

# Metal 스피닝의 신기술 동향

이태호\*

## New Technology of Metal Spinning

Tae - Ho Lee\*

### ABSTRACT

This paper investigates mainly on the technical development trend such as asymmetric technology and the metal spinning in heat treatment conditions. Although the classical spinning, so called conventional, shear, tube spinning, uses the axisymmetric shaped mandrel(which is same inner shape of the final product), new technology does not use it. and also spinning can be done with free mandrel

### 초 록

기존의 재래식, 전단, 튜브 스피닝은 모두 축대칭 제품의 형상화된 맨드릴을 사용하여 가공하여 왔다. 이러한 고전적 기법에서 한걸음 더 나아가 비축대칭, 열처리를 동반한 스피닝, 자유 맨드릴 공법이 시도되고 있다. 본 조사에서는 비대칭 스피닝과 열처리 스피닝에 등에 대한 신기술 동향과 자유 맨드릴을 사용하는 스피닝 기술 동향을 조사하였다.

Key Words: Axisymmetric(축대칭), Asymmetric Spinning(비대칭 스피닝), Blank(블랭크), Shear Spinning(전단 스피닝)

### 1. 서 론

잘 알려진 바와 같이 항공 우주, 자동차, 선박, 철도, 등 다양한 분야의 운송 시스템은 모두 금속 소재가 주를 이루고 있다. 운송 시스템은 이미 그 목적에서 볼 수 있듯이 빠르고 안전하게 움직이는 것이 필수적이다. 따라서 운송용 금속 소재는 가볍고 강도가 높아야하는 필요성이 제

기된다. 즉 경량화, 강건성, 동시에 내구성을 가질 필요가 있다. 금속 소재가 이러한 특성을 갖게 하기 위하여 사용되는 기술로는 열처리, 단조 공법들이 사용되고 있다. 이러한 요구조건에 잘 부합하는 기법 중에 스피닝이 공정이 있다. 미국, 일본, 독일, 중국 등에서는 이 분야의 기술이 활발히 진행되고 있다. 스피닝 공법으로 생산하는 부품은 축대칭 형상을 갖고 있는 판재 소재를 사용하여 가운데가 비어 있는 부품을 만드는 데 이용하는 공법이다. 스피닝은 재래식(conventional) 스피닝, 전단(shear) 스피닝, 튜브 스피닝으로 대별한다. 재래식 스피닝에서는 두께

\* KISTII(한국 과학기술정보연구원),  
ReSeat 프로그램 전문 연구위원  
교신저자, E-mail: Itaho0547@reseat.re.kr

가 거의 변하지 않는다. 형상화된 제품의 두께는 블랭크 두께와 같다. 이에 대하여 전단 스피닝과 튜브 스피닝의 경우에는 두께가 감소한다. 전단 스피닝의 경우에는 두께가 가공물의 벽과 회전하는 축의 각도에 따라 결정되어 지고, 튜브 스피닝의 경우는 가공물의 길이 증가에 따라서 결정된다.

## 2. 금속 스피닝의 기술 개발

재래식 스피닝(conventional spinning)은 형상 변화에 집중되고 벽두께 자체는 초기의 블랭크 두께와 같이 하는 스피닝이 이루어져 왔다. 이 공정에서는 일반적으로 롤러가 여러 번 지나간다.

전단 스피닝은 통상적으로 롤러를 1회 작업하며, 벽두께는 정현법칙에 의해서 결정되는 공법이다. 정현법칙은 초기 블랭크의 판재 두께를  $t_0$ 라 하고 스피닝된 최종 두께를  $t_f$ 라 할 때, 그리고 스피닝 각도, 즉 회전축과 맨드릴의 원추 반각을  $\alpha$ 라 하면 다음과 같은 sine 법칙이 성립함을 말한다.

$$t_f = t_0 \sin(\alpha)$$

그러나 이러한 전단 스피닝에서 제품의 두께를 의도적으로 정현 법칙에서 얻어지는 두께보다 얇게 하는 over spinning이나 두껍게 하는 under-spinning이 있다. under spinning을 하게 되면 플랜지를 안쪽으로 잡아당기게 되고, 이로 인해 플랜지가 롤러 쪽으로 기울어 주름형성의 원인이 된다. 반면에 over spinning을 하게 되면 롤러 앞쪽에 build up 현상이 일어나 플랜지가 앞쪽 즉 롤러에서 멀어지는 쪽으로 굽어진다.

Flow forming 이라고도 하는 튜브 스피닝은 원통형 맨드릴을 사용하여 실린더 형상의 제품을 만들며 벽두께는 모재보다 얇아지고 길이는 늘어나게 된다. 롤러는 하나 또는 2, 3개를 사용하기도 한다.

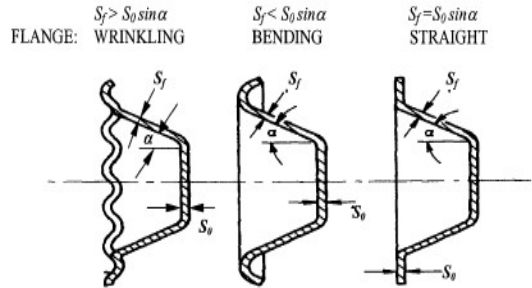


Fig. 1 Variations of shear spinning

전단 스피닝에서 tool의 힘에 영향을 주는 인자로는—이송율, 맨드릴 회전 속도, 판재 두께, 벽 각도, 롤러 직경, 롤러의 코 반경, 블랭크 직경, over-spinning 등이다. 이송 속도와 접선 방향 힘은 선형으로 증가한다. 최적의 맨드릴 회전 속도가 존재하며, 판재 두께와 세 방향의 힘의 분력도 비례한다. 성형 모드는 최초와 종말에서 서로 다르다. 이 과정을 세 단계로 나누어, 롤러가 판재에 접촉하는 맨드릴 반경으로 굽힘 과정과, 점차적으로 판재를 굽히면서 제품을 회전하는 과정, 끝으로 플랜지 성형 과정이다. Quigley와 Monahan은 tailstock의 끝 부분, 롤러에 의한 성형 영역과 플랜지 영역 등 셋으로 나누어 스트레인을 조사하였다. 세 영역 모두 후프 스트레인이 반경과 두께 스트레인에 비하면 작았다. 롤러의 길(path)에 대하여도 연구하였는데, 선형, 2차형(quadratic), 나선형(involute) 중에서, 나선형이 가장 좋은 결과를 보여 주었다. 스피닝율이 선형에는 1.7, 2차형에는 2에 비하여 나선형에서는 2.5를 보이고 있다.

이론적 연구로는 성형 에너지 방법을 사용한 힘의 예측, 상한 계(upper bound) 방법, 주름에 의한 실패 예측, 스피닝에서 응력 예측 등의 연구가 있다. 이와 같은 실험적 이론적 연구를 해석하기 위한 방안이 수치 해석이다. 묵시적(implicit) 모델로 탄-소성 재료에 대한 알고리즘(2001)을 시작으로, 2003년 레이저 가열 열간 가공에 최적 위치와 열간 영역의 최적화에, 또 2006년에는 over, under-spinning 조건에서의 플랜지 굽힘에 대하여 탄-소성 묵시적 모델이

사용되었다. 탄-소성 모델에 2가지 명시적(explicit) 모델이 있는데 2002년에 Kleiner 등이 2006년에는 응력과 스트레인, 두께 분포에 사용하였다.

### 3. 새로운 기술 동향

새로운 기술 동향은 크게 3가지로 나누어 생각할 수 있다. 즉 맨드릴을 사용하지 않는 즉 다이(die)가 없는 상태에서의 전단 스피닝으로, 가요성(flexible) 스피닝이라고 부르는 방법으로 본 기술 동향에 대하여는 2010년 추계 추진공학회에서 기 발표된 바 있다. 다른 두 방법은 비대칭 스피닝과 열간 스피닝이다.

비대칭 스피닝은 Amano와 Tamura가 1984년 제안하였으며, 수정 형 스피닝 선반을 사용하여 반경 방향으로 오프셋 롤러를 사용하는 방법이다.

이것은 타원 부품을 가공하는 방법으로 타원형 맨드릴을 따라 롤러가 반경 방향으로 왕복하는데, 캠과 링크로 연결된다. 발표된 바에 의하면, 타원의 장축으로는 치수가 정확한데 단축으로는 정확도가 떨어진다.

Gao 등이 1999년 “타원 스피닝(ellipse spinning)”이라고 부르는 새 방법을 개발하였다. 롤러의 오프셋 대신에 맨드릴을 오프셋 시키는 것을 사용하였다. 롤러와 맨드릴의 접촉점은 고정되어 있으나, 맨드릴의 회전축과의 오프셋은 변화된다.

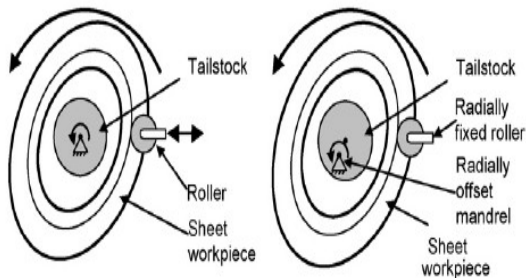


Fig. 2 Offset of roller and mandrel

2005년에 표준형 스피닝 선반에서 직경으로 반대쪽에 두 개의 스프링 제어가 되는 롤러를 사용하는 것을 Awiszus와 Meyer가 개발하였다. 불룩하거나 오목한 것 그리고 삼각대 형에 사용하였다. 두께 분포나 회전축과 원주 방향에는 적용이 되지 않아 스프링 방법보다 CNC 사용을 제안하고 있다.

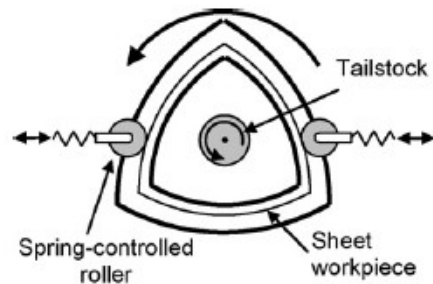


Fig. 3 Spring controlled roller

네 번째 방안은 Arai(2004, 2006)가 제안한 것으로 힘/위치 제어 시스템을 적용한 것으로, 롤러가 비대칭 맨드릴을 따라가는 것이다. 이 방안은 전단 스피닝으로 비대칭 형상에 성공적으로 적용하였다.

스피닝은 일반적으로 냉간가공이다. 그러나 두꺼운 부품이나 고강도 소재에는 성형력(forming force)을 줄이기 위하여 열간가공도 한다. 열간 스피닝은 고전적 구식으로 산소 이세틸렌 화염을 사용하기도 한다. 2003년 레이저 빔을 사용하는 열간 스피닝을 티타늄, 스테인리스 강, 니켈강에 성공적으로 적용하였다. 이 방법으로 스테인리스강에 성형율은 15-25% 증가시켰고, 성형력은 40%가 감소되었다.

2008년 Mori 등은 주조 알루미늄 블랭크를 더운 공기를 불어넣는 방(chamber)에 스피닝 장비를 설치하여 작업을 하였다. 이 공정은 특히 주조 알루미늄 성형을 위하여 적용되었다. 주조 알루미늄은 결함이 존재하여 성형이 어려웠는데, 전단 스피닝, 오버 스피닝(over-spinning)과 고온으로 결함이나 크랙이 제거되었다.

주조 알루미늄에는 dendrite나, blowhole과 수축 공동(shrinkage cavity) 등이 존재하여 부품의 강도는 높지 않다. 주조 결함들은 커다란 소성 가공에 의해 제거되는 것으로 알려졌다. dendrite는 정련 구조 속으로 부서져 버리고 blowhole과 수축 공동은 압축과 고온에 의한 확산으로 제거되고 있다. 주조 알루미늄은 연성이 부족하여 냉간 가공으로는 적합하지 않다. 알루미늄 소재 블랭크를 섭씨 350°와 400°로 하여 실험한 결과 벽 두께 40% 감소시키기 위해서는 블랭크의 온도가 400°가 되어야 하는 것으로 발표되었다. 350° 블랭크를 사용한 경우 맨드릴 코너 부근에서 원주 방향 파괴(fracture)가 발생하였다.

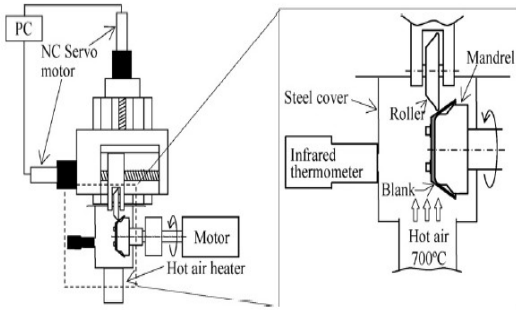


Fig. 4 Hot shear spinning of cast aluminium

두께 감소율 40%의 전단 스피닝 전후의 미세 구조의 변화를 현미경 사진으로 조사한 것을 보면, 주조 알루미늄의 축소 공동과 dendrite가 열간 가공으로 성공적으로 제거됨을 보여주고 있다.

맨드릴이 없는 자유 스피닝에 대하여 1944년 Kitazawa 등이 조사를 하였다. 회전하는 판재의 양 끝단을 클램프로 조이고, 원통형 툴(tool)을 사용하여 원하는 형상으로 점차 성형하는 방법이다.

두 번째 방법은 1997년 Shima 등이 제안한 것으로 맨드릴 대신에 롤러를 판재 내부에 설치하는 것이다. 이 롤러가 기존의 바깥의 롤러와 함께 두 개의 반대 쪽 롤러 세트가 되어 같이 움직이면서 통제가 가능하게 되고, 아주 국부적인 성형도 가능해진다.

2001년 Matsubara는 움직이는 블랭크 홀더를 개발하였다. 판재는 블랭크 홀더 양 끝단에 클램프로 부착하고, 이 홀더는 회전축을 따라서 움직인다. 물론 롤러도 같이 움직인다. 이 방법은 판재에서 구(공)면에 가까운 성형이 가능한 것으로 기존 형상으로는 불가능했던 것이다. 유사한 방법으로 상용 CAD/CAM 시스템을 이용하고 수치제어 방법으로 3차원 형상을 성형할 수 있다. 표면이 볼록한 (convex) 것에는 광범위하게 적용 가능하며, 반 꼭지각이 최소 10도 인 경우에는 원추형이나 피라미드형에 면의 수에 관계없이 가능하다.

4 번째 방법으로 Kawai 등이 맨드릴이 없는 것을 개발했는데, Kitazawa는 양 끝단을 부착한 것과 달리 여기서는 양 끝단은 자유로 놓아 두고 센터를 고정한 것이다. 이 방법은 원추형과 구형(2007) 부품 가공에도 사용된다.

언급한 대로 전단 스피닝에서는 맨드릴의 외형과 같이 제품의 내부 형상이 같게 성형이 되고 있다. 그리고 이때 성형 롤러는 맨드릴의 외형을 따라 정현 법칙대로 움직인다. 위 상황에서 롤러의 움직임에 착안하여 즉 맨드릴은 없어도 롤러가 정현법칙을 따라 움직이게 하는 성형 방법을 생각할 수 있다. 즉 스피닝 선반에서 회전축 한 끝에 원통형 맨드릴을 회전하게 한 상태에서 가공할 블랭크를 부착하고 롤러를 이동 시켜서 작업을 하는 것이다.

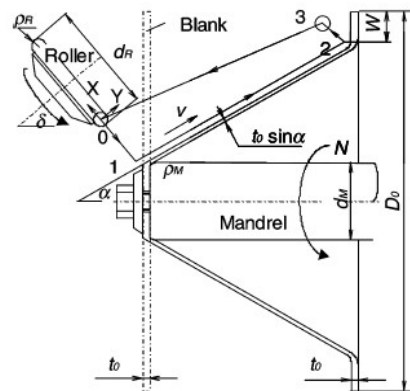


Fig. 5 Spinning with a single cylindrical mandrel (Kawai et al 2001)

이 때 중요한 것은 작업소재가 성형 과정에서 맨드릴이 없어도 충분히 형상을 유지 할 수 있는 강성(rigidity)이 있어야 한다. 그러면 제품의 내부 형상과 일치하는 맨드릴 외형이 없어도 가능하다. 실험을 통한 조사 결과 다이가 없는 전단 스피닝의 경우에 원통형 맨드릴의 직경이 작으면, 맨드릴의 코너 부위의 원추 벽 두께가 감소하는 것을 알았다.

또 이 벽두께의 얇아지는 현상으로 때때로 원추의 표면에 원추 방향으로 파괴(fracture)가 일어나기도 한다. 이런 현상은 정상적인 전단 스피닝에서는 거의 발생하지 않는 현상이다. 맨드릴 코너 부위의 원추 방향 파괴를 방지하기 위해서는 원통형 맨드릴의 최소 직경이 있음을 의미한다.

전단 스피닝의 초기 단계에서 일어나는 두께 얇아짐 현상은 성형 롤러의 비 직선 길(path)를 사용하여 점차적으로 변화시켜서 최종 값을 얻도록 하여 방지할 수 있다.

성형 롤러의 움직이는 길을 성형할 제품에 맞도록 정현 법칙을 만족하게 잘 제어할 수 있으면 여러 종류의 축대칭 제품을 성형 롤러와 일반적인 원통형 맨드릴로 성형할 수 있다. 축대칭 원추형 뿐 아니라 반구형(hemisphere)에도 원통형 맨드릴의 성형이 가능하고 이때는 접선 각도가 원을 따라서 점진적으로 감소하게 된다. 어떤 조건에 이르면 플랜지(flange)가 앞쪽으로 굽어지는 경향이 있고 이로 인해 외경이 작아지는 일이 있다.

원추형에서는 파괴나 주름형성에 대한 성형 한계점을 찾는 것이 용이한 편이나 반구형에서는 이 한계점 찾기가 용이하지는 않다.

일반 원통형 맨드릴을 사용하여 원추형의 전단 스피닝에서는 사인 법칙의 두께 변화 등을 현실화 할 수 있었으나 반구형에서는 정확하게 사인 법칙을 따라가기가 쉽지는 않았는데 이것은 주로 스프링 백이 원인이다. 제품 성형과정에서 지지해 주는 맨드릴이 없기 때문에 성형과정 중에 발생하는 스프링 백(spring back)을 감안하는 것도 한 방법이다. 이 가요성 과정으로 다양한 축대칭 제품에 그리고 소량으로 여러 종류

의 배치(batch) 생산에 적용할 수 있다.

#### 4. 학술 정보 분석

ISI Web of Knowledge 플랫폼에서 Web of science를 활용하여 1986년부터 현재(2010.9.27)까지 발표된 금속 스피닝에 관한 학술 정보를 조사하였다. Material science와 Metallurgical engineering으로만 압축한 결과 349편이 검색되었다. 최종적으로 이 문헌 정보를 이용하여 검색을 수행하였다. 미국이 단연 우위를 차지하고 있고 뒤를 이어 독일, 일본 중국 등이 활발하였다.

2000년부터 2010년 까지 발표된 상황을 보면 그림에서 보는 바와 같이 매년 20여 편 전후로 발표되고 있다. 2007년에 상대적으로 발표 논문 수가 많았고 2010년에는 아직 집계가 완료된 상태가 아닌 것으로 보면 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다.

우리나라의 발표 현황은 10대 국가 중 9위에 위치하고 있다. 전 세계적으로 보아 10대 국가 중에 9위에 속한다는 것은 상대적으로 활발한 활동으로 여겨지나 논문의 절대 양을 보면 15편(4%)에 불과하다.

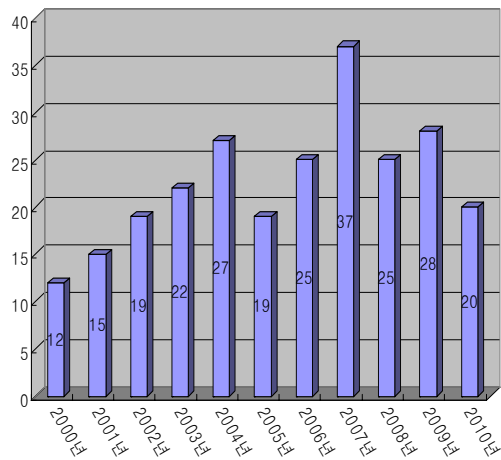


Fig. 6 2000년대 논문 발표 수

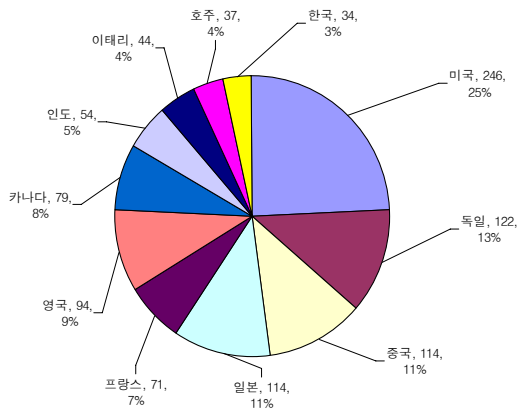


Fig. 7 Top 10 countries which published articles

논문 발표기관 별로 조사하여 10대 기관을 Fig 8에 표시하였다. 우리나라 기관의 연구 참여도를 조사하기 위하여 50대, 기관으로 확대하여 조사하여 보았다 KAIST가 12개 연구 기관과 함께 공동 30위에 위치하고 있는데 논문 수 3편으로 나타났다. 여기에는 세계 유수 대학인 MIT, CORNELL, STANFORD 등도 같이 포함되어 있어 이 분야가 특별히 각광을 받는 연구 분야는 아닌 것이 간접적으로 나타나고 있다. 즉 metal spinning은 학술적 연구 과제로서의 매력 보다는 현장의 기술적 개발에 초점이 맞추어진 실용적 기술임을 알 수 있을 것 같다.

## 5. 결 론

원천적으로 성형될 제품의 형상을 갖는 맨드릴과 같이 발달되어 오던 스피닝 공정이 최근 비대칭 스피닝이 가능해져 다양한 형태의 제품을 스피닝 공법으로 가공할 수 있게 되고 있으며, 전단 스피닝에서도 탈 맨드릴화 하고 있다. 소재의 연성이 문제가 되는 경우에는 부분 열간 가공이 전부터 사용해오던 방법이나, 한 걸음 더 나아가 주조 상태의 알루미늄을 가열 온실(chamber)에서 스피닝을 하여 기공, dendrite 등을 포함한 결함을 제거하면서 양질의 제품을

만들고 있다.

이러한 신기류 기법에서는 금속 소재의 강성 (rigidity)과 스프링 백에 대한 연구가 새로운 과제로 떠오르게 된다. 즉 맨드릴 없이 성형된 가공품이 탄성에 의해서 복원된 양을 예측하는 것이 중요해 질 것이고 이를 감안하여 가공하는 것이 이 공정의 요체가 될 것이다. 이러한 새로운 기법과 가능성에 대하여 산업 현장에서는 필요성이 있음에도 불구하고 생각할 여지가 없다고 생각하거나 불가능하다고 생각하여 더 이상의 요구가 제기되지 않고 있을 수 있다. 본 조사를 근거로 하여 국내에서도 다양한 부품에 스피닝 공정이 채택될 수 있는 길을 여는 것이 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. 이태호, "알루미늄 6061의 열처리에 대한 spinnability 연구", 충남대학교 석사 논문, 1980.
2. K. Kawai, L.-N. Yang, H. Kudo, "A flexible shear spinning of truncated conical shells with a general-purpose mandrel", Journal of Materials Processing technology, 113, pp.28~33, 2001
3. Ken Ichiro Mori, Minoru Ishiguro, Yuta Isomura, "Hot shear spinning of cast aluminium alloy parts", Journal of Materials Processing Technology, 209, pp.3621-3627, 2009
4. Xi-Cheng Gao, Da-Chang Kang, Xiao-Feng Meng, "Experimental research on a new technology - ellipse spinning", Journal of Materials Processing Technology, 194, pp.197-200, 1999
5. J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Dufloy, J. Allwood,, "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal", CIRP Annals-Manufacturing Technology, pp88-114, Vol 54, Issu 2 ,2005

6. C. C. Wong, T. A. Dean, J. Lin, "A review of spinning, shear forming and flow forming processes", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, pp.1419-1435, 2003
7. 이태호, "Free mandrel에 의한 Metal 스피닝 기술", 35회 한국 추진공학회 2010년 추계 학술대회, pp 241-244, 제주, 2010 11. 25-26
8. Ichiro Shimizu, "Asymmetric forming of aluminium sheets by synchronous spinning", *Journal of Materials Processing Technology*, 210, pp.585-592, 2010
9. K. Kawai, L.-N. Yang, H. Kudo, "A flexible shear spinning of axi-symmetric shells with a general-purpose mandrel", *Journal of Materials Processing technology*, 192-193, pp.13~17, 2007
10. Chun-Ho Liu, "The simulation of the multi-pass and die-less spinning process", *Journal of Materials Processing Technology*, 102-103, pp.518~524, 2007
11. Hiroshi Arai, "Robotic Metal Spinning-Forming non-axisymmetric products using force control", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2691-2695, 2005
12. Eamonn Quigley, John Monaghan, "Metal forming: an analysis of spinning processes", *Journal of Materials Processing Technology*, 103, pp.114~119, 2000