

크로스 롤러 가이드 다단 형상인발 공정설계에 관한 연구

Process Design of Multi-Stage Shape Drawing Process for Cross Roller Guide

이상곤¹, 이재은², 이태규², 이선봉³, 김병민^{4,✉}
 Sang Kon Lee¹, Jae Eun Lee², Tae Kyu Lee², Seon Bong Lee³ and Byung Min Kim^{4,✉}

¹ 부산대학교 PNU-IFAM JRC (PNU-IFAM JRC, Pusan National Univ.)

² 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 (Department of Precision Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

³ 계명대학교 기계자동차공학부 (Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.)

⁴ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: bmkim@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2319

Manuscript received: 2009.7.27 / Accepted: 2009.8.26

In the multi-stage shape drawing process, the most important aspect for the economy is the correct design of the various drawing stage. For most of the products commonly available round or square materials can be used as initial material. However, special products should be pre-rolled. This study proposes a process design method of multi-stage shape drawing process for producing cross roller guide. Firstly, a standard classification of shape drawing process is suggested based on the requirement of pre-rolling process. And a design method is proposed to design the intermediate die shape. The process design method is applied to design the multi-stage shape drawing process for producing cross roller guide. Finally, the effectiveness of the proposed design method is verified by FE-analysis and shape drawing experiment.

Key Words: Shape Drawing Process (형상인발공정), Process Design (공정설계), Standard Classification (분류기준), Intermediate Die Shape (중간다이 형상), FE-analysis (성형해석), Shape Drawing Experiment (형상인발실험)

기호설명

A = Cross sectional area of the product

P = Perimeter of the final product

r = reduction in area

RR = radius ratio

R_{max} = radius of circumcircle of the final product

R_{min} = radius of inscribed circle of the final product

SF = shape factor

SM = scale modulus

UR = unfilling rate

1. 서론

다단 형상인발공정은 일정한 단면형상을 가진 길이가 긴 기계부품을 효과적으로 생산할 수 있는 대표적인 성형공정이다.¹ 형상인발제품 생산을 위해서는 먼저 최종제품의 형상난이도를 고려하여 초기 소재로부터 형상인발공정만으로 생산 가능한지 혹은 형상압연공정 후 형상인발공정을 적용해야 생산이 가능한지에 대한 공정분류가 선행되어야 한다.² 공정분류 후 각 경우에 대한 공정설계가 이루어지게 된다. 형상인발만으로 가능한 경우에는 인발패스 수 설정 및 중간 다이 형상이 설정되어야 하며, 형상압연공정이 필요한 경우 형상압연공정과 이형인발에 대한 공정설계가 동시에 이루어져야만 한다. 인발공정에 대한 다양한 연구가 이루어졌지만,³⁻⁵ 실제 산업현장에 적용하기에는 여

러 가지 어려움이 많다. 이로 인하여 신제품 개발 시 개발비용 및 시간이 과도하게 소요되는 경우가 많았다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 체계적인 형상인발 공정설계방법의 확립이 매우 중요하다.

본 연구에서는 형상인발공정의 효과적인 공정설계를 위하여 먼저 초기 소재로부터 형상압연공정이 요구되는지 혹은 바로 형상인발이 가능한지에 대한 공정분류기준을 제시하였다. 또한, 초기 원형소재를 이용하는 형상인발공정에 대하여 초기 소재 크기, 형상인발 패스 수, 그리고 그에 따른 중간 패스 다이단면형상을 효과적으로 설계할 수 있는 공정설계방법을 제시하였다. 제시된 공정설계방법을 적용하여 대표적인 형상인발제품인 크로스 롤러 가이드(Cross roller guide) 생산을 위한 형상인발공정설계를 수행하였다. 마지막으로 설계된 공정에 대하여 성형해석 및 형상인발실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 형상인발 공정분류

2.1 공정분류 기준

공정분류를 위해서는 최종제품의 형상난이도(Degree of difficulty of shape)를 평가할 수 있는 기준이 요구된다. 본 연구에서는 형상인발 공정분류를 위하여 최종제품의 대칭면 개수, 형상계수(Shape factor, SF), 그리고 단면도심을 중심으로 제품형상에 외접/내접하는 최대/최소 원의 반경비(Radius ratio, RR)를 이용하여 형상난이도를 평가하였다.

최종제품의 단면에 대칭면이 많을수록 원형에 가깝기 때문에 형상인발만으로 제품 생산이 가능하다.⁶ 그러나 대칭면의 수가 1 개 이하인 경우 단면형상이 복잡하기 때문에 형상인발만으로 최종제품을 생산하는 것이 곤란하며, 형상인발 이전에 형상압연공정이 요구된다.

식(1)로 표현되는 형상계수는 최종제품의 면적에 대한 둘레길이 제곱에 대한 비를 나타낸 값이다. 형상계수는 제품 단면형상의 복잡성(Shape complexity)을 나타낸 값으로 형상계수가 크면 단면적에 비해 제품의 둘레길이가 상대적으로 긴 경우로 단면형상이 보다 복잡함을 의미한다.⁷

$$SF = P^2 / A \quad (1)$$

식(2)로 계산되는 반경비는 Fig. 1 과 같이 최종제품의 도심을 중심으로 형상에 접하는 외접 및 내접원의 반경비로 최대칭 단면인 경우 최소값 1 을 가진다. 반경비의 증가는 단면의 세장비(Aspect ratio) 증가 혹은 오목부(Concave)의 깊이가 과도하게 깊음을 의미한다. 이러한 경우 형상인발만으로 제품생산은 불가능하다.

$$RR = R_{max} / R_{min} \quad (2)$$

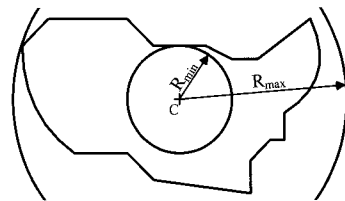
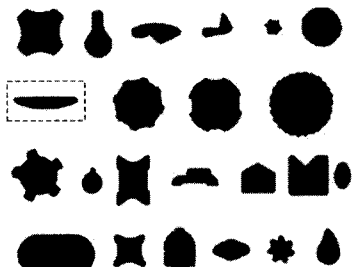
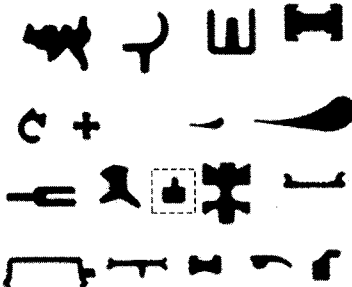


Fig. 1 A geometrical example of the calculation for radius ratio

2.2 공정분류 절차



(a) Products from square or round material



(b) Products requiring a pre-rolled material

Fig. 2 Samples of shape drawn products

이상의 공정분류 기준들을 적용하여 공정분류 절차를 확립하였다. Fig. 2 와 같이 실제 산업현장에서 작업자의 경험으로 분류된 다양한 제품형상들

의 분석을 통해 공정분류 기준값들을 설정하였다.²

설정된 기준값들을 적용한 공정분류 절차를 Fig. 3 에 나타내었다. 최종제품의 형상으로 먼저 대칭축의 개수를 평가한 후, 반경비와 형상함수값을 평가한다. Fig. 3 의 절차를 Fig. 2 의 형상들에 적용한 결과 각각 한 가지 형상을 제외한 모든 형상에 대하여 분류가 명확하게 됨을 알 수 있었다.

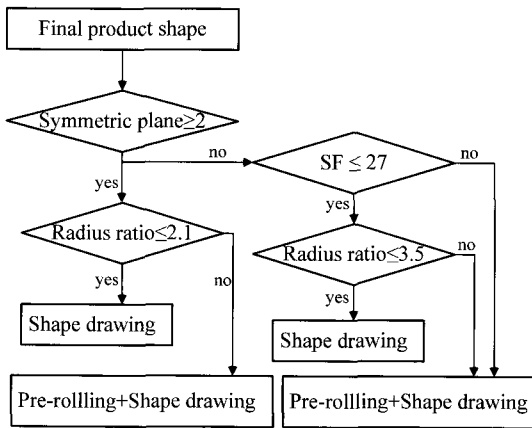


Fig. 3 Flowchart for classification of shape drawing

3. 형상인발공정 설계

3.1 초기 소재 크기 설정

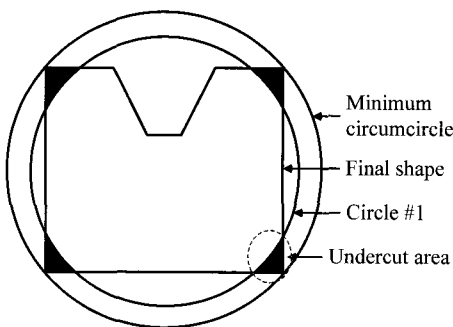


Fig. 4 Initial material size considering the final shape

초기 원형소재를 이용한 형상인발의 경우 최종 제품의 형상에 따라 초기 소재의 크기가 결정된다. 초기 소재의 크기는 반드시 최종제품의 최소 외접 원보다는 커야만 한다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 만약 초기 소재가 최소 외접원보다 작은 경우(Circle #1) 최종제품이 초기 소재보다 커 언더컷 영역이 발생하게 되어, 형상인발이 불가능하게 된다.

본 연구에서는 Fig. 4 에서 보듯이 언더컷 영역이 발생하지 않도록 최소 외접원 직경을 패스 당 2.0~4.0mm 확대하여 초기 소재 크기를 설정하였다.

3.2 중간다이 단면형상 설계

다단 형상인발공정을 적용하기 위해서는 패스 수, 각 패스에 대한 단면감소율 및 중간다이 단면형상이 설정되어야만 한다. 본 연구에서는 국부적인 단면감소율, 총단면감소율을 고려하여 패스 수를 설정하였다. 패스 수가 결정되면 각 패스에 대한 다이 단면형상이 설계되어야 한다. 중간다이 단면형상 설계는 다단 형상인발공정설계 시 가장 중요한 단계로 요구되는 품질을 가진 최종제품을 얻기 위해서는 적절한 중간다이 단면형상이 설계되어야만 한다. 최종제품 형상의 단순 확대 및 하중을 고려한 중간다이 단면형상 설계방법 등이 제시되었으나 복잡한 제품에 대한 적용 및 제품의 치수정도 등의 문제로 실제 현장적용에는 한계가 있다.⁸

Fig. 5 에서 보듯이 최종제품 형상과 초기소재 형상을 연결하여 가상다이(Virtual die)를 만들 수 있으며, 패스 수를 고려하여 가상다이를 절단함으로써 임의의 단면형상들을 얻을 수 있다. 가상다이는 CATIA 를 이용하여 직선요소로 구성된다. 본 연구에서는 절단된 임의의 단면형상을 이용하여 중간다이 단면형상을 설계하였으며, 각 패스의 단면감소율은 절단된 단면의 단면적으로 계산된다.

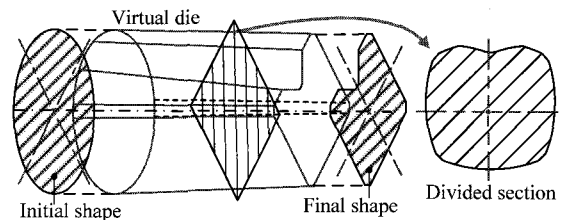


Fig. 5 Virtual die constructed by initial and final shape

가상다이를 이용한 중간다이 단면형상 설계절차는 다음과 같다.

Step 1) 초기소재와 최종제품 형상을 이용하여 1 차 가상다이 구성

Step 2) 패스 수를 고려하여 1 차 가상다이를 등간격으로 절단한 후 절단면 추출

Step 3) 단면감소율로 계산되는 식(3)의 스케일 계수(Scale modulus, SM)를 이용하여 최종형상을 확

대한 후, 확대된 형상과 Step 2 에서 추출된 절단면을 이용하여 2 차 가상다이 구성

$$SM = \sqrt{100 / (100 - r)} \quad (3)$$

Step 4) 2 차 가상다이를 1/2 로 나누어 확보되는 단면을 중간다이 단면형상으로 설정

4. 크로스 롤러 가이드 형상인발공정 설계

본 연구에서 제안한 설계방법의 타당성을 검증하기 위하여 현재 실제현장에서 2 패스 형상인발로 생산되고 있는 대표적인 형상인발제품인 크로스 롤러 가이드 형상인발공정설계에 적용하였다. Fig. 6 에 본 연구에서 적용한 크로스 롤러 가이드의 단면형상 및 치수를 나타내었다.

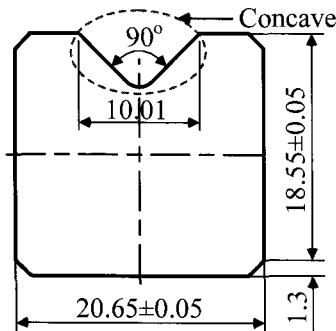


Fig. 6 Shape and dimension of cross roller guide

먼저 Fig. 6 의 제품에 대한 공정분류를 실시하였다. 대칭면의 개수는 1 개이며, 형상계수는 18.48, 그리고, 반경비는 2.64 이므로 형상인발공정만으로 생산이 가능하다.

Fig. 6 의 최종제품 단면에 대한 최소 외접원의 직경은 26.84mm 이며, 초기 소재 직경은 29.00mm 로 설정하였다. 따라서 총단면감소율은 42.48%이다. 일반적으로 벌크소재의 인발 시 패스당 감면율은 40% 이하이다. 본 연구에서는 총단면감소율이 40% 이상일 뿐만 아니라 Fig. 6 에서 보듯이 국부 단면감소율이 상대적으로 높은 오목부가 존재하는 경우 인발의 난이도가 높아지기 때문에 2 패스 형상인발로 설정하였다. 2 패스 형상인발에 대하여 최종 패스 다이 단면형상은 제품형상과 동일

하기 때문에 첫 번째 패스 다이 단면형상을 설계하였다. 먼저 초기소재와 최종제품 단면을 이용하여 1 차 가상다이를 구성한 후 중앙부를 절단하여 1 차 절단면을 확보한다. Fig. 7 에 1 차 가상다이와 절단면을 나타내었다. 절단면의 단면적은 507.47 mm² 이며, 첫 번째 및 두 번째 패스의 단면감소율은 각각 23.17%와 25.13%이다.

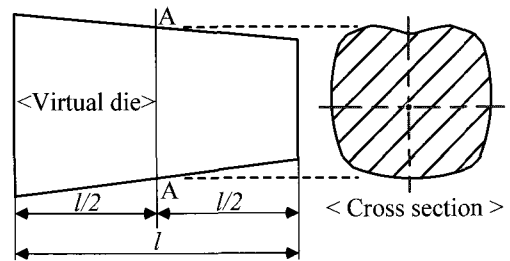


Fig. 7 Cross section of the first virtual die

Fig. 6 에서 보듯이 형상인발제품에서 오목부의 국부단면감소율은 상대적으로 다른 부분보다 높다. Fig. 7 에서 절단된 단면의 경우 오목부에서의 단면감소율이 충분히 높지 않기 때문에 중간다이 단면으로 활용할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 먼저 식(3)의 스케일계수를 이용하여 Fig. 8 에서 보듯이 최종제품형상을 확대한다.

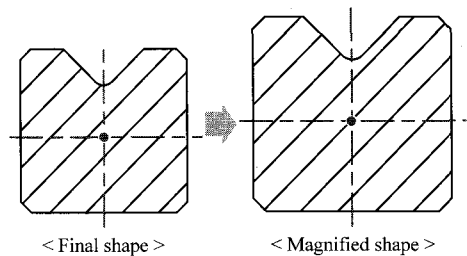
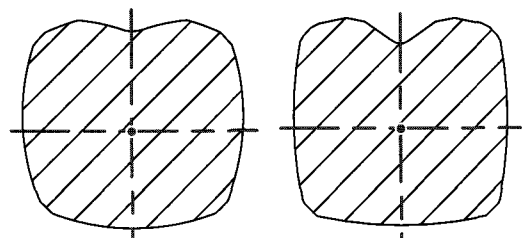


Fig. 8 Magnification of the final shape by SF



(a) First virtual die (b) Second virtual die

Fig. 9 Divided sections of virtual dies

그 후 확대된 형상과 Fig. 7 의 절단면 형상을 이용하여 2 차 가상다이를 구성한다. 구성된 2 차 가상다이를 1/2 로 절단하여 절단면 형상을 중간다이 단면형상으로 설정하였다. Fig. 9 에 1 차 및 2 차 가상다이 절단면을 나타내었다. Fig. 9 에서 알 수 있듯이 2 차 가상다이 절단면의 오목부 곡부감소율이 보다 높음을 알 수 있다.

본 연구에서 제시한 가상다이를 이용하여 설계된 중간패스 다이 단면형상과 실제 현장 숙련자의 노하우로 설계된 양산용 다이 단면형상을 초기소재 및 최종제품형상과 함께 Fig. 10 에 비교하여 나타내었다. 본 연구에서 적용한 설계방법을 적용한 경우 양산용 다이 형상보다 상/하부면의 곡부감면율은 상대적으로 낮으며, 양측면의 곡부감면율은 높음을 알 수 있다. 그러나, 전체적인 단면형상은 현장작업자에 의해 설계된 형상과 거의 유사함을 알 수 있다.

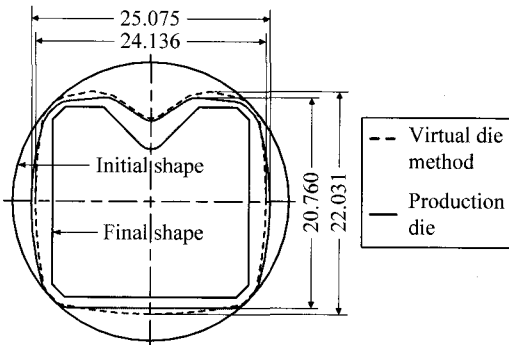


Fig. 10 Comparison of the designed section

5. 성형해석

본 연구에서 제시한 설계방법의 타당성을 검증하기 위하여 먼저 가상다이 및 현장작업자에 의해 설계된 두 가지 경우에 대한 성형해석을 수행하였다. 성형해석은 상용 S/W 인 DEFORM-3D 를 이용하였으며, 대칭면을 고려하여 1/2 단면에 대하여 수행되었다. 유한요소 개수는 약 51,500 개이며, 최소 사이즈는 약 0.4mm 이다. 초기소재의 인산염 피막치리를 고려하여 마찰계수(μ)는 0.11 로 설정하였다. Fig. 11 에 보듯이 첫 번째 패스의 변형이력을 고려하여 두 번째 패스에 대한 해석을 연속적으로 수행하였다.

Fig. 12 는 성형해석결과 각 패스에서의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 상대적으로

변형률이 많은 오목부에서 변형률이 높음을 알 수 있다.

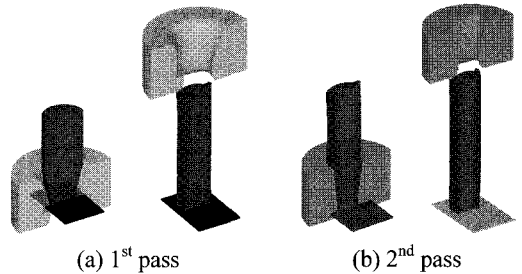


Fig. 11 FE-analysis of shape drawing process

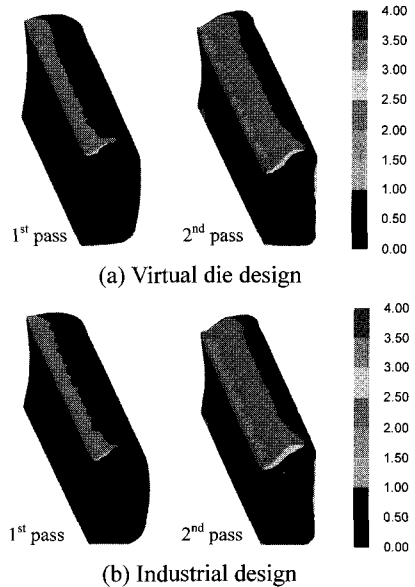


Fig. 12 Distribution of effective strain

본 연구에서 설계된 형상과 현장작업자에 의해 설계된 두 경우의 성형해석결과로부터 최종형상의 단면치수정도를 비교하였다. 단면치수정도는 요구되는 최종단면적(A_{final})과 해석결과 계산된 최종단면적($A_{analysis}$)을 이용하여 단면 미충만율(Unfilling rate, UR)을 계산하여 평가하였다. 미충만율은 다음의 식(4)로 계산된다.

$$UR = (1 - A_{analysis} / A_{final}) \times 100 [\%] \quad (4)$$

미충만율이 적을수록 단면 치수정도는 보다 우수하다. 성형해석결과 미충만은 주로 네 모서리부분에서 발생하였으며, 이는 제품 형상특성상 모서

리 부분에서의 소재유동구속 때문이라 사료된다. Table 1 에 해석결과 미충만율을 나타내었으며, 가상다이를 적용한 경우 미충만율이 보다 우수함을 알 수 있다.

Table 1 Unfilling rate of FE-analysis

Design method	Virtual die design		Industrial design	
	1 pass	2 pass	1 pass	2 pass
Reduction(%)	23.17	25.13	22.68	24.26
UR(%)	1.455		1.765	

6. 형상인발 실험

본 연구에서 제안한 설계방법 및 성형해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 형상인발실험을 수행하였다. 적용 소재는 실제 현장에서 제품으로 적용되는 AISI4137 소재이다. Fig. 13 에 제작된 형상인발공정의 중간다리와 인발기를 나타내었다. 인발다이는 소재에 변형을 가하는 초경팁과 스틸 케이스로 구성되어 있다.

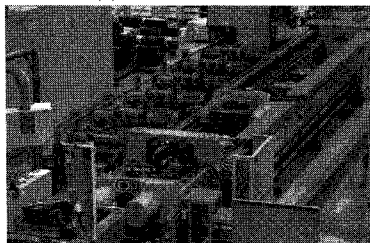
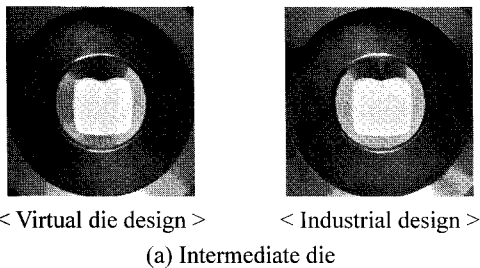


Fig. 13 Shape drawing experiment

Fig. 14 에 형상인발실험을 통해 생산된 제품을 나타내었으며, Fig. 15 는 최종제품의 단면형상이다. 최종제품에 대하여 3 차원 투영기를 이용하여 미충만율을 평가하였다. Table 2 에 해석 및 실험에 의한 인발하중 및 미충만율을 비교하여 나타내었다. 인발하중은 해석 및 실험결과가 유사함을 알 수

있다. 미충만율의 경우 성형해석 시 유한요소개수의 제약으로 인하여 해석결과와 실험결과와의 정량적인 차이는 다소 발생하지만, 그 경향은 잘 일치하고 있으며, 가상다이를 적용한 경우가 미충만율이 보다 우수함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제시한 설계방법을 적용할 경우 기존 현장작업자에 의해 설계된 경우보다 최종제품의 단면 치수정도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

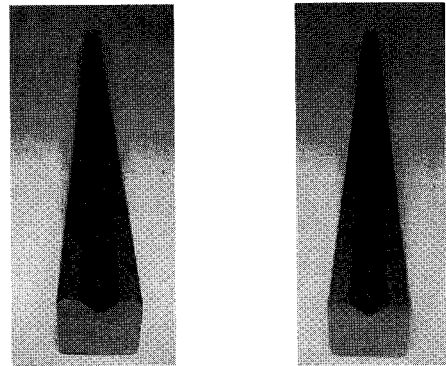


Fig. 14 Final products



Fig. 15 Cross section of the final products

Table 2 Comparison of drawing load and unfilling rate

Design method		Virtual die design		Industrial design	
		FEM	Exp.	FEM	Exp.
Load (ton)	1pass	31.51	32.71	31.93	32.95
	2pass	26.76	28.04	26.65	27.79
UR(%)		1.455	0.421	1.765	0.483

7. 결론

본 연구에서는 주로 현장작업자의 경험에 의존하여 이루어지고 있는 다단 형상인발공정에 대한 공정설계방법을 제안하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구에서는 형상계수, 대칭면 개수, 그리

고 내접원과 외접원의 반경비를 이용하여 공정분류기준 및 공정분류 절차를 설정하였다. 공정분류 절차 적용할 경우 초기 소재로부터 형상인발만으로 제품생산이 가능한지 혹은 형상압연 후 형상인발을 적용해야 제품생산이 가능한지 분류가 가능하였다.

2) 또한, 총단면감소율을 고려하여 형상인발 패스 수를 설정하였으며, 초기소재와 최종제품의 형상으로 만들어지는 가상다이를 이용한 중간다이 단면형상 설계방법을 제안하였다. 먼저, 초기소재와 최종제품형상으로 생성된 1 차 가상다이를 패스 수를 고려하여 절단한다. 절단된 단면형상과 스케일계수로 확대한 최종제품을 이용하여 2 차 가상다이를 생성한 후 2 차 가상다이의 중앙부를 절단하여 확보되는 단면형상을 중간다이 단면형상으로 설정한다.

3) 본 연구에서 제안한 공정분류 및 중단다이 단면형상설계방법을 대표적인 형상인발제품인 크로스 롤러 가이드 생산을 위한 형상인발공정설계에 적용하였다. 설계된 중간다이 단면형상에 대하여 성형해석과 형상인발실험을 수행한 후 현재 현장작업자에 의해 설계된 양산공정과 비교하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 설계방법을 적용할 경우 최종제품단면의 미충만율로 평가한 단면치수 정도가 보다 우수함을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 공정설계방법을 적용할 경우 형상인발공정설계를 보다 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업 및 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Yoshida, K. and Tuihiji, S., "Multiple Drawing of Rails for Linear Motion Guide," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 367-372, 2002.
2. Lange, K., "Handbook of Metal Forming," McGraw-Hill Book Company, pp. 14.22-14.23, 1985.
3. Brücker, M., Keller, D. and Reissner, J., "Computer-Aided Drawing of Profile from Round and Square Bar," *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 1, pp. 247-250,

1988.

4. Joun, M. S. and Hwang, S. M., "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, 1993.
5. Lee, S. K., Kim, B. M., Kim, S. W., Lee, Y. S. and Lee, J. H., "Optimal Die Profile Design in Tube Drawing Process for Prevention of Material Fracture," *J. KSPE*, Vol. 23, No. 11, pp. 78-84, 2006.
6. Basily, B. B. and Sansome, D. H., "Some Theoretical Considerations for the Direct Drawing of Section Rod from Round bar," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 201-209, 1976.
7. Boër, C. R. and Riegger, H., "Pattern Recognition in Steel Profile Production," *Int. J. Mach. Tool. Des. Res.*, Vol. 26, No. 1, pp. 21-34, 1986.
8. Steff, W. and Kopp, R., "Estimation of designing methods for the drawing of section rods and wire," *Wire J. Int.*, pp. 104-109, 1995.
9. Kim, Y. C., Kim, D. J. and Kim, B. M., "Intermediate Die Design System for the Multi-Stage Drawing Process," *Trans. NAMRI/SME*, Vol. 28, pp. 69-74, 2000.