

## 지열발전 시추프로젝트의 4D 정보화기반 통합관리 시스템 개발

이승수, 김광염\*, 신휴성

## Development of a 4D Information based Integrated Management System for Geothermal Power Plant Drilling Project

Seung Soo Lee, Kwang Yeom Kim\*, Hyu-Soung Shin

**Abstract** Deep drilling project should be managed systematically and efficiently because it is significantly influenced by various related factors having uncertainty and high risk in terms of economy and effective management. In particular, drilling project involves participants from various sectors including necessary service company and it also needs their collaboration by sharing related information occurring at drilling process in order to secure efficient performance management. We developed 4D (3D + time) information based visualization system for progress management by combining 3D design model and predicted optimized control parameters for each section in geothermal well design. We also applied PDM (precedence diagramming method) to the system in order to setup the effective process model and hooked it up to 3D information based on precedence relation and required time for informatized process network.

**Key words** Geothermal, Drilling, 4D visualization, Precedence diagramming method

**초 록** 대심도 시추공사는 불확실성을 가진 공사영향요소가 많고, 시공리스크가 크며, 공사성능관리의 효율화에 부에 따라 프로젝트의 경제성에 큰 영향을 미치기 때문에 체계적이고 효과적인 관리가 수행되어야 한다. 특히, 시추공사는 수많은 참여주체가 협업하여 진행되기 때문에, 실시간으로 발생하는 모든 시추정보는 원활하게 공유되어야 효율적인 성능관리가 수행될 수 있다. 본 연구에서는 지열정 설계정보를 활용하여 3차원 설계모델을 작성하였다. 또한, 지열정의 각 구간별로 최적화 설계된 성능제어변수 및 공기에 대한 성능정보의 예측결과를 3차원 모델과 연계하여 4D(3D+time)기반 진도 시각화시스템을 구축하였다. 공정간 선후행 관계 및 각 소요공기를 바탕으로 효과적인 공정 모델을 구축하기 위하여 선후행도형법을 활용하여 정보화 공정네트워크를 작성할 수 있는 모듈을 개발하여 3차원 정보와의 연계효율성을 고려하였다.

**핵심어** 지열, 시추, 4D 시각화, 선후행도형법

## 1. 서 론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

석유나 가스 등의 전통적인 자원산업 분야뿐만 아니라,

지열발전, 세일가스개발, 이산화탄소 지중저장 등의 최근 이슈가 되고 있는 산업분야에서 대심도 시추는 사업의 성공을 위해 매우 중요한 공정이다. 특히, 최근 EGS(enhanced geothermal system)방식의 비화산 지대에서도 적용할 수 있는 지열발전기술이 보급되면서 고온의 지하의 열에너지를 획득하기 위해서 3km가 넘는 대심도 시추공사의 중요성은 더욱 커지고 있다(Yoon et al., 2011). 대심도 시추는 불확실성을 가진 공사영향요소가 많고, 시공리스크가 크며, 공사성능관리의 효율화 여부에 따라 프로젝트의 경제성에 큰 영향을 미치기 때문에 체계적이고 효과적인 관리가 수행되어야 한다.

대심도 시추공사의 특징을 살펴보면, 리그매니저, 장

Received: Jun. 19, 2014

Revised: Jun. 24, 2014

Accepted: Jun. 26, 2014

\*Corresponding Author: Kwang Yeom Kim

Tel) +82319100225, Fax) +82319100235

E-Mail) kimky@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,  
Daehwa-dong 283, Goyangdae-Ro, ilsanseo-Gu, Goyang-Si,  
Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

비운영자, 데릭핸드(derrickhand), 시추 이수관리자, 플루어핸드(floorhands) 등 다수의 기술자가 참여하게 된다. 다양한 서비스 업체의 협업을 통한 정보의 원활한 공유도 필수적이다. 드릴리그(drill rig)라는 기계장비 의존적인 특징을 가지고 있기 때문에 최적화 제어를 위한 로깅정보, 지열정 설계정보 및 환경정보가 실시간으로 제공되어야 효율적인 프로젝트 관리가 수행될 수 있다. 그러나 시추공사는 지하에서 진행되는 공사내용이 육안으로 확인이 되지 않고, 공사의 수행목표인 설계정보, 공정정보 등도 시공내용과 비교하면서 관리하기가 매우 어렵다.

최근 건설 산업에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 3차원 정보화 설계를 수행하여 갈수록 광역화, 고층화되고 있는 시설물의 시공관리에 응용하고 있다. 대표적인 예가 4D 정보화기반 통합관리 시스템이다. 4D 시스템은 3차원 설계정보와 계획 및 수행된 공정정보를 연계시켜 진도관리를 수행할 수 있는 시스템이며, 기타 공사소요정보를 모델링하여 통합 정보화 관리시스템으로 발전하고 있다. 대표적으로 토공, 도로포장 등과 같은 수평적, 자연적 지형조건으로 구성되는 토목시설물 공사에 대해서 시각화된 정보의 표현은 효율적인 시공관리를 위하여 매우 활발히 적용되고 있다(Kang & Jee, 2006). 현재 제공되고 있는 4D 시스템은 ProProcess(DDRsoft, 2005) 등의 국내기관에서 유사 시스템 개발을 시도하였고, 상용화된 소프트웨어로는 대표적으로 Autodesk사의 Navisworks(Autodesk, 2014)와 Bentley사의 ConstructSim V8(Bentley, 2014)이 있다.

그러나 대심도 시추공사의 경우 지하공간에서 공사가 진행되고, 일반 토목공사와 같이 부재중심의 빌드업(build-up) 방식의 시공 진도시각화가 이루어지지 않는다. 지하의 암반을 제거하는 방식인 컷오프(cut-off) 개념의 공사가 수행된다. 따라서 3차원 설계방식을 부재 및 공간단위로 객체화하여 배치를 통해 설계를 수행하는 3D 객체기반설계 방식이 아닌, 설계기준선인 구간별 선형을 배치하고 각 구간별 표준횡단면을 정의하여 연장함으로써 표면 모델(surface model)을 생성하여 설계하는 3D 선형기반설계(3D alignment-based design)를 적용하여야 한다(Lee et al., 2014). 또한, 이러한 3차원 설계모델이 설계된 공정정보와 연계되어 4D 정보시각화를 구현하기 위해서는 기존 설계부재의 시공순서가 아닌 굴착 깊이단위로 진도가 시각화 될 수 있도록 시스템이 개발되어야 한다. 마지막으로 시스템의 활용성을 극대화하기 위하여 3차원 설계모델의 각 구간별 최적화된 시공제어변수 및 지반환경정보를 정보화할 수 있도록 하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 지열발전프로젝트의 대심도 시추공사를 위한 4D 정보화기반 통합관리 시스템을 구축

하기 위하여 선형기반설계기법을 활용하여 3차원 설계 모델을 구축하였다. 또한, Lee et al. (2013)이 제안한 지열정의 각 구간별 성능제어변수의 최적화설계 및 공정예측정보를 산출할 수 있는 TOSA(trip occurrence simulation algorithm)알고리즘을 활용함으로써, 산출될 수 있는 공정정보를 통해 공정네트워크모델을 작성하여 각 공정요소의 선후행관계와 소요공기를 정보화하였다. 마지막으로 3차원 지열정 설계모델과 공정네트워크 모델을 연계한 4D 시스템을 구축하기 위하여 지열정의 구간별 설계객체 코드에 따른 종속된 공정요소 코드를 생성하였다. 각 공정코드별 공기를 고려하여 시각화 시뮬레이션이 수행되도록 하였으며, 구간별 설계된 최적화 성능제어변수와 지반정보를 확인 할 수 있도록 정보를 모델링 하였다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 지열정 시추공사에 적용할 수 있는 4D 진도관리 시스템을 개발하기 위하여 3차원 지열정 설계모델과 PDM(precedence diagramming method)기반 공정관리 모듈을 개발하고, 이를 통합하여 4D 진도시각화 및 정보화를 수행하는 통합관리 시스템을 개발하는데 목적이 있다.

Fig. 1은 본 연구의 세부적인 연구수행 체계 및 방법에 대한 내용이다.

3차원 지열정 설계 모듈(3D well design module)은 3D 선형기반설계기법을 응용하여 지반정보, 지열정 설계단위를 고려하여 정보화단위 구간을 분할하고 각 구간별로 설계기준선이 3차원 공간상에 배치될 수 있도록 시작점(kick-off point)과 끝점(target point)을 기준으로 하는 직선이 생성될 수 있도록 하였다. 그리고 각 구간별 시작점을 기준으로 설계 표준단면정보가 생성되도록 하였는데, 지열정의 설계객체로서 지반(시추공의 직경

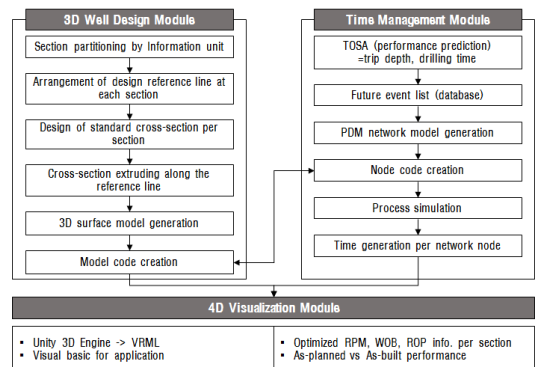


Fig. 1. Research strategy diagram

고려)과 케이싱정보가 반영되도록 하였다. 이후 각 구간별 배치된 표준단면이 설계기준선을 따라 연장시켜 3차원 표면모델이 생성되도록 하였으며, 각 생성된 모델객체별로 고유인식코드가 자동으로 생성되도록 하였다.

공정관리모듈은 TOSA알고리즘을 활용하여 각 정보화 단위 구간별 최적화된 WOB(weight on bit), RPM 및 예측 ROP(rate of penetration)와 시추공정의 순서 및 소요공기를 산출하였다. 그리고 시추공정에 따른 각 공정노드를 생성하여 선행관계의 정의를 통해 공정네트워크모델을 생성할 수 있는 PDM기법을 적용하여 정보모델을 생성하였다. 특히, 생성된 정보모델이 더욱 구체화되어 생성될 수 있도록 시추공정을 구성하는 드릴링, 케이싱, 시멘팅 및 라운드트립이 시추과정에서 반복적으로 연속적으로 동일하게 수행되는 점을 고려하여 4개의 공정을 세분화하였다. 세분화된 공정들의 선행관계를 정의하여 저장한 FEL(future event list)이 하위레벨로 구성될 수 있도록 하였다. 각 생성된 공정네트워크모델의 노드코드를 3차원 지열정 설계정보의 정보화단위 구간코드를 고려하여 종속될 수 있도록 생성하여 향후 4D 정보시각화를 위한 연계를 고려하였으며, 각 노드별 소요공기와 총 소요공기를 시뮬레이팅 되도록 하였다.

마지막으로 3차원 지열정 설계 객체들과 공정관리 모듈을 통해 생성된 각 노드별 코드가 연계되어 진도가 시각화 될 수 있도록 하기 위하여 각 노드가 수행되는 시작점과 끝점정보, 그리고 공기를 통해 해당 3차원 설계객체의 시각화 범위 및 이동 속도를 산정하여 진도가 현실적으로 시각화될 수 있도록 하였다. 특히 진도시각화 과정에서 사용자가 최적화된 운영제어변수 및 설계성능을 확인할 수 있도록 구간별 정보화하고 사용자 인터페이스를 개발하였다. 3차원 지열정 설계모듈은 Unity 3D graphic engine을 활용하여 모델링하였으며 이를 VRML(virtual reality modeling language)로 변환하여 설계모델의 운용을 가변게 하였다. 모든 모듈의 개발은 마이크로소프트사의 VBA(visual basic for application)를 통해 개발하였다.

## 2. 3차원 지열정 설계모듈 개발

지열정 설계모듈은 도로나 터널들의 설계에 활용되는 3D 선형기반설계기법을 활용하였다. 선형기반 설계는 구간별로 설계기준선의 배치와 표준단면을 작성하여 단면을 해당 구간의 설계기준선을 따라 연장하여 3D 서피스 모델을 획득하는 방법이다. 지열정의 설계는 conductor hole, surface hole, intermediate hole, production hole로 구분(Hossein, 2005)하여 수행된다. 정보화 단

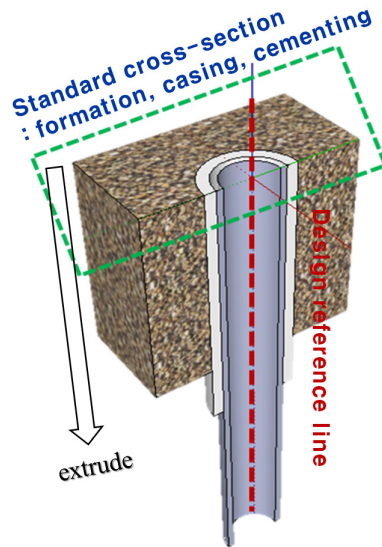
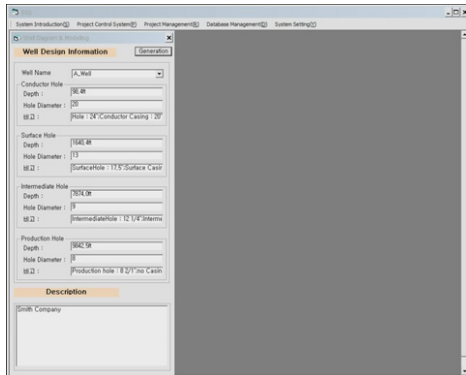


Fig. 2. 3D alignment based design method for geothermal well

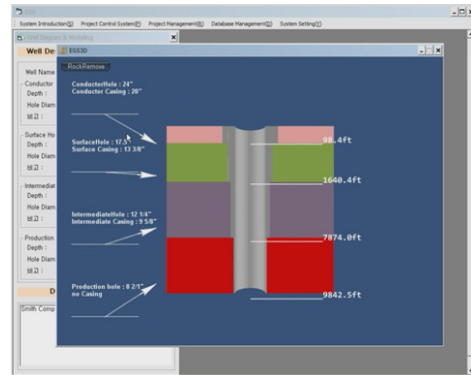
위를 분할하기 위하여 설계구간정보와 설계를 위해 사전 조사된 지반정보를 활용하여 각 구간을 분할되도록 하였다. Fig. 2는 3D 선형기반설계기법을 활용하여 지열정을 설계하는 방법에 대한 내용이다.

각 구간별 표준단면을 구성하는 설계객체는 지열정의 직경정보를 포함한 지반모델, 케이싱 파이프, 케이싱의 벽과 시추공 내벽사이를 구성하는 시멘트이다. 단면설계는 각 구간별 설계기준라인의 시작점을 기준하여 설계기준선의 수직된 면상에 설계가 수행되도록 하였다. 모듈개발과정에서 지열정의 설계가 폭 대비 길이가 매우 길어 케이싱라인이 잘 보이지 않는 가시적인 문제점이 발생하여 설계 전 케이싱파이프의 스케일을 조절할 수 있는 옵션기능을 부여하였다. 그리고 설계된 3차원 모델과 함께 사용자가 필요로 하는 각 구간의 깊이, 폭, 케이싱 제원, 시멘트 정보 등을 텍스트 정보로서 제공할 수 있도록 구간별로 소요 텍스트 정보가 동기화 될 수 있도록 하였다.

개발에 활용된 응용소프트웨어로는 Unity 3D Engine을 적용하였는데, 이는 3D 비디오 게임이나 건축/토목 구조물의 시각화, 실시간 3D 애니메이션, 콘텐츠 등을 만드는데 쓰이는 통합 에디터 툴로 다양한 어플리케이션을 제공하는 프로그램이다. 특히, 멀티 플랫폼을 지원하고 있어 윈도우 개발환경에서 제작하였더라도 플랫폼만 변경하면 스마트폰에서도 구현이 가능하다는 장점을 가지고 있다. Fig. 3은 3차원 지열정 설계모듈의 개발내용이며, (a)는 사용자가 지열정의 설계내용을 입



(a) design information input interface



(b) 3D surface model generation

Fig. 3. 3D well design module

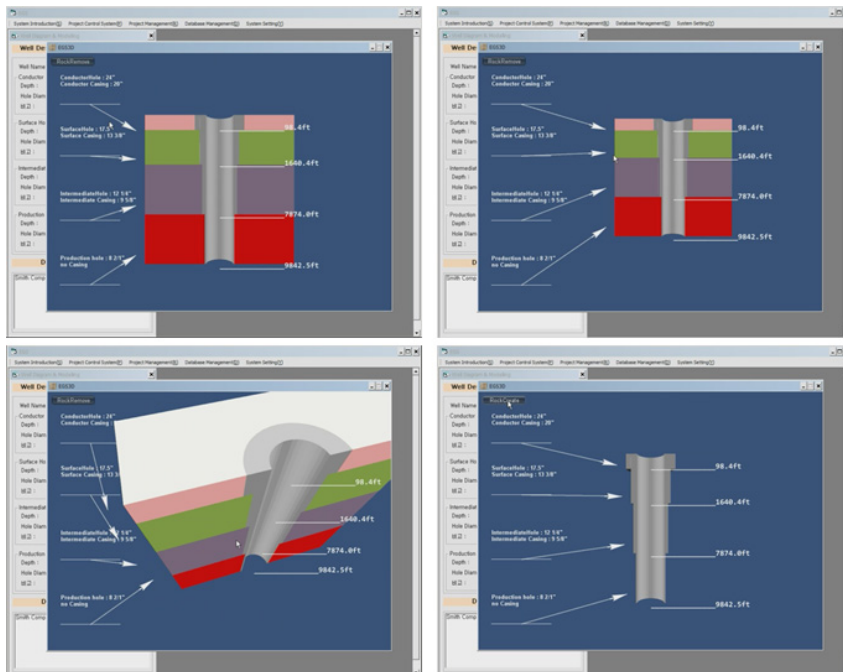


Fig. 4. 3D well model visualization

력하는 사용자 인터페이스이고 (b)는 입력변수의 정의를 통해 3차원 지열정 모델이 생성된 화면이다.

지열정의 설계정보를 입력하는 화면은 지열정의 설계 구간별로 구성되어 있으며, 지열정의 명칭, 깊이, 폭, 케이싱, 시멘팅, 지반 형성층 등의 정보를 입력하게 되어 있다. 지열정의 설계정보를 입력하고 출력버튼을 누르면 Fig. 3(b)와 같이 3차원으로 설계된 지열정 서피스 모델이 생성된다. 지반 형성층의 정보를 시각화하기 위하여 물성에 따라 색상화 될 수 있도록 기능을 부여하였

으며, 사용자가 화면상에서 각 구간의 상세 정보를 확인할 수 있도록 구간별 깊이, 케이싱 제원, 폭 등에 대한 정보를 동기화 하였다.

이 밖에 3차원 모델의 특성을 살려 사용자가 모델을 유연하게 다룰 수 있는 기능을 추가 하였는데, 각각의 개체별로 분리 및 통합하여 시각화 할 수 있도록 하였다. 또한 사용자가 원하는 각도에서 지열정 설계내용을 확인할 수 있도록 마우스를 드래그하여 시점을 자유롭게 변화 시킬 수 있다(Fig. 4).

### 3. PDM기반 공정관리모듈 개발

PDM은 일명 AON(activity on node)으로 불리며 Fig. 5와 같이 박스형태의 각 노드가 공정요소 개체를 의미하고 각 노드는 공기(time)에 대한 속성정보를 가지게 된다. 각 공정개체는 SS(Start to Start), FS(Finish to Start), FF(Finish to Finish), SF(Start to Finish)의 네 가지 연결방식에 의하여 선/후행관계를 표시하게 된다(John & Brian, 2005). SS는 전 단계 공정이 시작하고 얼마 후면 다음 공정이 시작하는 관계, FS는 전 단계 공정이 끝나고 얼마 후면 다음 공정이 시작하는 관계, FF는 전 단계 공정이 끝나고 얼마 후면 다음 공정이 끝나는 관계, SF는 전 단계 공정이 시작하고 얼마 후면 다음 공정이 끝나는 관계로서 매우 유연한 관계의 공정 네트워크를 작성할 수 있다.

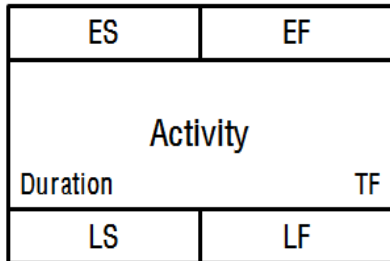
PDM의 공정네트워크를 구성하는 각 노드개체(node entity)는 속성정보로서 해당 공정의 인식코드 및 소요시간(time)을 가지며, 지열정 시추공사를 구성하는 공정은 크게 드릴링(순수굴착시간, 케이싱, 시멘팅, 라운드트립(round trip; 드릴스트링 인입/인발)으로 구성된다. 드릴링과 라운드트립에 대한 소요시간은 TOSA알고리즘을 통해 산출할 수 있다. TOSA알고리즘은 Bourgoyne and Young(1974) 모델을 활용하여 각 구간별 최적화 설계된 WOB, RPM 및 ROP를 산출할 수 있으며, 구간별 비트마모시나리오를 작성하여 시뮬레이션을 통해 라운드트립의 발생지점과 소요시간을 산출할 수 있다. 따라서 TOSA알고리즘을 통해 각 구간별 드릴링과 라운드 트립 공정의 선후행 관계 및 각 공정별 소요시간이 결정된다. 케이싱과 시멘팅 공정은 지열정 설계 구간(conductor hole, surface hole, intermediate hole, production hole)이 변하는 지점에서 수행되므로 이를 인식하여 주요 공정간 모든 선후행 관계가 작성될 수 있다. 그러나 현재 케이싱이나 시멘팅에 대한 소요시간을 산출할 수 있는 연구가 진행되어 있지 않은 관계로

케이싱 및 시멘팅의 예상 소요시간은 전문가의 판단에 따라 설계 및 입력하도록 하였다.

PDM 네트워크의 임계경로(critical path)를 구성하는 드릴링, 케이싱, 시멘팅, 라운드 트립 공정은 하위 세부 공정요소를 대표할 수 있는 것으로써 공정관리시 더욱 세분화된 네트워크정보가 요구 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 4개의 주요공정을 하위 세부공정요소로 분할하여 자동으로 작성될 수 있도록, 실제 현장에서 세부공정요소의 작업절차의 규칙성과 연속성을 정의하여 규약된 네트워크 데이터베이스인 FEL를 개발하였으며, Table 1의 내용과 같다.

Table 1의 내용을 살펴보면 4개의 대표 공정요소를 기준으로 각 요소별 세부공정요소(Level 2) 및 코드를 작성하고, 세부공정요소 간 작업이 수행되는 선후행 관계를 저장하였다. 사용자는 대표 공정요소의 네트워크 모델을 통해 시추공사의 소요 공기를 관리할 수 있으며, FEL을 통해 구체화된 공정네트워크 모델을 획득하여 구체적인 일정관리, 자원관리 등을 효율적으로 수행할 수 있을 것이다. 또한 각 노드의 속성별로 비용정보를 계산할 수 있다면, 일정과 비용을 통합하여 보다 경제적인 프로젝트를 수행할 수 있을 것이다.

Fig. 6은 PDM 기법을 바탕으로 공정관리를 위하여 개발한 모듈에 대한 내용이다. PDM 네트워크의 경우 공정정보를 각 요소별로 정보화하기는 간편하나 관리자 입장에서는 확인하기가 불편할 수 있으므로, PDM 네트워크 정보를 건설현장에서 공정관리시 활용하는 간트차트(Gantt chart)형식으로 변환될 수 있도록 모듈을 개발하였다. 각 PDM을 구성하는 노드를 클릭하면 해당 노드별로 속성정보(공기, code, 공사시작/완공 날짜 등)를 확인할 수 있다. 텍스트 공정관리 창을 구성하여 사용자가 공정계획을 변경할 경우, 공정 객체의 명칭, 작업일수, 여유시간 등을 확인하거나 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 각 공정개체마다 실제 현장의 진행 사항, 공기, 일정 등을 입력하여 실제 현장의 운영정보를 동시

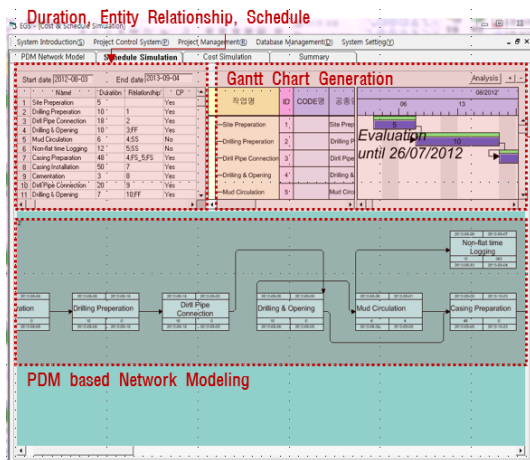


- Activity: activity name
- Duration: the time required of activity
- ES: Earliest start time
- EF: Earliest finish time
- LS: Latest start time
- LF: Latest finish time
- TF: Total float

Fig. 5. Composition of activity node

**Table 1.** Future event list database

No	Activity			Mandatory Relationship			
	Level 1	Code	Level 2	Precedence Activity	Relationship	Follow Activity	Relationship
1	Drilling	WC_D_DR_013	Drilling Preparation	-	F-S	BHA Handling	S-F
		WC_D_DR_014	BHA Handling	Drilling Preparation	S-F	Bit Rotation	F-S
		WC_D_DR_015	Bit Rotation	BHA Handling	F-S	Drill pipe Supplement	S-F
		WC_D_DR_017	Drill pipe Supplement	Bit Rotation	S-F	-	F-S
2	Round Trip	WC_D_RT_024	Break-out Drill String	-	F-S	Trip Out	S-F
		WC_D_RT_025	Trip Out	Break-out Drill String	S-F	Drilling Preparation	F-S
		WC_D_DR_013	Drilling Preparation	Trip Out	F-S	BHA Handling	S-F
		WC_D_DR_014	BHA Handling	Drilling Preparation	S-F	Make-up Drill String	F-S
		WC_D_RT_026	Make-up Drill String	BHA Handling	F-S	Trip In	S-F
		WC_D_RT_027	Trip In	Make-up Drill String	S-F	-	F-S
		WC_D_DR_016	Reaming	Break-out Drill String	S-S	Trip In	F-F
3	Casing	WC_D_CA_018	Casing Preparation	-	F-S	Casing Running	F-S
		WC_D_CA_019	Casing Running	Casing Preparation	F-S	Wellhead Operation	F-S
		WC_D_CA_020	Wellhead Operation	Casing Running	F-S	-	F-S
4	Cementing	WC_D_CE_021	Cementing Preparation	-	F-S	Cement Pumping	F-S
		WC_D_CE_022	Cement Pumping	Cementing Preparation	F-S	Curing	F-S
		WC_D_CE_023	Curing	Cement Pumping	F-S	-	F-S



**Fig. 6.** PDM based process management module

에 관리할 수 있도록 인터페이스를 구성하였다.

#### 4. 4D 정보화 기반 통합 시각화 관리 시스템 개발

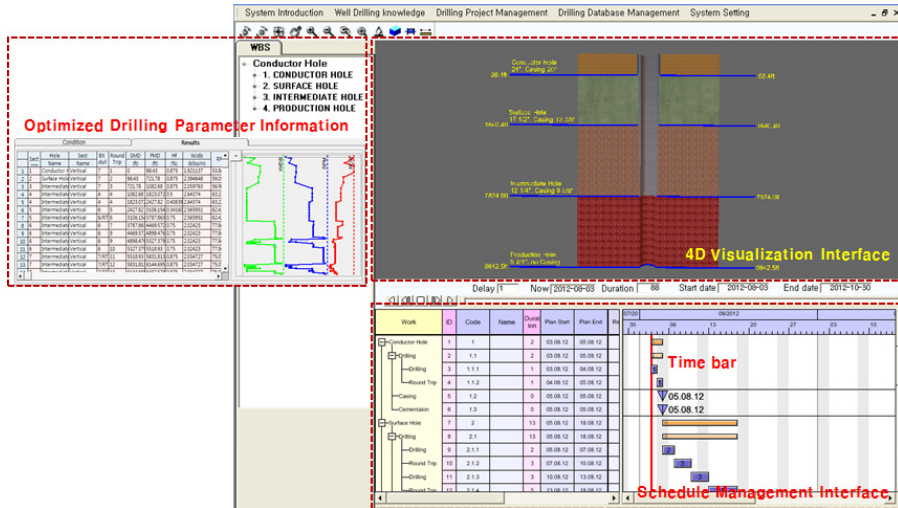
4D 진도시각화란, 3차원 모델에 시간적 속성정보를 연동함으로써 시간의 흐름에 따른 3차원 모델의 행태를 묘사하는 것으로서, 대표적으로 건설 분야에서는 BIM (Building Information Modeling) 기술이 4D로 많이 활용되고 있다. 4D를 기반으로 진도를 시각화하면 생성 정보에 대한 이해가 쉽고 각 참여주체별로 협업을 유도하기가 수월하며, 나아가 객체나 공중간의 간섭 및 충돌, 설계오류사항 등을 사전에 발견할 수 있다. 또한, 본 시스템에서 4D를 적용한 가장 큰 목적으로서 현장에서 눈으로 식별할 수 없는 공정진행 상황을 가상현실 기반 그래픽 기술로 확인함으로써 시행착오가 없는 공

정관리를 수행할 수 있다는 장점이 있다(Hijazi et al., 2009).

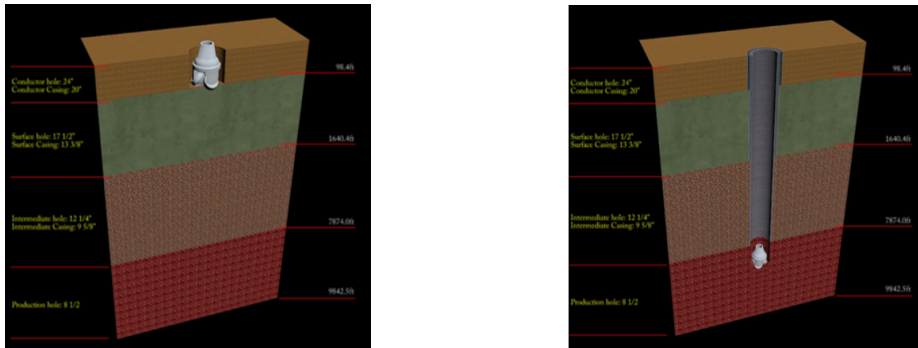
3차원 지열정 설계모델과 PDM 기반 공정관리 모델을 통해 작성된 정보를 통합 연계하여 4D 진도 시각화를 구현하기 위해서는 3차원 설계객체와 공정 네트워크를 구성하는 각 노드정보가 연계되어야 한다. 본 연구에서는 이들 요소가 자동으로 연계되기 위하여 3차원 설계 모델이 정보화 단위로 구분되어 설계된 점을 고려하여 공정 노드의 ID를 정보화 단위에 종속되도록 부여되게 하였다. 예를 들어 해당 구간의 설계코드가 Ixx로 인식되었다면, 해당 구간을 TOSA 알고리즘을 적용하여 각 공정이 생성되어 네트워크화 될 때 Ixx\_Drilling\_01 (구간명\_공정명\_순서) 형식으로 부여될 수 있도록 하였다. 그리고 시각화 과정에서 현실감을 증대하기 위하여 특수 동적효과를 발휘할 수 있는 그래픽 라이브러리를

연동하여 공정정보 및 발생위치정보와 동기화하는 연구를 진행하였다. 특히, 케이싱, 시멘팅의 경우 3차원 설계객체를 공간상에 공정순서와 시간에 맞게 동기화하면 되지만, 드릴링과 라운드 트립의 경우는 시각화될 수 있는 설계객체가 없기 때문에 시추비트 객체 라이브러리를 활용하여 발생 위치점과 시간을 동기화하였다. 비트의 해당 구간내 공정이 수행되는 시간이 실제 시각화 시뮬레이션 시간과 일치시키기 위하여 3차원 공간상 비트가 이동하는 거리를 공기로 나누어 시간 혹은 일단위로 일정 속도로 효과가 발생할 수 있도록 하였다. 또한 3차원 설계 구간별 최적화 설계된 장비운영 제어변수인 WOB, RPM과 성능변수인 ROP, 그리고 지반정보를 정보화하여 사용자가 프로젝트 관리 시 활용할 수 있도록 하였다.

Fig. 7은 4D 정보화기반 통합 시각화 관리시스템의



(a) 4D progress visualization & Informationization interface



(b) Progress visualization effect

Fig. 7. 4D Information based Integrated Management System

개발에 대한 내용이며, 진도 관리시 사용자가 공정의 순차 및 공기에 대한 정보를 쉽게 전달받을 수 있게 하기 위하여 간트 차트와 연동되게 하여 인터페이스를 구성하였다. 또한 Time Line 바는 현재 진도의 진척상황을 명확히 구분해주기 때문에 바를 기준으로 일정관리 결과에 대하여 적절한 대응을 수행할 수 있다. 그리고 팝업 인터페이스를 구성하여 TOSA 알고리즘을 통해 산출된 구간 및 심도별 최적화 장비제어변수를 확인할 수 있도록 하였다. Fig. 7(b)와 같이 드릴링과 라운드트립 공정의 상태를 쉽게 파악할 수 있도록 비트 설계객체를 활용하여 실제 굴착된 위치에 동기화 하였으며, 3차원 공간상에 심도, 설계정보 및 지반정보를 설명하는 텍스트를 위치하게 하여 정보 확인이 용이하도록 하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 프로젝트의 관리를 가시적으로 수행할 수 있는 4D 정보화기반 통합 시각화 관리 시스템을 개발하였다. 3D 선형기반설계기법을 활용하여 정보화 단위구간별 3D 서피스 모델을 자동으로 생성할 수 있는 3차원 지열정 설계모듈을 개발하였으며, 공정관리에 필요한 정보의 네트워크 모델을 유연하게 생성할 수 있도록 PDM 기법을 적용하였다. 각 3차원 설계모델과 공정 노드의 자동화 코드연계 및 시각화 방법을 활용하여 사용자가 간편하게 현재의 진도상태 혹은 설계내용을 파악할 수 있도록 하고, PDM 네트워크 모델을 간트차트화 하여 사용자에게 제공함으로써 효율적인 진도관리가 수행될 수 있도록 하였다. 마지막으로 진도관리과정에서 엔지니어에게 TOSA 알고리즘을 통해 산출된 구간 및 심도별 최적화된 장비제어변수를 정보화하여 제공함으로써, 시추성능의 향상, 리스크의 발생저감을 도모할 수 있도록 하였다.

본 연구는 지열정 시추공사 이외에도 최근 이슈가 되고 있는 셰일가스개발, 이산화탄소저장 사업 및 전통적인 대심도 시추사업에 적용될 수 있다. 다양한 참여주체 및 엔지니어가 관여하는 시추공사과정에서 정보의 원활한 공유를 통한 협업체제를 구축하고, 실시간으로 발주자의 기대공기에 부응할 수 있는 정보를 확인할 수 있게 함으로써 시추프로젝트의 효율화에 기여할 수 있을 것이다. 단, 향후 현장 적용을 통해 보완이

되거나 추가되어야 할 정보를 고려하여 업데이트가 지속되어야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국에너지기술연구원 지식경제 기술혁신 사업에 의하여 지원되었음(과제번호: 20123010110010).

## References

1. Autodesk, 2014, NAVISWORKS, <http://www.autodesk.co.kr/products/autodesk-navisworks-family/overview>
2. Bentley, 2014, ConstructSim V8i, <http://www.bentley.com/ko-KR>.
3. Bourgoyne, A.T. and Young, F.S., A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection, Society of Petroleum Engineers Journal 4238, August, pp. 371-384.
4. DDRsoft, 2005, 4D Progress management system, <http://www.ddrsoft.co.kr>.
5. Hijazi, W., Alkass, S. and Zayed T., 2009, Constructability Assessment Using BIM/4D CAD Simulation Model, AACE International Transactions, AACE, Morgantown WV.
6. Hossein, H.P., 2005, High-Temperature Geothermal Well Design, The United Nations University, <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-report/UNU-GTP-2005-09.pdf>.
7. John, C.H. and Brian, P.M., 2005, An Introduction to the Management Principles of Scheduling VirginiaTech, [http://www.virginiadot.org/business/resources/const/0504\\_ManagementPrinciplesofScheduling.pdf](http://www.virginiadot.org/business/resources/const/0504_ManagementPrinciplesofScheduling.pdf).
8. Kang, L.S. and Jee, S.B., 2006, Development of 4D System based on New Methodology for Visualizing Construction Schedule Data for Civil Engineering Projects, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, vol. 26(1D), pp. 95-103.
9. Lee, S.S., Lee, M.J., Jeong, J.Y. and Seo, J.W., 2014, Design of Flexible BIM System for Alignment-based Facility, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 34(2), pp. 677-685.
10. Lee, S.S., Kim, K.Y. and Shin, H.S., 2013, Development of Round Trip Occurrence Simulator Considering Tooth Wear of Drill Bit, Tunnel & Underground Space, 23(6), pp. 480-492.
11. Yoon, W.S. et al., 2011, Research Background and Plan of Enhanced Geothermal System Project for MW Power Generation in Korea, Tunnel & Underground Space, 21(1), pp. 11-19.





### 이 승 수

2006년 경희대학교 공과대학 토목공학과 공학사  
2009년 한양대학교 공과대학 토목공학과 공학석사

Tel: 031-995-0824

E-mail: sslee@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 석사후연구원



### 김 광 염

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사  
2007년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사

Tel: 031-910-0225

E-mail: kimky@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원



### 신 휴 성

1994년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1996년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학석사  
2001년 영국 Univ. of Wales Swansea 토목공학과 공학박사

Tel: 031-910-0651

E-mail: hyushin@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원