JESK J Ergon Soc Korea 2023; 42(4): 331-344
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2023.42.4.331
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Difference of Measurements of Joint Angles Using Different Motion-Measurement Systems - Comparison of an Electronic Goniometer and an IMU-based Motion Capture System based on Measurement of Wrist Motions

Inseok Lee, Yonghwi Kim

Hankyong National University, School of Social Safety Systems Engineering, Major of Safety Engineering / Research Center for Safety and Health, Anseong, 17579

인체 동작 측정시스템의 특성에 따른 관절 각도 측정 차이 – 전자 고니어미터와 IMU 기반 동작분석 시스템의 손목 동작 측정 비교

이인석, 김용휘

한경국립대학교 사회안전시스템공학부 안전공학전공 / 안전보건연구소

Corresponding Author
Inseok Lee
Hankyong National University, School of Social Safety Systems Engineering, Major of Safety Engineering / Research Center for Safety and Health, Anseong, 17579
Email : lis@hknu.ac.kr

Received : June 30, 2023
Accepted : July 04, 2023

Copyright@2023 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: The purpose of this study is to compare two different motion capture systems based on wrist motion measurements. The measurement equipment compared in this study are motion capture systems using electronic goniometer and IMU (Inertial Measurement Units).

Background: Electronic goniometers (EGs) have been widely used in various task situations to measure human body motion without significantly interfering with the subject's real activity, especially for measuring wrist motion. Recently, IMU-based motion capture systems (IMCs) are preferred for measuring human body movements in real-world environments. This is because the sensor is relatively small and the system typically operates wirelessly. Although several studies have validated the use of electronic goniometers, few studies have validated IMU-based systems in wrist motion measurement, especially compared to electronic goniometers. When evaluating human motion using these measurement systems, it is helpful to understand the characteristics of the various motion capture systems.

Method: A laboratory experiment was carried out with 10 male college students. Subjects wore an electronic goniometer and an IMC on their right wrist. Wrist flexion/extension and ulnar/radial deviation angles were measured in neutral, intermediate and extreme static postures. Subjects were asked to move their right wrist as desired at three given speeds: 50, 100, and 150bpm. Finally, they were asked to perform the simple task of assembling knots for 3min. While the subject moved his right wrist, joint angles were measured simultaneously with an electronic goniometer and IMC. Joint angles in static postures were measured with a manual goniometer and used as reference values for the joint angles. The absolute values of error, MDF, 10%, 50%, and 90% APDF of joint angles, angular velocity, and angular acceleration were calculated. Analyses of variance (ANOVAs) were applied to find significant effects

of equipment on wrist motion measurements.

Results: For static postures, IMC showed a lower value of absolute error than EG and the error in flexion/extension was higher than the error in deviation (p<0.05). The measurement errors showed higher values as the joint angle increased. EG showed higher errors than IMC in extension and ulnar deviation, while the errors of two equipment showed similar values in other positions. The errors of EG seemed to be related to the cross-talk effect of 2D goniometers, since the extension and ulnar deviation of wrists are closely related. For different speeds of wrist motions, it was found that two equipment showed similar values of MDFs, while the difference between two equipment increased as the motion speed increased. For simulated repetitive manual tasks, similar performances of measurement were found in the two equipment.

Conclusion: It was found that EG and IMC showed similar performances of measurement of wrist motion, while the error of measurement by EG is relatively large in severe extension and ulnar deviation of the wrist as compared to IMC. In normal working tasks, two equipment showed similar performance of measurement. For future study, it needs to measure the joint angles using other validated method, so that the frequency, angular velocity, and angular acceleration can be verified with respect to the golden values.

Application: The results of this study can be used in the studies of ergonomics to measure the human body motion for the purpose of work evaluation or product usability evaluation.

Keywords: Electronic Goniometer, IMU-based motion capture system, Wrist motion

1. Introduction

다양한 인간공학 연구에서 인체 동작과 관절의 각도를 측정하고 이를 운동학 혹은 운동역학적으로 분석하여 작업부하 평가나 제품의 사용성 평가 등에 활용하고 있다. 이 때 주로 사용하는 동작 측정 장비는 광학식 동작분석 시스템(Optical Motion Capture System, OMC), 전자 고니어미터(electronic goniometer, EG), IMU 기반 동작분석 시스템(IMU-based Motion Capture System, IMC) 등이 있다. 광학식 동작분석 시스템(OMC)은 마커의 위치를 정밀하게 측정할 수 있어 다양한 분야에서 활용되고 있지만, 적절한 공간 필요, 간섭으로 인한 측정 누락 오류 발생, 오류 최소화를 위해 충분한 수의 카메라 필요, 반사 마커 부착으로 인한 피측정자의 동작 방해 등 여러 단점이 있다. 이러한 이유 때문에 OMC는 조건이 잘 갖춰진 실험실 환경에서 활용하는 경우가 많고, 실제 작업 현장에서는 상대적으로 제한이 적은 전자 고니어미터(EG)를 활용하여 관절의 동작을 측정하는 경우가 많다. Kim and Lee (2017)은 EG를 이용하여 포도 수확 작업 중 손목과 팔꿈치의 각도를 측정하여 분석하였으며, 그 외에도 미용사의 손목 각도와 각속도(Chen et al., 2010), 치과 위생사의 목, 어깨 및 손목의 각도와 각속도(Akesson et al., 2012), 착유 작업에서 손목의 각도, 각속도, 빈도(Stal et al., 1999), 귀마개 분류 작업자의 손목 각도, 각속도 및 빈도(Arvidsson et al., 2003) 등 다양한 작업에서 EG가 손목과 상지의 동작분석에 활용되었다.

최근에는 IMU (Inertial Measurement Units)에 기반의 인체 동작 측정 및 분석 시스템이 많이 활용되고 있다. IMU 기반 동작분석 시스템(IMC)은 가속도계, 각속도계, 지자기계를 이용하여 물체의 관성을 측정하는 센서를 이용하는 장비로서, 센서 크기가 작고 몸에 부착하고도 행동에 큰 제약이 거의 없는 장점이 있다. 인간공학 연구에서도 이 장비는 인체 동작 측정에 많이 활용되고 있다. Merino et al. (2019)은 IMC와 EMG를 이용하여 바나나 수확 작업자들의 동작과 근활성도를 측정하여 평가하였다. Stenlund et al. (2015)은 운전 중 인지 과업 수행 시 IMC를 사용하여 운전자의 머리, 목, 몸통 및 골반의 동작을 측정 평가하였고, Lee et al. (2017)은 노인들의 자세 분석을 통한 특정 행동을 구별하는 알고리즘 제안에 사용하였다. Singh et al. (2016)은 의자 유형에 따른 자세 분석에 활용하였으며, Schall et al. (2016)은 간호사의 업무 중 상지 자세와 동작을 측정하였다.

IMC과 EG는 실제 작업 현장에서 작업자의 작업 동작을 측정하는데 많이 활용되고 있는 공통점이 있지만, EG는 주로 손목, 팔꿈치,

어깨의 관절 각도를 측정하는데 많이 사용되는 것에 비해 IMC는 특정 관절에 주로 많이 사용되기보다는 전신의 자세나 다양한 관절의 동작을 측정하는데 활용되는 차이점이 있다. 이는 IMU 센서가 작고 주로 무선 방식이라 착용시 실제 행동에 크게 방해되지 않는 점에 기인하는 것으로 보인다.

EG는 주로 손목의 동작분석 연구에 많이 활용되면서 측정의 타당성과 분석 방법에 대한 연구가 많이 이루어진 바 있다(Hansson et al., 1996; Jonsson and Johnson, 2001; Hansson et al., 2004; Hansson et al., 2006). IMC도 최근에 타당성에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(Kim and Nussbaum, 2013; Chen et al., 2018; Fennema et al., 2019). Kim and Nussbaum (2013)은 중량물 취급 작업에 대해 IMC와 OMC를 비교하는 실험실 실험 연구를 수행한 바 있으며, Chen et al. (2018)은 상지 반복 동작에 대해 IMC와 OMC의 측정 성능을 비교하였다. Fennema et al. (2019)은 기계 장치와 인체 모형 무릎 관절을 대상으로 하여 IMC, OMC, 그리고 EG를 비교하는 연구를 수행한 바 있다.

손목 동작을 측정하고 분석하는데 EG가 주로 많이 활용되었던 점을 감안하면 IMC를 손목 동작의 측정과 분석에 활용하는 것이 타당한지에 대한 연구가 필요하다고 할 수 있다. 특히 손목 동작은 다른 신체부위에 비해 운동 범위가 작고 동작의 빈도가 크며, 반복성이 많은 동적인 특성이 있다. 상대적으로 부착하기 용이하고 작업자의 행동에 대한 제약이 적은 장점이 있는 IMC를 손목 동작분석에 활용하기 위해서는 기존에 많이 사용되고 있는 EG와 비교하여 그 타당성을 확인하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 손목 동작을 대상으로 전자 고니어미터와 IMU 기반 동작분석 시스템의 동작 측정의 성능을 비교하고자 하는 것이다. 두 장비의 성능을 비교를 통해 이러한 장비를 활용하여 실제 작업 중 인체 동작을 측정하는 인간공학 연구의 타당성을 높이는데 기여하고자 한다.

2. Method

2.1 Subject

본 연구에서는 상지 질환 경험이 없는 대학생 남성 10명을 대상으로 손목 동작 실험을 진행했다. 피실험자의 평균(± 표준편차) 연령, 신장, 체중, 손길이는 각각 24.5(±1.2)세, 175.8(±6.4)cm, 73.9(±11.7)kg, 18.6(±0.9)cm이며, 피실험자 모두 오른손잡이다.

2.2 Experimental tasks

피실험자의 오른손 손목에 IMU 기반 동작 측정 장비와 전자 고니어미터를 함께 부착하고 주어진 실험 과업을 수행하는 동안 손목의 굴곡/신전과 요골/척골 편향 각도를 측정하였다(Figures 1 and 2), 실험은 총 3개의 과업으로 구성되었으며, 각 과업의 내용과 절차는 다음과 같다.

- 과업 1(정적 자세 실험): 정적 자세에서 손목의 각도를 측정하였다. 손목의 중립 자세, 굴곡/신전과 요골/척골 편향 4방향으로 중간 수준과 최대 수준의 자세를 약 3초간 유지하도록 하였다. 사진 관찰을 통해 관절 각도를 측정할 수 있도록 인체측정 기준점(Size Korea, 2019)을 참고하여 피실험자의 오른손 손 안쪽점, 손목 안쪽점, 팔꿈치 가쪽점에 마크를 부착하였다(Figure 2). 피실험자 측면과 손 위쪽에서 영상을 촬영한 후, 해당 자세에 대해 사진으로 출력했다. 그 후 수동 고니어미터(JAMAR, USA)를 사용하여 마커를 기준점으로 하여 굴곡/신전과 편향 각도를 직접 측정하였다.

- 과업 2(복합 동작 실험): 속도를 달리하는 자유 동작에서 손목의 각도를 측정하였다. 메트로놈을 이용하여 50bpm, 100bpm, 150bpm 3가지 동작 속도에 대해 자유롭게 손목을 움직이도록 하였다.

- 과업 3(모의 작업 동작): 2cm 간격으로 구멍이 뚫린 천에, 약 15cm의 끈을 2개의 구멍을 통과시킨 후 매듭을 묶는 작업이다. 약 3분간 작업을 수행하는 상지 반복 작업의 손목 각도를 측정하였다.

(a) (b)

Figure 1. (a): Electronic goniometer, (b): IMU-based motion capture system

2.3 Equipment

본 연구에서는 2개의 장비를 사용하였다(Figure 2). 첫째로 무선 데이터 처리 장치(Telemyo DTS system, Noraxon Inc, USA)와 전자 고니어미터(Biometics, UK)를 이용하여 손목의 각도를 측정하였다. EG는 2차원 측정이 가능하고 측정 범위는 ±150°이다. Cross-talk은 관절각 범위가 ±60° 이하일 때 ±5% 미만이다. 데이터 처리 장치의 A/D 변환 표본 추출률은 1,500Hz이다. 두 번째로 IMU 센서(CAPTIV T-Sens Motion of TEA, France)는 관성기반으로 2개의 센서를 통해 1개의 각도를 측정한다. 샘플링 속도는 16, 32, 64, 128Hz를 선택 할 수 있으며, 본 연구에서는 128Hz로 하였다.

2.4 Experimental procedure

실험 전 모든 실험 참여자에게 실험 안내문을 보여준 뒤 실험 동의를 구하였다. 그 후 두 개의 장비와 마커를 부착하였다. 측정 장비의 영점 위치는 과업 1에서 취하는 중립 자세를 기준으로 하였다. 즉, 피실험자가 팔걸이가 있는 의자에서 팔을 편하게 내려 팔걸이에 전완을 지지한 상태에서 손목을 편 자세이다(Figure 2). 과업 1에서 손목의 편향 자세를 취할 때는 손을 탁자에 지지하여 굴곡/신전 자세가 발생하지 않도록 하였으며, 손목의 굴곡/편향 자세는 손을 탁자에 지지하지 않은 상태에서 편향 자세를 최소로 하여 굴곡/신전 자세를 취하도록 하였다. 이때 전완은 의자의 지지대에 고정하여 불필요한 전완의 자세로 인한 오차 발생을 최소화하도록 하였다. 과업 2와 과업 3은 전완을 고정하지 않고 자유롭게 손목을 움직여 주어진 과업을 수행하도록 하였다.

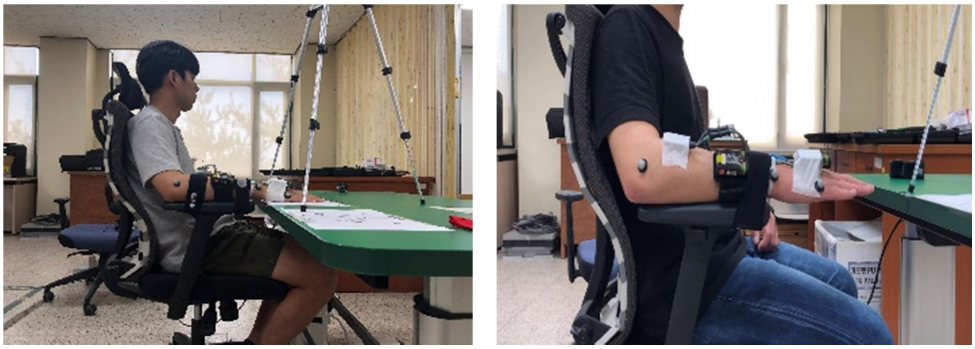


Figure 2. Neutral posture in the wrist

2.5 Data analysis

본 연구에서는 Hasson et al. (1996)에서 제시한 방식에 따라 EG로 측정된 각도 자료를 20Hz로 표본 추출했고, IMU 기반 동작분석기는 128Hz 그대로 사용하여 FIR low-pass filtering (cutoff frequency 5Hz) 하였다. 측정된 손목의 각도는 굴곡/신전(Flexion/Extension, F+/E-, +/-는 각도 표시 부호를 의미함)과 척골/요골 편향(Ulnar/Radial deviations, U+/R-)이다. 또한 각속도와 각가속도 산출과 그리고 FFT 분석은 MATLAB 2017b을 사용하였다. 각속도와 각가속도는 각도 자료를 통해 central difference 방법으로 구하였고, 마찬가지로 각도 자료를 통해 FFT를 실시한 후에 MPF (mean power frequency)를 구하였다.

정적 자세에서는 사진 촬영을 통해 측정한 각도로부터 각 장비에서 측정한 각도의 차이의 절대값인 절대 오차(Absolute Errors) 값을 구하여 비교하였다. 복합 동작과 조립 작업은 두 장비에 대해 각도, 각속도, 각가속도, 빈도를 구하여 비교하였다. 각도 비교는 굴곡/신전 및 편향 각도에 대해서 10%, 50% 그리고 90% APDF (Amplitude Probability Distribution Function) 값을 각각 구하였다. 10%와 90% APDF는 해당 운동자유도의 관절각 유효 최대치를 의미하며, 50% APDF는 중위값으로서 해당 운동자유도 관절각의 대푯값으로 사용될 수 있다. 또한 각속도의 비교는 50%와 90% APDF 값을 구하여 비교하였고, 각가속도는 50% APDF 값을 구하여 비교하였다. 그리고 각도 자료에 대해 FFT를 실시한 후에(window length 1,024 point), MPF를 구하여 손목 동작의 빈도를 비교하였다.

정적 자세에 대해서는 절대 오차 값을 종속변수로 하여 3원 분산분석을 실시하였다. 분산분석 모형의 요인은 Equipment(2수준, Electronic Goniometer (EG) and IMU-based Motion Capture System (IMC)), Posture(2수준, Flexion/Extension (FE) and Deviation (DV)), Posture Level(4수준, Medium and Extreme flexions and extensions, ulnar and radial deviations))이다. Posture Level은 Flexion/Extension에 대해서는 Medium Flexion (MF), Extreme Flexion (EF), Medium Extension (MEx), Extreme Extension (EEx)으로 4수준으로 나뉘고, Deviation에 대해서는 Medium Ulnar Deviation (MUD), Extreme Ulnar Deviation (EUD), Medium Radial Deviation (MRD), Extreme Radial Deviation (ERD) 4수준으로 나뉜다. 복합 동작에 대해서는 각도, 각속도, 각가속도, 빈도(MPF)를 종속변수로 하여 2원 분산분석을 실시하였다. 분석분석 모형의 인자는 각각 Equipment(2수준, EG and IMC)와 Speed(3수준, 50bpm, 100bpm and 150bpm)이다. 조립 작업에 대해서는 EG와 IMC에 따른 각도, 각속도, 각가속도, 빈도(MPF)의 차이를 비교하는 t 검정을 실시하였다. 통계적 검정의 유의 수준은 0.05로 하였으며, 유의한 주효과에 대해서는 Tukey 검정으로 사후검정을 실시하였다. 통계 분석은 SAS 9.4을 사용하였다.

3. Results

3.1 Static wrist postures

각 장비를 이용해 측정한 각도와 사진에서 측정한 각도의 차이의 절대값을 대상으로 3원 분산분석(Posture, Equipment, Posture Level)을 실시한 결과, 절대 오차가 자세, 장비에 따라 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(p<0.05) (Table 1).

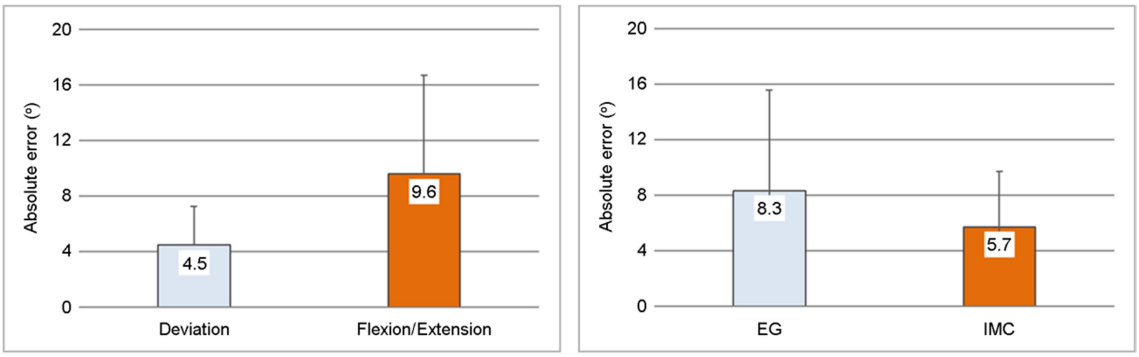
Table 1. Result of ANOVA for absolute errors of joint angles

Source of variation	Degree of Freedom	F	p-value
Equipment	1	50.78	**
Posture	1	14.08	**
Posture Level	6	9.96	**
Equipment × Posture	1	15.82	**
Equipment × Posture Level	6	13.43	**

**p < 0.01

두 장비와 직접 측정한 각도와의 차이의 절댓값을 자세와 장비 별로 평균값을 구하였다(Figure 3). 자세에 따라서는 요골/척골 편향 자

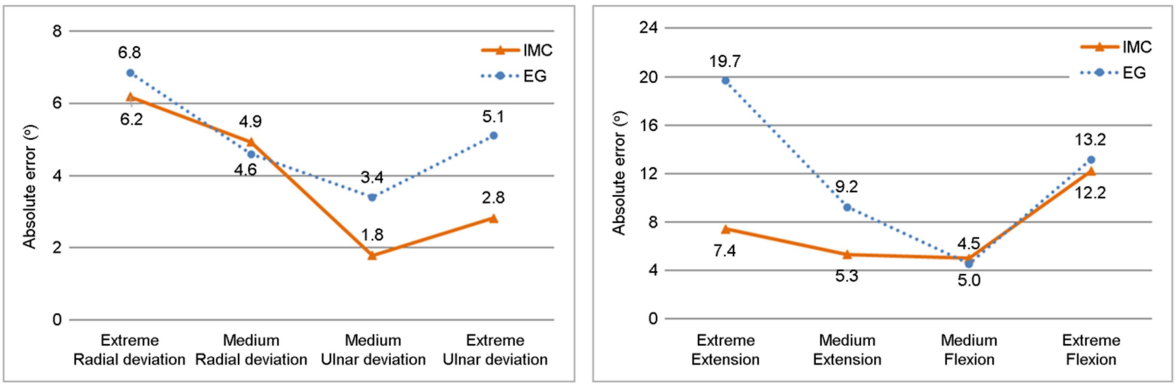
세가 더 작은 오차 값을 보였다. 하지만 굴곡/신전 자세의 동작 범위가 요골/척골 편향 자세보다 크고, 두 자세 모두 비교적 작은 절대 오차 값을 보여 정확성이 높다는 것을 알 수 있다. 장비 별로는 IMC가 더 작은 절대 오차 값을 보였다.



(a) Errors by posture* (b) Errors by equipment*

Figure 3. Mean absolute errors in joint angle measurements (*statistically significant with p<0.05)

두 장비의 차이를 자세히 보기 위해 장비에 따른 각 자세 수준 별 평균값을 그래프로 나타냈다(Figure 4). 자세 수준별 두 장비의 차이를 보면 두 장비 모두 중간 자세보다 최대 자세에서 절대 오차 값이 커짐을 알 수 있다. 특히, 척골 편향 자세와 신전 자세로 갈수록 EG의 절대 오차 값이 커져 두 장비의 차이가 커짐을 알 수 있다.



(a) Deviations (b) Flexion/extension

Figure 4. Mean absolute errors of joint angle measurement for each equipment

3.2 Dynamic motions

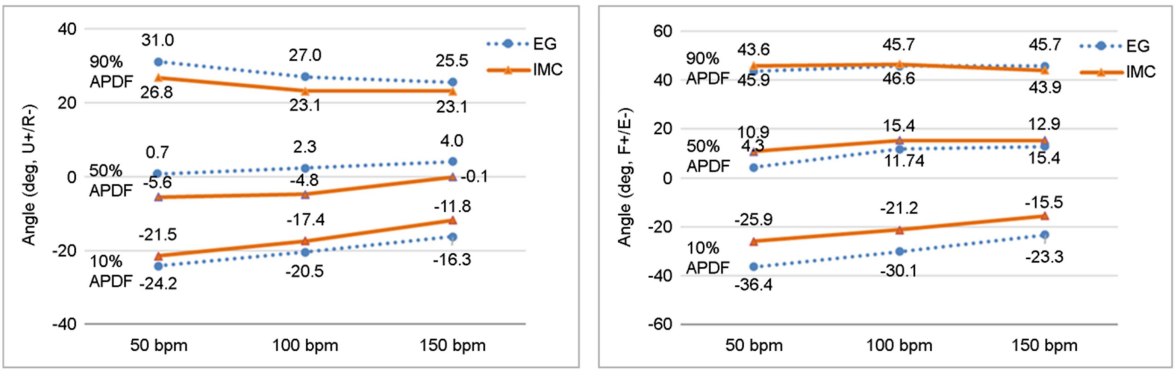
과업 2인 복합 동작에서 측정된 빈도, 각도, 속도, 각속도 값을 대상으로 2원 분산분석(Equipment, Speed)을 실시한 결과는 Table 2와 같다. 굴곡/신전 자세의 50%, 90% APDF를 제외하고 속도에 따라 각 측정 값에서 유의한 차이가 나타났다.

Table 2. Result of ANOVA for dynamic motion

Motion	Source of variation	Degree of freedom	Frequency (Hz)	Angle (°)			Velocity (°/s)		Acceleration (°/s²)
			MPF	10th†	50th†	90th†	50th†	90th†	50th†
Deviation	Equip	1	**		**		**	*	**
	Speed	2	**	**	**	*	**	**	**
	Speed × Equip	2	**						**
Flexion/ Extension	Equip	1		**	*		**	**	**
	Speed	2	**	**			**	**	**
	Speed × Equip	2	*		**	**			**

*p < 0.05, **p < 0.01, †APDF

복합 동작에서 두 장비의 속도에 따른 10%, 50%, 90% APDF 각도 값을 그래프로 나타냈다(Figure 5). 요골/척골 편향 자세는 EG가 IMC보다 최대치라 할 수 있는 10%와 90% APDF 값이 더 과도하게 측정되었다. 이는 EG가 IMC보다 더 넓은 범위를 측정한다는 것을 의미한다. 또한 같은 동작에 대해 편향 자세에서 50% APDF 값이 EG는 척골 편향 자세로, IMC는 요골 편향 자세로 측정되어, 두 측정 장비가 손목 편향 자세에서 차이가 있는 것을 알 수 있다. 굴곡/신전 자세에서는 10%, 50%, 90% APDF 값이 대체로 EG에서 더 작게 측정되었는데, 이는 같은 동작에서 EG가 IMC보다 신전 자세로 더 측정하는 경향이 있는 것을 알 수 있다.



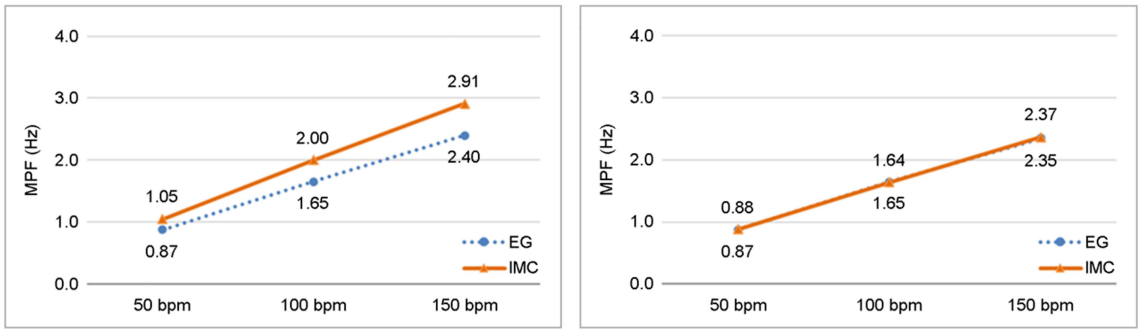
(a) Deviations (b) Flexion/Extension

Figure 5. Mean angles of 10%, 50%, 90% APDF of dynamic motions with various speeds

두 장비 빈도의 차이를 보기 위해 속도에 따른 MPF 값을 그래프로 나타냈다(Figures 6). 편향 자세와 굴곡/신전 자세 모두 대체로 처음 빈도에 비해 2배과 3배로 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 요골/척골 자세에서 IMC가 처음 빈도의 2배, 3배의 값에 제일 근접하였으며, EG는 상대적으로 빠른 빈도의 측정치가 낮게 나타나는 경향을 보였다. 이로 인해 편향 자세에서 속도가 빨라 질수록 두 장비의 차이가 커져 교호작용이 유의한 것으로 나타났다(p<0.05).

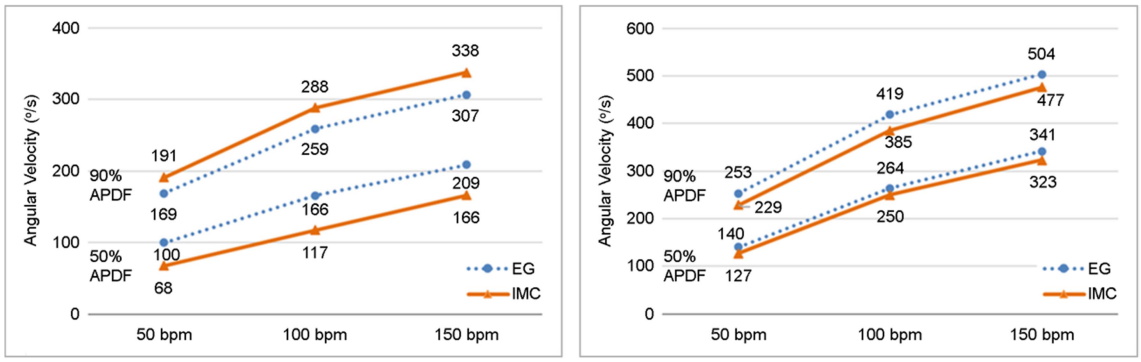
속도에 따른 50%, 90% APDF 각속도 값을 그래프로 나타냈다(Figures 7). 편향 자세에서 IMC가 EG에 비해 50% APDF 값에서는 낮은 값을, 90% APDF 값에서는 높은 값을 나타냈다. 이는 IMC의 측정 값이 더 폭 넓게 측정하는 것을 의미한다. 굴곡/신전 자세에서는 50%, 90% APDF에서 모두 IMC가 EG보다 낮은 값을 나타냈다. 각속도 측정에서 두 장비의 차이가 있는 것을 알 수 있다.

속도에 따른 50% APDF 각가속도 값을 그래프로 나타냈다(Figures 8). 편향 자세에서는 대체로 IMC가 EG보다 각가속도가 더 크게 측정되었다. 굴곡/신전 자세에서는 느린 동작에서는 두 장비 간에 차이가 적었으나, 동작의 속도가 빨라질수록 두 IMC가 EG보다 각가속도 커지는 경향을 보였다.



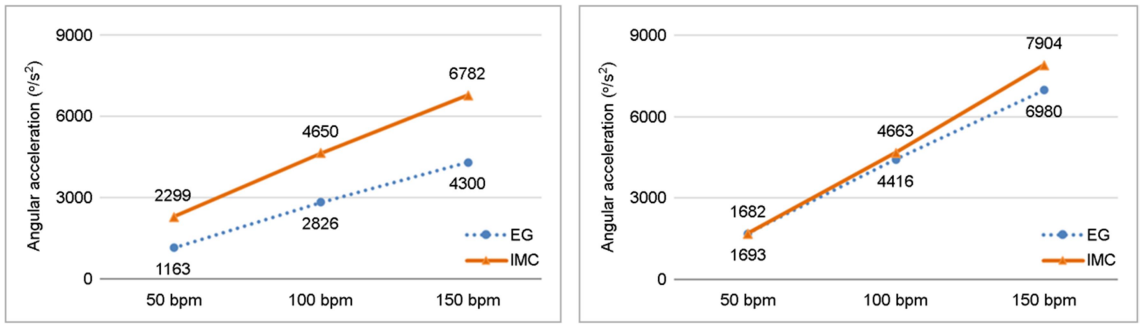
(a) Deviations (b) Flexion/Extension

Figure 6. Mean MPFs of dynamic motions with various speeds



(a) Deviations (b) Flexion/Extension

Figure 7. Mean angular velocity 50%, 90% APDF of dynamic motions with various speeds



(a) Deviations (b) Flexion/Extension

Figure 8. Mean angular acceleration 50% APDF of dynamic motions with various speeds

3.3 Assembly work

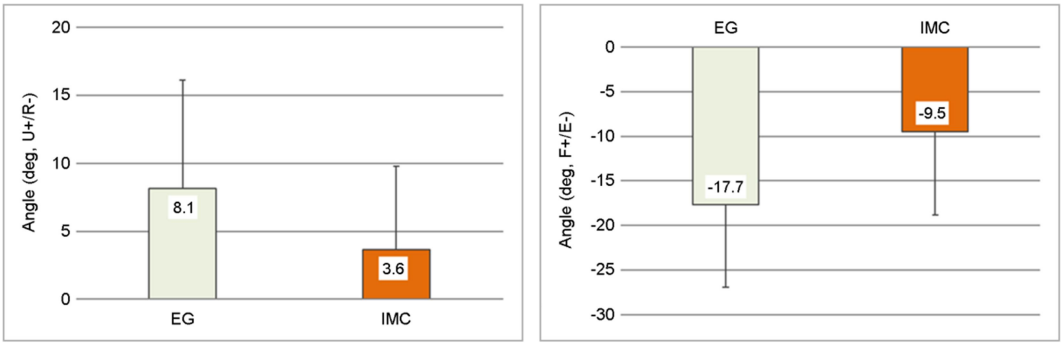
과업 3인 조립 작업은 일반적인 작업 상황을 가정하여 상지 반복 작업 중 손목의 각도를 측정한 것이다. 조립 작업 중 측정된 편향 자세와 굴곡/신전 자세의 동작 빈도(MPF), 각도(10%, 50%, 90% angles of APDF), 각속도(50%, 90% angular velocity of APDF), 각가속도(50% angular acceleration of APDF)에 대해 두 장비 간의 차이를 확인하기 위한 1원 분산분석을 실시하였다. 분산분석 결과 편향 자세의 10%와 90% APDF 각도와 50%와 90% APDF 각속도는 두 장비 간에 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았고, 나머지 변수는 모두 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05) (Table 3).

Table 3. Results of 1-way ANOVAs for the dependent variables measured during the assembly task to test the effect of different equipment

Motion	Frequency (Hz)	Angle (°)			Velocity (°/s)		Acceleration (°/s^2)
	MPF	10th†	50th†	90th†	50th†	90th†	50th†
Deviation	**		**				**
Flexion/Extension	**	**	**	*	**	**	**

*p < 0.05, **p < 0.01, †APDF

조립 작업 중 50% APDF 각도 값에서, 편향 자세와 굴곡/신전 자세는 각각 EG가 IMC보다 요골 편향 각도와 신전 각도가 더 크게 측정되었다(Figure 9). 이는 과업 1, 2의 결과와 같은 경향이다. 조립 작업에서 손목의 빈도에 대한 분석에서는 IMC가 EG보다 MPF 값이 더 크게 측정되었다(Figure 10). 다만, 두 장비 간의 차이가 크지는 않은 편이며, 이는 과업 2와 같은 경향이다. 조립 작업의 50%, 90% APDF 각속도에 대한 분석에서 편향 자세와 굴곡/신전 자세 모두 50% APDF는 두 장비 간에 차이가 없는 것으로 나타났지만, 90% APDF의 경우에는 편향 자세에서 IMC가 EG보다 큰 값을 보였고, 굴곡/신전에서는 EG가 IMC보다 큰 값을 보였다. 이러한 결과는 과업 2의 결과와 유사한 것이다(Figure 11). 조립 작업 중 손목의 동작의 각가속도에 대한 분석에서는 편향 자세와 굴곡 신전 모두 IMC가 EG보다 50% APDF 각가속도 값이 더 큰 것으로 나타났다. 그 차이가 크진 않지만 IMC의 측정 값 변화가 더 큰 것으로 보인다(Figure 12).



(a) Deviations* (b) Flexion/Extension*

Figure 9. Mean angles 50% APDF during assembly task (*statistically significant with p<0.05)

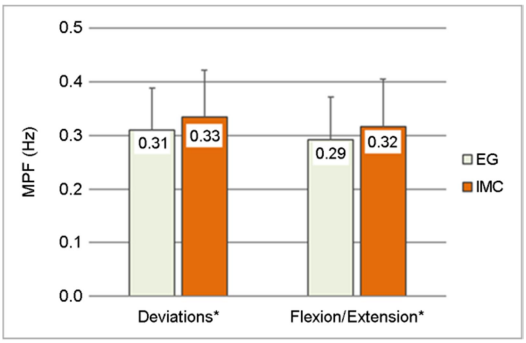
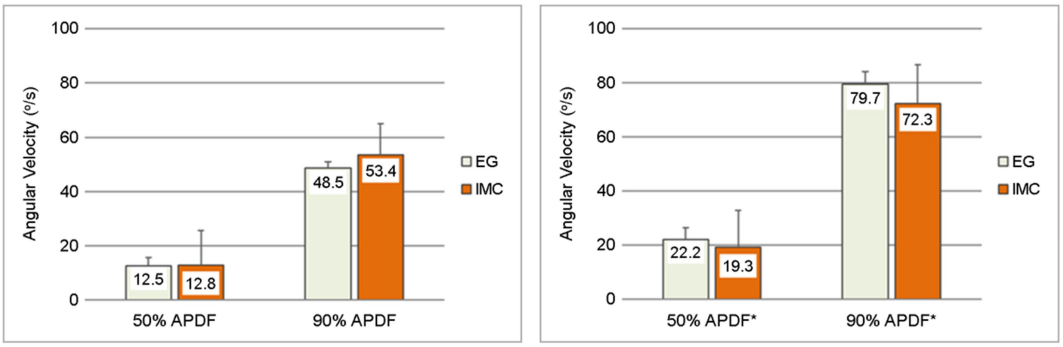


Figure 10. Mean MPFs of Deviation and Flexion/Extension during assembly task (*statistically significant with $p<0.05$)



(a) Deviations (b) Flexion/Extension

Figure 11. Mean angular velocities of 50% and 90% APDF during assembly task (*statistically significant with $p<0.05$)

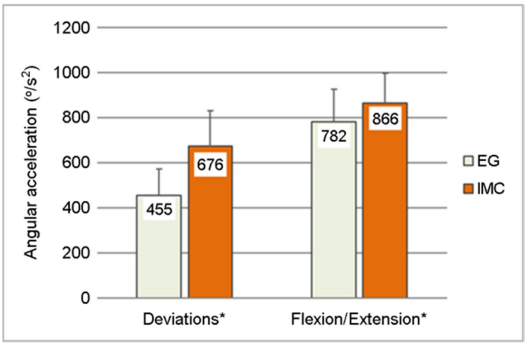


Figure 12. Mean angular acceleration 50% APDF during assembly work (*statistically significant with $p<0.05$)

4. Discussion

본 연구에서는 손목 동작을 대상으로 하여 전자 고니어미터와 IMU 기반 동작분석 시스템의 관절 각도와 동작 측정 성능을 비교하였다. 두 장비의 측정된 각도의 정확성을 확인하고자 과업 1인 정적 자세 실험을 진행하였다. 각도의 참값은 촬영된 사진을 통해 부착된 마커의 각도를 실제 측정하였다. 그 결과 굴곡/신전 자세와 편향 자세에서의 절대 오차 값이 9.6±7.1°와 4.5±2.8°로 측정되었다

(Figure 3). 굴곡/신전 자세와 편향 자세의 손목 동작 범위를 고려하면 비교적 오차가 크지 않은 편이라 할 수 있다. 절대 오차 값은 각 자세에서 중간 자세보다 최대 자세를 취할수록 더 커졌다. 이를 통해 손목 동작의 범위가 커질수록 두 장비 모두 정확성이 떨어지는 것을 확인했다. 특히, 척골 편향 자세, 신전 자세의 각도가 커질수록 전자 고니어미터의 측정 값이 커져 두 장비의 차이 또한 커지는 것을 확인했다(Figure 4). 손목의 신전 자세와 척골 편향 자세는 서로 영향을 미치는 동작으로서 전자 고니어미터의 Cross-talk 영향에 의해 측정 값이 증가한 것으로 추정된다. 극단적인 신전 자세에 대한 측정에서는 IMC 측정 장비가 EG에 비해 우수한 것으로 나타났다. 한편, 두 장비 모두 척골 편향 자세보다 요골 편향 자세에서 더 큰 절대 오차 값이 나타나 요골 편향 자세 분석에서 주의가 필요하다고 할 수 있다(Figure 4).

손목 동작의 속도에 따라서 측정 장비의 성능을 비교하기 위한 실험인 과업 2에서는 복합 동작에 대해 10%, 50%, 90% APDF 각도 값을 구하여 비교하였다. 편향 자세에서 EG의 측정 값의 범위가 IMC보다 더 넓은 것으로 나타났다(Figure 5). 앞서 정적 자세에서의 절대 오차 값을 비교하면 최대 요골 편향 자세와 척골 편향 자세에서 모두 EG가 더 높게 측정된 점을 감안할 때, EG가 전반적으로 IMC에 비해 극단적인 관절 각도에서 더 큰 값을 보이는 경향이 있는 것을 보인다. 50% APDF 관절 각도의 경우에는 EG는 척골 편향 자세로 IMC는 요골 편향 자세로 측정되었는데, 이는 EG의 척골 편향 각도가 상대적으로 크게 나타나는 경향과 관련이 있는 것으로 보이며, 신전 자세에 의한 영향이 있는 cross-talk 효과와도 관련이 있는 것으로 보인다. EG의 측정 값이 굴곡/신전 자세에서도 대체적으로 IMC에 비해 신전 자세 쪽으로 측정되는 것으로 비슷한 현상으로 보인다.

과업 2에서 측정한 손목 동작의 빈도에 대한 분석에서는 두 장비 모두 동작 속도에 비례해서 MPF 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 굴곡/신전 자세에서는 두 장비가 거의 같은 MPF 값을 보였지만, 편향 자세에서는 속도가 증가할수록 두 장비의 MPF 값이 차이가 커지는 것으로 나타났다(Figure 6). 동작 속도가 빠를수록 측정 장비에 의한 영향이 큰 점을 감안하여 사용하는 것이 필요한 것으로 보이며, 본 연구에서 설정한 동작 속도에서는 IMC가 EG에 비해 근사한 빈도 증가 결과를 보였다.

손목 동작의 각속도에 대한 분석에서는 두 장비 모두 속도가 증가할수록 각속도 값이 증가하는 것으로 나타나 동작 속도의 변화를 잘 측정하는 것으로 나타났다. 손목 편향 자세의 각속도는 IMC가 EG에 비해 넓은 범위로 측정된 것으로 나타났는데, 이 차이의 원인은 명확하지 않다(Figure 7). 각속도 50% APDF에서는 IMC의 측정 값이 더 작았으며, 90% APDF에서는 IMC의 측정 값이 더 큰 것으로 나타났다. 본 연구에서는 각속도의 참값을 측정하지 않았기에 어느 장비가 더 정확하게 측정하고 있는지는 확인되지 않았다.

손목 동작의 각가속도의 경우에는 50% APDF 값을 활용하였다. 10%, 90% APDF는 최대치를 나타내는데 각가속도를 구하는 과정 중에 미분을 2번 하기 때문에 값의 신뢰성이 떨어질 수 있어 제외하였다. 두 장비 모두 속도가 증가할수록 각가속도 값들이 증가하는 것을 통해 속도에 대한 반영을 잘 한다는 것을 확인했다. 편향 자세와 굴곡/신전 자세 모두 대체로 IMC가 EG보다 더 크게 나타났다(Figure 8). 동작 속도가 증가함에 따라 두 장비 간의 차이가 더 커져, 장비의 특성에 따른 영향이 있음을 알 수 있다.

일반적인 작업 상황을 가정한 상지 반복 작업인 과업 3에서는 대체로 과업 1과 과업 2의 결과와 유사한 경향이 나타났다. 손목 각도에서는 50% APDF 값을 통해 과업 1과 같이 EG가 Cross-talk의 영향으로 IMC보다 척골 편향 자세와 신전 자세의 각도가 크게 측정되는 경향이 나타났다. 빈도와 각가속도 모두 과업 2와 같이 IMC가 EG보다 높게 측정되었다. 각속도에서는 굴곡/신전 자세에서만 유의한 차이가 나타났고 과업 2와 같이 EG의 각속도가 더 큰 것으로 나타났다. 두 장비 간의 차이는 과업 2에서와 같이 동작 속도가 빠를수록 커지는데, 별도의 통제가 없이 이루어진 과업 3의 상지 반복 작업은 비교적 낮은 속도에서 작업이 이루어져 두 장비의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

전자 고니어미터와 IMU 기반 동작분석 시스템은 손목 각도 측정 성능에 있어서는 큰 차이를 보이지 않았으나, 실제로 장비를 신체에 부착하고 사용하는 방법과 과정은 큰 차이가 있다. EG는 와이어 형태의 센서를 손등과 팔목에 부착하여야 하기 때문에 장갑을 끼고 작업하거나 땀이 많이 나는 환경에서는 센서를 고정하는데 어려움이 있을 수 있다. IMC는 일반적으로 벨크로 형태의 부착 보조대를 사용하기 때문에 착용상 어려움을 덜할 수 있지만, 손등에 센서를 부착하기 위해 사용하는 벨크로가 손동작을 방해할 수도 있어 사용에 주의가 필요하다. 두 장비 모두 실제적으로 작업 동작을 방해하지 않도록 인체에 부착하여 사용하는데 주의가 요구된다.

5. Conclusion

본 연구에서는 손목의 관절 각도를 대상으로 전자 고니어미터와 IMU 기반 동작분석 시스템의 동작 측정 성능을 비교하였다. 두 장비는 광학식 동작분석 시스템에 비해 작업 현장에서 작업 동작과 자세를 측정하는데 많이 사용되는 특징이 있고, 전자 고니어미터가 오랜 기간 손목 동작 측정에 활용되었던 것에 비하여 IMU 기반 측정 시스템은 비교적 최근에 활용이 많이 되고 있는 장비라 할 수 있다. 동일한 동작에 대해 두 장비의 측정 성능을 비교하는 연구를 통해 손목 동작에 대한 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

손목의 굴곡/신전 자세와 요골/척골 편향 자세에 대한 각도, 빈도, 각속도, 각가속도를 분석한 결과 두 장비는 대체로 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 다만, 각도 변위가 커질수록 그리고 동작 속도가 빨라질수록 두 장비 간의 차이가 커지는 것으로 나타나 장비 활용에 있어 주의가 필요하다고 할 수 있다. 각도 측정에서 EG는 신전과 척골 편향에서 각도 변위가 클수록 오차도 크게 증가하는 것으로 나타나, 전반적으로는 IMC의 각도 측정 성능이 더 양호한 것으로 보인다. 동작의 빈도에 있어서는 두 장비 모두 유사한 결과를 보였으며, 일반적인 작업 속도에서는 두 장비 모두 유사한 결과를 보이고 있다. 관절 동작의 각속도와 각가속도에서도 두 장비 간의 차이는 크지 않으나, 동작 범위가 상대적으로 작은 편향 자세의 경우 IMC의 속도가 EG에 비해 높게 나오는 특성이 보여, 추후 이에 대한 타당성 검토 연구가 필요하다.

본 연구에서는 상용화되어 있는 장비 중 특정 회사의 장비를 하나씩만 활용해 전자 고니어미터와 IMU 기반 동작분석 시스템을 비교하였기 때문에, 이 결과가 단지 측정 방식에 의한 차이만이라고 하기에는 한계가 있다. 장비 개발 회사와 모델에 따라서 결과가 달라질 수 있는 점은 이 연구의 한계라 할 수 있다. 이 연구에서는 동작의 참값을 측정하지 않았기 때문에 두 장비 간의 차이가 나타나도 어떤 장비가 우수한 것인지를 확인하지 못하는 한계가 있다. 다른 연구에서는 광학식 동작분석 시스템을 활용하여 측정의 참값을 정하였던 것을 감안할 때, 추후에는 참값 측정을 통한 측정 장비의 우수성 여부를 비교할 필요가 있다. 그럼에도 본 연구가 가지는 의의는 두 장비의 차이가 나타나는 상황을 제시하였고, 어떤 경향이 나타나는지 알 수 있다. 그러므로 인간공학 연구에 사용하는데 활용할 수 있는 기초 자료를 제공함으로써 동작분석 연구의 타당성을 높일 수 있다고 생각된다.

Acknowledgement

본 연구는 2021년도 한경국립대학교 연구년 경비의 지원에 의한 것임.

References

Akesson, I., Balogh, I. and Hansson, G.Å., Physical workload in neck, shoulders and wrists/hands in dental hygienists during a work-day, *Applied Ergonomics*, 43, 803-811, 2012.

Arvidsson, I., Akesson, I. and Hansson, G.Å., Wrist movements among females in a repetitive, non-forceful work, *Applied Ergonomics*, 34, 309-316, 2003.

Chen, H., Schall Jr, M.C. and Fethke, N., Accuracy of angular displacements and velocities from inertial-based inclinometers, *Applied Ergonomics*, 67, 151-161, 2018.

Chen, H.C., Chang, C.M., Liu, Y.P. and Chen, C.Y., Ergonomic risk factors for the wrists of hairdressers, *Applied Ergonomics*, 41, 98-105, 2010.

Fennema, M.C., Bloomfield, R.A., Lanting, B.A., Birmingham, T.B. and Teeter, M.G., Repeatability of measuring knee flexion angles with wearable inertial sensors, *The Knee*, 26, 97-105, 2019.

Hansson, G.A., Arvidsson, I., Ohlsson, K., Nordander, C., Mathiassen, S.E., Skerfving, S. and Balogh, I., Precision of measurements of physical workload during standardised manual handling. Part II: Inclinometry of head, upper back, neck and upper arms, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 16, 125-136, 2006.

Hansson, G.Å., Balogh, I., Ohlsson, K. and Skerfvin, S., Measurements of wrist and forearm positions and movements: effect of, and compensation for, goniometer crosstalk, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14, 355-367, 2004.

Hansson, G.Å., Balogh, I., Ohlsson, K., Rylander, L. and Skerfving, S., Goniometer measurement and computer analysis of wrist angles and movements applied to occupational repetitive work, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 6, 23-35, 1996.

Jonsson, P. and Johnson, P.W., Comparison of measurement accuracy between two types of wrist goniometer systems, *Applied Ergonomics*, 32, 599-607, 2001.

Kim, J.H. and Lee, I., The effects of work characteristics of grapes-harvesting tasks on the wrist and elbow angles, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 36(5), 589-599, 2017.

Kim, S.W. and Nussbaum, M.A., Performance evaluation of a wearable inertial motion capture system for capturing physical exposures during manual material handling tasks, *Ergonomics*, 56(2), 314-326, 2013.

Lee, H.N., Kim, D.H., Kim, S.H., Jung, Y.J., Hwang, D.H., Kang, B.K. and Kim, H.S., Specific postures analysis and evaluation for the elderly using IMU (Inertial Measurement Unit) sensors, *Proceedings of Conference of Ergonomics Society of Korea*, 498-501, 2017.

Merino, G., Silva, L.D., Mattos, D., Guimaraes, B. and Merino, E., Ergonomic evaluation of the musculoskeletal risks in a banana harvesting activity through qualitative and quantitative measures, with emphasis on motion capture (Xsens) and EMG, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 69, 80-89, 2019.

Schall Jr, M.C., Fethke, N.B. and Chen, H., Working postures and physical activity among registered nurses, *Applied Ergonomics*, 54, 243-250, 2016.

Singh, R. and Gebhart, J.B., Effect of chair types on work-related musculoskeletal discomfort during vaginal surgery, *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 648.e1-648.e9, 2016.

Size Korea, http://www.sizekorea.kr, 2019.

Stal, M., Hansson, G.Å. and Moritz, U., Wrist positions and movements as possible risk factors during machine milking, *Applied Ergonomics*, 30, 527-533, 1999.

Stenlund, T.C., Lundstrom, R., Lindroos, O., Hager, C.K., Burstrom, L., Neely, G. and Rehn, B., Seated postural neck and trunk reactions to sideways perturbations with or without a cognitive task, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 25, 548-556, 2015.

Author listings

Inseok Lee: lis@hknu.ac.kr
Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, POSTECH
Position title: Professor, School of Social Safety Systems Engineering, Major of Safety Engineering / Research Center for Safety and Health, Hankyong National University
Areas of interest: Physical Ergonomics, Workload Evaluation, Agricultural Ergonomics, Accessible Design, Occupational Safety and Health Management

Yonghwi Kim: dydgnl2345@naver.com
Highest degree: BS, Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University
Position title: Safety Manager, Korean Industrial Health Association
Areas of interest: Safety Engineering, Physical Ergonomics