

# 건설공기 단축을 위한 적정 지하공법의 선정방법

글 | 이강 | 연세대학교 건축공학과 교수 Email : glee@yonsei.ac.kr

## 1. 공기단축과 공사비

일반적으로 공사기간과 공사비는 반비례한다. 즉, 공기를 단축하려면 인력과 고가의 장비나 공법이 투입되어야 하는 경우가 많기 때문에 공사비가 상승하는 경우가 많다. 예로 공기가 중요한 공사의 경우 3일만에 1개 층을 올릴 수 있지만, 초고강도 콘크리트 사용 등 여러 가지 비용상승 요인이 있기 때문에 일반적인 공사에서는 5일에서 7일 정도 시간을 가지고 공사를 진행한다. 그러나 최근 발주되는 프로젝트들을 살펴 보면, 바닥면적이 약 삼십만 평에 이르는 대규모 복합시설을 2년 만에 완공할 것을 요구하는 등 공기단축에 대한 크게 요구가 늘고 있다. 그렇다면 공기도 단축할 수 있고, 우리 현장에 여러 모로 가장 적절한 공법은 무엇이며 어떻게 선정할 수 있을까? 본 기고문은 공기단축의 다양한 전략과 장단점과 국토해양부의 공기단축 연구단 과제를 살펴 보고자 한다. 특히 본 저자가 진행하고 있는 적정 지하공법 선정방법 연구를 중심으로 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 일반적인 공기단축 전략의 분류

일반적인 공기단축 전략들과 그 특성을 살펴보면 다음과 같이 분류해 볼 수 있다.

### 2-1. 인력과 장비의 추가투입

가장 전통적인 방법으로 인력과 장비를 늘려 투입하는 방법이 있다. 기존 공법을 바꾸지 않아도 되는 장점이 있어, 현장에서 공기가 지연되면 일반적으로 가장 많이 사용하는 방법이지만, 가장 큰 단점은 인력과 장비를 추가하여도 작업의 생산성이 비례하게 증가하지 않는 점이다. 특히 어느 선을 넘으면 작업공간 부족 및 작업간의

간섭 등으로 유휴자원이 생기게 되어 생산성이 오히려 저하될 수 있다. 공사계획 단계에서 여러 가지 공기단축방법을 검토한다면 가장 늦게 고려해야 할 대안일 것이다.

### 2-2. 설계변경

설계변경도 가장 일반적인 공기단축방법 중의 하나이다. 공사에 시간이 많이 소요되는 부분을 단순화 시키고, 생산과 운송 등에 시간이 많이 걸리는 자재를 다른 자재로 교체하거나, 구조설계를 변경하는 경우는 매우 흔하다. 예를 들어 상대적으로 가격이 싼 철근 콘크리트구조체로 설계된 부분을 철골조로 바꾸어 공기를 단축하는 방법을 들 수 있다. 일반적으로 현장에서 “VE(Value Engineering)를 한다”고 하는 경우, 즉 공사 전 설계변경을 통하여 공사비를 낮추거나 공기를 단축하는 경우가 이러한 경우에 속할 수 있다. 물론 넓은 의미에서의 VE는 더 큰 범위를 포함한다. 바람직하지 않은 VE의 예로는 고품질 자재 등을 저품질 자재로 대체하거나 건축물의 전체적인 질을 낮추어 공사비를 줄이거나 공기를 단축하는 방법 등이 있다. 이러한 무리한 설계변경은 건축물의 전체적인 질을 저하시킬 우려가 있으므로 주의하여야 한다.

### 2-3. 고효율 장비 또는 신공법, 신자재의 사용

효율이 높은 장비 또는 신공법, 신자재 등을 사용하여 생산성을 높이는 방법이 있다. 이러한 경우 공사비가 크게 상승하는 경우가 종종 있으나 한편 공기단축효과와 함께 일반적으로 공사의 질을 높일 수 있는 경우가 많다.

### 2-4. 건식공법 또는 프리패브공법의 적용

일반적으로 미리 공장에서 자재를 생산하여 현장에서 조립하면, 전체공기를 단축시킬 수 있다. 그러나, 자재의 공장생산에 필요한

시간 등을 공정계획에 적절히 반영하지 못하거나 자재의 선주문(先注文) 시기를 놓치면 오히려 전체 공정이 늦어질 수 있는 위험성이 있다. 특히 공사 중 부득이하게 설계변경이 일어나면, 그 여파가 습식공사보다 크며, 허용되는 시공오차의 폭도 적어 정밀한 시공이 요구된다. 최근에는 시공기술의 발달로 이러한 시공오차 폭이 크게 줄었고 시공오차에 대응하는 디테일도 많이 개발되었다. 또한 3차원 패러메트릭 기술을 이용한 자동 디테일링 도구 및 CNC(computerized numeric control)기기 등이 발달하여 설계변경 시에도 프리패브 제품들의 생산 및 시공에 필요한 리드타임(leadtime)도 크게 줄었다 (Lee et al. 2006; Sacks et al. 2004; Sacks et al. 2006).

## 2-5. 공정의 병렬화(Parallelization)

공정계획에 있어 많은 경우, 구조체가 가지는 물리적 제약 등으로 한 작업이 끝나야만 다음 작업이 진행될 수 있다.

예를 들어, 1층 골조공사가 끝나야, 2층 골조공사를 시작할 수 있다. 그러나 만약 많은 공정들을 동시에 진행시킬 수 있다면 (극단적인 예로 1층에서 10층을 한꺼번에 시공할 수 있다면), 전체 공정을 줄일 수 있을 것이다.

현실적으로는 여러 개의 공정이 동시에 시작해서 동시에 끝나는 방식보다, 여러 개의 공정이 순차적으로 맞물려 진행되는 방식이 많이 사용된다. 코어선형 공법이나 TACT기법 등이 대표적인 예라 할 수 있겠다. 그러나 여유시간이 없기 때문에 반대로 한 공정에서 문제가 생기면 전체 공정이 영향을 받아 공기가 지연될 수 있는 위험성이 있다.

이상은 일반적으로 많이 적용되는 공기단축 전략들을 분류하여 나열해본 것이다.

많은 경우 공기단축 효과를 극대화할 수 있도록 여러 방식을 복합적으로 사용하고 있다. 이 밖에도 다른 공기단축 전략들이 있을 수 있다.

## 3. 우리나라의 총당공사 소요일수

건설산업의 국제경쟁력을 평가하는 지표로 가장 일반적으로 사용하는 두 가지 지표는 노동생산성과 총당 공사 소요일수이다. 특히 총당 공사 소요일수는 공사기간과 직접적인 관계가 있는 지

표이다. 그러나, 전연한 바와 같이 공기단축보다는 공사원이 절감이 우선할 경우, 선택적으로 공사를 더디게 진행할 수도 있다. 따라서 총당 공사 소요일수가 어느 지표와 마찬가지로 완벽한 지표는 아니지만 일반적인 경향을 파악하는 데는 무리가 없다.

참고로 여기서 총당 공사 소요일수란 우리가 흔히 얘기하는 골조공사 기간을 지칭하는 것(예: RC조 공사에서 3일 사이클, 5일 사이클)이 아니라, 전체 공사기간을 건물층수로 나눈 것이다.

기존의 연구결과를 살펴 보면, 한국의 총당 공사 소요일수가 31.6일로 미국의 11.7일, 일본의 18.3일보다 현격히 많은 기간이 걸리는 것으로 나타났다 (신동우 2003). 그러나 우리나라의 경우, 유럽이나 미국과 비교하여 공사기간이 상대적으로 오래 걸리는 지하공사가 많고, 최근 세계 최고층 건축물 시공 등을 성공적으로 수행하는 등 시공기술이 많이 발달하여 새로 총당 공사 소요일수를 분석하였다.

각 건축물의 공사규모 및 기간을 별도의 통계자료로 보유하고 있는 곳이 없어서, 한국 건설사 홈페이지와 일본의 대표적인 건축잡지인 신건축(新建築)에 게재된 건축물 중 최소 1개 이상의 지하층이 있고, 지상 5층 이상의 건축물 200개를 수집하여 비교하였다. 수집된 건축물 중 한국 건축물이 98개, 일본 건축물이 102개였다. 규모를 제한한 것은 건축물의 규모가 너무 작을 경우, 공사기간이 공사기술보다 기타 외적 요인의 영향을 많이 받을 수 있기 때문이다. 새로 분석한 결과에 따르면, 표 1과 같이 우리나라의 지하층 공사비율이 일본보다 높은데도 불구하고, 총당 소요공사일수는 더 적은 것으로 나타났다 (원종성, 이강 2006).

〈표 1〉 한국과 일본의 총당공사 소요일수(1995년-2007년)

	한국	일본
표본수	98개	102개
평균층수	22.8층	13.8층
최대층수	75층	59층
(지상층수, 지하층수)	(69층, 6층)	(54층, 5층)
최대지하층	9개 층	6개 층
지하층비율	22.1%	17.4%
총당소요공사일수(일/층)	50.1	53.0

(출처 : 원종성, 이강 2006)

위에서 보는 바와 같이 그동안 많은 노력과 기술투자로 우리나라 건설기술이 장족의 발전을 이루었다. 그러나 여전히 여러 측면에서 공기단축을 위한 신기술 개발의 노력이 필요하며, 이러한 맥락에서 시작된 것이 국토해양부의 공기단축 연구단 과제이다.

**4. 국토해양부 공기단축 연구단 과제**

공기단축연구과제는 국토해양부의 건설핵심기술 개발연구단 과제의 하나로, 정확한 명칭은 “공기단축 복합건설 기술개발 연구센터” 과제이다. 2006년 시작하여 2010년까지 5년간 진행되는 본 과제는 3세부로 나누어져 있다. 1세부는 건식공법(PC와 철골)을 활용한 건축물의 공기단축을 목표로 하고 있다. 2세부는 복합시공 기술 개발을 통한 공기단축을 목표로 하고 있다. 3세부는 건식공법(PC)을 활용한 교량의 공기단축을 목표로 하고 있다. 그 내용을 더 자세히 살펴 보면 아래 표 2와 같다. 앞장의 공기단축 전략분류 측면에서 연구내용을 살펴 보면 복합적인 면이 있으나, 1, 3세부는 건식공법 도입을 통한 공기단축이 주요 내용이고, 2세부는 새로운 시공기술이나 구조시스템 개발을 통하여 공기단축을 하는 것을 목표로 하고 있다. 각 세세부 연구내용에 대한 더 자세한 내용은 연구단 공식홈페이지인 <http://www.ircs-snu.org>를 참조하기 바란다. 아래의 세세부 과제중 저자는 2-1세세부 지하구조물의 공기단축형 복합시공기술 개발을 지원하는 역할을 하고 있다. 저자가 맡고 있는 연구과제의 내용은 다음과 같다.

**5. 지질조건과 목표공기에 맞는 공법의 선정**

저자가 참여하고 있는 2-1세세부는 지하구조물 시공방법 중 특히 공기단축 효과가 있는 것으로 알려진 탑다운(top-down)공법의 개선을 통한 공기단축을 목표로 하고 있다.

〈표 2〉 공기단축 과제의 연구내용

<p>제1세부 과제 : 완전건식 PC 및 철골복합 건축구조시스템 개발(주관연구기관 : 서울대)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1-1세세부과제 (주거용 PC 조립식 건축구조시스템 개발)</li> <li>• 1-2세세부과제 (대형업무용 PC 조립식 건축구조시스템 개발)</li> <li>• 1-3세세부과제 (철골복합화 모듈러 시스템 개발)</li> <li>• 1-4세세부과제 (철골복합화 고층 구조 시스템 개발)</li> </ul>
<p>제2세부 과제 : 공기단축형 복합시공기술 개발(협동연구기관 : 연세대)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2-1세세부과제 (지하구조물 공기단축형 복합시공기술 개발)</li> <li>• 2-2세세부과제 (지상구조물 공기단축형 복합시공기술 개발)</li> </ul>
<p>제3세부 과제 : 교량복합구조시스템 개발(협동연구기관 : 아주대)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3-1세세부과제 (조립식 내부구속 중공 CFT 교각 개발)</li> <li>• 3-2세세부과제 (중공형 프리캐스트 분절거더 개발)</li> <li>• 3-3세세부과제 (조립식PC 바닥판 및 PC 방음벽 개발)</li> </ul>

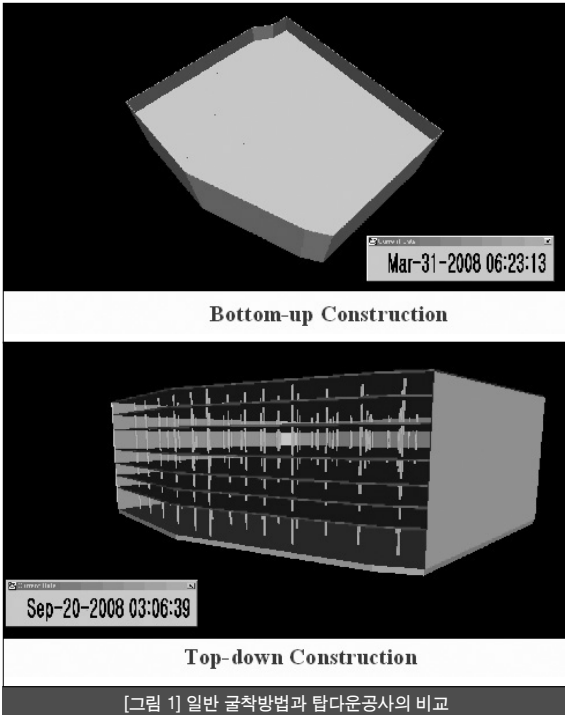
우리가 흔히 “탑다운(top-down)”이라고 하는 지하층과 지상층의 공사를 같이 진행하는 방식을 영문으로는 “업다운(up-down)공법”이라고 한다.

영문으로 탑다운(top-down)공법은 글자 그대로 위(top)에서부터 아래(down)로 슬래브를 타설해가며 굴착하는 방식을 말한다. 다른 말로 “cover and cut(덮은 뒤 굴착)”이라는 표현도 쓴다. 이러한 사실은 탑다운 공법의 개발배경에서도 알 수 있다. 탑다운 공법은 제2차 세계대전 당시 영국이 독일군의 눈을 피해 지하 방공호를 건설하고자, 먼저 땅을 덮고 지하에서 숨어 굴착을 하는 공법으로 개발되었다. 본 기고에서는 혼선을 막기 위하여 우리가 일반적으로 탑다운이라고 부르고 있는 업다운 공법과 지하 공사에 국한된 원래의 탑다운 공법을 구분하여 사용하겠다.

업다운 공사는 최근 도심공사가 늘면서 주변건물의 침하나 민원 등의 우려가 있을 때 많이 사용이 되고 있으며 또한 공기단축을 위한 대안공법으로도 각광받고 있다.

그러나 지상에서 지하로 “탑다운”하는 부분만 따로 비교해 보면 일반 지하층 굴착 및 구조체 공사 방식에 비해 탑다운 방식이 느낌을 알 수 있다.

그림 1은 먼저 바닥까지 굴착을 완료하고, 바닥에서부터 슬래브를 타설하는 일반적인 지하구조체 (“cut and cover” 또는 “bottom-up”) 시공방법과 탑다운 공법을 비교한 4D 시뮬레이션이다. 대상으로 했던 지하구조체의 경우, 탑다운 공사가 일반 지하공사방식에 비하여 약 4개월 정도 더딘 것으로 나타났다.



[그림 1] 일반 굴착방법과 탑다운공사의 비교

그 이유는 탑다운 공사의 경우, 굴토된 흙을 선시공된 슬래브에 뚫린 조그만 개구부를 통해서 버킷으로 들어 올려 반출하기 때문에 트럭이 직접 굴착현장에 들어가 굴토된 흙을 나르는 일반 굴착방식보다

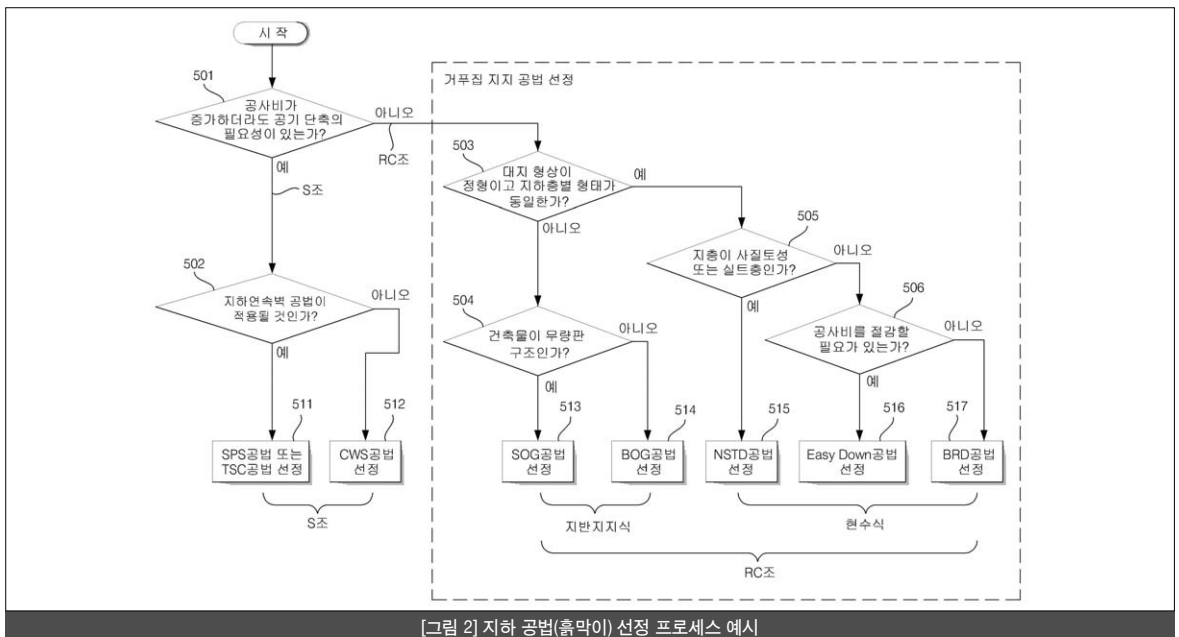
속도가 더딜 수밖에 없는 것이다.

그러나, 지하층과 지상층이 동시에 공사가 이루어지는 엇다운 방식은, 지하층공사가 완료되어야만 지상층 공사가 가능했던 기존의 방식보다 지상층 공사를 먼저 시작할 수 있기 때문에 공기단축이 가능하다. 단, 엇다운 공법의 경우 느려진 지하층 공기와 늘어난 공사비를 만회하기 위해서는 작은 규모의 건물에는 적용이 어렵고, 지하와 지상부분의 규모가 어느 정도 이상인 건물에 적용했을 때 효과가 있다.

그러면, 어느 정도 규모의 건물에 탑다운 공법을 적용했을 때 공기 단축의 효과가 있을까? 또 최근 많이 사용하고 있는 탑다운 공법으로는 슬래브 지지방식에 따라 SOG(slab on grade)공법, BOG(beam on grade)공법, NSTD(non-supporting top-down)공법으로 나누고 있는데, 어느 공법이 우리 현장에는 더 적절할까? 다른 공법들과 비교하여 개략적인 금액과 공기는 어떻게 차이가 날까?

연구를 진행하던 저자와 연구팀은 위와 같은 질문에 봉착하였다. 또한 그 과정에서 현장경험이 많은 엔지니어들도 의외로 최신 지하공법에 노출될 기회가 적어 지하공법에 대한 지식이 깊지 못하고, 컨설턴트의 선호에 많이 따라가게 된다는 것을 알았다.

이러한 문제를 극복하고자, 연구초기에는 기존 연구(김재업 외 2006; 박우열, 김재업 2006; Yang 2004; Yau and Yang 1998)를



[그림 2] 지하 공법(흙막이) 선정 프로세스 예시

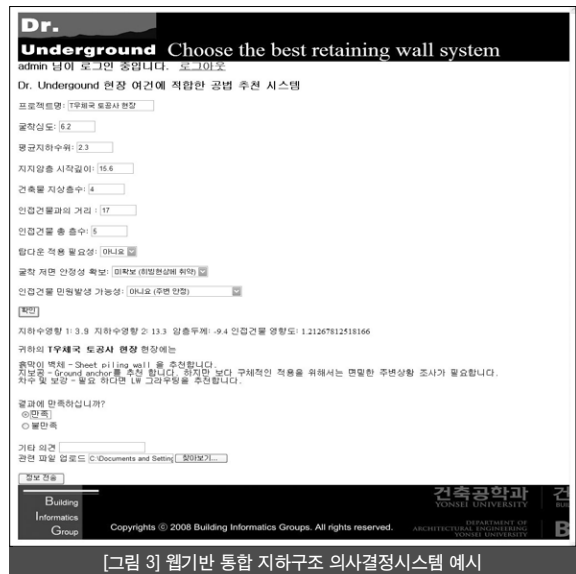
참조하여 데이터 마이닝(data mining)기법을 활용하여 연구를 진행하였다. 그러나 데이터 마이닝 기법을 활용하여 신뢰도 높은 결과를 얻기 위해서는 분석에 활용되는 공사사례 데이터 수가 매우 많아 하는 것으로 알려져 있었으나, 100여 개의 지하공사 데이터를 수집하는 것도 쉽지 않았다. 기존 연구에서 100-200여개의 데이터를 이용하여 좋은 결과를 도출한 사례가 있어서, 어렵게 수집한 100여개의 데이터로 분석을 하였으나, 기존 연구와는 달리 변수가 많아서 인지 적절한 결과가 도출되지 않았다. 이후 로지스틱 회귀분석을 사용하여 각 지하공법 선정의 핵심 요소를 추출하고, 이들의 관계를 재정의하여 아래 그림 2와 같은 지하공법 의사결정 프로세스를 만들었다.

추론된 의사결정프로세스의 효용성을 검증하기 위해 기존 분석에 사용되지 않은 새로운 사례를 통해 실제 적용 공법과의 일치도를 확인하였으며, 현재는 약 80%의 정확도를 보이고 있다. 향후 보다 다양한 실제 지하공사 사례들이 수집되고 분석에 활용된다면 보다 정확하며 일반화가 가능한 지하공법 의사결정프로세스의 구축이 가능하리라 생각된다. 현재 지속적인 지하공사 시공사례의 수집, 지하공사 공법소개, 그리고 개발된 의사결정프로세스에 기반한 지하공법 선정 도우미 역할을 하기 위해 웹 기반의 통합 지하구조 의사결정시스템을 구축하고 있다.

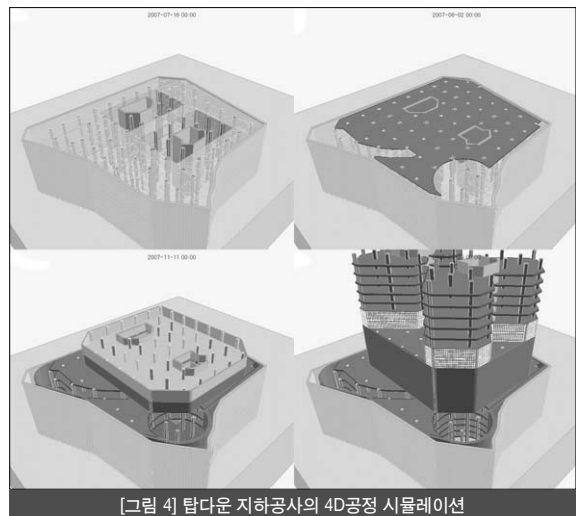
[그림 3]은 그 프로토타입이다. 인터넷 상에서 인터페이스를 통해 언제 어디서든 몇 개의 현장현황 및 지질조건 등의 필수 조건들을 입력하면, 주어진 현장조건에 적합한 지하공법을 제시해 줄 뿐만 아니라, 제시된 공법에 관한 시공상세 정보를 함께 제공한다. 또한 새로운 지하공법이나 성공사례의 소개, 다양한 사용자의 의견 및 전문지식을 공유할 수 있는 지식기반시스템으로서의 역할도 하려고 한다. 사용자의 동의 하에 입력된 폭넓은 지식정보는 데이터베이스를 통해 관리되고 공유될 것이다. 이는 다양한 지하공법에 대한 시공경험의 부재로 인한 문제점 해결에 도움을 줄 수 있으리라 기대된다.

동시에 보다 적절한 공법선정에 따른 공기단축의 효과도 기대할 수 있으리라 본다. 현재는 핵심 모듈만 작동 중이며, 2009년 상반기 완성을 목표로 준비하고 있다. 저자와 본 연구팀은 이와 더불어 건설 프로젝트 초기단계에서 각 지하공법의 개략적인 공사비 산출과 복잡한 지하구조물 공사의 효과적 공정관리를 위한 공법별 자동공정생성을 통한 4D시뮬레이션에 관한 연구도 진행 중이다. 현재는 건축물 지하공사의 공사비 및 공정자료의 수집과, 동시에 공

사비와 공정에 영향을 주는 핵심 요인들을 파악하고 있다. 또한 상용화된 3차원 패러메트릭 캐드를 활용하여 일부 프로젝트에 대해 복잡한 지하구조물을 모델링 하고 공정정보와의 연계를 통한 지하공사 4D시뮬레이션을 구현하려고 한다. 현재는 그림 4와 같은 결과물을 상당부분 수작업에 의존하여 생성하고 있지만, API(Application Programming Interface)를 통한 자동공정생성기능을 개발하려고 연구 중에 있으며, 이를 통해 일부 모델링 작업 및 공정정보와의 연결에 해당하는 소모적인 작업을 개선할 수 있으리라 기대된다.



[그림 3] 웹기반 통합 지하구조 의사결정시스템 예시



[그림 4] 탐다운 지하공사의 4D공정 시뮬레이션



## 6. 맺음말

이상에서 공기단축을 위한 일반적인 전략에서부터 국토해양부 공기단축 과제와 관련하여 본 저자가 수행하고 있는 웹 기반 지하공법 의사결정시스템의 개발 및 3차원 파라메트릭 캐드를 활용한 4D시뮬레이션 등과 같은 최신의 연구동향에 대해 살펴보았다.

공기단축을 위한 공사비 절감의 노력은 인력과 장비의 추가투입이라는 일차적인 방법에서부터 VE적용이나 프리패브공법의 사용에 이르기까지 다양한 방법으로 현장에 적용되고 있다.

최근에는 BIM(Building Information Modeling)이라는 새로운 개념의 건축물 정보관리를 통해 시공 중에 발생할 수 있는 간섭 문제를 조기에 발견할 수 있으며, 다양한 참여 주체들 간의 협업 및 요구되는 정보의 효율적 관리에 이르는 일련의 행위들을 통해 공기단축 및 공사비 절감도 가능하리라 본다.

본 저자가 수행 중인 건축물 지하구조물 시공에 관련해서도 새로운 공법의 개발뿐만 아니라, 개발된 공법의 올바른 현장 적용을 위한 정보 및 지식 관리, 그리고 시각적인 공정관리 등 공기단축 및

공사비 절감을 위한 이러한 새로운 노력의 일환으로 볼 수 있다.

오늘날 건설산업 전반의 새로운 기술적 패러다임의 변화를 생각해 본다면, 특히 국내의 진보된 IT기술의 접목을 통한 공기단축 노력은 보다 다양한 형태로 연구되고 적용될 수 있을 것이다. **SS**

### 참고문헌

1. 김재엽, 박우열, 김광희, (2006), "신경망과 사례기반추론을 이용한 흙막이공법 선정에 관한 연구." 대한건축학회 논문집(구조계), 22(5), 187-194.
2. 박우열, 김재엽, (2006), "Support Vector Machine을 이용한 흙막이공법 선정모델에 관한 연구." 한국건설관리학회논문집, 7(2), 118-126.
3. 신동우, (2003), "건설경쟁력 향상을 위한 CM 제도의 개선." International Seminar of AIK.
4. Lee, G., Sacks, R., and Eastman, C. M. (2006), "Specifying parametric building object behavior (BOB) for a building information modeling system." Automation in Construction, 15(6), 758-776.
5. Sacks, R., Eastman, C. M., and Lee, G. (2004), "Parametric 3D modeling in building construction with examples from precast concrete." Automation in Construction, 13(3), 291-312.
6. Sacks, R., Eastman, C. M., Lee, G., and Omdorff, D. (2005), "A Target Benchmark of the Impact of Three-Dimensional Parametric Modeling in Precast Construction." Journal of the Precast/Prestressed Concrete Institute, 50(4), 126-139.
7. Yang, J. B. (2004), "Hybrid AI system for retaining wall selection." Construction Innovation, 4(1), 33-52.
8. Yau, N.-J., and Yang, J.-B. (1998), "Applying case-based reasoning technique to retaining wall selection." Automation in Construction, 7(4), 271-283.

