

무선 메시 네트워크를 위한 포텐셜 필드 기반 라우팅의 구현과 실환경 테스트베드에서의 성능 평가

성지훈¹, 경연웅^{2*}

¹한국과학기술원 전기및전자공학과 박사, ²공주대학교 정보통신공학부 교수

Implementation of Potential Field-Based Routing for Wireless Mesh Networks and its Performance Evaluation in Real-World Testbed

Jihoon Sung¹, Yeunwoong Kyung^{2*}

¹Ph.D, Department of Electrical Engineering, KAIST

²Professor, Division of Information & Communication Engineering, Kongju National University

요약 산업계를 중심으로 최근에는 위치에 구애받지 않고 다양한 서비스를 자유롭게 이용하고자 하는 수요가 급증하면서, 비용 효율적이고 구축이 용이한 wireless mesh network (WMN) 솔루션이 다시 주목받고 있다. 본 논문에서는 3차원 WMN을 위한 라우팅 솔루션인 Autonomous Load-balancing Field-based Anycast routing+ (ALFA++)의 구현 이슈를 심도 있게 살펴본다. 이후에는 저가 상용 장치를 활용하여 구축한 대학 캠퍼스 건물 내 802.11 기반 3차원 WMN 테스트베드에서 ALFA+의 성능을 평가하고 이를 통해 궁극적으로 ALFA+의 실제 활용 가능성을 검증한다. 기존 대부분의 연구는 가상환경 기반 시뮬레이션을 통한 성능평가를 한 반면, 본 연구에서는 실환경 테스트베드에서 상용 장치를 활용한 성능평가 수행을 위해 필요한 구현 관련 상세정보를 소개하고 실환경 테스트베드에서의 결과를 기반으로 ALFA+의 실질적인 가치를 평가했다는 점에서 큰 의미가 있다.

주제어 : 무선 메시 네트워크; 포텐셜 필드, 라우팅; 테스트베드

Abstract In response to the increasing demand for unrestricted access to diverse services regardless of location, cost-effective and easily deployable Wireless Mesh Network (WMN) solutions have once again captured attention. This paper primarily addresses the implementation challenges of Autonomous Load-balancing Field-based Anycast routing+ (ALFA+) for three-dimensional (3D) WMNs. Subsequently, we evaluate the performance of ALFA+ in an 802.11-based 3D WMN testbed established within a university campus using commercial devices, thus validating the practical viability of ALFA+. While most prior research has relied on performance evaluation through virtual environment simulations, this study distinguishes itself by performance evaluations in a real-world testbed using commercial devices and providing detailed implementation-related information necessary for such evaluations. This approach holds considerable significance in assessing the actual applicability of ALFA+.

Key Words : Wireless mesh network, Potential field, Routing, Testbed

1. 서론

Wireless Mesh Network (WMN)는 비용 효율성과 구축의 용이성으로 인해 높은 잠재력을 지닌 솔루션으로서 학계에서도 활발하게 연구해 온 주제이고, 산업계를 중심으로서는 실제 구축사례가 많이 보고되어 왔다 [1,2]. 이러한 추세에 더해, 최근에는 Internet of Things (IoT) 기술의 확장과 함께 공간 제약 없이 다양한 서비스를 이용하고자 하는 수요가 증가하면서, WMN 솔루션이 다시 주목받고 있다 [3, 4].

이미 알려진 대로, WMN에서는 통상 다수의 메쉬 노드에서 생성된 트래픽이 소수의 메쉬 게이트웨이로 전달되는 방식으로 동작하기 때문에 패킷이 가능한 짧으면서도 혼잡하지 않은 경로를 통해 전달될 수 있어야 한다. 이러한 요구 사항을 충족하기 위한 솔루션으로 메쉬 게이트웨이와의 지리적인 근접성 정보와 트래픽 부하를 동시에 고려하는 Autonomous Load-balancing Field-based Anycast routing (ALFA)[5]이 소개되었다. 이전 연구[5,6]에서는 주로 전기장 시스템에서 양전하의 움직임과 WMN에서 패킷의 움직임 간의 유사성에서 착안하여 ALFA를 모델링하고, 가상환경 기반 시뮬레이션을 통해 다양한 시나리오에서 ALFA에 대한 성능을 검증해왔다. 하지만, 해당 초기 ALFA 모델은 2차원 평면형 WMN 토폴로지에서만 활용이 가능한 한계가 있어, 이후에 3차원 입체형 WMN 토폴로지에서도 활용이 가능한 ALFA+[7]라는 모델이 소개되었다.

본 논문에서는 실환경에서의 활용 가능성을 검증하기 위해 3차원에서도 활용이 가능한 ALFA+모델을 기준모델로 삼고 해당모델의 구현 이슈에 대해 심도있게 소개한 이후, 저가 상용 장치를 활용하여 구축한 대학 캠퍼스 건물 내 802.11 기반 3차원 WMN 테스트베드에서 ALFA+의 성능을 평가하고 분석한다.

2. 제안하는 방법

2.1 ALFA+ 기법 개요

여기서는 본 연구에 대한 이해를 위해 필요한 최소한의 사전정보로서, 이전 연구[7]에서 소개된 ALFA+ 기법에 대해 간략히 개요를 설명한다.

ALFA+는 전기장 시스템에서 양전하가 음전하를 향해 이동하는 움직임의 특성에서 영감을 받아 디자인된 라우팅 기법으로서, 전기장 시스템에서 각 양전하는 기본적

으로 가장 가파른 포텐셜 기울기를 따라 짧은 경로로 이동하려고 하나, 이웃하는 양전하 간에는 일정한 척력이 있어서 각 양전하는 약간 다른 경로를 따라 이동하려는 경향을 보이는 유연한 동작 특성에 주목하였다. 전기장 시스템에서의 이러한 동작특성은 전자기학에서 이미 아래의 포아송 방정식을 통해 모델링되어 왔다.

$$\nabla^2 \phi = -\frac{1}{\epsilon} \rho_v, \quad (1)$$

위 식에서, ϕ 는 포텐셜 값 (단위, V), ϵ 는 비유전율 (단위, C/Vm), ρ_v 는 볼륨전하밀도 (C/m³)를 의미한다.

위와 같이 전기장 시스템에 대한 이해를 기반으로 WMN에서 부하가 적은 상태에서는 각 패킷이 가능한 최단 경로를 통해 전달되고, 부하가 증가하여 네트워크가 혼잡해지면 패킷들이 서로 우회하도록 하는 라우팅 기법을 고안하고자 했다. ALFA+를 모델링하기 위해 finite element method (FEM)[8]과 local equilibrium method (LEM)[9]을 활용하였다. 먼저 FEM은 주어진 도메인에서 유한 요소를 활용하여 포아송 방정식과 같은 편미분 방정식의 해를 찾는 데 유용한 수치해석 기법이다. ALFA+ 모델링 관점에서 해는 포텐셜 값, 도메인은 주어진 대상 네트워크, 유한 요소는 해당 네트워크의 노드들로 구성된 도형(예: 3차원 모델의 경우 사면체로 [7]의 Fig. 1 참고)에 해당한다. 한편, LEM은 지역적인 해를 반복연산하여 수렴시키는 과정을 통해 전체적인 해를 찾는 수치 기법이다. 요약하면, FEM은 주변 이웃과의 포텐셜 값의 관계를 나타내는 지역적인 해만 제공하며, 전체적인 포텐셜 필드는 이웃 노드간의 지역적인 해를 반복적으로 계산하고 교환함으로써 얻어진다. 이러한 수치 기법들은 다음과 같이 각 메쉬 노드가 지역적인 해에 해당하는 포텐셜 값을 계산할 수 있는 분산 알고리즘을 도출할 수 있게 해준다.

$$\phi(i) = \left[\sum_{k \in \{u_i, l_i\}} \sum_{j=0}^{N-1} \{(\phi_{i,j+1} \vec{d}_{i,j} - \phi_{i,j} \vec{d}_{i,j+1})(\vec{d}_{i,j} - \vec{d}_{i,j+1})\} + \phi_{i,k} \left\| \frac{\vec{d}_{i,j} \times \vec{d}_{i,j+1}}{z_{i,k} - z_i} \right\|^2 + \eta \rho(v) \sum_{j=0}^{N-1} \left\| \vec{d}_{i,j} \times \vec{d}_{i,j+1} \right\|^2 \right] / \left[\sum_{k \in \{u_i, l_i\}} \sum_{j=0}^{N-1} \left\| \vec{d}_{i,j} - \vec{d}_{i,j+1} \right\|^2 + \left\| \frac{\vec{d}_{i,j} \times \vec{d}_{i,j+1}}{z_{i,k} - z_i} \right\|^2 \right], \quad (2)$$

위 식에서, $\phi(i)$ 는 노드 i 에서의 포텐셜 값, u_i 와 l_i 는 노드 i 와 x, y좌표는 동일하고 z좌표만 다른 이웃노드로서, 노드 i 위쪽에 존재하는 이웃노드와 노드 i 아래쪽에 존재하는 이웃노드 각각을 의미한다. 또한, $\phi_{i,j}$ 는 노드 i 의 j 번째 이웃노드의 포텐셜 값, z_i 는 노드 i 의 z좌표, $z_{i,k}$ 는 노드 i 의 z축상의 이웃노드 $k \in \{u_i, l_i\}$, $\vec{d}_{i,j}$ 는 j 에

서 i 방향으로의 상대적 거리벡터, η_i 는 노드 i 에서의 큐 내 패킷 수에 대한 민감도, q_i 는 노드 i 에서의 큐 내 패킷 수를 의미한다. 결과적으로, 각 메시 노드는 위 식을 통해 주변 노드와 함께 [7]의 Fig. 1에서 도식화된 것과 같이 사면체를 형성한다. 이렇게 구성된 유한 요소들을 통해, 해당 노드에서의 지역적인 해인 포텐셜 값을 계산하게 되는 것이다. 포텐셜 필드는 네트워크에 존재하는 모든 노드들의 포텐셜 값들의 집합으로 정의될 수 있는데, 이를 위해서는 내부 및 외부 경계조건에 대한 정의가 필요하다. 내부 경계조건은 메시 게이트웨이를 위한 것으로, 메시 게이트웨이에는 최저 상수 포텐셜값 (예: 0)을 할당한다. 이는 경계객체에 상수 값을 정의하는 Dirichlet 경계 조건[10]에 해당한다. 반면, 외부 경계조건은 주변 이웃노드가 충분하지 않은 노드를 위한 것으로, 외부 경계 조건은 먼저 주변 이웃노드가 충분하지 않은 노드를 대상으로 가상노드(실제 네트워크에는 존재하지 않지만 포텐셜 계산시 가상으로 있다고 간주하는 노드)를 배치하고 해당 가상노드에 최고 상수 포텐셜 값 (예: 1)을 할당하여 어떤 외부 경계노드이든 항상 FEM을 통해 식 (2)를 활용하여 포텐셜 값을 계산할 수 있도록 한다. 이러한 외부 경계 조건은 경계객체(본 논문에서는 외부 경계노드)에 대한 상수 값과 법선 미분 값을 정의하는 Robin 경계 조건[10]에 해당한다. 경계조건에 관한 상세 내용은 [11]에서 확인할 수 있다. 또한, 본 논문에서는 [7]에서의 가상노드배치규칙을 그대로 차용한다.

위와 같은 경계조건을 기반으로 아래의 단계를 통해 포텐셜 필드가 수립된다.

- 1) 메시 게이트웨이 및 메시 노드에게는 최저 0의 상수 포텐셜값이 할당되고, 가상노드에게는 최고 1의 상수 포텐셜 값이 할당된다.
- 2) 모든 메시 노드는 "hello" 메시지 교환을 통해 한 홉 이웃노드와 포텐셜 값 및 위치 정보를 교환한다.
- 3) 메시 노드는 교환된 정보를 기반으로 포텐셜 값을 비동기적으로 업데이트한다.
- 4) 단계 2) 및 3)을 반복한다.

이 과정에서 가상노드는 실제로 존재하지 않으므로 메시지 교환에 참여하지 않는다. 각 메시 노드는 수립된 포텐셜 필드를 기반으로 메시 게이트웨이의 업링크 전달을 위해 아래와 같이 경사도가 가장 급격한 다음 홉 노드로 선택한다.

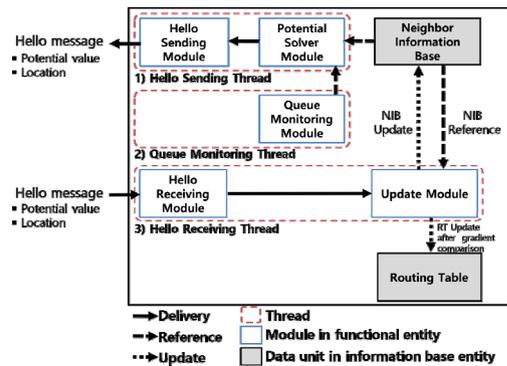
$$\arg \min_{j \in \mathcal{N}} (\phi(j) - \phi(i)), \quad (3)$$

위 식에서, \mathcal{N} 는 노드 i 의 이웃노드 집합을 의미한다.

2.2 구현 세부 사항

Fig. 1은 ALFA+의 전체 알고리즘 구조를 보여준다. 이웃 포텐셜 값 및 위치정보 등 라우팅 정보를 저장하는 정보 관리 엔티티와 'hello' 메시지의 전송 및 수신, 포텐셜 값 업데이트, 큐 정보 모니터링 및 라우팅 업데이트를 수행하는 기능 엔티티로 구성된다. 이 때, 'hello' 메시지에는 포텐셜 값 및 위치정보가 포함된다.

이제부터 ALFA+가 어떻게 구현되었는지 알고리즘의 동작 순서를 고려하여 Fig. 1을 기반으로 설명한다. 각 노드는 한 홉 이웃노드에게 매 t 초마다 'hello' 메시지를 브로드캐스트한다. 여기서 i 는 'hello' 메시지의 전송주기를 나타낸다(Hello Sending Module). 동시에 N 개의 이웃이 존재할 때 평균적으로 t/N 초마다 이웃노드로부터 'hello' 메시지를 받는다(Hello Receiving Module). 이후에, 포텐셜 값 및 위치정보와 같은 이웃 노드의 정보를 포함하는 Neighbor Information Base (NIB) 목록을 업데이트한다. 이 때, 노드가 고장나거나 추가된 경우 NIB에 해당노드의 정보를 추가하거나 삭제하여 업데이트한다(Update Module). 또한, 커널내 라우팅 테이블이 변경되어 경사가 가장 가파른 다음 홉 노드가 이전 대비 달라진 경우에 라우팅 테이블이 업데이트된다(Update Module).



[Fig. 1] Architecture of ALFA+ algorithm

한편, 각 노드는 NIB에 실존하는 이웃노드 정보와 Queue Monitoring Module로부터 큐 길이를 참조하여 포텐셜 값을 계산한다(Potential Solver Module). 포텐셜 값은 실존하는 이웃노드가 충분하지 않아 정상적으로 계산되지 않을 수 있다. 다시 말해, 포텐셜 값을 계산하는 노드는 한 홉 이웃노드들과의 조합으로 형성되는 삼각형 요소에 의해 완전히 둘러싸여 있어야 한다[11]. 이런 요구사항을 항상 만족시킬 수 있도록 이웃노드가 존재하지 않는 방향에 가상노드를 생성하는 방법이 제시

된 바 있다(Potential Solver Module). 가상노드는 실제 네트워크에는 존재하지 않고 FEM에서 사용되는 요소를 구성하는 데만 기여한다. 가상노드 생성 메커니즘 상세는 [11]에서 확인가능하다. 이 메커니즘을 통해 노드는 어떤 상황에서도 완전히 이웃들에 의해 둘러싸일 수 있다. 즉, 노드는 NIB에 실존하는 이웃노드 정보와 위의 메커니즘에 의해 생성된 가상노드를 사용하여 어떤 환경에서도 포텐셜 값을 계산할 수 있다. 이 때, 가상노드의 정보는 포텐셜 값을 계산한 후 즉시 삭제된다. 가상노드의 다른 효과는 초기 상태에서 가상노드에 가장 높은 포텐셜 값(예: 1)을 설정하는 외부 경계조건에서 나오는데, 이는 가상노드가 상대적으로 높은 포텐셜 값 때문에 패킷이 가능한 이웃노드가 존재하는 지역으로 이동하게 만든다. 반면에, (2)를 사용하여 포텐셜 값을 계산하려면 큐 길이를 얻어야 한다. 그러나 실험에 사용된 장비는 장치 드라이버가 공개되지 않은 상용 장비로서 물리적인 큐 길이 정보를 가진 특정 메모리에 접근할 수 없기 때문에, 결과적으로 다음과 같이 접근 가능한 물리적 인터페이스의 정보를 활용하여 논리적인 알고리즘을 기반으로 큐 길이를 얻는 방식을 고안하였다.

$$L2_Qsize = L3_tx_packet - L2_tx_packet, \quad (4)$$

위 식에서, $L2_Qsize$ 는 노드 i 의 layer 2 (L2)에서의 큐 사이즈, $L3_tx_packet$ 은 L2에 전송될 layer 3 (L3)에서의 IP 패킷 수, $L2_tx_packet$ 은 L2의 전송 인터페이스에서 발생한 모든 패킷 (전송, 유실, 충돌, 에러 패킷 등) 수를 나타낸다. 이 모듈은 t/m 마다 실행되며, 여기서 m 은 t 보다 작은 정수다. 이전 주기 t 동안 (4)의 m 회 평균값이 Potential Solver Module에서 사용되고, 이 때 m 은 2로 설정하였다.

3. 성능 분석

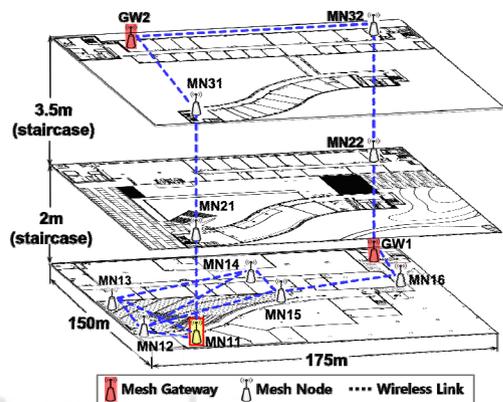
3.1 테스트베드 개요

먼저 WMN 테스트베드에 802.11n 호환 저가 상용 라우터(Linksys WRT150N)[12]가 사용되었다. 이 장치들은 DD-WRT[13]와 잘 호환되며, 이는 Linux 기반 펌웨어다. DD-WRT는 라우터의 물리적 매개변수를 재설정하는 기능을 제공한다. 본 논문의 실험에서는 DD-WRT v24-sp2 (10/10/09) std가 사용되었다. ALFA+의 알고리즘은 Linux의 응용 계층에 구현된다. ALFA+ 모듈은 교차 컴파일러인 mipsel-linux-g++로 컴파일된다. 트

래픽 생성을 위해 Iperf 성능 분석기 소프트웨어[14]를 사용한다.

3.2 실험 시나리오 설명

본 논문에서는 ALFA+와 지리정보기반 라우팅 (GR)[15]을 비교한다. 이 둘은 모두 한 홉 이웃노드의 정보만 필요로 하는 특성을 갖는데, 알고리즘별 동작특성을 비교하기 위해 본 실험에서는 새로운 노드가 네트워크에 추가될 때 ALFA+와 GR이 어떻게 반응하는지를 살펴본다. GR기법 자체적으로는 복수개의 메쉬 게이트웨이가 있을 때 어떤 게이트웨이를 목적지 노드로 선택할지에 대한 메커니즘이 없기 때문에 해당 기법의 동작특성에 따라 각 메쉬 노드별로 최단 경로길이를 계산되는 메쉬 게이트웨이를 목적지 노드로 선택되도록 설정하였다. 또한, 테스트는 Fig. 2에서와 같이 2개의 메쉬 게이트웨이와 10개의 메쉬 노드로 구성되는 KAIST 캠퍼스 내 한 건물에 구축한 3차원 WMN 토폴로지에서 수행하고, 물리계층 데이터율은 52Mbps 고정, RTS/CTS 모드는 비활성화, 내부 경계조건으로서 메쉬 게이트웨이에 0의 포텐셜 값, 외부 경계조건으로서 가상노드에 1의 포텐셜 값, η_i 은 2×10^{-4} , Hello 메시지 전송주기는 0.2초로 설정하고, 이러한 설정하에 20Kbyte의 UDP패킷을 생성하여 테스트를 수행하였다. 트래픽 생성 시나리오로서 소스 노드 MN12가 5Mbps의 일정량의 트래픽을 생성하도록 하고, 노드 MN16이 동시에 10Mbps의 혼잡 트래픽을 생성한다. 네트워크 혼잡상황을 극복하기 위한 시나리오를 연출하기 위해 실험 도중에 노드 MN11을 추가한다. 마지막으로, 일시적인 영향을 제거하기 위해 실험 수행 시간 중 80초 동안의 데이터를 수집한다.

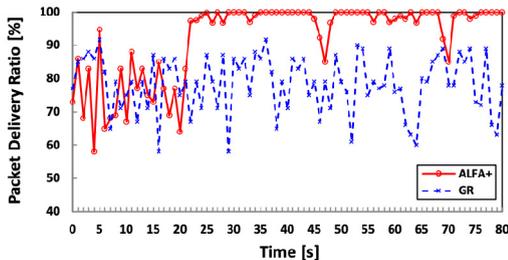


[Fig. 2] Indoor three-dimensional WMN topology

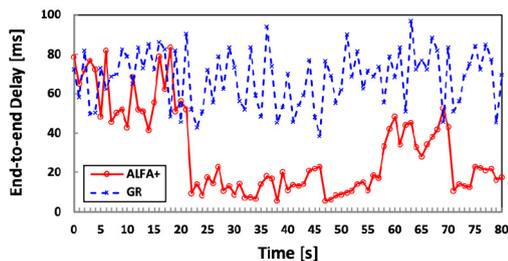
3.3 실험 결과

위에서 언급한 시나리오에서 패킷 전달률과 종단 간 지연시간에 대해 관측한 결과를 분석한다.

Fig. 3에서 처음 20초 동안의 데이터는 높은 트래픽 부하로 인한 혼잡 상태를 나타내고, 20초 시점에는 새로운 노드를 추가한다. ALFA+의 경우 새로운 노드 추가 후 2초 만에 패킷 전달률이 75%에서 98%로 개선되는 것을 볼 수 있다. 반면 GR은 뚜렷한 차이가 없이 여전히 78%의 패킷 전달률을 유지한다. 그 이유는 GR이 지리정보만을 고려하는 반면, ALFA+는 지리정보 뿐 아니라 트래픽 부하도 동시에 고려하여 다양한 경로를 통해 로드 밸런싱을 하기 때문이다. 좀 더 구체적으로 살펴보면, ALFA+의 패킷 전달률이 두 지점(47초경, 70초경)에서 급격한 하락이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이 현상은 트래픽 상황이 계속 변함에 따라 ALFA+가 그러한 동적인 상황을 반영하여 그때그때 포텐셜 필드를 업데이트하기 때문으로 보인다.



[Fig. 3] Packet delivery rate over time



[Fig. 4] End-to-end delay over time

반면에, Fig. 4에서는 종단 간 지연시간 관점에서 라우팅 기법의 성능을 보여준다. 가장 주목할 점은 ALFA+는 새로운 노드 추가에 유연하게 반응하여 이른 시점에 지연 시간을 줄였다는 점이다. 이러한 결과는 ALFA+가 한 홉 이웃노드의 정보만을 필요로 한다는 점과 지리 정보와 트래픽 부하정보를 동시에 고려함으로써 새로운 노

드 추가로 인해 활용가능한 대체 경로를 즉각적으로 활용할 수 있다는 ALFA+만의 강점에 의한 것이다. 반면, GR은 지리정보만을 고려하는 간단한 라우팅 메트릭으로 인해 어떤 개선도 관찰되지 않았다. 좀더 구체적으로 살펴보면, ALFA+의 경우, 45초와 69초경에 갑작스러운 변경점이 나타난다. 그 이유는 Fig. 3의 급격한 하락의 경우와 유사하게, 일시적인 경로 변경상황으로 인해 불필요한 경로를 일시적으로 헤매며 지연시간이 증가한 것으로 보인다.

위와 같은 실험 결과를 통해 ALFA+가 실험경에서도 양호한 서비스 품질을 보장하기 위해 활용 가능한 솔루션임을 보여준 것으로 큰 의의가 있다.

4. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법인 ALFA+의 구현과 관련된 세부 사항을 다룬다. 특히, 이전 논문들에서 다루지 못한 알고리즘 구조, 구현과정에서 발생한 이슈 및 해결책을 설명한다. 또한, ALFA+의 실제 활용 가능성을 검증하기 위해 IEEE 802.11 기반 3차원 WMN 테스트베드를 구축하고 ALFA+의 성능을 해당 테스트베드에서 ALFA+의 성능을 평가한다. 실험 결과는 ALFA+가 네트워크 상황에 유연하게 적응하며 자율 로드 밸런싱 특성을 통해 우수한 성능을 보여주는 라우팅 기법임을 보여준다.

향후 연구에서는 본 논문에서 비교한 GR을 포함하여 지리정보와 큐 길이를 동시에 고려하는 다양한 기법들과도 비교해볼 예정이다. 이 과정에서, 패킷 전달률 및 종단 간 지연시간과 같은 네트워크 성능 뿐만 아니라 처리 시간 및 리소스 소진량과 같은 시스템 측면에서의 오버헤드도 비교 분석할 예정이다. 또한, 실제 상용 장비에서의 구현 방식 차이는 결과에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에, 기법간 신뢰성 있는 비교를 가능하게 하는 방법론 개발이 필요하다. 이러한 연구를 통해 ALFA+의 활용 가치를 더 심도있게 검증할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] K.Keshav and K.Vineet, Wireless Mesh Networks Market [Internet], <https://www.alliedmarketresearch.com/wireless-mesh-networks-market-A31620>, 2022.

[2] A.Verma and H.Singh, Wireless Mesh Network Market, Key Insights [Internet], <https://www.researchnester.com/reports/wireless-mesh-network-market/5024>, 2023.

[3] C.Choi., "A Study On IoT Data Consistency in IoT Environment," *Journal of The Korea Internet of Things Society*, Vol.8, No.5, pp.127-132, 2022.

[4] Y.Kyung, T.Kim, and Y.Kim, "Retained Message Delivery Scheme utilizing Reinforcement Learning in MQTT-based IoT Networks," *Journal of The Korea Internet of Things Society*, Vol.10, No.2, pp.131-135, 2024.

[5] S.Jung, M.Kserawi, D.Lee, and J.K.Rhee, "Distributed potential field based routing and autonomous load balancing for wireless mesh networks," *IEEE Communications Letters*, Vol.13, No.6, pp. 429-431, 2009.

[6] S.Jung, D.Lee, M.Kserawi, and J.K.Rhee, "Autonomous load balancing anycast routing protocol for wireless mesh networks," in *Proc. 2009 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops*, Kos, Greece, 2009.

[7] S.Jung, J.Sung, B.Bang, M.Kserawi, H.Kim, and J.K.Rhee, "Greedy local routing strategy for autonomous global load balancing based on three-dimensional potential field," *IEEE Communications Letters*, Vol.14, No.9, pp. 839-841, 2010.

[8] J.M.Jin. The finite element method in electromagnetics, Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

[9] Z.Li and M.Reed, "Convergence analysis for an element-by-element finite element method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.1231995, 123, pp. 33-42.

[10] W.E.Boyce and R.C.DiPrima, Elementary differential equations and boundary value problems, Hoboken: Wiley, 2020.

[11] J.Sung, Y.Kyung, "Fine-Grained Boundary Conditions in Field-Based Routing," *Sensors*, Vol.24, No.3, p. 813, 2024.

[12] Linksys WRT150N, [Online]. Available: https://downloads.linksys.com/downloads/userguide/1224638359127/WRT150N_ug.pdf.

[13] DD-WRT, [Online]. Available: <http://dd-wrt.com/>.

[14] M.Gates, A.Tirumala, J.Ferguson, J.Dugan, F.Qin, K.Gibbs, and J.Estabrook. Iperf. [Online]. Available: <http://sourceforge.net/projects/iperf/>.

[15] B.Karp and H.T. Kung, "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks," in *Proc. MobiCom*, Boston, USA, 2000.

성 지 훈(Jihoon Sung)

[정회원]



- 2008년 2월 : 충남대학교 전기정보통신공학부(공학사)
- 2010년 1월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학석사)
- 2016년 8월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학석사)
- 2016년 9월 ~ 2020년 8월 : 삼성전자 무선사업부 책임연구원

<관심분야>

사물인터넷(IoT), 5G/6G, 네트워크 지능화

경 연 웅(Yeunwoong Kyung)

[종신회원]



- 2011년 2월 : 고려대학교 전기전자공학부(공학사)
- 2016년 8월 : 고려대학교 전기전자공학부(공학박사)
- 2016년 9월 ~ 2020년 3월 : 삼성전자 무선사업부 책임연구원

- 2020년 3월 ~ 2022년 8월 : 한신대학교 컴퓨터공학부 교수
- 2022년 9월 ~ 현재 : 국립공주대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야>

사물인터넷(IoT), SDN, 5G/6G, 이동성, 모바일 서비스