

향상된 인공생명 알고리즘에 의한 고속, 소폭 저널 베어링의 최적설계

양 보 석* · 송 진 대**

Optimum Design of High-Speed, Short Journal Bearings by Enhanced Artificial Life Algorithm

Bo-Suk Yang, Jin-Dae Song

Key Words : Artificial Life Algorithm(인공생명 알고리즘), Optimum Design(최적설계), Journal Bearings(저널베어링), Emergent Colonization(자연발생적 군서), Random Tabu Search Method(랜덤터부 탐색법)

Abstract

This paper presents a combinatorial method to compute the solutions of optimization problem. The present hybrid algorithm is the synthesis of an artificial life algorithm and the random tabu search method. The hybrid algorithm is not only faster than the conventional artificial life algorithm, but also gives a more accurate solution. In addition, this algorithm can find all global optimum solutions. And the enhanced artificial life algorithm is applied to optimum design of high-speed, short journal bearings and the usefulness is verified through this example.

기호설명

- E_e : 엘리트 보존전략에서 적응도가 높은 개체의 랜덤 이동시 추가되는 내부에너지
- G_e : 자원 섭취 시 증가되는 내부에너지
- I_e : 각 생물체의 초기 내부에너지
- L_e : 연령 1 증가 시 감소되는 에너지
- L_i : 생존에 필요한 최소에너지
- N_e : Random tabu 탐색법의 각 step 에서의 최대 탐색수
- N_s : Random tabu 탐색법의 step 수
- P_e : 원치 않는 자원 섭취 시 증가되는 에너지
- R_a : 생식을 위한 최소연령
- R_{er} : 생식을 위해 필요한 최소에너지
- R_p : 생식여부를 결정하는 확률
- R_r : Random tabu 탐색법의 각 step 의 반경비

1. 서론

인공생명이란 용어는 1987년 Langton 이 주관한 제 1 회 인공생명 workshop 에서부터 시작되었다. Langton 은 "자연계의 살아있는 시스템이 나타내는 거동을 모의하는 인공시스템에 대하여 연구하는 분야"로 인공생명을 정의하였다⁽¹⁾.

함수최적화를 위한 인공생명 알고리즘에서는 인공세계 내에서 인공생명체들이 대사(metabolism)와 생식(reproduction)을 통해 최적해 근방에 창발적 군집을 형성시켜 최적해를 탐색하게 된다.

그리고 Random tabu 탐색법은 Hu 에 의해 고안된 학습알고리즘으로 국소적 최적해에 수렴하는 것을 방지하고, 수렴소도와 정도 면에서 우수한 알고리즘이다⁽²⁾. 그러나 넓은 해공과 다변수 최적화문제에서 최적해 탐색능력이 떨어지는 단점이 있다.

기존의 미분 가능한 요철함수에 대한 최적화 알고리즘으로는 기울기 정보를 이용한 준 Newton 법, 공액경사법, simplex 등이 있으나 이러한 방법

* 부경대학교 기계공학부

** 부경대학교 대학원

들은 수렴속도와 정도는 우수하지만 수렴자체가 초기치에 의존하여 국소해에 수렴될 가능성이 있다. 이에 이윤희 등은 요철이 심한 함수에도 적용 가능하며, 초기치에 의존하지 않는 인공생명 최적화 알고리즘을 제안하여, 저널베어링의 최적설계에 적용하였다(7-9). 그러나 이 인공생명 알고리즘은 최적해 근방에 생명체의 군집이 이루어진 후의 최적해로의 수렴속도가 느리고, 해의 정밀도가 크게 향상되지 않는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 기존의 최적화를 위한 인공생명 알고리즘에 최적화 성능에 중대한 영향을 미치는 새로운 세대의 위치선정 등에 Random tabu 탐색법을 도입함으로써 수렴정도와 수렴속도가 우수하며 다변수 및 다봉성 함수 등에서도 우수한 성능을 제시하는 향상된 인공생명 알고리즘(10)을 제안하고 고속, 소폭 저널베어링의 최적설계에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

2. 제안된 조합 인공생명 알고리즘

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 최적화를 위한 인공생명 알고리즘에 R-Tabu 법을 도입함으로써 기존의 인공생명 알고리즘의 수렴속도와 계산정도를 향상시키기 위한 개선된 인공생명 알고리즘이다. 본 알고리즘의 흐름도는 Fig. 1과 같고 조합된 알고리즘을 설명하면 다음과 같다.

- 1) 초기설정에 기초하여 초기화를 행한다. 각각 같은 수의 생물체를 해 공간에 랜덤하게 배치하고, 각 생물체의 초기내부에너지를 부여한다. 생물체의 총수와 같은 수의 자원을 생물체가 존재하지 않는 장소에 랜덤하게 배치한다.
 - 2) 생물체는 식 (1)로 정의되는 근방영역내의 자신으로부터 가장 가까이 있는 자원을 탐색한다.
 - 3) 발견한 자원으로 이동한다. 근방에서 자원을 발견할 수 없는 경우에는 근방 내를 R-Tabu 법을 적용하여 이동하는데 적응도가 높은 개체는 이동하지 않고 만큼의 내부에너지를 얻는다.
 - 4) 대사를 실행하여 에너지 G_e 를 얻고, R-tabu 탐색법에 의해 폐기물을 근방영역내에 폐기한다.
 - 5) 생물체의 연령을 1만큼 증가시킨다.
 - 6) 인공생명체가 생식조건 $A \geq R_a, A \geq R_e$ 를 만족하면 생식조건을 만족하는 근방영역 C 내의 최 근방 동종의 개체와 R_p 에 따라 생식을 하여 번식한다.
 - 7) 내부에너지를 L_e 감소시켜, 생존이 불가능한 생물체를 소멸시킨다.
 - 8) 세대 수를 1만큼 증가시키고, 2)로 돌아가서 최대세대 수만큼 반복한다.
- 여기서 근방영역 C는

$$C = \{x \in R^n \mid \|x - x_s\|^2 \leq D\} \quad (1)$$

$$D = D_0 e^{-(t/T)\alpha}$$

으로 정의되며, 여기서 x_s 는 인공생명체의 현재 위치이고, D_0 는 초기치, t 는 세대수, T 는 최종세대 수 그리고 α 는 상수이다.

기존의 인공생명 알고리즘에서는 자원의 위치와 다음 세대의 위치가 해의 계산 정도에 결정적인 작용을 한다. 이에 본 알고리즘에서는 R-Tabu 법의 근방영역을 여러 step으로 나누어 효율적인 탐색을 수행하는 장점을 도입한다. 따라서, 자원의 폐기가 근방영역 내에서 최적점에 가장 가까운 step 영역에 이루어지므로 군집의 형성이 더욱 빠르게 이루어지고, 또한 밀집된 정도가 우수하게 된다. 특히 최적점 근방에 군집을 형성해가면서 적응도가 우수한 최상위 개체들은 반경이 가장 작은 step에서 정밀한 탐색을 수행하게 되므로 정도가 우수해진다. 또한 군집의 외곽에 존재하는 즉, 군집에 속해있으나 최적점으로부터 멀리 떨어져 있는 개체들도 최적점에 가까우면서 반경이 큰 step내에 자원을 만들게 되므로 조밀한 군집의 형성이 가능하게 된다.

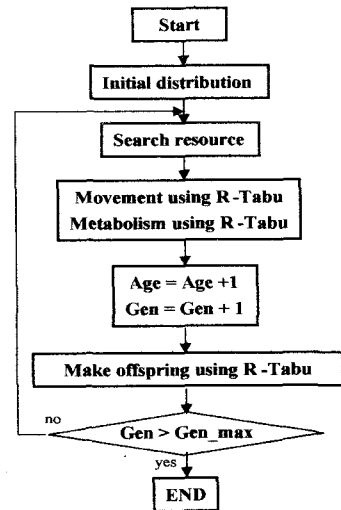


Fig. 1 the flowchart of the combined optimization algorithm

3. 고속, 소폭 저널 베어링의 최적설계

일반적으로 베어링설계에서 사용하는 설계방법으로는 많은 설계선도를 이용한 시행착오법에 의해 최적설계변수를 선택해 왔다. 그러나 이 방법

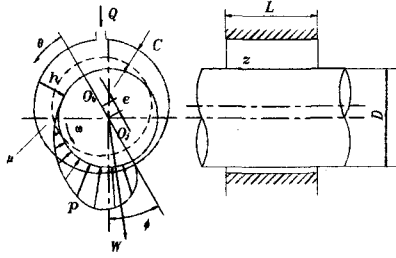


Fig. 2 Geometry of a hydrodynamic journal bearing

으로 최적설계변수를 성공적으로 선정하는 일은 쉬운 것이 아니고, 또 성공적으로 최적설계를 완성하기 위해서 많은 시간과 경비가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 향상된 인공지능 알고리즘을 이용해서 베어링의 최적설계에 대한 적용가능성을 검토하고 기존의 인공지능 알고리즘과 비교하였다.

3.1 설계변수와 상태변수⁽⁵⁾⁽⁹⁾

최적설계를 수행하는 것은 Fig. 2 에 나타난 고속, 소폭 저널 베어링의 최적설계변수를 찾아내는 것이다. 설계변수로는 여러 가지가 사용될 수 있으나, 본 논문에서는 반경름새 C, 폭경비 λ, 평균 점도 μ를 사용하여 설계변수벡터를 다음과 같이 표현하였다.

$$X^T = (C, \lambda, \mu) \quad (2)$$

상태변수는 주어지는 베어링의 운전조건들인 하중 W(N), 회전속도 n_s(rps), 편심률 ε, 유막압력 p(MPa), 유막온도 T(K), 저널표면의 마찰력 F_f(N), 공급유량 Q(m³/s), 휘들립 시작속도 ω_{cr}(rad/s) 등에 따라서 변화하는 물리량이다. 이 상태변수들은 일반적으로 설계변수에 의해서 결정되는 값들이다.

3.2 구속조건과 상태변수의 설계공식화

최적설계조건을 만족하기 위한 구속조건들은 다음과 같다.

$$g_i(X) \leq 0, \quad (i=1 \sim 10) \quad (2)$$

여기서

$$g_1 = C_{\min} - C, \quad g_2 = C - C_{\max},$$

$$g_3 = \lambda_{\min} - \lambda, \quad g_4 = \lambda - \lambda_{\max},$$

$$g_5 = \mu_{\min} - \mu, \quad g_6 = \mu - \mu_{\max}$$

$$g_7 = h_a - C\{1 - \varepsilon_0(X)\}, \quad (3)$$

$$g_8 = \Delta T(X) - \Delta T_a,$$

$$g_9 = \omega - \omega_{cr}(X),$$

$$g_{10} = p_{\max}(X) - p_a$$

식 (8)에서 하첨자 min 과 max 는 각각 상태변수의 하한과 상한값을 의미한다.

Table 1 Input parameters for optimum design

Minimum radial clearance	$C_{\min}=40 \mu\text{m}$
Maximum radial clearance	$C_{\max}=300 \mu\text{m}$
Minimum length to diameter ratio	$\lambda=0.2$
Maximum length to diameter ratio	$\lambda=0.6$
Minimum lubricant viscosity	$\mu=0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Maximum lubricant viscosity	$\mu=0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Allowable minimum film thickness	$h_a=10 \mu\text{m}$
Allowable maximum film pressure	$P_a=10 \text{ MPa}$
Allowable film temperature rise	$\Delta T_a=70 \text{ K}$
Density of lubricant	$\rho=860 \text{ kg/m}^3$
Specific heat of lubricant	$C_p=4.19 \times 10^3 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
Journal diameter	$D=0.1 \text{ m}$
Journal rotational speed	$n_s=40 \sim 24 \text{ rps}$
Applied load to bearing	$W=10 \text{ kN}$
Scaling factor	$\beta_1=1, \beta_2=10^5$
Weighting factor	$\alpha_1/\alpha_2=5/1$

위와 같은 구속조건들과 아래의 목적함수를 이용하여 향상된 인공지능 알고리즘에 적용하였다.

$$\text{Minimize: } f(X) = \alpha_1 \beta_1 \Delta T(X) + \alpha_2 \beta_2 Q(X) \quad (4)$$

여기서 α₁, α₂ 는 가중치 factor 이고, β₁, β₂ 는 scale factor 이다.

식 (4)의 목적함수에 사용되는 상태변수의 설계 공식은 다음과 같다. 먼저 평균 레이놀즈 수가 다음과 같이 정의된다.

$$R_e(X) = \frac{\rho C U}{\mu} \quad (5)$$

그리고, 수정계수 α_m 과 난류보정계수 G_θ^{*} 는 레이놀즈 수의 영역에 따라 각각 다음과 같이 정의된다.

$$R_e < 510: \quad \alpha_m = 1, \quad G_\theta^* = 1/12$$

$$510 \leq R_e < 1125: \quad \alpha_m = 5.914 R_e^{-0.285}, \quad G_\theta^* = 2.915 R_e^{-0.57}$$

$$1125 \leq R_e < 13500: \quad \alpha_m = 0.798, \quad G_\theta^* = 2.915 R_e^{-0.57}$$

$$R_e \geq 13500: \quad \alpha_m = 0.756, \quad G_\theta^* = 14.45 R_e^{-0.75} \quad (6)$$

베어링설계에서 가장 중요한 수정 Sommerfeld 수는 다음과 같다. 그리고 편심률 ε₀ 는 이 Sommerfeld 수의 함수로 표현된다.

$$S = \frac{n_s \mu D^3 \lambda}{48 G_\theta^* C^2 W} \quad (7)$$

$$\varepsilon_0 = \exp(-2.236 \alpha_m \lambda \sqrt{S}) \quad (8)$$

그리고 정상상태에서의 최대 유막압력은 다음과 같이 얻어진다.

$$p_{\max} = \frac{\pi n_s \mu D^2 \alpha_m^2 \lambda^2}{8 G_\theta^* C^2} \frac{\varepsilon_0 \sin \theta_0}{(1 + \varepsilon_0 \cos \theta_0)^3} \quad (9)$$

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{1 - \sqrt{1 + 24 \varepsilon_0^2}}{4 \varepsilon_0} \right) \quad (10)$$

소폭 저널베어링의 저널표면의 마찰력은 근사적으로 레이놀즈 수의 영역에 따라서 다음과 같이 주어진다.

$$R_e < 1125:$$

$$F_j \cong \frac{\pi^2 \mu n_s D^3 \lambda}{48 G_\theta^* C} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon_0}} + \frac{1 - \varepsilon_0}{(1 - \varepsilon_0^2)^{3/2}} \right\}$$

$$1125 \leq R_e < 13500:$$

$$F_j \cong \frac{\pi^2 \mu n_s D^3 \lambda}{48 G_\theta^* C} (1.109 \varepsilon_0^2 - 1.490 \varepsilon_0 + 2.748)$$

$$R_e \geq 13500:$$

$$F_j \cong \frac{\pi^2 \mu n_s D^3 \lambda}{48 G_\theta^* C} (1.792 \varepsilon_0^3 - 1.523 \varepsilon_0^2 - 3.697 \varepsilon_0 + 8.734) \quad (11)$$

이상의 식을 이용하면, 공급윤활유량 $Q(X)$ 와 유막온도 상승량 $\Delta T(X)$ 는 각각 다음 식과 같이 계산된다.

$$Q = \frac{\pi}{4} n_s C D^2 \varepsilon_0 \quad (12)$$

$$\Delta T = \frac{F_j R \omega}{\rho C_p Q} = \frac{2 F_j}{\rho C_p D C \varepsilon_0} \quad (13)$$

3.3 적용결과

4 종류의 생물체를 이용하여 최적해 탐색을 수행하였다. 한 세대동안의 생물체가 이동 가능한 범위 D 는 식 (1)에 의해 결정된다. D_0 그리고 α 와 함께 EAL의 수행에서 사용된 파라미터는 Table 2에 주어져 있다.

Fig. 3 과 Fig. 4 는 정적 하중이 10, 20kN 일 때

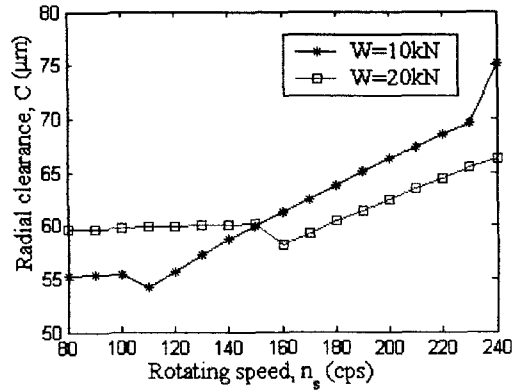


Fig. 3 Optimal results: radial clearance vs. rotating speed

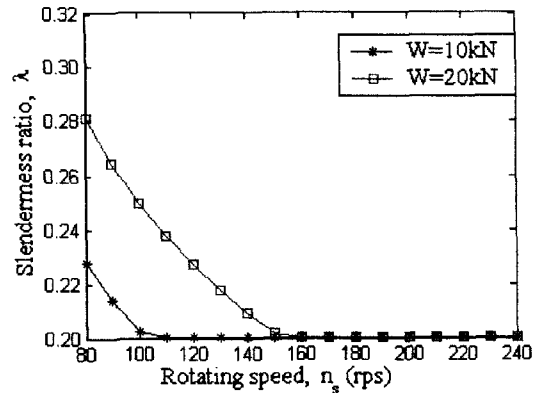


Fig. 4 Optimal results: length to diameter ratio vs. rotating speed

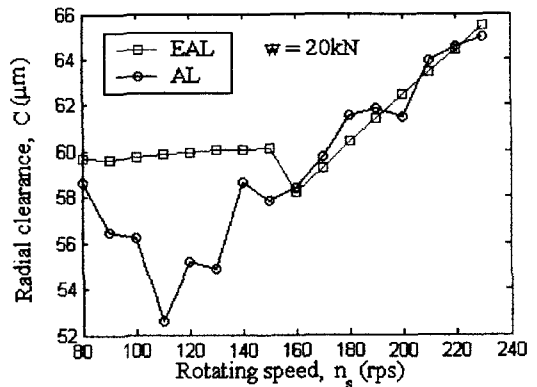


Fig. 5 Comparison with AL (Artificial Life algorithm)

회전수에 따른 최적화된 반경틈새 C 와 점도 μ 를 보여주고 있다. 계산결과는 Hashimoto⁽⁵⁾에 의한 결과와 같은 경향을 보여주고 있으며, Fig. 5는 기존의 AL의 계산결과와 비교하고 있으며, 역시 유

사한 경향을 보여주고 있음을 확인할 수 있다⁽⁹⁾.

Table 2 The parameters in EAL

Sym bol	Value	Symb ol	Value
E_e	10	P_e	1
G_e	50	R_a	3
I_e	150	R_e	150
L_e	5	R_p	0.0002
L_i	125	N_s	5
N_c	3	R_r	10
D_0	1.0	α	12

4. 결론

본 연구에서는 탐색의 초기치에 의존하지 않으면서 전역적 최적해를 효과적으로 탐색할 수 있는 향상된 인공생명 알고리즘을 기존에 저자에 의해 제안된 인공생명 알고리즘에 Random Tabu 탐색법을 적용함으로써 새로이 제안하였다. 제안된 인공생명 알고리즘을 고속, 소폭저널베어링의 최적설계에 적용하고, 기존의 방법과 비교하여 그 유효성을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Langton C.G., Editor, Artificial Life, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- (2) Assad A.M., Packard N.H., Emergent Colonization in an Artificial Ecology, Technical Report CCSR-92-3, 1992.
- (3) Hu, N., Tabu Search Method with Random Moves for Globally Optimal Design, Interational Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 35, pp. 1055-1070, 1992.
- (4) Hayashi, D. et al., Distributed Optimization by Using Artificial Life, T. IEE Japan 1996; Vol. 116C (5), pp.584-590 (in Japanese).
- (5) H. Hashimoto, 1997, Optimum Design of High-Speed, Short Journal Bearings by Mathematical Programming, Tribology Transactions, Vol.40, pp.283-293.
- (6) Yang, B. S., Choi, B. G., Yu, Y. H. and Nan, H. T., Optimum Design of a Damping Plate with an Unconstrained Viscoelastic Damping Layer Using Combined Genetic Algorithm, KSME Interational Journal, Vol. 13, No. 5, pp. 387-396, 1999.
- (7) 이윤희, 최병근, 양보석, 1999, "함수최적화를

위한 인공생명 알고리즘", 대한기계학회 '99 동역학 및 제어부문 하계학술대회 강연논문집, pp.211~216.

- (8) Yang B.S and Lee Y.H, Artificial Life Algorithm for Function Optimization, 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, DETC2000/DAC-14524.
- (9) Yang, B. S., Lee, Y. H., Choi, B. K., and Kim, H. J., 2001, Optimum Design of Short Journal Bearings by Artificial Life Algorithm, Tribology International, Vol.34, No.7, pp.427-435.
- (10) B.S. Yang and J.D. Song, 2001, Enhanced Artificial Life Algorithm for Fast and Accurate Global Optimization Search, Transaction on ASME, Journal of Mechanical Design, (투고 중).