



3D 프린터에 공급되는 PLA 필라멘트의 물성치 측정

Measurement of Structural Properties of PLA Filament as a Supplier of 3D Printer

최원* · 우재형** · 전정배** · 윤성수***,†

Choi, Won · Woo, Jae-Hyeong · Jeon, Jeong-bae · Yoon, Seong-soo

Abstract

Most of agricultural structures are consisted of complex components and exposed to various boundary conditions. There have been no ways to express those structures exactly for model experiment. As an alternative, 3D printer can produce any type of solid model. However, there are limited informations related to structural experiments using 3D printer. The object of this study gives the basic informations to structural engineers who try to use 3D printer for model experiment. When PLA was used as a supplier for 3D printer, the outcomes showed less heat deformation to compare with ABS. To test the material properties, two kinds of experiments (three-point flexibility test and compression test) were executed using universal testing machine. In three-point flexibility test, plastic hinge and its deformation were developed as observed in material such as steel. The behavior was in a linear elastic state, and elastic bending modulus and yield force were evaluated. In the compression test using unbraced columns with hinge-hinge boundary condition, the constant yield forces were observed regardless of different lengths in all columns with same section size, whereas the compressive elastic modulus was increased as the length of column was increased. The suggested results can be used for model experiments of various agricultural structures consisted of single material.

Keywords: 3D printer; filament; PLA; three-point flexibility test; compression test

1. 서 론

최근의 구조물은 다양한 수요에 발맞춰서 여러 형태의 구조물로 진화하고 있다. 그러나 실제 스케일대로 제작한 현장 실험은 시간과 비용이 기하급수적으로 소요되기 때문에 다양한 조건을 고려하지 못하며 매우 한정적으로만 진행되고 있다. 축소모형 구조실험들 중 Lee et al. (2010)은 철근과 콘크리트의 이중적인 재료특성에 기반한 상사법칙을 제안하였고, 원형구조물과 축소모형에서 다른 재료특성의 사용에 따른 영향을 반영하였으며, 일련의 시뮬레이션을 통해 타당성을 검토하였다. Cho et al. (2004)은 대구경 현장타설말뚝의 지지력 측정을 축소모형말뚝을 이용하여 경제적이고 효과적인 방안을 제시하고자 하였다. 또한 Yoo et al. (2005)은 계단식 보

강도 용벽에 대한 축소모형 실험을 통하여 용벽의 파괴 기작을 분석하였다. 다른 한편으로는 다양한 물질에 대한 인장 및 압축과 관련된 재료의 물성치를 도출하는 실험들이 진행되었다. Lee et al. (2004)은 해수가 흡수된 두꺼운 두께를 갖는 적층된 Carbon-Epoxy 복합재의 압축특성에 대한 연구를 정수압의 영향 아래에서 진행하였으나, 실험과 관련된 특별한 기준에 대한 언급은 없었다. Bang et al. (2011)은 알루미늄 폼 및 허니컴 샌드위치 복합재료의 면내·외 압축실험을 수행하였는데, 물성 관련 언급된 시방서 규정은 없었으며, 만능시험기기를 이용하여 하중-변위 관계와 좌굴하중의 특성을 분석하였다. Hwang and Choi (2011)는 수공적층으로 생산된 유리강화플라스틱을 이용한 기둥의 재료 강도를 추정하기 위한 실험을 진행하였다. 실험은 인장강도, 전단강도, 휨강도에 대해서 진행하였는데, 인장강도만 독일 DIN EN ISO 527-1,4에 근거하여 수행하였으며, 실험으로부터 계산된 물성치는 독일규준 DIN-18820에 근거한 복합적층 MW1과 비교해 보았다. Lee et al. (2011)은 FRP-콘크리트 합성말뚝인 하이브리드 CFRT (HCFRT)를 개발하는 과정의 일부로, CFRT와 HCFRT의 압축강도 실험을 진행하였는데, CFRT의 경우는 KS M ISO 527-4를 참고로 치수에 변화를 두어 실험하였으며, HCFRT의 경우는 기존의 연구문헌을 참고로 설정하였다. 그렇지만 구조분야에서 실내실험은 극히 한정적으로 진행되어 왔으며, 또한 부분적인 3차원 형태나 2차원 형태로 간소화

* Postdoctoral Fellow, Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University

** Graduate Student, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

*** Professor, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

† Corresponding author

Tel.: +82-43-261-2575 Fax: +82-43-271-5922

E-mail: yss@cbnu.ac.kr

Received: July 31, 2015

Revised: October 19, 2015

Accepted: November 18, 2015

하여 진행되어왔다. 일반적인 토목구조물과 달리 농업토목 구조물은, 실시간 변화하는 다양한 농산물 수요에 맞추어, 최소한의 비용으로 유동성 있게 건설되는 특징이 있다. 그러다 보니 최근에 빈번히 발생하는 이상강우나 폭설에 의한 구조물의 붕괴가 많이 보고되고 있다. 또한 농업토목 구조물은 다양한 경계조건 및 하중조건을 내포하고 있기 때문에 모든 경우를 고려해야 하지만, 설계단계부터 현실반영은 부분적으로 이루어지고 있다. 농업토목 분야 중 비닐하우스의 경우는 폭설로 2004년 1,700억원의 피해가 발생하였으며, 현재도 해마다 기후특성에 의하여 여름에는 태풍, 겨울에는 눈, 더불어 연중 돌풍에 의하여 한해 평균 약 1,000억원의 비닐하우스 기상재해가 발생하고 있다 (Jung, 2004; Ru, 2015). 특히, 비닐하우스는 지역의 특성에 따라서 불균일 하중이 지붕에 발생할 수 있는데도, 이를 고려한 실험은 미비한 실정이다 (Cho, 2010; Kim et al., 2012). 또한 구조물에서 발생 가능한 조건들을 고려한 구조 실험이 진행되고 있지만, 대부분의 실험은 현장실험이다 (Kim, 2006; Ru, 2015). 만약 저렴한 비용의 구조 실험 방법이 고안된다면 예산을 획기적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 다양한 분야로의 확대도 가능할 것으로 보인다. 또한 구조물의 사실적 묘사를 통해서 구조실험이 진행된다면 구조실험의 신뢰성도 보장될 것으로 보인다. 그 대안으로 3D 프린터를 이용할 수 있다.

최근 3D 프린팅 기술 발전으로 인하여 다양한 분야에서 3D 프린팅을 이용한 연구들이 진행되고 있다. Choi et al. (2013)은 3D 프린터를 이용하여 공업, 의료, 실생활에 대한 연구를 진행하였고, Oh (2014)는 FDM 와이어 적층가공 방식의 조립형 3D 프린터로 골반 골절 모델을 직접 제작하여 비용과 시간을 단축하였다. Park et al. (2014)은 3D 프린터를 활용하여 콘크리트 거푸집으로 활용할 수 있는 방안에 대해서 논의하고 석고를 활용한 모형실험을 진행하였다. 그러나 현재 3D 프린터는 구조분야에서는 매우 한정적으로 이용되고 있으며 기초적인 데이터조차 마련되어 있지 않다. 따라서 본 연구는 현재 급속도로 보급되고 있는 3D 프린터 기술을 이용하여, 구조해석을 진행하고자 하는 연구자들을 위한, 기초자료를 제공하는데 목적이 있다. 적층형 형태의 3D 프린터에 사용되는 대표적인 공급물질로는 ABS와 PLA가 있는데, 구조재료로서 선택 가능한 PLA의 합리성에 대하여 설명하고, PLA 재료로 생산된 출력물들의 물리적인 특징을 제공하고자 한다. 구조물의 파괴는 순수한 인장에 의한 파괴보다는 휨에 의한 파괴나 기동과 같은 구조요소가 압축에 지배를 받기 때문에, 휨에 대해서는 3점 휨 시험을, 압축에 대해서는 가로 방향으로 지지되지 않고 양 끝단이 힌지인 기동의 압축시험을 진행 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 3D 프린터 및 필라멘트

3D 프린터는 객체를 프린팅하는 생산방식에 따라 다양한 종류로 구분된다 (Table 1). 본 연구에 이용된 프린터는 적층형 (FDM) 방식을 채택한 3D 프린터 (Sprout, Former's FARM, Busan, South Korea)가 이용되었다. 대부분의 3D 프린터들은 출력물을 지지하는 지지대가 고정이고 노즐이 위 아래로 움직이면서 대상체를 출력하지만, 본 연구에 사용된 3D 프린터는, 출력물을 지지하는 지지대가 움직이는 방식을 취하고 있다. 따라서 작은 사이즈의 객체도 보다 세밀하고 안정적으로 출력할 수 있기 때문에 구조실험을 위한 모형 제작용으로 본 연구에서 채택하였다. 또한 듀얼 노즐을 공급하기 때문에, 구조물을 구성하는 각 요소별로 재료적, 구조역학적인 특징이 다르다면, 구조물 부위별로 구분하여 연속적으로 출력하는 것도 가능하다. 그리고 플라스틱을 뽑아내는 노즐의 경우 0.2 mm부터 0.9 mm까지 다양하게 지원하기 때문에, 구조물의 역학적인 특징에 따라서, 다양한 노즐 선택도 가능하다. 인쇄 가능 사이즈는 가로, 세로, 높이가 각각 235, 200, 200 mm 까지로 대각선의 길이를 고려하여 얻을 수 있는 최대 치수는 300 mm까지 가능하다.

3D 프린터의 원료로 사용되는 재료는 필라멘트라 불리는 플라스틱 계열의 재료가 다양하게 이용되는데, 대표적인 두 가지로는 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)와 PLA (Polylactide)를 들 수 있다. 필라멘트를 최종적으로 뽑아내는 노즐의 Extruder 내부온도는 ABS의 경우 225도 이상 설정하여야 하지만, PLA의 경우는 180도와 200도 사이에서 조절이 가능하다. 동일한 계열의 필라멘트라도 회사마다 제조하는 과정이 조금씩 다르고 염색된 필라멘트의 경우는 재료적 특성이 다를 수 있기 때문에, Extruder의 내부온도는 경험적으로 결정되어야 한다. 재료적 특징으로 ABS의 경우는 PLA보다 끈끈한 성질이 있고, 출력 후 사포나 샌딩 등의 표면 처리가 비교적 용이하며, 플라스틱용 도료나 아크릴계 도료로 도장이 가능하다. PLA는 옥수수나 사탕수수 원료로 만들어진 친환경 수지로 고분자 생분해성이며 ABS 보다 유해요소가 적다. 또한 ABS와 비교하여 80% 이상의 강도이며, 이산화탄소 발생량이 적고, 수축이 덜하며, 모형이 출력될 때 발생하는 찌꺼기가 적으며, 기포발생이 없다. 그러나 유기물로 만들어진 재료의 특성 때문에, ABS에 비하여 자연 상태에서 빨리 분해되는 특징이 있으며, 온도에 취약해서 60도 이상의 온도에서는 변형이 있을 수 있다.

Table 1 Type of 3D printer

Type	Characteristics
SLA (Stereolithography)	Stereolithography is the oldest method used to create 3D-printed objects. It's the process by which a uniquely designed 3D printing machine, called a Stereolithograph apparatus converts liquid plastic into solid objects. SLA printers use computer aided design (CAD) files which must be broken up into layers (STL format) before being printed in three dimensions.
FDM (Fused Deposition Modeling)	FDM works on an additive principle by laying down material in layers; a plastic filament or metal wire is unwound from a coil and supplies material to produce a part. FDM printers use two kinds of materials, a modeling material, which constitutes the finished object, and a support material, which acts as a scaffolding to support the object as it's being printed.
SLS (Selective Laser Sintering)	SLS uses high power laser (for example CO2 laser) to fuse small particles of plastic, metal or ceramic powder together, layer-by-layer, to form a solid model. SLS can produce parts from a relatively wide range of commercially available powder materials. These include polymers such as nylon or polystyrene, metals including steel, titanium, alloy mixtures, and composites and green sand.
LOM (Laminated Object Manufacturing)	Laminated Object Manufacturing is a rapid prototyping system that layers of adhesive-coated paper, plastic, or metal laminates are successively glued together and cut to shape with a knife or laser cutter. Objects printed with this technique are additionally modified by machining or drilling after printing. Typical layer resolution for this process is defined by the material feedstock and usually ranges in thickness from one to a few sheets of copy paper.
EBF3 (Electron Beam Freeform Fabrication)	NASA Langley Research Center (LaRC) is the originator and world leader in Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3) technology development. The operational concept of EBF3 is to build a near-net-shape metal part directly from a Computer Aided Design (CAD) file without the need for molds or tooling dies. It uses a focused electron beam in a vacuum environment to create a molten pool on a metallic substrate.
DMLS (Direct Metal Laser Sintering)	The technology fuses metal powder into a solid part by melting it locally using the focused laser beam. Parts are built up additively layer by layer, typically using layers 20 micrometres thick. This process allows for highly complex geometries to be created directly from the 3D CAD data, fully automatically, in hours and without any tooling.
3DP (Three Dimensional Printing)	An inkjet print head moves across a bed of powder, selectively depositing a liquid binding material. A thin layer of powder is spread across the completed section and the process is repeated with each layer adhering the the last. Material options, which include metal or ceramic powders, are somewhat limited but are inexpensive relative to other additive processes.
PP (PolyJet Photopolymer)	PolyJet 3D printing is similar to inkjet document printing, but instead of jetting drops of ink onto paper, PolyJet 3D Printers jet layers of liquid photopolymer onto a build tray and instantly cure them with UV light. The fine layers build up to create a precise 3D model or prototype. The 3D printer also jets a gel-like support material specially designed to uphold overhangs and complicated geometries.

2. 3D Solid Model

오토캐드를 이용하여 3D Solid로 제작된 모델은, 3D 프린터의 표준 파일 포맷인 STL (STereoLithography) 파일로 변환하였다. 이후 3D 출력을 위한 각각의 레이어를 생성하기 위해서는 슬라이서 (Slicer)란 프로그램을 이용하여야 한다. 본 연구에서는 Ultimaker (The Netherlands)사에서 공식 지원하는 오픈 소스인 Cura 14.01 슬라이서를 이용하여 최종적인 G-code 파일을 생성하였다. G-code 파일을 생성하기 위한 기본 설정으로, 구조물의 출력 해상도를 결정하는 레이어 높이는 0.2 mm로 정하였으며, 구조물의 외부로부터 내부까지 일정 두께를 100% 필라멘트로 채우는 옵션인 외벽두께는 1.2 mm와 2.0 mm로 설정하였다. 구조물 내부를 필라멘트로 채우는 정도를 나타내는 Fill density 항목은 다양한 설정이 가능하다. 단일한 재료로 이루어진 토목 구조물의 요소 내부는

일반적으로 가득 채워져 있기 때문에, Fill density를 100%로 설정해야 한다. 하지만 Fill density를 100%로 설정할 경우, 출력되는 모형의 크기가 커질수록 상단과 하단의 온도 차이가 발생해, 모형이 수축되면서 왜곡 현상이 심하게 발생할 수 있기 때문에, 3D 프린터 공급자들은 Fill density를 35% 정도로 추천한다. 따라서 Fill density 항목은 35%와 100%로 각각 나누어서 진행하였다 (Kang 2015; Kim, 2015; Gary, 2015). 프린팅을 진행하는 출력속도도 구조물의 품질에 영향을 미친다. 만약 속도가 느리다면 출력하는 대상체의 상층면과 하층면 사이에 온도 차이가 발생하고 이는 대상체의 변형을 유도할 수 있다. 또한 속도가 빠른 경우에는 출력의 정확성이 떨어질 수 있다. 따라서 출력속도는 예비실험을 통해서 25 mm·s⁻¹로 설정하였다. 그리고 구조물 형상의 변형을 막기 위해서 첫 번째 레이어를 제외하고는 모두 팬이 돌아가도록 설

정하였다. 특히, 3D 프린터는 접지 면적이 적고 높이가 긴 물체를 생성할 때는 각각의 높이에서 온도가 식어가는 시간 편차가 크게 발생되기 때문에, 제품의 외곽 치수가 위치에 따라 달라지고 품질 또한 저하된다. 따라서 이러한 단점을 줄이기 위하여 기둥의 경우 가로방향으로 출력되었으며, 단면을 대칭으로 만들기 위해서 단면의 형상은 원형을 피하고 정사각형 형태로 제작되었다. 본 연구에서 사용된 프린터는 Fig. 1에 보여지고 있다.

3. 시편의 제작

본 연구에서는 ABS보다 수축변형이 적은 PLA를 구조모형을 제작하기 위한 필라멘트로 선택하였다 (3ddong, 2015; Lievendag, 2015). 3D 프린터는 재료로 쓰이는 필라멘트를 유동화 시키기 위하여 노즐이라는 부분을 용융점까지 가열한다. 이 때 가열된 재료는 노즐을 통해서 내보내지고 bed라는 부분에 적층형태로 쌓이게 되면서 원하는 구조물이 출력되는 형태다. 그런데 각 회사마다 3D 프린터에 필라멘트를 공급하는 방식이 전부 다르기 때문에, 필라멘트의 지름과 노즐의 사

이즈(지름)는 회사별로 차이가 있다. 본 연구에서 사용된 3D 프린터는 0.2, 0.4, 0.6, 0.9 mm까지 다양한 노즐크기를 지원한다. 그래서 각각의 노즐마다 대상체를 출력할 수 있는 최소한의 크기는 다르게 된다. 따라서 가장 정밀하게 출력할 수 있는 0.2 mm 노즐로 테스트 하였을 시, 구조물을 구분할 수 있는 최소 치수는 0.6 mm 임을 확인 할 수 있었다. 따라서 모형 구조물의 최소 치수는 0.6 mm 이상으로 설정하여야 한다. 샘플의 크기는 콘크리트 ASTM C78에 따르면 3점 휨 시험의 경우 단면의 크기가 6×6 인치에 최소길이 21 인치를 권장하고 있으므로, 필라멘트를 이용해서 콘크리트를 대상으로 한 축소실험을 진행하는 것은 타당하지 않다. 하지만 축소된 모형 일지라도 상사법칙이 성립하는 구조적인 거동을 보인다면 철로 구성된 탄성체와 같은 구조물을 대상으로 한 구조실험재료로서는 타당하다. 본 연구에서 사용된 3D 프린터는 출력물이 놓이는 Bed의 사이즈가 한정적이기 때문에, 시편의 크기는 프린터가 뽑아낼 수 있는 최대 길이의 2/3 정도로 설정할 수 있다. 출력된 모형에 하중을 가하고 수치해석 결과와 비교함으로써 실제와 모형간의 연계성을 알아보고자 하였다.

4. 3점 휨 시험

탄성계수를 얻기 위한 실험 중 4점 휨 시험 (Four-point Flexural Test)이 좀 더 신뢰성 높은 실험결과를 보장해 주지만 3D 프린터가 생산하는 최대 길이의 한계 때문에 3점 휨 시험 (Three-point Flexural Test)만을 진행하였다 (Fig. 2).

탄성계수 측정을 위한 기계로는 UTM (Universal Testing Machine, JSM-UH SERIES, JIN SUNG HITEC Co., Ltd., Incheon, South Korea)을 이용하였다. 실험 중에 하중이 증가함에 따라서 재료의 중립축이 이동하고 이러한 미세한 움직임이 가중됨에 따라서 재료가 받침대에서 조금씩 움직이는 현상을 목격하였다. 따라서 재료를 떠받치는 받침대와 시편 사이에 양면 테이프를 이용하여 상대적인 움직임을 최소화 하도록 하였다. 하중을 재하하는 Load의 진행 속도는 $1\sim 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 경험적으로 설정하였으며, 실험하는 동안 하중과 변형 곡선을 실시간으로 저장하였으며, 비디오로 실험 전반을 녹화하여 구조물이 파괴되는 양상도 파악해 보고자 하였



Fig. 1 3D printer used in this study

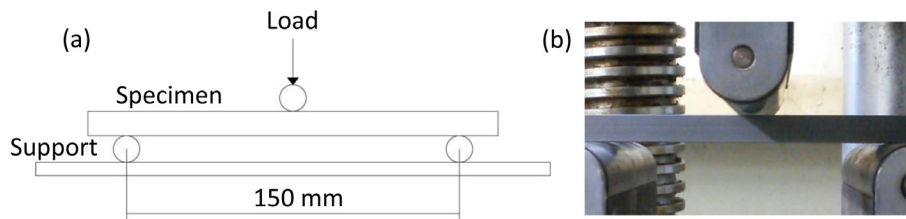


Fig. 2 Three-point flexibility test setup (a) and its experiment (b)

다. 3점 시험에서 하중 (P)과 처짐 (δ)의 관계는 다음과 같이 계산하였다 (Gere, 2004).

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (1)$$

여기서, E 는 휨탄성계수 (Pa), I 는 단면의 관성모멘트 (m^4), L 은 지점간의 길이 (m)이다.

테스트하는 샘플의 단면에서 밑변과 높이를 b (m)와 d (m)로 가정하면, 3점 휨 시험을 통해서 얻고자 하는 탄성계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E = \frac{L^3m}{4bd^3} \quad (2)$$

여기서, m 은 하중-처짐 (P/δ) 곡선에서 접선기울기 (N/m)이다.

재료의 변형이 선형적으로 변하는 구간에서 최대 허용 응력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{allowable} = \frac{M}{I}y = \frac{3Pl}{2bd^2} \quad (3)$$

여기서, M 은 모멘트 ($N\cdot m$), y 는 중립축으로부터의 거리 (m), $\sigma_{allowable}$ 은 허용항복응력 (N/m^2)이다.

5. 압축시험

하중이 부재의 횡단면 내에 등분포로 작용하더라도 구조물이 세장하다면 재료의 불균일성 등에 의해 집중하중처럼 발생하며 따라서 허용압축응력에 도달하기 전에 휘어져 버리는 현상이 발생한다. 그러므로 기둥과 같은 압축부재는 기둥의 길이 (L)와 횡단면의 최소단면인 2차 반경 (r)과의 비에 의해 정의되는 세장비 (Slenderness ratio)에 따라 단주와 장주로 구분한다.

본 연구에서 구조실험을 위해 이용되는 재료는 양단 끝을 아무런 처리 없이 UTM (Universal Testing Machine) 기계에 올렸기 때문에, 각 절점이 이미 힌지 상태라 가정할 수 있다. 따라서 유효 부재 길이계수 (k)는 1이 된다. 단면 2차 반경 (r)은 어떤 도형의 도심을 지나는 축에 관한 단면 2차 모멘트 (I)를 단면적 (A)으로 나눈 것의 평방근 값을 의미하므로 본 연구에서 사용된 세장비는 다음 식과 같이 정의하였다.

$$\lambda = \frac{kL}{r} = L\sqrt{\frac{A}{I}} \quad (4)$$

세장비를 이용하여 장주와 단주를 결정하기 위해서는 한계세장비를 결정하여야 한다. 탄성재료는 탄성학적 선형범위 이내에서 하중에 따른 거동이 일반적으로 동일하다. 따라서 본 연구에서 다루는 구조물의 한계세장비를 계산하기 위하여, 탄성체가 탄성변형 상태에서 성립하는 이론적인 공식을 차용하여, 한계세장비를 계산하였다. 따라서 양 끝이 힌지인 기둥의 경우 잔류응력을 고려한 한계세장비는 오일러 곡선에서 $0.5\sigma_y$ 에 대응하는 값을 기준으로 하고 있다.

$$\left(\frac{kL}{r}\right)_c = \left(\frac{L}{r_{min}}\right)_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y}} \quad (5)$$

여기서, c 는 critical, min 은 minimum, σ_y (Pa)는 항복압축 응력이다.

앞에서 언급한 한계세장비는 장주와 단주의 구분을 위한 대략적인 값을 산출하기 위한 용도로, 정확한 계산을 위해서는 실험을 통한 P-M 상관도를 이용하여 산출하여야 한다.

만약 기둥이 한계세장비 범위에 포함된다면 기둥의 파괴 양상은 단주의 특징을 보일 것이고 하중 변위 그래프로부터 탄성계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{PL}{A\delta L} \quad (6)$$

여기서, ϵ 은 변형률, P 는 압축하중 (N), A 는 기둥 단면의 면적 (m^2), δL 은 기둥의 길이 방향으로의 변화량 (m)이다.

III. 결과 및 고찰

1. 필라멘트에 따른 결과물의 특징

필라멘트의 선택에 있어서는 ABS의 경우 구조용 부품으로 강도가 우수하지만, Extruder의 가열 온도가 높기 때문에, 최종 구조물이 변형될 확률이 PLA보다 높았고, 생산된 구조물의 품질이 형태에 따라서 달라질 수 있는 소지가 높다는 것을 확인하였다 (3ddong, 2015; Lievendag, 2015). 특히, 부피가 큰 출력물은 열에 의한 수축이 다량 발생하여 출력하는 동안 플랫폼 위에서 특정 부위가 크게 휘어지는 현상을 목격하였다. Fig. 3은 ABS와 PLA의 경우 최종 출력물 바닥의 변형 양이 차이가 발생한 것을 보여주고 있다. ABS의 경우는 구조

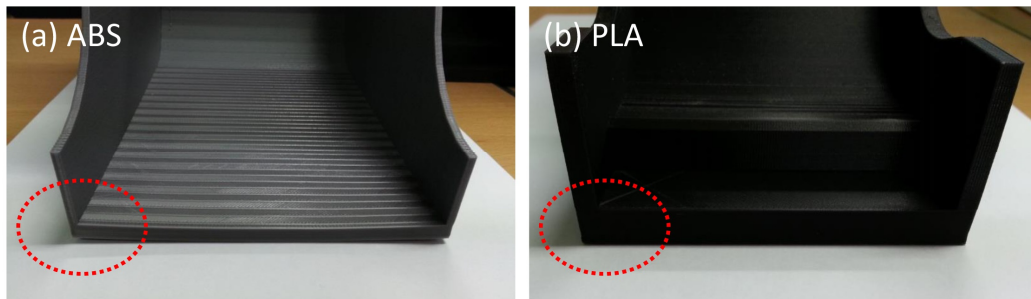


Fig. 3 Deformations of structures printed by 3D printer

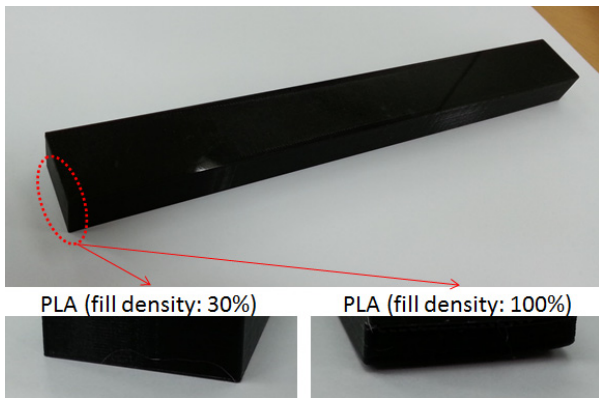


Fig. 4 Deformations depending on fill density

물의 모서리 부분이 바닥에서 들뜬데 비해서 PLA의 경우는 들뜸 현상이 전혀 발생하지 않았다. PLA는 열에 의한 변형이 적으며 비교적 큰 출력물도 외형적인 변형 없이 만들기가 쉽다는 것을 확인하였다. PLA의 경우 재료 특성 상 레이어간 결합이 ABS에 비해 아주 강해서 형태적인 변형이 적은 이유이기도 하다. 구조적 입장에서 변형이란 아주 미소한 변형을 이야기하므로 ABS의 변형은 구조적재료로서 타당하지 않다.

동일한 PLA를 사용한 경우에도 fill density 설정에 따라 결과물의 품질에 영향을 주었다. Fill density란 프린트되는 객체의 내부 필라멘트 밀도를 어떻게 조절할 것인지를 나타내는 값으로, Fig. 4에서 왼쪽은 fill density를 30%, 오른쪽은 100% 설정한 경우이다. 30%인 경우에는 보의 바닥면이 지면과 수평을 이루고 있지만, 100%인 경우는 보의 바닥면의 일부가 지면에서 떠있는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 필라멘트가 적층되면서 상층부와 하층부의 온도차이로 인한 수축으로 발생하는 것으로, 주어진 주변 환경조건에 따라서 편차는 더욱 커질 수도 있다. 특히, 구조물의 높이가 증가할수록 이러한 경향은 더욱 두드러짐을 알 수 있었다. 이러한 현상이 발생하는 위치가 구조물의 전체 변형에 민감한 부분이라면, fill density를 줄이는 방향으로 객체를 출력하여야 할 것이다.

2. 필라멘트 직경설정에 따른 휨탄성계수의 변화

보의 폭과 높이는 각각 0.02 m이고, 길이는 0.20 m인 단순 보 모형을 3D 프린터를 이용하여 출력하였으며 출력 시 필라멘트의 직경설정에 변화를 주어 탄성계수의 차이를 보고자 하였다. 필라멘트의 직경은 1.75 mm와 2.75 mm로, 하중을 단계적으로 부과하였다. 실험 시 시간길이는 0.15 m로 설정하였다.

Cho et al. (2000)은 파괴 및 비파괴 시험을 통한 콘크리트 강도와 탄성계수에 관한 관계를 알아보기 위한 공시체를 제작하였으며, 압축, 인장, 휨 공시체를 각각 4개씩 제작하여 실험하였다. Lee et al. (2004)는 Carbon-Epoxy 적층 복합재의 시험편을 총 4개를 준비하여 압축실험을 진행하였다. Lee et al. (2011)은 두 가지 플라스틱 재질의 FRP 재료들에 대하여 5번의 인장강도 실험을 진행하였다. Hwang and Choi (2011)은 유리강화플라스틱 공시체를 DIN EN 1990에 근거해서, 전체 실험 개수가 5% 분위계 (Fractile) 기준에 맞도록 하기 위해서, 총 5번의 실험을 진행하였다. Bang et al. (2011)은 알루미늄 복합재료의 압축실험을 위해서 총 3번의 반복실험을 수행하였다. 본 연구의 경우도 각각의 경우에 대해서 총 5번을 실시하였다. Fig. 5의 (a)~(e)는 이에 따른 하중-변위 그래프를 나타내며, 그 중 대표성 있는 시험결과를 진한 검은색으로 표시하였다. 참고로 압축탄성계수를 산정하기 위한 방법도 동일한 과정을 거쳤다. 그리고 이 그래프를 이용하여 항복 발생점 이전을 대상으로 기울기를 산정하였으며, 식 2를 이용하여 탄성계수를 도출하였다. 최종 결과는 Table 2에 정리하였다.

Table 2의 case 1, 5, 6, 7로부터 필라멘트 직경이 증가함에 따라서 탄성계수와 항복 값이 감소함을 알 수 있었으며, 이러한 수치는 매우 민감하게 변화하였다. 3D 프린터의 경우 필라멘트의 실제 직경에 상관없이 항상 동일한 양의 필라멘트가 노즐로 공급되어야 동일한 품질의 결과물을 생성할 수 있다. 따라서 동일한 필라멘트에 대하여 직경이 크게 설정될수록 실 프린팅속도는 느려지기 때문에, 출력되는 구조물의 각각

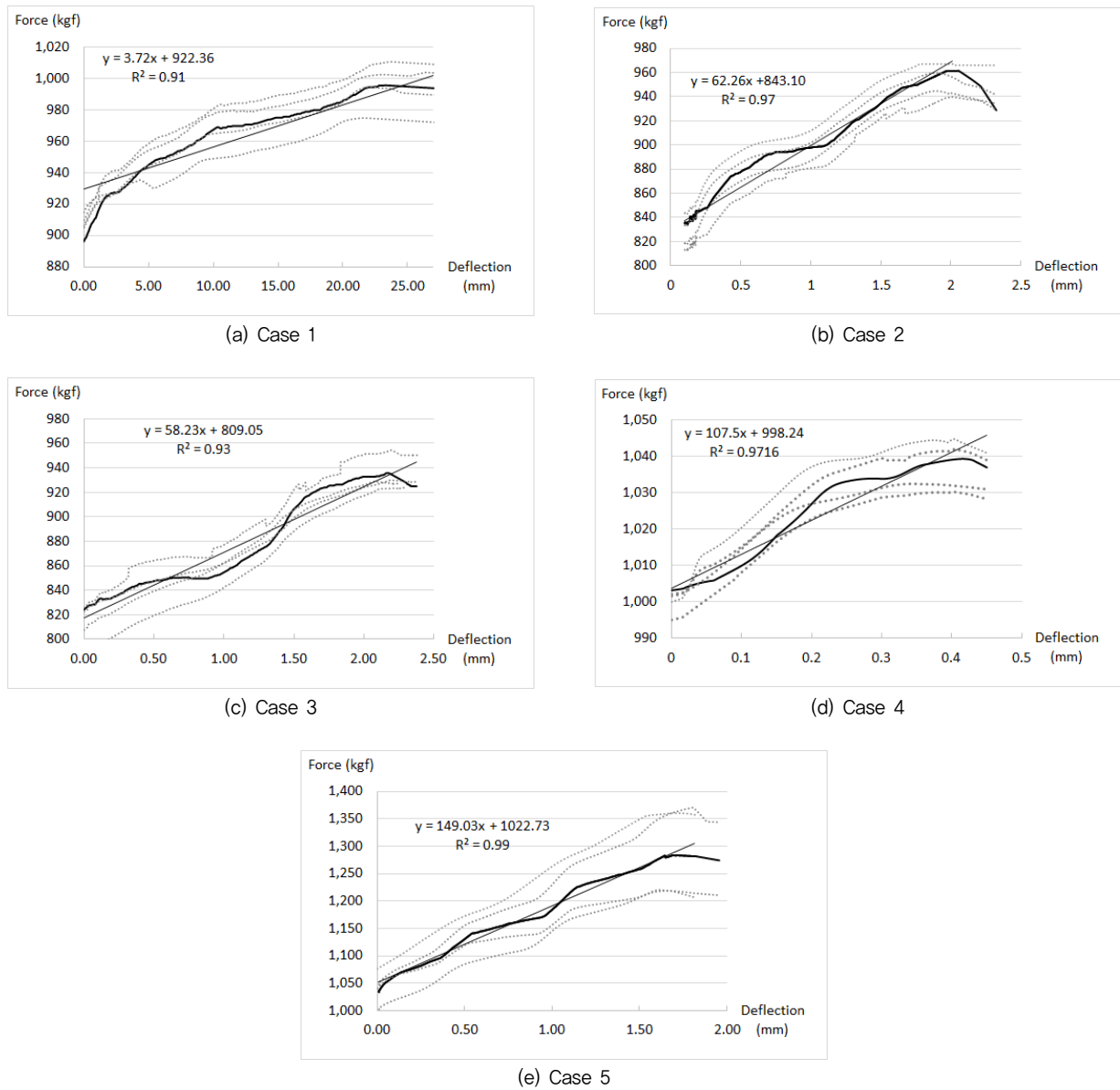


Fig. 5 Load-deflection curve for tensile elastic modulus (each case is matched with the list of Table 1)

Table 2 3D printer setting and tensile elastic modulus

Case	Size (10^{-3} m)	Span length (m)	Diameter setting (m)	Shell thickness (m)	Fill density (%)	Elastic modulus (10^6 N/m ²)	Yield force (10^3 N)	Failure characteristic
1	20×20×200	0,15	0,00275	0,0012	100	191,34	9,76	–
2	10×10×150	0,08	0,00175	0,0020	35	7,564,14	9,51	Many cracks
3	10×10×150	0,08	0,00175	0,0020	35	7,341,96	9,17	Many cracks
4	10×10×150	0,08	0,00175	0,0020	100	13,268,01	9,32	–
5	20×20×200	0,15	0,00175	0,0012	100	7,818,75	12,65	–
6	20×20×200	0,15	0,00200	0,0012	100	4,692,60	11,96	–
7	20×20×200	0,15	0,00250	0,0012	100	1,813,64	10,59	–

의 레이어는, 얇게 프린팅 되는 효과가 발생한다. 이러한 현상은 상호간에 접촉력을 약화시켜 탄성계수나 항복점을 낮게 발생시킨 것으로 판단되었다. 파괴되는 양상은 필라멘트의 사이즈가 증가할수록 변위가 증가되는 방향으로 파괴됨을 관찰할 수 있었다. 그러나 두 가지 모두 항복하는 구조적 재료로서는 무리가 없음을 그래프를 통해 이해하였다. 따라서 사용자가 탄성계수를 변화시키고 싶다면 단순히 필라멘트의 사이즈 변화를 통해서도 가능하다.

3. Shell thickness에 따른 휨탄성계수의 변화

3D 프린터는 필라멘트를 채우는 밀도를 Fill density라는 항목을 통해서 조절할 수 있다. 그러나 생성된 객체의 가장 바깥 부분도 동일한 밀도로 채워진다면 생성된 객체가 때로는 외부 힘에 매우 취약할 수 있다. 따라서 출력할 객체의 표면으로부터 일정한 두께만큼은 필라멘트를 가득 채워서 물체의 강도를 증가시킨다. shell thickness란 이 두께를 조절할 수 있는 항목으로 이의 변화가 탄성계수에 미치는 영향을 실험하였다. 구조물의 사이즈는 폭, 너비가 각각 0.01 m, 0.01 m인 경우와 0.02 m, 0.02 m인 경우로, 전자의 경우 shell thickness는 2.0 mm로 후자의 경우는 1.2 mm로 설정하였다. 실험을 통해서 얻은 탄성계수와 항복점은 Table 2의 case 4번과 5번에, 관련된 그래프는 Fig. 5의 (d)와 (e)에 정리하였다. 만약 앞서 언급된 각각의 보에 대해서 보의 shell thickness가 보의 폭에 대해서 동일한 비율을 갖는다면, 두 보는 상사법칙을 만족하기 때문에, 탄성계수가 동일해야한다. 그러나 이러한 비율을 달리 한 경우 탄성계수에 차이를 보였다. 실험에서도 알 수 있

듯이 전자의 보는 그 비율이 20 %이고 후자의 보는 6 %이기 때문에 전자의 보가 더 높은 탄성계수를 보였다. 그러나 비율이 증가한다고 그 비율만큼 탄성계수가 증가하는 것은 아니었다.

4. Fill density에 따른 휨탄성계수의 변화

논리적으로는 fill density가 증가할수록 구조물이 외부에서 견딜 수 있는 지표인 탄성계수는 증가할 것이다. 이와 관련된 실험은 Table 2의 case 3과 4를 기준으로 진행하였다. 모든 다른 조건들은 동일한 조건으로 설정한 상태에서 fill density가 증가할수록 탄성계수는 증가하였지만 fill density가 증가한 비율대로 탄성계수가 증가하지는 않았다. 그러나 휨에 대한 최대 항복 응력은 부재의 가장 바깥 부분에서 안쪽으로의 일정한 두께만 영향을 받기 때문에, 항복응력에는 커다란 변화가 발생하지 않았다. 그리고 fill density가 낮은 보의 경우 휨에 의한 처짐이 더욱 많이 생김을 알 수 있었다. 특이한 점은 fill density가 100 %인 case 1, 4, 5번의 경우 보의 중앙부에서 휨에 의한 파단이 순식간에 일어났지만, case 2나 3의 경우는 보의 중앙 하단 부 여러 곳에서 크랙이 진전하면서 파단이 서서히 진행되는 특징을 보였다.

5. 휨에 대한 재료적 재현성에 대한 평가

Case 2와 3은 동일한 크기와 동일한 설정을 적용한 객체를 만들었을 때 서로 다른 객체들이 구조체로서 동일한 반응을 하는지를 알아보는 테스트이다. Fig. 6은 시간에 따른 단순보의 처짐으로 두 경우 모두 보의 밑단에서 뚜렷한 항복현상을

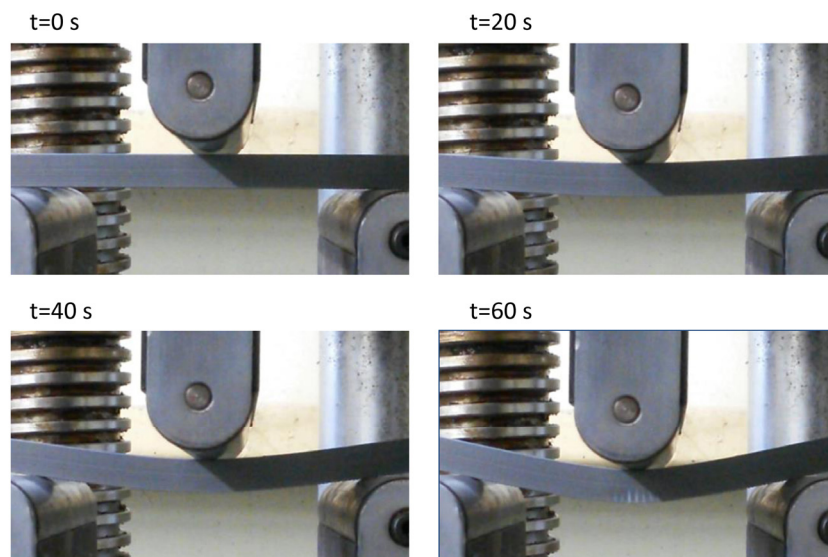


Fig. 6 Deflection of simply supported beam depending on time

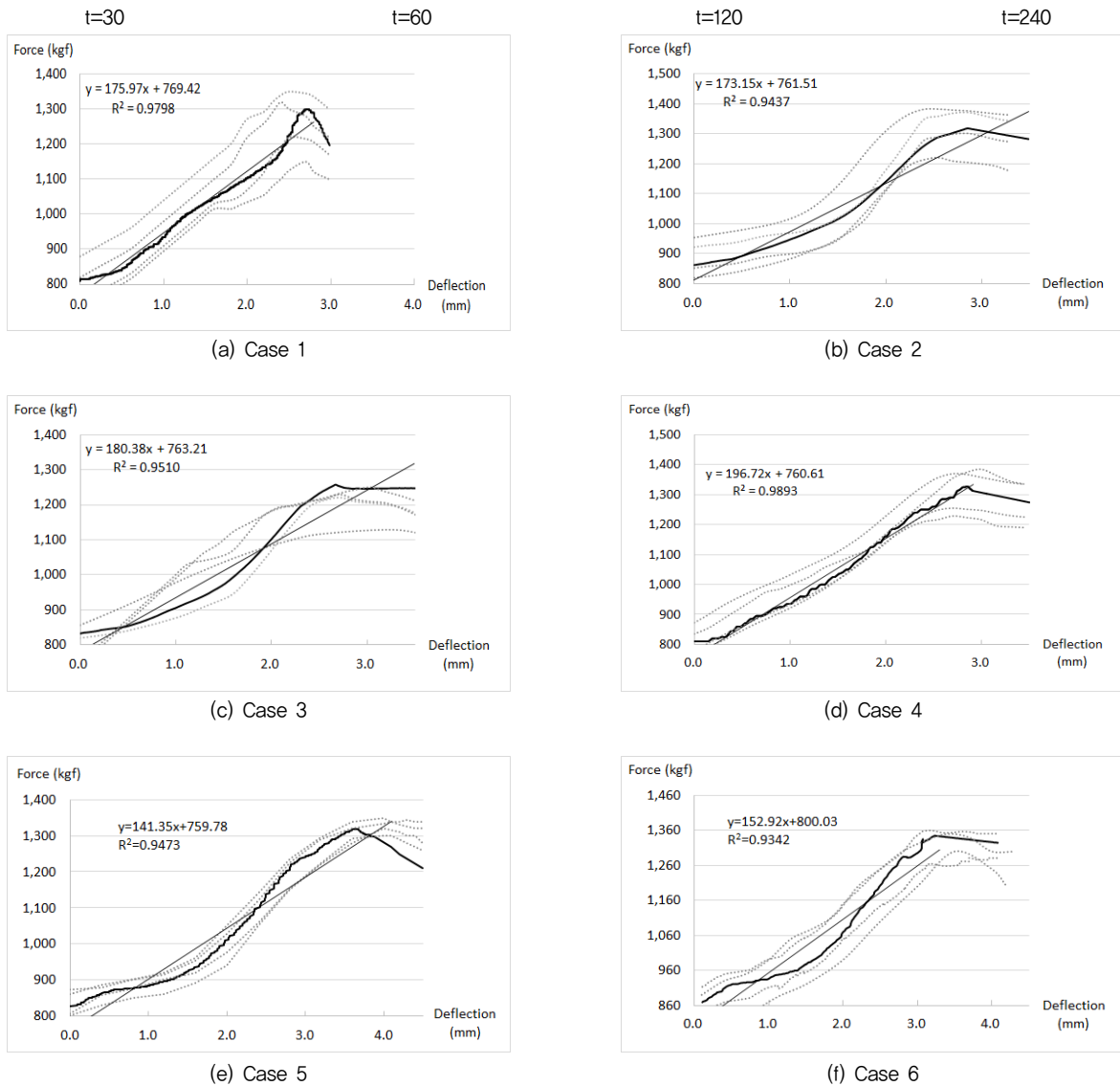


Fig. 7 Load-deflection curve for compressive elastic modulus (each case is matched with the list of Table 2.)

보여주었다. 또한 최대 탄성계수와 최대 항복응력이 각각 3%와 4% 이내로 실험적으로 유의수준에 있어, 향후 구조체로서 실험이 가능하며, 재현성도 우수함을 알 수 있었다.

6. Fill density에 따른 압축탄성계수의 변화

Fig. 7의 (a)~(f)는 하중-변위 그래프를 보여준다. 일반적인 상식으로는 압축부재의 밀도가 높아질수록 부재가 가지는 압축탄성계수는 증가하게 된다. 이와 마찬가지로 3D 프린터도 레이어별로 내부밀도를 fill density로 결정지을 수 있다. 따라서 압축부재 모형을 3D 프린터를 이용하여 출력 시 fill density 수치변화에 따른 압축탄성계수의 차이를 보고자 다

음과 같은 실험을 진행하였다. Case1, 2의 경우, Case3, 4 경우, Case5, 6의 경우 부재의 크기와 길이를 나타내는 외부적인 조건들은 동일하게 유지한 상태에서, Fill density의 변동에 따른 압축탄성계수의 변화를 살펴보았으며 정리된 내용은 Table 3과 같다. Fig. 7의 각각은 이러한 실험에서 얻은 하중-변위 그래프를 나타내며 항복발생점 이전을 대상으로 그래프 기울기를 산정하였다. 최종적으로 식 6을 이용하여 압축탄성계수를 계산하였다. 예상과 달리 부재의 fill density 상승에 따른 압축탄성계수의 증가는 차이를 보이지 않았다. 반면 단면이 커질수록 탄성계수는 증가를 보였는데 이는 구조물을 생성할 때 필라멘트를 적층하는 특수한 방식에서 비롯되는 것으로 추측된다.

Table 3 3D printer setting and compressive elastic modulus

Case	Size (10 ⁻³ m)	Slenderness ratio/critical slenderness ratio	Diameter setting (m)	Shell thickness (m)	Fill density (%)	Elastic modulus (10 ⁶ N/m ²)	Yield force (10 ³ N)	Failure characteristic
1	15×15×45	10.39/17.61	0.00175	0.002	100	926.12	13.24	n=1
2	15×15×45	10.39/17.87	0.00175	0.002	35	930.19	12.93	n=1
3	15×15×90	20.78/24.65	0.00175	0.002	100	1,800.74	13.15	n=1
4	15×15×90	20.78/24.65	0.00175	0.002	35	1,780.58	13.00	n=1
5	15×15×100	23.09/24.37	0.00175	0.002	100	1,759.76	13.15	n=1
6	15×15×100	23.09/24.08	0.00175	0.002	35	1,692.71	12.95	n=1

* n: compressive buckling coefficient

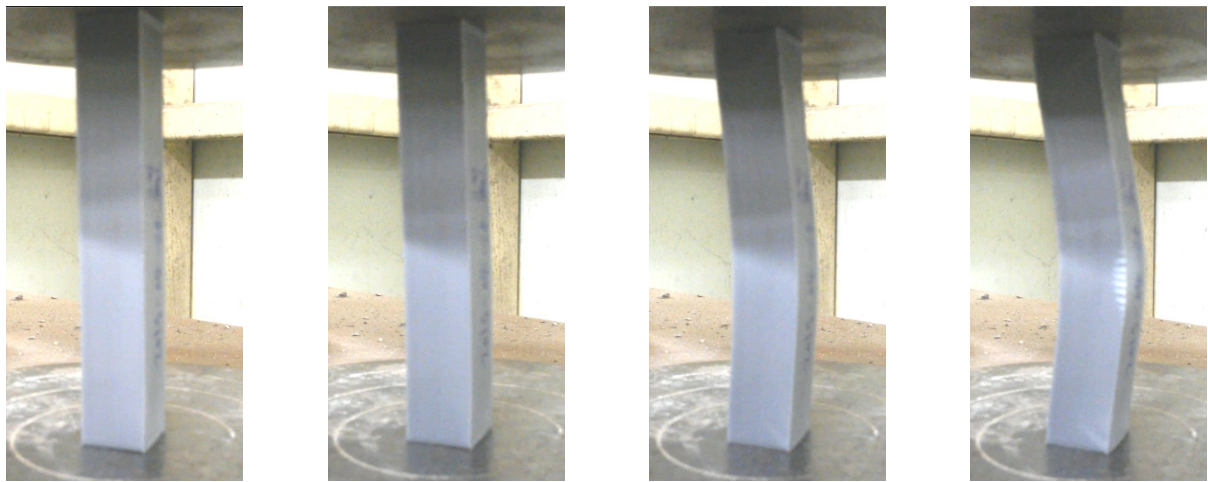


Fig. 8 Deflection of column with both ends pinned depending on time

7. 부재의 길이에 따른 압축탄성계수의 변화

모든 압축부재의 세장비는 한계세장비 이내에 포함되도록 하였으며, 실제 실험에서도 압축하중에 의한 파괴 양상은 단주의 특징을 보여주었다(Table 3). 일반적으로 탄성체는 넓이, 크기, 길이에 따른 탄성계수의 변화는 없으며, 물체의 밀도에 따른 탄성계수의 변동을 확인할 수 있다. 이에 대한 확인을 위하여 Case 1, 3, 5와 Case 2, 4, 6의 실험 결과를 확인한 결과, 압축부재의 길이에 따라서 압축탄성계수도 증가함을 알 수 있었다. 그러나 항복점은 모든 경우에 대하여 동일한 수치를 보여주었다.

8. 압축부재의 재료적 재현성 평가

압축부재가 구조재료로서 재현성이 가능한지에 대한 여부를 판단하고자 다음과 같은 내용을 검토하였다. 비교 대상부재는 Case 1과 2, Case 3과 4, Case 5와 6이며, 기둥의 길이를 제외하고 단면의 크기, fill density, shell thickness는 동일하

게 유지한 상태에서, 부재가 구조체로서 동일한 반응을 하는지를 검토하고자 하였다. 각각의 경우 최대 탄성계수와 최대 항복응력의 오차범위가 Case 1과 2의 경우에는 각각 1%, 3%로, Case 3과 4의 경우에는 0.4%, 1%로, Case 5와 6은 1.4%, 3%로 확인되었으며, 이는 유의수준내에 있다고 판단할 수 있다. 또한 Fig. 8은 재료의 항복되는 과정이 시간에 따라 어떻게 변화되는지 보여주고 있다. 기둥의 중심부에서 항복을 시작하였으며, 그 변형되는 형태 또한 구조적 기둥과 유사한 형태를 띠었다. Fig. 7은 각각의 실험에 대한 하중 변위 곡선을 보여주고 있으며, 이 그래프들에서도 알 수 있듯이, 항복점 전으로 정확하게 선형의 형태를 보여주었기 때문에 구조 재료로서 만족할만하다고 판단할 수 있다.

9. 유한요소해석결과와 축소모형간의 연계성

실물과 동일한 거동을 보이는 모형을 만드는 과정에서 반드시 상사법칙을 만족해야 한다. 본 연구는 정역학적인 범위를 다루기 때문에, 기하적 상사법칙 및 역학적 상사법칙이 성

립되어야 한다. 실제 구조물의 단면의 폭, 높이 및 길이는 0.540 m, 0.075 m 및 20.000 m (지간길이는 15.000 m)로 가정하였으며, 백분의 일 상사법칙을 적용하여, 3D 프린터로 프린트 된 단면의 폭, 높이 및 길이는 5.40 mm, 0.75 mm 및 200.00 mm(지간길이는 150.00 mm)로 설정하였다. 구조물은 단순보를 가정하였으며, 2 kN의 집중하중을 보의 중앙에 적용하였고, 물성치는 구조용 강재의 탄성계수 200,000 MPa, 포아송비 0.3으로 설정하였다. SAP2000 (Version 9, Computers and Structures, Inc., CA, USA)을 이용하여 구조 계산을 수행한 결과 3.70 cm의 연직처짐량을 얻을 수 있었다.

실험용 모형에 상사법칙을 만족하는 하중을 부과하기 위해서는 실험용 모형의 탄성계수를 알아야 한다. 따라서 UTM을 이용하여 하중-처짐 실험을 진행하였고, 실험결과와 선형 범위 내에서 식 2를 이용하여 3,875 MPa의 탄성계수를 얻을 수 있었다. 따라서 기하적상사 0.01 (150.00 mm/15.00 m)과 역학적상사 0.019375 (3,875 MPa/200,000 MPa)를 만족하는 집중하중 0.3875 N을 실험용 모형에 UTM을 이용하여 재 하하였고, 그 처짐량을 측정된 결과 3.85 cm를 얻을 수 있었다.

따라서 SAP2000에 의한 연직처짐량 3.70 cm와의 상대오차는 3.95 %가 되어서, 실제구조물과 축소모형간의 연계성이 탄성범위 내에서는 유의함을 확인하였다. 수치해석 방법은 구조물의 형태와 경계조건만 입력하면 빠르고 정확한 해석 값을 얻을 수 있는데 비해서, 재료나 형태의 비선형 또는 부분적인 재료적 파괴 등을 반영하기 힘든 단점이 있다. 또한 인간에 의해서 시공된 구조물 자체가 가지고 있는 비대칭성을 수치해석 방법은 표현할 방법이 없다. 기존 축소모형 실험이나 실내실험 방법은 재료적 한계로 인해서 정형화된 틀을 벗어나기 힘든 단점이 있지만, 3D 프린터는 3D 솔리드로 제작된 어떠한 형태의 물체도 생산이 가능하기 때문에, 앞으로 구조해석 면에서 활용도가 높을 것으로 보인다.

IV. 결 론

본 연구는 3D 프린터를 이용하여 구조실험을 진행하고자 하는 연구자들에게, 3D 프린터에 공급물질로 사용되는 PLA로 출력된 구조물의 기초적인 정보 제공과 물리적 특징을 이해시킴으로써, 3D 프린터를 이용한 구조실험의 활용성을 높이는 데 의미가 있다. 또한 본 연구에서 재료시험의 목적은 탄성적거동과 재료적항복의 범위를 살펴보고, 실제 구조물의 상사적 변환에 의한 모형 구조물의 가능성 여부를 확인하는데 있다.

대부분의 구조물은 순수한 인장에 의한 파괴보다는 휨 파괴나 기동과 같은 구조요소에서는 압축에 지배를 받는다. 따

라서 3D 프린터에 의해 생산된 구조체의 물리적 특징을 살펴 보기 위하여, 3점 휨 시험 및 가로방향으로 지지되지 않고 양 쪽 끝단이 힌지상태인 기동에 대한 압축실험을 진행하였다. 3D 프린터로부터 생성된 객체를 이용하여 휨실험과 압축실험을 한 결과 각각의 샘플만 보았을 때는 거동적인 특성이 정확히 선형의 관계를 가지고 있어, 그 자체적으로 구조적 재료로서 충분하였다. 그러나 단면이나 길이의 변화 또는 출력 설정에 따라서 비례적으로 항복응력이나 탄성계수가 변동하지는 않았다. 그러나 휨부재의 경우는 압축재보다 보다 유연하게 프린팅 옵션을 변경하여 재질적인 특징을 변경하는 것이 가능하였다. 압축부재의 경우는 단면 사이즈가 동일하면 길이에 상관없이 항복응력이 동일하게 나왔기 때문에 만약 항복응력을 늘리고 싶으면 단면을 키움으로써 가능하다. 하지만 휨시험이나 압축시험의 경우 탄성계수와 항복응력 간에는 뚜렷한 관계를 찾을 수 없었다. 따라서 축소모형 실험 시 탄성계수와 외부하중 (항복응력)은 스케일 크기가 다르게 적용되어야 한다는 것을 알 수 있었다. 재료적 특성으로는 부재가 굽어질 때 색깔 변화를 통해서 변성되는 정도를 정성적으로 파악하는 것이 가능하였다. 따라서 투명한 재료를 이용한다면 복잡한 구조물에서 항복점을 찾아나아가거나 항복의 정도를 파악하는데 매우 유용할 것으로 보인다. 따라서 스틸과 같은 연성거동을 하는 재료를 대신해서 충분한 응용 및 적용 가능성을 보였다.

본 연구의 결과를 이용하여, 단일한 재료로 구성된 파이프 하우스와 같은 철골구조로의 적용은 가능할 것으로 보이지만, 철근콘크리트와 같은 복합구조체로의 확대적용은 좀 더 많은 연구가 선행되어야 할 것으로 보인다. 또한 동일제품의 프린터라도 프린터의 설정 상태에 따라서 모형의 물성치가 바뀔 수 있는 가능성이 있기 때문에, 구조실험을 위해서는 동일한 프린터로 동일한 조건에서 출력된 모형을 가지고 실험을 진행하는 것을 추천한다. 프린터마다 동일한 슬라이서 프로그램을 이용하여, 3D 프린터가 인식할 수 있는 G-code로 변환한다면, 구조적으로도 동일한 결과를 출력할 수 있는지는 추후 연구가 필요할 것으로 보인다. 향후 연구는 종류가 다른 필라멘트로 동시에 구조물을 생성할 시, 기계적 세팅에 대한 내용과, 이에 따른 복합체의 물리적인 특징이 철근콘크리트 구조물의 특징을 만족하는지에 대한 관찰이다.

REFERENCES

- 3ddong, 3D Printing & maker movement. <http://cafe.naver.com/3ddong/4200>. Accessed 13 Oct. 2015.
- Bang, S. O., K. S. Kim, S. H. Kim, S. G. Song, and J. U. Cho,

2011. Study on compression tests of aluminum foam and honeycomb sandwich composites. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 12(9): 3802-3807 (in Korean).
3. Cho, C. H., M. G. Kim, and W. K. Kim, 2004. Bearing capacity evaluation of the drilled shaft using small scale model test. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 20(5): 117-126 (in Korean).
 4. Cho, S. H., 2010. Modal Testing of Arches for Plastic Film-Covered Greenhouses. *Earthquake Engineering Society of Korea* 14(2): 57-65 (in Korean).
 5. Cho, Y. H., S. H. Joh, and S. H. Yeo, 2000. Evaluation of strength and elastic moduli of concrete by destructive and nondestructive testings. In Proc. Korean Society of Civil Engineers, 265-268. Seoul, South Korea: KSCE (in Korean).
 6. Choi, E. J., S. A. Kim, J. Y. Bae, Y. J. Kwon, and K. H. Lee, 2013. A study on the state of the art of 3D printers. *Journal of the Korea Society of Computer Information* 21(2): 358-388 (in Korean).
 7. Gary, H., Simple mode. [Http://manual.slic3r.org/simple-mode/simple-mode](http://manual.slic3r.org/simple-mode/simple-mode). Accessed 9 Jun. 2015.
 8. Gere, J. M., 2004. Mechanics of Materials - 6th Edition. Stamford, Conn.: Thomson Learning, Inc.
 9. Hwang, K. J., and C. K. Choi, 2011. Evaluation of material test for the design of artistic column using glass reinforced plastic. *Journal of the Korean Association for Spacial Structures* 11(4): 101-108 (in Korean).
 10. Jung, S. G., 2004. survey and emergency measures of greenhouses damaged by abnormal snowloads, 167 Chusa-ro, Sinamyeon, Yesan-gun, Chungcheongnam-do: Chungcheongnam-do HUNGCHEONGNAM-DO Agricultural Research and Extension Services.
 11. Kang, J. H., Semi-auto leveling. [Http://formersfarm.com](http://formersfarm.com). Accessed 9 Jun. 2015.
 12. Kim, K. W. 2006. Study on the single and multi-span greenhouses considering higher load capacity: 166, Nongsaengmyeong-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do: National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration.
 13. Kim, M. G., S. W. Nam, W. M. Seo, Y. C. Yoon, S. G. Lee, and H. W. Lee, 2012. Agricultural Facility Systems Engineering. Seoul: Hyangmoonsa.
 14. Kim, V., Cura manual - part 02. [Http://106.240.234.10/walmaker](http://106.240.234.10/walmaker). Accessed 9 Jun. 2015.
 15. Lee, D. G., and J. Y. Cho, 2010. Similitude law on material non-linearity for seismic performance evaluation of RC columns. *Journal of Korea Concrete Institute* 22(3): 409-417 (in Korean).
 16. Lee, J. H, K. Y. Rhee, and H. J. Kim, 2004. A study on the compressive properties of seawater-absorbed carbon-epoxy composites - hydrostatic pressure effect. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 16(4): 191-195 (in Korean).
 17. Lee, Y. G., J. W. Choi, J. S. Park, and S. J. Yoon, Compression strength test of FRP reinforced concrete composite pile. *Journal of Korean Society for Composite Structures*, 2(4): 19-27 (in Korean).
 18. Nick Lievendag, The Creative's 3D Printing Filament Guide: ABS vs PLA vs many new, innovative materials. [Http://nicklievendag.com/filament-guide](http://nicklievendag.com/filament-guide). Accessed 13 Oct. 2015.
 19. Oh, W. G., 2014. Customized model manufacturing for patients with pelvic fracture using FDM 3D printer. *Journal of the Korea Digital Contents Society* 14(11): 370-377 (in Korean).
 20. Park, S. J., H. H. Song, D. Y. Kim, and C. S. Shim, 2014. Concrete formwork design for irregular structures using 3D printing. *Symposium of Korean Institute of BIM* 4(1): 89-90 (in Korean).
 21. Ru, H. R., 2015. Structural improvement of freestanding greenhouse for meteorological disasters response, 100, Nongsaengmyeong-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do: National Institute of Horticultural and Herbal Science, Rural Development Administration.
 22. Yoo, C. S., H. S. Jung, S. S. Jeon, B. W. Lee, K. Y. Kim, and H. Y. Jeon, 2005. Failure mechanism of geosynthetic reinforced segmental retaining well in tiered configuration using reduced-scale model tests. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 21(3): 65-77 (in Korean).