

# 인공생명 알고리즘을 이용한 프로팅 링 저널 베어링 지지 축계의 최적설계

## Optimum design of rotor supported on floating ring journal bearing by the enhanced artificial life optimization algorithm

송진대\*, 석호일\*, 양보석\*\*

Jin Dea Song, Ho-Il Suk and Bo-Suk Yang

Key Words : Enhanced Artificial, Floating Ring Journal Bearing, Optimum Design

### ABSTRACT

This paper presents an optimum design of rotor-bearing system using a hybrid method to compute 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. We applied EALA to the optimum design of rotor-shaft system supported by the floating ring journal bearings. we will propose the optimum shape of rotor, position and shape of bearings. Through this study, we investigate the reliability and usefulness of EALA.

### ———— 기호설명 ————

$D_0$ : 전체 근방영역 설정의 초기값  
 $E_e$ : 엘리트 보존전략에서 적응도가 높은 개체의 랜덤 이동 시 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  
 $N_a$ : 생존 개체 수  
 $N_c$ : 랜덤터부탐색법의 각 step 에서 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  
 $R_{f,N_s}$ : 최종세대의 가장 안쪽 step 의 반경  
 $R_p$ : 생식여부를 결정하는 생식률

$R_{p,min}$ : 최소 생식률  
 $R_r$ : 랜덤터부탐색법의 각 step 의 반경비  
 $\alpha$ : 근방영역의 감소를 결정하는 반경인자  
 $C_r$ : 틈새(clearance)       $e$ : 편심량  
 $\varepsilon$ : 편심률( $C_r/e$ )       $\gamma$ : 위치각  
 $\mu$ : 오일 점도       $M$ : 모멘트  
 $R$ : 반지름(D/2)       $\omega$ : 각속도  
 $p$ : 유막 압력       $h$ : 유막 두께  
 $\bar{\omega}$ : 평균 속도       $U$ :  $\omega_j R_j + \omega_r R_r$   
 $U_1$ :  $\omega_j R_j - \omega_r R_r$        $U_2$ :  $\omega_r R_r$   
 ※ 아래 첨자  
 1: 내측 유막 2: 외측 유막 j: 저널 r: 링

### 1. 서론

회전기계를 지지하는 베어링은 회전기계의 동력손실 및 안정성을 좌우하는 핵심적인 부품이다. 소형 가스터빈 및 선박엔진의 과급기 등에 채택되는 플로팅링 저널 베어링은 고속에서의 안정성이 우수한 특징이 있다. 본 연구에서는 플로팅링 저널 베어링의 형상최적설계와 이를 통하여 축계의 형상최적설계를 구현하고자 한다.

종래의 미분이 가능한 요철함수에 대한 최적화 알고리즘으로는 기울기 정보를 이용한 준 Newton 법, Sequential Quadratic Programming 등이 있으나,

\* 부경대학교 대학원  
 E-mail : shi626@mail1.pknu.ac.kr  
 Tel:(051)620-1604,Fax:(051)620-1530  
 \*\* 부경대학교 기계공학부

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 최적 설계에 적용하였다.(5~7) 이 인공생명 알고리즘(ALA)은 2 종 이상의 인공생명체가 다수 존재하고, 그들이 인공세계 내에서 대사와 이동 그리고 자기복제 등을 통하여 최적해가 존재하는 곳에 군집을 형성시키고 형성된 군집에 의해 집중탐색을 함으로써 해의 정도를 높이는 확률탐색 최적화 기법이다. 그러나 ALA 는 최적해 근방에 생명체의 군집이 이루어진 후에 전 생명체의 최적해로의 수렴속도가 느리고, 해의 정밀도가 크게 향상되지 않는 단점이 있어 랜덤타부 탐색법을 도입하여 하이브리드 인공생명 알고리즘인 향상된 인공생명 알고리즘을 제안하였다. 그리고 동시에 소폭 저널 베어링의 최적설계에 적용하여 그 실용성을 검토하였다.

본 연구에서 저자는 플로팅 베어링으로 지지되는 축계의 최적설계에 향상된 인공생명 알고리즘을 적용하고자 한다.

본 논문에서는 그 접근방법과 최적화 문제에 따르는 문제에 대해 논의한다.

## 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 개체의탐색 가능한 공간을 지각시스템으로 탐색 가능한 공간, 즉 근방영역  $C$

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

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

로 정의하고, 근방영역 내에서 랜덤탐색을 한다. 여기서  $x_s$  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.(7) 이에 R-tabu 법을 도입하여 근방영역을 여러 개의 하부 영역으로 나누어 탐색을 수행함으로써 최적해에 가까운 step 에 앞에서 언급한 새로운 위치를 선정함으로써 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  $le$  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 step 들로 나누고, 각 step 에 대해 랜덤한 점을 선택하여 현재의 적응도보다 우수한가를 평가하고 우수한 점이면 후보로 선정하고 아니면 새로운 점을 선택한다. R-tabu 법을 적용하여 모든 step 에 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 R-tabu 법을 적용하여 이동하며, 적응도가 높은 엘리트 개체는  $Ee$  만큼의 내부에너지를 얻는다.

5) 생물체의 연령과 전체 세대를 1 만큼 증가시킨다.

6) 생식을 실행한다. 생식 가능한 연령  $Ra$  이상이 되고 생식에 필요한 최소에너지  $Re$  이상의 내부에너지를 가지는 각 개체는 자신과 동종의 인공생명체를 근방영역 내에서 가장 가까운 개체로 선택하고 동일한 조건을 만족하면 생식률  $Rp$  에 따라 생식을 하게 된다. 태어난 자손의 초기위치는 부모개체 각각의 위치에 대한 근방영역 내에서 R-tabu 법을 적용하여 결정하게 된다.

7) 내부에너지를  $Le$  만큼 감소시켜, 내부에너지가  $Li$  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

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

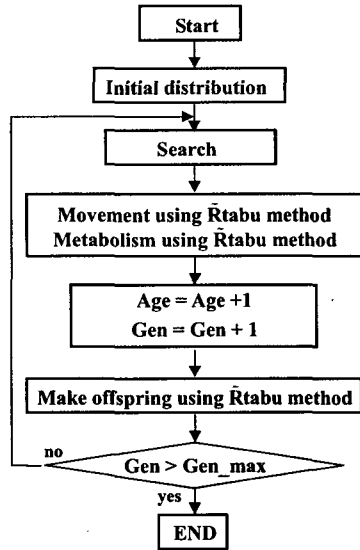


Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

Table 1 The parameters in EALA

생존속성	개체 수 속성	탐색속성	초기속성
$L_e = 1$	$N_{opt} = 160$	$N_c = 3$	$E = 90$
$L_t = 0$	$R_{p,min} = 10^{-6}$	$N_s = 5$	$N_{sp} = 4$
$I_e = 5L_e$	$R_a = 3$	$R_r$	$N_{in} = 160$
$G_e = 5L_e$	$R_p$	$\alpha = 12$	
$E_e = 2L_e$	$R_e$	$R_{f,N_s} = 10^{-8}$	
		$D_0 = 1$	

### 3. 프로팅 링 저널 베어링 해석

프로팅 링 저널 베어링은 링에 의해 분할되는 두개의 유막으로 구성되어 있다. 해석은 각각의 유막에 대해 해석되어지며, 내측 유막 및 외측 유막에 대한 모멘트 평형조건을 이용하여 각각의 유막 동특성이 결정된다.

정적평형상태에 대한 내측 및 외측의 유막을 지배하는 Reynolds 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial}{R\partial\theta} \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{R\partial\theta} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial Z} \right) = 6\omega \frac{\partial h}{\partial\theta} \quad (3)$$

가정된 편심비에 의해 구해지는 압력으로부터 평형방정식을 만족하는 편심비를 구하게 된다. 정적평형위치가 결정되면 각 유막에 대해서 동특성을 구할 수 있고, 동특성은 다음의 과정으로 구하여진다.

특성은 섭동해로부터 강성계수  $K_{xx}$  및  $K_{yy}$  는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{Bmatrix} K_{xx} \\ K_{yy} \end{Bmatrix} = - \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^{2\pi} p_x \begin{Bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{Bmatrix} R d\theta dz \quad (4)$$

여기서  $p_x = \left( \frac{\partial p}{\partial \theta} \right)_0$  이다.

각각의 유막에 대해 구해진 동특성은 다음의 평형방정식을 통하여 프로팅 링 저널 베어링에 대한 등가 동특성을 얻어낼 수 있다. 내측 유막에서의 힘의 평형방정식은

$$\begin{Bmatrix} \Delta f_x \\ \Delta f_y \end{Bmatrix} = [c_{L1}] \begin{Bmatrix} \Delta \dot{x}_j - \Delta \dot{x}_r \\ \Delta \dot{y}_j - \Delta \dot{y}_r \end{Bmatrix} + [k_{L1}] \begin{Bmatrix} \Delta x_j - \Delta x_r \\ \Delta y_j - \Delta y_r \end{Bmatrix} \quad (5)$$

과 같으며, 외측 유막에서의 힘의 평형방정식은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta f_x \\ \Delta f_y \end{Bmatrix} = [c_{L2}] \begin{Bmatrix} \Delta \dot{x}_r \\ \Delta \dot{y}_r \end{Bmatrix} + [k_{L2}] \begin{Bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \end{Bmatrix} + [m_r] \begin{Bmatrix} \Delta \ddot{x}_r \\ \Delta \ddot{y}_r \end{Bmatrix} \quad (6)$$

저널 회전속도에 동기된 가진력에 의한 변위, 속도 및 가속도 성분의 복소수 표현으로부터

$$\Delta x_i = \Delta X_i e^{j\omega t}, \quad \Delta \dot{x}_i = j\omega \Delta x_i, \quad \Delta \ddot{x}_i = -\omega_j^2 \Delta x_i \quad (7)$$

프로팅 링 저널 베어링의 힘의 등가 평형방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta f_x \\ \Delta f_y \end{Bmatrix} = [c_{Lj}] \begin{Bmatrix} \Delta \dot{x}_j \\ \Delta \dot{y}_j \end{Bmatrix} + [k_{Lj}] \begin{Bmatrix} \Delta x_j \\ \Delta y_j \end{Bmatrix} \quad (8)$$

여기서, 식 (13)을 식 (11)과 (12)에 대입하여, 식 (14)와 같은 형태로 만들면 등가의 강성 및 감쇠계수를 계산할 수 있다.

### 4. 최적설계

대상문제는 프로팅 링 저널 베어링으로 지지되는 축계이며 프로팅 링 저널 베어링은 유한 차분법으로 해석되며, 축계해석에는 유한요소법이 사용된다. 목적함수는 Q-factor 를 최소화 하는 것으로서 설계변수는 프로팅 저널 베어링의 폭경비 그리고 내측 및 외측 유막의 틈새이다. 그리고 축에대한 유한요소 각 단의 일부에 대한 지름이다.

$i$  차 모드에 대한 Q-factor 는  $Q_i = -\frac{\sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_i^2}}{2 \times \lambda_i}$  와 같이

주어진다. 여기서  $\lambda_r$  는  $i$  차 고유치의 실수부 및  $\lambda_i$  는  $i$  차 고유치의 허수부 이다.

또한 구속조건은 운전속도 130% 까지 고유치를 가지는 모든 모드에서 안정할 조건이다.

### 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) B. S. Yang and J. D. Song, 2001, Enhanced Artificial Life Algorithm for Fast and Accurate Optimization Search, Proceedings of Asia-Pacific Vibration Conference, pp. 732~736.

(4) 향상된 인공생명 최적화 알고리즘의 개발과 소폭 저널 베어링의 최적설계, 소음진동공학회 논문집, 제 12 권, 제 6 호, pp.478 ~ 487.

(5) D. M. Clarke, C. Fall, G.N. Hayden, T. S. Wilkinson, 1987, "An Analysis of the Steady-State Performance of the Cylindrical-Spherical Floating Ring Bearing", Trans. ASME, J. Tribology.

(6) M. Tanaka, Y. Hori, 1972, "Stability Characteristics of Floating Bush Bearing", Trans. ASME, J. Lubrication Technology.

(7) F. K. Orcutt, C. W. Ng, 1968, "Steady-State and Dynamic Properties of the Floating-Ring Journal Bearing", Trans. ASME, J. Lubrication Technology.

(8) C. H Li, S. M. Rohde, 1981, "On The Steady State and Dynamic Performance Characteristics of Floating Ring Bearing", Trans. ASME, J. Lubrication Technology.

(9) 김경웅 등, 1993, "프로팅 링 저널베어링에 대한 연구", 한국과학재단 연구보고서,