

최대 엔트로피 원리를 이용한 지중 콘크리트 구조물의 탄산화 불확실성 측정

윤병돈
(주)플랜올이엔씨 연구개발부문

Uncertainty Measurements on the Carbonation of Underground Concrete Structures Using Maximum Entropy Principle

Byong-Don Youn
Division of R & D, PLANALL Engineering & Construction Inc.

요약 지중 콘크리트 구조물의 탄산화 속도에 대한 불확실성 측정을 수행하였다. 최대 엔트로피 원리를 이용하여 지역별 전력구 및 공동구의 콘크리트 탄산화 속도 계수 확률 변수에 대한 불확실성을 정량화함으로써 확률적 탄산화 속도 분석에 대한 신뢰성을 검증하였다. 누적 분포함수를 이용한 전력구 및 공동구의 탄산화에 대한 확률 분석 결과 지역별로 탄산화 속도 계수의 차이가 큰 것으로 나타났다. 지역별 전력구 및 공동구의 탄산화 속도 계수 확률 변수에 대한 확률 밀도함수 $p(x)$ 의 엔트로피 $h(x)$ 를 측정한 결과, 부산 지역 공동구의 경우 0.293으로서 표준정규분포의 엔트로피 1.419에 비해 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 이 지역의 탄산화 속도 계수에 대한 표본 추출 및 확률 분포의 불확실성과 무작위성은 상당히 부족한 것으로 분석되었으며, 확률 분석 결과의 신뢰성을 제고하기 위해서는 보다 대표성 있는 표본 추출이 요구된다. 본 연구에서 전력구 및 공동구의 지역별 탄산화 속도 계수의 확률 변수를 엔트로피에 의해 단일화된 수치로 정량화함으로써 확률 변수의 불확실성은 누적 분포함수 분석보다 더 간단하고 이해하기 쉽게 측정할 수 있었다.

Abstract The reliability of stochastic carbonation rate analysis was verified by quantifying uncertainty about the concrete carbonation rate coefficient random variables of PCT (Power Cable Tunnel) and UT (Utility Tunnel) by region using the maximum entropy principle. As a result of probabilistic analysis of carbonation on the PCT and UT using a cumulative distribution function, it was found that there was a large difference in the carbonation rate coefficient by region. The measurement of the entropy $h(X)$ of the probability density function $p(x)$ for the carbonation rate coefficient random variables of PCT and UT by region yielded a value of 0.293 for UT in Busan. This entropy value is significantly different from the entropy of a standard normal distribution (1.419). Therefore, it was concluded that the uncertainty and randomness of the sampling and probability distribution for carbonation rate coefficient in this region are quite insufficient, and more representative sampling is required to improve the reliability of the probability analysis. In this study, by quantifying the random variables of carbonation rate coefficient by region on the PCT and UT as a single value by entropy, the uncertainty of probability could be measured more simply and easily than how it is measured in the cumulative distribution function analysis.

Keywords : Maximum Entropy Principle, Uncertainty, Randomness, Carbonation Rate, Underground Structures

*Corresponding Author : Byong-Don Youn(PLANALL E & C Inc.)

email: twowit@naver.com

Received August 12, 2021

Accepted December 6, 2021

Revised September 1, 2021

Published December 31, 2021

1. 서론

일반적으로 도로 및 철도 터널, 지하철, 공동구(UT: Utility Tunnel), 전력구(PCT: Power Cable Tunnel) 등과 같은 지중 콘크리트 구조물의 내구성능은 화학적 침식(chemical attack), 염해(chloride attack), 탄산화(carbonation)와 같은 다양한 요인에 의해 저하되며, 특히 콘크리트 탄산화는 지중 콘크리트 구조물의 열화를 가속시키는 주요 인자이다. 화학적 반응의 측면에서, 탄산화는 콘크리트의 시멘트 수화물(cement hydrates)이 공기 중의 이산화탄소(CO₂)와 반응하여 탄산칼슘(CaCO₃)을 생성하는 과정으로 정의할 수 있으며, 생성된 탄산칼슘은 콘크리트의 알칼리도(alkalinity)를 저하시켜 궁극적으로 콘크리트 내부의 철근을 부식시키는 손상을 유발한다. 따라서 콘크리트 탄산화에 대한 예측은 지중 콘크리트 구조물의 내구수명 관리에 중요한 요소이다.

이에 따라 실제 탄산화 측정 자료를 기반으로 지중 콘크리트 구조물의 탄산화 속도를 분석 및 예측하는 연구가 시도되었다[1,2]. 선행 연구의 경우, 수집된 다수의 탄산화 자료들은 통계 및 확률론에 근거하여 분석되어 탄산화 속도를 제시하고 있다. 그러나 이와 같이 확률론에 기초한 결과들은 필연적으로 불확실성(uncertainty)을 내포하고 있다. 즉, 확률적 접근에 의한 분석 결과는 적절하게 수행되어도 추정 값에 불과하며 우연효과(random effects)가 상존하기 때문에 확률 분석에는 항상 불확실성이 존재한다. 확률 불확실성의 정량적 분석은 표본 추출의 우연성(randomness)을 평가할 수 있는 주요 지표가 될 수 있으며, 수리 및 수문 분야 등에서 그 적용에 대한 연구가 비교적 활발하다[3,4].

본 연구에서는 지중 콘크리트 구조물의 탄산화에 대한 확률 변수의 불확실성을 단일화된 수치로서 정량적으로 분석할 수 있는 방법을 제시하였다. 전력구 및 공동구와 같은 지중 콘크리트 구조물의 확률적 탄산화 분석 결과에 대하여 최대 엔트로피 원리(MEP: Maximum Entropy Principle, 이하 MEP)를 이용하여 불확실성을 정량화함으로써 지중 콘크리트 구조물의 확률적 탄산화 속도에 대한 신뢰성을 검증하였다. 본 연구의 방법론이 지중 콘크리트 구조물에 대한 탄산화 평가 및 예측에 활용되길 기대한다.

2. 본론

2.1 지중 콘크리트 구조물 탄산화 자료 수집

전력구 및 공동구에 대한 탄산화 분석을 위하여 국내 4개 주요 지역에서 수행된 안전진단 결과로부터 자료를 수집하였다. 대상 시설물의 건설연도 및 공용기간, 탄산화 깊이 등을 수집하였으며, 수집된 자료의 현황은 Table 1, Fig. 1과 같다.

Table 1. Data collection status on PCT and UT by region

Location		Span Lengths (km)	Year of Construction	Year of Inspection	Num. of Data (set)
PCT	Seoul	8.5	1987 ~ 2008	2017	302
	Daejeon	11.1	1993 ~ 2002	2018	60
	Gwangju	24.9	1987 ~ 2015	2017	217
	Busan	41.6	1982 ~ 2009	2018	148
UT	Seoul	39.0	1978 ~ 2003	2017	161
	Daejeon	21.7	1994 ~ 2016	2016, 2018	77
	Gwangju	1.8	1998	2015, 2017	46
	Busan	7.3	1996	2016, 2018	64

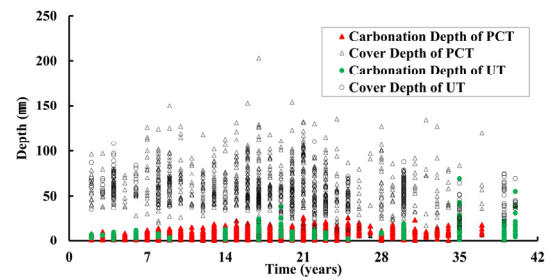


Fig. 1. Concrete cover depth and carbonation depth on PCT and UT

2.2 확률적 탄산화 분석 및 예측

일반적으로, 탄산화의 깊이는 탄산화 기간의 제곱근에 비례하는 것이 입증되었으며, 공기 중의 CO₂에 의한 콘크리트 표면에서의 탄산화 진행은 Eq. (1)과 같이 노출 시간의 함수로 표현된다[5].

$$y = b\sqrt{t} \quad (1)$$

Where, y denotes carbonation depth in concrete, b denotes carbonation rate coefficient of concrete, and t denotes exposed time in the air.

전력구 및 공동구의 탄산화 속도를 확률론적 접근을 통해 분석하였다. 본 연구에서는 Eq. (2)의 가우스 확률 밀도함수(PDF : Probability Density Function, 이하 PDF)

$p(x)$ 와 Eq. (3)의 누적 분포함수(CDF: Cumulative Distribution Function, 이하 CDF) $F(x)$ 를 이용하여 전력구 및 공동구의 탄산화 속도 계수에 대한 확률적 분석을 실시하였다. 확률 분석을 통해 국내에서 운영중인 전력구 및 공동구의 탄산화 속도를 50 % ~ 95 %의 비초과 확률(non-exceedance probability)로 분석하고 개략적인 탄산화 속도를 제시하였다.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{2}\left\{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right\} \quad (3)$$

Where, μ denotes the mean of normal distribution, σ denotes the standard deviation of normal distribution, π denotes the ratio of a circle's circumference to its diameter, x denotes data, and Φ denotes a precomputed function which represents the CDF $F(x)$ of the standard normal.

Table 2. CDF analysis results on the carbonation rate coefficient for PCT and UT by region

Division		Carbonation rate coefficient (mm/√year)			
		Mean (μ)	Variance (σ^2)	CDF 50 %	CDF 95 %
PCT	Seoul	1.877	1.168	1.880	3.652
	Daejeon	1.442	0.630	1.444	2.736
	Gwangju	2.192	1.378	2.195	4.118
	Busan	2.048	1.470	2.051	4.035
UT	Seoul	1.652	0.604	1.654	2.926
	Daejeon	2.352	1.191	2.355	4.135
	Gwangju	3.227	3.396	3.233	6.227
	Busan	0.999	0.105	1.000	1.528

Table 1, Fig. 1의 자료를 바탕으로 전력구 및 공동구의 지역별 탄산화에 대한 확률 분석 결과, Table 2, Fig. 2, Fig. 3에서와 같이 CDF 50 %에서의 탄산화 속도 계수(carbonation rate coefficient)는 각각 1.444 ~ 2.195 mm/√year, 1.000 ~ 3.233 mm/√year로 나타났다. 그리고, CDF 95 %에서 전력구 및 공동구의 탄산화 속도 계수는 각각 2.736 ~ 4.118 mm/√year, 1.528 ~ 6.227 mm/√year 범위에 있으며 지역별로 탄산화 속도 계수의 차이가 큰 것으로 나타났다.

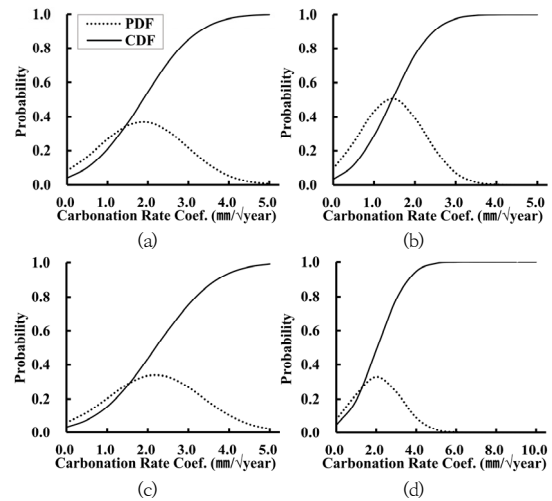


Fig. 2. Probability analysis results on the carbonation rate coefficient of PCT by region
(a) Seoul (b) Daejeon (c) Gwangju (d) Busan

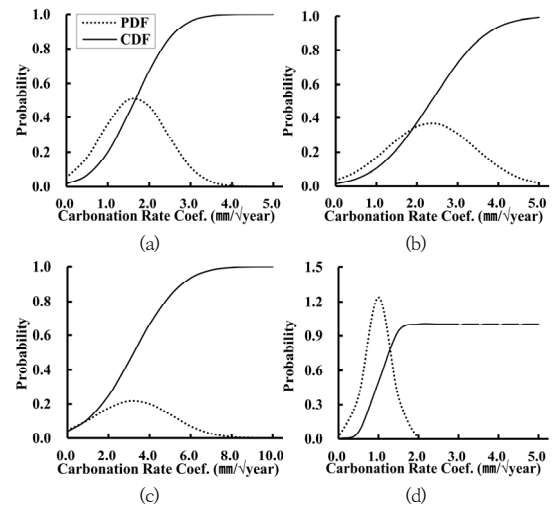


Fig. 3. Probability analysis results on the carbonation rate coefficient of UT by region
(a) Seoul (b) Daejeon (c) Gwangju (d) Busan

이와 같은 전력구 및 공동구에 대한 지역별 탄산화 속도 계수의 차이는 콘크리트 재료, 물결합재비(water-binder ratio), 시공품질 뿐만 아니라 온도, 습도, 대기 중 CO₂ 농도 등 주변 환경 영향에 기인한다. 특히, 수집된 자료에 한하여 광주 지역의 경우 지중 콘크리트 구조물의 탄산화 속도 계수가 높은 것으로 분석되어, 다른 지역보다 탄산화에 유리한 여건 아래 노출되었을 가능성이 높다는 것을 시사한다. 따라서, 콘크리트 탄산화에 따른 지중 콘크리트 구조물의 내구수명은 지역별로 규명하는 것이 바

람직할 것으로 판단된다.

2.3 탄산화의 불확실성 측정

MEP를 이용하여 지역별 전력구 및 공동구의 콘크리트 탄산화 속도 계수 확률 변수에 대한 불확실성을 정량화하였다. 현재 일련의 비파괴 검사치를 확률 및 통계적으로 분석하여 불확실성을 평가하는 방법 이외에 콘크리트 탄산화의 불확실성을 체계적이고 객관적으로 정량화할 수 있는 연구가 부족한 실정이다. 엔트로피는 확률 이론뿐만 아니라 확산 이론 및 정보 이론과 같은 많은 응용 분야에서 불규칙성 또는 불확실성의 정도를 측정하는 것에 활용되고 있다. 일반적으로, MEP는 주어진 확률 변수의 모멘트 제약 조건에 따라 확률 분포함수의 엔트로피를 최대화하여 편향되지 않은 확률 밀도함수를 추정한다 [6,7]. 엔트로피를 최대화하는 확률 분포는 가장 많은 방법으로 구현될 수 있는 빈도 분포와 수치적으로 동일한 것으로 밝혀졌다 [8]. 따라서 전력구 및 공동구의 지역별 콘크리트 탄산화 속도 계수 확률 변수에 MEP를 적용하여 탄산화 속도 계수에 대한 불확실성을 측정하였다.

2.3.1 최대 엔트로피

본 연구에서는 탄산화 속도 계수 x 의 가능한 참값에 대한 정보를 완전한 PDF $p(x)$ 의 형태로 표현하였다. 일반적으로 PDF $p(x)$ 의 불확실성은 분산(σ^2)과 엔트로피 $H(X)$ 로 측정할 수 있다 [9]. 그러나 분산은 PDF $p(x)$ 의 분산도를 나타내고 $H(X)$ 는 PDF $p(x)$ 의 모양을 포착한다는 점에서 차이가 있다. 즉, 확률 분포의 형태를 표현하는 특성 값으로 엔트로피의 적용이 가능하여 확률이나 확률 밀도가 특정 값에 집중되면 엔트로피가 작고, 반대로 확률이나 확률 밀도가 다양한 값에 고르게 분포된 경우 엔트로피가 큰 특성을 보인다. 엔트로피의 개념을 확장하면 임의의 현상에 대한 확률 분포를 기반으로 현상에 포함된 불확실성을 정량적으로 표현할 수 있다 [10]. 표준편차가 작을수록 그리고, 평균값에 대한 확률이 높을수록 불확실성 값은 작아진다. 반대로, 표준편차가 크고 평균값에 대한 확률이 낮을수록 불확실성 값은 커진다. 따라서 불확실성은 무작위 사건(random events)의 발생 빈도에 따라 정량적으로 표현될 수 있다 [11].

특히, 엔트로피는 확률 분포가 가지고 있는 정보의 양 또는 신뢰 수준(confidence level)을 수치로 표현한 것으로서 주어진 정보에 의해 생성되는 결과의 무작위성(random) 또는 불확실성을 정량적으로 추정할 수 있는 방법 중 하나이다 [12]. 확률 분포에서 특정 값을 선택할

확률이 증가하고 나머지 값을 선택할 확률이 감소하면 엔트로피는 작아진다. 반대로 여러 값을 선택할 확률이 비슷하면 엔트로피는 증가한다 [13]. 정보 X 는 확률이 $p(x)$ 인 확률 변수로 정의되며, 평균 개념이 도입되면 정보량 $I(X)$ 는 Eq. (4), 엔트로피 $H(X)$ 는 Eq. (5)로 나타낼 수 있다 [12].

$$I(X) = -\log_2 p(x) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} H(X) &= -\sum p(x) \log_2 p(x) \\ &= \sum p(x) I(X) = E[I(X)] \end{aligned} \quad (5)$$

Where, $H(X)$ denotes entropy of X , X denotes random variable with probability $p(x)$, and $p(x)$ denotes probability function of X .

MEP는 주어진 정보를 기반으로 불확실성을 최대화하고 정량화하는 기법으로서 불확실성을 정량화할 때 사용 가능한 정보가 제공되는 경우 최대 엔트로피를 사용하여 편향(bias)을 최소화할 수 있음이 입증되었다 [8]. 데이터를 분석할 때 평균(μ)과 분산(σ^2) 이외에 관심 데이터에 대한 추가 지식이 없는 경우 최대 엔트로피를 갖는 확률 분포 함수가 데이터에 대해 선호되는 확률 모델로 사용되며, 이러한 모델은 유연성을 최대화하고 지원되지 않는 제약을 최소화하여 편향 오류를 최소화한다.

탄산화 속도 계수와 같은 연속 확률 변수(continuous random variable)에 대하여 정규 분포를 적용하면 주어진 분산에 대한 미분 엔트로피가 최대화된다는 가우스 확률 변수는 등분산의 모든 확률 변수 중에서 가장 큰 엔트로피를 나타내며, 평균과 분산의 제약에서 최대 엔트로피 분포는 가우스(Gaussian)이다 [14]. PDF $p(x)$ 가 있는 연속 확률 변수 X 가 주어지면 미분 엔트로피는 Eq. (6)과 같이 정의된다. Eq. (6)과 같이 입력 변수가 연속적일 때 가우스 분포는 엔트로피를 최대화하며 이 경우 엔트로피는 분산에 따라 영향을 받는다.

$$\begin{aligned} h(X) &= -\int p(x) \ln p(x) dx \\ &= -\int p(x) \left\{ -\frac{1}{2} \ln(2\pi\sigma^2) - \frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} dx \\ &= -\frac{1}{2} \ln(2\pi\sigma^2) + \frac{Var(X)}{2\sigma^2} \\ &= \frac{1}{2} \ln(2\pi e \sigma^2) \end{aligned} \quad (6)$$

Where, $\int p(x) dx = 1$

$$\int xp(x)dx = \mu$$

$$Var(X) = \int p(x)(x-\mu)^2 dx = \sigma^2$$

2.3.2 탄산화 불확실성 측정

주어진 정보를 바탕으로 불확실성을 최소화하고 정량화하는 방법인 MEP를 이용하여 추정된 지역별 전력구 및 공동구의 탄산화 속도 계수의 확률 변수에 대한 불확실성을 측정하였다. 탄산화 속도 계수 통계량의 신뢰 구간에 따른 연속 확률 변수의 엔트로피는 Eq. (6)에 의해 측정할 수 있으며, 표준정규분포 $N(0, 1)$ 의 엔트로피 $H(X)$ 는 $\ln(2\pi e)/2 (=1.419)$ 가 된다.

정보량(amount of information)의 관점에서 Table 3 및 Fig. 4에서와 같이 전력구의 경우, 탄산화 속도 계수 확률 변수에 대한 $p(x)$ 의 엔트로피 $H(X)$ 는 대전 지역에서 표준정규분포에 대한 엔트로피 $H(X)$ 2.047 bit보다 작은 것으로 측정되었다. 공동구의 경우 서울 및 부산 지역의 탄산화 속도 계수 확률 변수에 대한 $p(x)$ 의 엔트로피가 표준정규분포의 엔트로피보다 작은 것으로 나타났다. 그리고, 광주 지역의 공동구에 대한 탄산화 속도 계수의 PDF $p(x)$ 에 대한 엔트로피는 표준정규분포의 엔트로피보다 높게 측정되어 확률 변수의 무작위성이 큰 것을 알 수 있다.

Table 3. Entropy $H(X)$ on the PDF $p(x)$ of carbonation rate coefficient for the PCT and UT

PDF $p(x)$		$H(X)$, (bit)	PDF $p(x)$		$H(X)$, (bit)
PCT	Seoul	2.1592	UT	Seoul	1.6831
	Daejeon	1.7138		Daejeon	2.1729
	Gwangju	2.2785		Gwangju	2.9290
	Busan	2.3250		Busan	0.4229

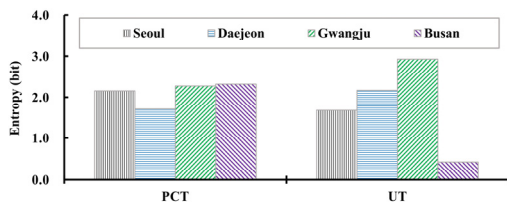


Fig. 4. Entropy $H(X)$ on the PDF $p(x)$ of carbonation rate coefficient for the PCT and UT

신뢰 수준(confidence level)의 관점에서 지역별 전력구 및 공동구의 탄산화 속도 계수 확률 변수에 대한 엔트로피와 표준정규분포의 엔트로피를 비교하여 분석하였다. 엔트로피 차이가 양수(positive number)인 경우, 전

력구 및 공동구에 대한 탄산화 속도 계수의 확률 변수의 분산이 표준정규분포의 분산보다 크다는 것을 의미한다. Table 4 및 Fig. 5에서와 같이 부산 지역의 공동구에 대한 탄산화 속도 계수의 확률 변수에 대한 엔트로피는 표준정규분포의 엔트로피에 비해 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 이 지역의 엔트로피 차이는 음수(negative number)를 나타냄으로 탄산화 속도 계수에 대한 확률 변수의 분산이 표준정규분포보다 작아 확률 변수의 불확실성과 무작위성이 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다.

Table 4. Measure of uncertainty for probability distribution on the PCT and UT by entropy

PDF $p(x)$	$H(X)$ (nat.)	Difference (b-a)/a (%)	PDF $p(x)$	$H(X)$ (nat.)	Difference (d-c)/c (%)
Standard Normal (a)	1.419	-	Standard Normal (c)	1.419	-
PCT (b)	Seoul 1.497	5.5	UT (d)	Seoul 1.167	-17.8
	Daejeon 1.188	-16.3		Daejeon 1.506	6.1
	Gwangju 1.579	11.3		Gwangju 2.030	43.1
	Busan 1.612	13.6		Busan 0.293	-79.3

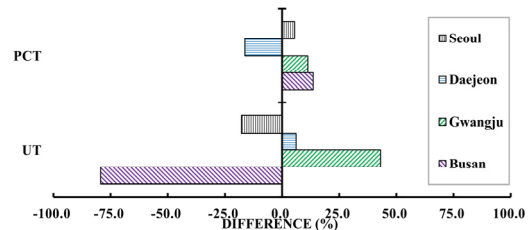


Fig. 5. Entropy $H(X)$ on the PDF $p(x)$ of carbonation rate coefficient for the PCT and UT

3. 결론

지중 콘크리트 구조물의 탄산화 속도에 대한 불확실성 측정을 수행하였다. MEP를 이용하여 지역별 전력구 및 공동구의 콘크리트 탄산화 속도 계수 확률 변수에 대한 불확실성을 정량화함으로써 확률적 탄산화 속도 분석에 대한 신뢰성을 검증하였으며, 도출된 결론은 다음과 같다.

전력구 및 공동구의 탄산화에 대한 확률 분석 결과, CDF 50 %에서의 탄산화 속도 계수는 각각 $1.444 \sim 2.195 \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$, $1.000 \sim 3.233 \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$ 로 분석되었다. 그리고 CDF 95 %에서의 경우, 탄산화 속도 계수는 각각 $2.736 \sim 4.118 \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$, $1.528 \sim 6.227 \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$ 범위로서 지역별로 탄산화 속도 계수의 차이

가 큰 것으로 나타났다.

지역별 전력구 및 공동구의 탄산화 속도 계수 확률 변수에 대한 PDF $p(x)$ 의 엔트로피 $h(x)$ 를 측정한 결과, 부산 지역 공동구의 경우 0.293으로서 표준정규분포의 엔트로피 1.419에 비해 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 이 지역의 탄산화 속도 계수에 대한 표본 추출 및 확률 분포의 불확실성과 무작위성은 상당히 부족한 것으로 분석되었으며, 확률 분석 결과의 신뢰성을 제고하기 위해서는 보다 대표성 있는 표본 추출이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 전력구 및 공동구의 지역별 탄산화 속도 계수의 확률 변수를 MEP에 의해 단일화된 수치로 정량화하였다. 이에 따라 확률 변수의 불확실성을 CDF 분석보다 더 간단하고 이해하기 쉽게 측정할 수 있었다.

References

- [1] C. S. Lee, Y. O. Kim, Y. H. Kim, "Probabilistic approach of carbonation speed of subway concrete structures", *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers*, Korea, pp.1468-1471, Oct. 2008.
- [2] S. K. Woo, L. Yun, S. T. Yi, "Estimation of Carbonation and Service Life of Box Culvert for Power Transmission Line", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.16, No.4, pp.116-121, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2012.16.4.116>
- [3] S. H. Jang, J. K. Lee, J. H. Oh, J. W. Jo, "Effect and uncertainty analysis according to input components and their applicable probability distributions of the Modified Surface Water Supply Index", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.50, No.7, pp.475-488, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2017.50.7.475>
- [4] S. C. Yang, S. K. Yang, Y. S. Kim, "Mean Velocity Distribution of Natural Stream using Entropy Concept in Jeju", *Journal of Environmental Science International*, Vol.28, No.6, pp.535-544, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.6.535>
- [5] JSCE, Standard Specification for Concrete Structures - 2007; Maintenance, p.278, Japan Society of Civil Engineering, 2007, pp.110-112.
- [6] E. T. Jaynes, "Information theory and statistical mechanics", *The Physical Review*, Vol.106, No.4, pp.620-630, 1957.
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.620>
- [7] E. T. Jaynes, "Information theory and statistical mechanics II", *The Physical Review*, Vol.108, No.2, pp.171-190, 1957.
- [8] Jaynes, E. T. Probability Theory: the Logic of Science, p.727, Cambridge University Press: Cambridge, 2003, pp.343-371.
- [9] J. V. Zidek, V. E. Constance, Uncertainty, Entropy, Variance and the Effect of Partial Information, Lecture Notes-Monograph Series 2003, pp.155-167.
- [10] M. Tribus, E. C. McIrvine, "Energy and Information", *Scientific American*, Vol.225, No.3, pp.179-190, 1971.
DOI: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0971-179>
- [11] N. M. Laurendeau, Statistical Thermodynamics: Fundamentals and Applications, p.448, Cambridge University Press: Cambridge, 2005, pp.69-96.
- [12] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication", *The Bell System Technical Journal*, Vol.27, pp.379-423, 1948.
DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [13] C. Gay, F. Estrada, "Objective probabilities about future climate are a matter of opinion", *Climatic Change*, Vol.99, pp.27-46, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9681-4>
- [14] T. M. Cover, J. A. Thomas, Elements of Information Theory, p.542, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991, pp.224-238.

윤 병 돈(Byong-Don Youn)

[정회원]



- 1996년 8월 : 인하대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2021년 9월 : 일본 규슈대학교 대학원 건설시스템공학과 (공학박사)
- 2006년 7월 ~ 2011년 12월 : (주)세니츠코퍼레이션 책임연구원
- 2012년 1월 ~ 현재 : (주)플랜웨이 엔지니어링 연구개발부문 전무이사

<관심분야>

구조물 건전도 모니터링, 콘크리트 내구성, 인공지능