

충격/진동 절연을 위한 탄성마운트의 최적 배치설계

박 주 현* · 정 정 훈** · 김 기 화*** · 조 대 승**** · 김 병 현**

A Study on the Optimum Layout Design of Resilient Mounts for Shock & Vibration Isolation

J. H. Park, J. H. Chung, G. H. Kim, D. S. Cho and B. H. Kim

ABSTRACT

Major equipment of combat vessels normally require the shock and vibration isolation to maintain its performance against environments of severe vibration and shock. In this paper, an optimal layout design method of resilient mounts for shock and vibration isolation is presented using simulated annealing optimization method. The reference levels of vibration and shock to isolate shipboard equipment are determined from the MIL-STD-167-1 and MIL-S-901 specifications. Through the numerical application, the validity of the presented method is investigated.

1. 서 론

함정을 비롯한 각종 군용 수송기계에 탑재되는 장비시스템은 진동 및 충격에 의한 가혹한 환경에서도 충분한 기능성과 내구성을 가져야 하며, 이를 위해 탄성마운트를 이용한 충격/진동 절연(isolation)이 매우 효과적인 방법의 하나이다. 특히, 최근의 냉전종식에 따른 국방비 절감차원에서 미국을 비롯한 선진 외국의 경우 엄격한 방진 및 내충격 설계에 의해 고가로 제작되는 군용 장비 시스템을 탄성마운트를 이용한 절연을 통해 상업용 기성(COTS : Commercial Off-The-Shelf) 장비시스템으로 대체하려는 노력이 증가되고 있는 추세이다. 예로서, 미국 해군의 경우 'ASSIT'(Advanced

Ship Shock Isolation Technology) 프로그램을 통해 COTS 장비시스템의 군용화를 위한 방진/내충격 탄성마운트를 개발 중에 있으며[1], 'Modular Deck Isolated System'을 새로운 잠수함 설계 및 건조의 핵심기술로 채용하는[2] 등 충격/진동 절연을 위한 설계기술 및 장치 개발에 박차를 가하고 있다.

충격/진동 절연 문제와 관련하여 대부분의 연구는 충격 또는 진동 각각의 하중에 대한 탄성마운트의 최적 설계 문제를 다루어 왔다. 그러나 많은 경우 하나의 하중관점에서 최적 설계된 탄성마운트가 다른 하중 측면에서는 절연 전 보다 오히려 불리한 결과를 초래하기 때문에[3] 이들 하중을 함께 고려한 탄성마운트의 최적 설계가 필요하다. 최근, 양 등[4]은 함정용 탑재장비의 충격사양인 MIL-S-901D[5]과 전장품과 같이 자체 기진력이 없는 장비시스템의 진동규격인 MIL-STD-167-1[6]에 따른 지지부 충격과 진동을 받는 장비시스템에 대하여 충격과 진동을 동시에 효과적으로 절연할 수

* 부산대학교 조선해양공학과 대학원

** 한국기계연구원 구조시스템연구부

*** 용인송담대학 건축설비과

**** 부산대학교 조선해양공학과

있는 탄성마운트의 특성치에 대한 최적설계 방법을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 [4]의 확장연구로서 [4]에서와 같은 지지부 진동과 충격을 받는 합정용 탑재장비의 절연을 위한 탄성마운트의 최적 배치설계 방법을 제시하였다. 최적화에 있어서는 설계변수인 탄성마운트의 위치를 이산화(discrete) 변수로 가정하고, 이산화 최적화 문제의 해법으로 널리 사용되고 있는 확률론적 최적화 방법의 하나인 Simulated Annealing(이하 "SA"라 함.) 알고리즘[7]을 사용하였다. 실제 합정에 탑재되는 Fig. 1과 같이 단일 탄성지지된(single resiliently mounted) 장비시스템에 대해 최적 배치설계를 수행하여 제시한 방법의 유용성을 검토하였다. 수치계산에 있어서는 통상 장비시스템의 강성이 탄성마운트의 강성에 비해 훨씬 크기 때문에 장비시스템을 6자유도를 갖는 강체(rigid body)로 가정하였다.

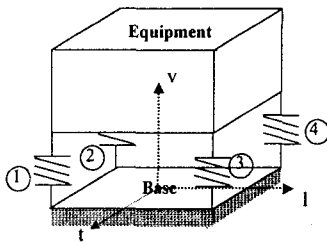


Fig. 1 Single layer isolation System

2. 최적설계 문제의 정식화

탄성마운트 최적 배치설계 문제는 다음과 같은 구속 최적화 문제(constrained optimization problem)로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } F(\{d\}) \\ & \text{Subject to } G_i(\{d\}) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 F 는 목적함수, G_i 및 $\{d\}$ 는 각각 구속조건과 설계변수이다. 이하에서는 본 연구에서 택한 목적함수, 구속조건 및 설계변수에 대해 상세히 기술한다.

· 목적함수 : $F(\{d\})$

자체기진력이 없는 합정용 탑재장비의 진동규격인 MIL-STD-167-1에서는 4~50 Hz의 주파수범위에

서 가진되는 진동에 대해 충분한 기능성과 내구성을 갖도록 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 상기 주파수 범위에서 대상 장비시스템의 진동가속도 파워 스펙트럼(power spectral densities)을 목적함수로 택하였다.

장비와 기저부 사이의 상대 좌표를 $\{z(t)\}$ 라 두면, 운동방정식은 다음과 같은 행렬형태로 표시할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{z}\} + [C]\{\dot{z}\} + [K]\{z\} = -[M]\{\ddot{y}(t)\} \quad (2)$$

여기서, $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량, 감쇠 및 강성행렬, $\{\ddot{y}(t)\}$ 는 지지부의 가속도이다. 지지부 가속도를 $\{\ddot{y}(t)\} = |\ddot{Y}|e^{j\Omega t}$ 와 같은 조화운동으로 가정하면 대상시스템의 절대가속도 $\{\ddot{X}\}$ 와 지지부 가속도 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\{\ddot{X}\} = \{H(\omega)\} |\ddot{Y}| \quad (3)$$

여기서, $\{H(\omega)\}$ 는 주파수 응답함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\{H(\Omega)\} = [[I] + \Omega^2 [K - \Omega^2 M + j\Omega C]^{-1} [M]] \{1\} \quad (4)$$

일정 주파수 f_1 과 f_2 사이에 대한 진동가속도 파워스펙트럼은 다음과 같이 계산된다

$$PS |_{f_1}^{f_2} = \int_{f_1}^{f_2} |H(\Omega)|^2 S(\Omega) d\Omega \quad (5)$$

여기서 $S(\Omega)$ 는 지지부 가속도 파워스펙트럼으로서 일정한 값을 갖기 때문에 본 연구의 목적함수는 최종적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \int_{f_1}^{f_2} |H(\Omega)|^2 d\Omega \quad (6)$$

· 설계변수 : $\{d\}$

최적 배치설계를 위해 고려한 설계변수는 장비시스템과 지지부 사이에 있는 탄성마운트의 위치 좌표이며, 본 연구에서는 이산화 변수로 가정한다.

· 제약조건 : $G_i(\{d\}) \leq 0$

본 연구에서는 다음과 같은 4개의 구속조건을 고려하였다.

$g(1)$ = 장비의 무게중심에 가해지는 충격에 의한 v 방향 최대 절대가속도 ($\leq 50g$)

$g(2)$ = 장비와 판 사이에 있는 탄성마운트의 v 방향

향 최대 층격변위 (≤ 0.05 m)

$g(3\sim 4)$ = 장비와 판 사이에 있는 탄성마운트의 t, l 방향 최대 정적회전변위 ($\leq 1.0e-5$ m). 본 구속조건은 탄성마운트의 배치에 있어서 기본 원칙인 자중에 의해 각 탄성마운트에 발생하는 변위가 가능한 한 균일해야 한다는 조건을 위해 도입하였다.

3. SA 알고리즘을 이용한 탄성마운트의 최적 배치설계

본 연구에서는 2절에서 정식화한 설계문제의 해법으로 SA 알고리즘을 사용하였다. 효율적으로 전체 최적점에 도달하기 위한 최적화기법으로 기존의 방법에서는 현재 탐색중인 점 근처에서 가장 좋은 정보만을 이용하는 국부적인 탐색방법만을 사용하나, 본 고에서 사용할 SA(Simulated Annealing)는 자연계의 원리를 기초로 하여 확률론적 탐색방법을 적용하고 있어 많은 경우 국부적인 탐색범위를 벗어나 전체적인 최적화 방향으로 수렴해가는 특징이 있다.

3.1 SA 알고리즘[7]

SA는 금속의 소냉(annealing)과정에 기초한 방법으로 매 탐색 과정시 제한적으로 목적함수 증가의 방향으로 이동을 허용하여 국소 최적점을 벗어날 수 있는 가능성을 높여준 방법으로, 많은 최소화문제에 적용되어 왔다.

금속의 소냉과정을 살펴보면, 어떠한 금속을 용융점까지 가열한 후 천천히 온도를 내려주면 그 금속의 전체 에너지는 점점 낮아져 결국 최소치에 도달하게 되며, 그 중간단계에서 어떠한 상태 i 에서 다음상태 j 와 에너지 차이 $\Delta E(E_j - E_i)$ 가 양수일 때는 다음의 확률한도 내에서 제한적으로 이동이 허용된다. (Metropolis criterion).

$$P_{accept} = \begin{cases} \exp\left(\frac{-\Delta E}{k_B T}\right) & \text{if } \Delta E > 0 \\ 1 & \text{if } \Delta E \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

여기서, T 는 온도이고, k_B 는 Boltzman 상수이다.

SA는 위의 금속의 소냉과정을 (1)식으로 표현되

는 일반적인 최적화문제에 적용한 방법으로, 목적함수 F 가 에너지에 해당되며, 어떤 상태 i 에 다음상태 j 로 변환은 각 설계변수를 임의로 증분시켜 구하고, 이때 $\Delta F(=F(x_j) - F(x_i))$ 가 양수일 때는 $F(x_j)$ 를 허용할 확률을 (7)식의 Metropolis criterion을 따른다. 그리고 반복 계산이 진행됨에 따라 온도 T 를 조금씩 줄여 주어 목적함수의 증가 상태를 허용할 확률을 점점 감소시켜 적절한 작은 확률의 될때 까지 계산을 반복한다.

(1)식의 최적설계시 P_{accept} 와 SA의 기본계산과정은 다음과 같다. 기호 i 는 현상태, j 는 다음상태를 뜻한다.

· 목적함수 증가시 허용확률 (P_{accept})

$$P_{accept} = \begin{cases} \exp\left(\frac{-\Delta F}{cT}\right) & \text{if } \Delta F > 0 \\ 1 & \text{if } \Delta F \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

여기서, $\Delta F = F(x_j) - F(x_i)$, c 는 ΔF 의 평균값 계산을 위한 상수, T 는 제어상수이다.

ΔF 가 양수일 때 (0, 1) 범위에서 임의의 수 ξ 를 발생시켜 $\xi < P_{accept}$ 면 증가를 허용하고, 그렇지 않으면 취소한다. 목적함수의 증가가 허용될 때마다 상수 c 와 M 은 다음과 같이 계산된다.

$$c = \frac{M \times c + \Delta F}{M + 1}$$

$$M = M + 1 \quad (9)$$

여기서 c 와 M 의 초기값은 각각 1과 0이다.

(8)식의 제어상수 T 는 목적함수 증가시 허용확률을 결정하는 양으로 계산이 진행됨에 따라 조금씩 감소시켜야 하며 그 감소량 (CF)는 다음과 같이 결정한다.

P_s = 목적함수 증가의 초기 허용확률

P_f = 목적함수 증가의 말기 허용확률

N = 반복계산 횟수

이라고 할 때,

초기 제어상수는

$$T_0 = \frac{-1}{\ln(P_s)} \quad (10)$$

이고, 감소량 (CF)는

$$CF = \left[\frac{\ln(P_s)}{\ln(P_f)} \right]^{\frac{1}{(N-1)}} \quad (11)$$

이 되어, i 번째 계산에서 제어상수는 다음과 같다.

$$T_i = T_{i-1} \times CF \quad (12)$$

· Simulated Annealing 계산과정

<step 1> P_s, N, P_f 를 결정하고, (10)식에서 초기 제어상수 T_0 를 계산하고, (11)식에서 제어상수 감소량 CF 를 계산한다.

<step 2> 초기설계변수벡터 x_i 를 선택한다.

<step 3> 설계변수의 증분량을 임의로 선택한 후, x_i 의 하나의 변수에 더하여 다음 설계변수에 더하여 다음 설계변수벡터를 x_j 를 계산한다.

<step 4> x_j 의 허용여부를 다음과 같이 결정한다.

(1) x_j 가 제한조건을 위반한 경우는 x_i 가 제한조건을 만족하면 취소하고, x_i 가 제한조건을 위반한 경우는 제한조건의 위반량의 대소에 따라 허용여부를 결정한다.

(2) x_j 가 제한조건을 만족한 경우는 x_i 가 제한조건을 위반한 경우는 허용하고, x_i 가 제한조건을 만족한 경우는 (8)식의 Metropolis 식을 따른다.

<step 5> <step4>에서 목적함수의 증가가 허용된 경우에는 (9)식에서 c 와 M 을 계산하고, x_i 의 모든 변수들에 대해 증분의 허용여부가 검토될때까지 <step3>에서 반복계산한다.

<step 6> 설계변수를 $x_i \leftarrow x_j$ 로 대체하고, 제어상수 T 를 (12)식에 의해 변경한 후, N 번의 반복계산이 완료된후 또는 적절한 수렴범위를 만족하면 계산을 종료한다.

3.2 수치계산 예 및 고찰

본 연구에서 제시된 탄성마운트의 최적 배치설계의 유용성을 검토하기 위해 단일 탄성지지된 실제 합정 탑재장비를 예로 수치계산을 수행하였다.

목적 함수와 구속조건 계산을 위해서 한국기계연구원에서 개발한 탄성지지 장비시스템 해석 프로그램[8]를 사용하였다.

구속조건을 계산하기 위한 충격하중은 합정용

탑재장비의 충격사양인 MIL-S-901D에서 규정하는 중간중량(medium weight) 충격시험을 기초로 하여 고려하였다. 즉, MIL-S-901D 중간중량 충격시험기의 경우 충격해머의 낙하에 의해 대상 시험품을 탑재하는 anvil table에 가해지는 충격가속도의 크기는 시험품의 중량에 거의 무관하게 일정한 값을 가지며, 그 형태는 지속시간 약 1msec의 half sine 파로 근사시킬 수 있으며, 충격해머 낙하높이가 5ft인 경우 충격가속도의 크기는 약 550g(g는 중력가속도)이다[9].

수치계산에 있어서 지지부 충격하중은 v 방향으로 작용하며, 탄성마운트의 개수는 4개로 고정시켰다. 설계변수인 탄성마운트의 위치는 대상 장비의 가로와 세로 길이를 5등분 한 점들만에 위치하도록 이산화 변수로 취급하였고, 같은 위치에 두 개의 마운트가 설치될 수 없다는 구속조건을 추가로 부가하였다.

대상장비의 질량은 241kg, 질량관성 모멘트는 t, l, v 축 각각에 대하여 각각 30.6, 15.0, 43.1 ($kg \cdot m^2$)이고, 각 탄성마운트의 강성은 모두 동일하며, t, l, v 축에 대하여 1.0e+5, 1.0e+5, 2.1e+5 (N/m)의 강성을 갖는다. 탄성마운트의 감쇠는 강성에 비례하는 구조감쇠로 가정하고 그때의 비례상수는 0.1로 가정하였다.

한편, SA 알고리즘은 보다 자세한 탐색을 위해서 최적설계가 종료한 후 계산된 최소점을 초기점으로 하고, 목적함수 증가의 허용확률과 총 반복계산 횟수를 줄여주며 증분량의 범위를 매우 작게하여 재계산을 행하여 보다 정확한 최소점을 찾고자 한다. Table 1은 목적함수 증가의 초기허용확률(P_s)과 말기허용확률(P_f) 반복계산횟수(N), 증분량을 보여주고 있다.

Table 1. The acceptance probability, iteration number and the scale of design variable

| | P_s | P_f | N | 증분량 |
|------|-------|--------|-----|-----|
| 단계 1 | 0.9 | 0.0001 | 200 | 1 |
| 단계 2 | 0.5 | 0.0001 | 100 | 1 |

본 고에서는 초기 위치를 세가지 경우에 대하여 최적화를 수행하였다. Fig. 2는 탄성마운트의 초기 위치와 최적화 시킨 후의 위치를 보여주고

있다. 결과에서 보는 바와 같이 초기 위치에 관계 없이 전체 최적점으로 수렴함을 알 수 있다.

Table 2와 Table 3에는 초기 위치에서의 최적화 위치에서의 목적함수 값, 구속조건 값의 변화를 보여주고 있다. 장비와 판 사이에 있는 탄성마운트의 t, l 방향 최대정적회전변위($g(3\sim4)$)가 구속조건 중에서 최적화하는데 가장 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

또한 장비에 걸리는 최대 충격가속도는 증가했으나, 탄성마운트에 걸리는 최대 충격변위는 감소했음을 알 수 있다.

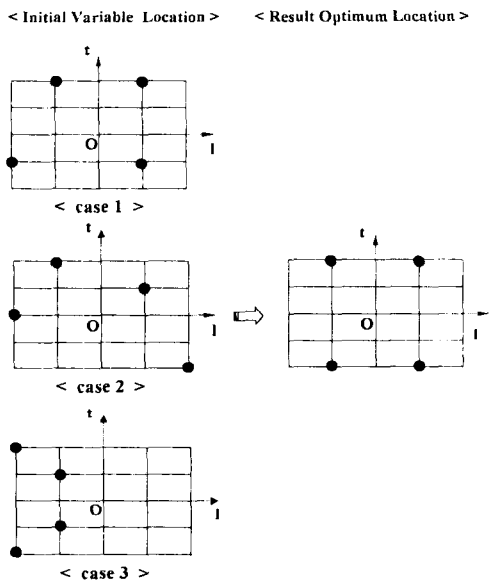


Fig 2. Initial variable design and optimum result location

Table 2. Results of object function value

| | Initial location | Optimum location |
|--------|------------------|------------------|
| Case 1 | 1.74105e+3 | 1.73863e+3 |
| Case 2 | 1.74208e+3 | |
| Case 3 | 1.74521e+3 | |

Table 3. Results of constraint calculations

| | Value | Case1 | Case 2 | Case 3 |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| g_1 | 489.82 | 3.05 | 0.59 | 23.86 |
| g_2 | 0.0044 | -33.86 | -15.69 | -31.25 |
| g_3 | 0.0 | -100 | -100 | -100 |
| g_4 | 0.0 | -100 | -100 | -100 |

4. 결론

본 고에서는 함정용 탑재장비의 충격 및 진동 규격인 MIL-S-901과 MIL-STD-167-1에 따른 지지부 충격과 진동을 받는 장비시스템에 대해 이 두 하중조건을 동시에 효과적으로 절연할 수 있는 탄성마운트 최적 배치설계 문제를 정식화하고, 수치해석을 통해 SA 알고리즘을 적용 제시된 최적 배치설계 방법의 유용성을 검토하였다. 제시한 탄성마운트의 최적 배치설계 방법과 함께 함정용 탑재장비를 비롯한 충격과 진동으로 인한 가혹한 환경에서 운용되는 각종 장비시스템의 최적의 진동/충격 절연 설계에 효과적으로 적용될 수 있으리라 판단된다. 본 연구결과를 더욱 효과적으로 적용하기 위해서는 대부분 비선형 하중-변위 특성을 갖는 내충격 탄성마운트를 고려할 수 있는 최적 설계방법에 대한 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 과학기술부의 지원 하에 국가지정연구실사업으로 수행중인 "제진장치를 활용한 제진 설계기술 개발"과제의 일환으로서 수행되었다.

참고 문헌

- (1) Feldhaus, F., 1997, "Advanced Ship Shock Isolation System Technology Program - Shock Design of the 3 Kip HYTREL[®] Shock & Acoustic Mount", Proc. of the 68th Shock and Vibration Symposium.
- (2) Carey, M., "The New Attack Submarine",

The Web document,

(<http://www.chinfo.navy.mil/navpalib/cno/n87/nssn.html>)

(3) Inman, D. J., 1996, Engineering Vibration, Prentice Hall, New Jersey.

(4) 양용진, 정정훈, 조대승, 김병현, 2001, "충격/진동 절연을 위한 탄성마운트 최적설계", 대한조선학회

(5) MIL-S-901D, Shock Tests. H.I. (High-Impact) Shipboard Machinery, Equipment, and Systems, Requirements for, 1989. 3.

(6) MIL-STD-167-1, Mechanical Vibrations of Shipboard equipment (Type I - Environmental and Type II - Internally Excited), 1974. 5.

(7) G.H. Kim, Y.S. Yang, 1992. " Stochastic Search Techniques for Global Optimization of Structures", Proceeding of the Korea-Japan Seminar on STRUCTURAL OPTIMUM, PP. 87~95.

(8) J.H. Chung and B.H. Kim, 1997, "Shock Response Analysis of the Multi -Rigid Bodies Interconnected by Nonlinear Resilient Mounts", ASME, PVP-Vol. 351.

(9) Clements, E.W., 1972, "Shipboard Shock and Navy devices for Its Simulation", NRL Report 7396.