

## 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 설계 문제를 위한 타부 서치 알고리즘

장길웅\*

### A Tabu Search Algorithm for Network Design Problem in Wireless Mesh Networks

Kil-woong Jang\*

\*Professor, Department of Data Informatics, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

#### 요 약

무선 메쉬 네트워크는 메쉬 클라이언트와 메쉬 라우터, 메쉬 액세스 포인트로 구성된다. 메쉬 라우터는 메쉬 클라이언트에게 무선 네트워크 서비스를 연결해주며, 메쉬 액세스 포인트는 유선 링크를 사용하여 백본 네트워크에 연결하고 메쉬 클라이언트에게 인터넷 액세스 서비스를 제공한다. 본 논문에서는 제한된 수의 메쉬 라우터와 메쉬 액세스 포인트를 사용하여 무선 메쉬 네트워크에 대한 네트워크 설계를 위한 최적화 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안된 최적화 알고리즘은 메타휴리스틱방식의 하나인 타부서치 알고리즘을 적용하였으며, 라우터와 메쉬 액세스 포인트의 배치에 따른 전송지연을 최소화하고 적절한 수행 시간 안에 결과가 도출되도록 설계되었다. 제안된 타부서치 알고리즘은 메쉬 라우터와 메쉬 액세스 포인트의 배치를 위한 전송지연과 알고리즘 수행시간 관점에서 비교 평가되었으며, 성능평가에서 기존의 제안된 메타휴리스틱 방식에 비해 우수한 성능을 보였다.

#### ABSTRACT

Wireless mesh networks consist of mesh clients, mesh routers and mesh access points. The mesh router connects wireless network services to the mesh client, and the mesh access point connects to the backbone network using a wired link and provides Internet access to the mesh client. In this paper, a limited number of mesh routers and mesh access points are used to propose optimization algorithms for network design for wireless mesh networks. The optimization algorithm in this paper has been applied with a sub-subscription algorithm, which is one of the meta-heuristic methods, and is designed to minimize the transmission delay for the placement of mesh routers and mesh access points, and produce optimal results within a reasonable time. The proposed algorithm was evaluated in terms of transmission delay and time to perform the algorithm for the placement of mesh routers and mesh access points, and the performance evaluation results showed superior performance compared to the previous meta-heuristic methods.

**키워드** : 네트워크 설계, 전송지연, 타부서치, 무선 메쉬 네트워크

**Key word** : Network design, transmission delay, tabu search, wireless mesh networks

Received 18 March 2020, Revised 27 March 2020, Accepted 4 April 2020

\* Corresponding Author Kil-woong Jang(E-mail:jangkw@kmou.ac.kr, Tel:+82-51-410-4375)

Professor, Department of Data Information, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.6.778>

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

무선 메쉬 네트워크는 모바일 사용자에게 무선 연결 기능을 제공하기 위한 효율적인 방법으로 널리 알려져 있다. 그 이유는 자체 구성 기능 및 설치비용 측면에서 많은 장점을 갖는 메쉬 네트워킹 패러다임의 높은 유연성 때문이다. 무선 메쉬 네트워크는 멀티 홉 유무선 링크를 통해 상호 연결된 고정 및 이동 노드로 구성된다. 무선 메쉬 네트워크 장치는 네트워킹 기능 및 하드웨어 기능 측면에서 계층적으로 구성되어 있다. 무선 메쉬 네트워크 장치는 그림 1과 같이 메쉬 라우터(mesh router: MR)와 메쉬 액세스 포인트(mesh access point: MAP), 메쉬 클라이언트(mesh client: MC)로 구분된다. 메쉬 액세스 포인트는 유선 백본과 연결을 위한 게이트웨이 기능을 가진 메쉬 라우터이다. 메쉬 라우터와 메쉬 액세스 포인트는 메쉬 클라이언트에 대한 기존 액세스 포인트 역할을 수행함과 동시에 다른 메쉬 라우터에 연결하여 무선 분산 시스템을 설정하는 기능을 가진다. 반면 메쉬 클라이언트는 메쉬 액세스 포인트나 메쉬 라우터를 통해 네트워크에 연결하여 트래픽을 송수신할 수 있다 [1-3].

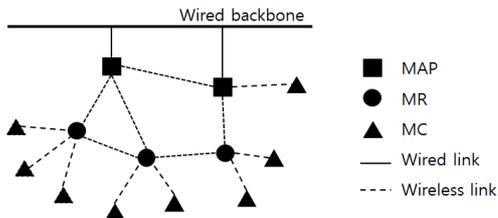


Fig. 1 Wireless mesh network architecture

무선 메쉬 네트워크에서 각 장치들의 무선 인터페이스와 무선 채널, 접속 메커니즘, 라우팅 전략 등 여러 가지 기능이 네트워크 성능에 영향을 미친다. 특히 네트워크 배치에는 수천 개의 장치가 포함될 수 있기 때문에 수동 튜닝과 재구성은 매우 비실용적이며, 필요한 서비스를 효율적으로 제공하기 위해서는 네트워크 커버리지와 토폴로지의 설계, 최적화가 중요한 역할을 한다 [4]. 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크를 설계하는 문제는 다른 무선 네트워크를 설계하는 것과 다르게 백본으로부터의 트래픽은 메쉬 라우터에 연결된 적어도 하나의 메쉬 액세스 포인트에 라우팅 되어야 하므로, 메쉬

클라이언트는 메쉬 라우터 또는 메쉬 액세스 포인트와의 연결을 보장하는 것과 더불어 각각의 메쉬 클라이언트와 적어도 하나의 메쉬 액세스 포인트 사이의 멀티홉 경로를 설정하여야 한다. 메쉬 액세스 포인트는 백본에 직접 연결되어야 하고, 처리 및 전송 능력 면에서 더 강력할 수 있기 때문에 메쉬 라우터보다 더 비싼 비용이 든다. 따라서 무선 메쉬 네트워크를 설계할 때, 무선 접속 네트워크에 대한 고전적인 무선 네트워크 설계에서와 유사하게 메쉬 클라이언트의 무선 커버리지와 유선 네트워크의 설계에서와 같이 트래픽 라우팅을 동시에 고려해야 한다[5].

본 논문에서는 각 노드에서 이용 가능한 복수의 무선 인터페이스와 채널이 있는 무선 메쉬 네트워크에 대하여 네트워크 설계를 위한 최적화 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서는 노드의 수가 많은 무선 메쉬 네트워크에서 최적화된 네트워크 설계를 위하여 메쉬 라우터와 메쉬 액세스 포인트에서 발생하는 경로상의 전송지연을 최소화하는 최적화 알고리즘을 제안한다. 무선 메쉬 네트워크에서의 네트워크 설계 문제는 이전 연구에서 NP-hard 문제로 증명되어 있다[6]. NP-hard 문제에 대하여 최적의 결과를 찾는 것은 방대한 시간과 계산이 요구되므로 이전 많은 연구에서 시간과 계산 비용을 줄이고 최적에 가까운 정답을 찾는 근사치 알고리즘이 주로 사용되었다. 본 논문에서도 적절한 실행시간 내에 최적에 가까운 결과를 도출하기 위하여 메타휴리스틱 방식 중 타부서치(Tabu search: TS) 알고리즘을 이용하여 무선 메쉬 네트워크의 설계 문제를 최적화한다. 제안된 타부서치 알고리즘은 다양한 조건하에서 메쉬 라우터와 메쉬 액세스 포인트 간에 발생하는 경로의 전송지연과 알고리즘 실행시간 측면에서 기존의 다른 메타휴리스틱 알고리즘과 성능을 비교된다.

## II. 관련연구

무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 설계와 관련하여 다양한 연구들이 진행되었다. 고정된 토폴로지를 가진 무선 메쉬 네트워크에서 미리 정의된 노드의 위치와 특성 하에서 채널 할당 및 라우팅 또는 게이트웨이 배치에 드는 비용을 줄이기 위한 연구가 진행되었다. Tajima *et al.*[7]은 채널 수, 전송 전력, 라디오 수가 미리 정의된 네

트위크 노드의 특징 하에서 일정량의 트래픽을 지원하는 게이트웨이의 수를 최소화하는 배치 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 인터넷을 오가는 특정 양의 트래픽을 지원하면서 게이트웨이의 수를 최소화하고 배치하는 방법을 제안하였다. Kodialam *et al.*[8]은 최종 사용자의 요구를 충족하고 처리량을 최대화할 수 있는 고정 토폴로지를 가정하면서 채널 할당 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 고정되지 않은 위상에 대해서도 설계 요소들 간의 관계를 적용하였으며, 다양한 매개변수를 포함하지 않을 경우 설계비용을 줄일 수는 있지만 최소화하지는 못하는 단점을 가졌다.

무선 메쉬 네트워크의 설계 및 관련 내용에 대하여 다양한 메타휴리스틱 방식이 적용되었다. Badia *et al.* [9]는 무선 메쉬 네트워크의 링크 스케줄링 및 라우팅에 유전자 알고리즘을 적용하였다. 제안된 유전자 알고리즘은 주어진 문제를 합리적으로 해결하고 확장성이 있는 반면, 광범위한 토폴로지 네트워크에 대해서는 최적의 결과를 얻지 못했다. Vanhatupa *et al.*[10]는 채널 할당을 위한 유전자 알고리즘을 제안하였다. 네트워크 최적화를 위해 라우터의 공정성 및 커버리지 지표를 동일하게 설정하였으며, 라우팅은 예상 전송 시간 또는 최단 경로 라우팅을 사용하여 알고리즘을 제안하였다. Girgis *et al.*[6]은 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 설계를 위한 메타휴리스틱 알고리즘인 유전자 알고리즘과 시뮬레이션 어닐링을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 제약 조건이 있는 저비용 네트워크 구성을 검색하고 사용된 게이트웨이의 수를 결정하였다.

### III. 문제 정식화

무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 계획 문제를 정식화하기 위해 사용되는 기호를 우선 정의한다.

- $V$  set of MR and MAP
- $E$  set of links
- $N$  number of MR and MAP
- $S$  set of candidate positions where to install mesh devices
- $L$  maximum number of links allowed to be installed in a MR or a MAP

- $\mu_{ij}$  indicator function, which is 1 if a direct wireless link is formed between MR(MAP)  $i$  and  $j$ , and 0 otherwise:  $\mu_{ii} = 0$
- $g_i$  indicator function, which is 1 if MR  $i$  is MAP and 0 otherwise
- $T$  maximum transmission range of MR and MAP
- $\delta_i$  delay of MAP  $i$  to connect the backbone
- $d_{ij}$  delay between MR  $i$  and  $j$

무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 설계 문제를 해결하기 위한 네트워크 모델과 가정은 다음과 같다. 본 논문에서 사용된 네트워크 모델은 비방향성 그래프  $G = (V, E)$ 로 나타낼 수 있으며,  $V$ 는  $N$ 개의 메쉬 라우터와 메쉬 액세스 포인트를 노드로 가진 집합을 나타내며,  $E$ 는 노드간의 연결을 나타내는 링크의 집합을 의미한다. 노드의 수는 네트워크상에 미리 결정되며, 그 중 일부를 메쉬 액세스 포인트로 설정한다. 즉 네트워크 모델에서 사용되는 모든 노드는 메쉬 라우터로 구성되며, 이중 일부를 게이트웨이 기능을 가진 메쉬 액세스 포인트로 구성한다. 노드  $i$ 에서  $j$ 로의 링크는 노드  $j$ 에서  $i$ 로의 링크가 존재함을 의미한다. 메쉬 라우터는 다른 메쉬 라우터 또는 메쉬 액세스 포인트와 연결을 위한 전송 지연  $d$ 가 발생하며, 메쉬 액세스 포인트로 설정되는 메쉬 라우터는 게이트웨이 기능을 가지며 유선 백본과 연결을 위한 전송지연  $\delta$ 가 발생한다. 각 노드는 최대 전송범위  $T$ 내에서 이웃한 노드와 연결가능하며, 네트워크에 존재하는 모든 노드는 다른 노드와 연결을 유지해야 한다. 본 논문에서 사용되는 전송지연은 노드 간의 거리에 비례하는 것으로 가정하며, 전송지연 값은 노드 간의 유클리드 거리를 계산하여 적용한다. 본 논문에서 사용되는 목적함수는 노드 간 연결에서 발생하는 전송지연과 메쉬 액세스 포인트가 유선 백본과 연결에서 발생하는 전송지연을 합한 값으로 정의한다. 따라서 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 설계 문제는 다음과 같이 목적 함수를 최소화하는 조합 최적화 문제로 정식화할 수 있다.

최소화 목적함수

$$\sum_{i=1}^N (\sum_{j=1}^N \mu_{ji} d_{ji} + g_i \delta_i), \forall i, j \in V \quad (1)$$

다음 조건을 만족할 때

$$\sum_{j=1}^N \mu_{ij} \leq L \quad (2)$$

식 (1)은 무선 메쉬 네트워크에서 각 메쉬 라우터 간의 연결을 위한 전송지연과 유선 백본과 연결을 위한 메쉬 액세스 포인트의 전송지연을 더한 총합을 최소화하는 목적함수를 나타낸다. 식 (2)는 각 노드의 링크의 수는 최대 링크의 수보다 작거나 같아야 함을 나타내는 제약조건이다. 각 메쉬 라우터와 메쉬 액세스 포인트의 최대 전송범위 안에 모든 메쉬 클라이언트는 포함되어야 한다. 즉 모든 메쉬 클라이언트는 메쉬 라우터나 메쉬 액세스 포인트에 접속하여 네트워크 서비스를 받아야 한다. 또한 각 메쉬 라우터의 생존 가능성을 위해 메쉬 액세스 포인트는 노드 분리 경로가 최소한 두 개 이상으로 가정한다.

#### IV. 제안된 타부서치 알고리즘

본 장에서 전송지연을 최소화하기 위한 무선 메쉬 네트워크 설계 문제에 대하여 최적화를 위한 타부서치 알고리즘에 대하여 기술한다. 다음과 같은 절차에 따라 제안된 타부서치 알고리즘은 수행된다.

- (a) 타부서치 알고리즘에 적용되는 해의 구조를 설계한다.
- (b) 최적해를 구하기 위한 초기해를 하나 생성한다.
- (c) 초기해를 이용하여 새로운 이웃해를 생성한다.
- (d) (c)에서 생성된 이웃해들 중 이전에 생성되지 않은 해 중 가장 성능이 우수한 해를 선택한다.
- (e) 미리 정의된 종료기준에 따라 기준을 만족하지 않으면 (c)로 이동하고, 기준을 만족할 경우 알고리즘을 종료한다.

앞서 기술한 타부서치 알고리즘의 절차에 대해 자세한 설명은 다음과 같다. 알고리즘에 적용되는 해를 구성하기 위해 먼저 해의 구조를 설계한다. 설계된 해의 구조와 제약 조건을 충족하는 초기해를 하나 생성한다. 생성된 초기해는 타부리스트라는 메모리에 저장된다. 또한 초기해는 처음으로 생성된 해이므로 임시최적해로 저장한다. 초기해를 이용하여 제안된 타부서치의 이웃해 생성방법에 의하여 새로운 이웃해를 생성한다. 생성된 이웃해들 중 가장 성능이 우수한 해를 선택하고 타부

리스트에 저장된 해와 비교한다. 만약 선택된 해가 타부리스트에 저장되어 있을 경우에는 새로 생성된 이웃해 중 그 다음 성능이 우수한 해를 선택하여 다시 타부리스트에 있는 해와 비교한다. 이러한 방식으로 이전에 타부리스트에 저장되지 않은 해가 선택될 때까지 반복한다. 선택된 해는 임시최적해와 비교하여 임시최적해보다 성능이 우수할 경우에만 선택된 해를 임시최적해로 저장한다. 또한 선택된 해는 다음 단계의 이웃해를 생성하기 위해 초기해로 다시 저장된다. 제안된 타부서치 알고리즘은 미리 정해진 종료기준에 따라 이웃해 생성방법을 반복함으로써 최종적으로 최적에 가까운 해를 찾는다.

##### 4.1. 해의 구조 설계

해의 구조 설계는 타부서치 알고리즘을 포함한 대부분의 메타휴리스틱 알고리즘에서는 기본적으로 필수적인 과정이다. 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 설계를 위하여 본 논문에서 제안된 해의 구조는 그림 2와 같다. 해를 구성하는 각 노드는  $N$ 개의 메쉬 라우터를 나타낸다. 모든 메쉬 라우터는 1부터  $N$ 까지 고유 번호를 부여한다. 제안된 타부서치 알고리즘 구현 시에 각 노드는 다음과 같은 필드로 구성된다. 각 메쉬 라우터는 네트워크상의 2차원 좌표로 구성된 필드를 가진다. 또한 메쉬 라우터 중 메쉬 액세스 포인트로 사용될 경우 사용 여부를 나타내는 필드  $G$ 를 가진다. 만약 메쉬 액세스 포인트로 사용될 경우 1로 설정하고, 그렇지 않을 경우에는 0으로 설정한다. 마지막으로 제약조건을 검사하기 위한 메쉬 라우터에 연결된 링크의 수, 즉 메쉬 클라이언트 수를 나타내는 필드  $H$ 를 가진다. 3가지 필드를 가진 노드를 사용하여 그림과 같이 연결리스트 형식으로 해를 구성한다. 또한 각 메쉬 라우터의 인접한 메쉬 라우터 정보를 저장하는 집합을 별도로 구성한다. 즉 알고리즘 실행에 따라 해의 구조가 변하므로 각 노드에 대한 인접 노드의 정보를 저장한다.

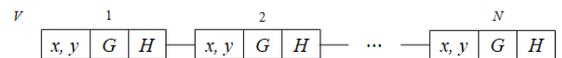


Fig. 2 Structure of solution

##### 4.2. 초기해 생성

앞서 기술한 해의 구조와 제약조건에 맞는 하나의 초기해를 생성한다. 초기해 생성은 다음과 같은 절차에 따

라 수행된다.

- (a) 모든 메쉬 라우터에 대하여 네트워크상에서 랜덤한 위치를 결정하여 해의 각 노드에 저장한다.
- (b) 전체 메쉬 라우터 중 10%에 해당하는 라우터를 메쉬 액세스 포인트로 선택한다. 메쉬 액세스 포인트는 백본과의 거리가 가까운 순으로 선택한다. 선택된 라우터의  $G$  필드를 1로 설정한다.
- (c) 각 메쉬 라우터에 대하여 전송범위 내에 배치된 메쉬 클라이언트 수를  $H$  필드에 저장한다. 이때 메쉬 클라이언트 수는 미리 정의된 최대 링크 수  $L$ 을 넘지 않도록 조정한다.
- (d) 생성된 초기해는 임시최적해로 설정하고, 타부리스트에 저장한다.

### 4.3. 이웃해 생성을 위한 이동

일반적으로 메타휴리스틱 알고리즘은 초기해를 사용하여 다양한 이웃해를 생성함으로써 최적해에 도달하게 된다. 제안된 타부서치 알고리즘도 초기해에 적용할 이웃해 생성방법을 제안한다. 이웃해 생성방법을 이동방법이라고도 한다. 제안된 타부서치 알고리즘에서 사용되는 이동방법은 메쉬 라우터의 좌표를 일정 크기를 적용하여 상하좌우로 이동시키는 방법을 사용한다. 즉 제안된 타부서치 알고리즘은 4가지 이동방법을 사용하여 이웃해를 생성한다. 본 논문에서 제안된 4가지 이동방식을 상이동(Up move), 하이동(Down move), 좌이동(Left move), 우이동(Right move)으로 정의한다.

그림 3은 제안된 타부서치 알고리즘에서 사용되는 이웃해 생성을 위한 4가지 이동방법을 나타낸 것이다. 그림에서 좌표에 적용되는  $k$ 는 좌표이동을 위한 고정 크기이며, 미리 결정하여 사용한다. 본 논문의 성능평가에서는  $k$ 값을 10으로 설정하였다. 초기해에 대하여 각 노드별로 4가지 이동방법을 모두 적용하여 새로운 이웃해를 생성한다. 새로 생성된 이웃해에서 새로 변경된 좌표에 따라 메쉬 액세스 포인트를 다시 결정한다. 즉 백본과 거리가 가장 근접한 노드를 다시 메쉬 액세스 포인트로 결정하고  $G$  필드를 수정한다. 또한 변경된 노드의 좌표에 따라 메쉬 클라이언트를 검색하여  $H$  필드를 수정한다.

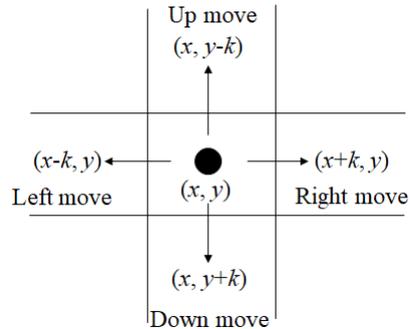


Fig. 3 Neighborhood generation moves of the proposed Tabu search algorithm

### 4.4. 타부리스트

일반적으로 타부서치 알고리즘은 최적해를 찾는 과정에서 새로운 이웃해를 생성하여 그 중 가장 결과가 좋은 해를 다음 이웃해 생성과정에 사용한다. 그 과정에서 기존에 생성된 적이 있는 해가 다시 선택되게 되면 결과가 같은 이웃해를 다시 생성함으로써 지역해에 빠지게 된다. 이를 해소하기 위해 이전에 생성된 해를 탐색하기 위한 메모리를 사용한다. 이 메모리를 타부리스트라고 한다. 타부리스트는 반복되는 해를 걸러내는 동시에 검색영역에서 이전에 방문하지 않은 새로운 영역을 검색할 수 있는 기회도 제공한다. 특히 타부리스트의 크기를 가변적으로 변경하여 다양한 문제에 적용했을 때 효과적으로 해를 검색하게 된다. 제안된 타부서치 알고리즘에서도 매 10번 이웃해 생성주기마다 타부리스트의 크기를  $N/20$ 과  $N/10$ 사이로 변경시켜 동작시킨다. 또한 타부리스트는 유한한 크기를 가진 메모리이므로 새로 생성된 해가 입력되었을 때 타부리스트가 가득 차게 되면 가장 먼저 입력된 해를 삭제하고 새로운 입력된 해를 추가하는 큐 구조를 가진다.

### 4.5. 알고리즘 종료

제안된 타부서치 알고리즘은 미리 정해진 횟수만큼 진행되면 종료된다. 다시 말해서 이웃해를 생성하는 하나의 해를 기준으로 새로운 이웃해가 생성되면 현재까지의 임시최적해와 비교해서 더 나은 성능결과를 연속적으로 발생되지 않는 횟수가 미리 정해진 횟수만큼 진행되면 제안된 타부서치 알고리즘은 종료한다.

### V. 성능평가

본 논문에서는 무선 메쉬 네트워크에서 네트워크 설계 문제를 위한 제안된 타부서치 알고리즘에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 성능을 평가하였다. 수행된 컴퓨터 시뮬레이션은 윈도우10 환경의 8GB 메모리와 3.6GHz CPU로 구성된 컴퓨터상에서 실행되었으며, 제안된 알고리즘과 비교 평가된 알고리즘은 C++ 언어로 구현하였다. 성능평가를 위해 모든 노드 간의 전송 지연과 알고리즘 실행시간 관점에서 기존에 제안된 유전자 알고리즘(genetic algorithm) 및 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)[6]과 비교 평가하였다.

시뮬레이션에서 사용된 네트워크 환경은 다음과 같이 설정한다. 네트워크의 크기는  $1000 \times 1000$ 로 설정하였으며, 노드를 랜덤하게 배치하였다. 노드의 최대 전송 반경  $T$ 는 200으로 설정하였으며, 노드 밀도가 다양한 네트워크를 구성하기 위해 메쉬 클라이언트 수  $N_c$ 를 400에서 1000까지 200단위로 구성하였다. 메쉬 라우터와 메쉬 액세스 포인트를 포함한 전체 노드의 수  $N$ 은 30, 40, 50이며, 이중 메쉬 액세스 포인트의 수는 전체의 10%로 가정하였다. 따라서 전체 노드의 수가 30인 경우에는 메쉬 액세스 포인트의 수는 3으로 설정하였다. 각 노드의 최대 링크 수  $L$ 은  $N_c / N \times 2$ 로 설정하였다. 논문에서 성능 평가된 각 알고리즘은 30번씩 시도하여 평균값과 표준편차로 결과를 나타내었다.

그림 4는 다양한 수를 가진 메쉬 클라이언트가 배치된 무선 메쉬 네트워크에서 메쉬 라우터와 메쉬 액세스 포인트 수를 다르게 설정했을 때, 제안된 타부서치 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 기존에 제안된 유전자 알고리즘 및 시뮬레이티드 어닐링과 비교한 결과이다. 그림 4(a)는 전체 메쉬 라우터의 수가 30개이고 그 중 10%인 3개를 메쉬 액세스 포인트로 설정한 결과이다. 시뮬레이션 결과에서 제안된 타부서치 알고리즘이 기존의 다른 알고리즘에 비해 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다. 그림 4(b)(c)에서도 메쉬 라우터와 메쉬 액세스 포인트의 수가 더 증가하더라도 제안된 타부서치가 기존 다른 알고리즘에 비해 성능이 우수함을 볼 수 있다. 같은 메타휴리스틱 알고리즘인 유전자 알고리즘이나 시뮬레이티드 어닐링보다 제안된 타부서치의 성능이 우수한 이유는 최적의 해를 검색하는 제안된 타부서치의 이웃해 생성방식이 적절히 잘 동작하여 최적에 가까운 해에 빠

르게 수렴하기 때문이다. 즉 제안된 이웃해 생성방식인 UpMove, DownMove, RightMove, LeftMove가 특정한 지역해에 빠지지 않고 검색하고자하는 전체 영역을 적절히 검색하였기 때문이다.

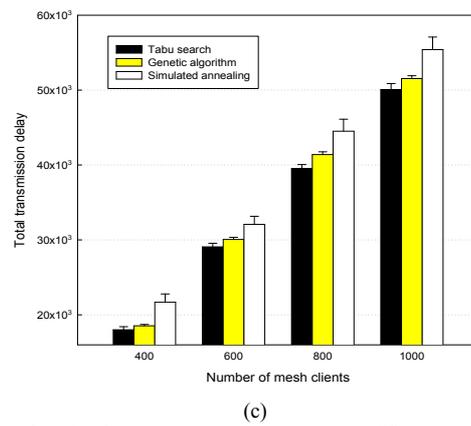
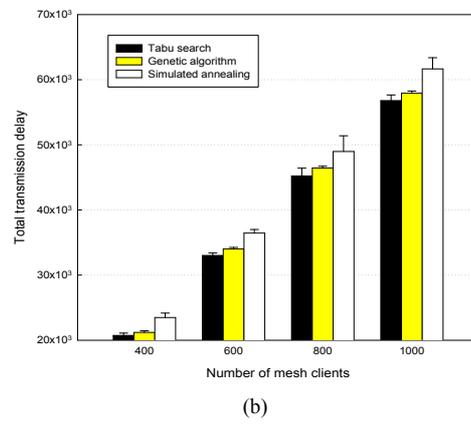
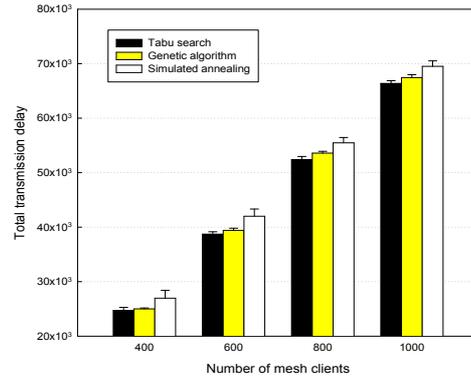


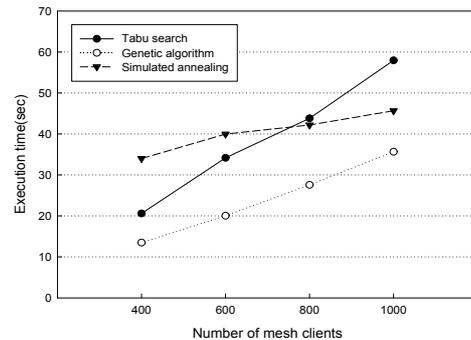
Fig. 4 Total transmission delay (a)  $N = 30$  (b)  $N = 40$  (c)  $N = 50$

그림 5는 앞서 수행한 네트워크 환경에서 각 알고리즘에 대한 시뮬레이션 실행시간을 나타낸 결과이다. 그림에서 유전자 알고리즘이 가장 빠른 시간에 해를 도출하고, 제안된 타부서치 알고리즘은 메시 클라이언트의 수가 적은 경우에는 시뮬레이티드 어닐링에 비해 빠른 실행시간을 가지지만, 메시 클라이언트의 수가 많은 밀도가 높은 네트워크에서는 다른 알고리즘에 비해 실행시간이 더 많이 소요됨을 볼 수 있다. 유전자 알고리즘의 경우에는 미리 지정된 개수의 해를 사용하여 이웃해를 생성하여 최적에 가까운 해에 도달하게 된다. 반면에 타부서치 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링은 해가 가지는 요소를 이용하여 이웃해 생성방식을 적용하기 때문에 해의 길이와 연관되어 실행시간이 결정된다. 따라서 메시 클라이언트의 수가 많은 네트워크 환경에서는 유전자 알고리즘에 비해 제안된 타부서치의 실행시간은 더 많이 소요된다. 또한 제안된 타부서치는 4가지의 이웃해 생성방식을 적용함으로써 시뮬레이티드 어닐링에 비해서도 노드의 수가 많은 네트워크에서는 더 많은 실행시간이 걸림을 볼 수 있다. 결론적으로 본 논문에서 제안된 타부서치 알고리즘은 무선 메시 네트워크에서 전송지연을 최소화하기 위한 네트워크 설계 문제를 적정한 실행 내에서 기존의 알고리즘에 비해 효율적으로 최적화함을 알 수 있었다.

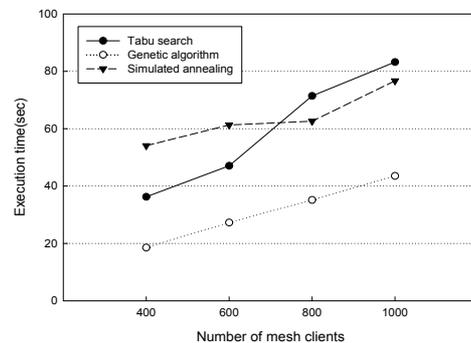
## VI. 결 론

본 논문은 무선 메시 네트워크에서 전송지연을 최소화하기 위한 네트워크 설계 문제를 최적화하는 타부서치 알고리즘을 제안하였다. 제안된 타부서치 알고리즘은 메시 라우터와 메시 액세스 포인트에서 발생하는 전송지연을 최소화할 수 있는 해의 구조를 설계하였으며, 이를 적용하여 초기해를 생성하고, 초기해를 기반으로 4가지 이웃해 생성방식을 적용하였다. 최적에 가까운 해를 빠르게 검색하기 위해 동적 타부리스트를 사용하였으며 적절한 알고리즘 종료 기준을 설정하여 최적해에 접근하였다. 제안된 타부서치 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 메시 라우터와 메시 액세스 포인트의 전송 지연 측면에서 기존의 유전자 알고리즘 및 시뮬레이티드 어닐링과 비교하였다. 성능평가에서 제안된 타부서치 알고리즘이 기존의 방식에 비해 적은 전송지연으로

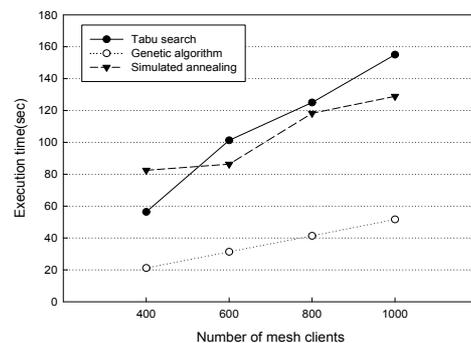
네트워크의 노드를 배치할 수 있음을 알 수 있었다. 결론적으로 제안된 타부서치 알고리즘이 무선 메시 네트워크에서 NP-hard 문제인 네트워크 설계 문제를 적절한 실행시간 내에서 효율적으로 해결하고 있음을 알 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Average execution time (a)  $N = 30$  (b)  $N = 40$  (c)  $N = 50$

## REFERENCES

- [ 1 ] K. C.Karthika, "Wireless Mesh network: A survey," in *International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking*, pp. 1966-1970, March 2016.
- [ 2 ] A. Cilfone, L. Davoli, L. Belli, and G. Ferrari, "Wireless mesh networking: An IoT-Oriented perspective Survey on relevant technologies," *Future Internet*, vol. 11, no. 4, pp. 1-35, April 2019.
- [ 3 ] R. Jayaraman, G. Raja, A. K. Bashir, S. H. Chauhdary, A. Hassan, and M. A. Alqarni, "Interference mitigation based on radio aware channel assignment for wireless mesh networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 101, no. 3, pp 1539-1557, May 2018.
- [ 4 ] S. Y. Shahdad, A. Sabathath, and R. Parveez, "Architecture, issues and challenges of wireless mesh network," in *Proceedings of International Conference on Wireless Communications, Signal Processing*, pp. 557-560, April 2016.
- [ 5 ] W. Ahmad and A. S. Qazi, "Comparison of Routing Protocols in Wireless Mesh Network on the Basis of Performance," *International Journal of Networks and Communications*, vol. 8, no. 2, pp. 29-33, February 2018.
- [ 6 ] M. R. Girgis, T. M. Mhmoud, B. A. Abdullatif, and A. M. Rabie, "Solving the wireless mesh network design problem using genetic algorithm and simulated annealing optimization methods," *International Journal of Computer Applications*, vol. 96, no. 11, pp. 1-10, June 2014.
- [ 7 ] S. Tajima, T. Higashino, N. Funabiki, and S. Yoshida, "An internet gateway access-point selection problem for wireless infrastructure mesh networks," in *Proceedings of International Conference on Mobile Data Management*, pp. 1-5, May 2006.
- [ 8 ] M. Kodialam and T. Nandagopal, "Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks," in *Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 73-87, August 2005.
- [ 9 ] L. Badia, A. Botta, and L. Lenzi, "A genetic approach to joint routing and link scheduling for wireless mesh networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 4, pp 654-664, June 2009.
- [10] T. Vanhatupa, M. Hannikainen, and T. D. Hamalainen, "Performance model for IEEE 802.11s wireless mesh network deployment design," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 68, no. 3, pp. 291-305, March 2008.



장길웅(Kil-woong Jang)

1997년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 학사  
 1999년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 석사  
 2002년 8월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 박사  
 2003년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 데이터정보학과 교수  
 ※ 관심분야 : 네트워크 프로토콜, 네트워크 최적화