

## 트래픽 중복 제거로 네트워크 에너지 소비를 최소화하기 위한 최적화 알고리즘

장길웅\*

### Optimization Algorithm for Minimizing Network Energy Consumption with Traffic Redundancy Elimination

Kil-Woong Jang\*

\*Professor, Division of Electronics Electrical and Information, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112 Korea

#### 요 약

최근 네트워크에서 안정된 전송을 위해 광대역의 대역폭과 중복 링크를 사용함으로써 과도하게 에너지를 소비하고 전송효율을 떨어뜨리는 결과를 낳고 있다. 본 논문에서는 트래픽 중복이 허용되는 네트워크에서 중복 트래픽을 제거함으로써 전송 링크의 수를 줄이고 전송에너지를 최소화하는 최적화 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 최적화 알고리즘은 타부서치 알고리즘을 이용한 메타휴리스틱방식을 사용한다. 제안된 최적화 알고리즘은 중복되는 트래픽을 효율적으로 경로 설정할 수 있도록 이웃해 생성방식을 설계하여 전송에너지를 최소화한다. 제안된 최적화 알고리즘의 성능평가는 네트워크에서 발생하는 모든 트래픽을 전송하기 위해 사용되는 링크의 수와 소모되는 전송에너지 관점에서 수행되었다. 성능평가 결과에서 제안된 알고리즘이 이전에 제안된 다른 알고리즘에 비해 더 우수한 성능 결과가 나타남을 확인할 수 있었다.

#### ABSTRACT

In recent years, the use of broadband bandwidth and redundant links for stable transmission in networks has resulted in excessive energy consumption and reduced transmission efficiency. In this paper, we propose an optimization algorithm that reduces the number of transmission links and minimizes transmission energy by removing redundant traffic in networks where traffic redundancy is allowed. The optimization algorithm proposed in this paper uses the meta-heuristic method using Tabu search algorithm. The proposed optimization algorithm minimizes transmission energy by designing a neighborhood generation method that efficiently routes overlapping traffic. The performance evaluation of the proposed optimization algorithm was performed in terms of the number of links used to transmit all traffic generated in the network and the transmission energy consumed. From the performance evaluation results, it was confirmed that the proposed algorithm is superior to other algorithms previously proposed.

**키워드** : 트래픽 중복 제거, 타부서치, 최적화, 네트워크 에너지

**Key word** : Traffic redundancy elimination, Tabu search, Optimization, Network energy

Received 25 May 2021, Revised 22 June 2021, Accepted 26 June 2021

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

Professor, Division of Electronics Electrical and Information, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.7.930>

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

오늘날의 네트워크는 많은 사용자를 수용하고 네트워크 신뢰도를 높이기 위해 여러 개의 중복 링크와 대용량의 대역폭을 구축하고 있다. 다중의 링크 중복과 대용량 대역폭은 네트워크 안정성을 높이는 동시에 네트워크의 에너지 효율성도 떨어뜨리는 단점을 가진다. 실제 환경에서 모든 네트워크 장치는 전원이 켜진 상태를 유지하지만, 대부분 장치 활용도가 낮게 나타나고 있다 [1-4]. 인터넷 서비스 제공업체에서 사용되는 백본 네트워크의 평균 사용률은 대략 30~40%로 활용도가 낮게 나타나고 있다[5]. 특히 네트워크에서 링크를 관리하는 라우터의 전력 소비는 트래픽 부하와는 무관하므로 사용하지 않는 네트워크 요소를 휴면 상태로 전환하여 에너지의 소모를 줄이고자 하였다. 이러한 기본개념을 이용한 라우팅 방식을 에너지 인식 라우팅(energy-aware routing)이라고 한다. 에너지 인식 라우팅을 이용하여 에너지를 절약하는 방안을 제안하였지만, 실제 구현에서 다양한 문제를 발생하였다[6].

일반적으로 에너지 인식 라우팅에서 주요 제약 조건 중 하나가 링크 용량이다. 에너지 인식 라우팅에서는 라우터가 중복 트래픽을 제거하여 네트워크 링크 용량을 늘릴 수 있다는 가정을 사용한다. 결과적으로 더 많은 트래픽 흐름이 링크를 통해 전송될 수 있으며 더 많은 링크가 휴면 상태를 통해 전송에너지를 절약할 수 있다. 오늘날 라우터는 네트워크 전송에서 반복되는 콘텐츠를 제거할 수 없지만, 기업이나 소규모 인터넷 서비스 제공업체에서 사용되는 상용 장치인 광대역통신망 최적화 제어기(WAN optimization controller)를 사용하여 트래픽 중복을 제거할 수 있다[7]. 광대역통신망 최적화 제어기는 소규모 인터넷 서비스 제공업체 또는 기업의 개별 사이트에 설치되어 사이트 중단 간 중복된 트래픽을 제거한다.

본 논문에서는 중복 트래픽을 제거할 수 있는 최적화 제어기를 가진 라우터로 구성된 네트워크에서 활성 링크 수를 최소화함으로써 네트워크의 전송에너지를 최소화하기 위한 최적화 알고리즘을 제안한다. 서비스 품질 제약하에서 활성 링크 수를 최소화하는 문제는 혼합된 정수 선형 계획법(mixed integer linear programming)을 사용하여 정식화할 수 있다. 그러나 이 문제는 NP-hard [8]로 알려져 있으며, 현재에는 규모가 작은 네

트워크에서만 명확하게 해결할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 대규모 네트워크에서 최적에 가까운 해를 찾기 위해 메타휴리스틱 알고리즘을 이용한 최적화 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안되는 최적화 알고리즘은 적절한 실행 시간 안에 최적에 가까운 해를 도출하기 위하여 메타휴리스틱 방식 중 하나인 타부서치(tabu search) 알고리즘을 적용한다. 제안된 타부서치 알고리즘은 주어진 네트워크에서 각 트래픽에 대하여 활성 링크와 전송에너지를 최소화하는 경로를 결정하고, 다양한 조건에서 활성화된 링크의 수와 전송에너지 측면에서 기존의 다른 알고리즘과 성능평가를 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 네트워크에서 에너지를 절감하기 위한 관련 연구를 기술하고, 3장에서는 네트워크에서 트래픽 중복 제거를 위한 문제를 정식화하고, 4장에서는 제안된 타부서치 알고리즘을 기술한다. 5장에서는 제안된 타부서치 알고리즘과 기존의 알고리즘의 성능을 비교하며, 6장에서 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

네트워크에서 트래픽 전송 시에 에너지 특성을 이용한 라우팅 방식을 에너지 인식 라우팅이라고 한다. 에너지 인식 라우팅에서는 경로 설정에 사용된 에너지를 중심으로 네트워크에서 사용되는 전체 에너지를 최소화 되도록 경로를 결정한다. *Neri et al.*[9]은 링크 최대 사용 제한을 충족하면서 각 트래픽에 대하여 완전한 연결을 보장하도록 노드와 링크에서 사용되는 에너지를 제어하고, 네트워크 자원을 최소로 이용하여 네트워크 트래픽에 사용되도록 제안하였다. 인터넷상의 트래픽은 서로 다른 사용자가 같거나 유사한 콘텐츠에 접근할 때 많은 양의 중복성을 나타낸다. 다양한 연구에서 네트워크에서 트래픽 중복을 제거하는 방법을 연구하였다. 특히 대규모 네트워크에 대한 실험을 위하여 엄격한 시간 제약을 두고 가능한 시간 내에 수용 가능한 해를 찾는 휴리스틱 방식을 제안하였다. *Pagano et al.*[10]은 최단거리 알고리즘에 기반한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 트래픽과 네트워크 토폴로지가 네트워크 성능에 어떻게 영향을 미치는지에 대하여 연구하였다. 노드와 관련된 트래픽을 고려할 때 네트워크 자원의 에너지를 차단함으로써 네트워크의 전체 에너지 소비를 최소화

되도록 제안하였다. *Spring et al.*[11]는 트래픽 흐름에서 중복 바이트를 제거하는 최초의 시스템을 개발하였다. 이러한 접근 방식에 따라 여러 상용 공급업체가 네트워크 전송에서 중복 콘텐츠를 제거할 수 있는 광대역 통신망 최적화 제어기를 도입하였다. *Giroire et al.*[12]은 대규모 네트워크에서 중복 트래픽을 제거하기 위한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 최단 거리를 이용한 탐욕적인 알고리즘 방식으로 제안되었으며, 트래픽 중복률에 따라 에너지 소모와 전송량을 측정하였다.

### III. 문제 정식화

본 논문에서는 네트워크에서 트래픽이 전송되는 동안 링크와 중복 제거 라우터(redundancy elimination router: RE-router)에서 발생하는 에너지를 최소화하기 위한 최적화 알고리즘을 제안하며, 이를 위해 우선 최적화 문제에 대하여 정수 계획법으로 정식화한다. 최적화 문제를 정식화하기 위해 사용되는 기호는 다음과 같다.

|          |   |
|----------|---|
| $V$      | set of nodes                              |
| $E$      | set of links                              |
| $n$      | number of nodes                           |
| $m$      | number of links                           |
| $R_{re}$ | set of redundancy elimination routers     |
| $D$      | set of all traffic demands                |
| $d$      | a traffic demand: $(sn, dn, t)$           |
| $sn$     | source node                               |
| $dn$     | destination node                          |
| $t$      | amount of traffic exchanged between nodes |
| $P$      | $(sn, dn)$ path                           |
| $A$      | set of active links                       |
| $E_{ij}$ | consumed energy on link $(i, j)$          |
| $E_v$    | consumed energy on RE-router $v$          |
| $F_{ij}$ | amount of traffic on link $(i, j)$        |
| $R_r$    | redundancy ratio                          |

트래픽 라우팅에서 발생하는 전송에너지를 최소화하기 위해 제안된 알고리즘에 대한 네트워크 모델은 다음과 같다. 본 논문에서 사용된 네트워크 모델은 비방향성

그래프  $G=(V, E)$ 로 나타내며,  $V$ 는  $n$ 개의 노드를 가진 집합이며,  $E$ 는  $m$ 개의 링크로 이루어진 집합을 나타낸다. 모든 노드는 라우터로 구성되며, 노드  $i$ 에서  $j$ 로의 링크  $(i, j)$ 는 단일 링크로 이루어져 있으며, 링크가 트래픽 전송을 위해 활성화되면  $E_{ij}$ 와트(Watt)만큼 에너지를 소비한다고 가정한다. 본 논문에서는 전송되는 트래픽에 대하여 중복률  $R_r$ 을 정의한다. 만약  $R_r = 0.3$ 이고 트래픽의 요구량이 10Gb 일 경우, 링크 상에서는 10Gb 대신에 중복률에 따라 중복을 제거한 7Gb를 전송하게 된다. 네트워크의 노드는 모두 라우터로 구성되며, 본 논문에서는 모든 노드는 중복 제거 기능을 가진 중복 제거 라우터로 가정한다. 트래픽 전송에 있어서 라우터가 중복 제거 동작을 수행할 경우, 추가로  $E_{re}$ 와트 만큼 에너지를 소비한다. 네트워크에서 사용되는 전체 트래픽 집합을  $D$ 로 나타내며, 각 트래픽  $d$ 에 따라  $(sn, dn)$  형식으로 트래픽 전송을 위한 경로  $P$ 가 결정된다. 여기서 소스 노드  $sn$ 과 목적지 노드  $dn$  간에 트래픽 요구량  $t$ 가 요구된다.

앞서 언급한 네트워크  $G=(V, E)$ 와 트래픽 집합  $D$ 가 주어졌을 때, 본 논문에서 제안하는 최적화 알고리즘은 트래픽 중복을 제거하여 활성화된 링크의 수를 최소화함으로써 소모되는 전송에너지를 최소화한다. 따라서 네트워크에서 트래픽 중복을 제거하여 전송에너지를 최소화하는 트래픽 라우팅 문제는 다음과 같은 목적함수를 가진 조합 최적화 문제로 정식화할 수 있다.

$$\text{Minimize} \quad \sum_{(i,j) \in E} E_{ij}x_{ij} + \sum_{v \in R_{re}} E_v w_v \quad (1)$$

$$\text{object to} \quad x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if link}(i,j) \text{ is used} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$w_v = \begin{cases} 1, & \text{if router } v \text{ performs RE-router} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

식 (1)은 트래픽 중복이 허용된 네트워크에서 활성화된 링크에서 소모되는 에너지와 중복 제거 라우터에서 소모되는 에너지의 합을 최소화는 목적함수를 나타낸다. 식 (2)는 트래픽이 링크  $(i, j)$ 를 통해 전송되면 1, 그렇지 않으면 0을 나타내는 이진 변수  $x_{ij}$ 를 나타낸다. 식 (3)은 트래픽 전송에 참여한 라우터가 중복 제거 동작을 수

행하는 라우터로 동작하면 1, 그렇지 않으면 0을 나타내는 이진 변수  $w_v$ 를 나타낸다.

#### IV. 제안된 타부서치 알고리즘

본 장에서는 트래픽 중복이 허용된 네트워크에서 전송에너지를 최소화하기 위한 라우팅 문제에 대하여 제안된 타부서치 알고리즘을 자세히 기술한다. 다음은 제안된 타부서치 알고리즘의 절차를 의사코드로 나타낸 것이다.

```

 $S_0 \leftarrow \text{genInitSolution}() \ // \text{ an initial solution: } S_0$ 
 $S_b \leftarrow S_0 \ // \text{ a temporary best solution: } S_b$ 
 $S_c \leftarrow S_0 \ // \text{ a current solution: } S_c$ 
insertTabulist( $S_0$ )
repeat // cnt ← 0
     $S_{rm} \leftarrow \text{removeMove}(S_c)$ 
     $S_{rp} \leftarrow \text{replaceMove}(S_c)$ 
     $S_{best} \leftarrow \text{selBestSolution}(S_{rm}, S_{rp})$ 
    while not isTabulist( $S_{best}$ ) do
         $S_{best} \leftarrow \text{selNextSolution}(S_{rm}, S_{rp})$ 
    end
    if cost( $S_{best}$ ) < cost( $S_b$ ) then
         $S_b \leftarrow S_{best}, cnt \leftarrow 0$ 
    else
        cnt ← cnt + 1
    end
    insertTabulist( $S_{best}$ )
     $S_c \leftarrow S_{best}$ 
until cnt <  $K_{max}$  // maximum iteration:  $K_{max}$ 
return  $S_b$ 

```

위에서 기술한 타부서치 알고리즘의 설명은 다음과 같다. 제안된 타부서치 알고리즘을 적용하기 위해 먼저 해의 구조를 설계한다. 해의 구조는 주어진 문제에 따라 적절히 설계된다. 설계된 해의 구조에 따라 주어진 문제의 제약 조건을 고려한 초기해  $S_0$ 를 한 개 생성한다. 초기해는 무작위 방식으로 생성되며, 제약 조건을 만족해야 한다. 필요에 따라 가능한 최적해를 빠르게 찾기 위해 휴리스틱 기법을 사용하기도 한다. 처음 생성된 초기해는 임시최적해  $S_b$ 이면서 현재해  $S_c$ 로 저장하고, 타부

리스트에 저장한다. 다음으로 현재해를 이용하여 인접해 생성방식에 의해 새로운 인접해를 생성한다. 생성된 인접해 중 가장 우수한 해  $S_{best}$ 를 하나 선택하여 타부리스트에 저장된 해와 비교한다. 만약 선택된 가장 우수한 해  $S_{best}$ 가 이전에 선택되어 타부리스트에 저장되어 있다면, 인접해 생성방식에 의해 생성된 해 중에 다음으로 우수한 해를 다시 선택한다. 같은 절차를 반복하여 타부리스트에 저장되지 않은 새로운 해가 나올 때까지 반복한다. 선택된 해  $S_{best}$ 는 임시최적해  $S_b$ 와 비교하여 성능이 우수하면 선택된 해  $S_{best}$ 를 임시최적해  $S_b$ 로 저장한다. 선택된 해  $S_{best}$ 는 새로운 인접해를 생성하기 위한 현재해로 사용된다. 타부서치 알고리즘은 앞서 기술한 인접해 생성과 우수한 해  $S_{best}$  선택, 임시최적해  $S_b$ 와의 비교를 반복함으로써 최종적으로 최적해에 도달하며, 종료 기준에 따라 알고리즘을 종료한다.

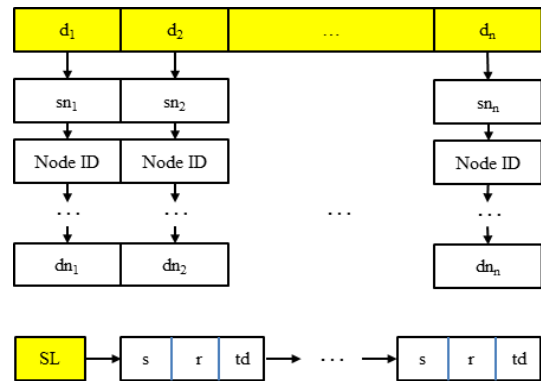


Fig. 1 Solution structure and solution list(SL)

##### 4.1. 해의 구조 설계

제안된 타부서치 알고리즘을 수행하기에 앞서 알고리즘에 적용되는 해의 구조를 설계한다. 일반적으로 설계되는 해의 구조에 따라 알고리즘 실행방식이 달라진다. 본 논문에서 제안된 해의 구조는 그림 1과 같다. 해의 구조는 네트워크에 존재하는 트래픽에 대한 경로를 나타낸다. 즉  $i$ 번째 트래픽  $d_i$ 에 대하여 소스 노드에서부터 경로를 지나는 노드와 목적지 노드를 해의 구성요소로 포함한다. 제안된 해의 구조는 초기해 생성과 인접해 생성을 위해 사용된다. 이 구조를 통해 생성된 해에서 트래픽 중복을 제거한 상태의 전체 네트워크의 경로 상태를 저장한 리스트를 별도로 구성한다. 본 논문에서는 이를 해 리스트(solution list:SL)라고 한다. 그림1에서

해 리스트는 네트워크의 모든 트래픽에 대한 경로에서 활성화된 링크를 나타내며, (sender, receiver, traffic demand) 형식으로 표현한다.

#### 4.2. 초기해 생성

최적해를 구하기 위한 알고리즘 첫 번째 단계로 설계된 해의 구조에 맞게 제약 조건을 만족하는 초기해를 하나 생성한다. 제안된 알고리즘에서는 휴리스틱 방식을 이용하여 초기해를 생성한다. 초기해 생성은 아래의 절차에 따라 수행된다.

- (1) 모든 트래픽에 대하여 최단 경로를 설정하기 위해 다익스트라 알고리즘을 사용한다.
- (2) 모든 트래픽에 대하여 최단 경로가 결정되면 경로상의 노드 번호를 해의 구성요소로 사용한다.
- (3) 모든 경로에 사용된 링크를 검사하여 중복되는 부분을 확인한다. 중복되는 링크는 중복률에 따라 링크에서 전송되는 트래픽 양을 계산하고, 중복 제거 라우터를 결정한다.
- (4) (1) - (3) 단계를 거쳐 생성된 초기해를 이용하여 모든 트래픽에 대하여 중복이 제거된 링크를 검사하여 하나의 해 리스트 SL을 만든다.

초기해 생성방식을 구체적으로 설명하기 위해 다음과 같은 예를 이용한다. 3개의 트래픽  $D = \{(1, 4, 10), (5, 8, 20), (1, 10, 30)\}$ 을 가진 네트워크에서 제안된 알고리즘은 다음과 같이 초기해를 생성한다. 여기서 각 트래픽은 (소스 노드, 목적지 노드, 트래픽 양)을 나타낸다. 각 트래픽에 대하여 최단 경로 알고리즘을 통해 결정하고, 그 결과에 따라 다음과 같이 집합  $P$ 와 각 경로  $p_i$ 를 생성한다.

$$P = \{p_1, p_2, p_3\}$$

$$p_1 = ((1, 6), (6, 7), (7, 4))$$

$$p_2 = ((5, 6), (6, 7), (7, 8))$$

$$p_3 = ((1, 2), (2, 3), (3, 7), (7, 10))$$

경로  $p_1$ 과  $p_2$ 에서 링크(6, 7)이 중복으로 사용되고 있다. 이를 적용하여 아래와 같은 해 리스트  $SL = \{(1, 6, 10), (6, 7, 15+e), (7, 4, 10), (5, 6, 20), (7, 8, 20), (1, 2, 30), (2, 3, 30), (3, 7, 30), (7, 10, 30)\}$ 을 생성한다. 그림 2는 지금까지 기술한 내용을 바탕으로 초기해를 나타낸 것이다. 그림처럼 네트워크에서 3개의 트래픽이 주어졌

을 때, 제약 조건에 맞게 하나의 초기해와 해 리스트 SL을 생성할 수 있다.

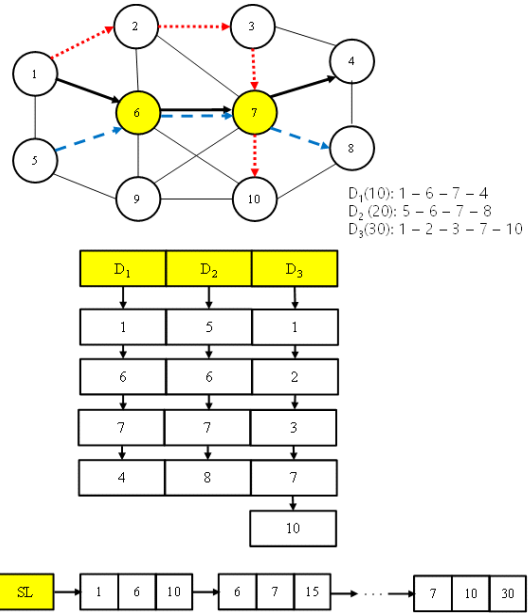


Fig. 2 Network Example and initial solution

#### 4.3. 인접해 생성

앞서 기술한 방식으로 하나의 초기해를 생성하고, 생성된 초기해를 이용하여 인접해를 생성한다. 제안된 타부서치 알고리즘에서는 초기해를 이용하여 인접해를 생성하고, 그중에서 가장 성능이 우수하고 이전에 생성된 적이 없는 해를 선택하여 반복적으로 인접해를 생성함으로써 최적해에 도달한다. 이러한 인접해를 생성하기 위해 인접해 생성방식이 사용된다. 제안된 타부서치 알고리즘에서 사용되는 인접해 생성방식은 크게 두 가지로 구분된다. 한 가지는 해의 구성요소 중 하나를 제거하는 제거방식(remove method)과 구성요소 하나를 교환하는 교환방식(replace method)이다.

먼저 제거방식은 현재의 초기해에서 하나의 구성요소를 제거하는 방식을 사용한다. 즉 트래픽 경로상에 있는 라우터를 제거하는 방식이다. 그림 2는 그림 1에서 사용된 네트워크와 트래픽에서 생성된 초기해를 이용하여 제거방식을 적용한 것이다. 초기해에서 세 번째 트래픽  $d_3$ 의 경로 1 - 2 - 3 - 7 - 10에서 라우터 3을 제거하여 1 - 2 - 7 - 10으로 경로를 수정하였다. 제거방식에 의

해 트래픽 전송을 위해 사용되는 경로의 수는 1개가 줄어들고 동시에 전송에너지도 감소하게 된다.

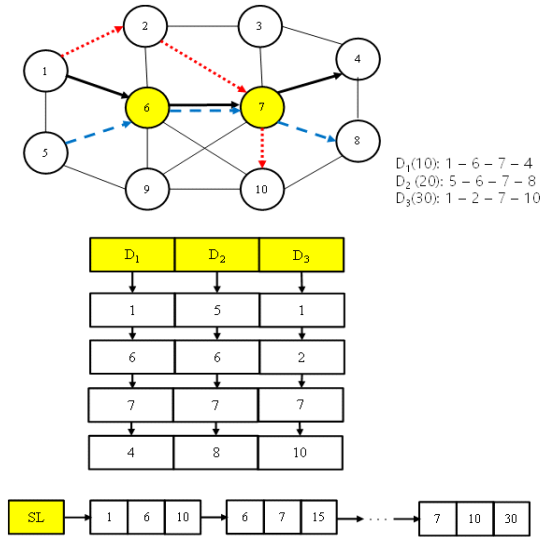


Fig. 3 Remove method of the proposed Tabu search algorithm

다음은 교환방식으로 현재의 초기해 경로에서 하나의 구성요소를 인접한 다른 요소로 바꾸는 방식을 사용한다. 즉 트래픽 경로상에 있는 라우터를 다른 라우터로 바꾸는 방식이다. 예를 들어 그림 4는 그림 3의 네트워크와 트래픽을 이용해 생성된 인접해가 임시최적해로

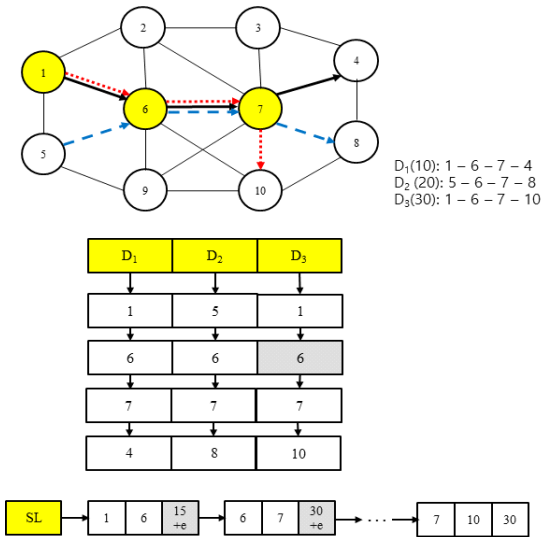


Fig. 4 Remove method of the proposed Tabu search algorithm

선택되었을 경우 이 해에 대하여 교환방식을 적용한 것이다. 초기해에서 세 번째 트래픽  $d_3$ 의 경로 1-6-7-10에서 링크(1, 2)를 링크(1, 6)으로 교환하여 경로를 수정한다. 경로가 6번 라우터를 거침에 따라 기존의 링크(2, 7)을 링크(6, 7)으로 수정한다. 제거방식이나 교환방식에서 경로 수정으로 인하여 경로가 끊어질 때 대해서는 별도의 복구 함수(repair function)를 통해 트래픽 경로 단절이 발생하지 않도록 복구한다. 수정된 경로에 따라 링크(1, 6)과 링크(6, 7)은 중복 링크가 되며, 1, 6, 7번 라우터는 중복 제거 라우터 기능을 수행하게 된다. 따라서 그림 4의 해 리스트 SL에서 나타난 것처럼 활성화된 링크의 수는 7개에서 5개로 감소하고, 네트워크 전체의 전송에너지도 감소하게 된다.

#### 4.4. 타부리스트

타부서치 알고리즘은 다른 메타휴리스틱 방식과는 달리 최적해 생성과정에서 발생하는 임시최적해를 별도의 메모리에 저장한다. 이 메모리를 타부리스트라고 한다. 타부리스트의 기능은 최적해에 도달하기 위해 인접해를 생성하는 반복과정에서 이전에 선택된 해가 다시 인접해를 생성함으로써 지역해에 빠지는 과정을 해소하는 것이다. 또한 타부리스트는 인접해를 검색하는 영역을 확장함으로써 이전에 검색되지 않은 영역을 탐색할 수 있도록 한다. 타부리스트의 크기는 고정되거나 변경하는 방법을 사용할 수 있다. 본 논문에서는 타부리스트의 크기를 이웃해 생성 주기 20번마다  $[n/10, n/5]$  사이의 크기로 변경시킨다. 큐 구조를 가진 타부리스트에서 새로운 해가 추가될 때마다 타부리스트를 검사하여, 타부리스트가 가득 차게 되면 가장 먼저 입력된 해를 삭제하고 새로운 해를 저장한다.

#### 4.5. 알고리즘 종료

타부서치 알고리즘의 종료는 반복되는 횟수에 의해 결정된다. 알고리즘에서 종료 횟수를 미리 정하고, 인접해 생성방식에 의해 도출된 해가 이전에 생성된 임시최적해보다 더 우수한 결과가 연속적으로 정해진 횟수만큼 발생하지 않으면 알고리즘은 종료한다.

## V. 성능평가

본 논문에서는 제안된 타부서치 알고리즘의 성능을 다른 알고리즘과 비교 평가하였다. 알고리즘의 성능평가는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 진행되었으며, 시뮬레이션 프로그램은 C++ 언어로 구현되었다. 시뮬레이션 환경은 3.6GHz CPU와 8GB 메모리로 구성된 컴퓨터에서 수행되었다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평가된 항목은 네트워크의 모든 트래픽 전송 경로상에 활성화된 링크의 수와 트래픽 전송에 사용된 링크 용량과 소모된 전송에너지이며, 각 항목에 대하여 기존에 제안된 최단 경로를 이용한 라우팅 알고리즘[11]과 메타휴리스틱 알고리즘인 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)과 비교 평가하였다.

컴퓨터 시뮬레이션은 다음과 같은 네트워크 환경에서 수행되었다. 네트워크의 크기는  $100 \times 100$ 로 구성되며, 노드는 무작위로 배치하였다. 다양한 노드 밀도를 구성하기 위해 네트워크의 노드를 200에서 1000까지 200씩 증가하여 발생시켰다. 네트워크에 사용된 트래픽은 100개를 생성하였으며, 각 트래픽의 소스 노드와 목적지 노드는  $[1, n]$  사이의 자연수로 랜덤하게 생성하고, 트래픽의 양은  $[10, 30]$  사이의 자연수로 랜덤하게 생성하였다. 본 논문에서 수행한 성능평가는 각 알고리즘에 대하여 10번씩 수행하였으며, 평균값과 표준편차를 결과로 나타내었다.

첫 번째 성능평가항목으로 트래픽 전송 시에 활성화된 링크의 수를 비교 평가하였다.

$$\text{Number of active links} = \sum |A| \quad (4)$$

그림 5는 다양한 노드 수를 가진 네트워크에서 중복률  $R_r = 0.5$  일 때, 제안된 타부서치 알고리즘을 시뮬레이티드 어닐링과 최단 거리 라우팅 알고리즘과 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 알고리즘보다 더 적은 수의 활성화된 링크를 사용하여 트래픽을 전송하고 있다. 이것은 적은 수의 링크를 이용하여 트래픽을 전송함으로써 전체 네트워크 트래픽 전송에 소모되는 에너지가 줄어들음을 알 수 있다. 같은 종류의 메타휴리스틱 알고리즘인 시뮬레이티드 어닐링보다 제안된 타부서치 알고리즘의 성능이 우수한 이유는 제안된 알고리즘에서 사용된 인접해 생성방식이 효과적으로 동작함으로써 더 좋은 성능을 가진 해

에 수렴하기 때문이다. 즉 제안된 인접해 생성방식인 제거방식과 교환방식이 특정 지역에 빠지지 않고 검색영역을 효과적으로 탐색하였기 때문이다.

두 번째 성능평가항목으로 트래픽 전송에 사용된 링크 용량을 측정하였다. 트래픽 전송에 사용된 링크 용량은 수식 (5)와 같이 활성화된 링크에서 트래픽 전송에 사용된 링크 용량의 총합을 나타낸다.

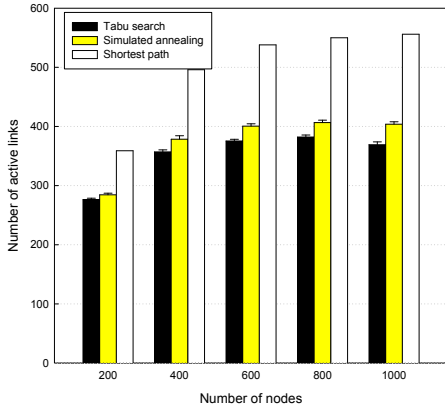
$$\text{Used capacity of active links} = \sum_{(i,j) \in A} F_{ij} \quad (5)$$

그림 6은 그림 5에서 사용된 같은 네트워크 환경에서 각 알고리즘에 대하여 링크 용량을 비교한 것이다. 활성화된 링크의 수와 비슷하게 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 링크 용량이 적게 사용됨을 볼 수 있다. 즉 제안된 타부서치 알고리즘이 중복을 많이 허용하여 링크를 사용함으로써 전체 링크 용량은 적어지고, 그에 따라 전송에너지도 낮아짐을 알 수 있다.

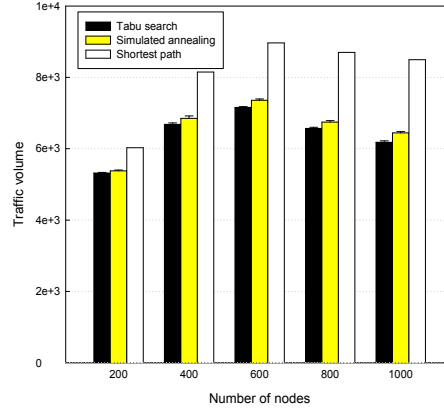
세 번째 성능평가항목으로 트래픽 전송을 위해 소모된 전송에너지를 측정하였다. 트래픽 전송에서 소모되는 전송에너지는 수식 (6)과 같이 정의되며, 수식 (1)의 목적함수와 일치한다.

$$\text{Power consumption} = \sum_{(i,j) \in E} E_{ij}x_{ij} + \sum_{v \in R_{r_c}} E_v w_v \quad (6)$$

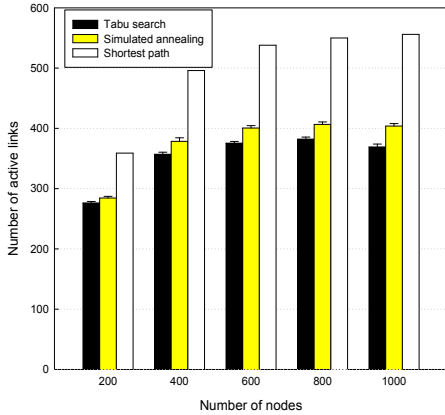
그림 7은 각 알고리즘에 대하여 전송에너지를 비교한 것이다. 앞선 활성화된 링크의 수와 사용된 링크 용량 평가 결과에서 알 수 있듯이 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 소모되는 전송에너지가 적게 사용됨을 볼 수 있다. 즉 제안된 타부서치 알고리즘이 트래픽 중복을 효과적으로 처리함으로써 활성 링크와 링크 용량을 줄임으로써 네트워크 전체 전송에너지를 줄일 수 있었다. 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 좋은 성능을 나타낸 것은 타부서치 알고리즘에서 제안된 인접해 검색 방식이 효과적으로 동작하여 더 많은 인접해 검색을 통해 성능이 우수한 최적해에 도달할 수 있었기 때문이다. 성능평가 결과에서 나타나듯이 본 논문에서 제안한 타부서치 알고리즘이 네트워크에서 중복을 제거함으로써 에너지 소모를 줄이고 효과적으로 트래픽을 전송하고 있음을 알 수 있었다.



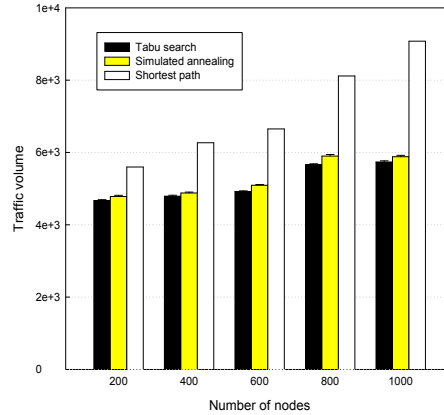
(a)  $r = 15$



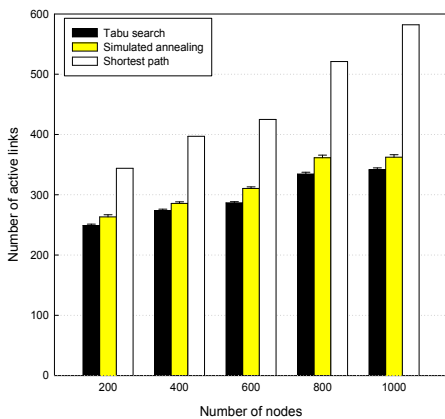
(a)  $r = 15$



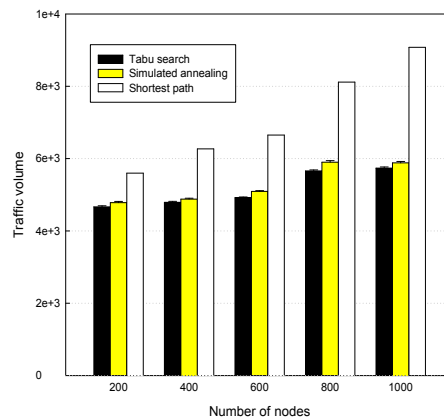
(b)  $r = 20$



(b)  $r = 20$



(c)  $r = 25$

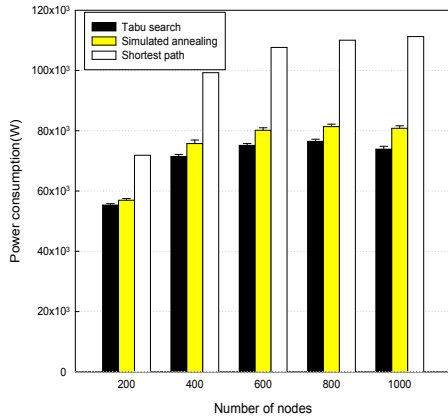


(c)  $r = 25$

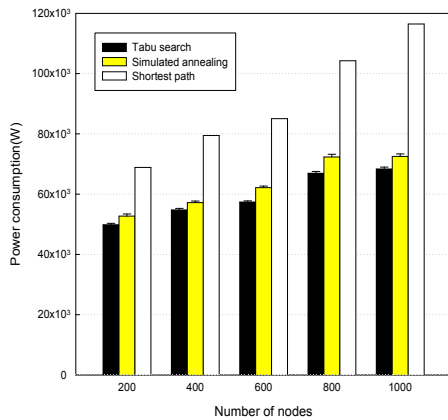
Fig. 5 Number of active links( $R_r = 0.5$ )

Fig. 6 Traffic volume( $R_r = 0.5$ )

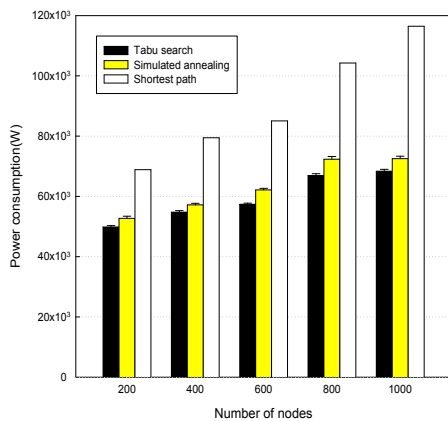




(a)  $r = 15$



(b)  $r = 20$



(c)  $r = 25$

Fig. 7 Power consumption ( $R_r = 0.5$ )

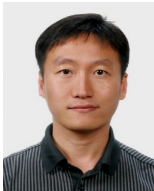
## VI. 결론

본 논문은 네트워크에서 트래픽 전송 시에 전송에너지 소모를 최소화하는 최적화 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 최적화 알고리즘은 메타휴리스틱 방식의 타부서치 알고리즘을 적용하였으며, 트래픽 전송 시 사용되는 링크의 수를 최소화할 수 있도록 설계하였다. 제안된 타부서치 알고리즘에 적용되는 해의 구조를 우선 설계하였고, 해의 구조에 적합한 하나의 초기해를 생성하였다. 최적해를 생성하기 위해 제거방식과 교환방식을 이용하여 인접해를 생성하였다. 반복되는 해를 제거하기 위해 타부리스트를 사용하여 최적해에 도달하였다. 제안된 타부서치 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 활성화된 링크의 수와 사용된 링크 용량, 소모된 전송에너지 관점에서 최단 거리 라우팅 알고리즘 및 시뮬레이티드 어닐링과 비교 평가하였다. 성능평가 결과에서 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 알고리즘보다 적은 링크의 수와 링크 용량을 사용하여 트래픽을 전송함으로써 전체 네트워크 전송에너지가 줄어들 수 있었다. 결론적으로 제안된 타부서치 알고리즘이 네트워크에서 중복을 제거하여 네트워크 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 라우팅 문제에 효과적으로 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

## REFERENCES

- [1] A. K. Rangiseti and B. R. Tamma, "Software Defined Wireless Networks: A Survey of Issues and Solutions," *Wireless Personal Communications*, vol. 97, no. 14, pp. 6019-6053, Aug. 2017.
- [2] F. Dabaghi, Z. Movahedi, and R. Langar, "A survey on green routing protocols using sleep-scheduling in wired networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 77, no. 1, pp. 106-122, Jan. 2017.
- [3] A. A. Deshmukh, M. Jothish, and K. Chandrasekaran, "Green Routing Algorithm for Wireless Networks," in *Proceedings of First International Conference on Information and Communication Technology for Intelligent Systems*, pp. 61-69, Jul. 2016.
- [4] R. E. Mohamed, A. I. Saleh, M. Abdelrazzak, and A. S. Samra, "Survey on Wireless Sensor Network Applications and Energy Efficient Routing Protocols," *Wireless Personal*

- Communications*, vol. 101, no. 21, pp. 1019-1055, May. 2018.
- [ 5 ] F. F. Jurado-Lasso, K. Clarke, A. N. Cadavid, and A. Nirmalathas, "Energy-aware routing for software-defined multihop wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 8, pp. 10174-10182, Apr. 2021.
- [ 6 ] W. Xiang, N. wang, and Y. Zhou, "An energy-efficient routing algorithm for software-defined wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 15, pp. 7393-7400, Oct. 2016.
- [ 7 ] T. J. Grevers and J. Christner, *Application Acceleration and WAN Optimization Fundamentals*, Cisco Press, 2007.
- [ 8 ] F. Giroire, D. Mazauric, J. Moulhierac, and B. Onfroy, "Minimizing routing energy consumption: from theoretical to practical results," in *Proceedings of IEEE/ACM Green Computing and Communications*, pp. 252-259, Dec. 2010.
- [ 9 ] L. Chiaraviglio, M. Mellia, and F. Neri, "Minimizing ISP network energy cost: formulation and solutions," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 20, no. 2, pp. 463-476, Apr. 2012.
- [10] R. G. Garroppo, S. Giordano, G. Nencioni, and M. Pagano, "Energy aware routing based on energy characterization of devices: solutions and analysis," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications Workshops*, pp. 1-6, Jun. 2011.
- [11] N. T. Spring and D. Wetherall, "A protocol-independent technique for eliminating redundant network traffic," in *Proceedings of ACM Special Interest Group on Data Communication*, pp. 87-95, Aug. 2000.
- [12] F. Giroire, J. Moulhierac, T. K. Phan, and F. Roudaut, "Minimization of network power consumption with redundancy elimination," *Computer Communications*, vol. 59, no. 15, pp. 98-105, Mar. 2015.



**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