

< 논문 >

## 축소시스템과 영역분할 기법과의 연동을 통한 대형구조물 설계 기법 연구

김 현 기<sup>†</sup> · 조 맹 효<sup>\*</sup>

(2006년 1월 16일 접수, 2006년 5월 31일 심사완료)

### Structural Design Optimization on the Reduced System Constructed from Large-Scaled Problem

Hyungi Kim and Maenghyo Cho

**Key Words :** Size and Shape Optimization(사이즈, 형상 최적화), Design Sensitivity(설계민감도), Two-Level Condensation Scheme(2 단계축소기법), Sub-Domain Method(영역분할 기법), Reduced System(축소시스템)

#### Abstract

In the present study, sizing and shape optimizations are performed based on the reduced system of large-scaled problem. In the analysis part, to achieve efficiency and reliability of computation, two-level condensation scheme is applied. In the construction of reduced system of large scaled problems, it is much more efficient to use sub-domain method. Thus, in the present paper, two-level reduction method combined with sub-domain method is employed. Once the reduced system is constructed, it is straightforward to obtain design sensitivities from the analysis results of the reduced system. We use semi-analytic method to obtain design sensitivities. Performance of the efficiency and reliability of the present reduction method in the structural optimization problem is demonstrated through the numerical examples. The present framework of reduction method should serve as a fast and reliable design tool in analysis and design of large-scaled dynamic problems.

#### 1. 서 론

컴퓨터 시스템의 발전으로 구조물의 동적 해석을 수행하는데 소요되는 시간은 과거에 비해 보다 빠르게 수행되고 있으며, 더불어 해석 가능한 구조물의 규모와 정밀도도 현저히 증가되고 있다. 그러나, 현재 구조물의 규모가 대형화(물리적 규모가 아닌, 많은 수의 자유도를 포함함을 의미) 되고 형상이 복잡해지며, 다양한 기능을 충족시켜야 하는 등 해석에 있어서 고려해야 할 조건과 설계를 위한 설계 변수 등도 신뢰도 높은 해석과 설계를 위해서 꾸준히 증가되고 있는 추세다. 이런 요구들은 전산 시스템의 발전에도 불구하고, 반복해석이 필요한 최적화 문제 또는 동적 해석 등에서는 충분한 전산자원과 많은 연산시간을 요구하기 때문에 해석

규모와 연산시간에 대한 제약의 원인이 되고 있다.

그러므로, 구조물의 신뢰성을 유지하면서, 시간과 전산자원 절약 등 효율성 문제를 개선하고자 하는 연구들이 과거부터 계속 진행되어 왔다. 이런 기법 중에서 가장 주목 받는 방법이 축소모델을 구성하는 방법이다.

축소모델에 대한 연구는 두 가지 방향으로 진행되어 왔다. 하나는 구조물의 거동에 지배적인 몇 개의 모드를 기초로 하여 시스템을 구축하는 **Reduced-Order Model** 방법으로, 모달해석이 그 예라고 할 수 있다.<sup>(1,2)</sup> 다른 하나는 시스템에서 중요한 자유도를 추출하여 그것을 기반으로 축소 시스템을 구성하는 방법으로 이에 대한 구성 방법들도 다양하게 제안되어 왔다.<sup>(3-6)</sup>

그러나, 축소시스템이 신뢰성을 보유하더라도, 대형 구조물로부터 축소시스템의 구성을 위해서는 상당한 계산 시간이 요구되며, 선택된 자유도가 국부적인 영역에 치우치거나, 저주파수만을 지나치게 강조하는 경향을 가질 가능성이 있으며, 시스템의 크기 정도에 따라서 축소시스템 구성이 오히려 비효율적일 수 있다.

† 책임저자, 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail : shotgun1@snu.ac.kr

\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : mhcho@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1693, FAX : (02)886-1693

본 연구에서는 이런 문제점을 개선하기 위해서 축소 시스템과 영역분할 기법의 연동을 통한 해석 기법을 제안 한다. 대형구조물의 효율적 해석을 위해서는 구조물을 하나의 단위로 간주하는 것보다는 여러 개의 부구조물로 나눈 후 각각의 영역에 대해 축소기법을 적용하는 것이 훨씬 효율적이다. 대형구조물을 몇 개의 부영역으로 분리한 후, 각 영역에서 2 단계 축소기법에 의해 축소시스템을 구성하게 된다. 이 방법은 해석 및 설계에 소요되는 전산 시간을 확연하게 줄일 수 있으며, 결과의 신뢰성을 보장 하는 매우 유용한 방법이다. 본 연구에서는 축소시스템을 기반으로 민감도 해석을 수행하고, 사이즈 및 형상 최적화 를 수행한 후, 전체시스템과의 비교를 통해 제안 방법의 신뢰성을 검증한다.<sup>(78)</sup>

## 2. 축소시스템/영역분할 기법의 연동

### 2.1 축소시스템의 정식화

대형구조물에서 축소시스템의 구성은 상당한 계산 시간을 필요로 하고, 주자유도 선정도 저차 모드나 국부적인 모드를 강조할 가능성이 있다. 본 연구에서는 이런 문제점을 개선하기 위해 대형구조물을 부영역(sub-domain)으로 분리하고, 각 영역에서 축소시스템을 구성한 후, 인터페이스 자유도를 통한 부영역의 결합을 통해 최종적인 축소시스템을 구성한다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{pp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ps}^{(1)} & \mathbf{K}_{pb}^{(1)} \\ \mathbf{K}_{sp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ss}^{(1)} & \mathbf{K}_{sb}^{(1)} \\ \mathbf{K}_{bp}^{(1)} & \mathbf{K}_{bs}^{(1)} & \mathbf{K}_{bb}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_p^{(1)} \\ \mathbf{u}_s^{(1)} \\ \mathbf{u}_b^{(1)} \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{pp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ps}^{(1)} & \mathbf{M}_{pb}^{(1)} \\ \mathbf{M}_{sp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ss}^{(1)} & \mathbf{M}_{sb}^{(1)} \\ \mathbf{M}_{bp}^{(1)} & \mathbf{M}_{bs}^{(1)} & \mathbf{M}_{bb}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_p^{(1)} \\ \mathbf{u}_s^{(1)} \\ \mathbf{u}_b^{(1)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_{bb} = \mathbf{K}_{bb}^{(1)} + \mathbf{K}_{bb}^{(2)}, \mathbf{M}_{bb} = \mathbf{M}_{bb}^{(1)} + \mathbf{M}_{bb}^{(2)}$$

Figure 1 은 전체시스템을 2 개의 부영역으로 나눈 예이다. 각 영역은 주자유도  $\mathbf{u}_p$ , 부자유도  $\mathbf{u}_s$ , 인터페이스 자유도  $\mathbf{u}_b$  로 나뉘어지고, 두 개의 부영역을 조립하면 식 (1)의 시스템 형태로 표현되며, 부자유도를 제거하기 위해 2 번째와 4 번째 행으로부터 식 (2)의 2 개 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{pp}^{(1)} \mathbf{u}_p^{(1)} + \mathbf{K}_{ps}^{(1)} \mathbf{u}_s^{(1)} + \mathbf{K}_{pb}^{(1)} \mathbf{u}_b^{(1)} &= \lambda (\mathbf{M}_{pp}^{(1)} \mathbf{u}_p^{(1)} + \mathbf{M}_{ps}^{(1)} \mathbf{u}_s^{(1)} + \mathbf{M}_{pb}^{(1)} \mathbf{u}_b^{(1)}) \\ \mathbf{K}_{bs}^{(2)} \mathbf{u}_s^{(2)} + \mathbf{K}_{bs}^{(2)} \mathbf{u}_b^{(2)} + \mathbf{K}_{sp}^{(2)} \mathbf{u}_p^{(2)} &= \lambda (\mathbf{K}_{ss}^{(2)} \mathbf{u}_s^{(2)} + \mathbf{K}_{sb}^{(2)} \mathbf{u}_b^{(2)} + \mathbf{K}_{sp}^{(2)} \mathbf{u}_p^{(2)}) \end{aligned} \quad (2)$$

부영역 1 에 대해서, 부자유도는 주자유도와 인터페이스 자유도로 표현될 수 있으며, 이것은 식 (3)로 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_s^{(1)} &= -(\mathbf{K}_{ps}^{(1)} - \lambda \mathbf{M}_{ps}^{(1)})^{-1} (\mathbf{K}_{pp}^{(1)} - \lambda \mathbf{M}_{pp}^{(1)}) \mathbf{u}_p^{(1)} \\ &\quad - (\mathbf{K}_{ps}^{(1)} - \lambda \mathbf{M}_{ps}^{(1)})^{-1} (\mathbf{K}_{pb}^{(1)} - \lambda \mathbf{M}_{pb}^{(1)}) \mathbf{u}_b^{(1)} \end{aligned} \quad (3)$$

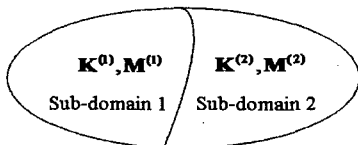


Fig. 1 Assembly of two sub-domains

식 (3)의 역행렬은 급수전개에 의해 근사화 되며, 고유치의 1 차항까지 고려한다(IRS 방법). 근사화에 의해 부영역 1 의 부자유도는 최종적으로 식 (4)로 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_s^{(1)} &= -[\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} \mathbf{K}_{sp}^{(1)} \mathbf{u}_p^{(1)} - [\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} \mathbf{K}_{sb}^{(1)} \mathbf{u}_b^{(1)} \\ &\quad + [\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} (\mathbf{M}_{ss}^{(1)} - \mathbf{M}_{ss}^{(1)} [\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} \mathbf{K}_{sp}^{(1)}) \lambda \mathbf{u}_p^{(1)} \\ &\quad + [\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} (\mathbf{M}_{ss}^{(1)} - \mathbf{M}_{ss}^{(1)} [\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} \mathbf{K}_{sb}^{(1)}) \lambda \mathbf{u}_b^{(1)} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 고려하여, 부영역 1 은 식 (5)의 변환행렬 형태로 주어진다. 여기서, 변환행렬  $\mathbf{T}_{sp}^{(1)}$ ,  $\mathbf{T}_{sb}^{(1)}$  는 식 (5)로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_p^{(1)} \\ \mathbf{u}_s^{(1)} \\ \mathbf{u}_b^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{T}_{sp}^{(1)} + [\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} (\mathbf{M}_{ss}^{(1)} + \mathbf{M}_{ss}^{(1)} \mathbf{T}_{sp}^{(1)}) \lambda & \mathbf{I} \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_p^{(1)} \\ \mathbf{u}_b^{(1)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $\mathbf{T}_{sp}^{(1)} = -[\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} \mathbf{K}_{sp}^{(1)}$ ,  $\mathbf{T}_{sb}^{(1)} = -[\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} \mathbf{K}_{sb}^{(1)}$

부영역 2 의 변환관계도 식 (5)와 유사하게 구해진다. 전체 시스템의 주자유도, 부자유도, 인터페이스 자유도 사이의 변환 행렬  $\mathbf{T}$  는 식 (6)으로 주어진다.  $\mathbf{u}_p^{(1)}, \mathbf{u}_b^{(1)}, \mathbf{u}_p^{(2)}$  은 부영역 1 의 주자유도, 인터페이스 자유도, 부영역 2 의 주자유도를 의미한다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_p^{(1)} \\ \mathbf{u}_s^{(1)} \\ \mathbf{u}_b^{(1)} \\ \mathbf{u}_p^{(2)} \\ \mathbf{u}_s^{(2)} \\ \mathbf{u}_p^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 & 0 \\ \mathbf{T}_{IRS}^{sp(1)} & \mathbf{T}_{IRS}^{sb(1)} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & \mathbf{T}_{IRS}^{sb(2)} & \mathbf{T}_{IRS}^{sp(2)} \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_p^{(1)} \\ \mathbf{u}_b^{(1)} \\ \mathbf{u}_p^{(2)} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_p^{(1)} \\ \mathbf{u}_b^{(1)} \\ \mathbf{u}_p^{(2)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{IRS}^{sp(1)} &= \mathbf{T}_{sp}^{(1)} + [\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} (\mathbf{M}_{ss}^{(1)} + \mathbf{M}_{ss}^{(1)} \mathbf{T}_{sp}^{(1)}) \lambda \\ \mathbf{T}_{IRS}^{sb(1)} &= \mathbf{T}_{sb}^{(1)} + [\mathbf{K}_{ss}^{(1)}]^{-1} (\mathbf{M}_{ss}^{(1)} + \mathbf{M}_{ss}^{(1)} \mathbf{T}_{sb}^{(1)}) \lambda \\ \mathbf{T}_{IRS}^{sb(2)} &= \mathbf{T}_{sb}^{(2)} + [\mathbf{K}_{ss}^{(2)}]^{-1} (\mathbf{M}_{ss}^{(2)} + \mathbf{M}_{ss}^{(2)} \mathbf{T}_{sb}^{(2)}) \lambda \\ \mathbf{T}_{IRS}^{sp(2)} &= \mathbf{T}_{sp}^{(2)} + [\mathbf{K}_{ss}^{(2)}]^{-1} (\mathbf{M}_{ss}^{(2)} + \mathbf{M}_{ss}^{(2)} \mathbf{T}_{sp}^{(2)}) \lambda \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 고유치항을 무시한 변환행렬에 의해 Guyan 시스템,  $[\mathbf{K}_G]$  과  $[\mathbf{M}_G]$  을 구축한다. 이것은 IRS 시스템 구축 시  $\lambda$  을 근사화 하기 위해 사용된다. 식 (7)의 변환행렬에 의해 구성된 최종적인 축소시스템과 강성행렬의 성분이 식 (8)에 주어져 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{IRS}^{(11)} & \mathbf{K}_{IRS}^{(12)} & 0 \\ \mathbf{K}_{IRS}^{(21)} & \mathbf{K}_{IRS}^{(22)} & \mathbf{K}_{IRS}^{(23)} \\ 0 & \mathbf{K}_{IRS}^{(32)} & \mathbf{K}_{IRS}^{(33)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_p^{(1)} \\ \mathbf{u}_b^{(1)} \\ \mathbf{u}_p^{(2)} \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{IRS}^{(11)} & \mathbf{M}_{IRS}^{(12)} & 0 \\ \mathbf{M}_{IRS}^{(21)} & \mathbf{M}_{IRS}^{(22)} & \mathbf{M}_{IRS}^{(23)} \\ 0 & \mathbf{M}_{IRS}^{(32)} & \mathbf{M}_{IRS}^{(33)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_p^{(1)} \\ \mathbf{u}_b^{(1)} \\ \mathbf{u}_p^{(2)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 2.2 인터페이스 영역을 개선한 축소시스템

식 (8)의 축소시스템은 부영역간의 결합을 위해 인터 페이스 자유도를 무조건적으로 포함하고 있다. 그러나, 인터페이스 영역에서 중요 자유도로 선정되는 비율은 매우 적기 때문에, 단지 부영역간의 결합을 위해서 인터페이스 영역을 모두 포함하는 것은 매우 비효율 적이다. 특히, 인터페이스 영역이 2 차원인 솔리드 요소에서는 전산자원의 문제를 일으키게 된다. 따라서, 인터페이스 영역에서 중요한 자유도만을 포함하기 위한

정식화의 개선이 요구된다. 식 (8)은 각 부영역의 주자유도와 인터페이스 자유도를 포함하고 있으며, 식 (9)는 인터페이스 영역을 주자유도와 부자유도로 분리하여 시스템을 재구성한 것이다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{pp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ps}^{(1)} & \mathbf{K}_{pp}^{(1)} & 0 \\ \mathbf{K}_{sp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ss}^{(1)} & \mathbf{K}_{sp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ss}^{(2)} \\ \mathbf{K}_{pp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ps}^{(1)} & \mathbf{K}_{pp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ss}^{(2)} \\ 0 & \mathbf{K}_{ps}^{(2)} & \mathbf{K}_{pp}^{(2)} & \mathbf{K}_{ss}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p^{(1)} \\ u_s^{(1)} \\ u_p^{(1)} \\ u_p^{(2)} \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{pp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ps}^{(1)} & \mathbf{M}_{pp}^{(1)} & 0 \\ \mathbf{M}_{sp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ss}^{(1)} & \mathbf{M}_{sp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ss}^{(2)} \\ \mathbf{M}_{pp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ps}^{(1)} & \mathbf{M}_{pp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ss}^{(2)} \\ 0 & \mathbf{M}_{ps}^{(2)} & \mathbf{M}_{pp}^{(2)} & \mathbf{M}_{ss}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p^{(1)} \\ u_s^{(1)} \\ u_p^{(1)} \\ u_p^{(2)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)의 두 번째 행에서, 주자유도와 부자유도 사이의 관계를 얻을 수 있으며, 이것은 식 (10)과 같이 주어진다.

$$u_s^{(i)} = -(\mathbf{A}^{\nu 3} - \lambda \mathbf{B}^{\nu 3})^{-1} (\mathbf{C}^{\nu 3} - \lambda \mathbf{D}^{\nu 3}) \begin{bmatrix} u_p^{(1)} \\ u_p^{(1)} \\ u_p^{(2)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $\mathbf{A}^{\nu 3} = \mathbf{K}_{ss}^{(1)}, \mathbf{B}^{\nu 3} = \mathbf{M}_{ss}^{(1)}$   
 $\mathbf{C}^{\nu 3} = [\mathbf{K}_{sp}^{(1)} \ \mathbf{K}_{sp}^{(1)} \ \mathbf{K}_{sp}^{(2)}], \mathbf{D}^{\nu 3} = [\mathbf{M}_{sp}^{(1)} \ \mathbf{M}_{sp}^{(1)} \ \mathbf{M}_{sp}^{(2)}]$

식 (10)에서 고유치 항을 고려하면, IRS 시스템이 구축되고, 이 항을 생략하면 Guyan 시스템이 구축된다. 주자유도, 인터페이스 주자유도와 부자유도 사이의 관계를 고려하여, 각 부영역의 주자유도와 인터페이스 주자유도로 구성된 3 개의 변위장으로 축소된다. 식 (10)에서 IRS 시스템 구성을 위해서 먼저 질량 효과를 제거한 Guyan 시스템이 구성되어야 한다. Guyan 시스템 구성을 위한 변환 행렬은 고유치 항을 제거하여 구성되며, 식 (11-a)로 주어진다.

$$\mathbf{T}_G^{\nu 3} = -(\mathbf{A}^{\nu 3})^{-1} \mathbf{C}^{\nu 3} \quad (a)$$

$$\mathbf{T}_R^{\nu 3} = \mathbf{T}_G^{\nu 3} + (\mathbf{A}^{\nu 3})^{-1} (\mathbf{D}^{\nu 3} - \mathbf{B}^{\nu 3} (\mathbf{A}^{\nu 3})^{-1} \mathbf{C}^{\nu 3}) \lambda \quad (b)$$

위의 변환 관계식에 의해 Guyan 시스템,  $\mathbf{K}_G^{\nu 3}$  과  $\mathbf{M}_G^{\nu 3}$  이 구축된다. 위에서 구축된 Guyan 시스템은 식 (11-b)의 IRS 시스템을 구성하기 위한 변환 행렬 구축에 사용된다.

여기서,  $\lambda$  는  $(\mathbf{M}_G^{\nu 3})^{-1} \mathbf{K}_G^{\nu 3}$  으로 근사화된다. 이 항을 고려하여 식 (11-b)의 IRS 변환 행렬  $\mathbf{T}_R^{\nu 3}$  이 구해진다. 식 (11-b)에 의한 최종 IRS 시스템은 식 (12)와 같다.

$$\mathbf{K}_R^{\nu 3} = \mathbf{T}_R^{\nu 3 T} \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{pp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ps}^{(1)} & \mathbf{K}_{pp}^{(1)} & 0 \\ \mathbf{K}_{sp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ss}^{(1)} & \mathbf{K}_{sp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ss}^{(2)} \\ \mathbf{K}_{pp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ps}^{(1)} & \mathbf{K}_{pp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ss}^{(2)} \\ 0 & \mathbf{K}_{ps}^{(2)} & \mathbf{K}_{pp}^{(2)} & \mathbf{K}_{ss}^{(2)} \end{bmatrix} \mathbf{T}_R^{\nu 3} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{pp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ps}^{(1)} & 0 \\ \mathbf{K}_{sp}^{(1)} & \mathbf{K}_{ss}^{(1)} & \mathbf{K}_{ss}^{(2)} \\ 0 & \mathbf{K}_{ps}^{(2)} & \mathbf{K}_{ss}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{M}_R^{\nu 3} = \mathbf{T}_R^{\nu 3 T} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{pp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ps}^{(1)} & \mathbf{M}_{pp}^{(1)} & 0 \\ \mathbf{M}_{sp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ss}^{(1)} & \mathbf{M}_{sp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ss}^{(2)} \\ \mathbf{M}_{pp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ps}^{(1)} & \mathbf{M}_{pp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ss}^{(2)} \\ 0 & \mathbf{M}_{ps}^{(2)} & \mathbf{M}_{pp}^{(2)} & \mathbf{M}_{ss}^{(2)} \end{bmatrix} \mathbf{T}_R^{\nu 3} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{pp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ps}^{(1)} & 0 \\ \mathbf{M}_{sp}^{(1)} & \mathbf{M}_{ss}^{(1)} & \mathbf{M}_{ss}^{(2)} \\ 0 & \mathbf{M}_{ps}^{(2)} & \mathbf{M}_{ss}^{(2)} \end{bmatrix}$$

### 3. 축소시스템 구축 알고리즘

Figure 2 는 축소시스템의 구축 과정을 보여준다. 이 과정은 총 6 단계로 구성되어 있으며, 그림에서 시스템의 각 부영역이 4 개 자유도 영역으로 분리되어 있으나, 초기

시스템 구축은 인터페이스를 모두 포함하는 축소시스템을 구축하게 된다.

첫 번째 단계에서는 각 부영역 단위의 변환 행렬을 구축한다. 이 단계에서는 각 부영역이 독립성을 갖고 있기 때문에, 부영역 단위의 변환 행렬을 독립적으로 구축할 수 있다. 여기서,  $\mathbf{T}_{p1}^{\nu 1}$  은 부영역 1 에서 구축되는 첫 번째 단계의 변환 행렬임을 의미한다.

두 번째 단계에서는 각 부영역 단위의 축소시스템이 얻어진다. 부영역 1 의 경우는 주자유도 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12 번으로 구성되고, 부영역 2 는 9, 10, 11, 12, 14, 15, 18 번 자유도로 구성됨을 알 수 있다.

세 번째 단계에서는 인터페이스 자유도를 모두 포함하여 구성된 축소시스템에서, 인터페이스를 주자유도와 부자유도로 분리한 시스템을 재구축해야 한다. 예를 들어, 세 번째 단계에서, 부영역 2 는 9, 10, 11, 12, 14, 15, 18 번 자유도로 구성된다. 그러나, 9, 11, 12 번 자유도는 인터페이스 부자유도에 해당하고, 10 번은 인터페이스 주자유도에 해당한다. 따라서, 세 번째 단계에서 10, 14, 15, 18 번은 주자유도로, 9, 11, 12 번은 부자유도로 재할당된다.

네 번째 단계에서는 재분할된 시스템을 고려한 각 축소시스템간의 변환 관계를 구해진다. 여기서,  $\mathbf{g}$  는, 축소시스템간의 변환관계를 나타내는 것이다. 축소시스템 변환 행렬  $\mathbf{T}_g^{\nu 2}$  는 주자유도 3, 6, 8, 10, 14, 15, 18 번, 부자유도는 9, 11, 12 번으로 구성된다. 여기서, 9, 11, 12 번 자유도는 인터페이스 부자유도에 해당한다.

다섯 번째 단계에서, 변환 행렬  $\mathbf{T}_g^{\nu 3}$  로 부터, 각 부영역 자유도 성분을 추출하여 부영역 단위의 변환 행렬을 구축한다.

여섯 번째 단계에서는 부영역 단위의 변환 행렬과 연산을 통해 축소시스템이 구축된다. 각 시스템간의 결합을 통해 최종적인 시스템을 얻을

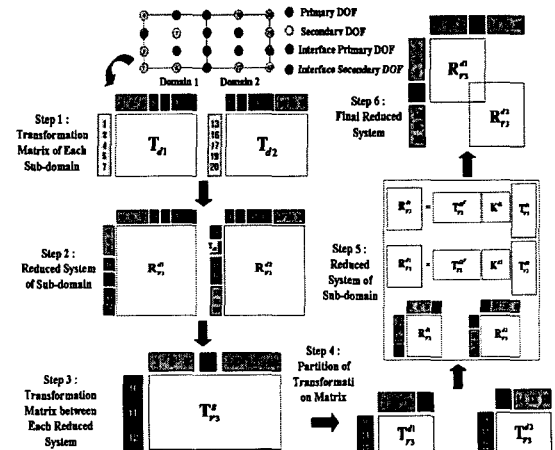


Fig. 2 Schematic of the construction of the reduced system

수가 있으며, 인터페이스 주자유도 10 번을 각 부영역이 공유하는 형태로 시스템을 구축하게 된다.

4. 축소시스템에서 개선된 민감도 계산

최적화 수행을 위해서는 민감도 계산이 필수적이며, 준해석적 방법이 가장 널리 사용된다. 준해석적 방법은 유한 차분법의 간편함과 해석적 방법이 갖는 신뢰성을 모두 고려하는 방법으로 강성행렬의 미분항이 포함되는 가상 하중벡터의 계산에서 주로 유한차분법이 사용된다. 그러나, 이 방법은 구조물의 크기와 관련된 변수에 대해서는 비교적 신뢰할 수 있는 민감도 결과를 제시하지만, 증분값에 따라 신뢰할 수 있는 결과를 제시하지 못한다. 최근 Van Keulen 등은 변위장을 순수변형부와 강제모드부로 분리하여 전체 민감도 중에서 강제모드부의 영향을 해석적 방법으로 도출하는 민감도 해석기법을 제안하였다.<sup>9)</sup>

본 연구에서는 축소시스템에서 얻어진 정보를 이용하여 강제모드 분리에 의한 민감도 해석을 수행한다. 축소시스템으로부터 얻어진 고유벡터는 변환행렬과의 연산을 통해 부자유도 부분의 고유벡터를 구할 수 있다. 이로부터 구해진 전체 자유도의 고유벡터를 이용하여 강제모드 분리를 통한 준해석적 민감도 해석기법을 적용한다. 이 방법은 적용하기가 간편하고, 축소시스템에서 구해진 고유치와 고유벡터의 결과가 전체 시스템과 큰 오차를 내지 않는다면 설계 변수의 증분값에 무관하게 정확한 민감도 결과를 제공한다. 또한, 많은 메모리와 계산 시간을 요구하는 대형구조물의 고유치 민감도에서 상당한 절감 효과를 얻을 수 있다.

식 (13)에서  $\{\phi_p\}$  는 축소시스템에서 얻어지는 고유벡터를 나타내며, 각 영역의 변환행렬에 의해서 각 영역의 부자유도에 대한 고유벡터  $\{\phi_s\}$  을 얻을 수 있다.

$$\{\phi\} = \begin{Bmatrix} \phi_p \\ \phi_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{T}_{rs} \end{Bmatrix} \{\phi_p\} = [\mathbf{T}] \{\phi_p\} \quad (13)$$

본 연구에서는 고유치 민감도를 목적함수 및 구속조건으로 사용하여 최적화 수행한다. 비감쇠 진동일 때, 고유치 문제는 다음과 정의된다.

$$\mathbf{K}(x)\phi(x) - \lambda(x)\mathbf{M}(x)\phi(x) = 0 \quad (14)$$

이 문제는 설계변수에 대해서 미분을 수행하면, 식 (15)과 같은 고유치 민감도 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\phi^T \mathbf{K}' \phi - \lambda \phi^T \mathbf{M}' \phi}{\phi^T \mathbf{M} \phi} \quad (15)$$

식 (15)에서 첫번째 항은 강제모드를 고려하여 고유벡터를 순수변형부와 강제모드부로 분리시킬 수가 있다. 그리고, 강제모드부에 대해서 정적문제와 동일하게 엄밀해로써 계산이 가능하다.  $\phi^T \mathbf{K}' \phi$  에서 고유벡터  $\phi$  를 순수변형부와 강제모드부로 분리하면 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} & (\phi_s^{*T} + \alpha^k r_k^T) \mathbf{K}' (\phi_s^* + \alpha^k r_k) \\ & = \phi_s^{*T} \mathbf{K}' \phi_s^* + \alpha^k r_k^T \mathbf{K}' \phi_s^* - \alpha^k \phi_s^{*T} \mathbf{K}' r_k - (\alpha^k)^2 r_k^T \mathbf{K}' r_k \end{aligned} \quad (16)$$

$\alpha^k$  는 고유벡터를 강제모드벡터와의 내적에 의해 변위장으로부터 강제모드 부분을 분리한 것을 의미한다. 식 (16)에서 네 번째 항은 강제모드 성질인  $\mathbf{K}r = 0$  에 의해 소거되고, 두 번째 항은  $\mathbf{K}' r_k + \mathbf{K} r_k = 0$  에 의해서  $-\alpha^k r_k^T \mathbf{K}' \phi_s^*$  로 바꾸면, 두 번째와 세 번째는 동일한 식이므로, 위의 식은 최종적으로 식 (17)과 같다.

$$(\phi_s^{*T} + \alpha^k r_k^T) \mathbf{K}' (\phi_s^* + \alpha^k r_k) = \phi_s^{*T} \mathbf{K}' \phi_s^* - 2\alpha^k \phi_s^{*T} \mathbf{K}' r_k \quad (17)$$

따라서, 설계변수 변화에 대한 고유치 민감도는 식 (18)로 표현된다.

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\phi_s^{*T} \mathbf{K}' \phi_s^* - 2\alpha^k \phi_s^{*T} \mathbf{K}' r_k - \lambda \phi^T \mathbf{M}' \phi}{\phi^T \mathbf{M} \phi} \quad (18)$$

5. 축소시스템에 대한 최적화 수행

5.1 사이즈 최적화(Size Optimization)

5.1.1 전투장갑차 상판구조물 I

사이즈 최적화를 위해 여섯개의 부영역을 갖는 구조물이 Fig. 3 에 주어져 있다. 각 부영역마다 후부영역과 주자유도를 선정하여 7.97%의 축소시스템을 구성하였다. 다음은 축소시스템에서 구조물의 사이즈 최적화를 위한 문제 조건이다.

- Objective Fn. : maximize  $\lambda_1$ (fundamental frequency)
- Constraint Eq. : volume  $\leq$  initial volume
- Design Variable (DV) : 5mm  $<$   $t_1 \sim t_6$   $<$  15mm
- Initial DV value :  $t_1 \sim t_6 = 10$ mm
- Linear programming perturbation : 5%
- Convergence value : 0.05%

목적함수는 고유주파수의 최대화이며, 설계 변수는 각 부영역의 두께로 설정하였고, 초기 volume(중량)보다 적은 값을 갖도록 구속조건을 부여하였다. Figure 4 와 5 는 목적함수와 설계변수의 수렴 값을 보여주고 있다.

수렴한 목적함수 값은 38.91 이며, 중앙 영역 두께가 증가하고, 전방과 후방 두께는 감소하고 있으며, 측면의 설계변수는 변화가 없음을 알 수 있다. 이런 결과는 Table 1 의 민감도 결과로부터 예측될 수 있다. 각 iteration 에서 전체시스템(FS)의 민감도는 유한차분법을 사용하였고, 축소시스템(RS)에서는 강제분리 기법에 의한 준해석적 방법을 사용하였다. 전체시스템과 비교하여 신뢰할 수 있는 민감도 결과를 보여주고 있으며, 이는 전체시스템에 의한 최적화 결과와 거의 일치하게 됨을 의미한다. 민감도 결과에서 t1, t6 는 상대적으로 적은 값을 보인다는 것은 설계변수 변화에 대해서 목적함수의 변화가 크지 않음을 의미하며, t4, t5 의 두께 변화는 목적함수에 큰

영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

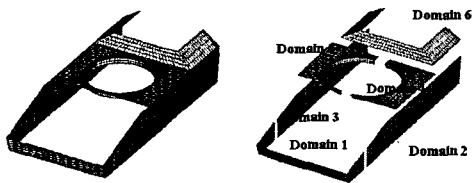
5.1.2 전투장갑차 상판구조물 II

Figure 6 은 5.1.2 장 예제에 7 번째 부영역 축소시스템을 추가하여 구성된 구조물이다. 부영역 1~6 은 형상 변화가 없으며, 이와 관련된 추가적인 작업은 필요하지 않다. 단지, 부영역 7 의 추가에 의해 인터페이스 자유도가 변하는 부영역의 재구성만 수행하면 된다.

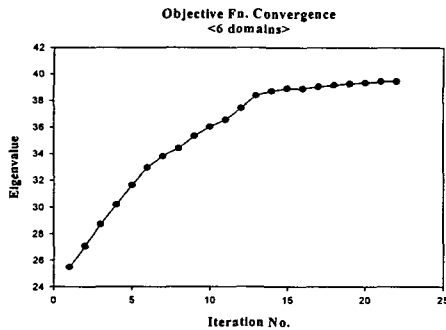
- Objective Fn. : maximize  $\lambda_1$  (fundamental frequency)
- Constraint Eq.: volume  $\leq$  initial volume ( $1.819 \times 10^8 \text{ mm}^3$ )
- Design Variable (DV) :  $5\text{mm} < t_1 \sim t_7 < 15\text{mm}$
- Initial DV value :  $t_1 \sim t_7 = 10\text{mm}$
- Linear programming perturbation : 2%
- Convergence value : 0.01%

목적함수와 구속 조건 및 설계변수는 아래와 같다. 앞의 예제에 비해서 설계변수의 증분값이 2%의 적은 값으로 주어졌기 때문에 더 많은 반복작업 후에 수렴 값을 얻게 됨을 알 수 있다.

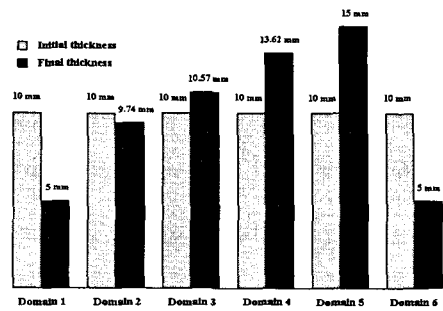
Figure 7 과 8 은 iteration 진행에 따른 목적함수와 각 설계변수의 수렴과정을 보여주고 있다. 목적함수는 최종적으로 131 에 수렴하고 있다. 설계변수는 부영역 1, 2, 7 에서는 감소하고 있으며, 부영역 3, 5, 6 에서는 증가하고 있다.



(a) Configuration of vehicle structure (b) Vehicle structure with 6 sub-domains  
**Fig. 3** Configuration of the infantry vehicle structure with six sub-domains



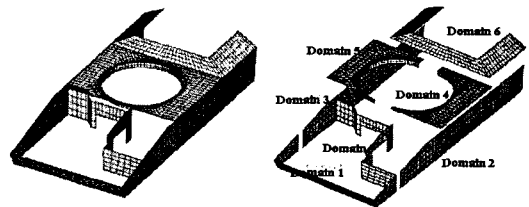
**Fig. 4** Convergence result of the objective function in the infantry vehicle structure



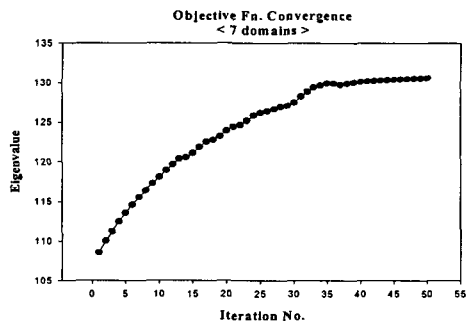
**Fig. 5** Convergence result of design variables in the infantry vehicle structure

**Table 1** Sensitivity comparison between reduced and global system

Iter No.	Analysis	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>
1	FDM	0.0000	0.7591	0.7377	1.7027	1.7428	0.0279
	RSAM	0.0000	0.7591	0.7377	1.7026	1.7427	0.0279
	Error(%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	FDM	0.0000	1.2408	1.0076	1.4998	1.6346	0.0346
	RSAM	0.0000	1.2408	1.0074	1.4995	1.6344	0.0346
	Error(%)	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00
8	FDM	0.0000	1.6889	1.1530	1.4063	1.5558	0.0348
	RSAM	0.0000	1.6823	1.1515	1.4046	1.5544	0.0348
	Error(%)	0.00	0.39	0.13	0.12	0.09	0.00
12	FDM	0.0000	1.3507	1.7024	1.4072	1.5650	0.0316
	RSAM	0.0000	1.3522	1.7047	1.4056	1.5636	0.0318
	Error(%)	0.00	0.11	0.13	0.11	0.08	0.60



(a) Configuration of vehicle structure (b) Vehicle structure with 7 sub-domains  
**Fig. 6** Configuration of infantry vehicle structure with seven sub-domains



**Fig. 7** Convergence of the objective function of infantry vehicle structure with seven sub-domains

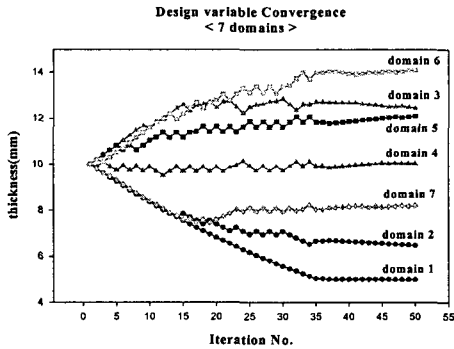


Fig. 8 Convergence of the design variable of infantry vehicle structure with seven sub-domains

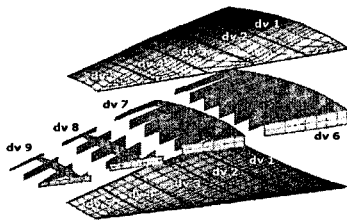


Fig. 9 High-speed aircraft wing with nine design areas and three sub-domains (dv: design variable)

5.1.3 초음속 비행체의 윙 구조물

Figure 9는 초음속 비행체의 wing 구조물을 축소 시스템 구축을 위해 3 개의 부영역으로 나누고, 9 개의 설계 영역으로 나누어 각 영역의 두께를 설계 변수로 설정한 것이다. 즉, 앞의 예제에서는 부영역과 설계 변수 영역이 일치하였으나, 이 문제에서는 해석을 위한 부영역과 설계를 위한 영역이 서로 다르다. wing skin 부분은 5개의 설계영역으로 분리되었고, rib/spar는 4개의 설계영역으로 분리되었다. 3 개의 부영역은 상부와 하부 skin 그리고 rib/spar 구조물이다.

- Objective Fn. : weight minimaton
- Constraint Eq.:
  - $\lambda_1 \leq 160.1, \lambda_2 \leq 1819.9$
  - $\lambda_3 \leq 2302.0, \lambda_4 \geq 5617.2$
- Design Variable (DV) : initial thickness
  - Skin (1~5 design sub-domain) = 3 cm
  - Rib (6~9 design sub-domain) = 5 cm
- convergence ratio : 0.02%

목적함수는 중량이며, 구속조건은 1,2,3,4 차 주파수에 대해 주어진다. 1,2,3 차 주파수를 구조설계 측면에서 회피해야 할 주파수로 가정하여 구속조건을 부과하였고, 4 차 주파수는 두께가 감소하면서 1,2,3 차 근처의 주파수 값으로 낮아지는 것을 막기 위해 초기값보다 증가하도록 인위적인 구속조건을 부과하였다. skin 영역의 초기 두께는 3cm 이며, rib 의 초기 두께는 5cm 이다. SLP(sequential linear program)가 사용되었고, 설계변수

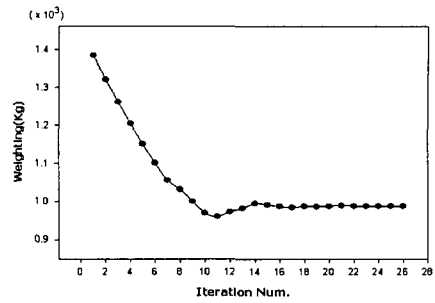


Fig. 10 Convergence of the objective function in the wing system with three sub-domains

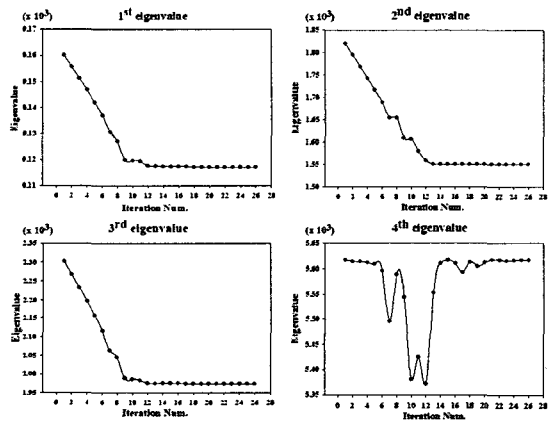


Fig. 11 Convergence of the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> eigenvalue in the wing structure

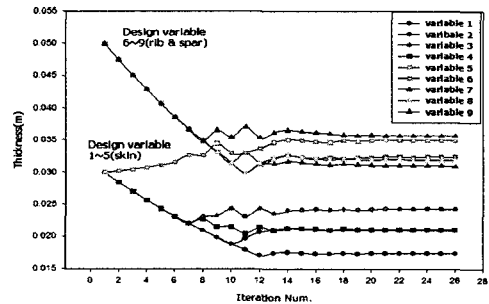


Fig. 12 Convergence of the design variables at the wing structure

증분값은 5%로 하였으며, 목적함수 값이 조건에 위배되는 경우, 즉 전 단계보다 큰 값을 갖게 되는 경우, 변수 증분값을 50%씩 감소시키면서 최적화를 수행하였다. Fig. 10은 목적함수(중량)의 수렴값을 보여주고 있다. 초기 중량 1383kg 에서 987kg 으로 수렴하였다.

Figure 11은 구속조건 (1 차 ~ 4 차 고유치)의 수렴 결과를 보여주고 있다. 구속조건에서 1 차부터 3 차는 초기 주파수 값을 회피하기 위해 감소하도록 조건을 부과하였고, 4 차 주파수에 대해서는 초

기값 이상의 값을 유지하도록 부과하였다.

목적함수의 구속 조건을 만족시키기 위해서는 각 설계영역의 두께가 감소되며, 이것은 시스템의 전체적인 주파수를 감소시키게 된다. 그러나, 4 차 주파수에 대한 구속조건은 이와는 반대 경향을 보이도록 부과되었기 때문에, 다소 진동하는 경향을 보이다가 증분율이 점차 감소되면서 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 각 설계변수의 수렴 과정은 Fig. 12 에 주어져 있다. 설계 변수 1-5 까지는 skin 영역이고, 6-9 는 nb 영역의 설계변수이다. 결과에서 skin 의 설계변수 5 만 초기값보다 증가했으며, 이것은 구속조건을 만족시키기 위해서 wing tip 부분의 두께 증가가 필요함을 의미한다.

5.2 형상 최적화(Shape Optimization)

형상 최적화는 Fig. 3 과 동일한 모델에서 수행되었다. 본 예제에서는 설계영역을 부영역 4 와 5 에 국한하여 수행하였다[Fig. 14(a)]. 부과된 동하중은 Fig. 14(b)에 나타내었고, 목적함수와 구속조건은 다음과 같다.

- Objective Fn. : weight minimization
- Constraint Eq. :  $\sigma_{von} < \sigma_{von}^{Max}$  in each time step  
17.82 <  $\lambda_1$  < 35.00
- Linear programming perturbation size : 10 %
- Convergence tolerance : 0.05%

본 예제에서는 3 개의 natural basis vector 를 사용하였고, Fig. 13 에 주어져 있다. 형상 최적화를 위해 SLP (Sequential Linear Programming)를 사용하였으며, 초기 형상과 최종 형상은 Fig. 14(c)와 Fig. 14(d)에 주어져 있다.

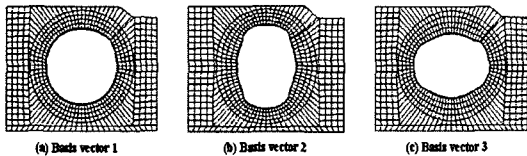


Fig. 13 Basis vectors for shape optimization

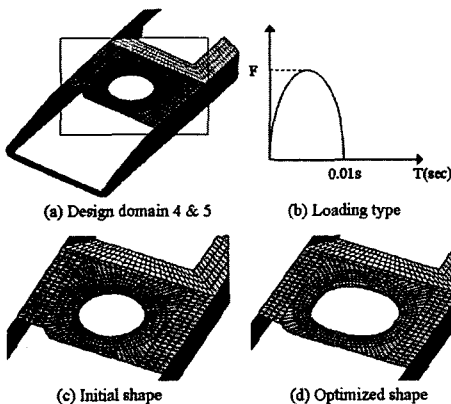


Fig. 14 Design domain, loading type and optimized shape of the infantry vehicle structure

구조물 중앙판 전체에 Fig. 14(b)의 동하중이 작용하는 것으로 가정하였다. 시간 응답을 통해 매 step 마다 변위와 응력을 계산하였으며, 최대 응력 발생시간을 임계시간(critical time)으로 선정하여, 그 시간에 대한 최적화를 수행하였다.

Table 2 와 Table 3 은 각 최적화 단계마다 축소시스템과 전체시스템에서 basis vector 증분량에 따른 구속조건(1<sup>st</sup> 모드 고유치) 민감도를 비교한 결과이다. 민감도 해석 방법은 강제 모드 분리기법을 채용하였고, 증분량은 1×10<sup>-5</sup> 이다. 결과로부터 축소시스템과 전체시스템의 민감도 결과가 거의 일치하고 있음을 보여준다.

최대응력 계산과 최대 응력 지점에서의 민감도 값은 축소시스템에서 구한 변위를 변환 행렬에 의해 전체영역으로 환원하여 계산하였다. 전체시스템을 해석한 경우와 오차가 발생하더라도, 그 차이는 구조물의 안정성에 심각한 영향을 줄 정도로 큰 오차는 발생되지 않을 것으로 사료되며, 전체시스템을 계산하는데 필요한 시간 비용과의 trade-off 측면에서도 매우 효율적이다. 또한, 구속조건을 만족시키는 결과는 구조물의 안정성을 확보한다고 볼 수 있으므로 축소시스템에 의한 최적화 수행 결과는 타당하며, 효율적이라고 할 수 있다. 최적화 수행 결과는 Table 4 에 주어져 있다. 초기에 보여진 최대 응력값은 최적화 수행으로 약 40%가 감소하였으며, 초기

Table 2 Eigenvalue sensitivity of reduced system in each step (1)

basis vector no.	[sensitivity]×10 <sup>-3</sup>					
	4 <sup>th</sup> iteration			9 <sup>th</sup> iteration		
	abs(RS)	abs(FS)	Error (%)	abs(RS)	abs(FS)	Error (%)
1	1.9767	1.9766	0.0051	4.1025	4.1025	0.0000
2	1.0147	1.0147	0.0000	2.5633	2.5632	0.0039
3	1.2016	1.2016	0.0000	3.6366	3.6367	0.0027

Table 3 Eigenvalue sensitivity of full system in each step (2)

basis vector no.	[sensitivity]×10 <sup>-3</sup>					
	15 <sup>th</sup> iteration			21 <sup>th</sup> iteration		
	abs(RS)	abs(FS)	Error (%)	abs(RS)	abs(FS)	Error (%)
1	6.5971	6.5968	0.0045	8.0775	8.0772	0.0037
2	3.9071	3.9067	0.0102	6.1837	6.1831	0.0097
3	5.6773	5.6774	0.0018	4.7270	4.7272	0.0042

Table 4 Convergence results of the objective function, stress, constraints

	Initial value	Converged value	Result
Von Mises Stress	148.26 Mpa	88.85 (Mpa)	40% reduced
Eigen value	1 <sup>th</sup>	17.82	35.00
	2 <sup>nd</sup>	104.11	132.48
	3 <sup>rd</sup>	107.36	132.76
Objective Fn. (Volume)	6.48 × 10 <sup>6</sup> (mm <sup>3</sup> )	5.80 × 10 <sup>6</sup> (mm <sup>3</sup> )	11 % reduced

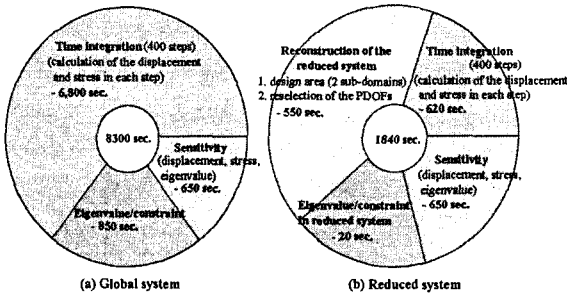


Fig. 15 Comparison of time cost in the one step in the optimization procedure

고유치는 17.82 에서 35.00 으로 증가하였다. 그리고, 목적 함수는 초기 값과 비교하여 11%가 감소하는 결과를 제공하고 있다.

5.3 축소시스템 기반 최적화 기법의 효율성

잘 구성된 축소시스템은 고유치 해석뿐만 아니라, 최적화나 시간적분 등 반복작업이 수행되는 해석에서 신뢰할 수 있는 해를 제공하며, 효율성 측면에서도 전체시스템을 해석하는 경우와 비교하여 매우 유용하다. 동하중 작용시 축소시스템 기반의 최적화 과정은 1) 시간적분, 2) 임계시간 선정, 3) 목적함수와 구속조건 민감도 계산, 4) SLP 에 의한 최적값 계산, 5) 형상변경, 6) 축소시스템 재구성으로 나누어진다.

전체시스템은 시간적분과 목적함수의 재해석에서 지나친 계산시간을 요구하지만, 이와 비교하여 축소시스템은 이 과정에서 시간소요가 거의 없다. 또한 민감도 해석 결과도 신뢰할 수 있음을 앞의 예제를 통해 확인할 수 있다. Figure 15 는 보형 장갑차 형상 최적화에서 전체시스템과의 시간 비교 결과이다. 동하중에 의한 최적화 수행에서, 전체시스템은 시간 적분, 응력 최대 시간에서 민감도 계산, 고유치/구속 조건 계산 등의 3 단계를 거쳐야 하고, 한 step 에서 총 8300 초를 소요하게 된다. 축소시스템을 통한 최적화는 시간 적분과 민감도 계산 그리고 매 step 마다 축소시스템의 재구성과 축소시스템에서의 고유치 해석 과정을 수행하게 된다. 전체 시스템 보다는 추가적인 작업이 더 필요하지만, 총 시간 비용은 약 1800 초이며, 이것은 전체시스템 시간 비용의 1/5 에 불과하다. 이것은 잘 선정된 주자유도에 기초한 축소시스템은 고유치 해석이나 민감도 해석뿐만 아니라 동하중이 작용하는 동적 해석 등에서 상당한 효율성을 보장함을 보여주는 결과라 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 축소시스템과 영역분할 기법과의 연동을 통해 효율성과 신뢰성을 확보한 축소 시스템을 구축하였으며, 이를 이용하여 사이즈 및 형상 최적화를 수행

하였다. 동적 하중하의 최적화 수행은 지나친 전산자원과 계산시간을 요구하기 때문에, 거대 용량의 전산 자원이 요구되는 전체시스템에 대한 해석과 최적설계는 매우 긴 시간과 전산자원을 요구하며 경우에 따라서는 계산량과 전산자원의 한계 때문에 최적 설계 작업이 제한적일 수밖에 없다. 그러나, 잘 구성된 축소시스템은 고유치 해석뿐만 아니라, 최적화 수행시 민감도 값을 정확하게 제공할 수 있으며, 시간 소요의 문제점을 해결할 수 있는 이점을 갖고 있다. 또한, 영역분할 기법과 연동한 축소시스템은 설계 영역이 전체시스템의 일부로 국한된 문제에서, 이미 구축된 다른 영역의 축소시스템을 그대로 사용할 수 있으므로 매우 효율적이다. 따라서, 본 연구에서 제공되는 기법은 대형구조물의 최적화 및 동적 해석 등 과도한 시스템 자원이 요구되는 문제에서 매우 유용할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 및 서울대학교 비행체특화 연구센터의 연구비 지원에 의한 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) Craig, R.R. and Banpton, M., 1968, "Coupling of Substructures for Dynamic Analysis," *AIAA Journal*, Vol. 6, No. 7, pp. 1313~1319.
- (2) Kim, T., Nam, C. and Kim, Y., 1997, "Reduced-Order Aeroservoelastic Model with an Unsteady Aerodynamic Eigen Formulation," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 6, pp. 1087~1088.
- (3) Guyan, R.J., 1965, "Reduction of Stiffness and Mass Matrices," *AIAA Journal*, Vol. 3, No. 2, p. 380.
- (4) O'Callahan, J., 1989, "A Procedure for an Improved Reduced System(IRS) Model," *Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference*, Union college, Schenectady, NY, pp. 17~21.
- (5) Kim, K.O. and Kang, M.K., 2001, "Convergence Acceleration of Iterative Modal Reduction Methods," *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 1, pp. 134~140.
- (6) Shah, V.N. and Raymund, M., 1982, "Analytical Selection of Masters for the Reduced Eigenvalue Problem," *Int.J.Numer. Mech. Engng.*, Vol. 18, No. 1, pp. 89~98.
- (7) Cho, M. and Kim, H., 2004, "Element-Based Node Selection Method for Reduction of Eigenvalue Problems," *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 8, pp. 1677~1684.
- (8) Kim, H. and Cho, M., 2004, "Construction of Reduced System by Two-Level Scheme and Refined Semi-Analytical Sensitivity Analysis Based on the Reduced System," *45th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Palm Springs, CA, AIAA-17317.
- (9) Van Keulen, F. and De Boer, H., 1998, "Rigorous Improvement of Semi-Analytical Design Sensitivities by Exact Differentiation of Rigid Body Motions," *Int.J. Numer.Mech.Engng.*, Vol. 42, pp. 71~91.