

향상된 유전알고리즘을 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼의 최적설계

Optimal Design of Squeeze Film Damper Using an Enhanced Genetic Algorithm

김영찬* · 안영공** · 양보석**

Young Chan Kim, Young Kong Ahn and Bo Suk Yang

Key Words : Enhanced Genetic Algorithm(향상된 유전알고리즘), Simplex Method(심플렉스법), Optimal Design(최적설계), Squeeze Film Damper(스퀴즈 필름 댐퍼)

ABSTRACT

This paper is presented to determine the optimal parameters of squeeze film damper using an enhanced genetic algorithm (EGA). The damper design parameters are the radius, length and radial clearance of the damper. The objective function is minimization of a transmitted load between bearing and foundation at the operating and critical speeds of a flexible rotor. The present algorithm was the synthesis of a genetic algorithm with simplex method for a local concentrate search. This hybrid algorithm is not only faster than the standard genetic algorithm, but also gives a more accurate solution and can find both the global and local optimum solution. The numerical example is presented that illustrated the effectiveness of enhanced genetic algorithm for the optimal design of the squeeze film damper for reducing transmitted load.

기호설명

- C, C_{min}, C_{max} : 반경름새
- C, C' : 저널중심과 회전체중심
- F_r, F_t : 각 좌표방향으로의 유체력
- F_{max}, F'_{max} : 탐색 전과 후의 최대전달력
- F_{op}, F'_{op} : 운전속도에서 탐색 전과 후의 전달력
- K_d, C_d : 주 강성계수와 감쇠계수
- K_s, C_s : centering spring 강성계수와 감쇠계수
- M, C, K : 시스템 질량, 감쇠, 강성
- L, L_{min}, L_{max} : 감쇠기 길이
- M : 베어링에 작용하는 회전체 질량
- R : 댐퍼 내륜의 반경
- r : 불평형 응답(감쇠기 내륜의 변위)
- μ : 댐퍼의 유체점성
- e : 편심량 $(y^2 + z^2)^{1/2}$
- ω : 회전 각속도
- ε : 편심율 (e/C)
- η : 질량 편심량
- α : 가중치
- f : 함수 적용도 값
- N_i : 최종 선택된 최적해의 수
- T_a : 유사도 한계값
- x : 전역탐색에 의해 탐색된 초기 후보해
- X_r, X_{min}, X_{max} : 투영된 변수, 변수범위
- 하첨자 i, j : 비교집단과 비교대상집단
- 상첨자 T : 전치계항자

1. 서론

발전기, 압축기, 펌프, 증기터빈 등의 육상용 대형 회전기계는 일반적으로 견고한 기초 지지대를 바탕으로 한 저널 베어링으로 지지되어 있다. 한편, 항공기용 제트엔진이나 가스터빈 등의 유연기초 지지대를 갖는 회전체의 지지베어링으로는 볼베어링이 사용되는 경우가 많다. 볼베어링은 자체의 지지강성은 높지만, 감쇠작용은 거의 없으므로, 감쇠작용을 외부적으로 부가하기 위해 볼베어링의 외륜부에 스퀴즈필름댐퍼(Squeeze Film Dampers)를 설치하여 회전체의 안정성을 도모하며 공진 진폭을 줄이도록 한다. 또한, 스퀴즈필름댐퍼는 틸팅패드베어링이 지지하는 회전체의 안정성을 높이기 위해 적용되는 경우도 있다⁽¹⁾.

더욱이 오늘날과 같이 회전체가 경량화 되고 효율을 높이 위해 고속화 되는 등 그 운전조건이 더욱 가혹해지는 환경에서는 회전체의 안정성 문제가 더욱 중요시 된다. 따라서 스퀴즈필름댐퍼의 응답특성을 초기 설계단계에서 파악하여 문제를 제거해 줄 필요성이 있다.

이러한 문제 해결의 한 방법으로 스퀴즈필름댐퍼의 적용에 관한 연구가 진행되어 왔다⁽¹⁻⁴⁾. 스퀴즈필름댐퍼는 구조가 단순하면서도, 감쇠성능이 우수하여 감쇠력의 증가를 필요로 하는 회전체에 간단하게 설치할 수 있는 유용한 장치이다. 이들 연구에서는 스퀴즈필름댐퍼의 형상을 설계 파라미터로 설정하여 지지 감쇠계수와 지지 강성계수를 정의하며, 위험속도영역에서 베어링과 지지부 간에 전달되는 힘을 최소로 하는 목적함수를 정의하였다. 그러나 이들 연구는 초기 설계단계에 적용

하기가 어렵고 선정된 파라미터들에 대한 초기 정보를 필요로 하며 감쇠계수 자체가 편심율의 함수가 되므로 초기 설계단계에서 규명하기가 어렵다.

따라서 본 논문에서는 기존의 참고문헌(4)을 바탕으로 운전속도에 대한 편심율을 구하고, 스퀴즈필름댐퍼의 제진성능을 향상시키기 위해, 향상된 유전알고리즘(EGA)⁽⁵⁾을 이용하여 댐퍼의 형상을 최적화 하였다.

유전알고리즘은 개체의 유전자를 조작하여 함수에 대한 적응도를 평가함으로써 최적해를 탐색하는 알고리즘으로 선택된 파라미터의 기술기정보를 필요로 하지 않고 오직 함수에 대한 적응도 값만으로 최적해를 결정할 수 있으며, 다수의 파라미터를 동시에 탐색함으로 기존의 단일점 탐색법(single point search method)에 비해 계산시간이 적게 소요되며 초기 설정위치 영향을 받지 않는 등 많은 장점을 갖고 있다. 본 논문에 적용된 EGA는 설계자의 필요에 따라서 전역 최적해(global optimum solution)와 국부 최적해(local optimum solution)를 동시에 탐색하며, 또한 다봉성 함수(multimodal function)에 대한 해의 탐색이 가능하다. 수정된 simplex method을 이용하여 국부적 집중탐색에 의한 해의 정도를 높일 수 있는 새로운 조합 유전 알고리즘이다.

2. 스퀴즈필름댐퍼의 이론해석

Fig. 1에 스퀴즈필름댐퍼의 개략도를 나타내었다. 자전을 하는 회전체를 지지하는 로러 베어링의륜에 댐퍼가 설치되어 있고, 댐퍼는 베어링의 지지강성에 비해 무시할 정도의 지지강성을 갖는 centering spring으로 지지되어 있다.

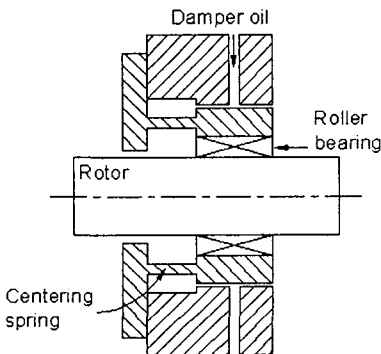


Fig. 1 Typical squeeze film damper arrangement with centering spring

축은 centering spring에 의해 자중에 의한 변위가 발생하지 않으므로 댐퍼의 저널중심과 회전체의 중심이 일치하여 동심원의 궤적을 갖는 자전운동을 한다. 댐퍼는 자전운동을 하지 않으나, 축의 휘돌림(whirl)에 동조하는 회전운동을 한다. 댐퍼의 외륜과 내륜 사이에 유막이 존재하며, 그 유막에서 스퀴즈작용이 일어나는 결과로 댐퍼의 감쇠력이 발생한다. 이론해석에 사용되는 스퀴즈필름댐퍼는 무한 소폭댐퍼로, 또한 유막력의 존재범위를 180°로 가정하여 얻은 유막력의 편심방향성분 F_r 와 그것에 직각방향성분 F_t 는 아래와 같이 나타내어진다.

$$F_r = \frac{2\mu L^3 R}{C^2} \dot{\alpha} \frac{\varepsilon^2}{(1-\varepsilon^2)^2} \quad (1)$$

$$F_t = \frac{\mu L^3 R}{2C^2} \dot{\alpha} \frac{\pi \varepsilon}{(1-\varepsilon^2)^{3/2}} \quad (2)$$

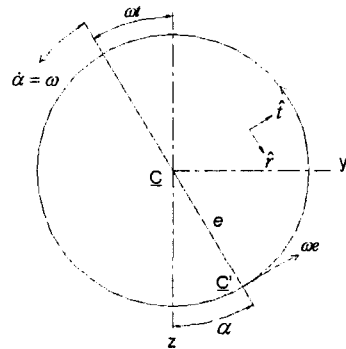


Fig. 2 Orbital motion of the damper

편심방향성분은 강성효과, 직각방향성분은 감쇠효과를 나타내며, 이들은 유체의 점도, 유막의 두께, 댐퍼의 형상과 편심량의 함수로 이루어져 있다. 이들의 등가강성과 감쇠는 아래의 식과 같이 나타내어진다.

$$K_d = \frac{2\mu\omega\varepsilon L^3 R}{C^3(1-\varepsilon^2)^2}, C_d = \frac{\mu L^3 R \pi}{2C^3(1-\varepsilon^2)^{3/2}} \quad (3)$$

Fig. 3은 회전체의 질량, 볼 베어링의 지지 스프링, centering spring, 댐퍼의 지지 강성과 감쇠로 구성된 스퀴즈 필름댐퍼를 1 자유도계로 모델링한 것을 나타낸다. 이 모델은 한쪽 방향, 즉 Fig. 1이 수직방향에 대한 관성력, 감쇠력 그리고 강성력을 고려한 것으로 지배방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = M\omega^2 \eta e^{i\alpha} \quad (4)$$

여기서 $C = C_d$, $K = K_d + K_s$ 이다.

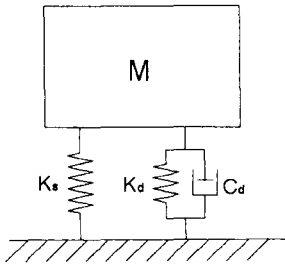


Fig. 3 Model of squeeze film damper

식 (4)의 해를 다음과 같이 가정하면

$$x = re^{i\omega t} \quad (5)$$

불평형 응답에 대한 회전반경의 크기(댐퍼 내륙의 변위)는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$r = \frac{M\omega^2\eta}{\sqrt{(K - M\omega^2)^2 + C^2\omega^2}} = e \quad (6)$$

힘 전달력은 다음과 같이 주어진다.

$$F = \frac{M\omega^2\eta(K + i\omega C)}{(k - M\omega^2) + i\omega C} \quad (7)$$

3. 향상된 유전알고리즘(5)

본 연구에서 이용된 알고리즘의 흐름도를 Fig. 4에 나타내었다. 이 유전알고리즘은 크게 2 단계로 구성된다.

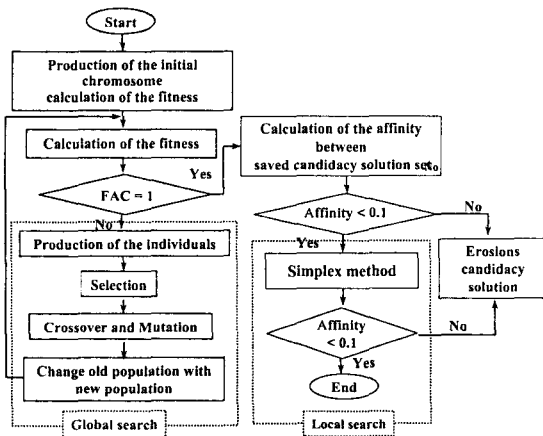


Fig. 4 Flow chart of proposed algorithm

1 단계는 수렴성을 평가하는 함수를 알고리즘에 적용하여 전역적인 후보해를 선정한다. 이 단계에서는 설계자의 의도에 따라서 다중 전역최적해(global optimum solutions) 및 국부최적해(local

optimum solutions)의 근사 위치를 탐색한다. 2 단계에서는 탐색된 해들 간의 유사도를 평가하여 탐색된 후보해 집단의 수를 줄이고 재설정된 해공간에서 수정된 simplex method를 적용하여 국부적인 집중탐색을 수행함으로써 해의 정도를 향상시키며 동시에 해 탐색시간을 줄이는 과정으로 이루어져 있다.

3.1 전역탐색 인정기준

초기 후보해 집단의 수는 설계자에 의해서 요구되는 해의 수를 고려하여 선택되며, 초기 전역탐색의 수렴성은 함수인정기준(function assurance criterion : FAC)⁽⁶⁾에 의해 결정된다.

$$FAC = \frac{|f_{i-1}^T f_i|^2}{(f_{i-1}^T f_{i-1})(f_i f_i)} \quad (8)$$

FAC의 값은 이론적으로 0과 1 사이의 값을 가진다. 이 값은 설계자가 임의로 설정하는 값으로 탐색하고자 하는 최적최적해와 국부최적해의 비로 주어지며 1인 경우가 완전히 수렴된 상태이다.

3.2 유사도 평가 및 국부 집중탐색

초기 전역탐색에서 구해진 해는 동일 최적해의 유사영역에 속한 해들이 얻어진다. 이들 해의 집단간의 유사성을 계산하여 유사집단 중 가장 적응도가 우수한 집단만을 선택하고 나머지는 제거함으로써 전체 탐색회수와 시간을 감소시킨다. 전역탐색에 의해 선택된 초기 후보해들에 대한 집단 상호간의 유사도 평가함수(affinity evaluation function: AEF)는 다음 식과 같다.

$$AEF_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (x_i - x_j)}{Norm(x)} \quad (9)$$

$$ac_{i,j} = \begin{cases} 1: AEF_{i,j} \leq T_a \text{ or } i \geq j \\ 0: \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

T_a 는 0에서 1 사이의 값을 가지며 유사도의 한계를 나타내고, ac_{ij} 는 후보해의 유사도를 나타내는 인자이다. 본 연구에서는 T_a 를 0.1로 설정하였다. N 은 초기 전체 후보해 집단의 수를 나타내며, 후보해 집단의 수는 찾고자 하는 모든 최적해를 탐색하기 위하여 충분히 크게 설정해야만 하며, 제안된 식은 다음과 같다.

$$N \geq \frac{3N_i}{FAC} + \frac{1 - FAC}{0.1 \times FAC} \quad (11)$$

3.3 수정된 Simplex Method

이 탐색법은 현재의 주어진 정보를 이용하여 새로운 위치의 정보를 탐색하는 기하학적인 방향성이 있는 탐색 이론이다. Nelder 와 Mead⁽⁷⁾는 새로운 점의 평가결과에 따라서 탐색단계를 결정하는 수정 이론을 제안하였다.

1) 만약 $X_{max} \leq X_r$ 또는 $X_{min} \geq X_r$ 인 경우, X_r 를 X_{min} 또는 X_{max} 로 대체한다. 이는 변수 범위에 대한 구속을 보장한다.

2) 만약 X_r 이 구속조건을 만족하지 못하는 경우, X_r 을 투영전의 점들 중에서 두 번째로 적응도가 낮은 점으로 대체한다. 이는 조건함수에 대한 구속을 보장한다. 이는 실제 최적설계에서 발생하는 구속조건을 만족시키기 위한 것이다.

4. 최적설계 및 고찰

4.1 최대전달력의 최소화

목적함수 $f(x)$ 는 식 (7)에 의해 표현되는 최대 전달력을 최소화하는 것으로 선정하였고, 설계변수 X 로는 감쇠기의 반경크기, 길이, 틈새 3 가지를 선택하였으며, 시스템파라미터 및 설계변수의 상, 하한은 다음과 같이 설정하였다.

$$f(X) = F_{max} \Rightarrow \text{minimize}$$

$$X = (R, L, C)$$

$$M = 33.45\text{kg}, R_{min} = 50.0\text{mm}, R_{max} = 70\text{mm}$$

$$\eta = 12.5\mu\text{m}, L_{min} = 15.0\text{mm}, L_{max} = 35.0\text{mm}$$

$$K_s = 2.154 \times 10^7 \text{N/m}, C_{min} = 50\mu\text{m}, C_{max} = 120\mu\text{m}$$

$$\mu = 2.66 \times 10^{-3} \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2, C = 100\mu\text{m}$$

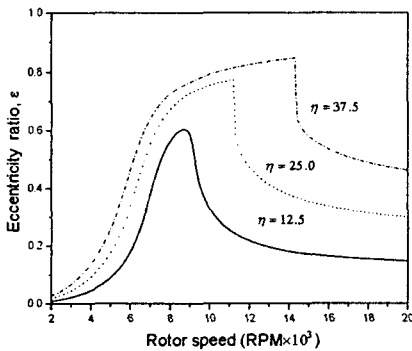


Fig. 5 Eccentricity ratio of squeeze film damper

또한 Fig. 5 는 질량 편심량 ($\eta = 12.5, 25.0,$

$37.5 \mu\text{m}$) 이 증가함에 따라서 댐퍼의 비선형성이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6 은 운전속도에 대한 초기 전달력과 최적 탐색후의 전달력을 나타내고 있다.

Case 1: 감쇠기의 틈새만을 설계파라미터로, 나머지 두 파라미터는 초기 값을 유지한 경우이다. 주어진 변수범위에서 최소 전달력은 888.34 N, 최적 틈새값은 58.87 μm 로, 이 이하에서는 다시 최대 전달력이 커지는 경향이 있다.

Case 2: 감쇠기의 길이만을 설계파라미터로 선택한 경우, 최적값이 35.0 mm 이고 최대 전달력은 838.95N 이다. 이 경우는 주어진 범위 내에서 상한값으로 선택되었다.

Case 3: 감쇠기의 반경만을 설계파라미터로 선택한 경우이다. 최적값이 70.0 mm 이고 최대 전달력은 1616.2N 이다. 이 경우 역시 상한값으로 수렴되었다.

Case 4: 감쇠기의 길이, 반경 그리고 틈새를 설계 파라미터로 선택한 경우이다. 탐색된 최적해는 $C = 89.44 \mu\text{m}$, $L = 35.0\text{mm}$, $R = 89.44\text{mm}$ 이며, 최대 전달력은 723.017N 으로 약 56.7%(초기값 1668.9N) 감소되었다. 초기 위험속도가 8700 RPM 에서 10800 RPM 으로 상향 이동하였다.

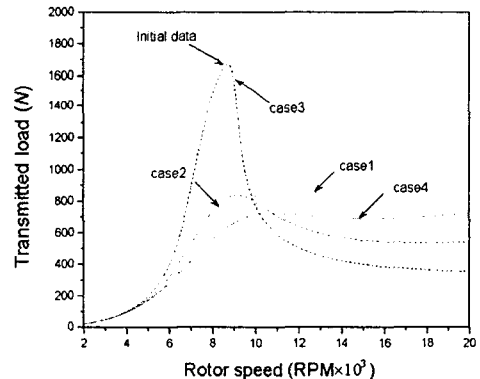


Fig. 6 Transmitted load for each design case

4.2 운전속도가 고려된 경우

앞의 예에서와 같이 1 차 위험속도영역에서 최대 전달력은 최적탐색에 의해 감소시킬 수 있었으나, 일정 운전속도이상에서는 속도의 증가와 함께 그 때의 전달력도 동시에 증가하는 비선형 경향을 보이고 있다. 따라서 운전속도를 고려한 최적해 탐색의 필요성이 있다.

$$\text{목적함수: } f(x) = TR \Rightarrow \text{minimize}$$

$$\text{설계변수: } x = (R, L, C)$$

$$TR = \alpha \frac{F'_{max}}{F_{max}} + \beta \frac{F'_{op}}{F_{op}} \quad (14)$$

여기서 $\alpha=3$, $\beta=1$, 운전속도는 18000 RPM 이다

Fig. 7 은 탐색 수행결과를 나타낸 것이다. 여기서 Optimum1 은 운전속도를 고려한 경우, Optimum2 는 운전속도를 고려하지 않은 경우이다. 그림에서와 같이 위험속도에서의 전달력은 Optimum1 이 높으나, 운전속도영역에선 Optimum2 가 더욱 높은 전달력 값을 보이고 있다.

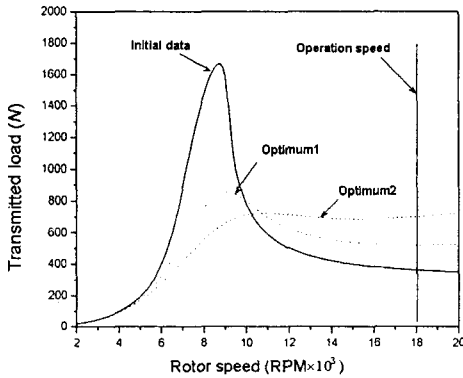


Fig. 7 Transmitted load for each design case

Table 1 은 운전속도를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우의 최대 전달력과 운전속도에서의 전달력을 나타내며, Table 2 는 탐색된 파라미터의 결과를 나타낸다.

Table 1 Effect of operation speed

	ω_{in} (RPM)	F_{max} (N)	F_{op} (N)
Initial data	8700	16668.9	364.2
Optimum 1	9100	854.97	522.18
Optimum 2	10800	723.017	700.99

Table 2 Results of optimal design

	C (μ m)	R (mm)	L (mm)
Initial data	100.0	64.8	22.7
Optimum 1	89.44	70.0	35.0
Optimum 2	104.12	70.0	35.0

5. 결론

항공기 엔진에서와 같이 롤러베어링으로 지지되는 고속 회전체 또는 추가적인 감쇠요소가 필요로 되는 경우에 가장 많이 적용되는 스쿼즈필름댐퍼의 특성을 검토하고 3 가지 설계파라미터(감쇠

기의 길이, 반경, 틈새)에 대하여 전달력을 최소화하는 최적설계를 수행하였다. 최적탐색 알고리즘으로 향상된 유전알고리즘을 적용하였으며, 반경계적의 비선형영역까지 확장함으로써 일반화된 시스템에 대한 최적설계를 수행하였다.

운전영역 내에서 전달력의 최소화는 하는 경우, 초기 위험속도에서의 전달력을 최소화하는 결과를 탐색하였으나, 이 경우 일정시점에서 운전속도의 증가에 함께 전달력 역시 증가하는 경향이 있음을 알 수 있었다. 따라서 실제 적용에서는 1 차 위험속도에서 뿐만 아니라 운전속도에서의 전달력을 함께 고려하는 것이 타당하리라 판단된다.

참고문헌

- (1) Malanowski, S., 1979, "Case Histories in which Subsynchronous or Synchronous Vibration Amplitudes Have Been Minimized after Employing Custom Designed Damper Bearings," Proceedings of the Conference on Stability and Dynamic Response of Rotors with Squeeze Film Bearings, University of Virginia.
- (2) Cunningham, R. E., Fleming, D. P., and Gunter, E. J., 1975, "Design of a Squeeze Film Damper for a Multi-mass Flexible Rotor," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 97, No. 4, pp. 1383-1389
- (3) Mohan, S., and Hahn, E. J., 1974, "Design of SqueezeFilm Damper Support for Rigid Rotors." ASME Journal of Engineering for Industry, pp. 976-982
- (4) Chen, W. J., Rajan, M., Rajan, S. D., and Nelson, H. D., 1988, "The Optimal Design of Squeeze Film Dampers for Flexible Rotor Systems." ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 110, pp. 166-174
- (5) 이용복, 김창호, 정시영, 이남수, 최동훈, 2000, "ER 스쿼즈 필름 댐퍼로 지지된 고속 회전 로터의 동적계수에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 제 10 권, 제 6 호, pp. 1029-1034
- (6) Kim, Y. C. and Yang, B. S., 2001, "Enhanced Genetic Algorithm for Fast and Accurate Global and Local Optimization Search", The Eight International Congress on Sound and Vibration, Hong Kong.
- (7) Friswell, M. I. and Mottershead, J. E., 1996, "Finite Element Model Updating in Structural Dynamics", Kluwer Academic Publishers, Vol. 38, pp. 56-59,
- (8) Nelder, J. A. and Mead, R., 1965, "A Simplex Method for Function Minimization", Computer Journal, Vol. 7, pp. 308-313.
- (9) Greenhill, L. M., and Nelson, H. D., 1981, "Iterative Determination of Squeeze Film Damper Eccentricity for Flexible Rotor Systems", ASME Journal of Mechanical Design, 81-DET-87, pp. 1-5.