

조강형 첨가제 사용에 따른 저온환경에서의 3D 프린팅 콘크리트의 압축강도 특성

유병현, 이동규*, 박종필, 황병일
동남기업(주) 중앙연구소

Compressive Strength Characteristics of 3D Printing Concrete in Low Temperature Environment by Using Early Strength Improvement Type Additive

Byung-Hyun Yoo, Dong-gyu Lee*, Jong-Pil Park, Byoung-Il Hwang
Research & Development Center, Dongnam

요약 3D 프린팅 콘크리트는 연속 적층 시 적층고가 높아짐에 따라 콘크리트의 자중이 증가되기 때문에 연속 적층성 확보를 위해 하단부 콘크리트가 적정 시간에 경화되어야 한다. 특히, 기온이 낮은 동절기의 경우 콘크리트의 경화속도가 늦어지게 되는데, 3D 프린팅 콘크리트 시공 중 하단부 콘크리트의 강도발현이 낮아 콘크리트의 자중을 버티지 못하게 되면 적층된 콘크리트가 무너지게 되는 문제가 발생된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 저온환경에서의 3D 프린팅 콘크리트의 초기강도를 증진이 필수적이다. 국내외 문헌에서는 Amine계, Nitrate계, Sodium계, Calcium계 등의 무기계 화학 첨가제를 사용하여 콘크리트의 초기강도를 증진시킨 사례가 보고되고 있다. 이에 본 연구에서는 Amine계, Nitrate계 및 Sodium계 조강형 첨가제 샘플 5종을 제작하여 그 성능을 평가하였고, 우수한 성능을 보인 샘플을 선별하여 이를 적용한 3D 프린팅 콘크리트의 초기강도 특성을 확인하였다. 그 결과 Nitrate계 첨가제 사용 시 10 °C 환경에서 기존 20 °C 환경의 3D 프린팅 콘크리트 배합대비 동등 이상의 초기강도 발현이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

Abstract The self-weight of the 3D printing concrete increases with increasing printing height. Therefore, the lower layer must be hardened within a suitable time to secure continuous printing performance. In particular, the hardening speed of concrete is slow in the winter season when the temperature was low. Hence, the early strength of 3D printing concrete requires improvement. In domestic and international literature, cases of increasing the early strength of concrete using inorganic chemical additives, such as amine-based, nitrate-based, sodium-based, and calcium-based, have been reported. In this study, early strength improvement-type additive samples (amine-based, nitrate-based, sodium-based) were prepared, and their performance was evaluated. When using a nitrate-based additive, the early strength was increased significantly in a 10 °C environment. In addition, it was possible to secure a higher early strength than the existing 3D printing concrete mixed at 20 °C.

Keywords : 3D Printing Concrete, Additive, Early Strength, Low Temperature, Laminating

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 20AUDP-B121595-05)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

*Corresponding Author : Dong-Gyu, Lee(Dongnam)

email: dglee@dongnamad.co.kr

Received August 21, 2020

Revised September 15, 2020

Accepted October 5, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

현재 전 세계적으로 3D 프린팅 콘크리트에 관한 연구개발이 활발히 진행되고 있지만 아직까지는 대부분 실내 환경조건에서의 기초적 연구단계에 머물러 있기는 상태이다. 3D 프린팅 콘크리트의 실용화를 위해서는 현장 환경조건 반영이 필수적인데, 우리나라의 경우 4계절에 대한 고려가 되어야 한다. 3D 프린팅 콘크리트는 연속 적층 시 적층고가 높아짐에 따라 콘크리트의 자중이 증가되기 때문에 연속 적층성 확보를 위해 하단부 층의 콘크리트가 적정 시간에 경화되어야 한다. 하지만, 기온이 낮은 동절기의 경우 콘크리트의 경화속도가 늦어지게 되는데, 3D 프린팅 콘크리트 시공 중 하단부 콘크리트의 강도발현이 낮아 자중을 버티지 못하게 되면 적층된 콘크리트가 무너지게 되는 문제가 발생된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 저온환경에서의 3D 프린팅 콘크리트의 초기강도 확보가 필수적이다. 일반적으로 국내에서 동절기에 콘크리트의 초기강도를 확보하기 위한 방안으로 단위 시멘트량을 증가시키거나, 조강형 혼화제를 적용하는 방안 등이 적용되고 있고, 추가적으로 양생온도를 한중콘크리트의 기준 온도인 4℃보다 높은 10~15℃ 수준으로 관리하여 콘크리트의 초기강도를 확보하고자 하고 있다.[1, 2, 3] 본 연구에 사용된 3D 프린팅 콘크리트 배합은 선행연구를 통해 상온(20℃) 조건에서 연속 적층성이 검증된 배합으로 1일 재령에서 5 MPa 이상의 압축강도가 확보된 상태이다. 하지만, 저온환경에서는 강도발현이 늦기 때문에 20℃ 환경과 동등한 수준의 초기강도를 확보하기 위해서는 단위 시멘트량을 높이거나 초기강도 증진을 위한 화학 첨가제를 사용해야 한다. 하지만, 단위 시멘트량이 증가하게 되면 콘크리트의 점성이 크게 증가되어 압송성 및 사출성 저하로 인한 3D 프린팅 장비에 부하가 많이 걸리게 되는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 저온환경에서 3D 프린팅 콘크리트의 초기강도 증진을 위한 조강형 첨가제를 제조하여 이를 적용한 3D 프린팅 콘크리트의 강도특성을 평가하고, 10℃ 저온환경에서 연속 적층이 가능하도록 5 MPa 이상을 초기강도를 확보하기 위한 조강형 첨가제 사용량을 도출하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

국내의 문헌에 따르면 일반 콘크리트의 초기강도 향상을 위해 사용되는 대표적인 첨가제는 Amine계, Nitrate계, Sodium계, Calcium계 등이 있다.[4, 5, 6, 7]

본 연구에서는 Amine계, Nitrate계 및 Sodium계 원료를 바탕으로 5종의 조강형 첨가제 샘플을 제작하여 그 성능을 비교평가하기 위해 Table 1과 같이 실험계획하였고, 저온환경 조건을 맞추기 위해 실험재료들을 10℃ 항온항습기에서 24시간 정치 후 실험을 진행하였다. 각각의 조강형 첨가제는 분체량 대비 1.0%를 사용하였고, 사용된 첨가제 사용량만큼 배합수를 차감하여 단위수량 변화 없이 실험을 진행하였다. 실험결과 가장 우수한 성능을 보인 샘플 1종을 선별하여 Table 2와 같이 10℃ 저온환경에서 20℃ 환경과 동등한 수준의 초기강도(5 MPa 이상) 확보가 가능한 3D 프린팅 콘크리트용 조강형 첨가제 사용량 도출을 위한 실험을 계획하였다. 본 실험에서는 온도조건에 따른 3D 프린팅 콘크리트의 강도 특성 평가를 위해 기존의 배합(Plain)은 20℃ 및 10℃ 환경조건에 맞추어 실험을 진행하였고, 선별된 조강형 첨가제는 분체량 대비 1.0~4.0% 사용하여 10℃ 환경조건에서 실험을 실시하였다. 또한, 선행실험과 마찬가지로 조강형 첨가제를 적용한 배합의 경우 저온환경 대응형 혼화제 사용량만큼 배합수를 차감시켜 단위수량 변화 없이 실험을 실시하였다.

Table 1. Experimental design of 3D printing concrete, using additive for low-temperature environment.

| Experimental factors | | Experimental level | |
|---|--------------|--|-------|
| W/B(%) | 1 | · 28.0 | |
| S/a(%) | 1 | · 100.0 | |
| Unit quantity of water (kg/m ³) | 1 | · 235 | |
| Replacement Ratio of admixture(%/B) | 1 | · FA(20)+SF(10) | |
| Flow(mm) | 1 | · 140±10 | |
| Admixture for low temperature environment | Type | · Amine(SP-1, SP-2) · Nitrate(SP-3) · Sodium(SP-4, SP-5) | |
| | Amount (%/B) | 1 | · 1.0 |
| Fresh concrete | 2 | · Flow · Temperature | |
| Hardened concrete | 1 | · Compressive strength | |

Table 2. Experimental design of 3D printing concrete for optimization of additive for low-temperature environment

| Experimental factors | | Experimental level | |
|---|--------------|-------------------------|----------------------------|
| W/B(%) | 1 | · 28.0 | |
| S/a(%) | 1 | · 100.0 | |
| Unit quantity of water (kg/m ³) | 1 | · 235 | |
| Replacement Ratio of admixture(%/B) | 1 | · FA(20)+SF(10) | |
| Flow(mm) | 1 | · 140±10 | |
| Admixture for low temperature environment | Type | 1 · Nitrate(SP-3) | |
| | Amount (%/B) | 4 | · 1.0 · 2.0 · 3.0 · 4.0 |
| Fresh concrete | 2 | · Flow · Temperature | |
| Hardened concrete | 1 | · Compressive strength | |

Table 3은 저온환경 대응을 위한 3D 프린팅 콘크리트용 조강형 첨가제 샘플 5종의 성능평가를 위한 3D 프린팅 콘크리트의 배합사항이다. 실험사항으로 굳지 않은 콘크리트에서 슬럼프 및 콘크리트 온도를 확인하였고, 경화 콘크리트에서 1, 3, 7 및 28일 재령의 압축강도를 측정하였다. 양생은 10 ℃에서 3일간 기건양생 후 20 ℃에서 기건양생하였다.

Table 3. Mix design of 3D printing concrete, using additive for low-temperature environment

| Experimental factors | W/B (%) | S/a (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | | | TK (%/B) | ACC (%/B) | AD (%/B) |
|----------------------|---------|---------|----------------------------------|-----|-----|-----|----|-----|----------|-----------|----------|
| | | | W | B | C | FA | SF | S | | | |
| Plain | 28.0 | 100 | 235 | 840 | 588 | 168 | 84 | 936 | 0.1 | - | 2.00 |
| SP-1 | | | | | | | | | | 2.00 | |
| SP-2 | | | | | | | | | | 2.00 | |
| SP-3 | | | | | | | | | | 1.0 | 2.00 |
| SP-4 | | | | | | | | | | 2.20 | |
| SP-5 | | | | | | | | | | 2.15 | |

Table 4. Mix design of 3D printing concrete for optimization of additive for low-temperature environment

| Experimental factors | W/B (%) | S/a (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | | | TK (%/B) | ACC (%/B) | AD (%/B) | |
|----------------------|---------|---------|----------------------------------|-----|-----|-----|----|-----|----------|-----------|----------|------|
| | | | W | B | C | FA | SF | S | | | | |
| Plain_20℃ | 28.0 | 100 | 235 | 840 | 588 | 168 | 84 | 936 | 0.1 | - | 2.00 | |
| Plain_10℃ | | | | | | | | | | | 2.00 | |
| SP-3(1.0)_10℃ | | | | | | | | | | | 1.0 | 2.00 |
| SP-3(2.0)_10℃ | | | | | | | | | | | 2.0 | 2.05 |
| SP-3(3.0)_10℃ | | | | | | | | | | | 3.0 | 2.05 |
| SP-3(4.0)_10℃ | | | | | | | | | | | 4.0 | 2.10 |

선행연구를 통해 선정된 조강형 첨가제의 최적사용량 도출을 위한 실험사항으로는 굳지 않은 콘크리트에서 유동성 및 콘크리트 온도를 측정하였고, 경화 콘크리트에서 1, 3, 7 및 28일 재령의 압축강도를 측정하였다. 20 ℃ 환경의 Plain 배합은 초기부터 20 ℃ 기건양생을 하였고, 10 ℃ 환경의 배합들은 3일간 10 ℃ 기건양생 후 20 ℃ 기건양생을 하였다. 본 실험에 사용한 3D 프린팅 콘크리트 배합사항은 Table 4와 같다.

2.2 사용재료

상기의 Table 5는 본 연구에 사용된 재료의 특성을 나타낸 것이다. 시멘트는 국내 A사의 분말도 3 350 cm²/g의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 플라이애시는 분말도 3 850 cm²/g의 국내 B사의 보령산 제품을, 실리카폼은 C사의 분말도 200 000 cm²/g의 말레이아산 제품을 사용하였다. 골재는 국내 D사의 밀도 2.61 kg/m³의 규사(7호사)를 사용하였다. 화학 혼화제는 E사의 증점제와 고성능 감수제를 사용하였는데, 증점제는 분체량 대비 0.1 % 사용하였고, 고성능 감수제는 목표 유동성 확보를 위해 사용량을 조절하였다.

조강형 첨가제는 Amine계 원료를 바탕으로 샘플 2종 (SP-1, SP-2)을 제작하였고, Nitrate계 원료를 사용하

여 1종의 샘플(SP-3)을 제작하였으며, Sodium계를 활용하여 샘플(SP-4, SP-5) 2종을 제작하여 총 5종의 조강형 첨가제를 사용하였고, 제작된 조강형 첨가제 샘플들의 특성은 상기의 Table 6과 같다.

Table 5. Properties of materials

| Material | | Properties |
|----------|--------------------------|---|
| C | Ordinary portland cement | Density : 3.15 kg/m ³ Blaine : 3 350 cm ² /g |
| FA | Fly ash | Density : 2.20 kg/m ³ Blaine : 3 850 cm ² /g |
| SF | Silica fume | Density : 2.10 kg/m ³ Blaine : 200 000 cm ² /g |
| S | Silica sand | Density : 2.60 kg/m ³ Size : 0.22 mm |
| TK | Thickener | Cellulose based Density : 0.75 kg/m ³ |
| AD | Superplasticizer | Polycarboxylic acid based Specific gravity : 1.07±0.05 |

Table 6. Properties of additive for low-temperature environment

| Factors | Type | Density(kg/m ³) | |
|---------|------|-----------------------------|-----------|
| ACC | SP-1 | Amine based | 1.15±0.05 |
| | SP-2 | | 1.12±0.05 |
| | SP-3 | Nitrate based | 1.24±0.05 |
| | SP-4 | Sodium based | 1.16±0.05 |
| | SP-5 | | 1.21±0.05 |

2.3 실험방법

굳지 않은 콘크리트에서 자체 유동성이 없는 3D 프린팅 콘크리트의 작업성 평가를 위해 KS L 5111 규정의 시멘트 시험용 플로 테이블을 이용하여 15회 낙하 후 3D 프린팅 콘크리트의 Flow를 측정하였고, 적외선 온도계를 이용하여 초기 콘크리트 온도를 측정하였다. 경화 콘크리트에서는 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 의거하여 압축강도를 측정하였고 1, 3, 7 및 28일 재령에서 각 수준별 시험체 3개의 압축강도를 측정하여 평균을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조강형 첨가제 성능평가

조강형 첨가제 5종의 샘플을 적용한 3D 프린팅 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트의 실험결과는 Fig. 1, 2와 같고, 경화 콘크리트의 실험결과는 Table 7 및 Fig. 3과 같다.

굳지 않은 콘크리트의 실험결과 초기 콘크리트 온도가 10 ℃를 다소 상회하였지만 각 수준별 온도편차가 1 ℃ 이내로 측정되었다. 사전에 10 ℃ 항온항습기에 재료들을 정치시킨 후 배합실험을 진행하였지만 믹싱 시 발생하는 마찰열과 초기 수화열의 영향으로 콘크리트 온도가 소폭 상승된 것으로 판단된다. 유동성의 경우 고성능 감수제의 사용량을 조절하여 Plain 동등한 수준의 유동성을 확보하였는데, 조강형 첨가제가 적용된 경우 동일한 혼화제 사용량에서 유동성이 감소되는 경향을 나타내었다. 특히 Sodium계 첨가제가 사용된 배합의 경우 목표 유동성 확보를 위한 고성능 감수제의 사용량이 크게 증가되었다.

압축강도 측정결과 10 ℃ 저온환경에서 Plain 배합은 재령 1일에 0.7 MPa, 재령 28일에 61.8 MPa를 나타내었다. 조강형 첨가제가 적용된 배합들 모두 초기강도가 증가되어 Plain 보다 높은 초기강도를 나타내었는데, Amine계 첨가제인 SP-1, SP-2를 사용한 배합은 각각 1.2 MPa, 2.4 MPa의 초기강도가 측정되었고, Nitrate계 첨가제인 SP-3를 적용 배합은 3.6 MPa의 가장 높은 초기강도를 나타내었다. Sodium계 첨가제인 SP-4 및 SP-5를 적용한 배합들의 경우 미미한 초기강도 증진을 보였는데, 이는 목표 유동성 확보를 위한 고성능 감수제의 사용량이 크게 증가됨에 따라 콘크리트의 응결지연이 발생되어 초기강도 발현에 영향을 미친 것으로 사료된다.

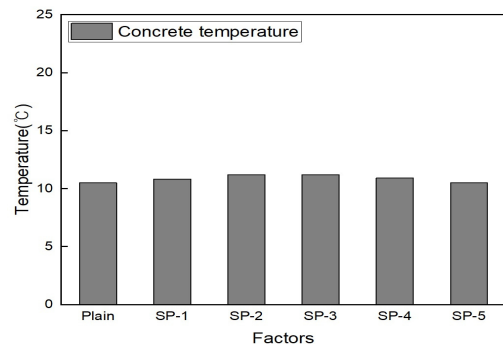


Fig. 1. Temperature of 3D printing concrete, using additive for low-temperature environment

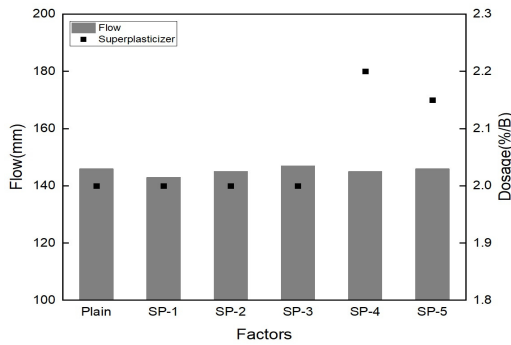


Fig. 2. Flow and dosage of superplasticizer of 3D printing concrete, using additive for low-temperature environment

Table 7. Compressive strength of 3D printing concrete, using additive for low-temperature environment

| Experimental factors | Compressive strength(MPa) | | | |
|----------------------|---------------------------|------|------|------|
| | 1D | 3D | 7D | 28D |
| Plain | 0.7 | 27.3 | 52.2 | 61.8 |
| SP-1 | 1.2 | 25.8 | 52.6 | 61.3 |
| SP-2 | 2.4 | 27.9 | 50.6 | 60.0 |
| SP-3 | 3.6 | 28.6 | 53.7 | 63.2 |
| SP-4 | 0.9 | 26.0 | 50.1 | 60.5 |
| SP-5 | 0.8 | 27.4 | 53.3 | 62.8 |

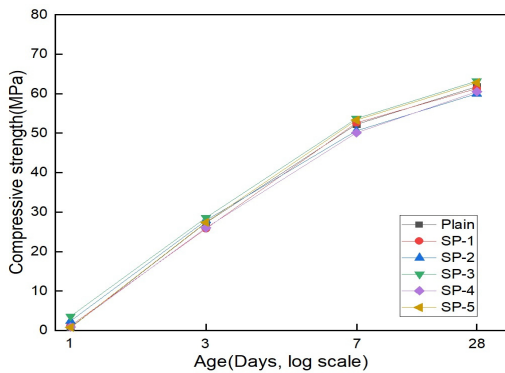


Fig. 3. Compressive strength of 3D printing concrete, using additive for low-temperature environment

3.2 조강형 첨가제의 최적 사용량 도출

선형실험을 통해 가장 우수한 초기강도 증진 효과를 보인 조강형 첨가제 샘플 SP-3을 적용하여 10 ℃ 저온환경에서 재령 1일에 5 MPa 이상의 압축강도 확보가 가능한 조강형 첨가제 최적 사용량 도출을 위한 실험결과

는 Fig. 4~6 및 Table 8에 나타내었다.

굳지 않은 콘크리트의 초기 온도 확인결과 본 실험계획에서 예측했던 초기 온도에 근접하게 측정되었고, 유동성의 경우 목표 유동성 확보를 위해 SP-3의 사용량이 증가됨에 따라 고성능 감수제의 사용량이 증가되는 경향을 나타내었다.

경화콘크리트에서 Plain 배합의 압축강도 측정결과 20 ℃ 환경에서 초기 압축강도는 5.2 MPa, 10 ℃ 환경에서 동일 배합의 압축강도는 0.9 MPa이 측정되어 20 ℃ 대비 압축강도 발현율이 약 17 % 정도밖에 되지 않았다. 반면에 10 ℃ 환경에서 조강형 첨가제인 SP-3을 적용한 배합의 경우 SP-3의 사용량이 증가함에 따라 초기강도가 크게 증진되었고, 장기강도는 소폭 증가되는 경향을 나타내었다. 조강형 첨가제 SP-3을 분체량 대비 2.0 % 사용 시 본 실험의 목표인 재령 1일 5 MPa을 상회하는 5.9 MPa의 압축강도가 측정되어 20 ℃ 환경의 기존 3D 프린팅 콘크리트 배합보다 높은 초기강도를 나타내었다.

본 연구를 통해 확인한 결과 기존의 3D 프린팅 콘크리트 배합을 10 ℃ 환경에서 사용하게 되면 초기강도 발현이 20 ℃ 환경보다 현저히 떨어지기 때문에 연속적층 시 하단부 콘크리트가 하중을 견디지 못하고 변형되거나, 심한 경우 적층된 콘크리트가 무너지는 문제가 발생할 수 있을 것으로 예측된다. 이러한 문제점을 미연에 방지하기 위해서 조강형 첨가제를 분체량 대비 2.0 % 정도 사용하게 되면 5 MPa 이상의 초기강도 확보가 가능하기 때문에 10 ℃ 저온환경에서도 3D 프린팅 콘크리트의 연속 적층성이 확보 될 것으로 판단된다.

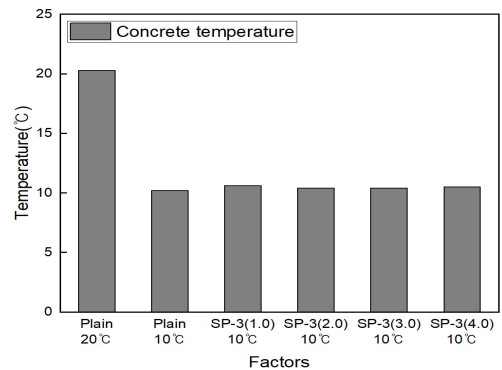


Fig. 4. Temperature of 3D printing concrete for optimization of additive for low-temperature environment

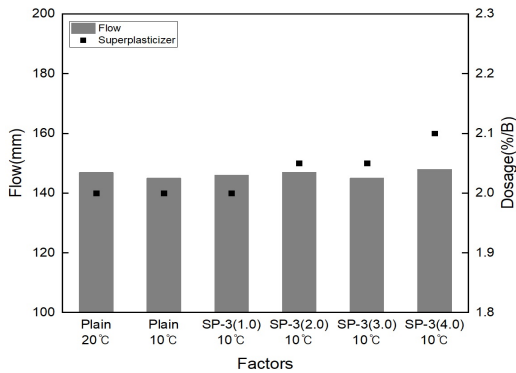


Fig. 5. Flow and dosage of superplasticizer of 3D printing concrete for optimization of additive for low-temperature environment

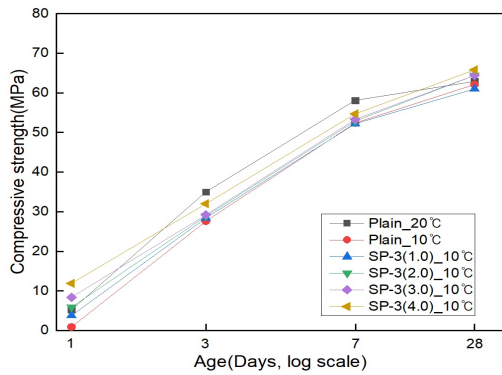


Fig. 6. Compressive strength of 3D printing concrete for optimization of additive for low-temperature environment

Table 8. Compressive strength of 3D printing concrete for optimization of additive for low-temperature environment

| Experimental factors | Compressive strength(MPa) | | | |
|----------------------|---------------------------|------|------|------|
| | 1D | 3D | 7D | 28D |
| Plain_20°C | 5.2 | 35.0 | 58.1 | 62.9 |
| Plain_10°C | 0.9 | 27.6 | 52.4 | 62.1 |
| SP-3(1.0)_10°C | 3.8 | 28.4 | 52.2 | 61.0 |
| SP-3(2.0)_10°C | 5.9 | 28.9 | 52.9 | 62.1 |
| SP-3(3.0)_10°C | 8.4 | 29.2 | 53.3 | 64.4 |
| SP-3(4.0)_10°C | 11.9 | 32.0 | 54.7 | 65.8 |

4. 결론

본 연구에서는 10 °C 저온환경에서 3D 프린팅 콘크리트

트의 초기강도를 증진시켜 연속 적층성을 확보하기 위해 Amine계, Nitrate계 및 Sodium계 원료를 바탕으로 조강형 첨가제 샘플 5종을 제작하여 성능을 비교평가 하였다. 가장 우수한 성능을 보인 샘플을 선별하여 기존 20 °C 환경에서 3D 프린팅 콘크리트와 동등한 수준의 초기강도(5 MPa 이상) 확보가 가능한 조강형 첨가제의 최적 사용량 도출을 위한 실험을 진행하였고, 결론을 요약하며 다음과 같다.

- 1) 조강형 첨가제 사용 시 10 °C 환경에서 기존의 배합보다 초기강도가 증진되는 것을 확인할 수 있었다. 특히, Nitrate계 원료를 사용한 SP-3 샘플을 분체량 대비 1 % 사용 시 Plain 대비 400 % 이상 초기강도가 증가하였다.
- 2) 가장 우수한 성능을 보인 SP-3의 최적사용량 도출을 위해 10 °C 환경에서 분체량 대비 1.0~4.0 % 사용하여 강도특성을 확인한 결과 SP-3의 사용량이 증가함에 따라 초기강도가 크게 증진되었고, 2.0 % 사용 시 20 °C 환경의 기존 3D 프린팅 콘크리트 배합보다 높은 초기강도를 확보할 수 있었다.
- 3) 저온환경 대응형 혼화제의 사용으로 10 °C 저온환경에서도 단위 시멘트량 증가 없이 20 °C 환경과 동등한 수준의 초기강도 발현이 가능하기 때문에 단위 시멘트량 증가에 따른 재료비 상승, 압송성 및 작업성 저하 문제없이 3D 프린팅 콘크리트의 연속 적층성 확보가 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Korea Concrete Institute, Concrete Standard Specification, Chapter14 cold weather concrete, 2009, pp.157-158.
- [2] J. H. Lee, Y. H. Jung, Y. R. Kim, "Development of early strength concrete technology for shortening the construction period", *Dealim Technology Information*, pp.36-45, 2009.
- [3] G. Y. Kim, Y. R. Kim, J. H. Park, "Investigation of Early-Age Concrete Strength Development Using Hardening Accelerator", *Journal of Korea Concrete institute*, Vol.28, No.3, pp.309-316, June, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2016.28.3.309>
- [4] H. Justnes, Erik C. Nygaard, "Technical calcium nitrate as set accelerator for cement at low temperatures", *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No.8, pp.1766-1774, Dec. 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00172-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00172-7)

- [5] S. S. Lee, H. Y. Song, J. H. Lee, "An Experimental Study on the Early Strength Development Properties of Concrete According to Curing Condition and Used Materials", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.6, pp.721-729, Dec. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2008.20.6.721>
- [6] J. P. Park, Y. W. Jung, "Performance Improvement of High Performance Shrinkage Reducing Agent using Early Strength Improving Agent", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.4, pp.296-302, April. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.4.296>
- [7] H. Mohamed, "Effect of Calcium Formate as an Accelerator on the Physicochemical and Mechanical Properties of Pozzolanic Cement Pastes", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No.6, pp.1051-1056, June. 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.015>

유 병 현(Byung-Hyun Yoo) [정회원]



- 2010년 2월 : 아주대학교 건설시스템공학과 (학사)
- 2012년 8월 : 아주대학교 토목공학과 (석사수료)
- 2012년 11월 ~ 현재 : 동남기업(주) 중앙연구소 선임연구원

<관심분야>
건설재료, 콘크리트

이 동 규(Dong-Gyu Lee) [정회원]



- 2012년 2월 : 청주대학교 건축공학과 (공학박사)
- 2010년 2월 ~ 2014년 8월 : 동남기업 중앙연구소 선임연구원
- 2014년 8월 ~ 2016년 3월 : 충청대학교 공학기술연구원 선임연구원
- 2016년 4월 ~ 현재 : 동남기업(주) 중앙연구소 책임연구원/연구팀장

<관심분야>
콘크리트, 건축재료 및 시공

박 종 필(Jong-Pil Park) [정회원]



- 2013년 2월 : 국립한밭대학교 건축공학과 졸업 (석사)
- 2012년 12월 ~ 현재 : 동남기업(주) 중앙연구소 선임연구원

<관심분야>
건설재료, 콘크리트

황 병 일(Byoung-Il Hwang) [정회원]



- 2018년 8월 ~ 2019년 9월 : JNT INC 연구원
- 2019년 2월 : 우석대학교 건설공학과 (공학석사)
- 2019년 10월~현재 : 동남기업(주) 주임연구원

<관심분야>
건설재료, 콘크리트