

## 후방유동성형에서 가공깊이와 이송속도가 성형력에 미치는 영향

남경오\* · 염성호\* · 권혁선\*\* · 홍성인\*\*\*

### The Effects of Forming Depth and Feed Rate on Forming Force of Backward Flow Forming

Kyoungoo Nam\* · Sungho Yeom\* · Hyuksun Kwon\*\* · Sungin Hong\*\*\*

#### ABSTRACT

The flow forming has been used to produce long thin walled tube parts, with reduced forming force and enhanced mechanical and surface quality for a good finished part, compared with other method formed parts. So flow forming technique is used widely in industrial production. Especially spinning and flow forming techniques are used frequently in automotive, aerial, defense industry. In this paper, finite element method analysis of three-roller backward flow forming of a workpiece is carried out to study effects of forming depth and feed rate on forming force. The axial and radial forces on several forming depth and feed rate conditions are obtained.

#### 초 록

두께가 얇고 길이가 긴 튜브 제품을 생산하기 위한 가공법으로는 유동성형에 의한 성형방법이 많이 이용되고 있으며 이는 다른 가공방법에 비해 성형에 필요한 힘이 적게 들고 유동성형에 의해 가공된 제품의 기계적인 강도가 우수하며 표면 품질이 우수하기 때문이다. 따라서 유동성형 기술은 산업현장에서 폭 넓게 이용되고 있다. 특히 스피닝과 유동성형은 자동차, 항공, 방위산업에 자주 이용되고 있다. 본 논문에서는 3개의 롤러를 가지는 후방유동성형에 대한 유한요소해석을 통해 가공깊이와 가공속도가 성형력에 미치는 영향을 살펴보았다. 다양한 가공깊이와 가공속도 조건에서 축방향과 반경방향의 성형력을 구하였다.

Key Words: Flow Forming(유동성형), Forming Force(성형력), Spinning(스피닝), Finite Element Method(유한요소법), Forming Depth(가공깊이), Feed Rate(이송속도)

† 2005년 11월 8일 접수 ~ 2005년 12월 12일 심사완료

\* 학생회원, 충남대학교 기계공학과

\*\* 정회원, AD SOLUTION

\*\*\* 정회원, 충남대학교 기계공학과  
연락처, E-mail: namko@cnu.ac.kr

성형 기술과 비교할 경우 얇은 두께를 갖는 금속의 축대칭 튜브를 제작하는 가장 효과적인 방법으로 자동차, 항공우주, 방위산업 등에 널리 이용되고 있다. 특히 각종 미사일의 추진기관용 연소관 제작에 있어서 구조적인 강도와 높은 치수정밀도를 요하는 제품 생산에 많이 이용되고 있다. 유동성형은 맨드릴(mandrel)에 원통형의 튜브가 테일 스톡(tail stock)에 의해 고정되어 맨드릴과 함께 회전하고 새들(saddle)에 고정된 2~3개의 작업 롤러가 주축 방향으로 이동하면서 튜브의 두께를 감소시키고 동시에 길이는 증가하는 가공 기술이다. 특히 가공이나 성형에 의한 칩의 발생이 없으며 롤러와 소재의 접촉 면적이 작기 때문에 다른 가공이나 성형공정에 비해 상대적으로 작은 성형력으로도 성형이 가능하고 성형기계도 비교적 간단한 구조를 가진다. 또한 유동성형을 통해 제작된 제품은 우수한 기계적인 성질과 치수정밀도 그리고 표면처리 효과를 가지고 있어 고품질의 다종 소량생산에 적합한 가공기술이다. 롤러의 진행방향과 소재의 유동방향이 동일한 경우를 전방(forward)유동성형이라고 하고 서로 반대인 경우를 후방유동성형이라고 한다. 대부분의 유동성형이 전방유동성형인 반면에 후방유동성형의 경우 맨드릴의 길이가 예비성형체에 맞게 설계될 수 있기 때문에 최종제품의 길이가 상대적으로 긴 형상일 경우 작업공간의 축소 및 맨드릴의 길이에 따른 축의 편심 회전에 의한 제품의 치수정밀도 저하를 고려한다면 후방유동성형 공정이 유리한 가공방법이라 할 수 있다.

1960년대 스피닝 또는 유동성형에 대한 해석적인 연구에 초등해법과 슬립선장법이 이용되었다. 이후 많은 실험적인 접근과 상계해법, 유한요소법을 이용한 수치해석 모델을 통해 소재의 거동, 응력과 변형률의 분포, 성형력 그리고 소재의 결함 등에 대한 연구가 진행되었다[1-9]. Y. Xu 등은 3차원 강소성 유한요소법을 이용해 유동성형에서의 소재에 대한 응력과 변형률 분포를 해석하였다[10]. K. S. Lee 등은 유동성형 과정에서 다양한 윤활조건과 성형비에 따라 롤러

에 작용하는 압력을 실험과 이론적 해석을 통해 유도하였다[11]. C. C. Wong 등은 스피닝과 유동성형에 대한 역사적 고찰과 함께 원형 실린더의 성형력에 미치는 이송속도와 롤러 형상에 대한 영향을 비교하였다[12, 13]. 현재까지 유동성형 및 스피닝의 연구동향은 주로 전방유동성형에 그치고 있으며 특히 대부분의 연구가 소재의 응력분포 및 변형에 중점을 두었기 때문에 실제 기기제작을 위한 성형력 자료는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 후방유동성형에 대한 3차원 강소성 유한요소해석을 통해 성형력에 가장 큰 영향을 주는 롤러의 가공깊이와 이송속도의 변화에 따른 축방향 및 반경방향의 성형력 변화를 고찰하였다. 본 연구를 위해 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM-3D를 사용해 후방유동성형에 대한 3차원 강소성 유한요소해석을 수행하였다.

## 2. 이론 및 해석 조건

### 2.1 이론적 배경

추진기관용 연소관의 유동성형은 다른 소성변형과 마찬가지로 대변형을 수반하기 때문에 기하학적 및 소재의 비선형을 포함하게 된다. 특히 소재와 롤러와의 접촉에 의한 소재의 소성변형량이 탄성변형량보다 충분히 큰 값을 가진다고 가정할 경우 강소성 유한요소해석으로도 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  $\epsilon^e$  (effective plastic strain rate),  $\sigma^e$  (effective stress),  $\sigma'_{ij}$  (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 탄성 변형을 무시하기 때문에 전 변형률은 소성변형률과 동일하다. 따라서 소성변형과 탄성변형을 고려한 전체 변형률 텐서  $D_{ij}$  (strain rate tensor)는 소성 변형률 텐서  $D_{ij}^p$  (plastic strain rate tensor)와 동일하다.

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.

22 모델 형상

Figure 1은 후방유동해석을 위한 3차원 유한요소 모델이다. 맨드릴과 소재 그리고 3개의 롤러가 120도 간격으로 위치한다. 가공깊이에 따라 롤러의 위치가 변경된 3가지 형태의 유동성형 모델이 설계되었다. 소재와 롤러의 치수는 Fig. 2와 Table 1과 같다. 여기에서 맨드릴의 반경은 소재의 내부 반경과 동일하다.

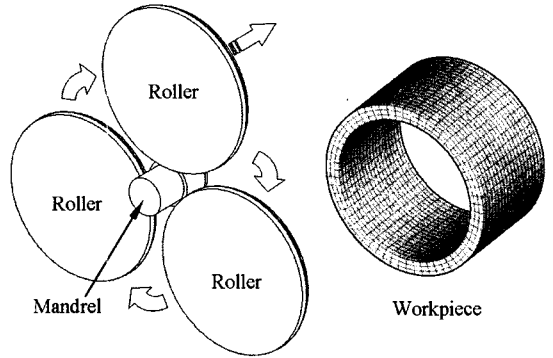


Fig. 1 FE Model for Backward Flow Forming

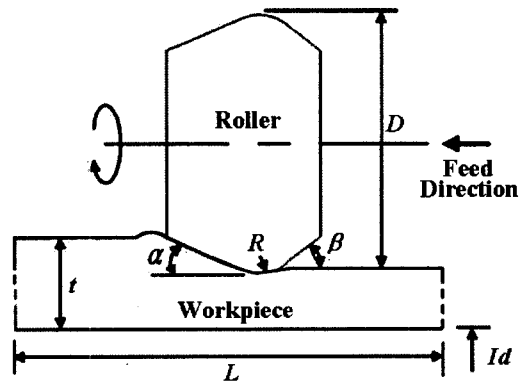


Fig. 2 Geometry of Roller and Workpiece

Table 1. Dimensions of Roller and Workpiece

Workpiece	
Inner diameter(mm) : $I_d$	60
Wall thickness(mm) : $t$	6
Initial length(mm) : $L$	44
Roller	
Diameter(mm) : $D$	264
Tip radius(mm) : $R$	5
Lead angle(°) : $\alpha$	30
Smooth angle(°) : $\beta$	10

23 해석 조건

본 연구를 위한 해석조건은 Table 2와 같다. 4 경우의 이송속도에 따라 3 경우의 두께감소를

을 적용해 모두 12 경우의 유동성형 공정을 해석하였다. 해석은 소재의 유동방향과 롤러의 진행방향이 서로 반대인 후방유동성형 방식을 적용하였다. 실제 유동성형은 회전하는 맨드릴에 소재가 고정되어 같이 회전하면서 이동하지만 일반적으로 해석에서는 편의상 소재가 고정되고 롤러는 주축을 중심으로 회전하며 이동하게 된다. 본 해석에서도 이와 같은 방식을 적용하였다. 소재와 맨드릴 사이의 마찰계수는 일반적으로 0.1~0.3을 많이 사용하고 있으며 본 해석에서는 쿨롬(coulomb) 마찰계수 0.2를 적용하였다. 롤러와 맨드릴은 강체(rigid body)로 가정하였고, 소재는 Al 5052의 냉간 물성값을 적용하였으며 항복강도는 200 MPa이다. 롤러의 주축에 대한 회전속도는 60 RPM을 적용하였으며 가공간 발생하는 열에 의한 효과는 고려하지 않았다.

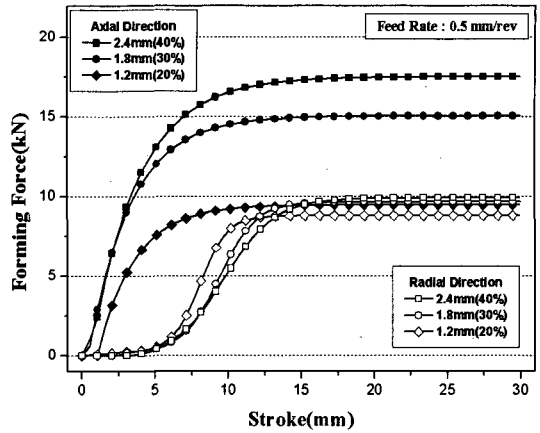
Table 2. Conditions of FE Analysis

Backward flow forming type	
Feed rate(mm/rev)	1.5
	1.2
	1.0
	0.5
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)

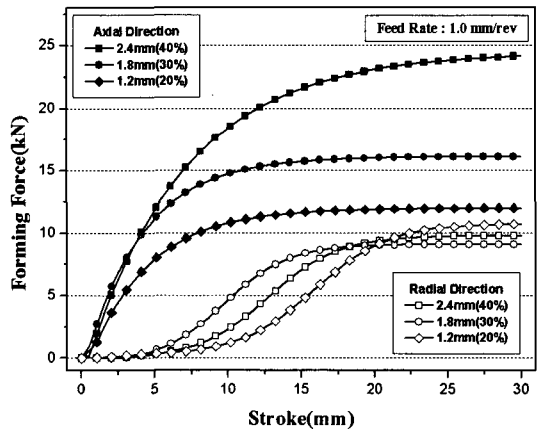
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 가공깊이에 따른 성형력 비교

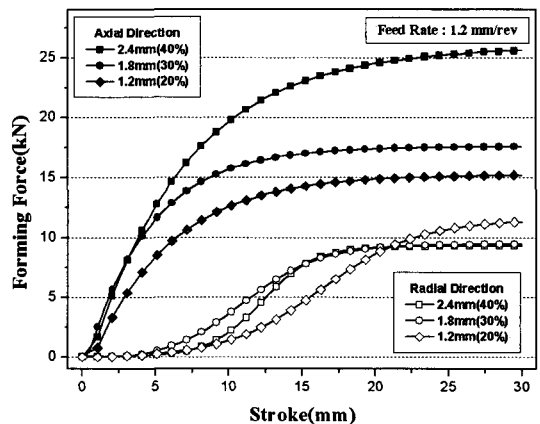
가공깊이에 따른 성형력 비교를 위해 동일한 이송속도 조건에서 20, 30, 40%의 가공깊이에 대한 후방유동성형 해석을 수행하여 주축과 반경



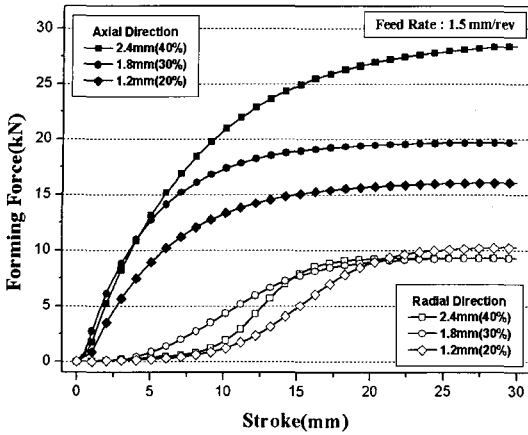
(a) Feed Rate 0.5 mm/rev



(b) Feed Rate 1.0 mm/rev



(c) Feed Rate 1.2 mm/rev



(d) Feed Rate 1.5 mm/rev

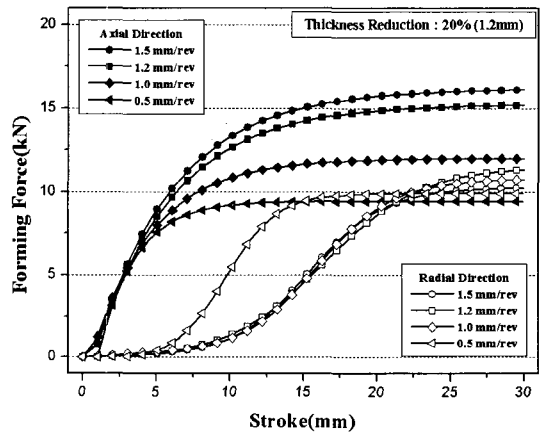
Fig. 3 Comparison of Forming Force with each Forming Depth in Feed Rate at (a) 0.5 mm/rev, (b) 1.0 mm/rev, (c) 1.2 mm/rev, (d) 1.5 mm/rev

방향에 대한 롤러에 작용하는 성형력을 비교하였다. 일반적으로 롤러에 작용하는 원주방향의 성형력은 고려하지 않는다. Fig. 3은 가공깊이에 따른 주축 및 반경방향 성형력을 보여주고 있다. 이 그림에서 각각의 이송속도에서 다른 주축 및 반경방향의 성형력은 유사한 형태를 보였다. 주축방향의 성형력은 가공이 진행됨에 따라 그와 비례하여 커지는 경향을 보였으며 일정 거리를 이동하게 되면 안정된 값을 가지게 되는데 이는 롤러가 이동하면서 소재가 전방 경사면을 완전히 빠져나올 만큼의 이동거리를 의미한다. 또한 그림에서 가공깊이가 커짐에 따라 안정화되는 이동거리가 증가하게 되는데 이는 가공깊이의 증가가 롤러의 팁(tip)부분과 소재의 끝단 거리가 증가했기 때문이다.

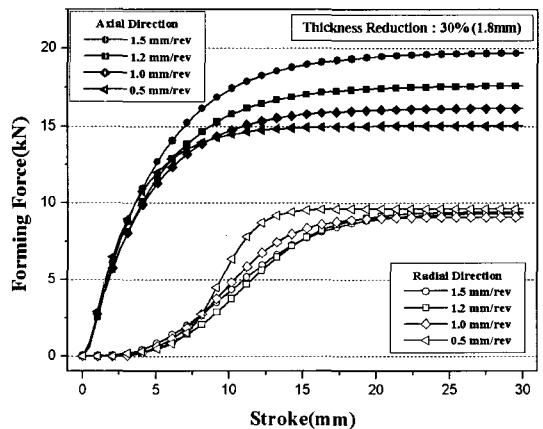
주축방향의 성형력은 각각의 이송속도에 따라 가공깊이가 커짐에 따라 선형적으로 커지는 경향을 보이고 있으며 이는 가공깊이가 증가함에 따라 소재와 롤러와의 접촉면적 증가에 따른 성형력 증가로 판단되며 특히 반경방향의 성형력은 가공깊이에 따른 접촉면적의 변화에도 크게 영향을 받지 않았다.

3.2 이송속도에 따른 성형력 비교

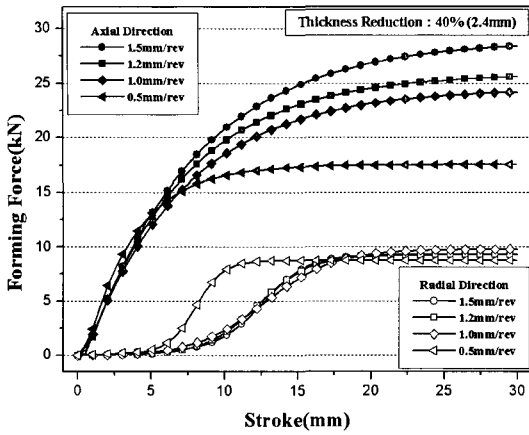
이송속도에 따른 성형력 비교를 위해 동일한 가공깊이 조건에서 0.5, 1.0, 1.2, 1.5 mm/rev의 이송속도에 대한 유동성형 해석을 수행하였다. Fig. 4는 각 이송속도에 따른 주축 및 반경방향 성형력을 보여주고 있다. 그림에서 동일한 가공깊이에서 주축방향의 성형력은 이송속도가 증가하면서 증가하였다. 반면 반경방향의 성형력은 이송속도가 증가하여도 크게 증가하지 않는 경향을 보였다.



(a) Thickness Reduction 20%(1.2 mm)



(b) Thickness Reduction 30%(1.8 mm)



(c) Thickness Reduction 40%(2.4 mm)

Fig. 4 Comparison of Forming Force with each Feed Rate in Forming Depth at (a) 20%(1.2 mm), (b) 30%(1.8 mm), (c) 40%(2.4 mm)

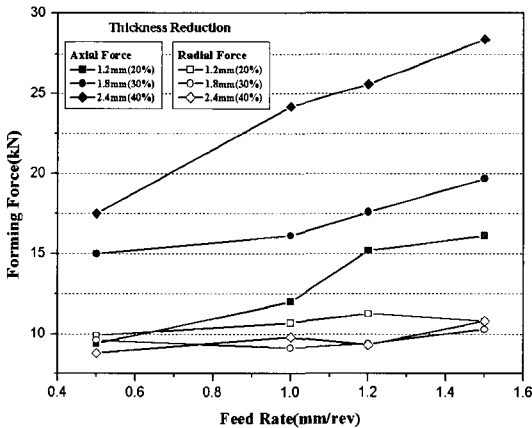


Fig. 5 Comparison of Forming Force with each Feed Rate and Forming Depth

3.3 이송속도와 가공깊이에 따른 성형력 비교

Figure 5는 이송속도와 가공깊이에 따른 안정화된 성형력을 함께 보여주고 있다. 주축방향의 성형력은 이송속도가 증가하고 가공깊이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며 반면 반경방향의 성형력은 이송속도와 가공깊이가 증가하여도 크게 영향을 받고 있지 않음을 보였다. 또한 낮은 이송속도와 가공깊이에서는 주축과 반경방향의 성형력이 비슷한 크기를 나타냈다.

4. 결 론

유동성형의 성형력에 미치는 가공깊이와 이송속도의 영향을 알아보기 위한 3차원 후방유동성형 유한요소해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 3개의 롤러를 가진 후방유동성형 유한요소해석을 통해 주축 및 반경방향의 성형력을 정량화 할 수 있었다.
- (2) 주축방향의 성형력은 가공깊이와 이송속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으나 반경방향의 성형력은 가공깊이와 이송속도의 변화에도 큰 차이를 보이지 않았다.
- (3) 후방유동성형 해석을 통해 계산된 성형력은 주축 및 반경방향의 동력계산을 위한 기초자료로 활용될 수 있으며 특히 가공깊이와 이송속도가 변경될 경우 주축방향에 대한 성형력 계산은 필수적으로 재 수행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 열과 롤러의 팁 형상이 성형력에 미치는 영향은 고려하지 않았다. 앞으로 이 부분에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. M. Hayame, H. Kudo, "Experimental study of tube spinning, Bull," 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. K. M. Xue, Z. Wang, Y. Lu, K. Z. Li, "Elasto-plastic FEM analysis and experimental study of diameter growth in tube spinning," J. Mater. Process. Technology, Vol. 69, 1997, pp.172-179

4. 윤수진, 이경훈, 은일상, "유동성형에서의 연소관 예비성형체 두께별 소성변형 형태," 한국추진공학회지, 제1권 제1호, 1997, pp.89-103
5. 장세용, 홍성인, 은일상, 박성한, 이경훈, "Study on the process of flow forming by an upper bound method," 한국소성가공학회지, 제2권 제4호, 1993, pp.70-84
6. 김진형, 홍성인, 이정환, 이영선, "상계해법과 유한요소법을 이용한 스피닝 공정 해석에 관한 연구," 한국소성가공학회지, 제6권 제6호, 1997, pp.517-526
7. S. I. Hong, S. H. Rhee, S. J. Yun, "A study on the neck-in process by flow forming," Met. Mater. Int., Vol. 4, No. 4, 1998, pp.895-898
8. K. Z. Li, N. H. Hao, Y. Lu, K. M. Xue, "Research on the distribution of displacement in backward tube spinning," J. Mater. Process. Technology, Vol. 79, 1998, pp.185-188
9. 홍대훈, 황두순, 이병섭, 홍성인, "티타늄 합금재의 튜브 스피닝 공정해석," 한국추진공학회지, 제4권 제3호, 2000, pp.55-63
10. Y. Xu, S. H. Zhang, P. Li, K. Yang, D. B. Shan, Y. Lu, "3D rigid-plastic FEM numerical simulation on tube spinning," J. Mater. Process. Technology, Vol. 113, 2001, pp.710-713
11. K. S. Lee, L. Lu, "A study on the flow forming of cylindrical tubes," J. Mater. Process. Technology, Vol. 113, 2001, pp.739-742
12. C. C. Wong, T. A. Dean, J. Lin, "A review of spinning, shear forming and flow forming processes," Int. J. Mach. Tools. Manuf., Vol. 43, 2003, pp.1419-1435
13. C. C. Wong, T. A. Dean, J. Lin, "Incremental forming of solid cylindrical components using flow forming principles," J. Mater. Process. Technology, Vol. 153, 2004, pp.60-66