

적응형 라스팅기의 자동화를 위한 제화용 라스트의 새로운 CAD Data화 기법

김승호*, 장광걸**, 김기풍**, 허 훈**, 권동수**

New CAD Datarization Technique of Shoe Lasts for Automation of the Adaptive Lasting Machine

Kim, S. H.*, Jang, K. K.**, Kim, K. P.**, Huh, H.** and Kwon, D. S.**

ABSTRACT

Lasting machines for shoe manufacturing are continuously developed with the aid of automation and CAM(Computer Aided Manufacturing). Although automation and CAM techniques have tremendously reduced the labor in shoe manufacturing, there still remain some parts manufactured by experts. In order to enhance the capability and efficiency of machines for labor-free shoe manufacturing, CAD data of a shoe last is essential. While CAD datarization takes the fundamental role in the shoe design and manufacturing, there has been little research for the CAD datarization of a shoe last. In this paper, a new procedure for CAD datarization of a shoe last using finite element patches and a tension spline method is proposed for application to shoe manufacturing machines. The outer line of a shoe-last sole is interpolated by a tension spline method and bonding lines are extracted from the shoe CAD data. Data set for a control algorithm of the lasting machine can be produced from the CAD data.

Key words : CAD Datarization of a shoe last, Tension spline method, Interpolated data from the shoe CAD data

1. 서 론

제화 산업은 우리나라의 주력 수출 산업 중의 하나로서 오랜 기간 기여해 왔지만, 1980년대 중반 이후 노동 인건비 상승, 정부의 중공업 육성정책, 근로자들의 3D 직종 기피 등의 여파로 국제 경쟁력을 상실한 상태이다. 또한, 신발 제조 설비도 핵심 부분은 대부분 이태리, 영국 등지에서 수입에 의존하고, 기술 수준의 발달이 미미하여 대만 등의 후발 국가에도 뒤처지고 있는 실정이다. 컴퓨터를 이용한 생산 공정은 그 동안 눈부신 발전을 거듭하여 자동화를 통한 효율적인 생산성 향상에 큰 역할을 해오고 있다. 현재 이태리, 미국, 영국 등에서는 이러한 CAM

을 신발 제조 산업에 적용하여 지속적인 발전을 거듭하고 있지만 우리 나라에서는 아직 이러한 연구가 본격적으로 수행되고 있지 않아, 지속적인 연구를 통한 기술 수준의 혁신이 요구되고 있는 실정이다. 신발 제조 산업이 국제적인 경쟁력을 가지기 위해서는 소품종 대량 생산의 견지를 벗어나 다품종 소량 생산이 가능하도록 하는 기술 수준의 확립이 반드시 이루어져야 할 것이다. 이를 위해서는 신발의 종류에 관계없이 적응적으로 생산할 수 있는 기계 기술의 개발이 선행되어야 할 것이다.

신발 제조 공정 중에서 CAM을 이용한 자동화가 제대로 이루어 지지 않은 분야는 신발의 갑피와 중창을 접합시키는 공정인 라스팅 작업으로, 신발 전체의 품질을 좌우하는 공정이다. 이 공정은 난이도가 높고 작업의 숙련도가 요구되어, 아직까지도 작업의 주체가 숙련공으로 제한되어 있는 분야이다. 제화 산업에 이러한 라스팅 작업까지 수행할 수 있는

*학생회원, 한국과학기술원 기계공학과

**한국과학기술원 기계공학과

- 논문투고일: 2000. 10. 6

- 심사완료일: 2000. 12. 23

CAM을 적용하기 위해서 가장 먼저 선행되어야 할 연구는 신발을 디자인 하거나 생산을 할 때 기본이 되는 라스트(Last)에 관한 연구이다. 라스트는 사람의 족형과 유사한 형태를 가지고 있고, 신발의 형상이나 치수와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 새로운 신발을 디자인하거나 기계를 초기화할 때 라스트의 형상으로부터 출발을 하게 된다. 라스트의 형상이나 치수의 정의에 대한 기초적인 연구는 현장에서의 경험을 바탕으로 수행되어 왔고 라스트의 각 부분을 다른 크기로 할출(Grading)하는 방법에 대한 연구도 여러 연구자들에 의해 수행되어 왔다¹¹⁾. 그러나, CAM에 적용하기 위한 가장 기본적인 작업이라고 할 수 있는 라스트의 CAD data화 작업은 국내는 물론이고 해외에서도 아직까지 수행된 적이 없다. 일반적으로 라스트의 설계와 신발 갑피의 설계에 사용되는 소프트웨어로는 Shoemaster, Crispin Dynamics, Lectra System 등이 있으나 대부분 고가인데 반해, 현재 상태로는 실제 신발을 제조하고 있는 라스팅 기계의 제어에는 적용할 수 없는 단점이 있다. 대부분의 재화 기계에서는 바닥면 데이터 중에서 추출된 기본적인 일부의 데이터만을 사용자가 새로 입력하여 사용하거나, 기계의 판매 시에 포함되어 있는 라이브러리에 의존하여, 제어에 활용하고 있고 국내에서는 이러한 연구는 지금까지 거의 전무한 실정이다.

본 논문에서는 라스트로부터 접촉식 측정기 및 기존의 CAD 소프트웨어를 사용하여 라스트를 절점좌표와 요소로 구성되는 유한요소 격자 형태로 CAD data화 하는 방법을 새롭게 제안하였다. 곡선이나 곡면의 보간은 일반적으로 B-spline 방법이나 NURBS를 이용한다^{18,9)}, 본 논문에서는 라스트의 CAD Data로부터 필요한 임의의 제어 정보를 특정 구간에서 Tension Spline 방법을 사용하여 보간(Interpolation)할 수 있는 방법을 제안하였다. 구성된 CAD data를 CAM에 적용하기 위한 한가지 예로서 라스팅 작업 시에 가장 제어하기 힘든 풀칠선(Bonding Line) 데이터를 추출하여 제어 시에 유용적으로 활용할 수 있는 기반을 마련하였다. 본 논문의 모든 절차와 결과는 현재 개발중인 적용형 라스팅 기계의 유동적인 제어에 맞추어져 있다.

2. 라스트의 CAD Data화 과정

본 논문에서는 라스트를 삼차원 접촉식 측정기로 측정하고, CAD용 소프트웨어를 사용하여 유한요소 격자화 하는 작업을 수행하였다. 유한 요소 격자는

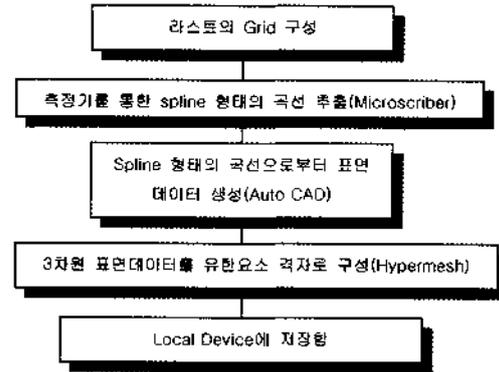


Fig. 1. Process sequence to construct CAD data of lasts.

삼차원의 좌표로 구성되는 절점과 이 절점들로 구성된 요소로 삼차원의 데이터를 저장하는 방식으로 다음과 같은 장점을 지니고 있다.

- 1) 라스트를 CAD data화 하는데 유한요소격자를 사용하면 전체 정보를 모두 저장 할 필요 없이 필요한 정보만 추출하여 저장 할 수 있어 메모리의 제약이 줄어들는다.
- 2) 절점의 좌표들로부터 원하는 형태나 궤적의 데이터로 쉽게 전환할 수 있어 수치적인 계산이 쉽다.
- 3) ASCII 형태의 데이터로 되어 있어 사용자가 기본적인 내용만 교육을 받으면 이를 활용하거나 수정하기가 용이하다.

Fig. 1은 라스트를 CAD data화 하는 과정을 나타내고 있다. Fig. 1에서 라스트의 격자 구성은 접촉식 측정기로 측정할 점들을 설정해 주는 작업이고, 접촉식 측정기를 CAD 소프트웨어에 연결하여 spline 형태의 삼차원 곡선을 얻게 된다. 본 논문에서는 접촉식 측정기와 Interfacing을 위해서 Auto CAD 2000을 사용하여 spline 형태의 곡선을 얻었다. Spline 형태의 삼차원 곡선으로부터 라스트의 표면 데이터를 생성하고, 이로부터 삼차원의 유한요소 격자를 이용하여 요소 분할을 실시하여 라스트의 CAD data화를 수행하게 된다. 구성된 CAD data는 저장장치에 저장되게 된다.

Fig. 2와 Fig. 3는 각각 라스트에 격자를 구성한 형상과 접촉식 측정기로부터 얻은 spline 곡선 형태의 삼차원 형상을 나타낸다. Fig. 2에서 가로 줄과 세로 줄이 만나는 점이 접촉식 측정기로 측정하는 점이 되고 CAD 소프트웨어 상에서 Fig. 3에서의



Fig. 2. Last to be measured with rectangular grid.

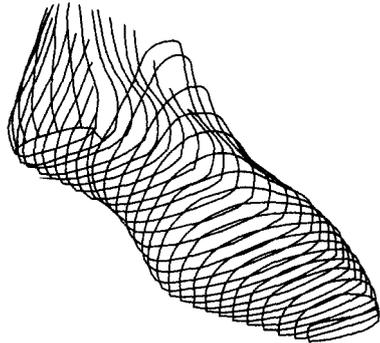


Fig. 3. Spline curves from the measuring instrument.

spline 형태의 곡선으로 변환된다. Spline 형태의 곡선은 전체 삼차원 데이터를 모두 포함하고 있으므로 이를 사용하여 표면화 하는 작업을 수행하게 된다.

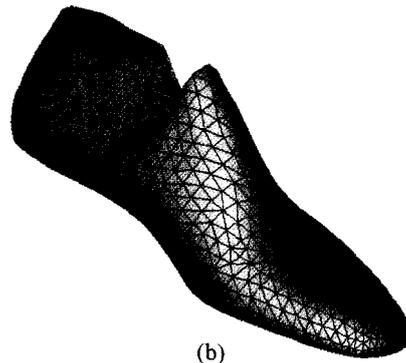
Fig. 3의 CAD 소프트웨어로부터 얻은 spline 곡선으로부터 구성된 표면 데이터를 Fig. 4에 도시하였고 이 표면 데이터를 삼각형 요소와 사각형 요소로 격자화 한 그림을 Fig. 5에 도시하였다. Spline 곡선으로부터 곡면을 얻은 작업은 3차원 모델링 소프트웨어인 Hypermesh Ver 3.0을 사용하여 수행하였다.



Fig. 4. Constructed surface data from spline curves.



(a)



(b)

Fig. 5. Constructed CAD data of last using finite element mesh system from surface data with respect to mesh types: (a) rectangular mesh; (b) triangular mesh.

각 곡선으로부터 인접한 곡선과 곡면을 만들고 이 곡면을 이웃한 곡면과 합치는 형태로 곡면을 구성하였다.

Fig. 5에서 유한요소 격자 형태의 CAD data는 각 절점의 좌표와 각 요소를 구성하는 절점의 정보를 ASCII형태로 저장하게 된다. 절점과 요소의 정보를 가지고 라스트 상의 임의의 평면이나 곡선을 추출하여 보간하는 방법을 사용하면 제화 기계의 자동화에 필요한 모든 데이터를 제공할 수 있다. 삼각형 요소는 같은 절점수를 가질 때 사각형 요소에 비하여 비교적 큰 곡률까지 표현 할 수 있으나 요소의 수가 많아 지는 단점이 있다.

3. Tension Spline 방법

구성된 라스트의 CAD Data로부터 제어에 필요한 절점을 추출하고 이 임의의 절점들을 지나는 곡선을 보간하기 위한 방법으로 본 논문에서는 tension spline 방법을 사용하였다. 이 방법은 cubic spline의

보완형으로 tension 파라미터를 사용하여 데이터를 보간하는 방법으로, tension의 양에 따라 데이터 점을 따라 지나가는 곡선의 형상을 조절 할 수 있는 장점이 있다^[10]. Fig. 6은 tension의 양에 따른 데이터의 보간 정도를 나타내는 그림이다. 신속한 작업이 요구될 때, 적은 데이터 포인트 만을 얻었는데 라스트의 형상이 급격하게 변하는 경우 이 tension양을 조절해 줌으로써 사용자가 유연한 곡선을 얻을 수 있을 것이다. Tension spline방법은 수치적으로 코드 화하기 쉽고 다루기 쉬운 장점이 있다. Tension 양을 조절하는 계수인 τ 가 0이면 해가 cubic spline의 형태가 되고, τ 가 어떤 해는 구간에서 선형 함수의 형태가 된다. Tension spline방법을 사용하면 다양한 곡률과 선형 구간이 생길 수 있는 숙녀화 및 특수화 등을 적은 데이터 수만으로도 보간이 가능하다. Tension spline 함수는 다음의 식 (1)을 만족하는 함수로 정의 할 수 있다.

$$\begin{cases} f \in C^2[t_0, t_n] \\ f(t_i) = y_i \quad (0 \leq i \leq n) \\ f^{(4)} - \tau^2 f'' = 0 \quad \text{in } (t_{i-1}, t_i) \end{cases} \quad (1)$$

$z_i = f''(t_i)$ 라 하면 함수 f 는 구간 $[t_{i-1}, t_i]$ 에서 아래의 경계조건을 만족하는 미분방정식 $f^{(4)} - \tau^2 f'' = 0$ 의 해가 된다. 여기서 $f^{(4)}$ 와 f'' 는 각각 f 의 4차와 2차 미분을 뜻한다.

$$\begin{aligned} f(t_i) &= y_i \quad f(t_{i+1}) = y_{i+1} \\ f''(t_i) &= z_i \quad f''(t_{i+1}) = z_{i+1} \end{aligned} \quad (2)$$

그러므로, 함수 f 는 다음과 같은 꼴로 나타낼 수 있

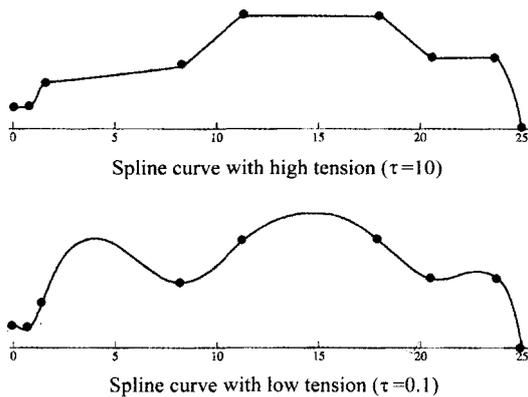


Fig. 6. Interpolated curve with respect to the amount of tension.

다. 여기서 h 는 t_i 과 t_{i+1} 사이의 구간 거리를 나타낸다.

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{z_i \sinh\{\tau(t_{i+1}-x)\} + z_{i+1} \sinh\{\tau(x-t_i)\}}{\tau^2 \sinh(\tau h_i)} \\ &+ \left(y_i - \frac{z_i}{\tau^2}\right) \frac{t_{i+1}-x}{h_i} + \left(y_{i+1} - \frac{z_{i+1}}{\tau^2}\right) \frac{x-t_i}{h_i} \end{aligned} \quad (3)$$

그리고, 식 (1)의 첫번째 조건으로부터 아래의 식 (4)을 얻을 수 있다.

$$\lim_{x \rightarrow t_i} f'(x) = \lim_{x \rightarrow t_{i+1}} f'(x) \quad (1 \leq i \leq n-1) \quad (4)$$

준식의 미지수 z_i 를 구하기 위해서, 각 구간에서 다음과 같은 관계식으로 정리할 수 있다.

$$\alpha_{i-1} z_{i-1} + (\beta_{i-1} + \beta) z_i + \alpha_i z_{i+1} = \gamma_i - \gamma_{i-1} \quad (1 \leq i \leq n-1)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{h} - \frac{\tau}{\sinh(\tau h_i)} = \beta_i \frac{\tau \cosh(\tau h_i)}{\sinh(\tau h_i)} - \frac{1}{h_i}$$

$$\gamma_i = \frac{\tau^2 (y_{i+1} - y_i)}{h_i} \quad (5)$$

위의 관계식을 행렬식으로 나타내면 아래와 같다.

$Az = \gamma$

$$A = \begin{bmatrix} \beta_1 + \beta_0 & \alpha_1 & \dots & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \beta_2 + \beta_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \beta_{n-2} + \beta_{n-3} & \alpha_{n-2} \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_{n-2} & \beta_{n-1} + \beta_{n-2} \end{bmatrix}$$

$$z = \{z_1, z_2, \dots, z_{n-1}, z_{n-2}\}^T$$

$$\gamma = \{\gamma_1 - \gamma_0, \gamma_2 - \gamma_1, \dots, \gamma_{n-2} - \gamma_{n-3}, \gamma_{n-1} - \gamma_{n-2}\}^T \quad (6)$$

여기서, z_0 와 z_n 은 임의의 값으로, 계산의 편의상 0으로 놓으면 식 (3)으로부터 각 구간에서 정의된 tension spline 함수를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 tension spline 방법으로 구성된 라스트의 CAD data로부터 추출된 일부의 곡선 데이터를 보간하는데 적용하였다.

4. 라스트 CAD data의 CAM에의 적용

구성된 라스트의 CAD data는 신발의 설계부터 시작하여 관련 기계의 설계 및 제어에 폭 넓게 사용할 수 있다. 자동화의 관점에서, 제화 기계의 제어는 라스트를 기본으로 해서 이루어지므로 라스트의 좌표에 의한 제어가 필요한 부분에 적절한 절점과 요소를 추출하여 보간하여 사용하면 될 것이다. 본 논문

에서는 CAM의 응용 분야 중 하나로, 힐/사이드 라스팅 작업 시에 필요한 최외곽선 및 풀칠선을 추출하여 보간하는 작업을 수행하였다. 구성된 라스트의 CAD data를 실제 기계의 제어에 사용하기 위해서는 다양한 라스트 종류의 데이터와, 다른 크기로의 할출이 가능한 데이터베이스를 구축하는 작업이 필요하다.

4.1 라스트 CAD data의 힐/사이드 라스팅기에서의 적용

신발 제조 공정 중에서 자동화의 수준이 가장 낮은 분야는 갑피를 중창에 결합하는 공정인 라스팅 작업이다. 라스팅 작업은 신발 전체의 품질을 좌우하는 중요한 공정으로 세팅 시간이 가장 오래 걸리며, 전문적인 숙련공의 작업으로 수행되는 분야이다. 현재 사용되고 있는 기계들은 부분적인 CAM의 적용이 이루어져 있기는 하지만 신발 제조의 가장 기본이라 할 수 있는 라스트의 데이터를 고려한 제어는 아직까지 이루어져 있지 않은 실정이다. 특히, 갑피와 중창을 직접 결합해 주는 풀칠선의 제어는 사용자가 케적을 직접 입력해 주거나 기계의 모듈 내에 포함되어 있는 데이터를 사용하는 경우가 대부분으로 숙련공이 아니면 수행하기 힘든 작업이다. 따라서, 라스트의 CAD data를 활용하여 초기 세팅 위치를 정하고, 삼차원에서의 임의 곡률을 가지는 풀칠선을 추출하여 라스팅 작업에 활용하는 것은 라스팅 기계의 자동화 관점에서 매우 중요한 일이라고 할 수 있을 것이다. 라스트의 초기 세팅 위치는 라스트의 삼차원 CAD data에서 바로 추출하여 사용할 수 있을 것이므로 본 장에서는 라스트의 CAD data로부터 풀칠선을 추출하고 보간하여 제어에 활용할 수 있도록 하였다. 물론 이와 같은 CAD data를 유동적으로 활용하기 위해서는 기계가 CAM에 바탕을 두어 설계되어야 하고, 그에 따르는 제어 분야의 연구도 동시에 수행되어야 할 것이다.

4.2 바닥면 및 풀칠선의 추출 및 보간

본 절에서는 구성된 라스트의 삼차원 CAD data로부터 신발의 바닥을 구성하는 면을 추출하고 수치적인 탐색 작업을 거쳐서 풀칠선 데이터를 추출해 내었다. 신발의 바닥면은 전체 데이터를 탐색작업으로 추출하는 방법도 있지만 본 논문에서는 초기 요소 분할시 바닥면과 윗면을 따로 요소 분할 함으로써 원하는 바닥면을 추출해 내었다. 추출된 풀칠선을 제어에 활용하기 위해 Tension spline방법을 사용하여

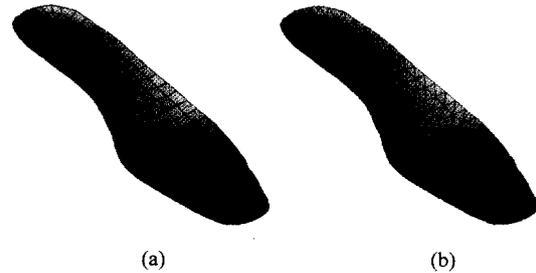


Fig. 7. Extracted finite element mesh data of bottom surface from the last CAD data with respect to mesh types: (a) rectangular mesh; (b) triangular mesh.

하나의 함수 꼴로 보간 하였다. Fig. 7은 라스트의 CAD data로부터 추출한 삼각형 및 사각형 유한요소를 사용한 격자 형태의 바닥면 데이터를 나타낸다.

풀칠선 추출 절차는 다음과 같다. 바닥면의 최외곽 라인상의 절점들을 각 절점에서 안쪽으로 수직인 벡터를 구하여 이 벡터 방향으로 특정 위치 만큼 움직인 점들을 구할 수 있다. 이 새로 구한 움직인 점들을 3차원 상의 바닥면에 탐색기법을 통하여 투영을 시키면 바닥면 위에 위치하도록 할 수 있다. 이런 과정을 통해 구한 3차원의 풀칠선을 역시 탐색기법을 통하여 풀칠 선이 속한 바닥면에 수직인 방향으로 특정 위치만큼 움직이 시켜 주면 3차원의 풀칠선을 얻을 수 있다. 현재 사용되고 있는 제화 기기의 풀칠 방법은 신발의 바닥면에 노즐이 접하는 형태로 접촉제가 도포되므로 평면상의 풀칠선을 추출해 내었다. Fig. 8은 삼차원상의 바닥면과 바닥면의 외곽선으로부터 추출된 풀칠선, 그리고 삼차원 데이터를 평면상에 투영시킨 이차원의 바닥면과 풀칠선을 나타낸다. 신발의 종류의 사이즈에 따라 움직이는 양과 풀칠하는 길이가 달라지므로, 풀칠선의 위치나 움직이는 양 및 길이는 사용자가 임의로 조절할 수 있는 양이다. 라스트 CAD data로부터 풀칠선 데이터의 추출과 보간을 위한 코드에는 다음과 같은 내용이 포함된다.

- 1) 제어부에 필요한 바닥면 데이터를 읽어 들이고 기준 좌표축을 설정하는 부분
- 2) 바닥면의 삼차원 유한요소 격자로부터 탐색기법을 통해 최외곽선을 추출하는 부분
- 3) 바닥면의 최외곽선으로부터 3차원의 풀칠선을 추출하는 부분
- 4) 추출된 데이터를 Tension spline 방법을 통해 보간하는 부분

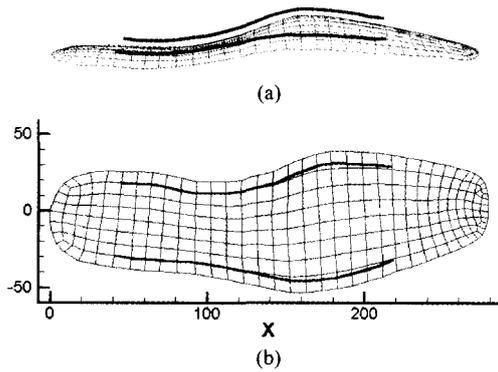


Fig. 8. Extracted bonding line from bottom surface data for the control algorithm of the lasting machine with respect to data type: (a) 3D data (b) 2D data.

5) 실제 제어에 사용될 ASCII형태의 데이터를 저장하는 부분

Fig. 8에서의 최외곽선과 풀칠선을 Tension spline 방법을 사용하여 보간한 그림을 Fig. 9에 도시하였다. 최외곽선이나 풀칠선을 표현하는 데이터의 개수는 사용자가 적절히 조절해 줄 수 있다.

Fig. 9에서 사용한 tension spline의 양은 0으로 일반적인 cubic spline의 결과와 같은 것이다. Tension의 양을 조절하는 것은 측정하여 구성된 라스트로부터 제어용 데이터를 추출할 때, 추출된 점의 수가 작아 사용자가 원하는 유연한 곡선을 얻기가 힘들 때 적절히 지정해 주는 값이다. Fig. 9의 풀칠선은 실제 공장에서 신발을 제조할 때에 사용되는 풀칠선과 거의 유사한 체적이다.

5. 결 론

본 논문에서는 제화 기계의 설계 및 자동화를 위하여 라스트를 CAD data화하는 방법을 제안하였다.

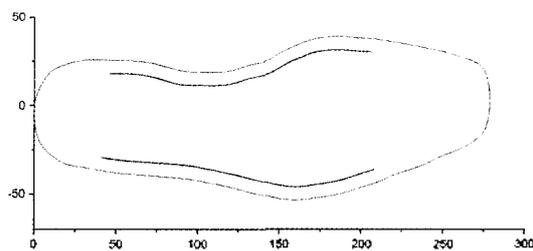


Fig. 9. Interpolated outer line and bonding line by tension spline method.

제어에 필요한 데이터를 유동적으로 추출하기 위해서 유한요소 격자 형태로 라스트를 CAD data화하여 삼차원 상의 점의 좌표와 점으로 구성된 요소로 표현하는 방법을 사용하였다. 구성된 CAD data는 신발의 설계부터 제화 기기의 제어 등 다양한 분야에서 사용될 수 있을 것이다. 또한, 삼차원의 점점 정보들로부터 일부의 정보를 추출하여 Tension spline 방법을 사용하여 보간하는 방법을 사용하였다. 구성된 라스트 CAD data의 CAM에의 적용성을 살펴보기 위하여 라스팅 작업시 제어에 필요한 일부 데이터를 추출하여 보간하는 방법을 제안하였다. 라스트 CAD data로부터 바닥면과 풀칠선을 추출하여 정밀한 제어에 활용 가능하도록 보간하는 작업을 수행하였다.

구성된 라스트 CAD data를 적극 활용하기 위해서는 라스트를 종류별로 데이터 베이스화 하는 작업이 필요할 것이고, 제어에 필요한 데이터도 마찬가지로 형태의 데이터 베이스화 하는 작업이 필요할 것이다. 또한 라스트를 크기 별로 측정하여 저장하는 방법은 많은 노력이 필요하고 데이터의 저장 공간에도 한계가 있으므로 한 모델로부터 다른 모델을 추출할 수 있는 할출(Grading)방법에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Fan, C. Y., "Chinese Shoe Size Specification System and Standard Shoe Last Series", *Proc. Light Industry Ministry and Chemical Industry*, pp. 145-166, 1982.
2. Liao, W. K., *Export Shoe Dimension and Last*, Taiwan Footwear Research Institute, 1984.
3. Venkatappaiah, B., *Introduction To The Modern Footwear Technology*, Mrs.B.SITA, 1988.
4. Browne, R., Clayton, C. and Hanley, J., In: Larcombe Peter (Ed.), *Modern Shoemaking No 29: Lasts*, SATRA Footwear Technology Center, 1990.
5. Zeuschel, D., Dent, J. and Rehagen, S. and Jackson, K., *American Last Making*, Brown Shoe Company, 1991.
6. Chen, R. C. C., "Feasibility study of shell shoe and shell shoe fitting techniques", *The 3rd Pan-Pacific Conference on Occupational Ergonomics*, Korea, 1994.
7. Cheng, F. T. and Perng, D. B., "A systematic approach for developing a foot size information system for shoe last design", *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 25, pp. 171-185, 1999.
8. 정형배, 나승수, 박종환, "NURBS Surface Global Interpolation에 대한 방법", *한국 CAD/CAM학회 논문집*, Vol. 2, No. 4, pp. 237-243, 1997.
9. 박형준, 김광수, "에너지 최소화에 근거한 B-spline

curve fitting을 이용한 근사적 lofting”, 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol. 4, No. 1, 1999.

10. Kincaid, D. and Cheney, W., *Numerical Analysis*. ITP, 1996.



김 승 호

1996년 한국과학기술원 기계공학과 학사
 1998년 한국과학기술원 기계공학과 석사
 1998년-현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정 재학중
 관심분야: CAD/CAM, Metal Forming, 전산해석



장 광 겁

1996년 서울대학교 수학교육과 학사
 1999년 한국과학기술원 수학과 석사
 1999년-현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정 재학중
 관심분야: CAD/CAM, 전산해석



김 기 풍

1996년 아주대학교 기계공학과 학사
 1998년 한국과학기술원 기계공학과 석사
 1998년-현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정 재학중
 관심분야: CAD/CAM, 구조설계



허 훈

1976년 서울대학교 기계공학과 학사
 1978년 서울대학교 기계공학과 석사
 1986년 University of Michigan (USA) 기계공학과 박사
 1986년-현재 한국과학기술원 기계공학과 조교수, 부교수, 교수
 관심분야: CAD/CAM, Metal Forming, 충격해석



권 동 수

1980년 서울대학교 기계공학과 학사
 1982년 한국과학기술원 기계공학과 석사
 1991년 Georgia Institute of Technology (Georgia, USA) 기계공학과 박사
 1995년-현재 한국과학기술원 기계공학과 조교수
 관심분야: Telerobotics, Robotics and Controls