

지하광산갱도의 물리모형 구현을 위한 3D프린팅 기술 적용사례

윤동호, Sayedalireza Fereshtenejad, 송재준*

Introduction of 3D Printing Technique applied for producing
Physical Models of Underground Mine Openings

Dong-Ho Yoon, Sayedalireza Fereshtenejad, Jae-Joon Song*

Abstract Physical models of underground mines are very useful to the design of mine openings and the management of work progress of mining companies as well as to consulting. Even though 3D image realization techniques for mine openings have already been developed by various companies the physical models are still widely used because they can provide better understanding without sophisticated equipments for the most of people. Conventional materials for the physical models are paper and acryl which demand a lot of time and labor to make the model even with low precision and high cost. In this research, 3D printing technique is adopted to develop the physical model with relatively short time, low cost, and proper degree of precision. Finally the computer software 「UMine2STL」 was developed and verified by comparing the printed product with its design.

Key words Underground mine, Openings, Physical modeling, 3D printing, UMine2STL

초 록 지하광산 물리모형은 그 시각적인 효과로 인해 광산 개발 및 컨설팅 과정에서 광산공동 설계 또는 공정관리 등의 효율성을 제고하는 데 매우 유용하다. 다양한 기업에서 갱내를 3차원 영상으로 구현하는 기술이 개발된 바 있지만, 현재까지도 갱도 전체를 가시적으로 파악하기 쉬운 물리모형이 널리 이용되고 있다. 기존의 물리모형 제작 방법은 종이나 아크릴 등의 재료를 이용하여 수작업으로 모형을 제작하므로 정밀도가 떨어지고 소요시간 및 비용이 매우 큰 단점이 있다. 따라서, 이 연구에서는 최근 각 분야에서 널리 활용되고 있는 3D프린팅 기술을 적용하여 지하광산 갱도의 물리모형을 저비용으로 정밀하고 신속하게 제작하는 기법을 개발하였으며, 최종적으로, 소프트웨어 「UMine2STL」을 개발하고 광산 갱도 일부를 출력하여 그 활용성을 검증하였다.

핵심어 지하광산, 광산갱도, 물리모형, 3D 프린팅, UMine2STL

1. 서 론

광산 물리모형은 그 시각적 효과로 인해 광산 개발 현장 및 컨설팅 기업 등 광업 분야에서 광산공동 설계나 공정관리 등의 효율성을 제고하기 위한 수단으로 활용되고 있다. 여러 연구에 의해 갱내를 3차원 영상으로 구현하는 기술이 이미 개발되어 상용화된 바가 있으나,

이보다는 갱도 전체를 가시적으로 파악하기 쉬운 물리모형이 현재까지도 널리 활용되고 있다(Caumon et al., 2009, Huber and Vandapel, 2003, Naemura et al., 2002). 현재까지 종이나 아크릴 등을 주재료로 하는 물리모형 제작기법이 통상적으로 이용되고 있으나 비용에 비해 결과물의 정밀도가 대체로 미흡한 실정이다. 다양한 재료를 적용하여 정밀도를 다소 향상시킬 수는 있지만, 여전히 전문 인력의 수작업을 요구하므로 소요시간 및 비용이 큰 단점이 있다.

이와 같은 문제를 개선하기 위해 본 연구에서는 3D 프린팅 기법을 도입하고자 하였다. 3D 프린팅 기법은 컴퓨터 기반의 환경에서 생성된 입체형상의 모델을 다양한 재료와 메커니즘을 이용해 실체를 가진 물체로 구

Received: Apr. 24, 2017

Revised: Apr. 26, 2017

Accepted: Apr. 26, 2017

***Corresponding Author:** Jae Joon Song

Tel) +8228809043, Fax) +8228718938

E-Mail) songjj@snu.ac.kr

38-307, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

현하는 기술을 말한다. 의학 분야의 연구에서는 3D 프린터를 이용하여 인간이 감지할 수 있는 범위 이상의 주파수까지 가정 가능한 인공 귀 제작, 기도삽관 수술용 장비 제작, 모낭과 땀샘을 포함한 자가 이식용 피부 제작 등에 이용된 바 있다. 우주항공 분야에서는 NASA에서 로켓엔진 부품 제작에 이용되기도 하였으며, 연구용 관측기거나 심우주 탐사로봇 등에 활용하려는 연구가 진행되고 있다. 또한, NASA MSFC와 Made In Space의 협업을 통해 무중력상태에서 작동하는 최초의 3D 프린터를 개발한 바 있다. 우주에서 3D프린터로 부품을 제조하려는 시도가 있었으며, 달의 토양을 이용해 달 표면에 전초기지를 건설하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있기도 하다. 토목건축 분야에서는 2014년에 중국의 Winsun이 초속경 시멘트와 재활용 산업 폐기물 혼합 재료를 이용하는 여러 대의 대형 3D 프린터로 24시간 이내에 10개의 데모 하우스를 건설한 바가 있다. 소요된 비용은 한 채당 5,000 USD 가량으로 3D 프린팅 기술이 비용 효율적이고 환경 친화적인 토목건축 시공에 사용될 수 있음을 보여주었다(Fereshkenejad and Song, 2016). 이처럼 최근 여러 산업계 전반에서 그 활용도와 효용성이 점점 증대되고 있는 3D프린팅 기술을 광업 분야에 도입하여, 지하광산 갱도의 복잡한 형상을 높은 정밀도의 3차원 물리모형으로 단시간 내에 제작할 수 있는 기법을 개발하고자 하였다.

2. 지하광산 물리모형 구현기술 개발

한국의 광산개발 기업은 대체로 규모가 영세한 편이어서 운영 중인 지하광산 갱도를 3차원 모델로 구축하고 운용 및 관리를 지속할만한 인적 자원과 예산이 부족한 실정이다. 따라서 대부분의 현장에서는 2차원 캐드 도면에 작성한 갱내 지도에 특정 지점에 대한 심도 정보를 추가로 기입하여 이를 광산 개발 및 운영 등의 목적으로 이용하고 있다. 본 연구에서는 이러한 국내 광산 기

업의 경쟁력 강화를 위해 별도의 시설 구축이나 상용 소프트웨어 구입 없이도 2차원 도면과 대략적인 심도 정보만을 활용하여 3차원 갱도모형을 생성하고 이를 3D 프린팅 가능한 형식으로 변환하여 손쉽게 지하광산갱도의 물리모형 제작이 가능하도록 하는 알고리즘과 소프트웨어를 개발하였다. 또한 실제 가용 중인 광산의 갱도 구간 일부를 모델링하고 3D 프린터를 통해 물리모형을 제작함으로써 해당 연구 성과로 개발된 소프트웨어 「UMine2STL」의 성능과 활용성을 검증하였다.

2.1 갱도 형상 구현 알고리즘

지하광산의 갱도는 부존된 광체의 형상과 이의 개발 방법 및 암질 등에 따라서 해당 현장에 가장 적합하도록 설계되며, 일반적으로 매우 복잡한 기하 구조를 갖게 된다. 광체의 형상이나 발파로 인한 갱도 내부의 불규칙한 표면을 모두 반영할 경우 입력자료의 수집과 처리에 드는 비용 및 시간이 증가한다. 이러한 점을 고려하여 지하광산 갱도의 형상을 단순화함으로써 적절한 수준의 정밀도를 유지하면서도 신속한 모델링이 가능한 알고리즘을 개발하고자 하였다. 이를 위해 광산 기본자료인 갱도좌표를 활용하여 갱도 세그먼트와 연결부를 정의하는 알고리즘을 다음과 같이 정의하고 적용하였다.

갱도 개체(Segment)

전체 갱도 영역 내에서 다수의 갱도가 특정한 위치에서 합류하거나 분기하는 경우, 이러한 위치를 연결점으로 정의하였다. 연결점의 좌표는 대부분의 광산에서 이용되는 매우 기초적인 자료이기도 하다. 본 연구에서는 갱도 형상을 원형으로 정의하고 연결점 좌표를 원통형 세그먼트의 시점과 종점으로 이용하여 갱도구간을 정의하는 알고리즘을 적용하였다. 갱도 세그먼트를 생성하기 위해서 시점(Ps)의 좌표(xs, ys, zs), 종점(Pe)의 좌표(xe, ye, ze), 갱도반지름(R), 갱도단면해상도(re)를

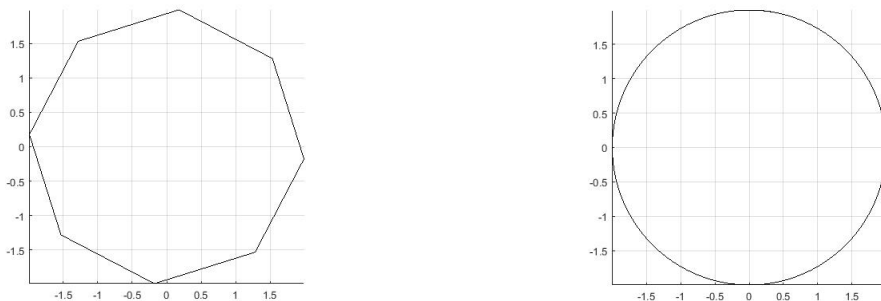


Fig. 1. Cross-section of mining tunnel segment in cases of (a) $re=9$ and (b) $re=101$, when $R=2$

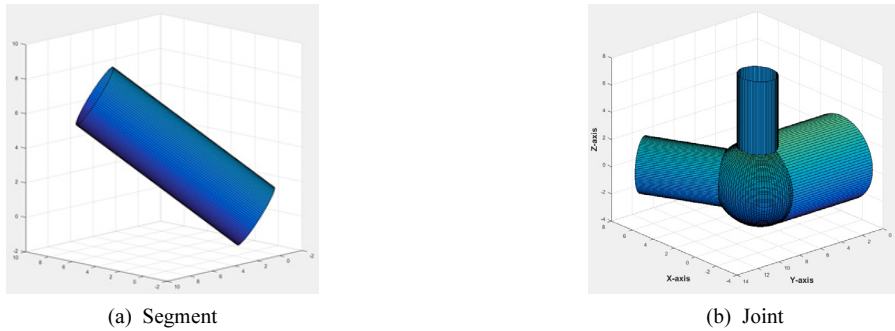


Fig. 2. (a) A cylindrical segment, and (b) a joint combined by a connecting-sphere

입력 자료로 사용하였다. 갱도단면해상도는 세그먼트의 원형 단면을 형상화하기 위해 사용되는 점의 개수를 의미하며, 폐곡선인 원의 형상을 모사하기 위해서는 시점과 중심이 서로 같아야 하므로 세그먼트 단면의 모양을 Fig. 1 (a), (b)와 같이 (re-1)개의 변을 갖는 다각형으로 정의하였다. 적절한 수준의 해상도(re=101)로 생성된 세그먼트의 형상은 Fig. 2 (a)와 같이 나타난다.

갱도 연결부(Joint)

앞에서와 같이 원통형 세그먼트를 정의한 이후, 갱도 연결부를 정의하기 위한 알고리즘을 새롭게 개발하였다. 갱도 연결부는 다수의 갱도가 접합되거나 분할되는 특정 부분을 의미하며, 갱도반지름 크기와 진행방향이 상이한 다수의 갱도 세그먼트 간 연결을 모사하기 위해 Fig. 2 (b)와 같이 연결구를 생성하여 부드럽게 결합되도록 하였다. 연결구는 특정 지점에서 연결되는 세그먼트의 반지름 값 중 최댓값을 탐색하여 이와 동일한 크기의 반지름을 갖도록 설정하였다. 당초 연구과정에서는 연결되는 세그먼트 수에 따라 여러 가지 형태의 연결부를 사전에 정의하고 상황에 따라 적절히 선택하여 적용하는 알고리즘을 고려하였으나, 개발기간이 길어지고 각 세그먼트의 직경이 다른 경우 적용이 어렵기 때문에 최종적으로 연결구 방식을 선택하였다.

2.2 3D프린팅 알고리즘

3D프린팅 기술은 4차 산업혁명을 주도할 것으로 예상되는 기술 중 하나로 손꼽히고 있다. 기존의 물리모형 제작방식을 개선하여 정밀도 향상, 소요시간 단축, 제작비용 절감을 목적으로 3D프린팅 기술을 도입하고 복잡한 지하광산 갱도형상을 단순화하여 모델링하는 알고리즘을 개발하였다. 해당 알고리즘을 이용하여 생성된 3차원 입체 모형을 현장 개발/관리 또는 컨설팅 등에 효과적으로 활용할 수 있도록 모형의 크기, 자립 안

정성, 출력포맷 범용성을 고려, 다음과 같이 3D프린팅을 위한 알고리즘을 추가로 개발하였다.

분할 프린팅

모든 3D프린터는 입력된 형상 정보를 출력하기 위한 공간을 필요로 하며, 대부분의 경우 기기 자체 내에 챔버를 갖추고 해당 공간 내에서 프린팅을 수행한다. 챔버에 대해 별도로 규정된 국제 표준이 없으므로 제조사나 기종 등에 따라 챔버의 크기가 각기 다르다. 또한, 챔버가 수용 가능한 크기를 초과하는 모델을 출력하기 위해서는 모델의 분할이 반드시 선행되어야 한다. 따라서, 이 연구에서는 3D프린터의 기종별 출력한도를 고려함과 동시에 사용자가 필요에 따라서 원하는 크기의 갱도모형을 손쉽게 출력할 수 있도록 분할프린팅 기법을 적용하였다. 3차원 직교 좌표계의 축방향으로(X방향, Y방향, Z방향) 분할 평면의 개수를 지정하고 위치를 선택하여 사용자가 원하는 수준으로 분할이 가능하도록 알고리즘을 적용하였다. 다만 갱도 연결부가 분할되는 경우 구조적인 안정성이 저하되게 되므로 오류 메시지를 출력하고 사용자로 하여금 다른 값을 입력하도록 하였다. 이러한 방식으로 모델은 다수의 모듈로 분할되어 개별 출력이 가능하게 되며, 개별적으로 출력하지 않더라도 각 모듈을 챔버의 공간 내에 효율적으로 배치하여 출력함으로써 출력시간을 대폭 단축할 수 있는 장점이 있다. 추후 출력된 모듈을 다시 결합해 물리모형을 제작하기 위하여 각 분할부에 맞는 커넥터를 자동으로 생성하는 알고리즘을 개발하였으며, Fig. 3 (a)와 같이 적용하였다. 커넥터를 이용하는 경우 모듈 간 결합을 통해 설치한 모형이 다시 분리될 수 있으므로 장기 보관이나 이동 및 재설치 등에 유리하다는 장점이 있다. 그러나 분할된 인접 모듈 사이를 연결하는 커넥터 개수가 지나치게 많고 그 방향 편차가 큰 경우에는 모듈 결합이 다소 어려워지는 단점이 있어 분할 위치를

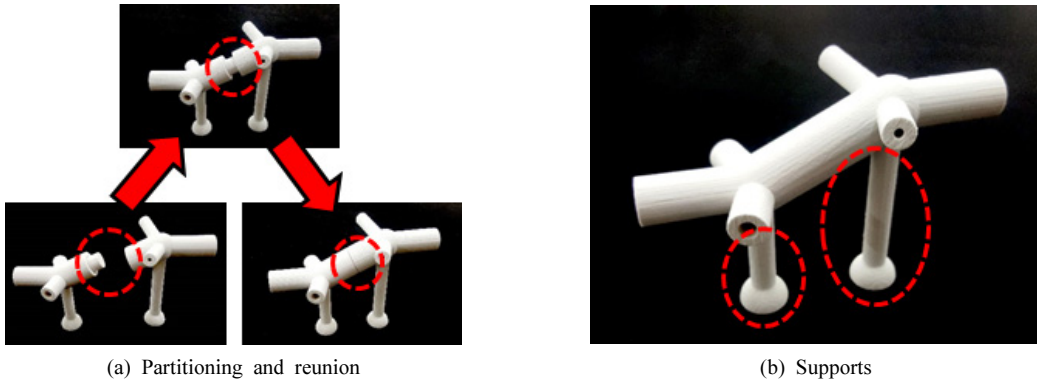


Fig. 3. (a) Reunion of modules printed after the partitioning, and (b) supports generated at joints

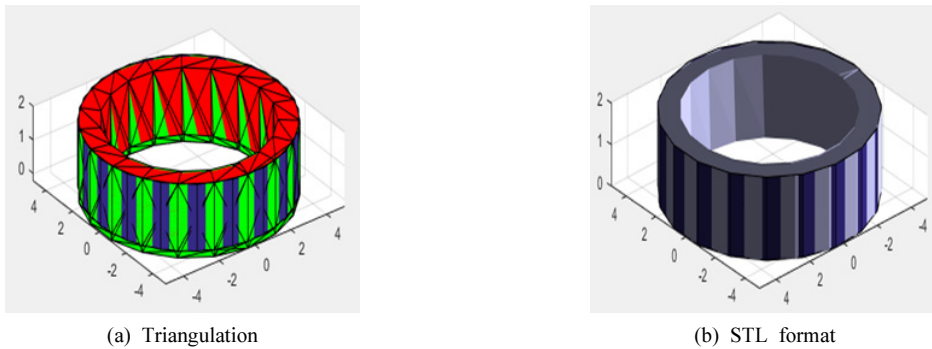


Fig. 4. (a) Segments after the triangulation, and (b) transformation into STL format

선정하는 단계에서 세심한 주의가 필요하므로 추가 연구를 통해 결합 방식을 개선할 필요가 있다.

지지대 생성

3D프린터로 물리모형을 출력하여 활용하기 위해서는 출력된 모형이 자체하중을 견디내고 자립할 수 있어야 한다. 이 연구에서는 지지대를 생성하여 모형을 지지하고자 하였고, 구조적으로 비교적 안정한 갱도연결부를 활용하여 지지대를 생성하고 하중을 견디도록 하였다. 지지대의 형상은 모델 하중을 효과적으로 지지할 수 있도록 일반적인 교각의 형상과 유사한 형상을 적용하였다. 사용자가 모델 내의 갱도연결부 좌표를 확인하고 지지대를 생성할 갱도연결부를 직접 선택할 수 있도록 하였으며, 생성되는 지지대의 기둥부 반지름, 바닥의 반구부 반지름을 입력하여 모듈에 따라 각기 다른 크기의 지지대를 생성할 수 있도록 하였다. 지지대 반구부의 바닥면은 사용자가 입력한 지지대 최저점 좌표로 자동적으로 연장되도록 설정하였다. 시험 출력한 지지대의 형상은 Fig. 3 (b)와 같이 원기둥 교각 모양으로, 생성된

모델의 자립이 용이하도록 하였다.

형상 정보 변환

생성된 형상 정보를 3D프린터로 출력하기 위해서는 3D프린터에서 인식할 수 있는 형태의 파일 포맷으로 변환하여 저장할 필요가 있다. 본 연구에서는 파일구조가 비교적 단순하며 거의 모든 기종의 3D프린터에서 인식 가능한 STL(STereoLithography) 형식으로 변환되도록 알고리즘을 구현하였다. STL 파일의 데이터 구조는 삼각형요소망의 꼭짓점 좌표와 법선방향 정보로 구성되어야 한다. 이전의 과정을 통해서 생성된 3차원 표면 형상을 구성하는 점들을 MATLAB 내장함수를 통해서 Fig. 4 (a)와 같이 특정 두께를 갖는 삼각형요소망으로 재구성하고, 각 삼각요소를 형성하는 꼭짓점 좌표와 법선방향 정보를 이용하여, 모델의 형상자료를 Fig. 4 (b)와 같이 STL 포맷으로 변환되도록 하여 높은 범용성을 확보하였다. 두께는 사용자 임의로 설정 가능하다.

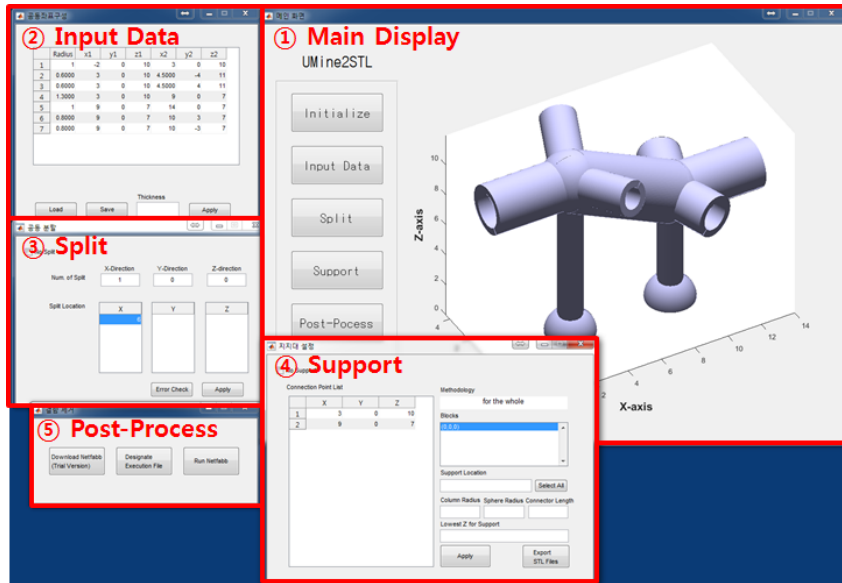


Fig. 5. Graphical User Interface of 「UMine2STL」

2.3 소프트웨어 개발

3D프린팅을 이용한 지하광산 갱도의 물리모형 제작을 위해 앞서 개발된 모든 알고리즘을 통합·적용하는 컴퓨터 소프트웨어를 개발하였으며 이를 위해 MathWorks사에서 제공하는 4세대 프로그래밍 언어인 MATLAB을 이용하였다. 원래 MATLAB은 수치해석 등을 위한 목적으로 만들어졌지만 다른 프로그래밍 언어에 비해 다양한 내장함수를 제공하며 우수한 시각화 능력을 가지고 있어 신속한 소프트웨어 개발에 유리하다는 장점이 있다. 사용자의 편의성을 고려하기 위해 MATLAB에서 제공하는 GUI(Graphical User Interface)를 적용하여 Fig. 5와 같이 인터페이스를 구성하고 MATLAB의 별도 설치 없이도 구동이 가능하도록 독립적인 어플리케이션으로 만들었다. 개발된 소프트웨어 「UMine2STL」의 기능 및 입력변수는 다음과 같다.

① 주 표시 화면

- 주 표시 화면 초기화 기능
- 화면 표시 형상의 회전 및 확대 기능
- 3D모델링을 위한 각 주요 기능의 설정창을 불러오는 기능

② 공동좌표 구성

- 지하광산 갱도 연결점 좌표 정보 입력 저장 기능
- 지하광산 갱도 연결점 좌표 정보를 엑셀파일로부터

가져오는 기능

- 물리모형 생성 시 고려할 갱도 두께 정보 입력 기능
- 입력자료 오류 검사 기능

* 입력변수: 공동 반지름, 세그먼트 시점과 종점의 X, Y, Z 좌표, 세그먼트 두께

③ 공동 분할

- X, Y, Z 각 축방향별 개수를 설정하여 공동 모형을 분할하는 기능
- 분할 위치가 갱도 연결부와 겹치지 않도록 오류 검사를 수행하는 기능

* 입력변수: 각 축방향별 분할 적용 횟수와 분할 위치

④ 지지대 설정

- 분할 평면에 의해 분할된 모듈별 인식자 자동 부여 기능
- 지지대 생성에 사용 가능한 연결점을 모듈별 목록으로 표시하는 기능
- 모듈별로 선택가능한 연결점 복수개를 입력해 지지대를 생성하는 기능
- 지지대 크기를 사용자 편의에 따라 조절하여 적용할 수 있는 기능
- 3D프린팅을 위해 범용성이 높은 STL 형식으로 정보를 변환하는 기능

* 입력변수: 지지대 생성 연결점 위치, 기둥부와 반구부의 반지름 크기, 커넥터 길이, 지지대 연장 최저점 Z 좌표

⑤ 후처리 과정

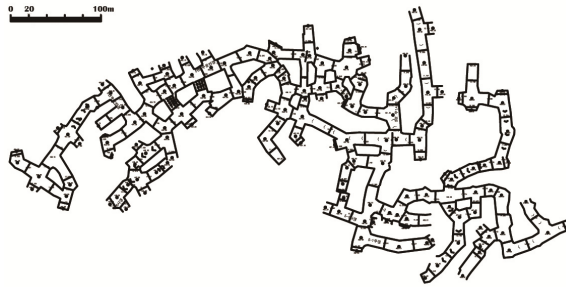
- 무료 후처리 프로그램 다운로드 웹페이지 연결 기능
- 설치경로 지정을 통한 후처리 프로그램 연계실행 기능

⑥ 기타 기능

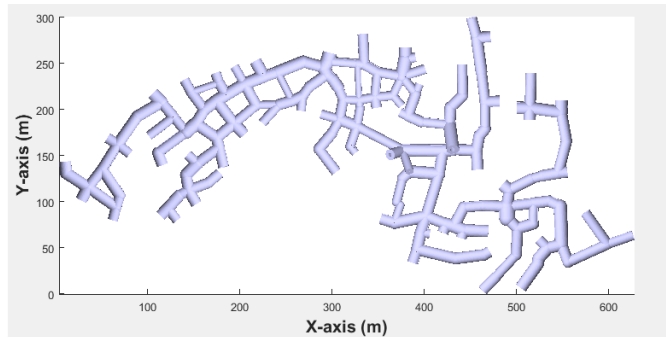
- 프로젝트명 입력을 통한 작업별 관리기능

3. 지하광산 갱도 물리모형 제작 예시

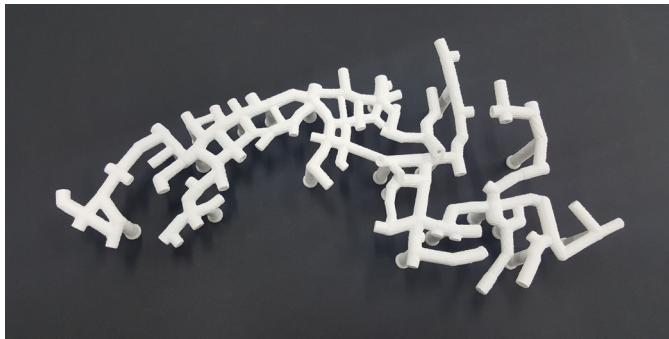
본 연구를 통해 자체 개발한 소프트웨어 「UMine2STL」을 활용하여 실제 지하광산 갱도의 물리모형을 제작함으로써 그 성능을 검증하고자 하였으며, 강원도에 위치한 A광산을 모형 제작 대상으로 선정하였다. 해당 광산은 주방식 채광법을 적용하여 개발 및 운영되고 있는 가형 석회석 광산이다. 해발 400~500 m 범위에 굴착된 A광산 X편의 복잡한 갱도 형상(Fig. 6 (a)) 내 모든 갱도 연결부 3차원 좌표를 제공받은 2차원 CAD 자료로부터 취득하여 물리모형 제작을 위해 「UMine2STL」로 Fig.



(a) 2D CAD Data



(b) 3D Model



(c) Physical Model (W × H × D = 30 × 14.5 × 4.5 cm)

Fig. 6. Production of the physical model for 'A' mine (level X) through 「UMine2STL」 and 3D printing techniques

6 (b)와 같이 대상을 모델링하였으며, 분할 프린팅의 적용을 위해 모델을 다수의 모듈로 분할하고 모형 자립을 위한 모듈별 지지대 및 모듈 간 결합을 위한 커넥터를 생성하였다. 생성된 다수의 모듈 형상자료를 각각 STL 파일로 변환하고 Autodesk사의 프리웨어인 Netfabb을 이용해 후처리하였으며, Z Corporation의 분말 적층식 3D프린터인 Zprinter-450을 이용하여 Fig. 6 (c)와 같이 직접 모형을 출력하였다. 출력된 모형의 크기는 가로 × 세로가 30 cm × 14.5 cm, 높이가 4.5 cm로 대략 2000:1 축척으로 축소 제작되었다. A광산으로부터 제공받은 2D 카드자료의 X편 갱도 연결점 좌표 중 누락된 지점의 정보를 주변 연결점 좌표로부터 추정하여 보완한 시간을 제외 하면, 모델링부터 출력 후 전시까지 대략 5시간 가량 소요되었으며, 입력자료 구성에 30분, 모델링에 10분, 프린팅에 3시간 40분, 모형 회수에 30분, 잔여 분진 제거 및 전시에 10분이 각각 소요되었다. 이와 같이 「UMine2STL」을 적용하여 지하광산의 갱도를 모델링하고 이를 변환하여 3D프린터로 출력하는 경우, 기존 방법보다 정밀한 물리모형을 저비용으로 신속하게 제작할 수 있음을 검증하였다. 입력자료를 엑셀 형식으로 미리 저장하여 관리하는 경우를 가정하면 입력자료구성에 소요된 30분을 단축할 수 있으며, 사용된 프린터보다 신속한 출력이 가능한 기종, 또는 출력시간이 동일하지만 모형의 회수가 보다 간편한 방식의 기종을 사용하는 경우를 가정하면 최소 30분 이상을 추가로 절약할 수 있을 것으로 예상된다. 여기에 시간 단축에 따른 부차적인 인건비 절감 효과까지 감안하면 이 연구에서 제안된 지하광산 갱도의 물리모형 제작 방법이 기존의 제작 방법에 비해 여러 면에서 더 우수한 것으로 판단할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 지하광산 입체모형 제작 기법의 단점을 개선하기 위해 지하광산의 갱도연결점 좌표

를 입력 자료로 사용하여 갱도의 3차원 입체형상을 구현하고 모델 분할 및 지지대 생성과 3D프린터용 파일 변환 기능을 가진 소프트웨어를 개발하였다. 이를 통해 실제 지하광산 갱도 일부를 모델링하고 3D프린터로 물리모형을 시험제작함으로써 개발된 소프트웨어의 활용성을 검증하였다. 해당 연구 결과는 광산 개발 컨설팅 기업의 종합적인 컨설팅 수행능력을 향상시키고, 광산 개발 현장 종사자의 업무 이해도 증진을 통해 작업 능력 제고 및 안전성 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 추후에 Surpac이나 GEMS 등 광산관리 프로그램과의 연동 기능, 지표와 광체 형상의 추가 구현, 다양한 공동 단면 형상 반영 등에 대한 후속 연구가 수행된다면 그 활용 범위가 더욱 확대될 것으로 예상된다.

사 사

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술인력 교류활성화지원사업 성과임(NRF-2016H1D2A2918263)

References

1. Caumon, G., Collon-Drouaillet, P., De Veslud, C. L. C., Viseur, S., and Sausse, J., 2009, Surface-based 3D modeling of geological structures, *Mathematical Geosciences*, Vol. 41, No. 8, 927-945.
2. Fereshkenejad, S., and Song, J. J., 2016, Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 49, No. 6, 2065-2074.
3. Huber, D. F., and Vandapel, N., 2003, Automatic 3D underground mine mapping, In *Field and Service Robotics*, 497-506, Springer Berlin Heidelberg.
4. Naemura, T., Tago, J., and Harashima, H., 2002, Real-time video-based modeling and rendering of 3D scenes, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 22, No. 2, 66-73.



윤 동 호

2014년 홍익대학교 공과대학 토목공학과
공학사

Tel: 02-880-8713

E-mail: 4energy@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템
공학부 석박사통합과정



Sayedali-reza Fereshtenejad

2009 Islamic Azad University (Meymeh),
Iran, B.Eng. Mining Engineering
2012 Islamic Azad University (Bafgh),
Iran, M.Eng. Mining Engineering

Tel: 02-880-7234

E-mail: a_r_fereshtenejad@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템
공학부 박사과정



송 재 준

1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 02-880-9043

E-mail: songjj@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템
공학부 부교수