

[特輯] 技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.1.079>

Metal 스피닝의 신기술 동향

이태호*

The Trend of New Technology in Metal Spinning

Tae-Ho Lee*

ABSTRACT

This study investigates mainly on the technical development trend through the published papers, such as asymmetric metal spinning, metal spinning in heat treatment conditions and free mandrel spinning. Although the classical spinning, so called conventional, shear, tube spinning, uses the axisymmetric shaped mandrel(which is same inner shape of the final product), in new technologies the mandrel can be asymmetric one, spinning can be done without mandrel and also spinning is done with heat treatment together.

초 록

본 조사에서는 주로 비 축대칭 스피닝, 열처리와 스피닝, 그리고 자유 맨드릴 스피닝 등에 대한 신기술을 동향을 문헌을 통하여 조사하였다. 기존의 재래식, 전단, 튜브 스피닝은 모두 축대칭 맨드릴(제품의 최종 제품의 내경과 같은)을 사용하여 가공하여 왔으나, 신 기법에서는 비 축대칭 맨드릴이나, 맨드릴이 없이, 또 열처리를 동반한 스피닝 공법이 시도되고 있다.

Key Words: Axisymmetric Mandrel(축대칭 맨드릴), 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 금

속 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 제기된다. 즉 경량화, 강성, 동시에 내구성을 가질 필요가 있다. 금속 소재가 이러한 특성을 갖게 하기 위하여 사용되는 기술로는 열처리, 단조 공법들이 사용되고 있는데, 스피닝은 이러한 조건에 잘 부합하는 기법 중 하나이다. 스피닝은 판재 소재를 사용하여 축대칭 형상을 갖고 있고,

접수일 2011. 4. 25, 수정완료일 2011. 12. 7, 게재확정일 2011. 12. 12

* 종신회원, KISTI(한국과학기술정보연구원),
ReSeat 프로그램 전문 연구위원

† 교신저자, E-mail: ltaho0547@reseat.re.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회(2011. 4. 28-29, 현대로템(주) 기술연구소) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

가운데가 비어 있는 부품을 만드는데 주로 이용하는 공법이다. 그러나 최근 이러한 기존의 스피닝 공법에서 탈피하여 새로운 기법에 대한 연구가 활발히 일어나고 있다. 본 논문은 이러한 새로운 기술 개발 동향에 대하여, 문헌을 중심으로 선진국의 기술 개발 동향을 파악 조사하여 우리의 산학연을 통한 현장으로의 응용을 기대하여 작성하였다.

2. 금속 스피닝의 기술 개발

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

전단 스피닝은 통상적으로 롤러를 1회 작업하며, 벽두께는 sine 법칙에 의해서 결정되는 공법이다. sine 법칙은 초기 블랭크의 판재 두께를 s_0 라 하고 스피닝된 최종 두께를 s_f 라 할 때, 그리고 스피닝 각도, 즉 회전축과 맨드릴의 원추 반각을 α 라 하면 다음과 같은 sine 법칙이 성립함을 말한다.

$$s_f = s_0 \sin \alpha$$

그러나 이러한 전단 스피닝에서 제품의 두께를 의도적으로 sine 법칙에서 얻어지는 두께보다 얇게 하는 오버 스피닝(over spinning)이나 두껍게 하는 언더 스피닝(under-spinning)이 있다. 언더 스피닝을 하게 되면 플랜지를 안쪽으로 잡아당기게 되고, 이로 인해 플랜지가 롤러 쪽으로 기울어 주름형성의 원인이 된다. 반면에 오버 스피닝을 하게 되면 롤러 앞쪽에 빌드 업(build up) 현상이 일어나 플랜지가 앞쪽 즉 롤러에서 멀어지는 쪽으로 굽어진다.

플로 포밍(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.

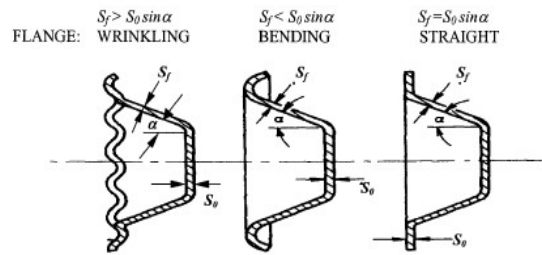


Fig. 1 Variations of shear spinning

전단 스피닝에서 툴(tool)의 힘에 영향을 주는 인자로는 이송률, 맨드릴 회전 속도, 판재 두께, 벽 각도, 롤러 직경, 롤러의 코 반경, 블랭크 직경, 오버 스피닝 등이다[1]. 이송 속도와 접선 방향 힘은 선형으로 증가하며, 판재 두께와 세 방향의 힘의 분력도 비례한다. 성형 모드도 최초와 종말에서 서로 다른데, 가공 과정을 세 단계로 나눌 수 있다. 즉 롤러가 판재에 접촉하여 맨드릴 반경으로 굽히는 과정과, 점차적으로 판재를 굽히면서 제품을 회전하는 과정, 끝으로 플랜지 성형 과정이다[1]. Quigley 와 Monahan은 심압대의 끝 부분과, 롤러에 의한 성형 영역과 플랜지 영역 등 셋으로 나누어 변형율을 조사하였다. 세 영역 모두 원주방향 변형률이 반경과 두께방향 변형률에 비하면 작았다[2]. 롤러의 길(path)에 대하여도 연구하였는데, 선형, 2차형(quadratic), 나선형(involute) 중에서, 나선형이 가장 좋은 결과를 보여 주었다. 스피닝률이 선형에는 1.7, 2차형에는 2에 비하여 나선형에서는 2.5를 보이고 있다[3]. 여기서 스피닝률은 초기와 만들어진 제품의 블랭크 직경 비를 말한다.

이론적 연구로는 성형 에너지 방법을 사용한 힘의 예측, 상한 계(upper bound) 방법, 주름에 의한 실패 예측, 스피닝에서 응력 예측 등의 연구가 되어왔다[2]. 이와 같은 실험적 이론적 연구를 해석하기 위한 방안으로 수치 해석이 사용되고 있다. 묵시적(implicit) 모델로는 탄-소성 재료에 대한 알고리즘(2001)을 시작으로, 2003년 레이저 가열 열간 가공에서 최적화 등에, 탄-소성 모델에 명시적(explicit) 모델은 응력과 변형율, 두께 분포에 사용하였다[1].

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 방법과 비축대칭 스피닝, 열간 스피닝으로 나누어 볼 수 있다.

3.1 비 축대칭 스피닝

비 축대칭 스피닝은 Amano와 Tamura가 1984년 제안하였으며, 수정 형 스피닝 선반을 사용하여 반경 방향으로 오프셋 롤러를 사용하였다 [22].

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[4].

2005년에 표준형 스피닝 선반에서 직경으로 반대쪽에 두 개의 스프링 제어가 되는 롤러를 사용하는 것을 Awiszus와 Meyer가 개발하였다 [5]. 불룩하거나 오목한 것 그리고 삼각대 형에 사용하였다. 두께 분포나 회전축과 원주 방향에는 적용이 되지 않아 스프링 방법보다 CNC 사용을 제안하고 있다.

Arai(2004, 2006)[6]는 힘/위치 제어 시스템을 적용하여, 롤러가 비대칭 맨드릴을 따라가는 방법을 제안하였으며, 이 방법으로 전단 스피닝비대칭 형상에 성공적으로 적용할 수 있었다.

3.2 열간 스피닝

스피닝은 일반적으로 냉간가공이다. 그러나 두꺼운 부품이나 고강도 소재에는 성형력(forming force)을 줄이기 위하여 열간가공도 한다[13]. 열

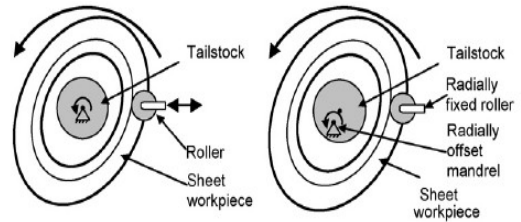


Fig. 2 Offset of roller and mandrel[1]

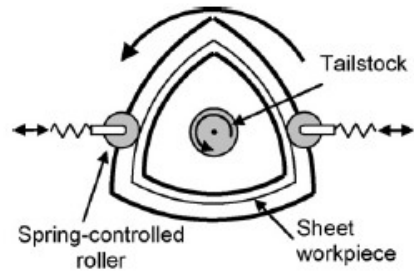


Fig. 3 Spring controlled roller[1]

간 스피닝은 고전적 구식으로 산소 아세틸렌 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[8].

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[9].

주조 알루미늄에는 덴드라이트(dendrite)나, 기포(blowhole)와 수축 공동(shrinkage cavity) 등이 존재하여 부품의 강도는 높지 않다. 주조 결함들은 커다란 소성 가공에 의해 제거되는 것으로 알려졌는데, 덴드라이트는 정련 구조 속으로 부서져 버리고 기포와 수축 공동은 압축과 고온에 의한 확산으로 제거되고 있다. 주조 알루미늄은 연성이 부족하여 냉간 가공으로는 적합하지 않다. 알루미늄 소재 블랭크를 350℃와 400℃로 하여 실험한 결과 벽두께 40% 감소시키기 위해

코너 부위의 원주 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 하면 방지할 수 있다.

성형 롤러의 움직이는 길을 성형할 제품에 맞도록 sine 법칙을 만족하게 잘 제어할 수 있으면 여러 종류의 축대칭 제품을 성형 롤러와 일반적인 원통형 맨드릴로 성형할 수 있다. 축 대칭 원추형 뿐 아니라 반구형(hemisphere)에도 원통형 맨드릴의 성형이 가능하고 이때는 접선 각도각을 따라서 점진적으로 감소하게 된다. 어떤 조건에 이르면 플랜지(flange)가 앞쪽으로 굽어지는 경향이 있고 이로 인해 외경이 작아지는 일 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 원인이었다. 제품 성형과정에서 지지해 주는 맨드릴이 없기 때문에 성형과정 중에 발생하는 스프링 백(spring back)을 감안하는 것도 한 방법이다. 이 가요성 과정으로 다양한 축 대칭 제품에 그리고 소량으로 여러 종류의 배치(batch) 생산에 적용할 수 있게 되었다.

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 검색

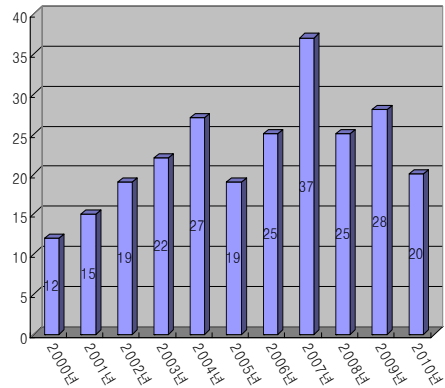


Fig. 6 Published papers in 2000's years

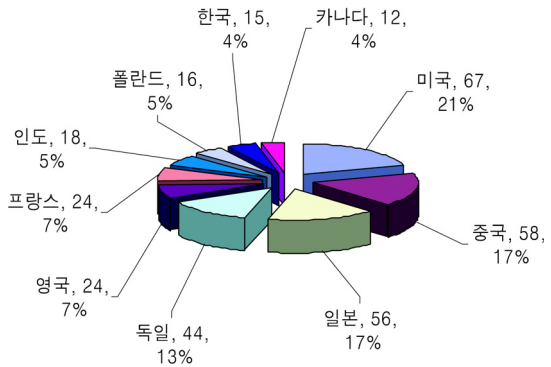


Fig. 7 Top 10 countries which published articles

을 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.

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 있지만 이 분야가 특별히 각광을 받는 연구 분야는 아닌 것이 간접적으로 나타나고 있다. 즉 금속 스피닝은 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, 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. O. Music et al "A review of the mechanics of metal spinning," Journal of Materials Processing Technologies 210, 2010, pp.3-23
2. Eamonn Quigley, John Monaghan, "Metal forming: an analysis of spinning processes," Journal of Materials Processing Technology, 103, 2000, pp.114-119
3. Hayama, Kudo, Shinokura, "Study of the pass schedule in conventional simple spinning," Bulletin of the JSME 65, 1970, pp.61-69
4. Gao, Kang, Wu, "Experimental research on a new technology-elliptical spinning," Journal of Material Processing Technology, 94, 1999, pp.197-200
5. Awisuzus, Meyer, "Metal spinning of non circular hollow parts," 8th International Conference on Technology of Plasticity, Oct., 2005
6. Arai, H., "Robotic metal spinning-forming non-axisymmetric products using force control," Journal of Robotics Society of Japan, 24, 2006, pp.140-145
7. 이태호, "Free mandrel에 의한 Metal 스피닝 기술," 제35회 한국추진공학회 2010년 추계 학술대회, 제주, 2010 11. 25-26, pp.241-244
8. Klocke, Wehrmeister, "Laser-assisted metal spinning of advanced materials," 4th Lane Conference, Germany, 2003
9. Ken Ichiro Mori, Minoru Ishiguro, Yuta Isomura, "Hot shear spinning of cast aluminium alloy parts," Journal of Materials Processing Technology, 209, 2009, pp.3621-3627
10. Kitazawa, Wakabayashi et al, "A CNC incremental sheet metal forming method for producing the shell components," Journal of JSTP 35, 1994, pp.1348-1353
11. Shima, Kotera, Murakami, "Development of flexible spin-forming method," Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 38, 1997, pp.814-818
12. Matsubara, S., "A Computer numerically

- controlled dieless incremental forming of sheet metal," Proceedings of Institution Of Mechanical Engineering Part B, Journal of Engineering Manufacture, 215, 2001, pp.959-966
13. 이태호, "알루미늄 6061의 열처리에 대한 spinnability 연구," 충남대학교 석사 논문, 1980
 14. 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, 2007, pp.13-17
 15. Xi-Cheng Gao, Da-Chang Kang, Xiao-Feng Meng, "Experimental research on a new technology - ellipse spinning," Journal of Materials Processing Technology, 194, 1999, pp.197-200
 16. J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood,, "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol 54, Issue 2, 2005, pp.88-114
 17. 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, 2003, pp.1419-1435
 18. Ichiro Shimizu, "Asymmetric forming of aluminium sheets by synchronous spinning," Journal of Materials Processing Technology, 210, 2010, pp.585-592
 19. Chun-Ho Liu, "The simulation of the multi-pass and die-less spinning process," Journal of Materials Processing Technology, 102-103, 2007, pp.518-524
 20. Hiroshi Arai, "Robotic Metal Spinning-Forming non-axisymmetric products using force control," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, pp.2691-2695
 21. 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, 2001, pp.28-33
 22. Amano, T., Tamura, k., "The study of an elliptical cone spinning by the trial equipment," Third conference on rotary metalworking Processes, 1984, pp.213-224