

# 자동차용 SIS 인발 공정에서의 맨드렐 형상 설계

김상우<sup>1</sup>, 이영선<sup>1</sup>, 권용남<sup>1</sup>, 이준우<sup>2</sup>, 이정환<sup>#</sup>

## Design of mandrel in tube drawing process for automotive steering input shaft

S.W. Kim, Y.S. Lee, Y.N. Kwon, J.W. Lee, J.H. Lee

### Abstract

Monobloc technology provides a homogeneous material along the complete tubular shaft without any discontinuity between the interconnecting tube and the stems as is found when the tubes and stems have been joined by welding. Cold tube drawing is a technique that can be applied for manufacturing of those monobloc tubular shafts with several advantages such as high productivity and cost reduction. The present study is concerned with the investigation about the process parameters related with tool configuration. In order to obtain successfully formed SIS(Steering Input Shaft) without any defects, advanced design of mandrel is presented and analyzed by the FEM and ductile fracture criterion in this paper.

**Key Words :** Tube Drawing, Mandrel, FEM, Steering Input Shaft, Ductile Fracture

### 1. 서 론

튜브소재를 이용한 제품은 중량감소, 강성증가 및 원가절감 등의 이점으로 인해 자동차, 항공기, 고속전철 등 수송기기류 뿐만 아니라 각종 가전 기기나 의료기기 부품 등 다양한 분야에 널리 적용되어 왔다. 그 중에서 자동차용 샤프트(Shaft) 부품은 차체의 경량화와 연비, 소음, 진동과 기계적 강도와 직접적인 연관성을 지니고 있어 이에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다.[1~2]

Side shaft, Steering input shaft 와 같이 단차가 있는 샤프트 부품의 제조방법으로는 중공형 봉재와 튜브를 마찰용접하는 방법을 사용하여왔으나 용접부로 인한 충분한 비틀림 강성이 확보되지 못하는 문제점이 발생됨에 따라 점차 연결부를 갖지 않는 MTS(Monobloc tube shaft)로의 전환이 요구되었다. MTS 를 성형하는 방법으로는 정밀도가

높은 스웨이징(Swaging) 공정이 널리 적용되고 있으나, 고가의 제조비용이 요구됨에 따라 자동차 부품의 가격인하 경쟁으로 인해 저 비용의 새로운 공정개발이 요구되고 있다.

MTS 의 제조에 있어 생산성 향상과 함께 원가 저감을 위한 냉간 인발 공정은 표면결함이 없고 단차부를 성형하기가 용이하여 기존의 스웨이징 공정을 대체할 수 있는 성형공정으로 개발되고 있는 추세이다. 그러나 스웨이징 공정에 비해 치수정밀도가 낮아 초정밀 인발성형의 국내기술개발이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 자동차용 SIS부품을 제조하기 위한 인발공정 설계에 있어서의 연성파괴이론을 이용한 유한요소해석을 수행함으로써 맨드렐의 형상에 따른 영향과 함께 과도없이 성공적인 인발 성형을 위한 최적의 맨드렐 형상을 제시 하고자 하였다.

1. 한국기계연구원 소재성형연구센터

2. 태림산업(주) 기술연구소

# 교신저자: 한국기계연구원, E-mail:ljh1239@kmail.kimm.re.kr

## 2. 기초물성 실험

### 2.1 유동응력 측정

SIS 제조를 위한 인발용 튜브소재로 SRM(Stretch Reducing Mill) 공정을 통해 제조된 외경 20.5mm, 내경 10mm 의 S45C 가 사용되었으며, 두께가 5.25mm 로 인장시편을 채취하기엔 부적합하므로 링 압축실험을 수행하여 Fig. 1 과 같이 유동응력을 측정하였다.[3]

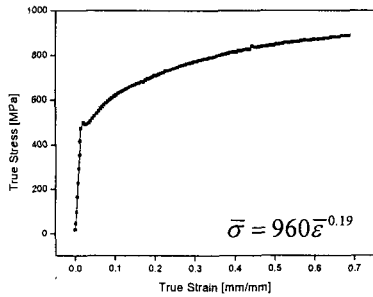


Fig. 1 Flow stress curve for S45C SRM tube

### 2.2 연성파괴기준의 결정

본 연구에서는 연성파괴이론과 유한요소 성형 해석을 통하여 인발용 튜브소재의 성형한계를 예측함으로써 최적의 인발공정 설계의 가이드라인을 제시하고자 하였다. 연성파괴이론으로는 식(1)의 Cockcroft and Latham[4]의 이론이 사용되었으며, 상수  $C_1$  은 파단이 발생하는 한계값을 의미한다. 임계 연성파괴치(Critical damage value)를 결정하기 위해 높이와 외경의 비가 상이한 세 가지 종류의 노치가 새겨진 시편을 제작하여 압축실험을 수행하였으며 그 결과 Fig. 2 와 같이 노치 중심에서 파단이 발생하였다. 파단이 발생할 때의 시편의 높이를 측정하고 동일한 조건하에서 유한요소해석을 수행하여 얻어진 상수  $C_1$  을 임계 연성파괴치로 결정하였다. Table 1 에 정리한 결과와 같이 H/D 에 따라 임계 연성파괴치는 0.725~0.828 인 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 크랙의 진전을 고려하여 0.70 을 임계 연성파괴치로 결정하였다.

$$\int_0^{\epsilon_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\epsilon = C_1 \quad (1)$$

Where,  $\epsilon_f$ : fracture strain,  $\sigma_1$ : maximum tensile stress  
 $\bar{\sigma}$ : effective stress

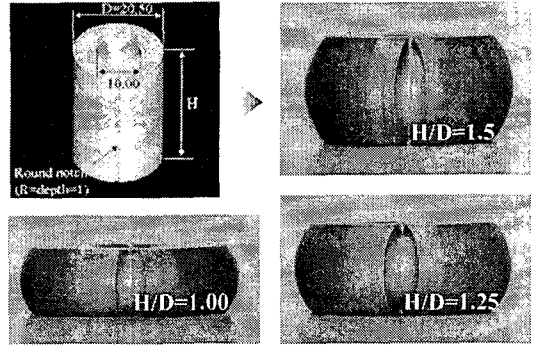


Fig. 2. Configurations of undeformed and fractured specimen for various H/D ratios

Table 1 Determination of critical damage value

H/D	Critical Damage Value	Fracture Height
1.50	0.725	15.44
1.25	0.810	12.08
1.00	0.828	8.78

## 3. 인발공정설계

### 3.1 인발공정설계

자동차용 SIS 부품의 경우  $\Phi 16.30$  과  $\Phi 20.12$  의 연결부를 포함한다. 따라서 초기 튜브소재는  $\Phi 20.50$  로 선정하였으며,  $\Phi 20.5 \rightarrow \Phi 16.30$  로의 단공정에 의한 인발성형은 단면감소율 36.78%로 인발공정에서의 단면감소율은 지나치게 과도하여 맨드릴의 좌굴을 유발할 수 있으므로 Fig. 3 과 같이  $\Phi 18.00$  공정을 추가하여  $\Phi 20.50 \rightarrow \Phi 18.00 \rightarrow \Phi 16.30$  로 단면감소율이 각각 22.84%, 18.06%가 되도록 3 단계 인발공정을 설계하였다.

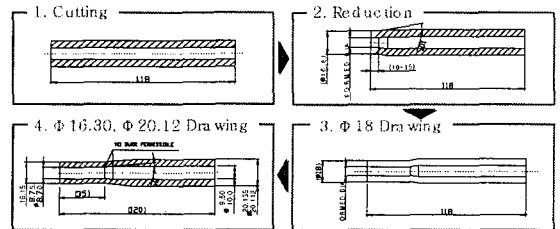


Fig. 3 Design of drawing process for SIS manufacturing

### 3.2 맨드릴 형상설계

SIS 부품과 같이 직경에 비해 두께가 두꺼운 튜

브소재를 인발하기 위하여 Fig. 3(2)에서와 같이 튜브 끝단을 축관하여 맨드렐의 이동에 의한 인발력이 작용할 수 있도록 하는 축관 공정을 포함하게 되는데 단면감소율 또는 급형의 입구각이 지나치게 클 경우 Fig. 4 와 같이 인발력의 증가와 함께 소재의 끝단에 파단이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 파단없이 인발력이 전달될 수 있도록 하기 위해 두 가지 형상의 맨드렐을 설계하였다. 우선 일반적으로 사용하고 있는 직각형 Mandrel A 와 축관 공정 후의 소재의 변형에 의한 단면 곡률을 유한요소해석을 통해 도출한 후 곡률에 맞게 맨드렐의 끝단부에 단차를 주어 하중을 세 부분으로 분산시킴으로써 소재의 파단을 지연하기 위한 Mandrel B 를 설계하여 제작하였다. Fig. 5 는 Mandrel B 의 설계방법과 실제 제작된 두 가지 맨드렐의 형상을 보여주고 있다.

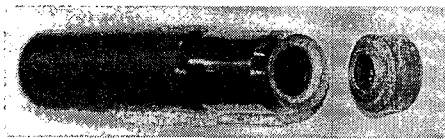


Fig. 4. Fracture occurred in the edge of tube

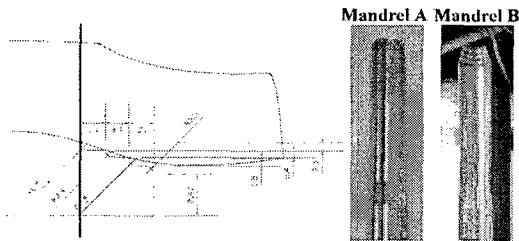


Fig. 5. Design of mandrel geometry

### 3.2 유한요소 성형해석

Figure 6 과 같이 맨드렐과 급형은 강체로, 소재는 강소성체로 가정하여, 상용 유한요소 코드인 Deform 2-D 를 사용하여 축관을 포함한  $\Phi 20.50 \rightarrow \Phi 18.00 \rightarrow \Phi 16.30$  의 다단 인발공정 해석을 수행하였다. 계산과정 중에 요소에 발생하는 식(1)의 적분값이 앞서 구한 임계 연성파괴치 0.7 을 초과하면 해당요소를 제거하고, 격자 재구성을 수행하도록 하여 끝단부에서의 파단발생을 가시화 할 수 있도록 하였다.

축관길이  $L=10\text{mm}$  에 대한 인발 공정의 성형해석결과 Fig. 7 에서와 같이 두 가지 형상의 맨드렐 모두  $\Phi 18.00$  및  $\Phi 16.30$  인발이 성공적으로 수행되

는 것으로 나타났다.  $\Phi 16.30$  공정의 경우 맨드렐의 코너부위에서 적분값이 0.7 이상으로 크랙의 발생을 예측하고 있으나 인발 후 기계가공에 의해 절단될 부분을 감안할 때 인발력을 전달하여 성형을 완료하기에는 충분할 것으로 판단된다.

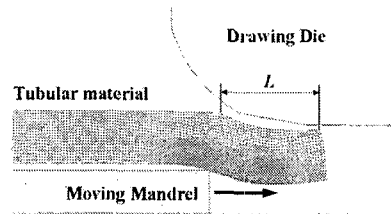


Fig. 6. FE model for drawing process

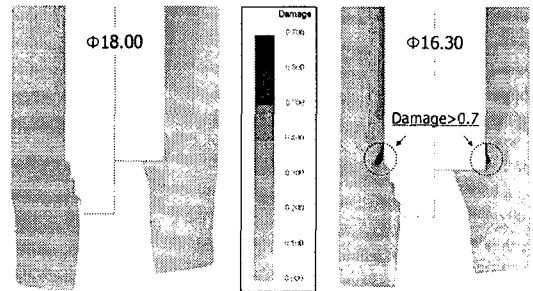


Fig. 7. Results of FE analysis for drawing processes

유한요소 해석을 통하여  $L=10\text{mm}$  에 대한 성형이 성공적으로 수행되는 것으로 나타났으나 축관 길이가 길어질수록 재료회수율이 저하되므로 각각의 맨드렐 형상에서의 인발이 가능하기 위한 최소 축관길이를 결정하고자 하였다. 축관 길이를 달리하여 여러 가지 경우에 대해 유한요소해석을 반복 수행한 결과 인발이 가능한 최소 축관길이는 Mandrel A 의 경우  $L=10\text{mm}$ , Mandrel B 의 경우  $L=6\text{mm}$  인 것으로 나타났다.

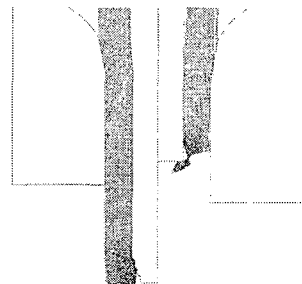


Fig. 8 The results of FE analysis in the case of  $L=6\text{mm}$  in reduction process

따라서, Mandrel B 와 같이 축관공정 후의 튜브의 끝단부의 곡률에 맞게 단차를 주어 설계하는 것이 하중을 분산시킴으로써 소재의 파단없이 인발력을 효과적으로 전달할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 인발 공정 실험

상기와 같은 설계조건에 따라 L=10mm 인 경우에 대한 인발공정 모사실험을 수행한 결과 두 가지 경우 Fig. 9 과 같이 전 공정 모두 성공적으로 파단없이 인발이 수행되었으며 Fig. 10 에서와 같이 최종 성형제품의 단면을 살펴본 결과 Fig. 7 의 유한요소해석으로부터 예측한 바와 같이 맨드렐의 코너부에 약간의 크랙이 발생하였으나 인발력을 전달하는 데는 무리가 없는 것으로 나타났다.

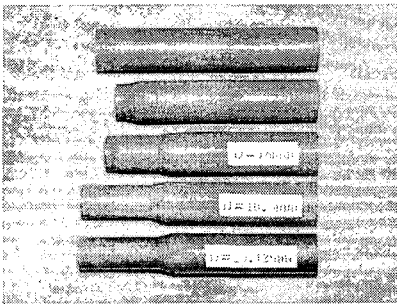


Fig. 9. Drawn tubes at each forming stage



Fig. 10. Cross section of final drawn tube

#### 4. 결론

본 연구에서는 자동차용 SIS(Steering Input Shaft)의 인발공정 설계에 있어 연성과괴이론과 유한요소성형해석을 이용하여 맨드렐의 형상에 따른 영향을 분석함으로써 소재의 파단없이 인발력을 효과적으로 전달할 수 있는 맨드렐 형상 설계를 제시하였으며 실험으로 검증하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 지역산업기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Ing. P. Amborn, Ing. H. Frielingsdorf, S. K. Ghosh and Ing K. Greulich, 1995, From metal cutting to metal forming modern side-shafts for passenger cars: manufacturing aspects, J. Mater. Process. Technol. Vol. 48, pp. 3~12
- [2] U. Amborn, S. K. Ghosh and I. K. Leadbetter, 1997, Modern side-shafts for passenger cars: Manufacturing processes II -Monobloc tube shafts , J. Mater. Process. Technol. Vol. 63, pp. 225~232
- [3] K. P. Rao and K. Sivaram, 1993, A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves, J. Mater. Process. Technol. Vol. 37, pp. 295~318
- [4] 최영민, 김낙수, 1994, 링 압축실험에 의한 유동응력 및 마찰인자의 결정(II), 한국소성가공학회지, 제3권, 제2호, pp. 215~228.
- [5] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and the workability of metals, J. Inst. Met. Vol. 96, pp. 33~39.