

시뮬레이션 기법을 활용한 고성능 프리캐스트 콘크리트 기둥의 작업프로세스 분석

신영수¹ · 조규만* · 조창근¹

¹조선대학교 건축공학과

Work Process Analysis of the High-performed Precast Concrete Columns using Simulation Technology

Shin, Young-Su¹ · Cho, Kyuman* · Cho, Chang-Geun¹

¹Department of Architectural Engineering, Chosun University

Abstract : Since the structure systems of construction projects have been forced to be large, high-rised, and complex, many researchers have been put their efforts to develop high strength concrete incorporating diverse advanced materials. In order to improve the performance of the concrete, the fibers leading high ductility to concrete have been used, consequently concrete columns adopting High-Performance Fiber Cement(HPFC) have been developed. This paper analyzed not only the construction work process of HPFC column installed to the real construction project, but also construction productivity of the columns by using discrete event simulation technique. As a result, several considerations on installing such a column have identified, compared with the works for typical concrete columns. In particular, there was specific characteristic to install the columns in terms of labor resource productivity, which is not shown with the work for the typical concrete columns.

Keywords : HPFC concrete columns, Work process, Discrete event simulation techniques

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설프로젝트의 시공단계에는 많은 공종들이 존재하며, 그 중 골조공사는 전체 시공단계 중 약 50% 이상을 차지한다(Woo et al, 2008). 이러한 골조공사는 공기 및 공사비 측면에서 매우 중요한 요소로서 작용하며, 이를 절감하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 한편, 최근 건설 구조물의 다양화, 대형화, 고층화 및 장기간화되면서 콘크리트 구조재료에 관한 고성능화가 요구되고 있으며, 특히 콘크리트의 고강도 및 고성능화가 대두되고 있다(Cho 2011). 고강도 및 고성능화 기술로서 특수재료를 콘크리트 배합설계 단계나 시공단계에 접목한 복합체 콘크리트 기술이 활발하

게 연구되고 있다. 특히 배합설계단계에서의 특수재료 혼입 기술은 콘크리트의 물리적, 화학적 특성을 조정하여 건축물이 필요로 하는 구조적, 성능적 기능을 향상시킬 수 있는 기술이다. 본 연구는 특수 섬유재료를 콘크리트에 혼입한 고성능 섬유복합체 시멘트(High Performance Fiber-Reinforced Cement, 이하 HPFC)를 재료로 하는 프리캐스트 기둥(Precast Column) 공법의 작업프로세스를 건설 시뮬레이션 기법을 활용하여 분석하였다. 이를 통해 HPFC 기둥의 현장 설치 작업프로세스 상의 다양한 시공상의 핵심 고려요인을 분석하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

일반적으로 철근콘크리트 구조물의 경우, 지진하중과 같은 횡하중을 받을 경우 기둥 부재에 하중이 집중된다. 특히 기둥 하단부 철근이 항복 및 좌굴하여 콘크리트에 심각한 균열 및 파괴 현상이 나타남과 동시에 내력을 상실하는 양상을 보인다(Lee et al, 2009). 따라서 이를 개선하고자 기둥 부재에 여러 가지 보강재료를 보강공법을 사용하는데, 본 연구는 보강재료로서 HPFC 기술을 접목한 콘크리트 기

* Corresponding author: Cho, Kyuman, Department of Architectural Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea
E-mail: cho129@chosun.ac.kr

Received January 2, 2014; revised February 3, 2014
accepted May 8, 2014

등을 대상으로 연구를 진행하였다. 한편 HPFC 적용은 특수 섬유 재료를 사용함에 따라 기존 골조공사 대비 추가 공정 및 비용이 발생하게 되므로, 공기 및 공사비 증가가 우려된다(Kang et al. 2006). 따라서 이를 해결하기 위해, 하프 프리캐스트(Half-Precast) 공법이 적용된 HPFC 기둥 공법을 분석 대상으로 선정하였다. 해당 공법의 실제 시공 사례를 통하여, 데이터를 수집하였고 수집된 데이터를 기반으로 건설시뮬레이션 기법을 활용하여 작업프로세스를 분석하였다. HPFC 기둥의 작업공정의 특징을 비교하기 위해 동일한 현장에 시공된 일반적인 RC 기둥과 비교를 통하여 HPFC 기둥의 작업프로세스상의 다양한 이슈를 확인하였다. 구체적인 방법은 다음과 같다. HPFC 기둥 및 RC 기둥 데이터를 바탕으로, 1) 작업공중(공정순서 및 선후환경) 분석하고, 2) 시뮬레이션 모델링을 위한, 작업공중별 투입 자원(작업조, 장비) 및 작업시간 분석하였다. 3) 분석된 작업프로세스와 각종 데이터를 기반으로 시뮬레이션 모델 개발 및 Web-Cyclone Simulation을 위한 Coding 작업 실시하고, 4) 시뮬레이션 결과 값 해석을 통한, 두 기둥 공법의 작업프로세스를 비교하였다.

2. 예비적 고찰

2.1 HPFC 콘크리트 기둥

본 연구의 HPFC 기둥 기술은 콘크리트 배합 설계에서 섬유를 혼입한 것으로 통상 ECC(Engineered Cementitious Composites)라고도 한다. ECC는 길이가 20 mm 이내, 직경 0.05mm 이하의 매우 가느다란 합성섬유를 혼입한 시멘트계 복합재료로서, 섬유를 혼입함으로써 높은 인장변형 능력 및 변형경화 특성을 갖는 고인성 시멘트 복합체이다(Lee et al. 2009). HPFC 기둥의 장점은 다음과 같다(Cho 2011, Cho et al. 2011, Cho et al. 2013).

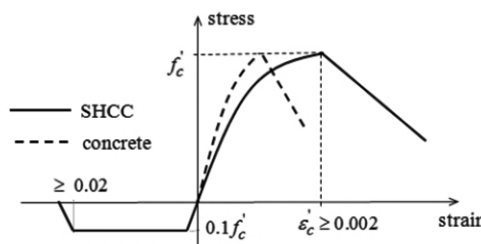


Fig. 1. Comparison of tensile stress behavior (Cho et al. 2011)

1) 기존 콘크리트 및 강섬유콘크리트(FRC)에 비해 인장 및 휨 거동 능력이 우수하여 높은 구조 성능을 기대할 수 있다. 특히 실험체 실험에서, HPFC 구조체의 경우 일반 RC 구조체에 비해 동일 응력(Stress)에서 더 높은 인장연

성거동(Strain)을 가지는 것이 확인되었다(Fig. 1). 이러한 성능은 국부균열이 급격하게 진전되어 취성과괴되는 기존 기술의 단점을 개선하여 구조체 전체가 높은 내진저항능력 및 내력을 유지할 수 있도록 한다.

2) PVA(폴리비닐알콜계) 섬유 제품의 사용함으로써, 다른 종류의 섬유에 비하여 가격 및 시공 면에서 유리하다. 섬유는 강제에 비해 취득이 용이하며, 굳지 않은 콘크리트와 같은 유동성 재료에 쉽게 혼입하여 다룰 수 있는 취급상 용이하다는 장점 등이 있다(Table 1).

Table 1. Properties on the type of fibers (Cho 2011)

-	PVA Fiber	Steel Fiber	Carbon	PP	Aramid
Tensile strength (MPa)	800-1600	1200	3500	600	3000
Strain rate(%)	6-10	3-4	0-2	25	4
Specific gravity	1.3	7-8	1.7	0.95	1.4
Durability	○	△	○	△	X
Cement affinity	○	X	X	X	△
Performance per price	○	△	X	△	X
Characteristic	Ease of concrete mix	Heavy, Easy rust	Expensive	Floats on water	Expensive

※ ○:Excellent, △:Normal, X:Poor

Table 2. Properties on the type of enhanced concrete columns (Cho 2011)

-	HPFC Column (This study)	Steel plate composite concrete	Fiber sheet concrete
Material	High tensile fiber concrete	Steel Plate	FRP Sheet
Principle	Placing concrete which combined high tensile fiber	Using steel plate to reinforce with sheath form	Sticking method by adhesive carbon sheet
Strengths	· Inexpensive · Excellent integration · High strength · Applicable precast method	· Reliable strength of steel material	· Light weight and load reduction · Durability · Corrosion resistant
Weaknesses	· Using coupler (in rebar connection)	· Expensive · Need anti corrosion method · Poor constructability · Long work task duration	· Expensive · Need high quality control · Need special equipment

3) 기존 복합화 기둥 공법(단면증설공법, 강판콘크리트합성공법, 섬유쉬트콘크리트공법)에 비하여 시공성 및 경제

성에서 유리하다(Table 2).

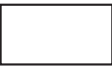


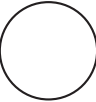


ECC를 활용한 기존 연구에 대한 내용은 다음과 같다.

조창근 외(2012)는 압축성형 ECC 패널을 활용한 철근콘크리트 복합 슬래브 구조에 대한 비선형 힘 해석 모델을 제시하였고, 해당 기술은 균열제어, 휨내력 및 휨변형능력 개선에 장점이 있는 것을 증명하였다(Cho et al. 2012). 김광윤(2009)은 기존 고강도콘크리트의 고온상태에서의 폭발 현상(Explosive spalling) 발생을 문제점으로 지적하고, 이를 보완하기 위한 ECC 혼입 및 피복 기술을 제시하여 폭발 제어 가능성을 시사하였다(Kim et al. 2008). 위의 기존연구 이외에도 대부분의 ECC 관련 연구는 구조적 성능분석에 대한 내용이 대부분이다. 따라서 본 연구는 시공 프로세스에 관한 분석을 수행함으로써, 실용화 과정에서의 해당 기술의 도입 판단의 근거로 활용하고자 한다.

2.2 사이클론 시뮬레이션 방법론

사이클론(CYCLONE) 시뮬레이션 기법은 현장에서의 작업을 이산 사건 기반의 네트워크 프레임워크 모델링 형태로 개발된 것이며, Halpin 교수에 의해 개발되었다. 이 기법은 반복적인 건설 프로세스의 시뮬레이션과 모델링을 위하여 시험되었고, 이후 Micro CYCLONE이 개발되었다(Song et al. 2010). 사이클론 모델링 요소들은 다음 Table 3과 같다.

Table 3. Elements of CYCLONE Modeling (Halpin and Riggs 1992)

Symbol	Name	Function
	NORMAL	Units arriving at this element begin processing immediately and are not delayed.
	COMBI	This element is always preceded by Queue Nodes. If units are available at some but not all of the preceding Queue Nodes, these units are delayed until the condition for combination is met.
	QUEUE	This element precedes all COMBI activities and provides a location at which units are delayed pending combination. Delay statistics are measured at this element.
	CONSOLIDATE	It is inserted into the model to perform special function such as counting, consolidation, marking, and statistic collection.
	COUNTER	It is used to define the number of times the system cycles.
	ARROW	Indicates the logical structure of the model and direction of entity flow

사이클론은 자원(resources) 및 작업시간(work task durations), 작업간의 논리적인(logic) 상호관계를 적용시켜 생산성을 측정하는 관리도구로 알려져 있다(Lee et al. 2013). 또한 작업간의 상호관계를 단순화하여 도표 및 그래프를 통하여 모델의 결과물을 제시하는 장점을 갖고 있다(Park et al. 2008). 본 연구의 사이클론 시뮬레이션은 공개 웹사이트를 이용하여 실시하였다(Web-Cyclone 2013).

시뮬레이션을 활용한 생산성에 관한 기존 연구에 대한 내용은 다음과 같다. 송창엽 외(2010)는 골조공사에서 유로 폼과 알루미늄 폼의 시뮬레이션을 실시하였으며, 알루미늄 폼 적용으로 인한 생산성 향상 및 최적의 작업공간 수, 작업조 수를 제시하고 실제사례와 유사한 점을 입증하여 시뮬레이션 결과를 증명하였다. 강석길(2010)은 철골세우기 공사에 대한 시뮬레이션을 실시하였으며, 현장관리자가 사전에 결정할 수 있는 최적의 철골 세우기 공사 작업조 수 및 장비 수를 도출하였다. 위의 기존연구 이외에도 대부분의 생산성 관련 연구는 기존 기술 및 사례간의 비교와 각 기술에서의 최적화된 조합을 도출하는 연구가 대부분이다. 본 연구는 HPFC 기둥이라는 신기술에 관한 분석을 수행함으로써, 해당 기술의 실용화 과정에서의 고려사항 판단의 근거로 활용하고자 한다.

3. HPFC기둥과 RC기둥의 시뮬레이션 모델

각 기둥별 작업프로세스의 시뮬레이션 모델링을 위하여, 1) 기둥별 작업프로세스, 2) 작업별 투입자원 및 작업시간을 조사하였으며, 이를 바탕으로 Table 3에서 제시한 모델링 요소를 이용하여 시뮬레이션 모델을 완성하였다.

3.1 작업프로세스

작업프로세스 분석을 위한 HPFC 기둥이 적용된 현장은 OO지방법원 청사 신축공사이며, Table 4는 현장의 개요를 요약한 것이다.

Table 4. Case introduction

Project Name	New Construction of OO District Court
Structure System	Reinforced Concrete
Building Category	Office Building
Building Scale	B1, 5F
Site Area	10,530.40㎡
Construction Area	2,138.56㎡
Total Floor Space	6,610.98㎡
Number of Column	35EA

적용 사례에서 1층의 35개의 기둥 중 2개소에 HPFC 기둥이 시공되었으며, 나머지 33개는 일반적인 RC 기둥으로 시공되었다. 상세한 위치는 Fig. 2와 같다.

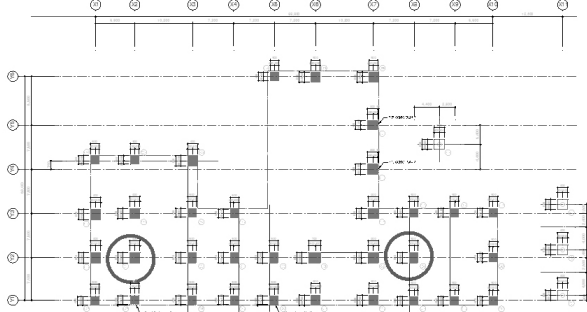


Fig. 2. 1st floor plan of the case project

3.1.1 HPFC 프리캐스트 기둥공사 프로세스

HPFC 기둥 공법 시공의 세부 과정은 다음과 같다.

- ① HPFC 박스 준비: 프리캐스트 공법으로 공장에서 미리 주문 제작한 HPFC 박스를 준비한다.
- ② HPFC 박스 현장 설치: 준비한 HPFC 박스를 크레인을 이용하여 인양한다. 특히 HPFC 박스와 접하는 기초 철근 위치에 정확히 설치하도록 하며, 설치 후 수평, 수직 맞춤을 하여 후타설 콘크리트의 변위 발생을 방지한다.
- ③ 무수축 모르타르 채움: 기초 철근과 HPFC 박스 간의 일체화를 위하여 모르타르를 타설한다. 특히 모르타르 양생 과정에서의 구조체 변형 발생을 막기 위해 무수축 모르타르를 사용한다.
- ④ 주철근 설치: HPFC 박스 상부로 일반 철근콘크리트 기둥을 타설하여야 하므로, HPFC 박스와 일체화된 하부 주철근과 후타설 콘크리트의 상부 주철근을 커플러(Coupler)를 이용하여 접합한다.
- ⑤ 거푸집 설치 및 콘크리트 타설: 콘크리트 타설을 위한 거푸집을 HPFC 박스 상부에 설치하고 펌프카를 이용한 콘크리트 타설 및 양생을 거쳐 1개소 기둥을 완성시킨다.

위의 과정을 도식화하고 실제 시공한 사례의 사진은 다음 Fig. 3, 4와 같다.

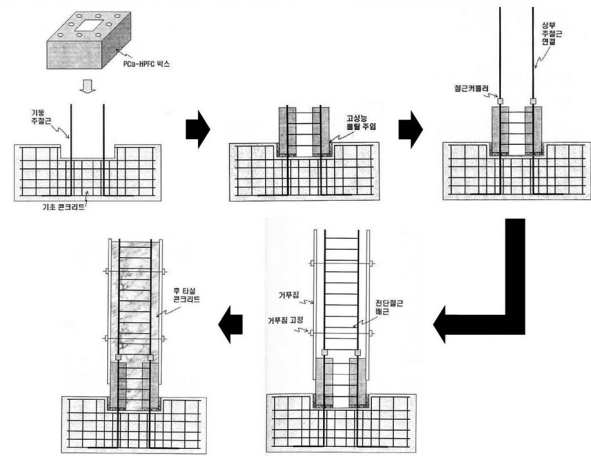


Fig. 3. Work process of HPFC column

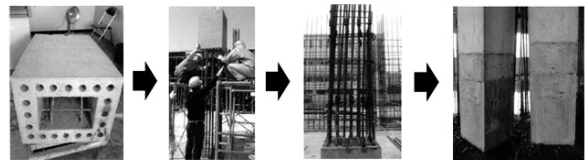


Fig. 4. Actual image of the column installation

3.1.2 일반 RC 기둥공사 프로세스

작업생산성 비교를 위하여 OO지방법원 청사 신축 공사의 일반 RC 기둥의 데이터를 수집하였다. 설계도서상 기둥 종류별로 단면적, 주근, 띠철근, 후부철근 적용이 상이한 경우가 대부분이었기에, 가장 많이 적용(18개소)된 길이 4.2m, 단면 0.5m 정방형, 주철근 16-HD22 기둥의 데이터를 사용하였다. 일반 RC 기둥 공법 시공의 간략한 과정은 다음과 같다. ① 주철근 배근 → ② 띠철근 배근 → ③ 거푸집 설치 → ④ 콘크리트 타설.

3.2 데이터 수집

데이터 수집은 작업이 수행된 실제 사례의 분석을 통해 수행되었다.

3.2.1 HPFC 프리캐스트 기둥

HPFC 기둥 작업프로세스에 대한 투입자원과 세부공종별 작업시간에 관한 데이터를 수집하였다. 투입자원 데이터는, (i) HPFC 박스를 현장 설치 단계의 ‘인양 작업조’와 ‘크레인’, (ii) 무수축 모르타르 채움 단계와 후타설 콘크리트 단계의 ‘콘크리트 작업조’, ‘믹서’, ‘펌프카’, (iii) 주철근 설치 단계와 거푸집 설치 단계의 ‘형틀 작업조’와 ‘크레인’이 필요하다(Table 5).

Table 5. Input Resources of HPFC and RC Columns

Activities	HPFC		RC	
	Labor	Equipment	Labor	Equipment
Precast box	○	○	×	×
Box lift	1 ¹⁾ (=3Man)	1 (Crane)	.	.
Box insertion	1 ¹⁾ (=3Man)	1 (Crane)	.	.
Non shrink mortar	○	○	×	×
Mixing and placing	1 ²⁾ (=3Man)	1 (Mixer)	.	.
Curing	1 ²⁾ (=3Man)	.	.	.
Rebar	○	○	○	×
Coupler connection	1 ³⁾ (=4Man)	.	.	.
Rebar lift	1 ³⁾ (=4Man)	1 (Crane)	.	.
Main rebar arrangement	1 ³⁾ (=4Man)	.	1 ⁴⁾ (=2Man)	.
Tie hoop arrangement	.	.	1 ⁴⁾ (=2Man)	.
Form	○	×	○	×
Form oil spread	1 ³⁾ (=4Man)	.	1 ³⁾ (=4Man)	.
Form connection	1 ³⁾ (=4Man)	.	1 ³⁾ (=4Man)	.
Concrete	○	○	○	○
Placing	1 ²⁾ (=3Man)	1 (Pump car)	1 ²⁾ (=5Man)	1 (Pump car)

※ 1) Lift work crew, 2) Concrete work crew, 3) Form work crew, 4) Rebar work crew

Table 6에서 보는 바와 같이, 모든 투입자원의 1회 순환 (cycle) 시간은 약 5시간으로 측정되었으며, 특히 무수축 모

르타르의 양생 관련 시간이 가장 많이 소요되는 것으로 나타났다.

3.2.2 일반 RC 기둥

일반 RC 투입자원 데이터는, 주철근 배근 단계와 띠철근 배근 단계의 ‘철근 작업조’가 필요하고, 거푸집 설치 단계의 ‘형틀 작업조’가 필요하다. 콘크리트 타설 단계의 ‘콘크리트 작업조’와 ‘뽀프카’가 필요하다(Table 5). 모든 투입자원의 1회 순환(cycle) 시간은 약 5시간 40분으로 측정되었으며, 각 작업별 소요시간은 Table 6과 같다.

Table 6. Duration data on each activity of the columns

Activities	HPFC	RC
	Duration	
Precast box	○	×
Box lift	0.167	.
Box insertion	0.333	.
Non shrink mortar	○	×
Mixing and placing	0.5	.
Curing	1.0	.
Rebar	○	○
Coupler connection	0.167	.
Rebar lift	0.333	.
Main rebar arrangement	0.333	1.0
Tie hoop arrangement	.	1.0
Form	○	○
Form oil spread	0.167	0.333
Form connection	0.5	2.333
Concrete	○	○
Placing	0.5	1.0
Sum	5.0	5.666

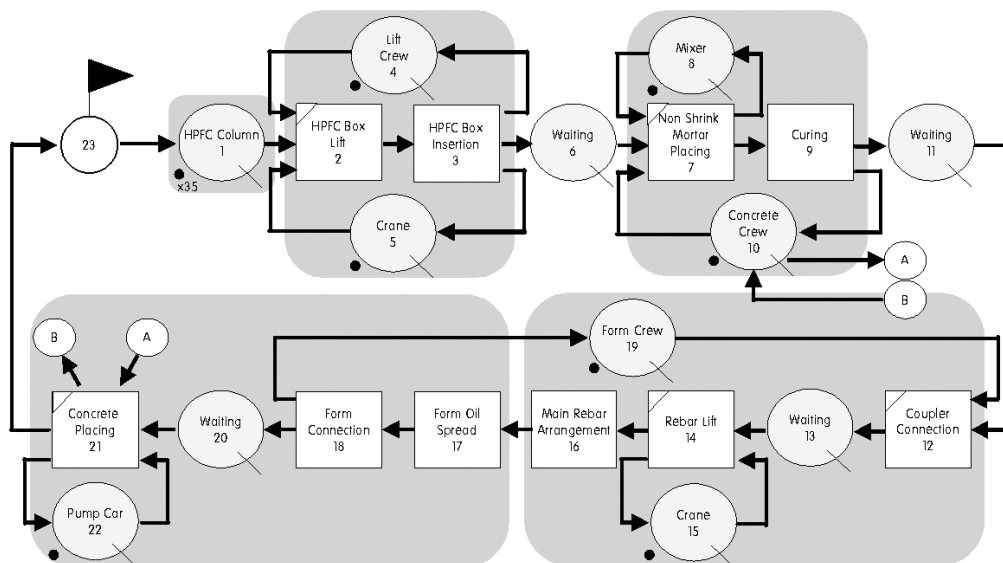


Fig. 5. HPFC Column Simulation Model(modified from Shin et al 2013)

3.3. 시뮬레이션 모델

HPFC 기둥 및 일반 RC 기둥에 대한 작업프로세스 및 작업데이터를 바탕으로 시뮬레이션 모델을 생성하였다.

3.3.1 HPFC 기둥

3.1.1항의 HPFC 기둥의 5단계 프로세스 및 3.2.1항의 투입자원 정보가 반영된 모델링을 실시하였다(Fig. 5). 첫 번째 과정인 'HPFC 박스 준비'는 프리캐스트 공법으로 제작된 박스를 준비하는 단계(Node 1)이다. 두 번째 과정인 'HPFC 박스 현장 설치'는 박스의 양중 후(Node 2) 주철근 위치에 맞게 설치하며(Node 3), 양중 작업조(Node 4)와 크레인(Node 5)이 필요한 단계이다. 세 번째 과정인 '무수축 모르타르 채움'은 박스와 기존 구조체의 접합을 위한 단계로서 무수축 모르타르 채움(Node 7) 및 양생(Node 9)을 실시하며, 믹서(Node 8)와 콘크리트 작업조(Node 10)가 필요한 단계이다. 네 번째 과정인 '주철근 설치'는 기초 철근과 주철근 연결을 위한 커플러를 설치(Node 12)하고 철근 인양(Node 14) 후 설치(Node 16)하며, 크레인(Node 15)과 형틀 작업조(Node 19)가 필요한 단계이다. 다섯 번째 과정인 '거푸집 설치 및 콘크리트 타설'은 후타설 콘크리트를 위한 거푸집 설치 및 박리제 도포(Node 17, 18)와 콘크리트 타설(Node 21)이며, 콘크리트 작업조(Node 10)와 펌프카(Node 22)가 필요한 단계이다. 모든 Node를 거쳐 COUNTER(Node 23)에 도달하면 한 번의 사이클이 종료되어 횟수가 체크되며, 다시 Node 1을 시작으로 사이클이 반복된다.

3.3.2 일반 RC 기둥

3.1.2항의 일반 RC 기둥의 4단계 프로세스 및 3.2.2항의 투입자원 정보가 반영된 모델링을 실시하였다(Fig. 6). 첫 번째 및 두 번째 과정인 '주철근 배근' 및 '띠철근 배근'은 주철근을 준비하고 배근(Node 1, 2)하고 띠철근까지 배

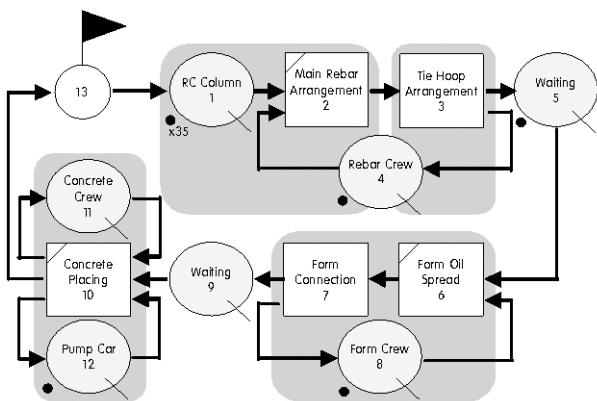


Fig. 6. RC Column Simulation Model

근하며, 철근 작업조(Node 4)가 필요한 단계이다. 세 번째 과정인 '거푸집 설치'는 콘크리트 타설을 위한 거푸집 설치 및 박리제 도포(Node 6, 7)이며, 형틀 작업조(Node 8)가 필요한 단계이다. 네 번째 과정인 '콘크리트 타설'은 콘크리트 타설(Node 10)이며, 콘크리트 작업조(Node 11)와 펌프카(Node 12)가 필요한 단계이다. 모든 Node를 거쳐 COUNTER(Node 13)에 도달하면 한 번의 사이클이 종료되어 횟수가 체크되며, 다시 Node 1을 시작으로 사이클이 반복된다.

4. 작업프로세스 분석 및 비교

개발된 시뮬레이션 모델의 수행을 위해, 웹사이클론을 활용하였으며, 이를 위해 Fig. 5, 6에서 설명한 프로세스 모델에 대한 코딩을 수행하였다. 시뮬레이션 조건으로써, 각각의 기둥을 35개 설치하는 것으로 가정하고 이에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 두 공법의 시뮬레이션 결과는 Table 7, 8, 9와 같이 나타났다.

4.1 작업시간별 비교

시뮬레이션 결과를 바탕으로 작업시간별 두 공법의 차이점을 확인하고자 한다. HPFC 기둥 공법의 총 생산 시간은 120.0 시간으로 나타났으며, 단위유닛 시간당 생산성은 0.2917(cycle/hour)로 나타났으며, 평균 사이클 시간은 3.428 시간으로 나타났다. 일반 RC 기둥 공법의 총 생산 시간은 96.3 시간으로 나타났으며, 단위유닛 시간당 생산성은 0.36(cycle/hour)로 나타났으며, 평균 사이클 시간은 2.751시간으로 나타났다(Table 7).

Table 7. Simulation result 1: Productivity and Cycle time

-	Total Sim Time Unit(h)	Cycle No.	Productivity (/time unit)	Average Cycle Time(h)
HPFC	120.0	35	0.2917	3.428
RC	96.3	35	0.3634	2.751

4.2 투입자원별 비교

시뮬레이션 결과를 바탕으로 투입자원별 두 공법의 차이점을 확인하고자 한다.

HPFC 기둥은 인양 작업조(Node 4)에서 71.25%, 크레인(Node 5, 15)에서 71.25%, 80.71%, 믹서(Node 8)에서 70.00%, 펌프카(Node 22)에서 85.41%로 높은 유휴 상태를 보였으나, 콘크리트 작업조(Node 10)에서 0.42%, 형틀 작업조(Node 19)에서 15.42%로 낮은 유휴 상태를 보였다(Table 8).

Table 8. Simulation result 2: HPFC Column installation

Node	Name	Average Unit Idle	Max. Idle Units	Times not empty(h)	% Idle	Average Wait time(h)
1	HPFC Column	2.5	35	17.0	14.17	2.8
4	Lift Crew	0.7	1	85.5	71.25	1.2
5	Crane	0.7	1	85.5	71.25	1.2
6	Waiting	5.4	23	89.0	74.17	9.5
8	Mixer	0.7	1	84.0	70.00	1.2
10	Concrete Crew	0.0	1	0.5	0.42	0.0
11	Waiting	0.0	1	0.0	0.00	0.0
13	Waiting	0.0	1	0.0	0.00	0.0
15	Crane	0.8	1	96.9	80.71	1.4
19	Form Crew	0.2	1	18.5	15.42	0.3
20	Waiting	25.0	33	116.5	97.08	56.7
22	Pump Car	0.9	1	102.5	85.41	2.8

일반 RC 기둥은 거푸집 준비(Node 5)에서 93.44%, 콘크리트 작업조(Node 11)에서 63.66%, 펌프카(Node 12)에서 63.66%로 높은 유휴 상태를 보였으나, 철근 작업조(Node 4)에서 0%, 형틀 작업조(Node 8)에서 2.08%로 매우 낮은 유휴 상태를 보였다(Table 9).

Table 9. Simulation result 3: RC Column installation

Node	Name	Average Unit Idle	Max. Idle Units	Times not empty(h)	% Idle	Average Wait time(h)
1	RC Column	26.9	35	96.3	100.00	24.2
4	Rebar Crew	0.0	1	0.0	0.00	0.0
5	Form Ready	5.7	12	90.0	93.44	11.7
8	Form Crew	0.0	1	2.0	2.08	0.1
9	Waiting	0.0	1	0.0	0.00	0.0
11	Concrete Crew	0.6	1	61.3	63.66	1.7
12	Pump Car	0.6	1	61.3	63.66	1.7

4.3 HPFC 기둥의 작업프로세스상 이슈

4.1절, 4.2절의 비교 분석을 통해 두 공법 간의 작업프로세스상의 이슈를 도출하여, HPFC 기둥 공법의 개선방향을 제시하고자 한다.

첫째, 작업시간별 비교 결과, 평균 사이클 시간에서 HPFC 기둥 공법이 약 0.67 시간(약 40분) 늦은 것으로 보였다. 이것은 프리캐스트 공법을 도입함에도 불구하고 별도의 장비 사용 및 추가 작업으로 인한 차이로 여겨진다.

둘째, 투입자원별 비교 결과, HPFC 기둥은 '콘크리트 작업조'와 '형틀 작업조'의 유휴 상태가 적게 나타났으나, 일반 RC 기둥은 '철근 작업조'와 '형틀 작업조'의 유휴 상태가 적

게 나타났다. 유휴 상태가 적다는 것은 자원 대비 작업조나 장비가 부족함을 의미한다. 따라서 위의 두 프로세스는 공통적으로 '형틀 작업조'의 추가 조정이 필요하다는 것을 도출할 수 있으며, HPFC 기둥의 경우 후타설 콘크리트 작업에 더하여 무수축 모르타르 작업이 추가되었기에 '콘크리트 작업조'의 유휴 상태가 상대적으로 적다는 점을 확인할 수 있다. HPFC 기둥의 경우 일반 RC 기둥과 달리 '콘크리트 작업조'가 생산성에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 따라서 해당 작업조의 조정을 통해 생산성 향상을 강구할 수 있으리라 예상된다.

이상의 결과를 바탕으로, HPFC기둥을 실제로 시공하기 위해서는 현재의 작업프로세스를 보다 간결하게 만들 필요가 있다. 즉, 일반적인 RC기둥에 비해 작업의 종류가 다양하기 때문에 작업의 생산성이 떨어지는 것으로 나타났으며, 이를 해결하기 위해 프로세스를 개선하는 것이 필요하다. 한편, 작업생산성 측면에서 큰 영향을 미치는 콘크리트 작업자와 형틀작업자를 충분히 투입하여, 전체 작업프로세스를 원활하게 진행시키도록 현장의 작업계획을 작성하는 것이 필요하다.

5. 민감도 분석

앞서 도출한 이슈에 대한 확인을 위한 민감도 분석을 실시하였다. 즉, HPFC 기둥의 '콘크리트 작업조'와 '형틀 작업조'의 조정과 일반 RC 기둥의 '철근 작업조'와 '형틀 작업조'의 조정을 통한 변화를 확인하였다. 그 결과 Table 10에서 보는 바와 같이, HPFC 기둥의 경우, 작업조를 1 → 2로 변경한 경우 '인양 작업조', '크레인', '믹서', '펌프카'에서 약 13%에서 60%까지의 유휴 상태 감소를 확인할 수 있었으며, 총 생산시간은 38.5(h), 평균 사이클 시간은 1.1(h), 생산성은 0.9091(cycle/hour)로 개선된 것을 확인할 수 있었다. 또한 일반 RC 기둥의 경우 Table 11에서 보는 바와 같이, 작업조를 1 → 2로 변경한 경우 '거푸집 준비', '콘크리트 작업조', '펌프카'에서 약 7%에서 32%까지의 유휴 상태 감소를 확인할 수 있었으며, 총 생산시간은 51.0(h), 평균 사이클 시간은 1.457(h), 생산성은 0.6863(cycle/hour)으로 개선된 것을 확인할 수 있다.

민감도 분석 결과, HPFC 기둥은 작업조 조정을 통해 큰 폭의 생산성 향상(0.2917에서 0.9091로, 약 3.1배)이 나타났으나, 그에 비해 일반 RC 기둥은 상대적으로 작은 폭의 생산성 향상(0.3634에서 0.6863으로, 약 1.9배)이 나타났다. 따라서 HPFC기둥의 설치공사에서 콘크리트 작업자와 형틀 작업자의 투입은 전체 프로세스에서 거의 대부분의 다른 투입자원들의 생산성을 증가시키는 것을 통해, 전체 작업생산성을 향상시키는 것을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

Table 10. Sensitivity analysis 1: HPFC Column installation

Node	Crew Variation	Scenario 1		Scenario 2		
	Name	A ¹⁾	B ²⁾	A	B	C ³⁾
1	HPFC Column	17.0	14.17	30.0	77.92	+63.75
4	Lift Crew	85.5	71.25	4.0	10.39	-60.86
5	Crane	85.5	71.25	4.0	10.39	-60.86
6	Waiting	89.0	74.17	37.0	96.10	+21.93
8	Mixer	84.0	70.00	19.0	49.35	-20.65
10	Concrete Crew	0.5	0.42	1.0	2.60	+2.18
11	Waiting	0.0	0.00	0.0	0.00	0
13	Waiting	0.0	0.00	0.0	0.00	0
15	Crane	96.9	80.71	25.8	67.13	-13.58
19	Form Crew	18.5	15.42	19.0	49.35	+33.93
20	Waiting	116.5	97.08	35.0	90.91	-6.17
22	Pump Car	102.5	85.41	21.0	54.55	-30.86
Total Sim Time Unit(h)		120.0		38.5		
Productivity(/time unit)		0.2917		0.9091		
Average Cycle Time(h)		3.428		1.1		

※ Scenario 1: Concrete Crew 1, Form Crew 1
 Scenario 2: Concrete Crew 2, Form Crew 2
 1) Times not empty(h), 2) % Idle, 3) Gap of % Idle with Scenario 1

Table 11. Sensitivity analysis 2: RC Column installation

Node	Crew Variation	Scenario 1		Scenario 2		
	Name	A ¹⁾	B ²⁾	A	B	C ³⁾
1	RC Column	96.3	100.00	51.0	100.00	0
4	Rebar Crew	0.0	0.00	0.0	0.00	0
5	Form Ready	90.0	93.44	44.0	86.29	-7.15
8	Form Crew	2.0	2.08	2.0	3.92	+1.84
9	Waiting	0.0	0.00	18.0	35.30	+35.3
11	Concrete Crew	61.3	63.66	16.0	31.36	-32.3
12	Pump Car	61.3	63.66	16.0	31.36	-32.3
Total Sim Time Unit(h)		96.3		51.0		
Productivity(/time unit)		0.3634		0.6863		
Average Cycle Time(h)		2.751		1.457		

※ Scenario 1: Reber Crew 1, Form Crew 1
 Scenario 2: Reber Crew 2, Form Crew 2
 1) Times not empty(h), 2) % Idle, 3) Gap of % Idle with Scenario 1

6. 결론

건축물의 대형화 및 고층화로 인해 고성능 콘크리트 기둥에 대한 연구가 최근 활발하게 진행되고 있지만, 기존의 연구는 해당 기둥의 구조적 성능 등을 분석한 연구가 대부분이며 실제 적용시 시공상의 고려요인 등에 대한 연구는 전무하다. 따라서 본 연구는 HPFC기둥이 실제로 적용된 사례분석을 기반으로, 사이클론 시뮬레이션 기법을 활용하여 시공프로세스 상의 작업생산성을 분석하였고, 이를 바탕으로 핵심 고려요인을 분석하였다. 연구의 결과로써,

(i) HPFC기둥의 설치시간은 일반적인 RC기둥의 설치시간에 비해 더 많이 소요되는 것으로 나타났지만 (HPFC기둥: 120시간, RC기둥: 96.3시간), (ii) 작업조의 조정에 따른 민감도 분석결과, 작업생산성 향상측면에서 HPFC 기둥은 일반 RC기둥에 비해 큰폭의 작업생산성 향상 (즉, HPFC기둥: 약 3.1배(0.2917에서 0.9091) 증가, 일반 RC 기둥: 약 1.9배(0.3634에서 0.6863) 증가)이 있었으며, (iii) 작업생산성 분석결과, 일반 RC조 건설공사와 상이하계, 콘크리트 작업자가 생산성에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이 연구의 결과를 활용하면, 향후 프리캐스트 HPFC기둥을 설치할 때, 작업생산성 및 공정계획 측면에서 관리자에게 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 사이클론 시뮬레이션 기법을 적용하는 과정에서 보다 정확한 결과를 도출하기 위해서는 입력데이터, 특히 작업시간에 대한 통계적 분포등을 분석하는 것이 필요하나, HPFC기둥설치에 대한 데이터가 아직 많지 않기 때문에 이 연구에서는 결정론적 방법론을 활용한 한계를 가지고 있으며, 향후 HPFC기둥의 적용사례가 증가하면 보다 정확한 시뮬레이션 분석을 수행해야만 한다. 또한, 소요기간 뿐 아니라, 소요비용이 추가된 생산성분석을 통한 다각적인 측면에서의 분석이 향후 연구로써 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

Kang, S. T., Park, J. J., Ryu, G. S., Koh, K. T., Kim, S. W., and Lee, J. H. (2006). "The Analysis about Economical Composition in Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete." Journal of Korea Concrete Institute, 18(1), pp. 33-36.

Cho, C. G. (2011). "Development of Seismic Strengthened Concrete Column using High Performance Fiber Reinforced Composites." Journal of the Architectural Institute of Korea, Commission of Complex Structure, 10, pp. 41-63.

Cho, C. G., Lim, H. J., and Lee, S. J. (2011). "Nonlinear Flexural Evaluation of SHCC and RC Composite Slabs." Journal of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 9, pp. 234-235.

Cho, C. G., Kim, Y. Y., Seo, J. H., and Lee, S. J. (2012). "Analysis Model of Extruded ECC Panel

- RC Composite Slabs.” Journal of the Korean Association for Shell and Spatial Structures, 12(1), pp. 51-58.
- Cho, C. G., Moon, H. J., Lim, H. J., Seo, J. H., and Kim, G. S. (2013). “Flexural Test and Nonlinear Analysis of SHCC and Reinforced Concrete Composite Slabs.” Journal of the Architectural Institute of Korea, 15(1), pp. 51-58.
- Halpin, D. W. and Riggs, L. S. (1992). “Planning and analysis of construction operations.” Wiley Interscience. New York.
- Lee, B. Y., Han, B. C., Cho, C. G., Kwon, Y. J., and Kim, Y. Y. (2009). “Fiber Distribution Characteristics and Flexural Performance of Extruded ECC Panel.” Journal of Korea Concrete Institute, 21(5), pp. 573-580.
- Lee, D. E., Kim, Y. W., and Son, C. B. (2013). “Estimating Productivity of Al-Form operation using Web-CYCLONE system.” Korean Journal of Construction Engineering and Management, KICEM, 14(3), pp. 115-122.
- Park, D. G., Lee, K. S., Yu, B. I., Kim, Y. S., Han, S. W. (2008). “A Productivity Analysis Method of Curtain Wall Works Using Construction Simulation.” Proceedings of the 2008 KICEM Conference, KICEM, pp. 256-261.
- Shin, Y. S., Cho, K. M., and Cho, C. G. (2013). “Productivity Analysis of Precast Column Structural Work.” Proceedings of the 2013 KICEM Conference, KICEM, pp. 121-122.
- Song, C. Y., Lee, H. C., Park, S. H., Cho, K. M., and Hyun, C. T. (2010). “Productivity Analysis of Structural Work for Apartment Building Using AL-Form.” Journal of the Architectural Institute of Korea, 26(4), pp. 113-121.
- Web-Cyclone, “<http://cyclone.ecn.purdue.edu:8080/WebCYCLONE/Cyclone.jsp>”, (Sep. 20, 2013)
- Woo, G. B., Oh, S. W., Kim, Y. S., and Kim, Y. S. (2008). “The Development of a Productivity System in the Structural Framework of Apartment Housing Projects Using Data Mining Technique.” Journal of the Architectural Institute of Korea, 24(9), pp. 113-122.

요약 : 최근 건설 구조물의 다양화, 대형화, 고층화 및 장기간화 되면서 콘크리트 구조재료에 관한 고성능화가 요구되고 있으며, 특히 콘크리트의 고강도 및 고성능화가 대두되고 있다. 콘크리트의 고성능화 및 재료 특성을 개선하는 방법으로 주로 첨단소재 기술에 의해 개발된 첨단 섬유를 적용하는 방법이 사용되어 왔으며, 고성능 섬유시멘트 복합체(이하 HPFC)를 적용한 콘크리트 기둥 공법이 그 중 하나이다. 본 연구는 시뮬레이션 기법을 활용해, 일반 RC 기둥 대비 프리캐스트 기법이 적용된 HPFC 기둥 공법 공정에 대한 작업프로세스를 분석함과 동시에, 수집한 작업데이터를 통해 HPFC 기둥 공법의 공정계획상 이슈를 도출하였다. 그 결과 생산성에 가장 영향이 큰 작업(노드)로 '콘크리트 작업조', '형틀 작업조'로 도출되었으며, 특히 '콘크리트 작업조'가 공정계획상 가장 중요한 요소로 작용함을 확인할 수 있었다. 해당 작업(노드)에 투입되는 작업조 수 변화를 통한 생산성 향상을 확인하였으며 본 연구를 바탕으로 HPFC 기둥 공법의 실용화 단계에 도움이 될 것으로 예상된다.

키워드 : 고성능 프리캐스트 콘크리트 기둥, 작업프로세스, 이산 시뮬레이션
