

작업자의 동작 인식 기술 (Motion Capture Technology)에 기반한 생산성과 안전 관리 연구 동향



한상욱 Assistant Professor / Department of Civil and Environmental Engineering / University of Alberta

1. 서론

근골격계 질환 (Work-related Musculoskeletal Disorder)이란 작업 중 신체를 이루고 있는 근육, 신경계, 힘줄, 관절 등의 손상에 의한 통증이나 부상을 의미한다 (Centers for Disease Control and Prevention, 1999). 미국의 경우 건설 산업에서 근골격계 질환과 관련된 부상이 약 33.6%를 차지하고 있으며 (CPWR 2013), 캐나다의 경우에도 관련 휴업 상해 청구 건수 (Lost Time Injury Claim)가 전체의 약 44%를 차지하고 있다 (Oleske et al., 2006). 이는 건설 산업에서의 기계화에도 불구하고, 여전히 인력 작업에 대한 의존도가 높음을 방증하며, 실제로 건설 노동자는 다른 산업에 비해 근골격계 질환과 관련된 위험에 대한 노출이 약 50% 정도 높다고 보고되었다

(Schneider, 2001). 이러한 질환은 발생 초기에 휴식이나 치료와 같은 적절한 조치가 없을 경우, 만성화로 인한 장기적인 노동력의 상실로 이어질 수 있으며, 매년 약 134억 달러가 그로 인한 비용으로 추정된다 (NRCIM, 2001).

이와 같은 안전 문제는 특히 작업 환경적인 측면에서 생산성과도 밀접한 연관이 있다. 예를 들어, 국가 경쟁력과 사고율을 비교했을 때 (그림 1), 작업 여건이 좋고 사고율이 낮은 국가들이 높은 국가 경쟁력을 가진다는 점은 둘 사이에 밀접한 상관관계가 있음을 시사한다(ILO 2006). 하지만, 생산성과 안전의 연관 관계에 대해서는 연구 대상 혹은 시각에 따라 다양한 견해들이 존재해왔으며, 최근에는 센서 기술 (Sensing Technology) 과 시뮬레이션 기법 (Simulation)을 이용하여 생산성과 안전 관련 정보의 측정 및 분석, 그리고 인간 공학적 (Ergonomics) 측

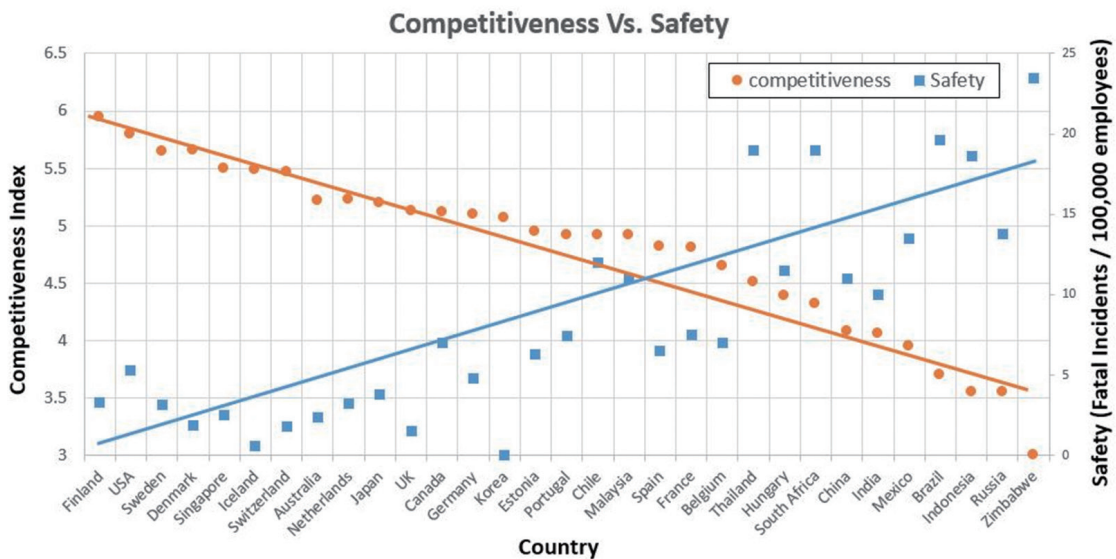


그림 1. 안전 사고율과 국가간 경쟁력과의 상관 관계 (ILO 2006)

면에서 둘 사이의 상관 관계를 알기 위한 연구들이 수행되고 있다. 이에 본 고에서는 작업자의 동작 인식 기술 (Motion Capture Technology)에 기반한 작업 환경 및 공정 관리 연구들의 동향에 대해서 간략히 소개하고자 한다.

2. 건설 생산성과 안전의 관계에 대한 연구 배경

생산성과 안전의 관계는 오랫동안 중요하게 다루어진 주제였고, 여전히 논쟁 중인 문제이기도 하다. 예를 들어, 노동에 대한 보수는 무사고가 아니라 생산 활동에 대한 대가로서 지불된다라는 시각이 있는 한편, 부상을 당했을 때는 생산 활동을 할 수 없기 때문에 둘은 분리되어서 생각되어질 수 없다는 시각도 존재한다 (Hessman 2015). 안전에 대한 인식과는 별개로 실무적인 측면에서는, 안전이 분리된 관리 대상이 아닌 전체 프로젝트 관리에 통합되어야 한다는 접근법이 최근에 주를 이루고 있음에도 불구하고, 여전히 많은 현장에서 안전 관리는 안전 관리자에게 의존하는 현상을 쉽게 볼 수 있다.

따라서 둘 사이의 상관 관계를 밝히고, 이를 실무에 적용하여 건설관리 기법을 향상시키기 위해서 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 연구적인 측면에서도, 안전과 생산성과는 양의 상관 관계, 즉 둘을 동시에 향상시킬 수 있다는 연구 결과가 있는 반면에, 하나를 향상시킬 때 다른 하나는 저하된다는 결과도 보고되어 왔다 (표 1). 이는 건설 현장에서 여러가지 다양한 요인들이 안전과 생산성에 동시 복합적으로 영향을 미치며, 단순한 인과

관계가 아닌 상호 작용에 의해서 둘 사이의 관계가 결정되기에, 연구 대상과 범위에 따라 상이한 결과가 나올 수 있음을 의미한다. 실제로 최근의 시각은 안전을 생산의 복잡계 (Complex System) 중 일부로 보는 연구가 주를 이루며, 복잡한 상호 작용의 이해를 통해 안전과 생산 활동을 향상시킬 수 있다는 결과를 보여준다.

3. 작업자의 동작 인식 기술 (Motion Capture Technology) 에 기반한 작업 환경 및 생산 관리 연구 동향

최근 다양한 센싱 (Sensing) 기술과 분석 기법의 발달로 인해 건설 작업자의 동작 측정 및 분석에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이들 연구는 크게 인간공학적 측면의 안전 및 건강 관리에 대한 적용이나, 작업자의 동작에 기반한 생산 및 공정 관리 분야를 대상으로 진행되어 왔으며, 최근에는 이러한 기술을 바탕으로 물리적인 측면에서 생산과 안전의 관계를 이해하려는 연구가 진행되고 있다. 기존의 컴퓨터 비전 (Computer Vision) 기법은 주로 특정 사물의 인식이나 위치 추적, 혹은 특정 동작의 인식에 중점적으로 적용된 반면에, 신체의 관절 단위까지 구현 및 저장되어 있는 세부적인 동작 자료는 보다 정교한 인간공학적 분석을 가능하게 하였다.

3.1 작업 환경 및 안전 관리 연구 동향

안전 분야와 관련된 연구의 흐름을 보면 (표2), 동작 정보를

표 1. 생산성과 안전의 관계에 대한 연구

연구자 (년도)	분석 방법	주요 내용
McLain and Jarrell (2007)	설문 조사 및 구조 방정식 모형	현장에서 생산성과 안전이 동시에 통합되어 관리될 때, 작업자의 안전 행동 양식이 향상되고 작업 중 위험요소가 줄어들어서 생산 활동에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.
Choudhry (2015)	설문 조사 및 통계 분석	대부분의 건설 관리 요소들이 생산 및 안전 모두와 상관 관계가 있으므로, 적절한 관리를 통해 두 가치를 동시에 향상시킬 수 있다.
Goldenhar et al. (2003)	인터뷰 및 설문 조사	생산에 대한 부담이나 생산 관리 활동은 사고율의 상승과 직접적인 연관이 있다.
Han et al. (2014)	시스템 다이내믹스 모형	공기 지연 및 재시공은 생산성 향상의 스트레스를 유발함으로써 사고율의 상승에 영향을 미친다.
Jiang et al. (2015)	시스템 다이내믹스 모형	생산과 안전은 중점 관리순위 설정, 생산 독려, 초과 근무에 의한 피로도 등과 같은 요인들은 의해 서로 상충 관계 (Trade-off)를 가진다.

표 2. 동작 인식 기술을 활용한 작업 환경 및 안전 관리 관련 연구

연구자 (년도)	사용 기술	주요 연구 내용
Ray and Teizer (2012)	Microsoft Kinect	인간공학적인 측면에서 작업자의 자세 평가 및 교육을 위한 동작 인식 및 분석 방법 제안
Han and Lee (2013)	3D Camcorder	스테레오 비전 카메라로부터 동작 정보를 추출하여 위험한 동작을 자동으로 인식하는 프레임워크 제안
Seo et al. (2014)	Microsoft Kinect	동작 정보에 기반한 작업의 인체역학 (Biomechanics)적 위험도 분석을 위한 프레임워크 제안
Golabchi et al. (2015b)	3D Modeling	가상 공간에서 생성된 동작 정보로부터 인간공학적인 위험도를 분석, 작업 환경 개선을 위한 프레임워크 제안 및 사례 연구
Kornell et al. (2015)	8-camera Eagle Digital Motion Analysis System and Electromyography (EMG) sensor	근육 활동 (Muscle Activity) 및 운동학 (Kinematics)에 기반한 들기 (Lifting) 작업 중 근육 피로도 측정 방법 연구

이용한 인간공학(Ergonomics)적인 관점에서 작업자의 자세 및 작업 방법을 분석하는 접근법부터, 작업 중의 하중이 신체의 주요 관절에 미치는 영향을 평가할 수 있는 인체역학(Biomechanics)적인 접근법까지 다양한 분석 방법이 소개되었다. 특히나 최근에는, 3D 모델링 기법과 결합하여 가상의 작업 환경 속에서 작업자가 취할 수 있는 동작과 그에 따른 위험도 분석을 통해 보다 나은 작업 환경을 관리 및 디자인하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다 (그림 2).

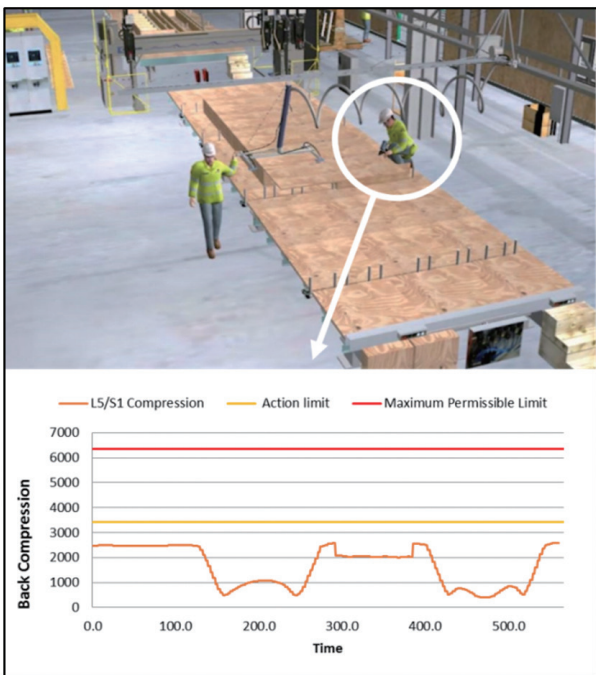


그림 2. 작업장의 가상 모형 공간에서 인간공학적인 위험도 분석 (Golabchi et al, 2015b)

3.2 생산 및 공정 관리 연구 동향

센싱 (Sensing) 기술의 발달과 함께, 건설 생산성 및 공정 관리 분야에서도 동작 인식 기술의 다양한 활용 방안이 연구되고 있다 (표 3). 생산성 측정 및 예측을 위해서는 현장에서의 자료 수집이 필수적이며, 따라서 많은 시간을 요하는 직접적인 관찰 및 분석 작업의 자동화를 위해 관련 기술이 적용되었다. 특히나

표 3. 동작 인식 기술을 활용한 생산 및 공정 관리 관련 연구

연구자 (년도)	사용 기술	주요 내용
Weerasinghe et al. (2012)	Microsoft Kinect	생산성 및 도구 활용 시간 (Tool time) 측정의 자동화를 위한 작업자의 동작 인식 및 위치 추적 방법 제안
Kim and Caldas (2013)	Microsoft Kinect	작업자의 동작 정보와 시물 인식 기법의 결합을 통해 작업 정보 인식 방법의 정확도 향상 방법 제안
Khosrowpour et al. (2014)	Microsoft Kinect	실내 작업 중 작업 시간과 순서의 측정 및 관리 자동화를 위한 동작 인식 기법 제안
Golabchi et al. (2015a)	시뮬레이션 (Simulation)	작업 동작의 표준 시간 산출 방법 (Predetermined Motion Time Systems)을 이용한 작업 시간 예측 모델 제안

동작 인식 기술은 인력 작업을 계획하고, 모니터링 및 통제하는데 필요한 세부적인 작업 정보를 제공함으로써 기존의 분석 및 관리 기법과 결합하여 생산성을 향상시키는데 기여할 수 있다. 이들 연구는 크게, 작업자의 동작을 인식하여 작업의 순서 및 작업 시간을 측정하는 분야에서부터, 최근에는 동작 정보를 이용한 작업 시간의 추정 및 예측 (그림 3)까지 다양한 주제로 진행되고 있다.

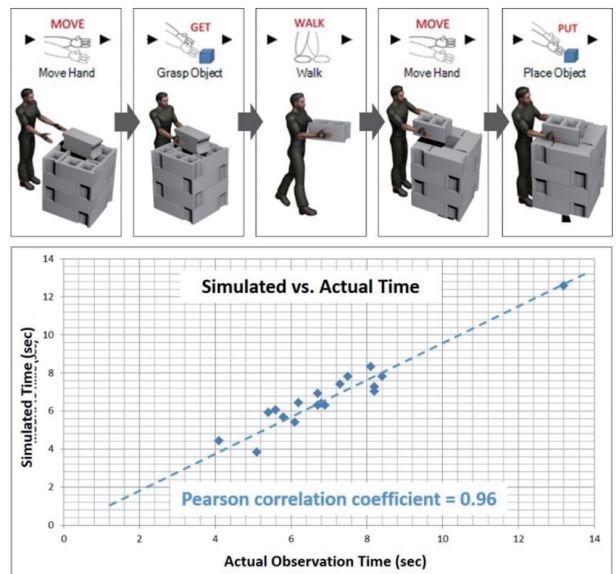


그림 3. 표준 동작 시간 시스템에 기반한 공정 시간 예측 시뮬레이션 모델 (Golabch et al, 2015a; Golabch et al, 2016)

3.3 공정 및 안전의 통합 분석 모델 소개

위와 같이 안전 및 공정 관리를 위해 적용된 동작 인식 기술을 바탕으로, 둘 사이의 상관 관계를 이해하고 생산성 및 안전성이 함께 고려된 작업 공간을 설계 및 관리하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 예를 들어, 캐나다 알버타주에 위치한 철골 제조 현장과 주택 모듈러 (Modular) 건설 현장을 대상으로 작업자의 동작 정보를 수집하고 생산성 및 안정성을 가상의 공간에서 함께 분석하는 기법이 연구 중에 있다 (그림 4). 동작 인식 기술은 앞서 설명한 바와 같이, 인간공학적인 안전 분석을 가능

하게 할 뿐만 아니라, 동작에 기반한 작업 시간의 예측을 통해 생산성 측정에도 활용될 수 있다. 특히 작업 중의 세부적인 동작 정보와 함께 동작 빈도 및 지속 시간, 물리적인 하중 등, 생산성과 인간공학적 위험도에 영향을 미치는 요소를 함께 고려함으로써, 보다 효율적인 작업 환경 및 작업 계획을 수립할 수 있게 한다.

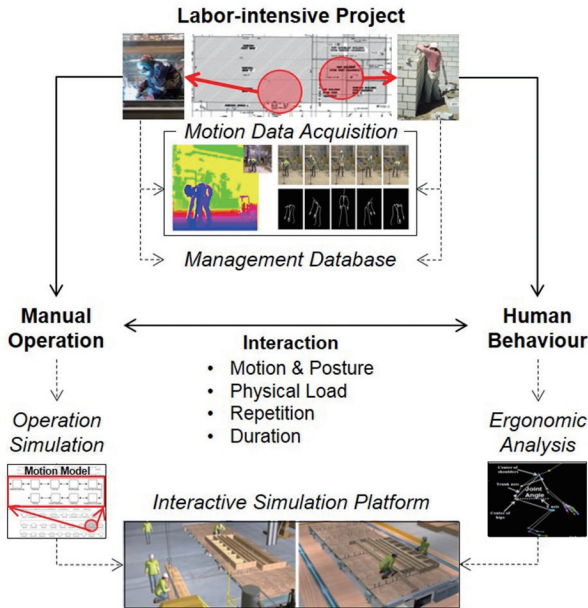


그림 4. 동작 정보에 기반한 공정 및 안전 관리 통합 모델링 프레임워크

4. 결론

다른 산업에 비해, 건설은 여전히 현장에서 근로자들에 의해 많은 작업이 이루어지는 노동 집약적 성격이 강한 산업이라 할 수 있다. 이에 노동생산성과 안전은 작업자와 직접적으로 연관된 중요한 관리 요소로서 지속적인 연구와 개선이 필요한 분야이다. 본 고에서는 다양한 관리 기법 및 관련 기술 중에서도 작업자의 동작 인식 기술과 관련된 연구들의 동향을 간략히 소개하였다. 이러한 기술은 기존의 직접적인 관찰에 의해 수행되어 오던 자료의 수집을 자동화할 뿐아니라, 보다 풍부하고 세부적인 작업 정보의 획득을 가능하게 할 수 있다. 특히나 작업자의 동작 정보를 기반으로 생산성과 인체공학적 안전성의 물리적 관계를 이해할 수 있고, 이를 바탕으로 보다 안전하고 생산적인 근무 환경을 조성하고 작업 계획을 수립하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

Centers for Disease Control and Prevention. (1999). STRESS...At Work. National Institute for Occupational Safety and Health; NIOSH Publication No. 99-101.

Choudhry, R. M. (2015). Achieving Safety and Productivity in Construction Projects. *Journal of Civil Engineering and Management*, DOI: 10.3846/13923730.2015.1068842.

CPWR (2013). *The Construction Chart Book*, 5th ed. CPWR, Silver Spring, MD.

Golabchi, A., Han, S. and AbouRizk, S. M. (2015a). Integration of Predetermined Motion Time Systems into Simulation Modelling of Manual Construction Operations. 2015 CSCSE International Construction Specialty Conference (ICSC 2015), Vancouver, BC, Canada, June 8 – 10, 2015.

Golabchi, A., Han, S., AbouRizk, S. M., and Kanerva, J. (2016). Micro-Motion Level Simulation for Efficiency Analysis and Duration Estimation of Manual Operations. *Automation in Construction*, Elsevier. (Under review)

Golabchi, A., Han, S., Seo, J., Han, S., Lee, S., and Al-Hussein, M. (2015b). An Automated Biomechanical Simulation Approach to Ergonomic Job Analysis for Workplace Design. *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 141, Issue 8, 04015020-1-12.

Goldenhar, L. M., Williams, L. J., & Swanson, N. G. (2003). Modelling relationships between job stressors and injury and near-miss outcomes for construction labourers. *Work & Stress*, 17(3), 218-240.

Han, S., and Lee, S. (2013). A Vision-based Motion Capture and Recognition Framework for Behavior-based Safety Management. *Automation in Construction*, Elsevier, 35, 131-141.

Han, S., Saba, F., Lee, S., Mohamed, Y., and Peña-Mora, F. (2014). Toward an Understanding of the Impact of Production Pressure on Safety Performance in Construction Operations. *Accident Analysis and Prevention*, Elsevier, 68, 106-116.

Hessman, T. (2015). Safety is Productivity. *Safety Leadership Conference 2015*, Greenville, South Carolina, October 26-28, 2015.

International Labour Organization (ILO) (2006). Occupational Safety and Health: Synergies between Security and Productivity. International Labour Office, Committee on Employment and Social Policy (GB.295/ESP/3, 295th Session), Geneva, March 2006.

Jiang, Z., Fang, D., and Zhang, M. (2015). Understanding the Causation of Construction Workers' Unsafe Behaviors based on System Dynamics Modeling. *ASCE Journal of Management in Engineering*, 31 (6), 04014099.

Khosrowpour, A., Niebles, J.C., and Golparvar-Fard, M. (2014). Vision-based workplace assessment using depth images for activity analysis of interior construction operations. *Automation in Construction*, 48, 74–87.

Kim, J. Y., and Caldas, C. H. (2013). Vision-based Action Recognition in the Internal Construction Site using Interactions between Worker Actions and Construction Objects. *Proceedings of the 2013 International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Montreal, Canada, August 10–14, 2013.

Komeili, A., Li, X., Gul, M., Lewick, J., and El-Rich, M. (2015). An Evaluation Method of Assessing the Low Back Muscle Fatigue in Manual Material Handling. 2015 Modular and Offsite Construction (MOC) Summit & 1st International Conference on the Industrialization of Construction (ICIC), Edmonton, Alberta, Canada, May 19–21, 2015.

McLain, D.L. and Jarrell, K.A. (2007). The perceived compatibility of safety and production expectations in hazardous occupations. *Journal of Safety Research*, 38(3), 299–309.

National Research Council and the Institute of Medicine (2001). *Musculoskeletal disorders and the workplace: low back and upper extremities*. Panel on Musculoskeletal Disorders and the Workplace. Commission on Behavioral and Social Sciences and Education. Washington, DC: National Academy Press.

Oleske, D.M., Lavender, S.A., Andersson, G.B., Morrissey, M.J., Zold-Kilbourn, P., Allen, C., & Taylor, E. (2006). Risk factors for recurrent episodes of work-related low back disorders in an industrial population. *Spine*, 31, 789–798.

Ray, S. J., & Teizer, J. (2012). Real-time construction

worker posture analysis for ergonomics training. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), 439–455.

Schneider, S.P. (2001). Musculoskeletal injuries in construction: a review of the literature. *Applied occupational and environmental hygiene*, 16(11), 1056–1064.

Seo, J., Starbuck, R., Han, S., Lee, S., and Armstrong, T. J. (2014). Motion Data-driven Biomechanical Analysis during Construction Tasks on Sites. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 29, B4014005–1–13.

Weerasinghe, I., Ruwanpura, J., Boyd, J., and Habib, A. (2012) Application of Microsoft Kinect Sensor for Tracking Construction Workers. *Construction Research Congress 2012*, pp. 858–867.