

# 에너지 효율적인 네트워크 이동성

우수창<sup>o</sup> 변상선 유혁  
고려대학교 컴퓨터학과  
{scwoo<sup>o</sup>, ssbyun, hxy}@os.korea.ac.kr

## Energy Efficient Network Mobility

Suchang Woo<sup>o</sup> Sangseon Byun Hyuck Yoo  
Dept. of Computer Science and Engineering, Korea University

### 요 약

WPAN(Wireless Personal Area Network)은 NEMO(Network Mobility) 환경에서 모바일 네트워크의 좋은 예가 될 수 있다. 특히, Piconet은 WPAN의 전형적인 형태이다. 이러한 Piconet의 모바일 디바이스는 배터리에 의해 전력을 공급받기 때문에 제한적인 에너지를 효율적으로 이용하는 것이 중요한 문제가 될 수 있다. 우리는 이 논문을 통해 Piconet이 모바일 네트워크를 형성할 때 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 방법을 제시한다. 이를 위해 우리는 에너지 모델을 제시하고, Piconet 단위의 모바일 네트워크에서 Scatternet 형성을 통해 새로운 경로를 생성하여 전체 네트워크의 에너지 소비를 줄일 수 있음을 보인다.

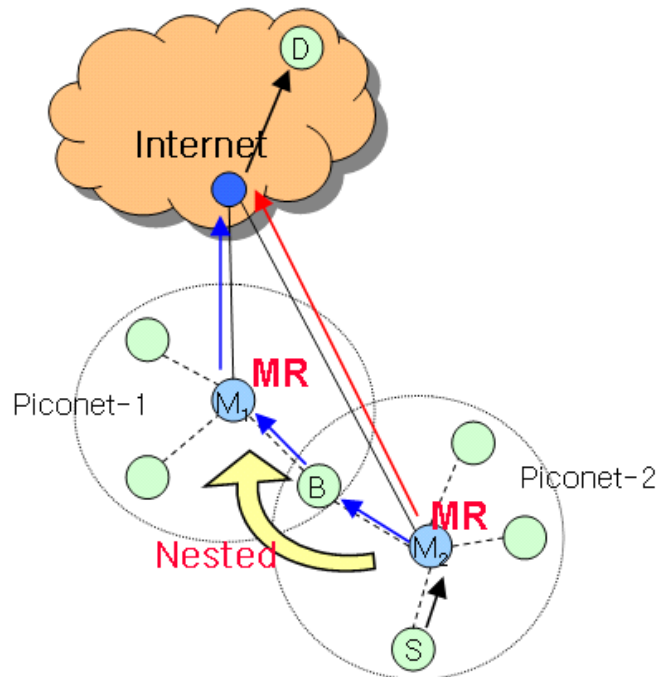
### 1. 서론

WPAN은 모바일 네트워크의 전형적인 예이다. 특히, 블루투스의 Piconet과 같은 소규모 네트워크는 NEMO 환경에 적합하다. NEMO는 MR(Mobile Router)가 중심이 되어 네트워크 단위의 이동성을 제공하는 것이다. 블루투스 Piconet은 하나의 master 노드를 중심으로 polling based network를 구성한다. 이 때 master 노드를 제외한 나머지 노드들은 slave 노드가 된다. 이러한 Piconet에서 master 노드가 MR의 역할을 수행하게 되면, [3,4]에서 제시하고 있는 NEMO를 위한 요구조건들을 충족시킨다.

Piconet을 구성하는 모바일 디바이스는 배터리에 의해 전력을 공급받으므로 에너지 소비는 디바이스의 lifetime과 직결된다. 따라서 제한적인 에너지를 효율적으로 이용하는 것은 중요한 문제이다. 이 논문에서는 블루투스 Piconet 단위로 모바일 네트워크를 구성하며, Piconet의 master 노드가 MR의 역할을 담당하는 <그림 1>과 같은 네트워크를 제안한다. Piconet 내의 네트워크는 블루투스로 구성되며, 인터넷은 무선 랜 인터페이스를 가진 master 노드를 gateway로 하여 연결된다고 가정한다. 이러한 네트워크에서 Piconet-2와 같이 링크 계층에서는 Piconet-1과 Scatternet을 구성하여 연결하고, 네트워크 계층에서는 NEMO의 nested mobility를 이용하여 인터넷과 연결되는 경로를 변경할 수 있다. 이런 경우, 저전력을 고려하여 설계된 블루투스를 이용하는 경로의 경우 무선 랜을 이용하는 것에 비해 전체 네트워크의 측면에서 에너지 소모를 줄일 수 있다. 이 논문에서는 무선 에너지 모델을 제시하고 Piconet 단위의 모바일 네트워크에서 nested mobility와 Scatternet 형성을 통한 새로운

경로 생성을 통해 전체 네트워크의 에너지 소비를 줄일 수 있음을 제안된 에너지 모델을 통해 보인다.

이 논문의 나머지 구성은 다음과 같다. 2장에서 이 논문에서 사용될 무선 랜과 블루투스의 에너지 모델을 제시하고, 3장에서 직접 무선 랜을 통해 연결하는 경우와 Scatternet을 통하는 경우 소비되는 에너지를 비교하며, 4장에서 결론과 향후 과제에 대해 기술한다.



<그림 1. Nested mobility를 이용한 경로 변경>

본 연구는 산업자원부의 성장동력사업 지원으로 수행되었음  
(과제번호 10016756)

2. 에너지 모델

이 장에서는 앞서 제시한 두 가지 경로에서 소모되는 에너지를 측정하기 위한 모델을 제시한다. 무선 랜의 경우는 [5,6]에서 측정된 값을, 블루투스는 [7,8]에서 측정된 값을 이용한다. 이 장에서 제시될 에너지 모델은 전송할 데이터 D bytes에 대하여 데이터 전송에 필요한 동작  $a_i$ 와 이에 소비되는 에너지의 평균값  $P_i$ , 그리고 동작이 지속되는 시간  $T_i$ 로 구성된다. 이 때, 전송에 필요한 모든 동작을 수행하는데 요구되는 전체 에너지는 식(1)과 같이 표현된다.

$$E_{total}(D) = \sum_{a_i \in A} T_i(D) \cdot P_i \quad (1)$$

2.1 WLAN

무선 랜은 Sleep, Idle, Receive, Transmit의 네 가지 모드로 나뉘어진다. 각각의 모드에서 소모되는 에너지는 <표1>과 <표2>와 같다[5,6]. Transmit 모드에서의 에너지 소모가 가장 크며, RF 출력 레벨이 클수록 power amplifier에서 소모되는 에너지로 인해 에너지 소모 차이가 최대 500mW 정도로 나타난다. Receive 모드에서는 Idle 모드에 비해 100mW정도 차이를 보인다. 에너지 소모량은 <표1>과 <표2>에서 보여지는 것처럼 구현된 NIC에 따라 차이를 지니기 때문에 이 논문에서는 이 두 가지의 NIC를 적용하여 에너지 소모를 비교한다.

모드	전송속도	RF 레벨	소비 전력 (mW)
Transmit	2Mbps	1mW	1420
	2Mbps	50mW	1880
	11Mbps	1mW	1490
	11Mbps	50mW	1930
Receive	2Mbps	-	1300
	11Mbps	-	1400
Idle	-	-	1340
Sleep	-	-	75

<표 1. Aironet PC4800의 소비 전력>

전송속도	모드	소비 전력 (mW)
2Mbps	Transmit	1327
	Idle	843
	Receive	966
	Sleep	66
11Mbps	Transmit	1346
	Receive	900
	Idle	739
	Sleep	47

<표 2. Lucent WaveLAN의 소비 전력>

IEEE 802.11b의 기본 전송 단위는 2384 byte의 프레임으로 구성되며 이중 헤더 부분인 38 byte는 1 Mbps의 전송률로 전송되며 나머지 부분은 최대 2346 byte로 1Mbps, 2Mbps, 5.5Mbps, 11 Mbps의 전송속도 (transmission rate) 중에 하나로 전송이 된다. 데이터의 크기가 2312 byte 보다 클 경우에는 단편화되어 전송이 되며 이를 고려한 데이터의 송/수신 시간은 식(2)와 같다.

$$T(D) = \frac{D \times 8}{Rate} + \frac{HeaderSize \times 8}{BasicRate} \times \lceil \frac{D}{MTU} \rceil \quad (2)$$

위의 시간을 이용하여 데이터 D bytes를 송/수신하는데 사용되는 에너지는

$$E_{wlanTx}(D) = T(D) \cdot P_{tx} \quad (3)$$

$$E_{wlanRx}(D) = T(D) \cdot P_{rx} \quad (4)$$

와 같다. 제시된 모델은 ARF(Automatic Rate Fallback)에 의한 전송속도의 변화나 충돌현상(collision effect)이나 전송 오류로 인한 재전송 등의 상황은 발생하지 않는다고 가정한다.

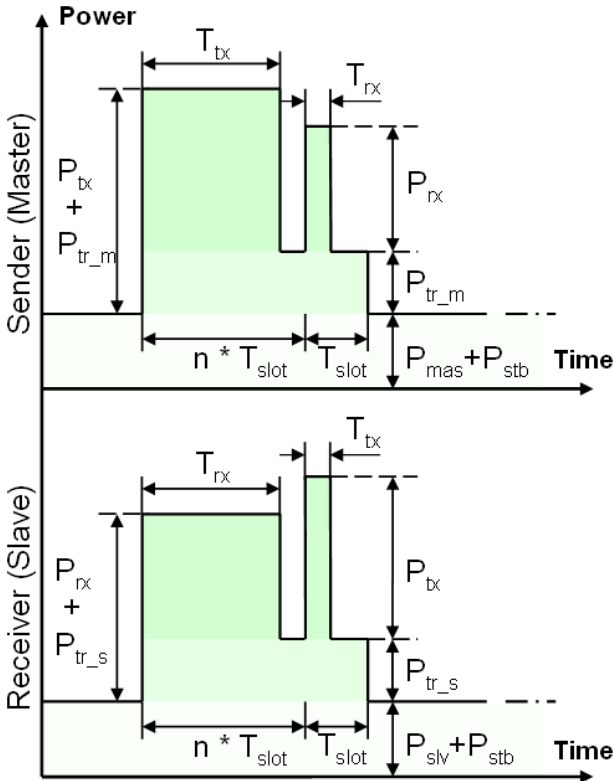
2.2 Bluetooth

블루투스의 에너지 모델은 [7]에서 제시된 모델을 기반으로 한다. [7]에서는 블루투스 프로토콜의 동작을 FSM으로 정의하여, 각각의 State에 논리적 동작 (logical activity)을 부여하고 이 동작에 소요되는 에너지를 측정하여 에너지 소비를 계산할 수 있도록 모델링하였다. <표3>은 에너지 소비 계산에 필요한 동작만을 정리한 것이다.  $P_{stb}$ 는 기본적으로 프로토콜 동작에 필요한 에너지이며,  $P_{tx}$ 와  $P_{rx}$ 는 데이터 송/수신시에 소모되는 에너지이며,  $P_{mas}$ 와  $P_{slv}$ 는 master와 slave의 역할을 수행하는데 소모되는 에너지이다. 그리고,  $P_{tr,m}$ 와  $P_{tr,s}$ 는 master나 slave에서 데이터 송 수신시에 추가적으로 소모되는 에너지이다. 데이터 송/수신 시에 소모되는 에너지는 <그림2>와 같다.

동작	P	소비 전력 (mW)
STANDBY	$P_{stb}$	50.90
TX	$P_{tx}$	277.20
RX	$P_{rx}$	181.58
MAS	$P_{mas}$	32.02
SLV	$P_{slv}$	58.46
TRM	$P_{tr,m}$	45.74
TRS	$P_{tr,s}$	19.34

<표 3. 프로토콜 동작에 따른 에너지 소비>

블루투스는 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식



<그림 2. 데이터 송/수신에 소비되는 에너지>

식을 이용하여 데이터를 전송하기 때문에 625 μs의 타임 슬롯을 기본으로 하여 데이터 송/수신이 일어난다. 그리고 모든 데이터의 송/수신은 master의 POLL에 대한 slave의 응답으로 이루어지기 때문에 master의 송신시간 T<sub>tx</sub>는 slave의 수신시간 T<sub>rx</sub>와 같고 master의 수신시간 T<sub>rx</sub>는 slave의 송신시간 T<sub>tx</sub>와 같다. 또한, 주고받을 데이터가 없을 경우에 master는 POLL 패킷을 slave는 NULL 패킷을 전송하기 때문에, 데이터 전송의 최소 시간은 POLL/NULL 패킷의 전송 시간과 같다. 데이터를 전송하는 시간은 패킷 타입에 영향을 받는다. 블루투스는 다양한 패킷 타입을 지원한다. 크게 SCO(Synchronous Connection Oriented) 패킷과 ACL(Asynchronous Connection Less) 패킷으로 나누어지며, 이 논문에서는 데이터 전송에 관련된 ACL 패킷만을 고려한다. ACL 패킷은 <표4>와 같이 다양한 payload를 가지며, 1개 이상의 홉수개의 타임 슬롯을 이용하는 멀티슬롯 패킷을 지원한다. <표4>는 기본 모듈레이션 방식인 GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) 모듈레이션만을 정리한 것이다. 블루투스에서 데이터 전송에 소요되는 시간은 데이터 전송에 사용된 타임 슬롯의 수와 비례한다. 데이터 D bytes를 보내는 경우 사용되는 타임 슬롯의 수 N은

$$N(D) = \lceil \frac{D}{\max\_payload} \rceil \times (1+n) \quad (5)$$

타입	Payload 헤더 (bytes)	Max Payload (bytes)	FEC	CRC
DM1	1	17	2/3	yes
DH1	1	27	no	yes
DM3	2	121	2/3	yes
DH3	2	183	no	yes
DM5	2	224	2/3	yes
DH5	2	339	no	yes
AUX1	1	29	no	no

<표 4. 패킷 타입에 따른 특성>

와 같다. max\_payload는 패킷 타입에 따라 <표4>와 같이 정의되며, n은 패킷 타입에 따라 사용하는 타임 슬롯의 수로 DH3나 DM3인 경우 3을 DH5나 DM5인 경우에는 5의 값을 가지며 기본값은 1이다. 데이터 D bytes를 전송하는 경우 소요되는 시간은

$$T(D) = 625\mu s \times N(D) \quad (6)$$

로 손쉽게 계산될 수 있다. 그런데, 블루투스는 패킷 단위로 Frequency hopping을 하기 때문에 625 μs를 모두 데이터 전송에 사용하지 않고 최대 366 μs만을 이용한다[1]. 멀티슬롯 패킷의 경우에는 최대 (n-1)\*625 + 366 μs의 시간만을 데이터 전송에 사용한다[2].

송신자에서 수신자로 D bytes의 데이터를 전송하는 경우에 사용되는 에너지를 패킷 타입별로 정리하면 아래와 같다. 단, 데이터 전송은 송신자에서 수신자로만 이루어지며, 역방향으로 전송되는 데이터는 없다고 가정한다. 그리고 데이터 전송에 소요되는 시간 T<sub>tx</sub>(=T<sub>rx</sub>)는 계산상의 편의를 위하여 max\_payload를 전송하는 시간으로 가정하여 아래와 같은 값을 이용한다.

$$T_{tx}(=T_{rx}) = 625 \times (n-1) + 366 \mu s \quad (7)$$

$$E_{sender}(D) = N(D) \times \left\{ (T_{slot} \times P_{roll}) + \frac{1}{n+1} \times (T_{ll} \times P_{rx}) + \frac{1}{n+1} \times (T_{tx} \times P_{tx}) \right\} \quad (8)$$

$$E_{receiver}(D) = N(D) \times \left\{ (T_{slot} \times P_{roll}) + \frac{1}{n+1} \times (T_{ll} \times P_{tx}) + \frac{1}{n+1} \times (T_{rx} \times P_{rx}) \right\} \quad (9)$$

P<sub>roll</sub>은 master의 경우 P<sub>tr,m</sub>값을, slave의 경우는 P<sub>tr,s</sub>의 값을 가지며, POLL 패킷과 NULL 패킷은 payload를 가지지 않기 때문에 126 bit의 동일한 크기를 가지며, T<sub>ll</sub>은

POLL 혹은 NULL 패킷 전송에 소요되는 시간으로 약 16  $\mu$ s로 계산한다.

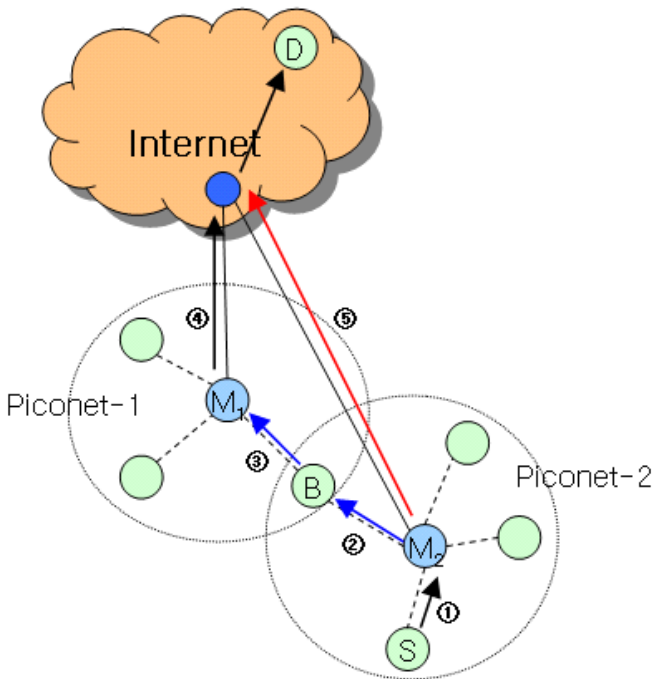
### 3. 에너지 소비 비교

Scatternet 형성과 nested mobility를 이용하여 새로 생성된 경로는 <그림 3>에서 보이는 바와 같이 ①→②→③→④과 같으며, 기존 경로는 ①→⑤이다. 두 경로에서 소비되는 에너지의 차이는 ②→③에서 사용되는 블루투스 프로토콜에서 소비되는 에너지와, ④와 ⑤의 무선 랜에서 소비되는 에너지 차이의 합과 같다.

에너지 소비의 차이는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$E_{diff}(D) = E_{wlanTx}(D)_{M_2} - \{E_{btTx}(D)_{M_2} + E_{btRx}(D)_B + E_{btTx}(D)_B + E_{btRx}(D)_{M_1}\} \quad (10)$$

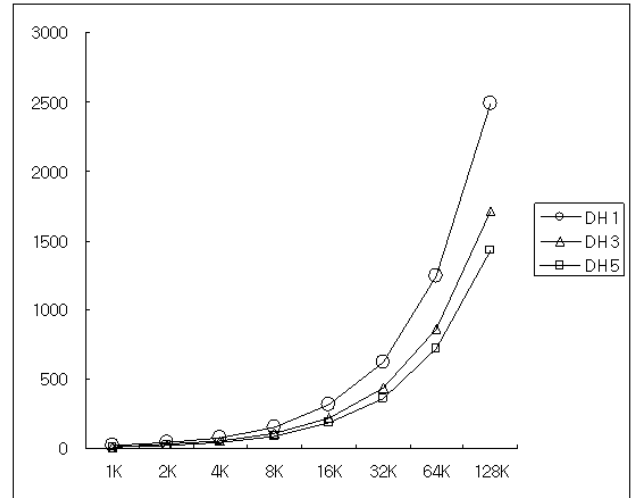
두 경로의 에너지 소비 차이를 비교할 때 추가적으로 고려해 주어야 하는 부분은 무선 랜의 Idle 모드에서 소비되는 에너지양이다. 무선 랜의 Idle 모드에서의 에너지 소비는 <표1,2>에서 보이는 바와 같이 Receive 모드에서 소비되는 에너지와 큰 차이가 없다. 결국 새로 구성된 경로를 이용하는 경우  $M_2$ 의 무선 랜 인터페이스는 에너지 소비가 다른 모드에 비해 크게 작은 Sleep 모드로 유지할 수 있기 때문에 기존 경로에 비해 에너지를 많이 절약할 수 있다.



<그림 3. 기존 경로와 새로 구성된 경로>

데이터 크기에 대한 ②→③ 경로에서 블루투스 인터페

이스에서 소비되는 에너지는 <그림 4>와 같다. 128 Kbytes의 데이터를 DH1 타입의 패킷으로 전송할 경우



<그림 4. 데이터 크기에 대한 패킷 타입별 에너지 소비>

6초 정도의 시간과 2491 mJ 정도의 에너지가 사용된다. 2491 mJ의 에너지는 Aironet PC4800의 경우 Idle 모드가 1.86초 정도 유지되는 경우에 소모되는 에너지와 같고, Lucent WaveLAN의 경우 Idle 모드가 2.9초 정도 유지되는 경우에 소모되는 에너지와 같다. 즉, 이 결과는 새로운 경로에서 소비되는 에너지가 무선 랜에서 소비되는 에너지 보다 작으며,  $M_2$ 의 무선 랜 모드를 Idle에서 Sleep으로 변경하여 에너지 소비를 상당히 줄일 수 있음을 의미한다.

### 4. 결론 및 향후 과제

에너지 모델을 이용하여 Piconet 단위의 모바일 네트워크에서 링크 계층의 Scatternet 생성과 네트워크 계층의 nested mobility를 이용한 새로운 경로 생성을 통해 전체 네트워크의 에너지 소비를 줄일 수 있음을 보였다. 이 논문에서는 Scatternet 형성과 nested mobility 적용으로 인한 성능저하를 고려하지 않고 에너지 측면만을 고려하였으나, 향후에는 ns-2[9]와 Blueware[10]의 에너지 모델을 이용하여 성능과 에너지 측면의 trade-off를 정량적으로 비교할 예정이다.

#### 참고문헌

[1] Specification of Bluetooth System. <http://www.bluetooth.com/>, November 2004. Bluetooth Special Interest Group document.  
 [2] Robert Morrow. *Bluetooth operation and use*. McGraw-Hill, 2002.  
 [3] T. Ernst, "Network Mobility Support Goals and Requirements," <http://www.mobilenetworks.org/nem>

o/drafts/draft-ietf-nemo-requirements-05.txt, October 2005.

[4] Hong-Yon Lach, C. Janneteau, and A. Petrescu, "Network mobility in beyond-3G systems," *Communication magazine*, Vol. 41, July 2003, pp. 52-57.

[5] L. M. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," in *Proc. INFOCOM*, April 2001, pp. 1548-1557.

[6] J. Ebert, B. Burns, and A. Wolsiz, "A trace-based approach for determining the energy consumption of a WLAN network interface," in *European Wireless Conference*, Feb. 2002, pp. 230-236.

[7] L. Negri and D. Zanetti, "Power/Performance Tradeoffs in Bluetooth Sensor Networks," in *Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Vol. 9, Jan. 2006.

[8] L. Negri, M. Sami, Que Dung Tran, and D. Zanetti, "Flexible power modeling for wireless systems: power modeling and optimization of two Bluetooth implementations," *WoWMoM*, June 2005, pp. 408-416.

[9] ns-2 Network Simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

[10] Blueware: Bluetooth Extension for ns. <http://nms.csail.mit.edu/projects/blueware/>.