



## 탄산화에 노출된 콘크리트 구조물의 배합설계에 대한 연구 - 유전자 알고리즘 적용성 평가

이성철<sup>1)</sup> · Maria, Q. Feng<sup>1)</sup> · 권성준<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>캘리포니아 주립대학교 어바인대 토목환경공학과

## Concrete Mixture Design for RC Structures under Carbonation - Application of Genetic Algorithm Technique to Mixture Conditions

Sung-Chil Lee,<sup>1)</sup> Maria, Q. Feng,<sup>1)</sup> and Sung-Jun Kwon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California Irvine, CA 92697, USA

**ABSTRACT** Steel corrosion in reinforced concrete (RC) structures is a critical problem to structural safety and many researches are being actively conducted on developing methods to maintain the required performance of the RC structures during their intended service lives. In this study, concrete mixture proportioning technique through genetic algorithm (GA) for RC structures under carbonation, which is considered to be serious in underground site and big cities, is investigated. For this, mixture proportions and diffusion coefficients of CO<sub>2</sub> from the previous researches were analyzed and fitness function for CO<sub>2</sub> diffusion coefficient was derived through regression analysis. This function based on the 12 experimental results consisted of 5 variables including water-cement ratio (W/C), cement content, sand percentage, coarse aggregate content per unit volume of concrete in unit, and relative humidity. Through genetic algorithm (GA) technique, simulated mixture proportions were proposed for 3 cases of verification and they showed reasonable results with less than relative error of 10%. Finally, assuming intended service life, different exposure conditions, design parameters, intended CO<sub>2</sub> diffusion coefficients, and cement contents were determined and related mixture proportions were simulated. This proposed technique is capable of suggesting reasonable mix proportions and can be modified based on experimental data which consider various mixing components like mineral admixtures.

**Keywords** : carbonation, genetic algorithm, service life, mixing design, relative humidity

### 1. 서 론

화석 에너지의 증가 및 대도시의 인구증가에 따라 이산화탄소량의 증가는 해마다 증가하고 있으며, 이는 콘크리트 구조물의 탄산화에 대한 피해를 더욱 증가시키고 있다.<sup>1,2)</sup> 탄산화는 외부의 이산화탄소의 농도에 따라 그 깊이가 증가하는데, 콘크리트 재료 배합을 통하여 탄산화 깊이를 제어할 수 있다. 탄산화에 영향을 미치는 콘크리트 배합인자는 시멘트 종류, 단위 시멘트량, 물-시멘트비, 골재의 종류 등 다양하게 분포하고 있다. 최근까지도 이러한 배합영향인자를 이용하여 탄산화 깊이를 예측하는 Meso level의 예측식들이 제시되고 사용되고 있다.<sup>2,4)</sup> 그러나 물리화학적인 반응을 기본으로 분석하면, 크게 콘크리트의 확산계수와 공극수에 해리되어 탄산화의 pH 감소를 방지할 수 있는 수화물(수산화칼슘 또는 CSH)의 양으로 분류할 수 있다. 1990년 이후 많은 물리화학적인 모

델들이 제시되고 있는데, 기본적으로 공극구조를 고려한 이산화탄소의 확산계수 모델링과 탄산화 반응을 통한 수화물의 해리를 기본으로 하고 있다.<sup>5-9)</sup> 균열부 또는 타설이음부에 대한 탄산화 깊이의 연구 역시, 실태조사에 따른 분석을 제외하면,<sup>10,11)</sup> 균열부의 확산계수를 증가시킬 뿐 기본적인 해석기법은 동일하다고 할 수 있다.<sup>12,13)</sup> 또한 콘크리트의 확산계수 도출을 위하여 실험뿐 아니라,<sup>14,15)</sup> 신경망이론 등을 통하여 확산계수를 예측하고 이를 이용하여 탄산화 거동을 해석하려는 연구도 진행되고 있다.<sup>16)</sup>

만일 콘크리트 구조물의 외부환경(이산화탄소 농도, 온도, 습도 등)을 정량적으로 평가할 수 있다면, 설계 피복두께를 고려하여 목표 내구수명에 따른 목표 탄산화 깊이를 설정할 수 있다. 한편 다양한 배합조건과 이에 따른 이산화탄소 확산계수를 실험적으로 알 수 있다면, 최적화 기법을 통하여 목표 탄산화 깊이를 만족하는 목표 확산계수를 구할 수 있으며, 이에 따른 콘크리트 배합을 역으로 추정할 수 있다. 유전자 알고리즘(GA: genetic algorithm)은 최적화 기법으로서 최근 들어 많이 사용되고 있다.<sup>17,18)</sup> 주로 설계기법에 적용되고 있는데 역해석을 통하여 최적 함수식을 만족하는 설계 변수를 가정할 수

\*Corresponding author E-mail : jjuni98@yonsei.ac.kr  
 Received October 26, 2009, Revised March 23, 2010,  
 Accepted April 16, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

있으므로, 그 적용성이 확대되고 있다. 콘크리트 분야의 적용성에 대해서는 고성능 콘크리트에 대하여 강도예측을 위한 배합 도출에 대하여, GA기법이 적용되고 있는 수준이다.<sup>19-21)</sup> 강도에 따른 배합추정에 대한 GA의 적용은 문헌에서 확인할 수 있으나, 내구설계를 위하여 열화인자의 확산계수를 도출하고 이를 위한 최적화 배합에 대한 연구는 전무하다고 할 수 있다.

이 연구에서는 기존의 실험 연구 성과를 이용하여, 콘크리트와 그에 따른 확산계수의 자료를 분석하였다. 동일한 환경에서 제작되고 실험된 12가지 조건의 콘크리트의 확산계수를 도출하기 위해, 배합인자(물-시멘트비, 단위 시멘트량, 단위 잔골재량, 단위 굵은골재량)와 습도와 같은 환경조건을 변수로 하는 확산계수 최적 함수식을 MATLAB을 통하여 도출하였다. 확산계수 실험값을 통하여, 제안된 기법의 검증은 수행하였으며, 목표 내구수명과 목표 확산계수를 가정하여, 이를 만족하는 최적 배합을 도출하였다.

이러한 기법은 최근 들어 중요하게 평가되는 성능 평가형 배합설계기법으로 사용할 수 있는데, 이 논문에서는 탄산화 깊이 예측과 배합도출을 위한 최적화 기법에 대한 내용이 토의될 것이다.

## 2. GA 기본 이론과 탄산화 영향 인자의 선정

### 2.1 GA의 기본이론

유전자 알고리즘(GA)은 일반적인 탐색 기법과는 다르게, 초기의 집단이라고 불리는 임의의 해의 집단을 형성하고 이를 수정하면서, 최적해를 찾아가기 시작한다. 기계 또는 전자공학 분야 등에 최적화 기법에 주로 사용되었으나, 최근 들어 토목구조물 설계, 관망해석, 콘크리트 배합도출에 사용되고 있다.<sup>17-21)</sup> 선택단계에서는 각 개체의 적합도를 이용하여 다음 세대를 위한 집단을 새로이 생성하는 연산이 수행된다. 유전자 알고리즘이 시작되는 과정으로 탐색 영역에서 임의의 해의 집단을 형성하여, 교배과정으로 전달해주는 역할을 하고 있다. 유전자 알고리즘의 성능은 교배 연산자의 성능에 크게 의존하기 때문에 올바른 교배 연산자를 정의하는 것이 필수적이다. 교배의 과정은 선택 과정에서 전달된 해의 집단 내의 있는 해들을 서로 나누어, 접목시키는 과정을 통해 새로운 값들을 가진 해의 집단을 만들어가는 것이라 할 수 있다. 변이의 과정은 집단 내의 해의 값을 새로운 값으로 바꾸는 과정을 말하며, 이는 유전자 알고리즘이 지역해(local solution)에 빠지는 것을 방지하면서 전체 영역의 탐색을 가능하도록 한다.<sup>22,23)</sup> Fig. 1에서는 GA의 연산 과정의 개요도를 나타내고 있다.<sup>24)</sup>

### 2.2 콘크리트 탄산화의 영향인자 및 예측식 분석

탄산화에 대한 영향인자는 크게 환경 요인에 따른 외

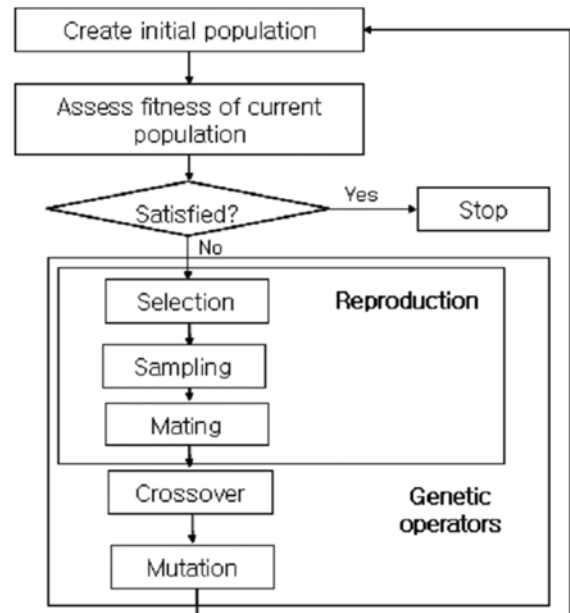


Fig. 1 Genetic algorithm process<sup>24)</sup>

부영향 인자와 확산계수와 수화물 형성에 관련된 내부 영향인자로 분류할 수 있다. 이러한 특성과 민감성을 분석하여, 변수로 고려한 반경험식(semi-empirical equation)이 다양하게 제안되고 있다. 이러한 기본식들은 시간의 제공근에 비례하여, 탄산화 깊이가 증가하는 것으로 실험과 실태조사를 통하여,<sup>1,2,11)</sup> 그리고 이론을<sup>5,25)</sup> 통하여 제시되고 있다. Table 1에서는 탄산화의 영향인자를 분석하였으며, Table 2에서는 국내에서 일반적으로 사용되는 반경험식 형태의 탄산화 예측식을<sup>1,2)</sup> 요약하여 정리하였다.

Fig. 2에서는 이 연구의 개요도를 나타내고 있다. 이 연구는 GA를 이용한 확산계수의 최적 함수식 도출과 목표내구수명에 따른 목표확산계수 도출 그리고 이에 따른 배합을 추정하도록 한다.

## 3. GA를 이용한 콘크리트 배합기법

### 3.1 확산계수 예측을 위한 최적 함수식 제안

#### 3.1.1 확산계수 실험 분석<sup>15,26)</sup>

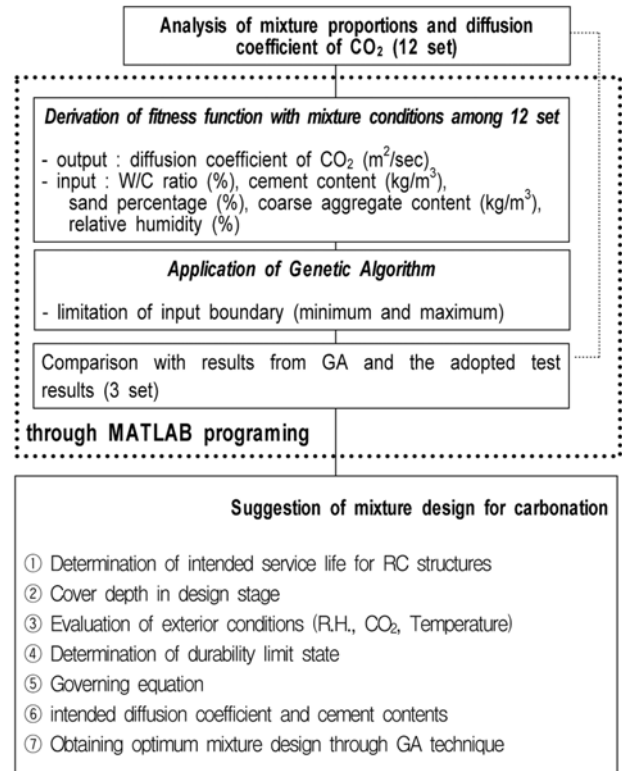
이 연구에서 인용한 실험 결과는 확산셀을 이용하여, 질소와 이산화탄소의 확산을 실험적으로 측정된 자료를 이용한 것이다. 배합은 총 3가지 배합을 사용하였으며, 상대습도를 4가지로 구분하여 확산계수를 측정하였다.<sup>15,26)</sup> 이산화탄소의 확산계수 추정을 위하여 다양한 실험이 수행되어 기체 확산성이 분석되었으나, 주로 시멘트 모르타르 및 페이스트에 국한된 것으로,<sup>5,6,14)</sup> 콘크리트를 대상으로 일정한 조건하에서 이산화탄소의 확산계수를 수행한 연구는 매우 희박하다. Table 3에서는 인용한 연구의 실험과정을 요약하였으며, 사용된 배합표 및 시멘트 특성은 Table 4에 정리하였다. 이 논문에서 인용한 연구는 보

**Table 1** Influencing parameter on carbonation behavior

Internal parameter (mixture)	Low W/C and large unit cement amount	·holding pH in alkali through producing large amount of hydration of CSH and Ca(OH) <sub>2</sub> ·low CO <sub>2</sub> diffusion through dense pore structure
	Aggregate	·CO <sub>2</sub> intrusion through artificial light weight aggregate
	Mineral admixture (slag and fly ash)	·small amount of Ca(OH) <sub>2</sub> due to pozzolanic reaction and latent hydraulic reaction ·low diffusion coefficient of CO <sub>2</sub>
	Mixed chloride content	·rapid carbonic reaction due to high pH from ion dissociation
	Alkali	·rapid carbonic reaction due to high alkali cement ·residual metallic oxide (K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O)
External parameter	CO <sub>2</sub> concentration	·Rapid carbonation through higher concentration of CO <sub>2</sub>
	Temp.	·increasing activity energy due to high temperature (Arrhenius law)
	R.H.	·decreasing carbonation in low R.H. due to insufficient H <sub>2</sub> O ·decreasing carbonation in high R.H. due to low CO <sub>2</sub> diffusion
	Induced chloride ion	·rapid carbonation due to dissociated chloride ion (cation)

**Table 2** Semi-empirical equations for carbonation process

Researcher	Equations
Syrayama	$t = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \varepsilon \cdot \frac{5000C^2}{(x-38)^2}$ <p><i>C</i>: carbonation depth, <i>x</i>: W/C ratio  <math>\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon</math>: factors for admixtures, cement type, exposure condition etc.</p>
Kishitani	$t = \frac{0.3(1.15 + 3W/C)C^2}{R^2(W/C - 0.25)^2} \quad (W/C \geq 60\%)$ $t = \frac{7.2}{R^2(4.6W/C - 1.76)^2} C^2 \quad (W/C < 60\%)$ <p><i>C</i>: carbonation depth, <i>x</i>: W/C ratio  <i>R</i>: factor for cement type, aggregate type, and surface treatment</p>
Hamada	$t = \frac{k}{R} C^2 \quad k = 0.3(1.15 + 3x)/(x - 0.25)^2$ <p><i>C</i>: carbonation depth, <i>x</i>: W/C ratio  <i>R</i>: factor for cement type, aggregate type, and surface treatment</p>
Ida	$t = \alpha\beta\gamma \frac{K}{(100x - 18)^2} C^2$ <p><i>C</i>: carbonation depth, <i>x</i>: W/C ratio  <i>K</i>: factor for exposure and cement type  <math>\alpha, \beta, \gamma</math>: quality, retardation, and environmental condition</p>



**Fig. 2** Flowchart for this study

**Table 3** Summary of test setup<sup>15,26)</sup>

Steps
a) Installation of test equipment in room (20°C)
b) Measurement of concrete sample thickness and diameter
c) Installation of sample (concrete disk) in cell
d) Applying N <sub>2</sub> gas and CO <sub>2</sub> gas in different cell with same pressure
e) Measurement of CO <sub>2</sub> concentration when CO <sub>2</sub> concentration in N <sub>2</sub> gas keeps constant (steady state)

$$D_{CO_2} = \frac{Qf_{CO_2}L}{(1-f_{CO_2})A}$$

where  $D_{CO_2}$ : diffusion coefficient of CO<sub>2</sub>,  $Q$ : flow rate of gas  
 $f_{CO_2}$ : mol fraction in N<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>,  $L$ : thickness of disk,  $A$ : area of disk

**Table 4** Mix proportions for CO<sub>2</sub> diffusion measurement<sup>15,26)</sup>

Case	W/C (%)	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )
1	42	425	179	714	895
2	50	315	158	748	1076
3	58	277	161	726	1117

Aggregate properties			
Type	Specific gravity	Absorption	F.M.
Fine	2.56	2.18	2.85
coarse	2.60	0.94	6.51

통 포틀랜드 시멘트(OPC : ordinary portland cement)만을 사용한 자료를 인용하였다.

### 3.1.2 확산계수식의 도출

인용한 실험에서는 습도조건을 10%, 45%, 75%, 그리고 90%로 분류하여 같은 배합조건에 대하여, 이산화탄소의 확산계수를 도출하였다. 습도의 증가에 따라, 그리고 배합의 낮은 물시멘트비에 따라 낮은 이산화탄소 확산계수를 보이고 있었다. Fig. 3에서는 인용한 확산계수 실험 결과를 나타내고 있다.

이 절에서는 배합의 최적화를 위하여 최적함수(fitness function)를 도출하도록 한다. 기존의 GA를 이용한 배합 최적화 연구에서는, 강도와 같은 특성값 도출을 위하여 다중의 배합인자를 변수로 하는 선형 다중회귀 분석식을 사용하였다.<sup>18,19)</sup> 그러나 기존의 연구 뿐 아니라<sup>5-8)</sup> Fig. 3과 같은 실험 결과에서도 습도가 큰 인자로 평가되고 있으므로, 이 연구에서는 배합인자 뿐 아니라 습도에 대한 사항을 고려하여 최적함수식을 도출하였다. 각 변수로는 물-시멘트비, 단위 시멘트량, 단위 잔골재량, 단위 굵은골재량, 그리고 상대습도를 설정하여 최적함수식을 구성하였다. 최적화 기법에서는 목적함수의 형태에 따라 다수의 지역해를 가지게 되는데, 이런 경우 지역해로 수렴하는 것을 피하기 위해 변수 초기 값의 적절한 지정 및 넓은 변수범위의 설정이 필요하다. 그러나 변수의 가능해 범위를 넓게 설정하더라도, 경사도를 이용하는 최적 기법들은 초기값에 의해 지역해로 수렴할 가능성이 있으므로 전역해를 구할 수 있는 GA와 같은 기법이 선호된다. 이 논문에서는 GA를 이용한 다중회귀 분석식을 도출하기 위해, Table 5와 같이 각 변수에 대한 가능해 범위를 지정하였다.

시멘트량이 증가함에 따라 확산계수는 감소하므로, (-)를 가지도록 하였으며, 물-결합재비만 범위를 -100~100을 가지도록 하여 최적해를 추정할 수 있도록 하였다. 한편 잔골재율 및 굵은골재량은 다른 배합인자들에 비해

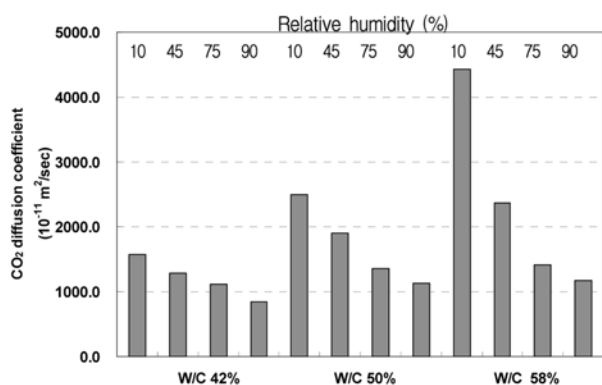


Fig. 3 CO<sub>2</sub> diffusion coefficients with W/C ratios and R.H.

Table 5 Variables for fitness function

Type	W/C (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	G (kg/m <sup>3</sup> )	R.H. (kg/m <sup>3</sup> )	a and b	Constant (-)
Max	100	0	10	10	-30	1	200,000
Min	-100	-100	-10	-10	-30	-1	0

상대적으로 낮은 영향을 가진다고 할 수 있으므로 -10~10의 범위를 가지도록 설정하였다. 확산계수는 상대습도에 매우 크게 좌우되므로, -30~30범위를 가지도록 하였다.

이 논문에서는 최적 다중회귀식과 최적배합을 도출하기 위해 MATLAB의 GA Toolbox를 사용하였는데, 한 세대의 집단크기(population size)는 20으로 하였으며 세대수 (generation)는 조기수렴을 방지하기 위해 10,000으로 하였다. 초기 1세대의 집단을 생성하기 위해 균일함수(uniform function)를 사용하였고 차세대 생성과 관련한 함수조건은 다음과 같이 결정하였다. 차세대생성을 위한 부모 선정은 추계론적 균일함수(stochastic uniform function)를 이용하였고 두 개의 우수개체가 다음 세대로 전달되도록 지정하였으며, 교배함수로는 이산함수 그리고 돌연변이 함수로는 정규분포함수를 사용하였다. 한편 교배율은 0.8을 사용하였다.

Table 6에서는 회귀분석 결과를 정리하였는데, 식 (1)에서는 일반적으로 사용되는 선형 다중회귀분석 결과를 나타내었으며, 식 (2)에서는 습도를 고려하여 변수를 증가시킨 것이다. 식 (1)의 경우, 오차의 평균은 13.2%였으며, 오차간의 변동계수는 105.5%로 오차의 변동성이 매우 크게 평가되었다. 한편 식 (2)의 경우, 오차의 평균은 19.8%였으며, 오차의 변동성이 80.3% 수준으로 평가되었다.

$$D_{CO_2} = I + A(W/C) + B(C) + C(S/a) + D(Agg) + E(RH) \quad (1)$$

$$D_{CO_2} = [I + A(W/C) + B(C) + C(S/a) + D(Agg) + E(RH)] \times (aRH + b) \quad (2)$$

식 (1)을 사용할 경우 높은 물-시멘트비(W/C 58%)에 대하여 너무 큰 오차를 가지게 되므로 이 연구에서는 식 (2)를 최적함수로 선정하였다. Fig. 4에서는 실험값과 식 (1) 및 (2)를 같이 도시하였다. 그림으로부터, 습도를 따로 고려한 식 (2)가 전반적으로 확산계수의 변화를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 논문에서는 최적함수식으로 식 (2)를 고려하였는데, 식 (1)에서 W/C 58% 경우 10.5~50.3%의 오차를 보인 반면 식 (2)에서는 0.1~31.8%의 오차를 보이고 있었다. 향후 연구에서 비선형 최적함

Table 6 Variables and constants in regression analysis

where  
W/C : water-cement ratio (%), C : cement content (kg/m<sup>3</sup>)  
S/a : sand percentage (%)  
Agg : coarse aggregate content (kg/m<sup>3</sup>), RH : relative humidity (%)  
I : intersection (constant)

	I	A	B	C	D	E
Eq. (1)	1003.744	15.104	-1.382	2.976	0.594	-9.864
Eq. (2)	16307.931	50.830	-29.566	5.552	-4.361	9.897
	a : -0.006489, b: 0.7434					

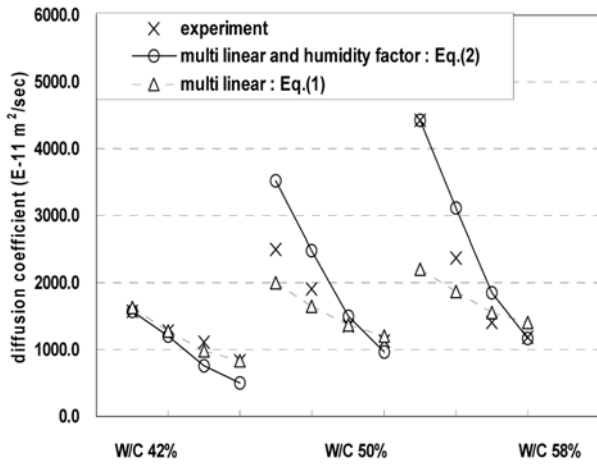


Fig. 4 Test and simulated results

수식을 이용하여, 최적함수를 도입하는 것도 합리적인 방법이 될 것이다.

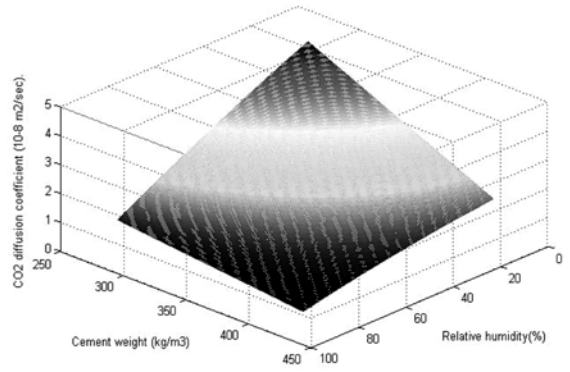
식 (2)에 따라 변화하는 확산계수 거동을 도시하기 위하여, Table 2의 배합변수를 조정하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 즉 Case 1은 Table 2에서 W/C 42%의 경우인데, 단위 시멘트량은 277 kg/m<sup>3</sup>에서 425 kg/m<sup>3</sup>으로, 상대습도의 변화는 10%에서 90%로 변화시키면서 확산계수의 변화를 도시한 것이다. Case 2 및 Case 3은 같은 Table에서 W/C 50% 및 W/C 58%의 경우를 나타내고 있으며, 단위 시멘트량과 상대습도의 변화범위는 Case 1과 같다. Cases 1~3의 contour에서 색상이 붉어질수록 이산화탄소 확산계수값이 높아지는 것을 의미한다.

### 3.2 GA를 통한 배합도출의 적용성 평가

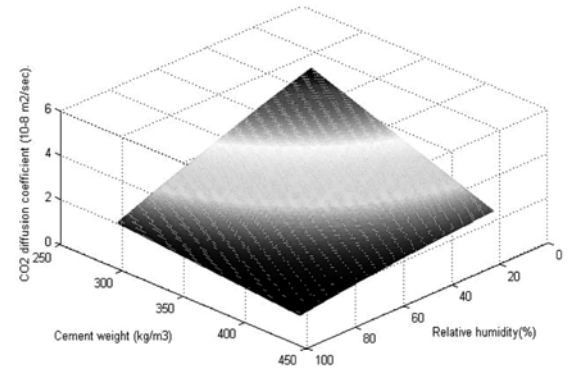
이 절에서는 제안된 기법을 통한 배합도출의 적용성을 평가하기 위해, 3가지 배합(W/C: 42%-R.H. 10%, W/C: 50%-R.H. 75%, W/C: 58%-R.H. 90%)에 대하여 평가를 수행하였다. MATLAB를 이용하여 프로그램을 구성할 때 배합 입력치의 상한치와 하한치를 설정하도록 하였는데, 각각의 값을 설정할 때는 어느 정도의 경험이 필요하다고 할 수 있다. 즉 GA를 적용하기 위한 data set에서 최대값 및 최소값을 찾는 것이 바람직하다. 설정된 상한치 및 하한치의 범위 및 GA를 통해서 도출된 값, 그리고 실험값에 대한 상대오차(%)를 Table 7에 정리하였다. 상대습도는 고정값이므로 상한 및 하한치의 범위를 같게 하여, 고정된 습도가 입력되도록 하였다.

한편 각각 해석을 통해 도출되는 과정을 그림으로 나타내었는데, 대표적으로 W/C 42%, R.H. 10%인 경우를 Fig. 6과 같이 나타내었다.

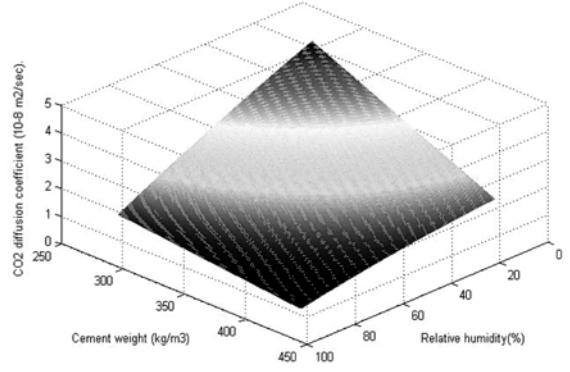
Table 6에서 알 수 있듯이 전체적으로 각각의 배합을 잘 추정하고 있으며, -9.11~8.80%의 상대오차를 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 5 Diffusion coefficient with changing cement content and relative humidity

## 4. 탄산화에 노출된 콘크리트 구조물의 배합 설계

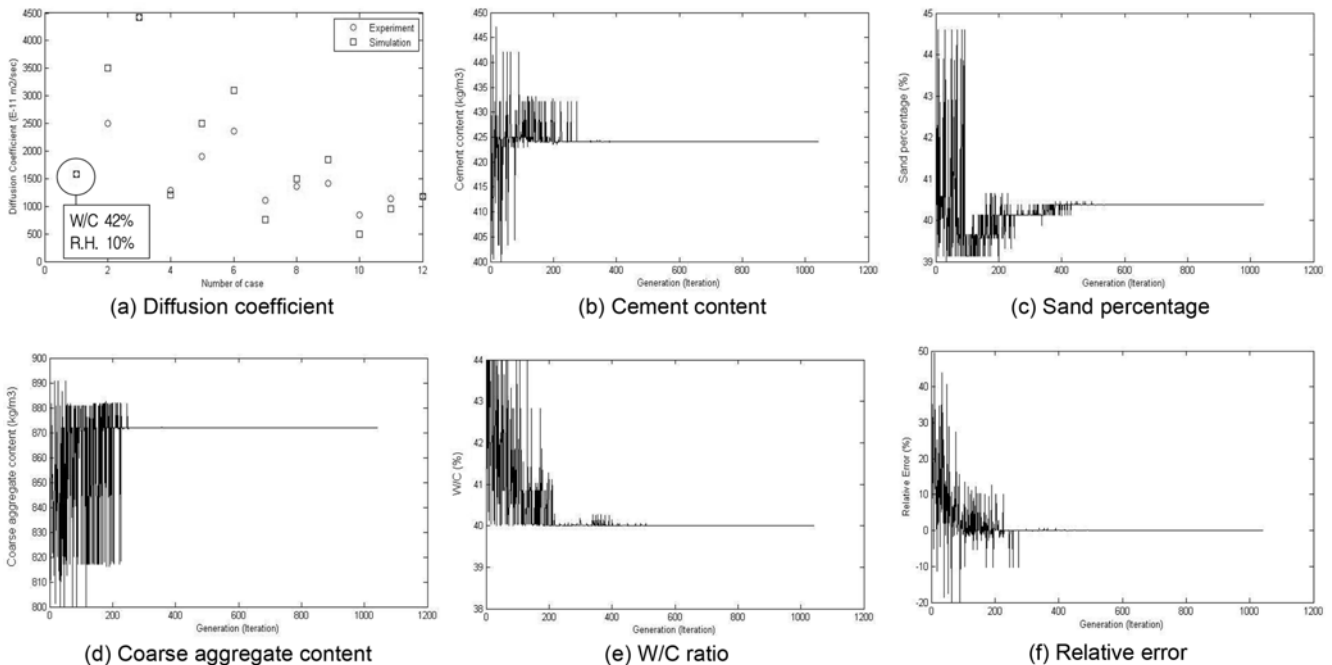
### 4.1 내구설계의 기본 개요

이 절에서는 탄산화에 노출된 환경에 대해, 배합설계를 수행하도록 한다. 배합설계를 위한 순서는 다음과 같이 설정할 수 있다.

- ① 대상 구조물의 목표 내구수명 설정
- ② 설계단계에서의 피복두께 산정
- ③ 환경조건의 분석
- ④ 내구한계상태의 정의
- ⑤ 지배방정식의 선정
- ⑥ 목표 확산계수 및 단위 시멘트량의 도출
- ⑦ GA를 통한 최적배합도출

**Table 7** Comparison with results from test and simulation from GA

W/C (%)	Diffusion coefficient ( $10^{-11} \text{ m}^2/\text{sec}$ )	W/C (%)	Cement ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	S/a (%)	Coarse aggregate ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	R.H. (%)
42 range GA error (%)	1576.3	42	425	44.4	895	10
	-	40~45	400~450	39~45	800~895	10~10
	1574.9	40.99	424.96	40.49	877.43	10
	0.10	2.40	0.00	8.80	1.96	-
50 range GA error (%)	1360.2	50	315	41.0	1076	75
	-	47.5~52.5	290~330	39~45	950~1100	75~75
	1503.0	48.71	329.65	42.64	1086.45	75
	10.5	2.58	-4.65	-4.00	-0.97	-
58 range GA error (%)	1179.1	58	277	39.4	1117	90
	-	55~60	260~330	39~45	950~1300	90~90
	1172.4	59.99	255.00	42.99	1100.11	90
	0.6	-3.43	7.94	-9.11	1.51	-



**Fig. 6** Simulated results through GA

물론 적절한 안전율 및 감소계수가 고려된다면 더욱 합리적인 설계가 되겠지만, 이 절에서는 안전율을 1.0으로 가정하여 목표 확산계수를 도출하였다.

일반적으로 탄산화를 고려해야 될 환경은 대도시 또는 지하구조물인데, 이산화탄소 농도가 높고 습도가 상대적으로 낮은 범위(50~70%)에서 탄산화가 심하게 발생한다. 기존의 연구에서는<sup>29)</sup> CO<sub>2</sub>농도 650~1,000 ppm, 습도가 65~85% 범위를 불량으로 구분하고 있으며 이에 대한 환경지수 증분치(20~40)를 고려하도록 하고 있다. 또한 CO<sub>2</sub> 농도 300~650 ppm 범위는 보통으로 정의하고 있지만, 환경지수 증분치(0~20)를 역시 고려하도록 하고 있다. 대도시의 경우 300 ppm이상의 농도를, 지하철 구조물의 경우 650 ppm 이상의 농도를 가지므로 탄산화 영

향을 고려하는 것이 바람직하다. 일본토목학회에서도<sup>30)</sup> 대도시 및 지하구조물에 대하여 탄산화에 대한 영향을 고려하도록 하고 있다.

## 4.2 노출환경 및 설계조건에 따른 배합의 제안

### 4.2.1 설계조건 분석

4.1절에서 언급한 것과 같은 순서로 대상 구조물을 가정하여, 최적배합을 도출하도록 한다. 대상구조물은 지하철 구조물 벽체로 가정하였으며, 목표내구수명에 대하여 A 구조물은 75년, B구조물은 100년으로 설정하였다. A의 설계피복두께는 50 mm로, B지점의 설계피복두께는 30 mm로 가정하였다. A 구조물의 노출환경은 연평균

65%의 상대습도, 12.7°C를 가정하였으며, B 구조물은 상대습도 75%, 온도 22°C를 가정하였다. A 구조물은 이산화탄소 농도가 극단적으로 높은 곳으로 가정하여, 2,700 ppm의 이산화탄소 농도를, B 구조물에서는 지하철정거장 수준의 980 ppm의 이산화탄소 농도를 가정하였다. 내구한계상태는 현재 시방서에서 제시하고 있는 탄산화 깊이가 피복두께에 이르는 상태를 내구한계상태로 정의하였다.<sup>25,27)</sup> 지배방정식은 식 (3)과 같이 CEB 제안식을 이용하였다.<sup>25)</sup>

$$d_c = \sqrt{2k_1k_2k_3\Delta c} \times \sqrt{\frac{D_{CO_2}t}{a}} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (3)$$

여기서  $d_c$ 는 탄산화깊이,  $k_1$ 은 국부적인 지역에 대한 상수,  $k_2$ 는 양생에 대한 상수,  $k_3$ 는 국부적인 물-시멘트비에 대한 상수,  $\Delta c$ 는 이산화탄소 농도( $kg/m^3$ ),  $D_{CO_2}$ 는 이산화탄소 확산계수,  $a$ 는 이산화탄소 반응률로서 수화물의 함수로 나타난다.  $n$ 은 건조 습윤 반복에 대한 상수,  $t_0$ 는 기준시간(보통 1년),  $t$ 는 존치시간을 나타낸다.

온도에 대한 영향을 고려하기 위해 기존의 연구를 인용하여<sup>3,7)</sup> 식 (4)와 같은 온도영향계수를 고려할 수 있다. 한편 지하 구조물이므로 강우로부터 직접적으로 보호를 받는다고 가정하면, 식 (3)의  $n$ 을 0으로 고려할 수 있으므로,<sup>25)</sup> 식 (5)와 같은 탄산화 예측식을 나타낼 수 있다.

식 (5)에서는 온도에 대한 영향이 고려되어 있으며, 습도에 대한 영향은 입력 자료로서 고려된다.

$$f(T) = D_{ref} \exp\left[\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4)$$

여기서  $D_{ref}$ 는 기준확산계수,  $U$ 는 8,500(Cal/mol K),  $R$ 은 기체상수,  $T_{ref}$ 는 기준온도로서 298 K,  $T$ 는 노출된 온도를 나타낸다.

$$d_c = \sqrt{2\Delta c} \times \sqrt{\frac{D_{CO_2}f(T)t}{a}} \quad (5)$$

여기서  $a$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>25)</sup>

$$a = 0.075 \cdot C \cdot CaO \cdot \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (6)$$

여기서  $C$ 는 단위 시멘트량( $kg/m^3$ ),  $CaO$ 는  $CaO$ 의 혼입량 %로서 0.65,  $\alpha_H$ 는 수화도로서 0.85를 가정,  $M$ 은 각각의 몰중량을 나타낸다. 식 (3)~(6)에서 이산화탄소의 확산계수를 포함하고 있는 더욱 합리적인 식이 있다면 이를 이용하는 것이 바람직하다. 이상의 결과를 정리하면 Table 8과 같이 나타낼 수 있다.

Table 8에서 단위 시멘트량과 이산화탄소 확산계수 사이에서는 일정한 관계가 있으므로, 무수히 많은 해를 가

**Table 8** Design parameters for carbonation design

Type	Structure A	Structure B		
Intended service life (year)	75	100		
Design cover depth (mm)	50	30		
Exterior condition	R.H.: 65% Temp.: 12.7°C	R.H.: 75% Temp.: 22°C		
CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	2,700	980		
Durability limit state	carbonation depth = cover depth			
Assumed cement weight (kg/m <sup>3</sup> )	300	330	335	370
Intended diffusion coefficient × 10 <sup>-11</sup> (m <sup>2</sup> /sec)	1,742	1,916	1,248	1,378

지게 된다. 이 연구에서는 먼저 단위 시멘트량을 Table 7과 같이 가정하고 이에 따른 목표확산계수를 4가지로 설정하였다.

#### 4.2.2 최적배합의 도출

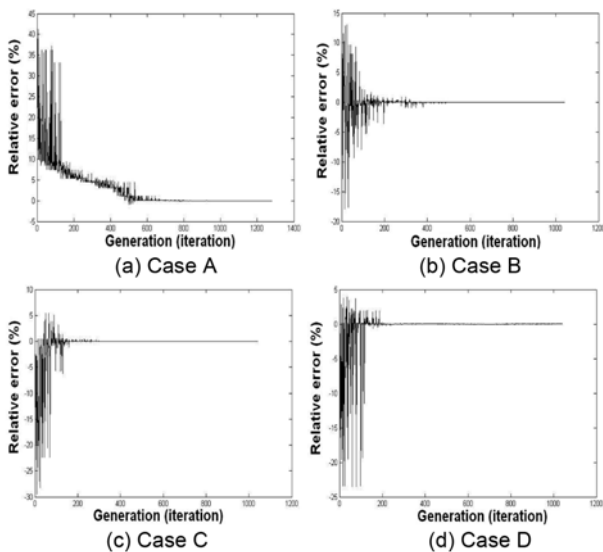
최적배합의 도출을 위하여 GA를 이용한 최적의 배합표를 구성하도록 한다. Table 8에서 나타내었듯이, 목표 확산계수와 단위 시멘트량 사이에서는 무수한 조합이 발생하므로, A구조물에 대해서는 단위 시멘트량이 300  $kg/m^3$ 과 330  $kg/m^3$ 인 경우를, B 구조물에 대해서는 단위 시멘트량이 335  $kg/m^3$ 과 370  $kg/m^3$ 인 경우로 가정하여, 각각의 배합을 도출하도록 한다. 최적함수가 식 (2)와 같이 도출된 상태이므로, 상대습도와 단위 시멘트량을 고정하여 식 (2)의 오차를 최소화시키는 배합을 도출한다. Table 9에서는 각각의 경우에 대하여 도출된 배합표를 나타내었으며, 목적함수와 목표 확산계수와의 상대오차는 Fig. 7에 도시하였다.

Table 9 및 Fig. 7에서 알 수 있듯이 목표 확산계수와 단위 시멘트량을 최종적으로 도출하면 그에 해당하는 배합표를 작성할 수 있다. Fig. 7과 같이 배합이 상대오차가 0에 수렴하지 않으면 배합인자의 상한치 및 하한치에 제한을 받는 경우가 발생하게 된다. 상한치 및 하한치의 범위 안에서 각 배합변수는 조정되어야 하며, 이 경우 상대오차의 감소를 확인한다.

이 연구에서는 기존의 이산화탄소 확산계수를 측정자료를 이용하여 이산화탄소 확산계수에 대한 회귀분석식을 도출하였으며 GA 기법을 이용하여 최적함수의 오차를 최소화하는 배합 설계기법을 제안하였다. 그러나 제안된 기법은 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우에만 국한되며, 단위 시멘트량은 277~425  $kg/m^3$ , 물-시멘트비는 42~58% 범위내에서만 적용이 가능하다고 할 수 있다. 이는 GA를 통해 도출된 확산계수의 최적함수식이나, GA를 통해 배합인자를 도출하는 과정이 모두 준비된 data set에 지배를 받기 때문이다. 더 많은 배합조건을 이용하고, 이에 따른 비선형 회귀분석 함수를 최적함수로 설정하면 이 연구는 더욱 합리적인 배합기법으로 발전할 것이다. 한편 이 연구에서는 탄산화만을 대상으로 하였

**Table 9** Mixture design through proposed GA technique

Case		Intended diffusion coefficient ( $10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$ )	W/C (%)	Cement ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	S/a (%)	Coarse aggregate ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	R.H. (%)
A	Structure A range	1,742	42.5	300	37.1	1191.2	65
			42~58	300~300	37~43	800~1200	65~65
B	Structure A range	1,916	53.1	330	37.0	953.6	65
			42~58	330~330	37~43	800~1200	65~65
C	Structure C range	1,248	50.0	335	42.5	1165.3	75
			42~58	335~335	37~43	900~1200	75~75
D	Structure B range	1,378	51.4	370	38.6	823.4	75
			42~58	370~370	37~43	800~1200	75~75



**Fig. 7** Relative errors with iteration

으나, 강도 또는 염화물 확산계수에 대하여 GA를 적용하여 다양한 요구 성능을 만족시키는 배합의 최적화 기법의 도출도 바람직하다.

### 5. 결 론

탄산화에 노출된 콘크리트 구조물의 배합설계에 대한 연구-유전자 알고리즘 적용성 평가에 대한 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 이 연구에서는 3가지 W/C 및 4가지 습도조건에서 시험된 이산화탄소 실험자료를 이용하여 배합인자(물-시멘트비, 단위 시멘트량, 잔골재율, 단위 굵은골재량)를 변수로 하는 다중회귀분석식을 도출하였다. 이때, 단순한 다중회귀 분석식을 통일하여 사용하는 것보다 습도영향을 고려한 변수를 사용하는 것이 오차의 분산을 적게 하였다.
- 2) 제안된 최적함수식에 GA를 적용하였으며, 3가지 배합에 대하여 콘크리트 배합을 추정하였다. 최대 오차는 10%보다 작은 수준으로 각각의 배합인자(물-시멘트비, 단위 시멘트량, 잔골재율, 단위 굵은골재

량)를 적절하게 추정하고 있었다.

- 3) 탄산화에 대한 내구설계를 수행하기 위하여 목표내구수명, 설계변수(피복두께), 노출환경(온도 및 습도) 등을 설정하였으며, 서로 다른 노출환경에 대한 콘크리트 배합을 제시하였다. 이 연구는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에 대해서 적용하도록 되어 있으나, 고로슬래그 또는 플라이애쉬 같은 혼화재료나 감수제와 같은 인자가 고려된 데이터가 구축된다면 고성능 콘크리트의 내구성 설계에서도 기초적인 배합을 제시할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. Kobayashi, K. and Uno, Y., "Mechanism of Carbonation of Concrete," *Concrete library of JSCE*, No. 16, 1990, pp. 139~151.
2. 和泉意登志, 喜多達夫, 前田熙信, 中性化, 技報堂出版, 1986, pp. 62~75.
3. Saeki, T., Ohga, H., and Nagataki, S., "Change in Micro-Structure of Concrete due to Carbonation," *Concrete Library of JSCE*, No. 18, 1991, pp. 1~11.
4. CEB, *Durable Concrete Structures-Design Guide*, 2nd Edition, Thomas Telford, London, 1992, pp. 28~35.
5. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 4, 1991, pp. 363~373.
6. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., "Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 8, No. 2, 1991, pp. 186~196.
7. Ishida, T. and Maekawa, K., "Modeling of PH Profile in Pore Water Based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory," *Concrete Library of JSCE*, No. 37, 2001, pp. 151~166.
8. Ishida, T. and Maekawa, K., "Modeling of Durability Performance of Cementitious Materials and Structures Based on Thermo-hygro Physics," *Rilem Proceeding PRO 29, Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures*, 2003, pp. 39~49.



9. Glasser, F. P., Marchand, J., and Samson, E., "Durability of Concrete-Degradation Phenomena Involving Detrimental Chemical Reactions," *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, Issue 2, 2008, pp. 226~246.
10. 阿部保彦, "ひび割れ幅がコンクリートの中性化深さに及ぼす影響に関する文献調査結果," *コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集*, Jan. 1999, pp. 7~14.
11. 권성준, 박상순, 남상혁, 조호진, "국내 도심지 콘크리트 교각 취약부의 탄산화 조사에 대한 연구," *한국구조물진단학회 논문집*, 11권, 3호, 2007, pp. 116~122.
12. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K., "Predicting Carbonation in Early-Aged Cracked Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, Issue 5, 2006, pp. 979~989.
13. Isgor, O. B. and Razaqpur, A. G., "Finite Element Modeling of Coupled Heat Transfer, Moisture Transfer and Carbonation Processes in Concrete Structures," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, Issue 1, 2004, pp. 57~73.
14. Houst, Y. F. and Wittmann, F. H., "Influence of Porosity and Water Content on the Diffusivity of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> through Hydrated Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, Issue 6, 1994, pp. 1165~1176.
15. 오병환, 정상화, 이명규, "콘크리트 중의 이산화탄소 확산계수에 대한 상대습도 영향 연구," *콘크리트학회 논문집*, 15권, 6호, 2003, pp. 778~784.
16. 권성준, 송하원, 변근주, "인공건경망을 통한 확산계수 도출과 공극구조 변화를 고려한 콘크리트 탄산화 해석," *대한토목학회 논문집*, 27권, 1A호, 2007, pp. 107~116.
17. 김승억, 마상수, "유전자 알고리즘을 이용한 비선형 비탄성 최적설계," *대한토목학회 논문집*, 23권, 5A호, 2003, pp. 841~850.
18. 윤영목, 김병헌, "2차 비탄성 해석과 유전자 알고리즘을 이용한 평면 강골조 구조물의 최적설계," *대한토목학회 논문집*, 24권, 1A호, 2004, pp. 87~100.
19. I-Cheng Y., "Computer-Aided Design for Optimum Concrete Mixtures," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, Issue 3, 2007, pp.193~202.
20. Lim, C. H., Yoon, Y. S., and Kim, J. H., "Genetic Algorithm in Mix Proportioning of High-Performance Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 409~420.
21. 임철현, 윤영수, 이승훈, 손유신, "고성능 콘크리트 배합에서의 유전자 알고리즘의 적용," *한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집*, 14권, 1호, 2002, pp. 551~556.
22. Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Welsley, Reading, MA, 1989, pp. 22~29.
23. Cantu'-Paz, E. and Goldberg, D. E., "Efficient Parallel Genetic Algorithms: Theory and Practice," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 186, 2000, pp. 221~238.
24. Mathworks, *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox 2, User's Guide*, 2007, pp. 108~132.
25. CEB Task Group 5.1, 5.2, *New Approach to Durability Design*, CEB, Sprint-Druck, Stuttgart, 1997, pp. 53~62.
26. Jung, S. H., "Diffusivity of Carbon Dioxide and Carbonation in Concrete through Development of Gas Diffusion Measuring System," Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Korea, 2002, pp. 35~42.
27. RILEM, "Durability Design of Concrete Structures," Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, 1994, pp. 75~78.
28. 한국콘크리트학회, *콘크리트 표준시방서-내구성편*, 건설교통부, 2004, pp. 65~69.
29. 지하철 건설본부, *지하철 구조물의 내구성 확보방안에 대한 연구*, 대한토목학회, 1999, pp. 168~189.
30. 日本土木學會, *コンクリート構造物の耐久性設計指針(案)*, 日本土木學會, *コンクリ-トライブラリ-*, 82号, Nov. 1995, pp. 2~18.

**요약** 콘크리트 내부의 철근부식은 구조물의 안전성에 큰 영향을 주므로, 목표 내구수명동안 구조물의 성능을 확보하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이 연구는 대도시나 지하구조물에서 중요하게 평가되는 탄산화에 대하여, 유전자 알고리즘을 적용한 콘크리트 배합기법에 대한 연구이다. 이를 위해, 배합인자에 따른 이산화탄소 확산계수를 문헌조사를 통하여 분석하였으며, 습도를 고려한 최적 함수식을 회귀분석을 통하여 도출하였다. 최적 함수식은 12개의 실험자료에 대하여, 물-시멘트비, 단위 시멘트량, 잔골재율, 단위 굵은골재량, 그리고 상대습도를 포함하도록 고려하였으며, 유전자 알고리즘을 통하여, 주어진 이산화탄소 확산계수에 대한 콘크리트 배합을 도출하였다. 3개의 배합에 대하여 검증한 결과, 10% 미만의 상대오차를 보이며 주어진 배합을 잘 추정하였다. 최종적으로 서로 다른 환경과 설계 제원을 가지는 콘크리트 구조물을 가정하여, 목표 확산계수와 단위 시멘트량을 계산하였으며, 이를 이용하여 배합을 추정하였다. 제안된 기법은 주어진 확산계수와 배합을 잘 추정하였으며, 다양한 배합인자 및 혼화재료가 고려된 실험 자료를 이용한다면 더욱 합리적인 배합 기법으로 발전할 것이다.

**핵심어** : 탄산화, 유전자 알고리즘, 내구수명, 배합 설계, 상대습도