

# 건설 현장 생산성 향상을 위한 Lean 프로세스 개발과 적용에 대한 연구

김용표<sup>1</sup> · 정용호<sup>2</sup> · 이민재<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>삼성물산 건축토목사업부 수석 · <sup>2</sup>충남대학교 토목공학과 석사과정 · <sup>3</sup>충남대학교 토목공학과 교수

## Construction Lean Process Development and Application for Field Productivity Improvement

Kim, Yong-pyo<sup>1</sup>, Jeong, Yong-ho<sup>2</sup>, Lee Min-jae<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Senior Chief of Architectural Civil Engineering Division, Samsung C&T Corporation

<sup>2</sup>Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

<sup>3</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

**Abstract :** Practical and efficient application of lean construction, which has been proposed as an alternative to the limitations of traditional construction management methods, was developed to facilitate application on site and improve productivity through the fusion of traditional construction management methods. The concepts of Lean Time and Lean Cycle Time, which are the principles of lean construction, were introduced to eliminate waste and smooth flow production and pursuit of perfection, and the goal of establishing and improving the criteria for measurement and improvement was established and the information collection template was configured and applied to ensure reliability of measurement and analysis. Based on this, the project feasibility, reliability, and continuous improvement process were applied to the Field case to verify its effectiveness.

**Keywords :** Lean, Productivity, Process, Cycle Time, Field Case

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경

맥킨지 보고서(2017)에 따르면 건설투자가 많은 41개국의 건설업 노동생산성 성장이 1%에 머물고 있으며 일부 선진국에서는 마이너스 성장이 나타나고 있는 것으로 보고되었다. 이는 전체산업 2.7%, 제조업의 3.6% 성장에 비해 저조한 실적을 보여주고 있으며 이와 같이 현저히 낮은 생산성 때문에 건설업계는 수십 년 동안 어려움을 겪고 있다. 낮은 생산성 문제를 해결하기 위해 학계와 업계의 다양한 연구와 현장의 노력이 있었지만 뚜렷한 개선의 효과를 찾아보기 어렵다. 이러한 문제점은 그동안 수행되었던 생산성 관련 주요 연구 결과에서도 나타나고 있다. 1993년 캐나다 국립 연구원(National Research Council Canada)에서 발표한 건설산업 생산성 연구 보고서, 2011년 Andreas Malisiovas의 생산

성 저하 요인, 2017년 맥킨지 글로벌 연구소, 2016년 보스턴 컨설팅 그룹에서 제시된 시공단계 생산성 문제의 공통점을 정리하면 1) 계획의 부실, 2) 시공과정에서의 정보수집 노력부족과 낮은 신뢰도, 3) 정보의 부실에 따른 측정 및 분석의 부실 등 PDCA 관리의 전반적인 문제점이 제시되고 있으며 24년간의 시간적 차이와 다양한 기술적 발전이 있었음에도 연구결과 내용의 변화가 미미하다. 이러한 연구결과는 결과적으로 그 동안의 생산성 향상을 위한 새로운 기술의 도입이 건설산업의 특성에 맞게 수용되지 못하고 있으며, 다양한 공사관리 방법론의 발전이 현장에 정착되지 못하고 있음을 반증하고 있다. 이러한 문제는 건설공사관리의 계획에서부터 수행, 측정, 평가와 분석 등 프로세스 전반에 구체적이며 효율적인 방안들을 요구하고 있다. 최근 이러한 요구에 보스턴 컨설팅 그룹(2016)과 맥킨지 글로벌 연구소(2017)에서 건설산업 생산성 향상방안을 구체적으로 제시하였다. 부실한 계획 문제는 엄격한 계획프로세스를 수립을 강조하며 린(Lean) 관리 방법 중 하나인 LPS (Last Planner System) 도입을 언급하였으며, 수행 단계에서의 생산성 향상은 철저한 준비작업을 강조하였다. 측정과 평가의 개선방안으로는 핵심성과 지표(Key Performance Index; KPI)의 재구성, 낭

\* **Corresponding author:** Lee, Minjae, Department of Civil Engineering, Chungnam University, Daejeon 34134, Korea

**E-mail:** LMJCM@cnu.ac.kr

**Received** September 6, 2019; **revised** February 21, 2020

**accepted** March 11, 2020

비제거와 변이의 최소화를 위한 린(Lean)시스템의 도입, 린 건설의 적극적 수용, 프로젝트 모니터링 강화를 제시하였다. PDCA 전단계에 공사관리 프로세스의 개선을 제시하고 있으며 대안으로 린 프로세스를 제안하고 있다. 그러나 공사현장에 어떻게 적용할지에 대한 실천적 방법론이 제시되지는 않았다. 이에 본 연구에서는 건설산업의 시공단계에서 계획의 신뢰성을 확보하며 신속하며 신뢰성 있는 정보수집과 실시간으로 측정 및 분석이 수행되어 실질적인 개선이 수행될 수 있는 구체적인 프로세스와 방법을 린 건설의 개념과 원리를 기반으로 제안하고자 한다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 건설 현장의 생산성을 향상 방안으로 린 건설의 개념과 이론을 바탕으로 시공계획 수립의 신뢰성을 확보하고, 시공과정에서 신속하게 정보를 수집하고, 측정분석이 효율적으로 수행되어 낭비가 제거되고 개선이 이루어지며 이러한 개선 행위가 지속될 수 있는 공사관리 프로세스를 제안한다. 제안된 프로세스는 현장 적용을 시도하여 효과와 효율성을 검증한다. 구체적인 연구는 다음과 같은 방법 및 절차에 의해서 수행되었다. 1) 린 건설의 이론과 선행연구를 고찰하여 건설현장 적용을 위한 시사점을 도출한다. 2) 기존 문헌 및 연구 고찰, 현장 경험을 바탕으로 계획에서부터 수행, 측정 평가 및 개선의 전반적인 시공관리를 수행할 수 있는 린 건설 프로세스를 제시한다. 3) 제시된 프로세스를 현장에 적용하여 효과를 검증하고 문제점을 도출한다.

## 2. 린 건설의 이론적 고찰

### 2.1 린 건설의 개념

린 생산방식은 일본의 토요타 자동차의 독창적인 생산방식인 TPS (Toyota Production System)를 MIT 국제 자동차 연구프로그램(IMVP) 연구원에서 미국 환경에 맞게 수정하여 린 생산(Lean Production)이라 명칭하였다. 린 생산이란 용어는 Womack 등에 의해 '세상을 바꾼 기계'라는 책을 통하여 소개되었다. 린의 이론적 토대라 할 수 있는 린 싱킹(Womack & Jones, 1996)에서는 '린 경영은 기업의 균사를 제거하여 생산성을 높이고 가치를 창출하는 전략이며, 생산 철학이다'라고 린을 정의하였다. 또한 '린의 핵심 사상은 낭비의 제거이며 끊임없는 진화를 통해 새로운 낭비를 찾는 창의적인 관점과 낭비를 제거하기 위한 새로운 문제 해결 역량을 확보하는 것'이라며 린이 정해진 방식이나 시스템이 아님을 명확히 하였다. 이러한 린의 개념을 건설 산업에 접목하여 1992년 핀란드의 Koskela, 버클리 대학의 Tommelein, Ballard 등에 의해 린 건설이 주창되었다. 린 건설은 건설공

사를 수행하는데 있어 린 생산의 핵심인 '낭비제거'와 '흐름 생산'에 중점을 두고 있다. 린 건설 학회(Lean Construction Institute) 창시자인 Howell (1999)은 "린 건설의 첫 번째 목표는 건설생산 역학의 이해와 자원의 조달과 생산사슬에서의 상호의존성과 변이의 영향을 이해하는 것이다"라며 건설 생산구조가 단순한 하나의 인과관계가 아니라 유기적인 상호 관계와의 영향임을 이해하여 전반적인 생산 흐름을 원활하게 유지하는 것이 우선되어야 함을 강조하였다. 김창덕 (2004)은 린 건설을 '낭비를 최소화하는 가장 효율적인 건설 생산 시스템'으로 정의하였으며, 이지연(2006)은 린 건설을 '린 생산 시스템에서 기원하며, 핵심 목표는 린 원리를 통해 최소비용과 최소의 기간으로 결함, 낭비, 재고가 없는 생산을 통해 궁극적으로 고객의 만족을 이끌어 낸다'고 표현하였다. Koskela et al. (2002)은 린 건설의 포괄적 개념은 '가치를 극대화하기 위해 자원, 시간, 노력의 낭비를 최소화하는 생산 시스템의 설계다'라고 린 건설의 창조성을 강조하였다. 린 건설은 가치를 구체화하고 가치 흐름을 분석해 프로세스 상에 내재되어 있는 비가치 작업을 최소화하며, 흐름 생산과 당김 생산을 통해 지속적으로 개선으로 완벽을 추구하는 방식이다. 이에 린 건설은 가치의 구체화, 가치 흐름의 매핑, 흐름 생산, 당김 생산, 완벽성 추구라는 5가지 원리를 제시하고 있다.

### 2.2 린 건설의 기존연구고찰

린 건설은 낭비를 제거하여 프로젝트 단위의 흐름을 최적화를 목적으로 한다. 따라서 낭비를 이해하는 것이 린의 핵심이다(Womack & Jones, 1996). Koskela et al. (2002)은 생산과정의 작업을 이동, 대기, 처리, 검사 4가지로 구분하여 처리 작업을 제외한 이동, 대기, 검사를 비가치 작업으로 규정하여 건설산업의 낭비요소를 제시하였다. 낭비를 구체적으로 제시한 연구로서는 Formoso et al. (2002)은 빌딩현장 사례 분석을 통해 과잉생산, 대체, 대기, 변경, 지나친 프로세스, 재고, 이동, 하자, 기타(날씨, 사고)로 분류하였으며, Alarcon (1994)은 자원 낭비, 계획 부족, 의사결정 미흡, 비효율적 감독 및 통제 등을 제시하였다. 김창덕 외(2006)는 VSM (Value Stream Method)기법을 활용한 커튼월 공사의 설계 프로세스 개선 사례를 제시하며 이해관계자 간 의사소통 부재, 관리의 부재를 낭비의 주요 요인으로 제시하였다. 김용우 외(2006)는 터널 굴착공사의 낭비요소로 자재 수급 지연, 선행공종 미완료, 보수적 조직문화, 관리자의 역량 부족 등을 현장 사례 연구결과로 제시하였다. Koskela (1992)는 낭비를 결함, 재작업, 설계 실수, 변경 지시의 횡수, 안전 비용, 지나친 자재사용 등을 제시하였다. 낭비 도출에 대한 다양한 사례연구에서 보여주듯 낭비요소는 현장의 상황이

나 공사의 특성, 주변 환경 등에 따라 다양하게 도출되고 있어 규정하기 어렵다. 따라서 낭비의 도출은 계획단계에서의 다양한 공사 관계자와 전문가, 축적된 정보를 바탕으로 낭비를 도출하고 해결방안을 모색하며, 시공과정에서 정보 수집과 치밀한 분석으로 가시적인 요인과 함께 비가시적인 낭비 요소의 도출과 정량화를 통한 통제의 노력은 지속되고 일일 시공관리의 중요한 관리 요소로 정착되어야 한다(Dozzi, S.P. & AbouRizk, S.M., 1993).

Koskela (1992)는 도출된 낭비요인의 적절성 판단은 측정을 통해서 가능하며, 측정은 개선 가능성을 정확히 파악하고 달성된 진행상황의 모니터링을 가능하게 한다. 따라서 린 건설에서 측정은 극도로(extremely) 중요하다고 강조하였다. 또한 낭비 감소, 가치 증가, 변동성 감소, Cycle Time 감소를 성과측정의 원리로 제시하였으며 이를 위해 측정의 단순화, 투명성, 전체 흐름에 집중, 지속적인 개선을 강조하였다. 문효기 외(2008)는 린 건설 프로세스 성능의 성과 지표로 제시한 TFV (Transformation Flow Value)의 개념을 근거하여 Transformation 관점의 전통적인 생산성, Flow 관점의 신뢰성, Value 관점의 효율성의 성과측정 방법을 PPC (Planned Percent Complete; 명일 작업계획 달성률)를 바탕으로 제시하였다. 김용우 외(2006)는 터널 현장 성과측정 방식으로 PPC를 활용하는 방안을 제시하였다. 김찬현(2000)은 건설 현장에 대해 PP&C (Production Planning and Control) 적용방안을 세부작업 계획과 작업성취도 측정의 실무적용이 가능하도록 예시를 들어 구체적으로 제시하였다. 그러나 대부분의 성과측정이 작업 완료 여부의 측정이 이루어지고 있다(윤정숙 외, 2008). 이러한 결과적 성과측정은 과정에서의 상세한 문제점을 도출하기 어렵고 왜곡된 결과를 도출할 수 있다. 따라서 과정 중심적 성과측정을 위한 구체적인 노력이 필요하다. 또한 성과 측정은 측정의 기준이 되는 계획의 신뢰도가 높다는 가정을 근간으로 한다. 그러나 다양한 성과 측정 연구에서 계획의 검증을 시도한 사례는 찾지 못하였다. 구분성(2008)의 국내 토목, 플랜트, 건축현장 3개 현장의 계획 신뢰도 평가 결과 PPC (Planned Percent Complete; 명일 작업계획 달성률) 평균 79%와 PAT (Percent Anticipate Task; 1주 이내 단기 작업계획 달성률) 평균 16%라는 심각한 계획 부실의 실태는 시공에 앞서 계획의 객관성과 신뢰성을 확보가 시급함을 인식할 수 있다.

이론적 고찰에서 제시하는 시사점을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 계획의 신뢰성과 객관성이 확보될 수 있는 구체적 방법의 제시가 필요하다.

둘째, 낭비요소는 다양하며 일률적으로 규정지을 수 없다. 따라서 낭비의 도출과 통제는 일상적인 공사관리 업무로 정착되어야 한다.

셋째, 측정 결과가 구체적인 분석과 개선방안의 도출이 가능하도록 측정요소가 핵심으로 단순화되고 구체화되어야 한다.

넷째, 완벽의 추구에 맞는 이상적인 기준이 수립되어야 하며 핵심 성과 지수의 기준으로 설정하여 도달하고자 하는 목표를 구체화한다.

### 3. 시공단계 린 프로세스 구축

건설산업 시공단계에 린 건설 프로세스를 구축하기 위해서는 린 건설의 핵심인 5가지 원리를 현장에 구체적으로 적용할 수 있도록 상세한 정의가 필요하다. 이를 위해 우리는 우선적으로 가치를 정의해야 한다. 여기서 가치란 고객에 의해 정의되며(Womack & Jones, 1996) 고객이란 사용자를 의미한다. 따라서 시공과정에서 공사 단계별 고객은 해당 공사 완료 후 사용하게 될 후속 공종으로 규정할 수 있다. 결과적으로 가치는 후속 공종이 원활하게 공사를 수행할 수 있도록 공간과 시간을 제공하는 활동으로 정의된다. 따라서 현장에서 가치의 구체화란 생산에 필요한 활동 즉 액티비티와 액티비티 속성으로 정의가 가능하며 직접적인 작업 외에 승인, 인·허가, 계약 등 간접적인 활동을 포함한다. 또한 액티비티 속성에는 각각의 액티비티에 필요한 최적의 자원량과 이상적인 작업시간이 포함되며 핵심 성과 지수(KPI)를 설정하는 기초가 된다. 가치 흐름 매핑은 액티비티의 작업 흐름을 연결하는 공정표로 정의한다. 여기서 작성되는 공정표는 이상적인 작업 흐름을 표현하며 궁극적인 목표로 핵심 성과 지수(KPI)를 도출하는 기준이 된다. 흐름 생산은 시공과정이며 정보 수집 및 측정분석을 통하여 부분적인 개선과 함께 전체 공사 흐름을 개선한다는 관점에서 낭비를 제거하여 원활한 공사가 수행되도록 함을 의미한다. 당김생산은 적기에 공정을 마무리하여 역지로 후속 공종이 수행되지 않도록 하는 관리를 의미한다. 완벽의 추구는 지속적 반복적 측정과

Table 1. Five Principles of Lean Construction

Principle	Application
Specify Value	Activity and Activity Attribute Required for Production Activity Attribute include resource and cycle time (Use as basic data for KPI) It includes activities necessary to perform preparatory work, authorization, contract, etc.
Identify The Value Stream	Link of Activity (Schedule) Present ideal flow without waste element in activity (detailed target schedule, KPI setting)
Flow	Eliminate waste from flow perspective Continuous waste removal and maintaining productive flows (measuring and improving)
Pull	Construction with optimum quality at the right time (Schedule shorten and compliance)
Perfection	Pursuing ideal construction goal without waste (schedule, cost)

분석, 개선을 통하여 이상적인 공정계획의 목표를 달성함을 의미한다(Table 1).

첫째, 건설 현장의 상황에 맞게 정의된 린 건설의 다섯가지 원리를 적용하고 선행 이론 고찰 결과에서 도출된 시사점을 수용하는 린 프로세스로 제시하며 구체적인 내용은 다음과 같다.

첫째, 모든 계획은 객관성과 신뢰성이 확보되도록 계획의 근거에 대한 구체적인 문서화를 통한 계획의 객관성을 검증한다. 이는 계획의 수립 과정에서 발생할 수 있는 개인, 조직, 경험의 편견과 오류, 정보의 오류 등 다양하게 산재되어 있는 판단 근거의 오류를 검증한다. 또한 수립된 계획이 고객의 요구 조건과 부합 여부 검토를 수행하는 계획의 적정성

검증을 수행한다.

둘째, 적정성 검증결과도 결과적으로는 불확실한 가정과 예측을 기반으로 하고 있다. 따라서 시공과정에서 예측한 상황의 정확성에 대한 검증이 필요하며 이는 시공 초기에 신속하게 수행되어야 한다. 즉 적정성 검증이 완료된 계획에 대해 시공 초기에 적합성 검증을 수행하는 것이다. 검증 항목은 생산성, 제약조건, 가정·가설의 정확성, 낭비요소, 측정요소, 측정방법 등에 대한 적합성을 검증한다.

셋째, 지속적 개선과 완벽을 위한 반복적 지속적 검증과 개선을 수행한다.

또한, 계획의 적정성, 적합성, 지속적 개선을 수행하기 위한 세부 프로세스의 특징은 다음과 같다.

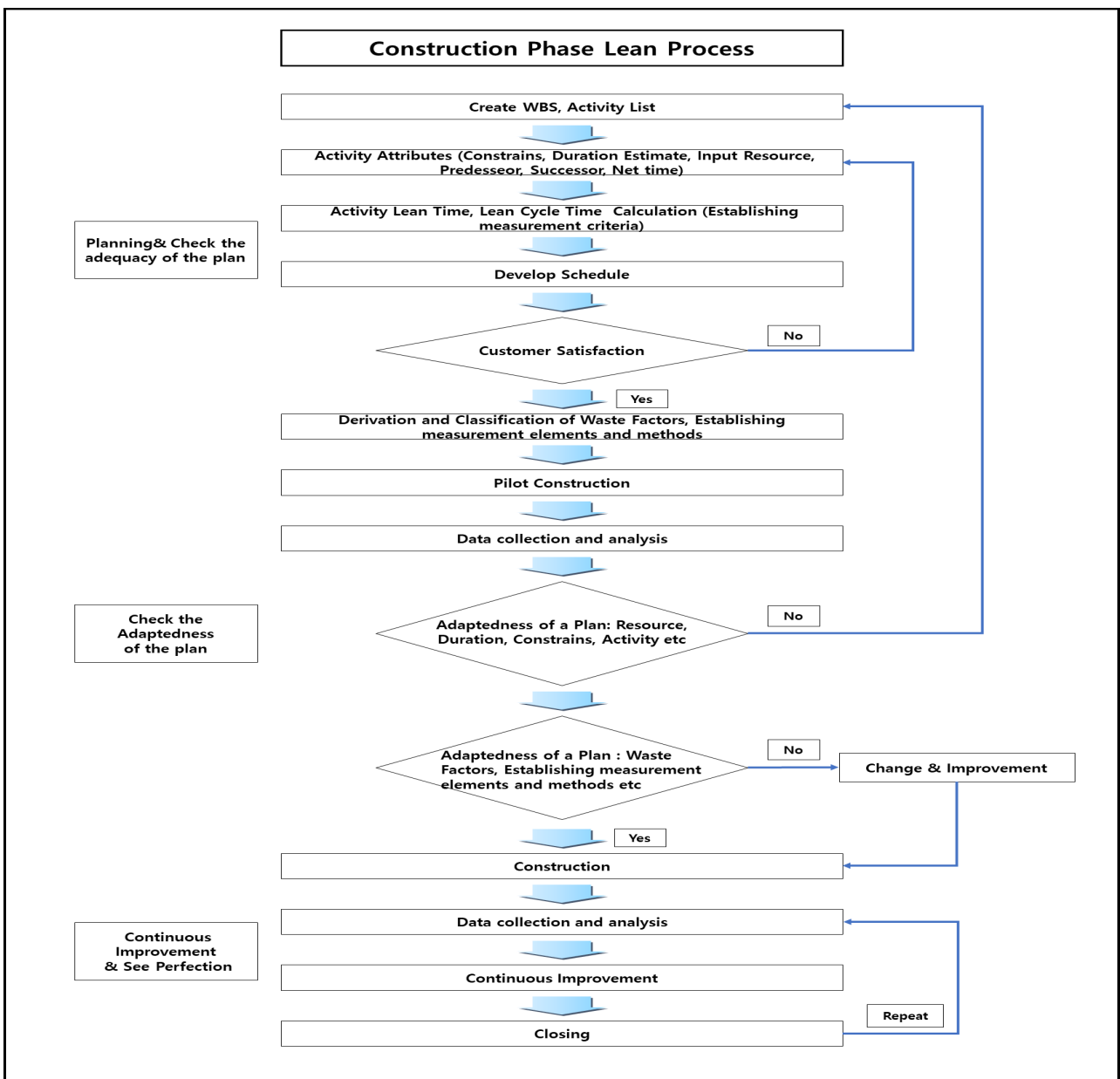


Fig. 1. Construction Phase Lean Process Flow Diagram



첫째, 가치를 액티비티와 함께 인·허가, 승인, 계약 등 준비작업을 포함하여 정의한다.

둘째, 액티비티 속성은 검증된 순작업 시간을 포함한다.

셋째, 낭비를 도출하는 측정기준은 사이클 타임으로 정한다.

넷째, 액티비티의 순작업 시간(Net Time)을 검증된 장비 효율, 정보, 장비기사 및 작업자의 의견과 경험등을 종합하여 정한다. 여기에 필수적인 이동시간, 휴식시간 등이 포함된 이상적인 작업시간을 정하고 린 타임(Lean Time)으로 정한다.

다섯째, 병행 작업, 중복 작업 시간을 계산한 이상적인 사이클 타임을 도입하여 린 사이클 타임(Lean Cycle Time)으로 정하며 핵심성과지표(KPI)로 제시한다.

여섯째, 측정은 린 사이클 타임을 기준으로 수행하며 성과지수는 '실작업 사이클 타임/린 사이클 타임'으로 정하며 목표지수는 1이다.

일곱째, 공정계획은 Bottom-up 방식으로 수립한다. 단위 액티비티의 작업시간을 정하고 액티비티의 집합으로 공종의 일정을 정한다. 이를 바탕으로 공정표를 작성한다.

여덟째, 성과측정의 기준 수립에는 반장 및 실 작업자의 의견을 적극적으로 반영한다.

아홉째, 린 타임, 린 사이클 타임도 현장 시공단계 검증을 거쳐 변경한다.

열 번째, 낭비요소의 도출은 현장 특성에 맞게 작업 참여자의 의견을 수렴하여 정하며 시공과정에서 지속적으로 개선한다.

이상의 내용을 반영한 시공단계 린 프로세스 흐름도는 <Fig. 1>으로 제시하였다.

## 4. 사례 연구

본 연구에서는 앞서 제시한 프로세스를 정해진 절차에 따라 건설현장에 적용하는 사례연구를 수행한다.

### 4.1 프로젝트 개요

대상 현장의 설정은 프로세스 적용의 용이성을 위해 단순 반복작업이 수행되는 수직구 굴착 공사를 대상으로 수행하였으며 프로젝트 개요는 <Table 2>와 같다.

Table 2. Project Overview

Construction Name	Construction Period	Major Progress	Method
OOO Industry Complex Phase 2	210 days	Retrieval Shaft (D=14.9M H=19M)	non-vibration rock breaking

수직구 토질은 초기 13m는 토사이며 19m는 연·경암으로 구성되어 있다. 1회 굴진장은 1m이며 암반굴착 공법은 무진동 할암으로 설계되어 있다. 본 연구에서는 암반굴착 공사를 적용 대상으로 연구를 수행하였다. 작업 사이클은 천공 - 할암 - 파쇄 - 상차운반 - 지보재 설치 - 슛크리트 타설의 단순 반복 작업이 수행되는 현장이며 주요 공종 및 자재, 장비, 인력은 고정 배치며 다음과 같다<Table 3>.

Table 3. Major operation quantity and resource input

major process	Quantity	Major equipment	manpower required
rock breaking shotcrete rock bolt (5m) Lattice Girder	3,660m <sup>3</sup> 157m <sup>3</sup> 590EA 15set	a crane of 80t a backhoe 06 a hydraulic drill Rock splitter 1set a shotcrete machine	7 people / 1 group

### 4.2 시공단계 Lean Process 적용

본 사례연구는 고안된 시공단계 린 건설의 프로세스의 실질적 적용을 통한 가능성과 효용성을 검증하는 단계로서 3개월간 4회 굴착 cycle에 적용하였다. 구체적인 절차로 초기 수립된 계획의 적정성 검증 및 변경을 수행하고 다음으로 수립된 계획을 시험시공을 통하여 적합성 검증을 수행한다. 마지막으로 반복적 측정 및 개선을 수행한다.

#### 4.2.1 계획의 적정성 검증

##### 1) 액티비티 및 속성 도출(가치의 구체화)

현장에서 수행되는 작업을 상세하게 분류하여 반드시 필요한 작업인 액티비티(가치)를 예측 가능한 모든 내용을 도출하였다. 현재 투입된 장비와 인원의 작업 생산성 추정은 경험 있는 작업자와 반장, 장비기사, 시공사 직원의 의견,

Table 4. Derivation of Activity and Net time

Activity	1cycle	Net time	Other
Rock mass Inspection		0.5 hr	-
Surveying		0.5 hr	-
Rock Drilling	Depth 1.2m 500 hole	3min/hole, 1500 min = 25 hr	Drill Machine
Rock bolt hole Drilling	Depth 5m 37 hole	5min /hole,, 185 min = 3 hr	Drill Machine
Rock split	500 hole	2min./hole 1000 min = 16.5 hr	Rock splitter 1set
B / H Breaker	210 m <sup>3</sup>	10 m <sup>3</sup> /min 210*10=2100 min 35 hr	-
Loading & Carry	360m <sup>3</sup> (disturbed rock Volumn)	2min/number 144*2= 288 min 5 hr	Bucket 2.5 m <sup>3</sup>
Install Rock bolt	37 hole	5 hole/min, 37*5= 185 min 3 hr	-
Install Lattice girder	1 set	3 hr	-
Install Wire mesh	84 m <sup>2</sup>	3 hr	-
Placing Shotcrete	13 m <sup>3</sup>	2 hr	-
Install Temporary stair	-	5 hr	-

기존 시공사례 등을 토대로 순 작업시간(Net Time)을 작성하였다(Table 4).

2) 린 타임 및 린 사이클 타임 도출(가치흐름 맵핑)

수직구 작업의 특성상 좁은 공간에서 작업 간 발생하는 필수적인 작업 교대를 위한 이동, 장비 교체, 휴식, 검사를 작업시간에 포함한 이상적인 작업시간인 린 타임을 도출하였다. 사례 현장의 경우 계획단계에서 중복 작업, 동시 작업은 안전상의 이유로 배제되어 린 타임의 합이 린 사이클 타임으로 산정되었다(Table 5).

Table 5. Derivation of Lean Time & Lean Cycle Time

Activity	NetTime	Inspection	Waiting	Move	Lean Time (hr)
Rock mass Inspection	0.5			0.5	1.0
Surveying	0.5			0.5	1.0
Rock Drilling	25		3(Rest)	1	29
Rock bolt hole Drilling	3		1.5(Include to change bit)		4.5
Rock split	16.5		2(Rest)	0.5	19
B / H Breaker	35		6(Rest)	1	42
Loading & Carry	5		1(Rest)		6
Install Rock bolt	3		0.5(Rest)	0.5	4
Install					
Lattice girder	3		1(Rest)	0.5	4.5
Install Wire mesh	3		0.5(Rest)	0.5	4
Placing Shotcrete	2	0.5 (Inspection)		1	3.5
Install					
Temporary stair	5		1(Rest)	1	7
Lean Cycle Time					125.5

도출된 린 사이클 타임은 125.5h이며, 8h/일 작업을 적용 1m 굴착에 16일(순작업일수)이 소요된다는 결과가 나왔다(Fig. 2).

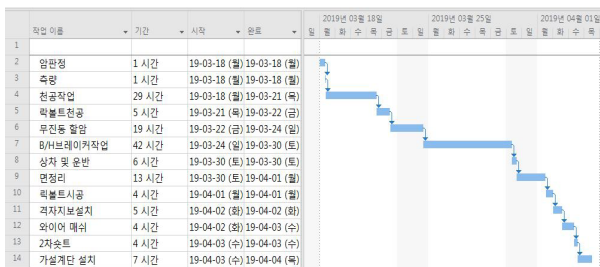


Fig. 2. Lean Cycle Time

3) 예측공기 검토(가치흐름 맵핑)

공기 검토 결과 계획 공기 210일(휴일포함)에(Fig. 3) 실 소요 공기 342일(6일/주)로(Fig. 4) 132일 지연이 예상되었다. 따라서 작업시간 연장, 작업조 추가 투입 등 전반적인 재검토를 수행하였다.



Fig. 3. Initial Schedule

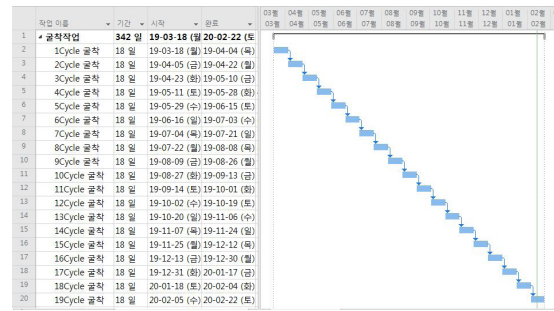


Fig. 4. Verification Schedule

4) 계획 적합성 검증결과

현장 여건상 가능한 방안 검토 결과 천공, 활암, 브레이커 작업의 2shift 운영(작업시간 16시간/일)으로 작업계획을 변경할 경우 공기 준수가 가능하였다(Table 6).

Table 6. Predicted Lean cycle time with concurrent operations and 2 shift operations

Activity	Original Lean Time (hr)	Change Lean Time (hr)
Rock mass Inspection	1	1
Surveying	1	1
Rock Drilling	29	15 (2shift)
Rock bolt hole Drilling	4.5	2.5 (2shift)
Rock split	18	9 (2shift)
B / H Breaker	42	21(2shift)
Loading & Carry	6	6
Install Rock bolt	4	4
Install Lattice girder	4.5	4.5
Install Wire mesh	4	4.
Placing Shotcrete	3.5	3.5
Install Temporary stair	7	7
Lean Cycle Time	125.5	78.5

그러나 2Shift 운영에 대한 준비 부족과 발주처 협의 지연, 본 작업과 연관관계에 있는 굴진 작업의 공기 지연이 예상된다는 사유로 현장에서 변경 없이 작업 착수를 결정하였다.

### 4.2.2 낭비 분류 및 정보 수집 방안 수립

낭비 분류는 현장소장과 주요 공사 관련자들의 의견수렴을 거쳐서 현장 특성에 맞는 6가지로 분류하였으며 주요 항목은 다음과 같이 도출되었다. 1) 대기: 과도한 점검 및 검측, 작업 투입 지연, 자재 수급지연, 휴식시간 과다 등. 2) 수리: 장비 고장, 부품 교체. 3) 계획 오류: 자원 계획 오류, 시공방법 오류, 시공순서 오류. 4) 재시공: 품질 불량, 시공 오류, 설계변경. 5) 불안전: 안전사고, 규정 미준수에 따른 교육 및 공사 중단 6) 관리 미흡: 의사결정 지연, 공중간 연결점 관리 미흡, 작업지시 오류, 작업 중 변경 지시, 작업자 교체, 장비 교체. 또한 낭비의 도출을 위한 정보 수집은 30분 단위로 작업별 현장 상황을 정리할 수 있도록 하였다. 현장에서 실시간 정보 수집이 용이하도록 타임 테이블(Time Table)을 활용하여 정리하였다(Fig. 5).

액티비티	30.5	31	31.5	32	32.5	33	33.5	34	34.5	35	35.5	36
전공	시	시	시	시	시	시	고장	재	양수기 고장			
락볼트전공												
함암												
브레이커												
상자및 운반												

액티비티	42.5	43	43.5	44	44.5	45	45.5	46	46.5	47	47.5	48
전공	시	재	시	시	시	시	시	시	시	시	시	시
락볼트전공												
함암												
브레이커												

Fig. 5. Time Table

### 4.2.3 계획의 적합성 검증(Pilot 시공)

계획의 적합성 검증을 위하여 시공 담당자 및 연구자가 함께 시공과정의 측정을 시행하여 액티비티 누락 여부, 넷 타임과 린 타임 산출 기준의 현장 적합성을 검증하였다. 측

Table 7. Adaptedness Measurement Results of Initial Plan

Activity	Net Time (Calculation base Adaptedness measurement result)	Lean Time (Calculation base Adaptedness measurement result)
Rock mass Inspection	0.5 hr	-
Surveying	0.5 hr	-
Rock Drilling	3min/hole,	Increase the move time of the four-time division operation
Rock bolt hole Drilling	5min/hole,	
Rock split	1.5min./hole	Increase the move time of the four-time division operation
B / H Breaker	10 mi/h	Increase the move time of the four-time division operation
Loading & Carry	2number / min	Increase the move time of the four-time division operation
Ground Leveling	4 hr	Missing
Install Rock bolt	5min/ hole,	-
Install Lattice girder	3 hr	-
nstall Wire mesh	3 hr	-
Placing Shotcrete	2 hr	-
Install Temporary stair	5 hr	-

정 및 검증결과 바닥 정지작업 누락과 천공·함암·암깨기·상차·운반의 4회 분할 작업에 따른 작업 간 이동시간의 증가가 확인되었다(Table 7). 각각의 액티비티의 넷 타임의 변동은 없었다.

린 타임의 적합성 검증결과에 따라 린 타임과 린 사이클 타임을 재설정 하였으며 결과적으로 초기계획 대비 10h의 린 사이클 타임이 증가되었다. 전체 공기 또한 20일이 증가되어 362일로 변경되었다(Table 8).

Table 8. Change Lean Time and Lean Cycle Time

Activity	Net Time	Inspectionk	Waiting	Move	Lean Time (hr)	Lean Cycle Time (hr)
Rock mass Inspection	0.5			0.5	1	1
Surveying	0.5			0.5	1	1
Rock Drilling	25		3(Rest)	2	30	30
Rock bolt hole Drilling	3		1.5		4.5	4.5
Nonvibration						
Rock split	16.5		2(Rest)	1.5	20	20
B / H Breaker	35		6(Rest)	2	43	43
Loading & Carry	5		1(Rest)	2	8	8
Ground Leveling	4		0.5(Rest)	0.5	5	5
Install Rock bolt	3		0.5(Rest)	0.5	4	4
Install						
Lattice girder	3		1(Rest)	0.5	4.5	4.5
Install Wire mesh	3		0.5(Rest)	0.5	4	4
Placing Shotcrete	2	0.5		1	3.5	3.5
Install						
stair construction	5		1(Rest)	1	7	7
Total Cycle Time					135.5	135.5

### 4.2.4 반복적 측정 및 개선(흐름생산, 완벽추구)

1~3 cycle 시공과정에서 지속적 측정을 통한 낭비도출 및 분석을 통한 개선을 시행하였다. 측정 결과 1Cycle에서는 초기 시공에 따른 시행착오로 인한 대기시간, 고장, 작업계획의 오류, 재시공, 빈약한 관리 등 많은 낭비 시간이 발생하였다. 대책으로 경험 많은 관리자 추가 투입, 예방점검, 작업 방법 변경을 시행하였으며 지속적인 정보 수집 및 분석 작업은 결과적으로 낭비 시간의 감소를 가져 왔다(Table 9, 10, 11).

그러나 적합성이 검증된 린 타임도 공사 수행 과정에서 다양한 변인으로 낭비요소와 관계없는 관리하기 모호한 영향에 따라 작업시간의 변화가 발생한다. 예를 들어 암반의 파쇄가 심하여 함암작업 수량이 감소되고 브레이커 작업으로 굴착을 시행되는 경우, 지하수 용출이나 과굴착으로 인한 숏크리트 타설량의 증가, 암질의 변화에 따른 천공작업 속도의 변화 등에 따라 당초 계획되었던 린 타임의 변화가

Table 9. 1CYCLE Waste Element Extraction

Activity	Net work Time	Waste						Lean Time (hr)	Real Time (hr)
		Wating	Repair	Poor Plan	Reconstruction	Unsafety	Poor Management		
Rock mass Inspection	1							1	1
Surveying	1							1	1
Rock Drilling	31	1	11				12	30	55
Rock bolt hole Drilling	4	2					1	4.5	7
Rock split	15.5							20	15.5
B / H Breaker	45	2	1	5			4	43	57
Loading & Carry	8			5				8	13
Ground Leveling	6	1						5	7
Install Rock bolt	4							4	4
Install Lattice girder	4.5	1						4.5	5.5
Install Wire mesh	4							4	4
Placing Shotcrete	3.5							3.5	3.5
Install Temporary stair	8				3.5			7	11.5
Total Cycle Time	135.5	7	12	10	3.5		17	135.5	185

Table 10. 2CYCLE Waste Element Extraction

Activity	Net work Time	Waste						Lean Time (hr)	Real Time (hr)
		Wating	Repair	Poor Plan	Reconstruction	Unsafety	Poor Management		
Rock mass Inspection	1							1	1
Surveying	1							1	1
Rock Drilling	31	3	2				1	30	37
Rock bolt hole Drilling	4							4.5	4
Rock split	23	2					2	20	27
B / H Breaker	44			4		2		43	50
Loading & Carry	8	5	4					8	17
Ground Leveling	5.5							5	5.5
Install Rock bolt	3							4	3
Install Lattice girder	3							4.5	3
Install Wire mesh	2							4	2
Placing Shotcrete	3.5							3.5	3.5
Install Temporary stair									
Total Cycle Time	129							128.5	154

Table 11. 3CYCLE Waste Element Extraction

Activity	Net work Time	Waste						Lean Time (hr)	Real Time (hr)
		Wating	Repair	Poor Plan	Reconstruction	Unsafety	Poor Management		
Rock mass Inspection	1							1	1
Surveying	1							1	1
Rock Drilling	31	1	1				1	30	34
Rock bolt hole Drilling	4						1	4.5	4
Rock split	23							20	23
B / H Breaker	40	2	2	6		2		43	52
Loading & Carry	8	4						8	12
Ground Leveling	6							5	6
Install Rock bolt	4							4	4
Install Lattice girder	3							4.5	3
Install Wire mesh	4							4	4
Placing Shotcrete	4							3.5	4
Install Temporary stair	8							7	8
Total Cycle Time	137							135.5	156

발생하였다. 따라서 이러한 필수적인 변화를 수용하고 낭비를 도출하기 위해서 초기에 계산된 린 타임과 별도로 작업 상황의 변화를 수용하는 최적의 작업시간을 확인하여 Net Working Time으로 정의하였다. 따라서 Net Working Time과 낭비 시간을 포함하여 실 작업시간(Real Time)으로 정하였으며 결과적으로 린 사이클 타임이 아닌 Net Working

Cycle Time이 핵심 성과 지수의 기준으로 설정되었다.

### 4.3 시공단계 린 프로세스 적용결과

측정 결과 낭비시간이 50.5h에서 20.5h으로 감소되었으며 Net Working Cycle Time 대비 Real Cycle Time을 나타내는 성과지수도 0.732에서 0.878로 상향 되었다<Table 12>.



Table 12. Results of All Cycle Lean system application

Cycle	1	2	3
Real Cycle Time(hr)	185	154	156
Net Working Cycle Time(hr)	135.5	129	137
Performanc Index	0.732	0.837	0.878

\* Performance Index = Net Working Cycle Time / Real Cycle Time

## 5. 결론

건설산업 시공단계 생산성 향상을 위한 현장 상황에 맞게 구체적이며 현실적인 공사관리 프로세스를 린 건설의 개념과 원리를 활용하여 제시하였다. 또한 역동적인 건설 현장에 적합하게 측정과 분석은 단순하고 투명하며 실시간으로 이루어질 수 있도록 하는데 중점을 두었다. 이를 위해 우선적으로 린 건설의 개념과 원리를 시공현장 적용이 용이하도록 현장의 시각에서 재해석하였다. 고객을 후속공종으로 정의하고 가치를 액티비티로 규정하였으며 가치의 흐름은 공정표로 제시하였다. 또한 측정과 분석의 신뢰성과 투명성을 확보하기 위해 이상적인 작업시간을 도출하여 ‘린 타임’과 ‘린 사이클 타임’이라 정하고 측정과 분석의 기준이며 목표로 설정하였다. 계획의 신뢰성이 전체적인 공사관리의 신뢰성을 확보하는 근간임을 인식하여 계획에서의 편견과 오류를 통제할 수 있도록 계획의 적정성 검증, 계획의 적합성 검증을 시행하여 계획의 검증을 강화하였다.

제시한 시공단계 린 프로세스를 현장에 적용하였으며 결과는 다음과 같다.

첫째, 적정성 검증 프로세스를 적용하여 계획단계에서 개인, 조직, 경험의 편견과 오류를 최소화할 수 있었으며 이로 인해 신뢰성이 향상된 계획을 수립할 수 있었다.

둘째, 시공 초기 현장 적합성 검증을 시행하여 계획의 수정이 적시에 수행되었다.

셋째, 린 타임과 린 사이클 타임을 도출하여 구체적이며 이상적인 목표와 핵심 성과 지수를 제시할 수 있었다.

넷째, 지속적 개선 결과 이상적인 목표치에 도달하지는 못하였지만 낭비가 50% 이상 감소되었다.

다섯째, 구체적으로 제시된 작업 효율이나 능력, 다양한 공사 관계자들의 토의를 바탕으로 계획이 수립되어 개인적 편견이나, 경험의 오류가 통제되었다. 시공과정에서도 계획의 엄밀함으로 인하여 세부적인 낭비요소들이 쉽게 도출되었다. 이는 현장관리자들이 업무에 집중할 수 있도록 하는 효과가 있었다.

여섯째, 최초 입찰 단계에서 전문 업체의 예측에 많은 오류가 있었다. 이러한 심각한 오류는 전문 업체, 전문가, 경험에 대한 비판적 검증의 필요성을 확인할 수 있었다.

또한 연구과정에서 다음과 같은 한계가 있었다.

첫째, 제시된 프로세스는 관리자들의 열정과 실수를 솔직하게 인정하는 투명성을 필요로 한다. 그러나 이러한 조건을 만족하는데 어려움이 있었다. 이러한 현상은 건설관리 역량을 초기 계획된 방법의 준수보다 변화를 인지하고 신속하게 계획을 변경할 수 있는 역량의 중요성이 강조되는 문화가 건설 현장에 정착되어야 함을 인식할 수 있었다.

둘째, 개인적인 경험과 편견에 의한 오류, 관리 부실, 역량 부족, 계획 오류 등 보이지 않는 낭비요소들의 분석과 분류를 시도하였다. 그러나 낭비요소의 경계가 모호하고 상호 연관성이 많은 관계로 하나로 특정 짓는데 어려움이 있었다.

셋째, 암질의 변화 등 다양한 변인에 의해 세부적인 작업 수량의 변화가 있었다. 따라서 린 사이클 타임은 적용하지 못하였으며 Net Working Time이라는 측정된 낭비 없는 작업시간을 성과 지표의 기준으로 선정하였다. 결과적으로 성과 지표도 상황에 따라 지속적인 관찰을 통해 변경되며 어떠한 기준과 계획도 고착되지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 ‘2018년도 충남대학교 학술연구지원사업’의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 주저자 김용표(2020)의 박사학위 논문 일부를 인용하였습니다.

## References

- Alarcon, L. (1997). "Tools for the identification and reduction of waste in construction project." *Lean Construction*, 1st Edition, press CRC, London.
- Andreas M. (2010). "Construction Productivity: From measurement to improvement." *PM-05-Advancing Project Management for the 21st Century "Concepts, Tools & Techniques for Managing Successful Projects" May 2010*, Heraklion, Crete, Greece.
- Barbosa, F., Woetzel, J., Mischke, J., Ribeirinho, M.J., Sridhar, M., Parsons, M., and Brown, S. (2017). "Reinventing construction: A route to higher productivity." Executive summary Report, McKinsey Global Institute.
- Dozzi, S.P., and AbouRizk, S.M. (1993). "Productivity in Construction." National Research Council, Canada, Ottawa, Dec, 1993.
- Formoso, C.T., Soibelman, L., De Cesare, C., and Isatto, E.L. (2002). "Material waste in building industry: main causes and prevention." *Journal of construction engineering and management*, 128(4), pp. 316-325.

- Gerbert, P., Rothballer, S.C., and Renz, A. (2016). "Shaping the future of construction - a breakthrough in mindset and technology." In World Economic Forum in collaboration with The Boston Consulting Group, Geneva, Switzerland.
- Howell, G.A. (1999). "What is Lean construction-1999." In Proceedings, IGLC, 7, pp. 26-28.
- Kim, C.D. (2004). "The Background and Concept of Lean Construction." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 5(4), pp. 3-9.
- Kim, C.D., and Lee, S.H. (2006). "The Improvement of Curtain Wall Design Process using Value Stream mapping Tools." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 7(5), pp. 128-137.
- Kim, C.H. (2001). "A Study on the Construction Process Analysis Model Based on the Principle of Lean Construction." MS thesis, Kwangwoon University.
- Kim, Y.W., and Jang, J.W. (2006). "Example of Last Planner : Tunnel Project." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 7(4), pp. 146-153.
- Koo, B.S. (2006). "A Case Study on the Lean Production System and the Application of Large-scale Overseas Construction Projects." *Construction Industry Trends*, Korea Institute of Construction Industry, Korea.
- Koo, B.S. (2008). "Reliability Evaluation and Analysis of Domestic Construction Projects Based on Lean Construction." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 28(5D), pp. 655-664.
- Koskela, L. (1992). "Application of the new production philosophy to construction." CIFE Technical Report, 1992-09, 72, Stanford university.
- Koskela, L., Howell, G., Ballard, G., and Tommelein, I. (2002). "The foundations of Lean construction." *Design and construction: Building in value*, 291, pp. 211-226.
- Moon, H.G., Yu, J.H., and Kim, C.D. (2008). "A Study of the Work Performance Measurement Based on TFV." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 24(7), pp. 93-100.
- Womack, J.P., and Jones, D.T. (1996). "Lean Thinking: Banish Waste And Create Wealth. Your Corporation." Press, Simon and Schuster.
- Yoon, J.S., Kim, H.I., Yu, J.H., and Kim, C.D. (2008). "A study on the Improvement of the Performance Measurement Based on Lean Construction." *Proceedings of KICEM Annual Conference*, KICEM, 8, pp. 285-288.

---

**요약 :** 전통적인 공사관리 방식의 한계에 대한 대안으로 제시되고 있는 린 프로세스를 시공단계에 적합하게 해석하여 현장에서 시공 관리자들이 효율적으로 적용하여 생산성을 향상시킬 수 있는 린 프로세스를 제시하였다. 이를 위해 우선적으로 린 건설의 5가지 원리인 가치의 규정, 가치 흐름, 흐름 생산, 당김 생산, 완벽 추구를 현장 특성에 맞게 정의하였다. 고객을 후속 공종으로 규정하고 가치는 액티비티로, 가치 흐름은 공정표로 정의하였으며 흐름 생산, 당김 생산, 완벽 추구를 공사중 모니터링과 개선으로 정의하였다. 또한 린 타임과 린 사이클 타임의 개념을 도입하여 객관적 측정 기준을 수립하였다. 낭비는 린 사이클 타임을 근간으로 도출하도록 하였으며 린 사이클 타임이 궁극적 개선의 목표가 되었다. 측정 및 분석의 신뢰성은 계획의 신뢰성이 확보를 담보로 한다. 이에 계획단계에서의 개인, 조직, 경험의 편견과 오류를 최소화될 수 있도록 계획의 적정성 검증 방안을 제시하였다. 또한 예측하기 어려운 다양한 상황에 계획이 적합한지를 검증하는 계획의 적합성 검증 방안을 제시하여 계획의 신뢰성을 높였다. 또한 제시한 프로세스를 현장에 적용하여 린 프로세스의 구체적 적용 방안의 예시를 제시하였으며 시사점을 제시하였다.

**키워드 :** 린 건설, 현장 실무형 린 프로세스, 린 사이클 타임, 린 타임, 계획 검증, 후속공종

---