

다양한 롤러 단면형상을 적용한 유동성형의 성형력 비교

남경오*, 김범년⁺, 원종호⁺⁺

(논문접수일 2007. 2. 15, 심사완료일 2007. 7. 27)

Comparison on the Forming Force of Flow Forming with Various Roller Profiles

Nam Kyoung O*, Kim Bum Nyun⁺, Won Jong Ho⁺⁺

Abstract

The flow forming has been used to produce long thin walled tube parts, with the reduced forming force and the enhanced mechanical and surface quality for a good finished part, compared with the formed parts using other method. Therefore, flow forming technique is used widely in industrial production. Spinning and flow forming techniques are used frequently in automotive, aerial and defense industries. The main factors for the flow forming machine design are motor power, bed rigidity, mandrel stiffness, spindle power, roller profile, etc. Especially, mandrel, spindle power and roller are important factors for flow forming machine capacity. In this paper, three dimensional finite element method for analysis of one-roller backward flow forming of a workpiece has been carried out to study effects of roller profile on forming force. Applied roller profile have roller lead geometries of angle 20°, 30°, 40°, concave and convex. Axial and radial forming forces on various roller profiles are obtained and compared with each analysis cases.

Key Words : Flow Forming(유동성형), Spinning(스피닝), Roller Profile(롤러 단면형상), Finite Element Method(유한요소법), Backward Flow Forming(후방유동성형), Forming Force(성형력)

1. 서론

유동성형에 의한 금속성형 기술은 다른 금속성형 기술과 비교할 경우 얇은 두께를 갖는 금속의 축대칭 튜브를 제작하

는 가장 효과적인 방법으로 자동차, 항공우주, 방위산업 등에 널리 이용되고 있다. 특히 각종 미사일의 추진기관용연소관 제작에 있어서 구조적인 강도와 높은 치수정밀도를 요하는 제품 생산에 많이 이용되고 있다. 유동성형은 맨드릴

* 한국원자력연구원 (namko@kaeri.re.kr)
주소: 305-353 대전시 유성구 덕진동 150-1
+ 한국전력연구원
++ 충남대학교 기계공학과

(mandrel)에 원통형의 튜브(cylindrical tube)가 테일 스톡(tail stock)에 고정되어 맨드릴과 함께 회전하고 새들(saddle)에 고정된 작업 롤러(roller)가 주축 방향으로 이동하면서 튜브의 두께를 감소시키고 동시에 길이가 늘어나는 가공기술이다. 유동성형의 특징으로는 가공이나 성형에 의한 칩의 발생이 없으며 롤러와 소재의 접촉면적이 작기 때문에 다른 가공이나 성형공정에 비해 상대적으로 작은 성형력으로도 가공이나 성형이 가능하고, 성형기계(forming machine)도 비교적 간단한 구조를 가진다. 또한 유동성형을 통해 제작된 제품은 우수한 기계적인 성질과 치수정밀도 그리고 표면처리 효과를 가지고 있어 고품질의 다량종 소량생산에 적합한 가공기술이다.

유동성형은 Fig. 1에서 보느냐와 롤러의 진행방향과 소재의 유동방향에 따라 전방 그리고 후방유동성형으로 구분하게 된다. 롤러의 진행방향과 소재의 유동방향이 동일한 경우를 전방유동성형(forward flow forming)이라 하고 서로 반대인 경우를 후방유동성형(backward flow forming)이라 한다. 대부분의 유동성형이 전방유동성형인 반면에 후방유동성형의 경우 예비성형체(preform)의 길이에 비해 최종제품의 길이가 상대적으로 긴 형상일 경우 작업공간의 축소 및 맨드릴의 길이에 따른 축의 편심 회전으로 인한 제품의 치수정밀도 저하를 고려한다면 후방유동성형 공정이 유리한 가공방법이라 할 수 있다.

1960년대 스피닝 또는 유동성형에 대한 해석적인 연구에 미끄럼선장법이 이용되었다. 이후 실험적인 접근과 상계해법, 유한요소법을 이용한 수치해석 모델을 통해 소재의 거동, 응력과 변형률의 분포, 성형력 그리고 소재의 결함 등에 대한 연구가 진행되었다⁽¹⁻⁶⁾. Nam 등은 롤러의 이송속도(feed rate) 및 두께감소비(thickness reduction ratio)에 따른 축방향과 반경방향의 성형력을 비교하였다⁽⁷⁻⁹⁾. Xu 등은 3

차원 강-소성 유한요소법을 이용해 유동성형에서의 소재에 대한 응력과 변형률 분포를 해석하였다⁽¹⁰⁾. Lee 등은 유동성형 과정에서 다양한 윤활조건과 성형비에 따라 롤러에 작용하는 압력을 실험과 이론적 해석을 통해 유도하였다⁽¹¹⁾. 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 유동성형기계제작을 위한 성형력 또는 롤러의 단면형상에 따른 성형력 비교자료는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 후방유동성형에 대한 3차원 강-소성 유한요소해석을 통해 롤러의 단면형상에 따른 축방향과 반경방향의 성형력 변화를 고찰하였다. 이러한 연구목표를 달성하기 위하여 압출과 압연과 같은 대변형(large deformation)을 포함하는 소성가공 해석이 많이 이용되고 있으며, 특히 메쉬 재구성(remeshing) 기능을 가지는 상용 유한요소 프로그램 DEFORM-3D를 이용하여 후방유동성형에 대한 3차원 강-소성 유한요소해석을 수행하였다.

2. 해석모델 및 조건

2.1 해석모델

후방유동해석을 위한 3차원 유한요소 모델과 소재의 메쉬형상(meshed geometry)은 Fig. 2와 같다. 유한요소모델은 롤러, 맨드릴 그리고 소재로 구성되었다. 단일롤러가 적용되었으며, 동일한 이송속도(feed rate)와 두께감소비 조건에서 5가지 형태의 롤러 단면형상을 적용하였다. 해석에 적용된 롤러의 단면형상은 Fig. 3과 같다. (a), (b), (c)는 롤러의 전

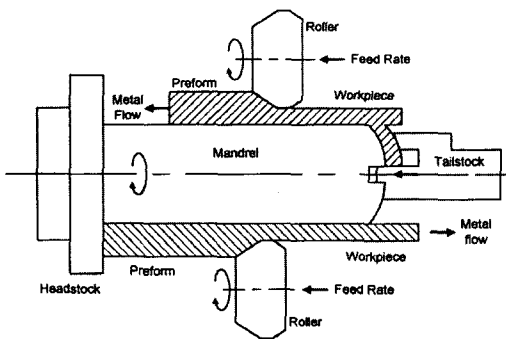


Fig. 1 Classification of Flow Forming

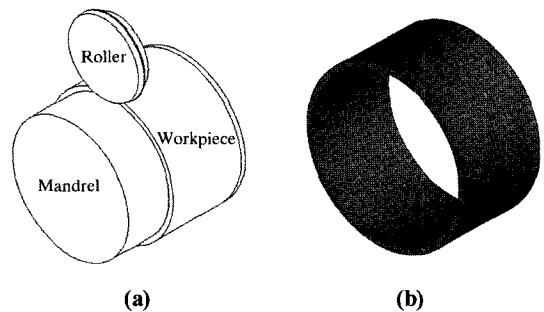


Fig. 2 FE Model for the Backward Flow Forming and Meshed Workpiece

방각(lead angle of roller)이 각각 20°, 30°, 40° 인 직선 형태의 단면을 나타내고 있으며 (d), (e)는 각각 오목한 단면과 볼록한 롤러의 단면형상을 나타내고 있다. 곡선 형태의 단면은 모두 반경 6.7mm의 원형 단면을 갖도록 모델링되었다. 해석에 적용된 단일롤러와 소재의 치수 및 형상은 Fig. 4 및 Table 1과 같다. 여기에서 맨드릴의 외경은 소재의 내경과

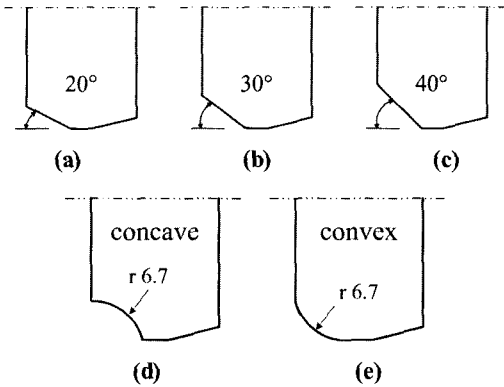


Fig. 3 Lead Angle of the Roller

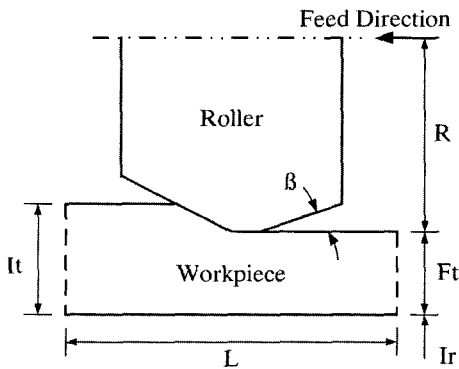


Fig. 4 Geometry of the Roller and Workpiece

Table 1 Dimension of the Roller and Workpiece

Workpiece	
Inner Radius(mm) : Ir	42.85
Initial Thickness(mm) : It	3.1
Final Thickness(mm) : Ft	2.17
Length(mm) : L	50
Roller	
Radius(mm) : R	26.5
Rear Angle(°) : β	10

동일하게 모델링되었다. 롤러의 후방각(rear angle of roller)은 모든 롤러의 단면형상에서 10°로 동일하게 적용되었다. 소재는 육면체 요소가 적용되었으며, 롤러는 소재와 접촉하도록 모델링하여 해석시간을 줄이도록 하였다.

2.2 해석 조건

본 연구를 위한 해석조건은 Table 2와 같다. 이송속도는 108mm/min, 회전속도는 60 RPM이 적용되었다. 두께감소비는 30%로 소재의 초기두께 3.1mm에서 0.93mm가 감소되어 최종적으로 2.17mm로 성형되는 가공조건이다. 해석은 소재의 유동방향과 롤러의 이송방향이 서로 반대인 후방 유동성형 방식을 적용하였다. 실제 유동성형은 회전하는 맨드릴에 소재가 고정되어 같이 회전하고 스펀들에 고정된 롤러가 축방향으로 이동하지만 일반적으로 해석상의 편의를 위해 소재가 고정되고 롤러가 소재의 주축을 중심으로 회전하며 이동하게 된다. 본 해석에서도 이와 같은 해석방식을 적용하였다. 소재와 맨드릴 사이의 마찰계수는 일반적으로 0.1~0.3을 많이 사용하고 있으며 본 해석에서는 냉간가공조건에서 자주 사용되는 전단마찰계수(shear friction coefficient) 0.12를 적용하였다. 일반적으로 롤러와 소재 사이의 마찰은 가공 시 맞물려 같이 회전하기 때문에 마찰은 고려하지 않는다. 롤러와 맨드릴은 강체(rigid body)로 가정하였고, 소재는 Al 5052의 냉간 물성(cold forming property)을 적용하였으며, 항복강도(yield strength)는 140MPa이다. 유동성형 중에는 롤러와 재료가 접촉하면서 재료의 소성변형에 의해 발생하는 열을 냉각하기 위해 냉각유를 공급하기 때문에 본 해석에서는 가공간 발생하는 열에 의한 효과를 고려하지 않았다.

Table 2 Boundary Conditions of the Finite Element Analysis

Backward Flow Forming Type	
Feed Rate(mm/sec)	1.8
Angular Velocity(rad/sec)	6.28
Thickness Reduction Ratio(%)	30
Shear Friction Coefficient	0.12
Workpiece Material	Al 5052
Roller, Mandrel	Rigid Body
Total Feed Distance(mm)	27

3. 결과 및 고찰

3.1 직선 형태의 전방각을 가진 롤러

직선 형태의 전방각을 가진 롤러를 적용한 후방유동성형

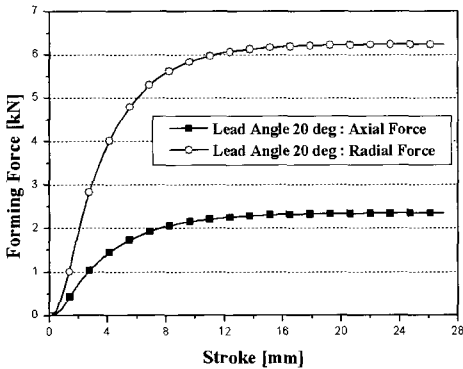


Fig. 5 Forming Force with the Lead Angle 20°

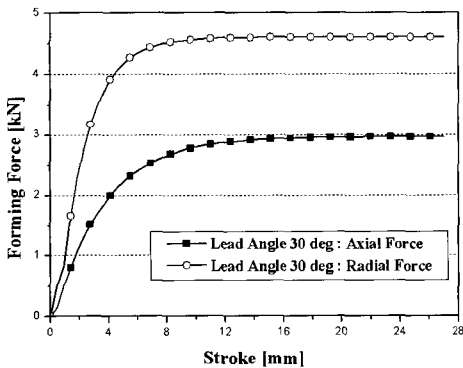


Fig. 6 Forming Force with the Lead Angle 30°

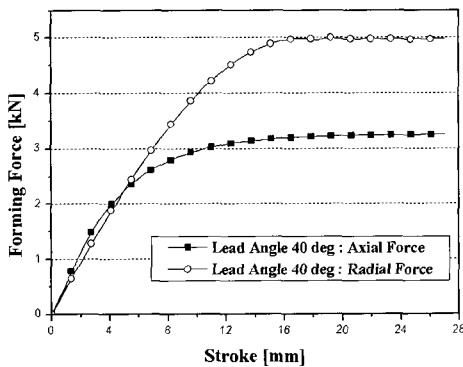


Fig. 7 Forming Force with the Lead Angle 40°

공정에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 각각의 해석에서 축방향과 반경방향의 성형력을 비교하였다. 20°, 30° 그리고 40°의 전방각을 적용한 결과는 각각 Figs. 5~7이다. 모든 해석에서 축방향의 성형력이 반경방향의 성형력보다 작은 값을 가졌다. 또한 축방향의 성형력은 전방각의 증가에 따라 같이 증가하는 경향을 보였으나 반경방향의 성형력은 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이는 전방각의 증가에 따라 급속유동이 자연스럽게 못하고 급격한 유동방향각의 증가가 성형력에 영향을 미친 것으로 판단된다. 축방향과 반경방향의 성형력 격차는 전방각의 증가에 따라 작아짐을 볼 수 있다. 성형력은 롤러가 축방향으로 이동하고 이로 인해 소재와의 접촉면적이 서서히 증가하게 됨과 동시에 각 방향의 성형력이 증가하게 된다. 그러나 롤러가 이동하는 거리(stroke)가 증가하면서 특정한 위치에서는 더 이상 접촉면적이 증가하지 않고 이 위치에서는 더 이상 성형력이 증가하지 않는 안정화 단계에 접어들게 된다. 따라서 성형력의 안정화 단계는 롤러와 소재 사이의 접촉면적이 일정하게 유지되는 시점에서의 롤러 이동거리 또는 위치로 판단내릴 수 있다. Fig. 5에서 반경방향의 성형력이 안정화되는 롤러의 이동거리는 약 20mm이고, 축방향은 18mm로 이는 Figs. 6~7과 비교할 경우 축방향의 성형력 안정화는 거의 비슷한 위치를 보였다. 그러나 반경방향 성형력의 경우에는 Fig. 6에서 보이는 것과 같이 전방각이 30°인 조건에서 성형력 안정화 위치는 약 14mm로 성형력 안정화 단계에 가장 먼저 도달하였다. Fig. 7에서 보이는 것과 같이 롤러의 전방각이 40°인 경우 반경방향의 성형력 안정화 위치는 19mm로 이는 Fig. 5에서 롤러 전방각이 20°인 해석결과와 유사한 결과를 보였다.

3.2 곡선 형태의 단면형상을 가진 롤러

곡선 형태의 단면형상을 가진 롤러를 적용한 후방유동성형공정에 대한 유한요소해석을 수행하여 각각의 해석결과에서 축방향과 반경방향의 성형력을 비교하였다. 볼록한 단면형상에서 성형 중 재료가 롤러의 중간부분을 통과할 경우 곡선의 불연속으로 인한 성형력 계산의 편차 발생을 방지하고 안정적인 성형력 계산을 위해 롤러의 중간부분에서 접선으로 곡선을 유도한 결과 6.7mm의 곡선 반경을 확인하였고, 오목한 단면형상과 볼록한 단면형상에 모두 적용하였다. 오목한 형상과 볼록한 단면형상을 적용한 성형력 결과는 각각 Figs. 8~9와 같다. 직선 형태의 전방각을 가진 해석결과와 동일하게 두 해석 모두 축방향의 성형력이 반경방향의 성형력보다 작은 값을 보였다. 그러나 성형력이 안정화되는 위치는 거의 동일하였다.

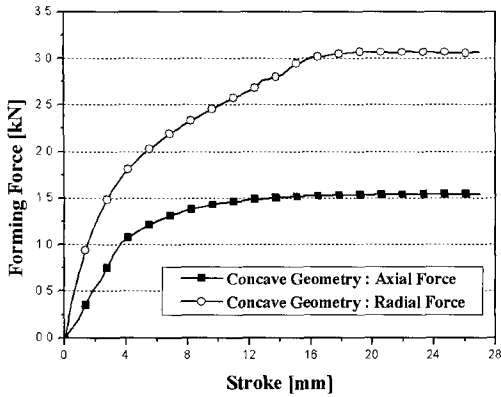


Fig. 8 Forming Force with the Concave Geometry

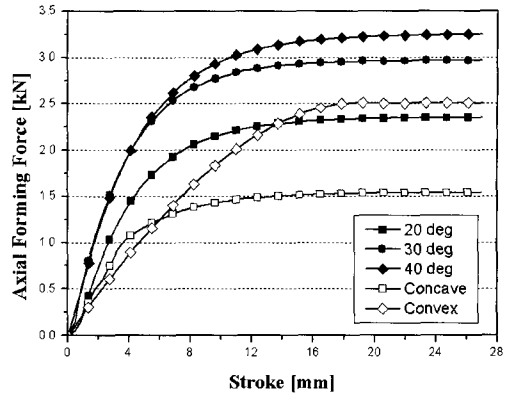


Fig. 10 Comparison of the Axial Forming Force

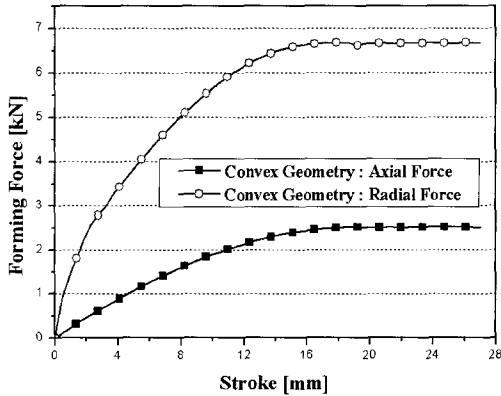


Fig. 9 Forming Force with the Convex Geometry

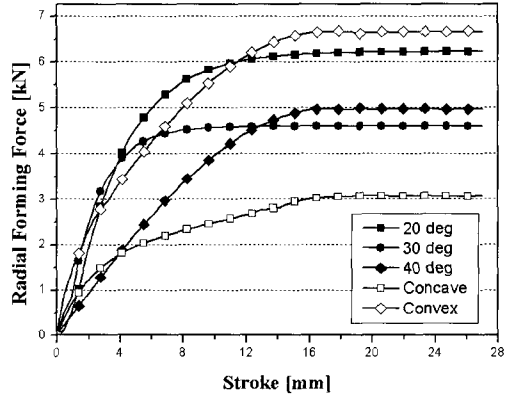


Fig. 11 Comparison of the Radial Forming Force

축방향과 반경방향의 성형력 격차가 블록한 단면형상을 가진 해석결과에서 크게 벌어짐을 확인할 수 있었다. 축방향의 성형력 차이는 크지 않았으나 반경방향의 성형력 차이는 형상에 따라 2배 이상의 차이를 보였다.

3.3 성형력 비교

Figs. 10~11은 직선 및 곡선형태의 단면형상을 가진 롤러의 후방유동성형 해석결과에서 축방향과 반경방향의 성형력을 비교한 결과를 나타낸다. Fig. 10에서 가장 작은 축방향의 성형력을 가지는 롤러의 단면형상은 오목한 형상인 반면 가장 큰 성형력을 가지는 단면형상은 40°의 전방각을 가지는 형상이다. 이는 롤러와 소재가 접촉하면서 성형에 의한 급속의 유동이 직선 형태나 블록한 단면형상보다 오목한 단면형상을 따라 이동하면서 급격한 소재의 변형을 완하시켜 이에 의해 축방향의 성형력 감소에 영향을 미치는 것으로

판단할 수 있다. 따라서 롤러의 전방각이 40°인 해석에서 가장 큰 축방향 성형력이 나온 것도 압출현상과 동일하게 롤러 전방각의 증가로 재료의 유동이 전단보다는 압축력에 크게 의존하게 되어 상대적으로 전방각이 작은 20°와 30° 조건보다 성형력이 크게 해석된 것으로 판단된다. Fig. 11에서 가장 작은 반경방향의 성형력을 가지는 단면은 오목한 형상이며 가장 큰 성형력을 가지는 단면은 블록한 형상임을 알 수 있다. 이는 롤러가 원주방향으로 회전하면서 롤러와 소재의 접촉면적이 블록한 단면형상이 오목한 형상보다 더 크기 때문이며 유사하게 직선 형태의 경우에는 전방각이 작은 20° 조건에서 반경방향의 성형력이 크게 해석되었다. 또한 Fig. 11에서 반경방향의 성형력 격차는 약 3.8kN인 반면 Fig. 10에서 축방향의 성형력 격차는 약 1.8kN으로 반경방향의 성형력 격차가 더 크게 벌어짐을 확인할 수 있다. 즉 롤러의 단면형상의 변화는 축방향보다 반경방향의 성형력에 더 민

감하게 반응함을 알 수 있다. 결과적으로 Figs. 10~11에서 가장 작은 축방향과 반경방향의 성형력을 가지는 롤러의 단면형상은 오목한 단면형상임을 확인할 수 있었다.

4. 결론

롤러의 단면형상에 따른 축방향과 반경방향의 성형력 변화를 고찰하기 위해 후방유동성형에 대한 3차원 강-소성 유한요소해석을 수행하였다. 직선형태의 롤러 단면에서 전방각의 증가와 성형력과의 관계는 Hayama 실험과 동일한 경향을 보였다⁽¹⁾. 즉, 반경방향의 성형력이 축방향의 성형력보다 큰 값을 보였으며, 전방각이 커지면서 성형력이 증가하는 경향을 보였다. 또한 해석결과를 통해 축방향과 반경방향에 대한 최소 성형력을 가지는 단면이 오목한 형상임을 확인하였다. 이를 통해 유동성형에서의 성형력은 단순히 전방각의 증가에만 영향을 받지 않고, 금속유동의 변화 정도와 접촉면적의 증감에 모두 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 단순히 롤러의 전방각 증가로 인한 접촉면적의 감소가 성형력의 감소와 반드시 일치하지는 않으며 금속유동의 변화와 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다. 그리고 모든 해석결과에서 반경방향의 성형력이 축방향의 성형력보다 큰 값을 가졌다. 이는 접촉되는 면적 및 형상이 롤러의 축방향 이송보다는 반경방향의 회전에 더 큰 비중을 차지하기 때문으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2005년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Hayame, M. and Kudo, H., 1979, "Experimental Study of Tube Spinning, Bull.," *JSME*, Vol. 22, pp. 769~775.
- (2) Branton, D. R., Ari-gur, P., Bratt, Z. and Gur, M., 1980, "Texture Inhomogeneity and Strain Distribution in Shear-spun Steel Tubes," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 44, pp. 185~194.
- (3) Yun, S. J., Lee, K. H. and Eun, I. S., 1997, "The Plastic Deformation of Combustion Chamber during the Flow Forming Process with Initial Preform Thickness," *J. of the Korean Society Propulsion Engineers*, Vol. 1, No. 1, pp. 89~103.
- (4) Kim, J. H., Hong, S. I., Lee, J. H. and Lee, Y. S., 1997, "A Study on the Process of Tube End Spinning by the Upper Bound Method and the Finite Element Method," *J. of the Korean Society for Technology of Plasticity*, Vol. 6, No. 6, pp. 517~526.
- (5) Li, K. Z., Hao, N. H., Lu, Y. and Xue, K. M., 1998, "Research on the Distribution of Displacement in Backward Tube Spinning," *J. Mater. Process. Technology*, Vol. 79, pp. 185~188.
- (6) Hong, D. H., Hwang, D. S., Lee, B. S. and Hong, S. I., 2000, "A Study on the Process of Tube Spinning for the Titanium Alloy," *J. of the Korean Society Propulsion Engineers*, Vol. 4, No. 3, pp. 55~63.
- (7) Nam, K. O., Yeom, S. H., Park, H. J. and Hong, S. I., 2006, "The Effects of Forming Depth and Feed Rate on Forming Force of Backward Flow Forming," *Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Fall 2006*, pp. 119~124.
- (8) Nam, K. O. and Won, J. H., 2006, "Evaluation on the Forming Force of Flow Forming with Various Roller Profiles," *Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Fall 2006*, pp. 380~385.
- (9) Nam, K. O., Yeom, S. H., Kwon, H. S. and Hong, S. I., 2005, "The Effects of Forming Depth and Feed Rate on Forming Force of Backward Flow Forming," *J. of the Korean Society Propulsion Engineers*, Vol. 9, No. 4, pp. 16~22.
- (10) Xu, Y., Zhang, S. H., Li, P., Yang, K., Shan, D. B. and Lu, Y., 2001, "3D Rigid-plastic FEM Numerical Simulation on Tube Spinning," *J. Mater. Process. Technology*, Vol. 113, pp. 710~713.
- (11) Lee, K. S. and Lu, L., 2001, "A Study on the Flow Forming of Cylindrical Tubes," *J. Mater. Process. Technology*, Vol. 113, pp. 739~742.
- (12) Wong, C. C., Dean, T. A. and Lin, J., 2003, "A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes," *Int. J. Mach. Tools. Manuf.*, Vol. 43, pp. 1419~1435.
- (13) Wong, C. C., Dean, T. A. and Lin, J., 2004, "Incremental Forming of Solid Cylindrical Components using Flow Forming Principles," *J. Mater. Process. Technology*, Vol. 153, pp. 60~66.