

3D 프린터용 시멘트 복합체의 배합요인에 따른 출력 품질의 실험적 평가

서지석¹, 김윤용^{2*}

Experimental Evaluation of the Effect of the Mixing Design Factors of the Cementitious Composite for 3D Printer on the Printing Quality

Ji-Seok Seo¹, Yun-Yong Kim^{2*}

Abstract: In this paper, to evaluate the output quality of the cementitious composite mixture for printing with the ME method for construction 3D printer, visual inspection of the output appearance and the dimensional error rate, compressive strength and flexural strength of the output were measured. As a result of the test, the mixing design with excellent output appearance was P1-2, P1-4, P2-5, P2-6, and the mixing design with good output appearance was P0-1, P1-1, P1-3, P1-6, P1-7 and P2-4. Of these mixing designs, P0-1 and P2-6 had the lowest dimensional error rates. As a result of evaluating the compressive strength and flexural strength of the various mixing designs, the Mixing design with excellent output designs showed good mechanical properties. However, mixing designs with excellent mechanical properties does not necessarily have excellent output quality. Therefore, in order to accurately evaluate the output quality, it is judged that visual inspection and dimensional error rate inspection should be performed first, and then the mechanical characteristics should be reviewed.

Keywords: 3D printer, Material Extrusion, Cementitious Composite, Printing output quality, Dimensional Error Rate

1. 서 론

3D 프린터는 3차원 모델링 으로부터 받아들이는 제품의 공간 정보를 한 층 한 층 (Layer-by-Layer) 적층하는 방식으로 제조하는 기술로서 다양한 재료를 이용하며 최근 3D 프린팅 기술의 급속한 발달로 일반 모형에서부터 정밀 부품까지 빠른 속도로 제조가 가능하다.(Charalampous, P. et al.,2021) 현재까지 상용화된 대표적인 3D 프린터는 FFF(Fuse Deposition Modeling) 방식으로 용융시킨 열가소성 고분자 필라멘트를 사용한다. FFF 방식은 높은 정밀도를 필요로 하지않는 일반 모형을 제작하기에는 충분한 출력오차를 가지며 이보다 발전된 방식인 광경화 수지를 사용하는 SLA(Stereo Lithography Apparatus) 방식은 보다 높은 정밀도로 엔지니어링 부품 제작에 활용이 가능하다.

건설산업에서도 3D 프린터를 적용하고자 많은 연구가 이루어지고 있으며 FFF 방식과 유사한 공정을 공유하며 보다

상위 개념인 ME(Material Extrusion) 방식의 특성에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Seo et al., 2019; El-Sayegh et al., 2020; Mohan, M. K. et al.,2021). ME 방식은 노즐을 통해 연속적인 필라멘트 형태로 재료를 압출하는 방식이며 목표한 구조물의 제조가 완료 될 때까지 다양한 경로로 이동하면서 출력을 진행한다. FFF 방식이 열가소성 재료에 열에너지의 공급 유무에 따라 형태 변경이 가능한 성질을 이용하였다면 건설 ME 방식은 시멘트 복합체가 시간의존적으로 유동특성 및 경화특성이 서로 상반되어 출력과 형태유지를 달성한다.

건설용 ME 방식은 FFF 방식과 유사한 개념을 공유하긴 하나 건설산업의 특성상 출력대상이 중·대형 구조물이나 건설 자재에 맞추어져 있어 출력 규모가 크기 때문에 허용 정밀도 면에서 차이점이 있다. FFF 방식은 출력 노즐 크기가 0.1 mm 단위에서 조절이 가능하여 출력오차도 이와 같은 단위를 반영하며 건설용 ME 방식은 시멘트 복합체에서 사용하는 단일 입상재료의 크기가 mm 단위에서 cm단위까지 범위가 넓어 노즐의 크기도 증가하여 FFF에 비해 큰 출력오차를 반영한다. 콘크리트 제품 및 시공현장에서 허용하는 오차는 3D 프린터를 사용하는 다른 산업분야에 비해 요구하는 정밀도가 높지 않으나 건설용 ME 방식 3D 프린터의 정밀도는 시멘트 복합체의 유동특성에 따라 좌우되기 때문에 출력성과 적층성을 만족하면서 허용 치수 오차를 만족하는 배합을 설계해야 한다.

¹정회원, (재)한국건설생활환경시험연구원, 선임연구원

²정회원, 충남대학교, 토목공학과, 교수

*Corresponding author: yunkim@cnu.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2022년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이 연구에서는 건설용 ME 방식으로 출력한 시멘트 복합체의 품질을 제고하기 위해 배합에 요인에 따른 출력 품질을 출력 외관 육안검사와 치수 오차율을 통해 평가하였으며 배합요인 별 상관관계를 고찰하고 출력 품질이 우수한 배합의 압축강도 및 휨강도를 측정하여 향후 건설 3D 프린팅 시멘트 복합체 출력물의 품질관리를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 사용재료 및 장비

2.1 사용재료

건설용 ME 방식 3D 프린터를 사용하여 시멘트 복합체를 출력하기 위해 사용한 재료는 결합재, 혼화제, 골재, 혼화제료 구분할 수 있다. 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, 이하 OPC), 플라이애시(Fly Ash, 이하 FA)이며 물성은 Table 1과 같다.

혼화제료는 에틸렌비닐클로라이드 (Etylene-vinyl Chloride, 이하 EVCL)을 혼합하였다. EVCL은 시멘트 혼화용 폴리머로서 시멘트 수화물과 폴리머가 상호 간 반응하여 필름을 형성함에 따라 내구성이 증대되는 효과를 가지고 있다. (Song and Shin., 2018). EVCL의 물성은 Table 2와 같다.

Table 1 Properties of binder for 3D printing

| Item | Density [g/cm ³] | Specific surface area [cm ² /g] | Compressive strength [MPa] | | |
|------|------------------------------|--|----------------------------|--------|---------|
| | | | 3 days | 7 days | 28 days |
| OPC | 3.15 | 3,459 | 19.24 | 26.75 | 55.00 |
| FA | 2.21 | 3,786 | - | - | - |

Table 2 Properties of admixture for 3D printing

| Item | Average particle size | Density | Unit weight |
|------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| EVCL | 130 μm | 0.4~0.5 g/cm ³ | 103 kg/m ³ |

Table 3 Fine aggregate and agent for 3D printing

| Item | Properties |
|----------------|---|
| Fine aggregate | Silica sand NO.7, Average particle size : 0.17~0.25 mm, Density : 2.6 g/cm ³ |
| | Silica sand NO.8, Average particle size : 0.1~0.17 mm, Density : 2.6 g/cm ³ |
| Agent | Thickener(Methyl cellulose), Type : Powder Average particle size : ~ 600 μm, pH : 7(Neutral) |
| | Air entraining, Density : 1.05 g/cm ³ , Type : Liquid, Solid contents : 38 %, pH : 7(Neutral) |
| | Air draining, Type : Powder, pH : 10(alkalinity) |

골재는 규사 7호사와 8호사를 사용하였으며 혼화제는 증점제(Thickener)와 공기연행제(Air Entraining Agent), 소포제(Air Draining Agent)를 사용하였다. 증점제를 제외한 혼화제는 ME 방식 3D 프린팅용 시멘트 복합체가 노즐에서 압출 시 견전한 연속성을 유지하는 여부를 판단하기 위해 시험적으로 첨가하였다.

2.2 3D 프린터 및 출력조건

시멘트 복합체를 출력하는 건설용 ME 방식 3D 프린터는 압출기(Extruder)가 각각의 3차원 축으로 이동할 수 있는 갠트리(Gantry) 타입이며 출력을 위해 압출기의 이동속도 20~25 mm/sec, 압출속도 125~165 e-step/mm로 설정하였다. 압출속도의 단위는 압출변위에 대한 회전시 압출기의 스텝모터 회전 수이다. 시험에 사용한 3D 프린터의 전경과 제원은 Fig. 1과 Table 4와 같다.

3. 배합설계 및 시험방법

3.1 배합설계

건설용 ME 방식 3D 프린터로 출력하기 위한 시멘트 복합체의 배합설계는 압출하여 노즐로 출력하기 위한 유동성을 유지함과 동시에 출력 후 경화가 완료되기까지 자중에 일부 저항하며 형상을 보존해야하기 때문에 출력성이 허용하는 한 낮은 물-결합재비로 배합해야 한다(Rehman, A., 2021, Wang, K., 2020). 배합설계에 적합한 배합요인은 규사의 종류(7호, 8호), 물-결합재비(이하, W/B), 규사-결합재비(이하, SS/B), 혼화제-결합재비(이하, Th/B, AE/B, AD/B)이며 모든 배합에서

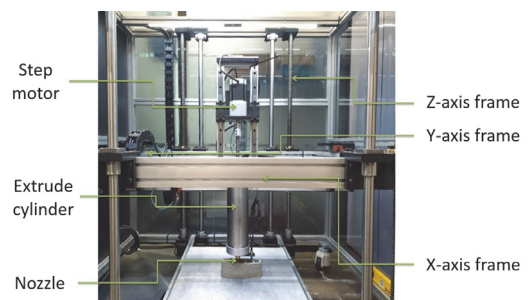


Fig. 1 View of material extrusion type 3D printer

Table 4 Spec of material extrusion type 3D printer

| Printing method | Printing scale | Maximum printing speed | Positioning accuracy |
|--------------------|----------------|------------------------|---|
| Material Extrusion | 500×500×500 mm | 150 mm/sec | X : 40 micron Y : 40 micron Z : 12 micron |

Table 5 Mix designs of cementitious composite for 3D Printing

| Mix. no. | Silica Sand | Binder [wt. %] | | | W/B [wt. %] | SS/B [wt. %] | Th/B ¹⁾ [wt. %] | AE/B ²⁾ [wt. %] | AD/B ³⁾ [wt. %] |
|----------|-------------|----------------|------|------|-------------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | OPC | FA | EVCL | | | | | |
| P0-1 | No. 8 | 85.5 | 10.0 | 4.5 | 35.0 | 60.0 | 0.100 | - | - |
| P0-2 | | | | | 40.0 | 82.0 | 0.100 | - | - |
| P0-3 | | | | | 45.0 | 110.0 | 0.100 | - | - |
| P1-1 | | | | | 45.0 | 100.0 | 0.100 | - | - |
| P1-2 | | | | | 45.0 | 110.0 | 0.200 | - | - |
| P1-3 | | | | | 45.0 | 110.0 | 0.230 | - | - |
| P1-4 | | | | | 45.0 | 110.0 | 0.250 | - | - |
| P1-5 | | | | | 45.0 | 110.0 | 0.250 | 0.500 | - |
| P1-6 | | | | | 45.0 | 110.0 | 0.250 | - | 0.050 |
| P1-7 | | | | | 50.0 | 130.0 | 0.100 | - | 0.100 |
| P2-1 | No. 7 | | | | 45.0 | 110.0 | 0.250 | - | 0.050 |
| P2-2 | | | | | 45.0 | 110.0 | 0.275 | - | - |
| P2-3 | | | | | 42.5 | 110.0 | 0.300 | - | - |
| P2-4 | | | | | 41.0 | 110.0 | 0.330 | - | - |
| P2-5 | | | | | 40.0 | 100.0 | 0.300 | - | - |
| P2-6 | | | | | 37.5 | 100.0 | 0.300 | - | - |

¹⁾Th/B: Thickner/Binder, ²⁾AE/B: Air Entraining/Binder, ³⁾AD/B: Air Draining/Binder

결합재의 비율은 동일하다. 각 배합요인은 모두 시멘트 복합체 3D 프린팅 시 재료를 건전한 상태로 연속적으로 출력하는 능력이 출력성과 단위 출력물을 적층하여 형태가 유지되는 정도인 적층성에 밀접한 영향이 있으며 설계배합의 유동특성에 기인한다.

W/B의 범위는 35 ~ 50 %이며 SS/B의 범위는 60 ~ 130 %, Th/B, AE/B, AD/B는 0.1 ~ 0.5 %의 범위를 가지고 있다. 배합요인 중 W/B와 SS/B는 유동성을 증감시키는 요인으로 출력 유동성 범위를 유지하기 위해 상호보완적인 관계이다. 증점제는 출력 시멘트 복합체의 출력 연속성을 유지하고 층간 결합력을 증진시키기 위한 목적으로 모든 배합에 사용하였으며 공기연행제 및 소포제는 특정배합의 시멘트 복합체 출력물 표면에 발생하는 표면 공극을 저감시키기 위해 사용하였다. 그러나, 혼화제의 사용량이 증가할 경우 출력성과 적층성이 크게 저하되므로 사용에 주의해야 한다. 설계한 배합은 다음 Table 5와 같다.

3.2 시험방법

3.2.1 출력 외관 평가방법

건설용 ME 방식 3D 프린터로 출력한 시멘트 복합체의 출력 외관을 평가하기 위해 지름 100 mm, 높이 60 mm의 중공형 원주형 시험체를 모델링하였다. 모델링 출력물의 외관은 육안으로 평가하였으며, 다음 각 기준의 만족 여부에 따라 Table 6과 같이 4단계로 평가하였다.

Table 6 Standard of 3D printing cementitious composite output quality

| Level | Standard of 3D printing quality | | | | Symbol |
|-------|---------------------------------|-------------------|-----------------|--------------|--------|
| | Printing output continuity | Surface integrity | Shape retention | Printability | |
| 1 | - | - | - | or ○ | X |
| 2 | ○ | - | - | ○ | △ |
| | - | ○ | - | ○ | |
| 3 | ○ | - | ○ | ○ | ○ |
| | - | ○ | ○ | ○ | |
| 4 | ○ | ○ | ○ | ○ | ◎ |

- ① 외관상 눈에 띄는 출력 불연속성 유무
- ② 출력물 표면의 과도한 기포생성 유무
- ③ 적층성이 확보된 후의 과도한 형태변화 유무
- ④ 출력소재(시멘트 복합체)의 압출 출력가능 여부

3.2.2 치수 오차율 평가방법

건설용 ME 방식 3D 프린터로 출력한 시멘트 복합체의 치수 오차율을 평가하기 위해 공시체 중앙점을 기준으로 직교하는 상부 및 하부 지름 Dh₁, Dh₂, Dh₃, Dh₄를 측정하였으며 높이 H₁, H₂, H₃, H₄는 지름 측정 직교 좌표를 중앙점을 기준으로 45도 회전한 위치에서 측정하였다. 공시체의 원형은 곡

선의 비선형성을 유지하는 척도로 활용할 수 있으며 공시체의 높이는 적층 높이를 달성할 수 있는 척도로 활용할 수 있다.

측정한 지름과 높이는 모델링 기준 정보에 따라 평가하며 지름기준은 100 mm, 적층높이 기준은 60 mm 이다. 각 기준에 대하여 측정한 치수의 변화 정도를 치수 오차율로 정의하였으며 이를 구하는 방법은 다음 식(1)과 같다.

$$P_e = \left(\frac{m_p}{m_m} - 1 \right) \times 100 \quad (1)$$

여기서, m_p 는 3D 프린터로 출력한 공시체의 측정길이(mm)로 각 측정점에서의 지름과 높이에 해당하며 m_m 은 공시체 모델링의 치수 정보로 직경의 경우 100 mm, 높이의 경우 60 mm 이다. P_e 는 치수 오차율(%)로 설정한 치수 정보로부터 증감된 수치를 나타내며 음수일 경우 모델링 한 치수보다 감소된 정도를, 양수일 경우 모델링 한 치수보다 증가된 정도를 나타낸다. P_e 의 절대값이 1에 가까울수록 높은 치수 정확성을 가진다. 출력물의 치수 오차율을 측정하기 위한 방법은 Fig. 2와 같다.

건설용 ME 방식 3D 프린터 출력물의 치수 오차율을 측정하기 위해 표준 공시체 모양을 모델링 하였다. 제시한 공시체는 3D 프린터의 출력 부하를 감소시키고 빠른 제작을 위해 중공 실린더 형태로 모델링 하였다. 모델링 한 시험체의 크기는 지름 100 mm, 높이 60 mm 이며 실제 출력물과의 오차를 비교하는 기준이다. 출력 노즐의 내경 조건은 6 mm로 적층성을 유지하기에는 세장비가 높기 때문에 3D 프린터 출력제어 조건 중 Shell 두께를 조정하여 2겹의 필라멘트로 공시체를 출력할 수 있게 하였다. 공시체를 출력하기 앞서 압출 실린더의 여압을 제거하고 출력여부를 사전에 검토하기 위해 약 50 mm 이격된 거리에서 Skirts를 설정하였으며 확인이 완료된 출력 Skirt는

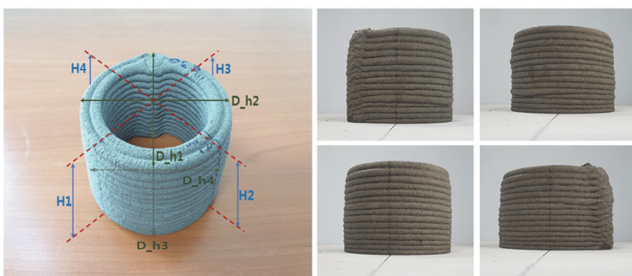


Fig. 2 3D Printer output dimensional error measurement method

Table 7 3D printing condition of benchmark specimens

| Nozzle Diameter [mm] | Printing speed [mm/sec] | e-step | Z-offset [mm] | Primary Layer Height [mm] |
|----------------------|-------------------------|---------|---------------|---------------------------|
| 6.0 | 20~25 | 125~165 | -1.0 | 5.0 |

경화 전 제거하여 출력베드에서 경화 완료 후 탈거에 방해가 되지 않도록 하였다. 출력물의 정밀도를 평가하기 위해 기존 연구에서 3D 프린터의 정밀도 측정용 기준 아티팩트를 제시하고 있으나 건설용 ME 방식 프린터가 모사하기에는 크기가 작고 복잡한 자유도를 가지고 있어 건설용 ME 방식 3D 프린터 출력물에 평가에는 맞지 않아 적용하지 않았다.(Minetola, P. et al, 2022) 공시체의 출력조건은 Table 7과 같다.

3.2.3 출력물의 역학적 특성 평가방법

건설용 ME 방식 3D 프린터로 출력한 시멘트 복합체의 압축 강도를 평가하기 위해 40×40×40 mm 공시체를 이용하였으며 2,400±200 N/sec의 하중 재하속도를 적용하였다. 또한, 기온 20℃, 상대습도 90% 조건으로 재령 7일 및 28일 후 압축강도를 측정하였다. 일반 거푸집 타설 제조방식이 아닌 3D 프린터로 출력한 상태와 유사한 조건에서 압축강도를 측정하기 위해 압축강도 공시체 보다 큰 형상을 출력한 후 유동성을 유지하고 있는 동안 소요의 시편 크기와 동일한 금속재질의 양생틀을 눌러 공시체를 성형 한 뒤 경화가 충분히 이루어진 후 탈형하는 방식으로 공시체를 제작하였다. 3D 프린터 출력 상태의 휨강도를 평가하기 위해 40×40×160 mm 공시체를 이용하였으며 50±10 N/sec의 하중 재하속도를 적용하였다. 양생은 압축강도 공시체와 동일한 조건이며 재령 28일의 휨강도를 측정하였다. 휨강도 공시체 또한 압축강도 공시체와 마찬가지로 휨 시험용 공시체보다 큰 형태로 출력한 후 소요의 시편 크기와 동일한 양생틀을 이용하여 제작하였다. 공시체의 제작방식 및 시험 전

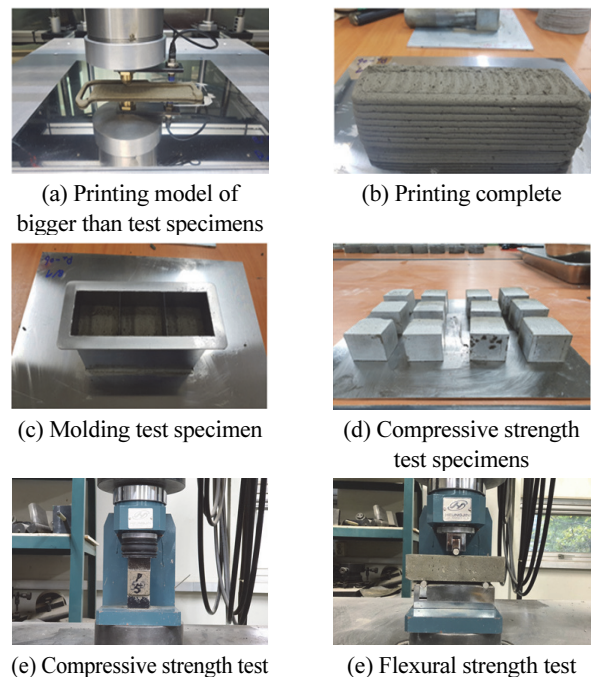


Fig. 3 View of making compressive strength test specimens and test

경은 다음 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 출력성 및 적층성이 일정 수준 이상이어야만 공시체의 제작이 가능하기 때문에 출력 외관 검사 및 출력 치수 오차율을 통해 우수한 결과를 나타낸 배합에 대해서만 압축강도와 휨강도를 평가하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 출력 외관 평가결과

건설용 ME 방식 3D 프린터로 출력한 시멘트 복합체의 출력 외관을 평가한 결과는 P1-2, P1-4, P2-5, P2-6 배합의 경우 가장 우수한 출력 외관인 Level-4로 분류되었으며 P0-1, P1-1, P1-3, P1-6, P1-7, P2-4 배합은 양호한 출력 외관인 Level-3, P0-2, P0-3, P2-3 배합과 P1-5, P2-1, P2-2 배합은 각각 Level-2와 Level-1으로 불건전한 출력 외관을 나타냈다. 각 배합요인 별로 출력 외관을 살펴보면 Level-4 배합은 W/B 37.5 ~ 45 %, SS/B 100 ~ 110 %, Th/B 0.2 ~ 0.3 % 범위로 나타났으며 Level-3 배합은 W/B 35 ~ 50 %, SS/B 60 ~ 130 %, Th/B 0.1 ~ 0.33 % 범위, Level-2 및 Level 1 배합은 37.5~45 %, SS/B 82 ~ 110 %, Th/B 0.1 ~ 0.3 % 범위로 나타났다. 각 수준 별로 배합 요인 범위가 넓고 서로 공유하기 때문에 각각의 개별 배합요인을 기준으로 출력 외관을 건전성을 정확하게 예측할 수 없었으나 규사 8호를 사용한 경우 W/B 45 % 일 때 SS/B 100 ~ 110 %, Th/B 0.1 ~ 0.25, 규사 7호를 사용한 경우 W/B 37.5 ~ 41 %, SS/B 100 ~ 110 %, Th/B 0.3 ~ 0.33 %일 때 출력 외관이 Level 3~4 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 이 때의 범위는 증점제만 고려했을 때로 공기연행제와 소포제는 배합 요인을 단순화

하기 위해 제외하였다. 대체적으로 W/B를 증가시키면 SS/B 또한 증가시키는 것이 출력성에 양호한 영향을 미치나 증점제의 첨가량에 따라 출력 품질이 다양하게 변화하여 대략적인 범위를 설계한 후 직접적인 출력시험을 통해 세부 조절이 필요할 것으로 판단된다. 각 배합의 출력품질 평가에 사용한 공시체 외관과 평가결과는 각각 Fig. 4 및 Table 8에 나타났다.

Table 8 Evaluation of 3D printing cementitious composite output quality

| Mixing designs | Standard of 3D printing quality | | | | Level |
|----------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|--------------|-------|
| | Printing output continuity | Surface integrity | Shape retention | Printability | |
| P0-1 | ○ | - | ○ | ○ | ○ 3 |
| P0-2 | - | - | ○ | ○ | △ 2 |
| P0-3 | ○ | - | - | ○ | △ 2 |
| P1-1 | ○ | - | ○ | ○ | ○ 3 |
| P1-2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ◎ 4 |
| P1-3 | ○ | - | ○ | ○ | ○ 3 |
| P1-4 | ○ | ○ | ○ | ○ | ◎ 4 |
| P1-5 | - | - | - | ○ | X 1 |
| P1-6 | ○ | - | ○ | ○ | ○ 3 |
| P1-7 | - | ○ | ○ | ○ | ○ 3 |
| P2-1 | - | - | - | - | X 1 |
| P2-2 | - | - | - | - | X 1 |
| P2-3 | ○ | - | - | ○ | △ 2 |
| P2-4 | - | ○ | ○ | ○ | ○ 3 |
| P2-5 | ○ | ○ | ○ | ○ | ◎ 4 |
| P2-6 | ○ | ○ | ○ | ○ | ◎ 4 |

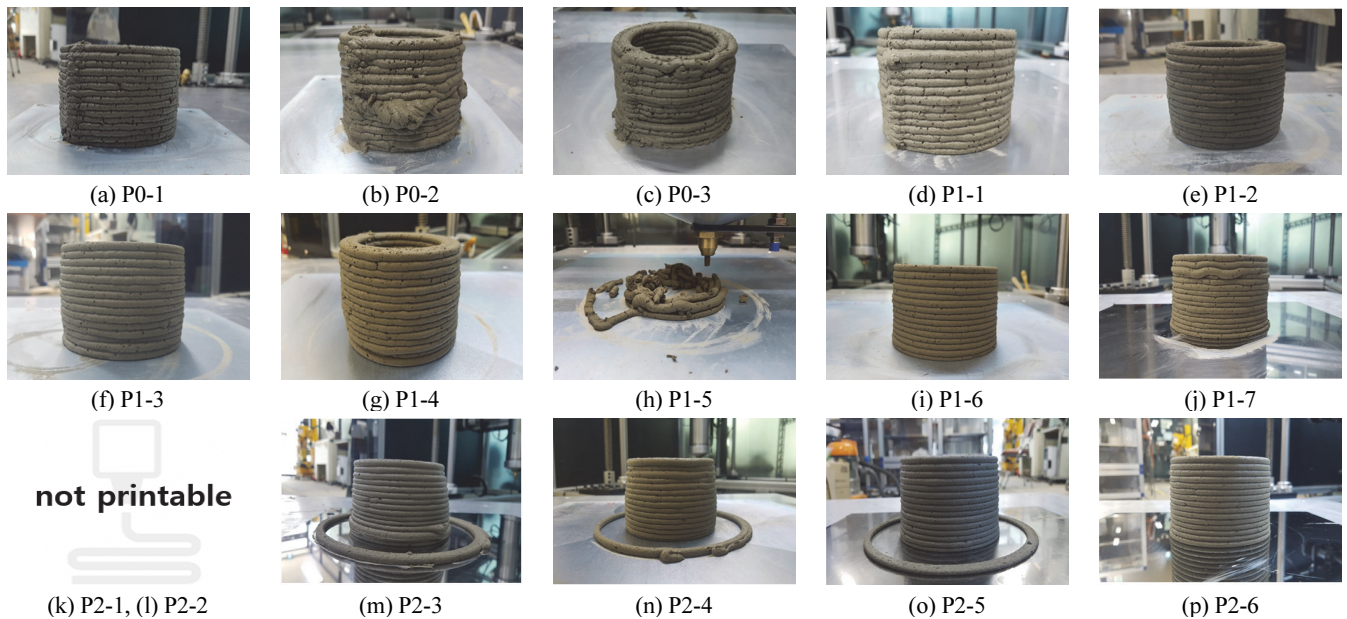


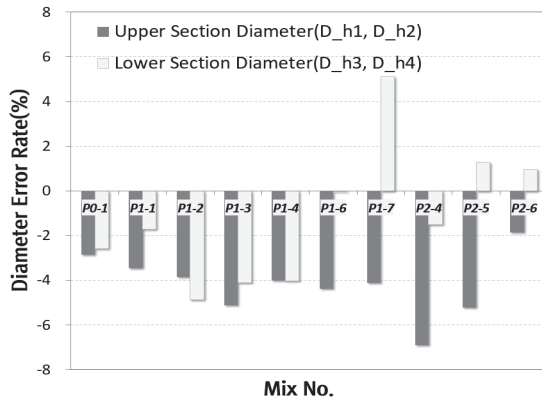
Fig. 4 Output results of cementitious composite according to each mixing design

4.2 치수 오차율 평가결과

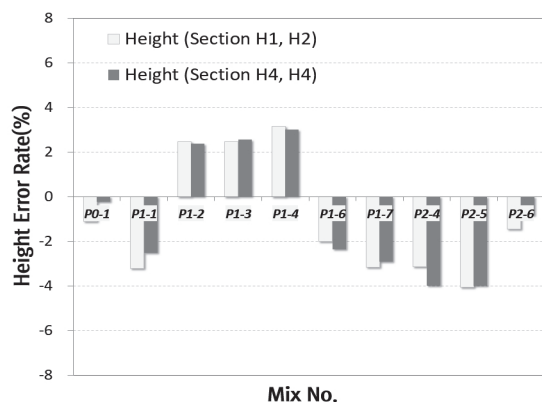
건설용 ME 방식 3D 프린터로 출력한 시멘트 복합체의 치수 오차율은 길이 측정이 가능한 품질 수준인 Level-3, Level-4에 해당하는 배합인 P0-1, P1-1, P1-2, P1-3, P1-4, P1-6, P1-7, P2-4, P2-5, P2-6를 대상으로 평가하였다. 상부 직경 및 하부 직경에 대한 치수 오차율 및 높이에 대한 치수 오차율은 Fig. 5에 나타났다.

공시체 상부 직경의 최대 오차율 평가결과 평균 -6.90%, 최소 오차율은 평균 -1.86%로 측정되었으며 하부 직경의 최대 오차율은 평균 5.13%, 최소 오차율은 평균 -0.03%로 측정되었다. 상위의 상부 직경 달성률을 나타낸 배합은 P2-6, P0-1이며 하부 직경 달성률이 상위인 배합은 P1-6, P2-6로 종합적인 평가결과 상·하부 직경에 대한 오차율이 우수한 배합은 P2-6로 나타났다. P2-6의 배합설계는 W/B 37.5%, SS/B 100%, Th/B 0.3%, 규사 8호를 사용한 배합이다.

공시체 높이의 최대 오차율 평가결과 평균 -4.07%, 최소 오차율 평가결과 평균 -0.24%로 측정되었으며 상위의 높이 달성률을 나타낸 배합은 P0-1, P2-6로 나타났다. 종합적인 평가결과 높이에 대한 오차율이 가장 우수한 배합은 P0-1로 나타났다. P0-1의 배합설계는 W/B 35.0%, SS/B 60%, Th/B 0.1



(a) Dimensional error rate about diameter



(b) Dimensional error rate about height

Fig. 5 Results of dimensional error rate

%, 규사 7호를 사용한 배합이다.

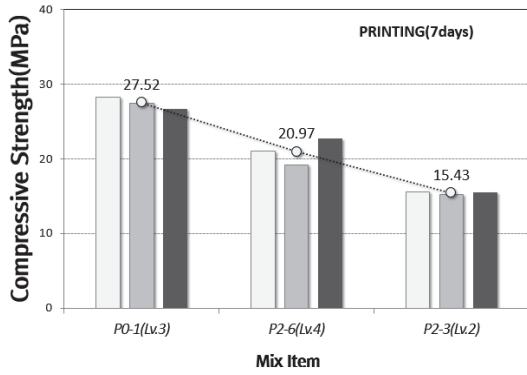
상부 직경과 하부 직경의 치수 오차율 차이가 눈에 띄게 큰 배합은 P1-6, P1-7, P2-4, P2-5로 나타났으며 규사 8호를 사용한 배합인 P1-6, P1-7에서는 W/B와 SS/B가 비교적 높았다. 또한, 규사 7호를 사용한 배합의 경우 W/B는 비교적 낮았으나 증점제의 사용량이 높았다. 이 같은 경향은 규사 8호를 사용한 배합의 경우 높은 W/B로 인해 유동성이 과도하게 높아지는 상태를 SS/B를 증가시켜 제어할 경우 겔보기 유동성은 제어할 수 있으나 점성 등 유변학적 특성이 소실되어 3D 프린터 출력 균질성이 떨어지기 때문인 것으로 판단된다. 규사 7호를 사용한 배합의 경우도 마찬가지로 과도한 증점제 사용으로 시멘트 복합체의 점성이 증가하여 노즐로부터 압출되는 필라멘트에 공극이 포함되는 등 출력 균질성이 저하되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 다양한 혼화제를 사용한 배합의 치수 오차율이 저하된 것은 각 혼화제가 서로 다른 목적을 가지고 있는 한편 적은 사용량으로도 시멘트 복합체의 물성을 크게 바꾸면서 서로 영향을 줄 수 있기 때문이며 혼화제 사용 시 이를 고려하여 사용해야 한다.(Xie, D. et al, 2021)

높이의 치수 오차율이 양수를 가진 배합은 P1-2, P1-3, P1-4 배합이었으며 나머지 배합은 음수의 치수 오차율로 측정되었다. 상기 치수 오차율이 양수인 배합은 규사 8호를 사용하였으며 모든 배합이 W/B 45%, S/B 110%로 동일하였으나 Th/B가 0.23~0.25까지 증가시킨 배합으로 비교적 많은량의 증점제를 첨가한 배합으로 나타났다. 이 같은 경향은 과도한 증점제를 사용한 점성의 증가로 경우 출력 연속성이 저하되어 일부 출력층에서 정상 출력량보다 많은 양이 출력되면서 증가된 적층량의 누적 때문에 발생한 것으로 판단된다.

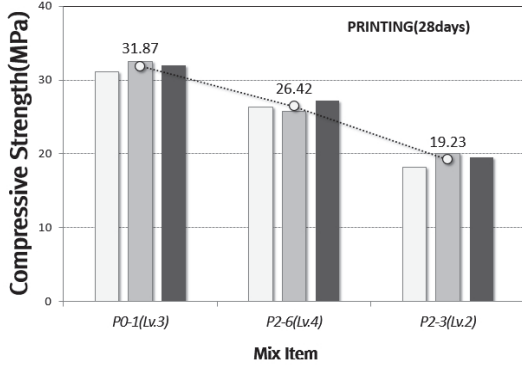
치수 오차율을 평가한 결과 직경 및 높이에서 가장 우수한 출력 치수 정확성을 달성한 배합은 P0-1과 P2-6로 나타났으며 각 우수 배합의 배합요인을 분석한 결과 다른 배합과 비교하여 낮은 W/B를 가지고 있는 것으로 나타났다. 또한, P0-1의 경우 규사 8호를, P2-6의 경우 규사 7호를 사용하였는데 규사 8호의 경우 규사 7호에 비해 입경이 작고 미분 함유량이 많기 때문에 P0-1 배합의 경우 P2-6 배합에 비해 적은 증점제 사용량에도 양호한 출력품질을 달성하기에 충분한 점성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 반면 규사 7호는 8호에 비해 입경이 크고 미분 함유량이 적기 때문에 P2-6 배합이 양호한 출력품질을 달성하기 위한 소요의 점성을 만족하기 위해서는 P0-1 배합에 비해 증점제의 사용량이 증가하는 것으로 나타났다.

4.3 역학적 특성 평가결과

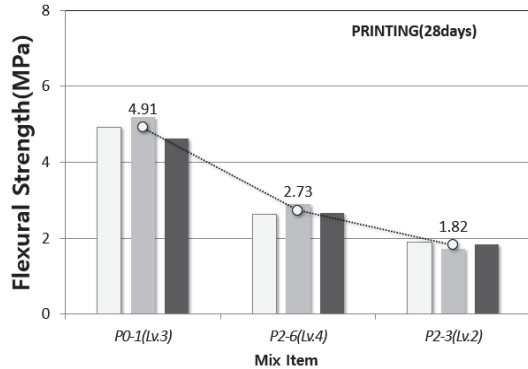
건설용 ME 방식 3D 프린터로 출력한 시멘트 복합체의 압축강도 및 휨강도를 평가하였으며 Fig. 6에 나타났다.



(a) Compressive strength aging 7 days



(b) Compressive strength aging 28 days



(b) Flexural strength aging 28 days

Fig. 6 Strength tests of specimens made by 3D printer

우수한 출력 외관과 낮은 치수 오차율로 출력이 가능한 배합인 P0-1과 P2-6의 7일 압축강도를 측정된 결과 각각 평균 27.52 MPa, 20.97 MPa, 28일 압축강도를 측정된 결과 각각 평균 31.87 MPa, 26.42 MPa로 나타났으며 비교를 위한 배합인 P2-3의 7일, 28일 압축강도는 각각 15.43 MPa, 19.23 MPa로 나타났다. P0-1과 P2-6의 28일 휨강도를 측정된 결과 각각 평균 4.91 MPa, 2.73 MPa로 나타났으며 비교를 위한 배합인 P2-3의 28일 휨강도는 1.82 MPa로 나타났다.

P0-1 배합의 출력 외관 평가결과는 Level-3으로 나타났으며 P2-6 배합의 평가결과는 Level-4로 나타났다. 출력 외관 평가에 따른 압축강도 특성을 비교하기 위해 Level-2 배합인

P2-3와 압축강도 및 휨강도를 비교한 결과 출력 외관이 양호할수록 압축강도 또한 비례하는 결과를 나타냈다. 이 같은 결과는 출력 외관과 치수 오차율과 같은 특성들이 시멘트 복합체 배합요인 중 W/B, SS/B 기인하여 성능을 발현하는 한편 압축강도 발현도 동일한 배합요인에 의해 좌우되기 때문이다. 그러나 3D 프린터로 출력이 가능한 정도의 유동성을 확보했으나 낮은 W/B 인해 출력 외관이 건전하지 못하더라도 3D 프린터 출력 압축강도가 높게 측정될 수 있기 때문에 출력 외관과 치수 오차율을 선 검토한 후 압축강도 및 휨강도와 같은 역학적 특성에 대해 평가해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 건설용 ME 방식을 통해 제조하는 시멘트 복합체 출력물 품질을 제고하기 위한 자료로 활용하기 위해 배합 요인에 따른 출력 외관 육안검사와 치수 오차율을 평가하고 출력 품질이 우수한 배합의 압축강도 및 휨강도를 측정하였으며 배합요인과 품질특성 상관관계를 고찰한 결과는 다음과 같다.

- (1) P1-2, P1-4, P2-5, P2-6 배합은 가장 우수한 출력 외관인 Level-4로 분류되었으며 P0-1, P1-1, P1-3, P1-6, P1-7, P2-4 배합은 양호한 출력 외관인 Level-3으로 분류되었다. 각 수준 별로 배합 요인 범위가 넓고 서로 공유되기 때문에 각각의 개별 배합요인을 기준으로 출력 외관 건전성을 정확하게 예측할 수 없었으나 규사 8호를 사용한 경우 W/B 45 % 일 때 SS/B 100 ~ 110 %, Th/B 0.1 ~ 0.25 %, 규사 7호를 사용한 경우 W/B 37.5 ~ 41 %, SS/B 100 ~ 110 %, Th/B 0.3 ~ 0.33 %일 때 출력 외관이 Level 3~4 사이에 분포하는 것으로 나타났다.
- (2) 상·하부 직경에 대한 오차율이 우수한 배합은 P2-6로 W/B 37.5 %, SS/B 100 %, Th/B 0.3 %, 규사 8호를 사용하였으며 높이에 대한 오차율이 가장 우수한 배합은 P0-1로 W/B 35.0 %, SS/B 60 %, Th/B 0.1 %, 규사 7호를 사용한 배합이다. 치수 오차율이 우수한 배합요인을 분석한 결과 다른 배합과 비교하여 낮은 W/B를 가지고 있는 것으로 나타났으며 비교적 우수한 출력 정확성을 충족하기 위해 규사 7호를 사용한 배합이 규사 8호를 사용한 배합에 비해 증점제 사용량이 높은 것으로 나타났다.
- (3) 우수한 출력 외관과 낮은 치수 오차율로 출력이 가능한 배합인 P0-1과 P2-6의 7일 압축강도를 측정된 결과 각각 평균 27.52 MPa, 20.97 MPa, 28일 압축강도를 측정된 결과 각각 평균 31.87 MPa, 26.42 MPa로 나타났으며 비교를 위한 배합인 P2-3의 7일, 28일 압축강도는 각각

15.43 MPa, 19.23 MPa로 나타났다. 28일 휨강도의 경우 P0-1, P2-6, P2-3 각각 4.91 MPa, 2.73 MPa, 1.82 MPa로 측정되었다. 우수한 출력 외관, 치수 오차율을 가진 배합에서 압축강도 또한 높게 나타났으나 출력 외관이 견전하지 못한 경우라도 W/B가 낮은 경우 압축강도가 높게 나올 수 있기 때문에 출력 품질을 검토하기 위해서는 출력 외관 및 치수 오차율을 선 검토한 후 압축강도에 대해 평가해야 할 것으로 판단된다.

(4) 시험을 통해 도출한 건설용 ME 방식 3D 프린터용 시멘트 복합체 배합사례를 검토한 결과 우수한 품질특성을 가진 배합의 W/B와 SS/B는 일정 범위 내에서 서로 비례관계를 가지고 있는 것으로 나타났으며 증점제와 같은 혼화제의 혼합량이 출력 품질에 미치는 영향에 대한 민감도가 높기 때문에 각 배합의 유동성 수준에 따라 적정 수준의 증점제 혼합량을 찾는 것이 중요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 도시건축연구사업 연구비지원(21AUDP-B121595-06)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Charalampous, P., Kostavelis, I., Kontodina, T., & Tzovaras, D. (2021). Learning-based error modeling in FDM 3D printing

process. *Rapid Prototyping Journal*.

2. Seo, J. S., Lee, B. C., and Kim, Y. Y. (2019). The Effects of Void Ratio on Extrudability and Buildability of Cement-based Composites Produced by 3D Printers. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection* 23(7), 104-112. (In Korean)

3. El-Sayegh, S., Romdhane, L., & Manjikian, S. (2020). A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(2), 1-25.

4. Mohan, M. K., Rahul, A. V., De Schutter, G., & Van Tittelboom, K. (2021). Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*, 115, 103855.

5. 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.

6. Rehman, A. U., & Kim, J. H. (2021). 3D concrete printing: A systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics. *Materials*, 14(14), 3800.

7. Wang, K. (2020). Feasibility Study of 3D Printing of Concrete for Transportation Infrastructure.

8. Minetola, P., de Freitas Pacheco, V., Massarani, M., Calignano, F., & Marchiandi, G. (2022). Proposal of an Innovative Benchmark for the Evaluation of 3D Printing Accuracy for Photopolymers. In *Materials Science Forum* (Vol. 1048, pp. 279-290). Trans Tech Publications Ltd.

9. Xie, D., Deng, L., Shen, J., & Yang, Y. (2021, February). Study on the Effect of Cellulose Ether on the Performance of Concrete. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 676, No. 1, p. 012042). IOP Publishing.

Received : 01/24/2022

Revised : 01/28/2022

Accepted : 02/04/2022

요 지 : 이 논문에서는 건설용 ME 방식 3D 프린터로 출력하기 위한 시멘트 복합체 배합의 출력품질을 평가하기 위해 출력 외관의 육안검사와 출력물의 치수 오차율, 압축강도 및 휨강도를 측정하였다. 시험결과, 출력 불연속 정도, 표면 무결성, 형태 유지능력, 출력가능 여부와 같은 4개 지표를 모두 만족하는 우수한 배합은 P1-2, P1-4, P2-5, P2-6으로 나타났다. 3개 지표를 만족하는 배합은 P0-1, P1-1, P1-3, P1-6, P1-7, P2-4으로 나타났다. 이 배합 중 오차율 측정용 중공 원주형 공시체의 직경 치수 오차율과 높이 치수율이 낮은 배합은 P0-1, P2-6로 나타났다. 치수 오차율이 우수한 배합과 그렇지 않은 배합의 압축강도 및 휨강도를 평가한 결과 출력 품질이 우수한 배합의 역학적 특성이 우수한 것으로 나타났다. 그러나, 역학적 특성이 우수한 배합이 반드시 출력 품질이 우수한 것은 아니기 때문에 정확한 품질평가를 위해서는 출력 외관에 대한 육안검사와 치수 오차율 검사를 선행하여 역학적 특성을 검토해야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 3D 프린터, ME방식, 시멘트 복합체, 출력 품질, 치수 오차율