

## 유기 염료의 제거를 위한 기능성 콘크리트의 제조

이예영 · 정재훈 · 이민준 · 박소현 · 조영상<sup>†</sup>

한국공학대학교 생명화학공학과  
15073 경기도 시흥시 산기대학로 237(정왕동)  
(2024년 7월 18일 접수, 2024년 8월 1일 수정본 접수, 2024년 10월 8일 채택)

## Fabrication of Functional Concrete for Removal of Organic Dye from Waste Water

Yea-Young Lee, Jea-Hun Chung, Min-Jun Lee, So-Hyeon Park and Young-Sang Cho<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering and Biotechnology, Tech University of Korea  
237 Sangidadaehak-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, 15073, Korea  
(Received 18 July 2024; Received in revised from 1 August 2024; Accepted 8 October 2024)

### 요 약

양이온 염료인 메틸렌블루의 흡착 능력을 향상시키기 위해 콘크리트에 활성탄 분말을 첨가하거나 실리카 나노입자를 코팅하여 기능성 콘크리트를 제조하였다. 원활한 흡착을 위해 콘크리트에 혼합되는 폴리스티렌의 양을 조절하여 시료의 밀도를 변화시켰고, 오염물 내의 시료 부유 거동을 제어할 수 있었다. 오염수에 가라앉지 않고 콘크리트 시편이 적절히 부유할 수 있는 폴리스티렌의 적정 투입량을 조절할 수 있었다. 기능성 콘크리트의 활성탄 분말 함량이 증가함에 비례하여 메틸렌블루의 흡착 능력이 증가되었으며, 활성탄을 산 처리하여 기능성 콘크리트를 제작할 경우, 산 처리하지 않은 기존의 활성탄 첨가 콘크리트보다 우수한 흡착 능력이 얻어짐을 확인하였다. 활성탄 분말을 첨가하는 것 외에, 실리카 나노입자를 침전법으로 합성하여 콘크리트에 코팅함으로써 메틸렌블루의 흡착 능력을 향상시킬 수 있었고, 실리카의 코팅 횟수에 비례하여 유기 염료의 흡착 능력이 증가함을 확인하였다. 실리카 나노입자와 활성탄 분말이 모두 코팅된 콘크리트는 실리카 나노입자만 코팅된 콘크리트보다 우수한 흡착 능력을 나타내었다.

**Abstract** – In this article, functional concrete samples were fabricated by incorporating activated carbon powder or by coating with silica nanoparticles to study the adsorption capacity of the cationic dye, methylene blue. To avoid the concrete samples from being settled down, the floating behavior of the samples in waste water could be controlled by adjusting the amount of polystyrene mixed in the concrete to change density of the samples. In addition to activated carbon powder, silica nanoparticles were synthesized by precipitation method for coating of concrete to improve the adsorption capacity of the samples. Conventional concrete samples without any additive materials showed very low adsorption capacity of methylene blue. However, functional concrete samples containing activated carbon or silica particles demonstrated significantly superior adsorption capacity of the organic dye. The adsorption of methylene blue could be increased by increasing the amount of activated carbon powder in the concrete samples. Acid-treated activated carbon, with developed pore structure, enhanced higher adsorption capacity compared to untreated activated carbon after incorporating in concrete samples. Additionally, silica-coated concrete showed improved adsorption capacity after repeated coatings and enhanced mechanical strength. Concrete samples coated with both silica sol and activated carbon powder showed enhanced adsorption capacity compared to concrete specimen coated with only silica nanoparticles.

Key words: Functional concrete, Activated carbon powder, Adsorption, Silica sol

### 1. 서 론

산업이 발달함에 따라 나타나는 수질 및 대기 오염은 환경 보존에 있어 관심을 가지고 해결할 필요가 있다. 산업 시설의 수가 증가함에 따라 산업 폐수 배출량은 늘어나고 있으며, 해마다 증가하고 있는 자동차 수로 인한 대기 오염도 심각한 상황이다. 환경부에 따

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yscho78@tukorea.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

르면 폐수 배출량은 2012 년도 3,643천 m<sup>3</sup>/일에서 2021년도 3,849 천 m<sup>3</sup>/일로 10 년간 5.9% 증가하였고, 국토 교통부에서는 2023 년 말 자동차 누적 등록대수가 전 년 대비 1.7% 증가하였다고 발표했다. 따라서 이와 같은 오염 문제를 해결하기 위해 흔히 접할 수 있는 건축물의 콘크리트나 도로 포장재 및 보도블록에 환경 정화용 분말 소재를 첨가하거나 코팅하는 방식으로 환경오염 문제를 완화하기 위한 연구가 진행되고 있다[1,2].

주로 광촉매를 이용한 기능성 콘크리트와 관련된 연구가 다양한데, 대기 중의 질소산화물을 제거하거나 유기 염료를 제거하기 위한 연구가 진행되고 있다[3-8]. 하지만, 활성탄이나 실리카 졸을 이용하여 기능성 콘크리트를 제작한 연구는 상대적으로 보고된 수가 적으며, 보통 기계적, 물리적 강도를 증가시키기 위한 기존의 연구가 대부분이다[9,10]. 기능성 콘크리트를 활용하여 수중 유기물 제거 관련 분야의 연구가 미진하므로, 본 논문에서는 활성탄과 실리카 졸을 사용 수중 유기물 제거에 적합한 기능성 콘크리트를 제작하고, 각각의 유기 염료 제거 능력을 판단하고자 하였다. 흡착 반응을 유도할 수 있는 기능성 콘크리트에는 첨가되는 성분 물질의 종류와 함량이 중요한 인자로 조절될 수 있으므로, 다양한 실험을 통해 최적의 성능을 기대할 수 있는 기능성 콘크리트의 제조 연구가 가능하다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험 재료

본 연구에 사용되는 콘크리트 시편은 삼화 상사의 해바라기표 울픽스 파워 드라이본드 시멘트와 약 2 mm 크기의 발포 폴리스티렌을 사용하여 제작하였다. 활성탄은 대원에프이디의 석탄 기반 조립 활성탄(평균 길이: 0.56 cm, 평균 지름: 0.4 cm)을 사용하였고, 활성탄의 산 처리를 위해 대정화금의 Sulfuric acid (98%)를 이용하였다. 또한, 대정화금의 potassium silicate solution (20%)과 덕산과학의 염산(36%)을 사용하여 실리카 졸을 합성하였고, 기능성 콘크리트의 유기 염료 흡착 능력을 알아보기 위한 유기물로 삼전화학의 메틸렌 블루(methylene blue trihydrate)를 사용하였다.

### 2-2. 분석기기

콘크리트 및 활성탄 표면은 주사전자현미경(FE-SEM, Apreo 2)을 사용하여 관찰하였다. 흡착 실험 시, 용액 내 콘크리트의 원활한 진동을 위해서 Changzhou Langyue 사의 shaker (HY-2)를 사용하였고, 메틸렌 블루 수용액의 흡광도 측정을 위해 OPTIZEN 사의 POP (UV-visible spectrometer)을 사용하였다. 실리카 졸의 입자 크기 분포는 입도 분석기(ZETA PLUS, Marlvern Instruments)로 측정하였고, 기능성 콘크리트의 조성은 HORIBA 사의 MESA-50 (X선 형광 분석기, XRF)와 적외선 분광기(FT-IR, Nicolet)을 사용하여 분석하였다.

### 2-3. 콘크리트의 제작 및 부유 조건 설정

콘크리트 시편은 시멘트 가루 1.5 g, 물 0.7 g을 혼합하여 제작하였고, 이를 1.5 × 1.5 × 1.0 cm의 실리콘 틀에 넣어 굳힌 뒤 완전히 건조하여 사용하였다. 특히, 시편이 완전히 건조되지 않아 흡착 실험에 영향을 미칠 수 있으므로 시편은 최소 48 시간 이상 건조했다. 또한, 원활한 흡착 실험을 위해 콘크리트에 발포 폴리스티렌을

0.03 g 첨가하여 시편이 유기 염료 용액 내에 적절히 부유할 수 있도록 제작하였다.

### 2-4. 활성탄 분말 혼입 콘크리트의 제작 및 메틸렌블루 흡착 실험

본 연구에서는 조립 활성탄을 막자사발을 이용해 곱게 분쇄한 후, 스타킹을 이용해 큰 입자를 걸러낸 뒤 분말 형태로 만들어 이를 실험에 사용하였다. 시편은 활성탄 분말과 시멘트 가루, 발포 폴리스티렌 0.03 g, 물 0.7 g을 혼합하여 제작하였고, 활성탄 분말의 함량은 0.1, 0.2, 0.3 g로 변화시켜 샘플을 제조하였다. 시편의 전체적인 재료 비율(조성)은 Fig. 1(a)에 개략적으로 설명되어 있으며, 제작된 시편은 모두 48 시간 이상 건조한 뒤 실험에 사용하였다. 흡착 실험에 사용할 메틸렌블루 용액은 0.00005 g/mL 농도로, 실험 당 25 mL 사용하였다. 1 분간 좌우로 150 번 진동하는 shaker (Changzhou Langyue, HY-2)에서 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 분 간격으로 용액을 채취하여 흡광도를 측정하였고, 미리 작성한 검량선을 활용해 각각의 흡광도를 농도 데이터로 바꾸어 흡착 결과를 도출하였다. 본 연구의 모든 흡착 실험들은 상온에서 진행되었다.

### 2-5. 황산 처리 활성탄 분말 혼입 콘크리트의 제작 및 메틸렌블루 흡착 실험

먼저 조립 활성탄을 증류수를 이용해 여러 번 세척한 후 완전히 건조하는 전처리 과정을 수행하였다. 5% 황산 용액 100 mL에 조립 활성탄 2 g을 넣고, 80 °C에서 3 시간 동안 감압 증류하였다. 이

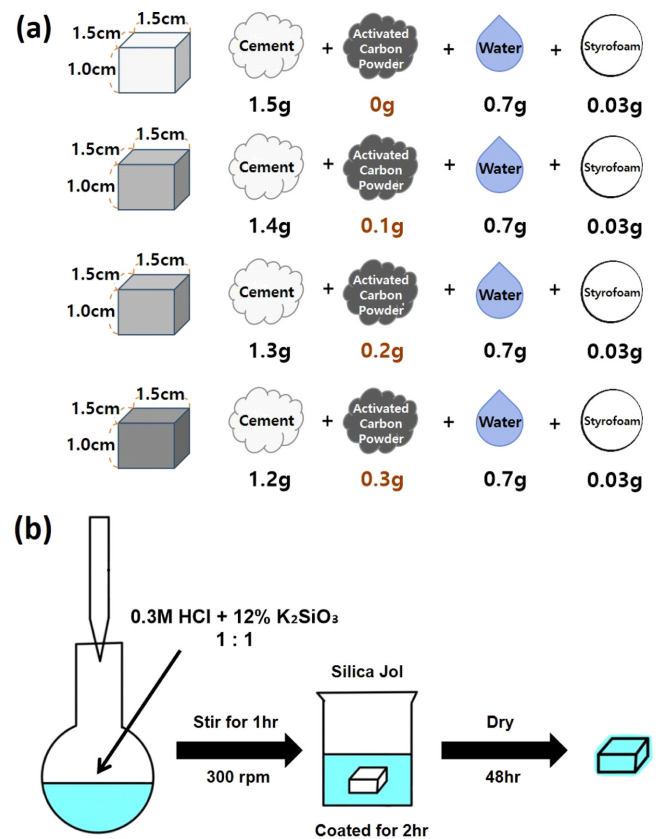


Fig. 1. (a) Schematic figure of the materials used to prepare functional concrete samples containing activated carbon powder. (b) Schematic figure of the method for preparation of silica-coated concrete samples.

후, 활성탄 표면에 묻은 시약을 제거하기 위해 증류수로 여러 번 세척하였고, 60 °C의 진공 오븐에서 24 시간 동안 건조하여 황산 처리 조립 활성탄을 제작하였다. 이는 막사사발을 이용해 굵게 갈아 분말 형태로 만들어 실험에 사용하였다. 시편은 시멘트 가루 1.4 g, 황산 처리 활성탄 분말 0.1 g, 발포 폴리스티렌 0.03 g, 물 0.7 g을 혼합하여 제작하였고, 48 시간의 건조 과정을 거쳤다. 흡착 실험에 사용할 메틸렌블루 용액은 0.00001 g/mL 농도로, 실험 당 25 mL 사용하였다. 1 분간 좌우로 150 번씩 진동하는 조건에서 5, 30, 60, 120, 180 분마다 용액을 채취한 뒤 흡광도를 측정하여 미리 작성한 검량선을 이용해 각각의 흡광도를 농도 결과로 바꾸어 흡착 결과를 도출하였고, 본 흡착 결과를 황산 처리하지 않은 활성탄 분말 혼입 콘크리트의 흡착 결과와 비교하였다.

### 2-6. 실리카 코팅 콘크리트의 제작 및 메틸렌블루 흡착 실험

실리카 졸은 0.3 M 염산과 12% potassium silicate 용액을 1 : 1의 부피비로 혼합한 뒤, 300 rpm에서 1 시간 동안 교반하여 제작하였다. 콘크리트 시편은 시멘트 가루 1.5 g, 발포 폴리스티렌 0.03 g, 물 0.7 g을 고르게 섞어 제작하였고, 48 시간의 건조를 거친 후 실리카 졸에서 2 시간 동안 코팅을 진행하였다. 이후, 실온에서 48 시간 동안 건조한 뒤 흡착 실험에 사용하였다. 실리카 코팅 콘크리트의 제작 방법은 Fig. 1(b)에 개략적으로 나타내었으며, 본 논문에서는 코팅 횟수에 따른 흡착능의 변화를 관찰하기 위해 코팅 횟수를 1, 3, 5, 7 번으로 증가시켜 샘플을 제작하였다. 메틸렌블루 용액은 0.00001 g/mL 농도로, 실험 당 25 mL 사용하였고, 제작한 시편을 용액에 담가 1 분간 좌우로 150 번 진동하는 조건에서 5, 30, 60, 120 분 간격마다 용액을 채취하여 흡착 실험을 진행하였다. 이후, 흡광도를 측정한 뒤 검량선을 이용해 각각의 흡광도를 농도로 변환하여 흡착 데이터를 도출하였다.

### 2-7. 실리카-활성탄 코팅 콘크리트의 제작 및 메틸렌블루 흡착 실험

실리카 졸에 활성탄 분말을 넣어 적절히 혼합한 후, 시멘트 가루 1.5 g, 발포 폴리스티렌 0.03 g, 물 0.7 g로 제작한 콘크리트 시편을 담가 2 시간 동안 실리카-활성탄 코팅을 진행하였다. 시편은 48 시간의 건조를 마치고 0.00001 g/mL 농도의 메틸렌블루 수용액 25 mL에서 흡착 실험을 진행하였다. 1 분간 좌우로 150 번 진동하는 조건에서 5, 30, 60, 120, 180 분 간격마다 용액을 채취하였고, 실리카-활성탄 코팅 콘크리트의 흡착 결과를 기존의 실리카 코팅 콘크리트 흡착 결과와 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 활성탄과 실리카를 사용하여 기능성 콘크리트를 제작한 후, 양이온성 염료인 메틸렌블루의 흡착 능력에 미치는 인자들을 고찰하고, 콘크리트의 조성 및 강도를 확인하였다. 또한, 모든 실험은 실온에서 진행하였다.

먼저, 시편이 유기 염료 내에서 잘 부유할 수 있도록 기능성 콘크리트의 제작 과정에서 발포 폴리스티렌을 첨가하였는데, 적절한 발포 폴리스티렌의 함량을 찾기 위해 첨가량을 0.02, 0.03, 0.04 g로 조절하여 시편을 제작하였다. Fig. 2는 발포 폴리스티렌을 (a) 0.02, (b) 0.03, (c) 0.04 g 씩 첨가하여 제작한 시편을 물에 담가 부유 정

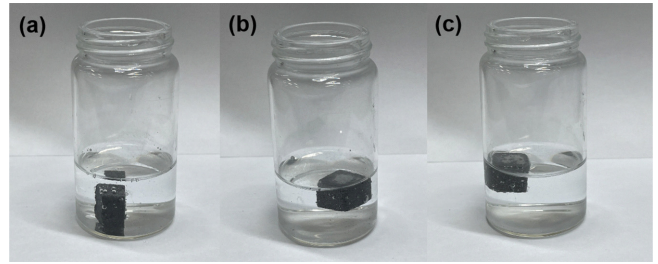


Fig. 2. Images showing the buoyancy of concrete samples produced using (a) 0.02 g, (b) 0.03 g, and (c) 0.04 g of expanded polystyrene.

도를 확인한 이미지이다. 발포 폴리스티렌을 0.02 g을 첨가한 콘크리트는 용액 안에서 가라앉은 형태를 나타내지만, 0.03 g 이상 첨가한 콘크리트는 용액 내에 적절히 부유 되는 것을 확인할 수 있었다. 콘크리트 흡착제가 오염물 속에서 부유된다면, 가라앉은 상태보다 상대적으로 오염물과 흡착제의 접촉 면적이 늘어나 오염물의 흡착 능력이 우수해질 수 있고, 콘크리트 시편이 오염물의 흐름을 따라 이동하면서 다양한 위치에서 흡착이 가능해질 수 있기 때문에 적절한 발포 폴리스티렌의 함량을 결정하는 것은 기능성 콘크리트의 제작에 있어 중요한 일이다. Fig. 2(c)에서 확인할 수 있듯이, 폴리스티렌의 추가량이 너무 많을 경우, 콘크리트 시편은 물에 뜨게 되어 일부는 공기 중에 노출되고 오염수와의 접촉 면적이 줄어들게 되므로 폴리스티렌의 사용량이 최적화될 필요가 있다. 발포 폴리스티렌의 함량이 증가할수록 콘크리트의 강도는 약해지므로, 시편이 용액 내에 적절히 부유 되고 적당한 강도를 유지할 수 있도록 발포 폴리스티렌의 함량을 0.03 g로 고정하였다[11,12].

본 논문에서 제작한 콘크리트는 적절한 건조시간을 찾아 건조 과정을 거친 뒤 흡착 실험에 사용되었는데, 건조 시간이 너무 짧으면 콘크리트의 강도가 유지되지 않아 실험 결과에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있기 때문이다. Fig. 3은 활성탄 분말 0.1 g 혼입된 콘크리트의 경화 시간을 24, 48, 72 시간으로 달리하여 흡착 시간에 따른 메틸렌블루의 농도 변화를 나타낸 그래프이다. 0.00005 g/mL 농도의 메틸렌블루 용액을 25 mL 사용하였고, 1 분간 좌우로 150 번 진동하는 shaker (Changzhou Langyue, HY-2)에서 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 분 간격으로 용액을 채취하여 흡광도를 측정하였다. 미리 작성한 검량선을 이용해 각각의 흡광도를 농도 데이터로 바꾸어 흡착 결과를 도출하였다. Fig. 3을 통해서 48 시간과 72 시간 건조의 결과가 비슷한 경향의 그래프를 나타내는 것으로 보아, 콘크리트 시편을 48 시간 이상 건조하면 흡착 실험 결과에서 큰 변화를 나타내지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 콘크리트의 건조 시간을 48 시간 이상으로 고정하여 실험하였다.

Fig. 4는 콘크리트 시편의 개수를 달리하여 흡착 시간에 따른 메틸렌블루의 농도 변화를 나타낸 그래프이다. 콘크리트의 활성탄 함량을 (a) 0, (b) 0.1, (c) 0.2, (d) 0.3 g로 변화시켰고, 활성탄을 혼합한 콘크리트가 활성탄을 혼입하지 않은 일반적인 콘크리트보다 훨씬 우수한 메틸렌블루의 흡착 결과를 나타내었다. 또한, 활성탄의 함량이 늘어날수록 메틸렌블루의 흡착능이 증가하였고, 흡착 실험에 사용되는 시편이 늘어날수록 흡착할 수 있는 콘크리트의 표면적이 늘어나 흡착 속도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 활성탄은 미세 기공을 가지고 있는 환경 친화적 흡착 소재로 거대 세공부터 분자 크

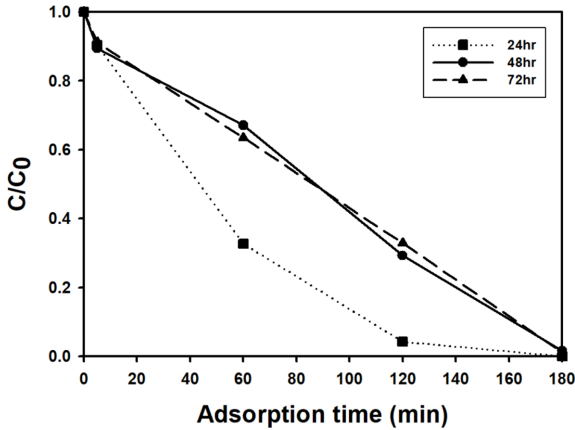


Fig. 3. Change of methylene blue concentration as a function of adsorption time. Concrete samples containing 0.1 g of activated carbon powder with different curing time were used as adsorbents.

기의 미세 세공까지 다양한 기공을 가지는 물질이다[13,14]. 따라서 활성탄 분말 혼입 콘크리트는 시편 내부 및 표면에 존재하는 활성탄의 다양한 세공을 통해 활성탄을 포함하지 않은 일반적인 콘크리트보다 우수한 메틸렌블루 염료의 흡착을 나타낸 것으로 보인다.

Table 1은 콘크리트에 혼입되는 활성탄 분말의 함량을 10 mg에서 100 mg까지 변화시켜 메틸렌블루의 흡착 효율을 관찰한 결과이다. 0.00003 g/mL의 메틸렌블루 수용액 30 mL에 활성탄 분말 혼입 콘크리트 시편을 넣고 1 분간 좌우로 150 번 진동하는 shaker

Table 1. Methylene blue adsorption efficiency of functional concrete according to the amount of activated carbon powder

Activated carbon powder (mg)	Removal efficiency (%)
10	96.22
30	98.26
50	99.18
70	99.21
80	100
90	100
100	100

(Changzhou Langyue, HY-2)에서 24 시간 동안 교반하여 흡착 결과를 도출하였다. Table 1에 따라, 활성탄 분말의 함량이 증가할수록 높은 메틸렌블루 흡착을 나타내는 것을 관찰할 수 있었다. 동일한 조건에서 흡착제로 커피 찌꺼기를 사용할 경우 기존의 연구 결과와 흡착 효율을 비교할 수 있다[15]. 커피 찌꺼기의 양이 10 mg 일 때 메틸렌블루의 흡착 효율은 26.23%인 반면, 활성탄 분말 10 mg을 혼입한 콘크리트 샘플의 메틸렌블루 흡착 효율은 96.22%인 것을 보아 커피 찌꺼기에 비하여 활성탄 분말이 훨씬 더 우수한 흡착 능력을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5(a)는 메틸렌블루 용액 농도 변화에 따른 활성탄 분말 혼입 콘크리트의 흡착 결과를 나타낸다. 0.00001, 0.00003, 0.00005 g/mL의 메틸렌블루 농도에서 활성탄 분말이 0.1 g 혼입된 콘크리트의 메틸렌블루 흡착 결과이다. 0.00005 g/mL에서 가장 가파른 흡착 기울기를 나타내는데, 그 이유는 메틸렌블루 용액의 초기 농도가 높을

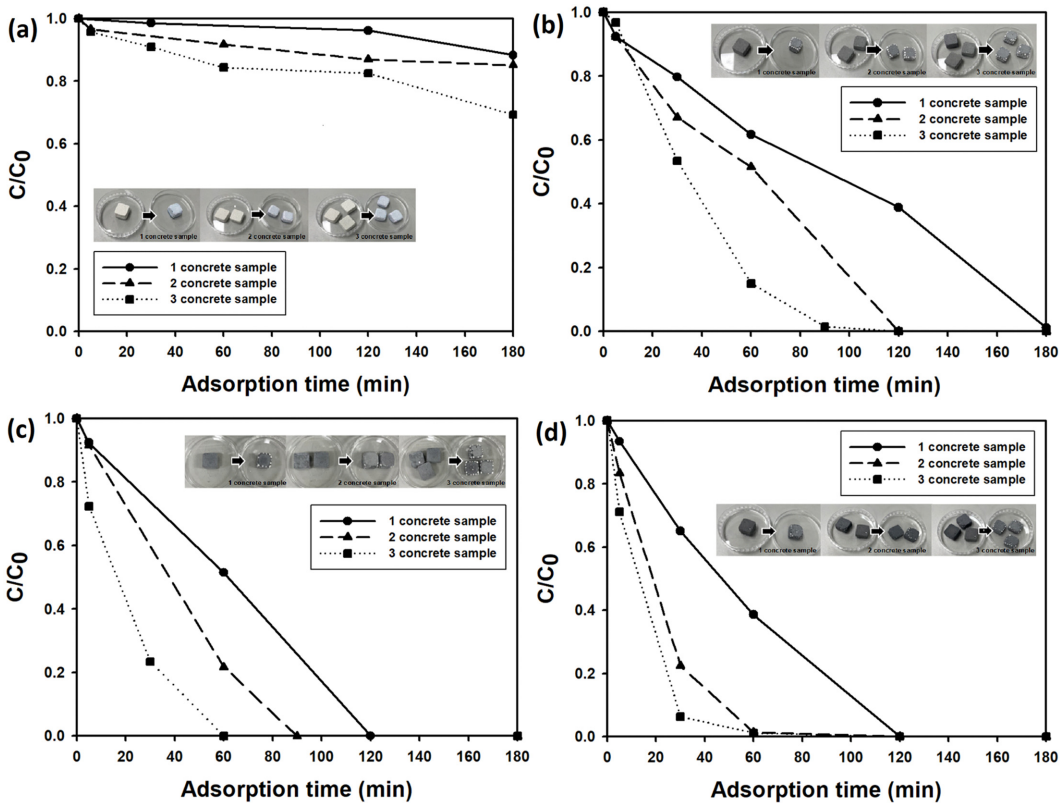


Fig. 4. Change of methylene blue concentration as a function of adsorption time using concrete samples containing (a) 0 g, (b) 0.1 g, (c) 0.2 g, and (d) 0.3 g of activated carbon powder.

수록 메틸렌 블루 분자의 이동이 활발해져 더 많은 메틸렌블루 분자가 흡착제 표면에 빠르게 도달하기 때문이다[16]. 하지만 흡착제의 양은 0.1 g로 고정되어 있기 때문에 메틸렌블루 용액의 초기 농도가 높을수록 흡착 평형에 도달하는 시간은 길어지는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 초기 농도가 높을수록 흡착이 더 빠르게 진행되고, 초기 농도가 낮을 때는 흡착 평형에 빠르게 도달하게 되는 결과를 확인할 수 있었다.

Fig. 5(b)는 흡착제(콘크리트에 혼입된 활성탄)의 단위 질량당 흡착된 메틸렌블루의 흡착량( $q$ )을 흡착 시간에 따라 초기 오염후의 염료 농도( $C_i$ )별로 나타낸 그래프이다.  $q$ 는 수용액 내에서 임의의 흡착 시간에 측정된 메틸렌블루의 농도  $C$ 와 흡착제의 투입량  $m$ , 흡착 시스템의 부피  $V$ 에 대해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \frac{V(C_i - C)}{m} \quad (1)$$

Fig. 5(b)를 통해 흡착 시간에 따라  $q$ 가 증가하는 양상을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)에서 얻어진 데이터가 선형성을 보인다고 가정하여 회귀 분석을 수행하고 기울기를 구할 수 있었으며, 단위 시간당 흡착제의 단위 질량당 메틸렌블루의 흡착량을  $C_i$ 의 함수로서 Fig. 5(c)에 나타내었다.  $C_i$ 가 증가함에 따라 흡착 속도는 빨라지지만, 증가하는 경향은 점차 완화됨을 알 수 있다.

활성탄은 산 처리를 통해 표면 구조를 파괴하거나 변화시킬 수 있다. 활성탄의 탄소 골격의 일부를 제거하여 기공 구조를 확장하거나 새로운 기공을 형성시킬 수 있으며, 새로운 작용기를 생성시켜 원하는 물질의 흡착 능력을 증가시킬 수 있다[17,18]. 따라서 본 논문에서는 황산을 이용하여 활성탄을 산 처리하였고, 황산 처리 활성탄과 산 처리를 하지 않은 활성탄의 표면 기공을 분석하였다. Fig. 6(b)는 황산 처리 활성탄의 표면 기공을 분석한 SEM 사진이고, Fig. 6(a)는 산 처리를 하지 않은 활성탄의 표면 기공을 분석한 SEM 이미지로, 황산 처리를 한 활성탄의 표면 기공이 더 확장된 모습을 관찰할 수 있다. Fig. 6(c)은 황산 처리 활성탄 분말이 혼입된 콘크리트 시편을 제작하여 기존 활성탄 분말 혼입 콘크리트와 메틸렌블루의 흡착 능력을 비교하여 나타낸 그래프이다. 황산 처리 활성탄 분말이 혼입된 콘크리트가 보다 우수한 메틸렌블루의 흡착 능력을 나타내었고, 그 이유는 앞서 전자현미경으로 관찰한 표면 기공을 통해 확인할 수 있듯이, 산 처리를 통해 활성탄 표면의 기공이 확장되어 더 많은 물리적 흡착이 가능하였고, 따라서 흡착 능력도 비례하여 증가한 것으로 예상된다.

실리카는 높은 표면적과 다양한 기공을 가지고 있어 반데르발스 힘에 의한 물리적 흡착이 가능한 물질로, 실리카 표면에는 음전하를 띠는 실라놀기(Si-OH)가 존재하므로 양이온 염료인 메틸렌블루와 정전기적 인력을 통해 흡착을 촉진할 수 있다[19]. Fig. 7(a)는 실리카를 코팅하지 않은 일반 콘크리트 시편의 표면을 관찰한 SEM 사진이고, Fig. 7(b)는 실리카를 코팅한 콘크리트 시편의 표면을 관찰한 SEM 이미지이다. 실리카가 코팅된 콘크리트는 실리카 입자들이 표면에 고르게 분포되어 있으며, 실리카 입자들 사이에 미세한 기공까지 형성된 것을 관찰할 수 있다. 또한, 실리카 졸(silica sol)은 실리카 입자가 수중에서 콜로이드 상태를 이룬 것으로, Fig. 7(c)는 실리카 졸 내에 분포하는 실리카 입자의 입도 분포를 보여준다. 본 논문에서 합성된 실리카 졸의 실리카 입자는 37.71 nm 크기에서 가장 높은 비율을 나타내는 것으로 확인되었다. Fig. 8(a)은 실리카

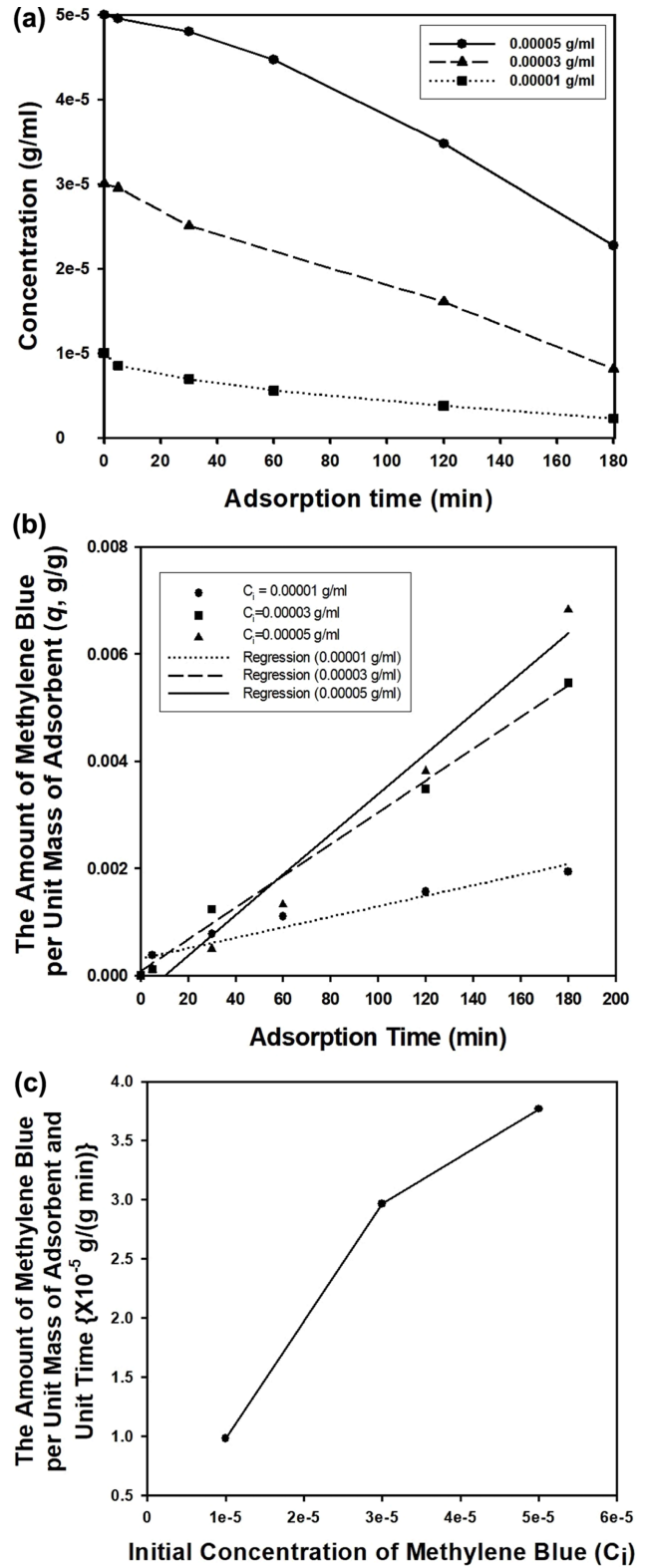


Fig. 5. (a) Change of methylene blue concentration as a function of adsorption time using concrete sample containing 0.1 g of activated carbon powder for different initial concentration of the dye. (b) Change of adsorbed amount of methylene blue per unit mass of activated carbon contained in concrete as a function of adsorption time. (c) Change of the adsorbed amount of methylene blue per unit mass of adsorbent and unit time as a function of the initial concentration of the organic dye.

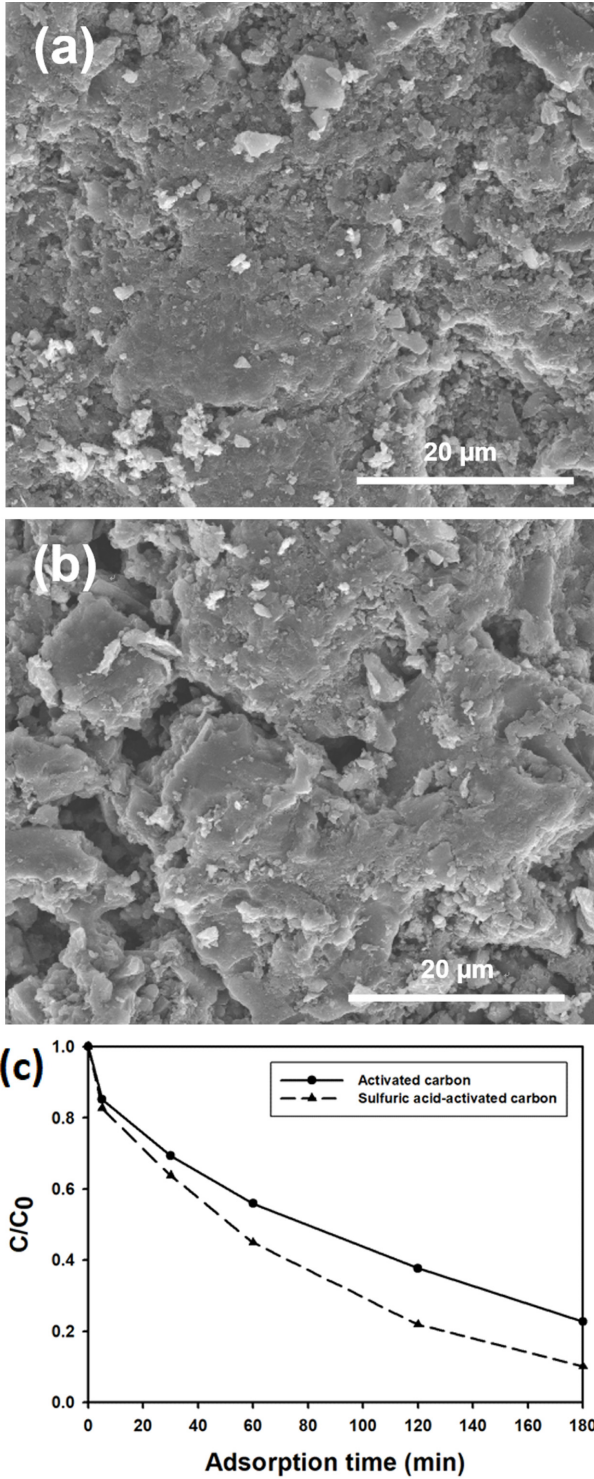


Fig. 6. SEM image showing surface pore structure of (a) activated carbon and (b) sulfuric acid-treated activated carbon. (c) Change of methylene blue concentration as a function of adsorption time using concrete sample containing 0.1 g of activated carbon powder and concrete sample containing 0.1 g of sulfuric acid-treated activated carbon powder.

졸의 코팅 시간을 달리하여 기능성 콘크리트를 제작한 뒤, 흡착 시간에 따른 메틸렌블루의 농도 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 8(a)의 샘플 절단면으로부터 30, 120, 300 분의 코팅을 거쳐 모두 샘플 표

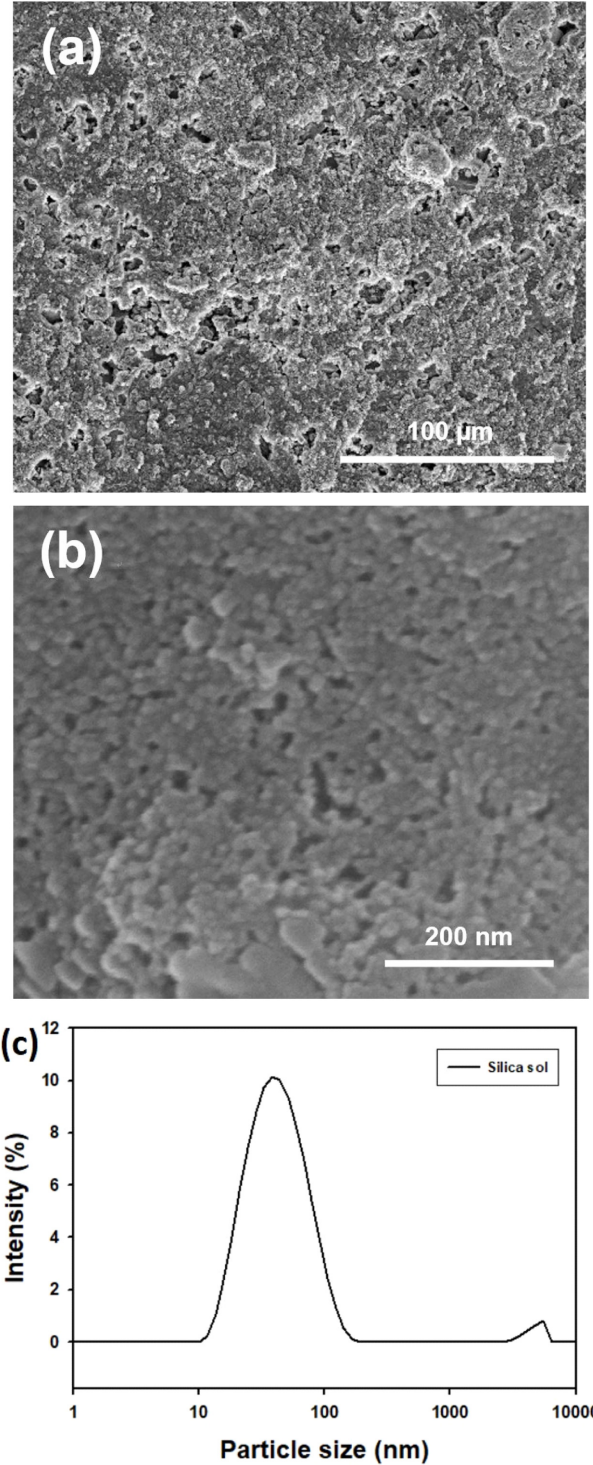


Fig. 7. (a) SEM image showing the surface micro-structure of concrete sample without silica coating. (b) SEM image showing the surface micro-structure of silica-coated concrete sample. (c) Particle size distribution of silica sol.

면 부근에서만 메틸렌블루의 흡착이 일어난 것을 확인할 수 있었다. 이는 코팅 시간을 늘려도 모세관 힘이 콘크리트 안쪽 깊은 곳까지 미치지 못하여 실리카 졸이 콘크리트 내부까지 침투하지 못해 일어난 현상으로 판단된다. 즉, 코팅 시간을 늘려도 실리카 졸은 샘플 표면 부근에서만 코팅되므로 120 분과 300 분에서 비슷한 흡착 경

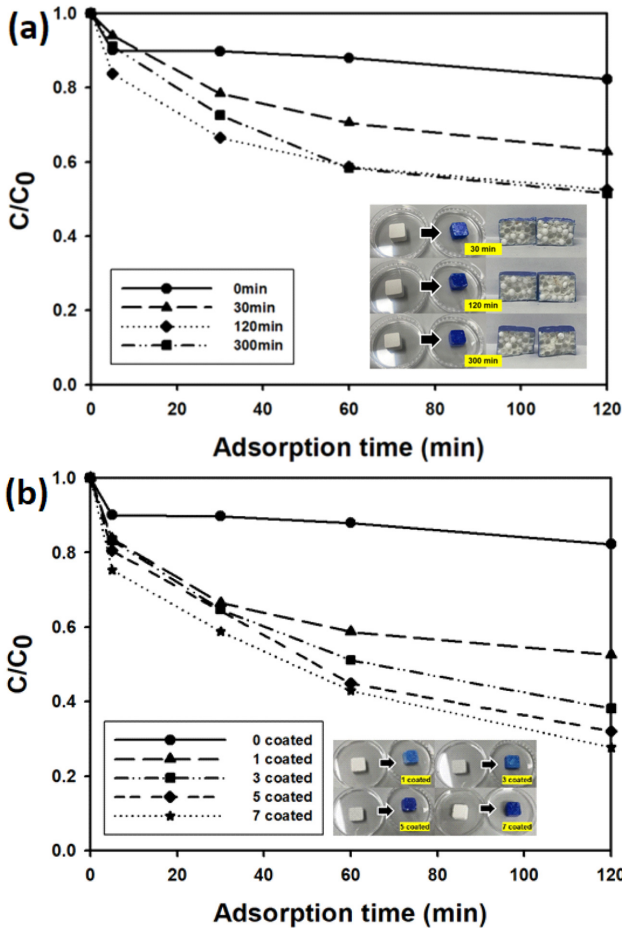


Fig. 8. (a) Change of methylene blue concentration as a function of adsorption time using concrete samples with different silica coating times. (b) Change of methylene blue concentration as a function of adsorption time using concrete samples with different number of silica coating.

향을 나타냄을 확인할 수 있었다. 따라서 본 실험에서는 코팅 시간을 길게 적용해도 유기염료 흡착 능력 증가를 관찰하기 어려울 것이라고 판단하였고, 실리카의 코팅 시간을 2 시간으로 고정 한 뒤, 실리카의 코팅 횟수를 늘려 메틸렌블루의 흡착 특성을 고찰하였다. Fig. 8(b)은 실리카 코팅을 1, 3, 5, 7 회 진행하여 제작한 콘크리트의 흡착 시간에 따른 메틸렌블루의 농도 변화를 나타낸 그래프이다. 실리카의 코팅 횟수가 증가함에 따라 콘크리트 표면의 실리카 함량이 늘어나 메틸렌블루의 흡착 속도가 향상됨을 확인할 수 있다. 실리카가 코팅된 콘크리트 시편의 흡착 실험 전, 후 사진을 관찰하면, 실리카 코팅 횟수가 늘어날수록 흡착 실험 후의 샘플이 더 짙은 푸른색을 나타내는 것으로 보아, 실리카의 코팅 횟수에 따라 콘크리트 내의 실리카 함량이 증가하였음을 확인할 수 있다. 아울러 흡착 실험 전, 후의 콘크리트가 거의 비슷한 형태를 유지하는 것으로 보아 실리카 코팅은 콘크리트의 강도 유지에도 도움을 줄 수 있는 것으로 예상된다. 그 이유는 콘크리트 표면에 실리카가 코팅되면서 콘크리트의 공극을 채워 밀도를 증가시키고 흡수율을 낮춰 압축 강도가 증진되었기 때문이다[20-22].

마지막으로, 실리카와 활성탄을 모두 코팅한 콘크리트를 제작한 후 메틸렌블루의 흡착 능력을 확인하였다. Fig. 9는 실리카-활성탄

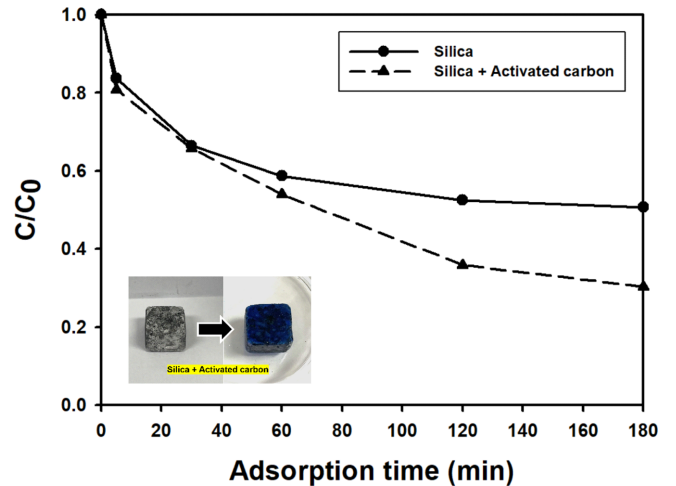


Fig. 9. Change of methylene blue concentration as a function of adsorption time using concrete samples coated with silica sol and concrete samples coated with silica and activated carbon powder.

코팅 콘크리트의 흡착 시간에 따른 메틸렌블루의 농도 변화를 나타낸 그래프이다. 실리카-활성탄 코팅 콘크리트는 실리카 뿐 아니라 활성탄 분말까지 코팅하여 실리카만 코팅된 콘크리트보다 더 우수한 흡착 능력을 나타내었다. 실리카-활성탄 코팅 콘크리트는 실리카의 코팅으로 높은 물리적 강도를 유지할 수 있었으며, 활성탄 분말의 코팅으로 유효 흡착제의 표면적이 증진되어 우수한 메틸렌 블루 흡착 능력을 나타낼 수 있었다.

기능성 콘크리트의 메틸렌블루 흡착 능력에 대해서 판단해보면, 활성탄 분말 혼입 콘크리트가 일반 콘크리트나 실리카 코팅 콘크리트, 실리카-활성탄 코팅 콘크리트에 비해 더 우수한 메틸렌블루 흡착 능력을 나타내는 것으로 보인다. Fig. 10(a)은 일반 콘크리트, Fig. 10(b)은 실리카 코팅 콘크리트의 메틸렌블루 흡착 후, 시편의 단면 이미지를 나타낸 것이다. 일반 콘크리트는 시편 표면 부근에서 메틸렌블루가 흡착된 것을 관찰할 수 있고, 실리카 코팅 콘크리트 또한 실리카가 코팅된 시편의 표면 부근에서만 메틸렌블루가 흡착된 양상을 관찰할 수 있다. 하지만 활성탄 분말을 혼입한 콘크리트의

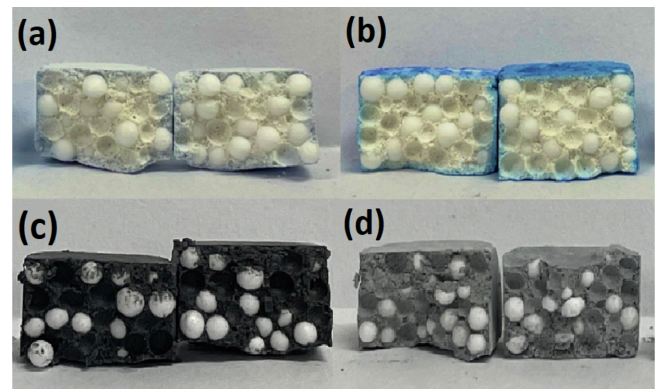


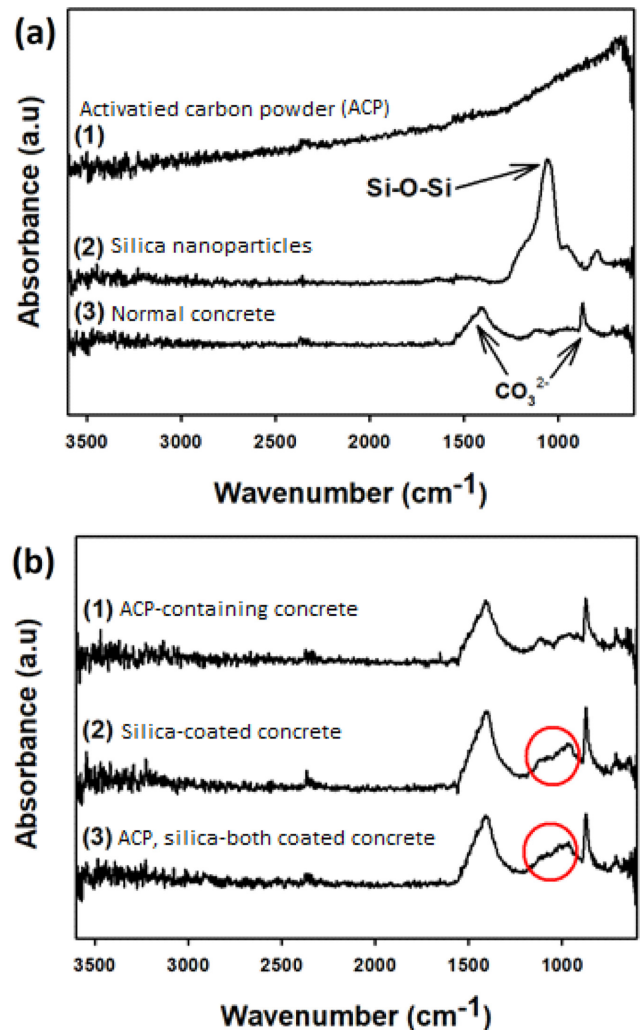
Fig. 10. Cross-sectional images of (a) normal concrete, (b) silica-coated concrete, and (c) activated carbon powder-containing concrete after methylene blue adsorption. (d) Cross-sectional image of activated carbon powder-containing concrete before methylene blue adsorption.

**Table 2. The composition of silica nanoparticle, normal concrete, and silica-coated concrete**

Silica nanoparticle		Normal Concrete		Silica-coated Concrete	
Element	Concentration (wt.%)	Element	Concentration (wt.%)	Element	Concentration (wt.%)
SiO <sub>2</sub>	91.9140	CaO	97.9657	CaO	95.4091
CaO	5.9876	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.9325	K <sub>2</sub> O	1.6919
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0383	SiO <sub>2</sub>	0.4403	SiO <sub>2</sub>	0.8774
K <sub>2</sub> O	1.9159	K <sub>2</sub> O	0.1948	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.8541
NiO	0.0004	NiO	0.0136	NiO	0.0141
TiO <sub>2</sub>	0.0856	TiO <sub>2</sub>	0.1086	TiO <sub>2</sub>	0.0618
CuO	0.0033	CuO	0.0045	CuO	0.0038
BaO	0.0003	BaO	0.0028	BaO	0.0050
Mo	0.0422	Mo	0.2100	S	0.4946
Sr	0.0079	Sr	0.0860	Mo	0.2431
Zn	0.0045	Mn	0.0358	Cl	0.1992
		Zn	0.0046	Sr	0.1043
		As	0.0009	Mn	0.0362
				Zn	0.0045
				As	0.0009

실험 전, 후 단면을 나타낸 Fig. 10(d)과 Fig. 10(c)을 살펴보면, 활성탄 분말이 콘크리트 내부까지 혼입되어 있어 시편 표면이 아닌 시편 전체에서 메틸렌블루의 흡착이 일어난 것을 육안으로 관찰할 수 있다. 따라서 기능성 분말 소재를 콘크리트에 코팅하는 것보다 혼입할 시에 메틸렌블루의 흡착능이 더 우수함을 확인하였다. 결과적으로 메틸렌블루 흡착에 있어 가장 뛰어난 흡착 능력을 나타내는 기능성 콘크리트는 시편 전체에서 흡착을 나타낼 수 있는 활성탄 분말 혼입 콘크리트로 판단된다. 특히 분말 활성탄의 첨가량이 0.3 g인 경우 가장 우수한 유기 염료의 제거율을 확인할 수 있었다. 또한 활성탄의 함량을 늘려 흡착 능력을 높일 수 있을 뿐 아니라 산 처리를 통해 활성탄의 기공을 넓혀 더 우수한 메틸렌블루 흡착을 나타낼 수 있음을 확인하였다.

추가적으로, 기능성 콘크리트들의 조성을 측정하였다. Table 2는 실리카 입자와 일반 콘크리트, 실리카가 코팅된 콘크리트의 조성을 나타낸 것이다. 먼저, 실리카 입자는 이산화규소의 함량이 약 91%로 나타나 고순도의 실리카 나노 입자가 합성된 것을 확인할 수 있었다. 실리카가 코팅된 콘크리트는 주성분이 시멘트이므로 산화칼슘 함량이 제일 높은 수치를 나타냈으며, 실리카가 코팅 되어있어 이산화규소의 함량 또한 높게 표시되었다. 일반 콘크리트는 실리카 코팅이 없기 때문에, 실리카가 코팅된 콘크리트보다 이산화규소의 함량이 낮게 표시되었다. Fig. 11은 활성탄 분말, 실리카 입자, 일반 콘크리트, 활성탄 분말 혼입 콘크리트, 실리카 코팅 콘크리트, 실리카-활성탄 코팅 콘크리트의 적외선 분광기(FT-IR) 측정 결과를 나타낸다. Fig. 11(a)의 실리카 입자의 FT-IR 측정 결과를 확인해 보면, 1080 내지 1100 cm<sup>-1</sup>에서 강한 피크가 관찰된다. 이는 Si-O-Si 결합의 신축 진동을 나타내는 특성 피크로, 실리카의 가장 강한 피크 중 하나이다[23]. Fig. 11(b)의 모든 콘크리트 샘플에서는 870에서 880 cm<sup>-1</sup>, 1400에서 1500 cm<sup>-1</sup> 부근에서 일정한 피크가 관찰되는데, 이는 시멘트의 주요 성분인 탄산칼슘과 관련 있는 것으로, 탄산염의 진동을 나타내는 것을 알 수 있다[24]. Fig. 11(b)의 실리카가 코팅된 콘크리트와 실리카와 활성탄이 모두 코팅된 콘크리트의 FT-IR 측정 결과를 확인해 보면, 960 cm<sup>-1</sup> 부근에서 동일하게 높은 피크가 관찰되는 것을 볼 수 있다. 이는 Si-OH의 신축 진동을 나타



**Fig. 11.** FT-IR spectra of (a) activated carbon powder, silica nanoparticles and normal concrete. And FT-IR spectra of (b) activated carbon powder-containing concrete, silica-coated concrete, and concrete coated with both silica sol and activated carbon powder.

내며, 실리카 표면에 존재하는 실라놀기(Si-OH)의 영향으로 나타난 피크로, 콘크리트 시편에 실리카가 존재하는 것을 확인할 수 있다[25].

기능성 콘크리트는 수질 처리 시설에 설치하여 여과 매체로 사용하거나 휘발성 유기화합물과 같은 대기 중 오염물질을 흡착하기 위해 도로 포장재에 활용될 수 있을 것이라 예상되며, 실리카를 이용하여 내구성을 높인 기능성 건축 자재로 제작하여 사용하는 등 환경 정화를 위해 많은 활용 방안이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 활성탄과 실리카 졸을 이용하여 기능성 콘크리트를 제작하였고, 메틸렌블루 염료의 흡착 능력을 확인하였다.

콘크리트가 오염수 내에 적절히 부유할 수 있도록 발포 폴리스티렌의 함량 조건을 확립하였고, 콘크리트의 활성탄 분말 함량이 증가할수록 메틸렌 블루의 흡착능이 향상됨을 확인하였다. 황산으로 활성탄을 산 처리 하여 활성탄의 표면 기공을 확장시켰고, 황산 처리 활성탄 분말이 혼입된 콘크리트가 산 처리 하지 않은 활성탄 분말이 혼입된 콘크리트보다 우수한 흡착 능력을 나타내는 것을 확인하였다. 아울러, 실리카는 표면에 음전하를 띠는 작용기를 가지고 있어 양이온성 염료의 흡착이 가능하므로 실리카가 코팅된 기능성 콘크리트를 제작한 후, 메틸렌블루의 흡착 능력을 측정하였다. 실리카의 코팅 횟수가 늘어날수록 메틸렌블루 염료의 흡착 능력이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 실리카 졸의 코팅 작업으로 콘크리트의 물리적 강도가 향상되었는데, 이는 실리카가 콘크리트 표면 공극을 채워 콘크리트의 밀도 향상으로 인해 나타난 현상으로 예상된다. 추가적으로 실리카 졸 뿐 아니라 활성탄 분말도 함께 콘크리트에 코팅하여 실리카에 의한 강도 유지 효과와 활성탄 분말에 의한 우수한 흡착 효과를 동시에 나타낼 수 있는 기능성 콘크리트를 제작하였다.

#### 감 사

본 연구는 한국연구재단의 중점연구소 지원 프로그램(과제번호: NRF-2017R1A6A1A03015562)과 기본 연구 사업의 연구비 지원(과제번호: RS-2023-00250648)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

- Kim, B. I., Oh, S. K., and Seo, S. H., "A Study on the Development of Light Emotion Friendly Concrete Block for Efficient Application of Titan-oxide photocatalyst," *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, **23**(6), 120-131(2019).
- Kim, H. R., "A Study on the Efficiency of Concrete to Absorb Hazardous Substances and to Emit Fragrance," M.S Dissertation, Chungju National University(2010).
- Jung, Y. W., Chang, C. H., and Kim, J. K., "Manufacture and Characteristics of Concrete Sidewalk Blocks Using Photocatalyst Agent," *J. Rec. Const. Resources.*, **7**(4), 423-430(2019).
- Yang, I. H., Park, J. H., Park, H. W. and Jung, H. W., "Self-Cleaning of Mortar Mixed with Photocatalyst by Using Methylene Blue Solution," *J. Rec. Const. Resources.*, **8**(3), 356-364(2020).
- Kim, H. J., Kim, Y. K. and Kwon, S. J., "Evaluation of Durability and Self-clearing in Concrete Impregnated with Photocatalyst-colloidal Silica," *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, **22**(5), 47-54(2018).
- Park, G. J., Park, J. J., Kwak, J. W. and Kim, S. W., "Research on the Efficient Manufacturing Method of Photocatalyst Concrete according to the Type and Mixing Ratio of Photocatalyst," *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, **23**(4), 69-77(2019).
- Faraldos, M., Kropp, R., Anderson, M. A. and Sobolev, K., "Photocatalytic Hydrophobic Concrete Coatings to Combat Air Pollution," *Catal. Today*, **259**(1), 228-236(2016).
- Boonen, E. and Beeldens, A., "Photocatalytic Roads: from Lab Tests to Real Scale Applications," *Eur. Transp. Res. Rev.*, **5**, 79-89(2013).
- Kim, S. S., Lee, J. B., Ko, J. S. and Kim, I. K., "A Study on the Nano Silica-Sol Coating for Improving Performance of Recycled Aggregate," *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, **17**(4), 84-90(2013).
- Woo, J. K., Hong, S. H., Jun, K. B. and Ryu, H. G., "A Study on the Development of Friendly Environment Mortar by Using Activated Carbon as Fine Aggregate," *J. Korea Inst. Build. Constr.*, **6**(2), 105-109(2006).
- Park, C. B., Kim, Y. H., Jun, Y. B., Kim, J. H. and Ryu, D. H., "Durabilities of Lightweight Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete," *J. Korea Concr. Inst.*, **33**(3), 227-234(2021).
- Sim, J. I. and Yang, K. H., "Influence of Specimen Geometries on the Compressive Strength of Lightweight Aggregate Concrete," *J. Korea Concr. Inst.*, **24**(3), 333-340(2012).
- Lee, J. M., Kim, H. H. and Chung, M. K., "Adsorption of Methylene Blue and Phenol from an Aqueous Solution on to Activated Carbon," *Applied Chemistry*, **6**(2), 951-954(2002).
- Kam, S. K., You, H. N. and Lee, M. G., "Adsorption Characteristics of Methylene Blue from Aqueous Solution According to Physical and Surface Properties of Activated Carbons," *J. Environ. Sci. Int.*, **23**(11), 1821-1826(2014).
- Kang, S. G., "A study on Characteristics of the Methylene Blue dye Adsorption in Wastewater Using Waste Coffee," M.S Dissertation, Ewha Womans University(2020).
- Li, H., Liu, L., Cui, J., Cui, J., Wang, F. and Zhang, F., "High-efficiency Adsorption and Regeneration of Methylene Blue and Aniline Onto Activated Carbon from Waste Edible Fungus Residue and Its Possible Mechanism," *RSC Adv.*, **10**, 14262-14273(2020).
- Yun, M. R., "A Study on the Adsorption of Heavy Metals by Impregnated Active Carbons," M.S Dissertation, Chosun University(2006).
- Ju, H. S., Lee, S. I., Lee, Y. S. and Ahn, H. G., "Surface Modification of Activated Carbon by Acid Treatment and Adsorption Property of Heavy Metals," *Applied Chemistry*, **4**(1), 173-176(2000).
- Parida, S. K., Dash, S., Patel, S. and Mishra, B. K., "Adsorption of Organic Molecules on Silica Surface," *Adv. Colloid Interface Sci.*, **121**(1-3), 77-110(2006).
- Heo, G. H., Song, K. C., Park, J. G., Park, J. H. and Jun, H. M., "Effect of Mechanical Properties of SiO<sub>2</sub> Coated Carbon Fiber Reinforced Mortar Composites," *J. Korea Concr. Inst.*, **32**(1), 65-76(2020).
- Kim, Y. H., Jeong, C. S., Song, M. S. and Lee, W. G., "The Effects of Silica Sol and Modified Latex on the Concrete Surface

- Protection Cement Mortar for Improvement of Durability of Concrete; *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.*, **20**(12), 715-722(2019).
22. Faiz Shaikh, Vimal Chavda, Naji Minhaj, and Hasan S. Arel, "Effect of Mixing Methods of Nano Silica on Properties of Recycled Aggregate Concrete;" *Struct. Concr.*, **19**(2), 387-399(2017).
23. Ruth Ellerbrock, Mathias Stein, and Jorg Schaller, "Comparing Amorphous Silica, Short-range-ordered Silicates and Silicic Acid Species by FTIR;" *Sci. Rep.*, **12**(1), 11708(2022).
24. Cho, J.-S., Waetzig, G. R., Udayakantha, M., Hong, C. Y. and Banerjee, S., "Incorporation of Hydroxyethylcellulose-Functionalized Halloysite as a Means of Decreasing the Thermal Conductivity of Oilwell Cement;" *Sci. Rep.*, **8**(1), 16149(2018).
25. Innocenzi, P., "Infrared Spectroscopy of Sol-gel Derived Silica-based Films: a Spectra-microstructure Overview;" *J. Non-Cryst. Solids*, **316**(2-3), 309-319(2003).

#### Authors

**Yea-Young Lee:** Undergraduate student, Department of Chemical Engineering and Biotechnology, Tech University of Korea, Siheungsi, 15073, Korea; alice979433@gmail.com

**Jeon-Hun Chung:** Graduate student, Department of Chemical Engineering and Biotechnology, Tech University of Korea, Siheungsi, 15073, Korea; micle123476@gmail.com

**Min-Jun Lee:** Undergraduate student, Department of Chemical Engineering and Biotechnology, Tech University of Korea, Siheungsi, 15073, Korea; lmj065@naver.com

**So-Hyeon Park:** Undergraduate student, Department of Chemical Engineering and Biotechnology, Tech University of Korea, Siheungsi, 15073, Korea; qtg0729@tukorea.ac.kr

**Young-Sang Cho:** Professor, Department of Chemical Engineering and Biotechnology, Tech University of Korea, Siheungsi, 15073, Korea; yscho78@tukorea.ac.kr