

복동금형을 이용한 돌기성형공정에 관한 유한요소해석

장동환[#] · 함경춘¹ · 고병두²

FE Analysis on the Serrated Forming Process using Multi-action Pressing Die

D. H. Jang, K. C. Ham, B. D. Ko

(Received August 5, 2008)

Abstract

In this paper, the serrated forming process is analyzed with finite element method. The seal should secure the overlapping portions of ligature, which has teeth for ligature to prevent from slipping each other after clamping. In the simulation, rigid-plastic finite element model has been applied to the serration forming process. Serration or teeth forming characteristics has been analyzed numerically in terms of teeth geometry based on different forming conditions. Analyses are focused to find the influence of different die movements and geometries on the tooth geometry, which is crucial for securing overlapping portions of ligature. Two major process variables are selected, which are the face angle and entry angle of punch, respectively. Extensive investigation has been performed to reveal the influences of different entry and face angles on the geometry of teeth formation in the simulation. Three different face angles of punch have been selected to apply to each simulation of serrated sheet forming process with every case of punch entry angles. Furthermore, tooth geometries predicted from simulation have been applied to the indentation process for comparing proper tooth geometries to secure the sealing.

Key Words : Serrated Sheet Forming Process, Finite Element Method, Tooth Geometry, Indention Process

1. 서 론

돌기(tooth of serration)는 어떤 소재의 표면이 날카롭게 돌출되어 나온 형상을 말하며 이러한 가공방법을 돌기성형공정(serrated forming process)이라고 한다[1, 2]. 일반적으로 이러한 돌기성형에 의해 성형된 판재는 철강재 코일이나 형강을 띠(ligature) 뮤음 체결하는 클립의 용도로 사용되며, 최근에는 경제적인 이유로 플라스틱 밴드 클립용으로도 많이 사용된다.

일반적으로 돌기를 성형하는 전통적인 방법에는 엠보싱(embossing)[3~4]과 널링(knurling)[5~6] 등

이 있었다. 그러나 이러한 전통적인 성형공정에 의해 형성된 돌기의 형상은 충분히 예리하지 못하기 때문에 띠 뮤음 체결을 위한 클립의 돌기로는 적당하지 않은 것으로 알려져 있다[2].

일반적으로 포장용 밴드 클립은 크게 세 가지 기계적 특성을 요구한다. 첫째, 경제성과 양산성을 위해서 사용되는 소재에 대한 크기와 중량이 소형이면서 경량이어야 한다. 둘째, 충분한 체결력을 확보하기 위해 쉽게 압착 체결될 수 있는 클립의 형상이 확보되어야 한다. 셋째, 체결후 풀림이나 늘어남과 같은 후변형이 최소화되는 충분한 강성이 요구된다. 이중에서 가장 중요한 요구

1. 인하공업전문대학 기계설계과

2. 인하대학교 대학원 기계공학부 Post-Doc

교신저자: 인하공업전문대학 기계설계과,

E-mail: dhjang@inha.ac.kr

사항은 세번째 요소로서 돌기형상 측면에서 미끄럼 방지를 위해 돌기가 매우 예리하여 압착체결 시 충분한 체결력이 확보되도록 하여야 한다[2]. 그러나, 현재까지 이러한 돌기성형에 대한 설계기준이 명확하게 확립되어 있지 않고 국/내외 생산기업에서 생산기술 측면에서 몇 가지 특허가 출원되어 있다[7]. 최근에 Koo[1~2] 등은 기구학적인 측면에서 돌기성형을 위한 복동금형에 대한 메커니즘을 제안하고 진흙(clay)을 소재로 하여 실험을 수행하였다.

본 논문에서는 Koo[1~2] 등이 제안한 복동금형 방식에 의한 성형공정을 이용하여 철강소재에 대해 강소성 유한요소법을 기반으로 수치해석을 수행하였다. 또한 해석결과로부터 얻어진 형상을 이용하여 마찰접촉문제(frictional contact problem)[8~9]를 바탕으로 압입체결 성형공정에 대한 모의실험을 수행하여 돌기형상에 따른 체결력을 평가하였다.

2. 돌기성형공정 분석

2.1 공정 및 돌기형상 계측조건

포장용 밴드에 대해 띠(ligature) 묶음체결을 위한 클립의 내면에 사용되는 돌기는 충분한 체결력을 확보하기 위하여 높이가 소재의 두께에 대해 35% 이상이 되어야 한다[7]. 더욱이 플라스틱 밴드를 사용하였을 경우에는 밴드 소재의 특성상 돌기의 높이가 더 높고 예리하여 클립과 밴드가 잘 압착체결 될 수 있어야 한다. Fig. 1 은 돌기성형에 의한 클립을 밴드에 압착했을 때의 체결상태를 도식적으로 나타낸 그림이다.

앞서 설명했듯이 본 논문은 경사 압입(inclined indentation)과 긁기(scratching) 공정이 순차적으로 적용된 복동금형을 기반으로 수행되었다. Fig. 2 는 돌기성형공정에 적용된 금형의 형상과 성형방법에

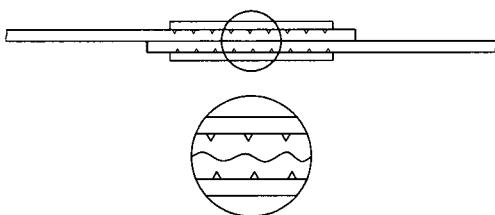


Fig. 1 Schematics of mechanical interlocking after sealing for steel ligament

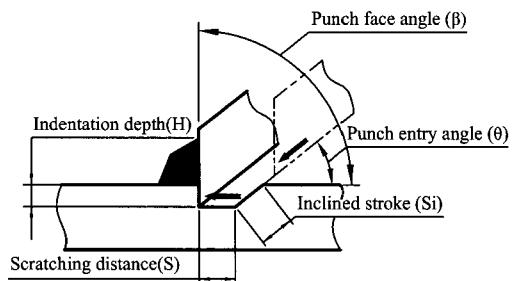


Fig. 2 Definition of design parameters

Table 1 The relationship between punch entry angle and inclined stroke

Punch entry angle(°)	Inclined Stroke(mm)
18	11.3
23	9.0
28	7.5
33	6.4
38	5.7

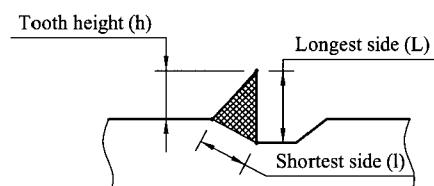


Fig. 3 The measurement of tooth geometry

대한 개념도이다. 그림에서 편치 진입각(punch entry angle, θ)은 성형편치가 경사 슬라이더에 의해 미끄러지는 각도를 말하며, 편치 선단각(punch face angle, β)은 경사압입 전면이 모재 표면과 이루는 각도를 말한다. 성형공정은 그림에서 알 수 있듯이 설정된 편치 진입각에 대해 행정거리(S_i)만큼 경사 압입공정을 수행한 후에 수평방향에 대해 긁기 행정거리(S) 만큼 성형이 진행되어 공정이 완료된다. 따라서 본 논문에서는 이 두 가지 공정 변수를 돌기의 형상생성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되어 주요한 설계변수로 설정하였다. 모의실험에서 동일한 행정거리에 대해 돌기형상을 비교하기 위하여 수직방향에 대한 압입깊이와 수평방향에 대한 긁기 행정거리는 각각 2.5mm와 5mm로 모두 동일하게 설정하였다. Table 1은 절입깊이(indentation depth, H) 일정조건을 위해 각각의 편치

진입각(θ)에 대해 계산된 경사행정거리를 나타낸다. 편치 선단각(β)은 예각(85°), 직각(90°), 둔각(95°)을 각각 적용하였으며 그 이외의 편치 형상은 모두 동일하게 모의실험을 수행하였다.

Fig. 3은 돌기의 기하학적인 형상을 계측하기 위한 방법을 설명한 것이다. 일반적으로 삼각형에 대한 형상비(aspect ratio)는 가장 긴 변에 대한 높이비 또는 외접원의 반지름 비 등으로 표현된다 [10]. 본 논문에서는 그림에서와 같이 성형이 완료된 후 생성되는 삼각형 돌기 형상에 대해 가장 긴 변과 짧은 변을 이용하여 돌기 형상비(tooth aspect ratio)로 정의하였다. 이와 같은 기준에 따라 기하학적으로 가장 안정적인 형상으로 알려져 있는 정삼각형인 경우에 형상비는 1이다. 또한 돌기의 높이(h)는 형상에서 좌측의 돌기 기저부를 기준으로 측정하였다.

2.2 예비모의실험

본 논문에서는 먼저 평면변형률 문제가 적용된 강소성 유한요소해석에 대한 타당성을 검토하였다. 이를 위하여 Koo[1~2] 등이 실험에서 사용한 재료인 진흙에 대해 마찰인자값(friction factor)을 고려하여 모의실험을 수행하고 해석결과를 돌기성형시험에 대한 결과와 비교하였다.

마찰인자값을 계산하기 위하여 외경:내경:높이의 비가 6:3:2인 진흙시편을 준비하여 링압축실험을 3회 반복 수행하였다. Table 2는 링압축실험에 의해 계산된 높이감소율(reduction in height)과 내경감소율(reduction in inner diameter)에 대한 결과로서 평균 마찰인자값이 약 0.7 정도로 계산되었다. 문현[11]을 참조하여 진흙을 완전소성체로 가정하였으며 유동응력과 유효변형률의 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 900 \bar{\epsilon}^0 \text{ (MPa)} \quad (1)$$

해석을 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D™[12]를 사용하였으며 성형편치의 속도는 0.1mm/sec이다. 마찰조건은 모든 편치의 경계면에 동일하게 마찰인자값 0.7을 적용하였으며 해석결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 편치의 접촉면이 예상되는 지점에 고밀도의 요소망을 구성하여 전처리를 수행하였다.

Fig. 4는 편치 선단각이 90° 일 때 5 가지의 진입각에 대해 모의실험과 돌기성형 실험에 의한 돌기형상의 높이를 비교한 그래프이다. 그림에서

Table 2 Experiment results after ring compression

No.	Reduction in height (%)	Reduction in inner diameter (%)
1	47.6	45.9
2	48.1	47.6
3	45.9	52.4

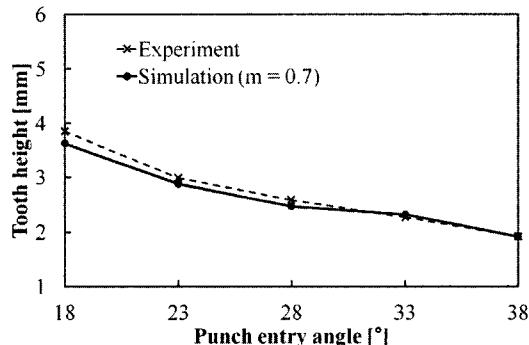


Fig. 4 The measurement of tooth height for simulation and experiment ($\beta=90^\circ$)

알 수 있듯이 전체적으로 설정된 마찰인자값에 대해 모의실험 결과와 돌기성형 실험결과가 거의 일치한다. 일부 진입각 구간에서 약 5% 이내의 범위 안에서 차이를 보이지만 전반적으로 본 논문에서 모의실험에 적용된 평면변형률에 의한 강소성 유한요소법이 적합한 것으로 판단된다.

3. 유한요소해석

3.1 돌기성형공정

3.1.1 해석조건

앞서 확인된 평면변형률에 의한 돌기성형의 모의실험에 대한 타당성을 바탕으로 다양한 편치 선단각과 진입각에 대해 수치해석 하였다. 해석에 사용된 소재는 일반적으로 박판소재에 이용되고 있는 냉간압연강(SPCC)과 화학적 조성이 유사한 AISI 5115를 사용하였으며 유동응력과 유효변형률의 관계는 Power law[13]에 따라 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 706.1 \bar{\epsilon}^{0.15} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

모의실험에 적용된 마찰인자값은 모든 경계면에 일반적인 냉간 금속성형에서 적용되는 0.12로 설정하였다. 해석에 사용된 소재의 두께는 9mm이며 그 이외의 해석조건은 앞에서와 동일하다.

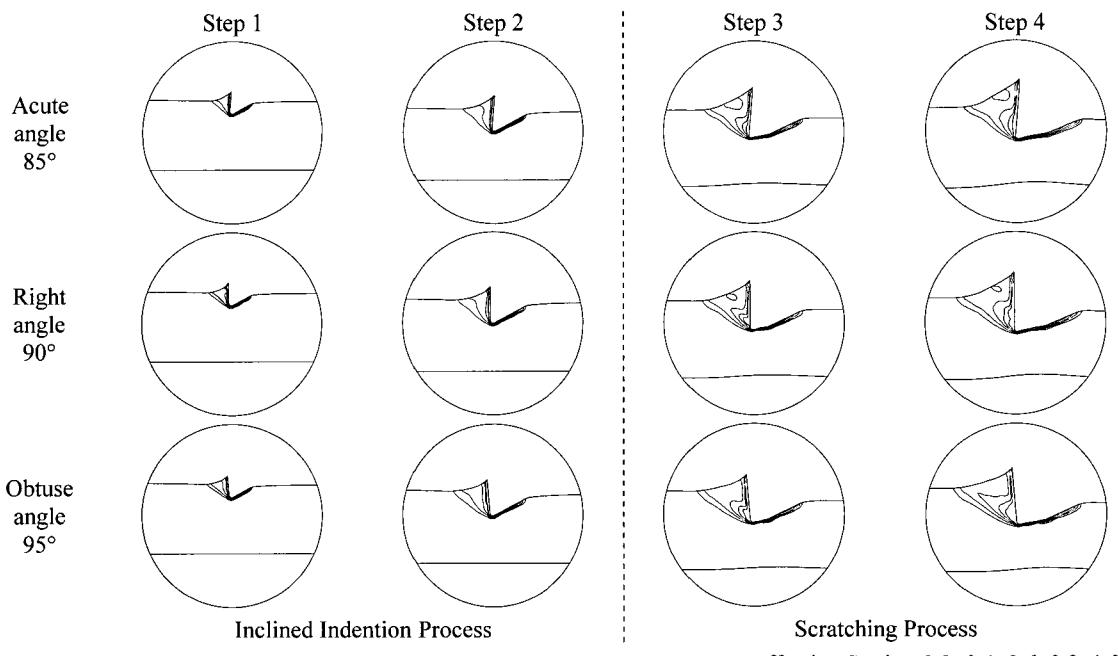
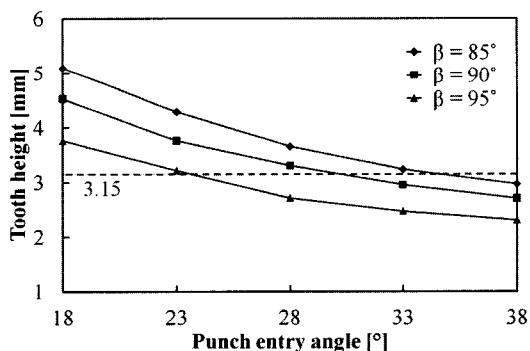
Fig. 5 Deformation patterns and effective strain at each serrated forming process ($\theta=28^\circ$)

Fig. 6 Influence of punch entry angle on the tooth height

3.1.2 해석결과

Fig. 5 는 편치 진입각이 28° 일 때 각각의 편치 선단각에 따라 공정의 진행에 따른 변형형태와 유효변형률을 나타낸 것이다. 그림에서 공정의 완료시점을 기준으로 경사 압입공정과 긁기공정으로 구분하여 4 구간의 행정거리에 따라 나타냈으며 유효변형률을 분포는 각각 5 개의 등간격으로 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 돌기형성공정은 경사 압입공정에서 돌기의 기본형상이 생성되고 이후에 이전 공정에서의 형상을 유지하면서 긁기공정에서는 단순히 돌기의 높이

만 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 원하는 돌기형상을 얻기 위해서 긁기공정에 대한 행정거리 제어를 통해 돌기 높이를 조절할 수 있을 것으로 판단된다. 유효변형률 분포는 모든 경우에 대해 압입편치의 경사면에서 최대값을 나타냈으며 편치 선단각이 작을수록 상대적으로 조밀하게 분포하였다.

밴드에 압착체결시 돌기높이는 압입되는 깊이를 판단할 수 있는 돌기의 기하학적인 형상 특징 중에서 중요한 기준으로 볼 수 있다. Fig. 6 은 모의실험에 적용된 세 가지 편치 선단각에 대해 돌기높이와 진입각에 대한 관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 편치 진입각과 선단각이 작을수록 돌기높이는 증가하는 경향을 보인다. 또한 편치 진입각이 클수록 선단각에 따른 돌기 높이에 대한 차이는 점차 감소하는 것으로 나타났다. 그림에서 표시된 기준선은 돌기높이가 3.15mm 인 지점으로서 앞에서 언급한 견고한 체결력을 확보하기 위하여 돌기높이가 소재의 두께에 대해 35% 이상인 기준을 나타낸 것이다. 이와 같은 기준을 바탕으로 편치 진입각이 23° 이하에서는 모든 선단각에 대해 높이 기준을 만족하였다. 그러나 반대로 편치 선단각이 95° 일 경우에는 대부분의 진입각에 대해 돌기 높이기준

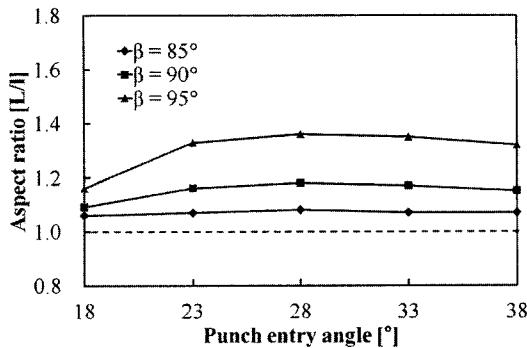


Fig. 7 Influence of punch entry angle on the aspect ratio

을 만족하지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 7은 각각의 편치 선단각에 대해 진입각과 돌기 형상비에 대한 관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서 편치 선단각이 작을수록 정삼각형의 형상비인 1에 근접하며 반대로 선단각이 클수록 형상비가 크게 나타났다. 전체적으로 모든 편치 선단각에 대해 진입각 28°를 기준으로 형상비가 증가하다가 감소하는 변곡점의 경향을 보인다. 이러한 경향은 편치 선단각이 95° 일 때 가장 크게 나타나며 상대적으로 85° 일 때는 진입각에 대한 영향이 작게 나타났다. 따라서 돌기형상 측면에서 편치 선단각 85° 을 적용하여 성형을 수행하면 가장 안정적으로 공정이 진행될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 압입체결 성형공정

3.2.1 해석조건

본 논문에서는 돌기성형공정에 의해 생성된 클립이 실제 밴드에 압입체결 되었을 경우에 기계적 결속력을 평가하기 위하여 마찰접촉문제[8~9]를 바탕으로 모의실험을 수행하였다. 해석대상은 각각의 편치 선단각에 대해 형상비가 급격히 변하는 세가지 18°, 28°, 38° 편치 진입각을 적용하였다. Fig. 8은 압입체결 성형공정에 적용된 성형방법에 대한 개념도이다. 그림에서 나타난 것처럼 돌기성형공정에 대한 모의실험에서 얻어진 형상만을 적용하여 요소망을 재구성하고 클립을 생성하였다. 전처리 과정에서 해석의 신뢰성을 위하여 압입체결이 예상되는 밴드와 클립 영역에 요소망을 조밀하게 구성하였다. 모의실험에 적용된 마찰인자값은 클립과 밴드의 모든 영역에 0.12로 설정하였으며 성형속도는 0.1mm/sec이다. 본 논문에서

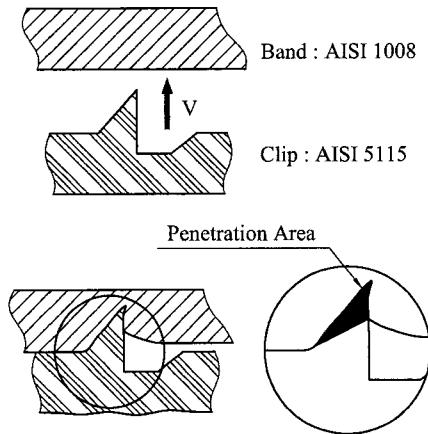


Fig. 8 Schematic configuration for indentation process and definition of penetration area

는 압입체결되는 기계적 결속력에 대한 평가기준을 설정하기 위하여 그림의 오른쪽 하단에 나타난 것처럼 체결이 완료된 후 클립의 돌기가 밴드의 영역에 침투되는 영역을 계측하였다. 다시 말해서 밴드에 대해 침투되는 영역이 상대적으로 클 때 기계적 결속력도 견고한 것으로 판단하였다. 압입체결 성형에 대한 모의실험에 적용된 클립소재는 돌기성형공정과 동일하게 AISI 5115를 사용하였으며 밴드소재는 연강인 AISI 1008를 적용하였다. AISI 1008에 대한 유동응력과 유효변형율의 관계는 Power law[13]에 따라 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 657.3 \bar{\epsilon}^{0.24} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

3.2.2 해석결과

Fig. 9는 각각의 편치 선단각과 진입각에 대해 압입성형후 체결된 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 편치 선단각이 작을수록 예리한 돌기형상으로 인하여 압입체결이 원활한 것으로 나타났다. 그럼으로부터 편치 선단각이 85°인 경우 진입각이 18° 와 38° 일 때 상대적으로 체결이 견고한 것으로 나타났다. 그러나 편치 선단각이 90° 와 95° 일 경우에는 대부분의 진입각에 대해 압입체결 상태가 불완전한 경향을 나타낸다. 따라서 클립이 밴드에 견고하게 압착체결되기 위해서는 돌기자체가 예각의 형상으로 생성되어야만 적합한 것으로 판단된다.

Table 3은 압입체결 성형에 대한 모의실험 결과로부터 계측된 침투영역과 돌기 형상비를 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 침투영역이 가장 큰

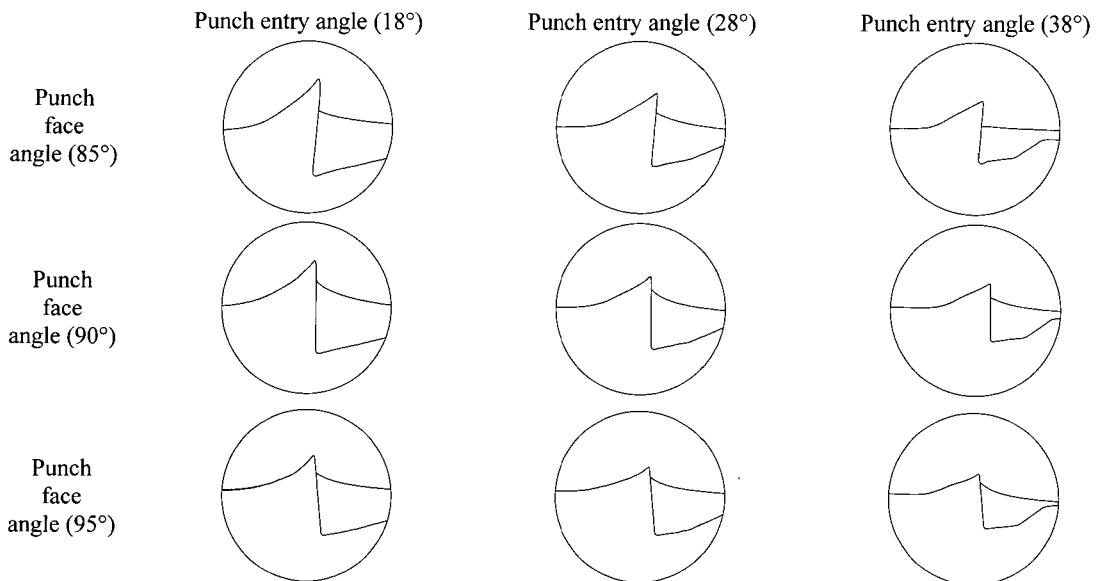


Fig. 9 Deformation patterns for various punch face and entry angle at indentation process

Table 3 The evaluations for indentation forming process

Punch face angle (°)	Punch entry angle (°)	Penetration area (mm ²)	Aspect ratio (L/l)
85	18	8.60	1.06
	28	5.13	1.08
	38	6.93	1.07
90	18	4.29	1.09
	28	2.65	1.18
	38	3.42	1.15
95	18	3.00	1.16
	28	1.70	1.36
	38	2.08	1.32

경우는 편치 선단각이 85° 이고 진입각이 18° 인 경우로 나타났으며 이러한 경우 형상비가 가장 1에 근접하게 나타났다. 편치 선단각이 95° 인 경우에는 각각의 진입각에 대해 형상비의 차이에 따른 침투면적이 차이가 크게 나타나지 않았다. 그러나, 편치 선단각이 85° 인 경우에는 각각의 진입각에 대해 형상비의 차이가 침투영역에 많은 영향을 주고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 편치 선단각이 예각인 경우에는 돌기형상에 대해 상대적으로 진입각에 의한 영향이 많은 것으로 판단된다. 또한 돌기성형공정에서 돌기의 형상이 안정적인 정삼각형의 형상에 가까울수록 기계적 결속력이 가장 견고한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 평면변형률에 의한 유한요소법을 기반으로 복동금형에 의한 돌기성형공정에 대해 수치해석을 수행하였다. 성형공정에서 편치 선단각과 진입각을 주요설계변수로 설정하여 돌기형상을 분석하고 입입체결력을 평가하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 복동금형을 적용한 돌기성형공정에서는 경사입공정에서 돌기의 기본형상이 생성되고 이어지는 굽기공정에서는 단순히 돌기의 높이만 증가된다.

(2) 편치 진입각과 선단각이 작을수록 돌기높이는 증가하는 경향을 보인다.

(3) 편치 선단각이 작을수록 형상비 1에 근접하며 모든 경우에 대해 진입각 28° 에서 변곡점의 경향을 보인다.

(4) 압입체결 성형결과 가장 견고한 기계적 결속력을 갖기 위해서는 돌기형상이 예각이면서 정삼각형의 형상에 근접해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] H. S. Koo, Y. S. Park, D. H. Jang, 2008, Experimental investigation on the serrated process, KSTP, Vol. 17, No. 3, pp. 203~209.

- [2] H. S. Koo, 2008, Experimental and analytical study on the forming process of serrated sheets, Ph. D Thesis, Inha University.
- [3] C. X. Feng, X. F. Wang, Z. Yu, 2002, Neural networks predictive modeling of honing surface parameters defined by ISO13565, SME J. of Manufacturing Systems, Vol. 21, No. 5, pp. 395~408.
- [4] H. S. Moon, S. J. Na, 1997, Optimum design based on mathematical model and neural network to predict weld parameters for fillet joints, SME J. of Manufacturing Systems, Vol. 16, No. 1, pp. 13~23.
- [5] K. Yamaguchi, P. B. Mellor, 1976, Thickness and grain size dependence of limit strains in sheet metal stretching, Int. J. Mech. Science, Vol. 18, pp. 85-90.
- [6] M. Seth, V. J. Vohnout, G. S. Daehn, 2005, Formability of steel sheet in high velocity impact, J. Mater. Process. Technol. Vol. 168, pp. 390~400.
- [7] U.S. Patent, Toothed Seal, No. 3636592, 1972.
- [8] D. H. Jang, B. B Hwang, 2003, Rigid-plastic FE modeling of frictional contact Problems based on a penalty method, KSTP, Vol. 12, No. 1, pp. 34~42.
- [9] D. H. Jang, S. H. Cho, B. B Hwang, 2003, Finite element analysis for frictional contact problem of axisymmetric deforming bodies, KSTP, Vol. 12, No. 1, pp. 26~33.
- [10] T. Asano, 2007, Aspect-ratio Voronoi diagram and its complexity bounds, Information Processing Letters, Vol. 105, pp. 26~31.
- [11] Das, M. Braja, 2005, Principles of geotechnical engineering, Cengage Learning Co.
- [12] SFTC, 2004, DEFROM-2D Ver. 8.0 Users Manual (Scientific Forming Technologies Corporation Inc., U.S.A.).
- [13] Air Force Material Laboratory, 1973, Forming Equipment, Materials, and Practices, Metal and Ceramics Information Center, p. 164.