

# 확산 Markov 프로세스 모델을 이용한 Queueing System 기반 지능 부하관리에 관한 연구

논 문
58-5-4

## A Study on the Intelligent Load Management System Based on Queueing System with Diffusion Markov Process Model

김 경 동\* · 김 석 현\*\* · 이 승 철†  
(Kyung-Dong Kim · Seok-Hyun Kim · Seung-Chul Lee)

**Abstract** - This paper presents a novel load management technique that can lower the peak demand caused by package airconditioner loads in large apartment complex. An intelligent hierarchical load management system composed of a Central Intelligent Management System(CIMS) and multiple Local Intelligent Management Systems(LIMS) is proposed to implement the proposed technique. Once the required amount of the power reduction is set, CIMS issues tokens, which can be used by each LIMS as a right to turn on the airconditioner. CIMS creates and maintains a queue for fair and proper allocation of the tokens among the LIMS requesting tokens. By adjusting the number tokens and queue management policies, desired power reduction can be achieved smoothly. The Markov Birth and Death process and the Balance Equations utilizing the Diffusion Model are employed for evaluation of queue performances during transient periods until the static balances among the states are achieved. The proposed technique is tested using a summer load data of a large apartment complex and give promising results demonstrating the usability in load management while minimizing the customer inconveniences.

**Key Words** : Load Management, Load Management Queue, Peak Load, Markov Birth and Death Process, Airconditioner Load, Diffusion Model

### 1. 서 론

부하관리는 최대 수요를 억제하거나 이동시키고 부하 평균화를 도모하여 전력계통을 안정적으로 운영하고 설비의 이용 효율도 높이는 것을 그 목적으로 하고 있다. 따라서 전력가격과 시스템 안정성을 고려한 다양한 부하관리 프로그램들이 개발 적용되고 있고 이들 프로그램에 대한 지속적인 평가도 이루어지고 있다[1][2]. 우리나라에서는 최대수요 전력제어, 직접제어, 휴가 보수, 자율 절전, 비상절전 및 심야전력요금제도 등과 같은 부하관리제도가 마련되어 부하관리에 참여하는 수용가들에게는 전력요금의 혜택과 인센티브를 부여하고 있다. 특히 통상적으로 1년중 최대 수요전력을 기록하는 주요원인이 되는 여름철의 냉방설비에 대한 직접 부하제어에 대해서는 비교적 활발한 연구가 수행되어져 왔다. Morris 등은 무선 주파수대를 이용한 단방향 에어컨 부하관리 기법에 대한 연구를 수행한 바 있고[3], 여름철 기온 상승으로 인한 1[°c] 온도 상승 시 추가 발생 부하량을 각 소비자 계층별로 나누어 분석한 연구[4] 및 직접부하제어를 통한 ILM(Interruptible Load Management)에 관한 연구[5] 등이 진행되었다. 또한 융통성 있는 부하제어 스케줄링과

직접부하 관리 시 고려해야할 제약 조건(Constraints), 즉 외부 온도, 부하 동작특성 및 부하 관리를 위한 조작에 따른 설비의 수명등을 고려하여 기존 부하관리 프로그램의 효율을 향상시키기 위한 연구도 진행된 바 있다[6].

최근에는 직접 부하 제어를 통한 부하관리에서 피크 부하 억제와 함께 사용자의 Thermal Comfort Level(TCL)을 높이고 발전회사의 수입 면에서도 이익을 낼 수 있도록 하기 위하여 부하제어가 가능한 부하 군을 대상으로 부하차단 시간 및 냉방부하 가동시간에 대한 최적의 스케줄링을 위하여 Iterative Deepening Genetic Algorithm이 개발된 바 있다.[7] 또한 건물의 내부온도와 습도를 기반으로 사용자가 느끼는 쾌적 상태를 유지하기 위한 유효온도(Effective Temperature)의 설정 및 이를 기반으로 현 상태와 다음 상태에서의 엔탈피 차이를 최소화하기 위한 LEE(Least Entalphy Estimation) 알고리즘에 관한 연구가 수행되었고 [8,9] 이를 기반으로 냉방부하의 사용양태에 직접적인 영향을 미치는 외부온도를 고려하여 제어가능 부하군의 냉방부하에 대한 최소 온(ON) 및 오프(OFF) 지속시간을 구하여 최적의 직접부하제어 스케줄링을 하기 위한 퍼지 Thermal Comfort 제어기 개발에 관한 연구가 진행된 바 있다[10].

본 연구실에서는 부하관리시 에어컨을 가동할 수 있는 권리에 해당하는 적정수의 토큰을 할당하고 큐잉이론(Queueing Theory)과 Markov의 생성 및 소멸 프로세스를 적용하는 기법에 대하여 발표한 바 있다[11].

지능 부하관리를 통하여 수용가의 불편을 최소화하면서도 자율적으로 부하를 관리하기 위하여 제안하는 부하관리시스템은 필요 부하 관리량을 전력회사로부터 통보 받아 이를

\* 정 회 원 : 중앙대 전자전기공학부 · 박사과정  
\*\* 준 회 원 : 중앙대 전자전기공학부 · 석사과정  
† 교신저자, 중신회원 : 중앙대 전자전기공학부 교수 · 공학  
E-mail : scllee@cau.ac.kr  
접수일자 : 2009년 3월 20일  
최종완료 : 2009년 4월 9일

이행하는 중앙지능관리서버 (Central Intelligent Management Server: CIMS)와 중앙관리서버와의 협조를 통해 각 세대의 냉방기를 관리 할 수 있는 다수의 로컬지능관리서버 (Local Intelligent Management Server: LIMS)가 네트워크로 연결된 구조로 구성하였다. CIMS와 LIMS가 상호 협력하며 부하를 관리하기 위한 수단으로 CIMS는 필요 관리량에 따라 적정수의 토큰(Token)을 발행하고 각 LIMS는 집안의 상황에 따라 냉방기를 가동하기 원할 경우 CIMS에게 냉방기를 가동할 권리에 해당하는 토큰을 요청하는 방안을 마련하였다. CIMS는 LIMS들의 토큰 요청을 관리하기 위한 큐(Queue)를 구성하여 관리하고 토큰을 요구한 각 LIMS들은 토큰을 할당 받는 대로 자신이 담당하는 세대내의 냉방기를 가동하도록 하며 일정조건이 만족되면 토큰을 반납하고 에어컨 가동을 정지하는 패턴을 반복하도록 한다.

본 논문에서는 큐잉시스템의 관리를 위해 필요한 각종 지표, 특히 큐에서의 기다리는 시간과 평균 큐의 길이를 산정하는 것이 큐에 들어와 있는 총 LIMS 수에 해당하는 각 상태들 간의 전이가 평형상태를 이룬 후에야 가능한 종래의 정적 평형식에 기반한 접근 방법[11]에서 나아가 평형이 이루어지는 과정에서도 시간에 따라 연속적으로 큐의 성능을 해석할 수 있도록 하기 위해 확산모델(diffusion model)을 이용한 Markov 생성 및 소멸 프로세스 기반 큐잉시스템을 제안 하였다. 제안하는 큐잉 시스템을 이전에 사용하였던 동일한 사례에 적용하여 이전 결과와의 비교를 통해 그 타당성과 효용성을 입증하였다.

2. 큐잉(Queueing) 시스템을 이용한 냉방부하의 관리

2.1 큐잉시스템의 구성

냉방기를 가동하기를 원하는 각 세대의 로컬관리 서버는 냉방기를 가동할 수 있는 권리에 해당하는 토큰을 중앙 부하관리(CIMS) 서버에 요청하고 중앙 관리 서버가 운영하는 큐에서 토큰이 부여 될 때 까지 기다리도록 한다. 따라서 부하관리 대상 아파트 단지 내의 전체 세대수에 해당하는 LIMS의 총 수가 큐에 도착할 수 있는 모집단의 규모가 된다. 각 LIMS의 토큰 요청 시간 간격은 토큰을 반납하여 냉방기 가동을 중지 한 후 집안의 온도 상승 속도에 따라 랜덤하게 변하며 요청률(Request Rate)이  $\lambda$ 인 지수 분포를 가지는 것으로 가정한다. 따라서 CIMS의 관점에서 본 큐에의 도착율은 현재 큐잉시스템에 들어와 있는 LIMS 수를 제외한 나머지 LIMS 수에  $\lambda$ 를 곱한 값이 된다.

토큰을 부여받은 LIMS가 냉방기를 가동하고 토큰을 반납 할 때까지 또는 회수 당할 때까지의 시간이 각 LIMS에 대한 서비스 시간이 되고 역시 각 세대의 냉방부하에 따라 랜덤하게 변하며 각 토큰의 서비스율(Service Rate)  $\mu$ 도 지수분포를 가지는 것으로 가정한다.

따라서 토큰을 요청한 LIMS의 수가 토큰수보다 적으면 LIMS는 토큰을 요청하는 대로 큐에서 대기할 필요 없이 즉시 토큰을 할당 받아 냉방기를 가동 할 수 있게 되고 요청한 LIMS의 수가 토큰 수 보다 많아지면 토큰 수만큼의 LIMS가 서비스를 받고 나머지 LIMS는 큐에서 대기하게 된다.

큐 운영정책(Queue Policy)은 선입선출 FCFS(First Come First Served ; FCFS)로 하고 수용가의 불편을 최소화하기위해 처음으로 큐에 진입하는 LIMS는 우선적으로 토큰을 할당하는 것으로 한다.

그림 1에 토큰 관리를 위한 큐잉시스템을 나타내었다.

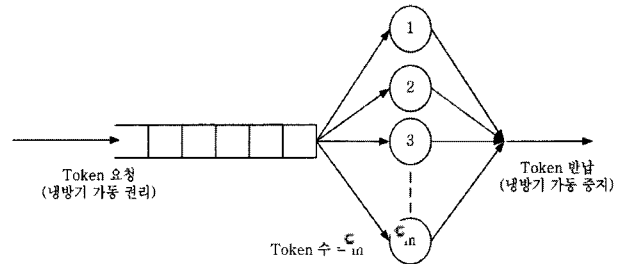


그림 1 토큰 관리 Queueing System  
Fig. 1 Queueing System for Token Management

2.2 큐의 길이 및 대기시간 관리

큐잉시스템에 들어와 서비스를 받거나 기다리는 LIMS의 총 수  $n$ 이 변하는 과정은 그림 2에서 보이는 바와 같이 Markov 생성 및 소멸과정(Birth and Death Process)으로 나타낼 수 있다. 토큰 수가  $c$ 개이고 전체 LIMS의 수가  $m$ 일 때 큐에서 본 도착률  $\lambda_n$ 와 서비스율  $\mu_n$ 은 각각 다음과 같이 된다.

$$\lambda_n = \begin{cases} (m-n)\lambda & (0 \leq n < m-1) \\ 0 & (n \geq m) \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu & (1 \leq n \leq c) \\ c\mu & (c+1 \leq n \leq m) \end{cases} \quad (2)$$

그림에서 각 노드(Node) 즉 상태는 큐잉시스템에 들어와 있는 LIMS의 총 수를 나타낸다.

총  $n$ 개의 요청이 들어와 평형상태(balanced-state)가 이루어졌을 때 각 상태 확률  $P_n$ 을 구하기 위한 평형식(balance equation)을 세우면,

$$P_0\lambda_0 = P_1\mu_1 \quad (n=0) \quad (3)$$

$$P_1\lambda_1 + P_1\mu_1 = P_0\lambda_0 + P_2\mu_2 \quad (n \geq 1) \quad (4)$$

$$P_2\lambda_2 + P_2\mu_2 = P_1\lambda_1 + P_3\mu_3$$

⋮

으로 되고 (1)과 (2)의  $\lambda_n$ 과  $\mu_n$ 을 대입하면

$$P_n = \begin{cases} \frac{m!}{(m-n)!n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 & (1 \leq n \leq c) \\ \frac{m!}{(m-n)!c!c^{n-c}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 & (c+1 \leq n \leq m) \end{cases} \quad (5)$$

$$P_0 = \left[ \sum_{j=0}^{c-1} \frac{m!}{(m-j)!j!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^j + \sum_{j=c}^m \frac{m!}{(m-j)!c!c^{j-c}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^j \right]^{-1} \quad (6)$$

을 얻을 수 있다.

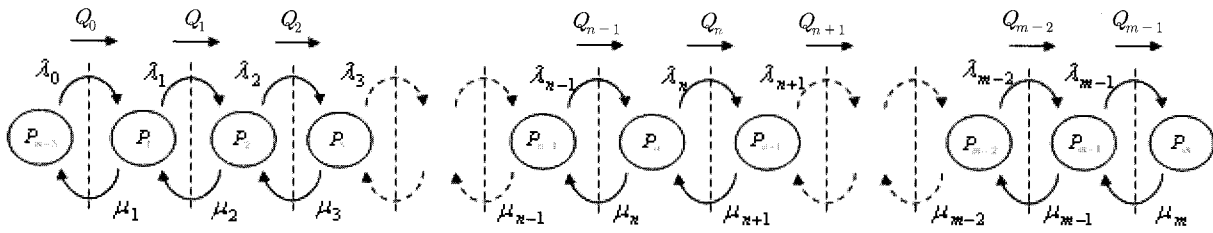


그림 2 마르코프 생성 및 소멸 과정  
Fig. 2 Markov Birth and Death Process

서비스를 요청할 것으로 기대되는 LIMS의 총 수 \$L\_r\$은

$$L_r = E(N) = \sum_{n=0}^m n P_n \quad (7)$$

이 되고 큐에서 대기할 것으로 기대되는 평균 LIMS의 수 \$L\_q\$는

$$L_q = \sum_{n=c}^m (n-c) P_n \quad (8)$$

이 된다. 큐에서 본 LIMS의 도착율의 기대치 \$\lambda\_{eff}\$는

$$\lambda_{eff} = \lambda(m - L_r)$$

이 되고, Little's Formula에 의해 LIMS의 큐잉 시스템 내에서의 평균체제시간은

$$S_t = \frac{L_r}{\lambda_{eff}}$$

이 된다. 끝으로 큐에서의 평균 대기시간(Waiting time) \$W\_q\$는

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{eff}} = \frac{L_q}{\lambda(m - L_r)} \quad (9)$$

가 된다.

### 3. Diffusion Markov 프로세스모델 기반 큐잉시스템의 구성

전절에서 유도한 각 상태의 확률 \$P\_n\$과 이를 기초로 유도된 큐에서의 대기열의 기대치 \$L\_q\$, 평균 대기시간 \$W\_q\$ 및 큐잉 시스템 내에 들어와 있는 전체 LIMS 수의 기대치 \$L\_r\$은 모두 상태간의 천이가 평형을 이루었을 때의 값이 된다. 그러나 \$\lambda\$와 \$\mu\$의 비율 \$\alpha = \frac{\lambda}{\mu}\$가 커질수록 큐의 길이가 길어지게 되고 평형이 이루어지기까지는 상당시간이 걸려 부하관리 초기에 큐잉시스템을 해석하기 어려운 문제점이 있다. 본 절에서는 전체적으로 평형이 이루어 질 때까지 부분적으

로 평형이 이루어지면서 과급되어 나가는 과정에서도 큐를 관리할 수 있도록 하기 위하여 확산마르코프 프로세스 모델을 수립 하고자 한다.

서비스를 받기 위하여 큐에서 기다리거나 서비스를 받는 LIMS 들의 수를 나타내는 각 상태간의 천이는 열 확산 Markov 프로세스 모델을 사용하여 다음과 같이 전개할 수 있다.

그림 3과 같은 열확산 모델에서 미소체적내의 열량은 \$C\_p \tau A \Delta x\$로 나타낼 수 있고, \$C\_p\$와 \$\tau\$는 각각 비열과 온도를 의미한다.

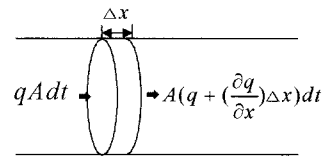


그림 3 열확산 모델  
Fig. 3 Heat Diffusion Model

\$dt\$ 동안 미소체적에 축적되는 열량의 변화는

$$C_p \left(\frac{d\tau}{dt}\right) A \Delta x dt \quad (10)$$

가 되고 이때 열속 \$q\$에 의해 미소체적으로부터 방사되는 열량은

$$- \frac{\partial q}{\partial x} A \Delta x dt \quad (11)$$

가 된다. 국지적인 평형상태에서 누적되는 열속과 방사되는 열속은 같아지므로 식 (10)과 (11)로부터

$$C_p \left(\frac{\partial \tau}{\partial t}\right) = - \frac{\partial q}{\partial x} \quad (12)$$

로 놓을 수 있다.

한편 그림 1의 Markov 생성 및 소멸 과정을 시변(time varying) 모델화 하면,

$$Q_n = \lambda_n P_n - \mu_{n+1} P_{n+1} \quad (13)$$

가 되고 \$\Delta t\$ 동안의 상태 \$n\$의 확률 변화는

$$P_n(t + \Delta t) - P_n(t) = -(Q_n - Q_{n-1})\Delta t$$

로 놓을 수 있다. 다시

$$\frac{P_n(t + \Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} = -\frac{Q_n - Q_{n-1}}{n - (n-1)} \tag{14}$$

로 변형하여  $\Delta t \rightarrow 0, m \rightarrow \infty$  로 하면

$$\frac{\partial P_n}{\partial t} = -\frac{\partial Q_n}{\partial n} \tag{15}$$

가 되어 식 (12) 와 동일한 형태로 됨을 알 수 있다.

모든  $P_n (n=1,2 \dots m)$ 에 대하여 벡터 식으로 나타내면,

$$\frac{\partial \mathbb{P}}{\partial t} = -\frac{\partial \mathbb{Q}}{\partial n} \tag{16}$$

가 되고 여기서  $\mathbb{P}(t) = [P_0(t) P_1(t) \dots P_m(t)]^T$  가 된다.

다시 식 (14) 와 (15) 로부터

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_n}{\partial t} &= -\frac{\partial Q_n}{\partial n} \\ &\approx -\frac{Q_n - Q_{n-1}}{n - (n-1)} = -Q_n + Q_{n-1} \end{aligned}$$

로 놓을 수 있고 식 (13)의  $Q_n$  을 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_n}{\partial t} &= -\lambda_n P_n + \mu_{n+1} P_{n+1} + \lambda_{n-1} P_{n-1} - \mu_n P_n \\ &= \lambda_{n-1} P_{n-1} - (\lambda_n + \mu_n) P_n + \mu_{n+1} P_{n+1} \\ &= [\lambda_{n-1} - (\lambda_n + \mu_n) \mu_{n+1}] \cdot \begin{bmatrix} P_{n-1} \\ P_n \\ P_{n+1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이 된다. 따라서 식 (16)은

$$\frac{\partial \mathbb{P}}{\partial t} = \mathbb{L} \cdot \mathbb{P} \tag{17}$$

로 나타낼 수 있고 여기서

$$\mathbb{L} = \begin{bmatrix} -\lambda_0 & \mu_1 & 0 & \dots & \dots \\ \lambda_0 & -\lambda_1 - \mu_1 & \mu_2 & 0 & \dots \\ 0 & \lambda_1 & -\lambda_2 - \mu_2 & \mu_3 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\lambda_{m-1} - \mu_m \end{bmatrix} \tag{18}$$

이 된다. 식 (17)로 부터

$$\mathbb{P}(t) = e^{\mathbb{L}t} \mathbb{P}(0) = \mathbb{S} e^{\mathbb{A}t} \mathbb{S}^{-1} \mathbb{P}(0) \tag{19}$$

가 된다. 여기서

$$\mathbb{L} = \mathbb{S} \mathbb{A} \mathbb{S}^{-1}$$

이고  $\mathbb{S}$ 와  $\mathbb{A}$ 는 각각 고유 값 행렬과 고유 값 대각 행렬이 된다.

$\mathbb{L}$ 에 식 (1)과 (2)의  $\lambda_n$ 과  $\mu_n$ 의 표현을 대입하면

$$\mathbb{L} = \begin{bmatrix} -m\lambda & \mu & 0 & \dots & \dots \\ m\lambda & -(m-1)\lambda - \mu & 2\mu & \dots & \dots \\ 0 & (m-1)\lambda & -(m-2)\lambda - 2\mu & \dots & \dots \\ 0 & 0 & (m-2)\lambda & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\lambda - c\mu \end{bmatrix}$$

$\lambda = \alpha\mu$ 로 놓으면

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} -m\alpha\mu & \mu & 0 & \dots & \dots \\ m\alpha\mu & -(m-1)\alpha\mu - \mu & 2\mu & \dots & \dots \\ 0 & (m-1)\alpha\mu & -(m-2)\alpha\mu - 2\mu & \dots & \dots \\ 0 & 0 & (m-2)\alpha\mu & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -(\alpha+c)\mu \end{bmatrix} \\ &= \mu \begin{bmatrix} -m\alpha & 1 & 0 & \dots & \dots \\ m\alpha & -(m-1)\alpha - 1 & 2 & \dots & \dots \\ 0 & (m-1)\alpha & -(m-2)\alpha - 2 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & (m-2)\alpha & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -(\alpha+c) \end{bmatrix} \\ &\triangleq \mu \mathbb{L}' \tag{21} \end{aligned}$$

로 놓을 수 있다. 따라서 식 (19)에서

$$\mathbb{P}(t) = e^{\mu \mathbb{L}' t} \mathbb{P}(0) \tag{22}$$

가 된다. 시간 t에 큐에 들어와 있는 LIMS의 총 수의 기대치는

$$L_r(t) = \sum_{n=0}^m n P_n(t) \tag{23}$$

가 되고, 이 때 큐에서 토론 할당을 기다리고 있는 LIMS 수의 기대치는

$$L_q(t) = \sum_{n=c}^m (n-c) P_n(t) \tag{24}$$

가 된다. 따라서 이로부터 시간 t에 큐에서 본 LIMS의 도착율의 기대치는

$$\lambda_q(t) = \lambda(m - L_r(t)) \tag{25}$$

로 되고 시간 t에서 LIMS의 큐잉시스템에서의 평균 체제시간은

$$S_q(t) = \frac{L_q(t)}{\lambda_q(t)} \quad (26)$$

로부터 구할 수 있다.

시간  $t$ 에서 토큰을 요청한 후 할당받기까지 큐에서 대기해야할 시간의 기대치는

$$W_q = \frac{L_q(t)}{\lambda_q(t)} \quad (27)$$

가 된다.

#### 4. 사례 연구

본 논문에서는 제시한 확산 Markov 프로세스 모델과 선행 연구[11]에서의 결과를 비교하여 제안된 모델의 타당성과 효율성을 확인하기 위하여 선행연구에서 제시한 사례를 그대로 인용하였다. 표 1은 전력소비가 비교적 큰 서울의 S 주상복합아파트의 2005년도 8월 전력 사용결과를 나타낸다. 전체 세대수는 740이고 해당 월의 전력 소비량은 1,575,677 [kWh], 단지 전체의 일평균 사용량은 52,522 [kWh]로서 그림 4와 같은 우리나라의 전형적인 8월의 일 부하 곡선을 사용하여 아파트 단지 전체의 일평균 사용량 5,028[kWh]로부터 피크 시 사용 전력을 약 3,053[kW] 내외로 산출 하였다.

표 1 2005년 8월 S 주상복합아파트 평균전기사용량 (kWh)

Table 1 Power consumption of S apartment complex in August, 2005(kWh)

일시	세대수	세대당 월평균 사용량	전체 월 사용량	전체 일평균 사용량
'05.8	740	2,126	1,575,677	52,522

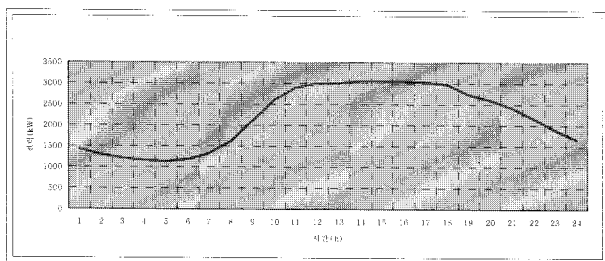


그림 4 전형적인 8월 일 부하 곡선  
Fig. 4 Typical daily load curve in August

절감목표인 최대 수요관리 전력은 최대 수요전력의 50%인 1526.5[kW]로 설정하였다. 세대 당 냉방부하의 평균 소비전력을 3[kW], 전체 부하에서 냉방부하 비중을 70%로 가정할 경우 냉방부하로 인한 총 소비 전력은 2137.1[kW]가

된다. 1526.5[kW]를 절감하기 위해서는 냉방부하가 610.6[kW]만 소비하도록 관리하여야하며 이 경우 목표 최대 수요전력으로 절감하기 위해 필요한 토큰의 수는 610.6[kW]/3[kW]=204개가 된다.

따라서  $c=204$ ,  $m=740$ 이며 LIMS당 평균 15분마다 토큰을 요청하고 토큰을 할당 받았을 경우 평균 12분을 가동한다면 각 LIMS당 토큰 요청율과 토큰 할당율은 각각  $\frac{1}{15}$  회/min 와  $\frac{1}{12}$  회/min 가 된다.

처음 부하관리를 시작할 때 일단 토큰 요청을 받아야만 할당이 가능하도록 하면 초기 조건은

$$P_0 = 1$$

$$P_n = 0, n \geq 1 \text{의 경우}$$

로 놓을 수 있다.

$P(t) = e^{Lt}P(0)$  에서  $t$ 를 변화시켜가며 산출한 각  $P_n(t)$  값에 대한 결과를 그림 5에 나타내었다.

시간이 경과함에 따라 토큰을 요청하는 LIMS의 총 수의 확률 분포는 점차 LIMS의 수가 늘어나는 방향으로 이동함을 알 수 있고 약 1시간 내외가 경과하면 전체적으로 평형상태가 이루어져 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다.

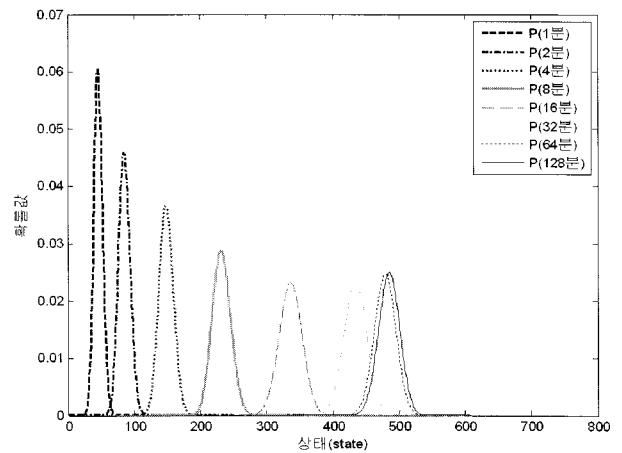


그림 5 시간에 따른 상태 확률 P의 변화  
Fig. 5 Changes in state probabilities with respect to time

그림 6은 예상되는 LIMS당 토큰할당 요청율을 평균 15분당 1회로 할 경우 각 LIMS당 매 회 평균 토큰할당 시간을 8분( $\mu=0.125$ )으로부터 점차 증가시켜가며 시간이 경과됨에 따라 토큰을 할당받기 위해 큐에서 기다리는 LIMS 수의 시간에 따른 변화를 나타내었다.

각 LIMS당 토큰 할당 시간을 점차 증가 시켜감에 따라,  $\mu$ 가 점차 감소되어 감에 따라 큐의 길이도 점차 늘어나며 주어진  $\mu$ 에 대하여는 일정 길이로 수렴해 가는 것을 알 수 있다.

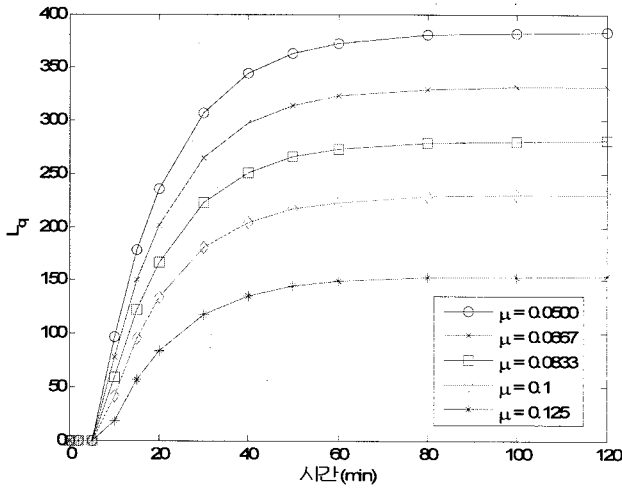


그림 6 시간 변화에 따른 Queue 길이의 변화  
Fig. 6 Changes in Queue lengths with time

특히  $\mu=0.0833$ (매회 할당시간 12분)의 경우 1시간 정도 경과 후 전체 길이가 280대 내외로 수렴하여 선행연구[11]의 정적평형상태의 결과인 281대와 일치됨을 알 수 있다. 그래프의 시작점이 일정시간 경과 후부터 시작하는 것은 부하관리 시작 순간부터 정해진 토큰이 소진 될 때 까지는 기다리지 않고 그대로 토큰을 할당받기 때문이다.

그림 7에 부하관리 시작 후 시간에 따른 토큰을 요청하는 LIMS가 큐에서 기다리는 시간의 기대값  $W_q(t)$ 의 변화를 보였다.

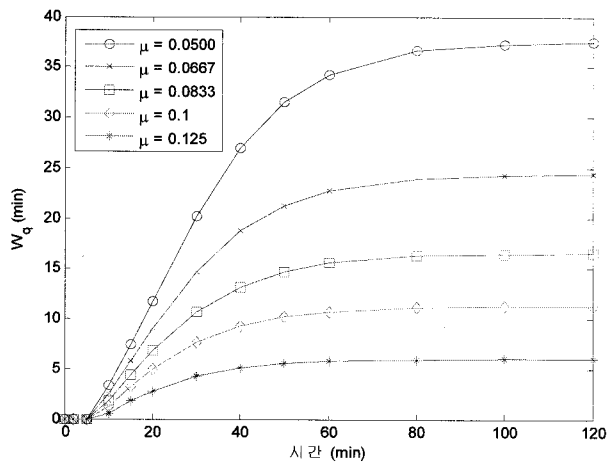


그림 7 시간에 따른 대기시간  $W_q(t)$ 의 변화 ( $\lambda=0.0667$ )  
Fig. 7 Changes in waiting time in the Queue

큐에서의 평균 대기시간 역시 대기열의 길이와 같이 시간이 감에 따라 증가하여 주어진 전체 704 세대와 할당된 토큰 204개에 대하여 전체적인 평형이 이루어지는 약 1시간 후에는 점차 일정해 짐을 알 수 있다.

그림 8에 주어진  $\alpha = \lambda/\mu$ 에 따라 큐잉시스템 전체에 들

어와 있는 LIMS의 총 수의 수렴값을 나타내었다.  $\alpha$  값이 1 이상이 되면서 LIMS의 총 수가 급격히 늘어나게 되고 더 증가하게 되면 거의 모든 LIMS가 큐잉시스템에 들어와 토큰을 할당받은 상태이거나 토큰 할당을 기다리는 상태가 되는 것을 알 수 있다.

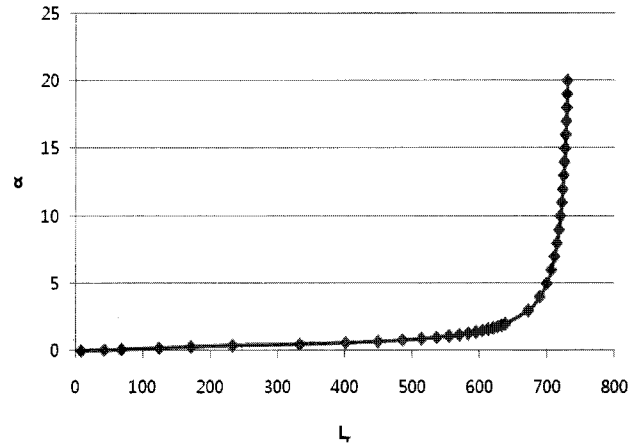


그림 8  $\alpha$ 값에 따른 큐내의 총 LIMS 수의 기대치  
Fig. 8 Steady state expected number of LIMS in Queueing System for varying  $\alpha$

그림 9는 그림 8에서  $\alpha \leq 2$ 인 경우를 확대해 그린 것으로 그림에서 제시된 사례의 경우, curve fitting 을 통해

$$\alpha = 7E - 11Lr^4 - 6E - 08Lr^3 + 2E - 05Lr^2 - 0.000Lr + 0.026$$

를 얻을 수 있다.

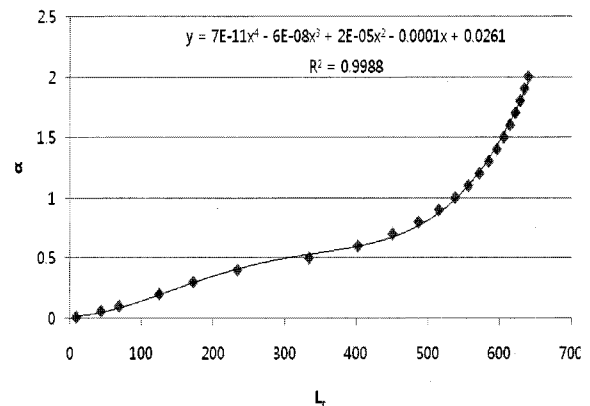


그림 9  $\alpha \leq 2$ 일 경우 평형 상태에서의  $L_r$   
Fig. 9 Expected number of LIMS in steady state for  $\alpha \leq 2$

따라서 주어진 각 LIMS의 토큰요청을  $\lambda$  에 따라 큐잉시스템내의 총 LIMS의 수를 관리하기 위하여  $\alpha$  값을 선택할 수 있고 그에 따라 LIMS당 토큰 할당율을 정할 수 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 대규모 아파트 단지와 같이 많은 세대 수용가들이 각자 패키지 에어컨을 소유하며 임의로 에어컨을 가동할 경우 급격히 늘어날 수 있는 최대 수요전력을 각 에어컨을 관리하는 LIMS로부터 에어컨의 가동 권리에 해당하는 톨크 신청을 받아 이를 큐잉 시스템으로 관리하여 각 수용가의 불편을 가능한 한 최소화 하면서도 최대수요를 원활하게 낮출 수 있는 기법에 대하여 기술하였다.

정적상태평형식(steady state balance equation)에 기초한 Markov 생성 및 소멸 과정을 이용한 큐잉 시스템 모델에서 수용가의 수가 커질 경우 평형상태에 이를 때 까지 상당시간이 소요되는 문제점을 개선하여 본 논문에서는 Markov 프로세스 확산 모델을 사용하여 부하관리 시작 시간부터 평형이 이루어질 때 까지의 경과 시간 중에도 큐를 해석하고 관리 할 수 있는 큐잉시스템 운영 기법을 제시 하였다.

제시된 기법을 사용할 경우 부하관리 시작 초기에는 보다 상황적응적인 지능 운영 전략을 수립하고 각 LIMS의 서비스를  $\mu$ 를 조율함으로써 보다 원활한 부하관리를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2006년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

#### 참 고 문 헌

- [1] P. Jazayeri, "A Survey of Load Control Programs for Price and System Stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, No 3, pp. 1504-1509, Aug. 2005.
- [2] Curt D. Puckett, "Regional Approaches to Measurement and Verification of Load Management Programs", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 23, No. 1, pp. 204 - 212, February 2008.
- [3] Jack F. Morris, Frank J. Kern and F. Richards "Distribution Automation for the Association of Missouri Electric Cooperatives" IEEE Trans. on Industry App. Vol. 24, No. 5, pp. 782 - 791, October 1988.
- [4] J.C. Hwang, "Assessment of Air Condition Load Management by Load Survey in Taipower", IEEE Transaction on Power Systems, Volume 16, No. 4, pp. 910 - 915, November 2001.
- [5] Kun-Yuan Huang and Yann-Chang Huang, "Integrating Direct Load Control With Interruptible Load Management to Provide Instantaneous Reserves for Ancillary Services", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, No. 3, pp. 1626-1634, August 2004.
- [6] A. Molina, A. Gabaldon, J.A. Fuentes and C. Alvarez, "Implementation and assessment of physically based electrical load models : Application to direct load control residential programmes" IEE Proc.-Gener. Trans.sm. Distrib., Vol. 150, No.1, pp. 61 - 66, January 2003.

- [7] Leehter Yao, Wen-Chi Chang and Rong-Liang Yen, "An Iterative Deepening Genetic Algorithm for Scheduling of Direct Load Control", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 20, No. 3, pp. 1414 - 1421, August 2005.
- [8] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-1992. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.; 1992.
- [9] Chi-Min Chu, Tai-Lang Jong, "Enthalpy estimation for thermal comfort and energy saving in air conditioning system", Energy Conversion and Management 2008, pp. 1620 - 1628, February 2008.
- [10] Chi-Min Chu and Tai-Lang Jong, "A Novel Direct Air-Conditioning Load Control Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 1356 - 1363, August 2008.
- [11] 이승철, 홍창호, 김경동, 이인용, 박찬업, "큐잉모델에 기초한 자율지능 부하 관리 시스템 연구", 조명전기설비학회 논문지, 제 22권 2호, 2008.

#### 저 자 소 개



#### 김 경 동 (金慶東)

1995년 홍익대 전자전기공학과 졸업.  
 1997년 한양대 기계공학과 석사 졸업.  
 2004 ~ 현재 중앙대 공대 전자전기공학부 박사과정. 지멘스 빌딩 자동화 사업부 차장  
 Tel : 031 999-7440  
 E-mail : kyungdong.kim@siemens.com



#### 김 석 현 (金碩炫)

2009년 중앙대 공대 전자전기공학부 졸업. 2009년 동 대학원 석사과정  
 Tel : 820-5289  
 E-mail : wyyang@cau.ac.kr



#### 이 승 철 (李承哲)

1969년 서울대 공대 전기공학과 졸업.  
 1974년 재무부 전매청 신탄진 연초제조장 전력과장. 1980년 현대엔지니어링 기전사업부 차장. 1982년 미국 Univ. of Florida 전기공학과 석사. 1985년 동 대학원 박사. 1995년 미 테네시대 항공우주대학원 전기 및 컴퓨터 공학과 교수. 현재 중앙대 공대 전자전기공학부 교수  
 Tel : 820-5325, Fax : 826-1103  
 E-mail : sclee@cau.ac.kr