[Original Article]

Producing the insoles for flat feet of senior men using 3D systems based on 3D scanning, 3D modeling, and 3D printing

Seol Young Oh and Dongae Suh^{**}

Symbiotic Life-TECH, Yonsei University, Korea

Dept. of Design, Myongji University, Korea^{*}

3D 스캐닝, 3D 모델링, 3D 프린팅 기반의 3D 시스템에 의한 시니어 평발용 인솔 제작

오 설 영 · 서 동 애[†]

연세대학교 심바이오틱 라이프텍 연구원, 명지대학교 디자인학부^{*}

Abstract

This study aimed to create 3D-printed insoles for flat-footed senior men using 3D systems. 3D systems are product-manufacturing systems that use 3-dimensional technologies like 3D scanning, 3D modeling, and 3D printing. This study used a 3D scanner (NexScan2), 3D CAD programs including Rapidform, AutoCAD, SolidWorks, Nautas+ compiling program, and a 3D printer. In order to create insoles for flat-footed senior men, we analyzed horizontal sections of 3D foot scans. We selected 20 flat-footed and 20 normal-footed subjects. To make the 3D insole models, we sliced nine lines on the surface of the subjects' 3D foot scans, and plotted 144 points on the lines. We calculated the average of these 3D coordinates, then located this average within the 3D space of the AutoCAD program and created 3D sole models using the loft surface tools of the SolidWorks program. The sole models for flat feet differed from those of normal feet in the depth of the arch at the inner sideline and the big toe line. We placed the normal-footed sole model on a flat-footed sole model, and the combination of the two models resulted in the 3D insole for flat feet. We printed the 3D modeled insole using a 3D printer. The 3D printing material was an acrylic resin similar to rubber. This made the insole model flexible and wearable. This study utilized 3D systems to create 3D insoles for flat-footed seniors and this process can be applied to manufacture other items in the fashion industry as well.

Received May 03, 2017

Revised May 30, 2017

Accepted June 07, 2017

[†]Corresponding author
(danaesuh@mju.ac.kr)

ORCID

Seol Young Oh

<http://orcid.org/0000-0002-4648-6080>

Dongae Suh

<http://orcid.org/0000-0003-0627-0805>

This research was supported
by the research fund of
Myongji University in 2016.

Keywords: 3D foot scan(3D 발 스캔), 3D solid modeling(3D 솔리드 모델링), 3D printing(3D 프린팅), flat feet(평발), insoles(인솔)

I. Introduction

발에는 인체를 지지하고 모든 체중을 받쳐주며, 보행 시 충격을 흡수하고 분산시

키는 완충 역할을 할 수 있도록 수많은 인대, 골격, 근육들이 접합, 배열되어 있다. 발바닥의 뼈들은 체중을 분산시키기 위해 활같이 휘어져 아치를 형성하고 있으며, 발 아치와 지면사이의 공간은 에어펌프의 역할을 하여 보행 시 충격을 완화하고, 체중이 한 부분에 집중되지 않게 분산시킨다(Kim, 2001; Kim, 2003; Park et al., 2009). 발아치의 형태가 비정상적이면 걸을 때 발의 피로감이 증가하고, 균형 감각이 떨어져 운동 능력이 저하된다. 정상적인 발아치의 높이는 2.3cm 정도이며, 정상보다 발아치가 낮으면 평발, 높으면 오목발로 분류된다(Jang, 2012).

평발은 발아치가 비정상적으로 낮아지거나 소실되어 발바닥 안쪽이 편평하게 변형된 상태로, 아치를 통한 충격 흡수가 어려워 몸 전체에 피로감을 주며, 장시간 보행 시 통증을 느낀다(Flatfoot, n.d.). 나이가 들면서 나타나는 노화, 체중 증가, 생활 습관 등으로 발아치 유지를 돕는 힘줄과 뼈를 받쳐주는 근육 및 인대가 퇴화하면서 아치가 내려앉게 되어 발볼이 넓어지고, 발바닥이 평평해져 평발의 비율이 증가하게 된다. 평발은 정상발에 비해 중족부에서 발과 바닥과 닿는 접지 면적이 많기 때문에 보행 장애가 나타나게 되는데, 평발에 인soles 삽입하면 정상발과 유사한 발아치의 형태가 만들어지면서 정상적인 접지 면적이 형성되고, 발 전체로 압력 분산이 되어 정상 보행이 가능하게 된다(Kim, 2011).

의학 분야에서는 의사의 문진과 방사선 사진 촬영으로 발바닥을 이루는 뼈와 관절의 각도로 평발을 진단하는데 비해, 신발 및 신발 보조용품 분야에서는 정상발과 평발의 분류를 위해 지면과 닿는 발 바닥면의 2D 이미지를 수집하여 분석하는 방법이 주로 사용된다. 기존에는 잉크를 묻힌 발을 족문기에 올려놓고, 발바닥 지문을 찍어 중족부의 형태를 분석하거나(Coughlin & Kaz, 2009; Kang, 2012; Kim, 2001; Kim, 2003; Kim, 2011), 아크릴 판 아래에 평판스캐너를 놓고 발바닥면의 2D 이미지를 스캔하는 방법이 주로 사용되었다(Kim, 2013; Park, 2005). 최근에는 기존의 잉크를 사용한 발 지문 측정 방법을 보완하여, 3D 발 스캔 데이터로부터 디지털 발 지문을 수집하는 방법이 시도되고 있으며(Lee, Lin, & Wang, 2014), 기술이 발전할수록 발바닥 데이터의 수집은 3D 스캐닝 기반으로 발전할 것으로 예상된다.

발 지문 데이터를 수집한 선행 연구들을 살펴보면, 동적 발 지문을 찍을 때는 족문기에 오른쪽 발을 얹고 체중 전체를 오른쪽 발에 옮긴 후, 수 초간 상태를 유지하였다가 천천히 발을 떼어내었을 때 찍힌 발바닥의 잉크 자국을 사용하고(Coughlin & Kaz, 2009; Kim, 2001; Kim, 2003), 정적 발 지문을 찍을 때는 족문기 위에 발을 올린 상태에서 무릎을 2번 구부렸다가 핀 후 발을 떼어내어 발바닥 전체에 체중의 압력이 충분히 가해져 발 지문이 선명하게 찍힐 수 있도록 한다(Kang, 2012). 그러나 3D 발 스캐너는 오른쪽 발을 스캐너 안에 넣고 체중을 양쪽 발에 골고루 분산시킨 상태에서 발의 3D 형상을 수집하게 되는데, 이 경우 체중이 분산되기 때문에 족문기로 동적 및 정적 발 지문을 측정한 경우보다 지면과 발바닥이 닿는 면이 적게 나타난다. 따라서 발아치 유형 분류를 위해 3D 발 형상을 분석할 때 바닥면과 3D 스캔 형상 데이터가 맞닿은 접지면의 형상만을 관찰하는 것은 측정 시 가해진 체중의 힘이 다르기 때문에 적합하지 않다. 이를 보완하기 위해 Lee et al.(2014)은 3D 발 스캔 데이터로부터 디지털 발 지문 데이터를 수집할 때, 접지면이 아니라 바닥면에서 1.5mm 올라간 수평면을 기준으로 발의 3D 메쉬 표면과 만나는 윤곽선을 따라 발 지문을 그린 후, AutoCAD 프로그램에서 치수를 측정하였다. 그러나 3D 스캔 데이터로부터 2D 발 지문을 수집한 연구가 아직 많지 않아, 발바닥 면 수집을 위한 수평면의 최적 위치에 대한 더 많은 논의가 필요하다.

수집한 발바닥 데이터에서 발바닥 편평도를 파악하는 방법 또한 다양하다. 발 지문에서 전족 폭에 대한 중족 폭 비율을 지수로 나타낸 Chippaux-Smirak Index(CSI)이나 발 지문의 후족 폭에 대한 중족 폭 비율 지수인 Stahelis Arch Index(SAI)를 사용하기도 하며(Kang, 2012), 전족부, 중족부, 후족부의 면적을 각각 측정하고 발바닥 전체의 면적에 대한 중족부 면적 비율인 Arch Index(AI)를 구하기도 한다(Murley, Menz, & Landorf, 2009). 발 안쪽 점과 발뒤꿈치 안쪽 점을 연결한 스타크선(Stalk line)과 세 번째 발가락과 발뒤꿈치 중심을 연결한 마이어선(Meyer line)을 긋고, 이 두 선의 이등분선과 발바닥 지문이 닿는 정도에 따라 발의 평발을 판정하는 Meyer & Stalk 방법도 사용된다(Choi, 2005).

인솔(insole)은 신발 안쪽에서 발을 받쳐주는 중창 부분을 말하며, 발바닥 형태로 제작되는 경우가 대부분이다(Jang, 2012). 한국 산업 규격의 구두용 조립식 중창규격(KS G 3406: 1994)에 따르면(Korean Agency for Technology and Standards, 2014), 인솔은 평균 체중을 지탱할 수 있는 충분한 강도와 견고성을 지녀야 하며, 하중을 반복적으로 연쇄 순환시킬 수 있는 탄력성을 지니고, 보행 시 추진력과 착용 시 안정감을 주어야 한다. 이러한 인솔은 발바닥과 신발 사이에서 착화감을 높이는 쿠션 역할을 하며, 발바닥에 가해지는 압력 하중을 효율적으로 분산시켜 보행에 도움을 주는 의료 보조 기구의 역할을 한다(Song, Kim, Kim, & Lee, 2016). 보조기구용 인솔은 외적인 요인에 의하여 변형된 발에 이상적인 발아치를 제공한다. 적합한 용도의 인솔을 착용하면 변형된 발 뼈, 인대, 근육 등의 구조가 정상적으로 바뀌어 자세를 바르게 유지하고, 발에 가해지는 충격을 흡수함으로써 발은 물론 몸 전체의 피로감을 감소시킬 수 있다(Park et al., 2009). 발 아치에 쿠션을 주는 기능성 인솔을 착용하면 족압의 접촉 면적이 높아지고, 근육피로도가 낮아지며 착용자의 만족도가 높아진다(Min et al., 2016). 국내 인솔 업체에는 기능성 인솔, 스포츠용, 평발 교정용, 충격흡수용 인솔 등, 다양한 용도의 제품들을 생산하고 있으나, 축적된 전문 기술과 정량적 데이터를 기반으로 개발된 제품들이 아니기 때문에 제품의 성능 및 효과에 대한 신뢰성은 아직 낮은 편이다(Kim, 2015).

의학의 발전으로 인해 전 세계가 고령화 사회로 접어들면서, 시니어(senior) 세대의 건강과 삶의 질 향상은 중요한 이슈이다. 발은 성, 연령, 체형, 보행 습관에 영향을 받는데, 고령자의 경우 근육 퇴화 및 장기간의 신발 착용으로 발 변형이 발생한다(Kim, 2013). 노화가 진행되면 발바닥 지방층이 얇아지고 발아치가 내려가게 되어, 발의 피로를 쉽게 느끼고 여러 종류의 발 질환을 겪게 된다. 매년 65세 이상 고령자의 30%가 낙상을 경험하는데, 노화로 인한 생리적 요인이나 질병과 같은 내적 요인뿐만 아니라 부적절한 보행 보조기 및 신발 착용과 같은 외적 요인이 복합적으로 상호작용하여 치명적인 낙상을 일으키는 것으로 보고되고 있다(Lee et al., 2007). 따라서 시니어 세대의 발 형태를 실증적으로 반영한 인간공학적 인솔

제품의 개발 및 보급이 시급하다.

3D 스캐너와 3D 프린터와 같은 3D IT 기술이 비약적으로 발달함에, 따라 신발 및 발 연구 분야에서도 3D 시스템이 활발히 적용되고 있다. 2005년 제5차 및 2010년 제6차 한국인 인체치수 조사사업(SizeKorea)은 전 연령대를 대상으로 3차원 발 스캐너로 수집한 3D 형상 데이터와 자동 계측 프로그램으로 측정된 24개 항목의 발 치수 데이터를 산업체와 학계에 제공하여, 3D 발 형상 연구가 활발하게 진행되는 기폭제가 되었다. 3D 발 스캔 형상 데이터와 3D 발 치수를 기반으로 한 연구는 3D 발 유형 분류(Choi, 2005; Lee & Kwon, 2008; Leem, Bang, & Shin, 2007; Seok & Park, 2007), 3D 스캔 데이터를 이용한 라스트 제작(Choi, 2015; Lee, 2004; Oh & Kim, 2013; Shi, Yi, Xiong, & Jiang, 2009; Xiong, Zhao, Jiang, & Dong, 2010), 3D 발 형상 분류에 의한 신발 치수체계(Butdee & Tangchaidee, 2008; Kim, 2013; Park, 2005), 3D 형상을 이용한 신발(Song & Kim, 2004) 및 인솔개발(Park et al., 2009) 등 다양한 분야로 발전하였다. 최근에는 3D 프린팅 인솔(Kim, 2015; Lim, 2016; Song et al., 2016)이나 3D 프린팅 라스트(Oh, Suh, & Kim, 2016)가 제작되는 등 발 연구 분야에서 3D 프린팅을 통한 연구도 폭넓게 진행되고 있다. 그러나 3D 발 스캔 데이터를 활용하여 발아치의 곡면 형태를 분석하고, 이를 제품개발로 연결하는 실증적인 연구는 아직 미비한 실정이다. 한국인 인체치수 조사사업(SizeKorea)에서는 자동 계측 프로그램을 사용하여 3D 스캔한 발 형상에서 부위별 길이, 둘레, 높이, 너비, 각도 치수를 측정하고 있지만, 발바닥의 아치의 형상을 파악할 수 있는 치수는 측정 항목에 포함되어 있지 않다. 3D 발 스캔 데이터를 연구 목적에 맞게 가공하면, 기존에 발바닥 및 발아치 연구에서 2D 이미지의 발 지문 자료로만 분석해 왔던 방법적 한계를 극복하고, 3D 발바닥 형상으로부터 3D 좌표 측정과 곡률의 정량적 분석이 가능해질 것이다.

신발제조 분야에서 3D 프린터는 이미 상용화 단계에 있다. 퓨마(Puma)와 리복(Reebok)은 제품 설계에 소요되는 시간을 단축하기 위해 프로토타입 제작 시 3D 프린터를 사용하고 있으며("How 3D printing", 2013), 나이키(Nike), 아디다스(Adidas), 뉴발란스(New Balance), 언더아머(Under Armor) 등 해외 주요 신발

브랜드들은 3D 프린팅 스포츠화의 상용화 기술을 보유하고 있다(Benedict, 2016). 특히 3D 시스템의 상용화는 맞춤형 인솔 분야에서 부상하고 있다. 과거 인솔제작은 석고로 발 모형을 뜬 후, 모형에 맞는 인솔의 높이를 전문가가 결정하여 제작하는 방식이었다. 이러한 수작업 방식은 과정이 복잡하고, 축적된 기술을 가진 전문가가 필요하며, 많은 제작 시간이 소요된다. 그러나 3D 스캐너와 3D 프린터와 같은 3D 기기가 보급되면서 인솔의 제작 과정 단축이 가능하게 되었다. 3D 스캐너를 사용하면 발의 치수를 프레임 단위로 측정하고 정합하여 정밀한 3D 인솔 모델을 생성할 수 있으며, 모델링한 인솔은 3D 프린터를 사용하여 원하는 소재로 출력할 수 있다(Song et al., 2016). 맞춤형 3D 프린팅 인솔 제조업체인 위브(Wiivv)는 고객이 스마트 앱을 사용하여 다섯 방향의 발 사진을 촬영하여 보내면, 사진에서 발 윤곽을 캡처하여 발 아치와 발뒤꿈치에 200개의 포인트를 만들어 맞춤형 인솔을 모델링하고, 3D 프린터로 제작하여 10일 이내에 완제품을 고객에게 발송한다(Benedict, 2017). 피츠인솔(Phits Insoles)의 맞춤형 인솔 제작 시스템인 Phits Expert Workflow에서는 footscan® 시스템을 사용하여 개인의 동적 보행 특성과 정적인 발 형태 데이터를 수집하고, 이를 분석하여 디자인한 인솔을 3D 프린터로 출력한다(Phits, n.d.b). 피츠인솔은 2016 리우 올림픽에서 12명의 선수들에게 고품질의 맞춤형 3D 프린팅 인솔을 제공하였으며(Phits, 2016), 이러한 맞춤형 인솔은 경기력 향상을 원하는 운동선수뿐만 아니라, 족저근막염 및 중족골에 이상이 있거나, 발 부위에 상해를 입은 사람들이 발의 기능을 회복할 수 있도록 도와준다(Phits, n.d.a). 이와 같이 해외의 경우 디자인 개발 단계에서부터 완제품 제조에 이르기까지 생산의 모든 단계에서 3D 프린팅 기술이 활용되고 있으나, 국내에서는 컨셉 디자인 단계에서 3D 프린터를 사용하는 것이 대부분이다. 국내 제조업의 국제 경쟁력을 높이기 위해서는 3D 스캐닝과 3D 프린팅을 연계한 다양한 3D 시스템 콘텐츠를 개발할 필요가 있다(Oh et al., 2016).

본 연구는 의류산업분야에서 웨어러블(wearable) 제품의 생산에 3D 기술 적용의 가능성을 확인하고 의류제품에 맞는 효율적인 3D 스캐닝, 3D 모델링, 3D 프린팅의 3D 시스템 제작 프로세스를 제안하고자 하

였다. 이를 위해 시니어 남성의 3D 발 스캔 데이터를 가공하여, 평발의 발 아치에 적합한 인솔의 3D 모델링을 구현하고, 유연한 재질로 3D 프린팅하여 착용 가능한 시니어 평발용 인솔을 3D 시스템 기반으로 제작하였다. 이와 같은 3D 시스템 프로세스는 기능성 인솔 제품뿐 아니라, 다양한 의류패션분야의 제품설계에서 활용이 가능하다.

II. Research Process

본 연구는 3D 시스템을 기반으로, 고령화 사회로 인해 급속히 증가하는 시니어 세대를 위한 평발용 인솔을 제작하였다. 이를 위해 제6차 한국인 인체치수 조사사업에서 수집한 만 60세 이상 69세 이하 남성 189명의 3D 발 스캔 데이터를 가공하여 발바닥의 수평단면 이미지를 수집한 후, 정상발과 평발 유형을 분류하고, 유형을 대표하는 평균 피험자를 20명씩 각각 선정하였다. 선정된 피험자들의 3D 발 스캔 형상에서 수직단면선을 추출한 후 3D 좌표를 측정하였으며, 평균 3D 좌표를 각각 연결하여 평발과 정상발의 유형별 발바닥 곡면을 3D 모델링하였다. 정상발과 평발의 발바닥 곡면은 발아치 형상에서 차이가 있었으며, 평발 유형의 3D 모델링 곡면 위에 정상발 유형의 3D 모델링 곡면을 중첩하여 평발에게 정상적인 발아치 곡면을 제공하는 3D 인솔을 모델링하였다. 인솔 모델은 신발 안에 부착이 가능하며 착용 시 보행에 불편함이 없도록 연질의 아크릴계 레진을 사용하여 SLA 방식의 3D 프린터로 출력하였다. 3D 시스템을 이용하여 시니어 평발용 인솔 제작을 위한 본 연구 프로세스는 <Fig. 1>과 같다.

III. Methods and Results

1. Collecting data & classifying foot types

1) Collecting 3D foot scan data

본 연구는 2012년 제6차 한국인 인체치수 조사사업(SizeKorea)에서 수집한 3D 스캔 자료 중 60대(60~69세) 성인 남성의 3D 발 스캔 데이터를 분석하였다. 3D 발 형상 스캐닝 및 3D 발 치수 자동계측에 사용된 시스템은 (주) K&I Technology System의 Nex-

<Fig. 1> Research process

Scan2 기종이었으며, 3D 스캔된 발 형상은 포인트 클라우드로(Point Cloud)로 수집된 후 폴리곤(Polygon) 형태로 저장되었다. K&I Technology의 자동계측 프로그램에 의해 총 24개 항목의 치수가 측정되었으며, 60대 남성의 3D 발 형상 데이터 205개 중에서, 자동계측 프로그램에서 측정한 총 24개의 발 관련 항목에 대해 측정 항목별 결측치가 없고, 3D 발 형상에 오류가 없는 189개의 발 스캔 데이터가 연구 자료로 최종 선정되었다.

2) Processing horizontal sections of 3D foot scan data

본 연구에서는 3D 스캔 데이터를 활용하여 평발 유형 분류가 가능하도록 최적의 발바닥 수평단면도(Horizontal Section, HS)를 구하는 방법을 고안하였다. Lee et al.(2014)의 선행 연구를 참고하여, 3D 발 데이터를 바닥면에서부터 1mm 간격으로 슬라이싱하여 XY평면과 평행한 11개의 수평단면도를 추출한 후, 정상발, 평발, 오목발의 유형 분류에 최적인 수평단면도가 관찰되는 발바닥 높이를 확인하였다. 수평단면도 추출에는 Rapidform 2004 프로그램을 사용하였으며, 폴리곤 형태의 3D 발 데이터(Fig. 2(a))를 바닥면(XY평면)에서부터 10mm 높이까지 1mm 간격으로 슬라이싱하여 폴리라인(Polyline) 형태의 발바닥 수평단면도(Fig. 2(b))를 가공하였다. 총 HS1부터 HS11까지 11개의 발바닥 수평단면도가 제작되었다(Fig. 2(c)).

발바닥 수평단면도를 분석한 결과, 선행 연구(Kim, 2001; Kim, 2003)의 발 지문 분석에서 기준으로 사용한 7개의 기준점과 3개의 기준선이 모두 관찰된 수평선의 높이는 바닥면에서 2mm 높이의 수평단면도(HS3)였다. 발아치 유형에 필요한 기준점을 모두 표시하면서 발아치의 높낮이를 시각적으로 표현하기 위해, 최종적으로 바닥면을 지나는 수평단면도(HS1), 바닥에서 1mm 떨어진 수평단면도(HS2), 바닥에서 2mm 떨어진 수평단면도(HS3)의 3단계로 이루어진 등고선을 발바닥 유형 분석을 위한 데이터로 사용하였다.

<Fig. 2> Horizontal sections of sole for foot types

3) Classifying foot arch types; normal, flat, and concave foot

(Fig. 2)에서 추출한 등고선 형태의 수평단면도로 부터 발아치 유형을 정상발, 평발, 오목발로 분류하였다. 바닥에서 2mm 떨어진 발바닥 수평단면도(HS3)에서 발볼 내측 바깥 점(1)과 발뒤꿈치 내측 바깥 점(2)을 지나는 접선(A)과, 발볼 외측 바깥 점(3)과 발뒤꿈치 외측 바깥 점(4)을 지나는 접선(B)을 그리고, 두 선이 만나는 점(6)을 표시한 후, 이 점과 두 번째 발가락의 중심(5)을 연결한 직선(C)을 그렸다. 발바닥 수평단면도에 그린 중심선(C)보다 바깥쪽에 발아치(7)가 있는 경우, 정상발(Fig. 3(a)), 중심선(C)보다 안쪽에 발아치(7)가 있는 경우는 평발(Fig. 3(b)), 발바닥 수평단면도에 발아치(7)가 나타나지 않는 경우는 오목발로 분류하였다(Fig. 3(c)). 60대 남성($n=189$)의 3D 발 스캔 자료로부터 추출한 발바닥 수평단면도를 분석한 결과, 정상발 139명(73.5%), 평발 50명(26.5%)으로 분류되었으며, 오목발 유형은 분류되지 않았다.

4) Selecting average subjects by foot types

발 유형별 평균 발바닥 곡면을 구하기 위해, 60대 남성의 정상발과 평발을 대표할 수 있는 피험자들을 각각 20명씩 선정하였다. 발아치 유형 분류에서 정상발로 분류된 139명과 평발로 분류된 50명의 자동계측 치수 중에서, 발직선길이(①), 발너비(⑤), 발등높

이(⑧), 발등둘레(⑬)의 치수가 한국인 인체치수 조사사업의 60대 남성 전체($n=189$) 평균값에 가까운 대표 피험자를 각각 20명씩 선정하였다. 선정된 정상발 대표 피험자($n=20$)와 평발 대표 피험자($n=20$)의 발 치수는 <Table 1>과 같았으며, 60대 남성 평균 발 치수와 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 선정된 발 유형별 대표 피험자들의 전체 평균은 발직선 길이 243.46mm, 볼둘레 251.74mm로, 기술표준원의 신발의 치수체계(KS M 6681 : 2007)에 따르면 245EEE에 해당하였다(Korean Agency for Technology and Standards, 2012).

2. Analysis of sole surface

1) Measuring 3D coordinates of sole surface

발 유형별 대표 피험자의 3D 발 데이터에서 정량적 분석이 가능한 3D 좌표 데이터를 얻기 위해, 발바닥 곡면을 이루는 주요 변곡점을 따라 9개의 수직 단면 기준선을 설정하고, 각각의 기준선 위에 등 간격으로 기준점을 총 144개 만든 후, 각 포인트의 3D 좌표 값을 측정하였다. 3D 발 데이터의 수직 단면선 형성과 발바닥 곡면 기준선 및 기준점 선정과 측정 방법은 다음과 같다(Fig. 4).

Step. 1. 수직단면선 슬라이싱: 3D 발 데이터 위에 XZ평면과 평행한 참조평면을 1mm 간격으로 형성한 후, 3D 폴리건 데이터와 참조평면이 만나

<Fig. 3> Classification of foot types using horizontal sections of sole

<Table 1> Measurements of 3D foot scan data

(Unit: mm)

Measurement	Subjects						SizeKorea (n=189)		
	Normal (n=20)		Flat (n=20)		Total (n=40)				
	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
① Foot length	244.45	10.12	242.42	8.92	243.46	9.49	243.83	10.74
	② Heel-to-toe 1 length	244.40	10.14	241.47	8.68	242.97	9.45	243.36	10.73
	③ Heel-to-toe 5 length	199.65	7.24	197.79	7.30	198.74	7.24	199.86	9.018
	④ Heel-to-instep length	136.40	10.45	133.47	6.88	134.97	8.90	132.57	9.51
	⑤ Foot breadth	94.85	5.57	96.05	3.67	95.44	4.72	96.07	5.06
	⑥ Ball distance	97.95	5.73	98.89	3.45	98.41	4.72	98.99	5.07
	⑦ Ball height	35.55	2.52	35.79	2.39	35.67	2.43	37.47	3.34
	⑧ Instep height	61.20	4.94	59.58	4.69	60.41	4.83	62.39	5.16
	⑨ Lateral malleolus height	69.30	4.62	66.00	5.41	67.69	5.23	67.41	4.64
	⑩ Heel height	26.35	5.93	25.00	3.48	25.69	4.88	25.02	3.83
	⑪ Height of upper point of heel point	46.00	11.06	43.26	7.19	44.67	9.36	42.59	6.15
	⑫ Ball circumference	250.10	17.01	253.47	12.10	251.74	14.73	258.57	15.02
	⑬ Instep circumference	246.40	13.71	249.00	10.48	247.67	12.15	254.83	13.44
	⑭ Heel-to-instep circumference	378.50	35.39	367.79	19.68	373.28	28.97	370.00	23.99
	⑮ Medial ball length	177.95	8.78	173.95	11.88	176.00	10.46	174.78	11.09
	⑯ Lateral ball length	156.10	7.26	154.37	7.29	155.26	7.24	153.59	8.28
	⑰ Ball center-to-toe 2 length	70.00	13.95	70.95	14.62	70.46	14.09	72.52	10.33
	⑱ Ball center-to-heel length	171.00	12.62	169.16	14.63	170.10	13.49	168.01	11.87
	⑲ Lateral ball width	41.10	4.46	41.16	2.87	41.13	3.72	42.19	4.02
	⑳ Medial ball width	53.65	3.72	54.84	4.03	54.23	3.87	53.66	4.16
	㉑ Toe 1 angle (°)	6.90	9.96	7.84	9.24	7.36	9.50	9.04	11.01
	㉒ Toe 5 angle (°)	17.90	11.57	15.42	11.14	16.69	11.28	16.65	11.33
	㉓ Ball angle (°)	14.15	3.56	13.79	3.92	13.97	3.69	14.13	3.45
	㉔ Center line angle (°)	2.30	0.87	2.47	1.07	2.38	0.96	2.09	1.04

는 경계선을 따라 형성된 폴리라인을 슬라이싱 하여 수직단면선을 추출하였다. 슬라이싱 과정은 Rapidform 2004를 사용하였다.

Step.2. 발바닥 외곽선(SL) 설정: 1mm 간격으로 형성된 수직단면선 위에 발바닥 외곽선(Sole line, SL)을 그렸다. 발바닥 외곽선(SL)은 발가락 두께의 이등분점(1)과 발뒤꿈치점(2)을 지나며, 발바닥을 XY평면 방향에서 내려다보았을 때 중족부 외측 가장 바깥쪽점(3)과 내측 가장 안쪽점(4)을 지나는 점을 연결한 스플라인(Spline) 곡선으로 제작하였다.

Step.3. 발바닥 곡면(Sole) 분리: 가공한 수직단면선을 SL을 따라 두 부분(upper & sole)으로 분리하고, 인솔 제작에 필요한 발바닥 곡면 데이터는 아래 부분의 수직단면선을 사용하였다.

Step.4. 발바닥 기준선 설정: 발바닥 곡면의 변곡점을 포함하는 9개의 단면선을 설정하고, 이를 발바닥 수직기준선(Vertical Section, VS)으로 명명하였다. VS1: 발바닥 내측에서 가장 바깥쪽 선,

VS2: SL의 내측점을 지나는 선, VS3: VS2과 VS4의 중간선, VS4: 첫째발가락 중심점을 지나는 선, VS5: 둘째발가락 중심점을 지나는 선, VS6: 셋째발가락 중심점을 지나는 선, VS7: 넷째발가락 중심점을 지나는 선, VS8: 다섯째발가락 중심점을 지나는 선, VS9: 발바닥 외측에서 가장 바깥쪽 선을 각각 기준선으로 설정하였다.

Step.5. 발바닥 3D 좌표데이터 설정: 9개의 발바닥 수직기준선(VS1~VS9) 위에 등간격의 기준점을 형성하였다. 각 수직기준선의 기준점은 좌표데이터의 손실을 최소화하면서도 계측의 용이성을 위해 선분 길이를 고려하여 등분점으로 설정하였다. 폴리라인의 길이가 긴 VS3, VS4, VS5, VS6, VS7은 20등분하여 총 21개의 등간격 포인트를, 폴리라인의 길이가 짧은 VS1과 VS9은 기준선을 5등분하여 총 6개의 등간격 포인트를 형성하였다. 또한 폴리라인의 길이가 중간인 VS2은 기준선을 15등분하여 총 16개의 포인트를, VS8은 10등분하여 총 11개의 등간격 포인트를 형성하였

<Fig. 4> Processing 3D foot scan data and measuring 3D coordinates of sole

다. 포인트 형성에는 AutoCAD 2011 프로그램이 사용되었으며 총 144개의 포인트가 형성되었으며, 이 점들을 발바닥 3D 좌표데이터로 설정하였다.

Step.6. 발바닥 3D 좌표데이터 측정: 정상발 스캔 데이터($n=20$)와 평발 스캔데이터($n=20$)의 발바닥에 형성된 144개 좌표점의 3D 좌표 값($(X_1, Y_1, Z_1), \dots, (X_{144}, Y_{144}, Z_{144})$)을 각각 측정하였다.

2) Analyzing 3D coordinates of sole surface by foot types

144개 기준점의 3D 좌표를 측정하고, 유형별 평균 값을 구하여 정상발과 평발 발바닥 곡면의 경향을 전족부, 중족부, 후족부로 나누어 분석하였다. 3D 좌표 데이터에서 X좌표는 발바닥의 길이, Y좌표는 발바닥의 너비, Z좌표는 발아치의 높이 경향을 나타내며, 이중 평발용 인솔 제작에 중요한 요인인 발바닥 아치의 높이를 나타내는 것은 Z방향의 좌표 값이다. 각 라인별 3D 좌표데이터 분석 결과는 <Table 2>~<Table 4>와 같다.

발바닥 내측에 위치한 수직기준선 VS1, VS2, VS3의 평균 좌표 값을 살펴보면, VS2에서는 X좌표(P(7)~P(14), P(20)~P(22))와 Z좌표(P(17)~P(22))에서 정상발과 평발의 좌표 값이 3mm 이상 차이가 나타났으

며, VS3에서는 X좌표(P(23)~P(26))와 Z좌표(P(33)~P(38))에서 발 유형 사이에 3mm 이상 차이를 보였다. 특히 VS1~VS9의 모든 기준선들 중 Z좌표 값의 차이가 이 구간에서 가장 크게 나타나, 평발과 정상발의 편평도 차이가 가장 큰 구간이 발바닥 내측선 VS3임을 알 수 있었다(Table 2).

발바닥 중앙부의 수직기준선 VS4, VS5, VS6에서 평발과 정상발의 평균 좌표 값이 3mm 이상 차이를 보인 구간은 VS4의 X좌표(P(44)~P(46))와 Z좌표(P(53)~P(57))였으며, 특히 VS4의 중족부 구간(P(53)~P(57))의 Z좌표 값 차이는 최대 5.185cm로 나타나, 발 유형에 따른 발아치의 높이 차이가 큰 부위임을 알 수 있었다(Table 3).

발바닥 외측부의 수직기준선 VS7, VS8, VS9에서 Z 좌표 값이 3mm 이상 차이를 보이는 구간은 없어, 평발과 정상발의 아치 차이는 없는 것으로 나타났다. 다만, VS8의 전족부, 중족부와 VS9의 중족부의 X좌표 값에 차이가 있어 정상발이 평발보다 앞쪽에 위치하는 것으로 나타났다(Table 4).

유형별 발바닥 곡면의 3D 좌표데이터를 종합하면, X좌표에서 3mm 이상 좌표 값의 차이가 나타난 수직기준선은 VS2, VS3, VS4, VS8, VS9으로, 발바닥의 외측 부위와 내측 부위에서 정상발이 평발보다 크며 발가락과 전족부의 길이가 정상발이 평발보다 길었

<Table 2> Measurements of 3D coordinates: VS1, VS2, VS3

	VS1							Point	VS2							Point	VS3									
	Point	X		Y		Z			Point	X		Y		Z			Point	X		Y		Z				
		Normal	Flat	Normal	Flat	Normal	Flat			Normal	Flat	Normal	Flat	Normal	Flat			Normal	Flat	Normal	Flat	Normal	Flat	Normal	Flat	
Fore foot	-	-	-	-	-	-	-	P(7)	222.920	209.853	89.750	91.650	9.240	9.367	P(23)	241.365	236.640	83.600	83.600	7.885	7.139					
	P(1)	190.336	189.094	94.500	94.800	12.649	11.861	P(8)	213.703	201.732	89.750	91.650	3.077	4.007	P(24)	233.169	229.023	83.600	83.600	0.849	0.675					
	P(2)	185.444	183.867	94.500	94.800	7.816	8.158	P(9)	202.227	191.666	89.750	91.650	3.004	3.841	P(25)	221.308	217.698	83.600	83.600	0.150	0.034					
	P(3)	178.513	177.308	94.500	94.800	6.456	6.953	P(10)	190.746	181.606	89.750	91.650	3.013	4.288	P(26)	209.434	206.325	83.600	83.600	0.652	0.337					
	P(4)	171.584	170.648	94.500	94.800	7.794	7.750	P(11)	179.268	171.571	89.750	91.650	3.000	5.114	P(27)	197.564	194.956	83.600	83.600	0.572	0.270					
	P(5)	165.447	164.575	94.500	94.800	11.313	10.533	P(12)	167.880	161.648	89.750	91.650	4.401	6.817	P(28)	185.669	183.575	83.600	83.600	0.241	0.043					
Mid foot	P(6)	164.270	161.830	94.500	94.800	17.487	16.089	P(13)	156.824	151.839	89.750	91.650	7.445	9.091	P(29)	173.767	172.190	83.600	83.600	0.362	0.122					
	-	-	-	-	-	-	-	P(14)	146.181	142.184	89.750	91.650	11.752	11.955	P(30)	162.076	160.900	83.600	83.600	1.930	1.178					
	-	-	-	-	-	-	-	P(15)	135.340	132.415	89.750	91.650	15.524	14.399	P(31)	150.639	149.749	83.600	83.600	4.963	3.295					
	-	-	-	-	-	-	-	P(16)	124.236	122.487	89.750	91.650	18.427	16.067	P(32)	139.223	138.577	83.600	83.600	8.194	5.322					
	-	-	-	-	-	-	-	P(17)	112.916	112.447	89.750	91.650	20.318	16.827	P(33)	127.737	127.346	83.600	83.600	11.078	6.929					
	-	-	-	-	-	-	-	P(18)	101.484	102.379	89.750	91.650	21.376	17.055	P(34)	116.117	116.068	83.600	83.600	13.312	8.183					
	-	-	-	-	-	-	-	P(19)	90.024	92.310	89.750	91.650	21.173	17.143	P(35)	104.342	104.758	83.600	83.600	14.472	8.608					
	-	-	-	-	-	-	-	P(20)	78.591	82.278	89.750	91.650	20.139	16.297	P(36)	92.555	93.456	83.600	83.600	13.934	8.110					
	-	-	-	-	-	-	-	P(21)	67.119	72.236	89.750	91.650	20.068	16.858	P(37)	80.893	82.162	83.600	83.600	12.210	7.124					
	-	-	-	-	-	-	-	P(22)	57.917	63.724	89.750	91.650	26.115	21.916	P(38)	69.522	70.843	83.600	83.600	9.687	6.484					
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P(39)	58.089	59.535	83.600	83.600	7.226	6.115					
Hind foot	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P(40)	46.564	48.479	83.600	83.600	5.034	5.483					
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P(41)	34.797	37.346	83.600	83.600	4.870	4.943					
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P(42)	24.116	27.053	83.600	83.600	8.935	8.317					
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P(43)	23.250	25.016	83.600	83.600	19.243	17.736					
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					

3D graph

Normal foot

Flat foot

100

50

0

Z

Y

X

P(6)

P(1)

(a) Vertical section 1 (VS1)

Normal foot

Flat foot

100

50

0

Z

Y

X

P(22)

P(7)

(b) Vertical section 2 (VS2)

Normal foot

Flat foot

100

50

0

Z

Y

X

P(43)

P(23)

(c) Vertical section 3 (VS3)

Note) : The difference is more than 3 mm between flat and normal : The difference is within 1~3 mm between flat and normal

<Table 3> Measurements of 3D coordinates: VS4, VS5, VS6

	Point	VS4						Point	VS5						Point	VS6					
		X		Y		Z			X		Y		Z			X		Y		Z	
		Normal	Flat	Normal	Flat	Normal	Flat		Normal	Flat	Normal	Flat	Normal	Flat		Normal	Flat	Normal	Flat	Normal	Flat
Fore foot	P(44)	246.399	243.089	74.700	72.400	7.775	6.896	P(65)	241.861	240.800	52.85	52.15	7.803	6.695	P(86)	230.798	230.020	36.400	35.650	7.757	7.094
	P(45)	237.459	234.071	74.700	72.400	0.310	0.169	P(66)	235.340	233.090	52.85	52.15	0.540	0.326	P(87)	225.377	223.643	36.400	35.650	0.899	0.525
	P(46)	224.696	221.582	74.700	72.400	0.000	0.000	P(67)	222.669	220.622	52.85	52.15	2.704	2.649	P(88)	213.607	211.939	36.400	35.650	2.092	1.961
	P(47)	211.938	209.083	74.700	72.400	0.448	0.252	P(68)	210.282	208.268	52.85	52.15	3.589	2.548	P(89)	201.967	200.290	36.400	35.650	2.079	1.902
	P(48)	199.195	196.605	74.700	72.400	0.308	0.042	P(69)	197.954	195.815	52.85	52.15	0.549	0.431	P(90)	190.190	188.588	36.400	35.650	0.892	0.700
Mid foot	P(49)	186.426	184.084	74.700	72.400	0.114	0.046	P(70)	184.945	182.974	52.85	52.15	0.472	0.384	P(91)	178.259	176.733	36.400	35.650	0.862	0.703
	P(50)	173.647	171.564	74.700	72.400	0.118	0.011	P(71)	171.936	170.132	52.85	52.15	0.365	0.304	P(92)	166.327	164.877	36.400	35.650	0.838	0.719
	P(51)	160.885	159.046	74.700	72.400	0.432	0.162	P(72)	158.928	157.290	52.85	52.15	0.421	0.223	P(93)	154.396	153.023	36.400	35.650	0.830	0.681
	P(52)	148.358	146.572	74.700	72.400	2.726	1.008	P(73)	145.959	144.452	52.85	52.15	1.320	0.388	P(94)	142.468	141.168	36.400	35.650	0.968	0.722
	P(53)	135.887	134.131	74.700	72.400	5.408	2.247	P(74)	133.052	131.624	52.85	52.15	2.889	0.842	P(95)	130.538	129.311	36.400	35.650	1.040	0.775
	P(54)	123.268	121.669	74.700	72.400	7.276	3.227	P(75)	120.075	118.791	52.85	52.15	3.538	1.105	P(96)	118.608	117.455	36.400	35.650	0.994	0.766
	P(55)	110.607	109.189	74.700	72.400	8.713	3.880	P(76)	107.092	105.956	52.85	52.15	2.888	0.903	P(97)	106.676	105.598	36.400	35.650	0.888	0.761
	P(56)	97.874	96.700	74.700	72.400	8.974	3.789	P(77)	94.145	93.126	52.85	52.15	1.697	0.544	P(98)	94.745	93.742	36.400	35.650	0.845	0.781
	P(57)	85.307	84.273	74.700	72.400	6.984	2.616	P(78)	81.195	80.288	52.85	52.15	0.708	0.377	P(99)	82.813	81.886	36.400	35.650	0.836	0.772
	P(58)	72.973	71.818	74.700	72.400	3.914	1.602	P(79)	68.198	67.446	52.85	52.15	0.503	0.418	P(100)	70.883	70.029	36.400	35.650	0.896	0.819
Hind foot	P(59)	60.519	59.346	74.700	72.400	1.621	0.922	P(80)	55.196	54.602	52.85	52.15	0.560	0.410	P(101)	58.953	58.175	36.400	35.650	0.990	0.834
	P(60)	47.784	46.844	74.700	72.400	0.869	0.610	P(81)	42.198	41.760	52.85	52.15	0.485	0.364	P(102)	47.025	46.324	36.400	35.650	1.041	0.855
	P(61)	35.026	34.332	74.700	72.400	0.487	0.378	P(82)	29.189	28.918	52.85	52.15	0.467	0.389	P(103)	35.099	34.476	36.400	35.650	1.153	1.032
	P(62)	22.263	21.827	74.700	72.400	0.692	0.638	P(83)	16.185	16.080	52.85	52.15	0.521	0.560	P(104)	23.202	22.654	36.400	35.650	1.668	1.731
	P(63)	10.925	10.594	74.700	72.400	5.404	5.175	P(84)	4.374	4.925	52.85	52.15	4.789	4.340	P(105)	12.372	11.799	36.400	35.650	5.924	5.707
	P(64)	7.524	7.046	74.700	72.400	17.233	16.635	P(85)	0.000	0.000	52.85	52.15	16.767	15.683	P(106)	8.388	7.399	36.400	35.650	16.664	16.140

<Note) : The difference is more than 3mm between flat and normal : The difference is within 1~3mm between flat and normal

다. Y좌표에서 3mm 이상 좌표 값의 차이가 나타난 수직기준선은 없는 것으로 나타나, 평발과 정상발의 발 너비의 차이는 많지 않음을 확인할 수 있었다. 발바닥 아치 높이 차이를 설명하는 Z좌표의 경우, 3mm 이상 좌표 값의 차이가 나타난 수직기준선은 VS2, VS3, VS4였다. 정상발과 평발의 아치 높이에 따른 위치 차이는 VS2에서 시작되어 VS3의 중족부에서 최대값(5.864mm)를 나타냈으며, VS4까지 이러한 경향이 유지되었다. VS5 이후로는 Z좌표 값의 차이가 크지 않아 평발과 정상발의 고유한 발바닥 아치 공간은 발 내측선에서부터 첫째발가락선까지인 발바닥 중족부 안쪽 구간에 위치하고 있음을 알 수 있다.

3. 3D modeling

1) 3D modeling sole surfaces by foot types

발바닥 3D 좌표데이터로부터 정상발과 평발의 발바닥 곡면을 3D 모델링하였다. 모델링 과정은 다음과 같다(Fig. 5).

Step.1. 발바닥 곡면의 스플라인 설정: <Table 2>~<Table 4>에서 측정한 144개 기준점을 AutoCAD 2011 프로그램의 3D 평면에 위치시킨 후, Y좌표 값이 같은 점들을 연결하여 스플라인 곡선을 만들었다. 총 9개의 수직기준선이 스플라인 곡선(VS1~VS9)으로 설정되었다.

Step.2. 발바닥 로프트 곡면 모델링: Step.1에서 설정된 수직기준선 VS1~VS9를 3D 로프트 곡면 모델링의 스케치선(Sketch line)으로 사용하여 발바닥의 곡면을 3D 모델링하였다. 3D 곡면 모델링에는 Solidworks 2012가 사용되었다.

Step.3. 발바닥 곡면 3D 모델링 완성: 정상발과 평발 발바닥을 3D 곡면으로 최종 완성하였으며, 전면, 측면, 등각뷰는 <Fig. 5>(Step.3)와 같다.

2) 3D modeling the insoles for flat feet

발바닥의 아치가 낮아 지면과 닿는 발바닥 면적이 많은 평발의 구조적 문제점을 개선하기 위해서는, 신발과 발바닥이 맞는 부분에 적절한 아치를 제공할

<Table 4> Measurements of 3D coordinates: VS7, VS8, VS9

	Point	VS7						Point	VS8						Point	VS9					
		X		Y		Z			X		Y		Z			X		Y		Z	
		Normal	Flat	Normal	Flat	Normal	Flat		Normal	Flat	Normal	Flat	Normal	Flat		Normal	Flat	Normal	Flat	Normal	Flat
Fore foot	P(107)	216.482	214.864	22.400	22.000	8.179	7.288	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P(108)	213.387	211.256	22.400	22.000	1.302	1.325	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	P(109)	203.823	201.786	22.400	22.000	1.791	1.373	P(128)	199.734	197.284	9.750	9.500	8.347	7.617	-	-	-	-	-	-	
	P(110)	194.339	192.383	22.400	22.000	2.323	1.946	P(129)	193.243	189.835	9.750	9.500	1.571	1.613	-	-	-	-	-	-	
	P(111)	184.817	183.002	22.400	22.000	1.381	1.434	P(130)	182.018	178.574	9.750	9.500	1.757	1.853	-	-	-	-	-	-	
	P(112)	175.195	173.514	22.400	22.000	1.179	1.230	P(131)	170.789	167.316	9.750	9.500	1.575	1.508	P(139)	170.514	165.468	0.000	0.000	9.003	8.197
Mid foot	P(113)	165.568	164.011	22.400	22.000	1.190	1.181	P(132)	159.559	156.052	9.750	9.500	1.579	1.534	P(140)	165.780	160.979	0.000	0.000	4.770	4.537
	P(114)	155.941	154.505	22.400	22.000	1.190	1.111	P(133)	148.329	144.788	9.750	9.500	1.640	1.621	P(141)	158.843	154.548	0.000	0.000	4.559	4.256
	P(115)	146.312	145.000	22.400	22.000	1.134	1.089	P(134)	137.099	133.526	9.750	9.500	1.747	1.828	P(142)	151.902	148.108	0.000	0.000	4.482	4.387
	P(116)	136.684	135.495	22.400	22.000	1.065	1.085	P(135)	125.880	122.270	9.750	9.500	2.201	2.224	P(143)	145.005	141.758	0.000	0.000	5.289	5.443
	P(117)	127.054	125.989	22.400	22.000	1.047	1.078	P(136)	114.695	111.052	9.750	9.500	3.160	3.224	P(144)	141.231	137.140	0.000	0.000	9.862	9.099
	P(118)	117.426	116.483	22.400	22.000	1.110	1.117	P(137)	103.642	99.922	9.750	9.500	5.086	4.927	-	-	-	-	-	-	
	P(119)	107.797	106.978	22.400	22.000	1.231	1.124	P(138)	96.235	92.157	9.750	9.500	12.111	11.666	-	-	-	-	-	-	
	P(120)	98.173	97.478	22.400	22.000	1.388	1.266	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	P(121)	88.556	87.989	22.400	22.000	1.733	1.593	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	P(122)	78.947	78.508	22.400	22.000	2.170	2.064	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Hind foot	P(123)	69.358	69.043	22.400	22.000	2.815	2.502	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	P(124)	59.810	59.599	22.400	22.000	3.760	3.262	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	P(125)	50.320	50.197	22.400	22.000	5.028	4.347	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	P(126)	41.236	41.208	22.400	22.000	7.853	7.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	P(127)	37.668	36.974	22.400	22.000	15.717	14.397	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3D graph																					
		(a) Vertical section 7 (VS7)						(b) Vertical section 8 (VS8)						(c) Vertical section 9 (VS9)							

Note) : The difference is more than 3mm between flat and normal

 : The difference is within 1~3mm between flat and normal

<Fig. 5> 3D modeling soles for normal feet and flat feet

수 있게 보형물을 삽입하여 발의 편평도를 정상발의 수준으로 높여 주어야 한다. 이를 위해 <Fig. 6>(Step.1)에서 제작한 평발 발바닥 곡면과 정상발 발바닥 곡면을 중합하여, 편평한 평발의 발바닥 곡면을 정상 곡률을 가진 발바닥 곡면으로 만들고자 하였다(Fig. 6).

Step.1. 발바닥 곡면의 중합 : <Fig. 5>(Step.3)에서 제작한 평발의 발바닥 곡면과 정상발의 발바닥 곡면을 원점(0, 0, 0)을 기준으로 중합하였다. 중합 결과, 평발과 정상발의 발바닥 내측 아치의 곡률 차이로 인해 나타나는 발바닥의 굴곡이 중합모

<Fig. 6> 3D modeling soles for normal feet and flat feet

형에 반영되어 입체적인 커브 곡면 형태를 보였다.

Step.2. 인솔의 3D 모델링 : 인솔 착용 시 착화감을 높이고 보행 시 발에 가해지는 무게를 흡수할 수 있도록, 평발과 정상발이 맞닿은 중합 곡면의 접합면에 5mm의 쿠션 두께를 추가하였다. 5mm의 쿠션을 더한 후 3D 인솔의 두께는 평발과 정상발의 Z좌표 값 차이가 가장 컸던 VS3의 중족부 구간(P(35), 5.864mm)에서 10.9mm로 가장 두꺼웠으며, 정상발이 평발보다 발아치 높이가 낮아 평발과 정상발의 Z좌표 값의 차이가 가장 작았던 VS2의 중족부 앞쪽(P(12), -2.416mm)에서 2.8mm로 가장 얇았다. Solidworks 2012 프로그램으로 인솔의 로프트 피쳐를 3D 모델링하였다. 피쳐 생성 시 밑면의 프로파일에는 평발의 로프트 곡면이, 윗면의 프로파일에는 정상발의 로프트 곡면이 사용되었다.

Step.3. 평발용 인솔의 완성: 최종 완성된 평발용 인솔을 YZ, XZ 방향으로 절단해 보면, 평발용 인솔이 신발과 닿는 밑면은 평발 발바닥 곡면의 편평도를 반영하여 굴곡이 없는 상태이고, 착용자의 발이 닿는 윗면은 정상발의 발바닥 곡면을 반영하여 활처럼 휘어진 형태로 설계되었다.

4. 3D printing the insoles for flat feet

시니어 평발용 인솔의 3D 프린팅에는 DWS System의 XFAB 3D 프린터가 사용되었다. XFAB 프린터는 빛에 반응하는 액체에 자외선 레이저를 쏘아 급속 경화시켜 한 층씩 얇은 막을 형성함으로써 모형을 출력하는 SLA(Stereo Lithography Apparatus) 방식이다. SLA 방식의 3D 프린터는 고가이나, 다양한 재료를 사용하여 정밀한 해상도의 출력이 가능하다. 인솔의 3D 프린팅 사출재료로는 발바닥 면에 가해지는

충격을 충분히 완화시킬 수 있도록, 유연한 고무재질의 질감을 구현한 연성 아크릴계 레진(DWS System의 Rubber-like: FLEXA692) 소재를 선정하였다.

하나의 덩어리 형태로 구성된 3D 솔리드 모형을 3D 프린터로 한 층씩 출력하기 위해서는, 3D 모델링 형상을 얇은 층 형태로 슬라이싱 변환해야 한다. 3D CAD에서 모델링 후 STL 파일로 저장된 시니어 평발용 인솔의 3D 솔리드 모델은 3D 프린터용 컴파일 프로그램인 DWS System의 Nauta+ ver1.2.0을 사용하여 얇은 슬라이싱 조각으로 분리되었다. 컴파일링된 3D 모형은 3D 프린터로 한 층씩 출력되었다. 본 연구에서 사용한 XFAB 3D 프린터로 한 번에 출력 가능한 모델의 크기는 180×180mm이었다. 제작한 평발용 인솔의 3D 모델 크기는 245×100mm이었기 때문에 XFAB 프린터로는 한 번에 출력하는 것이 불가능하였다. 따라서 제한된 플랫폼 크기에 맞추기 위해 인솔을 앞부분과 뒷부분으로 나누어 분할 출력하였다. 3D 프린터로 모델을 출력하는데 소요된 시간은 총 8~9시간이었다(Fig. 7).

출력된 3D 인솔의 후처리 작업을 진행하였다. 출력 후 남아 있는 여분의 레진을 제거하기 위하여 알코올에 담근 후 파우더를 뿌려서 표면의 끈적임을 제거하였다. 분할 출력된 인솔은 출력 시 사용한 아크릴계 레진을 녹여 접착한 후, 접착 면을 정리하여 최종 완성하였다. 후처리 단계는 총 6시간 정도가 소요되었다.

완성된 평발용 인솔은 (Fig. 8)과 같다. 고무재질과 유사한 물성을 지닌 검정색 아크릴계 레진을 사용하여 착용 시 자연스럽게 발바닥 부분이 휘어졌다가 다시 원래 상태로 회복될 수 있는 굽힘력과 회복력을 지니고 있다. 발바닥 곡면이 반영되었으며, 발바닥에서 측면으로 올라오는 곡선을 포함한 인솔로 제작되었다.

<Fig. 7> 3D printing process of the insoles for flat feet

<Fig. 8> 3D printed insoles for flat feet

IV. Conclusion

본 연구는 제조업에 새로운 패러다임을 제시하고 있는 3D 프린터를 활용하여 평발을 위한 인솔을 제작하였다. 3D 스캐너에서 수집된 3D 데이터를 가공하고, 3D CAD 프로그램을 활용하여 3D 모델링을 진행하고, 제작된 모델을 3D 프린터로 제작하는 과정을 제안하였다. 연구의 세부 과정 및 결과는 다음과 같다.

1. 시니어의 평발 발생빈도를 살펴보기 위해, 60대 이상 남성의 제6차 사이즈코리아 3D 발 스캔 데이터로부터 발바닥 유형을 분류하였다. 3D 발 스캔 데이터에서 발바닥 수평단면도를 추출하여 발아치 유형을 분석한 결과, 정상발 139명(73.5%), 평발 50명(26.5%), 오목발 0명(0.0%)으로 분류되었다.

2. 정상발과 평발 유형의 대표피험자를 20명씩 선정하고, 발바닥 곡면에 9개의 수직기준선과 144개의 포인트를 설정한 후, 3D 좌표(X, Y, Z)를 측정하고 그 경향을 분석하였다.

3. 시니어 평발 남성에게 부족한 발아치 굴곡을 추가하기 위해 평발의 발바닥 곡면에 정상발의 발바닥 곡면을 중첩하여 평발용 인솔을 3D 모델링하였다. 제작된 3D 인솔 모델은 평발에 필요한 발아치 및 발가락 부위에 정상발의 곡률을 제공할 수 있었다.

4. 모델링된 시니어 평발용 인솔을 3D 프린터로 출력하였다. 다양한 3D 프린터의 사출 재료 중 인솔에 적합한 연성 아크릴계 레진으로 출력하였다. 출력한 인솔은 고무와 같은 탄성이 있어 휘어짐이 가능하고, 출력 후에 신발에 넣어 착용할 수 있었다.

본 연구는 3D 스캔데이터를 이용하여 발아치 유형을 분류함으로써 자동계측 프로그램이 수집하지 못하는 발아치 곡면의 정보 분석 방법을 제시하였다. 또한, 3D 좌표데이터를 계측하여 형상을 정량화하여 활용하는 방안을 제시하였다. 3D 스캔 데이터는 다양

한 정보를 가지고 있는 데이터로, 연구 목적에 맞게 다양하게 활용할 수 있다는 점을 시사하고 있다. 평발과 정상발의 형상 차이를 인솔 곡면에 적용한 본 연구의 3D 시스템 제작 프로세스는 새로운 제품시장의 확대가 가능할 것으로 보이며, 시니어 평발을 위한 인솔뿐 아니라 다양한 연령과 발 유형을 위한 맞춤형 인솔 제작에 적용 가능할 것으로 여겨진다.

본 연구에서 발바닥 밑면뿐 아니라 측면을 모두 감싸는 일체형 인솔을 제작하였으나, 이는 신발의 종류 및 디자인에 따라 다양하게 호환되지 못하여 제품 착용 시 한계가 있다. 또한 출력 인솔에 대한 착화 테스트가 이루어지지 않아, 그 효용성 검증에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 여겨진다. 후속연구에서는 발바닥의 불편 부위의 개별 문제점에 집중하여 탈부착이 가능한 부분 인솔을 제작하여 그 효과를 검증하면 활용도가 높을 것으로 보인다.

References

- Benedict. (2016, September 11). Custom 3D printed insoles from Phits help athletes recover from injury. *3D Printing Applications in 3Ders.org*, Retrieved February 18, 2017, from <http://www.3ders.org/articles/20160911-custom-3d-printed-insoles-from-phits-help-athletes-recover-from-injury.html>
- Benedict. (2017, February 8). 3D printed insole startup Wiivv wearables looking well-heeled: \$4M raised, competitor eSoles acquired. *3D Printing Applications in 3Ders.org*, Retrieved February 18, 2017, from <http://www.3ders.org/articles/20170208-3d-printed-insole-startup-wiivv-wearables-looking-well-heeled-4m-raised-competitor-esoles-acquired.html>

- Butdee, S., & Tangchaidee, K. (2008). Formulation of 3D shoe sizes using scanning camera and CAD modelling. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 31(2), 449-455.
- Choi, J. I. (2015). *Development of design technique of Korean standard last for production of healthy-functional shoes*. Unpublished doctoral dissertation, Pusan National University, Busan, Korea.
- Choi, S. H. (2005). *Foot shape classifying of women in Korea with 3D foot scan data*. Unpublished doctoral dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Coughlin, M. J., & Kaz, A. (2009). Correlation of Harris Mats, physical exam, pictures, and radiographic measurements in adult flatfoot deformity. *Foot & Ankle International*, 30(7), 604-612. doi: 10.3113/FAI.2009.0604
- Flatfoot. (n.d.). In *Seoul National University Hospital, Medical Information*. Retrieved February 12, 2017, from <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=926772&cid=51007&categoryId=51007>
- How 3D printing impacts PUMA and Reebok. (2013, March 8). *3D Printer and 3D Printing News*, Retrieved February 18, 2017, from <http://www.3ders.org/articles/20130308-how-3d-printing-impacts-puma-and-reebok-in-designing-and-prototyping.html>
- Jang, S. E. (2012). *슈즈디자인과 패턴메이킹* [Shoes design and patternmaking]. Paju: Kyomunsa.
- Kang, H.-S. (2012). *Foot deformity measurement validity: The relationship between CSI, SAI, RCSP*. Unpublished master's thesis, Ewha Womans University, Seoul, Korea.
- Kim, E.-H. (2003). *The impact that the exercise influence on the foot form and footprint*. Unpublished master's thesis, Daejeon University, Daejeon, Korea.
- Kim, G. Y. (2001). *A study on the shape of women's foot arches*. Unpublished doctoral dissertation, Kyung Hee University, Seoul, Korea.
- Kim, J. H. (2015). *Development of foot-measuring toolkit and modeling process for designing customized round toe midsole with 3D printing technology*. Unpublished master's thesis, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Kim, K.-H. (2011). *Biomechanical analysis of arch support devices on normal and low arch*. Unpublished master's thesis, Kyungsung University, Busan, Korea.
- Kim, N. S. (2013). *A study on foot shape and shoe sizing system for the elderly*. Unpublished doctoral dissertation, Chonnam National University, Gwangju, Korea.
- Kim, Y.-D. (2015). *A case study on the development of insles for seniors in preparation for aged society*. Unpublished master's thesis, Hanbat National University, Daejeon, Korea.
- Korean Agency for Technology and Standards. (2012). *Sizing system for shoes* (KS M 6681 : 2007, 2012 confirmed). Gwacheon: Korean Agency for Technology and Standards.
- Korean Agency for Technology and Standards. (2014). *Assembly middle insole of shoes* (KS G 3406 : 1994, 2014 confirmed). Gwacheon: Korean Agency for Technology and Standards.
- Lee, J.-E., & Kwon, Y.-A. (2008). The classification of men's foot shape according to age. *Fashion & Textile Research Journal*, 10(5), 644-651.
- Lee, J. Y. (2004). *The investigation of the shoe-last size classification system for Korean adults with 3D foot-scanner*. Unpublished doctoral dissertation, Hanyang University, Seoul, Korea.
- Lee, Y.-C., Lin, G., & Wang, M.-J. J. (2014). Comparing 3D foot scanning with conventional measurement methods. *Journal of Foot and Ankle Research*, 7:44. doi:10.1186/s13047-014-0044-7
- Lee, Y.-J., Oh, M.-H., Kim, G.-Y., Nam, G.-W., Paek, H.-H., & Kim, J.-J. (2007). The relationship of balance and walking with preferred type of shoes in the elderly. *The Journal of Occupational Therapy for the Aged and Dementia*, 1(1), 30-37.
- Leem, Y. M., Bang, H. K., & Shin, K. J. (2007). Foot classification for manufacturing of comfortable

- shoes. *Journal of the Korean Society of Safety*, 22(6), 81-86.
- Lim, H. S. (2016). 3D printed midsole design according to the sole types of elementary school students. *The Research Journal of the Costume Culture*, 24(3), 315-323. doi:10.7741/rjcc.2016.24.3.315
- Min, S. N., Cho, J. Y., Park, S. J., Subramaniyam, M., Kim, S. E., & Lee, K. S. (2016, June). 아치 에어쿠션이 장착된 기능성 인솔에 대한 인간공학적 평가 [Ergonomic evaluation of functional insole with arch air cushion]. *Proceedings of Spring Conference of the Ergonomics Society of Korea and 18th Korea - Japan Joint Symposium, jeju-do*, 543-546.
- Murley, G. S., Menz, H. B., & Landorf, K. B. (2009). A protocol for classifying normal- and flat-arched foot posture for research studies using clinical and radiographic measurements. *Journal of Foot and Ankle Research*, 2:22. doi:10.1186/1757-1146-2-22
- Oh, H. K., & Kim, H. G. (2013). A study on the computerization of the shoe last manufacturing for customized handmade shoes: Focused on the data formation through a 3-Dimensional scanner. *Journal of Digital Design*, 13(2), 29-36.
- Oh, S.-Y., Suh, D.-A., & Kim, H.-G. (2016). Last design for men's shoes using 3D foot scanner and 3D printer. *The Journal of the Korea Contents Association*, 16(2), 186-199. doi:10.5392/JKCA.2016.16.02.186
- Park, J.-K. (2005). Classification of foot types for shoes size system of elderly women. *Journal of the Korean Society of Costume*, 55(2), 33-44.
- Park, J. Y., Kim, Y. K., Kim, M. H., Lee, S. J., Kim, M. W., & Kim, Y. C. (2009, June). Comparative analysis of 3D foot scan method and 3D laser scan method for development of custom-made insole. *Proceedings of Korean Society for Precision Engineering (KSPE) 2009 Spring Conference, Jeju-do*, 969-970.
- Phits. (2016, August 24). Phits at the Rio Olympics, Retrieved March 10, 2017, <http://www.phits.be/en/phits-rio-olympics>
- Phits. (n.d.a). About Phits insoles. Retrieved March 10, 2017, <http://www.phits.be/en/about-phits-insoles>
- Phits. (n.d.b). Phits expert workflow - from scan to insoles. Retrieved March 10, 2017, <http://www.phits.be/en/phits-expert-workflow-scan-insoles>
- Seok, H.-J., & Park, J.-E. (2007). The classification of elderly men's feet: With the three-dimensional body scanner data of Size Korea. *Journal of the Korean Society of Costume*, 57(10), 50-59.
- Shi, N., Yi, S., Xiong, S., & Jiang, Z. (2009, April). A CAD system for shoe last customization. *Proceedings of 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization (CSO 2009), Hainan, 1*, 957-960. doi:10.1109/CSO.2009.229
- Song, S. J., & Kim, S. H. (2004). A study on surface flattening for 3 dimensional shoe pattern design. *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, 9(3), 266-275.
- Song, E. Y., Kim, K. T., Kim, S.-H., & Lee, S. Y. (2016). Individual customized insole model. *The Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, 9(4), 323-329. doi:10.17661/jkiiect.2016.9.4.323
- Xiong, S., Zhao, J., Jiang, Z., & Dong, M. (2010). A computer-aided design system for foot-feature-based shoe last customization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(1), 11-19, doi:10.1007/s00170-009-2087-7