대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 B pp. 341~348 KSME 01S213

부분구조의 기여도 분석을 통한 대형구조물의 해석에 관한 연구

조은수*·백설*·임홍재**·김효식***

A Study on Modal Analysis of a Large Structural System with Contribution Factor Analysis of Substructures

Ean Soo Cho, Serl Baik, Hong Jae Yim, Hyo Sik Kim

Key Words: MAC Value(맥값), Modal Analysis(모달 해석), Superelement(초요소), Substructure(부분구조)

Abstract

In this study, a method is presented to find out a relationship between modes of a substructure and those of the system structure. Superelement analysis is performed for a full vehicle system, where the bus is partitioned by six parts. In this study, Modal Assurance Criteria(MAC) which is to represent the correlation between two mode shapes is used to investigate the contribution factor of each substructure for the full system. The proposed participation factor can be used for design of substructures to meet the design target of the total structural system.

1. 서 론

버스 차체와 같은 대형 구조물은 여러 개의 부분 구조물로 이루어져 있으며, 개발 시에도 각각의 부분 구조들이 별개로 제작된 후, 한 개의 시스템으로 결합된다. 이와 같은 버스 차체의 각종 성능 특성은 각 부분 구조물의 진동 특성과 밀접한 연관성을 갖게 된다. 따라서 버스 차체와 같은 대형 구조물의 진동 설계시에 각 부분 구조물의 진동특성이 어떤 영향을 미치는지를 파악하는 것은 매우 중요하다.[1] 본 연구에서는 실험적 모드와 해석적 모드의 상호 연관성을 파악하는데 사용되는 MAC(Modal Assurance Criteria)값[2][3]을 이용하여 부분구조물의 모달 특성과 전체 구조물의 모달 특성간의 상호 연관성을 찾아보기 위한 연구를 수행하고자 한다.

본 연구에서는 버스 차량의 B.I.W(Body In White)전체 시스템을 부분구조로 나누어 부분구조별로 동특성을 해석하고 이를 합성하여 전체시스템의 동특성을 검토하였다. 부분구조가 전체 시스템의 각 모드에 미치는 기여도를 예측하기 위하여 상용소프트웨어인 MSC/NASTRAN의 부분구조 합성법(Component Mode Synthesis)을 사용하였고, 모델을 구성하는 데 있어서는 각 부분 구조의 기여도를 파악하기 위하여 초요소법(super-element method)을 적용하였다.

2. 부분구조 합성법

부분구조 합성법은 component mode synthesis (CMS), modal synthesis 및 building block approach(BBA) 등으로 불리어지며, 크고 복잡한 구조물의 컴퓨터 실행시간, 경비절감 및 구조물의 부분적인 수정이 있을 경우 전체시스템을 재

*국민대학교 자동차공학대학원 석사과정
**국민대학교 기계·자동차공학부 부교수
***현대자동차 남양연구소

해석해야 하는 난점을 극복하기 위해 개발되었다. 부분구조 합성법은 복잡한 구조물을 몇 개의 주요 요소 또는 부분구조로 나누어 유한요소법이나 시험을 통하여 독립적으로 고유진동수(natural frequency)와 모드 형상(mode shape)을 구한 후, 이들 사이에 적절한 구속조건을 고려하여 합성한 전체구조물의 고유진동수와 모드형상 및 강제진동에 의한 응답(response)등을 구하는 방법이다.

3. 초요소(Superelement)법

대형 모델을 해석하는 경우, 일반적인 해석 방법으로는 디스크 공간이 문제가 되어 해석이 불가능했던 문제도 초요소법을 사용하면 해석이 가능하게 할 수 있다. 물론, 초요소를 정의하는 작업 과정을 필요로 한다. 또한 재해석(restart) 기법에 익숙한 경우라면 보다 작은 디스크 공간에서도 대형 모델을 해석하는 것이 가능하기도 하다. 초요소법을 사용한다고 해서 무조건적으로 디스크 공간을 줄일 수 있는 것은 아니다. 해석대상 모델을 요소로 분할했을 때 절점(node)의 수가 너무 적은 경우는 초요소법을 사용했을 때 큰 효과가 없지만 절점의 수가 대략 10,000개 이상이라면 초요소법을 사용하는 것이 효과적이다.

본 연구에서는 Guyan Reduction, GDR, CMR 등 세가지 방법을 사용하여 해석을 수행하였다.

3.1 정적축약

이 방법은 정적 해석과 동적 해석에 사용되는데, 이러한 두 가지 종류의 해석에 대한 일반적인 수식들을 아래에 나타내었다.

$$[K_{ff}]\{U_f\} = \{P_f\} \tag{1}$$

해석과정은 해답에 대한 방정식의 분할을 포함하고, 분할된 해답의 결합으로 전체 해답을 얻는다. MSC/NASTRAN에서 사용된 분할의 표기법을 아래에 나타내었다.

$$\left[\begin{array}{c|c} K_{oo} & K_{oa} \\ \hline K_{oa}^T & K_{aa} \end{array}\right] \left\{\begin{array}{c} U_o \\ \hline U_a \end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{c} P_o \\ \hline P_a \end{array}\right\} \tag{2}$$

여기서,

o-set = interior points (to be condensed out by the reduction)

a-set = exterior(or boundary) points(which are retained for further analysis)

f-set = unconstrained structural degrees of freedom (a-set + o-set)

위의 매트릭스를 두 개의 식으로 분할하면

$$[K_{oo}]\{U_o\} + [K_{oa}]\{U_a\} = \{P_o\} \tag{3}$$

$$[K_{oa}^T]\{U_o\} + [K_{aa}]\{U_a\} = \{P_a\} \tag{4}$$

첫 번째 식에 K_{oo}^{-1}를 곱하면

$$K_{oo}^{-1}[K_{oo}U_o + K_{oa}U_a] = K_{oo}^{-1}P_o \tag{5}$$

여기서, $G_{oa} \equiv -K_{oo}^{-1}K_{oa}$ (Boundary Transformation)라 하고 (6)

$$U_o^o \equiv K_{oo}^{-1}P_o$$

(Fixed Boundary Displacements)라고 하면 (7)

그때, $U_o = U_o^o + G_{oa}U_a$ (8)

(Total Interior Displacements)가 된다.

다시 U_o를 두 번째 식에 대입하면

$$K_{oa}^T[G_{oa}U_a + U_o^o] + K_{aa}U_a = P_a \tag{9}$$

가 된다.

여기에서, $K_{aa} \equiv K_{oa}^T G_{oa} + K_{aa}$ (10)

(Boundary Stiffness)

$$P_a \equiv G_{oa}^T P_o + P_a \tag{11}$$

(Boundary Loads)

라하고 residual structure에 대해서 풀면

$$U_a = K_{aa}^{-1}P_a \tag{12}$$

(Boundary Displacements)

가 된다.

$[K_{aa}]$ 매트릭스는 경계점에서 계산된 초요소의 강성행렬(stiffness matrix)이고 $\{P_a\}$ 벡터는 구조물의 나머지 부분으로 전달된 경계하중(boundary load)을 나타낸다. 이러한 부분적인 결과는 나중에 전체 구조물로 합쳐진다.

3.2 동적 해석에서 Guyan 축약의 근사화

정축약에서 사용된 것들이 동적 해석에서도 사용될 수 있는데, 사용하게된 동기는 정적해석에서와 같이 해석과정을 더 작은 부분으로 자르고 사용자의 근사화 기법을 통한 계산 비용의 절감이다. 축약과정은 어떤 근사화(질량이 없거나 하

중이 작용하지 않은 자유도의 제거)도 이루어지지 않은 부분과 근사화가 이루어진 부분을 포함한다. 위의 두 부분은 효율성의 이유로 동시에 축약이 이루어진다.

주파수 응답에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$[K+i\omega B-\omega^2 M]_{ff}\{U_f\}=\{P_f\} \quad (13)$$

여기서, i 는 $\sqrt{-1}$ 이고 ω는 단위시간당 라디안의 단위인 가진주파수이다. 이 방정식은 시간미분을 라플라스 연산자로 대체함으로써 얻어진다.

MSC/NASTRAN에서 과도응답 해석은 비슷한 방정식으로 계산되는데 그 방정식에서 $1/\Delta t$ 는 식(13)에 ω를 포함하는 항을 발생시키고 Δt는 과도응답을 계산하는데 사용된 시간 증분이다. 만일 식(5)의 연산이 시도된다면 주파수 의존 매트릭스 방정식이 계산되어야 한다

$$[G_{oa}]=-[K_{oo}+i\omega B_{oo}-\omega^2 M_{oo}]^{-1}$$
$$[K_{oa}+i\omega B_{oa}-\omega^2 M_{oa}] \quad (14)$$

과도 해석에 대한 방정식은 좀더 복잡해진다. 그러나 만일 외부 절점(exterior point)에 모든 중요한 자유도를 두고 식(14)에 있는 거의 모든 stiffness 항들을 무시하면 그때 단순화된 근사변환 $[\Gamma_{oa}]$는 다음과 같이 될 수 있다.

$$\{U_f\}\simeq[\Gamma_{oa}]\{U_a\} \quad (15)$$

여기서, $$[\Gamma_{oa}]=\begin{bmatrix} I_{aa} \\ --- \\ G_{oa} \end{bmatrix} \quad (16)$$

I 는 단위행렬을 나타내고 $[G_{oa}]$는 식(5)에서 정의되었다. 축약된 방정식을 만들기 위해 f-set 식(13)에 $[\Gamma_{oa}]^T$를 곱하고 식(15)에 $\{U_f\}$를 대입하면

$$[K+i\omega B+M]_{aa}\{U_a\}=\{P_a\} \quad (17)$$

만일 식(15)와 식(16)이 식(17)에 대입되고 식(3)~식(7)까지 비교해보면 식(6)을 제외한 모든 항들이 보존되어있다는 것을 알 수 있다. 여기에서 제외된 $\{U_o^0\}$항은 무시된다. 이것이 Guyan 축약 근사의 특징이다.

이러한 변수들의 변환에 포함된 근사화를 정량화 하는 몇 가지 방법이 있다. 첫째로, f-set은 a-set보다 더 많은 변수들을 가지기 때문에 몇 가지 정보들이 빠지게 된다. 두 번째 방법은 식(14)에 있는 항들의 상대적인 사이즈에 있다. 만일 K의 항이 B와 M에 있는 항들을 지배하면 근사화는 타당하다.

또한, 식(14)(superelement의 fixed boundary mode)에서 역변환된 항의 고유치가 조합된 모델보다 더 높은 고유진동수와 가진 주파수를 갖는다면 결과를 신뢰할 수 있다. 근사를 정량화 하는 또 다른 방법은 o-set의 항들이 어떻게 a-set으로 변환되는지를 결정하는 것이다. 만일 식(17)의 변환에 있는 항들이 명시적으로 쓰여진다면, 축약된 질량 매트릭스는

$$[M_{aa}]=[\overline{M}_{aa}]+[G_{oa}^T M_{oo} G_{oa}]$$
$$+[G_{oa}^T M_{oa}]+[M_{oa}^T G_{oa}] \quad (18)$$

이다.

stiffness와 damping 매트릭스들을 축약함으로써 유사한 표현들이 얻어진다.

3.3 Generalized Dynamic Reduction(GDR)

GDR은 Guyan reduction에서 사용된 a-set point들과 같은 값을 자동적으로 취하는 방법이다. GDR이 요구될 때, 근사화된 고유벡터 내부의 점들에 대해서 계산되어지는데, 그 계산된 결과들은 일반화된 좌표들에 의해 표현되는 형상함수들이다. 외부의 점들은 고정점, 자유점, 혹은 고정점과 자유점이 혼합된 점들이다.

fixed-boundary case에 대해서 근사화된 고유벡터들이 내부 자유도(interior degrees of freedom)에 대해서 얻어진다. 모드들의 일반화된 질량과 강성 계수들은 q-set에 놓여지고, 고유벡터들은 $[G_{oa}]$ 매트릭스로 병합된다. 여기에서 $[G_{oa}]$ 매트릭스는 b-set 행에 대해서는 정적 형상함수들로, q-set 행에 대해서는 동적 형상함수들로 구성된다. 만일 free-boundary option이 선택되면, 수식이 더욱 복잡해지고 계산비용이 더 높아진다.

여기서,

b-set = degrees of freedom fixed during component mode analysis or dynamic reduction

q-set = generalized degrees of freedom for dynamic or component mode synthesis

3.4 Component Mode Reduction

만일 component mode reduction(CMR)이 그 자체로만 사용된다면, 형상함수를 구하는 데 있어서 근사화된 고유벡터를 사용하지 않고 정확한 고유벡터를 사용한다는 것을 빼고는 GDR에 사용된 것과 똑같은 수식이 사용된다. GDR과 CMR이 같이 사용되면 GDR이 이루어진 후에, 그 결과를 가지고 고유치들을 얻는다. 축약된 고유벡터들은 근사화된 고유벡터들의 선형 조합을 얻는데 사용된다. 이렇게 해서 얻어진 결과는 좀 더 정확한 고유벡터를 얻어내고, 동적 형상함수를 위해 사용되는 벡터가 된다.

4. 부분 구조의 기여도 분석

4.1 초요소모델의 구성

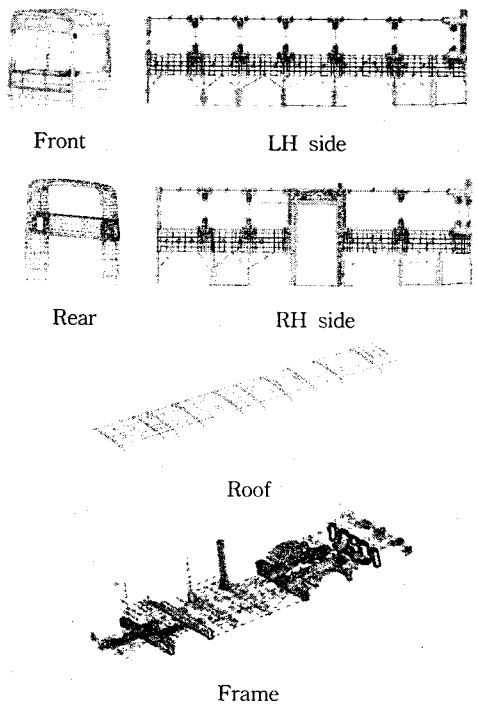

Fig. 1 FE model for substructure analysis

4.2 고유치 해석을 통한 부분구조합성법의 비교

Beam-Shell 모델로 구성된 Bus의 B.I.W를 실제로 현장에서 분류하는 6개의 부분구조(substructure)로 구성하였다. 초요소 모델의 구성을 위해 전체 모델의 절점을 부분구조별로 재정렬하고 색으로 분류하였다.

전체 모델을 6개의 부분구조물로 나누고 각 부분구조의 경계를 residual structure로 구성하였다. Fig. 1은 초요소법을 적용하기 위한 부분구조의 구성을 나타낸다. 전체 모델의 절점 개수는 32052개이다.

구성된 초요소 모델을 다음의 3가지 부분구조 합성법에 의해 진동해석을 수행하였다.

1. Guyan Reduction (Static Condensation)
2. Generalized Dynamic Reduction (GDR)
3. Component Mode Synthesis (CMS)

Table 1 The comparison of the modal analysis results

Mode No. of full sys.	Reference (Hz)	Guyan (Hz)	GDR (Hz)	CMS (Hz)
1	12.55	12.73	12.56	12.57
2	16.43	16.51	16.46	16.48
3	17.80	18.13	17.82	17.83
4	18.28	20.92	18.31	18.33
5	20.08	21.82	20.12	20.18
6	21.90	22.69	21.97	22.09
7	22.28	24.93	22.36	22.43

위의 3가지 방법으로 고유치를 해석해 본 결과를 Table 1 에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 정축약을 하는 Guyan method의 경우가 오차가 가장 큰 것으로 나타났다. 동축약을 하는 GDR과 CMS의 경우에는 거의 차이가 없으나 모델 사이즈가 큰 경우에는 일반적으로 CMS를 쓰는 것이 유리하고, 부분구조별로 고유치를 얻기 위해서는 CMS를 써야한다. 그러므로, 본 연구에서는 초요소법을 이용한 부분구조 해석을 위해 MSC/NASTRAN의 CMS를 사용하기로 한다.

4.3 부분구조의 고유치 해석

모드합성법은 복잡한 대형 구조물의 저차 진동모드를 효율적으로 구하기 위한 것으로 관심 있는 구조물을 몇 개의 부분구조로 분리한 후 각 부분구조의 독립된 고유치해석 결과와 연결부에

서 만족해야 하는 기하학적 적합조건을 이용하여 전체 구조물의 진동모드를 합성한다. 각 부분구조에서는 구속모드 또는 축약된 저차의 정규모드만을 사용하므로 최종적인 고유치 해석시 유효자유도의 수가 현저히 줄어들어 수치해석에서의 효율성을 향상시킬 수가 있다. 모드 축약은 고차모드의 영향을 무시하므로 근사가 더 많이 이루어진다. 이런 경우 부분구조의 해석에서 보다 많은 수의 모드를 고려함으로써 근사해의 정확도를 향상시킬 수 있다. 자유도의 수와 같은 수의 모드를 고려하면 부분구조의 모드간에 의존성이 없는 경우에 엄밀해를 얻을 수 있다.

Table 2 Modal frequencies of substructures with fixed boundary condition

	Roof	Left Side	Right Side	Front	Rear	Frame
1	34.67	20.92	26.42	40.00	35.40	37.86
2	39.81	26.33	27.29	54.75	38.33	37.87
3	43.31	28.14	30.00	58.44	42.71	49.30
4	44.41	29.38	30.02	62.28	45.10	49.32
5	45.45	32.89	35.11	67.14	52.11	50.03
6	46.10	34.65	36.26	69.52	57.84	52.77
7	47.13	36.53	39.43		61.70	53.41

Table 3 Modal frequencies of substructures with free boundary condition

	Roof	Left Side	Right Side	Front	Rear	Frame
1	3.51	2.24	2.32	5.66	11.59	7.78
2	16.99	2.32	2.41	10.54	18.48	8.68
3	22.04	2.33	2.68	11.35	18.65	9.37
4	22.41	2.34	5.27	12.29	25.32	13.09
5	24.86	2.70	6.49	12.91	27.68	14.81
6	25.99	3.34	8.17	13.25	31.06	15.21
7	26.14	6.57	11.41	15.47	35.10	19.09

Table 2은 실제 시스템에 연결되어 있는 고정경계 모드를 나타내고 Table 3은 경계가 구속되어 있지 않은 자유경계 모드를 보여준다. 결과에서 보듯이 고정경계 모드가 자유경계 모드보다 높은 수치를 보인다.

4.4 각 부분구조의 기여도 분석

초요소법(superelement method)을 사용하면 각 부분구조 별로 변형에너지를 구할 수 있는데, 변형에너지를 통해서 각 부분구조(substructure)의 기여도를 분석할 수 있다.

Table 4 Strain energy of each substructure

	Roof	Left Side	Right Side	Front	Rear	Frame
1	2.83E+02	3.78E+02	6.46E+02	3.57E+02	2.06E+02	9.76E+02
2	2.55E+02	7.06E+02	5.24E+02	1.09E+03	2.45E+02	2.11E+03
3	1.48E+02	3.63E+03	4.30E+02	5.19E+02	1.54E+02	9.75E+02
4	3.60E+02	2.94E+03	4.71E+02	3.24E+02	6.14E+02	1.46E+03
5	4.48E+03	4.99E+02	1.15E+03	2.01E+02	2.50E+02	8.98E+02
6	5.27E+02	1.07E+03	1.21E+03	6.16E+02	1.95E+03	3.69E+03
7	2.46E+03	1.85E+03	1.60E+03	8.39E+02	4.03E+02	1.62E+03
8	6.01E+03	8.57E+02	1.06E+03	7.45E+02	2.60E+02	1.05E+03
9	2.33E+01	8.31E+02	1.21E+04	4.90E+01	1.76E+02	2.02E+02
10	8.27E+00	1.28E+04	7.74E+02	10.00E+00	1.78E+01	4.78E+01

초요소를 이용하면 Table 4에서처럼 변형에너지를 구해서 부분구조의 기여도를 볼 수 있다. 변형에너지 만으로도 각 부분구조가 전체 시스템에 얼마나 영향을 미치는지 알 수 있으나, 좀 더 정확하게 변형에너지의 전체 시스템에 대한 비율(strain energy fraction)을 구함으로써 전체 시스템의 각 모드에 대한 부분구조의 기여도를 알 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{n} \text{fraction of each substructure} = 1$$

여기서, n = substructure의 개수

Table 5 Fraction of total strain energy of the residual structure modes

ModeNo (freq.)	Roof	Left Side	Right Side	Front	Rear	Frame
1(12.57)	0.09	0.12	0.21	0.11	0.07	0.31
2(16.48)	0.05	0.13	0.10	0.20	0.05	0.39
3(17.83)	0.02	0.58	0.07	0.08	0.02	0.16
4(18.33)	0.05	0.44	0.07	0.05	0.09	0.22
5(20.18)	0.56	0.06	0.14	0.03	0.03	0.11
6(22.09)	0.05	0.11	0.13	0.06	0.20	0.38
7(22.43)	0.25	0.19	0.16	0.08	0.04	0.16
8(24.36)	0.51	0.07	0.09	0.06	0.02	0.09
9(26.10)	0.00	0.06	0.90	0.00	0.01	0.02
10(26.30)	0.00	0.94	0.06	0.00	0.00	0.00

버스의 전체 시스템에 대한 모드 10개에 대한 부분구조의 기여도를 Table 5을 통해서 보면 front와 rear를 제외한 나머지의 부분구조가 각 모드별로 고르게 영향을 미친 것을 알 수 있다. 그러나, 특정 부분구조만이 영향을 미쳤다고 보기 어려운 경우도 있으므로 그래프를 통해 다시 살펴보면 Fig. 2과 같다. 그래프에서 보듯이 전체 시스템의 8개 모드에 대해서 각 부분구조가 미치는 기여도를 볼 수 있다.

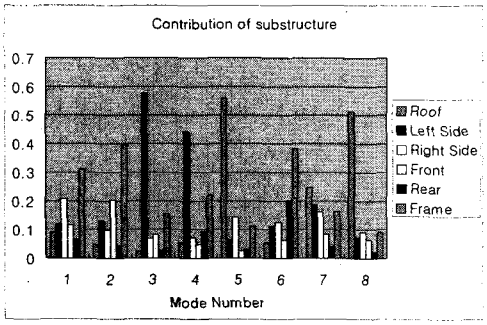

Fig. 2 Contribution of substructure in each of full system modes

4.5 MAC과 MSF를 이용한 모드별 기여도 분석

모드 형상들의 상관관계는 MAC의 사용을 통해서 얻어질 수 있는데, MAC은 두 개의 모드 형상 사이에서 상관관계(correlation)를 나타내는 0~1 사이의 값을 갖는 스칼라값이다. MAC이 거의 1에 가깝다는 것은 두 모드 형상 사이의 상관관계와 일치성이 높다는 것을 보여준다. 여기에서, MSF는 모드 형상을 직교 좌표계에 나타낼 때, 모드 형상을 나타내는 점들의 분포를 가장 잘 묘사하는 직선의 기울기로서 두 모드 형상의 크기 비를 나타낸다.

임의의 두 개의 모드에 대해서 MSF와 MAC를 정의하면 다음과 같다.

$$\phi_2 = \phi_1 \text{ (MSF)} \tag{19}$$

여기서,

ϕ_1 = 모드 형상 1을 나타내는 m 차원 벡터,

ϕ_2 = 모드 형상 2를 나타내는 m 차원 벡터,

m = 응답 자유도의 수이다.

그러므로, MSF는 다음과 같이 얻어진다.

$$\text{MSF} = \frac{(\phi_1^T \phi_2)}{\phi_1^T \phi_1} \tag{20}$$

여기서, T = transpose complex conjugate

식(20)은 다음과 같이 각각의 응답 자유도 $\phi(j)$의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\text{MSF} = \frac{\sum_{j=1}^{m} \phi_1^T(j)\ \phi_2(j)}{\sum_{j=1}^{m} \phi_1^T(j)\ \phi_1(j)} \tag{21}$$

여기서, $\phi(j)$ = the mode shape coefficient for response of freedom j이고, MAC은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{MAC} = \frac{|\ \sum_{j=1}^{m} \phi_1^T(j)\ \phi_2(j)\ |^2}{\sum_{j=1}^{m}(\phi_1^T(j)\ \phi_1(j))\ \sum_{j=1}^{m}(\phi_2^T(j)\ \phi_2(j))} \tag{22}$$

MAC값을 구하기 위하여 전체 시스템의 고유치를 얻기 위해 사용된 부분구조의 모드를 추출하였고, 전체 시스템과의 correlation을 통해서 부분구조의 각 모드가 전체 시스템의 각 모드에 대해서 어떻게 기여하는 지를 결과를 통해 살펴보았다.

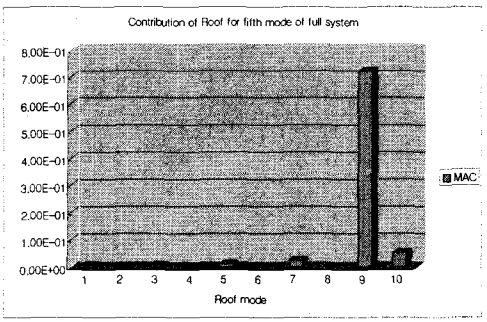

Fig. 3 Contribution of the roof for the fifth mode of the full system using MAC

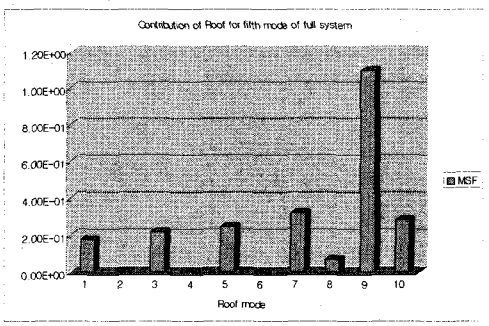

Fig. 4 Contribution of the roof for the fifth mode of the full system using MSF

전체 시스템의 각 모드에 대해서 가장 기여도가 큰 부분구조의 결과를 살펴보면 Fig. 5~Fig.6과 같다. 이렇게 해서 얻어진 결과를 토대로 Post-Processor를 통해 비교해 보면 Fig.7~Fig.8과 같다.

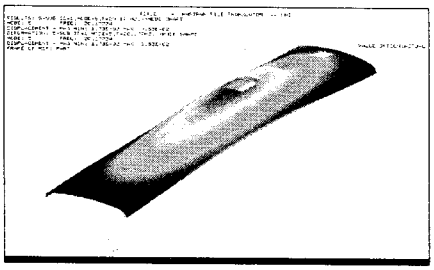

Fig. 5 Mode shape for the fifth mode of the full system

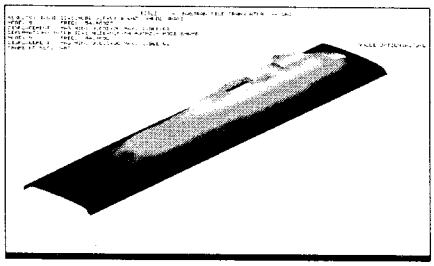

Fig. 6 Mode shape for the ninth mode of the roof

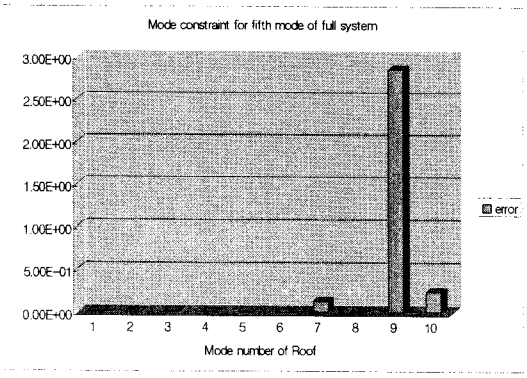

Fig. 7 Mode constraint for the fifth mode of the full system

4.6 모드 구속을 통한 결과 검증

MAC을 이용해서 얻은 결과는 가장 기여도가 큰 모드에 대해서는 Post-Processor를 통해 확인이 가능하지만, 모든 모드에 대한 검증이 어렵다. 따라서, 각 부분구조의 모드 구속(mode constraint)을 통해 결과를 검증하고자 한다. 초요소법에서 이용한 CMS는 각 부분구조로부터 추출한 모드의 조합을 통해서 전체 시스템의 모드를 계산한다.

부분구조별로 각각의 모드를 구속해서 얻은 결과의 오차가 큰 경우는 작은 경우에 비하여 기여도가 큰 것으로 볼 수 있다. 모드 구속을 통해 얻은 결과를 MAC의 결과와 비교해 보면 Fig. 7의 결과와 일치한다.

4.7 Participation Factor

MAC을 이용해서 얻은 부분구조의 각 모드별 기여도를 부분구조의 모드별 구속을 통해 검증하였고, 이에 따라 MAC을 이용한 기여도(Partici-pation Factor)를 얻을 수 있게 되었다. Fig. 8에서는 각 부분구조의 모드가 전체 시스템의 모드에 어떻게 영향을 미치는 지에 대해서 그래프로 나타내었다.

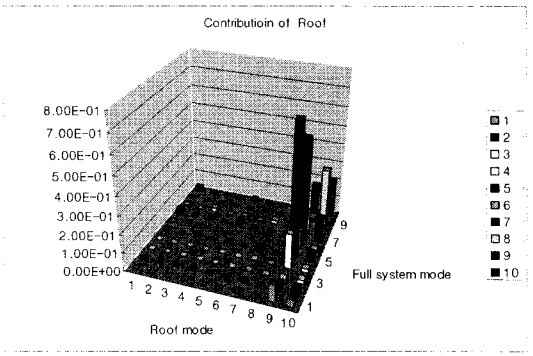

Fig. 8 Participation factor of the roof for full system

5. 결론

본 연구에서는 자유도가 많은 대형 구조물의 고유치 해석에서 전체 시스템을 여러 개의 부분구조로 나누고, 각 부분구조가 전체 시스템의 각 모드에 미치는 기여도를 평가하기 위한 방법을 제시하였다. 본 논문에서 수행된 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 자유도가 많은 구조물에서 전체 시스템을 여러 개의 부분구조로 나누어 고유치 해석을 하고, 나누어진 부분구조별로 변형에너지와 변형에너지의 전체에 대한 비율(Strain energy fraction)을 구함으로써 전체 시스템에 대한 각 부분구조

의 기여도를 파악할 수 있었다.

2) 부분구조의 고유치 해석을 통해 얻어진 각각의 모드를 Modal Scale Factor와 Modal Assurance Criteria를 이용하여 전체 시스템의 모드와 비교하였고, 이를 통하여 부분구조의 각 모드가 전체 시스템의 각 모드에 어떻게 영향을 미치는 지에 대한 평가를 할 수 있었다.

3) 부분구조의 각 모드를 조합(assembly)이 이루어지기 전에 구속하고, 이때 생기는 오차를 분석해서 MSF와 MAC을 통해 얻어진 결과의 타당성을 검증할 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 각 부분구조의 모드별 Participation Factor를 예측할 수 있었다.

4) 부분구조의 기여도 평가를 통한 민감도 해석 및 최적설계의 수행과 이를 이용한 설계 개선이 가능하다.

후기

본 연구는 국민대학교 자동차공학전문대학원을 통한 BK21 자동차공학 특화분야 사업 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 조은수, 2000, "부분구조의 기여도 분석을 통한 대형구조물의해석에 관한 연구,"석사학위논문, 국민대학교.

(2) R. R. Craig, Jr., 1981, "Structural Dynamics - An Introduction to Computer Methods", John Wiley & Sons.

(3) Nuno M.M Maia, Julio M.M Silvia, 1998, "Theoretical and Experimental Modal Analysis", Research Studies Press LTD.