

지하비축기지 건설시 지질조건을 고려한 건설공정의 가시화와 최적화 사례

최용근^{1)*}, 박준영²⁾, 이성임³⁾, 김호영⁴⁾, 이희석⁵⁾, 이승철⁶⁾

Visualization and Optimization of Construction Schedule Considering the Geological Conditions in the Complicated Underground Cavern

Yongkun Choi, Joon-Young Park, Sungam Lee, Ho Yeong Kim, Hee-Suk Lee, Seung Cheol Lee

Abstract Underground storage cavern is known as the most complicated underground project because of the complexity of construction schedule, tunnel size, and geological problems. In order to optimize the construction schedule of underground storage cavern, two up-to-date technologies were applied. The first technology was 3 dimensional visualization of complicated underground structures, and the second was 4 dimensional simulation considering construction resources, geological conditions and construction schedule. This application case shows that we can achieve optimized construction schedule in the ways to optimize the number of work teams, fleets, the sequence of tunnel excavation, the commencement time of excavation and the hauling route of materials and excavated rocks. 3 dimensional modeling can help designer being able to understand the status of complicated underground structures and to investigate the geological data in the exact 3 dimensional space. Moreover, using 4 dimensional simulation, designer is able to determine the bottle neck point which appear during hauling of excavated rocks and to investigate the daily fluctuation in cost.

Key words Underground storage cavern, 3-dimensional modeling, 4-dimensional simulation, Optimization of construction schedule, Visualization of design and construction

초 록 지하비축기지는 터널의 규모와 건설공정의 복잡성, 지질 및 지반공학적인 문제들로 인해 가장 난해한 지하공간건설 프로젝트로 알려져 있다. 최근 복잡한 지하구조를 3차원으로 가시화하고, 건설 자원과 지반조건 그리고 공정계획을 고려한 4차원 시뮬레이션을 활용하여 건설공정을 최적화하는 기술이 지하비축기지 건설 프로젝트에 적용되었다. 이 사례연구는 지하구조의 3차원 모델링을 통해 작업자가 복잡한 지하 현황을 쉽게 이해하고, 정확한 3차원 공간상에서 지질자료를 분석하고 검토할 수 있도록 도와줄 수 있음을 보여주고 있다. 또한 건설공정과 실제 공기를 고려한 4차원 시뮬레이션을 활용하여 자재와 버력의 반출입에서 나타날 수 있는 bottle neck의 위치와 시점을 판단하거나 일일 공사비의 변동을 검토하고, 작업조와 투입장비의 수, 터널 시공방향 및 굴착 착수 시점, 버력 및 자재의 운반경로를 검토함으로써 공정의 최적화를 달성할 수 있었다.

핵심어 지하비축기지, 3차원 모델링, 4차원 시뮬레이션, 공정 최적화, 설계 시공의 가시화

1. 서론

VDC (Visualization of Design and Construction) 기법은 설계와 시공과정을 3차원으로 가시화하고 가시화된 정보를 활용하여 건설공정의 타당성을 검증하는 최신 기법이다. VDC 기법은 주로 건축물이나 발전소 및 플랜트 등 여러 설비와 시설이 복잡하게 얽혀 있는 구조물의 설계와 시공에 주로 이용되는 기법이었으나, 최근 다양한 형태의 여러 터널들이 복잡하게 시공되는 지

¹⁾ 지오제니컨설팅 상무
²⁾ 지오제니컨설팅 자원사업부 과장
³⁾ 지오제니컨설팅 자원사업부 대리
⁴⁾ SK건설, GSUC사업본부 상무
⁵⁾ SK건설, GSUC팀 부장
⁶⁾ SK건설, Geotask팀 부장
* 교신저자 : ykchoi@geogeny.biz
접수일 : 2009년 6월 12일
심사 완료일 : 2009년 6월 18일
게재 확정일 : 2009년 6월 19일

하비축기지 프로젝트에 적용됨으로써 토목 프로젝트에서도 성공적으로 활용될 수 있음이 입증되었다. 뿐만 아니라 이 프로젝트에서는 기존의 VDC 기술에 건설공사를 위한 자원과 지반조건 그리고 공정계획을 고려한 4차원 시뮬레이션 기법을 추가하여 건설공정의 최적화를 달성할 수 있었다.

이 기법이 적용된 지하비축기지는 2개의 shaft와 여러 개의 access drift, 9개의 cavern 및 다양한 utility tunnel과 connection이 지하에서 복잡하게 연결되어 있으며, 특히 shaft를 제외한 모든 터널이 해저에 위치하고 있어서 조사의 한계로 인한 지하지질조건 불확실성과 높은 수압조건으로 인한 리스크를 가지고 있는 프로젝트이다(그림 1 참조).

건설공정과 관련해서는 복잡한 터널구조에 비해 주어진 공기가 짧아서 기계화된 대형장비가 여러 개의 터널 막장에서 동시에 작업을 수행해야 하며, 여러 막장에서 굴착된 버력의 반출과 건설자재와 인력 그리고 장비 등 터널 시공과 관련된 모든 이동이 제한된 운반용량을 가진 2개의 shaft를 통해 이루어져야 하는 어려운 조건이었다. 뿐만 아니라 2개의 cavern을 조기에 완공하여 우선적으로 사용되어야 하는 조건으로 인해 파이프 설치 등 관련 설비공사가 터널 굴착과 동시에 이루어져야 하는 문제가 있었다.

또한 발주자는 3차원 지질모델을 구축하고 이를 터널 시공에 따라 계속 업데이트함으로써 시공시 지질조건 변화에 즉각 대응하도록 요구하였다.

이러한 발주자의 요구사항을 만족시키고 지질조건에 따른 리스크와 짧은 공기로 인한 문제를 해결하기 위해 3차원 지질 모델링을 통해 지질 및 지반조건을 가시화하고, 지질조건과 실제 시공기간을 고려한 4차원 시뮬레이션을 통해 건설공정을 최적화하는 방법이 도입되었다. 그림 2는 3차원 모델링과 4차원 시뮬레이션을 통해 건설공정을 최적화하는 흐름을 보여준다. 3차원 모

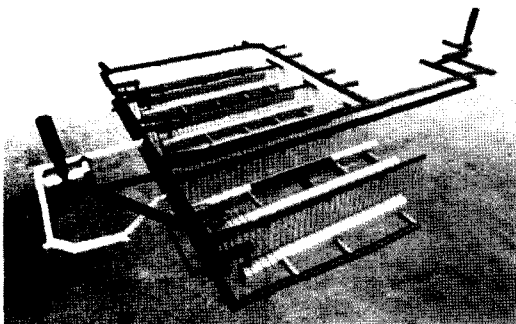


그림 1. 지하비축기지의 터널 배치

델링은 복잡한 터널과 지질, 지반조건을 3차원 DB로 구성하고 이로부터 설계 파라미터를 도출하는 과정으로 이루어지며, 4차원 시뮬레이션은 3차원 모델을 기반으로 공정계획과 지보방법, 사이클 타임, 지질조건, 시공기간 등을 고려하여 건설공정과 방법을 최적화하는 과정으로 이루어진다.

2. 지질조건과 지반공학적 특성의 3차원 모델링 및 활용

2.1 3차원 모델링 방법

지질조건과 지반공학적 특성을 3차원으로 모델링하고 가시화하는 소프트웨어로는 GEMS 프로그램이 사용되었다. GEMS는 광산 탐사 및 설계, 개발 및 생산을 위한 광산전문 solution이나, 3차원 DB를 통해 자료를 구축하고 이를 3차원으로 표현하는데 탁월하며, 지상 및 지하굴착 공정을 계획하고 시뮬레이션할 수 있는 기능을 가지고 있어서 여러 개의 터널이 복잡하게 연결되어 있는 지하비축기지를 가시화하는데 적합하다.

그림 3은 조사자료를 분석하고, 이를 통해 3차원 모델링을 위한 입력자료를 구성하며 3차원 모델링 결과를 활용하여 설계에 필요한 파라미터를 도출하는 과정을 보여준다. 3차원 모델링을 위한 입력자료는 지질조사, 시추조사, 물리탐사, 각종 현장시험에서 얻어진 모든 자료들로 구성되며, 이 자료들은 GEMS를 이용해서 3차원 DB 형태로 저장된다. 3차원 DB란 공간상의 어떤 위치에 어떤 특성값이 지정되어 있음을 가리키며, 동일 지점에 서로 다른 종류의 여러 특성값을 중복해서 지정할 수 있고, 주변 또는 같은 위치에 있는 특성값들간의 관계를 정의하여 지정하는 것도 가능하다.

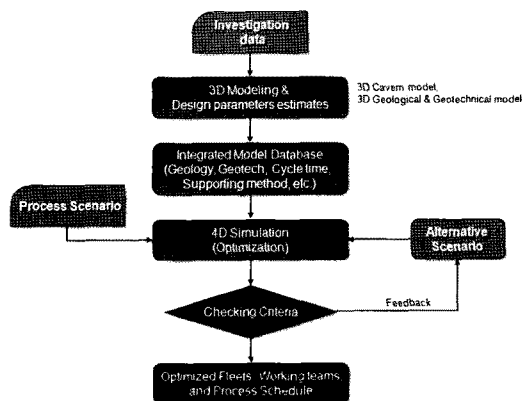


그림 2. 3차원 모델링과 4차원 시뮬레이션 기법을 이용한 건설공정의 최적화 방법

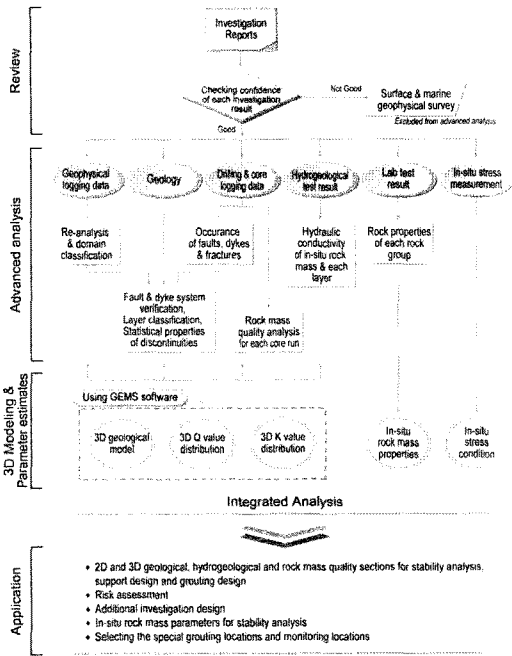


그림 3. 지질조건 분석과 3차원 모델링을 통한 설계 적용 과정

2.2 3차원 모델링 기법을 이용한 설계 파라미터 산정과 설계 적용

그림 4는 3차원 DB에 입력된 시추공의 위치와 시추 위치에 따른 RQD 및 암반의 공학적 분류(Q-system) 그리고 터널의 3차원 모델을 함께 표현한 그림이다. 이러한 3차원 DB를 이용함으로써 지반조사 자료의 밀도와 타당성을 검증할 수 있으며, 향후 추가 조사가 필요한 부분을 직관적으로 판단할 수 있게 된다.

그림 5는 시추 코어로부터 얻어진 지질정보와 물리탐사 결과, 시추공 검층(BHTV)에서 얻어진 결과를 종합하여 작성된 3차원 지질구조 모델로서 터널과 지질구조의 관계를 보여주는 그림이다. 이러한 3차원 모델을 이용함으로써 지질구조의 위치와 터널에 미치는 영향을 효과적으로 표현할 수 있으며, 설계자 및 시공자의 이해도를 높이는 데 도움을 줄 수 있다.

그림 6은 시추공을 따라 입력된 Q값 분포와 단층 및 dyke 등의 지질조건을 고려한 지구통계학적 분석과정을 통해 cavern 주변 암반의 Q값을 추정하는 과정을 보여준다. 3차원 Q값 분포는 제한적인 조사에 근거하여 통계적으로 추정된 값이긴 하지만, 착공이전의 추가 조사와 시공중 조사를 통해 지속적으로 보완되므로 설계 단계에서 적용할 수 있는 가장 합리적인 추정방법이라고 할 수 있다.

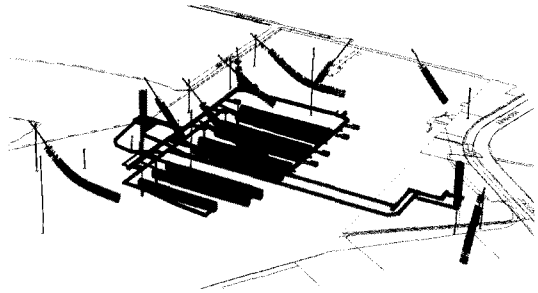


그림 4. 시추결과와 터널의 3차원 모델

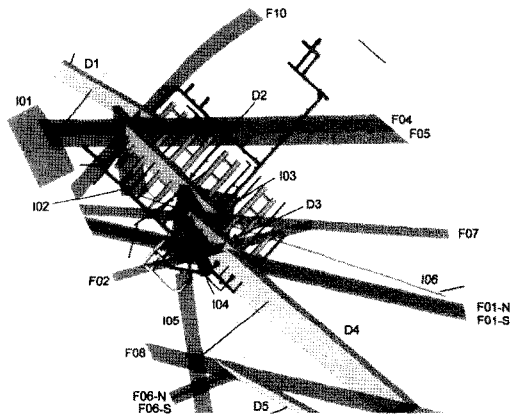


그림 5. Cavern과 지질구조의 관계를 표현한 3차원 모델(D는 dyke, F는 확인된 fault, I는 물리탐사 및 구조분석을 통해 얻어진 inferred fault를 가리킴)

그림 7은 3차원 index kriging 방법으로 추정된 cavern 주변 암반의 투수계수(hydraulic conductivity) 분포 특성을 보여준다. 지하 암반에서 지하수는 주로 절리나 단층 등의 불연속면을 따라 유동하므로 2차원적 흐름 보다는 불연속면을 따르는 3차원적 흐름이 중요하게 다루어져야 한다. 따라서 불연속면 분포특성을 고려하여 3차원으로 평가된 투수계수 분포 특성은 지하비축기지 설계에 가장 중요한 파라미터로 이해되며, 지하수의 3차원 유동해석에 직접 활용될 수 있는 장점이 있다.

이러한 3차원 모델링과 분석을 통해 터널 위치에 따른 굴착방법과 보강방법을 정의할 수 있으며, 표 1과 같이 지질조건과 지반공학특성에 따른 위험요인을 직관적으로 관찰하고 평가할 수 있다. 그림 8은 cavern 심도에 표현된 위험요인을 보여준다.

3. 4차원 시뮬레이션 기법과 P3 건설공정 검토

4차원 시뮬레이션이란 지질조건 및 지반조건을 포함한 터널의 3차원 모델에 사이클 타임을 고려한 실제 공

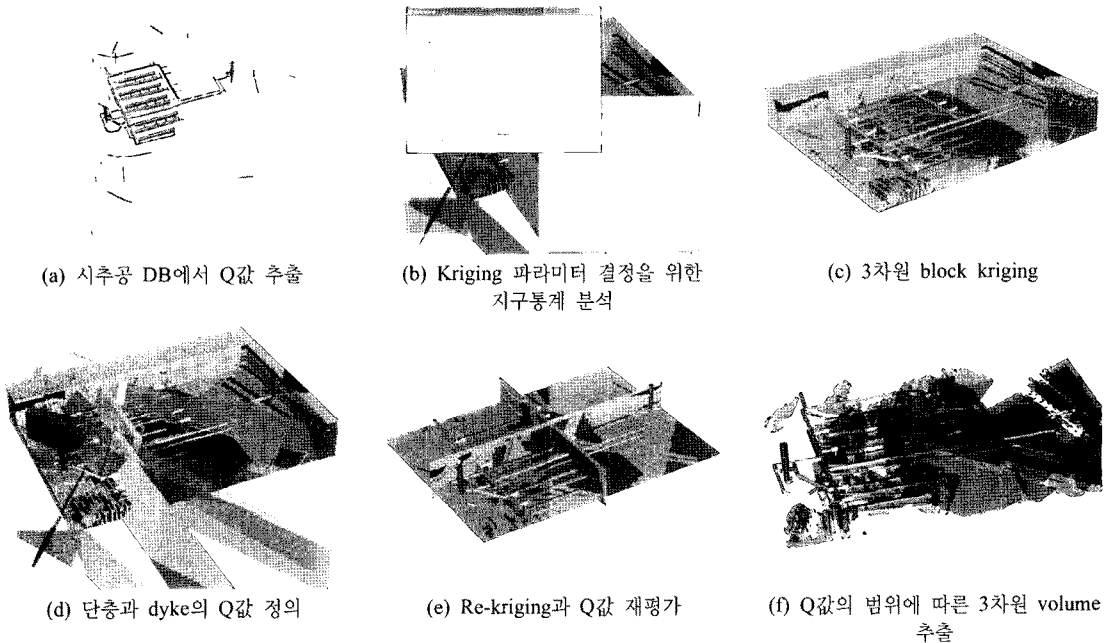


그림 6. 3차원 지구통계분석과 단층 및 dyke를 고려한 Q값 평가 과정(a→f 순서로 진행)

표 1. 지질조건과 지반공학적 특성에 따른 위험요인 요약

Geological Hazards	Associated Risk	Cavern Level ¹⁾
Fault zone	<ul style="list-style-type: none"> Soft ground of mixed face condition Large deformation 	③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑪, ⑬, ⑯, ⑰, ⑱, ⑲
Permeable zone	<ul style="list-style-type: none"> High groundwater pressure Large quantities of groundwater inflow 	①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑧, ⑩, ⑪, ⑫, ⑭, ⑮, ⑰
Stress concentration	<ul style="list-style-type: none"> Squeezing or spalling Support failure 	②, ③, ⑫
Highly jointed rock mass	<ul style="list-style-type: none"> Wedge failure (or roof fall) Sidewall and/or face instability 	①, ②, ③, ⑤, ⑦, ⑩, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮
Salinity of groundwater	<ul style="list-style-type: none"> Corrosion of equipments or facilities 	Permeable zone

¹⁾ 그림 8 참조

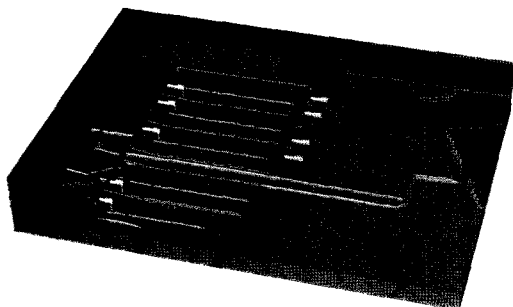


그림 7. 3차원 index kriging으로부터 얻어진 투수계수의 3차원 분포 특성

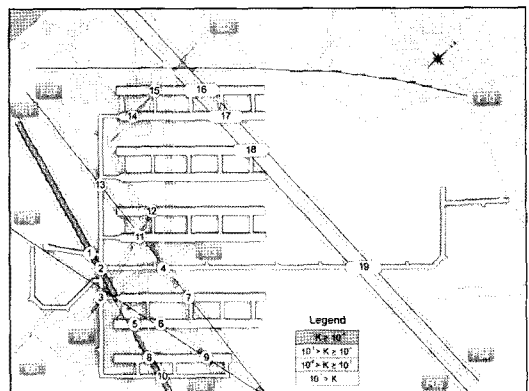


그림 8. Cavern 심도에서의 위험요인(표 1 참조)

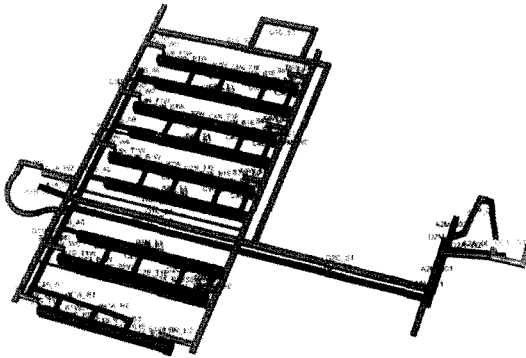


그림 9. 3차원 cavern 모델에 WBS code를 부여한 상태의 모델

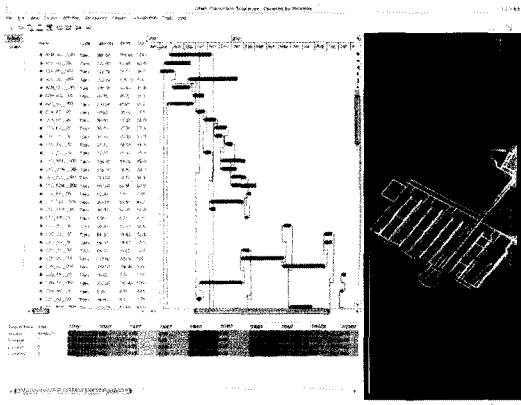


그림 10. GEMS에 입력된 공정 계획

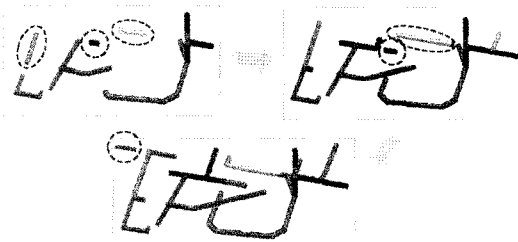


그림 11. 타당하지 않은 터널 시공계획을 수정한 사례

정을 결합하여 굴착공정의 타당성을 평가하고 이를 최적화하는 방법으로 정의될 수 있다. 4차원 시뮬레이션을 위한 4차원 모델은 3차원 통합 DB와 P3 건설공정으로 만들어지며, 다음과 같은 세부 항목들로 구성된다.

① 3차원 통합 DB (3D integrated database)

- Cavern, shaft, access drift, water curtain tunnel 등
- 터널별, 암반 및 수리특성에 따른 굴착방법 및 지보 방법

- 지질 및 지질구조
- 암반조건(Q-system)
- 수리특성

② P3 건설공정

- Cycle time(천공 및 발파, 지보, 버력처리, 계측 등의 터널 굴착 전공정)
- 작업조의 수
- 투입장비의 종류와 수
- 터널별 굴착 순서와 방향
- Calendar time
- WBS code

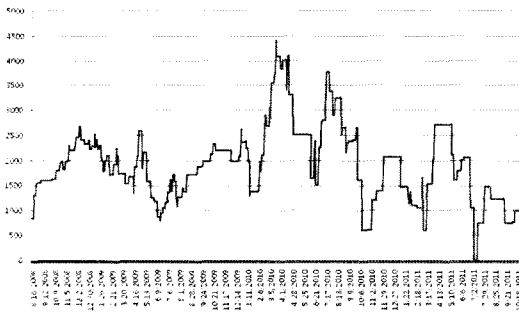
그림 9는 GEMS를 이용하여 만들어진 3차원 cavern 모델에 WBS code를 부여한 상태를 보여준다. GEMS는 모든 입력자료를 3차원 공간상의 DB로 관리하고 DB에 입력된 모든 자료들간의 상관성을 부여하므로 3차원 공간에서 터널 굴착이 진행됨에 따라 굴착조건 변화와 건설자재 투입량의 변화, 비용의 변화를 검토할 수 있도록 한다.

이러한 기능을 이용하여 굴착공정에 영향을 미칠 수 있는 모든 요인들을 종합하여 P3 프로그램으로 만들어진 건설공정의 타당성을 검증한다. 그림 10은 GEMS에 입력된 공정계획의 일부를 보여준다. P3 프로그램과 달리 GEMS에서는 입력된 공정을 3차원 모델과 시간을 고려한 4차원 시뮬레이션을 통해 수시로 검토하는 것이 가능하다. 그림 11은 실제 설계시 P3 프로그램에서 만들어진 굴착계획을 검증한 사례이다. 2차원적으로 계획되는 P3 프로그램에서는 터널의 공간배치와 작업순서를 완전히 고려할 수 없었으나, 지반조건과 사이클 타임 및 실제 공기(calendar time)를 고려한 GEMS의 경우에는 시각적으로 건설공정의 타당성을 검증할 수 있었다.

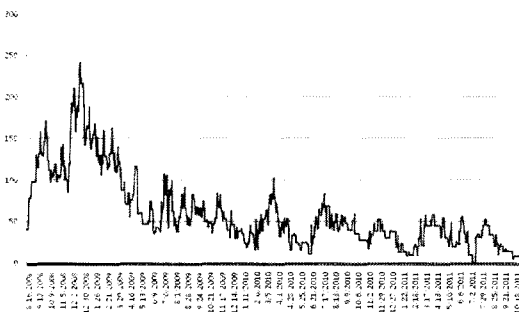
4. 4차원 시뮬레이션을 이용한 건설공정의 최적화

P3 프로그램으로 만들어진 기초 굴착공정의 타당성이 검증된 이후에는 cavern 건설에 따른 자원배분의 적정성을 검토하고 최적의 건설공정을 얻기 위해 공사진행에 따른 암석 굴착량의 변화 및 각종 비용의 변화를 분석하였다. 그림 12는 GEMS를 이용해서 분석된 굴착진행에 따른 암석 굴착량의 변화와 록볼트 설치량, 폭약비의 변화를 보여준다.

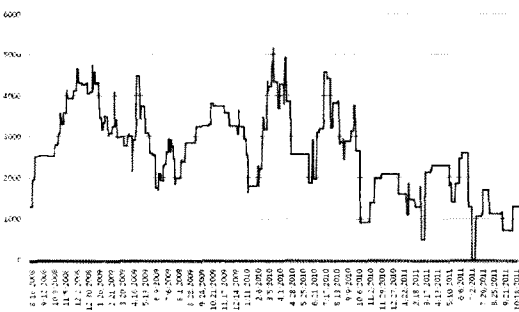
3차원 DB를 이용하여 터널이 진행되는 모든 지점에서 지반조건에 적합한 사이클 타임과 자재 및 비용이 지정되어 있으므로 굴착진행에 따른 암석 굴착량의 변화와 기타 비용의 변화는 실제 공사기간을 고려한 결과



(a) 암석 굴착량의 변화(단위 : 톤)



(b) 록볼트 설치량의 변화(단위 : m)

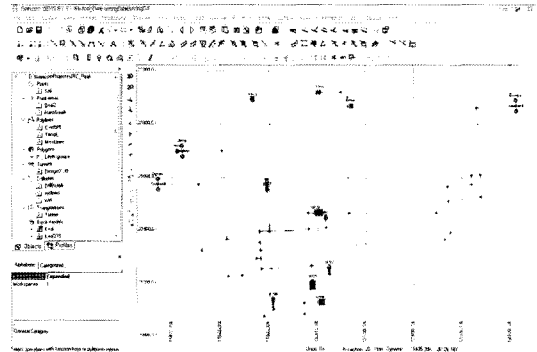


(c) 폭약비의 변화(단위 : kg)

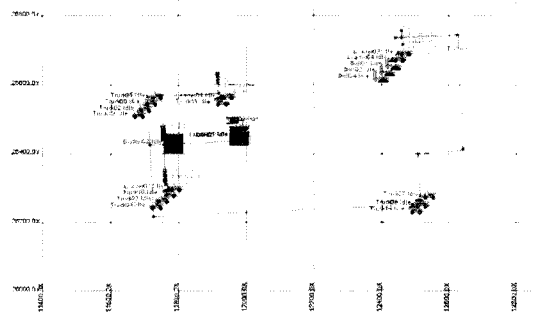
그림 12. 굴착진행에 따른 암석 굴착량의 변화와 록볼트 설치량, 폭약비의 변화(그래프의 x축에 해당하는 시간은 실제 공기를 표현하는 calendar time임)

를 보여준다.

운반용량이 제한된 2개의 shaft를 이용해서 모든 자재와 버력이 이동해야 하므로 그림 12의 (a)와 같이 시간에 따른 암석 굴착량의 변화는 어떤 시기에 어떤 경로로 버력이 얼마만큼 반출되어야 하며, 이를 위해 access shaft와 drift는 어느 시점까지 완성되어야 하고, 또한 작업조는 몇 조가 어디서 어떤 장비를 몇 대 이용하여 작업을 해야 하는지를 검토하는데 가장 기초적인 자료가 된다. 그림 13은 굴착 및 운반장비의 수와 작업조의 수를 최적화하기 위해 터널내 버력 반출을 위한



(a) 최대 버력 처리량이 발생하는 시점에 대한 운반 모델



(b) 운반 시뮬레이션 과정(장비 대기 시간이 과도하게 발생하는 지점을 보여줌)

그림 13. 운반경로와 투입 장비대수 및 작업조 수의 타당성을 검토하기 위한 시뮬레이션

트럭 대수와 작업조, 운반경로의 타당성을 검토한 사례를 보여준다. 이러한 시뮬레이션을 통해 최적의 장비 투입 대수를 결정할 수 있으며, 운반경로상의 작업 중첩에 따른 문제점을 해결할 수 있다.

이 설계에서는 이러한 건설공정의 최적화를 위해 “공정계획 → 공정의 타당성 검토 → 자원배분 타당성 검증 → 공정계획 수정”을 반복해가며 최적의 공정과 비용 및 자원 배분을 얻어낼 수 있었다.

5. 결론

지하비축기지는 터널의 종류와 규모, 그리고 터널 배치와 공정의 복잡성, 지질 및 지반공학적인 문제들로 인해 가장 난해하고 복잡한 지하공간건설 프로젝트로 알려져 있다. 최근 설계와 건설공정을 가시화하고 이를 공정의 최적화에 활용하려는 기술들이 국내외적으로 많이 시도되고 있으나, 이번 지하비축기지 프로젝트에서 활용된 VDC 기술은 토목공사인 지하터널공사에 최초로 적용된 사례이다. 이 프로젝트에서는 VDC 기술을

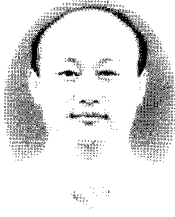
활용하여 복잡한 지하구조를 3차원적으로 가시화하고 이를 설계와 공정분석에 활용하였으며, 기존 VDC 기술을 한 단계 뛰어넘는 4차원 시뮬레이션을 활용함으로써 건설공정의 최적화를 이룰 수 있었다. 또한 3차원 및 4차원 기술은 시공시 얻어지는 각종 정보를 업데이트하여 시공에 반영하도록 하는 발주자의 다양한 요구조건도 충분히 만족시킬 수 있었다. 이 프로젝트에서 활용한 3차원 모델링과 4차원 시뮬레이션의 장점을 요약하면 다음과 같다.

3차원 모델링은 복잡한 지하구조를 가시화하여 작업자가 지하 현황을 쉽게 이해하고, 정확한 3차원 공간상에서 지질자료를 분석하고 검토할 수 있도록 도와준다. 또한 3차원 모델링을 통해 지반조건에 따른 정확한 굴

착량, 보강 및 그라우팅량을 평가할 수 있으며, 실제 굴착이 진행되면서 얻어지는 조사자료를 이용하여 3차원 모델을 수정함으로써 보다 현실에 가까운 예측과 평가를 가능하게 한다.

4차원 시뮬레이션은 모든 자료들이 종합된 3차원 통합 DB에 실제 작업공기를 고려함으로써 만들어지며, 3차원 모델의 공간정보를 활용하여 건설공정의 타당성을 검증하고 이를 최적화할 수 있게 한다. 이러한 타당성 검증에는 자재와 버력의 반출입에서 나타날 수 있는 bottle neck의 위치와 시점을 판단하거나 일일 공사비의 변동을 검토하고, 작업조와 투입장비의 수, 터널 시공방향 및 굴착 착수 시점, 버력 및 자재의 운반경로를 검토함으로써 공정의 최적화를 가능하게 한다.

최 용 근



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2005년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부 공학박사
 Tel: 02-3472-2261
 E-mail: ykchoi@geogeny.biz
 현재 (주)지오제니컨설팅 대표 상무

박 준 영



2001년 서울대학교 이과대학 지구환경과 학부, 이학사
 2004년 서울대학교 이과대학 지구환경과 학부, 이학석사
 Tel: 02-3472-2261
 E-mail: jypark@geogeny.biz
 현재 (주) 지오제니컨설팅 대표 상무

이 성 압



2005년 부경대학교 환경해양대학 환경탐사 공학과, 공학사
 2007년 부경대학교 환경해양대학 환경탐사 공학과, 공학석사
 Tel: 02-3472-2261
 E-mail: leecsam@geogeny.biz
 현재 (주) 지오제니컨설팅 대표 상무

김 호 영



1980년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1982년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 02-3700-7481
 E-mail: hykim-d@skec.co.kr
 현재 SK건설 GSUC사업본부 상무

이 희 석



1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1995년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 02-3700-7229
 E-mail: hslee@skec.co.kr
 현재 SK건설 GSUC팀 부장

이 승 철



1992년 고려대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 1994년 고려대학교 대학원 토목공학과 공학석사
 2003년 Univ. of Colorado Civil Eng. 공학박사
 Tel: 02-3700-8683
 E-mail: sclce-a@skec.co.kr
 현재 SK건설 Geotask팀 부장