

# 무선 애드혹 네트워크 시뮬레이션을 위한 인간 이동성 모델

홍성익, 김성진  
삼성종합기술원

## 요약

스마트 폰/탭 등 소형 스마트 기기의 대중화로 모바일 트래픽은 급증하고 있다. 사람이 들고 다니는 모바일 기기에 의해 트래픽이 발생하는 네트워크의 특성상, 그 성능은 사람의 이동 패턴에 의존할 수 밖에 없다. 안정적인 성능을 보장하기 위해서는 다양한 환경에서의 실험이 필수이나, 실제 모바일 기기들을 사용한 실험은 그 비용이나 소요 시간 등을 고려할 때 불가능한 일이라 할 수 있다. 이를 해결하기 위해 사람의 이동성 모델을 사용한 다양한 시뮬레이션으로 실험을 대신해 왔다. 본 고에서는 그 동안 제안된 수많은 인간 이동성 모델을 소개하고, 그 특성을 알아본다.

## I. 서론

전세계 모바일 사용자는 2017년 52억명에 달할 전망이다. 2017년에는 사람 이외에 사물간의 연결 - M2M (Machine to Machine)- 만 17억 개에 달하는 등 전체 모바일 접속 연결 수는 기하 급수적으로 늘어날 것이라고 한다 [4].

급속히 성장하는 모바일 네트워크에서 안정적인 서비스를 제공하기 위해서는 실제 모바일 기기와 같은 이동 패턴을 가지는 이동성 모델에 의한 시뮬레이션 연구가 필수적이다. 실제 기기를 사용한 실험을 위한 테스트 베드 마련도 어렵거니와 다양한 환경에서의 반복적인 실험 수행 역시 현실적으로 불가능하기 때문이다.

알바트로스, 자칼, 스파이더 원숭이나 개 <그림 1 참고> 같은 동물들에 대한 이동성 연구는 상대적으로 많이 진행되어 왔다 [1][2]. Viswanathan은 1996년 알바트로스의 발목에 바닷물 접촉을 센싱하는 장치를 설치하여 알바트로스의 한번 이동거리를 측정하였다. 그 결과 Levy-walk이라고 하는 특정한 패턴을 보임을 알게 되었고, 이후 많은 연구를 통하여 자칼, 스파이더 원숭이, 강아지 등 다양한 동물들이 역시 Levy-walk 이동 패

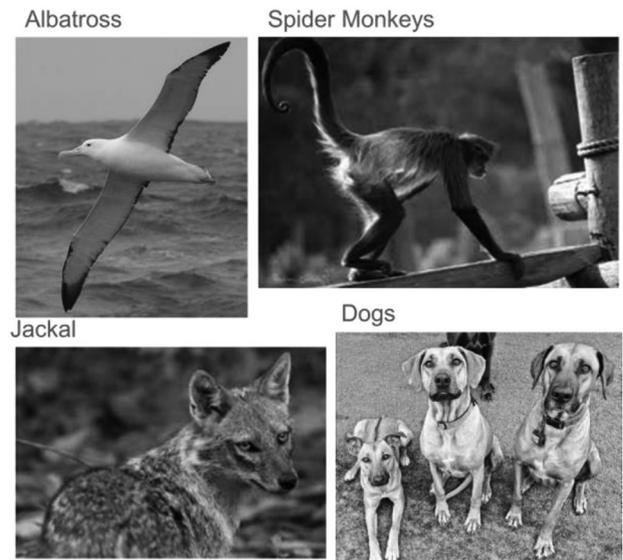


그림 1. 동물들의 이동성에 대한 연구

턴을 보임이 알려졌다 [1][2][3].

그렇다면 왜 동물들은 Levy-walk 패턴으로 이동하는 것일까? 이에 대한 답으로 Viswanathan은 3년 후인 1999년 Nature 논문에서 동물들의 이러한 패턴은 먹이 탐색 활동의 효율성을 높이기 위한 것이라고 주장하였다 [3]. 즉, 랜덤하게 분포되어 있는 먹이를 찾기 위해서는 Levy-walk 패턴으로 움직이는 것이 이동 거리 대비 가장 많은 먹이를 획득할 수 있다는 것이다. 그렇다면 과연 인간은 어떤 이동 패턴을 보일까?

“우리에게 주어진 어떤 책임도 없고, 우리가 필요로 하는 모든 물품을 언제 어디서든 얻을 수 있다면, 인간의 이동은 시공간적으로 랜덤 이동일 것이다” T. Hagerstrand, Regional Science, vol. 24, no. 1, pp. 6-21, 1970.

사람의 이동은 랜덤 이동인가? 아니면 단순히 먹을 것을 효율적으로 찾는 것인가? 모르긴 해도 둘 다 아닐 것이다. 사람의 이동은 그 사람의 의도 및 공간적이나 시간적인 제약에 의해 결정될 것이다. 또 먹이 등만을 찾아 다니는 동물과는 달리 본능 외에도 여러 다른 이유로 (예를 들면, 사회적인 여러 필요와 책

임에 의해) 이동한다. 이러한 다양한 제약을 모두 감안하여 가상 환경에서 현실과 똑같은 이동성을 재현하여 시뮬레이션을 수행한다는 것은 결코 쉬운 일이 아니다.

모바일 기기간의 연결에 의해 네트워크를 형성하는 모바일 애드혹 (Ad Hoc) 네트워크 (MANET) 및 Delay Tolerant 네트워크 (DTN) [5]가 등장함에 따라 이러한 네트워킹 상황하에서의 성능 예측이 더욱 중요하게 되었다. MANET 및 DTN 네트워크를 심층적으로 연구하기 위해서 프로토콜을 시뮬레이션하고 분석하는 일은 매우 중요하다. 프로토콜 시뮬레이션에는 몇 가지 중요한 요소가 있다. 먼저 모바일 기기의 움직임을 특정 짓는 이동성 모델과 서로간에 주고 받는 트래픽 패턴 등이다. 본 고에서는 그 중 이동성 모델에 주안점을 둔다. 그 동안 제안된 이동성 모델의 특성을 분석하고 장단점에 대해 알아본다.

인간 이동성 모델이 갖고 있는 또 다른 문제점은 그 모델의 현실성을 평가하는 방법이 없었다는 것이다. 사람의 이동 패턴을 하나하나 세부적으로 동일하게 표현할 수는 없다. 또 동일한 환경에서 실제로 측정된 이동 형태와 비교하여 얼마나 유사한지 비교하여 평가할 수도 없다. 그렇다면 어떠한 특성을 주요 요소로 볼 수 있을 것인가가 중요하다. 본 고에서는 모바일 네트워크의 성능을 특정 짓는 주요 요소를 먼저 정하고, 이를 얼마나 재현할 수 있는가를 그 평가 요소로 삼고자 한다.

이동 거리 (flight length)와 Inter-Contact Time (ICT)은 그런 의미에서 이동성 모델이 갖춰야 할 가장 중요한 요소라 할 수 있다 [22][23][24][33]. 이동 거리라 함은 한 모바일 노드가 정지하여 휴식하거나 또는 급격히 방향을 바꾸기 전 한번에 연속하여 움직였다고 생각할 수 있는 거리이다. ICT는 어느 두 노드가 서로의 통신 가능 영역(transmission range) 밖으로 떨어졌다가 다시 만날 때까지 걸리는 시간으로, 무선 통신 특히 노드간 통신에서 성능 예측에 중요한 요소이다.

그 동안의 이동성 모델은 이러한 이동 거리에 대해서 큰 관심을 두지 않았다. 또한 오랫동안 ICT의 분포는 정규 분포를 따를 것이라고 생각되어 왔다 [34]. 그러나, 최근 실제 데이터를 사용한 분석 결과 [33]에 따르면 ICT는 power-law 분포를 따르는 것으로 나타났다. ICT가 power-law를 따른다는 것은 정규 분포를 따를 때와는 달리 특정 평균값이나 분산으로 분포가 대표될 수 없다는 뜻이다. ICT가 무한대 값을 가지는 경우가 존재할 수 있으므로, 서로 다른 두 모바일 노드가 다시 만날 수 없는 경우가 있다는 뜻이다. 이는 모든 노드 상호간은 유한 시간 내에 만난다는 것을 가정(정규 분포)하는 이동성 모델에 의한 시뮬레이션 결과는 그 라우팅 성능이 실제 경우에 비해 매우 유리하게 해석되어 왔다는 것을 의미한다.

본 고에서는 II장에서 그 동안 제안된 인간 이동성 모델을 설

명하고, III장에서 이동 거리와 ICT 분포 측면에서 모델들을 검토한다. 그리고, IV장에서 결론을 맺는다.

## II. 인간 이동성 모델

그 동안 제안된 이동성 모델은 <표 1>과 같이 크게 랜덤 (random) 모델, 랜덤 파생 (random variant) 모델, 공간 제약 (geographic restriction) 모델, 공간적 관계 (spatial dependency) 모델 등으로 나눌 수 있었다 [6][7]. 또한 최근 SNS 등의 발달, WiFi/GPS (Global Positioning System) 등을 사용한 다양한 데이터의 등장 등으로 사회적 관계 (social relationship) 모델, 시공간적 관계 (spatio-temporal dependency) 모델 등이 많이 제안되고 있다.

랜덤 모델은 모바일 노드가 랜덤하게 공간적으로 움직인다고 가정하였다. 이는 단지 해석의 편의성을 위한 가정이어서 사람의 움직임을 제대로 묘사한다고 볼 수 없다. 랜덤 파생 모델은 랜덤 모델의 급격한 속도나 방향 전환 등의 문제를 완화시키기는 했으나, '랜덤하게 움직인다는' 랜덤 모델의 비현실적 요소를 그대로 안고 있는 단점이 있다. 공간 제약 모델은 장애물, 도로나 건물 등 인간의 이동 패턴에 영향을 주는 요소들을 모델링 하여 좀더 실제 사람의 이동 패턴에 가깝게 만들고자 했다. 공간적 관계 모델은 개개인의 이동뿐만 아니라 이들이 공간적으로 모이는 장소인 핫스팟 (hotspot)까지 모델링 하였다. 시공간적 관계 모델은 모바일 노드의 핫스팟 방문에 시간적인 요소를 추가하여 (예를 들어, 식당가에는 식사 시간에 사람이 많이 몰린다던가) 좀더 사람의 이동 패턴과 유사하다고 생각할 수 있도록 만들었다. 사회적 관계 모델은 노드 간의 소원 관계를 모델링하여 좀더 자주 만나는 사람들간의 그룹이 존재할 수 있게 하였다.

표 1. 인간 이동성 모델 분류

| 분류            | 모델                             |
|---------------|--------------------------------|
| 랜덤 모델         | Random WayPoint (RWP) [8]      |
|               | Random Direction (RD) [9]      |
|               | Truncated Levy Walk (TLW) [22] |
| 랜덤 파생 모델      | Gauss Markov (GM) [11]         |
|               | Markovian WayPoint (MWP) [12]  |
|               | Smooth Random (SR) [13]        |
| 공간 제약 (장애) 모델 | Freeway 모델 [14]                |
|               | Manhattan 모델 [14]              |
|               | Obstacle 모델 [15]               |

| 분류         | 모델   |
|------------|--|
| 공간적 관계 모델  | Dartmouth 모델 [16]                          |
|            | Pragma 모델 [17]                             |
|            | ORBIT [19]                                 |
|            | Self-similar Least Action Walk (SLAW) [23] |
| 시공간적 관계 모델 | Time-variant Community Model (TCM) [21]    |
|            | Spatio-TEmporal 모델 (STEP) [24]             |
| 사회적 관계 모델  | Reference Point Group Mobility (RPGM) [10] |
|            | Clustered Mobility 모델 (CMM) [18]           |
|            | Community Model (CM) [20]                  |

### Random WayPoint (RWP) 모델 [8]

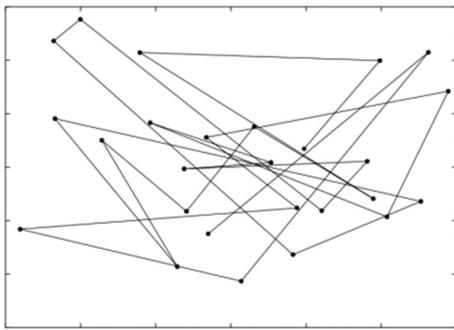


그림 2. RWP 모델을 사용한 샘플 trace [6][8]

RWP 모델에서, 모바일 노드는 주어진 영역 내에서 한 점 (waypoint)을 랜덤하게 선택하고, 그 점까지  $[V_{min}, V_{max}]$  구간 내에서 유니폼(uniform)하게 선택한 속도로 이동한다. 각 waypoint에서 모바일 노드는  $[\text{minpause}, \text{maxpause}]$  구간 내에서 유니폼하게 선택한 값 동안 움직이지 않고 쉰다. 각 모바일 노드는 위와 같은 이동과 쉰을 반복한다.

RWP 모델은 그 단순성과 해석적 (analytical) 편리함으로 많은 애드혹 라우팅 프로토콜의 성능 분석에 사용되었다 [13][26][27][28]. 그러나, 시뮬레이션 시간이 지남에 따라 노드들의 분포가 영역의 중심부에 몰리고 [7][29], 각 노드들이 목적지를 시뮬레이션 영역 내에서 랜덤하게 선택하는 등의 비현실적인 요소가 알려져 있다.

### Random Direction (RD) 모델 [9]

RD 모델은 RWP 모델의 단점인 중앙 부근에서의 노드 밀도가 높아지는 현상을 해결하기 위해 제안되었다. 모바일 노드는 전진 방향을  $[0, 360]$ 도 사이에서 유니폼하게 선택하고, 시뮬레이션 영역의 바운더리 (boundary)를 만날 때까지 이동한다. 바운더리에서 일정 시간 동안 정지한 다음  $[0, 180]$ 도 사이에서 유니폼하게 각도를 선택하여 또 다시 바운더리를 만날 때까지

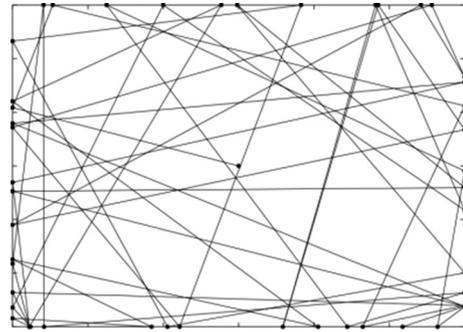


그림 3. RD 모델을 사용한 샘플 trace [6][9]

전진한다.

RD 모델은 RWP 모델의 단점 중 하나를 해결하였으나, 노드가 목적 방향을 랜덤하게 선택하고, 시뮬레이션 영역의 바운더리에서만 정지하는 등의 비현실적 요소를 갖고 있다.

### Reference Point Group Mobility (RPGM) 모델 [10]

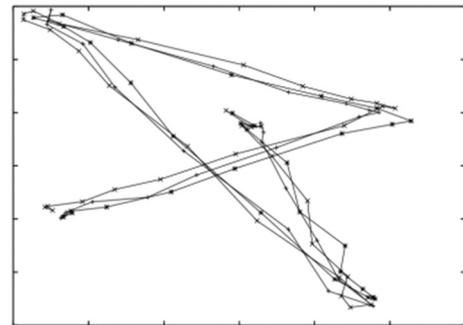


그림 4. RPGM 모델을 사용한 샘플 trace [6][10]

RWP와 RD 모델의 한계 중 하나는 각 노드가 제각각 독립적으로 이동한다는 점이다. RPGM 모델은 여러 노드가 단체로 이동하는 특성을 지닌 모델이다. 노드들은 먼저 임의의 그룹으로 할당을 받는다. 특정 노드 그룹의 이동은 가상으로 설정한 그룹 중심의 이동에 의존한다. 먼저 그룹의 가상 중심은 RWP 모델과 같이 이동한다. 각 노드는 그룹의 가상 중심의 다음 목적지 주변 반경  $r$  내의 특정 지점을 선택하여 그 곳으로 이동한다.

RPGM 모델은 여러 노드의 그룹 이동 특성을 나타낼 수는 있으나, 그룹의 가상 중심점이 RWP 이동 방식에 기반하므로 RWP의 단점을 많이 가진다.

### Gauss Markov (GM) 모델 [11]

GM 모델은 RWP 모델을 변형한 것이다. 속도를 제외한 모든 움직임은 RWP와 동일하다. 모바일 노드의 속도는 시간에 연관되어 Gauss-Markov 프로세스로 모델링된다. 이는 정지 지점

에서의 출발/도착 시 급격한 속도 변화를 막기 위해서이다. 이를 위해 시간적으로 앞뒤 속도간의 관계를 정의하는 특정 함수를 사용한다.

### Markovian WayPoint (MWP) 모델 [12]

MWP 모델은 RWP의 변형 모델의 하나로서 정지 시간과 순간 속도를 제어할 수 있다. 다음 waypoint 선택은 현재 위치를 기반으로 할 수 있으며, waypoint간의 마코비안 트랜지션(Markovian transition) 확률을 정의할 수 있어 노드들이 많이 몰리는 핫스팟(hotspot)을 만들 수 있다.

### Smooth Random (SR) 모델 [13]

SR 모델 역시 RWP 모델의 변형 중 하나이다. RWP 모델에서 정지 위치에서의 급격한 방향 전환과 가속/감속을 방지한다. 이를 위해 가속, 감속을 위한 함수를 따로 정의하며, 속도 변화의 빈도는 포아송 프로세스(Poisson process)를 따른다고 가정한다. 가감속 함수의 값을 작게 유지함으로써 급격한 속도 변화를 막고 시간에 따른 앞뒤 속도간의 관계를 강하게 만들 수 있다.

### Freeway 모델 [14]

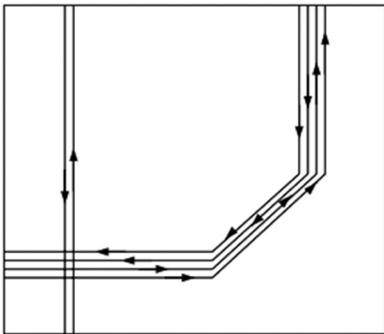


그림 5. Freeway 모델 [14]

Freeway 모델은 미리 정해진 도로(freeway) 지도를 사용한다. 지도에는 양방향으로 달릴 수 있는 차선이 있으며, 모든 노드는 차선 위에서만 이동할 수 있다. 노드의 속도는 직전 속도에 의존하여 결정되며, 같은 차선 위에 있는 노드들이 일정 거리 내에 위치할 경우 각 노드는 자신의 앞 노드를 추월할 수 없다.

### Manhattan 모델 [14]

Manhattan 모델은 대도시 내의 수평/수직 도로를 모방한 지도를 사용한 모델이다. 각 도로는 서로 역방향인 두 개의 차선을 가지며, 모든 노드는 이 차선 위에서만 이동할 수 있다. 노드의

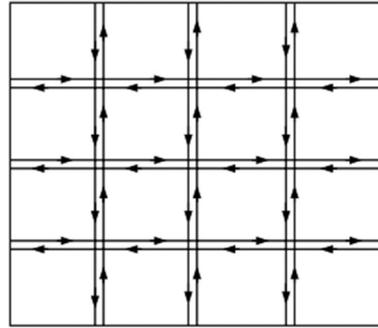


그림 6. Manhattan 모델 [14]

속도는 직전 속도에 의존하여 결정되며, 교차점에서는 정해진 확률 값에 의해 방향을 바꿀 수 있다.

### Obstacle 모델 [15]

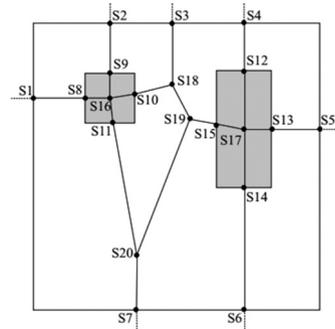


그림 7. Obstacle 모델을 사용한 건물 배치 및 그에 따른 Voronoi 다이어그램 [15]

Obstacle 모델은 빌딩 등 건축물이 있는 시뮬레이션 영역 내에서의 사람의 이동 패턴을 나타낸다. 먼저 시뮬레이션 영역 내에 장애물인 건물들을 배치한다. 건물의 각 꼭지점들 간에 Voronoi 다이어그램(diagram)[30]을 그린다. Voronoi 다이어그램은 미리 지정된 점들까지 가장 가까운 영역으로 나뉘어진 그림을 말한다. <그림 7>에서 두 건물(회색)의 각 꼭지점 8개가 Voronoi 다이어그램의 미리 지정된 점들이고, 'S'로 시작하는 19개의 점들을 각 꼭지점으로 하는 다각형 8개가 각 꼭지점까지의 최근점(closest point)를 이은 도형이 된다. 또한 이 도형의 변(side)들이 사람들이 이동할 수 있는 길(pathway)이 된다. 각 모바일 노드의 시작점과 속도 등은 사용자가 설정할 수 있다.

### Dartmouth 모델 [16]

Dartmouth 모델은 지금까지 설명한 이동성 모델과는 달리 실제 모바일 노드가 association된 AP에 저장된 로그에서

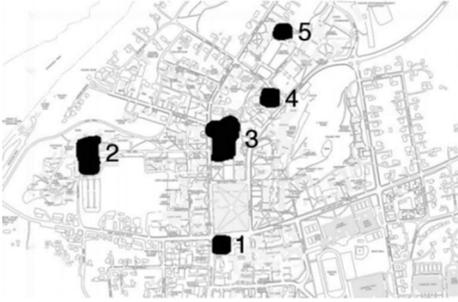


그림 8. Dartmouth캠퍼스 무선 네트워크 사용 로그(log)로부터 추출한 핫스팟 (hotspot)

각 모바일 노드들의 위치를 추출하여 실제 모바일 노드의 이동 trace를 예측하는 모델이다. <그림 8>과 같이 먼저 많은 모바일 노드들이 로그를 남긴 핫스팟 영역을 도출한 후, 각 핫스팟 사이의 사용자 이동을 실제 AP에 association된 시간 순서를 통해 트랜지션 확률을 구한다.

Dartmouth 모델은 실측된 데이터를 기반으로 모바일 노드의 trace를 생성하기 때문에 대량의 데이터를 필요로 하고, 특히 핫스팟 내에서의 이동을 기술하지 않는 문제점이 있다.

### Pragma 모델 [17]

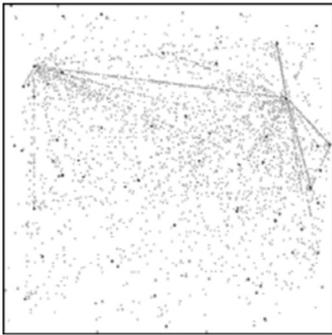


그림 9. Pragma 모델을 사용하여 이동하는 노드들의 snapshot

Pragma 모델은 preferential attachment [31]라는 사회학적 현상을 바탕으로 만들어진 모델이다. Preferential attachment란 “the rich get richer”현상을 표현한 것으로서 현재 자신이 가지고 있는 양에 비례하여 새로운 것을 얻게 되는 현상이다.

Pragma 모델은 attractor와 individual을 이용하여 preferential attachment현상을 만든다. 와 individual이 존재한다. Attractor는 individual이 관심을 가지는 랜드마크(landmark)이다. Individual은 각 모바일 노드이다. Attractor는 Poisson 프로세스로 생성되어 일정 시간 이후 사라진다. Individual은 attractor중 하나를 랜덤하게 선택하여 이동한다. 이때 각 attractor를 목표로 이동하고 있는 individual의 수에

가중치를 준다. 즉, 어떤 특정 attractor를 목표로 움직이는 모바일 노드가 많아짐에 따라 그 attractor의 attractiveness가 커져 더 많은 individual들이 그 attractor를 향해 움직이게 된다.

<그림 9>에서 시뮬레이션 영역 내에서 이동하고 있는 모바일 노드들의 스냅샷을 볼 수 있다. 모바일 노드들이 특정 영역에 많이 몰려 있는 것을 볼 수 있다.

### Clustered Mobility 모델 (CMM) [18]

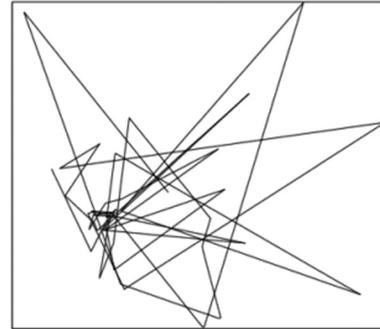


그림 10. CMM 모델을 사용한 샘플 trace

CMM 역시 preferential attachment 이론을 사용한 인간 이동성 모델이다. 먼저 시뮬레이션 영역을 subarea로 나누고, 각 subarea를 attractor로 사용한다. 모바일 노드는 특정 subarea에 할당되며 subarea별 attractiveness는 각 subarea에 할당되어 있는 모바일 노드 수에 비례한다. 각 노드는 동전을 던져서 현재 subarea에 그대로 머무르지 다른 subarea로 떠날지를 결정한다. 다른 subarea로 떠날 경우 어디로 갈지는 역시 그 당시 각 subarea에 속한 모바일 노드 수에 비례해서 결정한다.

### ORBIT [19]

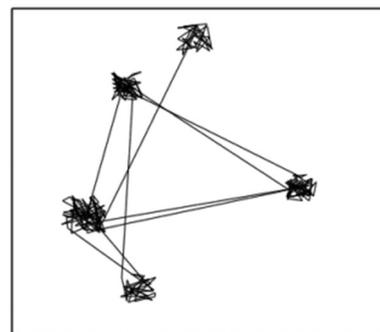


그림 11. ORBIT 모델을 사용한 샘플 trace

ORBIT 모델은 핫스팟을 표현할 수 있는 모델이다. 시뮬레이션 영역 내에 랜덤하게 선택한 특정 수의 핫스팟(예를 들면, 시뮬레이션 영역 크기보다 작은 정사각형)을 만들고, 각 모바일

노드에 핫스팟의 일부를 할당한다. 각 모바일 노드는 자신에게 할당된 핫스팟 사이를 이동하게 된다. 핫스팟 내에서는 RWP와 같이 랜덤하게 이동하며, 핫스팟 간을 이동할 때, 다음 목적지가 되는 핫스팟은 랜덤하게 선택한다.

### Community Model (CM) [20]

CM 모델은 소셜 네트워크 이론에 기반을 둔 이동성 모델이다. 각 모바일 노드들은 노드간 소셜 관계에 의해 그룹으로 나누어진다. 이 때 소셜 관계는 user에 의해 결정된다. 클러스터 그룹은 topo-graphical 영역에 매핑되고, 각 모바일 노드의 이동은 상호간의 소셜 관계의 강약에 의해 좌우된다. 소셜 관계는 인터랙션 매트릭스 (interaction matrix)로 표현된다.

### Time-variant Community Model (TCM) [21]

TCM 모델에서 각 모바일 노드는 홈 로케이션을 가지고 주기적으로 방문하며, 어웨이(away) 로케이션은 랜덤하게 선택해서 이동한다. 각 모바일 노드는 시간 축 상에서 정상 상태와 집중 상태로 번갈아 상태를 이동하며, 집중 상태에서는 높은 확률로 홈 로케이션으로 이동하며, 정상 상태에서는 홈/어웨이 로케이션으로 같은 확률로 이동한다. 이러한 규칙에 의해 각 모바일 노드는 자신의 홈 로케이션으로 비교적 주기적으로 이동하게 된다. TCM 모델은 아주 간단한 주기적 이동 패턴을 표현할 수 있는 모델이다.

### Truncated Levy Walk (TLW) [22]

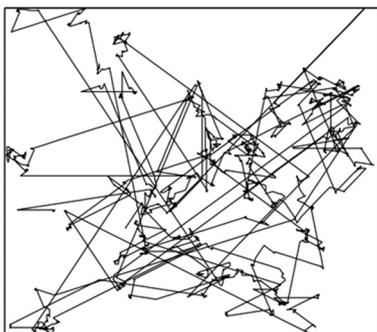


그림 12. TLW 모델을 사용한 샘플 trace

TLW는 실제 사람들이 움직인 GPS데이터를 사용하여 공통된 이동 패턴을 추출하고, 이를 모델링에 사용한 최초의 인간 이동성 모델이다. TLW는 100명 이상의 자원자로부터 모은 GPS trace 데이터를 기반으로 사람의 이동 거리(flight length)가 레비 (Levy) 분포를 따름을 발견하고 이를 모델링하였다. 즉, 수많은 짧은 이동과 간간히 나타나는 먼 거리 이동이 합해진 형태

로 이동한다는 것이다. 이동 간에 머무르는 시간 역시 레비 분포를 따르고, 이동 속도는 이동 거리에 비례함을 나타내었다.

### Self-similar Least Action Walk (SLAW) [23]

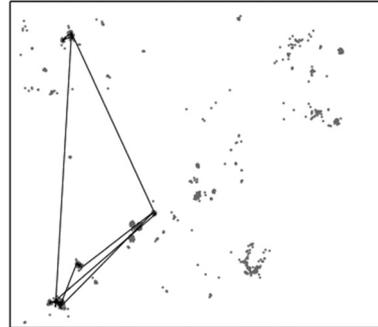


그림 13. SLAW 모델을 사용한 샘플 trace  
(회색 점은 trace를 만들기 위해 사용한 가상의 waypoint)

TLW가 레비 분포에 따른 이동 거리를 보이는 인간의 이동 특성을 나타내기는 하지만, 핫스팟에 모이는 군집 특성은 보이지 못한다. SLAW는 TLW의 특성을 모두 가지면서 인간 이동성의 공간적 특징인 핫스팟까지 표현할 수 있는 모델이다. SLAW는 먼저 인간이 이동할 수 있는 가상의 waypoint가 프랙탈 [32] 특성을 가진다는 것을 보이고, 이 프랙탈 waypoint를 최단 거리로 이동하고자 하는 의도가 레비 분포를 따르는 이동 거리로 나타남을 보였다.

### Spatio-TEmporal 모델 (STEP) [24]

SLAW 모델이 레비 분포 이동 거리와 핫스팟을 모두 표현하기는 하나, 이는 모두 공간적인 특성만을 나타낸다. STEP 모델은 이러한 특성에 인간 이동성의 시간적 특성까지 표현하는 모델이다. STEP 모델은 GPS trace 분석을 통해 핫스팟 들에 사람이 모이는 것에 일정한 주기성이 있음을 도출하고, 이를 모델에 도입하였다.

## III. 모델 검증

시뮬레이션을 위한 이동성 모델은 실제 사람의 이동 패턴을 얼마나 충실하게 묘사하느냐가 관건이다. 무선 환경에서의 이동성 모델의 충실도를 측정할 수 있는 방법으로는 모바일 노드가 geo-topologically 얼마나 유사하게 움직이는지 그리고 모바일 노드간의 연결성이 얼마나 유사하게 나타나는지가 특히 중요하다 [22][23][24]. 이에 본 장에서는 이동성 모델에 의해

생성되는 이동 거리 분포와 모바일 노드간의 ICT 분포를 그 척도로 삼아 모델의 충실도를 검증해 보고자 한다.

모델 검증을 위해서는 실제 이동 거리 분포와 ICT 분포를 측정할 수 있는 데이터가 필요하다. 이 데이터는 시뮬레이션으로 재현 가능한 환경 설정 값, 즉, 영역 크기 등 역시 알 수 있어야 한다.

표 2. 기존 데이터 집합

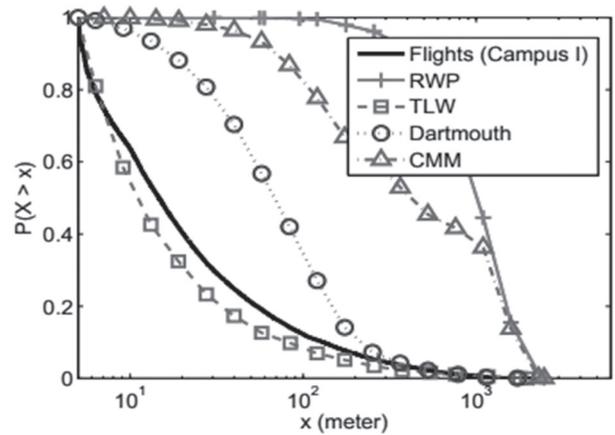
| 이름             | 장치        | 이동 거리 | ICT |
|----------------|-----------|-------|-----|
| Cambridge [33] | Bluetooth | X     | ○   |
| Hong Kong [33] | Bluetooth | X     | ○   |
| Infocom [33]   | Bluetooth | X     | ○   |
| Toronto [33]   | Bluetooth | X     | ○   |
| UCSD [36]      | WiFi      | △     | △   |
| Dartmouth [16] | WiFi      | △     | △   |
| MIT BT [33]    | Bluetooth | X     | ○   |
| MIT GSM [33]   | GSM       | △     | △   |
| SLAW [23]      | GPS       | ○     | X   |
| STEP [24]      | GPS       | ○     | ○   |

이동성 모델 검증을 위해 <표 2>와 같은 데이터 집합을 고려하였다. 그러나, 이러한 데이터 집합은 사용한 장치에 따라 이동 거리 또는 ICT 측정에 제한이 있을 수 있다. Bluetooth를 사용한 경우 ICT는 측정 가능하나 위치 정보가 없으므로 이동 거리는 측정이 불가능하다. WiFi 또는 GSM을 사용한 경우 association된 access point (AP) 또는 기지국의 위치를 아는 경우에 한해 위치 측정이 가능하기는 하나 그 전송 거리만큼 (수백 m ~ 수 km)의 오차가 있을 수 밖에 없다. GPS를 사용한 경우 작은 오차로 (수 m 이내) 이동 거리를 측정할 수 있으나 ICT의 경우는 모든 데이터가 동시에 수집되었을 경우만 측정 가능하다.

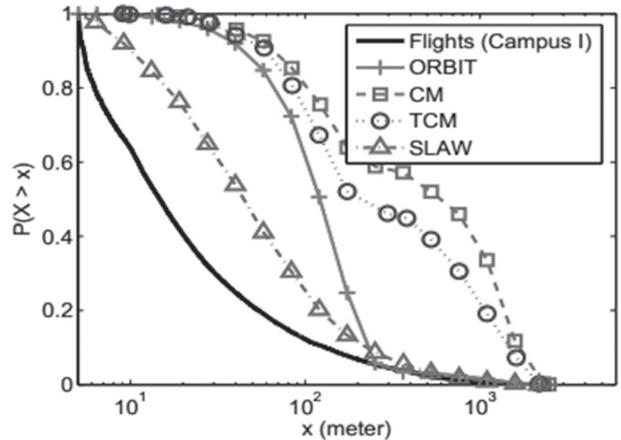
먼저 이동 거리를 수m 단위로 정밀하게 측정할 수 있는 데이터 집합은 SLAW [23]와 STEP [24]의 데이터 집합이 있다. 그러나 SLAW에서 사용된 데이터는 동시에 수집된 것이 아니므로 ICT 분포를 측정할 수 없다. 따라서 본 장에서는 STEP [24]에서 사용된 Campus I,II의 데이터를 사용하였다.

모델의 충실도 비교는 먼저 실제 데이터로부터 이동 거리와 ICT의 분포를 도출한 다음, 동일한 환경에서 각 모델을 시뮬레이션 하여 이동 거리 및 ICT의 분포를 도출, 그것을 실제 데이터에서 나온 분포와 비교하였다. 시뮬레이션은 [24]의 Campus I의 환경에 맞게 2km x 2km 영역에, 무선 전송 거리는 50m, 70개의 모바일 노드를 사용하여 56시간 동안 시뮬레이션을 수행하였고, 초기 24시간의 결과는 초기 효과 상쇄를 위해 버렸

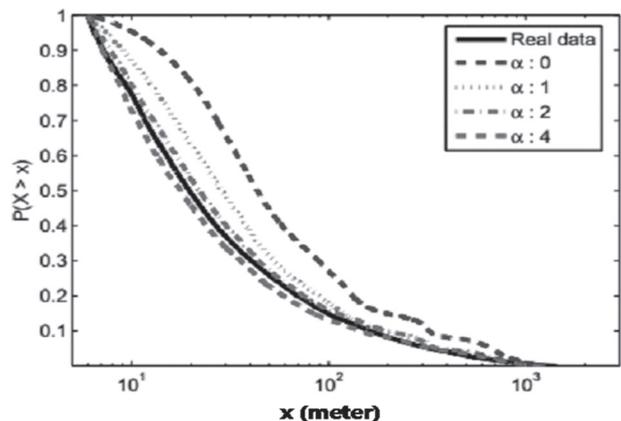
다. Dartmouth, CMM, SLAW, ORBIT, CM 및 TCM 등 핫스팟 모델을 위해서는 전체 영역을 200m 크기의 작은 영역으로 다시 나누고, 각 작은 영역을 핫스팟으로 간주하였다. Dartmouth 모델의 경우 실제 trace를 필요로 하므로 [24]의 trace를 그대로 사용하였다.



(a) RWP, TLW, Dartmouth, CMM 모델이 생성하는 이동 거리 분포



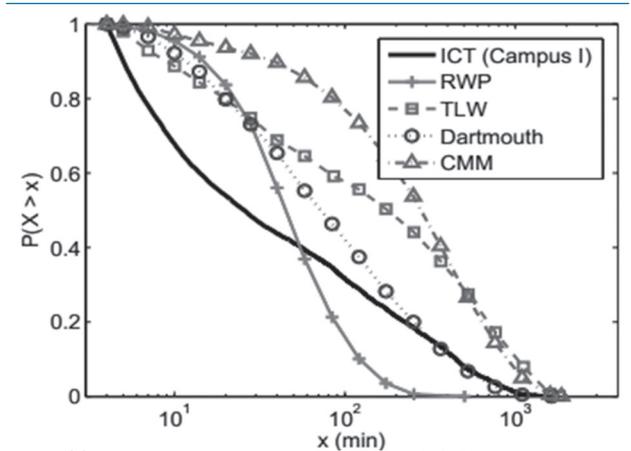
(b) ORBIT, CM, TCM, SLAW 모델이 생성하는 이동 거리 분포



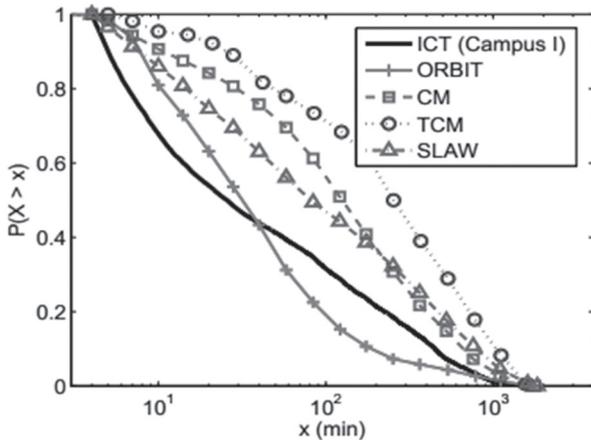
(c) STEP 모델의 파라미터 값에 따른 이동 거리 분포

그림 14. [24]의 Campus I 데이터를 기반으로 한 여러 이동성 모델이 생성하는 이동 거리 분포 (Campus II 플롯은 지면 제약으로 생략)

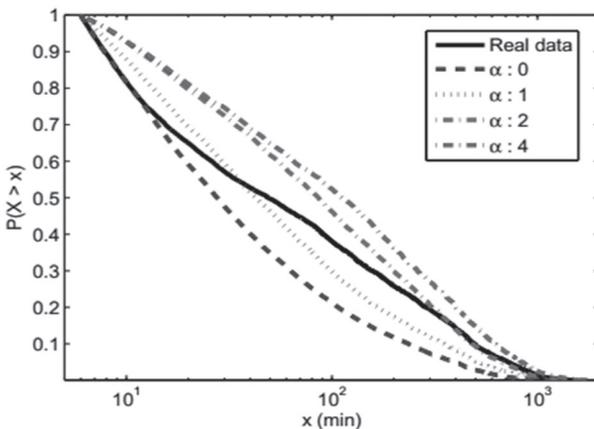
〈그림 14〉는 각 형태별로 대표적인 인간 이동성 모델 및 실제 데이터에서 측정된 이동 거리의 CCDF 분포를 서로 간의 차이를 명확히 표현하기 위해 semi-log 형태로 나타낸 것이다. TLW와 STEP이 실제 데이터를 사용한 플롯에 상대적으로 잘 맞는다는 것을 육안으로 확인할 수 있다.



(a) RWP, TLW, Dartmouth, CMM 모델이 생성하는 ICT 분포



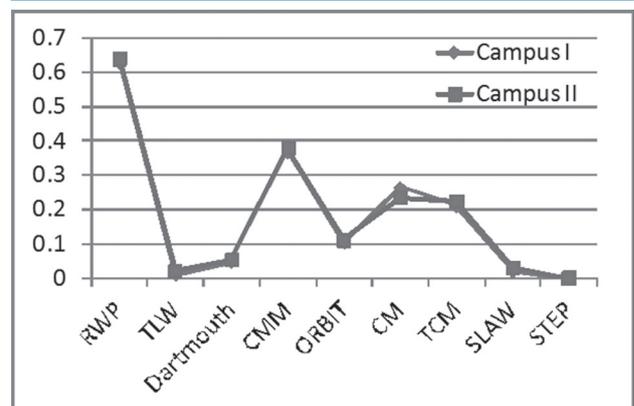
(b) ORBIT, CM, TCM, SLAW 모델이 생성하는 ICT 분포



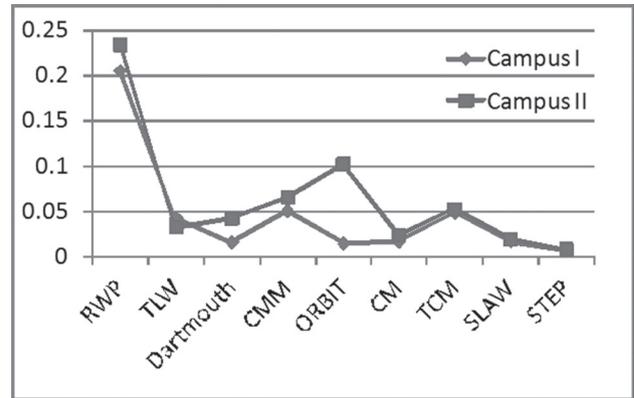
(c) STEP 모델이 생성하는 ICT 분포

그림 15. [24]의 Campus I 데이터를 기반으로 한 여러 이동성 모델이 생성하는 ICT 분포 (Campus II 플롯은 지면 제약으로 생략)

〈그림 15〉에서 볼 때 ORBIT과 STEP의 ICT 분포가 실제 데이터에서 측정된 ICT 분포와 잘 맞는 것으로 보인다. 그러나 좀 더 정밀한 비교를 위하여 Kullback-Leibler divergence (KL) 테스트 [35] 를 수행하였다. KL 테스트는 두 확률 분포의 차이를 계산할 때 사용하는 것으로, 어떤 분포에 대해 그 분포를 근사 하는 다른 분포를 사용해 샘플링을 한다면 발생할 수 있는 정보 엔트로피 차이를 계산한다.



(a) Campus II 환경[24]에서 측정된 이동거리 분포의 KL 테스트 결과



(b) Campus I, II 환경 [24]에서 측정된 ICT 분포의 KL 테스트 결과

그림 16. [24]의 Campus I 데이터를 기반으로 한 여러 이동성 모델이 생성하는 이동 거리, ICT 분포에 대한 KL 테스트 결과

〈그림 16 (a)〉에서 이동 거리 분포는 TLW, SLAW, STEP이, 〈그림 16 (b)〉에서 ICT의 분포는 CM, SLAW, STEP이 실제 측정된 이동 거리와 ICT 분포에 가장 잘 매칭된다고 볼 수 있다. TLW, SLAW, STEP은 모두 Levy-walk 기반 이동성 모델로서 SLAW는 TLW에 핫스팟이라는 공간적 제약, STEP은 SLAW에 핫스팟의 주기적 활성화라는 시간적 제약을 추가로 모델링 한 것으로서, Levy-walk이 인간 이동의 특성을 잘 반영하는 것으로 볼 수 있다.

## IV. 결론

본 고에서는 그 동안 제안된 인간 이동성 모델들에 대해 알아 보았다. 인간 이동성 모델은 무선 모바일 네트워크에서의 프로토콜 성능 테스트를 위한 시뮬레이션에 필수적이다. 초기 랜덤 모델부터 수많은 이동성 모델이 제안되었으며 최근에는 실제 데이터 집합의 분석 결과에 기반을 둔 모델들이 제안되었다. 본 고에서는 대표적인 모델들을 설명하고, 그 현실성을 검증하기 위해 모델이 만들어 내는 이동 거리와 Inter-Contact Time 분포를 시뮬레이션을 통해 알아보았다.

인간의 이동성 모델은 비단 무선 네트워크의 성능 분석뿐만 아니라, 전염병의 확산 통제, 효율적인 도시 교통망 설계 등 사람의 이동에 관련된 많은 분야에 적용될 수 있으므로 실제 데이터 분석에 의한 심도 있는 논의가 필요하다.

## 참고 문헌

- [1] G. M. Viswanathan, V. Afanasyev, S. V. Buldyrev, E. J. Murphy, P. A. Prince and H. E. Stanley, Lévy flight search patterns of wandering albatrosses, *Nature*, 1996.
- [2] R. P. D. Atkinson, C. J. Rhodes, D. W. Macdonald and R. M. Anderson, Scale-free dynamics in the movement patterns of jackals, *Oikos*, 98(1):134 – 140, 07/2002.
- [3] G. M. Viswanathan, Sergey V. Buldyrev, Shlomo Havlin, M. G. E. da Luz, E. P. Raposok and H. Eugene Stanley, Optimizing the success of random searches, *Nature*, 1999.
- [4] [http://www.cisco.com/web/KR/about/news/2013/1-4/news\\_0206.html](http://www.cisco.com/web/KR/about/news/2013/1-4/news_0206.html)
- [5] Kevin Fall, A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets, *ACM SIGCOMM*, 2003.
- [6] Tracy Camp, Jeff Boleng and Vanessa Davies, A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research, *Wireless communications & mobile computing*, Special issue on mobile ad hoc networking, 2002.
- [7] Fan Bai and Ahmed Helmy, A survey of mobility models in wireless adhoc networks, 2004.
- [8] David B Johnson and David A Maltz, Dynamic source routing in ad hoc wireless networks, In Imielinski and Korth, editors, *Mobile Computing*, volume 353. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [9] E. Royer, P. M. Melliar-Smith, and L. Moser, An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks, In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2001.
- [10] X. Hong, M. Gerla, G. Pei, and C. Chiang, A group mobility model for ad hoc wireless networks, In *Proceedings of the ACM International Workshop on Modeling and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, August 1999.
- [11] Ben Liang and Zygmunt J. Haas, Predictive distance-based mobility management for multidimensional pcs networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(5):718 – 732, October 2003.
- [12] Esa Hyttia, Pasi Lassila, and Jorma Virtamo, A markovian waypoint mobility model with application to hotspot modeling, In *IEEE ICC*, June 2006.
- [13] C. Bettstetter, Smooth is better than sharp: A random mobility model for simulation of wireless networks, In *ACM International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, Rome, Italy, 2001.
- [14] F. Bai, N. Sadagopan, and A. Helmy, IMPORTANT: A framework to systematically analyze the Impact of Mobility on Performance of Routing protocols for Adhoc Networks, In *IEEE INFOCOM*, 2003.
- [15] Amit Jardosh, Elizabeth Belding-Royer, Kevin Almeroth, and Subhash Suri, Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks, In *ACM MobiCom*, pages 217 – 229, 2003.
- [16] Minkyong Kim, David Kotz, and Songkuk Kim, Extracting a mobility model from real user traces, In *IEEE INFOCOM*, Barcelona, Spain, 2006.
- [17] Vincent Borrel, Marcelo Dias de Amorim, and Serge Fdida, A preferential attachment gathering mobility model, *IEEE Communications Letters*, 9:900 – 902, 2005.
- [18] Sunho Lim, Chansu Yu, and Chita R. Das, Clustered

- mobility model for scale-free wireless networks, In IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), November 2006.
- [19] Joy Ghosha, Sumesh J. Philip, and Chunming Qiao, Sociological orbit aware location approximation and routing (solar) in MANET, *Ad Hoc Networks*, 5:189–209, 2007.
- [20] Mirco Musolesi and Cecilia Mascolo, A community based mobility model for ad hoc network research, In ACM International Workshop on Multi-hop Ad Hoc Networks: from Theory to Reality (REALMAN), Florence, Italy, 2006.
- [21] W. Hsu, T. Spyropoulos, K. Psounis, and A. Helmy, Modeling time-variant user mobility in wireless mobile networks. In IEEE INFOCOM, Anchorage, AL, May 2007.
- [22] Injong Rhee, Minsu Shin, Seongik Hong, Kyunghan Lee, Seong Joon Kim and Song Chong, On the Levy-Walk Nature of Human Mobility, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Volume:19, Issue: 3, 2011.
- [23] Kyunghan Lee, Seongik Hong, Seong Joon Kim, Injong Rhee and Song Chong, SLAW: Self-Similar Least-Action Human Walk, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Volume:20, Issue: 2, 2012.
- [24] Seongik Hong, Kyunghan Lee and Injong Rhee, STEP: A spatio-temporal mobility model for humans walks, *IEEE, Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), SCENES workshop*, 2010.
- [25] J. Broch, D. Maltz, D. Johnson, Y. Hu, and J. Jetcheva, Multi-hop wireless ad hoc network routing protocols, In Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), 1998.
- [26] C. Chiang and M. Gerla, On-demand multicast in mobile wireless networks, In Proceedings of the IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), 1998.
- [27] J.J. Garcia-Luna-Aceves and M. Spohn, Source-tree routing in wireless networks, In Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Network Protocols (ICNP), 1999.
- [28] P. Johansson, T. Larsson, N. Hedman, B. Mielczarek, and M. Degermark, Routing protocols for mobile ad-hoc networks – a comparative performance analysis. In Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), pages 195–206, 1999.
- [29] C. Bettstetter, Mobility Modeling in Wireless Networks: Categorization, Smooth Movement, and Border Effects, in *ACM Mobile Computing and Communications Review*, vol. 5, no. 3, pp. 55–67, July 2001.
- [30] E. W. Dijkstra, A Note on Two Problems in Connection with Graphs, *Num. Mathematik*, 1:269–271, 1959.
- [31] Albert-Laszlo Barabasi and E. Bonabeau, Scale-free networks, *Scientific American*, 288:50–59, 2003.
- [32] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, New York: Freeman, 1983.
- [33] Augustin Chaintreau, Pan Hui, Jon Crowcroft, Christophe Diot, Richard Gass, and James Scott, Impact of Human Mobility on Opportunistic Forwarding Algorithms, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 6, No. 6, 2007.
- [34] Gaurav Sharma and Ravi R. Mazumdar, Scaling laws for capacity and delay in wireless ad hoc networks with random mobility, In *IEEE ICC*, Paris, France, 2004.
- [35] S. Kullback and R. Leibler, On information and sufficiency, *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 22, 1951
- [36] M. McNett and G. M. Voelker, Access and mobility of wireless PDA users, *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 9(2):40–55, 2005.

## 약 력



홍 성 익

1995년 경북대학교 공학사  
1995년~1996년 일본 규슈대학교 초청 특별  
청강생  
1998년 한국과학기술원 공학석사  
1998년~2005년 KT 통신망 연구소, 전임연구원  
2010년 미 노스캐롤라이나 주립대학교 공학박사  
2010년~현재 삼성종합기술원, 시뮬레이션그룹,  
전문 연구원  
관심분야: 인간 이동성 모델, 미래 인터넷,  
계산 과학, IT/BT 융합



김 성 진

2010년 서울대학교 공학박사  
1994년~2011년 삼성전자 종합기술원  
2011년~현재 삼성전자 종합기술원 그룹장/Master  
임원  
관심분야: Communication system,  
Information theory,  
Computational science