

# 비회전 대칭 단면 형상의 스플라인 인발 공정에 관한 연구

최병현<sup>1</sup> · 한수식<sup>2</sup> · 한철호<sup>#</sup>

## A study on the drawing of spline shaped section with non-rotary symmetry

B. H. Choi, S. S. Han, C. H. Han

### Abstract

During the drawing of reentrant section like a spline, the unfilled in the corner of dies or the bended product emerges from the large reduction of area, the complex shaped sections and other nonuniform properties in material and lubrication conditions. In this study, the drawing of the spline section with the non-rotary symmetry from a circular aluminum billet has been analyzed by using commercial code DEFORM-3D. A new die construction method preventing the spline from the drawback of bending and the unfilled defect has been suggested and verified through the analysis using centroid shift method and the hybrid construction between converged and diverged profile.

**Key Words** : Drawing(인발), Non-rotary symmetry(비회전 대칭), Spline(스플라인), Bending(굽힘), Centroid(도심)

### 1. 서론

산업 현장에서 사용되는 인발 가공 부품은 원형 단면 형상 뿐 아니라 사각, 삼각, 육각, 회전 대칭형, 비 회전 대칭형 등과 같은 이형의 단면 형상들을 갖는 경우도 많이 있으며 이로 인해 이형재 인발 공정의 해석 및 금형 설계에 대한 관심이 증대되고 있다.<sup>[1]</sup> 특히 스플라인 형상 단면재는 축을 연결하는 키와 안내 부품으로 많이 활용되고 있지만 아직까지 체계적인 해석결과가 발표되지 못하고 있는 실정이다.

인발 공정의 기본 목적은 소재의 단면을 줄이면서 원하는 단면 형상의 제품을 얻는 것으로 소재를 동일 단면 형상으로 줄이는 공정의 이론적 접근은 쉽지만 원형 소재를 이형의 단면 형상으로 줄이는 공정의 이론적 접근은 매우 어렵다. 그리고 이형재 인발 가공 시 금형과의 마찰 저항과 접촉 압력 그리고 소재 내부 응력의 불균일 분포로 인하여 코너 채움의 어려움 및 인발 후 제품

에 굽힘이 발생하는 경우가 많다. 이 경우 제품의 형상을 교정하기 위하여 추가적인 공정을 필요로 하게 되며 이러한 작업으로 제품의 단면 변화가 발생된다는 단점을 가지고 있다.

J. S. Gunasekera와 S. Hoshino는 사각 빌렛에서 비대칭 단면을 갖는 제품의 인발이나 압출에서 최소 인발 응력을 고려한 최적의 금형 형상을 얻는 방법을 제안하였고<sup>[2]</sup> Laila S.와 Bayounmi는 원형 빌렛으로 부터 사각 단면 제품으로 인발 성형할 때 최적 금형 형상과 인발력을 계산하였다.<sup>[3]</sup>

본 논문에서는 원형 단면 형상을 갖는 빌렛으로부터 비회전 대칭 단면 형상을 갖는 스플라인 제품을 인발하는 공정을 상용 강소성 유한 요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 해석하였고 코너 채움과 굽힘 현상을 개선하기 위해 금형 입구에서 출구까지 단면 형상의 효율적 배열 방법과 도심을 지나 가도록 다이를 구성하는 방법을 제안하고 해석을 통하여 제안된 방법의 유용성을 검증하였다.

1. 금오공과대학교 대학원 생산기계공학과

2. 금오공과대학교 기계공학부

# 교신저자: 금오공과대학교 기계공학부

E-mail: chhan@kumoh.ac.kr

## 2. 해석 방법

### 2.1 해석 모델

비 회전 대칭 단면을 가진 인발의 경우 단면형상의 복잡성으로 인하여 인발 후 굽힘이 발생하거나 코너 채움이 어려워 최종 제품의 형상 정밀도가 부족하게 되는 경우가 많다.

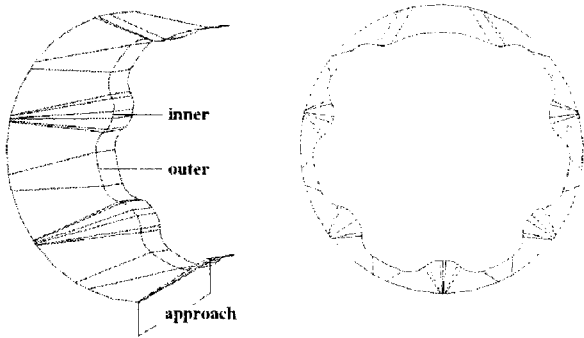


Fig. 1 Geometry for spline drawing

Fig. 1 은 해석대상인 스플라인 인발 금형의 입구와 출구 단면 형상을 나타내었다.

### 2.2 해석 조건

스플라인의 인발 공정 해석은 최소 대칭 형상을 고려하여 1/2형상 만을 해석하였고 빌렛의 물림부에 속도 조건을 부여하여 인발 공정이 일어나도록 하였다. 인발 성형시 Fig. 1에 나타난 inner 부분을 기준으로 설정한 다이 반각과 단면 감소율 등의 해석 조건을 Table 1에 정리하였다.

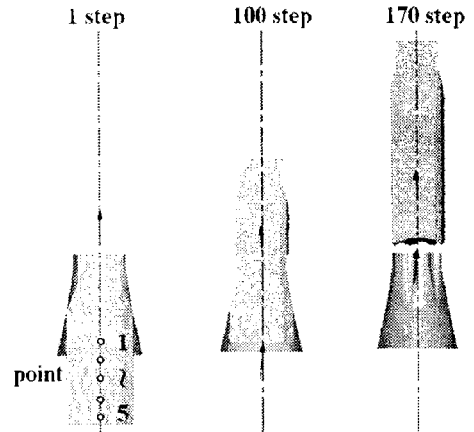
Table 1. Drawing conditions for analysis

Material	Al 2011
Drawing velocity	100 mm/s
Approach angle (2a)	9°(inner)
Reduction of area	26.42 %

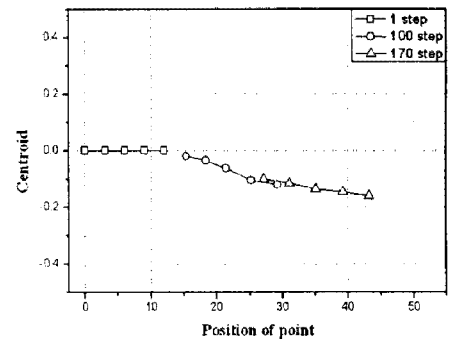
## 3. 해석 결과 및 분석

### 3.1 도심 설정의 영향

비회전 대칭 단면 형상의 스플라인 인발 공정을 해석한 결과 Fig. 2에 나타난 바와 같이 성형 후 제품에서 굽힘 현상이 발생하였다.



(a) Configurations of points tracking



(b) Points tracking at each step(original)

Fig. 2 Point tracking of spline drawing through normal dies

이러한 제품의 굽힘 현상은 어프로치 입구의 도심과 출구부의 도심 편차를 변화시켜 줌으로써 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 단면 형상에 따른 도심 편차의 영향을 정량적으로 표현하는 방법을 제안하고 이에 대하여 논하고자 한다. 2차원 평면에서 도심은 다음과 같다.

$$x_c = \frac{\int x dA}{\int dA}, \quad y_c = \frac{\int y dA}{\int dA} \quad (1)$$

비회전 대칭 단면 형상의 스플라인 인발 금형 설계시 도심에 의한 영향을 정량적으로 표현하기 위해서 도심을 Fig. 3와 같이 나타내어 식(2)와 같이 도심에 관한 도심 설정 변수를 도입하였다.

$$S_x = \frac{x_c}{R_0} \times 100 (\%), \quad S_y = \frac{y_c}{R_0} \times 100 (\%) \quad (2)$$

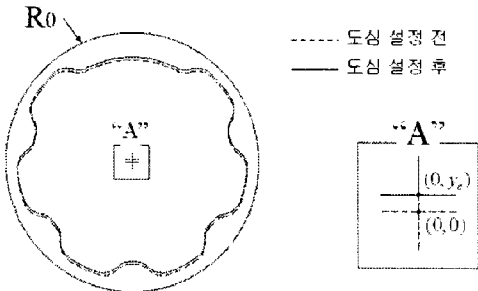


Fig. 3 Position of centroid

스플라인 인발 공정의 단면 형상에 대하여 어프로치 입구의 단면 도심과 출구 도심의 편차를 식(1)를 이용해 계산하고 출구 도심을 중심점으로 하여 공정 최종 단면 형상을 그리면 Fig. 3에 나타난  $x_c$ ,  $y_c$  변수들을 알 수 있다. 이 변수와 식(2)을 이용하여  $S_x$ ,  $S_y$  값을 구한다. 비회전 대칭 단면 형상의 스플라인은 y축에 대칭 형상이므로  $y_c = 0.13 \text{ mm}$ 가 되고,  $S_y = 2.1 \%$ 로 구해진다.

비회전 대칭 형상 스플라인 인발 공정 해석을 통하여 도심 설정 변수의 유효성 검증을 하였다. 문제의 특성상 3차원으로 해석하여야 하기 때문에 계산 시간이 많이 소요되어 인발 거리를 30 mm 까지 성형 해석하고 결과를 비교하였다. 인발 거리가 짧기 때문에 외부 형상으로는 굽힘 발생 여부를 판단하기가 곤란하여 Fig. 2(a)에 나타난 것과 같이 소재 내부 점들의 유동을 관찰하여 굽힘 발생 정도를 확인하였다.

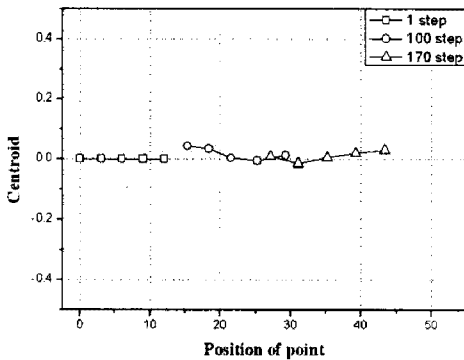


Fig. 4 Points tracking at each step  
( $S_y = 2.1 \%$ )

Fig. 4의 해석 결과에 나타난 것과 같이 도심

설정 변수를 도입하여 금형을 설계한 경우 그렇지 않은 Fig. 2(b)에 비하여 굽힘 현상이 많이 개선됨을 알 수 있다.

### 3.2 금형 형상의 영향

인발 공정에서 성형 후 제품의 형상은 어프로치 치부의 다이반각, 마찰 그리고 형상 등에 영향을 받는다. 특히 이들 중 어프로치부 형상의 영향이 매우 크다. Fig. 5의 (a)와 같은 통상적인 수렴형 금형구성법과 (b)와 같이 골부와 산부를 발산(Diverged)형과 수렴(converged)형으로 구성 조합한 하이브리드 모델링 기법을 비교하였다.

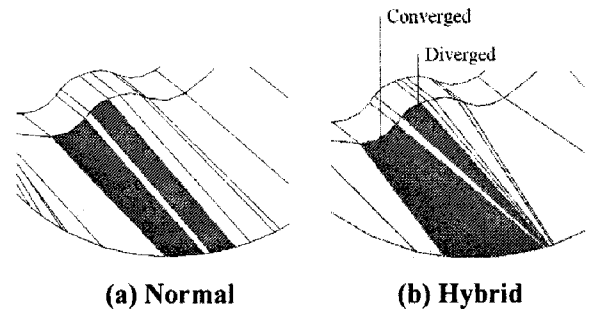
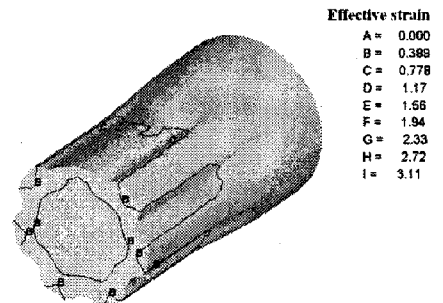
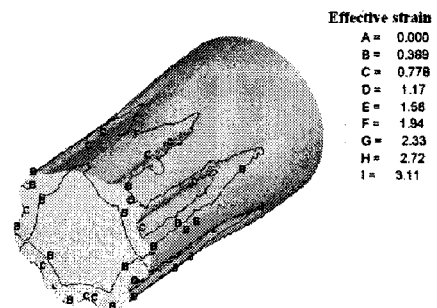


Fig. 5 Modeling of approach part



(a) Normal



(b) Hybrid

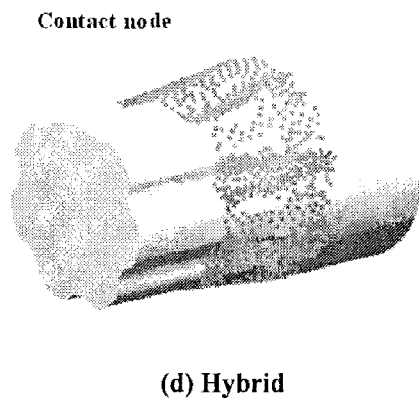
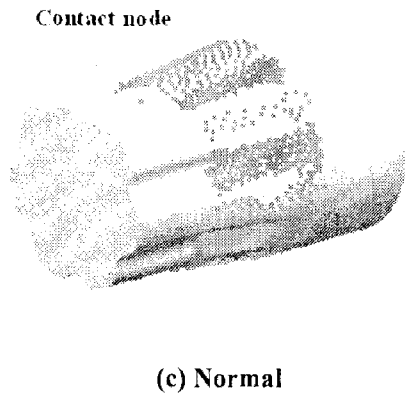


Fig. 6 Distribution of contact points

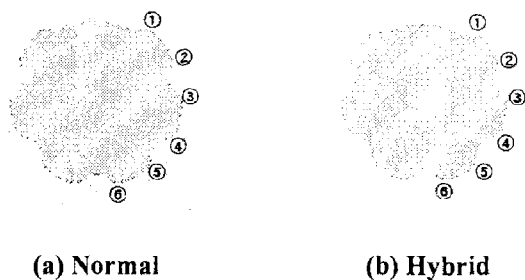


Fig. 7 Checking points on the final section

Table 2. Accuracy for die filling ( mm)

Process Point	Die Construction method	
	Normal	Hybrid
①	0.021	0.006
②	0.015	0.007
③	0.014	0.01
④	0.016	0.01
⑤	0.017	0.01
⑥	0.014	0.014

금형 형상에 따른 성형 제품의 형상 비교 결과 하이브리드 모델링 하였을 때 Fig. 6(a)(b)의 유효 변형률 분포에 나타난 것과 같이 코너의 강도 및 경도의 증가를 가져오며 Table 2에 나타난 것과 같이 최종 단면의 코너 채움이 우수하게 나타나고, Fig.6(c)(d)와 같이 금형 벽면 접촉부가 넓어짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 DEFORM-3D를 사용하여 비 회 전 대칭 형상 스플라인의 인발 공정시 발생하는 제품의 굽힘 및 코너채움에 대한 해석 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인발 공정시 어프로치부의 입출구의 도심 편차로 인하여 인발 후 제품에 굽힘 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 비회전 대칭 단면 형상을 가진 제품의 인발 금형 설계시 필요 도심 편차량을 나타내는 도심 설정 변수를 적용하여 도심을 일치하였을 경우 제품의 굽힘 현상을 개선할 수 있음을 확인하였다.

(3) 금형 어프로치부의 골과 산부를 수렴형과 발산형으로 조합하는 하이브리드 곡면 구성을 하면 스플라인 제품의 코너 채움과 최종제품의 유효변형률 분포를 개선할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 김낙수, 김형중, 2002, 소성가공과 해석, 문운당
- [2] J.S. Gunasekera and S. Hoshino, 1982, Analysis of Extrusion of Drawing of Polygonal Section Through Strictly Converging Dies, ASME, J. of Eng. For industry, Vol. 104, pp. 38~45.
- [3] Laila S. Bayoumi, 1999, Round-to-square section drawing through flat idle rolls, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, pp 1323-1338.
- [4] 진인태, 최재찬, 1997, 사각형 단면의 편심 압출시 제품의 굽힘 현상에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제6권, 제1호, pp. 46~52.
- [5] S.K. Lee, B.M. Kim, 2005, 다단 습식 선선공정 해석 및 적용, 한국소성가공학회지, 제14권, 제 8호, pp. 689~695.