

# 광합성균을 혼입한 시멘트 모르타르의 CO<sub>2</sub> 흡수성능에 관한 기초적 연구

## Effect of Partial Replacement of Water with Photosynthetic Bacteria on the Level of CO<sub>2</sub> Absorption in Mortar

정 재 호                      이 건 철\*                      윤 승 조                      조 재 흥                      최 중 구

Joung, Jae-Ho              Lee, Gun-Cheol\*              Yoon, Seung-Joe              Joe, Jae-Heung              Choi, Jung-Gu  
*Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation,  
Deasowonmyun Daehakro 50, Chungju, 380-702, Korea*

### Abstract

In this research, the CO<sub>2</sub> absorption performance of mortar was investigated. The level of CO<sub>2</sub> absorption in mortar with various binders including cement and nonsintered cement was examined. As a result for the mortar with photosynthetic bacteria, the compressive strength was similar to the one without the bacteria at early age but decreased at the age of 28 days. However, for the CO<sub>2</sub> absorption, with photosynthetic, the performance of the mortar with OPC, and nonsintered cement decreased to 21%(234 ppm) and 19.7%(243 ppm) respectively after 12 hours age.

Keywords : photosynthetic bacteria, CO<sub>2</sub> absorption, global warming, cement mortar

### 1. 서 론

최근 지구온난화의 심각성이 부각됨에 따라 탄소 배출을 줄이기 위한 환경운동이 전 세계적인 차원에서 진행되고 있다. 특히, 온난화로 인한 피해가 커지면서 각국은 이산화탄소(이하, CO<sub>2</sub>로 칭함) 양을 줄이는데 더욱 주력하고 있다[1,2].

이처럼 지구온난화의 주범으로 지목되고 있는 CO<sub>2</sub>는 국가 총에너지소비의 약 1/4이상을 차지하고 있는 건설 산업에서도 반드시 해결해야 하는 문제로 제기 되고 있으며[3], 이러한 환경문제 극복을 위한 노력으로 각종 연구를 통한 신기술 개발, 환경영향 평가기법 등이 활발히 이

루어지고 있다[4,5]. 특히, 국가 온실가스 감축목표를 2020년 배출전망치(BAU) 대비 30%를 감축하려는 국가 목표를 설정하고 목표달성을 위하여 다각적인 노력을 경주하고 있는 가운데 건설재료 분야의 실질적 성과획득이 절실히 요구되고 있는 실정이다[6].

시멘트-콘크리트산업에 있어서 CO<sub>2</sub> 저감 대책으로는 CO<sub>2</sub> 배출량이 적은 결합재를 적극 사용하는 방법, 비소성 시멘트 배합 사용 등 시멘트생산 및 콘크리트 제조 단계에서 CO<sub>2</sub>를 저감하는 방법 등이 일반적이다[7,8]. 한편, 콘크리트의 자체의 CO<sub>2</sub>를 흡수기술로서는 CO<sub>2</sub> 흡수성이 높은 식물성 섬유를 혼입하는 방법[9], 콘크리트 내부에 유용미생물을 혼입하여 콘크리트와 미생물간의 상호 작용을 이용하는 방법 등이 있을 수 있다. 이중 유용미생물을 콘크리트에 적용하여 콘크리트의 성능이 개선하고자 하는 연구는 국내외 다수의 연구자에 의해 많은 연구결과가 보고된 바 있다[10,11,12]. 이러한 측면에서 광합성 작용을 하는 유용미생물을 콘크리트에 적용할 경우 나무나 식물성 플랑크톤과 같이 콘크리트박테리아 등을 이용

Received : October 13, 2014

Revision received : October 22, 2014

Accepted : November 13, 2014

\* Corresponding author : Lee, Gun-Cheol

[Tel: 82-43-841-5207, E-mail: gcleee@ut.ac.kr]

©2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

하여 나무나 식물성 플랑크톤과 같이 CO<sub>2</sub>를 영양분으로 하고 O<sub>2</sub>를 방출하는 광합성 콘크리트의 개발이 가능할 것으로 예상된다[13].

이와 관련하여 Lee et al.[14] 등은 CO<sub>2</sub> 흡수형 콘크리트의 개발을 목적으로 광합성 박테리아 이용한 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 흡수성능에 대한 검토를 진행 중에 있다. 광합성균은 광합성작용을 하여 포도당을 만드는 세균으로서 산소를 사용하지 않는 혐기성 세균으로 동화색소를 가지고 있지 않으므로 광합성활동을 할 수는 없지만, 홍색황세균, 녹색황세균, 홍색세균 등은 세균 엽록소를 가지고 있어 이산화탄소와 수소화합물을 재료로 광합성작용을 하는 것으로 알려져 있다[15]. 이러한 광합성균은 농업, 축산, 수산 등에 있어 다양한 용도로 활용되고 있으나 콘크리트에 CO<sub>2</sub>를 흡수할 목적으로 연구는 전무한 상태이다.

따라서, 본 논문에서는 광합성 박테리아를 이용한 콘크리트의 CO<sub>2</sub>흡수기술로서 광합성 박테리아를 혼입한 모르타르의 기초적 특성에 대하여 검토하므로써 지구환경 부하를 저감 할 수 있는 친환경 콘크리트의 개발을 위한 기초적 자료로 제시하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다.

Table 1. Experimental design

| Experimental factor |   | Experimental level |             |
|---------------------|---|--------------------|-------------|
| W/B (%)             |   | 50                 |             |
| B : S               |   | 1 : 3              |             |
| Formulation details | Kinds of binder                             | OPC(C),            | Non-OPC(NC) |
|                     | Photosynthesis bacteria by water weight (%) | 0(PB 0),           | 100(PB 100) |

- Compressive strength (3, 7, and 28 days)
- Flexural strength (3, 7, and 28 days)
- SEM (3 and 28 days)
- XRD (3 and 28 days)
- Density of CO<sub>2</sub> (28 days)

[Notes] OPC : Ordinary portland cement, Non-OPC : Non-ordinary portland cement

즉 배합사항으로써 플레인 배합은 W/B 50%, B:S = 1:3으로 하였으며, 결합재 종류는 OPC와 OPC를 전혀 사용하지 않은 비소성 결합재 Non-OPC의 2종류로 하였다. 또한, 광합성균 혼입은 배합수에 광합성균을 전혀 혼입하지 않은 PB 0와 배합수의 100%를 광합성균으로 대체한 PB 100의 2종류로 하였다. 실험사항으로는 응결시간, 3, 7, 28일 재령에서의 압축 및 휨강도를 측정하고, 정밀분석으로는 SEM촬영 및 XRD분석을 실시하였다. 또한, 광합성균의 CO<sub>2</sub> 흡수여부를 확인하기 위하여 재령 28일에서의 CO<sub>2</sub> 농도 측정을 실시하였다. 단, 미생물의 생존 환경 조건을 고려하여 CO<sub>2</sub> 농도 측정용 시험체는 소정의 재령까지 온도 20±3℃, 습도 60±10%의 양생실에서 기중양생을 실시하였다.

Table 2. Mix proportions

| Type      | W/B (%) | B:S | Unit weight (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |    |    |      |     |     |
|-----------|---------|-----|----------------------------------|-----|-----|----|----|------|-----|-----|
|           |         |     | Binder                           |     |     |    |    | S    |     |     |
| C         | BS      | FA  | SL                               | SF  | S   | W  | PB |      |     |     |
| C-PB 0    |         |     | 508                              | 0   | 0   | 0  | 0  | 1524 | 254 | 0   |
| C-PB 100  | 50      | 1:3 | 0                                | 305 | 153 | 25 | 25 | 1524 | 0   | 254 |
| NC-PB 0   |         |     | 508                              | 0   | 0   | 0  | 0  | 1524 | 254 | 0   |
| NC-PB 100 |         |     | 0                                | 305 | 153 | 25 | 25 | 1524 | 0   | 254 |

[Notes] W/B : Water to binder ratio, C : Cement, BS : Blast furnace slag, FA : Fly ash, SL : Slaked lime, SF : Slaked lime, S : Sand, W : Water, PB : Photosynthesis bacteria

### 2.2 사용재료

본 실험에서 사용한 재료의 물리·화학적 특성은 Table 3 및 Table 4와 같다.

Table 3. Physical properties of cement

| Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Fineness (cm <sup>2</sup> /g) | Stability (%) | Setting time(min) |           | Compressive strength (MPa) |        |
|------------------------------|-------------------------------|---------------|-------------------|-----------|----------------------------|--------|
|                              |                               |               | Initial set       | Final set | 3 days                     | 7 days |
| 3.15                         | 3 480                         | 0.06          | 250               | 438       | 22.6                       | 31.3   |

Table 4. Physical and chemical properties of various cementitious materials used

| Segment | Physical features            |                               | Chemical composition |      |                                |     |                 |                                |
|---------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|------|--------------------------------|-----|-----------------|--------------------------------|
|         | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Fineness (cm <sup>2</sup> /g) | SiO <sub>2</sub>     | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | SO <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| BS      | 2.9                          | 4 300                         | 29.4                 | 40.2 | 15.4                           | 7.9 | 4.4             | 0.5                            |
| FA      | 2.2                          | 3 800                         | 52.2                 | 8.8  | 1.7                            | 2.0 | 0.8             | 2.8                            |
| SL      | 2.1                          | 2 000                         | 2.0                  | 91.3 | 1.1                            | 3.7 | 0.5             | 0.8                            |
| SF      | 2.1                          | 200 000                       | 95.1                 | 0.3  | 0.2                            | 0.7 | 0.8             | 0.1                            |

시멘트는 KS L 5201[16] 기준을 만족하는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 무기분체는 고로 슬래그 미분말(Blast furnace slag), 플라이애시(Fly ash), 소석회(Slaked lime) 및 실리카흄(Silica fume)을 사용하였으며, 골재는 주문진산 표준사를 사용하였다.

본 연구에서 사용한 광합성균은 국내 D사에서 물, 미생물, 영양분 등을 혼합하여 배양 판매하는 홍색황세균을 사용하였으며, 생균수는  $1 \times 10^{10}$  cell/ml이다. 이 세균은 광합성작용을 하여 포도당을 만드는 세균으로서 산소를 사용하지 않는 혐기성 세균이다. 일반적으로 세균은 동화색소를 가지고 있지 않아 광합성 작용을 할 수 없지만, 이 홍색황세균은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 수소화합물 (Hydrogen compound)을 재료로 광합성작용을 할 수 있는 세균류에 해당된다.



Figure 1. Mixing water including photo-synthesis bacteria

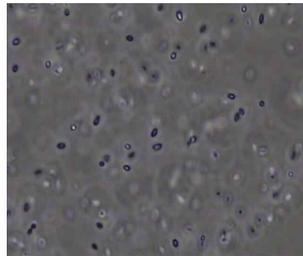


Figure 2. Photosynthesis bacteria (×1000 times magnified feature)

### 2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 모르타르의 혼합은 KS L 5109에 의거하여 물과 표준사를 투입하여 30초간 저속으로 혼합하고, 물을 투입하여 30초간 휴식한다. 휴식 후 분체를 투입하여 60초간 저속으로 혼합하고 다시 30초간 휴식 후 90초간 고속으로 혼합한 후 배출하였다.

응결시간(setting time)은 KS F 2436의 프록터 관입저항(proctor penetration resistance) 시험방법으로 실시하였다. 압축강도 및 휨강도 시험은 KS F 2476[17]에 의거하여 실시하였다. 40×40×160 mm로 제작된 시험체를 24시간 동안 20 ± 2 °C의 상온에서 기건양생 후 탈형하여 소정의 재령까지 20 ± 2°C의 수증양생을 실시하였으며, 계획된 재령에서 50kN UTM을 이용하여 강도를 측정하였다. Figure 3은 이산화탄소 농도를 측정하는 장비로 공시체를 기건양생(air dry curing)후 재령 28일에

300×300×300 mm의 PVC 용기에 밀봉 후 이산화탄소 측정기(IAQ-CALC Indoor Air Quality Meters 7545)를 사용하여 1시간 간격으로 12시간 동안 이산화탄소 농도(ppm)를 측정하였다. 또한, 광합성균 혼입에 따른 수화생성물의 성상을 파악하기 위하여 SEM촬영 및 XRD 분석을 실시하였다.

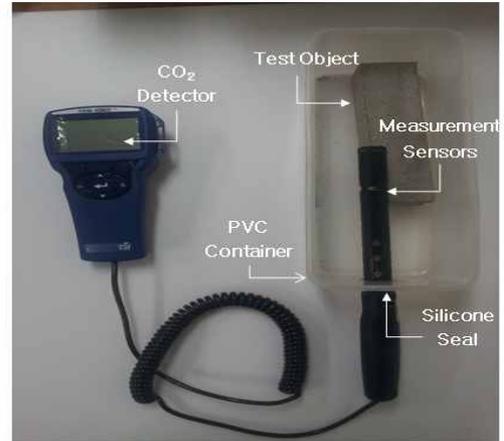


Figure 3. Photo of CO<sub>2</sub> measurement of specimens

### 3. 실험결과 및 분석

Figure 4는 분체타입 및 광합성균 유무별 시간 경과에 따른 관입저항치를 나타낸 것이다. C-PB 0의 경우 초결은 180분, 종결은 360분으로 나타났다. 반면, 광합성균을 혼입한 C-PB 100의 경우 초결은 240분, 종결은 450분으로 나타났다. 광합성을 혼입할 경우 광합성균을 혼입하지 않은 경우에 비해 응결시간이 지연되는 것을 확인할 수 있었다.

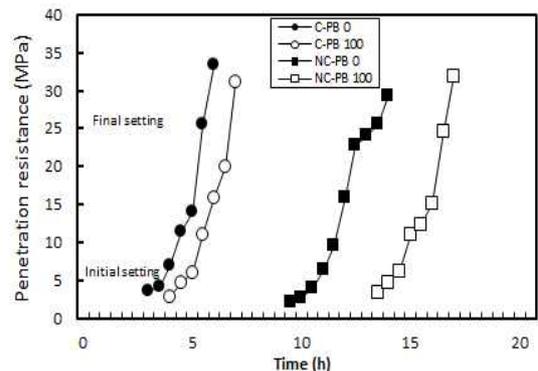


Figure 4. Setting evolution of specimens

비소성 시멘트를 사용한 NC-OPC의 경우도 광합성균의 혼입에 따라 응결시간이 지연되는 것으로 나타났는데, NC-PB 0의 초결은 570분, 종결은 840분으로 나타났으며 광합성균을 혼입한 NC-PB 100의 초결은 810분, 종결은 1020분으로 나타나 광합성을 혼입할 경우 광합성균을 혼입하지 않은 경우에 비해 초결, 종결 모두 약 3시간 정도 지연되는 것으로 나타났다. 이는 배지(medium)에 포함된 탄소원(C-source)이 완전히 소진되지 않은 것에 의한 결과로 사료된다.

Figure 5는 KS F 2476에 준하여 분체타입 및 광합성균 유무별 재령경과에 따른 압축강도 결과를 나타낸 것이다. C-PB 0의 경우 재령경과에 따른 강도증진 현상이 일반적인 강도발현 성상을 나타내었다. 한편, 광합성균을 혼입한 C-PB 100의 경우 3일 재령에서 C-PB 0에 비해 약간 큰 압축강도를 나타내고 있으나, 28일 재령 기준으로 볼 때 광합성균의 혼입에 따라 강도는 저하하는 것으로 나타났다. 특히 NC-PB 100의 28일 강도의 경우 NC-PB 0에 비해 현저한 강도저하를 나타내고 있다. 전반적인 경향을 볼 때 광합성균의 혼입에 따라 강도는 저하하는 것으로 분석되나, 3일 재령에서 C-PB 100이 C-PB 0에 비해 큰 강도 값을 나타내는 것은 낮은 강도 범위에서 발생할 수 있는 오차의 범위로 사료된다. 또한, 광합성균의 혼입에 따른 강도 저하 원인으로는 광합성균 배지(medium)에 포함되어 있는 당류계 탄소원(C-source)에 의한 응결지연 현상으로 사료된다.

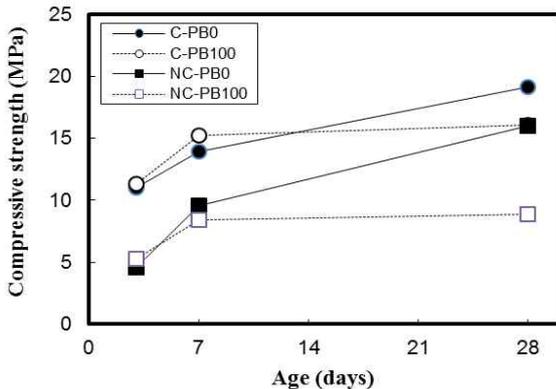


Figure 5. Compression strength of specimens

Figure 6은 Figure 5와 동일한 방법으로 휨강도 특성을 나타낸 것이다. 휨강도의 경우도 압축강도와 마찬가지로

로 광합성균의 혼입에 따라 강도가 저하하는 경향을 나타내었으며, 비소성 결합재의 경우 OPC에 비해 전반적으로 강도가 저하하는 것으로 나타났다.

압축강도와는 달리 C-PB 100의 경우 28일 재령이 광합성균을 혼입하지 않은 C-PB 0와 유사하게 나타나고 있는데, 이는 강도 범위에서 발생할 수 있는 오차일 가능성이 크다.

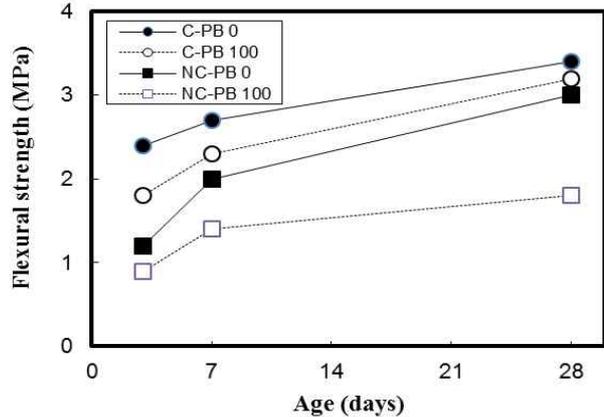


Figure 6. Flexural strength of specimens

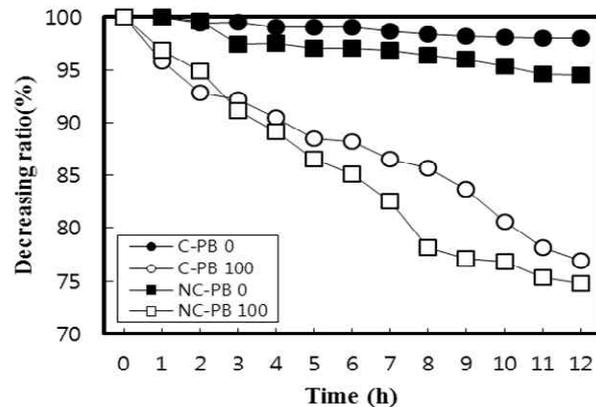


Figure 7. Reduction ratio of CO<sub>2</sub>

Figure 7은 분체타입 및 광합성균 유무별 시간경과에 따른 CO<sub>2</sub> 감소율을 나타낸 것이다. CO<sub>2</sub> 감소율 측정은 각각의 샘플에 대해 1시간 간격으로 12시간 동안 실시하였으며, 초기 CO<sub>2</sub>의 농도는 1100 ppm 전후로 나타났다. 광합성균을 혼입한 C-PB 100과 NC-PB 100의 경우 광합성균을 혼입하지 않은 경우에 비해 현저한 이산화탄소 감소율을 나타내었다. C-PB 0의 경우 12시간 경과 후

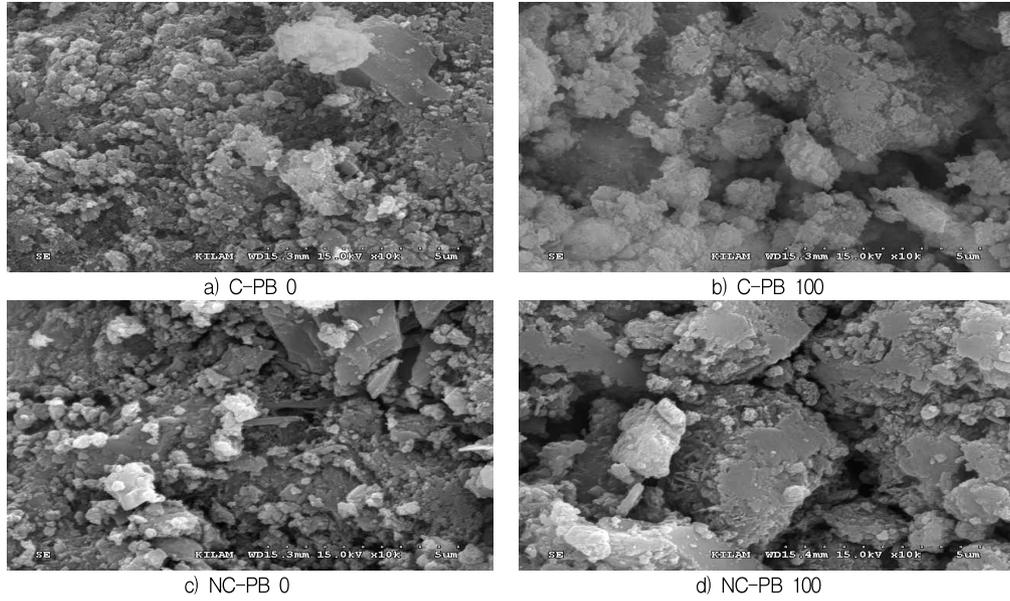


Figure 8. SEM images ( $\times 10000$ , 3days)

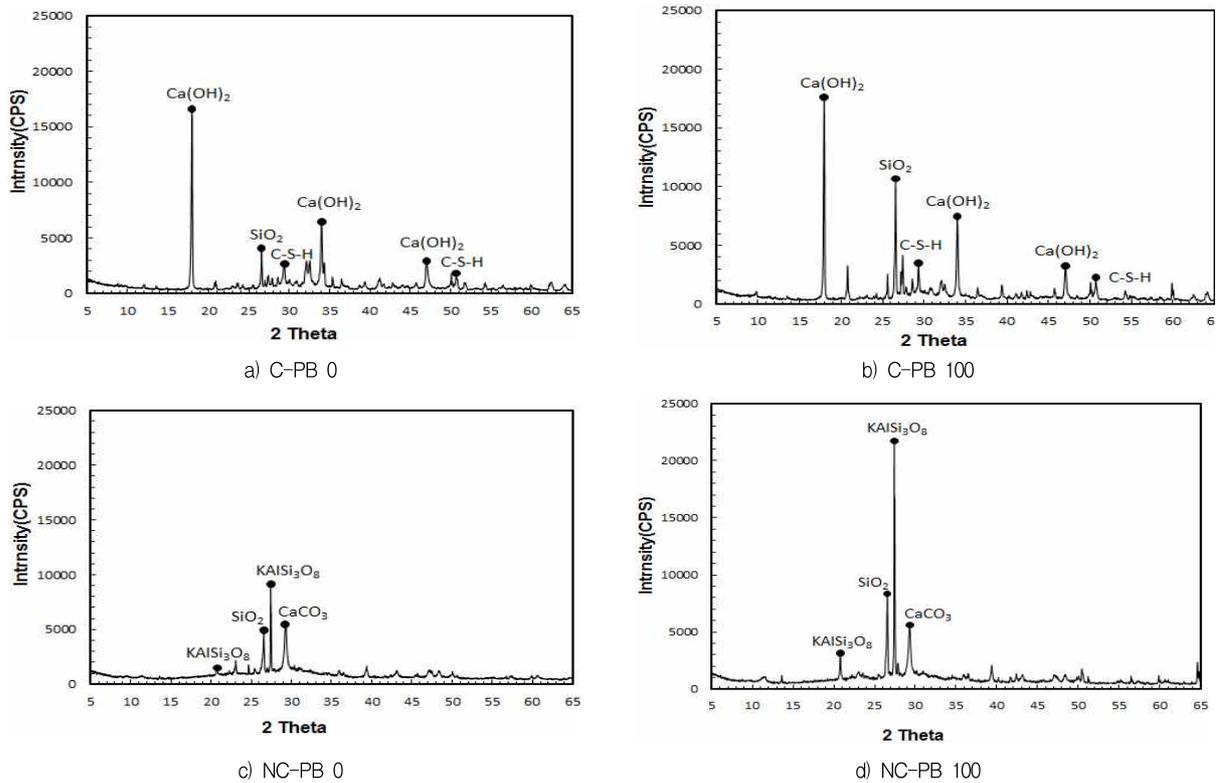


Figure 9. XRD analysis

이산화탄소 농도가 약 2%(980 ppm)정도의 감소율을 나타낸 반면, C-PB 100의 경우 12시간 경과 후 약 23.1%(846 ppm)의 감소율을 나타내어 플레인 대비 약

21%(234 ppm)의  $\text{CO}_2$  감소율을 확인 할 수 있었다. 또한, 비소성 시멘트 기반인 NC-PB 0의 경우 OPC 기반인 C-PB 0에 비해  $\text{CO}_2$  감소율이 약간 큰 것으로 나타났다.

한편, NC-PB 0에 광합성균을 혼입한 NC-PB 100의 경우 12시간 경과 후의 CO<sub>2</sub> 감소율은 약 19.7%(243 ppm)로 나타났다. 이처럼, 광합성균의 혼입된 시험체에서 높은 CO<sub>2</sub> 감소율을 나타내는 것은 현 단계에서는 광합성균의 영향으로 예상되나, 구체적인 메커니즘은 보다 구체적인 분석을 통해 확인 할 필요가 있다.

Figure 8은 분체타입 및 광합성균 유무별 3일 재령에서의 SEM촬영 결과를 나타낸 것이다. 광합성균 혼입 유무에 따른 경향으로는 C-PB 100의 경우 광합성균의 혼입에 따른 응결지연 현상으로 느슨한 조직구성을 나타내고 있다. 또한, 비소성 결합재인 NC-PB 0의 경우 잠재수경성과 포졸란 반응성을 가진 고로슬래그와 플라이애쉬가 알칼리성질을 나타내는 소석회화 반응하여 이온반응으로 전반적으로 밀실한 조직구성을 나타내었으며 여기에 광합성균을 혼입한 NC-PB 100의 경우도 상대적으로 느슨한 조직구성을 나타내었다.

Figure 9는 수화물의 생성물을 살펴보기 위하여 분체타입 및 광합성균 유무별 XRD분석 결과를 나타낸 것이다. 광합성균 혼입 유무에 따른 경향으로는 혼입유무에 따라 차이는 나타나지 않았지만 PB 0 비해 KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>이 높은 피크치를 나타내었다. 또한, 분체종류에 따른 경향으로는 분체종류에 따라 다소 다른 성상을 나타내었으며, Non OPC의 경우 OPC에 비해 C-S-H겔, Ca(OH)<sub>2</sub> 등이 확인되지 않는 반면 CaCO<sub>3</sub>의 함량의 피크치가 다소 높게 나타났다. 이는 XRD 분석만으로는 수화생성물의 생성유무 분석의 어려움이 있어, 향후 TGA 분석을 병행하여 종합적으로 분석할 필요가 있음을 시사하고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 시멘트 모르타르에 광합성균을 혼입하여 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 흡수 가능성에 대해 기초적인 검토를 실시하였고, 이상의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 응결시간의 지연현상은 광합성균 배양액에서 완전히 제거되지 않은 탄소원(C-source)으로 인한 것으로 판단되어, OPC의 경우 광합성균을 혼입한 경우 광합성균을 혼입하지 않은 경우에 비해 응결시간이 약 1시간 정도 지연되었고, Non OPC의 경우에도 광합성균을 혼입한 경우 초결, 종결 모두 약 3시

간 정도 지연되는 것으로 나타났다.

- 2) 압축강도 및 휨강도는 광합성균 혼입에 따라 전반적으로 강도가 저하하는 것으로 나타났다. Non OPC의 경우에도 전반적으로 OPC와 유사한 경향을 나타내었다. 이는 응결지연 현상에 의한 초기강도 지연 및 장기강도 발현을 감소에 의한 것으로 판단된다.
- 3) CO<sub>2</sub> 흡수에 대한 농도측정 결과로는 광합성균을 혼입한 C-PB 100과 NC-PB 100의 경우 광합성균을 혼입하지 않은 경우에 비해 현저한 이산화탄소 감소율을 나타내었다.
- 4) SEM 촬영 결과, 전반적으로 광합성균을 혼입한 경우 광합성균을 혼입하지 않은 경우에 비해 느슨한 조직구성을 나타내었는데, 정확한 분석에는 다소 어려움이 있어 추후 보다 정량적인 분석을 기반으로 초기재령에서의 강도 발현 여부를 검토할 필요가 있다.

#### 요 약

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 흡수형 콘크리트의 개발을 목적으로 광합성균을 혼입한 모르타르의 기초적 특성 및 CO<sub>2</sub> 흡수 성능에 대하여 검토하였다. 아울러, 결합재 종류별 CO<sub>2</sub> 흡수 가능성을 판단하기 위하여 결합재로서 시멘트 및 비소성 시멘트를 사용하여 그 특성에 대하여 검토하였다.

실험결과, 강도특성은 광합성균의 혼입한 경우 혼입 모르타르에 비해 초기강도는 유사하나 장기강도발현이 저하하는 것으로 나타났다. 그러나, CO<sub>2</sub> 농도측정 결과는 광합성균을 혼입한 경우 무혼입에 비해 12시간 후 측정치가 OPC의 경우 약 21%(234 ppm), 비소성시멘트의 경우 약 19.7%(243 ppm) 감소하는 것으로 나타났다.

**키워드** : 광합성균, 이산화탄소 흡수, 지구온난화, 시멘트 모르타르

#### References

1. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, (2005, 2, 16)
2. YC Yoon, JS Kim, A Study on the Effective Policies Preventing Global Warming. Institute of Social Sciences, 2009 May;20(1):85-114.

- 
3. Kim JH, Kim SW, Sohn JY, A study on the estimation of the environmental load intensity of construction materials for the building LCA, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 2004 Jul;20(7):211–8.
  4. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, National D/B for Environmental information of Building Products, Available from: <http://apess.kict.re.kr>
  5. Korea Environmental Industry&Technology Institute, Korea LCI Database Information Network, Available from: <http://www.edp.or.kr/lcidb/CO2db/CO2db01.asp>
  6. Cheongwadae Press(2009.11.17.). 2020 National Greenhouse Gas Reduction Goal, 2009
  7. KJ Mun, YS Soh, Effect of Admixture Materials on Quality of Non-Sintering Cement, *Journal of Architectural Institute of Korea* 2004 Oct;24(2):479–82.
  8. JJ Kim, YS Hwang, SH Lee, JW We, A study on the Effect of Strength Improvement and CO<sub>2</sub> reduction by using Eco-concrete in construction site, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2011 May;6(1):80–7.
  9. Joseph O. Kenaf Building Blocks, ASEE annual Conference & Exposition, 2014 June;121.
  10. WJ Kim, SY Ghim, 21C oriented New Paradigm of intelligent Smart Concrete–Turning of Concept Using Microbial Bio mineralization, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 2009 May;21(2):22–8.
  11. SJ Park, SY Ghim, Applications and Prospects of Calcium Carbonate Forming Bacteria in Construction Materials, *Journal of Microbiology and Biotechnnlogy*, 2012 Apl;40(3):169–79.
  12. J Lee, KY Cho, JP Seo, CH Cho, DS Seo, SP Kang, An Experimental Study on the Properties of Cement Paste Using EM, *Proceeding of the Korea Concrete Institute*, 2010 May;22(1):349–50.
  13. Korea Concrete Institute: Concrete and Environment, Kimoodang(2010)
  14. Lee GC, Lim JH, Yoon SJ, The Effect of Photosynthetic Bacterium on the Properties of Non-sintered Cement Mortar, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2013 Apl;13(1):101–2.
  15. MS Kim, JS Baek, Microbial hydrogen production, *The Korea Society for Biotechnology and Bioengineering*, 2005 Mar;20(6):393–400.
  16. KS L 5201: Portland cement; 2013, Korea.
  17. KS F 2476: Test method for polymer modified mortar, 2012, Korea.
  18. SH Lee, HS Lee, H Song, A Study on CO<sub>2</sub> Absorption of Concrete during Life Cycle of Building, *Korea Concrete Institute Conference*, 2010 Apl;20(1):557–80.
  19. Vagelis G, Papadakis, Michael N, Fardis, Costas G, Vayenas, Hydration and Carbonation of Pozzolanic Cements, *ACI Materials Journal*, 1992 Mar;89(2):119–30.
  20. Claus P, Maria G, The CO<sub>2</sub> Uptake of Concrete in a 100 year Perspective, *Cement and Concrete Research*, 2007;37(9): 1348–56.
  21. JH Hyun, BJ Lee, JU Bang, The Early Strength Properties of Carbon Reducing Concrete using Non-sintered Binder, *Korea Concrete Institute Conference*, 2013 May;25(1):70–706.
  22. Sirevag R, Buchanan B, Berry J A, Troughton J H, Mechanisms of CO<sub>2</sub> Fixation in Bacterial Photosynthesis Studied by the Carbon Isotope Fractionation Technique, *Archives of Microbiology*, 1977;112(1):35–8.
  23. Ghosh P, Mandal S, Chattopadhyay B D, Pal S, Use of Microorganism to Imporve the Strength of Cement Mortar, *Cement and Concrete Research*, 2005; 35(10):1980–3.
  24. Lee HS, Sin SW, Tae SH, The Development Status and the Future Research Trend of Sustainable Concrete, *Korea Concrete Institute Conference*, 2009Mar;21(2):34–102.