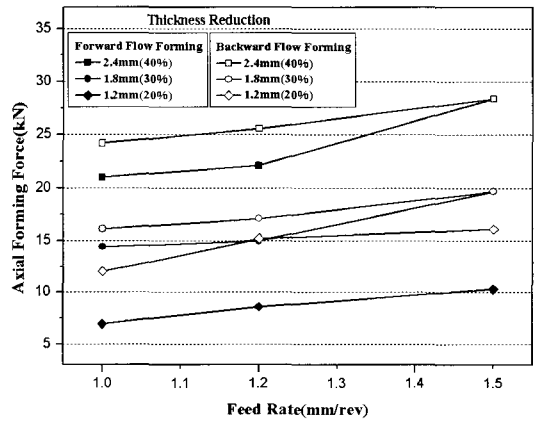


Fig. 8 Comparison of the Axial Forming Force with each Feed Rate and Forming Depth

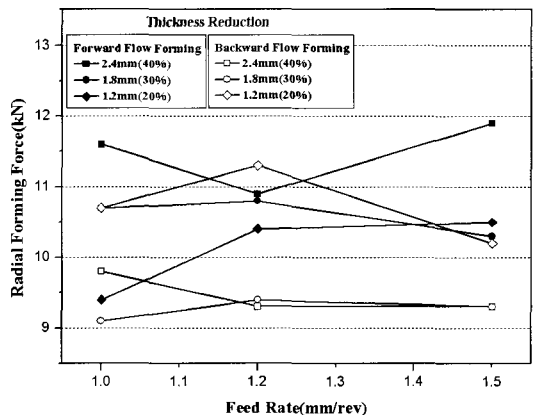


Fig. 9 Comparison of the Radial Forming Force with each Feed Rate and Forming Depth

4. 결 론

가공깊이와 가공속도의 변화에 따른 전후방 유동성형에서의 성형력 비교를 위해 3개의 물러를 가지는 전후방 유동성형의 3차원 강소성 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통해 각각의 가공깊이와 가공속도에 따른 축방향 및 반경방향의 성형력을 정량화할 수 있었다. 결과에서 축방향의 성형력은 가공깊이와 가공속도에 따라 비례하는 경향을 보였지만 반경방향의 성형력은 큰 변화를 보이지 않았다. 이를 통해 가공조건의 변화에 축방향의 성형력이 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 특히 대부분의 해석조건에서 축방향의 성형력이 반경방향의 성형력보다 큰 수치를 보였으나 가공깊이와 가공속도가 낮은 조건에서는 오히려 반대의 결과를 보였다.

참 고 문 헌

1. M. Hayame, H. Kudo, "Experimental Study of Tube Spinning", JSME, Vol. 22, 1979, pp.769-775
2. D. R. Branton, P. Ari-gur, Z. Bratt, M. Gur, "Texture Inhomogeneity and Strain Distribution in Shear-spun Steel Tubes", Mater. Sci. Eng., Vol. 44, 1980, pp.185-194
3. 김진형, 홍성인, 이정환, 이영선, "상계해법과 유한요소법을 이용한 스피닝공정 해석에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제9권 6호, 1997, pp.517-526
4. 홍대훈, 황두순, 이병섭, 홍성인, "티타늄 합금재의 튜브 스피닝 공정해석", 한국추진공학회지, 제4권 3호, 2000, pp.55-63
5. 남경오, 염성호, 권혁선, 홍성인, "후방유동성형에서 가공깊이와 이송속도가 성형력에 미치는 영향", 한국추진공학회지, 제9권 4호, 2005, pp.16-22
6. 남경오, 염성호, 홍성인, "연소기 제작을 위한 전후방 유동성형에서의 성형력 비교", 한국추진공학회 춘계학술대회논문집, 2006, pp.379-382