

인지무선 에드혹 네트워크를 위한 강화학습기반의 멀티채널 MAC 프로토콜

박형근*

Reinforcement Learning based Multi-Channel MAC Protocol for Cognitive Radio Ad-hoc Networks

Hyung-Kun Park*

*Professor, School of Electrical Electronic and Communication Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253 Korea

요 약

인지무선 에드혹 네트워크 (CRAHN : Cognitive Radio Ad-Hoc Networks)는 무선 서비스의 증가에 따른 주파수 자원부족을 극복할 수 있는 네트워크 기술이다. CRANH에서 주 사용자에게 대한 간섭을 회피하기 위해 유휴채널을 확인하는 채널센싱이 필요하며, 주 사용자 출현시 빠른 유휴 채널선택을 통해 핸드오버로 인한 시간지연을 최소화해야 한다. 본 연구에서는 강화학습을 이용하여 CRANH에서 주 사용자의 채널 센싱의 대상을 축소하고 유휴채널의 가능성이 높은 채널을 우선적으로 센싱하도록함으로써 전송효율을 개선하였다. 또한 주기적인 센싱을 수행하지 않고 데이터의 전송시점에 채널을 센싱함으로써 센싱시점과 데이터 전송시점간의 차이로 인한 주 사용자와의 충돌가능성을 최소화할 수 있는 멀티채널 매체접근제어(MAC: Medium Access Control) 프로토콜을 제안하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 분석하였다.

ABSTRACT

Cognitive Radio Ad-Hoc Networks (CRAHNs) enable to overcome the shortage of frequency resources due to the increase of radio services. In order to avoid interference with the primary user in CRANH, channel sensing to check the idle channel is required, and when the primary user appears, the time delay due to handover should be minimized through fast idle channel selection. In this paper, throughput was improved by reducing the number of channel sensing and preferentially sensing a channel with a high probability of being idle, using reinforcement learning. In addition, we proposed a multi-channel MAC (Medium Access Control) protocol that can minimize the possibility of collision with the primary user by sensing the channel at the time of data transmission without performing periodic sensing. The performance was compared and analyzed through computer simulation.

키워드 : 인지무선 에드혹 네트워크, 매체접근제어, 채널센싱, 강화학습, Q러닝

Key word : cognitive radio ad-hoc networks, medium access control, channel sensing, reinforcement learning, Q-learning.

Received 11 May 2022, Revised 2 June 2022, Accepted 7 June 2022

* Corresponding Author Hyung-Kun Park (E-mail:hkpark@koreatech.ac.kr, Tel:+82-41-560-1176)

Professor, School of Electrical Electronic and Communication Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.7.1026>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

다양한 무선 응용서비스의 증가로 주파수 자원에 대한 수요가 증가하고 있다. 그러나 무선 스펙트럼 자원은 제한되어 있어 이에 대한 요구를 따라가기 어려운 상황이다. 이를 해결하기 위한 방안으로 유휴 스펙트럼을 활용하는 인지무선네트워크가 개발되었다[1]. 인지무선 네트워크 기술은 제한된 무선자원을 효율적으로 사용하기 위해 허가받은 사용자가 사용하지 않는 시간에 스펙트럼을 동적으로 사용할 수 있도록 하는 무선통신시스템이다. 인지무선 에드혹 네트워크 CRAHN은 다양한 무선 서비스를 지원할 수 있도록 단말 스스로 통신네트워크를 구성할 수 있으며 기지국과 같은 중앙집중화된 네트워크를 필요치 않으므로 네트워크 구성이 보다 수월하고 주변 무선 환경으로의 확장이 용이하다.

인지무선 네트워크는 주파수 사용 허가를 받은 주 사용자(primary user)와 유휴채널에서만 주파수 사용이 가능한 부 사용자(secondary user)로 구성된다. 인지무선 네트워크에서는 주 사용자에 대한 간섭이나 충돌이 발생하지 않도록 주 사용자가 채널을 점유하지 않는 스펙트럼 홀을 부 사용자에게 할당해야 한다. 또한 부 사용자가 주 사용자의 출현을 인식하게 되면 바로 다른 스펙트럼 대역으로 전환해야 한다. 이를 위해 채널에 대한 기회적 접속을 제어하는 매체접근제어 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2]-[3]. CRAHN에서는 주 사용자에 대한 간섭 및 패킷 충돌을 최소화하는 것이 매체접근제어 설계의 주요 고려사항이 된다.

멀티 채널 환경에서 다양한 기회적 채널접속기법들이 제안되었으나 주 사용자의 트래픽 특성, 및 채널환경들을 인식하고 유휴 채널을 선택하는데 시스템 복잡도가 크게 증가하는 문제를 갖는다[4]. 특히 본 연구에서 고려하고 있는 인지무선 에드혹 네트워크에서는 중앙집중화된 네트워크가 존재하지 않기 때문에 단말 스스로 네트워크 환경에 대한 정보를 빠르게 획득하고 대응하는 것이 기술적 문제가 되고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 최근에는 인지무선 네트워크에 강화학습을 적용하고자하는 다양한 연구가 진행되고 있다[5-7]. 강화학습은 주어진 알고리즘에 따라 학습을 통해 다차원 입력 데이터를 적응적으로 빠르게 분석함으로써 네트워크의 변화에 따른 시스템의 최적성능을 도출할 수 있게 한다. 본 연구에서는 강화학습

을 이용하여 인지무선네트워크의 단말들이 과거 환경과 행동으로부터 학습할 수 있는 능력을 갖는 멀티채널 MAC프로토콜을 설계하였다. 이를 통해 인지무선 에드혹에서 기지국이 존재하는 않는 단말기간의 분산화된 네트워크에서 주사용자에 대한 간섭을 최소화하고 전송효율을 높일 수 있는 채널센싱 및 채널선택 기법을 도출한다.

II. 인지무선 네트워크에서의 채널센싱

인지무선 네트워크의 부 사용자들은 주사용자들에 대한 간섭을 최소화하기 위해 무선 스펙트럼 홀을 찾아야 하며 이를 통해 주파수 사용 효율을 극대화 해야 한다. 그림1은 부 사용자가 주 사용자에 대한 간섭 없이 멀티채널들의 빈 공간을 찾아 전송채널을 전환하는 예를 보여준다. 부 사용자들은 채널센싱을 통해 해당 채널의 주 사용자 유무를 판단하고 주 사용자가 없는 유휴 채널을 확인한 후에 전송채널로 활용하게 된다. 해당 채널에서 주사용자신호가 감지되면 즉시 해당채널을 비우고 다른 채널로 핸드오버해야 한다.

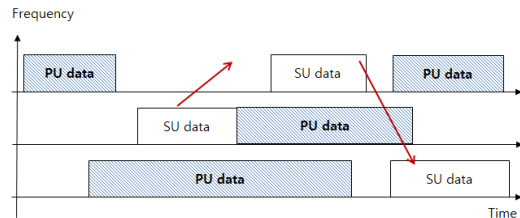


Fig. 1 Inter-channel handover to find white space

기존의 인지무선 에드혹 MAC에서 멀티채널의 수가 큰 경우 주기적으로 모든 채널을 센싱하여 PU의 출현여부를 확인하였다[8]. 이는 채널센싱으로 인한 많은 전력소모 및 전송효율저하를 야기하게 된다. 특히 주사용자 트래픽의 증가로 인해 센싱주기가 짧아질 경우 멀티채널의 채널 수가 증가할수록 성능저하가 크게 발생하게 된다. 또한 주기적 채널센싱으로 인해 채널센싱 시점과 실제 데이터 전송시점의 차이가 발생하게 되어 채널센싱 시점에서 채널이 idle 하더라도 실제 전송시점에 주 사용자의 트래픽이 존재할 수 있게 된다.

본 연구에서는 강화학습을 이용하여 채널 센싱의 대

상을 축소하여 일부 채널만을 센싱함으로써 센싱으로 인한 성능저하를 최소화한다. 또한 주기적인 센싱을 수행하지 않고 데이터의 전송시점에 채널을 센싱함으로써 센싱시점과 데이터 전송시점간의 차이로 인한 채널 센싱의 오류를 최소화한다.

III. 강화학습기반 채널센싱과 채널선택

강화학습은 MBA(Model-Based Algorithm)과 MFA(Model-Free Algorithm)으로 구분하는데 인지무선 에드혹 네트워크에서 부 사용자는 무선 네트워크 환경에 대한 사전정보를 갖지 못하여 exploration을 통해 학습하게 되므로 MFA의 대표적인 강화학습 알고리즘인 Q-learning기법을 고려하였다.

일반적인 Q-learning에서 에이전트들은 식(1)와 같이 Q 테이블을 업데이트 한다.

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = (1 - \alpha)Q_t(s_t, a_t) + \alpha [r_{t+1}(s_{t+1}) + \gamma \max_{a \in A} Q_t(s_{t+1}, a)] \quad (1)$$

이때 a 은 학습률을 γ 은 할인율을 의미한다. t 시점에 s_t 상태의 에이전트가 행동 a_t 를 수행하고 $t+1$ 시점에 s_{t+1} 상태로 전이된다. 이때 보상으로 r_{t+1} 를 받고 Q 테이블을 업데이트 한다. 이때 전이된 다음 상태인 s_{t+1} 상태의 Q값 중 가장 큰 Q값을 할인된 보상값으로 반영한다.

본 연구에서 고려하는 매체접근제어는 주 사용자의 트래픽 특성에 따른 최적의 유휴채널을 선택하고자 하므로 상태공간을 고려하지 않는 Q-learning을 이용하여 계산량을 크게 줄일 수 있다. 따라서 본 연구에서 환경은 상태공간으로 표현되지 않고 오직 행동공간과 1차원 Q테이블이 사용되므로 상태공간을 고려하지 않는 단순한 stateless Q-learning 방식을 사용한다. 상태공간을 고려한 식(1) Q값은 식(2)과 같은 stateless Q-learning 식으로 주어질 수 있다.

$$Q_{t+1}(m) = (1 - \alpha)Q_t(m) + \alpha r_{t+1}(m) \quad (2)$$

이때 행동 m 은 스펙트럼 채널의 선택을 의미하고 $Q(m)$ 은 선택된 채널 m 의 Q값을 나타낸다. 모든 부 사용자들은 각 채널에 대한 Q값을 저장하고 있게 된다. 본 연구에서 보상값 r 은 다음의 세 가지 값 중 하나를 리턴

한다.

- $r = 1$: 전송할 채널이 idle 하고 성공적으로 전송을 끝냈을 때의 보상값
- $r = -1$: 전송채널이 결정된 후 해당 채널을 센싱했을 때 주 사용자의 채널점유로 인해 채널이 busy 한 경우 또는 채널센싱의 오류로 인해 데이터 전송이 실패했을 때의 보상값.

부 반송파들은 전송할 데이터가 발생했을 때 각자의 Q-table을 통해 데이터를 전송할 채널을 선택하게 된다. 채널선택의 전략은 기본적으로 식(3)와 같이 greedy-policy를 따른다.

$$m_* = \operatorname{argmax}_{m \in M} Q_t(m) \quad (3)$$

단, 노드들이 이와 같은 greedy-policy만을 따른다면 노드들이 다른 채널들을 충분히 센싱할 수 없게 되어 Q값은 local optimum에 수렴할 수도 있게 된다. 이와 같은 local optimum의 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 ϵ -greedy방식을 사용한다. ϵ -greedy방식은 $1 - \epsilon$ 의 확률로는 Q값이 최대인 채널을 선택하고 ϵ 의 확률로는 랜덤하게 채널을 선택한다.

IV. 강화학습기반 CRAHN MAC 프로토콜

멀티채널 CRAHN에서는 네트워크를 제어하는 기지국이 존재하지 않으므로 단말 스스로 패킷충돌을 방지할 수 있도록 채널을 선택하고 데이터 전송을 결정해야 한다. 분산 네트워크에서 제어신호의 교환을 위한 공통 제어채널 out-of-band common control channel(CCC)를 사용한다. 공통제어채널 CCC는 클러스터마다 가장 안정적인 채널을 선택하는 것으로 가정한다. 부사용자들은 CCC를 통해 CSMA/CA방식으로 채널 접속을 시도하며 RTS/CTS (Request to Send/ Clear to Send) 패킷교환을 통해 부 사용자들 간의 패킷충돌을 방지한다. 또한 패킷 전송을 위한 채널정보를 교환함으로써 후보채널을 일정수 N_c 으로 제한한다. 따라서 모든 채널들에 대한 센싱을 수행하지 않고 후보 채널 중 Q값이 큰 채널부터 차례로 센싱하여 유휴채널이 검출되면 바로 전송할 수 있도록 한다.

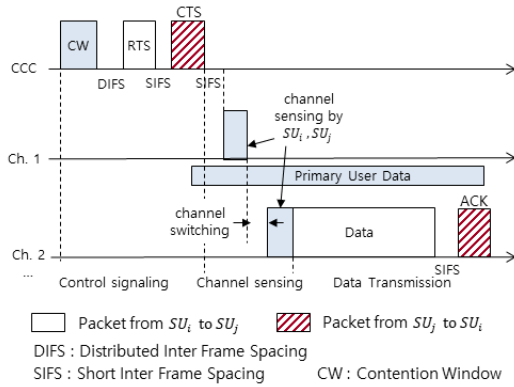


Fig. 2 Example of channel access for CRAHN

그림2는 제안한 CRAHN 매체접근제어 프로토콜을 기반으로 부 사용자 SU_i 에서 부 사용자 SU_j 로의 데이터 전송의 예를 보여준다. 그림에서와 같이 부 사용자 SU_i 는 공통제어채널 CCC를 경쟁을 통해 획득하고 RTS를 전송하게 된다. 이때 최대의 Q 값을 갖는 채널을 포함하여 N_c 개의 후보 채널을 선택하고 해당 채널번호와 그의 Q 값을 함께 RTS를 통해 전송한다. RTS패킷을 수신한 부 사용자 SU_j 는 자신이 갖고 있는 Q 테이블을 이용하여 N_c 개 후보 채널에 대한 Q 값을 평균하고 채널의 평균 Q 값에 따라 N_c 개 채널의 우선순위를 다시 정하여 이를 CTS를 통해 부사용자 SU_i 에 전송한다. 즉 식(4)에서와 같이 N_c 개의 후보채널들을 평균 Q 값이 가장 큰 것부터 순서대로 정렬하고 그 채널번호를 나열한 집합 C_t 를 CTS패킷을 통해 전송한다.

$$C_t = [c_{t,1} \ c_{t,2} \ \dots \ c_{t,N_c}] \quad (4)$$

이때 $c_{t,i}$ 는 i 번째 후보채널의 채널번호를 의미한다. 이 처럼 부 사용자간의 Q 테이블 정보를 공유하는 것은 데이터 송수신에 참여하는 부사용자 SU_i 와 SU_j 에서의 Q 값이 최적값에 수렴하지 않아 최적 행동이 다를 경우 서로의 경험을 이용하여 보다 최적값에 수렴할 수 있도록 한다. 또한 송수신 부 사용자들 간의 후보 채널 정보를 공유함으로써 선택된 채널이 주 사용자에 의해 사용되고 있을 경우 각자 동일한 다음 순위의 채널로 스위칭함으로써 보다 빠르게 채널 선택을 변경할 수 있도록 한다. N_c 값의 크기에 따라 CTS패킷 크기 및 전송효율에

영향을 줄 수 있으므로 적절한 N_c 값의 선택이 중요하다.

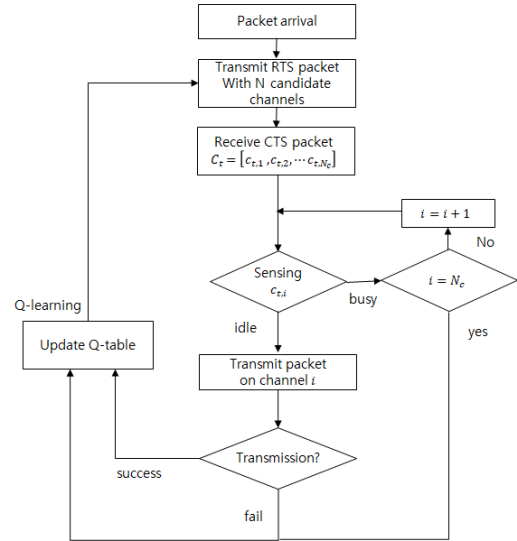


Fig. 3 Reinforcement learning based CRAHN MAC protocol

그림 3은 제안된 MAC프로토콜의 흐름도를 나타낸다. 송신할 패킷이 발생하면 RTS-CTS교환에 의해 N_c 개의 후보채널의 우선순위가 공유되고 채널센싱의 우선순위가 정해지면 우선순위에 따라 순차적으로 채널센싱이 이루어진다. 이때 송수신 부 사용자 모두 동시에 동일 채널을 센싱하게 되며, 채널이 idle할 경우 부 사용자들 간의 데이터 전송이 이루어지고 만약 채널이 busy할 경우 송수신 부사용자들은 미리 정해진 다음 우선순위의 채널로 스위칭하여 다시 채널센싱과 데이터 전송을 시도하게 된다. 즉, 기존과 같이 모든 채널을 센싱하는 것이 아니라 idle할 확률이 높은 채널부터 차례로 센싱하여 채널센싱결과 유효채널임이 확인 되면 바로 데이터를 전송하여 채널센싱 후 데이터전송을 위한 시간 지연을 최소화할 수 있다.

V. 시뮬레이션 및 성능분석

본 논문에서에서 제안하는 강화학습기반의 CRAHN MAC프로토콜의 성능분석을 위하여 그림3의 MAC프로토콜에 기반하여 Matlab 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 채널 대역폭은 1.2Mbps로 가정하였으며 주 사

용자 트래픽의 Active 시간과 idle 시간은 지수분포를 갖는다고 가정하였다. 채널별 주 사용자의 트래픽특성을 다르게 설정하였다. 부 사용자의 데이터는 평균 메시지 길이는 512byte로 하고 부 반송파 들은 항상 전송할 데이터를 갖고 있는 것으로 가정한다. 표 1은 [9]를 참조하여 시뮬레이션을 위한 주요 파라미터를 정리하였다.

Table. 1 Simulation parameters

Parameters	Values
The number of channels	5
Channel bit rate	1.2 Mbps
Data	512bytes
DIFS	50μsec
SIFS	10μsec
RTS	20bytes
CTS	20bytes
channel switching time	5μsec
sensing time	1msec
learning rate, α	0.2
Exploration, ϵ	0.2

그림 4 는 주 사용자 데이터의 평균 도착확률 λ 에 따른 전송효율을 보여주고 있다. 주 사용자의 도착확률이 증가할수록 가용한 주파수 자원이 줄어들기 때문에 기존의 주기적 센싱방식과 강화학습기반의 MAC 모두 전송효율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 강화학습기반의 MAC프로토콜은 센싱을 위한 후보채널의 수가 증가할 수 록 유휴채널 획득의 확률이 높아지므로 기존 방

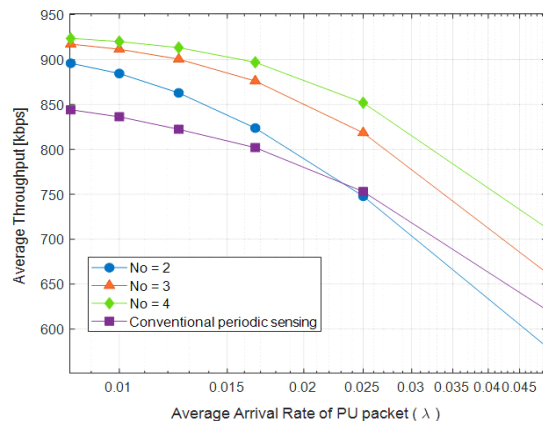


Fig. 4 Average throughput against arrival rate of PU packets

식에 비해 전송효율이 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 5는 강화학습을 통한 채널센싱의 후보 채널 수 N_c 에 따른 전송효율을 보여준다. 주 사용자의 도착확률이 증가할수록 유휴채널이 줄어들게 되므로 $\lambda = 0.5$ 의 경우는 센싱 후보채널의 수가 증가할수록 전송효율이 지속적으로 상승하나 그 보다 낮은 도착확률에서는 보다 낮은 수 후보채널에서 전송효율이 포화되는 것을 볼 수 있다.

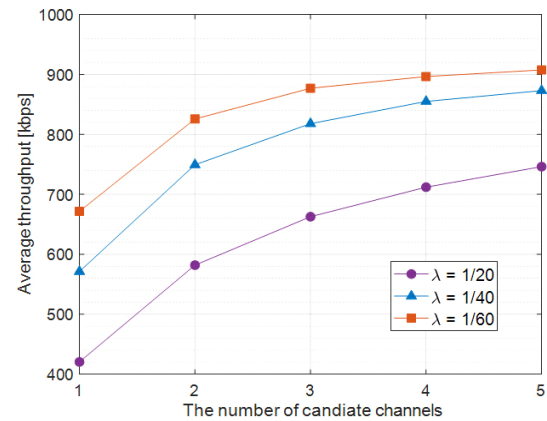


Fig. 5 Average throughput against the number of candidate channels

VI. 결론

인지무선 에드혹 네트워크 (CRAHN)은 무선 서비스의 증가에 따른 주파수 자원부족을 극복할 수 있는 네트워크 기술이다. 멀티채널 CRAHN에서 채널획득을 위한 채널센싱을 효과적으로 수행하여 주 사용자의 간섭을 최소화하면서도 전송효율을 높일 수 있는 매체접근 제어기술이 필요하다. 본 연구에서는 최근 활발히 연구되고 있는 기계학습의 하나인 강화학습을 이용하여 유휴채널 가능성이 높은 채널들을 우선적으로 센싱하고 접속을 시도함으로써 전송성공율을 높이고 전송효율을 크게 개선할 수 있는 멀티채널 CRAHN MAC프로토콜을 설계하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 비교 분석하였다. 성능분석결과 센싱후보채널의 수가 4일 때 9.3~13% 내외의 전송효율이 증가함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper was supported by Education and Research promotion program of KOREATECH in 2022

REFERENCE

[1] S. Sharmila and T. Shanthy, "A survey on wireless ad hoc network: Issues and implementation," in *2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS)*, Pudukkottai, India, pp. 1-6, 2016.

[2] Y. Zhang, Y. Wang, J. Chen, B. Zhao, C. Gao, and J. Dong, "Spectrum Reallocation Algorithm Based on the Mobile Model for Cognitive Radio Networks," in *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, Chongqing, China, pp. 11-14, 2020.

[3] S. Abdzaher, M. Abdrabou, A. Al-shami, and I. Saroit, "Performance Evaluation of Medium Access Control Protocols for Cognitive Radio Ad Hoc Networks," in *2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, Aswan, Egypt, pp. 76-79, 2019.

[4] F. F. Qureshi and A. G. Baksh, "Reliable Cognitive Radio multi-channel MAC protocol for Adhoc networks," in *2015 International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA'15)*, Sharjah, United Arab Emirates, pp. 1-6, 2015.

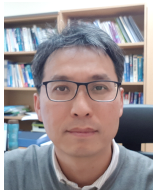
[5] M. -X. Wu, Y. -J. Yang, C. -Y. Xie, and C. -M. Wu, "Distributed Multichannel MAC Protocol in Cognitive Radio Ad Hoc Networks," in *2018 1st International Cognitive Cities Conference (IC3)*, Okinawa, Japan, pp. 260-261, 2018.

[6] P. Rungsawang and A. Khawne, "The implementation of spectrum sensing and spectrum allocation on cognitive radio," in *2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, PyeongChang, Korea, pp. 817-821 2017.

[7] T. N. Tran, T. -V. Nguyen, K. Shim, and B. An, "DQR: A Deep Reinforcement Learning-based QoS Routing Protocol in Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks," in *2021 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, Jeju, Korea, pp. 1-4, 2021.

[8] J. M. Kumbhar and V. P. Kulkarni, "Channel Selection in Multi-channel Multi-user RF Energy Harvesting Cognitive Radio Networks," in *2018 4th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Mangalore, India, pp. 1-5 , 2018.

[9] F. F. Qureshi, "Energy efficient cognitive radio MAC protocol for adhoc networks," in *Wireless Telecommunications Symposium*, London, UK, pp. 1-5, 2012.



박형근 (Hyung-Kun Park)

1995년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사
 1997년 2월 : 고려대학교 전자공학과 석사
 2000년 8월 : 고려대학교 전자공학과 박사
 2000년 9월 ~ 2001년 8월 : Univ. of Colorado at Colorado Springs, PostDoc.
 2001년 9월 ~ 2004년 2월 : 현대시스콤 선임연구원
 2004년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 교수
 ※관심분야 : 인지무선통신, 무선자원관리, 센서네트워크