

스플라인형상 인발을 위한 중간패스 단면형상 설계

이태규¹· 이재은¹· 이상곤²· 김병민[#]

Design of Intermediate Die for Spline Drawing

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

Abstract

The cross section shape of intermediate die is one of important parameters to obtain dimensional accuracy of final product in shaped drawing process. Until now it has been designed by the experience or trial and error of the expert. In this study, the cross section shape of intermediate die for spline shape is determined by the electronic field analysis, shape factor method. The result of the electronic field analysis, shape factor method has been compared with that of the present method. The effects of cross section shape on the dimensional accuracy were investigated by using FE analysis. And then the multi-stage shaped drawing experiments were performed to verify the results of FE analysis. As a result, the cross section shape from the electronic field analysis had the good dimensional accuracy. The electronic field analysis can be used for the method to obtain the cross section shape of intermediate die in shaped drawing process.

Key Words : Shaped Drawing Process(이형인발공정), Electronic Field Analysis(전기장해석), Intermediate Die(중간다이), Spline(스플라인), Scale Factor Method(형상계수법)

1. 서론

이형인발공정은 단면형상이 복잡하고 길이가 긴 제품을 성형할 수 있는 정형가공기술(Near-net-shape technology) 중의 하나이다. 일반적인 축대칭 원형인발과는 달리 복잡한 단면형상을 성형하기 위하여 최적 다이형상설계가 필수적이다. 스플라인형상과 같은 이형인발제품은 일반적으로 2~3 패스의 다단인발공정을 통해 성형되기 때문에 성형하중 및 최종제품의 치수정밀도를 만족하기 위한 적절한 중간패스 다이 단면형상을 결정해야 한다. 그러나 기존의 중간패스 다이 단면형상은 주로 현장작업자의 경험에 의한 시행착오 방법으로 설계되고 있는 실정이다[1]. 본 연구에서는 K. Lange[2]가 제안한 이형인발 제품의 다이 단면형상설계방법을 응용한 형상계수법(Scale factor

method), Lee[3]와 Shin[4] 등이 제안한 전압차에 의해 두 도체사이에 발생하는 등전위면을 이용하여 예비형상을 설계하는 전기장 해석법을 스플라인형상제품의 이형인발 다이 단면형상설계에 적용하였다.

본 연구에서는 중간패스 다이의 단면형상을 형상계수 법과 전기장해석을 통한 등전위법을 적용하여 결정하였다. 먼저, 설계된 중간패스 다이 단면형상들에 대해 성형해석을 통하여 인발하중과 치수정밀도를 평가하였으며, 이형인발 실험을 실시하여 그 결과를 검증하였다. 마지막으로 본 연구에서 제안한 방법에 대하여 현재 기존 현장작업자에 의해 설계된 단면형상으로 인발된 제품과 비교하여 그 타당성을 검증하였다. Fig. 1에 현장 작업자에 의해 설계된 중간다이 형상 및 최종 제품을 나타내었다.

1. 부산대 대학원 기계공학부 정밀가공시스템전공

2. PNU-IFAM 국제공동연구소

교신저자: 부산대 기계공학부, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

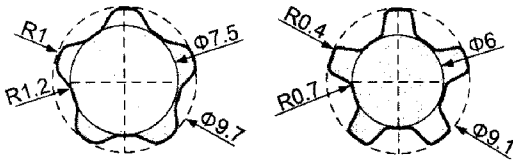


Fig. 1 Cross section shape of spline

2. 중간단면 형상결정

2.1 형상계수법

K. Lange 에 의하면 최종제품의 단면은 중립면에 의해 분할되며, 중간패스 다이 단면형상은 분할된 각 단면으로 동일한 단면감소율을 가지는 것이 좋다. 본 연구에서는 형상계수를 이용하여 단면감소율을 동일하게 다음과 같은 설계절차에 의해 중간단면 형상을 결정하였다.

- 1) 최종제품의 단면형상에 대하여, 초기 원형소재의 크기를 결정한다.
- 2) 최종제품과 초기 원형소재의 도심을 서로 일치시킨 후 두 단면을 연결한다.
- 3) 연결된 형상에 대하여 1패스당 단면감소율 r 을 고려하여 연결된 형상을 절단하며, 이 때 절단한 단면적은 식(1)에 의해 계산된다.

$$A = \left(1 - \frac{r}{100}\right) \cdot A_0 \quad (1)$$

단면감소율에 해당하는 형상계수 SF(=Scale factor)는 식(2)와 같이 정의된다.

$$SF = \sqrt{\frac{1}{1 - r/100}} \quad (2)$$

- 4) 식(2)에 의해 계산된 형상계수를 이용하여 최종제품의 단면을 확대한다.
- 5) 단계 3)에서 확보된 중간단면형상과 단계 4)에서 확보된 확대 단면형상을 연결한다. 연결된 형상에 대하여 중간부분의 단면을 추출하여 중간패스 다이 단면형상으로 결정한다.

이형인발공정의 경우 일반적으로, 이전 패스에서 최대한 제품의 형상에 근접한 형상으로 성형한 후 마지막 패스에서 최종형상을 성형하게 된다. SF를 적용할 경우 단계 3)에서 얻어지는 단면형상보다 더 최종제품의 형상에 근접한 단면형상을 얻을 수 있다. 최종형상의 단면적에 가까운 단면형상일수록 각 성형부위에서 일정한 단면감소

율을 가지므로 최종제품의 치수정밀도를 향상시킬 수 있다.

2.2 전기장 해석 응용

전압차에 의해 두 도체 사이에 발생하는 등전위면을 이용하여 다단인발다이의 단면형상을 설계하였다. 공간상의 두 도체에 다른 전압이 걸렸을 때, 공간 전위는 식 (3)과 같이 Laplace 함수로 나타내어진다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3)$$

이 때, 공간상의 같은 전압을 갖는 점들로 면을 구성할 수 있으며, 이러한 면들은 서로 겹치거나 중복되지 않는다는 특성을 가지고 있다. 이러한 등전위면의 특징을 이용하면 이형인발 초기소재 형상과 최종제품 형상 사이의 중간형상을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 범용유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS 10.0 를 이용하여 초기소재 및 최종제품의 형상에 대한 전기장 해석을 수행하여 등전위면 결과를 기초로 중간패스의 다이 단면 형상을 설계하였다. 초기소재 형상과 최종제품 형상에 각각 0V 와 1V 를 걸어 얻어진 등전위면들을 Fig. 2 에 나타내었다. 전기장 해석결과 초기소재와 최종제품의 형상 사이에서 등전위면이 형성됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 식(1)에서 계산된 단면적과 동일한 단면적을 가지는 단면형상을 선택하였다.

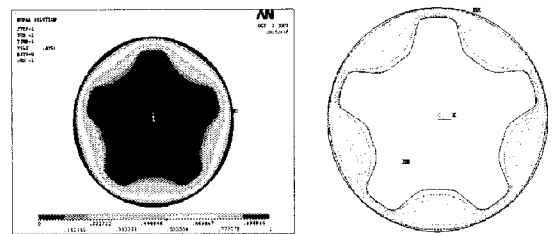


Fig. 2 Equi-potential lines between initial and final shapes of the shaped drawing products

3. 유한 요소 해석

3.1 소재 물성평가 및 해석모델

단면형상에 따른 다단 이형인발공정의 성형 특성을 분석하기 위하여 형상계수법과 전기장 해석으로 설계된 단면 형상에 대한 성형해석을 수행하여, 각 패스에서의 이형인발하중 및 제품 치수정밀도를 비교평가하였다.

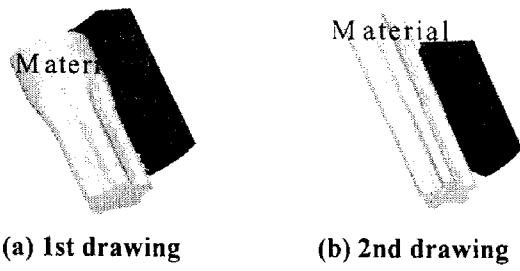


Fig. 3 FE analysis model

성형해석은 Fig. 3 에 나타낸 것과 같이 대칭면을 고려하여 1/10 단면에 대하여 수행하였으며, 2 번째 패스의 경우 1 번째 패스의 변형이력을 고려하여 수행하였다. 초기소재 직경은 최종제품의 도심을 중심으로 하는 외접원 크기를 고려하여 11mm 로 결정하였다. Kim[3] 등에 의하면 최종제품의 치수정밀도는 단면감소율 및 다이 반각에 많은 영향을 받는다.

본 연구에서는 단면감소율 및 다이 반각의 영향을 배제하기 위하여 각 패스당 단면감소율을 각각 27%, 24%로 설정하였으며, 다이와 소재 사이의 마찰상수(μ)는 0.1 로 설정하였다. 상용 유한요소해석 S/W 인 DEFORM-3D 를 이용하였다. 적용된 소재는 AISI 1017 이며, 인장시험을 통해 확보한 소재의 유효 응력-변형을 관계는 식(4)와 같다.

$$\bar{\sigma} = 781.93 \bar{\epsilon}^{0.204} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Fig. 4 는 본 연구에서 사용한 단면계수법, 전기장 해석과 현장작업자에서 얻어진 중간패스 단면형상을 나타낸 것이다. 단면계수법과 전기장 해석으로부터 얻어진 단면형상은 서로 유사하게 나타났으며, 현장 경험으로부터 얻어진 단면형상은 외접원의 크기가 작고, 내접원의 크기가 큰 형상으로 나타났다.


	Measured point	Scale factor	Electronic field	Field
	R1		4.96	4.81
R2		3.64	3.66	3.72

Fig. 4 Comparison of inscribed and circumscribed circle

3.2 치수정밀도 및 성형하중비교

성형해석 결과로부터 단면형상에 따른 각 패스별 단면적을 Table 1 에 나타내었다. 이형인발의 경우, 제품의 치수정밀도는 다이의 코너채움에 의

해 결정된다. Kim[5] 등에 의하면 단면감소율이 높을수록 제품의 치수정밀도가 높다. 유한요소 해석 결과 2 패스에서 치형 끝부분의 변형량이 가장 많은 전기장해석의 단면형상이 가장 높은 치수정밀도를 나타내었다. 반면, 상대적으로 1 패스의 단면 내접원이 가장 작은 단면계수법의 경우, 치형 끝부분의 변형량이 작기 때문에 치수정밀도가 낮다. 따라서 스플라인 형상의 치수정밀도를 높이기 위해서는 최종패스에서 치형 끝부분의 성형량을 상대적으로 크게 하여야 한다.

Table 1 Comparison of cross sectional area(mm²)

Pass No.	Scale factor	Electronic field	Field	CAD
1	5.529	5.558	5.541	5.698
2	4.257	4.274	4.270	4.320

일반적으로 이형인발제품 성형 시, 1 번째 패스는 최종 제품 성형을 위한 예비성형으로 높은 치수정밀도가 요구되지 않지만, 1 번째 패스의 치수정밀도가 상대적으로 높은 전기장해석의 경우, 2 번째 패스에서 실질적인 단면감소율이 높기 때문에 치수정밀도가 높은 것으로 판단된다.

제품의 단면형상에 따른 각 패스별 최대 인발하중을 Table 2 에 나타내었다. 1 번째 패스 하중의 경우 약 2.7ton 으로 유사하게 평가되었으며, 상대적으로 끝부분의 성형량이 작은 현장작업자에 의해 설계된 단면형상은 약 2.6ton 으로 나타났다. 2 번째 패스의 경우, 바닥부의 변형량이 상대적으로 많은 현장조건의 성형하중이 높게 나타났다. 이는 제품의 치수정밀도를 높이기 위해 바닥부의 성형량을 상대적으로 크게 할 경우 성형하중이 증가함을 의미한다. 성형하중의 증가는 인발하중에 의해 다이의 베어링부를 통과한 소재의 국부변형을 야기시킬 수 있으므로 이를 최소화하기 위해서는 인발하중이 작을수록 좋다. 즉, 성형하중에 의한 인발응력이 성형 후 최종제품의 항복응력을 넘지 않는 범위에서 적절한 치수정밀도 성형량을 결정하는 것이 중요하다.

Table 2 Comparison of drawing load (ton)

Pass No.	Scale factor	Electronic field	Field
1	2.704	2.612	2.694
2	1.454	1.469	1.408

4. 이형인발 실험

성형해석결과에 따른 단면형상별 치수정밀도 변화를 검증하기 위하여 설계된 이형인발 다이 단면형상에 대하여 실제 이형인발 실험을 실시하였다. Fig. 5 는 앞서 제시된 방법에 의해 설계 제작된 이형인발다이와 실험으로 생산된 제품의 단면형상을 저배율 현미경을 통해 나타낸 것이다.

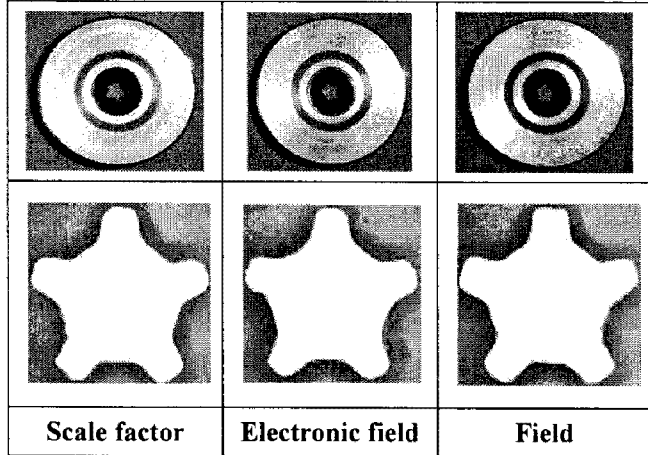


Fig. 5 Manufactured shaped drawing die and product

현장 경험에 의한 것과 전기장해석, Scale factor 의 최종제품 단면적과 치수정밀도를 측정해 보았다. Fig. 6 은 실험 후 투영기로 스캐닝한 단면형상의 단면적에 대한 치수정밀도를 비교하여 나타낸 것이다.

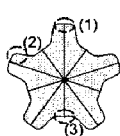
Cross section	Measured points	Final shape		
		Scale factor	Electronic field	Field
	(1)	0.04	0.03	0.09
	(2)	0.09	0.07	0.1
	(3)	0.05	0.08	0.07
	Area	41.83	42.20	42.05

Fig. 6 Measured cross sectional after shaped drawing process and comparison area

단면적은 차이가 거의 없었고, 치산과 치형 바닥부에서는 치수정밀도의 차이가 미세하게 있었지만 모두 허용오차범위 0.1mm 를 만족함을 알 수 있었다. 측정결과 전기장 해석에 의한 등전위법이 최종형상 단면의 치수정밀도에 대해 가장 양호한 것을 알 수 있었다.

이상의 형상인발 실험을 통해 단면적과 치수정밀도를 측정하여 앞서 제시된 두 가지 방법에

대해 신뢰성을 확보하였으며, 현장에서 적용 여부의 타당성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 성형해석과 이형인발 실험을 통하여 다단 이형인발공정의 중간다이 단면형상을 설계할 수 있는 방법을 제시하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 치형을 가진 스플라인 제품의 중간 인발 다이형상을 결정하기 위해 형상계수법과 전기장 해석을 이용한 등전위 법을 적용하였으며, 기존의 현장경험자에 의한 설계방법보다 적용이 용이함을 알 수 있었다.

(2) 본 연구에서 제안한 두 가지 방법에 대한 중간 다이를 제작하여 최종 스플라인 제품 인발 실험을 실시 한 결과 요구 치수 정밀도를 만족함을 알 수 있었다.

(3) 제시된 방법들은 향후 다양한 이형인발 제품의 다이 형상 설계에 효율적으로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- [1] Y.C. Kim, D.J. Kim, B.M. Kim, 2000, Intermediate Die Design System for The Multi-stage Drawing Process, NAMRI/SME, Vol. 28, pp. 69-74.
- [2] K. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill company.
- [3] 이석렬, 이영규, 박철현, 양동열, 2000, 열간단조에서의 최적 예비형상 설계, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A, pp 780-785.
- [4] 신현기, 이석렬, 박철현, 양동열, 2002, 전기장 이론을 이용한 3차원 단조공정에서의 예비형상 설계, 한국소성가공학회지, 제11권, 제2호, pp 165-170.
- [5] 김용철, 김동진, 김병민, 2000, 원형봉에서 사각재 인발공정의 코너채움에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 제17권, 제6호, pp 143-152.