

작업효율 지표 기반 안전관리행위 - 생산성 인과 모델 구축 - 메가 프로젝트 배관공사 중심으로 -

채연¹ · 박문서^{2*} · 조종우³ · 이진솔⁴ · 주선우⁵ · 홍영민⁶

¹서울대학교 건축학과 석사과정 · ²서울대학교 건축학과 교수, 서울대 건설환경종합연구소 · ³서울대학교 건축학과 박사과정 ·
⁴Texas A&M University 건축학과 박사과정 · ⁵삼성전자 건설기획그룹 Senior Professional · ⁶서울대학교 건축학과 석사과정

Causal Loop Diagram for the Relation Between Degree of Field Safety Management and Productivity Based on Effectiveness Metrics : Focusing on Plumbing work in Mega Project

Chae, Yeon¹, Park, Moonseo^{2*}, Cho, Jongwoo³, Lee, Jinsol⁴, Joo, Seonu⁵, Hong, Yeongmin⁶

¹Graduate Student, Department of Architecture, Seoul National University

²Professor, Department of Architecture, Seoul National University, Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University

³Graduate Student, Department of Architecture, Seoul National University

⁴Graduate Student, Department of Construction Science, Texas A&M University

⁵Senior Professional, Samsung Electronics Co. Construction Planning Group

⁶Graduate Student, Department of Architecture, Seoul National University

Abstract : Unsafe working environments slow down working speed in that it takes a lot of time to respond in case of an accident, greatly reducing the productivity of construction work. Therefore, proper safety management that does not impede the productivity of construction works is a very important factor for successful construction project. However especially in mega project, the mutual effects of safety management and productivity are complex. Therefore, this study establishes a causal model between safety management and productivity influencing factors based on effectiveness metrics, and analyzes the effect of increased site congestion due to excessive personnel input, irregular safety measures and inefficient change of work schedules. The result of this study, is expected to contribute to enhancing the competitiveness of the construction industry as the basis for establishing a safety management plan that can secure appropriate productivity.

Keywords : Productivity, Safety, System Dynamics, Effectiveness Metrics

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설산업은 안전사고 발생 리스크가 매우 높고(Kim & Han, 2017) 전 산업 중 재해자와 사망자 발생이 가장 많은 산업이다. 우리나라에서는 매일 100여 명의 현장근로자가 상해를 입고 있으며, 이 중 3명은 사망에 이르는 중대 재해를 입고 있다(Ahn et al., 2005). 특히 메가 프로젝트의 경우

근본적으로 높은 위험과 복잡한 공사 특성이 있다(Xu et al., 2020). Xu et al. (2020), Hu et al. (2015)에 따르면 장기 건설 과정에서 안전 위험 요소가 끊임없이 변화하고 상호작용을 이루어 그 위험을 더욱 증가시킨다.

또한 안전사고 발생은 사고 처리, 원인 조사·분석 및 대책 수립 등의 계획되지 않은 시간과 공사 중단으로 인한 공기 지연과 피해보상 등으로 인한 공사 비용이 추가적으로 소요 된다(Ha et al., 2019). 때문에 안전사고를 줄이기 위해 연구(Lim et al., 2008; Yim et al., 2010)와 실무적인 노력이 지속적으로 이루어져 왔다. 하지만, 선행연구에 따르면 안전사고를 줄이기 위한 다양한 노력들은 건설 생산성을 저해시키는 측면도 있다. 예를 들어, 작업 전 안전성 검사, 작업 수행 중 안전기준 준수, 작업 후 위험성 제거 확인 등은 작업 대기 및 지연을 유발함으로써 건설 생산성을 저해시킨다는 측면

* **Corresponding author:** Park, Moonseo, Department of Architecture, Seoul National University, Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University, B/D, 39 Gwanak-ro 1, Gwanak-gu, Seoul, Korea

E-mail: mspark@snu.ac.kr

Received November 4, 2020: revised January 4, 2021

accepted February 1, 2021

도 존재한다고 보고되고 있다(Kim, 2011; Pyo et al., 2005; Ahn & Song, 2010; Cho, 2008).

이처럼 안전 관리 행위와 건설 생산성은 상호연관·동태적인 관계가 있다. 따라서 성공적으로 공사관리를 하기 위해서는 건설공사의 생산성을 저해하지 않는 적절한 안전관리가 필요하다. 그러나 대부분의 기존 연구는 안전관리와 작업 생산성 간의 관계에 대하여 일방향적이고 정적인 형태분석(Kim et al., 2011; Pyo et al., 2005)을 하고 있어, 상호 간 미치는 복잡한 영향에 대한 연구가 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 작업 효율성을 나타내는 지표를 시스템 다이내믹스를 활용하여 안전관리와 생산성 영향 요인 간의 인과 모델을 구축하고, 인과 모델을 통해 현장 관리 행위와 작업 효율성 사이에서 나타나는 생산성 저해의 원인을 탐색하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구의 범위

건설공사에서 생산성은 일반적으로 투입 인원, 시간 대비 산출물의 양 또는 그 비율로 표현된다(Jeon & Lee, 2002). 따라서 산출물의 종류가 무엇인지에 따라 생산성의 표현형이 달라질 수는 있으나, 작업 시간이 생산성의 주요 변수임은 명백하다. 그러므로, 본 연구는 총 투입 인원들의 실제 작업한 시간을 표현하는 지표인 작업효율 지표를 생산성을 표현하는 지표로 정의하고, 인과 모델을 구축한다.

본 연구에서 분석 대상에 해당하는 안전관리 행위는 크게 두 가지로 구분한다. 첫째는 화재 예방을 위한 조치로 작업자들에게 추가적인 작업이 발생하는 행위이다. 둘째는 안전 관련 문서 확인 및 작업 현장 검사로 일과시간 중 작업자들의 작업중단을 야기하거나, 작업시간을 줄이는 행위이다. 이 두 가지 구분은 미국 OSHA Construction Safety and Health의 현장 내 안전관리 범위를 따라 구분하였다(Charles, D., 2006).

본 연구 대상 공사는 반도체 공장 FAB 건설공사로서, 설계와 시공이 동시에 일어나는 복합 공사의 특성을 지닌다. 더불어, 메가 프로젝트 건설공사에 해당하는 반도체 건설공사는 EPC 플랜트 공사에 해당한다. 배관 설치 공사는 여러 공종과 선후행 관계를 가지며 플랜트 건설 프로젝트에서 큰 비중을 차지하고 있기 때문에(Cho, 2017) 배관공사를 주요 관측 범위로 하여 실측 및 모델 구축에 그 결과를 활용하였다. 구축된 모델을 활용하여 안전 관리 행위로 인한 작업 시간의 영향을 확인한다.

1.3 연구의 방법 및 절차

본 연구는 다음과 같은 절차에 따라 진행된다. 첫째, 선행 연구를 통해 생산성 영향 요인 및 안전관리와 그 상관성, 작

업효율의 실측 및 지표 산출방법을 확인한다. 둘째, 현장 실측을 통해 작업효율을 측정하고, 안전관리 행위를 관찰한다. 셋째, 측정 및 관찰한 결과를 토대로 작업의 세부 분류, 효율 지표의 비교 분석을 통해 인과지도 모델을 구성한다. 그 후, 구성한 인과지도 모델을 통해 건설 안전 관리와 생산성 사이에 합의된 근본 원인을 탐색한다.

(Fig. 1)은 본 연구의 흐름을 도식화한 것이다.

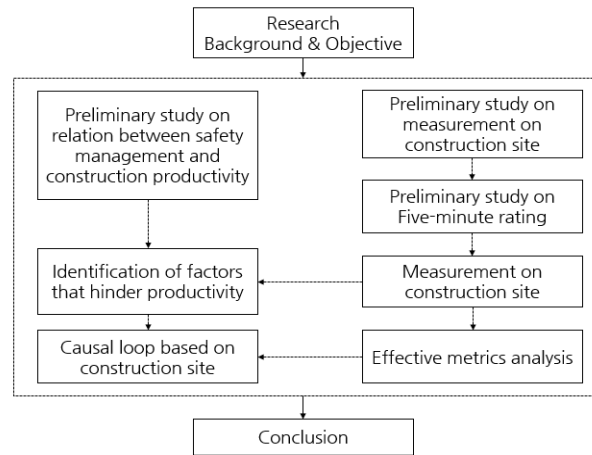


Fig. 1. Research Framework

2. 선행연구 고찰

2.1 생산성과 안전 관리 행위의 영향 관계 연구

국내 생산성 지표 중 활용도가 가장 높다고 볼 수 있는 표준 품셈은 작업생산성을 나타내는 지표이다. 작업생산성은 단위 작업량을 수행하는 데 걸리는 작업 시간 측정을 통해 산출된다. 따라서 작업생산성은 작업량이 동일한 경우에 작업 시간이 가장 적게 소비된 때가 생산성이 제일 높게 된다(Jeon & Lee, 2002). 동일한 작업량 산출에 필요한 작업시간이 곧 작업효율이 높은 것을 의미하므로, 작업효율이 높을 때 작업의 생산성이 높다고 할 수 있다. Dozzi and Abourizk (1993)에서도 작업효율로써 생산성을 분석하였다.

건설 안전사고의 원인은 작업현장, 기구, 기계, 설비 등이 불안전한 상태에서의 작업, 작업 근로자의 미숙련 및 불안전한 행동, 환경적 요인 등이 있다. 이러한 잠재 요인들은 서로 연관·축적되다가 한계에 이르르게 되면 건설 사고는 한순간에 갑작스럽게 발생하고, 연속적·복합적으로 일어나게 된다(Kim, 2009).

건설 과정 중 사고의 발생은 사고 처리, 원인 조사·분석 및 대책 수립 등에 따른 시간 소모로 인해 생산성이 크게 저하된다. 공사 중단에 따른 공기 지연, 피해 보상 역시 생산성에 악영향을 미치는 요인이 된다(Ha et al., 2019). 반면 불안전 안전관리를 통한 생산성의 저해 또한 많은 논문들에서

언급되고 있다(Kim, 2009; Pyo et al., 2005).

건설 과정에서의 생산성 향상을 위하여 각 활동을 VA (Value Adding)작업과 NVA (Non Value Adding) 작업으로 구분한다(Fadlil & Rosyidi, 2020). 위와 같은 작업의 구분은 계획 단계에서 작업 배치 기획에 활용된다(Fadlil & Rosyidi, 2020). Hasanzadeh and Jesus (2020)에 따르면 안전한 작업 환경은 NVA 작업에 대한 요구를 감소시키고 생산성을 향상시킨다.

2.2 시스템 다이내믹스에 근거한 메가 프로젝트 시뮬레이션 연구

시스템 다이내믹스(System Dynamics; SD) 모델은 복잡한 비선형 시스템을 분석할 수 있는 동태적인 방법론을 제공한다(De Marco et al., 2016; Park et al., 2009; Sterman, 2000) <Table 1>. 특히, 복잡계의 동적 시뮬레이션이 가능하다는 점에서 본 모델은 강점을 갖는다. 건설 과정에서의 복잡도가 매우 높은 메가 프로젝트에서도 본 모델이 활용된 연구가 진행되었다. De Marco et al. (2016), Love et al. (2002)은 메가 프로젝트 플랜트 공사의 복잡 영향을 시스템적으로 해석하였다.

Table 1. System dynamics legends

Legends	Explanation	
	When other conditions are the same	When factor A increases(decreases), factor B increases(decreases)
		When factor A increases(decreases), factor B decreases(increases)

건설 안전 관련 기존 연구를 통하여 시스템적으로. 관리 지표 등으로 생산성 확인은 비교적 용이하였고, 안전 관리로 인하여 생산성이 저해되었음을 보인 연구(Love et al., 2002)들이 있어 왔으나, 정량적인 확인이 어려웠다. 더불어, 안전 관리로 인하여 생산성이 저해되거나, 안전사고로 인한 생산성 저해와 관련한 선형적인 분석만이 있어왔다. 본 연구는 작업 생산성을 이루고 있는 주요 축 중 하나인 건설현장에서의 작업 시간 관측을 통해 안전관리와 생산성의 두 요인을 둘러싼 시스템 다이내믹스의 Causal Loop를 도출하고 이를 통한 Invisible loop의 탐색을 수행한다. 이러한 과정을 통해 파악한 인식을 토대로 적절한 안전관리 방안이란 무엇인가에 대해 고찰한다.

2.1에서 언급하였듯이, 안전관리와 생산성 두 요인 간의 관계는 동적인 영향에 있다. 따라서 두 요인 간의 관계를 동적인 측면에서 분석함으로써 보다 효율적인 안전관리 방안에 대한 탐색이 필요하다. Kang and Park (2009), Lee et al.

(2008), Zhan and Pan (2020)의 연구에서는 동적인 문제를 시스템적인 분석을 통하여 해결하였다. 하지만 현재까지 진행된 생산성 관련 동적 연구(Love et al., 2002; Zhan & Pan, 2020)는 생산성 확보 및 성과 달성 등을 위주로 진행되어 왔다. 안전과 생산성의 상호 영향을 동적으로 해석한 연구는 부족한 실정이다.

더불어 안전사고를 건설 생산성 저해 요인으로 본 사례(Kim et al., 2008; Hass et al., 2000; Son & Lee, 2002; Chung & Kim, 2006; Kim et al., 2003)와 불완전한 안전관리를 생산성 저해 요인으로 본 사례(Kim, 2011; Pyo et al., 2005; Ahn & Song, 2010; Cho, 2008)의 상충되는 연구가 존재한다.

3. 작업효율의 측정 및 결과

3.1 FMR을 통한 효율 지표의 측정 및 산출

작업자의 작업 생산성을 측정하는 방법으로 Work sampling, Grouping technique, Five-minute rating이 있다(Thomas, 1983). 그중 Five-minute rating (FMR) 방식은 개별 작업자의 작업 여부를 즉각적으로 판단하여, 전체 작업 효율을 측정하는데 유용하다(Thomas, 1983). 따라서 본 연구에서는 FMR 방식으로 작업효율을 측정하였다. 본 측정 방식은 관측 대상 작업을 설정하고, 수 초에서 분 단위에 해당하는 특정 시간 단위로 해당 작업을 수행하는 개별 작업자들을 대상으로 작업 여부 관측을 진행한다. 각 관측에서 관측자는 작업자의 작업 여부를 수행과 미수행으로 단순히 구분한다. 관측이 끝난 후 총 관측 시간 대비 작업 시간으로 구분된 작업 시간의 비율로 작업자의 작업효율을 도출한다(Thomas, 1983). 이렇게 관측된 작업효율(Effectiveness; EF)은 아래의 식을 따라 백분율로 표현된다.

$$EF = \frac{\sum_{t=T_1}^{T_2} \text{해당 시간 작업 인원수}}{\text{전체 인원수} \times \text{총 관측 시간}} \quad (1)$$

T_1 : 관측 시작 시간
 T_2 : 관측 종료 시간

Ahn et al. (2008)에 따르면 현장에서의 생산성을 작업효율로 볼 수 있으므로, 본 연구에서는 FMR 방식으로 측정된 작업효율 지표를 생산성을 표현하는 변수로 보았다. 또한 FMR 기반 관측을 진행하면서, 작업 진행 시 발생하는 대기 원인과 작업 구분을 함께 기록하여, 측정 및 모델구축에 활용하였다.

<Table 2>은 FMR에 활용된 측정 표의 예시이다. 본 표는 작업자별 관측 상황 확인이 가능하다. 시간 별로 작업자의

작업 여부를 판단하고 작업 세부사항을 기재한다. 더불어 대기 발생 시 대기 발생 원인을 세부사항에 기입하여 대기의 원인을 파악한다.

현장 작업 관측을 통한 생산성 지표 데이터 수집의 세부 절차는 다음과 같다.

- 1) 촬영 영상 및 현장 모니터링 정보를 토대로 작업을 세부 Activities로 분할한다.
- 2) Five-Minute Rating 방식으로 작업 시간을 자료화한다.
- 3) 2)의 결과에 해당하는 작업 시간표를 토대로 실제 작업에 투입되는 시간을 도출한다.
- 4) 작업 종료 일시와 해당 작업자 인원 정보를 종합하여 작업 생산성을 도출한다.

Table 2. Effectiveness measurement sheet in Five-minute rating

Date		Sept. 17		Work	300A Main welding
No.	Work hour	Worker		Work details	
		Welder	Plumber	Activity	Detailed
		1	1		
1	7:20	0	-	Welding	Fit-up
2	7:25	0	-		Fit-up
3	7:30	0	0		Fit-up
4	7:35	0	-		Fit-up
5	7:40	0	-		Tack welding
6	7:45	0	0		Tack welding
7	7:50	0	0		Waiting for inspection
8	7:55	-	-		Resource delay
9	8:00	-	-		Resource delay
10	8:05	-	-		Resource delay
11	8:10	0	0		Tack welding
⋮					
31	9:50	0	-	Welding	Welding
32	9:55	-	-	Welding	Waiting for inspection
33	10:00	0	-	Welding	Welding
Counts per worker		29	4	/	
Total Counts per worker		33	33		
Effectiveness per worker		88.6%	11.4%		
Total work amount		33		Effectiveness	50.00%

현장 답사는 총 7일 약 48시간분의 배관 양중, 설치, 용접 등의 작업을 대상으로 이루어졌다. 1.2절에서 정의된 안전 관리행위에 해당하는 안전관리로 인한 작업 및 검사 빈도수 증가에 따른 작업자의 작업 스케줄 변경 상황을 살펴본다. 안전관리 작업 및 검사의 빈도수가 증가한 경우에, 작업자가 체감하는 작업 확보 가능 시간이 감소하게 됨을 확인하였다.

해당 경우, 작업자는 작업 스케줄을 변경하여 작업 가능 시간을 확보하고자 한다.

먼저, 배관 작업 내 용접 관련 작업은 용접 준비 작업과 용접 작업으로 구분된다. 배관모듈 설치위치 반입 및 Fit-up에 해당하는 작업은 용접 준비 작업으로 구분되며 가접과 본용접에 해당하는 작업은 용접 작업으로 구분한다. 이때 Fit-up 작업은 본격적인 용접 작업 전 배관 사이를 미세하게 맞추는 작업을 말한다. 이때, 본 과정에 있어 작업 인원은 배관공, 용접공, 조공이며 조공의 경우 모든 작업에 투입되며 배관공, 용접공, 조공의 시간별 투입 인원 및 실제 작업 참여 인원을 확인한 후 작업효율을 구한다.

현장 답사를 통하여 확보한 작업 영상을 통하여 FMR을 진행하였다. 관측 일자 중 작업 스케줄 변경이 실행된 작업 일자에 시행된 작업은 전 작업에 속한다.

관측 일자 중 작업 스케줄 변경이 진행된 작업 일자에 해당 작업 중 변경된 작업 시간 동안의 작업 참여 인원 변화 및 해당 시간 이전 작업 참여 인원 변화를 확인한 후, FMR을 진행하여 작업 시간을 분석한다.

3.2 작업효율 측정 결과

아래 <Fig. 2>는 작업이 예정대로 진행되었던 경우와 안전 관리작업에 의하여 스케줄이 변경된 후 작업이 진행되는 중의 해당 작업 내 작업효율을 비교한 그래프이다. <Fig. 2>는 작업자들의 업무 투입 현황을 도식화하여 투입 인원수를 세로축으로, 관측 경과 시간을 가로축으로 하여, 관측 경과 시간별로 실작업을 수행하는 작업자의 비율을 도식화한 그림이다.

<Fig. 2>을 통하여 a) 작업 스케줄 변경 이전의 경우와 b) 작업 스케줄이 변경된 구간에서의 각 잡업의 작업 중단 상황 확인을 확인하였다. a)와 b) 각각의 경우에 Fit-up 작업 및 용접 작업, 배관 모듈 설치 작업을 진행하는 상황을 확인할 수 있다. a)의 경우 작업 검사 대기 및 작업 간섭에 의한 대기가 발생하였다. b)의 경우도 a)의 경우와 같이 작업 검사 대기로 인한 작업 중단 상황이 확인되었고, 더불어 추후 조치 관련 대기 사항이 확인되었다.

작업 스케줄이 변경되기 이전과 변경된 이후의 효율을 단순 비교를 하였을 때, a) 변경 이전의 경우 작업효율이 평균 35.6%를 보이는 반면, b) 작업 스케줄이 변경된 구간에서의 작업효율은 평균 15.4%를 보인다. 작업자들의 수준이 동일하다고 가정하였을 때, 작업 스케줄이 변경된 이후의 시간 동안의 작업효율은 이전 작업효율의 46% 수준에 미치지 못한다<Fig. 2>.

관측 결과 현장에서 작업 스케줄 변경은, 기존 계획된 작업 시간 동안 계획된 작업 물량이 완료되지 않은 경우, 해당

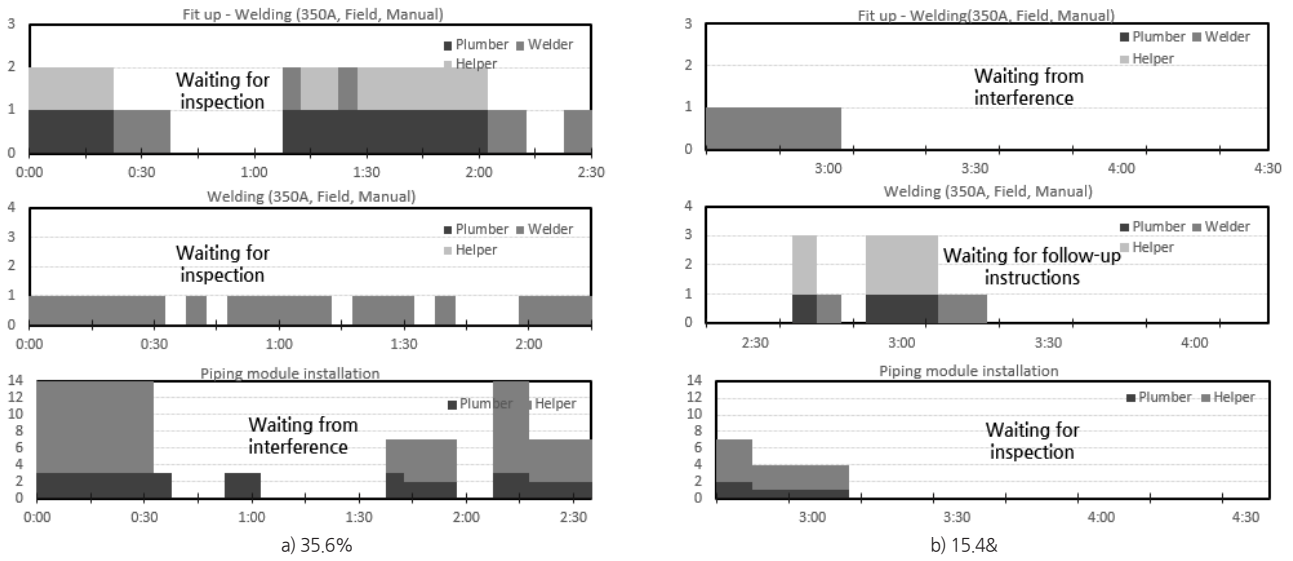


Fig. 2. Effect of unplanned changes of work time

작업에 할당되는 시간을 더욱 투입하여 실제 작업에 투입되는 시간을 확보하기 위해 시행된다. 본 연구에서는 해당 관리방안의 실효성을 분석하기 위해 작업 스케줄이 변경된 이후의 작업 시간과 이전 작업 시간의 효율을 비교하여 보았다. 그 결과, 작업 스케줄이 변경된 이후 작업효율이 더 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 3.1절에서 언급되었던, 스케줄 변경을 통한 작업자의 작업시간 확보에 해당하는 본래의 의도와 상반되는 결과이다.

이는 현장 내 안전관리방안의 실행에 있어, 인지되지 않는 상황들이 있으며 현장에서의 적용에 상황에 따른 영향이 있기 때문이다. 이를 시스템적으로 분석하기 위해 시스템 다이내믹스 모델을 수립하고 기존 관리방안이 현장에 어떠한 영향을 주고 있는지를 파악한다.

4. 시스템 다이내믹스 모델 수립

4.1 안전 관리 요소

현재 현장에서 진행되고 있는 안전관리는 다음과 같다. 화재 예방 보호 조치 작업 등의 안전 관련 작업과 안전 관련

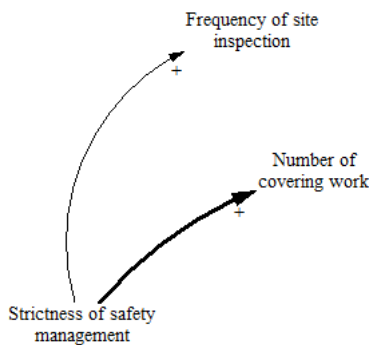


Fig. 3. Safety management on site

현장 검사이다. Strictness of safety management의 강화는 Covering 작업의 강화 및 현장 내 검사 빈도를 높이는 것을 말한다(Fig. 3).

4.2 작업 스케줄 변경이 유도되는 환경

현장 관측의 결과 작업 스케줄이 변경될 경우 기존에 현장에서 계획되었던 작업 시간 이외에 추가적으로 근무하는 시간, 즉 계획되지 않은 추가 작업 시간이 생기는 경향이 있었다.

현장에서 작업 스케줄 변경이 일어나는 가장 기저의 원인은 공기 등 일정에 따른 시간 압박이다. 또한 현장 내 작업 감시로 인한 작업 중단으로 실제 작업에 투입되는 시간의 확보가 어렵다고 판단하여 작업 스케줄을 변경하여 진행하게 된다. 작업자들은 이를 통해 계속되는 작업 중단을 방지하고 작업 연속성을 확보하고자 한다.

이러한 상황에서 안전관리로 인해 시간 압박을 받는 상황은 (Fig. 4)과 같다.

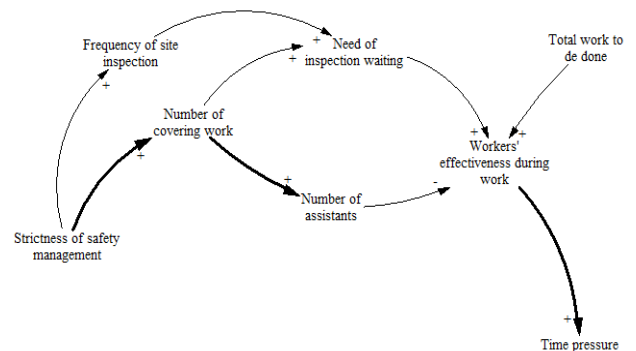


Fig. 4. Causal loop regarding how working time temporarily changes

안전관리 강화에 따라 Covering 작업의 강화 및 현장 내 검사 빈도가 높아진다. 먼저 Covering 작업이 이루어지는 경우 준비 등에 많은 시간이 소요된다. 이는 작업자의 유휴 시간으로 이어져 시간 압박이 있는 상황을 만든다. 또한 높아진 검사 빈도 또한 작업자의 유휴 시간을 만들게 된다.

안전관리에 의해 시간 압박이 발생할 경우, 작업자는 작업 스케줄을 변경하여 작업 시간 및 작업 연속성을 확보하고자 한다. 해당 상황은 아래의 <Fig. 5>와 같이 표현될 수 있다.

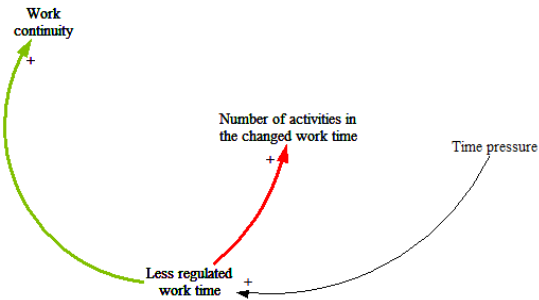


Fig. 5. Time pressure according to safety management

안전관리로 인한 시간 압박의 상황으로 작업 스케줄 변경이 일어나는 경우를 도식화하면 <Fig. 6>과 같다.

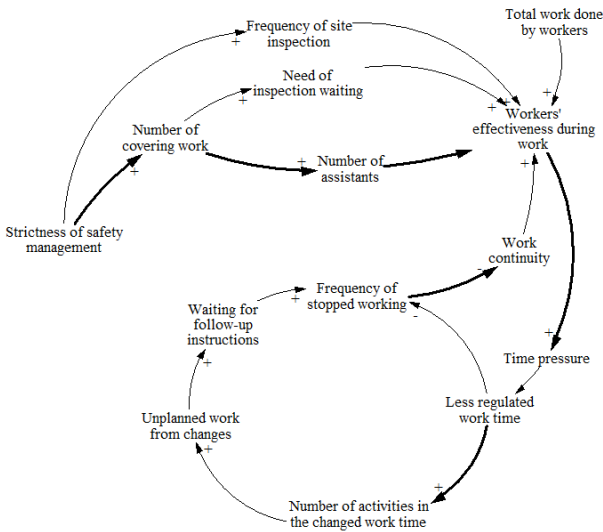


Fig. 6. Temporal change of working hours executed according to safety management

5. 관측 결과를 통한 시스템 다이내믹스 모델 분석

5.1 현장 혼잡도로 인한 안전관리 강화

현장 혼잡도를 유발하는 데는 다양한 요인이 있지만 본 연구에서는 현장 내 인원 증가(Um et al., 2003) 및 작업 간 간섭(Choi et al., 2013)의 두 요인에 의하여 발생함을 가정하

였다. 3.1에서 언급하였던 안전관리에 해당하는 작업 중 화재 예방 조치의 강화는 조공 등의 투입인원 증가의 결과를 낳는다. 이는 현장 혼잡도를 유발하여 결과적으로 현장의 안전 리스크를 높이고(Ahn et al., 2019) 안전 리스크를 줄이기 위하여 실행된 안전관리의 결과가 현장 혼잡도를 유발하여 다시 안전 리스크를 낳게 되어 이는 결국 Strictness of safety management의 강화를 낳는다(Fig. 7).

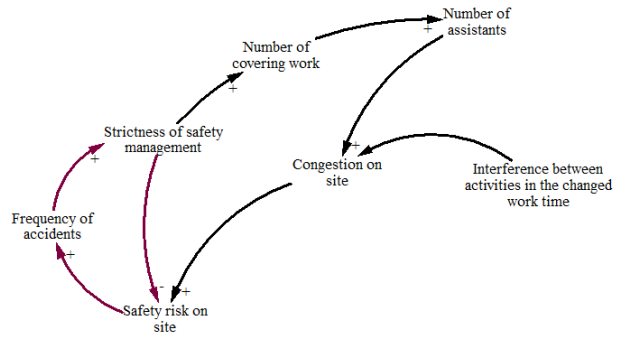


Fig. 7. Congestion on site and safety management

5.2 현장 내 스케줄 변경된 작업 시간의 영향

스케줄 변경된 작업 시간은 안전 감시자들의 관리가 기존 작업 시간에 비해 비교적 적기에 작업자들은 해당 작업 시간을 통해 작업 연속성을 확보하고자 한다. 하지만 이는 다양한 작업이 한꺼번에 진행되어 작업 간 간섭을 만든다. 이는 지속적인 작업 중단으로 이어져 오히려 작업 연속성을 저해하는 결과를 낳는다.

또한 스케줄 변경된 작업 시간의 진행은 곧 계획되지 않은 작업 시간에 작업이 진행되는 것을 의미한다. 이에 따른 진행사항 논의 및 작업 지시 대기 등의 대기가 발생하게 되고 스케줄 변경된 작업 시간의 진행을 통한 작업 시간의 확보가 실제 작업에 투입되는 시간을 크게 향상시키기 어려운 환경을 만들게 된다. 이를 <Fig. 8>와 같이 현장 관측을 통하여 확인하였다.

5.3 안전관리 행위와 작업 생산성의 상관 관계

<Fig. 9>은 안전관리로 인한 시간 압박을 받는 상황과 유도된 스케줄 변경된 작업 시간이 현장에 영향을 주는 인과 관계를 나타낸다.

6. 결론

본 연구는 시스템 다이내믹스 모델링을 통하여 현장에서 실제로 행해지는 안전관리방안이 의도하지 않은 결과를 낳는 과정을 밝혔다. 첫째로, 안전 리스크를 줄이기 위하여 실행된 안전관리의 결과가 현장 혼잡도를 유발하여 다시 안전

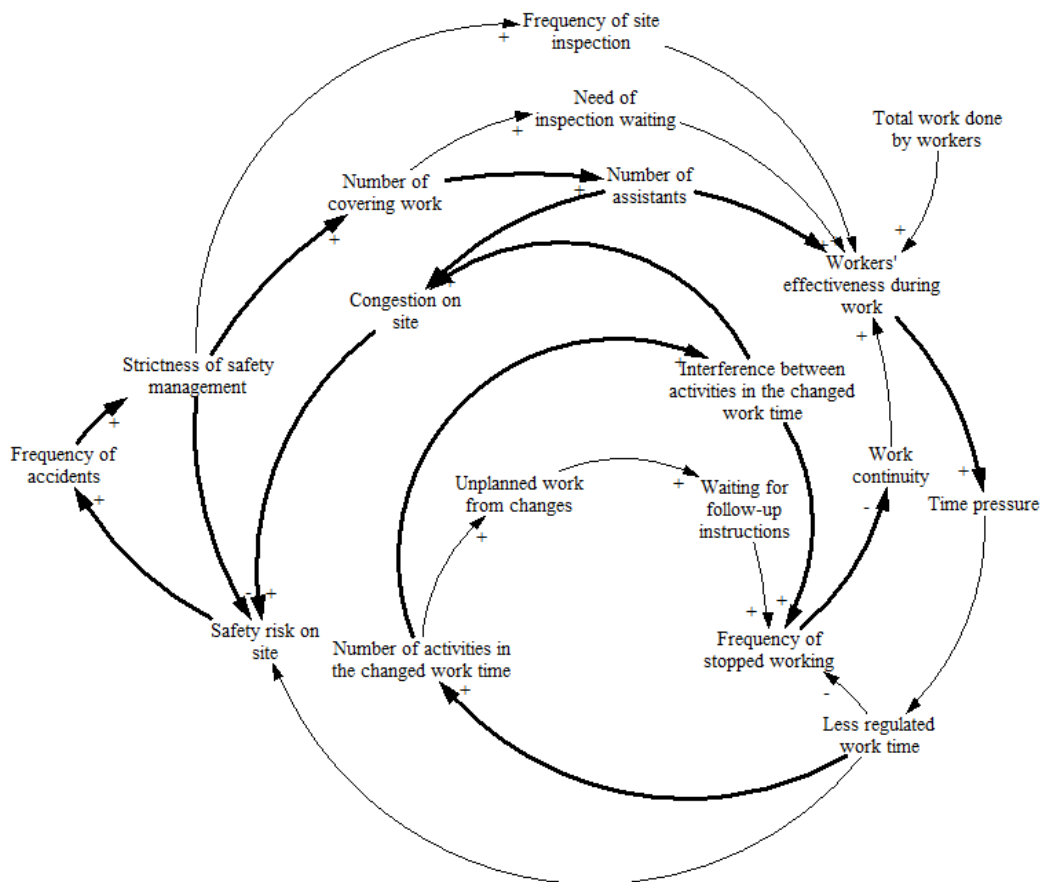


Fig. 8. Effect of field safety management on labor productivity

리스크를 낮게 뒀을 발견하였다. 둘째로 작업 연속성을 확보하기 위한 계획되지 않은 작업 시간에 이루어지는 작업이 오히려 작업 간 간섭을 만들고 이는 지속적인 작업 중단으로 이어짐을 보였다. 또한 진행 사항 논의 및 작업 지시 대기 등의 대기가 발생 오히려 작업 연속성을 저해하는 결과를 낳았고 이를 효율성 지표를 통해 확인하였다.

안전관리와 생산성의 상호 영향성에 대한 기초 연구인 본 연구의 결과물은, 적정 생산성 확보 가능한 안전 관리 방안 수립의 기반으로 인과지도를 도출하였다. 본 연구의 시스템 다이내믹스 모델은 연구 대상의 현장 조건에서 수립되어 모든 현장에의 적용은 어렵지만, 본 연구 결과를 통해 불안전 안전관리가 현재 생산성에 주는 영향을 알 수 있었다. 이를 통하여 안전관리 방안 계획 시 고려해보아야 할 요소를 살펴보고 실효성 있는 현장 안전관리에의 적용이 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 삼성전자 연구비 지원(과제번호: 0583-20200022)에 의한 결과의 일부임.

References

Ahn, S.H., Yu, J.H., and Kim, C.D. (2008). "The Work Condition Management Method for Improvement of Work Efficiency." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction Section*, 24(4), pp. 183-190.

Ahn, H.S. (2005). "A Study on the Improvement of the Safety Organizations for Construction Projects." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction Section*, 21(9), pp. 137-144.

Ahn, S.J., Kim, T.H., and Kim, J.M. (2019). "An Analysis of Factors Affecting the Safety of Tower Crane in Construction Site." *Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference*, pp. 44-45.

Ahn, S.J., and Song, S.H. (2010). "Integrated Safety Risk Management System on Construction Site Using System Dynamics Approach." *Journal of the Korea Safety Management and Science*, 12(3), pp. 1-11.

Charles, D. (2006). *Handbook of OSHA Construction Safety and Health*, 2nd ed, CRC Press, Florida.

Cho, Y.W., Seo, J.H., and Yang, K.M. (2008). "A Study on Management System Design of Plant Evaluation for

- Safety and Productivity.” *Journal of the Korea Safety Management and Science*, 10(1), pp. 197-204.
- Choi, B.J., Lee, H.S., Park, M.S., Kim, H.S., and Hwang, S.J. (2013). “4D BIM based Workspace Planning Process in Building Construction Project.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 14(5), pp. 175-187.
- Chung, B.H., and Kim, S.D. (2006) “Improvement Plan and Analysis of Construction Safety Management for Risk Management.” *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 6(4), pp. 53-60.
- De Macro A., Rafele C., and Thaheem M. (2016). “Dynamic Management of Risk Contingency in Complex Design-Build Projects.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(2), pp. 1-10.
- Dozzi, S.P., and Abourizk, S.M. (1993). Productivity in Construction (NRCC-37001). Ch.2, National Research Council Canada.
- Georgy, M.E., Chang, L., and Zhang, L. (2005). “Engineering performance in the US industrial construction sector: A publication of the american association of cost engineers.” *Cost Engineering*, 47(1), pp. 27-36.
- Ha, G.J., Ha, M.S., and Yi, D.R. (2019). “A Study on the Effective Management Methods of Craftsmen through Job Environment and Productivity Analysis of Construction Craft Workers.” *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 35(12), pp. 173-180.
- Hasanzadeh S., and Jesus M. (2020). “Productivity-Safety Model: Debunking the Myth of the Productivity-Safety Divide through a Mixed-Reality Residential Roofing Task.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(11), pp. 1-16.
- Hass, C., O’Connor, J.T., Tucker, R.L., Eickmann, J., and Fagerlund, W. (2000) “Prefabrication and Preassembly Trends and Effects on the Construction Workforce. Report No. 10.” Center for Construction Industry Studies, University of Texas at Austin, Austin.
- Hu Y., Chan A., Le Y., and Jin R. (2015). “From Construction Megaproject Management to Complex Project Management: Bibliographic Analysis.” *Journal of Management in Engineering*, 31(4), pp. 1-11.
- Jeon, Y.D., and Lee, J.S. (2001). “A Calculation Method on the Loss of Labor Productivity due to Change Orders.” *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 18(8), pp. 91-98.
- Kang, J.Y., and Park, H.S. (2009). “Development of a Construction Performance Causal Map Using System Dynamics.” *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 9(2), pp. 63-68.
- Kim, B.S., Lee, Y.S., Hong, J.S., and Kim, J.J. (2008). “Development of the Strategy for Construction Production Improvement by System Thinking.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 9(6), pp. 156-163.
- Kim, J.Y., Choi, J.H., and Lee, S.H. (2011). “Factors Affecting the Losses of Domestic Construction Productivity and Strategies for Avoiding Them.” *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 27(2), pp. 113-124.
- Kim, K.T. (2009). “A Study on the Implementation of USN Technologies for Safety Management Monitoring of Architectural Construction Sites.” *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 9(4), pp. 103-109.
- Kim, T., and Han, H. (2017). “A study on Change and Direction of Safety and Health Awareness of Construction Administration.” *GRI Review*, 19(1), pp. 69-90.
- Kim, T.W., Lee, H.S., Park, M.S., and Yu, J.H. (2011). “Productivity Management Methodology Using Productivity Achievement Ratio.” *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(1), pp. 23-31.
- Kim, W.B., Park, S.I., Lee, R.H., and Seo, J.W. (2018). “A Case Study on the Application of Machine Guidance in Construction Field.” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 38(5), pp. 721-731.
- Kwak, S.M. (1995). “Policy Analysis of Hanford Tank Farm Operations with System Dynamics Approach.” Doctoral Thesis, MIT, Cambridge, MA, pp. 34-36.
- Lim, J.Y., Han, K.K., and Kim, S.K. (2008). “A Study of Client’s Role for Safety Management at Construction Sites.” *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 8(5), pp. 75-83.
- Lim, H.L., Lee, Y.D., Kim, J.H., and Kim, J.J. (2010). “A Study on Safety Management and Improve Method through Analysis of Disaster Cases in Construction,.” *Proceeding of Proceedings of Fall Annual Conference of the Korea Institute of Building Construction*, 10(2), pp. 163-166.
- Pyo, Y.M., Bae, S.Y., Ryu, H.H., and Lee, S.B. (2005). “The Study on the Analyses of Factors Decreasing Construction Labor-Productivity Using AHP Method.” *Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference*, pp. 141-147.
- Shou W., Wang J., Wu P., and Wang X. (2020). “Value adding and non-value adding activities in turnaround maintenance process: classification, validation, and benefits.” *Production Planning & Control*, 31(1), pp. 60-77.
- Son, C.B., and Lee, D.C. (2002). “An Analysis on the Factors Decreasing Productivity of Building Construction.” *Journal of Architectural Institute of Korea*, 18(12), pp. 125-132.

- Sterman, J.D. (1992). "System Dynamics Modeling for Project Management." Sloan School of Management, <http://web.mit.edu/jsterman> (Aug., 2003).
- Thomas, H.R., and Daily, J. (1983). "Crew Performance Measurement via Activity Sampling." *Journal of Construction Engineering and Management*, 109(3), pp. 309-320.
- Um, I.S., Lee, H.C., and Kang, J.Y. (2003). "Operational Efficiency Scheme of Mailing Center for Automation." *Proceedings of the Korean Operations and Management Science Society Conference*, pp. 999-1006.
- Xu, N., Liu Q., Ma L., Deng Y., Chang H., Ni G., and Zhou Z. (2020). "A Hybrid Approach for Dynamic Simulation of Safety Risks in Mega Construction Projects." *Advances in Civil Engineering*, 2020, pp. 1-12.

요약 : 안전하지 못한 환경은 작업속도를 지연시키고, 사고 발생 시 대응에 많은 시간을 소요하게 하여 건설공사의 생산성을 크게 저하시킨다. 반면, 지나친 안전관리를 오히려 생산성 저해 요인으로 지적하는 연구도 존재한다. 따라서 건설공사의 생산성을 저해하지 않는 적절한 안전관리는 성공적 공사 수행에 매우 중요한 요인이나, 안전관리와 생산성 상호 간 미치는 영향이 복잡하기에 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 시스템 다이내믹스를 활용하여 안전 관리와 생산성 영향 요인 간의 인과 모델을 구축하고, 효율성 지표를 통한 생산성 측정 및 분석을 진행한다. 이를 통해 과다 인원 투입으로 인한 현장 혼잡도 증가, 비정기적 안전 조치 및 비효율적 초과근무가 실제 작업에 투입되는 시간에 미치는 영향을 분석한다. 안전관리와 생산성의 상호 영향성에 대한 기초 연구인 본 연구의 결과물은, 적정 생산성 확보 가능한 안전관리 방안 수립의 기반으로서 건설산업 경쟁력 제고에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

키워드 : 생산성, 안전관리, 시스템 다이내믹스, 효율성 지표
