

유한요소법을 이용한 이음매 없는 관 인발 공정 스케줄 설계 Design of Seamless Tube Drawing Process Schedule using Finite Element Method

*이용신¹, 윤상현², 윤덕재³, 김응주³

*Yong-Shin Lee(yslee@kookmin.ac.kr)¹, Sang-Hun Yoon¹, Duk-Jae. Yoon³, E-Z Kim³

¹ 국민대학교 기계자동차공학부, ² 국민대학교 기계설계학과, ³ 생산기술연구원

Key words : Seamless Tube, Drawing Process Schedule, Finite Element Method

1. 서론

튜브 또는 파이프 등의 관류는 모든 산업체에서 부품으로 사용되고 있어, 관류의 소재 및 생산공정 기술의 개발은 연구자들의 관심을 끌고 있다. 용도에 따라 직경이 수 미터에서 수 나노미터에 이르기 까지 다양한 크기의 관이 사용되고 있다[1]. 일례로 자동차에 사용되는 관은 다양한 용도로 쓰이는 데, 엔진에 연결되는 소구경 관은 고압을 견뎌야 하고, 배기가스 용의 비교적 직경이 큰 관은 큰 압력을 지지하기보다는 고온과 화공부식에 대한 저항이 요구되며, 연료 탱크 주입용 관은 비교적 사양이 완화된다. 이 외에도 차체의 경량화와 연계하여 차체 구조재로 사용되는 관도 있다[2]. 이들 중에서 고압용 소구경 관은 고가의 부품으로 산업체로부터 새로운 소재 개발 및 관련된 인발 공정 기술 개발에 관한 연구가 요구되고 있다.

관의 제작공정은 크게 두 가지로 나누어진다. 이음매 없는 관(Seamless tube)과 용접된 관의 두 종류가 된다. 이음매 없는 관은 원주 방향의 균질한 형상 및 재질로 내압과 비틀림에 대한 저항이 크다는 장점이 있다. 이음매 없는 관의 제작과정은 금속 빌렛을 가열하여 피어싱을 하거나 원심주조 등의 방법을 이용하여 관의 형태를 갖추는 공정으로부터 시작된다. 일단 관의 형태를 갖춘 소재는 이어지는 압출, 압연, 인발, 및 열처리 등의 다양한 후속공정을 거쳐 원하는 크기와 형상의 제품을 만들게 된다. 후속 공정에서 사용되는 맨드릴의 재질, 크기, 형상 및 위치는 균일하게 우수한 제품을 생산하는 데에 커다란 영향을 미친다[3]. 이에 맨드릴 없이 균일한 두께의 관을 인발하는 기술은 관의 생산기술을 한 차원 높이는 것으로 간주된다. 본 연구에서는 디젤엔진용 연료공급 소구경 관의 연속 인발 공정을 개발함에 있어, 맨드릴이 없는 공정도 포함하며 유한요소법을 이용한다.

2. 이음매 없는 관 연속 인발 공정 개발

본 연구에서 사용하는 금속은 400MPa 이상의 인장강도를 갖는 Fe-C-Si-Mn 계 합금이다. 초기 관의 사양과 최종 인발 후의 관의 사양을 포함하여 처음에 시도한 인발 공정 스케줄은 Table 1 에 주어진다.

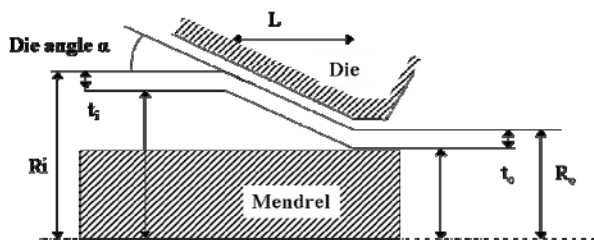


Fig. 1 Schematic of tube drawing with mandrel.

Table 1 Tube drawing process schedule

공정	외경 (mm)	내경 (mm)	두께 (mm)	단면감소율 (%)	총단면감소율 (%)
인발모관	21.7	16.5	2.6	-	-
소둔 처리	920°C				
1 차인발	18.0	13.5	2.15	28.0	28.0
2 차인발	14.0	10.0	2.0	31.0	50.0
소둔 처리	920°C				
3 차인발	11.0	7.2	1.9	30.0	65.0
4 차인발	9.0	5.0	2.0	16.0	71.0
소둔 처리	690°C				
최종인발	6.35	3.0	1.67	45.0	84.3

Fig. 1 에는 맨드릴이 있는 경우의 관 인발의 개략도를 보여주고 있다. 일반적으로 맨드릴 재질, 반경과 위치, 패스당 단면 감소율 외에도 금형의 접선각, 곡률반경 등이 관인발에서 주요 공정인자라 알려진다.

1 차, 2 차, 및 3 차 인발에서는 맨드릴을 사용하였고, 4 차와 5 차 인발에서는 맨드릴이 없는 공인발을 수행하였다. 각 단계별로 인발된 관의 외경과 내경을 실험에서 측정하였으나 3 차 인발 후의 실험에서 측정된 값은 분실되었다. 유한요소해석은 상용프로그램인 Deform 2D 를 이용하여 축대칭 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 소재의 물성은 물성실험을 통하여 얻었다. 즉, 소둔 처리 후의 인발 공정의 해석은 소둔된 소재의 물성실험을 통하여 얻은 것이다. 금형 및 맨드릴의 재료는 탄성계수가 210GPa 인 AISI-D2 로 탄성해석을 하였고, 반면에 상대적으로 변형이 큰 관의 소재는 강소성을 하는 것으로 가정하였다. 관은 3000 개의 요소로, 맨드릴은 1000 개의 요소로 모델링하였다.

3. 유한요소해석 결과분석 및 공정개선

Table 2 에서는 주어진 사양에 따라 실험한 결과와 유한요소해석 결과를 비교하여 보여준다. 처음 1,2,3 차의 인발 공정에 대하여는 실험결과와 유한요소해석결과가 공정의 요구사양과 매우 비슷하였다. Fig. 2 에서는 모든 인발공정에서 금형을 지나는 전후의 지역에서의 유효응력의 분포를 보여주고 있다. 최대 유효응력은 1, 2 3 차의 인발에서는 금형을 벗어날 때 맨드릴과 접촉하는 관의 내경 근처에서 발생하고 있으며, 4,5 차의 공인발 경우에도 비슷한 곳에서 최대 유효응력이 발생하는 것으로 예측되고 있다. 관의 국부적 파괴나 결함의 발생여부를 예측하기 위하여는 결함 성장해석등과의 연계가 요구되나, 유효응력의 크기만을 보아서는 국부적인 파괴는 발생치 않을 것으로 생각되고 실험에서도 가시적인 크랙은 나타나지 않았다.

Table 2 Comparison of dimensions by experiments and by FEM

항목	1 차인발 (맨드렐)	2 차인발 (맨드렐)	3 차인발 (맨드렐)	4 차인발 (공인발)	5 차인발 (공인발)
인발치수	Φ18.0×φ 13.5	Φ14.0×φ 10.0	Φ11.0×φ 7.2	Φ9.0×φ5.0	Φ6.35×φ 3.0
실험결과	Φ17.97× φ13.44	Φ14.07×φ 9.98	×	Φ9.1×φ 4.95	Φ6.24×φ 2.78
해석결과	Φ18.0×φ 13.52	Φ13.98×φ 9.97	Φ10.89×φ 7.18	Φ8.99×φ 5.10	Φ6.36×φ 2.87

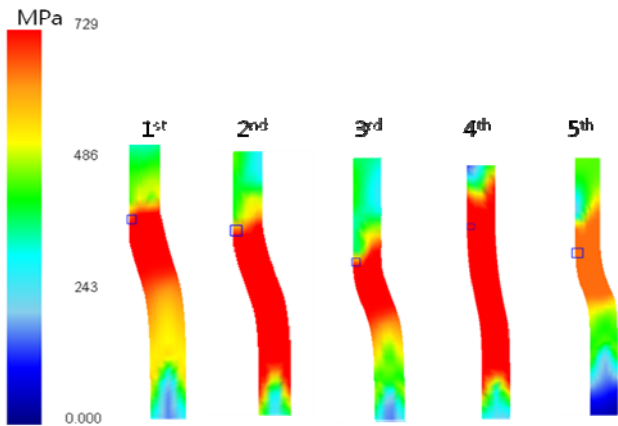


Fig. 2 Distribution of Effective stress

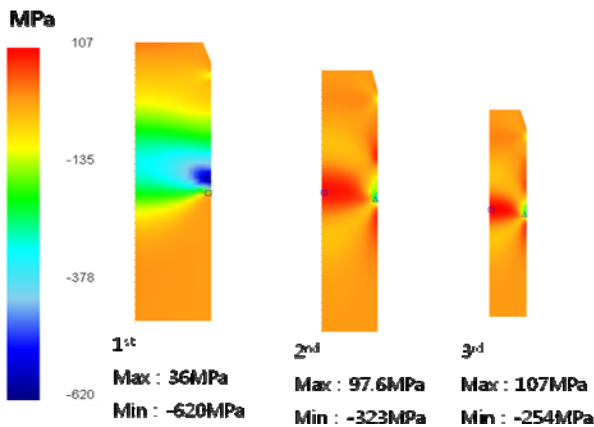


Fig. 3 Distribution of the stress σ_z in the mandrel

맨드렐은 취성재료 최대주응력의 분포가 필요하나, 인발공정에 사용되는 맨드렐이 하중받는 형태로 보아 축방향 응력 분포로도 파괴여부와 최대주응력 분포를 예측하는 것은 가능하다. Fig. 3 에 맨드렐에 작용하는 축방향 응력 분포를 보여준다. 맨드렐의 최대응력이 맨드렐 재료의 인장강도의 30% 정도로 안전할 것으로 예측된다. 그러나 초기 공정 스케줄은 목표하는 제품의 치수를 만족시키지 못하는 것이 실험과 유한요소해석에서 나타났다. 주요 설계변수를 선정하고 유한요소해석을 통하여 주요설계변수의 영향을 조사 분석한 것을 바탕으로 하여 공정스케줄을 개선하였다. 주요설계변수의 영향에 관한 조사는 별도의 논문으로 발표

될 예정이다.

초기 공정스케줄의 해석결과를 바탕으로 하여 두 가지의 공정스케줄 개선 안이 가능하다. 첫 번째는 5 차 인발공정 조건을 그대로 사용할 시에는 4 차 인발 후의 관의 외경과 내경이 $\phi 9.0 \times \phi 5.2$ 이 되도록 4 차 인발까지의 일부 공정 또는 여러 공정조건을 변경하여야 한다. 조금 쉬운 방법으로는 5 차 인발공정에서 맨드렐을 사용하여 최종 관의 치수를 만족시키도록 하는 것이다.

본 연구에서는 직경 3mm 인 맨드렐을 사용하여 5 차 인발하는 경우를 유한요소해석하였으며, 이 경우의 유효응력, 유효변형률과 원주방향 응력분포를 Fig. 4 에 보여준다. 결합해석 등의 보완이 없으나 관의 파괴는 없을 것으로 예측된다. 또한 맨드렐도 안전한 것으로 예측되었다.

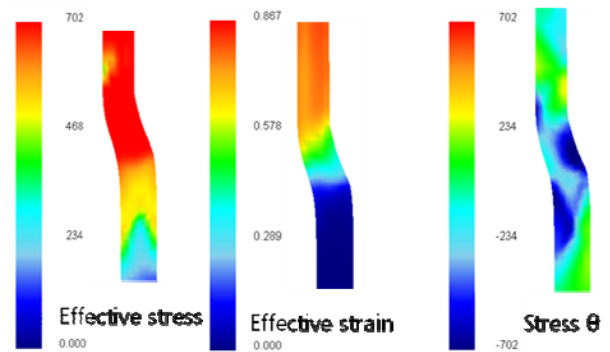


Fig. 4 Distribution of Effective stress, strain and σ_θ in the seamless tube for the renewed 5th drawing process.

4. 결론

이음매 없는 관의 연속 인발공정을 개발하기 위하여 실험과 유한요소해석을 병행하였으며, 초기 공정스케줄에 대한 유한요소해석의 결과를 바탕으로 하여 공정스케줄을 개선하는 연구를 수행하였다. 초기공정에서 맨드렐을 사용하는 1~3 차 인발은 실험과 유한요소해석에서 설계사양을 만족시키는 것으로 나타났다. 맨드렐의 유한요소해석은 최대응력이 맨드렐 소재의 인장강도보다 현저히 낮아 안전할 것으로 예측하였다. 유한요소해석 결과의 분석에서 두 가지의 공정개선이 가능할 것으로 제시하였다. 본 연구에서는 비교적 개선이 쉬운 5 차 인발을 맨드렐을 사용하는 경우를 유한요소해석을 수행하였으며, 소재와 맨드렐의 응력 분포로부터 제시한 공정 개선의 유효함을 확인하였다.

참고문헌

1. Hashmi, M.S.J., "Aspects of tube and pipe manufacturing process: Meter to nanometer diameter.", J. Mater. Process. Technol. **179**, 5-10, 2006.
2. Rfpodas Agudo F. J., "Manufacturing tubes for hydroforming applications", Tube Pipe Technol., <http://www.read-tpt.com/arcelor.htm>
3. 김현수, 배성우, 김용조, "관인발용 맨드렐 형상설계를 위한 유한요소해석", 한국정밀학회 2000 년도 춘계학술대회는문집, 120-123.
4. Shih, C-K., R-Q Hsu, C. Hung, "A study on seamless tube in the planetary rolling process", J. Mater. Process. Technol. **121**, 273-284, 2002.
5. Mamalis, A.G., L Votlander, A. Markopoulos, Precision Engineering, **28**, 16-30, 2004.