

기후정보를 이용한 초고층 건축 골조공사의 확률적 공기산정 모델

Probabilistic Model to Forecast the Duration of Structural Work in High-rise Building Construction Considering Weather Elements

신재원* 류한국**
Shin, Jae-Won Ryu, Han-Guk
이현수*** 박문서***
Lee, Hyun-Soo Park, Moon-Seo

Abstract

The duration of a construction project is not only a key element for taking a new order, but also a strict yardstick to determine a certain project successful or not. While construction project is full of uncertainty and contains many risk factors, however, the current schedule planning work relies on traditional deterministic scheduling methods. Among the all construction processes, the structural work is basically an outdoor work and most of the activities are proceeded out-air, that no matter how the schedule plan has been established accurately, an actual project is mostly affected by the weather condition, beyond anyone's control. Thus, the weather condition and the work cycle time for a unit section among many risks, have been chosen as main two factors to calculate the duration of structural work. The aim of this research is to present a probabilistic model to forecast the duration of structural work in high-rise building construction considering weather elements.

키워드 : 초고층 건축 공사, 골조공사, 기후 영향 요인, 시뮬레이션, 확률적 공기산정

Keywords : High-rise Building Construction, Structural Work, Weather Influence, Simulation, Probabilistic Duration Forecasting

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

하나의 생산라인에서 같은 종류의 제품이 반복해서 만들어지는 제조업과는 달리 건축 공사는 각 프로젝트 별로 서로 다른 조건과 상황이 주어지고, 또한 실외에서 이루어지는 작업이 많기 때문에 타 산업에 비해 기후의 영향을 많이 받는다. 이로 인해 건축 공사는 다른 산업들에 비해 불확실한 요소에 의한 리스크가 많고 공사의 진행 계획을 세우는데 많은 시간과 노력이 필요하다. 또한, 초고층 건축물 프로젝트와 같이 과거의 경험이 부족하고 새로운 공법들이 많이 활용되는 공사의 경우에는 계획을 수립하는데 기초가 될 만한 데이터가 일반 건축물에 비해서 부족하여 신뢰할 만한 공정 계획을 수립하기가 어렵고 각 현장별로 해당 공정계획을 하는 담당자에 따라 휴리스틱하게 공정계획이 이루어지고 있다. 또한 복잡한

설계요소의 반영과 새로운 첨단 시공기술의 활용으로 인해 상대적으로 정확한 공정계획이 어렵다. 실제 건설 현장에서는 이에 대해 많은 부분을 리스크 요인들로 간주하고 일반건축물에 비하여 상대적으로 긴 여유시간과 준비기간을 두고 공정계획을 수립하고 있다.

따라서 본 연구에서 공기 산정 요소에 대한 분석을 통해 초고층 건축물 공사 공기의 특징을 체계적으로 반영할 수 있고, 새로운 환경에 적합한 공정계획 시스템 개발을 위한 기초연구로서, 기후 정보를 이용한 초고층공사 골조공기 예측 모델을 제안한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

일반적으로 건축 공사는 “착공준비 → 토공사 → 지하골조 → 지상골조 → 마감공사 → 준공검사 → 준공”의 순서로 진행된다. 토공사, 지하골조의 공사 기간은 대부분 각 현장의 지반 여건에 달려 있기 때문에 이를 정형화하기 어렵다. 철근 콘크리트 공사는 골조공종이기 때문에 시공 중에 발생할 공종 리스크로 전체 공정에 상당한 영향을 미친다. 특히, 철근콘크리트 공사는 고층 건축물 공사에서 철골에 비해 공사기간 측면에서 약점이 있음에도 불구하고, 공사비 등의 측면에서 가진 장점으로 인하여 최근 공사에서 사용이 증가되고 있다.(류한국 외 2인, 2005) 따라서 본 연구에서는 초고층 건축공사의 골조 공

* 한미파슨스 건설전략연구소 연구원, 공학석사

** 한미파슨스 건설전략연구소 책임연구원, 공학박사
(교신저자, hglyu@hanmiparsons.com)

*** 서울대학교 건축학과 교수, 공학박사

※ 본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2006년도 건설기술기반구축사업(과제번호 : 06기반구축 D05-01)의 지원으로 이루어졌습니다.

사 중에서 전체 공정에 영향력이 크고 리스크 확률이 높은 철근 콘크리트 공사를 대상으로 하였다. 구체적인 연구 방법론을 주공정선 상에서 가장 많은 부분을 차지하며 비교적 정형적인 작업양상을 보이는 지상 골조공사에 적용함으로써 추후 나머지 공정들에 적용해 볼 수 있을 것이다.

본 연구에서는 문헌조사와 전문가와의 심층 면담을 거쳐 골조 공사의 공기 산정 요소를 공법에 의한 단위 작업 구역의 사이클 타임과 기후에 의한 영향, 두 가지로 도출하였다. 그리고 확률적 개념의 공기 산정을 위하여 단위 작업 구역의 사이클 타임을 베타 확률 분포의 형태로 가정하였다.

본 연구에서 초고층공사 골조공기 예측 모델을 제안하기 위해 수행한 절차는 다음과 같다.

- (1) 기후 요인을 비작업일을 초래하는 기후 데이터, 작업 생산성 영향 기후 데이터의 두 가지로 나누고, 기후가 골조 공사의 작업 생산성 비율에 미치는 영향을 회귀 분석을 통하여 수학적으로 정량화하였다.
- (2) 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 확률적인 공기산정이 가능한 공기 산정의 알고리즘을 제안하였다.
- (3) 제안한 알고리즘을 실제 건축 공사에 적용하여 실효성을 검증하였다.

2. 예비적 고찰

2.1 초고층 공사 공정계획 상황

일반 중저층 공사의 경우, 각 건설 회사마다 공사 유형에 따른 층별 작업 기간과 비 작업일 등에 대한 내부기준을 수립하여 공사기간 산정에 반영하고 있다. 하지만 초고층 건축물 공사의 공기산정에 있어서는 반복 작업에 의한 경험적 학습효과의 적용 살계가 적고, 공기산정 기준이 없으므로 연구의 구체적인 진행에 앞서 공정계획상의 차이점, 그리고 초고층 건축물 공사의 일반적인 공정계획 현황, 공기산정 방법을 알아보기 위해 전문가들과 면담조사를 실시하였다. 면담 조사는 현재 초고층 건축물 공사를 진행 중이거나 과거 공사 경험이 있는 국내 상위 5개사를 대상으로 하였고, 각 건설사의 해당 현장에서 공정 계획 및 관리 업무에 종사한 경험이 있는 현업 전문가 8인을 대상으로 진행하였다.

면담조사를 통해 파악한 실제 초고층 건축물 공사 공정계획의 문제점은 다음과 같다.

- 1) 초고층 건축물 공사에 대한 데이터화 된 자료와 경험의 부족
국내에서는 초고층 건축 공사가 본격적으로 시작된 것이 얼마 되지 않았고 외국의 공사 실적은 그대로 적용하기에 현실적 문제가 있다. 과거 공사 실적과 체계적인 데이터의 부족으로 일반 공사에 비해 준비기간이 길고 객관적인 기준이 없이 여유시간을 길게 책정하고 있다.
- 2) 초고층 건축 공사에 대한 공통의 인식 부족
건설사마다 초고층의 정의와 이에 따른 공정계획의 방법 및 구체적 대응 방안이 다르기 때문에 서로간의 지

식 공유가 힘들다. 경험이 부족한 초고층 건축물 공사에서는 결국 불필요한 시간과 노력의 낭비로 이어지게 된다.

3) 담당자 개개인의 경험에 의존하는 공정계획

각 건설사 내부에서도 체계화된 구체적인 공정계획 방법이나 지침이 없기 때문에 초고층 프로젝트를 담당했던 직원이 이직했을 경우 지식과 경험 전달이 쉽지 않고, 이는 또다시 부정확한 공정계획이나 지나치게 안정적인 대응으로 이어지게 된다.

2.2 기존 연구 고찰

본 연구의 두 가지 주요 연구 대상인 기후 요소의 건설 공기 영향과 건설 공사기간 산정에 대한 기존 연구는 다음과 같다.

(1) 기후 요소의 건설 공기 영향

권동찬과 이찬식(2004)는 "실적자료에 의한 고등학교 시설 공기산정"을 통해 공사 실적 자료를 대상으로 다중 선형회귀분석을 실시하여 도출한 순 공사기간에 기후 특성을 반영하여 산정한 작업 불가능 기간을 더하여 총공사 기간을 산정하는 방법을 제시하였다. 김신태(외 2인, 2004)는 "기후요소와 생산성간의 상관관계 분석에 관한 연구"에서 골조공사의 건설생산성과 5가지 기후요소 간의 관계를 단순회귀분석과 다중회귀분석을 통해 분석하고 기후요소에 의해 생산성을 예측할 수 있는 회귀식을 제시하였다. 정석남과 이학기(2003)는 "기후요소를 고려한 최적 착공시기 결정방법 연구"에서 가상기후 시뮬레이션을 통한 기후요소별 작업불가능일과 예정공정표를 연계하여 기후요소와 단위작업과의 관계를 확률값을 통해 총공사기간의 변화를 예측할 수 있게 하였다. Thomas(외 2인, 1999)는 "Loss of Labor Productivity due to Delivery Methods and Weather"를 통해 작업 생산성을 산출하는 방법을 제안하고, 작업 생산성 저하의 요인들을 제시하면서 그 중 기후 요소의 영향 정도를 파악하였다.

이들 연구는 기후 요소에 의한 작업 불가능 기간과 작업 생산성 중 한 가지에 대해서만 연구가 진행되었고 공기 산정을 하는데 있어 연구의 결과를 시스템적으로 활용하는 구체적인 방안이 다소 미흡하였다.

(2) 건설 공사기간 산정

Lee(2005)는 "Probability of project completion using stochastic project scheduling simulation"을 통해 건설공사의 완료 예정일에 완료할 수 있는 확률을 제공하는 확률적 프로젝트 스케줄 시뮬레이션 시스템을 개발하고 실용성을 제시하였다. 김상중과 이재섭(2003)은 "확률적 공기산정에 의한 공정계획 합리화 방안"에서 제조업에서 적용하고 있는 CCPM의 확률적 공기산정과 공정버퍼의 개념을 건설 프로젝트에 적용하였다. "황효상(외 4인, 2002)은 "공기산정 영향 요인별 실적공기 비교분석-사무소 건축공사 공기산정기준을 중심으로"를 통해 사무소 건축공사의 실적공기를 지상층수별, 연면적별, 마감공사 공중수

별, 발주기관별 공사기간을 통해 비교 분석하여 국내 건축공사의 공기단축 필요성을 제기하였다. 정인수(외 3인, 2000)는 “군시설 공사의 순공사기간 예측모형에 관한 연구”에서 군에서 실시한 공사실적자료를 대상으로 상관분석, 다중선형회귀분석 등의 통계적 방법을 사용하여 순공사기간 예측모형을 개발하였다 (류한국 외 2인, 2006).

이들 연구는 전체 공사 기간에 대한 확률적 계산을 제안하거나 실적자료를 분석하여 통계적 방법 등을 이용하여 공기 산정을 하는 방안을 제시하였으나 실적자료와 공사 기간의 확률적 산정 모두를 고려한 공기 산정 방법을 제시하는 것은 다소 미흡하였다.

3. 공기산정 요소로서의 사이클 타임과 기후

전문가 면담조사 결과 골조 공사는 나머지 다른 공정들에 비해 초기에 사이클 타임을 결정하는 것이 중요하며, 기후를 제외하고는 특정 층수나 현장 상황, 기타 여러 가지 조건에 의해 영향을 받는 정도가 타 공정에 비해 적었다. 따라서 골조공사의 공기를 산정할 수 있는 요인을 공법에 따른 단위 작업의 사이클 타임과 기후에 의한 기후요소 두 가지로 확정하고 이 두 가지 요인들을 고려한 공기 산정 모델을 제안한다.

3.1 확률적인 골조공사 사이클 타임

시뮬레이션 기법을 적용하기 위해서는 대상으로 하는 공정의 단위 작업의 예상 공기를 확률 분포의 형태로 가정하여야 한다. 이는 크게 두 가지 방법으로 접근할 수 있다. 한 가지는 과거 실적자료들을 취합하여 실제 작업이 이루어진 공기를 조사 한 후 확률분포 형태들을 대입하여 조사 결과에 가장 적합한 확률분포를 결정하는 방법이고, 다른 한 가지는 작업 공기의 확률분포의 종류를 가정을 통해 미리 선택하는 방법이다. 첫 번째 방법의 경우, 보다 정확한 확률분포의 가정이 가능하다는 장점이 있으나 신뢰할 수 있을만한 결과를 얻기 위해서는 많은 양의 데이터가 필요하고 한 두 개의 특이점이 확률분포 선택자체에 지나치게 크게 영향을 미치게 된다는 단점들이 있다. 두 번째 방법의 경우, 첫 번째 방법보다 실제 상황에 정확히 대입되지 않을 수 있다는 단점이 있지만 적은 데이터와 전문가의 지식을 통해 활용이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 방법의 장점을 결합할 수 있도록 하였다. 해당 작업의 공기의 확률분포는 기존 문헌들을 통하여 가장 적합한 형태를 가정을 통하여 선정하였고, 해당 확률 분포의 입력 데이터에 해당하는 수치에 대해서는 전문가의 판단과 함께 과거 실적자료의 대입을 통하여 해결하도록 하였다.

확률분포의 경우, 특정 작업의 기간을 나타내는 데에는 흔히 표준분포, 삼각분포, 베타분포 등이 쓰이고 있지만, 기존 연구 문헌들을 토대로(Foad Farid et al., 1994, Simaan M. AbouRizk et al. 1992) 작업 공기는 베타 분포를 따르는 것으로 가정하였다. 베타 확률 분포의 형태 결정 변수는 단위 작업의 최단, 최장시간, 형태 변수 a, b

이다. 이중 베타분포 형태 변수 a와 b는 최단, 최장 시간 등과 같이 시간을 나타내는 변수가 아닌, 베타 분포의 형태를 결정하기 위한 변수로, a와 b의 값에 따라 베타 분포의 형태가 직선이나 곡선 형태를 띠게 되고 산모양의 경우, 치우쳐 지는 방향이 결정된다. 이 두 변수와 베타 확률 분포는 다음과 같은 함수식 (1)을 따른다.

$$F(t) = \frac{(a+b+1)!}{a!b!} t^a (1-t)^b \quad (1)^1$$

3.2 골조공사와 기후 요소의 영향

작업을 전혀 진행할 수 없게 만드는 요인과 작업은 이루어지지만 생산성의 저하를 가져오는 요인은 다르다는 가정 하에, 작업에 영향을 미칠 수 있는 기후 데이터는 크게 비작업일을 초래하는 기후 데이터와 작업 생산성에 영향을 미치는 기후 데이터로 나누어 분석하였다.

(1) 비작업일을 초래하는 기후 데이터 기준

표 1과 같이 건설 현장에서 작업을 불가능하게 하는 기후 요소에는 크게 기온, 강수, 바람이 있다(신종현 외, 2005). 그러나 이 요소들에 대한 기준이 각 기관별, 업체별로 다르고 세부적으로는 각 지역별로도 서로 상이하다. 이와 관련된 기존의 연구들 또한 연구별로 작업 가능일과 비작업일의 기준을 서로 다르게 제시하고 있다.

결국 비작업일을 결정하는 기준을 하나로 통일하여 확정하려는 시도 자체는 크게 의미가 없을 것이다. 따라서 비작업일에 관한 내용은 실제로 공사를 수행하는 업체별로, 공기 산정 시 해당 업체의 시공 능력과 자체 기준을 고려해서 설정할 수 있도록 하는 것이 바람직할 것이다.

표 1. 기관 및 연구자 별 비작업일 기준

구분	저온기준	고온기준	
기온	대한주택공사 대한건축학회 대한토목학회 일본토목학회	일평균기온 4℃ 이하 시 한중콘크리트	일평균기온 25℃ 이상 시 서중콘크리트
	한국도로공사 COE 계약서	일평균기온 4℃ 이하 일최고기온 0℃ 이하	일최고기온 35℃ 이상
	ACI	일평균기온 4℃ 이하 한중콘크리트	
	양극영	주간기온 0℃ 이하	주간기온 25℃ 이상
	최인환	일평균기온 0℃ 이하	일평균기온 25℃ 이상
	진영섭	일평균기온 4℃ 이하 (골조공사)	일최고기온 35℃ 이상 일수의 50%
	최봉철	일최저기온 2℃ 이하	
	대한주택공사	일강우량 10mm 이상	
강수	산업안전기준	시간당 강우량 1mm 이상 시간당 적설량 1cm 이상	
	COE	일강우량 5mm 이상	
	양극영	주간강우량 10mm 이상 주간적설량 1cm 이상	
	최봉철	일강우량 5mm 이상 일수의 50%	
바람	산업안전기준	풍속 10m/s 이상(철골작업) 순간풍속 30m/s 이상 시 이탈 방지 조치(타워 크레인 작업)	
	양극영	주간최대풍속 10m/s 이상	

1) 양성민(1998), 시뮬레이션 기초

(2) 작업 생산성 비율에 영향을 미치는 기후 데이터

기후 데이터의 경우 작업에 영향을 미칠 수 있는 기후 요소를 문헌 조사를 통해 선정하였으며 실제 수행된 공사의 샘플 케이스 데이터를 통해 해당 지역의 계절별 기후가 작업 생산성 비율에 미치는 영향 정도에 대한 회귀 분석을 실시하였다. 선정된 기후 요소는 평균기온, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 평균풍속, 일조시간, 이들 6가지 요소들의 제공값, 그리고 강수량 데이터로 총 13개 기후 요소를 대상으로 하였고 이들 변수들의 데이터는 기상청 홈페이지²⁾에서 입수하였다.

샘플 케이스는 서울에 위치한 D사의 초고층 주상복합 건설 프로젝트로, 최고 층수 40층의 총 5개동으로 이루어져 있고, 2002년 9월부터 2003년 8월에 걸쳐 지상 골조공사가 진행되었다. 실적 자료를 토대로 각 작업일의 서울 지역 기후 요소들을 대입하고 모든 기후 요소들을 독립 변수로, 작업 생산성 비율을 종속 변수로 설정하여 중회귀 분석을 실시하였다.

작업 생산성 비율은 식 (2)과 같이 샘플 케이스 프로젝트의 각 층별 계획 공기를 실적 공기로 나눈 값을 적용하였고, 이렇게 얻은 작업 생산성 값들 중에서 작업 생산성의 비율이 1을 초과하는 경우는 들관작업이나 일정 조정을 위한 비정상적인 작업일 확률이 높으므로 작업 생산성 비율이 1미만인 층의 실제 작업일을 분석 대상으로 하였다.

$$P = \frac{D_p}{D_a} \quad (2)$$

- P : 작업 생산성 비율
- D_p : 계획 공기
- D_a : 실적 공기

프로젝트 수행일 중에서 D사 내부적 비작업일 기준인 평균기온 -2℃이하, 평균 풍속 10m/s 이상, 강수량 10mm 이상에 해당하는 날들은 제외하고, 계절별로 영향을 많이 미칠 수 있는 기후 요소가 다를 것이라는 가정하에 전체 데이터를 3~5월(봄), 6~8월(여름), 9~11월(가을), 12~2월(겨울)의 사계절로 나누어 분석하였다.

보다 더 의미 있는 회귀분석 식을 도출하기 위하여 매 회귀분석 시마다 설명력이 떨어지는 독립 변수들을 제외시켜 나가면서 최종적으로 모든 독립변수들이 95%의 신뢰도를 가질 때까지 반복적으로 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석에는 SPSS 12.0K for Windows를 사용하였다. 표 2⁷⁾은 전체 사계절의 분석 결과 중 설명을 위하여 봄 데이터 분석 결과 값들을 대표로 사용한 것이다.

일단 모든 독립변수들을 포함한 중회귀분석을 실시하였다. 최초 회귀분석에는 설명력이 부족한 변수들이 다수 포함되어 있으므로 표 2, 3과 같은 결과가 나왔다.

표 2. 봄 회귀분석 종합 결과 - 1차

R	R 제곱	수정된 R 제곱	추정값의 표준오차
0.646(a)	0.418	0.285	0.06407

회귀식의 설명력을 나타내는 R 제곱값은 표 2에서 0.418로 매우 높게 나타났으나, 이는 R 제곱값은 포함된 독립변수들이 의미 없는 변수들이라 할지라도 그 수가 많으면 값이 커지기 때문이다. 이를 보정해 주기 위한 것이 수정된 R 제곱값인데, 이 값은 0.285로 그 차이가 큰 것으로 보아 필요 없는 변수들이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다.

표 3은 최초 회귀분석시에 포함된 독립 변수들의 분석 결과이다.

표 3. 봄 회귀분석 변수 결과 - 1차

구분	비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률
	B	표준오차	베타		
(상수)	0.415	0.197		2.104	0.040
평균기온	-0.001	0.044	-0.093	-0.025	0.980
최고기온	-0.004	0.029	-0.375	-0.133	0.894
최저기온	0.005	0.018	0.355	0.251	0.803
강수량	-0.020	0.020	-0.150	-1.008	0.318
상대습도	0.014	0.004	2.527	3.319	0.002
일조시간	-0.021	0.014	-0.899	-1.587	0.118
평균풍속	-0.048	0.091	-0.401	-0.531	0.598
평균기온제곱	0.001	0.001	2.053	0.609	0.545
최고기온제곱	0.000	0.001	-1.141	-0.445	0.658
최저기온제곱	-0.001	0.001	-0.985	-0.868	0.389
상대습도제곱	0.000	0.000	-2.298	-2.840	0.006
일조시간제곱	0.003	0.001	1.200	2.477	0.016
평균풍속제곱	0.005	0.017	0.198	0.272	0.787

회귀분석의 t검정이란 각 회귀계수가 통계적으로 유의한 값을 가지는지를 보여주는 척도로써, 신뢰도 95%의 범위에 포함되기 위해서는 t값의 절대값이 1.96 이상이 되어야 한다. 그러나 표 3의 결과를 보면 위 회귀분석에는 그렇지 않은 변수가 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 2차 회귀분석 시에는 표의 변수들 중 t값의 절대값이 가장 작은 평균기온을 제외시키고 실행하였다.

표 4는 평균기온을 제외한 2차 회귀 분석의 결과 값이다.

표 4. 봄 회귀분석 종합 결과 - 2차

R	R 제곱	수정된 R 제곱	추정값의 표준오차
0.646(a)	0.418	0.297	0.06351

앞서 1차 분석에 비해 R 제곱값은 변화가 없지만 수정된 R 제곱값은 상승한 것을 알 수 있다. 이를 통해 1차 분석에 비해 남아있는 변수들의 설명력이 좋다는 것을 알 수 있다.

표 5는 2차 회귀 분석에 포함된 독립 변수이다. 표 5에도 아직까지 t값의 절대값이 1.96이 되지 않는 변수들이 많이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. 3차 분석 때는 가장 낮은 평균 풍속의 제곱 변수를 제거하고 분석을 실행하였다.

2) http://www.kma.go.kr/sfc/sfc_03_02.jsp

표 5. 봄 회귀분석 변수 결과 - 2차

구분	비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률
	B	표준오차	베타		
(상수)	0.416	0.194		2.142	0.036
최고기온	-0.005	0.011	-0.439	-0.428	0.670
최저기온	0.004	0.010	0.325	0.418	0.677
강수량범주	-0.021	0.020	-0.150	-1.026	0.309
상대습도	0.014	0.004	2.531	3.431	0.001
일조시간	-0.021	0.013	-0.899	-1.601	0.115
평균풍속	-0.049	0.089	-0.405	-0.551	0.584
평균기온제곱	0.001	0.001	1.978	1.314	0.194
최고기온제곱	0.000	0.000	-1.088	-0.764	0.448
최저기온제곱	-0.001	0.000	-0.962	-1.479	0.145
상대습도제곱	0.000	0.000	-2.303	-2.961	0.004
일조시간제곱	0.003	0.001	1.199	2.508	0.015
평균풍속제곱	0.005	0.017	0.202	0.289	0.773

이와 같은 방법으로 반복적인 수행의 결과, 최종적으로 다음 표 6, 7과 같은 결과를 얻었다.

표 6. 봄 회귀분석 종합 결과 - 10차(최종)

R	R 제곱	수정된 R 제곱	추정값의 표준오차
0.587(a)	0.344	0.305	0.06318

최종적으로 구한 회귀분석 결과를 나타내는 표 6을 보면, 최초 시행에 비해 R 제곱값은 0.344로 낮아졌지만 수정된 R 제곱값은 0.305로 오히려 높아졌음을 알 수 있고, R 제곱값과 수정된 R 제곱값의 차이도 줄어들었음을 확인할 수 있다.

표 7에서는 최종적으로 포함된 모든 변수들의 t값의 절대값이 1.96을 넘어, 모든 변수들이 신뢰도 95%를 만족해 주고 있음을 확인할 수 있다.

표 7. 봄 회귀분석 변수 결과 - 10차(최종)

구분	비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률
	B	표준오차	베타		
(상수)	0.304	0.121		2.517	0.014
상대습도	0.013	0.004	2.318	3.406	0.001
평균풍속	-0.025	0.013	-0.206	-1.965	0.054
상대습도제곱	-0.0001	0.000	-1.942	-2.842	0.006
일조시간제곱	0.001	0.000	0.416	3.366	0.001

봄 이외의 나머지 여름, 가을, 겨울에 대해서도 동일한 방법을 적용하여 얻은 결과는 표 8과 같다.

수정된 R 제곱값은 도출한 회귀식이 가지는 설명력을 나타내므로, 결국 생산성 비율이 1보다 낮은 날의 작업에 대해서 봄은 30.5%, 여름은 34.1%, 가을은 47.3%, 겨울은 31.1%가 기후의 영향으로 인한 것으로 설명할 수 있다.

F 검정은 회귀 분석 내 변수 각각의 유의성을 가리는 t검정과는 달리 회귀식 전체의 유의성을 조사하는 방법으로, 회귀식의 F값이 원하는 유의수준의 기각영역 F값보다 크면 회귀식이 유의하다고 할 수 있다. 봄에서 겨울까지의 각각 네 기각영역 F값을 F분포표 상에서 직선 보간법을 사용해서 알아보면 2.522, 2.768, 2.606, 3.170인 것을 알 수 있는데, 표 8에서와 같이 네 계절의 회귀식의 F값은 8.666, 11.525, 11.111, 13.879로 그보다 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 네 회귀식이 모두 유의하다는 것을 알 수 있다.

표 8. 기후 영향 요소 회귀 분석 결과 종합

계절	수정된 R 제곱값	F 값	독립 변수		
			변수	비표준화 계수	t 값
봄	0.305	8.666	상수	0.3036	2.517
			상대습도	0.0130	3.406
			평균풍속	-0.0249	-1.965
			상대습도제곱	0.0001	-2.842
			일조시간제곱	0.0109	3.366
여름	0.341	11.525	상수	1.4309	6.868
			최저기온	-0.0174	-4.319
			상대습도	-0.0129	-1.875
가을	0.473	11.111	상대습도제곱	0.0001	1.965
			상수	1.1216	10.086
			상대습도	-0.0105	-3.103
			평균기온제곱	-0.0004	-5.065
겨울	0.311	13.879	상대습도제곱	0.0005	4.259
			상수	0.6958	47.913
			최저기온	0.0109	5.067
			일조시간	0.0159	3.846

서울 지역의 기후 요소와 작업 생산성 간 회귀분석 결과로 얻은 회귀식은 다음과 같다.

$$Y_{Sp} = 0.3036 + 0.0130X_2 - 0.0249X_4 - 0.0001X_7 + 0.0109X_8 \quad (3)$$

$$Y_{Sm} = 1.4309 - 0.0174X_1 - 0.0129X_2 + 0.0001X_7 \quad (4)$$

$$Y_{Fl} = 1.1216 - 0.0105X_2 - 0.0004X_5 + 0.0005X_6 + 0.0001X_7 \quad (5)$$

$$Y_{Wn} = 0.6958 + 0.0109X_1 + 0.0159X_3 \quad (6)$$

Y_{Sp} : 봄철 작업 생산성 비율

Y_{Sm} : 여름철 작업 생산성 비율

Y_{Fl} : 가을철 작업 생산성 비율

Y_{Wn} : 겨울철 작업 생산성 비율

X_1 : 최저기온

X_2 : 상대습도

X_3 : 일조시간

X_4 : 평균풍속

X_5 : 평균기온제곱

X_6 : 최저기온제곱

X_7 : 상대습도제곱

X_8 : 일조시간제곱

식 (3)에서 (6)는 각각 봄, 여름, 가을, 겨울의 골조 공사 작업 생산성 비율에 미치는 기후 요소들의 영향을 나타내는 식들이다. 특이할만한 점은 일반적으로는 생산성에 영향을 미칠 것으로 예상하기 쉬운 강수량 변수가 최종적으로 도출한 회귀식에는 포함되어 있지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 강수량의 경우, 일정 강수량을 넘으면 작업이 불가능하게 되어 비 작업일을 야기하지만, 그러한 경우를 제외하면 일정 강수량 미만의 경우는 작업 생산성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 예상할 수 있는데, 이는 이전 연구의 결과와도 일치한다.(김진태 외, 2004) 또한, 최저기온, 상대습도, 상대습도의 제곱값들은 2개 이상의 계절에 있어서 작업 생산성 비율에 영향을 미치는 것으로 조사되었는데, 계절에 따라서 작업 생산성

에 양의 영향을 끼치기도 하고 음의 영향을 끼치기도 하는 것으로 나타났다. 가령, 상대습도의 경우 봄에는 계수가 +0.0130인데 반해 여름과 가을에는 각각 -0.0129, -0.0105인 것으로 보아 습도가 높은 여름과 여름을 막 넘긴 가을에는 습도가 높을수록 생산성이 저하하는데 반해 건조한 봄에는 습도가 높으면 생산성이 증가하는 것으로 분석할 수 있다. 최저 기온의 경우에도 여름에는 아침에 최저기온이 높을수록 그날의 생산성이 낮으나, 겨울에는 높을수록 생산성이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 내용들은 일상생활에서 직관적인 판단으로도 알 수 있는 것들이지만 보다 더 많은 영향을 미치는 요소들을 선정하고 이들의 영향을 계량화 했다는 점에서 의미를 찾을 수 있다.

(3) 기후 예측 모델

공기를 산정하는 시점에서 실제 공사가 진행될 시기는 미래의 상황이기 때문에 앞서 도출한 기후에 관한 조사 및 결론은 해당 공사가 수행될 시기의 기후를 얼마나 정확히 예측할 수 있느냐에 따라 그 효과에 많은 영향을 미친다고 할 수 있다.

현재 기상학 관련 학회를 통해서도 꾸준히 장기 예측 모델에 대한 연구로, 유사월 분석을 통한 2개월 단위 일기 예측이나 단계적 다중 선형회귀모형을 이용한 장기예측, 엘리노 정보를 이용한 장기예측 등과 같은 연구가 진행되고 있다. 건축학계에서도 이와 유사한 연구가 진행되었는데, 정성남(2000)은 기후요소를 분석하고, 이를 경험적 분포를 이용한 가상기후 시뮬레이션을 통해 가상 기후를 생성하는 방법을 제안하였다. 그 외에도 30년간의 기후 요소의 변화와 그 경향을 토대로 다소 부정확하게나마 대략적인 추세를 예측할 수 있는 통계적 방법도 존재하고, 비관적, 낙관적 선택에 의한 사용자의 결정에 따라 과거 30년간의 기후 데이터 중 혹한기/혹서기의 데이터나 이들의 80%수준에서 결정하는 것도 한 가지 방법에 속한다. 하지만 그 어떤 방법도 미래의 상황을 100% 정확하게 예측할 수는 없기 때문에, 보다 더 정확한 예측 방법을 고안하기 위한 지속적인 노력이 필요하다.

4. 골조공사 공기 산정 알고리즘

앞서 살펴본 골조 공사의 공기 산정의 영향 요소 두 가지, 단위 작업 구역의 사이클 타임과 기후 영향 요소를 고려한 골조 공사 공기 산정 알고리즘을 다음과 같이 제안하였다.

(1) 단위 작업 구역의 설정

골조 공사의 공법이 결정되면 해당 공법과 현장 상황, 프로젝트 규모 등을 종합적으로 고려하여 단위 작업의 규모를 결정한다. 경우에 따라서 1개 층 전 층이 단위 작업 규모가 될 수도 있을 것이고 한 프로젝트 내에서도 작업 존 분할이 있을 수도 있을 것이다. 또한, 공법에 따라 크게 최초 3~5개층, 기준층, 트랜스퍼 층 등의 3개 단

위 작업 구역의 위치와 작업 순서를 결정할 수 있다.

(2) 베타 분포 형태 결정 네 변수 설정

앞서 설명한 바와 같이, 단위 구역의 작업 공기는 베타 분포를 따르는 것으로 가정하고, 베타 분포의 형태를 결정하기 위한 변수들을 결정한다. 베타 분포의 형태를 결정하기 위해서는 최단시간, 최장시간, 베타분포 형태 변수 a, b의 네 개 변수가 필요하다.

최단, 최장시간과는 달리 형태 변수 a, b의 경우 실질적인 수치가 아닌 베타 분포의 형태를 결정하는 개념적 수치이기 때문에 이 두 변수의 값을 얻기 위하여 AbouRizk, S. M.(1992)이 고안한 공개 소프트웨어 VIBES를 사용한다. VIBES는 주어진 두 가지 입력 값들로부터 베타 분포 형태 변수 a, b를 도출해 주는 소프트웨어로서, 평균과 표준 편차, 평균과 최빈값, 최빈값과 표준편차, 두 개의 선택된 백분위 값, 하나의 선택된 백분위 값과 최빈값 등 총 다섯 가지의 입력 세트를 지원한다. 기존 실적 자료가 충분하다면 이 다섯 가지 입력 세트 모두 정확한 a, b값을 도출해줄 수 있지만, 일반적으로 실적 자료의 수가 충분하지 않다는 것을 고려했을 때, 과거 연구 문헌들로부터 데이터가 부족한 상황에서 가장 설명력과 신뢰도가 좋은 것으로 밝혀진(Fente, J. et al.) 최빈 시간과 75%확률의 사이클 타임³⁾을 입력하여 베타 분포 형태 변수 a, b를 구한다.

형태 변수 a, b는 주어진 값에 따라 결정되므로, 결국 골조 공법을 선택하면 해당 공법에 따라 최단, 최장, 최빈, 75%확률의 공기를 결정한다. 이 네 가지 변수들의 값에 대한 판단 근거는 표 9를 따른다.

표 9. 변수 판단 근거

변 수	자료 수 ≥ 30	자료 수 ≤ 30	
		거의 없음	약간수 존재
최단 시간	전문가 판단	전문가 판단	전문가 판단
최장 시간	실적 자료	전문가 판단	전문가/실적
최빈 시간	실적 자료	전문가 판단	실적 자료
75%확률의 시간	실적 자료	전문가 판단	실적 자료

최신 공법과 같이 실적 자료가 거의 없는 경우에는 네 개의 변수 모두 전문가의 판단에 따라 얻을 수밖에 없다. 최단 시간의 경우는 실적 자료의 수에 관계없이 공법의 개발 단계에서 해당 공법의 기술적 한계치의 개념으로 설정이 가능한 부분이므로 최대한 전문가 판단을 따르도록 하였다. 자료의 수가 통계적으로도 유효한 수만큼 있다면 최단 시간을 제외한 나머지 세 개의 변수는 실적 자료를 통해서 얻을 수 있을 것이다. 자료의 수가 통계적으로 유효한 수에까지 이르지 않는 않지만 전문가가 판단했을 때 일정 수가 된다면 최단 시간을 제외한 나머지 세 개의 변수는 실적 자료를 통해서 얻고, 최장 시간만 전문가의 판단을 병행하도록 하였다. 이는 해당 공법뿐만 아니라 일반적으로 발생할 수 있는 경우에 대한 전문가 판단의 활용을 위해서이다.

3) 설정한 사이클 타임의 기간을 초과할 확률이 25%라는 의미

(3) 시뮬레이션 실행

현재 일어나지 않은 상황에 대한 추정 방법으로서의 시뮬레이션에는 여러 가지 기법이 있다. 그 중에서 몬테카를로 기법은 변수들을 광범위하게 평가하며, 해당 항목의 확률변수를 설정하여, 해당분포의 범위 내에서 난수를 발생시킨 후 변수의 분포를 추정한다. 반복 시행을 통해 추정치를 얻어내므로 분산공분산법등 다른 기법에 비해 신뢰도가 높은 방법이라고 할 수 있다. 하지만 많은 반복 수행과 이에 따른 시간이 문제이다. 이에 본 연구에서는 Decisioneering 사의 Crystal Ball 7.0을 통해 시뮬레이션을 실행하였다. Crystal Ball은 엑셀을 기반으로 하고 있기 때문에 기존의 다른 여러 가지 시뮬레이션 기법에 비해서 현장이나 실제 작업에 적용하기에 우수하다. 또한 자료 입력이나 반복적인 처리는 엑셀 자체 기능인 매크로VBA와 같은 기능을 통해 손쉽게 수행이 가능할 것으로 예상할 수 있다.

앞서 설정한 단위 작업 구역의 작업 시퀀스에 따라 각각 순서대로 베타 확률 분포에 의한 확률적 공기를 가정하고, 전체 구역의 확률 분포 함수 적용이 된 이후에 전체 공기에 대한 시뮬레이션을 실행한다. 시뮬레이션 결과 값을 토대로 전체 공기, 혹은 단위 작업 구역별로 원하는 백분율 값을 결정하여 해당 공기를 산출하고 골조 공사의 시작 일을 설정한다.

(4) 기후 요소의 반복적인 대입

전체 공기, 혹은 단위 작업 구역별로 백분율 값을 결정한 후, 골조 공사의 시작일을 설정한다. 실제 골조 공사가 진행될 날짜의 기후 요소 예측치를 추정한 후 비작업일을 확인한 후 해당 일수만큼 공기를 연장한다. 전체 실제 작업일 내에 더 이상의 비 작업일이 포함되어 있지 않은 것을 확인 한 후 작업 생산성 식을 대입해 실제 작업일의 실제 생산성을 도출한다. 이에 따라 추가적으로 일수가 증가하면 또다시 해당 일수에 비 작업일이 포함되어 있는지 여부를 확인한 후 동일한 과정을 거친다. 최종적으로 전체 공기 중 실제 작업일 내에 비 작업일이 전혀 포함되어 있지 않은 상황에서 대입을 종료한다.

이 알고리즘을 도식화 한 것이 그림 1과 같다.

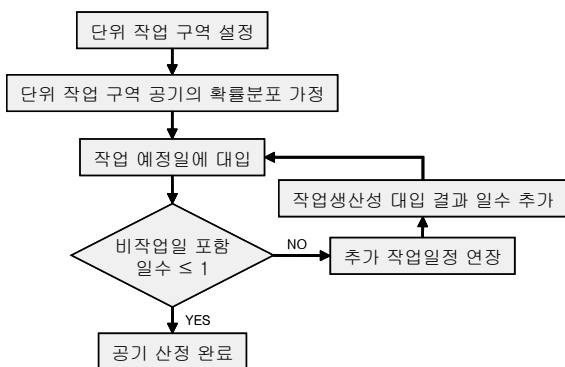


그림 1. 골조공사 공기산정 알고리즘

5. 사례 적용

4장에서 제안한 알고리즘을 실제 건설 현장의 데이터를 통해서 검증하였다. 알고리즘 상으로는 아직 수행되지 않은 프로젝트를 대상으로 제안한 공기 산정 모델을 적용하고, 추후 이를 확인해 보는 것이 정확한 의미의 검증이겠지만, 현실적인 한계로 이미 수행된 건설 현장에 적용, 검토하였다. 이미 수행된 프로젝트로 검토했을 경우, 정상적인 검토에 비해서 모든 조건은 동일하며, 다만 통계적 기후 예측 모델 대신 실제 작업일의 기후를 대입한다는 점만 다르다. 하지만 이 또한 통계적 기후 예측 모델 자체에 대한 검증만이 빠진 것이므로 이를 제외한 공기 산정 모델 전체의 검토에는 큰 무리가 없을 것이다.

해당 현장은 D산업의 서울에 위치한 초고층 프로젝트로, 2001년 11월에서 2003년 2월 사이에 철근 콘크리트로 골조 공사가 진행된 프로젝트이다. 총 3개동으로, 세 동 모두 초기 계획상의 공기보다 실적 공기가 많이 초과되었다. 앞서 기후의 생산성 영향도를 측정하기 위한 분석에서 사용한 프로젝트의 건설사와 동일한 건설사의 프로젝트를 선정한 것은 각 건설사 마다 시공 능력과 비작업일 선정 방법 등에서 차이가 발생할 수 있기 때문이다.

앞서 제시한 골조 공사 공기산정 알고리즘을 따라 이 프로젝트의 공기를 산정해본 결과는 다음과 같다.

(1) 단위 작업 구역의 설정

실제 프로젝트 준비 과정에서 충분한 검토를 통해 이루어 졌다는 가정 하에 실제 공정 계획상의 설정을 그대로 사용하였다. 1개 층을 단위 작업으로 하고, 초기 5개 층, 기준층, 트랜스퍼 층의 세 가지 작업으로 설정하였다.

(2) 베타 분포 형태 결정 네 변수 설정

해당 건설사의 과거 실적 자료들과 본 샘플 프로젝트의 공정 계획을 담당했던 담당자를 통해서 우선 기준층의 최단공기 3일, 최장공기 11일을 도출하였다. 그리고 베타 분포의 형태를 결정하기 위한 입력값인 최빈 시간과 75% 확률의 시간은 실적 자료와 담당자 의견을 종합하여 각각 5일과 6일을 선정하였다. 이를 통해 a는 3.458, b는 8.375를 도출하였다.

최단, 최장시간과 형태 결정 변수 a, b를 입력하여 구한 기준층 공기에 대한 확률 분포는 그림 2와 같다.

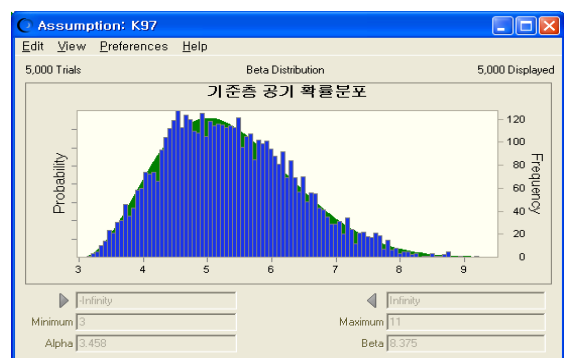


그림 2. 기준층 공기의 확률 분포

(3) 시뮬레이션 실행

기준층, 초기 5개층, 그리고 트랜스퍼 층의 공기에 대한 설정이 끝나면 해당 단위 구역의 순서와 그 수를 토대로 전체 공기에 대한 계산을 했고, 그림 3은 그 중 A동의 80%확률의 전체 공기 산출 결과 그래프이다.

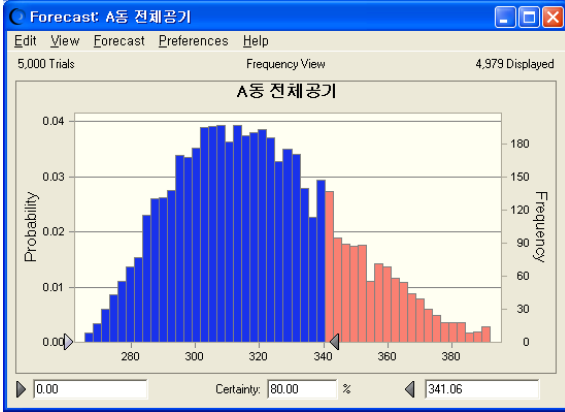


그림 3. A동 전체공기의 확률분포

(4) 기후 요소의 반복적인 대입

그림 3에서와 같이 80% 확률의 전체 공기를 계산 한 결과 341일이 도출되었다. D사의 비작업일에 대한 기준은 평균기온 -2°C 이하, 평균 풍속 10m/s 이상, 강수량 10mm 이상의 세 가지이다. 실제 작업 개시일인 2001년 11월 25일을 시작으로 총 공기를 대입하면서 비작업일 기준에 해당하는 작업일을 제외하면 1차적으로 종료일 2003년 10월 31일이 도출된다. 하지만 이때에는 비 작업일이 46일 포함되어 있다. 해당 일수를 연장한 2차 종료일은 2003년 12월 16일이다. 이때에도 추가적으로 포함된 5일의 비 작업일 만큼 연장하여 3차로 12월 21일의 종료일을 도출한다. 더 이상 비 작업일이 추가적으로 포함되지 않았으므로 실제 작업일의 작업 생산성 식을 대입한다. 4차로 1월 10일의 종료일이 도출되지만 여기서도 추가적으로 14일의 비작업일이 포함되어 있다. 14일을 연장하여 1월 24일의 종료일을 도출하고, 더 이상의 비 작업일이 포함되어 있지 않음을 확인한 후 해당 공기를 최종적인 공기로 결정한다. 그림 4는 이와 같은 과정을 거쳐 얻은 A동의 80% 확률의 최종적인 공기를 나타낸다.

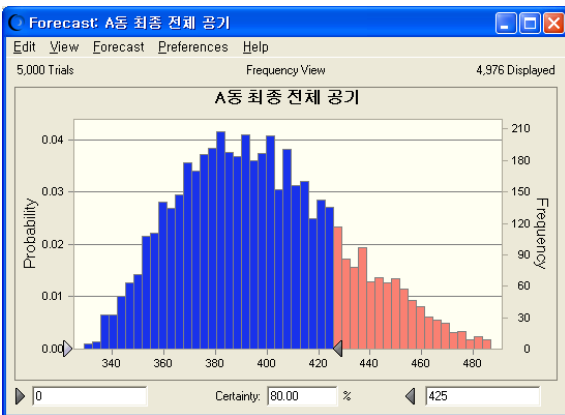


그림 4. A동 최종적인 전체공기의 확률분포_80%

하나의 예로서 80% 확률의 공기를 산정해 보았으나 같은 방법으로 90% 확률의 공기도 산정해 볼 수 있으며, 이는 그림 5와 같다.

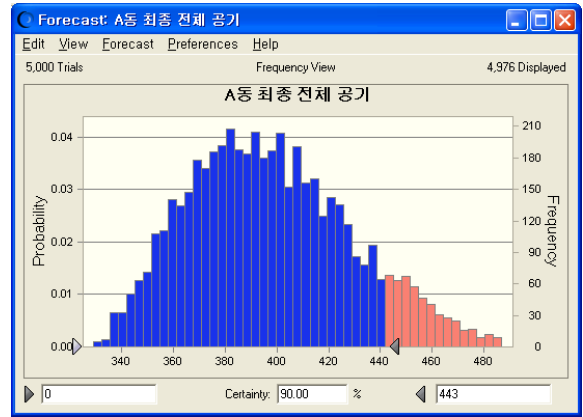


그림 5. A동 최종적인 전체공기의 확률분포_90%

같은 방법으로 나머지 B-1, B-2동에 대해서도 시뮬레이션을 이용한 확률적인 공기 계산을 실행하였으며, 그 결과를 원래 계획과 실제 수행된 결과 값들과 비교해 본 것이 표 10이다.

표 10. 총 공기 시뮬레이션 결과

	A동	B-1동	B-2동
층수	37	29	26
초기 계획 공기	394	333	312
실적 공기	439	369	330
확률 80% 예상 공기	425	359	336
확률 90% 예상 공기	443	370	344

당초 예상 공기는 실제 작업이 이루어진 일수에 비해 A동은 45일, B-1동은 36일, B-2동은 18일의 차이를 보였다. 하지만 본 연구에서 제안한 알고리즘을 통한 예측 공기의 경우, 실제 공사 기간과 80% 확률의 예상치는 A동 14일, B-1동 10일, B-2동 6일의 차이를 보였고 90% 확률의 예상치는 A동 4일, B-1동 1일, B-2동 14일의 차이를 보였다. 따라서 샘플 프로젝트를 대상으로 한 검증에서 본 연구에서 제안한 공기 산정 알고리즘이 기존의 확정적 공기 산정 방식보다 실제 공사 기간에 근접한 예측치를 제시해 주는 것으로 보아 기존 공기 산정 방식보다 더욱 신뢰할 수 있는 공기 산정 방식임을 알 수 있다.

본 연구에서 제안한 공기 산정 방식은 기존의 확정적 공기 산정 방식에 비해 불확실한 상황에 의한 공기 연장을 미연에 인식할 수 있고, 기후의 영향을 고려한 확률적 개념의 공기를 제시해 줌으로써 프로젝트의 예상 종료 시점을 예측하거나 시작 시기를 결정하는데 도움을 줄 수 있다.

4. 결론

본 연구는 초고층 건축물 중 철근콘크리트로 시공한 골조공사를 대상으로 기후요인에 따른 공사기간을 예측하는 확률모델을 제안하였다. 기존의 중저층의 아파트와 오피스텔과 같이 많은 실적자료가 있는 경우에는 확률적 모델(Probabilistic Model)보다는 전문가에 의한 결정적 모델(Deterministic Model)로 예측을 하고 있으며 또한 정확도도 높다. 그러나 실적사례가 비교적 적은 초고층 건축물의 경우에는 사례가 적기 때문에 기존의 공사기간에 대한 베타분포 정보와 시뮬레이션을 이용한 확률 모델을 이용하는 것이 전문가들의 공사기간의 산정을 위한 의사결정에 도움을 줄 수 있을 것이다. 즉, 초고층 건축물에 본 모델을 적용했을 경우에 연구의 효용성과 기여도가 높을 것으로 판단된다.

이에 본 연구는 기존의 확정적 공기 산정 방법의 한계를 극복하기 위하여 골조 공사의 확률적 공기를 예상하여 반영할 수 있는 기법을 제안하였다. 골조 공사의 공법에 따른 단위 공기를 확률 분포의 형태로 도출 한 후 층층수에 따른 총 공기를 산출 하고, 해당일 기후 요소들의 비작업일 포함 여부나 생산성 영향식을 적용하여 최종적인 확률적 공기를 제시 하였다.

작업 생산성 비율에 영향을 미치는 기후 요소를 알아보기 위한 회귀 분석의 경우는 결과로 얻은 회귀식의 모든 계절의 R제곱값이 30을 넘는 것을 보아 작업 생산성 비율의 저하에 기후가 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있었고, 예상과는 달리 강수가 비작업일 생성이 아닌 작업 생산성에는 크게 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 각 계절별로 생산성에 영향을 많이 끼칠 수 있는 기후 요소가 각각 다른 것을 알 수 있었다.

본 연구는 최종적으로 총 공기의 확률적 분포를 예상할 때 담당 전문가의 직관에 따라서 80%, 90%에 해당하는 공기를 산정하였고, 샘플 케이스의 분석 결과 해당 프로젝트에서는 90%확률의 예상 공기가 실제 프로젝트의 데이터에 좀 더 근접한 결과를 나타내었다. 하지만 어떠한 확률치를 어떤 상황에서 적용 하는 것이 보다 더 신뢰할 수 있는 결과를 도출 해 줄 수 있는지에 대해서는 본 연구에서 제안한 모델을 실제 프로젝트에 반복적으로 적용해서 결론을 얻을 필요가 있을 것이다.

본 연구는 현재 가장 많이 쓰이고 있는 철근콘크리트 공법을 그 대상으로 분석하였으나, 동일한 방법을 통해서 여러 다른 공법에 대해서도 분석이 가능할 것이다. 이러한 방법은 공사의 진행 도중에 공법이 변경되는 일이 발생했을 경우 더욱 효과적으로 사용될 수도 있다. 새로운 공법이 적용되더라도 일정 부분 공정 계획 전문가의 지식이나 공법 자체의 기술적 특징 등을 통해 기존 기법들보다 비교적 손쉽게 믿을만한 결과를 얻을 것이다.

본 연구는 사례 적용을 통해 제안한 모델을 검증하였으나, 앞으로 미래 프로젝트의 공기 산정을 위해서는 장기적인 기후 예측을 위한 기법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김상중, 이재섭(2004), "확률적 공기산정에 의한 공정계획 합리화 방안", 한국건설관리학회논문집, 5(6), pp.72-79.
2. 김신태, 김예상, 진상윤(2004), "기후요소와 생산성간의 상관관계 분석에 관한 연구", 한국건설관리학회논문집, 5(6), pp.80-89.
3. 권동찬, 이찬식(2004), "실적자료에 의한 고등학교 시설 공기산정", 한국건설관리학회논문집, 5(6), pp.138-145.
4. 류한국, 김선국, 이현수(2005), "착공전 단계에서의 철근콘크리트 공사 공정리스크 관리 방안", 한국건설관리학회논문집, 6(5), pp.119-127 (재인용).
5. 류한국, 김선국, 이현수(2006), "건설사별 공기비교를 통한 공기경쟁력 분석 -주상복합 및 오피스텔 건물을 중심으로-", 한국건설관리학회논문집, 7(1), pp.138-147.
6. 박성현, 조신섭, 김성수 공저(2004), 한글 SPSS Ver. SPSS 12K, (주) 데이터솔루션.
7. 신종현, 이진아, 이찬식(2005), "기후요소를 고려한 인천지역의 작업불가능일수 산정", 한국건설관리학회논문집, 6(1), pp.58-64.
8. 안상형, 이명호(2002), 경영 경제 통계학, 박영사.
9. 양성민(1998), 시뮬레이션 기초, 경성대학교 출판부.
10. 정석남, 이학기(2000), "가상기후 시뮬레이션에 의한 공기산정 의사결정 지원모델에 관한 연구", 한국건설관리학회논문집, 1(4), pp.74-81.
11. 정석남, 이학기(2003), "기후요소를 고려한 최적 착공시기 결정방법 연구", 대한건축학회논문집 구조계, 19(5), pp.113-120.
12. 정인수, 황종현, 박계식, 이찬식(2000), "군시설 공사의 순공사기간 예측모형에 관한 연구" 대한건축학회 논문집 구조계, 16(9), pp.67-74.
13. 한국건설산업연구원 편저(2005), 건설관리 및 경영 제 1편 : 이론, 보성각.
14. 황효상 외 4인(2002), "공기산정 영향 요인별 실적공기 비교 분석-사무소 건축공사 공기산정기준을 중심으로", 한국건설관리학회논문집, 3(3), pp.84-93.
15. AbouRizk, S. M., and Halpin, D. W., (1992), "Statistical Properties of Construction Duration Data.", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 118(3), pp.525-543.
16. AbouRizk, S. M., and Halpin, D. W., Wilson, J. R., (1994), "Fitting Beta Distributions Based on Sample Data.", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 120(2), pp.288-305.
17. AbouRizk, S. M., and Halpin, D. W., Wilson, J. R., (1991), "Visual Interactive Fitting of Beta Distributions.", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 117(4), pp.589-605
18. Farid, F., and Koning, T. L. (1994), "Simulation Verifies Queueing Program for Selecting Loader-truck Fleets.", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 120(2), pp.386-404.

19. Fente, J., Schexnayder, C., and Knutson, K., (2000), "Defining a Probability Distribution Function for Construction Simulation", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 126(3), pp.234-241.
20. Lee, D.E., "Probability of project completion using stochastic project scheduling simulation", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 131(3), pp. 310-318
21. Maio, C., Schexnayder, C., Knutson, K., and Weber, S., (2000), "Probability Distribution Function for Construction Simulation", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 126(4), pp.285-292.
22. Schexnayder, C., Knutson, K., and Fente, J., (2005), "Describing a Beta Probability Distribution Function for Construction Simulation", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 131(2), pp.221-229.
23. Thomas H. Randolph, David R. Riley, and Victor E. Sanvido (1999), "Loss of Labor Productivity due to Delivery Methods and Weather", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 125(1), pp.39-46
(接受: 2005. 11. 29)