

## 웨어러블 기술을 활용한 건설 현장 안전보건 관리



최병주 아주대학교 건축학과 조교수, bchoi@ajou.ac.kr

KICEM

### 1. 서론

건설작업자는 무거운 자재 운반과 같은 육체적으로 힘든 작업을 반복적, 지속해서 수행하며, 고소 작업, 중장비와의 동시 작업 등 다양한 위험작업을 수행해야 한다. 건설작업자는 업무와 관련하여 다양한 정신적, 육체적 위험에 노출되며, 이는 크고 작은 안전사고 및 업무와 관련된 질병으로 이어지고 있다. 산업안전관리공단의 발표에 따르면, 2017년 기준으로 건설업의 재해율은 0.84로 전체산업 재해율 0.48의 1.75배에 이르며, 사고성 사망 만인율의 경우 1.66으로 전체산업 평균 0.52의 3.19배에 달한다(국가통계포털 2019). 건설작업자의 안전사고와 업무와 연관된 질병은 작업오류, 생산성 감소, 품질 저하 등으로 이어질 수 있으며, 이는 노동집약적인 건설 프로젝트의 최종 성과에 큰 영향을 미친다.

이에 학계와 실무에서는 건설작업자가 현장에서 직면하는 위험요소의 중요성을 인지하고 이를 저감하기 위한 다양한 노력을 하고 있다. 건설작업자의 위험요소 관리의 첫 번째 단계는 위험요소의 정확한 측정 또는 감지라고 할 수 있다. 위험요소 측정 또는 감지를 위한 기존의 접근방식은 작업자 설문조사나 인터뷰 또는 관리감독자의 현장 점검에 의존하고 있었다. 그러나 이러한 접근방식은 설문조사 또는 현장 점검이 이루어지는 시점의 위험요소만을 측정 또는 감지할 수 있기 때문에 역동적으로 작업환경이 변화하는 건설 현장에서는 다수의 위험요인을 발견하지 못할 가능성이 있다. 또한, 기존의 방식은 설문조사 또는 인터뷰 응답자의 부정확할 수 있는 기억이나 관리감독자의 주관적 판단에 의존하여 위험요인을 판별하기 때문에 응답자 또는 점검자에 따라 결과가 달라지는 문제점이 있다. 마지막으로 설문조사나 인터뷰의 경우 건설작업자의 작업을 방해할 수 있으며, 관리감독자의 점검의 경우 대

규모 현장에서는 다수의 관리감독자가 필요하므로 경제적인 측면에서도 한계가 있다.

이러한 상황에서 최근 급속도로 발전하고 있는 웨어러블 센서는 기존 위험요소 측정 및 감지 방식의 한계점을 극복하고 새로운 건설 현장 안전보건관리의 장을 열 것으로 기대받고 있다. 건설작업자가 현장에서 작업 중 위험에 노출되면 다양한 방식으로 그 위험에 대해 반응하게 된다. 예를 들어, 고소 작업을 하는 작업자의 경우 교감신경계가 활성화되어 그와 관련된 심장 박동의 변화가 나타나거나, 미끄러운 바닥을 지나는 작업자의 경우 안전한 바닥을 걸을 때와는 다른 걸음걸이 패턴을 보이는 등 건설작업자는 작업 중 경험하는 위험에 대해 다양하게 반응한다. 이와 같은 건설작업자의 위험에 대한 다양한 반응을 웨어러블 센서를 통해 측정함으로써 건설 현장 위험요인을 지속적이고 더 정확하게 감지할 수 있다. 웨어러블 센서는 스마트밴드, 스마트글라스, 스마트헤드셋 등 다양한 형태로 존재하며 센서의 종류에 따라 신체 부위의 움직임(Kinematics), 심장박동 활동(Cardiac activity), 뇌파(Brain waves), 피부전기자극(Skin response), 눈동자 움직임(Eye movement) 등 다양한 인간의 반응을 측정할 수 있다. 웨어러블 센서를 활용한 위험요소 측정 및 감지는 센서에서 수집된 데이터를 분석하기 때문에 건설작업자가 센서만 착용하고 있다면 실시간으로 지속적인 모니터링이 가능하다. 그뿐만 아니라 주관적인 요소의 개입이 없는 데이터 분석에 의존하기 때문에 주관적인 편향의 문제에서 벗어날 수 있으며, 작업자의 작업도 방해하지 않는다. 또한 웨어러블 센서에서 측정하는 반응들은 각 개인의 특성과 위험 요소의 상호작용의 결과이므로 각 개인의 특성이 반영된 측정값이라 할 수 있다. 마지막으로 웨어러블 센서를 지속해서 착용하여 다수의 현장에서 장기간 위험요소에 대한 모니터링이

가능하다면 경제성 측면에서도 장점이 있다고 할 수 있다.

이에 본고에서는 웨어러블 센서를 활용한 건설 현장 안전보건 관리 연구 동향을 크게 행위적 반응, 생리적 반응, 인지적 반응 측정의 순서로 간략히 소개한다. 그 후 웨어러블 센서 현장 적용을 위해 당면한 과제를 설명 후 이를 극복하기 위한 향후 연구 방향에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 웨어러블 센서를 활용한 건설 현장 안전보건 관리 연구 동향

건설작업자의 위험에 대한 반응은 크게 위험 인지 단계에서의 반응(인지적 반응), 그에 따른 생리적 변화(생리적 반응), 마지막으로 실질적 행동(행위적 반응)으로 구분할 수 있다. 본 장에서는 웨어러블 센서를 활용한 유형별 반응 측정 및 위험요소 감지에 대한 연구 동향을 소개하고자 한다.

### 2.1 행위적 반응 측정

행위적 반응 측정은 웨어러블 센서에서 수집한 데이터를 통해서 작업자의 신체 부위의 움직임을 파악하고 이를 바탕으로 건설 작업자의 위험 요소에 대한 행위적 반응을 감지하는 방식이다. 눈으로 직접 확인하기 힘든 인지적, 생리적 반응에 비해 행위적 반응은 실질적으로 관찰이 가능한 반응을 측정한다는 점에서 가장 직접적인 측정 방식이라 할 수 있다. 행위적 반응 측정 및 분석에 가장 많이 활용되는 센서는 웨어러블 관성측정장치(Inertial Measurement Unit: IMU)센서로 그중에서도 가속도계를 활용해서 센서가 부착된 신체 부위의 움직임을 분석하는 방식이 주를 이루고 있다. 예를 들어 Yang et al. (2017)은 철골 작업자의 허반신에 부착한 웨어러블 IMU 센서의 가속도계에서 수집한 x, y, z축의 가속도 데이터를 활용하여 작업자의 보행 패턴을 파악하고 작업자가 균형을 잃어버리거나 할 때 발생하는 특이한 보행 패턴을 식별하여 추락 위험을 감지하였다. 그뿐만 아니라 Zhang et al. (2019)은 IMU 센서를 신체의 여러 곳에 부착하여 각 관절 부위의 상대적인 위치를 추정하고 이를 바탕으로 각 관절의 각도를 계산하여 인간공학적으로 불안정한 자세를 감지하였다. 또한 고급 기능공과 초급 기능공을 비교하여 인간공학적인 측면에서 작업 자세에 어떤 차이가 있는지를 확인하는 연구 또한 진행되고 있다. 마지막으로 최근에는 압력 센서가 부착된 스마트 깔창을 활용하여 발바닥 압력 패턴을 분석하여 미끄러짐, 헛디딤 등 보행과 관련된 위험을 감지하는 연구도 진행 중이다 (Antwi-Afri et al. 2018).

### 2.2 생리적 반응 측정

생리적 반응과 관련된 연구는 심장 박동이나 피부에서 측정할 수 있는 생리적 반응 등을 측정하여 건설작업자의 위험에 대한 생리적 반응을 감지한다. 심장 박동과 관련된 센서로는 초기에는 가슴 스트랩형 웨어러블 심전도(Electrocardiography: ECG) 센서가 많이 사용되었으며, 최근에는 피부 모세혈관의 혈류량의 차이를 측정하여 심장 박동의 변화를 측정하는 광혈류측정기(Photoplethysmography: PPG) 센서를 많이 사용하고 있다. 피부 반응 대표적인 신호로는 피부전기활동(Electrodermal Activity: EDA), 피부온도(Skin Temperature: ST), 그리고 근전도(Electromyography: EMG) 등이 있다. 먼저, 신체적으로 힘든 작업을 하면 심박수가 올라가는 생리적 반응을 활용하여 심장 박동의 변화를 측정하여 작업 부하를 분석할 수 있다. Hwang et al. (2017)은 신체 부하 측정에 널리 사용되는 %HRR(Percentage Heart Rate Reserve) 지표를 활용하여 건설작업자의 작업 부하를 분석하였으며, 그 후속 연구로 PPG, EDA, ST를 동시에 측정하여 건설작업자의 작업 부하 강도를 분류하는 기계학습 모델을 개발하였다. 그뿐만 아니라, Aryal et al. (2017)은 실험을 통하여 건설 현장에서 가장 흔한 작업 중 하나인 자재 운반 작업의 피로도 측정을 위한 기계학습 모델을 피부온도 데이터를 활용하여 개발하였다.

생리적 신호는 신체적 상태의 분석뿐만 아니라 위험인지와 같은 정신적 상태의 분석에도 활용되고 있다. 건설작업자가 현장에서 위험을 인지하게 되면 교감 신경계가 활성화되고 이는 여러 가지 생리적 신호의 변화로 나타나게 된다. 이러한 생리적 신호의 변화를 웨어러블 센서로 측정함으로써 작업자가 인지한 위험을 감지할 수 있다. Choi et al. (2019)는 현장에서 실제 작업하고 있는 작업자의 생리적 신호를 스마트 밴드로부터 수집하고 저위험 작업 시와 고위험 작업 시의 다양한 생리학적 신호를 비교하여 EDA 신호가 고위험 작업과 저위험 작업에서 유의미한 차이를 나타내어 건설작업자 위험 인지를 감지하는 데 활용될 수 있음을 보여주었다. 더 나아가 다양한 생리적 신호(PPG, EDA, ST)를 활용하여 작업의 위험도를 분류하는 기계학습 모델을 개발하였다.

### 2.3 인지적 반응 측정

인지적 반응과 관련된 연구는 위험요소 인지 과정에서 발생하는 신호들 예를 들어 뇌파 패턴의 변화나 눈동자 초점의 움직임 등을 측정하여 작업자의 위험에 대한 반응을 감지한다. 많이 사용되는 센서로는 안전모에 부착하여 뇌전도를 측정할 수 있는 스마

트 헬멧형 웨어러블 EEG(electroencephalogram) 센서나 눈동자의 움직임을 추적할 수 있는 시선추적 센서 등이 있다. Wang et al. (2017)은 건설작업자의 주의가 요구되는 작업과 그렇지 않은 작업을 혼합한 실험을 설계하고 웨어러블 EEG 센서를 통해 각 작업을 수행할 때 뇌전도를 측정하여 전두엽 부위에서 발생하는 뇌전도의 패턴이 주의를 요구하는 작업과 그렇지 않은 작업에서 유의미한 차이가 있다는 것을 밝혀냈다. 그뿐만 아니라 Jebelli et al. (2018)의 경우 웨어러블 EEG 센서를 활용하여 건설작업자의 업무와 관련된 스트레스의 강도를 분류하는 기계학습 모델을 개발하였다. 마지막으로 Hasanzadeh et al. (2018)은 건설작업자가 현장에서 위험 요소를 식별하면 다른 곳보다 그 위험 요소에 더 오랫동안 초점을 둔다는 사실에 기반하여 시선의 분포를 작업자의 위험 식별의 지표로 사용하였다. 또한, 사전 설문조사를 통하여 분류한 주의 수준이 높은 그룹과 낮은 그룹의 현장 위험 요소에 대한 시선 분포를 비교함으로써 주의 수준과 위험 식별과의 상관관계를 규명하였으며, 경험이 풍부한 작업자와 그렇지 않은 작업자의 시선 분포를 비교하여 경험이 위험 식별 능력에 유의미한 영향을 미친다는 사실을 밝혔다.

### 3. 웨어러블 센서 현장적용을 위한 과제 및 향후 연구방향

웨어러블 센서 기술 자체가 아직 초기 단계이기 때문에 건설 현장 적용에는 한계가 있을 수밖에 없다. 특히 건설관리 분야는 센서의 개발보다는 센서의 활용에 초점을 맞추고 있기 때문에 연구의 성숙도가 센서 개발의 속도에 의존적이라는 한계가 있다. 예를 들어, EDA, ST, PPG를 동시에 측정할 수 있는 웨어러블 센서나 뇌파를 측정하는 센서의 경우 건설 현장 활용을 위한 경제성 확보에는 시간이 좀 더 필요할 것으로 생각된다. 그뿐만 아니라 웨어러블 센서에서 수집된 데이터를 활용한 개인의 신체적 정신적 상태 측정 및 예측에 대한 표준 또한 아직 확립되지 못한 상태이다. 앞서 소개한 여러 가지 시도를 통해 그 가능성에 대한 검증은 이루어지고 있지만, 통일된 표준이 아직 마련되지 않아 이를 위한 광범위한 현장에 적용에 관한 연구가 향후 수행되어야 한다.

이러한 기술적 한계 이외에도 작업자들의 웨어러블 센서 사용에 대한 심리적 저항 문제 또한 고려하여야 한다. 이와 관련해서 Choi et al. (2018)은 건설작업자의 웨어러블 센서 기술 수용에 영향을 미치는 요소에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 기술의 유용성이나 용이성과 같은 일반적인 기술 수용에 영향을 미치는 요인 이외에도 개인의 사생활 침해에 대한 우려가 상당히 중요한 요

소임이 밝혀졌다. 또한, 작업자가 이전에 웨어러블 센서에 대한 경험 유무, 작업자의 반장 여부가 웨어러블 센서 수용에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 웨어러블 센서 현장 도입 시에는 이러한 요소들을 필수적으로 고려되어야 한다.

마지막으로 업계의 입장에서는 웨어러블 기술의 경제적 효용이 불명확하므로 적극적인 도입을 망설이고 있다. 건설 안전 및 보건 증진이 가시적인 성과라기보다는 보이지 않는 성과이기 때문에 이를 어떻게 정량화 할 수 있을 것인가에 대한 문제가 남아있다. 또한 정량화된 효용을 어떻게 비용과 비교할 것인가에 대한 문제도 아직 명확하게 해결되지 않은 상태이다. 이러한 문제들을 해결하기 위한 추가적인 노력이 앞으로 필요할 것이다.

이와 더불어 향후에는 현재의 연구 성과를 바탕으로 좀 더 깊은 이해를 위해 여러 가지 신호들을 통합하는 연구가 필요할 것이다. 예를 들어, 건설작업자의 안전행동의 의사 결정 과정인 위험요소 식별, 위험 인지 및 평가, 행동 등을 좀 더 깊이 있게 연구하기 위해 인지적, 생리적, 행위적 반응을 동시에 측정해서 비교하는 연구가 가능하다. 시선추적 기술을 활용해서 작업자가 위험요소를 식별했는지 확인하고 EDA 신호를 통해서 그 위험요소를 실제 위험으로 인지했는지 확인할 수 있다. 또한, IMU 센서를 통해서 실제 불안정한 행동이 발생했는지를 감지할 수 있다면 불안정한 행동이 발생하는 일련의 과정에 대한 좀 더 객관적이고 깊이 있는 연구가 될 것이다.

현장 적용의 측면에서는, 단순한 각 개인의 센서에서 수집된 정보가 아닌 다수의 작업자로부터 수집된 정보를 효과적으로 활용하는 방법에 관한 연구가 진행될 것이다. 예를 들어 다수 작업자의 위치정보와 웨어러블 센서에서 수집된 정보를 통합함으로써 현장의 어느 위치에 어떠한 위험 요소가 존재하는지 시각화하고 이를 바탕으로 관리감독자가 안전관리와 연관된 의사결정을 지원할 수 있을 것이다. 예를 들어, EDA 센서에서 수집된 위험인지 정보와 작업자의 위치정보를 맵핑하면 어느 곳에서 위험작업이 주로 수행되고 있는지 확인이 가능하고 이는 안전 관리자가 현장 안전관리의 우선순위를 수립하는 데 도움이 될 것이다. 또한 현재 작업자의 상태를 파악하는 연구를 넘어서서 어떻게 하면 웨어러블 센서를 활용해서 작업자 행동의 변화를 끌어낼 수 있는가에 대한 연구도 같이 수행될 것이다. 위험 상황에 있는 작업자의 행동 변화를 끌어내기 위해 어떻게 작업자에게 정보를 제공하는 것이 효과적이거나 대한 연구는 현장 안전보건 향상이라는 궁극적인 목표 달성을 위해 필수적이기 때문이다.

## 4. 결론

건설작업자는 업무와 관련하여 다양한 신체적, 정신적으로 위험에 노출되어 있으며, 이는 건설작업자의 안전 및 보건은 물론 프로젝트의 성과에 큰 영향을 미친다. 지속적이고 정확한 모니터링을 통하여 위험요소를 사전에 파악하는 것은 건설 현장 위험요소 관리에 있어서 필수적인 요소이다. 이러한 측면에서 위험요소에 대한 행위적, 생리적, 인지적 반응을 실시간으로 측정할 수 있는 웨어러블 센서는 건설작업자의 작업을 방해하지 않으면서 건설 현장 위험요소를 사전에 감지할 가능성이 충분하다. 본고에서 소개한 연구들은 웨어러블 센서를 활용한 건설 현장 안전보건관리를 위한 첫걸음이다. 센서 기술 및 데이터 분석 기술의 발달 등을 통한 수집된 데이터의 정확도 향상과 보다 다양한 현장 환경에서의 실험을 통한 신뢰할 수 있는 지표의 확보는 웨어러블 센서를 통한 건설 현장 안전보건 관리를 위해 풀어야 할 숙제라 할 수 있다. 그뿐만 아니라 다양한 센서의 통합을 통한 보다 깊이 있는 분석, 다수의 작업자로부터 수집한 데이터 분석을 통한 유의미한 활용 분야의 개발 등을 통하여 웨어러블 센서의 현장 적용을 가속할 수 있으리라 생각된다. 마지막으로 웨어러블 센서의 현장 적용에 관한 연구는 사생활 보호 등 건설작업자의 웨어러블 기술 수용에 영향을 미치는 요소들에 대한 고려도 동반되어 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 국가통계포털 (2019) "전체 산업재해현황 업종별 산업별 중분류." 고용노동부. [http://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?menuId=M\\_01\\_01&vwcd=MT\\_ZTITLE&parmTabId=M\\_01\\_01&parentId=D2.1:118\\_11806.2:#SelectStatsBoxDiv](http://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?menuId=M_01_01&vwcd=MT_ZTITLE&parmTabId=M_01_01&parentId=D2.1:118_11806.2:#SelectStatsBoxDiv) (2019. 06. 27)
2. Yang, K., Ahn, C. R., Vuran, M. C., & Kim, H. (2017). Collective sensing of workers' gait patterns to identify fall hazards in construction. *Automation in construction*, 82, 166–178.
3. Zhang, L., Diraneyya, M. M., Ryu, J., Haas, C. T., & Abdel-Rahman, E. M. (2019). Jerk as an indicator of physical exertion and fatigue. *Automation in construction*, 104, 120–128.
4. Antwi-Afari, M. F., Li, H., Yu, Y., & Kong, L. (2018). Wearable insole pressure system for automated detection and classification of awkward working postures in construction workers. *Automation in construction*, 96, 433–441.
5. Hwang, S., & Lee, S. (2017). Wristband-type wearable health devices to measure construction workers' physical demands. *Automation in construction*, 83, 330–340.
6. Aryal, A., Ghahramani, A., & Becerik-Gerber, B. (2017). Monitoring fatigue in construction workers using physiological measurements. *Automation in construction*, 82(2017), 154–165.
7. Choi, B., Jebelli, H., & Lee, S. (2019). Feasibility analysis of electrodermal activity (EDA) acquired from wearable sensors to assess construction workers' perceived risk. *Safety Science*, 115, 110–120.
8. Wang, D., Chen, J., Zhao, D., Dai, F., Zheng, C., & Wu, X. (2017). Monitoring workers' attention and vigilance in construction activities through a wireless and wearable electroencephalography system. *Automation in construction*, 82, 122–137
9. Jebelli, H., Hwang, S., & Lee, S. (2018). EEG-based workers' stress recognition at construction sites. *Automation in construction*, 93, 315–324.
10. Hasanzadeh, S., Esmaili, B., & Dodd, M. D. (2018). Examining the Relationship between Construction Workers' Visual Attention and Situation Awareness under Fall and Tripping Hazard Conditions: Using Mobile Eye Tracking. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(7), 04018060.
11. Choi, B., et al. (2018). "What drives construction workers' acceptance of wearable technologies in the workplace?: Indoor localization and wearable health devices for occupational safety and health." *Automation in construction* 84: 31–41.