

벤딩 공정에서 얇은 튜브에 대한 스프링백 예측

Spring Back Prediction of Thin-walled Tube in Bending Process

*진종업¹, 경효승², #조종택³, 김현준⁴, 김창수⁴

* J. W. Jeon¹, H. S. Jeong², # J. R. Cho(cjr@hhu.ac.kr)³, H. J. Kim⁴, C. S. Kim⁴

¹한국해양대학교 기계공학과, ²부산대학교 폴스로이스 대학기술센터,

³한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부, ⁴(주)동화엔텍 기술연구소

Key words : Inconel 625, Spring back, Elastic recovery, Finite element analysis, Elastic-plastic boundary

1. 서론

튜브의 굽힘 공정은 자동차, 항공기, 조선 등 여러 산업분야에서 각종 부품 제조에 널리 이용되고 있다. 이중 일부의 산업에서는 부분적으로 자동화 시스템이 도입되어 있지만, 많은 부분이 노동 집약적인 방법에 의존하고 있다. 그렇기 때문에 전체적인 시스템의 자동화와 성형기술의 국산화 방안이 시급한 과제로 남아있다. 튜브를 가공하는 장비들의 정확한 설계와 굽힘 가공 기술은 성능 향상과 생산성을 향상시키는데 중요한 역할을 하므로 정밀한 굽힘 가공 연구가 필요시 된다.

탄소성 거동이 적용되는 굽힘 가공의 경우에는 이론적인 접근 방법으로 해결하기 힘든 현상이 발생하여 실제 생산에 적용하기 위해서는 많은 시행오차가 필요하다. 즉 가공 후의 하중 제거에 따른 재료의 복원 능력이 발생하여 원래의 요구하는 형상에서 벗어나는 모양을 갖게 되는 경우가 많이 발생한다. 이러한 현상을 스프링백(Spring Back) 현상이라 한다.

본 연구에서는 튜브의 굽힘 공정을 굽힘 이론과 유한요소 해석을 통해 성형 후의 굽힘 반경 변화를 분석하여 정밀한 튜브 생산을 위한 성형 공정 조건을 제시하는데 있다. 다른 연구에서는 잘 다루어지지 않은 Inconel 625의 물성을 사용하였으며, 튜브의 두께는 매우 얇게 하여 해석을 수행하였다.

2. 튜브의 굽힘 이론

식을 제시하기에 앞서 Fig. 1에서와 같이 튜브의 단면에 대해 몇 가지 변수를 정의하였다. 튜브의 외경을 R, 두께를 t로 정의하였고 튜브의 단면에서 각도에 따른 중립축으로부터의 높이를 y, 그 때의 폭을 B(θ)로 정의하였다. 이 때, y가 R-t ≤ y ≤ R의 범위

에 존재하게 되면, 튜브의 내경을 고려하지 않아도 되므로 이 구간에서의 폭은 B*(θ)로 정의하였다.

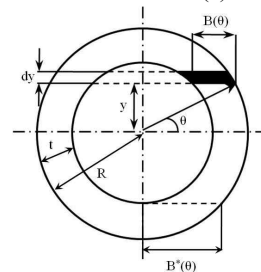


Fig. 1 Cross-section of tube

또한 튜브의 굽힘에 대해 4가지의 가정을 하였다.

- 1) 튜브의 단면은 중립면에 대해 직각을 유지.
- 2) 바우싱거 효과, 버클링 현상은 무시.
- 3) 튜브의 단면 형상은 일정하게 유지.
- 4) 탄소성경계는 R-t보다 낮은 위치에 존재.

이 가정들로부터

$$\int_A \sigma_x dA = 0, \int_A \sigma_x y dA = M \quad (1)$$

과 x 방향의 수직변형률

$$\epsilon_x = \frac{y}{\rho} \quad (2)$$

을 얻게 된다. A는 단면 전체의 면적적분, M은 가해진 굽힘 모멘트, ρ는 중립면의 곡률 반경이다. 이 때 응력이 항복강도를 넘어가면 소성 변형이 발생하므로 총 굽힘 모멘트는 탄성과 소성으로 나눌 수 있고 탄성과 소성을 나누는 경계의 높이를 y_E, 그 때의 각도를 θ_E로 정의하였다. 또한 y가 R-t에서부터는 폭이 B*(θ)이므로 소성은 두 가지로 표현된다.

$$M_{Total} = M_E + M_{P1} + M_{P2} \quad (3)$$

굽힘 모멘트를 구할 때, 굽힘 모멘트는 θ의 함수이므로 y를 θ의 함수로 반드시 바꾸어야 한다.

굽힘 모멘트는 튜브에 영구 변형을 일으키고, 변형을 일으킨 후에 제거 되면 튜브에 회복 굽힘 모멘트가 작용된다. 이 현상을 스프링백이라고 하며 회복 굽힘 모멘트를 구한 후 식(4)와 같이 최종 곡률 반경을 구할 수 있다. ρ 는 초기의 곡률 반경이고, ρ_E 는 탄성 회복 곡률 반경, ρ_R 은 최종 곡률 반경이다.

$$\frac{1}{\rho_R} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_E} \quad (4)$$

3. 유한요소해석

튜브의 굽힘 공정에 대한 해석 형상은 Fig. 2와 같다. 굽힘 다이는 소재와 접하는 면을 모델링 하였고, 회전 다이는 굽힘 각 조절을 용이하게 하기 위해 원형으로 모델링 하였다. 굽힘 및 회전 다이는 모두 공구강이므로, 튜브의 소재인 Inconel 625 보다 매우 강성이 커서 변형이 발생하지 않는다고 가정하였다. 튜브는 비선형해석이 가능한 변형체 (deformable body)로 모델링 하였으며, 8개의 절점을 갖는 솔리드(solid) 요소로 하였다. 튜브의 외경은 1.5mm이고 두께는 0.12mm이다.

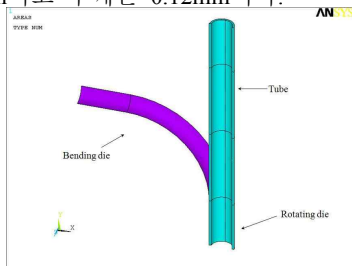


Fig. 2 F.E model

굽힘 다이와 튜브 사이에는 접촉 조건을 주어 기계적 거동이 이루어지도록 하였다. 가공시 발생하는 열 변형 및 열 전달은 무시하였고, 소재와 다이 사이에 발생하는 마찰은 존재하지 않는다고 가정하였다.

굽힘 해석은 회전 다이를 원하는 각도만큼 강저 회전 범위 시킨 후, 다이를 해제시켜 튜브에 스프링백이 발생하도록 하였다.

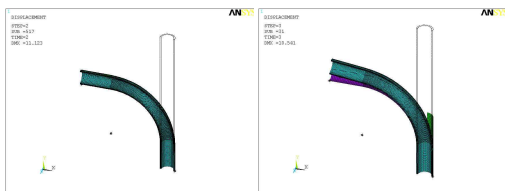


Fig. 3 Bending and recovery processes

굽힘 모멘트가 작용된 직후와 스프링백이 발생한 후의 응력은 Fig. 4와 같다.

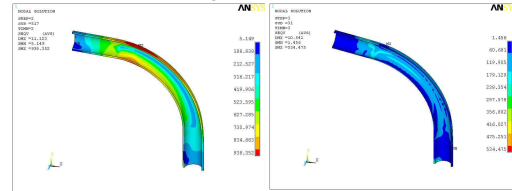


Fig. 4 von-Mises stress before and after spring back

4. 최종 곡률 반경 비교

튜브의 순수 굽힘에 대한 이론식을 유도했으며, 이 식으로 최종 곡률 반경을 구할 수 있다. 또한 유한요소 해석은 회전 다이가 제거 된 후 튜브의 최종 형상을 읽었고 절점들의 좌표를 읽어 곡률 반경을 측정하였다.

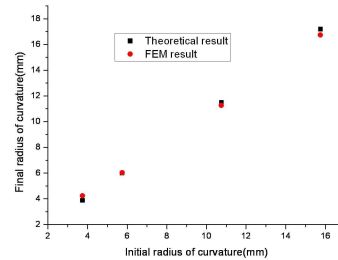


Fig. 5 Comparison between theoretical and FEM result with initial radius of curvature

결과를 보면, 굽힘 이론과 유한요소 해석이 8% 이하의 오차로 거의 일치함을 확인할 수 있었고 곡률 반경에 대한 굽힘 이론의 타당성을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 손쉬운 계산을 통해 굽힘 공정에서 원하는 곡률 반경에 맞게 공정 설계를 할 수 있으므로 실용성 또한 확인할 수 있었다.

후기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사의 말씀을 드립니다.
(No.K20702001648-10E0100-07010)

참고문헌

- H.A. Al-Qureshi, "Elastic-plastic Analysis of Tube Bending," International Journal of Machine Tools&Manufacture, 39, 87-104, 1999
- 김동원, 소성학, 청문각, 2009