

파단방지를 위한 튜브인발공정 최적 금형형상 설계에 관한 연구

이상곤*, 김병민#, 김상우**, 이영선**, 이정환**

Optimal Die Profile Design in Tube Drawing Process for Prevention of Material Fracture

Sang-Kon Lee*, Byung-Min Kim#, Sang-Woo Kim**, Young-Seon Lee** and Jung-Hwan Lee**

ABSTRACT

The objective of this study is to design the optimal die profile that can prevent material fracture in the tube drawing process for automobile steering input shaft. First, the CDV(Critical Damage Value) of material is obtained by the compression test and FE-analysis. The occurrence of fracture is estimated by the FE-analysis considering the CDV. In order to achieve the objective of this study, optimization technique and FE-analysis are applied. FPS(Flexible Polyhedron Search) method, which is one of the non-gradient optimization techniques often used in engineering, is used to search optimal die profile. The drawing die profile is represented by Bezier-curve to generate all the possible die profile. Using FPS method and FE-analysis the optimal drawing die profile is determined. To verify the effectiveness of the redesigned optimal die, the tube drawing experiment is performed. In the experimental result, it is possible to produce sound product without material fracture using the redesigned optimal die.

Key Words : Optimal Die Profile(최적 금형 형상), Steering Input Shaft(스티어링 인풋 샤프트), CDV(임계연성 파괴값), Optimization Technique(최적화기법), FE-Analysis(유한요소해석), Bezier-Curve(베지어 곡선), Tube Drawing Experiment(튜브 인발 실험)

1. 서론

근래 자동차 산업에 있어 환경문제 및 자동차 연비 개선을 위한 경량화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹ 특히, 축부품의 경우 기존 중실축을 사용하는 경우 연비, 소음, 진동 및 기계적 강도면에서 어느 정도 만족시키지만, 차량의 중량 증

가로 인해 연비에 악영향을 미치게 된다. 따라서, 최근에는 이를 개선하기 위하여 기존 스웨이징(Swaging) 공정 혹은 기계가공(Machining)으로 생산되던 중실축 부품에 대하여 냉간 튜브 인발공정이 적용되고 있다. 냉간 튜브 인발공정의 경우 제품 표면 치수정도가 우수하고, 특히, 단차가 있는 중공축 또는 일정한 외경을 가진 튜브 제품 생산

접수일: 2006년 3월 24일; 게재승인일: 2006년 9월 25일

* 부산대 대학원 정밀기계공학과

교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

E-mail bmkim@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2319

** 한국기계연구원 소성성형연구센터

에 있어서 스웨이징 공정을 효과적으로 대체 할 수 있으며, 생산단가도 낮출 수 있다.¹

본 연구의 목적은 튜브 인발 공정으로 생산되는 자동차용 SIS(Steering Input Shaft) 생산에 있어서 공정 중에 발생하는 소재의 파단을 방지할 수 있는 최적 인발 금형 형상 설계이다. 이를 위하여 본 연구에서는 링압축시험 및 유한요소해석을 통하여 초기 소재의 임계연성파괴값을 예측하고, 유한요소해석을 통하여 현 공정에 대한 문제점을 파악하였다. 현 공정에 대한 해석 및 현장결과를 토대로, 최적화기법인 FPS 법과 유한요소해석을 이용하여, 인발 공정중에 소재의 파단이 발생하지 않는 최적의 인발 금형 형상을 설계하였다. 설계된 인발 금형 형상에 대하여 그 타당성을 검증하기 위하여 튜브 인발 시험을 실시하였다. 그 결과 소재 파단 없이 건전한 제품을 생산 할 수 있었다.

2. 현 공정 문제점 평가

2.1 Steering Input Shaft 생산 공정

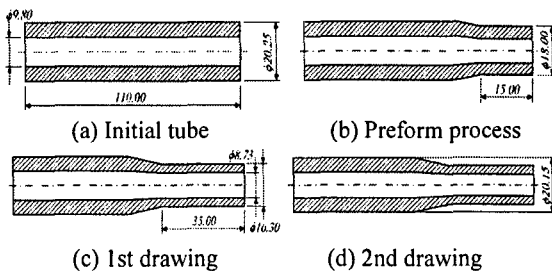


Fig. 1 Drawing process for steering input shaft(unit: mm)

Table 1 Current drawing process conditions

Drawing conditions	Unit	Value
Initial tube length	mm	110.00
Initial outer/inner Dia.	mm	20.25/9.80
Dia. of preform	mm	18.00
Preform length	mm	15.00
Dia. of 1st drawing die	mm	16.30
1st drawing length	mm	35.00
Dia. of 2nd drawing die	mm	20.15
Semi-die angle	°	15.00

본 연구에서 적용한 자동차용 SIS 인발공정은

Fig. 1 과 같이 예비성형공정, 1차 인발 및 2차 인발공정으로 이루어져 있다. Table 1 에 공정조건을 나타내었다.

현 공정의 경우 Fig. 2 에서 보듯이 예비성형공정 후 1차 인발공정에서 맨드릴과 접촉하는 소재 끝단부에서 인발 초기에 파단이 발생한다.

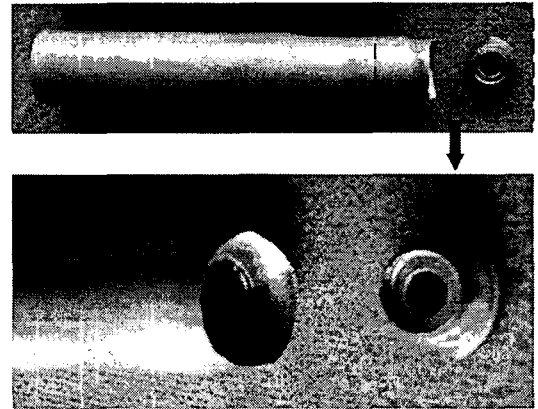


Fig. 2 Fracture at the beginning of 1st drawing

2.2 현 공정에 대한 유한요소 해석

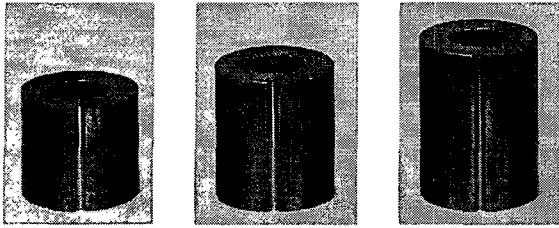
2.2.1 소재 물성치 및 마찰특성 평가

현 공정에 대한 유한요소해석을 수행하기 위한 초기 SM45C 소재에 대한 유동응력식은 소재 압축시험을 통해 확보하였다.² 압축시험을 통하여 얻은 초기 소재의 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 960.0\bar{\epsilon}^{0.190} \quad (1)$$

튜브 소재와 금형사이의 마찰특성을 평가하기 위하여 우선, 본 연구에서는 강소성 유한요소해석 S/W 인 DEFORM-2D 를 이용하여 여러 마찰상수 (m)에 대한 마찰보정곡선을 구하였다.^{2,3} 마찰보정곡선에 실제 현장에서 적용하고 있는 MoS₂ 를 도포한 조건에 대하여 링압축시험을 실시하여 높이 감소율에 따른 내경 감소율을 측정하여 마찰보정곡선에 표시하여 마찰상수를 결정하였다. 링압축 시험결과 MoS₂ 가 도포된 상태의 마찰상수는 0.1 이었다.

2.2.2 소재 임계연성파괴값 평가



(a) H/D=1.00 (b) H/D=1.25 (c) H/D=1.50
Fig. 3 Initial specimens for determination of CDV

Process	Distribution of damage
Preform	
	Max. damage value : 0.167
1st drawing	
	Max. damage value : 0.962

Fig. 4 The results of compression test and FE-analysis for evaluation of CDV

일반적으로 소재의 연성파괴값이 임계값을 초과하게 되면 소재에 파단이 발생하게 된다. 본 연구에서는 소재의 압축시험과 유한요소해석을 이용하여 소재의 파단발생을 평가할 수 있는 초기 소재의 임계연성파괴값(CDV: Critical Damage Value)을 평가하였다.⁴ 압축시험은 Fig. 3 과 같이 높이/외경 비가 다른 세가지 초기 소재에 대하여 반경 1mm 의 노치를 가공하여 각각의 소재를 압축속도 2mm/min 로 진행하여 노치부에 크랙이 발생할때까지 압축을 실시하였다. 노치부 크랙은 확대경을 이용하여 육안으로 관찰하였으며, 압축시험 후 각 소재에 대하여 크랙이 발생한 높이까지 유한요소해석을 수행하여 크랙 발생 부위의 연성파괴값을 초기 소재의 임계연성파괴값으로 설정하였다.

Fig. 4 에 압축시험 및 유한요소해석에 의한 결과를 나타내었다. 그 결과 노치부 중앙에서 크랙이 발생함을 알 수 있다. Table 2 에 그 결과를 정리하였다. 높이/외경 비 1.50 에서 임계연성파괴값이 가

장 낮은 0.725 였으며, 본 연구에서는 미소 크랙발생에 대한 육안관찰 오차를 고려하여 0.700 을 초기 소재의 임계연성파괴값으로 설정하였다.

Table 2 Height and max. damage according to H/D ratio

H/D ratio	Specimen height[mm]	Max. damage
1.00	8.78	0.828
1.25	12.08	0.810
1.50	15.44	0.725

2.2.3 유한요소해석 결과

Fig. 5 에 실제 공정에서 사용하고 있는 예비성형 및 1차 인발금형을 나타내었다.

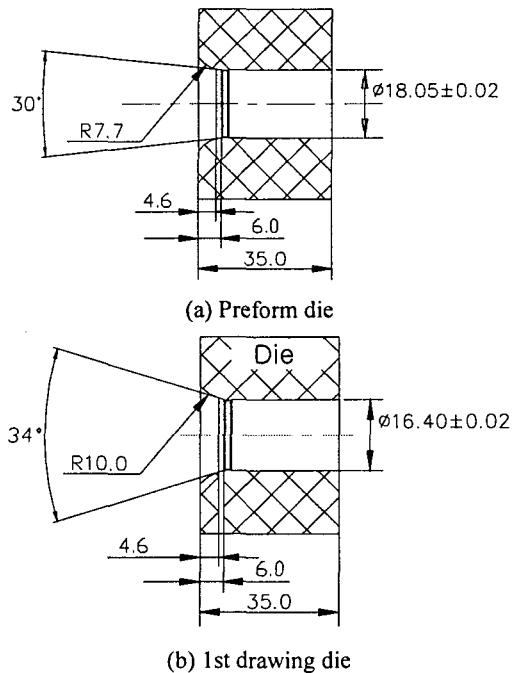


Fig. 5 Preform and 1st drawing dies(unit: mm)

Fig. 6 에 유한요소해석에 의한 예비성형공정 및 1차 인발공정 후의 소재의 연성파괴값 분포 및 최대값을 나타내었다. 해석결과에서 알 수 있듯이 1차 인발 초기단계에서 맨드렐과 접촉하고 있는 소재 끝단부에서 최대 연성파괴값이 소재의 임계연성파괴값(0.700)보다 높은 0.962 를 나타내었다. 해석결과는 Fig. 2 의 현장 결과와 잘 일치함을

알 수 있다. 따라서, 1 차 인발시 소재의 파단을 방지하기 위해서는 1 차 인발공정에 대한 공정변경이 필요함을 알 수 있다.

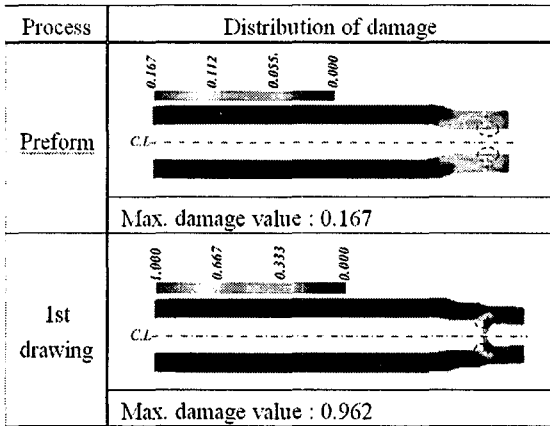


Fig. 6 Distribution and maximum of damage value

3. 최적 1 차 인발금형 설계

3.1 최적 인발금형 설계 절차

현재까지 많은 최적화기법들이 소성가공분야에 적용되어 왔다.⁵⁻¹⁰ 본 연구에서는 최적화기법으로 목적함수가 최적화 되게 하는 벡터 x 를 구하기 위해 심플렉스(Simplex)가 목적함수의 공간에서 목적함수를 더 작아지게 하는 방향으로 이동해 가는 FPS 법을 사용하였다.¹¹ Fig. 7 에 FPS 법에 의한 최적화 진행과정을 개략적으로 나타내었다.

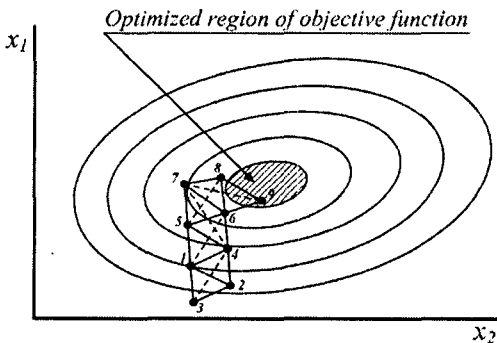


Fig. 7 Sequence of regular simplexes obtained optimizing objective function

인발금형 형상은 제어점(Control points)과 직선

요소(Line segments)로 금형의 형상을 정의할 수 있는 Bezier-curve 를 이용하였다.¹² Fig. 8 에 인발금형의 설계영역을 나타내었다.

이상의 방법을 이용한 최적 금형 형상 설계 절차는 Fig. 9 과 같다. 초기 금형 형상들에 대하여 유한요소해석을 수행하여 본 연구에서의 목적함수인 최대 연성파괴값을 소재의 임계연성파괴값과 비교한다. 목적함수가 임계연성파괴값을 초과할 경우 FPS 법과 Bezier-curve 를 이용하여 새로운 금형형상을 설계하여 다시 유한요소해석을 수행하고 목적함수를 임계연성파괴값과 비교한다. 이상의 과정을 반복하여 목적함수인 최대 연성파괴값이 임계 연성파괴값보다 작아질 때까지 반복수행하게 된다.

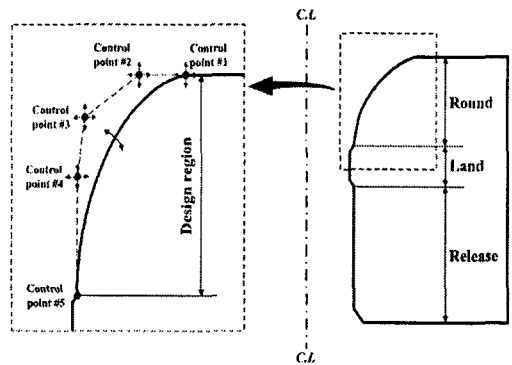


Fig. 8 Design region of drawing die

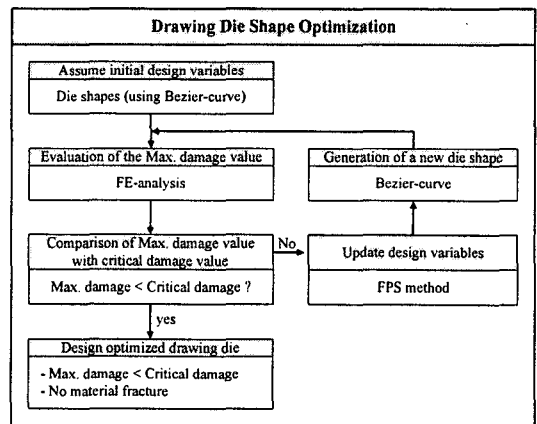


Fig. 9 Optimization procedure

3.2 최적화 적용 결과

Fig. 10 에 이상의 최적화 절차를 반복 적용하여 생성된 금형형상을 나타내었다. 본 연구에서는 16 회 반복으로 최적 금형 형상을 찾을 수 있었다.

Fig. 11 에 현 공정의 금형과 최적 설계된 금형 형상을 비교하여 나타내었다. 최적화 결과 기존의 라운드형 금형이 직선형 금형으로 변화되었으며 금형의 반각은 약 10°였다.

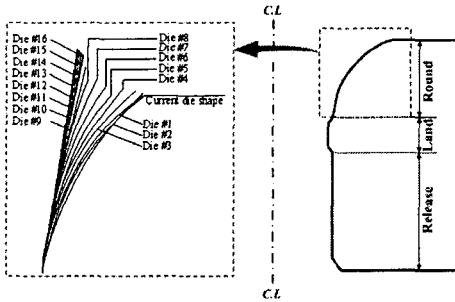


Fig. 10 Various die profile with iterations

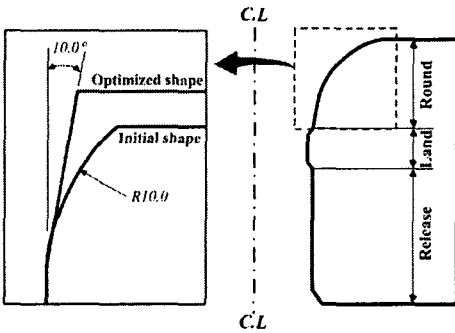


Fig. 11 Comparison of die profile between the initial and the optimized die die

최적화 반복 회수에 따른 최대 연성파괴값을 Fig. 12 에 나타내었다. 최적화가 반복 됨에 따라 최대 연성파괴값은 점차 감소하였으며, 12 번째 이후에는 거의 균일한 값을 나타내었다. 현공정의 경우 1 차 인발 완료 후 최대 연성파괴값이 1.050 로 임계연성파괴값 0.700 을 초과하였으나, 반복 횟수 10 번째 이후에서는 최대 연성파괴값이 임계 연성파괴값보다 낮았다. 본 연구에서는 최대 연성파괴값이 0.475 로 가장 낮은 값을 나타내는 12 번째의 금형 형상을 최적의 인발 금형 형상으로 결정하였다.

초기와 최적화된 금형형상에 대한 유한요소해석 결과를 Fig. 13 에 나타내었다. Fig. 13 에서 알 수

있듯이 최대 연성파괴값은 모두 맨드렐과 접촉하는 튜브 끝단부에서 발생하였다.

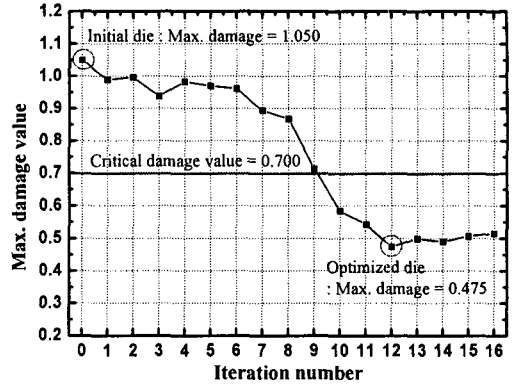


Fig. 12 Variation of maximum damage value with iterations

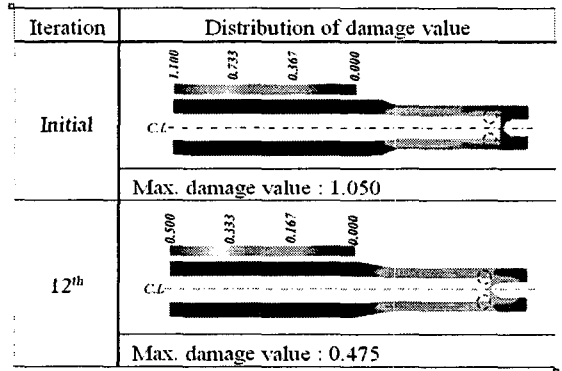


Fig. 13 Distribution and maximum of damage value with iterations

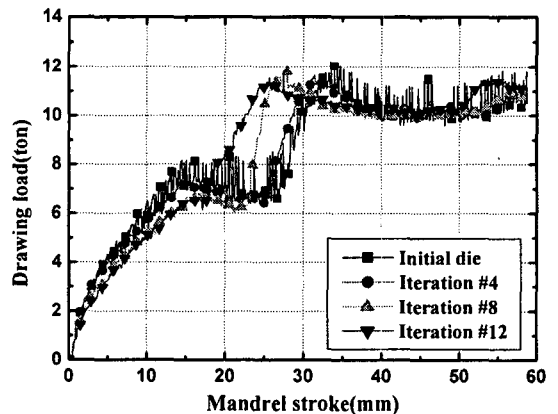


Fig. 14 Drawing load for different die profiles

Fig. 14는 반복횟수에 따른 인발 하중을 나타낸 것이다. 해석결과 모든 경우에 있어서 최대 인발 하중은 약 11.0~11.5ton 으로 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 최적이라고 판단한 12 번째 직선형 다이의 경우 실제 파단이 발생하는 스트로크 15mm 이내에서 최대 인발하중이 약 6.5ton 으로 초기 곡선형의 약 8.0ton 보다 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 직선형 다이의 경우 인발 초기단계에서 소재의 급격한 변형을 피할 수 있기 때문이며, 이러한 이유로 직선형 다이가 인발 초기단계에서 소재의 파단발생 가능성이 낮은 것으로 판단된다.

4. 튜브 인발 실험

본 연구에서는 최적화기법을 적용하여 설계된 인발 금형 형상에 대하여 튜브 인발 실험을 통하여 그 효과를 평가하였다. Fig. 15 과 Fig. 16 에 실험에 사용한 수평식 튜브 인발기와 최적 설계된 인발 금형을 나타내었다. Fig. 17 은 실험에 사용한 맨드렐이다. 맨드렐은 현공정에서 적용하고 있는 것을 그대로 적용하였다.

튜브 인발 실험 결과 튜브 소재의 파단없이 건전한 인발 제품을 생산할 수 있었다. Fig. 18 에 최적 설계된 금형을 이용하여 생산된 제품을 나타내었다.

이상의 실험을 통하여 본 연구에서 설계한 최적 인발 금형의 효용성을 확인할 수 있었다.

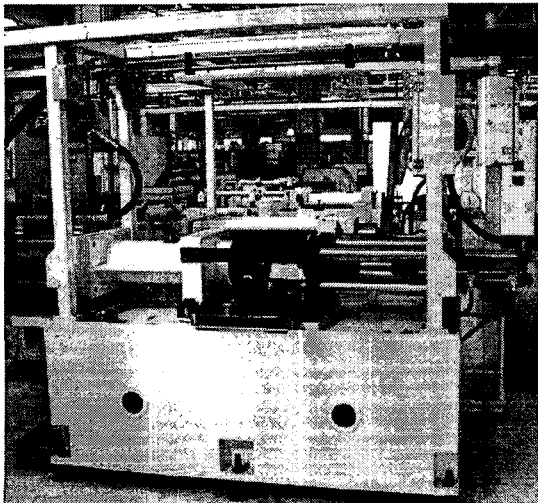


Fig. 15 Horizontal drawing machine

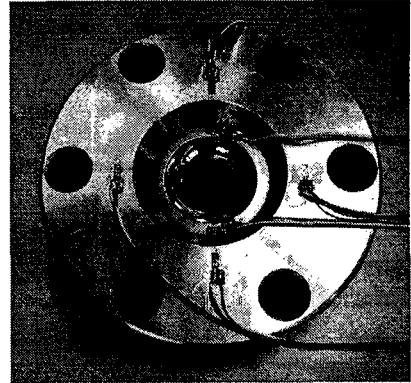


Fig. 16 Optimized 1st drawing die

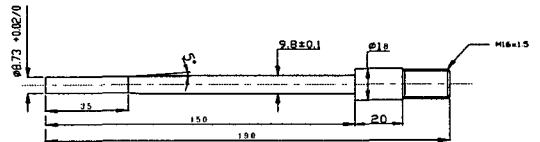


Fig. 17 Mandrel for tube drawing experiment

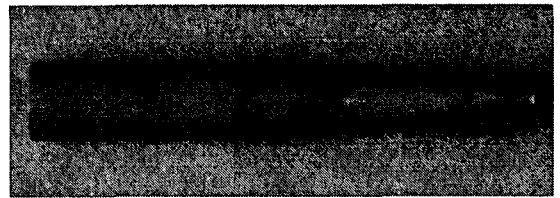


Fig. 18 Drawn tube using optimized drawing die

5. 결론

본 연구에서는 튜브 인발공정에 대하여 소재 물성평가, 최적화기법 및 유한요소해석을 통하여 소재의 파단발생을 방지할 수 있는 최적의 인발금형 형상을 설계하였다. 이상의 연구를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 링압축시험과 강소성유한요소 해석을 통하여 소재의 임계연성과파괴값을 구하였으며, 이를 토대로 현 튜브 드로잉 공정의 경우 최대 연성과파괴값이 임계값을 초과함을 알 수 있었다.

(2) 본 연구에서는 금형 형상을 효과적으로 정의할 수 있는 Bezier-curve 와 최적화기법인 FPS 법, 그리고 유한요소해석을 통하여 인발시 소재의 파

단발생을 방지할 수 있는 최적의 금형 형상을 설계할 수 있었다.

(3) 최적화된 금형 형상에 대한 유한요소해석 결과 튜브 소재에 발생하는 최대 연성파괴값은 현 공정의 1.050 및 소재의 임계연성파괴값인 0.700 보다 매우 낮은 0.475 였다.

(4) 최적화된 금형 형상에 대한 효용성을 평가하기 위하여 실제 튜브인발 실험을 실시 한 결과, 파단이 발생하지 않는 건전한 튜브인발 제품을 생산할 수 있었다.

이상의 연구결과, 본 연구에서 적용한 최적화 기법과 유한요소해석을 함께 적용할 경우, 본 연구에서 적용한 분야 이외에 많은 공학분야에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Amborn, P., Frielingsdorf, H., Ghosh, S. K. and Grulich, K., "From Metal Cutting to Metal Forming Modern Side-Shafts for Passenger Car: Manufacturing Aspects," J. Mater. Process. Technol., Vol. 48, pp. 3-12, 1995.
2. Altan, T., Oh, S. I. and Gegel, H. L., "Metal Forming: Fundamentals and Applications," ASM, pp. 48-53, 1989.
3. DEFORMTM-2D, SFTC, 1995.
4. Cockcroft, M. G. and Latham, D. J., "Ductility and The Workability of Metals," J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33-39, 1968.
5. Tomita, Y., "Optimization of Plastic Deformation Processes-Determination of The Die Profile Using The Minimum Energy Principle," J. JSTP, Vol. 24, pp. 1147-1150, 1983.
6. Fourment, L. and Chenot, J. L., "Optimal Design for Non-Steady State Parameters," Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 39, pp. 33-50, 1996.
7. Lee, S. K., Ko, D. C. and Kim, B. M., "Control of Microstructure in Hot Forging Process by Designing of Optimal Preform Shape," Annual Fall Conference of the KSPE, pp. 1085-1088, 1999.
8. Kishor, N. and Kumar, D. R., "Optimization of Initial Blank Shape to Minimize Earing in Deep Drawing Using Finite Element Method," J. Mater. Process. Technol., Vol. 130-131, pp. 20-30, 2002.
9. Byon, S. M. and Hwang, S. M., "Die Shape Optimal Design in Cold and Hot Extrusion," J. Mater. Process. Technol., Vol. 138, pp. 316-324, 2003.
10. Chong, T. H. and Lee, J. S., "A Design Method of Gear Trains Using a Genetic Algorithm," Int. J. KSPE, Vol. 1, No. 1, pp. 66-70, 2000.
11. Himmelblau, D. M., "Applied Nonlinear Programming," McGraw-Hill, 1872.
12. Anand, V. B., "Computer Graphics and Geometric Modeling for Engineers," John Wiley & Sons, 1996.