

적층 방향에 따른 3D 프린팅 콘크리트의 강도 특성

원희재

동산콘크리트산업(주)

Strength Characteristics of 3D Printed Concrete According to the Stacking Direction

Hee-Jae Won

DongSan Bio Concrete R&D Center, DongSan Concrete Industry Company

요약 현재 미래의 건설 산업 기술을 발전시키고자 최근 미래 산업으로 각광받고있는 3D 프린팅을 이용한 콘크리트의 시공기술을 활용하여 구조물을 건설하는 연구가 국내외 건설업계 및 학계에서 활발히 진행되고 있다. 하지만 현재 개발되고 있는 3D 프린팅 기술은 적합한 시공기술, 콘크리트 재료 자체의 물성이 사용기준에 미치지 못하고 실제 현장에서 적용하기가 어려운 상황이다. 또한 시공된 구조물에 대한 내구성 관리 및 유지관리를 위한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 Material extrusion 방식으로 출력한 3D 프린팅 콘크리트를 각각의 적층 방향 X, Y, Z축으로 나누어 측정된 압축강도와 휨강도를 기존의 몰드에 제작한 시험체와 비교 분석하였다. Test direction II Z축의 시험체의 압축강도가 나머지 Test direction I, III Y축, X축의 시험체에 비하여 8~10%의 높은 강도를 발현하였고 몰드 제작 시험체와 비교하였을 경우 4%가량 낮은 강도를 발현하였다. 휨강도 측정결과 재령 28일 기준으로 Test direction II Z축 방향의 시험체의 휨강도가 Test direction I, III Y축, X축의 시험체에 비하여 5~7%의 높은 강도를 발현하였고 몰드 제작 시험체와 비교하였을 경우 2%가량 낮은 강도를 나타내었다.

Abstract In order to develop future construction technology, research is actively being conducted on concrete construction technology using 3D printing, which is currently in the spotlight as a future industry in domestic and foreign construction industries and academia. However, 3D printing technology is currently being developed and does not meet the requirements for proper construction technology and the properties of concrete materials, and it is difficult to apply in the actual field. Research is also needed for the durability management and maintenance of constructed structures. This work compares the compressive and flexural strength to that produced in conventional molds by dividing the 3D printed concrete output by the laminated X, Y, and Z axes. The compressive strength of a test specimen in the II Z-axis test direction was 8-10% higher than that of the other test directions (I and III Y axes and X axis). The strength was 4% lower than that of a molded test specimen. As of 28th of the age, the bending strength of the test specimen in the Z-axis direction was 5 to 7% higher than that of the I and III Y, and X-axis test directions, and the strength was 2% lower than that of the molded test specimen.

Keywords : 3D Printing, Material Extrusion, Gantry, Compressive Strength, Flexural Strength

이 연구는 국토교통부 도시건축연구사업 연구비지원(20AUDP-B121595-05)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Hee-Jae Won(DongSan Bio Concrete R&D Center, DongSan Concrete Industry Company.)

email: ii5006ii@naver.com

Received October 30, 2020

Accepted February 5, 2021

Revised December 15, 2020

Published February 28, 2021

1. 서론

현재 건설 현장에서는 노동자들의 현장 노동 기피와 기술자들의 고령화로 인한 건설 현장 인력이 부족한 상태이며 현장에서의 사고로 인한 안전문제가 심각한 상황이다[1]. 이러한 문제들을 해결하고 미래의 건설 산업 기술을 발전시키고자 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내 건설 분야에서는 2014년 국토교통과학기술진흥원의 ‘건축물 대상 3D 프린팅 장비 및 설계기술 개발 계획’의 연구를 시작으로 최근 한국건설기술연구원은 2020년까지 소형 건축물 및 비정형부재 대상의 3D 프린팅 설계, 재료, 장비를 개발하는 것을 목표로 하는 등 국내의 건설업계 및 학계에서 활발히 진행되고 있다[2]. 3D 프린팅을 이용한 콘크리트 기술은 거푸집 없이 노즐로 시멘트계열의 재료를 압출하여 구조물을 적층 성형하는 기술이다. 특히 전통적인 시공방법으로 시공하기 어려운 비정형 구조물을 제작하기에 용이하다. 비용 절감, 설계 유연성 증가 등으로 복잡한 시공 프로세스를 간소화할 수 있는 장점을 가지고 있고, 시공 과정을 간소화하여 인건비를 절감 할 수 있다[3]. 또한 일회성 거푸집 제작과정을 생략할 수 있어 건설폐기물을 줄일 수 있어 환경오염을 줄일 수 있는 것 또한 3D 프린팅 기술의 장점이다. 하지만 현재 개발되고 있는 3D 프린팅 기술은 적합한 시공기술, 콘크리트 재료 자체의 물성이 사용기준에 미치지 못하는 상황이고, 압출 시 노즐이 막히거나 초기 강도 발현이 어려워 현장에 적용하기 어려운 실정이다. 구조물을 구축하기 위해선 경화되지 않은 상태에서의 압출성과 적층성이 요구되고 경화 후 구조적 안정성 확보가 매우 중요하다. 또한 레이어(Layer)를 적층하여 구조물을 제작하는 방식인 3D 프린터의 적층공법과 적층된 구조물에 대한 내구성 관리와 유지관리를 위한 연구가 필요한 실정이다[4]. 본 연구에서 사용된 3D 프린터는 X, Y, Z축을 이동시켜 노즐을 통해 압출시키는 갠트리(Gantry) 타입의 3D 프린터이며 레이어(Layer)를 적층하는 기술인 ME(Material Extrusion) 방식을 적용하여 실험을 진행하였다[5~7]. 선행연구에서는 몰드에 단순히 노즐을 통해 압출되는 재료를 타설하여 다짐 후 시험체를 제작하여 실험을 진행한 것을 확인할 수 있었다[6]. 본 연구에서는 ME(Material Extrusion) 방식의 적층공법을 적용한 빔 형태의 시험체를 커팅하여 각각의 X, Y, Z축의 적층 방향에 따른 압축강도와 휨강도를 기존의 몰드에 제작한 시험체와 비교하여 강도 특성을 확인하였다.

2. 사용재료 및 실험 방법

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트

이 실험에서 사용한 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Physical properties of cement

Setting time (min)		Compressive strength (MPa)			Blaine (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
Initial set	Final set	3d	7d	28d	3.318	3.14
240	340	17	28	43		

2.1.2 잔골재

골재는 주물사, 타일시멘트, 드라이비트, 방수에 많이 사용되는 60~80Mesh, 0.1mm~0.35mm 입도의 7호사 규사를 사용하였다.

2.1.3 혼화제

혼화제는 시멘트 분산작용과 미세공기의 연행으로 단위 수량저감, 워커빌리티(Workability) 및 내동해성을 개선시키는 국내 D사 제품의 고성능 AE감수제를 사용하였다. 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. Properties of air-entraining and high-range water-reducing admixture

Appearance	Density (g/cm ³)	Alkaline content(%)	Chloride ion content(%)
brown liquid	1.06	0.9	< 0.01

Table 3. Mix proportions of 3d printing concrete

Type	Binder ratio (Cement : Sand)	W/C(%)	AE water reducingagent (%)
3DP-C	50 : 50	30	20

2.2 실험 방법

2.2.1 배합 및 제조

본 실험의 배합은 W/C는 30%로 계획하였으며 시멘트와 잔골재의 비율은 50:50으로 설정하였고 혼화제의 혼입률을 20%로 설정하여 배합을 실시하였다. 사용된 배

합표는 Table 3과 같다. 또한 3D 프린팅으로 제작한 시험체와 비교하기 위해 기존 몰드에 제작한 시험체 또한 3D 프린팅으로 제작한 시험체와 동일한 배합으로 시험체를 제작하였다. 콘크리트의 믹싱은 가변식 콘크리트 팬믹서를 이용하여 분할혼합방식으로 혼합을 실시하였으며, Fig 1과 같이 시험체를 제작하기 위해 노즐 폭 40mm의 노즐을 제작하고 프린팅 적층 높이는 10mm로 설정하여 120×120×500mm의 빔 형태로 압축 성형하였다. 압출한 빔 형태의 시험체는 프린팅 24시간이 지난 후 시험대에서 시험체를 제거하여 커팅 절단기를 이용하여 100×100×100mm의 각주형 압축강도 시험체와 100×100×400mm 휨강도 시험체를 제작하였다. 본 실험에서 압축강도 시험체를 각주형 공시체로 제작한 이유는 3D 프린팅 설비의 출력 특성상 원주형 공시체 제작이 어려워 콘크리트 호안 및 응벽 블록 단체표준(SPS-KCIC0001-0703)을 참고하여 100×100×100 사이즈의 각주형 공시체로 시험을 실시하였다. 양생은 기건양생을 실시하였다. 현재 3D 프린팅현장에서는 3D 프린팅으로 구조물을 제작할 시 수증양생이 어려워 본 실험 또한 현장 상황을 고려하여 기건양생을 실시하였다.

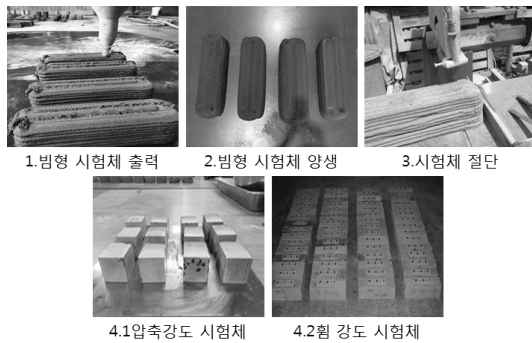


Fig. 1. 3D printing test body production

2.2.2 시험방법

본 실험에서는 Material extrusion 3D 프린팅 기술을 적용하여 적층 성형한 콘크리트의 압축강도 및 휨강도를 분석하였다. 각각의 실험은 3D 프린팅으로 제작한 시험체와 기존 몰드에 3D 프린팅으로 제작한 시험체와 동일한 배합으로 제작한 시험체를 각각 재령 일수에 따라 비교하며 실험을 진행하였다. 현재 3D 프린팅은 KS 기준이 명확하지 않기에 압축강도 시험 및 휨강도 실험을 공시체의 크기와 형상에 따른 강도에 관한 선행연구 [8]와 KS F 2405와 KS F 2408에 준하여 진행하였다.

압축강도는 국내 H사 제품의 용량 1000kN의 유압식 만능시험기를 사용하였다. 시험체는 프린팅 24시간 이후에 기건양생 실시하였으며 재령 일수에 맞춰 실험을 진행하였다. 압축강도 측정은 앞서 적층 성형 후 100×100×100mm 사이즈로 커팅한 각주형 시험체를 Fig 2에 나타난 것과 같이 X, Y, Z 축으로 각각 나누어 출력 방향에 따른 압축강도를 몰드에 제작한 시험체와 각각 비교하며 실험을 진행하였다. 휨강도 측정은 100×100×400mm 사이즈로 커팅한 시험체를 압축강도 측정방법과 마찬가지로 Fig 2의 나타난 것과 같이 X, Y, Z축으로 각각 나누어 기존 몰드에 제작한 시험체와 비교하여 실험을 진행하였다. 단 몰드에 제작한 시험체와 비교 분석하는 것에 초점을 두었기 때문에 몰드 제작 시험체의 압축강도와 휨강도 측정값은 모두 동일하게 적용하였고 3D 프린팅을 이용해 제작한 시험체의 측정값에만 변화를 주어 비교 분석을 실시하였다.

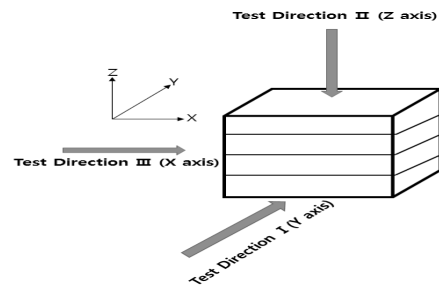


Fig. 2. Compressive strength according to the stacking direction

3. 시험결과 및 분석

3.1 압축강도 시험결과

Material extrusion 3D 프린팅 기술을 적용하여 적층 성형한 콘크리트의 Test direction I (Y axis)의 압축강도 결과는 Fig 3에 나타나 있다. 재령 28일 압축강도의 경우 몰드에 제작한 시험체는 35.14MPa의 압축강도가 나왔고 3D 프린팅으로 출력한 시험체는 32.18MPa의 값을 나타내었다. 몰드 제작한 시험체가 3D 프린팅으로 출력한 시험체보다 미세하지만 높은 강도를 나타냄을 볼 수 있었다. 재령 3일 7일과 28일 모두 강도가 증진하는 것을 확인할 수 있었으나 기존의 몰드에 제작한 시험체가 3D 프린팅으로 출력한 시험체보다 높은 강도를 나타내었다. 이는 몰드에 제작한 시험체는 충분히 다짐과 몰드 밀면에 진동 다짐을 주어 모르타르

의 공극을 채웠다. 반면 3D 프린팅으로 제작한 시험체는 적층 과정에 다짐과 진동다짐을 하여 공극을 메꾸는 과정이 없어 적층 시 내부에 공기가 침입하여 공극이 발생하므로 인해 몰드 제작 시험체보다 낮은 강도가 나온 것으로 판단된다. 또한 본 실험에 적용한 배합은 표준 모르타르의 배합보다 배합수의 양이 적고 표준사보다 입경이 작은 규사를 사용하였다. 이에 장시간 혼합할 경우 유동성이 저하될 것을 고려해 유동성 확보를 위해 사용한 AE 감수제가 적층 레이어(Layer)간에 공극을 유발하여 강도가 감소한 것으로 보인다. 하지만 3D 프린팅으로 출력한 시험체 또한 모두 몰드에 성형한 시험체와 비교했을 때 1~2MPa 정도의 차이를 보이는 것으로 보아 강도 차이는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 다음으로 Test direction II (Z axis)의 압축강도 결과는 Fig 4에 나타난 것과 같다. 재령 28일의 압축강도는 34.84MPa로 측정되었다. 앞의 Test direction I (Y axis)의 압축강도와 비교했을 때보다는 강도가 전체적으로 증가한 것을 확인 할 수 있었지만 앞서 말한 것과 같이 적층 과정 시 생기는 내부 공극으로 인해 다짐을 실시한 몰드 제작 시험체보다는 낮은 강도가 나온 것으로 판단된다. Test direction III (X axis)의 압축강도 측정 결과는 Fig 5와 같다. Test direction I (Y axis)의 측정결과와 비슷한 32.66MPa의 결과를 나타내었지만 Z 축과 비교했을 시 낮은 수치를 나타내었다. 각각의 X, Y, Z 축의 측정된 압축강도를 비교한 결과는 Fig 6과 같다. $Z > X = Y$ 순으로 강도가 높은 것으로 나타났으며 강도 차는 Test direction II (Z axis)의 시험체가 8~10% 정도의 우수한 강도를 발현하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 층간 부착 강도에 의존성이 높은 3D 프린팅의 특성상 출력 시 레이어(layer) 적층 방향인 Z축으로 하중을 가하여 측정할 시 가장 높은 강도를 나타내는 것으로 사료된다.

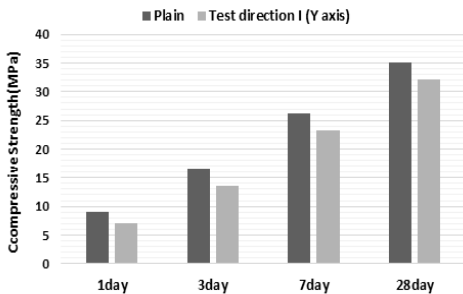


Fig. 3. Test direction I Y axis (Compressive strength)

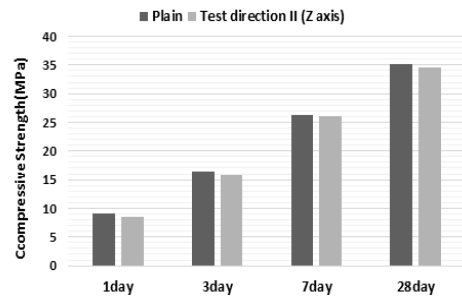


Fig. 4. Test direction II Z axis (Compressive strength)

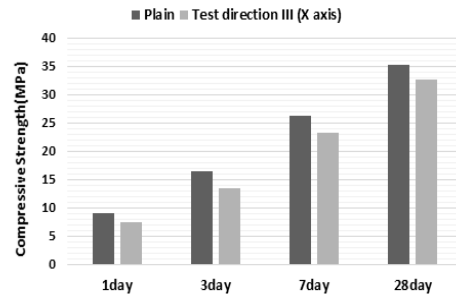


Fig. 5. Test direction III X axis (Compressive strength)

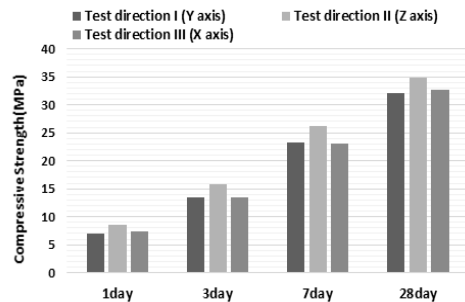


Fig. 6. Comparison of test directions I, II, (Compressive strength)

3.2 휨강도 시험결과

Material extrusion 3D 프린팅 기술을 적용하여 적층 성형한 콘크리트의 Test direction I (Y axis)의 휨강도 결과는 Fig 7에 나타나 있다. 재령 28일에 측정된 휨강도 측정값은 몰드에 제작한 시험체의 휨강도는 최대 7.44MPa의 강도가 나왔고 3D 프린팅을 이용해 제작한

시험체의 경우 최대 5.51MPa의 강도가 나왔음을 확인할 수 있었다. 몰드에 제작한 시험체와 마찬가지로 3D 프린팅으로 출력한 시험체 또한 꾸준하게 강도가 증진하는 것을 확인할 수 있었지만 위의 압축강도와 마찬가지로 미세하지만 몰드에 제작한 시험체가 더 높은 강도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. Test direction II (Z axis)의 휨강도 결과는 Fig 8과 같다. Z축 방향의 휨강도는 최대 6.25MPa의 강도가 나왔음을 확인할 수 있었다. 몰드에 제작한 시험체와 마찬가지로 3D 프린팅으로 출력한 시험체 또한 꾸준한 강도 증진을 보였으나 앞의 측정값과 같이 몰드에 제작한 시험체가 1MPa 높게 나온 것을 확인할 수 있었다. Test direction III (X axis)의 휨강도의 측정결과는 Fig 9와 같다. X축 방향의 휨강도는 최대 5.5MPa의 강도를 나타내었다. 3D 프린팅으로 출력한 시험체를 X, Y, Z 축으로 나누어 휨강도를 측정 한 결과 모두 몰드에 제작한 시험체가 1~2MPa 정도의 강도 차이를 보였다. 이는 앞의 압축강도 시험과 마찬가지로 3D 프린팅을 출력하며 적층 할 시 생기는 내부 공극으로 인해 다짐을 실시한 몰드 제작 시험체보다 낮은 강도가 나온 것으로 판단된다. 다음은 각각의 X, Y, Z 축의 압축강도를 비교한 결과이다. Fig 10에 나타내듯이 Z > Y = X 순으로 Test direction II (X axis)의 휨강도가 미세하지만 5~7%의 높은 값이 나왔고 Y축과 X축은 비슷한 양상을 보였다. 이는 앞의 압축강도 시험과 마찬가지로 층간 전단 부착 강도에 의존성이 높은 3D 프린팅의 특성상 레이어(layer)가 적층되는 방향인 Z축으로 하중을 가하여 측정할 시 가장 높은 강도를 나타내는 것으로 사료된다.

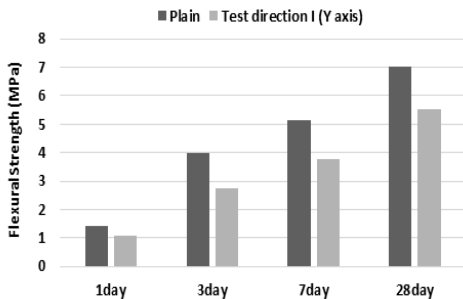


Fig. 7. Test direction I Y axis (Flexural strength)

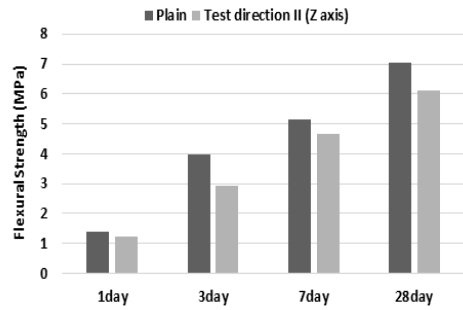


Fig. 8. Test direction II (Z axis) (Flexural strength)

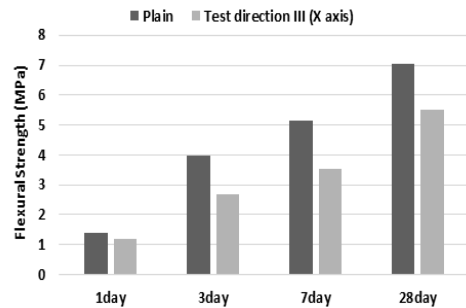


Fig. 9. Test direction III X axis (Flexural strength)

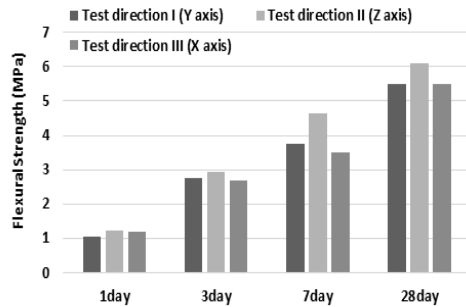


Fig. 10. Comparison of test directions I, II, III (Flexural strength)

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 Material extrusion 방식으로 출력한 3D 프린팅 콘크리트를 각각의 적층 방향으로 나누어 측정한 압축강도와 휨강도를 기존의 몰드에 제작한 시험체와 비교 분석하였고 분석한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 압축강도와 휨강도는 모두 Test direction II (Z axis)의 시험체가 나머지 Test direction I(Y axis), Test direction III (X axis)의 시험체에 비해 압축강도는 8~10%의 높은 강도를 발현하였고 휨강도는 5~7%의 높은 강도를 나타내었다. X, Y, Z축 각각의 압축강도와 휨강도 모두 비슷한 양상을 나타내는 것으로 보아 X, Y, Z 축의 출력 방향은 압축강도와 휨강도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.
- (2) 3D 프린팅을 이용해 출력한 시험체를 기존의 몰드에 제작한 시험체와 비교한 결과 미세하지만 몰드에 제작한 시험체가 더 높은 강도를 발현하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 몰드에 제작한 시험체는 충분한 다짐을 주어 공극을 채운 반면 3D 프린팅으로 제작한 시험체는 적층 과정에서 각각의 레이어(layer) 사이에 공극이 발생하여 층간 부착 강도가 감소하여 몰드 제작 시험체보다 낮은 강도가 나온 것으로 판단된다. 또한 유동성 확보를 위해 사용한 AE감수제가 적층 레이어(layer)간 공극을 유발하여 강도가 감소한 것으로 보여진다. 두 시험체가 미세한 차이가 나타나는 것으로 보아 3D 프린팅을 이용한 구조물 제작이 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 3D 프린팅은 출력 과정에서 콘크리트 응결시간이 짧아지게 될 경우 레이어(layer)와의 접착성을 확보하지 못하게 된다. 이로 인해 출력된 콘크리트의 내부에 공극이 발생하거나 층간 접착성이 확보되지 않으면 강도가 감소하기 때문에 추후에 짧은 경화시간을 확보하면서도 층간 접착성을 향상시킬 수 있는 방법을 추가적으로 고려하여야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] Park, hye mee, Development of the mix proportion of concrete for the extruder of construction 3D printers, Master's thesis, School of Civil and Environmental Engineering Graduate School, Kookmin University Seoul, Korea, [1]
- [2] Chen, Chao · Park, Yoo-Na · Yoo, Seung-Kyu · Bae, Sung-Chu · Kim, Jae-Jun, "Developing Design Process of 3D Printing Concrete Mix Proportion", Journal of the Korean BIM Society Vol.7, No.3 (2017)
DOI: <https://doi.org/10.13161/kibim.2017.7.3.001>

- [3] Dong-gyu Lee, Byung-Hyun Yoo, Ho-Jung Son, Development of Shrinkage Reducing Agent for 3D Printing Concrete, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 20, No. 12 pp. 37-43, 2019
- [4] Kim, Ki Hoon, Song, Dong Geun, Koo, Kyung Mo, "Fundamental Properties of 3D Printed Concrete According to Curing Condition", Korea Concrete Institute, 2019 Fall Conference Pages 507-508
- [5] Ji-Seok Seo, Bong-Chun Lee, and Yun-Yong Kim, Uniformity and Accuracy of Mortar Layer Thickness for the Quality Evaluation of 3D Printer Output, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.32, No.4, pp.371-377, August, 2020
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2020.32.4.371>
- [6] Ji-Seok Seo, Bong-Chun Lee, and Yun-Yong Kim, 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, Vol. 23, No. 7, December 2019, pp.104-112
DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2019.23.7.104>
- [7] Lee, Ho Jae, Kim, WonWoo, Seo, EunA, Moon, JaeHeum, A Study on the Pore Distribution between Layer of 3D Printed Mortar, Korea Concrete Institute 2019 Spring Conference, pp595-596
- [8] Choi, Joong Chul, Yang, Eun Ik, Yi, Seong Tae, Kim, Myung You, Effect of Specimen Sizes and Shapes on Compressive Strength of Concrete, Korean Concrete Institute 2003 Fall Conference, Vol.15 No.2

원 희 재(Hee-Jae Won)

[정회원]



- 2017년 2월 : 경북대학교 대학원 건설환경에너지공학부 건축공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 동산 BIO 콘크리트 연구소, 동산콘크리트산업(주) 연구원

<관심분야>

건설재료, 3D 프린팅