

중공축 내접 스플라인 성형을 위한 설계변수의 영향

왕창범¹·임성주²·박용복[#]

Effect of the Design Parameter for Internal Spline Forming Using the Tube

C. B. Wang, S. J. Lim, Y. B. Park

(Received August 25, 2006)

Abstract

In this paper, the cold extrusion process for internal spline forming using a thin and long tube has been analyzed by using a rigid plastic finite element code. The internal spline consists of 10 teeth. The cold extrusion process has been focused on the comparisons of load-stroke relation and filling states of the teeth according to design parameters. The design parameters involve extrusion ratio, extrusion angle and friction factor. The internal spline forming can cause the buckling and folding during the cold extrusion process because of using a thin and long tube. The optimum design parameters have been obtained through rigid-plastic finite elements analysis. The extrusion ratio and extrusion angle have great effects on the deformation characteristics of the cold extrusion process.

Key Words : Internal Spline, Cold Extrusion Process, Tube, Extrusion Ratio, Extrusion Angle

1. 서론

스플라인은 보스와 축의 둘레에 많은 키플 깎아 붙인 것과 같은 것으로서 일반적인 키플보다 훨씬 큰 동력을 전달할 수 있고, 내구력이 크며 서로 잘 미끄러져 운동할 수 있게 한 것이며 축과 보스의 중심을 정확하게 맞출 수 있는 특징이 있다[1].

본 논문에서는 길이가 긴 중공축 내부의 스플라인 성형에 대해 연구하였다. 특히 두께가 얇은 튜브형 샤프트의 경우에 중공축 내접스플라인 성형 공정은 좌굴(buckling)과 밀림 현상 등이 발생하기 쉽기 때문에 충분한 강도를 갖는 튜브의 치수와 재질의 결정, 그리고 스플라인 최적 형상을 고려한 고정밀 튜브성형기술이 매우 중요하다.

냉간성형 공정은 정형(near net shape)가공이 가능하여 재료 이용률의 대폭적 향상을 도모하고, 후절삭 가공의 배제 및 절감을 이룩하여 자원 및 에너지 절감을 실현시킬 수 있어 기계절삭공정, 용접가공, 열간가공 공정에 비하여 보다 환경 친화적인 공정으로 인정받고 있다.

그러나 냉간 성형공정은 응력집중이 국부적으로 발생하기 쉽고 금형의 마모, 단성변형으로 인한 정밀제품 생산이 어려울 뿐만 아니라, 고하중 등의 기술적인 문제가 발생한다. 또한 새로운 공정을 개발 할 경우 금형의 제작에서 오는 경제적 부담감과 번거로움 등으로 인하여 실제 현장에서는 성형하중의 예측, 소재와 금형 사이의 작용압력과 이에 따른 금형의 마모, 정확한 금형의 파손 기구 등을 고려하지 못한 채 경험에 의하여 금형

1. 공주대학교 기계자동차공학부 대학원

2. 한국생산기술연구원

교신저자: 공주대학교 기계자동차공학부

E-mail: ybpark@kongju.ac.kr

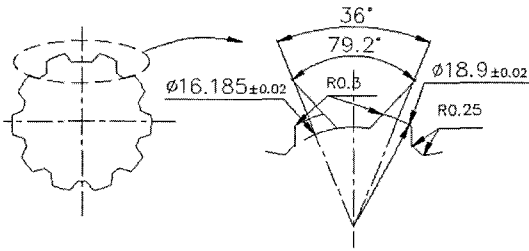


Fig. 1 Dimension of spline

설계 및 제작이 진행되고 있다.

이와 같은 어려움을 해결하기 위해 여러 가지 해석기법이 개발되었으며, 일반적으로 상계법과 유한요소법이 사용되어져 왔다. 먼저 Juneja[2]는 기어의 치형을 사다리꼴로 가정하여 상계해석하였고, Dean[3]는 각형 스플라인에 대해 치형을 반경방향에 평행한 직선으로 가정하여 상계해석하였으나, 모두 속도경계조건을 만족시키지 못하는 불완전한 속도장이었다. Cho[4]는 속도장을 이용한 스플라인 및 스퍼어 기어 폐쇄 단조 해석 등을 하였고, 최근에 Kim[5]이 내접 스플라인 형상의 폐쇄단조에서 길이가 짧은 스플라인 형상을 측면 압출법과 옆셋단조법을 적용하여 연구하였다. 또한 Kim[6]이 중공축 소재를 이용하여 전후방 복합 압출에 대해 여러 변수를 적용하여 유한요소해석을 하였으나, 길이가 긴 튜브 내부의 스플라인 성형 변수에 대한 연구는 찾아볼 수가 없었다.

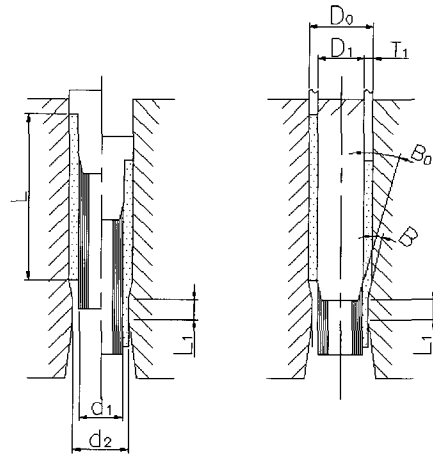
본 연구에서는 길이가 긴 중공축 소재의 내접 스플라인 성형시 소재의 응력 집중 및 성형 하중을 예측하고 압출비에 따른 소재의 치수와 소재의 압출각도 등을 주요 설계 변수로 설정하여 중공축에 대한 최적 스플라인 성형공정을 수립하고자 한다.

2. 스플라인 성형공정

2.1 최적공정 제안

Fig. 1 은 본 연구에서 성형하고자 하는 내접 스플라인의 형상으로 총 10 산의 치형으로 이루어져 있으며 큰 회전력을 전달하기 위해 치형의 충진 여부를 예측함으로써 최적의 스플라인 형상을 얻어야 한다.

스플라인 성형은 튜브를 하우징 금형 안에 삽입시킨 후 맨드릴 형태의 스플라인 펀치를 튜브 내경에 밀어 넣어 스플라인을 성형하는 방식이다.



- D_1 : Initial tube inner diameter
- D_0 : Initial tube outer diameter
- d_1 : Mandrel diameter
- d_2 : Extrusion diameter
- L : Tube length
- T_1 : Tube thickness
- B_0 : Punch angle
- B : Extrusion angle
- L_1 : Land length

(a) Process A

(b) Process B

Fig. 2 Extrusion processes for internal spline forming

Table 1 Process parameters for the extrusion

Parameters	Values
Initial tube inner diameter(D_1)	21mm
Initial tube outer diameter(D_0)	26.6mm
Mandrel diameter(d_1)	18.9mm
Extrusion diameter(d_2)	22mm
Tube length(L)	50mm
Tube thickness(T_1)	2.8mm
Mandrel angle(B_0)	45°
Extrusion angle(B)	12°
Land length(L_1)	3mm

본 논문에서는 두가지의 성형 공정을 제안하였다. Fig. 2(a)는 스플라인부의 길이가 긴 총형 형태의 맨드릴 펀치가 소재와 같이 이동하면서 소재를 점점 반경이 작아지는 하우징 금형으로 가압하여 스플라인 치형사이에 채워지는 성형 공정이다. 그리고 Fig. 2(b)는 스플라인부가 짧은 맨드릴 금형은 고정되어 있고, 펀치가 소재를 고정되어 있는 맨드릴 금형과 하우징 금형사이로 가압하여 스플라인을 성형하는 방식이다. 두 공정의 차이점은 소재와 접촉하고 있는 맨드릴 금형의 이동 유무

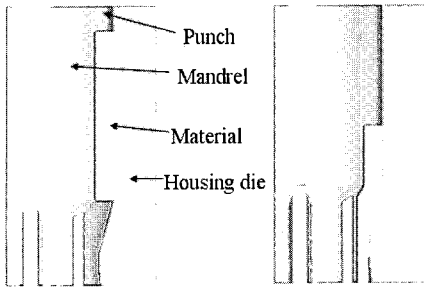


Fig. 3 Shapes of die and material before and after extrusion forming

Table 2 Design parameters of the extrusion

Case No.	Extrusion angle (°)				Extrusion ratio
	#1	#2	#3	#4	
1					1.47
2	10	15	22	30	1.59
3					1.71

Table 3 Design parameters for the tube

Parameters	Extrusion ratio		
	1.47	1.59	1.71
Reduction of area(%)	32	37	42
Tube size D ₀ × T ₁ (mm)	24.8×50	26.6×50	28.6×50
Friction factor(m)	0.1	0.1 0.2	0.1

이다. 일반적으로 이동 유무에 따라 마찰력의 차이가 발생할 것으로 판단된다.

Table 1에 공정 A와 공정 B에 대한 펀치와 금형의 치수를 나타내었으며, 냉간 가공에서는 마찰을 줄이기 위해 윤활처리가 요구되는 것을 감안하여 직경에 0.05mm의 틈을 주었다.

2.2 설계 변수

본 논문에서는 맨드렐의 이동 유무에 따른 최적 공정을 찾아내고 그 공정에 대한 최적의 설계 변수를 도출하려고 한다.

Fig. 3은 압출 공정에 대한 성형 전·후의 형상을 나타낸 것이다.

Table 2는 설계 변수에 대한 치수를 명시한 것으로서 압출 각도(extrusion angle)의 영향에 따른 성

형 하중 및 스플라인 치형 총진 여부를 분석하기 위해 압출 각도 및 압출비를 주요 설계 변수로 하였다. 압출비(extrusion ratio, A/A_i)는 1.47, 1.59, 1.72로 설정하여 유지하였다. 또한 Table 3에서처럼 압출비에 대한 단면감소율은 식(1)에 의해 32%, 37%, 42%로서 소재의 외경 치수를 다르게 설정하였고, 두께는 동일하게 2.8mm로 유지하였다.

$$Reduction\ of\ area = \frac{(A - A_i)}{A} \times 100\ (\%) \quad (1)$$

여기에서 A, A_i는 각각 압출전·후의 단면적이다. 또한 사용하는 금형과 소재의 접촉면에 발생하는 마찰은 일정전단마찰(constant shear friction)이 작용하는 것으로 하였으며, 마찰상수는 냉간 공정에서 흔히 사용하는 m=0.1을 설정하였고, 압출비가 37%일 때 m=0.05, 0.1, 0.2로 설정함으로써 마찰상수가 스플라인 성형에 미치는 영향을 알아보았다.

맨드렐의 각도를 압출 각도보다 큰 45°로 하여 소재의 자유유동이 이루어질 수 있도록 하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석 조건

유한요소법을 이용한 소성가공 해석 방법에는 탄소성 해석, 강소성 해석, 점소성 해석 등이 있는데 재각기 나름대로 장단점이 있으며, 해석목적에 따라 선택적으로 사용되고 있다.

본 해석에서는 강소성 유한요소법을 기반으로 하는 DEFORM-3D를 사용하였으며, 이의 수식화 과정은 문헌[7~8]에 상세히 소개되어 있다. 스플라인의 치형이 총 10산으로 시뮬레이션의 효율을 고려하여 스플라인 치형의 1/2에 해당하는 형상을 모델링하여 해석하였고, 금형은 강체로, 소재는 강소성체로 가정하였다.

소재는 기계구조용 탄소 강관으로 식(2)과 같은 응력-변형률 관계식을 가지고 있는 SM20C를 사용하였다[9].

$$\bar{\sigma} = 76.5 \bar{\epsilon}^{0.2} \quad (kgf / mm^2) \quad (2)$$

4. 해석결과 및 고찰

4.1 공정에 따른 성형해석 비교

공정 A와 공정 B에 대해 스플라인 형상이

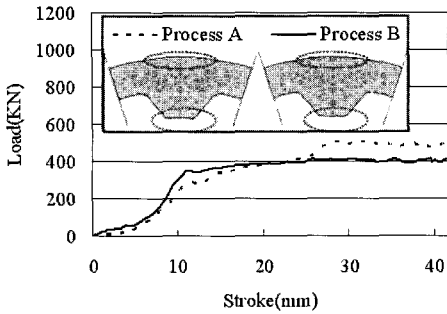


Fig. 4 Load-stroke curve and filling states of material according to the processes

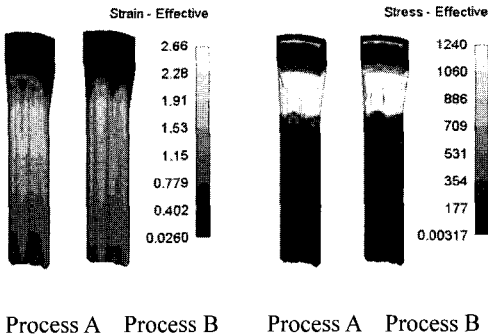


Fig. 5 Distributions of strain and stress for the extruded tube

있는 맨드렐의 이동 유무가 스플라인 성형에 미치는 영향을 살펴보았다.

Fig. 4는 공정 A와 공정 B의 성형 하중을 비교한 것으로, 공정 A의 성형 하중이 공정 B보다 크다. 공정 B가 펀치의 행정거리가 10mm일 때부터 정상상태 분포를 나타내고 있는 것에 반해, 공정 A는 펀치의 행정거리가 25mm일 때부터 정상상태 분포를 나타내고 있다. 또한 Fig.4의 공정 A와 공정 B의 성형된 튜브의 단면에서 성형 하중에 차이가 있지만, 소재가 맨드렐의 치형 사이에 충분히 채워짐을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 공정 A와 공정 B에 대한 유효 변형률 분포와 유효 응력 분포로서 공정 A의 유효 변형률이 공정 B보다 다소 높았지만, 모두 정상상태 분포를 나타내고 있다. 또한 유효 응력의 대부분이 스플라인 성형이 이루어지는 테이퍼 부분에 국부적으로 분포되어 있음을 알 수 있다.

4.2 압출비와 압출각도에 따른 성형해석
본 연구에서는 압출비를 달리하여 압출각도에

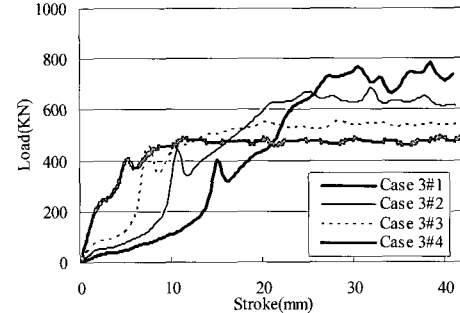
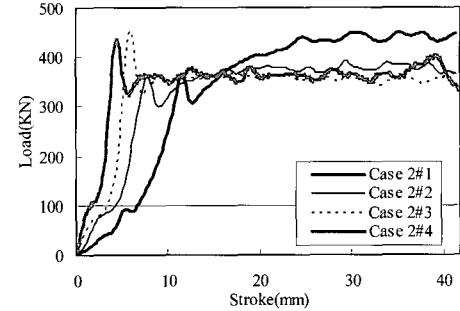
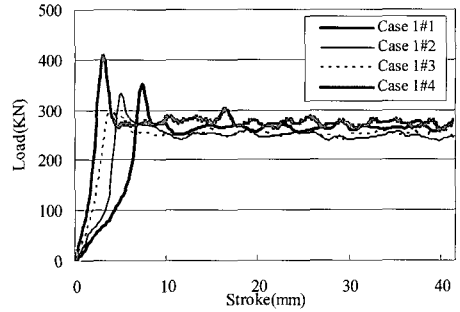


Fig. 6 Load-stroke curves according to extrusion angle and extrusion ratio

따른 성형 하중 변화와 스플라인의 충전 여부를 확인하였다.

Fig. 6은 하우징 금형의 압출각도가 10°, 15°, 22°, 30°일 때 압출비에 따라 튜브의 외경치수를 달리 하여 해석한 성형하중 곡선이다. Case1의 경우에는 성형 하중이 대부분 약 250KN으로 압출 각도에 따른 하중의 차이가 거의 없었지만, 압출각도가 30°일때 성형하중이 다소 크게 나타났다. 그러나 case2#4와 case3#4에서는 상대적으로 다른 압출각도에 비해 성형하중이 작아졌다. 또한 case2와 case3에서 압출비가 커질수록 성형하중이 커지는 것을 볼 수 있으며, 압출각도가 커질수록 성형하중은 작아짐을 알 수 있다. 압출비가 작고 압출

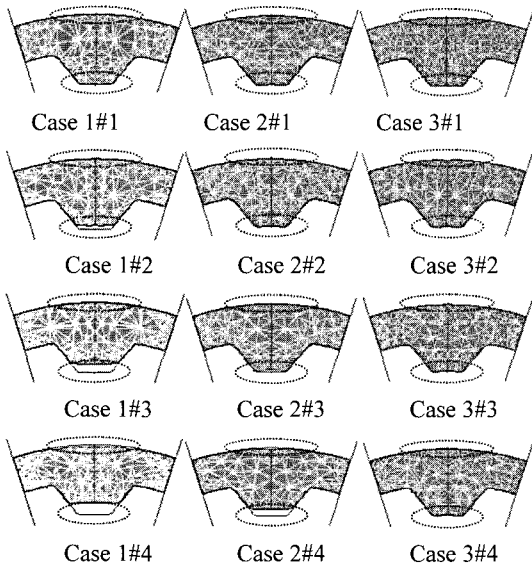


Fig. 7 Comparisons of filling states according to extrusion angle and extrusion ratio

각도가 클수록 정상상태 분포를 나타내고 스플라인 치형이 성형되기 시작하는 하중의 변동점이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 또한 압출비가 커질수록 압출각도에 따른 성형하중의 차이가 커짐을 확인할 수 있었으며, 이는 압출비와 함께 압출각도가 스플라인 성형에 큰 영향을 주는 변수라고 판단된다.

Fig. 7은 압출각도에 따라 압출비를 달리 하였을 때 소재가 치형 사이에 충분히 채워지는지 비교한 것이다. Case 1일 때, 소재가 스플라인 치형 사이에 채워지지 않았음을 확인할 수 있으며, case 2에서 #1과 #2는 소재가 치형 사이에 채웠으나, #3과 #4는 채워지지 않았다. Case 3의 경우 압출각도에 따라 소재가 충분히 채워졌음을 볼 수 있었다. 이는 압출비가 커질수록 소재가 채워질 수 있으며 동일 압출비에서 압출각도가 작을수록 소재가 먼저 채워진다고 판단된다.

이는 압출각도가 작을수록 소재와 금형사이의 마찰면적이 커지고 소재와 금형사이의 경계면에서 유동저항이 커지게 되면서 성형하중이 더 증가한 것임을 알 수 있다. 또한 반경방향으로 원활한 유동이 이루어져 스플라인 성형에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

4.3 마찰상수에 따른 성형해석

Fig. 8은 case 2에 대해 마찰상수가 0.05, 0.1, 0.2

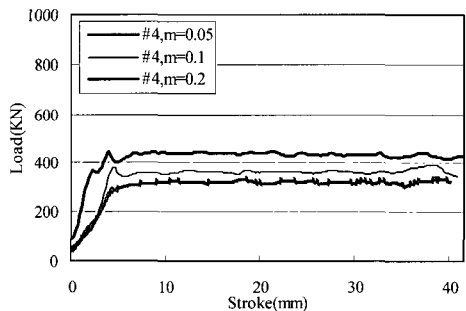
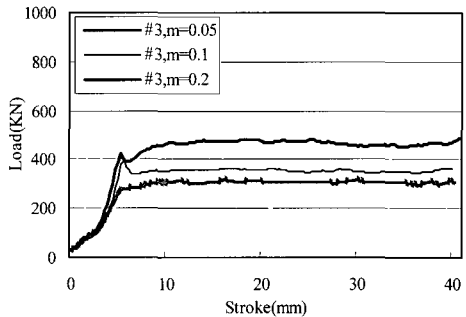
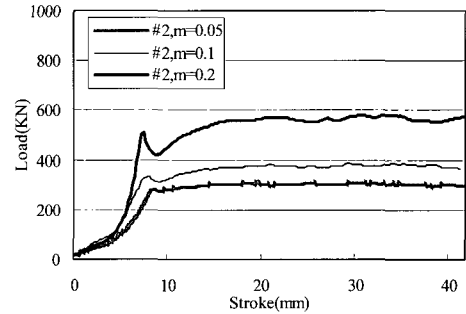
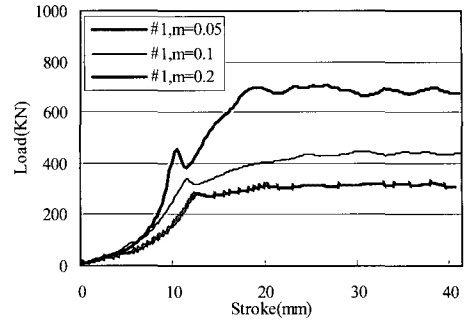


Fig. 8 Load-stroke curves according to extrusion angle and friction factor for the case 2

일 때, 압출 각도에 대한 성형하중 곡선을 나타낸 것이다.

동일 압출각도에서는 마찰상수가 클수록 성형하중이 크게 나타나고 같은 행정거리에서 마찰상

참 고 문 헌

수에 대한 성형하중의 변동점이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 압출각도에 상관없이 $m=0.05$ 일 때의 성형하중은 일정하였으며, 압출각이 커짐에 따라 마찰상수에 따른 성형하중의 차이는 크게 줄어들었다. 이는 압출 각도가 클수록 마찰상수에 대한 영향이 작다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 길이가 긴 중공소재에 대해 냉간 압출을 통한 내접 스플라인을 성형하면서 설계 변수로 압출 각도, 압출비 및 마찰상수를 설정하여 성형하중과 스플라인 충전 여부 등을 3 차원 가상성 유한요소해석 프로그램을 사용하여 검토하였다.

(1) 스플라인 성형시 맨드렐을 고정시킨 성형공정이 성형 하중에서 낮은 하중과 정상상태분포를 보였으며 소재의 충진을 확인할 수 있었다.

(2) 압출비가 커지고 압출각도가 작아지면 성형하중은 커지나, 소재의 반경 방향유동이 원활해지면서 소재가 채워지는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 냉간압출을 이용한 스플라인 성형시 압출비가 작고 압출각도가 클수록 성형하중이 정상상태분포를 나타내었다.

(4) 압출각도가 커질수록 성형하중에 대한 마찰상수의 영향이 작아짐을 알 수 있다.

(5) 설계 변수에 대한 결과에서 압출비가 1.59, 압출각도가 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 일 때 최적 스플라인 성형 변수라고 판단할 수 있으며, 본 연구에서 확인한 최적 설계 변수는 내접 스플라인 성형공정에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

- [1] S. D. Lee, 1999, Int. J. of Korea Society of Industrial Application, Vol. 2, No. 2, pp. 187~194.
- [2] O. P. Grover, B. L. Juneja, 1984, Analysis of Closed-Die Forging of Gear-Like Elements, Advanced Tech. of Plasticity, Vol. 2, pp. 888~893.
- [3] N. A. Abdul, T. A. Dean, 1986, An Analysis of the forging of Spur gear Forms, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 2, pp. 113~123.
- [4] 조해용, 최종용, 민규식, 1996, 중공 및 중실소재를 이용한 스플라인의 단조에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 제 13 권 제 1 호, pp. 108~115.
- [5] 김용조, 김현수, 이승동, 2000, 유한요소법에 의한 내접 스플라인 기어형상의 폐쇄단조공정해석, Journal of Advanced Materials, 경남대학교 신소재연구소, Vol. 12, pp. 33~38.
- [6] 김성현, 이호용, 2005, 중공축 소재를 이용한 전후방 복합압출의 성형 특성, 소성가공학회지, 제 14 권 제 9 호, pp. 772~778
- [7] S. Kobayashi, S. I. Oh, T. Altan, 1989, Metal Forming and the Finite-Element Method, New York Oxford University Press.
- [8] O. C. Zienkiewicz, 1977, The Finite Element Method, 3rd Ed McGraw-Hill, New York.
- [9] 송두호, 박용복, 김민웅, 2000, 단달림 형상의 예비성형체 성형에 대한 전방압출과 업셋팅공정의 비교, 소성가공학회 2000년 춘계학술대회 논문집, pp. 82~85.