

## CFD 연성해석과 유전자 알고리즘을 이용한 실내 열환경 최적설계에 관한 연구

김 태연<sup>†</sup>, 이 윤규\*

연세대학교 건축공학과, \*한국건설기술연구원

### Optimal Design for Indoor Thermal Environment based on CFD Simulation and Genetic Algorithms

Taeyeon Kim<sup>†</sup>, Yun-Gyu Lee\*

*Department of Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*

*\*Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi 411-712, Korea*

(Received August 6, 2003; revision received November 13, 2003)

**ABSTRACT:** The optimal design method of indoor thermal environment using CFD coupled simulation and genetic algorithms (GA) is developed in this study. CFD could analyze the thermal environment considering the distribution of temperature, velocity, etc. in a room. Therefore, It would be appropriate to use CFD for the optimal design method considering their distribution. In this paper, the optimal design means the most appropriate boundary conditions of the room among the conditions where the design target of indoor thermal environment is achieved. Two step optimal indoor thermal environment design method is proposed. It includes the GA for searching the optimal indoor thermal environment design. To examine the performance of this method, the optimal design of hybrid ventilation system, which uses the natural cross ventilation and the radiation-cooling panel is conducted. The optimal design which satisfies the design target (thermal comfort, minimum cooling load, minimum vertical temperature difference) is found using two step optimal design method.

**Key words:** Optimal HVAC design method(최적공조설계방법), Indoor thermal environment(실내 열환경), Genetic algorithms(유전적 알고리즘), CFD(전산유체역학)

#### 기호설명

- D(i) : 설계목표 i에 대한 평가함수
- G(i) : 설계목표 i에 대한 가중함수
- N(i) : 무차원화를 위한 기준량
- O<sub>total</sub> : 최적 공조설계의 평가치

Q<sub>panel</sub> : 냉방패널에 의해 제거되는 냉방부하

#### 1. 서 론

본 논문은 CFD(Computational Fluid Dynamics : 전산유체역학) 연성해석을 이용한 실내 열환경 최적설계방법의 개발을 목적으로 하고 있다. CFD를 이용한 연성해석 방법(예를 들면, 대류·복사 연성해석)은 실내의 불균일한 물리환경을 고려한 상세한 열환경 해석이 가능하여 실내 열

\* Corresponding author

Tel.: +82-2-2123-5783; fax: +82-2-365-4668  
E-mail address: tkim@yonsei.ac.kr

환경 해석 및 설계된 공조시스템의 성능 평가 등에 널리 사용되고 있다.<sup>(1)</sup> 최적 실내 열환경 설계란 실내의 불균일한 온도, 기류분포를 유용하게 이용하여 쾌적한 실내 환경 조성과 에너지 절약 등 모든 면에서 효과적으로 운영할 수 있는 경계 조건(공조시스템, 취출구, 흡입구의 위치, 풍량, 취출온도 등)을 찾아내는 행위라고 볼 수 있다. 따라서, 실내 열환경 최적설계방법에 이러한 분포성상 등을 해석할 수 있는 CFD 연성해석방법을 이용하는 것이 유리하다고 할 수 있다.

일반적으로 실내 열환경 최적설계방법은 (1) 설계자의 의사결정방법을 미리 결정하고 이에 따라서 적용 가능한 설계조건을 하나씩 검토해 나가는 방법(예를 들면, expert system),<sup>(2)</sup> (2) 모든 조건이 조합된 설계조건 중에서 가장 합리적인 것을 최적탐사방법(예를 들면, 유전적 알고리즘)에 의해 검색해 내는 방법 등으로 나누어 볼 수 있다.<sup>(3)</sup>

설계자의 의사결정을 이용한 최적설계방법은 설계진행 프로세스를 각 단계별로 분류하고, 이에 따라 실내 열환경의 설계, 해석, 평가 및 설계 수정의 피드백 과정을 되풀이하는 것으로 설계된 열환경이 일정한 조건을 만족하게 되면 이것을 최적 열환경 설계라고 판단하고 해석을 종료하게 된다. 이때 실내 열환경은 CFD 연성해석에 의해 해석하게 되는데, 이것은 결과적으로 실내 환경을 형성하는 물리적 분포성상을 이용한 최적 열환경 설계라고 말할 수 있다. 그러나, CFD 연성해석은 에너지 해석에 많이 사용되고 있는 동적 열부하 계산과 달리 그 자체가 많은 계산부하를 필요로 한다. 따라서 수많은 반복 해석을 해야 하는 의사결정방법에 이용할 경우, 결과적으로 매우 큰 계산부하를 필요로 하므로 복잡한 해석보다는 간단한 해석에만 이용할 수 있다는 단점이 있다. 또한 이러한 최적설계방법에 의해 해석된 설계는 해석의 출발점(초기치)에 따라 달라지는 경우도 종종 발생한다.

본 연구에서는 의사결정을 이용한 최적설계방법의 문제점을 해결하고 온도, 기류 등의 분포성상을 고려한 최적설계를 위하여 CFD 연성해석과 유전적 알고리즘(Genetic Algorithms, 이후 GA)을 이용한 2단계형 최적설계방법을 제안하고 그 유용성을 검토하였다. GA는 건축 이외 분야의 최적설계에 자주 등장하는 최적탐사방법으로 건축 분야에서는 최적덕트배관 설계, 최적공정관리, 최적건축재료 산정 등에 이용된 사례가 있다.<sup>(3-5)</sup>

## 2. 실내 열환경 설계와 유전적 알고리즘

### 2.1 유전적 알고리즘의 개요

유전적 알고리즘(GA)은 생물의 유전원리에 차안하여 고안된 최적탐사기법의 하나로 생물체가 교배와 돌연변이를 반복하여 보다 환경에 적응된 개체로 진화하는 과정을 공학적으로 응용한 것이다.

### 2.2 유전자 알고리즘의 유전자형, 표현형

생물체는 자신이 가지고 있는 유전자의 형태에 따라 그 특징이 결정된다. GA에서 취급하는 정보는 생물체와 마찬가지로 유전자형(Genotype, 생물체의 유전자)과 표현형(Phenotype, 유전자에 의한 생물체의 특징)의 2중구조로 되어 있다. 유전자형은 최적탐사문제에 있어서 가장 기초적인 규칙의 집합으로 유전행위자(genetic operator)에 의해 조작된다. 표현형은 유전자형의 특징을 나타낸다. 이 특징에 의해 주어진 문제에 대한 적합도, 즉 최적화의 정도가 결정된다. 생물체와 GA의 비교를 Table 1에 나타내었다.

### 2.3 유전자 알고리즘의 유전자 조작

생물체에서의 진화와 마찬가지로 GA에서는 유

Table 1 Organism and genetic algorithms

	Organism	Genetic algorithms
Genotype	TT, Tt, tt, ... (T : dominance, t : recessiveness)	000, 001, 010, ...
Phenotype	Characteristics according to genes Human race, type of flower, ...	Conditions according to genes Type of HVAC system, ...
Fitness	Ability of adaptation, ...	Efficiency of HVAC system, ...
Gene	T, t, ...	0, 1, ...

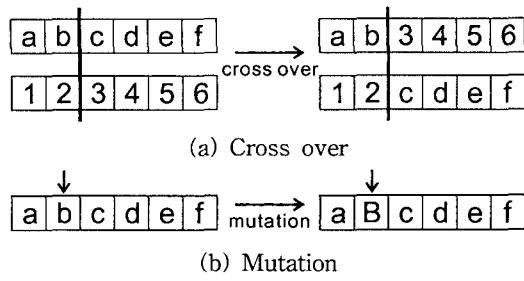


Fig. 1 Examples of GA operators.

전자형에 대하여 Fig. 1과 같은 유전자 조작이 적용되어 다음 세대의 유전자형을 생성한다. 가장 대표적인 유전자 조작에는 교배(cross over)와 돌연변이(mutation)가 있다. 유전자 조작의 적용빈도, 적용방법은 일반적으로 미리 결정된 일정한 확률에 의해 결정된다.

#### 2.4 GA의 순서

GA의 순서는 Fig. 2와 같다. 유전자형의 집합  $M(n)$ 을 어떤 세대  $n$ 의 개체군이라고 하면 각 개체는 유전자에 따른 특징에 의하여 주어진 문제에 대한 적합도가 결정된다. 일반적으로 GA의 유전자 조작은 적합도가 높은 유전자형에 적용된다. 그 결과, 새롭게 생성된 유전자형은 적합도가 낮은 유전자형과 치환된다. 이러한 조작에 의해 새로운 세대  $n+1$ 의 집합  $M(n+1)$ 이 생성되며, 이 과정을 필요한 횟수만큼 반복한다.

#### 2.5 유전자형의 선택

적합도에 의해 조작될 유전자형을 선택하는 방법은 GA의 탐사효율에 밀접한 관계가 있는 매우 중요한 것이다. 많이 사용되는 방법으로는 룰렛방법(Roulette wheel selection), 순위선택방법(Rank-

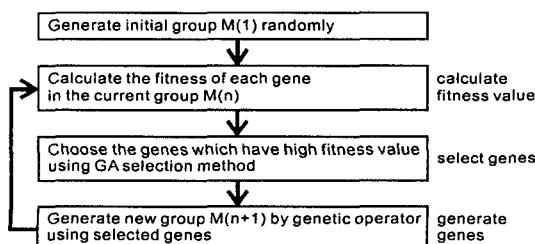


Fig. 2 Flow chart of GA.

based selection), 토너먼트방식(Tournament selection) 등이 있다.

#### 2.6 최적 열환경 설계를 위한 GA의 적용

복사패널과 자연환기를 병용한 하이브리드 공조시스템의 최적공조설계를 위한 GA의 유전형과 표현형의 사례를 Fig. 3에 나타내었다. 이 시스템의 유전형은 총 6개의 배열로 구성되어 있으며 각각의 유전자는 이산(離散)화된 값을 가진다. 각각의 유전자는 실의 형상, 복사패널의 위치 등의 정보를 가지고 있다. 이 유전자 배열이 공조설계 조건을 나타낸다. 이 설계조건은 교배, 돌연변이 등의 유전자 조작에 의해 변화한다. Fig. 4에 유전자형의 교배에 의한 설계조건의 변화를 나타내었다.

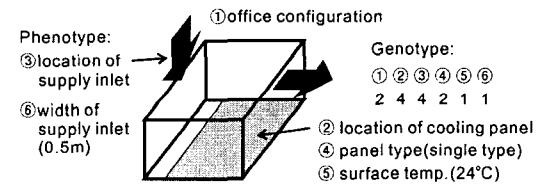


Fig. 3 Phenotype and genotype for optimal design of HVAC system.

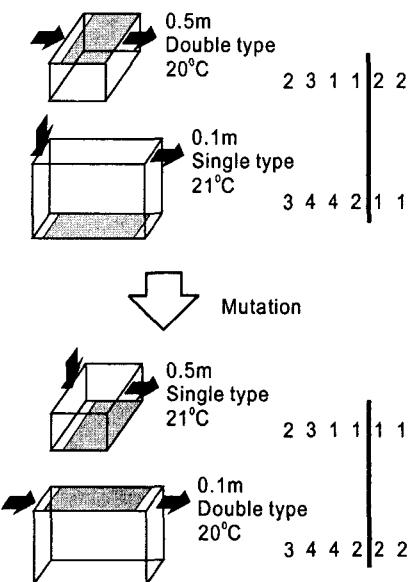


Fig. 4 Changing design parameters by GA operator.

### 3. 유전적 알고리즘을 이용한 2단계형 최적 열환경 설계방법

2단계형 최적설계방법은 Fig. 5와 같이 총 2단계의 탐사로 구성된다. 이 해석방법은 무수한 설계대안 중에서 비교적 의미가 있는 설계대안만을 선택하고, 이것을 대상으로 보다 상세한 해석을 하여 최적설계를 탐색해 나가는 것으로 폭넓은 검토가 가능하고 많은 해석시간이 필요한 CFD 연성해석의 단점을 보완하려는 의도에서 개발되었다. 각 단계에서의 상세한 해석방법은 다음과 같다.

#### 3.1 제1단계 탐사: 유전적 알고리즘과 간이 실내 열환경 해석방법에 의한 최적설계조건 탐사

제1단계의 최적설계조건은 GA에 의해 탐사된다. 설계조건에 의해 형성되는 실내 열환경 성상의 해석은 비교적 계산부하가 적은 간이 실내 열환경 해석방법을 사용한다. 본 연구에서는 실내 온도, 습도분포를 가정한 복사, 전도의 연성해석 방법을 사용하였다. 실내 온도는 내부발열, 공조 시스템에 의해 투입되는 열량, 환기, 벽면을 통해 출입되는 관류열량 등에 의한 열평형식에 의해 결정된다. 습도도 같은 방법으로 산출된다. 따라서 사무소와 같이 증고가 낮아 상하온도차가 거의 없는 공간의 경우, 실내 온도, 습도는 완전혼합온도 및 습도와 근사한 값을 가지게 된다. 단, 비교적 적은 계산부하로 해석이 가능한 관류열량과 이로 인해 형성되는 벽면온도에 의한 복사열의 이동성상은 상세하게 해석하였다. 복사해석의 경

우, 형태계수는 몬테카르로법(Monte Carlo method)<sup>(6)</sup>을, 각 벽면 사이의 복사열 다중반사를 고려한 복사전열해석은 게파르트 흡수계수법(Gebhart's absorption factor method)<sup>(7)</sup>을 이용하였다. 이 단계에서는 해석 전에 미리 정해 놓은 기준을 만족하는 복수의 최적설계 후보가 선택된다.

#### 3.2 제2단계 탐사: CFD 연성해석에 의한 설계 조건의 탐사

제2단계 탐사에서는 제1단계 탐사에서 선출된 최적설계 후보에 대해서만 CFD 연성해석방법을 이용하여 실내 열환경 성상을 해석한다.<sup>(1)</sup> 최적설계 후보의 수에 따라서 차이는 있지만 설계자의 의사결정을 이용한 CFD 연성해석의 최적설계방법과 비교해 계산부하가 매우 적다. 이 단계에서 최적설계의 정도를 나타내는 평가치가 가장 높은 것을 최적설계로 판단한다.

#### 3.3 실내 열환경의 정량화에 따른 최적설계의 평가

실내 열환경 성상의 정량화 방법은 공간의 사용목적, 공간을 사용하는 사람, 설계자의 개성 등에 따라 다양할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 최적설계에 일반적으로 많이 사용되는 방법을 사용하였다. 복수의 실내 열환경 평가요소에 대하여 다음의 식과 같이 종합적으로 평가한다.

$$O_{\text{total}} = \sum_i \left( G(i) \times \frac{D(i)}{N(i)} \right) \quad (1)$$

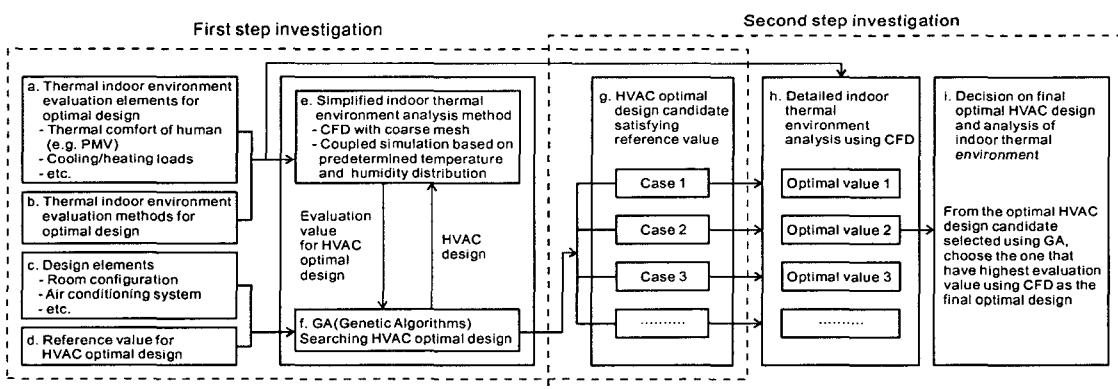


Fig. 5 Optimal indoor thermal environment design system.

여기서,  $O_{total}$  : 최적설계의 평가치

$G(i)$  : 설계목표  $i$ 에 대한 가중함수

$D(i)$  : 설계목표  $i$ 에 대한 평가함수

$N(i)$  : 무차원화를 위한 기준량

최적설계의 평가는 식(1)과 같이 가중함수, 평가함수 등에 의해 이루어진다. 가중함수는 설계목표에 대한 중요도를 나타내기 위한 함수이다. 평가함수는 해석된 물리량을 정량화시키는 함수이며 차원이 다른 물리량을 동일한 스케일로 평가하기 위하여 기준량으로 무차원화하고 있다.

따라서, 가중함수의 종류, 설계목표에 대한 평가방법 등에 의해 얻어지는 최적설계가 달라질 수 있다. 이러한 함수는 수행하는 최적설계의 목적, 용도 등에 의해 결정되는 것이 타당하다고 할 수 있으며, 최적설계의 평가방법에 관하여 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 3.4 2단계형 최적 실내 열환경 설계방법의 해석 순서

2단계형 최적 실내 열환경 설계방법의 해석순서는 Fig. 5에서 보는 바와 같으며, 상세한 해석순서는 다음과 같다.

(1) 최적설계를 위한 실내 열환경의 평가요소와 그 평가방법(각종 함수)을 결정한다. 또한 제1단계 탐사에서 최적설계 후보를 선정하기 위한 기준치를 확정한다(Fig. 5의 a~d). 이 기준치는 제2단계 탐사에서의 최적설계 후보의 수(또는 계산부하)에 영향을 미치기 때문에 경우에 따라서는 미리 그 값을 결정할 수 없는 경우도 생긴다. 이러한 경우에는 최적설계평가치의 기준이 아닌 최적설계 후보의 수(예를 들면 탐사된 설계의 상위 10위, 상위 5% 등)를 결정한다.

(2) GA에 의해 최적설계조건을 탐사한다. 이 탐사단계에서는 실내 열환경의 평가값이 최적설계 후보의 기준치 이상이 되는 설계조건을 선택한다. 실내 열환경 해석은 실내 온도, 습도 분포를 가정한 복사, 전도의 연성해석방법을 이용한다(Fig. 5의 e~g, 제1탐사). 정량화에 따른 평가치가 미리 설정한 값을 만족하는 설계 후보는 제2탐사에서 상세하게 검토된다.

(3) 제1탐사에서 GA에 의하여 최적설계 후보로 선택된 설계조건의 열환경 성상을 CFD 연성해석기법으로 해석한다. 이 단계에서의 열환경 정

량화 평가방법은 제1단계와 같다. CFD 연성해석에 의하여 온도, 습도의 실내 분포가 상세하게 해석되기 때문에 제1단계의 탐사와 다른 정량화 평가치를 얻을 수도 있다.

(4) CFD 연성해석에 의해 해석된 설계조건 중, 정량화 평가치가 가장 높은 것을 최적설계라고 정의한다(Fig. 5의 i).

### 4. 최적 실내 열환경 설계탐사의 응용사례: 중간기의 복사패널을 이용한 자연환기 하이브리드 시스템의 최적설계

제안된 최적설계방법의 유효성을 검토하기 위하여 복사패널<sup>(8)</sup>을 이용한 자연환기 하이브리드 공조시스템<sup>(9)</sup>에 관한 해석조건, 형상 등을 간단히 모델화하여 최적설계를 실시하였다. 해석은 중간기의 냉방만을 대상으로 하였다.

일반적으로 실내 열환경의 성능평가는 모든 계절조건을 대상으로 이루어져야 한다. 동적 열부하계산방법과 같이 표준 기상데이터를 이용하여 열환경을 해석하는 경우는 문제가 없으나 실내 분포성상을 이용하기 위해 CFD 해석방법을 이용한 본 연구에서는 동적 열부하 계산방법에서 사용하는 비정상 해석이 현실적으로 매우 어려우므로 논의대상에서 제외하였다. 이러한 경우, 각각의 계절에 따른 실내 열환경 해석을 하고 이에 대한 가중함수를 부여하여 설계조건을 평가하게 되면 결과적으로 모든 계절조건을 고려한 최적설계가 이루어지게 된다. 그러나 각각의 계절에 따른 합리적인 가중함수가 아직 많은 논란이 되고 있으며, 이러한 문제를 보완하기 위하여 동적 열부하 계산방법을 보조적으로 사용하는 방법 등이 거론되고 있다. 따라서 본 논문에서는 계절조건을 중간기에만 한정하여 문제의 단순화를 모색하였다.<sup>(10)</sup>

#### 4.1 해석조건

복사패널을 이용한 자연환기 하이브리드 공조시스템을 도입한 사무소 공간을 해석대상으로 설정하였다. 사무소 공간은 Fig. 6에 나타나 있는 3가지 형상으로 하였다. 해석공간 내에는 Fanger에 의해 제안된 인체 생리모델에 의해 열과 습기를 발생하는 인체모델 4개가 설치되어 있다. 자연환기 유입구와 배기구의 위치는 Fig. 7과 같다. 복

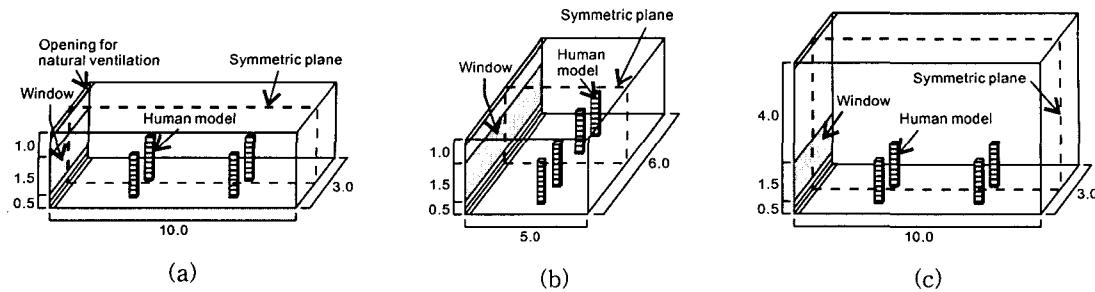


Fig. 6 Office configurations for optimal design (3 patterns).

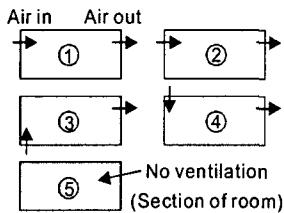


Fig. 7 Locations of natural ventilation opening (5 patterns).

사파널은 Fig. 8에 나타나 있는 것과 같이 실의 중앙, 천정, 바닥면에 설치되었다. 실 중앙에 설치할 경우, 패널의 높이는 1.5m, 3.0m로 하였다. 실의 길이가 5m인 경우(Fig. 6(a)), 복사패널은 Fig. 8(b)에서와 같이 설치하였다.

#### 4.2 공조조건에 따른 실내 열환경의 평가방법

최적설계를 위한 실내 열환경의 평가방법은 설

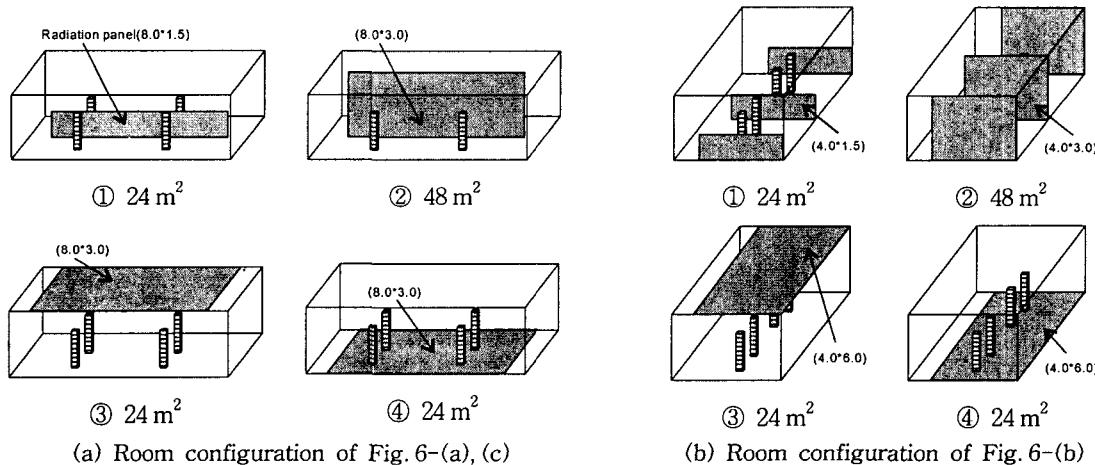


Fig. 8 Radiation panel installations (4 patterns).

Table 2 Functions for indoor thermal environment evaluation

Function	G(i) (Weight function)	D(i) (Evaluation function)	N(i) (Normalization function)
PMV of Human model (4 bodies in total)	When $ PMV  < 1 : 0.125$ When $ PMV  > 1 : 0.0$	$1 -  PMV $	1.0
Cooling load	0.3	$Q_{\text{total}} - Q_{\text{panel}}$	$Q_{\text{total}}$
Vertical temperature difference	When $\Delta T < 2.0 : 0.2$ When $\Delta T > 2.0 : 0.0$	2.0 - vertical temperature difference	2.0

$Q_{\text{total}}$  : Cooling load of room,  $Q_{\text{panel}}$  : Cooling load removed by radiation panel

Table 3 Conditions of cooling load (units: W)

Solar radiation <sup>*1</sup>	Lighting <sup>*2</sup>	OA equipment <sup>*2</sup>	Human <sup>*3</sup>	Total
500	600	1200	1008	3308

\*1 Provided uniformly on the window surface, \*2 Generated uniformly in the space, \*3 The value including sensible and latent heat. A cooling load for 4 out of 8 people ( $=0.25 \text{ person/m}^2$ ) is generated in the human model; the rest is generated uniformly in the space.

계자, 설계대상, 설계목표 등에 따라 다양하게 이루어질 수 있다. 본 해석에서는 인체의 열쾌적을 최우선 목표로 하여 다음과 같이 평가방법을 설정하였다. 실내 열환경은 (1) 인체 모델의 PMV (Predicted Mean Vote, 0에 가까울수록 최적),<sup>(11)</sup> (2) 복사패널의 투입열량(적을수록 최적), (3) 상하온도차(적을수록 최적)에 의해 평가된다. 본 해석에서는 3가지 요소를 식(1)의 정량화 평가함수에 의해 평가한다. 단, GA에 의한 탐사(제1탐사)에 있어서 실내 공기온도를 일정하다고 가정하고, 상하온도차는 없는 것으로 하였다. 정량화 평가함수의 각 식은 Table 2와 같다. 각 함수는 가장 높은 평가값이 1.0이 되도록 정의되어 있다.

실내 열환경의 평가방법은 최적설계의 가장 중요한 과제 중의 하나로 이후에도 지속적인 연구가 진행될 예정이다.

#### 4.3 실내 열환경 설계요소

본 해석에서의 실내 열환경 설계요소는 다음과 같다. 각 설계요소의 조합은 총 3120개가 된다.

- (1) 실 형상(Fig. 6의 (b), 3종류)
- (2) 자연환기 유입구의 위치(Fig. 7, 5종류) : 외벽의 상하, 천정, 바닥에 설치한 경우 및 자연환기를 사용하지 않은 경우
- (3) 패널의 설치위치(Fig. 8, 4종류) : 천정(설치 면적  $24 \text{ m}^2$ ), 바닥( $24 \text{ m}^2$ ), 실의 중앙( $24 \text{ m}^2$  [높이 1.5 m],  $48 \text{ m}^2$  [높이 3.0 m])
- (4) 복사패널의 형상(2종류) : 얇은 판을 겹쳐 만든 다판형 및 박스형태의 단판형. CFD 연성해석에서는 형태를 박스형으로 하고 대류 열전달률만을 변화시키는 것으로 간단히 모델화하였다. 다판형의 경우, 단판형의 표면적을 고려하여 단판형의 대류 열전달률의 3배가 되는 것으로 가정하였다. 단, 모델화에 의한 형태계수의 변화는 없는 것으로 가정하였다.<sup>(12)</sup> 또한 복사패널의 표면온도를 노점온도 이하로 제어할 수 있는 결로 허용형

복사패널로 설정하였다.<sup>(12)</sup>

(5) 복사패널의 표면온도(13종류) :  $9\sim21^\circ\text{C}$ 로  $1^\circ\text{C}$  단위로 변화

(6) 자연환기 유입구의 폭(2종류) : 0.5 m, 0.1 m. 자연환기 도입량은  $900 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 일정

#### 4.4 계산조건

본 논문에서 제안한 2단계형 최적설계방법을 이용하여 해석을 수행하였다. 자연환기 도입량은 중간기를 대상으로 하여  $900 \text{ m}^3/\text{h}$ (온도  $16^\circ\text{C}$ , 습도 60%)로 고정하였다. 자연환기구의 폭에 따른 풍량의 변화는 없이 유입풍속만이 변화하는 것으로 하였다. 자세한 실내 공조부하조건은 Table 3과 같다. 발열면, 유리면 이외의 면은 단열면으로 가정하였다. 유리를 통한 관류열도 고려하였다(열전달률은  $3.2 \text{ W/m}^2\text{C}$ ). 각 면의 대류 열전달률의 경우, 천정면은 6, 바닥면은 3, 측면은 4, 인체모델은  $4(\text{W/m}^2\text{C})$ 로 고정하였다.<sup>(12)</sup> 제1단계의 GA에 의한 탐사의 경우, 설계요소에 대응하는 6 bit의 유전자를 사용하였다. 또한 10개의 유전자를

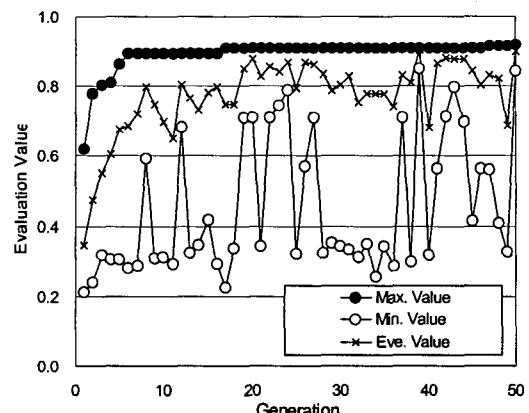
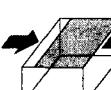
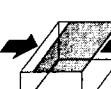
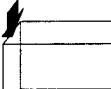


Fig. 9 Process of optimal design investigation using GA.

Table 4 Optimal design candidates and their optimal values according to the first investigation (GA) (top 11 figures)

 (1) No. 1 : 0.919	 (2) No. 2 : 0.919	 (3) No. 3 : 0.916
 (4) No. 4 : 0.915	 (5) No. 5 : 0.911	 (6) No. 6 : 0.911
 (7) No. 7 : 0.911	 (8) No. 8 : 0.909	 (9) No. 9 : 0.909
 (10) No. 10 : 0.906	 (11) No. 11 : 0.906	The figures in the table indicate numerical evaluation values ( $E_{total}$ ) for the indoor thermal environment.

탐사집단으로 하여 50세대까지 탐사를 수행하였다. 유전자 조작을 위한 교배율 및 돌연변이 발생률은 각각 0.8, 0.2로 하였다. 유전자는 일정교배에 의해 조작되었다. 교배를 위한 유전자 선택은 엘리트 전략에 의해 수행되었다. 제2단계 탐사에서는 3차원의 표준  $k-\epsilon$  모델을 이용한 대류·복사·전도의 연성해석을 이용하였다. PMV 산출을 위한 인체의 대사량은 1.2 met, 착의량은 1.0 clo로 설정하였다.

## 5. 해석결과

### 5.1 GA를 이용한 제1단계 탐사

GA에 의한 최적설계의 탐사과정을 Fig. 9에 나타내었다. 6회의 탐사(세대)로 유전자 집단 평가치의 최대값은 0.9 이상으로 높은 수치를 나타내었다(최적평가치의 최대는 1.0). 유전자 집단의 평균치는 약 20회의 탐사로 0.8 전후의 높은 값을 나타내었다. GA에 의해 선택되는 설계조건에 따른 열환경 평가치의 상위 11위(전 설계조건의 약 0.4%)까지를 Table 4에 나타내었다. 탐사결과 복사패널을 바닥에 설치하고 표면온도를 21°C로 한

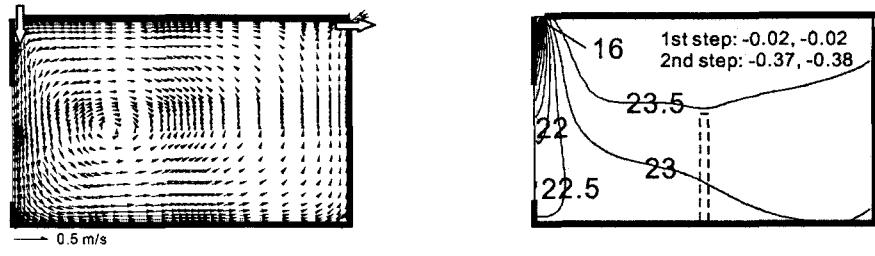
경우가 가장 높은 평가치를 나타내었다. 이 경우, 인체모델의 PMV는 0.0이고 실내 냉방부하의 약 24%(790 W)를 복사패널이 부담하고 있다.

### 5.2 CFD 연성해석을 이용한 제2단계의 최적 설계 탐사

CFD 연성해석을 이용한 제2단계 최적설계 탐

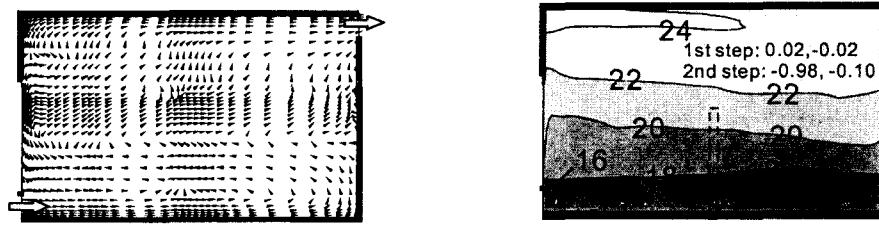
Table 5 Optimal evaluation values in the first and second investigations

Order	Evaluation value using GA	Evaluation value using CFD
1	0.919	0.676
2	0.919	0.650
3	0.916	0.640
4	0.915	0.659
5	0.911	0.631
6	0.911	0.203
7	0.911	0.649
8	0.909	0.658
9	0.909	0.667
10	0.906	0.611
11	0.906	0.610



(a) Velocity distribution (section)  
(b) Temperature distribution (°C)  
(The figures are PMV of human model in the first and second steps.)

Fig. 10 Case with high optimal values (Table 4(1)).



(a) Velocity distribution (section)  
(b) Temperature distribution

Fig. 11 Case with low optimal values (Table 4(6)).

사의 결과를 Table 5에 나타내었다. 실내에 온도 성층이 형성되었고 이에 따라서 인체모델의 PMV가 약간 낮아졌기 때문에 실내 열환경의 평가는 GA에 의한 제1단계 탐사의 경우와 비교해 낮은 값을 나타내었다. 11개의 최적설계 후보 중 가장 평가치가 높은 설계조건(Table 4(1), Table 5의 1위)과 가장 평가치가 낮은 설계조건(Table 4(6), Table 5의 6위)에 의한 기류분포, 온도분포를 각각 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다.

본 논문의 해석에서는 평가치가 가장 높은 설계 조건을 실내 열환경의 최적설계라고 판단하였다. 그러나 경우에 따라서는 목표로 하는 평가치의 수준에 따라 복수의 최적설계가 존재할 수 있다.

### 5.3 평가치가 가장 높은 설계조건

평가치가 가장 높아 본 논문에서 최적설계로 판단한 경우는 Fig. 10과 같이 유입폭 0.1 m의 자연환기가 천정에서 수직으로 유입하고 표면온도 21°C의 단판형 복사패널이 바닥면에 설치된 경우였다. 자연환기의 유입에 의해 공간 전체적으로 반시계방향의 순환류가 형성되었다. 이 순환류에

의해 비교적 균일한 온도분포를 보였으며, 인체 부근의 온도는 23°C 정도를 나타내었다. 기류속도는 대부분 0.2 m/s 이하의 저속으로 나타났다. 이러한 환경에 의한 인체모델의 PMV는 약 0.4 정도가 되었다. 또한 복사패널이 부담하는 냉방 부하는 GA를 이용한 제1단계 탐사의 경우보다 다소 증가하여 약 1,260 W가 되었다.

### 5.4 평가치가 가장 낮은 설계조건

평가치가 가장 낮았던 설계조건은 Fig. 11과 같이 유입폭 0.5 m의 자연환기가 창의 하부에서 수평으로 유입되고 표면온도 21°C의 단판형 복사패널이 천정면에 설치된 경우이다. 자연환기의 유입속도가 높은 관계로 공간 전체적으로 0.1 m/s 이하의 낮은 속도분포가 형성되었다. 상하온도차는 매우 커서 약 6°C 정도를 나타내었다. 인체모델의 PMV는 약 -1.0에서 -0.1 정도로 다른 설계조건과 비교해 낮은 값을 나타내었다. 복사패널이 부담하는 냉방부하는 1,138 W 정도가 되었다. 제1탐사와 제2탐사에서 실내 열환경 평가치가 크게 차이를 나타낸 원인은 제1탐사에서의 실

내 열환경 해석이 불균일한 온도분포를 고려하지 않았기 때문에 사료된다. 이 문제는 제1탐사에서의 열환경 해석의 정확도를 높임으로써 해결될 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 GA와 CFD 기법을 이용한 2단계 최적 실내 열환경 설계탐사수법을 개발하여 자연환기를 병용한 사무소 공간의 최적설계를 수행하여 그 유효성을 나타내었다.

제안된 탐사수법은 GA를 이용한 1차 탐사와 CFD 연성해석에 의한 2차 탐사로 구성된다. 1차 탐사에서는 GA와 간이 실내 열환경 해석수법을 이용하여 최적설계 후보를 선택하고 이것을 CFD 연성해석에 의하여 해석하기 때문에 적은 계산량으로 효율적으로 최적설계조건을 탐사할 수 있다.

그러나, 제1탐사에서의 간이 실내 열환경 해석수법의 정확도가 낮기 때문에 제2탐사에서의 실내 열환경 평가치와 다소 차이를 나타내기도 하였다.

이 해석방법이 보다 실용적으로 사용되기 위해서는 제1탐사의 해석 정확도를 향상시킬 필요가 있으며, 최근 다양한 방법들이 검토 중에 있다.<sup>(13)</sup>

## 참고문헌

- Murakami, S., Kato, S., Kondo, Y., Takahashi, Y. and Choi, D., 1995, Numerical study on thermal environment in air-conditioned room by means of coupled simulation of convective and radiative heat transfer, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, 57, pp. 105-116 (Japanese).
- Kim, T., Kato, S. and Murakami, S., 2001, Optimal design method of indoor thermal environment based on CFD coupled simulation, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, 84, pp. 53-60 (Japanese).
- Wang, S. and Jin, X., 2000, Model-based optimal control of VAV air-conditioning system using genetic algorithm, Building and Environment, 35, pp. 471-487.
- Lue, S. S. and Yang, C. H., 1999, GA-based multicriteria optimal model for construction scheduling, Journal of Construction Engineering and Management, pp. 421-427.
- Hegazy, T. and Wassef, N., 2001, Cost optimization in projects with repetitive non-serial activities, Journal of Construction Engineering and Management, pp. 183-191.
- Omori, T., Taniguchi, H. and Kudo, K., 1990, Monte Carlo simulation of indoor radiant environment, Int. J. Numerical Methods in Engineering, 30(4), pp. 615-628.
- Gebhart, B., 1959, A new method for calculating radiant exchanges, ASHRAE Transactions, 65, pp. 321-323.
- Jiang, Z., Cheng, Q. and Moser, A., 1992, Indoor airflow with cooling panel and radiative/convective heat source, ASHRAE Transaction, 98(1), pp. 33-42.
- Song, D., Kato, S., Murakami, S. and Kim, T., 2002, Study on cross-ventilation with radiational panel cooling for hot and humid regions, ASHRAE Transactions, 108(2).
- Ono, M., Kim, T., Kato, S. and Murakami, S., 2002, Two step optimal design method of indoor thermal environment based on CFD simulation and genetic algorithm - Optimal design of hybrid ventilation system considering four seasons, Summary of Technical Paper of Architectural Institute of Japan, D-2, pp. 1103-1104 (Japanese).
- ASHRAE handbook fundamental, 1993.
- Kim, T. and Roh, J. W., 2002, Study on thermal environment controlled by radiation cooling panel, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 18, No. 4, pp. 173-180.
- Oono, S., Morikawa, Y., Oguro, M., Shoji, K., Kato, S. and Kim, T., 2003, Fundamental Research on the indoor environment optimization technique considering layered structure of design process, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, 88, pp. 115-123 (Japanese).