

엔진 마운트의 동특성 해석 및 최적설계

임홍재, 성상준**, 이제형**, 조은수**, 이상범***

Dynamic Analysis and Optimal Design of Engine Mount Systems

Hong Jae Yim, Sang Joon Sung, Je Hyung Lee, Eun Soo Cho, Sang Beom Lee

ABSTRACT

In this paper, an integrated system for dynamic analysis and optimal design of engine mount systems is presented. The system can simulate static and dynamic behaviors of engine mount systems and optimize design parameters such as mount stiffness, mounting locations with desired design targets of frequency or displacement. A FF-engine with an automatic transmission is used to demonstrate the analysis and optimal design capabilities of the proposed design system.

1. 서론

엔진마운트 시스템은 자동차 진동 소음 특성에 결정적인 영향을 미치는 중요한 인자이기 때문에 엔진마운트 시스템의 설계는 자동차 설계과정에서 매우 중요한 분야 중 하나이다^(1,2). 엔진마운트는 엔진 아이들세이크와 험로 주행시 노면으로부터의 가진 등에 의한 자동차의 동특성을 결정짓는데 매우 중요한 역할을 한다. 엔진구동계에 의한 진동은 승객이 느끼는 승차감에 많은 영향을 주며, 계속되는 반복하중으로 인한 엔진의 주변 장치 및 부품, 그리고 엔진을 지지하고 있는 차체구조물의 피로 파괴의 원인이 된다. 그러므로 자동차의 승차감 향

상과 차체의 내구성 향상을 위해서 엔진마운트를 통해 차체로 전달되는 엔진 가진력을 감소시키고 진동을 절연시키는 것은 매우 중요하다^(3,4).

자동차의 설계초기단계에서, 개발될 자동차의 진동특성을 예측하고, 설계 변경 또는 개선이 요구되는 경우에 설계엔지니어가 적절히 대응하기 위해서는 엔진마운트 시스템의 진동특성해석 및 최적설계기법의 확립은 필수적이다. 이와 같이 엔진마운트의 동특성 해석과 설계 기술은 자동차 기술 경쟁력의 중요한 인자인 자동차의 승차감과 내구성을 향상시키기 위한 중요한 기술로 인식되어 많은 연구가 진행되어 왔다⁽⁵⁻⁹⁾.

본 논문에서는 엔진마운트 시스템 설계시에 필요한 정적, 동적 해석 및 최적설계 기능을 갖춘 엔진마운트 전용 설계 시스템에 대하여 설명한다.

* 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

** 국민대학교 대학원

*** 정회원, 국민대학교 자동차공학 전문대학원

2. 엔진마운트 설계 시스템의 개요

EMOPT(Engine Mount OPTimization)는 엔진 마운트 전용 해석·설계 프로그램으로 EMOPT가 지원하는 마운트의 종류는 고무 마운트와 유압 마운트가 있고, 엔진 마운트의 수는 최대 9개까지 장착하여 해석할 수 있다. 기본적으로 토크축과 탄성축을 구할 수 있으며 해석분야로는 정적 하중 해석, 동적 주파수 응답 해석, 모드해석, 지면입력에 대한 응답 해석 등이 가능하다. 로면 입력에 대한 응답 해석은 거친 노면 입력이 엔진 마운트 시스템에 어떤 영향을 미치는지를 시뮬레이션 할 수 있다.

엔진마운트 시스템의 최적설계에 있어서 설계변수는 마운트의 설치위치, 설치각도, 마운트강성을 선정할 수 있다. 그리고 구속조건은 마운트의 변위와 작용하중, 마운트 간의 강성비, 고유진동수 등을 채택할 수 있다. 목적함수로는 모드간의 비연성화, 고유진동수, 특정하중에 대한 엔진의 유동량 등을 선정할 수 있다.

EMOPT는 각종 해석 및 최적설계의 결과들을 표와 그래프로 볼 수 있으며, 엔진의 변형형상을 설계변경전의 형상과 비교하여 볼 수 있다.

EMOPT를 실행시키면 로고 화면이 나온 후 Fig. 1의 GUI환경으로 만들어진 화면이 나오게 된다. 오른쪽의 Main Menu Window에서 Input값들을 입력하고 계산결과와 출력형태를 엔진상의 좌표, 텍스트, 또는 파일의 형태로 선택하여 볼 수 있다.

3. 해석 및 설계 예

실제 차량의 엔진 마운트 시스템에 적용하여 개발된 프로그램의 실용성을 검증해 보고자 한다. 본 연구의 예제로 사용된 모델은 Fig.3과 같은 전륜구동형 차량의 엔진마운트시스템으로 자동변속기가 장착되어 있으며, 우측 지지점에 유압 엔진 마운트가 사용되었다.

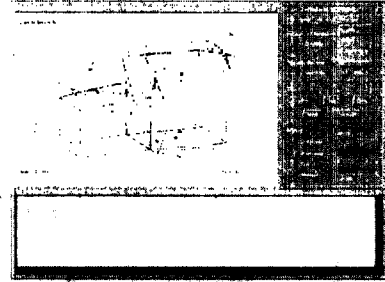


Fig. 1 Display menu of EMOPT

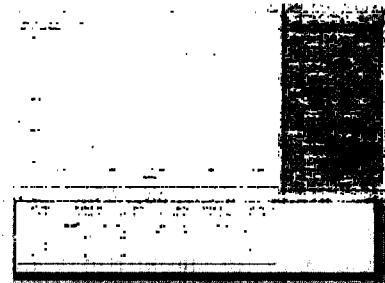


Fig. 2 Graphs for comparison

3-1 탄성축과 토크축 계산

Table 1은 탄성축과 토크축을 해석한 결과를 보여준다. 여기서 구한 탄성축과 토크축은 엔진 마운트의 기초위치와 엔진의 관성데이터에 관한 것으로 설계에 있어서 기초적인 데이터로 사용된다.

3-2 고유치 해석

본 예제에서는 고유치해석시 엔진시스템의 유연체 모드는 고려하지 않고 강체모드만을 고려한 해석결과가 Table 2에 나타나 있다. 프로그램의 해석결과를 검증하기 위하여 상용 유한요소 해석 코드인 MSC/NASTRAN을 이용하여 같은 해석을 수행한 결

과와 비교하였을 때 약 0.2%이내의 정확성을 갖는다⁽¹⁰⁾. 각 모드에 해당하는 모드형상을 EMOPT내에서 지원하는 모드형상 애니메이션을 통해서 Fig.4-Fig.9와 같이 볼 수 있다.

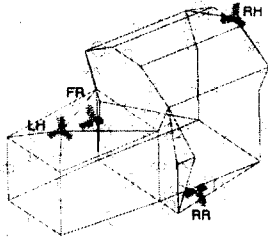


Fig. 3 Engine mount system

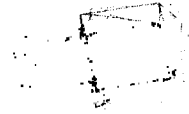


Fig. 6 Lateral mode



Fig. 7 Pitch mode

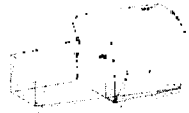


Fig. 8 Yaw mode



Fig. 9 Roll mode

Table 1 Torque axis and elastic center

| Torque Axes | | | | | |
|---------------------|-------------|--------------|------------------|---------|--------|
| cos α | cos β | cos γ | | | |
| -0.97 | -0.15 | 0.19 | | | |
| Elastic Center (cm) | | | | | |
| x | y | z | Direction Cosine | | |
| 3.82 | 18.27 | -23.06 | -0.7542 | 0.5529 | 0.3543 |
| | | | -0.0266 | -0.5648 | 0.8248 |
| | | | 0.6562 | 0.6126 | 0.4406 |

Table 2 Natural frequency analysis results

| | | Natural Frequency | | | | | |
|--------------|---------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mode | | X | Y | Z | XX | YY | ZZ |
| Freq (Hz) | EMOPT | 11.903 | 8.043 | 10.323 | 12.020 | 15.125 | 13.007 |
| | NASTRAN | 11.906 | 8.057 | 10.338 | 12.020 | 15.130 | 13.008 |
| Error (%) | | -0.017 | -0.174 | -0.145 | 0.0 | -0.033 | -0.008 |



Fig. 4 For/Aft Mode



Fig. 5 Bounce Mode

3-3 정적 응답 해석

엔진의 자체하중만을 입력 값으로 하여 정적 응답을 해석해 본 결과가 Table 3에 있다. Table 3과 MSC/NASTRAN의 해석 결과를 비교하여 보면, 0.5% 이내의 오차범위를 갖는 정확성을 보여준다⁽¹⁰⁾.

Table 3 Static Analysis Results

| Load (N, N · cm) | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|---------|--------|-------|--------|--------|--------|
| X | Y | Z | XX | YY | ZZ | | |
| 0.0 | 0.0 | -2197.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| Displacement of C.G. (cm, degree) | | | | | | | |
| X | Y | Z | XX | YY | ZZ | | |
| | | | | | | | |
| Number | Lat. | F/A | Comp. | Lat. | F/A | Comp. | MAG. |
| 1 | 0.027 | 0.227 | -0.148 | 23.91 | 747.1 | -159.8 | 764.38 |
| 2 | 0.023 | -0.232 | -0.429 | 5.30 | -288.1 | -180.7 | 340.15 |
| 3 | -0.055 | -0.110 | -0.425 | 220.8 | -120.5 | -637.5 | 685.37 |
| 4 | 0.022 | -0.077 | -0.373 | 77.57 | -78.12 | -555.3 | 566.12 |

3-4 동적 응답 해석

어떠한 주파수로 일정한 하중이 가해질 때 엔진의 응답 및 마운트에 걸리는 하중을 동적응답해석을 통하여 예측할 수 있고, 엔진의 주파수 응답특성을 볼 수 있다. Table 4는 EMOPT에서 해석을 수행한 결과를 보여준다.

Table 4 Dynamic analysis results

| Frequency of excitation | | | 10.0 Hz | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----------|---------|------------|--------|--------|--------|
| Load (N, N · cm) | | | | | | | |
| X | Y | Z | XX | YY | ZZ | | |
| 0.0 | 0.0 | -2337.99 | 1119.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| Motion of C.G. (cm, degree) | | | | | | | |
| | X | Y | Z | XX | YY | ZZ | |
| Disp. | 0.048 | 0.1497 | 0.1618 | 0.1031 | 0.0361 | 0.1745 | |
| Accel. | 189.11 | 591.0 | 638.75 | 406.9 | 142.4 | 688.68 | |
| Mount Number | Displacement (cm) | | | Forces (N) | | | |
| | Lat. | F/A | Comp | Lat. | F/A | Comp | MAG. |
| 1 | 0.1432 | 0.2140 | 0.0964 | 227.39 | 1174.3 | 187.94 | 1210.7 |
| 2 | 0.0452 | 0.0607 | 0.1307 | 18.85 | 121.97 | 92.26 | 154.09 |
| 3 | 0.0540 | 0.2983 | 0.1660 | 271.25 | 391.69 | 316.68 | 580.74 |
| 4 | 0.0520 | 0.0302 | 0.1390 | 343.0 | 64.2 | 442.66 | 563.66 |

3-5 마운트 최적설계

엔진마운트 시스템의 최적설계에 있어서 설계변수는 마운트의 설치위치, 설치각도, 마운트강성을 선정할 수 있다. 그리고 구속조건은 마운트의 변위와 작용하중, 마운트 간의 강성비, 고유진동수 등을 선택할 수 있다. 목적함수로는 모드간의 비연성화, 고유진동수, 특정하중에 대한 엔진의 유동량 등을 선정할 수 있다. 본 연구에서는 엔진의 고유진동수를 목적함수로 한다. 그리고, 설계변수로 엔진의 설치위치는 제외하고, 설치각도와 강성값을 설계변수로 채택하여 최적설계를 한 경우와, 설계변수에 설치위치까지 적용한 경우를 비교하였다. 그리고, 동일한 마운트에서 3개의 주축방향 강성은 같은 비율로 변화하도록 링크시키고 수행하였다. 엔진의 설치위치까지 설계변수에 포함시키려 할 때는 엔진룸 안에서 설치가능위치가 한정되어 있기 때문에 주의할 기울여야 한다.

Table 5에서는 최적설계 전후의 설계변수의 변화를 보여 준다. 각 강성의 설계변경 범위를 초기값의 $\pm 30\%$ 로 하고, 장착각도는 $\pm 15^\circ$, 그리고 설치위치는 $\pm 3\text{cm}$, $\pm 2\text{cm}$ 두 가지를 설계변수의 범위로 한다. 설계목표는 피치모드가 8Hz 이하에서 나타나고, 바운스모드 역시 10Hz 이하에서 나타나도록 하는 것이다. 그러나 설계변경전의 고유진동수를 보면 피치모드와 바운스모드가 설계목표값에 비하여 1~4 Hz가량 높은 것을 알 수 있는데, 이를 해결하기 위해 피치모드와 바운스모드의 고유진동수를 낮추도록 설계를 변경해야 한다. 급격하게 특성이 변하면 다른 측면의 특성에 영향을 미치므로, 두 모드의 고유진동수를 2Hz 낮추는 것으로 설정하고 최적설계를 수행한다.

최적설계전후의 엔진 마운트 시스템의 고유진동수가 Table 5에 나타나 있다. Table 5에 나타난 고유진동수의 변화를 살펴보면 피치모드(XX)와 바운스모드(Z)가 최적설계 전에 비해서 개선되어 있음을 알 수 있다.

최적설계를 수행 후 최적설계 결과를 검증할 필요가 있다. EMOPT에서는 설계변수와 목적함수가 목표치로 수렴이 되었는가를 확인할 수 있지만 최적설계를 한 엔진 마운트시스템이 실제 차량에 어떤 영향을 미치는지는 알 수 없다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 최적설계를 수행 후 변경된 데이터들을 Fig.10에 나타난 모델에 적용하여 MSC/NASTRAN으로 해석하여 최적설계 전·후 각 부재의 끝단에서의 전달력을 비교한다. 전달력을 비교하는 부위는 서스펜션부재의 좌·우측 부싱과 센터멤버의 앞쪽 패드 부위이다.

Fig. 11은 서스펜션부재의 왼쪽 부싱에 전달되는 전달력을 나타낸 그래프이다. 여기에서 Case 1을 제외한 나머지는 거의 같은 경향을 보여 준다. Case 2가 적은 수의 설계변수로 원하는 목표치에도달함을 알 수 있다. 엔진 아이들 영역인 25Hz에서 전달력이 최적화하기 이전 모델에서는 4.744N이나, 최적설계된 모델에서는 2.765N정도로 줄어든 약 41.7%의 감소 효과가 있다. 또한 56Hz 부근의 최고치가 54Hz 부근으로 이동하면서 작아짐을

알 수 있다. 그리고 65~100Hz에서는 전달력이 전반적으로 감소함으로써 진동 성능의 향상에 기여할 수 있음을 보여준다.

Fig. 12는 센터멤버의 앞쪽 패드에서의 전달력을 나타낸 그래프이다. Fig. 11에 비해 전달력의 감소는 작으나, 전 대역에 걸쳐서 전달력이 줄어들었음을 볼 수 있다.

최적설계를 수행함에 있어 강성값을 같은 비율로 변화도록 링크시키고, 강성값과 설치위치만을 설계변수로 정하고, 바운스모드와 피치모드를 2Hz 정도씩 낮추는 것을 목적함수로 수행한 Case 2가 설계목표를 만족하면서, 엔진크래들 시스템에서 전달력을 최소화 하는 것을 알 수 있다.

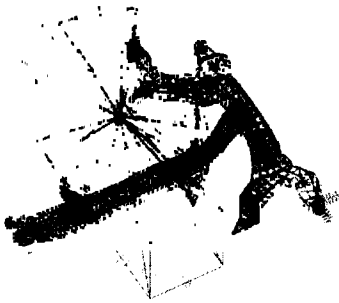


Fig. 10 F.E. Model
(Engine + Cradle)

Table 5 Design variables after optimization

| Item | | Initial | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
|---------|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Mount 1 | Stiff. Lat. | 1587.6 | 1277.1 | 1109.4 | 1109.4 | 1136.4 |
| | Stiff. F/A | 5488.0 | 4414.8 | 3834.8 | 3834.8 | 3928.4 |
| | Stiff. Comp. | 1950.2 | 1568.8 | 1362.7 | 1362.7 | 1396.0 |
| | Angle Lat. | -50 | . | -35 | -35 | -35 |
| | Loc. X | -1.82 | . | . | -2.145 | -2.324 |
| | Loc. Y | 8.5 | . | . | 6.784 | 6.973 |
| | Loc. Z | -0.5 | . | . | 1.467 | -2.184 |
| Mount 2 | Stiff. Lat. | 417.48 | 291.76 | 388.66 | 525.95 | 379.45 |
| | Stiff. F/A | 2009.0 | 1404.0 | 1870.3 | 2531.0 | 1826 |
| | Stiff. Comp. | 705.6 | 493.11 | 656.89 | 888.94 | 641.33 |
| | Angle Lat. | 30 | . | 15 | 15 | 20.165 |
| | Loc. Z | 4.06 | . | . | 5.9796 | 5.4176 |

Table 6 Frequency results after optimization

| | X | Y | Z | XX | YY | ZZ |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| Original | 65.0 | 65.0 | 65.0 | 65.0 | 65.0 | 65.0 |
| Case 1 | 63.0 | 63.0 | 63.0 | 63.0 | 63.0 | 63.0 |
| Case 2 | 61.0 | 61.0 | 61.0 | 61.0 | 61.0 | 61.0 |
| Case 3 | 59.0 | 59.0 | 59.0 | 59.0 | 59.0 | 59.0 |
| Case 4 | 57.0 | 57.0 | 57.0 | 57.0 | 57.0 | 57.0 |

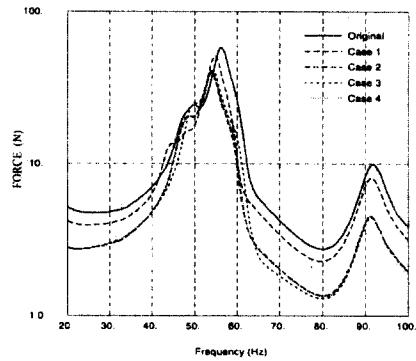


Fig. 11 Transmitted forces at the LH bushing

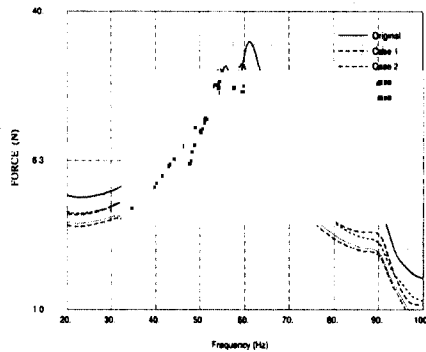


Fig. 12 Transmitted forces at the front pad of the center member

4. 결론

본 연구에서는 엔진마운트시스템의 동특성 해석 및 최적설계를 위한 EMOPT 프로그램에 대하여 설명하였다. 본 연구에서 개발된 엔진마운트 전용 해석 및 최적설계프로그램은 엔진 작동 성능의 설계기준에 맞는 최적의 엔진마운트의 강성, 마운트의 설치 위치 및 설치 방향 등을 결정할 수 있으며, 엔진의 아이들 세이크 및 험로주행에 대한 엔진마운트 시스템의 정역학 해석, 진동 모드해석, 주파수 응답해석 등 각종 해석을 수행할 수 있다. 특히 본 연구에서 개발된 프로그램을 설계자가 편리하게 사용할 수 있도록 하기 위하여, Motif를 이용한 GUI프로그램을 개발하였다. 본 논문의 예제에서 예시된 바와 같이 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 설계자가 각종 엔진 마운트시스템의 모델링, 설계 타당성 검토를 위한 각종 해석, 최적설계를 그래픽 화면상에서 용이하게 수행할 수 있다.

참고문헌

1. Kamal, M.M. and Wolf Jr., J.A., Modern Automotive Structural Analysis, Van Nostrand Reinhold Company, 1983.
2. Timpner, F.F., "Design Considerations in Engine Mounting ", SAE Paper, 1965.
3. Inman, D.J., Engineering Vibration, Prentice Hall International Editions, 1996.
4. 김종현, 차체의 유연성을 고려한 엔진지지계의 동적해석, 서울대학교 기계설계학과 박사학위논문, 1995.
5. 송명익, 지지부의 유연성을 고려한 엔진마운트의 동역학 해석 및 최적설계에 관한 연구, 국민대학교 기계설계학과 석사학위논문, 1997.
6. 최동운, 유압 엔진 마운트의 동특성 해석 컴퓨터 시뮬레이션 연구, 국민대학교 기계설계학과 석사학위논문, 1997.
7. 박노길, "차량 엔진동력계의 마운트설계에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집 제4권 제1호, pp.36~54, 1996.
8. 김민수, 김한성, 최동훈, "전륜구동형 승용차의 엔진마운트 시스템 최적설계", 한국자동차공학회 논문집 제1권 제3호, pp.74~82, 1993.
9. 황원걸, "엔진 마운트계의 최적설계에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집 제6권 제1호, pp.16~26, 1998.
10. 성상준, 엔진 마운트 시스템의 동특성 해석 및 최적설계에 관한 연구, 국민대학교 기계설계학과 석사학위논문, 1998.