

일체형 스티어링 휠 튜브의 인발에 관한 연구

이상곤¹·문형준¹·김병민[#]·이정환²·이영선²

Process Design of Monobloc Tube for Steering Input Shaft in Cold Drawing

S. K. Lee, H. J. Moon, B. M. Kim, J. H. Lee, Y. S. Lee

(Received September 21, 2005)

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. 새로운 신소재 개발에 대한 연구가 매우 활발히 진행 될 뿐 아니라 경량화에 부응하기 위해 기존의 자동차 부품에도 절실히 많은 연구가 필요하게 되었다.

연비, 소음, 진동과 기계적 강도에 영향을 미치는 자동차 부품에 대해서는 경량화와 고급 사양의 제품을 요구하고 있는 실정이다. 기존의 중실축(Solid Shaft) 부품의 경우 NVH(Noise, Vibration, Harshness)를 어느 정도 만족시켰으나 차량의 중량 증가로 인해 연비 개선에 결정적인 악 영향을 미

치게 되었다. 중공축(Hollow Shaft)의 도입을 통해 소음 및 중량 감소, 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. 따라서, 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 지

1. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
2. 한국기계연구원 재료기술연구소 공정연구부
교신저자 : 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

원가 실현에 적합한 공정이다[1].

본 연구에서는 FEM 을 이용하여 SIS(Steering Input Shaft)의 냉간 튜브 인발공정 시 공정변수들의 영향[2~7]을 파악하여 최적의 공정 조건을 찾고, 적절하지 못한 공정 조건으로 발생하는 인발 결함을 억제하는 것이다[8]. 또한, 결함을 방지할 수 있는 인발다이의 형상을 제시하고, 제시된 인발다이를 유한요소해석과 실험을 통해 검증하였다.

2. 유한요소해석 모델 및 조건

2.1 재료의 기계적 성질

SIS 튜브 인발 소재는 680°C 에서 약 20 분간 풀림처리를 한 SM45C 이고, 해석은 강소성 유한요소법을 이용하였다. 압축시험을 통한 소재의 유동응력식은 아래 식(1)과 같으며, Fig. 1 에 응력-변형률 선도를 나타내었다.

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

2.2 윤활제의 마찰상수 측정

마찰 보정 곡선(Calibration curve)을 얻기 위해 강소성 유한요소해석을 실시하였다. 보정 곡선은 응력-변형률 식과 강소성 유한 요소 해석 코드인 DEFORM-2D를 사용하여 작성하였다. 유한요소 해석을 실시하는 동안 전단 마찰 상수 값은 일정하다고 가정하였다.

무윤활 조건(Non-lubrication condition)과 MoS₂를 도포한 조건에서의 해석 결과로부터 각각의 전단 마찰 상수 값에 대해 높이 감소율에 따른 내경 감소율을 측정하여 마찰 보정 곡선을 작성하였다. 최소값을 가진 MoS₂ 윤활제는 전단 마찰 상수 값 0.10의 결과를 보였으며, Fig. 2에 보정곡선을 나타내었다.

2.3 연성파괴값 결정

소재의 연성파괴값(Critical damage value)을 얻기 위해, 세장비를 달리하여 3 가지 경우에 대해서 압축시험을 수행하였다. 압축시험 결과와 연성파괴 값을 Fig. 3 과 Table 1 에 나타내었다. 가지적으로 크랙이 관찰된 시점을 기준으로, 강소성 유한요소법을 수행하여 연성파괴값을 정하였다. 연성파괴 값은 미소 크랙(Micro crack)의 발생을 고려

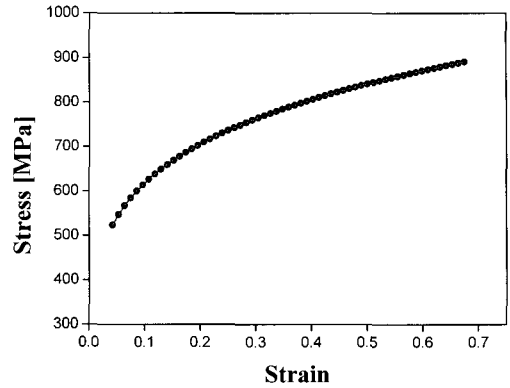


Fig. 1 Stress-Strain curve obtained from compression test

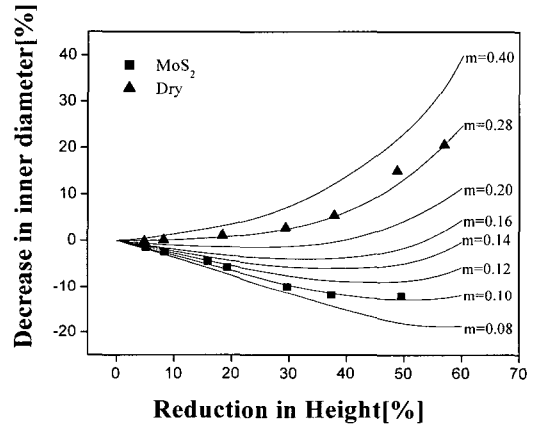


Fig. 2 Comparison between theoretical calibration curves and experimental results obtained from ring compression test

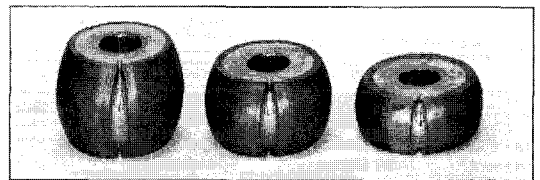


Fig. 3 Experimental results according to H/D ratio through compression test

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

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

하여, 0.700 로 정하였다.

3. 결함의 발생 및 원인 파악

3.1 튜브 인발공정 시 결함의 발생

SIS(Steering Input Shaft) 튜브 인발공정은 3 공정으로 구성되어 있다. SIS 튜브를 성형하기 위한 공정 순서는 먼저 1 차 인발을 하기 위한 예비 공정으로써 1 차 인발 시 소재를 맨드릴에 고정 시켜주기 위해 축관을 수행하고, 맨드릴을 이용한 1 차, 2 차 인발공정을 수행하여 제품을 성형한다.

SIS 튜브 성형공정과 실제 현장에서 튜브 성형 시 결함이 발생했던 인발공정 조건을 Fig. 4와 Table 2에 나타내었다.

Fig. 5와 6에 성형 시 사용했던 인발장비와 다이 그리고 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. 7은 Kobayashi[9] 등이 제안한 연성과파괴 분포결과이다.

실제 튜브 소재의 파단이 발생하는 부분에서 최대 연성과파괴 값이 0.962로 실험에 의해 확보한 임계 연성과파괴 값 0.700보다 높게 나타났다.

Fig. 8은 동일한 조건에서 1차 인발다이와 맨드릴을 사용한 경우에 대한 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 초기에 인발이 되면서 하중이 증가하다가 축관이 끝나는 지점에서 감면을 증가로 인해 하중이 다시 한번 증가하는 형태를 나타내고 있다.

시험 및 해석 모두 1차 인발 시 스트로크 약 18mm 지점에서 Tube 소재의 파단이 발생하였다. SIS 튜브 인발공정 시 결함은 1차 인발공정 수행 중 변형에너지가 변형한계를 초과하여 연성과파괴에 의한 결함이 발생하는 것으로 판단된다.

4. 공정변수 영향 평가 및 최적 다이형상 설계

4.1 다이 반각의 영향

Fig. 9 (a)에 실제 현장에서 성형 수행 시 결함이

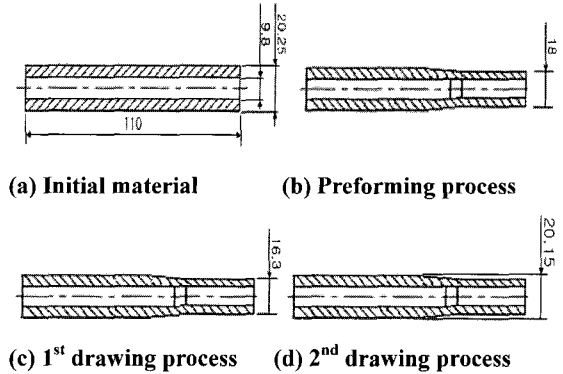


Fig. 4 Process sequences of SIS tube

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. 5 Existing drawing machine and die on the spot

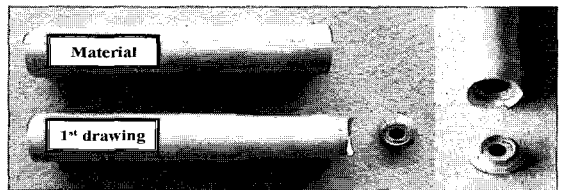


Fig. 6 Defect during 1st drawing process

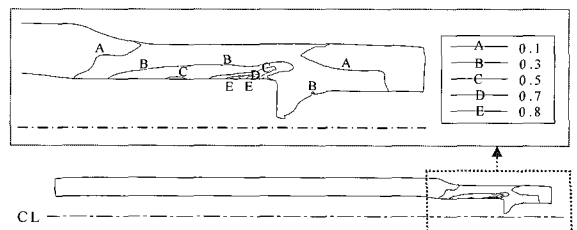


Fig. 7 Distribution of damage obtained from FEM at the real conditions

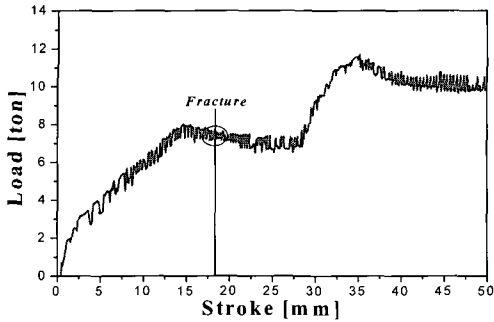


Fig. 8 Load-Stroke curve at 1st drawing process

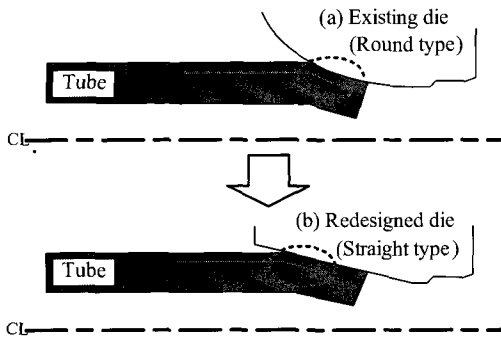


Fig. 9 Scheme of existing(a) and redesigned drawing die(b)

Table 3 The variation of damage according to Semi-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

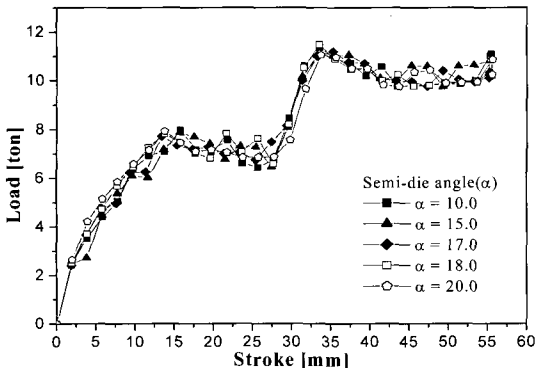


Fig. 10 Load-Stroke curve at 1st drawing process

발생한 1 차 인발다이를 나타내었다. 1 차 인발다이는 공정 초기에 소재와 가장 먼저 접촉하는 도입부, 도입부와 랜드부를 연결하는 직선부, 그리고 마지막 랜드부로 이루어져 있다. 도입부 곡률반경이 10.0mm 인 라운드 형상을 하고 있다.

본 연구에서는 기존의 라운드형 다이의 반각에 따른 영향을 평가하기 위하여 다이 도입부 곡률반경 10.0mm 에 대하여 다이 반각을 10.0°, 15.0°, 17.0°, 18.0°, 20.0°로 변화 시켜 성형해석을 수행하였다. 해석은 축관 공정 후 그 변형이력을 고려하여 수행하였다. Table 3 에 해석결과를 나타내었다. 해석결과로부터 모든 경우에 있어서 연성과파괴 값이 임계 연성과파괴 값 0.700 을 초과하는 것을 알 수 있었다. 기존 도입부 곡률반경 10.0mm 의 경우 다이 반각 10.0° ~ 20.0°사이에서는 모두 소재의 파단이 예상되었다.

Fig. 10은 다이 반각에 따른 인발하중을 나타낸 것이다. 하중 형태는 모두 동일하며, 반각이 작을수록 튜브 소재와 다이 사이의 마찰길이의 증가로 인하여 하중이 다소 증가하는 경향을 나타내지만, 그 증가량은 상당히 미미하였다.

4.2 다이 도입부 곡률의 영향

기존 도입부 곡률이 10.0mm 인 다이에 있어서 반각 변화만으로는 양호한 인발이 불가능하다는 것을 알 수 있었다. 튜브 소재의 파단은 대부분 1 차 인발 초반부에서 발생하였다. 따라서 초기 소재와 접촉이 이루어지는 다이 도입부의 형상이 중요한 영향을 미칠 것으로 판단되었다. 이를 고려하여 본 연구에서는 다이반각을 15°로 고정시키고 도입부 곡률 반경을 8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 16mm 로 변화시켜 해석을 수행하여, 인발다이 도입부의 곡률이 1 차 인발에 미치는 영향을 평가하였다.

Table 4 에 해석결과를 나타내었다. 해석결과에서 알 수 있듯이, 모든 경우에 있어서 최대 연성과파괴 값이 튜브 소재의 임계 연성과파괴 값 0.700 을 초과하였다.

이상의 결과로부터 인발다이에 있어서 다이 반각과 도입부 곡률반경의 변화만으로는 1 차 인발이 불가능한 것을 알 수 있었다.

Fig. 11은 Table 4 조건에 대한 하중-스트로크 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 11의 결과에서 다이 반각 15.0°인 경우 최대 하중은 도입부 곡률 반경 8.0mm 에 대하여 축관이 끝나는 부분의 감면율이 증가

하는 부분에 나타났다. 도입부 곡률이 클수록 소재의 초기 변형량이 적기 때문에 인발 하중이 상대적으로 낮아짐을 알 수 있다.

4.3 1 차 인발다이의 재설계

이상의 해석결과로부터 기존의 라운드형 인발 다이로는 1 차 인발이 불가능함을 알 수 있었다. 기존 도입부가 라운드형인 인발다이를 이용한 성형 수행 시 주로 튜브 소재의 파단이 1 차 인발 초반부에서 발생하였다. 이는 1 차 인발 전반부에서 튜브 소재가 접촉하는 다이 도입부의 라운드 때문에 소재의 급격한 유동변화 및 과도한 변형량으로 인하여 변형에너지가 변형한계를 초과하여 맨드릴 끝단부에서 소재가 파단 된 것으로 사료된다.

따라서, 1 차 인발 초기의 소재 변형량을 줄이기 위하여 Fig. 9 (b)에서와 같이 도입부가 라운드형상인 인발다이를 직선형으로 수정하여 1 차 인발 공정에 대한 해석을 수행하였다. 해석은 직선부의 다이 반각을 8.0°, 10.0°, 11.0°, 12.0°, 14.0°, 16.0°, 17.0°로 변화시켜 소재에 대한 연성과파괴 분포와 인발 하중을 평가하였다. Table 5 와 Fig. 12 에 해석 결과를 나타내었다.

Table 5 의 결과에서 알 수 있듯이 직선형 다이를 적용한 경우, 다이 반각이 11.0° 이하에서 최대 연성과파괴 값이 소재의 임계 연성과파괴 값인 0.700 이하로 나타났다.

따라서, 다이 반각이 11.0°인 직선형 다이로 1 차 인발을 할 경우 소재의 파단발생을 방지 할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 연성과파괴 값이 가장 낮은 다이 반각 10.0°인 직선형 다이를 최적의 다이로 선정하였다.

Fig. 12는 직선형 다이의 반각에 따른 인발 하중을 나타내고 있다. 하중의 형태는 이전의 결과와 유사하였으며, 다이 반각이 증가할수록 인발 하중이 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

이상의 결과를 기초로 하여 다이 반각 10.0°인 직선형 인발다이를 이용하여 실제 인발을 실시하였다. 제안된 인발다이를 통한 시 생산한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 직선형 다이를 사용할 경우 파단발생 없이 양호하게 인발이 가능함을 알 수 있었다.

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

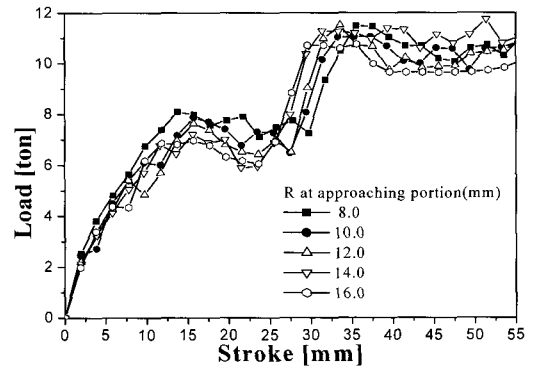


Fig.11 Load-Stroke curve according to radius at approaching portion

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

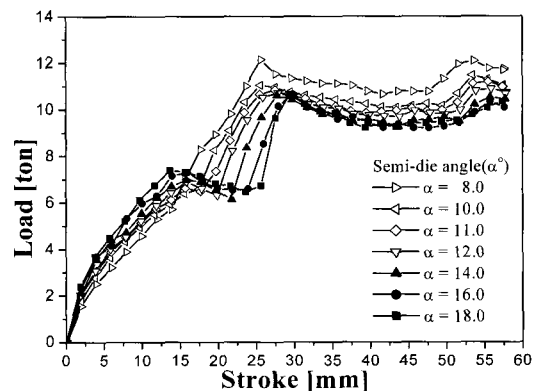


Fig.12 Load-Stroke curve according to semi-die angle in redesigned die



Fig.13 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 설계변수에 대한 결함의 영향을 파악하고 이를 근거로 결함을 방지할 수 있는 인발다이의 형상을 제시하였으며, 제시된 인발다이를 유한요소해석과 실험을 통해 검증하였다. 이상의 과정을 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) 다이 반각을 고정시키고 도입부 곡률을 감소시켜 해석한 결과 모든 경우에 있어서 최대 연성파괴 값이 소재의 임계 연성파괴 값을 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, J. Mater. Proc. Technol., pp. 3~12.
- [2] W.P. Fisher, A.J. Day, 1997, A study of the factors controlling the tube-sinking process for polymer materials, J. Mater. Proc. Technol., pp. 156~162.
- [3] Kyung-Keun Um, Dong Nyung Lee, 1997, An upper bound solution of tube drawing, J. Mater. Proc. Technol., pp. 43~48.
- [4] 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, J. Mater. Proc. Technol., pp. 73~77.
- [5] Yoichi Imamura, Muneatsu 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.
- [6] Pongpan Kaewtatip, Masahiko Jin and Masao Murakawa, 1999, Improving Ironing Performance by Using Dies Subjected to Radial Vibration, Journal of the JSTP, vol. 40, no. 457, pp. 123~128.
- [7] Pongpan Kaewtatip, Masahiko Jin, Tadashi Takanishi and Masao Murakawa, 2000, Relation Between Drawing Tool Shape and Product Precision, Journal of the JSTP, vol. 41, no. 470, pp. 227~232.
- [8] T. Okamoto, T. Fukuta and H. Hagia, 1997, Material Fracture in Cold Forging-Systematic Classification of Working Methods and Types of Cracking in Cold Forging, ASTM, pp. 216~226.
- [9] 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.