

건축물 3D 프린팅 설계지원도구 개발

이동윤¹, 서명배^{1*}, 주기범²

¹한국건설기술연구원 미래융합연구본부, ²한국건설기술연구원 스마트건설혁신본부

Development of Design Support Tool for Building 3D printing

Dongyoun Lee¹, Myoung-Bae Seo^{1*}, Ki-Beom Ju²

¹Department of Future Technology and Convergence Research,
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Department of Smart Construction, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 최근 3D 프린팅 기술이 발전함에 따라 건축분야에도 3D 프린팅 기술을 접목하여 건축 기술 혁신과 생산성을 높이고자 많은 연구들이 진행되고 있다. 해당 분야의 주된 연구들은 일반적으로 3D 프린터 개발, 건축물 3D 프린터에 적합한 재료 개발에 관한 것들이다. 장비와 재료분야에 비해 건축물 모델링 도구의 대표적인 BIM 데이터를 건축물에 대한 3D 프린팅에 적합하게 적용될 수 있도록 하는 설계지원도구에 관한 연구는 미비하다. 또한 기존 3D 프린팅 슬라이싱 프로그램은 제조업 중심으로 상용화되어 있어, 건축용 3D 프린팅에 적용하기에 적합하지 않는 부분이 나타난다. 따라서 본 연구에서는 건축물 3D 프린팅에 적합한 설계지원도구를 개발하고자 한다. 개발된 설계지원도구는 임의의 모델링 데이터를 기반으로 검증을 하였다. 검증 결과, 벽체패턴 생성은 오류가 발생하지 않고 정확하게 모델링되는 것으로 나타났다. 공기산출은 본 연구에서 제시한 수식이 유효한 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서는 STL 파일 출력 시 에러를 최소화하기 위해 최대 가장자리 길이를 100mm로 정하여 출력하는 것으로 검토하였다.

Abstract Recently, most studies of 3D printing in construction have focused on the development of 3D printers and materials suitable for construction 3D printers. In comparison, there has been little research on design support tools that enable representative BIM data of building modeling tools to be applied to 3D printing. In addition, existing 3D printing slicing programs are commercialized around manufacturing, showing that they are unsuitable for construction 3D printing. Therefore, this research aims to develop a design support tool for 3D printing for buildings. The developed design support tool was validated based on arbitrary BIM data. Verification showed that wall pattern generation was modeled accurately without errors, and a calculation of the construction period showed that the formula presented in this study was valid. Furthermore, the maximum length of the mesh split was set to 100mm to minimize errors when converting to STL files.

Keywords : 3D Printing, Design Support Tool, Construction, Building, Slicing

본 논문은 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(20AUDP-B121595-05)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Myoung-Bae Seo(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
email: smb@kict.re.kr

Received August 28, 2020

Revised September 17, 2020

Accepted October 5, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 4차 산업혁명기술 중의 하나인 3D 프린팅 기술이 산업전반에 확산되고 스마트시티 및 건설자동화 관련 기술에 대한 시장의 수요가 증가됨에 따라 Building Information Modeling(BIM)을 기반으로 3D 프린팅 기술을 건설에 접목하는 연구들이 국내외에서 활발히 진행 중이다[1]. 제조업에서 시작된 3D 프린팅 기술은 국가에서 추진 중인 건설 자동화 기술 중 무인시공 자동화 기술의 핵심기술 중의 하나로 스마트 시티 기반 기술로 활용될 가능성이 매우 높으며 재난 및 재해지역의 급속 시공, 저개발국가의 대형 주택단지 보급, 극한지 시공 등 신규시장 개척이 가능한 신기술이다[2].

3D 프린팅의 주요 원천기술은 크게 3D 프린팅 장비, 3D 프린팅 재료, 3D 모델링 및 슬라이싱 기능 등이다. 건축 3D 프린팅은 대부분 모르타르기반의 재료를 사용하고 있으며, 최근에는 이 기술을 이용하여 비정형 거푸집을 제작하는 연구도 진행되고 있다[3]. 3D 프린팅 장비를 개발하는 연구로는 주로 겐트리(Gantry)타입의 장비에 관한 것들이며, 최근 들어 델타(Delta), 크레인(Crane), 다관절로봇 등 다양한 타입의 장비들이 개발 및 연구되고 있다[4].

건축에서의 3D 프린팅은 설계 도구를 이용하는 것에 있어, 단순 디자인의 역할 뿐만 아닌 공정관리 및 물량산출 등의 관리적 역할이 요구되기도 한다. 이에 따라 건축 설계단계에서부터 사용되는 BIM이 3D 프린팅에 핵심적이 설계도구의 역할로 나타나고 있다[5]. BIM 데이터를 기반으로 3D 프린팅 건축물을 시공하기 위해서는 급속 시공이 가능한 재료, 건설장비 등과 더불어 3D 프린팅 시공에 필요한 시공법, 원가/공기 산정, 출력을 위한 구조물 형상 및 위상최적화 등이 필요하다. 그러나 현재 건축 3D 프린팅의 기술은 초기 및 성장단계로 이와 같은 요구사항을 지원할 수 있는 설계지원도구 및 플랫폼이 부재하다[6]. 그리고 3D 모델링은 건축에서도 다양한 3D 모델링 도구들이 상용화되어 있으나, 기존의 3D 프린팅 슬라이싱 프로그램은 제조업을 중심으로 상용화되어 있고, 건축 3D 프린팅에 이를 적용할 경우 건축분야에 상용화된 장비가 없어서 슬라이싱 프로그램에서 장비의 특성을 반영할 수 없다.

이와 같은 문제점을 극복하기 위해 최근 발표되고 있는 건축물 3D 프린팅 시공 사례는 대부분 자체적인 슬라이싱 기능을 개발하거나, 수동으로 장비의 경로를 좌표로

지정하여 움직이는 방식으로 운영하고 있다. 그러나 이 또한 자체적인 프로그램으로 타 장비에 대한 호환성이 떨어지는 문제점이 있다[5]. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서는 대형 목적물, 모르타르기반 재료, 구조적 안전성 등 건축의 특성을 반영한 슬라이싱 기능, 공정 및 원가 산출 기능, 설계지원 기능 등이 포함되고, 타 유형의 3D 프린팅의 장비와 호환성이 높은 3D 프린팅 설계지원도구 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 건축분야 3D 프린팅 사례들을 통해 도출된 3D 프린팅 슬라이싱 프로그램의 필요기능을 바탕으로 건축물 3D 프린팅 설계지원도구를 개발하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 건축물 3D 프린팅 설계지원도구를 개발하는 것으로, 건축분야 3D 프린팅 주요방식인 거푸집 프린팅 방식, 유닛단위 프린팅을 통한 조립방식, 현장에서 직접 출력하는 방식[7] 중에서 현장에서 직접 출력하는 방식을 대상으로 설계지원도구를 개발한다. 또한 본 연구의 3D 프린터 타입은 가장 일반적으로 사용되는 겐트리 타입을 대상으로 한다.

연구의 방법은 다음과 같다. 기존 건축 3D 프린팅 설계도구에 대하여 모델링 소프트웨어, 핸드 툴, 슬라이서 등을 고찰하고, 건축물 3D 프린팅 설계지원도구 설계를 위해 개념 정의 및 핵심기능 선정, 모델링 도구 선정을 한다. 이후 설계에서 제시된 기능을 포함한 설계지원도구를 개발하고 선정된 핵심기능 중심으로 검증한다.

본 연구의 순서는 다음과 같다.

첫째, 기존 건축 3D 프린팅 설계도구의 고찰을 건축 3D 모델링 소프트웨어, 핸드 툴, 슬라이서를 대상으로 수행한다. 둘째, 본 연구의 건축물 3D 프린팅 설계지원도구의 정의하고, 핵심 기능 및 3D 모델링 도구를 선정하여 설계지원도구를 설계한다. 셋째, 설계된 설계지원도구를 바탕으로 핵심 인터페이스를 설계를 수행하고, 벽체 패턴 자동 적용 기능, 공기산출 및 공정추정 모듈 기능 그리고 공정산출 기능을 개발하여 3D 프린팅 설계지원도구를 제시한다. 마지막으로 개발된 설계지원도구를 검증하기 위해 예시를 통해 벽체패턴 자동 적용 기능과 공기산정, STL 파일 출력 등을 검토한다.

2. 기존 건축 3D 프린팅 설계도구 고찰

일반적으로 건축물 3D 프린팅 출력 프로세스는 건축

물 설계, 설계검토, 모형 제작, 실제 출력 등의 단계로 구성된다. 해당 프로세스 중 설계 및 설계검토를 수행하기 위해 AutoCAD Revit(이하 Revit), Rhino 3D 등과 같은 건축 3D 모델링 소프트웨어, MakePrintable, MeshFix 등과 같은 핸드 툴, 3DprinterOS, Ultimaker Cura와 같은 슬라이서 프로그램을 이용한다. 다음으로 기존 건축 3D 프린팅에서 사용되는 상용화된 건축 3D 모델링 소프트웨어와 핸드 툴, 슬라이서를 고찰하였다.

2.1 건축 3D 모델링 소프트웨어

건축 3D 모델링 소프트웨어는 국내에서 가장 많이 활용되고 있는 Revit, Rhino 3D, TEKLA, SketchUP, 3Ds Max, ZBrush 등 모델링의 방식에 따라 다양한 프로그램들이 존재한다. 본 연구에서는 3D 프린팅 시장에서 많은 사용자층을 보유하고 있는 Revit과 Rhino 3D, Fusion 360을 중심으로 고찰하였다.

2.1.1 Autodesk Revit[9]

Revit은 건축, 기계 등과 같은 설계 프로그램 개발사로 유명한 Autodesk 사의 프로그램이며, 국내에 가장 많이 보급되어 있는 소프트웨어로써 많은 사용자를 보유하고 있다. 이는 구조설계 외에도 프로젝트 차원에서 중요한 다양한 콘텐츠를 제공하고 모델의 시각화, 부속의 명세와 수량 및 기타 다양한 도구 기능 등이 포함되어 있다. 또한 Revit은 기하형상과 좌표를 이용하여 다른 프로젝트와 결합할 수 있는 가능성을 제공함에 따라 지도정보 또는 지형에 모델을 투영할 수 있다.

2.1.2 Rhino 3D[10]

Rhino 3D는 Zbrush와 3Ds max의 폴리곤 모델링 방식이 아닌 넵스(Nurbs) 모델링 방식이기 때문에 각 부위의 치수 확인이 가능하며, 공학적인 수치로 곡면을 제작 가능하여 제품 디자이너들이 자주 사용하는 3D 모델링 도구이다. 이는 정확한 도면이나 도면의 대체할 수 있는 정면, 측면, 윗면, 아랫면의 사진이 확보가 되면 모델링 작업시간을 다른 3D 프로그램에 비해서 압도적으로 단축할 수 있는 특징이 있다.

2.1.3 Fusion 360[11]

Fusion 360은 Autodesk Revit과 같이 Autodesk사에서 개발한 도구로 다양한 3D 프로그램들의 기능들을 섞어 만든 프로그램이다. Fusion 360의 주요기능으

로는 자유형 모델링, 솔리드 모델링, 파라메트릭 모델링, 메쉬 모델링, 시뮬레이션, 데이터 변환, 조립품 모델링, 렌더링, 애니메이션, 3축 기계가공이 있다.

2.2 핸드 툴(Handy Tool)

3D 모델링된 파일은 3D 프린터로 출력이 가능하도록 STL 파일로 변환이 된다. 변환된 STL 파일은 곧바로 3D 프린터에 입력되는 것이 아닌 출력이 가능하도록 오류검토가 이뤄지는 단계를 거치게 된다. 이때 오류검토 및 출력이 가능한 STL 파일로 변환해주는 도구가 핸드 툴이다. 핸드 툴은 STL파일을 읽어 유효성을 검토하고, 필요한 경우 수정과 보안을 통해 프린팅 가능한 STL파일로 출력변환하거나 G-Code를 생성하는 기능이 있다. 다음은 주요 핸드 툴들을 고찰한 것이다.

2.2.1 MakePrintable[12]

MakePrintable은 웹 서비스 형태로 지원되며, 프린팅 전에 3D 모델파일을 업로드하여 이용한다. 이 프로그램은 모델 정보를 읽어 프린팅이 가능유무를 판단하고, 자동 수정하여 프린팅 가능한 상태로 사용자에게 피드백해주는 형태이다.

2.2.2 MeshFix[13]

MeshFix는 오픈소스 3D 모델 수정도구로 모델 상에 존재하는 비접합부나 자기접촉 문제 등의 문제들을 파워풀하게 해결해주는 프로그램이며, 윈도우 플랫폼 상에서만 구동된다. 출력물은 삼각메쉬로만 출력되며, 프린팅 가능한 형태로 출력해주는 특징이 있다.

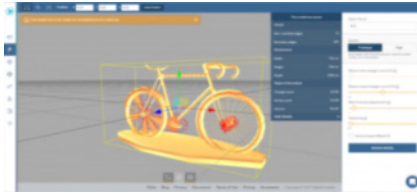
2.2.3 Meshmixer[14]

Meshmixer는 3D 메쉬계의 “만능칼”로 비유될 정도로 다재다능한 기능을 가지고 있으며, 파워풀한 수정 도구로서 최신 삼각 메쉬 편집기를 탑재하고 있다. 그러나 스케일링이나 미러링과 같은 기본적인 기능들은 지원하고 있지 않는 단점이 존재한다. 이러한 단점에도 불구하고 많이 사용되는 이유는 무료이며, OS X와 Linux, Window환경에서 모두 지원되기 때문이다.

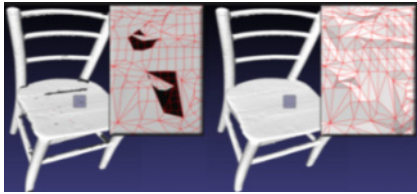
2.2.4 NetFabb[15]

NetFabb는 3D 프린팅 준비 도구로서 광범위한 능력을 가지고 있다. 기능이 매우 안정적이고 막강하며, Autodesk의 사용자 인터페이스를 제공하여 많은 사용자

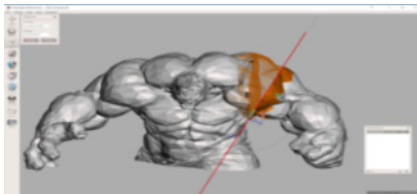
를 보유하고 있는 Autodesk 사의 프로그램을 사용하는 사용자에게 유용하게 사용된다.



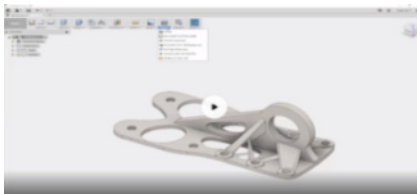
(a) MakePrintable



(b) MeshFix



(c) Meshmixer



(d) NetFabb

Fig. 1. Handy Tool

2.3 슬라이서 (Slicer)

슬라이서는 3D 모델링된 파일이 STL 파일로 변환되고 3D 프린터에서 출력이 가능하도록 G-Code로 변환해주는 프로그램을 말한다. 슬라이서는 일반적으로 3DPrinterOS와 Cura의 프로그램이 많이 사용된다.

2.3.1 3DPrinterOS[16]

3DPrinterOS는 클라우드 기반 플랫폼으로 슬라이싱 외에도 메쉬 복구 등의 다양한 옵션을 가지고 있다. 또한 초보자와 숙련자 및 전문가까지 모두 아우를 수 있는 제품으로 무료인 것이 큰 장점이다. 이 제품의 특징은 G코

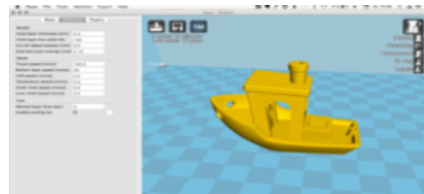
드가 생성되면 Toolpath Viewer를 통해서 미리 볼 수 있다는 것이며, JSON코드를 사용하여 사용자가 직접 슬라이서 설정을 입력할 수 있는 것이다.

2.3.2 Ultimaker Cura[17]

Ultimaker Cura는 슬라이서 중 가장 많이 사용되는 슬라이서로, 초보자부터 전문가까지 쉽게 다룰 수 있도록 하였으며 톨패스, 프린팅 시간과 재료량을 추정할 수 있도록 구성되어 있다. 이 프로그램의 특징은 빠른 UI와 큰 규모의 STL도 빠르게 처리할 수 있다는 것이다.



(a) 3DPrinterOS



(b) Ultimaker Cura

Fig. 2. Slicer

3. 건축물 3D 프린팅 설계지원도구 설계

3.1 설계지원도구 개념 및 정의

3D 프린팅 설계지원도구는 기존 제조업 분야에서 슬라이서의 기능을 갖추고 있는 도구를 의미하고 있지만, 건축분야에서는 슬라이서의 기능을 포함하고, 보다 광범위한 기능이 요구되는 것을 의미한다[6]. 따라서 본 연구에서 건축물 3D 프린팅 설계지원도구는 건축물의 3D 형상 모델링부터 건축물 3D 프린팅에 요구되는 복잡한 공기산출 및 공정관리, 출력 가능한 형태의 프린팅 파일로 모델정보를 출력해주는 기능 등을 포함하는 프로그램 도구로 정의한다.

설계지원도구의 형태는 형상 모델링을 위해 일반적으로 3D 캐드 프로그램과 연동되는 형태를 취하게 된다. 이때 3D 캐드 프로그램과의 원활한 연동을 위해 3D 캐드 플러그인이나 API형태로 캐드 내에 내재되는 형태를

가지는 경우가 일반적이며, 캐드 내에 내재된 형태에서 모델링 정보를 활용하여 공기산출과 STL파일 변환 등 설계지원도구가 요구하는 기능들을 구현하도록 한다.

3.2 핵심기능 선정

본 연구의 사전연구로서 박형진 외 2인(2017)은 건축물 3D 프린팅 설계지원도구 개발을 위한 요구기능을 도출하였다[6]. 해당 연구에서 설계지원도구의 주요기능으로 BIM 데이터 불러오기, STL 파일의 무결성 검토, 3D 프린팅 장비 사양 입력 및 선택, 3D 모델의 출력가능성 검토, 인필 패턴 선택 및 적용, 출력기간 및 물량 산출, 세부 조정 기능 등 7가지의 기능을 제시하였다. 본 연구에서는 사전연구에서 도출된 7가지 기능에서 핵심적인 기능을 선정하고, 구체화시켜 설계지원도구를 개발하고자 한다. 핵심기능은 건설 3D 프린팅 경험이 있는 설계 전문가 3인에게 2차례의 자문을 거쳐 선정되었다. 본 연구에서 선정한 핵심기능은 다음과 같다.

3.2.1 설계지원도구 핵심 인터페이스 설계

응용프로그램 개발에 있어, 인터페이스 설계 및 구성이 핵심적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 Application Programming Interface(API) 개발을 위한 작업 절차를 계획하고 메뉴를 구성하였으며, 로그인 창, 환경설정, 벽체패턴 자동설정, 공기산출 등을 구현하는 UI화면을 개발하였다. 단, 본 논문에서는 로그인 창, 환경설정 등의 세부적인 UI화면 개발에 대한 내용은 현재 오류사항에 따른 인터페이스 개선작업을 진행하고 있어 추후 연구에서 제시하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 핵심 인터페이스 설계의 개념만 제시하였다.

3.2.2 벽체 패턴 자동 적용 기능

벽체 패턴 자동 적용 기능은 벽체 패턴 자동 적용을 위한 알고리즘과 인터페이스에서 구동하기 위한 방법을 제시한다.

3.2.3 공기산출 및 공정추정 모듈 기능

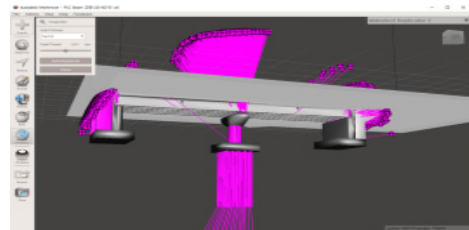
공기산출 및 공정추정 모듈은 건축물 시공의 주재료인 콘크리트의 특성을 반영하고, 적층되는 레이어 수, 운용 시간, 재료량 추가 등에 따른 공기산출 및 공정추정이 가능한 수식을 제시한다.

3.3 3D 모델링 도구 선정

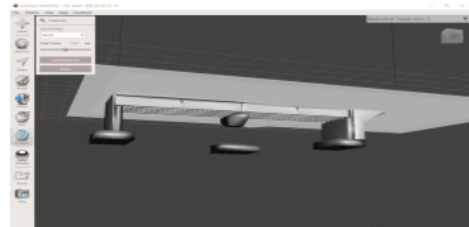
3D 프린터로 설계모델을 출력하기 위해서는 설계된 파일이 STL 파일로 변환되는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서 3D 모델링 도구를 선정하기 위해 STL 파일로 변환하는 것에 오류가 적은, 호환성의 적절성을 기준으로 판단하였다. STL과의 호환성 판단은 Revit과 Rhino 3D, Fusion 360 프로그램을 대상으로 실시하였다. 선정 결과는 다음과 같다.

우선, Revit을 테스트하였다. 진행 방법은 Revit으로 모델링 된 3D 모델을 활용하여 STL로 변환하고 오류검증용 틀에서 모델을 불러와서 에러를 체크하는 순서로 진행하였다. 특히 Revit에서는 STL 파일로 데이터를 저장하는 기능이 존재하지 않아서 별도로 제공되는 Add-In 프로그램인 "STL Exporter for Revit"을 활용하였다. 테스트를 위한 데이터는 한국건설기술연구원에서 2017년에 제작한 철도분야 BIM 라이브러리 중 PSC BEAM 교량을 대상으로 Export를 진행하였다. STL 파일은 Binary로 설정하였고 저장한 후 MshMixer에서 로딩한 후 에러 검토를 진행하였다. 순서는 다음과 같다.

MeshMixer로 데이터를 로딩하고 "Analysis"를 수행한 결과 약 2,360여개의 에러가 발견되었다. 이를 수정하기 위해 MeshMixer에 탑재되어 있는 "Auto Repair Tool"을 활용한 결과 에러는 제거되었으나 모델 형상이 깨지는 상황이 발생하였다(Fig. 3).



(a) 2,360 errors(defects)



(b) Modified Revit model using MeshMixer

Fig. 3. Errors found when converting to STL and modified Revit model using MeshMixer

다음으로 Rhino 3D를 테스트한 결과이다. 같은 방식으로 MeshMixer에서 데이터를 불러와 데이터 분석작업을 진행하였다. 진행한 결과, Rhino 3D는 님스(Nurbs) 기반 저작툴이기 때문에 Autodesk Revit 보다는 데이터 로딩이 우수한 것으로 나타났다. Fusion 360도 같은 방식으로 테스트를 진행하였다. Fusion 360도 마찬가지로 데이터 로딩이 우수하였으며, STL 변환 시 오류가 발견되지 않은 것으로 나타났다(Fig. 4).

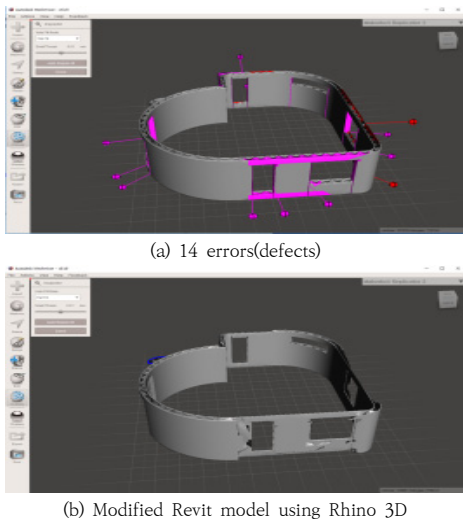


Fig. 4. Errors found when converting to STL and modified Revit model using Rhino 3D

테스트 결과, Rhino 3D와 Fusion 360이 STL과의 호환성이 좋은 것으로 나타났으며, 둘 중 일반적으로 3D 모델링으로 많이 사용하는 Rhino 3D를 본 연구에서의 3D 모델링 도구로 선정하였다.

4. 설계지원도구 개발

4.1 핵심 인터페이스 설계

설계지원도구는 Rhino 3D를 기반으로 개발되었다. Rhino 3D는 API개발을 위해 다양한 언어를 지원해주고 있으며, 대표적으로 VB, Python, C#, C/C++ 등이 있다. 본 연구에서는 API개발을 위해 C#을 사용하였다.

API개발을 위한 작업 절차를 계획하였으며, 그 전체 메뉴 구성은 로그인, 환경설정, 3DP작업, STL파일 저장 등으로 구성하였다(Fig. 5). 본 연구에서는 전체 메뉴 구성 중 벽체 패턴 자동 적용되는 것과 공기산출 및 공정추

정에 관한 내용을 중점적으로 개발하였으며, 이에 관한 내용을 중심으로 기술하였다.

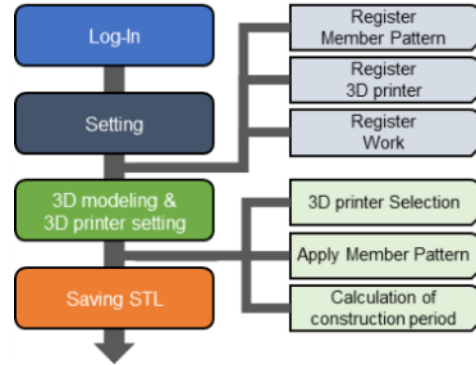


Fig. 5. API's menu configuration and procedure

4.2 벽체 패턴 자동 적용 기능 개발

벽체 패턴의 정의는 다양한 형태의 패턴을 하나의 형식으로 표현하기 위해 단위화 개념을 도입하였다.

패턴 입력방법에 대해 설명하기 위해 물결모양의 패턴에 대해 설명한다. Fig. 6과 같이 물결패턴 정의 시 폭방향으로 최상단과 최하단을 항상 1과 -1로 입력하고, 길이방향으로 최대 1의 값이 되도록 입력한다. 이렇게 단위 크기로 정의된 패턴은 입력받은 노즐폭과 자동계산된 벽체폭에서 노즐폭을 뺀 값 및 패턴 길이를 사용하여 단위화된 패턴값에 곱하여 패턴을 자동으로 생성하는 알고리즘을 적용하였다. 이러한 정의방식은 사용자가 어떠한 패턴 형태를 입력하더라도 프로그램 상에서 이를 고려할 수 있다.

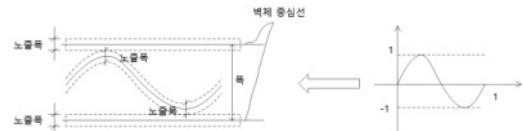


Fig. 6. Wall pattern application algorithm

4.3 공기 산출 및 공정추정 모듈 개발

4.3.1 공기 산출 개념 및 방법

3D 프린팅 작업 시 빠른 출력의 경우 특정 높이 이상이 되면 시멘트 페이스트가 충분한 강도가 확보되지 않은 상태로 적층되기 때문에 벽체 구조의 안정성이 확보되지 못하는 경우가 있다. 이런 경우 프린트 작업에 유효 시간을 두어 출력된 벽체의 안정성을 확보하도록 해야

한다. 이러한 유희시간을 쿨타임으로 정의하고 전체 3D 프린팅 일정에 이를 포함하여야 한다. 노즐 쿨타임 판단 기준을 크게 3가지로 분류하고 있으며, 이러한 노즐 쿨타임 판단기준에 따라 3D 프린팅 공정시간 계산 방식이 달라져야 한다.

(1) "레이어 수"를 선택한 경우

"레이어 수"를 선택한 경우는 입력된 레이어 수만큼 프린팅을 하고 이 후 노즐 쿨타임 만큼의 유희시간을 가지도록 하는 쿨타임 판단기준이다. "레이어 수"를 선택한 경우 프린팅 시간은 아래와 같이 산정할 수 있다.

먼저 총 레이어 수 l_{Total} 은 다음과 같다.

$$l_{Total} = \frac{H_{wall}}{h_{layer}} \quad (1)$$

Where, l_{Total} denoted Total number of wall layers, H_{wall} denotes Total number of wall layers, h_{layer} denotes Laminated height per one (Input value)

레이어 한 개 층에 대한 출력 시간을 산정하기 위해 먼저 레이어 한 개 층에 대한 총 출력 길이를 알아야 하며, 이는 다음과 같이 계산한다.

$$l_{layer} = \left(\frac{V_{Total}}{H_{wall}} \right) / w_{nozzle} \quad (2)$$

Where, l_{layer} denoted Output length per layer, V_{Total} denotes Total volume (Calculated value), H_{wall} denotes Wall height (Input value), w_{nozzle} denotes Nozzle width (Input value)

레이어 한 개 층을 출력하기 위해 소요되는 시간은 다음과 같이 계산된다.

$$t_{layer} = \left(\frac{l_{layer}}{s_{nozzle}} \right) / 60 \quad (3)$$

Where, t_{layer} denoted Output time per layer, s_{nozzle} denotes Nozzle movement speed (Input value)

또한, 쿨타임 횟수는 다음과 같다.

$$n_{cool} = \frac{l_{Total}}{l_{input}} \quad (4)$$

Where, n_{cool} denoted Number of cooling time, l_{input} denotes Number of layers of input cooling

time (Input value)

위의 관계들을 사용하여 전체 프린팅 시간 t_{Total} 을 산정하면 다음과 같다.

$$t_{Total} = (t_{cool} + t_{layer} \times l_{input}) \times n_{cool} + (l_{Total} - n_{cool} \times l_{input}) \times t_{layer} \quad (5)$$

(2) "운용시간"을 선택한 경우

"운용시간"이란 레이어 수에 의한 벽체 구조의 안정성보다 프린터기의 한계로 인한 제약사항이라 할 수 있다. 프린팅 면적이 넓은 경우 재료의 경화가 충분히 진행되어 레이어를 높이 적층하더라도 벽체의 구조적 안정성이 확보될 수 있다. 이러한 경우 프린터기는 연속적으로 작업을 수행하게 되며, 이로 인해 기계자체의 부하가 발생할 수 있다. 따라서 프린터기 운용시간에 제약을 둬므로서 유희시간을 확보하여 기계의 정상동작을 확보하고자 하는데 그 목적이 있다.

"운용시간"을 선택한 경우도 전체 프린팅 일정에 고려되어야 하며, 이를 고려하기 위해 운용시간에 의한 출력 가능한 레이어 수를 계산하고, 이를 바탕으로 "레이어 수"를 선택한 경우와 동일한 산정방식을 사용한다. 이때 출력가능한 레이어 수의 계산은 레이어 중간에 출력을 중지하지 않고 하나의 레이어가 모두 출력되었을 때를 고려하여 산정한다.

$$l_{input} = \frac{t_{operation}}{t_{layer}} \quad (6)$$

Where, $t_{operation}$ denoted Operation time (Input value)

위의 식을 통해 쿨타임 레이어 수인 l_{input} 을 계산하여 "레이어 수"를 선택한 경우와 동일하게 계산한다.

(3) "재료량 추가"를 선택한 경우

"재료량 추가"의 경우는 3D 프린터기의 재료 저장장치에 의해 발생하는 재료의 재충진을 위한 유희시간을 의미한다. 3D 프린터기에는 여러 종류가 있으며, 재료의 공급방식에 펌핑을 통한 연속적 공급과 미리 제작된 재료를 저장장치에 담아 출력하는 방식이 있다. 재료를 저장장치에 담아 출력을 하는 경우 재료가 모두 소진되었을 때 재 충전이 필요하며, 이를 위한 쿨타임이 요구된다. 따라서 "재료량 추가"를 선택한 경우도 전체 프린팅 일정에 고려될 수 있어야 한다.

"재료량 추가"의 경우도 "운용시간"을 선택한 경우와 동일하게 재료량으로 한 번에 출력할 수 있는 레이어 수를 계산하고 이를 사용하여 "레이어 수"를 선택한 경우와 동일한 계산식을 사용하여 전체 프린팅 시간을 산정한다. 이를 위해 "레이어 수"는 다음과 같이 산정한다.

$$l_{input} = \frac{V_{input}}{l_{layer} \times w_{nozzle} \times h_{layer}} \quad (7)$$

Where, V_{input} denoted Add material amount (Input value), h_{layer} denotes Laminated height per one (Input value)

4.3.2 3D 프린팅 공기를 고려한 공정산출 기능

공기 산정은 Fig. 7과 같은 공정입력창을 이용한다. 기존 공중 정의 메뉴에서 사용자가 환경설정에서 미리 등록한 공중 데이터를 선택하면 공중 데이터를 자동으로 읽어 와서 공기 산정을 위한 입력창을 구성한다. 이때 사용자는 예상 공기와 선·병행공정 및 공정시작을 입력하여 공정 순서를 계획할 수 있다.

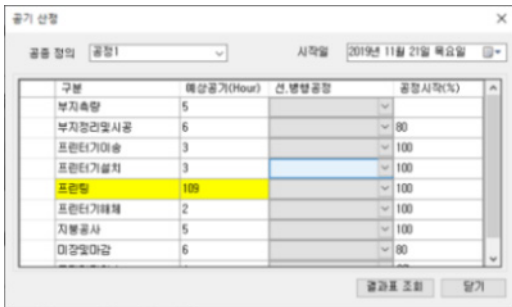


Fig. 7. Calculation of construction period

5. 설계지원도구 검증

5.1 테스트 개요 및 계획

건축 3D프린팅 설계지원도구의 주요 기능은 벽체 패턴 자동 적용 기능, 공기 산정, STL파일 출력 검토 등이다. 주요 기능을 검증하기 위해 다음과 같은 테스트를 진행하였다.

벽체 패턴 자동 적용 기능의 테스트는 Rhinp 3D에서 3D 모델링을 진행한 후 벽체 패턴을 적용하여 확인하는 것으로 진행하였다. 공기 산정의 경우 앞서 4장에서 정의된 수식에 대한 검증을 실시한다. 검증 방법으로는 입력

값들을 가정하고 실제 규모에 가까운 검증 모델을 선정하여 엑셀 수식 결과값을 통해 검증한다. 이때 통상적인 출력시간 소요일을 기준으로 결과값의 적정성 검토한다. 공기산출 윈도우 기능의 경우 출력된 화면을 바탕으로 오류 여부를 판단하도록 하며, 본 논문에서는 이에 관한 검토를 별도로 진행하진 않았다. 마지막으로 3D프린팅을 위한 가장 마지막 단계인 STL파일로의 출력과정에서 생성된 모델이 STL파일로 형상의 오류없이 제대로 저장되는지를 판단하기 위해 테스트 모델을 선정하였다. 그리고 이를 STL파일로 출력한 후 외부 프로그램에서 STL파일을 다시 불러와 형상을 검토함으로써 STL파일 출력에 대한 기능 검증을 수행하였다.

5.2 기능 테스트 및 결과

5.2.1 벽체 패턴 자동 적용 기능

벽체 패턴 자동 적용의 검토는 다음과 같이 벽체 중심선 그리기, 프린터기 선택, 벽체 패턴 적용, 벽면 형상 추출, 벽면에 두께 적용, 벽면 패턴 검토 순으로 진행된다. 각 단계별 진행 및 검토결과는 다음과 같다(Fig. 8).

(1) 벽체 중심선 그리기

벽체 중심선은 CAD정보를 불러오거나 또는 사용자가 직접 프린터가 지나가는 외벽과 내벽의 중심선을 X-Y평면에 그려준다. 내벽과 외벽은 일정한 두께로 서로 평행하거나 또는 두께가 변하는 복잡한 형상으로 모델링이 가능하다. 두께가 변하는 경우, 내벽과 외벽이 서로 연관된 유사한 형상을 가지고 있다면 모델링에 제약은 없다.

(2) 프린터기 선택

3DP 작업 탭을 클릭하고 환경설정에서 미리 등록된 프린터기 목록에서 프린팅에 사용할 프린터기를 선택한다.

(3) 벽체 패턴 적용

벽체에 적용할 패턴을 선택하여 자동으로 벽체 중심선을 따라 패턴을 적용하도록 한다. 벽체 패턴 적용 방식은 등간격과 비율 방식이 있다. 등간격은 벽체 중심선 길이를 동일한 간격으로 분할하여 여기에 패턴을 적용하는 방식이며, 비율 방식은 패턴의 폭과 길이의 비율을 사용자가 정의하면 자동으로 하나의 패턴에 대한 폭과 길이에 대한 계산을 수행하여 패턴 하나의 길이를 산정하고 이를 기준으로 중심선 길이에 대해 등간격으로 나누

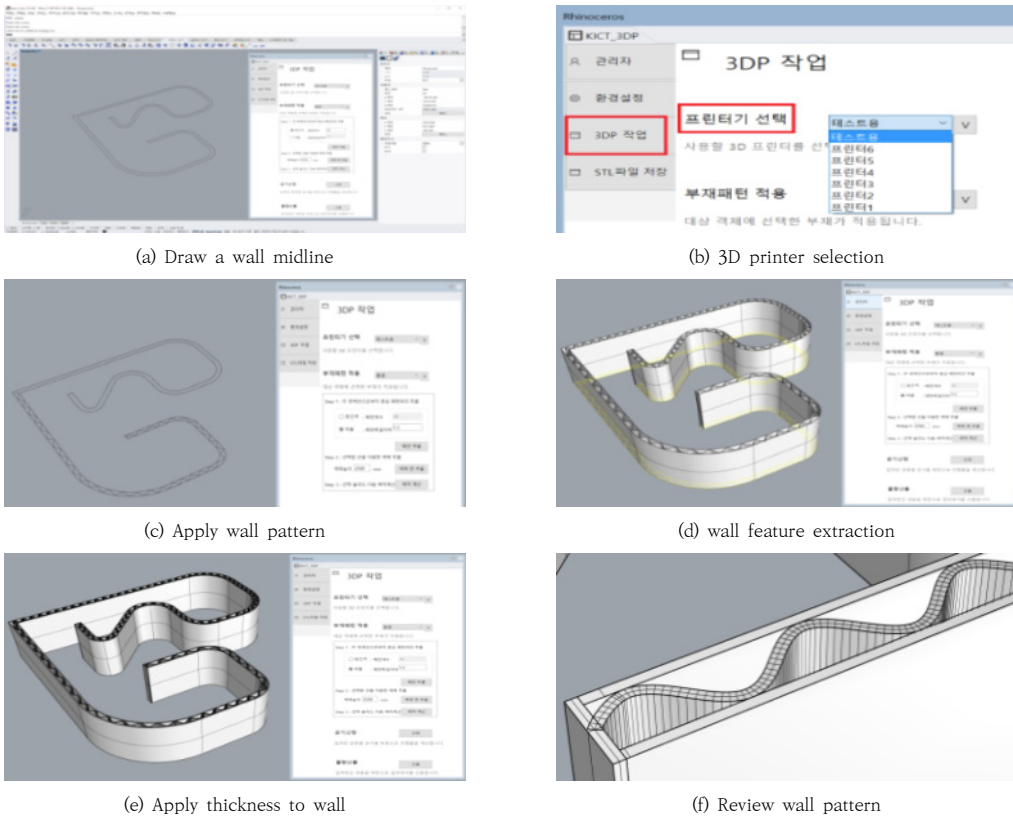


Fig. 8. Wall pattern automatic application function

는 방식이다. 등간격은 선택할 벽체에 몇 개의 패턴을 적용할 지에 대한 패턴 개수를 입력하도록 되어있으며, “비율”의 경우 하나의 패턴에 대한 폭-깊이비를 입력하도록 하고 있다. 등간격과 비율방식 모두 모델에 패턴을 적용하는 모델링 방법은 동일하다. 패턴 모델링 방법은 미리 입력된 패턴들 중 현재 벽체에 적용할 패턴을 먼저 선택한다.

(4) 벽면 형상 추출

벽체에 패턴을 모두 적용한 후 입체로 추출할 벽면의 선을 선택하고 “벽체 면 추출”버튼을 클릭한다.

(5) 벽면에 두께 적용

형상을 정의하는 모델링의 마지막 단계로서 면 형태로 추출된 벽체에 두께를 정의하여 입체형태로 표현하도록 한다. 이 과정은 API에서 자동적용하지 않고 사용자가 Rhino 3D의 offset surface기능을 사용하여 두께를 적용해 준다.

(6) 벽체 패턴 검토

패턴 모델링이 제대로 수행되었는지를 확인하기 위해 부분적으로 확대하여 모델링 형상을 체크한다. Fig. 9-(f)는 패턴이 시작되는 부분이며, 패턴과 벽체가 정확하게 만나고 있는 형상을 보여준다.

5.2.2 공기산정 검토

공정에 사용되는 3D 프린팅 출력 시간은 프로그램이 내부적으로 계산하고 있으며, 계산 방식은 4.3 공기 산출 및 공정추정 모듈 개발에 정의되어 있다. 공기산정에서 가장 기본이 되는 것은 쿨타임을 정의하기 위한 레이어 수이며, 이 설정을 바탕으로 검증을 수행한다. 검증에 사용된 값은 벽체 높이 2,500mm, 전체 부피 15,000,000,000mm³(실제 15,549,915,072mm³이며 억단위 생략), 노즐 폭 40mm, 노즐이동 속도 20mm/sec, 쿨타임 240분, 쿨타임을 위한 레이어 수 25로 설정하였다. 일반적으로 이와 유사한 형태의 프린팅은 4~7일 정도 소요되는 것으로 파악되었으며, 이 범위 내

의 값이 나오면 적절한 것으로 판단한다. 계산을 위해 가정한 값을 사용하여 엑셀에서 계산을 수행한 결과 4.5일로 계산되어 본 연구에서 제시된 방식이 유효한 것으로 검증된다(Fig. 9).

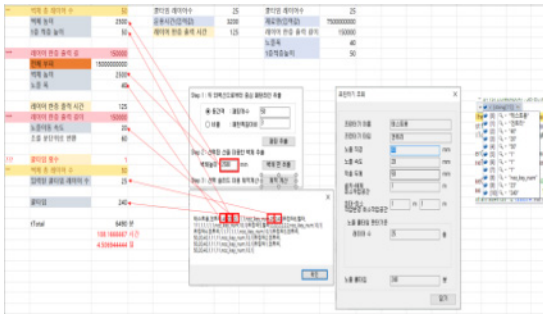


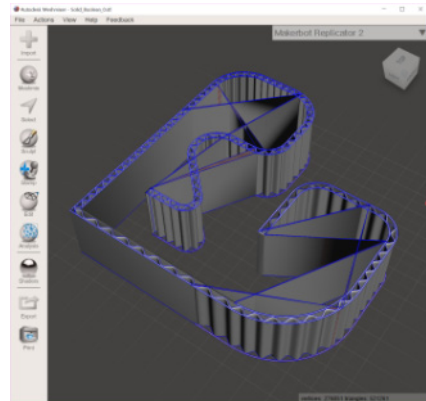
Fig. 9. Excel reviewing the calculation of construction period

5.2.3 STL 파일 출력 검토

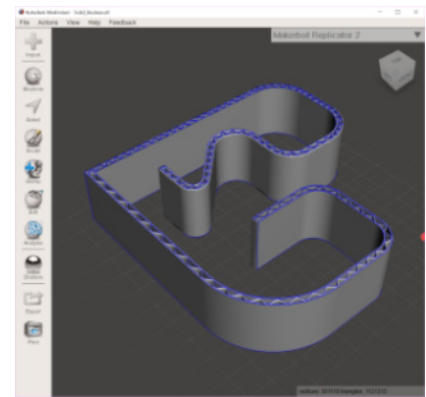
Rhino 3D의 STL 출력 기능을 테스트하기 위해 앞에서 모델링된 물결패턴을 가지는 모델을 STL파일 형태로 저장하고 이를 Autodesk사의 MeshMixer에서 모델 형상이 깨지지 않고 예러 없이 파일이 열리는지에 대한 테스트를 진행하였다. 테스트는 Rhino 3D에서 모델링 순서를 위해 사용된 예제파일을 STL파일 출력 대상 모델로 사용한다.

테스트진행 시 도구에서 지원하는 세부제어 옵션의 “최대가장자리 길이”의 값을 0~100mm까지 변화시켜 출력되는 STL 모델을 살펴보았다.

“최대가장자리 길이”의 의미는 mesh최대 분할 길이를 뜻하며, 초기값 0.0은 모델링할 때의 크기를 그대로 사용하는 것인데 곡면이 생성되어있고, 이 곡면의 내부 surface 분할이 매우 적은수로 되어있다면 STL변환 시 반드시 예러가 발생된다. 따라서 최대 가장자리 길이를 100mm정도로 한다면 일반적인 건축물 규모에 대해서 무리없이 변환이 가능할 것으로 판단된다. 이 값이 클수록 예러가 발생될 확률이 커지며, 이 값이 작을수록 STL 파일의 용량이 커지며, STL파일 변환 시 변환 시간이 과하게 소요된다(Fig. 10).



(a) Set "Maximum Edge Length" to 0.0



(b) Set "Maximum Edge Length" to 100.0

Fig. 10. Review conversion to STL

6. 결론

본 연구에서는 건축물 3D 프린팅 설계지원도구 개발의 필요성을 인식하고, 이에 따른 설계지원도구를 설계하고, 개발하였다. 이를 위해 기존 3D 프린팅 설계도구를 건축물 3D 모델링 소프트웨어, 핸드 툴, 슬라이서로 분류하여 고찰하였으며, 고찰한 결과를 참고하여 설계지원도구의 적합한 모델링 도구를 선정하였다. 그리고 설계지원도구를 설계하기 위해 선행연구에서 도출된 기능을 바탕으로 전문가들과의 자문을 통해 핵심기능을 도출하였다. 핵심기능은 핵심 인터페이스 설계와 벽체 패턴 자동 적용 기능, 공기 산출 및 공정추정 모듈 기능 등이다. 선정된 핵심기능을 중심으로 설계지원도구를 개발하였으며, 개발된 기능은 임의로 모델링된 데이터를 활용하여 검증을 실시하였으며, 3D 프린팅 기술에서 중요하게 고려되는 STL 파일 출력 검토도 함께 진행하였다. 그 결과,

벽체 패턴 자동 적용은 간섭 및 오차없이 생성되었으며, 공기산정도 본 연구에서 제시한 방식이 유효한 것으로 나타났다. 또한 STL 파일 출력도 최대가장자리 길이값을 건축물에 맞게 제시하여 에러값을 최저로 할 수 있도록 제시하여 검토하였다.

본 연구에서 건축물 3D 프린팅 설계지원도구를 건축 설계에서 많이 사용되는 모델링 도구를 활용하여 개발한 것은 모든 겐트리 타입의 3D 프린팅 기술에 적용할 수 있다는 것에 큰 의의가 있다. 또한 3D 프린팅이란 새로운 기술을 건축물에 적용함에 있어 공정관리 중 주요핵심인 공기산출을 할 수 있는 방식을 제안한 것은 향후 3D 프린팅을 이용한 건축물 출력에 있어 설계단계에서 정량적인 공정관리를 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

다만, 본 논문에서 제시한 설계지원도구는 핵심기능에 대해서만 제시하고 있기 때문에 사용자와 관리자 등의 개인설정 관리 및 서버 로그인 기능, 건설공사 표준폼셈과 일위대가와 연계된 공정관리 및 물량산출 기능 등이 추가 연구개발이 필요하다. 또한 본 연구에서 선정한 Rhino 3D 뿐만 아닌 Revit과 같은 상용화된 프로그램과 연계할 수 있는 기능 등을 도출하여 추가적인 개발이 요구된다. 따라서 향후 연구에는 앞서 언급한 기능과 다양한 3D 프린팅 타입에 맞는 설계지원도구 개발을 진행할 것이다.

References

- [1] K. B. Ju, M. B. Seo, H. J. Park, "A Development of Work Breakdown Structure and Link to Standard Estimation System for 3D Printing Building", Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol.19, No.12, pp.702-708, Dec. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.702>
- [2] T. A. M. Salet, F. P. Bos, R. J. M. Wolfs, Z. Y. Ahmed, "3D concrete Printing - A structural Engineering Perspective", Proceedings of the 2017 fib Symposium, pp.51-57, Jun. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2>
- [3] D. Lee, D. Lee, H. Cho, K. I. Kang, "Production Process and Mock-up Test of Freeform Concrete Segments using LOM type 3D Printer", Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol.18, No.1, pp.89-98, Feb. 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2018.18.1.089>
- [4] Y. W. D. Tay, B. Panda, S. C. Paul, N. A. Noor Mohamed, M. J. Tan, "3D Printing Trends in Building and Construction Industry: A Review", Journal of Virtual and Physical Prototyping, Vol.12, NO.3, pp.261-276, Apr. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
- [5] J. J. Yeon, "A Study Converting BIM Data into 3D Printing Data", Master's thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, pp.19-20, 2015.
- [6] H. J. Park, M. B. Seo, K. B. Ju, "A Study on Development of Design Support Tool for Building 3D Printing", Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol.20, No.12, pp.182-189, Dec. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.12.182>
- [7] S. J. Jung, T. H. Lee, "Study of Trends in The Architecture and The Economic Efficiency of 3D Printing Technology", Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.15, No.10, pp. 6336-6343, Oct. 2014
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.10.6336>
- [8] H. J. Park, M. B. Seo, K. B. Ju, "A Development of Work Item and Duration Estimation Method for 3D Printing based Building", Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol.18, No.12, pp.200-207, Dec. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.12.200>
- [9] Autodesk Revit, <https://www.autodesk.co.kr/products/revit/overview> (accessed Aug. 27, 2020)
- [10] Rhino 3D, <https://www.rhino3d.com/6/features> (accessed Aug. 27, 2020)
- [11] Fusion 360, <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview> (accessed Aug. 27, 2020)
- [12] MakePrintable, <https://makeprintable.com/features> (accessed Aug. 27, 2020)
- [13] MeshFix, <https://github.com/MarcoAttene/MeshFix-V2.1> (accessed Aug. 27, 2020)
- [14] Meshmixer, <http://help.autodesk.com/view/MSHMXR/2019/ENU/> (accessed Aug. 27, 2020)
- [15] NetFabb, <https://www.autodesk.co.kr/products/netfabb/overview> (accessed Aug. 27, 2020)
- [16] 3DprinterOS, <https://www.3dprinterOS.com/best-3d-printing-software-for-manufacturers/> (accessed Aug. 27, 2020)
- [17] Ultimaker Cura, <https://ultimaker.com/ko/software/ultimaker-cura> (accessed Aug. 27, 2020)

이 동 윤(Dongyoun Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 (공학박사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : 한국건설기 술연구소 미래융합연구본부 건설 자동화연구센터 박사후연구원

<관심분야>

건설 3D 프린팅, 건설관리, BIM, 가상현실, 스마트건설

서 명 배(Myoung-Bae Seo)

[정회원]



- 2001년 2월 : 조선대학교 전자계 산학과 (공학석사)
- 2019년 8월 : 세종대학교 컴퓨터 공학과 (박사수료)
- 2003년 2월 ~ 현재 : 한국건설기 술연구원 미래융합연구본부 건설 자동화연구센터 수석연구원

<관심분야>

건설정보, BIM, 가상현실, 건설3D 프린팅, 스마트건설

주 기 범(Ki-Beom Ju)

[정회원]



- 1998년 2월 : 단국대학교 대학원 건축계획과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 서울시립대학교 대 학원 건설관리과 (박사수료)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 한국건설기 술연구원 스마트건설혁신본부 선 임연구원

<관심분야>

건설 3D 프린팅, 건설관리, BIM, 스마트건설