

관성측정장치를 이용한 경추 가동범위 측정에 대한 고찰

임주혁, 김현호, 박영재, 박영배
경희대학교 대학원 한방인체정보의학과

A review on measuring cervical range of motion using an inertial measurement unit

Juhyuk Yim, Hyunho Kim, Young-Jae Park and Young-Bae Park

Department of Human Informatics of Korean Medicine, Graduate School, Kyung Hee University

Objectives: The purpose of this study was to review the article using an IMU(Inertial Measurement Unit) for measuring the cervical range of motion and to evaluate the feasibility of using an IMU for measuring the cervical range of motion.

Method: Scopus was used to search for the articles relating to the inclusion criteria. Which is measuring the cervical range of motion using an IMU. A total of 15 articles were selected through discussion. Degree and the reliability of the cervical range of motion and the validity of the data within the articles were extracted.

Results: The measurement of the cervical range of motion using an IMU were 92.25° to 138.2°, 122.4° to 154.9°, 73.75° to 93.1° on the sagittal plane, transverse plane, and coronal plane respectively. 38 of the 43 values showed good reliability. They were larger than 0.75. 5 of the 43 values showed reliability less than 0.75. They were measured by smart phone. 16 of the 21 values showed good validity. The remaining 5 were measured by smart phone. The lower reliability and validity of smart phone were related to the protocol. The IMU can measure the coupling motion and may be used in various situations.

Conclusion: The IMU may become a gold standard for measuring the cervical range of motion. The IMU measured not only the cervical range of motion but also the coupling motion. Furthermore, IMU may be used in various situations. Therefore, IMU must be considered a valuable measurement device.

Key Words : MU, inertial sensor, inertial measurement unit, motion analysis, ROM, neck

서론

관절가동범위(range of motion, ROM)는 경추의 근골격계 질환의 진단 및 평가에 있어 중요한 지표이다¹⁾. ROM과 관련된 두경부 위치 측정은 경향통 환자의 진단 및 평가에 있어 무척 중요하며, 외상 및 개인의 질병으로 인한 경향통이 경추의 가동 범위(cervical ROM, CROM)을 제한시킨다는 점도 연

구되었다²⁾. 또한, CROM은 편타성 손상(whiplash injury) 과도 밀접한 연관이 있다는 것이 밝혀졌으며³⁾, 줄어든 CROM은 경향통의 유용한 지표로 사용된다¹⁾. 이렇듯, 경추의 ROM 측정은 진찰행위에 있어 의미 있는 과정이라 볼 수 있다.

관성측정 장치(inertial measurement unit, IMU)는 가속도계(accelerometer), 각속도계(gyroscope), 지자 기계(magnetometer)의 복합 센서 모듈이다. IMU는

내장된 센서들로부터 각도의 형태로 방향을 기록해 전송하는데, 이를 통해 움직임 데이터를 검출해 자세 지각을 할 수 있게 한다⁴⁾. 초기에는 자세 제어를 위해 위성, 로켓, 비행기 등에서 주로 사용되었으며, 현재는 대중화되어 스마트폰, 드론, 모터바이크, 스포츠, 애니메이션 등의 다양한 분야에서 사용된다.⁵⁾ 뿐만 아니라 의료분야에서도 많이 사용되었는데, 1977년 Frisch G.D. 등이 관성 장치(inertial instrumentation)를 이용해 충격상황에서 두경부와 경추부의 반응을 측정하는 등⁶⁾ 1970년대 이래로 여러 차례 다양한 연구들이 수행되었다. 진동(vibration) 측정을 통한 인체의 연하 작용과 발성 연구, 육체노동자의 경향통 측정⁷⁾, 농기계 사용 시 사용자의 경추에 생기는 진동 측정⁸⁾, 낙하산을 펼치는 순간의 경추 충격 측정⁹⁾, 난치성 사경증(dystonia)의 보행 측정¹⁰⁾, 점프 동작 측정¹¹⁾ 등을 예로 들 수 있다. 이렇듯 IMU는 의료의 여러 분야에서 다양하게 쓰일 수 있으며 특히 인체 관절의 움직임과 보행측정, 진동 측정 등의 분야에 주로 연구되어 왔다.

기존의 표준 값(gold standard)이라 할 수 있는 동적 정보 측정 장치로는 영상 촬영 장치를 이용한 모션 캡처 시스템(motion capture system)이 대표적이다. 그러나 연구 목적으로 주로 사용하며 가격이 비싸고 넓은 공간이 필요하여 임상현장에서는 활용하기가 어렵다¹²⁾. 전자기장 시스템(electromagnetic field systems) 또한 표준 값으로 사용되나¹³⁾, 독립된 공간이 많이 필요하며 외부 금속 등에 의해 측정 과정에서 오류가 생기기 쉽다¹⁾. 게다가 임상현장에서 사용하기에는 지나치게 가격이 비싸고 장비의 크기와 무게가 부담된다⁴⁾. 기계식의 고전적인 장치로는 각도계(goniometry), 경사계(inclinometry), The cervical ROM device 등이 있다. 이 장치들은 기존의 임상현장에서 주로 사용되던 ROM 측정 기기이나¹⁴⁾, 측정 내용을 실시간으로 기록하는 것이 불가능하며 3차원의 움직임을 모두 측정하기 어렵고 시간이 많이 소비된다는 단점이 있다¹⁵⁾. 반면에, IMU는 다루기 쉬우며¹²⁾, 다른 진단장비들에 비해 비교적 저렴하고⁴⁾, 연속적인 동작을 실시간으로 기록하여 동작의 진

반적인 과정 전체를 측정한다는 장점이 있다. 본 연구에서는 IMU가 임상 및 연구현장에서 관절가동범위 측정에 사용될 만한 적합한 기기인지를 판단하고자 하였고, IMU가 근골격계 질환의 진료에 있어 진단 및 평가를 수행할 수 있는 가능성을 가진 기기임을 제시하고자 하였다. 또한, IMU가 임상에서 널리 쓰이고 있는 기기가 아닌 점을 고려하여, 다양한 IMU 기기들을 소개하고, CROM과 관련하여 응용 가능한 상황들을 정리하고자 하였다. 이를 위해 IMU를 통해 CROM을 측정한 문헌들을 고찰하였다.

연구자료 및 방법

본 연구는 공학적인 주제가 포함되었기에, 관련 주제의 검색을 보다 잘 수행해 낼 수 있도록 Scopus를 선정하여 Scopus에서 검색하였다. Scopus에서 “(cervical or neck) and (IMU or Inertial or accelerometer)”의 검색식으로 article title, abstract, keywords를 검색하였으며 날짜는 전체, 문서 형식은 ‘article or review’, 주제 영역(subject areas)은 ‘life sciences’와 ‘health sciences’로 하였다. 언어는 영어로 제한하였다. 그 결과 1971년부터 2016년까지 325개 논문이 검색되었다. 포함 기준(inclusion criteria)과 배제 기준(exclusion criteria)은 연구 주제에 맞도록 관련 분야의 전문가 3명의 자문을 거쳐 설정하였다. 검색식 구성 시에 ‘ROM’이라는 단어는 의도적으로 제외하였는데, 경추의 전반에 관한 정보를 충분히 수집한 뒤에 ROM에 관한 것을 읽어보면서 선정 기준에 맞는 연구들을 수집하는 방식을 취하였기 때문이다. 이를 통해, 경추의 움직임에 관한 측정을 보다 광범위하게 검토할 수 있었다.

논문의 포함 기준(inclusion criteria)은 IMU로 CROM을 측정한 것으로 하였다. 논문의 배제 기준(exclusion criteria)은 인체모형(dummy)과 시신(cadaver)을 이용한 연구, 수술 후 평가, 진동 및 단순 움직임을 측정된 것, ‘사고 상황 재현실험’과 같이 수동적인 CROM 측정(passive CROM) 상황이다. 단, 수동적인 움직임의 측정이라 해도 추나 시술 등

의 임상적 상황은 연구 주제에 적합하다고 판단하여 분석에 포함시켰다.

1차로 title과 abstract를 통해 325개의 논문 중 260개를 제외하였다. 제외된 연구들 중에서는 인체 모형과 시신을 목적으로 한 연구가 47례로 가장 많았다. 포함 기준(inclusion criteria)과 동떨어져 배제된 연구들은 126례였다. 배제된 연구들 중에서 IMU를 활용한 스포츠 관련 주제들이 다수 존재하였다. 축구선수가 헤딩을 할 때 경추의 움직임 측정⁶⁾, 미식축구 선수들이 진형(Scrum)을 짰 뒤 충돌할 때의 경추의 움직임 측정⁷⁾이 그것인데 CROM측정이 아닌 단순 움직임을 측정한 연구들이었기에 배제하였다. 이러한 배제 과정을 통해 65개의 논문이 남게 되었다.

2차로 남겨진 65개의 논문들은 abstract를 통해 전문가의 자문을 얻어 토의를 하고, 추가로 본문을 확인하여 41개를 제외하였다. 이때 제외된 연구들은 CROM을 측정은 하였으나 수동적(passive)인 CROM이어서 연구 주제와 맞지 않은 경우가 많았는데, 교통사고와 유사한 상황을 통해(sled test) 충격을 주어 CROM을 측정하는 연구¹⁸⁾ 등이 대표적이다. 그리고 보행 시 관절 움직임 측정¹⁹⁾ 등 경추의 움직임만을 측정하고 CROM은 측정하지 않은 연구들 또한 제외되었다. 이러한 과정을 통해 14개의 논문을 선정하였다.

추려진 14개의 논문 중 스마트폰 애플리케이션을 이용해 각도를 측정한 논문²⁴⁾을 분석하는 과정에서 추가로 한 개의 논문을 더 찾아 연구에 포함시켰다. 이는 아이폰을 사용해 CROM을 측정하는 연구¹³⁾로, IMU가 아이폰에 탑재되었기 때문에 연구주제에 적합하였으나, 검색식에 'smart phone'을 넣지 않았기 때문에 처음 검색한 325개의 연구에 포함되지 않았다.

이 같은 과정을 통해 분석할 15개의 연구들을 최종적으로 확정하였다(Fig. 1).

연구결과

본문에서는 최종 결정된 15개의 연구들을 다음과

같이 분류하였다. 첫째는, CROM 측정값들의 추출 및 분석, 둘째는 신뢰도와 타당도 정리, 셋째는 다양한 형태로 개발된 IMU device에 관한 소개 및 분석, 넷째는 주 평면 외의 관찰 값(coupling motion) 분석, 다섯째는 기타 다양한 상황 정리 등이다. IMU를 이용한 CROM의 측정이 적절히 이루어졌는지를 확인하기 위하여 ROM 값들과 신뢰도, 타당도 값들을 추출하여 정리 및 평가하였으며, IMU 센서가 어떠한 장치에 탑재되어 ROM을 측정하였는지를 소개하여 임상현장 활용에 도움이 될 수 있도록 하였다. 여기에 주 평면의 움직임이 아닌 다른 평면에서 발생하는 의도치 않은 측정값들을 추가로 분석하여 보다 유의미한 진단지표로서의 가능성을 제시하였고, IMU가 단순 CROM 측정뿐만 아니라 임상과 관련된 기타 다양한 상황에서 응용할 수 있는지 또한 파악하였다.

1. Measurement on Cervical ROM using an IMU

IMU로 CROM의 측정값을 구한 12개의 논문을 Table 1에 제시하였다. 모두 건강한 사람의 active CROM 측정값을 나타내었다. 제시된 값은 그 연구 실험 대상자 N 수의 평균값이다. 빨간색으로 표시한 부분은 편의를 위해 대상 항목을 각각 더하여 제시한 값이다. Pryce 등²⁰⁾의 측굴(lateral flexion) 값은 센서의 한계로 측정하지 못하였다. 이 연구에서는 대상자의 경추 움직임의 정도에 따라 low, med, high, max 4가지 종류의 값이 제시되었는데, max 값이 ROM에 가장 적합하다 판단하여 max 값을 추출하려 하였으나 값이 명시되지 않고 그래프로만 제시되어 Table 1에 실지는 않고 기타 다양한 상황에서의 측정을 소개한 5절에서 분석하였다. Schiefer 등²¹⁾의 연구에서는 3명의 의사가 측정한 값이 각각 제시되었는데, 세 측정값의 평균을 표에 제시하였다. Xu 등²²⁾의 연구는 가상현실 스마트 기기(virtual reality. VR)인 Oculus Rift로 측정한 연구인데, 결과 값을 표에 제시하였으나 지나치게 동떨어진 값을 가

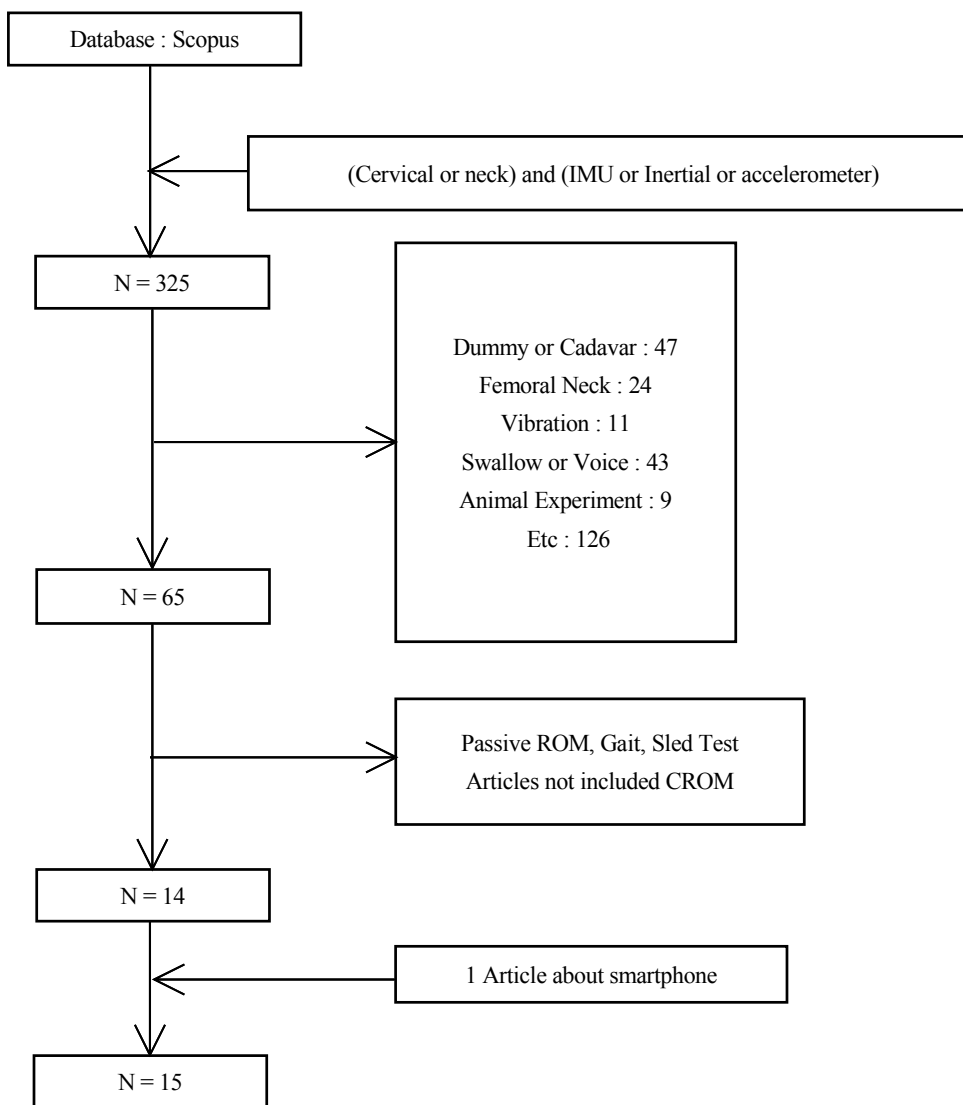


Fig. 1. A Review of Measurement on Cervical ROM using an IMU

저 CROM의 분석 과정에서 제외하였고, 다양한 device를 다룬 3절에서 보다 자세히 분석하였다. Kim 등⁴⁾은 자연스러운 움직임(nature test)과 중립을 가지려는 움직임(neutral test) 두 종류 중, 자연스러운 움직임이 적절하다고 판단해 그 값을 추출하였다. Peter 등¹⁾은 IMU의 부착부위를 4분류 하여 각각의 측정값을 제시하였는데, 그 4개의 값을 평균

내어 표에 제시하였다. Miyaoka 등²³⁾은 axial rotation은 측정하지 않았다. Tousignant 등¹³⁾은 여러 종류의 측정값 중, 타당도 비교를 위한 값이 대표 값이라 판단해 그 값을 표에 제시하였다.

제외한 3개의 논문은 다음과 같다. Milani 등²⁴⁾은 리뷰 논문으로 ROM 값이 따로 나타나지 않았고 타당도와 신뢰도만 제시되어 제외하였다. Cuesta-Vargas

등²⁵⁾과 Boissy 등²⁶⁾은 Passive 한 경추 움직임이지만 임상 현장 상황과 밀접하다 판단하여 분석에 포함한 연구이다. Cuesta-Vargas 등²⁵⁾은 경추 추나 시술 과정을 IMU로 측정하였으나 ROM 값이 명시되지 않아 표에서 제외하였고, Tousignant 등¹³⁾은 외력에 의해 범위가 제한된 값이므로 아래의 표에서는 제외하였다.

표준 편차(standard deviation) 값은 추가 분석 및 표 제시 방식에 있어 불필요하다고 여겨 제외하였고, 전체(total) 값이 따로 제시되지 않은 경우에는 직접 합하여 표에 제시하였다.

이 연구는 IMU가 관절가동범위 측정을 하기에 적합한 기기인지를 판단하기 위함이 목적이지만, IMU를 통해 측정된 CROM 값을 알아보는 것이 목적이 아니었기에 자료 합성은 하지 않았다. IMU를 통해 측정된 여러 부위의 관절가동범위들의 값을 합성한 뒤에, 기존의 참 값(gold standard)과 비교하여 제시하는 주제의 연구를 추후에 수행할 수 있을 것이라 생각된다(Table 1).

CROM은 IMU에 의해 시상면(sagittal plane), 수평면(transverse plane), 관상면(coronal plane)으로 구분되어 측정된다. 따라서 본 연구에서는 이를 기준으로 하여 제시된 table 1의 CROM 값을 분석하였다.

시상면의 움직임은 굴곡(flexion)과 신전(extension)

으로 이루어진다. 굴곡과 신전을 합친 전체(total) CROM 값은 Oculus Rift를 통해 측정된 69.8을 제외하면 모두 92.25와 138.2 사이에 분포되어 있다. 신전 값은 54에서 82.2 사이에, 굴곡 값은 52.0에서 63.2 사이에 각각 분포되어 있다. 굴곡의 측정값은 최댓값과 최솟값의 차이가 11.2로 비교적 큰 차이가 없었으나 신전 값은 최댓값과 최솟값이 25 도 가량 차이가 있었다. 다른 신전 값들은 50에서 60에 분포하는데 비해, Quek 등¹⁴⁾과 Tousignant 등¹³⁾의 신전 값은 각각 79.3과 82.2로 다른 값들 보다 20도 이상의 차이를 보였는데, 이는 모두 스마트폰으로 측정된 결과값 이었다.

수평면의 움직임은 좌측 회전과 우측 회전으로 이루어진다. 두 방향을 합친 전체 (total)값은 Oculus Rift를 통해 측정된 값을 제외하고는 모두 122.4에서 154.9에 분포되어 있다. 좌측 값은 65.3에서 80.5, 우측 값은 57.1에서 74.4에 분포되어 있으며, 좌측의 회전 각도가 우측에 비해 약간 높게 측정되었다. 좌측과 우측 측정값 11개 중 8개의 값이 69에서 75사이에 분포되어 있는데, 가장 낮게 나온 65.3과 57.1 은 모두 스마트폰으로 측정된 값이다.

관상면의 움직임은 좌측굴(left lateral flexion)과 우측굴(right lateral flexion) 로 이루어진다. lateral flexion을 lateral bending이라 표현한 연구도 있는데 본 연구에서는 lateral flexion으로 통일하여 표기하

Table 1. Measurement on Cervical ROM using an IMU.

Study	N	Sagittal Plane			Transverse Plane			Coronal Plane		
		Total	Extension	Flexion	Total	Left	Right	Total	Left	Right
Pancani et al ¹²⁾	12	106*	54	52	145			80		
Schiefer et al ²¹⁾	20	117*	54.33	62.67	141*	70	71	76.33*	39.33	37
Xu et al ²²⁾	10	69.8			99.5			16.2		
Alqhtani et al ¹⁵⁾	18	128.1*	66.4	61.7	154.9*	80.5	74.4	83.6*	42.1	41.5
Quek et al ¹⁴⁾	21	131.3*	79.3	52.0	122.4*	65.3	57.1	93.8*	48.8	45.0
Kim et al ⁴⁾	18	116.70	57.23	58.48	143.29	69.67	73.62	89.42	44.15	45.28
Peter et al ¹⁾	12	92.25			125.75			73.75		
Jan et al ²⁾	10			63.2		75.0			40.1	
Miyaoka et al ²³⁾	14	112.9*	61.2	51.7				86.6*	43.9	42.7
Duc et al ²⁸⁾	10	122			144			88		
Tousignant et al ¹³⁾	28	138.2*	82.2	56.0	147.8*	75.4	72.4	93.1*	47.5	45.6

Unit: degree; N: number of subjects, *These values were calculated by adding two separate values.

였다. 좌측굴과 우측굴의 값을 합친 전체(total) 값은 Oculus Rift를 통해 측정된 값을 제외하고는 모두 73.75와 93.1 사이에 분포되어 있다. 좌측굴의 값은 39.33에서 48.8 사이에 분포되어 있으며, 우측굴의 값은 37에서 45.6 사이에 분포되어 있다.

CROM 값들은 몇몇을 제외하고는 대체로 균일하게 측정되었다고 볼 수 있었다. 통계적으로 분석하지는 않았지만, 몇몇의 값들이 다소 동떨어진 값을 나타내었는데, 이는 ROM 측정만을 위한 디바이스가 아닌 스마트폰과 Oculus Rift를 통해 측정된 값들이었다. 이에 관해 본문의 '3. 다양한 형태의 IMU'에서 분석하여 정리하였다.

2. 신뢰도 및 타당도

2.1 신뢰도

IMU의 신뢰도를 연구한 8가지의 논문에서 제시된 ICC(Intraclass Correlation Coefficient) 값을 분석하였다. ICC값은 모두 평가자 내 신뢰도(Intra-rater reliability)이다. Pryce 등의²⁰⁾ 논문에서 antalo-occipital flexion 측정의 ICC 값이 0.66으로 제시되었으나 Table 2에는 표시하지 않았다. Peter 등¹⁾은 4가지 측정 방식에 따라 ICC 값을 각각 제시하였다. Table 2엔 이 4가지 측정 방식의 평균을 계산하여 소수점 셋째 자리에서 반올림하여 제시하였다. ICC 값은 0.75 이상이면 신뢰할 만한(good), 0.75미만 0.40 이상이면 보통의 신뢰도(moderate), 0.40 미만

이면 신뢰하기 힘든(poor)으로 해석하였다.²⁷⁾

시상면 움직임의 ICC 값은 모두 0.83 이상이므로 신뢰할 만 하였으며, 관상면 움직임의 ICC값 또한 대체로 0.90을 상회하였다. 따라서, 시상면과 관상면의 움직임들은 모두 신뢰할 만 하였다. 이에 비해, 수평면의 ICC 값은 14개 중 9개는 신뢰할 만 하였으나, Pancani 등¹²⁾의 ICC 값과 Tousignant 등¹³⁾의 ICC 값 들은 각각 0.65, 0.66, 0.74 로 보통 정도의 신뢰도를 보였고, Quek 등¹⁴⁾의 ICC값은 좌우 움직임이 각각 0.05와 0.33으로 제시되어 신뢰하기 어려웠다. 이렇듯, IMU는 시상면과 관상면의 움직임과는 달리 수평면의 움직임의 신뢰도는 다소 낮았다. 특히나, 0.4 이하의 신뢰하기 힘든(poor) 움직임은 모두 스마트폰으로 측정된 값이었으며, 이로 미루어 볼 때 스마트폰은 수평면의 CROM 측정을 수행하기 다소 어려울 수 있다고 생각된다. 하지만, 인체의 동작 측정만을 위해 개발된 IMU로 측정된 CROM 값들은 ICC 값이 모두 높아 신뢰할 수 있다고 보여진다.

2.2 타당도

IMU를 이용한 측정의 타당도를 평가하기 위하여, IMU 측정치와 기준에 쓰이던 측정 기기들의 측정값과 비교한 연구들을 분석하였다. 타당도 측정을 위해 인용한 3DMA와 CROM은 각도계와 경사계 등으로 이루어진 아날로그 측정 기기이다. Pryce 등²⁰⁾

Table 2. Reliability of Measurement on Cervical ROM using an IMU.

Study	N	Sagittal Plane			Transverse Plane			Coronal Plane		
		Total	Extension	Flexion	Total	Left	Right	Total	Left	Right
Pancani et al ¹²⁾	12		0.88	0.92	0.65			0.91		
Schiefer et al ²¹⁾	20		0.89	0.83		0.79	0.83		0.93	0.95
Alqhtani et al ¹⁵⁾	18		0.98	0.98		0.99	0.97		0.98	0.98
Quek et al ¹⁴⁾	16		0.82	0.86		0.05	0.33		0.85	0.90
Kim et al ⁴⁾	18	0.98	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.97	0.97	0.98
Peter et al ¹⁾	12	0.85			0.95			0.86		
Duc et al ²⁸⁾	10	0.87			0.98			1.00		
Tousignant et al ¹³⁾	28		0.84	0.78		0.66	0.74		0.78	0.77

Intraclass Correlation Coefficient(ICC), N: number of subjects.

은 Pearson r 값을 통하여 타당도를 제시하였고, Pearson r 값이 0.7이상이면 강한 상관관계(related strongly)가 있다고 해석하였다²⁰⁾. Pancani 등¹²⁾, Quek 등¹⁴⁾ Tousignant 등¹³⁾은 ICC(Intra-Class Coefficients) 값을 통해 타당도를 제시하였고, 본 연구에서는 ICC가 0.65 이상이면 good, 0.65미만 0.50 이상이면 moderate, 0.50미만이면 poor로 해석하였다²⁷⁾. Pancani 등¹²⁾, Pryce 등²⁰⁾의 연구는 인체의 동작을 측정하기 위한 목적으로 개발된 기기를 사용하여 CROM을 측정하였고, Quek 등¹⁴⁾, Tousignant 등¹³⁾의 연구는 스마트폰을 통해 CROM을 측정하였다.

스마트폰으로 측정하지 않은 6개의 값들은 모두 높은 타당도를 나타내었으나, 스마트폰으로 측정한 값들은 12개 중에서 7개만이 0.65 이상의 ICC 값을 나타내었다. 시상면과 관상면의 움직임은 아이폰으로 측정한 ICC 값 하나가 0.58로 보통을 나타낸 것을 제외하고는 모두 0.65 이상의 ICC 값과 0.7 이상의 Pearson r 값이 제시되어 높은(good) 타당도 값을 나타내었다. 이에 비해 수평면의 타당도 값은 2개만이 높은 값을 나타내었고, 나머지 4개는 ICC 값 0.53, 0.53, 0.43, 0.55로 보통(moderate) 혹은 낮은(poor) 값들을 나타내었다. 이 4개의 낮은 ICC 값은 모두 스마트폰으로 측정한 값이다. 이는 스마트폰의 신뢰도가 수평면에서 두드러지게 낮다는 점에서 앞서 제시한 신뢰도 분석과 유사한 점을 나타낸다. 이로 미루어 보아, 스마트폰으로 CROM의 수평면을 측정하는 것은 신뢰하기 어렵다고 보인다. 반면에, 인체의 동작을 측정하기 위한 목적으로 개발된 기기

들의 CROM 측정값은 신뢰할만하다. 이에 관하여, “다양한 형태의 IMU” 단락에서 추가적으로 고찰하였다.

3. 다양한 형태의 IMU. (다양한 IMU Device)

본 연구에서 고찰한 IMU는 개발 목적에 따라 인체 동작 측정만을 위해 개발된 디바이스와 스마트폰과 같은 범용 디바이스로 나누어 서술하였다. 또한 범용 디바이스는 다시 기기 형태의 차이를 고려하여 스마트폰과 Oculus Rift로 나누어 서술하였다.

3.1 인체 동작 측정용 IMU 디바이스 나열 및 서술

기존 연구에 사용된 도구 중, 인체의 동작만을 측정하기 위해 제작된 IMU 장치들은 table 3.1과 같다. 대부분의 장치들은 가속도계(accelerometer), 각속도계(gyroscope), 지자기계(magnetometer)를 모두 탑재하고 있다. 이 장치들은 끈, 벨트, 접착성 테이프 등을 통해 환자의 몸에 부착된 채로 대상의 움직임을 측정하는데, 각각의 디바이스들은 7.85g~47g 정도로 경량화되어 있고 크기 또한 작은 편이다(table 4). 또한, 무선으로 작동하는 디바이스들도 존재하여 측정 대상자에게 불편감과 부담감을 주지 않고, 움직임을 간편하게 측정할 수 있다(figure 2). 이 디바이스들의 신뢰도 타당도는 앞서 언급했듯이 모두 신뢰할 만하였다. 이로 미루어 볼 때, IMU를 이용한 디바이스들은 높은 신뢰도와 타당도를 기반으로 임상 현장에서 환자의 동적 정보를 측정하기 적합하다 할 수 있겠다.

Table 3. Validity of Measurement on Cervical ROM using an IMU.

Study	Gold standard	Validity	N	Sagittal Plane			Transverse Plane			Coronal Plane		
				Total	Extension	Flexion	Total	Left	Right	Total	Left	Right
Pancani et al ¹²⁾	The camera's system	ICC	12	0.98			1.00			0.96		
Pryce et al ²⁰⁾	video	Pearson r	13	0.78			0.92			0.95		
Quek et al ¹⁴⁾	3DMA	ICC	21	0.92			0.98			0.53 0.53 0.95 0.96		
Tousignant et al ¹³⁾	CROM	ICC	28	0.58			0.76			0.43 0.55 0.70 0.85		

N: number of subjects, 3DMA: three dimensional motion analysis (Eyeglasses-like instrument has three inclinometers placed at three different positions), CROM: Cervical Range of Motion Device.

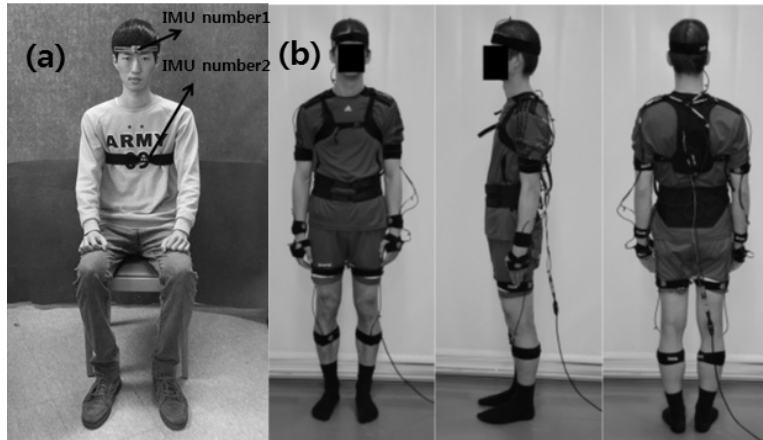


Fig. 2. (a) wireless IMU from Kim et al⁴⁾ (b) Wired IMU based CUELA system From Schiefer et al²¹⁾.

Table 4. Devices only for a measurement about movement.

Study	Device	Fix	Size	Communication
Pancani et al ¹²⁾	OPAL, APDM, Inc., Portland, Oregon, USA	Straps Dermatological patches	N/A	N/A
Pryce et al ²⁰⁾	Microstrain mXRS, Lord Sensing Systems; Williston, Vermont USA	N/A	47g, 58mm × 43mm × 22mm	Wireless
Schiefer et al ²¹⁾	CUELA SYSTEM (CUELA, IFA, Sankt Augustin, Germany)	Velcro straps	N/A. Only in picture.	Wired
Alqhtani et al ¹⁵⁾	3A Sensor String; ThetaMetrix, Waterlooville, UK	double-sided tape	N/A	Wired
Cuesta-Vargas et al ²⁵⁾	Inertiacube3, InterSense Inc., MA		26.2mm×39.2mm×14.8mm	N/A
Kim et al ⁴⁾	Model EBIMU24G, E2BOX, Seoul, Republic Korea	Velcro straps	7.85g, 32mm × 21mm × 6.5mm	Wireless
Peter et al ¹⁾	model 3DM-GX3-25; Microstrain, VT, USA	double-sided toupee tape	18g 44mm × 25mm × 11mm	Wired
Jan et al ²⁾	IC3. Intersense, Bedford, MA, USA		N/A	Wireless
Miyaoka et al ²³⁾	ADXL-250, Analog Devices Inc., Norwood, MA, USA	the glasses and suspenders with the two sensor elements	N/A	N/A
Duc et al ²⁸⁾	The wearable system (Physilog®, BioAGM, CH)	dermatological patches	N/A	wireless
Boissy et al ²⁶⁾	MotionPod, Movea Inc, Grenoble, France		33mm × 21mm × 15mm	Wireless

3.2 스마트폰에 내장된 IMU 를 통한 ROM 측정.
스마트 디바이스의 센서를 의료적으로 활용하려는 시도가 최근 다양하게 시도되고 있다²⁴⁾. 스마트폰에 내장된 각도계를 이용한 측정 프로그램은 간편

하고 빠른 각도 측정 결과를 제공하며, 특히 환자 스스로 언제든지 신속하게 측정이 가능하다는 장점이 있다²⁴⁾. 반면, 스마트 디바이스를 환자 몸에 고정하기 위해 암밴드와 같은 고정 장치를 추가적으로

사용해야 하며, 직접적 부착이 부담으로 작용하는 점이 단점으로 언급되기도 한다²⁴⁾. Milani 등은 2014년에 스마트폰을 이용한 각도측정 애플리케이션에 대하여 종설을 발표²⁴⁾하였는데, IMU를 이용한 각도 측정 애플리케이션이 9개, 영상분석을 이용한 각도측정 애플리케이션이 3개로 소개되었다. 소개된 12개의 애플리케이션 중 Tousignant의 연구¹³⁾에서 사용한 2개의 애플리케이션은 다른 것에 비해서 낮은 ICC (0.07~0.84)를 기록하였는데, 이는 해당 연구에서는 아이폰을 고정도구를 사용하여 고정하지 않고, 측정자가 잡은 상태에서 환자의 움직임을 따라가면서 측정하였기 때문에(*figure 4*)오차가 발생하였을 것으로 추측한다. 실제로 해당 연구의 단점을 보완한 June¹⁴⁾의 실험에 의하면, 헬멧을 이용하여

스마트폰을 고정시키고 측정하였을 때(*figure 3*)의 신뢰도는 (0.53~0.99)로 비교적 높게 보고되었다. 그 외 나머지 애플리케이션들의 평가자 간 신뢰도와 평가자 내 신뢰도를 나타내는 ICC가 하나의 값만 0.7 이고 대부분이 0.79 이상으로 높게 평가되었다. 따라서 스마트폰 애플리케이션을 이용한 각도 측정은 스마트폰의 고정 방식과 상태가 신뢰도에 중요한 변수가 됨을 알 수 있으며, 측정 방식을 올바르게 설계한 경우에 한하여 높은 신뢰도를 가진다고 할 수 있겠다.

3.3 Oculus Rift에 내장된 IMU 를 통한 ROM 측정
Oculus Rift VR은 IMU를 장착한 저렴한 3D 가상현실 Head-Mounted Display(HMD) 기기이다²²⁾.



Fig. 3. the Android phone based equipment set up from Quek et al¹⁴⁾.



Fig. 4. Position of the iPhone for the measurement of right lateral flexion from Tousignant et al¹³⁾.

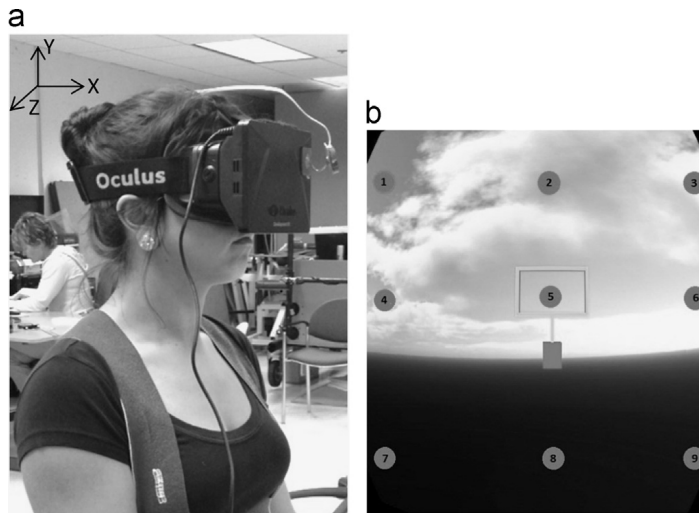


Fig. 5. (a) A participant wearing the Oculus Rift performing the task. (b) A yellow field goal post at the center viewpoint of the participant from Xu et al²²⁾.

이는 게임산업을 위해 개발되었지만, 재활의학이나 통증제어와 같은 의료 분야에 활용하기 위한 연구들이 보고되었다.²²⁾ Xu 등²²⁾의 연구에서는 Rift를 통해 경추 운동을 측정하여 Rift의 정확성을 평가하였고, 정확한 측정을 저해하는 방해요소들을 제시하였다. 이 연구에서는 Rift가 경추의 ROM을 측정하기에 적합한 기기라 소개하였고, 신뢰도 평가를 위해 제시한 RMSE(root mean square errors)도 10° 이하로 낮다고 설명하였다. 적외선 동작 분석 시스템인 Optotrak Certus System 과의 비교를 통한 타당도 평가 결과, 시상면, 관상면, 수평면에서의 회전 모두 2° 이내의 차이가 측정되었으므로 비교적 정확하게 움직임을 측정한다 볼 수 있다. 그러나 본 연구(table 1)에서 제시했듯이, Rift를 이용한 연구는 측정된 경추의 각도가 다른 연구들에 비해 현저히 적다. 이는, 해당 연구에서는 Rift 화면 내의 특정 지점을 응시하는 방식(figure 5)으로 경추의 회전을 유발하였기 때문에, 측정 대상자에게 직접적으로 경추의 최대 회전을 지시한 다른 연구와 차이가 발생하였다고 생각한다.

상술한 연구들을 종합해본 결과, IMU를 이용한

여러 디바이스들은 대체로 신뢰도 타당도가 높은 편이나, 인체의 움직임만을 측정하기 위해 개발된 디바이스들에 비해, 스마트폰 혹은 가상현실용 장치를 이용한 연구의 신뢰도, 타당도, 그리고 측정된 ROM 값은 비교적 낮게 측정되었다. 그러나, 인체 고정 방법 등 연구 디자인을 수정한 연구에서는 평가 지표들이 높게 측정되었다. 이로 미루어 보아, 개발 목적이 다른 IMU라 하더라도 장치 자체의 신뢰도와 타당도는 낮다고 볼 수 없을 것이며 측정 방법이 신뢰도와 타당도에 중요한 영향을 미치는 변수임을 알 수 있다. 따라서 범용 디바이스를 이용하여 측정할 경우, 장치를 고정시키거나 대상자의 움직임을 연구 목적에 맞게 유도시키는 과정 등의 측정 프로토콜을 보다 엄밀하게 설계해야 한다.

4. 커플링 모션

커플링 모션(coupling motion)은 주된 움직임이 발생하는 평면과 관련된 다른 평면에서 이차적인 움직임이 발생하는 것이다⁴⁾. 커플링 모션은 본래 주 평면의 움직임과 함께 일어나는 자연스러운 운동이라고 생각되었으나, 최근의 연구들에 의해 경추 통

증의 증거로도 생각된다²⁾. 또한, 중추신경계가 움직임을 조절하는 방식을 반영한다고 믿어지며, 경추 기능의 안정성 평가에 사용되기도 한다⁴⁾. 따라서, 경추의 커플링 모션은 퇴행, 질병, 외상 등의 병리학적인 장애로 인해 야기되는 임상적인 불안정 증상을 진단하는 중요한 요소이다⁴⁾.

커플링 모션의 측정은 기존의 참 값인 각도계 등에 의해서는 한계가 있었다. 반면에 IMU를 이용할 경우 커플링 모션을 비교적 용이하게 측정할 수 있다는 장점이 있다. IMU는 시상면, 수평면, 관상면 세 가지 평면을 각각 동시에 측정한다. 따라서, 주 평면에서의 움직임과 더불어 이차적인 평면에서의 움직임도 자동적으로 측정하기 때문에, 주 평면을 측정하면서도 자연스럽게 커플링 모션을 함께 측정하게 된다. 또한, 특정한 일정 시점에서만 측정값을 읽어야 하는 각도계에 비해, IMU는 움직임의 전체 과정이 그래프를 통해 온전히 나타나므로 움직임의 과정에 나타나는 각도 값들까지 온전히 파악할 수 있다는 장점이 있다.

Miyaoka 등²³⁾의 연구에서는 14명의 경추 굴곡 & 신전 시 측굴의 움직임과 경추 측굴 시 굴곡 & 신전의 움직임을 측정 후 표로 제시하였다. 경추의 굴곡 & 신전시 측굴의 움직임의 평균값은 좌우 각각 약 4° 정도였고, 경추의 측굴시 굴곡의 움직임 평균값이 7.06° 신전의 움직임 평균값이 12.1° 였다. 경추의 측굴시에 커플링 모션이 조금 더 발생한다는 것을 알 수 있다. 다만, 시상면과 관상면의 움직임만이 측정 가능하여 측정에 다소 한계가 있었다.

C. Duc 등²⁸⁾의 연구에서는 연관 동작(associate movements)의 개념으로 시상면, 관상면, 수평면에서 발생하는 커플링 모션 6개를 측정하고 표현했다. 커플링 모션의 ICC 값은 0.64에서 0.91 정도로 주 평면 운동의 ICC 값(1.00, 0.98, 0.87)에 비해 낮은 편이었다. 하지만, 수평면 회전시에 시상면에 발생하는 커플링 모션만이 0.64 정도의 값으로 중간 정도의 신뢰도를 갖고, 나머지 5가지의 커플링 모션은 모두 0.75 이상으로 신뢰할만하였다. 커플링 모션은 주 평면 운동에 비해서는 반복적으로 일정한 값이

측정되기 힘든 면이 있었지만, 대체적으로 신뢰할 만하였다. 커플링 모션은 관절고정술(arthrodesis)을 받은 환자 군과, 받지 않은 대조군의 비교에서도 차이가 있었다. 관절고정술을 받은 환자군의 주 평면의 경추 움직임은 대조군에 비해 모든 방향의 ROM이 낮았다. 관절 고정술을 받은 군이 커플링 모션의 결괏값도 대체로 낮았으나, 경추 측굴시 수평면에 발생하는 커플링 모션은 관절고정술을 받은 군이 더 높았다. 이는 관절고정술을 받을 경우 경추 측굴시 수평면의 움직임을 동반하게 된다는 것을 의미한다.

Kim 등⁴⁾의 연구에서는 시상면, 관상면, 수평면 세 평면의 움직임을 전후좌우를 구분하여 모두 측정하였으며, 이를 통해 총 12개의 커플링 모션의 값을 제시하였다. 또한, 별다른 의식이 없이 움직이는 자연 동작(natural test)과 커플링 모션을 의식적으로 억제한 중립 동작(neutral test)을 구분하여 측정해 그 값을 각각 제시하였다. 대부분의 커플링 모션의 ICC 값은 0.9 이상으로 신뢰할 만 했으며, 중립 동작((neutral test)에서 경추 신전 시에 수평면에 발생하는 커플링 모션의 ICC 값(0.83)과 경추 굴곡 시에 수평면에 발생하는 커플링 모션의 ICC 값(0.86)만이 비교적 낮았지만 충분히 신뢰할만한 수준이었다. 커플링 모션은 움직임의 평균값이 자연 동작(natural test)에 비해 중립 동작(neutral test)이 모든 방향에서 1~3° 가량 더 낮았다. 중립 동작(neutral test)의 커플링 모션 12종류 중 2가지는 12.35° 와 14.19°로 10° 이상이였으며, 9° 이상인 경우가 한 가지였고, 나머지는 9가지는 5~6° 정도의 움직임을 보였다. 커플링 모션이 가장 크게 나타나는 경우는 측굴시 나타나는 수평면에서의 움직임이었다. 이와 같이 중립 동작(neutral test)에서도 커플링 모션이 상당 부분 나타나는 것으로 보아 커플링 모션은 불수의적인 움직임이라 볼 수 있겠으며, 따라서 추후 연구를 통해 IMU를 통한 커플링 모션의 측정이 진단에 활용될 수 있을 것이라 생각된다.

5. 기타 다양한 상황에서의 ROM 측정

아래에 소개된 연구들은 단순 CROM 측정만이

아닌 다양한 상황에서의 경추의 움직임 연구하여 IMU의 응용 가능성을 제시하였기에 추가로 정리하여 제시하였다. 경추 보호대(cervical collar) 등의 장치를 통해 경추의 움직임을 제한시켜 IMU로 그 제한 정도를 측정하는 연구 2례^{12,20)}, 경추 추나 시술 교육 과정에 IMU를 도입한 1례²⁵⁾, 경추 골절이 의심되는 상황에서 응급처치를 시도해 그 효과를 평가한 1례²⁶⁾ 등이다. 또한, CROM을 측정은 하였으나 결괏값이 숫자로 명시되지 않고 그래프로 제시된 값들은 앞서 Table 1에서 제시하지 않고 본 단락에서 설명하였다.

5.1 Assessment of the Sheffield Support Snood, an innovative cervical orthosis designed for people affected by neck muscle weakness¹²⁾.

이 연구에서는 경추 ROM뿐만 아니라, 경추의 움직임 제한 장치들을 피험자에게 착용시킨 상태에서 경추의 제한된 움직임을 측정하였다. 연구에 사용된 경추 정형술(cervical orthoses) 장치는 Sheffield Support Snood (SSS), Vista, Headmaster 세 종류이다. Vista는 전면(frontal), 측면(lateral), 후면 (posterior) 부분에 지지 장치가 있고, Headmaster는 전면(frontal)에만 지지장치가 있다. SSS는 전면(frontal)에만 지지장치를 한 경우, 전면(frontal), 측면(lateral), 후면 (posterior)에 지지장치를 한 경우로 나누어 측정하였다. 모든 장치의 ICC 값은 0.85 이상으로 신뢰할 만 하였다.

Table 5에 제시된 ROM 값들이 경추 정형술 장치 (cervical orthoses) 착용 시 현저히 줄어드는 것을

확인할 수 있다. 특히, SSS 6 supports와 Vista 의 경우 경추 움직임 제한 능력이 좋은 것으로 보인다. 신전(extension)과 측굴(lateral flexion)의 경우 움직임이 20° 가량 줄어들며, 굴곡(flexion)과 회전(axial rotation) 의 경우 절반가량 움직임이 제한되는 것을 확인할 수 있다. 보조장치를 다방면에 설치하였기 때문이라 추측된다. 반면, Headmaster와 SSS A support의 경우 굴곡(flexion) 방향의 경추 움직임 제한 능력은 좋으나, 다른 방향은 제한 능력이 다소 떨어진다. 이는 굴곡(flexion) 방향으로만 보조장치를 하였기 때문으로 추측된다. P value 또한 대체로 이러한 설명과 상응한다.

5.2 Prehospital Spinal Immobilization: Effect of Effort on Kinematics of Voluntary Head-neck Motion Assessed using Accelerometry²⁰⁾.

Rob Pryce 등²⁰⁾은 경추의 움직임을 세 가지 단계로 조정하여 ROM을 측정하였다. 경추에 아무런 제한 장치가 없는 상태, 경추 보호대(Cervical Collar)를 착용시킨 상태, 척추 제한 장치(Pro-lite Spine Board)를 이용해 최대한 제한(full immobilization)시킨 상태이다. 모든 측정값의 Pearson r 값은 0.78 이상으로, 신뢰할 만 하였다.

본 연구에서는 ROM 값들이 그래프상으로 제시되었으며, 값을 명시하지는 않았다. 제시된 ROM값들을 보면 경추 보호대를 착용시킬 경우, 경추에 아무런 제한 장치가 없는 상태에 비해 굴곡과 신전은 약 절반가량 움직임이 제한되며, 회전 또한 대략 20° 이상 제한된다. 최대한 제한(full immobilization)

Table 5. Mean (SD, Standard deviation) values for the ROM reached performing extension, flexion, axial rotation and lateral flexion with orthoses.

Max ROM (deg)	Trials without orthoses	HR	SSS A support	SSS 6 supports	VA
Extension	54 (13)	50 (12)	43 (7)	35 (10) **	35 (7) **
Flexion	52 (9)	28 (13) **	36 (13) *	36 (12) *	27 (10) **
Axial rotation	145 (12)	116 (21)	101 (30) **	96 (33) **	77 (30) **
Lateral flexion	80 (12)	70 (13)	67 (11)	60 (18) *	61 (15) *

HR: Headmaster, SSS-A support: SSS with the A support, SSS-6 supports: SSSwith six supports, VA: Vista, (*) Level of significance for the difference with "trials without orthosis" is P < 0.05, (**) Level of significance for the difference with "trials without orthosis" is P < 0.01.

시킨 상태는 경추에 아무런 제한 장치가 없는 상태에 비해 굴곡은 거의 움직임이 불가능할 정도로 크게 제한되며, 신전과 회전은 각각 절반 이상 제한됨을 확인할 수 있다.

5.3 Inertial sensor real-time feedback enhances the learning of cervical spine manipulation: a prospective study²⁵⁾.

Antonio I Cuesta-Vargas 등²⁵⁾은 IMU를 경추 추나(cervical spine manipulation, CSM) 실습 교육시에 활용하였다. 6명의 실습생이 실시간으로 IMU를 통해 실시간으로 피드백 (feedback) 받으며 연구에 참가하였다. 시술 과정은 앙와위(lying supine), 시술 전 자세를 찾는 단계(finding the pre-manipulation position), 시술 전 자세(pre-manipulation position), 추나 시술(thrust) 이렇게 나뉘며 각각의 단계마다 회전(rotation), 측굴(side bending) 방향으로 측정하였다. 제시된 그래프를 보면 시간의 흐름에 따라 경추의 변위를 파악할 수 있다. 앙와위는 위치의 변화가 없고, 시술 전 자세를 찾을 때에 물결 모양의 사인 파동이 관찰되며, 시술 전 자세에서는 파동이 줄어들다 추나 시술시 급격한 변위를 나타낸다. 회전(rotation) 시와 측굴(side bending) 시 둘 다 비슷한 파동이 관찰되며 측굴(side bending)의 기울기도 나타난다.

트레이닝 전과 트레이닝 후에 추나 시술(Thrust) 각도의 차이는 트레이닝 후 회전(rotation) 방향으로 다소 높게, 측굴(side bending) 방향으로는 다소 낮게 나타났으나 통계적으로 유의한 결괏값을 갖지는 못했다(Table 6). 이는 강의, 60분 연습을, 시연으로 구성된 일련의 트레이닝 과정이 각도를 변화시키는데 충분한 영향을 주지 못했던 것이 아닌가 추측

Table 6. Angular displacement of the thrust (deg), Mean ± SD.

	Rotation	Side bending
Pre - training	9.0 ± 8.0	7.9 ± 3.6
Post - training	13.1 ± 8.3	6.6 ± 2.1

된다. 추나 시술(Thrust) 시에 경추의 움직임에 기존과 다르게 하는 것을 강조했다거나, 더 많은 연습시간을 제공했다면 결괏값이 달라질 수 있을 것이라 생각한다. 혹은 시연자들이 이미 충분히 숙련되었거나, 6명이라는 실습생의 수가 적었던 것이 결과에 영향을 미쳤을 수 있다고 생각해 볼 수 있다.

5.4 Effectiveness of Cervical Spine Stabilization Techniques²⁶⁾.

Patrick Boissy 등²⁶⁾은 환자의 경추 경추골절의 의심되어 의료기관으로 이송 시키기 전에 구조팀이 환자의 움직임을 최소화하는 상황을 연구하였다. 두부를 잡는 방식 (head squeeze, HS)과 승모근을 잡는 방식 (trap squeeze, TS) 두 개로 나누어 경추의 움직임을 측정하여 어떤 방식이 경추를 더 안정시키는 지 비교하였다. 또한, 환자를 척추 보드(spinal board) 위로 옮길 때 Lift & Slide 방식과 Log Roll 방식 중 어떤 것이 더 경추의 움직임에 무리를 주지 않는지를 비교하였고, 환자가 갑자기 일어나려고 하는 상황과 갑자기 고개를 좌우로 움직이는 상황을 가정하여 측정하였다. Lift & Slide는 환자를 직접 들어서 척추 보드 위에 내려놓는 방식이며, Log Roll은 환자를 반 바퀴 정도 굴린 뒤 척추 보드를 환자가 누워있던 자리에 위치시킨 뒤 환자를 원 위치로 다시 반 바퀴 정도 굴려 척추 위에 내려놓는 방식이다.

이 연구에서는 척추 보드 위로 옮기는 상황을 Lift & Slide, Log Roll 두 개로 나누어 측정한 뒤에 평균값을 제시하였다. 각도 값은 그래프로 나타내었으며 각 측정값들의 차이 값의 일부만 숫자로 본문에 제시하였다. 각각의 상황은 HS와 TS를 사용하였다. Lift & Slide 이 Log Roll 보다 우측굴(right lateral flexion) 을 제외한 모든 방향에서 5° 이상 적은 각도 값을 나타내었다. 따라서 Lift & Slide 가 환자를 더 안정적으로 척추 보드에 옮기는 상황이라 할 수 있겠다. HS 방식과 TS 방식은 대부분의 상황에서는 서로 비슷한 값을 나타내었으나, Log Roll 중 신전(extension)과 우측 회전(right rotation) 상황

에서 TS가 더 적은 각도 값을 나타내었다. 따라서, TS 방식이 보다 안정적인 방식이라 할 수 있다.

또한, 환자가 급작스럽게 혼란한 상황에서 일어나려고 하는 상황, 고개를 좌우로 흔들려는 상황을 가정한 측정하였다. 이는 구급상황에서 때때로 일어나는 상황으로, 좌우를 구분하기 보다 경추의 회전(rotation)과 굴곡(flexion)의 최대값을 제시하였다. HS 방식은 TS 방식에 비해 환자가 혼란해하며 급작스럽게 일어나려는 상황(sitting up)에 대한 대처가 잘 되지 않았다. 모든 값에서 뚜렷하게 HS 방식의 변위 값이 TS 방식에 비해 높았다. 따라서 TS 방식이 HS 방식에 비해 구급상황에 환자를 안정시키는데 더 효과적이라 할 수 있겠다. 두부 회전(head rotation) 상황에서는 HS 방식이 TS 방식에 비해 최대 측굴(maximum lateral flexion)에서 6.4° 정도 큰 값을 나타내어 적합하지 않았다. 이렇듯 Patrick Boissy 등²⁶⁾은 IMU를 통해 TS 방식이 더 적합하다는 것을 증명해낼 수 있었다.

이렇듯, 위의 연구들에서는 IMU를 사용하여 경추 정형술 장치(cervical orthosis), 경추 보호대(cervical collar) 등의 성능을 제품과 방식에 따라 비교적 정확하게 측정하여 비교할 수 있었으며, 고난도의 경추 추나 교육 과정에 실시간으로 적용하여 교육의 효과를 높이는 시도를 파악할 수 있었고, 구급대원이 환자의 경추를 고정하는 술기들의 성능을 비교할 수도 있었다. 따라서, 위 연구들을 통해 IMU가 단순하게 경추의 ROM 측정만을 해낼 뿐만 아니라, 경추의 움직임 측정과 관련된 다양한 상황에서 응용 가능한 장치라는 것을 알 수 있다.

결론

본 문헌 고찰 연구를 통하여, IMU를 이용한 CROM 값을 확인하였고, 이러한 측정의 신뢰도와 타당도가 충분히 높은 것을 확인하였다. IMU는 경추의 움직임과 관련된 여러 상황에 응용할 수 있었으며, 스마트폰 등 IMU가 탑재된 다양한 장치들을

통해서도 수평면을 제외한 경추의 가동 범위를 신뢰도 높게 측정할 수 있었다. 또한, IMU는 경추의 가동 범위 측정뿐만 아니라 커플링 모션까지 용이하게 측정하였다. 게다가 IMU를 탑재한 디바이스들은 무선으로 작동 가능하면서 작고 가볍기에 환자의 움직임을 저해하지 않아 활용도가 높으며, 스마트폰과 같이 범용성을 갖춘 디바이스도 존재하여 진입장벽 또한 낮다는 장점이 있다. 이러한 점들로 미루어 볼 때 IMU는 환자의 움직임과 관련된 기능을 평가하는 도구로써 임상 현장에서 활용 가능성이 높을 것이라 판단되며, 임상현장에서 환자의 관절 ROM을 측정하기에 적합한 기기라 보이고 향후에 IMU 활용 또한 증가될 것이라 기대한다. 따라서 IMU를 이용한 다양한 동작 측정 시스템의 연구개발이 필요하다.

참고문헌

1. Peter ST, Michael DJ, Jonathan MW. Do inertial sensors represent a viable method to reliably measure cervical spine range of motion? *Manual Therapy*. 2012;17:92-96.
2. Jan MJ, Julia T, Peter C, Gwendolen J. Wireless orientation sensors: Their suitability to measure head movement for neck pain assessment. *Manual Therapy*. 2007;12:380-385.
3. Michele S, Gwendolen J, Bill V, Justin K, Ross D. Physical and psychological factors predict outcome following whiplash injury. *Pain*. 2005;114:141-148.
4. Kim H, Shin SH, Kim JK, Park YJ, Oh HS, Park YB. Cervical Coupling Motion Characteristics in Healthy People Using a Wireless Inertial Measurement Unit. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2013:8.
5. Kim H, Park YB. Development of a motion analysis system and clinical indices for evaluating cervical rotations [Master's Theses]. 2014.

6. Frisch GD, D'Aulerio L, O'Rourke J. Mechanism of head and neck response to G(x) impact acceleration: A math modeling approach. *Aviation Space and Environmental Medicine*. 1977;48:223-230.
7. Hallman DM, Gupta N, Mathiassen SE, Holtermann A. Association between objectively measured sitting time and neck-shoulder pain among blue-collar workers. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2015;88(8):1031-1042.
8. Kouchakzadeh A, Beigzadeh Y. Permitted working hours with a motorised backpack sprayer. *Biosystems Engineering*. 2015;136:1-7.
9. Lo Martire R, Gladh K, Westman A, Lindholm P, Nilsson J, Ång BO. Neck muscle activity in skydivers during parachute opening shock. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. 2016;26(3):307-316.
10. Brecl JG, Pelykh O, Košutzká Z, Pirtošek Z, Trošt M, Ilmberger J, et al. Postural stability under globus pallidus internus stimulation for dystonia. *Clinical Neurophysiology*. 2015;126(12):2299-2305.
11. Omkar SN, Vanjare AM, Suhith H, Kumar SGH. Motion analysis for short and long jump. *International Journal of Performance Analysis in Sport*. 2012;12(1):132-143.
12. Pancani S, Rowson J, Tindale W, Heron N, Langley J, McCarthy AD, et al. Assessment of the Sheffield Support Snood, an innovative cervical orthosis designed for people affected by neck muscle weakness. *Clinical Biomechanics*. 2016;32:201-206.
13. Yannick TL, Nicolas B, Alexandre MD, Carol-Anne V. Reliability and criterion validity of two applications of the iPhone™ to measure cervical range of motion in healthy participants. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2013;10(69).
14. Quek J, Brauer SG, Treleven J, Pua YH, Mentiplay B, Clark RA. Validity and intra-rater reliability of an Android phone application to measure cervical range-of-motion. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2014;11(65).
15. Alqhtani RS, Jones MD, Theobald PS, Williams JM. Reliability of an accelerometer-based system for quantifying multiregional spinal range of motion. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*. 2015;38(4):275-281.
16. Higgins MJ, Tierney RT, Caswell S, Driban JB, Mansell J, Clegg S. An in-vivo model of functional head impact testing in non-helmeted athletes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. 2009;223(3):117-123.
17. Cazzola D, Preatoni E, Stokes KA, England ME, Trewartha G. A modified prebind engagement process reduces biomechanical loading on front row players during scrummaging: A cross-sectional study of 11 elite teams. *British Journal of Sports Medicine*. 2014;49(8):541-546.
18. Kang YS, Moorhouse K, Herriott R, Bolte IV JH. Comparison of Cervical Vertebrae Rotations for PMHS and BioRID II in Rear Impacts. *Traffic Injury Prevention*. 2013;14 (SUPPL1):S136-S147.
19. Khurelbaatar T, Kim K, Lee S, Kim YH. Consistent accuracy in whole-body joint kinetics during gait using wearable inertial motion sensors and in-shoe pressure sensors. *Gait and Posture*. 2015;42(1):65-69.

20. Pryce R, McDonald N. Prehospital Spinal Immobilization: Effect of Effort on Kinematics of Voluntary Head-neck Motion Assessed using Accelerometry. *Prehospital and Disaster Medicine*. 2015;31(1):36-42.
21. Schiefer C, Kraus T, Ellegast RP, Ochsmann E. A technical support tool for joint range of motion determination in functional diagnostics - An inter-rater study. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2015;10(16).
22. Xu X, Chen KB, Lin JH, Radwin RG. The accuracy of the Oculus Rift virtual reality head-mounted display during cervical spine mobility measurement. *Journal of Biomechanics*. 2015;48(4):721-724.
23. Miyaoka S, Hirano H, Ashida I, Miyaoka Y, Yamada Y. Analysis of head movements coupled with trunk drift in healthy subjects. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 2005;43(3):395-402.
24. Milani P, Coccetta CA, Rabini A, Sciarra T, Massazza G, Ferriero G. Mobile smartphone applications for body position measurement in rehabilitation: A review of goniometric tools. *PM and R*. 2014;6(11):1038-1043.
25. Cuesta-Vargas AI, Williams J. Inertial sensor real-time feedback enhances the learning of cervical spine manipulation: A prospective study. *European Spine Journal*. 2014;23(11); 2314-2320.
26. Boissy P, Shrier I, Brière S, Mellete J, Fecteau L, Matheson GO, et al. Effectiveness of cervical spine stabilization techniques. *Clinical Journal of Sport Medicine*. 2011;21(2):80-88.
27. Fleiss JL. *Design and analysis of clinical experiments*. New York:Wiley Classical Library. 1999.
28. Duc C, Salvia P, Lubansu A, Feipel V, Aminian K. A wearable inertial system to assess the cervical spine mobility: Comparison with an optoelectronic-based motion capture evaluation. *Medical Engineering and Physics*. 2014;36(1):49-56.