

다단 이형인발공정의 중간패스 단면형상 설계에 관한 연구

이재은¹ · 이태규¹ · 이상곤² · 김성민³ · 김병민[#]

A Study on Cross Sectional Shape Design of Intermediate Pass in the Multi-Stage Shape Drawing

J. E. Lee, T. K. Lee, S. K. Lee, S. M. Kim, B. M. Kim

(Received January 19, 2009)

Abstract

The multi-stage shape drawing is used to obtain long shaped products with high levels of dimensional accuracy and quality. It is important to design the cross sectional shapes of the intermediate passes to meet the required dimensional accuracy of the final product in the multi-stage shape drawing. Until now, the cross sectional shapes of the intermediate passes have been designed by the experiences. It is still remained unsolved problem to design the cross sectional shapes of intermediate pass drawing dies in the multi-pass shape drawing. In this study, a new technique is proposed to design the cross sectional shapes of intermediate passes. The proposed method is applied to a multi-stage shape drawing for a LM-guide which is one of the representative shape drawing products. In order to verify the effectiveness of the proposed method, FE-simulation and experiments have been carried out. The dimensional accuracy of the proposed method is compared with that of the conventional shape drawing process designed by the industrial engineers.

Key Words : Shape Drawing, Intermediate Pass, Cross sectional Shape, LM-Guide, Dimensional Accuracy

1. 서 론

기존의 기계가공이나 열간압출공정을 통해 생산되던 단면형상이 복잡한 제품을 냉간 이형인발 공정으로 생산함으로써 과도한 칩(Chip) 발생에 따른 소재손실, 가열에 따른 에너지 비용을 획기적으로 절감할 수 있으며, 기계적 성질이 보다 우수한 제품을 얻을 수 있다[1].

축대칭 인발공정과 달리 단면형상이 복잡한 이형인발(Shape drawing)공정은 인발하중, 단면감소를, 생산효율 등을 고려하여 일반적으로 2~3 패스 내의 인발로 행해진다. 다단 이형인발공정에서 초기형상은 대부분 봉재 또는 직사각재이며 요구되는

최종형상의 제품을 생산하기 위해서는 적절한 중간패스 단면형상 설계가 필요하다.

Brücker[2] 등은 원형 및 사각형소재로부터 이형 단면형상 제품 생산을 위한 다단 인발공정에 관한 전문가 시스템을 개발하였고, Hwang[3] 등은 원형 제품 인발 및 압출에 대한 민감도 해석 및 유한요소해석을 통하여 최적 패스설계를 수행하였다. Yoshida[4] 등은 스테인레스강에 대하여 다단 인발실험을 통해 가공조건을 검토하였고, 유한요소법을 적용하여 분석하였다. 그리고 Steuff[5] 등은 8각형 단면의 인발에서 설계방법에 따른 치수 정도와 진직도를 비교 평가하였으며, Renz[6] 등은 새로운 예비형상의 설계방법을 제안하여 실험을

1. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

2. 부산대-IFAM 국제공동연연구소

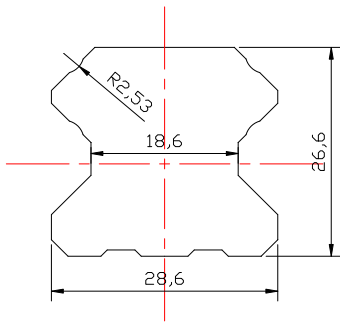
3. 광진실업(주)

교신저자: 부산대학교 기계공학부,

E-mail: bmkim@pusan.ac.kr



(a) Linear motion guide



(b) Dimension of final product

Fig. 1 Photo of linear motion guide

통해 검증하였다. 또한, Kim[7] 등은 직사각형 인발공정에서 중간다이의 단면형상설계방법을 제안하였고, 유한요소해석과 실험을 통해 분석하였다. 이상의 연구들은 주로 이형인발공정에 대한 현상 파악에만 국한되어 있으며, 실제 현장에 적용하기에는 한계가 있다.

이전 연구[8]에서는 치형이 있는 스플라인 이형인발제품에 적용하여 가상금형에 의한 중간패스의 단면형상 설계방법을 제안하였다. 그러나 가상금형은 초기 및 최종형상을 비율적으로 연결하여 구성하므로 대칭면이 2 개 이상인 경우는 설계가 용이하지만 대칭면이 1 개인 리니어 모션 가이드 (Linear motion guide, LM-Guide) 등에 적용하여 설계하기에는 한계가 있다. 따라서, 초기소재로부터 최종제품으로의 소재의 유동을 고려한 중간패스 단면형상 설계방법이 필요하다.

또한, 실제 현장에 용이하게 적용하기 위해서는 초기소재의 크기, 패스, 최종제품의 치수정도 등을 고려한 보다 체계적인 설계방법이 요구된다.

본 연구에서는 현장적용이 용이한 다단 이형인발공정 중간패스 단면형상설계방법을 제안하였다. 이를 이용하여 총 3 패스로 구성된 Fig. 1 과 같은

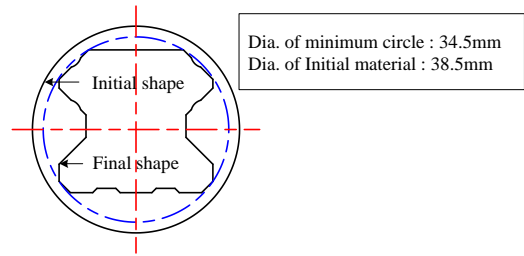


Fig. 2 Initial and final shape of linear motion guide

대표적인 이형인발제품인 리니어모션 가이드에 적용하였다. 설계된 중간패스 단면형상에 대하여 유한요소해석과 실험을 수행하였고, 실제품 생산에 적용되고 있는 공정과 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 중간패스 단면형상 설계방법

2.1 초기소재의 크기 결정

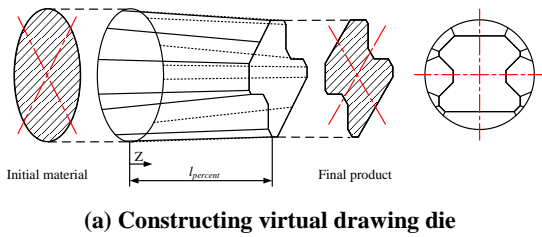
다단 이형인발공정에서 중간패스의 단면형상을 설계하기 위해서는 먼저 초기형상과 최종형상이 주어져야 한다.

본 연구에서 초기형상은 원형으로 제한하였으며, 초기소재의 직경은 패스 수를 고려하여 최종형상에 접하는 원의 직경보다 2~4mm 크게 선정하였다. 그 이유는 초기소재가 인발 시 다이스에 완전히 충전 되기 위해서는 최종형상보다 커야 하며, 중간패스의 단면형상은 초기형상과 최종형상 사이에 존재하기 때문이다. 리니어모션 가이드의 최종형상에 접하는 원의 최소직경은 34.5mm이며, 총 3패스로 구성되어 있으므로 초기소재의 직경은 최소직경보다 4mm 큰 38.5mm로 선정하였다. 이 때, 총 단면감소율은 46.27%이다.

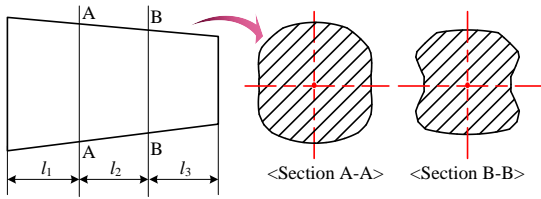
2.2 패스스케줄 결정

직사각형 인발의 경우 기하학적 대칭면이 2개 이상이기 때문에, 다이 입구의 크기에 따라 다이 각도가 대칭면을 기준으로 동일하게 변하게 된다. Kim[7] 등은 이러한 대칭성을 이용하여 가상금형 (Virtual drawing die)을 구성하였다.

본 연구에서는 직사각형이 아닌 단면형상이 복잡한 인발공정에 적용하기 위해 초기형상과 최종형상의 도심을 일치시킨 후 가상금형을 구성하였다. 그 이유는 대칭면이 하나일 때, 도심이 일치할 경우 인발력이 상대적으로 적게 들 뿐만 아니



(a) Constructing virtual drawing die



(b) Cutting virtual drawing

Fig. 3 Virtual drawing die of linear motion guide

Table 1 Reduction of area at each pass by virtual drawing die

Pass number	1	2	3	Total
R.A(%)	14.81	17.70	23.36	46.27

라, 인발시 소재의 휨이나 비틀림 발생을 최소화시켜 진척도를 향상시킬 수 있기 때문이다[9].

초기형상과 최종형상이 결정되면, Fig. 3(a)와 같이 가상금형을 구성한다. 이 때, 초기형상과 최종형상 사이는 소재의 유동을 고려하여 연결된다. 그 다음, Fig. 3(b)와 같이 패스 수에 따라 가상금형을 등간격으로 절단하면 임의의 단면형상과 단면적을 얻을 수 있다. 각 패스에 대한 단면적은 가상금형에 의해 결정된다. 본 연구에서 적용한 리니어모션 가이드의 경우 총 3패스의 인발공정이기 때문에 가상금형을 등간격으로 3등분하였으며, 절단된 단면들의 단면적은 각각 991.642mm², 816.111mm²이다. 이에 따른 각 패스에 대한 단면 감소율은 Table 1에 나타내었다.

2.3 중간다이의 단면형상 결정

실제 인발공정에서 중간다이의 단면형상은 인발력, 치수정도 등을 고려하여 국부적인 단면감소율의 차를 균일하게 하기 위해 최종형상에 유사하게 설계되어야 한다. 이전의 연구[7]에서도 직사각형 인발공정에서 중간다이의 단면형상은 최종제품과 유사하게 하기 위해 가로와 세로의 길이

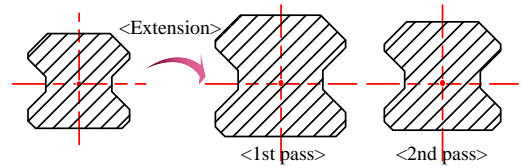
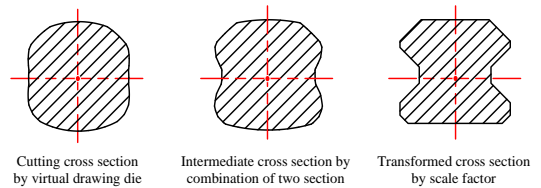
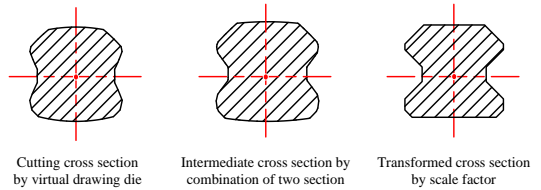


Fig. 4 Transformed final shape using scale factor



(a) 1st pass



(b) 2nd pass

Fig. 5 Intermediate die shapes for each pass

비로서 설계하였다. 또한, Steff[5] 등의 연구에 의하면 최종제품의 미충만율 (u_q)과 국부적인 단면 감소율(r_q) 사이의 관계는 식(1)과 같다.

$$u_q \approx \frac{1}{\gamma_q} \quad (1)$$

따라서, 최종제품의 치수정도 향상을 위해서는 가상금형으로부터 얻은 임의의 단면형상에 대해 언더컷 부분의 감면율은 작게, 모서리 부분의 감면율은 상대적으로 높게 설정해야만 한다. 본 연구에서는 가상금형으로부터 얻은 임의의 단면형상을 최종형상과 유사하게 변형시키기 위해 스케일계수(Scale factor, $S.F$)를 도입하였다.

$$S.F = \sqrt{\frac{A_{i-1}}{A_i}} = \sqrt{\frac{1}{1-\gamma}} \quad (2)$$

여기서, i 는 패스번호이며, γ 는 해당 패스에 대한 단면감소율이다. 식(2)에 의해 계산된 각 패스의 스케일계수는 1.259와 1.142이다.

스케일계수를 이용하면 Fig. 4와 같이 Fig. 3의 절단면과 면적이 동일하며 최종형상과 유사한 단

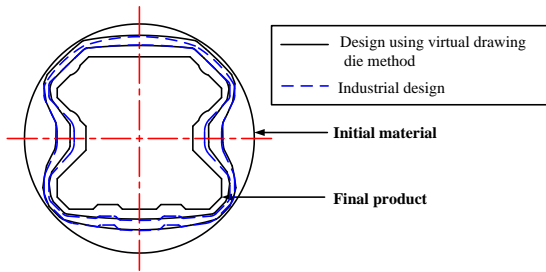


Fig. 6 Comparison of the die shapes between virtual drawing die method and industrial design

면을 얻을 수 있다. 이 때, 절단된 단면과 스케일 계수에 의해 얻어진 단면들의 조합은 면적이 동일하므로 형상변화만 존재하게 된다. 이를 통해 상대적으로 모서리 부분의 국부적인 감면율이 크고 언더컷 부분의 국부적인 감면율이 작은 단면을 얻을 수 있다. 따라서, Fig. 5와 같이 각 패스에 대해서 두 단면들의 조합으로 이형인발공정에 대해 적절한 중간다이의 단면형상이 결정된다.

Fig. 6은 현장도면과 가상금형에 의해 설계된 중간다이의 단면형상을 비교한 결과이다. 가상금형을 이용해 설계된 중간다이의 단면형상과 현장 작업자에 의해 설계된 단면형상이 매우 유사함을 알 수 있다.

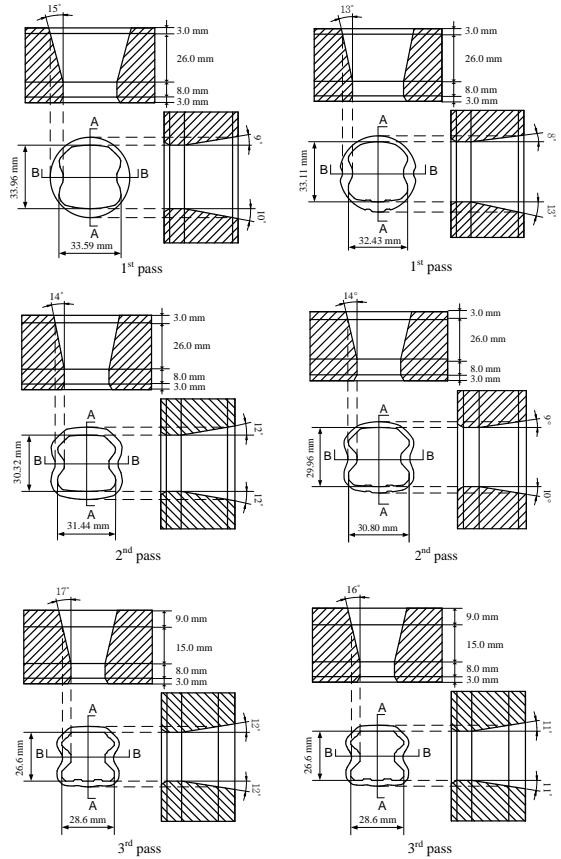
2.4 인발다이 설계

이형인발공정에서 다이입구 형상은 소재의 유입을 고려하여 설계되어야 한다. 일반적으로 유입되는 소재와 다이 사이의 각도는 식(3)과 같은 관계가 성립한다[5].

$$\tan \alpha_i = \frac{\gamma_i}{h_i} \quad (3)$$

여기서, α_i 는 국부영역의 소재와 다이 사이의 각도이며, h_i 는 성형영역에서의 다이 높이, γ_i 는 소재의 국부적인 감면율을 나타낸다. 즉, 이형인발공정에서 다이각도는 다이 높이와 소재의 국부적인 감면율에 따라 결정된다. 따라서, 본 연구에서는 다이입구의 형상은 유입되는 소재형상을 오프셋(Offset)하여 설계하였고, 그 크기는 다이각도를 고려하여 결정하였다. 또한, 다이 입구단면과 다이 출구단면의 도심은 일치하도록 하였다.

이에 따라 결정된 각 패스에 대한 다이 형상을 Fig. 7(a)에 나타내었으며, 현재 제품을 생산하고 있는 다이 형상도 Fig. 7(b)에 함께 나타내었다.



(a) Virtual drawing die (b) Industrial design

Fig. 7 Comparison of die shape between two methods

3. 성형해석 및 결과비교

3.1 성형해석

가상금형에 의한 설계방법의 타당성을 검증하기 위해 현장도면의 조건과 함께 상용 유한요소해석 S/W인 DEFORM-3D를 이용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 적용된 소재는 AISI 4137이며, 유한요소해석을 위해 인장시험을 통해 확보한 소재의 유효 응력-유효 변형률 곡선은 식(4)와 같다.

$$\bar{\sigma} = 1640 \varepsilon^{-0.14} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

해석조건으로 소재와 다이 사이의 마찰상수(m)는 0.1, 인발속도는 90mm/s로 설정하였으며, 해석 시간을 고려하여 초기 소재의 길이는 60.0mm, 요소 수는 60,000개로 설정하였다. 성형해석은 Fig. 8

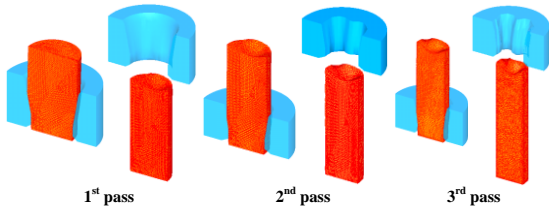
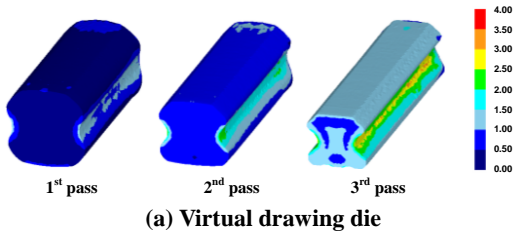
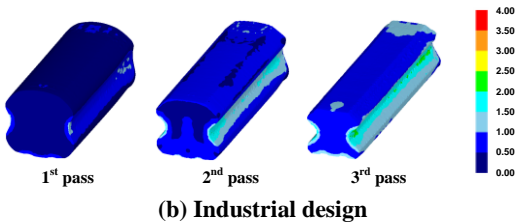


Fig. 8 FE-simulation for linear motion guide



(a) Virtual drawing die



(b) Industrial design

Fig. 9 Distribution of effective strain for two methods

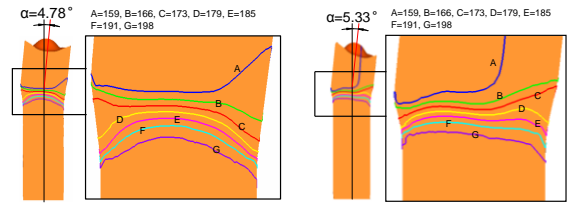
에 알 수 있듯이 대칭면을 고려하여 1/2 단면에 대해 수행하였으며, 첫 번째 패스를 완전히 빠져 나온 소재에 대해 변형이력을 고려하여 두 번째와 세 번째 패스에 대한 해석을 연속적으로 수행하였다.

3.2 성형해석결과

Fig. 9는 각 패스에 대한 성형 후 소재의 유효 변형률 분포를 나타낸 것이다. 두 패스 모두 측면 언더컷 부분에서의 변형집중으로 인해 변형률값이 높음을 알 수 있다.

Fig. 10은 최종패스의 변형영역 내에서의 소재유동 분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서 제시한 설계방법이 현장작업자의 경험에 의한 설계방법에 비해 소재유동이 상대적으로 균일하며, 이로 인해 제품의 진직도가 보다 우수할 것으로 판단된다 [10].

Table 2에 각 패스에 대한 감면율과 최종 패스 통과 후 제품에 대한 미충만율을 나타내었다. 미충만율(Unfilled rate, *U.R.*)은 다음의 식(5)로 계산하



(a) Virtual drawing die

(b) Industrial design

Fig.10 Distribution of velocity(mm/s) for two method

Table 2 Comparison the result of FE-simulation for design method

Case	R.A.(%)			U.R.(%)
	1 pass	2 pass	3 pass	
Virtual drawing die	14.81	17.70	23.36	0.356
Industrial design	20.60	15.98	19.46	0.426

여 평가하였다.

$$U.R. = \frac{(A_{final} - A_{analysis})}{A_{final}} \times 100 \text{ [%]} \quad (5)$$

여기서, A_{final} 은 최종제품의 단면적, $A_{analysis}$ 는 성형해석에 의한 단면적이다. 즉, 미충만율이 낮을수록 치수정도가 우수함을 의미한다.

최종패스에서 미충만율은 현장작업자에 의한 설계방법에 비해 본 연구에서 제시된 설계방법이 보다 우수함을 알 수 있다.

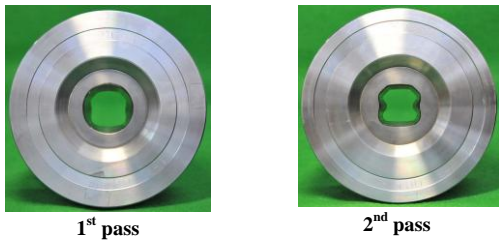
4. 이형인발실험

4.1 실험조건

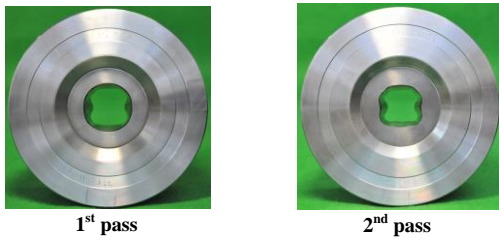
본 연구에서 제시한 중간다이 단면형상설계방법에 대한 성형해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 인발실험을 실시하였다. 실험에 적용한 두 경우의 다이와 인발기를 Fig. 11에 나타내었다.

실험에 사용된 소재는 AISI 4137이며, 초기 소재의 직경은 38.5mm, 길이는 1000.0mm이다.

인발 전에 구상화된 소재가 다이스를 통해 인발기에 충분히 물릴 수 있도록 포인팅 후 피막처리를 하여 실험을 실시하였으며, 인발 후에는 응력제거 열처리, 쇼트 블라스트, 포인팅, 그리고 피막처리 후 2차 및 3차 인발을 실시하였다. 인발속도는 모든 패스에 대해 90mm/s로 동일하게 설정하였다.



(a) Virtual drawing die



(b) Industrial drawing die

Fig. 11 Shaped drawing dies

Table 3 Result of experiment after drawing

Pass number	Drawing load(ton)			
	Virtual drawing die		Industrial design	
	FEM	Exp.	FEM	Exp.
1 st	21.082	21.641	24.981	24.592
2 nd	19.435	20.657	18.540	19.673
3 rd	22.297	23.116	20.631	20.903
U.R. (%)	0.356	0.178	0.426	0.232

4.2 실험결과 및 검토

인발실험을 통해 각 패스에 대한 인발력과 최종 인발된 제품에 대해 3차원 투영기를 이용하여 횡단면의 단면적을 측정하였고, 미충만율을 계산하여 평가하였다.

Table 3은 실험결과를 유한요소해석 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 각 패스에 대한 인발력의 경우 유한요소해석 결과와 비교하여 차이가 거의 없었으며, 경향이 유사하였다.

최종제품에 대한 미충만율의 경우 유한요소해석 결과보다 실험결과가 보다 우수하였다. 해석결과와 실험결과 미충만율 차이는 유한요소해석 시 요소수의 제약에 의한 것으로 판단된다.

Table 4는 본 연구에서 제시한 설계방법에 대한 인발실험 후 각 패스의 단면형상과 최종제품을 나타낸 것이다.

이상의 이형인발실험을 통해 본 연구에서 제시

Table 4 Final product after experiment

Pass No.	Cross section	Final product
1st		
2nd		
3rd		

한 중간다이 설계방법에 대한 타당성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 다단 이형인발공정에서 중간 패스의 단면형상 설계방법을 제시하였다. 제시된 설계방법을 리니어모션 가이드 생산을 위한 이형인발공정에 적용하여 그 타당성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서는 가상금형을 이용한 다단 이형인발공정의 중간 패스 단면형상 설계방법을 제안하였다. 제안한 설계방법에 대하여 대칭면이 하나인 리니어모션 가이드 생산을 위한 3패스 인발공정에 적용하였다. 제안된 설계방법은 현장작업자의 경험에 의한 시행착오법으로 설계된 중간패스의 단면형상과 매우 유사한 단면형상을 얻을 수 있다.

(2) 유한요소해석을 수행하였고, 단면적의 미충만율을 계산하여 단면치수정도를 평가하였다. 그 결과 가상금형을 적용한 설계방법의 단면치수정도가 보다 우수함을 알 수 있었다.

(3) 가상금형을 이용한 설계방법의 타당성을 검증하기 위하여 이형인발 실험을 수행하였다. 실험결과 인발력은 유한요소해석결과와 거의 유사하

였으며, 단면치수정도는 실험결과가 다소 우수하였다.

(4) 본 연구에서 제시한 가상금형을 이용한 설계방법을 적용할 경우 현장작업자의 경험에 의한 시행착오방법보다 체계적으로 다단 이형인발공정의 중간 패스 단면형상을 설계할 수 있으므로, 다양한 이형인발제품 생산에 용이하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업 및 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. K20601000004-08E0100-00410).

참 고 문 헌

- [1] M. Kobayashi, 1998, The present Situation of Cold Drawn Special Section(in Japan), J. JSTP, Vol. 39, No. 447, pp. 335~337.
- [2] M. Brücker, D. Keller, J. Reissner, 1988, Computer-Aided Drawing of Profiles from Round and Square Bar, Annals of the CIRP, Vol. 37, pp. 247~250.
- [3] M. S. Joun, S. M. Hwang, 1993, Pass Schedule Optimal Design in Multi-pass Extrusion and Drawing by Finite Element Method, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 33, No. 5, pp. 713~724.
- [4] K. Yoshida, S. Tuihiji, 2002, Multiple Drawing of Rails for Linear Motion Guide, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 367~372.
- [5] W. Steff, R. Kopp, Estimation of Designing Methods for Drawing of Section Rods and Wire, Wire J. Inter., Vol. 28, pp. 104~109.
- [6] J. P. Renz, R. Kopp, 1998, A new calibration method for complex shape sections with reflex angles, Wire J. Inter., pp. 96~100.
- [7] Y. C. Kim, D. J. Kim, B. M. Kim, 2000, Intermediate Die Design System for the Multi-stage Drawing Process, Trans. NAMRI/SME, Vol. 28, pp. 69~74.
- [8] 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, Transactions of Material Processing, Vol. 17, No. 8, pp. 627~632.
- [9] V. Nagpal, C. F. Billhardt, T. Altan, 1979, Lubricated Extrusion of "T" Sections from Aluminum, Titanium and Steel Using Computer-Aided Techniques, J. Eng. Ind, Vol. 101, pp. 319~325.
- [10] S. K. Lee, J. E. Lee, B. M. Kim, 2008, Optimization of Dies Angles to Improve the Dimensional Accuracy and Straightness of the Shaped Drawn Product Based on the FE Simulation and the Taguchi Method, Trans. of the KSME(A), Vol. 32, pp. 474~480.