

역복사 해석을 위한 혼합형 유전 알고리즘에 관한 연구

김기완* · 백승욱† · 김만영** · 유홍선***

(2003년 3월 5일 접수, 2003년 9월 3일 심사완료)

A Study on a Hybrid Genetic Algorithm for the Analysis of Inverse Radiation

Ki Wan Kim, Seung Wook Baek, Man Young Kim and Hong Sun Ryou

Key Words: Inverse Radiation Analysis(역복사 해석), Hybrid Genetic Algorithm(혼합형 유전 알고리즘), Parameter Estimation(파라미터 추정), Irregular Geometry(비직교 형상), Wall Emissivities(벽면 방사율), Finite-Volume Method(유한 체적법)

Abstract

An inverse radiation analysis is presented for the estimation of the boundary emissivities for an absorbing, emitting, and scattering media with diffusely emitting and reflecting opaque boundaries. The finite-volume method is employed to solve the radiative transfer equation for a two-dimensional irregular geometry. A hybrid genetic algorithm is proposed for improving the efficiency of the genetic algorithm and reducing the effects of genetic parameters on the performance of the genetic algorithm. After verifying the performance of the proposed hybrid genetic algorithm, it is applied to inverse radiation analysis in estimating the wall emissivities in a two-dimensional irregular medium when the measured temperatures are given at only four data positions. The effect of measurement errors on the estimation accuracy is examined.

기호설명

$D_{\sigma_i}^{mn}$: 방향가중치, 식 (6b)

\vec{n}_i : i -검사면의 단위수직벡터, 식 (6d)

I : 복사강도, $W/(m^2 \cdot sr)$

S_R^{mn} : 복사전달방정식의 생성항, 식 (6e)

T : 온도, K

그리스문자

ϵ_w : 벽면 방사율

x_a : 흡수계수, m^{-1}

σ_s : 산란계수, m^{-1}

$\phi^{m'n' \rightarrow mn}$: 산란위상함수, sr^{-1} , 식 (4)

Ω^{mn} : 입체각, sr

ΔA_i : i -검사면의 검사면적

ΔV : 검사체적

Ψ : $m'n'$ 과 mn 의 산란각도

θ, ϕ : 극각 및 방위각, rad

σ : Stefan-Boltzmann 상수

p_c : 교배 확률

p_m : 돌연변이 확률

σ_{st} : 표준 편차

하첨자

E, W, N, S, T, B : 검사체적 P 주위의 격자점

e, w, n, s, t, b : 검사체적 P 의 검사면

* 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

† 책임저자, 회원, KAIST 항공우주공학전공

E-mail : swbaek@sorak.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3714 FAX : (042)869-3710

** 회원, 현대자동차 승용디젤엔진시험팀

*** 회원, 중앙대학교 기계공학과

1. 서론

주어진 경계조건이나 초기조건들을 가지고 내부 온도분포를 구하는 직접적 접근 방법의 경우 설계자가 자신이 원하는 결과를 제공하는 시스템을 설계하기 위하여 임의의 조건들을 가지고 반복 계산한 후, 그 결과들 중에 최선의 조건을 선택하게 된다. 반면, 역열전달 해석에서는 특정한 온도분포를 제공하는 열전달 물성치나 초기 조건 및 경계 조건들을 구하게 된다. 역접근적 방법을 이용하면 설계자가 원하는 결과를 제공하는 최적의 설계조건을 반복 계산 없이 찾을 수 있기 때문에 효율적일 뿐 아니라 반복계산에 대한 시간과 수고를 절약할 수 있다는 장점이 있다.⁽¹⁾

특히, 역복사 해석에 관한 최근의 연구 동향은 다음과 같이 크게 두가지로 나눌 수 있다.⁽²⁾ 첫째는, 내부의 온도나 경계에서의 복사강도(intensity)를 몇 개의 점에서 측정하고 이 측정값을 통해 흡수 및 산란 계수, 방사율 등과 같은 복사열전달 물성치를 추정(estimation)하는 것이다. 측정값에 오차가 있을 경우, 오차의 크기나 광학거리 등의 조건들이 물성치 추정의 정확도에 미치는 영향에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되어 왔다.^(3~6) 물성치 추정에 관한 역복사 해석은 실험측정값과 계산결과와의 오차를 최소화하는 최적화의 형태로 구현될 수 있다. 즉, 우리가 알고자 하는 열전달 물성치를 설계변수로 하고, 측정값들과 계산결과와의 오차들의 합을 적합도 함수로 정의한 후, 이 적합도 함수 값을 최소로 하는 설계변수를 찾는다면 그때의 값이 우리가 알고자 하는 물성치에 근접한 값이 되는 것이다.

둘째는, 설계자가 원하는 온도 분포나 열유속 분포를 얻기 위한 경계조건을 찾거나 형상에 대한 최적 설계를 하는 것으로서 이에 대한 연구가 새롭게 주목을 받고 있다.⁽⁷⁾

최적화에 쓰이는 알고리즘으로는 켈레구배법(the conjugate gradient method)(3,6)이나 최소자승법(the least square method)(5)과 같은 구배(gradient) 정보를 이용하는 방법들이 많이 이용되고 있다. 이 방법들은 구배 정보를 이용하기 때문에 목적함수의 형태에 많은 영향을 받는다. 한편, 다윈의 자연선택설을 기초로 하고 있는 유전 알고리즘은 구배 정보를 사용하지 않기 때문에 목적함수의 형태에 관계없이 다양한 파라미터 추정에 사용되어 좋은 성능을 보여주고 있고(7~10) 역복사 해석에도 적용되어 가능성을 보여주었다.(3) 혼합형 유전 알고리즘은 유전 알고리즘이 안고 있는 단점들, 즉, 최적점 근처에서의 미세조정(fine local tuning) 능력이 부족한 것과 유전 알고리즘의 성능이 교배확률, 돌연변이확률, 그리고 해집단의 크기 등과 같은 유전 파라미터에 많은 영향을 받는 것을 해결하기 위하여 기존의 유전 알고리즘에 지역 최적화 알고리즘을 추가한 형태를 말한다.(9,11)

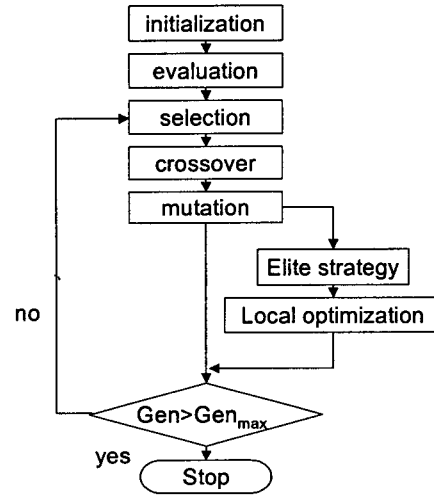


Fig. 1 The flowchart of the proposed hybrid genetic algorithm (HGA)

본 논문에서는 계산 시간 단축을 위하여 해집단(population)의 수를 10으로 하고, 한 세대에서 품질이 가장 좋은 해 하나에게만 지역 최적화 알고리즘을 적용하며, 지역 최적화 알고리즘의 공간 탐색 범위를 세대수의 증가에 따라 조절하는 형태의 혼합형 유전 알고리즘을 제안한다. 제안된 혼합형 유전 알고리즘의 성능을 검증한 후에, 이를 2차원 비직교 형상에서 4개의 온도 관측값으로 벽면 방사율을 구하는 역복사 해석에 적용하여, 측정 오차가 추정치의 정확도에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 이론 해석

2.1 혼합형 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 공간 탐색 능력이 뛰어나지만 최적점 근처에서 최적점까지 도달하는데 많은 시간이 소요된다. 이는 유전 연산들이 확률적으로 일어나기 때문에 최적점 근처에서의 미세 조정 능력이 떨어지기 때문이다. 이를 보완하기 위해 다양한 방법들(즉, 혼합형 유전 알고리즘, 병렬 유전 알고리즘, 공진화, 에코 모델 등)이 연구되고 있는데, 이 중 혼합형 유전 알고리즘은 유전연산을 거친 해집단들에 지역 최적화 알고리즘을 적용하는 방식이다. 이러한 혼합형 유전 알고리즘은 유전 알고리즘의 미세 조정 능력을 향상시키고 수렴 시간을 단축시키며 유전파라미터에 대한 영향을 줄이는 장점이 있지만, 미세 조정에 이용되는 지역 최적화 알고리즘의 공간 탐색 범위에 큰 영향을 받으며 각 해들에 대한 적합도 계산

(fitness evaluation)이 첨부되기 때문에 유전 알고리즘의 다른 구성 요소들에 비해 계산시간이 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다.⁽¹²⁾

혼합형 유전 알고리즘의 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 형태의 혼합형 유전 알고리즘을 제안한다. 즉, 해집단의 수를 10으로 하고 엘리트(elite strategy) 전략을 통하여 한 세대에서 품질이 가장 좋은 해에게만 지역 최적화 알고리즘을 적용하고, 지역 최적화 알고리즘의 공간 탐색 범위를 세대수의 증가에 따라 조절하는 것이다. Fig. 1은 본 연구에서 적용한 알고리즘을 나타내고 있다. 여기에서, 탐색체의 표현은 실수형을 고려하였으며, 선택(selection)은 품질 비례 선택 방법 중에서 해들의 다양성 확보를 위해 제안된 확률 보편 샘플링(stochastic universal sampling)을 사용하였고, 교차(crossover)는 BLX- α 산술적 교차($\alpha=0.5$)를 사용하였으며, 돌연변이(mutation)는 시간이 지남에 따라 교란의 정도를 감소시키는 비균등 돌연변이(non-uniform mutation)를 적용 하였는데, 이 연산이 미세 조정과 유사한 작업을 하게 된다. 이러한 유전연산이 끝나면 엘리트 전략으로 그 세대에서 가장 품질이 좋은 해를 따로 보관하고, 이 해에게만 지역 최적화 알고리즘을 적용한다. 지역 최적화 알고리즘은 비균등 돌연변이에서 사용한 아래의 식 (1)과 식 (2)를 가지고 각각의 세대에서 이동 폭을 구하고, 이동 폭만큼 각각의 유전자들을 이동시켜 적합도를 구한 뒤 엘리트 값보다 좋은 값이면 이 유전자들로 엘리트를 대체하는 방식이다.

$$v_k = \begin{cases} v_k + \Delta(t, UB - v_k) \\ v_k + \Delta(t, LB - v_k) \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta(t, y) = y(1 - r^a), \quad a = \left(1 - \frac{t}{T}\right)^b \quad (2)$$

여기에서, t 는 세대수, T 는 총세대수, r 은 난수(random number), y 는 이동폭, UB 와 LB 는 유전자 v 의 상한값과 하한값, 그리고 b 는 사용자 정의 상수로서 본 연구에서는 1을 사용하였다.

2.2 유한체적법

임의의 위치(\vec{r})에서 경로(\vec{s})를 따라 흡수, 방사 및 산란하는 매질의 복사강도는 아래의 식 (3)과 같은 복사 전달 방정식을 따른다. 즉,

$$\frac{1}{\beta_0} \frac{dK(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + I(\vec{r}, \vec{s}) = (1 - \omega_0)I_b(\vec{r}) + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s}) d\Omega \quad (3)$$

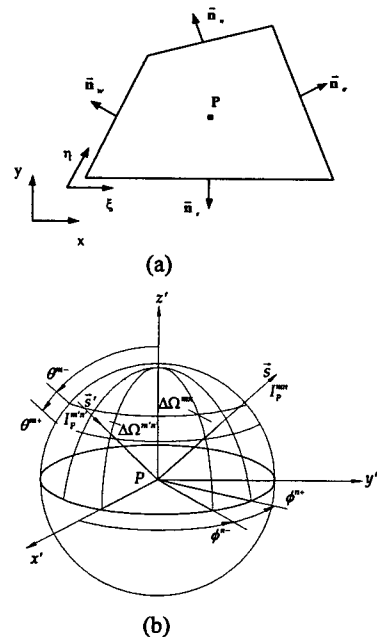


Fig. 2 Schematics of (a) control volume and (b) control angle

여기에서, $\beta_0 = x_a + \sigma_s$ 는 소멸계수, $\omega_0 = \sigma_s / \beta_0$ 는 산란알베도, $\Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s})$ 는 입사방향 \vec{s}' 에서 산란방향 \vec{s} 로 향하는 복사강도에 대한 산란위상함수로서 본 연구에서는 다음과 같이 Legendre 다항식 근사를 사용한다.

$$\Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s}) = \Phi(\cos \psi) = \sum_{j=0}^J C_j P_j(\cos \psi) \quad (4)$$

여기에서 ψ 는 산란각, C_j 는 팽창계수, J 는 산란함수의 차수를 나타낸다. 한편, 확산적으로 방사 및 반사하는 벽면을 떠나는 복사강도는 다음의 식처럼 방사 및 반사된 복사 강도의 합으로 표현된다. 즉,

$$I(r_w, s) = \epsilon_w I_b(r_w) + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \int_{s' \cdot n_w} I(r_w, s') |s' \cdot n_w| d\Omega \quad (5)$$

차분식을 얻기 위하여 식 (3)을 Fig. 2에 도시된 검사체적과 검사각도에 대하여 적분하고 검사체적과 검사각도 내에서 복사강도의 크기가 일정하다는 가정을 하면 다음과 같은 유한체적식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=\epsilon, \omega, n, s} I_i^{mn} \Delta A_i D_{ci}^{mn} = \beta_0 (-I^{mn} + S_R^{mn})_p \Delta V \Delta \Omega^{mn} \quad (6a)$$

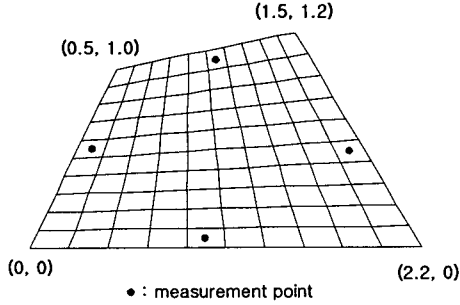


Fig. 3 Schematics of the physical system and the position of four measurement points

여기에서,

$$D_{\alpha}^{mn} = \int_{\phi^{*-}}^{\phi^{*+}} \int_{\theta^{*-}}^{\theta^{*+}} (\vec{s} \cdot \vec{n}_i) \sin \theta d\theta d\phi \quad (6b)$$

$$\vec{s} = \sin \theta \cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \sin \theta \vec{e}_y \quad (6c)$$

$$\vec{n}_i = n_{x,i} \vec{e}_x + n_{y,i} \vec{e}_y \quad (6d)$$

$$S_R^{mn} = (1 - \omega_0) I_b + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I^{m'n'} \Phi_{m'n' \rightarrow mn} d\Omega \quad (6e)$$

$$\Delta\Omega^m = \int_{\phi^{*-}}^{\phi^{*+}} \int_{\theta^{*-}}^{\theta^{*+}} \sin \theta d\theta d\phi \quad (6f)$$

한편, 격자점의 복사강도로부터 검사면에 있는 복사강도를 표현하기 위해서는 보간법이 필요하다. 본 연구에서는 가장 간단하면서도 물리적으로 타당한 양의 복사강도(positive intensity)를 가지도록 하는 계단차분법(step scheme)을 사용하였고, 최종 유한체적식을 다음과 같이 얻을 수 있다.⁽¹³⁾

$$a_P^{mn} I_P^{mn} = \sum_{I=\theta, \psi, N, S} a_I^{mn} I_I^{mn} + b_P^{mn} \quad (7a)$$

$$a_I^{mn} = -\Delta A_i D_{\alpha, in}^{mn} \quad (7b)$$

$$a_P^{mn} = \sum_{i=\theta, \psi, N, S} \Delta A_i D_{\alpha, out}^{mn} + \beta_{0,P} \Delta V \Delta\Omega^{mn} \quad (7c)$$

$$b_P^{mn} = (\beta_0 S_R^{mn})_P \Delta V \Delta\Omega^{mn} \quad (7d)$$

여기에서,

$$D_{\alpha, out}^{mn} = \int_{\Delta\Omega^m} (\vec{s} \cdot \vec{n}_i) d\Omega \text{ for } \vec{s} \cdot \vec{n}_i > 0 \quad (7e)$$

$$D_{\alpha, in}^{mn} = \int_{\Delta\Omega^m} (\vec{s} \cdot \vec{n}_i) d\Omega \text{ for } \vec{s} \cdot \vec{n}_i < 0 \quad (7f)$$

경계조건인 식 (5), 즉, 확산적으로 방사 및 반사하는 벽면을 떠나는 복사강도는 다음의 식처럼 차분된다.

$$I_w^{mn} = \epsilon_w I_{bw} + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \sum_{\vec{s} \cdot \vec{n}_w < 0} I_w^{m'n'} |D_{cw, in}^{m'n'}| \quad (8a)$$

여기에서 D_{cw}^{mn} 은 벽면에서의 방향가중치로서 복사강도가 벽면에서 내부 매질로 떠날 때 양의 값이 된다.

$$D_{cw, in}^{mn} = \int_{\Delta\Omega^m} (\vec{s} \cdot \vec{n}_w) d\Omega \text{ for } \vec{s} \cdot \vec{n}_w < 0 \quad (8b)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 역복사 해석 절차

본 연구에서 제안한 혼합형 유전 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 3과 같이 흡수, 방출 및 산란 하는 '회체' 가스로 채워진 2차원 비직교 형상에 대한 역복사 해석을 수행하였다. 먼저, 온도 측정값을 얻기 위해 직접적 접근 방법으로 다음과 같이 주어진 경계조건에서 내부 온도를 구하였다. 벽의 온도와 벽면 방사율은 각각 $T_w = 1,000\text{K}$ 와 $\epsilon_w = 0.7$ 이고, 내부에 있는 흡수, 방출 및 산란 하는 매질의 흡수계수와 산란계수는 각각 $\alpha_a = 0.5 \text{ m}^{-1}$ 와 $\sigma_s = 0.5 \text{ m}^{-1}$ 이며, 단위체적 당 생성에너지는 $S_{nr} = 5 \text{ kW/m}^3$ 이다. 본 예제에서는 $(N_x \times N_y) = (10 \times 10)$ 의 공간 격자계와 $(N_\theta \times N_\phi) = (4 \times 20)$ 의 각도 격자계를 사용하였고, 온도분포를 구하기 위하여 다음의 에너지 방정식을 사용하였다.⁽¹³⁾

$$\nabla \cdot \vec{q}^R = S_{nr} = \beta_0 (1 - \omega_0) \left(4\pi I_b - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I^{mn} \Delta\Omega^{mn} \right) \quad (9)$$

위의 절차를 통해 구해진 온도 분포 중에서 Fig. 3에 도시되어 있는 4개의 측정점에서의 온도값을 측정값으로 정하고, 벽면 방사율을 제외한 다른 물리량과 경계조건을 알고 있다고 가정한 상황에서 다음과 같은 적합도 함수를 정의하고 그 적합도를 혼합형 유전 알고리즘을 통해 최소화함으로써 벽면 방사율을 추정하게 된다.

$$f = \sum_{i=1}^4 (T_{i, measured} - T_{i, estimated})^2 \quad (10)$$

여기서, $T_{i, measured}$ 와 $T_{i, estimated}$ 는 각각 측정 온도값과 계산 온도값을 나타낸다.

3.2 혼합형 유전 알고리즘 성능 검증

제안된 혼합형 유전 알고리즘을 2차원 비직교 형상에서의 벽면 방사율 추정에 적용하여 그 성능을 검증하였다. 검증 내용으로는 지역 최적화 알고리즘이 최적점 근처에서의 미세 조정 능력을 향상시키고, 유전 알고리즘의 성능에 대한 교배 확률, 돌연변이 확률, 그리고 해집단의 크기 등과 같은 유전 파라미터들의 영향을 줄여 주는지를 살펴보았다. 유전 파라미터에 대한 영향은 다른 파라미터들의 값을 고정한 채로 하나의 파라미터들을 변화시켜가며 수행하였다.

Fig. 4는 지역 최적화 알고리즘(LOA, local

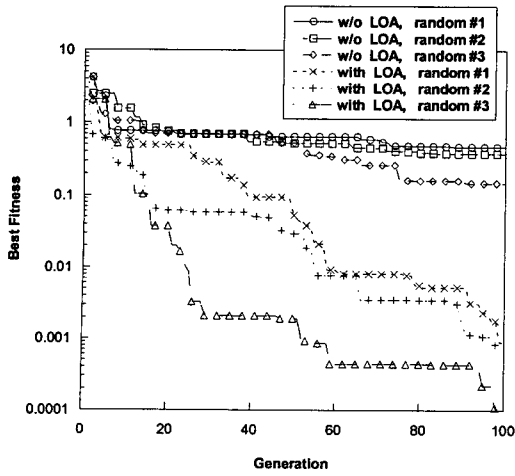


Fig. 4 Comparison of best fitness between GA without and with LOA for different random seeds

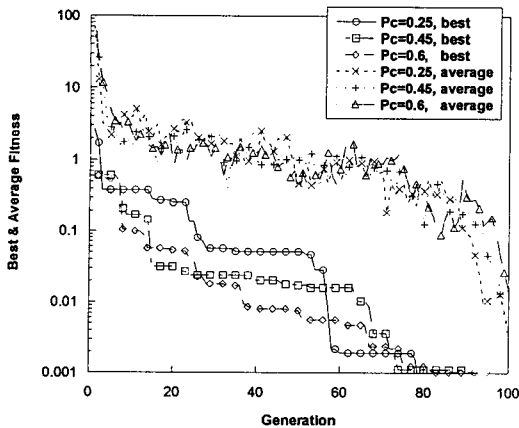


Fig. 5 Best & average fitness histories for various probabilities of crossover

optimization algorithm)을 포함했을 때와 포함하지 않았을 때의 유전 알고리즘의 성능을 보여준다. 여기에서 3개의 서로 다른 초기값, 즉, 다른 난수 종자(random seed)를 가지고 독립적으로 수행하였는데, 지역 최적화 알고리즘을 포함한 유전 알고리즘이 전반적으로 더 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 지역 최적화 알고리즘이 최적점 근처에서 미세 조정 능력을 향상시킬 수 있다. 하지만, 지역 최적화 알고리즘이 난수 종자에 종속적이기 때문에 지역 최적화 알고리즘을 포함한 유전 알고리즘의 성능이 난수 종자에 더 종속적임을 알 수 있다.

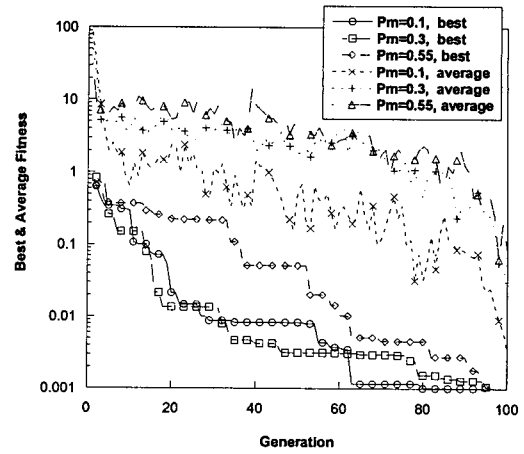


Fig. 6 Best & average fitness histories for various probabilities of mutation

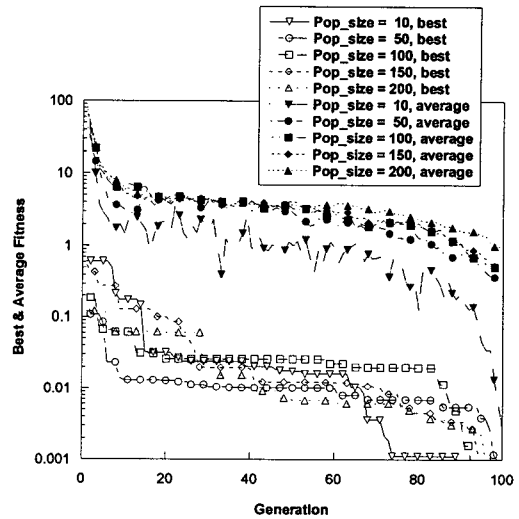


Fig. 7 Best & average fitness histories for different population sizes

이러한 영향을 줄이기 위해서는 여러 난수 종자들로 여러번 독립적으로 실행하고 그 값들의 평균값을 사용해야 할 것이다.

한편, 교배확률이 개발된 혼합형 유전 알고리즘의 성능에 미치는 영향을 다음과 같이 살펴 보았다. 여러 교배확률에서 해집단들의 평균 적합도(average fitness)와 엘리트 해의 최고 적합도(best fitness)를 구한 뒤 그 값들을 비교하여 보았다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 여러 교배확률에서 평균 적합도는 거의 동일하지만, 최고 적합도는 세대수 80까지 차이를 보임을 알 수 있는데,

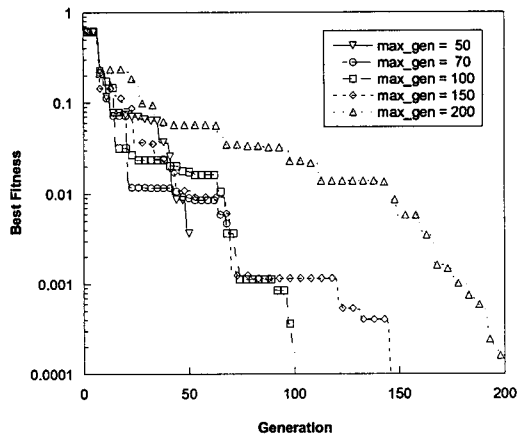


Fig. 8 Best fitness histories for various maximum generation numbers

이는 지역 최적화 알고리즘이 하나의 엘리트해에
 게만 적용되기 때문이다. 하지만, 세대수가 100에
 가까워질수록 지역 최적화 알고리즘의 미세 조정
 의 영향으로 같은 값으로 수렴해 감을 알 수 있
 다. 이를 통해 혼합형 유전 알고리즘이 교배확률
 의 영향을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

같은 방법으로 돌연변이 확률이 혼합형 유전
 알고리즘에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 6은
 세대수 증가에 따른 서로 다른 돌연변이 확률에
 서의 해집단의 평균 적합도와 최고 적합도의
 변화를 보여주고 있다. 평균 적합도를 비교해 보
 면 돌연변이 확률이 작을수록 더 좋은 성능을 보
 임을 알 수 있다. 하지만, 지역 최적화 알고리즘
 의 영향으로 최고 적합도는 같은 값으로 수렴해
 감을 알 수 있고, 이를 통해 혼합형 유전 알고리
 즘이 돌연변이 확률의 영향을 줄여줌을 알 수 있
 다.

일반적으로 유전 알고리즘은 해집단의 크기가
 커질수록 해들의 다양성이 유지되기 때문에 크기
 에 비례하여 성능이 좋아지지만, 계산 시간 또한
 비례하여 증가한다. Fig. 7은 해집단의 크기가 혼
 합형 유전 알고리즘에 미치는 영향을 보여주고
 있다. 해집단들의 평균 적합도를 비교해 보면 해
 집단의 크기가 작을수록 더 좋은 성능을 보이고
 있음을 알 수 있는데, 이는 해집단의 크기가 작
 을수록 엘리트 해의 영향을 크게 받기 때문이다.
 특히, 해집단의 크기가 10일 경우 그 영향이 가
 장 커서 변동(fluctuation)이 심함을 알 수 있다.하
 지만, 최고 적합도의 변화를 보면 해집단의 크기
 가 10일 때 가장 좋은 성능을 보임을 알 수 있

고, 이를 통해 혼합형 유전 알고리즘이 해집단의
 크기에 대한 영향을 줄여줌을 알 수 있다. 본 결
 과와 계산 시간을 고려하여 역복사 해석을 위한
 해집단의 크기를 10으로 정하였다.

앞에서 살펴본 여러 가지 유전 파라미터들과
 더불어 최대 세대수(maximum generation number)
 가 혼합형 유전 알고리즘에 미치는 영향을 고찰
 하였다. 식 (2)와 같이 지역 최적화 알고리즘에서
 엘리트 해의 유전자들의 이동 폭이 최대 세대수
 와 현재 세대수와의 비(ratio)의 범위 안에서 무작
 위(random)로 정해지기 때문에, 최대 세대수가 미
 리 정해져야 한다. 최대 세대수 또한 계산 시간
 과 비례하기 때문에 적절한 최대 세대수를 결정
 하는 것이 중요하다. Fig. 8은 여러 최대 세대수
 에서 세대수 증가에 따른 최고 적합도의 변화를
 보여주고 있는데, 100 이상에서 좋은 성능을 보
 여줌을 알 수 있다. 따라서 계산 시간을 고려하
 여 역복사 해석을 위한 최대 세대수를 100으로
 선정하였다.

3.3 벽면 방사를 추정

앞에서 검증한 혼합형 유전 알고리즘을 가지고
 2차원 비직교 좌표계에서 4개의 온도 관측값을
 가지고 벽면 방사율들을 추정하는 역복사 해석에
 적용하였다. 지역 최적화 알고리즘이 난수 종자
 에 종속적이기 때문에 다른 난수 종자를 가지고
 5번 독립 수행하고 그 값들의 평균값을 추정값으
 로 하였다.

측정값들에 오차가 없다고 가정할 때의 추정값
 을 Table 1에 나타내었는데, 4개의 벽면 방사율을
 0.2%의 상대오차 범위 안에서 정확히 추정함을
 알 수 있다. 한편, 측정값의 오차가 있을 경우 측
 정값의 오차가 벽면 방사율 추정에 미치는 영향
 을 알아보기 위해 다음의 식을 이용하여 오차가
 있는 측정값을 모사(simulation)하였다.^(3,4)

$$T_{i, measured} = T_{i, exact} + \sigma_{st} \zeta \quad (11)$$

여기에서, σ_{st} 는 측정값의 표준편차이고, ζ 는 표준정
 규분포를 따르는 확률변수이다. 그러므로, ζ 가
 -2.576과 2.576 사이에 있을 확률은 99%이다.⁽¹⁴⁾
 측정값의 오차에 따른 벽면 방사율 추정의 결과
 를 역시 다른 난수 종자를 가지고 5번 독립 수행
 하고 그 평균값을 추정값으로 하였다. Table 2에
 그 결과를 나타내었는데, 측정값의 표준편차가
 0.1일 때까지는 약 4%의 상대오차 범위안에서 비
 교적 정확히 추정하지만, 측정값의 표준편차가

Table 1 Estimated emissivities & relative errors

	Range	True Value	Estimated Emissivities	Relative Errors (%)
ϵ_1	0-1	0.7	0.7003	0.04
ϵ_2	0-1	0.7	0.7015	0.21
ϵ_3	0-1	0.7	0.6991	0.13
ϵ_4	0-1	0.7	0.7001	0.01

Table 2 Estimated emissivities & relative errors for different standard deviations

	True Value	$\sigma_{st}=0.05$		$\sigma_{st}=0.1$		$\sigma_{st}=0.5$	
		Value	Rel. Errors (%)	Value	Rel. Errors (%)	Value	Rel. Errors (%)
ϵ_1	0.7	0.684	2.25	0.671	4.13	0.571	18.31
ϵ_2	0.7	0.687	1.76	0.675	3.54	0.590	15.65
ϵ_3	0.7	0.690	1.31	0.681	2.70	0.617	11.76
ϵ_4	0.7	0.690	1.31	0.680	2.75	0.607	13.20

0.5가 될 때는 상대오차가 약 18%에 달하였다. 따라서 정확한 추정값을 얻기 위해서는 오차가 적은 측정값을 사용해야겠지만, 추정값의 오차가 상대오차이고, 4개의 측정값을 사용하였음을 고려해 볼 때 측정값의 표준편차가 존재하여도 본 알고리즘은 비교적 정확한 값을 추정함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 제안된 혼합형 유전 알고리즘의 성능을 검증한 후, 흡수, 방사 및 산란하는 매질로 채워진 2차원 비직교 형상에서 내부 4개 지점에서의 온도측정값을 가지고 벽면 방사율을 추정하는 역복사 해석에 적용하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(a) 교배확률 및 돌연변이확률, 최대 세대수, 그리고 해집단의 크기들을 변화시켜 가면서 유전 파라미터들이 혼합형 유전 알고리즘의 성능에 미치는 영향을 살펴본 결과, 지역 최적화 알고리즘이 유전 파라미터들의 영향을 줄여줌을 알 수 있었다.

(b) 오차를 가지고 있는 측정값을 모사하여 측정값의 오차가 벽면 방사율 추정의 정확도에 미치는 영향을 고찰하였다.

- 측정값들의 오차가 없다고 가정할 경우 4개의 벽면 방사율을 0.2%의 상대오차 범위 안에서 정확히 추정하였다.

- 측정값들에 오차가 있다고 가정할 경우, 표측정값의 표준편차가 증가할수록 추정값의 정확도는 떨어지지만, 4개의 측정값을 가지고 비교적 정확한 값을 추정하였다.

후 기

이 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술 개발)의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kang, D. H., Kwag, D. S., Kim, W. S., and Lee, Y. K., 2003, "A Study on the Estimation of One-dimensional Heat Fluxes on the Slab in Reheating Furnace by Using Inverse Analysis," *Trans. KSME(B)*, Vol. 27, No. 1, pp. 61~68.
- (2) França, F. R., Howell, J. R., Ezekoye, O. A., and Morales, J. C., 2002, "Inverse Design of Thermal Systems," *Advances in Heat Transfer*, Elsevier, Vol. 36, pp. 1~110.
- (3) Li, H. Y. and Ozisik, M. N., 1993, "Inverse Radiation Problem for Simultaneous Estimation of Temperature Profile and Surface Reflectivity," *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 7, No. 1, pp. 88~93.
- (4) Li, H. Y. and Yang, C. Y., 1997, "A Genetic Algorithm for Inverse Radiation Problems," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 7, pp. 1545~1549.
- (5) Ou, N. R. and Wu, C. H., 2002, "Simultaneous Estimation of Extinction Coefficient Distribution, Scattering Albedo and Phase Function of a Two-Dimensional Medium," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 4663~4674.
- (6) Kim, W. S. and Kwag, D. S., 1999, "A Study on the Estimation of Scattering Coefficient in the Spheres Using an Inverse Analysis," *Trans. KSME(B)*, Vol. 23, No. 3, pp. 364~373.
- (7) Ertürk, H., Ezekoye, O. A., and Howell, J. R., 2002, "The Application of an Inverse Formulation

in the Design of Boundary Conditions for Transient Radiating Enclosures," *J. Heat Transfer*, Vol. 124, pp. 1095~1102.

- (8) Carroll, D. L., 1996, "Chemical Laser Modeling with Genetic Algorithms," *AIAA J.*, Vol. 34, No. 2, pp. 338~346.
- (9) Park, T. Y. and Froment, G. F., 1998, "A Hybrid Genetic Algorithm for the Estimation of Parameters in Detailed Kinetic Models," *Computer Chem. Engng.*, Vol. 22, pp. S103~S110.
- (10) Giacobbo, F., Marseguerra, M., and Zio, E., 2002, "Solving the Inverse Problem of Parameter Estimation by Genetic Algorithms : the Case of a Groundwater Contaminant Transport Model," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 29, pp. 967~981.
- (11) Kang, S. J., Kim, K. W., Ryu, K. W., and Song, K. J., 2002, "A Study on the Wind Turbine Blade Optimization and Pitch Control using the Hybrid Genetic Algorithm," *J. KSAS*, Vol. 30, No. 6, pp. 7~13.
- (12) Moon, B. R., 2001, *Genetic Algorithms*, Dasung, Korea, pp. 101~103.
- (13) Kim, M. Y. and Baek, S. W., 1996, "Prediction of Radiative Heat Transfer in a Three-Dimensional Gas Turbine Combustor with the Finite-Volume Method," *Trans. KSME (B)*, Vol. 20, No. 8, pp. 2681~2692.
- (14) Anthony J. H., 2002, *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Duxbury, USA, pp. 407~408.