〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.6.474

유한요소해석 및 다구찌법을 이용한 형상인발제품 치수정도 및 진직도 향상을 위한 다이스각 최적화

이상곤* · 이재은** · 김병민†

(2007 년 9 월 20 일 접수, 2008 년 4 월 15 일 심사완료)

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

Sang-Kon Lee, Jae-Eun Lee and Byung-Min Kim

Key Words : Shaped Drawn Product(형상인발제품), Dies Angle(다이스각), Dimensional Accuracy(치수정도), Design of Experiment(실험계획법), FE-Simulation(유한요소해석), Taguchi Method(다구찌법)

Abstract

Recently, rods having irregular sections more complex than a rectangle or ellipse are necessary to produce mechanical parts. The cold shaped drawing process is used to obtain shaped drawn products with high levels of dimensional accuracy and quality. A cross roller guide, considered in this study, is one of the parts produced by shaped drawing process. A cross roller guide has a linear bearing system that rolls along a guide way. A cross roller guide is one of the most important components in terms of equipment because the quality of the product influences the precision linear motion. Therefore, the final dimensional accuracy of the linear rail in the shaped drawing is very important. The objective of this study is to find the optimized die angles to improve the dimensional accuracy and straightness of the final shaped drawn product. In order to achieve the aim of this study, design of experiment, FE-simulation, and the Taguchi method were used. Based on the analytical results, shaped drawing experiment has been performed to verify the result.

기호설명

$U.R$: 최종제품 단면의 미충만율
A_{final} : 요구 최종제품 단면적
$A_{analysis}$: 성형해석 시 최종제품 단면적
S : 진직도평가를 위한 표준편차

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2319 FAX : (051)581-3075
* 부산대-IFAM 국제공동연구소
** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

1. 서 론

길이가 길고 단면형상이 복잡한 제품은 형상인발공정을 통해 성형함으로써 제조비용의 절감이 가능하고 기존 절삭가공에 의한 제품에 비해 기계적성질이 보다 우수한 장점이 있다.(1) 최근 직선운동의 안내 가이드로 주로 공작기계 분야, 자동차, 고정도 위치결정 등에 많이 적용되고 있는 리니어 모션 가이드(linear motion guide(LM-Guide))는 대표적인 형상인발제품으로 보다 정교한 직선운동을 위해 높은 치수정도가 요구되는 제품이다.(2) 따라

Fig. 1 Cross roller guide

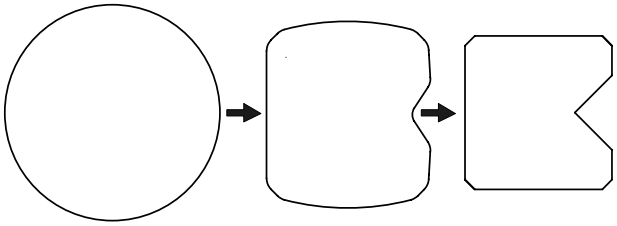


Fig. 2 Cross section of cross roller guide at each pass

서 최종 제품의 치수정도 향상을 위한 형상인발공정 조건의 설정이 매우 중요하다. 유한요소해석을 통한 형상인발공정에 대한 몇몇 연구가 이루어졌지만 대부분 공정해석을 통한 현상파악에 국한되어 있으며, 실제 현장에 적용하기에는 한계가 있다.[3~5]

본 연구에서는 Fig. 1 에서 보듯이 대표적인 리니어 모션 가이드인 크로스 롤러 가이드(cross roller guide)에 대하여 최종제품의 단면치수정도 및 진직도 향상을 위한 최적 다이스각을 설정하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 유한요소해석, 실험계획법, 그리고 최적 다이스각을 찾기 위해 다구찌법(Taguchi method)을 적용하였다. 설정된 최적 다이스각에 대하여 형상인발 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

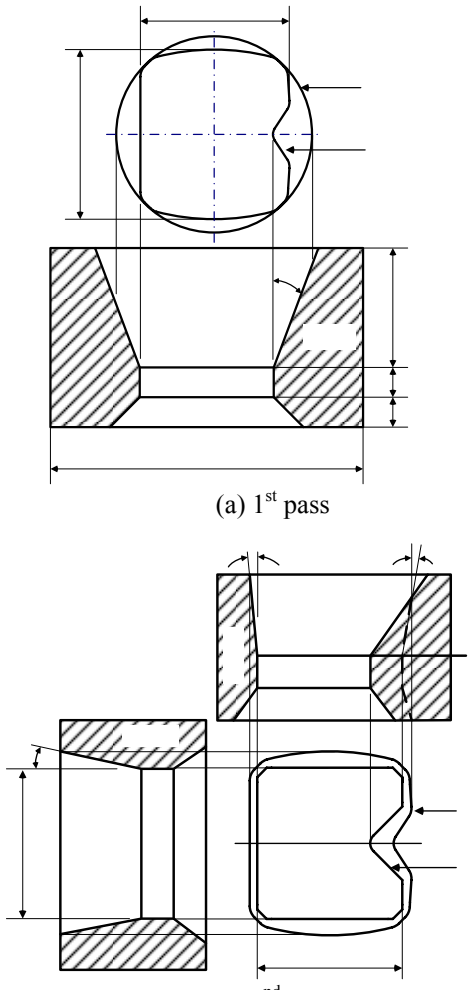
2. 형상인발공정 조건

2.1 크로스 롤러 가이드 형상인발

본 연구에서 적용한 크로스 롤러 가이드는 초기 원형소재에서 2 패스의 형상인발을 통하여 제조된다. Fig. 2 에 초기 소재 및 각 패스에 대한 단면형상을 나타내었다. 초기 소재는 길이 2.0 m, 직경 29.0 mm 의 원형이다. 총감면율은 41.0%이며, 첫 번째 및 두 번째 패스의 감면율은 각각 22.0%, 24.0%이다. 베어링 길이는 두 패스 모두 8.0mm 로 동일하며, 인발속도는 200.0 mm/s 이다. 이상의 조건을 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Process conditions for shaped drawing

Pass No.	1	2
Reduction[%]	22.0	24.0
Bearing length[mm]	8.0	8.0
Friction Coeff.(μ)	0.1	0.1
Drawing speed(mm/s)	200.0	200.0



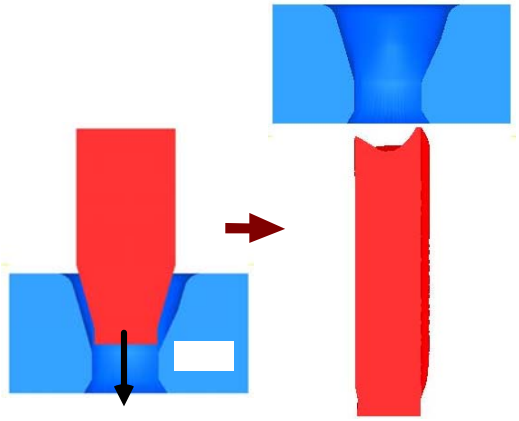
(a) 1st pass

(b) 2nd pass

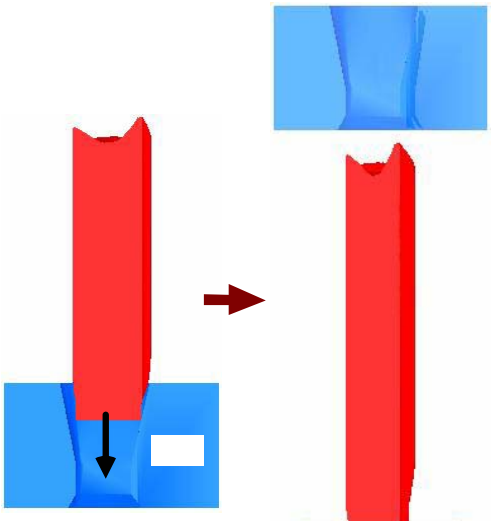
Fig. 3 Dies geometry for shaped drawing

2.2 설계 변수 설정 및 성형해석

본 연구에서 적용한 2 패스 형상인발 크로스 롤러 가이드의 경우 실제 현장경험에 의해 마지막 패스에서의 공정조건이 최종 제품의 치수정도에 가장 큰 영향을 미친다. Fig. 3 에서 보듯이 본 연구에서는 원형소재에서 중간단계 성형을 위한 1 차 인발의 경우 다이스각을 17° 로 설정하였다. 최종 형상을 위한 2 차 인발 다이스각은 Fig. 3(b) 에서 보듯이 면대칭을 고려하여 3 개의 다이각(α_1, α_2, α_3)을 갖도록 하였으며, 이들을 2 차 인발공정 설계변수로 설정하였다.



(a) 1st pass



(b) 2nd pass

Fig. 4 FE-analysis of the two pass shaped drawing

본 연구에서는 이들 설계변수가 최종 형상인발 제품의 단면치수정도 및 진직도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 먼저 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 Fig. 3 에서 보듯이 대칭면을 고려하여 1/2 단면에 대하여 수행하였으며, 상용 유한요소해석 S/W DEFORM-3D로 수행하였다.[6] 적용된 소재는 AISI4137 이며, 유한요소해석을 위해 인장시험을 통해 확보한 소재의 유효 응력-변형률 곡선은 식 (1)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 1640\bar{\varepsilon}^{0.14} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Fig. 4 는 크로스 롤러 가이드 형상인발공정에 대한 유한요소해석 절차를 나타낸 것이다. 첫 번째 다이를 완전히 빠져 나온 소재에 대하여 변형이력을 고려하여 두 번째 패스에 대한 해석을 연속적으로 수행하였다.

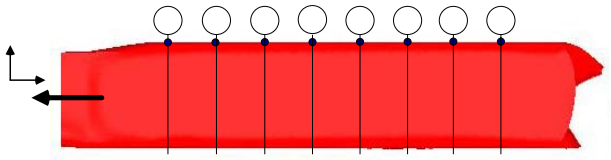


Fig. 5 Sampling points for the evaluation of straightness

2.3 목적함수 설정

본 연구에서는 최종제품의 단면치수정도 및 진직도 평가를 위하여 두 가지 목적함수를 설정하였다.

우선, 최종제품의 단면치수정도 평가를 위해서 미충만율(*U.R*: unfilling rate)을 목적함수로 설정하였다. 미충만율은 최종제품 단면적(A_{final})과 성형해석에 의한 단면적($A_{analysis}$)으로 계산되며 식 (1)과 같다.

$$U.R = \frac{A_{fianl} - A_{analysis}}{A_{final}} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

식 (2)의 미충만율이 낮을수록 단면치수정도는 우수한다는 것을 의미한다.

또한, 진직도는 길이방향의 제품 평균좌표에 대한 표준편차(standard deviation)으로 평가하였으며, 식 (3)와 같이 표현된다.

$$S = \sqrt{\left\{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\right\}/n} \quad (3)$$

여기서, x_i 는 진직도 평가를 위한 치수측정 지점의 측정값이며, $\bar{x}$ 는 측정값들의 평균값, n 은 측정점의 개수이다. 표준편차 S 값이 적을수록 최종제품의 진직도는 우수하다. Fig. 5 는 진직도 평가를 위한 좌표측정 위치를 나타낸 것이다.

3. 다이스각 최적화

최종제품의 단면치수정도 및 진직도 향상을 위한 최적의 다이스각을 설정하기 위하여 본 연구에서는 실험계획법과 다구찌법을 활용하였다.[7~9]

3.1 실험인자 및 직교배열표 작성

실험계획법과 다구찌법을 적용하기 위하여 우선 설계변수의 수준 및 직교배열표를 작성하였다. Fig. 3 에서 보듯이 본 연구에서는 최종 다이스의 다이

Table 2 Design variables and levels

Variables	Level 1	Level 2	Level 3
α_1(°)	7	9	11
α_2(°)	7	9	11
α_3(°)	8	10	12

Table 3 $L_9(3^3)$ orthogonal array

Simulation No.	α_1(°)	α_2(°)	α_3(°)
1	7	7	8
2	7	9	10
3	7	11	12
4	9	7	10
5	9	9	12
6	9	11	8
7	11	7	12
8	11	9	8
9	11	11	10

스각($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)이 설계변수이다. 수준은 실제 현장에서 적용하고 있는 다이스각을 기준으로 Table 2 와 같이 설정하였다. Table 3 은 $L_9(3^3)$의 직교배열표이다.

3.2 성형해석을 통한 다구찌법 적용 결과

2 개의 목적함수, 치수정도 및 진직도는 작을수록 좋으므로 식 (4)의 다구찌법 망소특성인 손실함수를 적용하여 SN(signal-to-noise)비를 비교하여 최적의 수준을 예측하였다.

$$SN = -10 \cdot \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \tag{4}$$

여기서, y 는 해석결과값, n 은 해석횟수를 나타낸 것이다.

Table 4 는 치수정도에 대한 성형해석 및 다구찌법 적용 결과를 나타낸 것이다. 인자의 최적수준은 SN 비가 최대인 수준이며, Fig. 6 에 치수정도에 대한 수준별 요인 효과도를 나타내었다.

치수정도에 대한 다이스각 영향은 α_3, α_1, α_2 순으로 영향이 적게 나타났다. 치수정도에 대해 SN비가 최대인 다이스각은 $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 9^o$, $\alpha_3 = 8^o$ 이다.

Table 5 와 Fig. 7 은 진직도에 대한 성형해석 및 다구찌법 적용 결과 및 진직도에 대한 수준별 요인 효과도를 나타낸 것이다.

Table 4 Comparison of SN ratio for unfilled rate

Simulation No.	Area (mm^2)	U.R (%)	SN ratio
1	187.74	1.175	-1.40258
2	186.96	1.582	-4.02589
3	185.45	2.380	-7.54263
4	187.68	1.206	-1.66850
5	187.16	1.481	-3.41906
6	187.77	1.158	-1.39383
7	186.42	1.870	-5.45890
8	187.91	1.085	-0.81948
9	187.33	1.390	-2.86725

Table 5 Comparison of SN ratio for straightness

Simulation No.	Average (mm)	Standard deviation	SN ratio
1	-9.90077	0.02015	33.9145
2	-10.01600	0.09891	20.0952
3	-10.14439	0.18011	14.8892
4	-9.87913	0.02227	33.0456
5	-9.83174	0.02234	33.0183
6	-9.86200	0.03419	29.3220
7	-9.76373	0.04324	27.2823
8	-9.84056	0.01954	34.1815
9	-9.89852	0.02390	32.4320

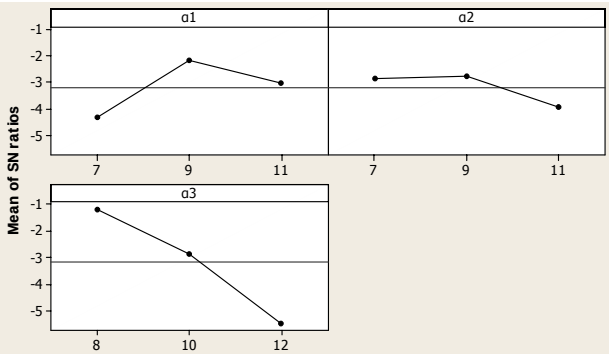


Fig. 6 The SN ratios for unfilling rate

Fig. 7 에서 α_3 의 영향도가 가장 크며, α_1 의 경우 α_3 보다 다소 작으나 거의 동일한 영향도를 나타내었다. 진직도에 있어 SN비를 최대로 하는 다이스각은 $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 7^o$, $\alpha_3 = 8^o$이다.

다구찌법의 SN 비를 최대로 하는 두 조건에 대한 성형해석을 수행하여, 그 결과를 평가하였다.

Table 6 Result of FE-simulation for the Taguchi method

Simulation No.	α_1 (°)	α_2 (°)	α_3 (°)	U.R (%)	S
10	9	9	8	1.072	0.01875
11	9	7	8	1.074	0.01418

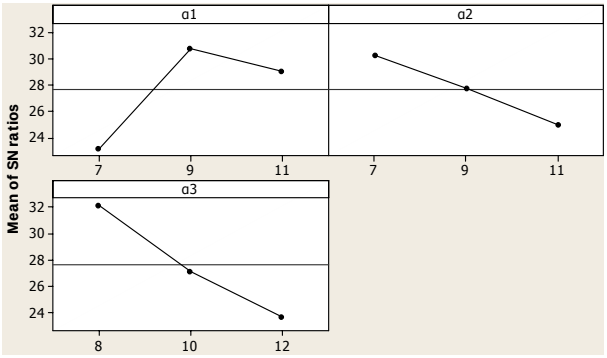
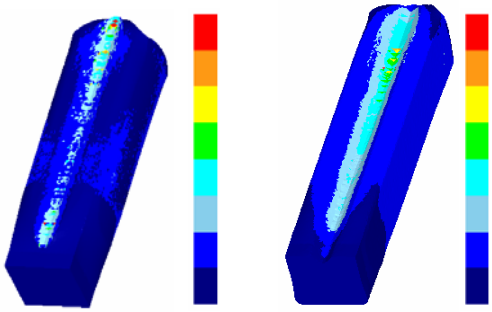


Fig. 7 The SN ratios for straightness



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

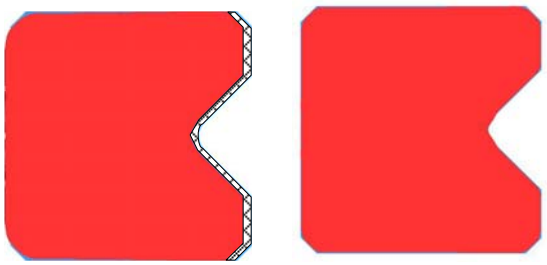
Fig. 8 Distribution of effective strain

Table 6 에 해석결과를 나타내었다. 해석결과 치수정도와 진직도 모두 만족할만한 결과를 나타내었다. 치수정도 평가를 위한 미충만율(*U.R*)의 경우 두 조건에서 거의 동일한 값을 나타내었다. 진직도 평가를 위한 표준편차(*S*)는 다이스각 $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 7^o$, $\alpha_3 = 8^o$의 경우가 다소 우수하였다. 따라서, 본 연구에서는 치수정도와 진직도를 동시에 고려하여 다이스각 $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 7^o$, $\alpha_3 = 8^o$의 경우를 최적의 조건이라고 판단하였다.

3.3 성형해석결과

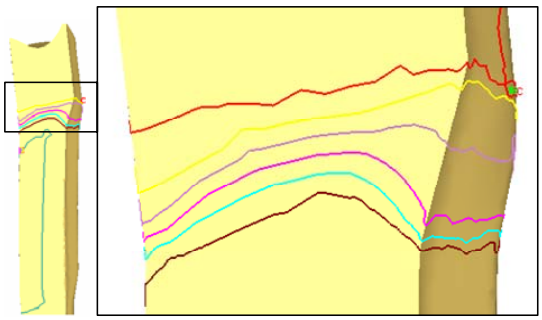
Fig. 8 은 1 번째 다이 통과 후 소재의 변형률분포와 2 번째를 통과한 최종 제품의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 중앙 홈부분에 변형이 집중되어 변형률 분포가 높음을 알 수 있다.

Fig. 9 는 미충만율이 가장 나쁜 경우와 최적 조건에 대한 최종제품의 단면형상을 나타낸 것이다.

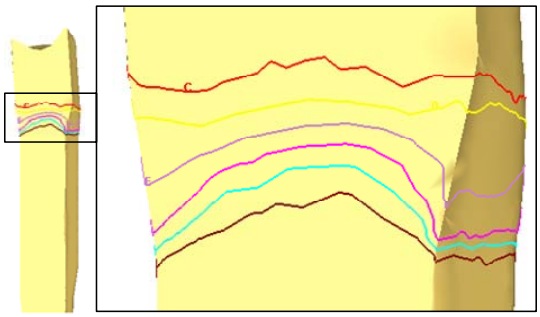


(a) $\alpha_1 = 7^o, \alpha_2 = 11^o, \alpha_3 = 12^o$ (b) $\alpha_1 = 9^o, \alpha_2 = 7^o, \alpha_3 = 8^o$

Fig. 9 Comparison of the cross-sectional shape



(a) $\alpha_1 = 7^o$, $\alpha_2 = 11^o$, $\alpha_3 = 12^o$



(b) $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 7^o$, $\alpha_3 = 8^o$

Fig. 10 Comparison of the velocity(mm/s)

Fig. 9 에서 미충만율이 가장 나쁜 다이스각 $\alpha_1 = 7^o$, $\alpha_2 = 11^o$, $\alpha_3 = 12^o$에 비해 최적 이라고 판단되는 $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 7^o$, $\alpha_3 = 8^o$의 경우 최종제품의 단면형상이 설계 단면형상과 거의 동일함을 알 수 있다.

Fig. 10 은 2 번째 다이스 통과 시 소재의 속도분포를 나타낸 것이다. Fig. 10 에서 알 수 있듯이 최적의 조건이라고 판단되는 경우가 다이스각 $\alpha_1 = 7^o$, $\alpha_2 = 11^o$, $\alpha_3 = 12^o$에 비해 다이스 내 변형영역에서 소재의 유동이 보다 균일함을 알 수 있으며, 특히 다이스 입구부의 소재가 다이스각 $\alpha_1 = 7^o$,

$\alpha_2 = 11^o$, $\alpha_3 = 12^o$에 비해 거의 수직으로 유입되는

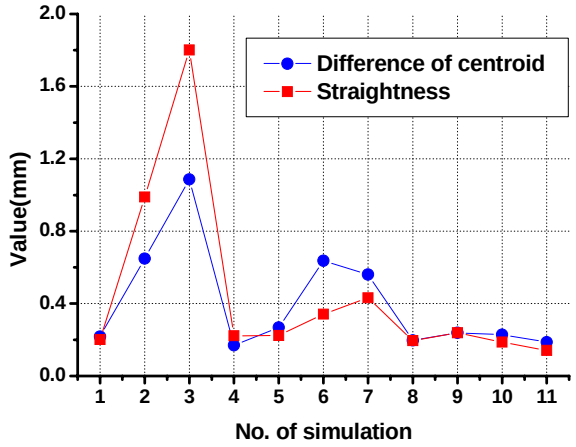


Fig. 11 The relationship between the difference of centroid and the straightness

것을 알 수 있다. 이로인 하여 다이스각 $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 7^o, \alpha_3 = 8^o$의 경우 최종 제품의 진직도가 보다 우수할 것으로 판단 된다.

Fig. 11 은 Table 3 과 Table 6 의 다이스각에 대한 다이스 출구부 최종제품의 도심과 입구부의 도심 차이와 최종제품의 진직도와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 11 에서 도심의 차이와 진직도는 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 따라서, 최종제품의 진직도를 향상시키기 위해서는 다이스 입구부와 출구부의 도심을 가능한 일치시키는 것이 유리함을 알 수 있다.

4. 형상인발 실험

이상의 결과를 검증하기 위하여 본 연구에서 제시함 최적 다이스에 대한 형상인발 실험을 실시하여 그 타당성을 검증하였다.

Fig. 12 는 1 번째 다이스 통과 후의 소재를 나타낸 것이다.

Fig. 13 은 2 번째 다이스 통과 후의 최종제품을 나타낸 것이다.

Fig. 14 는 최종제품에 대한 성형해석 및 실험에 의한 단면형상 및 치수를 비교한 것이다. 성형해석과 결과에 의한 최종제품의 단면형상이 잘 일치함을 알 수 있다. 실제 형상인발 실험결과 최종제품의 진직도는 0.75 mm/m 으로 수요자의 진직도 요구 한계값인 0.87 mm/m 을 만족함을 알 수 있었다.

이상의 형상인발 실험을 통해 본 연구에서 제시한 최적 다이스 적용에 대한 타당성을 확인할 수 있었다.

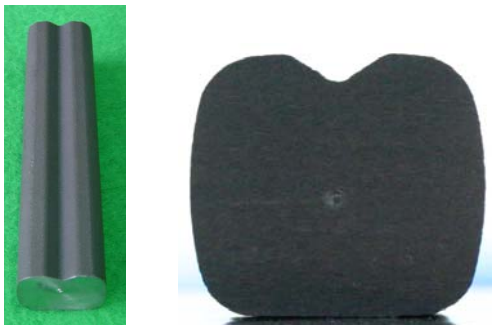
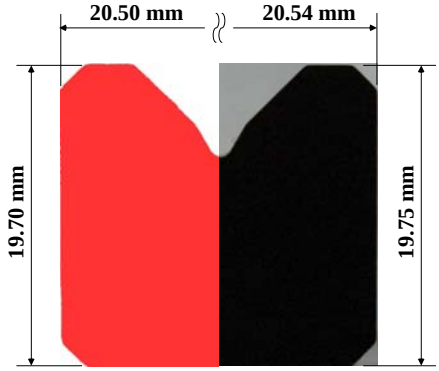


Fig. 12 Drawn product after the 1st pass

Fig. 13 Final drawn cross roll guide



(a) FE-simulation (b) Experiment

Fig. 14 Comparison of the cross-sectional shape between FE-simulation and experiment

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석과 실험계획법의 직교배열을 통한 다구찌법을 이용하여 2 패스 이형 인발공정의 최종 제품 치수정도 및 진직도 향상을 위한 최적 다이스각을 설정하였다. 초기 소재 재질은 AISI4137 이며, 직경이 29.0mm 원형으로 총다이감면율은 41.0%이다. 본 연구를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 다구찌법을 이용한 SN 비 분석결과, 치수정도 및 진직도 모두 다이스각 α_3, α_1, α_2 순으로

큰 영향을 미쳤지만, 진직도의 경우 α_3 와 α_1 이 거의 동일한 영향도를 나타내었다.

(2) 최종제품의 치수정도는 다이스각 $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 9^o$, $\alpha_3 = 8^o$일 때 가장 우수한 값을 나타내었으며, 진직도의 경우 다이스각 $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 7^o$, $\alpha_3 = 8^o$의 경우가 가장 우수하였다.

(3) 치수정도 및 진직도가 가장 우수한 두 조건에 대한 성형해석결과, 두 경우 모두 치수정도가 거의 동일하였으며, 진직도는 $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 7^o$, $\alpha_3 = 8^o$의 경우가 상대적으로 우수하였다. 따라서, 본 연구에서는 치수정도와 진직도를 모두 고려하여 다이스각 $\alpha_1 = 9^o$, $\alpha_2 = 7^o$, $\alpha_3 = 8^o$를 최적의 다이스각으로 설정하였다.

(4) 최종 다이스에 있어 입구부와 출구부의 도심차이와 진직도는 밀접한 관계를 가지며, 도심이 일치할수록 최종제품의 진직도는 향상됨을 알 수 있었다.

(5) 실제 형상인발 실험결과 최적 다이스각을 적용한 경우 최종제품의 단면형상이 성형해석결과와 잘 일치하였으며, 진직도 또한 수요자의 요구한계값을 만족하였다.

(6) 이상의 결과로부터 이형인발제품의 최종 치수정도 및 진직도 향상을 위한 다이스각 최적화에 다구찌법을 유용하게 적용할 수 있음을 알 수 있으며, 이형인발 이외의 다양한 금속성형공정에도 유용하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고문헌

(1) Kobayashi, M., 1998, “The Present Situation of Cold Drawn Special Section (in Japan)”, *J. JSTP*, Vol. 39, No. 447, pp. 335~337.

(2) Yoshida, K., Hosaka, E., Miyazaki, E., Taki, Y. and Shinbe, J., 1992, “Section Drawing for Stainless Steel Rail used in Linear Motion Guide (in Japan)”, Proc. of 43rd Japanese Joint Conference for Technology of Plasticity, pp. 371~374.

(3) Kim, Y. C., Choi, Y. and Kim, B., M., 1999, “Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Anlaysis of Non-Steady State Shaped Drawing Process”, *Int. J. Mach. Tools Manufac.*, Vol. 39, No. 39, pp. 1135~1155.

(4) Yoshida, K. and Tuihiji, S., 2002, “Multiple Drawing of Rails for Linear Motion Guide”, *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 367~372.

(5) Wang., K, W. and Argyropoulos, V., 2005, “Design and Analysis of Direct Cold Drawing of Section Rods through A Single Die”, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 166, pp. 345~358.

(6) SFTC, 2004, DEFORM-3D, Ver. 5.0

(7) Ko, D. C., Kim, D. H. and Kim, B. M., 1999, “Application of Artificial Neural Network and Taguchi Method to Perform Design in Metal Forming Considering Workability,” *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 39, pp. 771~785.

(8) Kim, J. K., 1999, “An Experimental Study on the Optimum Design of Sirocco Fan by Using Taguchi Method,” *Trans. of the KSME, (B)*, Vol. 23, No. 6, pp. 761~768.

(9) Ross, P. J, 1999, Taguchi Techniques for Quality Engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design, McGraw-Hill.