

# 단면 분할 FFD를 이용한 3D 라스트 데이터 생성시스템 개발

## Three Dimensional Last Data Generation System Utilizing Cross Sectional Free Form Deformation

박인덕\*, 김시경  
(Induck Park and Sikyung Kim)

**Abstract** : A new approach for human foot modelling and last design based on the cross sectional method is presented in this paper. The proposed last design method utilizes the dynamic trimmed parametric patches for the foot 3D data and last 3D data. The cross section a surface of 3D foot for the 3D last, design modeling of free form geometric last shapes. The proposed last design scheme wraps the 3D last data surrounding the measured 3D foot data with the effect of deforming the last design rule. The last design rule of the FFD is constructed on the FFD lattice based on foot-last shape analysis. In addition, the control points of FFD lattice are constructed with cross sectional data interpolation methods from the a finite set of 3D foot data. The deformed 3D last result obtained from the proposed FFD is saved as a 3D dxf foot data. The experimental results demonstrate that the last designed with the proposed scheme has good performance.

**Keywords** : cross sectional method, FFD(Free Form Deformation), 3D(3Dimensional)

### I. 서론

발의 형태는 개인에 따라 많은 차이가 있으며 이러한 차이를 충분히 고려하여 맞춤형 신발을 제작하기 위해서는 발의 형태 분석, 각 부의 치수 측정 및 족압 분포 분석이 필요하며, 이를 위한 필수 요건이 발의 3차원 족형 및 족압 측정이다[1]. 임창현[2], Mochimaru[3]등은 FFD 기법을 이용하여 라스트를 설계하는 기법을 제안하였다. 그러나 이 기법들은 실제 라스트 설계시 요구되어지는 20,000개의 3차원 족형 데이터를 80(5\*4\*4)개의 FFD 격자점만으로 변형하여 라스트 주요 설계 항목(볼거스, 힐둘레, 볼너비, 중창길이)등에 관한 주요 설계치수를 제시하지 못하고 라스트 형태만을 나타내는 문제점이 있었다. 또한, 토우 스프링(toe spring) 및 발의 보행축인 MT점에 대한 정보를 라스트 설계에 포함하지 않는 문제점이 있다. 본 연구에서는 개 개인의 발에 대한 3차원 형상정보를 생성하는 3D 측정 장치와 단면 분할 FFD(cross sectional Free Form Deformation)[4]을 이용하여 각 개인의 발 특성에 적합한 라스트를 생성하는 시스템을 설계하였다. 제안된 단면 분할 FFD는 측정되어진 3D 족형 데이터를 모두 포함하는 3D 라스트 데이터 및 3D 측정 발 데이터의 형태 분석을 통하여 결정된다. 또한 단면 분할 FFD의 격자점 및 변형 팩터 DF (Deformation Factor)는 3D 측정 발 데이터를 FFD 변형 후 3D 발 데이터를 포함하는 새로운 격자점을 구성하며 3D 발 데이터와 3D 라스트 데이터 차에 의해 변형 팩터가 결정된다. 제안된 방법을 통하여 설계되어진 3D 라스트 데이터를 통해 주요 설계 항목(볼거스, 힐둘레, 볼너비, 중창길이)등에 관한 주요 설계치수를 결론에 기술 하였다.

### II. 3차원 족형 측정

#### 1. 3차원 족형 측정 시스템

본 연구에서 사용한 3차원 족형 측정기 시스템 구성은 CCD 카메라 모듈과 카메라 모듈의 회전을 위한 스테핑 모터부, 스테핑 모터 제어부, CCD 이동 레일부, Digital I/O 부, 프레임 그레부로 구성 되어진다.

그림 1은 이러한 구성요소로 설계되어진 시스템 전체 외형을 보여주고 있다. 본 시스템에서, 발의 3차원 거리 정보를 얻기 위해 먼저 피 측정 발에 레이저라인을 조사하고 CCD 영상을 캡처한 후 CCD 영상으로부터 레이저 라인의 위치를 검색하고 이 검색된 위치에 광 삼각법을 적용하여 발의 변위를 추출함으로써 발의 3차원 위치 정보를 얻게 된다. 이렇게 발 위에 조사되어진 레이저 라인 데이터는 실제 좌표로써 윈도우 좌표공간(window coordinates)으로 매핑 처리된다. CCD 및 레이저라인 제너레이터 및 프레임 그레버를 포함하는 CCD카트는 발 주위를 360°회전하면서 취득한 300프레임의 발 영상 데이터를 가공하여 3차원 점군 데이터(Point Cloud Data)로 변환한다.

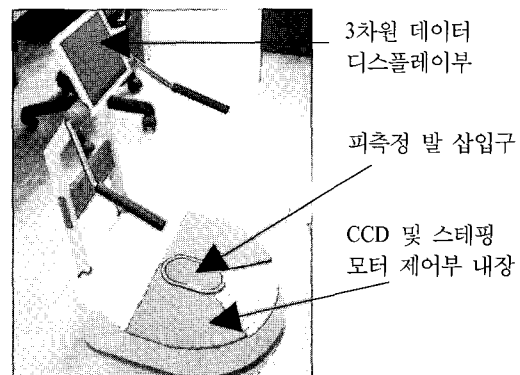


그림 1. 시스템 외형.

Fig. 1. Photograph of system (KOSCAN : 공주대학교 개발).

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 1. 14., 채택확정 : 2005. 6. 15.

박인덕, 김시경 : 공주대학교 전기전자정보통신공학부  
(han7770@daum.net/skim@kongju.ac.kr)

III. 단면 분할법을 이용한 라스트 설계

1. FFD(Free Form Deformation)

FFD 개념은 그림 2에서와 같이 외부의 격자점 블록과 내부의 객체에 대한 위치상호 관계를 정의하고 외부의 블록을 변형시켜 내부의 객체를 변형시키는 기법으로, 1986년 Thomas W. Sederberg와 에 의해 처음 제안되었다[5].

본 연구에서는 발과 라스트의 위치관계를 설정하고 라스트 설계안을 추출하는데 FFD기법을 적용하였다[6,7]. 발과 라스트의 치수 및 형상의 차이를 DF (Deformation Factor)로 정형화하면 FFD기법을 이용하여 3차원 족형 데이터로부터 라스트 설계 데이터를 추출할 수 있다. 그림 2는 3차원 측정기에서 얻어진 발 데이터를 포함하는 5\*4\*4(S축\*T축\*U축) 배열의 격자점을 나타낸다. 격자점 5\*4\*4(S축\*T축\*U축) 배열중 S축에 대한 어레이 개수는 라스트 저면부 데이터의 저면부 형태를 결정하는 주요점을 통해 결정된다. 주요점들의 개수는 5이며 이들 점 개수와 FFD 격자점의 S축이 일치하도록 S 축 방향의 격자점을 설정하였다. 같은 방법으로 T 축 및 U축 방향의 격자점의 개수를 각각 4 개로 설정하였다. 격자상의 제어 점  $P_{ijk}$  는 S, T, U에 대해서  $m+1, n+1, l+1$ 개로 정의되며  $5*4*4(x축*y축*z축)$  배열의 격자점을 만족하기 위하여,  $m = 4, n=3, l=3$ 으로 정의된다. 즉 그림 2에서 격자점 블록상의 제어점  $P_{ijk}$ 는 S, T, U에 대해서 (1)과 같이 표현된다.

$$P_{ijk} = X_0 + \frac{i}{m} S + \frac{j}{n} T + \frac{k}{l} U \quad (1)$$

여기에서  $X_0$ 는 격자 제어점  $P_{ijk}$ 의 원점좌표이다.

정규화된 객체에서 발표면 위 임의의 점 X는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$X = X_0 + sS + tT + uU$$

X의 좌표(s, t, u)상에  $0 \leq s, t, u \leq 1$ . 정규화된 객체인 발표면 위 임의의 점 X는 FFD 변형 후 점  $X_{ffd}$ 로 변하고 이 좌표는 s,t,u 좌표계에서 3차 Bernstein 다항식을 사용하여 구할 수 있다. (2)과 같이 표현된다.

$$X_{ffd} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^l P_{ijk} B_i^m(s) B_j^n(t) B_k^l(u) \quad (2)$$

여기서,  $B_i^m(s), B_j^n(t), B_k^l(u)$  는 n차의 Bernstein 다항식이다.

2. 단면 분할법 FFD를 이용한 라스트 설계

본 논문에서는 인체 족형 3차원 측정 데이터로부터 3차원 라스트 설계 데이터를 추출하기 위하여 족형 3차원 데이터를 25개의 2차원 다면으로 분할하는 단면 분할법을 사용하였다.

먼저 족형 단면 데이터를 이용한 FFD 격자점 블록 설계를 고려하기 이전에 3차원 족형 측정기에서 얻어진 족형 데이터를 단면 분할법을 이용하여 2차원 단면 분할 데이터로 분할한다. 분할하는 방법은 그림 3에서와 같이 사람 발을 발길이 중심축(limb line)을 기준으로 축 방향(x 방향)으로 분할한다. 3D 점군 측정 발 데이터로부터 단면 분할 발 데

이터를 추출하기 위하여, 우선 3차원 발 데이터를 발 중심축을 기준으로 배치한다. 그 후, 단면 분할 층에 대한 각각의 림브 중심선(limb center axis)을 설정한다. 먼저 3차원 발 데이터의 발꿈치 점을 단면 분할 컨타워 0에 일치 시킨다. 그 후 MT (Metatarsal Tibial)점은 컨타워 18에 일치시키고 MF (Metatarsal Fibular)점은 컨타워 17에 일치시키면 발 앞부분 끝점은 컨타워 24와 컨타워 25 사이에 배치한다. 이렇게 설정되어진 25개의 단면 분할 컨타워는 발 조인트 좌표계와 연계하여 그림 4와 같이 정의되어진다.

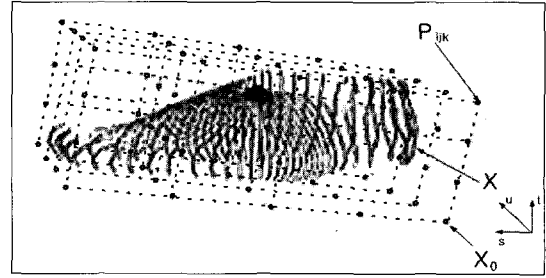


그림 2. 격자점 블록 및 내부 객체. Fig. 2. Control points block and interior object.

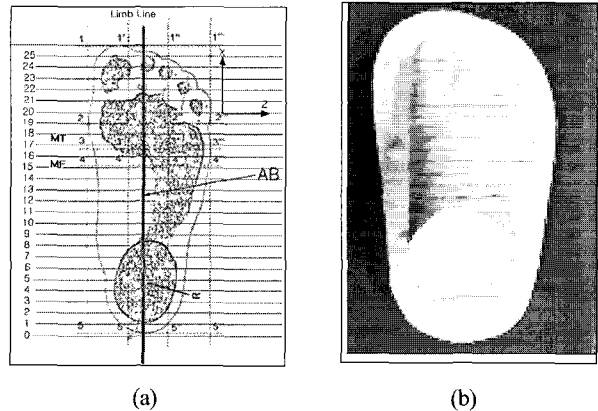


그림 3. 발 저면부 단면 분할 (a)와 발 조형물 단면 분할 사진 (b). Fig. 3. Foot bottom part cross sectional (a) and foot modeling cross sectional photos (b).

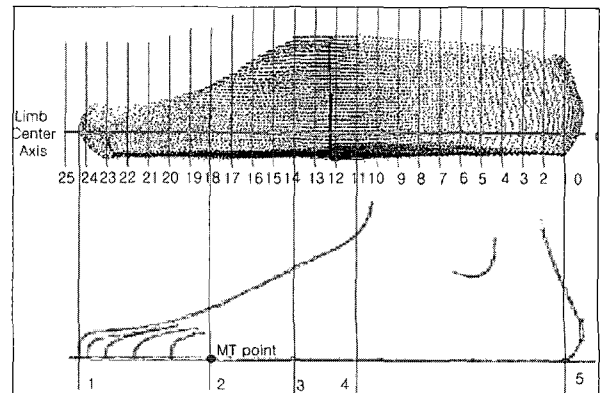


그림 4. 중심축을 기준으로 축 방향 분할. Fig. 4. Limb of basis from axis direction division.

그림 5는 그림 3에 보여진 발 단면층중 하나를 보이고 있다. 여기에서  $O_i$ 는 림브 라인과 발 단면층이 만나는 발 단면의 중심(limb center axis),  $\vec{A}, \vec{B}$ 는 점 링크벡터 이다. 이와 같은 단면층을 연속하여 발길이 중심축(limb)에 연계 하면 3D 발 데이터를 얻을 수 있다.

3. 라스트 설계를 위한 단면층 변형

3D 측정 발 데이터로부터 라스트를 설계하기 위하여 보행에 따른 발의 각 조인트의 움직임과 조인트에 연계되어진 뼈의 움직임을 고찰 하여야 한다. 본 연구에서는 라스트 설계를 위하여 그림 3에 보여진 발의 림브선(limb line)을 단면 분할법을 이용하여 변형 후 복잡한 3D 데이터를 손쉽게 처리 할 수 있는 단면층 2D 데이터로 변형 할 수 있다. 이를 위하여 발 중심축을 기준으로 분할되어진 림브를 사용한다. 여기에서, 두개의 단면 분할층이 서로 교차되지 않는 단면층의 법선 벡터를 얻는다. 또한, 발 표면의 변형 움직임을 묘사하기 위하여, 발 각 단면층의 반경을 축소, 확대시키는 스케일 팩터를 사용한다. 그림 6은 그림 4에 보여진 발 단면층에서 발 중심축(limb)을 추출한 모양을 보이고 있다. 세그먼트  $\overline{P_1P_0}$ 는 발의 앞부분을 나타내며,  $\overline{P_0P_2}$ 는 발의 뒷부분을 보이고 있다. 또한  $P_0$ 는 발의 MT 나타내고 있으며  $L_1$ 은 발의 앞부분 링크에 대한 방향,  $L_2$ 는 발 뒷부분 링크에 대한 방향이다. 보행에 따른 발의 전단부와 후단부가 MT를 기준으로 굽혀졌을때 전단부 림브 세그먼트  $\overline{P_1P_0}$ 과 후단부 세그먼트  $\overline{P_0P_2}$  두 링크 사이각이 각각  $\theta_1, \theta_2$ 라면 전체 조인트각은  $2\theta$ 이다.

3D 발 데이터에서 3D 라스트 데이터를 생성하기 위하여 보행시 나타나는  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 에 대한 분석이 필요하며 이렇게 결정된 작은 3D 발 데이터를 3D 라스트로 변형하는 FFD 기법의 변형팩터(deformation factor)에 반영 되어진다. 이를 위하여 먼저, 조인트의 단면도에 대한 방향을 설정하여야 한다.

그 후 발 단면층에 대한 조정을 취하며, 3D 발 데이터로부터 추출한 각 단면에 대하여 단면도 중심  $O_i$ 을 중심으로 하여 회전축  $L=L_1*L_2$ 를 설정한다. 발의 전단부에 대하여 발 단면도 법선 벡터는 회전축을 기준으로  $\theta_1$  및  $\theta_2$ 만큼 조정 되어진다. 각 단면층의 법선 벡터가 회전하면 그에 맞추어 각 단층별 발 컨타워 데이터도 회전하게 된다. 3D 발 데이터로부터 3D 라스트 설계시 수반되는 변형으로 인하여 체적이 변형되는 것을 방지하기 위하여 단층면에 있는 발 데이터로부터 중심선 까지가 일정하게 유지 되도록 스케일 팩터를 조정한다.

그림 7은 3D 발 데이터를 단면 분할하여 FFD 변형 3D 라스트를 만들기 위한 새로운 제어점을 추출하는 그림이다. 중심  $O_i$ 의 발 단면 컨타워 상의 한점  $A_0$ 는 회전축  $O_iA_0$ 를 중심으로  $\theta_i$  만큼 회전 후  $PA_0$ 으로 이동하게 된다. 변형 전 발 중심축 링크와 점  $A_0$ 사이의 거리는  $r_0$ 이고 라스트 설계를 위하여 MT를 기준으로 발 단층면을 회전 후 발 단층면 상의 한점  $A_0$ 는  $PB_0$ 으로 이동된다.

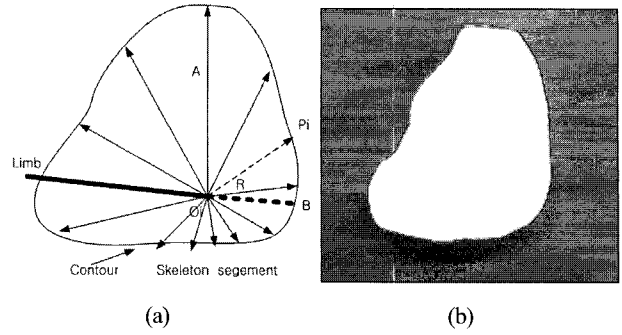


그림 5. 발 단면 분할 컨타워 (a)와 발 조형물의 단면 분할 컨타워 사진 (b).

Fig. 5. The foot cross section contour (a) and cross sectional contour photos foot modeling (b).

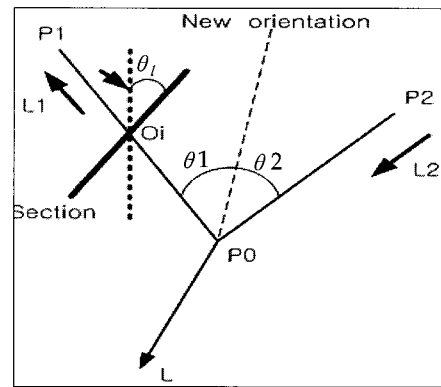


그림 6. 보행시 발 벡터도.

Fig. 6. During walking of foot vector.

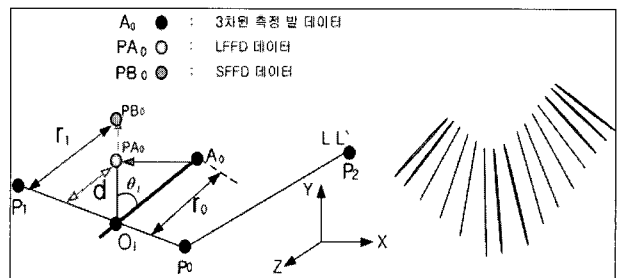


그림 7. 단면층에 대한 스케일 팩터.

Fig. 7. Scale factor for the cross section surface.

여기서,  $PA_0$ 는  $PB_0$ (링크 축과 거리가  $r_0$  이며  $O_i, PA_0$  선상에 놓인 점)로 되며 라스트 설계를 하기위한 발 각 단면층에 대한 축소, 확대 시키는 스케일링 팩터는 이때 이동한 점  $PA_0$ 와  $O_i$ 사이의 거리  $\overline{O_iPA_0}$ 는 (3)과 같이 나타낸다.

$$\overline{O_iPA_0} = \frac{r_0 * \overline{O_iPA_0}}{O_iA_0} \tag{3}$$

여기서  $r_0$ 는  $O_i$ 와  $A_0$ 사이의 거리이다. (3)에서 점  $PA_0$ 에서  $PB_0$  변형하기 위한 변형량은 선분  $\overline{O_iPB_0}$ 로 (4)와 같이 나타낸다.

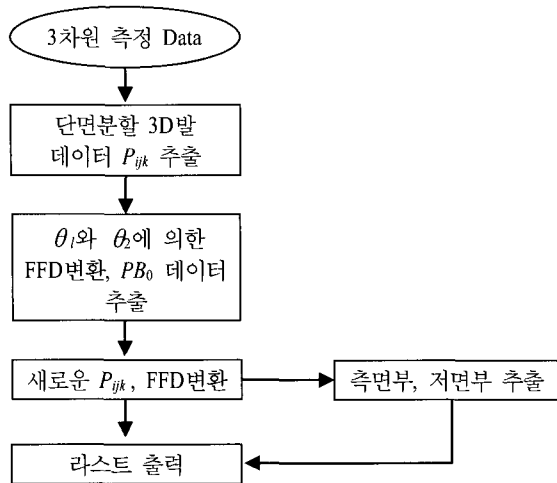


그림 8. 단면분할 FFD 3D 라스트 순서도.  
Fig. 8. Cross sectional FFD 3D last flowchart.

$$\overline{O_iPB_0} = \frac{r_1}{|d|} * |\overline{O_iPA_0}| \quad (4)$$

여기서 d는 점  $O_i$ 와  $PA_0$ 사이의 거리이다. 이렇게 발 3차원 데이터  $PA_0$ 를 3차원 라스트 데이터  $PB_0$ 로 변환하기 위해서는 FFD 변형되어진 격자점들을 새로운 격자점으로 대체한 후 새로운 FFD를 적용해야한다. 새로운 격자점  $5*4*4$ 으로 FFD를 적용하면 점  $PA_0$ 는 점  $PB_0$ 로 이동하게 되며, 그 결과 3차원 라스트 데이터가 형성되게 된다. 이때 변형량  $\overline{O_iPB_0}$ 는 (4)와 같으며, (4)는 점 하나에 대해서 나타낸 식이다. 본 논문에서 제안한 단면분할 FFD를 하기 위해서는 (4)의  $PB_0$ 가 FFD 변형을 하기위한 (2)의  $X_{ffd}$ 와 두식은 같게 놓고 변형하기위한 제어점  $P_{ijk}$ 을 구하면 단면 분할 FFD라스트 설계안을 통한 FFD변형을 계산 할 수 있는 공식이 된다. (5)를 유도 할 수 있다.

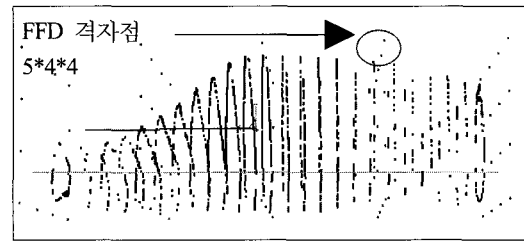
$$P_{ijk} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^l P_{ijk} B_i^m(s) B_j^n(t) B_k^l(u) = \frac{r_1}{|d|} * |\overline{O_iPA_0}|}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^l B_i^m(s) B_j^n(t) B_k^l(u)} \quad (5)$$

이렇게 계산되어진 새로운 제어점  $P_{ijk}$ 을 가지고 단면 분할 3D 라스트 FFD 변형을 가하기 위한 전체적인 프로그램 순서도를 그림 8에 나타내었다.

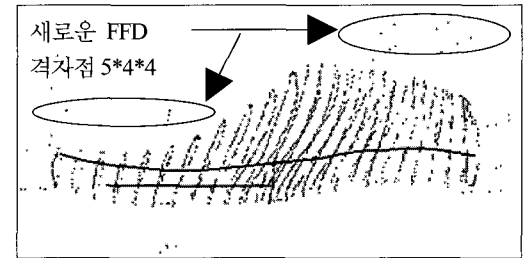
**IV. 실험 및 결과**

본 논문에서는 발의 림브를 단면 분할법을 이용하여 복잡한 3D 데이터를 손쉽게 처리 할 수 있도록 단면층으로 분할하였다. 그림 9은 단면 분할법을 적용하여 3D 라스트 데이터를 FFD로 변형을 주었을 때 그림을 나타낸다.

단면 분할 FFD로 변형을 주기전 그림 9(a)와 FFD 변형을 주었을 때 그림 9(b)에서 알수 있듯이 보행이나 주행동작을 감안하여 10mm의 Toe Room주었으며 엄지발가락 Toe spring을 적용하여 발의 편안함을 함께 할 수 있도록 하였다.



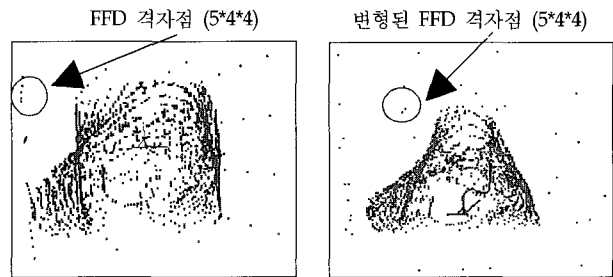
(a)



(b)

그림 9. FFD 변형전의 단면 분할(a)와 FFD 변형을 가한 단면 분할도(b).

Fig. 9. Cross sectional of FFD transformation the before (a) and cross sectional of FFD transformation a later (b).



(a)

(b)

그림 10. 3D 라스트 데이터를 FFD 변형하기 전(a)와 변형 후(b) 단면 분할법 FFD 변형 정면도.

Fig. 10. 3D Last data from FFD transformation a before(a) and after(b) cross sectional FFD transformation the front side.

이 그림에서 알 수 있듯이 단면 분할 FFD 이후 그림 (b)는 라스트 형상을 가짐을 알 수 있었다. 그림 10은 3D 라스트 데이터를 FFD 변형하기전과 본 논문에서 제안한 단면분할법을 이용하여 FFD 변형을 가했을 때 3D 라스트 데이터를 나타내는 정면도이다. 이 그림에서 단면 분할 FFD 변형 이후 발의 모습이 라스트의 모습으로 변형됨을 확인 할 수 있다.

표 1는 그림 9(a) 및 그림 10(a)에서 FFD 변형하기전의 림브를 중심으로 스케일 팩터의 FFD 제어점  $P_{ijk}$ 를 나타낸다. 표 2는 그림 9(b) 및 그림 10(b)에 나타난 것 같이 FFD 변형을 가했을 때의 림브를 중심으로 스캐링 팩터의 FFD 제어점  $P_{ijk}$ 나타낸다. 표 3은 기존 라스트 설계안 및 본 논문에서 제안한 단면 분할 라스트 설계안을 기준으로 제작되어진 라스트에 대한 주요 설계 부위 치수를 비교 하였다.

표 1. FFD 변형전의 스켈링 팩터  $P_{ijk}$ .

Table 1. Scaling factor data  $P_{ijk}$  before FFD transformation.

발 단면층 번호	i	j	k	발 단면층 번호	i	j	k
1	-122	13	-9	14	7	13	-9
2	-112	13	-9	15	17	13	-9
3	-102	13	-9	16	27	13	-9
4	-92	13	-9	17	37	13	-9
5	-82	13	-9	18	47	13	-9
6	-72	13	-9	19	57	13	-9
7	-62	13	-9	20	67	13	-9
8	-52	13	-9	21	77	13	-9
9	-42	13	-9	22	87	13	-9
10	-32	13	-9	23	97	13	-9
11	-22	13	-9	24	107	13	-9
12	-12	13	-9	25	117	13	-9
13	-2	13	-9				

표 2. FFD 변형 후의 스켈링 팩터  $P_{ijk}$ .

Table 2. Scaling factor data  $P_{ijk}$  after FFD transformation.

발 단면층 번호	i	j	k	발 단면층 번호	i	j	k
1	-122.6	32.84	-9	14	7.88	13.26	-9
2	-112.3	32.36	-9	15	17.91	11.59	-9
3	-102.1	32.53	-9	16	27.93	10.07	-9
4	-91.97	30.54	-9	17	37.94	8.75	-9
5	-81.81	29.27	-9	18	47.95	7.69	-9
6	-71.57	27.80	-9	19	57.96	6.91	-9
7	-61.55	26.15	-9	20	67.96	6.44	-9
8	-51.44	24.40	-9	21	77.97	6.35	-9
9	-41.36	22.54	-9	22	87.97	6.65	-9
10	-31.29	20.62	-9	23	97.97	7.41	-9
11	-21.23	18.68	-9	24	107.9	8.66	-9
12	-11.10	16.75	-9	25	117.9	10.46	-9
13	-1.141	14.88	-9				

표 3. 라스트 주요 설계 부위 치수 비교.

Table 3. Major part comparison between conventional last design method and cross sectional FFD method.

명 칭	기존 설계안 (mm)	단면분할 FFD (mm)	편차 (기존설계안 / 단면 분할 FFD)*100%
중창 길이	267.01	267.01	100
중창의 내측 볼 너비	38.8	39.18	99
중창의 외측 볼 너비	61.02	60.08	101
중창의 1중족 길이 ~ 뒤꿈치 끝길이	168.1	168.21	101
중창의 5중족 길이 ~ 뒤꿈치 끝길이	149.8	150.7	99
중창의 발꿈치 길이	41.05	42.03	97

표 3에서 알 수 있듯이 기존 설계안으로 제작된 라스트와 본 논문에서 제안한 단면 분할 FFD 라스트 설계안의 편차가 ±1~3%내에 있음을 알 수 있다.

V. 결론

발의 형태는 개인에 따라 많은 차이가 있으며 이러한 차이를 충분히 고려해야하는 맞춤형 신발 제작에는 정확한 발의 데이터가 필수적이다. 본 논문에서는 이러한 맞춤형 신발 제작을 위해 측정된 발의 3차원 형상에서 신발 제작 과정 중 라스트를 설계하는데 필요한 3D 라스트 데이터를 산출해냈다. 본 논문에서 제안한 단면 분할법을 적용하여 FFD 변형을 가했을 때 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

첫째, 본 연구에서 제안한 설계 기법은 기존의 라스트 설계가 라스트 전문인의 눈과 손에 의해서 설계되어 한 달 이상의 설계 기간이 소요한 것에 비하여 발의 3차원 형상을 측정하여 라스트 설계를 위한 데이터를 추출하는 소요시간을 1분으로 처리하여 라스트 설계 시간을 비약적으로 단축시켰다.

둘째, 라스트 설계시 사람의 손으로 직접 발 데이터를 측정하여 라스트 제작을 하므로 많은 오차가 발생한다. 본 논문에서는 단면 분할법을 이용한 FFD 라스트 설계안을 3차원 측정데이터에 적용하여 컴퓨터 프로그램으로 처리하여 설계에서 나타나는 오차를 최대한 줄이도록 하였다.

셋째, 측정되어진 3D 발 데이터에 림브션을 넣어 림브션을 기준으로 3D 발 데이터를 단면 분할법을 이용하여 FFD 변형하였다. 변형 후 복잡한 3D 발 데이터를 손쉽게 처리할 수 있도록 2D 데이터로 변형하여 3D 라스트를 측정자의 발과 같은 라스트 설계를 할 수 있었다.

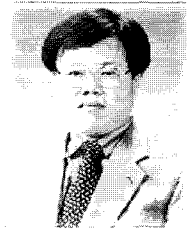
참고문헌

- [1] R. C. Adrian(Brown shoe Company), "American Last Marking," 1991.
- [2] 박인덕, 임창현, 김시경, "FFD를 이용한 3차원 라스트 데이터 생성 시스템," 제어·자동화·시스템 공학 논문지. vol. 9, no. 9, pp. 700-706. 2003.
- [3] M. Mochimaru, Y. Fukui and E. Tsutsumi "Classification of 3D foot shape based on inter-shape distance using the FFD method," *Japan ergonomics society*, vol. 33, no. 4, pp. 229-234, 1997.
- [4] S. Jianhua, and Thalmann, D. Thalmann, "Human Skin Deformation from Cress-Sections," *Computer Graphics International*, vol. 18, no. 4, pp. 443-452, 1994.
- [5] T. W. Sederberg and S. R. Parry, "Free-from deformation of solid geometric models," *Computer Graphics*, vol. 20, no. 4, pp. 151-160, 1986.
- [6] R. MacCracken and K. Joy, "Free form deformation with lattices of arbitrary topology," *Computer Graphic*, pp. 181-188, 1996.
- [7] C. Rezk-Salama, M. Scheuring, and G. Soza, "Fast volumetric deformation on general purpose hardware," *ACM Press*, pp. 17-24, 2001.



**박인덕**

1969년 7월 2일생. 1995년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 1997년 명지대학교 대학원 졸업(석사). 2005년 공주대학교 전기전자정보공학과 대학원 졸업(박사).



**김시경**

1964년 5월15일생. 1986년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1994년 Texas A&M University 졸업(박사). 1994년~현재 공주대학교 전기전자정보통신 공학부 부교수.