

자동화 적층 시공 시스템 및 재료 개발에 관한 연구

전광현* · 박민범** · 강민경*** · 김정훈****

Jeon, Kwang Hyun*, Park, Min-Beom**, Kang, Min-Kyung***, Kim, Jung-Hoon****

A Study on the Development of an Automated Freeform Fabrication System and Construction Materials

ABSTRACT

Recently, the interest and demand on free formed structure providing aesthetic value as well as functionality has been increasing. Formwork has numerous advantages such as high strength, convenience, accuracy and good quality of surface roughness. Nevertheless, it increases construction cost and period to build complex shapes. For these purpose, deposition construction systems such as Contour Crafting and Concrete Printing have been developed with active collaboration between university and industry by applying the rapid prototyping technology to the construction industry in USA and England. Since there has been no related research in Korea, the possibility of spin-off technology and its fusion cannot be expected. In this paper, design elements including mechanical system and control system related to automatic deposition construction system prototype for constructing a free curved structure without mold are described. As for an appropriate material for the system, fiber reinforced mortar was selected by experiments on compressive strength, fluidity, viscosity and setting time. By performing transfer and extrusion experiments, the possibility of the development of deposition construction system was demonstrated. Based on this research results, it is required to keep the automatic deposition construction system improve and extend it into the new application area in construction industry.

Key words : Automatic deposition construction system, Fiber reinforced mortar, Automation in construction, Robot system, Rapid prototype

초 록

최근 건설 산업에서는 기능과 조형미를 갖춘 비정형 구조물에 대한 관심과 수요가 증가하고 있는 추세이다. 거푸집 기반의 시멘트 구조물은 구조물의 강도, 시공의 용이성, 치수 정확도, 표면 거칠기 등의 측면에서 장점을 가지고 있지만, 다양한 비정형 구조물을 건설하는 데 있어서는 공사비용과 공사 기간을 증가시키는 한계점이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여, 미국과 영국에서는 이미 쾌속 조형 기술을 건설 분야에 적용시킨 Contour Crafting이나 Concrete Printing과 같은 적층 시공 시스템이 산·학 간의 공동연구를 통해 개발되었다. 국내에서는 이에 관련된 연구가 전무하여, 본 기술로부터 융합 및 파생될 수 있는 가능성이 가로막힌 실정이다. 본 논문에서는 거푸집 없이 자유 곡면 형태의 구조물을 시공할 수 있는 자동화 적층 시공 시스템의 프로토타입 개발에 관련된 기계, 제어 시스템을 포함한 설계 요소들에 관하여 기술하였다. 적층형 시공에 적합한 재료는 섬유보강모르타르를 압축강도, 유동성 및 점도, 경화시간 실험을 통하여 선정하였다. 선정된 모르타르 배합비로 자동화 적층 시공 시스템에서 이송 및 압출 실험을 수행함으로써 적층 시공 시스템의 성공적 개발 가능성을 입증하였다. 본 연구의 결과를 기초로 향후 자동화 적층 시공 시스템을 보완한다면 토목 및 건축의 다양한 응용 분야에 확대하여 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 자동화 적층 시공 시스템, 섬유보강모르타르, 건설자동화, 로봇 시스템, 쾌속 조형 기술

* 연세대학교 토목환경공학과 석사 (kwang-hyun@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (minbeom@yonsei.ac.kr)

*** 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 석사 (min-kyung@yonsei.ac.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 조교수 (Corresponding Author · Yonsei University · junghoon@yonsei.ac.kr)

Received September 20 2012, Revised October 23 2012, Accepted May 2 2013

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 건설 산업은 현장에 대한 기피와 숙련공의 노령화로 인한 기능 인력의 부족, 노무 생산성의 저하, 현장 안전에 대한 인식 부족 등과 같은 문제점을 지니고 있다. 이와 같은 건설 산업의 문제점을 해결하고 미래 건설 산업에서의 국가 경쟁력을 확보하기 위한 하나의 접근방법으로 건설 자동화 및 로봇 기술 개발이 많은 주목을 받고 있다(이정호, 2010, 김성근, 2008). 또한, 최근 건설 산업에서는 기능뿐 아니라 조형미까지 갖춘 비정형 구조물에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이다. 기존의 거푸집 기반의 구조물 축조 방법은 많은 장점들이 있지만, 그 특성상 복잡한 디자인을 구현하는 데에 한계가 있으며, 거푸집을 이용하여 시공하는 경우에 다수의 일회성 거푸집 제작에 따른 공사기간 및 공사비용 증가, 환경오염 등의 문제가 발생하게 될 수 있다. 따라서 이러한 기존의 거푸집 방식의 한계를 극복하고, 다양한 형태의 정교한 구조물을 제작할 수 있는 새로운 시공 방법의 개발이 요구된다.

본 논문은 구조물 시공을 위한 자동화 적층 시공 시스템 개발의 초기 연구로서, 거푸집 없이 자유 곡면 형태의 구조물 제작이 가능한 시공 시스템의 개발과 이 시스템을 통한 구조물의 시공을 그 목표로 한다. 본 시스템은 로봇 기술을 적용하여 기존 구조물에 적용하기 어려웠던 창조적이고 정교한 디자인을 구현할 수 있으므로 구조물의 조형미 대한 사회적 수요를 만족시킬 수 있을 것으로 기대되며, 건설 산업에 로봇 기술을 접목한 미래지향적 융합 기술로서 건설

산업의 기술력을 한 단계 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

현재 자동화 적층 시공 시스템에 관한 연구는 대부분 국외에서 이루어지고 있으며, 국내 연구는 전무한 상태이다. 적층 시공에 관한 최초의 연구는 Contour Crafting (CC)기술이며, 이 개념은 미국의 University of Southern California의 Behrokh Khoshnevis (1998)에 의해서 처음 고안되었다. 이는 갠트리 로봇(Gantry Robot)을 컴퓨터로 제어하는 무인시공을 통하여 빠르고 효율적으로 건축물을 축조하는 시스템으로, 세라믹 계열 또는 속경 시멘트계열의 재료를 압출하면서 노즐을 원하는 궤적으로 이송시키면서 얇은 레이어를 쌓아 구조물을 형성하는 방법이다. 자연 재해로 인해 파괴된 거주지의 복구를 위하여 급속도로 대량의 주택을 건설하는 것을 지향하고 있으며, 시공 과정에서 인력을 최소화하고 안전사고를 줄일 수 있는 등의 장점을 가지고 있다(Behrokh Khoshnevis, 2001), (Dooil Hwang, 2005). CC기술은 쾌속 조형(Rapid Prototyping) 기술 중 FDM (Fused Deposition Modeling) 기술을 확장하여 적용한 기술로서 가로 세로 폭 15mm의 사각형 노즐을 이용하여 초당 20mm의 압출속도로 적층 시공을 실시한다. 구조의 강도를 높이기 위해서 금속 코일 상에 재료를 압출하여 보강하는 방법을 제안 하였으며, 표면 처리 문제 해결을 위하여 흡수 공구를 사용하기도 하였다. 이미 타원 형태의 벽을 시공하는 실험을 완료한 상태이며, 현재는 다중 노즐을 이용한 곡선 벽면을 시공하는 연구를 진행 중에 있다. 하지만, 비연속적인 재료의 공급에 따라 재료의 정착성이 저하되는 단점을 가지고 있다(Behrokh Khoshnevis, 2006, Dooil Hwang, 2004).

Table 1. Hardware and performance comparison of automatic freeform construction systems

	Contour Crafting	Concrete Printing	D-Shape
Deposition type	extrusion	extrusion	3D printing
Nozzle	size	15mm	0.15mm
	shape	square	circle
	number	single or multi	single
Velocity of extrusion	20mm/sec	20min/layer	6300
Resolution	13mm	6mm	4~6mm
Reinforcing method	steel coil	Post-tensioning and grouting	
Compressive strength		100~110MPa	235~242MPa
Bending strength		12~13MPa	14~19MPa
Data preparation	CAD → CAM	STL file → G-Code file	CAD → CAE → CAM
Material	mortar and cement	fiber reinforced mortar	granular materials (sand/stone power)
Strength	smooth surface	high strength, short deposition procedure	high strength
Weakness	- decrease of adhesion due to discontinuous material supply	- limited operating area depending on frame size (5.4m×4.4m×5.4m)	- low speed - convex surface - limited operating area - removal of unhardened material

CC는 대량, 급속 시공을 지향하는 반면, 영국 Loughborough University의 Concrete Printing 기술은 다양한 형태의 고품질 구조물을 소량 생산하는 것을 지향하고 있다. CC기술과 동일하게 FDM기술을 적용하였으며 지름 9mm의 원형 노즐을 사용하여 한 레이어 당 20min의 압출 속도로 구조물을 시공한다. 구조물의 추가적인 보강을 위하여 보강 위치에 통로를 비워 놓고 프린팅을 실시한 후 포스트 텐션과 그라우팅을 적용하여 보강을 실시하였다. 또한, 프린팅의 정도를 높이기 위해 일반 재료보다 3배 이상의 강도를 지닌 100MPa이상의 섬유보강모르타르 재료를 개발하였다. 하지만 Loughborough University에서 개발한 Concreting Printing 기술에서는 노즐이 이동하는 프레임의 크기에 따른 작업 반경의 한계를 가지고 있다(Sungwoo Lim, 2010, Thanh Le, 2011).

D-Shape 기술은 쾌속 조형 기술 중 잉크젯 프린팅과 유사한 3D 프린팅 방법을 이용한 시공법으로서 지름 0.15mm의 노즐 6300개로 이루어진 프린터 헤드를 이동시키면서 프린터 헤드를 통해 모래나 석조 파우더와 같은 입상재료를 선택적으로 경화시키는 기술이다. 시멘트 재료에 비해 높은 강도를 지니고 있지만, 시공 과정이 느리며 경화 작업을 실시한 후에 경화되지 않은 재료를 따로 제거해야하는 단점을 지니고 있다. 아직 건설 구조물에 적용하기에는 무리가 있지만 다양한 형태의 조형물을 시공하는 실험을 통하여 가능성을 높이고 있다(Sungwoo Lim, 2011).

본 논문에서는 국내 자동화 적층 시공 시스템 개발에 관한 첫 연구로서 자동화 적층 시공 플랫폼과 제어 시스템을 개발하고, 이에 적합한 건설 재료를 적용하여 자동화 적층 시공 시스템의 시공 가능성을 평가하는 것을 목표로 삼았다. 2장에서는 갠트리 로봇 기반의 자동화 적층 시공 플랫폼의 개발 및 제어 시스템 개발에 관한 설계 및 구성에 관해 설명하였다. 3장에서는 자동화 적층 시공 시스템에 적합한 건설 재료를 실험적인 연구를 통하여 선정하였다. 4장에서는 적층 시공 시뮬레이션과 시공 실험을 통하여 자동화 적층 시공 시스템의 적용 가능성을 판단하였다. 5장은 결론 및 향후 연구 방향에 대하여 설명하였다.

2. 갠트리 로봇 기반의 자동화 적층 시공 플랫폼 개발 및 제어 시스템 개발

본 연구에서 개발된 시스템 플랫폼에서는 직관적인 좌표계를 사용하면서, 비교적 큰 작업 영역을 확보할 수 있는 갠트리 로봇을 선정하여 초기 개발을 용이하게 하였다. 시스템 플랫폼의 노즐은 Cartesian 좌표계 상의 X, Y, Z축 방향으로 이동하며 재료를 적층하며 구조물을 시공한다. 전체 시스템은 사각형 박스 구조의 지지 프레임 상에 3축의 리니어 액추에이터(linear Actuator)를 구성하

였다. 또한 축 이동 궤적을 제어하기 위해서 BLDC 서보모터(Brushless DC Servomotor)와 감속기를 액추에이터에 적용하였다. 본 시스템과 유사한 시스템으로는 수치제어 공작기계(Numerical Controlled Machine)가 존재하는데, 이는 G-Code라는 상위 프로그래밍 언어를 사용하여 자동 제어할 수 있다. G-Code는 폭넓게 사용되는 컴퓨터 수치제어(CNC: Computer Numerical Control) 프로그래밍 언어의 일반적인 이름으로서 Computer-Aided Engineering의 분야에서 빈번히 사용 된다. 본 연구에서 모르타르 압출 노즐부를 X, Y, Z 축 방향으로 이동시키는 목적으로서, G-Code가 편리성과 변환 호환성 면에서 적합하다고 판단되어 시스템의 이송 명령 체계로 G-Code를 사용하도록 설계하였다.

노즐의 이송에 대한 명령을 G-Code로 작성을 해서 주제어기에 입력하기만 하면 자동화 운전이 가능하도록 하였다. Figure 1은 시스템의 구성 단계를 나타낸다.

2.1 시스템 구동부 설계

액추에이터는 각 축에 적합한 특징을 고려하여 선정했으며, 전체 시스템의 작업영역은 각 액추에이터의 작업 스트로크에 따라 결정된다. 각 축에 사용된 액추에이터 및 모터의 사양은 Table 2와 Table 3과 같다.

X축은 F사의 DGE-40-ZR-KF 선형 액추에이터를 사용하였으며, X축을 하나의 액추에이터로 구동하면 가감속 시 진동이 발생하

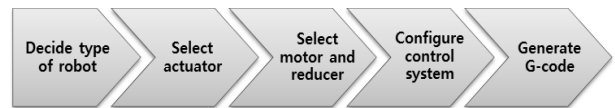


Fig. 1. System building procedure

Table 2. Specification of linear actuator

	stroke (mm)	drive type	repetition accuracy (mm)	mass (kgf)
X-axis	1300	pulley-belt	±0.1	16
X'-axis	1300	pulley-belt	±0.1	16
Y-axis	950	Ball screw	±0.02	24
Z-axis	800	Ball screw	±0.02	5.3

Table 3. Specification of motor

	Rate Power (W)	Rated revolution per minute (rpm)	Rated torque (N · m)	Encoder (pulse/rev)
X-axis	450	3000	1.43	2500
X'-axis	200	3000	0.64	2500
Y-axis	300	3000	0.95	2500
Z-axis	100	3000	0.32	2048

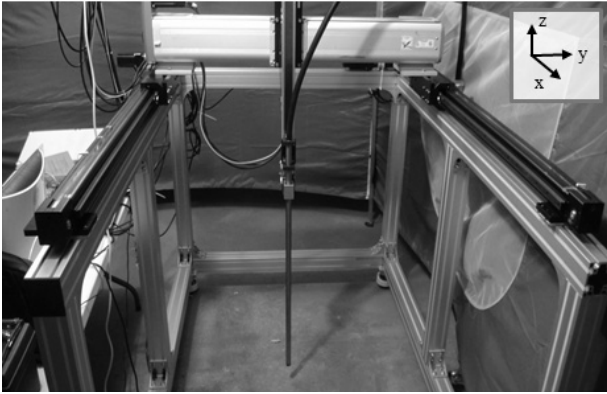


Fig. 2. Assembled 3-axis actuators

여 Z축 방향 모멘트 M_z 에 대하여 취약해지기 때문에 X방향으로 두 개의 선형 액추에이터를 평행하게 배치시킨 후에 같은 궤적으로 위치 제어가 되도록 동기화(Synchronization)시켜 운영하였다. 액추에이터는 풀리와 벨트로 구동되는 형식으로 회전 당 100mm 이송되며, 액추에이터 입력 축에 10:1 감속기를 장착한 후 정격속도 3000rpm (50rev/sec)의 모터를 연결하여 500mm/sec의 이동속도로 구동되게 하였다. 시스템의 Y축은 M_y 와 M_x 에 대한 저항력이 커야하기 때문에 두 개의 LM가이드를 가진 D사의 DRM160-P 액추에이터를 사용하여 작용하는 힘을 분산시켰다. Y축 액추에이터는 볼 스크류(Ball screw)를 사용하여 회전운동을 직선운동으로 전환시키며 볼 스크류의 1회전 당 20mm 이동을 한다. 액추에이터 입력 축에 정격과워 300W, 정격속도 3000rpm을 가진 모터를 연결하였고, 직경이 2:1 인 풀리(Pulley)를 이용하여 이동속도를 감속시켰다. 따라서 Y축 액추에이터의 이동속도는 500mm/sec로 구동한다. Z축은 적응을 위한 노즐이 연결되는 부분으로서 경량인 면서도 재료의 이송을 위한 호스와 노즐부에 대한 모멘트에 저항할 수 있어야 하는 설계 조건을 만족시키기 위해서 M사의 RS3 선형 액추에이터를 사용하였다. 액추에이터는 볼 스크류의 회전 당 6mm의 이동을 하며 100W, 3000rpm의 모터를 직결하여 300mm/sec의 이동속도로 구동하게 된다. X, Y, Z 축에 연결된 액추에이터의 길이는 1900mm×1250mm×1086mm이며, 축의 스트로크에 따라 작업 반경은 1300mm×950mm×800mm크기가 된다. Figure 2는 3축 액추에이터가 조합된 모습을 나타낸다. 또한 모르타르를 압출하는데 사용한 펌프는 P사의 2.2kW급 모노펌프로서 최대 20bar의 압력으로 최대 11L/min의 압출 속도 제한을 갖는다.

2.2 제어시스템 설계

G-Code가 지원되는 범용 3축 제어기는 고가일 뿐만 아니라, 추후에 센서 및 액추에이터에 대한 확장성이 떨어지고, 제어방식에 있어서의 유연성을 확보하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 저가

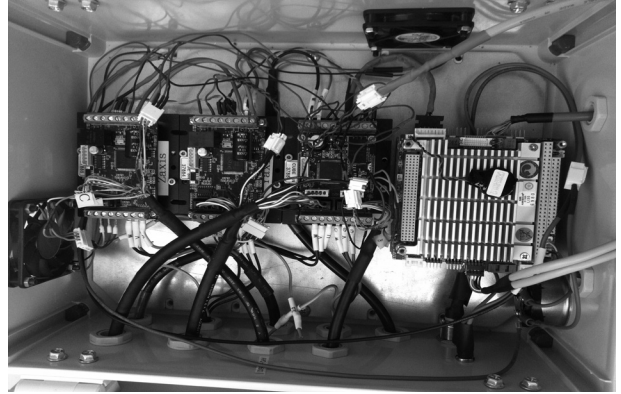


Fig. 3. Low level controllers and PC/104 Embedded PC

격이면서도 유연성, 확장성이 확보될 수 있도록 PC/104 인터페이스 기반의 임베디드 PC를 주제어기로 사용하고, 하위 모터제어기와는 CAN (Controller Area Network)통신을 통해서 데이터를 주고받는 분산제어방식을 택하였다. 주제어기 PC 내부에는 G-Code Interpreter 알고리즘을 프로그래밍하여, G-Code 명령어를 해석하여 최대 500Hz 주기로 3축 겐트리 로봇의 위치 궤적을 계산하고 하위 모터 제어기에 실시간으로 명령을 전송할 수 있도록 설계하였다. 주어진 code를 통해 시스템의 이동 궤적을 미리 확인하고 시스템의 오작동을 방지할 목적으로 Matlab 프로그램과 주제어기 프로그램에서 G-Code 궤적 생성 시뮬레이션을 실시할 수 있는 환경을 마련하였다.

CAN (Controller Area Network) 통신은 자동차, 건설 장비와 자동화 분야에서 사용되는 매우 신뢰성이 높은 통신 프로토콜로서, 주 제어기와 여러 축의 제어를 담당하는 하위의 서보 제어기간의 통신을 복잡한 배선 없이 2개의 통신선만으로 효율적인 통신 네트워크를 구성할 수 있도록 한다. 시스템에서 생성된 목표 위치(Reference Position) 궤적은 CAN통신을 통하여 서보모터 제어기로 전달되며, 각 서보모터 제어기는 목표 위치 궤적을 추종하도록 되어있다. Figure 3은 3축의 하위 제어기들과 PC/104 인터페이스를 갖춘 임베디드 PC를 나타낸다. 각 축의 액추에이터에 연결된 LM가이드의 이동에 대한 안전성을 확보하기 위하여 근접센서를 각 하위 제어기에 연결하여 LM가이드가 이동할 때 장착된 근접센서와 일정한 간격 이하로 가까워지면 이동을 자동으로 정지하도록 하였다. Figure 4는 전체 제어시스템의 구성을 보여준다.

2.3 G-Code

G-Code는 NC공작 기계의 이송, 가공, 공구보정번호, 주축의 회전, 기계 움직임 등의 제어 기능을 준비하도록 명령하는 기능이다. CAD를 통하여 작성된 도면을 자동화 적응 시공 시스템에 적용하기 위해 G-Code로 변환하는 작업이 수행되어야 하며, CAM (Computer

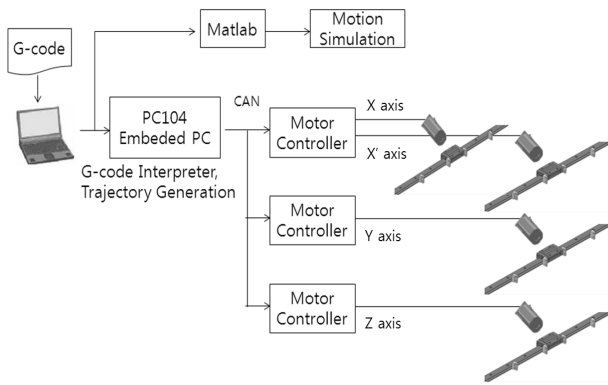


Fig. 4. System Configuration

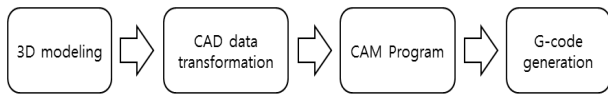


Fig. 5. G-Code generation procedure

Aided Manufacturing) 프로그램을 활용하여 도면으로부터 G-Code 변환이 가능하다. Figure 5는 G-Code 생성 순서를 나타낸다.

3. 자동화 적층 시스템에 적합한 건설 재료

3.1 실험계획

자동화 적층 시공 시스템은 노즐부를 통한 압출 및 적층 과정을 거쳐 구조물을 시공하는 방법으로서 압출 및 적층이 가능한 재료의 선정이 중요하다. 본 시스템에 사용되는 노즐의 직경은 15mm로, 재료의 입도 선정 시 노즐의 크기를 고려해야 한다. 재료의 물리적인 특성 평가를 위하여 강도, 경화시간, 유동성 시험, 압축강도 시험을 실시하였으며, 자동화 적층 시공에 중요한 요소인 재료의 적층 시기는 경화시간 시험을 통하여 판단하였다. 한편, 구조물을 형성하기 위해서는 압출된 재료의 퍼짐을 최소화 하면서 형태를 유지할 수 있는 특성이 필요한데, 형태 유지를 위하여 고점도 재료를 사용할 경우 펌프의 압송 능력을 저하 시킬 수 있으므로 유동성 실험을 통하여 펌프를 통한 압송이 가능하면서도 압출 형태를 충분히 유지할 수 있는 재료를 선정하고자 하였다. 본 연구에서는 3성분계 시멘트를 사용한 섬유보강모르타르에 혼입되는 혼화제 치환율을 다르게 하여 강도 특성 및 경화시간을 측정하였고, 증점제 및 수지의 혼합율에 따른 유동성과 펌프 압송성 특성을 파악하기 위하여 실험을 수행하였다.

3.2 사용재료 및 배합설계

배합에는 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트가 사용되었으며, 플라이애쉬와 고로슬래그, 실리카흄이 사용되었다. 또한, 성능 개선을

위하여 A사의 폴리사카라이드(Polysaccharide)계 증점제와 W사의 Styren-Acrylic계 폴리머 수지, 폴리카본산계의 액상 고성능감수제가 사용되었으며 균열 억제에 위하여 길이가 3mm인 나일론 섬유를 사용하였다. 잔골재는 비중 2.65이며 입도가 0.28~0.6mm인 규사와 0.1~0.28mm인 규사가 사용되었다.

본 논문에서는 물-결합재비(W/B)와 혼화제 및 혼화제의 치환율을 변화시켜 배합설계를 수행하였다. 배합 실험은 총 3단계의 시리즈로 나누어서 설계하였다. 시리즈 I 은 물-결합재비를 35%와 40% 두 수준으로 변화시켰으며, 시리즈II는 플라이애쉬와 고로슬래그는 시멘트 중량 대비 0%, 30%, 실리카흄은 시멘트 중량 대비 0%, 10%로 변화시켜 설계하였다. 또한, 시리즈III은 증점제와 수지의 혼입량을 각각 0%, B×0.1%로 변화하여 실시하였다. 고정변수로서 잔골재는 시멘트와 1:2 수준으로 배합하였고 고성능감수제는 B×2%, 섬유보강재는 1.2kg/m³로 설정하였다. Table 4는 실험요인 및 수준을 나타내며, Figure 6은 배합을 구분하는 표시를 나타낸다.

Table 4. Experiment factor and level

Type	Experiment factor	Experiment level
Series I	W/B(%)	2
		35%, 40%
Series II	Fly Ash(FA) mix(%)	2
		0, C×30%
	Blast Furnace Slag(BS) mix(%)	2
	0, C×30%	
Series III	Silica Fume(SF) mix(%)	2
		0, C×10%
Series III	Thickening Agent(%)	2
		0, B×0.1%
Performance test	Resins(%)	2
		0, B×0.1%
Performance test	Fresh mortar	2
		Mortar flow test Gilmore needle test
	Hardened mortar	1
		Compressive strength test

(1) C: Cement, W: Water, B: Binder

(2) Binder= Cement + Fly Ash(or Blast Furnace Slag) + Silica Fume

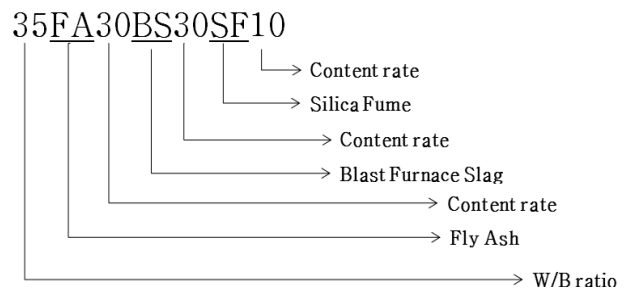


Fig. 6. Indicate method for mix concrete

3.3 실험 방법 및 결과

3.3.1 압축강도

압축강도 실험에서는 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말, 실리카흄의 혼입을 변화에 따른 강도를 측정하였다. 압축강도 시험체는 $\varnothing 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 크기의 공시체를 KS F 2403에 따라 제작하였고, 시편은 탈형 후 수중양생 하였으며 1, 3, 7, 28일 경과한 후 압축강도를 측정하였다. Figure 7은 W/B 35% 경우의 압축강도를 나타낸다. 1일 강도는 배합에 따른 차이가 크게 없었으나, 3일 강도부터 28일 강도까지 플라이애쉬를 혼입한 배합(35FA30)의 압축강도가 고로슬래그를 혼입한 배합(35BS30)에 비하여 높은 것으로 나타났다. 또한, 실리카흄을 추가로 혼입한 배합(35FA

30SF10)은 장기강도 측면에서 가장 유리한 것으로 나타났다. Figure 8은 W/B 40% 경우의 압축강도를 나타낸다. 고로슬래그 미분말을 혼입한 배합(40BS30)의 초기강도가 가장 높은 것으로 나타났지만, 3일 이후의 강도에서는 플라이애쉬 혼입 배합(40FA30)의 강도 증가에 비해 상승 폭이 작은 것으로 나타났다. 또한, 실리카흄을 혼입한 배합(40FA30SF10, 40BS30SF10)은 W/B 35% 실험과 마찬가지로 장기강도가 높은 결과를 보였다. 따라서 플라이애쉬와 실리카흄의 혼입에 따라 압축강도가 증진되며, 장기 강도 측면에서 유리한 것을 알 수 있었다.

Figure 9와 10에서는 플라이애쉬를 혼입한 경우와 고로슬래그 미분말을 혼입한 경우의 데이터를 분류하여 W/B비에 따른 압축강

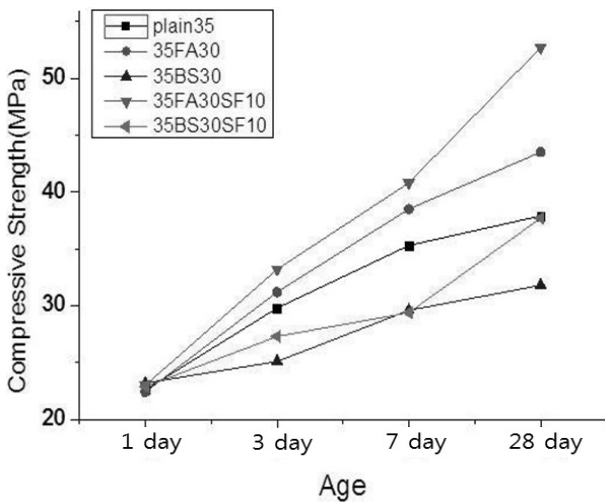


Fig. 7. Compressive strength of mortar with W/B ratio 35% and different admixtures

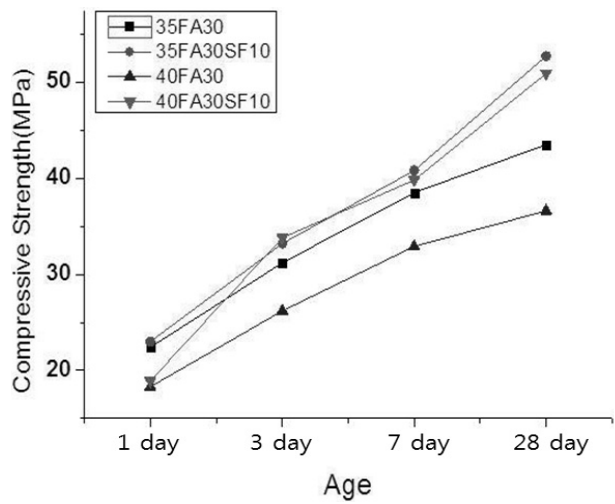


Fig. 9. Compressive strength of mortar with different W/B ratio (when FA added)

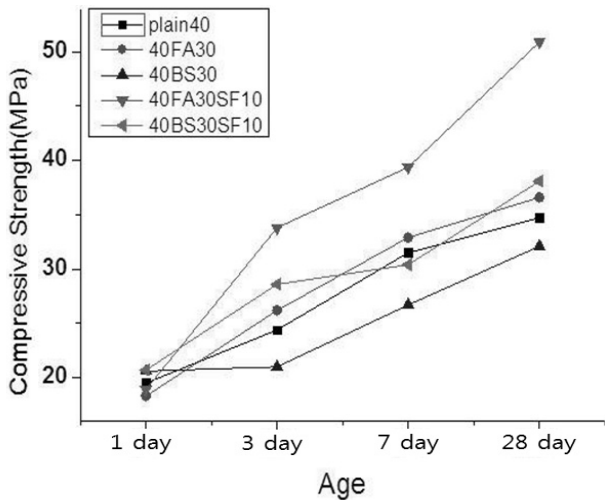


Fig. 8. Compressive strength of mortar with W/B ratio 40% and different admixtures

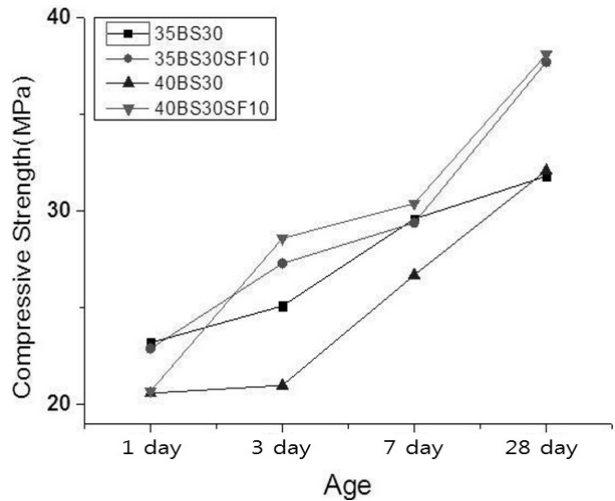


Fig. 10. Compressive strength of mortar with different W/B ratio (when BS added)

도를 비교하였다. 플라이애쉬를 혼입한 배합에서 W/B 35% (35FA30)가 W/B 40% (40FA30)에 비하여 초기강도와 장기강도 모두 큰 것으로 나타났다. 특히, 초기강도보다 장기강도로 갈수록 강도차이는 큰 것으로 나타났다. 고로슬래그 미분말을 혼입한 배합의 경우 W/B비에 따른 강도차이 보다는 실리카흙의 혼입에 따른 강도차이가 크게 나타났다.

이러한 결과는 플라이애쉬의 혼입은 포졸란 반응에 의해 수화열을 억제하고 강도를 증진시키며, 실리카흙은 초 미립 분말로서 초기 재령에서 포졸란 반응을 일으켜서 강도를 증진시키기 때문인 것으로 생각된다.

3.3.2 경화시간

경화시간 측정은 KS L 5103 (길모아침에 의한 시멘트의 응결시간 시험방법)에 따라 실시하였다. W/B비와 혼화제의 혼입율에 따른 경화시간의 시험결과는 Figure 11과 같다. 시험결과 초결 시간과 종결 시간 모두에 있어서, 고로슬래그 미분말을 혼입한 배합이 플라이애쉬 혼입 배합보다 경화시간이 크게 증가한 것으로 나타났다. 배합 설계 중에서 가장 빠른 경화시간을 보인 것은 플라이애쉬와 실리카흙을 혼입한 배합으로서 초결 시간이 60분으로 나타났다. 또한, 실리카흙의 혼입 전과 후의 경화시간을 비교해 볼 때, 혼입 후의 경화시간이 줄어든 것을 볼 수 있었다. 따라서 실리카흙의 혼입에 의해 응결시간이 빨라지는 것을 알 수 있다. 하지만, 길모아침 시험에 의한 결과는 표준방법에 의한 재료의 경화시간 비교를 위하여 실시한 것으로서 실제 자동화 적층 시공 시스템에서 층을 적층하는 시기는 초결 시간 이전에 이루어져야한다. 초결이 이루어지면 적층되는 층의 접착력이 감소하여 일체화 될 수 없기 때문에 자동화 적층 시공 시스템에서는 적층 시간을 약 20min 정도의 간격으로 실험을 실시하였다.

3.3.3 유동성

굳지 않는 모르타르의 흐름 시험은 KS F 2401 (굳지 않는 콘크리트의 시료 채취방법)에 따라 시료를 채취하여 KS L 5111 (시멘트

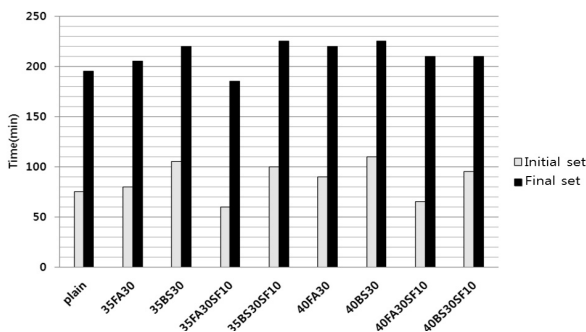


Fig. 11. Result of setting time test

시험용 플로우 테이블)과 ASTM C 1437에 의해 모르타르 플로우 시험을 실시하였다.

자동화 적층 시공 시스템 재료의 유동성 평가는 전술한 압축강도 및 경화시간 시험의 실험 결과에 따라 선정된 배합에 증점제와 수지를 B×0.1% 만큼 첨가하여 실시하였다. 즉, 플라이애쉬와 실리카흙을 시멘트 중량 대비 30%, 10% 혼입한 배합(FA30SF10)이 압축강도가 상대적으로 높고, 경화시간이 적절하였으므로, 이 배합을 유동성 평가 배합으로 정하고 W/B 35%와 W/B 40%에 증점제와 수지를 혼입하여 이에 따른 유동성 평가를 수행하였다. Figure 12는 모르타르 플로우 시험 결과에 따른 플로우 값을 나타낸다.

W/B비가 높을수록 플로우 값이 높게 나타나는 것은 일반적인 결과이고, 플라이애쉬와 실리카흙을 각각 시멘트 중량 대비 30%, 10% 혼입한 경우 plain 배합과 비교하여 플로우 값이 감소하였다.

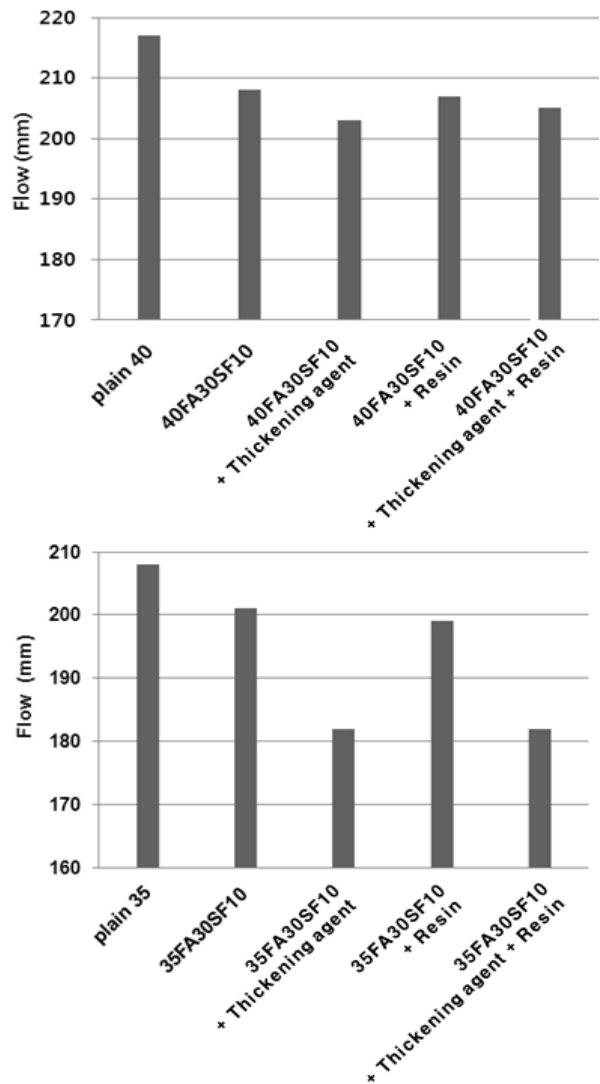


Fig. 12. Result of flow test

35FA30SF10 배합과 40FA30SF10 배합에 각각 증점제를 B×0.1%만큼 첨가한 결과, 첨가하지 않은 배합보다 19mm, 5mm 작은 플로우 값이 측정되었다. 또한, 유동성 평가 배합에 수지를 B×0.1% 만큼 추가로 혼합한 배합은 플로우 값에 있어서 큰 변화를 야기 시키지 않았다.

증점제는 점도를 향상시켜 압출 이후에 형태를 유지하는 데에 필요하지만, 고 점도의 재료는 펌프의 압송에 있어서 펌프 압력을 상승시키는 문제를 발생시킬 수 있으므로 혼입량에 주의하여야 한다. 또한, 수지는 유동성 측면에서는 영향을 미치지 않지만 적층 layer의 접착력과 형태유지를 증가시키기 위해 필요하다.

섬유보강모르타르의 실험을 통하여 W/B비 35%에 플라이애쉬와 실리카흄을 시멘트 중량 대비 30%, 10% 혼입하고, 바인더 중량 대비 1%의 증점제와 수지를 첨가한 배합이 자동화 적층 시공 시스템의 재료로서 가장 적합하다고 판단된다. 이 배합에서 실험한 결과 압축강도 52.7MPa, 초결시간 60분, 플로우 테이블 시험에 의한 플로우 값 182mm의 성능을 갖는 것으로 나타났다.

4. 자동화 적층 시공 시스템의 적용성 평가

4.1 적층 시공 시뮬레이션

자동화 적층 시공 시스템의 적용성 평가 실험 전에 Matlab을 이용하여 G-Code에 대한 시뮬레이션을 실시하여 노즐의 경로를

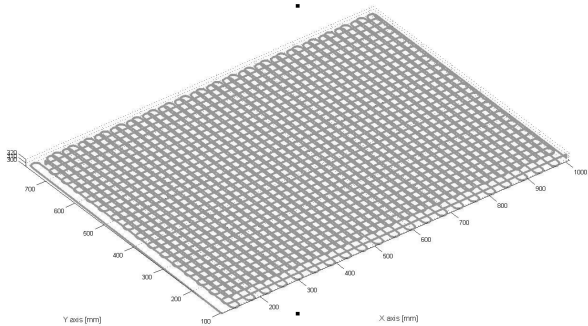


Fig. 13. G-Code simulation for grid Structure

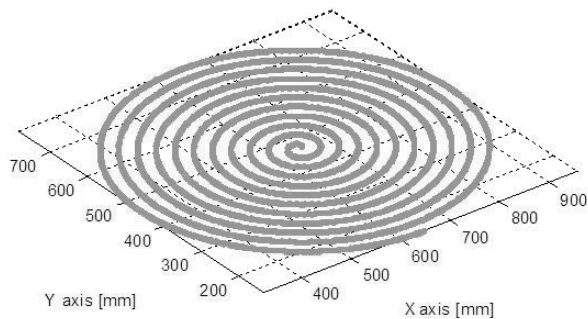


Fig. 14. G-Code simulation for spiral structure

사전에 확인할 뿐 아니라 시스템의 오작동을 조기에 방지하고자 하였다. 시뮬레이션에서는 초기 위치를 지정한 후에 직선 보간과 원형 보간이 적용된 프로그램에 G-Code를 입력하여 일정한 속도로 노즐 궤적을 생성하도록 하였다. Figure 13은 1000mm×656mm×320mm 크기의 격자무늬 구조물에 대한 시뮬레이션이며 Figure 14는 나선형 구조물에 대한 시뮬레이션을 나타낸다. 구조물의 크기는 950mm×783mm×350mm이며 압출속도는 100mm/sec의 일정한 속도로 설정하여 실시하였다.

4.2 적층 시공 실험

적층과정은 지면에 수평한 평면상에서 노즐을 이동하면서 이루어지는데, 평면상의 임의의 노즐 경로는 여러 개의 직선과 곡선들로 잘게 나누어 단순화가 가능하다. 실제 CAD, CAM에 있어서도 임의의 경로를 단순화 할 때, 여러 개의 직선과 곡선의 세그먼트로 분할하여 사용한다. 격자무늬 구조물과 나선형 구조물은 반복적인 직선과 곡선으로 이루어져 있어서, 개발 초기 과정에서 압출 형태의 이상 유무를 기준 형상과 비교하지 않고도 가시적으로 확인할 수 있는 좋은 테스트 구조물이 될 수 있다. 또한 이러한 기본 실험에 있어서의 압출 성능이 확인 된다면, 더 복잡한 비정형 구조물에도 시행착오 없이 성공적으로 적용이 가능하다고 볼 수 있다.

Figure 15는 Figure 14와 같이 설계된 나선형 구조물에 대한 실제 적층 실험한 결과를 보여준다. 일정한 양의 재료를 압출하면서 형태를 유지하며 적층이 가능한 것을 볼 수 있다. 정량 압출이 제대로 이루어지지 않는 경우나 노즐의 이송 속도와 재료의 압출속도가 일치하지 않는 경우에 있어서 재료가 끊어지거나 일정한 형태를 유지하지 못하게 되는 현상이 발생할 수 있다. 특히 적층 실험 초기에는 믹싱펌프에서 압출 노즐까지 이어진 호스에서 형성된 긴 유로의 유체저항으로 인하여 재료의 정량 토출이 원활하게 이루어지지 않았다. 원활한 정량 압출을 위해서는 중력을 거스르는 유로 형성을 최소화해야 하며, 각종 커플러와 리듀서(reducer)



Fig. 15. Spiral structure construction using Automated Freeform construction system

연결부에서의 압력강하가 최소화될 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 일정한 형태를 유지할 수 있도록 압출속도와 이송속도를 일치시키는 작업이 필요하다. 본 논문에서는 초기 연구로서 노즐부의 on/off 장치를 수동으로 대신하였으나, 향후 연구에서 연속적인 자동 운용을 위해서 주 제어기에서 제어될 수 있는 노즐부의 on/off 장치를 개발하는 것이 필요하며, 정량토출 성능 향상을 위해서는 믹싱 펌프의 개선에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것이다.

본 시스템에 있어서 모르타르 펌프의 최대 연속 작동 시간은 8시간이고 작동 온도는 2°C에서 45°C이다. 제작된 시스템에 있어서 운용 시간의 한계는 로봇 시스템에 있지 않고 이와 같은 펌프의 성능 사양에 제한되어 있다. 점도가 높은 재료를 사용하거나 파이프 내부에서 모르타르의 경화가 일어나게 되면 펌프에 무리를 줄 수 있게 되고 이로 인해 작동이 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 펌프의 용량을 높이거나 특정한 압출 속도에 최적화된 모르타르 펌프를 설계하거나 펌프의 위치를 높여서 중력에 대한 저항을 줄이는 방법들이 동원될 수 있을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 자동화 적층 시공 시스템의 초기 단계 연구로서 프로토타입 개발에 관련된 설계 요소들에 관하여 기술하였다. 3축 갠트리 로봇 형태의 기구부를 설계 하였으며, 이에 적합한 제어 시스템으로서 다축 이송 제어가 가능하면서도 추후 확장이 가능한 CAN 통신 기반의 분산 제어 시스템을 구축하였다. 운용 소프트웨어로서는 주 제어기 내에 G-Code interpreter 프로그램을 개발하였으며, 자동화 적층 시공 시스템의 오작동 방지와 노즐의 이동 경로 확인을 위한 Matlab 기반의 궤적 생성 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다.

한편, 자동화 적층 시공 시스템에 적합한 모르타르 배합설계를 위하여 압축강도, 경화시간, 유동성 평가를 실시하였다. W/B 35%에 플라이애쉬 30%와 실리카흄을 10% 혼합한 배합이 높은 압축강도성능을 보였을 뿐 아니라 경화시간 측면에서도 적층시공에 적합한 물성치를 보였다. 추가적으로 적층면 간의 접착력을 증가시키고 압출재료의 형태 유지를 유지하기 위하여 섬유를 보강하고 증점제를 혼합하여 자동화 적층 시공 시스템에 적절한 배합비를 선정하였다. 실제 적층 실험에서는 제안된 로봇 시스템과 3성분계 섬유보강 모르타르를 통해 적층 가능성을 입증하였으며, 초기 연구 이후의 추후 연구의 방향을 도출하였다. 향후 각 layer간의 접착력을 고려하여 적합한 적층 시기에 대한 추가 연구가 필요하며, 정밀한 정량

토출이 가능한 펌프 시스템에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것이다. 본 연구에서 나타난 결과를 기초로 하여 재료적인 측면의 추가적인 연구와 시스템의 지속적인 보완이 이루어진다면, 적층 시공 시스템 뿐만 아니라 무인화 건설 시스템과 무인 원격 보수 로봇의 요소기술로 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 일반연구지원사업 [기본연구지원사업, No. 2011-0026344]의 일부 지원을 받아 수행된 연구임

References

- Lee, J.-H., Ok, C.-E., Choi, H.-S. and Kim, Y.-S. (2010). "A development priority and technology roadmap for construction automation." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 26, No. 10, pp. 131-140 (in Korean).
- Kim, Y.-S., Seo, J.-W., Lee, J. and Kim, S.-K. (2008). "A study on the development of technology roadmap for construction automation." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 4D, pp. 493-504 (in Korean).
- Hwang, D. and Khoshnevis, B. (2004). "Concrete wall fabrication by contour crafting." *Proc. of 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC*, Republic of Korea.
- Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K. and Yeh, Z. (2006). "Mega-scale fabrication by contour crafting." *Industrial and Systems Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 301-320.
- Hwang, D. and Khoshnevis, B. (2005). "An innovative construction process-contour crafting (CC)." *Proc. of 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC*, Italy, pp. 1-6.
- Khoshnevis, B., Bussell, R., Kwon, H. and Bukkapatnam, S. (2001). "Crafting large prototypes." *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 8, pp. 33-42.
- Lim, S., Buswell, R., Le, T., Wackrow, R. and Austin, S. (2010). "Development of a viable concrete printing process." *Proc. of 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Slovakia, pp. 665-670.
- Lim, S., Buswell, R., Le, T., Austin, S., Gibb, A. and Thorpe, T. (2011). "Developments in construction-scale additive manufacturing processes." *Automation in Construction*, Vol. 21, pp. 262-268.
- Le, T., Austin, S., Lim, S., Buswell, R., Gibb, A. and Thorpe, T. (2011). "High-performance printing concrete for freeform building components." *Fib Symposium*, Prague, pp. 499-502.