

건설용 3D 프린팅 압출 및 적층공정에 따른 시멘트계 복합재료의 수축 특성 영향

이호재^{1*}, 김원우², 서은아², 문재흠³

Effect of Shrinkage Characteristics of Cement-Based Composites by Extrusion and Lamination Process of Construction 3D Printing

Hojae Lee^{1*}, Won-Woo Kim¹, Eun-A Seo¹, Jae-Heum Moon¹

Abstract: The purpose of this study is to evaluate the shrinkage characteristics of the cement-based composite for 3D printing construction, and to evaluate the shrinkage before/after extrusion and after printing during the printing process. As a result of evaluating the compressive strength by curing age of OPC-mix and printing-mix, similar trends were shown until 7 days of age, but the maximum shrinkage of 252 $\mu\text{m}/\text{m}$ was larger in the case of OPC-mix compared to printing-mix. During the printing process, the compressive strength of the cementitious composite material after extrusion was about 6.5 MPa lower than the material before extrusion until the 7th day of age, but the level of strength on the 28th day of age was similar. As for the shrinkage characteristics, the result of shrinkage after printing showed greater shrinkage in the range of 220-260 $\mu\text{m}/\text{m}$ compared to the result of shrinkage before extrusion.

Keywords: 3D printing, Additive manufacturing, Compressive strength, Shrinkage, Printing process

1. 서 론

3D 프린팅 기술은 건설분야에 적용되어 수년간 상당한 발전을 이루고 있다. 국내외 건설용 3D 프린팅 기술은 대부분 재료압출(ME: Material Extrusion) 방식으로도 일컬어지는 적층방식(AM: Additive Manufacturing)을 이용하고 있다. 적층방식을 이용하여 시공한 대표적인 사례로 건축물로는 Apis Cor와 COBOD의 2층 빌딩이 있으며, 구조물로는 TU Eindhoven과 Tsinghua University의 보도교가 있다(Buswell et al., 2020). 국내에도 한국건설기술연구원 주관의 연구단이 면적 100 m² 높이 3 m의 단층건축물을 시공한 사례가 있다.

3D 프린팅을 이용한 시공방식은 거푸집을 사용하지 않기 때문에 다양한 비정형 구조물을 자유롭게 설계할 수 있으며, 재료의 손실을 최소화하며 시공시간을 단축이 가능한 장점이 있다. 그러나 3D 프린팅의 주요재료로 사용되는 콘크리트와 몰탈을 포함한 시멘트계 복합재료는 수화과정에서 소성수축, 자기수축, 건조수축을 포함한 수축이 발생되며, 수축이 균열

을 동반한 경우 구조물의 성능이 저하된다(Kwon et al., 2016).

일반적으로 콘크리트는 거푸집을 이용하여 타설한 후 소오의 압축강도가 발현된 이후 거푸집을 해체하므로 콘크리트는 양생 초기에 상부면을 제외한 모든 면은 외기로부터 차단되어 있으며, 상부면도 가능한 표면의 수분이 증발하지 않도록 조치를 취하고 있다(KCS 14 20 12, 2018). 그러나 적층공법을 적용하여 시공하는 경우, 적층 직후부터 외기환경에 고스란히 노출되어 재료의 수분 증발이 가속화되며, 이는 Fig.1에서 볼 수 있듯이 초기 수축량의 증가와 균열의 발생으로 이어진다(Jo et al., 2020; Moelich et al., 2020).

적층공법 적용 시 재료의 초기재령에 외기노출로 인해 발생하는 수축에 대한 연구가 2010년대 후반부터 활발히 이루어



Fig. 1 Shrinkage crack on 3D printed layers (Jo et al., 2020; Moelich et al., 2020)

¹ 한국건설기술연구원 노후인프라센터, 전임연구원, 교신저자

² 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부, 전임연구원

³ 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부, 수석연구원

*Corresponding author: h.lee@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Daehwa-Dong, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 10223, South Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2021년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

어지고 있다. 해외에서는 양생 시 표면의 수분 증발의 방지와 수축저감제 사용에 따른 수축량을 저감효과에 대한 연구를 수행했으며 (Federowicz et al., 2020), 적층제작한 시험체에 구속조건을 반영하여 수축으로 인한 균열발생 효과에 대한 연구를 수행하였다 (Moelich et al., 2020). 국내에서는 적층을 위해 사용한 증점제의 수축 저감 효과를 몰드 타설 시험체와 적층 시험체를 비교한 연구를 수행했으며 (Lee et al., 2019a), 적층 시공 시 수축발생량 저감을 위해 수축저감제 개발에 대한 연구를 수행하기도 하였다 (Lee et al., 2019). 이 외에도 재료적 특성에서의 수축저감을 위해 결합제 개선 (Mastali et al., 2018). 또한 fiber를 적용하는 방식 (Feng et al., 2015), filler로 적층구조 내부를 채우는 방식 (Medjgbedo et al., 2018)에 대한 연구도 진행되고 있다.

앞서 언급한 지금까지의 연구는 대부분 적층 이후 재료의 수축현상에 초점을 맞춰왔다. 그러나 3D 프린팅을 이용한 적층시공기술은 배합이후 이송과 압출, 적층을 포함한 여러 단계의 공정을 포함하고 있으며 재료 또한 기존의 레미콘 시공용 재료와 비교하여 상대적으로 저유동, 고점도 재료를 사용한다(Lee et al., 2019b). 저유동, 고점도 재료는 이송과정 중 상대적으로 높은 압력을 필요로 하며, 높은 마찰력은 마찰열을 발생시켜 재료의 물성에 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 재료의 압출 전/후와 적층 이후 재료온도 변화를 측정하였으며, 각 공정별로 제작한 시험체의 강도와 시험체 제작 초기 수축특성(28일 전/후)에 대해 실험적으로 분석하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 사용재료

결합제는 1종 보통포틀랜드시멘트(OPC: ordinary Portland cement), 플라이애시 2종(FA: fly ash), 실리카흄(SF: silica fume)을 사용하였다. 잔골재는 국내산 규사 7호사를 사용하였으며, 혼화제는 유동성과 적층성을 확보하기 위해 D사에서 개발한 3D 프린팅용 폴리카르본산계 고성능 감수제를 동일하게 적용하였다.

2.2 적용배합

배합은 기존배합과의 비교를 위해 결합제로 OPC만을 사용한 배합과 Fig. 2의 한국건설기술연구원 컨소시엄에서 본 연구진이 개발하여 소형건축물(부지면적 10 m², 높이 3m) 출력에 적용한 3D 프린팅용 배합을 사용하였다.

적층 배합을 위해 결합제는 OPC, FA, SF 세 종류를 적용하였으며, 결합제는 중량비로 OPC:FA:SF = 70:20:10%의 비율로 혼합하여 3성분계로 적용하였다. 적용한 배합표는 Table 1



Fig. 2 3D Printing house in test-bed (KICT)

Table 1 Mix proportion

Mix	W/B		Unit weight (kg/m ³)				
	(%)	Water	OPC	FA	SF	Sand	Admixture
OPC	28	215	763	-	-	1055	15.27
Printing			533	153	77		

에 표현하였다.

2.3 사용장비

적층에 사용한 장비는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 길이 14 m, 폭 12 m, 높이 4 m의 대형 겐트리 장비를 이용해서 시험체를 제작하였다. 출력에 사용한 장비는 Mono-pump 형식의 출력력 7.5 kW 압출장치를 이용하였으며, 재료이송용 이송관은 고무재질의 호스를 20 m 연결하여 사용하였다. 압출용 노즐은 스테인레스 재질의 내경 25 mm 원형관을 사용하였다.



Fig. 3 3D Printer in test-bed(KICT) and Nozzle (right)

2.4 수축측정용 시험체 제작방법

압축강도와 수축변형을 실험은 2회차로 나누어 진행하였다. 1회차 실험(series A)에서는 개발된 배합이 동일한 조건에서 결합제로 OPC와 3성분계 결합제를 사용할 경우 수축량 변화를 분석하였다. 수축량 비교를 위해서 OPC 배합 1개 시험

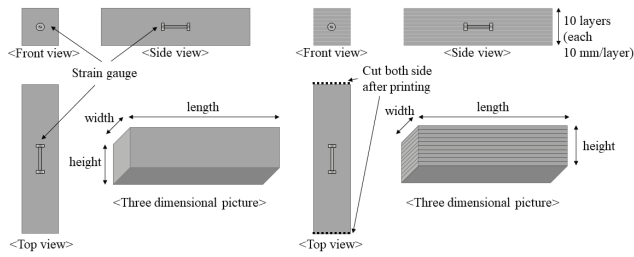


Fig. 4 Specimens for shrinkage measurement (mold casted specimen - left, printed specimen - right)(Lee et al., 2019a)

체, Printing배합 1개 시험체를 제작하여 20일간 수축량을 평가했다. 수축변형률 측정을 위해 강성이 있는 강제 몰드(100×100×400 mm)를 사용하였으며, 매립게이지를 시험체 중앙에 Fig. 4와 같이 설치하였다.

또한, 몰드의 바닥과 양단에는 1mm 두께의 테프론시트(Teflon sheet)를 폭방향과 길이방향 2중으로 위치시켰으며, 몰드와 테프론시트 사이에는 윤활유를 도포하여 시험체의 수축을 구속하지 않도록 제작하였다. 타설 후 시료표면에서의 수분증발 및 흡수를 막기 위해 폴리에스테르필름(Polyester film)을 표면을 덮어 외기의 접촉을 방지하였다. 출력 이후의 환경과 유사한 조건을 갖도록 타설 24시간 후 몰드를 탈형하고 표면의 필름을 모두 제거하여 시험체의 모든 면을 최대한 노출시켰다.

2회차 실험(series B)에서는 프린팅 배합만을 이용하여 세 가지 조건(배합 직후, 압출직후, 적층 후)의 시험체를 제작하여 수축을 분석하였다. 배합직후, 압출직후 조건에서의 시험체는 게이지의 매립 및 시험체의 이동을 위해서 Fig. 4의 그림과 같이 시험체 제작하였으며, 타설 1시간 후 몰드 및 필름을 제거하여 출력물과 동일한 환경을 조성할 수 있도록 하였다.

적층시험체의 수축율을 평가하고 몰드로 제작한 시험체와 결과를 비교하기 위해서 출력물의 폭을 100 mm로 출력하였으며, 1 layer당 10 mm의 높이로 10 layer를 출력하여 몰드시험체와 동일한 높이인 100 mm로 출력하였다. 출력물은 몰드 시험체의 탈형시기인 출력 1시간 후, 길이 400 mm 간격으로 시험체를 절단하여 모든 시험체의 조건을 최대한 동일하게 설정하였다. 적층시험체 내 수축변형률 측정을 위해 몰드시험체에 적용한 게이지와 동일한 변형률 측정게이지를 매립하였으며, 매립위치는 Fig.5와 같이 높이방향에서의 중앙점인 5번째 layer와 6번째 layer 중앙에 매립하였다.

수축변형률 측정결과의 신뢰성을 확보하기 위해 몰드시험체와 적층시험체를 조건별 각 2개를 제작하여 결과를 도출하였다. 수축변형률 결과는 측정시작일을 원점으로 2개 시험체의 평균값을 이용하여 그래프로 표현하였다

몰드로 제작한 시험체와 출력방법으로 제작한 시험체는 모두



Fig. 5 Printing specimen preparation process

타설 1시간 후 온도 20 ± 2 °C, 상대습도(RH: Related Humidity) 60RH%의 항온항습실로 이동하여 양생하였다. 몰드에 제작한 시험체와 적층공법을 적용하여 적층한 시험체의 수축변형률을 매립형 스트레인게이지와 데이터로거로 측정하였으며 결과를 상호비교하였다.

본 연구는 압출 전/후 몰드제작 시험체와 출력시험체의 수축특성을 상호 비교하기 위한 목적으로 실험을 21일(series A), 35일(series B) 진행하였다. 기존 출력 시험체의 수축연구 결과(Lee et al 2019) 출력시험체의 수축특성은 초기 14일 이전에 총 수축량의 80% 이상이 발현했으며, 14일에서 28일까지의 수축 증가 경향이 28일 이후에도 대체적으로 유지되어 단기실험으로도 상호비교가 가능할 것으로 판단하였다.

2.5 압축강도

수축변형률 측정용 시험체를 제작 시 압출 전/후 시험체의 압축강도 측정을 위해 ASTM C 39 - 20에 따라 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체를 함께 제작하여, 수축시험체와 동일한 조건의 항온항습실에서 양생하였다. 압축강도 측정은 배합당 4회(재령 1, 3, 7, 28일) 측정하였으며, 재령당 3개의 시험체를 측정하여 그 평균값을 사용하였다. 압축강도 측정을 위한 하중 재하속도는 0.3 MPa/sec를 적용하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 배합별 수축 및 강도 비교 (series A)

결합재로 OPC를 100% 사용한 배합과 3D 프린팅용 배합을 사용하여 강도를 평가한 결과는 Fig.6에 나타났다. OPC 배합의 경우 압축강도가 34.1, 50.3, 55.0, 68.8 MPa로 7일차까지 28일 압축강도의 약 80%가 발현했으며, Printing 배합의 경우 7일차 까지 압축강도는 유사하게 발현했으나 28일차 강도가 74.2 MPa로 증가하여, 7일차 강도는 28일차 강도의 약 74%가 발현됐다. OPC 배합 1일차 실험결과를 제외하고 재령별 강도 결과의 오차는 상당히 작게 나타나서 결과의 신뢰도가 높은 것으로 나타났다.

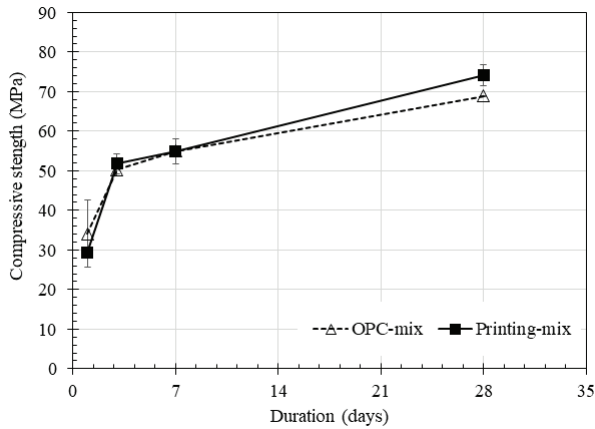


Fig. 6 Compressive strength(OPC mix, Printing mix)

결합재로 OPC를 100% 사용한 배합과 3D 프린팅용 배합을 사용하여 수축특성을 21일간 평가한 결과는 Fig. 7에 표현했다. 두 배합 모두 타설 후 재령 6시간에서 12시간 사이 10 - 30 $\mu\text{m}/\text{m}$ 범위의 미소한 팽창이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 경향은 출력용 배합의 몰드 타설 시험체와 적층시험체에서도 모두 동일한 경향을 확인할 수 있었다.

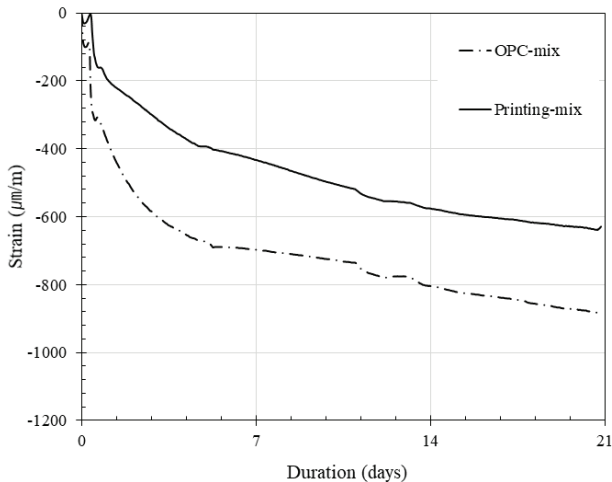


Fig. 7 Shrinkage results(OPC mix, Printing mix)

타설 후 재령 7일 이후의 수축을 증가 경향은 두 배합이 유사하게 나타나지만 양생 초기 OPC 배합의 수축이 크게 발생함에 따라 재령 3일차에 최대 288 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이상 차이가 발생했다. 하지만 재령 3일 이후 차이는 서서히 감소되어 재령 21일까지 차이는 220 - 230 $\mu\text{m}/\text{m}$ 범위에서 두 배합이 유사하게 증가하는 경향을 나타냄을 확인하였다. 결과적으로 OPC 배합과 비교하여 Printing 배합이 초기 수축을 상대적으로 저감하는 것으로 나타났다.

3.2 압출 전/후 강도 (series B)

압출과정에서의 재료물성 변화가 압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 압출 전/후 두 종류의 시험체를 각각 재령 1, 3, 7, 28일에 강도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 8에 그래프로 비교하여 표현하였다.

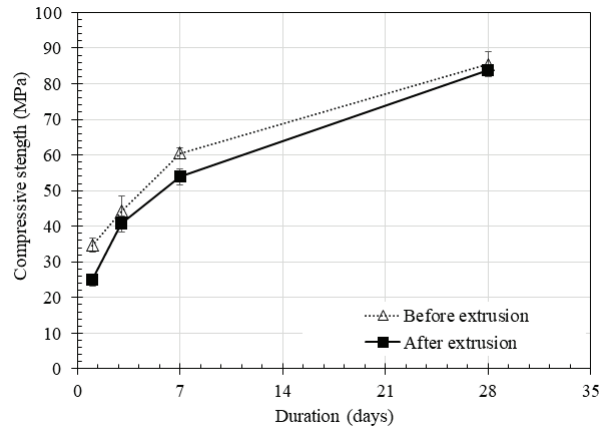


Fig. 8 Compressive strength(before and after extrusion)

압출 전 시험체는 배합 후 펌프에 들어가기 전 재료를 원주형 몰드에 제작하였으며, 압출 후 시험체는 적층 직전 노즐에서 압출되는 재료를 원주형 몰드에 제작한 시험체이다. 1, 3, 7, 28일 재령별 강도는 압출전 시험체의 경우, 평균적으로 34.6, 44.1, 60.5, 85.4 MPa가 발현되었다. 압출 전 시험체의 압축강도는 앞서 1회차 실험 시 동일한 배합인 Printing 배합을 이용하여 실험한 결과와 비교했을 때 7일차까지는 대체적으로 유사하였으나, 28일차 압축강도가 15 MPa 이상 차이가 발생하였다. 이는 다양한 원인이 있으나 배합 환경 및 조건의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 압출 후 시험체의 압축강도는 평균적으로 24.8, 40.7, 53.9, 83.6 MPa가 발현되어 1일차에 10 MPa 가량 차이났던 강도가 28일차에 1.8 MPa 차이로 줄어들 정도로 강도가 발현된 것을 확인할 수 있었다.

3.3 압출 전/후, 적층 후 수축결과 (series B)

출력과정 중 압출 전/후 재료를 이용하여 제작한 몰드 시험체와 적층제작한 시험체를 이용하여 측정한 수축결과를 Fig. 9에 표현하였다. 제작 조건 별 2개씩 제작한 시험체의 결과를 모두 정리하였는데, 각 조건별로 제작한 2개의 시험체는 재령에 따라 서로 유사한 거동을 보이는 것을 확인하였다.

실험결과는 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 압출 전과 후, 적층 후의 순서로 수축율이 점차적으로 증가하는데 전반적으로 각 단계별 120-130 $\mu\text{m}/\text{m}$ 범위의 차이를 유지하며 유사하게 수축이 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 9의 결과는 Fig. 10에 각

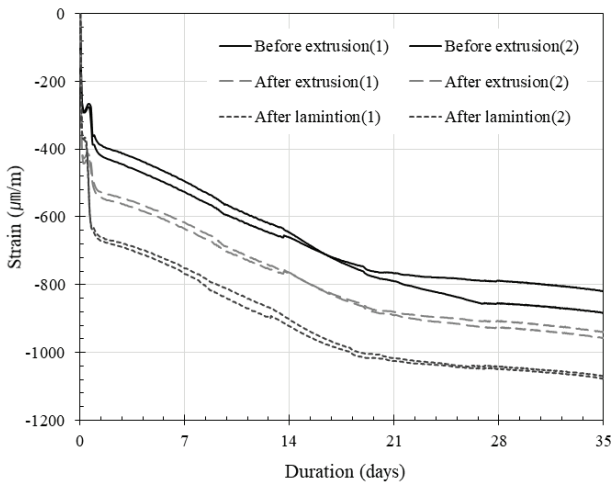


Fig. 9 Shrinkage results in printing process

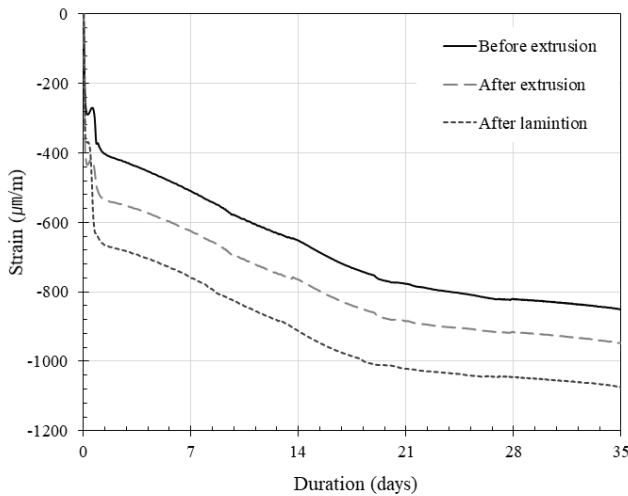


Fig. 10 Shrinkage results in printing process (mean value)

조건별 평균값으로 나타난 그래프에서 더욱 확연하게 구분할 수 있다.

Figure 10에서 볼 수 있듯이 동일한 재료를 이용하여 각 공정별로 재료를 추출하여 제작한 시험체이기 때문에 동일한 거동을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 재령 1일 이후의 거동만을 검토할 경우, 편차가 매우 작게 발생할 정도로 거동이 유사함을 알 수 있다. 결과적으로 공정 중 재료의 변동에 의해 수축에 영향을 미치는 경우는 1일 이내에 발생하는 초기 수축에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 10에 표현된 수축결과의 주요 재령별 결과는 Table 2에 별도로 정리하였다. 재령별 수축결과 뿐 아니라 결과의 해석을 위해 재령별로 상대적인 수축 증가율을 함께 표현하였다. 앞서 결과를 설명한 바와 같이 초기재령에서 배합간의 수축 결과에 가장 큰 차이가 발생하였으며, 이는 재령이 증가

Table 2 Shrinkage result and increasing rate

Days	Total shrinkage ($\mu\text{m}/\text{m}$)			Increasing rate of shrinkage		
	Before extrusion (A)	After extrusion (B)	After lamination (C)	B/A	C/A	C/B
1	-384	-521	-651	1.36	1.70	1.25
7	-513	-628	-760	1.22	1.48	1.21
14	-653	-766	-912	1.17	1.40	1.19
28	-821	-916	-1046	1.12	1.27	1.14

할수록 점차적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 초기 재령에서는 배합 직후 재료와 비교(C/A)하여 적층된 재료의 수축이 약 1.7배 정도 높게 나타난 것과 비교하면 상당히 높은 수치이지만 재령 28일차의 결과에서는 약 1.27배 높게 나타나 수축증가율의 차가 줄어들고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 3D 프린팅을 이용하여 시공한 건축물에 적용된 배합을 이용하여 출력공정이 재료의 수축특성과 강도에 미치는 영향을 실험적으로 평가하고자 하였다. 또한 기존 OPC만을 결합재로 활용한 배합을 이용하여 기존 배합들의 강도와 수축특성에 대한 상대적인 비교가 가능하도록 하는데 그 목적이 있으며, 본 연구결과를 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

- 1) OPC 배합을 기준배합으로 설정하여 압축강도와 수축특성을 프린팅 배합과 비교한 결과, 압축강도는 7일차까지 두 배합이 유사하게 나타났으나, 재령 28일에는 프린팅 배합이 74.2 MPa로 OPC 배합보다 5.4 MPa 높게 나타나 동일한 조건에서 프린팅 배합이 강도가 높게 나타났다. 또한 수축은 21일간 측정된 결과 프린팅 배합이 초기재령(재령 1일)에 최대 252 $\mu\text{m}/\text{m}$ 낮게 나타나 초기수축에서 유리한 것으로 나타났다.
- 2) 동일한 재료를 이용하여 압출 전/후 압축강도를 평가한 결과, 압출 이후 재령 7일차까지 압축강도는 압출전의 재료보다 압축강도가 약 6.5 MPa 낮게 나타났으나, 재령 28일차에는 유사한 강도가 나타남을 확인하였다.
- 3) 압출 전/후와 적층이후 수축을 평가한 결과, 압출 전 재료의 수축을 기준으로 압출 후 재료가 120-130 $\mu\text{m}/\text{m}$ 수준으로 수축이 더 발생하는 것으로 나타났으며, 적층이후 재료는 220-260 $\mu\text{m}/\text{m}$ 수준으로 수축이 더 발생하는 것으로

나타났다. 비율로는 압출 전 재료 대비 약 20~70% 수축이 더 발생하는 것으로 나타났다.

- 4) 기존 연구의 경우(Lee et al., 2019a), 몰드시험체와 적층 시험체의 수축을 측정했을 때 적층시험체가 수축이 더 적게 나타나는 것으로 나타났던 것과 비교하면, 배치되는 결과로 보여진다. 그러나 이는 기존연구와 비교하여 최대한 몰드탈형 시기를 앞당기고(타설 후 1시간), 적층 시험체의 수축을 적층 직후부터 몰드시험체와 동일한 시점에서 측정을 시작하였기에 실험조건의 변화에 의한 결과로 풀이된다.

본 연구결과 압출과정에서 장비의 출력 조건이 재료의 물성에 영향을 주는 것으로 풀이된다. 후속 연구에서는 출력과정 중 장비의 온도와 압력이 변화하는 양상, 압출 전/후 및 적층 이후 재료의 수분량 변화와 및 미세조직 변화의 양상을 평가하여 수축과의 상관성 분석이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업 연구비지원(20AU DP-B121595-05)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Buswell R. et al. (2020) Inspection Methods for 3D Concrete Printing. In: Bos F., Lucas S., Wolfs R., Salet T. (eds) Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. DC 2020. RILEM Bookseries, vol 28. Springer, Cham.
2. Kwon, S. H., & Kim, J. K. (2016). Understanding of Drying Shrinkage and Autogeneous Shrinkage in Concrete. Magazine of

- the Korea Concrete Institute, 28(6), 22-26.
3. KCS 14 20 12 (2018) 콘크리트 표준시방서, 콘크리트 공사, 거푸집 및 동바리
4. Jo, J., Jo, B., Cho, W., & Kim, J.-H. (2020). Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. International Journal of Concrete Structures and Materials. 14. 13. 10.1186/s40069-019-0388-2.
5. Moelich, G. M., Kruger, J., & Combrinck, R. (2020). Plastic shrinkage cracking in 3D printed concrete. Composites Part B: Engineering, 200, 108313.
6. Federowicz, K., Kaszyńska, M., Zieliński, A., & Hoffmann, M. (2020). Effect of Curing Methods on Shrinkage Development in 3D-Printed Concrete. Materials, 13(11), 2590.
7. Lee, H., Kim, K.-H., Yoo, B.-H., Kim, W.-W., & Moon, J.-H. (2019a). Shrinkage Characteristic of Cementitious Composite Materials for Additive Manufacturing, Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 23(6), 99-104.
8. Lee, D. G., Yoo, B. H., & Son, H. J. (2019). Development of Shrinkage Reducing Agent for 3D Printing Concrete. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 20(12), 37-43.
9. Mastali, M., Kinnunen, P., Dalvand, A., Firouz, R. M., & Illikainen, M. (2018). Drying shrinkage in alkali-activated binders—a critical review. Construction and Building Materials, 190, 533-550.
10. Medjigbodo, G., Rozière, E., Charrier, K., Izoret, L., & Loukili, A. (2018). Hydration, shrinkage, and durability of ternary binders containing Portland cement, limestone filler and metakaolin. Construction and Building Materials, 183, 114-126.
11. Feng, P., Meng, X., Chen, J. F., & Ye, L. (2015). Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. Construction and Building Materials, 93, 486-497.
12. Lee, H., Kim, J. H. J., Moon, J. H., Kim, W. W., & Seo, E. A. (2019b). Evaluation of the Mechanical Properties of a 3D-Printed Mortar. Materials, 12(24), 4104.
13. ASTM C 39. (2020) Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

Received : 10/25/2020

Revised : 10/29/2020

Accepted : 11/05/2020

요 지 : 본 연구의 목적은 적층 시공을 위해 개발한 시멘트계 복합재료 배합의 수축특성을 평가하며, 출력과정 중 압출 전/후, 적층 후의 수축을 평가하는데 있다. OPC배합과 프린팅 배합의 재령별 압축강도를 평가한 결과 재령 7일까지 유사한 경향을 보였으나, OPC 배합의 경우 프린팅 배합과 비교하여 최대 252 $\mu\text{m}/\text{m}$ 수축이 더 크게 나타났다. 출력과정 중 압출 후 재료의 압축강도는 압출 전 재료보다 재령 7일차까지 약 6.5 MPa 낮았으나, 재령 28일에는 동등 수준의 강도가 발현되었다. 수축특성은 적층 이후 재료의 수축 측정 결과 압출 전 재료와 비교하여 220-260 $\mu\text{m}/\text{m}$ 범위로 수축이 더 크게 나타났다.

핵심용어: 3D 프린팅, 적층공법, 압축강도, 수축, 출력과정
