

동적 자세에서 3D 인체 스캔데이터와 아바타의 체표면 치수 변화 비교분석

김 남 임 · 이 효 정⁺

국립공주대학교 의류상품학과 박사후 연구원 · 국립공주대학교 의류상품학과 부교수⁺

Comparative Analysis of Changes in Body Surface Dimensions Between 3D Human Body Scan Data and Dynamic Avatars in Dynamic Postures

Nam Yim Kim · Hyojeong Lee⁺

Postdoctoral Fellowship, Dept. of Fashion Design & Merchandising, Kongju National University

Associate Professor, Dept. of Fashion Design & Merchandising, Kongju National University

(received date: 2025. 3. 18, revised date: 2025. 4. 10, accepted date: 2025. 4. 14)

ABSTRACT

This study aimed to convert 3D human body scan data in dynamic postures into virtual avatars and to conduct a comparative analysis of body surface measurements between the two objects. The methodology included 3D scanning of the human body in a neutral standing posture, as well as with the knees flexed at 30° and 60°. These scans were then converted into avatars using a 3D virtual fitting system. To generate dynamic avatars, the joints of the neutral posture avatar were adjusted to match the scanned data. Subsequently, body surface circumferences and lengths were measured and compared between the scanned models and avatars. Cross-sectional shapes and distances at key body regions were also analyzed. The results indicated that differences in circumference measurements ranged from -1.4 cm to 0.5 cm in the neutral posture and from -5.4 cm to 0.3 cm in the flexed postures, depending on the specific body region. Surface length discrepancies ranged from -2.0 cm to -0.1 cm in the neutral posture and from -7.6 cm to -4.8 cm with knee flexion. The cross-sectional shape analysis revealed that in the neutral posture, the maximum hip circumference and thigh circumference regions were similar. However, as the knee flexion angle increased, the maximum hip circumference region appeared flatter in the avatar, creating a noticeable difference, while the thigh and calf shapes remained similar. In conclusion, the avatar transformation and dynamic avatar functions provided by the current virtual fitting programs do not fully reflect the shape and dimensions of human muscles and skeletal structures during movement. These findings provide meaningful information for researchers when utilizing such functions in clothing design and evaluation.

Key words: body 3D scan(인체 3차원 스캔), dynamic posture (동적 자세), virtual avatar(가상 아바타), 3D avatar sizing(3차원아바타 사이징)

본 연구는 한국과학기술부의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구결과의 일부임
(No. RS-2023-00211608, NRF-2022R1C1C1008076)

Corresponding author: Hyojeong Lee, e-mail: hyojeong@kongju.ac.kr

I. 서론

최근 국내·외에서 패션 산업 분야는 디지털 기술의 발달로 의류 제품 개발 시 디자인 결정 단계부터 원단, 패턴 설계, 맞춤새 평가에 이르는 일련의 과정을 3D 가상공간에서 진행하고 있는 추세이다. 현실 공간이 아닌 가상 공간으로의 환경 변화는 제품 개발 과정 시 소요되는 시간과 비용을 절감할 수 있어 제품 생산에 대한 효율을 높이고 있다. 한편 학계에서도 디지털 환경과 패션 테크놀로지가 접목된 형태로 3D 가상착의 기술의 필요성이 대두되면서 인력 양성을 위해 교육하고 있으며 다양한 콘테스트 등을 통해 가상착의 기술의 확산을 도모하고 있다. 이렇듯 3D 가상착의 시스템은 의류패션 분야에서 선택이 아니라 필수가 되었고 관련 연구도 꾸준히 보고되고 있다. 의복의 설계 과정에서 패턴을 제도하고 핏을 검토하는 과정에서 3D 가상착의 프로그램을 이용하는 연구가 대부분을 차지한다. 이를테면, 노년 남성의 팬츠 원형 패턴을 개발(Lim, 2023), 노년 비만 남성의 셔츠 개발(Seong & Kim, 2020), 테일러드 자켓(Do, 2012)과 같이 여유가 있는 의류제품을 개발에 이용한 바 있다. 인체에 완전히 밀착되는 형태의 의류 제품도 다수 개발한 사례가 보고되었는데 관련 연구로 밀착 사이클 상의 웨어 개발(Teyeme et al., 2023), 사이클 웨어(Jeong, 2016), 여성용 레깅스 개발(Shin, 2023), 자전거용 밀착 팬츠(Vuruskan & Ashdown, 2025)등의 패턴 개발에 활용되었다. 이 외에도 가상착의 프로그램을 이용하여 특수한 인체 환경 즉, 휠체어 생활 장애인 또는 지팡이를 의지하는 보행자 대상(Irovan et al., 2023), 유방 절제술 대상(Ermin & Şen Kılıç, 2025)으로 하여 여유가 있는 의류 제품, 밀착형 의류제품, 특수 브레지어를 개발을 사례도 보고되었다. 이렇듯 가상착의 시스템은 의류제품을 개발하고 특히 착용자의 신체적 특성을 고려한 맞춤제작 등 매우 광범위한 범위에서 활용이 되어

지고 있다. 이러한 연구들은 대부분의 가상 프로그램에서 의복 패턴을 개발 후 아바타의 치수와 자세를 변형하여 피팅한 후, 실제 소재의 역학적 특성을 반영해 평가한다. 이렇다 보니 실제착용과 가상착용 간의 맞춤새를 비교한 연구도 보고된 바 있다(Kim & Lee, 2023; Kim & Lim, 2022; Liu et al., 2017).

가상착의 시스템에서 착용 평가는 아바타를 대상으로 평가가 이루어진다. 이때 아바타의 사이즈는 시스템상에서 아바타의 사이즈 편집 기능을 이용하여 착용 대상자에 적합한 사이즈를 적용하고 새로운 아바타를 생성한 후 맞춤새를 평가한다. 이에 가상 아바타의 사이즈와 관련하여 다수의 연구가 보고되었다. Lee and Sohn(2012)는 키 크고 마른 체형, 보통체형 및 키 작고 배 나온 체형자 이 3D 스캔 형상과 이들의 실제 사이즈를 적용한 아바타 간의 사이즈를 비교하고 길이항목보다 둘레항목에서 차이가 더 났으며, 체형에 따라서도 매우 다른 양상을 보였으나 대부분 인체 형상이 아바타보다 허리둘레, 배꼽수준허리둘레, 엉덩이둘레, 넓다리둘레 및 넓다리중간둘레에서 치수가 더 크다고 하였다.

Kang(2014)의 연구에서도 19~59세 성인여성과 가상 아바타 간의 부위별 사이즈를 비교한 결과, 가슴둘레, 허리둘레, 엉덩이둘레, 넓다리둘레 등 둘레항목에서 두 객체 간에 차이가 났는데, 이는 아바타가 체형의 특성을 잘 반영하지 못해 기인된 결과라 하였다. 또 Lee and Jang(2020) 연구에 의하면 Size Korea에서 제공하는 20대, 30대, 40대 50대 여성의 체형별 인체 치수를 적용한 각 아바타를 만들고 난 후 인체 스캔 형상의 치수와 비교한 결과, 주로 목밑둘레, 젖가슴둘레, 허리둘레, 엉덩이둘레, 팔길이에서 연령대와 체형에 따라 아바타가 더 큰 경우와 스캔 형상이 더 큰 경우가 혼재되어 있었지만, 이를 제외한 나머지 항목들은 차이가 거의 없다고 하였다. 이러한 결과는 아바타 치수 설정 시 시스템상의 제한된 입력 항목으

로 인해 인체형상의 돌출된 부위는 아바타가 다소 납작하게 표현되어 체형의 특징을 잘 반영하지 못한 점을 가상 아바타의 한계점으로 지적하였다. 이 외에도 아바타와 3D 인체 정자세 스캔 모델을 활용하여 아바타로 재현하고 실제 인체 스캔 모델과 아바타 간의 사이즈를 분석해 가상착의 시스템의 활용성을 검증한 사례가 있다(Hong, 2020). 이 연구는 40대, 50대 및 60대 남성의 3D 인체 스캔 형상을 CLO 3D 가상시스템에서 아바타로 재현하고 실제 스캔 형상과 재현된 아바타 간의 치수를 비교 분석하였다. 결과에서 아바타로 재현하는 단계에서 실제 인체의 치수를 아바타 사이즈 편집창에 적용했음에도 불구하고 구현된 아바타의 치수는 높이항목, 둘레항목 및 길이항목 대부분 스캔 형상과 불일치했고 연령대 별로 사이즈 불일치 정도와 항목의 차이가 있었다. 특히 둘레방향에서 차이가 더 발생했는데, 3D 인체 스캔모델이 젖가슴둘레는 40대가 21mm, 50대는 13mm 더 큰 측정치를 보였고 허리둘레는 40대가 8mm 작게, 배꼽수준허리둘레는 50대가 -11mm 더 작게 나타나는 등 항목에 따라 차이가 있어 동작 시 사이즈 차이를 측정할 필요성에 대해 언급하였다. 이처럼 앞에서 제시한 선행연구들은 아바타의 정자세 시 치수를 분석했음에도 불구하고 치수 차이가 발생하였다. 그렇다면 동작 자세에서는 부위별로 실제 데이터와 아바타간의 치수 차이가 어떠한 양상을 보일 것인가에 대한 탐구도 필요할 것이다. 실제로 Jeong(2016)의 연구에서는 3D 아바타의 관절점을 이용해 동적 자세로 변형한 후, 체표길이를 반영한 동적 패턴을 연구한 바 있다. Teyeme et al.(2023)의 연구에서도 아바타의 사이클 동적 자세를 이용해 밀착의복의 디지털 압력값, 변형률, 압력분포를 보았고, Liu et al.(2017)은 정자세와 걷기 동작 시 가상압력 평가를 통해 핏을 검토하기도 한다. 그러나 이러한 연구를 진행하기에 앞서 보다 신뢰로운 연구결과를 도출하기 위해서는 아바타의 체표 변화가 동작에 따른 실물 인체의

해부학적 변화를 어느정도 반영하고 있는가에 대한 검토가 선행되어야 할 것이다. Lim(2023)과 Kang(2014)의 연구에서도 가상착의 환경에서 실제 착의 및 동작 기능성 평가는 불가능하다고 하였는데, 이는 가상 아바타는 실제 인체의 체형별 특성을 사실적으로 잘 표현하지 못해 아바타는 착용모델로서의 활용 가능성의 한계가 있다고 지적한 바 있다. 이렇듯 가상 아바타의 몇몇 한계점을 확인했으며, 가상착의 시스템에서 의복 패턴 설계 및 핏 평가에 대한 연구를 수행하기에 앞서 실제 착용할 대상자의 인체와 아바타 간의 치수에 대한 신뢰도 검증을 선행할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 3D 가상착의 프로그램에서 동적자세의 아바타의 체표변화를 실물 3D 인체 스캔 데이터와 비교분석 함으로써 아바타 치수에 대한 신뢰도를 검증하고자 한다. 실제 인체를 대상으로 정자세, 무릎 30도 굴곡 자세, 무릎 60도 굴곡 시킨 자세에서 인체 3D 스캔을 진행하고 스캔 모델과 CLO 3D 가상착의 시스템에서 스캔 모델을 이용하여 정자세 아바타 및 두 가지 무릎 굴곡 자세의 아바타로 구현한 후에 두 객체 간의 하지의 체표면 둘레항목과 길이항목의 치수를 비교 분석하고 동적 아바타 치수의 신뢰도를 검증하고자 한다.

II. 연구방법

1. 인체 스캔

본 연구의 피험자 20대 남성 1인(키, 174.5 cm, 체중 70.2 kg)을 대상으로 비접촉식 3D 전신스캐너(Cyberware, Inc. USA)를 이용해 서 있는 정자세 및 무릎을 30, 45, 60도로 굴곡시킨 자세를 취한 후 스캔을 실시하였다(Fig. 1). 이때 피험자의 체표면에 팬츠 제도에 필요한 의복 구성선의 위치 즉, 허리둘레, 엉덩이최대둘레, 밑위길이, 무릎둘레 외에도 넓다리중간둘레, 종아리최대둘레, 발목둘레, 옆선, 인심을 따라 빨간색으로 표식 점을 찍



〈Fig. 1〉 3D Body Scan in a Neutral Posture and Knee Flexion.

고, 이를 제외한 체표면에 2.5~3.0 cm 간격으로 검정색으로 표식점을 찍어 체표길이 측정이 용이하도록 하였다. 이러한 인체 스캔 데이터는 다음과 같이 명명하였다. 정자세의 인체 모델은 Human Scan Model(HSM), 무릎 굴곡 30도는 Human Scan Model-30(HSM-30), 무릎 굴곡 60도는 Human Scan Model-60(HSM-60)으로 명명하였다.

2. 3D 아바타 변환

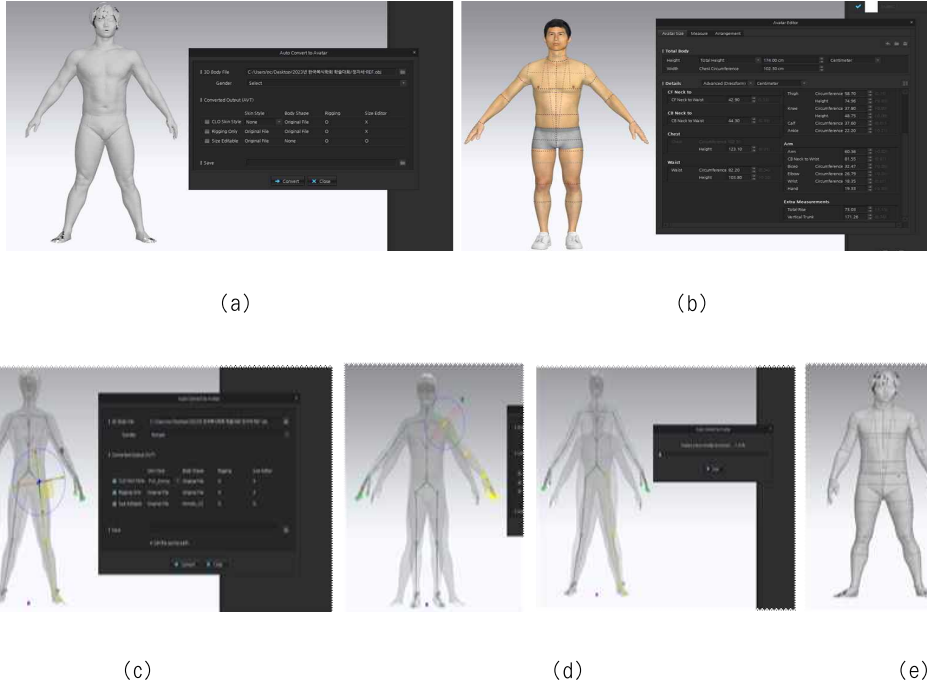
1) 정자세 아바타

인체 가상 아바타(Human Virtual Avatar, HVA) 제작은 〈Fig. 2〉와 같이 (주)클로버추얼패션의 CLO 3D 가상작의 소프트웨어를 활용하였다. 인체 정자세 스캔 모델을 가상 아바타로 변환하기 위해서는 기존 CLO에서 제공하는 아바타를 선정해야 하므로 동양인 남자 아바타(MV1__Martin)를 선택하였다. 그런 후에 인체 스캔 모델의 사이즈를 최대한 반영하기 위해 Hong(2020)의 연구를 참고하여 아바타 사이즈 편집창 메뉴에서 인체 항목이 가장 많은 Advanced(Dress form) 옵션을 선택하고 세부항목의 치수를 인체 치수와 동일하게 적용하고 저장하였다(Fig 2-(b)). 다음 단계는 CLO 3D 프로그램에서 아바타로 자동 변환 메뉴를 선택하고 변환할 파일은 HSM.obj 파일을 선택하고 변환에

적용될 기존 아바타는 사이즈를 편집한 동양인 아바타를 선택하였다(Fig 2-(c)). 세 번째 단계로 변환에 적용된 동양인 남자 아바타(MV1__Martin)의 부위별 관절과 관절점을 마우스로 움직이거나 기즈모를 사용하여 인체 스캔 모델 HSM과 잘 겹쳐질 수 있도록 위치와 자세 등을 조절하고 설정이 완료된 후에 최종적으로 아바타로 변환하기를 선택하였다. 변환된 아바타는 세 종류로 생성되는데 기존 CLO 아바타의 외형과 동일한 형태이나 관절점 편집은 가능하지만 사이즈 편집이 불가능한 형태, 두 번째 아바타는 관절점만 추가된 형태이고 사이즈 편집은 불가능한 형태, 세 번째 아바타는 관절점과 사이즈 편집이 가능한 형태로 생성되는데 본 연구에서는 사이즈 편집이 가능한 세 번째 아바타를 선정하고 스캔 모델과 동일하도록 사이즈를 조절하여 최종 아바타를 생성하였다(Fig 2-(e)).

2) 동작 자세 아바타 구현

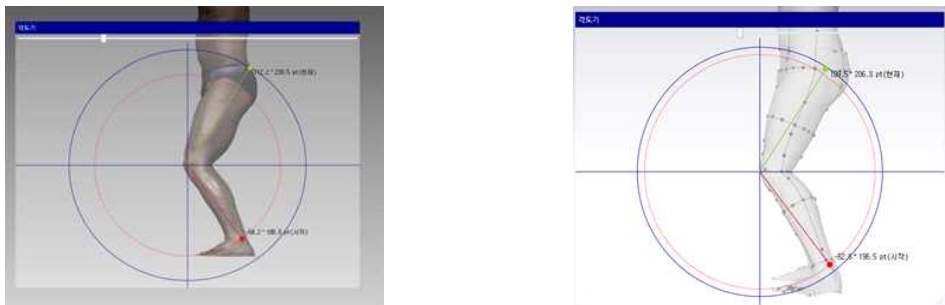
CLO 3D 프로그램에서의 아바타 변환은 정자세에서만 가능하므로 무릎 굴곡 각도 30도, 45도 및 60도 아바타 생성을 해야한다. 이를위해 앞서 생성한 인체 가상 아바타(HVA)를 사용하고 인체 스캔 데이터의 무릎 굴곡 각도와 동일하도록 온라



〈Fig. 2〉 An Example of the Process of Creating a Virtual Avatar Using Body Scan Data.

인 각도계를 이용하여 인체 정자세 아바타의 관절, 관절점 및 기즈모를 움직여 무릎 각도가 30도, 60도인 인체 가상 아바타를 생성하였다. 이때 HVA를 사용하여 동작 아바타를 생성하기에 앞서 HVA의 체표면에 CLO 프로그램의 3D 펜(pen)

기능을 사용하여 HSM의 기준선과 동일한 위치에 기준선을 표시함으로써 동작 아바타로 구현 시에도 아바타의 체표 둘레 및 길이 치수를 측정할 수 있도록 하였다.



(a) Angle measurement of the 3D body scan model(HSM) (b) Angle measurement of the virtual body avatar(HSV)

〈Fig. 3〉 An Example of Creating an Avatar for Knee Flexion Movement Using a 3D Scan Model.

3. 동작에 따른 체표 길이 분석

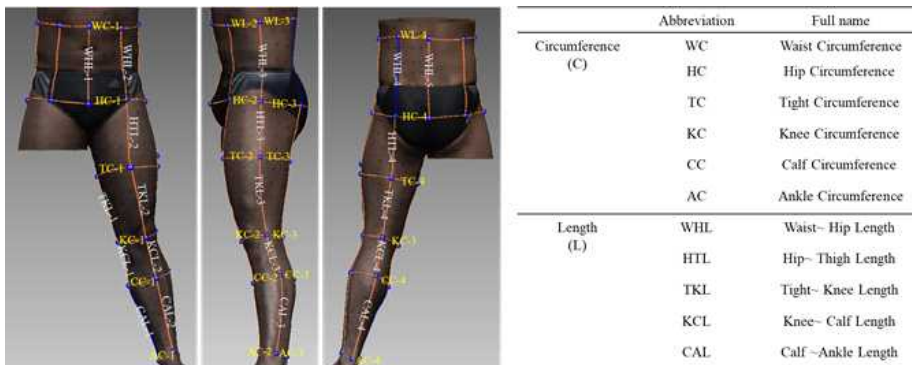
하지 무릎 굴곡각도에 따른 체표면 길이를 위한 체표면 분할 기준은 Size Korea에서 제공하는 표준인체측정법을 참고하여 허리앞점, 허리뒤점, 넓다리점, 무릎뼈가운데점, 오금점, 종아리아래점, 가쪽복사점을 기준으로 인체 앞중심선, 뒤중심선, 내측선, 외측옆선을 선정하였다. 먼저, 가상작의 프로그램에서 아바타 편집창의 줄자 기능을 활성화하여 아바타 체표면 상에 보여지는 앞중심선과 뒤중심선을 추출하였다. 그리고 중심선으로부터 주요한 둘레를 따라 점(dot)을 표시하고 이들 점을 연결하여 허리, 엉덩이, 넓다리, 무릎, 정강이 둘레선을 생성했다. 이 둘레측정치들의 1/2에 해당되는 외측과 내측에 점을 찍고 이들 점을 연결하여 내측선과 외측옆선으로 설정하였다. 그리고 앞중심선부터 외측옆선 지점까지의 둘레를 측정하고 둘레값의 1/2지점을 기준으로 인체 전면을 두 개의 영역으로 분할하였다. 이와 같은 방법으로 엉덩이최대둘레선, 넓다리둘레선, 종아리최대둘레선, 종아리최소둘레선에서 전면과 후면을 두 개의 영역으로 각각 분할하였다. 이때 체표면 길이 측정 시 살았길이와 살뒤길이는 사이즈코리아에서 제공하는 측정법의 경우 살알길이는 허리앞점부터 살점, 살뒤길이는 허리뒤점부터 살점까지

의 길이를 측정하고 있다. 그러나 인체 3차원 스캔 시 살점의 위치는 결측되는 부위로 인체 스캔 모델에서의 살았길이와 살뒤길이의 측정은 부정확하므로, 본 연구에서는 허리앞점부터 엉덩이최대둘레선까지의 구간에서만 1구역(WHL1)과 5구역(WHL5)을 측정하였다(Fig. 4).

3D 스캔 모델(HSM)과 인체 가상 아바타(HVA)의 무릎 굴곡 각도에 따른 체표면 둘레 및 길이 측정도 정자세와 동일한 위치에서 수행하였다. 3D 스캔 모델의 경우 체표 둘레 및 길이 측정은 Geomagic Design X software(3D systems, USA)의 3D 스케치 툴을 사용하여 측정하였다. 가상 아바타는 앞서 기술했듯이 CLO 3D 프로그램에서 3D 펜을 사용하여 기준선을 제시하였는데 이 선을 클릭하면 해당하는 위치에서의 길이 또는 둘레 측정 기능을 활용하였다(Fig. 5).

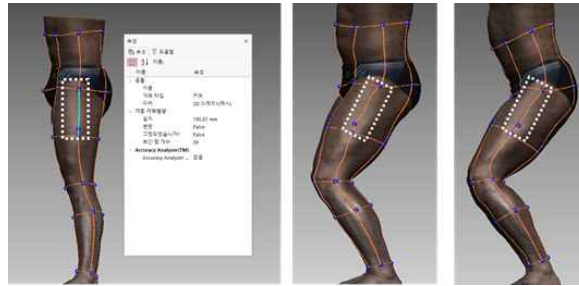
4. 3D 스캔 모델과 가상 아바타 간의 단면 비교

인체 스캔 모델을 이용하여 가상 아바타로 구현한 경우 두 객체 간의 단면 형태를 <Fig. 6>과 같은 방법으로 비교하였다. CLO 3D 가상작의 시스템에서 가상 아바타를 구현하고 이를 확장자 OBJ 형태로 저장하였다. 이를 Geomagic Design X software에서 import한 후에 두 객체를 병합하

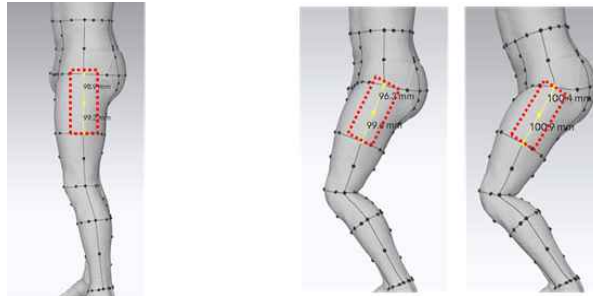


(a: Front b: Side c: Back)

<Fig. 4> Example of Partition Lines for Measuring Body Surface Length and Circumference



(a) Body surface length of the body scan model

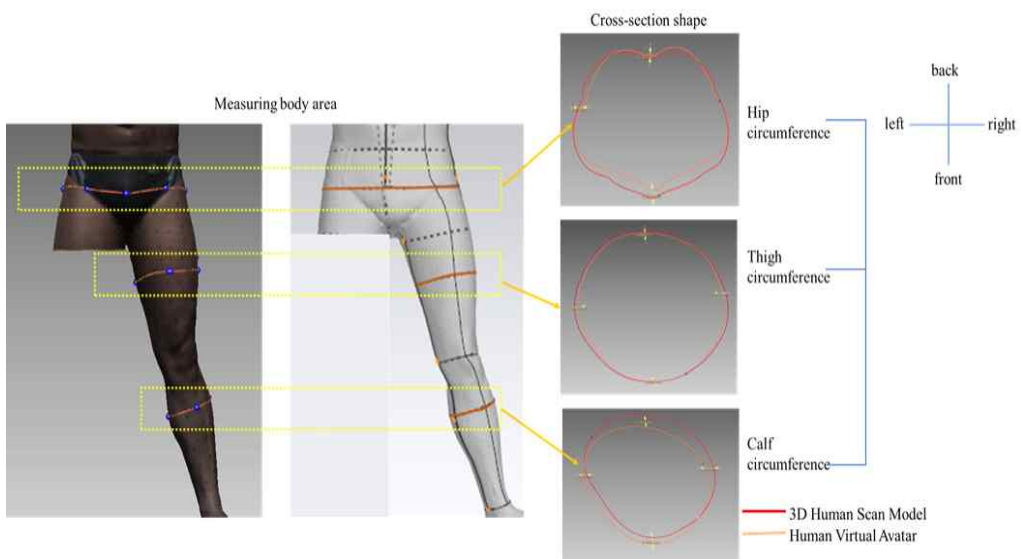


(b) Body surface length of the virtual avatar

<Fig. 5> Example of Measuring Body Surface Length according to the Knee Flexion Angle

었다. 그런 후에 동일한 위치에서 엉덩이둘레 최대, 허벅지둘레 및 종아리최대둘레에 평면을 설정

하고 자르기 기능을 이용하여 세 평면에서 데이터를 잘라 단면의 형태를 비교하고 두 단면 간의 거



<Fig. 6> Cross-sectional Shape between 3D Scan Model and Human Virtual Avatar

리를 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 하지의 체표면 치수 분석

인체 3차원 스캔 모델(HSM)과 가상 아바타(HVA)의 정자세(0°)와 무릎 굴곡 각 30, 60° 일 때 치수 비교 위치는 허리둘레선, 엉덩이최대둘레선, 넓다리둘레선, 무릎둘레선, 종아리최대둘레선 및 발목둘레선이었다. 또한 각 구역에서 허리둘레선지점부터 발목둘레선지점까지 연결하여 각 구역의 총길이를 측정하였다. 그런 다음 인체 둘레와 길이를 정자세와 두 동작자세 시 둘레 치수와 길이 치수를 세분화하여 객체 내와 객체 간에서 각각 수행하였다.

먼저, 3D 스캔 모델을 가상 아바타로 변환하였을 때 정확하게 치수가 적용되었는가 확인하는 절차를 진행했다. 두 객체에 대해 정자세에서 1구역부터 4구역까지 둘레를 모두 합했을 때의 차이를 비교하였고 결과는 <Table 1> 과 같다. CLO에서 아바타로 자동 변환 시, 두 객체 간의 둘레항목의 차이는 -1.4~0.5cm (-2.6~2.3%) 범위에서 차이가 났고, 허리둘레, 엉덩이최대둘레, 허벅지둘레치수, 무릎둘레, 종아리둘레는 아바타가 스캔 모

델보다 더 작은값을 보였다. 반면에 발목둘레는 아바타의 둘레치수가 더 크게 나타났다. 한편으로 정자세 스캔 모델과 아바타 간의 허리둘레지점부터 발목둘레지점까지 각 구역에서의 길이 차이 측정한 결과는 <Table 2>와 같다. 다만, 1구역은 앞살길이, 5구역은 뒤살길이 위치에 해당되는데 이 구역은 앞서 기술했듯이 인체 스캔 시 살부위는 결측이 되는 위치에 해당되는데 이 곳의 길이 측정치가 부정확하다고 판단되어 측정하지 않았다. 두 객체 간의 길이치수 차이는 -2.0~-0.1cm (-2.0~-0.1%) 범위이고 4구역에서 -2.0cm (-2.0%) 수준으로 상대적으로 다른 부위보다 치수 차이를 보였고 2구역에서 -1.5cm (-1.5%) 정도 치수 차이를 나타냈다. 이는 Hong(2020)의 연구에서도 인체 스캔 모델을 이용하여 아바타로 변환할 때 스캔 모델의 사이즈를 적용했을 때 실제 아바타의 치수는 스캔 모델의 치수와 차이가 있었다. 이때 엉덩이둘레는 아바타가 스캔 모델보다 작고 발목둘레는 더 크다고 밝힌 바 있으며 이러한 결과는 본 연구결과와 일치하였다. 이러한 차이는 앞에서 아바타는 인체의 돌출된 부분을 반영하지 못하고 왜곡된 형태로 구현되어 실제 인체치수보다 더 작게 나타나는 것으로 보인다.

<Table 1> Comparison of Lower Limb Circumference Measurements between the 3D Scan Model in a Neutral Posture and the Virtual Avatar.

(cm, %)

	HSM (A)	HVA (B)	Difference*	
			Value	Rate(%)
Waist circumference	84.4	83.9	-0.5	-0.6
Hip circumference	97.6	96.3	-1.3	-1.3
Thigh circumference	54.3	52.9	-1.4	-2.6
Knee circumference	35.5	34.9	-0.6	-1.7
Calf circumference	38.0	37.6	-0.4	-1.1
Ankle circumference	22.0	22.5	0.5	2.3

*Difference = (%)((B-A/A))*100

<Table 2> Comparison of Lower Limb Length between the Body 3D Scan Model and the Virtual Avatar.

(cm, %)

Length	Measuring area	HSM (A)	HVA (B)	Difference*	
				Vlaue (cm)	Rate (%)
Waist circumference ~	1** (WHL1)	Front crotch length			
	2 (WHL2~CAL2)	96.1	94.7	-1.4	-1.5
	3 (WHL3~CAL3)	95.3	95.2	-0.1	-0.1
Ankle circumference	4 (WHL4~CAL4)	99.2	97.2	-2.0	-2.0
	5** (WHL5)	Back crotch length			

*Difference = $(\%)((B-A/A)) \times 100$

**When measuring the length from the hip circumference to the thigh circumference(H.~T.) the area corresponds to area 1(Front crotch length) and area 5(back crotch length). When scanning the 3D body, the instep area is missing, so this area is not measured.

1) 무릎 굴곡 시 스캔 모델과 아바타 객체 내 체표 둘레 차이 비교

객체 내에서의 자세에 따른 체표둘레 변화는 인체 스캔 모델을 대상으로 할 때, 체표둘레 변화는 <Table 3>과 같다. 정자세와 비교 시 무릎을 30도로 굴곡하는 자세에서의 둘레 변화값은 모든 측정위치의 1구역은 증가하였고 특히 엉덩이최대둘레는 4.3cm, 허벅지둘레는 3.0cm 증가하였다. 2구역의 경우에는 허리둘레지점을 제외하고 모든 측정위치에서 정자세보다 감소하였고 엉덩이최대둘레(-4.8cm)와 허벅지둘레지점(-3.1cm)에서 감소하였다. 이를 제외한 나머지 영역은 무릎둘레지점의 1구역에서 2.7cm 증가하였고, 발목둘레지점의 전면 1구역에서 1.3cm 증가하였다. 반면에 발목둘레지점의 후면 3구역의 경우에는 오히려 -1.4cm 감소하였다. 이러한 결과는 인체 스캔 시 발을 바깥쪽으로 외전시키면서 발목이 회전되어 나타난 결과로 사료된다. 무릎을 60도로 굴곡했을 때의 체표둘레 변화 시 정자세보다 증가한 곳은 엉덩이최대둘레지점(3.7cm)과 허벅지둘레지점과 무릎둘레지점의 1구역에서 3.8cm, 3.2cm 정도 정자세보다 증가하였다. 이 외에도 발목둘레의 후면 3, 4구역은 1.2cm, 1.4cm 각각 증가하였다. 반면에 눈에 띄게 감소한 부위는 허리둘레지점의 3구역(-3.0cm)과

엉덩이최대둘레지점의 4구역(-3.8cm) 및 허벅지둘레지점의 2구역(-2.9cm)에서 감소하였다. 이러한 결과로, 무릎을 굴곡각도에 따라 인체의 체표둘레는 동일한 둘레지점의 전면 또는 후면의 둘레값의 1/2 지점을 기준으로 좌측인지 우측인지에 따라서도 매우 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 외에도 인체의 굴곡각도가 커질수록 체표둘레는 증가와 감소가 측정 위치에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 이상의 결과로, 체표둘레변화율은 정자세와 비교할 때 무릎 30도 굴곡 시 -4.8~4.3cm, 60도 굴곡 시 -3.8~3.8cm 범위에서 감소 또는 증가하는 것으로 확인되었다.

인체 스캔 모델을 이용하여 가상 아바타로 구현하고 이를 인체 스캔 모델과 동일한 수준으로 무릎을 굴곡했을 때의 체표 둘레치수 변화는 무릎을 30도로 굴곡한 자세에서의 체표 둘레치수 변화는 정자세와 비교할 때 엉덩이최대둘레지점의 2, 3구역에서 동일하게 -2.5cm, 4구역에서 -2.7cm 하였다. 허리둘레지점 3구역은 -0.8cm, 허벅지둘레의 3지점에서도 -0.7cm 감소하였다. 이를 제외한 나머지 평가 위치에서의 둘레변화는 -0.4~0.1cm 범위에서 증가와 감소가 공존하였다. 한편, 무릎을 60도로 굴곡했을 경우 아바타의 체표 둘레치수 변화는 엉덩이최대둘레지점의 3구역에서 1.7cm 증

<Table 3> Changes in Body Surface Circumference Measurements according to knee Flexion Angle in the Body 3D Scan Model and Virtual Avatar.

(cm)

		Static posture (A)				30 Degree (B)				60 Degree (C)				Difference							
														30 Degree (B-A)				60 Degree (C-A)			
		Front		Back		Front		Back		Front		Back		Front		Back		Front		Back	
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
H S M	Waist C.	21.2	21.4	22.4	19.4	21.5	22.1	20.4	19.9	20.8	23.2	19.4	20	0.3	0.7	-2.0	0.5	-0.4	1.8	-3.0	0.6
	Hip C.	24.5	23.4	25.1	24.6	28.8	18.6	22.8	24	24.4	21.8	28.8	20.8	4.3	-4.8	-2.3	-0.6	-0.1	-1.6	3.7	-3.8
	Thigh C.	13.9	13.9	13.1	13.4	16.9	10.8	12.6	14.8	17.7	11	13.8	13.3	3.0	-3.1	-0.5	1.4	3.8	-2.9	0.7	-0.1
	Knee C.	10.3	8.9	8.0	8.2	13.0	7.7	7.9	7.3	13.5	6.6	8.5	7.2	2.7	-1.2	-0.1	-0.9	3.2	-2.3	0.5	-1.0
	Calf C.	10.2	9.9	9.4	8.5	11.4	9.7	8.7	8.7	11.7	8.4	8.6	8.4	1.2	-0.2	-0.7	0.2	1.5	-1.5	-0.8	-0.1
	Ankle C.	6.7	6.2	4.8	4.3	8.0	5.3	3.4	5.3	7.2	4.0	6.0	5.7	1.3	-0.9	-1.4	1.0	0.5	-2.2	1.2	1.4
H V A	Waist C.	20.8	21.2	21.4	20.5	20.9	21.4	20.6	20.3	21.2	21.3	20.6	20.8	0.1	0.2	-0.8	-0.2	0.4	0.1	-0.8	0.3
	Hip C.	24.2	23.1	24.7	24.3	24.4	20.6	22.2	21.6	23.8	21.2	26.4	20.4	0.2	-2.5	-2.5	-2.7	-0.4	-1.9	1.7	-3.9
	Thigh C.	13.6	13.9	12.8	12.6	13.2	13.6	12.1	12.7	13.3	13.6	12.6	12.7	-0.4	-0.3	-0.7	0.1	-0.3	-0.3	-0.2	0.1
	Knee C.	8.8	8.8	8.8	8.6	8.8	8.1	8.6	8.0	8.8	7.5	8.4	7.5	0.0	-0.7	-0.2	-0.6	0.0	-1.3	-0.4	-1.1
	Calf C.	9.2	9.9	9.2	9.4	9.2	9.8	9.2	9.4	9.2	9.9	9.2	9.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.3
	Ankle C.	5.3	5.3	5.3	6.6	5.2	5.2	5.3	6.6	5.1	5.1	5.3	6.6	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.2	-0.2	0.0	0.0

C: Circumference

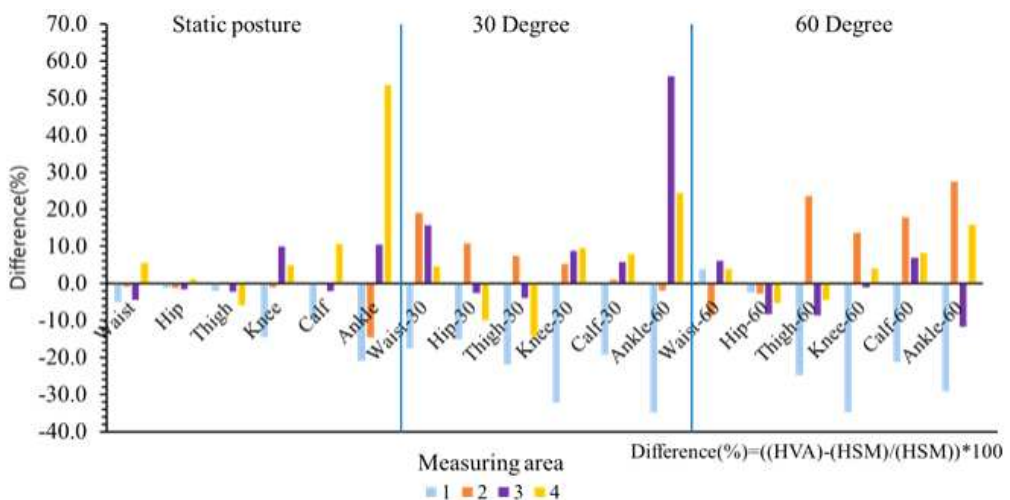
가하였다. 이를 제외한 나머지 평가 위치에서 전반적으로 정자세보다 둘레가 감소하는 경향을 나타냈고 엉덩이최대둘레지점의 4구역에서 -3.9cm 감소하였다. 이곳은 아바타가 무릎을 굴곡하는 동작 시 엉덩이중심부에 골(valley)이 생기는데 체표면을 따라 둘레를 측정 시 골을 지나기 때문에 길이가 줄어든 것으로 사료된다. 이상의 결과로 체표둘레 변화율은 정자세와 비교할 때, 무릎 30도 굴곡 시 -2.7~0.2cm 범위이고 무릎 60도 굴곡 시에는 -4.6 ~1.7cm 수준으로 무릎 굴곡 각도가 클수록 체표둘레 치수는 감소와 증가가 더 큰 것으로 확인되었다.

2) 무릎 굴곡 시 스캔 모델과 아바타 간 체표 둘레 차이 비교

인체 스캔 모델과 가상 아바타 두 객체간의 둘레 차이를 비교한 결과는 <Fig. 7>과 같이 정자세에서 아바타의 발목둘레의 4구역에서 가장 큰 차이를 나타냈다. 또한 무릎둘레지점의 3구역, 종아리최대둘레지점의 4구역 및 발목둘레지점의 3구역에서 아바타가 스캔모델보다 10% 정도 더 큰 것으로 평가되었다. 이렇듯 둘레임에도 불구하고 두

객체 간의 둘레 차이는 인체 전면인지 후면인지에 따라 차이가 발생했고 더 나아가 전면 또는 후면에서도 좌측인지 우측인지에 따라서도 아바타의 둘레값이 더 큰 곳과 작은 곳이 공존하였다. 전반적으로 볼 때 아바타의 체표둘레값은 스캔 모델보다 -30~50% 범위로 비교적 큰 차이가 나타났다. 다음은 무릎을 30도로 굴곡했을 때의 두 객체 간의 체표둘레 차이를 살펴보면, 모든 둘레지점의 1구역은 모든 평가위치에서 아바타의 둘레가 작았고 나머지 둘레지점의 각 구역별로 감소한 부분은 있으나 전반적으로 아바타보다 인체스캔 모델의 둘레치수가 큰 것으로 평가되었다. 특히 발목둘레지점의 3, 4구역은 인체 모델의 둘레치수가 눈에 띄게 컸고 특히 3구역에서 가장 뚜렷한 차이를 나타냈다. 무릎 60도 굴곡 시의 객체 간의 둘레 차이율은 허리둘레를 제외하고 모든 평가위치의 1구역에서 아바타의 둘레가 인체 스캔 모델의 둘레보다 작았고 이를 제외한 나머지 둘레지점의 2구역은 다른 구역보다 상대적으로 스캔 모델의 둘레치수가 아바타보다 더 큰 것으로 나타났다.

이상의 결과로, 스캔 모델과 아바타 두 객체 간의 하지 둘레는 체표의 위치에 따라 차이를 보였



<Fig. 7> Changes in Body Surface Circumference according to Knee Flexion Angle in the body 3D Scan Model and Virtual Avatar.

다. 특히 인체 전면인지 후면인지에 따라서 차이가 나고, 좌측(내측)인지 우측(외측)인가에 따라서도 차이가 발생하였다. 3D 아바타는 무릎 굴곡 시 전면 내측의 피부 신장을 모두 반영하지 못해 대체로 1구역에서 차이율은 음의 값을 보였으며, 후면 피부의 수축으로 인한 체표 둘레 감소를 반영하지 못해 3, 4구역은 양의 값을 보였다. 특이하게도 아바타는 무릎 60도 굴곡에서는 전면의 외측에서는 더 길게 측정되는 양상이 나타났다. 이러한 결과는 <Table 3>과 같이 스캔 모델은 2구역의 경우 1구역보다 근육과 지방이 상대적으로 더 크고 발달하여 무릎 굴곡 각도가 증가할수록 근육의 이동과 수축으로 인해 정자세의 둘레치수보다 -4.8~4.3cm 범위에서 둘레치수가 감소하지만, 아바타의 경우 무릎의 굴곡각이 증가함에도 불구하고 정자세와의 차이가 -3.9~0.3cm로 인체 동작 시 근육과 지방의 변화 양상을 거의 반영하지 못했기 때문으로 사료된다.

이러한 결과는 연구에서 가상착의를 이용해 동적 패턴 설계 및 동적 압력을 평가할 때 연구자들이 하지 체표 치수를 그대로 반영하기보다 본 연구결과를 참고해 추가로 가감하여 평가하면 보다 신뢰로운 결과를 얻을 수 있음을 시사한다.

3) 무릎 굴곡 시 스캔 모델과 아바타 객체 내 체표 길이 차이 비교

다음은 인체 스캔 모델을 대상으로 무릎 굴곡 각도에 따른 하지의 체표길이 치수 변화값이고 <Table 4>와 같다. 정자세와 비교할 때 무릎을 30도로 굴곡했을 경우 가장 눈에 띄게 길이가 변한 곳은 무릎부터 종아리까지이고 전면 2구역에서 4.9cm 수준으로 증가하였다. 이 곳은 무릎가운데점부터 종아리최대둘레선지점까지 수직으로 내린 길이로 무릎을 굴곡함으로써 체표길이가 늘어났기 때문이라 할 수 있다. 두 번째로 변화를 보인 곳은 엉덩이최대둘레선지점부터 허벅지둘레지점의 인체 후면 4구역에서 4.5cm 증가하였는데 이는

엉덩이최대둘레지점부터 허벅지둘레지점까지의 길이에 해당되는데 이는 무릎을 굴곡함으로써 자연스럽게 체표면이 증가하였기 때문이다. 이를 제외한 나머지 평가 부위에서의 체표길이 변화율은 정자세와 비교할 때 -2.7~1.8cm 범위에서 증가와 감소가 공존하는 것으로 나타났다. 다음은 무릎을 60도로 굴곡했을 때의 변화율을 살펴보면, 가장 두드러지게 변한 곳은 엉덩이최대둘레지점부터 허벅지둘레지점까지의 후면 4구역으로 9.2cm 증가하였다. 한편, 무릎둘레지점부터 종아리최대둘레지점의 전면 2구역의 경우 무릎 굴곡 각도가 커질수록 체표길이는 덜 늘어나는 것으로 확인되었다. 무릎을 굴곡 각도가 30도에서 60도로 증가함에도 불구하고 허리둘레지점부터 허벅지둘레지점까지의 체표길이는 거의 유사한 수준으로 변화하는 것으로 나타났다.

가상 아바타를 대상으로 정자세와 무릎을 30도와 60도로 굴곡했을 경우 정자세 대비 체표길이 치수 변화는 우선, 무릎 30도 굴곡 시 정자세와 비교할 때 허리둘레지점부터 엉덩이최대둘레지점에서 -4.4~-2.1cm 범위에서 둘레치수가 감소하였다. 이는 인체 스캔 모델과 동일한 자세가 되도록 허리관절을 앞으로 숙여지도록 아바타의 관절점을 움직이고 무릎을 30도로 굴곡하는 자세로 구현 시 아랫배위치가 상대적으로 평평해짐에 따라 체표길이가 줄어든 것으로 사료된다. 엉덩이최대둘레지점의부터 허벅지둘레지점까지의 2구역에서 -2.2cm 수준으로 길이치수가 짧아졌는데 이곳은 인체 전면둘레의 1/2 지점으로 무릎가운데뼈를 지나는 위치이다. 따라서 무릎을 굴곡할 때 앞엉덩이와 허벅지가 만나는 곳이 접혀지면서 길이치수가 짧아지기 때문이라 사료된다. 반면, 엉덩이최대둘레지점부터 허벅지둘레지점까지의 4구역은 3.1cm 증가하였는데 이는 엉덩이에서 가장 돌출된 부분을 지나 허벅지둘레지점까지 연결된 곳으로 무릎 굴곡 시 체표면이 늘어나면서 나타난 결과이다. 이외에도 무릎둘레지점부터 종아리최대둘레지점까지

<Table 4> Changes in Body Surface Length according to Knee Flexion Angle in the Body 3D Scan Model and Virtual Avatar.

(cm)

Length		Static posture (A)					30 Degree (B)					60 Degree (C)					Difference									
																	30 Degree (B-A)					60 Degree (C-A)				
		Front		Side		Back	Front		Side		Back	Front		Side		Back	Front		Side		Back	Front		Side		Back
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
H S M	W.~H.	23.7	21.3	22.8	24.6	25.1	22.3	21.2	22.7	23	22.4	18.9	18.1	22.1	22.9	22.5	-5.9	-0.5	-0.4	-6.5	-10.8	-20.3	-15.0	-3.1	-6.9	-10.4
	H.~T.		20.3	19.8	20.9			18.2	19.7	23.6			16.9	19.5	28.3			-10.3	-0.5	12.9			-16.7	-1.5	35.4	
	T.~K	23.5	24.7	23.3	22.8		21.4	24.8	21.8	20.9		21.4	24.8	21.8	20.9		-8.9	0.4	-6.4	-8.3		-8.9	0.4	-6.4	-8.3	
	K.~C.	13.9	13.3	12.7	13.3		15.2	17.5	13.6	12.8		11.8	14.3	12.4	10.1		9.4	31.6	7.1	-3.8		-15.1	7.5	-2.4	-24.1	
	C.~A.	20.8	20.5	22	22.7		21.4	20.7	21.2	22.1		21.4	20.7	21.2	22.1		2.9	1.0	-3.6	-2.6		2.9	1.0	-3.6	-2.6	
H V A	W.~H.	22.2	21.2	21.5	22.4	22.1	18.9	16.8	18.2	20.1	20.0	18.2	16.1	18.5	21	20.3	-14.9	-20.8	-15.3	-10.3	-9.5	-18.0	-24.1	-14.0	-6.2	-8.1
	H.~T.		19.9	19.1	19.1			18.1	19.6	22.1			17.5	20.1	24.3			-9.0	2.6	15.7			-12.1	5.2	27.2	
	T.~K	22.9	24.2	21.8	21.5		20.8	24.4	20.4	19.2		22.6	25.3	19.8	19.3		-9.2	0.8	-6.4	-10.7		-1.3	4.5	-9.2	-10.2	
	K.~C.	13.4	12.6	12.1	12.3		16.1	16.1	12.6	11.9		11.5	13.4	11.6	10.8		20.1	27.8	4.1	-3.3		-14.2	6.3	-4.1	-12.2	
	C.~A.	20.7	19.7	20.9	21		20.4	19.9	21	20.3		20.3	19.8	21.1	21.3		-1.4	1.0	0.5	-3.3		-1.9	0.5	1.0	1.4	

W = Waist, H = Hip, T = Thigh, K = Knee, C = Calf, A = Ankle

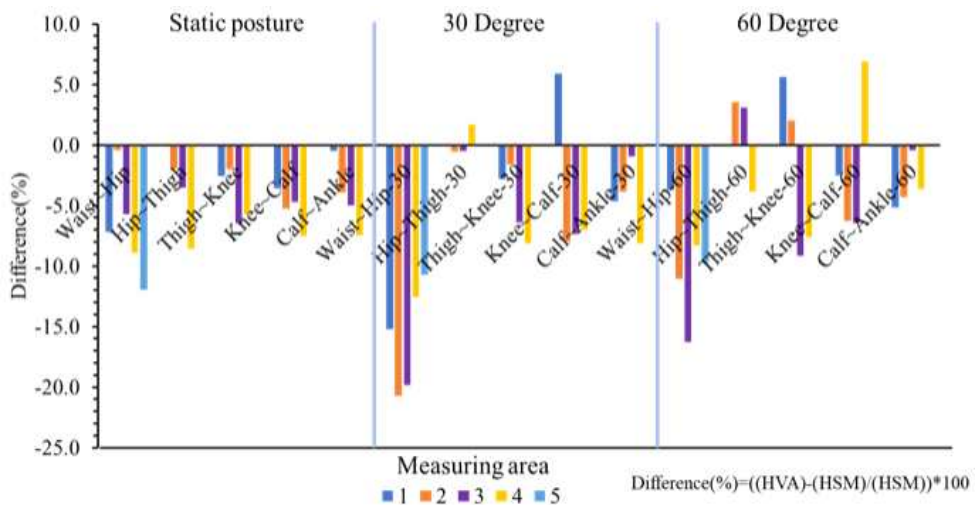
* When measuring the length from the hip circumference to the thigh circumference(H.~T.) the area corresponds to area 1(Front crotch length) and area 5(back crotch length). When scanning the 3D body, the instep area is missing, so this area is not measured.

의 2구역은 정자세보다 길이치수가 증가하였는데 여기서도 무릎을 굴곡하면서 체표면이 신장되기 때문에 나타난 결과이다. 무릎을 굴곡할 때 전반적으로 길이치수는 정자세보다 -4.4~3.1cm 범위에서 평가 위치에 따라 증가와 감소가 공존하였다. 무릎을 60도로 굴곡했을 때의 체표길이 치수 변화를 살펴보면, 무릎 30도 굴곡 시와 마찬가지로 허리둘레지점부터 엉덩이최대둘레지점까지의 2구역에서 -5.1cm 감소하였고 1구역도 -3.8cm 감소하여 다른 평가위치보다 눈에 띄게 길이가 감소하였다. 이는 앞서 30도에서 기술했듯이 아바타와 인체 스캔모델과 유사한 자세가 되도록 아바타의 허리 관절점을 앞으로 숙이는 자세로 움직이고 무릎을 굴곡하는 자세로 구현함으로써 자연스럽게 아랫배 부위가 수축되어 나타난 결과라 사료된다. 한편, 60도 굴곡 시 엉덩이최대둘레지점부터 허벅지둘레지점까지의 4구역은 6.3cm 정도 증가하였는데, 이 부위도 앞서 기술했듯이 무릎 30도와 같은 이유로 증가한 것이라 할 수 있다. 전반적으로 인체 외측에서 길이가 짧아졌는데 이는 무릎을 더 굴곡할수록 엉덩이가 뒤로 빠지게 되면서 상대적으로 측면의 체표면이 수축하기 때문인 것으로 판단된다.

무릎 60도 굴곡 시의 체표길이 치수는 -3.5~6.3cm 범위에서 인체 부위별로 정자세보다 길이가 더 길어지거나 짧아지는 것으로 평가되었다.

4) 무릎 굴곡 시 스캔 모델과 아바타 객체 간 체표 길이 차이 비교

정자세 시의 두 객체 간의 차이는 아바타의 체표길이 치수가 허리둘레지점부터 엉덩이최대둘레지점까지 전 구역에서 짧았는데 기존문헌(Hong, 2020; Lee & Shon, 2012)도 이 부위의 길이는 실제 인체 치수보다 아바타의 길이가 더 작은 것으로 나타나 본 연구결과와 일치하였다. 무릎을 30도로 굴곡한 자세에서 두 객체 간의 길이 차이는 전반적으로 아바타의 길이가 작으나 무릎둘레지점부터 종아리최대둘레지점의 1구역은 아바타의 길이가 스캔 모델보다 더 길게 측정되었다. 이는 무릎 굴곡 시 무릎 내측 즉, 1구역의 체표면에 주름이 잡히면서 체표길이가 줄어들지만 아바타의 경우 이 부분을 거의 반영하지 못하기 때문에 나타난 결과라 사료된다. 60도의 경우에는 엉덩이최대둘레부터 허벅지둘레지점의 2와 3구역, 허벅지둘레부터 무릎둘레지점까지의 1, 2구역은 아바타



〈Fig. 8〉 Changes in Body Surface Length according to Knee Flexion Angle in the Body 3D Scan Model and Virtual Avatar.

가 스캔 모델보다 길이 치수가 더 긴 것으로 평가되었다. 이 부위는 인체의 근육 등 연부조직이 무릎 굴곡 시 근육 수축 또는 이동함으로써 체표면의 길이가 변하게 된다. 하지만 앞서 기술했듯이 아바타는 이러한 부분들을 반영하지 못하기 때문에 해당 아바타의 길이가 스캔 모델보다 더 체표 길이가 긴 것으로 사료된다. 이 외에도 무릎둘레 지점부터 종아리최대둘레지점까지의 4구역에서도 아바타의 길이가 더 길 것으로 평가되었는데 이 부위는 후면 종아리의 가운데를 지나는 비복근이 위치한 곳으로 무릎 굴곡 시 근수축이 발생하게 된다. 하지만 이 부위에서도 아바타는 근육의 움직임을 반영하지 못해 나타난 결과라 할 수 있다.

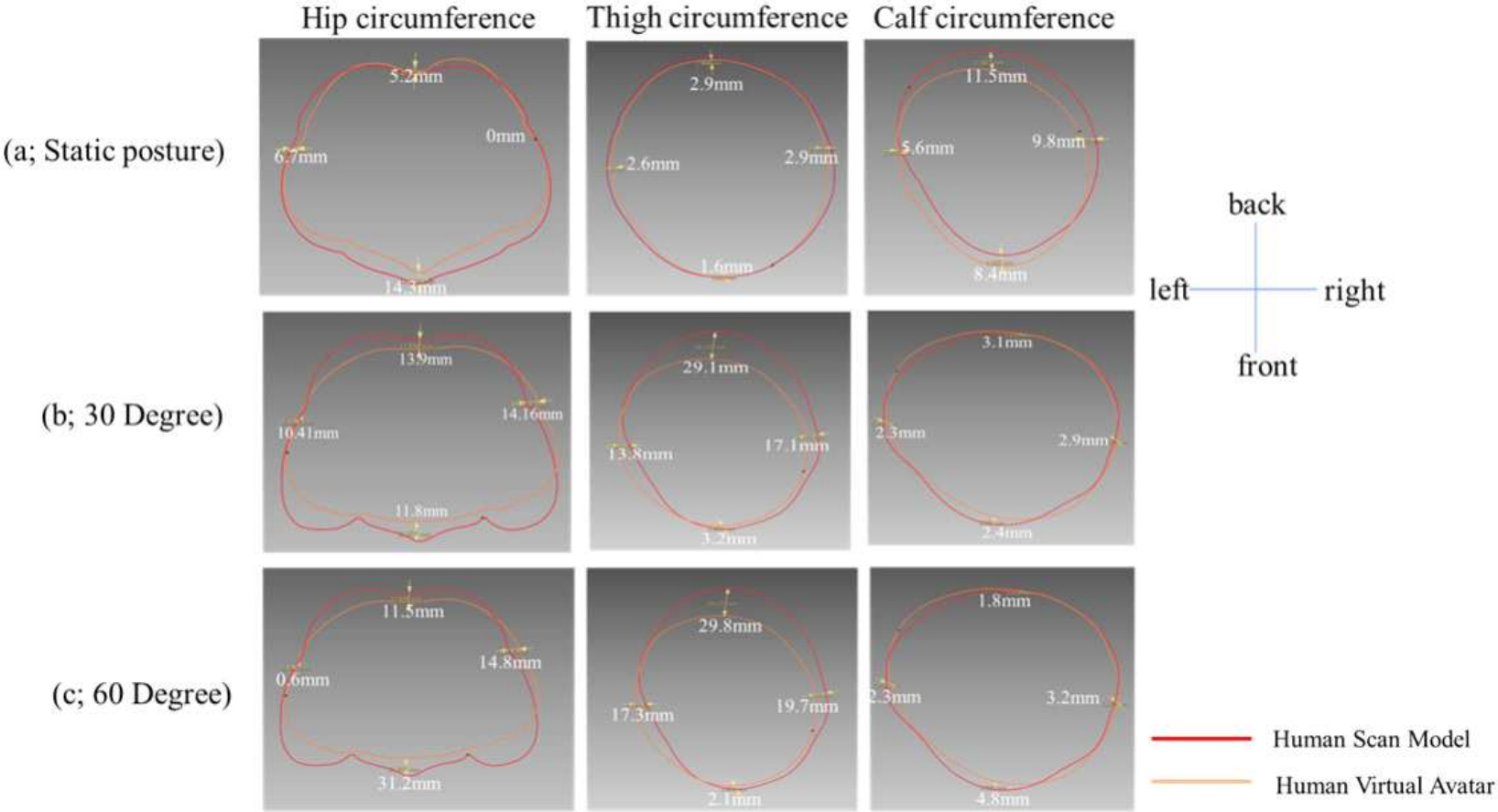
이상의 결과에서 인체 실제치수를 아바타 사이즈 편집기에 적용하고 정자세 아바타로 구현했음에도 불구하고 실제로 아바타의 체표 길이를 측정하면 스캔 데이터의 인체치수와는 차이가 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과 역시, 가상착의 프로그램을 이용해 동적 패턴을 설계하거나 평가할 때 유의해야 할 것이다.

2. 인체 3D 스캔 모델과 가상 아바타의 단면 변화

이 연구에서는 세 지점에 대해 인체 스캔 모델과 이를 이용한 가상 아바타 간의 3차원 단면 형상을 비교하였다. 즉, 엉덩이최대둘레지점, 허벅지둘레지점 및 종아리최대둘레지점에서 단면을 중첩한 형태는 <Fig. 9>와 같다. 정자세일 때 인체 스캔 모델과 아바타 간의 단면 형태를 보면 엉덩이둘레의 경우 인체 스캔 모델이 인체 전면에서 더 큰 반면 후면에서는 아바타가 더 컸으나 전반적으로 스캔 모델이 아바타보다 더 큰 것으로 나타났다. 허벅지둘레의 단면 형태는 두 객체 간의 차이가 거의 없었다. 무릎둘레의 단면 형태는 전면의 경우 아바타가 후면은 스캔 모델이 더 컸고 좌측은 아바타가 우측은 스캔 모델이 더 큰 것으로 나타났다. 무릎 30도 굴곡 시 두 객체 간의 엉덩이최대둘레, 허벅지둘레 및 종아리최대둘레의 단면

의 형태를 보면 엉덩이최대둘레는 스캔 모델이 전면과 후면에서 더 컸지만 우측은 아바타가 더 큰 것으로 나타났고 좌측에서는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 허벅지둘레의 경우 전면은 두 객체 간의 차이가 거의 없고 좌측은 아바타가 우측은 스캔 모델의 더 컸으며 후면은 눈에 띄게 스캔 모델이 더 큰 것으로 평가되었다. 특히, 우측부터 후면의 경우 스캔 모델이 더 컸는데 이는 무릎 굴곡 시 외측에 허벅지 외측에 해당되는 곳으로 이는 근육과 지방 등 연부 조직이 상대적으로 이동함으로써 나타난 결과라 판단된다. 다음은 종아리최대둘레의 단면 형태로 종아리는 좌측부터 전면까지는 스캔 모델이 더 컸으나 전반적으로 볼 때 두 객체 간의 차이는 크지 않았다. 무릎을 60도로 굴곡했을 때의 객체 간의 단면 형태는 엉덩이최대둘레의 경우 눈에 띄게 좌·우측에서 스캔 모델이 아바타보다 더 컸고 전면의 경우에는 아바타가 스캔 모델보다 더 큰 것으로 평가되었다. 허벅지의 경우 전반적으로 스캔 모델이 인체 전면부터 후면까지 더 컸는데 이는 무릎을 60도로 굴곡하는 자세에서도 30도와 마찬가지로 근육과 지방 등의 이동함으로써 나타난 결과라 사료된다. 무릎둘레지점의 단면의 경우 전반적으로 아바타보다 스캔 모델이 더 컸고 특히 전면부터 우측까지의 단면이 눈에 띄게 더 우측으로 이동한 것으로 확인되었다.

이상의 결과로, 스캔 모델의 엉덩이최대둘레지점, 허벅지둘레지점 및 종아리최대둘레지점의 단면 형태는 무릎 굴곡 각도에 따라 인체의 근육, 지방 등과 같은 연부조직의 이동 방향을 잘 반영하고 있으나 아바타는 거의 반영하고 있지 않았다. 이는 결과적으로 인체 움직임에 있어 둘레 값의 차이를 초래하는 결과를 가져온다는 것을 간접적으로 의미하고 있다고 판단된다. 또한 3D 스캔 데이터를 불러와 아바타로 변환했음에도 불구하고 그 과정에서 CLO 3D는 기존에 저장된 아바타의 3차원 형상을 더 따르는 형식으로 변환이 됨을 알 수 있었다. 실질적으로 육안으로는 3차원 스캔 데



〈Fig. 9〉 Cross-sectional Shape and Distance between the Two Objects according to Knee Angle.

이터와 아바타의 차이가 크게 구별되지 않으나, 3차원 단면 형상을 비교한 결과, 엉덩이둘레의 단면 형태가 가장 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

3. 아바타 변환 기능의 체표면 치수에 대한 종합적 고찰

아바타 변환 기능의 체표면 치수 분석 결과를 종합하여 <Table 5>에 정리하였다. 두 객체 간의 무릎을 30도로 굴곡 시 발목둘레를 제외하고 아바타가 스캔 모델보다 둘레 치수가 작은 것으로 확인되었다. 특히 엉덩이최대둘레에서 -5.4cm(-5.7%) 줄었다. 이 외에도 허벅지둘레는 -3.5cm(-6.4%), 무릎둘레는 -2.4cm(-6.7%) 수준으로 아바타의 길이가 더 작은 것으로 평가되었다. 전반적인 가상 아바타의 체표둘레 치수는 인체 스캔 모델의 체표둘레 치수보다 -5.4~0.3cm(-5.7~1.4%) 범위에서 평가 위치에 따라 아바타의 체표둘레는 스캔 모델보다 부위별로 증가와 감소를 나타냈다. 다음은 무릎을 60도로 굴곡했을 때 무릎둘레를 제외한 나머지 부위에서 아바타의 둘레가 스캔 모델보다 더 작은 것으로 나타났다. 특히, 엉덩이최대둘레는 -4.7cm(-4.9%), 허벅지둘레는 -3.6cm(-6.5%) 및

무릎둘레는 -3.6cm(-10.1%) 정도 아바타의 둘레 치수가 작은 것으로 평가되었다. 가상착의 동적 아바타 변환은 무릎 굴곡 각도에 따라 실제 인체 치수보다 인체 부위별로 증가와 감소의 경향이 달리 나타나고, 특히 엉덩이최대둘레와 허벅지둘레 및 무릎둘레의 경우 둘레차이가 크게 발생하므로 이 부분에 대해 유념해야 할 것이다. 이를테면, 하의의 실루엣이 슬림핏인 경우 아바타가 약 엉덩이둘레의 경우 약 6% 가량 작은 것을 고려해 여유량 설정에 반영해야 함을 확인했다.

다음으로 무릎 굴곡 동작 시 두 객체 간 체표길이 차이에 대한 결과를 <Table 6>에 나타냈다. 허리둘레지점부터 발목둘레지점까지 체표길이 차이는 무릎을 30도와 60도 모두 아바타의 길이가 스캔모델의 길이보다 전반적으로 다 작았다. 특히 무릎을 30도 굴곡 시 인체 후면 중앙 3구역에서 -7.6cm(-7.6%) 수준에서 작았고 전면 중앙 2구역, 옆선 3구역은 유사한 수준으로 작았으면 -7.6~-4.7cm(-7.6~-4.7%) 범위에서 차이가 있는 것으로 확인되었다. 무릎 60도 굴곡 시에는 전면 중앙 2구역에서 -2.7cm(2.8%) 정도 아바타의 체표길이가 더 작았고 옆선 3구역, 내측 인심 4구역은 -1.8cm(-1.9%), -1.5cm(-1.5%) 정도 작았으며

<Table 5> Difference in Body Surface Circumference Measurements between the Two Objects during Knee Flexion Movement.

(cm, %)

	30 Degree		60 Degree		Difference*			
	HSM	HVA	HSM	HVA	30 Degree		60 Degree	
					Value (cm)	Rate (%)	Value (cm)	Rate (%)
Waist circumference	83.9	83.2	83.4	82.8	-0.7	-0.8	-0.6	-0.7
Hip circumference	94.2	88.8	95.8	91.1	-5.4	-5.7	-4.7	-4.9
Thigh circumference	55.1	51.6	55.8	52.2	-3.5	-6.4	-3.6	-6.5
Knee circumference	35.9	33.5	35.8	32.2	-2.4	-6.7	-3.6	-10.1
Calf circumference	38.5	37.6	37.1	37.4	-0.9	-2.3	0.3	0.8
Ankle circumference	22.0	22.3	22.9	22.1	0.3	1.4	-0.8	-3.5

*Difference value = HAV - HSM, Rate = ((HAV - HSM) / HSM) * 100

<Table 6> Difference in Body Surface Length Measurements between the Two Objects during Knee Flexion Movement.

(cm, %)

Area		30 Degree		60 Degree		Difference*			
						30 Degree		60 Degree	
		HSM	HVA	HSM	HVA	Value (cm)	Rate (%)	Value (cm)	Rate (%)
Waist circumference point ~ Ankle circumferene point	1** (WHL1)								
	2 (WHL2~CAL2)	99.1	94.4	95.9	93.2	-4.7	-4.7	-2.7	-2.8
	3 (WHL3~CAL3)	95.8	91.0	94.6	92.8	-4.8	-5.0	-1.8	-1.9
	4 (WHL4~CAL4)	99.5	91.9	96.8	95.3	-7.6	-7.6	-1.5	-1.5
	5** (WHL5)								

* Difference value=HVA-HSM, Rate=((HVA-HSM)/HSM)*100

** Areas 1 and 5 are the locations of the groin area, so they are excluded from measurements when scanning the 3D human body.

전반적으로 -2.7~-1.8cm(-2.8~-1.5%) 범위에서 아바타이 체표길이가 더 작았다. 이러한 체표길이는 하의에서 바지 길이에 영향을 받는 부위일 뿐 아니라 동작 시 길이방향의 여유량이 부족하면 움직임에 제약을 받는다. 이에 3차원 동작 아바타를 이용한 피팅 평가 시 밑위길이와 바지길이에 대하여 추가적인 여유량에 대해 고려해야함을 알 수 있다.

IV. 결론 및 제언

본 연구는 20대 남성 1인을 대상으로 정자세, 무릎 30도 굴곡 자세, 무릎 60도 굴곡 자세의 스캔 모델을 CLO 3D 가상착의 시스템의 가상 아바타로 구현하고 두 객체 간의 하지 둘레 항목과 길이 항목의 둘레값을 비교하였으며 엉덩이최대둘레지점, 허벅지둘레지점 및 종아리최대둘레지점의 단면형태도 비교하였다. 인체 스캔 시 허리둘레, 엉덩이최대둘레, 허벅지둘레, 무릎둘레, 종아리최대둘레 및 발목둘레를 체표면에 직접 표시함으로써 무릎 굴곡 시에도 정자세와 동일한 위치에서 인체둘레 및 길이를 측정하였다. 가상아바타로 구현한 후 스캔 모델과 동일한 사이즈가 되도록 아

바타 사이즈 편집창에서 편집이 가능한 항목은 모두 스캔 모델과 동일한 치수를 적용한 후 정자세 아바타, 무릎 30도 굴곡 아바타, 무릎 60도 굴곡 아바타로 구현하였으며 체표치수, 단면형태를 비교하였으며 결론은 다음과 같다.

첫째, 인체 3차원 스캔 모델과 이를 활용한 가상 아바타 두 객체 간의 둘레치수 차이는 정자세일 경우 아바타가 스캔 모델보다 허벅지둘레에서 -1.4cm(-2.6%) 정도 더 작게 측정되었고, 전반적으로 -1.4~0.5cm(-2.6~2.3%) 범위에서 부위에 따라 체표둘레 치수 차이를 나타냈다.

둘째, 정자세에서 허리둘레지점부터 발목둘레지점까지의 체표길이는 2구역(전면), 3구역(외측), 4구역(후면) 전 구역에서 아바타가 스캔 모델보다 길이가 더 작았고, 후면 4구역(후면)에서 -2.0cm(-2.0%)정도 작게 측정되었다. 이는 엉덩이돌출점과 종아리최대둘레지점을 지나는 위치에 해당되는 곳인데 아바타로 변환 시 인체의 돌출된 부분이 모두 반영되지 못했기 때문이다.

셋째, 무릎을 30도와 60도로 굴곡 시 스캔 모델과 아바타 간의 둘레치수 차이는 30도는 엉덩이최대둘레에서 -5.4cm(-5.7%) 정도 아바타가 스캔 모델보다 더 작게 측정되었다. 허벅지둘레는 -3.5cm

(-6.4%) 수준에서 더 작았고 무릎둘레의 경우에도 -2.4cm(-6.7%) 정도 더 작게 측정되어 전반적으로 아바타가 스캔모델보다 인체둘레치수가 작았다. 무릎 굴곡 동작 시의 두 객체 간의 체표길이 치수 차이는 무릎을 30도 굴곡했을 때 전반적으로 아바타의 길이가 작았고 -7.6~-4.7cm(-7.6~-4.7%) 범위에서 차이가 있었으며 인체 후면 즉, 엉덩이 최대돌출점과 종아리최대둘레지점을 지나는 곳에서 체표길이 치수 차이가 가장 컸다. 무릎을 60도로 굴곡할 경우도 마찬가지로 아바타가 스캔 데이터에 비해 -2.7~-1.8cm(-2.8~-1.5%) 수준으로 나타났다.

넷째, 스캔 모델과 아바타 두 객체의 허리둘레 지점, 엉덩이최대둘레지점 및 종아리최대둘레지점에서 무릎 굴곡 각도에 따른 단면의 형태 변화는 엉덩이둘레의 경우 정자세에서는 두 객체 간의 형태가 유사했지만, 무릎의 굴곡 각도가 커질수록 아바타는 굴곡이 적은 완만한 형태로 드러났다. 허벅지둘레지점의 경우 두 단면의 형태는 정자세에서는 유사하였으나 무릎의 굴곡 각도가 증가할수록 전면을 제외한 좌·우측과 후면에서 두 객체 간의 단면의 거리는 차이 있었다. 한편, 종아리최대둘레 지점의 경우에는 모든 곳에서 거리 차이는 있었으나, 단면의 형태는 큰 차이가 없었다.

이상의 연구로 인체 스캔 모델을 가상 아바타로 구현하고 두 객체 간의 정자세 및 동적 자세 시의 체표치수 차이를 인체부위별로 구간화하여 미시적으로 분석하는 한편, 종합적인 차이도 분석하였다. 그 결과 현재 가상착의 프로그램에서 제공하는 아바타 변환 기능과 동적 아바타는 인체의 동작에 따른 근육과 골격의 형태와 치수를 모두 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 특히, 가상착의 프로그램을 이용해 핏을 검토하거나 동적 패턴을 제도할 경우에는 본 연구결과에서 제시하는 아바타와 스캔 데이터의 차이에 대해 유념할 필요가 있다. 본 연구에서 인체 스캔 모델은 1인으로 대상으로 수행했다는 한계가 있으나, 실제 인체 스

캔 정자세 모델을 이용하여 정자세 아바타, 동작 아바타로 구현하고 실제 인체의 체표치수와 비교 검증하여 아바타 변환 기능의 활용성을 검증한데 의의가 있다.

Reference

- Do, W.-H. (2012). A study on the fit preferences of the tailored jacket for women using 3D clothes modeling system. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 36(9), 940-951. <http://doi.org/10.5850/JKSCT.2012.36.9.940>
- Ermin, G., & Şen Kılıç, A. (2025). Design and evaluation of mastectomy bras using 3D virtual prototyping. *Applied Sciences*, 15(4), 1788. <http://doi.org/10.3390/app15041788>
- Hong, E.-H. (2020). Usability verification of virtual clothing system for the production of a 3D avatar reproduced from 3D human body scan shape data-focusing on the CLO 3D program. *Journal of the Korea Fashion and Costume Design Association*, 22(1), 1-13. <http://doi.org/10.30751/kfcd.2020.22.1.1>
- Irovan, M., Indrie, L., Frunze, V., Florea-Burduja, E., & Raru, A. (2023). Digital methods in the development of adaptive clothing for people with disabilities. *Industria Textila*, 74(1), 28-34. <http://doi.org/10.35530/IT.074.01.202295>
- Jeong, Y. (2016). Development of ergonomic pattern for motorcycle pants using 3D virtual clothing. *Korean Journal of Human Ecology*, 25(2), 207-225. <http://doi.org/10.5934/kjhe.2016.25.2.207>
- Kang, Y. (2014). A study on the reality of avatar sizes comparing with body sizes of women aged 19 to 59. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 38(6), 896-912. <http://doi.org/10.5850/JKSCT.2014.38.6.896>
- Kim, H. & Lim, H. (2022). A comparative analysis between real and virtual stretchable tight-fitting clothing. *International Journal of Costume and Fashion*, 22(2), 29-43. doi.org/10.7233/ijcf.2022.22.2.029
- Kim, N. Y., & Lee, H. (2023). Exploring variables affecting the clothing pressure of compression garment-A comparison of actual garments and virtual garments. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 47(6), 1080-1095. <http://doi.org/10.5850/JKSCT.2023.47.6.1080>
- Lee, M. J. & Sohn, H. S. (2012). A comparative analysis of the different between CLO 3D avatar sizing and actual body measurement shapes. *Journal of Fashion Business*, 16(4), 137-151. <http://doi.org/10.1080/10758175.2012.708888>

- 12940/jfb.2012.16.4.137
- Lee, Y.-R. & Jang, J.-A. (2020). A comparative of the different between virtual fashion 3D avatar and Size Korea of adult women's body shapes. *Fashion & Textile Research Journal*, 22(1), 87-93. <http://doi.org/10.5805/SFTI.2020.22.1.87>
- Lim, J. (2023). Developing of slacks clothing pattern for the elderly men using a 3D virtual garment simulation system. *The Research Journal of the Costume Culture*, 31(5), 627-639. <http://doi.org/10.29049/rjcc.2023.31.5.627>
- Liu, K., Wang, J., & Hong, Y. (2017). Wearing comfort analysis from aspect of numerical garment pressure using 3D virtual-reality and data mining technology. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 29(2), 166-179. <http://doi.org/10.1108/IJCST-03-2016-0017>
- Seong, O. J. & Kim, S. J. (2020). Building up the foundation for the elderly apparel industry through the development on shirt sloper of elderly obese males-Applying CLO 3D program. *The Research Journal of the Costume Culture*, 28(3), 299-312. <http://doi.org/10.29049/rjcc.2020.28.3.299>
- Shin, J. (2023). A study of leggings patterns using a 3D virtual simulation program-Focused on the women in 30's. *Journal of the Korea Fashion and Costume Design Association*, 25(4), 93-106. <http://doi.org/10.30751/kfcda.2023.25.4.93>
- Teyeme, Y., Malengier, B., Tesfaye, T., Vasile, S., & Van Langenhove, L. (2023). Fit and pressure comfort evaluation on a virtual prototype of a tight-fit cycling shirt. *AUTEX Research Journal*, 23(2), 153-163. <http://doi.org/10.2478/aut-2021-0057>
- Vuruskan, A., & Ashdown, S. P. (2025). Comparison of actual and virtual pressure of athletic clothing in active poses. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 37(1), 1-21. <http://doi.org/10.1108/IJCST-02-2024-0036>