

수중 음파 센서 네트워크에서 우선순위 기반의 PR-MAC 프로토콜

조희진[†], 남궁정일^{**}, 윤남열^{***}, 박수현^{****}, 류영선^{*****}

요 약

수중 음파 센서 네트워크는 수중환경에서 재해방지, 환경 감시 시스템 등의 용도로 이용될 수 있다. 그러나 수중환경에서는 지상과는 다른 긴 전파 지연과 낮은 전송 속도, 제한된 대역폭과 같은 특성을 고려하여야 한다. 본 논문은 수중 음파 센서 네트워크에서 우선순위에 따라 슬롯이 각 노드에 맞게 할당되는 비경쟁방식의 슬롯 예약 구간을 통해 충돌 및 에너지 손실을 최소화하는 Priority Reservation MAC(PR-MAC) 프로토콜을 제안한다. 또한 성능을 평가하기 위해 수학적 분석 모델을 제시하고 그 결과로 충돌 확률, 충돌에 의한 에너지 소모량, 처리율, 채널 효율을 기존 프로토콜과 비교 평가하여 제안된 프로토콜의 우수성을 보인다.

PR-MAC Protocol based on Priority in Underwater Acoustic Sensor Networks

Hui-Jin Cho[†], Jung-Il Namgung^{**}, Nam-Yeol Yun^{***},
Soo-Hyun Park^{****}, Youngsun Ryuh^{*****}

ABSTRACT

Underwater acoustic sensor networks can be used disaster prevention and environmental monitoring systems in underwater environments. Because, the underwater environment is different from the ground, the long propagation delay, low transfer rates and limited bandwidth characteristics should be considered. In this, paper will propose the MAC protocol that allocates time slot into each node according to priority policy through the period of contention-free slot reservation in underwater acoustic sensor networks in order to avoid collision and minimize energy consumption waste. We perform mathematical analysis to evaluate the performance of the proposed protocol with regard to the collision probability, the energy consumption by collision, throughput and channel utilization. We compare the proposed protocol with the conventional protocol, and the performance results show that the proposed protocol outperforms the conventional protocol.

Key words: PR-MAC, Underwater Acoustic Sensor Networks(수중 음파 센서 네트워크), Period of Contention-Free Slot Reservation(비경쟁 방식의 슬롯 예약 구간), Priority(우선순위), Media Access Control(MAC)(매체접근제어(MAC))

* 교신저자(Corresponding Author): 박수현, 주소: 서울시 성북구 정릉동 861-1 국민대학교 BIT전문대학원 경상관 C동 312호(136-702), 전화: 02)910-5085, FAX: 02)910-4017, E-mail: shpark21@kookmin.ac.kr

접수일: 2010년 12월 20일, 수정일: 2011년 2월 21일
완료일: 2011년 2월 28일

[†] 정회원, 국민대학교 BIT전문대학원 유비쿼터스시스템 Lab. (E-mail: apple0129@daum.net)

^{**} 정회원, 국민대학교 BIT전문대학원 유비쿼터스시스템 Lab. (E-mail: greenji@naver.com)

^{***} 정회원, 국민대학교 BIT전문대학원 유비쿼터스시스템 Lab. (E-mail: anuice@naver.com)

^{****} 종신회원, 국민대학교 BIT전문대학원 유비쿼터스시스템 Lab.,

^{*****} 정회원, 한국생산기술연구원
(E-mail: ysryuh@kitech.re.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-C1090-1121-0001).

1. 서 론

센서 네트워크의 기술이 발전하고 그에 따른 관심이 커짐에 따라 센서 네트워크 기술을 이용하여 인간이 접근하기 힘든 환경에서 여러 가지 필요한 정보들을 얻으려는 시도가 이루어지고 있다. 특히 무선 센서 네트워크는 주로 환경을 감시하는 목적으로 위험한 환경에 센서를 분포하여 이에 대한 여러 정보를 수집하여 전송하는 역할을 한다[1]. 무선 전송 매체는 브로드 캐스트 전파특성을 가지며 무선 전송매체를 노드들이 공유함으로써 충돌이 발생할 수 있다[2]. 따라서 무선 센서네트워크의 MAC 프로토콜은 채널 충돌이 발생하지 않도록 설계해야 한다. 또한 수중 센서 네트워크 기술은 무선 통신 및 통신 프로토콜 등의 다양한 분야를 접목시킨 센서 네트워크를 해양이나 강에 설치하여 수중의 데이터 수집, 수중탐사, 무인 환경 감시 시스템, 항로 설정, 자연재해 방지, 군사적인 목적 등의 여러 분야에서 응용되는 기술이다. 이러한 희망적인 전망에도 불구하고 수중 센서 네트워크는 물속이라는 특수한 환경에서 동작을 하기 때문에, 네트워크 통신에 있어서 많은 제약 사항을 가진다. 특히 육상 센서 네트워크에서 주로 사용되던 전파는 물속에서 심각한 감쇠 현상과 대역폭이 30~300Hz로 상당히 제한적이므로 사용이 불가능하고, 광학파장은 빛의 분산 때문에 수중에서는 사용할 수 없다[3]. 그래서 수중 센서 네트워크에서는 수중에서 뛰어난 전달 특성을 가지는 음파통신을 주로 이용하여 향상된 통신 환경을 제공한다[3]. 그러나 음파 통신은 지상에 비해 긴 전파 지연과 상당히 제한된 대역폭을 가지므로 한 번에 보낼 수 있는 정보량이 적고 주변신호와 도플러 편이 현상에 많은 영향을 받게 된다. 수중 채널은 다중경로(multipath)와 페이딩(fading) 때문에 심하게 약화되고, 높은 오류 발생률과 일시적인 연결 단락(shadow zone)이 발생한다. 또한 수중 센서는 배의 부착물이나 부식에 의해 고장이 발생하고 배터리 용량이 제한적이며, 수중에서는 태양 에너지와 같은 에너지를 사용할 수 없으므로, 배터리를 간단히 재충전 할 수 없다[4]. 그러므로 이러한 특성들을 반영하여 수중 환경에서 무선으로 패킷을 전송하는 수중 음파 센서 네트워크에 적합한 MAC 프로토콜 개발이 필요하다.

본 논문에서는 우선순위에 따라 슬롯이 각 노드에 맞게 할당되는 비경쟁방식의 슬롯 예약 구간을 통해

충돌 및 에너지 손실을 최소화하는 수중 음파 센서 네트워크에 적합한 MAC 프로토콜을 제안한다.

2. 관련 연구

현재까지 센서 네트워크를 위한 많은 MAC 프로토콜 연구가 진행되어 왔다. PEDAMACS[5]는 에너지 효율을 높이기 위하여 하나의 기지국에 의해 모든 노드들이 동기화되는 MAC 프로토콜이다. 이 프로토콜은 중앙집중식 구조의 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식을 통하여 높은 채널 효율과 에너지 효율을 가진다. S-MAC[6]은 기존의 802.11 DCF[7] 방식을 개선시킨 프로토콜로써 CSMA(Carrier Sense Multiple Access) 기반의 경쟁방식이며 이웃노드 간에 수신 구간을 동기화한다. S-MAC과 PEDAMACS는 수중이 아닌 지상 환경의 센서 네트워크에서 높은 에너지 효율을 가지므로 수중 음파 센서 네트워크에 적용하기에는 수중 환경의 긴 전파 지연과 낮은 전송 속도, 제한된 대역폭과 같은 특성으로 인해 전송 효율이 떨어진다.

최근 들어 수중 환경에 적합한 수중 음파 센서 네트워크 MAC 프로토콜이 활발히 연구되고 있는데 UWAN-MAC[8]은 수중 음파 네트워크에서 에너지 효율적인 MAC 프로토콜을 제안하였다. 이 프로토콜은 데이터를 전송하기 위해 모든 노드는 채널을 미리 확보하여 주어진 시간에 데이터를 전송한다. 채널을 확보하기 위해 초기 설정단계에서 임의의 시간에 설정 메시지를 전송하여 인접한 노드에게 자신의 채널 사용시간을 알림으로써 각 노드의 전송채널을 설정한다. 그러나 이 프로토콜은 채널을 미리 설정하므로 인하여 보낼 데이터가 없는 경우 불필요하게 채널을 낭비 할 수 있으며 많은 노드가 사용될 경우 채널 충돌에 의한 전송지연 및 에너지 낭비가 발생할 수 있다. Slotted FAMA[9]는 기존의 FAMA(Floor Acquisition Multiple Access)[10] 프로토콜을 향상시켜 전송 지연 및 처리율을 높일 수 있는 프로토콜을 제안하였다. 기존의 FAMA 프로토콜은 데이터 전송 시 다른 노드와 충돌을 피하기 위하여 전송매체를 감지한 후 채널이 비어 있을 경우에 RTS/CTS 패킷을 전송하여 채널을 확보한다. 제안된 Slotted FAMA 프로토콜은 기존의 FAMA 프로토콜의 기능에서 타임 슬롯을 사용하여 데이터 패킷을 전송한다.

Tone-Lohi[11]는 채널 효율과 에너지 효율을 높이기 위한 MAC 프로토콜을 제안하였다. 제안된 프로토콜은 채널을 예약하기 위한 예약구간과 데이터를 전송하기 위한 데이터구간으로 구성된 프레임을 가진다. 데이터를 보내고자 하는 노드는 예약구간에서 짧은 신호(Tone)를 전송하며 그 중 하나의 노드만 채널을 예약한다. 채널을 예약한 노드는 데이터구간에서 데이터를 전송하고 다시 경쟁구간으로 들어간다. 이 프로토콜에서는 짧은 신호를 사용하기 위해 송수신기에 전송 및 탐지를 위한 별도의 장치를 구현하였으며, 하나의 프레임 구간에서 하나의 노드에서만 데이터를 전송할 수 있다. [2]는 위에 언급한 논문들을 보완하여 수중 음파 센서 네트워크에서 전파 지연과 충돌을 고려한 MAC 프로토콜을 제안하였다. 이 프로토콜은 슬롯 예약 구간과 데이터 전송 구간으로 나뉘어져 있으며 슬롯 예약 구간에서는 경쟁방식에 의해서 데이터 전송 구간을 예약하는 예약 메시지를 전송함으로써 데이터 전송 구간에서의 충돌을 줄인다. 데이터 전송 구간에서는 데이터 전송이 이루어질 때를 제외하고 비활성(sleep) 상태를 유지함으로써 에너지 소모를 최소화 한다. 그러나 슬롯 예약 구간에서 경쟁방식에 의해 슬롯을 획득하여 이웃노드로 예약 메시지를 전송하게 되는데 이때, 경쟁방식을 사용하기 때문에 충돌이 발생할 수 있으며 무선 매체 특성상 이를 탐지를 할 수 없다. [12,13]에서는 2홉 이웃노드를 아는 동적 스케줄링 방식이 제안되었는데 시간은 슬롯으로 나뉘어져 있고, 그림 1과 같이 슬롯으로 이루어진 프레임이 랜덤 액세스 구간과 스케줄 된 액세스 구간으로 나뉜다.

그리고 노드의 전송거리 이내에 있는 노드를 1홉 이웃으로 정의 하였다. 랜덤 액세스 구간에서는 자신의 ID와 1홉 이웃노드 정보(ID)를 이웃노드들과 교환한다. 이런 과정을 통해 모든 노드는 2홉 이웃노드

까지의 정보를 가질 수 있다. 스케줄 된 액세스 구간에서는 슬롯들이 차례로 슬롯 번호를 가지고 있고, 이 구간에서 스케줄에 따라 데이터 통신이 이루어진다. 각 슬롯에서 각 노드들은 고유의 우선순위(priority)를 다음의 식(1)을 통해 계산한다[12]. 여기서의 해쉬 함수는 보통 MD5를 사용한다[12].

$$prio(u,t) = hash(u \oplus t) \tag{1}$$

u는 노드의 ID이고, t는 슬롯 번호를 뜻하며 기호 '⊕'는 두 인자 u와 t를 합쳐 해쉬 함수를 구한다는 뜻이다. 노드의 ID는 유일한 값이고 모든 노드들은 동기화가 되어 있다고 가정하기 때문에, 노드들은 어떤 주어진 슬롯에 대해 동일한 우선순위를 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 우선순위를 가지고 자신의 우선순위가 모든 2홉 이웃노드들의 우선순위보다 높다면, 그 슬롯을 획득한다. 이때 슬롯을 획득한 노드를 승자(winner)라고 한다[12].

3. 제안된 Priority Reservation MAC(PR-MAC)

지상뿐만 아니라 수중에서도 무선 전송 매체는 특성상 정교한 스케줄링에 의한 예정된 전송이 아닌 경우 채널 간에 충돌 발생을 예상하거나 회피할 수 없고 특히 수중 음파 통신에서는 긴 전파 지연으로 인하여 큰 시간과 에너지의 손실이 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 특징을 파악하고 새로운 기법을 적용하여 충돌 횟수 및 에너지 손실을 최소화하고 긴 전파지연을 고려한 MAC 프로토콜을 설계하였다.

제안된 프로토콜은 사전에 정해진 우선순위에 따라 TDMA 할당방식에 의한 비경쟁방식(Contention Free Protocol)으로 각 노드에게 전송 기회가 할당되는데 이 예약 구간에서 각 노드들은 데이터 패킷을 전송하기 위한 데이터 전송 슬롯을 예약하게 된다. 이러한 예약구간을 통하여 이웃노드간의 데이터 전

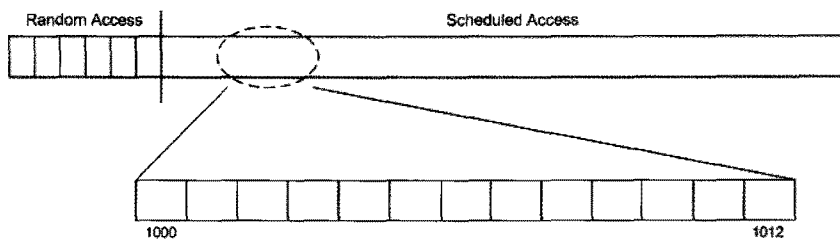


그림 1. 기존 프로토콜의 슬롯 구성

송 스케줄을 미리 알 수 있게 되므로 데이터 전송구간에서 자신이 예약한 전송슬롯과 이웃노드로 부터의 수신 슬롯에서만 깨어나 전송하므로 충돌 및 에너지 손실을 최소화하여 처리율을 향상시킬 수 있게 된다. 또한 TDMA 기반으로 사용되는 타임 슬롯에 수중환경에서의 전파지연 요소를 반영하여 인접한 슬롯 간에 패킷을 전송할 때 전파지연에 의한 충돌이 발생하지 않고 다른 슬롯에 영향을 미치지 않을 만큼 충분히 긴 시간의 타임 슬롯 길이로 설정하여 수중에서의 긴 전파지연으로 인해 발생할 수 있는 문제점을 해결 하였다.

앞서 언급한 [2] 논문은 모든 노드가 슬롯예약 구간에서 활성(active) 상태를 유지해야함으로써 많은 에너지 손실이 발생할 수 있으며 같은 전송범위내의 노드가 동시에 같은 예약 슬롯을 사용하여 예약 메시지를 전송하려고 하면 충돌이 발생하게 된다. 또한 이웃하지 않은 노드가 동시에 같은 예약 슬롯을 사용하여 예약 메시지를 전송하게 되면 예약 구간에서의 충돌은 발생하지 않으나 그 두 노드와 이웃한 노드는 데이터 전송 구간에서 양쪽 노드에게서 동시에 데이터를 수신하게 되므로 충돌이 발생하여 결국 데이터를 받을 수 없게 된다.

제안한 Priority Reservation MAC(PR-MAC) 프로토콜에서는 슬롯 예약 구간에서 위 프로토콜과 마찬가지로 활성 상태를 유지하지만 우선순위에 의한 비경쟁방식으로 슬롯이 각 노드에 맞게 할당되므로 슬롯 예약 구간이 줄어든다. 즉, 활성 상태를 유지하는 구간이 그만큼 줄어들어서 에너지 손실을 줄일 수 있다. 또한 비슬롯방식에 비하여 충돌을 줄일 수 있는 슬롯방식으로서 2홉 이웃노드를 아는 동적 스케줄링 방식[12,13]의 우선순위 할당 기법을 통해 2홉까지의 모든 노드들에게 예약 슬롯이 각각 할당되므로 예약 구간에서의 예약 메시지 충돌은 거의 발생하지 않는다. 그로인하여 충돌에 의한 에너지 낭비를 최소화 한다. 본 논문에서는 각 노드의 시간 동기화

는 이전에 미리 이루어진 것으로 가정하고 시간 동기화에 대한 내용은 다루지 않겠으며 또한 각 노드의 ID가 unique 하다고 가정한다.

제안된 프로토콜에서는 그림 2와 같이 전송 구간을 랜덤 액세스 구간과 전송 사이클 구간인 슬롯 예약 구간, 데이터 전송 구간으로 구성하였으며 전송 사이클 구간에서 슬롯 예약 구간의 슬롯을 예약 슬롯, 데이터 전송 구간의 슬롯을 데이터 슬롯이라고 칭한다.

CSMA 방식인 랜덤 액세스 구간에서는 각 노드는 자신의 정보(node ID, RSSI, Power status)를 랜덤 백오프타임 후 1홉 이웃노드들과 랜덤하게 교환한 후, 수신된 이웃노드의 정보(node ID, RSSI, Power status)를 자기 자신의 이웃노드들에게 재전송 한다. 이러한 정보 교환 과정을 수차례 반복함으로써 모든 노드는 2홉 이웃노드까지의 정확한 정보를 가질 수 있다. 이때 각 노드는 서로 교환한 정보 값을 이용한 아래 표 1과 같은 우선순위 결정 함수(Priority_Decision_Func)를 통해 2홉 이웃노드까지의 우선순위를 결정하여 슬롯 예약 구간을 우선순위가 높은 순서대로 획득할 수 있게 되며 초기에 한 번의 랜덤 액세스 구간을 통해 결정된 우선순위로 반복적으로 예약구간의 슬롯이 할당된다. 우선순위는 각 노드의 파워 잔량과 채널상태와 같은 정보를 기반으로 결정되게 되는데 이는 존재한 노드에게 더 높은 우선순위를 부여함으로써 파워 잔량이 적고 채널상태가 좋지 않은 노드에 의한 데이터 손실 및 고장을 방지하고 견고하고 안정성 있는 네트워크를 유지하기 위함이다.

슬롯 예약 구간은 랜덤 액세스 구간에서 결정된 우선순위에 의해 슬롯을 획득한 순서에 따라 전송할 데이터가 있는 노드는 우선순위에 따라 획득한 예약 슬롯에서 이웃한 노드로 데이터 전송 구간의 슬롯을 예약하기 위한 예약 메시지를 전송하고 전송할 데이터가 없는 노드는 예약 메시지 전송을 하지 않고 이웃노드로부터 들어오는 예약 메시지를 청취한다. 예

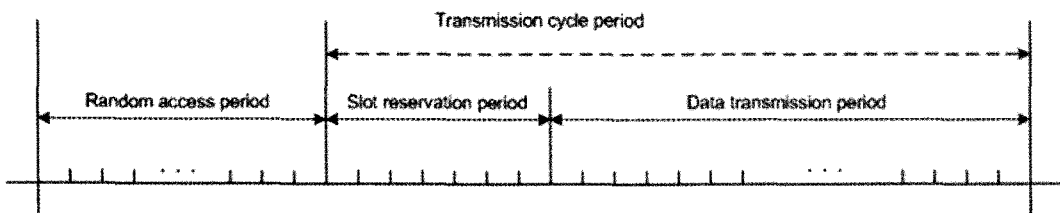


그림 2. 제안된 PR-MAC 프로토콜의 전송 사이클

표 1. Pseudo-code for Priority_Decision_Func

<p>Procedure Priority_Decision_Func(Information of node)</p> <p>For Number of Node among 2-hop in network</p> <p>Function Priority Decision</p> <p>Pass In: Information of each node such as ID of node, Power levels and Channels condition</p> <p>Calculate: highest power levels and best channels condition</p> <p>Sort: the calculated value in the higher order</p> <p>Determine: the value of a high order priority store in array: a high priority</p> <p>Pass Out: the most robust node in the order</p> <p>End function</p> <p>Next</p>

약 메시지는 전송할 노드의 아이디와 예약한 데이터 슬롯번호를 포함한다. 예약 메시지를 수신한 이웃노드는 전송한 노드의 아이디와 예약한 데이터 슬롯번호를 저장한다. 제안된 프로토콜에서는 데이터 슬롯의 충돌을 회피하기 위하여 예약 구간에서 데이터 슬롯번호를 선택할 때 다른 노드가 미리 예약한 데이터 슬롯번호를 제외하고 랜덤하게 선택한다. 이것은 예약 구간에서 모든 노드는 활성 상태를 유지하며 다른 노드의 예약 메시지를 청취하고 있기 때문에 자신이 예약 메시지를 전송하기 전까지의 데이터 슬롯의 예약 정보를 알 수 있기 때문에 가능하다. 슬롯 예약 구간이 끝나면 데이터 전송 구간이 시작되는데, 데이터 전송 구간은 그 구간 전체가 에너지 효율을 증대시킬 수 있는 비활성화 구간으로 슬롯 예약 구간에서 예약한 데이터 슬롯에서만 해당노드가 활성화되어 데이터를 전송한다. 이때 이웃한 노드들은 서로 이웃하는 노드의 데이터 전송 스케줄을 알고 있으므로 해당 슬롯에서 깨어나 데이터를 수신할 수 있다. 데이터 슬롯에서는 이웃하지 않은 두 노드가 예약 슬롯에서 동일한 데이터 슬롯을 예약하였을 때 해당 데이터 슬롯에서 두 노드가 동시에 데이터를 전송하므로 충돌이 발생할 수 있다. 센서 네트워크에서 사용되는 데이터는 다른 네트워크와는 달리 상대적으로 짧은 길이의 데이터를 사용하므로 다른 네트워크에 비해 전송 시간이 짧다. 또한 예약 메시지는 데이

터보다 더 짧은 길이의 메시지를 사용하기 때문에 예약 슬롯은 데이터 슬롯보다 더 짧은 길이의 슬롯으로 구성 할 수 있다.

그림 3은 수중 음파 센서 네트워크의 구조로써 7개의 노드가 존재하고 각 노드의 전송 범위는 동일하며 전송 범위 안에 노드 간에는 데이터 전송이 가능하다고 가정한다. 또한 랜덤 액세스 구간을 통해 그림 3의 ①과 같이 우선순위가 결정되었다고 가정하였다.

그림 4는 제안된 프로토콜의 동작 예이며, 다음은 동작 예에서의 전송절차를 순차적으로 설명한 것이다.

Step.1 먼저 슬롯 예약은 선제하는 랜덤 액세스 구간에 의해 표 1과 같이 결정된 우선순위에 따라 할당되는데 그림 3과 같이 노드A의 우선순위가 가장 높게 결정되어 첫 번째 예약 슬롯을 획득하여 데이터 전송 구간을 예약하기위한 예약 메시지를 노드A와 인접한 이웃노드인 C, B, F에게 전송하였다.

Step.2 이때 이웃노드인 노드B, C, F는 노드A의 예약 메시지를 수신하여 노드A가 이미 예약한 데이터 슬롯 2번은 예약할 수 없음을 알게 된다. 따라서 데이터 슬롯 예약 시에 미리 예약된 데이터 슬롯은 제외하고 다른 데이터 슬롯을 예약함으로써 데이터 슬롯에서의 충돌을 줄일 수 있다.

Step.3 다음으로 우선순위가 높은 노드B는 두 번째 예약 슬롯을 획득하여 5번 데이터 슬롯을 예약하는 예약 메시지를 전송한다. 2홉까지의 모든 노드들

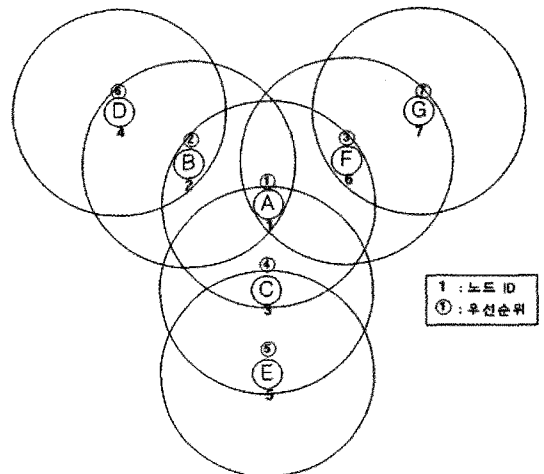


그림 3. 수중 음파 센서 네트워크 구조

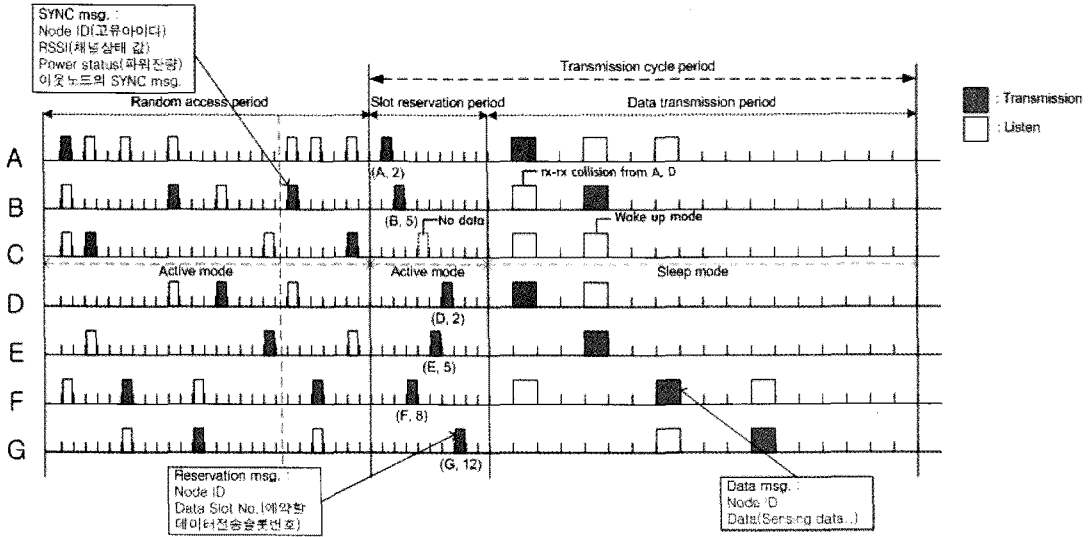


그림 4. 제안된 PR-MAC 프로토콜의 동작 예

은 우선순위에 의해 결정된 순서대로 슬롯을 획득하므로 예약 구간에서의 충돌은 거의 발생하지 않는다.

Step.4 3번째 우선순위의 노드 F는 8번 데이터 슬롯을 예약하였고, 노드 C는 전송할 데이터가 없으므로 예약 메시지를 전송하지 않았다.

Step.5 다음으로 노드 E는 노드 B와 서로 이웃하지 않았기 때문에 노드 B가 예약한 메시지를 수신하지 못하여 동일한 데이터 슬롯 5번을 예약하였다.

Step.6 노드 D 또한 노드 A와 이웃하지 않아 노드 A가 예약한 메시지를 수신하지 못하여 노드 A와 동일한 데이터 슬롯 2번을 예약하였고, 다음으로 노드 G가 12번 데이터 슬롯 예약 메시지를 전송하였다.

Step.7 슬롯 예약 구간이 끝나면 데이터 전송 구간이 시작되는데, 예약 구간에서 2번 데이터 슬롯을 예약한 노드 A와 노드 D는 동시에 2번 데이터 슬롯에서 깨어나 데이터를 전송하였다.

Step.8 인접한 노드 간에는 서로의 전송 스케줄을 알고 있으므로 노드 A의 이웃노드인 노드 B, C, F는 노드 A의 전송 시점인 2번 데이터 슬롯에서 깨어나 데이터를 수신하게 된다. 그러나 동일한 데이터 슬롯을 예약한 노드 D의 이웃노드인 노드 B는 노드 D로부터의 데이터도 동시에 수신하게 되어 rx-rx 충돌이 발생하게 된다. 하지만 노드 A, D와 동시에 이웃하지 않은 노드 C, F는 데이터 슬롯에서 충돌 없이 정상적으로 데이터를 수신할 수 있다.

Step.9 다음으로 노드 B와 E도 동일한 데이터 슬

롯에서 데이터를 전송하지만 이들은 서로 동시에 이웃인 노드가 없기 때문에 데이터 전송구간에서 충돌이 발생하지 않는다.

Step.10 노드 F와 G가 스케줄링 된 데이터 슬롯에서 순차적으로 데이터를 전송하게 된다. 이후 전송 사이클이 주기적으로 반복되며 전송할 데이터가 있는 노드들은 슬롯 예약구간에서 다시 데이터 슬롯을 예약하게 된다.

4. 성능 평가

4.1 PR-MAC 프로토콜의 수식 모델

수식 모델과 관련된 표기는 아래 표 2와 같다.

PR-MAC 프로토콜을 기반 하여 네트워크상에서 노드의 에너지 소비를 측정하기 위해 아래와 같은 기준에 제시된 전송 에너지 소비 모델을 이용하였다 [14].

$$E = P_0 T_p A(r) = P_0 T_p r^k a^r \quad (2)$$

위 모델에서는 송신 노드에서 수신 노드로 직접 패킷을 전달하는 방식을 사용하였다. P_0 는 거리가 r 만큼 떨어진 수신 노드에서 요구하는 수신 에너지이며, T_p 는 하나의 패킷을 전송하는데 걸리는 시간이고 k 는 에너지 확장 요소로서 원기동 구조이일 때는 1의 값을 가지고 실질 상에서는 1.5, 구형의 확장일 때는 2의 값을 가진다[15]. a 는 흡수 계수인 $\alpha(f)$ 에서 얻어

표 2. 모델링에 사용된 표기

Notations	Descriptions
E	전송 에너지
P_0	거리가 r만큼 떨어진 수신 노드에서 요구하는 수신 에너지
T_p	하나의 패킷을 전송하는데 걸리는 시간
r	거리
k	에너지 확장 요소
a	주파수 의존 조건
$\alpha(f)$	흡수 계수(단위 : dB/km)
f	중심 주파수(단위 : kHz)
P_w	노드가 적어도 하나의 다른 노드와 충돌 할 확률
P_{wo}	노드가 다른 노드와 충돌하지 않을 확률
T	노드가 데이터를 발생시키는 특정 구간
τ	패킷 길이
N	네트워크상에 노드의 수

진 주파수 의존 조건이며 다음과 같은 식(3)을 가진다[15].

$$a = 10^{\alpha(f)/10} \tag{3}$$

$\alpha(f)$ 는 아래와 같은 Thorp의 표현식[15]에 의해 계산된다.

$$\alpha(f) = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \tag{4}$$

여기서 f 는 중심 주파수로서 단위는 kHz이며 $\alpha(f)$ 의 단위는 dB/km이다. 본 논문에서 수행된 시뮬레이션에서는 $P_0 = 1$, $f = 25$, $k = 1.5$ 를 사용하였다.

제안된 프로토콜은 비경쟁방식으로 할당된 예약 구간에서의 예약 메시지 전송을 통해 데이터 전송 구간을 예약하는 방식으로 비슬롯방식에 비해 충돌 확률을 줄일 수 있는 슬롯방식이 사용되었다. 비슬롯방식을 사용한 UWAN-MAC의 충돌 확률과 슬롯방식을 사용한 본 논문의 제안된 프로토콜의 충돌 확률을 비교하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} P_w & (\text{노드가 적어도 하나의 다른 노드와 충돌 할 확률}) \\ &= 1 - P_{wo} \text{ (노드가 다른 노드와 충돌하지 않을 확률)} \\ &= 1 - \left[\left(1 - \frac{2\tau}{T} \right)^{N-1} \right] : \text{비슬롯방식} \end{aligned}$$

$$P_w = 1 - P_{wo} = 1 - \left[\left(1 - \frac{\tau}{T} \right)^{N-1} \right] : \text{슬롯방식} \tag{5}$$

여기서 N 은 네트워크상에 노드의 수이며 각 노드가 특정구간 $[0, T]$ 에서 패킷 길이가 τ 인 데이터를 독립적으로 발생할 경우 적어도 하나의 다른 노드의 패킷과 충돌할 확률을 의미한다. 위 충돌 확률을 통하여 충돌 발생에 의해 낭비되는 에너지 소모량을 비교해보면 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N(1 - [(1 - 2\tau/T)^{N-1}])E & : \text{UWAN-MAC} \\ N(1 - [(1 - \tau/T)^{N-1}])E & : \text{제안된 PR-MAC} \end{aligned} \tag{6}$$

위 수식에서는 충돌 확률인 수식(5)에 노드의 수인 N 과 각 전송을 위한 에너지 값 E 를 넣어 모든 노드를 위해 사용되는 전체 전송 에너지 값을 도출하였다.

4.2 PR-MAC 프로토콜의 시뮬레이션

제안된 PR-MAC 프로토콜은 Visual Basic으로 자체 제작한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 성능평가를 수행하여 기존의 MAC 프로토콜들과의 비교 분석을 통해 제안된 논문의 높은 우수성을 증명하였다. 수행된 시뮬레이션에서는 네트워크상 노드의 에너지 소비를 측정하기 위해 위에서 언급한 에너지 소비 모델을 이용하였고 각 노드가 매 전송 사이클마다 데이터를 전송하는 것으로 가정하고 랜덤 액세스 구간은 초기 한번만 실행되므로 시뮬레이션에 포함시키지 않았다. 성능평가에서 노드 수의 증가에 따른 충돌 횟수, 채널 효율, 처리율, 에너지 소모량을 기존 MAC 프로토콜인 UWAN-MAC 및 [2]가 제안한 수중 음파 센서 네트워크를 위한 매체접근제어 프로토콜과 비교 평가하였다. 수중환경에 대한 인터페이스로 표 3과 같이 시뮬레이션 파라미터들을 수중에서의 음파통신에 적합하게 설정하였다.

본 시뮬레이션에서는 수중에 10×10 km 크기로 구성된 네트워크에 수중 환경의 낮은 대역폭을 고려한 전송범위는 1 km이며 데이터 전송률은 1 kbps 인 노드들을 20~200개 랜덤하게 배치하였다. 제안한 프로토콜의 타임 슬롯은 예약 슬롯과 데이터 슬롯으로 구분되며 노드에서 전송되는 예약 메시지 패킷은 100 bit, 데이터 패킷은 3000 bit를 사용한다. 일반적으로 수중에서의 노드 간 최대 전송 지연이 약 67 msec 이므로 이에 따른 전송 지연과 전송 패킷의 크

표 3. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Values
Network Area	10 × 10 km
Transmission Range	1 km
Data Transmission Rate	1 kbps
Reservation Packet Size	100 bit
Data Packet Size	3000 bit
Underwater Propagation Delay	67 msec
Reservation Slot Size	1 sec
Data Slot Size	4 sec
Transmission Cycle	200 sec
Number of Nodes	20~200
Number of Simulation	10

기를 고려하여 예약 슬롯은 1 sec, 데이터 슬롯은 4 sec로 설정하였다.

아래의 시뮬레이션 수행 결과 차트에서 사용된 용어인 Jang-MAC은 [2]가 제안한 수중 음파 센서 네트워크를 위한 매체접근제어 프로토콜을 나타낸다.

그림 4는 네트워크상의 노드 수의 증가 따른 충돌 횟수를 나타낸 그림이다. 노드의 수가 증가할수록 충돌 횟수도 증가되는 것을 볼 수 있는데 노드의 수가 증가함에 따라 이웃노드의 수가 증가하게 되므로 충돌의 횟수도 증가하는 것이다. 제안된 PR-MAC 프로토콜은 비경쟁방식의 슬롯 예약 구간으로 인하여 네트워크상의 노드 수가 증가하게 되더라도 충돌이 거의 발생하지 않으므로 충돌횟수 역시 기존의 MAC 프로토콜들보다 확연히 낮은 것을 볼 수 있다.

그림 5는 네트워크 노드 수의 증가에 따른 채널 효율을 존재하는 모든 슬롯과 실제 데이터를 보내기 위해 사용된 슬롯의 비로 나타내었다. UWAN-

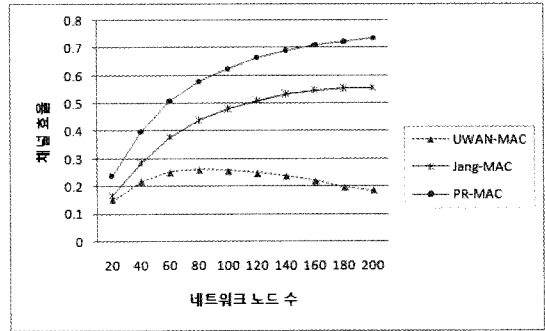


그림 6. 채널 효율

MAC 프로토콜의 채널 효율이 가장 낮게 나타나는 이유는 앞서 설명한바와 같이 UWAN-MAC은 채널을 초기 단계에서 미리 설정함으로 보낼 데이터가 없는 경우에도 채널이 낭비되어 채널 효율이 떨어지는 것이다. PR-MAC 프로토콜은 증가되는 노드 수 만큼의 슬롯 예약 구간이 설정되므로 슬롯 예약 구간에서의 채널 낭비는 거의 없다. 그러므로 기존 프로토콜에 비해 채널효율이 월등히 높을 수밖에 없는 당연한 결과가 보여 지는 것이다.

그림 6는 네트워크 노드 수의 증가에 따른 처리율을 나타내었는데 여기서 처리율은 데이터를 전송할 경우 발생할 수 있는 충돌이 얼마만큼의 비중을 차지하는 지를 볼 수 있도록 실제 사용된 슬롯의 수와 충돌 없이 정상적으로 패킷을 전송한 슬롯의 비로 나타내었는데 네트워크 노드 수의 증가에 반비례하여 처리율은 전체적으로 감소되는 것을 알 수 있다. 기존의 프로토콜들과 비교했을 때 PR-MAC 프로토콜은 비경쟁방식의 슬롯예약을 통해 충돌이 거의 발생하지 않으므로 처리율 또한 우수하게 평가되었다.

그림 7은 네트워크 노드 수의 증가에 따른 에너지 소모량을 나타내었다. 에너지 소모량은 패킷을 전송

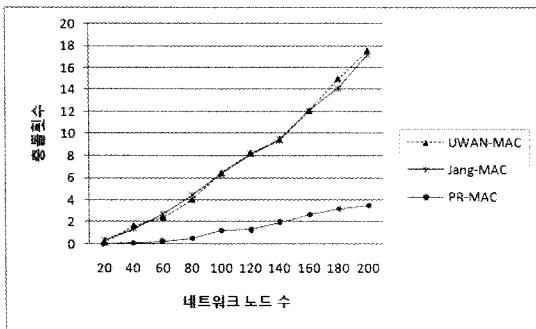


그림 5. 충돌 횟수

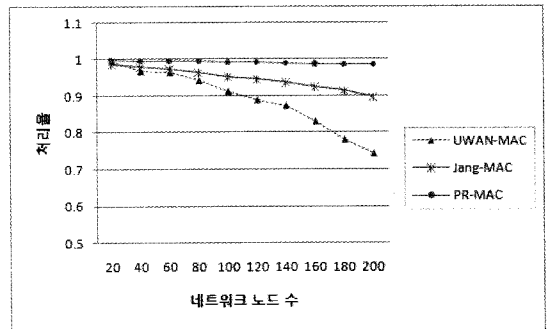


그림 7. 처리율

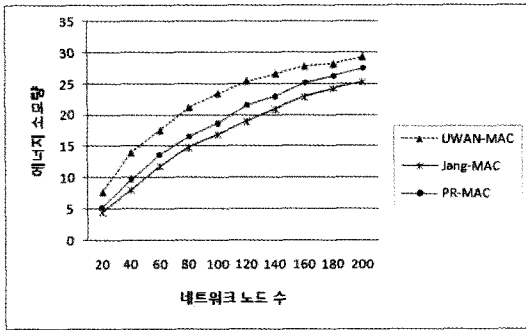


그림 8. 에너지 소모량

하는데 소모되는 에너지와 이웃노드로부터 데이터를 수신하는데 필요한 에너지를 에너지 소비 모델에 기반하며 도출하였고 네트워크상의 노드가 많아질수록 전체적으로 소모되는 에너지양이 증가됨을 볼 수 있다. 이것은 같은 크기의 네트워크상에 노드가 많아질수록 이웃 노드가 증가하게 되고 이에 따라 전송에너지 및 수신에너지가 증가되고 충돌도 증가하게 된다는 걸 의미한다. 그러므로 네트워크 노드 수가 증가할수록 노드가 소모하는 에너지양이 증가하게 되는 것이다. 기존의 프로토콜들과 비교했을 때 그림에서 보여 지듯이 제안된 PR-MAC 프로토콜은 비슬롯 기반이라 충돌율도 높은 UWAN-MAC 보다는 에너지 소모량이 높지 않지만 같은 슬롯기반인 Jang-MAC에 비해서는 에너지 소모량이 높아지는 것을 알 수 있다. 이것은 Jang-MAC에서는 한정된 일정 구간만큼의 슬롯 예약 구간 안에서 경쟁방식에 의해 데이터 슬롯을 예약하기 위한 예약 메시지를 전송하게 되는데 노드의 수가 증가할수록 한정된 슬롯 예약 구간에서의 예약 메시지 충돌로 인해 데이터 슬롯을 예약하지 못하여 결국 데이터 전송구간에서 데이터를 전송하지 못하게 되는 것이다. 이로 인해 데이터를 전송하는데 소모되는 전송에너지가 참여 노드 수에 반하여 증가되지 않기 때문인 것이다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 수중 음파 센서 네트워크에 적합한 PR-MAC 프로토콜을 제안하였다. 제안된 프로토콜은 무선 환경의 브로드캐스트 전파특성과 경쟁방식에 의해 충돌이 발생할 수 있는 상황을 극복하여 충돌을 최소화하고 에너지 손실을 줄이는데 중점을 두

었다.

본 논문에서 제안하는 PR-MAC 프로토콜은 초기 랜덤 액세스 구간에서 2홉 이웃노드간의 정보를 교환하여 결정된 우선순위 따라 활성 상태를 유지하는 슬롯 예약 구간의 예약 슬롯이 비경쟁방식으로 각 노드에 할당된다. 그러므로 경쟁방식에서 일어날 수 있는 충돌을 방지할 수 있고 경쟁방식인 기존 프로토콜에 비해 활성 상태를 유지하는 구간이 줄어들므로써 에너지 손실을 줄일 수 있다. 또한 데이터 전송 구간에서는 이전의 슬롯 예약 구간에서의 예약 메시지에 의해 이웃노드간의 스케줄을 서로 알고 있으므로 해당 구간에서만 활성화 되어 에너지 손실을 최소화 할 수 있다.

제안된 PR-MAC 프로토콜의 성능을 평가하기 위해 기존에 제시된 에너지 소비모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 통해 노드 수의 증가에 따른 충돌 횟수, 채널 효율, 처리율, 에너지 소모량을 기존의 MAC 프로토콜들과 비교 분석하여 평가하였다. 이러한 비교 분석의 결과 제안된 PR-MAC 프로토콜은 기존의 MAC 프로토콜들보다 높은 우수성을 나타내었다. 그러나 제안된 프로토콜에서 인접하지 않은 노드 간에 데이터 전송 구간에서의 충돌은 여전히 해결되지 못하였는데 향후 연구를 통하여 이러한 문제를 최소화할 것이다. 또한 앞으로 우선순위 선정 시 시급한 데이터를 보내고자하는 노드에게 실제 우선순위를 부여할 수 있는 방안을 연구할 것이고 랜덤 액세스 구간의 경우 현재 초기에 한번만 실행되도록 설계하였으나 수중환경의 특성과 오류율을 고려하여 n번의 전송 사이클 후 랜덤 액세스 구간이 다시 실행되도록 설계 하는 MAC 프로토콜 연구가 필요하다.

참고 문헌

[1] 이기욱, 성창규, "에너지 효율 제약조건을 가진 센서 네트워크 모니터링 시스템 구현," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol.13, No.1, pp. 10-16, 2010.

[2] 장길용, "수중 음파 센서 네트워크를 위한 매체 접근제어 프로토콜," 정보과학회논문지, 제35권, 제4호, pp. 337-344, 2008.

[3] M. Stojanovic, "Acoustic (underwater) Com-

- munications," In *J.G. Proakis editor, Encyclopedia of Telecommunications. John Wiley and Sons*, 2003.
- [4] Dario Pompili, Tommaso Melodia and Ian F. Akyildiz, "Routing Algorithm for Delay-insensitive and Delay-sensitive Applications in Underwater Sensor Networks," *ACM Mobicom '06*, 2006.
- [5] J. Shu and P. Variaya, "PEDAMACS: Power Efficient and Delay Aware Medium Access Protocol for Sensor Networks," *Information Research Frontiers* Vol.5, pp. 29-37, 2003.
- [6] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An Energyefficient Mac Protocol For Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE INFORCOM*, pp. 1567-1576, 2002.
- [7] IEEE Standard 802.11 for Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications, Aug. 1999.
- [8] V. Rodoplu and M. K. Park, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Wireless Accoustic Networks," In *Proceedings of the IEEE OCEANS'05* conference, 2005.
- [9] M. Molins and M. Stojanovic, "Slotted FAMA: a MAC Protocol for Underwater Acoustic Network," In *Proceedings of the IEEE OCEANS'06 Asia Conference*, 2006.
- [10] C. L. Fullmer and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Floor acquisition multiple access (FAMA) for packetradio networks," 1995.
- [11] Affan A. Syed, Wei Ye, and John Heidemann. "T-Lohi: A New Class of MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks," Technical Report ISI-TR-638, USC/Information Sciences Institute, 2007.
- [12] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks," In 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), pp. 181-92, Los Angeles, CA, 2003.
- [13] L. Bao and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "A New Approach to Channel Access Scheduling for Ad Hoc Networks," *ACM SIGMOBILE*, 2001.
- [14] E. M. Sozer, M. Stojanovic, and J. G. Proakis, "Underwater acoustic networks," *IEEE J. Ocean Eng.*, Vol.25, No.1, pp. 72-83, Jan. 2000.
- [15] L. Berkhovskikh and Y. Lysanov, "Fundamentals of Ocean Acoustics," New York: Springer-Verlag, 1982.



조 희 진

2002년 신홍대학 멀티미디어학과
전문공학사
2008년 한국교육개발원 멀티미
디어학 공학사
2010년 국민대학교 비즈니스정보
통신 이학석사

2010년~현재 국민대학교 비즈니스 IT 전문대학원 박사
과정
관심분야: 애드혹 네트워크, UW-ASN 통신 프로토콜,
임베디드 시스템



박 수 현

1988년 고려대학교 컴퓨터학과
이학사
1990년 고려대학교 수학과 전산
학 이학석사
1998년 고려대학교 컴퓨터학 이
학박사

1990년 (주)LG전자 중앙연구소 선임연구원
1999년~2001년 동의대학교 공과대학 컴퓨터·소프트웨
어공학과 조교수
2002년~현재 국민대학교 정보시스템전공 부교수
관심분야: 유비쿼터스 네트워크, Underwater Sensor
Network



남 궁 정 일

1995년 인천대학교 기계공학과 공
학사
2005년 국민대학교 비즈니스정보
통신 이학석사
2007년~현재 국민대학교 비즈니
스 IT 전문대학원 박사
과정

관심분야: 센서 네트워크, 애드혹 네트워크, 통신 프로토
콜, 임베디드 시스템



류 영 선

1984년 서울대학교 바이오시스템
및 소재학부 학사
1986년 서울대학교 바이오시스템
및 소재학부 석사
1997년 서울대학교 로봇공학 공
학박사
1989년~1990년 삼성전자

2000년 (주)삼주기계 기술연구소 소장/이사
2003년 로보랜드(주) 대표이사
2003년~현재 한국생산기술연구원 수중로봇개발단 단
장 과학기술연합대학원대학교 지능형로봇공학
과/교수
관심분야: 수중로봇, 생체모방 로봇공학



윤 남 열

2003년 안동대학교 정보통신공학
과 공학사
2009년 국민대학교 비즈니스정보
통신 이학석사
2009년~현재 국민대학교 비즈
니스 IT 전문대학원 박사
과정

관심분야: USN, UW-ASN 통신 프로토콜, 임베디드 시
스템