

시공공정 효율화를 위한 시뮬레이션 수식모형 구축에 관한 연구

A Study on Simulation Numerical Formula Model for Construction Process Efficiency

박종혁* · 전용배**

Park, Jong-Hyuk · Jeon, Yong-Bae

요 약

건설공사의 시공공정을 관리자의 경험적 판단에 의하여 작업팀을 구성하여 운영하면, 시공공정의 진행이 비효율적으로 될 가능성이 많다. 그러나 시공계획단계에서 모의조작을 통하여 자원할당, 공사비, 공사기간의 최적 안을 산출하면 시공공정을 정량화하여 효율적인 운영을 할 수 있다. 본 연구에서는 시공공정을 계획할 때 작업팀 운영의 변화에 따른 자원할당 변동치, 자원 손실비, 총공사비, 공사기간의 최적 안을 모의조작 할 수 있는 수식모형의 시안 식을 제안하였다. 제안된 수식모형을 검증하기 위하여 시공공정의 수평작업역과 수직작업역이 각각 상이하게 구성된 공동주택 골조공사에 적용하여 시현하였다. 본 연구에서 제시된 수식모형을 적용하여 모의 조작을 실시한 결과가 실제 사례공사에서 적용된 작업팀의 운영실적보다 효율화를 달성하였다.

키워드 : 시공공정, 모의조작, 자원할당변동치, 수식모형

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

시뮬레이션은 실제 건설사업을 수행하기 이전에 다양한 조건 하에서 건설사업을 컴퓨터상에서 수행해 봄으로써, 건설사업의 수행에 있어서 많은 문제점을 사전에 예측하고 분석하며, 시간과 비용측면에서 최적의 계획을 가능케 하는 사업관리에 있어서의 중요한 도구를 제공한다¹⁾. 그러므로 시뮬레이션 즉, 모의조작은 시공공정의 운영에 있어서 활용도가 높아 마일스톤을 사용한 長岡弘明 外3(1997)의 연구와 자원모델구축에 관한 김경주(2000) 등의 여러 연구가 있었다. 그러나 건설공사 초기의 공정 계획단계에서 구성된 작업팀이 시공의 중간시점 또는 후반기에서 작업팀의 구성을 조정할 필요가 있을 때 즉, 시공공정이 진행

되면서 공정이 축소되어 작업팀의 구성을 다시 조정할 경우가 발생한다. 이러한 상황발생을 공사계획단계에서 여러 경우의 수를 가정하여, 모의조작을 하면 시공공정의 효율화를 유도할 수 있다. 그러나 기존의 상용프로그램은 작업팀의 변화를 주기 위해서는 이벤트와 이벤트를 모의조작을 하면서 지정하여야하는 번거로움이 있다. 따라서 본 연구에서는 자원의 흐름이 수평영역과 수직영역이 상이하게 구성될 때, 시공공정의 효율화를 위해 작업팀의 구성과 모의조작을 시도할 경우 요구되는 수식모형을 제안하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 이벤트 중심의 기존의 수식을 응용하여 수평작업역과 수직작업역의 변화에 따른 요소작업의 위치를 찾아내는 수식을 제안하였고, 이벤트 중심의 시공공정 계산이 아닌 작업팀의 변화에 따른 모의조작을 할 수 있는 수식모형을 제안하였다. 모의조작과정에서 각 요소작업의 비용, 손실, 자원변동치, 공기 등을 계산하여 그 결과에서 최적안을 선택하여 다음단계의 모의조작을 할 수 있도록 하였다.

* 일반회원, 서일대학 토목과 부교수, 공학박사. jhpark@seoil.ac.kr

** 일반회원, 한중대학교 토목환경공학과 조교수, 공학박사.(교신저자) ybjeon@hanzhong.ac.kr

1) 김경주(2000), "건설공정 시뮬레이션을 위한 독립자원 모델 구축 방안 연구", 대한토목학회 논문집 제 20권 제4-D호.

2. 기존 시공공정 분석 Network 기법

2.1 ADM 관련 연산식

TE는 그 경유점을 떠나는 모든 후속활동이 가장 일찍 시작할 수 있는 시각, 즉 활동의 가장 이른시작시각(earliest start time-ES)과 일치한다. 한 활동의 ES에 활동기간(activity duration-D)을 더하면 그 활동이 가장 일찍 종료될 수 있는 시각, 즉 가장 이른 종료시작(earliest finish time-EF)이 계산된다. 이러한 관계를 i-j 표시를 첨자로 써서 나타내면 다음과 같다.²⁾

$$\begin{aligned} ES_j &= TE_i \\ EF_{ij} &= ES_{ij} + D_{ij} \\ TE_j &= \max\{EF_{-j}\} \quad \dots \text{(식 1)} \end{aligned}$$

2.2 PDM 관련 연산식

연관도표기법(PDM)은 ADM보다 반복적이고 중첩된 작업을 더 효과적으로 모형화하고 있으므로 작업이 반복일 때와 많은 작업이 동시에 수행되는 때는 ADM 보다 더 좋다.³⁾ 공정 연산식은 다음과 같이 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} ES_j &= ES_i + SS_{ij} \text{ 또는} \\ &EF_i + FS_{ij} \text{ 중 큰 것} \\ EF_j &= EF_i + FF_{ij} \text{ 또는} \\ &ES_i + SF_{ij} \text{ 또는} \\ &ES_j + D_j \text{ 중 큰 것} \quad \dots \text{(식 2)} \end{aligned}$$

여기서 SS_{ij} = 시작시점관계에 대한 선도시간
 FS_{ij} = 종료시점관계에 대한 지연시간
 SF_{ij} = 시작종료시점관계에 대한 선도시간

3. 시공공정 분석 시물레이션 모형

3.1 수식모형구성

시공공정 모의조작을 위한 분석수식모형이 만들어지면 모의 조작의 전개를 원활하게 할 수 있고, 관리자의 경험에 따라 작업

팀의 구성을 선택할 수 있으므로 시공공정의 운영 효율을 배가시킬 수 있다. 분석수식모형은 다음과 같이 구성된다.

1) 시공공정 진행에 따른 작업팀의 위상을 파악하는 수식 모형 : 작업팀의 운영을 효과적으로 하기 위해 두 개 이상의 작업팀으로 분할 할 경우 작업팀의 수평작업역과 수직작업역의 위상을 파악하여야 분할이 가능하다.

2) 한 작업팀의 작업영역내 반복 순회 회수, 작업영역 수 그리고 최단 요소작업의 순회 회수 결정 수식 모형 : 한 작업영역에서 요소작업이 순회 할 수 있는 회수와 작업영역의 수 즉, 작업팀의 수를 결정하기 위한 수식 그리고 작업팀의 휴업손실을 최소화 하고, 작업효율을 균등하게 할당하기 위한 최단 작업의 순회 회수를 결정하도록 한다.

3) 작업영역을 분할 할 경우의 시공공정 시작시기와 완료시기 결정 수식모형 : 전체 작업영역을 두개 이상으로 분할 경우 각 조건에 따른 시공시작시기와 완료시기 공정계산을 위한 수식 모형

4) 작업팀의 휴업손실을 최소화 하고자 할 경우 최단 작업공정을 순환시키고 할 경우의 공정계산 수식 모형

3.2 작업공정 위상 수식모형

공정진행 위상수식은 작업 활동의 공정 진행상의 위치를 파악하는 수식이다. M 개의 요소작업으로 된 시공공정이 Nt 개의 수평작업역과 R 개의 수직작업영역을 반복하여 작업이 진행된다면 각 요소작업은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_{m \cdot n \cdot r} \quad \dots \text{(식 3)} \\ (1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N_t, 1 \leq r \leq R)$$

각 요소작업인 $A_m(A_1, A_2, \dots, A_M, 1 \leq m \leq M)$ 이 공사완료시까지 발생하는 총 시공공정의 수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I = AM \cdot N_t \cdot R \quad \dots \text{(식 4)}$$

여기서 I : 총 이벤트 수
 AM : 총 요소작업 수
 Nt : 총 수평작업역 수
 R : 총 수직작업역 수

각 요소작업의 작업 진행과정을 나타내기 위해 $AM=6$,

2), 3) 이배호(2000), "건설공사관리 이론과실제", 구미서관, pp116-145.

Nt=12, R=10 으로 하여 대입하여 진행과정을 보면 표 1.과 같다. 식 4와 표1.에서 보인 시공공정의 진행과정에서 공정의 순서 i 와 요소작업 Am의 수평 및 수직작업의 위치를 찾아내는 식을 유도하여 다음과 같은 수식모형 시안을 개발하였다.

$$r = \text{int} \{ (i-1)/(AM \times Nt) \} + 1 \quad \dots \text{(식 5)}$$

$$n = \text{int} \{ \{ \frac{(i-1)}{AM} \} - \{ \frac{(r-1)(AM \times Nt)}{AM} \} + 1 \} \quad \dots \text{(식 6)}$$

$$m = [i - \{ (r-1)(AM \times Nt) \} - \{ (n-1)AM \}] \quad \dots \text{(식 7)}$$

여기서 r : 수직작업역
 n : 수평작업역
 m : 요소작업

표 1. 요소작업의 수평 및 수직작업역 진행경로

i (이벤트)	m(요소작업)	n(수평작업역)	r(수직작업역)
1	1	1	1
2	2	1	1
3	3	1	1
⋮	⋮	⋮	⋮
77	5	1	2
78	6	1	2
79	1	2	2
80	2	2	2
⋮	⋮	⋮	⋮
718	4	12	10
719	5	12	10
720	6	12	10

3.3 공정분할 수식모형

시공공정의 진행상황 즉, 요소작업, 수평작업역, 수직작업역을 동시에 표현하면 Am.n.r로 나타낼 수 있다. 예를 들어 A1.1.1 이면 요소작업 1번이고 수평작업 1영역이고 수직작업 1영역이라는 것을 알 수 있다. 이 요소작업의 수평 및 수직작업 위치를 찾아내는 수식을 앞 절에서 표현하였으므로 이제 시공공정의 효율화를 위해 즉, 유희작업기간을 축소하고 이들 작업영역을 분할하고, 순환시키기 위한 수식 모형을 만들려고 한다. 먼저 요소작업의 순환을 위한 공정의 분할은 요소작업의 작업기간과 기본공정의 작업기간과 함수관계를 이루고 있다. 기본공정의 한 요소작업의 총 작업기간은 순작업기간과 유희작업기간 즉, 작업 중단기간을 합하여 구해진다. 시공공정 진행의 효율화를 위해서는 이들 작업중단기간을 최대한 감해주어야 한다. 물론 일일작

업의 자원배당의 효율적인 할당을 고려하면서 하여야 한다. 기본공정의 순환기간 즉, 한 작업역에서 각 요소작업의 총 작업기간 Dsum, 각 요소작업중 최장작업기간 Dmax 라 하면, 한 요소작업의 반복 작업순환은 회수는 다음과 같이 된다.

$$N = \text{int} \{ \frac{Dsum}{Dmax} + 0.5 \} \quad \dots \text{(식 8)}$$

즉, 한 요소작업의 반복 작업순환 회수는 최장작업기간에 대한 순환기간의 배수정수이며, 시공공정 분석과정에서 시안으로 1을 가감하여 결정할 수 있다. 최장작업기간에 의한 작업순환회수가 구해지면 작업팀의 수 또한 구할 수 있다. 투입되는 작업팀은 공사의 규모 및 예정공기와 관련된다. 즉, 공시규모가 크면 작업팀의 수는 증가하고 공기가 짧으면 작업팀의 수를 늘려 돌관작업을 고려하여야 한다. 총 수평작업영역 Nt, 반복작업 순회 회수 N이라하면 작업팀의 수 또는 작업 영역의 수 Q는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \text{int} \{ \frac{Nt}{N} + 0.5 \} \quad \dots \text{(식 9)}$$

작업 순회 회수와 작업팀이 구해지더라도 시공공정의 효율성을 이루기 위해서는 각 요소작업에 할당된 작업부하가 균등하게 분배되어야 한다. 즉, 각 요소작업의 작업기간이 가능하면 모든 작업이 근사한 공기를 갖도록 공정의 조정이 있어야, 모든 작업의 가동효율이 증대되고 중단되는 작업을 줄여 유희 손실을 축소할 수 있다. 작업기간이 짧은 요소작업의 유희기간 즉, 작업 중단기간을 Lm이라하면 이 작업반이 순회할 수 있는 작업구역의 수 Q는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \text{int} \{ \frac{(Dm.n.r + Lm)}{Dm.n.r} + 0.5 \} \quad \dots \text{(식 10)}$$

여기서 Dm.n.r : 요소작업의 공기

공사시공에 있어서 한 작업팀 내의 각 요소작업간에 공기가 크게 차이가 나는 경우는 그 작업의 효율성 증대를 위해 다른 요소작업과 다른 순회회수를 갖도록할 수 있다. 이렇게 할 경우 공정분석은 각 작업영역의 해당작업에 위의 식을 적용하여 더미로 연결하여 작업의 중단기간을 축소할 수 있다.

3.4 공정분할 조건에 따른 수식모형

3.4.1 작업팀 분할과 순회조건

시공공정을 분할할 경우 작업영역 Q는 Q1, Q2, Q3, ..., Qm 로 나누어질 수 있다. 이 때 각 작업영역 Q와 요소작업이 한 작업영역내의 순회회수 N에 따른 수평작업영역 n의 조건은 다음과 같다.

- Q1 작업영역의 수평작업 n의 범위는 1에서 N까지
- Q2 작업영역의 수평작업 n의 범위는 N+ 1에서 2N까지
- Q3 작업영역의 수평작업 n의 범위는 2N+1에서 3N까지
- ...
- Qi 작업영역의 수평작업 n의 범위는 (i-1)N+1에서 iN까지

3.4.2 작업팀조건과 공정계산

각 작업영역 조건에 따른 각 공정의 조기착공시기와 조기완료 시기를 계산하는 수식은 요소작업, 수평작업역, 수직작업역의 조건에 따른 경우의 수와 작업영역 또는 작업팀의 수를 판별하여 요소작업의 위치를 찾아내어 그 조건에 적절한 수식으로 계산하여야 한다. (식 5)~(식 7)에 제시한 요소작업의 위치를 찾는 식의 이용하여 공정계산은 기존의 ADM 기법과 PDM 기법을 응용하여 다음과 같은 수식모형시안을 개발하였다.

1) Q1의 작업영역

작업팀이 하나 또는 작업영역이 하나인 경우 각 조건에 따라 적용할 수식모형은 다음과 같다.

- ① m=1, n=1, r=1 인 경우
 - ESi = 0
 - EFi = ESi + Dm . . . (식 11)

여기서 m : 요소작업번호, n : 수평작업번호,
 r : 수직작업번호, i : 이벤트 번호
 ESi : i 이벤트 조기착공시기
 EFi : i 이벤트 조기완료시기
 Dm : m 요소작업기간

- ② m≠1, n=1, r=1 인 경우

$$\left. \begin{aligned} ES_i &= ES_{(i-1)} + SS_{(m-1,m)} \\ EF_i &= EF_{(i-1)} + FF_{(m-1,m)} \end{aligned} \right\} \text{중 큰 값} \dots \text{(식 12)}$$

$$= ES_i + D_m$$

여기서, SS_(m-1,m) : 요소작업 (m-1) 과 m 의 시작지연시간
 FF_(m-1,m) : 요소작업 (m-1) 과 m 의 완료지연시간

EF_i-ES_i=D_m 이면 ES_i, EF_i는 구해진 값을 사용하고, 그렇지 않은 경우 ES_i=EF_i-D_m 으로 결정하여야 한다.

- ③ m=1, n≠1, r=1 인 경우

$$ES_i = EF_{m.(n-1).r}$$

또는 ES_i = EF_j

$$EF_i = ES_i + D_m \dots \text{(식 13)}$$

여기서, j : i-Am
 Am : 요소작업의 수

- ④ m≠1, n≠1, r=1 인 경우와
 m≠1, n≠1, r≠1 인 경우

$$\left. \begin{aligned} ES_i &= ES_{(i-1)} + SS_{(m-1,m)} \\ &= EF_j \end{aligned} \right\} \text{중 큰 값}$$

$$\left. \begin{aligned} EF_i &= EF_{(i-1)} + FF_{(m-1,m)} \\ &= ES_i + D_m \end{aligned} \right\} \text{중 큰 값} \dots \text{(식 14)}$$

여기서, EF_j : EF_{m.(n-1).r}

EF_i-ES_i=D_m 이면 ES_i, EF_i는 구해진 결과 값을 사용하고, 그렇지 않은 경우 ES_i=EF_i-D_m 으로 결정하여야 한다.

- ⑤ m=1, n=1, r≠1 인 경우
 - ESi = EFα
 - ESi = EFβ } 중 큰 값
 - EFi = ESi + Dm . . . (식 15)

여기서, α=i-((Am×Nt)-(Am-1))
 β=i-((Am×N)+Am)
 즉, EFα : EF_{m(max).n.(r-1)}
 EFβ : EF_{m.n.(r-1)}

⑥ $m \neq 1, n=1, r \neq 1$

$$\left. \begin{aligned} ES_i &= ES_{(i-1)} + SS_{(m-1,m)} \\ ES_i &= EF_\beta \end{aligned} \right\} \text{중 큰 값}$$

$$\left. \begin{aligned} EF_i &= EF_{(i-1)} + FF_{(m-1,m)} \\ EF_i &= ES_i + D_m \end{aligned} \right\} \text{중 큰 값} \dots (\text{식 16})$$

여기서, EF_β 란 요소작업 m 과 수평작업영역 n 은 같고 수직작업영역 r 은 $(r-1)$ 영역 작업의 EF 를 의미하고, 계산 결과 값이 $EF_i - ES_i = D_m$ 이면 ES_i, EF_i 는 구해진 값을 사용하고, 그렇지 않은 경우 $ES_i = EF_i - D_m$ 으로 결정하여야 한다.

⑦ $m=1, n \neq 1, r \neq 1$ 인 경우

$$\left. \begin{aligned} ES_i &= EF_j \\ &= EF_\alpha \end{aligned} \right\} \text{중 큰 값}$$

$$EF_i = ES_i + D_m \dots (\text{식 17})$$

2) Q2 의 작업영역

작업팀이 두개 또는 작업영역이 두개인 경우 두 번째 작업영역에서 각 조건에 따라 적용할 수식모형은 다음과 같다.

표 2. a)Q2 작업영역 적용수식

요소작업조건	적용 수식
$m=1, n=N+1, r=1$	(식 11)
$m \neq 1, n=N+1, r=1$	(식 12)
$m=1, n=N+1, r \neq 1$	(식 15)
$m \neq 1, n=N+1, r \neq 1$	(식 16)

(b) Q2 작업영역 적용수식

요소작업조건	적용 수식
$m=1, n=N+2, r=1$ $m=1, n=N+3, r=1$ $m=1, n=N+4, r=1$ \vdots $m=1, n=N+N, r=1$	(식 13)
$m \neq 1, n=N+2, r=1$ $m \neq 1, n=N+3, r=1$ $m \neq 1, n=N+4, r=1$ \vdots $m \neq 1, n=N+N, r=1$	(식 14)
$m \neq 1, n=N+2, r \neq 1$ $m \neq 1, n=N+3, r \neq 1$ $m \neq 1, n=N+4, r \neq 1$ \vdots $m \neq 1, n=N+N, r \neq 1$	(식 17)

3) Q3~QN 의 작업영역

작업영역 또는 작업팀이 3 개~N개인 경우 3번 작업팀 또는 N 번째 작업영역에서 요소작업조건 수평영역 n 의 조건식을 다음과 같이 변경하여 (식 11)~(식 17)을 적용하여야 한다.

$$\begin{aligned} Q3 \text{ 이면 } n &= 2N + 1 \\ Q4 \text{ 이면 } n &= 3N + 1 \\ &\vdots \\ Qf \text{ 이면 } n &= (f-1)N + 1 \end{aligned}$$

4) 다른 작업영역으로 요소작업을 순환할 경우

요소작업의 작업기간이 최장 요소작업보다 작은 경우(최장 요소작업보다 1/2까지)는 다른 작업영역으로 순환하면 유희손실을 줄일 수 있다. 이러한 요소작업의 순환시 공정 수식모형은 다음과 같다.

$$ES_i = EF_k = EF_{m,(n-N),r}$$

또는 $ES_i = EF_{(i-1)}$

$$EF_i = ES_i + D_m \dots (\text{식 18})$$

여기서, $k = i - (N \times Am)$

4. 사례적용 및 분석

4.1 사례공사의 모형

본 연구에서 제안한 수식 모형을 적용하여 모의조작하기위한 골조공사의 기본시공공정의 작업요소별 연관관계는 표 3과 같이 구성되며, 1개 작업팀의 작업반의 구성은 2003년 시중노임단가(대한건설협회2006)를 기준으로 표 4와 같이 구성하였다.

표 3. 작업반 연관관계

선행작업	후속작업	SSij	FFij
벽체철근설치	벽체형틀설치	0	1
벽체형틀설치	슬래브형틀설치	1	1
슬래브형틀설치	슬래브철근설치	1	1
슬래브철근설치	콘크리트타설A5	2	1
콘크리트타설	양생	1	4

표 4. 17개 작업팀 구성요건

구분	자 원	자원 요구 량(인/ 일)	작업 반구 성(인)	작업 기간	비용 단가	1일비용	비 고
벽체철근 설치	철근공	36	12	3	96,310	1,155,720	
	보통인부	18	6		52,483	314,898	
벽체형틀 설치	형틀목공	92	23	4	92,041	2,116,943	해체
	보통인부	48	12		52,483	629,796	포함
슬래브형 틀설치	형틀목공	44	22	2	92,041	2,024,902	해체, 동
	보통인부	22	11		52,483	577,313	바리포함
슬래브철 근설치	철근공	16	8		96,310	770,480	
	보통인부	8	4		52,483	209,932	
콘크리트 타설	콘크리트공	8	8	1	87,613	700,904	벽체, 슬래 브포함
	보통인부	8	8		52,483	419,864	
	펌프카	1	1		121,584	486,336	
양 생				4			

사레공사는 4세대 2 코아형 공동주택공사로 2003년 4월 착공하여 골조공사의 경우는 2004년 4월30일 완공하여 약 400여 일이 소요되었으며 예정공사비는 54억원으로 추정되었다. 총 12개동으로 10층 6개동, 13층 2개동, 15층 4개동으로 구성되어 있어 모의조작을 실시하여 최적안을 구하고자할 경우, 수평작업역의 변동과 수직작업역을 동시에 고려하여야 하는 다중 반복공정으로 구성되어 있다.

4.2 사례공사 분석방법

사레공사는 수평작업역과 수직작업역이 각각 상이한 경우이므로 먼저 수직작업역에 따른 분석을 한 후 수평작업역에 따른 분석을 하고 요소작업의 순환과 요소작업의 작업기간을 변경하여 모의조작을 하고자 한다. 모의조작의 순서는 다음과 같이 전개한다.

1) Step 1

① Case 1

수직작업역이 1층에서 15층까지이므로 이 단계에서는 먼저 10층까지 수직작업역을 고정하여 수평작업역에 해당하는 작업팀의 변화에 따른 총비용, 손실비용 등 공사비 변화와 일일 자원의 변동치를 파악한다.

② Case 2

Case 1에서 공사비와 일일 자원의 변동치가 가장 합리적인 작업팀의 구성을 선택하여, 요소작업의 작업기간이 작은 요소작업을 다른 수평작업영역으로 순환하여 결과를 선택한다.

③ Case 3

요소작업의 작업기간을 조절하여 모의조작 한다.

2) Step 2

11층에서 13층까지의 수직작업역에서 작업팀의 수를 조절하

여 각각의 경우를 step 1 과정에서 도출된 최적의 작업팀의 결과와 연결하여 모의조작 한다.

3) Step 3

14층에서 15층 수직작업영역에서 작업팀의 수를 조절하여 각각의 경우를 step 1과 step 2의 과정의 최적값과 연결하여 모의조작 한다.

4.3 수식모형 적용한 모의조작 분석

1) Step 1

① Case 1

모의조작을 수행한 결과 그림 1~그림 3.의 결과가 구해졌다. 그림 1.~그림 3. 가운데에서 공사비, 공사기간, 자원의 변동치를 고려한 결과 작업팀이 2조로 구성 각각 6동을 순환한 경우가 가장 합리적으로 판단함

	총작업일수	순작업일수	휴업일수	손실비용(천원)	총비용(천원)
벽체철근	474	360	114	167,694	697,254
벽체형틀	480	480	0	0	1,318,560
슬래브형틀	472	240	232	603,664	1,228,144
슬래브철근	472	240	232	227,360	462,560
콘크리트타설	236	120	116	196,862	400,492
양생	480	480	0	0	0
합 계	2,614	1,920	694	998,718	3,706,518

(a)비용, 공사기간 :128일

	철근공	인부	목수	콘크리트공	펌프카
벽체철근	36,864	9,216	0	0	0
벽체형틀	0	4,608	15,920	0	0
슬래브형틀	0	116,160	464,640	0	0
슬래브철근	51,440	15,360	0	0	0
콘크리트타설	0	15,360	0	15,360	240
양생	0	0	0	0	0
합 계	93,304	160,704	481,568	15,360	240

(b) 자원변동치

그림 1. Step1 Case1 n=3, 작업팀 4조

	총작업일수	순작업일수	휴업일수	손실비용(천원)	총비용(천원)
벽체철근	643	360	283	416,293	945,853
벽체형틀	689	480	209	571,376	1,889,936
슬래브형틀	682	240	442	1,150,084	1,774,564
슬래브철근	682	240	442	433,160	668,360
콘크리트타설	237	120	117	198,549	402,189
양생	689	480	209	0	0
합 계	3,621	1,920	1,701	2,570,913	5,278,713

(a) 비용, 공사기간:248일

	철근공	인부	목수	콘크리트공	펌프카
벽체철근	15,416	4,104	0	0	0
벽체형틀	0	1,728	6,348	0	0
슬래브형틀	0	60,016	240,064	0	0
슬래브철근	31,744	7,936	0	0	0
콘크리트타설	0	13,824	0	13,824	216
양생	0	0	0	0	0
합 계	48,160	87,608	246,412	13,824	216

(b) 자원변동치

그림 2. Step1 Case1 n=4, 작업팀 3조

	총작업일수	순작업일수	휴업일수	손실비용(천원)	총비용(천원)
벽체철근	453	360	93	136,803	666,363
벽체형틀	480	480	0	0	1,318,560
슬래브형틀	476	240	236	614,072	1,238,552
슬래브철근	475	240	236	231,280	466,480
콘크리트타설	238	120	118	200,245	403,866
양생	480	480	0	0	0
합 계	2,603	1,920	683	982,155	3,689,955

(a) 비용, 공가기간:248일

	철근공	인부	목수	콘크리트공	폼프카
벽체철근	14,400	3,600	0	0	0
벽체형틀	0	1,152	4,232	0	0
슬래브형틀	0	58,080	232,320	0	0
슬래브철근	30,720	7,680	0	0	0
콘크리트타설	0	7,680	0	7,530	120
양생	0	0	0	0	0
합 계	45,120	78,192	236,552	7,530	120

(b) 자원변동치

그림 3. Step1 Case1 n=6, 작업팀 2조

② Case 2

Case 1에서 구해진 작업팀 2조인 경우에서 요소작업 슬래브형틀과 슬래브 철근공을 각각 1개조로 하여 2개의 수평작업영역으로 순환시켜, 그림 4.와 같이 총비용, 손실비용, 자원변동치를 축소할 수 있었다.

	총작업일수	순작업일수	휴업일수	손실비용(천원)	총비용(천원)
벽체철근	455	360	95	139,745	669,305
벽체형틀	480	480	0	0	1,318,560
슬래브형틀	240	240	0	0	624,480
슬래브철근	241	240	1	960	236,180
콘크리트타설	240	120	120	203,640	407,280
양생	480	480	0	0	0
합 계	2,136	1,920	216	140,725	2,848,525

(a) 비용, 공가기간:250일

	철근공	인부	목수	콘크리트공	폼프카
벽체철근	14,688	3,672	0	0	0
벽체형틀	0	1,152	4,232	0	0
슬래브형틀	0	242	968	0	0
슬래브철근	15,360	3,840	0	0	0
콘크리트타설	0	7,808	0	7,808	122
양생	0	0	0	0	0
합 계	30,048	16,714	5,200	7,808	122

(b) 자원변동치

그림 4. Step1 Case2 n=6, 작업팀 2조

③ Case 3

벽체철근 작업의 작업기간을 4일로 조정하여 그림 5.과 같은 결과를 얻었다.

	총작업일수	순작업일수	휴업일수	손실비용(천원)	총비용(천원)
벽체철근	480	480	0	0	527,040
벽체형틀	480	480	0	0	1,318,560
슬래브형틀	240	240	0	0	624,480
슬래브철근	241	240	1	960	236,180
콘크리트타설	240	120	120	203,640	407,280
양생	480	480	0	0	0
합 계	2,161	2,040	121	960	2,706,260

(a) 비용, 공가기간:250일

	철근공	인부	목수	콘크리트공	폼프카
벽체철근	648	128	0	0	0
벽체형틀	0	1,152	4,232	0	0
슬래브형틀	0	242	968	0	0
슬래브철근	15,360	3,840	0	0	0
콘크리트타설	0	7,808	0	7,808	122
양생	0	0	0	0	0
합 계	16,008	13,170	5,200	7,808	122

(b) 자원변동치

그림 5. Step1 Case3 n=6, 작업팀 2조

2) Step 2

Step 1의 결과에서 작업팀 2조의 Case 3의 결과에 작업중단 없이 계속하여 진행할 경우 나머지 11층에서 13층의 순환할 수 있는 수평영역은 총 6동이므로 작업팀이 2조인 경우와 1개조인 경우이므로, 이 두 과정을 연속하여 모의조작 하여 그림 6.과 그림 7.이 구해졌다. 작업팀이 2조인 그림 6.이 합리적으로 판단됨.

	총작업일수	순작업일수	휴업일수	손실비용(천원)	총비용(천원)
벽체철근	74	72	2	2,196	81,252
벽체형틀	74	72	2	5,494	203,278
슬래브형틀	44	36	8	20,816	114,488
슬래브철근	45	36	9	8,820	44,100
콘크리트타설	44	18	26	44,122	74,568
양생	74	72	2	0	0
합 계	355	306	49	37,326	443,118

(a) 비용, 공가기간:297일

	철근공	인부	목수	콘크리트공	폼프카
벽체철근	648	128	0	0	0
벽체형틀	0	1,152	4,232	0	0
슬래브형틀	0	5,566	22,264	0	0
슬래브철근	1,536	384	0	0	0
콘크리트타설	0	1,920	0	1,920	30
양생	0	0	0	0	0
합 계	2,184	9,150	26,496	1,920	30

(b) 자원변동치

그림 6. Step2 Case3 n=3, 작업팀 2조

3) Step 3

나머지 14층과 15층으로 이루어진 4개동의 경우 작업팀을 1개조 4개동 순환의 경우와 2개조 2개동 순환의 경우로 하여 Step1 과 Step2의 결과에 작업중단 없이 연속하여 모의조작을 진행하였다.

	총작업일수	순작업일수	휴업일수	손실비용(천원)	총비용(천원)
벽체철근	72	72	0	0	79,056
벽체형틀	72	72	0	0	197,784
슬래브형틀	70	36	34	86,468	182,140
슬래브철근	70	36	34	33,320	68,600
콘크리트타설	69	18	51	85,547	117,093
양생	72	72	0	0	0
합 계	425	306	119	121,768	527,580

(a) 비용, 공가기간:322일

	철근공	인부	목수	콘크리트공	폼프카
벽체철근	162	32	0	0	0
벽체형틀	0	288	1,058	0	0
슬래브형틀	0	4,366	17,424	0	0
슬래브철근	2,304	576	0	0	0
콘크리트타설	0	2,304	0	2,304	36
양생	0	0	0	0	0
합 계	2,466	7,566	18,482	2,304	36

(b) 자원변동치

그림 7. Step2 Case3 n=6, 작업팀 1조

	총작업일수	순작업일수	휴업일수	손실비용(천원)	총비용(천원)
벽체철근	40	32	8	8,784	43,920
벽체형틀	40	32	8	21,976	109,880
슬래브형틀	31	16	15	39,030	80,562
슬래브철근	32	16	16	15,680	31,360
콘크리트타설	31	8	23	39,031	52,507
양생	40	32	8	0	0
합 계	214	136	78	65,470	265,822

(a) 비용, 공가기간:327일

	철근공	인부	목수	콘크리트공	폼프카
벽체철근	972	192	0	0	0
벽체형틀	0	1,728	6,348	0	0
슬래브형틀	0	1,936	7,744	0	0
슬래브철근	640	160	0	0	0
콘크리트타설	0	1,024	0	1,024	16
양생	0	0	0	0	0
합 계	1,612	5,040	14,092	1,024	16

(b) 자원변동치

그림 8. Step3 Case3 n=2 작업팀 2조

	총작업일수	순작업일수	휴업일수	손실비용(천원)	총비용(천원)
벽체철근	32	32	0	0	35,136
벽체형틀	32	32	0	0	87,904
슬래브형틀	30	16	14	36,428	78,060
슬래브철근	30	16	14	13,720	29,400
콘크리트타설	29	8	21	35,637	49,213
양생	32	32	0	0	0
합 계	185	136	49	50,148	230,500

(a) 비용, 공가기간:325일

	철근공	인부	목수	콘크리트공	폼프카
벽체철근	162	32	0	0	0
벽체형틀	0	288	1,058	0	0
슬래브형틀	0	1,936	7,744	0	0
슬래브철근	1,024	256	0	0	0
콘크리트타설	0	1,024	0	1,024	16
양생	0	0	0	0	0
합 계	1,186	3,536	8,802	1,024	16

(b) 자원변동치

그림 9. Step3 Case3 n=4, 작업팀 1조

모의조작의 결과 나머지 층수의 경우 작업팀이 1개조가 합리적인 것으로 판단됨

5. 결론

본 연구에서 시공공정 효율화를 위해 모의조작 시 필요한 수식 모형을 제안하였고, 제안된 수식모형을 사용하여 실제 시공된 현장 자료를 토대로 작업팀의 구성방법과 요소작업의 순환방법을 다양하게 변화시켜 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 기존 공정계산 수식은 작업 활동기간과 이벤트만 고려하여 공정의 순서를 계산하는 수식이고, 수평작업역과 수직작업역을 고려하여 관리자가 경험적인 판단으로 인위적으로 작업역을 순환하고자할 경우에는 가능하지 않지만 본 연구에서 개발한 수식은 작업자의 현 위치를 파악할 수 있어 이를 가능하게 한다.
- 2) 모의조작에서 작업팀의 구성은 시공초기단계와 시공 중기까지는 같은 조로 운영하는 것이 효율적인 것을 알 수 있으며 초기공정에서 4개조로 운영하는 것과 비교하여 공사비 면에서 약 20%의 차이를 보였다.

3) 제시된 수식모형은 요소작업의 위치를 파악하여 계산하므로 모의조작의 조건을 다양하게 변경하여 시험할 수 있다.

4) 제시된 수식모형은 향후 모의조작용 프로그램 개발에 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 후진계산 수식모형에 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2005년 서울대학 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

1. 김경주(2000), "건설공정 시뮬레이션을 위한 독립자원 모델 구축 방안 연구", 대한토목학회 논문집 제 20권 제4-D호.
2. 대한건설협회(2006), "2006 상반기적용 건설업 임금실태조사 보고서", pp8-pp12, (<http://cak.or.kr/>)(2006.10).
3. 신현식(1995), "공사관리 핸드북", 태림문화사, pp139-151.
4. 이배호(2000), "건설공사관리 이론과 실제", 구미서관, pp116-145.

5. 한국건설산업연구원(1997), "건설관리 및 경영 제 1편 : 이론", 보성각, pp293-295.
6. Jaeho Son and Mirosław J. Skibniewski(1999), "Multiheuristic Approach for Resource Leveling Problem in Construction Engineering", Journal of Construction Engineering and Management, vol.125, no.1, pp23-31.
7. Ming Lu and s.M. AbouRizk(2000), "Simplified CPM/PERT Simulation Model", Journal of Construction Engineering and Management, vol.126, no.3, pp219-226.
8. Olusegun O. Faniran, Perter E.D. Love and Heng Li(1999), "Optimal Allocation of Construction Planning Resources", Journal of Construction Engineering and Management, vol.125, no.5, pp311-319.
9. Robert B. Harris(1978), "precedence and Arrow Networking Techniques for Construction", Jon Wiley & Sons, pp254-312.
10. 長岡弘明 外3(1997), "繰り返し型工事におけるマイルストーンを用いた工程計画・管理方法", 日本建築學會計劃系論文集 第492號, pp171-177.

논문제출일: 2006.10.31

심사완료일: 2007.02.01

Abstract

If construction process operate composing work team by judgment manager's experience, possibility that progress of construction process becomes as inefficient is much. But, If produce optimal proposal of resources allocation, construction cost and duration through simulation at work plan step, work schedule because do quantification efficient operate do can. When plan construction process in this research, resources allocation by change of work team operation change, resources cost loss, total cost, optimal proposal of construction duration tentative plan of numerical formula model that can do simulation propose. Apply and revealed to apartment house framework which horizontal work area of process and vertical work area are composed as is each different construction process to verify proposed numerical formula model. Achieved efficiency than work team's operation results which apply numerical formula model that is presented in this research and enforce simulation is applied in actuality example construction.

Keywords : Construction Process, Simulation, Resource allocation by Change, Numerical Formula Model