

3D 프린팅 콘크리트 배합설계 프로세스에 관한 연구

Developing Design Process of 3D Printing Concrete Mix Proportion

진초¹⁾, 박유나²⁾, 유승규³⁾, 배성철⁴⁾, 김재준⁵⁾

Chen, Chao¹⁾ · Park, Yoo-Na²⁾ · Yoo, Seung-Kyu³⁾ · Bae, Sung-Chu⁴⁾ · Kim, Jae-Jun⁵⁾

Received June 12, 2017; Received August 19, 2017 / Accepted August 22, 2017

ABSTRACT: 3D concrete printing technology builds structural components layer-by-layer with concrete extruded through a nozzle without using forms. This technology can simplify construction processes by optimizing design flexibility, construction time, and cost. Furthermore, the 3D printing technology is easy to make an irregularly shaped and function embedded building(or object) which is difficult to be constructed by conventional construction method. However, the 3D printing concrete is not suitable for current commercial standard and the material itself. It is also difficult to apply it to the construction site due to the lack of initial strength and the nozzle which is clogged during the process. The research of mix proportion design process for 3D printing concrete which differs from the conventional concrete is necessary in order to solve the problems. This paper aims to calculate the 3D printing concrete mix proportion design process based on the mix materials and performance information derived from the previous researches. Therefore, the usage variation range, mutual influence relationship, and the importance priority of the mix proportion are analyzed. Based on this results, the basic design process of 3D printing concrete which contains planning design phase, basic design phase and validating performance phase is suggested. We anticipate to confirm applicability verification about the actual production by referring to this 3D printing concrete mix proportion study. In the future, this study can be utilized for blueprint of the 3D printing concrete mix proportion.

KEYWORDS: 3D Printing Concrete, Mix Proportion, Design Process

키 워 드: 3D 프린팅 콘크리트, 배합비, 설계 프로세스

1. 서론

전 세계 3D 프린터 제조 및 관련 서비스 시장의 규모는 2019년 6억 달러로 예상되며, 3D 프린팅으로 제조된 제품의 가치를 더할 경우 133억 달러에 달할 것으로 전망된다(Oh et al., 2014). 이 중 건설분야 3D 프린팅 콘크리트 시장은 2016년에는 2,450만 달러에서 2021년에는 5,640만 달러 규모로 성장(연평균성장률 15.02%)할 전망이다(Markets And Markets, 2016).

최근 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서는 3D 프린팅 기술을 이용하여 달에 건축물을 생산하려는 계획과 더불어 3D 프린팅 콘크리트와 관련된 연구가 진행되었다(Werkheiser et al., 2015). 또한 Skanska는 2014년부터 콘크리트 기반의 3D 프린팅 시공 프로세스와 로

봇을 이용한 콘크리트 배합 및 운송 시스템에 대한 연구를 진행하고 있다(Skanska, 2017). 중국의 3D 프린팅 회사인 Winsun은 2016년 3D 프린터 및 3D 프린팅 콘크리트를 이용하여 두바이에 사무용 건축물을 완성하였다(Tess, 2016). 이처럼 국외의 경우 상당한 기술적인 진보와 상업화 측면에서 가시적인 성과를 도출해내고 있다. 반면 국내 건설분야에서는 2014년 국토교통과학기술진흥원의 '건축물 대상 3D 프린팅 장비 및 설계기술 개발 기획'의 연구를 시초로 국가 단위에서 3D 프린팅 건축과 관련된 연구과제가 진행되고 있다. 최근 한국건설기술연구원은 2020년까지 소형 건축물 및 비정형부재 대상의 3D프린팅 설계·재료·장비를 개발하는 것을 목표로 연구하고 있다(Kim, 2017; Shin, 2017).

제조산업 분야에서 3D 프린팅 기술을 사용하는 목적은 전통적인 제조방법으로 생산하기 어려운 상품을 만들어 내는 것에

¹⁾ 학생회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정 (jingmo@hanyang.ac.kr)

²⁾ 학생회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정 (yoona6419@gmail.com)

³⁾ 정회원, 한양대학교 건축공학부 박사후연구원 (james_yoo@hotmail.com)

⁴⁾ 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수 (sbae@hanyang.ac.kr)

⁵⁾ 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수 (jjkim@hanyang.ac.kr) (교신저자)

있다. Malaeb et al.(2015)은 위와 같은 내용이 건축에도 적용될 수 있음을 주장한다.

현재까지 건설분야에서 주로 활용되어오고 있는 3D 프린팅 기술은, FDM(Fused Deposition Modeling) 방식이며 콘크리트 또는 시멘트 모르타르를 재료로 활용한다. 이 방식은 콘크리트를 직접 압출하여 거푸집 없이 객체를 생성할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 이를 통해 객체의 시공 과정을 간소화하여 노동력과 비용을 절감하고, 설계의 자유도를 높일 수 있다는 것이 핵심이다¹⁾. 하지만 현재 개발되고 있는 콘크리트 기반 3D 프린팅 방식은 형상의 자유도가 시장기대치보다 낮으며, 재료의 물성도 실제 사용기준에 도달하지 못하고 있다. 더 구체적으로 설명한다면, 3D 프린팅 기술이 갖는 태생적인 한계(적층생산)와, 콘크리트라는 재료적 특수성(수화반응)에 기인한다(Ma et al., 2014). 그럼에도 불구하고 FDM 방식이 주로 활용되는 이유는 기술 도입의 난이도가 낮고, 단 기간에 기존 건설방식을 대체할 수 있었기 때문이다(콘크리트를 쉽게 접목시킬 수 있었다는 점).

최근 프랑스의 XtreeE사는 3D 프린팅 건축의 방향을 비용절감, 생산성 향상에만 국한하지 않고, 비정형상 구현과 새로운 기능, 부가치 창출에 두고 있다. 현재 XtreeE는 로보틱암(robotic arm)을 이용하여 적층부위에 대한 문제(적층면의 부착강도)를 해결하고 비정형의 건축 객체를 생산하였다. 하지만 여전히 콘크리트의 재료적 물성을 보완하는 것이 연구의 가장 큰 핵심을 차지하고 있다(Gosselin et al., 2016).

현재까지 국내의 3D 프린팅 콘크리트에 대한 연구는 기초적인 수준에 불과하다. 3D 프린팅 기술이 가져오는 높은 형상자유도 구현과 부가치 창출뿐만 아니라, 건축물로서의 구조적 합리성을 달성하기 위해서는 3D 프린팅용 콘크리트 개발을 위한 배합설계 프로세스가 매우 중요하다. 특히 출력방식과 재료적 특성 자체가 최종생산품의 설계형상에 막대한 영향을 준다는 점에서, 향후 3D 프린팅 건축물 설계에 핵심 제약조건(constraint condition)으로 자리 잡을 수 있기 때문이다.

이에 따라 본 연구는 기존 3D 프린팅 콘크리트 개발 사례, 특히, 연구문헌에서 도출된 각각의 3D 프린팅 콘크리트의 배합 재료와 성능 정보를 기반으로 배합설계 프로세스를 구축하고자 한다. 이를 통해 각 배합재료의 사용량 변동 범위, 상호 영향관계, 중요도 우선 순위를 도출하고자 한다. 본 연구에서는 최종적으로 3D 프린팅 콘크리트 배합 설계 프로세스를 제안하였다.

Table 1. Research cases of 3d printing concrete

No.	Titel	Country
A	Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete	UK
B	A study on the development of an automated freeform fabrication system and construction materials	Korea
C	Concrete composition for 3d printing, concrete and manufacturing method of the concrete using it	Korea
D	Experimental study on the mix design and performance of 3d printing concrete	China
E	Construction concrete mix design for 3d printing	China
F	3D concrete printing: machine and mix design	America
G	Multidisciplinary design project mega scale 3d printing	UK
H	Preparation and application of 3d printing materials in construction	China
I	Mortar composition for 3d printing, mortar and manufacturing method of the concrete using it	Korea

2. 3D 프린팅 콘크리트의 기존 연구 고찰

2.1 3D 프린팅 콘크리트 선행연구 고찰

국내외 3D 프린팅 콘크리트에 대한 연구는 아직 기초단계에 머물러 있어 선행연구, 특허 등의 수집이 어렵다. 이에 따라 본 연구는 3D 프린팅 콘크리트 배합비 및 성능 정보의 수집이 가능한 9가지 사례를 추출하였다. 사례국가와 명칭은 표 1과 같으며, 배합비 및 성능 정보는 표 2와 같다.

먼저 해외를 살펴보면 영국 Loughborough University에서는 2012년 고강도 3D 프린팅 콘크리트에 대한 연구를 진행하였다. 주로 피복제와 벽 패널로 사용할 수 있는 고강도 3D 프린팅 콘크리트를 개발하였으며, 의자(bench) 형상의 모델을 출력하였다(Le et al., 2012). 또한, 영국 University of Surrey에서는 다양한 응결 시간을 가지고 있는 고밀도/고성능 3D 프린팅용 콘크리트와 저밀도/고성능 콘크리트의 배합비를 연구결과로 제시하였다(Airey et al., 2012).

미국 Beirut University에서는 3D 프린팅 장비와 콘크리트 재료를 설계하였다. 특히 유동성, 응결 속도, 강도 등의 성능실험을 통해 초결시간이 70분이며 42MPa의 압축강도를 갖는 3D 프린팅용 콘크리트를 개발하였다(Malaeb et al., 2015). 중국 Huazhong University of Science and Technology는 초결시간이 336분, 종결시간이 532분, 78.2Mpa 압축강도(28일)의 성능을 가지는 3D 프린팅 콘크리트를 개발하여 성능 검증을 통과하였다. 하지만 출력 속도가 느리고 일반 콘크리트와 초결시간에 차이가 없기 때문에 3D 프린팅 과정에 적합하지 않다는 연구 결과가 있었다(Li and Li, 2014). 또한 중국 Tongji University는 탄소 섬유를 사용하여 높은 휨강도를 가지고 있는 3D 프린팅 콘크리트를

¹⁾ NASA와 Winsun의 사례는 3D 프린팅 기술을 적정기술(appropriate technology)로 활용하였다. NASA의 경우 출력재료의 현지 조달이 가장 큰 목적이며, Winsun의 경우 3D 프린팅 기술의 가장 큰 장점인 비정형상 구현보다, 생산의 자동화에 따른 노동력/재료 절감에 초점을 두었다.

개발하였다. 하지만 실제 출력을 통한 시험 검증을 하지 않았다 (Qiao et al., 2016). 중국건축주식회사의 기술센터는 혼화제에 대한 실험을 통해 다양한 환경에서 차별된 응결시간을 지니고 있는 콘크리트를 개발하였다(He et al., 2016).

국내에서는 연세대학교에서 자동화 적층 시스템과 3D 프린팅 용 콘크리트를 연구하였다. 이 연구에서는 초결시간이 60분, 압축 강도(28일) 52.7MPa의 속경 콘크리트를 개발하였는데 시멘트의 사용량이 골재 사용량의 2배를 초과하여 경제성에 문제가 있었다. 한국동산콘크리트산업(주)에서는 2016년 3D 프린팅용 모르타르 및 제조 방법에 대한 특허를 출원하였다. 3D 프린팅용 모르타르와 콘크리트를 개발하였지만 압축 강도가 27.35Mpa, 33.42Mpa에 불과하였다(Jeon, 2016).

사례분석 결과 국내의 개발사례 대부분에서는 3D 프린팅 콘크리트의 배합비 설계 시, 재료의 종류, 사용량, 성능평가 방법, 실험검증 프로세스 등에 대해 일관성을 확보하고 있지 않았다. 게다가 개발된 3D 프린팅 콘크리트는 강도가 현저히 낮거나, 수축변형이 심하고, 다양한 양생 환경에 적용시킬 수 없다는 한계를 가지고 있었다. 이를 바탕으로 본 연구는 배합재료와 콘크리트 성능

간 상호 영향 관계를 분석하고, 배합재료의 중요도 우선 순위 및 사용량 변동 범위를 도출하여 3D 프린팅 콘크리트의 배합설계 프로세스를 도출하는 과정으로 연구를 진행하였다.

3. 3D 프린팅 콘크리트 배합 설계

선행연구 고찰을 통해 3D 프린팅 콘크리트의 배합 설계 시 고려되어야 하는 영향요인 다음과 같다. 물 바인더 비(W/B), 시멘트, 골재, 혼화제·제, 섬유 사용량, 프린터 노즐 사이즈, 프린팅 속도 등이다. 외부환경 요인으로는 환경조건과 설계강도, 내구성 등이 있다. 본 연구에서는 3D 프린팅 콘크리트의 배합 단계에서 직접적으로 고려되어야 하는 재료들을 내부요인으로, 환경조건 및 제한요인은 외부요인으로 나누어 고찰하였다.

3.1 내부 요인 고찰

본 연구에서는 3D 프린팅 콘크리트의 배합성능을 총 5개의 요인(유동성, 압축성, 경화시간, 압축강도, 시공성²⁾)으로 평가하였다. 다만 앞서 언급된 성능이 모두 고려된다고 하더라도 콘크

Table 2. Results of domestic and international 3d printing concrete previous researches

No.	W/B	C	Aggregate (mm)	Additive		Admixture			Fiber (kg/m ³)	Nozzle (mm)	FS (MPa)	CS (MPa)	IST (min)	FST (min)	OT (min)	ER (m ³ /h)	PS (m/min)
A	0.26	70%B	150%B < 2	FA 20%B	SF 10%B	Superplasticizer 1%B	Retarder 0.5%B		1.2			110	-	-	100	0.036	-
B	0.35	71%B	36%B < 0.6	FA 21%B	SF 8%B	Superplasticizer 2%B	Thickening agent 1%B	Resin 1%B	1.2	15	-	52.7	60	-	-	-	6
				BS 30%B		Admixture 4.7%B	Microbial soup 23.5%B										
C	0.71	70%B	382%B < 5	BS 30%B		Admixture 4.7%B	Microbial soup 23.5%B		5.8	-	6.6	27.35	-	-	-	-	-
D	1	71.5%B	515%B < 15	BS 28.5%B		Admixture 4.6%B	Microbial soup 30.8%B		7.3	-	7.1	33.42	-	-	-	-	-
				-		Superplasticizer 0.5%B	Accelerator 1%B	Retarder 0.3%									
E	0.32	100%B	100%B < 3	-		Superplasticizer 0.5%B	Accelerator 1%B	Retarder 0.3%	-	9	-	78.2	336	532	50	0.060	2
				-		Superplasticizer 2%B	Accelerator 3%B										
F	0.43	100%B	439%B < 5	-		Superplasticizer 2%B	Accelerator 3%B	Retarder 0.5%B	2.6	-	-	-	-	-	-	-	-
				-		Superplasticizer 0.8%B	Accelerator 0.8%B	Retarder 0.5%B									
G	0.39	100%B	192%B < 2	-		Superplasticizer 0.8%B	Accelerator 0.8%B	Retarder 0.5%B	-	20	-	42	70	-	-	0.324	11.26
				-		Superplasticizer 0.8%B	Accelerator 0.8%B	Retarder 0.5%B									
H1	0.26	70%B	150%B < 2	FA 20%B	SF 10%B	Superplasticizer 1%B	Retarder 0.5%B		1.2	-	-	-	-	-	-	0.324	0.66
				FA 20%B	SF 10%B	Superplasticizer 1%B	Retarder 0.3%B										
H2	0.35	70%B	150%B < 2	FA 20%B	SF 10%B	Superplasticizer 1%B	Retarder 0.3%B		1.2	-	-	-	-	-	-	2.420	2.28
				BS 20%B		Superplasticizer 0.1%B	Accelerator 0.1%B	Retarder 0.5%B									
I1	0.35	80%B	100%B < 0.85	BS 20%B		Superplasticizer 0.1%B	Accelerator 0.1%B	Retarder 0.5%B	-	-	-	58.3	58	122	-	-	-
				BS 20%B		Superplasticizer 0.1%B	Accelerator 0.06%B	Retarder 0.6%B									
I2	0.35	80%B	100%B < 0.85	BS 20%B		Superplasticizer 0.1%B	Accelerator 0.06%B	Retarder 0.6%B	-	-	-	62.3	75	90	-	-	-
				BS 20%B		Superplasticizer 0.1%B	Accelerator 0.06%B	Retarder 0.6%B									

Abbreviation: W/B: Water/Binder; C: Cement; IST: Initial Setting Time; CS: Compressive Strength; B: Binder; FA: Fly Ash; BS: Blast Furnace Slag; SF: Silica Fume; FS: Flexure Strength; FST: Final Setting Time; OT: Open Time; ER: Extruded Rate; PS: Print Speed; 1/2: Two different results shown in the same experiment

²⁾ 시공성 검사는 전체적인 요구사항을 만족하는지를 확인하는 것으로서 압축성, 가공성, 경화시간 등의 종합적 성능을 검사하는 것이다(Oh et al., 2002; Le et al., 2012).

리트 성능이 완벽하다고 할 수 없다. 그 이유는 3D 프린팅 과정에서 콘크리트 응결시간이 매우 짧아지게 될 경우 다음 레이어(layer)와 연결(접착) 성능을 확보하지 못하기 때문이다(Malaeb et al., 2015). 또한 출력된 콘크리트의 내부에 공극이 발생하거나 층간 접착성이 확보되지 않으면 압축강도가 20% 감소된다(Lim et al., 2011). 따라서 배합 설계 시 짧은 경화시간을 확보하면서도 층간 접착성을 추가적으로 고려되어야 한다(Malaeb et al., 2015; Le et al., 2012). 결과적으로 본 연구에서는 배합비를 설계할 때 유동성, 압축성, 접착성, 경화시간, 압축강도, 시공성을 반드시 고려해야 할 6개 영향요인으로 선정하였다.

다음으로 선행 연구를 통해 3D 프린팅 콘크리트 배합 재료와 콘크리트 성능 간의 관계에 대해 분석하였고, 각 요인들의 영향 정도에 따라 표 3과 같이 정리 하였다. 배합 재료는 모두 시공성에 영향을 주기 때문에 표 3에는 생략하였고 배합 설계 시 종합 성능으로 검사할 것이다.

Table 3. The influence factors of the 3d printing concrete performance

Category	W/B	C	AG	Additive			Admixture				Fiber
				FA	BS	SF	SU	RE	AC	TH	
Flowability	●	□	×	□	□	□	●	×	□	□	□
Extrudability	□	□	●	×	×	×	●	×	×	□	□
Adhesive property	□	●	×	□	●	□	×	×	×	●	●
Setting time	●	□	×	□	□	●	□	●	●	×	×
Compressive strength	●	□	●	●	□	●	×	□	●	×	●

Influence Degree ● : high □ : normal × : low

Abbreviation: AG: Aggregate; TH: Thickening Agent; BS: Blast Furnace Slag; FA: Fly Ash; AC: Accelerator; SF: Silica Fume; SU: Superplasticizer; RE: Retarder; C: Cement

3.1.1 물-결합재비 (W/B) 영향 분석

표 3을 통해 W/B는 3D 프린팅 콘크리트의 유동성, 경화 시간, 압축강도와 높은 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있다. W/B가 증가하면 유동성을 향상시킬 수 있지만 다량으로 물을 사용함으로써 경화시간이 증가하여 콘크리트의 품질이 떨어질 수 있다. 게다가 콘크리트 분리(concrete disintegration) 현상을 촉발시킨다. 이에 따라 3D 프린팅 콘크리트의 배합비 설계 시 유동성을 증가하기 위해 단순히 W/B를 증가시키는 것은 적절하지 않은 방법이다.

그림 1은 W/B와 각 콘크리트 압축강도와의 관계를 나타낸다. W/B는 보통 0.25~1 사이의 비율로 사용되어지는데 3D 프린팅 콘크리트는 기존 건축공법과 달리 거푸집과 같은 지지 구조가 없이 자중을 스스로 지지해야 하고, 형태를 그대로 유지해야 하기 때문에 신속한 응결을 위해서는 우선적으로 낮은 W/B를 고려해

야한다. 기존 연구 결과에서는 C, D 콘크리트를 제외하고 W/B는 모두 0.25~0.4로 설계하였으며, 압축강도가 40MPa이상인 고강도 콘크리트로 나타났다. C, D 콘크리트는 상대적으로 높은 W/B를 설정하여 압축강도가 27.35MPa, 33.42MPa로 낮게 나오는 결과를 보였다. 높은 압축강도를 얻기 위해 W/B는 0.25~0.4사이에서 선택하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

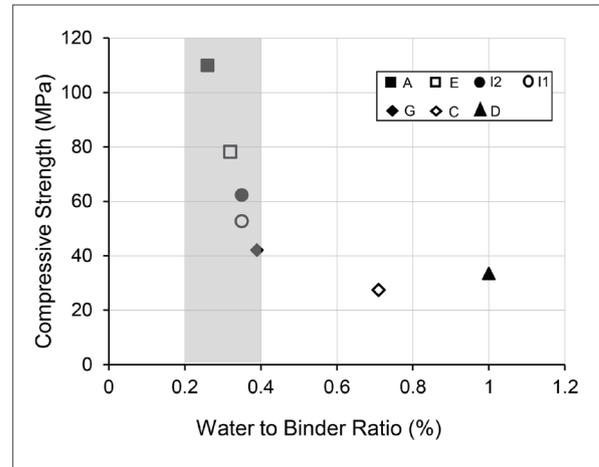


Figure 1. Relationship between compressive strength and water to binder ratio

이상의 내용을 정리해 보면 경화시간을 단축하거나 강도를 높이기 위해 W/B를 낮게 설정하는 것은 높은 유동성을 얻기 위해 W/B를 높게 설정하는 것과 서로 상반된다. 이 상반된 문제를 해결하기 위해서는 다양한 첨가제를 추가적으로 혼합하여 조절할 필요가 있다.

3.1.2 결합재 내 시멘트 사용비율의 영향 분석

표 3을 보면 결합재 내 시멘트 사용 비율은 레이어간 접착성에 높은 영향을 주고, 유동성 및 압축성과 경화시간에도 영향을 주는 것을 볼 수 있다. 그림 2는 9가지 사례의 결합재 내 시멘트 사용비율로 모두 총 결합재의 70%이상 사용되었다. 또한 혼화제 없이 순수 시멘트만 사용하는 경우도 있는 것을 확인할 수 있다. 시멘트 사용량이 적어지면 배합의 접착성이 떨어지고 모래 분리는 더 심각하게 발생하는 것으로 나타났다.

그림 2를 보면 결합재 내 시멘트 사용 비율은 압축강도와 비례 관계가 없으며, 압축강도의 주요 결정 요인이 아닌 것을 알 수 있다. 압축강도의 영향 요인은 다양하며 시멘트 사용량을 높이더라도 다른 영향 요인에 따라 압축강도의 차이는 크게 나타난다. 따라서 배합비 설계 시 결합재 내 시멘트 사용 비율은 결합재의 70%이상이 적합하며 골재, 혼화제·제, 섬유 등의 영향을 고려해야 한다.

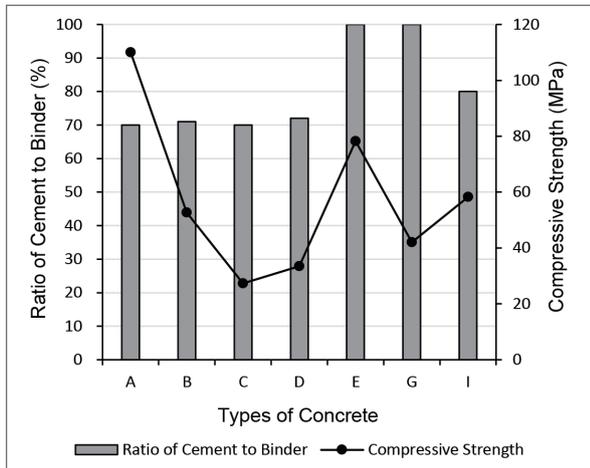


Figure 2. Ratio of cement to binder and effect to the compressive strength

3.1.3 골재 사용량의 영향 분석

표 3을 통해 골재는 3D 프린팅 콘크리트의 압축성, 압축강도에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 적당한 골재 사용량을 선택하는 것은 배합비 설계에서 매우 중요하다. 낮은 B/Sand는 모래 분리 문제를 발생시키고 3D 프린팅 과정에서 콘크리트 이송(유동성) 및 압출을 어렵게 만든다. 게다가 낮은 B/Sand는 프린팅된 레이어 사이에 접착력을 감소시켜 압축강도를 낮춘다. 기존 9개 사례를 검토해보면 골재 사용량은 최대한 결합재 사용량의 5배까지 사용하는 것을 확인할 수 있다.

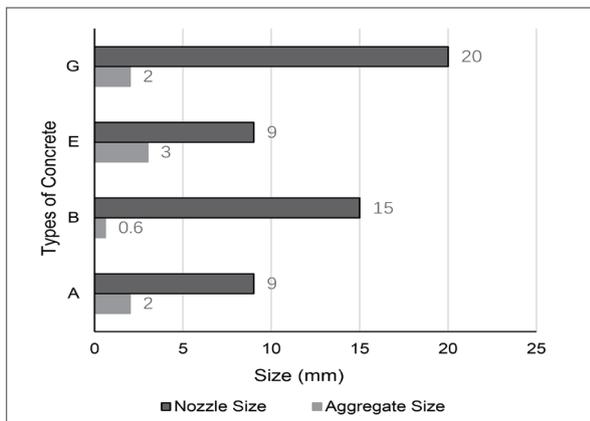


Figure 3. Nozzle and aggregate size of 3d printing concrete

골재의 최대 크기와 노즐 직경간의 관계는 그림 3을 통해 알 수 있다. 골재 최대 크기는 노즐 직경과의 비례관계는 없지만 노즐 직경은 골재 최대 크기보다 세 배 이상 크도록 설계해야 한다. 따라서 배합비 설계 시 사용할 노즐 사이즈는 골재 사이즈보다 세 배 이상 커야 한다.

3.1.4 혼화재의 영향 분석

혼화재는 3D 프린팅 콘크리트의 경화시간, 접착성 및 압축강도에 영향을 준다. 선행연구에서 사용한 콘크리트의 결합재 중 혼화재의 비율은 그림 4와 같다. 3D 프린팅 콘크리트에 사용하는 혼화재는 주로 고로슬래그, 실리카흄, 플라이애쉬이다. 고로슬래그는 단독으로 자주 사용되고, 실리카흄과 플라이애쉬는 함께 사용하는 것을 알 수 있다. 그리고 혼화재 사용량이 결합재량의 30%에 넘지 않는 것을 확인할 수 있으며, 이는 시멘트의 사용량이 70%이상인 것과 일치한다.

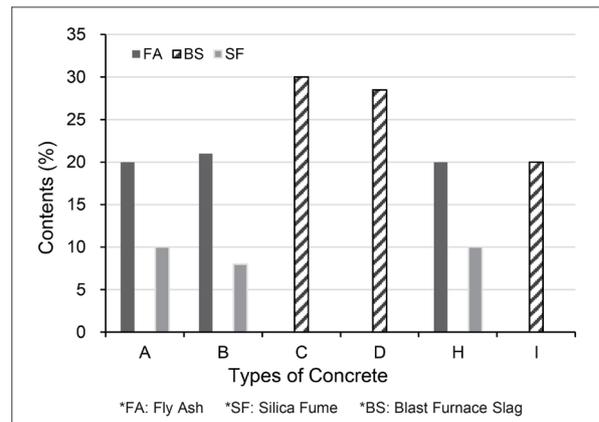


Figure 4. Percentage of additive used in binders

일반적으로 플라이애쉬를 사용하면 콘크리트 유동성이 증가하며 포졸란 반응에 의해 수화열을 억제하여 장기강도 발현에서 유리하다(Jeon et al., 2013). 플라이애쉬는 3D 프린팅 콘크리트의 장기 강도를 높일 수 있도록 자주 혼합되는 혼화재 중 하나이다. 플라이애쉬 사용량은 20%를 혼합할 때 콘크리트의 28일 압축강도를 증가시킬 수 있고, 30% 이상 사용하면 28일 압축강도가 감소한다(Zhang et al., 2015). 그림 4를 보면 각 유형 콘크리트의 플라이애쉬 혼합량은 모두 20%인 것을 확인할 수 있다. 따라서 초기 압축강도 감소를 방지하기 위해서는 3D 프린팅 콘크리트 내 플라이애쉬 혼합량은 20%이하로 사용하는 것을 권장한다.

고로슬래그의 사용은 콘크리트의 접착성을 증가시키며, 응결 속도를 늦추어 유동성을 확보 수 있는 효과가 있다. 고로슬래그는 표면적이 크기 때문에 물과의 흡착력이 높고 물의 증발을 방지하는 보조 감수 효과도 있다(Zhang and Wang, 2004). 3D 프린팅 콘크리트에 고로슬래그를 사용하면 강도를 향상시킬 수는 없지만 유동성과 접착성에 유리하게 작용한다. 반면에 고로슬래그를 혼합한 콘크리트는 느린 응결속도 때문에 경화시간에 불리하게 작용한다.

3D 프린팅 콘크리트는 거푸집이 없이 자기 형태를 유지할 수 있도록 빠른 시간에 경화가 이루어져야 하기 때문에 고로슬래그

를 선택하면 낮은 W/B와 감수제를 사용하고 조강제의 추가적 사용이 권장된다. 그림 4를 보면 각 유형 콘크리트의 고로슬래그 혼입량은 모두 30%이하 사용되었고 빠른 경화 시간을 얻기 위해서는 3D 프린팅 콘크리트의 고로슬래그 혼입량을 30%이하로 사용하는 것을 권장한다.

실리카흙은 3D 프린팅 콘크리트의 압축강도를 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 응결시간을 촉진하는 효과가 있다(Airey et al., 2012). 선행연구에서 실리카흙의 혼입량은 모두 10%로 플라이애쉬와 같이 사용할 경우 강도는 100MPa를 초과하게 된다. 실리카흙과 플라이애쉬를 함께 혼입하는 것이 강도에 가장 유리할 것으로 판단된다.

3.1.5 혼화제의 영향 분석

표 3에서 언급된 것과 같이 혼화제는 3D 프린팅 콘크리트의 유동성, 압축성, 접착성, 경화시간, 압축강도에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 3D 프린팅 콘크리트에 사용되는 혼화제는 감수제, 응결 지연제, 조강제, 증점제, 수지 등이다.

감수제는 3D 프린팅 콘크리트의 강도를 증가하기 위해 낮은 W/B를 사용하면서 유동성을 유지할 수 있도록 하는 역할을 한다(Malaeb et al., 2015). 낮은 W/B는 낮은 유동성과 압축성을 나타냄으로 프린팅 시 호스와 노즐이 막히거나 펌프의 압력을 증가시키는 문제를 초래할 수 있다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 유동성과 압축성을 개선할 수 있는 감수제를 추가적으로 사용해야 한다. 감수제는 유동성에 미치는 영향에 임계점이 있는데, 임계점 이하에서는 감수제 사용량과 유동성의 관계는 비례관계이며 임계점 이상에서는 감수제 사용량과 유동성의 관계가 반비례 관계이다(Li and Li, 2014). 배합비에 따라 임계점은 다르지만 기존 9개 사례에서는 감수제 사용량을 결합재의 0.5%~2%로 우선적으로 고려하였다. 감수제는 0.5%이하로 사용하면 콘크리트 유동성이 줄어들어 원활하게 출력될 수 없고, 2%이상 감수제를 쓰면 유동성이 너무 커 출력면에 퍼짐 현상이 발생한다. 이러한 문제를 방지하기 위해서는 적절한 유동성과 압축성을 얻을 수 있도록 감수제 사용량은 0~2%로 사용하는 것을 권장한다.

콘크리트 출력 시 자중이나 응결 속도에 따라 기존 레이어의 변형과 붕괴 현상이 발생하거나, 새로운 레이어의 무게를 지지할 수 없는 경우도 있다. 이는 콘크리트의 초기 강도와 관계가 있으며, 이를 해결하기 위해서는 조강제를 결합재의 0~3% 범위 내에서 추가적으로 사용해야 한다. 이를 통해 응결속도를 촉진해 줄 뿐만 아니라 초기 강도를 증가시킬 수 있다. 하지만 조강제의 사용량이 증가할수록 초기 수화반응 속도를 증진시켜 콘크리트가 쉽게 굳어지고 유동성이 없어지기 때문에 조강제를 사용하는 것은 유동성과 압축성에 불리할 수도 있다. 게다가 30도 이상의 환경에서 조강제를 사용하면 3D 프린팅 콘크리트의 강도에 매우

불리하게 작용할 수 있다(Qiao et al., 2016). 이와 같이 조강제를 더 이상 사용할 수 없는 경우에는 조강제 대신 증점제를 사용하여 접착성을 높이고, 형태유지 효과 확보할 수 있다. 증점제는 점도를 향상시키고 압출 이후에 형태를 유지할 때 필요하지만, 고점도의 재료는 펌프의 압송 과정에서 펌프 압력을 상승시키는 문제를 발생시킬 수 있으므로 혼입량에 주의하여야 한다. 기존 9개 사례를 보면 증점제는 결합재의 0%~1%사이로 사용하였다.

반대로 응결 속도가 너무 빨라지면 수화반응을 억제시키는 응결 지연제를 추가해야 한다. 응결 지연제를 추가 하면 콘크리트 비빔 후 탱크 내에서 콘크리트 응결을 지연시킬 수 있다. 이를 통해 출력 시 파이프가 막히는 것을 방지하고, 적절한 시공 시간을 확보할 수 있게 된다. 하지만 응결 지연제를 많이 사용하게 되면 초기강도에 불리하고, 28일 강도도 감소하게 된다(Li and Li, 2014). 따라서 기존 9개의 사례를 토대로 응결지연제는 결합재의 0%~0.5%정도 사용해야 한다.

3.1.6 섬유유 영향 분석

섬유는 적층면 간의 접착력을 향상시키고 압출 재료의 형태유지 및 균열 억제를 위하여 활용된다. 섬유 사용량은 압축성에 영향을 많이 주기 때문에 다량으로 투입할 경우 노즐이 막힐 수도 있다. 그림 5를 보면 절반의 사례에 해당하는 콘크리트가 섬유를 1.2 kg/m³으로 사용하였고, 이 사용량은 배합비에 따라 다르다. C, D 콘크리트의 섬유 사용량이 다른 유형 콘크리트보다 다섯 배 가량 많은 것은 C, D유형 콘크리트는 높은 W/B를 사용했기 때문이다. 이에 따라 유동성이 증가하여 섬유를 많이 사용해도 펌프가 막히는 문제가 없었다. 하지만 압축강도는 27.35MPa, 33.42MPa에 불과하였다. 결과적으로 배합설계 시 섬유 사용량은 1.2kg/m³이며 요구성능에 따라 변동가능하다.

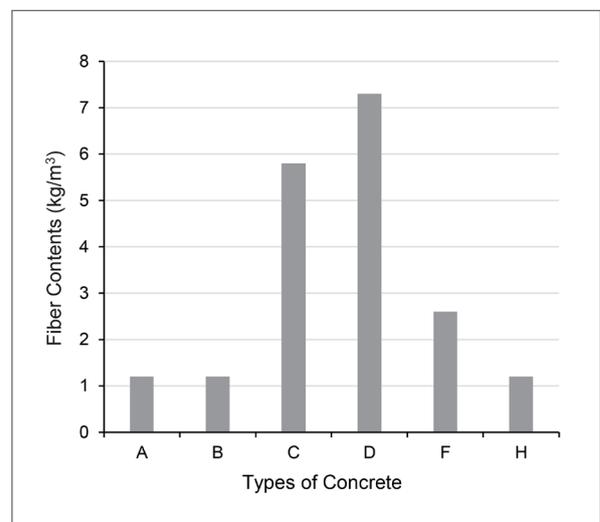


Figure 5. Quantity of fiber used

3.2 외부 요인 고찰

외부 영향요인은 구조물의 환경조건, 요구 성능, 프린터 종류 등이 있다. 3D 프린팅 콘크리트의 배합 설계 과정은 환경조건에 의한 영향을 많이 받으며, 구조물의 품질·용도·장소 등에 따라서 차이가 있다(Kim et al., 2008).

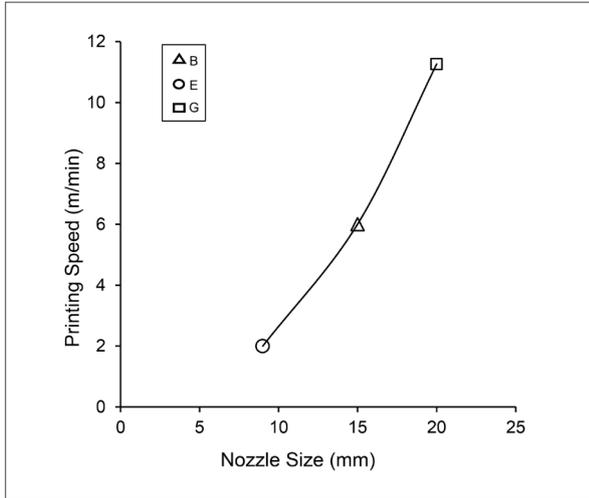


Figure 6. Relationship between nozzle size and printing speed

콘크리트의 경화 시간은 건축물의 위치와 기상에 따라 달라지므로 배합재료에 영향을 주게 된다. 또한 건축물의 용도에 따라 설계 강도가 다르므로 강도에 영향을 주는 인자들을 조절하기 위해서는 외부 영향요인을 명확하게 고려해야 한다. 또한 시공 시 적합한 프린터를 고려하는 것도 중요한데 프린터의 노즐 사이즈는 배합 설계 시 골재 사이즈의 사용 가능 범위를 정할 수 있고, 프린터의 압력, 프린팅 속도 등의 프린터 속성은 콘크리트의 유동성, 압축성, 경화시간에 적합해야 한다. 그림 6은 노즐 사이즈의 증가에 따라 프린팅 속도가 정비례로 증가하는 것을 보여준다. 따라서 3D 프린팅 콘크리트 배합 설계 전, 외부 영향 요인들을 추가적으로 고찰해야 할 필요가 있다.

4. 3D 프린팅 기반 콘크리트 배합설계 프로세스

본 연구에서는 앞서 내외부 요인을 모두 종합하여 그림 7과 같은 3D 프린팅 콘크리트의 배합설계 프로세스를 제안하였다. 배합설계 프로세스는 크게 외부 영향 요인을 확인하는 계획 설계 단계, 골재/결합재/ W/B를 설계하는 기본 설계 단계, 마지막으로 혼화제와 첨유 사용량을 확인하는 단계별 배합(Mix1~Mix5) 과정을 포함하는 실험 검증 및 개선 단계로 나누어진다. 본 절에서는 그림 7의 프로세스에 따라 설명하고자 한다.

먼저 계획설계 단계는 3D 프린팅 콘크리트 및 적용범위를 확인하고, 구조물의 환경조건과 요구 성능을 명확하게 확인하는 단

계이다. 환경조건으로는 건축물의 용도, 위치, 기상, 사용되는 프린터 종류 등이 있다. 구조물의 요구 성능은 내용연수, 강도, 내구성 등 성능항목 및 목표치를 나타낸다. 구조물의 요구 성능에 따라 W/B, 시멘트 사용량, 골재 및 혼화제·제 등 강도에 높은 영향을 주는 요인들을 고려하게 되므로 구조물의 설계 강도를 명확히 하는 것이 중요하다. 이와 마찬가지로 시공 환경, 프린터의 규격에 따라 골재의 크기, 콘크리트의 경화시간, 프린팅 속도, 압력 등이 영향을 받게 되므로 배합설계시 외부요인에 해당하는 환경조건과 요구 성능을 명확히 확인하는 계획설계 단계가 진행되어야 한다.

기본설계 단계는 골재의 크기 및 사용량, 결합재 사용량, W/B에 관한 설계를 진행하게 된다. 골재의 크기 및 사용량, 결합재 사용량, W/B는 앞 장에서 도출한 상호관계와 사용 범위를 고려하여 결정한다. 이 단계에서 초기 Mix 1이 완성된다.

실험 검증 및 개선 단계는 혼화제와 첨유 사용량에 대해 검증하는 과정이다. 이 단계에서는 계획 설계 단계에서 요구하는 성능을 만족하기 위해 앞서 설계된 기본 설계를 바탕으로 콘크리트의 유동성, 압축성, 접착성, 경화시간, 압축강도 총 5개 성능을 검증하면서 각 성능의 영향 인자의 사용량을 조절하여 성능을 개선하는 단계이다. 앞 장에서 각 성능에 영향을 주는 요인이 혼화제와 첨유에서 차이가 있는 것을 확인하였다. 이에 따라 성능검증 프로세스를 설계할 때, 여러 배합재료로부터 많은 영향을 받는 성능을 먼저 검증하게 되면 이후 나머지 배합재의 변동에 따라 성능이 변하는 문제가 생기게 된다. 따라서 본 연구의 프로세스는 혼화제와 첨유의 사용량이 콘크리트 성능에 영향을 주는 순서에 따라 기존 성능을 변동시키지 않도록 유동성과 압축성, 접착성, 경화 시간, 강도, 시공성 검증의 순서로 제시되어 있다.

유동성과 압축성에 영향을 주는 요인으로는 W/B, 골재 사용량, 감수제이다. W/B와 골재량은 기본 설계 단계에서 이미 결정되었으므로 이 단계에서는 감수제 사용량으로 유동성과 압축성을 검증하게 된다. 프린팅 단계에서 호스가 막히지 않고 원활하게 공급될 수 있는지, 노즐에서 연속적으로 압출할 수 있는지, 적절히 성형될 수 있는지를 확인하여 감수제 사용량을 조절한다. 감수제는 유동성과 압축성과 모두 비례관계로, 감수제 양이 감소하면 유동성과 압축성 또한 감소한다. 따라서 사례를 토대로 감수제는 결합재의 0~2%가 적절하다. 만약 감수제 사용량을 최대한으로 조절했음에도 불구하고 성능이 만족되지 않는다면 기본 설계 단계로 되돌아가 W/B를 다시 선정해야 한다. 최종적으로 유동성과 압축성이 만족되면 Mix 2가 완성된다.

다음은 적층면의 접착성을 평가하는 단계이다. 접착성에 영향을 주는 요인은 시멘트, 고로슬래그, 증점제, 첨유 등이다. 시멘트와 고로슬래그 사용량은 기본 설계 단계에서는 이미 고려되었으므로 증점제와 첨유 사용량으로 접착성을 평가한다. 퍼짐 현상

또는 형상이 유지되지 않거나, 적층면간 연결성이 좋지 않으면 증점제 혼입을 증가시켜야 한다. 만약 증점제 사용량을 결합재의 0~1%범위 내에서 최대로 조절했음에도 불구하고 접착성이 만족되지 않는다면 기본 설계단계로 다시 돌아가 결합재 사용량을 수정해야 한다. 이렇게 접착성이 만족되면 Mix 3이 완성된다.

다음은 완성된 Mix 3이 경화시간을 만족하는지 검증하는 것으로 주요 영향 요인은 W/B, 실리카흄, 응결 지연제, 조강제 사용량이 있다. W/B와 실리카흄의 배합비는 기본 설계 단계에서 고려되었으므로 이 단계에서는 응결 지연제와 조강제의 사용량으로 평가한다. 초기 계획 설계 단계에서 계획된 공사 기간 내 완공할 수 있는 콘크리트 프린팅 속도가 설계되었으므로 경화 시간에

프린팅 속도에 만족되지 않으면 시간 간격을 줄일 수 있다. 반대로 온도가 높은 시공 환경에 경화를 촉진시킬 수 있는 조강제를 사용하여 레이어간 프린팅서 경화를 억제하고 충분한 시공 시간을 주기 위해서는 응결 지연제를 결합재의 0%~0.5% 범위 내에서 추가 사용해야 한다. 만약 응결 지연제와 조강제의 배합비를 최대로 조절했음에도 불구하고 성능이 만족되지 않는다면, 기본 설계 단계로 되돌아가 경화시간에 높은 영향을 주는 W/B의 사용량을 다시 선정하고 각 단계 검증을 다시 진행하여야 한다. 최종적으로 경화시간을 만족되면 Mix 4가 완성되게 되고 다음 단계로 넘어간다.

다음은 Mix 4가 강도를 만족하는지 검증한다. 강도에 영향을

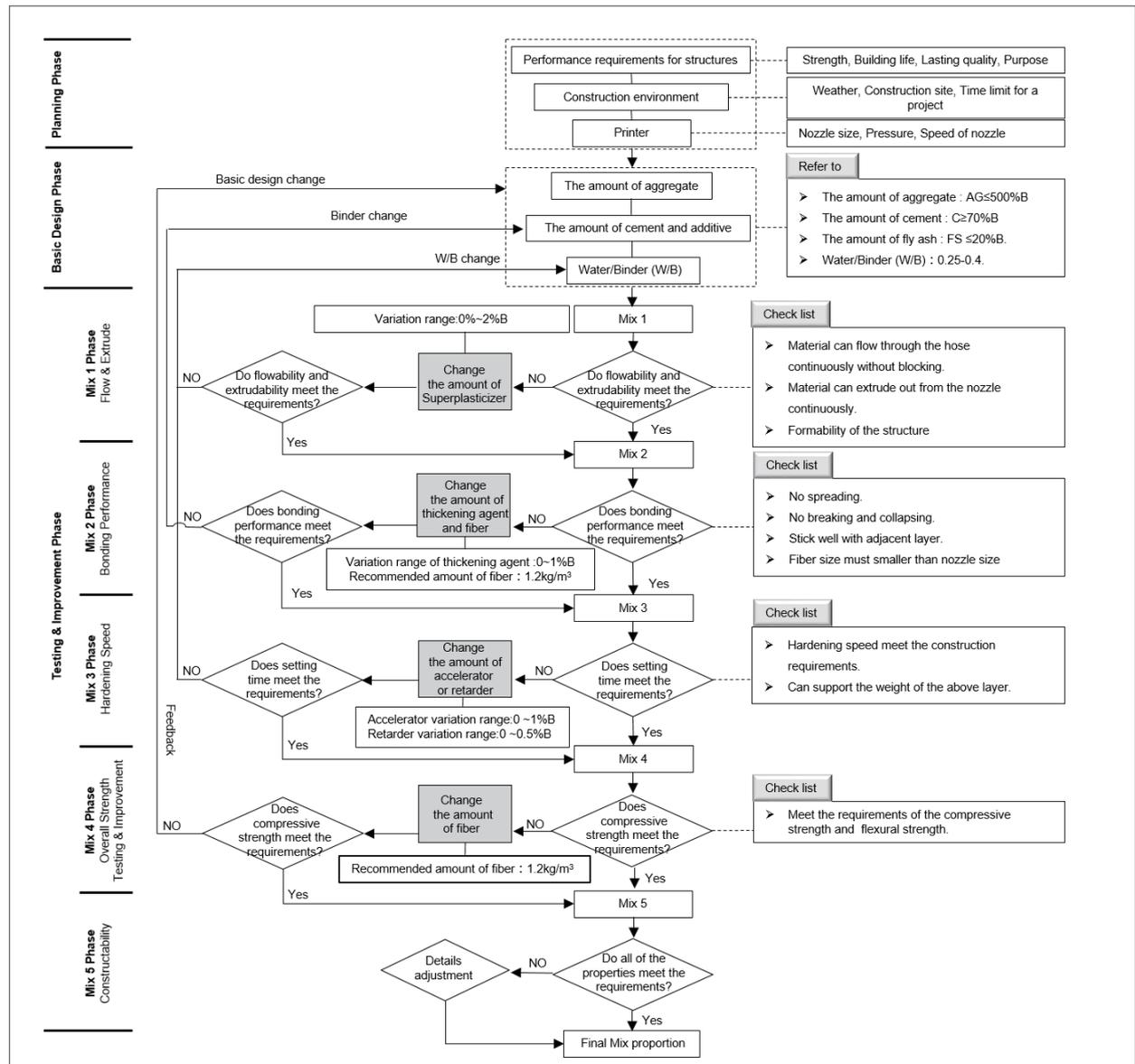


Figure 7. Mix proportion design of 3d printing concrete

주는 요인들은 선행 단계에서 모두 고려되었으므로 이 단계에서는 Mix 4의 강도가 설계 요구 강도를 만족하는지를 확인한다. 만약 요구 강도를 만족한다면 다음 단계로 진행되고, 만족하지 않으면 섬유를 추가한다. 섬유 추천 사용량은 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 이다. 만약 섬유를 많이 사용해도 목표 설계강도에 도달하지 못하면 기본 설계로 되돌아가 다시 설계하여야 한다. 이 단계를 통과할 경우 Mix 5가 완성된다.

마지막으로 Mix 5에 대한 시공성을 평가한다. 시공성 검사는 전체적인 요구사항을 만족하는지를 확인하는 것으로, 압축성, 가공성, 경화시간 등의 성능을 검사하는 것이다. 지금까지 3D 프린팅 콘크리트의 유동성, 압축성, 접착성, 경화시간, 압축강도를 각 단계별로 검증했지만 혼화제를 추가 후 기존 성능에 경미한 변동이 생길 수 있기 때문에 Mix 5는 최종적인 성능을 평가할 필요가 있다. 따라서 Mix 5(5단계 배합)로 계획 단계에서 확인한 외부 조건을 모의하고 프린팅하며 성능을 확인하며, 더 향상할 수 있는 부분에서는 세부적인 조절을 통해 시공 조건에 적합한 3D 프린팅 콘크리트의 최종 배합비를 결정할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 3D 프린팅 콘크리트의 선행연구 및 특허 조사를 통해 콘크리트 성능에 영향을 주는 요인을 도출하였고, 도출된 3D 프린팅 콘크리트의 영향 요인을 바탕으로 기존 3D 프린팅 콘크리트의 문제점을 보완할 수 있는 콘크리트 배합설계 프로세스를 제시하였다. 결과는 다음과 같다.

- 1) 3D 프린팅 콘크리트의 성능 평가는 유동성, 압축성, 접착성, 경화시간, 압축강도, 시공성을 평가하는 것이다.
- 2) 3D 프린팅 콘크리트의 내부 요인으로는 W/B, 시멘트, 골재, 혼화제·제, 섬유가 있고, 환경조건, 요구 성능, 노즐 등 외부 요인도 고려해야 한다.
- 3) 3D 프린팅 콘크리트의 배합비 설계시 참고할 수 있는 기본 설계프로세스를 제안하였고, 계획 설계 단계, 기본 설계 단계, 실험 검증 및 개선 단계 세 단계로 나누어 구성하였다. 실험 검증 및 개선 단계에서는 시험 검증 순서는 각 영향 요인들의 사용량이 콘크리트 성능에 영향을 주는 순서에 따라 프로세스 순서가 기존 성능을 변동시키지 않도록 유동성과 압축성, 접착성, 경화시간, 강도, 시공성 검증의 순서로 진행하였다.

본 연구에서는 3D 프린팅 콘크리트의 배합설계 프로세스 개발에 대한 기초 연구로서 적합한 배합비 설계 프로세스를 제안하였다. 하지만 실제 제안된 배합비 설계 프로세스를 이용하여 3D 프린팅 콘크리트를 제작/평가/검증을 수행하지는 못하였다. 그리고 3D 프린팅 콘크리트는 콘크리트 자체의 성능만을 고려하는 것이 아니라 프린터 성능, 노즐 사이즈, 환경온도 등 외부 환경도 고려

해야 하므로 배합설계 시 단계별로 성능 평가과정이 수반되어야 한다. 따라서 향후 연구에서는 본 연구에서 제안된 배합설계 프로세스를 기초로 실제 3D 프린팅 콘크리트를 제작하여 프로세스의 효용성을 검증하고 또한 그 결과를 바탕으로 보다 개선된 최적의 설계 프로세스를 도출할 필요가 있다고 판단된다.

References

- Airey, J., Nicholls, S., Taleb, H., Thorley, S., Tomlinson, S., Hiralal, D. U. (2012). Multidisciplinary Design Project Mega scale 3D Printing, Master of Engineering From the University of Surrey, pp. 15–18.
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudilliere, N., Dirrenberger, J., Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders, *Materials and Design*, pp. 102–109.
- He, G. Q., Zhang, T., Huo, L., Li, G. Y., Zhang, N., Wang, B. H. (2016). Preparation and application of 3D printing materials in construction, *Concrete Institute of China*, 320(6), pp. 141–144.
- Jeon, K. H., Park, M. B., Kang, M. K., Kim, J. H. (2013). A Study on the Development of an Automated Freeform Fabrication System and Construction Materials, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 33(4), pp. 1665–1673.
- Jeon, J. Y., Seo, D. (Dongshan Concrete Industry Co., Ltd.). (2016). Concrete composition for 3D Printing, *Concrete and Manufacturing Method of the Concrete using it*, KR Patent, KR101620074B1, (May. 3, 2016).
- Jeon, J. Y., Seo, D. (Dongshan Concrete Industry Co., Ltd.). (2016). Mortar composition for 3D Printing, *Mortar and Manufacturing Method of the Concrete using it*, KR Patent, KR101620075B1, (May. 3, 2016).
- Kim, S. S., Park, K. P., Lee, J. B. (2008). Performance Based Design for High Curability Concrete, *Korea Concrete Institute (KCI)*, pp. 969–974.
- Kim, G. J. (2017). Build a home with 3D printer technology in 2020, [HYPERLINK "http://www.cnews.co.kr/uhtml/read.jsp?idxno=201702141141037270851"](http://www.cnews.co.kr/uhtml/read.jsp?idxno=201702141141037270851)<http://www.cnews.co.kr/uhtml/read.jsp?idxno=201702141141037270851> *Construction Business*, (Feb. 9, 2017).

- Li, X., Li, G. W. (2014). Experimental Study on the mix design and performance of 3D printing concrete, Huazhong University of Science and Technology, Master Thesis, pp. 24–25.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM), pp. 1221–1232.
- Lim, S. W., Buswell, R., Le, T., Wackrow, R., Austin, S., Gibb, A., Thorpe, T. (2011). Development of a viable concrete printing process, 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2011), pp. 665–670.
- Ma, J. W., Jiang, Z. W., Su, Y. F. (2014). Development and Prospect of 3D Printing Concrete Technology Building Decoration Materials World, 61(61), pp. 41–46.
- Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Hamzeh, F. (2015). 3D concrete printing: machine and mix design, International Journal of Civil Engineering and Technology, 6(6), pp. 14–22.
- Market-Reports, (2016). 3D Concrete Printing Market By Product Type (Walls, Floors & Roofs, Panels & Lintels), by Concrete Type (Ready-Mix, High-Density, Precast, Shotcrete), by Software (Design, Inspection, Printing), by End-Use Sector (Architectural, Industrial, Domestic) & by Region – Forecast to 2021, <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-concrete-printing-market-10362292.html> (May, 2016).
- Oh, J., Oh, J. S., Jung, H. Y. (2014). Applicability to the Construction of 3D Printing Technology, The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers, 62(9), pp. 38–44.
- Oh, J. W., Song, K. R., Ahn, Y. S. (2002). A Study on the Application of Constructability in Construction Project Process, Architectural Institute of Korea, 18(12), pp. 157–164.
- Qiao, X. Y., Pan, N., Li, Y. T. (2016). Mix proportion design of 3D printing concrete, China Academic Journal Electronic Publishing House, pp. 240–241.
- Skanska. (2017). 3D printing for construction, <http://www.skanska.co.uk/about-skanska/innovation-and-digital-engineering/innovation/3d-printing/> (Jan. 23, 2017).
- Shin, T. Y. (2017). Ministry of Land, Create a Building with 3D printer……The 10 meters of hanok (Korean traditional house) is also open to visitors, HYPERLINK "<http://www.viva100.com/main/view.php?key=20170108010002542>"<http://www.viva100.com/main/view.php?key=20170108010002542> Bridge economy, (Jan. 2017).
- Tess. (2016). Dubai lays out regulations for 3D printed buildings, HYPERLINK "<http://www.3ders.org/articles/20160714-dubai-lays-out-regulations-for-3d-printed-buildings.html>"<http://www.3ders.org/articles/20160714-dubai-lays-out-regulations-for-3d-printed-buildings.html> (Jul. 14, 2016).
- Werkheiser, N. J., Fiske, M. R., Edmunson, J. E., Khoshnevis, B. (2015). Development of additive construction technologies for application to development of lunar/martian surface structures using in-situ materials, CAMX Conference Proceedings, pp. 1–9.
- Zhang, Z. J., Zhang, Q. Q., Yu, C. R., Li, G. H., Geng, J. H. (2015). Exploration and application of concrete strength, fly ash content and water cement ratio, Concrete Practical Technology, 311(9), pp. 152–153.
- Zhang, J. D., Wang, P. M. (2004). High-titanium blast furnace slag powder and its application in concrete, Tongji University Master's Thesis, pp.13–15.