

독립 공리를 이용한 구조 최적화 방법론 개발

이 광 원* · 박 경 진**

(1999년 11월 3일 접수)

A Structural Optimization Methodology Using the Independence Axiom

Lee, Kwang Won and Park, Gyung-Jin

Key Words : Axiomatic Design(공리적 설계), Structural Optimization(구조 최적 설계), Logical Decomposition(논리적 분해), Sum of Squares(제곱합), Uncoupled Design(비연성 설계), Nearly-Uncoupled Design(준비연성 설계)

Abstract

The Design Axioms provide a general framework for design methodologies. The axiomatic design framework has been successfully applied to various design tasks. However, the axiomatic design has been rarely utilized in the detailed design process of structures where the optimization technology is generally carried out. The relationship between the axiomatic design and the optimization is investigated and Logical Decomposition method is developed for a systematic structural optimization. The entire optimization process is decomposed to satisfy the Independence Axiom. In the decomposition process, design variables are grouped according to sensitivities. The sensitivities are evaluated by the Analysis of Variance(ANOVA) to avoid considering only local values. The developed method is verified through examples such as the twenty-five members transmission tower and the two-bay-six-story frame.

1. 서론

일반적으로 설계(design)의 사전적 의미는 "건설, 제작, 공사 등에 있어서 그 목적에 따라 실제적인 계획을 세우고, 도면 등으로 명시하는 일"이다. 이것을 보다 구체화 시키면 설계란 "우리가 얻고자 하는 것(what)과 그것을 얻는 방법(how) 사이의 계속적인 상호 작용을 통하여 그것을 얻는 방법(how)을 구체화하는 것"으로 간주할 수 있다.⁽¹⁾ 설계는 누구에게나 받아들여 질 수 있는 일반적이고 과학적인 원리 원칙(general and scientific principles)과 절대적인 판단 근거에 입각하여 수행되어야 한다. 과학적인 원리원칙이나 절대적인 판단 근거가

설정된다면 보편적인 설계 결과를 기대할 수 있으며, 이러한 판단기준은 좋은 설계와 좋지 않은 설계를 구분해 내는 데에도 이용될 수 있다. 이와 같은 보편적 판단기준을 구축하기 위해 공리(axiom)적 접근 방법을 개발한 이론이 Suh에 의해 개발된 공리적 설계(axiomatic design)이다.⁽¹⁾ 공리적 설계란, 설계작업을 수행할 때 두 가지 설계 공리(design axiom)를 제시해 주고, 그것을 기준으로 설계물의 기능과 이에 따른 설계 변수의 관계를 규명하며, 그리고 설계물의 강건성(robustness) 판단의 기준을 제시한다. 설계에 대한 오랜 동안의 관찰과 경험으로 얻어진 두 가지 설계 공리는 독립 공리(independence axiom)와 정보 공리(information axiom)이다. 독립 공리는 기능과 물리적인 변수 사이의 관계를 규명하여 얻고자 하는 것과 얻는 방법의 적절한 상관 관계를 제공한다. 정보 공리는 설계의 성공 가능성 및 복잡성에 대하여 다룬다. 설계 공리 이론은 이미 공학적인 재료, 생산 공정, 인공 피부, 소프트웨어, 시스템 등의 설계에 성공적으로 적용되었으며, 특히 Albano와 Suh는

* ㈜대우자동차 기술연구소

** 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : gjpark@email.hanyang.ac.kr
TEL : (031)400-4065 FAX : (031)407-0755

자동 주차장의 구조 설계에 설계 공리를 적용한 바 있다.⁽²⁾

주어진 조건을 만족하면서 설계자가 원하는 최적의 결과를 제공하는 이론이 최적화 이론(optimum theory)이다.⁽³⁻⁵⁾ 최적화 이론은 이미 구조물의 설계에 적용되어 구조 최적 설계(structural optimization)의 고유의 설계 영역을 구축하였다. 그러나, 현재 구조 최적 설계 방법에 공리적 설계를 직접 도입하기는 어렵다. 그것은 구조 설계는 설계변수의 수가 기능적 요구의 수에 비해 현저히 많아서 독립 공리를 만족하는 설계 문제를 정의하기 어렵고, 또한 설계 변수들이 서로 상관 관계를 지니고 있어서 독립 공리를 만족하는 설계 문제를 구성하기 어렵기 때문이다. 이러한 이유로 구조 설계를 위한 공리적 설계는 아직 개념 설계의 단계에 머물러 있어서 상세 설계인 구조 최적 설계에는 적용하지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 개념설계의 단계에 한정된 구조물의 공리적 설계의 한계를 극복하고, 설계 공리를 이용한 최적화 설계가 가능한 설계 방법론을 개발하기 위한 연구가 필요하다.

본 연구는 구조 최적 설계 시 공리적 설계 기법을 이용할 수 있는 방법론의 개발을 목적으로 한다. 이를 위하여, 설계 공리와 최적 설계간의 관계를 수학적 증명을 통해 분석한다. 개발한 설계 기법은 독립 공리를 구조 설계에 적용하는 과정인 논리적 분해(logical decomposition)를 기반으로 구성된다.⁽⁶⁾ 논리적 분해는 적절한 설계창(design window)에서 설계 목적에 영향력이 큰 설계 변수를 정의하여 공리적 설계의 설계 방정식(design equation)을 구성하는 과정이다. 설계 행렬을 구성하기 위한 설계 민감도 정보를 위해 구간에서의 민감도 의미를 지닌 제곱합(sum of squares)을 이용한다.^(7,8) 제곱합은 본래 분산 분석(analysis of variance)에서 이용되는 것으로서 설계 목적에 대한 설계 변수의 영향력을 의미한다. 설계 문제가 구성되면 구조 최적화 기법으로써 최종적인 설계 결과가 도출된다. 개발한 설계 기법을 검토하기 위해 25 부재 전송탑, 2 칸 6 층 프레임의 설계 문제를 예제로 제시한다. 상용 구조 최적화 소프트웨어인 GENESIS 가 구조 최적 설계를 위해 사용되었다.⁽⁹⁾

2. 설계 공리의 개요⁽¹⁾

설계 공리의 목적은 설계에 대한 객관적이고

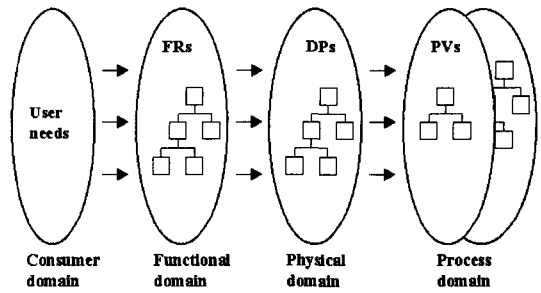


Fig. 1 Concept of domains and mapping

과학적인 틀을 세워 실제 문제에 응용하는 것이다. 공리적 설계에서는 각 영역(domain) 사이의 사상(mapping)을 통해 인지된 요구 사항들을 만족하는 종합적인 해법을 세우는 것을 설계라고 정의한다. 제품 설계에서는 기능적 요구조건(functional requirement, FRs)을 품고 있는 기능적 영역(functional domain)에서 설계 변수(design parameters, DPs)를 품고 있는 물리적 영역(physical domain)으로의 사상이 이루어진다. 기능적 요구 조건은 사용자 영역에서 사용자에 의해 주어진 최초의 요구 사항을 완벽하게 만족하면서 서로 독립적인 최소한의 집합으로 정의된다. 설계 변수는 기능 요구를 독립적으로 만족하기 위해 물리적인 영역에서 실제 필요한 것들을 구현한 것이다. 공정 설계에서 공정 변수(production variables, PVs)는 설계 변수를 만족하는 제작을 위해 결정된다.

영역과 사상에 대한 설명은 Fig. 1 과 같다. 소비자 영역은 고객의 요구 사항이다. 고객의 요구 사항을 기능적 영역으로 사상하여 기능적 요구 조건들의 집합을 형성한다. 기능적 요구 조건은 달성하려는 바를 공학적 용어로 표현한 것이다. 그 후 기능적 요구 조건은 물리적인 영역으로 사상이 되는데 여기서 독립적으로 기능적 요구 조건을 만족하기 위한 설계 변수를 선택한다. 지그재그(zigzag) 과정을 통해 기능적 요구 조건과 설계 변수를 각각 분해한다. 물리적인 영역에서의 설계 변수는 실제 물리적인 개체의 개념화를 통해 결정된다.

설계 공리는 좋은 설계를 얻기 위하여 항상 유지되어야 하는 것으로서 설계 공리 1 과 설계 공리 2 의 두 가지 공리로 나눌 수 있다.

공리 1 : 독립 공리(The Independence Axiom)

채택 가능한 설계는 각각의 기능 요구가 다른 어떤 기능 요구들에게도 영향을 미치지 않으면서 만족되도록 기능 요구들과 설계 변수들 사이의 사상이 이루어지는 것이다.

공리 2: 정보 공리(The Information Axiom)

설계 공리 1 을 만족하는 설계들 중에서 가장 최소한의 정보량을 갖는 설계가 상대적으로 가장 좋은 설계이다.

설계 공리 2 의 내용은 본 연구에서는 구체적으로 적용되지 않았기 때문에 자세한 내용은 생략하기로 한다. 독립 공리는 사상 과정에서 채택 가능한 설계의 조건을 제시하고 있다. 설계 과정은 기능적 영역과 물리적 영역 사이의 사상 과정이며 이는 다음과 같은 설계 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\{FRs\} = [A]\{DPs\} \tag{1}$$

식 (1)의 $\{FRs\}$ 는 독립적인 기능 요구 벡터이고, $\{DPs\}$ 는 설계 변수 벡터이다. $\{FRs\}$ 와 $\{DPs\}$ 사이의 관계는 설계 행렬(design matrix)로 표현되며 설계 행렬 내의 각각의 인자 는 다음과 같이 표현 된다.

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \tag{2}$$

식 (2)와 같이 설계 행렬의 구성 성분은 설계 민감도를 의미한다. 그러나 식 (2)와 같이 수학적 인 정의에도 불구하고 많은 경우 설계 행렬의 인자들은 기능 요구와 설계 변수 사이의 영향 관계

만을 표현한다. 표현 방법은 O 와 X 를 이용하여 O 로 표기된 항목은 영향이 없고 X 로 표기된 항목은 영향이 있음을 의미한다.

독립 공리를 만족하기 위한 평가 기준은 설계 행렬이 대각 행렬이나 삼각 행렬의 형태이어야 한다. 대각 행렬의 설계를 비연성 설계(uncoupled design), 삼각 행렬인 경우 비연성화 설계(decoupled design)라 한다. 이외의 행렬 형태를 지니면 연성 설계(coupled design)라 한다. 이러한 평가 기준을 정리하면 Table 1 과 같다.

비연성 설계는 기능 요구와 설계 변수가 각각 독립적인 관계를 유지 하는 설계로서 특정한 기능 요구를 해당되는 설계 변수만을 가지고 만족시킬 수 있다. 비연성화 설계는 설계 대상을 구현하는 방법에 순서가 있는 방법이다. 순차적으로 설계 변수의 값을 결정해 나가는 설계 방법이다. 이 경우 지정된 설계 순서를 따를 경우 독립 공리를 만족할 수 있다. 연성 설계는 각 설계 변수가 다수의 기능 요구에 영향을 미치는 것으로 설계 시 타협을 통한 피드백(feedback)이 존재하므로 설계 결과에 좋지 못한 영향을 미친다. 공리적 설계의 패러다임에서는 이는 피해야 하며 설계자의 재고를 통해 피드백이 없는 비연성 설계나 비연성화 설계로 변환 시키는 것을 추천한다.

공리적 설계의 구체적인 적용 사례 중 가장 대표적인 것이 캔과 병을 따는 오프너(can and bottle opener)이다. 오프너의 한 쪽은 캔을 따는 기능을 수행하고 다른 한 쪽은 병을 따는 기능을 수행한다. 각기 독립적인 기능을 독립적인 변수를 통해 구현되고 있다. 이 오프너는 독립 공리를 잘 만족

Table 1 Verification methods of the independence axiom

	Design equation	Design result
Uncoupled design	$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & O & O \\ O & A_{22} & O \\ O & O & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$	$\begin{aligned} FR_1 &= A_{11} * DP_1 \\ FR_2 &= A_{22} * DP_2 \\ FR_3 &= A_{33} * DP_3 \end{aligned}$
Decoupled design	$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & O & O \\ A_{21} & A_{22} & O \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$	$\begin{aligned} FR_1 &= A_{11} * DP_1 \\ FR_2 &= A_{21} * DP_1 + A_{22} * DP_2 \\ FR_3 &= A_{31} * DP_1 + A_{32} * DP_2 + A_{33} * DP_3 \end{aligned}$
Coupled design	$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$	$\begin{aligned} FR_1 &= A_{11} * DP_1 + A_{12} * DP_2 + A_{13} * DP_3 \\ FR_2 &= A_{21} * DP_1 + A_{22} * DP_2 + A_{23} * DP_3 \\ FR_3 &= A_{31} * DP_1 + A_{32} * DP_2 + A_{33} * DP_3 \end{aligned}$

하는 사례이다.

3. 최적 설계와 공리적 설계의 관계

공리적 설계에서는 비연성 설계, 비연성화 설계를 좋은 설계로 규정하고 있다. 이것은 최적 설계 문제를 공리적 설계의 관점에서 접근했을 때 이러한 형태로 나타낼 수 있어야 한다는 것을 의미한다. 그러나, 최적 설계 문제가 영역간 사상을 통해 비연성 설계, 비연성화 설계로 표현될 때 본래 최적해와 동일한 결과를 도출할 보장은 없다. 그러한 이유로 최적 설계 문제와 공리 설계 문제와의 관계를 수학적으로 밝혀 공리적 설계 방식에 의해 수행 가능한 최적 설계의 형태가 무엇인지를 도출한다. 증명 과정은 제한조건이 없는 최적 설계문제에 대해 수행된다. 제한조건이 있는 경우에도 라그란지 함수(Lagrange function)를 사용하여 동일한 결과를 얻을 수 있다. 본 장에서는 주어진 최적 설계 문제를 일반적인 최적화 방법인 모든 설계 변수를 동시에 고려하는 설계(all-at-once design)와 공리적 설계를 대상으로 수행하여 최적해를 구한 후 두 최적해의 일치 여부를 수학적으로 비교해 본다.

3.1 비연성 설계(Uncoupled design)

최적 설계문제가 비연성 설계방정식으로 표현되는 공리적 설계 문제인 경우 목적 함수를 의미하는 함수 f 는 아래의 정식과 같이 설계 변수 x_1 만으로 이루어진 함수 f_1 과 설계 변수 x_2 만으로 이루어진 함수 f_2 로 구성된다. 제한 조건이 없는 문제의 경우 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\text{find } x_1, x_2 \tag{3}$$

$$\text{to minimize } f \tag{4}$$

$$f = f_1(x_1) + f_2(x_2) \tag{5}$$

제한조건이 없으므로 목적 함수 f 를 최소화하는 방향으로 설계가 수행된다.

3.1.1 모든 설계 변수를 동시에 고려하는 설계

최적 설계에서는 함수 f 를 최소화하기 위해 함수 f 의 일차도함수가 0 이 되어야 하는 필요 조건(necessary condition)이 존재한다. 목적함수 f 는 독립적인 설계 변수 x_1 만으로 이루어진 독립

적인 함수 f_1 과 독립적인 설계 변수 x_2 로 이루어진 독립적인 함수 f_2 로 구성된다. 이것은 x_1 에 의한 함수 f 의 편미분과 x_1 에 의한 함수 f_1 의 편미분이 동일함을 의미한다. 설계 변수 x_2 와 함수 f_2 의 경우도 이와 동일하다. 식 (6)과 식 (7)이해를 구하는 필요조건이 된다.

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial f_1}{\partial x_1} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_2} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = 0 \tag{7}$$

3.1.2 공리적 설계

식 (3) - (5)의 정식은 다음과 같은 설계방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & O \\ O & \times \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \tag{8}$$

설계 행렬이 대각 행렬이므로 비연성 설계이다. 그러한 이유로 목적함수를 최소화하기 위해 함수 f_1 에 대해서는 x_1 만으로 설계를 수행하며, 함수 f_2 에 대해서는 x_2 만으로 설계를 수행한다. 식 (8)의 설계 방정식은 식 (9), (10)과 같은 필요 조건을 지닌다.

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_2} = 0 \tag{10}$$

모든 설계 변수를 동시에 고려하는 설계의 필요 조건인 식 (6), (7)의 조건과 공리적 설계를 의미하는 식 (9), (10)의 조건이 서로 동일하다. 이것은 일반적인 최적화 문제의 최적해와 공리적 설계의 최적해가 일치함을 의미한다.

3.2 비연성화 설계 I(Decoupled design I)

설계 공리에서는 설계방정식이 비연성화 설계도 좋은 설계라고 규정하고 있으며 각 기능적 요

구 조건들을 만족시킬 수 있도록 설계 변수를 순차적으로 결정한다. 최적 설계 문제가 비연성화 설계 방정식으로 표현되는 공리적 설계 문제인 경우 목적 함수를 의미하는 f 는 식 (13)과 같이 설계 변수 x_1 만으로 이루어진 함수 f_1 과 설계 변수 x_1 과 x_2 로 이루어진 함수 f_2 로 구성된다. 제한 조건이 없는 문제의 경우 최적화 정식은 다음과 같다.

$$\text{find } x_1, x_2 \quad (11)$$

$$\text{to minimize } f \quad (12)$$

$$f = f_1(x_1) + f_2(x_1, x_2) \quad (13)$$

3.2.1 모든 설계 변수를 동시에 고려하는 설계 목적함수 f 를 최소화하기 위한 필요조건은 식 (14), (15)와 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_2} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = 0 \quad (15)$$

3.2.2 공리적 설계

함수 f_1 은 설계 변수 x_1 만의 함수이고, 함수 f_2 는 설계 변수 x_1 과 x_2 의 함수이므로 설계공리를 적용하면 다음과 같은 설계 방정식으로 정의된다.

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & O \\ \times & \times \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

설계 공리에서 제시하는 순차적 방법에 의하면 첫 번째 단계에서 함수 f_1 을 최소화하는 x_1 을 결정하고, 두 번째 단계에서 함수 f_2 를 최소화하는 x_2 를 결정한다. 함수 f_2 를 최소화 하는 두 번째 단계에서 설계 변수 x_1 은 첫 번째 단계에서 결정한 값을 고정하여 사용한다. 첫 번째 단계에서 최적해를 얻기 위한 필요 조건은 식 (17)과 같다.

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = 0 \quad (17)$$

식 (17)을 만족하는 해를 x_1^* 라 가정하면, 함수 f_2 를 최소화하기 위한 필요 조건은 식 (18)과 같다.

$$\frac{\partial f_2(x_1^*, x_2)}{\partial x_2} = 0 \quad (18)$$

전술한 바와 같이 함수 f_2 가 설계 변수 x_1 과 x_2 의 함수이지만 두 번째 단계에서 x_1 의 값은 x_1^* 로 고정된다. 식 (18)을 만족하는 해를 x_2^* 라 가정한다. 이와 같은 방법으로 공리적 설계문제를 통해 얻은 최적해는 x_1^* 과 x_2^* 이다. 만일 x_1^* 과 x_2^* 가 식 (14)와 (15)를 모두 만족한다면 모든 설계를 동시에 고려하는 설계와 공리적 설계에서 동일한 해를 구할 수 있다. 이를 증명하기 위해 다음과 같이 x_1^* 과 x_2^* 의 값을 식 (15)에 대입한다.

$$\frac{\partial f_2(x_1^*, x_2^*)}{\partial x_2} = 0 \quad (19)$$

그리고, x_1^* 과 x_2^* 의 값을 식 (14)에 대입한다.

$$\text{이때 식 (17)에서 } \frac{\partial f_1(x_1^*)}{\partial x_1} = 0 \text{이므로}$$

$$\frac{\partial f_1(x_1^*)}{\partial x_1} + \frac{\partial f_2(x_1^*, x_2^*)}{\partial x_1} \neq 0 \quad (20)$$

식 (20)에 의하면 공리적 설계에서는 식 (14)가 성립하지 않는다. 이것은 최적해를 위한 필요 조건이 서로 일치하지 않음을 나타낸다. 그러므로, 비연성화 설계 I으로 나타나는 최적 설계 문제는 공리적 설계에 적합하지 않다.

3.3 비연성화 설계 II (Decoupled design II)

식 (16)과 같은 설계는 최적 설계 문제를 해결할 수 없으므로 다음과 같은 설계 방정식을 만족하는 비연성화 설계의 경우를 고려해 본다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{The condition to be } \frac{\partial f}{\partial x_1} = 0 \\ \text{The condition to be } \frac{\partial f}{\partial x_2} = 0 \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} \times & O \\ \times & \times \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \quad (21)$$

식 (21)의 설계방정식은 식 (11)-(13)에 정의된 최적화 정식을 기반으로 수립된 방정식이다. 목적 함수 f 를 최소화하기 위한 필요조건을 기능적 요구 조건으로 설정하여 비연성화 설계를 수행한다. $\frac{\partial f}{\partial x_1} = 0$ 이 되는 조건이 x_1 만의 함수이고, $\frac{\partial f}{\partial x_2} = 0$ 이 되는 조건이 x_1 과 x_2 의 함수이다. 이것을 식으로 나타내면 비연성화 설계는 식 (22), (23)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = g(x_1) \quad (22)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_2} = h(x_1, x_2) \quad (23)$$

식 (22)는 적분에 의해 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f = G(x_1) + l(x_2) \quad (24)$$

식 (24)를 x_2 로 편미분하면 식 (25)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial f}{\partial x_2} = \frac{\partial l(x_2)}{\partial x_2} \quad (25)$$

식 (23)과 식 (25)을 비교하면 다음과 같다.

$$h(x_1, x_2) \neq \frac{\partial l(x_2)}{\partial x_2} \quad (26)$$

식 (26)과 같이, f 에 대한 x_2 의 편미분 결과가 서로 다르므로 비연성화 설계 II 의 형태를 지닌 최적 설계문제는 공리적 설계에 적절치 않다.

3.4 준비연성 설계(Nearly-Uncoupled design)

함수 f_1 과 f_2 가 모두 설계 변수 x_1 과 x_2 의 함수이고, 목적함수 f 가 함수 f_1 과 f_2 로 이루어진 최적화 문제의 정식은 다음과 같다.

$$\text{find } x_1, x_2 \quad (27)$$

$$\text{to minimize } f \quad (28)$$

$$f = f_1(x_1, x_2) + f_2(x_1, x_2) \quad (29)$$

식 (29)의 함수 f_1 에 대한 설계 변수 x_1 의 영향력이 매우 크고, 함수 f_2 에 대한 x_2 의 영향력이 매우 크다고 가정하면 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$x_1 \text{의 } f_1 \text{에 대한 영향력} \gg x_1 \text{의 } f_2 \text{에 대한 영향력} \quad (30)$$

$$x_1 \text{의 } f_1 \text{에 대한 영향력} \gg x_1 \text{의 } f_2 \text{에 대한 영향력} \quad (31)$$

3.4.1 모든 설계 변수를 동시에 고려하는 설계
목적함수 f 를 최소화하기 위한 필요조건은 식 (32)와 (33)과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_2} = \frac{\partial f_1}{\partial x_2} + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = 0 \quad (33)$$

식 (30)과 식 (31)의 조건에 의해 $\frac{\partial f_2}{\partial x_1}$ 과 $\frac{\partial f_1}{\partial x_2}$ 은 무시할 수 있다. 그에 따라 식 (32), (33)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_2} = 0 \quad (35)$$

3.4.2 공리적 설계

함수 f_1 에 대한 설계 변수 x_1 의 영향력이 매우 크고, 함수 f_2 에 대한 설계 변수 x_2 의 영향력이 매우 크므로 다음과 같은 설계방정식을 갖는 식

으로 표현된다.

$$\begin{cases} \text{The condition to find the minimum of } f_1 \\ \text{The condition to find the minimum of } f_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} \times & O \\ O & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

위의 공리적 설계를 만족하는 필요조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = 0 \quad (37)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_2} = 0 \quad (38)$$

이 조건은 동시설계에서 함수 f 를 최소화하는 조건식 (34), (35)와 동일하다. 이것은 식 (30)과 (31)의 조건을 지닌 설계의 경우 비연성 설계로 간주될 수 있음을 의미한다. 식 (36)의 설계방정식은 설계민감도 해석을 통해 얻어질 수 있으며 비연성 설계와 유사하지만 비대각 요소들이 완전히 0이 되지는 않으므로 준비연성 설계라 명한다.

모든 설계 변수를 동시에 고려하는 설계에서 구한 해를 (x_1^+, x_2^+) 라 가정하고 설계 공리에 의해 구한 해를 (x_1^*, x_2^*) 라 가정하면, 두 해의 사이에는 작은 차이가 존재할 수 있다. 이것은 앞에서 0으로 간주했던 함수 f_2 에 대한 x_1 의 영향력이 완전히 0이 아니고, 함수 f_1 에 대한 x_2 의 영향력이 완전히 0이 아니기 때문이다. 즉, $\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = 0$ 의 조건으로부터 얻은 최적해 (x_1^*, x_2) 의 x_1^* 가 x_2 의 영향을 받을 수 있으며, $\frac{\partial f_2}{\partial x_2} = 0$ 의 조건으로부터 얻은 최적해 (x_1, x_2^*) 의 x_2^* 가 x_1 영향을 받을 수 있기 때문이다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 반복 수행을 통해 설계를 수행한다. 반복 수행의 방법은 설계가 완전히 수렴할 때까지 전체 설계를 반복하는 것이다. 반복 수행의 과정은 흐름도를 이용하여 Fig. 2에 도시하였다.

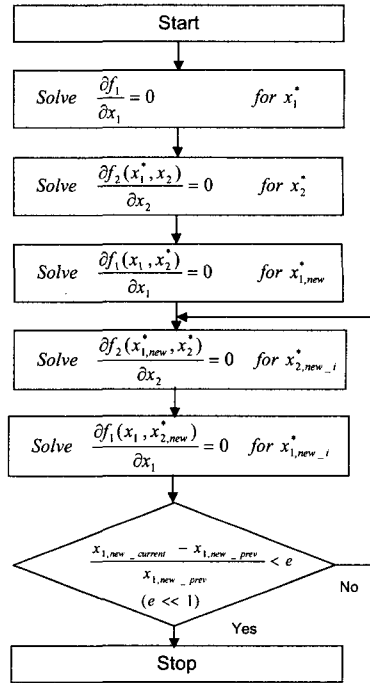


Fig. 2 The flow of finding solution in the nearly uncoupled design

4. 구조 최적 설계를 위한 공리적 설계 방법론⁽⁶⁾

4.1 논리적 분해(Logical decomposition)

앞장의 증명에 의해 비연성 설계 문제나 준비연성 설계 문제인 경우에만 공리적 설계 방식에 의한 최적 설계가 가능하다. 이와 같이, 구조 설계 문제를 비연성 또는 준비연성 설계 문제로 만들어 설계를 수행하기 위한 과정이 논리적 분해(Logical Decomposition)이다. 논리적 분해는 적절한 설계창 (design window)을 찾아 각 설계목적에 영향을 많이 주는 설계 변수를 정의하여 설계방정식을 구성하는 과정이다. 구조 최적 설계의 관점에서 보면, 독립 공리의 수학적 표현인 설계 방정식을 나타내는 식 (1)의 기능 요구 벡터 $\{FRs\}$ 는 목적 함수로, 설계 변수 벡터 $\{DPs\}$ 는 구조 설계 변수 벡터로 대치된다. $\{FRs\}$ 와 $\{DPs\}$ 사이의 관계를 나타내는 설계 행렬 $[A]$ 의 인자 A_{ij} 는 목적 함수에 대한 설계 변수의 설계 민감도로써 대치한다. Fig. 3은 논리적 분해의 흐름이다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 정의된 설계 문제에

대해 논리적 분해를 수행하기 위해 설계 변수를 선정한다. 설계 변수의 선정은 구조물의 특성이나 기존의 설계 결과에 의존한다. 선정된 설계 변수를 이용하여 설계 방정식의 구성을 위한 설계 민감도를 계산한다. 설계 민감도의 크기는 목적 함수에 대해 설계 변수가 갖는 영향력의 크기를 의미한다. 설계 민감도 정보로서 구간 민감도의 개념을 지닌 제곱합(sum of squares)을 이용한다. 독립 공리를 만족하는 설계 방정식을 위해 유사한 특성을 지닌 설계 변수들을 하나의 집단으로 묶는 그룹화(grouping)를 수행한다. 일련의 과정을 거친 후에 독립 공리가 만족되는 설계 방정식을 구성하지 못한다면 개발한 논리적 분해에서는 다시 설계 변수를 선정의 단계로 돌아가서 다시 논리적 분해를 수행한다.

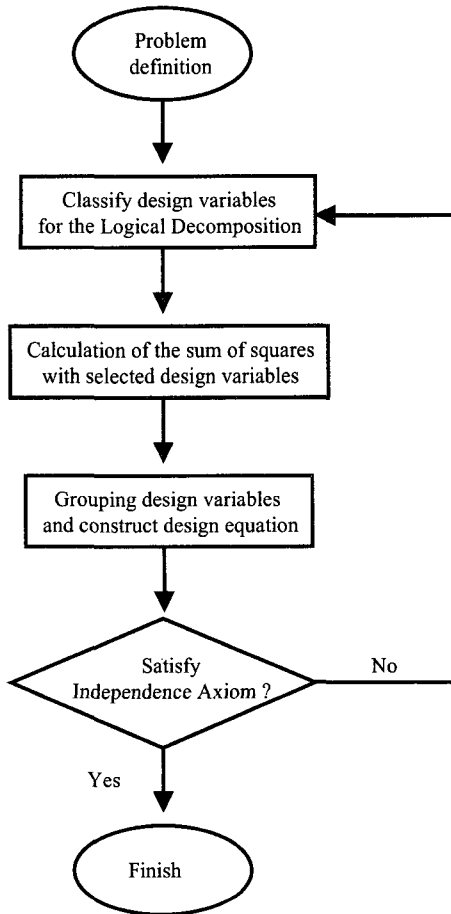


Fig. 3 The flow of the Logical Decomposition

4.2 민감도 해석

식 (1)에서 목적 함수인 $\{FRs\}$ 와 설계 변수인 사이의 $\{DPs\}$ 관계를 의미하는 설계 행렬 $[A]$ 는 목적 함수에 대한 설계 변수의 설계 민감도로 구성된다. 일반적으로 구조 최적화 설계에서 의미하는 설계 민감도(design sensitivity)란 변위나 응력과 같은 반응치(response)의 설계 변수에 대한 수학적 미분치로 정의되며, 흔히 최적화 설계에서 비선형 문제를 선형화 하는데 사용되고 있다.⁽¹⁰⁾ 설계 민감도는 특정한 설계 지점에서 함수의 기울기를 의미한다. 그러나, 특정한 설계 지점에서 구한 함수의 기울기가 설계 영역 전체에서 함수의 기울기를 나타내진 못한다. 다시 말해서 하나의 지점에서의 민감도 정보가 설계 전반에 걸친 민감도 정보를 제공하지 못한다. 이와 같은 이유로 분산 분석에서 이용되는 제곱합(sum of squares)을 설계 민감도 정보로서 이용한다.^(7,8) 제곱합은 임의의 구간에서의 설계 변수에 의한 반응치들의 산포(散布) 정도를 나타내는 수치이다. 다음은 제곱합을 의미하는 공식이다.

$$sum\ of\ squares = \sum_i^k (\eta_i - m)^2 \quad (39)$$

식 (39)의 η_i 는 i 번째 설계 변수에 의한 특성치(characteristic value)를 의미하고, m 은 전체 평균, k 는 실험 횟수를 의미한다. 제곱합의 계산을 위해 직교 배열표(orthogonal array)를 이용한다. 설계 변수의 수준과 수준 별 수치는 해당되는 설계 변수에 적용되는 상한(upper limit)과 하한(lower limit)을 기준으로 설정한다. 직교 배열표 실험시 수준의 수와 수준 별 설계 변수의 값에 의해 제곱합의 결과가 변경될 수 있다.

4.3 공차와 집단화

논리적 분해에서 설계 목적에 대한 설계 변수의 영향력은 제곱합의 값으로 표현된다. 이와 같이 수치로 표현되는 설계 방정식은 독립 공리를 만족하는 비연성 설계 방정식으로 만들기 어렵다. 그것은 구조 설계 문제에서 완전히 영향을 주지 않는 설계 변수와 설계 목적의 관계는 드물기 때문이다. 다시 말해서 제곱합이 정확히 0인 목적 함수와 설계 변수의 관계는 구조 최적 설계 문제에는 드문 일이다. 이와 같은 경우 설계 공리의 제 8 정리인 독립성과 공차의 정리를 적용한다.

설계 공리에는 두 가지 공리를 기반으로 여러 추론(corollary)들과 정리(theorem)들이 존재하여 세부적인 사항들을 정의한다.⁽¹⁾

제 8 정리 독립성과 공차 (Independence and Tolerance)⁽¹⁾

설계자가 명시한 공차가 다음의 식을 만족한다면 그 설계는 비연성 설계이다.(A design is an uncoupled design when the designer specified tolerance is satisfied the following equation.)

$$\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \right) \Delta DP_j \leq tolerance \quad (40)$$

식 (40)은 임의의 목적 함수에 대응하는 설계 변수를 제외한 나머지 설계 변수들의 변화에 대한 설계 목적의 변화이다. 위의 정리에 의하면 해당되지 않은 설계 변수의 기능 요구에 대한 영향의 크기가 설계자가 정의한 공차의 영역 안에 있다면 영향이 전혀 없다고 간주한다. 다시 말해서 행렬의 비대각 요소들이 0 이 아니라도 설계자가 정의한 임의의 한계 허용치 보다 작다면 0 으로 간주한다는 것을 의미한다. 그러나, 설계자의 관점에서 명시된 공차 한계에 의해 판단되는 것이지, 일반화된 공차 한계는 존재하지 않는다. 본 연구에서도 논리적 분해를 위한 설계 행렬을 구성 할 때에 민감도 해석을 수행하여 상대적으로 작은 크기의 민감도는 설계자가 설정한 공차의 영역 안에 있다면 영향력이 전혀 없다고 간주하여 설계 행렬을 구성한다.

설계 공리에서 이상적인 설계(ideal design)는 기능적 요구(FRs)의 수와 설계 변수(DPs)의 수가 일치하면서 기능적 요구의 독립성을 보장할 수 있는 설계이다. 만일 기능적 요구의 수가 설계 변수의 수에 비해 적으면 이 설계는 주어진 기능적 요구를 만족할 수 없으며 반대로 기능적 요구의 수보다 설계 변수의 수가 많으면 과잉 설계(redundant design)가 되거나 연성 설계(coupled design)가 된다. 따라서 설계를 수행할 때에는 기능적 요구와 설계 변수의 수가 같고 설계 행렬이 비연성 설계(uncoupled design)의 형태가 되어야 한다. 이것이 제 4 정리인 이상적인 설계이다. 그러나, 일반적인 구조 최적 설계에서 하나의 목적 함수에 적용되는 설계 변수의 수는 하나 이상이다. 결국 설계가 이상적인 설계가 되기 위한 조건에 위배된다. 이러한 문제점은 설계 공리의 제 28 정리인 그룹화(grouping)를 이용하여 해결한다.

제 28 정리 그룹화⁽¹⁾

모든 기능 요구 혹은 특정한 기능 요구에 모두 영향을 주는 설계 변수들을 그룹화할 수 있으면 독립 공리를 만족하는 설계 방정식을 구현 할 수 있다.

다시 말해서 동일한 특성을 나타내는 설계 변수를 묶어 하나의 설계 변수로 간주할 수 있다. 그룹화를 통해 같은 특성을 나타내는 설계 변수들을 하나의 설계 변수로 묶어서 하나의 설계 변수로 간주하는데, 이와 같은 변수들을 집단 설계 변수(group design variable)라 정의한다.

5. 예제 및 고찰

5.1 25 부재 전송탑

Fig. 4 의 25 부재 전송탑(twenty-five member transmission tower)의 최적화 문제이다. 이 구조물은 25 개의 트러스 부재로 구성된 구조물이다. 구조물의 위치에 따라 세 부류로 나누어 같은 부류는 같은 단면적을 지닌 부재로 구성된다. 하중은 1, 2 번 절점에 $F_x = 24kN$, $F_z = 18kN$ 그리고 3, 6 번 절점에 $F_x = 30kN$, $F_y = 40kN$ 을 적용된다. 설계의 목적은 구조물 질량의 최소화과 2 번 절점의 x 방향 변위의 최소화이다. 선정된 설계 변수는 치수 설계 변수인 트러스의 부재의 단면적 A_1, A_2, A_3 와 배치(configuration) 설계 변수인 절점의 z 좌표 Z_3, Z_4, Z_5, Z_6 이다. 단면적 A_1 은 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 번 부재의 단면적이며, A_2 는 10, 11, 12, 13 번

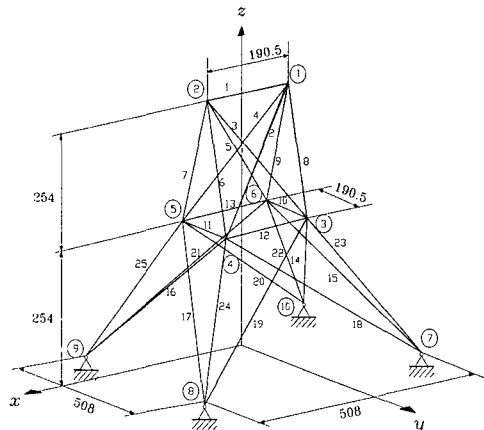


Fig. 4 25-member transmission tower

Table 2 Levels of design variables for Logical Decomposition (25-member transmission tower) – unit mm

	Level 1	Level 2	Level 3
A1	2.5	2.0	1.5
A2	2.0	1.0	0.5
A3	2.5	2.0	1.5
Z3	-140.0	0.0	200.0
Z4	-140.0	0.0	200.0
Z5	-140.0	0.0	200.0
Z6	-140.0	0.0	200.0

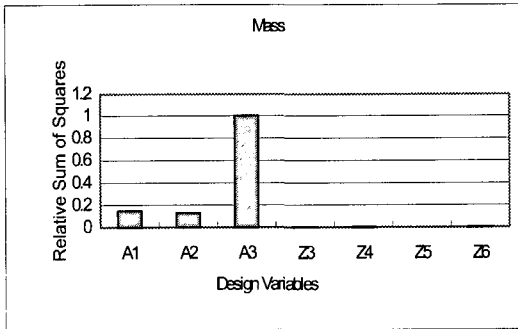


Fig. 5 Relative sum of squares for the mass response of 25-member transmission tower

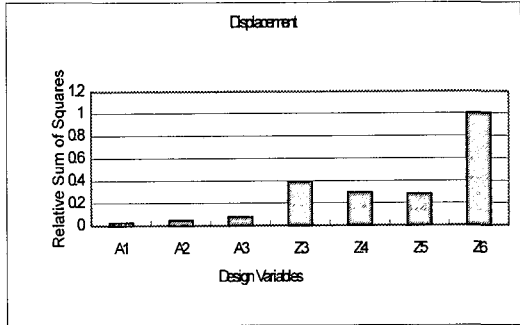


Fig. 6 Relative sum of squares for the displacement response of 25-member transmission tower

부재, 그리고 A3는 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25번 부재의 단면적이다. 좌표변수는 3, 4, 5, 6번 절점의 z 방향 좌표 설계 변수이다.

설계 행렬을 구성하기 위해 민감도 정보인 제곱합을 계산한다. 제곱합의 계산을 위해 실험계획법에서 사용되는 직교 배열표를 이용한다. 사용된 직교 배열표는 3 수준의 $L_{18}^{(9)}$ 이며, 수준별 설계 변수의 수치는 해당되는 설계 변수에 부여된 상한과 하한을 적용한다. 수준별 설계 변수의 수치는 Table 2와 같다.

직교 배열표의 실험을 위해 18번의 유한 요소 해석이 수행된다. 유한 요소 해석을 위해 GENESIS ver. 5.0이 사용된다.⁽⁹⁾ 제곱합의 결과는 Fig. 5, 6과 같다. Fig. 5와 6의 횡축은 설계 변수를 의미하고, 종축은 상대적 제곱합(relative sum of squares)의 크기이다. 상대적 제곱합은 가장 큰 제곱합으로 나머지 제곱합을 정규화(normalization)한

Table 3 Group design variables of 25-member transmission tower

Group Design Variable	Design variable
TDP1	A1, A2, A3
TDP2	Z3, Z4, Z5, Z6

값으로 무차원수이다. 상대적 제곱합의 개념은 각 설계 목적에서의 설계 변수의 영향력의 크기를 동일한 차원(dimension)에서 비교하기 위함이다.

위의 결과에 의하면, 구조물의 질량에 대해서는 단면적 A1, A2, A3가 영향력이 크고, 2번 절점의 x 방향 변위에 대해서는 좌표변수 Z3, Z4, Z5, Z6이 영향력이 큰 설계 변수임을 알 수 있다. 제곱합 계산 결과를 토대로 집단 설계 변수를 선정한다. 그 결과는 Table 3과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \text{min. mass} \\ \text{min. displacement} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & O \\ O & \times \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} TDP1 \\ TDP2 \end{Bmatrix} \quad (41)$$

집단 설계 변수 TDP1 이 변위 설계 목적에 끼치는 영향력은 식 (41)과 같이 정확히 0 이 아니다. 그러나, 변위 설계 목적에 대한 TDP2 의 영향력에 비해 TDP1 의 영향력이 크게 작으므로 무시할 수 있다. 그러므로 이 설계 방정식은 준비연성화 설계이며 반복 수행을 필요로 한다. 식 (41)의 설계 방정식에 의해 질량과 변위에 대한 설계를 수행한다. 질량에 대한 최적화 설계의 정식은 다음과 같다.

find TDP1 (42)

to minimize mass (43)

subject to $\sigma \leq \sigma_{allowable}$ (44)

설계 변수는 집단 설계 변수 TDP1 이고, 목적 함수는 구조물의 질량, 제한 조건은 응력이다. 위의 식에서 목적 함수인 질량은 25 부재 전송탑의 질량을 의미하고, σ 는 응력, $\sigma_{allowable}$ 은 허용 한계 응력(allowable stress)이다. 변위에 대한 설계의 정식은 다음과 같다.

find TDP2 (45)

to minimize displacement (46)

subject to $\sigma \leq \sigma_{allowable}$ (47)

설계 변수는 집단 설계 변수 TDP2 이고, 목적 함수는 구조물의 변위이고, 제한 조건은 응력이다. 위의 식에서 목적 함수인 변위는 2 번 절점의 x 방향 변위이다. 제한 조건은 질량에 대한 설계에서 사용된 것과 동일하다. 준비연성화 설계이므로 3 번의 반복수행이 이루어 졌고, 얻어진 설계해와 결과는 다음과 같다.

$$[A1^*, A2^*, A3^*, Z3^*, Z4^*, Z5^*, Z6^*] = [1.91, 0.67, 2.14, -47.01, 105.27, 70.43, 0.10]$$

Table 4 와 같이 수행된 설계는 반복 수행을 통해 수렴하고 있음을 알 수 있다. 질량에 대한 설계에서는 질량은 19.8% , 변위는 4.6%가 감소하였다. 25 부재 전송탑의 예제의 결과에 의해 공리적

Table 4 Results of the design for 25-member transmission tower

	Mass(kg)	Displacement(cm)
Initial response	2.062E+03	1.822E+00
1 st iteration	1.630E+03	1.738+00
2 nd iteration	1.653E+03	1.737+00
3 rd iteration	1.653E+03	1.737+00
Optimized response	1.653E+03	1.737+00

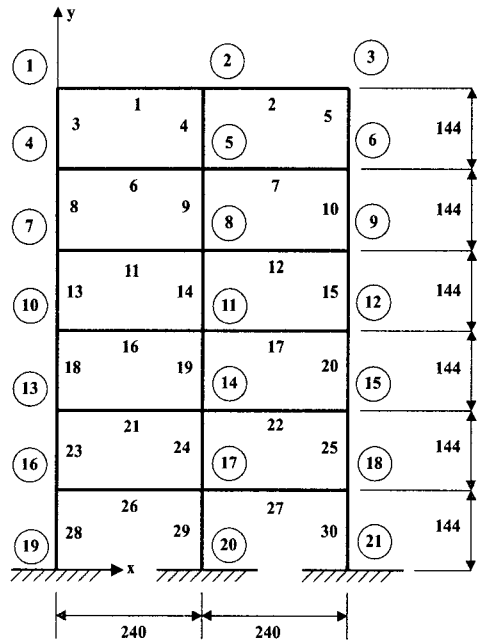


Fig. 7 Two-bay, six-story frame

설계 방식을 도입한 최적화 설계가 가능함을 알 수 있다.

5.2 2칸 6층 프레임(2 bay 6 story frame)

Fig. 7 과 같이 30 개의 보 요소로 구성된 2 칸 6 층 프레임에 대한 최적화 설계이다. 각 부재에는 분포하중이 작용하며 자세한 내용은 참고문헌[3]에 수록되어 있다. 설계 목적은 2 칸 6 층 프레임 구조물의 질량을 줄이는 것과 2 번 절점의 y 방향 변위를 최소화하는 것이다. 선정된 설계 변수는 프레임의 배치(configuration) 설계 변수인 절점의 좌표 Y1, Y4, Y7, Y10, Y13, Y16 이다. 이 설계 변수는 각각 1, 4, 7, 10, 13, 16 번 절점의 y 방향 좌표를

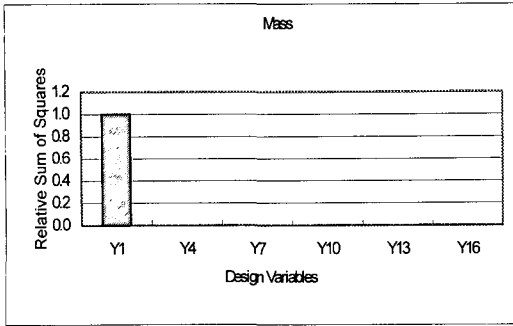


Fig. 8 Relative sum of squares for the mass response of two-bay, six-story frame

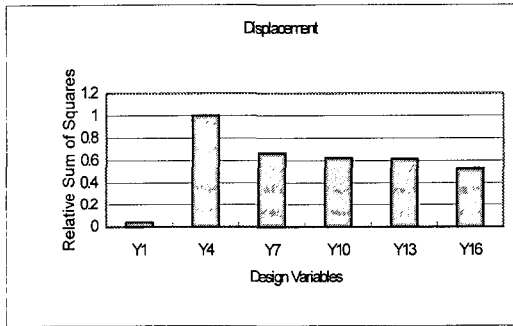


Fig. 9 Relative sum of squares for the displacement response of two-bay, six-story frame

의미한다. 본래 동일한 y 방향 좌표를 갖는 절점들을 서로 연계(linking)를 하여 설계 과정 중에서 층을 구성하는 부재가 수평을 유지하도록 하였다. 즉, 한 층을 구성하는 3 개 절점의 y 방향 좌표는 하나의 설계 변수로써 조절된다.

제공합의 계산을 위해 직교 배열표 실험이 수행된다. 직교 배열표는 설계 변수가 6 개이고 3 수

준이므로 $L_{18}^{[19]}$ 을 이용하였으며 수준별 설계 변수의 수치는 해당되는 설계 변수에 부여된 상한과 하한을 고려하여 설정하였다. 해석을 위한 설계 변수별 수준은 Table 5 와 같다.

직교 배열표의 실험을 위해 18 번의 유한 요소 해석이 수행되었다. 유한 요소 해석을 위해 GENESIS ver. 5.0 이 사용되었다.⁽⁹⁾ 제공합 계산의 결과는 Fig. 8 과 Fig. 9 와 같다.

Fig. 8 과 9 의 횡축은 설계 변수를 의미하고 종축은 상대적 제공합의 크기이다. 위의 결과에 의하면 질량 설계 목적에 대해서는 좌표설계 변수 Y1 의 영향력이 크고, 변위 설계 목적에 대해서는 좌표 설계 변수 Y4, Y7, Y10, Y13, Y16 가 영향력이 크다. 위의 결과에 의하여 집단 설계 변수와 설계 방정식을 구성 한다. Fig. 8 과 9 의 제공합 결과를 기반으로 각 설계 목적에 대하여 설계 변수가 미치는 영향력의 상관 관계의 분석을 통하여 집단 설계 변수와 설계 방정식을 구성한다.

Table 6 Group design variables of two-bay, six-story frame

Group Design Variable	Design variable
SDP1	Y1
SDP2	Y4, Y7, Y10, Y13, Y16

$$\begin{Bmatrix} \min. mass \\ \min. displacement \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & O \\ O & \times \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} SDP1 \\ SDP2 \end{Bmatrix} \quad (48)$$

Table 5 Levels of design variables for Logical Decomposition(two-bay, six story frame) – unit mm

	Level 1	Level 2	Level 3
Y1	2.5	2.0	1.5
Y4	2.0	1.0	0.5
Y7	2.5	2.0	1.5
Y10	-140.0	0.0	200.0
Y13	-140.0	0.0	200.0
Y16	-140.0	0.0	200.0

Table 7 Results of the design of two-bay, six-story frame

	Mass	Displacement
Initial response	7.836E+03	6.205E+00
1 st iteration	7.828E+03	5.850+00
2 nd iteration	7.817E+03	5.800+00
3 rd iteration	7.622E+03	5.760+00
4 th iteration	7.622E+03	5.760+00
Optimized response	7.622E+03	5.760+00

집단 설계 변수 SDP1 이 변위 설계 목적에 끼치는 영향력은 식 (48)과 같이 정확히 0 이 아니다. 약간의 영향력은 존재하지만 SDP2 의 영향력에 비해 크게 작다. 그러므로 이 설계 방정식은 준비연성화 설계이며 반복 수행을 필요로 한다. 식 (48)의 설계 방정식에 의해 질량과 변위에 대한 설계를 수행 한다. 질량에 대한 설계의 정식은 식 (42)-(44)와 동일하며 변위에 대한 설계의 정식은 식 (45)-(47)과 동일하다. 4 번의 반복수행을 통해 얻어진 설계해와 결과는 Table 7 과 같다.

$[Y1^*, Y4^*, Y7^*, Y10^*, Y13^*, Y16^*] = [-50.0, -49.85, -49.85, -50.0, -39.52, 23.52]$

Table 7 과 같이 수행된 설계는 반복 수행을 통해 수렴하고 있음을 알 수 있다. 질량은 2.7 %가 감소하였고, 변위는 7.2 %가 감소하였다. 최적 설계를 수행한 결과 2칸 6층 프레임의 크기가 줄어드는 방향으로 움직이는 결과를 얻었다.

6. 결 론

설계 공리를 이용한 구조물의 최적화 설계를 수행하기 위한 방법론을 개발하였다. 설계 공리가 적용된 최적화 설계를 위해서 문제의 유형이 비연성 설계 또는 준비연성 설계가 되어야 함을 수학적으로 증명하였다. 준비연성 설계가 가지는 한계점을 보완하기 위해 반복수행을 통해 설계값을 찾을 수 있는 방법을 제시하였다. 최적 설계 문제에 설계 공리를 적용하여 복잡하게 얽혀 있는 설계 변수간의 관계를 분석하고 체계적이고 일원화된 방법으로 구조물의 최적 설계를 수행할 수 있는

논리적 분해를 제시하였다. 준비연성 설계 문제를 구성하기 위해, 구간의 민감도 정보를 지닌 제곱합을 이용하였다. 개발된 설계기법을 이용하여 25 부재 전송탑에 적용하여 질량을 19.8%, 변위를 4.6% 감소시킬 수 있었다. 2 칸 6 층 프레임의 예제도 질량과 변위를 각각 2.7%, 7.2% 감소시킬 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국과학재단지정 최적설계신기술센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Suh, Nam. P., 1990, *The Principle of Design*, Oxford University Press, New York
- (2) Albano, Leonard D. and Suh, Nam P., 1992, "Axiomatic Approach to Structural Design," *Research in Engineering Design*, Springer-Verlag, New York, pp. 171~183
- (3) Haug, E. J., Arora, J. S. 1979, *Applied Optimal Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (4) Arora, J. S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- (5) Haftka, R. T. and Zafer G., 1992, *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Academic Publishes.
- (6) 이광원, 1998, "독립 설계 공리를 이용한 구조물의 최적 설계," 한양대학교 기계설계학과 박사학위 논문
- (7) 박성현, 1982, 현대실험계획법, 대영사
- (8) 이찬준, 김영호, 1994, 공업 통계학, 전영사
- (9) GENESIS ver. 5.0 Users Manual, VMA, Colorado Springs.
- (10) Lee, K. W. and Park, G. J., 1997, "Accuracy Test of Sensitivity Analysis in the Semianalytic Method with respect to Configuration Variables," *Computer and Structures*, Vol. 63, No. 6, pp. 1139~1148.
- (11) 도성희, 1997, "설계 공리를 응용한 TV 유리 벌브의 제조를 고려한 설계 방법 개발," 한양대학교 기계설계학과 박사학위 논문
- (12) Suh, Nam. P., 1995, "Design and Operation of Large Systems," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 3, pp.203~213.
- (13) Suh, Nam. P., 1995, "Axiomatic Design of Mechanical System," Special 50th Anniversary Combined Issue of the Journal of Mechanical Design and the Journal of Vibration and Acoustics, *Transaction of the ASME*, Vol. 117, pp. 1~10.
- (14) Suh, Nam. P., 1984, "Developing of the Science Base for the Manufacturing Field Through the Axiomatic Approach," *Journal of Robotics and Computer Integrated Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 397~415.