

전달함수합성법을 이용한 차량용 에어컨 컴프레서 브라켓의 동특성 해석

정홍석* · 서세영* · 이두호* · 김찬목*

Dynamic Analysis of Compressor Mounting Bracket using FRF-based Substructuring Method

Hong-suk Chung, Se-Young Seo, Doo-Ho Lee and Chan-Mook Kim

Key Words : FRF-based Substructuring Method(전달함수합성법), Dynamic Stress(동응력), Forced Vibration Response (강제진동응답).

Abstract

Researches on the FRF-based substructuring method have been mainly focused on vibratory response analysis. Present study is concerned about the application of the method to the dynamic stress analysis of a compressor mounting bracket in a passenger car. This is performed by using reaction forces that can be obtained by the FRF-based substructuring method. The air-conditioner system, composed of a compressor, a bracket and a test jig, is analyzed by using the FRF-based substructuring method. The experimental and numerical FRFs are combined to calculate the system responses and reaction forces at the connection point. The dynamic reaction forces plugged into the bracket FE model to compute the stresses of the bracket. Dynamic stresses by the present method are compared with those from FE model. The comparison shows possibility of practical usage of the method for the real problem.

기호설명

- F : 외력
- H : 주파수응답함수
- K' : 연결요소의 리셉턴스(receptance)
- K : 부분구조합성법 시스템 행렬
- R_j : j 번째 연결점에서의 반력
- x_r : r 점에서의 응답

1. 서론

오늘날 컴퓨터의 발달로 인해 공학문제의 해석 범위가 점점 넓어져 가고 있다. 그러나 일반적인

로 복잡한 구조물들은 모델링의 어려움과 함께 정확한 구조물의 동특성을 해석하기는 쉬운 문제가 아니다. 그러나 간단한 구조물의 동특성은 수식화하기에 용이하며 더욱 정확하게 유한요소법 등에 의한 해석이 가능하므로 동적 비연성된 부분구조의 모델을 사용하여 복잡한 구조물의 동특성 예측에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 복잡한 구조물의 동특성을 간단한 부분 구조들로 나누어 해석한 후 종합하여 전체 시스템의 동특성을 예측하는 것을 부분구조합성법이라 한다⁽¹⁾. 이러한 연구들 중 전달함수합성법은 선형 시스템의 응답을 계산하기에 보다 편리한 방법으로 알려져 있다. 이 방법의 기본 개념은 각각의 비연성된 부분 구조들의 주파수응답함수를 임피던스(impedance)나 리셉턴스(receptance) 형태로 구하여 전체 구조물의 응답을 계산하는 것이다. 이 방법은 계산이 어려운

* 국민대학교 자동차공학 전문대학원

시스템의 고차 모드의 정보가 주파수응답함수에 포함되어 있고, 실험에서 구한 주파수응답함수 수식에 직접 적용할 수 있으며, 주파수응답함수 자체의 오차 이외의 계산상의 오차가 개입되지 않기 때문에 중,고주파 대역에서의 응답특성도 비교적 정확하게 계산할 수 있다는 장점을 갖는다. 이와 함께 복잡한 구조물을 해석할 경우, 실험 데이터의 사용으로 오차를 최소화 시킬 수 있는 장점이 있다.

이러한 전달함수합성법을 실제 차량에 적용하여 차량의 소음 등을 해석한 사례⁽²⁾와 민감도 해석을 적용한 연구⁽³⁾가 있으며, 주파수응답함수를 실험 데이터로 사용한 경우도 있다.⁽⁴⁾ 또한 전달함수합성 계산 시 실험에서 얻은 주파수응답함수행렬의 역행렬 변환 과정에서 일어나는 오차의 증폭과 응답 스펙트럼의 왜곡을 감소시키는 연구도 활발히 진행 중이다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

본 논문은 차량에 장착되는 에어컨 컴프레서 브라켓 구조물에 대하여 유한요소 해석 데이터와 진동 실험 데이터를 혼합하여 전달함수합성법을 적용, 진동응답특성을 해석하였으며, 전달함수합성법을 이용하여 부분구조물의 동응력 해석 가능성을 살펴보았다.

2. 전달함수합성법 수식화

2.1 3중 부분구조의 전달함수합성

Fig. 1과 같이 A, B, C 세 개의 부분구조가 직렬로 연결되어 있는 구조물을 고려한다. 각각의 부분구조 A, B, C는 스프링 강성 k_i 와 감쇠계수 c_i 를 가지고 연결되어 있으며, 각각의 연결체는 서로 비연성 되어 있다고 가정한다.

전달함수합성법에 의하면 외력 F 가 부분구조 A의 f 점에 작용하고 있고 부분구조 C의 r 점에서 응답 x 를 구하고자 할 때 각 부분구조의 전달함수와 연결부의 정보만 알면 전체 구조물의 응답을 구할 수 있다.

먼저 부분구조 A에서 외력 F 가 f 점에 작용할 때 부분구조 A의 연결부의 변위 응답은 다음과 같다.

$$\{x_i^A\} = [H_{ij}^A]\{R_j\} + [H_{if}^A]\{F_f\} \quad \begin{matrix} i=1, \dots, m \\ j=1, \dots, m \end{matrix} \quad (1)$$

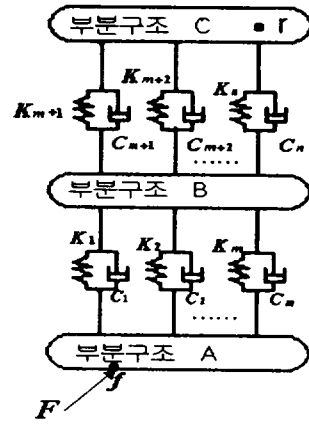


Fig. 1 Substructure system model

여기서 H 는 주파수응답함수를 나타내며, 이하 본 논문에서 사용하는 주파수응답함수의 형태는 리셉턴스(rectance)이다. 위 식에서 상첨자는 부분구조의 이름을 의미하며, x_i 는 연결점 i 에서의 변위를 의미하고 H_{ij} 는 가진점 j 와 응답점 i 사이의 주파수응답함수를, R_j 는 연결점 j 에서의 반력을 의미한다.

부분구조 B와 부분구조 C의 연결부분에서의 변위는

$$\{x_i^B\} = -[H_{ij}^B]\{R_j\}, \quad \begin{matrix} i=1, \dots, n \\ j=1, \dots, n \end{matrix} \quad (2)$$

$$\{x_i^C\} = [H_{ij}^C]\{R_j\}, \quad \begin{matrix} i=m+1, \dots, n \\ j=m+1, \dots, n \end{matrix} \quad (3)$$

과 같고, 부분구조 C의 r 점에서의 변위는 다음과 같다.

$$\{x_r^C\} = [H_{rn}^C]\{R_n\}, \quad i=m+1, \dots, n \quad (4)$$

즉, 식 (4)에 의하면 부분구조 C에 포함된 연결부의 반력을 구하면 r 점에서의 응답을 구하는 것이 가능하다. 각 부분구조 A와 B, B와 C는 탄성결합 되어 있으므로 아래와 같은 변위조건을 만족하여야 한다.

$$[K_{ij}^I]\{R_j\} = \begin{cases} x_h^A \\ x_h^C \end{cases} - \begin{cases} x_h^B \\ x_{i_2}^B \end{cases}, \quad \begin{matrix} i_1=1, \dots, m \\ i_2=m+1, \dots, n \end{matrix} \quad (5)$$

$$\text{where } [K_{ij}^I] = \begin{cases} \frac{1}{(k_i + j\omega c_i)}, & \text{if } i=j \\ 0, & \text{if } i \neq j \end{cases}$$

식 (1),(2),(3)을 식 (5)에 대입하면 다음과 같이 각 연결점에서의 반력을 구할 수 있다.

$$\{R_i\} = [K_{ij}^{-1}][H_{ij}^A]\{F_j\}, \quad i=1, \dots, n \quad (6)$$

여기서

$$[K_{ij}] = [K_{ij}^I] + [H_{ij}^A] + [H_{ij}^B] + [H_{ij}^C] \quad (7)$$

식 (7)에서 부분구조별 주파수응답함수의 하첨자 i, j 는 식 (1), (2), (3)의 표기 방법과 같다. 이제 식 (6)에서 계산된 연결점에서의 반력을 식 (4)에 대입하면 부분구조 A의 f 점을 가진한 경우 부분구조 C의 r 점에서의 응답을 다음과 같이 얻을 수 있다.

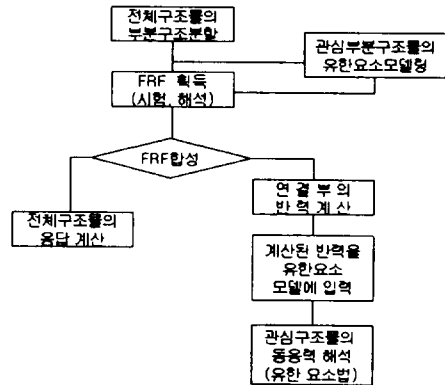
$$\{x_r^C\} = [H_r^C][K_{ij}^{-1}][H_{ij}^A]\{F_j\} \quad (8)$$

식 (8)에서 계산된 전체 구조물의 강제 진동응답은 복소수값으로서 가진력에 대한 응답의 크기(magnitude)와 위상(phase)정보를 포함한다.

2.2 전달함수합성에 의한 동응력 해석

전달함수합성법에 의해 응답을 계산하는 과정에서 식 (6)에 의해 입력 하중에 대한 연결 부분의 반력을 구할 수 있다. 하나의 연결 부분에서의 반력은 모델에서 선정된 연결점의 자유도의 수만큼 나온다. 여기서 반력은 응답과 마찬가지로 복소수 값으로서 크기 정보와 위상 정보를 함께 가지고 있으며, 이는 전체 구조물에 입력되는 동하중(dynamic force)에 대한 부분 구조물의 동적 반력을 의미한다. 즉, 식 (6)에서 계산되는 반력은 전체 구조물에 입력되는 동하중이 구조물들을 통해 크기와 위상이 변하여 부분 구조물에 입력되는 동하중으로 볼 수 있다. 그러므로 위의 반력을 부분

구조물의 연결점에 동하중으로 입력하여 해석을 한다면 부분 구조물만을 해석함으로써 관심있는 부분 구조물의 전체 구조물에 연결되어 있는 상태



의 정상상태 동응력 분포를 해석할 수 있다.

Fig. 2 Flowchart for dynamic stress analysis

이러한 방법으로 구조물의 동응력 해석에 전달함수합성법을 적용하면 절점의 개수에 의존하여 지수적으로 계산 시간이 증가하는 유한요소 해석을 보완하여 결과를 효율적으로 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 비관심 구조물을 집중질량 등으로 모델링 함으로써 나타나는 동응답의 오차를 줄일 수 있다. 또한 이러한 해석 방법은 전달함수합성법의 장점이 그대로 적용되며, 짧은 시간동안 여러 설계 변경을 해야 하는 현장의 설계분야에서는 주파수응답함수만을 가지고 구조물의 동응력 해석이 가능할 것이다.

Fig. 2 에는 본 논문에서 전달함수합성법을 이용하여 구조물의 진동 응답과 동응력을 구하는 과정을 순서대로 나타내었다.

3. 컴프레서 브라켓의 동특성 해석

3.1 브라켓 구조물의 부분구조 분할

Fig. 3 은 차량에 장착되는 에어컨 컴프레서 브라켓 구조물(이하 브라켓 구조물)을 나타낸다. 브라켓 구조물의 전달함수합성법 수식화를 위하여 Fig. 1 와 같이 지그, 브라켓, 컴프레서로 3 개의 부분구조로 분할하였으며, 각각의 부분구조물은 각각 4 개의 볼트로 체결되어 있다. 여기서 연결 요소의 감쇠는 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 전체 구조물을 부분구조로 분할함에 있어 지그를 하나의 부분 구조물로 나누어 지그의 특성을 독립적

으로 응답 계산에 포함시켰다. 이러한 구분은 브라켓의 설계 변경 시 변경된 브라켓의 주파수응답 함수만 구할 수 있으면 변경된 전체 구조물의 응답을 구할 수 있는 장점이 있으며, 지그의 주파

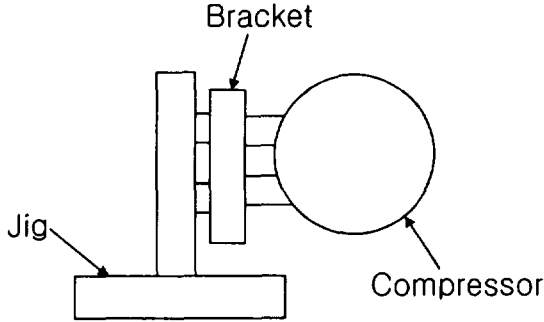


Fig. 3 Air-conditioner compressor system

수응답함수 대신 차량 엔진의 주파수응답함수를 사용하면 실제 차량의 엔진에 브라켓과 컴프레서를 장착했을 때의 진동 응답을 예측할 수 있다.

3.2 주파수응답함수의 획득

각 부분구조물의 주파수응답함수를 구하기 위하여 컴프레서와 지그는 충격시험(impact test)을 통해서 주파수응답함수를 구하였으며, 브라켓에 대하여는 유한요소법을 사용하여 주파수응답함수를 구하였다.

충격시험 시 경계조건으로는 컴프레서는 자유상태(free-free)의 경계조건을 주었으며, 지그는 정반에 장착된 상태로 시험을 하였다. 각각의 부분구조물의 응답은 3축 가속도계를 사용하여 3방향의 가속도를 측정하였다. 부분구조물의 가진은 충격망치(impact hammer)를 사용하여 한 가진점마다 3방향의 가진을 하였다.

유한요소 모델링과 해석은 상용 소프트웨어인 MSC/PATRAN 과 MSC/NASTRAN 을 사용하였다. 브라켓의 유한요소 모델의 검증에 위하여 1차적으로 고유치 해석을 수행하여 브라켓의 고유 진동수와 고유 진동형을 실험값과 비교하였고, 2차적으로 조화 해석(Harmonic Analysis)을 수행하여 주파수응답함수를 비교, 데이터의 타당성을 검증하였다. Table 1 과 Fig. 4 를 보면 브라켓 단품 모델에 대하여는 고유 진동수와 고유 진동형, 주파수응답함수 모두 매우 정확하게 해석 가능함을 알 수 있다.

3.3 컴프레서 시스템의 유한요소 모델

앞 절에서 설명한 브라켓의 유한요소 모델을 근거로 전체 구조물인 브라켓 구조물에 대하여 유한요소 모델링을 하였다. 브라켓 모델은 앞 절에

Table 1. Comparison of natural frequencies of the bracket

Mode	Method	Modal test [Hz]	FEM [Hz]	Error [%]
1st		2,825	2,806	0.67
2nd		3,461	3,414	1.37
3rd		5,404	5,528	2.18

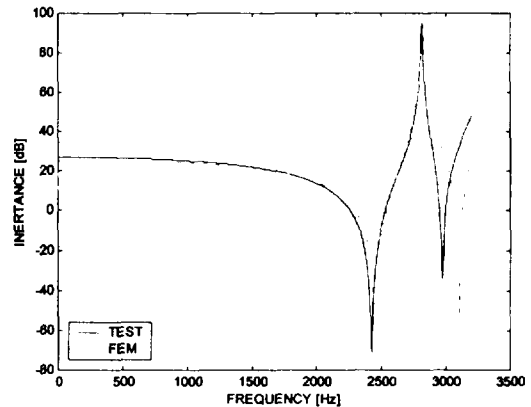


Fig. 4 Comparison of FRFs of the bracket between modal test and FE analysis

서 검증된 3 차원 모델을 그대로 사용하였다.

컴프레서에 대한 모델링은 폴리과 몸체 두 부분으로 나누어 집중질량으로 모델링 하였다. 집중질량의 위치는 컴프레서의 무게중심에 위치시켰으며 집중질량의 물성치는 컴프레서의 질량과 회전관성을 입력하였다. 브라켓과 컴프레서 집중질량의 연결은 강결합 요소(rigid element)인 RBE2 요소를 사용하였다. 또한 연결 볼트의 강성을 고려하기 위하여 RBE2 요소와 브라켓과 연결되는 절점에 3 방향의 스프링 요소를 사용하였다. 충격시험시 가속도계 부착 위치에서의 응답을 얻기 위하여 컴프레서 부분에 두 개의 질량을 추가하여 컴프레서 집중질량에 강결합 요소로 연결을 하였으며, 전체 시스템에 영향을 미치지 않도록 하기 위하여 질량 값을 매우 미소하게 입력하였다.

지그에 대한 모델링은 일반적으로 경계조건으로 변위 구속을 할 수 있으나, 본 모델에서는 주파수별 가진에 따른 동응력 해석을 위하여 약 10^6

kg의 대질량으로 모사하였다. 브라켓과 지그 대질량의 연결은 컴프레서와 마찬가지로 RBE2 요소로 연결 후 연결 볼트의 강성을 물성치로 하는 스프링 요소를 넣었다.

3.4 진동 특성 비교

전달함수합성법을 사용하여 계산되는 직접적인 결과는 주어진 힘에 대한 정상상태(steady-state)의 강제 진동응답이지만, 가진하는 힘을 단위 힘이라 가정하여 식 (8)의 가진력 항에 힘의 스케일(scale)을 1로 하여 계산하면 전체 구조물의 주파수응답 함수를 얻을 수 있다. 이렇게 하여 구할 수 있는 주파수응답함수의 형태는 리셉턴스(receptance) 형태이므로 모빌리티(mobility)나 이너턴스(inertia) 형태의 주파수응답함수를 구하기 위해서는 각각 $j\omega$ 와 $-\omega^2$ 을 곱하여 주면 된다.

가진점으로 지그를 가진하여 전달함수합성법으로 계산한 전체 구조물의 컴프레서에서의 주파수응답함수와 충격시험으로 구한 전체 구조물의 컴프레서에서의 주파수응답함수를 Fig. 5에 나타내었다. Fig.5에서 볼 수 있듯이 200Hz 부근의 노이즈와 300Hz 대역의 피크가 없어진 것을 제외하면 전달함수합성법을 이용하여 계산한 주파수응답함수는 실제 실험에서 얻은 주파수응답함수와 비교하여 상당히 일치함을 볼 수 있다. 200Hz에 노이즈가 있는 이유는 부분구조의 충격실험 시 그 영역에서의 지그의 주파수응답함수의 노이즈가 주파수응답함수 합성 시 증폭되었다고 판단된다. 그러나 실험 시 기여도(coherence)가 좋지 않았던 저주파 대역 외에는 고주파 대역에서도 주파수응답함수가 잘 일치하고 있다.

Fig. 6에서는 전체 구조물을 유한요소 해석으로 얻은 주파수응답함수와 충격시험으로 구한 주파수응답함수를 비교하였다. 여기서의 가진점은 브라켓이며 응답점은 컴프레서이다.

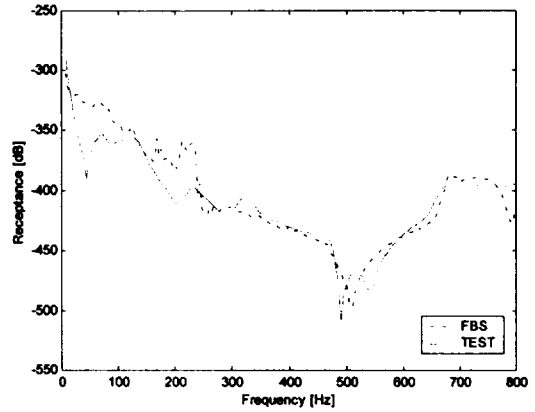


Fig. 5 Comparison of an FRF measured by impact test with that of FBS method

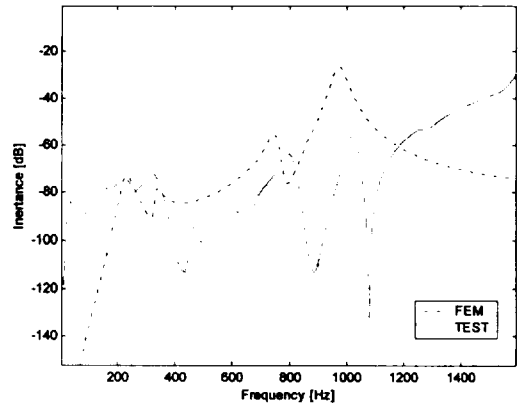
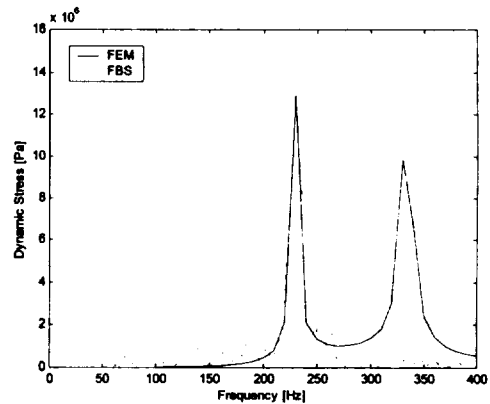
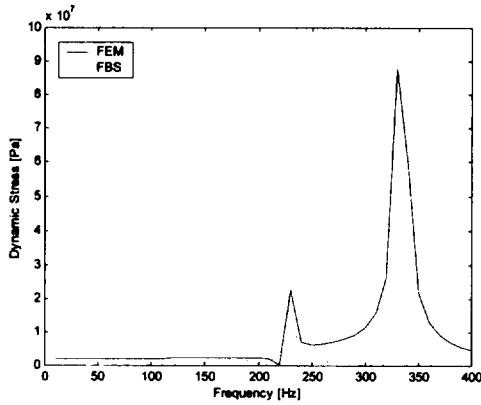


Fig. 6 Comparison of an FRF measured by impact test with that of FE analysis



(a) point I



(b) point 2

Fig. 7 Comparison of dynamic stresses

3.5 동응력 해석

동응력 해석을 위하여 전달함수합성법에 의해 계산된 반력을 브라켓 단품의 유한요소 모델에 동하중으로 입력하여 조화해석을 하였다. 동하중의 크기는 전체 브라켓 시스템의 지그 부분이 30g의 가속도로 상하방향으로 가진된다고 가정하여 브라켓의 연결 부분에서의 반력을 계산하였으며, 동하중을 입력한 지점은 브라켓의 8개의 볼트 연결지점으로, 한 연결점 마다 x, y, z 세 방향의 동하중을 주어 브라켓의 동응력을 해석하였다. 해석 주파수의 범위는 40~400Hz로, 주파수 간격은 4Hz로 하였으며, Fig. 7에서 브라켓 시스템의 유한요소 모델의 해석 결과와 비교하였다. 브라켓 시스템의 유한요소 해석은 지그에 대한 집중질량에 30g의 동하중을 입력하여 해석하였다.

Fig. 7은 브라켓의 대표적인 점을 선정하여 주파수에 따른 응력의 변화를 나타낸 것으로 전체 구조물의 유한요소 해석의 경우 230Hz와 330Hz 부근의 두 공진점에서 응력이 크게 상승하는 것을 볼 수 있다. 그러나 전달함수합성의 경우 230Hz 부근의 응력 상승 경향은 볼 수 있으나 전체적으로 응력 변화 형상이 불규칙하고 330Hz 부근의 응력 상승을 볼 수 없었다.

이러한 결과의 가장 큰 원인은 위상의 민감성 때문이라 판단된다. 진동시험 시 노이즈는 필연적으로 혼입되게 되며, 노이즈는 주파수응답함수를 왜곡시키게 된다. 이러한 노이즈에 대하여 주파수응답함수의 크기는 비교적 둔감하지만, 위상은 노이즈에 매우 민감하여 쉽게 왜곡된다.⁽⁷⁾ 그러므로 시간에 따라 하중의 크기가 변하는 동하중의 입력의 경우 하중이 여러 곳에서 작용한다면 입력되는 하중의 크기와 더불어 위상도 응력 분포에 큰 요인으로 작용할 것이다. 이러한 이유에 의해 각 부분 구조물의 진동시험 시 노이즈가 브라켓의 동응력 계산에 악영향을 미쳤다고 판단된다.

앞으로 전달함수합성법에 의한 동응력 계산을 위하여 각 부분구조물의 주파수응답함수의 획득 시 주파수응답함수의 왜곡을 최소화 시키는 연구가 선행되어야 할 것이다.

4. 결론

차량용 에어컨 컴프레서 브라켓에 대하여 실험 데이터와 유한요소 데이터를 혼합하여 전달함수합성법을 적용, 진동 응답 특성 및 동응력 해석을 수행한 결과, 결론은 다음과 같다.

- (1) 전달함수합성법을 이용하여 전체 구조물의 진동 응답의 크기는 매우 정확하게 예측할 수 있었다.
- (2) 전달함수합성법에 의한 동응력 해석에는 반력의 크기 정보뿐 아니라 위상 정보도 중요하게 작용한다고 판단되며, 정확한 동응력 해석을 위해서는 주파수응답함수의 노이즈 제거 등 보정이 필요하다.

참고문헌

- (1) 長 昭男, 大態政明, 部分構造合成法, 培風館, 1991.
- (2) 황우석, 이두호, 2000, "전달함수를 이용한 차실 소음의 부분구조 해석", 한국소음진동공학회지, 제 10권 제 3호, pp.480-485.
- (3) 이두호, 황우석, 김찬목, 2000, "전달함수합성법을 이용한 엔진마운트계의 민감도 해석", 한국기계공학회지, Submitted for publication.
- (4) S.D. Ochsner and R.J. Bernhard, 1995, "Application of a component mobility technique to automotive suspension systems", Noise Control Engineering Journal, Vol.43, pp.73-82.
- (5) T.C.Lim and J.Li, 2000, "A theoretical and

computational study of the FRF-based substructuring technique applying enhanced least square and TSVD approaches”, *Journal of Sound and Vibration*, 234(4), pp.1135~1157

- (6) J.Li and T.C.Lim, “Application of Enhanced Least Square to Component Syntheses Using FRF for Analyzing Dynamic Interaction of Coupled Body_Subframe System”, *SAE Paper*, No.1999-01-1826.
- (7) 정의봉, 안세진, 1995, “전달함수합성법에 의한 차체-엔진계의 실험적 진동해석”, *한국소음진동공학회 추계학술대회논문집*, pp. 289~295
- (8) 정재훈, 지대한, 1998, “다중전달함수합성법을 이용한 구조물의 동특성 해석”, *한국소음진동공학회지*, 제 8 권 제 1 호, pp. 139~145