KICEM

대규모 지하공사의 비용 · 일정 리스크 관리

서종원 한양대학교 건설환경공학과 교수
김정환 한양대학교 건설환경공학과 박사과정

1. 서론

최근 국내 사회기반시설의 확충이 꾸준히 이루어지고 있는 가운데, 도심지와 같은 복합공간의 효율적인 사용이 요구되고 있으나 활용 가능한 용지는 점차 줄어가고 있는 실정이다. 따라서 도심지내 건설되는 입체 · 복합 공간 구조물의 경우, 대규모 지하공사는 공간 활용성 및 안정성의 극대화를 위하여 필수불가결한 존재가 되었다. 또한, 교통시스템의 주요요소이며 대표적인 지하구조물인 터널공사의 경우도 국가간 원활한 교통소통을 위한 해저터널 등의 수요가 증가함에 따라 점차 대형화 되어가는 추세에 있다.

이러한 대규모 지하공사의 경우 일반적으로 시공되는 지하공사에 비하여 규모가 크고 복잡도가 높을 뿐만 아니라 설계 · 시공과정에서 공학적으로 극복해야 할 부분이 상당하다. 또한 대심도 및 대단위 굴착으로 인하여 주변 지반 및 인접구조물에 대한 불안정성을 초래할 가능성이 매우 높고, 토질변수 및 기타 변수 등의 데이터가 가지는 불확실성으로 인하여 시공과정에서 발생하는 공학적 리스크와 더불어 경제 · 환경적 리스크를 초래하게 될 가능성이 높다. 이러한 문제점에 적절히 대응하기 위하여 여러 공학 · 사회 · 경제적 문제와 이에 수반되는 환경적 문제를 최소화하는 방안을 마련하고, 대규모 지하공사에서 전(全) 과정에서 발생가능한 모든 리스크를 파악하고 분석하여 대응함이 절실히 필요하다.

이를 위해 기존의 전통적인 리스크 관리 방식에서 벗어나 시공법에 따른 토질변수 및 기타변수의 불확실성에 기인한 공학적인 리스크 분석 기법을 접목한 리스크 분석 및 관리의 개발이 요구된다. 해외 선진국의 대규모 지하공간건설을 위한 리스크 관리 시스템은 설계 · 시공 프로세스별 리스크 파악 및 대응방안 수립과 같은 통상의 정성적 혹은 준 정량적 리스크 분석과 더불어 불확실성을 가진 지반 물성치에 대한 시뮬레이션 분석의 접목을 통해 시공 전 리스크 발생 가능성을 예측하고 이를 통한 사회경제적 리스크 감소에 적극적으로 활용하고 있는 실정이다.

리스크 발생 시 강도 및 빈도 분석과 물성치의 불확실성을 동시에 고려한 공기 및 공사비의 확률적 분석 자료를 바탕으로 예비비의 합리적 산정을 가능케 하고 자본 활용의 효율성 증대와 최적공법의 산출이 기대되며 공사주변지역의 민원감소의 효과를 가져 오게 된다.

대규모 지하공사도 여느 건설공사와 마찬가지로 프로젝트 전단계에 걸친 다양한 리스크의 파악 및 분석을 위한 리스크 레지스터의 작성이 필요하고, 이를 근거로 리스크 대응방안을 구축하여야 하며, 리스크를 비용 및 일정으로 표현하는 것이 필요하다. 한편, 대규모 지하공사 프로젝트는 다양한 리스크 중 지반이라는 불확실성이 큰 재료를 다루어야 하므로 설계단계에서의 공법선정 및 선정공법에 따른 시공단계에서 봉착 할 수 있는 공학적 리스크의 비중이 매우 크다 할 수 있다. 이에 본 기사는 프로젝트 의사결정의 가장 중요한 기준이 되는 대규모 지하공사의 비용 및 공기 리스크에 대하여 논의하고자 하며, 비용 및 공기 리스크를 고려한 공법선정 기법, 그리고 불확정적 3D 지하공간자료를 기반의 시공 프로세스 시뮬레이션을 통한 리스크 분석 · 관리 및 의사결정 방법론에 대하여 기술하였다.

2. 기술동향

국내 건설 산업의 리스크 관리 분야를 살펴보면, 최근 들어 다양한 건설공사에서 계획 · 설계 · 시공 · 사용 단계별 리스크 인식, 분석 및 평가를 통하여 리스크제어 및 합리적 의사결정을 가능케 하는 리스크 관리 체계의 중요성이 인식되어 산업에서의 수용이 점차 확대되고 있는 실정이다. 이와 같이, 조직 및 프로젝트의 관리적 차원에 리스크라는 부분을 능동적으로 고려하게 되었으나, 정량적으로 비용 및 일정 리스크를 고려하여 이를 의사결정에 포함 시키는 관리기법의 적용은 아직 초기단계라고 볼 수 있다.

한편, 공학적 리스크의 경우에는 사고 시 중대한 영향을 미칠 수 있는 원자력 발전소 및 지하철 공사 등의 공사의 안정성을 향상하는데 목적으로 수행되어 왔다. 다만 이러한 공학적 리스크 분석의 경우 시공중 혹은 완공 후 구조물 손상, 파괴에만 초점을 두어 사고 확률 저감 및 사고위험비용의 산정 등에 국한되어서 수행되어 왔다 (Seo and Choi, 2008, Choi et al., 2004). 그러므로 관리적 측면에서의 리스크 및 공학적 리스크를 통합적으로 고려하고, 불확실성을 고려한 정성적, 정량적 리스크 분석 및 평가를 통하여 대규모 지하공사 수행에 따른 공학적, 경제적 리스크를 최소화 하고 지하공사의 단계별 의사결정에 기여함으로써 지하 공사 사업관리 체계화 및 효율성 증대로 인한 공사비, 공기 저감을 유도할 필요가 있다.

국외에서는 리스크 관리에 쓰이는 다양한 기법의 통합을 통해 리스크 관리의 체계화 및 표준화가 상당히 이루어진 단계이며, 공학적 시공조건에 대한 확률론적 분석을 위한 핵심기술 연구가 미국, 일본, 그리고 서유럽 주요 국가들을 중심으로 이미 안정화 단계에 접어들었다. 지하공사의 안정성 및 경제성 향상을 위한 리스크 관리기법의 개발도 이미 상당한 연구 성과를 거둔 것으로 평가할 수 있다.

특히, 국외의 리스크 관련 연구는 지질학적 측면 등 주요 공학적 시공조건들에 대한 정량적, 확률론적 분석을 통해 시공 시 문제 발생의 가능성을 산정하고 이에 기초한 공사비, 공기 등의 리스크 관리에 적극 활용하는 실정이다. 이에, 본 기사는 해외에서 개발된 리스크 관련 기술 중 다음의 두 가지에 대하여 소개하고자 한다.

(1) RBES (Risk Based Estimate Self-modeling)

미국의 워싱턴 주 교통부에서 개발한 RBES(Risk Based Estimate Self-modeling) 프로그램은 토목 설계와 건설 공사 프로젝트에 사용될 목적으로 특별히 개발되었으며, 정량적 리스크 분석을 수행함으로써 프로젝트의 비용과 진행 일정을 통합할 수 있도록 디자인되었다. 프로그램을 실행하기 전 프로젝트의 예상 공사기간과 예상 비용 그리고 핵심 스케줄 등의 기본 정보가 필요하다. 그림 1에 보인바와 같이 리스크 파악 및 분류 방법에 의하여 리스크 등록부에 등록된 리스크들을 입력하고 각 리스크 별 특성(리스크 상태, 파악 일자, 내용, 유발 요인, 발생 확률, 리스크가 미치는 영향)을 추가 입력하여 프로그램을 실행시키면, 그림 2와 같은 형태로 프로젝트의 단계별 비용 분포 및 예상 공사 완공일 분포가 산출된다. 비용/진행 일정에 미치는 리스크 분석 프로세스의 본질은 리스크를 기초비용(Base Cost)로부터 분리함으로써 이들을 영향력과 발생 가능 확률과 같이 정량적으로 표현하는데 있다. 이는 이전 단계에서 정성적 리스크 분석(Qualitative Risk Analysis)의 일부로서 행해지도록 구성되어 있다. (WSDOT, 2008)

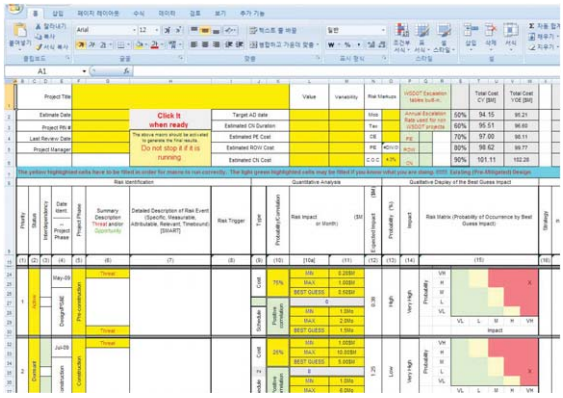
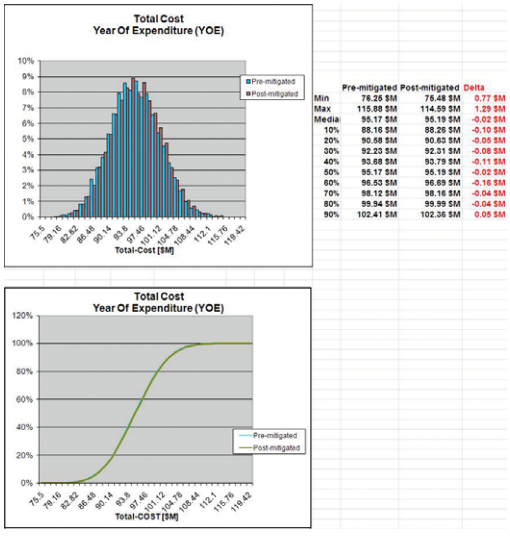


그림 1. RBES 워크시트 프로젝트 데이터 입력



	Pre-mitigated	Post-mitigated	Delta
Min	76.26 $M	76.48 $M	0.77 $M
Max	115.88 $M	114.59 $M	1.29 $M
Media	95.17 $M	95.19 $M	-0.02 $M
10%	88.16 $M	88.26 $M	-0.10 $M
20%	90.88 $M	90.83 $M	-0.05 $M
30%	92.23 $M	92.31 $M	-0.08 $M
40%	93.68 $M	93.79 $M	-0.11 $M
50%	95.17 $M	95.19 $M	-0.02 $M
60%	96.53 $M	96.69 $M	-0.16 $M
70%	98.12 $M	98.16 $M	-0.04 $M
80%	99.94 $M	99.99 $M	-0.04 $M
90%	102.41 $M	102.36 $M	0.05 $M

그림 2. RBES 시뮬레이션 결과

(2) DAT (Decision Aids for Tunneling)

터널의사결정체계 (DAT, Decision Aids for Tunneling)는 미국 M.I.T 대학 H. H. Einstein 교수에 의해 개발된 터널의 공기 및 공사비 산정기법으로 그림 3에 보인바와 같이 터널주변의 불확실한 지질변수와 예측불가능한 시공법상의 변수를 고려하여 시공과정을 수치적으로 시뮬레이션하고 총 공기 및 공사비의 분포를 얻을 수 있는 시스템이다. 또한 DAT는 터널공사에 대한 공기 및 공사비 산정과 더불어 자원에 대한 결과값을 도출하는 기능이 포함되어 있다.

DAT를 활용하기 위해서는 터널 주변 지질조건, 지보재의 물성 및 지보패턴모델, 터널 공사 수량 및 단가(단위길이당 비용), 터널 굴진율, Cycle time 등에 대한 자료를 입력하여야 한다. 이러한 입력값들은 불확실성을 가질 수 있도록 DAT 내부에서 모델링 되어지며, 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 공기/공사비 및 자원사용에 대한 확률분포(scatter gram) 결과값을 얻게된다.

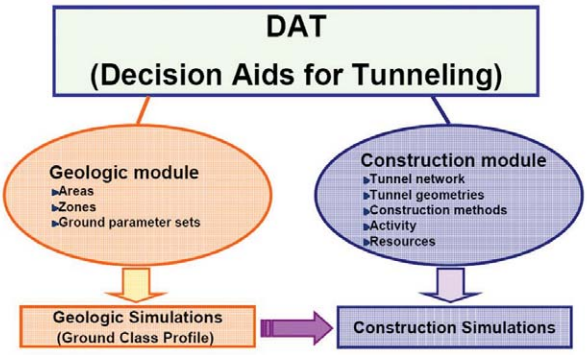


그림 3. DAT(Decision Aids for Tunneling) 모듈 구성요소

지질 조사를 통해 획득한 기초자료와 지질전문가의 주관적인 판단을 기반으로 지질도 및 주상도에 대한 확률 분포를 생성하는 지반 시뮬레이션 모듈과 이를 기반으로 각 지질특성에 적합한 터널공법의 모델링 및 네트워크를 구성하는 시공 모듈에 의해 생성된 공기 및 공사비 확률 분포는 예상되는 리스크를 시간과 비용의 측면에서 정량화 하여 공법 선정과 같은 의사결정 및 발생 리스크의 대응에 도움을 준다. 이를 활용하여 계획 및 설계단계에서 공법비교와 신공법 적용 및 설계타당성 검토가 가능하며 시공단계에서는 공정 및 자원관리가 가능하고 지반정보갱신(Update)을 통해 미 굴착 지역에 대한 불확실성을 감소시킬 수 있다. (Min et al., 2008, Einstein, 2004)

하지만 터널 중심으로 설계된 프로그램이기 때문에 도심지에서 주로 시공 되고 있는 흙막이 및 배수, 기초공사에 대한 부분은 고려가 미흡하다. 또한 연구범위 설정에 있어서 공기 및 공사비 분포 생성 시 고려되는 영향요소가 지반정보에 국한되어 있다. 최근 도심지 공사에서는 소음 및 환경 등 민원 문제나 주변 구조물의 영향으로 공사비의 증가와 공기의 연장 사례가 증가하고 있다는 점에서 도심지에서 발생할 수 있는 다양한 영향요소의 범위를 설정할 필요가 있다.

3. 대규모 지하공사 비용 · 일정 리스크 관리체계 구축

본 절에서는 현재 국토해양부의 도시재생사업의 일환으로 필자가 수행하고 있는 '도심지 대규모 지하공사의 리스크 관리시스템 개발' 연구 결과 중 대규모 지하공사의 비용 일정 리스크와 관련된 일부분을 정리하여 기술하였다.

3.1 지하공사 공법 및 프로세스 조사

지하공사는 크게 굴착공사와 터널공사로 나뉠 수 있는데, 굴착공사는 다시 터파기와 흙막이 공사로 나누어진다. 도심지의 경우 구조물에 인접하여 시공하는 경우가 많으므로, 계획, 설계 및 시공단계에 이르기까지 적절한 공법 선정과 함께 지속적인 리스크 관리가 필요하다. 그림 4는 지하공사의 공법분류를 나타내고 있다.

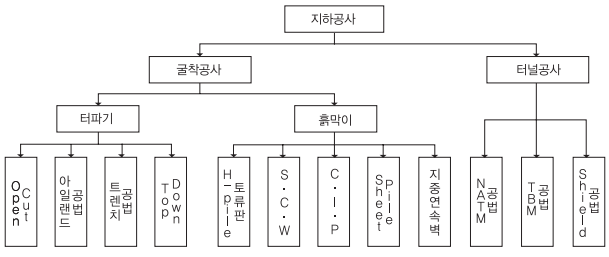


그림 4. 지하공사 공법 분류

굴착, 흙막이 및 터널 공법을 선정할 시에는 지반조건, 지하수위, 인접구조물 및 지하매설물, 굴착규모와 깊이 등의 시공 기술에 관련된 요소뿐만 아니라 공사기간, 공사비, 시공성 및 안정성 등의 모든 조건을 고려하여 적정한 공법을 선정하여야 한다. 위의 지하공사 공법 중 흙막이 공사를 예

를 들어 살펴보면, 흙막이 공사는 안전한 굴착을 하기 위한 것으로 충분한 강도와 강성을 가져야 하고 공사 중이나 공사가 완료된 후에도 배면의 토립자 유출, 구조체의 변형, 배수에 의한 주위지반의 침하가 발생하여 인접한 도로, 구조물이나 지하 매설물에 피해를 주는 경우가 많으므로 설계와 시공단계에서의 충분한 검토가 있어야 한다.

특히 상·하수도관의 파손은 흙막이 구조체의 붕괴로 연결되는 2차적인 원인이 되므로 특별한 주의가 필요하다. 흙막이 공사의 한 방법인 지하연속벽 공법의 경우 표 1에 보이는 공법특징을 가지며, 그림 5와 6에서 보여지는 시공프로세스를 거치게 된다. 이러한 시공프로세스의 조사가 기반이 되어 각 프로세스의 공사비 및 공기 항목의 불확실성을 기반으로 시뮬레이션을 수행하게 된다.

〈표 1〉 지하연속벽 공법 개요 및 특징

공법	시공개요	특징
지하연속벽	- 지중 연속벽으로 지중에 소정 두께의 보호벽을 형성 철근망을 삽입후 콘크리트를 타설하여 가설이나 영구용 지하층 외벽 구조체를 형성.	- 완전한 차수효과 - 구조물의 측벽으로 이용 가능 - 소음이 적음 - 공사비가 비쌈

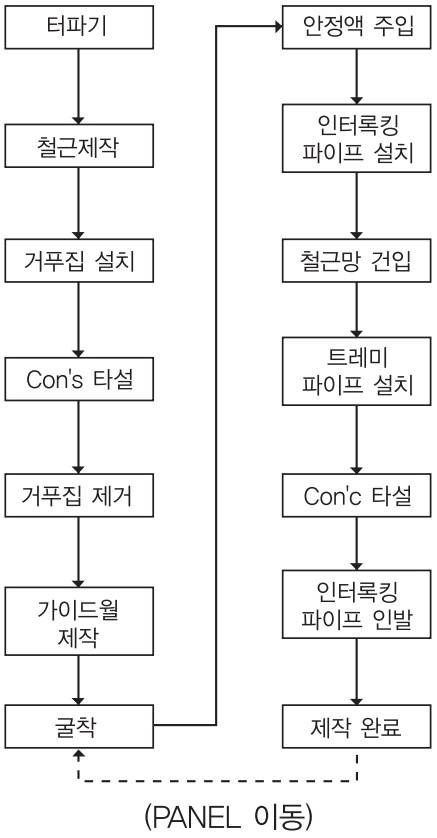


그림 5. 지하연속벽 시공 프로세스

그림 6. 지하연속벽 시공 현장 사진

3.2 리스크의 파악 및 리스크 레지스터 작성

리스크 파악은 리스크 관리의 기초단계로써, 전체적인 리스크 관리를 가능케 하는 기초수준의 리스크 분류 체계의 분석 대상이 되므로 그 중요성은 매우 높다. 리스크 파악은 관련 프로젝트의 이해당사자(Stakeholder) 모두가 참여하여야 전역적/지역적 수준의 리스크를 도출할 수 있고, 특히 본 연구와 같이 리스크 관리 시스템이 지하공사 안정성 향상에 기여하기 위하여 설계, 감리, 시공하는 설계사, 감리단, 시공사 측면의 리스크가 매우 중요하다. 따라서, 도심지 지하공사에 참여한 경험이 있는 전문가들을 대상으로 설문지를 작성하여 배포, 리스크 파악의 수단으로 활용하였다.

한편, 공기 및 공사비에 영향을 줄 수 있는 영향요소를 세부적으로 분류할 필요가 있으며, 이를 RBS(Risk Breakdown Structure), 리스크 등록부 (Risk Register) 작성 시 고려하여야 한다. 각 분류항목의 불확실성에 의해 변동할 수 있는 자재 종류 및 물량, 작업조(인원, 장비)에 대한 확률분포 데이터는 총 공기 및 공사비 확률분포 산출의 근거가 된다. 표 2와 같은 영향요소의 가중치를 설정 및 영향유무를 판단하여 항목의 범위를 설정하고 해당되는 각 항목을 변수로 활용한다.

〈표 2〉 도심지 지하공사의 영향요소 분류

분류 항목	세부 항목
설계조건	구조물 하중, 지반정수, 보조공법 등
지반조건	지반성질, 지하수, 지질상태 및 심도
부지조건	부지 고저차 및 형상, 규모, 인접대지와 관계 등
환경조건	소음, 진동, 침하, 오염 등
시공조건	지반 붕괴 및 굴착저면의 파괴형상, 시공성, 작업 안전성 등
경제조건	공기 및 공사비, 자재, 인원, 장비, 대지활용, 생산성 등

3.3 엑셀기반 지하공사 비용·공기 리스크 분석 툴 개발

Excel 기반으로 몬테카를로 시뮬레이션에 최적화된 리스

크 분석 툴인 Crystal Ball 7을 활용하여 기본적인 프로그램의 틀을 설계하였다. Crystal Ball은 공기 및 공사비의 확률분포 산출시 고려되는 영향요소 데이터의 불확실성으로 인해 변동할 수 있는 변수의 값을 적합한 확률분포로 입력하여 공기 및 공사비의 분포를 각각 나타낼 수 있으며 두 분포를 결합시켜 공기 및 공사비 Scatter Chart 산출하는데 적합하다. 프로그램의 시트구성은 표 3과 같다. 시트 1은 공사 개요 및 관련내용 및 특이사항을 입력하고 시트 2는 산출근거에 따른 분석결과인 공기 및 공사비 분포와 결과보고서를 나타낸다. 아래 그림 은 Crystal Ball에서 지반 DB를 활용하여 지반의 특성만을 변수로 지정하여 공기 및 공사비 확률분포와 분석결과 보고서를 산출해 보았다.

Excel 시트 3, 4는 굴착공사 및 터널공사를 공법별, 유형별로 분류하여 생산성 및 일위대가 기반으로 산출근거를 마련하여 각 영향요소에 의한 변수 값을 입력 하면 된다. 이 시트는 현장조사를 통한 정량적 데이터 수집을 통해 업데이트 될 수 있다. 각 영향요소에 의해 공법별 적용 가능한 인원 및 장비조합(작업조)과 자재를 입력하면 공기 및 공사비 산출근거가 결정되고 입력된 각 변수의 확률분포에 따라 Excel 시트 2에서 공기 및 공사비 확률분포 및 Scatter Chart가 표시된다.

〈표 3〉 리스크 분석 시스템 시트구성

Excel 시트	제 목	내 용
1	공사 내용	공사 개요 및 관련 내용
2	분석 결과	공기 및 공사비 분포 및 리스크 분석결과 보고서
3	굴착공사 산출근거	굴착공사 생산성 및 일위대가 기반의 산출근거
4	터널공사 산출근거	터널공사 생산성 및 일위대가 기반의 산출근거
5	지반정보 요약	지질 주상도 및 리스크 분석에 필요한 지반정보 요약정보
6~15	지반 DB	지반조사 결과 데이터

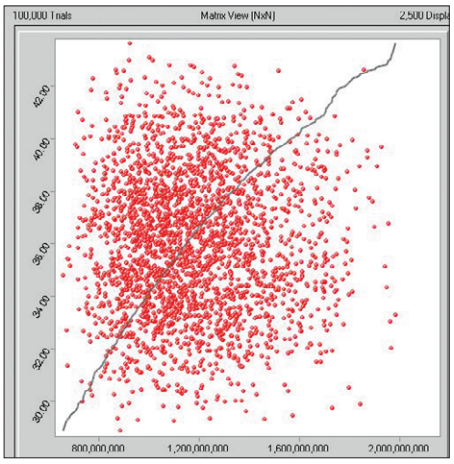


그림 7. 공기 및 공사비 Scatter chart

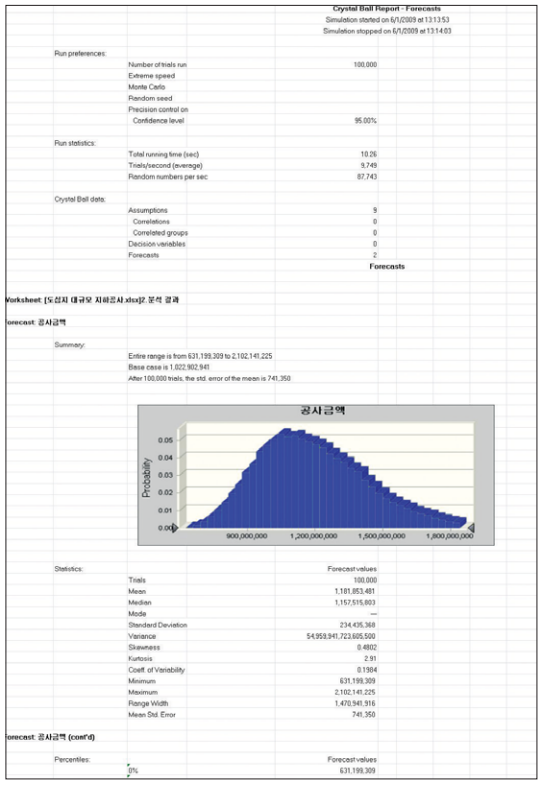


그림 8. 분석결과 시트

공기 및 공사비 확률분석 시뮬레이션 결과를 활용하여 공법이나 노선 선정 및 신공법 적용을 위한 의사결정에 활용할 수 있다. 만약 두 가지 다른 공법에 따른 공기 및 공사비 scatter chart가 비슷한 분포로 나타난다면, 이는 주어진 지질, 지반, 환경 등의 조건에 대해 각각의 공법에 대한 리스크 및 불확실성을 고려한 공사비용과 공사시간에 대한 분포가 유사하다는 의미라고 할 수 있다.

이와 같은 경우는 이론상은 두 가지 공법 중 어느 것을 사용해도 무방하다고 할 수 있지만, 이와 같은 상황을 처리하는 두 가지 정도의 접근법이 있다. 주어진 프로젝트가 지반상태에 민감한 경우, 시뮬레이션을 지반에 대한 불확실성 및 그에 대한 영향을 위주로 시뮬레이션을 수행하여 두 가지 공법의 지반에 대한 불확실성이 전체 공기와 비용에 미치는 영향을 비교하여 한 가지 공법을 선택하거나 다른 사용가능한 구체적인 정보, 추가적인 리스크 파라미터나, 자원분배 등을 추가적으로 고려하게 된다면, 비슷한 분포를 보였던 두 가지 공법의 분포가 다르게 나올 것이다.

Excel 시트 5는 지반정보를 요약한 시트로 그림 8과 같은 지질 주상도 및 도심지 지하공사 계획 및 시공 리스크 분석에 필요한 지반정보를 요약하여 표시한다.

그림 8. 지질주상도

Excel 시트 6~15는 지반조사 결과를 엑셀형식으로 DB화한 전체 내용을 입력한다. 각 시트에는 설계 및 시공에 필요한 지반 데이터 값이 포함되어있다.

4. 결 언

본 기사에서는 대규모 지하공사 프로젝트 진행 시 의사결정의 가장 중요한 기준이 되는 비용 및 공기 리스크에 대하여 살펴보았다. 해외에서 개발된 비용 일정 리스크 관리 기법 및 툴에 대하여 검토하였으며, 특히, 지질학적 측면 등 주요 공학적 시공조건들에 대한 정량적, 확률론적 분석을 통해 시공 시 문제 발생의 가능성을 산정하고 이에 기초한 공사비, 공기 등의 산정기법에 대하여 알아보았으며, 현재 국내에서 개발되고 있는 지하공사 비용 일정 리스크 산정 체계를 소개하였다.

앞서 언급한 바와 같이, 비용 및 공기 리스크를 고려한 공법선정 기법, 그리고 불확정적 3D 지하공간자료를 기반의 시공 프로세스 시뮬레이션을 통한 리스크 분석 · 관리 및 의사결정 방법론은 지하공사, 특히 대규모의 도심지 지하공사 및 터널 등의 프로젝트에 적용이 반드시 필요하다. 논의된 비용 일정 리스크 관리를 통하여 도심지의 대규모 지하공사 그리고 다양한 지반조건, 지하수 및 해수의 영향조건을 고려해야 하는 해저터널과 같은 대규모 지하공사에 있어서 기술적, 경제적으로 혁신적인 설계, 시공기술을 확보할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Choi, H., H. Cho, et al. (2004). "Risk assessment methodology for underground construction projects." ASCE Journal of Construction Engineering and Management 130: 258~272.
2. Einstein, H. H. (2004). "Decision aids for tunneling – Update." Design of Structures 2004, 199~207.
3. Min, S. Y., T. K. Kim, et al. (2008). "Design and construction of a road tunnel in Korea including application of the Decision Aids for Tunneling – A case study." Tunnelling and Underground Space Technology 23(2): 91~102.
4. Seo, J. and H. Choi (2008). "Risk-Based Safety Impact Assessment Methodology for Underground Construction Projects in Korea." ASCE Journal of Construction Engineering and Management 134: 72~81.
5. Washington D.O.T. (2008). Risk Management Plan (RMP) User's Guide, (www.wsdot.wa.gov/publications)