

3D 프린터용 시멘트 복합체의 간극비가 출력성과 적층성에 미치는 영향

서지석¹, 이봉춘², 김윤용^{3*}

The Effects of Void Ratio on Extrudability and Buildability of Cement-based Composites Produced by 3D Printers

Ji-Seok Seo¹, Bong-Chun Lee², Yun-Yong Kim^{3*}

Abstract : The material properties of the 3D printing cement composite mortar were evaluated, and the performance range in which printing was possible was calculated using the void ratio in a fresh state as a single index. As a results of the tests, as the water-binder ratio (W/B) increased, the mortar flow value increased and the density and strength decreased. As the sand-binder ratio (SS/B) increased, the mortar flow value decreased. However, strength and density increased and decreased up to a certain SS/B. As admixture-binder ratio (Ad/B) increased, mortar flow value, density, and strength decreased. These trends make it difficult to mix-design to meet the target performances of 3D printing mortars, represented by extrudability and buildability. The value of mortar flow increased proportionally with the void ratio, while the density and strength apparently decreased as the void ratio increased. This indicates that void ratio can be utilized as a single index for controlling the material properties in the design of mortar mixtures. It was found that mortar mixture could be printed by a 3D printer when the void ratio was in the range from 0.6 to 0.7. This was verified by printing a mortar which has the void ratio of 0.634. The mortar was produced with the mixture design of W/B 35.0%, SS/B 60.0%, and Ad/B 0.1%. Further research applying diverse admixtures is needed to improve the quality of 3D printing output mortars.

Keywords: 3D Printer, Material Extrusion, Buildability, Extrudability, Void Ratio

1. 서 론

3D 프린팅은 출력하고자 하는 대상을 3차원으로 모델링한 후 층별로 제조하는 기술로서 고분자, 금속, 세라믹 등 재료를 활용하여 적층하는 AM(Additive Manufacturing) 방법이 있다. 건설 분야에서는 시간과 비용을 절감하면서 비선형적이고 기하학적 복잡성을 표현할 수 있는 구조물을 제작하기 위해 다양한 건설용 3D 프린팅 기술을 연구하고 있다(Hager et al., 2016). AM 방법 중 ME(Material Extrusion) 방식은 유동적인 상태의 재료에 압력을 가하여 노즐을 통해 원하는 위치에 연속적으로 분사하는 방식으로 굳지 않은 상태와 굳은 상태가 모두 존재하는 시멘트 복합체에 적용하기 유리하다.

시멘트 복합체는 유동성과 경화성을 가지고 있으며 수화반응을 통해 상반된 두 특성이 시간에 따라 교차하는 성질을 가지

고 있다(Kim et al., 2003). 이 같은 특성은 ME 방식 3D 프린팅 재료의 성능요소인 출력성(extrudability)과 적층성(buildability)으로 나타난다. 출력성은 노즐에서 출력되는 3D 프린팅 재료의 속도와 양이 연속적으로 일정하게 유지되는 정도이며 적층성은 3D 프린팅 재료를 연속적으로 쌓아 올릴 때 기존에 적층된 층이 상부 자중에 의해 발생하는 변형에 저항하는 정도이다. 두 성능요소 모두 재료의 유변학적 특성에 기인하기 때문에 굳지 않은 상태에서의 시멘트 복합체 유동성을 정량적으로 평가하는 것이 중요하다(Le et al., 2012; Lee et al., 2017; Malaeb et al., 2019).

시멘트 복합체는 콘크리트와 모르타르로 구분할 수 있으며 굵은 골재의 배합 여부로 결정하기 때문에 역학적 특성이 다르다. 이는 곧, 3D 프린팅 출력물의 규모, 강도 및 내구성, 경제성 등을 고려하여 재료를 선정해야 함을 뜻한다. 3D 프린팅 재료로 콘크리트를 사용할 경우 소형구조물의 벽체, 기둥 등이 적합하고 모르타르를 사용할 경우 2차 제품, 고부가가치의 디자인 블록, 비정형 패널의 제조가 유리하다(KAIA, 2018).

이 연구에서는 모르타르를 이용하여 ME 방식의 3D 프린터로 건축 내·외장재를 출력하기 위해 시멘트계 복합 결합재를 활용하여 사용재료의 배합비율과 간극비에 따른 출력성과 적층성, 역학적 특성의 상관관계를 실험적으로 분석하고 3D 프린팅용 모르타르의 적정배합을 도출하였다.

¹정회원, 한국건설생활환경시험연구원, 주임연구원

²정회원, 한국건설생활환경시험연구원, 책임연구원

³정회원, 충남대학교, 토목공학과, 교수

*Corresponding author: yunkim@cnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34113, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용재료

3D 프린팅용 모르타르를 출력하기 위해 사용한 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, 이하 OPC), 플라이애시(Fly Ash, 이하 FA)와 에틸렌비닐클로라이드(Ethylene-vinyl Chloride, 이하 EVCL)를 배합하여 사용하였다. FA는 포졸란 반응으로 시멘트 복합체의 구조가 치밀하여 내구성이 우수하며 구상의 입자 간 불배어링 효과에 의해 유동성을 개선하는 재료이다. EVCL은 에틸렌에 비닐클로라이드가 결합된 시멘트 혼화용 폴리머로서 난연성 뿐만 아니라 시멘트 수화물과 폴리머 필름이 상호 간에 형성됨에 따라 내구성을 증대시키며 모르타르는 굵은 골재를 배합하지 않기 때문에 취약한 건조수축 저항성, 내화학적 등의 내구성능을 보완해줄 수 있는 재료이다(Song and Shin., 2018). 3D 프린팅용 모르타르 결합재의 물리적 특성 및 기본배합은 Table 1과 같다.

Table 1 Binder for 3D printing

Item	Average particle size	Density	Unit weight
OPC	20 μm	3.15 g/cm^3	1,970 kg/m^3
FA	40 μm	2.26 g/cm^3	230 kg/m^3
EVCL	130 μm	0.4~0.5 g/cm^3	103 kg/m^3

사용 잔골재로는 출력 표면의 조도를 고려하여 규사 8호(Silica Sand NO.8, 이하 SS)를 사용하였으며 혼화제로는 메틸셀룰로오스계 증점제(Thickener, 이하 Ad)를 사용하였다. 굳지 않은 시멘트 복합체에 증점제를 적절히 사용할 경우 점도, 전단응력이 향상되어 적층성을 개선하고 연속출력 시 노즐에서 출력되는 필라멘트(filament) 형태의 재료의 표면에서 갈라짐이나 이형의 주름을 방지하는 효과를 가진다. 반면, 과용할 경우 출력성이 저하되기 때문에 배합, 출력환경에 따라 유동성을 평가하여 사용량을 결정해야 한다. 3D 프린팅 시멘트 복합체용 규사와 혼화제의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Fine aggregate and admixture for 3D printing

Item	Properties
Fine aggregate	Silica sand NO.8, Average particle size : 0.1~0.17 mm Density : 2.6 g/cm^3
Admixture	Thickener(Methyl cellulose), Type : Powder Average particle size : ~ 600 μm , pH : 7(Neutral)

2.2 시험방법

3D 프린팅용 시멘트 복합체의 배합에 따른 특성을 고찰하

기 위해 굳지 않은 상태에서의 평가와 굳은 상태에서의 평가로 나누어 진행하였으며 최종적으로 3D 프린터를 통해 출력한 출력물을 평가하였다. 굳지 않은 상태에서는 3D 프린팅 적층성 및 출력성을 평가하기 위해 유동성을 측정하는 모르타르 흐름시험과 적층 시 재료가 부담하는 자중을 측정하기 위한 밀도시험을 진행하였으며 굳은 상태에서는 출력물의 출력강도를 간접적으로 평가하기 위해 시험체를 제작하여 압축강도를 평가하였다.

2.2.1 흐름시험

3D 프린팅용 모르타르의 흐름시험은 KS L 5105, KS L ISO 679를 준용하여 실시하였다. 사전 시험 시 배합요인에 의한 유동성의 변동이 크게 나타나 시험자, 시험환경에 따른 오차를 최소화하기 위해 배합 절차와 시간을 고정하여 시험을 수행하였다. 특히, 밀도와 입경이 다른 결합재의 분산성을 고려하기 위해 기존 모르타르의 건비빔 시간을 크게 늘렸으며 분말형 혼화제인 증점제는 물과 반응하여 겔(gel)형상으로 변화하여 서로 응집하는 현상 때문에 배합수를 혼입하기 전에 첨가하였다. 습비빔의 경우 표준 모르타르 배합보다 배합수의 양이 적고 표준사보다 입경이 작은 규사를 사용하기 때문에 장시간 혼합할 경우 유동성이 저하될 우려가 있다. 그러나, 습비빔을 충분히 하지 않았을 경우 유동성이 제대로 발현되지 않기 때문에 혼합이 진행 중인 반죽 움직임은 확인하며 배합하였다. 모르타르 흐름값은 흐름 테이블을 이용하여 모르타르를 12.7 mm 높이에서 15초간 25회의 속도로 낙하한 후 서로 다른 방향의 직경을 4회 측정하였다.

2.2.2 밀도시험

시멘트 복합체의 밀도는 굳지 않은 상태에서와 굳은 상태에서의 밀도를 측정하였다. 굳지 않은 상태에서의 밀도는 EN 1015-6 규격을 참조하였으며 질량을 알고 있는 용기와 온도를 유지하여 밀도를 알고 있는 물의 질량을 통해 용기의 부피를 계산한 후 측정된 모르타르 질량에 나누어 밀도를 구하였다. 용기에 모르타르를 다짐하는 방법은 EN 규격을 참조하여 모르타르 흐름값 범위에 따라 Table 3에 나타냈다. 모르타르 흐름값의 범위는 EN 1015-3을 통해 측정된 값으로서 KS 시험과 방법은 같다. 그러나, 시험조건인 낙하거리, 15초간 낙하

Table 3 Determination methods of the bulk density of mortar

Consistence in use	Flow Value [mm]	Filling and compaction method
Stiff mortar	<140	Vibration
Plastic mortar	140 to 200	Vibration or shock
Soft mortar	> 200	Filling

횡수, 흐름 테이블의 중량이 다르다. 따라서, KS시험 조건에 비해 EN 규격이 더 낮은 모르타르 흐름값을 나타내는 조건인 것을 고려하여 소성 모르타르(plastic mortar) 조건에 맞는 다짐 방법을 사용하였다. 굳은 상태에서의 밀도는 모르타르 시험체를 28일간 25°C, 90%의 28일간 양생한 후 수중무게, 표면 건조 포화 무게, 절대건조 무게를 측정 후 절대건조 밀도를 계산하였다.

2.2.3 압축강도 시험

시멘트 복합체 3D 프린팅 출력물의 강도는 사전시험을 통틀드 제작 대비 70%의 압축강도를 나타낸 것을 확인했으나 모델링 시 빈 공간의 채움조건에 따라 강도가 달라지기 때문에 출력성을 가늠할 수 없는 상태의 강도특성을 간접적으로 알아보기 위해 KS L 5105를 준용하여 시험을 수행하였으며 두 상태의 강도 상관성은 향후 검토가 필요하다. 시험체의 제작은 50×50×50 mm 정육면체 몰드에 모르타르를 타설한 후 층당 16회씩 총 32회 다짐하여 제작했다. 3D 프린팅용 시멘트 복합체의 점도가 높을수록 다짐 시 내부에 공기가 침입하여 공극이 발생할 수 있으므로 충분히 다짐하고 몰드 밑면에 충격을 주어 모르타르가 공극을 채우도록 했다. 압축강도의 측정 방법은 하중제어 방법으로 수행하였으며 0.6±0.4 MPa/sec의 속도로 측정하였다.

3. 모르타르의 간극비와 배합설계

3D 프린팅용 시멘트 복합체를 제조하기 위해 가장 중요한 성능은 출력성과 적층성이다. 모르타르의 흐름값은 실제 3D 프린팅 모르타르의 적층성 및 출력성을 전단응력, 전단속도, 항복응력과 같이 직접 반영하지 않는다. 그러나, 모르타르 흐름값은 유변학적 특성에 의해 나타난 결과를 간접적으로 측정할 수 있다. 적절한 범위에서 제어되는 모르타르 흐름값은 3D 프린팅 가능한 적층성과 출력성을 나타내기 때문에 모르타르 흐름값과 같이 유동성을 고려한 배합설계는 3D 프린팅용 시멘트 복합체 제조에 적합하다. 3D 프린팅용 모르타르와 같이 다양한 성능 목표를 달성하기 위한 고성능의 시멘트 복합체 배합은 혼입되는 재료의 종류가 일반 배합보다 많고 필요한 여러 가지 특성 중 하나의 개선으로 인해 다른 특성이 저하될 우려가 있어 상관관계가 복잡하다. 따라서, 합리적인 관점에서 배합을 설계하기 위해서는 단일지표를 기반으로 설계해야 한다. 이러한 관점의 모르타르 배합을 설계하기 위한 이론의 개념을 Fig. 1에 나타냈다. (NG et al., 2016)

물막 두께 이론(water film thickness theory)은 각 재료 혼합 전 체적과 혼합 후 체적을 통해 굳지 않은 시멘트 복합체 내의

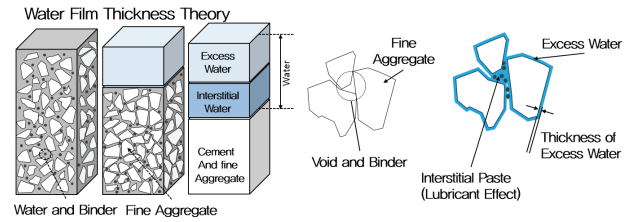


Fig. 1 Diagrams of the water film thickness

간극비와 과잉수를 구하여 유동성과의 관계를 설명한 이론이다. 이 이론에서 유동성은 과잉수가 간극을 이동하는 윤활작용에 기인한 것으로 가정한다. 그러나 이 같은 이론은 간극을 과잉수가 충분히 차지할 때의 거동을 설명하는 것으로 자기충전이 가능한 정도의 유동성을 나타낼 때 적합하다.

반면 3D 프린팅 재료는 퍼지지 않고 쌓는 가능할 정도의 유동성을 확보하는 것이 중요하며 고체의 입상재료가 점성과 마찰 등 물리적인 작용으로 형상이 변화하는 것을 억제해야 하므로 모르타르 내에 존재하는 과잉수를 계산하지 않고 부피 내 존재하는 물과 고체 입상재료의 체적을 측정하여 간극비를 계산하였다. 물 막 두께 이론(NG et al., 2016)으로부터 고체 입상재료에 대한 물의 체적비율 u_w 와 전체 체적에 대한 고체 입상재료의 체적비율 ϕ 는 각각 식(1)과 식(2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$u_w = V_w / V_c \quad (1)$$

$$\phi = \frac{M/V}{\rho_w u_w + \rho_\alpha R_\alpha + \rho_\beta R_\beta + \rho_\gamma R_\gamma} \quad (2)$$

여기서, V_w, V_c 는 혼입한 물 및 고체 입상재료의 부피(cm^3)이다. M, V 는 실험을 통해 측정된 굳지 않은 모르타르의 질량(g)과 부피(cm^3)이며 $\rho_\alpha, \rho_\beta, \rho_\gamma$ 는 물을 제외한 나머지 입상재료의 밀도(g/cm^3), $R_\alpha, R_\beta, R_\gamma$ 는 물을 제외한 나머지 입상재료 간 체적비율이다. 물, 기체와 같은 유체가 이동할 수 있는 공간의 비율을 나타내는 간극비 u 는 식(3)과 같이 ϕ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$u = \frac{1-\phi}{\phi} \quad (3)$$

이 연구에서 사용한 3D 프린팅용 모르타르 배합은 Table 4와 같이 물-결합재비(W/B), 규사-결합재비(SS/B), 혼화제-결합재비(Ad/B)를 변수로 설계하였다. 각각의 배합은 실험을 통해 밀도(M/V)를 측정 후, 그 값을 이용하여 u 를 계산하였고, 계산된 u 와 모르타르 흐름값, 밀도, 강도와 같은 재료적 특성을 분석하여 3D 프린팅 모르타르의 적층성과 출력성을 정량적으로 평가하였다.

Table 4 Mix designs of mortar for 3D Printing

Item	Binder (wt. %)			W/B (wt. %)	SS/B (wt. %)	Ad/B (wt. %)
	OPC	FA	EVCL			
1				50.0	100	0.1
2				47.5	100	0.1
3				45.0	100	0.1
4				42.5	100	0.1
5				40.0	100	0.1
6				37.5	100	0.1
7				35.0	100	0.1
8	85.5	10.0	4.5	50.0	70	0.1
9				50.0	80	0.1
10				50.0	90	0.1
11				50.0	110	0.1
12				50.0	120	0.1
13				50.0	130	0.1
14				50.0	100	0.2
15				50.0	100	0.3
16	50.0	100	0.4			

4. 실험결과 및 고찰

4.1 배합 모르타르 흐름값

재료배합에 의한 3D 프린팅용 시멘트 복합체 모르타르 흐름 특성을 알아보기 위해 W/B, SS/B, Ad/B에 따라 흐름특성을 분석하였으며 각 재료의 배합범위에 따른 측정결과는 Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4와 같다.

3D 프린팅용 시멘트 복합체 모르타르의 흐름값은 W/B가 감소할수록, SS/B, Ad/B가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. W/B에 의한 흐름값 경향을 알아보기 위해 W/B의 범위 50~35%, SS/B, Ad/B는 각각 100%, 0.1%로 설계하여 시험을 수행하였으며 흐름값은 W/B가 증가할수록 평균 최소 101.5 mm에서 181.5 mm까지 증가하는 경향을 나타냈다. W/B 50~40%까지 흐름값이 서서히 감소하였으나 37.5% 부근에서 급격히 저하되어 흐름판 낙하에 의한 자연스러운 흐름값 증가가 아닌 표면이 갈라짐에 따라 무너지는 현상을 나타내기 시작하였다. 이는 W/B가 감소할 경우 모르타르 내에서 재료 간 유통작용을 담당하는 자유수가 감소하여 입상재료 간 유동성이 저하되고 흐름값도 감소하는 것으로 판단된다. SS/B에 의한 흐름값 경향을 알아보기 위해 SS/B의 범위 70~130%, W/B, Ad/B는 각각 50%, 0.1%로 설계하여 시험을 수행하였으며 SS/B가 증가할수록 흐름값은 평균 최대 216.45

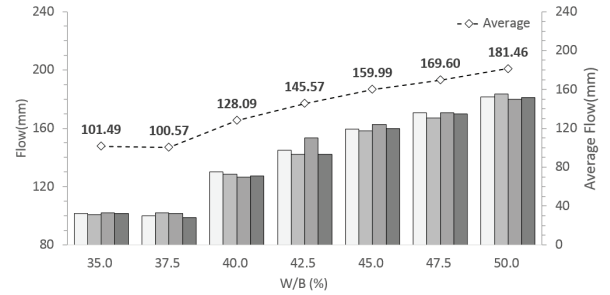


Fig. 2 W/B vs. Flow of mortar for 3D printing

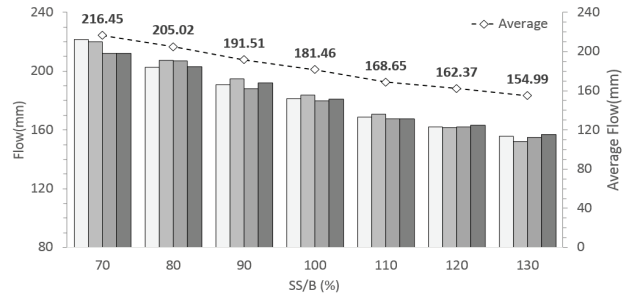


Fig. 3 SS/B vs. Flow of mortar for 3D printing

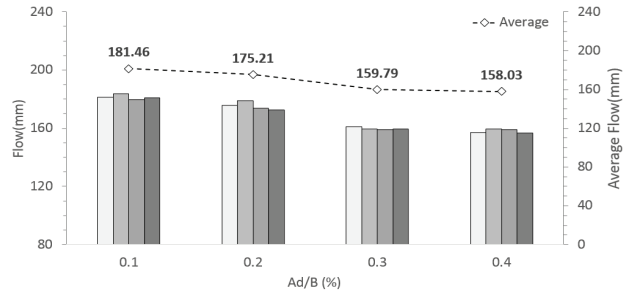


Fig. 4 Ad/B vs. Flow of mortar for 3D printing

mm에서 154.99 mm 까지 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 SS/B가 증가할 경우 모르타르 내 자유수에 의한 유통능력에 비해 입상재료의 마찰면이 증가하기 때문에 흐름값이 감소하는 것으로 판단된다. Ad/B에 의한 흐름값 경향을 알아보기 위해 Ad/B 범위 0.1~0.4%, W/B, SS/B는 각각 50%, 100%로 설계하여 시험을 수행하였으며 Ad/B가 증가할수록 흐름값 평균은 181.46 mm에서 158.03 mm까지 감소하는 경향을 나타냈다. Ad/B가 증가할수록 혼화제로 사용한 증점제의 효과로 인해 흐름값이 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 입상재료와 자유수 간의 유통 및 마찰에 의한 물리적 현상에 직접 작용하기보다 모르타르의 점성, 전단응력과 같은 흘러내림에 대한 저항성을 근본적으로 증가시키기 때문으로 판단된다.

4.2 배합 모르타르의 밀도

재료배합에 의한 3D 프린팅용 모르타르 밀도 특성을 알아보

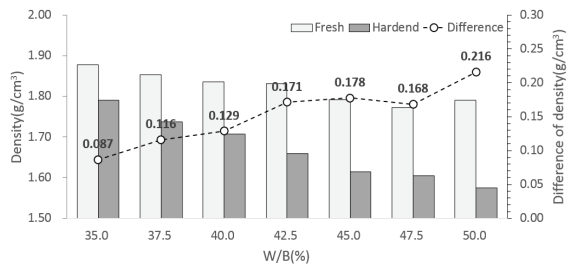


Fig. 5 W/B vs. Density of mortar for 3D printing

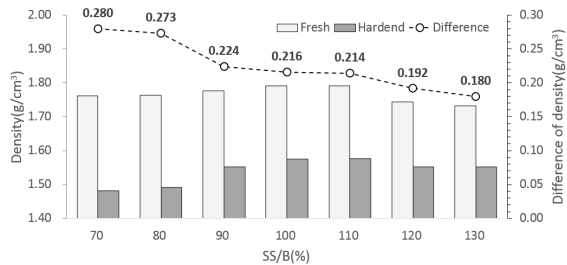


Fig. 6 SS/B vs. Density of mortar for 3D printing

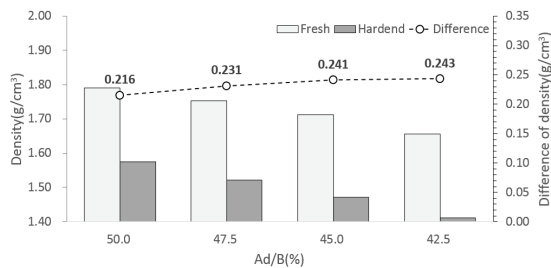


Fig. 7 Ad/B vs. Density of mortar for 3D printing

기 위해 B/W, SS/B, Ad/B에 따라 굳지 않은 상태에서의 밀도와 굳은 상태에서의 밀도 특성을 분석하였으며 각 재료에 의한 배합범위는 모르타르 흐름값 시험과 동일하게 진행하였다. 모르타르 밀도의 측정결과는 Fig. 5, Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

밀도는 W/B가 감소할수록 증가하였으며 SS/B는 일정 수준까지 증가한 이후 다시 감소하는 경향을 나타냈다. Ad/B는 증가할수록 밀도가 감소하는 경향을 보였다. W/B가 증가할수록 굳지 않은 상태의 밀도는 최대 1.88 g/cm³에서 1.78 g/cm³, 굳은 상태의 밀도는 최대 1.79 g/cm³에서 1.59 g/cm³ 까지 감소하는 것으로 나타나 두 상태의 밀도 모두 감소하는 경향을 나타냈으며 두 상태 간 밀도 차이는 W/B가 증가할수록 증가하였다. 이는 W/B가 감소할 경우 가장 큰 밀도를 가지고 있는 결합재가 페이스트의 형태로 동일한 체적에 가장 많이 혼입되어 밀도가 증가하고 수화반응을 일으키는 반응수를 제외한 나머지 자유수가 증발함에 따라 상태 간 밀도차가 가장 크게 나는 것으로 판단된다. SS/B가 증가할수록 굳지 않은 상태의 밀도는 최대 1.79 g/cm³에서 1.73 g/cm³, 굳은 상태의 밀도는 최대 1.57 g/cm³에서

1.49 g/cm³ 까지 감소하는 것으로 나타나 두 상태의 밀도 모두 일정 SS/B까지 증가하다 감소하는 경향을 나타냈으며 두 상태 간의 밀도 차이는 SS/B 증가할수록 감소하였다. 이는 SS/B가 증가할 경우 간극에 페이스트가 치밀하게 채워지기 때문에 밀도가 증가하지만 SS/B가 과도하게 높아지는 경우 모르타르 내 간극을 페이스트가 채우지 못하고 동일 체적당 밀도가 가벼운 규사로 채워짐에 따라 전체적인 밀도가 감소하고 페이스트가 차지하는 용적을 감소시키기 때문에 밀도차도 감소하는 것으로 판단된다. Ad/B가 증가할수록 굳지 않은 상태의 밀도는 최대 1.79 g/cm³에서 1.62 g/cm³, 굳은 상태의 밀도는 최대 1.57 g/cm³에서 1.41 g/cm³로 나타나 두 상태의 밀도 모두 감소하는 경향을 나타냈으며 두 상태 간의 밀도 차이는 Ad/B가 증가할수록 증가하였다. 이는 혼화제로 사용한 메틸셀룰로오스계 증점제의 친수성과 소수성의 차이에 의해 기포가 발생하여 밀도가 감소한 것으로 판단된다.

4.3 배합 모르타르의 압축 강도

재료배합에 의한 3D 프린팅용 모르타르 강도 특성을 알아보기 위해 B/W, SS/B, Ad/B에 따라 압축강도를 측정하여 강도 특성을 분석하였으며 각 재료에 의한 배합범위는 흐름값 시험과 동일하게 진행하였다. 모르타르의 재령별 압축강도 측정결과는 Table 5와 같다.

압축강도는 모든 재령에서 W/B가 감소할수록 증가하고 SS/B와 Ad/B가 증가할수록 감소하였다. 모든 재령에서 W/B가 증가할수록 압축강도는 감소하였으며 28일 재령 압축강도는 최대 41.92 MPa로 측정되었다. W/B 42.5% 이상에서 압축강도가 큰 폭으로 감소하는 경향을 나타냈으며 이는 시멘트 계열의 재료가 수화반응을 일으키기 위해 요구하는 반응수의 양이 적기 때문에 충분한 강도를 발현할 수 있으나 결합수 중 반응하고 남은 자유수가 전체 조직에 분포하여 모르타르 내 결합력이 감소하기 때문으로 판단된다. SS/B가 증가할수록 압축강도는 증가하다 다시 감소하는 경향을 나타냈다. 28일 재령을 기준으로 한 압축강도는 SS/B 80%에서 최대 29.10 MPa로 측정되었으나 SS/B 100%까지 큰 차이가 없었으며 SS/B 110%에서 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났다. 이는 SS/B가 필요 이상으로 증가할 경우 수화반응으로 조직이 치밀해지는 과정에서 체적당 결합수가 감소하여 수화반응에 필요한 반응수의 양도 감소했기 때문으로 판단된다. Ad/B가 증가할수록 압축강도는 28일 재령 압축강도는 29.13 MPa에서 22.80 MPa으로 감소 감소하였으며 이는 혼화제로 사용한 메틸셀룰로오스계 증점제의 친수성과 소수성의 차이에 의해 기포가 발생하여 강도가 감소한 것으로 판단된다.

Table 5 Results of mortar strength for 3D printing

W/B (wt. %)	SS/B (wt. %)	Ad/B (wt. %)	Compressive Strength			W/B (wt. %)	SS/B (wt. %)	Ad/B (wt. %)	Compressive Strength			W/B (wt. %)	SS/B (wt. %)	Ad/B (wt. %)	Compressive Strength		
			3	7	28				3	7	28				3	7	28
			days	days	days				days	days	days				days	days	days
50.0	100	0.1	5.42	21.36	30.68	50.0	70	0.1	5.65	16.56	28.91	50	100	0.1	5.01	20.82	29.13
47.5	100	0.1	6.75	23.16	32.69	50.0	80	0.1	5.27	16.17	29.10	50	100	0.2	3.75	17.09	26.02
45.0	100	0.1	7.04	22.84	32.74	50.0	90	0.1	5.12	19.05	28.03	50	100	0.3	3.49	17.12	24.77
42.5	100	0.1	8.98	29.66	38.76	50.0	100	0.1	5.65	20.07	28.37	50	100	0.4	2.53	16.59	22.80
40.0	100	0.1	11.66	33.04	40.25	50.0	110	0.1	5.83	19.35	25.61	-	-	-	-	-	-
37.5	100	0.1	11.03	34.02	39.17	50.0	120	0.1	5.24	18.83	22.38	-	-	-	-	-	-
35.0	100	0.1	14.18	33.15	41.92	50.0	130	0.1	5.62	17.60	21.90	-	-	-	-	-	-

Table 6 Results of calculating void ratio for 3D printing mortar mix designs

W/B (wt. %)	SS/B (wt. %)	Ad/B (wt. %)	R_{OPC}	R_{FA}	R_{PO}	R_{SS}	$M(g)$	$V(cm^3)$	$V_c(cm^3)$	ϕ	u
50.0	100	0.1	0.333	0.054	0.138	0.474	2,500	1408.05	814.28	0.578	0.729
47.5	100	0.1	0.333	0.054	0.138	0.474	2,475	1395.85	814.28	0.583	0.714
45.0	100	0.1	0.333	0.054	0.138	0.474	2,450	1367.82	814.28	0.595	0.680
42.5	100	0.1	0.333	0.054	0.138	0.474	2,425	1324.43	814.28	0.615	0.627
40.0	100	0.1	0.333	0.054	0.138	0.474	2,400	1307.89	814.28	0.623	0.606
37.5	100	0.1	0.333	0.054	0.138	0.474	2,375	1282.09	814.28	0.635	0.575
35.0	100	0.1	0.333	0.054	0.138	0.474	2,350	1222.40	814.28	0.666	0.501
50.0	70	0.1	0.389	0.063	0.161	0.387	2,200	1249.57	698.45	0.559	0.789
50.0	80	0.1	0.368	0.060	0.153	0.419	2,300	1304.03	737.06	0.565	0.769
50.0	90	0.1	0.350	0.057	0.145	0.448	2,400	1351.53	775.67	0.574	0.742
50.0	110	0.1	0.318	0.052	0.132	0.498	2,500	1395.93	820.08	0.587	0.702
50.0	120	0.1	0.304	0.050	0.126	0.520	2,600	1452.18	858.48	0.591	0.692
50.0	130	0.1	0.292	0.048	0.121	0.540	2,700	1510.69	896.89	0.594	0.684

4.4 간극비에 따른 재료적 특성 및 최적배합 범위

각 재료의 비율인 W/B, SS/B, Ad/B에 의한 모르타르 흐름 값, 밀도, 강도는 서로가 복합적으로 작용하여 재료적 특성을 반영하기 때문에 많은 시험배합을 통해 출력 가능한 배합의 범위를 찾아야 한다. 따라서, 재료적 특성을 공통으로 제어하는 단일지표가 필요하다. 이 연구에서는 3D 프린팅용 시멘트 복합체 모르타르의 간극비를 단일지표로 선정하여 각 물리적 특성을 비교한 후 3D 프린팅 가능한 실제 출력범위를 설계하였다. 목표한 출력 및 성능을 만족하는 범위는 Fig. 8과 같이 실제 프린팅을 통해 산정하였다. 여기서 Ad/B에 의한 배합은 3D 프린팅용 모르타르를 직접 구성하는 재료가 아니므로 재료 체적비에 의한 간극비 u 를 반영할 수 없어 제외하였으며 식(1), 식(2) 및 식(3)을 이용하여 계산한 간극비 u 는 Table 6과 같다.

3D 프린팅이 가능한 W/B 기준 배합범위는 W/B 40~50 %, SS/B 100 %, Ad/B 0.1 %, SS/B 기준 배합범위는 W/B 50%,

SS/B 100~110%, Ad/B 0.1 %로 나타났다. W/B의 경우 출력성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 W/B 50 % 이상에서는 출력성이 확보되었으나 적층성이 확보되지 않았으며 40 % 이하에서는 출력이 되지 않아 출력성 및 적층성을 확인할 수 없었다. SS/B의 경우 100% 이하에서 출력성은 양호

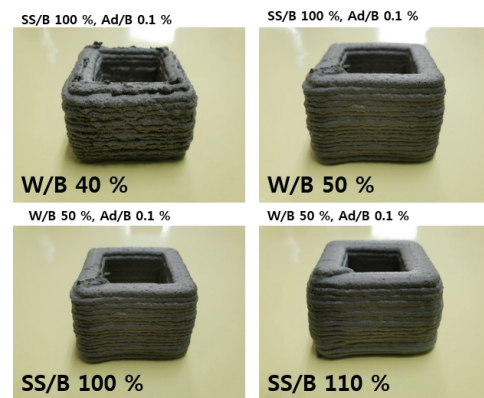


Fig. 8 3D printing specimens by mix designs

하였으나 건조수축 등의 문제가 발생하였으며 110% 이상에서는 적층성이 불균일한 것으로 나타났다.

출력 배합범위를 나타낸 간극비 u 와 각 물질 간 상관관계는 Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 배합 재료비에 의한 3D 프린팅용 모르타르의 간극비 u 와 모르타르 흐름값, 굳지 않은 상태 및 굳은 상태의 밀도, 재령별 압축강도는 대부분 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났으며 특히 굳지 않은 상태에서의 물성과 간극비와의 관계는 결정계수가 0.8 이상으로 나타났다. 반면, 굳은 상태에서의 물성인 압축강도와의 상관관계는 상대적으로 낮았으나 재령이 낮을수록 높은 상관관계를 나타냈다. 특히 가장 큰 재령별 강도 편차를 나타내는 SS/B 120~130 %에서는 간극비에 의한 모르타르 강도 경향성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 재령이 증가할수록 강도가 증가함에 따라 재령 간 강도 차이가 증가하여 요소별 편차 커지면서 경향성을 벗어나는 측정값 때문이며 굳지 않은 상태에서 계산한 간극비가 비교적 동일상태의 재료

Table 7 Mortar Mixing Design of 3D Printable Test

W/B (wt. %)	SS/B (wt. %)	Ad/B (wt. %)	R_{OPC}	R_{FA}	R_{PO}
35.0	60	0.1	0.411	0.067	0.170
R_{SS}	$M(g)$	$V(cm^3)$	$V_c(cm^3)$	ϕ	u
0.351	1,950	1077.88	659.84	0.612	0.634



Fig. 12 Result of 3D Printing Test

적 특성을 잘 반영하였으나 굳은 상태의 특성은 SS/B가 110 %일 때까지 경향성을 유지하나 그 이상일 때 수화반응에 의한 간극비의 변화를 반영하지 못한 것으로 판단된다.

4.5 간극비 범위에 따른 출력성 검토

시험에 의해 3D 프린터로 출력이 가능한 모르타르 배합에 따른 간극비 u 는 0.6~0.7의 범위인 것으로 나타났다. 이를 검증하기 위해 다음 Table 7과 같은 배합을 설계하여 출력성과 적층성을 실험적으로 평가하였다. 설계한 배합의 간극비 u 는 출력 가능 예상범위인 0.6~0.7 내에 있도록 하였다. 시험 결과, Fig. 12와 같이 설계 형상인 중공 원주 형태로 압출 노즐직경 5 mm에서 15층이 출력되는 양호한 결과를 얻었다. 현 시점에서 외장재 형상을 및 크기를 고려한 적층높이는 60 mm로 확인하였으나 하부변형이 뚜렷하게 발생하지 않은 점을 고려할 때 그 이상도 가능할 것으로 판단된다. 그러나, 적층높이를 개선하기 위해서는 모르타르의 출력성이 시간에 따라 저하되기 때문에 실시간으로 배합 후 출력할 수 있도록 현 장비의 개선이 필요한 실정으로 추가적인 연구가 필요하다. 이 모르타르의 간극비 u 는 0.634로 설계한 간극비 범위 0.6~0.7 내에 있어 적절한 출력성과 적층성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 그러나 3D 프린팅 중에 필라멘트 형상이 부분적으로 끊기고, 기포가 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 증점제, 소포제 등을 배합에 적용하는 추가적인 성능개선 연구가 필요할 것으로 판단된다.

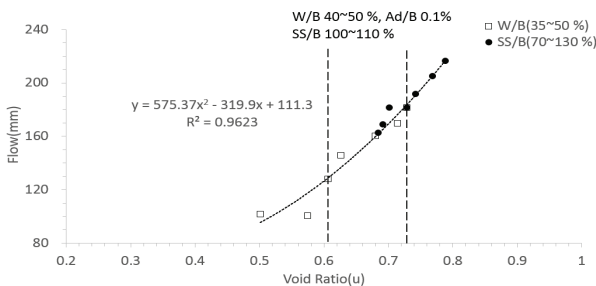


Fig. 9 Void ratio vs. Flow of mortar for 3D printing

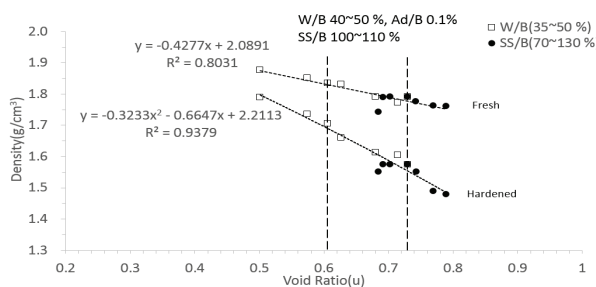


Fig. 10 Void ratio vs. Density of mortar for 3D printing

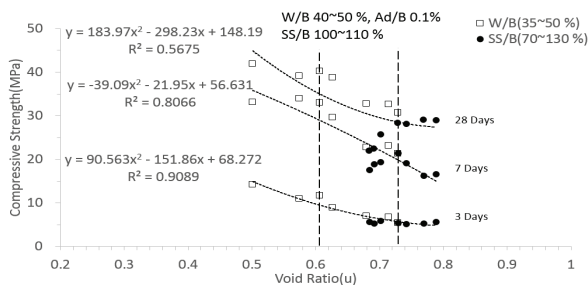


Fig. 11 Void ratio vs. strength of mortar for 3D printing

5. 결 론

이 연구에서는 3D 프린팅용 모르타르의 W/B, SS/B, Ad/B의 배합 재료비와 간극비 u 에 따른 역학적 특성의 상관관계를 실험적으로 분석하고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) W/B가 증가할수록 모르타르 흐름값은 증가하였으며 밀도와 강도는 감소하였다. SS/B가 증가할수록 모르타르 흐름값은 감소하였으며 밀도는 증가하였다. 강도는 SS/B 110 %에서 점차 감소하여 SS/B 120~130 %에서 크게 감소하였다. Ad/B가 증가할수록 모르타르 흐름값, 밀도, 강도는 감소하였다. 이 결과는 3D 프린팅이 출력 가능한 모르타르 배합범위를 찾는 단일지표로 모르타르 흐름값을 사용할 수 없음을 의미한다.
- (2) 배합 재료비에 따른 각각의 재료적 특성을 단일지표로 제어하기 위해 간극비 u 를 통해 모르타르 흐름값, 밀도, 강도와의 상관관계를 평가하였다. 간극비 u 가 증가할수록 모르타르 흐름값은 증가하는 반면 밀도와 강도는 감소하는 경향을 보였으며, 그 상관성은 매우 높은 것으로 나타났다. 그러나 SS/B가 120% 이상의 범위에서는 간극비 u 와 강도의 상관성이 감소하는 것으로 나타났으며, 이 범위는 출력이 불가능한 배합이다.
- (3) 이 연구에서 사용한 ME 방식 3D 프린터에서 출력이 가능하고, 소요 성능을 만족하는 모르타르의 간극비 u 의 범위는 0.6~0.7인 것으로 나타났다. 그러나, 모르타르 필라멘트 형상의 부분적 끊김과 기포의 발생 등과 같은 출력물 품질 저하 현상을 제거하기 위해서는 증점제, 소포제 등의 혼화제를 활용하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 도시건축연구사업 연구비지원(17A-UDP-B121595-04)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Hager, I., Golonka, A., and Putanowicz, R. (2016), 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?, *Proceedings of International Conference on Ecology and new Building materials and products*, Elsevier Procedia, 292-299.
2. Kim, Y.Y., Kong, H-J, and Li, V.C. (2003), Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-mixture Shotcreting, *ACI Materials Journal*, 100(6), 511-518.
3. Song, H and shin, H.W. (2018), High Temperature Properties of Cement Mortar Using EVA, EVCL Redispersible Polymer Powder and Fly Ash, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 6(4), 365-372.
4. Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell R.A., Gibb, A.G.F., and Thorpe, T. (2012), Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Journal of Materials and Structures*, Springer, 45(8), 1221-1232.
5. Lee, H.J., Kim, W.W., and Moon, J.H. (2017), An experimental study of mortar rheology for 3D printing extruder, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Korea, 29(2)
6. Malaeb, Z., AlSakka, F., and Hamzeh, F. (2019), 3D Concrete Printing: Machine Design, Mix Proportioning and Mix Comparison Between Different Machine Setups. In Jay G. Sanjayan, Ali Nazari, and Behzad Nematollahi(Eds.), *3D Printing Technology : Construction and Building Applications.*, Elsevier, Amsterdam, 115-136.
7. KAIA, R&D Report, Development of innovative design, material and equipment for 3D printing small buildings/freeform members, 2017.
8. NG, P. L., KWAN, A.K.H, LI, L.G. (2016), Packing and Film Thickness Theories for the Mix Design of High-performance Concrete, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 17(10), 759-781.

Received : 10/28/2019

Revised : 11/05/2019

Accepted : 11/07/2019

요 지 : 3D 프린팅용 시멘트 복합체 모르타르의 재료적 특성을 평가하고 굳지 않은 상태에서의 모르타르 간극비를 단일지표로 하여 프린팅이 가능한 성능 범위를 산출하였다. 시험 결과, W/B가 증가하면 모르타르 흐름값은 증가하였으며 밀도와 강도는 감소하였다. SS/B가 증가하면 모르타르 흐름값은 감소하였다. 그러나 강도와 밀도는 특정 SS/B까지 증가하다 감소하였다. Ad/B가 증가할수록 모르타르 흐름값, 밀도, 강도는 감소하였다. 이러한 경향성은 따른 3D 프린팅용 모르타르의 목표 성능 만족하기 위한 배합설계를 어렵게 한다. 한편, 간극비가 증가할수록 모르타르 흐름값은 비례적으로 증가하는 반면 밀도와 강도는 감소하는 경향을 보였으며, 그 상관성은 높게 나타났다. 이는 배합설계에 따른 재료적 특성을 제어하는 단일지표로서 간극비를 활용할 수 있음을 나타낸다. 3D 프린터로 출력 가능한 모르타르 배합범위를 시험한 결과, 간극비가 0.6~0.7일 때 출력이 가능하였다. 이를 검증하기 위해 W/B 35.0 %, SS/B 60.0 %, Ad/B 0.1%를 배합하여 간극비를 0.634로 설계했을 때 출력이 가능하였다. 그러나 3D 프린팅 출력 모르타르의 품질을 향상하기 위해서는 혼화제를 활용하는 추가적인 연구가 필요하다.

핵심용어 : 3D 프린터, ME방식, 적층성, 출력성, 간극비
