

튜브 스피닝 공정에서 성형깊이가 컵형 튜브의 변형거동에 미치는 영향

신영철[#] · 윤덕재¹ · 임성주¹ · 최호준¹

Effects of Forming Depth on the Deformation Behavior of Cup-like Tubes in Tube Spinning Process

Y. C. Shin, D. J. Yoon, S. J. Lim, H. J. Choi

(Received July 5, 2012 / Revised August 17, 2012 / Accepted August 27, 2012)

Abstract

The aim of this study was to investigate the effects of forming depth on the deformation behavior of cup-like tubes made of AISI1020 steel in tube spinning process. Spinning process was performed on cup-like tubes, which had an inner diameter of 34mm and thicknesses of 7, 8.5 or 11.5mm. The forming depths achieved were 3, 4, and 5.5mm. The complex deformation behaviors occurring during the tube spinning process was explained using the experimental results. Also analyzed were the causes of the material buildup and the bulge defect of inner surface, observed on cross section of tubes. The relationship between tube spinning conditions and the height of bulge defect was examined. The results indicate that bulge defect is increased with a decrease of the forming depth. Moreover, a critical forming depth exists for preventing the generation of the bulge defect in the tube spinning process. The present results will be useful for future decisions of forming depths for successful tube spinning of cup-like tubes.

Key Words : Tube Spinning, Flow Forming, Cup-like Tubes, Forming Depth, Buildup, Bulge Defect

1. 서 론

튜브 스피닝 공정은 튜브형의 소재를 회전시킨 뒤 롤러를 제어하여 벽두께를 얇게 하고 길이 및 단면형상의 변화를 주는 공정이다. 또한 미려한 표면품질과 정확한 가공공차를 가지면서도 얇고 긴 튜브형 부품 제작에 가장 효과적인 방법이므로 자동차, 항공우주, 방위산업 등에 널리 이용되고 있다. 성형 중 롤러와 소재의 접촉 면적이 비교적 작기 때문에 상대적으로 작은 성형력으로도 성형이 가능하므로 튜브 스피닝 성형기는 비교적 작고 간단한 구조를 갖는다. 특히 타 성형공정에 비하여 고 세장비를 갖는 튜브 제작에 유리한 장

점을 가지고 있다.

가스 스프링 하우징과 같이 컵(cup)형 튜브제작이 요구되는 경우, 일반적으로 기계가공이 이용되거나 가공경화에 의한 강도향상을 목표로 단조공정이 활용되고 있다. 하지만 고 세장비를 갖는 튜브 제작이 필요한 경우에는 두 공정 모두 적용에 한계가 있다. 벌크(bulk) 소재로부터 드릴링을 이용하여 튜브를 제작하는 기계가공 공정은 튜브의 길이가 길어질수록 재료이용률이 현저하게 저하되고 가공시간 또한 길어지게 되며, 단조공정은 펀치길이 한계 및 프레스의 구조적 한계로 인하여 성형 가능한 튜브의 길이가 제한적이다. 대안으로 아이어닝 공정을 활용하거나 용접공정을 통해

1. 한국생산기술연구원
교신저자: 한국생산기술연구원,
E-mail: yeshin@kitech.re.kr

튜브를 이어 붙이는 방법들이 적용되고 있으나, 튜브 스피닝 공정을 사용하게 되면 아이어닝 공정에 비해 작은 용량의 성형기로도 동일한 치수를 갖는 튜브의 성형이 가능하고, 용접공정에서 발생되기 쉬운 접합부 결함 및 강도저하 문제로 부터도 자유로울 수 있게 된다. 따라서 튜브 스피닝 공정이 고 강도, 고 세장비를 갖는 튜브를 결함 없이 제작할 수 있는 가장 경제적이고 안정적인 방법이라고 할 수 있다.

고 세장비를 갖는 부품을 튜브 스피닝 공정을 통해 성형하고자 하는 경우, 튜브는 초기 두께가 두꺼운 후벽 튜브의 형태가 된다. 후벽 튜브를 스피닝 성형하여 성공적으로 목표치수를 확보하기 위해서는 이송속도와 성형깊이 등, 공정 변수에 따른 성형 특성 파악이 선행되어야 한다. 이에 Fazeli 등[1]은 실험계획법을 사용하여 여러 공정 변수가 알루미늄 튜브의 표면조도에 미치는 영향을 분석하였고, Wong 등[2]은 3차원 ALE 유한요소 해석을 통해 롤러 이송속도에 따른 알루미늄 튜브의 성형 특성을 분석하였다.

유한요소해석을 이용한 스피닝 공정의 연구사례는 꾸준히 증가하고 있는 추세인데, Xia 등[3]은 MARC를 통해 축대칭 튜브성형을 위한 다중패스 넥-스피닝에 대한 연구를 수행하였고, Debin 등[4]과 Mohebbi 등[5]은 ABAQUS/Explicit을 이용하여 스피닝 성형 중 튜브의 변형 특성에 대하여 분석하였다. 하지만 후벽 튜브의 스피닝 성형과정에서 발생하는 과도한 변형을 구현한 유한요소해석 연구결과는 여전히 찾아보기 힘들다.

최근 Yoon 등[6]이 실험을 통해 후벽 튜브 스피닝 공정에서 롤러 단면 형상이 성형성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 하지만 실험적인 방법을 통해 후벽 튜브의 스피닝 성형특성을 고찰한 연구사례는 여전히 미미한 실정이고, 특히 철강 소재 후벽 튜브를 대상으로 한 연구사례는 더욱 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 고 세장비를 갖는 튜브제작을 위하여 AISI1020 탄소강으로 제작된 컵형 후벽 튜브의 스피닝 성형 공정을 다뤘으며, 스피닝 성형의 핵심 공정변수인 성형깊이가 후벽튜브의 변형거동에 미치는 영향성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 세 가지 두께의 튜브에 대하여 각각 세 가지 성형깊이를 적용하여 실험을 수행하였으며, 단면 분석을 통해 가공된 튜브에서 관찰되는 빌드업(buildup), 내측 벌지결함 등의 발생 원인에 대하



Fig. 1 Photograph of tube spinning equipment

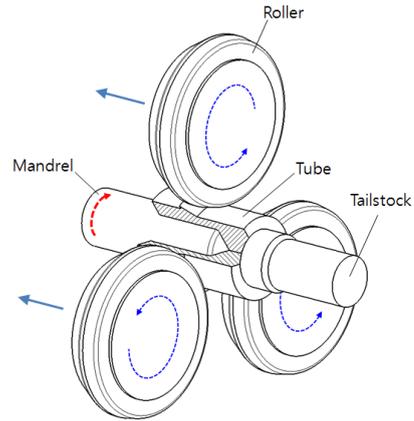


Fig. 2 Schematic diagram of tube spinning

여 고찰하였고 성형깊이와 내측 벌지결함과의 상관관계에 대하여 분석을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 튜브 스피닝 성형실험을 위해 한국생산기술연구원에서 제작한 성형장치를 나타내고 있다. 소재의 유동방향과 롤러의 진행방향이 서로 동일한 전방 튜브 스피닝 방식을 적용하였다.

성형기는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 한 개의 맨드렐(mandrel)과 세 개의 롤러(roller)를 가지고 있으며, 컵(cup)모양 시편의 한쪽 끝단부를 지지하기 위한 심압대(tailstock)와 성형완료된 시편의 취출을 위한 취출장치(ejector)를 가지고 있다. 맨드렐에 컵모양의 시편을 끼워 넣고 심압대를 전진시켜 시편을 고정시킨 뒤에, 맨드렐에 회전을 가한

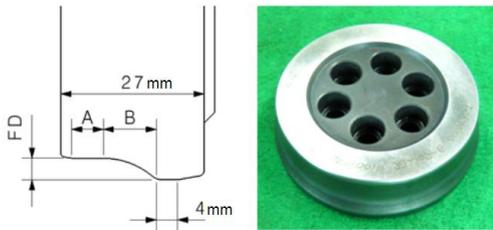


Fig. 3 Roller shape

Table 1 Dimensions of workpiece and the process conditions

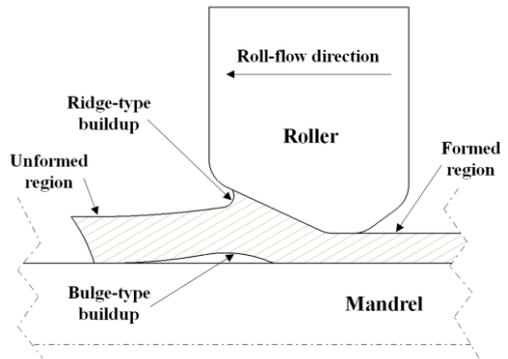
Parameter	Value
Workpiece(tube)	
Inner diameter	34mm
Outer diameter(OD) (Wall thickness)	48, 51, 57mm (7, 8.5, 11.5mm)
Initial length	64mm
Spinning Conditions	
Forming Depth(FD)	2, 4, 5.5mm
Axial feed rate	0.6mm/rev
Speed of rotation	300rpm

상태에서 롤러들을 전진시키게 되면 시편과 롤러와의 마찰에 의해 롤러가 회전하면서 점진적으로 성형이 이루어지게 된다. 성형 중 시편 및 롤러의 과열 방지를 위해 펌프를 통해 냉각수를 공급하였다. 롤러들이 설치되어 있는 주 블록(main block)에는 로드셀을 달아 성형과정에서의 축방향 하중 변화가 컴퓨터 시스템을 통해 기록되게 하였다.

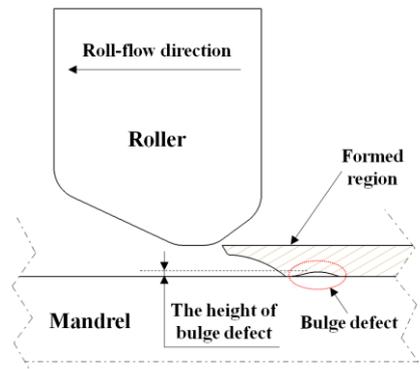
2.2 실험조건

Table 1에 실험에 사용된 컵형 튜브의 초기 치수와 성형조건을 나타내었다. 실험에 사용된 튜브의 치수는 내경이 34mm, 초기 두께는 7, 8.5, 11.5mm로 후벽 튜브에 속한다. 튜브의 소재는 AISI1020 탄소강이다.

성형깊이의 영향성 분석을 위해 세 가지 성형깊이를 갖는 롤러를 제작하였다. 각각의 성형깊이는 2, 4, 5.5mm로, 초기 두께 8.5mm인 튜브를 기준으로 벽두께 감소율을 계산하면 대략 24, 47, 65% 정도가 된다. 롤러의 형상은 Yoon 등[6]의 결과를 바탕으로 Fig. 3과 같이 오목형(concave)으로 설계



(a) During tube spinning process



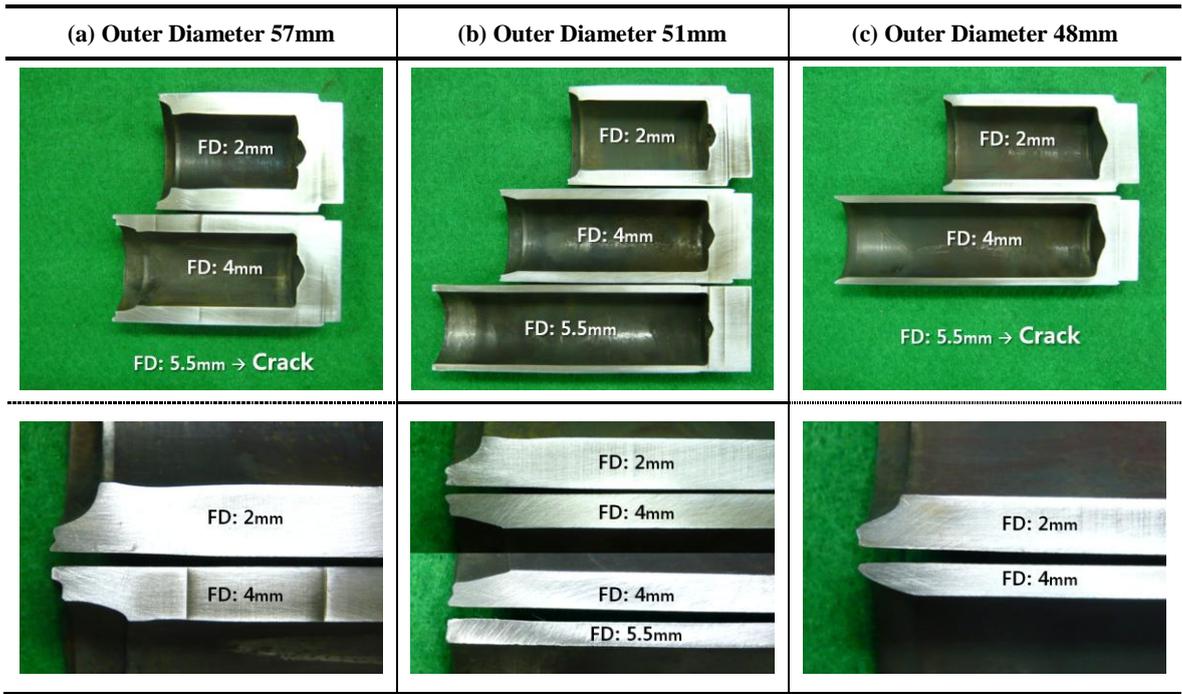
(b) After tube spinning process

Fig. 4 Illustration of the bulge effect

하였다. 후벽 튜브의 스피닝 성형 시에는 Fig. 4(a)에서와 같이 롤러 전방에 빌드업이 과도하게 성장하게 되므로[7], 빌드업 성장을 억제하기 위해 오목형 가공부(B) 전방에 랜드부(A)를 추가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

튜브 스피닝 성형 과정에서는 튜브에 복잡한 변형거동이 발생하게 된다. 이와 같은 변형거동은 튜브의 3차원 변형에 기인하는 것으로, 이해를 돕기 위하여 스피닝 성형과정에서 나타나는 튜브의 변형형상을 Fig. 4에 그림으로 나타내었다. 후벽 튜브의 스피닝 성형 중, 튜브 소재에는 롤러와 접촉하는 주변에만 국부적인 압축응력이 작용하게 된다[2]. 다시 말해 롤러를 통해 가해지는 성형력은 튜브를 축방향으로 연신시키려 하기보다는 롤러와의 접촉부를 기준으로 하여 사방으로



• FD: Forming Depth

Fig. 5 Spun tubes with different forming depths

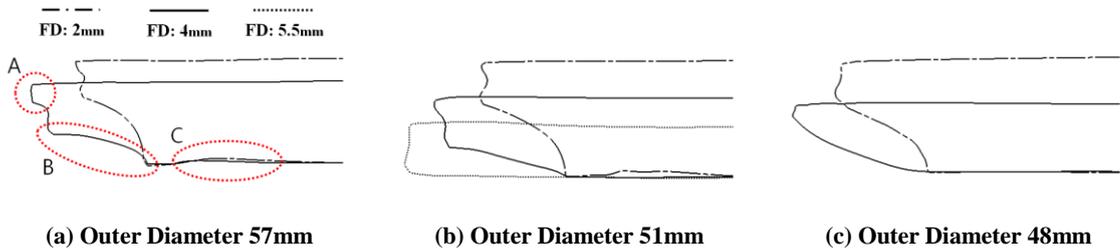


Fig. 6 Comparisons of section profiles

벌지를 일으키려 하게 된다. 결국 상대적으로 구속이 덜한 롤러의 전방에는 벌지(bulge-type buildup)가 발생하여 점점 성장하게 된다. 축방향 연신이 원활하지 못하므로, 소재는 성형초반 롤러의 회전방향으로 쏠려나가다가 점차 롤러의 전진 방향으로 쏠려 빌드업(ridge-type buildup)을 발생시키게 된다. Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이, 성형 중에 발생한 벌지가 성형이 완료된 후에도 튜브의 끝단에 그대로 남아 있을 수 있는데 이를 벌지결함(bulge defect)으로 간주하였다.

Fig. 5는 스피닝 성형된 튜브의 단면을 나타낸 것이다. 튜브의 초기 두께에 따른 끝단부 형상 차이를 손쉽게 비교할 수 있도록 단면을 확대하

여 하단에 표시하였다.

성형깊이가 5.5mm인 경우, 외경이 57mm인 튜브에서는 중공 시작부에서 크랙이 발생하였다. 이는 롤러와 소재의 접촉면적이 증가하면서 중공 시작부의 축방향 단면에 과도한 인장응력이 작용하여 파단에 이른 것으로 사료된다. 외경이 48mm인 튜브를 5.5mm 깊이로 성형한 경우에도 크랙이 발생하였으며, 이때의 성형 후 벽두께는 1.5mm 이므로 성형기의 미소한 설정오차를 버티지 못하고 불안정 변형이 점점 증가하다가 파단에 이른 것으로 판단된다.

Fig. 6은 Fig. 5에 나타난 튜브 끝단의 단면 형상을 보다 효과적으로 분석하기 위하여, 2차원

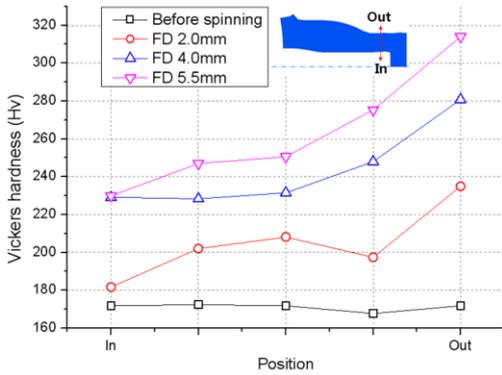


Fig. 7 Comparisons of the hardness of spun tubes

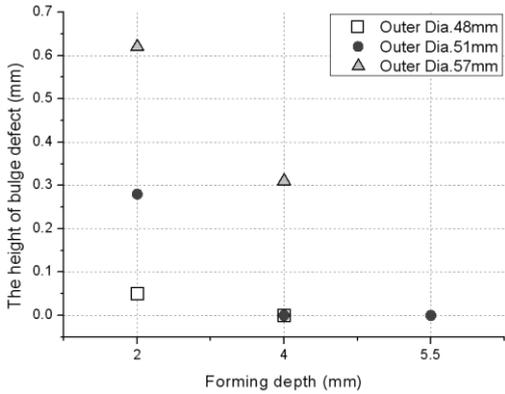


Fig. 8 Effect of forming depth on the height of bulge defect

스캐닝을 통해 단면 윤곽을 추출 후 성형깊이 별로 비교하여 나타낸 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 성형과정 중 튜브에 복잡한 변형거동이 발생했음을 파악할 수 있다.

Fig. 7은 세 가지 성형깊이(2mm, 4mm, 5.5mm)로 스피닝 성형한 외경 51mm 튜브의 단면 경도 분포를 비교하여 나타낸 그래프이다. 스피닝 성형된 튜브의 경도는 축대칭 분포를 나타내게 되므로 Fig. 7에 나타낸 튜브의 단면에 대하여 반경방향으로 측정을 실시하였다. 경도 분포를 통해 튜브에는 전반적으로 연신이 발생했으나 표면으로 갈수록 더 많은 연신이 일어나고 있음을 알 수 있다. 이는 튜브가 Fig. 6의 'B'부와 같이 변형되는 이유를 설명해준다. Fig 6의 'A'부는 롤러 전방에서 성장하는 빌드업과 관련이 있다. 스피닝 성형 중반에 튜브의 끝으로 몰린 빌드업이 전방 소재의 지지를 받지 못하고 롤러에 의해 축방향으로 변형

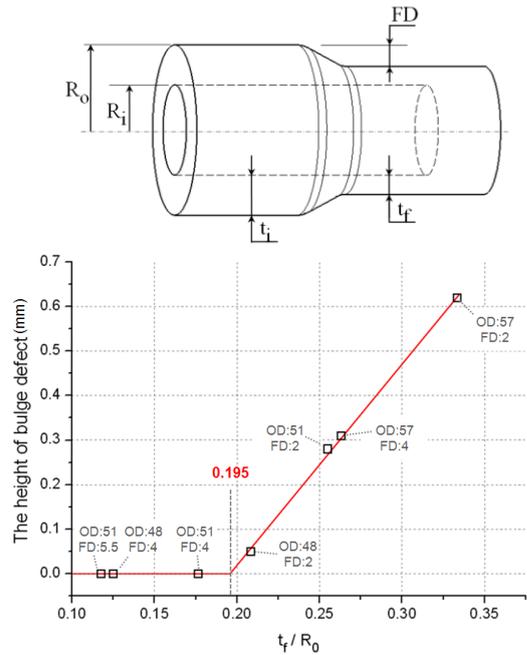


Fig. 9 The relationship between the height of bulge defect and t_f/R_0

된 것이다. 'C'부는 변형과정에서 발생한 내측 벌지의 높이가 성형깊이보다 커지면서, 성형 중반 살두께 부족으로 성형이 충분히 이루어지지 못하여 결함으로 남은 것으로 사료된다. 이처럼 성형 완료된 튜브에 남은 내측 벌지결함은 튜브의 가용길이를 감소시키는 결과를 가져오므로 재료가 용융의 향상을 위해서는 반드시 제거되어야 한다.

Fig. 6의 단면 비교를 통해 성형깊이가 커짐에 따라 빌드업 또한 크게 성장함을 알 수 있다. 반면 특정 성형깊이 이상에서는 내측 벌지결함이 사라지면서 가용영역이 더 커지게 되므로 재료가 용융이 향상되고 2차 가공을 통한 부품제작에도 훨씬 유리해짐을 파악할 수 있다(Fig. 6(b)).

성형 조건에 따른 내측 벌지결함의 반경방향 높이를 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. 성형완료된 튜브에 남은 내측 벌지결함의 높이는 동일한 튜브 두께에서는 성형깊이가 커질수록, 동일한 성형 깊이에서는 튜브 두께가 얇을수록 작아지는 경향을 보이고 있다. 내측 벌지결함이 발생하는 조건을 보다 명확하게 파악하기 위해, 성형조건 변수들과 내측 벌지결함과의 상관관계에 대한 다각도의 분석을 수행하였다. 성형 후 튜브 두께를 성형 전 튜브의 외부 반경으로 나눈 값(t_f/R_0)으로

실험한 스피닝 조건을 대표하고, 각 경우에 발생한 내측 벌지결함 높이(반경방향)를 그래프로 나타낸 결과 Fig. 9와 같은 관계가 있음을 파악할 수 있었다. t_p/R_0 값이 대략 0.195를 기준으로 그 이하에서는 내측 벌지결함이 발생하지 않고, 그 이상에서는 t_p/R_0 값에 비례하여 내측 벌지결함이 커지는 것을 알 수 있다. 다시 말해 외경대비 성형 후 튜브두께가 늘어남에 따라 내측 벌지결함 높이가 증가하였다. 후벽튜브의 스피닝 공정에서, 내측 벌지결함의 발생을 방지하기 위해서는 튜브의 외경 및 두께를 고려하여 일정 성형깊이 이상으로 성형해야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는 성형되는 튜브의 내경을 고정하였고 회전 속도와 롤러 전진 속도와 같은 스피닝 성형조건을 모두 동일하게 고정하여 실험을 수행하였다. 향후 추가적인 연구를 통하여 여러 성형 조건변수들과 내측 벌지결함과의 상관관계를 보다 종합적인 관점에서 파악할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결론

본 연구는 고 세장비를 갖는 튜브제작을 위한 기초연구로 수행되었으며, AISI1020 탄소강으로 제작된 후벽 튜브의 스피닝 공정에서 성형깊이가 튜브의 변형거동에 미치는 영향성을 파악하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 스피닝 성형 중 튜브에 나타나는 복잡한 변형거동에 대하여 설명하고 이를 바탕으로 롤러 전방에서 관찰되는 빌드업, 및 튜브 내측 벌지결함 등의 발생 원인에 대하여 고찰하였다.

(2) 성형깊이가 커짐에 따라 빌드업 또한 크게 성장하나, 특정 성형깊이 이상에서는 튜브의 가용영역이 더 커져서 재료 이용률이 향상되고 2차가공을 통한 부품제작에 유리해짐을 파악하였다.

(3) 성형되는 튜브의 내경 치수를 고정한 상태에서 스피닝 성형 조건과 내측 벌지결함 높이와의 상관관계를 검토해본 결과, 성형 전 튜브 외경 대비 성형 후 튜브의 두께가 늘어남에 따라

내측 벌지결함 높이가 증가하는 것을 확인하였으며 내측 벌지결함이 발생하지 않는 특정 조건이 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 컵형 튜브의 스피닝 성형조건을 결정하는데 있어 매우 유용할 것으로 사료되며 튜브 내측에 추가적인 기계가공을 필요로 하는 경우에도 가공여유 결정을 위해 유용하게 쓰일 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] A. R. Fazeli, M. Ghoreishi 2009, Investigation of Effective Parameters on Surface Roughness in Thermomechanical Tube Spinning Process, *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 2, No. 4, pp. 261~270.
- [2] C. C. Wong, A. Danno, K. S. Fong, 2010, Deformation Behavior in Flow Forming of Cylindrical Cups using Finite Element Method, *Steel Res. Int.*, Vol. 81, No.9, pp. 1002~1005.
- [3] Q. X. Xia, S. W. Xie, Y. L. Huo, F. Ruan, 2008, Numerical Simulation and Experimental Research on the Multi-pass Neck-spinning of Non-Axisymmetric Offset Tube, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 206, No. 1-3, pp. 500~508.
- [4] S. Debin, Y. Guoping, Xu. Wenchen, 2009, Deformation History and the Resultant Microstructure and Texture in Backward Tube Spinning of Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 17, pp 5713~5719.
- [5] M. S. Mohebbi, A. Akbarzadeh, 2010, Experimental Study and FEM Analysis of Redundant Strains in Flow Forming of Tubes, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 210, pp. 389~395.
- [6] D. J. Yoon, Y. C. Shin, S. J. Shin, H. J. Choi, 2010, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 218~221.
- [7] ASM International, 2005, *ASM Handbook Metal Working: Bulk Forming*, Vol. 14A, ASM International, Ohio.