터널 및 지하공간에서의 BIM 활용 및 전망

글 조 현 ＼ 기술연구소장 ＼ 토목사업본부 상무 ＼ 공학박사 ＼ **전화** 02-3433-7088 ＼
E-mail hcho@ssyenc.com

글 이송헌 ＼ 토목기술부 부장 ＼ 도로및공항기술사 ＼ **전화** 02-3433-7768 ＼
E-mail song7778@ssyenc.com

1. 머리말

최근의 건설산업의 가장 큰 변화는 IT기술 도입에 따른 생산성 향상을 꾀하려는 노력이다. 국내의 건설경기 둔화 및 공공발주 물량의 감소는 건설업체들의 과다 경쟁 수주로 채산성을 악화시키고 있으며 이러한 악순환은 새로운 기술 도입 및 개발을 통하여 생산성을 향상시키려는 건설산업의 새로운 패러다임을 형성하게 되었다. 특히, 토목공사의 경우 VE(Value Engineering)를 통해 원가를 절감하려는 건설업체의 노력이 집중되고 있으며 이러한 방법으로 BIM 도입을 적극적으로 시도하고 있다.

토목공사 현장은 건축 현장과는 달리 비정형화된 구조물이 많고 과업구간이 길어 BIM 적용이 상대적으로 어렵고 비효율적이라는 인식이 많았다. 그래서 초창기 토목분야의 BIM은 주로 구조분야, 그 중에서도 교량분야에 집중되어 3차원 상세 모델링을 통한 특수교량의 형상검토나 간섭검토 등의 시공성 검토와 가설단계 시뮬레이션을 이용한 장비운영 및 시공단계 이해에만 치중되었다. 하지만 2009년 말 4대강 살리기 등 대형 국가사업이 동시다발적으로 진행되면서 발주처와 시공사는 효과적인 공사관리 및 시공계획의 방안으로 BIM을 도입하기 시작하였으며, 3차원 토공모델을 이용하여 준설량을 검토하고 3차원 철근모델을 이용하여 복잡한 부분 및 비정형 구조물의 배근상세를 검토하는 등 불필요하게 소비되는 시간과 비용, 노력을 최소화하고 정보의 통합관리 및 공유가 가능한 BIM을 다양한 분야로 적용하기 시작하였다. 그리하여 최근에는 교량이나 수자원 분야 외에 지하철, 철도, 도로, 단지, 터널, 항만분야 등 거의 모든 토목분야로 광범위하게 확대되고 있다.

이러한 시대적 추세에 발맞추어 당사는 2009년부터 토목분야에서의 BIM 도입을 적극적으로 검토하였으며, 그 결과 호남고속철도 4-2공구를 필두로 국내외 토목현장에 BIM을 적극 적용함으로써 명실상부한 토목분야 BIM 선두주자로 자리매김하고 있다.

본고에서는 당사 국내외 지하철 현장에 적용되고 있는 BIM 현황, 적용결과 및 효과 등에 대해 소개함으로써 현재 건설분야에서 이슈가 되고 있는 BIM에 대하여 그 중요성을 알림과 동시에 향후 터널 및 지하공간에서 BIM을 어떻게 활용할 것인가에 대해 간략히 제안해 보고자 하였다.

2. 국내 지하철 현장에서의 BIM 적용

2-1. 공사개요

부산도시철도 1호선 연장 다대구간 5공구 건설공사는 기존 도시철도 연장 공사로서 신평~다대포 구간의 총 7.74km 노선이 6개 공구로 구분된다. 당 현장은 그 중 다대포해수욕장 앞 구간에 해당하는 제5공구로서 총 연장 1.27km, 정거장 1개소, 환기구 3

표 1 부산지하철 1호선 연장 다대구간 5공구 공사개요

구분	주요내용	
공사기간	2010년 11월 ~ 2015년 2월(54개월)	
공사연장	L = 1,268.7m	
공사금액	1,004억 원	
구조물 현황	본선	1,011.8m(NATM + M-CAM)
	정거장	178.2m(1개소)
	환기구	78.7m(3개소)

개소를 건설하는 공사이다.

본 구간은 폭 30m의 도로 하부를 통과하는 노선으로 우회도로가 없으며 주변에 다대어판장, 상업지역 및 주거 밀집지역이 위치하고 있다. 또한 차집관로, 상수관, 가스관로 등의 각종 지하시설물이 매우 많이 분포하여 개착공법 적용시 지장물 이설문제, 극심한 교통체증, 환경 민원문제, 인접구조물 안정성저하 등 많은 시공상의 어려움이 있다. 또한 터널 천단부는 풍화토층으로서 기존의 갱내보강에 의한 NATM 적용시 안정성 확보를 위한 보강 물량이 많고 공사기간이 과다하여 안정성 및 시공성 측면에서 매우 불리하다.

이러한 점을 극복하고자 당사는 CAM(Cellular Arch Method)공법의 하중전달 메커니즘을 응용하여 새로운 터널 공법인 M-CAM(Modified Cellular Arch Method) 공법을 개발하였으며 이를 본 현장에 적용할 예정이다.

2-2. BIM 적용현황

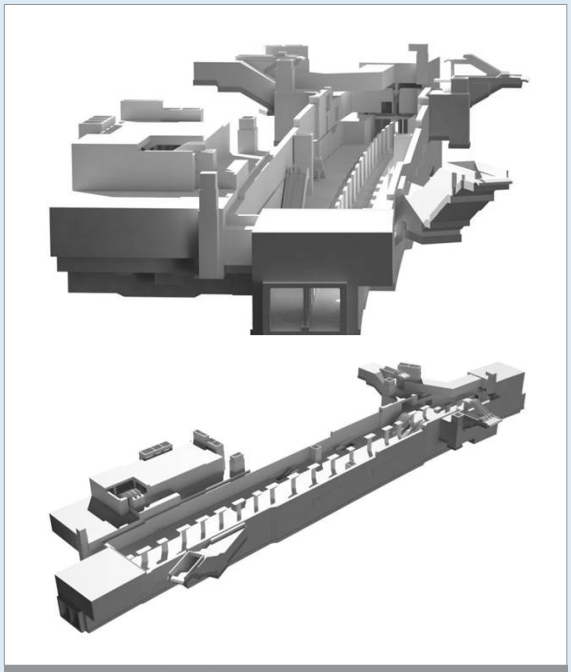
앞 절에서 언급한 현장 여건을 바탕으로 시공시 공기 지연요소를 사전에 파악하고 이를 해결함으로써 철저한 공사관리를 하고자 터널 및 지하구조물 구간 전체에 대하여 BIM을 적용하였다. 본 현장의 경우 당사 국내토목현장 중에서 BIM을 처음으로 적용한 지하철 현장이라는 데에 의의가 있으며, 본고에서는 터널 및 정거장 구간의 BIM 적용현황 및 예상효과 등을 서술하였다.

표 2 BIM 적용범위

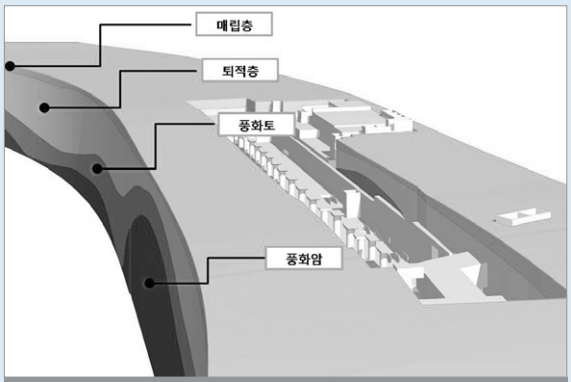
항목	적용내용
3D 정보모델링	• 정거장 1개소 및 본선 터널 • 개착구간 흙막이 가시설 • 지형 및 지반 정보 입력 • 지하 지장물과의 간섭
4D 공사관리시스템	• 공정계획에 따른 공사관리 통합시스템 구축
가상현실 안전관리시스템	• 위험공종 및 구간에 대한 안전관리시스템 구축
가상현실 장비운영시스템	• M-CAM 구간 시공에 대한 장비의 적정성 검토 • CPW 항타 장비의 이동에 따른 교통 우회계획 수립

2-3. 3D 정보모델링 구축

지하철 현장이라는 특성을 고려하여 전 구간(정거장 구간, 터널 구간, 환기구 구간 등)에 대하여 [그림 1]과 같이 3D 정보모델을 구축하여 설계도면의 오류사항을 사전에 체크하였으며, [그림 2]와 같이 지형 및 지반을 모델링하고 각 지층별 정보를 입력함으로써 실제 시공시 지반현황 등을 파악하고 토공량 등을 미리 예측할 수 있도록 계획하였다.



[그림 1] 정거장 구간의 3D 정보모델

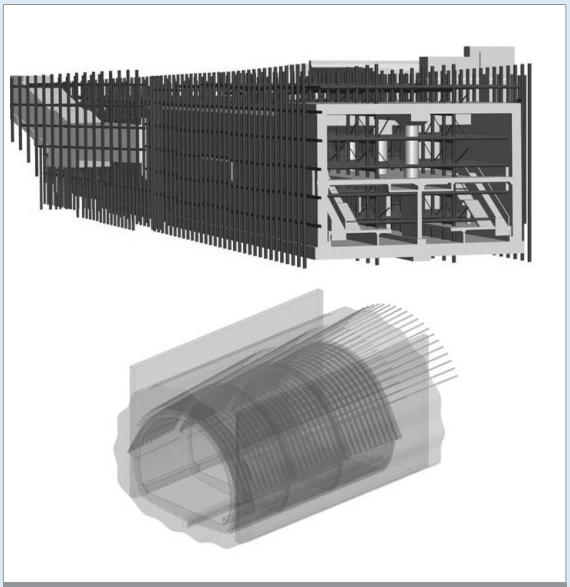


[그림 2] 지층별 정보를 입력한 3D 정보모델

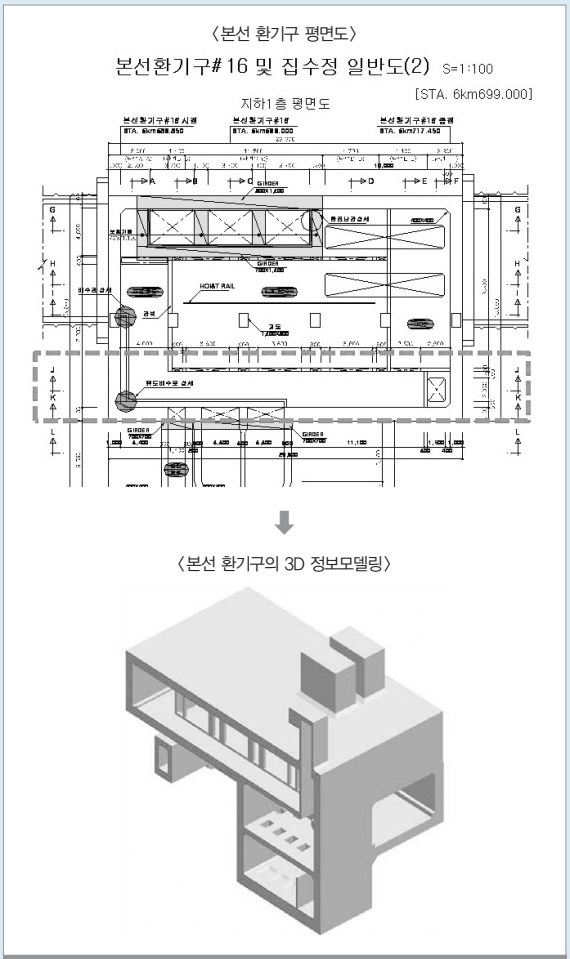
[그림 3]은 정거장 구간 흙막이 가시설 및 터널 구간의 3D 정보모델 구축 화면으로서, 지하구조물 시공시 사전 공기 지연 요소를 체크하고 공기 만회 대책을 수립함으로써 보다 정밀한 공정 관리가 가능하도록 계획하였다.

1) 3D 정보모델을 활용한 설계 오류 검토

3D 정보모델을 구축하고 이를 통하여 설계시 오류사항을 검토한 결과, 총 5개소에서 도면간의 상호 불일치에 따른 설계오류를 발견하였다. 발견된 설계오류는 시공성 등을 고려하여 도면을 수정하였으며, 3D 정보모델 또한 수정후 이를 4D 공정관리와 연동하였다.



[그림 3] 정거장 및 터널구간의 3D 정보모델



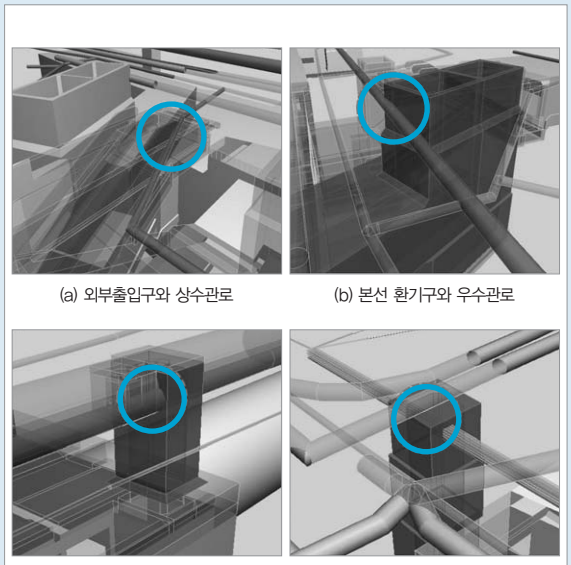
[그림 4] 구조물 모델링을 통한 누락 도면 도출

또한 3D 정보모델을 활용하면 다음의 [그림 4]와 같이 단면상세도의 누락과 같은 도면 오류도 발견이 가능하며 3D 모델링을 통해 누락된 부분을 2차원 도면으로 변환할 수 있으므로 매우 유용하다. 도면 누락 또한 시공시 Shop Drawing을 도출하는데 영향을 주는 요소이며 이는 공기를 지연시킬 수 있으므로 사전에 철저한 검토가 반드시 필요하다고 판단된다.

2) 지하 지장물과의 간섭 검토를 통한 시공성 개선방안 수립

지하철 공사는 주로 도심지에 시공되기 때문에 시공중 지하 지장물과 구조물의 간섭으로 인하여 공기가 지연되는 현상이 빈번하게 발생한다. 이러한 점을 고려하여 사전에 지하 지장물 현황을 추가로 3D 정보모델에 반영하여 시공구간의 구조물과 간섭이 되는 지장물을 사전에 정확히 파악하였으며 지장물 이설계획 등을 수립하여 공사기간을 극복하고자 노력하고 있다.

지하철 구조물(정거장, 본선 환기구 등)과 지하 지장물(우수 및 오수관로, 차집관로 등)의 상호 간섭 여부를 검토한 결과, 총 10개소에서 구조물 시공시 지하 지장물과 구조물의 상호 간섭이 발생할 것으로 검토되었다([그림 5] 참조). 이러한 결과를 바탕으로 구조물 시공전 협의를 통하여 합리적인 시공 대책을 수립함으로써 공기지연 요소를 사전에 배제할 수 있다.



(a) 외부출입구와 상수관로 (b) 본선 환기구와 우수관로

(c) 본선 환기구 맨홀과 하수관로 (d) 근린생활시설 맨홀과 통신관로

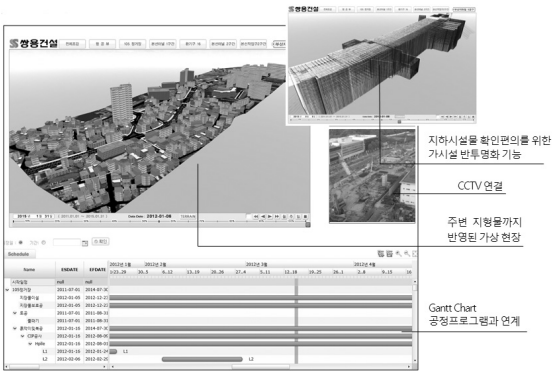
[그림 5] 3D 정보모델을 활용한 지하 지장물과 구조물 간의 간섭 검토

2-4. 웹기반 4D 공정관리시스템

다양한 복합 공종이 진행되는 지하철 공사의 효과적인 공정관리

및 대책마련을 위해 3D 정보모델과 공정데이터를 연계한 4D 시스템을 구축하였다. 4D 시스템은 기존 텍스트 기반의 공정관리에 비해 보다 직관적으로 현황을 이해할 수 있기 때문에, 관련 기술진간에 활발한 커뮤니케이션을 통해 각 공종 간의 간섭문제 해결이나 만회대책 마련에 매우 효과적이다.

4D 공정관리를 지원하는 상용프로그램이 있으나, 사용자수에 따라 고가의 프로그램을 별도로 구매하고 현장의 요구사항을 프로그램에 즉각 반영하기 어려운 단점이 있어 당사에서는 2009년부터 온라인 기반의 통합 4D 시스템을 자체 개발하여 운영중에 있다. [그림 6]은 본 현장에 대하여 구축된 4D 시스템 화면이다.



[그림 6] 웹기반 4D 공정관리 시스템 화면

현장에서 활용중인 공정관리 프로그램과 온라인으로 직접 연계가 되어 있기 때문에, 공정의 변경 및 실적을 입력하면 해당 사항이 시스템에 즉각 반영이 된다. 또한 지하철 현장의 특성을 감안하여 본 구조물 이외에 주변현황까지 반영하여 이해도를 높였으며, 가시설 등을 반투명 처리함으로써 지하구조물 공정 파악이 보다 용이하도록 하였다.

2-5. 가상현실 장비운영 및 아바타 안전관리시스템

서두에서도 언급하였듯이, 본 현장에는 당사에서 개발한 M-CAM(Modified Cellular Arch Method)공법이 터널 일부 구간에 적용되는데, 본 공법의 시공성을 사전에 분석하고자 가상현실을 이용한 장비운영시스템을 구축하였다. 이를 활용하여 CPW(Continuous Pile Wall), 강관다단그라우팅 등을 가상현장에서 시공해 봄으로써 장비의 간섭문제, 강관다단의 시공각도 등을 사전에 검토하여 시공성을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하고 있다.

[그림 7]은 M-CAM 공법으로 터널을 시공할 때 강관다단의 시공범위, 시공각도, 장비의 위치 및 회전반경 등을 시뮬레이션 하는

[그림 7] 가상현실 장비운영을 활용한 터널 시공방안 검토

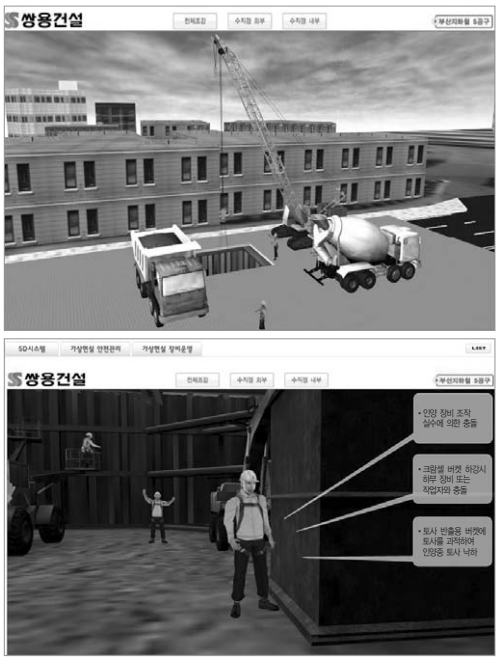
[그림 8] 가상현실 장비운영을 활용한 교통우회계획 수립

장면을 보여주는 것이다.

또한 지상에서 CPW(Continuous Pile Wall) 시공시 항타 장비의 이동에 따른 교통혼잡을 최소화하고 최적의 교통우회계획을 수립하기 위하여 [그림 8]과 같이 가상현장을 활용한 장비운영시스템을 구축하여 활용하고 있다.

그리고 최근 건설분야에서 이슈화되고 있는 건설현장의 안전사고 예방 및 안전활동 의식을 고취하여 무재해 달성 등을 하고자 KOSHA18001을 바탕으로 한 아바타 안전관리 시스템을 시공구간별로 구축함으로써 현장직원들의 안전의식 고취를 통한 중대재해 사전예방에 만전을 기할 수 있도록 하였다.

구축된 웹기반 가상현장 내에서는 자유롭게 이동 및 접근, 관찰이 가능하다는 점을 이용하여 건설 아바타(Avatar)가 주요 구조물 및 장비 등 해당 위치로 접근시 관련 안전관리 항목을 확인할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 특히 터널 작업구는 각종 장비가 밀집되어 있고 공정이 복잡하여 시공시 안전관리가 철저히 요구되는 구간이므로 [그림 9]와 같이 장비운영과 안전관리가 복합적으로 가능한 시스템을 구축하여 적용중이며, 본 시스템에 안전관리 항목을 점진적으로 Database화 하게 된다면 향후 체계적인 안전관리 교육자료로도 활용이 가능할 것으로 판단된다.



[그림 9] 아바타를 활용한 가상현실 안전관리시스템

3. 국외 지하철 현장에서의 BIM 적용

3-1. 공사 개요

싱가포르 도심지하철 2단계 921공구는 DTL Stage 2의 10개 공구중 마지막 구간으로써, 약 1.1km의 단선 병렬 지하철 현장이며 설계와 시공을 동시에 진행하는 실시설계/시공병행(Fast Track) 방식의 공사이다. 당 현장은 로처 정거장(Rochor Station) 및 리틀 인디아 정거장(Little India Station) 2개의 신설 정거장과, 두 정거장을 60m의 NATM 터널(Mined Tunnel) 및 340m의 개착식 터널(Cut & Cover Tunnel)로 연결하고, 로처 정거장에서 DTL1 903공구의 부기스 정거장(Bugis Station)까지 293m의 구간을 TBM 터널(Bored Tunnel)로 연결하는 전형적인 도심지 공사이며, 기존의 부킷 티마 수로(Bukit Timah Canal)를 영구이설하기 위한 박스형 수로구조물을 새로이 시공하고, 신설되는 로처 정거장 상부에 장래 계획중인 6차선의 지하고속도로(Future Underground Infrastructure)중 약 160m를 정거장과 병행 시공해야 하는 복잡한 공사구간이다.

표 3 싱가포르 도심지하철 2단계 C921공구 공사개요

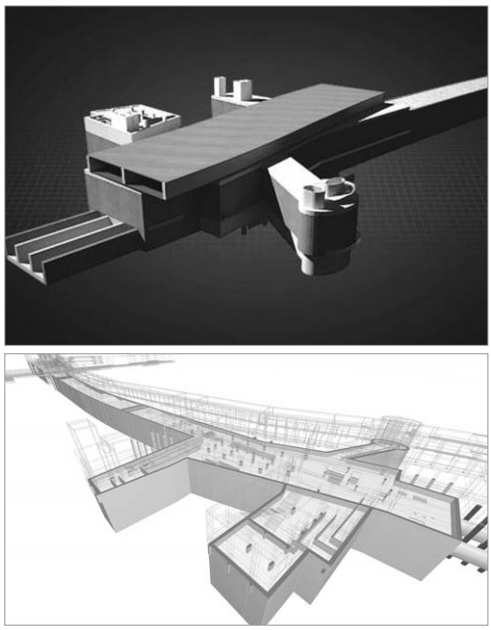
구분	주요내용	
공사기간	2009년 6월 ~ 2016년 3월(81개월)	
공사연장	L = 1,065 m	
공사금액	7,200억 원	
구조물 현황	본선	688.4m(NATM + TBM + Bored Tunnel)
	정거장	323.0m(2개소)
	환기구	53.6m(2개소)

본 공사는 연약지반에 단계별 운하 이설 및 기존 지하철 직하부에 NATM 터널 시공 등 최고 수준의 난공사이며, NATM, TBM 및 Cut & Cover 등 주요 지하철 건설 공법을 모두 적용한 대규모 프로젝트로써 본 현장의 매우 복잡한 공정을 효율적으로 관리하기 위하여 BIM을 적용하였다.

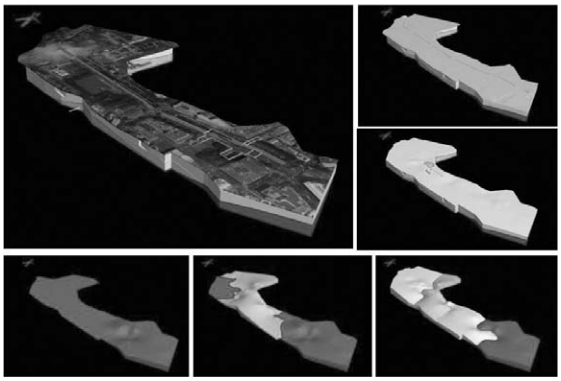
3-2. BIM 적용 현황

1) 3D 정보모델링을 통한 암반별 굴착량 산정

[그림 10]은 로처 정거장의 3D 정보모델을 나타낸 것으로 복잡한 공정을 효율적으로 관리하기 위하여 공정에 따라 정거장을 상세 모델링 하였다. [그림 11]은 Boring Data로 3차원 지반 정보모델을 구축하고 이를 이용하여 암반별 굴착량을 산정한 사례를 보여



[그림 10] 로처 정거장 구간의 3D 정보모델링

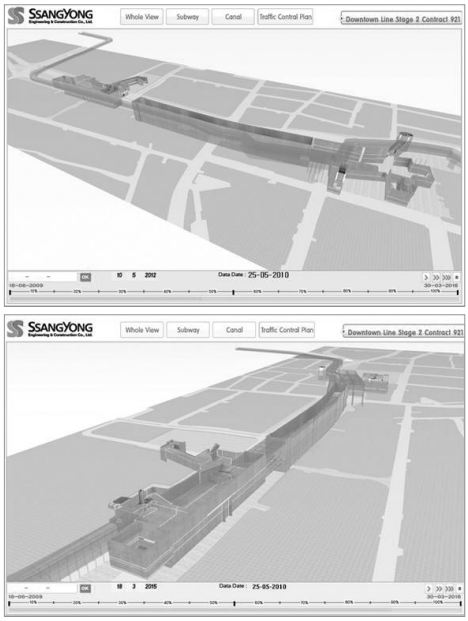


[그림 11] 지반정보모델을 통한 굴착량 산정

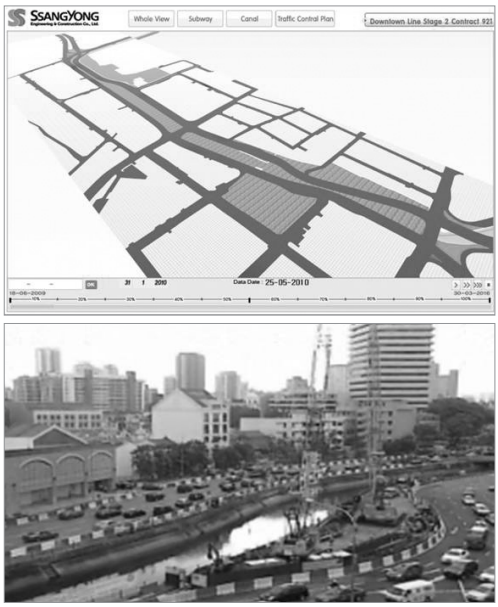
주는 것이며, 이를 통해 개략적인 굴착공사비 산정이 가능하다.

2) 4D 공정관리

앞에서도 언급했듯이, 본 공사는 주요 터널공법을 모두 적용한 난공사로써 특히 단계별 운하 이설(Canal Diversion) 및 그에 따른 교통우회계획(Traffic Diversion Plan) 수립(총 46회)이 철저하게 요구되는 공사이다. [그림 12] 및 [그림 13]과 같이 수로의 단계별 이설 및 교통우회계획 수립을 위하여 3D 정보모델을 활용하고 있으며, 매월 1회 발주처(LTA, Land Transport Authority, 싱가포르 육상교통청)에 BIM 자료를 활용하여 공정 진도 및 향후 계획 등을 보고하고 있다.



[그림 12] 웹기반 4D 공정관리시스템



[그림 13] BIM을 활용한 교통우회계획 수립

[그림 14] BIM을 통한 단계별 수로이설계획 수립

4. 맺음말

본고에서는 당사 국내외 지하철 현장에 적용되고 있는 BIM 현황, 적용결과 및 효과 등에 대하여 소개하였으며, BIM을 적용함으로써 사전 설계오류와 시공시 발생할 문제를 사전에 차단하여 원가절감과 공기단축에 기여할 수 있음에 대해 기술하였다. 2차원 및 텍스트상으로는 찾기 어려운 성과품의 문제점을 사전에 검토한 점, 수량 등의 오류를 찾아내고 보완하여 시공 전 문제점들을 제거했다는 점 등에서 큰 효과가 있었으며, 다양한 공사계획을 보다 손쉽게 수립하고 안전이나 운영면에서 놓칠 수 있는 사항을 검토하고 있다는 점은 현장에 큰 도움이 되고 있다.

또한 IT와 접목한 가상현실을 이용한 장비운영 시스템 및 안전관리 아바타 시스템 등을 구축함으로써, 현장 작업자와 관리자가 사전 시공을 통한 학습의 효과를 야기하므로 추후 본 공사 진행시 원활한 시공이 가능할 수 있을 뿐만 아니라, 장비의 원활한 운용 효과를 기대할 수 있고, 안전관리 계획 및 교육을 통한 사전 안전 마인드를 제고함으로써 현장에서 발생 가능한 안전사고를 사전에 방지할 수도 있다.

현재까지 건설산업은 설계와 시공 사이에서의 애매모호한 경계를 극복하지 못하여 왔다. 이는 2D 설계의 한계이다. 즉 설계자는 2D 도면으로 현장을 이해하고 설계를 하지만 시공자는 2D도면을 근거로 현장에서 구조물을 시공하고 3D화한다. 이러한 설계와 시공의 경계를 극복하고 향후 효율적인 유지관리를 위해서 건설산업 제도화를 기반으로 BIM 기술은 설계, 시공 및 유지관리 영역까지 적용되어야 한다고 생각한다. 또한, 사용자의 특성에 맞도록 설계전문 BIM 인력과 시공 관련 BIM인력의 양성이 선행되어야 할 것이다.

현재 사회적으로 이슈가 되고 있는 BIM을 토목분야에 성공적으로 정착시키기 위해서는 BIM은 단순한 도구가 아니라 체계적인 시스템이며, BIM을 활용한 철저한 공사관리를 수행함으로써 공기단축, 공사비 절감 등을 도모할 수 있다는 점을 널리 고취시키고 신규 적용 아이템들을 추가적으로 개발하는 등 토목분야에서 BIM이 더욱 활성화될 수 있도록 노력해 나가야 할 것이다. 현장 적용성을 고려한 첨단 IT기술과 건설산업의 제도화를 통해 토목분야의 BIM기술이 자리매김을 한다면 향후 건설산업은 새로운 차원의 역사를 기록할 것이라 기대해 본다.