

# 호도착기록에 기반한 위치갱신 알고리즘의 성능 분석

이 종 민<sup>†</sup> · 권 보 섭<sup>††</sup> · 맹 승 렬<sup>†††</sup>

## 요 약

무선단말기에 도착하는 호의 연결을 위해서 유휴상태에 있는 무선단말기의 위치정보를 관리하는 위치추적 방법이 사용된다. 본 논문에서는 시간이 지남에 따라서 호도착율이 변화할 때에 적합한 호도착기록에 기반한 위치갱신 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘을 사용한 위치추적 방법은 무선단말기의 호도착기록을 사용하여 호도착율의 변화를 파악하고, 이를 사용하여 현재의 호도착율에 적합한 타임아웃 주기를 계산한다. 그리고 이 방법에 대한 성능을 평가하기 위하여 고정/가변 호도착율에 대한 분석 모델과 그에 따른 분석 결과를 제시함으로써 호도착율의 변화에 적합함을 보인다.

## Performance Analysis of Call Arrival History-Based Location Update Algorithm

Jong Min Lee<sup>†</sup> · Boseob Kwon<sup>††</sup> · Seung Ryoul Maeng<sup>†††</sup>

## ABSTRACT

Location tracking is used to keep track of the location information of a mobile terminal in an idle state for a call setup between mobile terminals. In this paper, we introduce a location update algorithm based on the call arrival history, which is appropriate for a variable call arrival rate over time. The location tracking strategy which uses the proposed algorithm can find changes in the call arrival rate by maintaining a call arrival history of a mobile terminal, from which a mobile terminal can calculate an appropriate timeout interval for a variable call arrival rate. We show that the proposed scheme is appropriate for a variable call arrival rate by presenting a simple analytical model and analytical results to investigate its performance for both a fixed and a variable call arrival rate.

키워드 : 위치추적(Location tracking), 시간에 기반한 위치갱신(Time-based location update), 호도착기록(Call arrival history), 개인휴대통신망(Personal communication network)

### 1. 서 론

유휴상태에 있는 무선단말기에 호(call) 도착시 이를 빨리 연결해 주기 위해서는 해당 무선단말기의 위치를 빨리 파악할 수 있어야 한다. 이때 무선단말기의 위치 정보를 관리하여 호가 빨리 연결될 수 있도록 해 주는 방법을 위치추적(location tracking)이라 한다. 위치추적은 위치갱신(location update)과 페이징(paging)으로 이루어진다. 위치갱신은 유휴상태에 있는 무선단말기에서 이동 중에 자신의 현재 셀 위치를 시스템에 알려주는 것이며, 페이징은 특정 무선단말기로 호 도착시 가장 최근에 위치갱신된 셀 주변에 해당 무선단말기를 찾기 위한 신호를 방송하는 것을 의미한다. 위치추적의 목적은 이러한 위치갱신과 페이징을 위한 전체 경비를 감소하도록 하는 것이다.

일반적으로 위치추적 방법은 위치갱신 기법에 따라서 거리에 기반한 방법[1, 2], 움직임에 기반한 방법[1, 3], 시간에 기반한 방법[1, 4]으로 분류할 수 있다. 거리에 기반한 방법

은 무선단말기가 가장 최근에 위치갱신한 셀로부터 직선거리로  $d$ 셀 이상 이동하면 위치갱신이 이루어진다. 전체 성능 면에서 다른 방법들에 비하여 좋은 성능을 보이는 것으로 알려져 있으나, 셀간 거리정보를 알기 위해 망 토폴로지 정보를 알아야만 하는 단점이 있다[1, 3]. 움직임에 기반한 방법에서는 가장 최근에 위치갱신한 셀에서부터  $m$ 개의 셀 경계를 이동하면 위치갱신이 이루어진다. 이는 거리에 기반한 방법에 비해 구현하기 쉬운 장점이 있으나, 두 셀간 경계를 빈번하게 왕복하는 경우 거의 이동하지 않았음에도 불구하고 위치갱신이 불필요하게 발생하는 단점이 있다[1]. 시간에 기반한 방법은 정해진 타임아웃 주기에 따라서 타이머가 종료하면 위치갱신이 이루어진다. CDMA(code division multiple access) 시스템에서는 80msec 단위로 증가하는 페이징 채널 슬롯 카운터를 사용하여 타이머 구현이 가능하다[5]. 다른 방법에 비하여 간단하게 구현할 수 있으며, 무선단말기가 유휴상태에 있을 때 트랜시버의 사용을 최소화하여 전력 소모가 적다는 장점이 있으나[4], 위치추적 경비를 줄이기 위하여 타임아웃 주기를 신중하게 선택하여야 한다.

본 논문에서는 시간이 지남에 따라서 호 도착율이 동적으로 변화할 때 적합한 호도착 기록에 기반한 위치갱신 알

<sup>†</sup> 정 회 원 : 동의대학교 컴퓨터·소프트웨어공학부 교수

<sup>††</sup> 정 회 원 : 안동대학교 컴퓨터교육과 교수

<sup>†††</sup> 정 회 원 : 한국과학기술원 전자전산학과 교수

논문접수 : 2003년 4월 10일, 심사완료 : 2003년 8월 19일

고리즘을 제안한다. 이 방법은 시간에 기반한 위치갱신을 기반으로 한다. 제안한 알고리즘을 사용한 위치추적 방법은 인접한 호 사이의 시간 차 집합인 호도착기록(call arrival history)을 이용하여 최신 호 도착율(call arrival rate)에 대한 정보를 얻는다. 이렇게 얻은 호 도착율 정보에 따라서 적절한 타임아웃 주기를 설정함으로써 시간이 지남에 따라서 변화하는 호 도착율에 적용할 수 있는 위치추적 방법을 제안한다. 그리고 본 논문에서 제안하는 방법에 대하여 호당 평균 위치추적 경비를 구하기 위한 분석 모델을 제시한다. 시간이 지남에 따라서 도착율(arrival rate)이 랜덤하게 변화하는 프로세스를 모델링하기 위하여 MMPP(Markov-modulated Poisson process) 모델을 사용한다[6].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 시간에 기반한 위치갱신 기법의 하나로 고정 타임아웃 주기를 가지는 시간에 기반한 위치갱신 기법과 본 논문에서 제안하는 호도착기록에 기반한 위치갱신 기법에 대해서 기술한다. 3절에서는 이에 대한 분석 모델을 제시하고, 4절에서는 이에 대한 분석 결과를 보여준다. 마지막으로 5절에서 결론을 기술한다.

## 2. 무선단말기를 위한 위치갱신 알고리즘

### 2.1 고정 타임아웃 주기를 가지는 시간에 기반한 위치갱신 기법

시간에 기반한 위치갱신 기법을 기술하기 위해 사용되는 표기법은 다음과 같다.

- $t_{ca,i}$  :  $i$ 번째 호 도착 시간
- $t_{lu,i,j}$  :  $i$ 번째 호 도착후  $j$ 번째 위치갱신 시간
- $S_i$  :  $t_{ca,i}$ 와  $t_{ca,i+1}$  사이에 발생한 위치갱신 시간의 집합 ( $S_i = \{t_{lu,i,j} \mid t_{ca,i} < t_{lu,i,j} < t_{ca,i+1} \text{ for } j \geq 1\}$ )
- $T$  : 고정 타임아웃 주기
- $\Delta t_i$  :  $i$ 번째 인접한 호간 시간 차 ( $\Delta t_i = t_{ca,i+1} - t_{ca,i}$ )
- $\Delta t_{avg}$  : 평균 인접한 호간 시간 차

$$(\Delta t_{avg} = \sum_{i=0}^{k-1} \Delta t_i / k, k \geq 1)$$

고정 타임아웃 주기를 가지는 시간에 기반한 위치갱신 기법[1]에서는 고정 타임아웃 주기  $T$ 가 경과하면 위치갱신을 수행하게 된다. 호가 도착한 후 그 다음 호가 도착할 때까지 여러 번의 위치갱신이 발생할 수 있으므로  $n$ 번째 호 도착 후  $i$ 번째 위치갱신시간은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

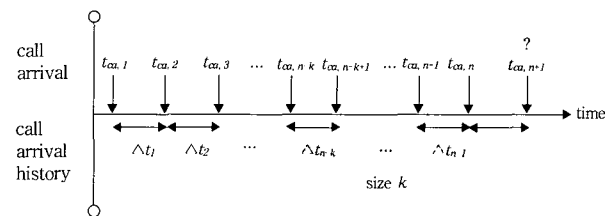
$$t_{lu,n,i} = t_{ca,n} + i \cdot T \text{ for } i \geq 1 \quad (1)$$

타임아웃 주기  $T$ 가 클 경우 무선단말기는 위치갱신을 하기 전에 많은 수의 셀 경계를 지나갈 수 있으므로 페이징 경비가 커질 수 있다. 반면에 페이징 경비를 감소시키기 위하여  $T$ 를 작게 할 경우에는 잦은 위치갱신으로 인하여 위치갱신 경비를 증가시킬 수 있다. 따라서 전체 위치추적 경

비 면에서 좋은 성능을 보이기 위해서는 타임아웃 주기  $T$ 를 적절하게 선택하는 것이 필요하다. 그러나, 호도착율이 동적으로 변화하는 경우에는 적절한 타임아웃 주기  $T$ 를 찾는 것이 어렵다.

### 2.2 호도착기록에 기반한 위치갱신 기법

(그림 1)은 호도착기록(call arrival history)의 개념을 보여준다. 현재까지  $n$ 번째 호가 도착하였다고 가정한다. 즉,  $1 \leq i \leq n$ 에 대한  $t_{ca,i}$ 를 이미 알고 있다고 가정한다. 호도착기록은 (그림 1)처럼 크기가  $k$ 인  $\Delta t_i$ 의 집합으로 정의한다 ( $n-k \leq i < n$  &  $k < n$ ). 호도착기록으로부터 평균 인접한 호간 시간 차를 식 (2)와 같이 쉽게 알 수 있다. 이를 사용하면 현재의 호도착율을 쉽게 알 수 있다.



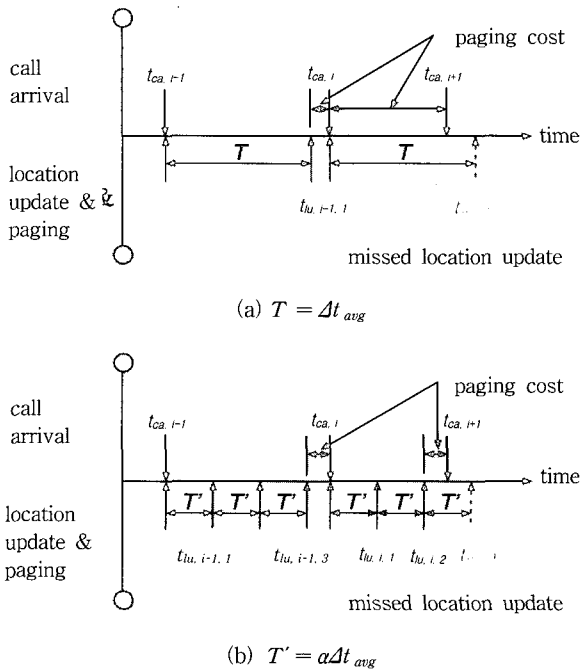
(그림 1) 호도착기록의 개념

$$\Delta t_{avg} = \frac{\sum_{i=n-k}^{n-1} \Delta t_i}{k} \quad (2)$$

호가 현재의 호도착율을 따라서 지속적으로 도착한다고 가정하면 ( $n+1$ )번째 호가 도착할 시간  $t_{ca,n+1}$ 은  $t_{ca,n}$ 과  $\Delta t_i$ 의 함수로 나타낼 수 있다. 평균 인접한 호간 시간 차  $\Delta t_{avg}$ 를 이용하면  $t_{ca,n+1}$ 을 직관적으로 예상할 수 있다. 즉,  $t_{ca,n+1}$ 은  $t_{ca,n} + \Delta t_{avg}$ 로 표시할 수 있다. 따라서 새 호가 도착하기 전에 위치갱신을 할 수 있도록  $\Delta t_{avg}$ 를 타임아웃 주기로 사용 가능하다. 그러나 위치추적 경비 관점에서 위치갱신과 페이징은 절충 관계에 있다. 이는 다음 호가 도착할 때까지 위치갱신을 많이 수행하면 호 도착시 찾아야 할 셀의 수가 줄어들어 페이징경비가 감소하며, 위치갱신을 적게 수행하면 이와 반대로 무선단말기의 이동에 따른 페이징경비가 증가하기 때문이다. 따라서 타임아웃 주기를 이에 적합하게 조절하여 위치갱신을 적절히 수행함으로써 전체 위치추적 경비를 최소화하여야 한다.

본 논문에서는 가장 최근에 위치갱신한 셀 주변을 찾아서 해당 무선단말기의 셀 위치를 파악하기 위한 페이징 방법으로 최단거리 우선 분할 기법(shortest-distance-first partitioning scheme)[1, 3, 7] 사용을 가정한다. 이 방법은 무선단말기의 현재 셀 위치를 발견하기 위하여 가장 최근에 위치갱신한 셀 주변을 가까운 셀간 거리 순서로 탐색한다. 페이징 지연을 고려하지 않는다면 사용자 위치에 대한 확률 분포가 주어지지 않을 때 이 순차적 탐색 기법이 페이징경비를 감소시키는데 유리한 것으로 알려져 있다[8]. 본 논문에

서도 지연시간과 관련된 페이징경비는 고려하지 않는다.



(그림 4) 위치갱신과 페이징간의 관계

(그림 2)는 위치갱신과 페이징간의 관계를 보여준다. (그림 2)(a)의  $t_{lu,i,1}$ , (그림 2)(b)의  $t_{lu,i,3}$ 에서 수행될 예정이었던 위치갱신은 그전에 호가 도착하여 수행되지 못한 경우이다. 이와 같이 호 도착으로 인하여 수행되지 못한 위치갱신을 미수행 위치갱신(missed location update)이라고 한다. 평균적으로 가장 최근에 위치갱신한 시점으로부터 시간이 경과할수록 페이징경비는 이에 비례하여 증가하게 된다. 따라서 이러한 미수행 위치갱신으로 인하여 위치추적경비 면에서 페이징경비가 증가하여 성능이 저하될 수 있다. 이를 방지하여 성능을 좋게 하기 위해서는 호 도착당 위치갱신 횟수를 적절하게 조절할 필요가 있다. 이를 위하여 (그림 2)(b)에서처럼 타임아웃 주기 변경을 위한 매개변수  $\alpha$  ( $0 < \alpha \leq 1$ )를 도입하고,  $\Delta t_{avg}$ 를 타임아웃 주기로 사용하는 대신에  $\alpha \Delta t_{avg}$ 를 사용하도록 한다. 그러면,  $n$ 번째 호 도착후  $i$ 번째 위치갱신 시간은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$t_{lu,n,i} = t_{ca,n} + i \cdot (\alpha \Delta t_{avg}) \text{ for } i \geq 1 \quad (3)$$

매개변수  $\alpha$ 는 호당 위치갱신비 LCR(Location update-to-Call arrival Ratio)을 조절하는 역할을 한다. 예를 들어,  $[t_{ca,i}, t_{ca,i+1})$  구간에서 수행된 위치갱신 횟수가  $|S_i|$ 이면  $\alpha$ 는  $1/(|S_i|+1)$ 이 된다. 따라서  $k \leq i < k+l$ 일 때  $[t_{ca,i}, t_{ca,i+1})$  구간에서  $\sum_{i=k}^{k+l-1} |S_i|$  번의 위치갱신이 발생하므로  $[t_{ca,k}, t_{ca,k+l})$  구간의 평균 LCR은  $\sum_{i=k}^{k+l-1} |S_i|/l$ 임을 알 수 있다.  $\alpha$  값이 0에 가깝게 될수록 호당 평균 위치갱신은 증가하게 되

어 LCR은 증가하게 된다. 반면에  $\alpha$  값이 1에 가깝게 될수록 호당 평균 위치갱신은 감소하게 되어 LCR은 감소하게 된다. 따라서 위치추적 경비면에서 좋은 성능을 보일 수 있도록  $\alpha$  값 또는 LCR을 적절히 조절해 줄 수 있어야 한다. 이때, 최소 위치추적 경비를 얻을 수 있는 LCR을 최적 LCR이라 한다. 고정 호도착율에 대한 최적 LCR은 분석 모델로부터 또는 경험적으로 계산할 수 있다. 따라서 주어진 환경에 대한 최적 LCR 또는  $\alpha$  값을 선택함으로써 제안된 방법이 호도착율의 변화에 적용할 수 있도록 할 수 있다.

**호도착기록에 기반한 위치갱신 알고리즘**

- 공유 변수
  - 호도착기록 :  $\Delta t_i$  for  $0 \leq i < k$  ( $k$ : 상수)
  - 타임아웃 주기 변경 매개변수 :  $\alpha$
  - 위치갱신횟수 :  $N_{lu}$
- 지역 변수
  - 새 타임아웃 주기 :  $\Delta t_{new}$
  - 가장 최근의 호도착시간 :  $t_{last}$
  - 호도착기록에 대한 인덱스 :  $i$

**[과워온]**

1. 호도착기록에 의한 타임아웃 주기에 따른 타이머 초기화
2. 기타 변수 초기화 :  $t_{last} \leftarrow$  현재 시간,  $N_{lu} \leftarrow 0$ ,  $i \leftarrow 0$
3. 위치갱신 수행

**[호도착]**

1.  $\Delta t_i \leftarrow$  현재 시간 -  $t_{last}$
2.  $i \leftarrow (i+1) \text{ modulo } k$
3.  $t_{last} \leftarrow$  현재 시간
4.  $\Delta t_{new} \leftarrow \alpha \sum_{i=0}^{k-1} \Delta t_i / k$
5. 타임아웃 주기  $\Delta t_{new}$ 를 가지는 타이머 시작

**[타이머 종료]**

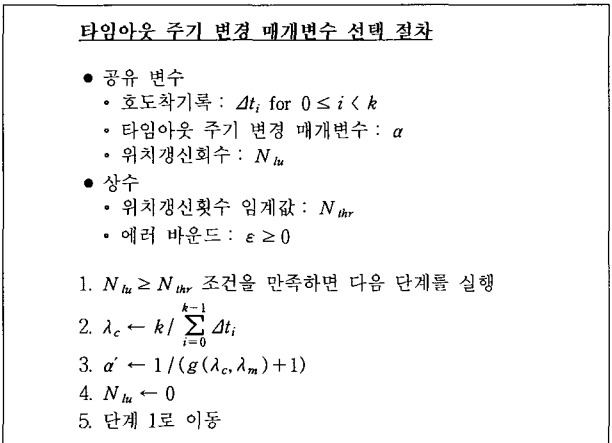
1. 현재 셀 위치와 가장 최근에 위치갱신한 셀 위치가 다르면  $N_{lu}$ 를 1만큼 증가시키고 위치갱신 수행
2. 타임아웃 주기  $\Delta t_{new}$ 를 가지는 타이머 시작

(그림 3) 호도착기록에 기반한 위치갱신 알고리즘

(그림 3)은 이상에서 논의된 사실을 바탕으로 본 논문에서 제안하는 위치갱신 알고리즘을 정리한 것이다. 이 알고리즘을 적용하여 호도착시 호가 도착한 시간으로부터 바로 이전의 호 도착시간과의 차이를 호도착기록에 반영한다. 이렇게 구한 호도착기록을 사용하여 호도착율의 변화를 파악하고, 이에 따라서  $\alpha$  값을 적절하게 선택함으로써 새로운 타임아웃 주기를 설정한다.

앞에서 기술한 것처럼 매개변수  $\alpha$ 를 적절하게 선택하면 호도착율의 변화에 따라서 적응성이 있는 위치추적방법을 만들 수 있다. (그림 4)는 셀이동을  $\lambda_m$ 이 주어졌을 때 호도착율  $\lambda_c$ 의 변화에 따라서 매개변수  $\alpha$ 를 선택하는 절차이다.  $\alpha$ 는 0에서 1사이의 값이 가능하며, 초기화시 이 사이에 있는 임의의 값을 선택하면 된다. 단계 1은 매개변수  $\alpha$ 를 갱신하기 위한 조건을 나타낸다. 위치갱신횟수  $N_{lu}$ 가 위치갱신횟수 임계값  $N_{thr}$ 보다 커지면 다음 단계를 실행한다.  $N_{thr}$ 은 최신 호도착율과 그에 따른 타임아웃 주기를 계산하는 시

기 제어에 사용된다.  $N_{thr}$ 이 작은 경우에는 호도착율과 타임아웃 주기가 자주 갱신되며, 클 경우에는 드물게 갱신된다. 단계 1의 조건을 만족하면 무선단말기에서는 단계 2에서  $k$ 개의 호도착기록을 이용하여 최신 호도착율을 계산한다. 단계 3에서는 매개변수  $\alpha$ 를 새로 계산하는데, 주어진  $\lambda_c$ 와  $\lambda_m$ 에 대하여 최적 LCR을 알고 있다면 이를 이용하여  $\alpha'$ 을 계산할 수 있다. 이러한 역할을 하는 함수를 최적 LCR 생성 함수  $g(\lambda_c, \lambda_m)$ 이라 한다. 단계 4에서는 위치갱신횟수  $N_{lu}$ 를 0으로 설정하고, 다시 단계 1로 돌아간다.



(그림 4) 타임아웃 주기 변경 매개변수 선택 절차

**3. 호도착율에 따른 분석 모델**

**3.1 가 정**

본 절에서는 성능 분석을 위한 가정을 기술한다. 셀 구조는 2차원 격자(grid) 셀 구조[9]를 고려한다. 이는 기지국이 거리의 교차로에 위치한 맨해튼 시도로 모델(Manhattan city streets model)에서 찾아볼 수 있다[10]. 위치갱신 비용  $U$ 는 한 셀에 대한 페이징경비  $V$ 의 10배라고 가정한다[11]. 변수  $r$ 은 타임아웃 주기 변경 매개변수 생성 절차에서 최적 LCR 생성 함수  $g(\lambda_c, \lambda_m)$ 에 의해 생성되는 LCR이라고 한다.

무선단말기는 한 셀에서 이웃한 네 방향의 셀로 이동시 같은 확률을 가지는 랜덤 워크 모델(random walk model)을 따른다고 가정한다[1, 2, 3, 7]. 랜덤 워크 모델은 개인휴대통신망(personal communication network)에서 보행자를 모델링하는 데 유용한 것으로 알려져 있다[2, 7]. 모델링을 간단하게 하기 위하여 가장 최근에 위치갱신한 셀의 좌표를 (0, 0)이라고 한다. 변수  $v$ 는 무선단말기의 이동 속도(m/sec)를 나타낸다. 이동 속도를 모델링하기 위하여 무선단말기는 각 셀에서 셀간 이동을  $\lambda_m$ (cells/second)을 가지는 지수 분포(exponential distribution)를 따른다고 가정한다[11]. 고정 호도착율의 경우에는 평균 호도착율  $\lambda_c$ (calls/second)를 가지는 지수 분포를 따라서 호가 도착한다고 가정한다.

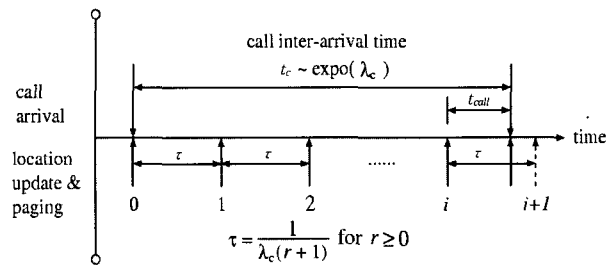
MMPP(Markov-modulated Poisson process) 모델은 도착율이 시간이 지남에 따라서 랜덤하게 변화하는 프로세스

를 모델링하는데 많이 사용되어 왔다[6, 15, 16]. 2개의 상태를 가지는 MMPP 모델은 Markov 체인이 상태 1과 상태 2에 있을 때 각각  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 의 Poisson 프로세스에 따라서 호가 도착한다. 상태 1에서 상태 2로의 상태 천이와 반대 방향의 상태 천이는 각각 평균 시간  $1/\sigma_1$ 과  $1/\sigma_2$ 의 지수 분포에 따른 시간 후에 발생한다. 2개의 상태를 가지는 MMPP 모델을  $MMPP(\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1, \sigma_2)$ 라고 표기한다. 이와 마찬가지로  $n$ 개의 상태를 가지는 MMPP 모델은  $MMPP(\lambda_1, \dots, \lambda_n, \sigma_1, \dots, \sigma_n)$ 라고 표기한다.

**3.2 고정 호도착율에 대한 분석 모델**

일반적으로 위치추적 경비는 위치갱신 경비와 페이징 경비로 이루어진다[1-3, 11]. (그림 5)는 두 개의 연속된 호 사이의 위치추적 경비에 대한 분석 모델이다. 새로운 호는 평균시간  $1/\lambda_c$ 의 지수분포를 따르는 시간 주기를 따라서 도착한다. 두 인접한 호 사이에서의 위치갱신 횟수  $i$ 는 LCR  $r$ 과 관련이 있음을 알 수 있다. 이는 타임아웃 주기 변경 매개변수 선택 절차에 의하여 결정되는 시간 간격  $\tau (=1/(\lambda_c(r+1)))$ 에 따라서 위치갱신을 수행하기 때문이다. 따라서 호당 평균 위치갱신경비  $C_u(r)$ 은  $r$ 에 비례함을 쉽게 알 수 있다.  $C_u(r)$ 은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$C_u(r) = rU \text{ for } r \geq 0 \tag{4}$$



(그림 6) 두 개의 연속된 호 사이의 위치추적 경비에 대한 분석 모델

페이징 경비는  $[i\tau, (i+1)\tau)$  구간에서의  $t_{call}$ 의 분포에 의해서 결정된다. 호당 평균 페이징 경비를 계산하기 위해서는 가장 최근에 위치갱신한 시간  $i\tau$ 에서 호 도착시간  $(i\tau + t_{call})$  사이에 무선단말기가 셀을 평균적으로 얼마나 이동했는지를 알 수 있어야 한다. 이때  $t_{call}$ 의 범위는  $0 \leq t_{call} < \tau$ 이다. 그러면 호당 평균 페이징경비는  $[0, \tau)$ 구간에서의  $t_{call}$ 의 분포와 관련 있음을 알 수 있다.  $[0, \tau)$ 구간에서의 평균 셀경계 이동 횟수를  $m(r)$ 이라고 하자.  $t_{call}$ 은 Poisson arrival rate-exponential inter-arrival time pattern을 보이므로  $[0, \tau)$ 구간에서 호의 도착은 랜덤하고 균등(uniform)하게 분포되어 있다[12, 13]. 무선단말기의 셀 거주시간(cell residence time)은 셀간 이동을  $\lambda_m$ 을 가지는 지수 분포를 보인다고 가정하였으므로  $[0, t_{call}]$  구간에서의 평균 셀경계 이동

횟수는  $\lambda_m t_{call}$ 이다. 따라서  $m(r)$ 을 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 이때  $\lambda_c/\lambda_m$ 은 호-이동율(call-to-mobility ratio ; CMR)이라고 한다[3, 11].

$$\begin{aligned} m(r) &= \int_0^r \frac{1}{\tau} \cdot (\lambda_m t_{call}) dt_{call} \\ &= \frac{\lambda_m}{\tau} \int_0^r t_{call} dt_{call} \\ &= \frac{1}{2(r+1)} \cdot \frac{1}{\lambda_c/\lambda_m} \end{aligned} \quad (5)$$

이제 무선단말기가  $m(r)$ 번 셀 경계 이동후 특정 셀에 있을 확률을 구한다. 간단하게 하기 위하여  $\lceil m(r) \rceil$ 을  $m$ 이라고 하자.  $x$ 축  $y$ 축으로의 셀 경계 이동횟수를 각각  $k, (m-k)$ 라고 하자. 그리고  $(+x)$ 축 방향과  $(-x)$ 축 방향으로의 셀 경계 이동횟수를 각각  $i$ 와  $\bar{i}$ 라고 하자 ( $0 \leq i \leq k$ ). 또한  $(+y)$ 축 방향과  $(-y)$ 축 방향으로의 셀 경계 이동횟수를 각각  $j$ 와  $\bar{j}$ 라고 하자 ( $0 \leq j \leq m-k, \bar{j} = m-k-j$ ). 2차원 격자 셀 구조와 랜덤 워크 모델을 따른다고 가정하였으므로 무선단말기의 현재의 셀 위치에서 이웃한 네 개의 셀로 각각 같은 확률  $p=1/4$ 을 가지고 이동한다.  $(+x)$ 축,  $(-x)$ 축,  $(+y)$ 축,  $(-y)$ 축 방향으로의 셀 경계 이동횟수를 각각  $X_1, X_2, X_3, X_4$ 라고 하자. 이때 무선단말기가  $m$ 번의 셀 이동동안  $x$ 축으로  $k$ 셀,  $y$ 축으로  $(m-k)$ 셀 만큼 이동하였을 때 셀  $(i-\bar{i}, j-\bar{j})$ 에 있을 확률을  $X_1=i, X_2=\bar{i}, X_3=j, X_4=\bar{j}$ 인 확률  $p_{m,k}(i, \bar{i}, j, \bar{j})$ 라고 한다. 이는 다항분포(multinomial distribution)를 보이는  $X_1, X_2, X_3, X_4$ 의 결합 확률 질량 함수(joint probability mass function)이다[14]. 따라서  $p_{m,k}(i, \bar{i}, j, \bar{j})$ 는 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$p_{m,k}(i, \bar{i}, j, \bar{j}) = \left(\frac{1}{4}\right)^m \binom{m}{i, \bar{i}, j, \bar{j}} \quad (6)$$

이때  $k=i+\bar{i}$ 이고,  $m=i+\bar{i}+j+\bar{j}$ 이다.

모델링을 간단하게 하기 위하여 가장 최근에 위치갱신된 셀의 위치를  $(0, 0)$ 이라고 가정한다. 페이지에는 최단거리 우선 기법 사용을 가정하였으므로, 지연시간을 고려하지 않는다면 셀  $(x, y)$ 에 있는 무선단말기의 탐색경비는 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$s(x, y) = (2 \max\{|x|, |y|\} + 1)^2 \quad (7)$$

호당 평균 페이지경비는 모든 가능한 경로에 대하여 특정 셀에 있을 확률과 그때의 탐색경비의 곱을 합한 것으로 구할 수 있으며, 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$C_b(r) = V \sum_{k=0}^m \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^{m-k} p_{m,k}(i, \bar{i}, j, \bar{j}) \cdot s(i-\bar{i}, j-\bar{j}) \quad (8)$$

이때  $m = \lceil m(r) \rceil$ 이다.

호도착율  $\lambda_c$ 와 셀간 이동을  $\lambda_m$ 이 주어지면 평균 위치추적경비는 위에서 구한 평균 위치갱신 경비와 평균 페이지경비의 합으로 계산할 수 있으므로 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 평균 위치추적 경비  $C_{\lambda_m}^{\lambda_c}(r)$ 를 최소화시키는  $r$ 을 최적 LCR  $r^*$ 라고 한다.

$$C_{\lambda_c}^{\lambda_m}(r) = C_u(r) + C_p(r) \quad (9)$$

### 3.3 가변 호도착율에 대한 분석 모델

먼저 셀간 이동율이  $\lambda_m$ 이고 호도착율이 2개의 상태를 지니는  $MMPP(\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1, \sigma_2)$ 를 따를 때의 평균 위치추적 경비  $C(\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1, \sigma_2, \lambda_m)$ 를 구하도록 한다. 식 (9)에 의하여 셀간 이동을  $\lambda_m$ 과 호도착율  $\lambda_c$ 가 고정되었을 때의 최소 위치추적 경비  $C_{\lambda_c}^{\lambda_m}(r)$ 를 계산할 수 있다. 앞에서 기술한 것처럼  $g(\lambda_c, \lambda_m)$ 는  $\lambda_c$ 와  $\lambda_m$ 이 주어졌을 때  $C_{\lambda_c}^{\lambda_m}(r)$ 를 최소화시키는 최적 LCR  $r^*$ 을 생성하는 함수이다. 그러므로 호당 평균 위치추적 경비는 각 호도착율에 대한 최적 LCR을 사용하여 쉽게 구할 수 있다. 호도착율이  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 일 때, 평균 구간 시간  $1/\sigma_1, 1/\sigma_2$ 동안의 평균 호도착수는 각각  $\lambda_1/\sigma_1, \lambda_2/\sigma_2$ 이다. 그러므로  $C(\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1, \sigma_2, \lambda_m)$ 는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 이때  $i=1, 2$ 에 대하여  $r_i = g(\lambda_i, \lambda_m)$ 이다.

$$\begin{aligned} C(\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1, \sigma_2, \lambda_m) &= C_{\lambda_m}^{\lambda_1}(r_1) \cdot \frac{\lambda_1/\sigma_1}{\lambda_1/\sigma_1 + \lambda_2/\sigma_2} + C_{\lambda_m}^{\lambda_2}(r_2) \cdot \frac{\lambda_2/\sigma_2}{\lambda_1/\sigma_1 + \lambda_2/\sigma_2} \\ &= C_{\lambda_m}^{\lambda_1}(r_1) \cdot \frac{\lambda_1\sigma_2}{\lambda_1\sigma_2 + \lambda_2\sigma_1} + C_{\lambda_m}^{\lambda_2}(r_2) \cdot \frac{\lambda_2\sigma_1}{\lambda_1\sigma_2 + \lambda_2\sigma_1} \end{aligned} \quad (10)$$

위의 수식을  $n$ 개의 상태를 가지는  $MMPP(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ 에 대하여 일반화시키면 다음과 같다.  $R_i$ 를 전체 도착한 호에 대하여  $\lambda_i$ 의 호도착율을 가지고 도착한 호의 비율이라고 하자. 그러면 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_i = \frac{\lambda_i \prod_{j=1, j \neq i}^n \sigma_j}{\sum_{i=1}^n \left( \lambda_i \prod_{j=1, j \neq i}^n \sigma_j \right)} \quad (11)$$

본 논문에서 제안한 위치갱신 기법을 사용하면 시간이 지남에 따라서 호도착율에 대한 정보를 추적하여 특정 호도착율에 의해 호가 생성되는 시간 구간을 알 수 있다. 따라서 호당 평균 위치추적 경비는 각 시간 구간에서의 최소 위치추적경비와 관련이 있으며, 이는 식 (12)와 같이 표현할 수 있다. 이때  $1 \leq i \leq n$ 에 대하여  $r_i = g(\lambda_i, \lambda_m)$ 이다.

$$C(\lambda_1, \dots, \lambda_n, \sigma_1, \dots, \sigma_n, \lambda_m) = \sum_{i=1}^n C_{\lambda_m}^{\lambda_i}(r_i) \cdot R_i \quad (12)$$

식 (12)는 본 논문에서 제안한 위치갱신 기법의 호당 평

균 위치추적 경비를 나타내는 것이나, 이를 이용하여 타임아웃 주기가 서로 다른 경우에 대한 위치추적 경비를 예상할 수 있다. 이는 타임아웃 주기를 반영하는 LCR  $r_i$  값을 조절하여 쉽게 구할 수 있다. 예를 들어, 2개의 상태를 가지는  $MMPP(\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1, \sigma_2)$ 의 경우에 무선단말기의 호도착율은 시간이 지남에 따라서 변화하지만, 무선단말기 입장에서서는 다음 경우와 같이 생각할 수 있다.

- 경우1 :  $\lambda_1$ 의 호도착율로 호가 도착한다.
- 경우2 :  $\lambda_2$ 의 호도착율로 호가 도착한다.
- 경우3 :  $\lambda_{avg}$ 의 호도착율로 호가 도착한다. 이때  $\lambda_{avg}$ 는 식 (13)과 같다.

$$\lambda_{avg} = \frac{\lambda_1/\sigma_1 + \lambda_2/\sigma_2}{1/\sigma_1 + 1/\sigma_2} \tag{13}$$

$$= \frac{\lambda_1 \sigma_2 + \lambda_2 \sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2}$$

이에 따른 무선단말기의 위치추적 경비를 최소화하기 위한 호당 위치갱신비 LCR  $r_i$  ( $i=1,2$ )는 다음과 같다. 경우1과 경우2에서는 각각 호도착율  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 에 대한 최적 LCR 생성 함수  $g(\lambda_1, \lambda_m)$ 와  $g(\lambda_2, \lambda_m)$ 를 사용한다. 경우3에서는 장시간에 걸쳐 호도착율이  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 로 섞여 들어올 때 이에 대한 평균 호도착율  $\lambda_{avg}$ 에 대한 최적 LCR을 사용한 것이다. 각 구간에서의 호당 평균 위치갱신 횟수를 일정하게 해주기 위하여 식 (17)에서와 같이 호도착율에 따라서 조정된 LCR  $r'$ 을 계산하여 사용한다. 이때  $r'$ 이 음수가 될 수 있는데, 이는 현재의 호도착율에 대한 타임아웃 주기가 평균 호도착시간  $1/\lambda_i$ 보다 커서 호도착전에 위치갱신이 이루어지지 못함을 의미한다. 따라서 이 구간에서의 위치추적 경비는 페이지링에만 의존하게 되며,  $r_i = 0$ 임을 쉽게 알 수 있다.

• 경우 1 :  $r_i = g(\lambda_1, \lambda_m)$  (14)

• 경우 2 :  $r_i = g(\lambda_2, \lambda_m)$  (15)

• 경우 3 :  $r_i = \begin{cases} \frac{\lambda_{avg}}{\lambda_i} (g(\lambda_{avg}, \lambda_m) + 1) - 1 & \text{if } r_i \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$  (16)

$$\frac{1}{\lambda_i (r_i + 1)} = \frac{1}{\lambda_{avg} (r' + 1)} \text{ for } i = 1, 2 \tag{17}$$

이를  $n$ 개의 상태를 가지는  $MMPP(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ 에 적용하면 다음과 같은  $r_i$ 를 사용하여 서로 다른 타임아웃 주기를 가지는 경우에 대한 위치추적 경비를 계산할 수 있다. 위와 마찬가지로  $n$ 개의 서로 다른 호도착율에 대한 경우와 이에 대한 평균 호도착율에 대한 경우를 생각할 수 있다.

•  $r_i = g(\lambda_j, \lambda_m)$ , where  $j \in \{1, \dots, n\}$

•  $r_i = \begin{cases} \frac{\lambda_{avg}}{\lambda_i} (g(\lambda_{avg}, \lambda_m) + 1) - 1 & \text{if } r_i \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ , 이때  $\lambda_{avg}$

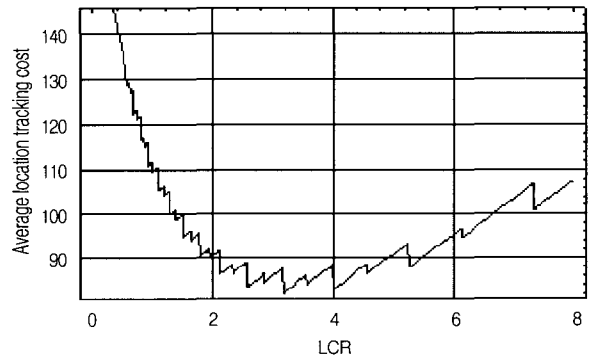
는 식 (18)과 같다.

$$\lambda_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j \prod_{j=1, j \neq i}^n \sigma_j}{\sum_{j=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n \sigma_j} \tag{18}$$

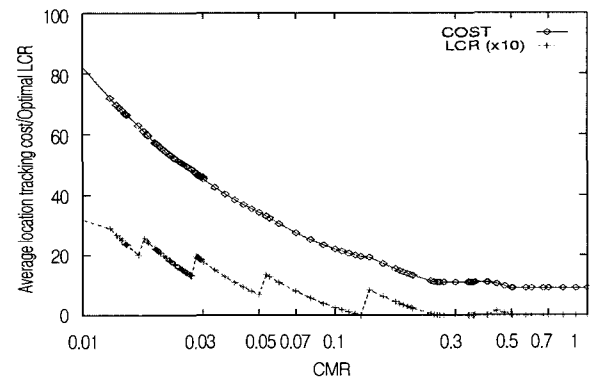
#### 4. 분석 결과

개인휴대통신망에서 마이크로셀 환경은 셀의 한 변 길이가 수백 미터 정도를 가정한다. 예를 들어, 셀의 한 변 길이가 200m이고 무선단말기의 이동속도가 2km/hour(셀간 이동율  $\lambda_m = 10$  cells/hour)라고 하자. 그러면 호-이동율(CMR)이 0.01, 0.1, 1일 때의 호도착율  $\lambda_c$ 는 각각 0.1, 1, 10 calls/hour가 된다. 앞서 가정한 것처럼 위치갱신 비용  $U$ 는 한 셀에 대한 페이지링 경비  $V$ 의 열 배이다.

(그림 6)은 CMR이 0.01일 때 LCR을 변화시키면서 계산한 평균 위치추적 경비를 보여준다. 이때 평균 위치추적 경비를 최소화시키는 최적 LCR이 존재함을 그림에서 알 수 있다. 다른 CMR의 경우에도 비슷한 모양의 그래프를 보이므로 주어진 환경에서 위치추적 경비를 최소화할 수 있는 최적 LCR을 구할 수 있음을 알 수 있다.



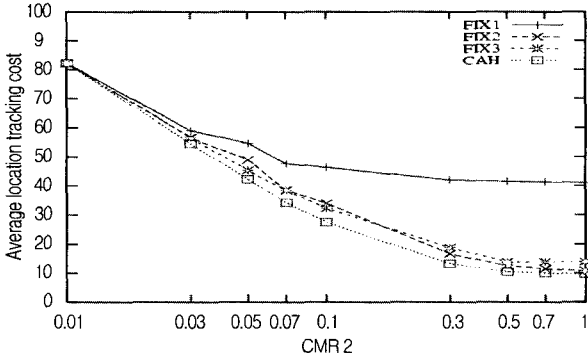
(그림 6) CMR이 0.01일 때의 평균 위치추적 경비



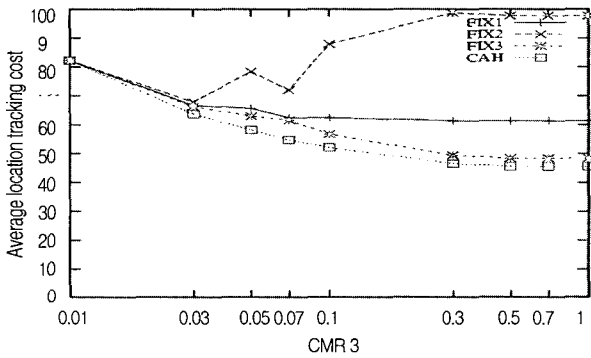
(그림 7) CMR 변화에 따른 최소 위치추적 경비와 최적 LCR

(그림 7)은 고정된 CMR에 대하여 최적 LCR을 적용하였을 때의 위치추적 경비이다. LCR은 그림에서 잘 보일 수 있도록 실제 값에 10배를 하여 그래프에 반영하였다. 이 결

과는  $0 \leq r \leq r_{max}$ 에 대하여 최소 위치추적 경비를 가지는 LCR  $r$ 을 선택하여 구한 결과이다. 이때  $r_{max}$ 는 미리 결정된 최대 LCR값이다. 주어진 CMR에 대하여 이와 같은 최적 LCR을 사용함으로써 위치추적 경비를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.



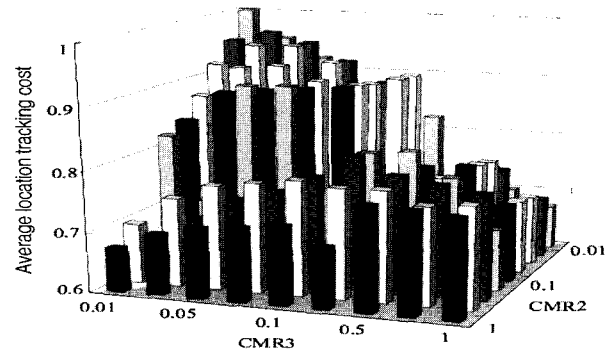
(그림 8)  $1/\sigma_1=1/\sigma_2$ 일 때의 평균 위치추적 경비



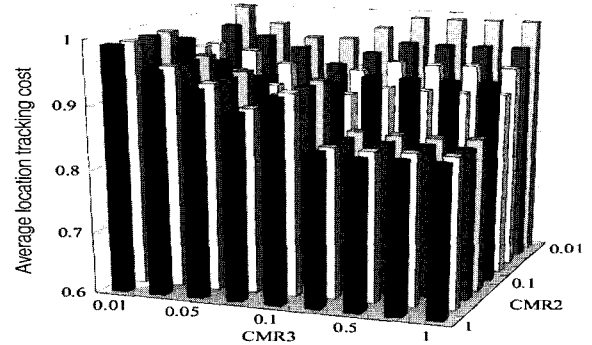
(그림 9)  $\lambda_1/\sigma_1=\lambda_2/\sigma_2$ 일 때의 평균 위치추적 경비

다음은 평균 셀간 이동율이  $\lambda_m$ 일 때 2개의 상태를 가지는  $MMPP(\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1, \sigma_2)$ 에 의하여 호가 도착하는 경우에 대한 성능 평가이다. 이를 위하여 다음과 같은 두 개의 호 도착 패턴에 대하여 고려한다. ① 각 상태에서의 평균 시간 주기가 동일한 경우 ( $1/\sigma_1=1/\sigma_2$ ), ② 각 상태에서 도착한 평균 호의 수가 동일한 경우 ( $\lambda_1/\sigma_1=\lambda_2/\sigma_2$ ). 이 두 경우에 대한 결과는 각각 (그림 8), (그림 9)와 같다. 간단하게 하기 위하여  $\lambda_m$ 과  $\lambda_1$ 를 각각 1.0과 0.01로 고정시키고  $\lambda_2$ 를 0.01에서 1.0까지 변화시키면서  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 의 차이가 커짐에 따른 성능 변화를 알아본다. CMR은  $\lambda_c/\lambda_m$ 으로 정의되어 있고  $\lambda_m$ 이 1.0이므로 그림에서 CMR2는  $\lambda_2$ 와 동일한 의미를 지닌다. FIX1, FIX2, FIX3은 각각 식 (14), 식 (15), 식 (16)을 적용하여 구한 결과이며, CAH는 본 논문에서 제안한 위치갱신기법을 적용하였을 때의 성능을 보여준다. (그림 8)과 (그림 9)로부터 제안된 방법이 다른 방법에 비하여 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. FIX1의 경우는 두 경우에 모두 성능이 나쁜 것으로 나타난다. FIX2는 (그림 8)에서는 CAH에 근접한 성능을 보이나, (그림 9)의 경우에는 가장 나쁜 성능을 보인다. FIX1과 FIX2 방법은 한 상태에서의 최

적 LCR만을 사용함으로써 호도착율이 변화하는 상황에 잘 적응하지 못함을 알 수 있다. 따라서 호도착율이 가변적인 상황에서는 타임아웃 주기를 하나의 호도착율을 가정하고 선택하는 것보다 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하여 호도착율의 변화에 적응할 수 있도록 LCR을 선택하는 것이 성능에 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.



(a)  $1/\sigma_1=1/\sigma_2=1/\sigma_3$



(b)  $\lambda_1/\sigma_1=\lambda_2/\sigma_2=\lambda_3/\sigma_3$

(그림 10) 3개의 상태를 가지는  $MMPP(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 에 대한 정규화된 위치추적 경비 ( $\lambda_m=1.0, \lambda_1=0.01$ )

(그림 10)은 가변 호도착율에 대하여 본 논문에서 제안된 방법의 성능을 더 살펴보기 위하여 평균 셀간 이동율이  $\lambda_m$ 일 때 3개의 상태를 가지는  $MMPP(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 에 대한 성능 평가이다. (그림 8)과 (그림 9)에서의 FIX1, FIX2의 경우에서처럼 특정 호도착율에 대하여 최소 위치추적 경비를 보이는 고정 타임아웃 주기를 사용하는 경우보다 FIX3에서처럼 평균 호도착율에 최적인 타임아웃 주기를 사용하는 방법이 평균적으로 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 따라서 이 경우와 본 논문에서 제안한 방법을 사용했을 때의 성능을 상대적으로 비교한다. 성능 차이를 더 잘 알아볼 수 있도록 하기 위하여 평균 호도착율에 최적인 타임아웃 주기를 사용하는 경우에 대한 위치추적 경비를 1로 하여 본 논문에서 제안한 방법의 위치추적 경비를 정규화(normalization)하여 보여준다. 앞서 기술한 것처럼 CMR2와 CMR3은 각각  $\lambda_2, \lambda_3$ 과 동일한 의미를 지닌다. (그림 10)(a)는 각 상태에서의 평균 시간 주기가 동일한 경우이며, (그림 10)

(b)는 각 상태에서 도착한 호의 수가 동일한 경우이다. 본 논문에서 제안한 방법이 각각 최대 33%와 16%의 성능 향상을 보임을 알 수 있다.

**5. 결 론**

본 논문에서는 호도착율의 변화에 쉽게 적응할 수 있는 호도착기록에 기반한 위치갱신 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 호도착기록을 사용하여 호도착율의 변화에 대한 최신 정보를 계산하고 이에 적합한 타임아웃 주기를 선택함으로써 호도착율의 변화에 적응할 수 있도록 한다. 본 논문에서 제안한 위치갱신 기법의 성능을 분석하기 위하여 랜덤 워크 모델에 기반한 분석 모델을 고정 호도착율과 가변 호도착율에 대하여 제안하였다. 또한, 2개의 상태를 가지는 MMPP 모델과 3개의 상태를 가지는 MMPP 모델에 대한 성능을 분석하여 결과를 제시하였다. 성능 분석한 결과에 의하면 본 논문에서 제안한 위치갱신 기법이 고정 타임아웃 주기를 가지는 경우에 비하여 안정적이면서도 좋은 성능을 보임을 알 수 있었다.

**참 고 문 헌**

[1] A. Bar-Noy, I. Kessler and M. Sidi, "Mobile Users : to Update or Not to Update?," Wireless Networks, Vol.1, No.4, pp.175-185, 1995.  
 [2] J. Ho and I. Akyildiz, "Mobile User Location Update and Paging under Delay Constraints," Wireless Networks, Vol. 1, No.4, pp.413-425, 1995.  
 [3] I. Akyildiz, J. Ho and Y.-B. Lin, "Movement-based Location Update and Selective Paging for PCN Networks," IEEE/ACM Trans. Networking, Vol.4, No.4, pp.629-638, Aug., 1996.  
 [4] C. Rose, "Minimizing the Average Cost of Paging and Registration : A Timer-based Method," Wireless Networks, Vol.2, pp.109-116, 1996.  
 [5] TIA/EIA/IS-2000.5 Ballot Resolution Version 1.04, "Upper Layer (Layer 3) Signaling Standard for CDMA2000 Spread Spectrum Systems," July, 1999.  
 [6] W. Fischer and K. Meier-Hellstern, "The Markov-modulated Poisson Process (MMPP) Cookbook," Performance Evaluation, Vol.18, pp.149-171, 1992.  
 [7] U. Madhow, M. Honig and K. Steiglitz, "Optimization of Wireless Resources for Personal Communications Mobility Tracking," IEEE/ACM Trans. Networking, Vol.3, No.6, pp. 698-707, 1995.  
 [8] M. Verkama, "A Simple Implementation of Distance-based Location Updates," Proc. 1997 IEEE 6th Int'l Conf. on Universal Personal Communications Record, pp.163-167, 1997.  
 [9] A. Abutaleb and V. O. Li, "Location Update Optimization in Personal Communication Systems," Wireless Networks, Vol.3, pp.205-216, 1997.  
 [10] H. Persson, "Microcellular Structures and Their Performance," Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 413-418, 1992.  
 [11] J. S. Ho and J. Xu, "History-based Location Tracking for Personal Communications Networks," Proc. IEEE Vehicular

Technology Conference, pp.244-248, 1998.  
 [12] D. Gross and C. Harris, "Fundamentals of Queueing Theory," 2nd ed., ch.1, pp.26-27, John Wiley & Sons, 1985.  
 [13] R. W. Wolff, "Stochastic Modeling and the Theory of Queues," ch.2, Prentice-Hall Inc., pp.73-74, 1989.  
 [14] J. L. Devore, "Probability and Statistics for Engineering and the Sciences," 3rd ed., ch.5, Brooks/Cole Publishing Company, pp.193-194, 1990.  
 [15] M. A Farahani and M. Guizani, "Markov modulated Poisson Process Model for Hand-off Calls in Cellular Systems," Wireless Communications and Networking Conference, Vol.3, pp.1113-1118, Sept., 2000.  
 [16] G. Min and M. Ould-Khaoua, "A Queueing Model for Pipelined Circuit-switched Networks with the MMPP Traffic," Ninth International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, pp.259-266, 2001.



**이 종 민**

e-mail : jongmin@dongeui.ac.kr  
 1992년 경북대학교 컴퓨터공학과(공학사)  
 1994년 한국과학기술원 전산학과(공학석사)  
 2000년 한국과학기술원 전자전산학과  
 전산학전공(공학박사)  
 1997년~1999년 삼성전자 정보통신총괄  
 (학술연수)  
 1999년~2002년 삼성전자 무선사업부 책임연구원  
 2002년~현재 동의대학교 컴퓨터·소프트웨어공학부 전임강사  
 관심분야 : 모바일 컴퓨팅, 인터넷 프로토콜, 병렬처리



**권 보 섭**

e-mail : bxkwon@andong.ac.kr  
 1983년 경북대학교 전자공학과(공학사)  
 1990년 충남대학교 대학원 전자공학과  
 (공학석사)  
 1997년 한국과학기술원 전산학과(공학박사)  
 1983년~1985년 LG전자 연구원  
 1985년~1998년 한국전자통신연구원 선임연구원  
 1998년~현재 안동대학교 컴퓨터교육과 조교수  
 관심분야 : parallel computer architecture, communication network, computer education



**맹 승 렬**

e-mail : maeng@calab.kaist.ac.kr  
 1977년 서울대학교 전자공학과(학사)  
 1979년 한국과학기술원 전산학과(공학석사)  
 1984년 한국과학기술원 전산학과(공학박사)  
 1988년~1989년 펜실바니아대학 방문교수  
 1994년~1995년 Univ. of Texas at Austin  
 방문교수  
 1984년~현재 한국과학기술원 전자전산학과 전산학전공 교수  
 관심분야 : embedded computing, cluster and grid computing