

## OLED 폐유리 미분말을 혼화재로 활용한 콘크리트의 탄산화 특성 평가

### Evaluation of Carbonation Characteristic for Concrete using OLED Waste Glass Powder

김재돈<sup>1</sup>, 장일영<sup>2\*</sup>

Jae-Don Kim<sup>1</sup>, Il-Young Jang<sup>2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

In this study, the carbonation characteristics of concrete according to the mixture of OLED waste glass were evaluated. Replacement capacities of OLED waste glass were 0%, 10%, 20%, and 30% of cement, and they were named OG 0, OG 10, OG 20, and OG 30. As a result of the compressive strength test, OG 0 without replacing OLED waste glass showed high intensity until the 14th. However, the higher the replacement rate of OLED waste glass, the higher the compressive strength of 28 days. In addition, the speed of carbonation was faster with the higher the replacement rate of OLED waste glass, and the accelerated carbonation experiment was about three times faster than the natural carbonation test. In conclusion, the carbonation characteristics of OLED concrete are expected to be positive in terms of atmospheric CO<sub>2</sub> absorption.

*Keywords : Concrete, OLED, Carbonatation, Waste glass*

1 정회원, 주저자, 금오공과대학교 토목공학과, 박사과정

2\* 정회원, 교신저자, 금오공과대학교 토목공학과, 교수

E-mail: jbond@kumoh.ac.kr

1 Dept. of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology

2\* Dept. of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology

## 1. 서론

온실가스 저감에 대한 환경적, 제도적 요구가 점차 심화함에 따라 시멘트 산업에서도 다양한 방법으로 CO<sub>2</sub>를 저감하기 위한 시도가 이어지고 있다. 대표적으로 고로슬래그, 플라이애시 등의 산업 부산물을 혼화재로 활용하여 폐기 시 발생하는 환경부하 및 시멘트 대체 사용에 따른 시멘트 생산량을 감소 시켜 해당 과정에서 발생하는 막대한 양의 이산화탄소를 저감하는 연구들이 이루어지고 있다. 다양한 산업부산물 중 폐유리는 경우 이론적으로는 전량 재활용 할 수 있지만, 엄격한 생산품질기준으로 인해 대부분 폐기되는 실정이다. 이에 시멘트 산업에서는 폐유리의 재활용 방안으로 시멘트 대체 재료로 사용하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다(Karamberi et al 2005).

폐유리는 높은 함량의 가용성 SiO<sub>2</sub> 성분을 포함하므로 플라이애시, 실리카 폼과 같은 포졸란계 재료의 혼입 시 발생하는 포졸란 반응을 기대 할 수 있다. 이 반응은 시멘트 경화체 내 생성된 수산화칼슘과 혼화재로부터 용해된 SiO<sub>2</sub>와 반응하여 C-S-H 겔을 생성하는 것으로, 입경에 따라 그 반응성에 차이를 보인다. 유리 분말의 입경이 75 $\mu$ m 이하에서 뚜렷한 반응이 나타나기 시작하여 입경의 크기가 작아질수록 반응성이 커진다(Idir et al., 2011). Pereira-de- Oliveira et al. (2012)의 연구 결과에 따르면, 평균 입경 75 $\mu$ m 이하의 폐유리를 혼화재로 사용 시 최대 40%까지 재령 28일 OPC 콘크리트 대비 100%를 상회하는 압축강도 결과를 보였다. 이러한 경향은 치환율 범위 10 - 20%에서 더욱 두드러지게 나타났다.

한편, 기존 열화현상으로서의 콘크리트 탄산화 관점에서 벗어나 이를 대기 중 CO<sub>2</sub> 흡수 와 관련된 연구들이 활발하게 이루어지고 있다. 연구들에 의하면 탄산화로 인한 CO<sub>2</sub> 흡수에 가장 큰 영향

을 미치는 것은 콘크리트에 포함되어있는 탄산화 반응 참여 클링커 및 수화물의 량과 탄산화의 깊이이다. 실제 폐유리와 같은 포졸란계 혼화재를 적용할 경우 OPC 콘크리트와 비교하여 탄산화 진전 속도가 촉진된다는 연구 결과가 보고된 바 있다. 플라이애시의 경우 치환율에 따라 급속 탄산화 환경에서 최대 8배까지 탄산화 깊이가 증가하였으며(Yoo et al., 2007), 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 치환한 삼성분계 콘크리트 역시 30% 이상 치환하였을 때 탄산화 깊이가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Jeon et al., 2018).

따라서, 본 연구에서는 OLED 폐유리 미분말을 활용하여 포졸란계 재료로서의 사용성을 검증하고, 더 나아가 촉진 탄산화 실험을 통해 OLED 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 흡수 능력을 평가하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 사용재료 및 배합

본 연구에서 사용된 시멘트는 KS L 5201을 만족하는 보통 포틀랜드 시멘트 (Ordinary Portland Cement: OPC)로 CaO를 약 70% 함유하고 있다. 반응성 분체로 유기 발광 다이오드(Organic Light Emitting Diode: OLED) 패널 제작 공정에서 배출되는 파유리를 활용하여 포졸란 반응성 확보를 위해 분쇄 과정을 통해 약 10 $\mu$ m의 평균입경을 갖는 미분말을 사용하였다. 사용된 혼화재의 물리 화학적 특성을 Table 1에 나타내었다.

배합에 사용된 잔골재는 하천모래로서 비중이 2.60이고, 흡수율이 1.05인 것을 사용하였다. 굵은 골재는 쇄석으로 비중이 2.65이고, 흡수율이 0.90, 최대 치수(Gmax)가 25mm 인 것을 사용하였다.

**Table 1. Physical and chemical properties of binders used in this study**

|                                      | OPC                            | OLED  |       |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------|-------|
| Oxides (%)                           | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.37  | 0.10  |
|                                      | MgO                            | 2.69  | 2.33  |
|                                      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.40  | 19.00 |
|                                      | SiO <sub>2</sub>               | 15.60 | 55.90 |
|                                      | SrO                            | 0.10  | 3.38  |
|                                      | CaO                            | 70.00 | 6.87  |
|                                      | K <sub>2</sub> O               | 1.71  | -     |
|                                      | SO <sub>3</sub>                | 1.45  | -     |
|                                      | Na <sub>2</sub> O              | -     | 0.27  |
|                                      | BaO                            | -     | 11.80 |
| Specific gravity(g/cm <sup>3</sup> ) | 3.17                           | 2.61  |       |
| Fineness(cm <sup>2</sup> /g)         | 3,610                          | 7,650 |       |
| Average diameter(μm)                 | 9.05                           | 10.47 |       |

## 2.2 배합설계 및 시편 제작

OLED 미분말의 치환율에 따른 강도 발현 특성 및 CO<sub>2</sub> 흡수 능력을 평가하기 위해 Table 2와 같이 시멘트 페이스트 및 콘크리트 배합설계를 산정하였다.

각 시편명은 OLED 분말의 혼입률 0%, 10%, 20% 및 30%를 순서대로 OG0, OG10, OG20 및 OG30으로 정하였다. 시멘트 페이스트의 물-결합재 비(Water to binder ratio; w/b)는 0.4로 고정하다. 이때, OLED의 중량비 치환에 따라 변화된 콘크리트의 부피는 잔골재 양을 조절하여 맞추었

**Table 2. Mix design of concrete and paste mixes**

|          | Abbrev. | Binder |       | Water | Sand  | Gravel | Air content(%) |
|----------|---------|--------|-------|-------|-------|--------|----------------|
|          |         | OPC    | OLED  |       |       |        |                |
| Concrete | OG 0    | 403.6  | 0.0   | 161.4 | 807.2 | 1009.0 | 2.0            |
|          | OG 10   | 363.2  | 40.4  |       | 802.7 |        |                |
|          | OG 20   | 322.8  | 80.8  |       | 798.2 |        |                |
|          | OG 30   | 282.4  | 121.2 |       | 793.7 |        |                |

다. 모든 배합에서 불필요한 화학반응을 최소화하기 위해 화학첨가제의 사용은 배제하였다.

산정된 콘크리트 배합 설계를 토대로 배합 재료가 충분히 혼합될 수 있도록 2분간 건비빔 후, 배합수를 첨가하여 3분 동안 실시하였다. 압축강도, 휨강도 및 급속 탄산화 실험을 위한 콘크리트 시편은 원주형 몰드(Ø 100 × 200mm), 각주형 몰드 (100 × 100 × 400) 및 각주형 몰드 (50 × 50 × 100mm)를 이용하여 제작하였다. 타설 후 24시간이 경과 하였을 때 탈형 하여 20 ± 2°C 조건에서 수중 양생을 진행하였다.

## 2.3 압축강도 측정

재령별 OLED 페유리 치환에 따른 압축강도 발현 특성을 평가하기 위해 KS F 2456(콘크리트 압축강도 시험)에 의거하여 재령 1, 3, 7, 14 및 28 일의 콘크리트 시편을 대상으로 압축강도를 측정하였다. 실험에 사용된 장비는 최대용량 2,000kN의 만능재료시험기(Universal Testing machine; UTM)을 이용하여 재하조건 300 kN/min의 하중제어 방식으로 수행되었다. 압축강도의 측정은 모든 배합에 대해 3회 측정된 강도 값을 평균하여 사용하였다.

## 2.4 촉진 및 옥외 탄산화 실험

OLED 콘크리트의 탄산화 저항성을 평가 및 비

교하기 위해 촉진, 옥외 탄산화 실험을 실시하였다. 촉진 탄산화 실험은 시편을 탄산화 챔버에 정착시킨 후 촉진 탄산화 실험을 진행하였다. 탄산화 촉진을 위해 CO<sub>2</sub> 농도 3%, 온도 20 ± 2°C, 상대습도(RH) 60%의 환경을 유지하였다. 옥외 탄산화 실험은 시편을 기상의 영향을 받는 자연스러운 환경에서 진행되었다. 일정 기간 노출 후 탄산화 깊이 측정을 위해 시편을 절단하였다. 절단면을 대상으로 KS F 2596에 따라 페놀프탈레인 지시약을 이용하였다. 이때, Fig. 1과 같이 모든 시편에 대해 총 6개의 동일한 지점에서 발색 되지 않은 영역의 길이를 1mm 단위로 측정하여 그 평균값을 탄산화 깊이로 산정하였다. 측정 지점에 골재가 있을 경우 탄산화가 진행된 경계면 양 끝점을 연결하는 선을 그어 해당 깊이까지의 길이를 탄산화 깊이로 가정하였다.

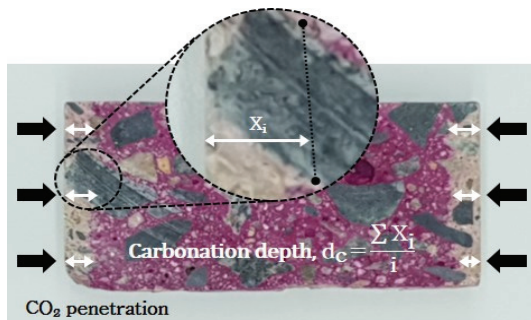


Fig. 1 Schematic diagram of measurement of the carbonation depth using phenolphthalein indicator

또한, 장기 재령에서의 탄산화 깊이를 예측하기 위해 옥외 탄산화 실험에서 측정된 탄산화 깊이와 아래의 식(1)을 이용 하였으며, 식(1)에서  $d_c$ 는 탄산화 깊이,  $\alpha$ 는 탄산화 속도계수,  $time$ 은 탄산화 환경 노출 시간을 나타낸다. 식(1)은 일반적으로 탄산화 깊이예측에 널리 활용되는 식으로

확산량을 나타내는 Fick의 제 1법칙의 간략화하여 나타낸 것이다.

측정된 탄산화 깊이를 식의 좌항( $d_c$ ), 해당 탄산화 깊이에 대응하는 노출시간을 우항의  $time$ 에 대입하여 탄산화 속도계수( $\alpha$ )를 도출하게 된다. 노출 기간별로 구해진 속도계수 값을 회귀분석하여 실험에의해 측정되지 않은 노출기간의 속도계수값을 산정하며 이를 활용하여 최대 10년 까지의 탄산화 깊이를 산정하였다.

$$d_c [mm] = \alpha \sqrt{time [yrs]} \quad \text{식 (1)}$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 압축강도 변화

OLED 콘크리트의 강도발 현 특성 평가를 위해 재령 1-28일에서 시편의 압축강도를 측정하였으며 결과는 fig. 2와 같다. 시편의 종류와 관계없이 재령의 증가에 따라 압축강도가 증가하는 결과를 나타냈으며 이는 지속적인 수화반응에 의한 것으로 판단된다. 특히, OLED를 치환하지 않은 OG 0의 경우 재령 14일까지 OLED를 혼입한 시편과 비교하여 항상 높은 값을 나타냈으며, 재령 14일 OG 0의 압축강도는 41.43MPa 이었다. 하지만 재령 14이리 이후 OLED 혼입 양과 관계없이 모든 OLED 혼입 콘크리트의 압축강도가 OG 0의 강도 값을 초월하였는데, 이는 중장기 수화 과정에서의 포졸란 반응 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 포졸란 반응으로 생성된 C-S-H 겔은 콘크리트 내 공극을 채움으로써 밀실 하게 하여 압축강도 증진에 기여한다. Du et al. (2014)의 연구에 따르면 페유리의 시멘트 치환은 포졸란 반응

에 의해 시간이 지남에 따라 동일한 양생 조건에서 최대 10% 이상 증가된 압축강도를 보였고, 이러한 강도 증진 효과는 페유리의 분말도가 낮을수록 포졸란 반응성이 증가하여 더욱 향상되는 것으로 보고되었다(Mirzahosseini et al., 2015).

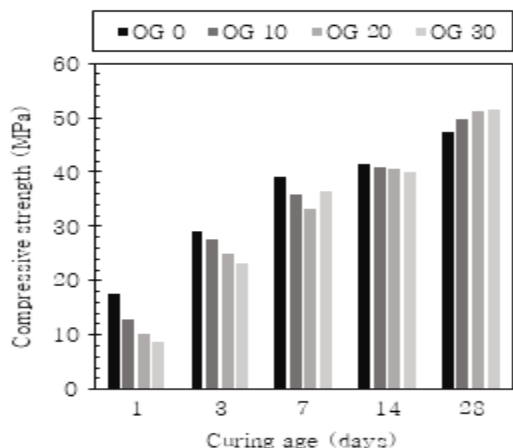


Fig. 2 Compressive strength of OLED-mixed concrete with curing ages

뿐만 아니라 콘크리트 내 OLED 미분말 치환율의 증가는 본격적인 포졸란 반응이 일어나는 중장기 재령에서 더 높은 강도 발현을 나타냈는데, 이러한 결과는 콘크리트 내 OLED 페유리의 양이 증가할수록 더 많은 양의 포졸란 반응이 발생하고 이에 따라 C-S-H 겔 생성량이 증가하여 강도 증진을 초래한 것으로 판단된다. 실제로 Du et al. (2014)의 연구 결과에서 페유리를 시멘트 대체재로 사용하여 최대 15 - 60% 치환하였을 때 페유리의 혼입율이 증가할수록 CH의 감소율은 증가하였으며, C-S-H 겔의 함량 역시 증가하였다. 결론적으로, 본 연구에서 사용된 약 10 μm의 평균입경을 가진 OLED 미분말은 충분한 포졸란 반응을 일으키며 이에 따라 압축강도에 증가에 기여한다고 말할 수 있다.

### 3.2 촉진 및 옥외 탄산화 실험

OLED 콘크리트의 탄산화 깊이 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 촉진 탄산화 실험 결과에서 모든 시편은 노출시간에 따라 탄산화 깊이가 증가하는 경향을 나타냈다. 특히, OLED 혼입률과 관계없이 OPC 100% 콘크리트와 비교하여 낮은 탄산화 저항성을 보였는데, 이는 포졸란 반응으로 인한 콘크리트 내 CH 함량의 감소 때문인 것으로 사료된다. OLED를 혼입한 콘크리트의 경우 포졸란 반응으로 인해 CH를 우선적으로 소비하여 더 많은 양의 CO<sub>2</sub> 침투를 허용한다. 반대로 OPC 콘크리트는 충분한 양의 CH가 존재하고 이는 유입된 CO<sub>2</sub>와 반응하여 다량의 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)을 형성한다. 생성된 CaCO<sub>3</sub>는 CH에 비교하여 높은 밀도를 가지므로(Sanjuan et al., 2003) 탄산화가 진행될수록 콘크리트 내 공극구조를 치밀하게 만들어 더 이상의 CO<sub>2</sub> 침투를 제한하고, 이러한 현상은 콘크리트 표면에서부터 발생하여 결과적으로 탄산화 반응을 더디게 만드는 원인으로 작용할 수

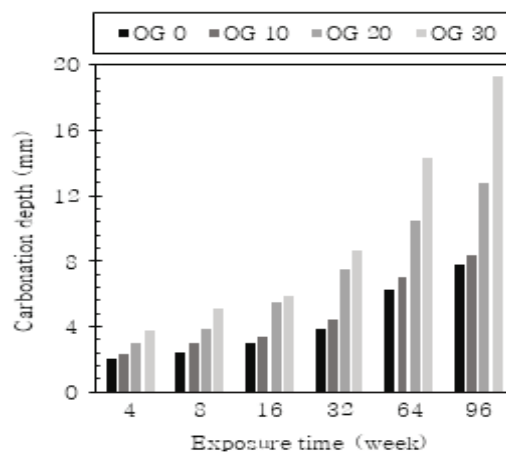


Fig. 3 Carbonation depth of OLED-mixed concrete with time exposed to an accelerated conditions

있다. 또한, OLED 콘크리트 내 페유리 미분말의 혼입률이 증가할수록 탄산화 깊이도 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향 역시 OLED 혼입률이 증가함에 따른 포졸란 반응성 증가에 기인한 것으로 사료 된다.

Fig. 4에 옥외 탄산화 실험 결과를 나타내었다. 전체적으로 fig. 3의 급속탄산화 실험 결과와 유사한 경향을 나타냈지만 모든 경우에서 급속탄산화에 비해 낮은 침투 속도를 보였다. 모든 재령 및 배합에서 평균적으로 3배 정도의 침투 속도의 차이를 나타냈으며, 재령 96주의 OG 30 배합에서 약 11mm의 탄산화 깊이 차이를 나타냈다. 높은 탄산화 농도에 의해 CH의 소모가 가속화됨에 약 3배 정도의 탄산화 속도 차이가 발생한 것으로 판단된다.

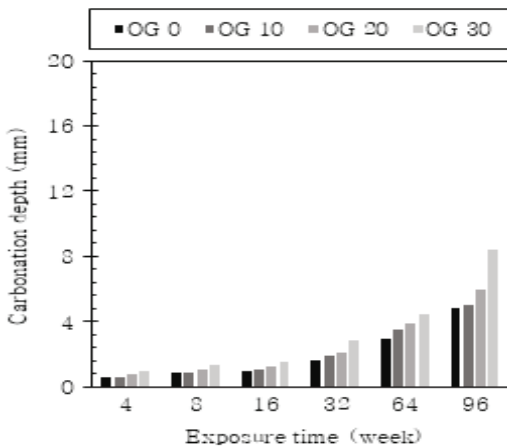


Fig. 4 Carbonation depth of OLED-mixed concrete with time exposed to an natural conditions

또한, 옥외 탄산화 실험에 의해 도출된 탄산화 깊이를 식 (1)을 이용하여 최대 10년까지의 탄산화 예측 깊이를 fig. 5에 나타내었다. 앞선 탄산화 깊이 결과와 같이 OLED 혼입률이 증가할수록 탄산화 깊이도 함께 증가하였으며 10년의 예측값에

서 OG 30의 탄산화 깊이는 OG 0에 비해 6.14mm 높은 값을 나타냈다. 정확한 CO<sub>2</sub> 흡수량의 계산은 추가적인 실험이 있어야 가능하겠지만, OLED 콘크리트의 빠른 탄산화 속도는 CO<sub>2</sub> 흡수 관점에서 OPC 콘크리트에 비해 뛰어날 것으로 사료 된다.

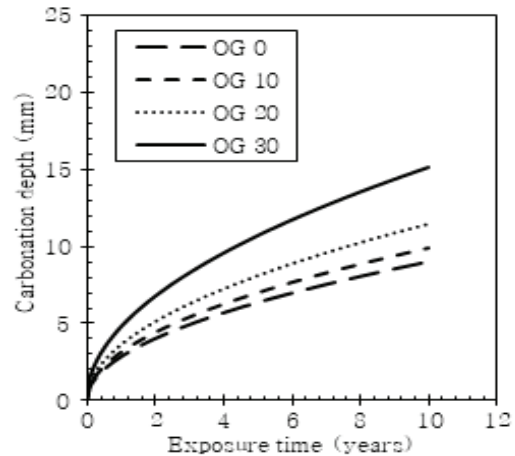


Fig. 5 Prediction to carbonation depth of OLED-mixed concrete based on experimental results up to 10 years

#### 4. 결론

본 논문에서는 콘크리트에서 OLED 미분말의 치환량에 따른 탄산화 속도를 측정하여 CO<sub>2</sub> 흡수량을 예측하였다. 압축강도 및 탄산화 실험과 페놀프탈레인 지시약을 통한 콘크리트 시편의 탄산화 깊이를 측정하였으며, 그 값을 토대로 미래의 탄산화 깊이를 예측하였으며 결론은 다음과 같다.

- 1) OLED 혼입 콘크리트는 초기에 OPC 콘크리트에 비해 낮은 압축강도를 가졌지만 재령일이 증가함에 따라 격차를 줄여나가다 28일을 기점으로 OPC 콘크리트의 강도를 초과

하였다. 이러한 결과는 OLED 분말의 SiO<sub>2</sub> 성분에 의한 포졸란반응의 증가에 의한 것으로 판단된다.

- 2) 급속 및 옥외 탄산화 실험에서 OLED 분말의 혼입은 탄산화의 깊이를 증가시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 OPC 콘크리트에 존재하는 다량의 CH 성분이 CO<sub>2</sub>와 결합하는 과정에서 CH보다 부피가 큰 CaCO<sub>3</sub>를 형성하면서 콘크리트 표면의 공극 구조를 차단해 CO<sub>2</sub>의 침투를 저해하는 반면 OLED 콘크리트에서는 포졸란 반응에 의해 CH를 소모하므로 비교적 표면의 공극이 보존되어 CO<sub>2</sub>가 깊이 침투한 것으로 판단되며 OLED 콘크리트의 높은 탄산화 속도는 CO<sub>2</sub> 흡수에 상당량 기여할 것으로 사료 된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20CTAP-C1520 28-02).

## 참고문헌

- [1] Karamberi, A., and A. Moutsatsou. "Participation of coloured glass cullet in cementitious materials." *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, no. 2, pp. 319-327 (2005).
- [2] Idir, Rachida, Martin Cyr, and Arezki Tagnit-Hamou. "Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet." *Cement and Concrete Composites*, vol. 33 no. 1, pp. 19-29, (2011).
- [3] Pereira-de-Oliveira, Luiz A., João P. Castro-Gomes, and Pedro MS Santos. "The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components." *Construction and Building Materials* vol. 31, pp. 197-203, (2012).
- [4] Yoo, Sung-Won, et al. "Study on the Carbonation Properties of Fly Ash Concrete by the New Rapid Carbonation Experimental System." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, vol. 27 no. 4A, pp. 601-607, (2007)
- [5] Jeon, B. H., H. S. Kim, and S. H. Lee. "A study on the evaluation of the carbonation resistance and properties ternary blended concrete according to replacement ratio of blast furnace slag and fly ash." *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 30 no. 1, pp. 23-30 (2018).
- [6] Du, Hongjian, and Kiang Hwee Tan. "Waste glass powder as cement replacement in concrete." *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 12, no. 11, pp. 468-477, (2014).
- [7] Mirzahosseini, Mohammadreza, and Kyle A. Riding. "Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM)." *Cement and Concrete Composites*, vol. 56, pp. 95-105, (2015).
- [8] Sanjuan, M. A., C. Andrade, and M. Cheyrezy. "Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions." *Advances in Cement Research*, vol. 15, no. 4, pp. 171-180, (2003).

(접수: 2020.11.23. 수정: 2020.12.07. 게재확정: 2020.12.11.)