

블루투스 피코넷을 위한 효율적 스케줄링 기법

(An Efficient Scheduling Scheme for Bluetooth Piconets)

이 우 신 [†] 이 혁 준 ^{**}
(Woosin Lee) (Hyukjoon Lee)

요 약 블루투스의 통신 방식은 마스터에 의해 제어되는 TDD 기반의 방식으로, 슬레이브의 패킷 전송은 마스터의 패킷 전송 여부에 따라 종속적으로 이루어진다. 따라서 마스터 또는 슬레이브의 큐 내에 전송할 데이터가 없을 경우 POLL 또는 NULL 패킷 전송으로 인한 슬롯의 낭비가 발생할 수 있다. 그러므로 블루투스 인트라피코넷 통신에서 슬롯의 낭비를 최소화 할 수 있는 스케줄링 기법은 매우 중요한 요소이다. 그러나 인트라피코넷 스케줄링은 마스터에 의하여 이루어지므로, 일반적으로 알려진 스케줄링 기법을 적용하기 위해서는 마스터가 슬레이브의 큐 내의 대기 중인 데이터의 양을 알아야 하지만, 블루투스 통신 방식에는 이것이 불가능하다. 본 논문에서는 슬레이브 큐 내에 대기 중인 데이터의 양에 대한 정보 없이도 효율적인 스케줄링이 가능한 블루투스 피코넷 스케줄링 기법을 제안한다. 제안된 스케줄링 기법은 슬레이브와 마스터 간에 주고받은 패킷의 종류에 따라 마스터는 마스터와 슬레이브의 큐 내에 대기 중인 데이터의 존재여부를 식별하고 이를 기반으로 하여 슬레이브들과의 스케줄링을 수행한다. 제안된 스케줄링 기법과 기존의 스케줄링 기법간의 비교 실험을 통하여 제안된 스케줄링 기법의 우수함을 보인다.

키워드 : 블루투스, 인트라피코넷 스케줄링, MAC 스케줄링

Abstract Communication between Bluetooth devices is based on TDD by a master unit. In this discipline, the transmission of slave packets can be made only when the master transmits a packet to the slave. Thus, some slots may be wasted when there is no user data in the master's or slave's queue due to the transmission of a POLL or NULL packet. Therefore a scheduling scheme which can minimize the slot waste is required in Bluetooth intra-piconet communication. However, since the master is responsible for the intra-piconet scheduling, it must be provided with an information on each slave's queue length to apply traditional scheduling schemes, which is impossible in Bluetooth. This paper presents a new Bluetooth intra-piconet scheduling scheme that is efficient and does not require the information on each slave's queue length. The scheduling is done based on the information about the existence of data in the master and slave queues which is derived by the master identifying the type of packets transmitted. The master schedules to communicate with the slaves according to the priorities determined based on this information. We presents simulation results which indicate a significant improvement in the performance when our proposed scheme is used.

Key words : Bluetooth, Intra-Piconet Scheduling, MAC Scheduling

1. 서 론

최근 통신 하드웨어 및 소프트웨어 기술의 발전으로

인해 주머니 속에 넣고 다닐 수 있을 만큼 작은 이동 컴퓨팅 기기의 보급이 확산되고 있다. 따라서 한 사람이 여러 대의 다양한 종류의 이동 컴퓨팅 기기를 소지하는 경우가 급속히 늘어나기 시작하고 있으며, 이들 기기들 간에 무선 통신을 통해 상호 연결한 개인 영역망(Personal Area Network)의 이용 또한 보편화 될 것으로 예측되고 있다. 98년부터 유럽 및 미국에서는 범용의 단거리 고속 무선 데이터 인터페이스 표준들이 제정되고 상용화가 추진되어 왔으며, 그 결과로 블루투스[1,2]가 등장하게 되었다. 블루투스는 근거리상의 컴퓨터, 이동전화, 헤드 셋,

이 논문은 2001년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원과 한국과학재단 목격기초연구(R01-2001-00349) 지원으로 수행되었음

[†] 학생회원 : 광운대학교 컴퓨터공학과
anihilist@kw.ac.kr

^{**} 종신회원 : 광운대학교 컴퓨터공학과 교수
hlee@daisy.kwangwoon.ac.kr

논문접수 : 2002년 1월 26일

심사완료 : 2002년 10월 29일

프린터, PDA, 노트북, 가전기기 등과 같은 디바이스들을 상호 무선 링크로 연결하여 연결 케이블 없이도 양방향 통신을 가능하게 하는 기술이다. 블루투스는 저가에 구현이 가능하며 범용성이 높다는 장점으로 인하여 이동 통신의 중요한 구성 요소로 부상하고 있으며, 무선 시리얼 케이블로서의 단순한 역할을 넘어서 개인 영역망을 구현하기 위한 주요 기술로 응용 범위가 확대되고 있다[3]. 블루투스 기술을 이용한 개인 영역망 구현을 위해서는 블루투스 피코넷과 스캐터넷에서의 효율적인 스케줄링이 필요하나, 현재 블루투스 표준에는 이들 스케줄링 기법들이 정해져 있지 않기 때문에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

표준화와 관련된 연구사례로서, 우선 블루투스 SIG의 활동을 들 수 있다. 블루투스 SIG는 블루투스의 새로운 기술과 시장 조사에 대한 것들을 수행하고 있는 단체로서, SIG내의 연구 그룹들 중에서 PAN 연구 그룹은 PAN 구현에 관한 표준화 연구로서 이더넷 인캡슐레이션(Ethernet Encapsulation), 단일 피코넷의 관리, 랜 액세스 포인트에 관하여 연구하고 있고, 이것을 토대로 다중 피코넷 관리, 피코넷간의 라우팅(Inter-piconet routing), 액세스 포인트간의 로밍(roaming)에 대한 연구를 진행하고 있다[1]. IEEE 802.15는 10m 이내 거리의 무선 네트워크인 PAN에서의 물리 계층과 MAC 계층의 표준을 정하기 위한 연구 그룹으로 태스크 그룹(Task Group) 별로 물리 계층 및 MAC 계층, 무선랜(WLAN)과의 공존, 초근거리망(WPAN)에서의 20Mbit/s 이상의 전송, 초근거리망에서의 낮은 전송에 대한 표준화 연구를 진행하고 있다[2]. IETF의 IP over Bluetooth BoF 그룹에서는 ad hoc 네트워크를 기본으로 하는 PAN의 구현에 관한 표준화 연구를 수행하고 있다. 즉, 블루투스 네트워크를 구성하는 노드들 간의 패킷 전송 방법으로 이더넷 패킷을 전송하는 방법과 IP 패킷을 직접 전송하는 두 가지 방법(계층 2와 계층 3 중에서의 선택), Zero-conf 이슈, MANET 이슈 등을 연구하고 있다[4].

블루투스 스캐터넷 형성에 관한 연구로서 Salonidis 등은 분산처리를 이용하여 주어진 다수의 블루투스 노드들로 최소수의 피코넷을 포함하는 스캐터넷을 형성하는 알고리즘을 개발하였다[5]. Bhagwat 등은 라우팅 벡터 방식을 이용한 인트라피코넷 및 인터피코넷에서의 라우팅 알고리즘을 소개하였다[6].

기존에 최적의 기법으로 알려진 스케줄링 기법들은 블루투스 피코넷에 그대로 적용할 경우 성능 저하가 초래된다. 이것은 마스터에 의해 제어되는 TDD(time division duplex) 방식을 따르는 블루투스 통신의 특성

상 시간 슬롯(time slot)의 낭비가 발생하여 패킷 전송 지연이 늘어나기 때문이다. 또한 기존의 스케줄링 기법들은 서버(마스터)가 클라이언트(슬레이브) 큐의 길이에 대한 정보를 가지고 있는 것을 가정으로 하는데, 블루투스 패킷헤더에 이러한 정보를 실어 보내줄 수 있는 필드가 존재하지 않는다. 따라서 마스터에게 슬레이브 큐의 길이를 알려주기 위해서 슬레이브는 마스터에게 별도의 패킷을 전송해야 하고 그 결과로 전송지연이 늘어날 수밖에 없다. 블루투스 피코넷 스케줄링 기법에 관한 연구로는, Kalia 등은 마스터와 슬레이브 큐의 상태에 따라 세 가지 경우로 구별하여 우선순위에 따라 스케줄링을 진행하는 기법을 연구하였으나 현재의 표준에 수정 없이는 적용이 불가능하다[7]. Capone 등은 기존의 스케줄링 방법을 블루투스 피코넷에 적용할 경우의 문제점을 지적하고, 블루투스에 적용 가능하면서 공정성(fairness)을 보장할 수 있는 효율적 스케줄링 알고리즘을 제안하였다[8].

본 논문에서는 위에서 언급한 블루투스의 특성을 고려하여 마스터 큐와 슬레이브 큐의 길이에 대한 정보 없이, 큐 내의 전송 데이터의 유무에 관한 정보만을 이용하여 현재 블루투스 표준을 준수하는 동시에 기존의 기법에 비하여 더욱 효율적인 스케줄링 기법을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서 블루투스의 통신 방식에 대하여 피코넷 스케줄링과 관련된 내용을 중심으로 알아보고 3절에서 일반적인 스케줄링 기법들과 이전에 제안된 블루투스 피코넷에서 스케줄링 기법을 소개한다. 4절에서는 본 논문에서 제안한 스케줄링 기법에 대하여 설명하고, 5절에서는 기존에 제안된 스케줄링 기법들과 본 논문에서 제안한 블루투스 스케줄링 기법에 대한 비교 실험 결과를 보여준다. 6절에서는 결론 및 향후 연구계획에 대하여 논한다.

2. 블루투스 통신

블루투스 통신은 마스터-슬레이브 방식을 기반으로 한다. 즉, 모든 블루투스 디바이스들은 마스터 또는 슬레이브 중 하나로 동작하고, 이들 디바이스들 간의 통신은 마스터를 통해서 이루어진다. 주파수 hopping 순서를 설정함으로써 연결을 요청하는 블루투스 디바이스가 마스터가 되고, 마스터의 연결 요청을 수신하고 마스터의 주파수 hopping 순서에 동조함으로써 연결을 수락하는 블루투스 디바이스가 슬레이브가 된다. 대기(standby) 상태에 있는 블루투스 디바이스들은 Inquiry, Inquiry Scan, Page, Page Scan 과정을 통해 노드간의 연결을 설정할 수 있다. 하나의 마스터는 7개의 활성 슬레이브(active

slave)를 가질 수 있으며, 하나의 마스터와 하나 이상의 슬레이브가 연결되어 형성되는 망을 피코넷이라 한다. 또한, 두 개 이상의 피코넷이 연결되어 형성되는 망을 스캐터넷이라 한다.

블루투스 채널은 79개 또는 23개의 RF 채널 상에서 의사 랜덤 주파수 홉핑(pseudo random frequency hopping)을 수행한다. 홉핑 열(hopping sequence)은 피코넷마다 유일하게 주어지며 마스터의 블루투스 주소값에 의해 결정된다. 홉핑 열의 위상은 마스터의 블루투스 클럭(clock)에 의해 결정된다. 채널은 625 μ sec의 크기를 갖는 시간 슬롯(time slot)들로 이루어지며, 각 시간 슬롯은 서로 다른 홉 주파수가 사용된다.

그림 1은 마스터에 의해 제어되는 TDD 방식과 타이밍(timing)을 나타내고 있다. 마스터는 홀수 슬롯에서 전송하고, 슬레이브는 짝수 슬롯에서 전송한다. 마스터로부터 데이터 패킷이나 컨트롤 패킷을 받은 슬레이브는 바로 다음 슬롯을 할당받고, 마스터로 패킷을 전송할 수 있다. 마스터는 슬레이브로 전송할 데이터가 없어도 슬레이브의 슬롯 할당을 위해 POLL 패킷을 전송하고, 슬레이브는 마스터로 전송할 데이터가 없어도 NULL 패킷을 전송한다. 마스터는 각 슬레이브로 전송될 패킷이 대기할 수 있도록 최대 7개의 큐를 갖고, 각 슬레이브는 한개씩의 큐를 가진다. 따라서 각 슬레이브 별로 마스터 큐와 슬레이브 큐의 쌍을 정의할 수 있으며 이 마스터-슬레이브 큐의 쌍과 연관지어 가상의 마스터-슬레이브 쌍을 가정할 수 있다. 본 논문에서는 이를 편의상 마스터-슬레이브 쌍으로 지칭한다.

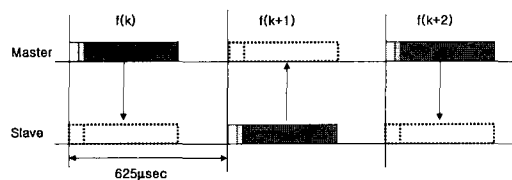


그림 1 TDD and timing

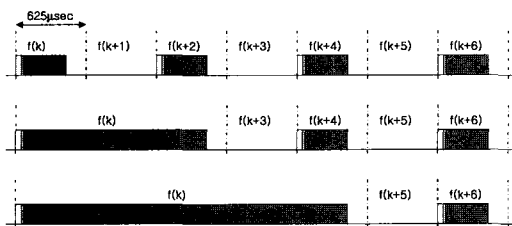


그림 2 Multi-slot packet

블루투스 표준은 음성과 데이터를 혼합하는 멀티미디어 응용을 지원하기 위하여 SCO(Synchronous Connection-Oriented)와 ACL(Asynchronous Connectionless)의 2가지 형태의 링크(link)를 정의하고 있다. 즉, 음성 신호를 전송할 때는 SCO 링크를, 데이터를 전송하는 경우에는 ACL 링크를 사용한다. SCO 링크는 일정한 간격으로 연속된 두개의 슬롯이 마스터와 슬레이브에게 할당된다. ACL 링크는 피코넷의 마스터와 모든 슬레이브 간에 비동기 또는 일정 주기 형태로 패킷을 전송한다. 마스터와 하나의 슬레이브 사이에는 1개의 ACL 링크가 존재한다. 마스터는 ACL 링크를 제어하기 위해 여러 슬레이브 중에서 하나를 선택하는 폴링(polling) 기법을 사용한다. ACL 링크는 1-슬롯, 3-슬롯, 5-슬롯 크기의 다중 슬롯 데이터 패킷을 전송할 수 있다. 그림 2는 단일 및 다중 슬롯 패킷의 홉에 대하여 나타내고 있다. 다중 슬롯 패킷의 홉 주파수는 패킷 전송이 시작된 시간 슬롯의 홉 주파수가 계속 사용된다.

3. 블루투스 피코넷을 위한 스케줄링 기법

서버가 클라이언트들을 방문하기 위한 순서를 정하기 위해서는 클라이언트 큐의 길이를 알아야 한다. 서버가 클라이언트들의 큐의 길이를 알고 있을 경우, 최적의 기법은 큐의 길이 순으로 방문하는 것으로 ERR(Exhaustive Round Robin) 기법이라 한다[9]. 블루투스 통신에서 마스터가 슬레이브 큐의 길이에 대한 정보를 얻기 위해서는 폴링을 사용해야 한다. 그러나 폴링은 추가적인 데이터 패킷을 발생시키고 그 결과로 다른 패킷들은 전송지연이 늘어나게 된다. 슬레이브 큐의 길이를 마스터에게 전달하지 않으면서 블루투스 통신에 적용할 수 있는 방법 중 기존의 ERR 기법과 근사한 방법은 고정된 방문 순서를 따르면서 마스터와 슬레이브의 큐가 모두 소진된 후에만 다른 마스터-슬레이브 쌍에 대한 전송을 수행하는 방법이다[8].

기존의 스케줄링 기법 중에서 큐의 길이를 모르는 상황에서 가장 좋은 성능을 나타내는 것은 PRR(Pure Round Robin) 기법이다[10]. PRR 기법은 한 주기에 한 번씩 클라이언트에게 서비스를 제공한다. 이를 블루투스 피코넷에 적용하면 마스터는 슬레이브로 하나의 패킷을 전송하고, 마스터로부터 패킷을 전송 받은 슬레이브는 마스터로 하나의 패킷을 전송한다. 슬레이브로부터 패킷을 전송 받은 마스터는 다음 시간 슬롯에 다른 슬레이브로 패킷을 전송한다.

그림 3은 ERR 기법과 PRR 기법을 블루투스 피코넷에 적용한 실험 결과로, 입력 파일의 길이는 평균 8 페

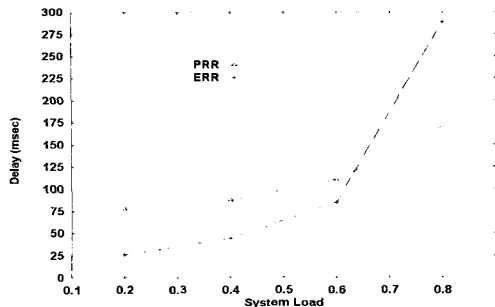


그림 3 ERR과 PRR의 실험 결과

킷의 지수 분포를 따르고 입력 트래픽은 포아송 분포를 따를 때, 시스템 부하에 따른 전송지연을 시뮬레이션을 통해 측정된 것이다. 이 실험 결과는 [8]의 실험을 재현한 것이다. 이 그래프에서 우리는 시스템 부하가 낮을 때는 ERR 기법이 적은 전송지연을 보이고, 시스템 부하가 높을 때는 PRR 기법이 적은 전송지연을 보임을 알 수 있다. ERR 기법에서 시스템 부하가 낮을 때 전송지연이 낮은 이유는 현재의 마스터-슬레이브 쌍의 큐가 소진될 때까지 데이터를 전송한 후, 다음 마스터-슬레이브 쌍으로 전환할 때, 전환한 마스터 슬레이브 쌍의 큐에 전송할 데이터가 대기하고 있을 확률이 낮아서 전송지연 발생률이 낮기 때문이다. 반면에 시스템 부하가 높을 때, ERR은 마스터와 슬레이브 중에서 한쪽의 큐가 비어 있더라도 NULL 패킷의 전송으로 인하여 다른 마스터-슬레이브 쌍의 큐에 대기 중인 패킷에 불필요한 전송지연을 유발시키는 반면에, PRR 기법은 이러한 전송지연을 적게 유발시킨다. 이것은 마스터의 전송이 있으면 곧이어 슬레이브의 전송(전송할 데이터가 없으면 NULL 패킷을 전송)이 따라야 하는 마스터 슬레이브간 통신의 특성에서 기인된 것이다.

PP(Priority Policy) 기법은 ACL 링크에서 마스터와 슬레이브 큐의 길이에 대한 정보를 이용하는 대신에 HOL(Head-of-the-Line) 패킷의 크기(1 slot, 3 slot)를 레이블(label)로 구분하고, 이것을 스케줄링에 적용하였다[7]. 예를 들어 3-1 마스터-슬레이브 쌍은 마스터 큐의 HOL 패킷 크기가 3 slot이고, 슬레이브 큐의 HOL 패킷의 크기가 1슬롯인 경우이다. 4개의 연속된 시간 슬롯을 사용하는 SCO 링크의 경우, 마스터 슬레이브 쌍을 3가지 클래스로 구분한다. 첫 번째 클래스는 가장 효율이 높은 스케줄로 마스터-슬레이브 쌍이 1-1, 3-1, 1-3의 레이블을 가지는 상태이다. 이 상태에서는 슬롯의 낭비가 없다. 3-3 레이블 역시 첫 번째 클래스에 속한다. 두 번째 클래스는 3-0, 0-3의 레이블을 갖는

경우이며, 25%의 슬롯이 낭비된다. 세 번째 클래스는 1-0, 0-1의 레이블의 경우로 50%의 슬롯이 낭비된다.

같은 클래스에 속한 모든 마스터-슬레이브 쌍은 같은 우선순위를 가진다. HOL 우선순위 정책에서 첫 번째 클래스에 속한 마스터-슬레이브 쌍에는 가장 높은 우선순위가 부여되며, 우선순위 값으로 P1이 할당된다. 두 번째 클래스에 속한 마스터-슬레이브 쌍에는 P2 값이 부여된다. 세 번째 클래스는 1의 우선순위를 부여한다. 이러한 우선순위에 따라 결정되는 스케줄링 기법은 다음과 같다.

- (가) 라운드-로빈 방식으로 모든 마스터-슬레이브 쌍의 전송을 수행한다.
- (나) 만약 마스터 슬레이브 쌍이 우선순위 P를 가지고 있으면, P번 데이터를 전송하고, 다른 마스터 슬레이브 쌍으로 전환한다.
- (다) P 값은 위의 클래스에 따라 결정한다.

PP 기법이 적용되기 위해서는 마스터가 슬레이브 큐의 HOL 패킷의 크기에 대한 정보를 갖고 있어야 하지만, 블루투스 패킷헤더에는 이러한 정보를 실어 보내줄 수 있는 필드가 존재하지 않는다. 따라서 마스터에게 슬레이브 큐의 길이를 알려주기 위해서 슬레이브는 마스터에게 별도의 패킷을 전송해야 하고 그 결과로 전송지연이 늘어날 수밖에 없다. 이와 같은 문제점으로 PP 기법을 블루투스 피코넷에 그대로 적용하기는 어렵다.

LRR(Limited Round Robin) 기법은 ERR 기법을 기반으로 각 주기에 마스터-슬레이브 쌍의 전송횟수를 제한하는 스케줄링 기법이다[8]. LRR에서 전송제한 값이 1이면 PRR과 같아진다. 전송제한 값은 캡처 효과(capture effect)를 줄여주고 공평성을 보장해주는 역할을 한다. LWRR(Limited Weighted Round Robin)은 LRR 기법을 기반으로 한 개선된 기법으로, LWRR은 큐의 상태를 이용하여 가중치가 동적으로 바뀌는 가중라운드 로빈 기법의 하나이다[8]. LWRR은 통신의 시작 시점에 각 슬레이브의 가중치를 최고값으로 설정한 후 슬레이브에 POLL 패킷이 전송되거나 마스터와 슬레이브 사이에 데이터의 교환이 없을 경우 슬레이브의 가중치를 1씩 감소시킨다. 슬레이브의 최소 가중치는 1이고, 이 경우 슬레이브는 최대 가중치에서 1을 뺀 값에 해당하는 주기 동안 데이터를 전송하지 못한다. 마스터와 슬레이브 사이에 데이터의 교환이 이루어지면, 슬레이브의 가중치는 최고 가중치 값으로 복귀한다. LWRR은 이전에 순서가 돌아온 큐가 전송할 데이터를 갖고 있지 않았다면, 다음에 그 큐에게 순서가 돌아왔을 때에도 전송할 데이터를 갖고 있을 확률이 낮을 것이라는 가정을 기반

으로 한다. 그러나 LWRR 기법은 현재의 슬레이브 큐의 상태가 아닌 과거의 슬레이브의 활성도(activeness)에 의존하므로 성능향상이 제한적일 수밖에 없다.

ERR 기법은 하나의 마스터-슬레이브 쌍의 마스터와 슬레이브 중 길이가 긴 큐가 모두 소진 된 후에야 다음 마스터-슬레이브 쌍으로 전환한다. 길이가 짧은 큐를 가진 쪽은 길이가 긴 큐가 모두 소진될 때까지 NULL 패킷을 전송한다. NULL 패킷에 대한 지연 시간은 총 패킷 전송 지연 시간에서 제외되어야 하므로, 각 마스터-슬레이브 쌍의 패킷 전송 지연 시간은 길이가 긴 큐 내의 패킷 수의 두 배만큼 누적된 값에서 NULL 패킷의 전송 지연 시간을 뺀 나머지가 된다. 이 값을 모든 마스터-슬레이브 쌍에 대하여 누적하면 피코넷 내의 총 패킷 전송 지연 시간이 된다. 즉, 모든 패킷이 1·슬롯 패킷일 경우, S를 활성 마스터-슬레이브 쌍의 개수, i를 마스터-슬레이브 쌍의 색인(indices), q_m를 슬레이브 i에 대한 마스터 큐의 길이, q_s를 슬레이브 i의 큐라 하고,

$$q_i = \max(q_m, q_s), r_i = \min(q_m, q_s), P_i = \sum_{j=1}^i q_n, P_0 = 0,$$

$$z_j = \begin{cases} 1 & \text{if } q_m < q_s \\ 0 & \text{if } q_m > q_s \end{cases}$$

$$\delta_j = \begin{cases} 1 & \text{if } q_i > r_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

라고 하면, ERR 기법의 총 패킷 전송 지연 시간 D_{ERR}은 아래의 식으로 주어진다.

$$D_{ERR} = \sum_{i=1}^S \left\{ \sum_{j=1}^{q_i} (2i - z_j) - \delta_i \sum_{j=1}^{q_i} (2i - z_j) \right\} \quad (1)$$

PRR 기법은 큐의 길이와 상관없이 모든 마스터-슬레이브 쌍이 순차적으로 전송해야 하기 때문에 모든 마스터 및 슬레이브의 큐 중에서 길이가 가장 긴 큐가 모두 소진될 때까지 피코넷 내의 다른 마스터와 슬레이브는 NULL 패킷을 전송한다. ERR의 경우에서와 마찬가지로 NULL 패킷에 대한 전송 지연 시간은 제외되어야 하므로, 각 마스터-슬레이브 쌍에 대하여 피코넷 내의 최장 큐 내의 패킷 수의 두 배만큼 누적된 값에서 NULL 패킷의 전송 지연 시간을 빼고 이 값을 모든 마스터-슬레이브 쌍에 대하여 누적하면 피코넷 내의 총 패킷 전송 지연 시간 D_{PRR}은 아래의 식으로 주어진다.

$$D_{PRR} = \sum_{i=1}^S i - \sum_{j=1}^S \left\{ \sum_{i=q_n+1}^q (2Si - 2S + 2j - 1) + \sum_{i=q_n}^q (2Si - 2S + 2j) \right\} \quad (2)$$

여기서 Q = max_i q_i이고, R = 2S Q이다.

예를 들어, 그림 4에서와 같이 첫 번째 마스터 슬레이브 쌍의 마스터 전송 데이터와 슬레이브 전송 데이터가 각각 5개의 패킷으로 이루어져 있고, 두 번째 마스터-슬레이브 쌍의 마스터 전송 데이터는 10개의 패킷이고, 슬레이브 전송 데이터는 0개의 패킷이 있는 두 개의 마스터-슬레이브 쌍으로 이루어진 피코넷의 경우, ERR이 (a) → (b)의 전송 순서를 가질 때 D_{ERR} 값을 구하면,

$$q_{m_1} = q_{s_1} = 5, q_{m_2} = 10, q_{s_2} = 0 \text{이므로,}$$

D_{ERR} = ∑_{i=1}¹⁰ i - ∑_{i=6}¹⁵ 2i = 465 - 210 = 255가 된다. ERR이

(b) → (a)의 전송 순서를 가질 때 D_{ERR} 값을 구하면,

$$q_{m_1} = 10, q_{s_1} = 0, q_{m_2} = q_{s_2} = 5 \text{이므로,}$$

D_{ERR} = ∑_{i=1}¹⁰ i - ∑_{i=1}⁵ 2i = 465 - 110 = 355가 된다. PRR의 경우에는 전송 순서와 상관없이,

$$D_{PRR} = \sum_{i=1}^m i - \left\{ \sum_{i=6}^m (4i-3) + \sum_{i=6}^m (4i-2) + 0 + \sum_{i=1}^m 4i \right\} = 305 \text{가 된다.}$$

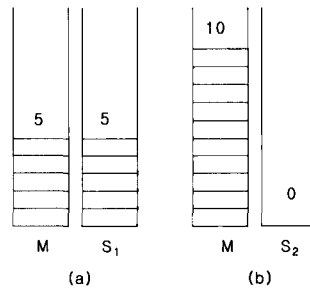


그림 4 마스터 슬레이브 쌍의 입력의 예

표 1은 각 큐에 데이터 패킷이 입력 완료된 상황에서 첫 패킷 전송이 슬롯 1에서 시작되었을 때 모든 패킷 전송이 끝난 시점에서의 ERR 기법과 PRR 기법의 전송 순서에 따른 전송지연의 결과를 보여주고 있다. 여기서, 우리는 ERR 기법은 전송 순서가 (a) → (b)일 때 전송 지연이 가장 낮으며, 같은 큐의 길이지만, (b) → (a) 순으로 전송을 하게 되면, 전송지연이 높아짐을 알 수 있다. PRR 기법으로 전송을 하는 경우에는 전송 순서와

표 1 그림 4 예의 전송지연 시간

스케줄링 방식	전송순서	전송지연(slots)
ERR	(a) → (b)	255
	(b) → (a)	355
PRR	상관 없음	305

관계없다. 이 예를 통해서 블루투스 피코넷에서는 마스터-슬레이브 큐의 길이의 합보다는 마스터-슬레이브 쌍에서 마스터와 슬레이브 모두 전송할 데이터가 있는지의 여부가 패킷 전송 지연에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 따라서 마스터와 슬레이브에 모두 전송 데이터가 존재할 때 가장 높은 우선순위를 부여하고, 그 다음으로 마스터와 슬레이브 중 어느 한 쪽에만 전송 데이터가 있는 경우, 마지막으로 양쪽 모두 전송 데이터가 없는 경우 순으로 우선순위가 부과되어야 한다.

4. 제안하는 스케줄링 기법

본 논문에서 제안하는 블루투스 피코넷 내에서의 스케줄링 기법은 각 마스터-슬레이브 쌍 별로 부여되는 우선순위에 따라 전송 순서를 결정하는 방식을 따른다. 우선순위의 초기값으로 모든 마스터-슬레이브 쌍에게 최고의 우선순위 값(2)을 부여한 후, 각 마스터-슬레이브 쌍에서 전송이 일어났을 때 아래의 규칙에 따라 동적으로 바뀐다.

- (1) 마스터-슬레이브 쌍에서 마스터가 데이터 패킷을 전송하고, 슬레이브로부터 데이터 패킷을 전송 받으면 마스터-슬레이브 쌍의 우선순위 값을 2로 한다.
- (2) 마스터-슬레이브 쌍에서 마스터만 데이터 패킷을 전송할 경우와 슬레이브만 데이터 패킷을 전송할 경우 우선순위를 1로 한다.
- (3) 마스터-슬레이브 쌍에서 마스터와 슬레이브 모두 NULL 패킷을 전송할 경우 우선순위를 1로 한다.

여기서 (2)와 (3)은 모두 NULL 패킷의 전송이 발생하는 경우이다. 따라서 두 경우 모두 다른 마스터 슬레이브 쌍으로 빠르게 전환하여 (1)의 경우에 해당하는 마스터-슬레이브 쌍으로 전환할 확률을 높여줌으로써 NULL 패킷 전송에 의한 불필요한 전송지연을 최소화하도록 한다. (2)와 (3)의 경우에 우선순위는 같지만 (2)의 경우에는 전송 횟수에 제한을 두어 제한 값을 넘으면 다른 마스터 슬레이브 쌍으로 전환하고, (3)의 경우에는 바로 다른 마스터-슬레이브 쌍으로 전환하도록 하여 두 경우의 서비스 시간 할당에 차이를 둔다. (1)의 경우에도 불필요한 패킷 전송 지연은 발생하지 않지만, 스케줄링의 공정성을 위하여 전송 횟수에 제한을 둔다. 이때 다른 모든 마스터-슬레이브 쌍들의 우선순위가 낮으면 이전 마스터-슬레이브 쌍이 데이터를 전송한다. 전송 횟수의 제한 값은 임의로 정할 수 있으며 최적값에 대한 분석은 이루어지지 않았다. 이전 절에서 보인 예의 경우에 대하여 제안된 스케줄링 기법에 의해 발생하는

전송 지연 시간의 계산은 다음과 같이 된다.

2개의 마스터-슬레이브 쌍에서 (a)는 우선순위 값이 2이고, (b)는 우선순위 값이 1이다. 그러므로 (a)부터 전송한다. 전송 횟수의 제한 값을 5로 설정한다면, (a)에서 슬레이브로부터 5번째 패킷을 받은 후 (b)가 전송해야 되는데 (b)의 우선순위는 1이고, (a)의 우선순위는 2이다. 그러므로 다시 (a)가 전송하고, 이때 2개의 NULL 패킷 전송에 의한 슬롯 낭비가 발생하며, (a)의 우선순위 값은 1이 된다. 낭비된 2개의 슬롯은 (b)의 10개의 데이터 패킷의 전송 지연 시간을 증가시킨다. (a)가 전송한 후 (b)가 전송하고, (b)에서 전송 횟수의 제한 값에 의해 5번째의 패킷 교환이 있는 후, 다시 (a)가 전송한다. 이 때 2개의 NULL 패킷 전송이 또 한번 발생하고, (b)의 5개의 데이터 패킷의 전송 지연을 증가시킨다. 다시 (b)를 방문하여 5번째의 패킷 교환 후 전송을 마친다.

그러므로 이전 절에서 보인 ERR 기법이 (a) → (b)의 전송 순서를 가질 때 총 패킷 전송 지연 값에 위에서 설명한 패킷 전송 지연 시간을 더하면 제안된 스케줄링 기법에서의 총 전송 지연 시간이 값이 결정된다. 즉, $255 \text{ slots} + 2 \times 10 \text{ slots} + 2 \times 5 \text{ slots} = 285 \text{ slots}$ 이다.

이 스케줄링 기법에 의하면 양쪽 모두 전송 데이터가 없는 마스터-슬레이브 쌍이 전송하는 경우가 발생하므로 NULL 패킷 전송의 최소화가 완전히 배제되지는 않지만, 시스템 부하가 높을 경우에는 확률적으로 마스터와 슬레이브 모두 전송 데이터를 가지고 있는 쌍에 의한 서비스 시간 점유율이 높아지므로 다른 기법에 비하여 상대적으로 우수한 성능을 보인다. 다음 절에서는 이를 뒷받침하는 시뮬레이션 결과를 보인다.

5. 성능 분석

5.1 블루투스 시뮬레이터의 구현

제안된 스케줄링과 기존의 스케줄링의 성능 비교 실험을 위하여 블루투스 MAC 계층을 추가한 GloMoSim을 이용하였다[11]. GloMoSim은 무선 네트워크 시스템을 위한 공개 시뮬레이터로서 병렬 이산 사건(event) 시뮬레이션 능력을 제공하는 C 언어 기반의 병렬 처리 언어인 PARSEC으로 디자인되었다. OSI 7계층의 네트워크 구조와 같은 계층 접근 방식으로 구성되었고, 계층간의 통신을 위하여 표준 API들을 이용한다. 추가된 블루투스 MAC 프로토콜에 구현된 스케줄링 기법으로는 제안된 스케줄링 알고리즘 이외에도 성능 비교를 위하여 PRR, ERR, PP, LWRR이 포함되었다.

그림 5는 블루투스 피코넷 스케줄링 실험을 위하여

블루투스 MAC 계층이 탑재되어 있는 GloMoSim의 구조를 나타낸 것이다. GloMoSim은 각 계층들의 입력이나 사용자에 의한 입력을 드라이버를 통해서 받아들이고, 드라이버를 통해서 받아들인 메시지는 메시지 큐에 저장한다. 큐에 저장된 메시지는 설정된 타이머에 의해 호출되고, 호출된 메시지들은 계층 호출기(layer caller)에 의해 지정된 계층에서 처리된다. 각 계층은 독립적으로 이 메시지들을 처리하고, 처리 결과는 또 다른 메시지를 발생시킬 수 있고, 이 메시지는 메시지 큐에 저장된다.

블루투스 MAC 계층은 큐, 마스터 리스트, 슬레이브 리스트, 블루투스 클럭 타임, 출력 매개 변수 등의 블루투스 MAC 계층을 위한 값들을 초기화하는 초기화 함수, 블루투스 MAC 계층에서의 모든 기능을 수행하는 계층 함수, 출력 매개 변수들을 출력하는 후처리 함수로 구현되었다.

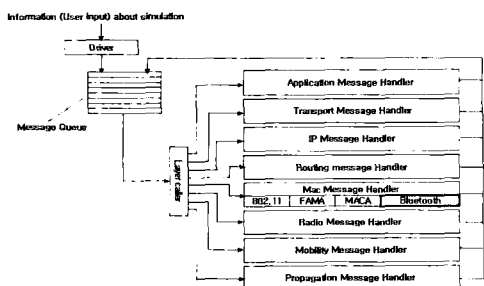


그림 5 GloMoSim의 내부 구조

그림 6은 본 논문에서 구현된 블루투스 MAC 계층에 해당되는 메시지를 처리하는 시뮬레이터의 내부 구조를 보여 준다. BLUETOOTH CONNECTION 제어기(controller)는 블루투스 각 노드가 요청과정이나 접근과정을 거쳐 연결 상태로 있다고 가정하고, 사용자 입력에 의해 피코넷을 구성한다. 사용자 입력에 의한 입력 데이터는 TRAFFIC INPUT 제어기를 통하여 전달받는다. FROM RADIO 제어기는 물리 계층으로부터 전달된 데이터를 처리한다. TRANSMISSION START 제어기는 구성된 피코넷에서 마스터의 통신 시작을 위한 타이머를 설정한다. TIMER EXPIRED 제어기는 설정된 타이머의 만료 시 발생하는 메시지를 처리한다.

각 블루투스 노드는 마스터 리스트와 슬레이브 리스트를 갖는다. 피코넷에서 마스터가 되는 노드는 마스터 리스트에 정보가 없고, 슬레이브 리스트에는 슬레이브들의 주소가 있다. 슬레이브 노드는 마스터 리스트에 마스

터의 주소와 클럭 값이 있고, 슬레이브 리스트는 비어 있다. 블루투스 큐는 네트워크 계층에서 전달받은 데이터를 다른 노드로 전달하기 위하여 데이터를 저장하는데, 구현된 시뮬레이터에서는 사용자 입력에 의한 데이터를 저장한다. 블루투스 노드는 마스터와 슬레이브가 될 수 있으므로, 슬레이브들에 대응하는 큐와 마스터에 대응하는 큐를 가진다.

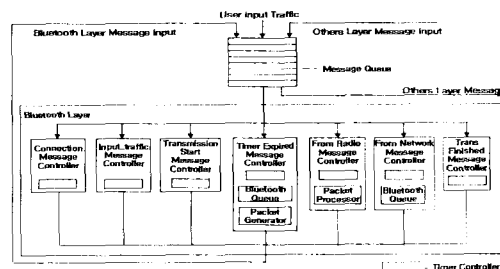


그림 6 구현된 블루투스 MAC 계층의 내부 구조

5.2 시뮬레이션 환경

블루투스 표준에 따라 블루투스 노드들의 라디오 전파 영역은 10m, 대역폭은 1MHz, 슬롯의 길이는 625 μsec로 설정하였다. 시뮬레이션 시간은 50초 동안 지속했다. 본 실험에서는 노드들의 이동성을 지원하지 않으며 전송 에러 확률은 0으로 가정했다.

그림 7은 블루투스 하나의 마스터와 7개까지의 슬레이브로 구성되는 피코넷의 시뮬레이션 모델을 나타내었다. 마스터 노드는 각 슬레이브에 대응하는 7개의 큐를 가지고 있고, 각 슬레이브는 마스터에 대응하는 1개의 큐를 가지고 있다. 모든 서로 큐는 독립적이다. 입력 파일의 크기는 [8]의 시뮬레이션 결과와의 성능비교를 위하여 평균 8패킷, 50패킷의 지수 분포를 따르고, 입력 트래픽은 평균 0.2에서 0.8까지의 시스템 부하를 갖게

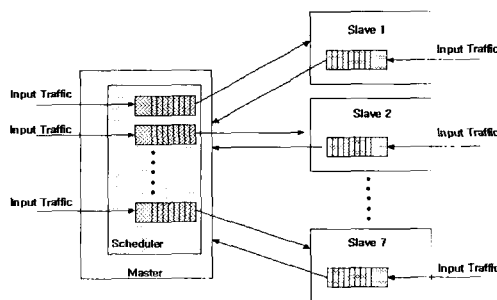


그림 7 시뮬레이션 모델

하는 포아송 분포를 갖도록 하였다. 여기서 각 패킷의 길이와 단위는 1슬롯이다. 제안된 스케줄링 기법과 LWRR 기법의 비교실험에서의 전송횟수 제한 값은 5로 설정을 하였으며, 전송횟수 제한 값의 변화에 따른 제안된 기법의 성능변화를 측정 실험에서는 2에서 15까지 변화시켰다. 각 패킷마다의 전송 지연 시간(슬롯수)의 합을 전송된 패킷의 수로 나누어 평균 패킷 전송 지연 값을 계산하였다.

5.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 시스템 부하, 전송 파일의 크기, 슬레이브 개수, 제안된 스케줄링 기법에서의 전송횟수를 변화하며 이에 따른 전송 지연 시간을 측정하는 방식으로 진행하였다.

그림 8은 입력 파일의 크기가 평균 8패킷의 지수 분포를 따르고, 0.2에서 0.8까지의 시스템 부하를 갖는 포아송 분포를 따르는 입력 트래픽을 사용했을 때의 실험 결과이다. 이 그래프에서는 PP 기법이 가장 낮은 전송 지연을 보인다. 구현된 PP 기법은 마스터가 슬레이브 큐의 상태에 대한 정보를 가지고 있다고 가정하고, 마스터-슬레이브 쌍에서 마스터와 슬레이브 모두 전송할 데이터가 있을 때에는 4개의 패킷을 전송하고, 마스터만 전송할 데이터가 있을 때와 슬레이브만 전송할 데이터가 있을 때에는 1개의 패킷을 전송하고, 마스터 슬레이브 양쪽 모두 전송할 데이터가 없을 때에는 스케줄링에서 제외된다. 그러므로 PP 기법은 다른 스케줄링 기법에 비하여 NULL 패킷에 의한 시간슬롯의 낭비가 적다. 이와 같은 이유로 입력 파일의 크기가 평균 50패킷의 지수 분포를 따를 때와 슬레이브 개수에 따른 실험 결과에서도 가장 낮은 전송 지연을 보인다. PRR 기법은 시스템 부하가 낮을 때 전송 지연 시간이 다른 기법들보다 높음을 알 수 있다. 이것은 전송할 데이터가 없는 마스터-슬레이브 쌍이 전송하는 횟수가 상대적으로 높

기 때문으로 앞서 설명한 내용과 일치한다. 시스템 부하가 0.8에 가까워지면서 다른 스케줄링 기법들의 전송 지연이 급격하게 증가하는 데, 그 이유는 한쪽 큐가 비어 있는 마스터-슬레이브 쌍에 의한 NULL 패킷의 전송 횟수가 늘어나면서 전송지연이 증가하기 때문이다. 제안된 스케줄링 기법은 시스템 부하가 0.4이내에서는 ERR이나 LWRR과 전송 지연 시간의 차이가 그다지 크지 않지만 시스템 부하가 0.4에서 이상의 구간에서는 큰 차이를 보인다. 제안된 스케줄링 기법과 LWRR 기법이 ERR보다 전송 지연이 작은 이유는, 제안된 스케줄링 기법과 LWRR 기법은 전송 횟수를 제한함으로써 하나의 마스터-슬레이브 쌍을 점유할 확률이 ERR보다 상대적으로 낮아졌기 때문이다.

그림 9는 입력 파일의 크기가 평균 50패킷의 지수 분포를 따를 때의 시뮬레이션 결과로 그림 8의 결과와 유사함을 알 수 있다. 시스템 부하가 높을 때 ERR과 LWRR 및 스케줄링 기법 간의 전송 지연 차가 그림 8에서 보다 비교적 적은 이유는 LWRR과 제안된 스케줄링 기법이 전송 횟수에 제한을 두는 방식을 이용하는데, 이 전송횟수를 파일의 평균 길이의 변화에 따라 적용적으로 변화시키지 않았기 때문이다. 스케줄링의 효율을 높이기 위해서는 전송횟수의 제한을 파일의 평균 길이에 비례하여 증가되어야 할 것으로 보인다.

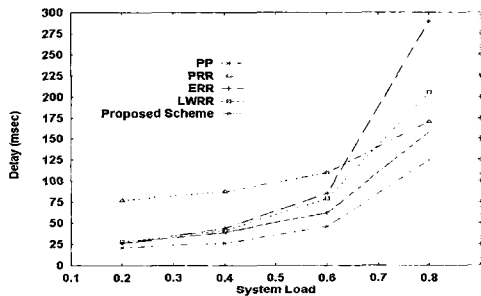


그림 8 평균 파일의 길이가 8패킷인 경우의 시스템 로드 변화에 따른 전송 지연의 비교

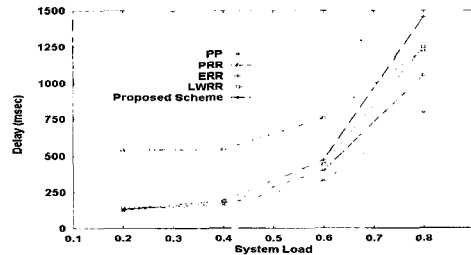


그림 9 평균 파일의 길이가 50패킷일 때의 System Load에 따른 전송 지연의 비교

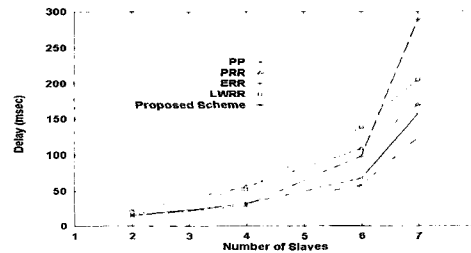


그림 10 슬레이브 개수에 따른 전송 지연의 비교

그림 10은 입력 파일의 크기가 평균 8패킷의 지수 분포를 따르고, 입력 트래픽이 평균 0.8의 시스템 부하 갖는 포아송 분포를 따를 때, 슬레이브 개수에 따른 전송 지연의 증가를 보이고 있다. 슬레이브의 수가 1개이면 모든 스케줄링 기법들의 전송 지연은 같다. 이 그래프에서 모든 기법에 의한 전송 지연 시간이 지수적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나, 이 실험에서도 슬레이브의 수가 5이상에서는 제안된 스케줄링 기법의 전송 지연 시간이 PP 기법을 제외하고는 최소가 됨을 알 수 있다.

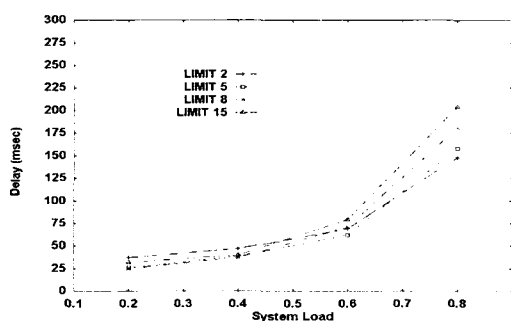


그림 11 전송 횟수의 제한 값에 따른 전송 지연의 비교

그림 11은 제안한 스케줄링 기법에서 전송 횟수의 제한에 따른 전송 지연을 보인다. 이때, 이때 전송 횟수의 제한 값이 작아지면, PRR 기법에 근사하고, 제한 값이 커지면 ERR 기법에 근사하게 된다. 그러므로 시스템 부하가 낮을 경우, 전송 횟수의 제한 값이 작으면 다른 마스터-슬레이브 쌍으로 전환하는 횟수가 많아져 전송 지연이 늘어나게 되고, 제한 값이 크면 ERR 기법과 유사함으로 전체적인 전송 지연 값은 줄어든다. 반면에 시스템 부하가 높을 경우, 제한 값이 작으면 다른 슬레이브로의 전환이 빠르기 때문에 전체적인 전송 지연 값은 줄어들게 되고, 제한 값이 높으면 계속해서 하나의 마스터-슬레이브가 슬롯을 점유할 확률이 높기 때문에 전체적인 전송 지연 값은 늘어나게 된다.

6. 결론

본 논문에서는 기존에 최적의 방식으로 알려진 스케줄링 기법들을 블루투스 피코넷에 그대로 적용할 경우, 마스터에 의해 제어되는 TDD(time-division duplex) 방식을 따르는 블루투스 통신의 특성상 시간 슬롯(time slot)의 낭비가 발생하여 패킷 전송 지연이 늘어나고, 마스터에게 슬레이브 큐의 길이를 알려주기 위해서 발생하는 패킷 전송 오버헤드 때문에 효율이 떨어지는 문제

점을 분석한 후, 이러한 문제점을 고려한 효율적인 스케줄링 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 블루투스의 특성을 고려하여 마스터 큐와 슬레이브 큐의 길이에 대한 정보 없이, 큐 내의 전송 데이터의 유무에 관한 정보만을 이용하여 확률적으로 불필요한 NULL 패킷의 발생을 억제하여 데이터 패킷의 전송 지연 시간을 줄인다.

제안된 기법의 성능을 검증하기 위하여 GloMoSim 시뮬레이터에 블루투스 MAC 계층을 추가하여 블루투스 시뮬레이터를 구현하였으며, 구현한 시뮬레이터를 이용하여 기존의 스케줄링 기법 및 기존의 블루투스 스케줄링 기법과 성능을 비교하였다. 실험 결과 PP 기법이 가장 성능이 우수하였다. 그러나 PP 기법은 블루투스 표준에 수정 없이는 실제로 적용하기 어렵다. 반면에 블루투스 표준을 준수하며 실제 적용 가능한 기존의 스케줄링 기법 중에서는 본 논문에서 제안된 기법의 성능이 가장 우수함을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안한 스케줄링 기법과 이전에 제안된 스케줄링 기법들은 블루투스 피코넷 내의 스케줄링을 위한 것이며 향후 블루투스 피코넷간(인터피코넷)의 스케줄링에 대한 연구가 진행될 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] Specification of the Bluetooth System, version 1.0, July 1999, <http://www.bluetooth.com/>
- [2] IEEE 802.15 WG, <http://grouper.ieee.org/groups/802/15.999>
- [3] J. Haartsen, "The Bluetooth Radio System," IEEE Personal Communications Volume: 7 1, February 2000, pp. 28-36.
- [4] IETF MANET WG, http://www.ietf.org/html_charters/manet-charter.html
- [5] T. Salonidis et al., "Distributed Topology Construction of Bluetooth Personal Area Networks," Proc. of IEEE INFOCOM, 2001.
- [6] P. Bhagwat, et al., "A Routing Vector Method (RVM) for routing in Bluetooth Scatternets," IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communication, pp 375-379, 1999.
- [7] M. Kalia, D. Bansal, R. Shorey, "Data scheduling and SAR for Bluetooth MAC, for Bluetooth MAC," IEEE VTC 2000-Spring Tokyo, pp. 716-720, 2000.
- [8] A. Capone, M. Gerla, R. Kapoor, "Efficient Polling Schemes for Bluetooth Picocells," ICC 2001, IEEE International Conference on Communication, vol 7, pp. 1990-1994, 2001.
- [9] Z. Liu, P. Nain, D. Towsley, "On Optimal Polling

Policies," *Queuing Systems*, Vol. 11, pp. 59-83, 1992.

[10] O. Fabian, H. Levy, "Polling System Optimization Through Dynamic Routing Policies," *IEEE INFOCOM '93*, vol. 1, pp. 194-200, 1993.

[11] GloMoSim, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/gloMosim>



이 우 신

2001년 2월 광운대학교 컴퓨터공학과(공학사). 2001년 3월~현재 광운대학교 컴퓨터공학과 석사과정. 관심분야는 네트워크, 이동컴퓨팅



이 혁 준

1987년 8월 University of Michigan, Computer Science(학사). 1989년 6월 Syracuse University, Computer Science(석사). 1993년 12월 Syracuse University, Computer Science(박사) 1994년 3월~1996년 2월 삼성전사(주) 멀티미디어 연구소 선임연구원. 1996년 3월~현재 광운대학교 컴퓨터공학과 조교수. 관심분야는 무선네트워킹, 인터넷 분산컴퓨팅, 이동컴퓨팅