

# 건설 시뮬레이션을 활용한 커튼월 적층공법의 생산성 분석방안

## A Productivity Analysis Method of Curtain Wall Works Using Construction Simulation

박 동 근*	이 경 석**	유 병 인***	김 영 석****	한 승 우*****
Park, Dong-Geun	Lee, Kyung-Suk	Yu, Byung-In	Kim, Young-Suk	Han, Seung-Woo

### 요 약

최근 사회 경제적 요구의 증가, 건설기술 및 공법의 발전, 고객의 다양화 등 건설 환경의 급격한 변화로 인해 고층건물이 과거에 비해 크게 증가하고 있으며, 고층화 및 고급화 경향에 따라 고층 오피스공사의 외부마감으로만 사용되던 커튼월공사가 고층 아파트 및 주상복합의 외부마감으로 확대 사용되고 있다. 전체 공사비의 10~15%를 차지하는 주요 공법인 커튼월 공사는 최근 공기단축을 목적으로 골조공사가 시작한 일정시점 이후부터 커튼월 공사를 동시에 시작하는 방식인 적층공법이 많이 사용되고 있다. 하지만 커튼월 적층공법은 두 작업이 동시에 진행됨으로써 발생하는 작업 간 간섭에 의해 커튼월 공사의 공기가 지연이 되는 문제점이 있는데, 노무자 투입에 관한 방법론과 전산화 시스템의 부재로 인해 효율적인 해결책이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 이를 위한 방안으로 가상공간에서 실제공사를 수행하기 전 미리 문제점을 예측하고 분석할 수 있는 건설 시뮬레이션 기법이 있지만 아직 건축공사에는 그 적용이 전무한 실정으로 이 논문에서는 대표적인 건설 시뮬레이션 기법인 사이클론을 이용하여 커튼월 적층공법의 작업 프로세스 일반화 모델을 개발하여 노무 및 장비 자원의 투입량에 따른 작업 생산성을 예측하였다. 이 연구의 결과는 현장관리자의 노무 및 장비 투입을 위한 효과적인 의사결정 도구로 활용될 수 있으며, 공기지연 시 원인분석 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 커튼월 적층공법, 건설 시뮬레이션, 사이클론, 시뮬레이션 모델

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

최근 사회경제적 요구의 증가, 건설기술 및 공법의 발전, 고객의 다양화 등 건설환경의 급격한 변화로 인해 고층건물이 과거에 비해 크게 증가하고 있으며, 과거 고층 오피스공사의 외부마감으로 주로 사용되던 커튼월 공법이 고층화 및 고급화 추세에 따라 고층 아파트 및 주상복합 건물에 확대 사용되고 있다.

커튼월공사는 고층건물의 공기 단축을 위해 가장 많이 활용되는 외부마감 공법으로서 전체 공사비의 10~15%를 차지하는 주요 공정 가운데 하나이다. 커튼월 공사는 대량의 커튼월 자재를 운반하고 설치하는 작업의 반복을 통해 수행되는 작업으로서, 장비 및 노무자에 대한 의존도가 높고, 선행 작업으로 골조공사 후행작업으로는 내부마감공사와 연계되어 설치되는 특징이 있다.

최근 공기 단축을 목적으로 많이 사용되는 커튼월 적층공법은 골조공사가 시작된 일정시점 이후부터 커튼월공사를 동시에 수행하는 공법으로서 공기 단축에 매우 효과적

인 공법으로 각광받고 있으나 커튼월 적층공법이 수행되는 과정에서 투입되는 노무 및 장비 자원에 따라 골조공사와 자주 간섭을 일으키기 때문에 이론적으로 가능한 공기보다 상당시간 지연되는 문제점이 있다.

현장관리자는 이러한 문제점을 해결하고자 선행공사의 축적자료를 활용하여 장비 및 노무 자원의 투입 계획을 세우지만, 축적자료를 활용한 대안은 실제 작업에 적용하는 과정에서 장비 및 노무자의 투입을 번복하게 되는 문제점이 나타나는 것으로 분석되었다. 이는 커튼월 공사의 현장관리자가 장비 및 노무자의 투입 관리에 활용할 수 있는 방법론의 부재로 판단되며 최적 생산성을 기대할 수 있는 도구의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구의 목적은 건설 시뮬레이션 기법을 이용하여 커튼월 적층공법의 커튼월 공사에 대한 일반화 모델을 제시하고, 일반화 모델을 통해 세부작업 시간에 따른 최적 생산성을 기대할 수 있는 장비 및 노무자의 작업 생산성 증진을 위한 조합을 산출하는 것이다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

커튼월 적층공법에서 커튼월공사의 장비 및 노무자의 투입에 관한 개선방안을 도출하기 위해서는 현장에서 발생하는 작업 간 간섭에 의한 생산성 영향요인의 파악이 선행되어야 한다. 이를 위해 현장관리자 인터뷰, 관련 연구문헌 및 기술개발동향 분석을 수행하였으며 현장에서의 장비 및

\* 일반회원, 인하대학교 건축공학과, 공학석사, orientalroot@hotmail.com

\*\* 일반회원, 인하대학교 건축공학과, 석사과정, llkslls@hanmail.net

\*\*\* 일반회원, 인하대학교 건축공학과, 석사과정, ybi2222@gmail.com

\*\*\*\* 종신회원, 인하대학교 건축공학과, 부교수, youngsuk@inha.ac.kr

\*\*\*\*\* 종신회원, 인하대학교 건축공학과, 조교수, shan@inha.ac.kr

노무자 투입계획의 한계성을 극복하고 커튼월 작업의 최적 생산성을 도출할 수 있는 시뮬레이션 일반화 모델을 제안하였다.

커튼월공사의 종류로는 유닛형 커튼월과 스틱형 커튼월이 있으나, 운반, 양중, 설치작업이 비교적 단순하여 고층건물의 커튼월 적층공법 중 70%정도의 비율(조경환,2007)로 사용되고 있는 유닛형 커튼월을 연구의 대상으로 한정하였고 이를 위한 연구 방법은 다음과 같다.

- 1) 커튼월공사에 대한 이론적 고찰 : 커튼월 적층공법의 문제점을 분석하고 국내외 관련 연구문헌을 고찰한다.
- 2) 커튼월 적층공법의 생산성 측정 및 분석 방법 제시: 전문가 인터뷰를 통해 커튼월 적층공법의 생산성 영향요인을 도출하고, 커튼월 적층공법의 생산성 분석 방법을 제시한다.
- 3) 현장 데이터 수집 및 일반화 모델 제시 : 커튼월공사의 세부작업 사이클 타임을 분석하고 커튼월 적층공법의 일반화 모델을 제시한다.
- 4) 시뮬레이션 결과 분석 및 일반화 검증 : 커튼월 작업 프로세스 모델링을 코드화하여 시뮬레이션 결과를 분석하고, 통계기법을 이용하여 일반화 모델을 검증한다.

## 2. 커튼월 공사에 관한 이론적 고찰

### 2.1 커튼월공사의 적층공법의 문제점

커튼월 공사의 적층공법은 한정된 범위의 공사현장에서 골조공사와의 동시작업이 이루어지는 것으로 골조 공사에 비해 커튼월 작업의 공기관리가 어려운 특징이 있다. 골조 공사와의 간섭으로 인해 공기지연이 발생이 되면 현장관리자는 선행공사의 축적자료를 활용하고 기술 회의를 하며 당사자의 직감 및 경험으로 판단하여 노무자의 투입 또는 야간작업을 진행하는 돌판 작업을 하여 공기를 맞춰오고 있기 때문에 현장적용 과정에서 장비 및 노무자를 추가로 투입하는 실수를 반복을 하게 된다. 이는 현장관리자가 활용할 수 있는 공기지연을 줄이기 위한 방법론의 부재로 판단되며 최적 생산성을 기대할 수 있게 하기 위한 도구의 개발이 시급한 것으로 판단된다. 따라서 현장의 다양한 조건을 고려하여 프로세스를 가상공간에서 미리 구현하고 장비 및 노무자의 조합을 도출 할 수 있는 시뮬레이션 기법을 활용하여 해결할 수 있을 것이다.

### 2.2 국내외 관련 문헌고찰

건설 시뮬레이션을 활용하여 공사의 생산성을 도출한 국내외 관련 문헌은 표 1과 같았으며, 주로 토목공사의 공법을 대상으로 작업의 사이클 타임을 측정하고 생산성을 비교한 문헌들이 주를 이루었다. 하지만 국내외 관련문헌은 공법의 비교를 위해 건설 시뮬레이션을 사용했을 뿐 작업 프로세스 상의 생산성을 증진시키기 위한 방안이나 활용을 위한 방법론을 제기하지 못하였고 건축공사 분야의 적용 확대를 위한 방안을 제시하지 못한 한계가 있었다.

표 1. 국내외 논문분석

문헌	저자	내용
섬유강화 폴리머 및 프리캐스트 콘크리트 상판의 시뮬레이션 모델	홍태훈 의 3명 (2005)	섬유강화 폴리머를 활용한 교량상판의 시공 생산성을 파악하기 위해 기존의 프리캐스트 콘크리트 교량상판의 시공생산성을 건설시뮬레이션으로 비교, 분석 하였다.
카 리프트의 성능변화에 따른 터널공사 버력처리 공정 생산성 분석 연구	이시욱 의 2명 (2006)	도심지 지하철 터널현장의 버력처리 공정을 대상으로 카 리프트의 속도의 변화에 따른 세부작업의 작업 시간을 측정 후 시뮬레이션을 사용하여 생산성을 비교 분석하였다.
기성 콘크리트 파일 두부정리 자동화 장비 개발에 관한 연구	박상준, (2005)	개발 중인 두부정리 자동화 장비를 대상으로 재래식 방식과의 작업시간 및 생산성을 건설시뮬레이션을 활용하여 비교분석하였다.
Application modeling of the conventional and the GPS-based earthmoving systems	Han, S.W. (2005)	재래식 토공시스템과 최신 현장에서 도입되고 있는 GPS기반의 토공시스템의 생산성을 건설 시뮬레이션으로 비교 분석하였다.

이와 달리 본 연구에서는 커튼월 공사를 대상으로 일반화 모델을 제시하여 문제점 개선을 위한 방법론을 제시할 것이며, 서로 다른 대상을 비교하는 방식이 아니라 한 가지 공정에 대하여 일반화 모델링을 수행한다. 이는 건설 시뮬레이션 방식을 건축공사 영역으로 확대시킬 수 있을 것이며 장비 및 노무자의 조합에 의한 공사의 생산성 예측을 가능하게 할 수 있다.

## 3. 커튼월 적층공법의 생산성 측정 및 분석 방법

### 3.1 사이클론의 개요

Halpin(1992)에 의해 개발된 사이클론(CYCLONE) 기법은 대표적인 건설 시뮬레이션 기법 중 하나로서 순환되는 작업의 정보를 구성하는 네트워크를 나타낸다. 사이클론은 자원 및 작업시간, 작업간의 논리적인 상호관계를 적용시킨 생산성 측정을 위한 관리도구로, 작업관계를 단순화하여 표현할 수 있으며, 텍스트 위주가 아닌 그래프와 표를 통한 표현기법으로 결과를 도출함으로써 평가가 용이하고 다양한 프로세스 분석이 가능한 장점이 있다. 사이클론 시뮬레이션 기법을 사용할 경우, 대상 공종의 프로세스 모델링을 통해 건설관리자가 쉽게 프로세스 내에서 발생되고 있는 문제점의 분석 및 평가가 가능하며, 개선방안을 도출하여 보다 효율적인 작업 프로세스를 제안할 수 있다. 사이클론 독립적인 모듈로 구성되어있으며, 각각의 모듈은 전체 시스템의 개개의 부분을 관리하고 있다. 모듈은 데이터 입력 모듈, 시뮬레이션 모듈, 결과 생성 모듈, 민감도 분석 모듈, 통계 분석 모듈로 구성되어 있다.

### 3.2 커튼월 적층공법의 생산성 영향요인과 측정방법

#### (1) 커튼월 적층공법의 생산성 영향요인 도출 및 구분

커튼월공사의 최적 생산성을 기대하기 위해서는 우선 공기지연에 영향을 미치는 요인이 도출되어야 한다. 이를 위해 커튼월 적층공법이 적용 중인 현장 또는 커튼월 적층공법을 수행해 본 경험이 있는 종합건설업체와 전문건설업체 현장관리자를 대상으로 전문가 인터뷰를 실시하였다. 그 결

과 공사 중에 발생하는 공기지연에 관한 생산성 영향요인이 표 2와 같이 도출되었으며 인터뷰를 통해 현장에서 관리 가능한 요인과 불가능한 요인을 구분하였다.

표 2 생산성 영향요인의 구분

생산성 영향요인	설명	현장관리
자재의 공급	자재의 가격 변화에 따른 자재 수급 문제	무
날씨에 의한 작업 중지	날씨의 변화에 의한 양중 및 설치작업의 유무	무
위험 작업에 의한 작업 중지	골조공사의 위험한 작업에 의한 공사 중지	유
설계의 오류	설계도면의 오류에 의한 작업변경	무
노무자 투입수	노무자의 출역 및 작업인력 관리의 미비	유
장비의 활용	복합적인 공사의 진행으로 인한 장비의 효율성 문제	유
공장생산자에 의한 자재 생산 일정의 변경	공장생산자에 의한 자재공급의 지연	무

건설 시뮬레이션으로 수집되는 자료들은 물리적인 특성을 지니는 것이기 때문에 현장관리차원에서 통제할 수 있는 범위인 장비와 노무자 투입의 조직작업을 커튼월 시공의 영향요인으로서 한정하였다.

(2) 영향요인을 고려한 생산성 데이터 측정방법

시뮬레이션을 이용한 일반화 모델에서는 노무자와 장비의 투입에 관한 영향요인이 적용 가능하고, 작업의 생산성이 좌우된다는 것을 알 수 있다. 커튼월공사는 커튼월 유닛의 운반, 양중, 그리고 설치로 이루어진 일련의 작업 사이클로 구성되며 이런 과정의 반복을 통해 완성됨으로 커튼월공사의 최적 생산성이라 즉 장비와 노무자의 작업시간 상에 지연되는 시간이 존재하지 않는 조건하에서 장비와 노무자 투입수라고 말할 수 있다.

따라서 장비와 노무자의 조합에 의한 작업시간은 커튼월공사의 작업생산성을 분석하기 위한 데이터로 사용된다. 커튼월공사의 장비 및 노무자의 시간측정은 세밀한 작업의 측정이 가능하고 측정대상자의 심리적인 부담감을 줄일 수 있는 장점을 가진 Stopwatch방식과 녹화 후 작업 진행과정을 반복하여 재생할 수 있는 장점을 가진 비디오 측정법을 병행하여 사용한다.

3.3 커튼월 적층공법의 생산성 분석방법

앞서 언급한 바와 같이 현장 내에서 현장관리자가 직접 관리할 수 있는 생산성 영향요인을 분석하여 장비와 노무자의 최적조합으로 최적생산성을 기대할 수 있다. 커튼월의 인양 및 운반을 위한 장비로는 타워크레인, 호이스트, 윈치, 포크리프트는 현장에서 필수적으로 사용되며, 하이드로 크레인과 고소 작업대는 작업 진행 상 필요에 따라서 추가로 투입된다. 노무자는 작업조 단위로 구분되어 세부작업에 투입되는데 커튼월 적층공법에서 작업조는 2명의 운반 작업조, 7명의 설치 작업조로 구성되고 설치 작업조는 1명의 윈치 조정자, 2명의 고정철물 조립자, 4명의 커튼월 설치 작업자로 구성된다. 양중작업은 골조공사와 커튼월공사에서 공통적으로 실행되며 2명으로 구성된다. 아래의 표 3은 본 논문에서 다룬 장비와 노무자의 작업 세분화를 설명한 것이며 사이클 타임을 측정하기 위한 기준이 될 것이다.

표 3 자원의 조합에 의한 작업의 세분화

작업구분	자원	세부작업 프로세스
호이스트 양중	호이스트	대기 → 양중준비 → 양중 → 대기
	노무자	대기 → 적재 → 양중준비 → 대기
윈치 양중 및 설치	윈치	대기 → 와이어 하강 → 자재결속 → 양중 → 부재설치 → 이동 → 대기
	노무자	대기 → 자재결속 → 대기 → 부재설치 → 대기
노무자 운반	노무자	대기 → 이동 → 자재운반 → 대기

4. 커튼월 적층공법의 생산성 개선방안

4.1 현장 데이터 수집

작업 프로세스 일반화 모델의 개발은 커튼월 공사 사이클 타임 데이터를 수집하는 과정에서 우선적으로 현장 별로 각기 다른 환경을 제약해야 한다. 따라서 현장을 선택하는 기준은 유사한 장비의 활용과 노무자의 투입수 그리고 커튼월의 종류가 고려되어야 한다. 본 연구에서는 현장을 선택하는 기준으로 고층건물의 커튼월 적층공법 중 70%정도의 비율로 사용되는 유닛형 커튼월을 대상으로 호이스트에 의한 양중 여부, 노무자의 작업조 구성을 고려하였다. 현장의 데이터는 총 3곳의 커튼월 적층공법이 적용중인 현장을 대상으로 수집되었다. 데이터 측정을 위한 현장조사는 2007년 10월 11일에서 2007년 11월 28일까지 현장 세 곳을 5차례에 걸쳐서 시간측정과 비디오 녹화방식을 통해 자료를 수집하였다.

(1) 현장의 커튼월공사 분석

현장조사 결과 3곳의 현장의 장비 및 노무자는 다음과 같이 구분된다. 커튼월공사에 투입되는 장비의 종류는 자재양중을 위한 호이스트와 커튼월 설치를 위한 윈치이며, 노무자는 작업의 형태 별로 야적장 자재운반 작업조, 층별 자재운반 작업조, 커튼월 설치 작업조로 구성된다. 커튼월 공사의 세부작업을 표 4와 같이 14가지로 분할하였다.

표 4 커튼월 공사 세부작업

순서	작업내용	순서	작업내용
1	자재 운반	8	층별 운반작업자 이동
2	양중 준비	9	설치 준비
3	호이스트 양중	10	설치 위치 운반
4	운반작업자이동	11	윈치 위치 이동
5	자재 하차	12	윈치 긴결
6	호이스트 하강	13	커튼월 위치 고정
7	층별 적재소 운반	14	커튼월 설치

현장으로 반입된 커튼월은 지식층의 운반 노무자에 의해 호이스트로 운반되기 전까지 대기 상태를 유지한다. 지상층의 운반 노무자는 커튼월 적재 장소에서 호이스트로 커튼월을 운반한 후에 다음 커튼월의 운반을 위해 적재장소로 이동하여 운반을 준비한다. 호이스트로 운반된 커튼월은 호이스트 양중 준비 단계를 거쳐 해당층으로 양중되고 해당 층에 도착한 커튼월은 해당층 적재장소로 운반노무자에 의해 운반된다. 해당층 커튼월 설치 노무자는 적재소의 커튼월에 고정철물을 조립한 후에 작업위치로 운반한 후에 윈치에 긴결시킨다. 설치 노무자와 윈치는 설치위치에서 커튼월 조

립위치에 맞추어 설치하고 설치가 끝난 후 윈치는 다음 설치 위치로 이동하면서 커튼월 1유닛의 1사이클 작업 프로세스는 종료하게 된다.

#### (2) 커튼월공사의 세부작업 사이클 타임 측정

커튼월공사의 세부작업 사이클 타임을 측정하기 위해 건물 외부에서 작업이 이루어지는 자재 운반, 양중 준비, 호이스트 양중, 운반작업자 이동은 Videotape Recording Method를 사용하여 시야 확보가 가능한 위치에서 녹화하였고 층별 운반, 층별 야적장운반, 설치 준비, 설치위치 운반, 윈치 긴결, 커튼월 위치 고정, 커튼월 설치는 Stopwatch Study를 사용하여 측정하였다. 아래의 표 5는 세부작업으로 나누어 총 25회를 측정하여 각 작업의 평균 시간을 나타낸 것이다.

표 5 현장 측정 사이클 타임

작업내용	A현장	B현장	C현장	총평균시간
측정횟수	13회	7회	5회	총 25회
운반작업자 이동	33.23	35.29	28	32.2
양중운반	86.31	97.14	90.8	91.4
하강	30	30	30	30
양중준비	16	16.29	9.2	13.8
양중(10층기준)	30	30	30	30
운반작업자 이동	15.62	22.43	23.4	20.5
층별운반	13.69	13.71	11.6	13
층별 야적장 운반	83.69	97	83	87.9
설치준비	147.62	138.71	134.4	140.2
설치위치운반	20.23	20.57	21.2	20.7
윈치이동	56.23	63.43	52.6	57.4
윈치긴결	21.85	22.57	16.6	20.3
윈치위치고정	18.46	19.14	25	20.9
커튼월설치	226.23	248.86	252.2	242.4

#### 4.2 커튼월 적층공법의 일반화 모델 제시

커튼월 공사는 표 4에서와 같이 14가지 세부작업으로 이루어져 있다. 이러한 세부작업은 크게 호이스트와 노무자에 의한 양중작업과 윈치와 노무자에 의한 관계로 구분할 수 있으며 두 가지의 세부작업을 사이클론 요소를 이용하여

논리관계를 수립하고 아래 그림 1과 같이 사이클론 모델을 제안하였다.

적층공법이 적용중인 현장을 대상으로 조사 측정한 데이터를 기초로 사이클론의 요소를 활용한 모델링 작업으로 작업 간 논리관계가 표현되었고 이를 통해 커튼월공사의 작업프로세스 모델링을 구축한 것이다. 이러한 조사 결과로 만들어진 커튼월의 작업프로세스 모델은 사이클 타임을 활용하여 커튼월공사 전체의 생산성을 파악할 수 있고 또한 커튼월 적층공법으로 진행되었던 커튼월공사의 생산성 비교를 통해 일반화가 가능해지기 때문에 사이클 타임을 활용하여 시뮬레이션 분석을 실시 할 수 있게 된다.

시뮬레이션의 분석은 커튼월 작업프로세스 모델링을 코드화하고 웹으로 구현되어 있는 사이클론에 입력하여 생산성을 도출하게 되며 시뮬레이션의 민감도 분석을 통해 장비 및 노무자의 투입수를 변화하여 생산성의 변화 값을 파악할 수 있다.

#### 4.3 시뮬레이션 결과

##### (1) 커튼월공사의 생산성

위와 같이 코드화 결과물을 사이클론 프로그램에 입력하여 시뮬레이션 한 생산성 결과 값은 0.00276이 측정되었고 내용은 그림 2와 같다.

CurtainWall		
PRODUCTIVITY INFORMATION		
Total Sim. Time Unit	Cycle No.	Productivity (per time unit)
29989.8	83	0.002767907652568766

그림 2 Cyclone 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 200회의 사이클을 수행하도록 설정하였고 사이클론에서는 설정된 사이클을 수행한 전체 구동시간이 표현되므로 커튼월 100개에 k대한 200회 사이클을 구동하기 위해 소요되는 전체 구동시간은 29989.8초로 도출되었다. 단위시간(sec)당 회전율은 총 사이클을 전체 구동시간

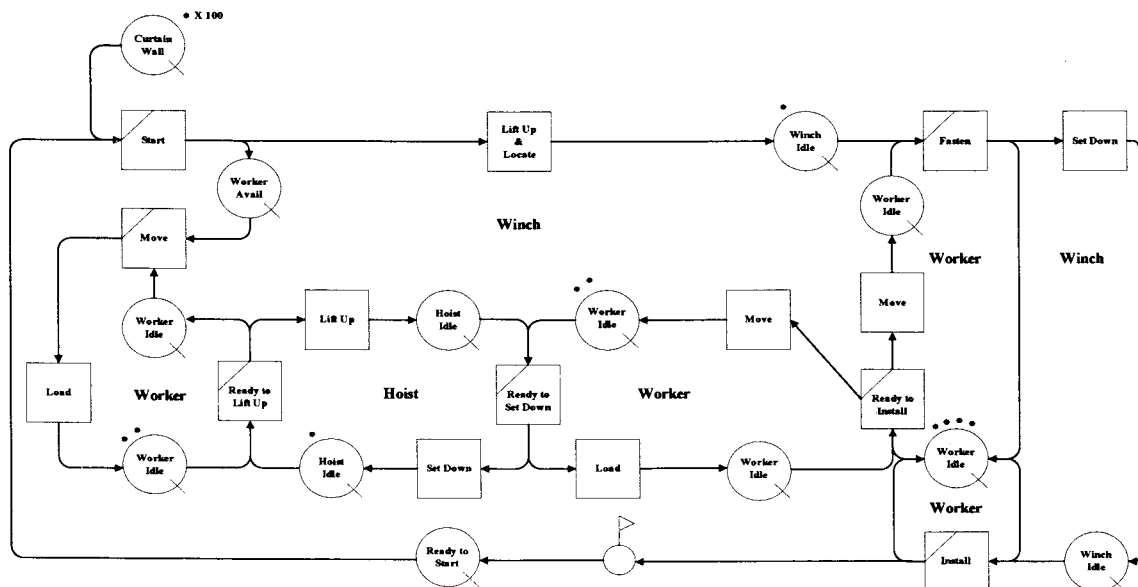


그림 1 커튼월 공사 작업 프로세스 모델링의 논리관계

으로 나누어 산출된다. 세부작업에 소요되는 커튼월 1 유닛 당 작업시간은 전체 구동시간인 29989.8초에서 사이클 회수인 83회로 나눈 결과, 직업 간 간섭의 영향이 없을 경우 커튼월 운반에서 설치까지 커튼월 1유닛당 소요되는 작업 시간은 361.32초로 도출된다.

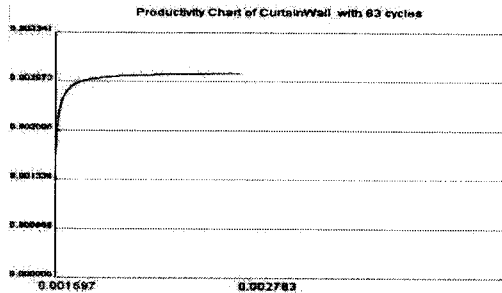


그림 3 커튼월 공사의 작업생산성

그림 3은 커튼월공사의 생산성을 표현한 그래프이다. 생산성 그래프는 사이클이 반복됨에 따라 일정한 값에 수렴한다. 일정한 수렴되는 결과 값은 200회의 사이클을 시뮬레이션 상에서 입력하여 0.00276의 생산성 값을 도출하였다. 이는 단위시간인 1초당 0.00276 사이클을 수행한다는 의미이다.

(2) 커튼월공사의 민감도 분석

커튼월공사에 투입되는 장비는 호이스트와 윈치이며 각 작업의 작업조는 지상층 운반노무자 2명, 해당층 운반노무자 2명, 설치 노무자 4명으로 구성되어 있다. 작업조 수의 2배 투입은 노무자 수의 2배 투입과 연관된다. 만약 운반노무자의 수를 3명으로 증가시키면 작업조에 해당되는 노무자의 수가 변화하게 된다. 따라서 노무자의 투입은 작업조를 고려한다. 시뮬레이션의 민감도를 분석한 결과 호이스트의 투입수는 생산성에 영향을 미치지 못하며 지상층 운반 노무자와 해당층 설치 노무자를 3배로 늘리고 윈치를 2대 더 투입시키는 조건에서 작업의 생산성이 3배로 증가하는 것으로 도출되었다. 이는 장비 및 노무자의 투입에 따라서 커튼월공사의 작업 프로세스 생산성이 영향을 받으며 일반화 모델을 통해 예측할 수 있는 도구로 활용된다.

4.4 커튼월공사의 작업프로세스 일반화 모델링의 검증 및 예측

장비 및 노무자의 투입수에 의한 커튼월공사의 생산성을 예측하기 위해서는 커튼월공사의 작업프로세스 모델링이 일반화되어야 한다. 따라서 본 절에서는 최근 공사가 완료된 현장의 실적데이터와 인터뷰결과와 수집된 현장의 데이터 값을 활용하여 일반화 모델을 검증하기 위해 통계기법을 이용한 분석 및 일반화 모델에 적용시켜 도출되는 결과 값과 공사의 실적자료를 비교하여 검증을 실시하였다.

(1) 통계기법을 활용한 검증

통계기법을 활용한 검증은 동일한 현장의 실제 시간 당 작업 프로세스의 사이클 숫자와 일반화 모델링 결과로 도

출된 시간 당 작업 프로세스의 사이클 숫자를 비교하여 실시한다. 데이터의 검증은 비모수 통계기법 중 윌콕슨 부호 순위 검정(Wilcoxon's signed rank test)을 통해 검증한다. 이는 두 데이터의 분포의 동일성 검정을 위해 활용되며 시뮬레이션 값과 실제 데이터 값의 동일성을 비교함으로써 건설 시뮬레이션이 일반화 모델로 적합하다는 검증을 나타낸다. 3개 현장의 실제 시간당 작업 프로세스 사이클은 시간당 4, 4, 5, 3, 4, 4 사이클로 도출되었고, 시뮬레이션을 통해 분석된 시간 당 사이클은 10, 10, 10, 9, 9, 9 사이클로 도출되었다. 시간 당 사이클 숫자를 SPSS 통계 소프트웨어를 이용하여 분석한 결과 근사 유의확률(p-value)은 0.024로 0.01보다 큰 값이 도출되었다. 이는 신뢰도 99%내에서 만족하는 값에서 유의수준 0.01의 값보다 크므로 두 데이터 간의 차이가 없음을 나타낸다. 실제 시간 당 작업 프로세스의 사이클과 일반화 모델링 결과로 도출된 시간 당 작업 프로세스의 사이클 수치는 근사한 값을 나타내며 이는 일반화 모델로 적합함을 의미한다.

(2) 커튼월공사의 작업프로세스 일반화 모델링의 예측

검증을 위한 두 번째 방법으로는 현장의 데이터를 시뮬레이션으로 분석한 결과와 실제 커튼월공사 계획상의 생산성을 분석하는 방법이다. 일반화 모델 예측을 위한 데이터는 코드화 작업되었고 코드화 된 작업 프로세스를 시뮬레이션으로 분석한 결과 그림 4의 데이터 결과 값을 얻었다.

PRODUCTIVITY INFORMATION		
Total Sim. Time Unit	Cycle No.	Productivity (per time unit)
29826.0	32	0.001072889435336015

그림 4 일반화 모델 예측을 위한 데이터의 결과값

예측을 위한 현장의 데이터 생산성은 분석결과 32개의 유닛에 대한 커튼월 작업의 총 시간이 29826.0초(8시간 28분)로 도출되었다. 따라서 본 현장에서 진행 중인 커튼월공사는 1개 유닛 당 932.0초의 작업속도를 나타내고 있다. 따라서 본 논문에서 제시하는 커튼월공사의 작업프로세스 모델링의 일반화는 통계기법을 활용한 결과와 실제 데이터와 시뮬레이션 분석 결과 데이터가 유의한 값을 지닌다는 결론으로 검증되었다. 이와 같이 검증된 커튼월공사의 작업프로세스 일반화 모델링은 차후 다른 커튼월공사 현장에서 장비 및 노무자의 조합에 의한 커튼월 작업프로세스의 생산성을 예측하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

5. 결론

현장관리자는 커튼월 적층공법이 적용중인 커튼월공사 현장에서 발생하는 공기지연을 해결하기 위해 선행공사의 축적자료 및 경험을 바탕으로 대안을 제시하여 왔다. 그러나 장비 및 노무자의 투입관리에 활용할 수 있는 생산성 분석 방법론의 부재로 인해 대안을 실행하는 과정에서 장비 및 노무자 투입을 반복하는 문제점이 발생되고 있었다. 따라서 본 논문에서는 건설 시뮬레이션을 활용한 커튼월

공사의 작업프로세스 일반화 모델을 개발하여 장비 및 노무자의 조합에 따른 작업프로세스 생산성을 도출하고 이를 예측하였다. 이 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 커튼월 적층공법의 커튼월 공사에서 장비 및 노무자 투입 방법의 문제점을 분석한 결과 현장관리자가 활용할 수 있는 작업프로세스 관련 생산성 분석 방법론의 부재로 인해 현장에서는 장비 및 노무자를 추가 투입하는 등 시행착오가 많이 발생하고 있는 것으로 조사되었다.
- (2) 국내외 관련 문헌 고찰 결과, 건설 시뮬레이션을 활용한 생산성 관련 연구는 주로 토목공사에 한정되어 있었으며 공기지연에 대한 개선방안을 제시하지 못하는 한계점을 지니고 있었다. 본 논문에서는 건축공사를 대상으로 연구의 범위를 확장하고, 커튼월공사 공기지연에 대한 개선방안을 제시하기 위해 일반화 모델을 제안하였다.
- (3) 공기지연을 개선하기 위한 커튼월 적층공법의 생산성 영향요인을 분석한 결과, 위험 작업에 의한 작업중지, 노무자의 투입수, 장비의 활용으로 조사 및 분석되었으며 현장관리자가 직접적으로 통제할 수 있는 생산성 영향요인의 관리대상은 장비와 노무자로 분석되었다.
- (4) 커튼월 적층공법이 적용중인 커튼월 공사 3개 현장을 대상으로 데이터를 수집하였고, 이를 활용하여 커튼월공사의 작업프로세스 일반화 모델을 개발하였다. 그 결과 생산성 측정값은 0.0276으로 측정되었고 민감도의 표를 얻을 수 있었으며 통계기법으로 일반화 모델을 검증한 결과는 유의수준 0.024로 신뢰도 99% 내에서 유의수준 0.01보다 큰 값이 도출되어 일반화 모델의 타당성을 제시하였다.

커튼월공사의 작업프로세스 일반화 모델은 커튼월공사의 생산성을 예측함으로써 현장관리자의 효율적인 장비 및 노무자 관리를 지원하며 진행 중인 현장의 공기지연 발생 시

개선을 위한 분석도구로 활용될 것으로 기대된다. 향후 커튼월 적층공법의 커튼월공사 뿐만 아니라 타 공종으로의 확대 적용과 장비 임대비 및 유지비 그리고 노무비를 포함한 분석에 관한 추가적인 연구가 필요하며, 이를 통해 합리적인 원가계획이 적용된 장비 및 노무자의 최적 조합을 산출할 수 있을 것으로 사료된다.

## 6. 참고문헌

1. 박상준, "기성콘크리트 파일 두부정리 자동화 장비 개발에 관한 연구", 인하대학교 학위논문, 2005.
2. 삼성건설, "초고층 외장공사 시공프로세스 개선을 통한 공기 60일 단축"
3. 안병주 외3, "커튼월공사의 JIT관리를 위한 양중조달시스템 개발에 관한 연구", 한국건축학회 논문집, 2003
4. 윤석찬, "커튼월 적용 시스템 분석 및 검수에 따른 개선사항", 일산M-city 신축공사
5. 원서경 외2, "시스템 다이내믹스를 활용한 토공장비의 조합 모형 연구", 한국건설관리학회 논문집, 2007.
6. 임선옥, "휴대폰을 입은 SK올지로 건설현장", SK건설
7. 이시욱 외2, "카리프트의 성능 변화에 따른 터널공사 버력처리 공정 생산성 분석 연구", 한국건설학회발표대회 논문집, 2006.
8. 정순오 외3, "커튼월 Life Cycle Process의 효율성 향상을 위한 비효율 요인 및 중요도 도출", 한국건설관리학회 논문집, 2005
9. 한승우, "Application modeling of the conventional and the GPS-based earthmoving systems", Purdue University, 2002.
10. 홍태훈 외3, "섬유강화폴리머 교량상판의 적용성 분석", 대학토목학회논문집, 2005.
11. "초고층 건축물의 커튼월", 현대건설
12. Halpin, D. W., "Planning and analysis of construction operation", John Wiley & sons, INC, 1992
13. Web-Cyclone (<https://engineering.purdue.edu/CEM/People/Personal/Halpin/Sim>)

## Abstract

The curtain-wall work has been more frequently applied in the construction industry since demand of high-rise buildings has been increased. The curtain-wall work is usually performed with the frame work simultaneously for reducing construction period, but it might be delayed because of several problems caused by interference of process. However, there is not an appropriate tool which can be used by a work manager for adjusting quantity of the construction equipments or the workers when the curtain-wall work was delayed. To resolve this problem a construction simulation anticipating and analyzing potential problems before starting the work can be applied in the curtain wall work. This research suggests a general model for the curtain-wall work by using construction simulation and produces a combination of construction equipments and workers which can estimate optimum work productivity.

key words : curtain-wall work, construction simulation, cyclone, simulation model