

# 동적 네트워크 환경 적응형 포텐셜 필드 기반 무선 멀티홉 라우팅 기법

성지훈<sup>1</sup>, 경연웅<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술원 전기및전자공학과 박사, <sup>2</sup>국립공주대학교 정보통신공학과 교수

## Adaptive Potential Field-Based Wireless Multihop Routing for Dynamic Network Environments

Jihoon Sung<sup>1</sup>, Yeunwoong Kyung<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Department of Electrical Engineering, KAIST

<sup>2</sup>Professor, Division of Information & Communication Engineering, Kongju National University

**요약** 본 연구는 무선 멀티홉 네트워크를 위한 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법을 기초로 하며, 특히 네트워크 환경의 동적 변화에 대응할 수 있는 방법으로 네트워크 홀 문제를 해결하기 위해 기존에 제안된 가상노드 기법의 유효성을 탐구한다. 이전 연구들은 가상노드 기법을 적용한 해당 라우팅 기법이 네트워크 홀 문제 상황에서 우수한 성능을 보였음을 확인했지만, 동적인 네트워크 상황을 고려한 시도는 없었다. 본 연구는 링크 손실이나 노드 고장과 같은 동적 네트워크 변화를 직접 고려하며 가상노드 기법을 적용한 포텐셜 필드 라우팅 기법의 적응성을 검증하고자 한다. 이를 위해 NS-3 시뮬레이터를 활용하여 성능 평가를 수행하며, 기존 접근법들과 비교하여 해당 기법의 동적 네트워크 변화 상황에 대한 향상된 적응성을 입증한다. 본 연구는 실제 네트워크에서 발생할 수 있는 동적인 네트워크 상황 변화에 대응할 수 있는 해법을 찾았다는 점과 그 해법으로 기존 가상노드 기법의 활용 범위를 확대하였다는 점에서 의의가 있다.

**주제어** : 무선 멀티홉 네트워크; 포텐셜 필드 라우팅; 가상노드; 동적 네트워크 환경; 적응형 기법

**Abstract** This paper focuses on the potential field-based routing scheme developed for wireless multihop networks, emphasizing the exploration of the previously proposed virtual node concept to address network hole problems in dynamic network environments. Previous studies have demonstrated the superior performance of integrating the virtual node scheme into this routing strategy under network hole scenarios, but they have not addressed dynamic network conditions. This study directly considers dynamic network changes such as link failures or node breakdowns, validating the adaptability of the potential-field routing scheme integrated with the virtual node concept. Performance evaluations using the NS-3 simulator are conducted to demonstrate its improved adaptability to dynamic network change situations, compared to conventional approaches. This study highlights the significance of exploring new applications of the virtual node concept for effectively managing dynamic network changes in real-world scenarios.

**Key Words** : Wireless multihop networks, Potential field-based routing, Virtual node, Dynamic network environment, Adaptive method

\*교신저자 : 경연웅(ywkyung@kongju.ac.kr)

접수일 2024년 08월 23일 수정일 2024년 09월 23일 심사완료일 2024년 10월 14일

## 1. 서론

무선 멀티홉 네트워크(WMN)는 비용 효율적으로 지리적 제약상황에서도 유연하게 구축할 수 있어 활용 가능성이 높아 꾸준히 연구되어 왔다 [1,2]. 또한, 학계의 연구를 뛰어넘어, Internet of Things (IoT) 관련 시나리오를 포함하여 실제 필드에서도 다양하게 활용되고 있다 [3-6].

이러한 높은 활용성에도 불구하고, WMN는 무선 환경에서 멀티홉을 통해 패킷을 전달하기 때문에 효율적인 패킷 라우팅 문제는 오랫동안 중요한 연구 주제로 자리잡아 왔다. 이러한 맥락에서, 목적지 노드까지의 거리와 지역적 트래픽 혼잡도를 동시에 고려하는 라우팅 기법으로 전자기학에서 영감을 받아 고안된 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법이 소개되었다 [7]. [7]를 포함하여 대부분의 이전 연구[8-10]에서는 전자기학의 방정식을 기반으로 해당 기법의 모델링 방법을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 제안 방식의 성능을 검증해왔다. 그러나, 제안 모델의 근원인 전자기학에서의 방정식은 경계 조건에 따라 해가 달라지는 중요한 특성이 있음에도 불구하고, 이를 심도 있게 고찰하지 않고 단순한 조건을 적용함으로써 이러한 특성이 모델링 과정에서 사실상 간과되어 왔다. 최근, 이러한 단순한 경계 조건의 한계에 주목하여 고도화된 경계 조건을 기반으로 하는 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법이 제안되었다 [11]. 이 고도화된 경계 조건을 통해 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법은 기존 단순한 경계 조건에 따라 불규칙적인 노드 배치를 갖는 네트워크에서 이웃 노드들로 사방이 둘러싸여 있지 않아 발생하는 포텐셜 값을 계산할 수 없는 문제를 가상노드라는 개념을 도입하여 극복할 수 있게 되었다. 지리적 제약으로 인해 불규칙적인 노드 배치를 갖는 네트워크가 실제 환경에서는 흔히 발생할 수 있다는 점을 감안할 때, 가상노드 기법의 가치는 매우 크다고 할 수 있다. 그러나, 이전 연구[11]에서는 불규칙적인 노드 배치 상황을 고려했지만, 노드 고장으로 인해 노드 배치 상황이 시간에 따라 동적으로 변하는 상황에 대한 고려는 하지 않았고, 해당 시나리오에서의 성능 검증 또한 수행되지 않았다.

이러한 맥락에서 본 논문에서는 실제 네트워크에서 발생할 수 있는 노드고장과 같은 동적 네트워크 변화 상황에 신속하게 대응할 수 있는 방법을 탐구한다. 해결 방안으로 기존 가상노드 기법을 활용하는 방법을 소개한 이후, 동적 네트워크 변화 상황을 직접적으로 고려하여 성능 검증을 수행한다. 이를 통해 궁극적으로 기존 포텐셜

필드 기반 라우팅 기법이 동적 네트워크 환경 적응형으로 진화할 수 있음을 보인다.

## 2. 관련 연구

이 절에서는 제안하는 방법에 대한 이해를 돕기 위해, 이전 연구[7-10]에서 제안된 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법에 대한 개요를 설명하고, 이를 기반으로 본 연구의 동기를 소개한다.

포텐셜 필드 기반 라우팅은 전자기학에서 양전하와 음전하 간의 인력 및 척력의 관계를 네트워크 라우팅 문제에 접목시켜 고안된 라우팅 기법이다. 즉, 음전하가 특정 위치에 고정되어 있고 양전하가 임의의 위치에서 생성되면, 두 전하 간의 인력에 의해 양전하는 음전하 쪽으로 끌려가게 될 것이다. 동시에 다른 위치에서 별개의 양전하가 발생하면, 두 양전하는 모두 음전하 쪽으로 끌려가면서 동시에 서로 밀어내는 척력이 발생하게 될 것이다. 이러한 움직임 특성에 착안하여, 양전하를 패킷에, 음전하를 목적지 노드에 개념적으로 매핑하여 패킷이 생성되면 기본적으로 목적지 노드로 향하되, 패킷들이 혼잡한 지역에서는 서로 우회하여 목적지 노드로 향하도록 설계되었다. 전자기학에서 위에서 설명한 전하간 관계성은 아래 포아송 방정식에 의해 수식화되어왔다.

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

위 식에서,  $\phi$ 는 포텐셜 값 (단위,  $V$ ),  $\epsilon$ 는 비유전율 (단위,  $C/Vm$ ),  $\rho$ 는 볼륨전하밀도 (단위,  $C/m^3$ )를 의미한다. 이 수식에 위에서 설명한 개념 매핑을 토대로 아래와 같은 라우팅 메트릭을 고안하였다.

$$\phi(n) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (\phi_{n,i+1} \vec{d}_{n,i} - \phi_{n,i} \vec{d}_{n,i+1}) (\vec{d}_{n,i} - \vec{d}_{n,i+1}) + \eta \rho(n)}{\sum_{i=0}^{N-1} \|\vec{d}_{n,i} - \vec{d}_{n,i+1}\|^2}, \quad (2)$$

위 식에서,  $\phi(n)$ 는 노드  $n$ 의 포텐셜 값,  $N$ 은 전체 노드의 수,  $\phi_{n,i}$ 는 노드  $n$ 의  $i$ 번째 이웃노드의 포텐셜 값,  $\vec{d}_{n,i}$ 는 노드  $n$ 에서 노드  $i$ 까지의 상대거리 벡터,  $\eta$ 는 큐에 있는 패킷수에 대한 민감도,  $\rho(n)$ 는 노드  $n$ 의 큐에 있는 패킷수를 의미한다. 여기서 언급하는 노드  $n$ 은 WMN에서 패킷을 생성하거나 중간에 패킷을 전달하는 릴레이노드를 의미한다. 또한, 본 논문에서 별도의 언급이 없는 한, 노드는 릴레이노드를 지칭한다.

앞서 설명한 바와 같이, 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법은 포아송 방정식을 통해 모델링되었으며, 포아송 방정식과 같은 미분방정식을 풀기 위해서는 필연적으로 경계 조건이 필요하다 [12]. 또한, 경계 조건에 따라 미분방정식의 해가 달라지기 때문에 경계 조건의 설정은 매우 중요한 요소이다. 이를 네트워크 관점에서 보면, 미분방정식의 해는 노드들의 포텐셜 값에 해당하며, 특정 노드는 포텐셜 값의 차이가 가장 큰 노드를 다음 홉 노드로 결정하기 때문에 경계 조건에 따라 라우팅 성능이 달라지게 된다. 이러한 중요성에도 불구하고, 기존 대부분의 관련연구[7-10]에서는 경계 조건에 대해 깊이 있게 고찰하지 않고, 목적지 노드에 해당하는 내부 경계 노드에는 임의의 가장 작은 상수값을, 일반 릴레이노드 중 네트워크 외곽 지역에 있는 노드에 해당하는 외부 경계 노드에는 임의의 가장 큰 상수값을 포텐셜 값으로 할당하는 가장 단순한 방식을 적용해왔다.

이러한 기존의 한계를 극복하기 위해, 최근 [11]에서는 기존의 단순화된 경계 조건을 면밀히 분석하고 이를 보완하는 고도화된 경계 조건을 제안하였다. 요약하자면, 기존 경계 조건은 노드의 물리적 배치 위치만을 기반으로 수동으로 경계노드를 지정하고, 지정된 경계노드에 동일한 포텐셜 값을 할당하도록 되어 있어, 경계 조건 적용시 번거로울 뿐만 아니라 주관적일 수 있는 수동적인 경계노드 선정작업이 요구되었으며, 경계노드들에 동일한 포텐셜 값이 배정됨으로써 달성할 수 있는 라우팅 성능이 제한적일 수밖에 없는 한계가 있었다. 이를 극복하기 위해, [11]에서는 이웃 노드들의 배치 상황을 기반으로 주관적이지 않고 일관된 방식으로 경계노드를 선정할 수 있는 알고리즘 기반 자동화된 방법을 도입하고, 가상 노드 개념을 적용하여 경계 노드의 포텐셜 값을 설정할 때 네트워크 내부 릴레이노드가 포텐셜 값을 정하는 방식과 동일하게 (2)를 활용할 수 있도록 하였다. 이를 통해 경계 노드들 간에도 서로 다른 포텐셜 값을 할당하여 경계 노드가 다음 홉으로 활용될 수 있게 하여 달성 가능한 라우팅 성능을 극대화하였다. 더 나아가, (2)를 활용하여 포텐셜 값을 계산할 때, 해당 노드가 이웃 노드들과 삼각형을 형성하며 열린 구간없이 삼각형들로 둘러싸여 있어야 계산이 가능하다는 제약 조건을 극복하기 위해 고도화된 경계 조건을 설계하는 과정에서 도입된 가상 노드 개념을 활용하였다. 결과적으로, 이웃노드가 없는 구역에 가상 노드를 배치하고(본 논문에서는 [11]의 가상 노드 배치 방법을 차용하였으므로, 구체적인 배치방법은 해당 문헌을 참고) 해당 가상 노드에 임의의 가장 큰 상

수값을 배정하여 (2)를 기반으로 포텐셜 값을 계산함으로써, 이웃노드가 적은 가상 노드가 배치된 구역에서 이웃노드가 많은 네트워크 내부 구역으로 패킷이 전송될 수 있도록 하였다. 또한, 가상 노드를 활용했을 때 유도되는 이런 동작 특성을 네트워크 홉 문제에 접목하여, 해당 문제를 해결할 방안을 제시하였으며, 시뮬레이션 실험을 통해 이와 관련된 성능 검증도 수행하였다.

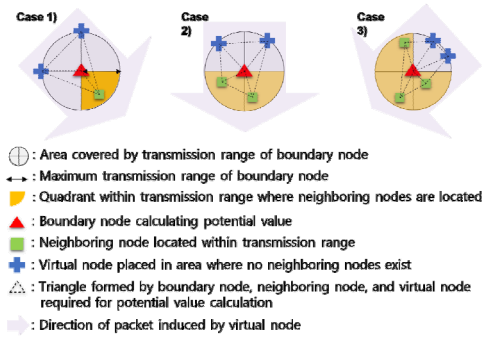
이후 포텐셜 필드 기반 라우팅에 대한 후속 연구 [13,14]가 진행되었으나, 여전히 노드 고장과 같은 동적 네트워크 상황 변화를 직접적으로 고려하여 포텐셜 필드 기반 라우팅의 유효성을 검증한 바가 없다.

### 3. 제안하는 방법

본 논문에서는 앞서 설명한 연구배경을 기반으로 노드 고장과 같은 동적 네트워크 상황이 네트워크 운영 도중 발생하는 상황에서도 고도화된 경계 조건을 적용한 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법이 유연하게 대응하여 동작할 수 있는지에 대해 살펴보고자 한다.

앞 절에서 설명한 바와 같이, 고도화된 경계 조건의 핵심은 가상노드 개념을 도입함으로써 어떠한 노드 배치 상태를 갖는 네트워크에서도 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법을 일관되게 동작시킬 수 있다는 점이다. 또한, 이러한 맥락에서 [11]에서는 인위적으로 생성된 네트워크 홉이 있는 격자형 및 비격자형 네트워크 토폴로지 뿐만 아니라, 실환경에 실제 구축된 네트워크로서 공간 제약으로 인해 네트워크 홉이 내재된 구굴 와이파이 네트워크 토폴로지 등 다양한 네트워크 토폴로지에서도 수율 및 패킷 전달률에 대한 성능 평가를 수행하여, 고도화된 경계 조건이 적용된 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법이 네트워크 홉이 존재하는 임의의 네트워크에서도 우수한 성능을 보임을 입증하였다. 그러나, 네트워크 배치 상황이 시뮬레이션 실험 도중에 변하는 동적인 네트워크 상황은 고려되지 않았다. 실환경 네트워크에서는 노드고장 상황이 불시에 언제든지 발생할 수 있기 때문에, 이러한 상황에서도 제안된 방법이 큰 문제없이 정상적으로 동작하는지 검증하는 것은 실제 활용성 검증 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 동적으로 네트워크 배치 상황이 변하는 상황에서도 유연하게 대응할 수 있는 방법으로서 포텐셜 필드 라우팅 기법이 가상노드 기법을 활용하는 방식을 제안한다. 기본적으로 포텐셜 필드 라우팅 기법은 주기적으로 이웃노드와 노드의

위치 정보 및 포텐셜 값을 포함하는 hello 메시지를 교환하는 방식으로 동작하기 때문에, 만약 불시에 이웃노드 중 일부가 고장난 경우, 각 노드는 다음 포텐셜 값을 계산하는 시점에 고장노드가 없다고 가정하고 경계조건에 따라 필요한 경우 해당 구역에 가상노드를 배치하여 (2)를 기반으로 포텐셜 값을 계산하게 된다. 본 논문에서는 [11]에서의 가상노드배치규칙을 그대로 차용하였으며, 이해를 돕기 위해 Fig. 1에서 이를 도식화하였다.



[Fig. 1] Virtual node scheme diagram

이러한 과정을 통해 네트워크 배치 상황이 동적으로 바뀌더라도 가상노드 기법을 활용하여 포텐셜 필드 라우팅 기법이 환경에 적응할 수 있게 된다.

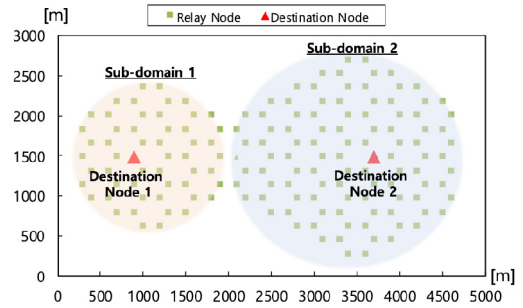
## 4. 성능 분석

### 4.1 시뮬레이션 개요

본 논문에서는 이전 논문[11]에서와 같이 NS-3 시뮬레이터[15]를 통한 가상환경 기반 시뮬레이션을 통해 성능 검증을 수행한다. 주요 관심사인 노드고장과 같은 동적인 네트워크 상황을 연출한 상태에서, 제안하는 가상노드 기법을 활용하는 고도화된 경계 조건 기반 모델을 기존 단순한 경계 조건 기반 모델과 비교하여 성능을 평가한다.

### 4.2 시뮬레이션 시나리오

본 연구의 목표가 가상노드 기법을 활용하는 고도화된 경계 조건을 적용한 포텐셜 필드 기반 라우팅이 동적인 네트워크 상황에서도 유연하게 대응할 수 있는지를 검증하는 것인 점을 감안하여, 동적 네트워크 상황을 노드고장을 통해 연출하고, 이로 인해 성능 열화가 발생할 수



[Fig. 2] Simulation network topology

있는 상황을 연출한 상태에서 제안 기법과 기존 기법간의 성능 비교를 수행하였다. 성능 평가를 위한 네트워크 토폴로지는 Fig. 2에서와 같이 2개의 서브 도메인으로 나뉘는 총 154개 노드로 구성된 토폴로지를 고려하였다. 이 때, 앞서 설명한 성능 열화가 뚜렷하게 발생할 수 있는 상황 연출을 위해 절대적인 노드배치수가 적어 동일한 노드 고장이 발생하더라도 그것으로 인한 임팩트가 큰 서브 도메인 중간구역에서 노드 고장이 집중적으로 발생하도록 하였다. 좀더 구체적으로 설명하자면, 서브 도메인 중간구역에서 10개 노드를 무작위로 추출하여, 전체 목적지 노드수와 링크 대역폭의 곱을 100%로 간주할 때 30%에 해당하는 트래픽이 해당 10개 노드들에 의해 발생하도록 하여 혼잡구역이 발생하도록 하고, 동시에 해당 구역 이외 구역에서 무작위로 선택된 노드들에 의해 10%의 백그라운드 트래픽이 생성되도록 연출하였다. 여기서 모든 노드의 트래픽 생성은 이 방식은 [11]에서처럼 포아송 분포를 따른다고 가정하여 위에서 백분율로 설명한 트래픽양과 트래픽 생성노드수를 고려하여 포아송 분포에서의 트래픽 생성률이 자동계산되도록 하고, 해당 값을 시뮬레이션 파라미터에 자동입력되도록 하였다. 이후에 노드고장 상황 연출을 위해 시뮬레이션 중간에 서브 도메인 중간구역에서 30%에 해당하는 트래픽 생성을 위해 선택된 10개의 노드들에 대해 시뮬레이션 시작과 끝 중간 시간대에 정상동작이 하지 않도록 고장 상황을 연출시키고 이런 상황에서 제안 기법 및 기존 기법간 성능 비교를 수행하였다. 가상노드를 활용하는 제안 방식으로 인한 효과를 파악하는 것이 본 논문의 주된 포인트인 점을 감안하여 가상노드 기법과 직접적인 관계가 없는 내부 경계 조건은 단순히 목적지 노드에 가장 작은 상수값을 포텐셜 값으로 할당하는 기존 Dirichlet 모델을 적용하였다.

기타 시뮬레이션 파라미터로는, 최근 연구[11]에서와

동일하게 고도화된 경계 조건을 적용하여, 목적지 노드에는 가장 낮은 상수값인 0을, 가상노드에는 가장 높은 상수값인 1을 할당하였다. 또한, 각 노드의 전송거리는 250m, 간섭거리는 550m로 각각 설정하였고, RTS/CTS와 hello-message-jitter 파라미터는 활성화상태로 설정하였다. 이외에도 최대 큐 사이즈는 100으로,  $\eta$ 는 경험적으로 최적의 성능을 보인  $10^{-4}$ 로 설정하였으며, 생성 패킷의 종류 및 크기는 1,000바이트의 UDP 패킷으로, 채널 대역폭은 2Mbps로 설정하였다. 이처럼, 위에 언급된 모든 시뮬레이션 파라미터는 최근 연구[11]와 동일하게 설정되었으며, 별도로 언급되지 않은 파라미터는 기본값을 적용하였다.

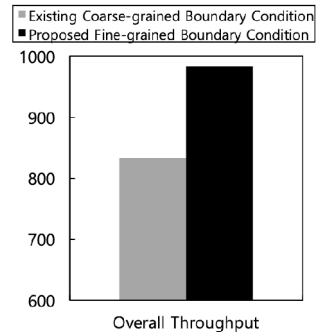
위와 같은 시뮬레이션 파라미터 설정 하에, 성능 평가를 위해 총 1,000 시간단위 시뮬레이션 중 600 시간단위에 대한 데이터만을 활용하여 수율 및 패킷 전달률이라는 두 가지 성능 지표를 측정하였다. 이 때, 결과의 신뢰도를 높이는 차원에서 모든 시뮬레이션은 각 시나리오별로 10회 반복수행하였고, 반복수행을 통해 관측된 값의 평균값을 그래프에 나타냈다.

### 4.3 시뮬레이션 결과

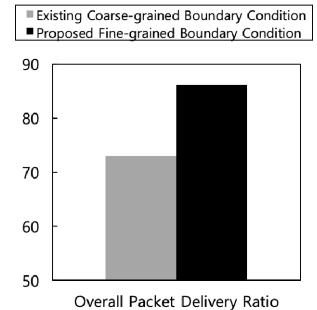
동적 네트워크 상황에서도 제안 기법이 유연하게 대응할 수 있는지를 검증하기 위해 이전 절에서 설명한 시나리오에서 패킷전달률 및 수율에 대해 관측한 결과를 분석해보고자 한다.

Fig. 3에서 기존 단순 경계 조건을 적용한 포텐셜 필드 기반 라우팅의 경우 약 830Kbps의 수율을 달성한 반면, 제안하는 고도화된 경계 조건을 적용한 포텐셜 필드 기반 라우팅의 경우 기존 기법 대비 약 18%가량 개선된 약 980Kbps의 수율을 달성하는 것을 볼 수 있다. 다른 성능 지표에 대한 결과로서 Fig. 4에서는 노드고장 상황에서 경계 조건별 패킷 전달률을 보여주고 있는데, 기존 기법의 경우 73%가량의 패킷 전달률을 보이는 반면, 제안 기법에 의해서는 86%가량의 패킷 전달률을 보여 제안 기법이 기존 기법 대비 약 18%가량 개선된 성능을 보임을 확인할 수 있다. 이렇듯 위와 같은 성능 분석을 통해서 가상노드 개념을 도입하여 포텐셜 필드 기반 라우팅에 적용시킨 제안기법이 기존 기법대비 노드고장이 발생하는 동적인 네트워크 상황에서도 유연하게 대응할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 동적 상황에 대한 적응력은 이전 절에서 설명한 바와 같이, 제안하는 기법이 노드 위치 정보와 포텐셜 값을 포함하는 hello 메시지를 이웃노

드와 주기적으로 주고받는 과정을 통해, 이웃노드 중 일부가 고장난 경우 이를 자연스럽게 인지할 수 있는 메커니즘에서 비롯된다. 이 때, 다음 포텐셜 값을 계산하는 시점에 해당 고장노드가 없다고 가정하고, 고도화된 경계조건에 따라 필요한 경우 해당 구역에 가상노드를 배치한 상태에서 포텐셜 값을 계산하게 된다. 만약 가상노드를 배치한 상태에서 포텐셜 값을 계산하게 되면, 자연스럽게 가상노드가 배치된 구역에서 이웃노드가 있는 네트워크 내부 방향으로 패킷이 전송되도록 유도될 것이며, 이러한 이점을 기반으로 Fig. 3과 Fig. 4에서와 같은 향상된 성능을 보이게 되는 것이다.



[Fig. 3] Overall throughput under different boundary conditions in node failure scenarios



[Fig. 4] Overall packet delivery ratio under different boundary conditions in node failure scenarios

이러한 적응형 기법에 의한 성능 향상은 변칙적인 상황이 발생할 가능성이 높은 실환경 네트워크에서 구동되는 기법에 요구되는 중요한 사항이라는 점에서, 제안 기법의 적응력을 검증한 것은 큰 의미가 있다.

## 5. 결론 및 향후 연구

본 논문은 노드고장과 같은 동적 네트워크 상황에서도 유연하게 대응할 수 있는 가상노드 기법을 활용한 포텐셜 필드 기반 라우팅 전략을 제시하고, 시뮬레이션을 통해 제안 전략의 경쟁력을 검증하고자 한다. 결과적으로, 제안하는 고도화된 경계 조건이 적용된 포텐셜 필드 기반 라우팅은 동적인 네트워크 상황에서도 일관되게 우수한 라우팅 성능을 달성하였다.

향후 연구에서는 더 다양한 시나리오를 고려한 가상환경 및 더 나아가 실환경에서의 성능 평가를 수행하여, 가상노드 기법이 적용된 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법의 더욱 폭넓은 상황에서의 적응성을 검증할 것이다. 또한, 경계 조건을 더욱 세밀하게 조정하여 주어진 네트워크 환경에 맞게 최적의 라우팅 성능을 달성할 수 있도록 하는 방법론에 대한 연구를 진행할 계획이다. 이러한 연구를 통해 실제 환경에서 활용성이 높은 기법으로 진화하는 방향을 모색해보고자 한다.

## REFERENCES

- [1] A.W.L.Wong, S.L.Goh, M.K.Hasan, and S.Fattah, "Multi-hop and mesh for LoRa networks: Recent advancements, issues, and recommended applications," *ACM Computing Surveys*, Vol.56, No.6, pp.1-43, 2024.
- [2] J.P.A.Leon, L.J.de la Cruz Llopis, and F.J.Rico-Novella, "A machine learning based distributed congestion control protocol for multi-hop wireless networks," *Computer Networks*, Vol.231, p.109813, 2023.
- [3] J.Gu, M.Park, S.Lee, H.Kang, and B.Kim, "Evaluation of a Multi-Hop Wireless Internet-of-Things Network on Large Ships," *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol.11, No.12, p.2243, 2023.
- [4] L.Leonardi, L.L.Bello, and G.Patti, "MRT-LoRa: A multi-hop real-time communication protocol for industrial IoT applications over LoRa networks," *Computer Communications*, Vol.199, pp.72-86, 2023.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] S.Jung, D.Lee, M.Kserawi, and J.K.K.Rhee, "Autonomous load balancing anycast routing for wireless mesh networks: VoIP call support," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on on Consumer Electronics*, Kyoto, Japan, 2009.
- [9] S.Jung, D.Lee, M.Kserawi, and J.K.Rhee, "Autonomous load balancing anycast routing protocol for wireless mesh networks," in *Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops*, Kos, Greece, 2009.
- [10] S.Jung, M.Kserawi, and J.K.K.Rhee, "Potential-field-based anycast routing in large-scale wireless mesh networks: A distributed algorithm based on finite difference method," *Journal of KIISE: Computing Practices and Letters*, Vol.16, No.6, pp.683-687, 2010.
- [11] J.Sung and Y.Kyung, "Fine-Grained Boundary Conditions in Field-Based Routing," *Sensors*, Vol.24, No.3, p.813, 2024.
- [12] W.E.Boyce and R.C.DiPrima, *Elementary differential equations and boundary value problems*, Hoboken: Wiley, 2020.
- [13] J.Sung and Y.Kyung, "In-depth study of potential-based routing and new exploration of its scheduling integration," *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol.140, No.3, pp.2891-2911, 2024.
- [14] J.Sung and Y.Kyung, "Implementation of Potential Field-Based Routing for Wireless Mesh Networks and its Performance Evaluation in Real-World Testbed," *Journal of The Korea Internet of Things Society*, Vol.10, No.3, pp.1-6, 2024.
- [15] NS-3, [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>.

### 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