

## 콘크리트의 흡수율에 따른 균열 자기치유 성능

우해식<sup>1</sup>, 박병선<sup>3</sup>, 유성원<sup>2</sup>, 최영철<sup>1\*</sup>

# Crack Self-Healing Performance According to Absorption Test of Fiber Reinforced Concrete

Hae Sik Woo<sup>1</sup>, Byoung Sun Park<sup>3</sup>, Sung Won Yoo<sup>2</sup>, Young Cheol Choi<sup>1\*</sup>

**Abstract:** Cracks in concrete structures are inevitable phenomena caused by shrinkage, hydration heat, and external loads. These cracks facilitate the penetration of external harmful ions into the concrete, which greatly reduces its durability. Recently, self-healing concrete has been actively studied. Also, self-healing fiber-reinforced concrete have been studied to control the crack in concrete and to maximize the self-healing capability. In this study, mortar specimens containing PVA fiber, fly ash and crystalline admixture were fabricated. The compressive and flexural strength were evaluated. Also, the self-healing performance was evaluated by the absorption test. From the results, it was confirmed that the amount of water absorbed by healing of the crack decreased as time increased. It was also found that PVA fiber is beneficial for the production of calcium carbonate, an additional healing product.

**Keywords:** Polyvinylalcohol fiber, Self-healing, Absorption test, Fly-ash

## 1. 서론

콘크리트에서 균열은 수축, 수화열 및 외부하중에 의해 불가피하게 발생하는 현상이다. 콘크리트에서 발생하는 균열은 콘크리트 내부로 침투하는 유해인자에 의해 철근의 부식을 가속화 시키는 문제점이 발생하고 있다(B.S Park et al., 2018). 또한, 균열은 콘크리트 구조물의 내구성을 감소시켜 안전성 감소 및 유지보수 비용이 증가하는 단점이 있다. 최근에는 이와 같은 문제점을 보완하기 위해 콘크리트가 스스로 균열을 치유하는 개념의 자기치유 콘크리트에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 자기치유 콘크리트 연구는 균열 폭 닫힘(crack closing) 및 내구성 회복(durability recovery)을 바탕으로 연구가 수행되어 왔다(M. Roig et al., 2016).

일반적으로 콘크리트는 작은 균열 폭을 갖는 균열에 대해 스스로 치유하는 특성을 가지고 있다. 이는 콘크리트 내부에 존재하는 미수화 시멘트 입자가 외부에서 침투한 물과의 제

수화에 의한 것이다. 또한, 균열면에서 칼슘 이온이 공기 중의 이산화탄소 및 물속에 용해되어 있는 탄산 이온과 반응하여 생성된 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)에 의한 균열 충전에 의한 것이다(Z. LV et al., 2014). 하지만, 이러한 과정은 상당히 서서히 발생하며, 균열 폭 100 $\mu$ m까지 치유 가능하다고 보고되고 있다(Edvardsen. C et al., 1999).

콘크리트 스스로 자기치유 특성을 가지고 있지만, 효과가 미미하기 때문에 자기치유 성능 향상을 위한 혼화재료, 미생물 및 마이크로캡슐 등을 활용하여 자기치유 성능을 향상시키기 위한 연구가 수행되고 있다(Van. d et al., 2009). 일반적으로 섬유보강 콘크리트는 외부하중 및 유해인자에 의해 발생한 균열을 초기에 효율적으로 제어하는 특성을 가지고 있으며, 콘크리트 구조물의 연성을 향상시켜 내구성을 향상시키는 목적으로 사용되었다(H. Choi et al., 2016).

섬유혼입 시멘트계 복합체를 이용한 섬유보강 콘크리트의 연구가 활발히 수행 중에 있다. 섬유혼입 시멘트계 복합체는 고성능 섬유보강 콘크리트의 한 종류로서, 높은하중의 저항 및 높은 연성의 특성을 가지고 있다(V.C. Li et al., 2003). 섬유혼입 시멘트계 복합체에서 대부분의 균열폭을 80 $\mu$ m 이하까지 제어할 수 있다(J. Zhang et al., 2011). 또한, 일반 콘크리트에서 발생하는 균열폭과 달리, 섬유 보강 콘크리트에서 발생하는 미세 균열들은 수분 및 유해인자에 의한 영향이 감소되며, 자기치유 효과가 향상된다는 연구가 수행된 바 있다(S. Fan et al., 2014). 일반 콘크리트와 비교하였을 때, 섬유혼입

<sup>1</sup>정회원, 가천대학교 토목환경공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 한국건설생활환경시험연구원 주임연구원

<sup>3</sup>정회원, 가천대학교 토목환경공학과 교수

<sup>4</sup>정회원, 가천대학교 토목환경공학과 부교수, 교신저자

\*Corresponding author: zerofe@gachon.ac.kr

Department of Civil and Environmental Eng. Gachon University, Seongnam-si, 13120, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 3월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

시멘트계 복합체의 연성능력은 크게 평가되며, 이러한 특성으로 구조물의 지진하중 전달, 변형성 및 내구성에 대한 연구가 수행되고 있다 (K. Rokugo et al., 2009).

섬유보강 콘크리트는 섬유들이 시멘트 매트릭스(Matrix)에서 가교역할의 특성을 가지고 있으며, 균열 폭 제어의 특성을 가지고 있다. E. Herbert와 V. Li (2013)의 연구결과에 따르면, 시멘트 매트릭스의 자기치유 성능은 균열 폭이 작을수록 높아지며, 섬유에 의한 균열 폭 제어가 잘 될수록 균열 자기치유 성능이 우수한 것으로 보고되었다. 또한 M. Sahmaran와 V. Li (2009)의 연구결과에 따르면, 초기 하중에 의해 변형률이 대략 1%에 도달하면, 평균 균열 폭은 60 $\mu$ m로 발생하게 된다. 하지만, 인장변형률 증가에 의해 평균 균열 폭은 증가하지 않으며, 다수의 미세 균열들이 1~2mm 간격으로 발생한다는 연구가 수행된 바 있다.

폴리비닐알콜(Polyvinylalcohol, PVA) 섬유는 균열 내 수분 및 이온의 이동을 억제시켜 균열 내 pH 및 이온의 농도를 높이는 역할을 하여 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>) 생성을 촉진하여 균열 자기치유 성능을 향상시키는 연구가 수행된 바 있다(E. Ozbay et al., 2013). 발산소 부산물인 플라이애시(FA) 및 실리카폼(SF) 혼입은 비정질의 이산화규소(SiO<sub>2</sub>)를 가진 반응성이 높은 포졸란 재료이며, 균열 충전의 효과적인 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 폴리비닐알콜(PVA) 섬유보강 콘크리트 모르타르를 제작하였으며, 이를 통해 섬유 혼입율에 따른 휨강도 및 압축강도를 비교 분석하였다. 또한, PVA 섬유의 부착성능 특성을 분석하였으며, 흡수율 실험을 통한 PVA 섬유 혼입율에 따른 균열 자기치유 성능평가를 수행하여 비교 분석하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 재료

섬유보강 모르타르 제작에 사용된 PVA 섬유의 형상 및 역학적 특성을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 시험체 제작 시 사용된 PVA 섬유의 사진을 나타내고 있다. PVA 섬유의 직경은 40  $\mu$ m, 길이는 8mm, 밀도는 1.3g/cm<sup>3</sup>, 인장강도는 1600MPa, 연신율은 6%, 탄성계수는 41GPa인 섬유를 사용하였다. 섬유보강 모르타르의 바인더로 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 플라이애시(FA)를 사용하였으며 화학성분은 Table 2에 나타내었다. 화학분석은 X선 형광분석기(X-ray Fluorescence, XRF)를 통해 나타낸 결과이며, 사용된 기기는 LA-950, HORIBA를 사용하였다. XRF 기기분석에 의해 OPC의 화학성분(Table 2참조)을 기반으로 수화생성에 의한 주요광물인 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF의 구성비는 각각 70.2%, 0.14%, 5.80%, 10.04%이다. OPC의 밀도와 분말도는 각각 3.14g/cm<sup>3</sup>, 3,880cm<sup>2</sup>/g이다. FA

의 밀도와 분말도는 각각 2.15g/cm<sup>3</sup>, 4000cm<sup>2</sup>/g이다.

**Table 1** Mechanical Property of PVA fiber

| Type      | Diameter [ $\mu$ m] | Length [mm] | Density [g/cm <sup>3</sup> ] | Tensile Strength [MPa] | Elongation percentage [%] | Elastic modulus [GPa] |
|-----------|---------------------|-------------|------------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|
| PVA fiber | 40                  | 8           | 1.3                          | 1,600                  | 6                         | 41                    |



**Fig. 1** PVA(Polyvinylalcohol) fiber

**Table 2** Chemical compositions of raw materials

|                                | Chemical Compositions (%) |       |
|--------------------------------|---------------------------|-------|
|                                | OPC                       | FA    |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.17                      | 0.98  |
| MgO                            | 3.06                      | 1.46  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.29                      | 24.30 |
| SiO <sub>2</sub>               | 18.50                     | 50.50 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.17                      | 0.66  |
| SO <sub>3</sub>                | 4.51                      | 2.15  |
| Cl                             | 0.03                      | 0.01  |
| K <sub>2</sub> O               | 1.67                      | 1.56  |
| CaO                            | 63.20                     | 9.93  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.39                      | 1.24  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.30                      | 5.96  |
| NiO                            | 0.007                     | 0.013 |
| CuO                            | 0.015                     | 0.011 |
| SrO                            | 0.086                     | 0.124 |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0.015                     | 0.015 |
| Sum                            | 99.41                     | 98.91 |

OPC 및 FA의 입도분포는 Fig. 2와 같이 나타내고 있다. Fig. 3은 사용된 원재료인 OPC 및 FA의 XRD 패턴을 나타내고 있다. OPC의 XRD 패턴 분석을 통해 시멘트는 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF 및 석고(gypsum)로 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 또한, FA의 주요 광물은 Quartz(SiO<sub>2</sub>)와 Mullite(3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>)로 구성되어 있으며, 비정질(Amorphous) 특성에 의해 2 $\theta$ 는 15 ~ 30° 사이에서 할로우 피크가 관찰되었다.

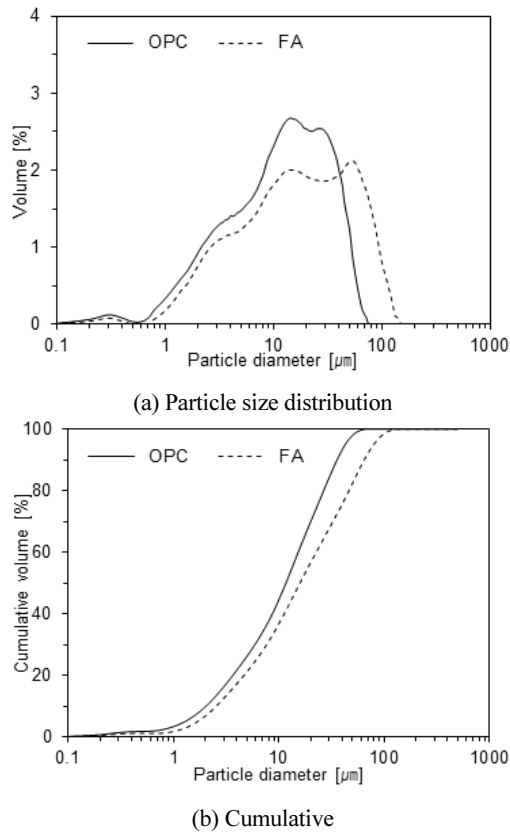


Fig. 2 Particle size distributions of raw materials

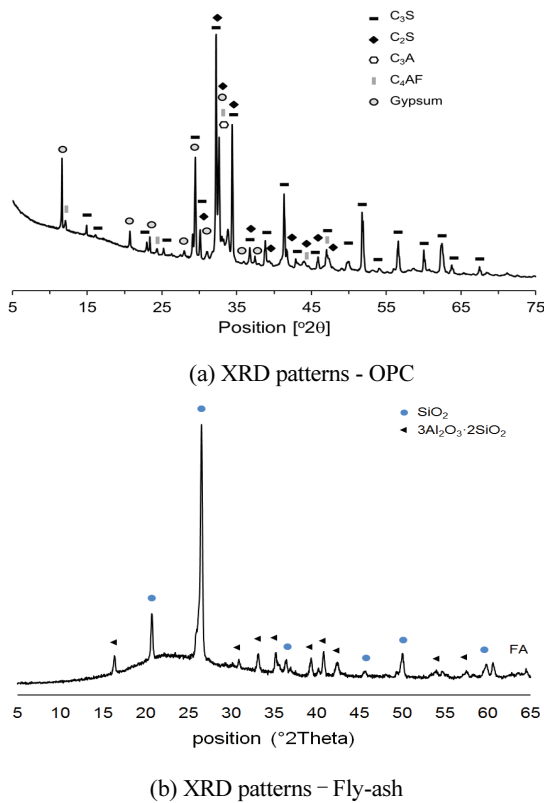


Fig. 3 XRD patterns of raw materials

### 2.1.1 배합 및 실험방법

Table 3은 강도 및 흡수율 시험을 위한 섬유보강 모르타르 시험체의 배합표를 나타내고 있다. 물-바인더 비는 45%로 고정하였으며, 섬유의 분산을 위해 유동화제, 분리저감제, 소포제를 사용하였다. 유동화제는 PF0배합에서 바인더의 중량대비 0.2%를 모든 배합에 동일하게 적용하여 사용하였다.

Table 3 Mixture proportions of flexural member concrete

| ID       | Mixture weight (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |     |     |     |      |      |
|----------|-------------------------------------|-----|------|-----|-----|-----|------|------|
|          | W                                   | OPC | PVA  | SHm | FA  | S   | T    | AF   |
| PF0      | 375                                 | 583 | 0    | 250 | 0   | 808 | 0    | 0    |
| PF0.5    | 375                                 | 583 | 6.5  | 250 | 0   | 794 | 1.50 | 0.83 |
| PF1.0    | 375                                 | 583 | 13.0 | 250 | 0   | 782 | 1.50 | 0.83 |
| PF1.5    | 375                                 | 583 | 19.5 | 250 | 0   | 768 | 1.50 | 0.83 |
| FA20F0   | 375                                 | 416 | 0    | 250 | 167 | 744 | 0    | 0    |
| FA20F0.5 | 375                                 | 416 | 6.5  | 250 | 167 | 732 | 1.50 | 0.83 |
| FA20F1.0 | 375                                 | 416 | 13.0 | 250 | 167 | 718 | 1.50 | 0.83 |
| F20F1.5  | 375                                 | 416 | 19.5 | 250 | 167 | 706 | 1.50 | 0.83 |

\*T: thickener, AF : antifouling agent

또한, 플라이애시에 의한 섬유 분산 특성을 살펴보기 위해 FA를 OPC 체적대비 20%를 치환한 시험체를 제작하였다. 일반적으로 플라이애시의 경우 입자가 구형의 형태를 가지고 있다. 또한, 비표면적이 크고 밀도가 크며, 골재 사이의 공극을 충전시키는 역할을 한다. 추가적으로, 플라이애시는 수경성을 가지지 않기 때문에 시멘트의 일부를 치환하였을 경우, 배합 과정에서 ball-bearing 효과를 통해 섬유분산 능력을 향상시키는 특성을 가지고 있다. PVA 섬유의 부착성능 실험을 위한 장치 및 개략도를 Fig. 4에 나타내고 있으며, PVA 섬유에 대한 하중과 이에 대한 변위 측정을 통해 수행하였다. PVA 섬유 혼입 시험체의 압축강도를 평가하기 위해 40 mm × 40 mm × 160 mm 시험체를 제작하였으며, 재령 7일, 28일에 대한 압축강도를 측정하였다. 또한, 휨성능 평가를 수행하기 위해 시험체 100 mm × 100 mm × 400 mm를 제작하였다. Fig. 5은 휨성능평가 실험에 대한 사진을 나타내고 있다.

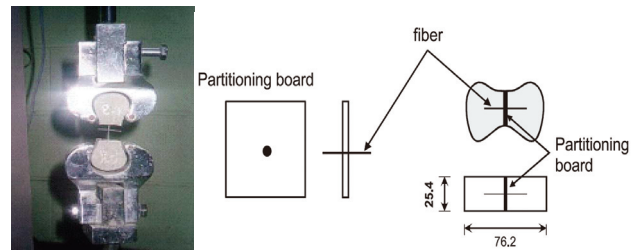


Fig. 4 Experiment of PVA fiber bond performance

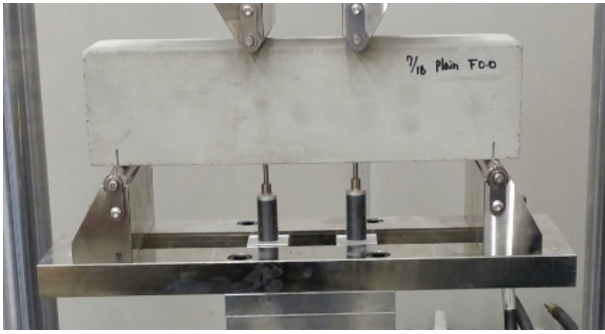


Fig. 5 Experiment on flexural performance

PVA 섬유 혼입 콘크리트 모르타르의 균열 자기치유 성능 평가를 수행하기 위해, 흡수율 실험을 수행하였다. 흡수율 실험을 수행하기 위해 제작된 원형 시험체는 100 mm × 50 mm 를 사용하였으며, 할렬 인장시험을 통해 균열을 유도하였으며, ASTM C 1585 시험법을 기반으로 흡수율을 측정하였다. Fig. 6은 흡수율 실험에 대한 그림을 나타내고 있으며, 균열이 유도된 시험체 하단부에 물이 흡수될 수 있도록 유리막대를 양 끝단에 놓아 시험체가 일정 높이를 유지할 수 있게 수행하였다. 사용한 물은 0.2% 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)수용액을 사용하였으며, 시험체 하단부가 노출되는 수위는 약 3mm이며, 일정 수위를 유지하면서 수행하였다.

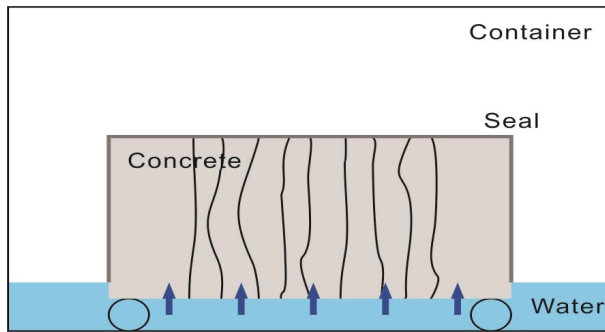


Fig. 6 Absorption test on crack self-healing performance

### 2.1.2 흡수율 실험을 통한 균열 자기치유 성능평가

Table 4와 같이 시간에 따른 시험체의 질량을 측정하였으며, 이를 통해 수분이 흡수되는 양을 측정하였다. 시간이 지남에 따라, 균열이 치유되면서 흡수되는 수분의 양이 감소되며, Table 4와 같이 측정시간에 따라 흡수율을 측정하였다. 또한, Eq. (5)를 통해 흡수율을 계산하였다.

$$I = \frac{m_t}{ad} \quad (5)$$

여기서,  $I$ 는 흡수율 (mm),  $m_t$ 는 시간에 따른 시험체의 질량 (g),  $a$ 는 수분에 노출된 면적 (mm<sup>2</sup>),  $d$ 는 물의 밀도(0.001

g/mm<sup>3</sup>)이다. 흡수율 실험 이후, 자기치유 생성물에 대한 분석을 수행하였다. 균열면에 대해 자기치유 생성물의 유무를 판단하기 위해, 광학현미경을 통하여 생성물 분석을 수행하였다.

Table 4 Measurement time and tolerance

|    | Time                            | Tolerance |
|----|---------------------------------|-----------|
| 1  | 1 min                           | 2 sec     |
| 2  | 5 min                           | 10 sec    |
| 3  | 10 min                          | 2 min     |
| 4  | 20 min                          | 2 min     |
| 5  | 30 min                          | 2 min     |
| 6  | 60 min                          | 2 min     |
| 7  | Every hour (up to 6 hour)       | 5 min     |
| 8  | Once a day (up to 3 days)       | 2 hour    |
| 9  | 3 measurement (from 4 to 7 day) | 2 hour    |
| 10 | 1 measurement (from 7 to 9 day) | 2 hour    |
| 11 | 1 measurement (14 day)          | 2 hour    |

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 PVA 섬유 부착특성 및 역학적 특성

#### 3.1.1 PVA 섬유 부착특성 분석

PVA 섬유 부착특성을 분석하기 위해서, Fig. 4과 같이 단면적이 적은 중앙부에서 균열을 먼저 유도하였으며, 하나의 PVA 섬유에 대한 하중 및 변위를 측정하였다. 또한, 리본 모양의 시험체 중앙에 PVA 섬유를 설치하고 모르타르를 타설한 후 부착실험을 수행하였다. Fig. 7은 PVA 섬유의 부착성능 실험결과를 나타내고 있다. 모르타르와 PVA 섬유의 상대슬립 약 1.8mm에서 부착하중이 최대로 측정되었으며, 최대 부착하중은 약 100N인 장치를 사용하였다.

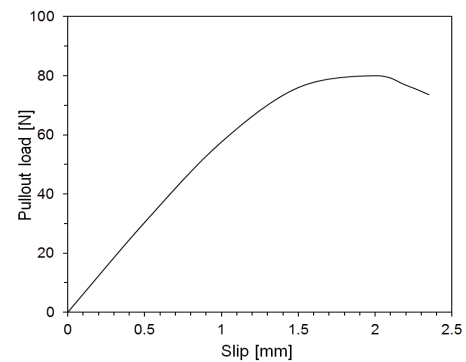


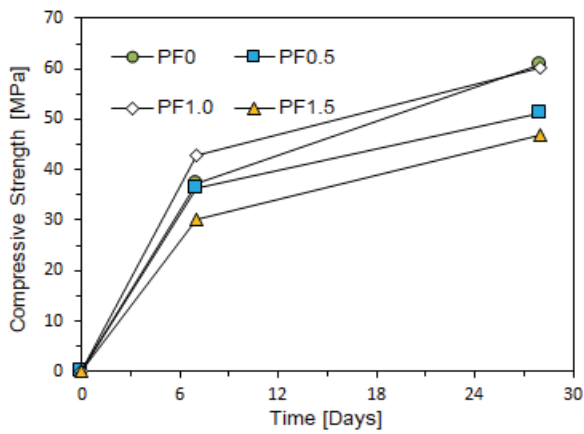
Fig. 7 PVA fiber bond-slip result

#### 3.1.2 PVA 섬유 압축강도 및 휨성능 평가

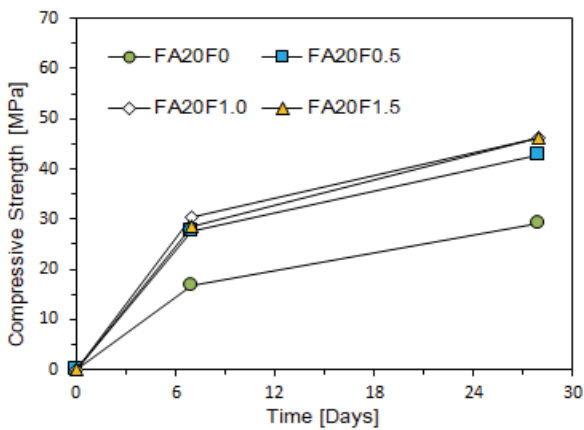
PVA 섬유 혼입율에 따른 역학적 성능 변화를 확인하기 위해 PVA 섬유 혼입율을 1.5%까지 증가시키면서 압축강도 및



휨 성능 평가를 수행하였다. Fig. 8은 섬유 혼입을 및 플라이에 시 치환한 배합에 대한 압축강도 결과를 나타내고 있다. PF0의 경우, 섬유 혼입율이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 섬유 혼입율이 1.5%인 경우에는 압축강도가 50MPa 이하로 측정되었다. 이에 따라 Plain의 경우, 섬유 혼입율에 따른 압축강도의 영향이 크게 나타나지 않았다. 그러나, 플라이에서 20%를 치환한 배합의 경우, 섬유 혼입율이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향이 나타났으며, 최대 섬유 혼입율인 1.5%의 경우 PF1.5 배합의 압축강도와 유사한 결과가 나온 것을 확인할 수 있었으며, 섬유 혼입율에 따른 압축강도는 Plain의 경우 반비례하며, 플라이에서의 경우 비례하는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Compressive strength results according to PVA fiber content in Plain

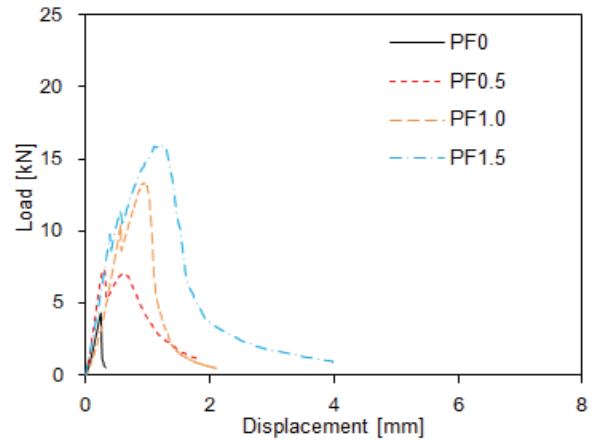


(b) Compressive strength results according to PVA fiber content in Fly-ash

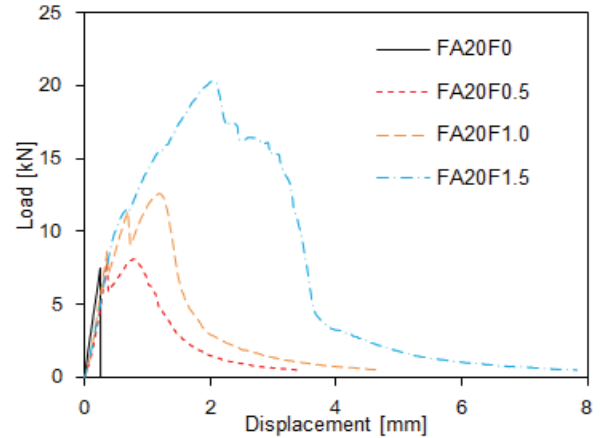
Fig. 8 Compressive strength results according to PVA fiber content

PVA 섬유 혼입율에 따른 휨성능 평가 결과는 Fig. 9에서 나타내고 있다. 섬유를 혼입하지 않은 배합인 PF0 및 FA20F0의 경우 휨 하중 및 연성 특성은 거의 발휘하지 못하고 있는 것으

로 확인되었다. 하지만, 섬유 혼입을 증가에 따라 휨 하중 및 연성이 증가하는 것을 확인하였으며, 최대 하중에서 변위가 증가하는 것으로 나타났다. Plain의 경우, 휨하중 및 연성의 증가가 미미하게 측정되고 있지만, 플라이에서 20% 치환한 경우 휨강도와 연성이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히, 섬유 혼입율 1.5%의 경우, 휨 하중 및 연성이 크게 증가한 것으로 나타났다. 이는 플라이에서 혼입에 따른 ball-bearing 효과로 인해 섬유 분산성이 향상된 것으로 확인되었다.



(a) Flexure results according to PVA fiber content in Plain



(b) Flexure results according to PVA fiber content in Fly-ash

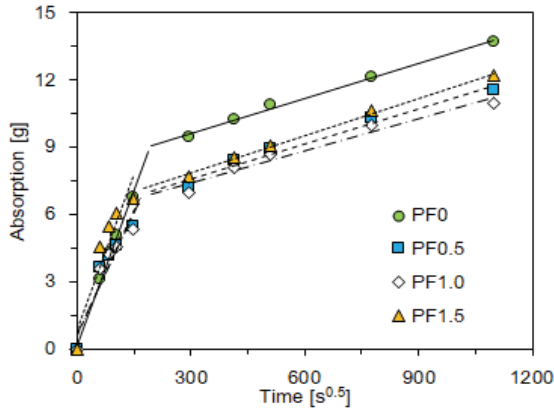
Fig. 9 Flexure load results according to PVA fiber content

### 3.2 PVA 섬유 혼입 균열 자기치유 성능평가

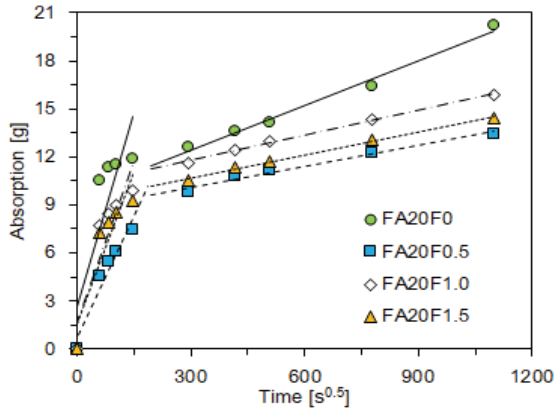
#### 3.2.1 흡수율 실험을 통한 균열 자기치유 성능평가

흡수율 실험결과는 Fig. 10에 나타내고 있으며, PVA 섬유 혼입에 의해 시간에 지남에 따라 흡수율이 감소하는 것을 확인하였으며, 이는 균열 자기치유에 따라 균열면이 감소하여 흡수되는 수분의 양이 감소한 것으로 확인되었다. 하지만, 섬유 혼입율에 따른 영향은 없는 것으로 나타났으며, 이는 섬유 혼입율에 관계없이 균열폭을 동일하게 유도하였기 때문으로 확인되었다. 또한, 섬유 혼입율이 증가함에 따라 균열유도률

더 작은 크기로 수행하였다면, 섬유 혼입율에 따른 자기치유 성능이 향상될 것으로 판단된다.



(a) Absorption results according to PVA fiber content in Plain



(b) Absorption results according to PVA fiber content in Fly-ash  
**Fig. 10** Absorption results according to PVA fiber content

### 3.2.2 균열 자기치유 생성물 분석

흡수율 실험 이후, 균열 면에서 PVA 섬유 주변으로 생성된 자기치유 생성물을 Fig. 11와 같이 나타내고 있다. PVA 섬유가 치유 생성물을 촉진하는 역할을 하여 PVA 섬유 주변에 자기치유 생성물이 다수 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, PVA 섬유로 인해 침투한 수분의 흡수율 실험 이후, 이동을 방해하며, 이로 인해 PVA 섬유 주변부 이온의 농도 및 pH가 증가하여 섬유 주변부에서 자기치유 생성물이 다량 침전되는 현상이 발생한 것으로 확인하였다. 이와 같이 섬유 주변부에 침전된 자기치유 생성물은 대부분 탄산칼슘( $\text{CaCO}_3$ )인 것으로 확인되었으며, 이는 외부에서 수분과 같이 유입되는  $\text{CO}_3^{2-}$ 와 모르타르 내부에서 용출된  $\text{Ca}^{2+}$ 가 반응하여 생성된 것으로 나타났다. 이를 육안으로 확인하기 위해서, 광학현미경을 이용하여 섬유 주변부에 침전된 탄산칼슘을 Fig. 11과 같이 확인하였으며, PVA 섬유 혼입 시 탄산칼슘의 침전을 가속화시킬 수 있을 것으로 확인하였다.



(a) Self-healing products for 1 day



(b) Self-healing products for 14 day

**Fig. 11** Self-healing products of PVA fiber reinforced concrete using optical microscope (B. S. Park et al., 2018)

## 4. 결론

본 논문에서는 PVA 섬유의 부착성능 특성을 분석하였으며, 섬유보강 콘크리트 모르타르를 제작하였다. PVA 섬유 혼입을 기본으로 배합을 수행하였으며, 추가적으로 플라이애시 20% 치환한 배합에 대한 모르타르를 제작하였다. 제작된 시험체에 대해 압축강도 및 휨성능 평가를 수행하였으며, 흡수율 실험을 통해 균열 자기치유 성능평가를 수행하였다. 또한 흡수율 실험 이후, 균열 면에서 생성된 자기치유 생성물에 대해 광학현미경을 이용하여 육안조사를 수행하였다. PVA 섬유 특성에 의해 섬유 주변부에서 탄산칼슘 침전이 유리하게 작용하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 수행한 결론은 다음과 같다.

- (1) PVA 섬유의 부착성능 분석을 위해, 단면적이 적은 중앙부에서 균열을 유도하였으며, 하나의 PVA 섬유의 하중 및 변위를 측정하였다. 이를 통해, 모르타르와 PVA 섬유의 상대슬립 약 1.8mm에서 부착하중이 최대로 측정되었다.
- (2) PVA 섬유 혼입율에 따른 모르타르 시험체의 압축강도

를 측정하였다. Plain의 경우, 섬유 혼입율이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 섬유 혼입율이 1.5%인 경우, 압축강도가 가장 낮게 나타났으며, 50MPa이하로 측정되었다. 이는 Plain의 경우, 섬유 혼입율에 따른 압축강도 변화의 영향이 없는 것으로 확인하였다.

- (3) 그러나, 플라이애시 20%를 치환한 배합의 경우, 섬유 혼입율이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향이 나타났으며, 최대 섬유 혼입율인 1.5%의 경우 PF1.5 배합의 압축강도와 유사한 결과가 나온 것을 확인할 수 있었다.
- (4) Plain의 경우, 휨하중 및 연성의 증가가 미미하게 측정되고 있지만, 플라이애시 20% 치환한 경우 휨강도와 연성이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 섬유 혼입률 1.5%의 경우, 휨 하중 및 연성이 크게 증가한 것으로 나타났다. 이는 플라이애시 혼입에 따른 ball-bearing 효과로 인해 섬유 분산성이 향상된 것으로 확인되었다.
- (5) PVA 섬유 혼입에 의해 시간에 지남에 따라 흡수율이 감소하는 것을 확인하였으며, 이는 균열 자기치유에 따라 균열면이 감소하여 흡수되는 수분의 양이 감소한 것으로 확인되었다. 하지만, 섬유 혼입율에 따른 영향은 없는 것으로 나타났으며, 이는 섬유 혼입율에 관계없이 균열폭을 동일하게 유도하였기 때문으로 확인되었다.
- (6) 흡수율 실험 이 후, 균열면에서 PVA 섬유 주변으로 자기치유 생성물이 침전되는 것을 확인하였다. 이는, PVA 섬유로 인해 침투한 수분의 이동을 방해하며, 이로 인해 PVA 섬유 주변부 이온의 농도 및 pH가 증가하여 섬유 주변부에서 자기치유 생성물이 다량 침전되는 현상을 확인하였다.
- (7) 이와 같이 섬유 주변부에 침전된 자기치유 생성물은 대부분 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)인 것으로 확인되었으며, PVA 섬유 혼입 시 탄산칼슘의 침전을 가속화 시켜 자기치유 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2016년도 한국에너지기술평가원(KETEP) 에너지기술개발사업의 연구비 지원(No. 20161120200190)에 의해 수행되었습니다.

## References

B. S. Park, Y. C. Choi, *Quantitative evaluation of crack self-healing in cement-based materials by absorption test*, Constr. Build. Mater.

184 (2018) 1-10.

M. Roig-Flores, F. Pirritano, P. Serna, L. Ferrara, *Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests*, Constr. Build. Mater. 114 (2016) 447-457.

H. Mihashi, T. Nishiwaki, *Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete-State-of-the-Art Report*, Journal of Advanced Concrete Technology, 10, no. 5 (2012) 170-184.

M. De Rooij, K. Van Tittelboom, N. De Belie, and E. e. Schlangen, *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials-State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*: Springer (2013).

S. Igarashi, M. Kunieda, T. Nishiwaki, *Research activity of JCI technical committee TC-075B: Autogenous healing in cementitious materials* (2010), 89-96.

Z. Lv, D. Chen, *Overview of recent work on self-healing in cementitious materials*, Mat, Con, 64 (2014) 316.

Edvardsen, C. : *Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete*. ACI Materials Journal, 96 (4) (1999) 448-454.

Van der Zwaag, S., van Dijk, N.H., Jonkers, H.M., Mookhoek, S.D., Sloof, W.G. : *Self-healing behaviour in engineering materials: bio-inspired but respecting their intrinsic character*. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences 367 (2009) 1689-1704.

Xing, F., Ni, Z., Han, N., Biqin., Du, X., Huang. Z., Zhang, Z. : *Self-healing mechanism of a novel cementitious composite using microcapsules*. In: International Conference on Durability of Concrete Structures, Hangzhou, China (2008) 195-204.

H. Choi, M. Inoue, S. Kwon, H. Choi, M. Lim, *Effective Crack Control of Concrete by Self-Healing of Cementitious Composites Using Synthetic Fiber*. Mat. 9 (2016) 248.

V.C. Li, *On Engineered Cementitious Composites (ECC) - a review of the material and its applications*, Advanced Concrete Technology 1 (3) (2003) 215-230.

J. Zhang, C.K. Leung, Y. Gao, *Simulation of crack propagation of fiber reinforced cementitious composite under direct tension*, Eng. Fract. Mech. 78 (2011) 2439-2454.

S. Fan, M. Li, *X-ray Computed microtomography of three-dimensional microcracks and self-healing in engineered cementitious composites*, Smart Mater. Struct, 24 (2014) 015021.

D. Hou, H. Ma, Y. Zhu, Z. Li, *Calcium silicate hydrate from dry to saturated state: structure, dynamics and mechanical properties*, Acta Mater. 67 (2014) 81-94.

K. Rokugo, T.Kanda, H. Yokota, N. Sakata, *Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan*, Mater. Struct. 42 (2009) 1197.

E. Herbert, V. Li, *Self-Healing of Microcracks in Engineered Cementitious Composites (ECC) Under a Natural Environment*, Materials, 6 (7) (2007) 2831-2845.

M. Sahmaran, V. Li, *Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash*, Cem. Mat. 39 (2009) 1033-1043.

E. Ozbay, M. Sahmaran, H.E. Yucel, T. K. Erdem, M. Lachemi, *Effect of Sustained Flexural Loading on Self-Healing of Engineered Cementitious Composites*, J. Adv. Concr. Technol. 11 (2013) 167-179.

B. S. Park, S. W. Oh, Y. C. Choi , *The Self-healing Performance Evaluation Of Fiber Reinforced Cementitious Composites With Inorganic Binder*, The 13th International Conference on Steel and Composite Structures (SS18). 184 University of Western Australia (2018).

ASTM Standard C1585, *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*,

ASTM International, (2006) West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/C1585-04, www.astm.org.

Received : 01/23/2019

Revised : 02/21/2019

Accepted : 02/27/2019

---

**요 지** : 콘크리트 구조물에서 균열은 수축, 수화열 및 외부하중 등에 의해 발생하는 불가피한 현상으로, 외부 유해인자를 콘크리트 내부로의 침투를 용이하게 하여 내구성을 크게 감소시킨다. 최근 스스로 균열을 치유하는 자기치유 콘크리트에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 또한 콘크리트에 발생하는 균열을 제어하여, 그 성능을 극대화하기 위한 자기치유 섬유 보강 콘크리트의 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 PVA 섬유를 혼입한 자기치유 모르타르를 제작하였다. PVA 섬유 혼입율에 따른 압축강도 및 휨 성능 평가를 수행하였다. 또한, 흡수율 실험을 통해 자기치유 성능평가를 수행하였으며, 시간에 따라 균열 폭의 감소로 흡수되는 수분의 양이 감소하는 것을 확인하였다. 자기치유 생성물 분석을 통해 PVA 섬유 혼입에 의해 탄산칼슘 침전이 더 유리한 것으로 확인되었다.

**핵심용어** : 폴리비닐알콜 섬유, 자기치유, 흡수율 실험, 플라이애시

---