

일체형 스티어링 휠 튜브의 인발공정 설계

문형준¹, 이상곤¹, 김병민[#], 이정환², 이영선², 이준우³

Process design of Monobloc Tube for Steering Input Shaft in cold drawing

H.J. Moon, S.G. Lee, B. M. Kim, J.H. Lee and Y.S. Lee

(Received Month Day, Year)

Abstract

MTS(Monobloc Tube Shaft) has been used for the reduction in weight of shaft and increase in supply of power in the auto industry nowadays. Cold drawing process having high productivity and reduction in the cost has been regarded as the effective technology that is able to substitute for swaging process as forming MTS with constant outer diameter or hollow shaft without surface defects. The objective of this study is not only to find out the optimal process conditions understanding the effect of process parameters on carrying out cold drawing process of SIS(Steering Input Shaft) but also to control the defects resulted from inappropriate process conditions. Therefore, the proper drawing conditions are presented using FE-Analysis and experiment in the paper.

Key Words : Cold Tube Drawing, Deformation Energy, Ductile Fracture, Defects, FE-Analysis, Mandrel

1. 서 론

오늘날의 자동차 산업은 최첨단을 향해 달리고 있다. 그러나 자동차 업계에서는 오랜 기술 개발에도 불구하고 아직까지 자동차 부품에는 많은 난제가 현존하고 있다.

중공축(Hollow Shaft)의 도입을 통해 소음 및 중량감소, 그리고 강성 증대로 인해 에너지 절약은 물론 원가 절감과 기계적 강도를 확보하는 방향으로 발전해 왔다. 중실축의 초기 모델은 마찰 용접에 의한 제조 방법이 주류를 이루어 왔으나 연결부 및 단차부에 소재의 불연속 지점이 발생하고 용접부로 인해 충분한 비틀림 강성을 확보하지 못하는 문제점이 발생될 가능성이 높았다. 따

라서, 축(Shaft)의 중량 감소와 동력 전달 토크의 증가를 위해 MTS(Monobloc Tube Shaft) 도입이 증가되었다. 냉간 튜브 인발 공정은 표면 결함이 없고, 단차가 있는 중공축(Hollow Shaft) 또는 일정한 외경을 가진 MTS 성형 시 스웨이징(Swaging)을 대체 할 수 있는 효율적인 성형 기술로서 생산성이 높아 저 원가 실현에 적합한 공정이다.

본 연구의 목적은 SIS(Steering Input Shaft)의 냉간 튜브 인발공정 시 공정변수들의 영향을 파악하여 최적의 공정 조건을 찾고, 적절하지 못한 공정 조건으로 발생하는 인발 결함을 억제하는 것이다. 또한, 최적의 인발 공정을 설계함으로써 결함이 없고 정밀한 SIS 튜브의 인발 및 생산성 향상에 기여하는데 있다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과

2. 한국기계연구원

3. 태림산업주식회사

교신저자: 부산대학교 기계공학부 bmkim@pusan.ac.kr

2. 유한요소해석 모델 및 조건

2.1 재료의 기계적 성질

SIS 튜브 인발 소재는 SM45C 이며 소재에 대해 압축시험을 수행하여 다음과 같은 유동응력식(1)을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 960 \bar{\epsilon}^{-0.19} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

링 압축시험을 통한 확보한 MoS2 윤활제의 전단마찰상수(m) 값은 0.1 이었다.

2.2 연성파괴값 결정

소재의 연성파괴값(Critical damage value)을 얻기 위해, 세장비를 달리하여 3 가지 경우에 대해서 압축시험을 수행하였다. 압축시험을 통한 실험결과와 연성파괴값을 Fig. 1 과 Table. 1 에 나타내었다. 가시적으로 관찰된 시점을 기준으로, 강소성 유한요소법을 수행하여 연성파괴값을 정하였다. 크랙이 가시적으로 관찰된 시점을 기준으로 하였으므로 그전에 이미 미소 크랙이 발생되었을 것을 고려하여, 연성파괴값을 0.7로 정하였다.

3. 결함의 발생 및 원인 파악

3.1 튜브 인발공정 시 결함의 발생

SIS(Steering Input Shaft) 튜브 인발공정은 3공정으로 구성되어 있다. 1차 인발을 하기 위한 예비 공정으로써 소재를 맨드릴에 고정 시켜 치수 정밀도와 인발 시 편심을 방지하기 위한 축관을 수행하고, 맨드릴을 이용한 1차, 2차 인발공정을 수행하여 제품을 성형한다. SIS 튜브의 성형공정과 실제 현장에서 튜브 성형수행 시 결함이 발생했던 인발공정 조건을 Fig. 2와 Table. 2에 나타내었다. Fig 3에 성형 수행 시 발생한 결함을 나타내었다. 1차 인발 공정 시 맨드릴 끝단부와 접촉하는 부분에서 소재의 과도한 국부 연신에 의해 파단이 발생하는 것을 알 수 있었다.

3.2 유한요소해석에 의한 결함 예측

SIS(Steering Input Shaft) 튜브 성형 시 나타난 결함의 원인을 규명하기 위해서 기존 공정과 동일한 조건에 대한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 4는 Kobayashi⁽⁵⁾ 등이 제안한 연성파괴 분포결과이다.

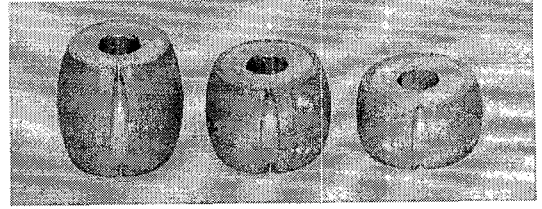


Fig. 1 Experimental results according to H/D ratio at dry condition through compression test

Table. 1 Height and damage when crack occurred according to different H/D ratio

Experimental condition	Height	Max.damage
H/D ratio 1.00	8.78	0.828
H/D ratio 1.25	12.08	0.810
H/D ratio 1.50	15.44	0.725

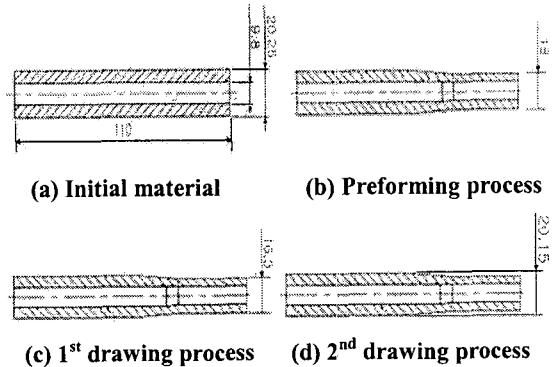


Fig. 2 Process sequences of SIS tube

Table. 2 Process conditions of SIS tube drawing

Drawing Conditions	Values
Length of initial material[mm]	110
Initial outer / inner diameter[mm]	20.25 / 9.8
Diameter of preforming die[mm]	18.05
Diameter of 1 st drawing die[mm]	16.30
Semi die angle of 1 st drawing die[°]	15
1 st drawing length[mm]	35

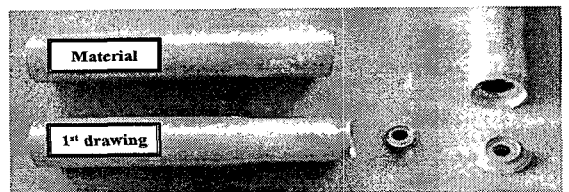


Fig. 3 Defect appeared on product during 1st drawing process

실 공정 시 결함이 발생한 부분에서 최대 연성 파괴 값이 나타남을 알 수 있으며, 그 값은 초기 소재의 임계 연성파괴 값 0.700 을 초과한 0.962 였다. SIS 튜브 인발공정 시 결함은 1 차 인발공정 수행 중 변형에너지가 변형한계를 초과하여 연성 파괴에 의한 결함이 발생하는 것으로 판단된다.

4. 공정변수 영향 평가 및 최적 다이형상 설계

4.1 다이 반각의 영향

Fig. 5 (a)에 실제 현장에서 성형 수행 시 결함이 발생한 1 차 인발공정 다이를 나타내었다.

실제 공정에서 적용되었던 1 차 인발다이 도입부 곡률을(10mm) 고정시키고 다이반각 변화가 연성파괴 값에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다이반각을 변화시켜 성형해석을 수행하였다. 해석 결과 최대 연성파괴 값을 Table. 3 에 나타내었다.

해석 결과로부터 모든 경우에 있어서 연성파괴 값이 임계 연성파괴 수치 0.7을 초과하였다. 따라서, 곡률 10mm에 대해 다이반각 변화만으로는 소재의 파단을 방지할 수 없음을 알 수 있었다.

4.2 다이 도입부 곡률의 영향

결함이 발생한 동일한 조건에서 1 차 인발다이 각도를 15° 로 고정시키고 도입부 곡률을 변화시켜 인발공정 해석을 수행하였다. Table. 4 에 인발다이 도입부 곡률 변화에 대한 최대 연성파괴 값을 나타내었다.

도입부 곡률이 작을수록 연성파괴 값은 작아지나 곡률부의 치수 변화에 의한 연성파괴 값의 감소가 한계를 가지고 있어, 임계 연성파괴 수치 보다 큰 연성파괴 값이 발생하여 연성파괴 값이 집중되는 부분에서 파단 가능성을 확인할 수 있었다. 따라서, 도입부 곡률이 작아질수록 최대 연성파괴 값도 감소하지만 모두 임계 연성파괴 값 0.700 을 초과하였다.

이상의 해석결과로부터 다이 반각 및 도입부 곡률 변화만으로는 소재의 파단 발생을 방지할 수 없음을 알 수 있었다.

4.3 인발다이의 재설계

1 차 인발 시 연성파괴에 의한 결함을 방지하기 위해서는 성형 시 변형에너지 증가로 인한 연성 파괴 값을 감소시킬 수 있는 인발다이의 재설계

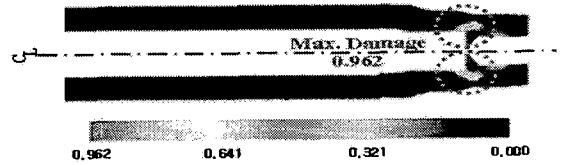
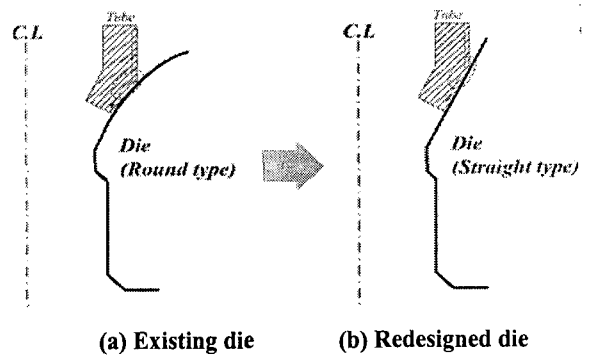


Fig. 4 The distribution of damage obtained from FEM at the real conditions



(a) Existing die (b) Redesigned die
Fig. 5 The geometry of existing and redesigned 1st drawing die

Table. 3 The variation of damage according to semi-cone die angle

Semi-die angle	Radius at die	Max. Damage
10°	10 mm	0.977
15°	10 mm	0.854
17°	10 mm	0.802
18°	10 mm	0.818
20°	10 mm	0.828

Table. 4 The variation of damage according to radius at approaching portion

Semi-die angle	Radius at die	Max. Damage
15°	8 mm	0.871
15°	10 mm	0.854
15°	12 mm	0.925
15°	14 mm	0.956
15°	16 mm	1.044

가 요구된다.

이를 위해 본 연구에서는 Fig. 5(b)와 같이 인발 초기에 소재의 변형량이 상대적으로 적은 직선형 다이를 고려하였다. 직선형 다이에 대하여 기존의 해석조건에서 다이반각을 변화시켜 성형해석을 수행하였다. Table. 5에 다이반각 변화에 따른 최대

연성파괴 값을 나타내었다. 다이반각이 10°일때 가장 낮은 연성파괴 값 0.518을 나타내었다. 따라서 연성 파괴 값이 가장 작은 다이반각 10°인 직선형 다이를 최적의 조건으로 설정하였다. 이 조건에 대해 실험을 수행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 파단이 없는 양호한 제품을 얻을 수 있었다.

Table. 5 Analytical results through redesigned die

Semi-die angle [°]	Max. Damage
8	0.658
10	0.518
11	0.678
12	0.811
14	1.100
16	0.993
17	0.963

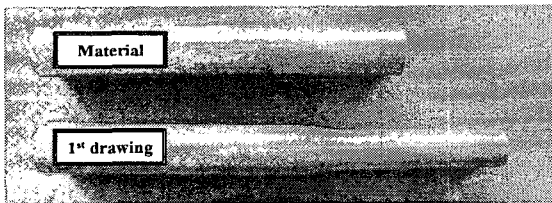


Fig. 6 Experimental results through redesigned die

5. 결과 및 고찰

기존의 다이를 적용한 공정에서는 소재 파단 발생을 방지할 수 없었기 때문에 인발다이 형상을 재설계하였고, 연성파괴의 원인이 SIS 튜브를 성형할 때 인발다이 곡률부에서의 변형에너지의 증가로 판단되었기 때문에 곡률부가 없는 인발다이 형상을 제시하였다. 해석 결과 기존의 인발다이 형상 보다 연성파괴 수치가 낮아지는 것을 알 수 있었으며, 재설계한 인발다이는 기존의 다이에 비해 연성파괴에 의한 결함을 저하시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

6. 결론

본 연구에서는 자동차 부품 요소로 널리 사용되는 SIS(Steering Input Shaft) 튜브 성형 시 발생하는 결함에 대해 유한요소해석을 통해 결함 발생 원인을 규명하였다. 또한 1 차 인발다이의 설계변

수에 대한 결함의 영향을 파악하고 이를 근거로 결함을 방지할 수 있는 인발다이의 형상을 제시하였으며, 제시된 인발다이를 유한요소해석과 실험을 통해 검증하였다. 이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 1 차 인발공정 시 도입부 곡률을 고정시키고 다이반각을 변화시켜 해석한 결과 모든 경우에 있어서 임계 연성파괴 수치를 초과하기 때문에 파단이 발생할 것으로 판단되었다.

(2) 1 차 인발 시 기존 다이의 도입부 곡률을 감소시키면 연성파괴 수치가 감소하지만 임계 연성파괴 수치를 초과하기 때문에 파단이 발생할 것으로 판단되었다.

(3) 연성파괴 원인이 인발다이 곡률부의 변형에너지 증가로 판단되어 도입부 곡률이 없는 직선형 인발다이를 설계하였다. 유한요소해석 결과 연성파괴 수치가 크게 감소되는 것을 알 수 있었다. 또한, 재설계된 직선형 다이를 적용한 결과 양호한 제품을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Dr.-Ing. P. Amborn, Dipl.-Ing. H. Frielingsdorf, Prof. S.K. Ghosh, Dr.-Ing. K. Greulich, 1995, "From Meral Cutting to Metal Forming Modern Side-Shafts for Passenger Cars: Manufacturing Aspects", Journal of Materials Processing Technology, pp. 3~12.
- [2] W.P. Fisher, A.J. Day, 1997, "A study of the factors controlling the tube-sinking process for polymer materials", Journal of Materials Processing Technology, pp. 156~162
- [3] Z.T. Wang, G.F. Luan, G.R. Bai, 1999, "Study of the deformation velocity field and drawing force during the dieless drawing of tube," Journal of Materials Processing Technology, pp. 73~77.
- [4] Yoichi Imamura, Munekatsu Furugen, Yoshinobu Ando and Hajimu Choba, 1999, "Development of a New Tube-Drawing Process for Achieving Ultrasooth Inner Surface", Journal of the JSTP, vol. 38, no. 472, pp. 477~481.
- [5] S. Kobayashi, 1970, "Deformation Characteristics and Ductile Fracture of 1040Steel in Simple Upsetting of Solid Cylinders and Rings", Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, vol. 92, pp. 391~399.