

스플라인 이형인발을 위한 중간 다이 단면형상 설계

이재은¹· 이태규¹· 이상곤²· 김병민[#]

Design of the Cross Sectional Shape of Intermediate Die for Shaped Drawing of Spline

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

(Received October 13, 2008)

Abstract

The cross sectional shape of intermediate die is one of important parameters to improve 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 sectional shape of intermediate die for spline shape is determined by the electric fields analysis and scale factor method. The result of the electric fields analysis and scale factor method have been compared with that of the expert method. The effects of cross sectional shape on the dimensional accuracy were investigated by using FE-simulation. And then the multi-stage shaped drawing experiments were performed to verify the results of FE-simulation. As a result, the cross sectional shape from the electric fields analysis and scale factor method had the good dimensional accuracy. These two methods can be used for the method to obtain the cross sectional shape of intermediate die in shaped drawing process.

Key Words : Shaped Drawing Process, Intermediate Die Design, Electric Fields Analysis, Scale Factor, Spline

1. 서론

단면형상이 복잡하고 길이가 긴 제품은 인발 공정을 통해 생산함으로써 제조비용을 절감할 수 있고 기존의 절삭가공에 의한 제품에 비해 기계적인 성질이 우수한 장점이 있다[1].

축대칭 인발공정과 달리 단면형상이 복잡한 이형인발(Shaped drawing)공정은 인발하중, 단면감소율, 생산효율 등의 문제 때문에 보통 2~3 패스 내의 인발로 행해진다. 다만 이형인발공정에서 초기형상은 대부분 봉재 또는 직사각재이므로 적절한 중간 다이의 단면형상 설계가 필요하다. 그러나 실제 현장에서의 중간 다이의 단면형상 설계는 주로 현장작

업자의 경험에 의한 시행착오 방법으로 행해지고 있는 실정이다. 따라서 최종제품의 치수정도, 진직도 등을 고려하여 적절한 중간 다이의 단면형상 설계방법에 대한 연구가 매우 중요하다.

이형인발공정에 대한 몇몇 연구들이 이루어져 왔지만, 중간 다이의 단면형상 설계에 대한 연구는 부족한 실정이다[2~4].

본 연구에서는 Kim[5] 등이 제안한 직사각재 인발공정에서 가상금형을 이용한 중간 다이의 단면형상 설계방법과 Shin[6] 등이 제안한 3차원 단조 공정에서의 등전위면을 이용한 예비형상 설계방법을 Fig. 1(a)에 나타낸 스플라인 인발제품에 적용하여 중간 다이의 단면형상을 설계하였다. 설계된

1. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
2. PNU-IFAM 국제공동연구소
교신저자: 부산대학교 기계공학부.
E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

단면형상들에 대해 유한요소해석과 인발실험을 통해 성형하중 및 치수정도를 비교평가하였다.

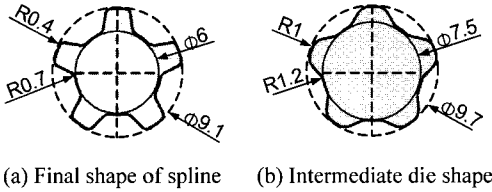


Fig. 1 Cross sectional shape of spline

2. 중간 다이 단면형상 설계방법

2.1 현장작업자의 경험에 의한 설계

Fig. 1(b)는 현장작업자의 경험에 의해 설계된 스플라인 제품의 중간 다이의 단면형상을 나타낸 것이다. 중간 다이의 단면형상은 대략적인 소재의 유동 및 국부적인 감면율, 충진율 등을 고려하여 현장작업자의 경험에 의해 설계 되었다. 그러나 이 방법은 현장작업자의 경험에 의한 시행착오로 인해 많은 시간과 비용이 소요되는 단점이 있다.

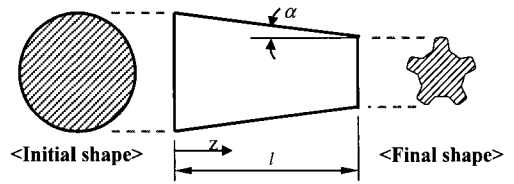
2.2 스케일 계수에 의한 설계

본 연구에서는 스플라인 형상에 적용하기 위해 Kim[5] 등이 직사각재의 중간 다이 설계시 제안한 방법에 스케일 계수(Scale factor; S.F.)를 적용하여 다음과 같은 절차로 중간 다이의 단면형상을 결정하였다.

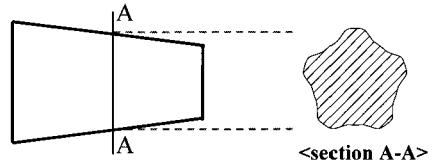
먼저, 최종제품의 단면형상에 대하여 가상의 외접하는 원을 그려 초기 원형소재의 크기를 결정한다. 그리고 최종형상과 초기형상의 도심을 일치시킨 후 Fig. 2(a)와 같이 두 단면을 서로 연결하여 가상의 금형을 구성한다. 1패스당 단면감소율을 고려하여 Fig. 2(b)와 같이 가상의 금형을 절단하며, 이 때 절단된 단면적은 식 (1)에 의해 계산된다. 여기서, A_0 는 초기 단면적(mm²), A 는 중간 패스의 단면적(mm²), γ 는 단면감소율(%)이다.

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

절단된 형상을 최종형상에 가깝게 만들기 위해 단면감소율을 고려한 스케일 계수를 계산하여 최종단면을 확장시킨다. 이 때, 스케일 계수는 식 (2)와 같이 계산된다.

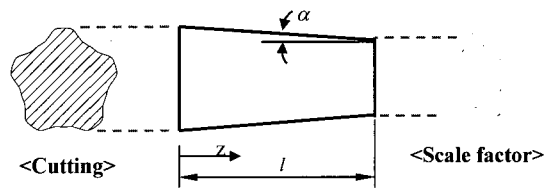


(a) Constructing the virtual drawing die

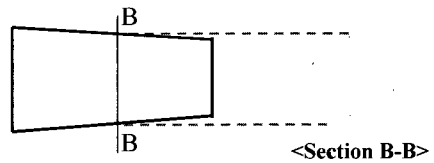


(b) Cutting the virtual drawing die

Fig. 2 Virtual drawing die and cutting shape



(a) Reconstruction of the virtual drawing die



(b) Determination of intermediate die shape

Fig. 3 Virtual drawing die and intermediate shape

$$S.F. = \sqrt{\frac{1}{1 - \gamma/100}} \quad (2)$$

앞에서 확보한 두 개의 단면을 Fig. 3(a)와 같이 서로 연결하여 가상의 금형을 재구성한다. 재구성된 가상의 금형에서 Fig. 3(b)와 같이 중간부분의 단면을 절단하면 현장작업자의 경험에 의한 단면형상과 유사한 단면형상을 얻을 수 있다.

이와 같이 스케일 계수를 이용하면 스플라인 형상에 대해서도 최종형상에 가까운 중간 다이의 단면형상을 설계할 수 있다. 최종형상에 가까운 단면형상일수록 최종패스에서 각 성형부위의 단면감소율이 일정하게 되기 때문에 최종제품의 치수정도를 향상시킬 수 있다[7].

2.3 전기장 해석에 의한 설계

전압차에 의해 두 도체 사이에 발생하는 등전위면들은 공간상의 같은 전압을 갖는 점들로 구성되며, 서로 겹치거나 중복되지 않는다. 또한 초기형상에 임의의 전압을 걸어주면 전위는 에너지가 최소로 드는 경로로 최종형상 쪽으로 이동하게 된다. 이러한 특징을 이용하면 초기형상과 최종형상 사이 최적의 중간단계의 형상을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 중간 다이의 단면형상 설계를 위해 범용 유한요소해석 S/W인 ANSYS Ver.10을 이용하여 2차원 전기장 해석을 수행하였다. Fig. 4는 초기형상과 최종형상에 각각 1V와 0V를 걸어 얻어진 등전위면들을 보여준다. 등전위면의 형상은 전위값이 0V에 가까울수록 최종형상에 가깝고, 1V에 가까울수록 초기형상에 가깝다는 것을 알 수 있다. 등전위면들 사이에서 식(1)에서 계산된 단면적과 동일한 면적을 가지는 형상을 중간 다이의 단면형상으로 결정하였다.

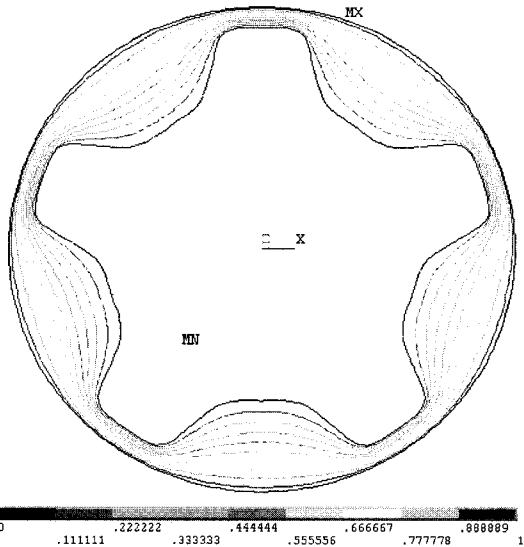


Fig. 4 Equipotential lines generated between initial and final shapes

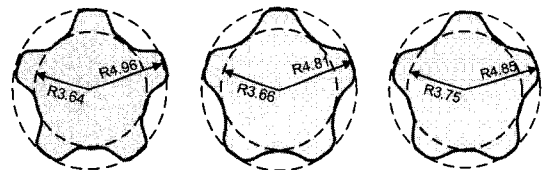
이상의 결과로 설계된 세 가지의 단면형상을 Fig. 5에 모두 나타내었다.

Table 1는 본 연구에서 적용된 세 가지의 단면형상에 대해 외접원(Circumscribed Circle; C.C.)과 내접원(Inscribed Circle; I.C.)의 반경, 그리고 단면의 둘레길이를 비교한 것이다. 외접원은 스케일 계수

에 의한 단면형상이 가장 크며, 전기장 해석과 현장작업자의 경험에 의한 단면형상은 상대적으로 작고 유사한 결과를 보였다. 또한 내접원은 현장작업자의 경험에 의한 단면형상이 가장 크며, 스케일 계수와 전기장 해석에 의한 단면형상이 상대적으로 작고 유사한 결과를 보였다. 둘레길이는 스케일 계수, 전기장 해석, 현장작업자에 의한 단면형상 순으로 낮은 결과를 보였다. 다른 단면형상들과 비교하여 현장작업자에 의한 단면형상은 외접원의 크기가 작고, 내접원의 크기가 크며, 둘레길이가 최소가 됨을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of parameters for three method

Parameter	Scale factor	Electric fields	Expert
C.C.	4.96	4.81	4.85
I.C.	3.64	3.66	3.75
Perimeter	32.29	30.28	30.08



(a) Scale factor (b) Electric fields (c) Expert

Fig. 5 Comparison of intermediate die shape

3. 유한요소해석

3.1 스플라인 이형인발 공정 조건

Kim[8] 등에 의하면 최종제품의 치수정도는 단면감소율 및 다이각도에 많은 영향을 받는다. 본 논문에서는 중간 다이의 단면형상 설계방법에 따른 치수정도를 비교하기 위해 다른 조건들은 모두 동일하게 설정하여 유한요소해석을 수행하였다.

초기소재의 직경은 최종형상의 도심을 기준으로 한 외접원의 크기를 고려하여 11.0 mm로 결정하였다. 총 단면감소율은 54.5%이며, 첫 번째 및 두 번째 패스의 단면감소율은 각각 40.0%, 24.0%이다. 베어링 길이는 두 패스 모두 4.0 mm로 동일하며, 인발속도는 200 mm/s이다. 그리고 각 패스에 대한 다이각도는 9°로 고정하였다. 이상의 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Process conditions for shaped drawing

Pass No.	1	2
Reduction[%]	40.0	24.0
Bearing length[mm]	4.0	4.0
Friction Coeff.(μ)	0.1	0.1
Drawing speed(mm/s)	200	200
Half die angle(°)	9	9

3.2 유한요소해석

본 연구에서는 중간 다이의 단면형상 설계를 위한 두 가지의 방법을 제시하였고, 현장작업자의 경험에 의한 단면형상과 비교하기 위해 강소성 유한요소해석 S/W인 DEFORM-3D를 이용하여 성형해석을 수행하였다. 성형해석은 Fig. 6에 보듯이 대칭면을 고려하여 1/10 단면에 대하여 수행하였으며, 첫 번째 패스를 완전히 빠져나온 소재에 대해 변형이력을 고려하여 두 번째 패스에 대한 해석을 연속적으로 수행하였다. 적용된 소재는 AISI 1017이며, 인장시험을 통해 확보한 소재의 유효 응력-변형률 곡선은 식 (3)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 781.93 \cdot \bar{\epsilon}^{0.204} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

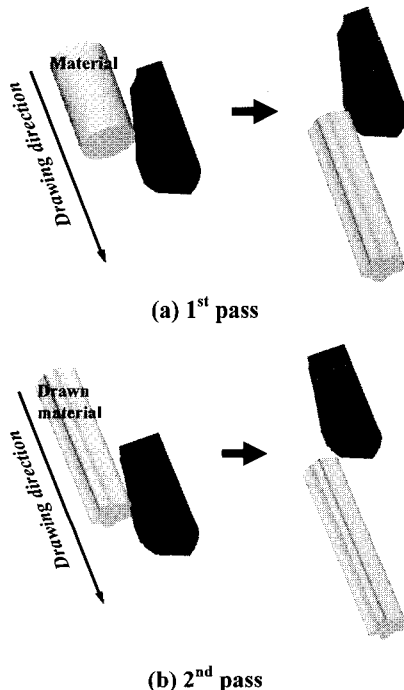


Fig. 6 FE-simulation of the two pass shaped drawing

3.3 인발하중 및 치수정도 비교

Table 3은 세 가지의 설계방법에 대해 성형해석을 통한 인발하중 비교결과를 나타낸 것이다. 첫 번째 패스의 경우 스케일 계수와 전기장 해석에 의한 경우가 약 2.7ton으로 상대적으로 크며, 현장 작업자의 경험에 의한 경우가 상대적으로 낮은 결과를 보였다. 두 번째 패스의 경우 전기장 해석과 현장작업자의 경험에 의한 경우가 약 1.45ton으로 상대적 크며, 스케일 계수에 의한 경우가 상대적으로 낮은 결과를 보였다. 그 원인은 동일한 단면감소율에 대해 단면형상에 따른 둘레길이의 차이로 마찰면적이 달라지기 때문이다. 그러나 실제로 인발하중의 차이는 아주 미미하였다.

Table 3 Comparison of drawing load(ton) at each shaped drawing after FE-simulation

Pass No.	Scale factor	Electric fields	Expert
1	2.704	2.694	2.612
2	1.408	1.454	1.469

Table 4는 성형해석결과로부터 각각의 패스에 대한 단면적을 측정된 결과이다. 최종제품의 단면적은 중간 다이의 단면형상 설계방법 중 전기장에 의한 경우가 상대적으로 높고, 현장작업자의 경험에 의한 경우, 스케일 계수에 의한 경우 순으로 낮았지만, 치수정도는 모두 우수하였다.

Table 4 Comparison of cross sectional area(mm²) at each shaped drawing after FE-simulation

Case	Scale factor	Electric fields	Expert	Product
Area (mm ²)	42.57	42.74	42.70	43.20

이형인발의 경우 최종제품의 단면적 뿐만 아니라, Fig. 7에서 보듯이 최종제품의 코너채움 또한 중요한 치수정도 평가 척도이다[8]. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 7에 나타내었듯이 코너부에서의 최종제품과 인발 다이사이의 거리를 측정하여 치수정도를 평가하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 알 수 있듯이 현장작업자에 의한 단면형상에 비해 스케일 계수에 의한 단면형상이 코너 부위의 치수정도가 보다 우수하였다.

그 이유는 국부적인 단면감소율이 크기 때문이다. 하지만 모든 경우에 있어서 허용치수공차 0.1mm를 만족하였다.

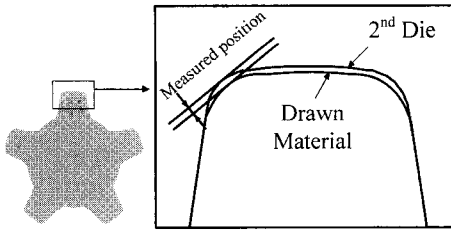


Fig. 7 Measured position for evaluation of dimensional accuracy

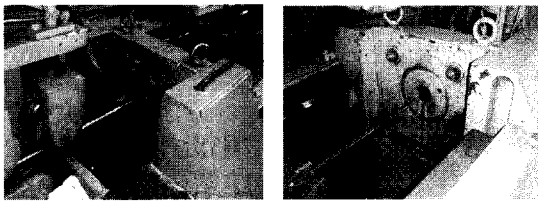
Table 5 Comparison of dimension at corner

Case	Scale factor	Electric fields	Expert
Clearance(mm)	0.05	0.04	0.06

4. 이형인발실험

4.1 실험조건

본 연구에서 제시한 중간 다이 단면형상 설계 방법에 대한 성형해석결과를 검증하기 위해 이형인발다이를 제작하여 인발실험을 실시하였다. 소재길이는 2.0m로 설정하여, 인산염 피막처리된 소재로 인발실험을 하였다. 실험에 사용된 인발장비는 Fig. 8과 같다.



(a) Inlet (b) Outlet
Fig. 8 Commercial drawing machine

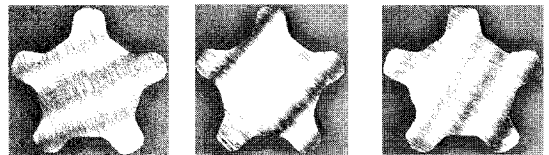
4.2 실험결과

인발실험 결과로부터 중간 다이의 단면형상 설계 방법에 따른 최종제품의 치수정도를 측정하여 평가하였다. Fig. 9와 같이 시편을 채취한 후 투영기로 스캐닝하여 단면적과 코너 부위의 치수를 측정하였다. 치수 측정결과는 Table 6에 나타내었다.

최종제품의 단면적 측정결과, 성형해석 결과와 아주 유사함을 알 수 있었다. 따라서, 최종제품의 치수정도는 전기장 해석에 의한 경우 가장 우수하였다.

스플라인의 코너 부위의 치수정도는 전기장 해석에 의한 경우가 상대적으로 우수하였지만, 그 차이는 미미하며, 모든 경우에 있어서 허용치수공차 0.1mm를 만족하였다. 따라서, 현장작업자의 경험에 의한 경우 외에 스케일계수와 전기장 해석에 의한 경우에 대해서도 신뢰성을 확보할 수 있었다. 또한 현장작업자의 경험에 의한 경우에 비해 전기장 해석 또는 스케일계수에 의한 경우가 시간적으로 상당히 단축되기 때문에 보다 효율적이라고 판단된다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 스케일계수와 전기장 해석에 의한 중간 다이의 단면형상 설계방법들에 대한 타당성을 확인할 수 있었다.



(a) Scale factor (b) Electric fields (c) Expert
Fig. 9 Cross sections after shaped drawing process

Table 6 Comparison of dimension at corner and cross sectional area in final shape

Case	Scale factor	Electric fields	Expert
Clearance(mm)	0.09	0.07	0.1
Area(mm ²)	41.83	42.20	42.05

4. 결론

본 연구에서는 다단 이형인발공정에서 중간 다이의 단면형상을 설계방법들을 제시하였으며, 현장작업자의 경험에 의해 설계된 단면형상과 비교하였다. 설계된 단면형상에 대해 유한요소해석을 수행하고 이형인발실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서는 스케일계수와 전기장 해석에 의한 중간 다이의 단면형상 설계방법을 제시하였고 유한요소해석 및 실험을 통해 그 타당성을 검

증하였다.

(2) 최종 스플라인 제품의 단면적은 전기장 해석에 의한 설계방법이 상대적으로 가장 높고, 현장작업자의 경험에 의한 설계방법, 스케일계수에 의한 설계방법 순으로 낮았지만, 치수정도는 모두 우수하였다.

(3) 본 연구에서 제안한 중간 다이의 단면형상 설계방법에 대해 이형인발실험을 실시한 결과, 코너 부위의 치수정도는 허용치수오차 0.1mm를 모두 만족함을 알 수 있었다.

(4) 이상의 결과로부터 기존의 현장작업자의 경험에 의한 설계방법보다 체계적으로 적용할 수 있으며, 비용 및 시간을 줄이는데 매우 유용할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업 및 교육과학기술부의 재원으로 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] K. Yoshida, E. Hosaka, E. Miyazaki, Y. Taki, J. Shinbe, 1992, Section Drawing for Stainless Steel Rail used in Linear Motion Guide(in Japan), Proceeding of 43rd Japanese Joint Conference for Technology of Plasticity, pp. 371~374

[3] J. R. Renz, R. Kopp, 1998, A new calibration method for complex shape sections with reflex angles, Wire J. Inter., 31, pp. 96~100.

[4] U. Greulich, 1961, Das ziehn von sondeerrofilen aus stahl, Drahtwelt, 47, pp. 579~583.

[5] Y. C. Kim, D. J. Kim, B. M. Kim, 2000, Intermediate Die Design System for The Multi-stage Drawing Process, Transactions of NAMRI/SME, Vol. 28, pp. 69~74.

[6] H. K. Shin, S. R. Lee, C. H. Park, D. Y. Yang, 2002, The Optimal Design of Preform in 3-D Forging by using Electric Field Theory, Transactions of Materials Processing, Vol.11, No.2, pp. 165~170.

[7] W. Steuff, R. Kopp, 1995, Estimation of designing methods for drawing of section rods and wire, Wire J. Inter., 28, pp.104~109.

[8] Y. C. Kim, D. J. Kim, B. M. Kim, 2000, A Study on the Corner Filling in the Drawing of Quadrangle Rod from Round Bar, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.17, No.6, pp. 143~152.