

콘크리트 3D프린팅의 적층시간 간격에 따른 적층 성능

이윤정¹, 송진수², 최승호³, 김강수^{4*}

Buildability for Concrete 3D Printing According to Printing Time Gap

Lee, Yoon Jung¹, Song, Jin-Soo², Choi, Seung-Ho³, Kim, Kang Su^{4*}

Abstract: Buildability of fresh concrete, a key element of Concrete 3D printing, is the ability to build filaments at a desirable height without excessive deformation or collapse. Buildability is closely related to yield stress, and the higher the yield stress, the better. Also, the shear stress of fresh concrete increases as it hardens over the time after extruded, and consequently the buildability increases. Therefore, in concrete 3D printing, proper time gaps between printed layers (Printing Time Gap, PTG) are required to ensure the buildability of fresh concrete. As the PTG increases, the buildability increases; however, an excessive PTG reduces the bond performance between the printed layers, and the extrudability can be lowered as the printing time increases. In this research, therefore, 3D printing experiments were conducted with the variable of PTG to examine the buildability of 100 MPa-high strength concrete. In addition, a pseudo-layer loading method was applied to simulate the buildability test for 3D concrete printing and its applicability was examined.

Keywords: Concrete 3D Printing, Rheology, Buildability, Yield Stress, Printing Time Gap

1. 서론

1.1 연구 배경

일반적인 철근콘크리트 공사에서 거푸집 작업은 많은 소요 비용과 노동력, 공사기간의 지연 등을 초래하는 경우가 많다. 또한, 최근 수요가 증가하고 있는 비정형 건축물에서는 이러한 거푸집 작업을 한층 더 복잡하고 어렵게 하고 있다. 콘크리트 3D프린팅은 굳지 않은 상태의 콘크리트를 압출하고 적층하는 방식으로 시공이 가능하기 때문에 거푸집이 필요하지 않으며, 이에 따라 공사비 및 노동력을 절감하고 공사기간을 획기적으로 단축시킬 수 있다. 국외에서는 이러한 콘크리트 3D프린팅을 성공적으로 개발·적용한 사례가 다수 존재하며, 이미 상용화 단계에 접어들고 있다. 그러나, 국내의 경우, 국외에 비해 콘크리트 3D프린팅 기술의 개발 및 연구 정도가 상대적으로 미비한 수준이며, 이러한 기술 수준의 격차를 해소하기 위해서는 관련 기술 개발 및 연구가 절실히 필요한 실정이다.

1.2 기존 연구

1.2.1 레올로지 특성

Petit(2007)의 연구에 따르면 콘크리트 3D프린팅에서는 압출성과 적층성을 확보하는 것이 중요하다. 압출성은 굳지 않은 콘크리트를 끊어짐 없이 연속적으로 출력하는 성능이며, 적층성은 필라멘트를 변형 및 붕괴 없이 일정한 높이로 적층하는 성능이다. 이러한 압출성과 적층성은 굳지 않은 콘크리트의 레올로지 특성 중 점도 및 항복응력과 밀접한 관련이 있다. Lee et al.(2018)은 점도가 높고 항복응력이 낮을수록 압출성을 확보하는 데에 유리하지만 적층성은 항복응력이 높을수록 우수하므로, 높은 점도와 적절한 항복응력을 갖는 배합을 사용하는 것이 중요하다고 보고하였다. 또한, 굳지 않은 콘크리트는 시간이 경과함에 따라 경화되므로, 시간 경과에 따른 점도와 항복응력의 변화를 파악하는 것이 중요하다(Lee et al, 2017).

1.2.2 PTG의 영향

Panda et al.(2018)과 Perrot et al.(2016), Hong et al.(2018)의 연구에 따르면 레이어의 적층시간 간격(Printing Time Gap, 이하 PTG)이 짧으면 콘크리트 변형이 과도하게 발생되어 붕괴에 이를 수 있으며, 반대로 PTG가 지나치게 큰 경우에는 레이어 사이의 부착성능이 감소할 수 있다. Perrot et al.(2016)과 Hong et al.(2018)은 실제 콘크리트 3D프린팅 상황을 가정하여 PTG에 따른 모의 적층실험을 수행하였다. 즉, 이들의 모의 적층실험

¹정회원, 서울시립대학교, 건축공학과, 석사과정

²정회원, 서울시립대학교, 건축공학과, 학사

³정회원, 서울시립대학교, 건축학부, 박사

⁴정회원, 서울시립대학교, 건축학부, 교수, 교신저자

*Corresponding author : kangkim@uos.ac.kr

Department of Architecture, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2019년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

험에서는 콘크리트 3D프린팅으로 적층실험을 수행하지 않고, 몰드로 실험체를 제작하여 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM)로 압축력을 가하는 실험을 수행하였으며, 이때 가력하중의 크기는 콘크리트 레이어 상부 층의 무게를 고려하여 적용하였다. 실험결과, Fig. 1에 나타난 바와 같이 PTG가 증가할수록 수직 변위는 감소하고, 항복시점은 늦어지는 것으로 나타났다. 여기서 항복시점은 균열이 육안으로 관찰되거나 급격한 수직변위가 발생되었을 때로 판단하였다.

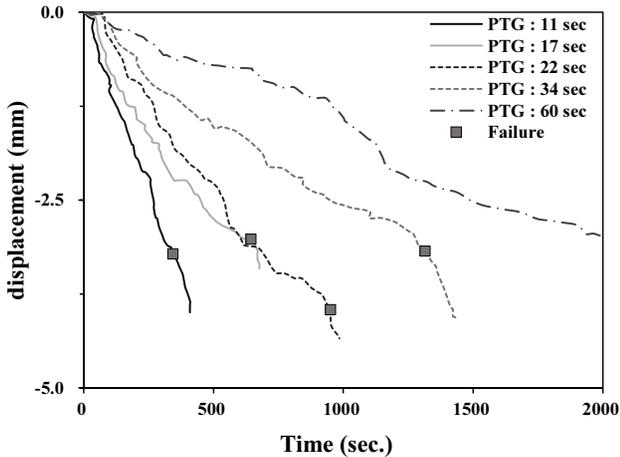


Fig. 1 Displacement results according to PTG(Perrot, 2016)

이 연구에서는 100 MPa급 고강도 콘크리트 배합에 적합한 적층성을 확보하기 위하여 PTG를 변수로 한 3D 프린팅 실험을 수행하였으며, 이와 더불어 콘크리트 3D 프린팅 방법을 유사하게 모사할 수 있는 모의 적층실험 방법의 유효성을 검토하기 위하여 모의 적층실험을 수행하였다.

2. 실험 계획

2.1 실험계획 및 변수

이 연구에서는 Table 1에 제시된 바와 같이 100 MPa급 고강도 콘크리트 배합에 적합한 적층성을 확보하기 위하여 PTG를 변수로 한 3D 프린팅 실험을 수행하였다. 배합재료는 시멘트(Cement, C), 물(Water, W), 고형분 30% 함량의 폴리카본산계 고성능감수제(Superplasticizer, SP), 응결지연제(Retarder, RT), 실리카 폼(Silica Fume, SF), 필러(Filler, F), 잔골재(Fine-Sand, FS)이며, 잔골재는 입자의 크기가 0.22~0.42인 6호사 및 0.07~0.22인 7호사를 사용하였다. 배합재료의 물성자료는 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Concrete mix design

W	C	SF	F	S(#6)	S(#7)	SP	RT
0.19	1.0	0.34	0.12	0.37	0.55	0.042	0.01

Table 2 Properties of Concrete mix design

C	SF	F	S(#6)	S(#7)
10 μm	0.5 μm	4.2 μm	0.22-0.42 mm	0.075-0.22 mm

Table 3에 나타난 바와 같이 실험변수는 가력방법(loading type)과 PTG이다. 가력방법은 실제 콘크리트 3D프린팅을 통한 적층 하중(P)과 모래를 통한 모의적층 하중가력(S)이며, PTG는 30초와 60초로 설정하였다.

Table 3 Variables of experiment

Specimen	Loading type	PTG (sec.)	Layering Velocity (R)
P-30s	printing layer (P)	30	1 m/h
P-60s	printing layer (P)	60	0.54 m/h
S-30s	sand loading (S)	30	1 m/h
S-60s	sand loading (S)	60	0.54 m/h

2.2 실험 방법

Fig. 2와 3은 콘크리트 3D 프린팅 실험과 모의 적층실험을 나타낸 것이다. 모든 실험체는 콘크리트 3D 프린팅을 이용하



Fig. 2 Concrete 3D printing

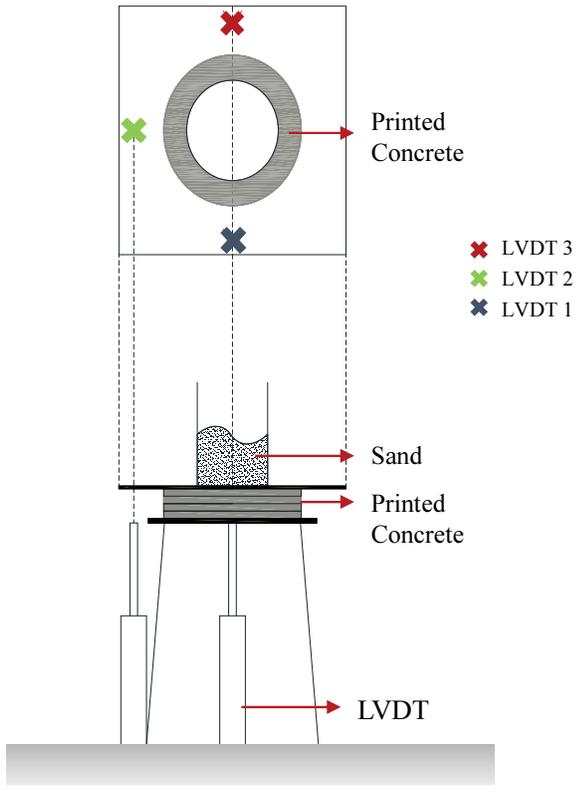


Fig. 3 Pseudo-Layer loading method using sand

여 각각의 PTG에 따라 4개층(4-layer) 까지 적층하였다. 이후 5층(5-layer) 부터 P-30s와 P-60s 실험체에서는 콘크리트 3D 프린팅을 이용하여 적층하였으며, S-30s와 S-60s 실험체에서는 모래를 이용하여 필라멘트 1개의 무게씩 PTG에 따라 가력하였다.

각 필라멘트의 목표 층 높이는 8 mm이며, 필라멘트를 프린팅 한 후 출력한 층 높이를 측정하여 목표 값과 실험 값을 비교하였다. 실험체의 항복은 적층 시 균열이 발생하거나 급격하게 수직변위가 증가하였을 때로 가정하였으며, 각 실험체의 항복한 시점(층수)과 변위를 비교하였다. 점도와 항복응력은 Brookfield Rheometer (DV3T)를 사용하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 레올로지 측정 결과

Fig. 4에 나타난 바와 같이 항복 응력은 시간이 지남에 따라 증가하는 경향을 보였다. 배합 후 115분 동안은 원활한 압출과 적층이 가능하였으며, 배합 후 약 115분이 경과하였을 때 항복응력이 급격하게 증가하였다. Fig. 5는 RPM을 변수로 하여 시간에 따른 점도의 측정결과를 나타낸 것이다. 점도도 전반적으로는 항복 응력과 유사하게 시간에 따라 증가하는 경

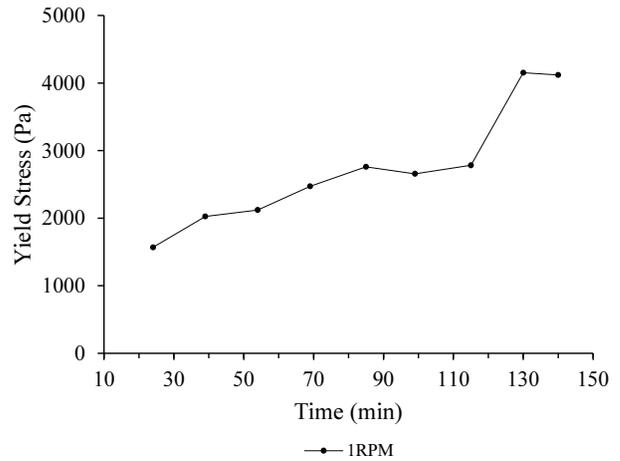


Fig. 4 Measurement results of yield stress with time

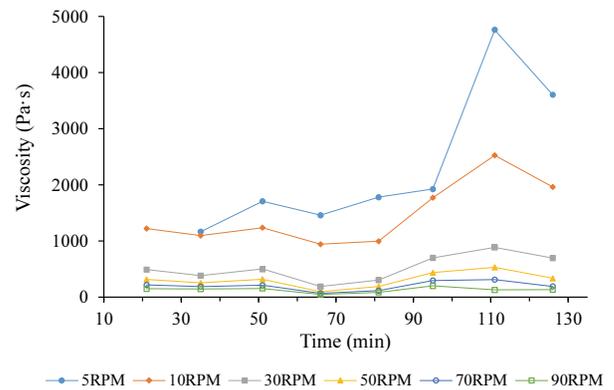


Fig. 5 Measurement result of viscosity with time

향을 나타내었다. 다만, 측정 속도가 10 RPM를 넘는 경우에는 측정값들의 차이가 크게 나타나지 않았으며 시간에 따른 점도의 증가 폭도 작게 나타난 반면에, 측정 속도 10 RPM 이하에서는 시간에 따른 증가폭과 측정값들의 차이가 뚜렷하게 나타났다.

3.2 실험 결과

Fig. 6은 실험체들의 적층 사진을 나타낸 것이며, Fig. 7은 레이어 증가에 따른 목표 높이와 실험체의 실제 높이를 나타낸 것이다. P-30s 실험체는 총 8층까지 적층하였으며, 적층 종료 시까지 균열은 발생하지 않았다. 다만, Fig. 7에 나타난 바와 같이 실험시 층 높이가 목표 층 높이에 도달하지 못하였으며, 이는 3층 적층 시점부터 레이어가 적절하게 경화되기 전에 다음 레이어가 적층되면서 Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이 상당한 변형이 발생하였기 때문이다. 즉, Fig. 9에 나타난 바와 같이 각 레이어의 목표 출력높이에 비해 3층 적층시 레이어 높이가 큰 차이를 보인 것을 알 수 있다.

P-60s 실험체에서는 Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 7층 적층

시점에 1층 레이어에서 최초의 균열이 발생하였으며, 이후 총 11층 까지 적층하였다. Fig. 7과 Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이 P-60s 실험체는 8층까지 층 높이가 비교적 일정하게 증가하였으며, 8층 적층 이후에는 하부층 레이어의 균열 및 변형으로 인하여 목표 층 높이와 실제 층 높이의 차이가 급격하게 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 6(c)에는 S-30s 실험체의 적층 사진을 나타내었다. S-30s 실험체는 콘크리트 3D 프린팅을 이용하여 4층까지 적층한 후, 모래를 이용하여 추가적으로 10층을 적층하여 총 14층까지 적층하였다. S-30s 실험체의 초기 균열 시점은 정확하게 파악되지 않았으나, Fig. 8(a)에 따르면 3층 적층 시점부터 목표 층 높이와 실제 층 높이의 차이가 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 6(d)에는 S-60s 실험체의 적층 사진을 나타내었다. S-60s 실험체는 콘크리트 3D 프린팅을 이용하여 4층까지 적층한 후, 모래를 이용하여 추가적으로 9층을 적층하여 총 13층까지 적

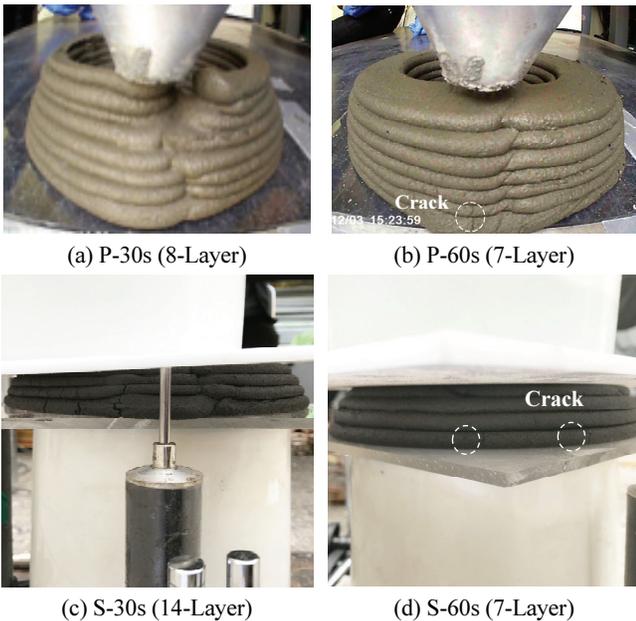


Fig. 6 Test specimens

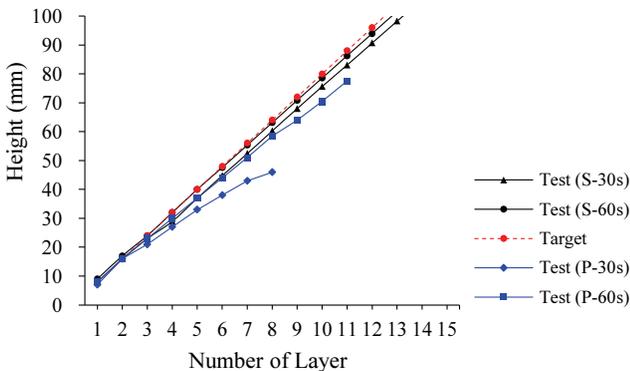
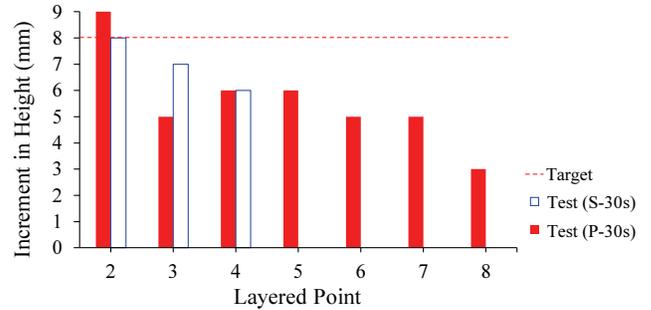
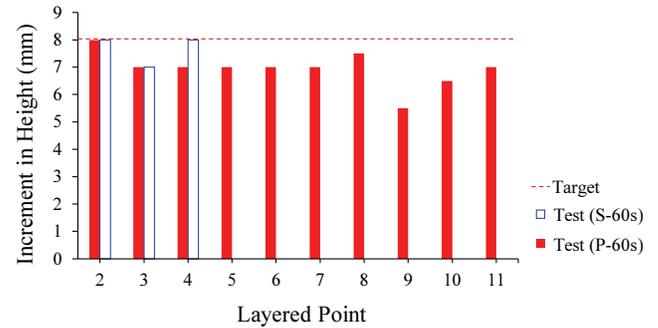


Fig. 7 Layered heights of specimens

층하였다. S-60s 실험체는 추가적으로 3층에 해당하는 하중을 적용하였을 때 (즉, 총 7층) 1층 레이어에서 최초의 균열이 관측되었다. 다만, Fig. 7에 나타난 바와 같이 S-60s 실험체는 균열 발생 이후에도 완만한 수직 변형을 나타내었다.

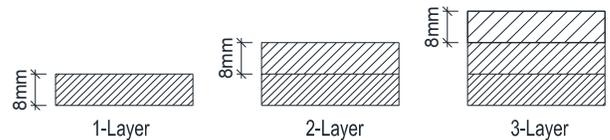


(a) Comparison of specimens P-30 and S-30 (PTG 30 sec.)

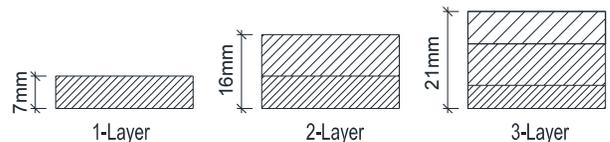


(b) Comparison of specimens P-60 and S-60 (PTG 60 sec.)

Fig. 8. Increment in heights at each layered point



(a) target heights of layers



(b) measured heights of layers (P-30s)

Fig. 9 Heights of printed layers

3.3 PTG의 영향

P-30s 실험체는 P-60s 실험체에 비하여 상대적으로 매우 이른 시점 (즉, 3층 레이어 적층 시)에 항복하였으며, S-30s 실험체도 3층 적층 시점에 항복한 것으로 나타났다. 따라서 30초의 PTG는 사출된 필라멘트의 강도가 발현되어 상부층을 적

층하기에는 부족한 것으로 판단된다. 이에 비해 60초의 PTG로 사출된 P-60s, S-60s 실험체들은 상대적으로 높은 층높이에서 항복하는 것으로 나타났다. 다만, P-60s와 S-60s 실험체에서도 모두 7층 적층시 균열이 발생되었기 때문에 콘크리트 프린팅에 적합한 PTG라고 보기에는 무리가 있다. 따라서, 추가 실험을 통해 60초 이상의 PTG에서 안정적인 적층이 가능할지 확인해야 할 것으로 판단된다. 다만, PTG와는 별개로 필라멘트가 적층됨에 따라 자중에 의하여 최하부층 레이어가 한계과과응력에 도달하여 항복할 수 있으므로 프린팅 1회당 출력 가능한 최대 높이도 검토해야 할 것으로 판단된다.

3.4 모의 적층 실험의 유효성 확인

Fig. 7에 나타난 바와 같이 S series 실험체들에 비하여 P series 실험체에서 상대적으로 더 큰 수직 변위가 발생하였다. 이는 P series 실험체의 경우 층이 높아짐에 따라 5층 이상의 레이어에서도 변형이 발생하는 것에 비해 S series 실험체에서는 1~4층의 레이어에서만 수직 변형이 발생하기 때문이다. 또한 P-60s 실험체와 S-60s 실험체는 8층 적층 시까지 유사한 수준의 수직 변형을 나타내었다. 이에 비해, P-30s 실험체와 S-30s 실험체는 상대적으로 큰 수직 변형 차이를 나타내었다. 이처럼 PTG가 작을수록 모의 적층 실험과 콘크리트 3D 프린팅 실험에서 수직 변형의 차이는 큰 것으로 나타났다. 따라서, 필라멘트의 강도가 발현되기 위한 최소 PTG를 만족한다면 모의 적층 실험이 콘크리트 3D 프린팅 실험을 유사하게 모사할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 콘크리트 3D프린팅의 PTG에 따른 적층 성능을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 콘크리트 3D 프린팅 실험(P)과 모의 적층 실험(S)에서 PTG가 30초인 실험체들은 모두 3층 적층시점에서 항복하였으며, 따라서, 30초의 PTG는 필라멘트의 강도가 발현되기에는 부족한 것으로 나타났다.
2. 이에 비해 PTG가 60초인 실험체들은 상대적으로 높은 층높이에서 항복하는 것으로 나타났다. 다만, PTG가 60초인 실험체들에서도 모두 7층 적층시 균열이 발생되었기 때문에 콘크리트 프린팅에 적합한 PTG라고 보기에는

무리가 있으며, 60초 이상의 PTG에 대한 추가적인 적층성 실험을 통하여 콘크리트 3D 프린팅에 보다 적합한 PTG를 도출할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. 콘크리트 3D 프린팅 실험(P)과 모의 적층 실험(S)에서 PTG에 따른 항복시점은 매우 유사한 것으로 나타났다. 필라멘트의 강도가 발현되기 위한 최소 PTG를 만족한다면 모의 적층 실험을 통하여 콘크리트 3D 프린팅의 적층성을 모사하는 데에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: NRF-2016R1A2B2010277).

References

1. Petit, J. Y., Wirquin, E., Vahhove, Y., and Khayat, K. (2007), Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete, *Journal of Cement and concrete Research*, 37(5), 655-670.
2. Panda, B., Paul, S. C., Mohamed, N. A. N., Tay, Y. W. D., and Tan. M. J. (2018), Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymers mortar, *Journal of Measurement*, 113, 108-116.
3. A., Perrot, D., Rangeard, and A., Pierre (2016), Structural built-up of cement-based materials used for 3D printing extrusion techniques, *Journal of Materials and Structures*, 49(4), 1213-1220.
4. Hong, S. G., Park, J. S., and Kim, N. H. (2018), Structural Stability in Concrete 3D Printing Construction, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 30(4), 345-352.
5. Lee, S. T., Lee, Y. J., Kim, J. H., Jeong, H. S., Han, S. J., and Kim, K. S. (2018), Experimental Study on Mix design for Rapid Prototyping Concrete, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 30(1), 553-534.
6. Lee, S. T., Lee, Jeong, H. S., Han, S. J., Lee, Y. J., Kim, J. H., and Kim, K.S. (2017), Analytical Study on Open-time of Concrete Rapid Prototyping Machine, *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 29(2), 47-48.

Received : 04/09/2019

Revised : 04/26/2019

Accepted : 05/14/2019

요 지 : 굳지 않은 콘크리트의 적층성은 콘크리트 3D 프린팅의 핵심 요소로써 필라멘트의 변형 및 붕괴 없이 일정한 높이로 적층하는 성능이다. 적층성은 항복응력과 밀접한 관련이 있으며, 항복응력이 높을수록 우수하다. 또한, 굳지 않은 콘크리트는 압출된 후 시간경과에 따라 경화되면서 전단응력이 증가하기 때문에 적층성이 높아지게 된다. 따라서, 콘크리트 3D 프린팅 시 굳지 않은 콘크리트의 적층성 확보를 위해서는 출력되는 레이어 사이의 적절한 시간 간격(Printing Time Gap, 이하 PTG)이 필요하다. PTG가 증가함에 따라 적층성은 증가하지만, PTG가 과도하게 커지면 출력된 레이어 간의 부착성능이 감소하며, 출력시간이 길어짐에 따라서 압출성능이 저하될 수 있다. 이 연구에서는 100 MPa 급 고강도 콘크리트 배합에 적합한 적층성을 확보하기 위하여 PTG를 변수로 한 3D 프린팅 실험을 수행하였으며, 이와 더불어 콘크리트 3D 프린팅 방법을 유사하게 모사할 수 있는 모의 적층실험 방법의 유효성을 검토하기 위하여 모의 적층실험을 수행하였다.

핵심용어 : 콘크리트 3D 프린팅, 레올로지, 적층성, 적층시간 간격
