# Validity of a Portable APDM Inertial Sensor System for Stride Time and Stride Length during Treadmill Walking

트레드밀 보행 시 APDM 포터블 관성센서 시스템을 이용한 보행 활보장 및 활보장 시간의 타당성

Gye Rae Tack[1,2], Jin Seung Choi[1,2,*]

[1]Department of Biomedical Engineering, Konkuk University, Chungju, South Korea

[2]BK21 PLUS Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University, South Korea

[*]Corresponding author

Jin Seung Choi, Ph.D. Assistant Professor

#410, Biomedical Engineering, 268 Chungwon-daero, Chungju-si, Chungbuk, 27478, South Korea

Phone: +82.43.840.3768, Fax: +82.43.851.0620, Email: jschoi98@kku.ac.kr

**Acknowledgements**

This paper was supported by Konkuk University.

**Abstract**

**Objective**: The purpose of this study is to compare the accuracy of stride time and stride length provided by a commercial APDM inertial sensor system with the results of a three dimensional motion capture during treadmill walking.

**Method**: Five healthy males participated in this experiment. All subjects walked on the treadmill for 3 minutes at their preferred walking speed. Three-dimensional motion capture system (3D motion) and an APDM inertial sensor system were simultaneously used for extracting gait variables, such as stride time and stride length. Mean difference and RMS difference were used to compare the measured gait variables from the two measurement devices. The regression equation derived from the range of motion of the lower limb was also applied to correct the error of stride length.

**Results**: As a result, the stride time extracted from the APDM almost coincided with those from 3D motion (the mean difference and RMS difference are less than 0.0001 sec and 0.0085 sec, respectively). On the other hand, in the case of the stride length, mean difference and RMS difference are less than 0.1141 m and 0.1254 m, respectively. However, after the correction of the stride length error using the derived regression equation, the mean difference and the RMS difference decreased to 0.0134 m and 0.0556 m or less, respectively.

**Conclusion**: In this study, we confirmed the possibility of using the temporal variable provided from the APDM during treadmill walking. By applying the regression equation derived only from the range of motion provided by the APDM, the error of the spatial variable could be reduced. Although further studies are needed for additional subjects and various speeds, this result may be the basic data for using APDM in treadmill walking.

*Keywords:* Treadmill, APDM inertial sensor system, Stride time, Stride length, Regression equation

## Introduction

일반적인 보행 분석 방법은 광학적 영상측정기법을 이용한 동작분석 장비를 활용한다. 이 장비의 장점은 정밀한 동작 측정이 가능하고, 상업적 장비의 폭넓은 보급으로 인해 다양한 측정 장비와의 동기화 및 측정 데이터의 공유가 용이하다는 것이다. 또한, 근골격 모델링 소프트웨어와의 동시 작업도 가능하다. 하지만, 매우 고가인 적외선 카메라가 다수 필요하며, 실험 공간의 한계를 가지고 있다.

트레드밀은 이러한 실험 공간의 제약을 해소하고 다양한 실험 조건 조절이 용이하여, 보행 연구에 널리 사용되고 있다. 최근에는 가상현실 컨텐츠로 인해 그 활용성이 부각되고 있다. 하지만, 일반적인 트레드밀은 평지 보행과 비교하여, 긴 시간의 변동성, 생체역학적인 패턴 및 시각 정보의 불일치 등의 한계가 보고되고 있다(Alton, Baldey, Caplan, & Morrissey, 1998; Dingwell, Cusumano, Cavanagh, & Sternad, 2001; Dingwell & Cusumano, 2010; Lee & Hidler, 2008). 이러한 변화는 실제적인 평지 보행과의 비교를 통해 확인하고 개선되어야 할 것이다.

최근 인체 동작의 측정 및 분석에 관성센서가 폭넓게 활용되고 있다. 관성센서를 이용한 동작 측정은 휴대성이 뛰어나며, 다양한 연구를 통한 측정 정확도도 많이 향상되어 많은 연구자들이 사용하고 있다. 일반적으로 사용되는 관성센서는 가속도계 (accelerometer), 각속도계 (gyroscope), 지자계 (magnetometer)이며, 이러한 센서는 측정 목적에 따라 개별 또는 함께 사용되고 있다. 상용화된 관성센서시스템 중 APDM 의 MobilityLab 은 보행 및 균형성 평가 연구에 널리 사용되고 있다. 이 시스템은 각 3 축의 가속도계, 각가속도계, 지자계가 포함된 관성센서모듈 6 개로 구성되며, 보행 및 다양한 균형성 평가방법에 대한 측정 데이터를 제공한다. 보행 연구의 관점에서, 이 시스템은 실외 평지 보행 시 신뢰할 수 있는 보행 데이터를 제공한다는 점에서 상당히 유용하다(Mancini et al., 2011). 하지만, 이 장비는 평지 보행에 초점을 맞추어 개발되었으며(Aminian, Najafi, Büla, Leyvraz, & Robert, 2002; Salarian, Burkhard, Vingerhoets, Jolles, & Aminian, 2013), 트레드밀 보행에 대한 검증이 부족한 상태이다. 이러한 이유로, 평지와 트레드밀에서의 10 분 보행 시 보행 변동성을 비교한 선행 연구에서, 실외 평지와 트레드밀 보행에서 각각 관성센서와 3 차원 동작분석기를 사용된 바 있다(Choi, Kang, Bang, Kang, & Tack, 2011). 이는 두 실험조건에서 신뢰할 수 있는 측정 방법이 각기 달랐기 때문이지만, 일반적으로 동일한 변인의 측정과 비교를 위해서는 같은 장비로 분석하는 것이 요구된다. 최근 트레드밀 보행에 APDM 관성센서 시스템을 활용한 선행 연구가 있으나(Hollman et al., 2016), 이는 트레드밀 보행 시 관성센서 시스템의 타당성을 확인한 연구는 아니다.

이를 정리하면, 보편적인 보행 연구를 위해 다양한 실험조건에서 일률적으로 사용될 수 있는 측정 장비가 필요하며, 최근 폭넓게 사용되고 있는 관성 센서의 활용 가능성이 매우 크다. 즉, 트레드밀 보행 시 발생하는 영향을 확인하기 위해 실외 평지 보행 데이터와의 직접적인 비교가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 이에 대한 기초연구로, 트레드밀 보행 실험을 수행하여 상용화된 APDM 관성센서 시스템으로부터 추출된 보행 변인의 정확도를 3 차원동작분석기를 이용한 결과와 비교하고, 사용 가능성에 대해 논의하고자 한다.

## Method

### 1. Participants

본 연구에는 최근 2 년간 하지 근골격계 질환 경험이 없고, 정상적인 보행이 가능한 20 대 대학생 5 명이 참여하였다. 모든 실험 참가자는 실험 설명문 및 동의서에 동의한 후 실험에 참가하였으며, 실험내용은 교내 연구윤리위원회(IRB)로부터 승인을 받았다(7001355-201507-HR-066). 피험자의 신체특성은 <Table 1>과 같다.

Table 1. Subject characteristics

| Subject no. | Age (years) | Height (cm) | Weight (kg) | Leg length (cm) | Preferred walking speed (km/hr) |
|---|---|---|---|---|---|
| S1 | 28 | 170 | 98 | 84.4 | 3.6 |
| S2 | 27 | 176 | 73 | 91.9 | 3.5 |
| S3 | 28 | 186 | 96 | 96 | 3.8 |
| S4 | 23 | 175 | 67 | 90.5 | 3.0 |
| S5 | 22 | 176 | 70 | 87.5 | 3.4 |
| mean | 25.6 | 176.6 | 80.8 | 89.9 | 3.46 |
| SD | ±2.9 | ±5.8 | ±15.0 | ±4.3 | 0.30 |

2. Measurements

모든 실험은 동일한 트레드밀(RX9200S, TOBEONE, Korea)에서 수행되었다. 모든 피험자는 본 실험에 앞서 트레드밀 적응을 위해 5 분 이상의 연습보행을 수행하고, 본인의 선호보행속도를 결정했다. 피험자는 트레드밀에서 자신의 선호보행속도를 이용해 2 분간 보행을 수행하였다. 이 때 피험자의 시선은 전방을 주시하고, 보행에만 집중하도록 요청하였다.

보행 변인 도출을 위해, APDM 관성센서 시스템 (APDM Inc., USA)과 3 차원 동작분석기(Motion analysis Inc., USA)를 동시에 사용하였다. APDM 관성센서 시스템으로부터 보행 변인 도출을 위해 6 개의 센서를 신체 각 부위(dorsal side of both wrists, the sternum close to the clavicular notch, the lower back in correspondence to L4/L5, and the frontal side of the shanks close to the malleoli)에 부착하였으며, 센서의 원데이터(raw data)는 샘플링 주파수 128Hz 로 수집하였다. 3D motion capture system 은 적외선 카메라 6 대로 구성되었으며, 지름 6mm 의 구형 반사마커를 Helen hayes 마커셋의 발 뒤꿈치와 발가락(the heel and toe)에 부착하고 실험하였다. 샘플링 주파수는 120 Hz 로 데이터를 획득하였다.

3. Data processing

관성센서 시스템에서 산출된 보행 시공간 변인의 정확도를 3 차원 동작분석기 데이터 결과와 비교하였다. APDM 관성센서 시스템의 stride time 과 stride length 은 Mobility lab 소프트웨어에서 계산된 값을 이용하였다. 3 차원 동작분석기 데이터의 잡음(noise)을 제거하기 위해 3 차원 동작데이터는 2 차 0 지연 Butterworth 필터(2nd order zero-lag Butterworth filter)를 이용하여 7Hz 차단 주파수(cut-off frequency)로 처리하였다. 보행 시공간 변인을 도출하기 위해, FVA(foot velocity algorithm) 방법을 이용해 heel contact 시점을 검출하고(O'Connor, Thorpe, O'Malley, & Vaughan, 2007), 연속된 Heel contact 사이의 간격 시간을 이용해 stride time 과 stride length 을 계산했다(Danion, Varraine, Bonnard, & Pailhous, 2003).

보행 변인 비교를 위해, 개인별 2 분간의 보행 중 중간 50 걸음씩을 추출하여 3 차원 동작분석기의 변인을 기준으로 APDM 의 변인 평균 차이 및 RMS 차이를 비교하였다. 또한 오차가 크게 발생한 stride length 의 오차를 보정하기 위해, linear regression equation 을 적용하였다(Bland & Altman, 1999). 이때 종속변인은 stride length 의 오차로 정하였고, 독립변인은 양발의 height, leg length, range of motion of shank (ROMshank) and knee (ROMknee)를 입력하였다. 이 중, ROMshank 와 ROMknee 값은 APDM 에서 제공하는 값이다. 회귀식의 산출방식은 단계입력(step wise)으로 하여, 관련성이 높은 독립변인만 선택하였다. 보행 변인 산출과 계산은 Matlab (Mathworks Inc., USA)을 이용하였고, 회귀방정식 산출은 통계 소프트웨어인 SPSS Statics ver. 23 (IBM Corps, USA) 을 이용하였다.

## Results

1. Accuracy

<Figure 1>은 두 장비로부터 획득한 stride time과 stride length의 개인별 수치를 나타내며, <Figure 2>는 각 변인의 오차 크기와 분포 비율을 나타낸다. APDM으로부터 획득한 Stride time 값은 오차의 크기가 매우 작아서(오른발과 왼발 각각 mean difference=-0.0001sec과 0.0000sec, RMS difference=0.0085sec과 0.0079sec) (Figure 2 top), 두 장비로부터 산출된 값이 거의 일치하였다. 하지만, stride length는 오차의 크기가 비교적 크며(오른발과 왼발 각각 mean difference=-0.1141m과 0.1134m, RMS difference=0.1254m과 0.1312m), 개인별로 그 크기도 일정하지 않았다. 또한 오차가 편중된(bias) 형태를 나타냈다(Figure 2 bottom). 즉, APDM으로부터 산출된 stride length가 좀더 과대평가(overestimate)되어 더 큰 값을 나타냈다.

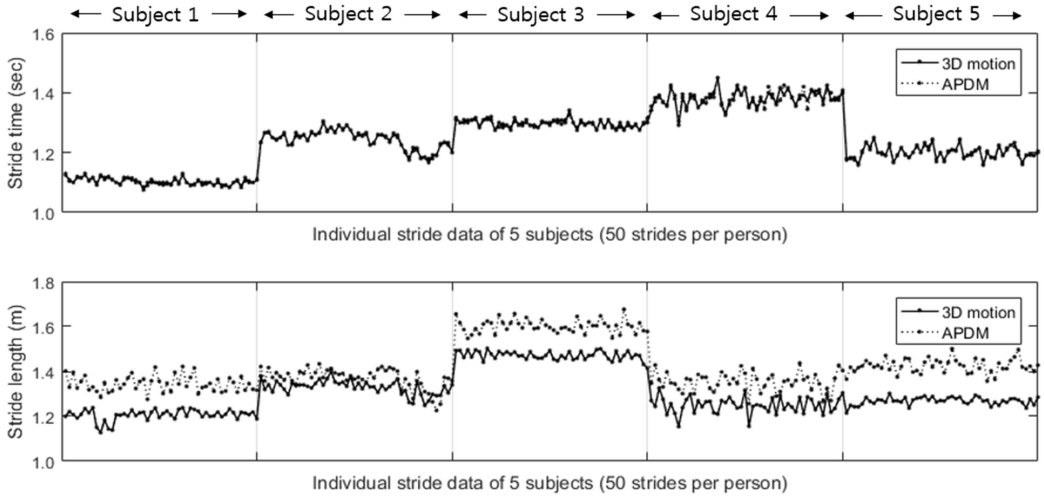


Figure 1. Individual pattern of stride time (top) and stride length (bottom) from 3D Motion and APDM

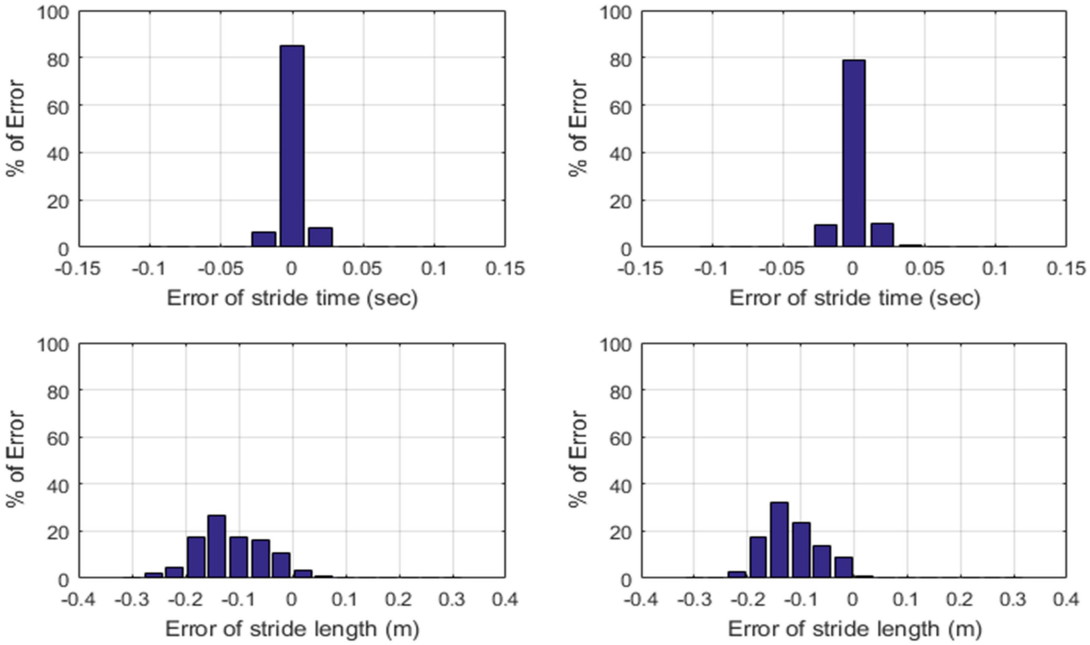


Figure 2. Size and distribution of error of stride time and stride length from APDM (left top: right stride time, right top: left stride time, left bottom: right stride length, right bottom: left stride length)

2. Correction using regression equation

Step wise를 이용한 회귀식 도출 결과, 상수와 오른발 ROM shank 값만을 사용하였을 때 가장 정확한 추론이 가능했다. 산출된 회귀식은 다음과 같다.

$$\textit{Estimated error of stride length} = 0.384 - 0.007 \times ROMshankR$$

회귀식을 이용해 산출된 Estimated error of stride length를 APDM에서 계산된 stride length에 더하여 보정하였다. <Figure 3>과 <Figure 4>, <Table 2>는 회귀식 적용을 통한 APDM의 stride length가 개선된 것을 나타낸다. 즉, 오차 크기가 줄어, 오차 분포의 치우침도 줄어든 것을 확인할 수 있다.

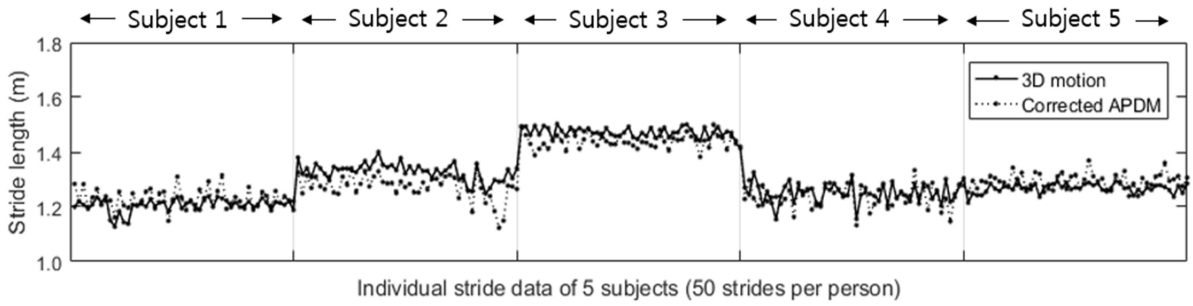


Figure 3. Results of the corrected stride length from APDM

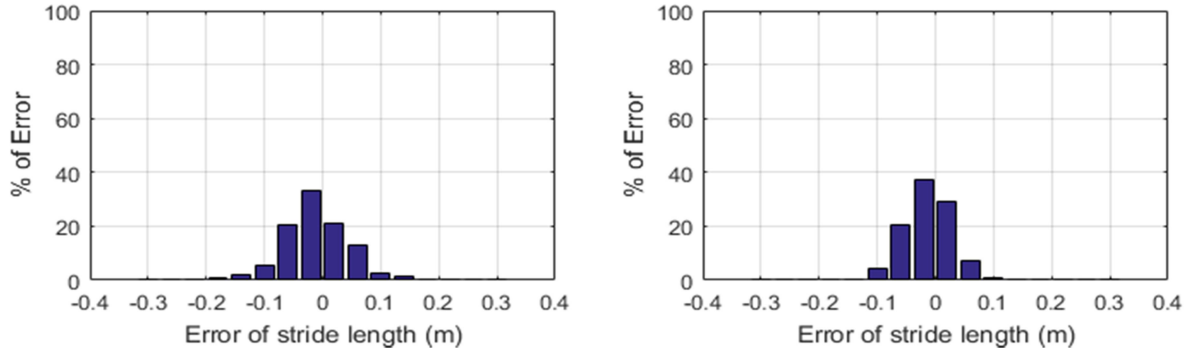


Figure 4. Size and distribution of error of stride length from APDM after correction (left: right stride length, right: left stride length)

Table 2. Results of mean and RMS difference between 3D motion and APDM.

| | | | Original data | | | After correction | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 3D motion | APDM | Mean difference | RMS difference | Corrected APDM | Mean difference | RMS difference |
| Stride time (sec) | Right | 1.2450 ±0.1044 | 1.2450 ±0.1044 | -0.0001 | 0.0085 | - | - | - |
| | Left | 1.2451 ±0.1042 | 1.2451 ±0.1041 | 0.0000 | 0.0079 | - | - | - |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stride length (m) | Right | 1.3025 ±0.1000 | 1.4158 ±0.1062 | -0.1141 | 0.1254 | 1.3152 ±0.0982 | -0.0127 | 0.0556 |
| | Left | 1.3046 ±0.1029 | 1.4187 ±0.1069 | -0.1134 | 0.1312 | 1.3181 ±0.1012 | -0.0134 | 0.0426 |

## Discussion

본 연구는 트레드밀 보행 시 상업적인 APDM 관성센서시스템에서 제공하는 보행 시공간 변인의 정확도를 3차원 동작분석기의 결과와 비교하여 정확도를 확인하기 위한 것이다. 그 결과, APDM으로부터 추출된 stride time는 3차원 동작분석기로부터 추출된 값과의 평균 오차가 0~0.0001 sec 이하로 거의 일치하였다. 보행 시간 데이터는 정확한 보행 시점(gait event)의 추출을 통해 얻을 수 있다. 일반적으로 APDM의 MobilityLab system은 3축 가속도계, 3축 각속도계, 3축 지자계를 가진 센서 6개를 피험자의 각 신체부위에 부착한다. 이러한 센서 중, 하지에 부착한 센서의 움직임을 통해 시공간 변인 도출에 사용된다. 이를 구성하는 알고리즘의 기초가 되는 선행 연구에서는 3차원 동작분석기와 힘판을 이용하여 평지 보행 시에 보행 시공간 변인의 정확도를 검증되었다(Aminian et al., 2002; Salarian et al., 2013). 또한 보행 시점(i.e.: heel contact)의 충격 또는 하지의 해부학적 구조에 따른 보행 시 생체역학적 움직임 특성 등을 바탕으로, 가속도계와 자이로 센서를 개별 또는 동시에 이용한 보행 시점 검출 정확도는 오차가 수~수십 msec로 매우 높다(Choi, Kang, Mun, Bang, & Tack, 2009; Lau & Tong, 2008). 이러한 알고리즘은 트레드밀 보행의 경우에도 동일한 적용이 가능하다고 판단된다. 즉, APDM의 보행 시간 계산 알고리즘이 평지보행을 기반으로 도출되었으나, 트레드밀 보행에 따른 영향이 거의 없다고 판단할 수 있다.

반면, APDM으로부터 산출된 stride length는 평균오차가 0.1m 이상으로 컸으며, 값의 치우침(전반적으로 stride length가 큰 값을 나타내었다, Figure 1 and 2)도 존재하였다. 특히, 이러한 값의 차이는 개인차가 존재하여(Figure 1), 일정한 값을 더하거나 빼는 방법으로 보정할 수 없었다.

일반적으로 APDM에서 사용하는 공간 변인(spatial variable)의 도출 방식은 두 개의 진자 운동 모델 (double-pendulum model)에 바탕을 두고 있다. 즉, swing과 stance 구간에서 하지의 진자(pendulum) 또는 역진자(inverse pendulum) 모델의 계산 결과에 영향을 미치게 된다. 이러한 방식은 2개~4개의 관성센서 조합을 사용하는 알고리즘이 있으나(Aminian et al., 2002; Salarian et al., 2013), 공통적으로 하지의 움직임에 의해 발생하는 관성(가속도 또는 각속도)의 측정을 바탕으로 계산된다. 트레드밀 보행 시 평지 보행과는 달리 stance 구간에서 지지하는 발이 트레드밀 벨트에 의해 뒤로 이동하며, 이 때 센서의 측정값에 영향을 끼치게 된다. 즉, 평지와 트레드밀에서의 보행 형태 차이(특히 stance 구간)로 인해 평지 기반의 APDM 결과와 차이를 발생시킨다고 판단된다.

본 연구에서는 트레드밀 보행 시 APDM을 이용한 보행 공간 데이터 활용을 위해, 추가적인 고찰을 수행하였다. 성인의 신장을 기준으로 개발된 APDM의 알고리즘을 3-8세의 어린이에게 적용하기 위한 Lanovaz, Oates, Treen, Unger, and Musselman (2017)의 선행연구에서 사용한 회귀식 방법을 본 연구에도 적용하였다. 도출된 회귀식을 이용한 보정 결과, 0.1m 이상이었던 APDM의 stride length 평균오차가 0.01m 정도로 매우 많이 줄었다. 또한 이 회귀식은 APDM에서 제공하는 변인만으로 구성할 수 있고, 하나의 회귀식으로 모든 피험자에게 동일하게 적용할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구는 몇 가지 제한점을 가지고 있다. 우선, 본 연구에서 도출된 회귀식은 일반화하여 사용될 수 없다. 그 이유는 단지 5명의 피험자의 데이터를 사용하여 도출되었기 때문이다. 본 연구에서는 트레드밀 보행 시 APDM으로부터 제공된 시간 변인의 사용가능성을 확인하였으며, APDM에서 제공하는 변인만을 이용해 도출된 회귀식이 공간 변인의 오차를 줄일 수 있다는 점을 제시하고자 하였다. 또한, 본 연구의 결과는 피험자의 선호 속도 보행 시 결과만으로 제한한다. 따라서 다양한 보행 속도와 경사 등에 따른 영향을 살펴보기 위해서는 추가적인 연구가 필요하겠다.

## Conclusion

본 연구는 트레드밀 보행 시 상업적인 APDM 관성센서시스템에서 제공하는 보행 시공간 변인의 정확도를 3차원 동작분석기의 결과와 비교하고, 정확도를 보완하기 위한 것이다. 그 결과, APDM으로부터 추출된 stride time의 오차는 매우 작은 반면, stride length은 전반적으로 과대평가에 의한 오차가 존재하였다. 하지만, 이러한 오차는 APDM에서 제공되는 ROMshankR을 이용한 회귀식을 통해 보정할 수 있었다. 따라서, APDM 관성센서시스템의 stride time은 트레드밀 보행 연구에도 직접 사용이 가능하며, stride length의 경우에도 보정을 통해 사용이 가능하다고 판단된다.

## Acknowledgements

This paper was supported by Konkuk University.

## Reference

Alton, F., Baldey, L., Caplan, S., Morrissey, M.C., (1998). A kinematic comparison of overground and treadmill walking. *Clinical Biomechanics, 13*(6), 434-440.

Dingwell, J. B., Cusumano, J. P., Cavanagh, P. R., Sternad, D., (2001). Local dynamic stability versus kinematic variability of continuous overground and treadmill walking. *Journal of Biomechanical Engineering, 123*(1), 27-32.

Dingwell, J. B., Cusumano, J. P., (2010). Re-interpreting detrended fluctuation analyses of stride-to-stride variability in human walking. *Gait & Posture, 32*(3), 348-353.

Lee, S. J., Hidler, J., (2008). Biomechanics of overground vs. treadmill walking in healthy individuals. *Journal of Applied Physiology, 104*(3), 747-755.

Mancini, M., King, L., Salarian, A., Holmstrom, L., McNames, J., & Horak, F. B.(2011). Mobility Lab to Assess Balance and Gait with Synchronized Body-worn Sensors. *Journal of Bioengineering & Biomedical Science, 12*, Suppl 1, 007.

Aminian, K., Najafi, B., Büla, C., Leyvraz, P. F., & Robert, P.(2002). Spatio-temporal parameters of gait measured by an ambulatory system using miniature gyroscopes. *Journal of Biomechanics, 35*(5), 1036-1043.

Salarian, A., Burkhard, P. R., Vingerhoets, F. J., Jolles, B. M., & Aminian, K.(2013). A novel approach to reducing number of sensing units for wearable gait analysis systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 60*(1), 72-77.

Choi, J. S., Kang, D. W., Bang, Y. H., Kang, M. S. & Tack, G. R. (2011). Stride Time Variability on the Overground & Treadmill Walking in the healthy adults. *Korean Journal of Sport Science, 22*(1), 1701-1707.

Hollman, J. H., Watkins, M. K., Imhoff, A. C., Braun, C. E., Akervik, K. A., & Ness, D. K.(2016). A comparison of variability in spatiotemporal gait parameters between treadmill and overground walking conditions. *Gait & Posture, 43*, 204-209.

O'Connor, C. M., Thorpe, S. K., O'Malley, M. J., & Vaughan, C. L.,(2007). Automatic detection of gait events using kinematic data. *Gait & Posture, 25*(3), 469-474.

Danion, F., Varraine, E., Bonnard, M., & Pailhous, J.(2003). Stride variability in human gait: the effect of stride frequency and stride length. *Gait & Posture, 18*(1), 69-77.

Bland, J. M. & Altman, D. G. (1999). Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical Methods in Medical Research, 8*(2), 135-160.

Choi, J. S., Kang, D. W., Mun, K. R., Bang, Y. H., & Tack, G. R.(2009). Development of gait event detection algorithm using an accelerometer. *Korean Journal of Sport Biomechanics, 19*(10), 159-166.

Lau, H. & Tong, K.(2008). The reliability of using accelerometer and gyroscope for gait event identification on persons with dropped foot. *Gait & Posture, 27*(2), 248-257.

Lanovaz ,J. L., Oates, A. R., Treen, T. T., Unger, J., & Musselman, K. E.(2017). Validation of a commercial inertial sensor system for spatiotemporal gait measurements in children. *Gait & Posture, 51*, 14-19.