

기후변화의 풍속과 일조시간 양생조건에 따른 콘크리트 탄산화 성능중심평가

김태균¹, 신재호², 최승재³, 김장호^{4*}

Performance Based Evaluation of Concrete Carbonation from Climate Change Effect on Curing Conditions of Wind Speed and Sunlight Exposure Time

Tae-Kyun Kim¹, Jae-Ho Shin², Seung-Jai Choi³, Jang-Ho Jay Kim^{4*}

Abstract: Currently, extreme weather events such as super typhoon, extreme snowfall, and heat wave are frequently occurring all over the world by natural and human caused factors. After industrial growth in the 1970s, earth's temperature has risen sharply. due to greenhouse effect. Global warming can be attributed to gases emitted from using fossil fuel such as average carbon dioxide, perfluorocarbons, nitrous oxide, and methane. Especially, carbon dioxide has the highest composition of about 90%. in the fossile fuel usage emitted gas. Concrete has excellent durability as a building material climate change. However, due to various of physical and chemical environmental effect such as conditions during its curing process, the performance degradation may occur. Carbon dioxide in the atmosphere causes steel corrosion and durability decreases by lowering the alkalinity of concrete. Therefore, in this study, concrete durability performance with respect to carbonation from curing conditions change due to wind speed and sunshine exposure time. Concrete carbonation experiment are performed. using wind speed (0, 2, 4, 6) m/s and sunlight exposure time (2, 4, 6, 8) hrs. Also, performance based evaluation through the satisfaction curve based on the carbonation depth and carbonation rate test results are performed.

Keywords: Climate change, Concrete carbonation, Satisfaction curve, Performance based evaluation

1. 서 론

극심한 기후변화는 지역적으로 다양한 환경조건으로 나타난다. 기후변화의 원인으로는 크게 자연적 요인과 인위적 요인으로 구별할 수 있다. 자연적 요인은 태양활동, 태양복사와 화산분화에 의한 성층권의 에어로졸 증가 현상으로 나타나며, 인위적 요인으로는 사람들이 과도한 화석연료 사용 및 삼림파괴와 같은 상황에서 유발한다(Kang, 2004).

다양한 기후변화의 결과물로는 슈퍼태풍, 극한폭설, 폭염과 같은 극한 기후현상을 발생 시키며 실제로 극한기후변화 현상의 발생빈도는 전 세계적으로 급격히 증가하고 있다. 그러므로 토목과 건축 시공현장에서는 현재 발생하고 있는 기후변화에 대응할 수 있는 시공기술 및 기준이 절실히 필요하다.

또한 1970년대 급격한 산업화 성장시기를 통하여 지구의 온도가 많이 상승하였다. 이러한 기후변화는 다양한 문제점

들을 야기 시키지만 특히 지구온난화로 평균기온이 상승하는 것이 제일 심각한 문제이다. 지구온난화에 영향을 미치는 온실가스의 종류로는 이산화탄소, 과불화탄소, 아산화질소, 메탄과 같은 다양한 종류의 화학성분으로 구성되어 있다 (Kim et al., 2008). 특히 온실가스의 종류중 이산화탄소가 약 90%를 차지하며 이산화탄소의 경우 철근 콘크리트에 큰 영향을 미칠 수 있다. 콘크리트는 건설재료로서 탁월한 내구성능을 지니고 있으며, 사회기반시설물 건설에 사용되는 건설재료의 70% 이상을 차지한다. 그러나 콘크리트는 타설 직후 콘크리트의 경화조건은 노출환경에 따라 물리, 화학적인 요인으로 성능저하 현상이 발생하기도 한다. 특히 대기중 이산화탄소가 콘크리트 수화생성물과 반응하여 탄산칼슘을 생성한다. 이러한 원인으로 콘크리트 내부의 알칼리도 저하에 따른 철근의 부식과 콘크리트 내구성 저하를 초래하게 된다. 콘크리트 탄산화 작용의 경우 장기적으로 작용하며, 반응속도가 느리기 때문에 측정을 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다(Kwon et al., 2007 ; Kim et al., 2008 ; Jung et al., 2010).

따라서 본 연구에서는 기후인자 요소를 고려한 양생을 통하여 콘크리트 구조물의 열화현상 중 가장 큰 원인이라고 할 수 있는 탄산화에 대한 콘크리트 내구성 검토를 하고자 하며 확보

¹정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정

²정회원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정

³정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정

⁴정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: jjhkim@yonsei.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2015년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2015년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

한 탄산화 실험데이터를 바탕으로 성능중심평가방법(PBE : Performance based evaluation)을 제안하고자 한다.

2. 성능중심형평가의 이론

본 연구에서 사용하고자 하는 성능중심평가방법은 Bayesian 확률방법을 이용하여 만족도 곡선을 작성하는 것으로서 Bayesian 확률적 방법은 표집에서 얻은 정보를 사용하며 통계적 추리를 할 때 표집으로부터 얻은 정보 이외의 다른 정보는 사용하지 않는다. 또한 본 연구에서 사용하듯이 불확실한 상황에서 통계적으로 얻은 정보를 토대로 어떤 의사결정을 해야 하는 방법에서는 Bayesian 확률적 방법이 기초가 되며 중요시되는 경우가 있다.

예를 들어 본 연구에서는 기존의 연구가 미비한 콘크리트 양생조건인 풍속과 일조시간에 대하여 실험적 데이터를 확보하고 이를 바탕으로 Bayesian 확률을 이용하여 내구성능을 예측하는 것이다. 이러한 방법을 통하여 내구성능이 검증이 될 경우 추후 건설현장에 적용이 가능하며, 인명피해나 재산피해를 방지 할 수 있을 것이다.

또한, 기존 내진성능평가에서 사용되었던 취약도 곡선(Fragility curve)과 비슷하게 만족도 곡선을 작성한다. Fragility curve의 경우 구조물이 지진에 대한 붕괴나 취약도를 평가하는데 사용되는 것으로서 Bayesian(Ang et al., 2006 ; Box et al., 1992) 확률 통계 방법을 바탕으로 사용한다. 즉 Fragility 방법은 Bayesian 방법을 기반으로 유도된 내진성능평가 방법으로써, Shinozuka와 Singhal(Sinizuka et al., 2001a ; Shinozuka et al., 2000b ; Singhal et al., 1996)에 의해 개발된 Fragility 방법은 Fragility 곡선을 교량이나 구조물의 취약성을 확률론적으로 평가하는 데 사용되고 지반 진동강도에 대해 붕괴와 같은 한계를 초과하는 현상을 정규분포 함수 곡선으로 조건부 확률을 나타내며, 평균값과 로그 표준 편차 값을 식(1)에서 나타내는 Maximum Likelihood 식을 통하여 추산한다.

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{1-x_i} \quad (1)$$

여기서, F(.)는 특정 손상단계의 Fragility 곡선을 의미하고,

a_i 는 교량 i 를 대상으로 한 최대 지반 진동 가속도(Peak Ground Acceleration : PGA)값이며, x_i 는 a_i 와 같은 PGA값 이하의 교량 손상에 따라 0 혹은 1로 결정된다. N은 지진 후 조사된 총 교량의 수로 정한다. 통용되는 로그정규분포의 가정 하에서는 $F(a)$ 를 식(2)와 같은 형태로 취한다.

$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{c} \right)}{\zeta} \right] \quad (2)$$

여기서 a 는 PGA를, $\Phi[.]$ 는 표준화된 정규분포 함수를 나타낸다. 식(2)에서 c 와 ζ 는 식(3)으로 나타낸 $\ln L$ 를 최대화하기 위해 계산된 값이다.

$$\frac{d \ln L}{dc} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \quad (3)$$

3. 실험방법

3.1 실험조건 및 배합

Table 2는 배합조건을 나타낸 표로써 w/c는 55%, 슬럼프 12 cm, 굵은골재는 25 mm로 설정하였으며 설계기준강도는 27 MPa로 설정하였다. Table 1은 풍속과 일조시간에 대한 다양한 양생조건을 나타낸 것이다. 양생조건은 기상청에서

Table 1 Curing condition of wind speed and sunlight exposure time

| Case | Wind speed (m/s) | Sunlight exposure time (hr) | Case | Wind speed (m/s) | Sunlight exposure time (hr) |
|------|------------------|-----------------------------|------|------------------|-----------------------------|
| 1 | 0 | 2 | 9 | 4 | 2 |
| 2 | 0 | 4 | 10 | 4 | 4 |
| 3 | 0 | 6 | 11 | 4 | 6 |
| 4 | 0 | 8 | 12 | 4 | 8 |
| 5 | 2 | 2 | 13 | 6 | 2 |
| 6 | 2 | 4 | 14 | 6 | 4 |
| 7 | 2 | 6 | 15 | 6 | 6 |
| 8 | 2 | 8 | 16 | 6 | 8 |

Table 2 Concrete mix proportion

| Coarse Aggregate (mm) | Slump (cm) | Air (%) | w/c | Unit (kg/m ³) | | | | f _{ck} (MPa) |
|-----------------------|------------|---------|-----|---------------------------|--------|--------|---------|-----------------------|
| | | | | w | c | s | g | |
| 25 | 12 | 5 | 55 | 183.4 | 333.45 | 677.26 | 1013.58 | 27 |

작년 10년 동안의 자료를 분석하여 풍속과, 일조시간에 관하여 다음과 같이 설정하였다. 풍속의 경우 0, 2, 4, 6 m/s 일조시간은 2, 4, 6, 8 시간으로 총 16 가지 경우로 설정하였다.

또한 양생의 방법으로는 실내 시험장에서 다수의 삼파장 전구와 공업용 대형 선풍기를 이용하여 28일간의 양생을 실시하였다. 배합의 검증을 위해서 컨트롤 시편을 제작하여 수중양생, 항온항습양생, 기건양생을 시킨 후 28일 압축강도를 측정하였다.

3.2 탄산화 실험방법

Fig. 1은 탄산화 시험 장비로써 28일간 실내에서 풍속, 일조 시간 양생을 마친 시편을 탄산화 장비로 옮겨 28일의 추가 양생을 시킨 후 탄산화 깊이 측정을 실시하였다. 탄산화 시험의 경우 온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도는 95% 이상, 이산화탄소는 $5 \pm 0.2\%$ 에서 수행하였다. 탄산화 시험 공시체의 경우 사각물 드 공시체와 원형 공시체를 사용한다. 사각물 드 공시체의 경우 단면 정방형으로 그 한쪽의 길이는 100 mm로 하고 공시체의 길이는 400 mm로 한다. 1회 측정을 목적으로 할 경우 $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 또는 $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 의 원형 공시체를 제작하여 사용한다. 본 연구에서는 1회 측정을 목적으로 함으로써 $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 의 원형 공시체를 이용하였고, 각 케이스별 공시체는 3개씩 제작하였다. 탄산화 깊이 측정시 공시체의 활렬면을 쪼개서 측정을 진행하였다. 탄산화 시험에 사용되는 시약은 KS M 8238에서 규정하는 제조 과정을 거쳐 용액으로 만들어 시험을 실시한다.

KS M 8238에서 규정한 페놀프탈레인 용액을 이용하여 측



Fig. 1 Carbonation test equipment

정하였으며 지시약으로 사용되는 페놀프탈레인 용액의 경우 95%의 에탄올 90 mL에 페놀프탈레인 분말 1 g을 녹이고 물을 첨가하여 100 mL로 제작한다. 다만, 공시체가 매우 건조한 경우에는 95%의 에탄올 양을 70 mL로 하여 첨가하는 물의 양을 증가시킬 수 있다. 그러나 본 연구에서는 양생습도를 95% 이상으로 설정하였으므로 시약의 경우 에탄올 90 mL로 제작하여 실시하였다. 탄산화 깊이의 측정 시기는 보통 1, 4, 8, 13, 26 주 단위로 측정하지만 본 연구에서는 양생 기간을 고려하여 4 주째 측정을 실시하였다. 또한, 탄산화 깊이를 측정하는 방법으로는 3개의 공시체에 대하여 각 공시체의 2면 10점의 평균값을 합계하여 6면 30점의 탄산화 깊이 평균값을 각각 계산하여 0.5 mm 단위로 반올림한다. 탄산화가 진행된 시편의 경우 단면을 절단하여 페놀프탈레인용액을 분사할 경우 탄산화가 진행되지 않는 부분은 보라색으로 변화게 된다. 탄산화 진행 방향은 외부로부터 내부로 침투하는 것으로써 콘크리트 표면으로부터 비탄산화 부분의 경계면까지의 길이를 탄산화 깊이라 칭한다.

따라서 본 연구에서 최종적으로 구하고자 하는 탄산화 속도 계수(상수) A를 구하는 일반적인 식은 식 (4)와 같이 나타내며 상수 C_t 는 실험을 통하여 구할 수 있다.

$$C_t = A\sqrt{t}$$

$$A = \frac{C_t}{\sqrt{t}} \tag{4}$$

여기서 A는 탄산화 속도 계수를 나타내며, C_t 는 탄산화 깊이(mm), t는 탄산화기간(week)을 나타낸다.

컨트롤 시편 역시 수중양생, 항온항습양생, 기건양생을 28일 시킨 후 탄산화 시험 장비에서 4주간 추가 양생을 실시한 후 탄산화 깊이와 탄산화 속도계수를 측정하여 비교 분석하였다.

4. 실험결과

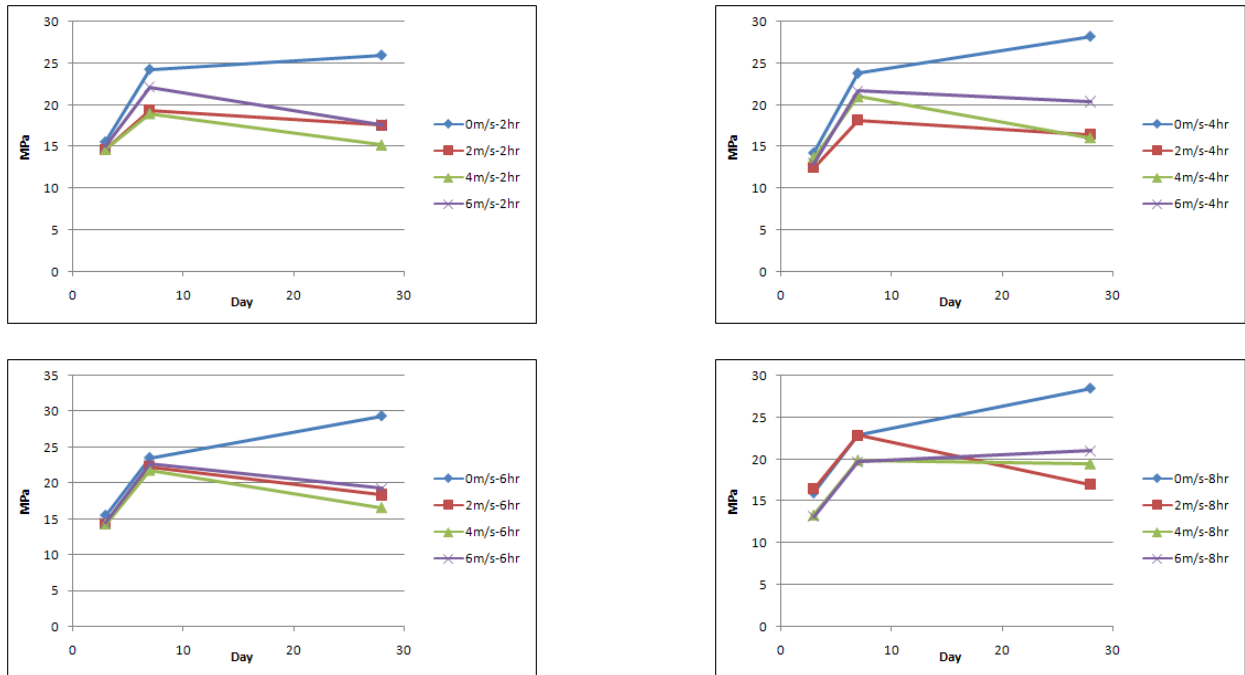
Table 3, 4와 Fig 2, 3은 풍속과 일조시간 양생조건에 대한 강도 실험 결과와 탄산화 실험 결과를 각각 정리한 표와 그림이다.

4.1 콘크리트 강도 측정 결과

Table 3과 Fig. 2에서는 압축강도와 인장강도의 강도 증가율이 유사하게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 7일까지의 초기 압축강도는 정상적인 강도 발현이 이루어지지만 28일 강도의 경우 풍속이 0 m/s인 경우를 제외한 나머지 시험체는 강

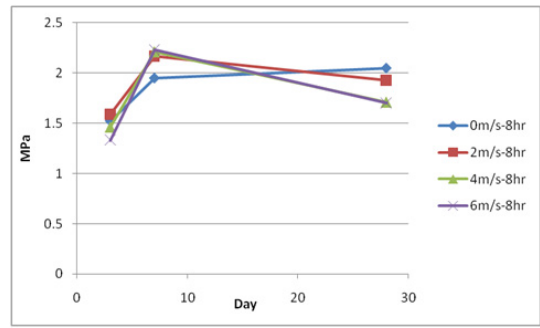
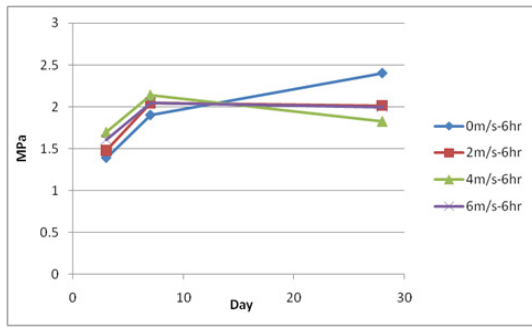
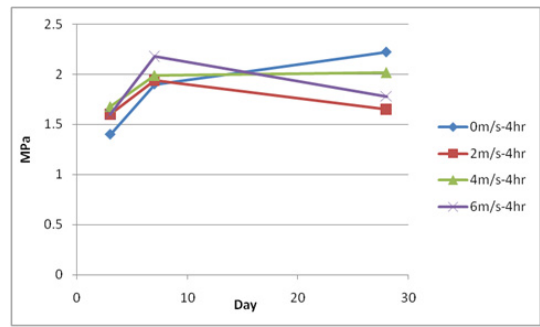
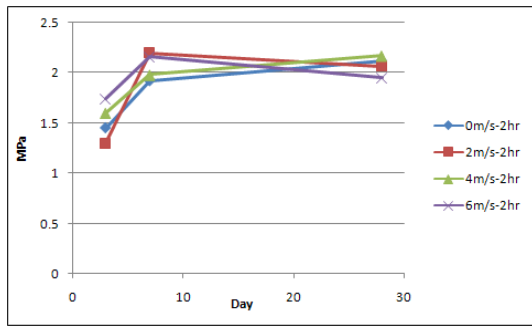
Table 3 Experimental strength test results

| Case | Wind Speed (m/s) | Sunlight exposure time (hrs) | Compressive strength (MPa) | | | Splitting tensile strength (MPa) | | |
|---------------------------------------|------------------|------------------------------|----------------------------|-------|--------|----------------------------------|-------|--------|
| | | | 3days | 7days | 28days | 3days | 7days | 28days |
| 1 | 0 | 2 | 15.57 | 24.24 | 25.94 | 1.45 | 1.92 | 2.12 |
| 2 | 0 | 4 | 14.28 | 23.78 | 28.18 | 1.4 | 1.9 | 2.22 |
| 3 | 0 | 6 | 15.49 | 23.55 | 29.36 | 1.39 | 1.9 | 2.4 |
| 4 | 0 | 8 | 15.99 | 22.87 | 28.46 | 1.52 | 1.95 | 2.05 |
| 5 | 2 | 2 | 14.66 | 19.34 | 17.55 | 1.3 | 2.2 | 2.07 |
| 6 | 2 | 4 | 12.51 | 18.17 | 16.44 | 1.6 | 1.94 | 1.65 |
| 7 | 2 | 6 | 14.34 | 22.25 | 18.36 | 1.48 | 2.05 | 2.02 |
| 8 | 2 | 8 | 16.45 | 22.87 | 17 | 1.59 | 2.17 | 1.93 |
| 9 | 4 | 2 | 14.66 | 18.97 | 15.21 | 1.6 | 1.98 | 2.17 |
| 10 | 4 | 4 | 13.7 | 21.01 | 16.08 | 1.68 | 1.99 | 2.02 |
| 11 | 4 | 6 | 14.27 | 21.8 | 16.57 | 1.7 | 2.14 | 1.83 |
| 12 | 4 | 8 | 13.33 | 19.91 | 19.48 | 1.46 | 2.21 | 1.71 |
| 13 | 6 | 2 | 15.11 | 22.1 | 17.62 | 1.74 | 2.16 | 1.95 |
| 14 | 6 | 4 | 13.03 | 21.65 | 20.4 | 1.6 | 2.18 | 1.78 |
| 15 | 6 | 6 | 14.46 | 22.66 | 19.29 | 1.61 | 2.05 | 2 |
| 16 | 6 | 8 | 13.18 | 19.65 | 21 | 1.33 | 2.23 | 1.7 |
| Temperature & Humidity Chamber curing | | | 17.06 | 23 | 31.11 | 1.58 | 2.18 | 2.25 |
| Wet curing | | | 18.24 | 26.6 | 38.32 | 1.72 | 2.29 | 2.7 |
| Air dry curing | | | 16.13 | 23.36 | 28.61 | 1.36 | 1.84 | 2.2 |

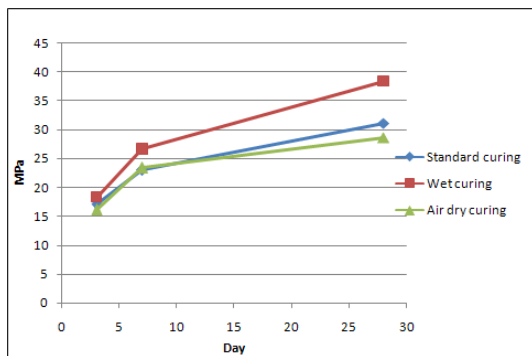


(a) Compressive strength Sunlight exposure time with 2, 4, 6, 8 hrs

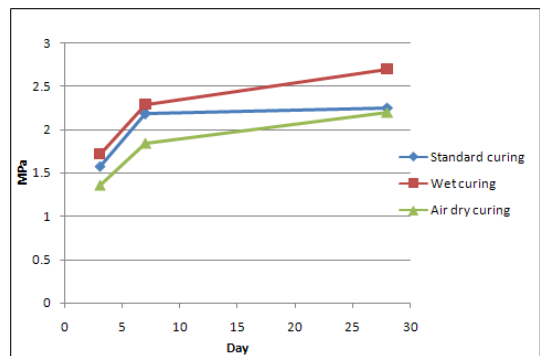
Fig. 2 Compressive and tensile strengths versus wind speed and sunshine time



(b) Tensile strength Sunlight exposure time with 2, 4, 6, 8 hrs



(c) Compressive strength of air dry, wet, Chamber curing



(d) Tensile strength of dry, wet, Chamber curing

Fig. 2 Compressive and tensile strengths versus wind speed and sunshine time (continued)

도 저하 현상이 일어나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 풍속으로 인한 시편 내부의 수분이 증발 이동함으로써 제대로 된 수화반응이 일어나지 못한 것으로 판단된다. 이와 반대로 수중, 항온항습, 기건양생의 경우 28일 강도가 정상발현 되는 것을 확인 할 수 있다.

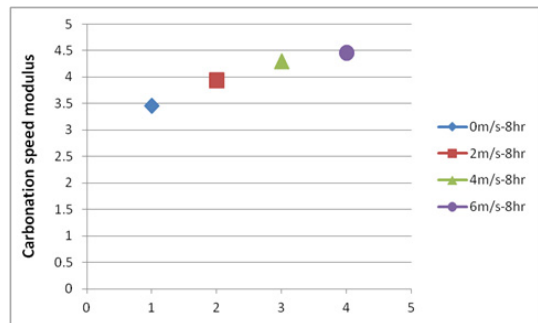
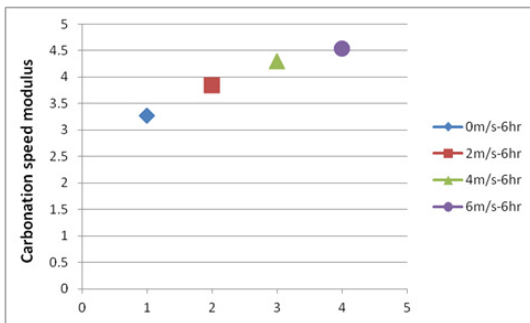
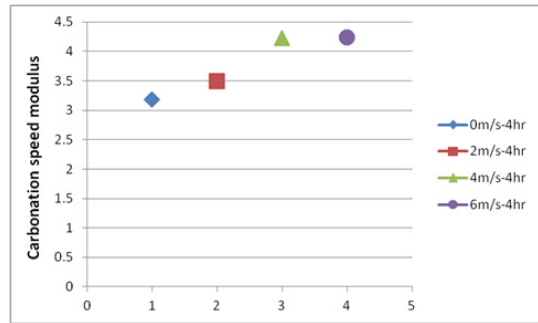
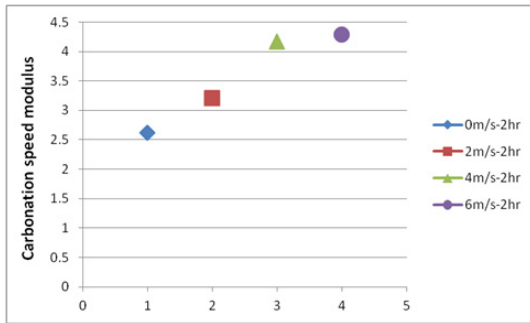
4.2 콘크리트 탄산화 깊이

Table 4와 Fig. 3에서 풍속-일조시간의 경우 풍속과 일조시간이 클수록 탄산화 축진이 많이 일어나는 것을 확인 할 수 있다. 풍속 6 m/s, 일조시간 6 hr의 경우 풍속 0 m/s, 일조시간 2 hr 보다 약 1.7배 더 침투 한 것을 확인 할 수 있으며 풍속 4 m/s 와 6 m/s의 경우 탄산화 침투 깊이가 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 컨트롤 시편들과 비교 분석한 결과 수중양생과

항온항습기 양생을 실시한 시편의 경우 0.6, 0.8 mm의 탄산화 깊이를 나타내며 거의 콘크리트 수화 반응시 이산화탄소와 반응이 일어나지 않은 것을 확인 할 수 있다. 이와 반대로 기건양생의 경우 4.9 mm의 탄산화 깊이가 측정되는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 풍속 0 m/s, 일조시간 2 hr 보다는 작지만 상대적으로 비슷한 침투 깊이를 확인 할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 양생과정에서 상대습도가 높을수록 상대적으로 탄산화 진행 속도가 감소하는 것을 알 수 있고, 풍속과 일조시간이 크게 발생하는 환경일수록 양생이 제대로 이루어 지지 않으며 시편 내부에 공극률이 커지면서 이산화탄소의 침투가 용이해져 깊게 침투 할 수 있다는 것을 확인 하였다. 따라서 콘크리트 탄산화에 영향을 미치는 인자는 환경적 요인이 크게 작용 한다는 것을 알 수 있다.

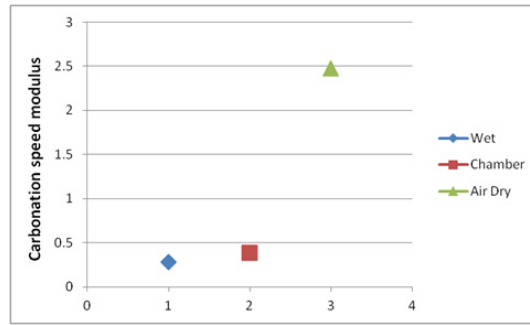
Table 4 Experimental carbonation test results

| Case | Wind speed (m/s) | Sunlight exposure time (hrs) | Carbonation depth (mm) | Carbonation speed modulus (mm/\sqrt{weeks}) |
|------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
| 1 | 0 | 2 | 5.2 | 2.62 |
| 2 | 0 | 4 | 6.4 | 3.18 |
| 3 | 0 | 6 | 6.5 | 3.27 |
| 4 | 0 | 8 | 6.9 | 3.46 |
| 5 | 2 | 2 | 6.4 | 3.21 |
| 6 | 2 | 4 | 7.0 | 3.49 |
| 7 | 2 | 6 | 7.7 | 3.84 |
| 8 | 2 | 8 | 7.9 | 3.93 |
| 9 | 4 | 2 | 8.3 | 4.17 |
| 10 | 4 | 4 | 8.5 | 4.23 |
| 11 | 4 | 6 | 8.6 | 4.29 |
| 12 | 4 | 8 | 8.6 | 4.30 |
| 13 | 6 | 2 | 8.6 | 4.28 |
| 14 | 6 | 4 | 8.5 | 4.24 |
| 15 | 6 | 6 | 9.1 | 4.53 |
| 16 | 6 | 8 | 8.9 | 4.46 |
| 17 | Temperature & Humidity Chamber curing | | 0.8 | 0.38 |
| 18 | Wet curing | | 0.6 | 0.28 |
| 19 | Air dry curing | | 4.9 | 2.47 |



(a) Carbonation speed modulus - Sunlight exposure time with 2, 4, 6, 8 hrs

Fig. 3 Carbonation speed modulus versus wind speed and sunshine time



(b) Carbonation speed modulus of air dry, wet, Chamber curing

Fig. 3 Carbonation speed modulus versus wind speed and sunshine time (continued)

4.3 탄산화 속도 계수

탄산화 속도의 경우 식 (4)를 통하여 시간에 따라 탄산화가 콘크리트에 얼마나 침투하는지 철근콘크리트의 경우 철근에 얼마나 가깝게 다가가는지를 판단할 수 있는 계수로써 환경적인 영향을 크게 받는다.

탄산화 속도 계수가 가장 크게 나타나는 경우는 풍속 6 m/s, 일조시간 6 hr으로 나타나며, 이것은 풍속 0 m/s, 일조시간 2 hr 보다 약 1.75배 정도 크게 나오는 것을 확인 할 수 있다. 또한 수중양생과 항온항습기양생의 경우 탄산화 속도 계수가 상당히 낮은 수치로 나오는 것을 확인 할 수 있으며 전체적으로 탄산화 깊이와 유사한 경향을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

5. 만족도 곡선 작성

5.1 가상데이터 생성

만족도 곡선은 다양한 변수의 성공/실패 여부를 통계적인 방법으로 결정하는 것이며 충분한 데이터베이스를 구축하기 위해서는 실험을 통해 사용 가능한 자료를 많이 확보하여야 한다. 그러나 이러한 충분한 자료확보가 현실적으로 불가능한 것이

므로 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 다량의 가상데이터를 생성하고 이를 바탕으로 만족도 확률곡선을 작성한다. 가상데이터 생성 방법은 기존의(Kim et al., 2010)연구를 참고한다.

5.2 콘크리트 탄산화 깊이 만족도 곡선

Fig. 4 ~ 15의 경우 풍속과 일조시간에 따른 탄산화 깊이와 탄산화 속도 계수를 만족도 곡선으로 나타낸 그림이다. 만족도 곡선의 경우 실험데이터와 가상데이터를 바탕으로 성공, 실패 여부를 설계자의 기준에 부합하는지 0, 1로 결정한 후 Bayesian 확률 프로그램을 이용하여 표준편차와 평균값을 도출할 수 있고 이를 바탕으로 정규분포곡선을 이용하여 만족도 곡선을 작성할 수 있다. 만족도 곡선을 작성하기 위해서는 요구 만족기준을 정하여야 한다. 본 연구에서는 실제 건설현장에 적용 가능하도록 기준을 정하였다. 옥외의 공기나 흠에 직접 접하지 않는 실내에서 타설을 실시하였으며, 철근의 경우 D 35 이하인 철근을 사용하여 콘크리트 피복두께를 20 mm라 가정하였다. 콘크리트 구조물의 탄산화 내구성 평가의 방법으로는 식 (5)를 사용하여 탄산화 깊이 y_p 의 예측값(mm)을 계산할 수 있다.

$$\gamma_p y_p \leq \varnothing k y_{lim} \quad (5)$$

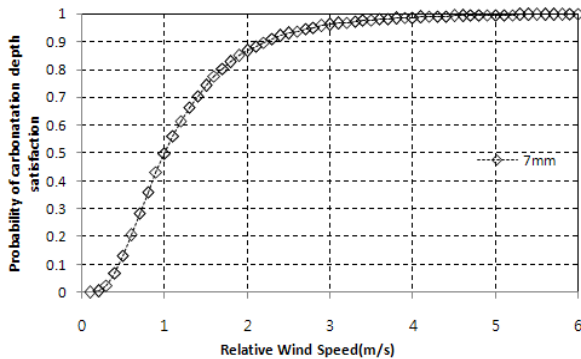


Fig. 4 Satisfaction curve of wind speed parameter for carbonation depth (7mm)

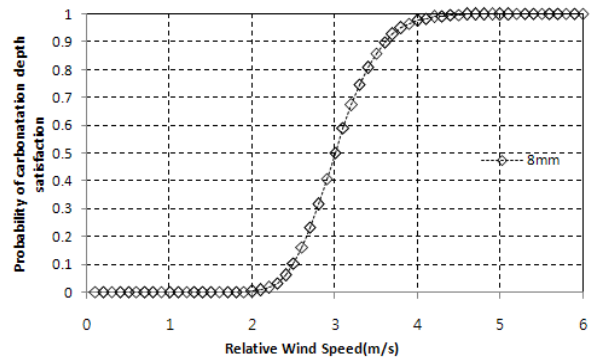


Fig. 5 Satisfaction curve of wind speed parameter for carbonation depth (8mm)

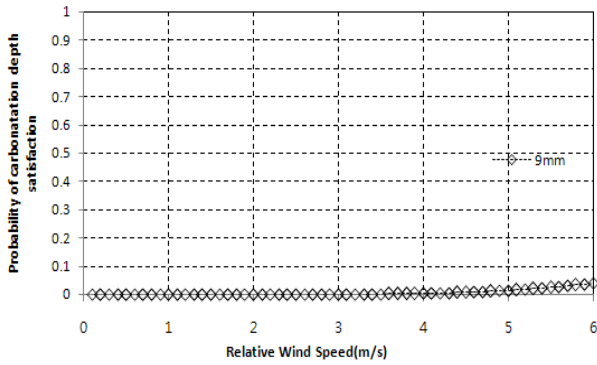


Fig. 6 Satisfaction curve of wind speed parameter for carbonation depth (9mm)

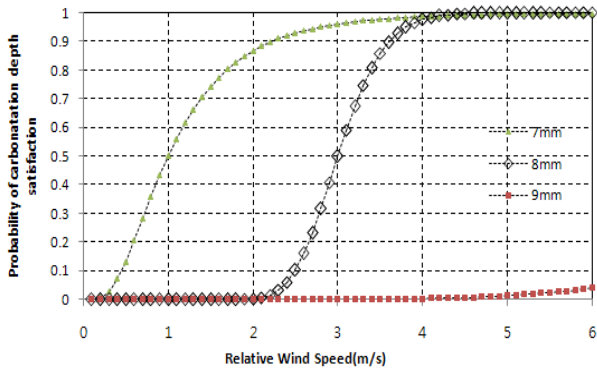


Fig. 7 Satisfaction curve of wind speed parameter for combine carbonation depth (7, 8, 9mm)

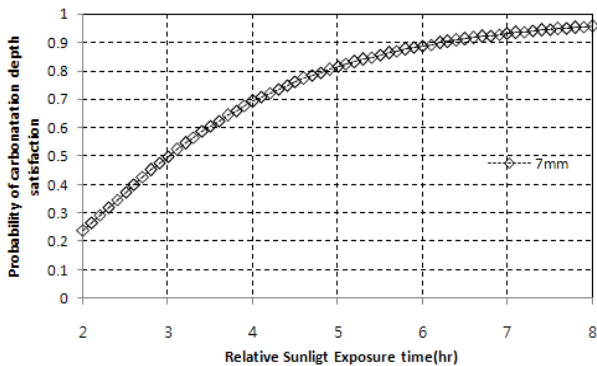


Fig. 8 Satisfaction curve of sunlight exposure time parameter for carbonation depth (7mm)

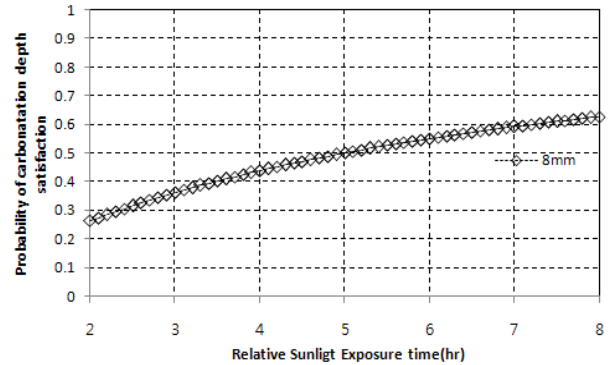


Fig. 9 Satisfaction curve of sunlight exposure time parameter for carbonation depth (8mm)

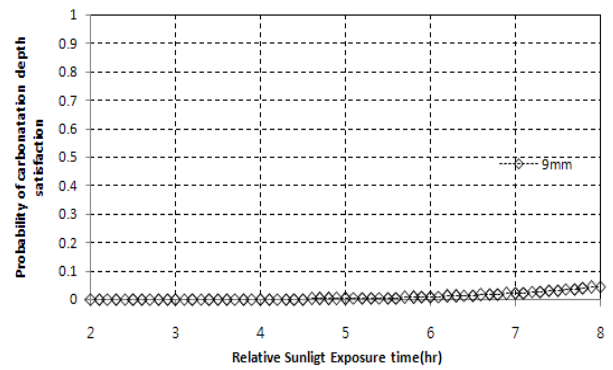


Fig. 10 Satisfaction curve of sunlight exposure time parameter for carbonation depth (9mm)

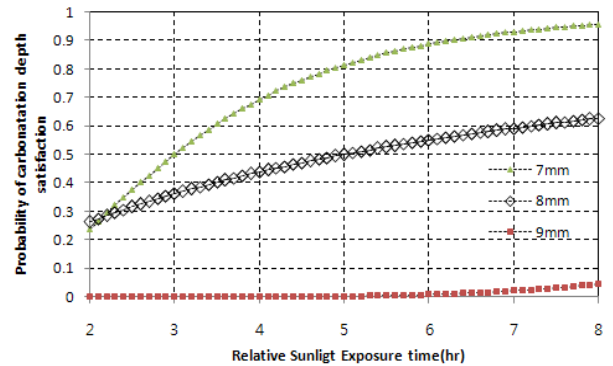


Fig. 11 Satisfaction curve of sunlight exposure time parameter for combine carbonation depth (7, 8, 9mm)

여기서, γ_p 는 탄산화에 대한 환경계수 1.1, c_k 는 탄산화에 대한 내구성 감수계수로서 일반적으로 0.92로 나타내며, y_{lim} 는 철근부식이 발생할 수 있는 탄산화 한계깊이(mm)이고, 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$y_{lim} = c - c_k \quad (6)$$

c 는 설계피복두께(mm), c_k 는 한계탄산화 깊이 여유값으로서 자연환경에서는 10 mm, 심한 염해환경의 경우 25 mm로 설정한다. 따라서 본 연구에서 피복두께를 20 mm로 설정하였으므로 탄산화 깊이의 예측값은 대략 8.36 mm로 나온다. 그러므로 요구 만족규정을 8 mm로 설정하였고 다양한 만족확률을 비교 분석하기 위하여 만족규정을 7, 9 mm 추가하였다. Fig. 4 ~ 11의 그래프는 탄산화 깊이를 나타낸 만족도 곡선

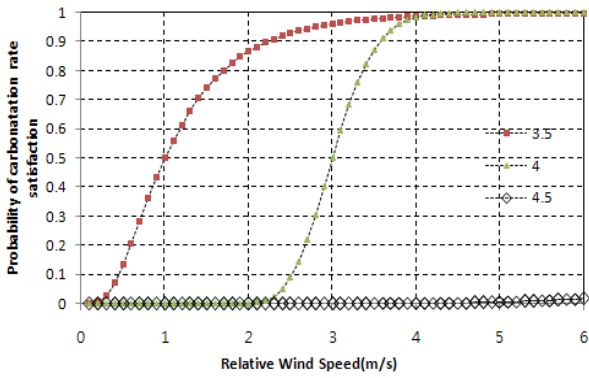


Fig. 12 Satisfaction curve of wind speed parameter for combine carbonation rate (3.5, 4, 4.5)

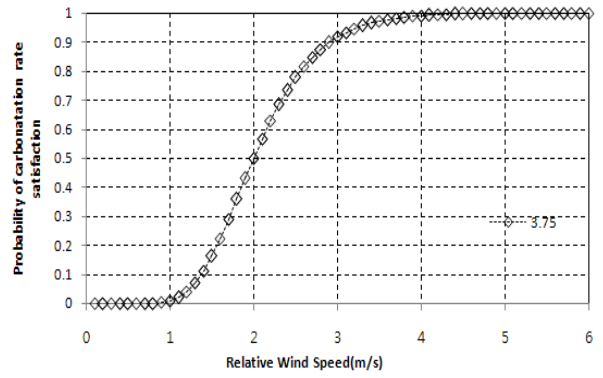


Fig. 14 Satisfaction curve of wind speed parameter for carbonation rate (3.75)

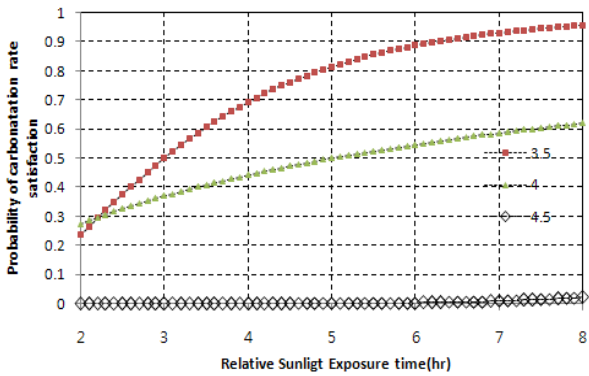


Fig. 13 Satisfaction curve of sunlight exposure time parameter for combine carbonation rate (3.5, 4, 4.5)

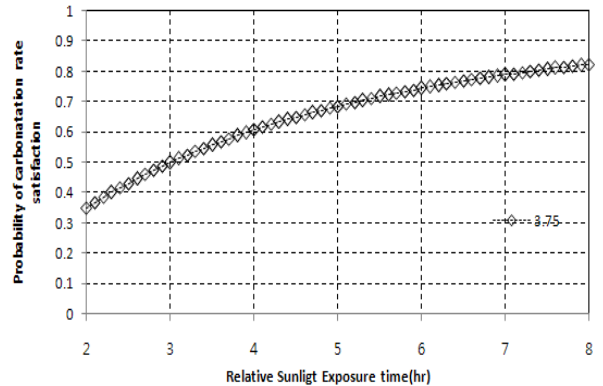


Fig. 15 Satisfaction curve of sunlight exposure time parameter for carbonation rate (3.75)

으로써 만족규정을 (7, 8, 9) mm를 기준으로 적용하였다. 만족도 곡선을 평가하는 방법으로는 Fig. 7를 대상으로 할 경우 풍속에 따른 탄산화 깊이 기준을 8 mm로 하였을 때 50%의 확률을 만족시키기 위해서는 양생시 풍속이 3 m/s 이상 발현 되어야 하며 7 mm를 기준으로 하였을 경우 1 m/s 이상 이어야 한다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 11의 경우 탄산화 깊이 기준을 7 mm로 하였을 경우 80% 이상 만족 확률을 나타내기 위해서는 5시간의 양생일조시간을 거쳐야 한다는 것을 확인 할 수 있다. 탄산화 깊이 같은 경우 만족도 곡선 범위가 일조시간 보다 풍속의 경우가 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며 이것은 탄산화 깊이에 일조시간 보다 풍속이 더 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

5.3 탄산화 속도 계수 만족도 곡선

Fig. 12와 13은 풍속, 일조시간에 대한 탄산화 속도 계수를 만족도 곡선으로 나타낸 것으로서 식 (4)를 통하여 탄산화 속도의 계수를 (3.5, 4, 4.5)로 설정 할 수 있다. 그러나 탄산화 깊이 (7, 8, 9) mm에 대하여 탄산화 속도 계수는 (3.5, 4, 4.5)비례

하는 것을 알 수 있으며 만족도 곡선은 똑같이 나온다는 것을 알 수 있다. Fig. 12의 경우 설계자의 요구 만족 규정 3.5에 관하여 풍속의 경우 30%, 70%만족할 확률은 0.8 m/s, 1.2 m/s의 양생조건이 필요하다. 또한 Fig. 13의 일조시간의 경우 2.2 hr, 4 hr의 양생조건이 필요하다. 이러한 성능중심평가의 경우 설계자의 다양한 요구목표에 대하여 설정이 가능하며 탄산화 속도 계수를 3.75로 바꾸어 요구 만족 기준으로 설정할 경우 Fig. 14와 15과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 설계자의 다양한 만족요구목표에 따라서 성능중심평가를 통해서 추후 기후변화가 자주 발생하는 건설현장에 적용 가능하다.

6. 결론

본 연구에서는 다양한 풍속, 일조시간에 관하여 양생을 실시한 콘크리트 시편의 탄산화 성능에 관하여 실험적으로 검토 후 이를 바탕으로 성능중심평가방법(Performance Based

Evaluation : PBE)을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 탄산화 깊이 측정의 경우 양생조건이 극한 상황으로 갈수록 콘크리트 내부에 미세 공극을 발생시킴으로써 탄산화 침투가 깊게 일어나는 것을 알 수 있으며 만족도 곡선의 경우 풍속과 일조시간에 관하여 그래프 범위가 넓게 나타나는 것은 양생조건이 영향을 많이 미친다는 것을 알 수 있다.
- 2) 탄산화 속도 계수의 경우 탄산화 깊이와 동일한 만족도 곡선을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 요구 목표를 달리 할 경우 만족도 곡선의 다양한 변화를 가져오는 것을 알 수 있다.
- 3) 만족도 곡선의 경우 설계자의 다양한 요구 목표에 따라 설정하고, 실험을 통한 데이터 및 다량의 가상데이터를 생성할 수 있으며, 성능중심 위주의 평가가 가능하다.
- 4) 일반적으로 상대습도 95%의 경우는 생기지 않으나 극한 기후 환경을 검토하고 일반적인 상황과 비교분석을 위하여 습도를 95%로 선택하였다. 상대습도가 95%일 경우 탄산화 깊이가 덜 발생 할 수는 있지만 풍속과 일조시간의 양생조건과 탄산화 상대습도 95%에 관한 연구는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 데이터를 확보하기 위하여 기존의 탄산화 조건인 상대습도 $60 \pm 5\%$ 와 달리 95% 조건으로 데이터를 확보하였으며, 추후 더 많은 탄산화 상대습도에 관한 연구를 수행할 필요가 있다.
- 5) 본 연구에서 탄산화 성능중심평가를 위하여 단기간 촉진탄산화 실험을 하였다. 그러나 구조물들이 촉진실험이 아닌 외부에 장기간 노출 될 경우 실제 성장과는 차이가 날 수도 있다.
- 6) 본 연구에서는 한 가지 내구성 평가를 통하여 성능을 평가 하였으므로 정확한 데이터 구축을 위해서 추후 다양한 내구성평가를 실시하여 연구를 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(11기술혁신F04)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 전합니다.

References

1. Kwon, S.J., Park, S.S., and Nam, S.H. (2007), A Suggestion for Carbonation Prediction Using Domestic Field Survey Data of Carbonation, Korea institute for structure maintenance and inspection, KSMI 11(5), 81~88 (In Korean).
2. Kim, J.H., Oh, K.C., and Park, S.B. (2008), A study on carbonation velocity for concrete structures, Korea institute for structure maintenance and inspection, KSMI 12(2), 163~170 (In Korean).
3. Jung, H.J., Kim, G.S. (2010), A Long-term Durability Prediction for RC Structures Exposed to Carbonation Using Probabilistic Approach, Korea institute for structure maintenance and inspection, KSMI 14(5), 119~127 (In Korean).
4. Kang, W.S. (2004), The Impacts and Measures of Climate Change on Construction Industry, Construction economy research institute of korea (In Korean).
5. Kim, H.S., Ahn, T.S. (2008), Climate Change and Civil Engineering Construction with Sustainable Concrete Technical Development, Korea concrete institute, KCI, 56(5), 68~74 (In Korean).
6. Ang, A.H.S-S., Tang, W.H. (2006), Probability Concepts in Engineering, Wiley & Hoboken.
7. Box, G. E. P. and Tiao, G .C. (1992), Bayesian Inference in Statistical Analysis, Addison Wesley.
8. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H., Uzawa, T., and Ueda, T. (2001), Statistical Analysis of Fragility Curves, Technical Report, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering.
9. Singhal, A., Kiremidjian, A.S. (1996), A Method for Earthquake Motion Damage Relationships with Application to Reinforced Concrete Frame, NCEER-97-0008 Technical Report, National Center for Earthquake Engineering Research(NCEER).
10. Shinozuka, M., Feng, M Q., Lee, J. H., and Naganuma, T. (2000), Statistical Analysis of Fragility Curves, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 126(12), 1224~1231.
11. Kim, J,H.J., Phan, D.H., Lee, K.S., Yi, N.H., and Kim, S.B. (2010), Development of PBD Method for Concrete Mix Proportion Design Using Bayesian Probabilistic Method, Korea concrete institute, KCI, 20(2), 171~177 (In Korean).

Received : 03/30/2015

Revised : 07/08/2015

Accepted : 07/22/2015

요 지 : 현재 전 세계적으로 자연적, 인위적 요인으로 인하여 이상기후가 나타나고 있다. 이상기후의 대표적인 것으로 슈퍼태풍, 극한폭설, 폭염과 같은 극한 기후현상이 초래된다. 1970년대 산업화 시대 이후 급격하게 지구의 온도가 상승하는 것을 알 수 있으며, 이로 인하여 발생하는 가장 큰 문제점은 지구 온난화이다. 지구 온난화에 영향을 미치는 온실가스의 종류로는 이산화탄소, 과불화탄소, 아산화질소, 메탄과 같은 다양한 종류의 화학성분이 존재하며 특히 이산화탄소가 약 90%의 비중을 차지하는 것을 알 수 있다. 콘크리트의 경우 건설재료로써 탁월한 내구성능을 지니고 있으며, 사회기반시설물 건설 재료로 70%이상 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 타설직후 물리·화학적으로 다양한 환경조건으로부터 성능저하 현상이 발생하기도 한다. 특히 대기중의 이산화탄소는 콘크리트 알칼리도 저하에 따른 철근을 부식시키고 내구성 저하를 초래하게 된다. 따라서 본 연구에서는 풍속, 일조시간에 관하여 양생 한 후 콘크리트의 탄산화 실험을 접목시켜 탄산화 깊이와 탄산화 속도 계수를 측정하고 이를 바탕으로 만족도 확률 곡선을 통하여 성능중심평가(Performance Based Evaluation(PBE))를 수행 할 것이다.

핵심용어 : 기후변화, 콘크리트 탄산화, 만족도 곡선, 성능중심평가
