

# 무선 애드혹 네트워크에서 노드 비 겹침 경로문제를 위한 타부 서치 알고리즘

김 재 환\*, 장 길 웅<sup>o</sup>

## Tabu Search Algorithm for Node-Disjoint Path Problem in Wireless Ad-Hoc Networks

Jae-Hwan Kim\*, Kil-Woong Jang<sup>o</sup>

요 약

본 논문에서는 무선 애드혹 네트워크에서 노드 쌍 간에 노드 비 겹침 경로문제를 위한 최적화 알고리즘을 제안한다. 노드 비 겹침 경로문제는 소스 노드와 목적 노드 간에 서로 다른 중간 노드를 사용하여 다수의 경로를 설정하는 문제이다. 본 논문은 메타 휴리스틱 방식의 하나인 타부 서치 알고리즘을 사용하여 많은 수의 노드가 배치된 무선 애드혹 네트워크 환경에서 전송 에너지를 고려한 노드 비 겹침 경로문제를 해결한다. 특히 네트워크 노드의 밀도가 높을수록 노드 비 겹침 경로 문제는 많은 계산량과 시간이 요구된다. 따라서 제안된 알고리즘은 짧은 실행 시간 안에 전송에너지를 최소화하는 노드 비 겹침 경로를 결정한다. 제안된 알고리즘의 성능은 노드 비 겹침 경로에 사용되는 전송에너지양과 결과를 도출하기 위해 필요한 시간 측면에서 평가하였으며, 평가 결과에서 제안된 알고리즘이 기존의 다른 알고리즘에 비해 비슷한 실행시간 내에 전송에너지양을 10-20% 줄일 수 있음을 보였다.

**Key Words** : Wireless ad-hoc networks, node-disjoint path problem, optimization, tabu search

### ABSTRACT

In this paper, we propose an optimization algorithm for the node-disjoint path problem between node pairs in a wireless ad-hoc network. The node-disjoint path problem is to establish multiple paths using different intermediate nodes between source and destination nodes. In a wireless ad-hoc network environment where a large number of nodes are deployed, we solve the node-disjoint path problem considering the transmission energy by using the Tabu search algorithm which is one of the metaheuristic methods. Especially, the higher the density of the network node, the greater the computation time and the time required for the problem. Therefore, the proposed algorithm determines the node-disjoint path that minimizes the transmission energy within a short execution time. The performance of the proposed algorithm was evaluated in terms of the amount of transmission energy used in the node-disjoint path and the time required to derive the result. The results show that the proposed algorithm can reduce the amount of transmitted energy by 10-20% within similar execution time compared to other algorithms.

\* First Author : (ORCID:0000-0002-8248-6352)Korea Maritime and Ocean University, Department of Data Information, jhkim@kmou.ac.kr, 정희원

<sup>o</sup> Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-8447-9965)Korea Maritime and Ocean University, Department of Data Information, jangkw@kmou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201806-B-059-RN, Received May 15, 2018; Revised August 17, 2018; Accepted September 3, 2018

## I. 서 론

네트워크의 신뢰성과 견고성은 네트워크의 관리 측면에서 중요한 요소이다. 특히 실시간 서비스를 요구하는 멀티미디어 서비스에서는 더욱 필요한 특성이다. 초고속의 데이터 전송이 이루어지고 노드의 용량이 기하급수적으로 늘어나는 현재의 네트워크에서 경로상의 노드 또는 경로의 소실은 데이터 전송의 품질을 급격히 떨어뜨리는 원인이 된다. 소실된 경로를 복원하기 위한 방법으로 다중의 분리된 경로를 설정하는 방법이 적용될 수 있다<sup>1,2</sup>.

네트워크에서 노드 비 겹침 문제는 회로 설계, 이동통신 설계, 다중경로설정 등과 같은 다양한 응용분야에서 이론적 또는 실제적으로 적용되어 왔다. 네트워크에서 소스 노드와 목적 노드간의 경로들이 중간 노드가 중첩되지 않도록 설정하는 것을 노드 비 겹침 경로문제(node-disjoint path problem)라고 한다<sup>3</sup>. 특히 광 네트워크와 애드혹 네트워크의 발전으로 노드가 겹치지 않는 경로를 설정하는 것은 미리 설정된 경로에 문제가 발생했을 때 또 다른 경로로 데이터를 전송할 수 있는 네트워크 신뢰성을 높일 수 있는 방안이 될 수 있다. 신뢰성이 높은 네트워크에서는 일반적으로 노드 비 겹침이 된 경로 2개를 구성한다. 하나는 연결설정과 데이터전송을 위하여 사용되고, 하나는 백업용으로 사용된다. 또한 네트워크에서 부하균형(load balancing)과 혼잡제어(congestion control), 처리량 최적화(throughput optimization) 등과 같은 경우에도 노드 비 겹침 문제가 중요한 역할을 할 수 있다<sup>3</sup>.

반면에 네트워크 신뢰성을 높이는 노드 비 겹침 경로문제는 경로중복과 낮은 링크효율로 인하여 네트워크 자원을 비효율적으로 사용하게 된다. 따라서 다중의 노드 비 겹침 경로문제는 에너지 소비를 증가시켜 전체 네트워크의 에너지 효율을 2%에서 10% 정도 떨어뜨리는 것으로 조사되었다<sup>4</sup>. 특히 이 조사에서 라우터와 네트워크 카드가 가장 많은 에너지를 소비하고 있다고 보고하였다. 따라서 트래픽 처리에서 에너지를 효과적으로 사용하기 위해서는 과도하게 네트워크 자원을 사용하지 않는 것이 필요하다.

본 논문에서는 무선 애드혹 네트워크에서 에너지효율을 고려하여 최소에너지를 가지는 2개의 노드 비 겹침 경로문제를 위한 최적화 알고리즘인 타부 서치 알고리즘을 설계하고 성능을 평가한다. 최소에너지를 가지는 노드 비 겹침 경로문제는 조합 최적화문제로 NP-complete로 증명되어있다<sup>5</sup>.

NP-complete 문제는 방대한 계산량과 시간이 요구

된다. 완전 검색 알고리즘(exhaustive search algorithm)과 같은 최적해(global solution)를 찾는 방식은 방대한 계산비용으로 인하여 최근에는 사용되지 않으며, 최적해를 찾기 위한 계산량과 시간을 줄이기 위해 최적해의 근사치를 찾는 메타 휴리스틱 방식이 대안이 될 수 있다. 메타 휴리스틱 방식 중 하나인 타부 서치 알고리즘은 지역 검색 방식을 포함한 최적화 방식이다. 특히 타부 리스트라는 메모리 구조를 이용하여 지역 검색 방식의 효과를 높이고 있다. 타부 서치 알고리즘은 하나의 해에 대해서 인접한 해를 모두 검색함과 동시에 타부 리스트를 이용함으로써 메타 휴리스틱 방식의 약점인 지역해(local optimum)에 빠지는 경우를 다소 극복하고 있다.

이러한 장점을 가진 타부 서치 알고리즘을 이용하여 본 논문에서는 무선 애드혹 네트워크에서 최소 에너지를 위한 노드 비 겹침 경로문제를 해결하고자 한다. 제안된 알고리즘에서는 새로운 이웃해 생성방식을 사용하여 효과적으로 좋은 해에 접근하도록 설계되었으며, 다양한 실험조건에서 경로의 최소에너지와 실행 시간 면에서 기존의 다른 방식과 비교 평가한다.

## II. 관련연구

네트워크의 신뢰성을 높이기 위하여 다양한 방식이 제안되었다. Kandula *et al.*<sup>6</sup>은 경로를 분리하지 않고 다수의 경로 상에 트래픽을 동적으로 분리하는 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 최대 네트워크 활용률을 최소화하는 목적으로 가용한 경로들 간에 소스와 목적지의 트래픽을 분리하는 방식을 제안하였다. Fisher *et al.*<sup>7</sup>은 다수의 물리적인 케이블을 하나의 논리적인 링크로 묶어 중복된 케이블을 정지시킴으로써 경로를 결정하는 방식을 제안하였다. Xiong *et al.*<sup>8</sup>은 경로 증가 방식을 이용하여 최소경로길이를 가진  $k$ 개의 노드 비 겹침 경로를 찾는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 하나의 소스에서 다수의 목적지로 다익스트라 알고리즘을 적용한 2개의 노드 비 겹침 경로를 찾는 방식이다. Lin *et al.*<sup>9</sup>은 최대 전송지연과 최대링크효율을 고려한 2개의 노드 비 겹침 경로를 설정하는 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 네트워크 에너지 사용과 네트워크 장애 허용 간의 균형을 맞추기 위해 트래픽 제어를 사용하고 있다. 중복된 링크를 정지시킴으로써 에너지를 줄이고 링크의 최대이용률을 상한선에 제한함으로써 장애 허용을 줄이고 있다. Kodialam *et al.*<sup>10</sup>은 대역폭과 전송지연을 고려하여 경로를 분리하는 알고리즘을 제안하였다. 제

안된 방식에는 노드 비 겹침과 링크 비 겹침을 결합한 방식으로 제안되었다. Kim<sup>[10]</sup>은 메타 휴리스틱 방식 중 하나인 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘을 이용하여 이동 애드혹 네트워크에서 노드 간 다중경로를 설정하는 방식을 제안하였다.

### III. 문제의 정식화

무선 애드혹 네트워크에서 노드 비 겹침 경로문제를 해결하기 위해 다음과 같은 네트워크 모델과 제약 조건을 고려한다. 본 논문에서 사용된 네트워크 모델은  $N$ 개의 노드를 가진 노드 집합( $V$ )과 노드 간의 거리로 가중치를 설정한 링크 집합( $E$ )으로 구성된 가중치가 있는 비방향성 그래프  $G(V, E)$ 로 나타낸다. 각 노드의 최대전송반경( $R_{max}$ )은 모두 동일하게 설정하였다. 각 링크의 거리는 최대전송반경 안에 있으며, 유클리드 함수에 의해 결정된다. 본 논문에서 다음과 같은 내용을 가정한다. 사용되는 노드는 이동성을 가지지 않는 고정 노드로 가정한다. 또한 각 노드는 GPS 또는 위치식별 알고리즘을 이용하여 위치정보를 가지며, 이 위치정보를 제어 메시지를 통하여 네트워크에 배치된 다른 노드로 전송하여 위치정보를 공유한다.

그림 1은 소스 노드  $S$ 에서 목적 노드  $D$ 로  $k$ 개의 노드 비 겹침 경로를 나타낸 예이다. 이때 설정된 경로의 집합을  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ 라고 하며, 노드 비 겹침 경로문제에 필요한 전송에너지( $E$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(P) = \sum_{i=1}^k E(p_i) \quad (1)$$

여기서  $E(p_i)$ 는 설정된 경로  $p_i$ 에 있는 노드들의 전송 에너지의 총합을 나타내며,  $E(p)$ 는 노드가 겹치지 않는 경로들의 전송에너지 총합을 나타낸다. 본 논문에서 무선 애드혹 네트워크에서 노드 비 겹침 경로문

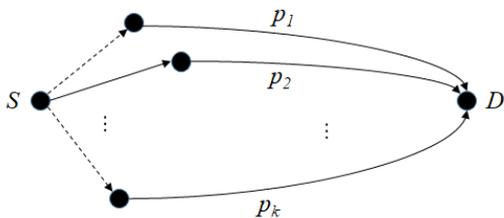


그림 1.  $k$  노드 비 겹침 경로의 예  
Fig. 1. Example of  $k$  node-disjoint paths

제를 해결하기 위한 목적함수는  $E(p)$ 를 최소화하는 것이다. 수식 (1)에서 노드가 겹치지 않는 경로에서 사용된 노드의 전송에너지는 수식 (2)와 같이 다시 정리할 수 있다. 소스 노드는 브로드캐스팅 방식을 이용하여 한번 전송으로 인접노드로 데이터를 전송하며, 그 이후의 경로는 노드들의 전송에너지를 합한 값으로 계산할 수 있다. 따라서 앞서 제시한 네트워크 모델에서 노드 비 겹침 경로문제에서 전송 에너지를 최소화하는 것은 다음과 같이 조합 최적화 문제로 정식화할 수 있다.

최소화

$$E(P) = C(S) + \sum_{x \in P, x \neq S} C(x) \quad (2)$$

여기서  $C(S)$ 는 소스 노드의 전송에너지를 나타내며,  $C(x)$ 는 경로 상에 있는 중간 노드  $x$ 의 전송에너지를 나타낸다. 그림 1에서 소스 노드와 목적 노드를 제외한 경로 상의 다른 중간 노드는 출력 링크를 하나씩 가지며, 소스 노드만 출력 링크를  $k$ 개 가진다. 그러나 무선 네트워크의 특성 중 하나인 브로드캐스팅 방식을 이용하여 소스 노드는 한 번의 브로드캐스팅으로 최대전송거리 내에 있는 모든 노드로 데이터 전송함으로써 전송 에너지를 줄일 수 있다.

### IV. 제안된 타부 서치 알고리즘

이 장에서는 앞서 기술한 노드 비 겹침 경로문제에 대하여 경로 상에 사용되는 전송에너지를 최소화하기 위한 제안된 타부 서치 알고리즘에 대하여 기술한다. 제안된 알고리즘의 전반적인 동작순서는 다음과 같다.

- 단계 1. 인코딩(encoding)
- 단계 2. 하나의 초기해(solution) 생성
- 단계 3. 현재 해를 기준으로 이웃해 생성
  - a. 교환이동(replace move)
  - b. 삭제이동(remove move)
  - c. 새로운 해를 타부리스트에 저장
- 단계 4. 종료 기준을 만족하지 않으면 단계 3으로 이동

좋은 결과를 얻기 위해 우선적으로 해의 구조를 결정해야 한다. 해의 구조는 인코딩을 설계함으로써 이

루어지며, 설계된 인코딩에 따라 알고리즘의 성능과 코딩이 달라진다. 따라서 해에 대한 인코딩은 최적해를 탐색하는 데 중요한 역할을 한다. 해의 인코딩이 결정되면 하나의 초기해를 생성한다. 초기해는 문제에서 제기된 조건식을 만족해야하며, 일단 최적해로 선택되고 타부리스트에 저장된다. 생성된 초기해를 사용하여 이웃해를 생성한다. 이웃해를 생성하기 위해 다양한 이웃해 생성방식을 사용할 수 있다. 여기서 이웃해 생성방식을 이동이라고 부른다.

본 논문에서는 두 가지 이동방법을 제안한다. 제안된 이동방법을 이용하여 다양한 인접해를 생성한다. 이 중에 지금까지 타부리스트에 저장된 해를 제외한 해 중에 가장 좋은 해를 선택하여 현재까지의 최적해와 비교한다. 만약 새로 선택된 좋은 해가 현재까지의 최적해보다 더 우수할 경우, 새로운 해를 최적해로 저장하고 타부리스트에 저장한다. 새로 바뀐 최적해를 사용하여 다시 인접해를 생성하여 동작을 반복한다. 만약 새로 선택된 해가 현재까지의 최적해보다 성능이 나쁠 경우에는 최적해로 저장하지 않는다. 그러나 이 해를 최적해로 선택하지 않지만 다음 세대의 인접해 생성을 위해서 사용되고, 중복된 동작을 방지하기 위해 타부리스트에 저장한다. 같은 방식의 절차에 따라 알고리즘 종료 기준을 만족할 때까지 이웃해 생성 과정을 반복하여 최적해를 결정한다.

#### 4.1 인코딩

제안된 타부 서치 알고리즘은 소스 노드에서 목적 노드까지 노드가 중복되지 않도록 2개의 경로를 설정하는 것이다. 본 논문에서는 인코딩에 필요한 요소로 송신노드와 수신노드, 사용된 전송 에너지를 사용한다. 또한 인코딩에 필요한 네트워크 노드는 소스 노드와 목적 노드, 중간 수신 노드들이다. 그림 2는 소스 노드에서 목적 노드까지 경로를 설정하기 위해 (송신 노드, 수신노드, 전송에너지) 쌍으로 구성된 해의 인코딩을 나타낸 것이다. 여기서  $S$ 는 소스 노드,  $D$ 는 목적 노드,  $x_1, x_2, \dots, x_{k-1}$ 은 경로 상에서 데이터를 송수신한 노드,  $c_1, c_2, \dots, c_k$ 는 전송 에너지를 나타낸다. 본 논문에서는 2개의 노드 비 겹침 경로문제에 대하여 적용되므로 그림 2에서 나타난 인코딩을 2개 사용한다.



그림 2. 인코딩  
Fig. 2. Encoding

#### 4.2 초기해

제안된 해의 인코딩을 사용하여 제안된 알고리즘에서 이웃해 생성을 위한 초기해를 하나 생성한다. 초기해 생성은 다음과 절차로 진행된다.

단계 1. 소스 노드  $S$ 에 인접한 노드 중 하나  $x_1$ 을 임의로 선택하고, 집합  $c$ 에 포함시킨다. 노드 간의 전송 에너지  $c_1$ 과 함께 경로 상에  $(S, x_1, c_1)$  요소를 포함시킨다.

단계 2. 단계 1과 같은 방법으로 노드  $x_1$ 에 인접한 노드 중 집합  $c$ 에 포함되어 있는 않은 노드  $x_2$ 를 선택하고, 집합  $c$ 에 포함시킨다. 노드  $x_1$ 과  $x_2$  사이의 전송 에너지  $c_2$ 를 경로의 요소( $x_1, x_2, c_2$ )로 저장한다.

단계 3. 목적지 노드가 나올 때 까지 위의 동작을 반복한다.

단계 4. 하나의 경로가 완성되면 다시 단계 1에서부터 동작을 수행하며 이때 집합  $c$ 는 그 내용을 그대로 유지하여 진행한다. 경로가 2개 만들어지면 초기해 생성을 종료한다.

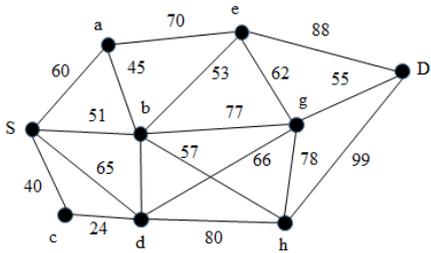
#### 4.3 이웃해 생성

이웃해 생성은 하나의 해에 대하여 또 다른 새로운 해를 생성하는 것이다. 제안된 타부 서치 알고리즘에서 새로운 이웃해를 생성하기 위해 두 가지 이동을 제안한다. 이웃해 생성을 위한 이동은 하나의 해에 포함된 모든 요소에 대하여 순서대로 적용된다. 제안된 타부 서치 알고리즘은 다음과 같은 이동방식을 사용한다.

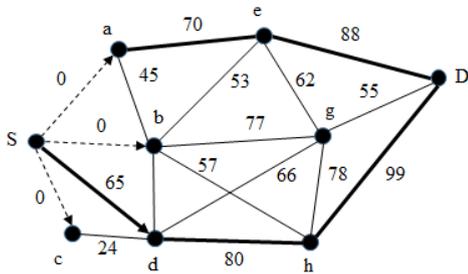
첫째, 송신 노드의 인접 노드 중 현재 사용되지 않은 노드 중 하나를 수신 노드로 교환하는 교환이동(replace move)

둘째, 해의 요소 중 삭제하고자 하는 요소의 이전 요소와 다음 요소가 경로를 설정할 수 있는 경우에 현재 요소를 삭제하는 삭제 이동(delete move)

그림 3은 무선 애드혹 네트워크에서 하나의 해에서 제안된 이동방식을 적용한 예이다. 그림 3(a)는 7개의 노드로 구성된 네트워크 구조를 나타낸 것이다. 그림 3(b)는 노드  $S$ 에서 노드  $D$ 로 2개의 노드 비 겹침 경로를 설정한 경우이다. 이때 노드  $S$ 는 노드  $b$ 로 브로드캐스팅을 이용하여 데이터를 전송할 수 있다. 이를 명시적 전송이라 한다. 또한 최대 전송 반경을 이용한 번의 브로드캐스팅 전송을 이용하여 노드  $S$ 의 최대 전송 범위 내에 있는 노드로 데이터를 전송할 수 있다. 이것을 묵시적 전송이라 한다. 그림 상에 실선은 명시적 전송을 나타내며, 점선은 브로드캐스팅에 의한 묵시적 전송을 나타낸다. 따라서 소스 노드는 한

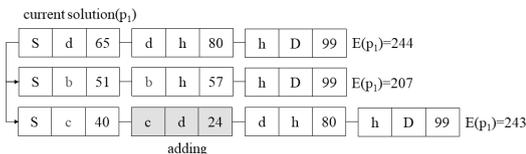


(a)

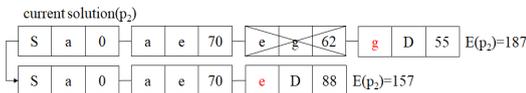


$$\begin{aligned}
 p_1: S - d - h - D & \quad E(p_1)=65+80+99=244 \\
 p_2: S - a - e - g - D & \quad E(p_2)=0+70+62+55=187 \\
 E(p_1+p_2) & =244+187=431
 \end{aligned}$$

(b)



(c)



(d)

그림 3. 제안된 알고리즘의 이웃해 생성 방식 (a) 네트워크 예 (b) 2 노드 비 겹침 경로 예 (c) 교환이동 (d) 삭제이동  
 Fig. 3. Neighborhood methods of the proposed algorithm (a) network example (b) 2 node-disjoint paths example (c) replace move (d) remove move

번의 브로드 캐스팅을 사용하여 2개의 링크를 설정한다. 그림에서는 경로  $p_1$ ,  $p_2$ 로 가정하였다.

그림 3(c)는 그림 3(b)의 현재해 중 경로  $p_1$ 에서 첫 번째 요소의 수신 노드  $d$ 를 노드  $b$ 와  $c$ 로 교환이동을 적용한 것이다. 교환이동은 송신노드의 인접노드 중 현재 경로에 포함되어 있는 않는 노드를 모두 적용하여 새로운 이웃해를 생성하는 방법이다. 노드를 교환하는 과정에서 경로가 연결되지 않는 경우가 발생할 수 있다. 즉 그림의 두 번째 해와 같이 노드  $d$ 를 노드

$c$ 로 교환하면 해는  $(S, c, 40) - (d, h, 80) - (h, D, 99)$ 로 바뀐다. 이때 첫 번째 요소와 두 번째 요소는 연결이 끊어진 경로가 만들어진다. 이런 경우에 제안된 알고리즘에서는 복구함수를 사용하여 끊어진 경로를 복구한다. 즉 새로운 요소  $(c, d, 24)$ 를 삽입하여 경로가 연결이 되도록 만든다.

삭제이동은 경로상의 임의의 요소를 삭제할 경우 삭제된 요소의 이전 요소와 다음 요소사이에 그 노드를 삭제하는 것이다. 삭제이동의 경우에도 임의의 노드를 삭제하여 경로가 단절될 경우 복구 함수를 이용하여 경로를 연결하도록 하였다. 그림 3(d)는 경로  $p_2$ 에서 세 번째 요소를 삭제한 경우를 나타낸다. 세 번째 요소  $(e, g, 62)$ 를 삭제하면 삭제된 요소의 앞뒤의 요소는 연결이 되지 않는다. 이 경우는 뒤에 있는 요소  $(g, D, 55)$ 를  $(e, D, 88)$ 로 바꾸는 복구함수를 수행한다. 위에서 언급한 두 가지 이동방법을 적용하여 다양한 형태의 이웃해를 생성하고 최적에 가까운 해를 찾는다. 제안된 알고리즘에서는 초기 경로 설정 후 교환이동과 삭제이동에 의해 새로운 경로를 설정하게 되는데 이때 경로가 단절될 수 있다. 그러나 이 경우에 복구 함수를 이용하여 다시 경로를 연결하여 항상 경로를 보장하게 된다. 따라서 이러한 과정을 거침으로써 네트워크의 신뢰성을 보장하며 본 논문에서는 별도로 신뢰성을 측정하기 위한 목적함수와 실험을 수행하지 않는다.

#### 4.4 타부리스트

타부 서치 알고리즘은 타부리스트라는 메모리를 사용하여 이미 발생된 해를 재사용하지 않고 아직 검색되지 않은 해의 영역을 탐색할 수 있는 특징을 가진다. 타부리스트는 고정크기의 메모리를 가지거나 동적으로 크기를 변화시키는 방식이 있다. 특히 동적으로 메모리 크기를 변화시키는 방식은 NP 문제에 대하여 더 향상된 결과를 탐색하는 중요한 기능을 한다. 제안된 타부 서치 알고리즘은  $N$ 개의 노드에 대하여 알고리즘 반복 주기 매 30번마다  $N/40$ 에서  $N/20$ 사이의 값을 무작위로 선택하여 타부리스트 크기를 적용시킨다. 만약 타부리스트가 가득 차게 되면 가장 오래된 해는 삭제되고 새로운 해를 추가하게 된다.

#### 4.5 알고리즘 종료

제안된 타부 서치 알고리즘은 미리 결정된 반복횟수에 의해 종료된다. 제안된 방식은 초기해로부터 알고리즘 수행 중에 발생하는 해에 대하여 제안된 이웃해 생성방식을 적용하여 더 좋은 결과를 가진 해가 연

속적으로 나오지 않는 횟수가 미리 결정해진 반복횟수에 도달하면 알고리즘은 종료된다. 본 논문에서는 반복횟수를 100으로 설정하였으며, 시물레이션 상에서도 100이상에서는 더 좋은 결과를 도출되지 않았다.

### V. 성능평가

동일한 형식으로 결론을 작성한다본 논문에서는 무선 애드혹 네트워크에서 노드 비 겹침 경로문제를 해결하기 위해 제안된 타부 서치 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 컴퓨터 시물레이션을 수행하였다. 수행된 컴퓨터 시물레이션은 윈도우 기반의 운영체제와 메모리 8GB, CPU 3.6GHz 인텔 프로세서로 이루어진 컴퓨터상에서 수행되었다. 본 논문에서 평가 비교된 각 알고리즘은 C++ 언어로 구현하여 성능평가가 이루어졌다. 각 알고리즘의 성능은 노드가 겹치지 않는 경로상의 전송 에너지와 알고리즘 수행시간 측면에서 기존에 제안된 최단 경로(shortest path)<sup>[8]</sup> 방식과 시물레이티드 어닐링(simulated annealing)<sup>[10]</sup>을 비교 평가하였다.

각 알고리즘의 성능평가는 100×100 크기의 2차원 네트워크에서 노드를 랜덤하게 배치하였다. 다양한 형태의 네트워크를 구성하기 위해 노드의 수를 400에서 1000까지 100씩 증가시켰으며, 노드의 최대전송범위( $R_{max}$ )를 10, 15, 20으로 각각 설정하여 시물레이션을 수행하였다. 본 논문에서 수행한 시물레이션은 각 알고리즘을 10번씩 시도하였으며, 결과는 평균값으로 나타내었다. 시물레이션에 적용된 전송에너지는 노드 간의 전송거리를 사용하였다. 즉, 전송거리가 멀수록 노드의 전송에너지는 증가하기 때문이다.

그림 4는 노드의 최대전송범위를 10, 15, 20으로 설정하고 노드의 밀도를 다르게 했을 때, 3개의 알고리즘에 대하여 2개의 노드 비 겹침 경로에서 사용되는 전송 에너지의 총합을 나타낸 것이다. 그림에서 제안된 타부 서치 알고리즘의 성능이 기존의 최단거리 방식과 시물레이티드 어닐링의 성능에 비해 우수함을 나타내고 있다. 같은 종류의 메타 휴리스틱 알고리즘인 시물레이티드 어닐링의 경우에도 최단경로방식에 비해 성능이 우수함을 볼 수 있다. 이 결과에서 복잡한 계산을 요구하는 NP 문제에서 메타 휴리스틱 방식이 일반적인 휴리스틱 방식보다 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 제안된 타부 서치 알고리즘이 같은 종류의 메타 휴리스틱 방식인 시물레이티드 어닐링보다 높은 성능을 보인 이유는 시물레이티드 어닐링의 이웃해 생성방식이 빠르게 지역 최적해에 수렴한 반

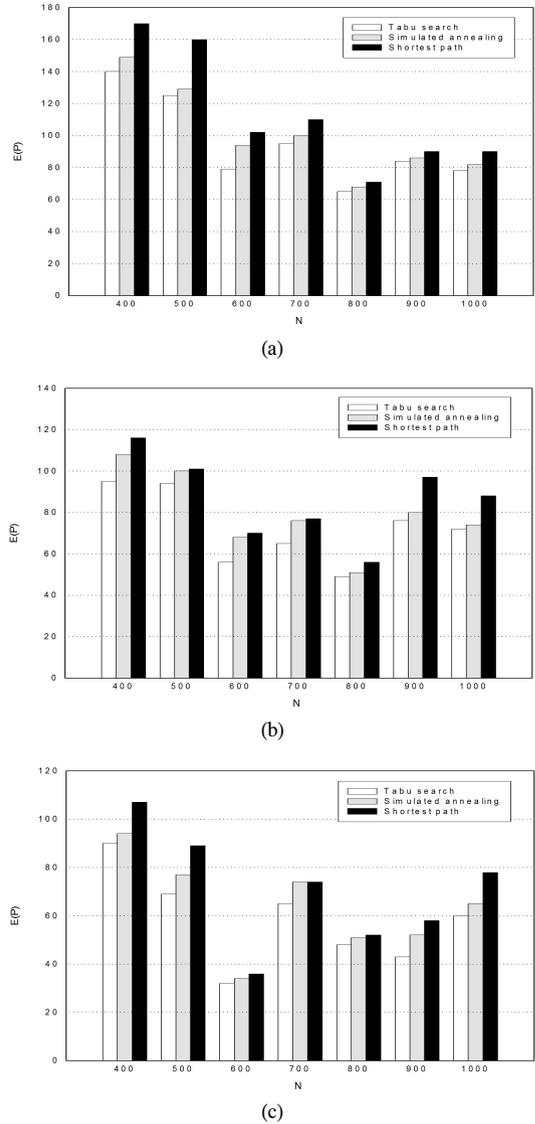


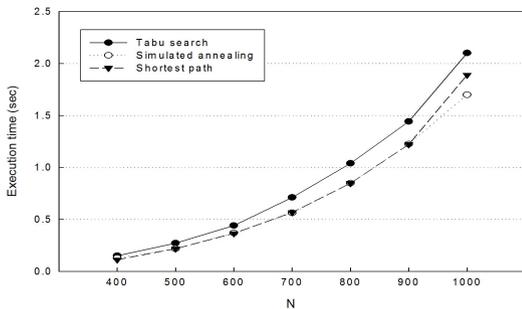
그림 4. 전체 전송 에너지 (a)  $R_{max}=10$  (b)  $R_{max}=15$  (c)  $R_{max}=20$   
 Fig. 4. Total transmission energy (a)  $R_{max}=10$  (b)  $R_{max}=15$  (c)  $R_{max}=20$

면 제안된 타부 서치 알고리즘은 효과적인 이웃해 생성방식이 적용되어 빨리 지역 최적해에 도달하지 않고 더 좋은 해를 가진 결과에서 수렴하기 때문이다. 즉 제안된 타부 서치 알고리즘의 이웃해 생성방식인 교환이동과 삭제이동이 효과적으로 동작함을 나타낸다. 또한 다익스트라 알고리즘을 이용한 최단경로방식은 하나의 경로를 찾는 방식에서는 항상 최적을 보장하지만 노드 비 겹침 경로문제에서는 항상 최적을 보장하지 않는다. 노드 비 겹침 경로문제는 하나의 경로

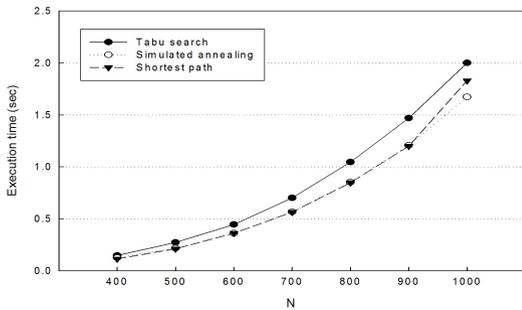
가 설정된 이후 그 노드는 다음 경로 설정에서는 삭제된다. 즉 노드가 삭제되면 그에 딸린 에지도 삭제되고 이를 최단경로방식으로 경로를 설정하여 이전 경로와 경로비용을 합했을 때는 최적을 보장하지 않는다. 시뮬레이션 과정에서 최단경로를 이용하여 경로를 설정한 다음 제안된 타부 서치를 실행했을 때 더 좋은 경로를 찾는 경우가 발생하였다. 따라서 최단경로방식에 비해 메타휴리스틱방식이 노드 비 겹침 경로문제를 더 효과적으로 찾게 된다.

그림 5는 그림 4와 동일한 실험조건에서 각 알고리즘의 수행시간을 비교하였다. 그림에서 수행시간 측면에서 제안된 타부 서치 알고리즘의 수행시간이 최단

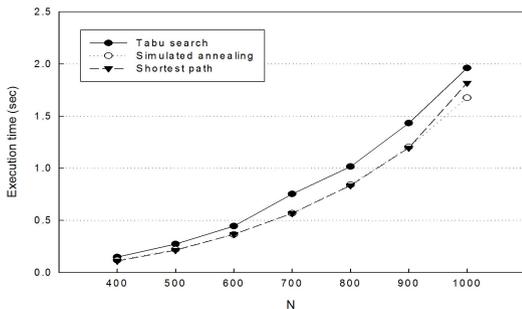
거리방식과 시뮬레이티드 어닐링과 비슷한 결과를 나타낸다. 비교 대상인 시뮬레이티드 어닐링에서도 제안된 타부 서치 알고리즘과 유사하게 알고리즘 종료 기준을 반복 횟수로 설정하였다. 적용된 반복 횟수는 시뮬레이티드 어닐링을 적용하여 더 좋은 결과가 나오지 않을 때까지 반복하여 실행하였다. 시뮬레이티드 어닐링의 실행시간이 제안된 타부 서치 방식보다 인접해 생성을 적게 발생하여 실행시간이 단축됨을 알 수 있으며, 특히 노드의 개수가 1000일 때는 가장 높은 성능을 보이고 있다. 이는 알고리즘 최적해가 지역해에 빠져 가장 빠르게 종료될 수 있음을 예측할 수 있다. 일반적으로 노드의 수가 많아지면 계산되는 양도 증가하게 된다. 그림에서 노드의 수가 증가함에 따라 각 알고리즘은 지수적으로 수행시간이 증가하고 있다. 제안된 타부 서치 알고리즘도 노드의 수가 증가함에 따라서 이웃해 생성으로 인하여 수행시간이 증가함을 볼 수 있다. 그러나 제안된 타부 서치 알고리즘에서 사용된 이웃해 생성방식이 최적해에 빠르게 접근함으로써 실행시간을 줄이고 있다. 따라서 성능평가결과에서 제안된 타부 서치 알고리즘이 NP-complete인 무선 애드혹 네트워크에서 효율적인 전송 에너지를 가진 노드 비 겹침 경로문제를 빠른 알고리즘 수행시간 안에 해결하고 있음을 알 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 실행시간 (a)  $R_{max}=10$  (b)  $R_{max}=15$  (c)  $R_{max}=20$   
 Fig. 5. Execution time (a)  $R_{max}=10$  (b)  $R_{max}=15$  (c)  $R_{max}=20$

## VI. 결 론

본 논문은 무선 애드혹 네트워크에서 소스 노드에서 목적 노드까지 신뢰성 높은 데이터 전송을 위해 노드가 겹치지 않게 경로를 설정하는 최적화 알고리즘을 제안하였다. 제안된 최적화 알고리즘은 타부 서치 알고리즘을 사용하였으며, 제안된 타부 서치 알고리즘에서는 최적해를 찾기 위한 해 인코딩 설계, 초기해 생성, 새로운 해를 생성하기 위한 이웃해 이동방식, 종료 기준으로 구성하였다. 제안된 타부 서치 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 소스에서 목적지까지 설정된 경로상의 전송에너지양과 알고리즘 실행시간 측면에서 기존 다른 알고리즘과 비교 평가하였다. 성능평가 결과에서 제안된 타부 서치 알고리즘이 기존의 알고리즘에 비해 비슷한 실행시간 내에 전송에너지가 적게 소모되는 것을 볼 수 있었다. 이 결과로써 많은 노드를 가진 복잡한 구조를 가진 무선 애드혹 네트워크에서 신뢰성 높은 데이터 전송을 위한 노드 비 겹침 경로문제를 위해 제안된 알고리즘이 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 과제로 제안된 타부 서치 알고리즘을 이동성을 가진 노드에 대하여 적

용하여 동적인 토폴로지를 가진 애드혹 네트워크에도 효과적인 알고리즘을 개발하고, 네트워크의 신뢰성을 보장하기 위해 패킷 전달율 등 네트워크 효율성을 높일 수 있는 방안도 연구하고자 한다.

References

[1] G. Lin, S. Soh, K. Chin, and M. Lazarescu, "Efficient heuristics for energy-aware routing in networks with bundled links," *Computer Netw.*, vol. 57 no. 8, pp. 1774-1788, Jun. 2013.

[2] D. Zhang, Q. Liu, L. Chen, W. Xu, and K. Wang, "Multi-layer based multi-path routing algorithm for maximizing spectrum availability," *Wireless Netw.*, vol. 24, no. 3, pp. 1-13, Apr. 2018.

[3] R. Hadid, M. H. Karaata, and V. Villain, "A stabilizing algorithm for finding two node-disjoint paths in arbitrary networks," *Int. J. Foundations of Comput. Sci.*, vol. 28, no. 04, pp. 411-435, Jun. 2017.

[4] M. Pickavet, W. Vereecken, S. Demeyer, P. Audenaert, et al., "World wide energy needs for ICT: the rise of power-aware networking," in *Proc. IEEE Advanced Netw. and Telecommun. Syst.*, pp. 1-3, Dec. 2008.

[5] G. Lin, S. Soh, K. W. Chin, and M. Lazarescu, "Energy aware two disjoint paths routing," *J. Netw. and Comput. Appl.*, vol. 43, pp. 27-41, Aug. 2014.

[6] S. Kandula, D. Katabi, B. Davie, and A. Charny, "Walking the tight rope: responsive yet stable traffic engineering," in *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 253-264, Oct. 2005.

[7] W. Fisher, M. Suchara, and J. Rexford, "Greening back bone networks: reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links," in *Proc. ACM SIGCOMM Wksp. Green Netw.*, pp. 29-34, Aug. 2010.

[8] K. Xiong, Z. Qiu, Y. Guo, and H. Zhang, "Multi-constrained shortest disjoint paths for reliable QoS routing," *ETRI J.*, vol. 31, no. 5, pp. 534-44, Oct. 2009.

[9] M. Kodialam and T. Laksman, "Restorable

dynamic quality of service routing," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 6, pp. 72-81, Jun. 2002.

[10] S. Kim, "Adaptive MANET multipath routing algorithm based on the simulated annealing approach," *Scientific World J.*, vol. 2014, pp. 1-8, Jun. 2014.

김 재 환 (Jae-Hwan Kim)



1984년 2월 : 고려대학교 산업  
경영공학부 졸업  
1987년 2월 : KAIST 산업 및  
시스템공학과 석사  
1993년 8월 : KAIST 산업 및  
시스템공학과 박사  
1991년 9월~현재 : 한국해양대  
학교 데이터정보학과 교수

<관심분야> 최적화 알고리즘, 머신러닝

장 길 웅 (Kil-Woong Jang)



1997년 2월 : 경북대학교 컴퓨  
터공학과 졸업  
1999년 2월 : 경북대학교 컴퓨  
터공학과 석사  
2002년 8월 : 경북대학교 컴퓨  
터공학과 박사  
2003년 3월~현재 : 한국해양대  
학교 데이터정보학과 교수

<관심분야> 컴퓨터 네트워크, 무선 네트워크, 네트  
워크 최적화