

감도해석과 축소임피던스합성법을 이용한 T형 구조물의 동특성 해석에 관한 연구

오 재용*, 류 지 우**, 조 준호***

(Analysis for Dynamic Characteristics of T-shaped structure using Sensitivity Analysis and Reduced Impedance Method)

(Jae-Eung Oh, Ji-woo Ryu, Jun-Ho Cho)

1. 서 론

컴퓨터의 눈부신 발달에 힘입어 실험 또는 해석적 방법으로 일반 구조물이나 기계구조물의 진동특성을 손쉽게 정확하게 파악하는 것이 가능하게 되었다. 그런데 최근의 산업현장은 지금까지의 정확한 구조해석에만 그치지 않고 이를 바탕으로 강도 개선, 재료 절감을 통한 원가절감, 중량 최소화 문제등의 차원에서 동적인 특성의 변경을 요구하고 있다. 이러한 문제는 그 중요성에도 불구하고 여전히 설계자의 경험이나 시행착오에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 구조물 결합부분에 주목하여 동특성의 변경 문제를 해석하고자 하였다. 즉 거의 모든 구조물이 결합부를 가지고 있는데 결합부 특성을 정확히 파악할 수 없기 때문에 리벳이나 볼트나 어떤 특수한 형태 결합부가 구조물의 특성에 주는 영향을 예측하기 어렵다. 이러한 결합부의 특성을 알아내고 구조물 동특성 변경 및 개선안을 제시하는 최적설계를 위해 감도해석기법은 아주 유효하게 쓰일 수 있다. 한편 구조물의 대형화, 복잡화는 구조물 동특성 해석에 더욱 많은 계산시간과 용량이 큰 전자계산기를 필요로 하게 되었으며, 본계의 결합부위가 변경되거나 결합형태가 변했을때 전체의 동특성을 다시 해석할 필요없이 본계만의 정보로부터 전체의 동특성을 알아낼 필요가 생겼다. 이러한 의미에서 구조물의 본계로부터 전체의 동특성을 해석을 위한 부분구조합성법이 대두되게 되었다. 본 연구에서는 이러한 감도해석과 부분구조합성법의 공통된 문제를 일치화하고자 하였다. 즉 감도해석기법을 이용하여 필요한 구조물의 동특성에 부합하는 결합부의 최적한 설계변수를 규명하였고 이렇게 구해진 결합부의 설계변수와 본계의 정보를 알고리즘이 비교적 간단하고 오차가 적은 축소임피던스 합성법에 적용하여 전체의 동특성을 해석함으로써 감도해석기법과 축소임피던스 합성법의 통합적용이 최적설계와 이에따른 동특성 해석에 효과적인 방법임을 보이고자 하였다.

- * 한양대학교 자동차공학과, 정회원
- ** 한양대학교 대학원
- *** 한양대학교 대학원, 정회원

대상구조물은 구조물 결합의 기본적인 형태인 T형을 선택하였다. T형 구조물은 본계 A(16개의 사각요소)와 본계 B(8개의 사각요소)로 이루어져 있으며 두개의 스프링으로 결합되어있다. 설계변수는 강성에 국한하였으며 결합부의 결합형태는 탄성결합과 강결합으로 하였다. 감도해석과 축소임피던스 합성법에 의해 구해진 고유진동수와 FRF를 상용 유한 요소 해석 패키지인 MSC/NASTRAN을 통하여 검증하여 이 연구의 타당성을 검토하였다.

2. 이론해석

2.1 감도해석 [2, 7]

다음과 같은 운동방정식을 생각한다.

$$(-\omega^2[M] + [K])(X) = (-\lambda[M] + [K])(X) = 0 \quad (1)$$

여기에서 $[M]$, $[K]$, ω , λ , (X) 은 각각 질량행렬, 강성행렬, 고유진동수, 고유치, 그리고 변위벡터를 나타낸다. 여기에서 설계 변수 γ 가 γ_0 에서 미소량 ε 변화해서

$$\gamma = \gamma_0 + \varepsilon \quad (2)$$

이 되면 $[M]$, $[K]$, ω , λ_r , ω_r 들도 따라서 변화하게 되는 데, 이것들을 1차 미분항만을 고려하여 표시하면

$$[K] = [K_0] + \frac{\partial [K]}{\partial r} \cdot \varepsilon = [K_0] + [K'] \cdot \varepsilon \quad (3)$$

$$[M] = [M_0] + [M'] \cdot \varepsilon$$

$$\omega_r = \omega_{0r} + \omega_r' \cdot \varepsilon$$

$$\lambda_r = \lambda_{0r} + \lambda_r' \cdot \varepsilon$$

$$[\phi_r] = [\phi_{0r}] + [\phi_r'] \cdot \varepsilon$$

또 $\lambda_r = \omega_r^2$ 이므로

$$\lambda_r' = 2 \cdot \omega_r \cdot \omega_r'$$

$$\omega_r' = \lambda_r' / 2\omega_r \quad (4)$$

이 되고, 따라서 고유진동수의 감도는 고유치의 감도에 의하여 구할 수 있게 된다.

$$(-\lambda_{0r} \cdot [M_0] + [K_0]) \cdot (\phi_{0r}) = (0) \quad (5)$$

이 되고, 변경후에도

$$(-\lambda_r \cdot [M] + [K]) \cdot (\phi_r) = (0) \quad (6)$$

인 관계를 만족시키게 된다. (6)식에 (3)식의 관계를 대입하여 ε^2 이상의 항을 무시하여 ε 의 계수를 비교하여 정리하면,

$$\begin{aligned} &(-\lambda_{o,r} [M_o] + [K_o]) (\phi_{o,r}') \\ &= (\lambda_{o,r} [M'] + \lambda_r' [M_o] - [K']) (\phi_{o,r}) \end{aligned} \quad (7)$$

이 되고 (7)식의 앞에 $(\phi_{o,r})^T$ 를 곱하면, 좌변은 고유치의 문제이므로 결국 0이 되고, 따라서 $(\phi_{o,r})^T \cdot (\lambda_{o,r} [M'] + \lambda_r' [M_o] - [K']) (\phi_{o,r}) = 0$ (8)

여기에서 고유 진동모우드 벡터를 다음과 같이 정규화하기로 한다.

$$\begin{aligned} &(\phi_{o,r})^T \cdot [M_o] \cdot (\phi_{o,r}) = 1 \\ &(\phi_{o,r})^T \cdot [K_o] \cdot (\phi_{o,r}) = \lambda_{o,r} = \omega_{o,r}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

식(8)과 식(9)의 관계를 이용하여 정리하면

$$\lambda_r' = (\phi_{o,r})^T \cdot ([K'] - \lambda_{o,r} [M']) \cdot (\phi_{o,r}) \quad (10)$$

이 되어 고유치의 감도가 강성행렬의 감도 $[K']$, 질량행렬의 감도 $[M']$ 와 r 차의 고유진동모우드 $(\phi_{o,r})$ 에 의하여 표시됨을 알 수 있다.

2.2 최적화 문제¹⁰⁾

감도행렬을 통틀어 $[A]$, 원하는 설계변경량 (p) , 변경하고자 하는 목표값과 현재값과의 차(즉 원하는 고유진동수와 초기 고유진동수와의 차)를 (y) 라 하면 최적화 문제는

$$[A] \cdot (p) = (y) \quad (11)$$

로 나타낼 수 있다. 이 식은 1차 방정식의 형태이지만 감도행렬 $[A]$ 가 일반적으로 정방행렬이 아니므로, (p) 를 바로 구하는 것은 불가능하다. 이 경우 식 (11)의 우변과 좌변의 차, 즉 오차의 자승값이 최소로 되게 하는 해를 구하는 최소자승법의 사용이 필요하다.

$$(E) = (y) - [A] (p) \quad (12)$$

$$D = (E)^T (E) \quad (13)$$

식 (12)의 (E) 는 오차벡터이며 D 는 자승오차이다. 식 (12), (13)으로부터 자승오차는

$$D = (y)^T (y) - 2(p)^T [A]^T (y) + (p)^T [A]^T [A] (p) \quad (14)$$

D 는 (p) 의 2차 함수로써 최소값은 (p) 에 미분값이 0일 때이다. 즉

$$\frac{\partial D}{\partial (p)} = 2(-[A]^T (y) + [A]^T [A] (p)) = 0 \quad (15)$$

따라서 설계변수 수정량 (p) 는 다음과 같다.

$$(p) = ([A]^T [A])^{-1} [A]^T (y) \quad (16)$$

2.3 축소 임피던스 합성법^{14, 15)}

2.3.1 본계의 정식화

복잡한 구조물을 유한요소법에 따라 정식화가 가능한 몇개의 부분구조(본계)로 아래의 그림 2.1과 같이 나눈다.

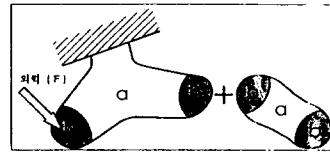


그림 2.1 축소임피던스 합성법이 적용되는 본계

그림과 같이 그 중 하나의 본계에만 주목하여, 그 본계에 인접하는 타 본계와 접촉하는 영역(점, 선, 면 또는 그들의 집합), 외부에서의 강제진동이 작용하는 부분, 응답을 알고 싶은 부분, 또는 그것들을 포함하는 본계의 영역을 영역 b 라고 한다. 영역 b 이외의 영역을 영역 a 라고 한다. 이제 이 본계를 다른 모든 본계들로부터 잘라놓고 여기에 유한요소법을 적용하여 운동방정식을 작성하면

$$[M] (\ddot{x}) + [K] (x) = (f) \quad (17)$$

여기서 $[M]$, $[K]$ 를 각각 질량 행렬, 강성행렬을 나타낸다. (x) 는 이산화한 본계의 변위를 나타내고, (f) 는 작용력 벡터를 나타낸다.

작용력 (f) 가 원진동수 ω 의 조화함수

$$(f) = (F) e^{j\omega t} \quad (18)$$

로 표시된다면, 이 본계의 응답이 정상상태로 된 시점에서

$$(x) = (X) e^{j\omega t} \quad (19)$$

으로 된다.

식 (18)과 식 (19)를 식 (17)에 대입하면

$$[R] (X) = (F) \quad (20)$$

단, $[R] = [K] - \omega^2 [M]$

식 (20)은 영역 a와 영역 b로 간단하게 나눌 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} \\ R_{ba} & R_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_a \\ X_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (21)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 첨자 a와 b는 각각 영역 a와 영역 b에 대응하는 것이다. 식 (21)에서 (X_a) 를 소거하여 영역 b에만 관계하는 식을 구하면

$$[z](X_b) = (F_b) \quad (22)$$

$$\text{단, } [z] = [R_{bb} - R_{ba} R_{aa}^{-1} R_{ab}] \quad (23)$$

식 (23)에 정의된 행렬 $[z]$ 를 이 분계의 축소 임피던스라고 부른다. 식 (23)의 R_{aa}^{-1} 을 계산하는 데는 시간이 오래 걸리고 오차가 생기기 쉬우므로 실제의 계산에서는 식 (21)의 행렬 $[R]$ 중 영역 a에 속하는 자유도에만 부분적으로 가우스 소거법을 적용하여서 $[R_{bb}]$ 가 위치하는 부분을 0 행렬로 하면 식 (21)는 다음과 같은 형이 된다.

$$\begin{bmatrix} R_{aa}' & R_{ab}' \\ 0 & R_{bb}' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_a \\ X_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (24)$$

식 (24)의 하반부는 식 (22)과 같으므로 $[R_{bb}'] = [z]$ 로 된다. 이와같이 가우스 소거법에 의하여 축소 임피던스를 간단히 구할 수 있다.

2.3.1 분계의 합성

분계의 합성과정은 그림 2.2와 같은 3개의 분계로 구성되는 구조물로부터 설명될 수 있다.

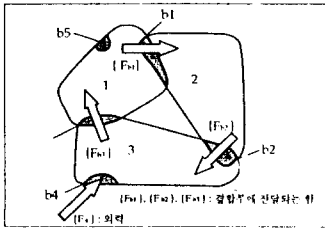


그림 2.2 3개의 분계로 이루어진 전체

그림 2.2의 사선부가 각 분계의 영역 b에 해당하는 부분이고 b_1, b_2, b_3 는 각각 분계 1과 2, 분계 2와 분계 3과 1의 결합부를, b_4 는 외력이 작용하는 부분, b_5 는 응답을 측정하는 부분이다. 우선, 분계 1의 영역 b는 b_1, b_3, b_5 를 말하며, 분계 1에 대응하는 식(22)는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} z^{(1)}_{b1b1} & z^{(1)}_{b1b3} & z^{(1)}_{b1b5} \\ z^{(1)}_{b3b1} & z^{(1)}_{b3b3} & z^{(1)}_{b3b5} \\ z^{(1)}_{b5b1} & z^{(1)}_{b5b3} & z^{(1)}_{b5b5} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{b1} \\ X_{b3} \\ X_{b5} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -F_{b1} \\ F_{b3} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (25)$$

다음에 분계 2의 영역 b는 b_1, b_2 이며, 분계 2에 대응하는 식 (22)는 다음에 따라 표기된다.

$$\begin{bmatrix} z^{(2)}_{b1b1} & z^{(2)}_{b1b2} \\ z^{(2)}_{b2b1} & z^{(2)}_{b2b2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{b1} \\ X_{b2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{b1} \\ -F_{b2} \end{Bmatrix} \quad (26)$$

또, 분계 3의 영역 b는 b_2, b_3, b_4 이며 분계 3에 대응하는 식 (22)은 구체적으로

$$\begin{bmatrix} z^{(3)}_{b2b2} & z^{(3)}_{b2b3} & z^{(3)}_{b2b4} \\ z^{(3)}_{b3b2} & z^{(3)}_{b3b3} & z^{(3)}_{b3b4} \\ z^{(3)}_{b4b2} & z^{(3)}_{b4b3} & z^{(3)}_{b4b4} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{b2} \\ X_{b3} \\ X_{b4} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{b2} \\ -F_{b3} \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (27)$$

여기서 결합부에 작용하는 힘은 각각 분계 1 + 2, 분계 2 + 3, 분계 3 + 1의 방향을 취한다. 이제 식 (25), (26), (27)을 합성하여 전체의 운동 방정식을 구하면

$$\begin{bmatrix} z^{(1)}_{b1b1} + z^{(2)}_{b1b1} & z^{(1)}_{b1b3} & z^{(1)}_{b1b5} & 0 & z^{(1)}_{b1b5} \\ z^{(1)}_{b3b1} & z^{(1)}_{b3b3} + z^{(2)}_{b3b3} & z^{(1)}_{b3b5} & z^{(2)}_{b3b2} & z^{(1)}_{b3b5} \\ z^{(1)}_{b5b1} & z^{(1)}_{b5b3} & z^{(1)}_{b5b5} + z^{(2)}_{b5b5} & z^{(2)}_{b5b2} & z^{(1)}_{b5b5} \\ 0 & z^{(2)}_{b2b1} & z^{(2)}_{b2b2} & z^{(2)}_{b2b2} + z^{(3)}_{b2b2} & z^{(2)}_{b2b3} \\ z^{(1)}_{b5b1} & z^{(1)}_{b5b3} & z^{(1)}_{b5b5} & z^{(2)}_{b5b2} & z^{(1)}_{b5b5} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{b1} \\ X_{b3} \\ X_{b5} \\ X_{b2} \\ X_{b4} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ F_b \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (28)$$

식 (28)로부터 강제진동 응답을 구하는 것은 이것을 다시 한번 가우스 소거법을 사용하여 축소하면

$$\begin{bmatrix} z_{b4b4} & z_{b4b5} \\ z_{b5b4} & z_{b5b5} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{b4} \\ X_{b5} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_b \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (29)$$

식 (29)를 응답에 대한 것으로 바꾸면

$$\begin{Bmatrix} X_{b4} \\ X_{b5} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{Bmatrix} (F_b) \quad (30)$$

이 얻어진다. 식 (30)의 우변에서 $[G_1]$ 은 영역 4의 자기 컴플라이언스, $[G_2]$ 는 영역 4와 영역 5사이의 상호 컴플라이언스를 표시하는 행렬이다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 대상구조물

대상 구조물은 그림 3.1과 같다. 분계 A와 B가 두개의 스프링으로 연결되어 있다.

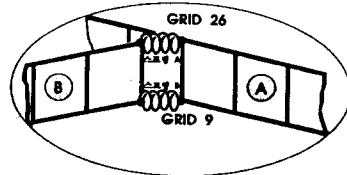
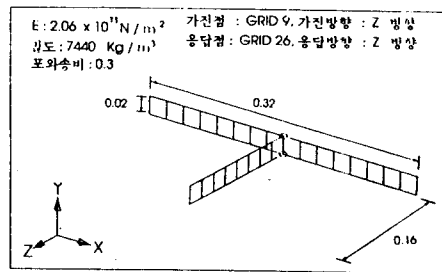


그림 3.1 스프링으로 연결된 T형 구조물

3.2 프로그램 구성도

시물레이션에 사용된 프로그램의 구성도를 다음 그림 3.2, 3.3, 3.4에 나타내었다.

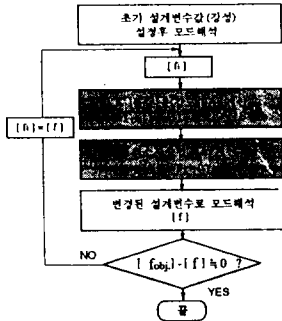


그림 3.2 감도해석 프로그램 흐름도

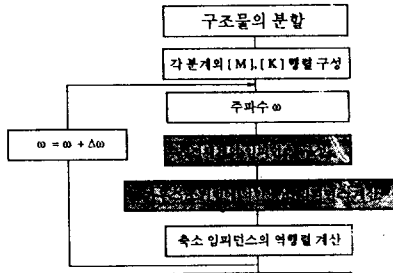


그림 3.3 축소임피던스 프로그램 흐름도

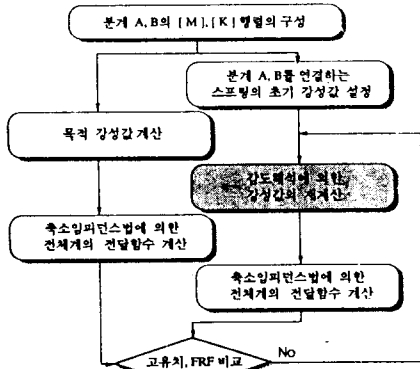


그림 3.4 감도해석과 축소임피던스의 합성

4. 결과 및 고찰

4.1 탄성결합

□ 대상 시스템

1. 다음 표 4.1과 같은 시스템 I로부터 탄성결합의 특성을 갖는 표 4.2와 같은 시스템 II를 추정하는데 감도해석과 축소임피던스 합성법을 적용하였다. 이때 시스템 I과 II에서 고유진동수의 차이가 뚜렷한 2차 모우드와 3차 모우드(표의 어두운 부분)의 고유진동수에 대하여 주목하였다.

표 4.1 시스템 I의 고유진동수 및 결합 스프링의 강성
(가진:9번 Z, 응답:26번 Z)

시스템 I				
고유진동수	Mode No.	1	2	3
		Hz	131.1	689.8
결합스프링의 강성		2.5×10^6 N/m		

표 4.2 시스템 II의 고유진동수 및 결합 스프링의 강성
(가진:9번 Z, 응답:26번 Z)

시스템 II				
고유진동수	Mode No.	1	2	3
		Hz	131.2	707.1
결합스프링의 강성		3.0×10^6 N/m		

2. 다음 그림 4.1은 시스템 I의 전달함수를 나타내는 것이며, 그림 4.2는 시스템 II를 나타낸다.

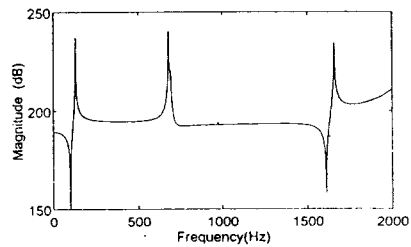


그림 4.1 시스템 I의 전달함수(가진:9번 Z, 응답:26번 Z)

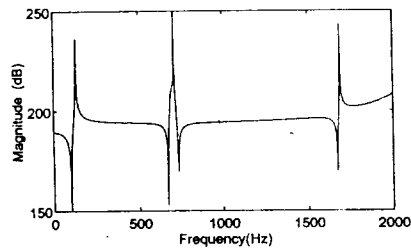
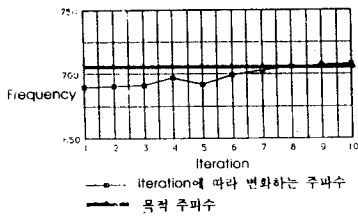


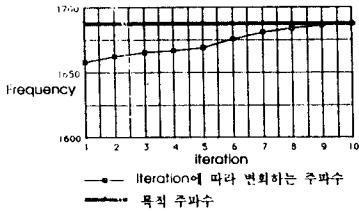
그림 4.2 시스템 II의 전달함수(가진:9번 Z, 응답:26번 Z)

□ 시스템 I로부터 시스템 II의 추정

1. 감도해석을 통하여 시스템 I에서 시스템 II의 특성(2차, 3차 고유진동수)을 갖는 스프링 강성계수를 계산하였다. 그림 4.3은 시스템 II의 특성을 추정할 때 반복에 따른 2차 모우드와 3차 모우드의 주파수 변동을 나타낸다. 10회의 반복만에 목적하는 주파수와 일치하는 것을 알 수 있다.
2. 그림 4.4는 계산된 스프링 강성값을 이용해 축소임피던스 합성법을 적용한 결과의 전달함수이다. 이때의 고유진동수는 표 4.3과 같이 나타난다. 추정된 결과의 특성을 가지는 시스템을 II'라고 하였다.



(a) 2차 고유진동수



(b) 3차 고유진동수

그림 4.3 감도해석에 따른 주파수의 변동

표 4.3 시스템 II와 추정된 시스템 II'의 고유진동수 (가진9번 Z 응답26번 Z)

Mode No.	시스템 II	시스템 II'	오차(%)
2	707.1	708.0	0.1
3	1689.1	1688.0	0.1

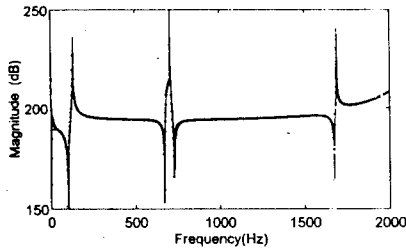


그림 4.4 시스템 II와 시스템 II'의 전달함수 (가진9번 Z 응답26번 Z)

(— : 시스템 II, - - - : 시스템 II')

3. 그림 4.4와 표 4.3으로부터 원래의 시스템과 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 다음 표 4.4는 추정된 강성값이다.

표 4.4 시스템 II'의 강성값

좌표		x	y	z	rx	ry	rz
강성 (N/m)	스프링 A ($\times 10^7$)	0.2812	0.1333	0.2554	0.2468	0.2500	0.2500
	스프링 B ($\times 10^7$)	0.2650	0.5944	0.3521	0.2482	0.2504	0.2500

5. 여기에서 목표하는 정확한 스프링 상수값을 찾아가지 못하는 이유는 처음에 참값으로 가정한 스프링에 의하여서만이 목표로 정한 전달함수를 나타내는 것이 아니고, 다른 여러가지 형태의 스프링에 의해서도 주목하고 있는

주파수 범위내에서는 같은 진동특성을 보일 수 있다는 것을 의미한다. 즉 2000Hz내에 목적하는 고유진동수에 부합하는 스프링에 대한 등가 스프링강성이 구해졌음을 나타낸다.

6. 이상의 결과로부터 두 구조물이 탄성결합하는 경우 감도해석을 통하여 원하는 강성값을 계산하였고 이 결과를 축소임피던스 합성법에 적용하였을 때 목적하는 동특성과 일치하는 해석결과를 보임을 알 수 있었다.

4.2 강결합

□ 대상 시스템

1. 다음 표 4.5와 같은 시스템 III으로부터 강결합의 특성을 갖는 표 4.6과 같은 시스템 IV를 추정하는데 감도해석과 축소임피던스 합성법을 적용하였다. 이때 시스템 III과 IV에서 고유진동수의 차이가 뚜렷하고 레벨이 큰 2차 모드와 5차 모드(표의 어두운 부분)의 고유진동수에 대하여 주목하였다.

표 4.5 시스템 III의 고유진동수 및 결합 스프링의 강성 (가진9번 Z 응답26번 Z)

시스템 III						
고유진동수	Mode No.	1	2	3	4	5
		Hz	131.3	703.5	865.8	989.8
결합스프링의 강성						0.1×10^9 N/m

표 4.6 시스템 IV의 고유진동수 및 결합 스프링의 강성 (가진9번 Z 응답26번 Z)

시스템 IV							
고유진동수	Mode No.	1	3	4	5	6	
		Hz	131.3	705.3	886.9	994.6	1820.6
강성 (N/m)	스프링 A ($\times 10^{11}$)	x	y	z	rx	ry	rz
		0.445	0.011	0.362	0.147	0.015	0.196
(N/m)	스프링 B ($\times 10^{11}$)	x	y	z	rx	ry	rz
		0.445	0.011	0.362	0.147	0.015	0.196

2. 다음 그림 4.5은 시스템 III의 전달함수를 나타내는 것이며, 그림 4.6은 시스템 IV를 나타낸다.

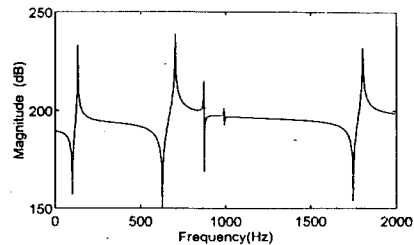


그림 4.5 시스템 III의 전달함수(가진9번 Z 응답26번 Z)

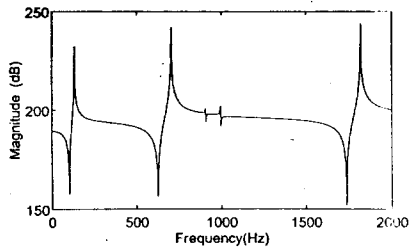


그림 46 시스템 IV의 전달함수(가진9번 Z 응답:26번 Z)

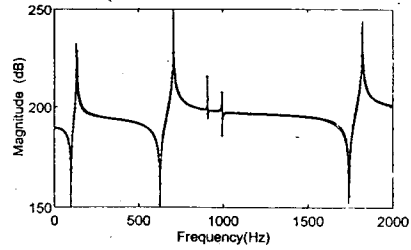


그림 48 시스템 IV와 시스템 IV'의 전달함수
(가진9번 Z 응답:26번 Z)

(— : 시스템 IV, - - - : 시스템 IV')

□ 시스템 III으로부터 시스템 IV의 추정

1. 시스템 III으로부터 감도해석을 통하여 시스템 IV의 특성을 갖는 스프링 강성계수를 계산하였다. 그림 4.7은 시스템 IV의 특성을 추정할 때 반복에 따른 2차 모우드와 5차 모우드의 주파수 변동을 나타낸다. 3회의 반복으로 목적하는 주파수와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

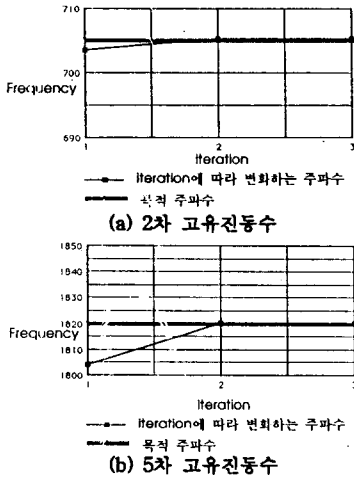


그림 47 감도해석에 따른 주파수의 변동

2. 그림 4.8은 계산된 스프링 강성값을 이용해 축소임피던스 합성법을 적용한 결과의 전달함수이다. 이 때의 고유진동수는 표 4.5와 같이 나타난다. 추정한 결과의 특성을 가지는 시스템을 IV'라고 하였다.

표 4.7 시스템 IV와 추정된 시스템 IV'의 고유진동수
(가진9번 Z 응답:26번 Z)

Mode No.	시스템 IV	시스템 IV'	오차(%)
2	705.3	705.0	0.0
5	1820.6	1821.0	0.0

3. 그림 4.8과 표 4.7로부터 원래의 시스템과 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 다음 표 4.8은 추정된 강성값이다.

표 4.8 시스템 IV'의 강성값

좌표	x	y	z	rx	ry	rz
강성 (N/m)	스프링 A ($\times 10^9$)	0.1000	0.1000	0.1001	0.1000	0.1000
	스프링 B ($\times 10^9$)	0.1000	0.1000	0.9996	0.1000	0.1000

5. 이상의 결과로부터 두 구조물이 강결합하는 경우 감도 해석을 통하여 원하는 강성값을 계산하였고 이 결과를 축소임피던스 합성법에 적용하였을 때 역시 목적하는 동특성과 일치하는 해석결과를 보임을 알 수 있었다.

4.3 유한요소법(FEM)에 의한 검증

1. 감도해석을 통하여 추정된 강성값과 축소임피던스 합성법을 이용한 동특성 해석 결과의 타당성을 검토하기 위하여 상용 유한 요소해석 패키지인 MSC/NASTRAN을 이용하여 시스템 II', 시스템 IV'의 결과를 비교하였다.

2. 다음 표 4.9과 그림 4.9는 감도해석과 축소임피던스 합성법에 의해 구해진 시스템 II'와 FEM에 의한 결과를 비교한 것이다.

표 4.9 FEM 과 시스템 II'의 고유진동수
(가진9번 Z 응답:26번 Z)

Mode No.	FEM	시스템 II'	오차(%)
2	708.4	708.0	0.0
3	1687.6	1688.0	0.0

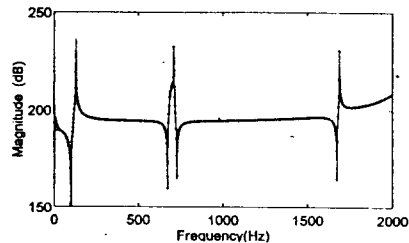


그림 4.9 FEM 과 시스템 II'의 전달함수
(가진9번 Z 응답:26번 Z)

(— : FEM, - - - : 시스템 II')

4. 다음 표 4.10과 그림 4.10은 감도해석과 축소임피던스 합성법에 의해 구해진 시스템 IV'와 FEM에 의한 결과를 비교한 것이다.

표 4.10 FEM 과 시스템 IV'의 고유진동수
(가진:9번 Z 응답:26번 Z)

Mode No.	FEM	시스템 IV'	오차(*)
2	705.3	705.0	0.0
5	1820.6	1821.0	0.0

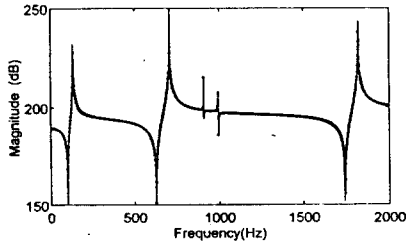


그림 4.10 FEM 과 시스템 IV'의 전달함수
(가진:9번 Z 응답:26번 Z)
(—— : FEM, - - - : 시스템 IV')

5. 이상의 결과로부터 2000Hz이내에서 강성의 변경과 부분구조합성에 의한 목적 주파수 변경의 결과는 탄성결합이나 강결합에 관계없이 상용 유한요소 해석 패키지인 MSC/NASTRAN의 결과와 비교할 때 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두 본체가 탄성결합, 강결합으로 합성될 때, 감도해석 기법을 이용하여 목적하는 동특성을 갖는 강성값을 예측하였다.
2. 축소임피던스 합성법 프로그램을 개발하였고, 본체의 정보와 예측된 결합부 강성값을 축소임피던스 합성법에 적용함으로써 전체계의 동특성을 정확히 해석하였다.
3. 결합구조물 동특성해석 및 변경에 감도해석기법과 축소임피던스 합성법의 통합적용이 매우 효과적임을 증명하였다.

참고문헌

- [1] 오 재용, 1985, "구조물 모우드해석의 기초와 응용", 최성출판사

- [2] 長松昭男, 1985, "モード解析", 培豊館
- [3] D. J. Ewins, 1984, Modal Testing : Thoery and Practice, Research Studies Press
- [4] 長松昭男, 大熊政明, 1989, 部分構造合成法, 培豊館
- [5] 유 병덕, 1989, "부분구조합성법을 이용한 구조물의 동특성 해석에 관한 연구", 한양대학교 석사학위 논문
- [6] 長松昭男 外 2, "縮小インピーダンス合成法による強制振動解析(第1報)", 日本機械學會論文集, 第 46巻 407號, 1980, pp 703 - 712
- [7] Fox, R. L., 1968, "Rate of Change of Eigenvalues and Eigenvectors", AIAA Vol.6 No.1, pp2426
- [8] 朴 錫柱 外 4, "プレス機械の振動解析と最適設計", 日本機械學會論文集 第 56巻 524號, pp.872 - 880
- [9] 강 희중, 1991, "자동차 엔진 마운트계의 동특성 개선을 위한 고유모우드 해석 및 구조변경", 한양대학교 석사학위 논문
- [10] 최 상열, 1992, "감도해석법을 이용한 연진 마운트계의 동특성 규명 및 개선", 한양대학교 석사학위 논문