

인공생명 알고리즘을 이용한 유체마운트의 최적설계

Optimal Design of Fluid Mount Using Artificial Life Algorithm

안영공[†] · 송진대^{**} · 양보석^{*} · 김동조^{*}

Young Kong Ahn, Jin Dae Song, Bo-Suk Yang and Dong-Jo Kim

(2002년 1월 14일 접수 : 2002년 7월 8일 심사완료)

Key Words : Fluid Mount(유체마운트), Artificial Life Algorithm(인공생명 알고리즘), Optimum Design(최적설계)

ABSTRACT

This paper shows the optimal design methodology for the fluid engine mount by the artificial life algorithm. The design has been commonly modified by trial and error because there is many design parameters that can be varied in order to minimize transmissibility at the desired fundamental resonant and notch frequencies. The application of trial and error method to optimization of the fluid mount is a great work. Many combinations of parameters are possible to give us the desired resonant and notch frequencies, but the question is which combination provides the lowest resonant peak and notch depth. In this study, the enhanced artificial life algorithm is applied to get the desired fundamental resonant and notch frequencies of a fluid mount and to minimize transmissibility at these frequencies. The present hybrid algorithm is the synthesis of an artificial life algorithm with the random tabu (R-tabu) search method. The hybrid algorithm has some advantages, which 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. The results show that the performance of the optimized mount compared with the original mount is improved significantly.

1. 서론

엔진과 차체를 결합하는 엔진마운트의 제진특성은 차량의 승차감에 크게 영향을 미친다. 엔진 마운트는 일반적으로 진동을 한 곳에서 다른 곳으로 전달되는 것을 막기 위해 두 구조물을 서로 결합하는데 사용되며, 정적으로는 두 구조물을 서로 고정시키는 탄성요소와 동적으로는 서로 절연시키는 요소들로 구성되어 있다. 고무와 강성이 낮은 금속판으로 구성된 고무마

운트는 다양한 산업현장에서 사용되고 있으나, 가진 주파수의 증가와 고무마운트의 동강성(dynamic stiffness)이 함께 상승하는 단점을 가지고 있다. 그러므로 두 구조물의 결합상태를 좋게 하기 위해, 마운트의 강성을 증가시키면, 동강성이 증가하게 되어 절연 효과가 저하하게 된다. 한편, 절연효과를 높이기 위해서는 보다 낮은 정강성(static stiffness)이 요구되며, 그 결과로 구조물 사이의 결합능력은 떨어진다. 엔진마운트 설계의 주요 과제는 정적으로는 강하고, 동적으로는 유연하게 만드는 것이 요구되어 진다. 이러한 고무마운트의 단점을 극복하기 위해, 유체마운트(fluid mount)가 1960년대 초반에 개발되었고, 그 이후 유체마운트에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔으며, 또한 마운트 및 마운트 시스템의 최적설계에 관한 연구도 활발하게 이루어져 왔다.^(1~7) 그러나 이들

[†] 책임저자, 정회원, 부경대학교 공과대학 기계공학부
E-mail : ahn@mail1.pknu.ac.kr

Tel : (051) 620-1618, Fax : (051) 620-1405

^{*} 정회원, 부경대학교 공과대학 기계공학부

^{**} 부경대학교 대학원

최적설계에 사용된 최적화 기법은 국부해에 수렴할 가능성을 가지는 단점이 있다.

유체마운트는 승용차, 트럭, 버스등에 이용되고 있으며, 최근에는 항공기용 엔진마운트, 헬리콥터 pylon 절연기 등과 같은 항공기산업에도 이용되고 있다.⁽⁴⁾

유체마운트는 2개의 고무챔버(chamber) 내부에 유체가 채워져 있고, 이 두 챔버를 연결하는 유체이동통로(inertia track)로 유체의 이동이 가능한 고무마운트이다. 유체이동통로는 마운트의 내부 혹은 외부에 설치 되어져 있다. 2개의 유연한 고무챔버 사이로 이동하는 유체의 질량과 고무부분의 확장에 의한 탄성이 동흡진기 효과를 일으키게 된다.

유체마운트를 이용하는 차량의 운전조건 등에 의해 요구되어지는 공진 및 노치(notch) 주파수에서의 진동절연을 극대화하기 위해서 변경할 수 있는 마운트의 설계변수는 많이 있다. 이 설계변수들은 일반적으로 설계자에 의해 시행 착오적인 방법으로 결정되어져 왔다. 이와 같은 방법으로 요구되는 공진 및 노치 주파수는 얻을 수 있지만, 문제는 최소의 공진피크와 최대의 노치 깊이는 구할 수 없으며, 마운트의 성능을 최적화 하기 위해서는 이들 설계변수를 복합적으로 평가하는 것이 필요하다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 설계자에게 요구되어지는 마운트에 기본 공진주파수 및 노치주파수에서의 진동 전달률을 최소화하는 문제를 고려하였으며, 최적설계를 위한 최적화 기법으로는 전역해 탐색이 가능한 인공생명 알고리즘을 도입하였다.⁽⁸⁾ 본 연구에 사용된 인공생명 알고리즘(artificial life algorithm)은 종래의 알고리즘⁽⁹⁾에 랜덤타부(random tabu) 탐색법⁽¹⁰⁾을 결합하여 계산 시간과 최적해의 정밀도를 향상시킨 최적화 기법이다. 연구에 이용된 유체마운트는 차량에 주로 이용되는 엔진마운트로서 참고문헌(1)에 소개된 2개의 챔버와 내부에 유체의 이동통로를 가진 마운트이다.

최적화된 마운트의 성능이 본래의 것에 비해 월등히 향상되었음을 수치시뮬레이션을 통하여 입증하였다. 또한 종래의 최적화기법으로 널리 알려진 SQP(sequential quadratic programming)⁽¹¹⁾에 의한 최적화 결과와 비교하여 본 인공생명 알고리즘의 유용성을 검증하였다.

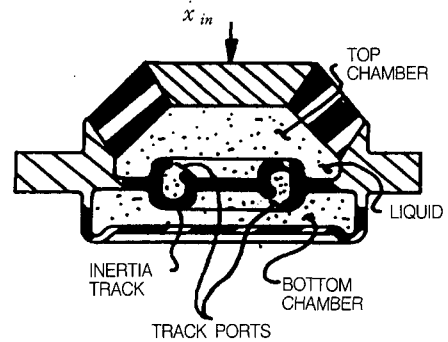


Fig. 1 Fluid mount with inertia track

2. 유체마운트

본 연구에서 사용된 마운트는 차량용 엔진이나 트럭의 캡(cab) 지지부에 일반적으로 이용되는 것으로, 마운트의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.⁽¹⁾ 마운트의 절연효과를 검증하는데 사용되는 마운트의 동강성 $D(s)$ 는 Bond graph 모델로부터 얻을 수 있다. 동강성은 식 (1)과 같이 변위 x 에 대한 힘 F 의 비로 나타내어지며, 동강성이 낮을 수록 노치주파수에서 높은 마운트의 동적 절연효과를 가진다.

$$D(s) = \frac{F(t)}{x(t)} = K_r + jK_I + j\omega R_r + \left(\frac{A_p^2}{C_T}\right) \frac{(1/(I_f C_B) - \omega^2 + j\omega R_o / I_f)}{(1/C_B + 1/C_T) / I_f - \omega^2 + j\omega R_o / I_f} \quad (1)$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$, ω 는 각주파수(rad/s), K_r 과 K_I 는 고무의 실수부와 허수부의 강성계수, R_r 은 고무의 감쇠계수, A_p 는 상부 챔버의 유효 피스톤 단면적, R_o 는 유체이동 통로에 작용하는 유체저항을 나타낸다. $C_B (= 1/K_u)$ 와 $C_T (= 1/K_{ub})$ 는 상부 및 하부 챔버의 컴플라이언스(compliance)로서, 고무의 탄성 공동(elastomeric cavities)현상에 의해 변화하는 압력 변화에 대한 챔버의 체적변화로서 나타내어지고, I_f 는 유체이동 통로로 이동하는 유체관성으로서, 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$I_f = \frac{\rho L}{g A_t} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, L 과 A_t

는 유체통로의 길이와 단면적을 나타낸다. 식 (1)로부터 마운트의 절연효과를 평가하는 다른 유용한 방법인 마운트의 동적 전달률(dynamic transmissibility)을 유도하기 위해, 복소 강성인 식 (1)을 마운트의 강성특성을 나타내는 실수부 K' 와 감쇠특성을 나타내는 허수부 K'' 로 분리하면, 다음과 같이 표현된다.

$$K' = K_r + \left(\frac{A_p^2}{C_T}\right) \times \frac{(1/(I_f C_B) - \omega^2)((1/C_B + 1/C_T)/I_f - \omega^2 + (\omega R_o/I_f)^2)}{\{(1/C_B + 1/C_T)/I_f - \omega^2\}^2 + (\omega R_o/I_f)^2} \quad (3)$$

$$K'' = K_f + \omega R_r + \left(\frac{A_p^2}{C_T}\right) \times \frac{\omega R_o/(I_f^2 C_T)}{\{(1/C_B + 1/C_T)/I_f - \omega^2\}^2 + (\omega R_o/I_f)^2} \quad (4)$$

동적 전달률 T 는 입력에 대한 출력의 비로서 다음과 같이 정의된다.

$$T = \left(\frac{K'^2 + K''^2}{(K' - M\omega^2)^2 + K''^2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

여기서 M 은 마운트에 의해 지지되는 엔진의 질량에 해당된다. 만약, 비감쇠 마운트로 가정하면 ($K_f = R_r = R_o = 0$), 식 (1)의 동강성 D 와 전달률 T 는 각각 한 쌍의 비감쇠 극(pole)과 영(zero)의 값을 나타낸다. 동강성과 전달률의 최대값은 극인 다음의 공진 주파수들에서 발생한다.

$$\omega_{rD} = \sqrt{\frac{C_B + C_T}{C_B C_T I_f}} \quad (6)$$

$$\omega_{r1T} = \sqrt{\frac{A - \sqrt{-4C_B C_T I_f M (A_p^2 + K_r (C_B + C_T)) + A^2}}{2C_B C_T I_f M}} \quad (7)$$

$$\omega_{r2T} = \sqrt{\frac{A + \sqrt{-4C_B C_T I_f M (A_p^2 + K_r (C_B + C_T)) + A^2}}{2C_B C_T I_f M}} \quad (8)$$

여기서

$$A = C_B I_f (A_p^2 + C_T K_r) + M(C_B + C_T)$$

또한, ω_{rD} 와 ω_{r2T} 는 유체의 이동에 의한 동강성과 전달률의 공진주파수(rad/s)이고, ω_{r1T} 는 질량 M 과 마운트에 의해 결정되는 전달률의 기본 공진주파수(rad/s)이다. 동강성과 전달률의 노치주파수는 일치하며, 다음의 노치주파수라 불리는 영역에서 최소가 된다.

$$\omega_{ns} = \sqrt{\frac{A_p^2 + K_r (C_B + C_T)}{(A_p^2 + K_r C_T) C_B I_f}} \quad (9)$$

3. 감도해석 (Sensitivity Analysis)

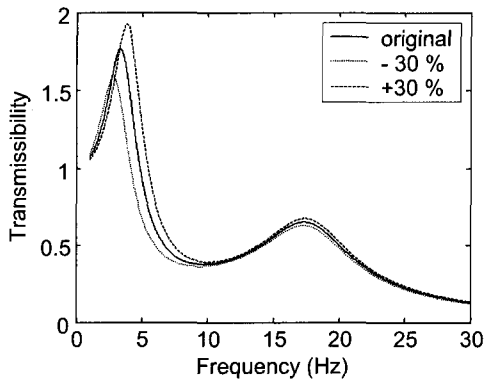
마운트의 매개변수에 대한 추정오차가 얼마나 마운트 제진성능에 영향을 미치는가를 평가하고, 또한 본 최적설계에 의한 결과를 검토하기 위해 감도해석을 수행한다. 동적 전달률 T 는 각 매개변수 값의 변화에 따른 감도를 결정하기 위한 수치 시뮬레이션에 사용되었다. 매개변수로는 고무강성의 실수부, 유체의 이동관성, 유체저항, 유효피스톤 단면적, 상부 챔버의 체적강성(volumetric stiffness)이 고려된다. 그 외 나머지 매개변수인 고무감쇠, 고무 강성의 허수부, 체적감쇠 계수들의 변화에 따른 마운트 특성변화는 미소하므로 고려되지 않았다.

각 매개변수 오차의 범위는 -30%에서 +30%까지로 하고, 마운트의 성능은 오차가 없는 경우와 비교되었고, Table 1에 오차가 없는 경우의 매개변수를 나타내었다. 마이너스 오차를 가지는 경우는 매개변수의 과소추정을 의미하고, 양의 오차는 매개변수의 과대추정을 의미한다.

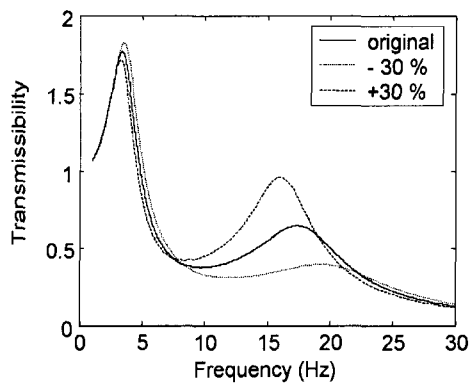
매개변수의 변화에 따른 전달률 특성을 Fig. 2에 나타내었고, Fig. 2에서 오차가 없는 매개변수의 전달률 곡선에 대한 기본공진, 노치 및 유체의 이동에 의한 주파수는 3.380 Hz, 9.72 Hz 및 17.4 Hz로 나타났다. 또한 식 (7)~(9)에 Table 1에 주어진 설계변수 값을 대입하면 기본공진, 노치 및 유체유동에 의한 주파수는 3.58 Hz, 7.46 Hz 및 18.4 Hz가 된다. 이는 Fig. 2에서 얻어진 값과 비교하여 약간의 차이가 있다. 식 (7)~(9)는 비감쇠 마운트로 가정하여 얻은

Table 1 Mount parameters used in numerical simulation

Parameters	Original value
Effective piston area A_p	2.19 mm ²
Fluid inertia I_f	8.67 MN · s ² /m ⁵
Fluid resistance R_o	0.463 GN · s/m ⁵
Imaginary spring rate of rubber K_I	14.0 kN/m
Real spring rate of rubber K_r	99.8 kN/m
Top volumetric stiffness K_{vt}	91.3 GN /m ⁵
Bottom volumetric stiffness K_{vb}	2.10 GN /m ⁵
Rubber damping R_r	0 N · s/m
Engine mass M	175.12 kg

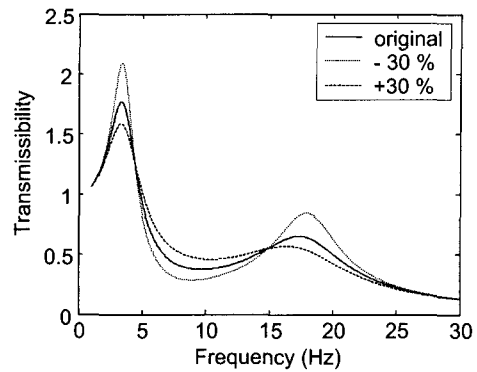


(a) Rubber stiffness K_r

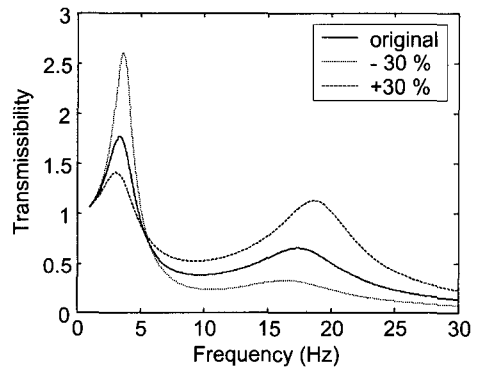


(b) Fluid inertia I_f

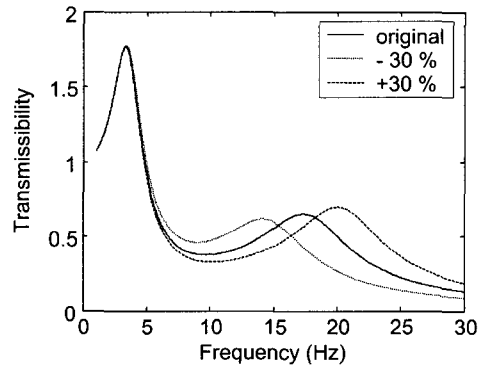
식이기 때문에 값의 차이가 발생하지만 마운트의 윤곽을 결정하는 설계 초기단계에서 유용한 가치가 있는 식이다.



(c) Fluid resistance R_o



(d) Effective piston area A_p



(e) Volumetric stiffness K_{vt}

Fig. 2 Effect of design parameters on transmissibility

3.1 고무강성

Fig. 2(a)에 보이듯이 고무강성 K_r 의 변화는 마운트의 기본 공진주파수에 크게 영향을 미친다. 강성이 과대 추정되면 기본 공진주파수가 상승하며, 또한 마운트 내부의 감쇠비가 감소하여 공진 진폭이 증가한다.

3.2 유체의 이동관성

유체 이동관성 I_f 의 특성은 마운트의 기본 공진주파수에 거의 영향을 끼치지 않으나, 유체이동에 의한 공진주파수에 크게 영향을 미친다. 유체이동 관성이 과대 추정되면 그 공진주파수는 낮아지나, 관성력의 증가로 공진진폭은 증가함을 Fig. 2(b)에서 알 수 있다.

3.3 유체저항

Fig. 2(c)에서는 마운트의 감쇠특성은 유체저항 R_o 의 변화에 크게 좌우됨을 나타내고 있다. 유체저항이 과대 추정되면, 마운트의 기본 공진주파수와 유체이동에 의한 공진주파수에서의 전달률이 낮아지는 반면, 노치주파수에서는 제진효과가 저하된다.

3.4 피스톤 단면적

유체이동 통로 내로 유체를 주입시키는 유체 공동의 유효면적으로 정의되는 피스톤 단면적은 유체저항의 경우와 같이 마운트의 진동절연 효과에 크게 영향을 미치는 매개변수 중의 하나이다.

Fig. 2(d)에 보이듯이 피스톤 면적의 과대추정은 기본공진주파수에서 전달률의 피크를 낮추나, 반면 유체유동에 의한 공진주파수와 노치주파수에서의 전달률이 상승하는 결과를 가져온다.

3.5 체적강성

마운트의 체적 혹은 벌지(bulge)강성은 Fig. 2(e)에 보이듯이 기본 공진주파수에 거의 영향을 끼치지 않으나, 노치 및 유체이동에 의한 공진주파수에 크게 영향을 미친다. 체적강성이 과대 추정되면 노치주파수에서의 진동 절연효과가 상승하며, 또한 유체이동에 의한 공진주파수도 상승한다.

4. 유체마운트의 최적화

향상된 인공생명 알고리즘⁽⁸⁾(enhanced artificial life algorithm: EALA)은 함수최적화를 위한 인공생명 알고리즘⁽⁹⁾과 랜덤타부 탐색법⁽¹⁰⁾이 조합된 최적화 기법으로 그 순서도를 Fig. 3에 나타내었다.

EALA는 설계변수의 정의영역에 대응하는 가상 공간 내에 2종 이상의 인공생명체와 인공자원이 존재하는 것으로 가정하고, 모든 개체는 지각기능, 생식기능,

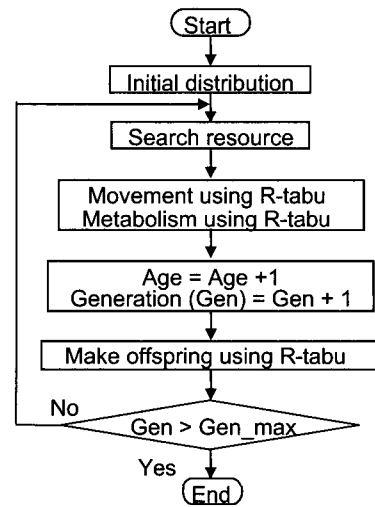


Fig. 3 Flow chart of the enhanced artificial life algorithm

대사기능 그리고 이동기능 등을 보유하고 있는 것으로 가정한다. 초기에 임의로 분포된 개체들은 자원을 근방영역 $C^{(9)}$

$$C = \left\{ p \in R^N \mid \|p - p_s\|^2 \leq R_d e^{-(g/G)\alpha} \right\} \quad (10)$$

내에서 탐색한다. 여기서 p_s 는 개체 자기자신의 위치, R^N 은 N 차원 실수 집합, N 은 설계변수의 수, R_d 는 초기값, g 는 현재 세대수, G 는 최종 세대수, α 는 상수 등을 나타낸다. 탐색된 자원이 없을 때 근방영역을 다수의 스텝으로 나누어 각 스텝에 대해 임의의 점을 선택하여 적응도가 현 위치보다 우수한 위치를 선택하고, 모든 스텝에 대해 선정된 위치 중 가장 적응도가 우수한 위치로 이동한다. 이때, 랜덤타부 탐색법을 적용함으로써 근방 영역을 여러 스텝으로 나누어 보다 효과적으로 탐색을 하게 된다. 탐색된 자원이 있을 때, 자원을 향해 이동하고 대사에 의한 폐기물은 랜덤타부 탐색법을 적용하여 선정된 장소에 폐기한다.

모든 개체는 일정 연령에 도달하게 되고, 내부 에너지가 충분하면, 생식을 할 조건이 된다. 그러면, 근방영역 내에서 동종의 생명체를 찾아 생식 확률에 따라 자손을 낳는다. 이 때, 자손이 탄생하는 위치는 부모개체의 위치에 대한 근방 영역에서 랜덤타부 탐색법에 의해서 결정된다. 한 세대가 지나면 각 개체는

나이를 먹고 내부 에너지는 규정된 양만큼 잃게 된다. 세대가 거듭 되어 자원을 얻는 기회가 적어지고 나이가 많은 개체들은 내부에너지가 감소해 결국 소멸하게 된다. 개체들은 현재 자신의 위치보다 적응도가 높은 위치에 자원을 만들고, 자손을 낳고, 이동을 한다. 세대가 거듭되면서 개체들은 군집을 이루게 되며, 군집의 위치는 최적점이 존재하는 곳이 된다.

본 논문에서는 기본공진주파수와 노치주파수의 전달률 T_{r1} 와 T_{rs} 를 동시에 혹은 각각을 최소화하는 것을 목적 함수로 정의하였고, 채택된 설계변수는 다음과 같다.

$$\mathbf{X} = \{A_p, I_f, R_o, K_i, K_r, K_{ut}, K_{vb}\}^T \quad (11)$$

최적화문제는 구속조건

$$0.7\mathbf{X}_0 < \mathbf{X} < 1.3\mathbf{X}_0 \quad (12)$$

를 만족하면서 목적함수

$$f(\mathbf{X}) = \alpha_1\beta_1T_{r1}(\mathbf{X}) + \alpha_2\beta_2T_{rs}(\mathbf{X}) \quad (13)$$

를 최소화하는 \mathbf{X} 를 찾는 것이다.

여기서 α_1 과 α_2 는 가중치를 나타내고,

$\beta_1(=1/T_{r1}(\mathbf{X}_0))$, $\beta_2(=1/T_{rs}(\mathbf{X}_0))$ 는 스케일 변수이다. 또한 \mathbf{X}_0 는 Table 1에 제시하고 있는 설계 변수 값들이다. 특히 요구되어지는 기본공진 및 노치 주파수는 오차가 없는 매개변수의 전달률 곡선에서 구한 3.380 Hz와 9.72 Hz로 정의하였다.

그 기본공진주파수와 노치주파수들은 차량에 따라서 차이가 있을 수 있다. 하지만, 주 운전주파수에서

전달률을 최소화 하기위해서 노치가 주 운전주파수에서 발생하도록 또한 기본 공진주파수는 엔진의 공회전주파수와 관련이 있으므로, 기본 공진주파수는 공회전주파수와 일치하지 않도록 설계되어진다. 이와 같은 조건을 고려하여 수치실험은 다음 3가지 경우에 대해서 시행되었다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{case 1) } a_1 = 1, a_2 = 0 \\ \text{case 2) } a_1 = 0, a_2 = 1 \\ \text{case 3) } a_1 = 1, a_2 = 1 \end{array} \right\} \quad (14)$$

또한 EALA를 검증하기 위해 SQP에 의한 최적화 결과들과 비교를 하였다. SQP는 초기치에 의존하는 특성을 가지고 있기 때문에, SQP의 서로 다른 3가지 탐색 초기치에 대해서 식 (14)와 같은 3가지 경우의 수치실험을 시행하였다. 3가지 탐색 초기치들은 모든 설계변수의 하한치, 그리고 Table 1에 주어지는 설계 변수 값, 마지막으로 상한치 등이다. 이들은 하첨자 min, orig 그리고 max로 각각 표시하였다

Case 1)의 최적화 목적은 엔진 공회전주파수에 관련된 기본 공진주파수에서의 전달률을 최소화하여 진동절연효과를 극대화 하는 것이다. 기본 공진주파수에서의 전달률 만을 고려하여 최적화한 설계변수는 Table 2에 나타내었고, 이에 대응하는 가진 주파수에 대한 전달률과 동강성을 Fig. 4에 그리고 Fig. 4를 요약하여 Table 3에 나타내었다. EALA에 의해 최적화된 결과와 SQP_{orig}, SQP_{max}에 의한 결과들이 기본 공진주파수에서의 전달률이 거의 비슷한 수준에 도달한 것을 확인할 수 있다. 그러나 SQP_{min}의 결과는 다른 최적화된 결과에 비해 상대적으로 높은 전달률을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 4(a)에서 SQP_{min}에 의

Table 2 Optimal parameters of the optimized mount for the fundamental resonant frequency mode

	Original value	EALA		SQP _{min}		SQP _{orig}		SQP _{max}	
		Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)
A_p	2.190E-03	2.847E-03	30.00	2.389E-03	9.08	2.847E-03	30.00	2.847E-03	30.00
I_f	8.670E+06	6.425E+06	-25.90	6.105E+06	-29.58	8.847E+06	2.04	1.127E+07	30.00
R_o	4.630E+08	6.019E+08	30.00	3.592E+08	-22.42	6.019E+08	30.00	6.019E+08	30.00
K_i	1.400E+04	1.811E+04	29.35	1.443E+04	3.07	1.820E+04	30.00	1.820E+04	30.00
K_r	9.980E+04	8.710E+04	-12.73	6.986E+04	-30.00	9.574E+04	-4.07	1.105E+05	10.69
K_{ut}	9.130E+10	1.104E+11	20.97	6.397E+10	-29.93	9.162E+10	0.35	1.187E+11	30.00
K_{vb}	2.100E+09	1.674E+09	-20.31	1.470E+09	-30.00	1.705E+09	-18.81	1.470E+09	-30.00

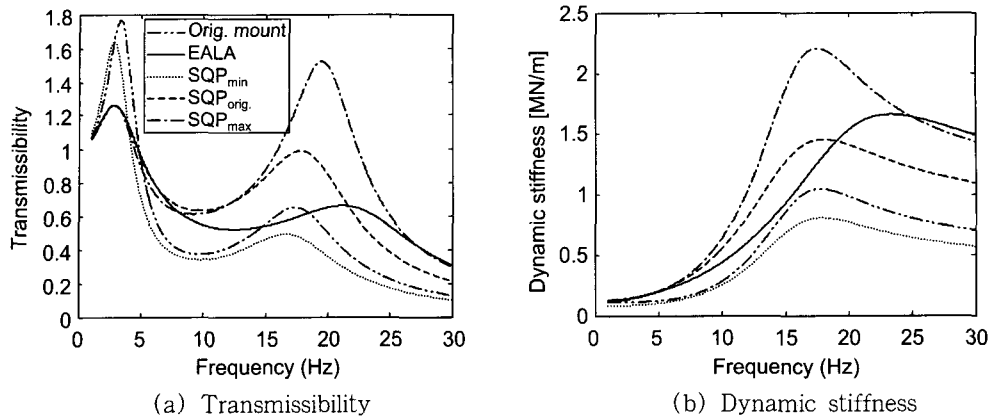


Fig. 4 Property of the original and optimized mounts for the notch frequency mode

Table 3 Property of the original and optimized mounts for the fundamental resonant frequency mode

	Original value	EALA		SQP _{min}		SQP _{orig}		SQP _{max}	
		Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)
T_{r1}	1.770	1.258	-28.90	1.639	-7.41	1.263	-28.64	1.265	-28.55
T_{r1}^* [MN/m]	0.115	0.141	22.59	0.088	-23.71	0.145	26.13	0.148	29.28
ω_{r1} (Hz)	3.380	2.879	-14.82	2.879	-14.82	2.887	-14.56	2.879	-14.82
T_{ns}	0.374	0.520	39.29	0.342	-8.46	0.632	69.16	0.610	63.35
K_{ns}^* [MN/m]	0.264	0.649	146.08	0.239	-9.50	0.524	98.57	0.526	99.39
ω_{ns} (Hz)	9.721	12.565	29.25	9.753	0.32	9.759	0.39	9.215	- 5.21
T_{r2} [MN/m]	0.648	0.659	1.75	0.492	-24.03	0.987	52.42	1.518	134.46
K_{r2}^*	1.036	1.607	55.08	0.784	-24.36	1.451	40.03	2.091	101.80
ω_{r2} (Hz)	17.380	21.181	21.87	16.681	-4.02	17.850	2.70	19.524	12.34

이고 있음을 알 수 있다. Fig. 4(a)에서 SQP_{min}에 의한 결과가 노치주파수에서의 전달률은 가장 낮은 것으로 보인다. 그러나 이는 목적함수에서 평가되지 않는 것으로 최적화 관점에서는 의미 없는 것이다. 이들 중 가장 낮은 전달률을 제시하는 결과는 EALA에 의한 $T_{r1} = 1.2584$ 이다. 이는 X_o 에 의한 T_{r1} (X_o)에 대해 약 28.9% 감소한 것임을 Table 3에서 확인할 수 있다. 동강성의 특성은 전달률의 노치주파수 부근으로부터 유체의 이동에 의한 공진주파수 부근영역의 경향과 일치하므로 Case 1), 2), 3)에 대해서 설명은 생략한다.

Case 2)의 최적화는 주 운전주파수에서의 전달률만을 최소화하고자 요구되어진 노치주파수에서의 전달률만을 고려한 경우로서, 최적화된 설계변수는 Table 4에 나타내었고, 대응하는 전달률과 동강성이

Fig. 5에 그리고 Fig. 5를 요약하여 Table 5에 나타내었다. 노치주파수에서의 전달률은 EALA가 가장 낮게 나타났고, SQP_{orig}, SQP_{min} 그리고 SQP_{max}의 순으로 전달률이 증가하고 있다. 각 설계변수들의 변화는 모두 앞에서 언급한 설계변수의 감도해석에서 보여주는 경향과 일치하고 있음을 Table 5에서 확인할 수 있다. EALA와 SQP에 의해 최적화된 설계변수 값은 유사한 경향을 보인다. 즉 Case 1)의 경우와는 달리 SQP에 의한 결과들은 탐색 초기치와 관계없이 상한 혹은 하한 값으로 수렴하는 설계변수가 많다. 그러나 Table 5에서 상한 및 하한치로 수렴하지 않는 두 변수 I_f 와 K_w 의 값들은 EALA와 SQP의 3가지 탐색조건에 의한 결과들간에 상당한 차이를 보이고 있다. SQP에 의한 I_f 를 제외한 다른 6개의 설계변수 값을 EALA에 의해 얻어진 설계변수 값으로 고정시

Table 4 Optimal parameters of the optimized mount for the fundamental resonant frequency mode

	Original value	EALA		SQP _{min}		SQP _{orig}		SQP _{max}	
		Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)
A_p	2.190E-03	1.533E-03	-30.00	1.533E-03	-30.00	1.533E-03	-30.00	1.533E-03	-30.00
I_f	8.670E+06	6.694E+06	-22.79	7.402E+06	-14.62	6.460E+06	-25.49	7.674E+06	-11.49
R_o	4.630E+08	3.241E+08	-30.00	3.241E+08	-30.00	3.241E+08	-30.00	3.241E+08	-30.00
K_i	1.400E+04	9.837E+03	-29.73	9.800E+03	-30.00	9.800E+03	-30.00	9.800E+03	-30.00
K_r	9.980E+04	6.986E+04	-30.00	6.986E+04	-30.00	6.986E+04	-30.00	6.986E+04	-30.00
K_{vt}	9.130E+10	1.187E+11	29.97	1.187E+11	30.00	1.187E+11	30.00	1.187E+11	30.00
K_{vb}	2.100E+09	2.558E+09	21.81	1.560E+09	-25.72	2.692E+09	28.21	2.430E+09	15.71

Table 5 Property of the original and optimized mounts for the notch frequency mode

	Original value	EALA		SQP _{min}		SQP _{orig}		SQP _{max}	
		Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)
T_{r1}	1.770	2.999	69.44	2.901	63.89	3.021	70.70	2.963	67.37
T_{r1}^* [MN/m]	0.115	0.075	-34.82	0.072	-37.09	0.075	-34.43	0.074	-35.72
ω_{r1} (Hz)	3.380	3.127	-7.48	3.059	-9.48	3.139	-7.12	3.099	-8.30
T_{ns}	0.374	0.115	-69.15	0.124	-66.74	0.113	-69.86	0.125	-66.56
K_{ns}^* [MN/m]	0.264	0.104	-60.62	0.098	-62.68	0.106	-59.93	0.097	-63.22
ω_{ns} (Hz)	9.721	11.341	16.66	10.606	9.10	11.583	19.15	10.504	8.05
T_{r2} [MN/m]	0.648	0.290	-55.21	0.341	-47.39	0.275	-57.55	0.356	-45.05
K_{r2}^*	1.036	0.858	-17.19	0.901	-13.02	0.844	-18.55	0.913	-11.88
ω_{r2} (Hz)	17.380	21.785	25.35	20.790	19.62	22.133	27.35	20.542	18.19

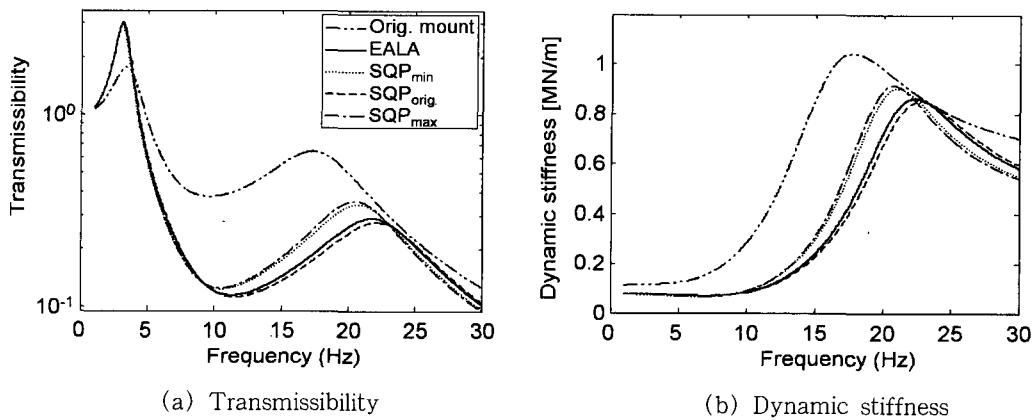


Fig. 5 Property of the original and optimized mounts for the notch frequency mode

Table 6 Optimal parameters of the optimized mount for the modes of the notch and fundamental resonant frequencies

	Original value	EALA		SQP _{min}		SQP _{orig}		SQP _{max}	
		Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)
A_p	2.190E-03	2.044E-03	-6.68	2.087E-03	-4.69	2.087E-03	-4.69	2.087E-03	-4.69
I_f	8.670E+06	6.069E+06	-30.00	6.069E+06	-30.00	6.069E+06	-30.00	6.069E+06	-30.00
R_o	4.630E+08	3.241E+08	-29.99	3.241E+08	-30.00	3.241E+08	-30.00	3.241E+08	-30.00
K_i	1.400E+04	1.820E+04	30.00	1.820E+04	30.00	1.820E+04	30.00	1.820E+04	30.00
K_r	9.980E+04	6.986E+04	-30.00	6.986E+04	-30.00	6.986E+04	-30.00	6.986E+04	-30.00
K_{ut}	9.130E+10	1.187E+11	30.00	1.187E+11	30.00	1.187E+11	30.00	1.187E+11	30.00
K_{vb}	2.100E+09	1.470E+09	-29.99	1.470E+09	-30.00	1.470E+09	-30.00	1.470E+09	-30.00

Table 7 Property of the original and optimized mounts for the modes of the notch and fundamental resonant frequencies

	Original value	EALA		SQP _{min}		SQP _{orig}		SQP _{max}	
		Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)	Optimal value	Remark (%)
T_{r1}	1.770	1.833	3.57	1.802	1.82	1.802	1.82	1.802	1.82
T_{r1}^* [MN/m]	0.114	0.081	-29.26	0.082	-28.80	0.082	-28.80	0.082	-28.80
ω_{r1} (Hz)	3.380	2.952	-12.67	2.940	-13.00	2.940	-13.00	2.940	-13.00
T_{ns}	0.374	0.193	-48.26	0.200	-46.37	0.200	-46.37	0.200	-46.37
K_{ns}^* [MN/m]	0.264	0.180	-31.74	0.186	-29.48	0.186	-29.48	0.186	-29.47
ω_{ns} (Hz)	9.721	11.198	15.19	11.148	14.67	11.148	14.67	11.148	14.67
T_{r2} [MN/m]	0.648	0.458	-29.26	0.479	-26.10	0.479	-26.10	0.479	-26.10
K_{r2}^*	1.036	1.455	40.38	1.516	46.26	1.516	46.26	1.516	46.26
ω_{r2} (Hz)	17.380	23.216	33.58	23.281	33.95	23.281	33.95	23.281	33.95

키고 I_f 만을 변수로 하는 1변수 문제로 치환하였을 때, 노치주파수에서의 전달률은 $I_f = 6.433 \text{ MN} \cdot \text{s}^2/\text{m}^5$ 일 때 최소가 됨을 도식적인 방법으로 확인하였다. 이는 SQP_{orig}에 의해 얻어진 결과와 가장 유사한 결과이다. EALA에 의해 얻어진 I_f 의 값과 $I_f = 6.433 \text{ MN} \cdot \text{s}^2/\text{m}^5$ 과의 차이는 약 4%이다. K_{ut} 의 영향은 상대적으로 미소하다. 그러나 I_f 와 같은 방법으로 평가를 해보면 K_{ut} 가 상한치로 수렴하는 것이 노치주파수에서 더욱 낮은 전달률을 보였다. 이는 Fig. 2(e)의 결과와 동일한 경향이다. 이에 대해서도 SQP_{orig}에 의한 결과가 더욱 좋은 추정 값을 제공하고 있으며, EALA가 뒤를 따르고 있다. EALA에 의해

최적화된 마운트의 기본 공진주파수에서의 전달률은 Table 1에 제시되는 원래의 마운트에 비해 약 69.44% 증가하였으나, 이 경우에 목적 함수로 고려하고 있는 노치주파수에서의 전달률은 약 66.5% 감소하였다.

Case 3)은 기본 공진주파수와 노치주파수에서의 전달률을 최소화하는 경우로서, 최적화된 설계변수는 Table 6에 나타내었고, 이에 대응하는 전달률과 동강성이 Fig. 6에 그리고 Fig. 6을 요약하여 Table 7에 나타내었다. Fig. 6(a), 6(b)에서 전달률과 동강성은 SQP의 3가지에 대한 결과는 하나로 겹쳐 SQP_{min}의 점선만 보이고, EALA에 의한 결과는 아래쪽 실선으로 보이고 있다. 이 경우는 Table 6 및 7로부터 확인할 수 있는 바와 같이 SQP에 의한 결과는 탐색초기

수 값을 EALA에 의해 얻어졌음을 확인할 수 있다. 상한 또는 하한치로 수렴하지 않는 유일한 설계변수인 A_b 만을 독립변수로 하고 나머지 6변수를 EALA에 의해 최적화된 설계변수 값으로 고정하여 검토한 결과 $A_b = 2.0586 \text{ mm}^2$ 일 때 최적의 결과를 얻는다는 것을 등고선 선도(contour)로부터 확인할 수 있었다. 이는 A_b 가 약 6% 감소된 상태이며, EALA에 의한 결과와 가장 근접해 있다. EALA에 의해 얻어진 마운트의 기본 공진주파수에서의 전달률은 약 3.57% 증가하였으나, 노치주파수에서의 전달률은 약 44.4% 감소하였다.

이상의 3가지의 경우에 대한 수치실험으로부터 EALA는 어떤 경우에도 최적의 해를 찾고 있으며, SQP에 의해 얻어진 가장 우수한 해의 정밀도와 같은

정도의 해를 얻을 수 있었다. 한편, SQP의 최적화 결과는 탐색초기치에 의존하기 때문에 탐색된 결과가 최적해 인지 아닌지는 SQP 자체만으로는 평가할 수 없다. 따라서 전역적 최적해를 탐색하기 위해서는 추가적인 평가방법을 필요로 하는 단점이 있다.

5. 결 론

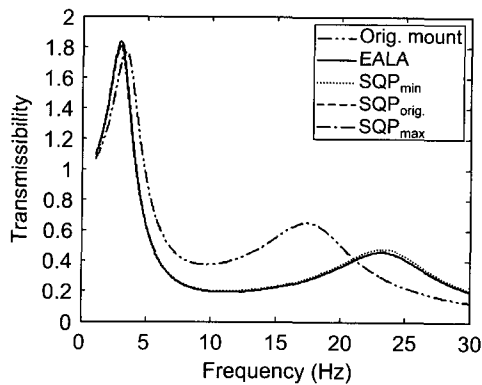
유체엔진마운트를 설계하기 위해 고려되어야 할 문제는 엔진의 주 운전주파수와 엔진의 공회전 주파수와 관련된 기본 공진주파수에서 진동 전달률을 최소로 줄이는 것이다. 따라서 마운트의 노치주파수가 엔진의 주 운전주파수에 위치하도록, 또한 공회전주파수와 기본 공진주파수가 일치하지 않도록 해야 하는데, 엔진마운트의 설계변수가 많은 관계로 마운트 설계자가 수 많은 시행착오를 통하여 설계변수를 결정 하는 것이 일반적이었다.

그러나 이런 시행착오에 의해 만들어진 마운트의 성능이 최대인가? 즉, 노치주파수에서의 전달률이 최소인가라는 의문을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 인공생명 알고리즘을 이용하여 마운트의 최적설계를 아래의 3가지 경우에 대해 수행하였다.

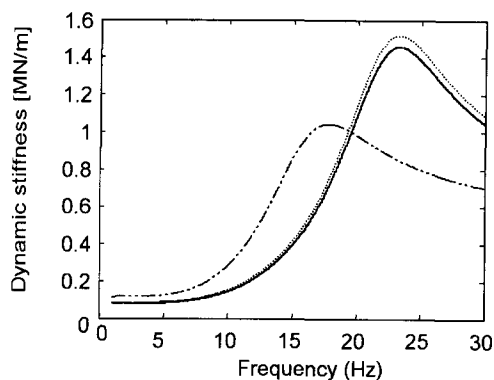
- (1) 요구되어진 기본공진주파수에서의 전달률만을 고려.
- (2) 요구되어진 노치주파수에서의 전달률만을 고려.
- (3) 요구되어진 노치 및 기본공진주파수에서의 전달률을 동시에 고려.

본 최적화 알고리즘에 의해 최적화된 마운트의 성능은 종래의 시행 착오적으로 설계된 마운트 성능에 비해 크게 향상 되었음을 수치 시뮬레이션을 통하여 검증하였고, SQP에 의한 결과와 비교하였다. 본 연구에서 고려하고 있는 유체마운트의 경우에 SQP에 의한 해의 탐색 결과는 경우에 따라 초기치에 의존하는 단점이 있는 반면, EALA는 모든 경우에 전역최적해를 탐색하였으며, 또한 SQP와 대등한 해의 정밀도를 얻을 수 있었다.

따라서 유체엔진마운트의 설계단계에 본 최적화 알고리즘을 이용하여 마운트를 최적화 함으로써 마운트의 성능을 보다 향상시킬 수 있음을 본 연구를 통하여 확인하였다.



(a) Transmissibility



(b) Dynamic stiffness

Fig. 6 Property of the original and optimized mounts for the notch frequency mode

참고 문헌

- (1) Flower, W. C., 1985, "Understanding Hydraulic Mounts for Improved Vehicle Noise Vibration and Ride Qualities," SAE Paper No. 850975.
- (2) Taylor, H. J., 1986, "The New Generation of Engine Mount," Proceedings of the SAE Milwaukee Section Lecture Series, Milwaukee, WI, SAE Paper No. 86052.
- (3) Nakajima, Z., Matsuoka, C. and Okuya, S., 1990, "The Development of the Hydraulic Strut Mount," Proceedings of the SAE Passenger Car Meeting and Exposition, Detroit, MI, SAE Paper No. 901729.
- (4) Miller, L. R., Ahmadian, M., Nobles, C. M. and Swanson, D. A., 1995, "Modeling and Performance of an Experimental Active Vibration Isolator," Trans. ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 117, No. 3A, pp. 272~278.
- (5) 안영공, 김원철, 양보석, 1998, "MR유체 엔진 마운트의 성능해석," 한국소음진동공학회지, 제 8 권, 제 3 호, pp. 457~466.
- (6) Seto, K., Sawatari, K., Nagamatsu, A., Ishihama, M. and Doi, K., 1991, "Optimum Design Method for Hydraulic Mount," SAE Paper No. 911055.
- (7) Yu, Y., Peelamedu, S. M., Naganathan, N. G. and Dukkipati, R. V., 2001, "Automotive Vehicle Engine Mounting Systems: A Survey," Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 123, pp. 186~194.
- (8) Yang, B. S. and Song, J. D., 2001, "Enhanced Artificial Life Algorithm for Fast and Accurate Optimization Search," Proceedings of Asia-pacific Vibration Conference, pp. 732~736.
- (9) Yang, B. S. and Lee, Y. H., 2000, "Artificial Life Algorithm For Function Optimization," Proceedings of 2000 ASME IDTEC/CIE DAC-14524.
- (10) Hu, N., 1992, "Tabu Search Method with Random Moves for Globally Optimal Design," Int. J. of Numerical Methods in Eng., Vol. 35, pp. 1055~1070.
- (11) The Mathworks Inc. Version 2. i (Release 12), Optimization Toolbox for Use with Matlab. 1