

CR Ad-hoc Network에서 패킷 충돌을 고려한 효율적인 경로탐색 알고리즘

김진수*, 최준호*, 신명진*, 이지선*, 유상조^o

An Efficient Routing Algorithm Considering Packet Collisions in Cognitive Radio Ad-hoc Network

Jin-Su Kim*, Jun-Ho Choi*, Myeong-Jin Shin*, Ji-Seon Lee*, Sang-Jo Yoo^o

요 약

인지무선 애드혹 네트워크(Cognitive Radio Ad-hoc Networks)에서는 노드 간에 라우팅을 수행함에 있어 제어 패킷의 전송을 위한 협소대역인 공통 제어 채널을 사용할 경우 무분별한 제어 패킷의 방송형 전송으로 인해 공통 제어 채널의 과부하를 유발하고 패킷간의 충돌을 발생시켜 경로탐색의 오버헤드를 증가시키고 신뢰성을 떨어뜨린다. 본 논문에서는 인지무선 ad-hoc네트워크에서 주사용자의 출현 가능성과 주변 사용자의 상황을 고려하여 패킷 충돌을 감소시키는 효율적인 경로 탐색 알고리즘을 제안한다. AODV기반의 인지무선 애드혹 네트워크에서 채널을 통한 경로탐색 과정에서 데이터를 전송하기 위한 이웃 노드와의 공통된 채널이 존재하지 않을 경우 제어 메시지를 전송하지 않는다. 그리고 공통된 채널이 존재 할 경우 채널 기여도를 측정하여 채널 기여도가 작을수록 지연 시킨 후 패킷을 전송하게 된다. 또한 제안된 방법에서는 사용가능한 채널의 수와 채널의 안정성 등을 고려한 규칙을 적용하여 제어 메시지 전송을 조절하도록 한다. 이와 같은 세 가지 단계를 통해 경로 탐색에 사용되는 제어 메시지의 수와 제어 메시지 간의 충돌 확률을 감소시킬 수 있고 경로의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 모의실험을 통해 기존의 방법 보다 제안된 방법을 이용하여 경로 탐색할 경우 패킷 충돌이 감소됨을 확인 할 수 있었다.

Key Words : Cognitive Radio(CR), Ad-hoc Network, Packet Collision

ABSTRACT

In cognitive radio ad-hoc networks, common control channel overload and packet collisions are occurred due to indiscriminate broadcasting of control packets. So that the path reliability is reduced and control channel is easily saturated. In this paper, we propose a new routing algorithm considering the probability of appearance of primary user and channel status of neighbor nodes. When the source node needs to transmit a data packet to the destination, it performs route discovery process by exchanging control messages using a control channel in ADOV CR Ad-hoc networks. If any intermediate node doesn't have common data channel with previous node to transmit data, it doesn't rebroadcast control packet. And if it has common data channels with previous node, each node determines channel contribution factor with the number of common channels. Based on the channel contribution factor, each node performs different back-off broadcasting. In addition, each node controls control packet flooding

※ 본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초사업연구임(No.2011-0021152).

◦ 주저자 : 인하대학교 정보통신공학과 멀티미디어 통신망 연구실, jhchoi86@inha.edu, 준회원

◦ 교신저자 : 인하대학교 정보통신공학과 멀티미디어 통신망 연구실 sjyoo@inha.ac.kr, 종신회원

* 인하대학교 정보통신공학과 멀티미디어 통신망 연구실

논문번호 : KICS2013-07-305, 접수일자 : 2013년 7월 24일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 21일

by applying to proposed advanced mode using such as number of available channels and channel stability. With the proposed method, the number of control packets to find the data transmission path and the probability of collision among control packets can be decreased. While the path reliability can be increased. Through simulation, we show that our proposed algorithm reduces packet collisions in comparison with the traditional algorithm.

I. 서 론

지난 20여 년간 무선 통신 서비스는 그 규모나 종류 면에서 괄목할만한 성장을 거듭해왔다. 앞으로는 더욱 더 다양한 형태의 정보를 전달하는 통신 시스템들이 등장하여 의료, 복지, 안전, 물류 등의 다양한 분야에 활용될 것으로 예상된다. 기본적으로 새로운 무선 통신 서비스를 제공하기 위해서는 그에 상응하는 주파수 자원이 필요하다. 그런데 현실적으로 사용 가능한 주파수 대역은 제한되어 있는 형편이라 향후 다양한 무선 통신 서비스에 대한 수요가 늘어날 것으로 예상된다는 점을 고려한다면 머지않아 주파수 고갈 문제가 대두될 것으로 짐작할 수 있다. 이런 문제를 해결할 수 있는 방안은 주파수 자원의 이용 효율을 높이는 것이다. 사실 주파수 자원을 효율적으로 사용하는 방법에 대한 연구는 이미 통신 분야에서 오랜 기간 다루어 온 연구 과제인데, 최근까지는 이미 할당된 주파수 대역을 보다 효율적으로 이용하는 방안에 대한 연구가 대부분이었다. 미국 FCC(Federal Communications Commission) 에서 이미 사용이 허가된 주파수 대역의 사용 현황을 조사한 결과에 따르면 해당 대역의 이용 효율이 대부분 예상보다 상당히 낮은 것으로 나타났다. 이는 주파수 부족 현상이 원천적으로 주파수 자체가 한정된 자원이기 때문에 발생하는 것이기는 하지만, 이미 할당된 자원의 이용 효율이 낮은 데에도 기인한다는 점을 시사한다. 따라서 주파수 자원 이용 효율을 높이는 것이 주파수 자원 부족 문제를 해결하기 위한 현실적인 방안이 될 수 있음을 알 수 있고 2002년에는 무선 인지 기술이 FCC에 의해 승인 되었다^[1,2].

인지 무선(cognitive radio) 기술^[3]은 실시간으로 주변 전파 환경을 인식하고 그에 따라 시스템의 동작 방식을 변경할 수 있는 기술로서 앞서 언급한 주파수 자원 이용 효율을 높일 수 있는 유력한 기술로 대두되고 있다. 원래 인지 무선 시스템은 전파 환경 인식, 동작 방식 변경, 학습(learning) 등을 포함한 지능적인 통신 시스템으로 매우 유연한 시스

템이다.

이 기술은 무선통신 시스템에 할당된 주파수 대역 중에서 현재 사용되지 않고 있는 주파수 대역을 감지하여 이를 사용한다. 인지무선 기술의 핵심은 특정 대역에 대한 권한을 부여 받지 않은 부사용자(SU: Secondary User)가 해당 대역을 이용하여 통신을 수행하는데 있어서, 해당 대역에 대한 권한을 부여 받은 주 사용자(PU: Primary User)의 시스템에 최대한 간섭을 주지 않도록 하는 것이다. 따라서 부사용자는 주사용자를 보호하는 한편 비상시 즉각적으로 동작 채널을 바꾸어야 한다. 이러한 인지 무선 환경의 멀티채널 ad-hoc네트워크에서 부사용자들 간의 데이터 통신을 위해서는 가용 채널을 이용한 라우팅 경로의 선택이 필요하다.

그러나 인지 무선 노드들로 구성되어 있는 무선 ad-hoc네트워크상에서는 빈번한 주사용자의 출현과 토폴로지 변화 등으로 인해 한 번 설정된 경로를 계속 유지하는 것이 매우 어렵다^[4]. 경로의 재검색이 자주 일어날 뿐만 아니라 이용 채널의 변경도 빈번하게 일어나게 된다. 부사용자들은 채널 변경이나 경로 재검색이 발생하였을 경우 협소대역인 공통 제어 채널을 이용하여 각종 제어 메시지를 전송하게 된다. 이때 제어 채널에 과도한 패킷이 유입하게 되는데 이는 채널 과부하를 유발하게 되고 패킷 간의 충돌이 빈번하게 발생하여 동적인 네트워크 상황을 효율적으로 반영하지 못하게 된다. 또한 경로를 탐색하는 제어 메시지가 목적지 노드까지 도달하지 않는 문제가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 패킷 충돌로 인한 경로 설정의 불이익을 방지하기 위한 채널 기여도(channel contribution)를 기반으로 하는 라우팅 경로의 탐색 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제II장에서는 기존기술의 문제점을 살펴보고 제III장에서는 제안된 기술의 기본 동작과정 및 경로선택 방법을 자세히 설명한다. 제IV장에서는 경로탐색 알고리즘의 구조에 대하여 설명하고, 제V장에서는 알고리즘의 성능을 평가한다. 마지막으로 제VI장에서는 본 연구의

결론을 맺는다.

II. 기존 기술의 문제점

인지무선 네트워크에서의 라우팅은 주사용자의 출현에 따라 해당 스펙트럼을 이용 중이던 부사용자들이 동적으로 스펙트럼을 변경해야 한다. 인지무선 노드들 간의 스펙트럼 스위칭의 진행에 따라서 인지 무선 네트워크의 토폴로지는 동적으로 변하게 된다. 이러한 네트워크 토폴로지의 변화는 빈번한 경로 정보의 갱신을 야기해 경로정보의 관리를 복잡하게 하며, 이를 위한 라우팅 제어메시지의 증가는 네트워크의 오버헤드를 증가시킨다. 따라서 인지무선라우팅에서는 주사용자의 출현을 고려한 스펙트럼 정보를 이용하는 것이 중요하다.

기존에 라우팅 연구에는 네트워크 토폴로지 상의 변경이 있을 때마다 라우팅 정보를 변경하는 proactive방식^[5]과 데이터 전송을 필요로 할 때만 경로를 탐색하는 reactive방식으로 나눌 수 있다. proactive방식은 중앙 집중구조의 네트워크에서 효율적인 성능을 보여주지만 라우팅 정보와 네트워크 토폴로지가 동적으로 변하는 인지무선 네트워크에는 적합하지 않은 라우팅 방식이다. 반면 reactive방식은 요구기반(On-demand)방식의 라우팅 기법^[6,7]으로서 소스노드가 데이터 전송을 필요로 할 때 경로를 찾는 기법이기 때문에 인지 무선 네트워크와 같은 동적인 환경에도 적응적으로 활용될 수 있다. 대표적인 요구 기반 라우팅 기법으로는 AODV라우팅 프로토콜^[8,9]이 있다. AODV에서의 경로탐색과정은 소스노드가 목적노드로의 경로가 필요할 때에만 실행된다. 소스노드는 데이터를 보내려 하는 목적지에 대한 경로를 찾기 위해 RREQ(Route Request) 패킷을 브로드캐스팅 한다. 중계노드들은 RREQ 메시지를 수신하여 자신이 최종 목적지인지 여부를 확인하여 자신이 목적지가 아니면 자신의 정보를 RREQ에 업데이트 한 후 다시 목적지를 향해 브로드캐스팅 하여 목적지까지 전달한다. RREQ를 수신한 목적노드는 응답메시지인 RREP(Route Reply) 패킷을 생성하여 RREQ 패킷이 거처온 경로를 따라 소스노드로 보낸다. 소스노드가 RREP메시지를 받으면 소스노드에서 목적노드까지의 경로가 설정된다. 이와 같이, AODV 라우팅 프로토콜의 동작을 위해서는 부사용자 사이에 RREQ, RREP 와 같은 제어 메시지의 교환이 필수적이다. 대부분의 AODV 기반 라우팅 프로토콜에서는 이러한 제어 메시지의

전송만을 위한 협소대역(narrow bandwidth channel)인 공통 제어 채널(CCC: Common Control Channel)이 존재한다고 가정한다. 그림 1은 AODV 기반 인지무선 애드혹 네트워크에서 경로 탐색과정 동안에 발생하는 RREQ패킷을 보여준다. 인지무선 네트워크의 RREQ 패킷에는 local sensing한 채널 정보가 들어 있어 나중에 데이터 채널 경로에 사용된다. 이러한 RREQ는 주변 노드에 브로드캐스팅하여 주변 노드의 채널 상태정보를 획득하여 경로 데이터 전송 경로에 반영하게 된다.

이때, 특정 노드에서 주변 노드로부터 동시에 RREQ 패킷을 받게 되면 패킷 충돌이 발생하게 되고, 패킷 오버헤드의 증가로 인해 제어 채널이 폭주하게 된다. 그에 따라 소스 노드에서 목적지 노드까지 경로를 찾지 못하는 경우가 빈번하게 발생하게 된다.

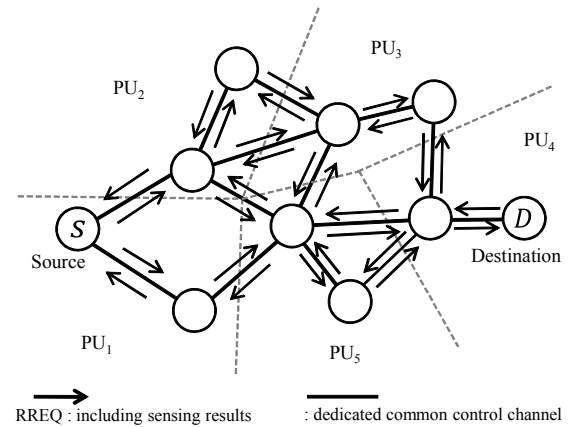


그림 1. 기존 AODV기반 인지무선 애드혹 라우팅
Fig. 1. Existing AODV based CR ad-hoc Routing

본 논문에서는 협소대역의 제어채널에 과도한 제어 메시지의 유입으로 인한 패킷충돌과 경로 탐색 실패의 문제점을 해결하기 위해 채널 기여도를 기반으로 하여 세 가지 단계를 도입한다. 이를 통해 경로 탐색에 사용되는 제어 메시지의 수와 제어 메시지 간의 충돌 확률을 감소시킬 수 있고 경로의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하려고 한다.

III. 패킷 충돌을 고려한 경로탐색 알고리즘

3.1. 시스템 모델

본 논문은 AODV 방식을 기반으로 CR 특성을 고려하여 RREQ 패킷을 제어하는 새로운 방식을 제안한다. 각 노드는 지역 센싱(local sensing)을 통

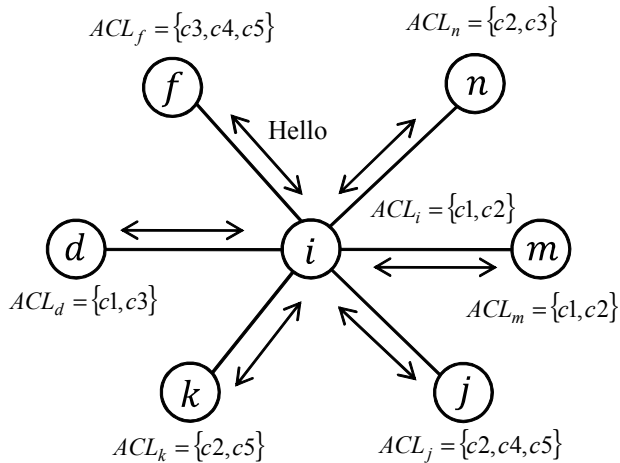


그림 2. Hello 메시지를 이용한 주변 노드의 정보교환
 Fig. 2. Exchange of neighbor node channel information by Hello message

해서 자신의 가용 채널 목록(ACL: Available Channel List)을 알게 되고, 주기적으로 주변 노드들과 Hello 메시지 패킷을 교환함으로써 주변 노드들의 가용 채널 목록 역시 알고 있다. 그림 2는 노드가 Hello 메시지를 이용하여 주변 노드의 가용 채널 목록을 획득하는 시나리오를 보여준다.

표 1은 본 논문에서 사용하는 인지무선 애드혹 네트워크 라우팅을 위한 노드 *i*의 라우팅 테이블을 나타낸다. 각 노드는 *node ID*, *ACL*, *Channel Stability*, *Average Channel Stability*, *Number of neighbors*, *ForwardNode*, 그리고 *Reverse Node*를 갖는다. *node ID*는 각 노드를 구

표 1. Node *i*의 라우팅 테이블
 Table 1. Node *i* routing table.

<i>node ID</i>	<i>i</i>	
<i>ACL</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>
<i>Channel Stability</i>	$0 < a \leq 1$	$0 < b \leq 1$
<i>Average Channel Stability</i>	$0 < k \leq 1$	
<i>Number of neighbors</i>	<i>n</i>	
<i>RREQPacket</i>	RREQ packet table	
<i>RREPPacket</i>	RREP packet table	
<i>ForwardNode</i>	next node id	
<i>Reverse Node</i>	previous node id	
<i>RREQ_Count</i>	<i>r</i>	
<i>Number of Available Channel</i>	<i>p</i>	

분하는 식별자 값이며, *ACL*은 노드가 사용 가능한 채널 목록이다. *Channel Stability*는 각 채널에 대한 안정성을 나타내고 0~1사이의 값을 갖으며, 주 사용자의 채널에 대한 평균채널 사용빈도의 역수이다. 즉, 주사용자가 빈번하게 나타나는 채널의 *stability*는 적은 값을 갖게 되고 반대 경우에는 높은 값을 갖게 된다. *Average Channel Stability*는 각 채널들의 *stability*의 평균값이며 제안하는 방법에서 RREQ패킷의 브로드 캐스팅 여부를 조절하는데 사용된다. *Number of neighbors*는 각 노드의 전송 범위 내에 있는 노드의 수를 의미한다. RREQ패킷은 RREQ 패킷이 중간 노드를 통해 전달되어 오면서 누적된 정보들을 갖는다. *ForwardNode*는 브로드캐스팅 종료 후 목적지에서부터 출발지까지 전송되는 RREP를 수신한 *node ID*가 되며, *Reverse Node*는 반대로 RREQ패킷을 수신한 이전 *node ID*가 된다.

표 2는 본 논문에서 새롭게 정의된 CR_RREQ 패킷의 구조를 보여준다. 기존의 AODV RREQ 패킷에 새롭게 정의된 영역들이 포함되어 있다. 새로 추가된 영역을 보면 *ACL_i*, *Mode Type*, *Mode Threshold*, *Average Common Channel Stability* 그리고 *Average Number of Common Channels* 이 있다. *ACL_i*는 *i*번째 노드의 가용 채널을 의미하며, *Mode Type*은 RREQ 패킷을 어떤

표 2. CR_RREQ 패킷 구조
 Table 2. CR_RREQ packet structure

Conventional AODV Fields			
Type	Flag	Reserved	HopCount
RREQ(Broadcast) ID			
Destination IP Address			
Destination Sequence Number			
Originator IP Address			
Originator Sequence Number			
CR_AODV Fields			
<i>ACL_i</i>			
<i>Mode Type</i>			
<i>Mode Threshold</i>			
<i>Average Common Channel Stability</i>			
<i>Average Number of Common Channels</i>			
<i>Stability Threshold</i>		<i>RREQ_Count</i>	
<i>Average Channel Threshold</i>			

동작 모드로 브로드캐스팅 할 것인지를 의미하며 소스노드에 의해 결정된다. *Mode Threshold*는 특정 동작 모드로 작동해야 할 제약조건을 의미한다. *Average Common Channel Stability*는 노드간의 전송이 가능한 중복되는 채널들의 평균 *stability*이고, *Average Number of Common Channels*은 중복 채널 개수의 평균값으로 RREQ 패키지가 목적지에 도착하였을 때, RREP를 보낼 데이터 통신 경로를 선택할 때 사용된다. *Average Channel Threshold*와 *RREQ_Count*, 그리고 *Stability Threshold*는 본 논문에서 제안하는 동작모드를 결정하는 변수들로서 3.2절에서 자세히 다루도록 한다.

3.2. 동작 모드 고려한 경로 탐색 알고리즘

본 논문에서는 세 가지 동작 모드를 기반으로 하는 경로 탐색 알고리즘을 제안한다. 무분별한 제어 메시지의 전송을 막기 위해 가용채널수, 지연시간, 주변 노드의 상황 및 채널의 안정성을 고려하였다. 각 동작 모드는 가용 채널수를 이용하는 기본 동작 모드로부터 채널상황을 고려하는 지연모드, 지연시간동안 전송되는 제어메시지의 수를 고려하는 향상된 채널 기반 지연 모드로 구성된다.

3.2.1. 기본동작 모드 (DOM : Default Operation Mode)

기본동작모드는 가장 기본이 되는 방식으로써, 일반적인 패킷 브로드캐스팅 방법이다. 그림 3에서 보이는 것과 같이 노드 *i*는 노드 *i-1*로부터 RREQ패킷을 받는다. 그러나 노드 *i*가 사용할 수 있는 채널과 노드 *i-1*이 사용할 수 있는 채널 중 중복되는 채널이 없기 때문에 데이터를 전송할 수 있는 채널이 존재하지 않는다. 따라서 노드 *i*는 경로로 사용될 수 없고, 그렇기 때문에 RREQ패킷을 브로드캐스팅 하지 않는다. 만약 이전 노드와 겹치는 채널이 하나라도 존재하면 브로드캐스팅을 수행한다. 이러한 특성으로 인해 경로를 설정하는 과정에서 RREQ 패킷 충돌이 빈번히 발생하는 문제점이 존재한다. 기본 동작 모드는 이어지는 다른 모드가 사용되었을 때 기본적으로 동작하게 된다.

3.2.2. 채널기반 지연모드 (CBM : Channel-based Back-off Mode)

채널기반 지연 모드는 CR네트워크에서 RREQ의 충돌을 제어하고 상대적으로 가치가 높은 RREQ를 빨리 전달하기 위해 채널 정보를 기반으로 RREQ

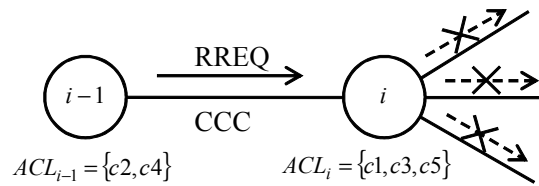


그림 3. 기본 동작 모드 예
Fig. 3. Example of Default Operation Mode

전송 지연을 차별화 시키는 방법이다. 각 노드는 이전 노드와 중복되는 가용채널의 수를 바탕으로 전송 지연을 수행한다. 노드 *i-1*에서 브로드캐스팅을 수행하면 *i*번째 노드들이 RREQ 패키지를 받게 된다. 이때 *i*번째 노드들은 자신의 가용채널과 RREQ를 보낸 이전 노드의 가용채널 중 중복되는 채널의 수를 얻게 되고, 중복되는 채널의 수를 바탕으로 지연시간을 갖은 후에 제어 메시지를 브로드캐스팅 하게 된다.

이때 지연시간을 결정하는 방법은 그림 4와 같다. CW_{max} (*maximum contention window*)는 시스템에서 제공하는 최대 지연시간이고 *N*은 RREQ를 보낸 이전 노드 *i-1*의 가용채널 수이며, *NCA* (*Number of Common Available Channels*)는 두 노드 *i-1*과 노드 *i* 사이에 가용채널의 수를 의미한다. 먼저 이전 노드의 가용채널 수로 CW_{max} 를 분할한 뒤 *NCA*의 값에 따라 CW 를 선택한다. 그림 4에서는 $N=5$, $NCA=3$ 이므로, CW_{max} 를 5개로 분할한 후 NCA 값에 따라 CW_3 이 선택되며,

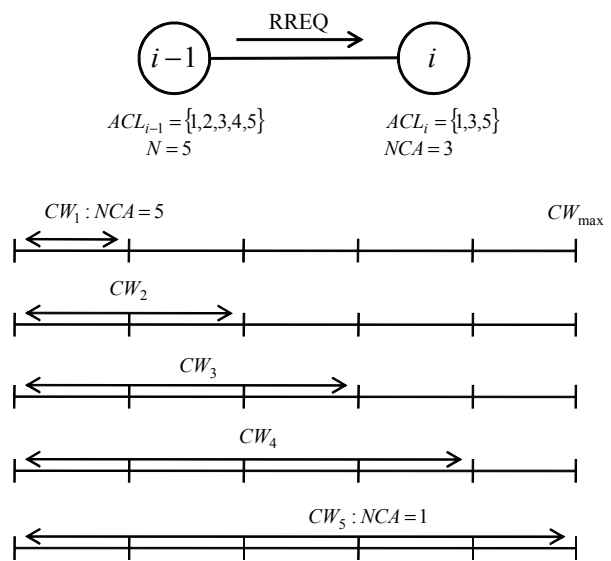


그림 4. 채널 기반 지연모드 예
Fig. 4. Example of Channel based Back-off Mode

노드 i 는 CW_3 의 범위 내에서 임의의 지연시간을 선택하여 패킷을 브로드캐스팅 하게 된다. 즉, 두 노드 사이에 가용 채널수(NCA)가 많을수록 해당 링크의 채널 상태가 우수한 것으로 간주하여 짧은 지연시간을 갖게 되고 채널수(NCA)가 적을수록 링크는 불안정한 것으로 간주되어 긴 지연시간을 갖게 된다.

지연 시간을 결정하는 방법을 일반화 하면 다음과 같다. 식 (1)은 모든 채널이 가용 채널인 경우 ($NCA=N$)이며, 식 (2)는 $N-1$ 개가 겹쳤을 경우를 나타낸다. 이러한 과정을 거쳐 일반화 시키면 식 (3)을 얻을 수 있다. 각 노드는 구해진 CW 의 범위 내에서 임의의 시간을 선택하여 지연 시킨 후 제어 메시지를 전송하게 된다.

$$CW_1 = [0 \sim \frac{CW_{max}}{N}], NCA = [N] \quad (1)$$

$$CW_2 = [0 \sim \frac{CW_{max}}{N} \times 2], NCA = [N-1] \quad (2)$$

$$CW_k = [0 \sim \frac{CW_{max}}{N} \times k], NCA = [N-k+1] \quad (3) \quad (1 \leq k \leq N)$$

3.2.3. 향상된 채널 기반 전송 모드 (A-CTM: Advanced Channel-based Transmission Mode)

향상된 채널 기반 전송 모드는 기본적으로 채널 기반 지연모드를 바탕으로 작동한다. 총 3가지의 단계가 있으며, 가용채널의 수, 지연 시간동안 수신한 제어 메시지의 수, 그리고 경로의 평균 stability값에 따라 브로드캐스팅의 유무가 결정된다. 세 단계를 모두 만족 시킬 경우에만 브로드 캐스팅이 수행되고, 각 단계의 문턱값(threshold)들은 소스노드가 경로를 요청하는 처음 단계에서 정해지며, 표 1에서 확인할 수 있다.

(1) Step 1: 가용 채널의 수

첫 번째 단계는 가용채널의 수에 의해 결정된다. 제어 메시지를 수신한 노드에서 이전 노드 사이의 사용 가능한 공통채널의 수(NCA)가 시스템에서 요구하는 문턱 값인 *Average Channel Threshold* 보다 크지 못하면 사용가능한 공통 채널이 존재함에도 불구하고 브로드캐스팅을 하지 않는다. 그림 5에서 보면, 노드 i 는 공통 가용채널의 수가 1개 존재하여 데이터를 전송할 수 있지만 문턱값을 넘지

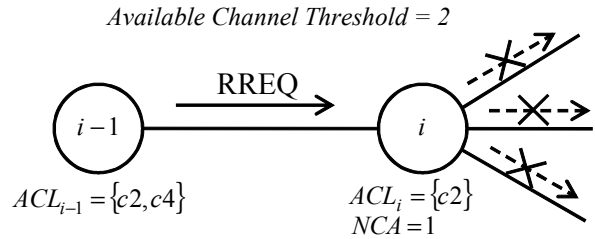


그림 5. A-CTM의 1단계 시나리오
Fig. 5. Scenario of Step1 in A-CTM

못하기 때문에 브로드캐스팅하지 않음을 볼 수 있다.

(2) Step 2: 지연시간동안 수신한 제어메시지 수

두 번째 단계는 지연 시간동안 수신된 제어 메시지의 수에 따라 브로드캐스팅의 유무가 결정된다. 즉, 채널기반 지연모드에 의해 전송이 지연된 노드는 지연 시간동안 주변 노드로부터 제어 메시지를 수신하게 된다. 이때 수신한 제어 메시지의 수가 시스템에서 요구하는 문턱값($RREQ_Count$) 보다 많게 되면, 주변에 경로로 사용될 수 있는 노드가 충분히 존재하는 의미이므로 브로드캐스팅을 하지 않게 된다.

그림 6에서 노드 b 는 노드 a 로부터 RREQ 패킷을 받고, 중복채널의 수가 1개뿐이기 때문에 채널기반 지연모드에 의하여 브로드캐스팅이 지연된다. 이때, 지연시간동안 노드 b 는 주변노드들인 노드 c , 노드 e , 노드 d , 노드 f 로부터 RREQ패킷을 수신하게 된다. 따라서 노드 b 는 지연시간동안 $RREQ_Count$ (Ex. 3)보다 많은 4개의 패킷을 수

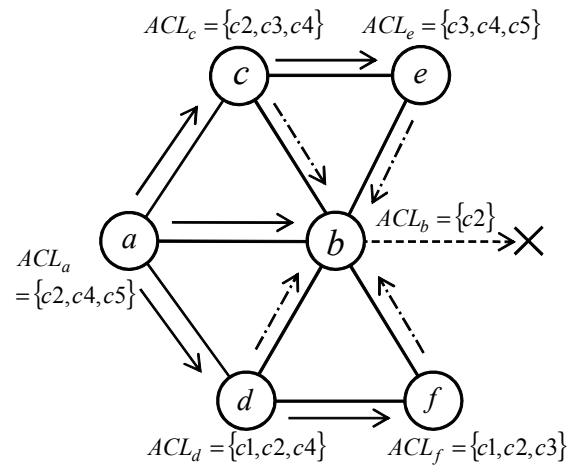


그림 6. A-CTM의 2단계 시나리오
Fig. 6. Scenario of Step 2 in A-CTM

신하였으므로 주변에 더 좋은 경로가 충분히 존재한다고 가정하고 브로드캐스팅을 하지 않는다.

(3) Step 3: 경로의 안정성

마지막 단계는 각 채널의 평균 stability에 의해 작동한다. 만약 평균 채널 stability가 특정 문턱 값인 *Stability Threshold*보다 작게 되면, 채널 상태가 좋지 않다고 판단하여 브로드캐스팅을 하지 않는다. 그림 7에서 노드 b의 평균 채널 stability는 0.3으로 *Stability Threshold*인 0.4보다 작기 때문에, 브로드캐스팅을 하지 않음을 보여준다.

향상된 채널 기반 전송 모드는 이와 같은 세 단계를 순서대로 적용하여 모든 단계를 만족할 경우, 제어 메시지를 주변 노드들에게 브로드 캐스팅 하게 된다. 향상된 채널 기반 지연모드는 많은 부사용자가 존재할 때 부사용자 사이에 발생하는 제어 메시지로 인한 혼잡도를 효율적으로 낮출 것으로 기대된다.

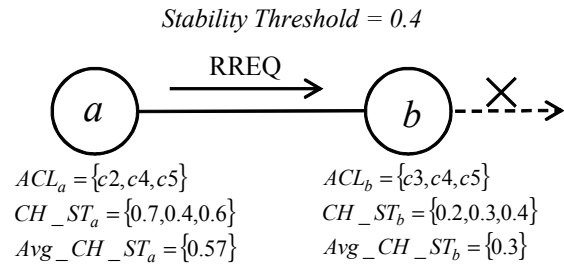


그림 7. A-CTM의 3단계 시나리오
Fig. 7. Scenario of Step3 in A-CTM

3.3. 경로 선택 (Path Selection)

소스 노드에서 RREQ패킷전송을 시작한 후 노드들을 거쳐 목적지 노드까지 도달하면, 목적지에서는 데이터 통신을 위한 경로를 선택하여야 한다. 만약 하나의 경로가 존재할 경우에는 경로 선택이 필요하지 않지만, 여러 경로가 존재할 경우에는 선택할 수 있는 기준이 필요하며, 목적지 노드는 *Average Common Channel Stability*와 *Average Number of Common Channels* 을 이용하여 경로를 선택하게 된다.

그림 8은 경로 선택 과정을 보여준다. 노드들은 가용채널과 각 채널에 대한 stability값을 갖는다. 노드간의 링크는 순서대로 L_1, L_2, L_3 이다. L_1, L_2, L_3 를 통해 계산되는 *Average Common Channel Stability* 는 식 (4), (5), (6)과 같다.

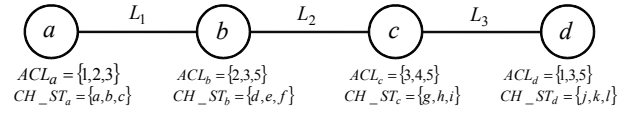


그림 8. 경로 선택 예
Fig. 8. Example of path selection

$$CS_2 = \frac{\left(\frac{b+d}{2}\right) + \left(\frac{c+e}{2}\right)}{1} \quad (4)$$

$$CS_3 = \frac{CS_2 + \left(\frac{e+g}{2}\right) + \left(\frac{f+i}{2}\right)}{2} \quad (5)$$

$$CS_4 = \frac{CS_3 + \left(\frac{g+k}{2}\right) + \left(\frac{i+l}{2}\right)}{3} \quad (6)$$

이 식을 일반화 시키면, k번째 노드까지의 *Average Common Channel Stability*는 식 (7)과 같다. CS_{k-1} 은 k-1번째 노드까지의 *Average Common Channel Stability*이고, CS_k 는 k번째 노드와 k-1번째 노드간의 중복 채널의 평균 안정도이다.

$$CS_k = \frac{CS_{k-1} + CS_{Lk}}{\text{hopcount} = k - 1} \quad (7)$$

*Average Number of Common Channels (ACC)*은 목적지 노드에 도달할 때까지 중간 노드들의 중복되는 가용 채널의 평균값이다. 그림 9에서의 각 노드사이의 *Common Channel (CC)*은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} CC_{L1} &= 2(\text{channel} : 2,3) \\ CC_{L2} &= 2(\text{channel} : 3,5) \\ CC_{L3} &= 2(\text{channel} : 3,5) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)로부터 k노드까지의 *ACC*는 식(9)를 통해 구할 수 있다.

$$ACC_k = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} OC_{Li}}{\text{hopcount} = k - 1} \quad (9)$$

식 (7)과 식 (9)를 바탕으로 목적지 노드에서는 식(10)을 이용하여, 여러 가지 경로들 중에서 최적 경로를 선택하게 된다.

$$\text{Path Decision} = \alpha \times CS_k + (1 - \alpha) \times ACC_k \quad (10)$$

α 는 0과 1 사이의 값을 갖는 변수로써, CS_k 또는 ACC_k 중에서 목적지 노드에서 경로를 선택할 때 가중치를 둘 수 있다. α 값이 0.5보다 클 경우 중복 채널의 수 보다는 가용 채널들의 stability를 중요하게 여김으로써, 데이터 통신 중 사용하는 채널에 대한 주사용자의 개입이 작아짐으로써 사용하는 채널의 변화확률이 낮아져서 경로가 끊어지는 확률이 줄어들 것이다. 반대로 α 값이 0.5보다 작을 경우에는 데이터 통신 중 사용하고 있는 채널이 주사용자의 개입에 의해 사용하지 못하게 되더라도 다른 가용 채널을 이용하여 경로의 끊어짐 없이 데이터통신을 계속 할 수 있는 장점이 있을 것이다.

그림 9는 제안하는 알고리즘의 의사코드를 나타낸다.

IV. 시뮬레이터 구조 및 구현

시뮬레이터는 MATLAB을 이용하여 구현하였으며, 시뮬레이터의 구조는 그림 10에서 확인할 수 있다. 개발된 시뮬레이터는 크게 “Topology Control”과 “Routing Control” 두 부분으로 나누어져 있으며, Topology Control에서는 노드생성과 채널 할당에 대한 여러 변수들을 설정할 수 있다. Routing Control에서는 동일 조건하에 각 모드에 대한 RREQ 패킷 브로드캐스팅을 통해 패킷량과 충돌량을 확인할 수 있다.

그림 11은 Routing Control 실행화면이다. 왼쪽

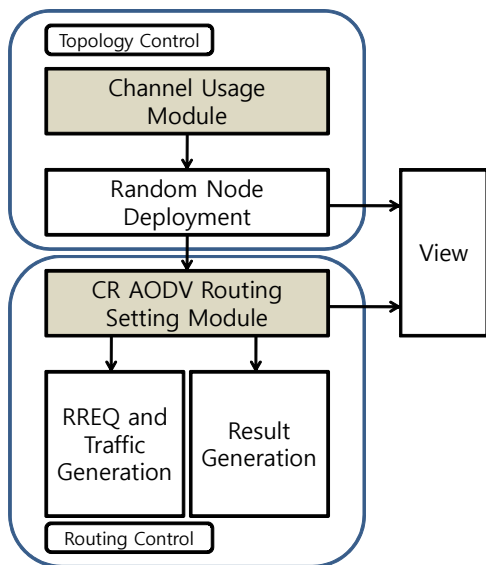


그림 10. 시뮬레이터 구조도
Fig. 10. Simulator architecture

```

At each node :
WHILE(1)
  FOR ALL  $i$ , where  $i \in \{SU_i\}$ ,
    Hello_packet_exchange()
    make_local_Table();
    /* update recent channel information based on Hello
    packet */
  END FOR
END WHILE

At source node :
mode_decision(); /* source determine operation mode */
make_RREQ_packet(); /* initialize RREQ packet */
broadcast_RREQ_packet(); /* broadcast RREQ packet */

At intermediate nodes :
node  $n$  received RREQ from node  $n-1$ 
IF  $n$  is DestNode THEN
  path_selection();
  send_RREP_packet();
  BREAK.
ELSE IF Operation Mode is DOM THEN
  IF common available channel exists THEN
    broadcast_RREQ_packet();
    BREAK
  END-IF
ELSE IF Operation Mode is CBM THEN
  compared_number_of_common_channel();
  IF no common available channel exist THEN
    BREAK
  END-IF
  sel_CW();
  wait_time();
  IF back-off time reaches THEN
    broadcast_RREQ_packet();
  END-IF
ELSE IF Operation Mode is A-CTM THEN
  IF  $n$ 's number of available channel > Avg_Ch_TH
  AND /*step 1*/
    number of receive RREQ packet < RREQ_Count
  AND /*step 2*/
    average channel stability > Stability_TH THEN
  /*step 3*/
    broadcast_RREQ_packet();
    BREAK.
  END-IF
END-IF
  
```

그림 9. 제안하는 방법의 의사 코드
Fig. 9. Pseudo code of proposed scheme

위에서부터 시계방향으로 기본동작모드, 채널기반 지연모드, 향상된 채널 기반 전송 모드의 패킷 전송 과정을 보여준다. 각 화면에서 푸른 원은 주사용자

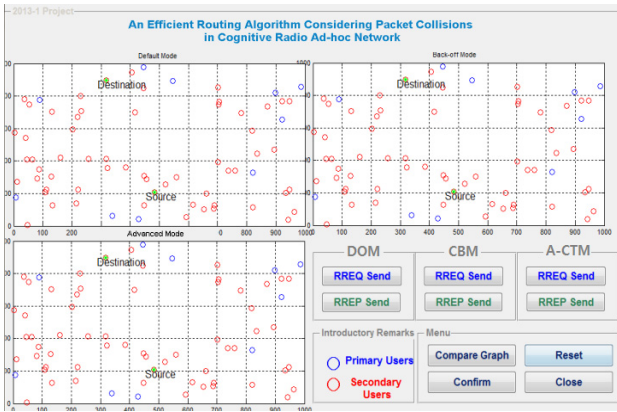


그림 11. 시뮬레이터 실행 화면
Fig. 11. Simulator

를 나타내며, 붉은 원은 부사용자를 나타낸다. 각 모드의 RREQ 버튼을 누르면 소스노드에서 RREQ 패킷 전송을 시작하며, RREQ 전송이 완료된 후 RREP send 버튼을 누르면 목적지 노드에서 RREP 패킷 전송을 시작한다.

그림 12는 RREP 패킷과 RREQ 패킷 전송을 완료한 모습이다. 노드 형성 및 패킷 전송 과정은 다음과 같다.

- i) 먼저 SU와 PU가 무작위로 생성되며, 주어진 파라미터를 기반으로 전송 범위가 결정된다.
- ii) 주사용자는 평균과 분산값을 바탕으로 정규분포에 따라 무작위로 가용 채널과 각 채널의 Stability가 결정된다.
- iii) 부사용자는 전송 범위 안에 있는 주사용자들을 센싱하고, 근접한 주사용자들 사용하지 않는 중인 채널을 할당받는다. 주사용자와 마찬가지로 채널에 대한 Stability가 결정된다.
- iv) RREQ 전송을 시작하면, 소스노드는 주변 노드로 패킷을 전송하고 파란 선으로 연결된다. 이때 충돌이 발생한 패킷은 붉은 선으로 연결되며 해당 노드는 검정색으로 표시한다.
- v) RREQ 브로드캐스팅이 끝난 후 경로가 존재하면 경로가 검정색 점선으로 연결되며, "Path Found"라는 문구가 형성된다. 반대로 경로가 존재하지 않을 경우 "No Path Found" 문구가 형성된다.

V. 성능 평가

본 장에서는 제안된 경로탐색방법의 성능을 검증하기 위하여 다양한 환경에서의 모의실험을 수행하였다. 표 3은 시스템에서 사용하는 기본적인 변수들

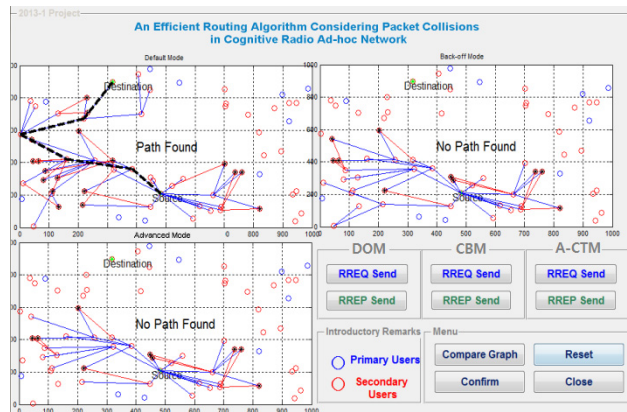


그림 12. 경로 탐색 수행 후 결과
Fig. 12. Result of route discovery

이며, 식 (11)은 경로감쇄 모델을 기반으로 주사용자와 부사용자의 지역 센싱 범위를 결정하는 수식이다. 장애물이 없는 공간을 가정하여 실험을 진행하였고 이에 따라 경로감쇄지수(β)값을 3으로 설정하게 되었다. 각 모드의 성능을 비교하기 위해 표 4와 같이 부사용자의 수와 채널 분포를 위한 평균값, 그리고 분산 값을 변화시키며 50번의 데이터를 측정하였다. 그 외의 변수들은 모두 다음과 같이 일정하게 유지시켰다. ($PU=10, \beta=5, K=0.7, P_t=10000, P_r=-50, O_Count=1, R_Count=3, Avg_Ch_St=0.4, \text{Number of Channels}=10$)

실험에서는 Mean과 Variance값을 이용하여 주사용자가 사용하는 채널의 수를 설정하였다. 정규분포를 이용하여 주사용자의 채널을 할당 하였는데 이때 Mean값은 주사용자가 평균적으로 사용하는 채널의 수를 의미한다. 즉, Mean값이 클수록 주사용자는 보다 많은 채널을 점유하게 되고 이에 따라

표 3. 시스템 파라미터
Table 3. System parameter

Nm_PU	Number of PU
Nm_SU	Number of SU
P_t	Transmission Power
P_r	Receive Power
$Mean$	Mean for allocation PU's ch
$Variance$	Variation for allocation PU's ch
β	Path Loss Exponent
K	Constant
O_Count	Step 1 value
R_Count	Step 2 value
Avg_Ch_St	Step 3 value

부사용자는 사용할 수 있는 채널의 수가 줄어들게 된다. 주사용자의 사용 패턴이 부사용자의 채널 환경에 미치는 영향을 확인하기 위해서 Mean값을 두 가지 경우(2와 4)로 나누어 실험을 진행하였다.

$$Coverage = \left(k \frac{P_t}{P_r}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

Case 1은 부사용자의 개수를 60개로 고정시킨 상태에서의 실험 결과를 보여준다. 위에서부터 기본 동작 모드, 채널기반 지연모드, 향상된 채널 기반 전송 모드를 나타내며, 두 경우 모두 패킷량과 충돌량이 감소함을 확인할 수 있다. 그러나 경로 발견 성공률의 경우 기본동작 모드가 가장 높음을 확인할 수 있다. Case 2는 부사용자의 개수를 80개로 고정시킨 후 Case 1과 마찬가지로 Mean과 Variance값만 바꾸어 측정하였다. 80개를 측정하였을 때 역시 Case 1과 마찬가지로 패킷량과 충돌량은 감소하였지만, 경로 발견 성공률은 기본동작 모드가 가장 높게 측정됐다. Case 3은 앞의 두 경우들과 똑같은 조건 아래 부사용자의 수를 100개로 바꿔 측정된 결과이다. 패킷량과 충돌량의 경우 앞의 경우들과 마찬가지로 감소하는 경향을 보였다. 하지만 Case1과 Case2와는 반대로 경로 발견 성공률이 채널기반 지연모드와 향상된 채널 기반 전송 모드가 기본동작 모드에 비해 높게 측정되었다. Case 4는 앞의 경우들과 같은 조건하에 부사용자의 수를 120개로 늘려서 측정했다. 앞의 세 가지 경우와 마찬가지로 패킷량과 충돌량은 감소하였지만, Case 3과 마찬가지로 경로 발견 성공률에 있어서 채널기반 지연모드와 향상된 채널 기반 전송 모드가 기본동작 모드보다 높은 성공률을 보였다. 마지막으로 Case 5는 앞의 경우들과 같은 조건하에 부사용자의 수를 140개로 늘려서 측정했다. 앞의 네 가지 경우와 마찬가지로 패킷량과 충돌량은 감소하였지만, Case 3, 4와 마찬가지로 경로 발견 성공률에 있어서 채널기반 지연모드와 향상된 채널 기반 전송 모드가 기본동작 모드보다 높은 성공률을 보였다.

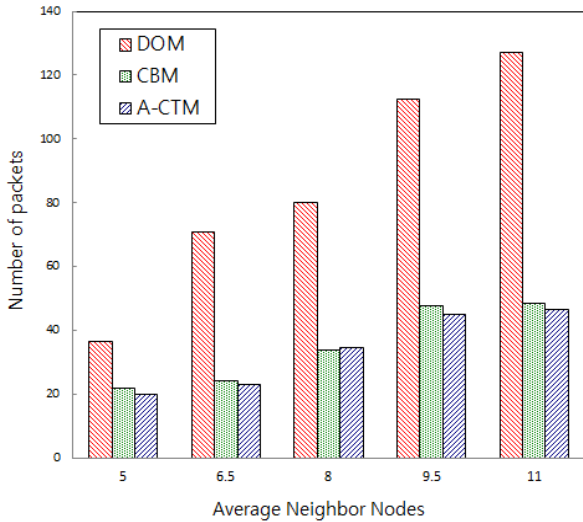
그림 13(a)와 (b)는 mean과 variance값이 2와 4 일 때, 평균 주변 노드수의 변화에 따른 각 동작 모드의 패킷량을 나타낸 그래프이다. Mean과 Variance값에 관계없이 평균 주위 노드의 수가 증가할수록 기본 동작 모드의 패킷량은 급격히 증가하며, 채널기반 지연모드와 향상된 채널 기반 전송

표 4. 시뮬레이션 결과 표
Table 4. Simulation Result.

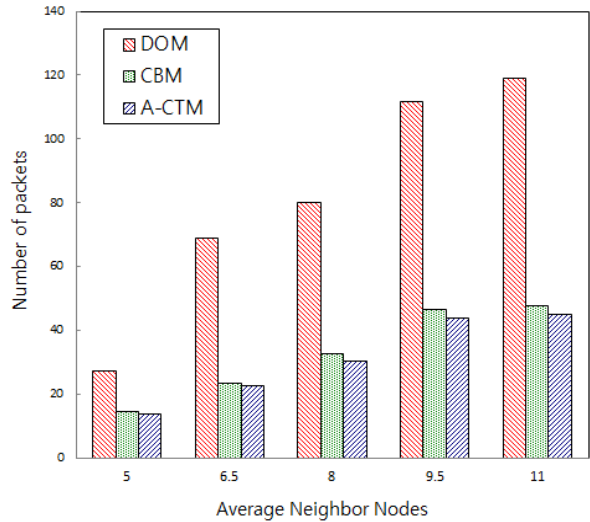
Mode	Flooding	Collisions	Path Finding
Case1 : SU 60, average neighbor node=5			
M=V=2			
DOM	36.5	8.8	60%
CBM	21.8	4.4	34%
A-CTM	20.0	3.8	30%
M=V=4			
DOM	27.2	6.8	52%
CBM	14.3	2.8	26%
A-CTM	13.7	2.3	24%
Case2 : SU 80, average neighbor node=6.5			
M=V=2			
DOM	70.8	24.3	45%
CBM	24.1	6.7	38%
A-CTM	23	6.2	37%
M=V=4			
DOM	68.7	24.1	39%
CBM	23.2	6.3	34%
A-CTM	22.7	6.0	32%
Case3 : SU 100, average neighbor node=8			
M=V=2			
DOM	80.1	29.4	32%
CBM	33.8	10.1	40%
A-CTM	34.7	10.1	40%
M=V=4			
DOM	79.9	29.4	42%
CBM	32.7	8.5	52%
A-CTM	30.3	7.9	50%
Case4 : SU 120, average neighbor node=9.5			
M=V=2			
DOM	112.4	43.9	25%
CBM	47.6	12.5	42%
A-CTM	45.1	12	42%
M=V=4			
DOM	111.7	42.2	33%
CBM	46.4	10.3	55%
A-CTM	43.9	9.9	54%
Case5 : SU 140, average neighbor node=11			
M=V=2			
DOM	127	57.35	20%
CBM	48.45	14.9	48%
A-CTM	46.5	12.35	46%
M=V=4			
DOM	119.15	56.8	30%
CBM	47.65	12.25	56%
A-CTM	45.1	11.85	58%

모드의 경우에는 평균 주위 노드의 수가 증가할수록 패킷량이 기본 동작 모드에 비해 크게 증가하지 않는 것을 볼 수 있다.

그림 14(a)와 (b)는 mean과 variance값이 2와 4

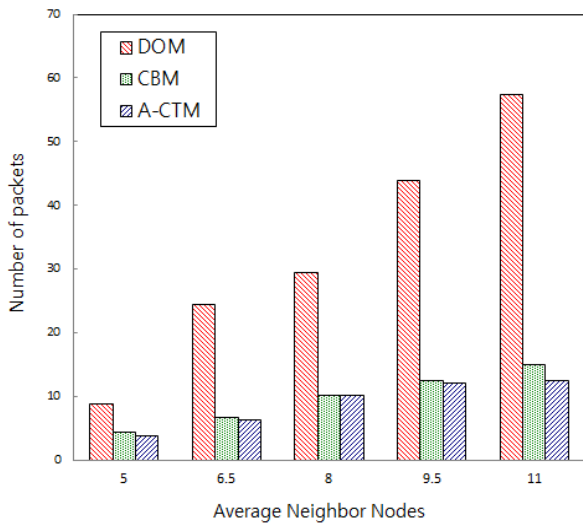


(a) mean=var=2일 때의 패킷량

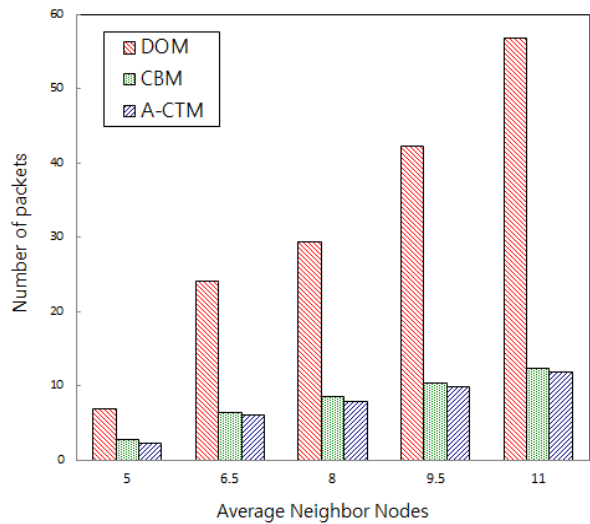


(b) mean=var=4일 때의 패킷량

그림 13. 평균과 분산에 따른 패킷의 수
Fig. 13. Number of packets with mean and variance



(a) mean=var=2일 때의 패킷량



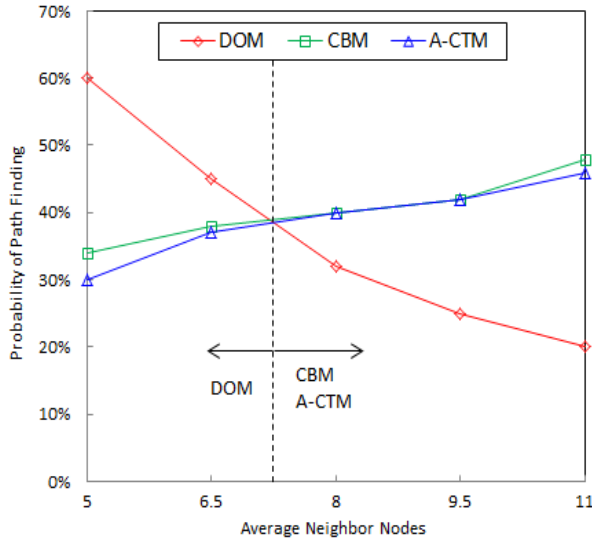
(b) mean=var=4일 때의 패킷량

그림 14. 평균과 분산에 따른 충돌의 수
Fig. 14. Number of collisions with mean and variance

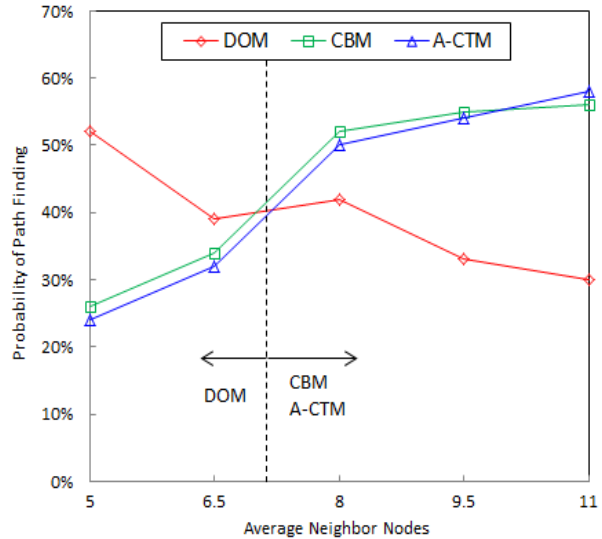
일 때의 평균 주변 노드수의 변화에 따른 각 동작 모드의 패킷 충돌량을 보여주는 그래프이다. 그림 13과 유사하게 기본 동작 모드에서는 패킷 충돌수가 급격하게 증가하였지만, 채널기반 지연모드와 향상된 채널 기반 전송 모드는 상대적으로 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 많은 제어 메시지가 네트워크상에 전송 될수록 패킷 충돌량 또한 증가함을 알 수 있다. 또, 그림 13과 그림 14로부터 주사용자의 채널 할당을 위한 mean과

variance값이 패킷량과 충돌량에 큰 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다.

그림 15(a)는 mean과 variance값이 2일 때, 그림 15(b)는 mean과 variance값이 4일 때의 평균 주변 노드 숫자에 따른 각 동작 모드의 경로 발견 성공률을 보여준다. 그래프의 결과에 따르면 평균과 분산값에 상관없이 평균 주변 노드 숫자가 약 7개일 경우를 기점으로 결과가 반전됨을 알 수 있다. 평균 주변 노드의 수가 7개보다 적을 경우에는 기본 동



(a) mean=var=2일 때의 패킷량



(b) mean=var=4일 때의 패킷량

그림 15. 평균 이웃 노드 수에 따른 경로 탐색 성공 확률
Fig. 15. Probability of path finding with average neighbor nodes

작 모드에서 더 높은 경로 탐색 성공률을 보이지만, 평균 주변 노드의 수가 7개보다 많아질 경우에는 채널기반 지연모드와 향상된 채널 기반 전송 모드에서 더 높은 경로 탐색 성공률을 보인다. 부사용자가 많이 존재할 때, 즉 평균 주위 노드의 숫자가 클 경우, 네트워크상에 전송되는 패킷의 양이 많아져서 패킷 충돌량이 증가하게 되고, 그에 따라 경로 탐색 성공률이 감소하게 되므로 채널기반 지연모드와 향상된 채널 기반 전송 모드가 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 반대로 부사용자의 숫자가 적을 경우에는 패킷 전송량이 줄어들어 충돌량이 감소하게 되고 이에 따라 경로 탐색 성공률은 증가하게 되어 기본 동작 모드가 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 이와 같이 세 가지 동작 모드 중에서 최적의 모드를 선택하기 위해서는 주변 이웃 노드의 수를 이용하게 된다. 본 실험 환경에서는 주변 이웃 노드의 수가 7일 때를 기준으로 최적의 동작 모드를 선택하게 된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 AODV기반 인지 무선 애드 혹 네트워크에서 협소대역 공통 제어 채널에서 전송되는 제어 메시지 패킷들 간의 충돌을 감소시키는 효율적인 경로탐색 알고리즘을 제안하였다. 기존의 라우팅 알고리즘에서는 경로를 찾기 위한 제어메시지

의 전송 과정에서 발생하는 제어 메시지 간의 충돌을 고려하지 않고 있다. 이에 반해 제안된 알고리즘은 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 세 가지 동작 모드를 사용하며, 많은 부사용자가 존재하는 혼잡한 네트워크 환경에서도 패킷 충돌을 감소시킬 수 있다. 가용채널 수와 지연시간 동안에 주변 노드의 상황을 고려함으로써 제어 메시지의 전송을 관리하게 되고 이는 제어 메시지의 수를 효율적으로 관리함으로써 협소 대역인 공통 제어 채널에서의 패킷 충돌의 감소와 라우팅 알고리즘의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

또한, 모의실험을 통하여 주변 노드의 숫자에 따라 데이터 통신을 위한 경로 설정에 있어 서로 다른 특성을 보였다. 즉, 주변 노드의 숫자가 적을 경우에는 기본동작 모드가 더 좋은 성능을 보였으며, 주변 노드의 숫자가 클 경우에는 채널기반 지연모드와 향상된 채널 기반 전송 모드가 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있었다. 제안된 알고리즘을 적용하여 적절한 동작모드를 선택하여 효율적인 데이터 통신 경로 설정을 할 수 있으며, 그에 따라 부사용자들이 가용 주파수 대역을 효율적으로 사용할 수 있을 것이다.

본 연구를 통하여 재난, 재해 시 긴급 네트워크, 군 통신 등과 같은 다양한 응용 분야에 유용하게 적용할 수 있을 것이며, 또한 주파수 부족 현상을 해결할 수 있을 것이다. 또한, 주어진 조건이 바뀔

다면 결과도 다르게 나올 것이기 때문에 이 알고리즘에 대한 후속적인 연구가 더 필요할 것이다. 본 연구를 바탕으로 인지무선기술과 패킷 충돌량 감소 및 경로 탐색 성공률에 대한 연구가 기대된다.

References

- [1] FCC, *Spectrum policy task force report*, ET Docket No. 02-155, Nov. 2002.
- [2] FCC, *Notice of Rule Making and Order*, ET Docket No. 03-322, Dec. 2003.
- [3] J. Mitola III, "Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio," Ph.D. dissertation, Royal Inst. Technol., Sweden, May 2000.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, and K. R. Chowdhury, "CRAHNs: Cognitive Radio Ad Hoc Networks," *Ad Hoc Networks*, vol 7, no. 5, pp. 810-836, July 2009.
- [5] Q. Wang and H. Zheng, "Route and spectrum selection in dynamic spectrum networks," in *Proc. IEEE Consumer Commun. Networking Conf. (CCNC 2006)*, pp. 625-629, Las Vegas, U.S.A, Jan. 2006.
- [6] J. So and N. Vaidya, "A routing protocol for utilizing multiple channels in multi-hop wireless networks with a single transceiver," *Technical Report of Univ. Illinois Urbana-Champaign*, Oct. 2004.
- [7] G. Cheng, W. Liu, Y. Li, and W. Cheng, "Spectrum aware on-demand routing in cognitive radio networks" in *Proc. IEEE Consumer Commun. Networking Conf. (CCNC 2006)*, pp. 571-574, Las Vegas, U.S.A, Jan. 2006.
- [8] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) routing*, Request for Comments (RFC) 3561, July 2003.
- [9] S. Mahamuni, V. Mishra, and V. M. Wadhai, "Performance evaluation of AODV routing protocol in cognitive radio Ad-hoc network," *Int. J. Wireless Mobile Networks (IJWMN)*, vol. 3, no. 5, pp. 65-74, Oct. 2011.

김진수 (Jin-Su Kim)



2008년 3월~현재 인하대학교
정보통신 공학과 학사과정
<관심분야> Cognitive Radio,
Ad-hoc network, Routing
protocol

최준호 (Jun-Ho Choi)



2012년 2월 인하대학교 정보통신
공학박사(공학사)
2012년 3월~현재 인하대학교
정보통신 공학과 석사과정
<관심분야> Sensor Network,
CR ad-hoc Network, Routing
protocol

신명진 (Myeong-Jin Shin)



2007년 3월~현재 인하대학교
정보통신 공학과 학사과정
<관심분야> Ad-hoc network,
Cognitive Radio,

이지선 (Ji-Seon Lee)



2009년 3월~현재 인하대학교
정보통신 공학과 학사과정
<관심분야> Routing protocol,
Cognitive Radio,

유 상 조 (Sang-Jo Yoo)



1988년 2월 한양대학교 전자
통신학과(공학사)

1990년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과(공학석사)

2000년 8월 한국과학기술원 전
자전산학과(공학박사)

1990년 3월~2001년 2월 KT 연

구 개발본부

2001년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수
<관심분야> 초고속 통신망, 무선 MAC 프로토콜, 인
터넷 QoS, Cross-layer 프로토콜 설계, Cognitive
Radio Network