

초고층 프로젝트에서의 학습곡선효과 상쇄요인 분석 및 작업 생산성 산정 방법 제시

이보경¹ · 박문서* · 이현수¹ · 김현수¹ · 문명기¹

¹서울대학교 건축학과

Analysis on Offset Factors of Learning Curve Effect and Estimation of Labor Productivity in High-rise Projects

Lee, Bogyong¹, Park, Moonseo*, Lee, Hyun-Soo¹, Kim, Hyunsoo¹, Moon, MyungGi¹

¹Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

Abstract: Focusing on repetitive works of construction, many research have been conducted about application of the learning curve effect. However, it is still controversial, especially on the high-rise project, since the productivity improvement from the learning curve effects are hard to prove. In the previous research, applicability of the learning curve was mainly derived from the labor productivity data. Although the research were based on the real data, they merely concentrated on the simple conclusion that the labor productivity had improved or not, instead of the process interpretation. Therefore, the purpose of this research is to analyze the influence factors of the learning curve effect in high-rise projects and elucidate the offset factors of the effect. Based on these factors, a model for estimating the labor productivity containing the concept of process learning is suggested. Through our research, traditional learning curve theory could be compensated and re-established with having more appropriateness for high-rise projects.

Keywords: Learning Curve Effect, High-rise, Labor Productivity

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설산업의 개별 프로젝트들은 비반복적으로 수행되는 동시에 다수의 반복 작업을 포함한다. 이러한 특징은 작업의 반복으로부터 작업자의 숙련도가 향상되는 학습곡선효과를 건설 작업 생산성 예측 및 관리에 적용하고자 하는 연구들의 바탕이 되었다. 특히 최근 들어 그 수요가 증가하고 있는 초고층 건물의 경우, 반복 작업을 포함하는 층수가 증가하므로 학습곡선효과가 발생하기 더 적합한 환경을 가진다 (COUTO and TELXEIRA 2005). 이에 따라 초고층 프로젝트의 작업 생산성 관리 시 학습곡선효과의 영향을 고려해야 한다는 연구들이 주목받고 있다.

그러나 Jarkas(2010)에 의하면 실제 초고층 건설 현장에서 학습곡선효과로 인한 작업의 생산성 향상을 체감하기는 어렵다. 이는 프로젝트 수행 시 학습곡선효과의 발현을 방해하는 다른 요인들이 있음을 암시한다. 그럼에도 기존의 학습곡선효과이론을 통한 숙련도 향상을 전제로 작업 생산성의 개선을 기대한 작업계획을 수립할 경우, 공사가 진행될

수록 실제 작업 생산성과의 차이를 가지게 되므로 공사 수행의 효율이 저해될 수 있다.

또한 기존의 연구들은 학습곡선효과를 통한 작업자 숙련도 향상이 작업 생산성 향상에 반영되는 과정보다는 효과의 발생 유무에만 초점을 맞춘 경향이 있다. 이는 학습곡선효과와 작업 생산성 향상을 동일한 개념으로 보는 등의 오류를 발생시키며 건설에서의 학습곡선효과 적용에 대한 잘못된 개념을 형성하기 쉽다.

따라서 기존의 학습곡선효과이론을 건설 프로젝트의 작업 생산성 관리에 반영하기 전에 그 발현 과정에 대한 분석을 통해 기존의 이론을 초고층 프로젝트의 작업 생산성 산정 시 적용 가능하도록 보정하는 과정이 필요하다.

본 연구에서는 초고층 프로젝트에서 발생하는 학습곡선효과의 상쇄 요인에 대해 분석하고 이를 토대로 초고층 프로젝트에 적합하도록 기존의 학습곡선이론을 보완한 작업 생산성 산정방법을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 동일한 작업과 새로운 작업의 수행이 반복되는 초고층 프로젝트의 작업 상황을 살펴보기 위해 층이 올라가면서 평면이 구간별로 변화하는 초고층 건물의 비내력벽 시공으로 연구의 범위를 한정한다. 이때 '초고층 건물'은 우리나라의 일반적 분류기준인 40층 이상을 의미한다. 또한 학습곡선효과이론에서 일컫는 작업 반복의 단위는 층(floor)

* Corresponding author: Park, Moonseo, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea
E-mail: mspark@snu.ac.kr
Received July 8, 2013; revised September 4, 2013
accepted September 16, 2013

으로 하며 이를 작업 생산성에 반영하기로 한다. 여기서 층별 작업 생산성은 단위 작업투입시간 당 작업물량(unit/h)을 의미한다.

또한 본 연구에서는 건설 프로젝트의 반복 작업 수행 시 학습곡선효과가 유효하다고 가정한다. 추가적으로, 위의 연구 범위를 적용하는 과정에서 시공에 필요한 모든 자재는 작업 수행시간 전에 이미 각 작업 수행 공간으로 옮겨져 있음을 가정한다.

본 연구의 수행방법은 다음과 같다.

- (1) 선행연구 분석을 통해 문제점을 확인하고 학습곡선효과와 초고층 프로젝트에서의 작업 생산성 각각의 영향요인을 도출한다.
- (2) 공통 영향요인을 중심으로 초고층 프로젝트에서의 학습곡선효과 상세요인을 도출한다.
- (3) 연구 범위 내의 초고층 프로젝트의 작업 생산성 데이터를 수집하여 작업일수 및 작업인원 등을 고려한 실제 작업투입 시간을 산정한 후, 층별 작업 생산성으로 변환하여 기존 학습곡선효과 이론과 비교·분석 한다.
- (4) 데이터 분석을 통해 기존의 학습곡선효과 이론을 보완한 작업 생산성 산정 모델을 작성한다.
- (5) Case-Study를 통해 작성된 모델을 검증하고 그 결과를 분석한다.

2. 선행연구 분석

2.1 건설산업에서의 학습곡선효과

2.1.1 학습곡선효과의 정의

학습곡선효과는 새로운 작업이나 변화된 작업의 생산량이 증가할 때마다 비용(작업 시간, 투입 자원, 원가 등)이 그 전 생산 주기에 비해 특정 비율(학습률)만큼 감소하는 현상을 말한다(Thomas et al. 1986). Wright(1936)에 의해 처음 발견되었으며 이는 비행기의 조립 과정에서 생산량이 두 배가 될 때마다 요구되는 투입 작업시간이 20%씩 감소하는 현상으로부터 유래한다(Cunningham 1980). 특히 세계 2차 대전 당시 미 정부가 전투기와 선박을 제조하면서 요구되는 비용과 시간을 예측하는 데 학습곡선효과를 적용하고자 하면서 주목받기 시작했다(Yelle 1979). 이 후, 학습곡선효과 발생의 전제인 '작업의 반복성'을 포함하는 다양한 산업에서 이를 적용하고자 하는 연구가 수행되었다(Adler and Clark 1991; Amor and Teplitz 1998; Cherrington et al. 1987).

학습곡선효과는 과거의 경험으로부터 학습하는 인간의 특성이 반영된 학습효과를 수학적 모델로 해석한 것을 말한다. 일반적으로 5가지 모델 1) Straight line model; 2) stanford "B" model; 3) cubic model; 4) piecewise model; 5) exponential model이 주로 사용된다. 'Straight line model'은 작업 수행 시 학습으로 인한 생산성의 향상 정도인 학

습률이 일정함을 전제한다. 'Stanford "B" model'은 작업자가 작업의 반복 수행 시, 경험으로 인한 노하우(know-how)가 축적됨을 가정한다. 이 때, 경험으로 인한 노하우 축적이 없는 경우를 'straight line model'로 볼 수 있다. 'Cubic model'은 학습률이 일정하지 않다고 가정하는데, 이는 작업자의 경험 축적과 작업 완료에 다가갈수록 생산성의 상승 정도가 완만해지는 현상을 고려한다. 'Piecewise model'은 'cubic model'을 선형화한 모델이며 'Exponential model'은 일정 횟수의 반복이 이뤄진 후에 해당 작업에 대한 비용이 반으로 감소함을 가정한다(Thomas et al. 1986).

기존의 연구들에 의해 건설산업에 포함되는 작업의 학습률이 동일 작업 내에서 대체로 일정하고 Straight line model이 실제 작업 수행 결과와 가장 유사하여 적용성이 높다고 알려져 있으므로(Thomas et al. 1986), 본 연구에서의 학습곡선도 이를 따른다. 이 모델은 Fig 1과 같이 지수함수 형태를 가지며 log-log 스케일로 변환 시, 선형 함수를 가지므로 'straight line'이라 불린다.

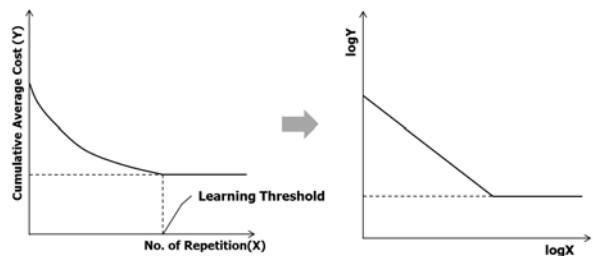


Fig. 1. Learning Curve and Straight Line Model

학습곡선은 다음과 같은 수식을 가진다(Yelle 1979).

$$Y = KX^n \quad \text{-----} \quad (1)$$

Y = X 번째 작업 시 필요한 투입 자원의 양

K = 첫 번째 작업 시 필요한 투입 자원의 양

X = 누적 작업 횟수

$$n = \frac{\log \phi}{\log 2} = \text{학습지수}$$

ϕ = 학습률

2.1.2 건설산업에서의 학습곡선효과 및 작업 생산성에 관한 선행연구

1970년대부터 건설산업에서의 작업 반복성에 주목하여 학습곡선효과의 건설 프로젝트에의 적용 가능성에 관한 연구(Gates and Scarpa 1972; Thomas et al. 1986; COUTO and TEIXEIRA 2005; Hinze and Olbina 2009)가 지속되었다. 또한 건설에서 학습곡선효과의 적용을 전제로 이를 시뮬레이션에 활용하거나 작업 생산성을 분석 및 예측하는 연구(Hijazi et al. 1992; Lutz et al. 1994; Farghal and Everett 1997; Wong et al. 2007)도 다수 진행되었다. 그러나 최근에 학습곡선효과가 실제 작업 생산성의 향상에 미치는 영향

정도가 거의 없음을 밝히는 연구들이 수행되면서, 기존의 학습곡선을 건설산업에 그대로 적용하는 것은 적합하지 않음을 밝히는 연구(Thomas 2009; Jarkas 2010; Jarkas and Homer 2011)도 수행되고 있다.

위의 연구들은 대체로 건설에서의 학습곡선효과 적용 가능성에만 초점을 맞추고 있는데, 그 적용 가능성을 작업 생산성의 향상 여부를 통해 확인하고 있다는 한계가 있다. 예를 들어, Jarkas(2010)는 철근 고정 작업에서 학습곡선효과가 작업 생산성 향상에 미치는 영향이 거의 없음을 밝히고 학습곡선효과를 건설산업에 적용하는 데 대한 비판적인 견해를 제시했으나 학습곡선효과와 작업 생산성의 엄밀한 구분이 생략되어 있다. 학습곡선효과로 인한 작업 숙련도의 발생과 숙련도 발생이 작업 생산성 향상으로 이어지는 것은 별개의 문제로, 작업자의 숙련도 향상은 작업 생산성의 향상에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요인들 중 하나라 할 수 있다. 학습곡선효과가 작업 생산성에 반영되는 과정에서 다른 영향요인들에 의해 숙련도 향상의 영향이 상쇄될 수 있는 가능성이 있는 것이다. 따라서 학습곡선효과가 표면적으로 드러나는데에 관한 연구뿐만 아니라 그 효과가 작업 생산성과 연계되는 과정을 살펴볼 필요가 있다.

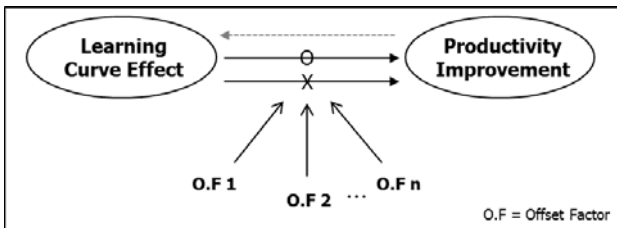


Fig. 2. Relationship between Learning Curve Effect and Productivity Improvement

2.2 초고층 프로젝트의 학습곡선효과 상쇄요인 선정

2.2.1 초고층 프로젝트에서의 학습곡선효과

건설산업에서 작업 생산성에 영향을 미치는 요인들은 다양하다(Herbsman and Ellis 1990). Kim et al.(2011)에 따르면 건설 작업 생산성에 영향을 미치는 요인을 통제 가능여부로 나눌 수 있으며, 이는 각각 관리 특성, 프로젝트 특성, 작업 특성 등으로 나눌 수 있다(Liberda et al. 2004).

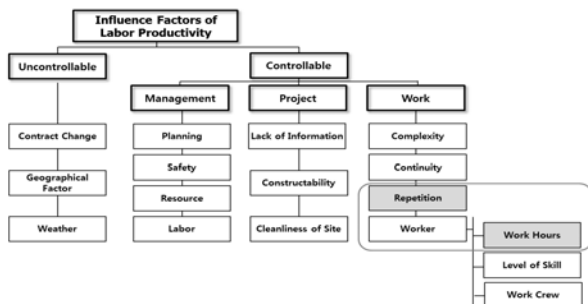


Fig. 3. Influence Factors of Labor Productivity in Construction

본 연구는 초고층 프로젝트에서의 학습곡선효과를 그 대상으로 정함에 따라, 각각의 특징적 영향요인들을 살펴보고 그 과정에서 학습곡선효과 발현을 상쇄하는 요인을 선정해야 한다.

초고층 프로젝트의 경우, Fig 3의 요인들에 의한 영향을 고르게 받는데, 특히 기후, 작업 공간관리, 프로젝트의 난이도, 작업의 반복 정도 등에 영향을 많이 받는다(Hegazy and Kamarah 2008; Lee et al. 2009). 또한 학습곡선효과 발현에 영향을 미치는 요인들로는 작업 자체의 난이도, 반복정도, 작업에 투입되는 시간, 작업 반복에 대한 피로감 등이 있으며(Hijazi et al. 1992), 이들 대부분은 Fig 3의 분류에서 통제 가능한 요인들 중, 특히 작업 특성에 해당한다고 볼 수 있다. 본 연구는 학습곡선효과 상쇄요인에 대한 분석을 첫째 목적으로 함에 따라, 작업 특성과 관련된 요인들을 중심으로 분석하고자 한다.

작업 생산성 산정과정에서 반영되면서도 작업 자체의 특성과 관련이 있는 요인들을 학습곡선효과 상쇄를 발생시킬 가능성을 가진다고 판단하고, '작업 자체의 반복 정도'와 '작업자가 실제 작업에 투입하는 시간을 본 연구에서의 중요 요인으로 고려하고자 한다.

'작업의 반복정도'는 학습곡선효과 발생의 기본적인 조건임과 동시에 초고층 프로젝트에서 공사 수행의 층수가 증가함에 따라 그 정도가 극대화된다. 그럼에도 실제 초고층 프로젝트 수행 과정에서 학습곡선효과 발현 여부에 대한 논란이 있으므로 이에 관한 연구가 필요하다. 또한 '작업 투입시간'은 학습곡선효과로 인한 작업 생산성의 향상이 일어나는데 영향을 미칠 가능성이 있으므로 초고층 프로젝트에서의 작업 투입시간에 영향을 미치는 요인들을 살펴볼 필요가 있다.

2.2.2 작업의 반복 정도

초고층 프로젝트는 같은 작업을 포함하는 층의 반복을 가지므로 작업의 반복을 전제로 한 전통적인 학습곡선효과 적용이 적합한 것으로 여겨져 왔다. 그러나 Fig 4와 같이 초고층 건물은 용도 또는 구조적인 이유 등으로 인해 평면의 변화를 가지므로 몇몇 작업에 대해서는 완전한 반복 작업이 이루어진다고 볼 수 없다.

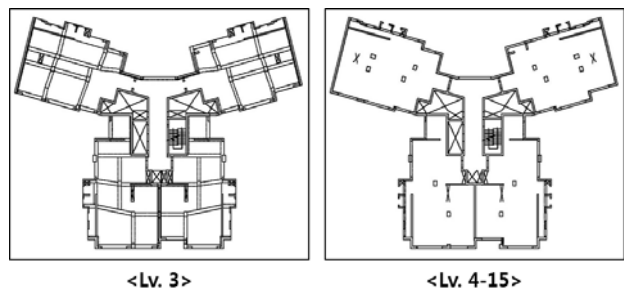


Fig. 4. Example: Change of Plan in Identical Building

Hijazi et al.(1992)에 의하면 작업의 반복이 멈췄다가 다시 발생하거나 새로운 작업이 시작될 경우 학습효과 역시 멈추었다가 다시 발생한다고 볼 수 있다. 이는 작업의 반복성이 깨지는 경우 학습곡선효과 역시 다시 산정할 필요가 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 반복과 비반복 작업 구간을 가지는 초고층 프로젝트의 특징을 반영하여 반복성이 정지되거나 재시작할 때 마다 학습곡선효과를 재산정하여 작업 생산성에 반영하고자 한다. 아래의 Fig 5는 작업의 변화에 의한 작업 간의 학습률 변화가 작업 시간에 미치는 영향을 나타낸다.

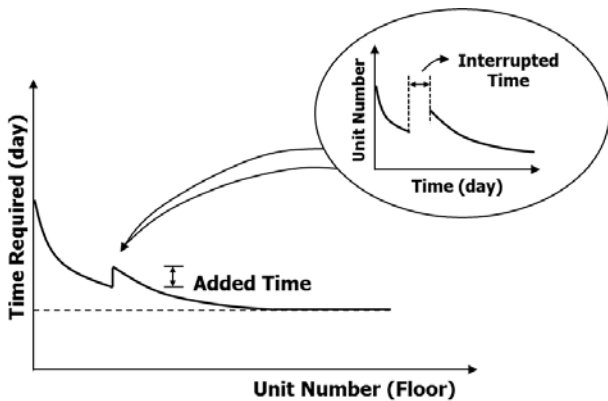


Fig. 5. Possible Influences on Learning Curve Effect by Work Change(Hijazi et al. 1992)

2.2.3 작업 투입시간과 작업자 이동시간

초고층 프로젝트에서 필요한 유틸리티(작업자, 자재 등)를 적시에 공급하는 것은 성공적인 프로젝트의 수행에 매우 중요한 요소이다. Fig 3에서 구분되었듯이 작업자의 이동시간은 초고층 프로젝트의 수행 과정에서 작업자로부터 비롯된 작업 생산성 영향요인들 중 작업투입 시간에 영향을 미친다.

특히 작업자의 수직이동은 자재의 이동에 비해 더 복잡한데, 자재의 경우 혼잡을 피하기 위해 작업이 이루어지지 않는 시간에 미리 작업 공간으로 이동시켜둘 수 있지만 작업자는 작업수행시간에만 이동할 수 있기 때문이다(Park et al. 2013). 작업 수행공간이 고층화 될수록 작업 공간에 도달하는데 걸리는 시간이 길어지며 이는 작업자의 실제 작업수행시간을 감소시킨다. 따라서 작업자의 수직 이동시간은 실제 작업수행시간을 반영하는 작업 생산성 산정에 영향을 미친다. 작업자 이동시간이 작업자가 실제로 작업을 수행하는 데 소요된 시간에 포함되어 작업 투입시간이 실제보다 크게 측정될 우려가 있다. 이에 본 연구에서는 작업자 이동시간을 초고층 프로젝트의 작업 생산성 산정에서 중요한 요소이며 학습곡선효과를 상쇄시키는 요인 중 하나로 판단한다.

3. 학습곡선효과를 반영한 초고층 프로젝트의 작업생산성 모델 개발

본 장에서는 앞서 학습곡선효과를 상쇄시키는 요인으로

선정된 '작업의 반복정도'와 '작업자 이동시간'을 반영한 작업 생산성 산정 모델을 제시한다. 현장에서의 비내력벽 시공 작업 생산성 데이터를 학습곡선효과와의 관점에서 분석하고 그 결과를 작업 생산성 산정 모델에 반영한다.

3.1 작업 생산성 데이터 분석

3.1.1 데이터 변환 및 분석

실제 현장에서 발생하는 작업 생산성 데이터로는 학습곡선효과와의 발현정도를 바로 알기 어렵다. 한 작업자의 작업 시간을 추적·관찰하는 것이 현실적으로 어려울 뿐 아니라 대부분 작업조를 이루어 작업하는 등의 현장상황에 영향을 받기 때문이다. 또한 '층이 올라갈수록 작업자의 작업 속련도가 향상 된다는 학습효과에 대한 일반적 통념은 존재하나, 구체적인 작업계획에 영향을 주는 수준에 미치지 않는다.

Table 1. Example: Labor Productivity Data of Constructing Non-bearing Wall in Highrise Project

Floor	Quantity (m ³)	Work Hours (h)	Standard Work Hours per day (h)	Additional Work Hours (h)	Duration (day)	No. of Workers (man)
2	963	432	8	0	18	3
...
20	963	384	8	0	16	3
21	1221	727	8	7	18	5
...
26	963	384	8	0	16	3
...
43	858	512	8	0	16	3
...
47	858	432	8	0	18	3

따라서 현장에 존재하는 작업 생산성 데이터를 통해 학습곡선효과와의 영향정도를 살펴보기 위해서는 조건에 맞는 데이터를 선별하고 분석하는 과정이 필요하다. 위의 Table 1은 P건설의 초고층 주상복합 프로젝트의 층별 비내력벽 작업 생산성 데이터이다.

위 현장은 총 47개층을 가지며 작업의 반복과 관련하여 크게 5개의 구간으로 나눌 수 있다. 1~20층(구간 ①)까지는 같은 물량으로 같은 작업이 반복되며 21~25층(구간 ②)은 용도의 변화로 인해 작업 또한 변화하면서 각기 다른 작업 물량을 가진다. 26~42층(구간 ③)은 다시 1~20층과 동일한 작업이 반복되며 43, 44층(구간 ④)과 45~47층(구간 ⑤)은 각 평면 변화에 따라 새로운 작업이 진행된다. 여기서 구간 ①과 ③은 비교적 긴 구간동안 동일한 작업이 반복됨을 알 수 있으며 특히 구간 ③의 경우, ①에서 수행되었던 작업과 동일한 물량이 사용되는 작업이 수행됨을 알 수 있다.

위의 작업 생산성 데이터를 학습곡선으로 해석하기 위해

서는 다음과 같은 데이터 변환작업이 필요하다(NGUYEN and NGUYEN 2012).

- (1) 일일 작업 기준시간과 층별 작업 일수, 층별 일일 작업 투입 인원을 곱한 후 층별 추가 작업시간을 더해 층별 총 작업시간을 산정한다.
- (2) 각 층의 물량을 기준으로 작업의 반복구간을 식별한다.
- (3) 물량이 다른 층 간의 동등한 비교를 위해 층별 총 작업시간을 단위물량 당 작업시간으로 환산한다.
- (4) 위의 환산한 단위물량 당 작업시간을 기준으로 층별 누적평균 작업시간을 구한다.
- (5) (4)의 누적평균 작업시간과 작업 수행 번호의 로그 값을 계산한다.

Table 2. Results of Data Conversion

Floor	Cycle No.[X]	Equivalent Work Hours (h/m3)	Cumulative Average Work Hours[Y] (h/m3)	Ln Y	Ln X
2	1	0.449	0.449	-0.8016	0
...
20	19	0.399	0.420	-0.8681	2.9444
21	20	0.590	0.428	-0.8481	2.9957
...
26	25	0.399	0.445	-0.8096	3.2189
...
43	42	0.597	0.425	-0.8550	3.7377
...
47	46	0.878	0.453	-0.7917	3.8286

(1)에서 층별 추가 작업시간은 기후, 공정지연 등의 이유로 일일 작업 기준시간을 만족하지 못한 날들의 작업 시간을 합산한 것을 의미한다. 또한 (4)에서의 학습곡선은 straight-line model로 해석하는데, 데이터의 정확성을 높이기 위해 단순 층별 작업 시간 대신 '층별 누적 평균 작업시간'을 산정하기로 한다(Thomas et al. 1986). 이를 통해 전체적인 추이를 벗어난 예외적 데이터들이 분석 결과의 정확성을 떨어뜨리는 것을 막을 수 있다. 데이터 변환작업의 결과는 Table 2와 같다.

다음으로 비교적 작업의 반복이 길고 뚜렷한 구간을 찾고 (2층~20층) 선형 회귀식 도출을 통해 학습률(Learning Rate)을 산정한다(NNGUYEN and NGUYEN 2012).

$$\ln Y = \alpha + n * \ln X \quad \text{-----} \quad (2)$$

(학습률) = $2^{-n} * 100$

X = Cycle Number

Y = 층별 단위물량당 누적평균 작업시간

α = 상수

n = 학습지수

식 (2)를 통해 구한 학습률을 적용한 학습곡선식을 통해 이론적 학습곡선효과 발생을 가정했을 때의 층별 작업시간 ($Y_{X.learn}$)과, 실제 누적평균작업시간($Y_{X.ca}$)이 반영된 작업 생산성을 비교한다. 이때의 작업시간 Y는 앞서 제시된 데이터 변환을 거친 단위물량 당 작업시간을 의미한다. 식은 각각 다음과 같다.

$$P_{X.actual} = \frac{1}{Y_{X.ca}} \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$Y_{X.ca} = \frac{\sum_{i=1}^X (t_{sti} * W_i * d_i)}{X} \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$P_{X.learn} = \frac{1}{Y_{X.learn}} \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$Y_{X.learn} = Y_1 * X^n \quad \text{-----} \quad (6)$$

$P_{X.actual}$ = X층의 실제 작업 생산성

$P_{X.learn}$ = 학습곡선효과에 의한 X층 작업 생산성

$Y_{X.ca}$ = X층의 누적평균작업시간

$Y_{X.learn}$ = 학습곡선효과에 의한 X층 작업시간

t_{sti} = i번째 층의 일일 기준 작업시간

W_i = i번째 층의 작업인원

d_i = i번째 층의 작업일수

n = 학습지수 (learning index)

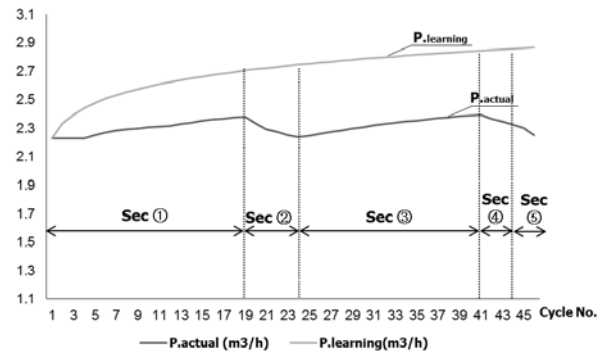


Fig. 6. Example: Comparison of the Learning Curve Effect with the Actual Labor Productivity

3.1.2 데이터 분석결과

Fig 6에 따르면 누적평균작업시간을 반영한 작업 생산성과 학습곡선효과에 의한 이론적 작업시간을 반영한 작업 생산성이 분명한 차이를 보임을 알 수 있다. 학습곡선효과가 완전히 적용된 경우의 작업시간은 지수함수 형태로 점점 감소함에 따라 작업 생산성은 점차 증가하는데($P_{.learning}$ Fig 6), 이는 작업의 반복과 비반복을 고려하지 않고 매 층마다 동일한 작업을 실시했다는 가정에 기초한다. 층별 누적평균작업시간을 반영한 작업 생산성의 경우($P_{.actual}$ Fig 6), 일정하게 증가하다가 20~24번째 작업에서 감소한 후 다시

증가하는 경향을 가진다. 또한 42번째 작업에서는 다시 생산성이 다소 감소한다. 이 때, 작업 생산성의 감소가 시작되는 층은 실제 작업 내용이 변화하는 곳과 일치한다. 이는 Hijazi et al.(1992)의 문헌에서 확인한 바와 같이 작업이 변화할 때마다 학습곡선효과와 재시작이 발생할 가능성이 있음을 의미한다.

작업 생산성 값의 절대량에도 차이를 보이는데, 이론적 학습곡선에 의한 작업 생산성이 층별 누적평균작업시간이 반영된 작업 생산성에 비해 항상 더 큰 값을 가진다. 이는 실제 작업 생산성에 비해 이론의 값이 과장되어 있으며, 이상적인 학습곡선효과가 실제 작업에서는 상쇄되었음을 의미한다. 이어지는 보정 모델의 작성 시, 작업 투입시간에 영향을 미치는 작업자의 수직이동 시간을 고려해야 한다.

3.2 학습곡선효과를 반영한 작업 생산성 보정 모델

3.2.1 작업 생산성 보정 모델의 개요

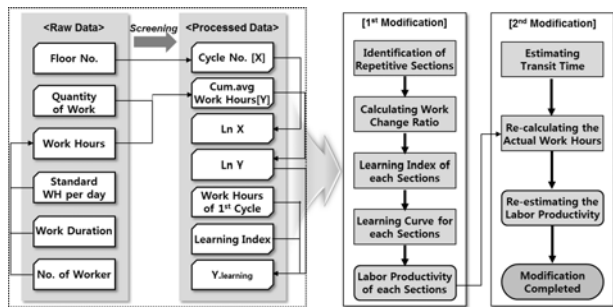


Fig. 7. Model for Estimating the Labor Productivity applied the Learning Curve Effect

Fig 7은 초고층 프로젝트에서의 학습곡선효과가 반영된 작업 생산성 산정 모델을 나타낸다. 3.1.1에서 제시된 절차를 따라 가공된 데이터를 바탕으로 두 번의 보정 절차를 거치게 된다. 이 때, 1차 보정의 목표는 각 구간별 학습 정도에 의한 독립적인 작업 생산성 패턴을 갖게 하는 것이다. 2차 보정에서는 1차 보정 과정에서 구간별 패턴을 가지게 된 작업 생산성의 과장된 값을 조정하는 것이 그 목표이다.

3.2.2 작업의 반복과 변화를 반영한 1차 보정

기존의 학습곡선효과이론에 의한 작업생산성 산정은 동일한 공종의 작업인 경우 같은 학습률을 가진다는 가정에 기초한다. 즉, 같은 공종의 작업 내에서도 작업의 반복이 정지되었다가 다시 시작하는 경우나 작업이 변화하는 경우를 따로 고려하지 않는다. 그러나 실제 작업 생산성 데이터는 작업의 변화 유무와 그 정도에 따라 생산성 향상의 추이가 달라짐을 확인할 수 있다(Fig 6). 이를 반영하기 위해 기존 이론에서 비롯한 학습곡선을 기준으로 구간 별 데이터 보정을 실시한다. 이 때 각 구간별로 작업 내용의 변화에 따

라 학습의 정도가 변하는 현상을 반영하며 그 절차는 Fig 8과 같다.



Fig. 8. Process of 1st Modification

먼저 작업 내용의 반복과 변화 구간을 작업 물량을 기준으로 식별한다. 작업의 변화를 나타내는 기준은 물량 이외의 다른 요소일 수 있으나 위 데이터 분석 과정에서 작업 물량이 변화할 때마다 생산성의 추이가 변화하였으므로 본 연구에서는 물량을 작업 변화의 기준으로 삼는다.

이 때 학습곡선효과와 특성을 가질 수 있는 구간 단위는 5개층 이상으로 한다. 또한 각 구간들 중 이전에 수행되었던 작업과 동일한 작업이 재등장하는 구간이 있는지 여부도 함께 식별한다.

다음으로 각 구간별 학습곡선을 구하는데, 이는 작업이 변화할 때 학습효과가 재시작 되어 독립적인 곡선을 가지도록 한다. 이를 위해 각 구간별 학습지수(learning index)를 계산한다. 학습지수는 학습률을 결정하는 지표로서 항상 음의 값을 가지며, 학습지수의 절댓값이 클수록 학습률은 작아지고 이는 학습효과와 정도가 커짐을 의미한다(Jelen and Black 1983).

작업의 변화가 발생하는 경우 구간 사이의 작업의 변화도 (Work Change Ratio)를 산정하여 학습지수에 반영하기로 한다. 작업의 변화도는 작업이 반복되는 흐름 내에서 변화된 정도를 나타낸다. 물량을 기준으로 작업의 반복과 변화 유무를 판단하였으므로 변화 정도의 판단 역시 물량을 기준으로 하기로 한다. 본 연구는 평면 변화를 가지는 프로젝트를 그 대상으로 함에 따라 해당 구간의 작업 물량이 이전 구간의 작업 물량에 비해 그 변화정도가 클수록 작업의 변화정도도 크다고 볼 수 있다. 이를 산정하는 식은 다음과 같다.

$$WCR = \frac{|Q_{k+1} - Q_k|}{Q_k} \quad \text{-----} \quad (7)$$

Q_k = 구간 k의 작업물량

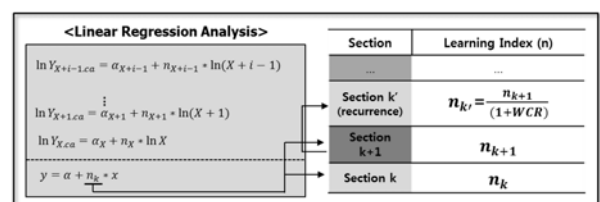


Fig. 9. Re-estimating the Learning Index of each Sections

동일한 작업이 다른 작업 수행으로 정지되었다가 다시 시작될 때, 혹은 그 내용이 변화했을 때, 그 전 수행에서만만큼의 생산성이 바로 발현되지는 않는다. 이는 이미 수행된 적이 있는 작업이라 할지라도 다시 시작되는 경우 재적용하는 시간이 소요되기 때문으로 볼 수 있다. 또한 작업 흐름 내에서 작업이 변화하는 정도가 클수록 이전의 생산성을 되찾는 데 시간이 더 소요된다. 그러나 초반의 적응 과정을 거치고 나면 경험에 의해 작업의 첫 수행 시 보다 더 빠른 시간 안에 예전의 생산성에 도달하게 된다. 이는 작업의 변화구간 및 재등장 구간의 학습률이 이전 구간에 비해 커져서 학습효과로 인한 생산성 향상 효과가 최초 수행에 비해 작아짐을 의미하며 이는 곧 학습지수의 절댓값 감소를 의미한다. 따라서 작업의 변화도를 각 구간의 학습지수에 반영하며 그 과정은 Fig 9와 같다.

위의 1차 보정을 수행하면 작업의 반복과 변화에 따라 각 구간별로 다른 패턴의 학습곡선을 가지게 되고, 그 패턴이 실제 작업 생산성의 추이를 따르게 된다.

3.2.3 작업자 이동시간을 반영한 2차 보정

초고층 공사 수행 시 작업자 이동에 걸리는 시간은 공사 층이 올라갈수록 높이 상승에 의해 증가한다(Barney 2003). 작업자 이동시간은 실제 작업이 수행되지 않는 시간으로, 층별 작업 생산성 산정 시 이를 제하는 과정이 필요하다.

작업자가 호이스트에 탑승하여 원하는 작업 공간까지 도달한 후 하차하는 데 걸리는 시간을 Cycle Time이라 할 때 이를 구하는 식은 다음과 같다(Park et al. 2013). Cycle Time은 크게 세 부분(호이스트 운행시간, 호이스트 문의 개폐시간, 작업자의 승·하차시간)으로 나뉜다. 이 세 부분을 중심으로 호이스트가 정격속도에 도달하기 전 정지하는 경우와 그렇지 않은 경우, 각각의 Cycle Time을 구한다.

$$t_k = \frac{v_{ck}}{a_k}, (v_{ck} = a_k t_k) \quad \text{----- (8)}$$

$$t_{li} = \sqrt{\frac{2D_{hki}}{a_k}}, (D_{hki} = v_0 t_{li} + \frac{1}{2} a_k t_{li}^2 = \frac{1}{2} a_k t_{li}^2, (v_0 = 0)) \quad \text{----- (9)}$$

$$\text{if } D_{hki} < \frac{v_{ck}^2}{2a_k}, \text{ then Cycle Time}_k = \sum_{i=1}^n (t_{li}) + (S+1)(t_{so_k} + t_{sc_k}) + W(t_{i_w} + t_{o_w}) \quad \text{----- (10)}$$

- D_{hki} = 현재 층에서 다음 도착 층까지 이동거리
- v_{ck} = 호이스트의 정격속도
- a_k = 호이스트의 가속도

- S = 한 cycle 내에서의 정차 횟수
- t_{so_k} = 문이 열리는 데 걸리는 시간
- t_{sc_k} = 문이 닫히는 데 걸리는 시간
- W = 탑승 인원
- t_{i_w} = 작업자들이 승차하는 데 걸리는 시간
- t_{o_w} = 작업자들이 하차하는 데 걸리는 시간
- t_k = 호이스트가 정격속도에 도달하는 데 걸리는 시간
- t_{li} = D_{hki} 가 $v_{ck}^2/2a_k$ 보다 작을 때, 호이스트가 D_{hki} 만큼 움직이는 데 걸리는 시간

2차 보정 모델에 위의 식을 적용하기 위해서는 일반적인 초고층 공사에서 사용되는 호이스트의 용량과 작동패턴, 탑승자 정보에 대한 가정 등이 필요하다. 본 모델에 적용되는 호이스트에 대한 가정은 Table 3과 같다.

Table 3. Assumptions for Operation and Passengers of Hoist

Classification	Assumptions
Operation	Passengers always board at the ground floor and get off at their destinations.
	Hoists can stop at every floor.
	It takes 8~10 seconds to open and close the door.
Passengers	It takes 4~8 seconds to load and unload each workers.
	Each Workers uses it four times a day. (Once in the morning and afternoon, Twice at the lunch)

본 연구에서의 작업자 이동시간은 작업 생산성을 측정하고자 하는 작업을 수행하는 작업자들로 그 범위를 한정한다. 즉, 층별 비내력벽 시공을 수행하는 작업자들이 하루에 호이스트를 이용하는 데 걸리는 시간만을 고려하여 그들의 실제 작업시간에서 제한다.

1차 보정을 거친 층별 작업시간을 기준으로 위의 식에서 도출한 작업자 이동시간을 더해 작업 생산성에 반영함으로써 2차 보정을 수행한다. 즉, 현장에서 순수하게 작업 수행에만 사용되었다고 생각하는 층별 일일 기준 작업시간에 작업자 이동시간을 더한 만큼의 시간동안 해당 층의 작업이 이루어진 것으로 볼 수 있다. 이를 반영한 2차 보정 후 층별 작업 생산성은 다음과 같다.

$$P_{X.m_2} = \frac{1}{Y_{X.m_1} + t_h} \quad \text{----- (11)}$$

- $P_{X.m_2}$ = 2차 보정을 거친 X층에서의 작업 생산성
- $Y_{X.m_1}$ = 1차 보정을 거친 X층에서의 작업시간
- t_h = 작업자 이동시간

4. Case-Study

4.1 사례분석의 개요

Table 4. Outline of Case Project

Classification	Contents
Project Name	Rebuilding the Haewoondae AID APT (H-Company)
Location	Haewoondae-Gu, Busan
Use	Residential/Commercial
Height	128.1m (45Floor)
Variation of Plan	

3장에서 작성된 ‘학습곡선효과를 적용한 작업 생산성 보정 모델’의 적용성을 검토하기 위해 연구의 범위에 적합한 초고층 프로젝트를 대상으로 본 모델을 적용하기로 한다.

사례분석은 지상 45층의 규모를 가진 1개동의 비내력벽 시공작업을 대상으로 실시하였다. 개략적인 작업 생산성 데이터는 다음과 같다.

Table 5. Labor Productivity Data of Constructing Non-bearing Wall in Case Project

Floor	Quantity (m ³)	Work Hours (h)	Standard Work Hours per day (h)	Additional Work Hours (h)	Duration (day)	No. of Workers (man)
2	662	480	8	0	15	4
...
20	662	416	8	0	13	4
21	860.6	952	8	0	17	7
22	721.58	768	8	0	16	6
23	662	416	8	0	13	4
...
40	662	384	8	5	12	4
41	595.8	600	8	0	15	5
...
44	595.8	520	8	0	13	5
45	463.4	600	8	0	15	5

Table 5의 작업 생산성 데이터를 Table 2와 마찬가지로 변환하여 층별 작업생산성을 산정하였다. Fig 10은 해당 현장의 실제 층별 작업 생산성과 학습곡선효과를 적용한 작업 생산성의 그래프이다. 3장에서의 데이터 분석결과와 마찬가지로 실제 층별 작업 생산성은 구간별로 달라지며 학습곡선효과를 적용했을 때와 값에서 일정 정도의 차이를 가진다.

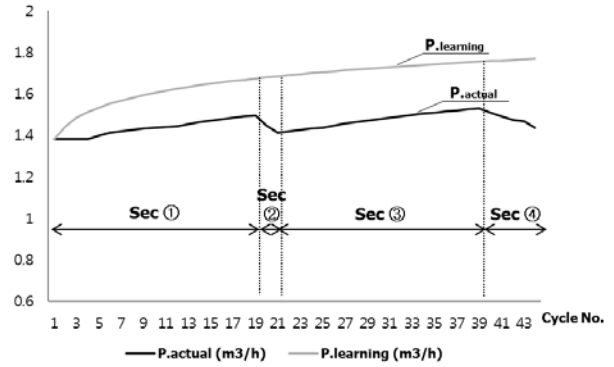


Fig. 10. Comparison the Learning Curve Effect with the Actual Labor Productivity

4.2 작업 생산성 보정의 수행

4.2.1 1차 보정의 수행

기존의 학습곡선효과 이론을 적용한 작업 생산성의 값을 기준으로 Fig 8과 같은 순서로 1차 보정을 수행했다. 먼저 작업의 반복구간을 식별하는데, 사례분석 대상 현장은 총 4개의 작업구간을 가진다. 1~20층(구간 ①)은 같은 작업물량을 가지는 첫 번째 구간이며, 21, 22층(구간 ②)은 각각 층고 상승에 의해 작업이 변화한다. 23~40층(구간 ①)까지는 구간 ①의 작업이 다시 수행되며 41~44층(구간 ③)은 팬트층으로 작업이 변화한다. 45층은 최상팬트층으로 독자적인 작업을 가진다.

Table 6. Results of Estimating the Learning Index of each Sections in Case Project

Section	Floor	Work Change Ratio	Learning Index
③	41~44	0.1	-0.0380
①'	23~40	0.3	-0.0446
②	21~22	-	-
①	1~20	-	-0.0657

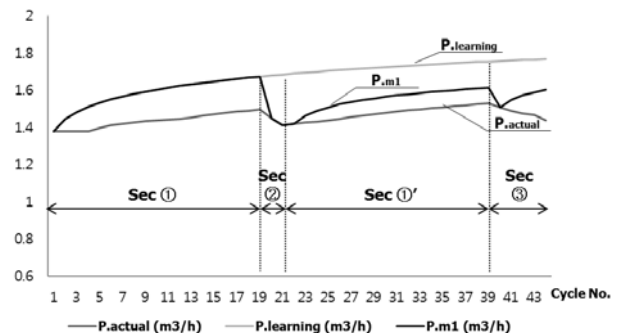


Fig. 11. Results applied the 1st Modification

식별 결과, 23~40층의 경우 구간 ①이 재등장한 구간임이 확인되었으며 식 (7)에 의해 작업의 변화도를 산정한다. 이를 반영한 각 반복구간별 학습지수는 Table 6과 같다. 이때, 구간 ②는 학습효과가 나타나기에 충분한 구간의 길이를 갖추지 못했으므로 학습곡선을 따로 도출하지 않고 누적평균작업시간의 값을 이용하기로 한다.

Fig 11은 위의 1차 보정 과정에서 산정한 구간별 학습지수를 반영하여 구한 각 구간별 작업 생산성 곡선($P_{.m1}$)과 실제 층별 작업 생산성($P_{.actual}$)을 함께 그린 그래프이다. 그 결과 기존의 학습곡선효과 이론에서 비롯된 단일 곡선($P_{.learning}$)의 패턴이 구간 별 각기 다른 패턴을 가지는 생산성 곡선으로 보정되었다. 이 단계에서는 아직 두 그래프의 값의 차이가 존재하지만 실제 작업 생산성의 구간별 속성이 반영되었다는 점에서 1차 보정 단계의 목표를 달성했다고 볼 수 있다.

4.2.2 2차 보정의 수행

본 단계에서는 작업자 이동시간을 산정하여 작업수행시간에서 제하는 보정을 실시했다. 이를 위해 호이스트의 1회 Cycle Time을 Park 외 5인(2013)의 식(8), (9), (10)을 이용하여 구한다. 이 때, 호이스트의 운행 및 탑승자 정보에 관한 가정은 Table 3을 따르며, 호이스트의 기본 정보는 다음과 같다.

Table 7. Hoist of the Case Project

Classification	Contents
Type	Twin
Model	ALIMAK 650
Capacity	2200kg
Cage Size (W×L×H)	1.5m X 4.6m X 2.3m
Contract Speed	65m/min



Fig. 12. Workers' Transit Time of Case Project

Fig 12에 따르면 공사 수행 층이 올라갈수록 작업자 이동시간 역시 증가하는 추세를 따르는 것을 알 수 있다. 또한

해당 건물의 21층과 40층 지점에서 기준층 층고 3.0m에서 4.0m로 층고 변화가 발생하는데, 이로 인한 수직 이동거리 증가 및 작업 인원 증가로 인해 작업자 이동시간이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

위의 결과를 식(11)에 따라 작업 수행 시간에 반영하여 2차 보정을 수행한 작업 생산성($P_{.m2}$)을 산정했다. 그 결과 1차 보정을 거쳐 구간 별 각각의 패턴을 가지도록 보정된 생산성을 기준으로, 작업 투입시간의 과장된 값을 보정함으로써 그 값이 실제 데이터와 비교적 유사해졌음을 확인할 수 있다. 특히 구간 ①의 경우 실제 데이터와 매우 유사한 패턴과 값을 가지게 되었으며, 이를 통해 2차 보정 단계의 목표를 달성했다고 볼 수 있다. 다음은 실제 작업 생산성과 비교한 2차 보정 작업 생산성 그래프이다.

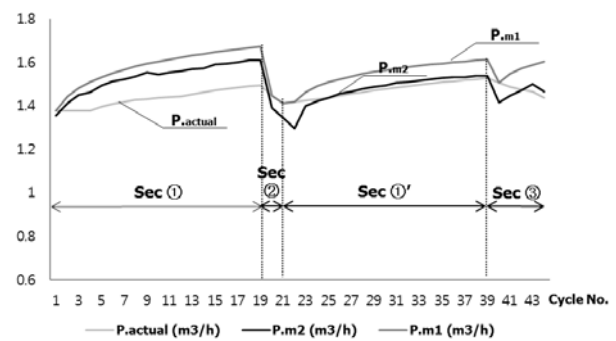


Fig. 13. Results applied the 2nd Modification

4.3 사례적용의 결과

위에서 제시한 작업 생산성 보정 모델은 학습곡선효과 이론을 기준으로 초고층 프로젝트의 특성 및 작업 특성이 반영된 작업 생산성을 산정하는 것을 그 목적으로 한다.

1차 보정에서는 프로젝트 내 작업을 반복과 변화를 가지는 구간으로 각각 나누어 학습의 패턴을 고려했다. 사례에 적용한 결과, 본 모델이 실제 데이터의 구간별로 학습의 정도가 각각 다른 현상을 반영할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 2차 보정에서는 작업 공간의 높이 상승에 따라 작업수행시간에 영향을 미칠 수 있는 작업자 이동시간을 고려했다. 역시 사례에 적용한 결과, 실제 작업 수행에 걸린 시간이 좀 더 실제 데이터와 근접함으로써 작업 생산성의 값이 보정되는 것을 알 수 있었다.

구간 ①에서는 2차 보정을 거친 데이터와 실제 데이터 간의 차이가 가장 커서 본 모델의 효용이 가장 낮다. 이는 첫 번째 구간에서 공통적으로 나타나게 되는 본 모델의 대표적인 한계점이라 할 수 있으며, 첫 번째 구간의 두 가지 특징으로부터 비롯한다. 먼저, 작업의 첫 번째 구간에서는 본 모델의 2차 보정 상쇄 요인인 작업자 이동시간의 영향이 상대적으로 적다. 또한 그 시점이 해당 프로젝트의 초기라는 점에서 작업자가 프로젝트 자체의 정보 습득 및 작업

환경에 적응하는 데 어느 정도의 시간이 소요될 것이라고 예상할 수 있다. 본 모델이 위의 특성들을 충분히 반영하지 못하여 그 영향을 크게 받는 첫 번째 구간의 보정이 다른 구간에 비해 미흡하다고 볼 수 있다.

다른 한계점으로는 1차 보정에서 학습곡선효과 적용 시, 이론에 의해 실제 데이터의 각 구간 첫 번째 작업시간 값을 그대로 사용하기 때문에 2차 보정 과정에서 각 구간의 초기 생산성 값들이 실제 데이터보다 작아지는 현상이 발생했다. 이로 인해 본 모델을 적용하는 경우, 각 구간의 초기 값들은 항상 실제 값보다 작아진다는 한계를 가진다. 또한 마지막 구간인 구간 ③의 경우 구간의 길이가 충분하지 않아서 그 패턴과 값을 보정하는 데 어려움이 있었다. 따라서 구간 ③과 같이 비교적 짧은 작업 구간들로 이루어진 초고층 프로젝트의 경우 본 모델을 이용하기 어렵다.

5. 결론

본 연구는 초고층 프로젝트 수행 시 기존 이론의 학습곡선효과 발생을 상쇄시키는 요인에 대해 분석하고 이를 반영한 작업 생산성 산정 모델을 제시하였다. 또한 학습곡선효과와 작업 생산성간의 관계를 분명히 하고, 효과 발생 여부를 넘어 발현 과정에 대해 보다 깊이 있는 연구를 진행하였다.

이 과정에서 작업의 반복과 비반복 구간에 따라 학습 정도에 차이가 발생하는 현상과 작업자 이동시간이 작업 수행시간에 포함되어 있음이 초고층 프로젝트에서의 학습곡선효과 발현을 상쇄시키는 요인들을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 모델을 통해 초고층 프로젝트 및 건설 작업 특성이 반영된 학습곡선효과와의 적용 가능성을 확인할 수 있으며, 작업 생산성에 관한 구체적인 데이터 산정이 가능함에 따라 학습곡선효과를 고려한 작업 생산성 계획 수립에 도움을 줄 수 있다. 위의 요인들을 반영한 작업 생산성 산정 모델을 프로젝트 수행 초기에 학습효과를 고려한 작업 생산성 계획에 이용하면, 학습의 정도에 따른 작업원 수급 및 편성, 작업조 구성 등에 관해 기존의 학습곡선효과 이론을 적용할 때 보다 더 정확한 예측이 가능할 것이다.

단 본 연구의 작업 생산성 산정 모델은 구간별로 평면변화가 발생하는 초고층 프로젝트로 그 적용 범위가 한정되어 있으므로 일반 초고층 프로젝트에의 적용 시, 별도의 검증이 필요하다. 또한 본 연구에서 제시한 모델은 학습정도 및 생산성의 척도로 해당 작업의 '물량'을 적용하였는데, 본 모델을 다른 공정 전반에 적용하기 위해서는 위의 기준에 적합하도록 환산하는 등의 추가 연구가 필요할 것이다. 아울러 연구에서 제시한 두 가지 상쇄요인 이외의 다른 요인의 존재에 대한 가능성이 있으며 이에 관한 후속 연구가 진행된다면 본 연구의 작업 생산성 모델의 적용성을 더 높

일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업(09첨단도시A01) 결과의 일부이며, 서울대학교 건설환경종합연구소의 연구비 지원으로 수행되었음에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- Adler, P. S. and Clark, K. B. (1991). "Behind the learning curve: A sketch of the learning process", *Management Science*, 37(3), pp. 267-281.
- Amor, J. P. and Teplitz, C. J. (1998). "An efficient approximation for project composite learning curves", *Project Management Journal*, 29(3), pp. 28-42.
- Barney, G. C. (2003). *Elevator Traffic Handbook: Theory and Practice*, Taylor & Francis Routledge.
- Cherrington, J. E., Lippert, S. and Towill, D. R. (1987). "The effect of prior experience on learning curve parameters", *International Journal of Production Research*, 25(3), pp. 399-411.
- COUTO, J. P. and TEIXEIRA, J. C. (2005). "Using linear model for learning curve effect on highrise floor construction", *Construction Management and Economics*, 23(4), pp. 355-364.
- Cunningham, J. A. (1980). "Using the learning curve as a management tool", *Spectrum, IEEE*, 17(6), pp. 45-48.
- Farghal, S. H. and Everett, J. G. (1997). "Learning Curves: Accuracy in Predicting Future Performance", *Journal of Construction Engineering and Management*, 123(1), pp. 41-45.
- Gates, M. and Scarpa, A. (1972). "Learning and experience curves", *Journal of the Construction Division*, 98(1), pp. 79-101.
- Hegazy, T. and Kamarah, E. (2008). "Efficient Repetitive Scheduling for High-Rise Construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(4), pp. 253-264.
- Herbsman, Z. and Ellis, R. (1990). "Research of factors influencing construction productivity", *Construction Management and Economics*, 8(1), pp. 49-61.
- Hijazi, A. M., AbouRizk, S. M. and Halpin, D. W. (1992). "Modeling and Simulating Learning Development in Construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, 118(4), pp. 685-700.
- Hinze, J. and Olbina, S. (2009). "Empirical Analysis of the

- Learning Curve Principle in Prestressed Concrete Piles”, *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(5), pp. 425-431.
- Jarkas, A. (2010). “Critical Investigation into the Applicability of the Learning Curve Theory to Rebar Fixing Labor Productivity”, *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(12), pp. 1279-1288.
- Jarkas, A. and Horner, M. (2011). “Revisiting the applicability of learning curve theory to formwork labour productivity”, *Construction Management and Economics*, 29(4) , pp. 483-493.
- Jelen, F. C. and Black, J. H. (1983). *Cost and optimization engineering*, McGraw-Hill, New York.
- Jeon, Y. D. and Lee, J. S. (2001). “A calculation method on the loss of labor productivity due to change order”, *Proceeding of Korean Institute of Construction Engineering and Management*, pp. 295-300.
- Kim, T. W., Lee, H., Park, M. and Yu, J. (2011). “Productivity Management Methodology Using Productivity Achievement Ratio”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(1), pp. 23-31.
- Lee, B., Park, M., Lee, H., and Kim, H. (2012). “Analysis of Applicability of Learning Curve Effect in Construction”, *Proceeding of Korean Institute of Construction Engineering and Management*, pp. 225-226.
- Lee, H. S., Shin, J.W., Park, M. and Ryu, H. G. (2009). “Probabilistic Duration Estimation Model for High-Rise Structural Work”, *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(12), pp. 1289-1298.
- Liberda, M., Ruwanpura, J. and Jergeas, G. (2004). “Construction Productivity Improvement: A Study of Human, management and External Issues”, *Construction Research Congress*, pp. 1-8.
- Lutz, J. D., Halpin, D. W., and Wilson, J. R. (1994). “Simulation of Learning Development in Repetitive Construction”, *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(4), pp. 753-773.
- NGUYEN, L. D. and NGUYEN, H. T. (2012). “Relationship between Floor Number and Labor Productivity in Multistory Structural Work: A Case Study”, *Construction Research Congress*, pp. 1520-1529.
- Oglesby, C. H., Parker, H. W. and Howell, G. A. (1989). *Productivity Improvement in Construction*, McGraw-Hill Inc., New York.
- Park, M., Ha, S., Lee, H., Choi, Y., Kim, H. and Han, S. (2013). “Lifting demand-based zoning for minimizing worker vertical transportation time in high-rise building construction”, *Automation in Construction*, 32, pp. 88-95.
- Thomas, H. R. (2009). “Construction Learning Curves”, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 14(1), pp. 14-20.
- Thomas, H. R., Mathews, C. T. and Ward, J. G. (1986). “Learning Curve Models of Construction Productivity”, *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(2), pp. 245-258.
- United Nations Committee on Housing Building and Planning (1965). *Effect of repetition on building operation and processes on site, ST/ECE/HOU/14*, United nations, New York.
- Wong, P. S. P., Cheung, S. O. and Hardcastle, C. (2007). “Embodying Learning Effect in Performance Prediction”, *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(6), pp. 474-482.
- Wright, T. P. (1936). “Factors Affecting the Cost of Airplanes”, *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3(4), pp.122-128.
- Yelle, L. E. (1979). “The Learning Curve: Historical Review and Comprehensive Survey”, *Decision Sciences*, 10(2), pp. 302-28.

요약: 건설 프로젝트 내의 작업의 반복성에 주목하여 건설산업에의 학습곡선효과 적용에 관한 연구가 꾸준히 이루어졌다. 그러나 충분한 반복 작업을 가지는 초고층 프로젝트에서 학습곡선효과가 실제로 발생하는가에 대한 논란은 지속되고 있다. 이에 관해 기존의 연구들은 실제 건설 현장의 작업 생산성 데이터 분석을 통해 효과의 유무를 검증하였으나 작업 생산성의 향상 여부에만 초점을 맞추고 있을 뿐, 효과가 발생하는 과정에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 이에 본 연구는 초고층 프로젝트에서 학습곡선효과가 발현되는 과정에 영향을 미치는 요인들을 분석하여 그 효과를 상쇄시키는 요인들을 찾고, 이를 반영한 작업 생산성 산정 모델을 제시하고자 한다. 이를 통해 기존의 이론을 보완하고 건설산업에서의 학습곡선효과 이론을 재정립하는 데 기여할 수 있다.

키워드: 학습곡선효과, 초고층 프로젝트, 작업 생산성
