Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 23, No. 6, November 2019, pp.99-104
https://doi.org/10.11112/jksmi.2019.23.6.99
pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

적층공법을 적용한 시멘트계 복합재료의 수축특성

이호재[1*], 김기훈[2], 유병현[3], 김원우[4], 문재흠[5]

Shrinkage Characteristic of Cementitious Composite Materials for Additive Manufacturing

Hojae Lee[1*], Ki-Hoon Kim[2], Byeong-Hyun Yoo[3], Won-Woo Kim[4], Jae-Heum Moon[5]

Abstract: In the present study is focused on the evaluation of the shrinkage characteristics of mix proportion using viscosity agent for printing. Also, another purpose is to compare the shrinkage properties of the mold cast specimen with the additive manufactured specimen using 3D printing techniques. Viscosity agent makes the shrinkage was reduced by an average of 25% (as of 56 days) compared to the reference mix. The effects of reduced shrinkage were also founded, with a reduction of about 15% (as of 28 days).As a result of evaluating the shrinkage using the additive manufactured specimen and the mold cast specimen prepared by the printing mix, the shrinkage of the additive manufactured specimen was reduced by about 25% (based on 28 days). Based on the results of this study, it is possible to predict the shrinkage rate and the occurrence of cracks due to shrinkage on the printing of cement-based composite materials using 3D printing.

Keywords: 3D printing, Additive manufacturing, Compressive strength, Shrinkage, Viscosity agent

1. 서 론

2000년대 초반 USC의 Contour craft 팀(B. Khoshnevis, 2004)으로부터 시작된 건설용 3D 프린팅 연구는 2010년대 전 세계적으로 확산되어, 대표적으로 Loughborough 대학(T.T. Le et al. 2012), Surrey 대학(A.Alwi et al. 2013) 및 TU Eindhoven (R.J.M.R. Wolfs. 2015)에서 건설용 3D 프린팅 연구를 수행하여 독창적인 건축물을 건설하였다.

새로운 형태의 건설방식으로 구조적 성능 확보를 위해 역학적 성능을 비롯한 성능 평가 방법에 대한 다양한 연구가 활발히 이뤄지고 있다. Feng et al.은 binder jetting 방식을 3D 프린터를 이용하여 콘크리트의 압축강도 및 휨 강도에 대한 평가를 수행하였다(P.Feng et al., 2015). Shakor et al. 또한 binder jetting 방식으로 콘크리트를 제작하였으며 압축강도를 비롯한 역학적 특성에 대한 영향을 연구하였다(Shakor et al., 2017).

현재 건설용 3D 프린팅 기술의 주류는 적층공법으로 불리우는 AM(Additive manufactruing)방식으로, 건설용 소재를 layer 단위로 적층해 나가는 방식을 취하고 있다. 3D 프린팅 적층공법의 경우, 거푸집이 필요없이 원하는 형상을 출력하여 제작할 수 있다는 큰 장점이 있다. 그러나 출력된 시멘트계 복합재료의 관점에서의 적층공법은 특별한 양생기법 없이 타설 직후부터 외기에 직접적으로 노출되어 수축에 매우 취약한 형태의 공법이다.

콘크리트의 수축은 구조물의 치수안정성에 영향을 미치며 수축으로 인한 균열은 구조물의 성능 및 수명에 악영향을 준다. 수축을 저감시키기 위한 방식 중 하나로 배합의 구성재료를 변화시켜 수화특성을 개선하고자 결합재를 활성화 시킨 시멘트계 소재로 치환하여 강도는 유지하면서 수축을 개선하는 방식에 대한 연구가 수행되고 있다(M.Mastali et al, 2018). 또한 재료적 관점에서 carbon fiber를 적용하는 방식(Y. Wang et al., 2019), filler를 이용해 내부 공간을 채우는 방식(G. Medjgbodo et al., 2018)에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

그러나 아직 적층공법을 적용한 시멘트계 복합재료의 수축특성에 대한 연구는 진행된 바가 없어 본 연구에서는 적층공법을 위해 개발한 배합을 활용하여 수축특성에 대한 평가를 수행하였다.

[1] 정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터, 전임연구원
[2] 정회원, 아세아시멘트 지원기획본부 연구개발팀, 선임연구원/과장
[3] 정회원, 동남기업 중앙연구소, 선임연구원/과장
[4] 정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부, 전임연구원
[5] 정회원, 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 2019년12월 1일까지 학회로 보내주시면 2020년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2019 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 사용재료

실험을 위한 주요 사용재료는 결합재 3종과 골재 1종이며, 결합재로 사용한 1종 보통포트랜드시멘트(OPC: ordinary Portland cement), 플라이애시 2종(FA: fly ash), 실리카흄(SF: silica fume)과 잔골재로 사용한 국내산 규사에 대해 KS 기준에 따라 원재료 분석을 실시하였다. 혼화제로는 폴리카르복실계 고성능감수제(HWRA: high water reduction agent)를 사용했으며, 적층성능 확보를 위해 셀룰로오스계 증점제(Viscosity agent)를 사용했다.

2.2 적용배합

28일 설계기준강도를 60 MPa로 설정하여 배합을 설계하였다. 설계기준강도를 만족하기 위해 기준배합의 W/B(water-binder ratio)를 28%로 설정 후, 3D프린터 적층공법용 배합 개발을 위해 분당 4리터 수준의 압출성능과 60 layer이상의 적층성능(cycle time 20 sec, layer thickness 10mm 기준)을 만족하도록 지속적인 반복실험을 수행하였다. Fig. 1은 배합 설정을 위한 60 layer 연속적층 실험을 수행하는 모습이다.

적층공법용 배합을 위해 결합재는 OPC, FA, SF 세 종류를 적용하였으며, 결합재는 중량비로 OPC:FA:SF = 70:20:10%의 비율로 혼합하여 3성분계로 적용하였다. 적용한 배합표는 Table 1에 표현하였으며, 적층성능을 위해 셀룰로오스계 증점제를 결합재 중량대비 0.2% 적용하였다.

배합은 동일한 배합을 증점제 유무에 따라서 배합을 2종류로 구분하여 시험체를 제작하였다. 증점제가 들어가지 않은 배합을 기준배합(reference mix)로 설정하였으며, 증점제가 들어간 배합을 적층용 출력배합(printing mix)로 설정하였다. 기준배합은 출력배합용으로 적용한 증점제가 수축변형률에 미치는 영향을 분석하기 위해 이용하였다.

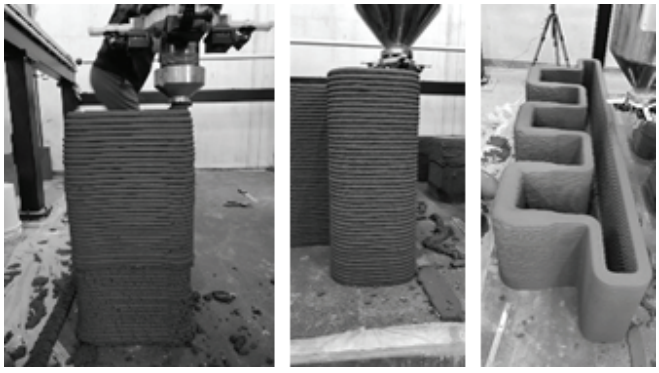

Fig. 1 Extrudability and buildability test

2.3 시험체 제작방법

수축변형률 실험은 2단계로 나누어 진행하였다. 1단계 실험에서는 적층성능을 위해 적용한 증점제가 수축에 미치는 영향을 평가하기 위해 증점제 적용 전/후 압축강도와 수축변형률을 평가하였다. 2단계 평가는 휨몰드로 제작한 시험체와 3D 프린팅 적층공법으로 제작한 시험체의 수축변형률을 비교평가하였다.

2.3.1 증점제의 수축변형률 영향 분석

적층성능 확보를 위해 적용한 증점제가 수축량에 미치는 영향을 평가하기 위해 증점제 적용 여부에 따른 수축변형률을 분석하였다. 수축변형률 분석을 위해 2개 배합을 적용하였다. Table 1에 나타낸 배합에 증점제가 혼입되지 않은 기준배합과 증점제를 적용한 출력배합을 적용하였다.

수축변형률은 외기 노출 영향을 평가하기 위해 총 수축(Total shrinkage) 측정방식, 건조수축의 영향을 배제하기 위한 밀봉수축방식의 두 가지 방식으로 56일간 측정하였다. 3D 프린팅용 시멘트 복합재료의 경우, 배합직후부터 외기에 노출되어 수축현상(자기수축, 수화수축, 소성수축, 건조수축 등)으로 알려진 모든 수축의 영향을 받는다. 3D 프린팅 적층공법 적용에 따른 수축 영향을 검토하기 위해 배합직후부터 표면을 외기에 노출시켜 모든 수축을 측정할 수 있도록 총수축 측정방식을 적용했다. 밀봉수축측정방식은 외기의 영향만을 배제할 수 있도록 총수축 방식과 동일하게 제작한 시험체를 모두 밀봉하여 타설 직후부터 수축변형률을 측정하였다.

수축변형률 측정을 위해 강성이 있는 강재 몰드(100×100×400 mm)를 사용하였으며, 길이측정을 위한 스트레인게이지(Strain gauge)를 시험체 중앙에 Fig. 2와 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.

Table 1 Mix proportion

Mix	W/B	Binder content ratio (%)			Unit weight (kg/m^3)						Note
	(%)	OPC	FA	SF	Water	OPC	FA	SF	Sand	HWRA	Viscosity agent
Reference	28	70	20	10	232	580	166	83	1146	8.29	-
Printing	28	70	20	10	232	580	166	83	1146	8.29	0.2% of binder weight

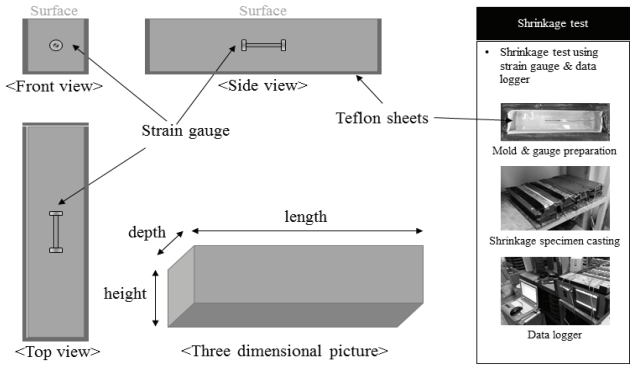

Fig. 2 Total shrinkage measurement method

밀봉수축측정방식은 시멘트계 복합재료를 타설 후 시료표면에서의 수분증발 및 흡수를 막기 위해 폴리에스테르필름(Polyester film)을 표면을 덮어 외기의 접촉을 방지하였다. 이에 반해 총수축 측정방식은 표면을 노출시켜 외기에 접촉할 수 있도록 제작하였다.

수축변형률 측정결과의 신뢰성을 확보하기 위해 실험조건별 배합당 2개, 총 8개의 시험체를 제작하여 결과를 도출하였다. 실험조건별 수축변형률 결과는 측정시작일을 원점으로 2개 시험체의 평균값을 이용하여 그래프로 표현하였다

2.3.2 적층공법에 의한 수축변형률 분석

적층공법을 위해 증점제를 적용한 출력배합을 이용하여 몰드시험체와 적층시험체간의 수축변형률 양상을 28일간 분석하였다. 몰드에 제작한 시험체와 적층공법을 적용하여 적층한 시험체의 수축변형률을 매립형 스트레인게이지와 데이터로거로 측정하였으며 결과를 상호비교하였다. 3D프린터를 이용한 시험체 출력 시 출력장비 내의 측정장비 반입의 어려움, 출력 후 시험체의 이동을 위한 24시간 양생 필요성으로 인해 시험체 출력 24시간이 경과한 이후 출력물을 이동하여 수축변형률을 측정하였다.

수축변형률 측정을 위한 적층시험체 제작 시 시험체의 크기가 수축변형률에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해, Fig. 3과 같이 몰드시험체와 동일한 크기(100×100×400 mm)로 출력하여 적층한 시험체를 이용하여 수축변형률을 측정하였다. 적층시험체는 노즐크기(25 mm)의 제약으로 인해 1 layer당 최대 출력 폭을 50 mm로 설정하였으며, 시험체 폭 100 mm를 충족하기 위해 횡방향으로 2 layer를 붙여서 출력하였다. 1 layer당 출력높이는 10 mm로 시험체 높이 100 mm를 위해 총 10개 layer로 출력하였다.

적층시험체 내 수축변형률 측정을 위해 몰드시험체에 적용한 게이지와 동일한 변형률 측정게이지를 매립하였으며, 매립위치는 높이방향에서의 중앙점인 5번째 layer와 6번째 layer 중앙에 매립하였다. 축방향으로는 적층시험체당 2개의

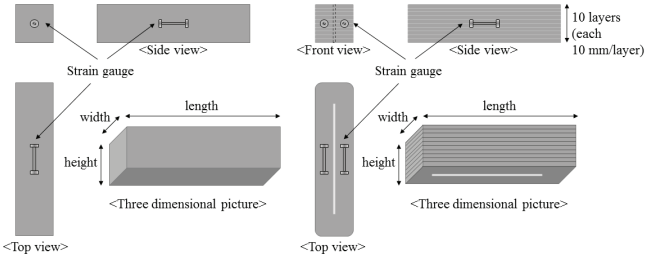

Fig. 3 Specimens for shrinkage measurement (mold casted specimen - left, additive manufactured specimen – right)

게이지를 이용하여 2개의 layer의 각 중앙에 위치시켰다.

수축변형률 측정결과의 신뢰성을 확보하기 위해 몰드시험체 2개, 적층시험체 3개를 제작하여 결과를 도출하였다. 각 적층시험체의 경우 2개의 게이지의 측정결과의 평균값을 사용하였으며, 수축변형률 결과는 측정시작일을 원점으로 2개 시험체의 평균값을 이용하여 그래프로 표현하였다

2.4 압축강도

수축변형률 측정용 시험체를 제작 시 압축강도 측정을 위해 ASTM C 109에 따라 cubic 시험체(50×50×50 mm)를 함께 제작하였다. 적층시험체가 출력 직후부터 외기에 노출되는 조건을 모사하여, 압축강도 측정용 시험체도 적층시험체와 동일한 조건에서 외기에 노출하여 양생하였다. 압축강도 측정은 배합당 3회(재령 7, 14, 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 결합재 및 골재 분석결과

3.1.1 OPC

KS L 5201에 따라 결합재를 분석한 결과, 비중 3.13 g/cm^3, 비표면적은 3,542 cm^2/g, 수경성 시멘트의 압축강도는 재령에 따라 3일차 23.3 MPa, 7일차 36.6 MPa, 28일강도가 48.5 MPa로 나타났다. 응결시간의 경우, 초결은 263분, 종결은 360분으로 평가되었다.

3.1.2 Fly Ash

KS L 5405에 따라 플라이 애시를 분석하였으며, 비중 2.25 g/cm^3, 비표면적은 3,232 cm^2/g으로 나타났다. 강열감량은 2.9%, 활성도 지수는 28일차 81%, 91일차 99%에 해당하는 것으로 나타났다.

3.1.3 Silica Fume

실리카흄은 KS F 2567에 따라 분석한 결과, SiO_2 함량이 91.3% , 비표면적은 19.3 cm^2/g으로 나타났으며, 45-μm (No. 325)체에 남는 양은 4.4%으로 나타났다.

3.1.4 잔골재

잔골재는 KS F 2504에 따라서 흡수율을 평가한 결과 1.20% 수준이며, 크기가 0.16~0.20 mm, 표건밀도 2.59 g/cm^3로 분석되었다. KS F 2511에 따라 0.08 mm 체 통과량을 평가한 결과, 통과량은 0.7%로 1.0% 보다 낮게 나타나 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

3.2 압축강도

압축강도는 총 3개 종류의 시험체를 제작하여 각각 재령 7, 14, 28일에 강도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 4에 그래프로 비교하여 표현하였다.

기준배합의 경우 7일 강도가 71.56 MPa, 28일 강도가 80.87 MPa로 설계기준강도인 60 MPa를 재령 7일차에 이미 넘어선 것으로 평가되었다. 기준배합에 증점제를 첨가한 출력배합의 경우, 기준배합과의 수축변형률 비교를 위해 수축평가용 시험체 제작 시 1회(1st trial), 몰드시험체와 적층시험체의 수축변형률 비교를 위한 시험체 제작 시 2회(2nd trial) 시험체를 제작하였으며, 그 압축강도를 비교하였다.

출력배합의 경우, 7일 강도는 1회 시험 시 보다 2회 시 시험 시 약 8 MPa 정도 더 높게 나타났으나 14일차 강도는 0.2 MPa 차이로 거의 동일하게 나타났다. 28일 강도는 1차 68.89 MPa, 2차 70.77 MPa로 차이가 2 MPa 이내로 발현되어 동등한 수준의 강도가 발현되는 것을 확인하였다. 기준배합과 출력배합의 압축강도는 설계기준강도인 60 MPa를 모두 만족하는 것을 확인하였다.

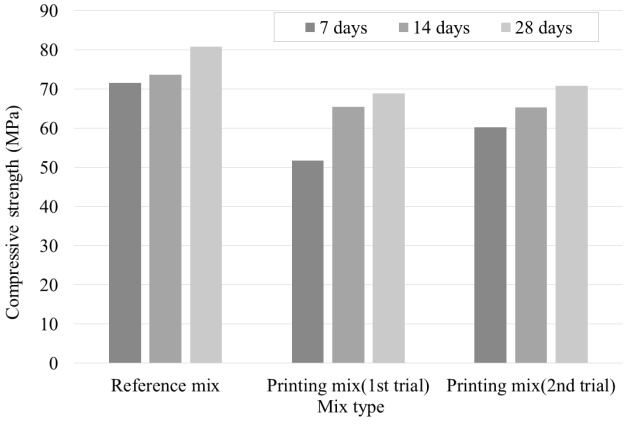

Fig. 4 Compressive strength

3.3 수축변형률

시험체의 수축변형률 측정은 타설 초기 5분 단위, 1일 이후 1시간 단위로 측정하였으며, 매 12시간 측정결과를 그래프로 표현하였다.

3.3.1 증점제의 수축변형률 영향 분석

증점제를 적용하지 않은 기준배합의 수축변형률 측정결과는 Fig. 5에 그래프로 표현하였다. 1일차 총 수축변형률은 -455×10^{-6} 이며, 밀봉한 시험체의 수축변형률은 -399×10^{-6} 로 나타났다. 반면, 증점제를 적용한 출력배합 시험체의 수축변형률 측정결과는 Fig. 6에 그래프로 나타냈다. 1일차 총 수축변형률은 -239×10^{-6} 이며, 밀봉한 시험체의 수축변형률은 -127×10^{-6} 로 나타났다.

Table 2에 분석한 결과를 통해 증점제를 적용한 출력배합의 경우 기준배합과 비교하여 양생 1일차 총 수축변형률은 약 51% 감소, 밀봉한 시험체의 수축변형률은 약 70% 감소되는 것으로 나타났다. 최종 56일 결과에서는 출력배합의 경우, 기준배합과 비교하여 22~27%까지 수축변형률이 감소되는 것으로 나타났다.

분석결과 기준배합의 총 수축변형률의 경우, 56일차 수축변형률과 비교하여 1일차 49%, 7일차 81%로 나타났다. 밀봉양생한 시험체의 수축변형률을 56일차 수축변형률과 비교할 경우, 1일차 58%, 7일차 93%로 대부분의 변형이 양생초기에 발생하는 것으로 나타났다.

출력배합의 경우 총수축변형률의 경우 56일차 수축변형률과 비교하여 1일차 31%, 7일차 64%로 나타났다. 밀봉양생한 시험체의 수축변형률을 56일차 수축변형률과 비교할 경우, 1일차 23%, 7일차 62%로 수축변형률 발생의 경향은 밀봉여부와 상관없이 유사하게 나타났으며, 결과적으로 증점제를 적

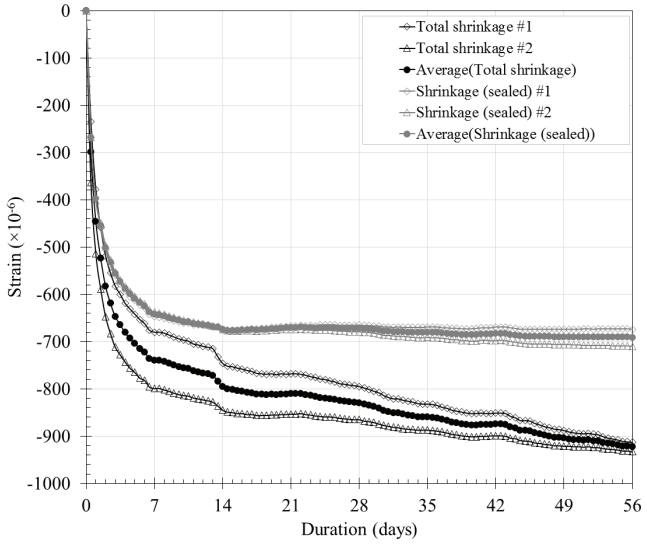

Fig. 5 Shrinkage result(reference mix)

Table 2 Shrinkage result and decreasing rate by viscosity agent

Days	Total shrinkage			Sealed shrinkage		
	Reference mix [$\times10^{-6}$]	Viscosity agent mix [$\times10^{-6}$]	Decreasing rate [%]	Reference mix [$\times10^{-6}$]	Viscosity agent mix [$\times10^{-6}$]	Decreasing rate [%]
1	-446	-218	51	-398.5	-118	70
7	-739.5	-456	38	-644	-312.5	51
14	-800.5	-573.5	28	-676.5	-407	40
28	-833	-644.5	23	-673	-458.5	32
56	-918.5	-713	22	-691	-502.5	27

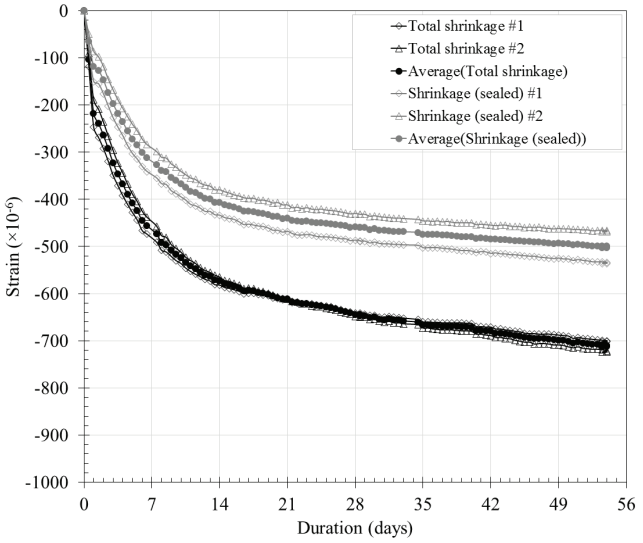

Fig. 6 Shrinkage result(viscosity agent mix)

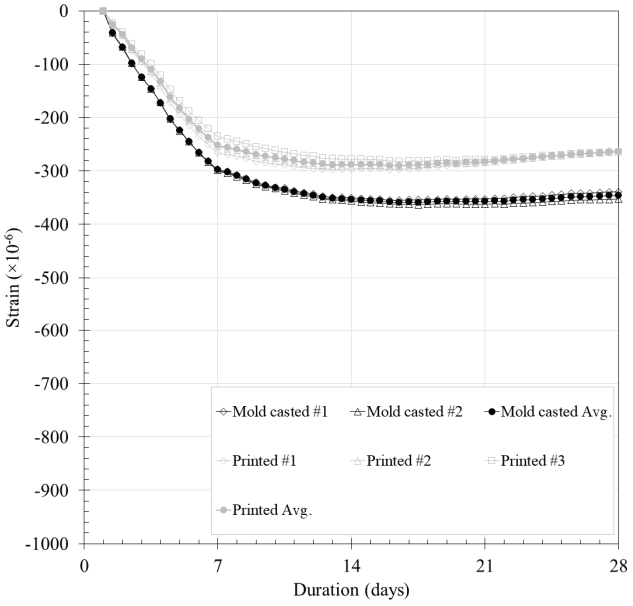

Fig. 7 Shrinkage result(mold casted and printed specimens)

용한 경우, 증점제를 사용하지 않은 기준배합과 비교하여 총 수축변형률도 적어지지만 수축 경향도 완만하게 발생되어 초기 수축으로 인한 충격도 감쇄시킬 수 있는 것으로 나타났다.

3.3.2 적층공법에 의한 수축변형률 분석

모든시험체에 동일한 출력배합을 이용하여 적층공법을 적용한 3개의 시험체와 몰드에 타설한 2개 시험체의 수축변형률 측정결과는 Fig. 7에 표현하였다. 제작한 시험체는 24시간 기중양생 이후에 시험체를 이동하여 측정하였으며, 이를 기존시험결과와의 시각적인 구분을 위해 1일부터 측정결과를 도시하였다. 적층시험체의 경우, 각 시험체당 2개의 게이지에서 측정된 결과를 평균값으로 산출하여 표기했다. 몰드시험체와 적층시험체 모두 각 시험체 종류별 측정결과간 차이가 최대 -30×10^{-6} 이내로 나타나 결과의 신뢰도가 높음을 확인하였다.

28일차 수축변형률 측정결과, 모든 시험체의 수축변형률은 -400×10^{-6} 으로 나타났으며, 이는 타설 직후부터 재령 1일차까지 수축변형률의 영향이 반영되지 못했기 때문으로 해석된다.

몰드시험체의 경우, 측정직후부터 지속적으로 수축이 발생되다가 재령 16일이 지나면서 더 이상의 수축은 발생되지 않고 유지되는 현상이 발생하였다. 적층시험체는 수축이 7일차까지 약 -30×10^{-6} /day 의 속도로 수축이 발생되지만 7일차 이후 수축변형률이 완만하게 감소하며 14일 이후 수축이 정체, 점차 감소하는 현상이 발생하였다.

적층시험체의 수축변형률이 몰드시험체와 비교하여 최대 -82.5×10^{-6} 적게 나타났다. 단순 수축변형률의 차이는 1차 실험결과에서 발생한 시험체간의 수축변형률보다 작게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 적층공법을 위해 개발한 배합의 수축특성을 기존 수축특성 측정방식을 이용하여 분석하고, 실제 적층공법을 적용 시 수축특성의 변화양상을 분석하고자 하였다. 본 연구에서 수행한 수축특성 연구 결과에 대해서 다음과 같이

정리하였다.

1) 기준배합의 경우, 외기에 노출시킨 시험체의 경우, 수축량은 밀봉양생한 시험체보다 약 50 micro strain이 높게 나타나며, 56일차 수축변형률의 약 50%가 발현된다. 그러나 밀봉양생의 경우, 수축변형률의 값은 작지만 7일차에 56일차 수축변형률의 93%가 발현되어 수분의 증발을 방지할 경우 대부분의 수축이 7일이내에 발현되는 것을 확인할 수 있었다.
2) 증점제를 결합재 대비 0.2% 혼입할 경우, 혼입하지 않은 기준배합과 비교하여 1일차 50-70%, 7일차 38-51%, 56일차 22-27% 저감시키는 것으로 확인되었다. 또한 7일차까지의 수축발현속도를 약 40% 저감시킨다. 초기수축발현속도 저감으로 인해 구조물의 양생 초기 수축으로 인한 충격발생을 저감 시킬 수 있을 것으로 사료된다.
3) 증점제를 적용 시 압축강도는 28일 기준 약 12 MPa (15%) 저하된다. 이는 증점제가 배합수와 반응하여 수화에 대한 부정적인 영향을 주며, 증점제와 결합한 수분의 부피가 미세구조에 영향을 주기 때문으로 사료된다.
4) 3D 프린팅 기법으로 출력한 적층시험체는 몰드시험체와 비교하여 수축변형률이 약 80 micro strain 저감된다. 이는 적층시험체의 출력과정에서 재료내부의 구조가 몰드시험체와 비교하여 밀도가 낮아져 수축기구가 충분하게 적용하지 못했기 때문이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업 연구비지원(17AUDP-B121595-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. A. Alwi, S. Karayiannis, B. Starkey, M. Gardner, K. Reodique, T. Varley (2013) Contrucktion, MegaScale 3D Printing, MegaScale 3D Printing, University of SURREY, p. 199.
2. B. Khoshnevis (2004) Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies, *Automation in Construction*, 13(1) 5-19.
3. Gildas Medjigbodo, Emmanuel Rozière, Kevin Charrier, Laurent Izoret, Ahmed Loukili, Hydration, shrinkage, and durability of ternary binders containing Portland cement, limestone filler and metakaolin, *Construction and Building Materials*, 183(20), 114-126.
4. M. Mastali, P. Kinnunen, A. Dalvand, R. Mohammadi Firouz, M. Illikainen (2018), Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review 1. *Construction and Building Materials*, 190(30), 533-550
5. P. Feng, X. Meng, J. -F. Chen, L. Ye, (2015) Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders, *Construction and Building Materials*, 93, 486-497.
6. P. Shakor, J. Sanjayan, A. Nazari, S. Nejadi (2017) Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing, *Construction and Building Materials*, 138 398-409.
7. R. J. M. R. Wolfs (2015) 3D PRINTING OF CONCRETE STRUCTURES, Department of the Built Environment, Eindhoven University of Technology, 70.
8. T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, A. G. F. Gibb, T. Thorpe (2012) Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Materials and Structures*, 45(8), 1221-1232.
9. Yan Wang, Shaohui Zhang, Guoxin Li, Xianming Shi (2019) Effects of alkali-treated recycled carbon fiber on the strength and free drying shrinkage of cementitious mortar, *Journal of Cleaner Production*, 228(10), 1187-1195.

Received : 09/23/2019
Revised : 09/30/2019
Accepted : 10/01/2019

요 지 : 본 연구의 목적은 시멘트계 복합재료의 적층을 위해 증점제를 적용하여 개발한 출력배합의 수축 특성을 평가하고, 프린팅 기법을 이용해 제작한 적층시험체와의 수축 특성을 비교하는 데 있다. 증점제 적용 시 수축이 기준배합과 비교하여 평균 25% 저감(56일 기준)되는 것을 확인하였다. 수축이 저감되는 긍정적인 효과에 반해 압축강도는 약 15% 감소(28일 기준)되는 부정적인 효과도 확인되었다. 출력배합을 이용해 제작한 적층시험체와 몰드시험체를 이용하여 수축을 평가한 결과, 적층시험체의 수축변형률이 약 25% 감소(28일 기준)되는 것을 확인하였다. 본 연구결과를 통해 3D 프린팅을 이용한 시멘트계 복합재료의 출력 시 수축의 진전속도와 수축으로 인한 균열의 발생시점을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 3D 프린팅, 적층공법, 압축강도, 수축, 증점제