

인텔리전트 빌딩 제어 시스템의 성능해석을 위한 시뮬레이터 개발

Development of the Intelligent Building Control System Simulator for the Performance Analysis

배 중 원, 임 동 진*, 홍 승 호*, 송 규 동**

*한양대학교 제어계측공학과 (Tel: 0345-400-5212; Fax: 0345-406-6639; E-mail: limdj@hyunp2.hanyang.ac.kr)

**한양대학교 건축공학과 (Tel: 0345-400-5135; Fax: 0345-400-5130; E-mail: kdsong@hyunp2.hanyang.ac.kr)

Abstracts To provide pleasant building environment and the ease of maintenance and facility management, many new office buildings are being built as intelligent buildings. Building control systems which are employed in intelligent buildings require advanced types of controllers and varieties of control schemes. Designing and installation of these types of advanced building control systems take a lot of effort and also they are costly. In order to design these systems, it is necessary for the designers to have means to analyze and estimate the performance of control systems. The simulator which is presented in this paper is composed of three parts, HVAC simulation module, elevator simulation module, and evacuation modeling module for the outbreak of fire or similar disasters. In this paper, the functions and modelling method for each module are explained and simulation results are presented.

Keywords Intelligent building, Control System, Simulation, HVAC, Elevator, Evacuation

1. 서론

최근 신축되고 있는 많은 대형 건물들이 쾌적한 오피스 환경을 제공하는 동시에 업무 능력을 향상시키고 건물 운영의 편의성을 도모할 목적으로 인텔리전트 빌딩의 형태로 건축되고 있으며 이러한 추세는 앞으로 계속될 전망이다.

건물의 인텔리전트화에 비례하여 빌딩 제어 시스템에는 첨단 제어 기기와 이를 효과적으로 운용하기 위한 다양한 제어 기법이 요구되며, 이러한 시스템을 최적으로 설계하고 설치하는 데에는 적지 않은 시간과 비용이 소모된다. 이와 같이 나날이 복잡해지고 고도화되는 빌딩 제어 시스템을 보다 효율적으로 설계하고 성능을 초기 단계에서 분석하고 평가할 수 있는 방법이 필요하며, 이를 위해서는 빌딩 제어 시스템에 대한 시뮬레이터 개발이 필수적이라 할 수 있다.

인텔리전트 빌딩에는 사용자에게 여러 가지 편의를 제공하고 인명과 재산을 보호하는 각종 설비가 설치되는데, 제공되는 서비스의 유형에 따라 공조·냉난방 시스템, 엘리베이터 관리 시스템, 소화 및 방재 시스템, 조명 설비 시스템, 전력 설비 시스템, 방법 및 출입 통제 시스템 등으로 크게 구분할 수 있다.

본 논문에서는 위에서 열거한 여러 빌딩 제어 시스템의 요소들 중에서 대표적인 공조·냉난방 시스템, 엘리베이터 관리 시스템, 소화 및 방재 시스템을 대상으로 한 시뮬레이터 개발 결과를 설명한다.

2. 시뮬레이터의 구성과 개발환경

빌딩 제어 시스템은 제어 대상이 되는 시스템의 모델 특성에 따라 정적 모델(static model)과 동적 모델(dynamic model)로 구분되며, 동적 모델은 다시 연속 동적 모델(continuous dynamic model)과 이산 사건 모델(discrete event model)로 나눌 수 있는 복합 시스템이다. 본 논문에서는 이와 같이 다양한 성격의 모델

이 공존하는 빌딩 제어 시스템을 통합 모델링하기 위해서 그래픽 시뮬레이션 통합 소프트웨어인 ARENA를 사용하여 시뮬레이터를 개발하였다. ARENA는 기존의 대표적인 시뮬레이션 언어인 SIMAN과 애니메이션 기능을 갖는 Cinema를 통합한 것으로 사용자는 친숙한 그래픽 화면(GUI)을 통해 시스템의 논리 구조를 이해하여 설계상의 문제점을 쉽게 찾아 낼 수 있으며, 수집된 정보를 분석하는 도구들을 제공함으로써 통계 분석과 그래프 출력 작업을 용이하게 해 주는 장점이 있다.

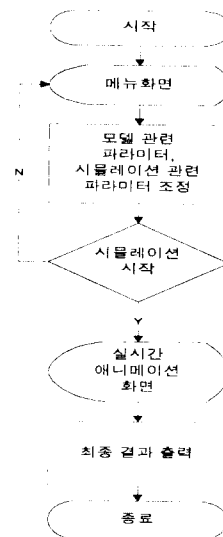


그림 1 통합 시뮬레이터의 동작 흐름도

개발된 시뮬레이터는 그림 1과 같은 일련의 동작을 하게 된다. 시뮬레이션이 시작되면 주 메뉴에서 빌딩 환경 모델에 관련된 파라미터와 시뮬레이션 관련 파라미터 등을 조정할 수 있도록 하고 시뮬레이션이 시작됨과 동시에 각 시스템 별로 애니메

이선이 일어나며, 관심 있는 변수들의 변화가 실시간으로 그래프로 출력되거나 수치로 디스플레이 된다. 시뮬레이션이 끝나게 되면 시뮬레이션 결과를 출력하고 마무리된다.

3. 빌딩 제어 시스템의 모델링

3.1 공조·냉난방 시스템 모델

공조란 주어진 실내의 온도, 습도, 환기, 기류 및 청정 등을 조절하여 실내를 사용 목적에 알맞은 상태로 유지시키는 것을 말한다. 공조·냉난방 시스템을 시뮬레이션 하는 목적은 빌딩 내의 공조 부하에 대해 적절히 대응하는 충분한 용량을 갖는 공조기를 설치하여 에너지 절약적이고 쾌적한 환경을 제공하는 공기조화 설비를 구축하는데 있다.

일반적인 대형 건물에서는 존(zone)이나 층 단위의 개별 공조가 보편적이다. 인텔리전트 빌딩에서의 공조도 유지·관리의 편리성과 건물의 구조와 용도 변경에 유연한 대응을 하기 위해서 존을 통한 개별 제어가 가능해야 한다. 이에 본 논문에서는 건물의 내부를 6개의 벽체로 둘러싸인 단위 공간(space, room, zone)들로 구획하여 건물 외부와의 열 출입과 인접공간 사이의 벽체를 통한 열 출입으로 인해 발생하는 내부의 온도 변화를 관찰할 수 있도록 공기 조화 시뮬레이터를 개발하였다.

공조 시스템 모델의 전체 구성은 그림 2와 같다.

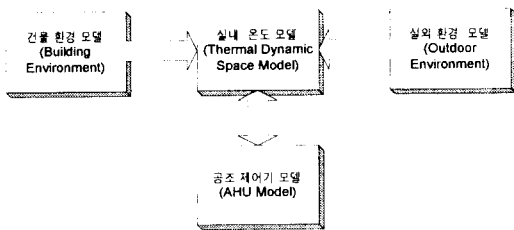


그림 2 공조 제어 시스템의 전체 블록도

모델의 단순화를 위해서 아래와 같은 조건들을 가정한다.

- (1) 벽체를 통한 열 전도는 한 방향만을 통한다.
- (2) 채실 인원에 의한 발열, 조명 발열, 기기 발열, 외기 입출입에 의한 열 취득/열 손실은 없다고 가정한다.
- (3) 실내의 온도 분포는 어디에서나 균일하다.
- (4) 건물 벽체는 순물질이며 열 전달 계수는 일정하다.

Thermal Response Factor Method

건물내의 열량 변화를 엄밀하게 모델링 하려면 열에 관련된 복잡한 동적 모델이 필요하다. 본 논문에서는 미분 방정식으로 표현되는 일련의 동적 모델을 사용하지 않고 보다 간략하게 실내의 열량 변화를 계산하는 방법으로써 Mitalas와 Stephenson이 제안한 열 응답 계수법(Thermal Response Factor Method)^[2]을 사용한다.

열 응답 계수법에 기초하여 외벽이나 실내 간벽을 통해 들어오는 열 전도량은 아래 식으로부터 구해진다.

$$Q_{con} = A \sum_{n=0}^m b_n T_s t_{-ndt} - \sum_{n=1}^m d_n Q_{con t_{-ndt}} - AT_i \sum_{n=0}^m c_n \dots(1)$$

- Q_{con} : 시간 t에서의 전도에 의한 열취득/열손실.
 $Q_{con t_{-ndt}}$: (t-ndt)에서의 전도에 의한 열취득/열손실.
 $T_{s t_{-ndt}}$: solar-air temperature(외벽에 작용시),
 인접하는 공간의 온도(간벽에 작용시).

- A : 벽의 면적
 b_n, d_n, c_n : 전달 함수 계수
 (Transfer function coefficient)

(1)식에서 m은 재료의 열 용량(thermal capacity)에 의존하는 값이다. 벽체가 외벽인 경우에는 외부 환경 모델에서 제공되는 Solar-Air Temperature가 벽을 관류하여 열 출입이 일어나게 되며, 건물 내부의 간벽인 경우에는 인접 공간의 실내 온도가 그 벽체에 작용한다.

각 벽체를 통해 출입하는 열량은 매 시간마다 열 응답 계수법에 의해 계산되고 이것을 합산하면 벽체를 타고 출입하는 총열량이 된다. 이 열량과 공조기가 공급하는 열량의 합이 현재 시간에서의 실내 총열량이 되는데 이것으로부터 실내의 온도를 구하는 식은 아래와 같다.

$$(\rho C_p V)_s \frac{dT_s}{dt} = Q_{total} + Q_{hvac} \dots(2)$$

- ρ : 실내 공기의 밀도
 C_p : 실내 공기의 비열
 V : 실내 공기의 부피
 Q_{total} : 벽체를 통해 들어온 총 열량
 Q_{hvac} : 공조기를 통해 들어온 열량

제어기에서는 실내 온도와 실외온도의 차를 귀환하여 다음 식으로 주어지는 PID제어를 사용하여 송풍량을 가감함으로써 실내의 냉난방 부하를 조절하게 된다.

$$U(n) = U(n-1) + K_p(e_n - e_{n-1}) + K_I e_n \Delta T + \frac{K_d}{\Delta T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \dots(3)$$

3.2 엘리베이터 시스템 모델

고층 건물의 핵심적인 수직 운송 수단으로써 엘리베이터의 효율적인 관리를 위해서는 사전에 엘리베이터의 운송 능력과 서비스 능력을 파악하여 그 건물의 특성에 맞는 제어 방법을 개발하는 것이 필요하다. 이러한 목적으로 본 논문에서는 가상의 건물에 가장 일반적인 축적 제어(Collective control)방식을 적용해 보았을 때, 서로 다른 입력 파라미터 조건하에서 엘리베이터의 이용률과 층별 평균 대기 시간 등을 조사해 보았다.

엘리베이터 승객이 엘리베이터가 설치된 복도 앞에서 누르는 호출 버튼을 홀 호출 버튼(Hall call button)이라고 하고, 승차후 엘리베이터의 운행 방향을 지정하는데 사용하는 버튼을 차량 호출 버튼(Car call button)이라고 정의하자. 축적 제어 방법은 홀 호출과 차량 호출이 도착한 순서대로 시스템에 등록되지만, 서비스되는 층은 엘리베이터가 빌딩 내에서 상승하고 하강하는 순서에 의해서 결정된다. 한 방향의 서비스가 모두 끝나면, 반대 방향으로의 가장 높은 홀 호출이 있는 층으로 이동하게 된다. 만약 다른 방향으로의 호출이 없는 경우는 새로 전해진 홀 호출이나 차량 호출에 반응하여 새로운 방향으로 진행하게 된다.

엘리베이터 관리 시스템의 시뮬레이터의 구성은 그림 3과 같고 엘리베이터 시스템의 정의를 위해 고려된 모델 파라미터는 다음과 같다.

- 수송 능력(contract capacity) : 승차 정원
 운행 층수
 층간 거리
 Main terminal

- 승객 승하차 시간
- 속도(contract speed)
- 가속도(acceleration)
- 출입문 열리는 시간(door closing time)
- 출입문 닫히는 시간(door opening time)

각 층에 승객이 도착하는 시간 간격은 일반적으로 지수 분포 함수(exponential probability distribution function)를 사용하지만 본 시뮬레이터에서는 실제에 좀 더 근사한 균등 확률 분포 함수(Uniform probability distribution function)를 사용하여 모델링 하였다.

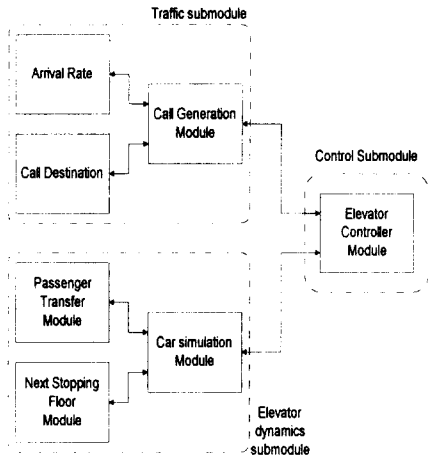


그림 3 엘리베이터 시뮬레이터의 구조

3.3 소화·방재 시스템 모델 - 재난 대피 계획

빌딩에 화재가 발생하였을 경우를 가정하고 한 층에 거주하고 있는 사람들이 방화벽으로 둘러싸인 안전한 비상 계단을 통해 피난층으로 대피(evacuation)하는 수평 이동의 시나리오를 가정적으로 모델링 하였다.

화재 발생시 대피 경로에는 한꺼번에 수많은 사람들이 몰리게 되며 한정된 통로와 출입구, 계단에는 필연적으로 병목 현상이 벌어지게 된다. 소방 관련 법규에는 방화벽으로 둘러싸인 피난층으로 통하는 비상계단까지의 물리적 거리만을 명시해 놓고 있기 때문에 설계된 건물의 층 구조 계획(floor plan)에 따라 실제로 걸리는 대피 시간을 계산할 방법이 없다.

개발한 시뮬레이터는 거주 인원과 건물의 층 구조에 바탕을 둔 동선을 고려할 수 있게 만들어 거주 인원이 비상계단까지 대피하는데 걸리는 시간을 아주 근사하게 파악할 수 있도록 개발되었다.

각 대피 경로의 길이와 동선 별 사람의 이동 속도, 출입구, 존별 거주 인원을 입력 파라미터로 지정할 수 있도록 하였고 또 병목 현상이 발생될 부분까지 모델링하여 애니메이션이 이루어지기 때문에 시각적 효과도 매우 크다.

4. 시뮬레이션 및 결과

4.1 공조·냉난방 시스템의 시뮬레이션 적용 예

표 1과 같은 열 전달 함수 계수 값을 갖는 ASHRAE 벽체 종류 #32(4-in 콘크리트 + 2-in 단열재) 6개로 이루어진 공간(=실)을 생각한다.

그림 4와 같이 건물 외부에 면하는 외벽이 3개이고 내부의 공

	n=0	n=1	n=2	n=3
b	0.00312	0.04173	0.02736	0.00119
d	1.00000	-0.94420	0.05025	-0.00008
Σc	0.0734			

표 1 Wall #32의 전달 함수 계수

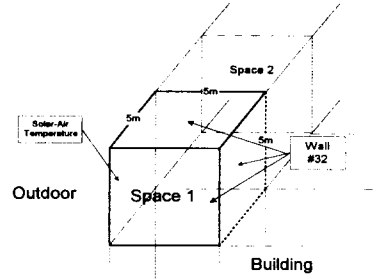


그림 4 단위 공간(Space)의 예 (외벽3+간벽3)

간과 접촉하는 간벽이 3개인 공간(space1)을 가정하였다. 시뮬레이션 초기에는 실 설정 온도를 22℃로 하였다가 시뮬레이션 시간이 49가 되었을 때 설정 온도를 20℃로 변화시켰다. 실내의 온도 변화의 추이는 그림 5와 같다.

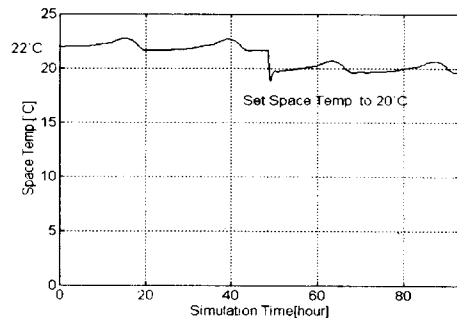


그림 5 실내 온도 변화

외기 데이터를 24시간 단위로 같은 값을 사용하였기 때문에 그림 5에서 곡선의 주기적인 변화를 볼 수 있으며, 설정 온도의 변화를 완만히 추종하고 있음을 살펴 볼 수 있다. 본 시뮬레이터는 이와 같이 냉·난방 부하에 대처하는 공조기 부하를 예측할 수 있으므로 건물의 특성에 맞는 공조기 용량의 결정에 도움이 되리라 사료된다.

4.2 엘리베이터 시스템의 시뮬레이션 적용 예

인접층 간의 엘리베이터를 이용한 이동은 없으며 축적 제어를 사용하고 위로 올라가려는 호출이 가장 빈번한 Up-peak 60분 동안 엘리베이터를 운영하였을 때, 엘리베이터의 이용률과 층별 평균 대기 시간을 조사한다.

시뮬레이터에 실제 사용된 입력 데이터는 다음과 같다.

- 1) 건물 데이터
 - 층수 : 10 층
 - 층간 거리 : 3m
 - 2) 엘리베이터 구성 데이터
 - 승차 정원 : 11 / 15명
 - 속도 : 1.5 m/s
- 2) 승객 데이터
- Arrival Pattern : Up-peak
 - Main terminal : 1층
 - 승객 탑승 시간 : 0.5 s/person

가속도 : 0.5 m/s
 출입문 열리는 시간 : 0.8 s
 출입문 닫히는 시간 : 1.5 s

승차 정원을 11명과 15명으로 조정했을 때 엘리베이터의 이용률은 표 2와 표 3과 같은 결과를 보였고, 층별 평균 대기 시간은 표 4와 같았다.

표 2 승차 정원 = 11명인 경우 --- Case 1

	Category	Occurrences		Standard Percent(%)
		Number	AvgTime	
Elevator Loaded	Empty	61	3.0095	5.1
	Not Full	105	30.260	88.26
	Full	44	5.4333	6.64

표 3 승차 정원 = 15명인 경우 --- Case 2

	Category	Occurrences		Standard Percent(%)
		Number	AvgTime	
Elevator Loaded	Empty	61	3.0039	5.09
	Not Full	61	56.012	94.91
	Full	0	0	0

표 4 승객의 층별 평균 대기시간 (단위: 초)

층	1	2	3	4	5
Case 1	73.909	65.852	67.582	73.523	78.409
Case 2	56.347	61.236	62.845	64.521	75.265
층	6	7	8	9	10
Case 1	67.978	74.829	72.037	75.72	77.704
Case 2	66.334	65.945	68.562	70.824	65.425

이와 같이 승차정원이나 다른 파라미터값을 조정해 가며 시뮬레이션을 수행함으로써 특정 건물의 통행 패턴에 적합한 엘리베이터를 결정하는데 본 시뮬레이터가 유용하게 사용될 수 있다고 생각된다.

4.3 소화·방재 시스템의 시뮬레이션 적용 예

센터코어 구조의 건물에 개발한 시뮬레이터를 적용해 보았다. 이 건물은 실제하는 빌딩의 층 구조 계획을 약간 변형한 것이다. 적용한 주요 입력 파라미터 값은 다음과 같다.

- 바닥면적 : 42(m) × 27(m) = 1134m²
- 존(zone)의 개수 : 8개
- 층 거주 인원수 : 240명(=30×8)
- 존 별 동선의 개수 : 3~4개
- 존 별 동선의 길이 : 개별 정의
- 비상계단의 개수 : 2개

그림 6은 화재 발생 후 벌어지는 대피 애니메이션 화면을 나타내며 화재 경보를 인지한 거주인들이 대피하는 데 걸린 시간을 표 5에 나타내었다.

이 시뮬레이션 결과는 안전한 대피 경로의 설계, 효과적인 방화벽 설치 등에 활용될 수 있으므로 건물의 방화 계획 및 재난 대비에 실질적인 도움이 되리라 생각된다.

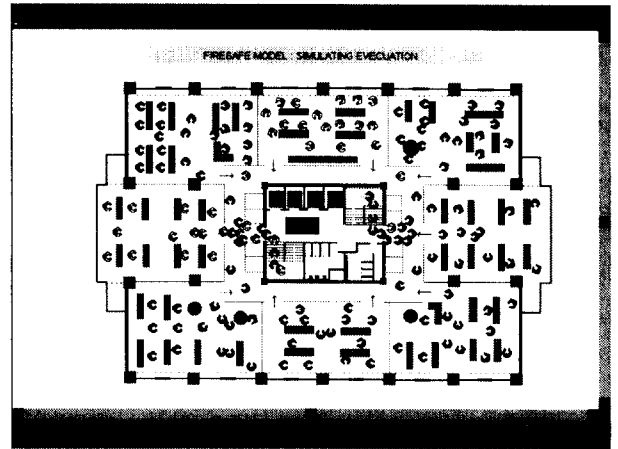


그림 6 대피 애니메이션

표 5 대피 시간 (단위 : 초)

	Avg.	Variance	Minimum	Maximum
비상계단1	136.20	.50969	16.900	254.90
비상계단2	136.20	.50967	17.300	254.80

5. 결론 및 고찰

인텔리전트 빌딩 제어 시스템의 사전 성능 평가를 위한 시뮬레이터 개발을 목표로 공조·냉난방 시스템과 엘리베이터 관리 시스템, 소화·방재 시스템에 대한 기본 모델을 개발하였고 간단한 사례에 대해 시뮬레이션을 수행해 봄으로써 공조기의 용량결정, 엘리베이터의 운송 능력 파악, 방화를 위한 구조 계획 등에 본 시뮬레이터가 유용성이 있음을 확인하였다.

본 시뮬레이터는 현재에도 계속 보완·개발 중에 있으며, 아이디어 개발과 시스템 모델링에 보다 세련된 기법이 도입된다면 더욱 복잡한 제어방식도 적용 가능할 것이라 생각된다.

향후 최종 결과로써 인텔리전트 빌딩의 통합 시뮬레이션이 가능한 통합 시뮬레이터가 개발된다면 많은 비용 절감 효과가 기대되며, 국내 기술이 취약한 인텔리전트 빌딩 제어 시스템의 설계 기술의 발전에도 기여할 수 있으리라 본다.

참고 문헌

- [1] "ARENA Template Reference Guide", System Modeling Co. 1995
- [2] "ASHRAE Handbook 1985 Fundamentals", ASHRAE Inc., pp. 2631-2634, 1985
- [3] C. D. Pegden, R. E. Shannon, R. P. Sadowski, "Introduction to Simulation Using SIMAN", McGraw-Hill, Inc., 1995
- [4] G. C. Barney, "Elevator Technology", Ellis Horwood, pp. 63-70, 1986
- [5] M. G. Singh, "System & Control Encyclopedia", Pergamon Press, vol.2, pp.1420-1430, 1987
- [6] K. D. Song, "Optimization of Building Orientation and Local Climatic Conditions", pp.29-39, 1989
- [7] 박귀태 외, "인텔리전트 빌딩 기술의 특집", 전기학회지, 제 43권, 10호, 1994