

중공형 LM-Guide Rail 제조를 위한 다단 형상 인발공정의 중간 다이스 설계에 관한 연구

이경훈¹ · 김상현² · 이선봉³ · 김동환⁴ · 김성민⁵ · 김병민[#]

Design Method for the Intermediate Dies in Multi-Stage Shape Drawing: The Case for a Hollow Linear Motion Guide Rail

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

(Received November 6, 2014 / Revised March 4, 2015 / Accepted March 18, 2015)

Abstract

One of the most important aspects in multi-stage shape drawing is the proper design of the intermediate dies especially to provide adequate metal distribution. In the current study, a method for designing the intermediate dies has been developed to manufacture hollow linear motion guide rails by multi-stage shape drawing. The design method is based on the modified virtual die method. The effectiveness of the proposed design method was verified by FE-simulations and experiments using Mn55Cr carbon steel. From the results of the FE-simulations and the experiments, the proposed design method led to a drawn product with a sound shape. The dimensional tolerances of the product were within the allowable specified tolerances.

Key Words : Multi-Stage Shape Drawing, Modified Virtual Die Method, Hollow Linear Motion Guide Rail, FE-simulation, Shape Drawing Experiment

1. 서 론

다단 형상 인발은 일정한 단면형상을 가지면서 길이가 긴 기계부품을 제조할 수 있는 소성가공 공정이다. 대표적인 형상 인발 제품인 리니어 모션 가이드 레일(LM guide rail)은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 반도체, 디스플레이 제조 장비는 물론 공작기계, 정밀 측정기기 등의 직선운동부의 핵심부품으로 사용되며 높은 정밀도가 요구되는 제품이다[1].

리니어 모션 가이드 레일과 같은 형상 인발 제품은 일반적인 축대칭 원형 인발과는 달리 복잡한 단

면형상을 성형하기 위해 최적의 다이스 형상 설계가 필수적이다. 대부분의 형상 인발 제품들은 일반적으로 2~4패스의 다단 인발공정을 통해 성형되기 때문에 성형하중 및 국부응력 집중 현상을 감소시키며 최종제품의 치수정밀도를 향상시키기 위한 적절한 중간패스 다이스의 단면형상을 결정해야 한다 [2]. 하지만 다단 형상 인발공정에서 중간 다이스 형상은 대부분 현장작업자의 경험에 의한 시행착오를 통해 설계되고 있다. 이로 인하여 신제품 제조 시 개발시간 및 비용이 과도하게 소요되고 있다.

최근에는 형상 인발공정에 대한 이론적 접근, 실험

1. PNU-IFAM 국제공동연구소

2. 동국제강 중앙기술연구소 봉형강 연구팀

3. 계명대학교 기계자동차공학부

4. 한국국제대학교 항공부품공학과

5. 광진실업주식회사 생산부

Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ., E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

및 유한요소해석을 이용한 연구들이 활발히 진행되고 있다. Juneja 등은 원형에서 정다각형 단면 봉재의 인발 및 압출에 대한 상계해를 유도하였고[3], Basily 등은 원형봉에서 형상이 복잡한 정다각형

단면 형상의 인발공정에 대해 상계해법을 이용하여 최적의 다이 형상을 제시하였다[4]. Gunasekera 등은 선적분법을 이용하여 인발 및 압출공정에 대한 상계해석을 수행하여 선형 및 원추형 금형 형상을 정의하였다[5]. Kim 등은 직사각형 인발공정에 대해 동일한 마찰 조건, 직사각형 비에 대해 짧은 변과 긴 변의 다이 반각과 단면적 감소율이 코너 채움에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다[6]. Brucker 등은 원형이나 사각재로부터 이형 제품을 제조하기 위한 다단 형상인발 공정에 관한 전문가 시스템을 개발하였다[7]. Lee와 Kim 등은 사각·육각 단면, 중실형 리니어 모션 가이드 및 스플라인 형상과 같은 다양한 이형 제품을 생산하기 위해 가상금형법, 단면분할법 및 전기장 해석법을 중간 다이스 단면형상설계에 적용하였다[8~11]. 최근 경량화 및 원가 절감을 위해서 관재를 이용한 이형 제품의 개발 요구가 증대되고 있지만, 현재까지 발표된 연구들은 대부분 중실형 형상 인발공정설계에 관한 것들이다.

따라서, 본 연구의 목적은 중공형 이형 제품 제조를 위한 다단 형상 인발공정 시 중간 다이스 형상 설계법을 개발하는 것이다. 대표적인 형상 인발 제품인 리니어 모션 가이드 레일을 중공형으로 제조하기 위해 수정 가상금형 설계법(Modified virtual drawing die method)을 제안하여 중간 다이스 형상을 설계하였다. 제안된 설계법에 대하여 성형 해석 및 인발 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

2. 가상금형 설계법을 이용한 중간 다이스 형상 설계

2.1 가상금형 설계법

중간 다이스 형상 설계를 위해서는 먼저 초기 소재의 형상 및 크기가 결정되어야 한다. 본 연구에서 초기 형상은 원형으로 제한하였으며, 초기 소재의 직경은 패스 수를 고려하여 최종 제품의 외접원 직경보다 8~10mm 정도 크게 선정하였다. 초기 소재가 최종 제품보다 작거나 같을 경우, 금형 내부를 완전히 충전시킬 수 없기 때문이다. Fig. 2는 리니어 모션 가이드 레일 및 초기 관재의 단면 형상과 치수를



Fig. 1 Photograph of LM-guide rail assembly

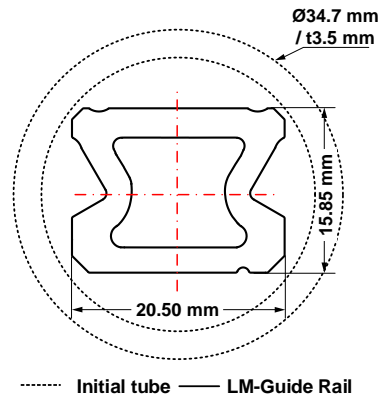


Fig. 2 Cross section of initial tube and LM-guide rail

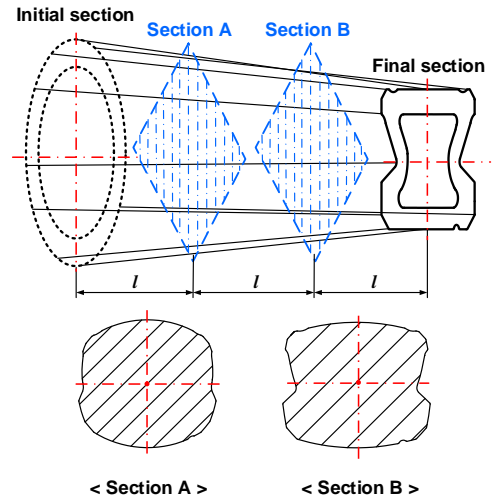


Fig. 3 Virtual drawing of LM-guide rail

나타낸 것이다. 초기 관재의 직경은 34.70mm이고, 다단 튜브 싱킹 공정 중 두께가 두꺼워지는 현상을 고려하여 초기 관재의 두께는 3.5mm로 결정하였다.

본 연구에서는 Kim 등이 제안한 형상계수법을 응용하여 다단 형상 인발공정 시 중간 다이스 형상을 설계하였으며, 설계절차는 아래와 같다[9].

- 1) 최종 단면 형상의 외접원 직경을 계산하다.

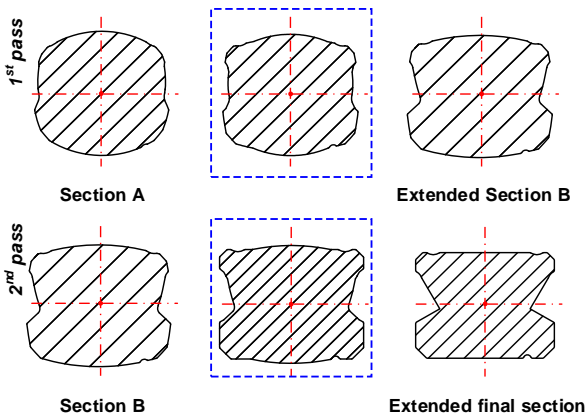


Fig. 4 Intermediate die shapes for each pass

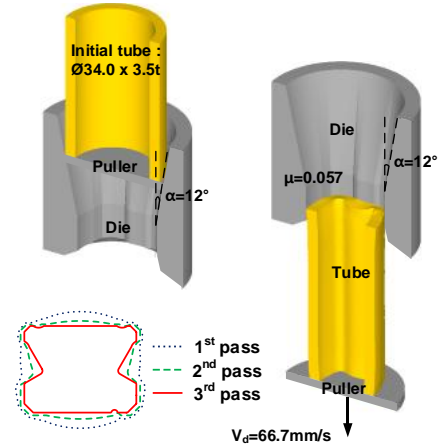


Fig. 5 3D FE-Model for LM-guide rail

2) 외접원 직경 및 패스 수를 고려한 초기 관재의 직경을 결정한다.

3) 초기 단면 및 최종 단면 형상의 도심을 일치시킨 후, Fig. 3과 같이 가상급형을 구성한다.

4) 인발공정의 패스 수에 따라 Fig. 3과 같이 가상급형을 등간격으로 절단하여 각 패스에 대한 중간 다이스 형상을 얻는다.

5) 임의로 정의된 중간 다이스 형상의 단면적을 고려하여 각 패스 별 형상계수(S.F.: Scale factor)를 계산한다.

$$S.F. = \sqrt{\frac{A_{i-1}}{A_i}} = \sqrt{\frac{1}{1-\gamma}} \quad (1)$$

여기서, i 는 패스 순서이며, γ 는 해당 패스에 대한 단면감소율이다. 계산된 형상계수(1.156)를 이용하여 최종 단면 형상을 확대시킨다.

6) Fig. 4에 나타낸 것과 같이 단계 4)에서 확보된 중간 다이스 형상과 단계 5)에서 정의된 확대 단면 형상을 겹치도록 연결한다. 외곽선들을 추출하여 모서리 부분의 감면율이 크고 언더컷 부분의 감면율이 낮은 새로운 중간 다이스 단면 형상이 결정된다.

2.2 유한요소해석 조건

가상급형 설계법의 유효성을 검증하기 위해 상용 유한요소해석 S/W인 DEFORM-3D를 이용하여 3차원 성형해석을 수행하였다. 적용된 소재는 Mn55Cr이며, 유한요소해석을 위해 인장시험을 통해 확보된 유동응력식은 식 (2)와 같다.

$$\bar{\sigma} = 944.3\bar{\epsilon}^{0.184} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

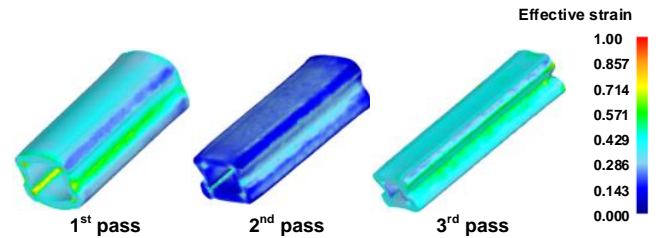


Fig. 6 Effective strain distribution at each drawing pass

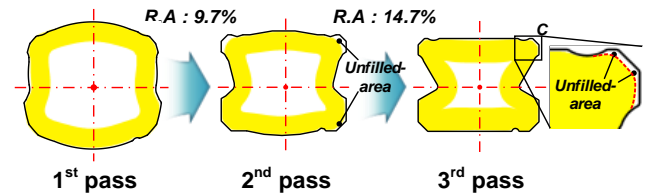


Fig. 7 Cross-sectional shape at each drawing pass

Fig. 5와 같이 인발 공정은 총 3패스로 구성되어 있으며, 초기 소재의 길이는 50mm로 설정하였다. 각 패스에서 다이스 단면형상은 가상급형 설계법을 기반으로 제안되었다. 실제 작업 현장에서 각 패스 별 인발 후 응력제거 및 가공성 향상을 위한 풀림 열처리를 실시한다. 이를 고려하기 위하여 각 패스에서 성형된 인발품은 유효변형률을 0으로 재설정하여 다음 패스의 초기 소재로 투입되었다. 관재와 다이스 간의 마찰계수는 인산염 피막처리를 고려하여 0.011로 정의되었다[9].

2.3 유한요소해석 결과

각 패스에 대한 성형 후 소재의 유효변형률 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 모든 패스에서 측면 언더컷 부분에서 국부적인 변형집중으로 인해 변형률 값이 높음을 알 수 있다. 형상 인발의 경우, 단면의 각

위치마다 다이스 반각의 크기가 변화된다. 반각이 가장 큰 지점인 언더컷 부분에서 유효변형율이 높게 나타나고 각도가 작은 부분에서는 유효변형률이 상대적으로 낮게 분포된다.

Fig. 7은 성형해석 후 각 패스 별 제품 단면을 나타낸 것이다. 개발목표 외곽형상과 제품의 단면형상을 비교하였을 때, 리니어 모션 가이드 레일의 네 모서리 부분에서 미충진 결함이 발생하였다. 폭 및 높이 치수오차는 각각 최대 0.255mm와 0.389mm였다. 중공형 소재를 이용한 형상 인발공정의 경우, 중실형 소재를 적용하였을 때보다 소성변형영역에서 소재 내부 반력이 감소되며 베어링 부에서의 인장력에 의하여 미충진 결함이 발생하기 쉽다. 따라서, 성형해석 결과에서 나타난 미충진 결함을 보상할 수 있는 급형의 형상 설계방법이 필요하다.

3. 수정 가상급형 설계법을 이용한 중간 다이스 형상 설계

3.1 수정 가상급형 설계법

다단 형상 인발공정에서 중간 패스 다이스의 단면형상 설계법 중 하나인 가상급형 설계법을 중공형 인발 제품의 다이스 설계에 활용하기 위하여 다음의 두 가지 수정 설계법을 개발하였다. 치수 오차를 보상하기 위해 중간 다이스 단면 형상을 수정하는 Overall-offset 설계법과 최종 다이스 단면 형상을 수정하는 Local-offset 설계법의 절차는 다음과 같다.

Overall-offset 설계법은 중간 다이스의 단면형상을 확대시켜 최종 제품의 치수오차를 감소시키는 방법이다. 가상급형 설계법을 적용한 2nd 패스 성형해석 시 미충진된 영역의 최대 오차만큼 2nd 다이 단면형상을 확대시킨다. 다이스 단면적과 관재 단면적으로부터 도출된 수정 형상계수(M.S.F.: Modified scale factor)를 기존 2nd 다이 단면형상에 곱하여 오프셋된 단면형상을 제시한다. 이를 통해 3rd 패스에 투입될 소재의 크기를 상대적으로 증가시킴으로써 최종 제품의 치수 오차를 감소시키는 방법이다.

$$M.S.F. = \sqrt{\frac{A_{i-1,die} + (A_{i-1,tube} - A_{i,tube})}{A_{i,die}}} \quad (3)$$

여기서, A_{die} 는 다이 출구부 단면적, A_{tube} 는 성형된 인발재의 단면적, i 는 패스 수를 나타낸다. 2nd 패스에

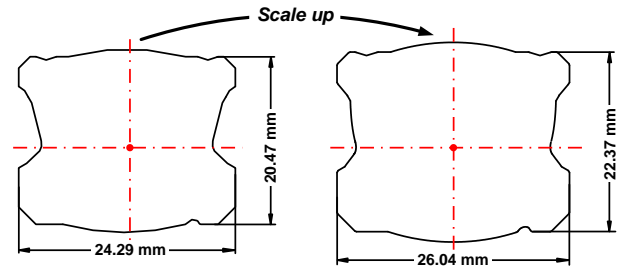


Fig. 8 Application of overall-offset at 2nd drawing pass

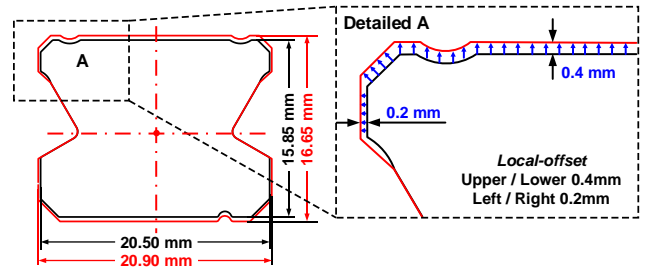


Fig. 9 Application of local-offset at 3rd drawing pass

서 계산된 수정형상계수 값은 1.176이었으며, 오프셋된 2패스 다이 단면형상을 Fig. 8에 나타내었다.

Local-offset 설계법은 인발 성형 후 발생된 치수 오차만큼 최종 패스의 다이들 부분적으로 확대하여 새로운 다이 단면형상을 도출하는 것이다. 가상급형 설계법을 적용한 3rd 패스 성형해석 결과를 바탕으로 각 모서리부와 상·하면에서 발생된 치수오차를 보상하기 위해 부분적으로 확대하였다. 좌·우 모서리부와 상·하면을 각각 0.2mm와 0.4mm만큼 확대하였다. Fig. 9는 수정된 3rd 패스 다이 단면형상을 나타내고 있다.

3.2 유한요소해석 조건 및 결과

수정 가상급형 설계법의 유효성을 검증하기 위해 해석을 수행하였다. 2nd 패스와 3rd 패스의 다이스 모델은 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 제시된 형상으로 수정되었으며, 그 외 조건은 이전 해석조건과 동일하다.

Fig. 10은 성형해석 후 최종패스에서 리니어 모션 가이드 레일의 단면을 나타낸 것이다. 실선은 설계된 외곽 형상이며, 점선은 해석 결과를 나타낸다. 리니어 모션 가이드 레일의 최대 치수오차는 좌·우 모서리부 및 상·하면에서 각각 0.023mm와 0.038mm로 나타났다. 이는 제품 허용공차 범위인 ±0.05mm를 충족시키므로 수정 가상급형 설계법이 중공형 형상 인발 제품 제조 시, 외곽 형상을 설계하는데 있어 유효함을 확인할 수 있었다.

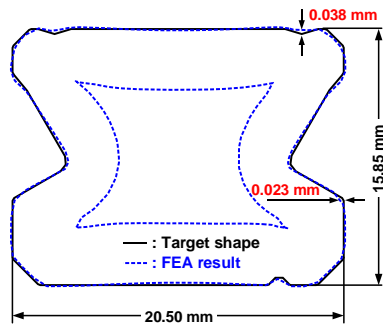
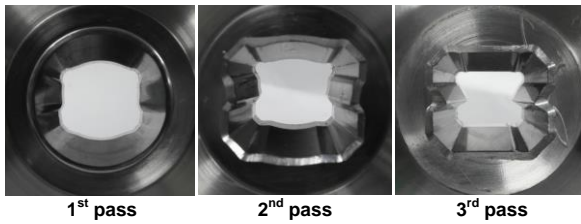
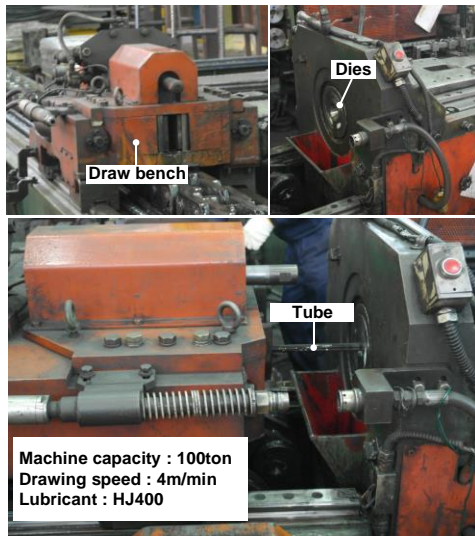


Fig.10 Comparison of deformed section



(a) Shape drawing dies



(b) Cold drawing machine

Fig.11 Shape drawing experiment

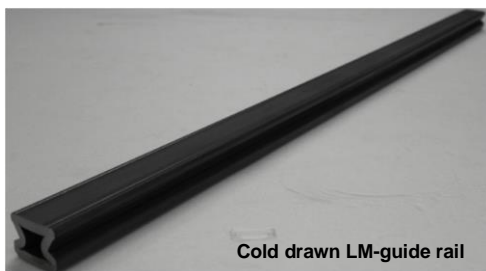


Fig.12 Manufactured LM-guide rail

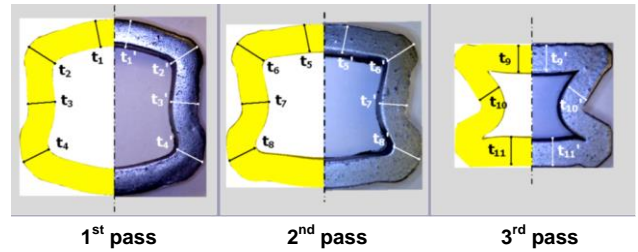


Fig.13 Cross section of drawn product

Table 1 Comparison of measured thickness

FEA (mm)	Experiment (mm)	Error (%)
$t_1=3.72$	$t_1'=3.70$	0.54
$t_2=3.98$	$t_2'=3.95$	0.75
$t_3=3.71$	$t_3'=3.64$	1.89
$t_4=3.85$	$t_4'=3.84$	0.26
$t_5=3.66$	$t_5'=3.62$	1.09
$t_6=4.24$	$t_6'=4.30$	-1.42
$t_7=3.61$	$t_7'=3.64$	-0.83
$t_8=4.06$	$t_8'=4.10$	-0.99
$t_9=3.73$	$t_9'=3.58$	4.02
$t_{10}=3.29$	$t_{10}'=3.25$	1.22
$t_{11}=3.88$	$t_{11}'=3.75$	3.35

4. 중공형 형상 인발 실험

본 연구에서 제안한 설계법 및 성형해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 중공형 형상인발 실험을 수행하였다. 적용 소재는 실제 현장에서 제품으로 적용되는 Mn55Cr강이다. 사용된 초기 관재의 직경, 길이 및 두께는 각각 34mm, 800mm와 3.5mm였다.

금형을 통과하여 드로우 벤치에 체결되기 위해 관재의 앞부분은 포인팅 처리되었다. 관재는 구상화 열처리 후 인산염 피막처리 후 인발되었다. 인발속도는 66.7mm/s이며, Fig. 11에 각 패스에 따라 제작된 인발 다이스 및 사용된 냉간 인발기(100ton)를 나타내었다. 한 패스 인발 후, 인발제품의 잔류 응력을 제거하기 위해 700°C에서 풀림처리가 실시된다. 풀림 처리된 소재는 다시 포인팅, 쇼트 블라스트 및 피막처리 후 다음 패스 형상 인

발 실험에 사용된다.

Fig. 12에 형상 인발 실험을 통해 생산된 제품을 나타내었으며, Fig. 13은 각 패스 통과 후 제품의 단면형상 및 치수 측정위치를 해석결과와 비교하여 나타낸 것이다. Table 1에 나타나듯이 인발 성형된 제품의 각 위치 별 두께는 해석과 실험에서 유사하게 측정되었다.

5. 결론

본 연구에서는 중공형 리니어 모션 가이드 레일 제조를 위한 다단 형상 인발공정의 중간 다이스 설계법을 제안하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 중공형 인발 제품의 중간 다이스 단면형상을 결정하기 위해 기존의 가상금형 설계법을 적용하였다. 하지만 소성변형영역에서 관재 내부 반력의 감소 및 인장력에 의하여 다이스 모서리부에 미충진 결함이 발생하였다.

(2) 미충진 결함 개선을 위해 수정 형상계수를 이용하여 중간 다이스 단면 형상을 확대시키는 Overall-offset 설계법과 최종 패스의 다이 단면형상을 발생된 치수오차만큼 부분적으로 확대시키는 Local-offset 설계법을 조합한 수정 가상금형 설계법을 제안하였다.

(3) 수정 가상금형 설계법의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석 및 형상 인발 실험을 수행하였다. 성형된 리니어 모션 가이드 레일의 최대 치수오차를 평가한 결과, 허용공차 $\pm 0.05\text{mm}$ 미만으로 나타났다. 본 연구에서 제시한 설계법을 적용할 경우, 최종제품의 치수정도가 향상됨을 알 수 있었다.

이상으로, 본 연구에서 제시한 수정 가상금형 설계법을 적용할 경우 중공형 형상 인발공정의 중간 다이스 설계를 보다 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 소재부품기술개발사업[10042740, 중량 40% 저감 중공형 LM-Light Rail 개발]과 PNU-IFAM 국제공동연구소의 지원으로 수행하였음.

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] 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. 627~632.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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. 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.