

Industry 4.0 환경에서의 작업자 정신 및 신체 건강 상태 모니터링 연구 동향 분석

Analysis of Research Trends in Monitoring Mental and Physical Health of Workers in the Industry 4.0 Environment

박정철*

Jungchul Park*

〈Abstract〉

Industry 4.0 has brought about significant changes in the roles of workers through the introduction of innovative technologies. In smart factory environments, workers are required to interact seamlessly with robots and automated systems, often utilizing equipment enhanced by Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) technologies. This study aims to systematically analyze recent research literature on monitoring the physical and mental states of workers in Industry 4.0 environments. Relevant literature was collected using the Web of Science database, employing a comprehensive keyword search strategy involving terms related to Industry 4.0 and health monitoring. The initial search yielded 1,708 documents, which were refined to 923 journal articles. The analysis was conducted using VOSviewer, a tool for visualizing bibliometric data. The study identified general trends in the publication years, countries of authors, and research fields. Keywords were clustered into four main areas: 'Industry 4.0', 'Internet of Things', 'Machine Learning', and 'Monitoring'. The findings highlight that research on health monitoring of workers in Industry 4.0 is still emerging, with most studies focusing on using wearable devices to monitor mental and physical stress and risks. This study provides a foundational overview of the current state of research on health monitoring in Industry 4.0, emphasizing the need for continued exploration in this critical area to enhance worker well-being and productivity.

Keywords : Industry 4.0, Operator 4.0, VOSviewer, Research trend, Network analysis

* 정회원, 교신저자, 한국교통대학교, 교수
E-mail: jcpark@ut.ac.kr

* Dept. of Safety Engineering, Korea National University of Transportation

1. 서론

4차 산업혁명에는 혁신적인 기술의 도입으로 작업자의 역할에 변화를 일으키고 있다. 작업자들은 스마트 팩토리 환경에서 로봇과 자동화 시스템과의 원활한 상호작용이 요구되며, 가상 현실(Virtual Reality) 및 증강 현실(Augmented Reality) 기술을 활용한 장비를 착용하기도 한다. Operator 4.0은 D. Romero 등[1]이 제안한 4차 산업혁명 환경에서의 새로운 작업자 개념으로, Super-strength, Social, Augmented, Virtual, Smarter, Analytical, Healthy, Collaborative 라는 8개의 키워드로 정의된다. 이 중, ‘Healthy Operator’는 웨어러블 기기를 이용해 실시간으로 심박, 호흡, 스트레스 등 작업자의 건강 상태와 신체 활동을 모니터링하고 이를 적극적으로 활용하는 것이다.

Operator 4.0의 연구 트렌드를 분석한 Valentina 등[2]에 따르면, 이러한 ‘Healthy Operator’의 개념은 2018년까지 다른 키워드들에 비해 상대적으로 적은 주목을 받아왔다. 그러나 2018년 이후 Operator 4.0 또는 Industry 4.0에 대해 많은 연구가 이루어져 왔음에도 불구하고, ‘Healthy Operator’ 측면에 관련된 연구의 동향에 대해서는 조사 및 분석된 바가 거의 없다. 따라서, 본 연구는 작업자의 Industry 4.0 환경에서 작업자의 신체적/정신적 상태 모니터링에 관한 최근의 연구 문헌을 체계적으로 분석하여 그 동향을 파악하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구방법

2.1 문헌 수집 방법

Web of Science (WoS)를 사용하여 관련 문헌

을 검색하였다. Web of Science는 전 세계의 학술 연구 및 출판물에 대한 서지 정보와 인용 정보를 제공하는 가장 광범위한 학술 정보 데이터베이스 중 하나이다. 본 연구에서는 Science Citation Index Expanded (SCIE), Social Sciences Citation Index (SSCI), Arts & Humanities Citation Index (A&HCI) 등의 주요 저널 인용 색인을 모두 포함하는 Web of Science의 Core Collection을 사용하였다. 검색 기간의 시작 년도는 별도로 설정하지 않았으며, 2024년도 5월까지의 논문을 포함하도록 하였다.

연구 목표에 부합하는 논문을 검색하기 위해 관련 키워드를 조합하였다. 주요 키워드로는 배경(Context)에 관련된 2개의 키워드 ("Industry 4.0" 및 "Operator 4.0"), 주제(Topic)에 관련된 7개 키워드("Mental", "Physical", "Cognitive", "Occupational", "Safety", "Health", "Well-being"), 행위(Action)에 대한 3개 키워드 "Sens*", "Monitor*", "Detect*"가 사용되었다. 단어의 여러 변형된 형태를 모두 포함함으로써 검색의 유연성과 포괄성을 높이기 위해 일부 키워드에 대해 아스테리스크(*)를 와일드 카드로 사용하였다. 예를 들어 "Monitor*"를 사용함으로써 "monitor", "monitoring", "monitors" 등을 포함해 검색을 수행할 수 있었다. 각 카테고리 별 최소 하나 이상의 키워드를 포함하는 논문을

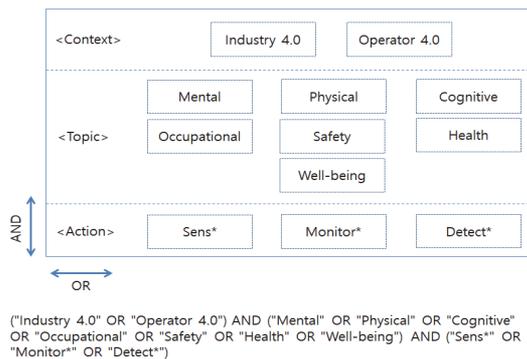


Fig. 1 The keywords used in the search

검색할 수 있도록 Fig. 1과 같은 키워드 검색 식을 구성하여 사용하였다.

2.2 관련 논문 추출

제목, 초록, 저자 선정 키워드 필드를 포함하는 ‘주제어(Topic)’ 검색에 위의 키워드 검색 식을 적용하여 검색을 수행하였다. 이러한 과정을 통해 총 1,708개의 문헌이 수집되었다. 수집된 문헌 가운데 Operator 4.0 개념이 본격적으로 확산되기 시작한 2018년도보다 이전에 발행된 문헌은 129편으로, 이를 제외하면 이후 발행된 문헌의 수는 총 1,579편이었다. 본 연구에서는 학술지에 초점을 두고 상대적으로 peer review 과정이 철저하지 않은 학술대회 논문이나 저서, 정기 간행물 등의 유형을 제외하고자 하였다. 그 결과, 총 923편의 학술지 게재 논문이 추출되었다.

2.3 분석 도구

추출된 논문의 연도, 국가, 연구분야 등 일반적인 현황을 파악하기 위해 Web of Science에서 제공하는 결과 분석 기능을 활용하였다. 또한, 논문에 대해 저자가 입력한 키워드를 분석하기 위해 VOSviewer 1.6.20 프로그램을 사용하였다. VOSviewer는 네덜란드 Leiden University의 Centre for Science and Technology Studies (CWTS)에서 개발한 소프트웨어로, 학술 문헌의 서지 정보를 분석하여 시각적으로 표현해 줌으로써 연구 분야의 구조를 이해하고 주요 연구 주제와 트렌드의 파악을 돕는 분석 도구이다[3]. 같은 키워드가 논문에 동시에 나타나는 횟수가 많을수록 해당 키워드들이 서로 관련되어 있다고 추론할 수 있다. VOSviewer는 논문에 포함된 키워드들이 동시에 나타나는 빈도를 활용해 키워드 간의 연관성을

유추하고, 이에 기반해 연구 영역을 키워드 집합의 형태로 군집화함으로써 네트워크 구조를 분석할 수 있다. VOSviewer는 이미 많은 체계적 문헌 연구들에서 서지 데이터의 분석에 활용되어 왔다[4,5].

키워드 분석에 앞서 전처리 과정을 거쳤다. “Internet of Things”와 “IoT”, “Artificial Intelligence”와 “AI” 등 줄어와 약어에 해당하거나, “Sensor”와 “Sensors” 처럼 단수-복수 관계에 있는 단어, 하이픈의 유무나 대소문자 외에 차이가 없는 단어 등은 동일한 키워드로 보고 통합하였다. “Industries”, “Covid-19” 등과 같이 일반적이거나 본 연구 주제와 관련이 먼 키워드들은 제외되었다. 키워드 출현의 최소 기준은 10회, 군집 분석 파라미터인 Resolution은 0.9로 설정하였다.

3. 연구 결과 및 토의

3.1 일반 현황

수집된 논문들을 게재 연도별로 살펴보면 Fig. 2와 같다. Operator 4.0 개념이 확산된 2018년 이후로 2021년까지 논문 편수가 급격히 증가하였음을 알 수 있다. 2021년부터 2023년까지는 논문의 수가 거의 일정 수준에 머물렀으나, 2024년도는 5

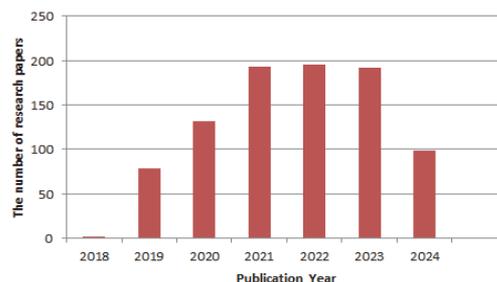


Fig. 2 The number of research papers by year of publication

Table 1. The number of papers and citations by country

Rank	Country	The number of papers	Citations	Total link strength
1	China	129	3388	82
2	USA	111	3174	115
3	India	108	1724	101
4	Italy	103	3950	62
5	Spain	80	1719	84
6	Germany	79	2007	65
7	UK	66	1349	74
8	France	47	1333	85
9	Australia	46	1332	46
10	Portugal	42	617	36
11	South Korea	39	832	40
12	Saudi Arabia	35	750	51
13	Brazil	34	431	15
14	Canada	34	854	32
15	Malaysia	28	507	44
16	Pakistan	26	733	58
17	Poland	26	240	30
18	Turkey	24	1575	53
19	Norway	22	513	55
20	Taiwan	22	263	8

월까지의 논문만이 집계되었음을 감안하면 이전 연도보다 증가하는 추세를 보일 것으로 전망된다.

논문들을 저자의 국적에 따라 살펴보면, 2018년 이래 총 86개 국의 저자들에 의해 관련 연구가 수행되었다. 논문 편수를 기준으로 상위 20개 국 저자들의 논문 편수와 인용횟수, 총 링크 강도(키워드 동시 출현 논문 수)는 Table 1과 같다. 중국 저자들에 의해 가장 많은 129편의 연구가 이루어졌으며 인용횟수는 이탈리아 다음으로 가장 많은 3388회로 나타났다. 논문 편수 기준으로 2위는 미국으로 111편이었으며, 저자들의 총 연결 강도는 중국을 앞서는 것으로 나타났다. 한국의 경우 총 39편의 SCIE급 논문이 게재된 것으로 나타나 11위에 위치하는 것으로 나타났다. 상위 3개국인 중국, 미국, 인도와 9위의 호주를 제외하면 상위 10위의 나머지 순위는 모두 유럽 국가들이 차지하여, 전반적으로 유럽에서도 활발한 연구가 이루어지고 있는 것을 알 수 있다.

연구 분야에 따라 논문을 분류한 결과는 다음 Fig. 3과 같았다. 전기/전자 공학 분야의 연구가

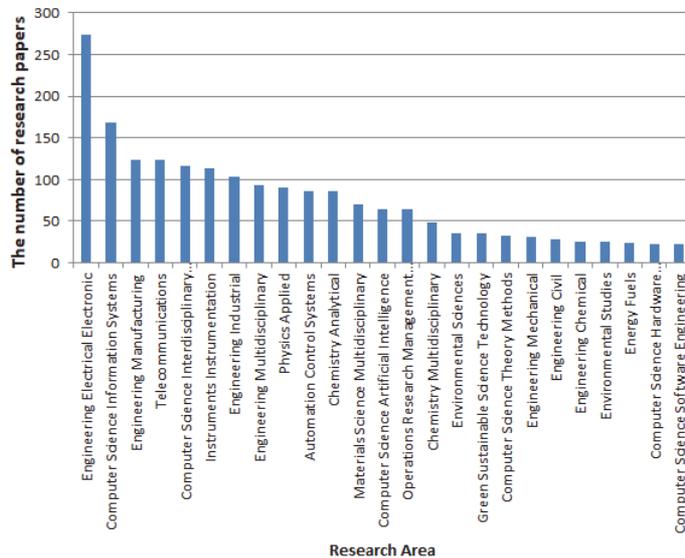


Fig. 3 The number of research papers by research area

참고문헌

- [1] Romero, D., Bernus, P., Noran, O., Stahre, J., Fast-Berglund, Å. “The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation towards Human-Automation Symbiosis Work Systems”, APMS 2016: Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World, p. 677~686, (2016).
- [2] Valentina, D. P., Valentina, D. S., Salvatore, M., Stefano, R., Smart operators: How Industry 4.0 is affecting the worker’s performance in manufacturing contexts, *Procedia Computer Science*, Vol. 180, p.958-967, (2021).
- [3] Van Eck, N. and Waltman, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *scientometrics* 84:2, p.523~538, (2010).
- [4] Gladysz, B., Tran, T.-A., Romero, D., van Erp, T., Abonyi, J., Ruppert, T., Current development on the Operator 4.0 and transition towards the Operator 5.0: A systematic literature review in light of Industry 5.0, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 70, p.160~185, (2023).
- [5] Lee, J.-E., Yoo, R.-H., Cho, M.-J., Analyzing Research Trends in Forest Watersheds Using the Vosviewer Program *Journal of Korean Society of Industry Convergence*, 26(6), p.1183~1195, (2023).
- [6] Ciccarelli, M., Papetti, A., Germani, M., Exploring how new industrial paradigms affect the workforce: A literature review of Operator 4.0, *Journal of Manufacturing Systems* 70, p.464~383, (2023).
- [7] Simeone, A., Grant, R., Ye, W., Caggiano, A. Operator 4.0 intelligent health monitoring: a Cyber-Physical approach, *Procedia CIRP*, 118, p.1033-1038, (2023).
- [8] Greco, A., Caterino, M., Fera, M., Gerbino, S., Digital twin for monitoring ergonomics during manufacturing production, *Appl Sci* 10, p.1~20, (2020).
- [9] Yang, Z., Shi, J., Jiang, W., Sui, Y., Wu, Y., Ma, S. Influences of augmented reality assistance on performance and cognitive loads in different stages of assembly task, *Front Psychol* 10, p.1~17, (2019).
- [10] Pollak, A., Paliga, M., Pulooulos, MM, Kozusznik, B., Kozusznik, M.W., Stress in manual and autonomous modes of collaboration with a cobot, *Comput Hum Behav*, 112: 106469, (2020).
- [11] Peruzzini, M., Grandi, F., Pellicciari, M., Exploring the potential of Operator 4.0 interface and monitoring. *Comput Ind Eng*, 139:105600, (2020).