

다양한 종횡비의 직사각바 다단 인발공정에서 치수정도 향상을 위한 프로세스 맵

고필성¹ · 김정훈¹ · 김병민[#]

Process Map for Improving the Dimensional Accuracy in the Multi-Stage Drawing Process of Rectangular Bar with Various Aspect Ratio

P. S. Ko, J. H. Kim, B. M. Kim

(Received January 29, 2018 / Revised April 23, 2018 / Accepted May 10, 2018)

Abstract

In the rectangular bar multi-stage drawing process, the cross-section dimensional accuracy of the rectangular bar varies depending on the aspect ratio and process conditions. It is very important to predict the dimensional error of the cross-section occurring in the multi-stage drawing process according to the aspect ratio of the rectangular bar and the half die angle of each pass. In this study, a process map for improving the dimensional accuracy according to the aspect ratio was derived in the drawing process of a rectangular bar. FE-simulation of the multi-stage shape drawing process was carried out with four types of rectangular bar. The results of the FE-simulation were trained to the nonlinear relationship between the shape parameters using an Artificial Neural Network (ANN), and the process maps were derived from them. The optimum half die angles were determined from the process maps on the dimensional accuracy. The validity of the suggested process map for aspect ratios 1.25~2:1 were verified through FE-simulation and experimentation.

Key Words: Multi-stage drawing process, Rectangular bar, Process map, Aspect ratio, Dimensional accuracy

1. 서 론

이형인발공정은 원형단면소재를 원하는 단면형상의 다이를 통과시켜 길이가 긴 기계부품을 생산할 수 있는 대표적인 성형공정이다[1]. 인발공정의 경우 소재의 이용률이 매우 높으며, 제품의 기계적 성질이 매우 우수한 장점이 있다[2,3]. 이형단면형상을 가진 제품은 형상의 복잡한 정도를 고려하여 초기 소재로부터 이형인발공정만으로 생산가능한지 혹은 형상압연공정 후 이형인발공정을 적용해야 생산이 가능한지에 대하여 판단이 된 이후 공정설계가 이루어지게 된다[4]. 이형인발공정 제품은 일반적인 축대칭 인발공정과 달리 단면형상이 복잡한 경우 인

발하중, 단면감소율, 생산효율등을 고려하여 다단 패스로 설계된다.

최근에는 이형인발공정에 대한 이론적 접근, 실험 및 유한요소해석을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. Lee 등은 이형인발 공정설계 전에 인발공정만으로 생산가능 여부를 판단하기 위하여 대칭면 개수, 형상계수, 최대/최소 반경비 등의 정도를 파악하여 복잡한 단면에 대한 공정분류 기준을 확립하였다[5]. Lee 와 Ji 등은 이형인발 공정에서 중간패스 단면형상 설계를 하기 위하여 가상금형법, 전기장 해석법 등을 적용하였다[6,7]. Kim 등은 직사각형 이형인발공정에서 동일한 마찰조건하에서 직사각형 종횡비에 따라 다이반각과 단면감소율이 코너

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

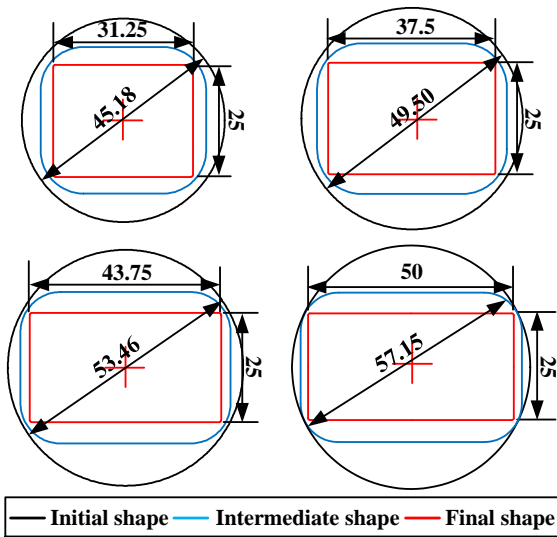


Fig. 1 Initial and final shapes of rectangular bar

충진률에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다 [8]. 이형인발공정에 대한 많은 연구가 수행되었다. 하지만, 다단 이형인발공정에서 단면형상의 치수정도 향상에 대한 연구는 실정이다.

본 연구에서는 1.25:1, 1.5:1, 1.75:1 그리고 2:1과 같이 4개의 다양한 종횡비(Aspect ratio)를 가지는 직사각바(Rectangular bar) 다단 인발공정에서 인발공정의 주요변수인 다이반각을 기초로 하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 단면치수정도 향상을 위한 프로세스 맵(Process map)을 도출하였다. 도출된 프로세스 맵은 유한요소해석 및 실험을 통하여 유효성을 검증하였다.

2. 다이반각에 따른 치수정도

2.1 유한요소해석 조건

프로세스 맵을 도출하기 위하여 직사각바 다단 인발공정에 대한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 초기소재는 원형으로 제한하였으며, 종횡비는 각각 1.25:1, 1.5:1, 1.75:1, 2:1이다. 다단 인발공정은 30.2%의 등단면감소를 패스스케줄로 설계되었으며, 각 패스의 다이반각은 5°, 15°, 25°의 조건으로 조합하여 Table 1에 나타내었다. 첫 번째 패스는 원형에서 사각형으로 써 성형량이 많은 부위의 다이반각이 설정값이며, 측면의 다이반각은 설정 값에 의하여 결정된다. 두 번째 패스는 사각

Table 1 Half die angle according to each case

Case No.	Half die angle (°)	
	1 st pass	2 nd pass
1	5	5
2	5	15
3	5	25
4	15	5
5	15	15
6	15	25
7	25	5
8	25	15
9	25	25

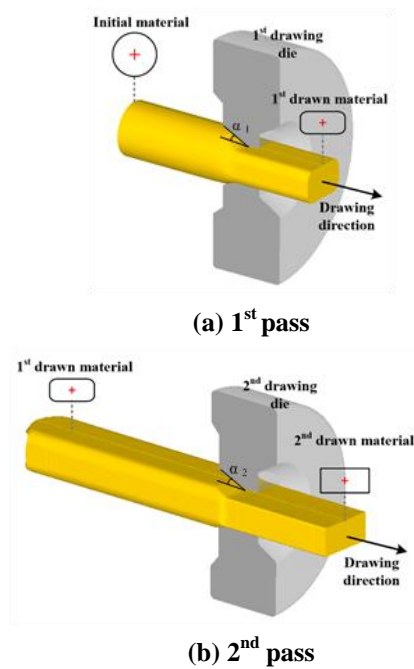


Fig. 2 FE-model of multi-stage drawing process

형에서 사각형인 동일한 다이반각으로 설정되었다. 적용된 소재는 STS316L 이며, 유한요소해석을 위해 인장시험으로 확보한 유동응력식은 $\bar{\sigma} = 1180.86\epsilon^{0.41}$ [MPa]이다. 이는 유한요소해석에서 강소성체인 초기소재 물성으로 사용되었다. 본 연구에서 사용된 유한요소해석모델을 Fig. 2에 나타내었다. 1/4 모델로 설정하였으며, 소재내 약 150,000 개의 3 차원 사면체 메쉬를 생성하였다. 소재와 인발다이 사이의 마찰조건은 마찰상수(m) 0.1로 결정하였고, 인발속도는 5mm/s 이다. 첫 번째 패스 인발 후 소재의 변형이력을 제거 위하여 완전플립 열처리 후 두

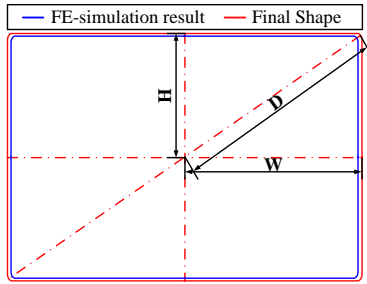


Fig. 3 Measurement position of simulation results

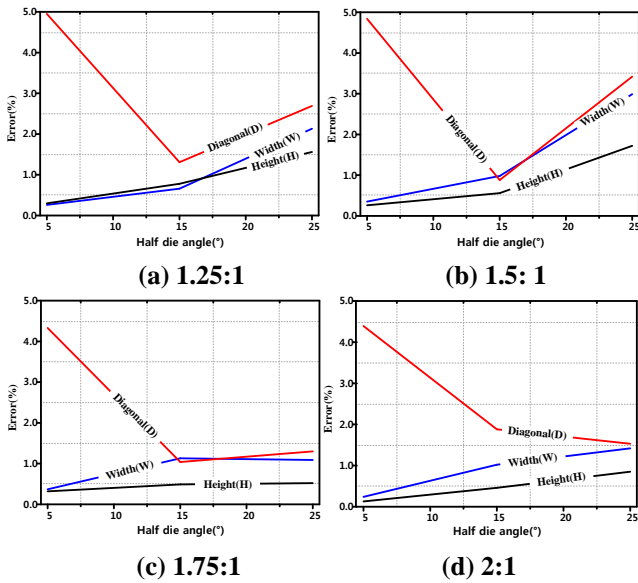


Fig. 4 Distributions of error according to aspect ratio

번째 패스 인발공정 을 수행한다. 따라서, 완전플립 열처리 효과를 고려 하기 위하여 첫 번째 패스 인발 후 소재에 축적된 유효변형을 값을 0 으로 재설정 한 후 두 번째 패스 성형해석을 수행 하였다.

2.2 유한요소해석 결과도출

인발공정 성형해석 결과로부터 직사각바 단면에 대한 치수오차평가는 Fig. 3 과 식(1)의 기준으로 높이(H), 너비(W), 대각선(D) 등 세부위로 평가하였다.

$$Error = \left| \left(1 - \frac{L_{FE-simulation}}{L_{Final\ shape}} \right) \right| \times 100[\%] \quad (1)$$

여기서, $L_{Final\ shape}$ 은 종횡비에 따라 최종제품에 대한 각 부위의 목표치수이다. $L_{FE-simulation}$ 은 성형해석의 결과로써, 각 부위의 치수측정 값이다. 즉, 오차율이 낮을 수록 해석결과의 치수정도가 우수함을 의미한다. 도출된 결과는 다양한 조건 중 경향을 쉽게 알아볼 수 있는 조건을 선정하여 Fig. 4 에

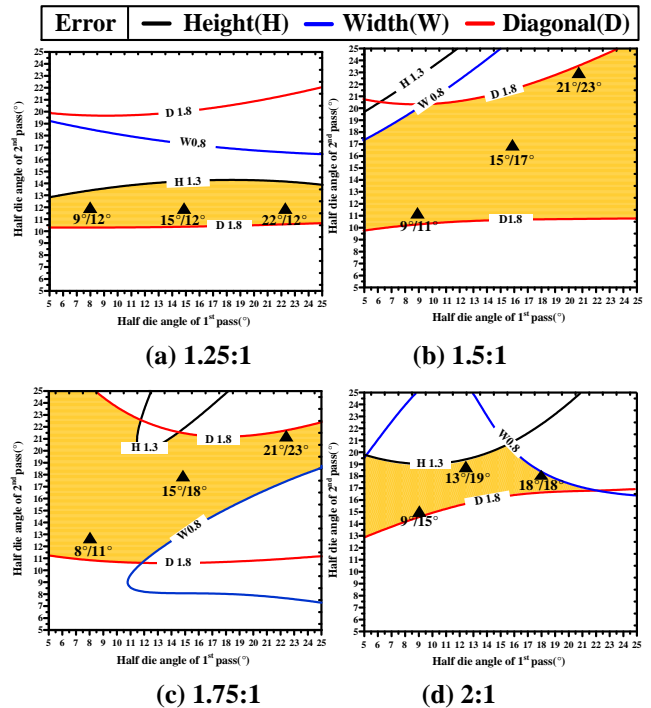


Fig. 5 Process map according to various aspect ratio

나타내었다. 종횡비에 따라 높이, 너비의 오차율은 모든 종횡비에서 다이반각의 증가에 따라 오차율도 같이 증가하는 경향을 보였다. 대각선의 오차율은 다이반각 5°일 때 가장 높은 것으로 나타났으며, 1.25~1.75:1 의 종횡비는 다이반각의 증가에 따라 오차율이 감소 후 다시 증가하는 경향으로 나타났다. 2:1 의 종횡비는 다른 종횡비와 달리 다이반각의 증가에 따라 오차율이 감소하는 경향으로 나타났다. 일반적으로 현장에서 적용되는 직사각 바의 허용치수오차와 각 부위 의 도출 값을 식(1) 과 같이 오차율로 표현하면 각 부위에 따라 절대 값인 높이 |1.3|%, 너비 |0.6|%, 대각선 |1.8|%으로 표현 된다. 유한요소해석에 수행 된 조건만으로 최적조건을 찾기에는 어려움이 있다. 따라서, 인공신경망 기법을 이용하여 성형해석에 수행된 다이반각 조건 외에 다른 다이반각 조건에 대한 결과값을 예측하여 프로세스 맵을 도출하고자 한다.

3. 치수정도 향상을 위한 프로세스 맵

3.1 종횡비에 따른 프로세스 맵

본 연구에서 종횡비에 따라 유한요소해석을 통하여 도출된 오차율 결과와 각 패스의 다이반각인 5°~

Table 2 FE-simulation results for verification of process map

Aspect ratio	Half die angle (°)		Error(%)		
	1 st pass	2 nd pass	H	W	D
1.25 : 1	8	12	0.9	0.5	1.5
	15	12	0.8	0.4	1.4
	22	12	0.9	0.7	1.5
1.5 : 1	9	11	0.4	0.4	1.5
	15	17	0.7	0.5	0.9
	21	23	1.2	0.4	1.7
1.75 : 1	8	11	0.6	0.7	1.8
	15	18	1.1	0.3	1.2
	22	21	1.2	0.5	1.7
2 : 1	9	15	1.1	0.4	1.7
	13	19	0.9	0.3	1.3
	18	18	1.2	0.7	1.4

25° 사이를 1° 간격으로 인공신경망에 학습시킴으로써, 다양한 조건의 다이반각에 대한 결과값을 예측하여 프로세스 맵을 도출할 수 있었다. 도출된 프로세스 맵은 중횡비를 구분하여 Fig. 5에 나타내었으며, 프로세스 맵의 X 축은 첫 번째 패스의 다이반각, Y 축은 두 번째 패스의 다이반각이다. 프로세스 맵에는 직사각 바의 높이, 너비, 대각선의 오차율을 선으로 구분하였으며, 세부위의 치수오차율을 모두 만족하는 영역을 표시하여 나타내었다. 중횡비에 따라 오차율 영역은 각각 달라지며, 직사각바의 높이와 너비는 다이반각이 증가할수록 오차율이 커지는 반면 대각선은 다이반각이 증가할수록 오차율이 낮아진다. 1.5:1의 중횡비에서 다이반각에 따라 치수오차를 만족하는 영역이 가장 큰 것으로 나타났으며, 1.75:1의 중횡비에서 높이와 너비영역이 줄어들기 시작하여 2:1의 중횡비는 치수허용오차를 만족하는 영역이 가장 작은 것으로 나타났다. 즉, 두 번째 패스의 다이반각으로 결정할 수 있는 영역이 작다는 것을 의미한다.

3.2 검증해석 및 결과

본 연구에서 도출한 프로세스 맵의 검증을 하고자 중횡비에 따라 3개의 각 패스 다이반각을 결정하였다. 다이반각은 프로세스 맵에서 직사각바 세부위의

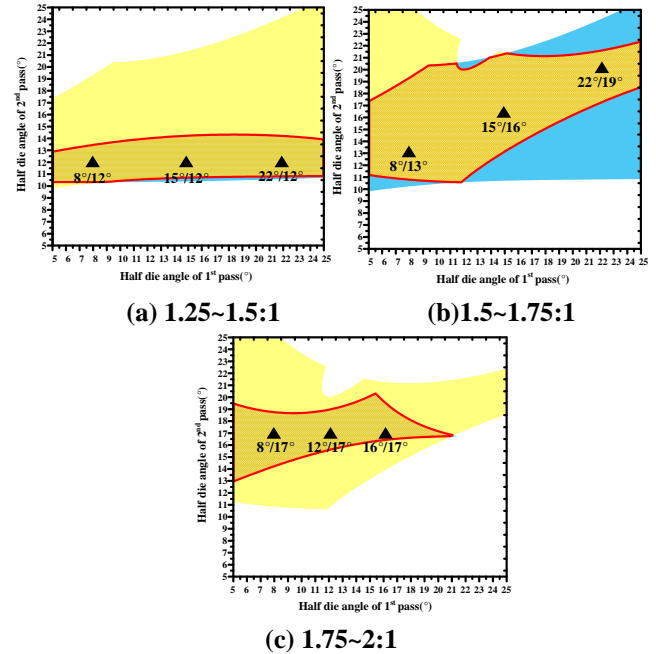


Fig. 6 Combined process map for various aspect ratio

Table 3 FE-simulation results for verification of combined process map

Aspect ratio	Half die angle (°)		Error(%)		
	1 st pass	2 nd pass	H	W	D
1.325:1	8	12	1.2	0.5	1.1
	15	12	0.7	0.64	1.2
	22	12	1.1	0.59	1.0
1.675:1	8	13	1.0	0.6	0.8
	15	16	1.1	0.6	0.9
	22	19	0.8	0.6	1.5
1.825:1	8	17	0.2	0.3	1.0
	12	17	0.9	0.6	1.5
	16	17	0.9	0.7	1.1

오차율을 모두 만족하며, 각 패스의 다이반각에 따라 오차율의 경향을 확인할 수 있는 범위로 결정하여 Table 2에 나타내었다. 다이반각은 낮을수록 금형의 길이가 길어지므로, 인발장비의 사양을 고려하여 8°보다 낮은 각도는 고려하지 않았다. 결정된 다이반각으로 성형해석을 수행하였다. 검증해석을 수행한 결과를 통하여 1.25:1, 1.5:1, 1.75:1, 2:1의 모든 중횡비에서 프로세스 맵과 같이 치수오차 및 경향이 일치하는 것을 확인하였다.

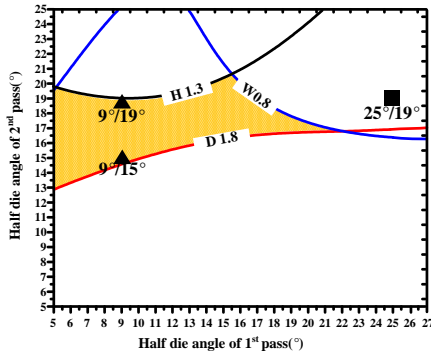
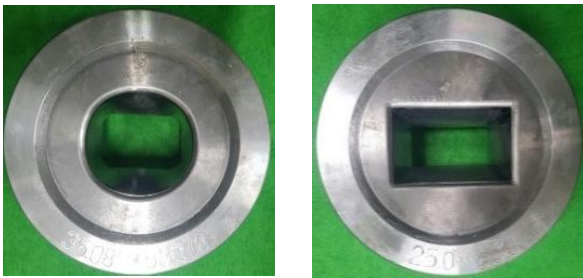


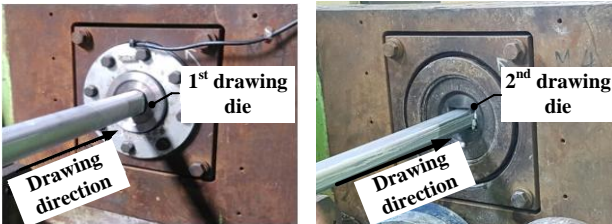
Fig. 7 Verification conditions of the suggested process map(2:1)



(a) 1st pass

(b) 2nd pass

Fig. 8 Manufactured shape drawing dies(2:1)



(a) 1st pass

(b) 2nd pass

Fig. 9 Experimental setup for shape drawing process

3.3 프로세스 맵 응용

본 연구에서 유한요소해석과 인공지능망을 이용하여 1.25:1, 1.5:1, 1.75:1, 2:1 등 4개의 중형비에 대한 프로세스 맵을 도출하였다. 이 프로세스 맵들을 이용하여 4개의 중형비 외에 다른 중형비에 대한 오차율을 예측하였다. 프로세스 맵을 중형비에 따라 1.25:1과 1.5:1, 1.5:1과 1.75:1, 1.75:1과 2:1로 각각 겹친 후 서로 같은 영역의 범위를 도출함으로써, 3개의 프로세스 맵을 도출하였다. 중형비 1.

25~1.5:1, 1.5~1.75:1, 1.75~2:1에 해당되며, Fig. 6에 나타내었다. 오차율이 만족하는 범위는 프로세스 맵 내에 표시하였으며, 이 범위 내에서 각 패스의 다이

Table 4 Comparison between FEM and experiment for final product shape

Half die angle (°)	Final product shape		
	FEM	Experiment	
9 15			
9 19			
25 19			

Table 5 Error(%) between FEM and experiment

Half die angle(°)		Aspect ratio 2 : 1					
		Error(%)					
		FEM			Experiment		
1 st pass	2 nd pass	H	W	D	H	W	D
9	15	1.1	0.4	1.7	1.0	0.2	1.3
9	19	1.2	0.6	1.8	1.1	0.6	1.7
25	19	1.1	0.8	1.3	1.2	0.7	1.4

반각을 결정할 수 있다. 프로세스 맵을 검증하기 위하여 각각 1.325:1, 1.675:1, 1.825:1으로 중형비의 중간값으로 결정하였으며, 각 패스의 다이반각과 그에 따른 유한요소해석 결과를 Table 3에 나타내었다. 프로세스 맵에서 오차율의 정도까지 예측 하기에 어려움이 있었지만 1.325:1, 1.675:1, 1.825:1의 모든 중형비에서 직사각바 단면의 세부위 모두 오차율을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

4. 실험 및 고찰

본 연구에서 제시한 프로세스 맵 및 그에 따른 해석결과를 검증하기 위해 다단 인발실험을 수행하였다. 실험은 2:1의 중형비를 이용하여 실시하였으며,

프로세스 맵 및 실험조건을 Fig. 7에 나타내었다. 결정된 다이반각은 프로세스 맵 영역 내의 조건인 $9^\circ/15^\circ$, $19^\circ/19^\circ$ 와 영역 외의 조건인 $25^\circ/19^\circ$ 로 결정하였다. 실험조건을 각각 다이로 제작하여 실험을 진행하였으며, Fig. 8과 9에 나타내었다. 실험에 사용된 소재는 STS316L이며, 초기소재 직경 57.15 mm, 길이 1,000mm이다. 인발 전에 소재가 다이를 통해 인발기에 충분히 물릴 수 있도록 포인팅 후 표면 처리 및 윤활제인 금속비누(Metal soap)를 도포하여 실험을 실시하였으며, 인발 후에는 응력제거 열처리, 쇼트 블라스트, 포인팅 및 금속비누 도포 후 2차 인발을 실시하였다. Table 4에 인발실험을 통해 생산된 제품을 나타내었으며, 해석 및 실험결과의 오차를 도출하여 Table 5에 나타내었다. 해석 및 실험을 통하여 프로세스 맵에서 예측된 결과와 같이 결정된 각 패스의 다이반각에 따라 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이상의 직사각바 다단 인발공정에서 해석 및 실험을 통하여 본 연구에서 제시한 프로세스 맵의 유효성이 검증되었다.

결론

본 연구에서는 직사각바 다단 인발공정에서 치수정도 향상과 각 패스의 최적다이반각 결정을 위한 프로세스 맵을 제시하였다. 제시된 프로세스 맵에서 각 패스의 다이반각을 결정하여 다단 인발공정에서 해석 및 실험으로 프로세스 맵의 유효성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 직사각바를 인발공정으로 제작 시 단면치수정도 향상을 위하여 종횡비에 따라 각 패스의 다이반각을 결정할 수 있는 프로세스 맵을 제시하였다. 종횡비에 따라 단면치수오차를 만족하는 영역 내에서 다이반각을 결정할 수 있으며, 치수오차를 만족하는 영역은 두 번째 패스의 다이반각에 의해 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

(2) 종횡비에 따른 프로세스 맵의 오차율 내의 영역에서 각 패스 다이반각을 결정 시 프로세스 맵과 오차율이 일치함을 다단 인발공정 해석을 통하여 알 수 있었다. 또한, 4개의 프로세스 맵을 이용하여 1.25:1, 1.5:1, 1.75:1, 2:1의 종횡비 외에 1.375:1, 1.625:1, 1.875:1등으로 종횡비의 프로세스 맵을 도출하여 실험성을 검증하였다.

(3) 본 연구에서 제안한 종횡비에 따른 프로세스

맵 중 2:1의 종횡비에서 오차범위 내의 각 패스 다

다이반각 조건과 오차범위 외의 각 패스 다이반각을 결정하여 성형해석과 다단 인발공정을 수행한 후 프로세스 맵과 비교하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 프로세스 맵과 같이 성형해석 및 실험에서 잘 일치함을 알 수 있었다.

후기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] M. Kobayashi, 1988, The Present Situation of Cold Drawn Special Section, J, Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 39, No.447, pp. 335~337.
- [2] K. Yoshida, S. Tuihiji, 2002, Multiple Drawing of Rails for Linear Motion Guide, Adv. Technol. Plast., Vol. 1, pp. 367~372.
- [3] T.K. Lee, J.E. Lee, S.K. Lee, B. M. Kim, 2008, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf.(editor: C. G. Park), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 337~340.
- [4] K. Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill., New York, 1985.
- [5] S. K. Lee, J. E. Lee, T. K. Lee, S. M. Kim, 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.
- [6] 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.
- [7] S. I. Ji, K. H. Lee, L. S. Hong, J. Y. Jung, J. S. Kim, B. M. Kim, 2015, Process Design of Multi-pass Shape Drawing Wire with Asymmetric Trapezoid Profiles, Trans. Mater. Process., Vol. 24, No. 3, pp.187~193.
- [8] 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.