

스플라인 다단 형상 인발 중간패스 다이 설계

The Design of the intermediate die of multi-pass drawing for Spline shaft

*서정관¹, 이태규¹, 이경훈¹, 김성민¹, 이상곤², #김병민³

*J. K. Seo¹, T. K. Lee¹, K. H. Lee¹, S. M. Kim¹, S. K. Lee², #B. M. Kim (bmkim@pusan.ac.kr)³

¹ 부산대학교 대학원 정밀기계공학과, ² 부산대학교 PNU-IFAM JRC, ³ 부산대학교 기계공학부

Key words : Multi-pass drawing, Intermediate die, Design of Experiment, Unfilling area

1. 서론

형상 인발공정은 특정 형상을 가진 금형에 봉재, 선재, 관재 등의 소재를 통과시켜 원하는 단면형상을 가진 길이가 긴 제품을 생산하는 대표적인 냉간 소성가공 공정이다. 최근 자동차, 반도체, 로봇, 정밀 측정기기 등의 다양한 산업 분야에서 단면형상이 복잡한 형상 인발 제품들이 활발하게 이용되고 있다.

특히, 자동차의 조향장치로 사용되는 스플라인 샤프트는 표면에 치형을 가진 길이가 긴 부품으로 치형부의 높은 충진율이 요구되는 제품이다. 따라서 최종 제품의 치형부 충진율 향상을 위한 형상인발공정 조건의 설정이 매우 중요하다. 최근 유한요소 해석을 통한 형상인발공정에 대한 몇몇 연구가 이루어졌지만 대부분 공정해석을 통한 현상파악에 국한되어 있으며, 실제 현장에 적용하기에는 한계가 있다.⁽¹⁻²⁾

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 전기장 해석, 유한요소해석, 그리고 인공신경망학습을 이용하여 치형부 미충진율 최소화를 위한 스플라인 다단형상인발공정의 중간다이 설계 방법을 제안하였다.

2. 스플라인 다단 형상 인발 공정 조건

본 연구에서 적용한 스플라인 샤프트는 초기 원형소재에서 2패스의 형상인발을 통하여 제조된다. Fig. 1에 각 패스에 대한 단면 형상 및 다이를 나타내었다. 초기 소재는 길이 1.5m, 직경 30.0mm의 원형봉재이다. 총감면율은 40%이며, 1패스의 단면감면율, 다이 각도 및 다이 형상을 설계변수로 설정하였으면 Table 1에 나타내었다. 2패스의 다이 각도는 8°로 고정하였으며, 인발속도는 200mm/s이다.

본 연구에서는 이들 설계변수가 스플라인 다단 형상 인발 제품의 충진율에 미치는 영향을 평가하기 위하여 상용 유한요소 해석 S/W인 DEFORM-3D V6.1을 이용하여 변형해석 및 다이강도 해석을 수행하였다. 변형해석에 사용된 재료는 AISI1018이며, 유효응력-변형률 곡선은 $\bar{\sigma} = 947.0 \epsilon^{0.262}$ [MPa], 마찰상수(μ)는 0.1로 설정하였다.

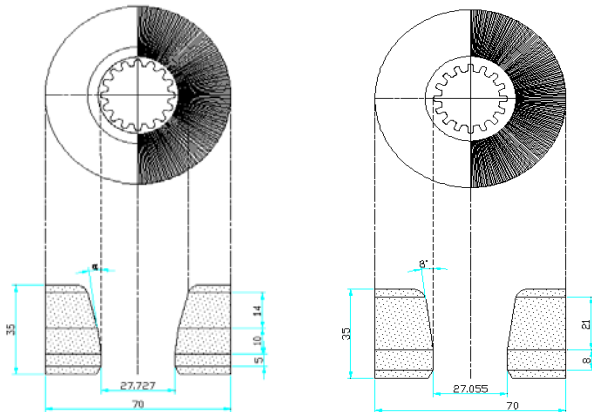


Fig. 1 Die geometry for shaped drawing

Table 1 Process conditions for shaped drawing

Pass No.	1	2
Die angle (°)	7, 10, 13	8
Initial workpiece diameter (mm)	15	-
Reduction Area (%)	22, 26, 30	-
Length of die land (mm)	5	8
Spline drawing speed (mm/s)	200	200
Friction factor (μ)	0.1	0.1

3. 중간패스 금형 설계

최종제품의 치형부 미충진율 최소화를 위한 최적 중간패스 다이를 설정하기 위해 본 연구에서는 실험계획법과 인공신경망 기법을 활용하였다.

3.1 실험인자 및 직교배열표 작성

실험계획법과 다구찌법을 적용하기 위하여 우선 설계변수의 수준 및 직교배열표를 작성하였다. 본 연구에서는 중간 다이스의 다이스각(α), 단면 감소율(R.A), 그리고 단면형상(shape)이 설계 변수이다. 수준은 실제 현장에서 적용하고 있는 단면감소율 및 다이스각을 기준으로 Table 2와 같이 설정하였다. Table 3은 $L_9(3^3)$ 의 직교 배열표이다. 단면형상은 ANSYS v.10을 이용한 전기장 해석을 통해 설정하였다. Fig. 2에 설정된 단면형상을 나타내었다.⁽³⁾

Table 2 Design variables and levels

Variable	Level 1	Level 2	Level 3
α (°)	7	10	13
R.A(%)	22	26	30
Shape	1	3	6

Table 3 $L_9(3^3)$ orthogonal array

Simulation No.	α (°)	R.A(%)	Shape
1	22	7	1
2	22	10	3
3	22	13	6
4	26	7	3
5	26	10	6
6	26	13	1
7	30	7	6
8	30	10	1
9	30	13	3



Fig. 2 Shape of intermediate dies using electric analysis

3.2 유한요소해석을 통한 인공신경망 적용 결과

직교배열표에 따라 DEFORM-3D를 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 인공신경망 학습을 수행하였다. Fig. 3의 (a), (b), (c)는 각 변수에 따른 최종제품의 미충진율(Unfilling rate)를 나타낸 것이며, (d)는 인공신경망을 이용한 중간다이의 최적형상을 도출한 것이다. 1패스의 단면감소율이 감소하고, 다이스각이 증가할수록 미충진 면적이 감소하고 있다. 충진율 향상을 위한 최적의 단면감소율 및 다이스각을 설정하기 위한 실시한 인공신경망 학습결과로 도출된 최적의 중간금형 설계변수는 단면감소율 22%, 다이스각 13°, Shape 4이다. 그러나, Fig. 3의 (a), (b), (c)와 같이 단조감소하는 경향을 보이는 인공신경망 학습결과와 경우 단면감소율이 감소하고, 다이스각이 증가할수록 미충진 면적이 감소하는 반면에 인발하중은 증가한다. 증가된 인발하중으로 인해 제품에 백킹이 발생할 수 있으며 다이마멸 및 파손으로 인한 다이수명 단축을 가져올 수 있다. 이에 따라 최적의 중간다이 설계를 위해 다이강도해석을 실시하여 한계 단면감소율 및 다이스각을 선정하였다.

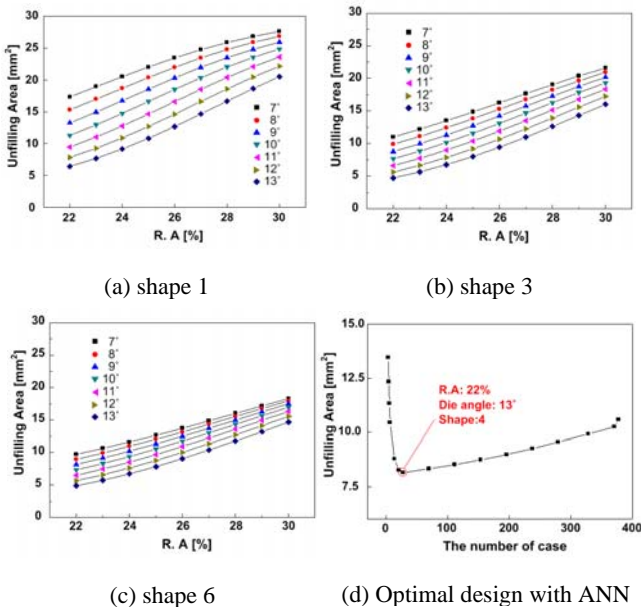
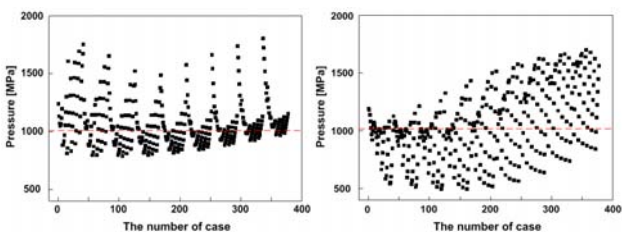


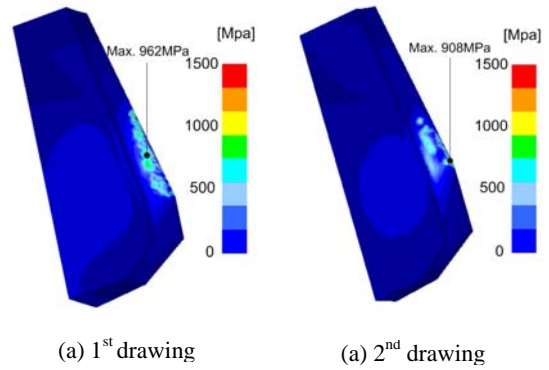
Fig. 3 Unfilling Area with different process variables and optimal design with Artificial Neural Network

3.3 다이 강도해석

다이의 재질은 K05S로서 한계허용강도는 1050MPa이다. 1패스와 2패스 다이 모두 허용강도를 만족하는지 확인하기 위해 Table 3의 직교배열표에 따라 인발재의 변형해석의 결과를 이용하여 강도해석 및 인공신경망 학습을 수행하였으며 Fig. 4에 그 결과를 나타내었다. 단면감소율 23%, 다이스각 10°, Shape 4일 때, 다이의 한계항복강도 이내에서 최소의 미충진면적을 보였다. Fig. 5와 6에 강도해석 결과와 최적 조건에서의 미충진율을 나타내었다.



(a) 1st drawing (b) 2nd drawing
Fig. 4 Results of strength analysis using ANN



(a) 1st drawing (a) 2nd drawing
Fig. 5 Strength analysis with optimal design

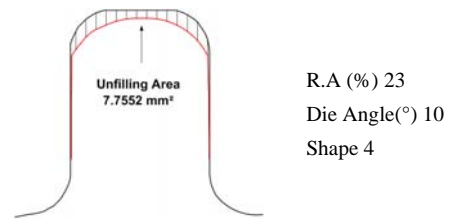


Fig. 6 Unfilling area with optimal design

4. 결론

본 연구에서는 전기장 해석, 유한요소해석과 실험계획법을 이용하여 2패스의 스플라인 샤프트 형상 인발공정의 충진율 향상을 위한 중간 다이의 최적 단면감소율, 다이스각, 및 다이형상을 설정하였다. 초기 소재 재질은 AISI1018이며, 직경이30.0mm인 원형으로 충단면감소율은 40.0%이다. 본 연구를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

1. 형상이 복잡한 스플라인 단단 형상인발 중간패스 다이형상을 범용 유한요소해석 S/W인 ANSYS V10를 이용한 전기장 해석을 통해 간단하게 추출할 수 있었다.
2. 최종제품의 미충진면적은 단면감소율이 감소하고 다이스각이 증가할수록 감소하였으며, 본 연구에서는 1, 2패스 다이 강도해석을 수행하여 한계값을 선정하였다.
3. 그 결과 단면감소율 23%, 다이스각 10°, Shape 4 일 때, 최종제품의 미충진면적은 가장 낮은 값 7.7552mm를 나타내었다.
4. 이상의 결과로부터 실험계획법 및 인공신경망기법을 이용하여 형상인발제품의 충진율 향상을 위한 단면감소율, 다이스각, 중간다이형상을 유용하게 설정할 수 있었다.

후기

본 연구는 지식경제부 지역산업기술개발사업 및 부품소재기술개발사업으로 지원된 연구임

참고 문헌

1. Kim, Y.C., Choi, Y., and Kim, B.M., "Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Non-Steady State Shaped Drawing Process," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, **39**(39), 1135-1155, 2008.
2. Yoshida, K., and Tuihiji, S., "Multiple Drawing of Rails for Linear Motion Guide," *Advanced Technology of Plasticity*, **1**, 367-372, 2002.
3. Lee, J.E., Lee, T.K., Lee, S.K., and Kim, B.M., "스플라인 이형인발을 위한 중간 다이 단면형상 설계," *한국소성가공학회지*, **17**(8), 627-632, 2008.