

전단스피닝에서 가공깊이와 리드각이 성형력에 미치는 영향

염성호* · 남경오* · 박현진* · 홍성인**

The Effects of Forming Depth and Lead Angle on Forming Force of Shear Spinning

Sungho Yeom* · Kyoungo Nam* · Hyunjin Park* · Sungin Hong**

ABSTRACT

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

초 록

각이 있는 얇은 콘 제품을 생산하기 위한 가공법으로는 전단 스피닝에 의한 성형방법이 많이 이용되고 있으며 이는 다른 가공방법에 비해 성형에 필요한 힘이 적게 들고 전단 스피닝에 의해 가공된 제품의 기계적인 강도가 우수하며 표면 품질이 우수하기 때문이다. 따라서 전단 스피닝 기술은 산업현장에서 폭 넓게 이용되고 있다. 특히 전단 스피닝과 유동성형은 자동차, 항공, 방위산업에 자주 이용되고 있다. 본 논문에서는 전단 스피닝에 대한 유한요소해석을 통해 가공깊이와 롤의 리드각이 성형력에 미치는 영향을 살펴보았다. 다양한 가공깊이와 롤의 리드각 조건에서 축 및 반경방향의 성형력을 구하였다.

Key Words: Shear Spinning(전단 스피닝), Flow Forming(유동성형), Forming Force(성형력), Finite Element Method(유한요소법), Forming Depth(가공깊이), Lead Angle(전방각)

† 2006년 12월 6일 접수 ~ 2007년 1월 20일 심사완료

* 학생회원, 충남대학교 기계공학과

** 정회원, 충남대 기계공학과,
충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단
연락처, E-mail: yenji@cnu.ac.kr

1. 서 론

전단 스피닝에 의한 금속성형 기술은 다른 금

속성형 기술과 비교할 경우 각을 갖는 얇은 두께의 축대칭 콘 부분이나 관의 축소되는 부분을 제작하는 가장 효과적인 방법으로 자동차, 항공 우주, 방위산업 등에 널리 이용되고 있다. 특히 각종 미사일의 탄두 콘부분이나 로켓의 연료탱크 돔 제작에 있어서 구조적인 강도와 높은 치수정밀도를 요하는 제품 생산에 많이 이용되고 있다. 전단스피닝은 각을 갖는 맨드릴(mandrel)에 판재를 삽입대(tail stock)에 의해 고정시키고 맨드릴과 함께 회전하여 새들(saddle)에 고정된 1개의 작업 롤러가 주축 방향으로 맨드릴의 각을 따라 이동하면서 판재의 두께를 감소시킴과 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 전단 스피닝을 통해 제작된 제품은 우수한 기계적인 성질과 치수정밀도 그리고 표면처리 효과를 가지고 있어 고품질의 다품종 소량생산에 적합한 가공기술이다. 판재의 성형에 있어서 소재의 형상은 변화하지만 두께 감소가 없는 성형을 일반 스피닝(conventional spinning)이라 하고 형상의 변화와 두께변화를 갖는 성형을 전단 스피닝(shear spinning)이라 한다.

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 결합 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 롤러에 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 대

한 영향을 비교하였다[12-13]. 현재 스피닝 연구 동향은 주로 전방유동성형에 그치고 있으며 특히 대부분의 연구가 소재의 응력분포 및 변형에 중점을 두고 있다. 최근에는 실제 기계제작에서 필요한 성형력에 대한 연구가 수행 되었다[14-16].

본 연구에서는 전단 스피닝에 대한 강소성 유한요소해석을 통해 성형력에 가장 큰 영향을 주는 롤러의 가공깊이와 리드각의 변화에 따른 축 및 반경방향의 성형력 변화를 고찰하였다. 본 연구를 위해 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM을 사용하여 전단 스피닝에 대한 강소성 유한요소해석을 수행하였다.

2. 이론 및 해석 조건

2.1 이론적 배경

미사일의 콘 부분의 전단 스피닝은 다른 소성 변형과 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 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 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

Fig. 1은 전단 스피닝을 위한 유한요소 모델이다. 각을 갖는 맨드릴과 소재 그리고 롤러가 위치한다. 가공깊이에 따라 롤러의 리드각이 변경된 4가지 형태의 전단스피닝 모델이 설계되었다. 소재와 롤러의 치수는 Fig. 2와 Table 1과 같다. 여기에서 맨드릴의 각은 소재의 각과 동일하다.

23 해석 조건

본 연구를 위한 해석조건은 Table 2와 같다. 4 경우의 리드각에 따라 3 경우의 두께감소율을

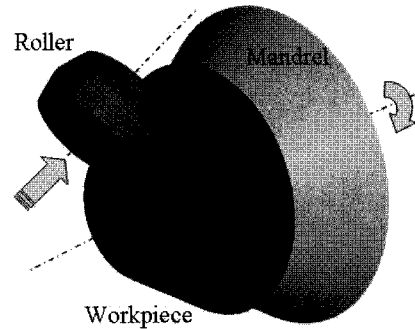


Fig. 1 FE Model for Shear Spinning

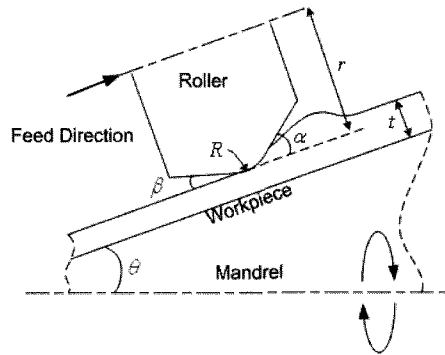


Fig. 2 Geometry of Roller and Workpiece

Table 1. Dimensions of Roller and Workpiece

Workpiece	
Mandrel angle(°) : θ	16
Wall thickness(mm) : t	6
Initial length(mm) : L	44
Roller	
Diameter(mm) : r	25
Tip radius(mm) : R	5
Lead angle(°) : α	a
Smooth angle(°) : β	10

적용해 모두 12 경우의 전단 스피닝 공정을 해석하였다. 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 가정

하였고, 소재는 Al 5052의 냉간 물성값을 적용하였으며 항복강도는 200 MPa이다. 롤러의 주축에 대한 회전속도는 60 RPM을 적용하였으며 가공간 발생하는 열에 의한 효과는 고려하지 않았다.

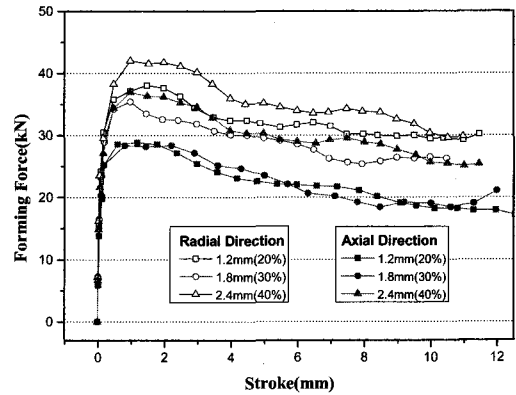
Table 2. Conditions of FE Analysis

Shear spinning	
Feed rate(mm/rev)	1.0
Lead angle (°)	20
	25
	30
	35
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)

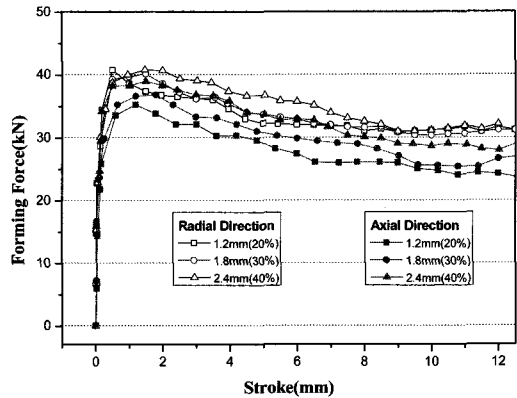
3. 결과 및 고찰

3.1 가공깊이에 따른 성형력 비교

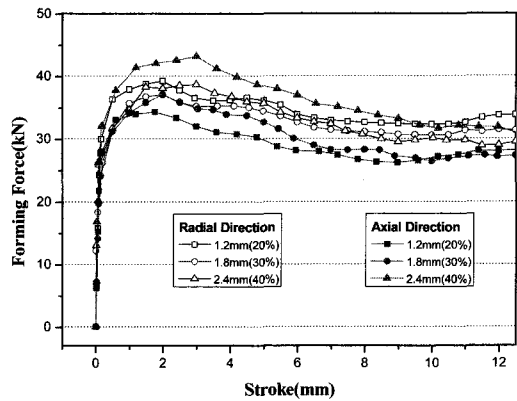
가공깊이에 따른 성형력 비교를 위해 동일한 이송속도 조건에서 20, 30, 40%의 가공깊이에 대한 전단 스피닝 해석을 수행하여 주축과 반경



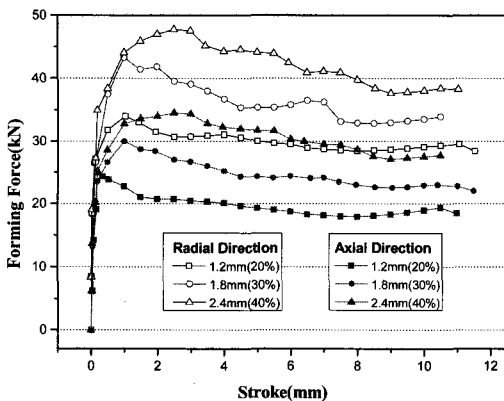
(b) Lead Angle 25 degree



(c) Lead Angle 30 degree



(d) Lead Angle 35 degree



(a) Lead Angle 20 degree

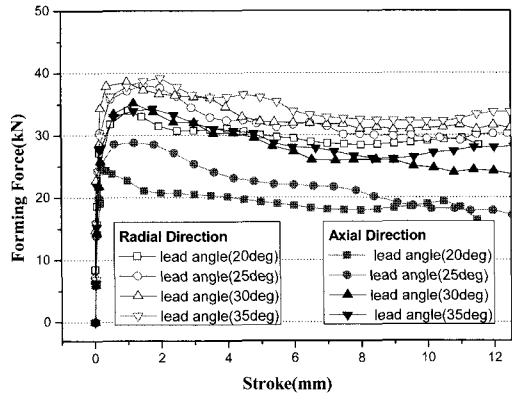
Fig. 3 Comparison of Forming Force with each Lead Angle in Forming Depth at (a) 20 deg, (b) 25 deg, (c) 30 deg, (d) 35 deg

방향에 대해 롤러에 작용하는 성형력을 비교하였다. 일반적으로 롤러에 작용하는 원주방향의 성형력은 고려하지 않는다. Fig. 3은 가공깊이에 따른 주축 및 반경방향 성형력을 보여주고 있다. 이 그림에서 각각의 리드각에 따른 주축 및 반경방향의 성형력은 유사한 형태를 보였다. 주축 방향과 원주방향의 성형력은 가공이 시작되면서 성형력이 급격히 증가하고 가공이 진행됨에 따라 성형력이 작아지면서 안정되는 경향을 보이고 있다. 또한 그림에서 리드각이 커지면서 가공 깊이에 따른 성형력의 분포가 작아지는 것을 확인할 수 있다. Fig.3(a) 리드각이 20(deg)에서는 원주방향의 성형력 분포가 30kN~50kN사이에서 분포하고 Fig3.(c) 리드각이 30(deg)에서는 원주방향의 성형력 분포가 35kN~40kN에서 분포한다.

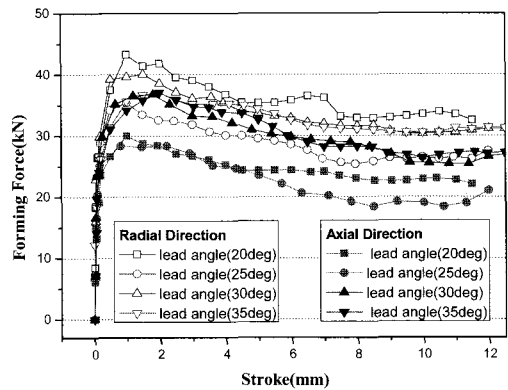
전단스피닝에서 주축과 원주방향의 성형력은 가공이 진행되면서 유동성형과 같은 주축방향과 원주방향의 성형력차가 뚜렷이 나타나지 않았다 [14]. 전단스피닝에서는 롤러의 진행방향이 축방향으로만 진행되는 것이 아니라 원주방향으로도 분산 되는 것으로 판단된다. 또한 성형력은 리드각에 따라 가공깊이가 커지면서 증가하는 경향을 보이고 있으며 이는 가공깊이가 증가함에 따라 소재와 롤러와의 접촉면적 증가에 따른 성형력 증가로 판단되며 특히 리드각이 작은 경우 Fig.3(a) 처럼 가공깊이에 따른 성형력의 변화를 확인할 수 있다. 이는 접촉면적의 변화에 따라 성형력이 크게 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 리드각에 따른 성형력 비교

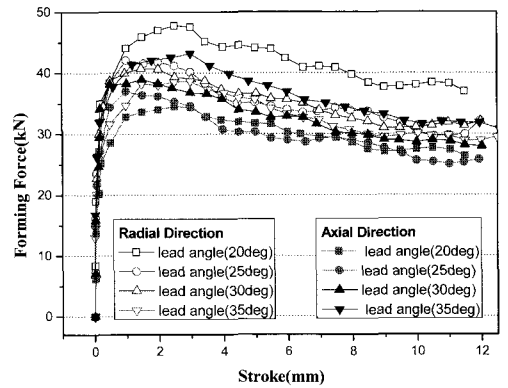
리드각에 따른 성형력 비교를 위해 동일한 가공깊이 조건에서 20, 25, 30, 35 degree의 리드각에 대한 전단 스피닝 해석을 수행하였다. Fig. 4는 각 리드각에 따른 주축 및 반경방향 성형력을 보여주고 있다. 그림에서 동일한 가공깊이에서 주축방향의 성형력은 리드각이 증가하면서 증가하였다. 그러나 반경방향의 성형력이 리드각의 증가에 따른 뚜렷한 차이를 보이지는 않았다.



(a) Thickness Reduction 20%(1.2 mm)



(b) Thickness Reduction 30%(1.8 mm)



(c) Thickness Reduction 40%(2.4mm)

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)

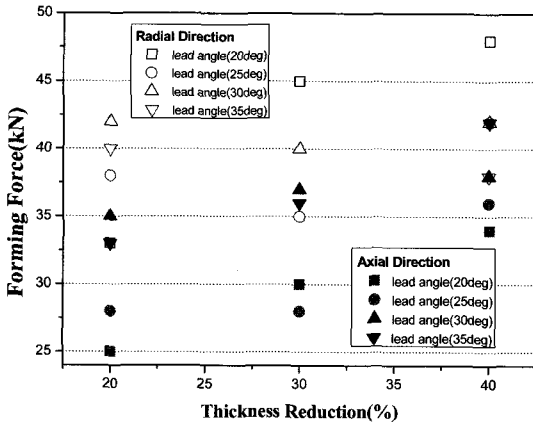


Fig. 5 Comparison of Forming Force with each Lead Angle and Thickness Reduction

반면 두께 감소율이 증가하면서 주축 및 반경방향의 성형력은 증가하는 경향을 보였다.

3.3 가공깊이와 리드각에 따른 성형력 비교

Fig.5는 가공깊이와 리드각에 따른 성형력을 보여주고 있다. 주축방향의 성형력은 리드각이 증가하고 가공깊이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며 반면 반경방향의 성형력은 리드각이 증가하여도 성형력에 뚜렷한 영향을 받고 있지 않음을 보였다.

4. 결 론

전단 스피닝의 성형력에 미치는 가공깊이와 리드각의 영향을 알아보기 위한 전단스피닝의 유한요소해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전단스피닝에 대한 유한요소해석을 통해 주축 및 반경방향의 성형력을 정량화 할 수 있었다.
- (2) 가공깊이가 증가함에 따라 롤러와 소재와의 접촉면적 증가로 인해 주축 및 원주방향의 성형력이 증가하는 경향을 보였으나 리드각이 증가함에 따른 성형력의 변화는 주축방향

에서만 증가하는 경향을 보였다.

- (3) 전단 스피닝 해석을 통해 계산된 성형력은 주축 및 반경방향의 동력계산을 위한 기초자료로 활용될 수 있으며 특히 가공깊이와 리드각이 변경될 경우 주축 및 반경방향에 대한 성형력 계산은 필수적으로 재 수행되어야 할 것으로 판단된다.

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

참 고 문 헌

1. M. Hayama, 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 1호, 1997, pp.89-103
5. 장세용, 홍성인, 은일상, 박성한, 이경훈, "Study on the process of flow forming by an upper bound method," 한국소성가공학회지, 제2권 4호, 1993, pp.70-84
6. 김진형, 홍성인, 이정환, 이영선, "상계해법과 유한요소법을 이용한 스피닝 공정 해석에 관한 연구," 한국소성가공학회지, 제6권 6호, 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
 14. 남경오, 염성호, 박현진, 홍성인, "후방유동성형에서 가공깊이와 이송속도가 성형력에 미치는 영향," 한국추진공학회지, 제9권 제4호, 2005, pp.16-22
 15. KyoungO Nam, SungHo Yeom, SungIn Hong, "Study on the Forward and Backward Flow Forming Process for Manufacturing Combustion Chamber", *Proceedings of Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2006 Beijing, China*, April 20-23, 2006, AJCPP2006-22162
 16. SungHo Yeom, KyoungO Nam, SungIn Hong, "Spinning Process Analysis of the Dome Shape of Launch Vehicle Tank using Finite Element Method", *Proceedings of Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2006 Beijing, China*, April 20-23, 2006, AJCPP 2006-22161