

## 교차 계층 설계 기법을 사용한 새로운 AODV 라우팅 프로토콜 설계 및 성능평가

장재신<sup>1\*</sup> · 위성홍<sup>2</sup>

### Performance Evaluation of the new AODV Routing Protocol with Cross-Layer Design Approach

Jaeshin Jang<sup>1\*</sup> · Sunghong Wic<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Professor, Department of Electronic Telecommunications Mechanical & Automotive Engineering, Inje University, Gimhae, 50834 Korea

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Electrical and Electronic Engineering, The Cyber University of Korea, Seoul, 03051 Korea

#### 요 약

본 논문에서는 이동 애드혹 네트워크에서 널리 사용되는 AODV 라우팅 프로토콜과 통신 노드의 이동성 때문에 발생하는 통신 경로 단절 등의 문제를 해결하기 위해 다중 경로설정을 지원하는 AODV 기법을 기반으로 개선된 다양한 연구 결과들을 분석한다. 그리고 AODV 기법이 사용하는 홉 기반 라우팅 기법의 문제점을 분석하고, 이를 개선하기 위해 홉 수를 주 메트릭으로 사용하면서 보조 메트릭으로 경로 지연시간의 합을 사용하는 새로운 C-AODV 라우팅 프로토콜을 설계하고, NS-3 네트워크 시뮬레이터에 구현하여 성능평가를 수행한다. 컴퓨터 시뮬레이션 성능평가 결과를 토대로 C-AODV 기법이 기존 AODV 기법과 비교하여 성능이 어느 정도 개선되는지 비교 분석하고 앞으로 개선할 사항 등을 제시한다.

#### ABSTRACT

In this paper, we describe recent research results on AODV routing protocol, which is widely deployed at mobile ad hoc networks, and AODV related routing protocols with multi-path routing schemes. We suggest the critical problems which minimum hop routing schemes have, such as AODV routing protocol, and then, propose a new C-AODV routing protocol with two routing metrics: the primary metric is the hop count, the secondary metric is the sum of link delay times. We implemented C-AODV protocol by modifying AODV at the NS-3, and thus, elaborate on how we change the original AODV source code of NS-3 in order to implement the C-AODV scheme. We show numerical comparison of C-AODV scheme with the original AODV scheme and then, discuss how much the C-AODV enhances routing performance over AODV protocol. In conclusion, we present future research items.

**키워드** : C-AODV, NS-3, RREQ, 라우팅 프로토콜, 이동 애드혹 네트워크

**Keywords** : C-AODV, NS-3, RREQ, routing protocols, mobile ad hoc networks

Received 3 March 2020, Revised 19 March 2020, Accepted 2 April 2020

\* Corresponding Author Jaeshin Jang(E-mail:icjoseph@inje.ac.kr, Tel:+82-55-320-3520)

Professor, Department of Electronic Telecommunications Mechanical and Automotive Engineering, Inje University, Gimhae, 50834 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.6.768>

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. 서론

기존 AODV(ad-hoc on-demand distance vector) 라우팅 프로토콜은 임의의 두 통신 노드 사이(홉)의 무선 전송 링크 품질이 모두 같다고 가정하여 송신 노드와 목적지 노드 사이의 홉 수가 최저가 되는 라우팅 경로를 선택하는 것이다[1]. 이러한 유형의 라우팅 프로토콜을 MHR(minimum hop routing) 기법이라고 한다. 그러나 이러한 접근은 통신 기술의 발달로 통신 노드 사이의 무선 전송 링크 품질을 크게 개선하고, 또 다양해진 최신의 연구 결과를 제대로 반영하지 못한다는 문제점을 갖고 있다. 즉, 노드 A와 노드 C가 직접 통신을 하는 그림 1과 같은 예를 고려해보자. 두 노드는 멀리 떨어져 있어서 가장 낮은 속도인 6 Mbps로 통신하고 있다고 가정하자. 이때 두 통신 노드의 사이에 있는 통신 노드 B가 패킷 릴레이와 같은 도움 노드 역할을 해주면 노드 A와 노드 B, 그리고 노드 B와 노드 C 사이의 채널 속도가 54 Mbps로 매우 우수하므로 노드 A-C로 이루어지는 기존 라우팅 경로 대신 노드 A-B-C로 구성된 새로운 라우팅 경로를 사용하면 전체적으로 시스템 처리량을 증가시킬 수 있다는 것이 협력통신의 기본 개념이다[2]. 애초 협력통신 개념은 물리계층과 데이터링크 계층에서 주로 연구를 했지만, 이 개념을 네트워크 계층에 적용해도 성능향상을 달성할 수 있음을 어렵지 않게 생각할 수 있다. 따라서 네트워크 계층에서도 협력통신 개념을 적용하여 홉 기반이 아니라 통신 경로 품질이 우수한 라우팅 경로를 선택하여 사용하면 시스템 처리량 향상을 달성할 수 있을 것으로 생각되어 본 연구를 진행하였다.

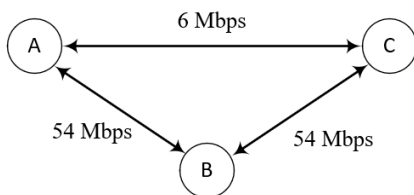


Fig. 1 Simple communication example

II장에서는 AODV 라우팅 프로토콜 동작에 대해서 살펴보고, AODV 프로토콜에 기반을 두고 진행된 다양한 연구 결과들을 정리하였다. III장에서는 본 논문에서 제안한 라우팅 프로토콜의 동작 원리를 기술하였고, NS-3 네트워크 시뮬레이터에 구현하기 위해 수정한 부

분을 자세하게 설명하였다. IV장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성능평가를 수행한 뒤 성능평가 결과를 기존 AODV 프로토콜과 비교 분석하였으며, V장에서 결론으로 본 논문을 끝맺는다.

## II. 관련 연구 동향

이동 애드혹 네트워크는 인프라 네트워크를 사용하지 않고 통신 노드가 인접 통신 노드와 패킷을 직접 통신하는 네트워크 구조이므로 송신 노드가 멀리 떨어져 있는 목적지 노드와 통신하기 위해서는 여러 통신 노드들로 구성된 통신 라우팅 경로를 설정하는 라우팅 프로토콜이 필요하다. 그리고 이동 애드혹 네트워크는 통신 노드들의 이동성 때문에 라우팅 프로토콜은 수시로 통신 경로를 재설정하는 기능을 갖추고 있어야 한다. AODV 프로토콜은 이동 애드혹 네트워크에서 송신 노드와 목적지 노드 사이의 패킷 전송 경로를 설정하기 위해 널리 사용되는 네트워크 계층 프로토콜이다[1]. AODV 프로토콜은 on-demand 기법을 사용하는 라우팅 기법으로 송신 노드에서 전송할 패킷이 발생했을 때 목적지 노드와 RREQ(route request)와 RREP(route reply) 제어 패킷을 교환하여 통신 경로를 설정한다. 통신 경로를 설정하는 과정에서 경로 루프가 발생하는 것을 방지하기 위해 두 개의 계수기(counter)를 관리하는데 broadcast ID와 시퀀스 번호이다. 송신 노드는 새로운 RREQ 패킷을 전송할 때마다 broadcast ID 값을 증가하며 <송신 노드 주소, broadcast ID> 세트를 이용하면 신규 RREQ 패킷과 이전 RREQ 패킷을 구분할 수 있다. 또한, 신규 RREQ 패킷을 전송하기 전이나 목적지 노드로서 RREP 패킷을 전송하기 전에 시퀀스 번호를 증가시키는데, 이것은 시퀀스 번호를 사용하여 최신 경로 정보 진위를 판단하기 위함이다. RREQ 패킷과 RREP 패킷의 구조를 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

송신 노드가 전송한 RREQ 방송 패킷을 수신한 인접한 통신 노드들이 RREQ 패킷을 다시 인접 노드로 전송할 때마다 그림 4와 같은 역방향 통신 경로가 생성된다. 한편 목적지 노드가 RREQ 패킷을 수신하면 RREP 패킷을 생성하여 송신 노드에게 전송한다. RREP 패킷은 제일 먼저 도착한 RREQ 패킷의 역방향 전달경로를 따라서 유니캐스트 방식으로 송신 노드로 전달되며, RREP

패킷이 이동할 때마다 송신 노드와 목적지 노드가 사용할 순방향 경로가 그림 5와 같이 설정된다.

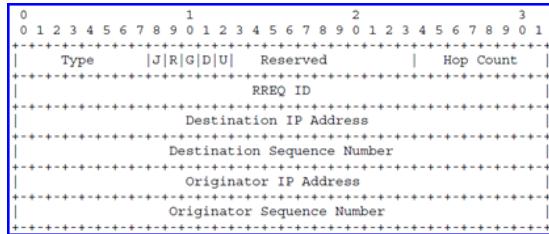


Fig. 2 RREQ packet format

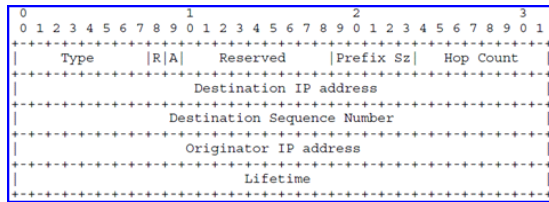


Fig. 3 RREP packet format

순방향 경로로 설정되지 못한 나머지 후보 역방향 경로들은 유효시간 이후에 삭제되며, RREP 패킷이 송신 노드에 도착하면 송신 노드와 목적지 노드 사이에 양방향 통신 경로 1개 설정이 완성된다. 목적지 노드는 가장 먼저 도착한 RREQ 패킷에 대해서만 응답하며, 그 이후에 도착하는 동일한 <송신노드 주소, broadcast ID> 값을 갖는 RREQ 패킷들은 모두 폐기한다.

이동 애드혹 네트워크는 통신 노드들의 이동성 때문에 통신 경로가 계속 변하고 있어서 통신 경로의 신뢰성을

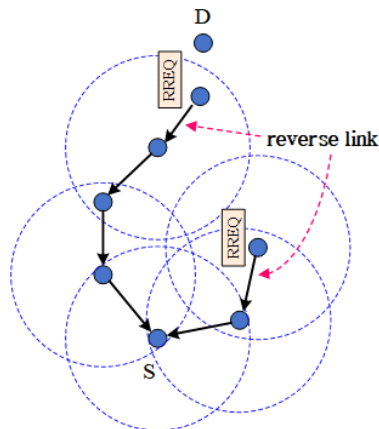


Fig. 4 Example of reverse route setup

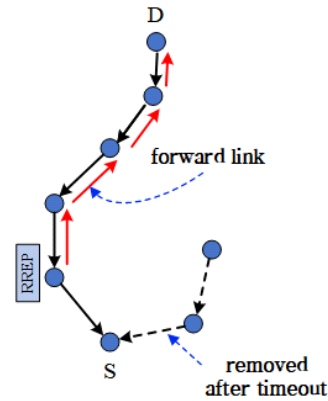


Fig. 5 Example of forward route setup

을 높이고 멀티 홉 환경에서 시스템 처리량을 높이는 것이 아주 중요하다. 통신 경로의 신뢰성을 높이기 위한 연구가 많이 진행되었는데 AODV 프로토콜을 이용한 대표적인 몇 가지 연구 결과를 아래에 기술하였다.

논문[3]에서는 독립적인 노드-분리 라우팅 경로를 설정할 수 있는 AODVM(AODV-multipath) 기법을 제안하였다. 해당 기법을 실현하기 위해서는 각 통신 노드에서 RREQ 패킷을 수신할 때마다 RREQ 테이블을 만들어서 관리하며, 목적지 노드로부터 RREP 응답 패킷을 수신하면 RREQ 테이블에 있는 해당 경로 정보를 라우팅 테이블로 복사하여 저장한다. 송신 노드가 RREP 응답 패킷을 수신하면 RRCM(route confirmation) 패킷을 목적지 노드에 전송하며, 2개 이상의 노드-분리 통신 경로를 만들기 위해 각 통신 노드들은 주변 통신 노드에서 RREP 응답 패킷 전송을 감지하면 RREQ 테이블에서 주변 통신 노드 관련 정보를 모두 삭제한다. 그러나 통신 네트워크 내에 통신 노드 개수가 충분하지 않을 때는 독립적인 노드-분리 라우팅 경로를 찾을 수 없을 수도 있다. 이러면 다른 노드보다 처리능력과 신뢰도가 높은 R-노드를 배치하고 R-노드를 통과하는 노드-분리 라우팅 경로를 설정하도록 하였다. 그러나 R-노드를 배치하는 방법과 수정된 RREQ와 RREP 패킷 구조를 제시하지 않아서 실현 실효성에는 의문이 생긴다.

논문[4]에서는 멀티 홉 무선 네트워크 환경에서 새로운 ETX (expected transmission count) 메트릭을 사용하여 시스템 처리량을 최대로 할 수 있는 라우팅 경로를 설정하는 방법을 제안하였다. ETX 메트릭을 계산하기 위해서는 순방향과 역방향의 패킷 전달률(delivery ratio)

을 측정해야 하며 패킷 전달률을 측정하기 위해서는 링크 레벨에서 새로운 프로브(probe) 패킷을 도입하여 방송기법으로 전송해야 한다.

논문[5]에서는 AODV 라우팅 프로토콜을 사용하는 애드혹 네트워크 환경에서 패킷 전송손실을 줄이기 위해 네트워크 코딩 기법을 결합한 연구 결과를 제시하였다. 네트워크 코딩을 사용할 경우 기존 AODV 라우팅 프로토콜의 성능을 개선할 수 있음을 NS-3 네트워크 시뮬레이터를 사용하여 보였다. 논문[6]에서는 MANET (mobile ad-hoc network) 환경의 군 전술망에서 AODV 라우팅 프로토콜의 성능을 개선하기 위해 홉 카운터 외에 링크 품질을 추가로 사용하는 LQA-AODV(link quality aware AODV) 기법을 제안하였다. 링크 품질을 나타내기 위해 비용(cost) 메트릭을 정의하여 사용하였으며, 해당 메트릭을 RREQ와 RREP 패킷에 저장하기 위해 새로운 16비트 필드를 추가하였다. 해당 연구 결과는 저자가 작성한 본 연구 논문과 유사한 접근 방법을 택했지만 RREQ와 RREP 패킷의 Reserved 필드를 사용하지 않고 새로운 16비트를 추가하였기 때문에 기존 AODV 라우팅 프로토콜과 호환성을 유지할 수 없다는 문제점을 갖는다.

논문[7]에서는 기존 AODV 라우팅 프로토콜에 경로 유지관리 개념을 추가한 새로운 AODV 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 경로 유지관리 기법으로는 송신 노드와 목적지 노드 간 경로가 설정된 이후 목적지 노드가 주기적으로 방송기법으로 DiRREQ(destination initiated RREQ) 패킷을 전송하는데, 방송기법에 의한 망 부하를 줄이기 위해 송신 노드와 목적지 노드 사이의 기존 라우팅 경로에서 1-홉 이웃 노드들만 RREQ 패킷 전송에 참여할 수 있도록 제한하였다. 논문[8]에서는 차량 통신 환경인 V2I(vehicle to infrastructure) 환경에서 이동 차량과 RSU(road side unit)간 신뢰성이 높은 통신을 제공하기 위해 백업 경로를 AODV 라우팅 프로토콜을 응용하여 만드는 방법을 제안하였다. 이를 위해 라우팅 테이블과 RREQ 패킷 변경이 필요한데, 특히 RREQ 패킷의 Reserved 필드의 한 비트를 backup 비트로 정의하여 사용하였다.

논문[9]에서는 하이브리드 WMN(wireless mesh network) 환경에서 사용할 수 있는 듀얼모드 AODV 라우팅 프로토콜을 제안하고 NS-3를 사용하여 성능평가를 수행하였다. 하이브리드 WMN은 인프라 WMN과 클라이언트

WMN이 공존하는 네트워크 환경으로 두 WMN의 구조가 서로 달라서 기존 AODV 라우팅 프로토콜을 그대로 사용하는 것은 비효율적이라고 판단하였다. 그래서 듀얼모드 AODV는 노드의 이동성이 거의 없는 인프라 WMN에서는 hello 메시지를 활용하여 Proactive 성격의 라우팅 프로토콜을 기능을 갖게 하고, 노드의 이동성이 큰 클라이언트 WMN에서는 reactive 성격의 라우팅 프로토콜 기능을 갖추도록 수정하였다. 논문[10]에서는 애드혹 네트워크 환경에서 AODV, OLSR(optimized link state routing), DSDV(destination-sequenced distance vector), 그리고 DSR(dynamic source routing) 라우팅 프로토콜을 NS-3 네트워크 시뮬레이터를 사용하여 성능을 비교하였다. 성능평가 결과에 따르면 AODV 프로토콜의 성능이 전반적으로 우수함을 확인할 수 있었다.

### III. 교차 계층 기법을 이용한 C-AODV 프로토콜

기존 AODV 프로토콜은 홉 기반 라우팅 프로토콜로 송신 노드와 목적지 노드 사이의 홉 수가 최소인 라우팅 경로를 찾는 기법이다. 홉 기반 라우팅 프로토콜은 무선 통신 링크들의 품질이 유사할 때는 우수한 성능을 나타내지만, 무선 통신 링크의 품질이 크게 다양할 때는 홉 기반 라우팅 프로토콜에 의해 찾아낸 경로가 최적 라우팅 경로가 아닐 가능성이 매우 크다. 이것처럼 홉 기반 라우팅 프로토콜이 통신 링크 품질의 다양성을 고려하지 못하기 때문에 최근 물리계층과 데이터링크 계층의 눈부신 기술발전 결과들을 제대로 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 두 통신 노드 사이의 무선 통신 경로 품질의 다양성을 수용한 새로운 C-AODV (AODV with Cross-layer approach) 기법을 제안하였다. C-AODV 라우팅 기법의 설계 목표는 기존 AODV 라우팅 프로토콜에 교차 계층 설계 기법(Cross-layer approach)을 적용하여 시스템 처리량을 증대시키는 것이다.

#### 3.1. C-AODV 프로토콜

기존 AODV 라우팅 프로토콜은 경로 설정 패킷인 RREQ와 RREP 패킷을 사용하여 송신 노드와 목적지 노드 사이의 라우팅 경로를 설정하며, RREQ 패킷은 다음과 같은 정보를 포함하고 있다.

- 송신 노드 주소, 송신 노드 시퀀스 번호
- 목적지 노드 주소, 목적지 노드 시퀀스 번호
- Broadcast ID, 송신 노드로부터의 홑수 ( $N_h$ )

AODV 프로토콜은 두 개의 시퀀스 번호를 사용하는 데 송신 노드 시퀀스 번호는 최신 역방향 경로를, 목적지 노드 시퀀스 번호는 최신 순방향 경로를 관리/유지하는 데 사용된다. Broadcast ID는 구 RREQ 패킷과 신규 RREQ 패킷을 구분하는 데 사용되며, 송신 노드로부터의 홑수  $N_h$ 가 AODV 프로토콜에서 경로설정에서 사용되는 메트릭이다. 본 논문에서 제안한 C-AODV 라우팅 프로토콜은  $N_h$ 를 주 메트릭으로 사용하면서 보조 메트릭으로 경로 지연시간의 합 ( $D_{path}$ )을 사용한다. 먼저 통신 노드 사이의 링크의 지연시간은 데이터 패킷의 크기를 물리계층의 데이터 전송속도로 나눈 값으로 정의한다. 따라서 경로 지연시간의 합은 RREQ 패킷이 거처온 링크들의 지연시간의 합으로 정의한다. 그런데 네트워크 계층에서 경로의 지연시간을 계산하려면 물리계층 파라미터인 데이터 전송속도 값을 알아야 하므로 C-AODV 프로토콜을 구현하려면 교차 계층 설계기법을 적용해야 한다. 그리고 C-AODV 프로토콜에서 경로 설정 메트릭으로  $N_h$ 와  $D_{path}$ 를 사용하여 라우팅 경로를 설정하려면 기존 AODV 프로토콜에서 다음과 같은 수정이 필요하다.

- RREQ 및 RREP 패킷 구조 수정 ( $D_{path}$ 를 기록할 수 있어야 함)
- 라우팅 테이블 수정 ( $D_{path}$ 를 기록할 수 있어야 함)
- Hello 메시지 처리 절차 수정
- RREQ 및 RREP 패킷 처리 절차 수정

기존 AODV 프로토콜에서 송신 노드가 방송기법으로 전송한 RREQ 패킷들이 통신 노드를 지날 때마다  $N_h$  값을 갱신하는 것처럼 C-AODV 프로토콜에서는  $N_h$  값과  $D_{path}$  값도 기록하고 갱신해야 한다.  $D_{path}$  값을 기록하기 위해 RREQ 패킷의 “Reserved” 필드를 사용하였으며, 지연시간을 기록하는 방법은 마이크로초 ( $\mu\text{sec}$ ) 단위로 환산한 지연시간 값의 정수 부분만 발췌해서 사용한다. RREQ와 RREP 패킷과 같은 제어 패킷은 기본 전송속도로 전송되기 때문에 그림 1과 같이 2개 홑을 거쳐서 노드 C에 도착한 RREQ 패킷은 노드 A에서 1개 홑으로 노드 C에 도착한 RREQ 패킷보다 늦게 도착할 확

률이 매우 크다. 따라서 임의의 통신 노드에서 동일한 RREQ 패킷을 중복으로 수신했다라도 (송신 노드 주소, 목적지 주소, Broadcast ID 세트가 같은 경우), 먼저 도착한 RREQ 패킷 값과 비교하여  $N_h$  값이 같거나 크지만  $D_{path}$  값이 작으면 채널 품질이 더 우수한 통신 경로이므로 나중에 도착한 RREQ 패킷이 거처 온 경로 정보를 라우팅 테이블에 기록(갱신)한다.

기존 AODV 프로토콜에서는 임의의 통신 노드와 인접한 이웃 노드들과의 (one-hop neighbor) 링크 상태를 파악하기 위해 주기적으로 Hello 메시지를 교환하여 라우팅 테이블 정보를 관리하는 데 사용한다. 그러나 이 기법을 C-AODV 프로토콜에 그대로 적용할 때는 라우팅 경로설정/관리에서 문제가 발생하기 때문에 C-AODV 프로토콜에서는 Hello 메시지를 사용하여 라우팅 테이블 정보를 수정하는 조건을 더욱 엄격하게 제한하였다. 예를 들면, 그림 1에서 송신 노드 A와 목적지 노드 C가 통신 노드 B를 통한 경로를 설정한 경우 (즉, 라우팅 경로가 A-B-C인 경우), 노드 A가 Hello 메시지를 방송기법으로 전송하고 노드 C가 Hello 메시지를 수신한 경우, 기존 AODV 기법에서는 노드 C는 노드 A가 인접 노드라고 판단하여 라우팅 테이블을 갱신할 수 있다. (즉, 라우팅 경로가 A-C로 변경) 그러나 C-AODV 프로토콜에서는 이러한 사유로 라우팅 테이블을 갱신하지 못하도록 해야 한다.

마지막으로 RREQ 패킷과 RREP 패킷을 처리하는 방법에서도 일부 수정이 필요하다. 기존 AODV 기법에서 임의의 통신 노드가 같은 RREQ 패킷을 중복으로 수신했을 경우에 해당 패킷을 즉각 폐기하지만, C-AODV 기법에서는 중복으로 수신한 RREQ 패킷이더라도 주 메트릭과 보조 메트릭 값을 비교하여 더 좋은 채널 환경인지를 판단한 후 패킷 폐기 또는 패킷 전달 선택을 한다. 또한, 중간 노드에서는 목적지 노드로의 최신 경로 정보를 가지고 있더라도 RREQ 패킷에 대한 응답인 RREP 패킷을 전송할 수 없으며 반드시 목적지 노드만 RREP 패킷을 보낼 수 있어야 한다. 그리고 기존 AODV 기법에서는 목적지 노드가 1회만 RREP 패킷으로 응답할 수 있었지만, C-AODV 기법에서는 목적지 노드에 RREQ 패킷이 중복해서 도착했다라도 주 메트릭과 보조 메트릭 값이 최초 도착했던 RREQ 패킷의 메트릭 값과 비교하여 채널 경로 상태가 더 우월하다고 판단하면 RREP 패킷을 2회 이상 전송할 수 있다.

### 3.2. NS-3에 C-AODV 기법 구현

여기에서는 기존 AODV 기법을 C-AODV 기법으로 변경하기 위해 NS-3 내에서 수정했던 부분을 다음과 같은 순서대로 설명하고자 한다.

- 물리계층 데이터 전송속도 정보를 사용하는 방법
- RREQ과 RREP 패킷 수정( $D_{path}$ 를 기록할 수 있어야 함)
- 라우팅 테이블 수정( $D_{path}$ 를 기록할 수 있어야 함)
- Hello 메시지 처리 절차 수정
- RREQ 및 RREP 패킷 처리 절차 수정

먼저 무선 LAN(local area networks) 시스템은 패킷을 수신하면 수신 패킷의 신호 대 잡음 비를 토대로 효율적인 데이터 전송속도를 계산한다. 이 기능을 적응적 전송속도(rate adaptation)라 하는데 NS-3의 무선 LAN에서는 WifiRemoteStationManager와 해당 클래스를 상속받은 IdealWifiManager 클래스를 일부 수정하여 RTS(request to send) 패킷을 수신한 노드에서 해당 노드와 RTS 패킷을 전송한 노드 사이의 적절한 데이터 전송속도를 계산하도록 하였다. 무선 LAN MAC 계층에서 계산한 데이터 전송속도를 상위 계층 프로토콜인 C-AODV 프로토콜에 전달하는 것은 NS-3에서 제공하는 패킷 Tag 개념을 사용하여 구현하였다. 패킷 Tag을 패킷에 붙여서 전송할 수 있으며 NS-3에서는 패킷 Tag을 붙여도 패킷 길이가 변하지 않기 때문에 인접한 계층 간에 정보를 주고받을 때 사용하고 있다. 본 논문에서는 패킷 Tag에게서 상속을 받아 Data rate Tag를 설계하였으며 설계된 Tag 구조를 그림 6에 나타내었다. 통신 노드가 인접한 노드들로부터 방송용 패킷을 수신하면 수신 신호대 잡음비(SNR: signal to noise ratio) 값 기반으로 통신 링크에 적절한 데이터 전송속도를 계산할 수 있으며, 계산한 값을 Data rate tag의 `m_datarate` 필드에 저장한 뒤, 방송용 패킷에 부착하여 상위계층으로 전달하며, 해당 기능은 무선 LAN 모듈의 `MacLow::ReceiveOk()` 함수 내에 구현하였다.

RREQ와 RREP 패킷 헤더 내에  $D_{path}$  값을 저장하기 위해 `RreqHeader`와 `RrepHeader` 클래스 내에 정수형 데이터를 저장할 수 있는 1바이트 크기의 `m_pathDelay` 변수와 관련 접근함수를 구현하였다. 또한, 라우팅 테이블에도  $D_{path}$ 을 저장하기 위해 `RoutingTableEntry` 클래스

```
class DataRateTag: public Tag
{
public:
    DataRateTag ();
    DataRateTag (double rate);
    WifiTxVector GetDataTxVector (void) const;
    static TypeId GetTypeId (void);
    virtual TypeId GetInstanceTypeId (void) const;
    virtual uint32_t GetSerializedSize (void) const;
    virtual void Serialize (TagBuffer i) const;
    virtual void Deserialize (TagBuffer i);
    virtual void Print (std::ostream &os) const;
    void Set (double rate);
    double Get (void) const;
private:
    double m_datarate;
};
```

Fig. 6 Format of data rate tag

내에 `m_path_delay` 변수와 관련 접근함수를 구현하였다. Hello 메시지 처리와 RREQ와 RREP 패킷 처리 절차 변경은 모두 `RoutingProtocol` 클래스 내의 관련 함수들을 수정하여 해결하였다. C-AODV 프로토콜을 구현하기 위하여 NS-3의 AODV 프로토콜을 수정/추가한 내용을 요약 정리하여 표 1에 나타내었다.

Table. 1 Summary of modification in NS-3

Layer	Class name	Contents
Layer 2	MacLow	Make data rate tag Add the tag to broadcast packets
	WifiRemoteStationManager	Compute data transmission rates
Layer 3	RreqHeader, RrepHeader	Make pathDelay variable and related access functions
	RoutingTableEntry	Make pathDelay variable and related access functions into the routing table
	RoutingProtocol	Process Hello messages Process RREQ, RREP packets

## IV. 성능평가 결과

### 4.1. 시스템 환경

본 논문에서 제안한 라우팅 프로토콜은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성능평가를 시행하였으며, 네트워크 시뮬레이터인 NS-3[11]를 사용하였다. 성능평가에서는 아래와 같이 두 가지 네트워크 모델을 사용하였다.

- 모델 1: 6개 통신 노드가 일렬로 정렬된 모델
- 모델 2: Random waypoint 모델[12]

첫 번째 네트워크 모델은 6개 통신 노드가 동일한 간격으로 일렬로 정렬되어있는 구조로서( $n_0 - n_1 - \dots - n_5$ ), 6개 통신 노드의 위치는 시뮬레이션 수행 동안 모두 고정되어 있으며,  $n_0$ 가 송신 노드이고  $n_5$ 가 목적지 노드인 네트워크 모델이다. 이 네트워크 모델은 C-AODV 라우팅 프로토콜이 저자가 제안한 배경에 맞게 잘 동작하는지 확인할 목적으로 도입하였다. NS-3에 구현된 무선 채널 모델에 기반을 두고 AODV 라우팅 프로토콜을 사용하여 테스트한 결과 두 통신 노드가 최대 110m 정도 떨어져 있을 때는 거의 전송오류 없이 패킷을 주고받았지만, 두 노드 사이의 거리가 115m로 증가하면 패킷 전송이 거의 이뤄지지 않는 것을 확인하였다. 따라서 멀티홉 네트워크 모델에서 라우팅 프로토콜의 성능을 살펴 보기 위해 본 성능평가에서는 인접한 통신 노드 간격을 20m ~ 40m 사이 값으로 설정하였다.

Random waypoint 모델은 각 통신 노드들이 독립적으로 움직이는 이동 모델로서, (i) 각 통신 노드들이 현재 위치에 일정한 시간 (pause time) 동안 머무른 후( $t_p$ ), (ii) 다음 이동 위치로 이동하는데 다음 이동 위치와 이동 속도는 랜덤하게 결정한다. (iii) 다음 이동 위치에 도착하면 (i) ~ (ii) 절차를 다시 반복한다. Random waypoint 모델은 실제 이동통신 환경과 매우 유사한 환경에서 C-AODV 프로토콜 기법의 성능을 평가하기 위해서 채택하였다.

패킷 생성 모델은 on-off 트래픽 모델을 사용하였으며, 본 성능평가에서는 off 시간을 0으로 설정하였다. 따라서 시뮬레이션 수행시간 동안 512 kbps의 일정한 속도로 패킷을 발생하는 CBR (constant bit rate) 모델을 사용한 셈이다. 전파 손실 모델은 로그 거리 전파 모델(log distance propagation loss model)을 사용하였으며, 경로에 따른 수신 전력의 크기는 식(1)을 사용하여 구할 수 있다[13].

$$L(d) = L_0 + 10n \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \text{ [dB]} \quad (1)$$

성능평가에서 사용한 시스템 파라미터를 표 2에 나타내었다.

Table. 2 System parameters

Parameters	Values
Packet length	1,024 bytes
Packet gen. rate	512 kbps (CBR)
# of total packets	6,124
Traffic model	ON-OFF model (offTime=0)
Simulation duration	100 sec
Communication area	700m × 700m
Node speed	uniform(0, 0.7m/s)
Node pause time	uniform(0, 2.0sec)
Transmission power	16.0206 dBm
Transmission gain	1 dB
Reception gain	1 dB
Min. recep. power	-96 dBm
Rx Noise Figure	7 dB
Carrier frequency	2,407 GHz
$L_0$	46.6777 dB
$d_0$	1 m
Path loss exponent, $n$	3

#### 4.2. 성능평가 척도

본 논문에서 제안한 C-AODV 프로토콜의 성능을 기존 AODV 라우팅 프로토콜의 성능과 비교하기 위해 다음과 같은 세 가지 성능평가 척도를 사용하였다. 아래 세 가지 성능평가 결과값들은 NS-3에서 Flow monitor를 사용하여 도출하였다[11].

- 성공적으로 수신한 패킷 수,  $rxPackets$
- 평균 패킷 수신율,  $\overline{R_{rx}}$  (bps)
- 패킷당 평균 지연시간,  $\overline{D_{rx}}$  (nsec)

첫 번째 성능평가 척도  $rxPackets$ 은 컴퓨터 시뮬레이션 수행시간 동안 성공적으로 수신한 총 패킷 수를 나타낸다. 일반적으로 라우팅 프로토콜이나 전달계층 프로토콜을 성능 비교를 할 때 성능평가 척도로 패킷 전송비 (Packet transmission ratio, PTR)를 사용하는데, PTR은 수신 노드에서 성공적으로 수신한 총 패킷 수를 송신 노드에서 전송한 총 패킷 수로 나눈 값이다. 따라서 첫 번째 성능평가 척도는 PTR 값을 계산하는데 사용할 수 있다. 두 번째 성능평가 척도는 시스템 처리량(Throughput)에 해당하는 변수로서, NS-3의 Flow monitor에서 아래

와 같은 방법으로 계산하였다.

$$\overline{R_{rx}} = \frac{8 \times rxBytes}{timeLastRxPacket - timeFirstRxPacket} \quad (2)$$

윗 식에서 rxBytes는 성공적으로 수신한 총 패킷 양을 바이트로 나타낸 값이며, timeLastRxPacket과 timeFirstRxPacket은 수신 노드에서 마지막(처음) 패킷을 성공적으로 수신한 시간을 각각 나타낸다. 세 번째 성능평가 척도는 패킷당 평균 지연시간으로 아래와 같은 방법으로 계산하였다.

$$\overline{D_{rx}} = \frac{delaySum}{rxPackets} \quad (3)$$

위 식에서 delaySum은 수신한 패킷들의 지연시간의 합을 의미한다.

### 4.3. 성능평가 결과

본 논문에서 제안한 C-AODV 프로토콜의 성능평가 결과는 NS-3를 사용한 컴퓨터 시뮬레이션으로 도출하였으며, 모든 성능평가 결과값은 서로 다른 시뮬레이션 시드 값을 사용하여 각각 10회 성능평가를 수행한 뒤, 신뢰도 95%의 신뢰구간을 도출하여 나타내었다. 성능평가 결과는 1번 네트워크 모델에서 세 가지 성능평가 척도 결과를 각각 기술한 다음, 2번 네트워크 모델에서의 성능평가 결과 순으로 기술하겠다.

먼저, 1번 네트워크 모델을 사용한 경우 패킷 생성 속도가 512kbps인 경우 성공적으로 수신한 패킷 수, 시스템 처리량, 그리고 패킷당 평균 지연시간의 성능평가 결과를 각각 그림 7~9에 나타내었다.

먼저 그림 7은 통신 노드 사이 간격을 20m부터 40m까지 5m씩 증가시키면서 성공적으로 수신한 패킷 개수

성능평가 결과를 서로 비교한 것이다. 노드 사이 간격이 30m인 경우를 제외하고는 C-AODV 기법의 상대적으로 우수함을 알 수 있다. 이것은 AODV 기법의 경우는 송신 노드와 목적지 노드 사이의 홉 수를 최소로 하는 라우팅 경로를 선택하지만, C-AODV 기법의 경우는 홉 수는 증가하더라도 단대단(end-to-end) 지연시간이 최소가 되는 경로를 찾기 때문에 파악된다. 한편 노드 사이 거리가 30m일 때 성능이 열악했던 이유를 파악하기 위해 좀 더 세밀하게 분석한 결과는 다음과 같다. AODV와 C-AODV 프로토콜에서 송신 노드  $n_0$ 와 목적지 노드  $n_5$ 까지의 통신 라우팅 경로는 모두 2홉으로 구성되는데 AODV 기법은  $n_2$  노드를 중간 노드로 사용하고 있었으며, C-AODV 프로토콜은  $n_2$ 와  $n_3$  노드를 교대로 중간 노드로 사용하고 있었다. 6개 통신 노드들이 모두 고정되어 있으므로 시뮬레이션 초기에 경로설정 기법에 따라 통신 경로를 한 번 설정하면 시뮬레이션 종료까지 경로를 변경하거나 재설정할 필요가 없다고 판단되는데, C-AODV 프로토콜은 시뮬레이션 수행시간 동안 7회 정도 경로를 재설정하고 있었으며, 이러한 불필요한 과정 때문에 성공적으로 수신한 패킷 개수 성능 결과가 감소한 것을 알 수 있었다. 이 문제는 C-AODV 프로토콜의 논리 오류가 아니라 저자가 NS-3에 이미 구현된 AODV 프로토콜을 C-AODV 프로토콜로 변경 구현하는 과정에서 일부 사소한 문제가 발생한 것 때문이다. 따라서 이 문제가 해결되면 노드 개수가 30개인 경우에는 두 프로토콜의 성능 결과가 같게 될 것으로 생각된다.

그림 8은 그림 7과 같은 환경에서 평균 패킷 수신율(시스템 처리량) 성능평가 척도를 사용하여 두 기법의 성능평가 결과를 비교한 것으로 평균 패킷 수신율을 식(2)와 같이 정의하였으므로 성공적으로 수신한 패킷 개수 결과와 유사한 형태로 도출됨을 알 수 있다.

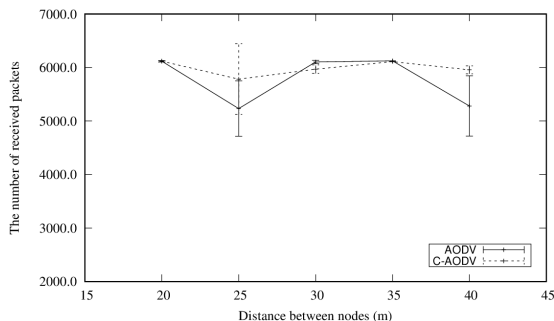


Fig. 7 Comparison of the number of received packets

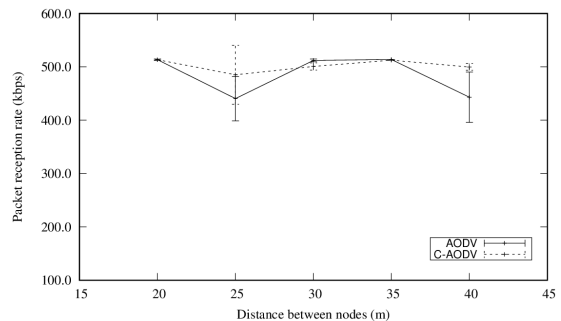


Fig. 8 Comparison of system throughput



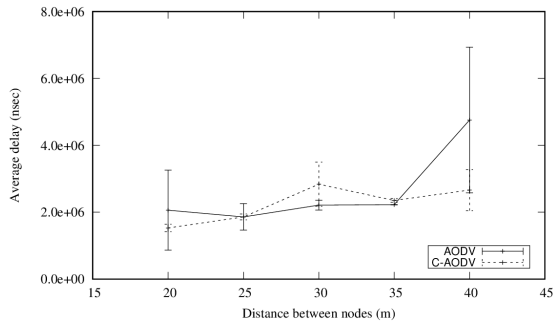


Fig. 9 Comparison of the average packet delay

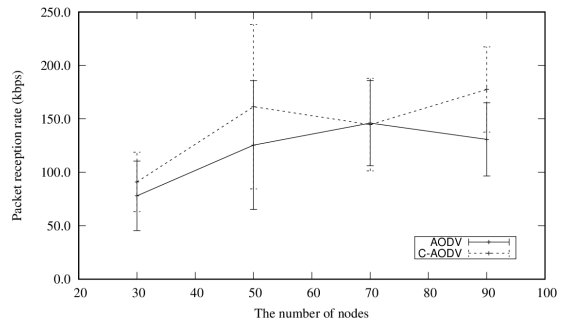


Fig. 11 Comparison of system throughput

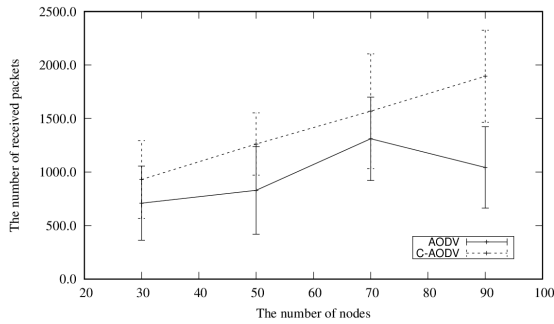


Fig. 10 Comparison of the number of received packets

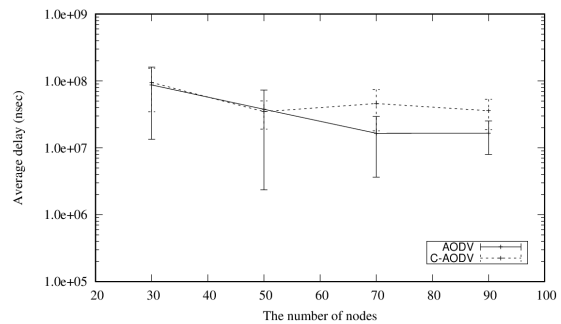


Fig. 12 Comparison of the average packet delay

그림 9는 평균 패킷 지연시간 성능평가 척도를 사용하여 두 기법의 성능평가 결과를 비교한 것으로 평균 패킷 지연시간은 식 (3)을 사용하여 도출하였다. 그림 7, 그림 8 결과와 유사하게 통신 노드 간 거리가 30m인 경우를 제외하면 C-AODV 프로토콜 성능이 기존 AODV 프로토콜보다 성능이 우수함을 알 수 있다.

그림 10 ~ 12는 2번 네트워크 모델을 사용하여 성능평가를 수행한 결과를 나타내었다. 먼저 그림 10은 통신 노드의 개수를 30개부터 90개까지 증가시키면서 성공적으로 수신한 패킷의 수를 비교한 것이다. 성능평가 결과에 따르면 C-AODV 기법의 성능이 기존 AODV 기법과 비교할 때 모든 경우에서 성능이 우수함을 보여준다. 그림 11은 평균 패킷 수신율 성능을 비교한 것으로 통신 노드의 수가 70개인 경우를 제외하면 모든 경우에서 C-AODV 기법의 성능이 우수함을 알 수 있다.

그림 12는 패킷의 평균 지연시간 성능을 비교한 것으로 통신 노드 개수가 70개와 90개일 때 평균 지연시간 성능이 다소 나쁨을 알 수 있다. C-AODV 기법은 AODV 기법과 비교하여 송신 노드와 목적지 노드 사이의 라우팅 경로에서 홉 수가 증가할 가능성이 크므로 경로를 선택

정하는 데 시간이 다소 많이 걸린다. 또한, 여러 개의 통신 노드를 거치므로 단말의 이동성에 따라서 통신 경로를 재설정해야 하는 가능성이 크기 때문에 평균 지연시간 성능이 나쁠 수도 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 이동 애드혹 네트워크에서 사용하는 AODV 라우팅 프로토콜에 대해서 살펴보았다. 그리고 통신 노드의 이동성 때문에 발생하는 통신 경로 단절 등의 문제를 해결하기 위해 다중 경로설정을 지원하는 AODV 기법을 기반으로 개선된 다양한 라우팅 프로토콜도 살펴보았다. AODV 기법이 사용하는 홉 기반 라우팅 기법의 문제점을 개선하기 위해 홉 수를 주 메트릭으로 사용하면서 보조 메트릭으로 경로 지연시간의 합을 사용하는 새로운 C-AODV 라우팅 프로토콜을 설계하였고, NS-3 네트워크 시뮬레이터에 구현하여 성능평가를 수행하였다. 성능평가 결과를 토대로 C-AODV 기법을 기존 AODV 기법과 비교 분석한 결과 대부분 환경에

서 C-AODV 기법의 성능이 우수한 것으로 확인되었다.  
 앞으로는 다중 경로설정 기능을 지원하고, 에너지를 효율적으로 사용할 수 있는 개선된 C-AODV 기법에 관하여 연구를 진행할 계획이다.

## REFERENCES

- [ 1 ] C. Perkins, E. B. Royer, and S. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing," IETF RFC-3561, IETF Networking Working Group, July 2003.
- [ 2 ] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74-89, Oct. 2004.
- [ 3 ] Z. Ye, S. V. Krishnamurthy, and S. K. Tripathi, "A framework for reliable routing in mobile ad hoc networks," in *Proceeding of IEEE INFOCOM*, San Francisco: SF, pp. 270-280, 2003.
- [ 4 ] D. Couto, D. Auayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," in *Proceeding of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, San Diego: SD, pp. 134-146, 2003.
- [ 5 ] S. Choo and J. Park, "Improving performance of AODV-based ad-hoc networks," in *Proceeding of Summer Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp. 478-479, 2018.
- [ 6 ] T. Lee, S. Jeun, and Y. Kim, "Improved AODV routing protocol considering the link quality of wireless transmission environments," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 10, pp. 1903-1911, Oct. 2016.
- [ 7 ] H. Choi, "AODV protocol based on destination-initiated flooding in mobile ad hoc networks," *Journal of Korea Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 42, no. 11, pp. 2112-2121, Nov. 2017.
- [ 8 ] C. Cho and S. Ahn, "A V2I backup routing mechanism based on AODV in the vehicular communication environment," in *Proceeding of Summer Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, pp. 667-668, 2016.
- [ 9 ] H. Kim, "Dual mode-AODV for the hybrid wireless mesh network," *Journal of Korea Industrial Information Systems Research*, vol. 22, no. 1, pp. 1-9, Feb. 2017.
- [10] Jaeshin Jang, Van-Vuong Ngo, and Sunghong Wie, "A performance comparison of routing protocols for mobile ad hoc networks using the NS-3," *Journal of Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 308-316, Feb. 2015.
- [11] NS-3 network simulator, version 3.26, [Internet]. Available: <http://www.nsnam.org>. 2016.
- [12] A. Pramannik, B. Choudhury, T. S. Choudhury, W. Arif, and J. Mehedi, "Simulative study of random waypoint mobility model for mobile ad hoc networks," in *Proceedings of 2015 Global Conference on Communication Technology*, pp. 112-116. 2015.
- [13] Y. Park, I. Hong, J. Choi, and H. You, *Fundamentals of Mobile communications*, 4<sup>th</sup> ed.: Life and Power, 2017.



**장재신(Jaeshin Jang)**

1998년 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학박사  
 1997년~2002년: ㈜삼성전자 네트워크사업부 책임연구원  
 2002년~현재: 인제대학교 전자기계자동차공학부 교수  
 2010년~현재: 한국정보통신학회 이사  
 ※관심분야: 차세대이동통신, 이동 애드혹 네트워크, MAC 프로토콜 및 라우팅 프로토콜



**위성홍(Sunghong Wie)**

2001년 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학박사  
 2001년~2008년: ㈜삼성전자 네트워크사업부 책임연구원  
 2009년~현재: 고려사이버대학교 전기전자공학과 교수  
 ※관심분야: 이동성관리프로토콜, MAC 프로토콜, 정보중심네트워크