

콘크리트 구조물의 확률론적 탄산화 예측 모델 개발 및 내구성 해석

Durability Analysis and Development of Probability-Based Carbonation Prediction Model in Concrete Structure

정현준*

Jung, Hyunjun

Abstract

Recently, many researchers have been carried out to estimate more controlled service life and long-term performance of carbonated concrete structures. Durability analysis and design based on probability have been induced to new concrete structures for design. This paper provides a carbonation prediction model based on the Fick's 1st law of diffusion using statistic data of carbonated concrete structures and the probabilistic analysis of the durability performance has been carried out by using a Bayes' theorem. The influence of concerned design parameters such as CO₂ diffusion coefficient, atmospheric CO₂ concentration, absorption quantity of CO₂ and the degree of hydration was investigated. Using a monitoring data, this model which was based on probabilistic approach was predicted a carbonation depth and a remaining service life at a variety of environmental concrete structures. Form the result, the application method using a realistic carbonation prediction model can be to estimate erosion-open-time, controlled durability and to determine a making decision for suitable repair and maintenance of carbonated concrete structures.

Keywords : Durability Analysis, Carbonation Prediction Model, Statistic Data, Probabilistic Analysis, Design Parameters

요 지

최근에 탄산화 콘크리트 구조물의 정량적인 사용수명과 장기적인 성능을 확보하고 예측하기 위해서 확률론적인 내구성 해석 및 설계를 수행하는 연구가 많이 진행되고 있다. 이와 관련하여 콘크리트 구조물에 확률론적 내구성 설계 개념을 도입하고 있다. 본 논문에서는 탄산화 콘크리트 구조물의 통계적인 자료를 이용하여 Fick의 첫 번째 법칙에 근거한 탄산화 예측 모델에 적용하였으며, 이를 이용하여 확률론적 내구성 해석을 수행하였다. 이 예측모델에 관련된 설계변수인 CO₂ 확산계수, 대기중의 CO₂ 농도, CO₂ 흡착량, 시멘트 수화도 등의 영향을 검토하였다. 확률론에 기초한 탄산화 예측모델은 여러 환경에 위치한 콘크리트 구조물에 모니터링 자료를 이용하여 탄산화 깊이와 잔존수명을 예측하였다. 그 결과로 본 연구에서 합리적인 탄산화 예측모델을 이용한 적용 방법은 탄산화 콘크리트 구조물의 내구성 확보 및 구조물의 손상 개시시기를 예측하고 구조물을 유지·관리하기, 위한 유연한 의사결정을 할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 내구성 해석, 탄산화예측모델, 통계적인 자료, 확률론적 해석, 설계변수

1. 서 론

최근 설계 및 시공 기술의 발전과 신재료의 개발로 인해 국내·외에서 요구하고 있는 콘크리트 구조물의 목표내구수명은 점차 증가하고 있는 추세이다. 하지만 산업의 발달과 도시화 인해 점차 발생이 증가되는 CO₂량의 영향과 온난화 현상과 같은 각종 환경조건에 의해 콘크리트 구조물의 열화현상의 가속화가 예상된다. 이로 인해 콘크리트 구조물의 성능저하로 이어지고 구조물의 내구수명이 목표치에 도달하지 못하는 경우가 발생된다(WHO, 2006; 기상청, 2006).

도심에서 콘크리트 구조물의 성능저하를 일으키는 가장 큰 원인으로 콘크리트 탄산화를 예로 들 수 있다. 이러한 콘크리트에 탄산화를 일으키는 가장 큰 영향을 주는 요인은 대기 중 CO₂량의 증가이다. CO₂ 영향으로 인한 콘크리트 구조물의 탄산화에 영향을 미치는 요인은 시멘트 종류, 구조물의 용도, 환경조건, 배합비율, 온도, 수화도, 상대습도 등으로 분류 할 수 있다. 콘크리트의 탄산화로 인한 콘크리트 구조물의 성능저하는 단기간에 발생하지 않는다. 오랜 시간동안 침투한 CO₂의 영향 및 환경조건으로 인해 콘크리트 구조물의 성능저하가 발생하게 된다. 콘크리트 구조물의 내구성능

*정회원 · 인천대교(주) 기술본부 구조물/시설물팀 사원 (E-mail : chung6@korea.ac.kr)

이 저하되면 안전성 및 내하력을 저하하게 되는 과정을 겪게 되고 결국에 구조물의 붕괴로도 이어질 수 있다. 따라서 탄산화된 콘크리트 구조물은 적절한 유지관리가 요구된다.

탄산화에 관한 연구는 국내·외에서 많이 진행되었으며 특히 수명예측에 필수적인 탄산화 속도 모델에 대한 여러 연구가 수행된 바가 있다. 제안된 모델들은 콘크리트 구조물의 탄산화 깊이와 수명을 예측하고 구조물을 유지관리하기 위한 지표로 활용되고 있다(이창수, 2004; 이창수, 2003). 그러나 선행된 연구들의 해석 및 실험결과는 초기 탄산화 속도계수에 대해서 일괄적으로 적용 되어 있으며, 대상 콘크리트 구조물의 특성 및 상태를 합리적으로 반영하지 못하고 있는 실정이다.

일반적으로 콘크리트 내 철근의 부식 조건 중에 탄산화의 경우, 구조물의 물리적인 수명은 철근 위치까지 탄산화가 진행되었을 경우 부동태 피막의 파괴로 철근의 부식이 이루어져 철근의 부피가 팽창하게 되고 국부적인 압력으로 인해 균열이 발생되기까지를 구조물의 손상이 발생되었다고 판단한다. 실제 목표한 수명을 갖지 못하더라도 열화 되는 시점을 상시 예측하여 열화된 구조물을 유지·보수할 수 있어야 최소 비용으로 목표 내구수명을 완수 할 수 있게 최대효과를 누릴 수 있다. 따라서 열화된 구조물의 내구성을 향상시키기 위하여 적절한 시기에 유지관리활동이 필요하며, 이 시기를 정확히 예측하는 것이 콘크리트 구조물의 내구성 확보와 경제성 측면에서 매우 중요하다.

본 연구에서 Fick의 첫 번째 법칙을 토대로한 기존의 탄산화 예측모델에 베이저안 기법과 라틴 하이퍼큐브 샘플링 기법(LHS)을 이용하여 탄산화 예측 모델식을 개발하여 확률론을 기초로 대상 콘크리트 구조물의 특성 및 상태를 반영한 콘크리트 구조물의 탄산화 깊이를 예측하고 한계상태합수를 통하여 탄산화된 콘크리트 구조물의 잔존수명을 예측하였다. 또한, 초기 탄산화 속도 모델의 중요한 설계변수인 CO₂ 확산계수, 대기중의 CO₂ 농도, CO₂ 흡착량, 시멘트 수화도 등을 고려한 모델을 구성하여 초기에 발생하는 불확실성을 줄였다. 각 설계변수가 신뢰성 지수에 미치는 영향을 정량적인 분석을 하기 위하여 각 설계변수에 따른 민감도 해석을 수행하였다. 개발된 탄산화 예측 모델은 지속적으로 모니터링 데이터가 축적되는 실구조물의 경우 유용한 기법이라고 판단되며, 설계단계에서 가지는 여러 변수를 통계적 기법을 이용하여 상당부분 제거할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 제시한 탄산화 예측모델을 이용한 적용 방법은 탄산화 콘크리트 구조물의 내구성 확보 및 구조물의 손상 개시시기를 예측하고 구조물을 유지·관리하기, 위한 유연한 의사결정을 할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 콘크리트 구조물의 탄산화 내구성 예측 모델

2.1. 콘크리트의 일차원 탄산화 모델

콘크리트와 같은 다공성 매체 내부에서 일어나는 물질의 이동은 일반적으로 Fick의 첫 번째 법칙을 모델로 한다. 일차원적인 탄산화 속도 모델을 정상흐름 상태에서 유체의 흐름을 표현하기 위해서 Fick의 첫 번째 법칙을 이용하여 콘크리트 구조물의 탄산화 속도 모델은 식 (1)과 같이 나타낼

수 있다(Miguel, 2001; 이창수, 2003).

$$x = \frac{2D}{a}(C_1 - C_2)t \quad (1)$$

여기서, x 는 탄산화의 깊이(cm)이고, C_1 은 외부에서 유입된 CO₂농도(g/cm³)이고, C_2 는 탄산화된 부분과 미진행된 콘크리트 경계면의 CO₂농도(g/cm³)이며, D 는 CO₂확산계수이며, t 는 경과한 시간(second)이고, a 는 단위 부피당 콘크리트를 탄산화 시키기 위해 필요한 CO₂량(g/cm³)이다.

식 (1)에서 탄산화 경계면의 콘크리트 표면으로부터 거리를 탄산화 깊이로 보고, 외부에서 유입된 CO₂농도를 대기 중의 CO₂농도로 치환하면 식 (2)과 같다(이창수, 2004).

$$C_x = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2} \cdot C_{CO_2} \cdot t}{a}} = A \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

여기서, A 는 탄산화 속도계수(cm²/s)이고, t 는 콘크리트의 탄산화 경과시간(second)을 나타낸다. C_x 는 경과한 시간에서의 탄산화 깊이(cm)이고, D_{CO_2} 는 CO₂ 확산계수(cm²/s)이고, C_{CO_2} 는 대기 중의 CO₂농도(g/cm³)이며, a 는 CO₂ 흡착량(g/m³)이다.

2.1.1 CO₂ 확산계수

D_{CO_2} 는 선행연구를 통해서 식 (3)과 같이 구할 수 있다(이창수, 2003). CEB-FIP 1990에서 제안하는 콘크리트의 CO₂ 및 O₂ 확산계수는 $0.5 \times 10^{-4} \sim 6.0 \times 10^{-4}$ 의 범위로 제안하고 있다(CEB FIP, 1990; Miguel, 2001).

$$D_{CO_2}(t) = D_1 \cdot t^{-n_d} \quad (3)$$

여기서, D_1 는 1년경과 후의 CO₂ 확산계수이고, n_d 는 확산계수의 감소를 반영한 시간계수이다. 시간계수(n_d)는 W/C에 따라 상당히 다른 결과를 보인다.

표 1. W/C의 배합비율에 따른 D_1 과 n_d 값

	W/C	D_1	n_d
$D_{CO_2_45\%}$	0.45	0.6496	0.2180
$D_{CO_2_50\%}$	0.50	1.2358	0.2348
$D_{CO_2_55\%}$	0.55	2.2248	0.2395

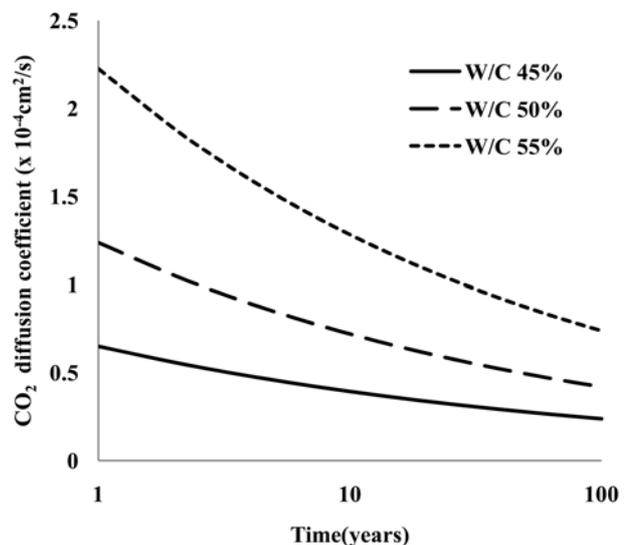


그림 1. 시간에 따른 CO₂ 확산계수

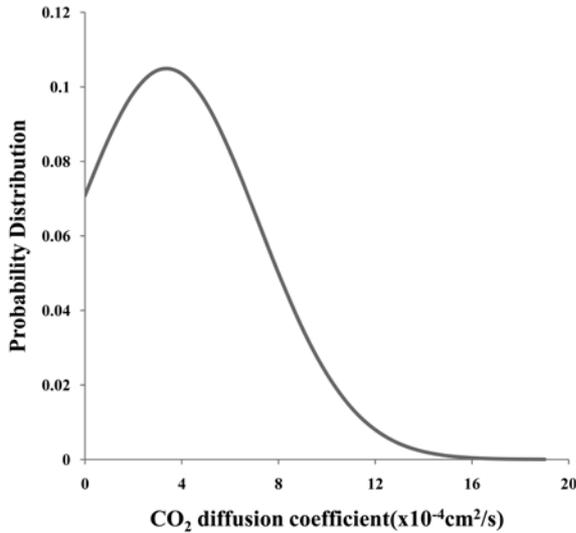


그림 2. CO₂ 확산계수의 확률분포(이창수, 2004)

그림 1을 보면, 시간계수(n_d)는 W/C 가 큰 콘크리트 일수록 CO₂ 확산계수가 증가하고 있으며, 초기 수화도의 CO₂ 확산계수가 높다. 기존의 연구결과와 마찬가지로 탄산화가 진행되면 콘크리트의 다공성 구조의 밀실성이 향상 되어 확산계수가 감소된다.

표 1과 같이 W/C 의 배합비율에 따라 각각의 값을 다르게 나타낸다(이창수, 2003).

본 논문에서는 그림 2와 같이 모델변수로 CO₂ 확산계수를 사용하였고, 선행연구 자료로 CO₂ 확산계수의 평균 $3.87 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$, 표준편차 $3.79 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 를 이용하였다(이창수, 2004).

2.1.2 대기 중의 CO₂농도

서울의 연평균온도가 12.2°C을 기준으로 2100년까지의 대기온도 상승률을 고려하여 CO₂농도를 예측한 결과, 대기 중의 CO₂농도는 그림 2와 같이 추세식 (4)을 이용하여 각 년도에 해당하는 대기 중의 CO₂농도를 산정하였다(이창수, 2003).

$$C_{CO_2} = 12.611 \cdot \ln(t) - 95.172 \quad (4)$$

2100년 후의 대기 중의 CO₂농도는 1995년 보다 약 2배 가량 증가한다.

2.1.3 CO₂ 흡착량

콘크리트를 완전히 탄산화하기 위해 요구되는 CO₂량은 시멘트의 종류 및 화학적 성분과 배합조건 및 경과연수에 의존하게 된다. 특히, 탄산화의 화학적 반응을 고려할 때, CaO와 CO₂량이 대표적인 지배인자이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 요소를 고려하여 적용하였다. CO₂ 흡착량은 수화도와 시멘트 내의 CO₂량과의 관계에 의해 자연폭로 및 대기 중 조건에서 식 (5)과 같이 구할 수 있다(이창수, 2004).

$$a = 0.75 \cdot C \cdot CaO \cdot \alpha_H \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO_2}} (\text{g/cm}^3) \quad (5)$$

여기서, C 는 단위 시멘트량(g/cm^3)이고, CaO 는 시멘트 내 CaO 량이고, α_H 는 시멘트 수화도이며, M 은 몰중량($CO_2:44 \text{ g/M}$, $CaO:56 \text{ g/M}$)이다.

표 2. 포틀랜드 시멘트의 화학적 조성비율(차수원, 2002)

	포틀랜드 시멘트 종류			
	TYPE I	TYPE II	TYPE IV	TYPE V
$C_3S(\%)$	49	42	23	46
$C_2S(\%)$	23	37	58	32
$C_3A(\%)$	10	6	3	4
$C_4AF(\%)$	9	12	9	13

시멘트의 CaO 은 시멘트의 종류에 따라 다르게 되며 이를 표 2와 같이 화학적 조성 비율을 기초로 산정하였다(차수원, 2002).

2.1.4 시멘트 수화도

포틀랜드의 시멘트의 주요 구성물은 알라이트(alite), 베라이트(belite), 알루미네이트(aluminate), 페라이트(ferrite)등으로 구분된다. 이들의 화학식은 각각 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF 로 나타낸다. 화합물은 동일한 양생조건을 갖더라도 각각 다른 수화도를 보이기 때문에 각 화합물의 수화도는 가중평균을 취해서 계산할 수 있다. 시멘트 수화도(α_H)는 식 (6)과 같다.

$$\alpha_H = \alpha_{h(C_3S)} W_{C_3S} + \alpha_{h(C_2S)} W_{C_2S} + \alpha_{h(C_3A)} W_{C_3A} + \alpha_{h(C_4AF)} W_{C_4AF} \quad (6)$$

여기서, $\alpha_{h(C_3S)}$ 는 알라이트(alite)의 수화도이고, $\alpha_{h(C_2S)}$ 는 베라이트(belite)의 수화도이고, $\alpha_{h(C_3A)}$ 는 알루미네이트(aluminate)의 수화도이며, $\alpha_{h(C_3S)}$ 는 페라이트(ferrite)의 수화도이다. 또한 W_i 는 시멘트량에 대한 화합물의 중량비이다.

각 성분별 수화도는 가중평균 하여, 시멘트 종류(표 3)에 따른 콘크리트의 전체 수화반응속도(overall kinetics of reaction)를 그림 3과 같이 구할 수 있다.

그림 3에서 나타내는 바와 같이 베라이트의 수화도 속도가 다른 구성물보다 느림을 알 수 있다. 하지만 다른 연구(차수원, 2002)인 그림 4를 보면 시멘트 구성물의 수화도가 모두 빠르게 진행되고 있음을 볼 수 있다.

본 논문에서는 표 3을 적용하여 수화도 속도를 구하였다. 그림 5는 포틀랜드 시멘트에 대한 수화도 속도 차이에 대한 선행된 연구결과를 비교 하였다. 본 연구에 적용된 수화도

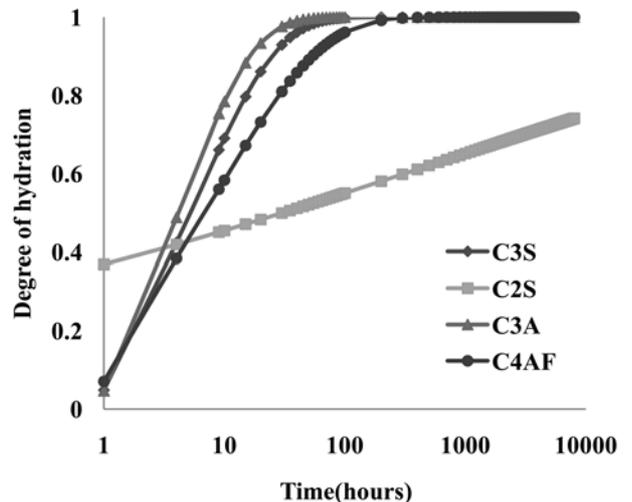


그림 3. 포틀랜드 시멘트의 주요 구성물의 수화도 속도(이창수, 2004)

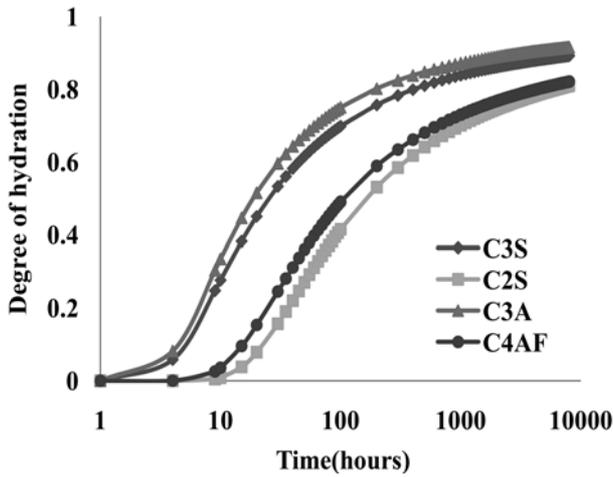


그림 4. 포틀랜드 시멘트 주요 구성물의 수화도 속도(차수원, 2002)

모델이 상대적으로 수화도 진행속도가 빠르지만 일정기간의 양생과정을 거친 후의 두 모델의 반응 속도는 수렴하는 것으로 평가되었다.

본 논문에서는 Avrami 형태의 식을 사용하여 각 화합물에 해당하는 수화도를 식 (7)에 의해 계산하였다(이창수, 2004). Avrami식은 결정화하는 초기에 잘 맞지만 시간이 지남에 따라 2차 결정화가 형성되기 때문에 잘 맞지 않는 단점이 있다. 하지만 베이지안 기법은 초기치를 계측 데이터로 보정하여 사후 예측치에 잘 맞게 되기 때문에 Avrami식의 단점을 보완할 수 있을 것으로 사료된다.

$$\alpha_n = 1 - \exp\left\{-\alpha_i \cdot (t - \beta_i)^{\gamma_i}\right\} \quad (7)$$

여기서, 시멘트 화합물에 따른 상수를 나타낸 α_i , β_i , γ_i 는 표

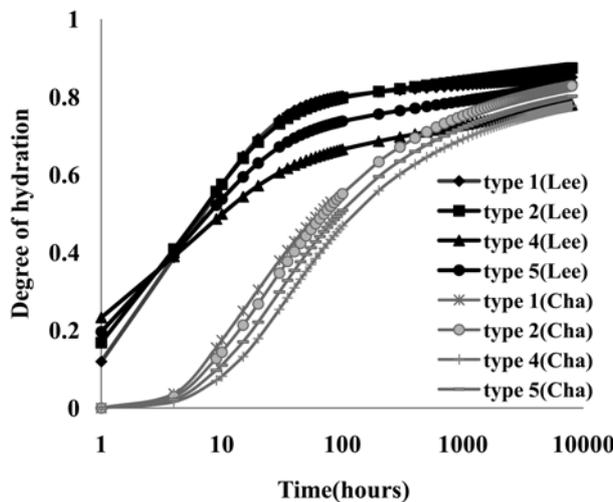


그림 5. 포틀랜드 시멘트의 종류별 수화도 속도 비교(이창수, 2004; 차수원, 2002)

표 3. 시멘트 구성 화합물의 상수(이창수, 2004)

	α_i	β_i	γ_i
C_3S	0.25	0.90	0.70
C_2S	0.46	0	0.12
C_3A	0.28	0.90	0.77
C_4AF	0.26	0.90	0.55

3을 참고하였으며, 표 2를 이용하여 본 모델에 적용하였다.

2.2. 탄산화 내구성 분석

2.2.1 확률론적인 해석기법을 이용한 탄산화 예측 모델링

확률론적인 해석을 통한 모델을 정확하게 결정하기 위해서는 확률변수에 대한 충분한 데이터가 필요하다. 확률변수는 표준정규분포를 통한 통계적인 방법을 통하여 구해진 것이기 때문이다. 사전예측치는 통계적이고 결정론적인 방법에 의해 계산되지만 사후예측치를 계산할 때는 해석모델과 주변 조건 및 계측자료, 재료의 특성이 가지는 불확실성을 고려하여 사후예측치를 나타내야 한다.

본 논문에서는 정현준 등(2008)이 염해 문제에 적용하였던 베이지안 기법을 탄산화 예측 모델에 적용하였다. 베이지안 기법을 이용한 탄산화 예측 모델은 구조물에 대한 모니터링 데이터가 필요하다. 초기 모델변수가 가지는 불확실성으로 인한 확률을 $P'(\underline{g})$ 라고 하고, 계측 데이터의 추세가 고려된 불확실성에 대한 확률을 $P''(\underline{g})$ 로 표현한다. 이 두 확률 사이에는 베이스 이론에 의해서 식 (8)과 같은 관계가 성립하게 된다(Ang, 1975).

$$P''(\underline{g}) = c_1^* P(\underline{X}|\underline{g})P'(\underline{g}) \quad (8)$$

여기서, \underline{g} 는 모델변수이다. 본 논문에서는 CO_2 확산계수 (D_{CO_2})를 모델변수로 사용하였다. c_1^* 는 전 확률 조건으로부터 결정되는 상수이다. $P(\underline{X}|\underline{g})$ 는 모델변수 \underline{g} 을 가질 때 계측 데이터 \underline{X} 가 가지는 불확실성이다.

$$P(\underline{g}) = P(\underline{X}) \quad (9)$$

단조 증가하는 문제인 경우에 해당하는 문제들에 식 (9)가 성립된다. 선행 연구로 콘크리트의 염해침투, 압축강도, 크리프, 건조수축, 장기처짐 등의 문제들에 적용하였다(Bazant, 1989; 오병환, 1999; 양인환, 2006; 정현준, 2008). 즉, k 번째 구간의 모델상수의 불확실성은 열화예측의 불확실성과 같다.

2.2.2 라틴 하이퍼큐브 추출법을 이용한 예측치

라틴 하이퍼큐브 샘플 추출법은 많은 수의 파라미터를 분석하는데 유용하며, 적은 모의실험을 수행하면서도 실험점들이 모델변수 영역에 골고루 분포되는 공간을 채우게 되는 특성을 가지고 있다(Mckay, 1979). 모니터링을 통해 계측된 시간 t_m 에서 탄산화 깊이 ($m=1, 2, 3, \dots, M$)를 X_m 이라 하면, 초기 계측치를 이용해서 개선 전, 즉 모니터링을 통해 얻어지는 추가적인 데이터를 고려하지 않은 탄산화 깊이 X' 의 평균 \bar{X}' 과 표준편차 σ_m^X 는 식 (10)과 같다. 이 때, 등가의 확률을 가지는 구간을 k 개로 나누었다.

$$\bar{X}'_m = \frac{1}{K} \sum_k X'_m{}^{(k)}, \quad \sigma_m^X = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_k (X'_m{}^{(k)} - \bar{X}'_m)^2} \quad (10)$$

여기서, \bar{X}'_m , σ_m^X 는 각각 시간 t_m 의 함수이다. 시간 t_m 에서 X_m 에 해당하는 탄산화 깊이를 계측한 후에는 우도함수 (likelihood function) p_k 를 식 (11)과 같이 구한다.

$$p_k = \exp\left[-\sum_m \frac{1}{2} \left(\frac{X_m - X'_m{}^{(k)}}{\sigma_m^X}\right)^2\right] \quad (11)$$

여기서, 우도함수의 표준편차 σ_m^X 는 기존의 실험치나 측정 데이터로부터 추정해야 한다. 모델 예측치의 평균 \bar{X}_m'' 는 통계적 분포를 전술한 베이지안 기법을 사용하여 식 (12)와 같이 계산된다.

$$\bar{X}_m'' = \sum_k P''(X_m^{(k)})X_m^{(k)} = c_o \sum_k p_k X_m^{(k)} \quad (12)$$

개선된 탄산화 깊이의 평균 예측치 \bar{X}_m'' 의 표준편차 $\sigma_m^{X''}$ 는 식 (13)과 같다.

$$\sigma_m^{X''} = \sqrt{c_o \sum_k p_k (X_m^{(k)} - \bar{X}_m'')^2} \quad (13)$$

2.3. 확정론적 한계상태식

콘크리트 내부로 CO₂가 침투·확산하게 되면 시간이 지남에 따라 탄산화로 인해서 콘크리트의 알칼리 특성이 중성화되기 시작한다. 콘크리트가 탄산화 과정을 겪으면서 점점 탄산화 깊이가 깊어지고, 철근 깊이까지 탄산화가 진행되게 되면 철근의 부동태 피막이 파괴된다. 이러한 피막 파괴현상은 철근의 부식을 야기하고 구조물의 내구성능을 저하하는 요인이 된다. 탄산화가 진행되어 철근 깊이까지 도달하여 철근 부식을 유발하는 시점을 사용성 한계상태로 정의하고, 이때의 부식발생 확률을 계산한다. 한계상태에 대한 부식 발생 확률을 구하기 위해 다음 식 (14), (15)와 같은 한계상태함수(limit state function)로 정의하였다.

$$\underline{g} = \underline{\theta}[D_{CO_2}], R = r(\underline{g}), S = s(\underline{g}) \quad (14)$$

$$G = R - S \quad (15)$$

여기서, R 은 콘크리트 피복두께(D), 하중함수 S 는 시간에 따라 변화하는 탄산화 깊이이며, θ 는 함수를 의미한다. 한계상태함수 G 는 손상확률 P_f 로 나타낼 수 있다. 손상확률

P_f 보다 실무에서는 신뢰성 지수 β 를 이용하여 부식발생 확률을 나타낸다. 손상확률 P_f 와 신뢰성 지수 β 는 식 (17)과 같은 관계가 있다.

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_G(g) dg \quad (16)$$

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G}, P_f = \Phi(-\beta) \quad (17)$$

여기서, $f_G(g)$ 는 확률밀도함수이고, σ_G 는 G 의 표준편차이며, μ_G 는 G 의 평균이다.

3. 탄산화 내구성 해석 시나리오

본 논문에서는 다음과 같은 절차로 내구성 해석을 수행하였고, 그림 6과 같이 나타내었다.

- 1) 탄산화 해석 모델에 사용될 설계변수를 선정한다.
- 2) 정규분포를 이용하여 각 설계변수의 누적분포함수(Cumulative Density Function : CDF)를 생성한다.
- 3) 2 단계에서 계산된 누적분포함수와 라틴 하이퍼큐브 샘플 추출법(Latin Hypercube Sampling : LHS)을 이용하여 설계변수의 샘플을 추출한다.
- 4) 추출된 샘플을 무작위로 배열하여 설계변수 조합을 구성한다.
- 5) 조합된 각 설계변수를 이용해서 탄산화 깊이를 계산하고 사전 예측치를 구한다.
- 6) 초기 모니터링 데이터로 초기 우도함수(initial likelihood function)를 계산한다.
- 7) 초기 우도함수를 사용하여 5단계에 구한 사전 예측치를 보정한다.
- 8) 대상 구조물의 콘크리트 피복두께의 평균과 표준편차를 구하여 저항치인 R 값으로 정한 후 한계상태함수를 이용하여

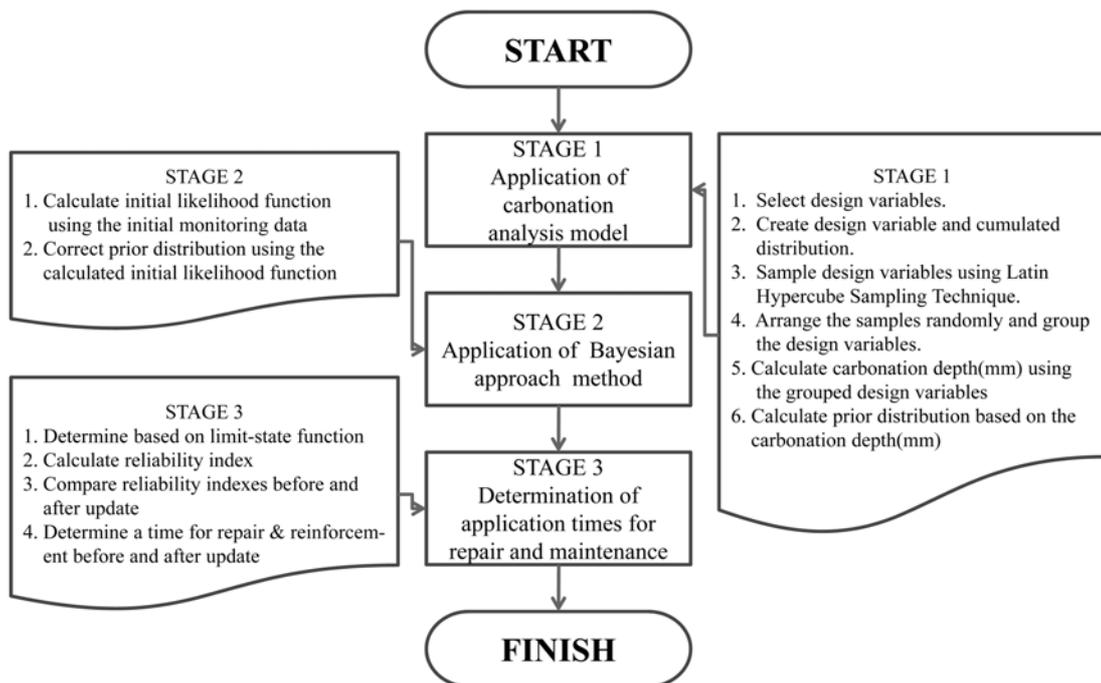


그림 6. 탄산화의 내구성 예측 해석 절차

신뢰성 지수를 구하고 구조물의 수명을 구한다.

4. 탄산화 예측 모델의 민감도 해석

4.1. 라틴 하이퍼큐브 샘플 수 및 COV 값

Bazant 등(1989)에 따르면 라틴 하이퍼큐브 샘플 수는 설계변수의 수 n 을 두 배 고려한 값이 전체의 설계변수의 수에 대한 결과에 수렴되는 것을 확인하였고 정현준 등(2008)에서 계산량의 증가가 크지 않을 경우 $3n$ 으로 했을 때 전체 설계변수의 수와 같은 결과에 수렴됨을 확인되었다. 그림 7을 보면, 라틴 하이퍼큐브 샘플 수는 샘플 수를 늘리면 사

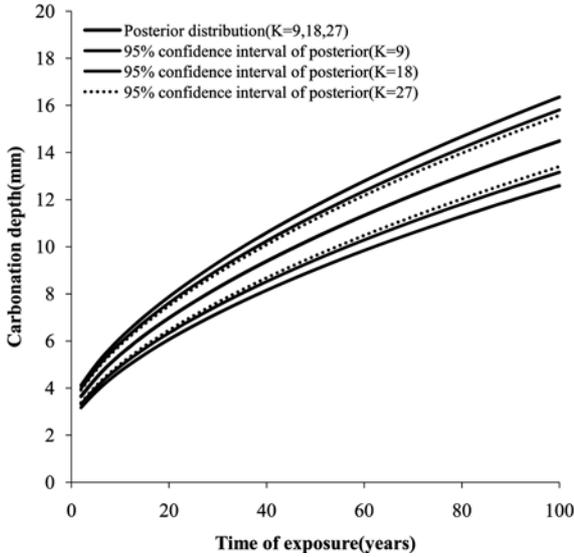


그림 7. 라틴 하이퍼큐브 샘플 수의 변화에 따른 탄산화 깊이의 사후예측치 변화

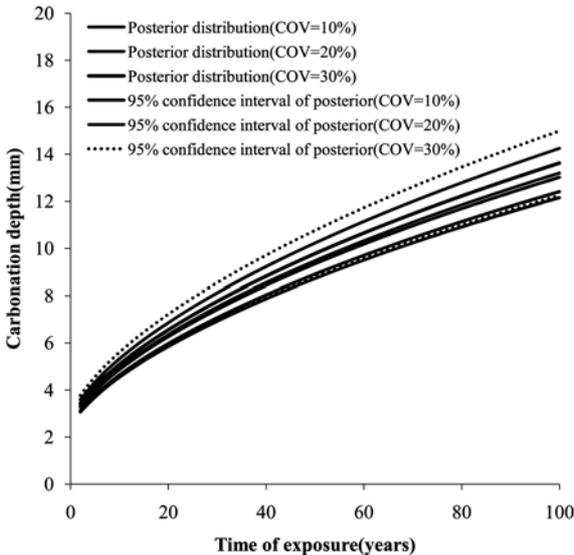


그림 8. COV 값 변화에 따른 탄산화 깊이의 사후예측치 변화

전예측치와 사후예측치의 분산도분포가 좁혀진다. 그러나 최소량의 모니터링 데이터와 최소량의 샘플개수를 이용하는 것이 개발된 모델을 사용하는데 의의가 있고, 계산시간의 효율성을 위해서 최소 개수인 9개의 샘플을 이용하였다. 또한, 그림 8에서 COV(coefficient of variation)값의 범위가 10~30%였을 때를 비교하면 거의 유사한 값을 보이고 있고 라틴 하이퍼큐브 샘플 수와 마찬가지로 분산도의 분포가 좁아진다. 하지만 그림 7과 8을 보면 본 연구에서는 샘플 수와 COV 값의 변화에 따른 영향은 그리 크지 않을 것으로 판단된다.

4.2. 설계 변수

제시되는 확률론적 내구성 해석 방법을 이용하여 한계상태 함수를 구성하는 각 설계변수가 신뢰성 지수에 미치는 영향을 정량적인 분석을 하기 위하여 민감도 해석을 수행하였다. 한계상태함수를 구성하는 설계변수는 실측 자료이거나 실험 자료를 기초로 하여 분석해야 한다. 그러나 이에 대한 국내에 자료가 미흡하여 본 연구에서는 사전 연구된 연구 자료를 참조하였다. 각 설계변수에 대한 민감도 해석을 하기 위해서 합리적인 범위(평균값의 50%를 초과하지 않는 범위) 내에서 변화를 주었고 설계변수의 변화에 따른 탄산화 깊이의 영향을 고찰하였다. 표 4에는 민감도 해석을 하기 위한 설계확률변수는 CO_2 확산계수 D_{CO_2} , 대기중의 CO_2 농도 C_{CO_2} , CO_2 흡착량 a , 시멘트 수화도 α_H 를 사용했다. 또한 각각의 설계변수에 대한 평균과 표준편차를 나타내었다.

4.2.1 CO_2 확산계수, D_{CO_2}

CO_2 확산계수는 시멘트량, 시멘트의 종류와 주변 환경 등 많은 변수를 가지고 있고 실험을 하게 될 때 실험의 방법과 실험조건에 따라 상당히 변화가 심하므로 신뢰할 만한 데이터를 구하기가 쉽지가 않다. 민감도 해석을 수행하기 위해서 사전 연구한 자료를 이용하였고 다른 변수인 대기중의 CO_2 농도 C_{CO_2} , CO_2 흡착량 a , 시멘트 수화도 α_H 는 표 4에 제시되어 있는 값을 사용하였다.

그림 9를 보면, CO_2 확산계수를 변화시킴으로서 신뢰성 지수로 손상개시시기를 결정하였다. 다른 설계변수가 같고 신뢰성 지수가 1.5였을 때 손상되는 개시시기로 가정하면 이때에 이르는 시간은 CO_2 확산계수가 $2.87 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 였을 때보다 $4.87 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 가 2배 빠르게 72년에서 36년으로 손상개시시기가 앞당겨 졌다.

4.2.2 대기중의 CO_2 농도, C_{CO_2}

대기중의 CO_2 농도는 지역과 나라별로 많은 차이가 발생하며 국내의 대기중 CO_2 농도를 단순회귀분석한 값을 이용하였고 다른 변수인 CO_2 확산계수 D_{CO_2} , CO_2 흡착량 a , 시멘트 수화도 α_H 는 표 4에 제시되어 있는 값을 사용하여

표 4. 설계확률변수에 대한 평균과 표준편차

설계 변수	사전 예측치 (평균, 표준편차)	평균치 변화 범위
$D_{CO_2} (\times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s})$	$N(3.87, 3.79)$	2.87, 3.87, 4.87
$C_{CO_2} (\text{g}/\text{cm}^3)$	Using (4) formula, (0.74)	0.69, 0.74, 0.79
$a (\text{g}/\text{cm}^3)$	Using (5) formula and Table 2, (1.65)	0.65, 1.65, 2.65
α_H	Using (6) and (7) formula, (0.12)	0.06, 0.12, 0.18

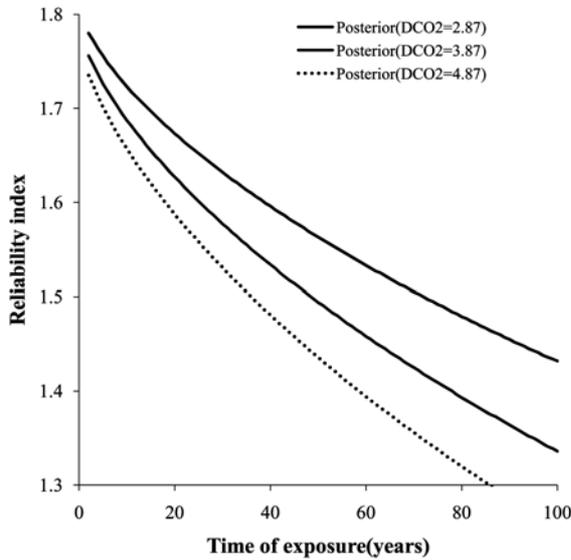


그림 9. CO₂ 확산계수의 변화에 따른 신뢰성 지수 변화

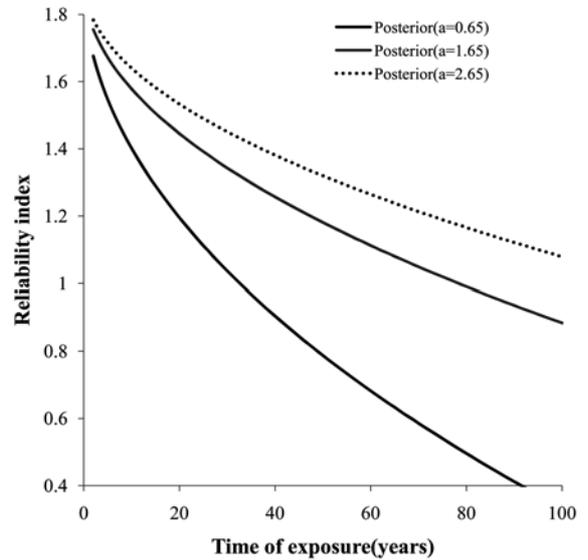


그림 11. CO₂ 흡착량에 따른 신뢰성 지수 변화

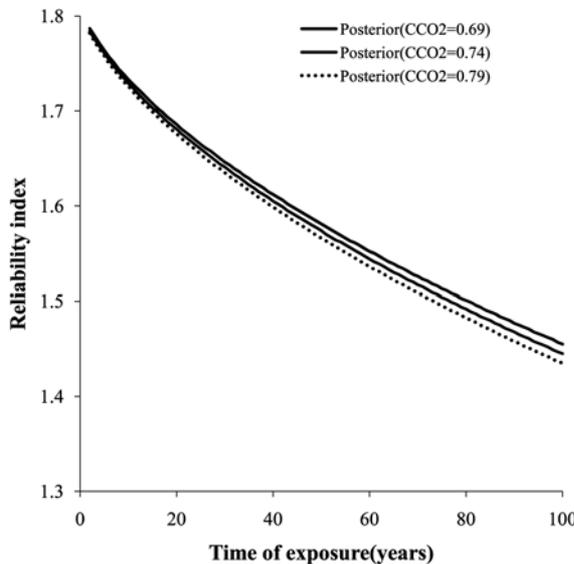


그림 10. 대기중의 CO₂ 농도에 따른 신뢰성 지수 변화

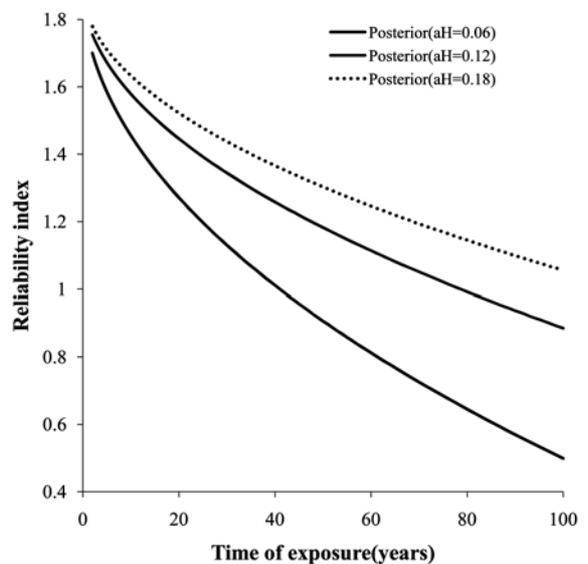


그림 12. 시멘트 수화도에 따른 신뢰성 지수 변화

민감도 해석을 수행하였다.

그림 10을 보면, 대기중의 CO₂ 농도를 0.69, 0.74, 0.79 g/cm³로 변화에 대해서 손상개시시기를 결정하였다. 만약 신뢰성 지수가 1.5에서 손상이 된다면 대기중의 CO₂ 농도를 0.69, 0.74, 0.79 g/cm³인 경우에 대해서 각각 80년, 77년, 73년으로 감소한다.

4.2.3 CO₂ 흡착량, a

CO₂ 흡착량은 시멘트의 종류, 화학적 성분 및 배합조건, 경년, 시멘트 수화도와 CaO량의 관계 등 많은 변수를 가지고 있다. CO₂ 흡착량은 0.65, 1.65, 2.65 g/cm³의 범위를 주었고 다른 변수인 CO₂ 확산계수 D_{CO_2} , 시멘트 수화도 α_H 는 표 4에 제시되어 있는 값을 사용하여 민감도 해석을 수행하였다.

그림 11을 보면, CO₂ 흡착량은 다른 변수보다 부식 개시 시기에 미치는 영향이 가장 큰 것을 알 수 있다. 그림 11에서 CO₂ 흡착량이 0.65, 1.65, 2.65 g/cm³로 증가함에 따라 신뢰성 지수가 1.2에서 19.5년, 47년, 73년으로 급격히

증가함을 알 수 있다. 따라서 탄산화 콘크리트 구조물의 엄밀한 내구성 예측을 수행하기 위해서 CO₂ 흡착량을 합리적으로 예측하는 것이 필수적인 요소인 것으로 판단된다.

4.2.4 시멘트 수화도, α_H

시멘트 수화도는 콘크리트의 수화발열과정과 재료의 특성에 따라 많은 차이가 발생되고 시멘트의 반응정도에 따라 다르게 표현될 수 있으나 이를 정량적으로 계산하기는 어렵다. 따라서 이를 근사적으로 추정하기 위해서는 시멘트 화학 조성에 따른 각 화합물의 수화도의 가중평균을 취함으로써 구하였다. 시멘트 수화도는 0.06, 0.12, 0.18의 범위를 주었고 다른 변수인 CO₂ 확산계수 D_{CO_2} , 대기중의 CO₂ 농도 C_{CO_2} , CO₂ 흡착량 a 는 표 4에 제시되어 있는 값을 사용하여 민감도 해석을 수행하였다.

그림 12를 보면, 시멘트 수화도를 0.06, 0.12, 0.18로 변화시켜 신뢰성 지수의 변화를 분석하였다. 시멘트 수화도는 0.06, 0.12, 0.18로 증가함에 따라 신뢰성 지수가 1.2에서 손상개시 시기는 24.5년, 47.5년, 69년으로 증가됨을 알 수 있다.

5. 적용예

5.1. 대상 교량

본 논문에 적용한 가좌IC고가교는 1986년에 준공되었고 인천광역시 서구 가좌동에 위치한 교량으로 1종 시설물이며, 총 연장은 500 m이다. 상부구조는 강박스거더 형식으로 구성되어 있으며 하부구조는 역T형이며, 기초는 말뚝기초 형식으로 시공되었다.

노량대교(구교)는 1987년에 준공되었고 서울특별시 동작구 도심에 위치한 콘크리트 구조물이다. 1종 시설물이며 상부구조는 PSC박스거더, RC 슬래브로 구성되어 있으며 하부구조는 라멘식이며 기초는 말뚝기초와 우물통 형식으로 시공되었다.

가좌IC고가교는 1997년도, 2002년도, 2005년도 정밀안전진단으로 RC 역T형인 교각의 코어를 채취하고, 노량대교(구교)는 1997년도, 2004년도, 2009년도 정밀안전진단으로 교각의 코어를 채취하여 각각 탄산화를 측정하였다(한국시설안전공단, 1995~2007). 가좌IC고가교(육상)와 도심지역에 위치한 노량대교(강상)를 각 환경조건별로 분류하고 측정위치와 구조물의 경과년도 및 탄산화 깊이를 표 5에 나타내었다.

표 5는 조사된 도심에 위치한 각 환경조건별 콘크리트 구조물의 모니터링 데이터인 시간에 따른 탄산화 깊이를 나타내었고, 콘크리트 구조물의 신뢰성 지수를 산정하기 위해서 한계상태합수식의 저항치인 R값으로 표 6의 각각에 해당하는 환경조건에 적합한 평균과 표준편차를 사용하였다.

내구성 문제의 설계변수(design parameter)로 확률변수는

표 5. 적용 대상교량의 탄산화 모니터링 데이터

교량명	환경조건	측정지점	시간 (Year)	탄산화 깊이 (mm)
가좌 IC 고가교	육상	교각	11	5
			16	5
			19	7
노량대교	강상*	교각(구교)	10	6
			17	6.5
			22	8.4

*도심에 위치

표 6. 환경조건별 대상교량의 피복두께의 통계 데이터

교량의 환경조건	현장 모니터링 자료의 개수	평균 (mm)	표준편차 (mm)
육상	540	61.66	32.50
강상*	399	57.17	33.73

*도심에 위치

표 7. 설계확률변수에 대한 평균과 표준편차

설계 변수	사전예측치 (평균, 표준편차)
$D_{CO_2} (\times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s})$	$N(3.87, 3.79)$
$C_{CO_2} (\text{g}/\text{cm}^3)$	Using (4) formula, (0.74)
$a(\text{g}/\text{cm}^3)$	Using (5) formula and Table 2, (1.65)
α_H	Using (6) and (7) formula, (0.12)

CO_2 확산계수 D_{CO_2} , 대기중의 CO_2 농도 C_{CO_2} , CO_2 흡착량 a , 시멘트 수화도 α_H 를 사용했다. 사전확률분포를 정하기 위해서 필요한 가용 데이터가 없으므로 표 6에서 제시되어 있는 값을 사용하였다. 개발 모델은 CO_2 확산계수를 제외하고 모두 콘크리트 종류에 따라 표와 식을 이용하여 상수 형태로 적용하였다. 본 논문에서는 보통포틀랜드시멘트(TYPE I)를 이용하였다.

정밀안전진단 정기점검주기인 5년에 해당하는 탄산화 깊이 모니터링 데이터를 개발한 모델에 적용하였다. 또한, 개발 모델로 탄산화 깊이를 예측하고 신뢰성 지수를 통하여 잔존수명을 예측하여 내구성 해석을 수행하였다.

5.2. 탄산화 콘크리트 구조물의 내구성 해석

개발된 모델을 적용한 도심지역에 위치해 있는 환경조건별 탄산화 깊이를 모니터링 데이터로 사전 예측치를 보정한 사후 예측치의 변화를 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 본 논문에서 민감도 해석을 한 부분과 마찬가지로 라틴 하이퍼

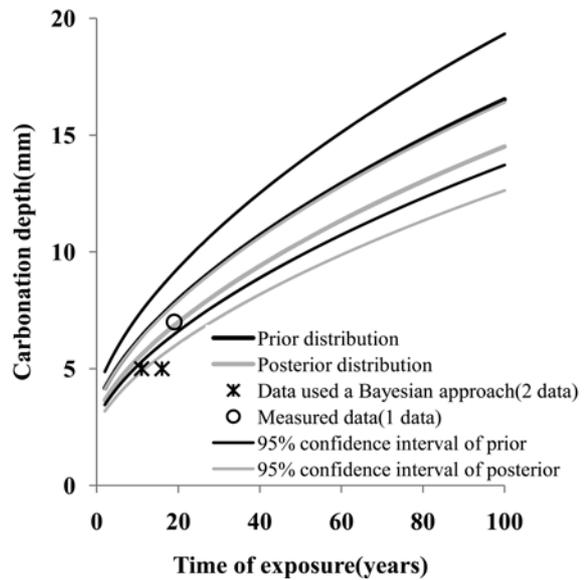


그림 13. 대상교량에 대한 탄산화 깊이의 사전 예측치와 사후 예측치 변화(가좌IC고가교)

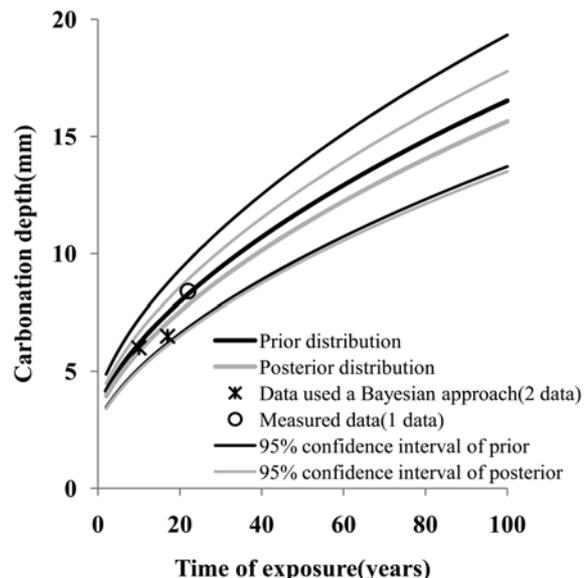


그림 14. 대상교량에 대한 탄산화 깊이의 사전 예측치와 사후 예측치 변화(노량대교)

큐브 샘플 수는 샘플 수를 늘리면 사전예측치와 사후예측치의 분산도분포가 좁혀진다. 계산시간의 효율성을 위해서 최소 개수인 9개의 샘플을 이용하였다.

그림 13과 그림 14는 육상에 위치한 가좌IC고가교와 도심 지역에 위치한 노량대교의 탄산화 깊이를 모니터링 데이터로 사전 예측치를 보정하여 예측한 결과이다. 가좌IC고가교와 노량대교 모두 사전 예측치에 비해서 보정된 사후 예측치의 불확실성이 확연히 감소되었고, 신뢰성 구간에 모니터링 데이터가 포함되었다.

환경 조건별 각 콘크리트 구조물의 계측 지점 데이터의 경과연수에 따른 탄산화 신뢰성 지수에 대한 그래프를 그림 15와 그림 16에 나타내었다.

두 구조물 모두 탄산화가 진행되는 시간에 비해서 피복두께가 두꺼운 편이다. 따라서 신뢰성 지수 그래프로 사후예측효과를 보기 위해서 목표설계수명을 60년으로 가정하였다. 따라서 가좌 IC고가교는 신뢰성지수가 1.5에서 노량대교는 신뢰성 지수가 1.3에서 구조물의 손상이 발생하는 것으로 가

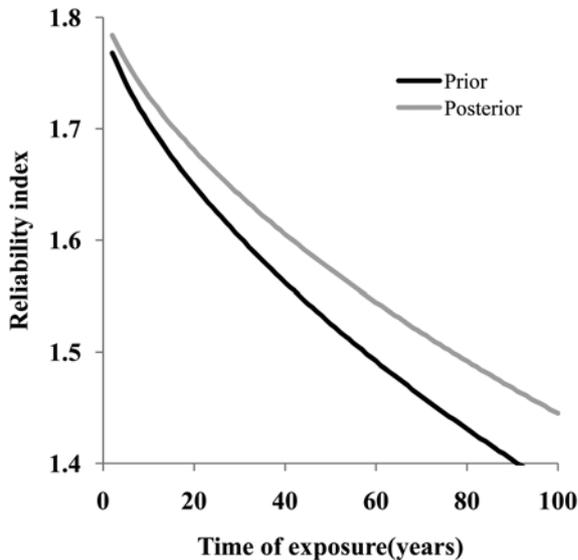


그림 15. 대상교량에 대한 신뢰성 지수의 사전 예측치와 사후 예측치 변화(가좌IC고가교)

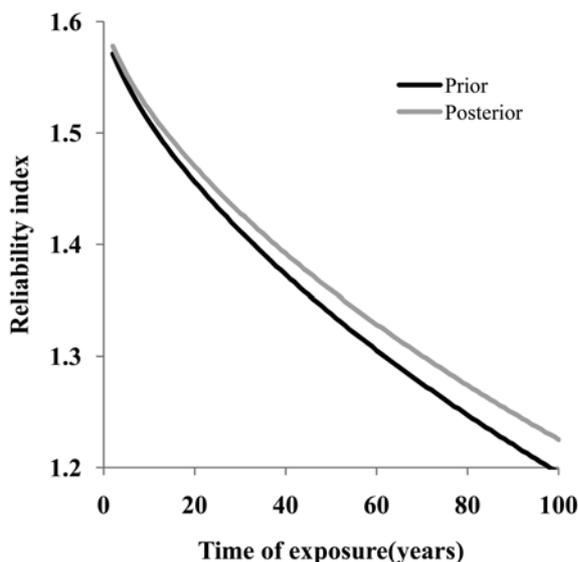


그림 16. 대상교량에 대한 신뢰성 지수의 사전 예측치와 사후 예측치 변화(노량대교)

정한다.

가좌IC고가교는 업데이트 전 57년 후에 손상이 발생하고 업데이트 후 77년 후에 손상이 발생한다. 노량대교의 경우에는 업데이트 전 62년 후에 손상이 발생하고 업데이트 후 70년 후에 손상이 발생한다. 따라서 가좌IC고가교는 약 20년 정도 미뤄서 개보수시기를 결정할 수 있고, 노량대교의 경우에는 약 8년 정도 미뤄서 개보수시기를 해야 한다고 의사결정 할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 본 논문에서는 Fick의 첫 번째 법칙을 토대로한 기존의 탄산화 예측모델에 베이저안 기법과 라틴 하이퍼큐브 샘플링기법(LHS)을 이용하여 탄산화 예측 모델을 개발하여 확률론을 기초로 새로운 시각에서 실 콘크리트 구조물의 정량적인 잔존수명을 예측하였다.
2. 탄산화 예측 모델의 설계변수에 대한 민감도 해석을 수행한 결과, 라틴 하이퍼큐브 샘플 수와 COV값의 변화에 대한 영향은 크지 않고 모델의 효율적인 사용성을 위해서 적은 수의 샘플수를 사용하였고, 모델의 설계변수 중 CO₂ 흡착량과 시멘트 수화도의 영향이 가장 크므로 이들 변수에 대해 적절히 예측하는 것이 필수적인 요소인 것으로 판단된다.
3. 각 설계변수에 대한 민감도 해석을 수행하기 위해서 합리적인 범위 내에서 변화를 주었고 설계변수의 변화에 따른 탄산화 깊이의 영향에 대해서 CO₂ 확산계수는 다른 설계변수가 같고 신뢰성 지수가 1.5였을 때 손상되는 개시시기로 가정하면 CO₂ 확산계수가 $2.87 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 였을 때 보다 $4.87 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 가 2배 빠르게 72년에서 36년으로 손상개시시기가 앞당겨졌고 대기중의 CO₂ 농도는 0.69, 0.74, 0.79 g/cm³의 범위에서 1.5의 신뢰성 지수에서 손상이 된다고 가정하면 대기중의 CO₂ 농도는 0.69, 0.74, 0.79 g/cm³인 경우에 각각 80년, 77년, 73년으로 감소한다. 시멘트 수화도는 0.06, 0.12, 0.18로 증가함에 따라 신뢰성 지수가 1.2에서 손상개시시기가 24.5년, 47.5년, 69년으로 증가 되었고, CO₂ 흡착량은 0.65, 1.65, 2.65 g/cm³로 증가함에 따라 신뢰성 지수가 1.2에서 19.5년, 47년, 73년으로 급격히 증가함 보여 다른 변수보다 부식 개시시기에 미치는 영향이 가장 크다. 따라서 다른 설계변수보다는 탄산화 콘크리트 구조물의 엄밀한 내구성 예측을 수행하기 위해서 CO₂ 흡착량을 합리적으로 예측하는 것이 필수적인 요소인 것으로 판단된다.
4. 현장 특성을 반영한 본 탄산화 예측모델을 사용하여 내구성 해석을 수행한 두 구조물의 내구성을 예측한 결과, 두 구조물 모두 95% 신뢰성 구간이 좁혀진 것으로 보아 불확실성이 줄인 예측치를 보여주었고 엄밀한 탄산화 깊이를 예측하였다.
5. 본 연구에 적용한 두 구조물의 경우 신뢰성 지수를 각각 가정한 값으로 개보수시기를 결정한다면 가좌IC고가교는 약 20년 정도 미뤄서 개보수시기를 결정하고, 노량대교는 약 8년 정도 미뤄서 개보수시기를 결정한다. 따라서 탄산

화에 대한 내구수명의 신뢰성을 충분히 확보하기 위해서 본 논문에서 적용한 탄산화 예측 모델을 이용한 내구성 해석 도입할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 기상청(2006) 지구대기감시 보고서 2006 - 온실가스 및 반응 가스, pp. 17-20.
- 양인환(2006) 비선형 회귀분석기법을 이용한 콘크리트 교량 프리스트레스의 장기예측, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 18, No. 4, pp. 507-515.
- 오병환, 양인환(1999) 콘크리트 구조물의 합리적인 압축강도 추정기법 연구, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 11, No. 2, pp. 241-249.
- 이창수, 윤인석(2003) 대기환경변화를 고려한 콘크리트 구조물의 중성화 예측, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 15, No. 4, pp. 574-584.
- 이창수, 윤인석, 김용혁(2004) 서울시내 콘크리트 구조물의 중성화 진행 속도의 확률분석, **서울도시연구**, 제5권 제1호, pp. 95-104.
- 정현준, 지광습, 공정식, 강진구(2008) 베이저안 기법을 이용한 염해 콘크리트구조물의 내구성 예측, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 20, No. 1, pp. 77-88.
- 차수원(2002) 콘크리트의 수화도 및 단열온도상승량 예측모델 개발, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 14, No. 1, pp. 118-125.
- 한국시설안전공단(1995-2007) **정밀안전진단보고서**.
- Ang, A.H.-S. and Tang, W.H. (1975) Probability concepts in engineering planning and design, Basic principles. John Wiley and Sons, Vol. 1, pp. 329-359.
- Bazant, Z.P. and Kim, J.K. (1989) Segmental Box Girder - Deflection Probability and Bayesian Updating, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No. 10, pp. 2528-2547.
- Comite Euro-International du Beton, CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d'Information
- Miguel, A.S. and Casr, D.O. (2001) Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating, *building and environment*, Vol. 36, pp. 949-953.
- Mckay, M.D., Beckman, R.T., and Conover, W.J. (1979) A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis output from a computer code, *Technometrics*, Vol. 21, pp. 239-245.
- WMO (2006) greenhouse gas bulletin - the state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2005, No. 2:1.

(접수일: 2010.2.5/심사일: 2010.6.3/심사완료일: 2010.6.22)