

# 인공생명 알고리즘을 이용한 저널 베어링의 최적설계

## Optimum Design of Journal Bearing by the Enhanced Artificial Life Optimization Algorithm

송진대\* · 양보석\*\*  
Jin-Dae Song and Bo-Suk Yang

Key Words : Enhanced Artificial Algorithm, Optimum Design

### ABSTRACT

This paper presents an optimum design of journal bearings using a hybrid method to find the solutions of optimization problem. The present hybrid algorithm, namely Enhanced Artificial Life Algorithm(EALA), is a synthesis of an artificial life algorithm(ALA) and the random tabu search(R-tabu) method. EALA is applied to the optimum design of journal bearings supporting simple rotor. The applicability of EALA to optimum design of rotor-bearing system is exemplified through this study.

### 기호설명

- $D_0$  : 전체 근방영역 설정의 초기값
- $E_e$  : 엘리트 보존전략에서 적응도가 높은 개체의 랜덤 이동 시 부가되는 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
- $N_a$  : 생존 개체 수
- $N_c$  : 랜덤터부탐색법의 각 step에서 최대탐색수
- $N_{in}$  : 초기 개체 수
- $N_{opt}$  : 최적 개체 수
- $N_{sp}$  : 종족 수
- $N_s$  : 랜덤터부탐색법의 하부 영역인 step 수
- $R_a$  : 생식을 위한 최소 연령
- $R_e$  : 생식을 위해 필요한 최소 에너지
- $R_{fNs}$  : 최종세대의 가장 안쪽 step의 반경
- $R_p$  : 생식여부를 결정하는 생식률
- $R_{p,min}$  : 최소 생식률
- $R_r$  : 랜덤터부탐색법의 각 step의 반경비
- $\alpha$  : 근방영역의 감소를 결정하는 반경인자

- $C$  : 베어링 틈새(clearance)     $\lambda$  : 폭경비(=L/D)
- $\epsilon_0$  : 평형상태 편심률             $p$  : 유막 압력
- $h$  : 유막 두께                       $\Delta T$  : 유막온도상승
- $\omega_{cr}$  : 불안정거시속도

### 1. 서론

종래의 미분이 가능한 요철함수에 대한 최적화 알고리즘으로는 기울기 정보를 이용한 준 Newton 법, Sequential Quadratic Programming 등이 있으나, 이러한 방법은 수렴속도와 정도는 우수하지만 수렴이 초기치에 의존하여 국소해에 수렴될 가능성이 있다.

저자는 요철이 심한 함수에도 적용가능하며, 초기치에 의존하지 않는 인공생명 최적화 알고리즘을 제안하여, 저널베어링의 최절 설계에 적용하였다.<sup>(1~2)</sup> 이 인공생명 알고리즘(ALA)은 2종 이상의 인공생명체가 다수 존재하고, 그들이 인공세계 내에서 대사와 이동 그리고 자기복제 등을 통하여 최적해가 존재하는 곳에 군집을 형성시키고 형성된 군집에 의해 짐탐색을 함으로써 해의 정도를 높이는 확률탐색 최적화 기법이다. 그러나 ALA는 최적해 근방에 생명체의 군집이 이루어진 후에 전 생명체의 최적해로의 수렴속도가 느리고, 해의 정밀도가 크게 향상되지 않는 단점이 있어 랜덤터부탐색법을 도입하여 하이브리드 인공생명 알고리즘인 향상된 인공생명 알고리즘을 제안하였다. 그리고 동시에 소폭 저널 베어링의 최적설계에 적

\* 부경대학교 대학원  
E-mail : membrane@mail1.pknu.ac.kr  
Tel:(051)625-1604,Fax:(051)620-1530  
\*\* 부경대학교 기계공학부

용하여 그 실용성을 검토하였다.

본 연구에서 저널베어링으로 지지된 회전축계의 최적설계에 향상된 인공생명 알고리즘을 적용하였다. 수치실험에 사용된 저널베어링은 진원베어링으로 하였고, 축계는 단순회전체를 채택하였다. 본 연구를 통해 회전축계에 제안된 알고리즘의 적용성을 검토하고자 한다.

## 2. 향상된 인공생명 알고리즘

기존의 ALA 에서는 최적해가 존재하는 곳에 군집형성을 얼마나 빠르게 하는가가 최적화 성능을 좌우하는 1 차적 요인이다. 또한 형성된 군집에 속해있는 개체들의 군집영역에 대한 개체 밀도가 얼마나 높은가가 해의 정도를 결정하는 중요한 관건이 된다. 이는 집중탐색의 효율을 결정하며 동시에 높은 해의 정도를 의미한다.

군집 형성의 시기와 개체 밀도는 기본적으로 다음 3 가지의 중요한 과정, 즉 1) 대사를 행할 때 폐기물의 폐기위치, 2) 원하는 자원을 찾지 못했을 경우, 랜덤이동을 할 위치, 3) 생식에 의해 생성되는 자손의 초기위치 등을 결정하는 방법에 의존된다. 궁극적으로 새로운 위치를 얼마나 효율적으로 선정하는가가 중요한 문제가 된다.

ALA 는 각 개체의 탐색 가능한 공간을 지각시스템으로 탐색 가능한 공간, 즉 근방영역  $C$

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

$$D = D_0 e^{-t/T} \quad (2)$$

로 정의하고, 근방영역 내에서 랜덤탐색을 한다. 여기서  $x_i$  는 임의 개체의 자기자신의 위치,  $t$  는 세대 수,  $T$  는 최종 세대 수이다.

ALA 는 다수의 전역 최적해를 탐색하는 능력이 있으며, 그 탐색속도가 면역유전 알고리즘 등에 비해 월등히 우수한 장점을 가지고 있다.<sup>(2)</sup> 이에 R-tabu 법의 개념을 도입하여 ALA 의 장점을 유지하면서 단점을 보완하였다. 각 개체의 근방영역을 여러 개의 하부 영역으로 나누어 탐색을 수행하여 최적해에 가까운 영역에 언급된 새로운 위치(폐기물 폐기위치, 랜덤이동 위치 그리고 자손의 초기위치)를 선정하게 한다. 이를 통해 더욱 효율적인 탐색을 수행할 수 있도록 향상된 인공생명 알고리즘을 제안하였고, 그 흐름도는 Fig. 1 과 같다. 알고리즘을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

1) 초기설정에 기초하여 초기화를 수행한다. 각 종족에 대해 같은 수의 생물체를 해 공간에 랜덤하게 배치하고, 각 생물체의 초기내부에너지  $I_e$  를 부여한다. 각 종족에 대해 개체 수와 같은 수의 자원을 랜덤하게 배치한다.

2) 생물체는 식 (1)에 의해 정의되는 자신의 근방영역 내에 존재하는 자원을 탐색한다.

3) 자원이 탐색되면 가장 가까운 곳에 위치한 자원으로 이동하여 대사를 실행한다. 에너지  $Ge$  만큼 내부에너지를 증가시키고 폐기물을 근방영역 내에 폐기한다.

이 때 위치 선정방법은 근방영역을 여러 개의 하부영역 들로 나누고, 각 하부영역에 대해 랜덤한 점을 선택하여 현재의 적응도보다 우수한가를 평가하고 우수한 점이면 후보로 선정하고 아니면 새로운 점을 선택한다. 모든 하부영역에 대해 얻어진 후보들을 비교하고, 이들 중 가장 우수한 적응도(fitness)를 가지는 점을 폐기물의 폐기위치로 선정한다.

4) 근방에서 자원을 발견할 수 없는 경우에는 근방 내를 3)에서 설명한 것과 같은 방법으로 이동하며, 적응도가 높은 엘리트 개체는  $E_e$  만큼의 내부에너지를 얻는다.

5) 생물체의 연령과 전체 세대를 1 만큼 증가시킨다.

6) 생식을 실행한다. 생식 가능한 연령  $R_a$  이상이 되고 생식에 필요한 최소에너지  $R_e$  이상의 내부에너지를 가지는 각 개체는 자신과 동종의 인공생물체를 근방영역 내에서 가장 가까운 개체로 선택하고 동일한 조건을 만족하면 생식률  $R_p$  에 따라 생식을 하게 된다. 태어난 자손의 초기위치는 부모개체 각각의 위치에 대한 근방영역 내에서 3)에서 설명된 방법으로 결정하게 된다.

7) 내부에너지를  $L_e$  만큼 감소시켜, 내부에너지가  $L_i$  이하인 생존 불가능한 생물체를 소멸시킨다.

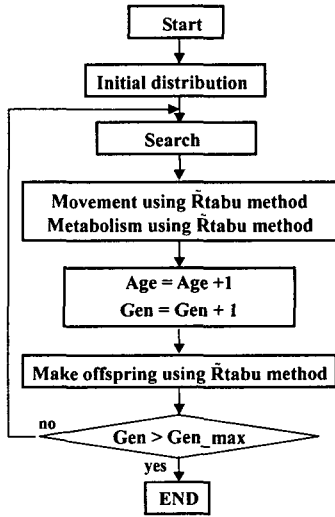
8) 2)~7)의 과정을 최대세대 수만큼 반복한다

이들 인자는 인공생명의 거동 및 속성의 어느 측면에 주요한 작용을 하는가에 따라 크게 다음 4 가지의 범주로 분류될 수 있다.

- 1) 생존 속성 : 개체의 에너지와 관련된 속성
- 2) 개체 수 속성 : 생존개체 수와 관련된 속성
- 3) 탐색 속성 : 탐색과 관련된 속성
- 4) 초기 속성 : 초기상태 및 독립적인 속성

**Table 1** The parameters in EALA

생존속성	개체 수 속성	탐색속성	초기속성
$L_e = 1$	$N_{opt} = 8$	$N_c = 3$	$E = 90$
$L_l = 0$	$R_{p,\min} = 10^{-8}$	$N_s = 5$	$N_{sp} = 4$
$I_e = 5L_e$	$R_a = 3$	$R_r$	$N_{in} = 8$
$G_e = 5L_e$		$\alpha = 12$	
$E_e = 2L_e$		$R_{f,N_s} = 10^{-8}$	
		$D_0 = 1$	



**Fig. 1** Flow chart of the proposed algorithm

이들 인자는 최적화의 수행성능에 중대한 영향을 끼친다. Table 1.에 주어져 있는 인자들의 값은 수렴성과 계산효율을 동시에 고려하여 제안된 범위이다.

### 3. 최적설계

대상문제는 저널베어링으로 지지된 단순회전체로 목적함수로는 운전속도내의 불평형응답을 최소화 하는 것으로 하였다. 이때, 최소화 하는 불평형응답은 위험속도에서의 불평형 응답속도를 그 평가 대상으로 하였다. 저널베어링은 무한 소폭 저널베어링<sup>(5)</sup>으로 근사화된 강성 및 감쇠 계수를 사용하였다.

$$f = \text{Unbalance Response at resonant frequencies} \quad (3)$$

설계변수로는 저널베어링의 폭경비 ( $\lambda = L/D$ ) 및 베어링 틈새 (C)를 사용하였다.

$$X^T = (\lambda, C) \quad (4)$$

구속조건은 설계변수의 상한 및 하한 이외에 저널베어링의 온도상승, 불안정 개시속도 및 최대 유막 압력 등을 사용하였고<sup>(6)</sup>, 식 (5)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 g_1 &= C_{\min} - C, & g_2 &= C - C_{\max}, \\
 g_3 &= \lambda_{\min} - \lambda, & g_4 &= \lambda - \lambda_{\max}, \\
 g_5 &= h_a - C\{1 - \varepsilon_0(X)\}, \\
 g_6 &= \Delta T(X) - \Delta T_a, \\
 g_7 &= \omega - \omega_{cr}(X), \\
 g_8 &= p_{\max}(X) - p_a
 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 하첨자 min 과 max 는 각각 설계변수의 하한과 상한 값을 의미한다. 각 기호의 의미 및 계산에 사용된 값들은 Table 2 에 나타내었다.

**Table 2** The parameters in EALA

Minimum radial clearance	$C_{\min} = 40 \mu\text{m}$
Maximum radial clearance	$C_{\max} = 300 \mu\text{m}$
Minimum length to diameter ratio	$\lambda_{\min} = 0.2$
Maximum length to diameter ratio	$\lambda_{\max} = 0.6$
lubricant viscosity	$\mu_{\min} = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Allowable minimum film thickness	$h_a = 10 \mu\text{m}$
Allowable maximum film pressure	$p_a = 10 \text{ MPa}$
Allowable film temperature rise	$\Delta T_a = 70 \text{ }^\circ\text{K}$
Density of lubricant	$\rho = 860 \text{ kg/m}^3$
Specific heat of lubricant	$C_p = 4.19 \times 10^3 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{K}$
Journal diameter	$D = 0.1 \text{ m}$
Journal rotational speed	$n_s = 500 \sim 20000 \text{ RPM}$
Applied rotor mass / 2	$M = 54.432 \text{ kg}$

최적화된 설계변수는

$$X_{opt}^T = (\lambda, C) = (0.6500, 283.35 \mu\text{m})$$

이며, 최적화된 설계변수에 의한 불평형 응답곡

선을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 무차원 불평형 응답은 식 (6)으로 정의된다.

$$\bar{U} = U/e \quad (6)$$

여기서  $U, e$ 는 불평형 응답 및 편심량이다.

최적화된 베어링으로 지지되는 축계의 2개의 위험속도는 2750 RPM 과 4461 RPM 으로 2번째 위험속도에 의한 불평형 응답이 지배적으로 나타나고 있다.

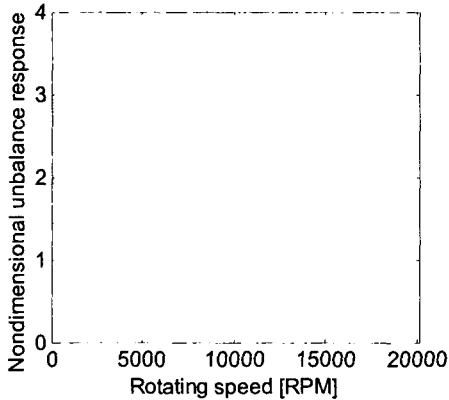


Fig. 2 Unbalance response

#### 4. 결 론

저널베어링으로 지지된 비감쇠 탄성회전체의 불평형응답 최소화에 EALA 가 적용되었다. 저널베어링은 무한소폭베어링으로 근사화된 강성 및 감쇠계수가 이용되었으며, 구속조건으로 베어링의 온도상승 및 최대압력 등이 고려되었다.

본 논문에서는 EALA 에 의해서만 최적화가 이루어졌으나, 알려져 있는 최적화 기법과의 비교검증이 요구된다.

또한 실용적인 회전축계모델에 EALA 을 적용하여 실용성을 평가하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- (1) 양보석, 이윤희, 김동조, 최병근, 2001, 함수 최적화를 위한 인공생명 알고리즘, 대한기계학회 논문집 A, Vol. 25, No. 2, pp. 173~182.
- (2) Yang B.S and Lee Y.H, 2000, Artificial Life Algorithm for Function Optimization, ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, DETC2000/DAC-14524.
- (3) H. Hashimoto, 1997, Optimum Design of High-Speed Short Journal Bearings by Mathematical Programming, Tribology Transactions, Vol.40, pp. 283~293.
- (4) 향상된 인공생명 최적화 알고리즘의 개발과 소폭 저널 베어링의 최적설계, 소음진동공학회는 문집, 제 12 권, 제 6 호, pp.478 ~ 487.
- (5) Funakawa, M. and Tatara, A., 1985, Stability Criterion of an Elastic Rotor in Journal Bearings, trans. JSME, Vol. 1, pp. 1238~1244.
- (6) 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.