쿤-터커 조건을 이용한 건물의 에너지성능과 비용 최적화방법

Optimization Method of Building Energy Performance and Construction Cost Using Kuhn-Tucker Conditions

원 종 서*　　　구 재 오**
Won, Jong-Seo　　　Koo, Jae-Oh

Abstract

The purpose of this study is to present rational methods of multi-criteria optimization of the shape of energy saving buildings. The object is to determine the optimum dimension of the shape of a building, based on the following criteria: minimum building costs (including the cost of materials and construction) and yearly heating costs. Mathematical model described heat losses and gains in a building during the heating season. It takes into consideration heat losses through wall, roof, floor and windows. Particular attention was paid to have a more detailed description of heat gains due to solar radiation. On the assumption that shape of building is rectangle in order to solve the problem, the proportions of wall length and building height are determined by using non-linear programing methods(Kuhn-Tucker Conditions). The results constitute information for designers on the optimum proportions of wall lengths, height, and the ratios of window to wall areas for energy saving buildings.

키워드 : 다중기중최적화, 연간 난방비, 수리적 모델, 비선형계획법(쿤-터커 조건)
Keywords : Multi-criteria optimization, yearly heating costs, mathematical model, non-linear programing methods(Kuhn-Tucker Conditions)

1. 서 론

최적화의 목적은 많은 가능성으로부터 최고의 해를 선택하는 것이기 때문에 최고의 의미를 표현하기 위해서는 건물을 평가함으로서 객관적인 건물의 역할을 정의할 필요가 있다.

이것을 측정하는 것을 최적화 기준 또는 목적함수라고 할 수 있으며 기준과 목적함수의 선택은 가장 중요하며, 건물 가치에 결정적인 요인이 된다.

건물을 최적화함에 있어 목적함수의 절대극값을 찾을 수는 없다. 일반적으로 실행 가능한 해 영역을 정의 할 때, 많은 제약들이 현존하게 되며 이러한 제약조건들은 등식과 부등식의 형태를 가지게 된다. 이 제약조건들은 건축구조에 있어서는 하중과 관련된 방정식을, 건축 환경에 있어서는 벽으로부터의 열전달 방정식을, 더 나아가 건물의 형태와 구성요소와 관련된 방정식을 해결할 수 있게 한다.

대부분의 경우 解값은 가능해 영역의 경계선에서 발생한다. 따라서 제약조건은 최적화 문제의 함수식에서 가장 중요하며 제약조건의 생략은 가치 없는 해를 구하는 결과를 초래한다.

최적화 문제의 함수식에 있어서 중요한 요소는 결정변수들의 선택이다. 이 결정변수들은 건물의 형태를 결정짓고, 구조나 벽체를 구성하는 물리적양 뿐만 아니라 건물을 특징짓는 다른 값들로 구성된다. 중요한 문제는 다양한 결정변수에 대한 목적함수의 민감도 문제이다.

최적화문제는 목적함수뿐만 아니라 제약조건과 결정변수들이 정확히 정의될 때만 고려될 수 있으며,『최적해』의 정의는 목적함수, 제약조건, 결정변수들의 정보가 주어지지 않는다면 무의미하게 된다.

주의해야할 것은 최적화의 문제는 건물이 아니라 건물의 수리적 모델에 따르는 물리적 모델이기 때문에 그 결과는 모델이 건물과 건물 안에서 발생하는 현상을 충분히 정확하게 설명되어 질 때만이 유용하게 된다.

따라서 건물에서 고려하는 요구사항 즉, 건물가치기준,은 다양할 수 있으며 절대적인 최적 해를 갖는 건물은 존재할 수 없다.

본 논문에서는 투자가와 건축가 그리고 에너지 엔지니어를 고려하여 2가지 관점으로 즉, 건물의 형태에 따른 시공비용 및 에너지소비량의 관점으로 건축물의 에너지

* 연세대 건축공학과 박사과정
** 강원대 건축학부 정교수, 공학박사

성능 최적화를 위한 수리적 모델 및 방법을 제시하는 것을 주요 목적으로 하였다

2. 건축에서 최적화문제의 특징

문제의 성격에 따라 어떤 특정 기법이 사용되건 해를 도출하기 위한 최적화의 과정은 과학적 사고의 방법이라는 기본 원리에 입각하고 있다. 이는 문제를 객관적으로 평가하고 이에 대한 해를 도출하는 지침이 된다. 그러나 최적화 방법을 적용함에 있어서 하나의 정확한 규칙은 없다. 특히 수리적 기법에 의존하는 '모델의 해'단계를 제외한 다른 단계에서는 고정된 규칙은 없다. 그러나 문제의 해결을 위한 최적화의 일반적 과정은 다음과 같으며, 최적화 문제는 문제의 성격에 따라서 단일기준, 다중기준 등으로 나눌 수 있다.

또한 최적화기법이란 일반적으로 대상의 영역에서 요구되는 사항을 가장 잘 만족시키는 대안을 찾아내는 과정이라고 할 수 있다. 현재까지 다양한 최적화 이론과 기법이 제시되고 있으며 문제해결을 위한 조건에 따라서 각각 장·단점을 가지고 있다.

최적화 기법을 적용하기 위해서는 적용하는 기법이 문제의 형태와 일치하여야 하며, 얻고자 하는 정보의 종류에도 부합되어야 한다. 최적화 기법에는 일반적으로 선형계획법, 비선형계획법, 동적계획법 등이 있으며, 본 연구에서는 이중 비선형계획법을 적용하였다.

2.1 단일기준(single criteria)

어떠한 문제의 최적화에 있어서 한 가지 기준만 적용한다면 최적 값을 찾아내는 문제는 단지 결과의 최고치만 찾아내면 된다. 목적함수는 1차원적 도식으로 가능하므로 최적 값 또한 유일하게 하나뿐이게 된다. 벡터상의 그래프에서 원점에서 멀리 떨어진 점일수록 성능평가의 특성상 최적 값에 해당한다. 건축에서 이러한 문제의 예는 건물 냉난방에 주기에 따른 비용절감의 문제와 같은 경우가 있다.

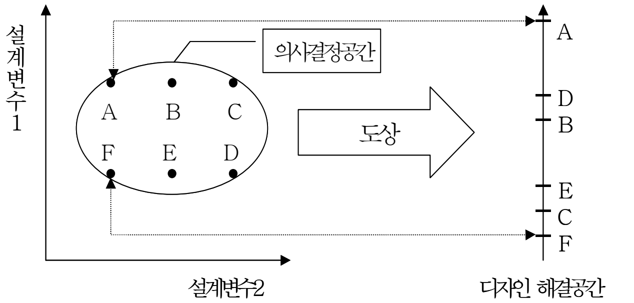

그림 5 단일기준일 경우 최적값의 선정

2.2 다중기준

다중기준의사결정(MCDM : Multi-Criteria Decision Making)이란 여러 상반된 기준(Criteria)들을 고려하여 의사결정을 내리는 것을 의미한다.

다중기준 의사결정(MCDM)은 다목적 의사결정(MODM : Multiple Objective Decision Making)과 다요소의사결정(MADM : Multiple Attribute Decision Making)으로 크게 분류된다.

표 1. 다요소의사결정과 다목적의사결정의 특징

항목 \ 다중기준의사결정	다요소 의사결정 (MADM)	다목적 의사결정 (MODM)
기준	요소	목적
목적	불분명	분명
요소	분명	불분명
제한사항	불변성(Inactive)	가변성(Active)
대안	유한개	무한개
용도	선택/평가(evaluation)	설계(Design)

표1은 다요소의사결정과 다목적 의사결정이 갖는 특징들을 나타내 주고 있다. 다요소의사결정은 유한개의 대안들의 집합으로부터 하나의 대안이나 그와 선호도가 같은 몇 개의 대안을 선택하는 것이고, 다목적 의사결정은 제한조건에 의해 함축적으로 정의된 무한개 대안집합에서 최적대안을 선택하는 것이다. 그러므로 다목적 의사결정이 최적대안을 설계(design)하는 문제인데 반해, 다요소의사결정은 선택상의 문제이다.

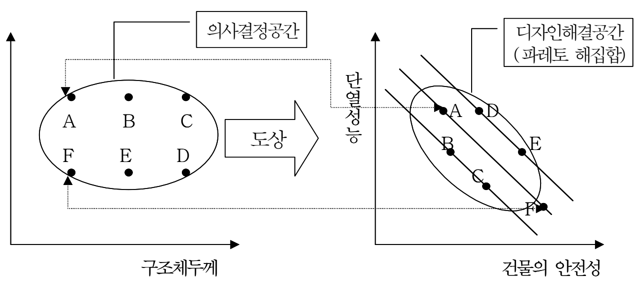

그림 6 의사결정 공간과 2차원 성능기준간의 도상

일반적으로 최적화 연구의 대부분은 함수의 단일, 대역 최적 해를 찾아내는 방법에 대하여 고려한다. 그러나 많은 경우에 찾기 원하는 여러 개의 최적해가 있을 수 있다. 또한, 최적화를 위한 하나이상의 기준이 존재하는 문제들도 있다.

2가지 이상의 기준을 갖는 경우 다중기준(multi-criteria)의 최적화 문제에서 성능을 고려할 경우 성능의 공간은 2차원이 되며 선택 가능한 성능들의 집합은 전체 해결공간을 차지하게 된다.

2.3 비선형계획문제

일반적으로 비선형계획문제(nonlinear programming problem)는, m개의 부등식 제약조건 $g_i(x_1,...., x_n) \le 0$, $i=1,...., m$ 및 l개의 등식제약조건 $h_j(x_1,...., x_n)=0$, $j=1,...., l$을 만족하는 n차원 벡터 $x=(x_1,...., x_n)$ 중에서 목적함수(objective function) $f(x_1,...., x_n)$를 최소로 하는 최적해

(optimal solution)를 구하는, 최적화문제(optimization problem)로 정식화된다. 여기에서 f, g_i, i=1,..., m, h_j, j=1,...,l은 변수 $x=(x_1,\dots, x_n)\in R^n$에 대하여 정의되는 실수치 함수(real-valued function)이다. 또 함수 g_i, i=1,...., m과 h_j, j=1,..., l은 제약함수(constraint functions)라 부르고, 부등식제약조건과 등식제약조건은 간단히 제약조건(constraint)이라 부른다.

여기서는 이러한 비선형계획문제를 간단히

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && f(x) \\ &\text{subject to} && g_i(x)\le 0,\ i=1,\dots, m \\ & && h_i(x)=0,\ \ j=1,\dots, l \end{aligned} \quad \cdots\cdots (1)$$

로 쓰기로 한다.

문제 (1)에서 모든 제약조건을 만족하는 x를 실행 가능해 또는 가능해(feasible solution)라 하고, 실행 가능해 전체의 집합 $X= \{x\in R^n \mid g_i(x)\le 0,\ i=1,\dots, m\ ;\ h_j(x)=0,\ j=1,\dots, l\}$ 을 이 문제의 제약집합(constraint set)이라 한다. 제약집합을 X를 이용하면 비선형계획문제는

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && f(x) \\ &\text{subject to} && x\in X \end{aligned}$$

로 간단히 나타낼 수 있다.[1)]

여기서는 (1)[2)]과 같이 표현되는 문제를 총칭하여 비선형계획문제라 하며, 선형계획문제는 비선형계획문제의 특별한 경우로 본다.

3. 건물의 수리적 모델 자료분석

건물의 형태와 에너지소비 사이에 관련된 정보는 건물형태변수에 따른 에너지 변화로 나타낼 수 있다. 이 형태변수의 선택은 매우 중요하며, 건물의 형태와 에너지소비와 관련된 변수는 3.2절과 같다.

3.1 기본 단위 모델의 정의

본 연구에서 사용된 기본 단위 모델은 평행육면체로서, 평행육면체의 선택은 대부분 시공되는 건물형태의 기본이 되고 평행육면체들의 조합으로 건물을 대표할 수 있기 때문이다.[3)]

1) 김도상 외 5인, 비선형최적화 이론, 민음사, 1998.

2) m=0, l=0일 때, 즉 제약조건이 없는 경우에 문제(1)은 minimize f(x), $x\in R^n$가 되어 제약이 없는 최적화문제(unconstrained optimization problem)라 부르고, $m\neq 0$ 또는 $l\neq 0$인 경우에는 제약이 있는 최적화 문제(constrained optimization problem)라 부른다. 목적함수 f 및 모든 제약함수 g_i, h_j가 x에 관하여 선형함수일 때, 문제(1)은 선형계획문제(linear program)라 부르고, 목적함수와 제약함수 중에 적어도 한 개 이상의 비선형함수가(nonlinear function) 존재할 때 비선형계획문제(nonlinear program)라고 한다. 그렇지만 이러한 구별은 주로 문제의 최적 해를 계산하는 방법을 생각할 때 필요한 것이지 이론적인 고찰을 할 때에는 반드시 양자를 구분해서 볼 필요가 없는 경우가 많다.

3) P. Depecker, C. Menezo, J. Virgone, S. Lepers Design of buidings shape and energetic consumption. Building and Environment. 2001.

따라서 실제 시공될 건물이 존재할 때 에너지소비를 최소화할 수 있는 형태(장단변비 및 층고)가 무엇인지를 알 수 있게 된다.

에너지 소비의 의미는 건물의 실내설정온도를 유지하는데 필요한 에너지로 정의될 수 있다. 실내설정온도는 대개 거주자의 쾌적을 고려하여 18℃로하고 이 건물의 용도를 공동주택으로 가정하여 공조시스템(HVAC system) 사용은 고려하지 않았다. 건물의 향은 남향(동서축)을 기준으로 하였다.

3.2 결정변수와 제약조건

(1) 결정변수(Decision variables)

- 벽길이
- 층수
- 벽, 창, 지붕, 바닥의 열저항
- 창면적비[4)]

(2) 제약조건(Constraints)

결정변수는 다음의 제약조건들을 만족해야만 한다.

- 건물의 체적 $V=l_1l_2h$
- 건물의 평면형태는 직사각형모양
- 열저항(열관류율)과 관련된 제약조건
- 창의 크기[5)] $0.1\le r\le 0.6$(남동측창일 경우)

3.3 최적화 모델의 부분적 기준

그림2와 같은 건물의 형태를 취할 때, 부피 V, 층고 h, 장변 l_1, 단변 l_2라 하고, 건물의 열 손실은 외벽과 환기에 의해 일어나며, 열 취득은 창을 통해 태양복사에너지에 의해 발생한다고 가정한다. 열 손실과 열 취득의 차이는 설치된 난방시설에 의해서 그 차이만큼 에너지가 공급된다. 이때 최소 건물 시공비용과 에너지 요구량은 다음과 같다.

(1) 건물의 시공비용부분 수리적 모델

$$F_1=h\sum_{i=1}^{4} l_i(1-r_i)C_{wall-i}+h\sum_{i=1}^{4} l_i r_i C_{win-i}+\frac{V}{h}(C_{roof}+C_{floor})$$

단, h : 건물높이

l : 벽길이

4) 건설교통부고시 공동주택의 에너지절약 설계기준, 제1장 3조, 1999. 5.
"창면적비"라 함은 지붕과 바닥을 제외한 건축물 전체 외피면적에 대한 창면적의 비를 말하며 창면적비 산정시 창틀은 창면적에 포함하여 계산한다. 다만, 계단실 및 승강기의 공간 등은 계산에서 제외한다.
※ 창면적비 = [창면적 / (외벽면적 + 창면적)] × 100]

5) 건설교통부고시 공동주택의 에너지절약 설계기준, 5조 3.(창의 크기) 가. 남측 또는 남동측의 창은 일사의 적정한 이용과 창의 열손실을 고려하여 적정한 크기로 하고, 창면적비가 60%를 초과하지 않도록 한다.

r : 창면적비
C_{wall} : 벽체 1㎡당 시공비용
C_{win} : 창문 1㎡당 시공비용
C_{roof} : 지붕 1㎡당 시공비용
C_{floor} : 바닥 1㎡당 시공비용

(2) 건물의 에너지소비부분 수리적 모델

건물 에너지 분석도구들은 단순 에너지계산과 상세 에너지 계산으로 나눌 수 있으며, 선택된 방법론이나 분석 프로그램은 계획시 요구사항들을 만족시켜야 한다. 에너지 분석 방법/도구를 선택할 때에는 다음 요인들을 항상 고려하여만 한다.[6)]

- 정확도
- 민감도
- 배우고 사용하는 시간과 비용
- 상세의 수준과 쉬운 이용법
- 필요한 데이터의 유효성
- 산출값의 질
- 프로젝트의 단계

일반적으로 빠르고 단순화한 에너지 분석 방법들은 도일법(Degree-Day method)과 균형점온도(balance point temperature)의 개념을 바탕으로 사용하고 있다.

만약 건물에너지 분석이 시스템의 비교 또는 설계대안들을 비교할 목적으로 사용한다면 단순화한 에너지 분석법을 사용하는 것이 적합하고, 건물 에너지 시스템과 하위 시스템의 상세한 에너지 분석을 원한다면 정밀시뮬레이션 프로그램을 사용하는 것이 효과적이다.[7)]

본 논문의 목적은 전자와 유사하고 수리적인 모델수립을 위해서 계산하기 간편한 도일법을 사용하여 함수식을 수립하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$F_2 = h[24HDD\sum_{i=1}^{4} l_i(1-r_i)\frac{1}{R_{wall}} + \sum_{i=1}^{4} l_i r_i \frac{1}{R_{win-i}} - \sum_{i=1}^{4} l_i r_i p_i \theta_i] + 24HDD\frac{V}{h}(\frac{1}{R_{roof}} + \frac{1}{R_{floor}})$$

단, HDD : 난방도일
θ : 일사량
p : 창의 투과율
V : 건물의 체적
R_{wall} : 벽체의 열저항
R_{win} : 창의 열저항
R_{roof} : 지붕의 열저항
R_{floor} : 바닥의 열저항

4. 다중기준 최적화를 위한 건물의 수리적 모델

건물의 장・단변 (l_1, l_2) 그리고 높이(h), 각각 창을 포함하여 남북측・동서측 그리고 지붕과 바닥의 시공비용과 에너지소비량 (q_1, q_2, q_{rf})은 다음 식과 같이 l_1, l_2, h를 (m_1, m_2, m_{rf}) 공통인수로 묶을 수 있다.

$$F = F_1 + F_2$$

$$F_1 = m_1 l_1 h + m_2 l_2 h + m_{rf} l_1 l_2$$

$$F_2 = q_1 l_1 h + q_2 l_2 h + q_{rf} l_1 l_2$$

여기서,

$$m_1 = (1-r_1)C_{wall1} + r_1 C_{win1} + (1-r_3)C_{wall3} + r_3 C_{win3}$$

$$m_2 = (1-r_2)C_{wall2} + r_2 C_{win2} + (1-r_4)C_{wall4} + r_4 C_{win4}$$

$$m_{rf} = C_{roof} + C_{floor}$$

$$q_1 = 24HDD[(1-r_1)\frac{1}{R_{wall1}} + r_1\frac{1}{R_{win1}} + (1-r_3)\frac{1}{R_{wall3}} + r_3\frac{1}{R_{win3}}] - r_1 p\theta(0) - r_3 p\theta(\pi)$$

$$q_2 = 24HDD[(1-r_2)\frac{1}{R_{wall2}} + r_2\frac{1}{R_{win2}} + (1-r_4)\frac{1}{R_{wall4}} + r_4\frac{1}{R_{win4}}] - r_2 p\theta(\frac{\pi}{2}) - r_4 p\theta(\frac{3\pi}{2})$$

$$q_{rf} = 24HDD(\frac{1}{R_{roof}} + \frac{1}{R_{floor}})$$

단, p : 유리창의 투과율
θ(0) : 남측면 일사량(W/㎡)
θ(π/2) : 동측면 일사량(W/㎡)
θ(3π/2) : 서측면 일사량(W/㎡)
θ(π) : 북측면 일사량(W/㎡)

이 경우 제약조건은 다음과 같다.

등식제약조건 $V = l_1 l_2 h$

부등식제약조건 $l_{min1} \le l_1 \le l_{max1}$ 와 $l_{min2} \le l_2 \le l_{max2}$

목적함수를 라그랑지 승수벡터를 사용하면 다음의 형태로 치환할 수 있다.

6) ASHRAE handbook: fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Ventilating and Air-Conditioning Engineers, 1997.
7) Mohammad Saad Al-Homoud, Computer-aided building energy analysis techniques, Building & Environment, 2001.

$$F* = (m_1 l_1 h + m_2 l_2 h + m_{rf} l_1 l_2 h) + (q_1 l_1 h + q_2 l_2 h + q_{rf} l_1 l_2) + \lambda(l_1 l_2 h - V) + \mu_1(l_{\min 1} - l_1) + \mu_2(l_{\min 2} - l_2) + \mu_3(l_1 - l_{\max 1}) + \mu_4(l_2 - l_{\max 2})$$

여기서, $\lambda, \mu_i (i=1,2,3,4)$: 라그랑지 승수

일반적으로 의사결정자들의 어떠한 비용에 대하여 느끼는 효용(utility)을 기대가치만 가지고 설명한다는 것은 여러 가지 면에서 부족하다. 왜냐하면, 모든 사람들이 현금가치에 대해 선형적인 효용치를 갖는다고 볼 수는 없기 때문이다. 따라서 기대가치만을 가지고 문제 상황을 판단하는 것은 의사결정자의 가치개념을 제대로 반영하지 못한다. 그러므로 개인에 따라 달라지는 주관적인 가치개념과 위험에 대한 태도를 객관적인 척도로 대치시켜 줄 수 있는 방법이 필요하다.[8)]

따라서 구축한 수리적 모델 F*를 이용하여 건물을 평가한다면, 함수 $F = F_1 + F_2$ 을 효용함수 전환하여야만 한다. 함수 F_2는 에너지소비 부분이므로 건물의 사용연수에 따라 에너지소비량과 비용이 증가한다. 또한 사용연수는 이자율과 인플레이션을 고려하여 건물의 사용연수에 대한 수정계수(Y)로 나타낼 수 있다.

그러므로 함수 $F = F_1 + YF_2$ 의 형태로 표현될 수 있으며, 가중계수(weighting factor)를 w라 하면,

$$\sum_{n=1}^{N} w = 100(\%) \quad ^{9)}, \quad Y = \frac{1-w}{w}$$

$F = wF_1 + (1-w)F_2$ 로 표현 될 수 있으며, 함수식 F는 연속함수의 형태이므로 0에서 1사이의 값을 취할 수 있다.

w=1은 건물의 생애주기가 0인 경우, 다시 말하면 초기시공비용만을 산정한 경우가 되고, w=0은 건물의 생애주기가 무한대일 경우가 되므로 초기시공비용이 거의 무시된다.

따라서, F*가 극값을 갖기 위한 필요조건(쿤-터커 조건)은 다음과 같다.

$$F* = w(m_1 l_1 h + m_2 l_2 h + m_{rf} l_1 l_2 h) + (1-w)(q_1 l_1 h + q_2 l_2 h + q_{rf} l_1 l_2) + \lambda(l_1 l_2 h - V) + \mu_1(l_{\min 1} - l_1) + \mu_2(l_{\min 2} - l_2) + \mu_3(l_1 - l_{\max 1}) + \mu_4(l_2 - l_{\max 2})$$

$$\frac{dl_1}{dF*} = w(m_1 h + m_{rf} l_2) + (1-w)(q_1 h + q_{rf} l_2) + \lambda l_2 h - \mu_1 + \mu_3 = 0$$

$$\frac{dl_2}{dF*} = w(m_2 h + m_{rf} l_1) + (1-w)(q_2 h + q_{rf} l_1) + \lambda l_1 h - \mu_2 + \mu_4 = 0$$

$$\frac{dh}{dF*} = w(m_1 l_1 + m_2 l_2) + (1-w)(q_1 l_1 + q_2 l_2) + \lambda l_1 l_2 = 0$$

$$\frac{d\lambda}{dF*} = l_1 l_2 h - V = 0$$

위의 다변수함수식을 풀면, 아래와 같으며 이 3가지 형태의 解중에서 함수식 $F = F_1 + YF_2$ 의 값이 최소가 되는 값이 주어진 제한조건에서의 최적 값(optimum value)[10)]이 된다.

(1) 실행 가능영역 내에서의 해

만일 $l_{\min 1} \le l_1 \le l_{\max 1}$이고 $l_{\min 2} \le l_2 \le l_{\max 2}$ $v_i=0$, i= 1, 2, 3, 4일 때

$$l_1 = \left(\frac{V}{\frac{wm_1 + (1-w)q_1}{wm_2 + (1-w)q_2} \times \frac{wm_{rf} + (1-w)q_{rf}}{wm_2 + (1-w)q_2}} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$$l_2 = l_1 \times \frac{wm_1 + (1-w)q_1}{wm_2 + (1-w)q_2},$$

$$h = l_1 \times \frac{wm_{rf} + (1-w)q_{rf}}{wm_2 + (1-w)q_2}$$

(2) 제약조건상에서의 해 :

$$l_2 = l_{\min 2},\ l_2 = l_{\max 2},$$

$$l_1 = \left(\frac{V}{l_{\min 2} \times \frac{wm_{rf} + (1-w)q_{rf}}{wm_2 + (1-w)q_2}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$l_1 = \left(\frac{V}{l_{\max 2} \times \frac{wm_{rf} + (1-w)q_{rf}}{wm_2 + (1-w)q_2}} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$h = l_1 \times \frac{wm_{rf} + (1-w)q_{rf}}{wm_2 + (1-w)q_2}$$

(3) 제약조건상에서의 해 :

$$l_1 = l_{\min 1},\ l_1 = l_{\max 1},$$

8) 김성희. 意思決定論; 分析 및 應用. 영지문화사. 2000. 1.

9) Yehuda. Kalay. Evaluating and predicting design performance. John Wiley & Sons. 1992.

10) 최종적으로 에너지소비부분 함수는 비용으로 환산하기 위해서는 에너지 단위에 대한 비용을 곱해주어야만 한다. 또한, 여기서 정확한 에너지비용은 난방설비 설치시 보일러의 효율을 고려하여야만 하지만 본 연구에서는 각 세대별 동일한 기기사용시 보일러의 효율은 이산변수로 취급하여 생략하였다.

$$l_2=\left(\frac{V}{l_{\min 1}\times\frac{wm_{rf}+(1-w)q_{rf}}{wm_1+(1-w)q_1}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$l_2=\left(\frac{V}{l_{\max 1}\times\frac{wm_{rf}+(1-w)q_{rf}}{wm_1+(1-w)q_1}}\right)^{\frac{1}{2}},$$

$$h=l_2\times\frac{wm_{rf}+(1-w)q_{rf}}{wm_1+(1-w)q_1}$$

위의 해에서 높이h는 전체 층고의 합과 항상 일치하는 것은 아니다. 따라서 적절한 높이h를 구하기 위해서는 각각의 해를 함수F에 적용시킨 후 解들 중에서 가장 작은 값을 갖는 것을 선택한 후, 건축물의 장·단변 길이를 다시 결정하여 적용되어져야 한다.

5. 다중기준 최적화에 의한 모델평가

본 장에서는 4절에서 얻어진 수리모델을 바탕으로 사례연구를 통해 최적해 도출과정을 보이고 그 방법에 대하여 평가하였다.

표 3 사례건물의 현황

건물 용적		20000㎥
건물 층고		2.6m
건물의 단변길이		13m
건물 위치		서울
서울지방	난방도일	2545.8
	일사량	방위별 일사량 남 측: 185405.77 W/㎡ 북 측: 74393.45 W/㎡ 서 측: 140228.22 W/㎡ 동 측: 130518.26 W/㎡
건물의 내구연한		25년
창면적비		0.1≤ r ≤0.6
난방 연료		도시가스 전력량기준(37.24원/kWh)

(1) 외피의 최적화방법

건물의 외벽은 콘크리트 벽두께 20cm, 단열재는 발포폴리스티렌 판을 사용하였다. 콘크리트 벽의 단위면적당 비용은 약 70,000원(열저항 : 1.4㎡℃/W), 발포폴리스티렌의 열성능을 향상(1㎡℃/W) 시키는데 드는 비용은 약 5,500원[11]이며, 건물 지붕은 플랫지붕으로 플랫지붕과 중공콘크리트를 사용하였으며, 단위 면적당 시공비용은 약 88,000원(열저항 : 1.472 ㎡℃/W), 열성능을 향상(1㎡℃/W) 시키는데 드는 비용은 약 4,300원으로 설정하였다.

건물의 바닥은 중공콘크리트를 사용하였으며, 단위 면적당 시공비용은 약 117,000원(열저항 : 0.610 ㎡℃/W), 열성능을 향상(1㎡℃/W) 시키는데 드는 비용은 약 7,300원으로 설정하였다. 서울지역의 2002년도 난방도일은 2545.8[12]이다. 난방시 사용연료는 도시가스로 하며, 외벽의 내용연한은 25년이라고 가정하였다.

또한, 유리창의 형태는 3중 유리로 단위면적당 비용은 279000원, 열관류율 2.6 W/㎡℃, 차폐계수는 0.82로 설정하였다.

이때 외피의 최적화방법[13]에 의해 최적 저항과 비용을 구하면 다음과 같다.

$R_{wall}=3.22\,m^{2\circ}\ C/W$

$C_{wall}=80010$

$R_{roof}=3.64\,m^{2\circ}\ C/W$

$C_{roof}=97322.4$

$R_{roof}=2.79\,m^{2\circ}\ C/W$

$C_{roof}=132914$

(2) 형태최적화

형태의 최적화에 앞서 결정변수 중의 하나인 창면적비를 경계조건 내에서 정하였다. 남측창의 창면적비는 0.5 그리고 나머지는 0.1로 가정하였다.

$$m_1=(1-r_1)C_{wall1}+r_1C_{win1}+(1-r_3)C_{wall3}+r_3C_{win3}=279414$$

$$m_2=(1-r_2)C_{wall2}+r_2C_{win2}+(1-r_4)C_{wall4}+r_4C_{win4}=199818$$

$$m_{rf}=C_{roof}+C_{floor}=230236.4$$

$$q_1=24HDD[(1-r_1)\frac{1}{R_{wall1}}+r_1\frac{1}{R_{win1}}+(1-r_3)\frac{1}{R_{wall3}}+r_3\frac{1}{R_{win3}}]-r_1p\theta(0)-r_3p\theta(\pi)=39859$$

$$q_2=24HDD[(1-r_2)\frac{1}{R_{wall2}}+r_2\frac{1}{R_{win2}}+(1-r_4)\frac{1}{R_{wall4}}+r_4\frac{1}{R_{win4}}]-r_2p\theta(\frac{\pi}{2})-r_4p\theta(\frac{3\pi}{2})=43742$$

$$q_{rf}=24HDD(\frac{1}{R_{roof}}+\frac{1}{R_{floor}})\fallingdotseq 39142$$

이상을 정리하면, 표4과 같으며, 다른 값들은 건물 수정계수의 가중치w에 의해 결정된다. w=1일 때, 실행가능영역 내에서 건물의 장·단변 길이 및 높이를 구해보면 다음과 같다.

11) 물가정보에서 보간하여 사용

12) 기상청 홈페이지 주간 산업기상정보 또는 부록참조

13) 원종서, 이경희, 비선형계획법을 이용한 건물의 외피최적화방법, 한국생태환경건축학회논문집, 2003. 6.

표 4 사례건물의 향에 따른 시공비용 및 에너지소비량

시공비용	원/㎡	에너지소비량	kWh/㎡
남-북 측면	279,414	남-북 측면	39.859
동-서 측면	199,818	동-서 측면	43.742
지붕-바닥 면	230,236.4	지붕-바닥 면	39.142

$$l_1 = \left(\frac{20000}{\frac{279414}{199818} \times \frac{230236.4}{199818}} \right)^{\frac{1}{3}} = 23.16\ m$$

$$l_2 = 23.16 \times 1.4 = 32.42\,m$$

$$h = 23.16 \times 1.15 = 26.63\,m$$

이다.

또한, w=0일 때, 실행가능영역 내에서 건물의 장·단변 길이 및 높이를 구해보면 다음과 같다.

$$l_1 = 29.06\ m$$

$$l_2 = 29.06 \times 0.911 = 26.47m$$

$$h = 29.06 \times 0.8948 = 26.00m$$

표 5 실행 가능해영역내에서 최적화된 건물의 장·단변길이 및 높이

항목	w=1일때	w=0일때
l1(장변)	23.16 m	29.06 m
l2(단변)	32.42 m	26.47 m
h(높이)	26.63 m	26.00 m

그러나 실제로 공동주택에서는 모듈에 의한 설계가 대부분이므로 실행 가능해 영역 내에서 건물의 시공되는 일은 거의 없기 때문에 제약조건이 필요하다.

일반적으로, 우리나라에서 시공되는 대부분의 공동주택은 단변이 11m-13m 정도로 제한되어 있다.

따라서 w=1, 제약조건으로 단변을 13m 로 가정할 경우 건물의 장·단변길이 및 높이는 다음과 같다.

$$l_2 = 13\ m$$

$$l_1 = \left(\frac{20000}{13 \times 1.15} \right)^{\frac{1}{2}} = 36.58\ m$$

$$h = 36.58 \times 1.15 = 42.07\,m$$

w=0, 제약조건으로 단변을 13m 로 가정할 경우 건물의 장·단변길이 및 높이는 다음과 같다.

$$l_2 = 13\ m$$

$$l_1 = \left(\frac{20000}{13 \times 0.895} \right)^{\frac{1}{2}} = 41.46\ m$$

$$h = 41.46 \times 0.895 = 37.11\,m$$

공동주택의 층고를 2.6 m로 설정하였으므로, 건물의 층수는 w=1일 때 16.18층이 되므로 16층일 때와 17층일 경우 그리고 w=0일 때, 14.27층이 되므로 14층일 때와 15층일 경우로 나누어서 건물의 형태를 정하였으며, 이 때의 건물의 형태는 표6과 같다.

표 6 제약조건 내에서 최적화된 건물의 장·단변길이 및 높이

층고	14층	15층	16층	17층
l_1(장변)	42.27 m	39.45 m	36.98 m	34.81 m
l_2(단변)	13.00 m	13.00 m	13.00 m	13.00 m
h(높이)	36.40 m	39.00 m	41.60 m	44.20 m

표6과 함수 $F = F_1 + F_2$을 이용하여 층수가 몇 층일 때 최소값을 갖는지 탐색하였다.

$$F_1 = m_1 l_1 h + m_2 l_2 h + m_{rf} l_1 l_2$$

$$F_2 = q_1 l_1 h + q_2 l_2 h + q_{rf} l_1 l_2$$

표 7 시공비용 부분 계산과정

함수 / 층수	$F_1 = m_1 l_1 h + m_2 l_2 h + m_{rf} l_1 l_2$				함수값 (단위: 원)
	변수	m1	m2	mrf	
		279414	199818	230236.4	
14층	l1	42.27	-	42.27	650,985,285.8
	l2	-	13.00	13.00	
	h	36.40	36.40	-	
15층	l1	39.45	-	39.45	649,276,873.4
	l2	-	13.00	13.00	
	h	39.00	39.00	-	
16층	l1	36.98	-	36.98	648,586,977.7
	l2	-	13.00	13.00	
	h	41.60	41.60	-	
17층	l1	34.81	-	34.81	648,911,240.1
	l2	-	13.00	13.00	
	h	44.20	44.20	-	

표 8 에너지소비량 부분 계산과정

함수 / 층수	$F_2 = q_1 l_1 h + q_2 l_2 h + q_{rf} l_1 l_2$				함수값 (단위: KWh)
	변수	q1	q2	qrf	
		39,715	43,664	38493	
14층	l1	42.27	-	42.27	102,920.7043
	l2	-	13.00	13.00	
	h	36.40	36.40	-	
15층	l1	39.45	-	39.45	102,982.2296
	l2	-	13.00	13.00	
	h	39.00	39.00	-	
16층	l1	36.98	-	36.98	103.214.9011
	l2	-	13.00	13.00	
	h	41.60	41.60	-	
17층	l1	34.81	-	34.81	103,614.1501
	l2	-	13.00	13.00	
	h	44.20	44.20	-	

이상을 정리하면 표 9과 같으며, 건물의 층수는 15층이

나 16층으로 결정 할 수 있다.

표 9. 제약조건 내에서 함수의 값

층수 / 함수	14층	15층	16층	17층
F_1	650,098,286	649,276,873	648,586,998	648,911,240
F_2	103,536	103,576	103,791	104,174

6. 결 론

최적화기법을 실제 설계단계에 적용할 때에는 그 단계의 문제해결의 성격과 효과를 검토하여 적합한 방법을 선정하여야 한다.

본 논문은 다중기준최적화를 위한 가장 합리적인 방법으로 비선형계획법(NLP : Non-linear programing)을 바탕으로 한 라그랑지 승수(Lagrange Multipliers) 벡터법과 쿤-터커 조건(Kuhn-Tucker conditions)을 이용하여 기초적인 수리적 모델(mathematical model)의 해법을 탐색하였으며, 에너지 소비의 관점에서 최적화된 건물의 장·단변비와 높이를 구하는 방법을 제시하였다.

각 부분별 기본이 되는 다중기준 최적화 수리모델의 범주는 다음과 같다.

(1) 시공비용부분의 수리적 모델은 재료비와 시공비를 포함하였으나, 열원장비의 설치 및 장착 비는 포함하지 않았다.

(2) 본 연구에서는 난방에너지에 대한 개념접근을 기간부하로 접근(에너지소비측면)하였다. 이 후의 연구에서는 최대부하를 동시에 고려하여, 건물의 형태에 따른 열원장비 비용문제도 포함(환기에 의한 열손실 포함)할 것이므로 이 번 연구에서 보여준 기초적인 모델 보다는 구체적인 수리적 모델이 필요하다.

(3) 대역 최적화(global optimization)를 위한 방법론으로는, 건축물은 긴 생애주기를 가진 제품이므로 사용기간에 대한 이자율과 인플레이션에 대한 적당한 이해가 필요하기 때문에 가중계수를 이용하여 효용 함수의 형태로 변환시켰다.

이번 연구에서는 벽체의 선택이나 창문의 선택에 있어서의 의사결정방법은 생략하였으며, 간단한 평면형태에 대한 최적화 문제만을 다루었으나 향후 연구과제로는 복잡한 평면에 대한 수리적 모델구축과 함께 벽체와 창문 선택에 적합한 알고리즘 소개 및 적용을 병행할 예정이며, 전산화를 이루어 건축가나 엔지니어들도 쉽게 실무에 적용 가능한 툴로 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 원종서, 이용준, 이경회, 다중기준최적화기법에 의한 사무소 건물 설계대안의 성능평가, 대한건축학회논문집 계획계, 2000. 10.
2. 김도상외 5인, 비선형최적화 이론, 민음사, 1998.
3. 진경일, 유전자알고리즘을 이용한 건축디자인 최적화 방법에 관한 연구, 연세대학교 박사학위논문, 2001.
4. 안병욱, 건축디자인 프로세스에서 CAAD모델을 이용한 종합 성능 평가법, 연세대학교 박사학위논문, 2000.
5. 김성희, 의사결정론; 분석 및 응용. 영지문화사, 2000. 1.
6. 김대식외 2인, 경제학원론, 박영사, 2002.2.
7. Marks W, Jedrzejuk H, Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization Basic theory, Building and Environment, 2002.
8. Catarina Thormark, A low energy building in a life cycle -its embodied energy, energy need for operation and recycling potentia, Building and Environment, 2002.
9. David A. Coley, Stefan Schukat, Low-energy design : combining computer-based optimization and human judgement, Building and Environment 2002.
10. M.M. Gouda, S. Danaher, C.P. Underwood, Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization. Building and Environment. 2002.
11. Antony D. Radford, John S. Gero, Design by optimization in Architecture, Building and Construction, VNR Company. 1988.
12. Whittle, Peter, Optimization under constraints, John Wiley & Sons. 1971.
13. Donald M. Simmons, Nonlinear programming for operations research, Prentice-Hall. 1975.
14. Yehuda E. Kalay, Evaluating and predicting design performance, John Wiley & Sons. 1992.
15. P. Depecker, C. Menezo, J. Virgone, S. Lepers, Design of buidings shape and energetic consumption, Building and Environment, 2001.
16. ASHRAE handbook: Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Ventilating and Air-Conditioning Engineers, 1997.
17. Bazaraa, Sherali, Shetty, Nonlinear programming : Theory and Algorithms. John Wiley & Sons, 1993.
18. Gordon Mills, Optimisation in economic analysis, GEORGE ALLEN & UNWIN, 1984.
1.19. Mohammad Saad Al-Homoud, Computer-aided building energy analysis techniques, Building and Environment, 2001.