

인텔리전트 빌딩 시스템의 최적설계 및 성능평가를 위한 통합 시뮬레이션 모델 개발

Developing an Integrated Simulation Model for Optimal Design and Performance Evaluation of Intelligent Building Systems

송 규동*, 배 중원**, 고 성준**, 임 동진***, 홍 승호***

K.D. Song, J.W. Bae, S.J. Koh, D.J. Lim, S.H. Hong

*정회원, 한양대학교 건축공학과 교수, 건축학박사

**한양대학교 제어계측공학과 석사과정

***한양대학교 제어계측공학과 교수, 공학박사

Abstract

To provide pleasant building environment and the ease of facility maintenance and 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 the advanced building control systems require a vast amount of effort and money. Therefore, in order to design control systems which are optimized in terms of performance and cost effectiveness, it is necessary for the designers to have means to analyze and estimate the performance of designed control schemes and systems. This paper presents a prototypical simulation tool for several important intelligent building systems. The simulator developed in this study is composed of four parts: 1) HVAC system simulation module, 2) elevator simulation module, 3) fire evacuation modeling module for the fire emergency or similar disasters, and 4) network simulation module. This paper mainly describes the functions and modelling method for each module and several examples of simulation results.

Keywords Intelligent Building, Control System, Simulation, HVAC, Elevator, Fire Evacuation, Network

1. 서론

최근 신축되고 있는 많은 대형 건물들은 쾌적한 오피스 환경을 제공하는 동시에 업무 능률을 향상시키고 효과적이고 경제적인 건물의 운용을 도모할 목적으로 건물자동화(BA) 시스템, 사무자동화(OA) 시스템 및 정보·통신(TC) 시스템을 갖춘 소위 인텔리전트 빌딩의 방식으로 건축되고 있으며 이러한 추세는 앞으로 계속될 전망이다.^[1] 건물의 인텔리전트화에 비례하여 건물자동화 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 건물자동화 시스템을 보다 효율적으로 설계하고 성능을 초기 단계에서 분석하고 평가할 수 있는 방법이 필요하며, 이를 위해서는 건물자동화 시스템에 대한 시뮬레이터 개발이 필수적이라 할 수 있다. 인텔리전트 빌딩의 건물자동화 시스템은 제공되는 서비스의 종류에 따라 공조시스템, 엘리베이터 시스템, 소화 및 방재 시스템, 조명설비 시스템, 전력설비 시스템,

방법 및 출입통제 시스템 등으로 구분할 수 있으며, 이러한 시스템들은 건물내의 각 종 네트워크 시스템으로 접속되어 통합 제어 및 관리되고 있다.

본 논문에서는 위에서 열거한 여러 가지 건물자동화 시스템 중에서 본 연구에서 개발한 공조시스템, 엘리베이터시스템, 재난대피 및 네트워크시스템의 시뮬레이션 모델의 개요에 대해 설명하였고 각각의 적용례를 보였다.

2. 시뮬레이션 모델의 구성과 개발환경

건물자동화 시스템의 제어 모델은 제어 대상이 되는 시스템의 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 모델이 공존하는 제어 시스템들을 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^{[2],[3]}.

개발된 통합 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 애니메이션이 일어나며, 관심 있는 변수들의 변화가 실시간으로 그래프나 수치로 출력되며, 시뮬레이션을 종료하고 나면 그 최종결과를 출력한다.

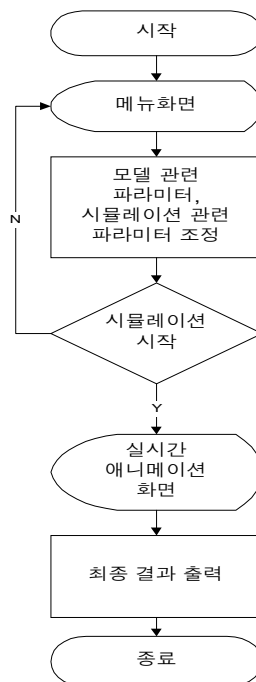


그림 1. 통합 시뮬레이터의 동작 흐름도

3. 건물제어 시스템의 모델링

3.1 공조시스템 시뮬레이션 모델

일반적인 대형 건물에서는 평면상의 조-닝 및 층별 조-닝을 통하여 공조기의 효율적 운영을 꾀하는 것이 보편적이다. 인텔리전트 빌딩에서의 공조도 유지 및 관리의 편의성과 건물의 구조와 용도 변경에 유연하게 대응하기 위하여 조-닝을 통한 개별공조 및 제어가 가능해야 한다.^{[1],[4]} 이에 본 연구에서는 건물의 내부를 6개의 구조체로 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 VAV방식의 공조시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 공조시스템 시뮬레이션 모델의 전체 구성은 그림 2와 같다.

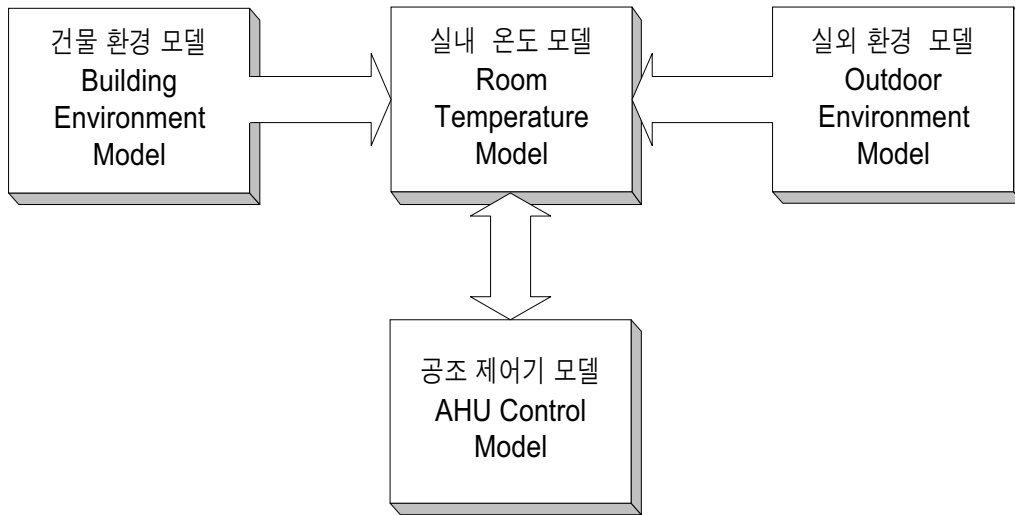


그림 2. 공조시스템 시뮬레이션 모델의 블록도

본 연구에서는 아래와 같은 조건들을 가정하여 공조시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

- 벽체를 통한 열 전도는 2차원 적이다.
- 실내의 온도는 균일하게 분포되어 있다.

건물내의 열량 변화를 정확하게 모델링 하려면 열에 관련된 복잡한 동적 모델이 필요하지만, 본 연구에서는 미분 방정식으로 표현되는 일련의 동적 모델을 사용하지 않고 보다 간략하게 실내의 열량 변화를 계산하는 방법으로써 Mitalas와 Stephenson이 제안한 열응답계수법(Thermal Response Factor Method)을 사용하였다.^{[5],[6]} 열응답계수법에 기초하여 외벽이나 실내 간벽을 통해 전달되는 열량은 식 (1)로부터 구해진다.

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

단,

- Q_{con} : 시간 t에서의 전도에 의한 열취득/열손실. [Kcal/h]
- $Q_{con_{t-ndt}}$: (t-ndt)에서의 전도에 의한 열취득/열손실. [Kcal/h]
- $T_{s_{t-ndt}}$: sol-air temperature(외벽의 상당외기온 또는 간벽의 경우 인접공간의 온도) [°C]
- A : 구조체의 면적 [m^2]
- b_n, d_n, c_n : 전달함수의 계수 (Transfer function coefficient)

식 (1)에서 m은 재료의 열 용량(thermal capacity)에 의존하는 값으로서 외벽표면으로 유입된 열이 실내로 전달되는데 걸리는 시간을 가리킨다. 벽체가 외벽인 경우에는 외부환경모델에서 계산되는 상당외기온(Sol-air Temperature)에 의해 벽체를 통해 열출입이 일어나고 건물 내부의 간벽인 경우에는 인접 공간의 실내 온도가 그 벽체에 작용하여 간벽을 통한 열출입이 일어난다.^[5]

각 벽체를 통해 출입하는 열량은 매 시간마다 열응답계수법에 의해 계산되고 이것을 합산하면 벽체를 타고 출입하는 총열량 Q_{total} 이 계산된다. 이 열량과 공조기가 공급하는 열량의 합이 현재 시간에서의 실내 총열량이 되는데 이것으로부터 실내의 온도는 식 (2)으로 구할 수 있다.^[7]

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

단,

- ρ : 실내 공기의 밀도 [kg/m^3]
- C_p : 실내 공기의 비열 [Kcal/kg °C]
- V : 실용적 [m^3]
- Q_{total} : 벽체를 통해 들어온 총 열량 [Kcal/h]
- Q_{AHU} : 공조기로부터 공급된 열량 [Kcal/h]

제어기에서는 실내 온도와 실외온도의 차를 궤환하여 식 (3)에 의해 주어지는 PID제어 알고리즘을 사용하여 실의 냉난방 부하의 변동에 대하여 VAV 유닛의 송풍량을 가감하게 된다.

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

3.2 엘리베이터 시스템 시뮬레이션 모델

고층 건물의 핵심적인 수직 운송 수단인 엘리베이터 시스템의 최적 설계를 위해서는 설계단계에서 엘리베이터의 운송 능력과 서비스 능력을 파악하여 대상 건물의 특성에 맞는 제어 알고리즘을 개발할 필요가 있다. 이러한 목적으로 본 연구에서는 가상의 건물에 가장 일반적인 축적제어(Collective control)방식의 엘리베이터 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하여 다양한 조건에서 엘리베이터의 이용률과 층별 평균 대기 시간 등을 계산해 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 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^[7]. 그림 3은 엘리베이터 시스템 시뮬레이션 모델의 구성을 보인 것이고 그림 4는 각 층에 도착했을 때 승객의 승하차를 결정하는 알고리즘에 대한 페트리넷(Petri Net) 모델을 나타낸 것이다.

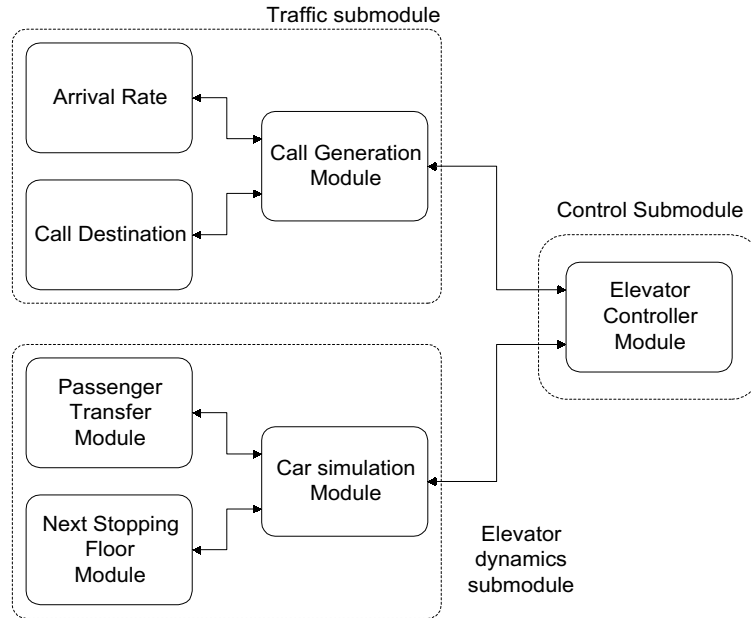


그림 3. 엘리베이터 시스템 시뮬레이션 모델의 구조

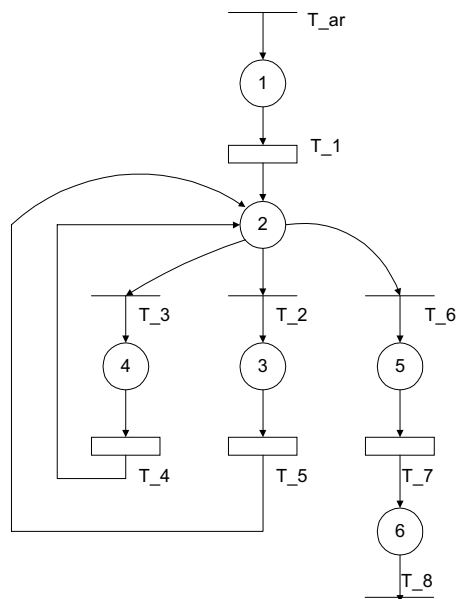


그림 4. Passenger Transfer Module의 페트리넷 모델

표 1. Passenger Transfer Module 페트리네트 모델의 상태

상태	설 명
1	엘리베이터가 현재층에 정차
2	현재층에 존재하는 호출의 종류를 검사하는 상태
3	하차할 승객이 있는 상태
4	승차할 승객이 있는 상태
5	승/하차 승객이 더 이상 없는 상태
6	현재층에서 엘리베이터의 서비스가 종료된 상태

표 2. Passenger Transfer Module 페트리네트 모델의 천이

천이	설 명
ar	도착층에 서비스 호출이 등록
1	문 여는 시간
2	차량 호출이 있는 경우
3	서비스 방향과 동일한 홀 호출이 있는 경우
4	승객 승차 시간
5	승객 하차 시간
6	호출이 모두 서비스 된 경우
7	문 닫는 시간
8	발차

엘리베이터 시스템의 모델링을 위해 고려된 주요 변수들은 아래와 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)

엘리베이터의 용량을 결정하기 위한 수계산에서는 일반적으로 각 층에 승객이 도착하는 시간 간격을 Poisson 확률 분포라고 가정하고 있고 이러한 가정에 의한 오차를 무시하고 있다^[8]. 하지만 실제 엘리베이터 시스템에서, 승객의 도착 시간 간격은 균등 확률 분포(Uniform probability distribution function)로 보아야 옳으며 본 시뮬레이터에서는 시뮬레이션의 장점을 십분 활용하여 실제에 좀 더 근사한 시뮬레이션 결과를 얻기위해서 균등 확률 분포 함수를 사용하여 모델링하였다. 그림 5는 본 연구에서 개발한 엘리베이터 시스템 시뮬레이션 모델의 애니메이션 화면을 보인 것이다.

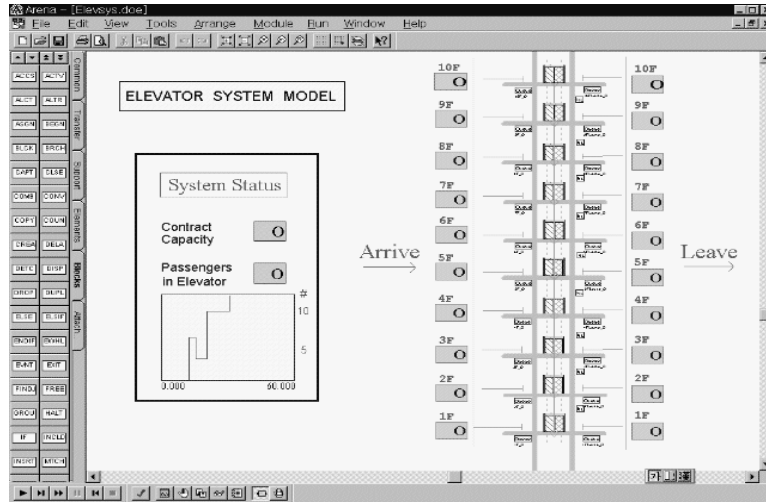


그림 5. 엘리베이터 시스템 시뮬레이션 모델의 애니메이션 화면

3.3 재난대피 시뮬레이션 모델

건물의 고층화, 대형화에 따라 소화를 비롯한 건축물의 방재는 대단히 중요한 문제이다. 화재로 인한 피해를 경감하기 위해서는 우선 불을 내지 않는 노력이 필요하지만, 완전한 방화는 불가능하다. 따라서, 차선책으로서 건축자재의 불연화, 화재 감시·경보 장치와 방재 설비의 적소설치가 필요하다. 화재 등의 재난 발생시 최우선적으로 고려해야 할 사항은 재실자의 안전하고 신속한 대피 문제이며 방재 설비의 설치 등도 대피 문제와 연관하여 설계되어야 함은 당연하다.

사람이 아무런 제약도 받지 않는 정상시의 걸음을 자유 보행 속도라고 하며, 일반적으로 0.5~2m/s 정도의 속도를 취한다. 그러나 혼잡이 발생하는 부분에서는 후속보행자가 균중을 뚫고 빠져나가기가 곤란하므로 앞의 보행 속도에 동조하게 된다. 이와 같은 상태를 군집보행이라고 하며, 보행 속도(v)와 군집밀도(ρ)와의 관계는 식 4로 표현된다.

$$v = 1.610 - 0.263\rho + 0.007\rho^{-4.74} \quad \dots(4)$$

수평방향의 피난에 있어서 기존의 수계산에 의한 거실에서 복도까지 퇴출시간의 대략적인 추정식은 식 5와 같다.

$$T_r = \max \left(L_{\max}/v, \frac{\rho \times A}{N \times DR} \right) \quad \dots(5)$$

단,

- L_{\max} : 거실내에서 복도에 의한 출구까지의 최장거리 [m]
- v : 군집보행속도 [m/s]
- ρ : 거실의 인구밀도 [인/m²]
- N : 출구의 유동계수 [인/m]
- DR : 출구 폭 [m]

건물내에 화재가 발생하면 대피로에는 한꺼번에 많은 사람들이 몰리게 되며 한정된 넓이의 통로와 출입구, 계단에는 필연적으로 병목 현상이 발생하게 된다. 현행의 소방 관련 법규에는 방화벽으로 둘러싸인 피난층으로 통하는 비상계단까지의 최대거리만을 명시해 놓고 있지만 실제로는 건물의 평면상의 동선계획과 대피인원수 및 기타 요인에 의해 대피에 소요되는 시간이 달라질 수 있다. 따라서 식 5에 의해 주어지는 추정치만으로는 대피시간의 구체적인 파악이 불가능하다. 본 연구에서는 전술한 사항을 비롯하여 거주 인원과 건물 평면상의 동선을 고려하여 대피자들이 비상계단까지 도달하는데 걸리는 시간을 아주 근사하게 파악할 수 있는 재난대피 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

개발된 재난대피 시뮬레이션 모델은 각 대피 경로의 길이와 동선 별 사람의 이동 속도, 출입구, 존별 거주 인원을 입력 변수로서 지정할 수 있도록 하였고, 또한 대피자들이 이동하는 상황을 애니메이션으로 보여 줄 수 있어 비상구 등에서의 병목현상을 시각적으로 검사하게 함으로써 건축 설계 단계에서 재난대피 동선계획과 비상구의 위치 및 넓이 등에 대한 의사 결정에 도움을 줄 수 있도록 하였다.

3.4 네트워크 시스템 시뮬레이션 모델

인텔리전트 빌딩에는 건물자동화(BA), 사무자동화(OA) 및 정보·통신(TC) 시스템과 관련하여 다양한 방식의 네트워크 시스템이 설치된다. 본 연구에서는 이러한 네트워크 시스템들 가운데 모든 인텔리전트 빌딩들이 공통적으로 가지고 있는 건물자동화 네트워크 시스템의 성능을 평가할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 건물자동화 네트워크는 크게 필드네트워크와 제어센터 네트워크로 구분될 수 있다. 필드 네트워크는 HVAC, 전력 및 조명 제어, 소화 및 방재 시스템 등의 제어를 위하여 건물 내에 산재한 각종 센서, 제어기 및 구동기들 사이의 데이터 전송을 담당하며, 제어센터 네트워크는 제어센터 내에 설치되어 건물자동화와 관련된 기능을 수행하는 컴퓨터들 간의 데이터 통신 기능을 수행한다. 제어센터 내의 컴퓨터들 사이에 전송되는 데이터는 주로 데이터 분석, 통계 처리, 데이터 저장, 데이터 베이스 관리 및 보고서 작성 등에 관한 파일과 프로그램들로 구성되어 있다.

인텔리전트 빌딩 내의 각종 센서 및 제어기기에서 생성되는 데이터들은 신속하게 전송이 완료되어야 하므로 필드 네트워크는 실시간통신(Real-time communication)이 보장되도록 설계되어야 한다. 또한 제어센터 네트워크는 파일과 프로그램 등의 많은 양의 데이터를 고속으로 전송할 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서 인텔리전트 빌딩의 네트워크 시스템을 구축하기 위해서는 먼저 주어진 건물 환경에서 생성되는 데이터들의 특성을 조사 및 분석하고, 이러한 데이터들이 네트워크를 통하여 전송되는 경우에 주어지는 성능 요구 사항을 만족하는 가를 검증할 수 있는 네트워크 설계 도구가 필요하게 된다. 네트워크 시스템의 성능 해석을 위한 시스템 모델링 방식에는 수학적 모델과 시뮬레이션 모델이 있다. 수학적 모델은 네트워크 시스템의 성능에 관련된 파라미터들을 명확하게 나타낼 수 있는 장점이 있으나, 수학적 모델을 개발하기 위하여서는 많은 가정을 필요로 하게 되며, 따라서 수학적 모델로는 근사적인 성능 해석 결과만을 얻을 수밖에 없다. 예를 들어 건물자동화 네트워크 시스템으로 현재 널리 사용되고 있는 ARCNET의 경우 토큰-패싱 방식으로 동작되며, 토큰패싱 방식 프로토콜에서 데이터 전송지연 시간 T 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다^[9].

$$T = \frac{N\omega(1 - \frac{S}{N})}{2(1-S)} + \frac{S\bar{X}}{2\bar{X}^2 R(1-S)} + \frac{\bar{X}}{R} + \frac{\tau}{3} \quad \dots(6)$$

단,

$$\omega = \frac{X_t}{R} + \frac{\tau}{3}$$

$$S = N \frac{\lambda \bar{X}}{R}$$

N = 네트워크 내의 노드 수

R = 네트워크 데이터 전송 속도

λ = 각 노드에서 단위 시간 당 데이터 생성 빈도

\bar{X} , \bar{X}^2 = 각 노드에서 생성되는 메시지 길이의 1차 및 2차 모멘트

X_t = 토큰 프레임 길이

τ = 프레임 전파 지연 시간

식 6은 각노드에서 데이터 도착 빈도가 지수분포를 가지는 Poisson 프로세스이고, 모든 노드에서 데이터 생성주기와 데이터 길이의 분포가 동일하며, 노드의 분포가 전체 케이블 길이에 대하여 균등 분포를 가진다는 가정 하에서만 성립된다. 그러나, 네트워크 시스템은 이러한 가정을 따르지 않는 다양한 조건하에서 동작되며, 예를 들어 네트워크 내의 노드들이 서로 다른 데이터 생성 빈도와 데이터 길이 분포를 가지는 경우에 노드들 간에 상호 작용을 수학적으로 모델링하여야 하며, 이러한 경우에 또 다른 가정을 필요로 하게 되어 수학적 모델은 성능 해석의 근사적인 값만을 도출할 수밖에 없다. 따라서, 좀더 정확하고 실제의 상황에 가깝게 네트워크 시스템의 성능을 해석하기 위해서는 네트워크 시스템의 동작을 컴퓨터 상에서 그대로 모사한 시뮬레이션 모델을 사용하는 것이 바람직하다. 시뮬레이션 모델은 개발하는 데는 많은 시간이 소요되지만, 수학적 모델의 경우처럼 결과의 정확성을 저하시키는 앞서 언급한 바와 같은 가정을 필요로 하지 않는 큰 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 개발한 네트워크 시스템 시뮬레이션 모델은 건물자동화 네트워크를 통하여 전송되는 데이터들의 전송 지연시간과 단위 시간 당 네트워크 시스템의 데이터 처리량(throughput) 및 전송된 메시지의 개수 등을 산출하도록 하여, 주어진 건물 환경에 가장 적합한 네트워크 시스템을 설계 및 구축하는데 유용하게 활용될 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 실시간 통신에 가장 적합한 순환 서비스 방식(예, 토큰-패싱 및 폴링 방식)의 네트워크 시스템을 모델링하며, 이러한 네트워크 모델은 네트워크 관련 파라미터만을 교체함으로써 필드 네트워크와 제어 센터 네트워크의 모델링에 모두 적용될 수 있다. 네트워크 시스템 시뮬레이션 모델에 고려된 주요 변수는 아래와 같다.

- 네트워크 내의 노드(node) 수
- 네트워크의 데이터 전송 속도
- 각 노드에서 데이터 생성 주기
- 각 노드에서 생성되는 데이터의 길이
- 각 노드의 전송큐 용량
- 각 노드에서 데이터 전송을 위하여 소요되는 처리 시간

필드 네트워크에 접속된 센서 및 제어 기기에서는 주로 데이터가 주기적으로 생성되며, 데이터 길

이 또한 일정한 길이로 패킷화 되어 있는 것이 보편적이다. 한편, 제어센터 네트워크에 접속된 노드들에서 생성되는 데이터들은 불규칙한 주기로 생성되며, 데이터 길이 또한 불규칙한 특성을 갖고 있다. 본 시뮬레이션 모델에서는 이러한 불규칙 데이터를 불규칙 함수의 종류만을 지정하여 다양한 불규칙 데이터들이 생성될 수 있도록 하였다.

필드 네트워크 모델의 경우에는 HVAC등의 제어 시스템 모델에서 생성되는 센서와 콘트롤러 데이터들이 네트워크를 통하여 전송되도록 하여, 추후에 빌딩 내의 모든 제어 시스템 모델들이 네트워크 시스템 모델을 통하여 통합될 수 있도록 하기 위한 기반을 마련하였다. 네트워크 시뮬레이션 모델에서는 생성된 데이터가 전송큐에 대기하였다가 네트워크를 통하여 전송되는 과정을 애니메이션 기능을 통하여 보여줌으로써 시각적인 효과를 극대화하였다. 그림 6은 네트워크 시스템의 시뮬레이션 모델의 실시간 애니메이션 화면을 보인 것이다.

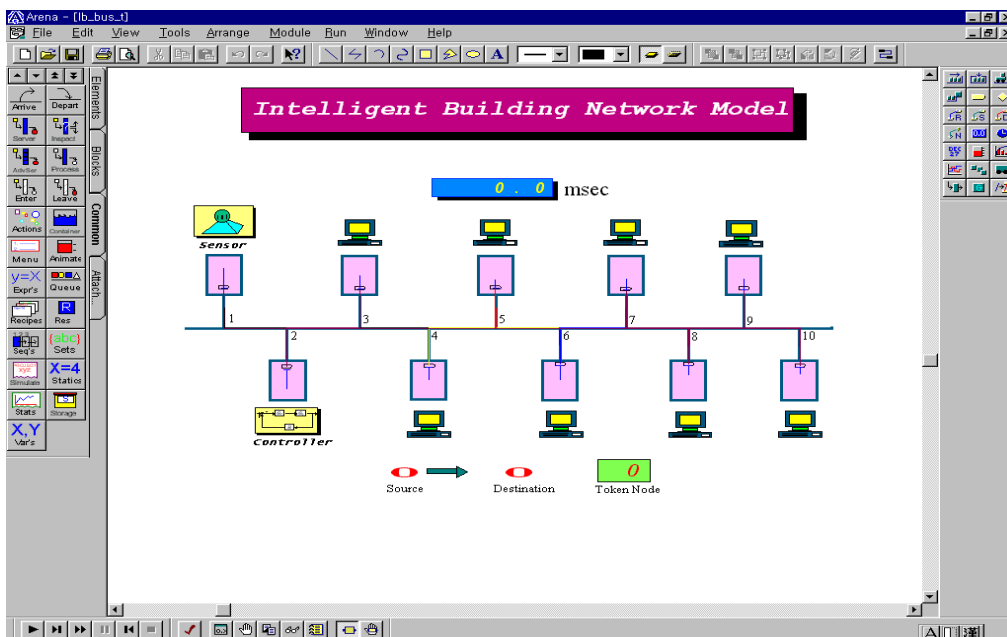


그림 6. 네트워크 시스템 시뮬레이션 모델의 애니메이션 화면

4. 시뮬레이션 모델 적용례 및 결과

4.1 공조시스템 시뮬레이션 모델의 적용례

표 3과 같은 열전달 함수의 계수(Heat transfer function coefficient) 값을 갖는 ASHRAE 벽체32번(4-in 콘크리트 + 2-in 단열재)^[5] 둘러싸인 공간을 대상으로 본 연구에서 개발한 공조시스템 시뮬레이션 모델을 적용해 보았다. 대상 공간은 그림 7에 보인 것과 같이 3개의 외벽과 3개의 간벽으로 둘러싸인 것으로 가정하였다.

그림 8은 시뮬레이션 초기에 실내 설정온도를 22℃로 하였다가 시뮬레이션 시간이 49가 되었을 때 설정온도를 20℃로 변화시켰을 경우의 실온의 시각별 변화를 나타낸 것으로서 외기온도와 태

양복사에너지를 24시간을 주기로 같은 값을 사용하였기 때문에 곡선의 주기적인 변화를 보이고 있지만 설정 온도의 변화를 원만히 추종하고 있음을 볼 수 있다. 그림 9는 공조 시스템 모델의 화면으로서 시각별 상당외기온, 공조기로부터 공급된 열량 및 실온의 그래프 등을 보여주고 있다.

표 3. ASHRAE 벽체 32번^[5]의 전달 함수의 계수

	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			

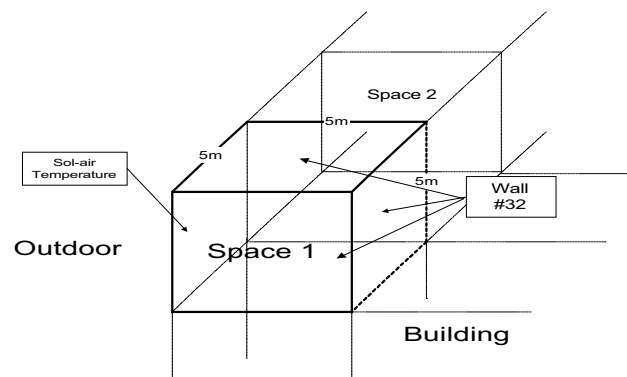


그림 7. 단위 공간(Space)의 예 (외벽3+간벽3)

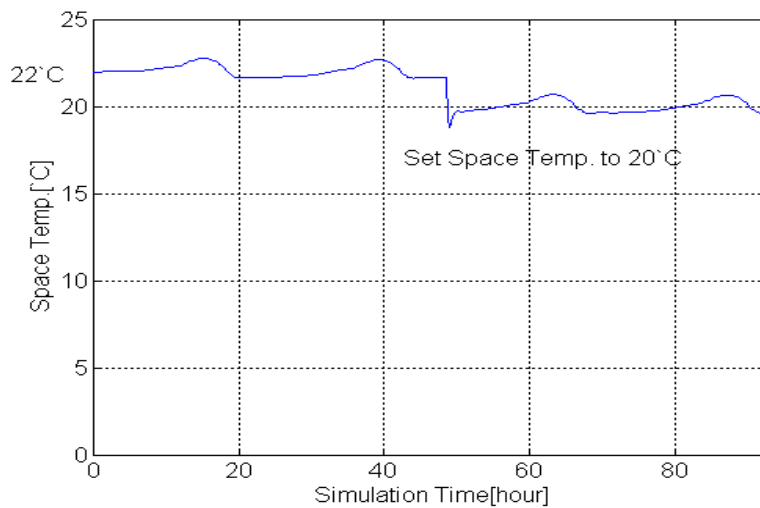


그림 8. 실내의 온도 변화

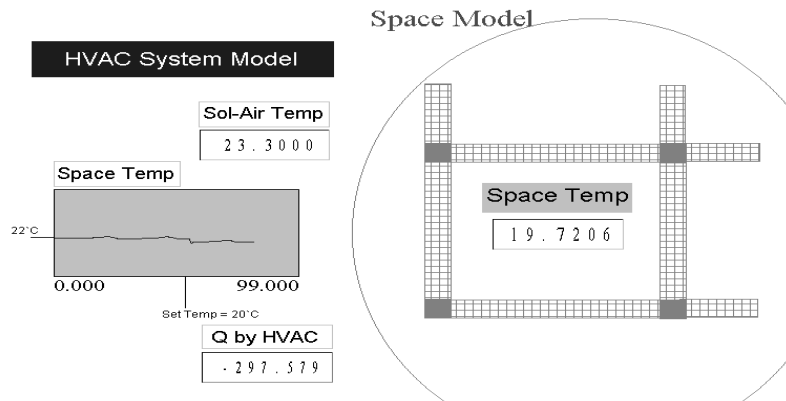


그림 9. 공조 시스템 시뮬레이션 모델의 화면

4.2 엘리베이터 시스템 시뮬레이션 모델의 적용 예

엘리베이터 시스템의 시뮬레이션에 대한 가정으로서 바로 인접한 층 사이에서는 엘리베이터를 이용한 이동은 없는 것으로 하였으며, 엘리베이터의 제어는 축적제어 방식을 모델링하였다. 위로 올라가려는 호출이 가장 빈번한 출근 시간대의 60분 동안 엘리베이터를 운행하였을 때, 엘리베이터의 이용률과 층별 평균 대기 시간을 시뮬레이션을 통해 조사해 보았다. 시뮬레이터에 입력된 데이터는 아래와 같다.

- 건물 데이터:
 - 층수= 10 층
 - 층간거리= 3m
- 승객 데이터
 - Arrival Pattern= Up-peak
 - Main terminal= 1층
 - 승객 탑승 시간= 0.5 sec/person
- 엘리베이터 데이터
 - 승차 정원= 11명, 15명
 - 속도= 1.5 m/sec
 - 가속도= 0.5 m/sec
 - 출입문 열리는 시간= 0.8 sec
 - 출입문 닫히는 시간= 1.5 sec

그림 10은 엘리베이터 시스템의 동작을 실시간으로 시뮬레이션하는 애니메이션 화면을 보인 것이다. 위에서 보인 입력 데이터를 갖고 시뮬레이션한 결과, 승차 정원을 11명과 15명으로 조정했을 때 엘리베이터의 이용률은 각각 표 4, 표 5와 같이 나타났다. 또한, 엘리베이터 사용자의 층별 평균 대기 시간은 표 6과 같이 나타났다.

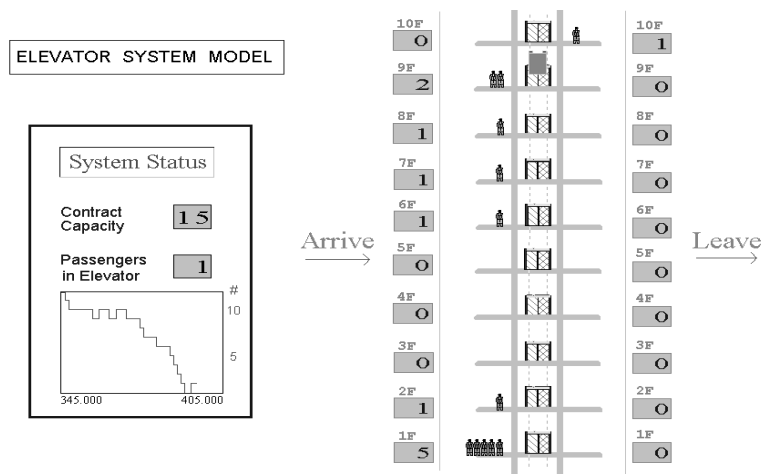


그림 10. 엘리베이터 시스템 시뮬레이션 모델의 애니메이션 화면

표 4. 승차정원이 11명인 경우의 시뮬레이션 결과 (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 5. 승차정원이 15명인 경우의 시뮬레이션 결과 (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 6. 엘리베이터 이용자의 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

4.3 재난대피 시뮬레이션 모델의 적용례

건물에 화재가 발생했을 경우 재실자들이 방화구조의 비상계단까지 도달하는데 소요되는 시간을 시뮬레이션을 통해 계산하기 위해 본 연구에서는 센터코어 방식의 건물을 모델링해 보았다. 이 건물은 실존하는 건물의 평면을 약간 변형한 것으로서 주요 입력 데이터는 아래와 같다.

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

표 7은 재실자들이 대피하는데 소요된 시간을 보인 것이고, 그림 11은 화재 발생 후 화재 경보를 인지한 재실자들의 대피 장면을 묘사한 애니메이션 화면이다.

표 7. 재난 대피 시간 (단위 : 초)

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

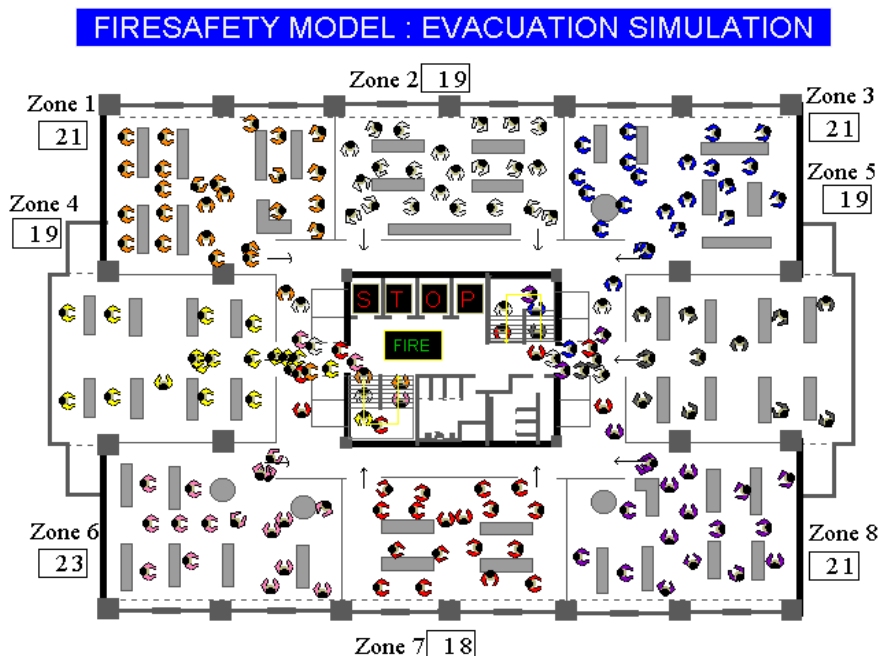


그림 11. 재난대피 시뮬레이션 모델의 애니메이션 화면

4.4 네트워크 시스템 시뮬레이션 모델의 적용 예

본 연구에서는 토큰-패싱 방식으로 동작되는 네트워크 시스템을 모델링하였다. 그림 12는 네트워크 시스템 모델의 애니메이션 화면을 보인 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 10개의 노드로 구성된 네트워크 시스템 모델에서 노드 1과 노드 2에는 센서와 컨트롤러가 접속되어 100 msec의 주기로 데이터를 주기적으로 생성하며, 다른 노드들에는 컴퓨터들이 접속되어 평균 100 msec의 지수 분포 함수로 데이터를 생성하는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션 모델의 주요 입력 데이터는 다음과 같다.

- 네트워크 내의 노드(node) 수: 10
- 네트워크의 데이터 전송 속도: 0.5 Mbps
- 각 노드에서 데이터 생성 주기: 100 msec (노드 1,2는 주기적; 노드 3-10은 지수분포함수)
- 각 노드에서 생성되는 데이터의 길이: 1024 bits
- 각 노드의 전송큐 용량: 1
- 각 노드에서 데이터 전송을 위하여 소요되는 처리 시간: 1.5 msec

표 8은 시뮬레이션 결과를 보인 것이다. 센서 및 컨트롤러에서 주기적으로 생성되는 데이터의 경우 데이터 전송 지연 시간이 디지털 제어 시스템의 샘플링 주기보다 크면 시스템의 제어 성능이 저하할 뿐만이 아니라 컨트롤러 신호의 왜곡(jitter) 현상에 의하여 구동기의 마모를 가속화할 수 있으므로 전송 지연 시간은 제어 시스템의 샘플링 주기보다 작아야 한다^[10]. 본 연구를 통하여 개발된 시뮬레이션 모델은 네트워크 시스템의 데이터 지연 시간을 미리 예측 가능하게 하여 네트워크 시스템을 설치하는데 있어서 발생할 수 있는 시행 착오를 최소화할 수 있을 것으로 사료된다.

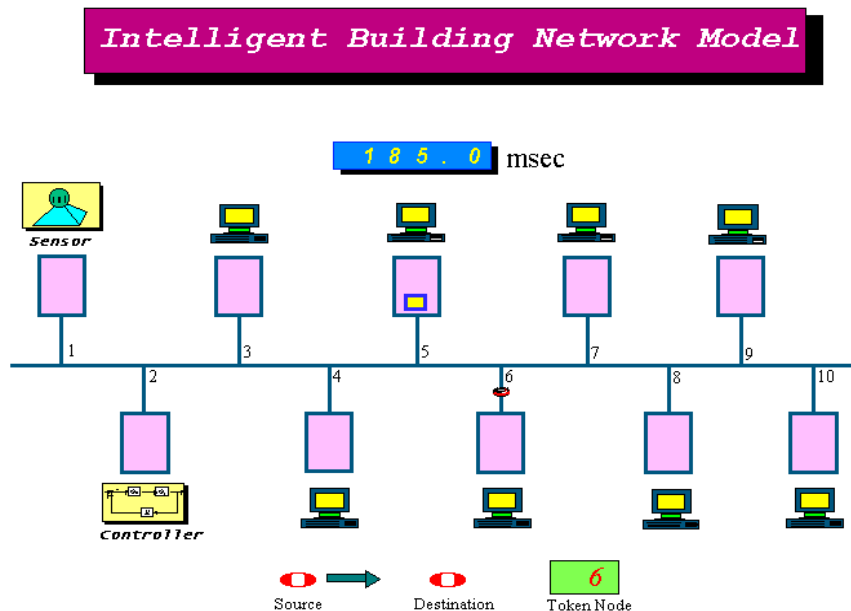


그림 12. 네트워크 시스템 시뮬레이션 모델의 애니메이션 화면

표 8. 필드 네트워크 시스템의 시뮬레이션 결과

Node	생성된 데이터	전송된 데이터	수신된 데이터	Avg. Queueing Delay (msec)	Avg. System Delay (msec)
1	236	235	235	21.053	23.101
2	236	235	235	25.112	27.106
3	29	29	30	2.688	4.736
4	29	29	29	2.097	4.145
5	29	29	30	2.391	4.439
6	28	28	27	2.557	4.605
7	28	28	23	2.190	4.238
8	28	28	25	2.306	4.354
9	28	28	35	2.506	4.554
10	28	28	28	2.490	4.538

총 시뮬레이션 시간= 23.5sec

전체 시스템의 평균 Queueing Delay : 6.397 msec

전체 시스템의 평균 System Delay : 8.445 msec

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 건축 설계의 초기단계에서 각종 인텔리전트 빌딩의 제어 시스템들의 성능을 미리 평가해 볼 수 있는 통합 시뮬레이터 개발을 목표로 우선 공조시스템과 엘리베이터 시스템, 재난대피 및 건물자동화 네트워크 시스템에 대한 초보적인 시뮬레이션 모델들을 개발하였다. 그리고 간단한 사례에 대해 시뮬레이션을 수행해 봄으로써 공조기의 용량결정, 엘리베이터의 운송 능력 파악, 화재 등의 재난시 재실자의 안전한 대피를 위한 건축 및 동선 계획, 네트워크 시스템 설계 등을 시뮬레이션을 통해 평가 할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

본 논문에서 소개된 시뮬레이션 모델들은 현재에도 좀더 복잡한 제어방식을 모델링할 수 있도록 계속 보완·개발 중에 있다. 물론, 모든 시뮬레이션 모델의 경우에서처럼 본 연구에서 개발된 모델들은 향후 실제의 건물을 대상으로 실험과 관찰을 통하여 검증의 단계를 거칠 필요가 있다.

앞으로 기타 시스템에 대한 시뮬레이션 모델을 추가 개발하여 발전시킴으로써 향후 인텔리전트 빌딩의 통합 시뮬레이션이 가능한 통합 시뮬레이터가 개발될 수 있을 것으로 기대된다. 인텔리전트 빌딩 시스템의 통합시뮬레이터를 사용함으로써 건축주는 건물의 용도와 규모 및 사업의 특성에 적합한 경제적인 시스템의 구입이 가능하게 될 것이며, 인텔리전트 빌딩 시스템 공급자 또는 시스템 통합설계자들은 시공 후의 시행착오를 최소화 함으로써 결과적으로 시간적 및 경제적인 손실을 줄일 수 있게 될 것이다.

6. 참고 문헌

- [1] 박귀태 외. 1994. “인텔리전트 빌딩 기술의 특집,” 전기학회지, 제 43권, 10호.
- [2] Systems Modeling Co. 1995. *ARENA Template Reference Guide*, System Modeling Co.
- [3] Pegden, C.D., R.E. Shannon, and R.P. Sadowski. 1995 *Introduction to Simulation Using SIMAN*, McGraw-Hill, Inc.
- [4] Carlson, R.A. and R. Giandomenico. 1994. *Understanding Building Automation Systems*, John Wiley & Sons.
- [5] ASHRAE. 1985. *ASHRAE Handbook 1985 Fundamentals*, ASHRAE Inc. pp. 2631-2634.
- [6] Song, K.D. 1989. *Optimization of Building Shape with Respect to Building Orientation and Local Climatic Conditions*, Master's Thesis, Univ. of Oklahoma, pp.29-39.
- [7] Singh, M.G. 1987. *System & Control Encyclopedia Vol. 2*, Pergamon Press, pp.1420-1430, vol.3, pp.2099-2101.
- [8] Barney, G.C. 1986. *Elevator Technology*, Ellis Horwood, pp. 63-70.
- [9] J. R. Piementel. 1990. *Communication Networks for Manufacturing*, Prentice-Hall.
- [10] Hong, S.H. 1995. "Scheduling Algorithm of Data Sampling Times in the Integrated Communication and Control Systems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.3, No.2.