

# 염해에 노출된 콘크리트의 내구수명 확보를 위한 최적 배합 도출에 대한 연구 - 유전자 알고리즘의 적용

## Study on Optimum Mixture Design for Service Life of RC Structure subjected to Chloride Attack - Genetic Algorithm Application

권성준\* · 이성철\*\*

Kwon, Seung-Jun · Lee, Sung Chil

### Abstract

A control of chloride diffusion coefficient is very essential for service life of reinforced concrete (RC) structures exposed to chloride attack so that much studies have been focused on this work. The purpose of this study is to derive the intended diffusion coefficient which satisfies intended service life and propose a technique for optimum concrete mixture through genetic algorithm(GA). For this study, 30 data with mixture proportions and related diffusion coefficients are analyzed. Utilizing 27 data, fitness function for diffusion coefficient is obtained with variables of water to binder ratio(W/B), weight of cement, mineral admixture(slag, fly ash, and silica fume), sand, and coarse aggregate. 3 data are used for verification of the results from GA. Average error from fitness function is observed to 18.7% for 27 data for diffusion coefficient with 16.0% of coefficient of variance. For the verification using 3 data, a range of error for mixture proportions through GA is evaluated to 0.3~9.3% in 3 given diffusion coefficients. Assuming the durability design parameters like intended service life, cover depth, surface chloride content, and replacement ratio of mineral admixture, target diffusion coefficient, where exterior conditions like relative humidity(R.H.) and temperature, is derived and optimum design mixtures for concrete are proposed. In this paper, applicability of GA is attempted for durability mixture design and the proposed technique would be improved with enhancement of comprehensive data set including wider range of diffusion coefficients.

**Keywords** : concrete, genetic algorithm, durability design, diffusion coefficient, mixture design

### 요 지

콘크리트의 염화물 확산계수의 제어는 염해에 노출된 콘크리트 구조물의 내구수명 확보에 필수적이며, 이를 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 본 연구는 목표 내구수명을 만족하는 목표확산계수를 도출하고 유전자 알고리즘을 통하여, 최적배합을 도출하는데 있다. 이를 위하여, 동일한 골재 및 혼화재를 사용한 30개의 배합과 그에 따른 염화물 확산계수를 분석하였으며, 27개를 대상으로 확산계수 예측식을 도출하였다. 확산계수 예측식의 변수로는 물-결합재비, 단위 혼화재량(슬래그, 플라이 애쉬, 실리카폼), 단위 시멘트량, 단위 잔골재 및 굵은 골재량을 포함하도록 하였으며 나머지 3개의 배합에 대하여 검증을 수행하였다. 최적 함수식은 27개의 배합에 대하여 평균 18.7%의 오차와 16.0%의 변동계수를 보이고 있었다. 주어진 3개의 확산계수에 대하여, 유전자 알고리즘을 통하여 도출된 배합은 0.3%~12.2%의 오차범위를 가지며 각각의 배합인자를 도출하였다. 최종적으로 서로 다른 내구성 설계변수(목표내구수명, 피복두께, 표면염화물량, 혼화재량)와 노출환경(온도 및 습도)을 가정하여 목표 확산계수를 도출하였으며, 이에 만족하는 최적화된 콘크리트 배합을 제안하였다. 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여, 내구성 콘크리트 배합도출에 대한 적용성을 평가하였으며, 제안된 기법은 다양한 확산계수의 범위를 가지는 광범위한 자료구축을 통하여 개선될 것이다.

**핵심용어** : 콘크리트, 유전자 알고리즘, 내구성설계, 확산계수, 배합 설계

### 1. 서 론

콘크리트는 경제적이면서도, 쉽게 역학적 성능을 만족시킬 수 있으므로, 오랫동안 건설재료로 사용되어 왔다. 그러나 염해에 노출된 콘크리트는 염화물 침투로 인해 빠른 시간에

부식이 발생하게 되며, 이는 균열발생, 콘크리트 피복 박리 등 구조 안전성 문제로 진전되는 것이 일반적이다(Broomfield, 1997; Song *et al.*, 2006). 국내의 시방서에서도 내구한계상태를 정의하여, 철근위치에서의 유입되는 염화물량을 제한하고 있으며, 이는 내구성 설계를 수행할 때, 중요하게 사용된

\*정회원 · 교신저자 · University of California, Irvine 객원연구원 · 공학박사 (E-mail : jjuni98@yonsei.ac.kr)  
\*\*University of California, Irvine 박사후연구원 · 공학박사 (E-mail : sungcl@uci.edu)

다(한국콘크리트학회, 2004; JSCE 2002). 염화물 확산계수는 염화물 거동을 평가하기 위한 매우 중요한 변수인데, 많은 배합 조건과 노출환경을 동시에 고려할 수 있는 확산계수의 도출은 매우 제한적으로 연구되고 있다. 촉진시험을 통하여 염화물 이온의 확산계수를 사용하는 방법이 현재 일반적으로 사용되고 있다(Tang, 1996; Tang and Nilsson, 1993; ASTM, 1997). 이러한 촉진시험방법은 비교적 24시간 이내의 짧은 시간동안에 수행할 수 있으나, 시편 제조, 전기장치의 설치, 시약(AgNO<sub>3</sub>)의 분무 등 많은 부가적인 많은 단계를 필요로 한다. 한편 실험을 수행할 경우 제한된 수의 시편이 사용되므로, 배합 전체를 대표하기에 한계가 있다. 실험조사나 장기간의 노출 시험을 기준으로 하여 도출되는 겉보기 확산계수는 사용자 편의성에서 또, 가장 확실한 물리적인 값(염화물량)을 제공할 수 있다는 점에서 다양하게 사용되고 있다(Thomas and Bentz, 2002). 그러나 겉보기 확산계수는 동일한 환경조건이라 하더라도, 배합조건에 따라 표면염화물량 및 확산계수가 다르게 평가되며, 동일한 배합이라 하더라도 외부환경(온도, 습도, 존치시간, 외부 염화물 농도)에 따라 다른 확산계수를 도출하게 된다. 최근 들어 시간에 따라 변화하는 겉보기 확산계수를 이용한 염화물 해석기법(Tang and Goost, 2007), 배합조건에 따른 겉보기 확산계수에 대한 연구(Thomas and Bamforth, 1999), 실험조사를 통한 균열부 확산계수에 대한 연구(Kwon *et al.*, 2009; 권성준과 박상순, 2008) 등 다양한 조건을 고려하여 확산계수에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 겉보기 확산계수에 대한 연구는 장기간의 노출시험과 다양한 배합의 제조라는 단점을 가지고 있으며, 실험조사를 통하여 도출하기에는 많은 제약이 따르고 있다. 최근 들어 신경망이론을 이용하여, 염화물 확산계수를 도출하고 이를 염화물 거동 평가에 연결시킨 연구가 진행되고 있다(Song and Kwon, 2009). 이러한 연구는 다양한 내부 및 외부환경을 고려한 확산계수의 도출은 가능하지만, 인식된 학습패턴을 적용시키려는 프로그램이 있어야 하며, 확산계수의 예측은 가능하지만, 역해석(reverse analysis)을 통한 최적화 배합에 적용하기에는 제한이 따른다.

유전자 알고리즘(GA: Genetic Algorithm)은 최적화 기법의 하나로서, 토목공학에서는 설계기법에 적용되고 있는데, 기존의 정보를 이용하여, 원하는 결과를 예측하는 기법뿐 아니라, 역해석을 통하여 입력 항목의 최적화를 수행할 수 있으므로, 그 설계기법에 대한 적용성이 확대되고 있다(김승익과 마상수, 2003; 윤영목과 김병현, 2004). 콘크리트 관련 연구에서는 고성능 콘크리트에 대한 배합 도출에 대하여, GA기법이 적용되고 있는데, 주로 강도 예측과 평가에 적용되고 있지만(임철현 외, 2002; I-Cheng Yeh, 2007, Lim *et al.*, 2004), 고내구성 배합도출에 대해서는 적용되지 않고 있다.

본 연구에서는 기존의 자료(삼성건설, 2003)를 이용하여 혼화재료(고로 슬래그 미분말, 플라이 애쉬, 실리카 폼)를 포함하는 30개의 배합에 대하여, 겉보기 확산계수를 분석하였다. 27개의 배합자료와 그에 따른 확산계수를 이용하여, 확산계수에 대한 최적 함수식을 matlab 프로그램을 이용하여 도출하였으며, 나머지 3개의 배합자료를 이용하여 검증을 수행하였다. 제안된 기법을 이용하여, 다양한 조건에서 가정된

RC 구조물에 대한 배합표를 도출하였는데, 본 연구는 염화에 노출된 콘크리트 구조물의 목표내구수명 확보에 유용하게 사용될 수 있다고 평가된다. 기존의 GA의 적용이 주로 소요강도를 위한 배합추정에 국한하였다면, 본 연구는 소요강도와 같은 목적값으로 염화물 확산계수를 설정하였고 설계 조건에 따라 가정되는 목표 염화물 확산계수와 이를 만족하는 배합추정으로 그 영역을 더욱 넓혔다고 할 수 있다.

## 2. GA의 기본 이론 및 실험계획

### 2.1 GA의 기본이론

유전자 알고리즘(GA; Genetic Algorithm)은 다윈의 자연진화적인 적자생존과 자연선택의 원리를 기반으로 정립된 최적화 알고리즘 기법이다. 일반적인 탐색기법과는 다르게, 초기의 집단이라고 불리는 임의의 해의 집단을 형성함으로써, 해를 찾아가기 시작한다. 기계공학과 화상인식 등, 최적화 기법에 주로 사용되었으나, 최근 들어 토목구조물 설계, 관망 해석, 콘크리트 배합도출에 사용되기도 한다. 초기에 생성된 개체에서 선택(Selection), 교배(Crossover), 변이(Mutation)과정을 거치면서 그 해에 대한 정확도가 증가하게 되며, 적합도가 가장 큰 값이 최종적으로 선정된다(Goldberg, 1989; Cantu'-Paz and Goldberg, 2000).

#### 2.1.1 선택(Selection)

선택단계에서는 각 개체의 적합도를 이용하여 다음 세대를 위한 집단을 새로이 생성하는 연산이 수행된다. 유전자 알고리즘이 시작되는 과정으로, 탐색 영역에서 임의의 해의 집단을 형성하고 교배과정으로 전달해주는 역할을 하고 있다. 일반적인 선택방법으로는 Roulette wheel selection이 쓰이고 있으며, Ranking selection, Tournament selection 등의 방법이 있다. 식 (1)에서는 Roulette wheel selection을 사용할 경우, 인구( $k$ )에서 선택되는 염색체의 선택확률( $P_k$ )을 나타내고 있다(Mathworks, 2007).

$$P_k = \frac{f_k}{\sum_{i=1}^{size} f_i} \quad (1)$$

여기서,  $f_i$ 는 전체인구의 크기를 나타낸다.

#### 2.1.2 교배(Crossover)

유전자 알고리즘의 성능은 교배 연산자의 성능에 크게 의존하기 때문에 문제에 맞는 올바른 교배 연산자를 정의하는 것이 필수적이다. 교배의 과정은 선택과정에서 전달된 해의 집단내의 있는 해들을 서로 나누어, 접목시키는 과정을 통해 새로운 값들을 가진 해의 집단을 만들어가는 과정이라 할 수 있다. 하나의 점을 기준으로 해를 바꾸는 방법(Single-Point Crossover), 두 점을 기준으로 하는 방법(Two-point cross over) 그리고 일정한 점만을 기준으로 하는 방법(Uniform cross over)이 있다(Mathworks, 2007).

#### 2.1.3 변이(Mutation)

변이의 과정은 집단내의 해의 값을 새로운 값으로 바꾸는 과정을 말하며, 이는 유전자 알고리즘이 지역해에 빠지는 것

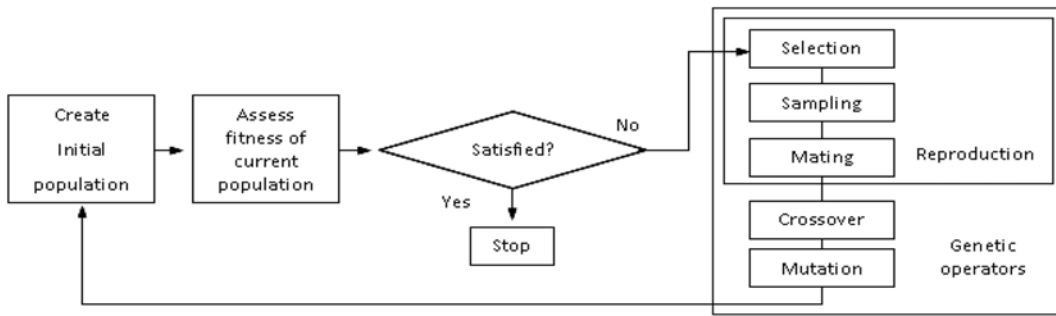


Fig. 1 Genetic algorithm process (Mathworks, 2007)

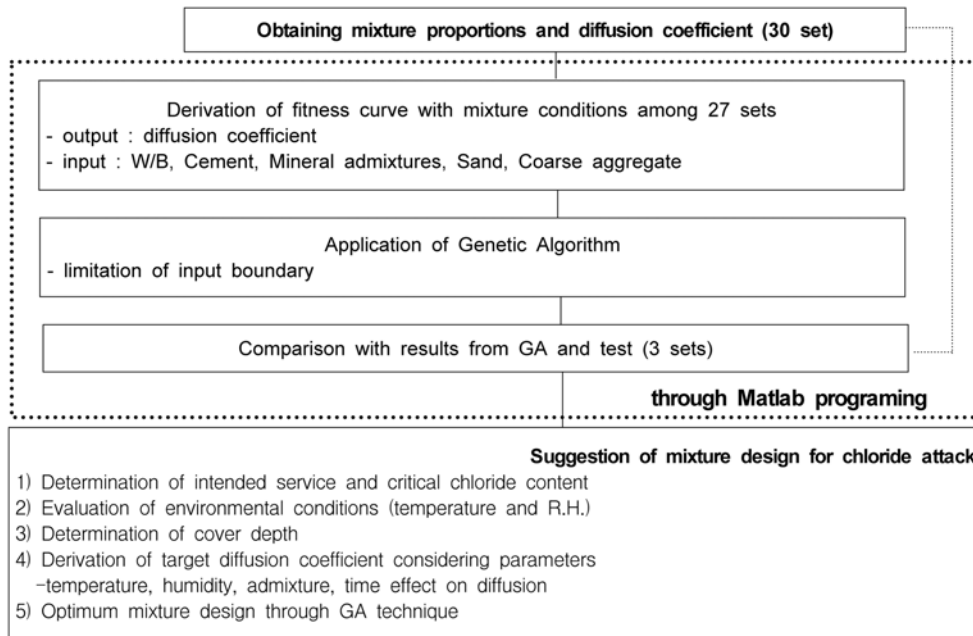


Fig. 2 Flowchart for this study

을 방지하면서 전체 영역의 탐색을 가능하게 한다. 변이확률은 변이 대상이 되는 유전자 수와 집단 내 전체 유전자 수의 비로 정의되는데, 변이확률이 높으면 임의의 탐색과 비슷한 형태가 되어버리고, 너무 낮을 경우 국부적인 최적값을 도출할 우려가 있으므로 신중하게 선택해야 한다(Mathworks, 2007).

Fig. 1에서는 GA의 연산과정의 개요도를 나타내었으며, Fig. 2에서는 GA를 이용한 본 연구의 개요도를 나타내고 있다.

## 2.2 기존자료의 분석 (삼성건설, 2003)

본 절에서는 GA를 적용하기 위한 기존의 연구(삼성건설, 2003)를 요약하였다. 슬럼프 15±1.5 cm, 공기량 4.5±1.0%를 목표로 물-결합재비를 37%, 42% 및 47% 3단계로 변화시켜 30개 배합의 콘크리트를 제조하였는데, 콘크리트 배합 및 180일 침지된 확산계수의 결과를 Table 1에 28일 강도와 함께 정리하였다. 사용된 시멘트 및 골재의 특성은 Table 2에 수록되어 있다. Table 1의 G30S05-47의 확산계수(W/B: 47%)가 G30S05-42(W/B: 42%)보다 더 작게 실험적으로 평가되었으므로,  $1.8 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 를  $2.1 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 수정하여 해석을 수행하였다. 본 논문에서 인용한 실험자료에서 3종 배합을 사용한 경우, 물-결합재비가 37%에서 47%로 증가하면서 확산계수는 1.3~1.5배의 확산계수 증가를 보이고 있으므로, 이를 고려하여 수정한 것이다. 한편

총 30개의 배합 중, NPC100-42, F30N70-42, F20S05-37의 3가지 배합은 검증용으로 사용되었다.

Table 1에는 28일 강도가 포함되어 있는데, 평균 40.6 MPa을 보이고 있으며, 최소값이 28.5 MPa로 제시되어 있다. 이러한 강도 분포는 현재 일반적으로 사용되는 RC 구조물의 소요강도에 큰 문제가 없으리라 판단된다. 본 연구에서는 확산계수에 대한 배합추정만을 고려하므로 28일 소요강도가 27 MPa이하인 배합만을 다루기로 가정한다. 겉보기 확산계수의 도출을 위하여, 콘크리트 공시체를 28일 동안 수중양생 한 후, 3.5% NaCl 용액에 6개월 간 침지시켰다. 이때 콘크리트 공시체에 염소이온의 일방향 침투를 유도하기 위하여 한쪽 면을 제외한 나머지 면은 에폭시로 코팅하였으며, 6개월 침지후 콘크리트 공시체를 깊이별로 갈아낸 후 AgNO<sub>3</sub> 용액을 이용한 전위차 적정법으로 염소이온 프로파일을 구하였다. 콘크리트 분말 시료를 AASHTO T 260에 따라 질산은 용액을 이용한 적정법으로 산가용성 염소이온량을 측정하였다. Table 1에서 \*로 표시된 3가지 배합은 이후 검증용으로 사용되며, 적용성은 3.3절에서 다루어 질 것이다.

## 3. GA를 적용한 최적 배합도출

### 3.1 최적함수 설정을 위한 배합인자

주어진 목적값 (확산계수)에 대하여 GA를 이용한 배합 추

Table 1. Mixture design and strength (28 days)

Names of Mix.	Items	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						Binder×%		Strength (MPa, 28 days)	Diffusion coefficient ×10 <sup>-12</sup> (m <sup>2</sup> /sec)	
				W	Cementitious Materials				S	G	Admixture			
					C	GGBS	FA	SF			SP			AE
NPC100-37		37	45	168	454	-	-	-	767	952	1.0	0.017	49.0	4.1
<i>NPC100-42*</i>		42	45	168	400	-	-	-	787	976	0.9	0.015	44.3	5.2
NPC100-47		47	47	168	357	-	-	-	838	960	0.85	0.017	38.5	7.3
G30N70-37		37	45	168	318	136	-	-	762	946	0.8	0.018	47.0	2.1
G30N70-42		42	45	168	280	120	-	-	783	972	0.75	0.013	40.5	3.0
G30N70-47		47	47	168	250	107	-	-	835	956	0.65	0.015	37.0	3.2
G50N50-37		37	45	168	227	227	-	-	760	943	0.75	0.017	47.3	1.4
G50N50-42		42	45	168	200	200	-	-	780	969	0.7	0.0135	42.6	1.6
G50N50-47		47	47	168	178	179	-	-	832	953	0.6	0.015	38.2	1.7
F10N90-37		37	45	168	409	-	45	-	760	943	0.75	0.018	44.2	3.5
F10N90-42		42	45	168	360	-	40	-	780	969	0.9	0.021	38.0	5.2
F10N90-47		47	47	168	321	-	36	-	832	952	0.75	0.017	34.3	6.2
F20N80-37		37	45	168	363	-	91	-	752	934	0.75	0.018	42.5	3.2
F20N80-42		42	45	168	320	-	80	-	774	961	0.85	0.025	37.3	4.0
F20N80-47		47	47	168	286	-	71	-	826	946	0.7	0.017	32.3	5.9
F30N70-37		37	45	168	318	-	136	-	745	952	0.75	0.2	38.2	3.9
<i>F30N70-42*</i>		42	45	168	280	-	120	-	768	953	0.75	0.015	33.0	4.3
F30N70-47		47	47	168	250	-	107	-	820	939	0.65	0.019	28.5	5.9
F10S05-37		37	45	168	386	-	45	23	756	938	1.0	0.023	49.0	2.2
F10S05-42		42	45	168	340	-	40	20	777	965	0.9	0.021	42.6	2.8
F10S05-47		47	47	168	303	-	36	18	829	950	0.9	0.021	38.0	3.3
<i>F20S05-37*</i>		37	45	168	340	-	91	23	749	929	0.9	0.023	45.2	2.5
F20S05-42		42	45	168	300	-	80	20	771	957	0.85	0.025	40.9	3.6
F20S05-47		47	47	168	268	-	71	18	810	927	0.9	0.025	36.1	3.8
G30S05-37		37	45	168	295	136	-	23	759	942	0.75	0.015	49.1	1.4
G30S05-42		42	45	168	260	120	-	20	765	949	0.75	0.015	43.6	1.9
G30S05-47		47	47	168	232	107	-	18	832	952	0.8	0.015	36.3	2.1(1.8)
G35F15-37		37	45	168	227	159	68	-	751	932	0.65	0.014	48.1	1.8
G35F15-42		42	45	168	200	140	60	-	773	959	0.65	0.014	41.0	1.9
G35F15-47		47	47	168	178	125	54	-	804	921	0.7	0.014	36.0	2.3

GGBS : ground granulated blast furnace slag

SF : silica fume

W/B : water to binder ratio

SP : super plasticizer

\* : data for verification

FA : fly ash

S : sand

G : coarse aggregate

AE : Air entrainer

Table 2. Chemical composition and properties of binding materials

Types	Items	Chemical composition(%)						Physical properties		
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig. loss	Specific gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
OPC		21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214
GGBFS		32.74	13.23	0.41	44.14	5.62	1.84	0.2	2.89	4,340
FA		55.66	27.76	7.04	2.70	1.14	0.49	4.3	2.19	3,621
SF		93.3	0.5	1.21	0.27	1.03	0.02	1.1	2.21	190.620

OPC : Ordinary Portland Cement

정을 위해서는, 배합영향인자를 함수로 하는 최적의 확산계 수 예측식이 필요로 하게 된다. 본 연구에서는 matlab을 이

용하여 다중회귀 분석을 수행하였는데, 영향인자로는 W/B (물-결합제비), 단위 시멘트량, 고로 슬래그 미분말, 플라이

애쉬, 실리카 폼, 잔골재량 및 굵은 골재량을 영향인자로 설정하였다. 물-결합재비는 가장 일반적으로 배합에 필요한 요소로서 내구성 뿐 아니라 강도에도 직접적인 영향을 미치고 있다. 단위 시멘트량이 증가할 경우, 수화물 형성이 많아지고 이는 조밀한 공극구조를 가진 콘크리트를 형성하게 된다 (Metha and Monteiro, 1993). 또한 혼화재료를 사용한 콘크리트 역시, 포졸란 반응을 통하여 추가적인 수화물을 형성하게 되므로, 공극구조의 개선을 가져오게 된다. 이러한 영향은 수분 및 염화물 이온의 주된 통로가 되는 모세관 공극 (capillary pore)의 감소와 수화물 증가를 통한 염화물 이온의 흡착을 증가시키므로 확산계수 감소에 매우 효과적이다(송하원 등, 2005).

### 3.2 Matlab을 이용한 최적함수의 도출 및 GA의 적용

최적화기법에서는 목적함수의 형태에 따라 여러개의 지역해를 가지게 된다. 이런 경우 지역해로 수렴하는 것을 피하기 위해 변수의 초기값을 적절하게 지정하는 것과 함께, 여러 각 변수가 가질 수 있는 범위를 충분히 넓게 설정하는 것이 필요하다. 그러나 비록 변수의 가능해 범위를 넓게 선정한다 할지라도 경사도를 이용하는 최적기법들은 초기값에 의해 지역해로 수렴할 가능성이 내재되어 있다. 따라서 전역해를 구할 수 있는 GA와 같은 기법이 선호된다. GA를 포함한 최적화문제에서는 변수의 가능해 범위를 최대한 넓게 산정함으로써 전역해의 탐색을 극대화할 수 있지만 변수의 물리적 의미가 유효한 범위내에서 해가 탐색되어야 한다. 따라서 최적화 문제에서 변수의 경계조건은 사용자의 경험을 이용하면서도 가능한 해의 영역에 대하여 전역해 탐색이 되도록 적절한 범위로 결정되는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 GA를 이용한 다중회귀 분석식을 도출하기 위해, Table 3과 같이 각 변수에 대한 가능해 범위를 지정하였다.

시멘트량과 혼화재료(슬래그, 플라이애쉬, 실리카폼)가 증가함에 따라 확산계수는 감소하므로, (-)를 가지도록 하였으며, 물-결합재비만 범위를 .50~50을 가지도록 하여 최적해를 추정할 수 있도록 하였다. 한편 잔골재 및 굵은 골재는 다른 배합인자들에 비해 상대적으로 낮은 영향을 가진다고 할 수 있으므로 .5~5의 범위를 가지도록 설정하였다.

본 논문에서는 최적 다중회귀식과 최적배합을 도출하기 위해 matlab의 GA Toolbox를 사용하였는데, 각 변수에 대한 가능해 범위는 충분한 범위에 대하여 전역해를 탐색할 수 있도록 Table 3과 같이 설정하였다. 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 우수개

체가 다음 세대로 전달되도록 지정하였으며, 교배함수로는 이산함수 그리고 돌연변이 함수로는 정규분포함수를 사용하였다. 한편 교배율은 0.8을 사용하였다.

식 (2)에서는 배합자료를 변수로 하는 최적함수의 도출 결과를 나타내고 있다. 확산계수 도출을 위한 최적함수의 변수에 혼화제(AE제, AE감수제 등)를 포함하는 것이 바람직하지만, 이는 목표 슬럼프(15 cm)와 목표 공기량(4.5%)에 대하여, 적절한 혼화제를 사용한다고 가정하여 고려하지 않았다.

$$D_{app}(m^2/sec) = [4622.882 - 43.512(W/B) - 4.569(C) - 6.044(Slag) - 4.641(FA) - 8.271(SF) - 0.992(S) + 0.262(G)] \times 10^{-14} \quad (2)$$

여기서,  $D_{app}$ 는 겉보기 확산계수,  $W/B$ 는 물-결합재비(%),  $C$ 는 단위 시멘트량( $kg/m^3$ ),  $Slag$ ,  $FA$ ,  $SF$ 는 각각 단위 고로 슬래그 미분말( $kg/m^3$ ), 플라이 애쉬( $kg/m^3$ ), 실리카 폼( $kg/m^3$ ),  $S$ 와  $G$ 는 단위 잔골재 및 굵은 골재량( $kg/m^3$ )을 나타내고 있다.

본 연구에서는 각각의 배합인자를 선형회귀분석으로 이용하였다. 겉보기 확산계수와 물-결합재비를 선형으로 회귀분석에 이용한 연구는 제시되어 있지만(Thomas and Bentz, 2002), 혼화제의 영향을 선형으로 가정하는 것에서는 많은 개선점을 가지고 있다. 기존의 연구(Lim *et al.*, 2004)에서는 고성능 콘크리트 강도에 대한 목적함수의 선정을 위해 각각의 배합인자를 선형으로 가정하였는데, 본 연구에서의 확산계수의 회귀 분석식 역시, 각각의 배합인자의 선형을 가정하여 다중회귀 분석을 수행하였으며, 이를 이용하여 GA를 적용하였다. 더 많은 배합자료를 습득한 후, 비선형 다중회귀분석을 통하여 합리적인 확산계수식을 도출하는 것이 바람직하다. 식 (2)을 통하여 도출된 오차의 평균은 전체 27개의 확산계수에 대하여, 18.7%로 이에 대한 변동계수는 16.0%으로 분석되었다. 동일한 배합을 가진 시편이라 하더라도, 확산계수는 큰 오차와 변동계수를 가지고 있으므로 (Kwon *et al.*, 2009; 橫關康祐 등, 1998), 16.0% 수준의 변동계수는 적절하다고 할 수 있으며, 일반적으로 0.2이상의 확산계수에 대한 변동계수를 내구성 파괴확률 해석에서 사용하고 있다(Stewrt and Mullard, 2007; Stewrt, 2004; Stewrt and Rosowsky, 2004; Sudret *et al.*, 2005). Fig. 3에서는 실험값과 식 (2)에서 평가된 값의 비교를 나타내고 있다.

내구수명을 위한 배합을 설정할 경우, 혼화재료를 미리 설정하는 것도 효과적인 배합기법이 될 수 있다. 고로 슬래그 미분말만을 사용했을 경우, 플라이 애쉬만을 사용했을 경우, 그리고 슬래그, 플라이애쉬, 실리카폼을 모두 사용했을 경우로 분류하여, 회귀 분석식을 도출하고 오차 및 변동계수를 분석하면 Table 4와 같이 나타낼 수 있다.

각각 도출된 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있는데, 특히 FA를 혼입한 경우에 회귀분석 결과가

Table 3. Variables for multi regression analysis for fitness function

Type	W/B (%)	C ( $kg/m^3$ )	GGBFS ( $kg/m^3$ )	FA ( $kg/m^3$ )	SF ( $kg/m^3$ )	S ( $kg/m^3$ )	G ( $kg/m^3$ )	Constant (-)
Max	100	0	0	0	0	5	5	2000
Min	-100	-100	-100	-100	-100	-5	-5	6000

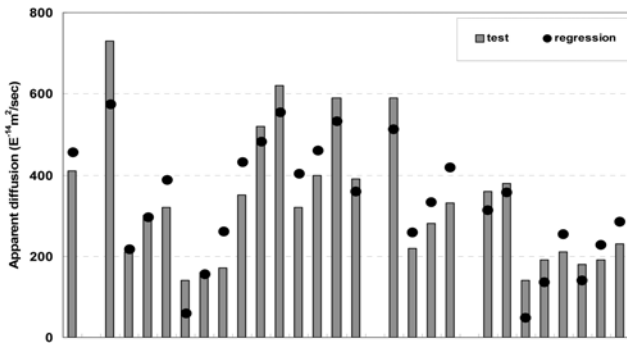


Fig. 3 Comparison with results from experiment and GA analysis

우수하게 평가되었다. Table 4의 추정식들은 사용된 혼화재 종류에 따라 분석한 것이지만, 본 연구에서는 식(2)를 기준으로 배합추정을 수행하도록 한다. 비선형 회귀분석을 통한

최적의 추정식 도출은 다양한 배합자료와 확산계수자료를 입수한 뒤 추후 연구될 예정이다.

### 3.3 실험에 따른 배합의 GA 적응성의 검증

본 절에서는 검증용으로 준비한 3가지 배합에 대하여, 검증 수행하도록 한다. Table 5에서는 실험에서 인용한 배합표와 GA를 통하여 도출된 배합과의 차이를 나타내고 있는데, 비교적 정확하게 배합을 설계할 수 있음을 알 수 있다.

Table 5에서 목표연화물 확산계수는 실험으로 도출된 값을 나타내고 있으며, 상한치 및 하한치의 경계조건을 대입하여 확산계수에 따른 배합을 도출하였다. 하나의 확산계수를 도출하는 최적함수식(식 2)을 만족하는 최적해는 무수히 많이 존재하므로, 최적해의 도출을 위한 경계값의 설정이 필요하다. 본 최적기법 프로그램에서는 상한치 및 하한치를 입력하

Table 4. Results of regression analysis for different mixture conditions

Regression analysis										
Type	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	x8	Average of error (%)	C.O.V of error (%)
GGBFS	-1530.356	-139.692	-141.302	0.000	0.000	28.011	-16.220	114479.155	19.9	18.2
FA	213.081	19.874	0.000	19.832	0.000	0.573	4.887	-21588.913	4.1	3.1
GGBFS+FA+SF	-50.171	-4.919	-6.562	-5.666	-12.172	1.776	-0.321	3514.843	19.4	9.2

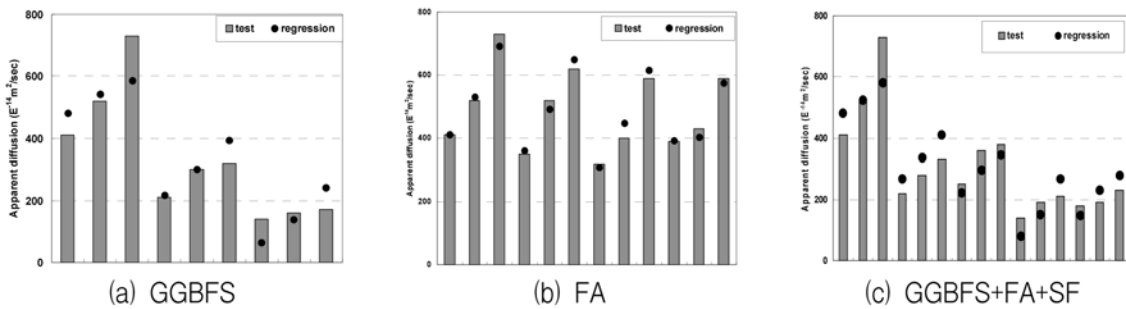


Fig. 4 Regression analysis with separate mineral admixture conditions

Table 5. Verification of proposed technique for mixture design using GA

	Results	W/C (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	Slag (kg/m <sup>3</sup> )	FA (kg/m <sup>3</sup> )	SF (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )
Case 1 target diffusion coefficient 5.2×10 <sup>-12</sup> (m <sup>2</sup> /sec)	GA (boundary range)	42.2	398.6	0.0	0.0	0.0	789.3	959.6
		35~45	390~410	0.0~0.0	0.0~0.0	0.0~0.0	750~850	950~1000
	test	42.0	400.0	0.0	0.0	0.0	787.0	976.0
	error (%)	0.5	0.35	-	-	-	0.3	1.7
Case 2 target diffusion coefficient 4.3×10 <sup>-12</sup> (m <sup>2</sup> /sec)	GA (boundary range)	43.0	253.9	0.0	134.7	0.0	766.2	969.5
		35~45	250~300	0.0~0.0	110~150	0.0~0.0	750~850	950~1000
	test	42.0	280	0.0	120.0	0.0	768	953.0
	error (%)	2.4	9.3	-	12.2	-	0.2	1.7
Case 3 target diffusion coefficient 2.5×10 <sup>-12</sup> (m <sup>2</sup> /sec)	GA (boundary range)	36.9	348.4	0.0	89.6	21.8	799.8	994.5
		35~45	330~380	0.0~0.0	80.0~100.0	10.0~35.0	750~850	950~1000
	test	37.0	340.0	0.0	91	23.0	749.0	929.0
	error (%)	0.3	2.5	-	4.5	5.2	6.7	7.0

도록 구성되었는데, Table 5에 같이 수록하였다. 상한치 및 하한치의 입력 범위는 축적된 데이터의 범위에 따라 결정하는 것이 바람직하다. 혼화재를 사용하지 않는 조건은 경계조건을 모두 0.0으로 두어, 의도적으로 혼화재 사용량을 0.0으로 설정하였다. case2의 경우, 단위 플라이 애쉬량에서 12.2%의 오차가 발생하였으나, 이를 제외하면 전체적으로 0.3~9.30% 수준의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 내구수명 확보를 통한 설계조건 및 배합 제한

본 절에서는 노출환경과 콘크리트 구조물 재원을 가정하여 배합을 제안하도록 하는데, 다음과 같은 과정을 거친다. 내구설계를 위해서는 적절한 안전율이 고려되어야 하지만 (JSCE, 2002; RILEM, 1994), 본 연구에서는 배합도출에 중점을 두도록 하여, 하중계수 및 감소계수는 모두 1.0으로 설정한다. 배합도출과정을 요약하면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

RC 구조물은 서로 다른 목표내구수명을 가지는 것으로 A 구조물은 100년을 B 구조물은 75년의 목표내구수명을 가정한다. 주로 이러한 내구수명 설정은 구조물의 공학적, 사회적 중요성에 고려하여 설정하는 것이 일반적이다. 한편 임계 염화물량은 콘크리트 시방서(한국콘크리트학회, 2004)를 기준으로 하여 1.2 kg/m<sup>3</sup>을 임계 염화물량으로 설정한다. 표면 염화물에 대해서는 A구조물은 시방서에서 제시한 비탈대 영역(13.0 kg/m<sup>3</sup>)을 적용하였으며, 연평균 온도 10°C, 상대습도 100%에 노출되어 있다고 가정하였다. B 구조물은 해안선 근처에 노출되어 있다고 가정하여, 9.0 kg/m<sup>3</sup>의 표면염화물량을 설정하였으며, 연평균 온도 25°C, 상대습도 85%를 가정하였다. 피복두께에 대하여, 두 구조물은 각각 10 cm 및 8 cm를 가진다고 가정하였다. A 구조물에는 고로 슬래그 미분말을 사용하는 것으로 가정하였으며, B 구조물은 혼화재가 없는 콘크리트를 사용한다고 가정하였다. 외부 노출환경에 따라 가정된 온도 및 습도의 영향을 확산계수에 고려해야 한다. 온도에 대해서는 식 (3a)를 고려하였으며(Thomas and Bentz, 2002), 습도에 대해서는 식(3b)를 고려하여 온도 및 습도 영향을 고려한 확산계수를 도출하도록 한다(Saetta et al., 1993).

$$F(T) = \exp\left[\left(\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \quad (3a)$$

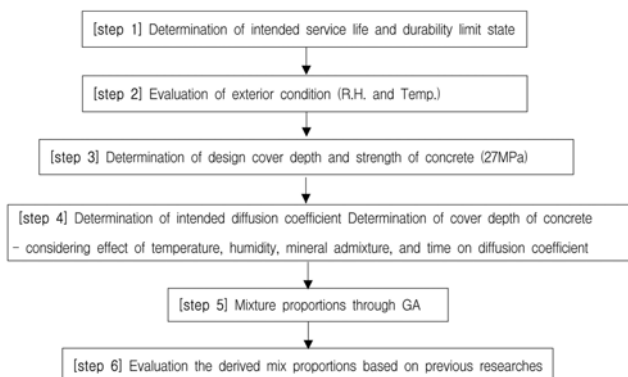


Fig. 5 Flowchart for optimum mix proportions through GA technique

$$F(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4}\right]^{-1} \quad (3b)$$

여기서,  $U$ 는 확산에 따른 활성화 에너지 (35000 J/mol),  $R$ 은 기체상수,  $T_{ref}$ 는 293K(20°C),  $h$ 는 상대습도(%),  $h_c$ 는 상대습도 임계값(0.75)을 나타내고 있다.

본 연구에서는 식 (4)과 같이 Fick's 2nd law에 근거한 염화물 이동의 확산을 고려한다. 주어진 시간동안 확산계수가 시간의 지수승으로 감소한다고 알려져 있으며, 시간에 따른 확산계수( $\bar{D}$ )의 변화는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다 (Thomas and Bentz, 2002).

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\bar{D}t}}\right)\right] \quad (4)$$

$$\bar{D} = D_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^m \quad (5)$$

여기서,  $t_0$  및  $D_0$ 은 기준시간(28일)에서의 재령 및 확산계수,  $\bar{D}$ 는 시간의존성이 고려된 확산계수를 나타내며,  $m$ 은 상수로서 혼화재의 치환율에 따라 변화한다.

존치시간이 주어지게 되면, 평균화된 확산계수를 도출할 수 있는데(Poulsen, 1993), 식 (6a)와 (6b)로 분류하여 나타낼 수 있다. 온도 및 습도 영향인자를 독립적이라 가정하여 고려하면,  $\bar{D}$ 는 식 (7a) 및 (7b)로 나타낼 수 있다.

$$\bar{D} = \frac{1}{t} \int_0^t D_0 \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^m d\tau = D_0 \frac{t_0^m}{t} \left[\frac{\tau^{1-m}}{1-m}\right]_0^t = \frac{D_0}{1-m} \left(\frac{t_0}{t}\right)^m \quad (t < t_R) \quad (6a)$$

$$\bar{D} = D_0 \left[1 + \frac{t_c}{t} \left(\frac{m}{1-m}\right)\right] \left(\frac{t_0}{t}\right)^m \quad (t \geq t_R) \quad (6b)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{t} \int_0^t D_0 F(T) F(h) \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^m d\tau = \frac{D_0}{1-m} F(T) F(h) \left(\frac{t_0}{t}\right)^m \quad (t < t_R) \quad (7a)$$

$$\bar{D} = D_0 F(T) F(h) \left[1 + \frac{t_c}{t} \left(\frac{m}{1-m}\right)\right] \left(\frac{t_0}{t}\right)^m \quad (t \geq t_R) \quad (7b)$$

여기서,  $t_R$ 은 일반적으로 시간의존성이 작아지는 시점인 30년으로 가정된다.

GA를 이용하여 배합을 도출할 경우, 혼화재의 치환율은 30%로 가정하였으며, 이 경우 시간의존성 지수( $m$ )은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다(Thomas and Bentz, 2002). 한편 혼화재를 치환하지 않은 경우에 대해서는  $m$ 값을 0.2로 사용한다.

$$m = 0.2 + 0.4(FA/50 + SG/70) \quad (8)$$

여기서  $FA$  및  $SG$ 는 플라이 애쉬 및 고로 슬래그 미분말의 치환율(%)을 나타낸다.

본 연구는 주어진 설계변수(피복두께, 시간, 시간지수 등)에 따라 목표내구수명 동안 유입된 염화물량이 임계염화물량(=1.2 kg/m<sup>3</sup>) 미만으로 유도할 수 있는 확산계수를 도출하는 것이다. 여기서 도출된 확산계수는 재령 28일에 해당하는 확산계수 이므로, 식 (5)를 이용하여 재령 6개월의 확산계수를 최종적으로 도출하도록 한다. 왜냐하면, 본 연구에서 GA를 적용한 시편의 배합이 6개월 존치된 시편의 경우를 기준으로 한 것이기 때문이다. 이상의 과정을 표로 정리하면 Table 6과 같이 정리할 수 있으며, 최종적으로 4가지 배합(M1~M4)을 도출하도록 설정하였다.

Table 6과 같이 4가지 배합도출을 위한 목표확산계수를 도

Table 6. Assumptions for durability design parameters

Structure	Type A		Type B	
Intended service life	100 years		75 years	
Critical chloride content	1.2 kg/m <sup>3</sup>		1.2 kg/m <sup>3</sup>	
Surface chloride content	13.0 kg/m <sup>3</sup>		9.0 kg/m <sup>3</sup>	
Exterior condition	Temp. : 10°C, R.H. : 100%		Temp. : 20°C, R.H. : 70%	
Mineral admixtures	Slag (30%)		N/A	
Cover depth	10.0 cm	8.0 cm	12.0 cm	9.0 cm
Target diffusion coefficient (28 days) ×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /sec	7.23	4.65	9.51	5.42
Target diffusion coefficient (6 months) ×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /sec	3.63	2.33	6.55	3.72
Mixture design	M1	M2	M3	M4

Table 7. Results of mixture proportions from GA

Type	W/B (%)	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Slag (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )
M1	42.1 (35~45)	261.1 (250~300)	113.4 (100~150)	781.2 (750~850)	997.4 (950~1000)
M2	43.6 (35~45)	276.9 (250~300)	117.9 (100~150)	784.3 (750~850)	982.2 (950~1000)
M3	40.8 (35~50)	378.5 (300~400)	-	773.1 (750~850)	999.7 (950~1000)
M4	39.7 (30~40)	433.8 (400~500)	-	758.3 (750~850)	967.5 (950~1000)

출하였으며, GA를 적용하여 도출된 배합 결과는 Table 7과 같이 나타낼 수 있다. Table 7에서는 각 배합 도출을 위하여 GA를 적용할 때, 입력한 상한치 및 하한치를 같이 기입하였다.

한편 고로 슬래그 미분말의 치환율을 30%로 만들기 위해

서는 먼저 GA를 적용하여, 물-결합재비와 시멘트량을 결정하였으며, 이에 따라 30%의 치환율이 만족할 때 까지, GA를 반복하여 수행하였다. M1 배합을 도출하는 과정에서, 반복에 따라 변화하는 배합조건과 최적함수의 값을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)의 상대오차 변화는 각 iteration에 따라 목표확산계수와 가정된 배합인자를 식 (2)에 입력하였을 때, 도출되는 확산계수와와의 차이를 나타내는 것이고, Fig. 6(d)는 최적함수가 0에 가까운 3.63×10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>/sec을 추적해가는 과정을 보여주고 있다.

본 연구에서는 목표확산계수와 내구성 설계조건(피복두께, 온도, 습도, 표면 및 임계 염화물량)에 따라 최적의 배합을 도출하도록 GA를 적용하였다. 그러나 하나의 확산계수 도출을 위하여 많은 지역해(local solution)가 존재한다. 현재의 수준에서는 기존자료와 경험을 바탕으로 GA를 적용하였으나, 배합에 대한 상한치 및 하한치의 정량적인 제안에 대하여 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 GA를 적용하기 위한 최적 함수 도출에서, 1.7~7.3×10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/sec의 범위

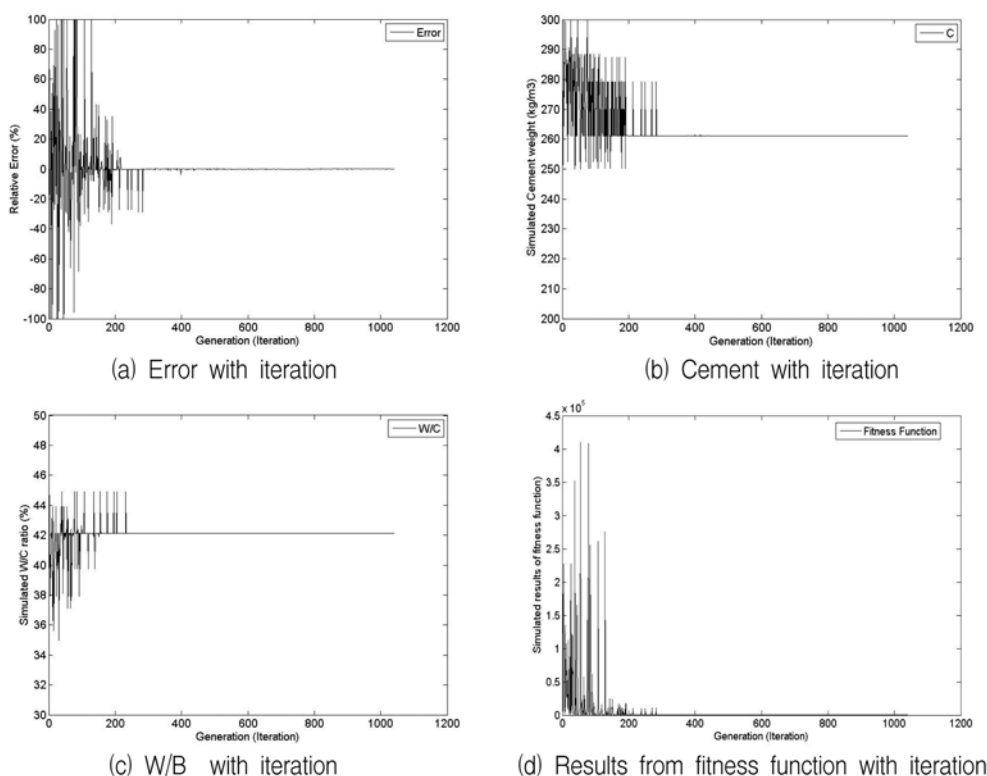


Fig. 6 Simulation results with iteration using genetic algorithm



를 가지고 있는 배합을 이용하였다. 광범위한 범위의 확산계수를 도출할 수 있는 배합조건과 혼화제의 분말도 및 다양한 치환율을 가지고 있는 배합자료가 구축된다면 제안된 기법은 더욱 합리적으로 사용될 수 있을 것이다. 한편 하나의 확산계수에 대하여, 여러 개의 배합조건이 나오게 되는데, 이 경우 경제성 분석에 따라 최적의 해를 선택하는 것도 좋은 최적화 방법이 될 것이다.

## 5. 결 론

염해에 노출된 콘크리트의 내구수명 확보를 위한 최적 배합 도출에 대한 연구-유전자 알고리즘의 적용을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 동일한 골재, 시멘트 종류 및 혼화제를 사용한 30개 배합 자료를 이용하여, 확산계수를 예측할 수 있는 최적함수식을 도출하였다. 함수식의 영향인자는 물-결합재비, 단위 시멘트량, 단위 잔골재 및 굵은 골재량이며, 도출된 식은 27가지의 실험값과 비교하여 평균 18.7%의 오차와 16.0%의 오차의 변동계수를 가지고 있었다. 한편 준비된 3가지 배합에 대하여, GA를 통하여 도출된 배합과의 비교를 수행한 결과, 오차범위는 0.3%~9.3%를 나타내었다. GA를 통하여 도출된 배합은 확산계수의 변화를 적절하게 반영하고 있음을 알 수 있다.
2. 다른 노출환경(온도 및 습도)과 내구설계변수(피복달개, 표면염화물량, 목표내구수명, 혼화재료)등을 고려하여, 목표 확산계수를 4가지 조건으로 도출하였으며, GA를 통하여 내구수명을 만족시킬 수 있는 배합을 제시하였다. 본 연구는 확산계수의 변화를 좀 더 명확하게 반영할 수 있는 배합자료가 축적된다면, 고내구성 콘크리트의 배합에 대한 기본적인 자료로 사용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

연구는 한국건설재시험연구원에서 주관하는 “건설생산성 향상을 위한 건설자재 표준화 연구”(과제번호 : 06기반구축 A02)의 일환으로 국토해양부 R&D정책 인프라사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

권성준, 박상순(2008) 실태조사를 통한 항만 콘크리트 구조물의 균열부 확산계수 추정에 대한 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권 제5A호, pp. 745-751.

김승억, 마상수(2003) 유전자 알고리즘을 이용한 비선형 비탄성 최적설계, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권 제5A호, pp. 841-850.

삼성건설(2003) **고내구성 콘크리트 염소이온 확산특성 평가**, 연구보고서, 삼성건설 기술연구소

송하원, 권성준, 변근주, 박찬규(2005) 혼화제를 사용한 고성능 콘크리트의 배합특성을 고려한 염화물 확산 해석기법에 관한 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권 제1A호, pp. 213-223.

윤영목, 김병현(2004) 2차 비탄성 해석과 유전자 알고리즘을 이용한 평면 강골조 구조물의 최적설계, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권 제1A호, pp. 87-100.

임철현, 윤영수, 이승훈, 손유신(2002) 고성능 콘크리트 배합에서의 유전자 알고리즘의 적용, **한국콘크리트학회 봄 학술발표회**, 한국콘크리트학회, Vol. 1, pp. 551-556.

한국콘크리트학회(2004) **콘크리트 표준시방서 내구성편**. 건설교통부

橫關康祐, 岡田浩司, 堤知明, 渡邊賢三 (1998), ひび割れを有するえ鐵筋コンクリートの鹽化物浸透挙動と壽命豫測に關する檢討, **コンクリート構造物のリハビリテーションに關するシンポジウム論文集**, 10, pp. 1-6.

ASTM C 1202 (1997) *Annual Book of ASTM Standards*, v.04.02.

Broomfield, J.P. (1997) *Corrosion of Steel in Concrete : Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1997.

Cantu'-Paz, E. and Goldberg, D.E. (2000) Efficient parallel genetic algorithms: theory and practice, *Computer Methods Applied Mechanics Engineering*, Vol. 186, pp. 221-238.

Goldberg, D.E. (1989) *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Reading, MA.

JSCE-Concrete committee (2002) *Standard Specification for Concrete Structures*.

Kwon, S.-J., Na, U.J., Park, S.S., and Jung, S.H. (2009) Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack : probabilistic approach for chloride diffusion, *Structural Safety*, Vol. 31, No. 1, pp. 75-83.

Lim, C.-H., Yoon, Y.-S., and Kim, J.-H. (2004) Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 409-420.

Mathworks (2007) *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox 2, User's Guide*, The Mathworks, Inc.

Metha, K. and Monteiro, P.J.M. (1993) *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Vol. 2, Prentice Hall, New Jersey.

Poulsen, E. (1993) On a model of chloride ingress into concrete, Nordic Miniseminar-Chloride Transport, Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Gothenburg: pp. 1-12.

RILEM (1994) Durability design of concrete structures. Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN.

Saetta, A.V., Scotta, R.V. and Vitaliani, R.V. (1993) Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 90, pp. 441-451.

Song, H.-W. and Kwon, S.-J. (2009) Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure, *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, pp. 812-824.

Song, H.-W., Back, S.-W., Lee, C.-H., and Kwon, S.-J. (2006) Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration, *J. of Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 12, No. 4, pp. 265-284.

Stewart, M.G. and Mullard, J.A. (2007) Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures, *Engineering Structures*, Vol. 29, pp. 1457-1464.

Stewart, M.G. (2004) Spatial variability of pitting corrosion and its influence on structural fragility and reliability of RC beams in flexure, *Structural Safety*, Vol. 26, pp. 453-470.

Stewart, M.G. and Rosowsky, D.V. (2004) Time-dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridge decks, *Structural Safety*, Vol. 20, pp. 91-109.

Sudret, B., Defaux, G., and Pendola, M. (2005) Time-variant finite element reliability analysis - application to the durability of cooling towers, *Structural Safety*, Vol. 27, pp. 93-112.

Tang, L. (1996) Electrically accelerated methods for determining chloride diffusivity in concrete-current development, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, No. 176, pp. 173-179.

Tang, L. and Joost, G. (2007) On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, pp. 589-595.

Tang, L. and Nilsson, L.O. (1993) Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC paste and mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 347-353.

Thomas M.D.A. and Bamforth P.B. (1999) Modeling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 487-95.

Thomas, M.D.A. and Bentz, E.C. (2002) *Computer program for*

*predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides*-Life365 Manual, SFA.

Yeh, I-C. (2007) Computer-aided design for optimum concrete mixtures, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 193-202.

(접수일: 2009.9.22/심사일: 2009.11.6/심사완료일: 2010.7.10)