

## 조향장치용 스플라인 샤프트 이형인발 공정변수 최적화

이상곤<sup>1</sup> · 김성민<sup>2</sup> · 이선봉<sup>3</sup> · 김병민<sup>#</sup>

# Optimization of Process Variables of Shape Drawing for Steering Spline Shaft

S. K. Lee, S. M. Kim, S. B. Lee, B. M. Kim

(Received January 20, 2010 / Revised February 5, 2010 / Accepted February 18, 2010)

### Abstract

In the multi-pass shape drawing process, the appropriate process design is very important to produce sound products. The reduction ratio, die angle, and the intermediate die shape are very important process variable of the multi-pass shape drawing. The aim of this study is the determination of the reduction ratio, die angle, and the intermediate die shape of the 2 pass shape drawing process for producing steering spline shaft. In this study, FE analysis, Taguchi method, and ANN(artificial neural network) were applied to determine the appropriate reduction ratio, die angle, and intermediate die shape. After the determination of the process variables, FE analysis and drawing experiment were performed to evaluate the effectiveness of the determined process variables. The dimensional accuracy of the final drawn spline shaft was evaluated by using 3D surface profiler and 3D laser digitizing system.

**Key Words** : Multi-Pass Shape Drawing, Reduction Ratio, Die Angle, Intermediate Die Shape, Taguchi Method, ANN

### 1. 서 론

이형인발공정은 요구되는 단면형상을 가진 다이에 관재, 봉재, 선재 등의 소재를 통과시켜 원하는 단면형상의 길이가 긴 제품을 생산하는 대표적인 냉간 소성가공공정이다[1]. 최근 자동차, 전기/전자 생산장비, 산업로봇, 정밀계측장비 등 다양한 산업분야에서 이형인발 제품들이 활발히 적용되고 있다.

Fig. 1에서 보듯이 자동차 조향장치 동력전달용 부품으로 사용되는 스플라인 샤프트(spline shaft)는 표면에 치형을 가진 길이가 긴 부품으로 우수한 단면 치수정도가 요구되는 부품이다. 현재 국내에서는 초기원형 소재를 기계가공을 하여 생산하고 있으나, 기계가공으로 인한 과도한 소재 손실, 생산성

저하, 기계적 성질 저하 등의 문제가 발생하고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 이형인발공정의 적용이 필수적이다. 이형인발공정 적용 시 정형가공 및 대량생산이 가능할 뿐만 아니라 공구비용과 소재 손실량을 최소화 할 수 있다[2~5].

따라서, 본 연구의 목적은 기계가공으로 생산되고 있는 스플라인 샤프트 이형인발을 위한 다단 이형인발공정을 설계하는 것이다. 본 연구에서는 스플라인 샤프트 이형인발을 위해 다이반각( $\alpha$ ), 다이감소율( $R$ ), 그리고 중간패스 다이형상( $S$ )을 설계변수로 선정하였다. 다구찌법(Taguchi method), 성형해석, 그리고 인공신경망기법(Artificial neural network: ANN)을 적용하여 요구되는 치수정도를 만족하는 스플라인 샤프트 생산을 위한 설계변수를 설정하였으며, 이에 대한 성형해석 및 이형인

1. 부산대 PNU-IFAM 국제공동연구소  
2. 부산대 대학원 정밀기계공학과  
3. 계명대 기계·자동차공학부  
# 교신저자: 부산대 기계공학부, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

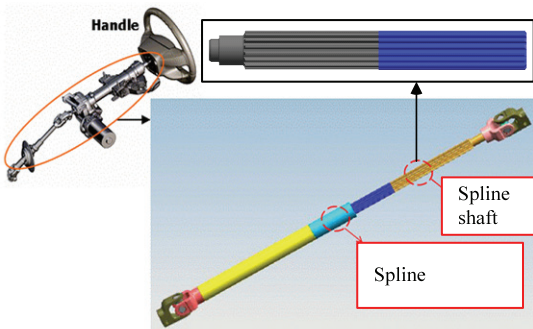


Fig. 1 Steering spline shaft

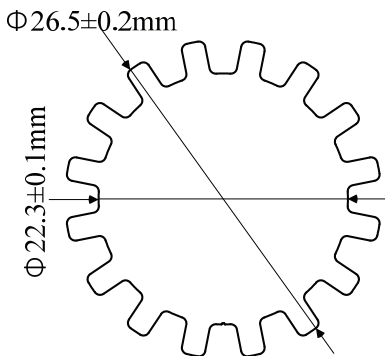


Fig. 2 Shape and dimension of steering spline shaft

발실험을 수행하였다. 실험을 통해 생산된 스플라인 샤프트에 대하여 3D surface profiler 및 3D laser digitizing system 을 이용하여 최종제품의 단면 미측면적과 치수를 측정된 결과 요구되는 허용치수공차를 만족하였으며, 본 연구에서 적용한 공정 설계방법 및 설정된 설계변수들의 타당성을 확인할 수 있었다.

## 2. 다단 이형인발 설계변수 선정

Fig. 2 에 본 연구에서 적용한 조향장치 스플라인 샤프트 단면형상 및 치수를 나타내었다. 16 개의 치산을 가진 기어형상의 단면이며, 최종제품의 외접원, 내접원, 그리고 치산폭 치수가 중요하다.

유럽, 일본 등 선진업체에서는 직경 30.0mm 의 초기소재로 총단면감소율 35.24%인 2 패스 인발을 통해 생산하고 있다. 따라서, 본 연구에서도 2 패스 이형인발공정을 적용하였다. 2 패스 인발공정 설계를 위한 설계변수로 1 번째 패스 단면감소율 ( $R_1$ ), 다이반각( $\alpha_1$ ), 다이 단면형상(S), 그리고 2 번

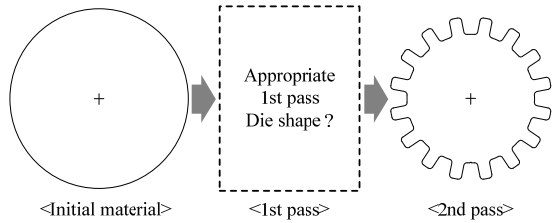


Fig. 3 Determination of the 1st pass die shape

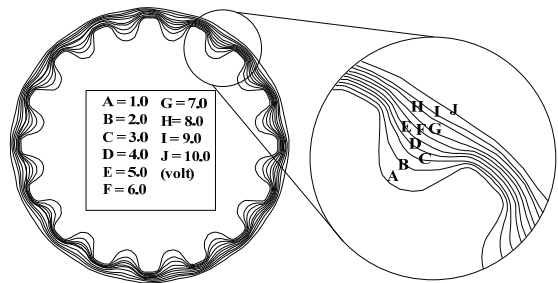


Fig. 4 Result of electric field analysis

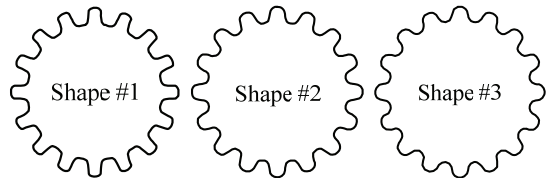


Fig. 5 Candidates of 1st pass die shape

째 패스 다이반각( $\alpha_2$ )을 선정하였다. 현장 노하우 및 경험을 토대로 1 번째 및 2 번째 패스 다이반각 범위는 14.0~22.0°, 1 번째 패스 단면감소율 범위는 20.0~24.0%로 설정하였다. 2 번째 패스 다이 단면형상은 Fig. 2 의 최종제품 단면과 동일하며, 단면감소율은 1 번째 패스 단면감소율의 종속변수이다.

다단 이형인발공정 시 중간패스 다이단면형상은 중요한 설계변수중의 하나이다. Fig. 3에서 보듯이 요구되는 품질을 가진 최종제품을 생산하기 위해서는 적합한 중간패스 다이 단면형상이 설계되어야만 한다. 본 연구에서는 초기소재와 최종제품 사이에 전기장해석(electric field analysis) 시 생성되는 등전위선(equipotential line)을 이용하여 중간패스 다이 단면형상들을 선정하였다[6, 7].

전기장해석은 ANSYS Ver.10 을 이용하여 수행하였으며, 초기소재와 최종제품 형상에 각각 10V

**Table 1 Design variables and range**

Variables	Range
$R_I$ : Reduction ratio (%)	20.0~24.0
$\alpha_1$ : 1st die angle (°)	14.0~22.0
$S$ : No. of 1st pass shape	1, 2, 3
$\alpha_2$ : 2nd die angle (°)	14.0~22.0

**Table 2 Orthogonal array table**

Trial No.	$R_I$	$\alpha_1$	$S$	$\alpha_2$
1	20	14	1	14
2	20	18	3	18
3	20	22	6	22
4	22	14	3	22
5	22	18	6	14
6	22	22	1	18
7	24	14	6	18
8	24	18	1	22
9	24	22	3	14

와 0V 의 전압을 걸어 해석을 수행하였다. Fig. 4 에 전기장해석결과를 나타내었다.

Fig. 4 의 전기장 해석결과로부터 1 번째 패스 다이 단면형상 변수로 3 개의 형상을 추출하였다. Fig. 5 에 추출된 형상들을 나타내었다. 이상의 설계변수 및 범위는 Table 1 과 같다.

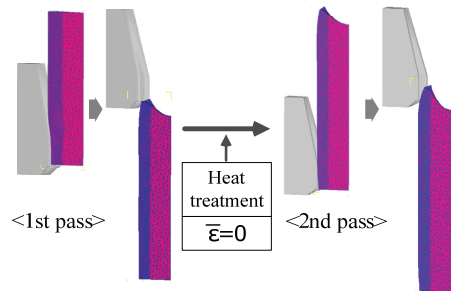
### 3. 최적 설계변수 설정

#### 3.1 실험계획법 및 다구찌기법 적용

본 연구에서는 설계변수 최적화를 평가하기 위해 최종 스플라인 샤프트 단면의 미충만면적(unfilled area: UA)을 목적함수로 설정하였으며, 미충만면적은 요구단면적( $A_{final}$ )과 실제단면적( $A_{real}$ )을 이용하여 식(1)로 계산된다.

$$UA = (A_{final} - A_{real}) / A_{final} \times 100 \quad (1)$$

최적 설계변수 선정을 위하여, 우선 본 연구에서는 실험계획법과 다구찌법을 이용하여 각 설계변수의 영향도를 평가하였다. 영향도 평가를 위해 먼저, Table 2 와 같이 각 설계변수조합에 대한 3



**Fig. 6 FE analysis of shape drawing process**

**Table 3 Unfilled area(mm<sup>2</sup>) after FE analysis**

Trial No.	UA	Trial No.	UA
1	2.464	6	3.268
2	2.086	7	4.800
3	1.949	8	3.253
4	2.896	9	5.331
5	3.264		

수준의 직교배열표를 작성하였다.

#### 3.2 성형해석

Table 3 의 설계변수조합에 대한 미충만면적을 평가하기 위하여 성형해석을 수행하였다. 성형해석은 DEFORM-3D Ver.6.1 로 수행하였으며, 대칭성을 고려하여 1/32 단면에 대한 해석을 수행하였다. 초기소재(AISI1018)에 대한 유효응력-변형률 곡선은 인장시험을 통해 확보하였으며, 식(2)와 같다.

$$\bar{\sigma} = 947.0 \cdot \bar{\epsilon}^{0.262} \quad [MPa] \quad (2)$$

Fig. 6 에서 보듯이 1 번째 패스 인발 후 응력완화 및 가공성 향상을 위한 풀림열처리를 고려하여 1 번째 패스 인발 후 소재의 유효변형률을 0 으로 재설정 후 2 번째 패스 인발해석을 수행하였다. 인발속도는 200mm/s, 소재와 다이 사이의 마찰상수(m)는 0.1 로 설정하였다.

성형해석 후 각 설계변수 조합에 따른 치산부에서 발생하는 미충만면적은 Table 3 과 같다.

Table 3 의 해석결과 및 다구찌법을 이용하여 각 설계변수가 미충만면적에 미치는 영향도를 평가하였으며, Fig. 7 에 수준별 영향도를 나타내었다. 영향도는  $\alpha_1 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow R_I \rightarrow S$  순으로 낮아짐을 알 수 있다.

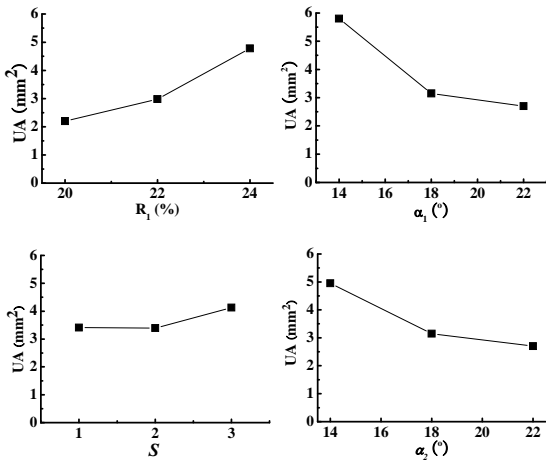


Fig. 7 Impact of design variables on the UA

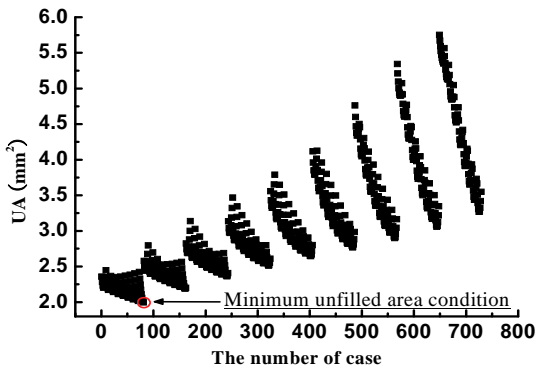


Fig. 8 Output of ANN for the UA

### 3.2 신경망기법을 이용한 최적설계변수 설정

직교배열표의 설계변수조합과 성형해석결과 및 미충만면적을 입력데이터로 하여 미충만면적 최소화를 위한 최적 설계변수조합을 설정하였다. 본 연구에서는 영향도가 가장 낮은 1 번째 패스 단면 형상은 2 번째 형상(S2)으로 고정한 후 신경망학습을 실시하였다[8]. 732 개 신경망학습 설계변수 조합에 대한 미충만면적을 Fig. 8 에 나타내었다.

신경망학습결과  $\alpha_1=20^\circ$ ,  $\alpha_2=20^\circ$ ,  $R_1=20\%$ 일 때 미충만면적이 가장 작았다.

단면형상이 복잡한 이형인발공정의 경우 공정 중 다이 파손이 자주 발생한다. 특히 본 연구에서 적용한 스플라인 샤프트의 경우 2 번째 패스 다이 치형부에서 파손이 자주발생하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 미충만면적 최소화와 함께 다이

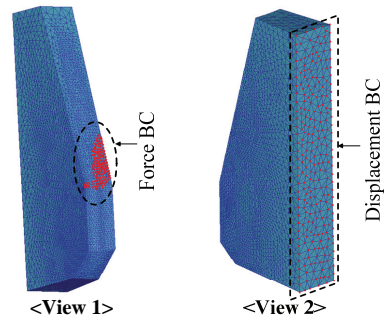


Fig. 9 Initial model for strength analysis of die

Table 4 Maximum Mises stress(MPa) on the 2nd die

Trial No.	Max. Mises stress	Trial No.	Max. Mises stress
1	1,170	6	1,180
2	1,440	7	966
3	1,350	8	1,350
4	1,060	9	1,070
5	979		

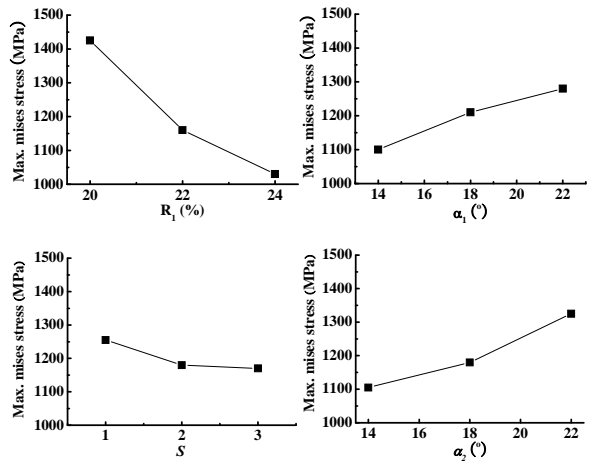


Fig.10 Impact of design variables on the maximum mises stress

파손방지도 함께 고려하였다. 이를 위하여 Table 2 의 설계변수조합에 대한 다이강도해석을 수행하였다. 강도해석은 Fig. 9 에서 보듯이 성형해석 시 다이에 작용하는 하중과 변위를 경계조건(BC)으로 적용하여 DEFORM-3D 로 수행하였다.

Table 4 에 각 설계변수조합에 따른 최대응력을

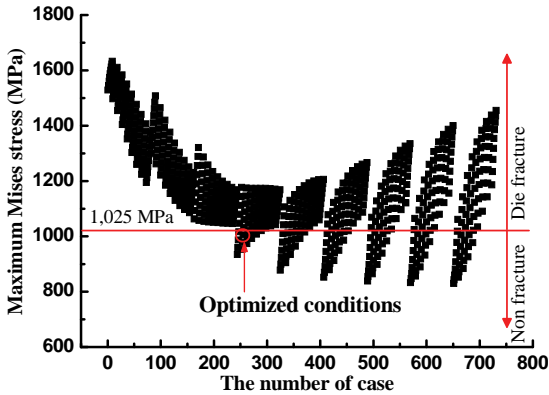


Fig.11 Output of ANN for maximum stress in the 2nd drawing die

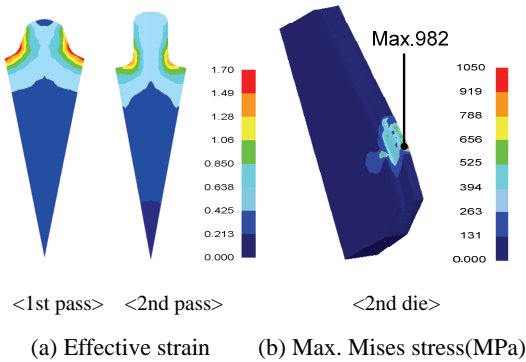


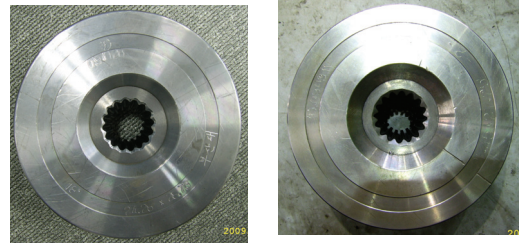
Fig.12 Result of FE analysis

나타내었으며, 다구찌기법을 적용한 영향도평가 결과는 Fig. 10 과 같다. 영향도는  $R_1 \rightarrow a_2 \rightarrow a_1 \rightarrow S$  순으로 낮아짐을 알 수 있다. 중간 패스 다이형상을 2 번째로 고정한 후 신경망학습을 수행하였다. Fig. 11 은 732 개 설계변수조합에 대한 신경망학습 결과를 나타낸 것이다. 다이 재질은 K05S 초경합금으로 허용강도(약 1,025MPa)를 기준으로 하여 가능한 설계변수를 설정하였다. 그 결과,  $a_1=18^\circ$ ,  $a_2=18^\circ$ ,  $R_1=21.5\%$ 를 최적조건으로 설정하였으며, 이 경우 미충만면적은 약 2.664mm<sup>2</sup>이었다.

설정된 최적 설계변수조합에 대한 성형해석 및 강도해석을 수행하였다. Fig. 12 에 해석결과를 나타내었다. 유효변형률은 변형량이 상대적으로 많은 치골부분이 높음을 알 수 있으며, 해석결과 미충만면적은 약 2.836mm<sup>2</sup> 으로 신경망예측결과와 약 6.6%의 오차가 발생하였으나 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 강도해석결과 최대발생응력은 982MPa 로 허용응력 1,025MPa 보다 낮다.

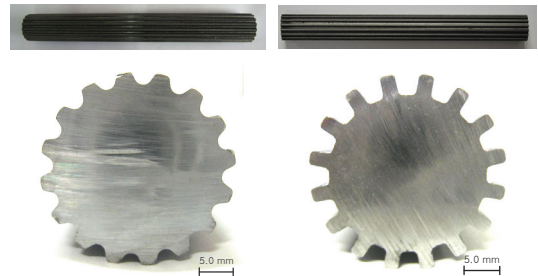
#### 4. 이형인발 실험

본 연구에서 제시한 스플라인 샤프트 이형인발 공정 설계변수조합에 대한 타당성을 검증하기 위하여 이형인발실험을 수행하였다. Fig. 13 은 실험에 사용된 이형인발 다이 사진이며, Fig. 14 는 각 패스별 인발된 제품을 나타낸 것이다.



(a) 1st pass (b) 2nd pass

Fig.13 Shape drawing dies



(a) 1st pass (b) 2nd pass

Fig.14 Drawn spline shaft

인발된 최종제품에 대하여 3D surface profiler 와 3D laser digitizing system 을 이용하여 각각 미충만면적과 단면치수정도를 평가하였다. 측정된 미충만면적은 약 1.512mm<sup>2</sup> 로, 성형해석 결과의 2.664mm<sup>2</sup> 보다 우수하였다. 실험 및 해석결과의 차이는 성형해석 시 해석시간 제약에 따른 유한요소 개수 및 크기의 제약 때문으로 사료된다. 단면치수 측정결과 치산폭 공차는 -0.03mm, 치산외경공차는 +0.118mm, 그리고 치산내경공차는 -0.087mm 로 모두 허용공차를 만족하였다.

Table 5 는 성형해석과 인발실험 시 인발하중을 나타낸 것이다. 성형해석 시 인발하중이 실험결과보다 다소 낮게 평가되었다. 그 이유는 성형해석 시 요소 크기 제약으로 인하여 소재와 다이 사이의 접촉면적이 실제 실험보다 작기 때문이다.

**Table 5 Drawing load of FE analysis and experiment**

Case	1st pass	2nd pass
FE analysis	20.7ton	12.9ton
Experiment	21.3ton	13.4ton

이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 최적 설계변수조합에 대한 타당성을 검증할 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 다구찌기법, 성형해석 및 인공신경망학습기법을 적용하여 조향장치 스플라인 샤프트 이형인발을 위한 2 패스 단단 이형인발공정을 설계하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 1 번째 패스 다이각도( $\alpha_1$ ), 감소율( $R$ ), 단면형상( $S$ ), 그리고 2 번째 패스 다이각도( $\alpha_2$ )를 설계변수로 선정하였으며, 실제 현장에서 적용 가능한 범위로 각 설계변수범위를 설정하였다.

(2) 각 설계변수 범위를 고려하여 직교배열표를 작성한 후 각 설계변수조합에 대한 성형해석을 수행하였다. 성형해석을 통해 최종제품의 미충만 면적을 평가하였으며, 다구찌기법을 적용하여 각 설계변수가 미충만면적에 미치는 영향도를 평가한 결과, 영향도는  $\alpha_1 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow R_1 \rightarrow S$  순으로 낮아짐을 알 수 있다.

(3) 본 연구에서는 미충만면적과 함께 이형인발시 다이과손을 고려하여 설계변수를 최적화하였다. 설계변수가 다이에 발생하는 최대응력에 미치는 영향도는  $R_1 \rightarrow \alpha_1 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow S$  순으로 낮아짐을 알 수 있다.

(4) 인공신경망학습을 통해 미충만면적과 다이에 발생하는 최대응력을 고려한 최적설계변수 조합은  $\alpha_1=18^\circ$ ,  $\alpha_2=18^\circ$ ,  $R_1=21.5\%$ ,  $S=2$  이었다. 해석결과 최적조건 시 미충만면적은 약  $2.664\text{mm}^2$  였으며, 최대발생 응력은 약  $982\text{MPa}$  로 허용응력 이내의 값을 나타내었다.

(5) 본 연구에서 제시한 최적 설계변수조합에 대한 타당성을 검증하기 위해 이형인발실험을 수행하였으며, 인발된 최종제품의 미충만면적은 약  $1.512\text{mm}^2$  로 해석결과보다 우수하였다. 또한, 단

면치수 측정결과 요구되는 허용공차를 모두 만족함을 알 수 있었다.

이상의 연구결과로부터 스플라인 샤프트 이형인발공정을 설계할 수 있었으며, 향후 다양한 이형인발제품 생산을 위한 공정설계에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부의 부품소재기술개발사업 및 지역산업기술개발사업(과제번호:20080837000)으로 수행된 연구임.

### 참 고 문 헌

- [1] K. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill Book Company, pp. 14-22~14-23.
- [2] K. Kobayashi, 1998, The present situation of cold drawn special section(in Japan), J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 39, No. 447, pp. 335~337.
- [3] W. Steuff, R. Kopp, 1995, Estimation of designing methods for drawing of section rods and wire, Wire J. Int., Vol. 28, pp. 104~109.
- [4] K. Yoshida, S. Tuihiji, 2002, Multiple drawing of rails for linear motion guide, Adv. Technol. Plast., Vol. 1, pp. 367~372.
- [5] T. K. Lee, C. J. Lee, S. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2009, A study on the pass schedule of multi-pass shape drawing process for cross roller guide, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 7, pp. 550~555.
- [6] H. K. Shin, S. R. Lee, C. H. Park, D. Y. Yang, 2002, The Optimal Design of Preform in 3-D Forming by using Electric Field Theory, Trans. Mater. Process., Vol. 11, pp. 165~170.
- [7] J. E. Lee, T. K. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2008, Design of the cross sectional shape of intermediate die for shaped drawing of spline, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 8, pp. 550~555.
- [8] D. H. Kim, D. J. Kim, B. M. Kim, 1998, Process design of multi-step wire drawing using artificial neural network, Trans. Mater. Process., Vol. 7, No. 2, pp. 127~138.