

## 역추적 기법을 활용한 중공형 LM-Guide Rail의 맨드렐 인발 금형 설계

김병민<sup>1</sup> · 김상현<sup>2</sup> · 이경훈<sup>#</sup>

### Die Design in Mandrel Drawing by using Backward Tracing Scheme: A Case for Hollow Linear Motion Guide Rail

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

(Received June 23, 2017 / Revised July 19, 2017 / Accepted August 1, 2017)

#### Abstract

In this paper, a design method for an intermediate die was developed to manufacture a hollow linear motion guide rail in mandrel drawing process based on virtual die method and backward tracing scheme. FE simulations and mandrel drawing experiments using Mn55Cr carbon steel were performed to prove the effectiveness of the proposed design method. Results of FE simulations and experiments showed that the proposed design method could lead to drawn products with sound shape and the highest dimensional precision.

**Key Words** : Mandrel Drawing, Backward Tracing Scheme, Hollow Linear Motion Guide Rail, FE-simulation, Shape Drawing Experiment

#### 1. 서론

맨드렐 인발 공정은 일정한 단면형상을 가지면서 길이가 긴 중공형 기계부품을 제조할 수 있는 소성가공 공정이다. 대표적인 중공형 인발 제품인 리니어 모션 가이드 레일(LM-guide rail)은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 자동차, 반도체, 디스플레이 제조장비는 물론 공작기계, 정밀 측정기기 등의 직선운동부의 핵심부품으로 사용되며 높은 정밀도가 요구된다 [1,14,15].

대부분의 이형 강재부품은 일반적으로 다단 형상 압연 및 인발 공정을 통해 제조되기 때문에 성형하중 및 국부변형을 최소화하고 최종제품의 치수정밀도를 향상시키기 위한 공정 설계가 필요하다. 이형 인발 공정 설계에 대한 초기 연구들은 정다각형 단

면 봉재의 인발 공정에 대한 성형하중 계산 및 최적의 금형 형상 결정과 재료 유동을 예측하는데 초점을 맞추고 있다[2~6].

인발 제품의 대칭축의 수가 감소되고 단면형상이 복잡해지면, 이형인발 공정은 원활한 재료 유동, 강재의 파단 방지 및 금형 수명 향상을 위해 다단 패스로 설계되어야 한다. 최근에 다단 이형인발 공정에 대한 유한요소해석 및 실험을 이용한 연구들이 활발히 진행되고 있다. Joun과 Hwang은 원형 제품의 인발과 압출 공정에서의 최적 패스 설계에 관한 연구를 수행하였고[7], Brucker 등은 다단 이형인발 공정에 대한 전문가 시스템을 개발하였다[8]. Yoshida 등은 다단 패스 인발 실험을 통해 스테인리스강의 인발 가공조건을 검토하였고 유한요소법을 이용하여 분석하였다[9]. Lee와 Kim 등은 단면형상이 복잡

1. 부산대학교 기계공학부

2. 동국제강 중앙기술연구소 봉형강 연구팀

# Corresponding Author: Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: submarine@kmou.ac.kr



Fig. 1 Photograph of LM-guide rail assembly

한 이형 강재부품을 제조하기 위해 가상금형법, 단면분할법 및 전기장 해석법과 같은 중간 금형 설계법을 제안하였다[10~13].

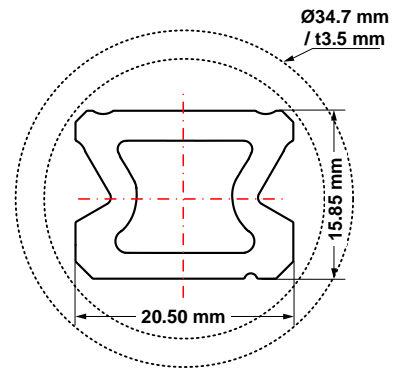
최근 수송기계 부품의 경량화 및 원가 절감을 위해 중공형 이형 강재부품의 개발 요구가 증대되고 있다. 하지만, 대부분의 연구들은 중실형 이형인발 공정의 성형하중, 코너 채움, 균일 변형 등에 등에 관한 것들이다. 이에 반해 Lee와 Kim 등은 중공형 리니어 모션 가이드 레일을 제조하기 위해 수정 가상금형법을 제안하였지만[14,15], 중공형 인발 제품의 내부 형상 제어 및 패스 수 감소에 관한 추가적인 연구를 필요로 하였다.

본 연구의 목적은 중공형 리니어 모션 가이드 레일을 제조하기 위한 다단 이형인발 공정 시 중간 금형을 설계하는 것이다. 기존 3패스의 튜브 싱킹 공정을 대체할 수 있는 2패스의 맨드릴 인발 공정 설계를 위하여 역추적 기법(backward tracing scheme)을 이용하였다. 1<sup>st</sup> 패스에서 관재를 튜브 싱킹 공정으로 이형 인발한 후, 2<sup>nd</sup> 패스에서는 인발재의 내부 형상을 제어하기 위한 맨드릴 인발 공정을 적용하여 제품을 성형하였다. 제안된 공정 설계안에 대하여 다단 성형해석 및 맨드릴 인발 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

## 2. 역추적 기법을 이용한 중간 금형 설계

### 2.1 중간 금형 형상 설계

중간 금형의 형상 설계를 위해서는 먼저 초기 소재의 형상 및 크기가 결정되어야 한다. 본 연구에서 초기 형상은 원형으로 제한하였으며, 소재의 직경은 패스 수를 고려하여 최종 제품의 외접원 직경보다 8~10mm 정도 크게 결정하였다. Fig. 2는 초기 관재



..... Initial tube — LM-Guide Rail

Fig. 2 Cross section of initial tube and LM-guide rail

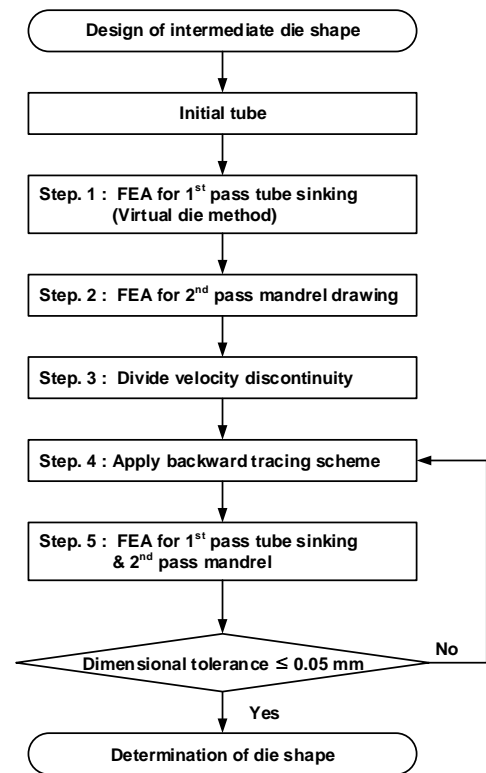


Fig. 3 Flow chart of backward tracing scheme

및 중공형 리니어 모션 가이드 레일의 단면 형상을 나타낸 것이다[14]. 초기 관재의 직경과 두께는 각각 34.70mm와 3.5mm이다. 역추적 기법을 이용한 중간 금형의 형상 설계 순서는 Fig. 3에 나타내었으며 다음과 같다.

1) 가상금형법을 통해 설계된 금형을 이용하여 1<sup>st</sup> 튜브 싱킹 및 2<sup>nd</sup> 맨드릴 인발 공정에 대한 예비 성

형해석을 수행한다. 성형된 제품의 치수 오차 및 내부형상을 확인한다.

2) 2<sup>nd</sup> 맨드렐 인발 공정의 속도불연속영역을 분할한 후, 역추적 기법을 적용한다.

3) 역추적 기법을 통해 도출된 중간 금형을 이용하여 이형인발 공정의 성형해석을 수행한다. 1<sup>st</sup> 튜브 싱킹 및 2<sup>nd</sup> 맨드렐 인발 공정에 대한 해석 후 중공형 제품의 치수 오차 및 내부형상을 확인한다.

### 2.2 유한요소해석 조건

중간 금형 형상 설계법의 유효성을 검증하기 위해 상용 유한요소해석 S/W인 DEFORM-3D를 이용하여 3차원 성형해석을 수행하였다. 사용된 소재는 Mn55Cr강이며, 유동응력식은 아래 식 (1)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 944.3\bar{\epsilon}^{0.184} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

다단 인발 공정은 총 2패스로 구성되었으며, 초기 소재의 길이는 50mm로 설정하였다. 실제 작업 현장에서는 각 패스 별 인발 후 응력제거 및 가공성 향상을 위한 풀림 열처리를 실시한다. 이를 고려하기 위하여 1<sup>st</sup> 패스에서 성형된 중간재는 유효변형률을 0으로 재설정하여 2<sup>nd</sup> 패스의 초기 소재로 사용되었다. 소재와 금형 간의 마찰계수는 인산염 피막처리를 고려하여 0.057로 정의되었다[11,14].

Fig. 4는 예비 인발공정의 해석 모델을 나타낸 것이다. 1<sup>st</sup> 패스 튜브 싱킹 금형의 단면형상은 가상금형법을 적용해 설계되었으며, 2<sup>nd</sup> 패스에서의 맨드렐 및 금형 형상은 개발목표 형상을 기준으로 설계되었다. Fig. 5는 2<sup>nd</sup> 패스 맨드렐 인발 성형해석 시 속도불연속면에서의 해석 시간( $t_{total}$ )을 나타낸다.  $\Delta t$ 만큼  $n$ 등분된 미소 튜브에 대한 역추적 기법의 해석 과정을 Fig. 6에 나타내었다. 미소 분할된 튜브에 대한 전방 하중 시뮬레이션의 결과로 나타난 속도 벡터를 역으로 대입하여 역추적 해석을 실시한다[16]. 금형의 입측까지 역추적 해석을 순차적으로 실시하여 2<sup>nd</sup> 패스에서의 맨드렐 및 금형 단면형상을 설계한다. Fig. 7은 재설계된 이형인발 공정의 해석 모델을 나타낸 것이다. 1<sup>st</sup> 튜브 싱킹 및 2<sup>nd</sup> 맨드렐 인발 공정의 단면감소율은 각각 22.8%와 33.2%이다.

### 2.3 유한요소해석 결과 및 고찰

성형해석 후 소재의 유효변형률 분포 및 치수 오

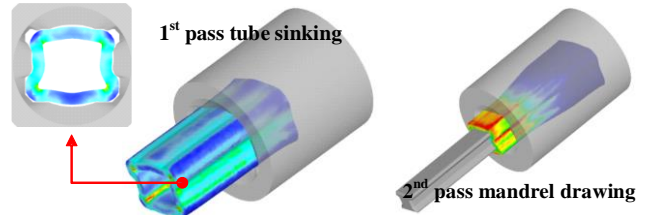


Fig. 4 FE analysis of pre-drawing process (Step. 1 & 2)

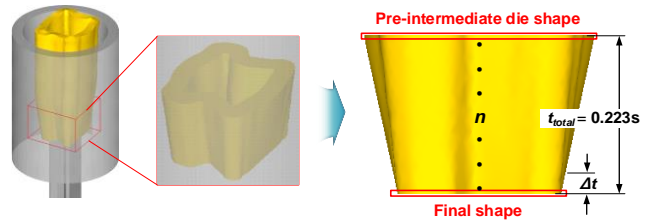


Fig. 5 Illustration of velocity discontinuity in 2<sup>nd</sup> pass mandrel drawing (Step. 3)

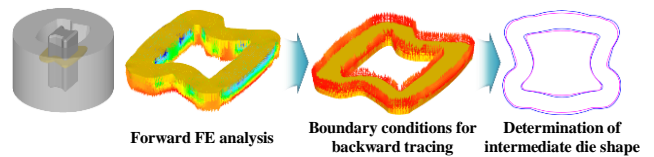


Fig. 6 Illustration of backward tracing scheme (Step. 4)

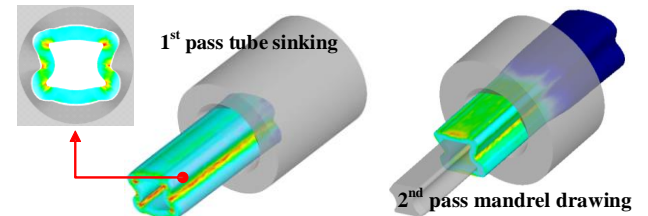
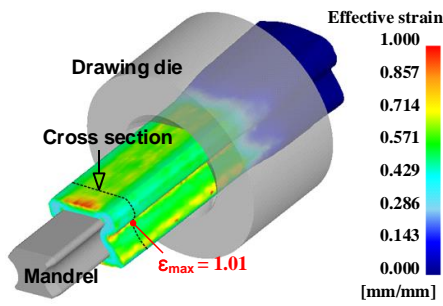
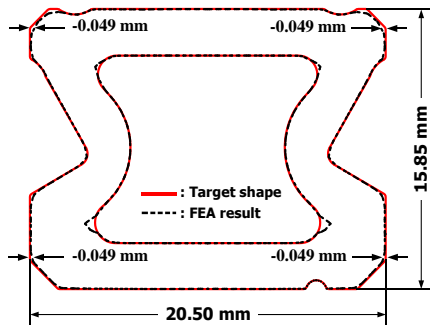


Fig. 7 FE analysis of shape drawing process (Step. 5)

차를 Fig. 8에 나타내었다. 다이 반각이 가장 큰 측면 언더컷 부분에서 국부적인 변형집중으로 인해 가장 높은 변형률 값이 나타났다. 개발목표 외곽형상과 성형된 제품의 단면형상을 비교하였을 때, 리니어 모션 가이드의 네 모서리 부분에서 0.049mm의 치수 오차가 확인되었다. 또한 하단부 내부에서 응력집중 현상으로 인한 파단이 발생할 수 있기 때문에 실제 사용환경에서 제품의 내구성을 보장하기 어렵다. 내부의 형상이 뾰족하게 성형되는 원인은 1<sup>st</sup> 패스 금형을 통과한 중간재의 내부 둘레와 맨드렐 둘레의 비( $\beta = P_{tube}/P_{mandrel}$ )가 높기 때문이다.

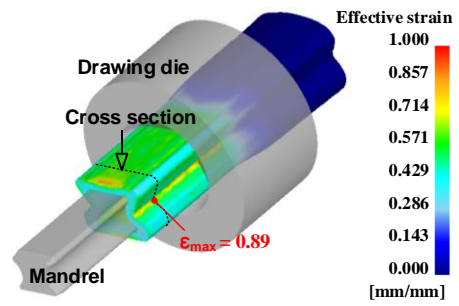


(a) Effective strain distribution

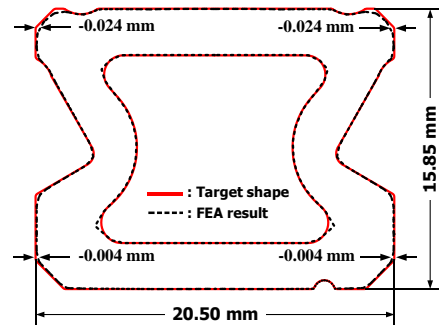


(b) Comparison of deformed section

Fig. 8 FE analysis results of 2<sup>nd</sup> pass mandrel drawing



(a) Effective strain distribution



(b) Comparison of deformed section

Fig.10 FE analysis results of redesigned 2<sup>nd</sup> pass mandrel drawing

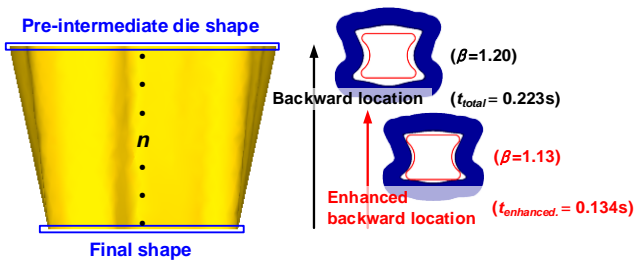


Fig. 9 Enhanced backward tracing scheme for 2<sup>nd</sup> pass mandrel drawing

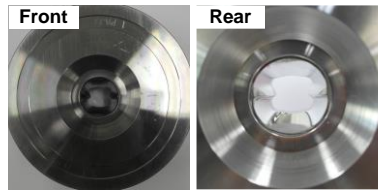
위 결함들을 보완하기 위해서는 제안된 1<sup>st</sup> 패스 금형의 단면형상을 수정해야 한다. Fig. 9는 서로 다른  $\Delta t$ 에 대한 역추적 기법 적용 결과를 나타낸 것이다. 기존 1<sup>st</sup> 패스 금형 형상은 속도불연속면에서의 총 해석시간( $t_{total}$ )에 대하여 역추적 기법을 적용하여 제안된 것이다. 이 때 소재 내부 둘레와 맨드릴 둘레의 비는 1.20이다. 둘레비를 최소화하기 위하여 1<sup>st</sup> 패스 성형된 중간재 내부 표면과 2<sup>nd</sup> 패스 맨드릴이 접촉되는 시점( $t_{enhanced}$ )까지 역추적 기법을 수행하였다. 그 결과 둘레비가 1.13으로 감소된 1<sup>st</sup> 패스 튜브 싱킹 금형의 단면 형상이 새롭게 도출되었다.

재설계된 중간 금형을 적용한 성형해석 후 소재의 유효변형률 분포를 Fig. 10(a)에 나타내었다. 다이 반각이 큰 측면 언더컷 부분에서 유효변형률이 가장 높게 나타났다. 하지만 변형률의 최대값은 1.01에서 0.86로 감소되어 국부변형이 다소 완화되었다. Fig. 10(b)는 성형해석 후 최종 패스에서 제품의 단면형상을 나타낸 것이다. 실선과 점선은 각각 설계형상 및 해석 결과를 나타낸다. 최대 치수오차는 최대 0.024mm이며 제품 허용공차 범위인  $\pm 0.05\text{mm}$ 를 충족시킨다. 또한 내측 하단부의 형상 결함도 완화되었다. 역추적 기법을 이용한 중간 금형 설계법이 맨드릴 인발 공정 설계에 유효함을 확인하였다.

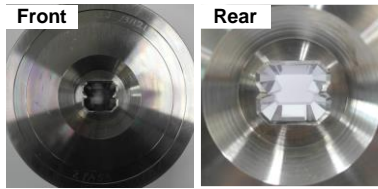
### 3. 맨드릴 인발 실험

제안된 중간 금형 설계법 및 성형해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 중공형 리니어 모션 가이드 레일 제조를 위한 맨드릴 인발 실험을 수행하였다. 사용된 소재는 Mn55Cr강이며, 직경, 두께 및 길이는 각각 34.70mm, 3.5mm와 800mm였다.

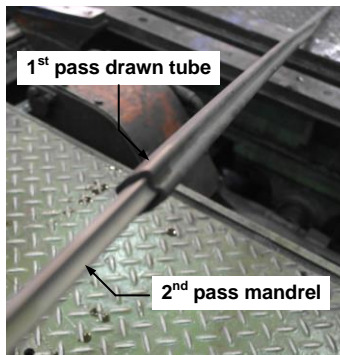




(a) 1<sup>st</sup> pass die



(b) 2<sup>nd</sup> pass die



(c) 2<sup>nd</sup> pass mandrel

Fig.11 Photograph of shape drawing dies and mandrel

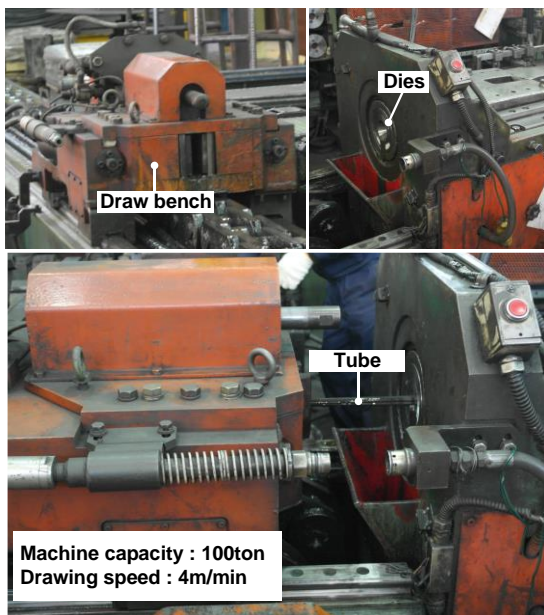


Fig.12 Mandrel drawing experiment

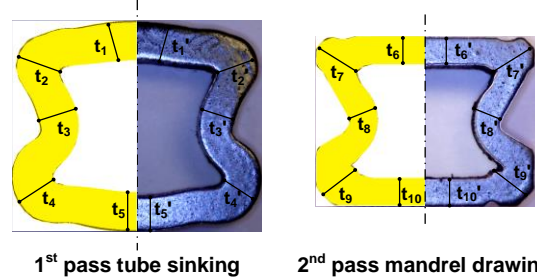


Fig.13 Cross section of drawn product

Table 1 Comparison of measured thickness

FEA (mm)	Experiment (mm)	Error (%)
$t_1=3.93$	$t_1'=3.85$	2.04
$t_2=4.86$	$t_2'=4.35$	10.49
$t_3=3.87$	$t_3'=3.65$	5.68
$t_4=4.38$	$t_4'=4.06$	7.31
$t_5=3.90$	$t_5'=3.63$	6.92
$t_6=2.59$	$t_6'=2.56$	1.16
$t_7=4.24$	$t_7'=4.20$	0.94
$t_8=2.73$	$t_8'=2.80$	-2.56
$t_9=3.84$	$t_9'=3.61$	5.99
$t_{10}=2.58$	$t_{10}'=2.54$	1.55

인발 다이스를 통과하여 드로우 벤치에 체결되기 위해 구상화 열처리된 소재의 앞부분은 포인팅되었다. 인산염 피막처리 된 소재는 4m/min의 속도로 인발 가공되었으며, 각 패스 별 금형 및 사용된 냉간 인발기(100ton)는 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 1<sup>st</sup> 패스 인발 후, 중간재의 잔류 응력을 제거하기 위해 700℃에서 풀림 처리가 실시되었다. 풀림 처리된 소재는 포인팅, 쇼트 블라스트 및 피막처리 후 2<sup>nd</sup> 맨드릴 인발 실험에 사용된다.

각 패스 통과 후 제품의 단면형상 및 치수 측정 위치를 해석결과와 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 실험 결과 제품의 최대 폭 및 높이가 각각 20.45 mm와 15.88mm로 측정되었다. Table 1에 나타나듯이 인발 가공된 제품의 각 위치에 따른 두께는 해석과 실험에서 유사하게 측정되었다. 중공형 리니어 모션 가이드 레일 제조에 있어 2pass 맨드릴 인발 공정이 기존 3pass 튜브 싱킹 공정보다 관제 성형 및 내부 형상 제어가 우수함을 확인하였다[14].

## 4. 결론

본 연구에서는 중공형 리니어 모션 가이드 레일 제조를 위한 맨드릴 인발 공정의 중간 금형 설계법을 제안하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 중공형 인발 제품의 중간 다이스 단면형상을 설계하기 위해 가상금형법 및 역추적 기법이 적용되었다. 중간재 내부와 맨드릴의 둘레비를 감소시켜 중공형 리니어 모션 가이드 레일의 내부 형상을 제어하였다.

(2) 제안된 중간 금형 설계법의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석 및 맨드릴 인발 실험을 수행하였다. 성형된 리니어 모션 가이드 레일의 최대 치수오차를 평가한 결과, 허용공차  $\pm 0.05\text{mm}$  미만으로 나타났고 내부 형상 제어가 우수하였다.

## 후 기

이 논문은 2015학년도 한국해양대학교 신진교수 정착연구비 지원 및 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1C1B5017016).

## REFERENCES

- [1] M. Kobayashi, 1998, The Present Situation of Cold Drawn Special Sections, *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, Vol. 39, No. 4, pp. 43~45.
- [2] B. L. Juneja, R. Prakash, 1975, An Analysis for Drawing and Extrusion of Polygonal Sections, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 15, No. 1, pp. 1~18.
- [3] B. B. Basily, D. H. Sansome, 1976, Some Theoretical Considerations for the Direct Drawing of Section Rod from Round Bar, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, No. 4, pp. 201~208.
- [4] J. S. Gunasekera, S. Hoshino, 1982, Analysis of Extrusion or Drawing of Polygonal Sections Through Straightly Converging Dies, *J. Eng. Ind.*, Vol. 104, No. 1, pp. 38~43.
- [5] R. NB. Wright, P. B. Marine, Y. Yi, 1987, Experimental Mechanics of Shaped Bar Drawing, *Adv. Tech. Plast.*, Vol. 2, pp. 863~870.
- [6] Y. C. Kim, Y. Choi, B. M. Kim, J. C. Choi, 1999, A Study on the Drawing of Rectangular Rod from Round Bar by using Rigid Plastic FEM and Neural Network, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 8, No. 4, pp. 331~339.
- [7] M. S. Joun, S. M. Hwang, 1993, Pass Schedule Optimal Design in Multi-Pass Extrusion and Drawing by Finite Element Method, *Int. J. Mech.*, Vol. 33, No. 5, pp. 713~724.
- [8] M. Brücker, D. Keller, J. Reissner, 1988, Computer-Aided Drawing of Profiles from Round and Square Bar, *CIRP Ann-Manuf. Techn.*, Vol. 37, No. 1, pp. 247~250.
- [9] K. Yoshida, S. Tuihiji, 2002, Multiple Drawing of Rails for Linear Motion Guide, *Adv. Tech. Plast.*, Vol. 1, pp. 367~372.
- [10] 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.
- [11] S. K. Lee, J. E. Lee, T. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2009, Process Design of Multi-stage Shape Drawing Process for Cross Roller Guide, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 26, No. 11, pp. 124~130.
- [12] J. E. Lee, T. K. Lee, S. K. Lee, S. M. Kim, B. M. Kim, 2009, A Study on Cross Sectional Shape Design of Intermediate Pass in the Multi-Stage Shape Drawing, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, No. 4, pp. 283~289.
- [13] S. M. Kim, S. K. Lee, C. J. Lee, B. M. Kim, M. S. Jeong, S. B. Lee, 2012, Process Design of Multi-pass Shape Drawing Considering the Drawing Stress, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 4, pp. 265~270.
- [14] K. H. Lee, S. H. Kim, S. B. Lee, D. H. Kim, S. M. Kim, B. M. Kim, 2015, Design Method for the Intermediate Dies in Multi-Stage Shape Drawing - The Case for a Hollow Linear Motion Guide Rail, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 24, No. 3, pp. 155~160.
- [15] S. H. Kim, 2014, M. D. Thesis, Pusan National University, Busan, pp. 6~17.
- [16] J. H. Lee, B. S. Kang, B. M. Kim, 1995, Feasibility Study on Three-Dimensional Backward Tracing Scheme of Rigid-Plastic Finite Element Analysis, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 4, No. 3, pp. 267~281.