

# 급결제를 사용한 외장재용 3D 프린팅 콘크리트의 강도 특성

서대석  
동산콘크리트산업(주)

## Strength Characteristics of 3D Printing Concrete for Exterior materials using Accelerating agent

Dae-Seuk Seo  
DongSan Bio Concrete R&D Center, DongSan Concrete Industry Company

**요약** 본 연구는 최근 증가하고 있는 건축물의 다양한 외벽 형상에 따라 적용이 가능한 비정형 건축물에서의 적용을 위해 3D 프린팅 기법을 적용한 외장재의 제조를 위한 기초 연구로서 진행하였다. 3D 프린팅 외장재의 출력성과 적층성의 확보를 위하여 3D 프린팅 콘크리트를 몰드에 타설한 시험체와 급결제를 사용한 출력물 시험체의 단위중량과 강도 특성을 분석하였다. 몰드에 타설한 콘크리트의 단위중량에 비하여 급결제를 사용한 3D 프린팅 콘크리트의 단위중량이 3.5%~5.0% 정도 감소하는 경향을 나타내었고, 압축강도는 몰드에 타설한 콘크리트의 압축강도에 비하여 3D 프린팅을 통한 출력물의 압축강도는 36%~46%정도 감소하는 경향을 나타냈다. 휩강도의 경우 몰드에 타설한 콘크리트의 압축강도에 비하여 3D 프린팅을 통한 출력물의 압축강도는 36%~46%정도 감소하는 경향을 나타냈다. 급결제를 사용한 3D 프린팅 콘크리트의 강도 특성에 관한 영향은 2.0~5.8%정도 감소하는 경향을 나타냈다. 따라서, 3D 프린팅 출력시 급결제의 사용에 따른 강도 특성에 영향은 출력에 의한 강도 특성의 감소 보다 적은 것으로 나타나 3D 프린팅 외장재 제조시 급결제의 사용이 가능한 것으로 판단된다.

**Abstract** In this study, the output results of 3D printed exterior materials for application to buildings of various shapes are output tests using test specimens, in which 3D printing concrete is cast in a mold and accelerating agents are used to ensure stackability. The unit weight and strength characteristics of the body were analyzed. Compared to the unit weight of concrete placed in the mold, the unit weight of 3D printing concrete using accelerating agents tends to decrease by approximately 3.5% to 5.0%, and the compressive strength is the compressive strength of the concrete placed in the mold. In comparison, the compression strength of the output by 3D printing tended to decrease by approximately 36% to 46%. In the flexural strength, the compressive strength of the output through 3D printing decreased by approximately 36% to 46% compared to the compressive strength of concrete placed in the mold. The impact on the strength characteristics of 3D printed concrete using accelerating agents tended to decrease by approximately 2.0 to 5.8%. Therefore, 3D printing output accelerating agents can be used.

**Keywords** : 3D Printing Concrete, Accelerating Agents, Unit Weight, Compressive Strength, Flexural Strength

---

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

\*Corresponding Author : Dae-Seuk Seo(DongSan Bio Concrete R&D Center, DongSan Concrete Industry Company.)  
email: webist@nate.com

Received November 3, 2020

Revised December 22, 2020

Accepted February 5, 2021

Published February 28, 2021

## 1. 서론

1980년대에 개발된 3D 프린팅 기술은 IT 기술의 발전과 함께 현재 다각적인 방면으로 연구가 진행되어 고분자, 금속, Clay 등을 비롯하여 콘크리트 재료에 이르기까지 다양한 재료가 개발되었다. 또한, 다양한 3D 소프트웨어의 개발에 따라 3D 모델링을 통한 다양한 형태의 모델링이 용이하고 이를 이용한 출력물의 제작도 가능해지고 있는 실정이다. 이러한 3D 프린팅 기술은 공장에서 생산되는 공산품까지도 집에서 출력하여 사용할 수준에 이르기까지 발전할 것으로 예상된다.

현재 3D 프린팅 기술은 크기가 작고 단순한 모형의 제작에서부터 실제로 거주가 가능한 대형 건축물의 출력에 이르기까지 발전되었고, 건축분야에 있어서는 건축물의 외형을 거푸집으로 프린팅하는 방식, 건축물을 유닛별로 모델링하고 이를 출력하는 방식, 건축물 전체를 모델링하여 출력하는 방식으로 적용이 이루어지고 있다.

건축 분야에 있어서 3D 프린팅 기술의 활용은 주로 비정형의 건축물을 대상으로 기술의 적용시 기존의 거푸집을 사용하는 공정에 비하여 비정형 건축 구조물의 건설이 용이하고, 연속적인 작업이 가능하기 때문에 공기 단축과 현장에서 3D 프린팅 기기를 운용하는 인력 외에는 작업인원이 필요하지 않아 인건비 절감이 가능하다는 장점이 있다[1].

3D 프린팅 건축 기술에 사용되는 재료는 시멘트 복합체로서 콘크리트와 콘크리트가 주로 사용되고 있으며, 굵은 골재의 배합 여부로 결정하기 때문에 역학적 특성이 다르다. 시멘트 복합체는 유동성과 경화성을 가지고 있으며 수화반응을 통해 상반된 두 특성이 시간에 따라 교차하는 성질을 가지고 있다[2]. 이 같은 특성은 ME 방식 3D 프린팅 재료의 성능요소인 출력성(extrudability)과 적층성(buildability)으로 나타난다. 출력성은 노즐에서 출력되는 3D 프린팅 재료의 속도와 양이 연속적으로 일정하게 유지되는 정도이며 적층성은 3D 프린팅 재료를 연속적으로 쌓아 올릴 때 기존에 적층된 층이 상부 자중에 의해 발생하는 변형에 저항하는 정도이다. 두 성능요소 모두 재료의 유변학적 특성에 기인하기 때문에 굳지 않은 상태에서의 시멘트 복합체 유동성을 정량적으로 평가하는 것이 중요하다[3-5].

본 연구에서는 비정형 건축구조물에 적용되는 3D 프린팅 외장재의 개발을 위한 기초 연구로서 현장에서 3D 프린팅 출력시 상부층의 하중에 의한 하층부의 변형이 발생하는 것을 방지하여 빠른 시간에 적층이 가능하도록

급결제를 사용하여 적층성을 확보하기 위한 연구로서 4개의 지지부와 그 상부에 위치한 X축과 Y축 방향으로 이동이 가능한 빔과 Z축 방향으로 이동이 가능한 갠트리(Gantry) 타입의 3D 프린터를 사용하여 ME(Material Extrusion) 방식을 적용하여 실험을 진행하였다[6]. Material extrusion 방식의 출력 방식을 적용하여 제작한 외장재용 3D 프린팅 콘크리트 출력물의 단위중량과 출력방향에 대한 강도특성을 비교 분석하였다.

## 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 <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Initial set	Final set	3d	7d	28d	3.318	3.14
240	340	17	28	43		

#### 2.1.2 잔골재

잔골재는 5mm이하의 강모래로 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. Physical properties of fine aggregate

Aggregates	FM <sup>1)</sup>	SSD <sup>2)</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	water absorption ratio (%)	Unit volume weight (kg/L)
River sand	2.70	2.57	1.53	1.480

\*1) F.M : Fineness Modulus

\*2) SSD : Surface dried specific gravity of aggregates

#### 2.1.3 혼화제

혼화제는 시멘트 분산작용과 미세공기의 연행으로 단위 수량저감, 워커빌리티(Workability) 및 내동해성을 개선시키는 국내 D사 제품의 고성능 AE감수제를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 3과 같다.

Table 3. Properties of air-entraining and high-range water-reducing admixture

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

2.1.4 급결제

실험에 사용된 급결제는 황산알루미늄(aluminium sulfate hydrate)을 주성분으로 하는 액상형의 급결제로 주요 성분 및 합성 공정은 Table 4와 같다.

Table 4. The main Component and Synthetic methods of Accelerating agent

Main component	Additive	Synthetic condition
Aluminium Sulfate, Diethanol amine	Stabilizer etc.	Room temp.

2.2 실험 방법

2.2.1 배합 선정

본 실험의 배합은 W/C는 25%로 계획하였으며 시멘트와 잔골재의 비율은 사전 시험을 통하여 콘크리트의 펌핑성과 출력성을 검토하여 0.8 : 1(Q)과 1 : 1(Q1)로 결정하였고, 혼화제의 사용량은 KS F 2476에 준하여 Flow 시험을 통해 측정값이 200을 만족하는 혼화제의 혼입률을 결정하였으며, 결정된 배합은 Table 5와 같다.

사용된 급결제는 노즐부를 통하여 출력시 적층부 표면부에 도포되는 방식으로 사용하였으며, 도포된 급결제의 양은 예비 출력시험을 통하여 적층시 출력체의 표면부에 얇게 도포되는 양으로 분당 300ml가 도포되도록 결정하였다.

Table 5. Mix design of 3DP concrete

Type	W/C (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			AD
		W	C	S	
Q	25.0	313	1,252	1,562	11.26
Q1		355	1,422	1,422	18.48



Fig. 1. Concrete 3D printing machine



Fig. 2. Concrete 3D printing nozzle

2.2.2 시험방법

3D 프린팅 시험체의 출력을 위하여 사용된 장비는 장비는 Fig 1과 Gantry type의 장비를 사용하여 출력하였으며, 프린팅 적층 높이와 적층폭은 각각 40mm, 10mm로 120×120×500mm 크기로 출력하여 24시간 양생후 콘크리트 커팅기를 사용하여 단위중량 시험과 압축강도 시험용으로 100×100×100mm, 휨강도 시험용으로 100×100×400mm의 크기로 시료를 절단하여 시료를 제작하였다. 3D 프린팅에 의한 강도 변화를 관찰하기 위하여 3D 프린팅시 시료를 채취하여 동일한 크기의 몰드에 3층으로 나누어 25회 다짐을 통하여 시험체를 제작하였다. 각각의 시험은 각각의 배합(Q, Q1)에 따라 몰드 타설(MOLD), 3D 프린팅(3D), 급결제 도포 3D 프린팅(3DA)에 의해 제작된 시료를 대상으로 하였다.

단위중량 시험은 KS F 2462에 준하여 재령 28일에 측정하였으며, 압축강도 시험 및 휨강도 시험은 재령 7일, 14일, 28일에서 KS F 2405와 KS F 2408에 준하여 국내 H사 제품의 용량 100t의 유압식 만능시험기를 사용하여 압축강도를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 단위중량

재료의 배합 및 3D 프린팅과 급결제의 사용에 따른 단위중량 특성을 살펴보기 위해 외장재용 3D 프린팅 콘크리트의 단위중량 실험결과는 Fig. 3과 같다.

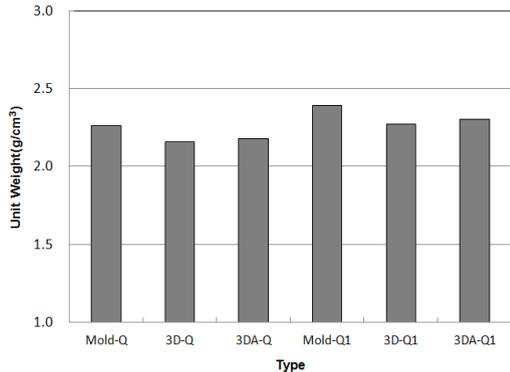


Fig. 3. Unit weight of 3D Printing concrete

급결제를 사용한 외장재용 3D 프린팅 콘크리트의 단위중량은 배합비에 따라 시멘트와 잔골재의 비가 0.8 : 1(Q)에 비하여 시멘트와 잔골재의 비가 1 : 1(Q1)의 경우가 4.8~5.4% 정도 크게 나타났으며, 몰드에 타설한 경우(Mold)가 3D 프린팅 출력(3D)에 비하여 3.5~5.0%, 크게 나타났다. 또한 급결제의 사용에 따른 영향은 급결제를 사용한 경우(3DA)가 사용하지 않은 경우에 비하여 단위중량은 0.9~1.5%로 비교적 적게 나타났다. 급결제의 사용에 대한 단위중량에 대한 영향은 비교적 적은 것으로 나타났으며, 배합에 따른 단위중량의 변화는 Q에 비하여 Q1의 경우가 단위중량에 사용되는 단위 시멘트량이 높아 단위중량이 크게 나타난 것으로 판단되며, 3D 프린팅 출력에 대한 영향은 다짐, 진동으로 제작되는 몰드에 타설되는 시험체가 적층방식에 의해 제작되는 시료에 비하여 밀실하게 적층되지 못하기 때문에 단위중량이 감소한 것으로 사료된다.

#### 3.2 압축강도

사용재료의 배합비와 3D 프린팅 및 급결제의 사용에 따른 압축강도 특성을 비교하기 위한 재령에 따른 압축강도 실험결과는 Fig. 4 및 5와 같다.

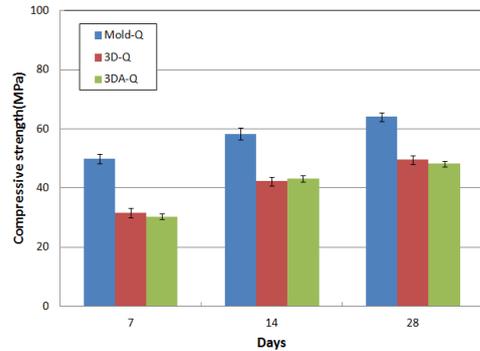


Fig. 4. Compressive strength of 3D Printing concrete using accelerating agent (Type Q)

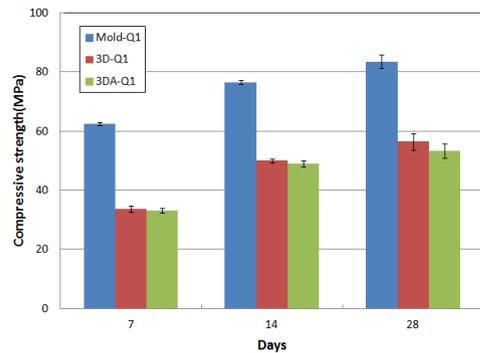


Fig. 5. Compressive strength of 3D Printing concrete using accelerating agent (Type Q1)

배합비의 변화에 대한 압축강도의 영향은 재령 7일에 Q1에 비하여 Q의 Mold, 3D, 3DA에 비하여 각각 25.4%, 6.6%, 9.6% 14일의 경우 31.2%, 18.2%, 13.6% 28일의 경우에 30.1%, 14.0%, 10.7% 감소하는 것으로 나타나 사용 시멘트량이 적은 경우에 있어서 압축강도가 감소하는 경향을 나타냈다[7]. 시멘트와 잔골재비가 0.8 : 1인 경우(Q)에 있어서 몰드에 타설한 경우와 3D 프린팅 의한 압축강도의 영향은 재령 7일의 몰드에 타설한 경우에 비하여 3D와 3DA의 압축강도가 각각 46.3%, 46.9%, 재령 14일에는 34.6%, 35.9%, 재령 28일에는 32.4%, 36.1%로 감소하는 것으로 나타났으며, 시멘트와 잔골재비가 1 : 1인 경우(Q1)에 있어서 재령 7일의 몰드에 타설한 경우에 비하여 3D와 3DA의 압축강도가 각각 36.8%, 39.2%, 재령 14일에는 27.4%, 26.1%, 재령 28일에는 22.6%, 24.8% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 단위중량의 변화에 있어서와 같이 몰드에 타설한 경우가 3D 프린팅으로 출력한 것에 비하여 적층에 대한

영향이 없이 밀실하게 제조되어 몰드에 타설한 경우의 압축강도가 크게 나타난 것으로 판단된다.

3D 프린팅 출력시 급결제의 사용 유무에 따른 압축강도는 Q의 경우 재령 7일, 14일, 28일에 있어서 각각 1.2%, 2.0%, 2.8%로 나타났으며, Q1의 경우에는 3.9%, 1.9%, 2.85로 나타나 급결제의 사용에 따른 영향은 역상의 급결제가 출력체의 표면부에 얇게 도포되기 때문에 배합이나 타설방법의 차이에 의한 압축강도 변화에 비하여 작게 나타나는 것으로 사료된다. 따라서 3D 프린팅에 적층성의 확보를 위하여 급결제를 사용하는 경우 배합을 고려하여 급결제의 사용을 결정하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

### 3.3 휨강도

사용재료의 배합비와 3D 프린팅 및 급결제의 사용에 따른 휨강도 특성을 비교하기 위한 재령에 따른 압축강도 실험결과는 Fig. 6 및 7과 같다.

배합비의 변화에 대한 휨강도의 영향은 재령 7일에 Q1에 비하여 Q의 Mold, 3D, 3DA에 비하여 각각 5.7%, 11.7% 15.3% 14일의 경우, 26.3%, 29.5% 25.1% 28일의 경우에 28.5% 36.6% 36.1% 감소하는 것으로 나타나 사용 시멘트량이 적은 경우에 있어서 휨강도가 감소하는 경향을 나타냈다. 시멘트와 잔골재비가 0.8 : 1인 경우(Q)에 있어서 몰드에 타설한 경우와 3D 프린팅 의한 휨강도의 영향은 재령 7일의 몰드에 타설한 경우에 비하여 3D와 3DA의 휨강도가 각각 15.1%, 14.6%, 재령 14일에는 10.9%, 13.3%, 재령 28일에는 8.3%, 10.1%로 감소하는 것으로 나타났으며, 시멘트와 잔골재비가 1 : 1인 경우(Q1)에 있어서 재령 7일의 몰드에 타설한 경우에 비하여 3D와 3DA의 휨강도가 각각 19.6%, 21.7%, 재령 14일에는 13.1%, 12.5%, 재령 28일에는 13.6, 15.4% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 압축강도 실험 결과와 같이 3D 프린팅시 적층에 대한 영향으로 휨강도가 감소하는 것으로 판단된다.

급결제를 사용한 콘크리트의 휨강도와 급결제를 사용하지 않은 3D 프린팅 콘크리트의 휨강도에 비하여 Q에 있어서는 재령 7일, 14일, 28일의 휨강도는 각각 0.5%, -2.7%, -2.1%의 차이를 나타냈으며, Q1의 경우에는 -2.7%, 0.75%, -2.1%의 차이를 나타냈다. 급결제의 사용에 따른 영향은 압축강도에서와 같이 배합이나 타설 방법의 차이에 의한 휨강도 변화에 비하여 작게 나타나는 것으로 나타났다.

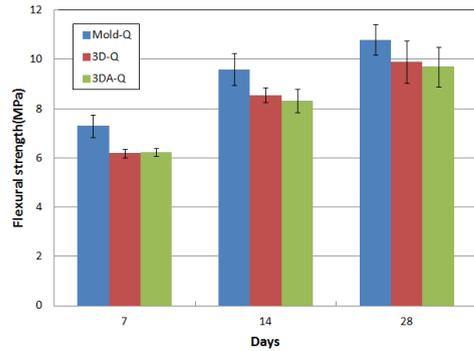


Fig. 6. Flexural strength of 3D Printing concrete using accelerating agent (Type Q)

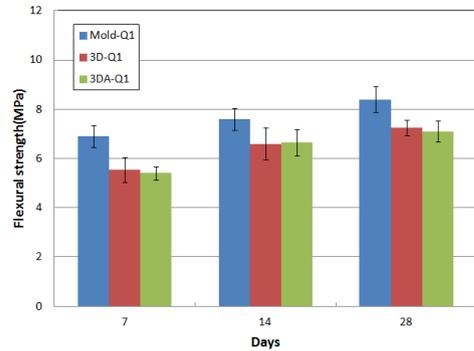


Fig. 7. Compressive strength of 3D Printing concrete using accelerating agent (Type Q1)

## 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 3D 프린팅 외장재의 제조시 콘크리트의 적층성의 확보를 위하여 급결제가 사용에 따른 단위중량, 압축강도 및 휨강도의 특성을 평가, 분석하였으며, 검토한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 급결제를 사용한 외장재용 3D 프린팅 콘크리트의 단위 중량에 대한 영향은 배합에 대한 영향이 크게 나타났으며, 3D 프린팅에 의한 단위중량이 몰드에 타설한 단위중량에 비하여 작게 나타나는 경향을 나타내었고, 급결제의 사용에 대한 영향은 적은 것으로 나타났다.
- 2) 급결제의 사용에 따른 압축강도에 대한 영향은 배합이나 타설 방법의 차이에 비하여 작게 나타나 3D 프린팅 외장재의 제조시 적층성의 확보를 위하

- 여 급결제의 사용이 가능한 것으로 판단된다.
- 3) 급결제를 사용한 3D 프린팅 콘크리트의 휨강도는 급결제의 사용에 따른 영향은 압축강도에서와 같이 배합이나 타설 방법의 차이에 의한 휨강도 차이에 비하여 작게 나타났다.
  - 4) 급결제를 사용하여 3D 프린팅 출력시 강도에 대한 영향이 적어, 지속적으로 작용하는 상부층의 하중에 따른 하층부의 변형 발생을 효과적으로 억제시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] 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  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.12.3>
- [2] Kim, Y.Y., Kong, H-J, and Li, V.C. (2003), "Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-mixture Shotcreting", ACI Materials Journal/Nov-Dec 2003, Vol.100, No.6, pp. 511-518.  
DOI: <https://doi.org/10.14359/12958>
- [3] Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell R.A., Gibb, A.G.F., and Thorpe, T. (2012), "Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete", Journal of Materials and Structures, Springer, 45(8), pp.1221-1232.  
DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- [4] Lee, H.J., Kim, W.W., and Moon, J.H. (2017), "An experimental study of mortar rheology for 3D printing extruder" Proceedings of the Korea Concrete Institute, Korea, 29(2)  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.031>
- [5] Malaeb, Z., AlSakka, F., and Hamzeh, F. (2019), "3D Concrete Printing: Machine Design, Mix Proportioning and Mix Comparison Between Different Machine Setups". In Jay G. Sanjayan, Ali Nazari, and Behzad Nematollahi(Eds.), 3D Printing Technology : Construction and Building Applications., Elsevier, Amsterdam, pp.115-136.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00006-3>
- [6] Ji-Seok Seo, · Bong-Chun Lee, and Yun-Yong Kim, "Uniformity and Accuracy if Mortar Layer Thickness for the Quality Evaluation if 3D Printer Output", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.32, No.4, pp.371-377, August, 2020  
DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2019.23.7.104>
- [7] Md. Kobir Hossain, Mohammad Abdur Rashid, and Md. Rezaul Karim, "Effect of Cement Content and Size of Coarse Aggregate on the Strength of Brick

Aggregate Concrete", DEUT Journal, Vol.2, No.2, pp.20-24, June, 2015

서 대 석(Dae-Seuk Seo)

[정회원]



- 2006년 6월 : 충남대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 동산 BIO 콘크리트 연구소, 동산콘크리트산업(주) 연구소장

<관심분야>

건설재료, 3D 프린팅