

인공생명을 이용한 유체마운트의 최적화 Optimal Design of Fluid Mount Using Artificial Life Algorithm

안 영공, 송 진대, 양 보석
Young Kong Ahn, Jin Dae Song, Bo-Suk Yang

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

ABSTRSCT

This paper shows the optimum design of the fluid engine mount. The design has been modified by trial and error because there is many design parameters that can be varied in order to obtain resonant and notch frequencies, and notch depth. It seems to be a great application for optimal design for the mount. 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 notch frequency of a fluid mount and minimize transmissibility at the notch frequency. The present hybrid algorithm is the synthesis of an artificial life algorithm with the random tabu (R-tabu) search method [1]. 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 a conventional engine mount can be improved significantly compared with the optimized mount.

1. 서론

엔진과 차체를 결합하는 엔진마운트의 특성에 차량동의 승차감은 크게 영향을 받는다. 이를 개선하기 위해 유체마운트에 대한 연구가 80년대 중반부터 활발히 이루어져 왔고^(1,2), 많은 승용차, 트럭, 버스에 이용되고 있으며, 최근에는 항공기용 엔진마운트, 헬리콥터 pylon 절연기 등과 같은 항공기 산업에도 이용되고 있다^(3,4).

유체마운트는 두 개의 고무챔버(chamber) 사이로 유체의 이동이 가능한 고무마운트이다. 두 챔버 사이에 유체이동 통로(inertia track)라 불리는 유로가 이들 챔버를 서로 연결하는데 사용된다. 유체이동 통로는 마운트의 내부 혹은 외부에 설치되어 있다. 두개의 유연한 고무 챔버 사이로 이동하는 유체의 질량과 고무부분의 확장에 의한 탄성이 동흡진기 효과를 일으키게 된다. 엔진마운트는 일반적으로 진동을 한 곳에서 다른 곳으로 전달되는 것을 막기 위해 두 구조물을 서로 결합하는데 사용되며, 정적으로 두 구조물을 서로 고정시키는 탄성요소와 동적으로는 서로 절연시키는 요소들로 구성되어 있다. 엔진마운트 설계의 주요 과제는 정적으로는 강하고, 동적으로는 유연하게 만들 것이 요구되어진다. 고무와 강성이 낮은 금속판으로 결합되는 고무마운트는 다양한 산업현장에 사용되고 있다. 고무마운트의 동강성(dynamic stiffness)은 가진 주파수의 증가와 함께 상승한다. 그러므로 두 구조물의 결합상태를 좋게 하기 위해 마운트의 강성을 증가시키면, 동강성은 증가하고 절연효과는 저하하게 된다. 한편, 절연효과를 높이기 위해서는 보다 낮은 정강성(static stiffness)이 요구되며, 그 결과로 구조물 사이의 결합능력은 떨어진다. 이러한 고무마운트

의 단점을 극복하기 위해, 유체마운트(fluid mount)가 개발되어졌다. 이 유체마운트의 특성에 대한 연구는 활발히 이루어져 왔으나, 최적설계에 관한 연구는 거의 이루어 지지않았고, 단순히 동흡진기의 정점 이론을 바탕으로 한 검토 정도가 이루어졌다.⁽⁵⁾

유체마운트를 이용하는 차량의 운전조건등에 의해 요구되어지는 공진 및 노치(notch) 주파수와 노치 깊이를 만족시키기 위한 마운트의 설계변수는 많이 있다. 그 설계변수들은 일반적으로 설계자에 의해 시행 착오적인 방법으로 결정되어져 왔다. 이와 같은 방법으로 요구된 공진 및 노치 주파수와 노치 깊이를 얻었지만, 문제는 최소의 공진피크와 최대의 노치 깊이를 가지는 알 수 없으며, 마운트의 성능을 최적화 하기 위해서는 그 설계변수들을 복합적으로 평가하는 것이 필요하다.

이러한 관점에서부터, 본 연구에서는 엔진과 마운트에 의해 결정되는 기본 공진주파수 및 노치 주파수와 노치 깊이를 조건으로 한 마운트의 최적 설계를 위해 인공생명 알고리즘을 도입하였다.⁽⁶⁾ 본 연구에 사용된 인공생명 알고리즘의 특징은 종래의 알고리즘⁽⁷⁾에 랜덤타부(random tabu) 탐색법이 결합되어져 계산시간과 해의 정밀도가 향상되었다. 본 연구에 이용된 유체마운트는 차량에 주로 이용되는 마운트로서 참고문헌 1에 소개된 것으로서 두 개의 챔버와 유체이동통로를 가진 마운트이다. 최적화된 마운트의 성능이 종래의 것에 비해 월등히 향상되었음을 연구결과로부터 알 수 있다.

2. 유체마운트

본 연구에 사용된 마운트는 차량의 엔진이나 트럭의 캡(cab)의 지지부에 일반적으로 이용되는 것으로서, 마운트의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.⁽¹⁾

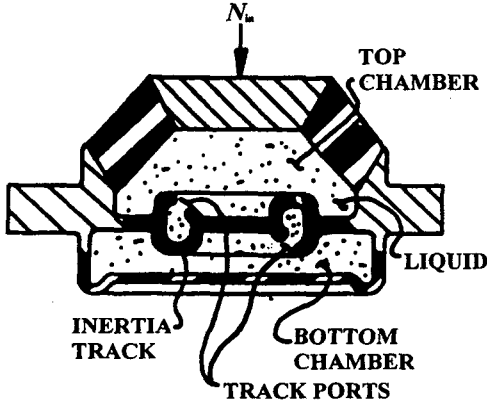


Fig. 1 Fluid mount with inertia track

Bond graph 모델로부터 마운트의 절연효과를 검증하는데 사용되는 마운트의 동강성 $D_O(s)$ 를 얻을 수 있다. 동강성은 아래의 식과 같이 변위 x 에 대한 힘 F_O 의 비로 나타내어지며, 동강성이 낮을수록 노치 주파수에서 높은 마운트의 동적 절연효과를 가진다.

$$D_O(s) = \frac{F_O(t)}{x(t)} = K_R + jK_i + j\omega R_R + \left(\frac{A_p^2}{C_T}\right) \frac{(1/(I_f C_B) - \omega^2 + j\omega R_0 / I_f)}{(1/C_B + 1/C_T) / I_f - \omega^2 + j\omega R_0 / I_f} \quad (1)$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$, ω 는 각주파수(rad/s), K_R 과 R_R 은 고무의 강성과 감쇠계수, A_p 는 상부 챔버의 유효 피스톤 단면적, R_0 는 유체이동 통로에 작용하는 유체저항을 나타낸다. C_B ($=1/K_{vb}$)와 C_T ($=1/K_{vt}$)는 상부 및 하부 챔버의 컴플라이언스(compliance)로서, 고무의 탄성공동(elastomeric cavities)현상에 의해 변화하는 압력변화에 대한 챔버의 체적변화로서 나타내어지고, I_f 는 유체이동 통로로 이동하는 유체 관성으로서, 다음식과 같이 나타내어진다.

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

여기서 ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, L 과 A_i 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'_O 와 마운트의 감쇠특성을 나타내는 허수부 K''_O 로 분리하면 다음과 같다.

$$K'_O = K_R + \left(\frac{A_p^2}{C_T}\right) \times \frac{(1/(I_f C_B) - \omega^2)((1/C_B + 1/C_T) / I_f - \omega^2 + (\omega R_0 / I_f)^2)}{\{(1/C_B + 1/C_T) / I_f - \omega^2\}^2 + (\omega R_0 / I_f)^2} \quad (3)$$

$$K''_O = K_i + \omega R_R + \left(\frac{A_p^2}{C_T}\right) \times \frac{\omega R_0 / (I_f^2 C_T)}{\{(1/C_B + 1/C_T) / I_f - \omega^2\}^2 + (\omega R_0 / I_f)^2} \quad (4)$$

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

$$T_O = \left(\frac{K'_O{}^2 + K''_O{}^2}{(K'_O - M\omega^2)^2 + K''_O{}^2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

여기서 M 은 마운트에 의해 지지되는 질량이다. 만약, 비감쇠 마운트로 가정하면($K_i = R_R = R_D = 0$), 식(1)의 동강성 $D_O(s)$ 와 전달률 T_O 는 각각 한 쌍의 비감쇠 극(pole)과 영(zero)의 값을 나타낸다. 동강성의 최대값과 전달률의 최대값은 극인 다음의 공진 주파수들에서 발생한다.

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

$$\omega_{rs1T} = \sqrt{\frac{A - \sqrt{-4C_B C_T I_f M (A_p^2 + K_r (C_B + C_T)) + A^2}}{2C_B C_T I_f M}} \quad (7)$$

$$\omega_{rs2T} = \sqrt{\frac{A + \sqrt{-4C_B C_T I_f M (A_p^2 + K_r (C_B + C_T)) + A^2}}{2C_B C_T I_f M}} \quad (8)$$

여기서

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

또한, ω_{rsD} 과 ω_{rs2T} 는 유체의 이동에 의한 동강성과 전달률의 공진 주파수(rad/s)이고, ω_{rs1T} 는 질량 M 과 마운트에 의해 결정되는 기본공진 주파수에서의 전달률의 공진 주파수(rad/s)이다.

동강성과 전달률의 노치 주파수는 일치하며 다음의 노치 주파수라 불리는 영에서 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 매개변수 추정의 정확도는 마운트 성능에 중요한 영향을 끼치는 요소 중의 하나이다. 추정오차가 얼마나 마운트 제진성능에 영향을 미치는가를 결정 및 최적설계에 의한 결과를 검토하기 위해 감도 해석을 수행한다. 동적 전달률 T_O , 노치 주파수 ω_{ns} , 전달률의 공진주파수 ω_{rs1T} , ω_{rs2T} 의 식(5)-(9)는 각 매개변수 값의 변화에 따른 감도를 결정하기 위한 수치 시뮬레이션에 사용되었다. 매개변수로는 고무강성의 실수부, 유체

동 관성, 유체저항, 유효피스톤 단면적, 체적강성 (volumetric stiffness)이 고려된다. 그 외 나머지 매개변수, 고무감쇠, 고무강성의 허수부, 체적감쇠 계수들의 변화에 따른 마운트 특성변화는 미소하므로 고려되지 않았다.

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

3.1 고무강성

Fig. 2(a)에 보이듯이 고무강성 K_R 의 변화는 마운트의 기본 공진 주파수에 크게 영향을 미친다. 강성이 과대추정 되면 마운트 내부의 감쇠비의 감소로 공진진폭과 주파수가 상승한다.

3.2 유체이동 관성

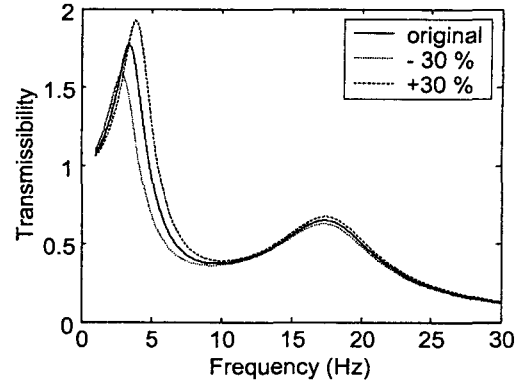
유체이동 관성 I_f 의 특성은 마운트의 기본 공진 주파수에 거의 영향을 끼치지 않으나, 유체이동에 의한 공진주파수에 크게 영향을 미친다. 유체이동 관성이 과대추정 되면 공진주파수는 낮아지나, 관성력의 증가로 공진진폭은 증가함을 Fig. 2 (b)에서 알 수 있다.

Table 1 Mount parameters used in numerical simulation

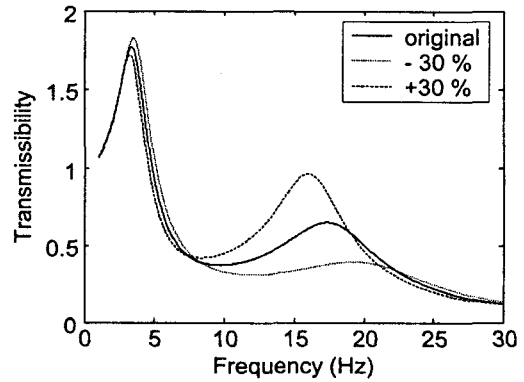
Parameters	Original value
Effective piston area A_p	$2.19 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Fluid inertia I_f	$8.67 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^5$
Fluid resistance R_0	$4.63 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^5$
Imaginary spring rate of rubber K_i	$1.40 \times 10^4 \text{ N}/\text{m}$
Imaginary spring rate of rubber K_r	$9.98 \times 10^4 \text{ N}/\text{m}$
Top volumetric stiffness K_{vt}	$9.13 \times 10^{10} \text{ N}/\text{m}^5$
Bottom volumetric stiffness K_{vb}	$2.10 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}^5$
Rubber damping R_r	$0 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$

3.3 유체저항

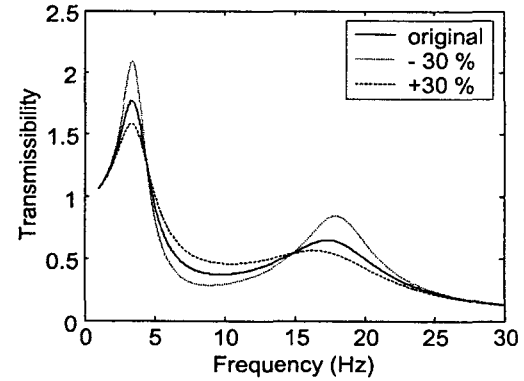
Fig. 2(c)에서는 마운트의 감쇠특성은 유체저항 R_0 의 변화에 크게 좌우됨을 나타내고 있다. 유체저항이 마운트의 공진주파수와 기본 공진주파수에서의 과대추정되면 유체이동에 의한 전달률이 낮아지는 반면, 노치 주파수에서는 제진효과가 저하된다.



(a) Rubber stiffness K_R



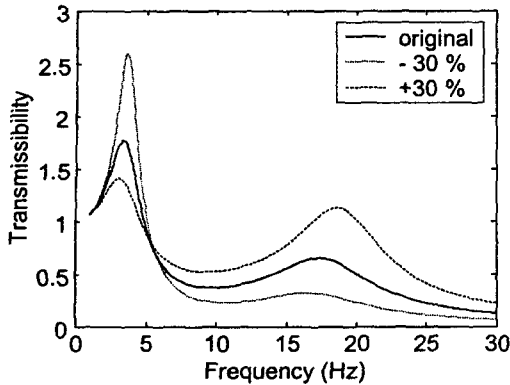
(b) Fluid inertia I_f



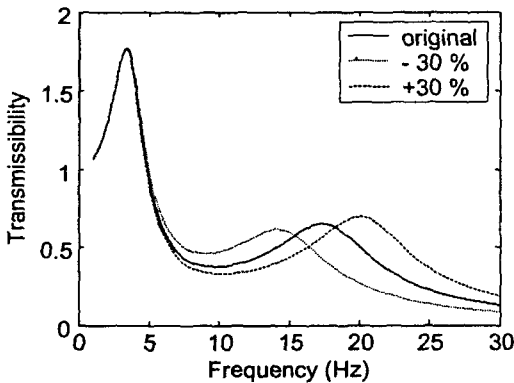
(c) Fluid resistance R_0

3.4 피스톤 단면적

유체이동 통로내로 유체를 주입시키는 유체공동의 유효면적으로 정의되는 피스톤 단면적은 유체저항의 경우와 같이 마운트의 진동절연 효과에 크게 영향을 미치는 매개변수 중의 하나이다. Fig. 2(d)에 보이듯이 피스톤 면적의 과대추정은 기



(d) Effective piston area A_p



(e) Volumetric stiffness K_v

Fig. 2 Effect of design parameters on transmissibility

본 공진주파수의 전달률의 피크를 낮추나, 반면 유체유동에 의한 공진주파수와 노치 주파수에서의 전달률은 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. 체적 혹은 벌지(bulge)강성이 과대추정 되면 노치 주파수에서의 진동 절연 효과가 상승하며, 또한 유체이동에 의한 공진주파수도 상승한다.

4. 유체마운트의 최적화

이상의 감도해석의 결과를 종합적으로 평가하여 유체마운트의 최적 설계변수를 선택하는 데에 인공생명 알고리즘이 채택되었다. 최적화를 위한 인공생명 알고리즘은 최적해 근방에 창발적 균집을 형성시켜 최적해를 찾는 알고리즘이다. 최적화 성능은 개체의 대사에 의한 폐기물의 폐기위치 선

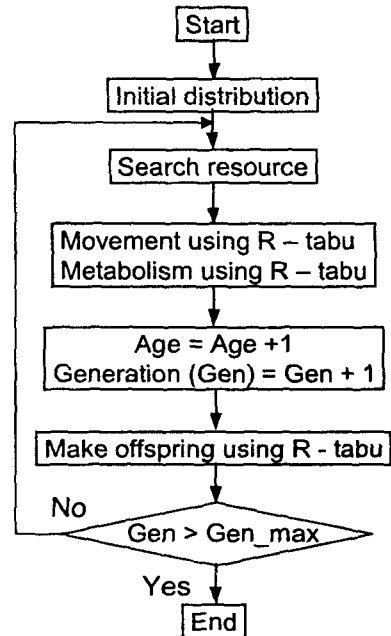


Fig. 3 Flow chart of the Enhanced Artificial Life Algorithm

정, 생식에서의 자손의 초기위치, 랜덤 이동에 있어서의 이동 위치 선정방법에 크게 의존한다. 이에 인공생명 알고리즘에서는 이러한 위치의 선정의 과정에 랜덤타부 탐색법을 적용하여 그 최적화 성능을 향상시킨 알고리즘이다.

Fig. 3에 최적화 알고리즘의 순서도를 나타내고 있다. 인공개체는 4종류의 개체가 사용되었고, 각 종은 40개의 개체로 초기화 되었다. 또한 개체들은 랜덤하게 인공세계에 분포해 있으며 초기 내부 에너지를 가진다.

개체들은 근방영역 내에서 대사를 하고자 하는 자원을 탐색하여 자원이 존재할 경우, 대사를 실행하고 내부에너지를 증가시키며 랜덤타부법을 이용하여 폐기물을 폐기하며, 그렇지 않을 경우는 랜덤타부법을 이용하여 이동한다.

일정량 이상의 내부에너지를 가지고 일정 나이 이상이 된 개체는 생식을 할 수 있으며, 근방영역 내의 동종의 생식가능한 개체의 생식확률에 따라 랜덤타부법을 이용해 선정된 위치와 자손을 낳는다.

한 세대가 지나면 각 개체는 나이를 먹고 내부 에너지를 규정된 양만큼 잃게 된다. 세대가 거듭 되어 자원을 얻을 기회가 적고 나이가 많은 개체들은 내부에너지가 감소해 결국 소멸하게 된다.

본 논문에서는 기본공진주파수와 노치 주파수의 전달률 T_{n1} 과 T_{n2} 를 동시에 최소화 하는 것을 목적 함수로 고려하였고, 채택된 설계변수는 다음과 같다.

$$X = \{A_p, I_f, R_0, K_i, K_r, K_v, K_{vb}\}^T \quad (10)$$

최적화문제는

구속조건:

$$7X_0 < X < 1.3X_0, g_i(X) < 0, i=1, 2.$$

$$g_1(X) = \omega_{ns} - (\omega_{ns, 0} - \pi) \quad (11)$$

$$g_2(X) = (\omega_{ns, 0} + \pi) - \omega_{ns}$$

를 가지면서

목적함수:

$$f(X) = \alpha_1 T_{r1}(X) + \alpha_2 T_{ns}(X) \quad (12)$$

를 최소화하는 X 를 찾는 것이 된다. 여기서 가중치 α_1 과 α_2 는 1.0, 2.0 이고, $\omega_{ns,0}$ 는 Table 1 에 제시하고 있는 X_0 를 이용하여 얻은 노치 주파수이다. 설계변수의 변화에 따른 노치 주파수의 변화를 $\pm 0.5\text{Hz}$ 로 제한하였다

최적화된 마운트의 매개변수를 Table 2에 나타내었다. 이들 변수는 노치 주파수, 즉 주 운전주파수에서의 전달률을 낮추기 위한 가중치를 기본공진 주파수에 비해 2배로 하였으므로, 그 가중치에 따라 변화했음을 감도해석결과로부터 확인할 수 있다.

한편, 최적화된 마운트의 성능을 검토하기 위해 주파수의 변화에 따라 전달률과 동강성을 최적화 이전의 것과 비교한 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 노치 및 기본공진 주파수에서의 전달률과 동강성이 낮아졌음을 알 수 있고, 유체의 유동에 의한 공진주파수에서의 전달률이 크게 줄었고, 동강성은 상승하였다. 이들 결과를 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 2 Optimized parameters of the fluid mount

	Optimized value	Parameter variation
A_p	$2.15 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	- 2.17 %
I_f	$6.07 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^5$	- 30.0 %
R_o	$4.23 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^5$	- 8.53 %
K_i	$1.82 \times 10^4 \text{ N}/\text{m}$	+ 30.0 %
K_r	$6.99 \times 10^4 \text{ N}/\text{m}$	- 30.0 %
K_{vi}	$1.19 \times 10^{11} \text{ N}/\text{m}^5$	+ 30.0 %
K_{vb}	$1.67 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}^5$	- 20.8 %

5. 결론

유체엔진 마운트를 설계하기 위해 가장 먼저 고려되어야 할 문제는 엔진의 주 운전주파수에서 진동을 최소로 줄이는 것이다. 그래서 마운트의 노치 주파수가 엔진의 주 운전주파수에 위치하도록

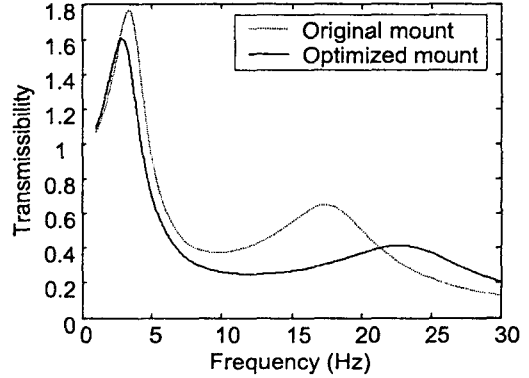


Fig. 4 Transmissibility of the fluid mount

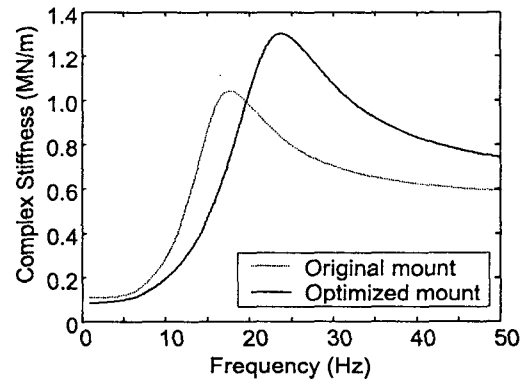


Fig. 5 Dynamic stiffness of the fluid mount

Table 3 Property of the original and optimized mount

	Original mount	Optimized mount	Remark
$T(\omega_{r1})$	1.74	1.58	- 9.20 %
$D(\omega_{r1})$	1.15×10^5	8.96×10^4	- 22.1 %
ω_{r1} (Hz)	3.6	3.1	- 13.2 %
$T(\omega_{r2})$	0.623	0.398	- 36.1 %
$D(\omega_{r2})$	1.04×10^6	1.30×10^6	+ 25.0 %
ω_{r2} (Hz)	18.4	24.1	+ 31.3 %
$T(\omega_{ns})$	0.436	0.320	- 26.6 %
$D(\omega_{ns})$	1.64×10^5	1.39×10^5	- 15.2 %
ω_{ns} (Hz)	7.4	7.9	+ 6.62 %

특 해야 하는데, 엔진 마운트의 설계변수가 많은 관계로 수 많은 시행착오를 통하여 주 운전주파수와 노치 주파수가 일치 하도록 설계변수를 결정하는 것이 일반적이었다. 그러나 이런 시행착오에

의해 만들어진 마운트의 성능이 최대인가? 즉, 노치 주파수에서의 전달률이 최소인가라는 의문을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 주어진 노치 주파수와 엔진마운트에 의해 결정되는 기본공진 주파수에서의 전달률을 최소로 하는 마운트의 최적설계를 위해 인공생명 알고리즘을 도입하였다. 본 최적화 알고리즘 혹은 그 밖의 최적화 기법에 의해 마운트의 설계변수를 종합적으로 평가함으로써 설계된 마운트의 성능은 시행 착오적으로 설계된 것에 비해 상당히 향상될 수 있음을 본 연구를 통하여 확인 할 수 있었다.

참고문헌

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 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. Gau, S. J. and Cotton, J. D., 1995, "Experimental Study and Modeling of Hydraulic Mount and Engine System," SAE Paper 951348.
5. Seto, K., Sawatari, K., Nagamatsu, A., Ishihama, M. and Doi, K. and 1991, "Optimum Design Method for Hydraulic Mount," SAE Paper 911055.
6. B. S. Yang and J. D. Song 2001 Proceedings of Asia-Pacific Vibration Conference. Enhanced Artificial Life Algorithm for Fast and Accurate Optimization Search.
7. Bo-Suk Yang, Yun-Hi Lee, 2000, "ARTIFICIAL LIFE ALGORITHM FOR FUNCTION OPTIMIZATION", Proceedings of 2000 ASME IDTEC/CIE DAC-14524