

비대칭 사다리꼴 단면 선재의 다단 인발 공정설계

지세인¹ · 이경훈² · 홍리석³ · 정진영³ · 김종성³ · 김병민[#]

Process Design of Multi-Pass Shape Drawing of Wire with Asymmetric Trapezoid Profiles

S. I. Ji, K. H. Lee, L. S. Hong, J. Y. Jung, J. S. Kim, B. M. Kim

(Received December 31, 2014 / Revised January 20, 2015 / Accepted February 5, 2015)

Abstract

The objective of the current study is to determine cross-sectional profile of intermediate dies in order to improve the plastic strain homogeneity which directly affects not only the dimensional accuracy but also the mechanical properties of final product by redesigning the intermediate dies using the conventional electric field analysis (EFA) method. Initially, the multi-pass shape wire drawing was designed by using the equivalent potential lines from EFA. The area reduction ratio was calculated from the number of passes in multi-pass shape wire drawing but constrained by the capacity of the drawing machine and the drawing force. In order to compensate for a concentration of strain in a region of the cross section of the wire, the process for multi pass wire drawing from initial round material to an intermediate die was redesigned again using the electric field analysis. Both drawing process designs were simulated by the finite element method in which the strain distribution and standard deviation plastic strain of the cross section of drawn wires were examined.

Key Words : Multi-Pass Shape Wire Drawing, Process Design, Electric Field Analysis, Standard Deviation Plastic Strain

1. 서 론

이형제품 제조 시 형상이 복잡하거나 초기 소재에 비해 단면감소율이 큰 최종 제품을 생산할 경우 한 다이를 통과할 때의 단면 감소율을 낮추는 반면 다이의 개수는 증가시켜 다단 패스 신선 공정으로 생산성을 높일 수 있다. 이러한 다단 형상 성형 제품 개발을 위한 공정 및 다이 설계는 최종 제품의 사양을 결정하는 주요한 역할을 한다[1~3].

최근 이러한 이형 제품들의 설계방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Lee 등은 용이한 다단 이형인발공정 중간패스 단면 형상설계방법을 제안

하고 이를 리니어 모션 가이드(Linear motion guide)에 적용하였다[4]. 설계된 중간 패스 단면형상에 대하여 유한요소해석과 실험을 수행하고 실제품 생산에 적용되고 있는 공정과 비교하여 그 타당성을 검증하였다. Kim 등은 다단 형상인발 공정설계 시 전기장 해석(Electric Field Analysis)과 평균단면감소율(Average reduction ratio)을 이용하여 중간 패스 다이의 단면형상을 설계하였다[5]. 또한, 축대칭 인발하중 예측모델을 이용하여 형상인발공정 하중을 계산하여 소재의 변형저항과의 비교를 통해 인발 가능성을 평가하고 유한요소해석 및 검증 실험을 수행하였다. 특히 Shin 등은 3차원 단조공정에서의 예비형상 설계

1. 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템전공

2. PNU-IFAM 국제공동연구소

3. 고려제강 기술개발연구원

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

에 전기장해석을 적용하였다[6]. 이 때 전기장의 등전위면을 이용한 설계 방법에 대한 타당성을 확인하였다. 하지만 이러한 전기장 해석을 통해 설계된 예비형상에는 소재의 재료 특성이나 최종 제품의 단면 특성에 대한 정보가 반영되지 않는다. 이에 따라 임의의 이형 형상제품 제조 시 소재의 파단, 다이 파손 등의 성형 결함을 최소화하고 치수 정도 및 제품의 경쟁력 향상을 위한 설계방법에 관한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 비대칭 사다리꼴 단면 형상의 제품에 대하여 중간 다이 형상 수정을 통해 제품 단면의 국부적인 변형 집중을 저감할 수 있는 설계 방안을 제시하였다. 유한요소해석을 통해 기존의 전기장 해석을 이용한 설계 방안과 제품의 좌우 단면의 변형량을 고려한 설계 방안을 비교하였다. 유한요소해석은 상용코드인 ANSYS 10.0과 DEFORM 3D를 사용해 수행되었고, 선재의 기초 물성은 인장 시험을 통해 측정되었다.

2. 다단 이형인발 공정설계

2.1 패스 스케줄 설계

Fig. 1은 본 연구에 사용된 사다리꼴 선재의 단면 형상 및 치수를 나타낸 것이다. 이형인발 시 성형 방향을 고려하여 초기 소재의 직경은 최종제품의 최소 외접원 크기보다 크게 설정하였다.

다단 이형인발 공정을 설계하기 위하여 장비 사양 및 인발력 등을 고려하여 단면 감소율을 15~20%로 제한하였다. 따라서 식 (1)에 의해 초기 선재 직경은 10mm, 총 패스 수는 6패스로 계산하였다[8]. 이 때 U_m 은 평균 단면감소율을 나타내고 A_n 및 A_0 는 각각 최종 및 초기 단면적을 나타낸다. 또한 n 은 패스 수를 나타낸다.

$$U_m = 1 - (A_f / A_0)^{1/n} \quad (1)$$

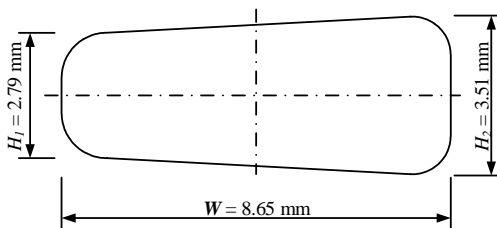


Fig. 1 Dimension of wire with trapezoid profile

Table 1 Pass schedule of multi-pass shape wire drawing

No. of pass	Cross-sectional area (mm ²)	Reduction of area (%)
1	64.3	18.2
2	53.3	17.1
3	44.4	16.7
4	37.0	16.7
5	30.8	16.7
6	26.5	14.2

각 패스별 단면적과 단면 감소율을 Table 1에 나타내었다. 총 단면 감소율은 66.3%이고 공정 중 재료의 가공경화와 최종 제품의 치수 정밀도를 고려하여 마지막 패스에서 단면 감소율을 낮게 설정하고 이를 1, 2패스에서 보상하였다.

2.2 전기장에 의한 중간 다이 형상 설계

전기장 해석(EFA: Electric Field Analysis)을 이용한 중간 다이 형상 설계 방법은 다음과 같다. 먼저 도심을 일치시킨 두 물체에 대하여 각각 다른 전압을 인가한다. 이 후 두 물체의 사이에서는 서로 겹치지 않는 유한개의 등전위선(Equivalent potential line)이 생성된다. 특히 등전위선과 최소에너지경로를 거치는 중간형상은 지배방정식은 서로 다르나 유사한 경향을 보이기 때문에 등전위면을 이용한 예비형상 설계에 물리적 의미를 부여한다[6]. 따라서 초기 소재와 최종 제품 사이에 생성된 많은 등전위선 중 원하는 단면적을 갖는 선을 추출하여 각 패스별 중간 다이 형상으로 사용하게 된다.

본 연구에서는 6패스 이형인발 공정의 중간 다이 설계를 위해 전기장해석을 통해 확보된 등전위선 중 앞서 설계한 단면감소율과 단면적을 만족하는 등전위선 형상을 중간 다이의 단면형상으로 선정하였다. Fig. 2는 초기 소재에 1V, 최종 제품에 0V를 인가하여 전기장 해석을 수행하기 위한 모델과 그 결과이다.

하지만 전기장 해석으로 나온 다이의 형상은 좌·우 측의 변형량 차이로 인해 국부적인 변형 집중을 유발한다. 이러한 원인들로 성형 후 소재는 길이방향으로 휘거나 뒤틀리는 현상이 나타난다. 특히 다단 공정에서는 양측의 속도차이로 인해 금형 마모가 발생하기도 한다. 따라서 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 소재의 형상을 고려하여 중간 다이 형상 재설계를 수행하였다.

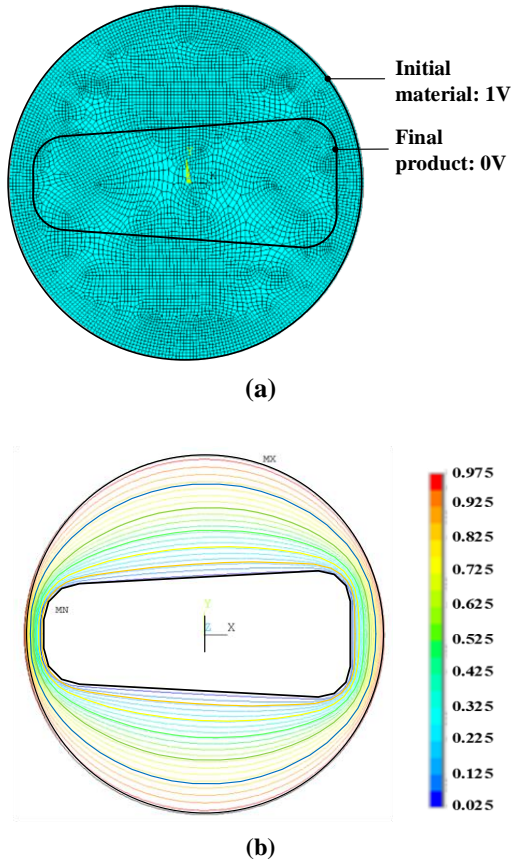


Fig. 2 FE model for electric field analysis and equivalent potential lines

2.3 중간 다이 형상 재설계

선재의 냉간 인발의 경우 생산성을 높이기 위해 주로 2 개 이상의 다이를 연속적으로 배치하여 생산한다. 이 때, 각 형상에 의해 선재의 뒤틀림이나 휨 현상을 방지할 수 있는 패스 및 중간 다이 형상을 재설계하였다. 이 때 공정 설계는 동일하되 중간 다이 중 비대칭 형상의 다이의 개수를 최소화하는 방안을 제시하였다. 그 과정은 다음과 같다. 6 패스 다이 형상은 최종 제품의 형상과 동일하기 때문에 수정이 불가능하다. 동일한 단면적의 대칭 다이 형상을 찾기 위해서는 먼저 도심을 일치시키고 다음 패스에서의 다이 형상을 모두 포함할 수 있어야 한다. 예를 들어, 5 패스 대칭 형상의 다이는 Fig. 3 과 같다. 수정된 다이의 형상은 마지막 패스의 다이를 모두 포함하지 않기 때문에 최종 제품의 코너부에서 미충만이 발생할 확률이 높다. 따라서 비대칭 중간 다이의 개수를 최소화할 수 있는 방안은 4 패스까지의 다이 형상을 수정하는 것으로 결정할 수 있다.

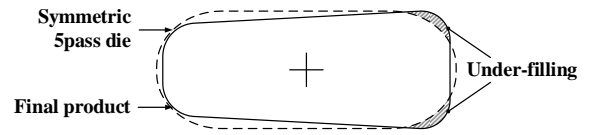


Fig. 3 Redesigned symmetric die profile at 5th pass

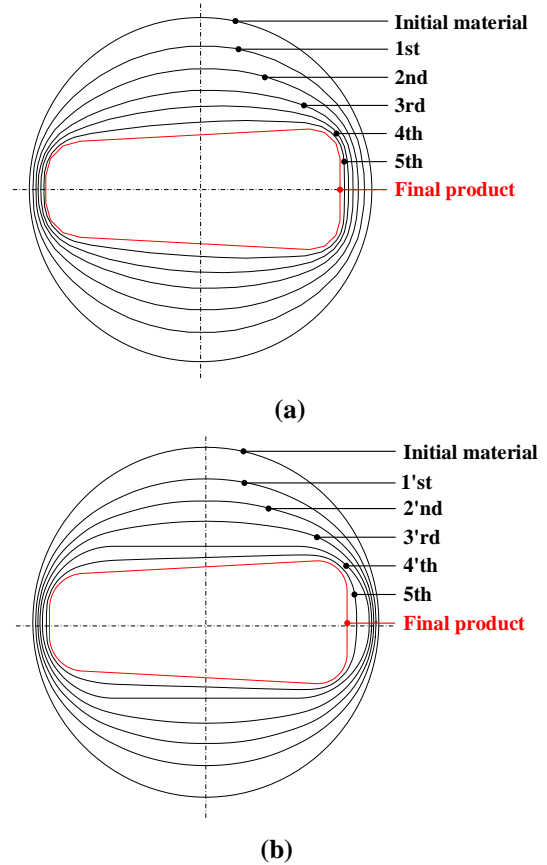


Fig. 4 Cross-sectional profile of intermediate dies (a) by conventional EFA method (b) by redesigned method

따라서 앞서 설계된 다이와 동일한 단면적을 가지면서 대칭형상의 다이를 결정하고 초기 소재에서부터 수정된 4패스 형상까지 전기장해석을 재수행한다. 이 때 1~4패스의 형상이 대칭단면을 고려하여 결정된다.

설계된 두 중간 다이 형상을 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 앞서 언급하였듯이, Fig. 4(a)는 기존의 전기장 해석으로 도출된 등전위선의 형상이다. 또한 Fig. 4(b)와 같이 1~4패스의 다이는 좌우 대칭 형상으로 수정하였고 5~6패스에서 최종 형상을 성형할 수 있도록 기존의 다이 형상을 사용하여 설계하였다.

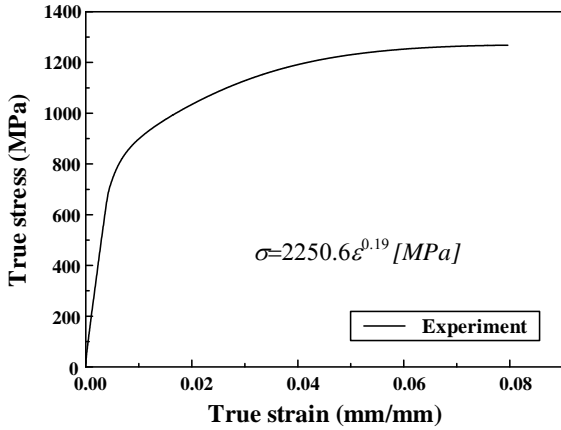


Fig. 5 True stress-strain relationship by tensile test

3. 유한요소해석

앞서 제시된 중간 다이 형상 설계법을 비교하기 위하여 기존의 전기장 해석과 본 연구에서 제시한 다이 형상에 대하여 유한요소 해석을 진행하였다.

3.1 선재의 재료 물성

본 연구에 사용된 소재인 탄소 함유량이 0.5 wt% C의 Si-Cr강은 서스펜션 스프링, 가진 제품, 자동차 및 오토바이 부품 등으로 이용된다. 유한요소 해석을 수행하기 앞서 인장시험을 통해 초기 소재의 물성을 도출하였다. 시험편은 KS B 0802 A9에 따라 준비하였고 선재의 직경 및 표점 거리는 5.5, 50 mm이다. 또한 속도는 10mm/min으로 수행하였다. Fig. 5에 인장 시험으로 얻은 유효 응력-변형률 관계를 나타내었다. 아래와 같은 결과에서 항복강도 (0.2% 오프셋법) 이후의 소성 변형 영역에 대하여 얻은 유효응력 식은 $\bar{\sigma} = 2250.6\bar{\epsilon}^{0.19}$ [MPa]이며 이는 유한요소해석에서 강소성체인 초기 소재 물성으로 사용되었다.

3.2 유한요소해석 조건

본 연구에서 사용된 유한요소해석 모델을 Fig. 6에 나타내었다. 중심면을 기준으로 상·하 대칭 형상이기 때문에 1/2 모델로 선정하였다. 또한 소재 내 약 100,000개의 3차원 사면체 메쉬를 생성하였다. 다이 반각은 성형이 가장 많이 되는 상·하측을 기준으로 6°로 설정하였다. 인산염 피막 처리된 소재의 마찰 특성을 고려하여 마찰상수 0.1으로 결정하였고 소재는 10mm/s로 이동한다[8].

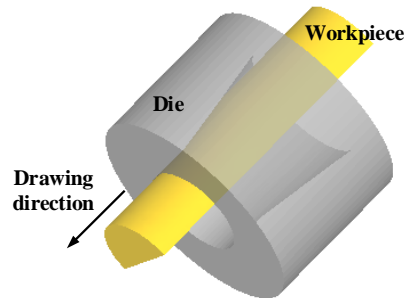


Fig. 6 FE model for multi-pass shape wire drawing

Table 2 Dimensional error from FE analysis

		Die (mm)	FEA (mm)	Error (mm)
W	Conv.	8.650	8.641	-0.009
	Redes.		8.614	-0.036
H ₁	Conv.	2.790	2.7717	-0.022
	Redes.		2.7617	-0.032
H ₂	Conv.	3.510	3.4799	-0.038
	Redes.		3.5009	-0.017

다단 형상인발 공정은 단면감소율과 패스수의 관계에 따라 Table 1과 같은 패스 스케줄로 진행되었고 각 패스의 성형이 끝난 뒤 별도의 열처리 공정이 없기 때문에 (i+1)번째 패스의 해석 수행 시 (i)번째의 해석 결과 중 각 노드에서의 변형 이력을 초기 변형률(pre-strain)으로 입력하였다.

3.3 유한요소해석 결과

3.3.1 최종 제품의 치수 평가

Table 2에 최종 제품의 목표 치수와 두 가지의 설계 방법으로 성형된 제품의 치수를 비교하였다. Conv.는 기존의 전기장 해석을 이용한 설계 방법이고 Redes.은 본 연구에서 제안한 설계 방법이다. 본 연구에서 제품의 특성상 치수의 허용오차는 ±0.05 mm 이다. 두 설계안의 유한요소해석 결과 모두 최종 제품의 허용오차는 만족하는 것을 확인하였다.

3.3.2 변형률 분포 평가

Fig. 7과 Fig. 8은 각 설계법에 의한 패스별 변형 후 변형률 분포를 나타내었다. 선재의 단면의 변형률을 비교하기 위하여 단면에 대한 변형률 분포를

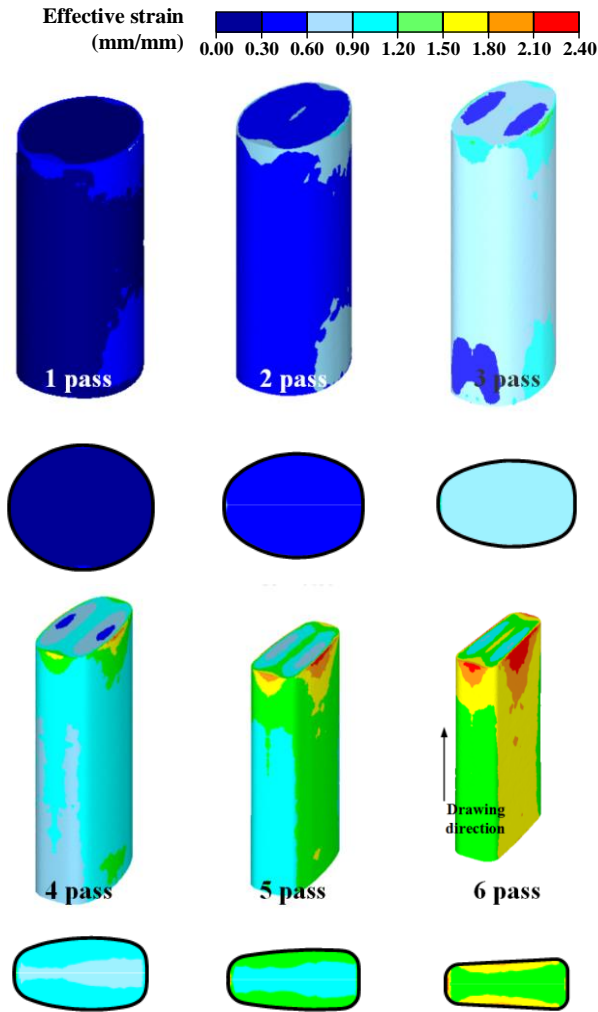


Fig. 7 Effective strain distribution of each passes by conventional EFA method

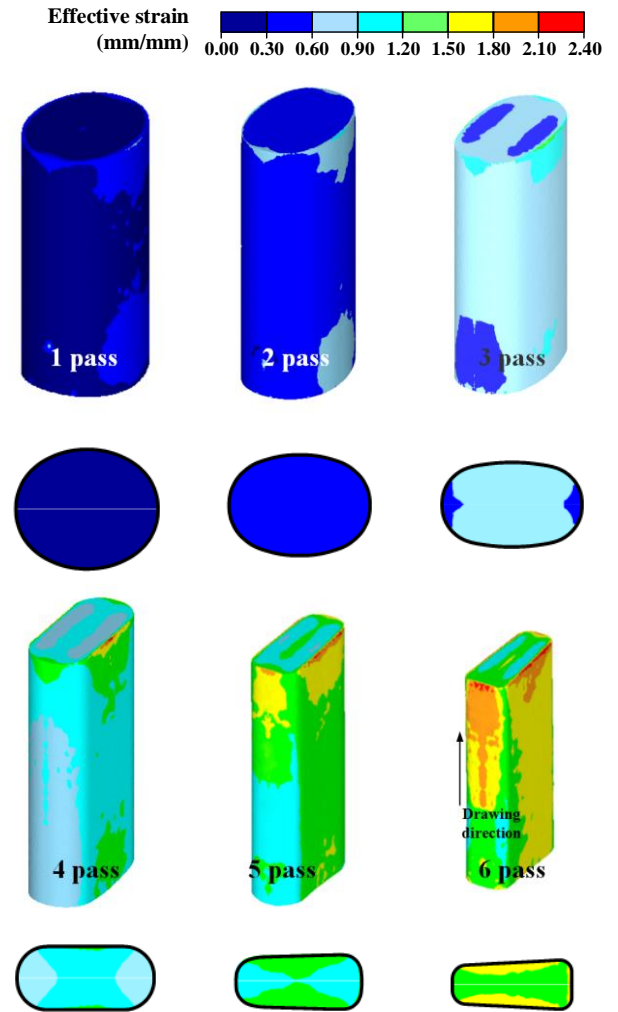


Fig. 8 Effective strain distribution of each passes by redesigned method

함께 나타내었다. 기존의 전기장 해석을 이용한 설계 방법(Fig. 7)은 제품의 비대칭 단면 형상을 고려하지 않아 최종 제품의 변형률 분포가 제품 단면의 좌측에 집중되는 것을 알 수 있다. 반면 본 연구에서 제안한 설계 방법(Fig. 8)의 제품들은 비교적 균일한 변형률 분포를 가지며 특히, 4, 5패스에서 중심부까지 변형이 충분히 전달된 것을 확인하였다.

3.3.3 변형률 분포 편차 평가

본 연구에서는 단면의 국부적인 변형률 집중을 정량적으로 평가하기 위하여 식 (2)을 이용하여 변형률 분포 편차(SDP: Standard Deviation Plastic Strain)를 계산하였다[9]. 변형률 분포 편차는 주로 복잡한 단면을 갖는 제품에 대하여 국부적인 변형 집중을

알아 보는 지표로 사용된다.

$$SDP_w = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\epsilon_{i,w} - \epsilon_{avg,w})^2 / N} \quad (2)$$

where, $\epsilon_{avg,w} = \sum_{i=1}^N \epsilon_{i,w} / N$

위의 식에서 $\epsilon_{i,w}$ 는 유한 요소 해석 상의 노드 i 에서의 유효 변형률, $\epsilon_{avg,w}$ 는 요소 w 에서의 평균 유효 변형률, i 와 N 은 각각 요소 w 내에서 노드 번호 및 총 노드의 갯수를 의미한다.

Fig. 9와 같이 최종 패스에서의 단면 1/2 면적에 대해 10개의 요소(w)로 나누어 각 요소당 100개의 노드(i)의 변형률을 추출하여 계산하였다.

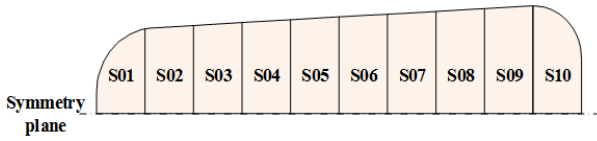


Fig. 9 Divided element of final product for SDP

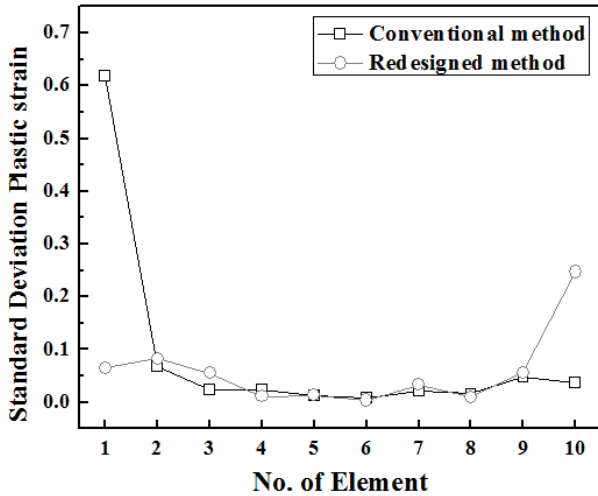


Fig.10 Standard Deviation Plastic Strain at each element in the final product

그 결과 Fig. 10과 같이 기존 설계안(Conv.)에 의한 제품의 변형률 분포 편차를 살펴보면 좌측부에서 극심한 변형률 집중을 확인할 수 있다. 동일한 단면 감소율을 갖기 때문에 마지막 패스에서 계산된 변형률 값은 유사하다. 또한 중심부에서는 변형률 분포가 비슷한 반면 좌·우측부에서 변형률 분포 편차(SDP) 값을 비교하면 기존의 설계안이 약 3배 가량 높은 값을 가진다. 즉, 동일한 단면적 및 단면감소율을 갖는 공정 설계 시 중간 다이 형상을 수정을 통해 국부적인 변형률 집중을 완화하여 소재의 기계적 물성을 개선하고 다이에 작용하는 응력 집중을 분산시켜 생산성을 높일 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 다단 이형 인발 공정 설계 중형비가 크고 비대칭 형상의 제품인 사다리꼴 선재를 제조하기 위한 성형 공정의 설계법을 제시하였다. 특히 기존의 전기장 해석을 이용하여 설계한 방법과 비교하여 비대칭 단면의 다이 개수를 최소화하는 방법을 제시하였다. 또한, 이를 유한요소해석을 통

해 검증하였다.

(1) 제품의 단면 특성 상 국부적 변형 집중을 저감하기 위해 비대칭 형상의 중간 다이 개수를 최소화하도록 재설계하였다. 각 패스에서 동일한 단면감소율을 갖는 기존의 설계법과 제안된 재설계법의 유한요소해석 결과 두 경우 모두 치수 오차를 만족하는 결과를 얻었다. 또한 최종 제품의 변형률 레벨은 유사한 수준의 값을 가진다.

(2) 두 설계법에 대하여 변형이 집중되는 양을 정량적으로 측정하기 위해 최종 제품 단면의 변형률 분포 편차를 계산하여 비교하였다. 재설계법에 의해 제조된 제품이 비교적 낮은 변형률 편차를 가지기 때문에 상대적으로 국부적인 변형률 집중을 저감하였다. 향후 제안된 설계법에 따라 다단 형상 인발 실험을 수행하여 유용성을 검증할 예정이다.

후 기

이 논문은 (주)고려제강 사외위탁연구과제 및 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A5A1048294).

REFERENCES

- [1] S. K. Lee, J. E. Lee, B. M. Kim, S. M. Kim, 2007, Die Design in The Complex Shape Drawing of Cross Roller Guide to Improve The Dimensional Accuracy, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 21, No. 10, pp. 1573~1579.
- [2] T. K. Lee, C. J. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2009, Prediction of Drawing Load in The Shape Drawing Process, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 4, pp. 323~328.
- [3] Y. C. Kim, D. J. Kim, B. M. Kim, 2000, Intermediate Die Design System for The Multi-Stage Drawing Process, Trans. NAMRI/SME, Vol. 28, pp. 69~74.
- [4] S. K. Lee, J. E. Lee, T. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2009, Process Design of Multi-Stage Shape Drawing Process for Cross Roller Guide, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 26, No. 11, pp. 124~130.
- [5] S. M. Kim, S. K. Lee, C. J. Lee, M. S. Jeong, B. M.

- Kim, 2012, Process Design of Multi-Pass Shape Drawing Considering The Drawing Stress, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 4, pp. 265~270.
- [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, Trans. Mater. Process., Vol. 11, No. 2, pp. 165~170.
- [7] S. K. Lee, J. E. Lee, S. M. Kim, B. M. Kim, 2010, Design of Intermediate Die Shape of Multistage Profile Drawing for Linear Motion Guide, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 24, No. 12, pp. 2539~2544.
- [8] T. K. Lee, 2010, M.S. Thesis, Pusan National University, Pusan, p. 28.
- [9] M. Wang, H. Yang, Z. C. Sun, L. G. Guo, 2009, Analysis of Coupled Mechanical and Thermal Behaviors in Hot Rolling of Large Rings of Titanium Alloy Using 3D Dynamic Explicit FEM, J. Mater. Process. Technol., Vol. 209, No. 7, pp. 3384~3395.
- [10] J. E. Lee, T. K. Lee, S. K. Lee, S. M. Kim, B. M. Kim, A Study on Cross Sectional Shape Design of Intermediate Pass in The Multi-Stage Shape Drawing, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 4, pp. 283~289.