

번들 링크를 가진 네트워크에서 에너지 인식 라우팅을 위한 최적화 알고리즘

장길웅*

Optimization Algorithm for Energy-aware Routing in Networks with Bundled Links

Kil-Woong Jang*

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

요 약

네트워크에서 전송지연을 줄이고 신뢰성을 높이기 위해 주로 고성능 및 고출력의 네트워크 장비를 사용하여 네트워크 품질을 보장하고 있다. 본 논문에서는 다수의 물리적 케이블로 이루어진 번들 링크를 가진 네트워크에서 트래픽 전송 시 소모되는 에너지를 최소화하기 위한 최적화 알고리즘을 제안한다. 제안된 최적화 알고리즘은 메타휴리스틱 방식 중 하나인 타부서치 알고리즘을 적용하였으며, 각 트래픽에 대하여 소스 노드와 목적지 노드의 경로상에 있는 케이블을 최소로 선택하여 전송에너지가 최소화되도록 설계하였다. 제안된 최적화 알고리즘은 네트워크상의 모든 트래픽에 대하여 전송상에 사용되는 케이블의 수와 링크 효율 관점에서 성능평가가 수행되었으며, 성능평가 결과에서 이전에 제안된 방식보다 우수한 성능을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

In order to reduce transmission delay and increase reliability in networks, mainly high-performance and high-power network equipment is used to guarantee network quality. In this paper, we propose an optimization algorithm to minimize the energy consumed when transmitting traffic in networks with a bundle link composed of multiple physical cables. The proposed optimization algorithm is a meta-heuristic method, which uses tabu search algorithm. In addition, it is designed to minimize transmission energy by minimizing the cables on the paths of the source and destination nodes for each traffic. In the proposed optimization algorithm, performance evaluation was performed in terms of the number of cables used in the transmission and the link utilization for all traffic on networks, and the performance evaluation result confirmed the superior performance than the previously proposed method.

키워드 : 에너지 인식 라우팅, 번들 링크, 타부서치, 최적화

Keywords : Energy-aware routing, Bundled links, Tabu search, Optimization

Received 20 January 2021, Revised 8 February 2021, Accepted 22 February 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.2021.25.4.572>

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. 서 론

현재의 네트워크는 사용자 요구에 대하여 서비스 품질을 만족시키면서 서비스를 받는 사용자의 수를 최대한으로 높이기 위해 설계되고 있다. 낮은 지연을 보장하고 링크 장애나 주요 이벤트로부터 발생하는 트래픽을 처리하기 위해서는 더 많은 장치나 중복 링크를 구축함으로써 달성된다. 그러나 이렇게 설계된 네트워크는 일반적으로 활용도가 낮게 나타나고 있다[1-4]. 실제로 인터넷 서비스 제공업체의 백본 네트워크에서의 평균 사용률은 약 30~40%로 나타나고 있다[5]. 이와 더불어 에너지 효율성을 떨어뜨리고, 에너지 소비량이 증가함에 따라 환경문제까지 일으킬 수 있다[6].

네트워크상에서 에너지 효율을 높일 수 있는 한 가지 방법으로 가능한 한 가장 적은 수의 링크와 라우터에 걸쳐 트래픽을 라우팅하는 방법을 고려할 수 있다. 대표적으로 백본 라우터와 물리적 인터페이스 카드에 대하여 트래픽 정점 기간이 아닌 동안에 활용도가 낮은 라우터 및 물리적 인터페이스 카드를 모두 휴면 상태로 설정하는 것이다. 이와 관련하여 인텔은 0BASE-X[7] 개념을 도입해 물리적 인터페이스 카드로 데이터를 빠르게 전송할 수 있는 활성 상태에서 에너지 절약을 위한 휴면 상태로 빠르게 전환할 수 있으며, 그 반대의 경우도 적용하고 있다. 이러한 방식은 사용 빈도가 낮은 링크의 에너지 소비를 효과적으로 줄일 수 있다.

본 논문에서는 활성/휴면 전환 기능이 있고 다중 물리적 케이블로 연결되는 물리적 인터페이스 카드와 라우터를 가진 네트워크에서 최적화 알고리즘을 설계한다. 적용되는 다중 물리적 케이블은 IEEE 802.1 AX[8]에 의해 표준화된 하나의 논리적 번들 링크를 형성하며, MAC(media access control) 계층은 각 번들 링크를 단일 링크로 취급한다. 번들 링크를 사용하는 장점은 네트워크 운영자에게 네트워크 용량을 쉽게 갱신할 수 있도록 해 주며, 전체 네트워크 용량이 필요하지 않은 기간에는 케이블의 전원을 끌 수 있는 기능을 제공한다. 본 논문은 네트워크 사업자가 IEEE 802.1 AX 케이블을 사용하여 현재 또는 예상 트래픽에 근거하여 번들 링크의 개별 케이블에 대한 전원을 휴면상태로 선택하여 전송 에너지를 최소화하는 최적화 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 다루는 최적화 문제는 네트워크 토폴로지와 트래픽 정보를 입력으로 사용하고, 주어진 트래픽에 대

하여 전송 상태에서 전원을 끌 수 있는 최대 케이블 수를 식별하여 라우팅을 수행한다. 네트워크에서 에너지 인식 라우팅은 NP-complete 문제로 증명되어 있으며 [9], 적절한 실행 시간 내에 최적에 가까운 결과를 도출하기 위하여 메타휴리스틱 방식 중 타부서치(tabu search) 알고리즘을 이용하여 에너지 인식 라우팅 문제를 해결한다. 제안된 타부서치 알고리즘은 번들 링크를 가진 네트워크에서 각 트래픽에 대하여 전송에너지 소비를 최소화하는 경로를 결정하며, 이에 대한 성능평가는 다양한 조건에서 활성화된 케이블의 수와 링크 효율 측면에서 기존의 다른 알고리즘과 성능을 비교한다.

II. 관련 연구

에너지 인식 네트워크 기기의 특성을 활용할 수 있는 네트워크에서 전송에너지를 줄일 수 있는 방식을 다음 4가지로 분류할 수 있다. 첫 번째 방식으로 에너지 인식 라우팅(energy-aware routing) 방식이다. 에너지 인식 라우팅은 경로 설정에서 사용된 에너지만 고려하여 네트워크의 전체 에너지 소비를 최소화하는 트래픽 경로를 결정한다. *Neri et al.*[10]은 완전한 연결을 보장하고 최대 링크 사용 제한을 충족시키면서 노드와 링크의 전원을 제어하기 위해 최소의 네트워크 자원을 네트워크 트래픽에 집중시키는 방식을 제안한다. 또한, 알고리즘 실행 시간에 대한 엄격한 제약을 두고 대규모 네트워크에서도 수용 가능한 시간 내에 근사해를 찾을 수 있는 휴리스틱 방식을 제안하였다. 두 번째 방식은 에너지 인식 네트워크 설계(energy-aware network design) 방식이다. 에너지 인식 네트워크 설계는 노드와 관련된 트래픽 요구를 고려할 때 네트워크 요소의 전원을 끄는 것만으로 네트워크의 전체 전송에너지 소비를 최소화하는 트래픽 라우팅 전략을 제안한다. *Pagano et al.*[11]은 Dijkstra의 알고리즘에 기반한 휴리스틱을 제안했으며 네트워크 성능에 대한 트래픽 양과 토폴로지의 영향을 깊이 있게 조사하였다. 세 번째 방식은 에너지 인식 라우팅 및 네트워크 설계(energy-aware routing and network design) 방식이다. 에너지 인식 라우팅 및 네트워크 설계는 노드와 관련된 트래픽 요구를 고려하여 경로 설정으로 발생하는 전송에너지와 전체 링크 및 노드의 전원을 끌 가능성을 함께 고려하여 네트워크의 전체 전송에너

지 소비를 최소화하는 트래픽 라우팅 방식을 제안한다. 이 방식은 전력 인식 라우팅과 네트워크 설계 문제를 동시에 고려해야 한다. Rougier et al.[12]은 노드와 링크에서 선형 에너지를 가지고 있다고 가정하며, 하나의 정해진 네트워크 토폴로지만 고려함으로써 네트워크 확장성을 보장하지 못하는 단점을 가진다. 마지막으로 번들 링크가 있는 에너지 인식 라우팅 및 네트워크 설계 (energy-aware routing and network design bundled links) 방식이다. 이 문제는 번들 링크의 단일 물리적 인터페이스 카드 전원을 끄는 방식을 이용하여 에너지 인식 라우팅 및 네트워크 설계 방식을 확장한다. Lazarescu et al.[9]는 번들 링크를 이용한 라우팅에 대한 새로운 휴리스틱을 제안하였다. 이 논문에서 제안한 방식은 단일 경로만 사용하여 각 트래픽 요구를 라우팅하는 기능을 제공하고, 각 트래픽 요구에 대해 여러 경로를 허용한다.

III. 문제 정식화

번들 링크를 가진 네트워크에서 에너지 인식 라우팅 문제를 정식화하기 위해 본 논문에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

V	set of nodes
E	set of links
n	number of nodes
m	number of links
c_{ij}	link capacity between nodes i and j
b_{ij}	bundle size of link(i, j)
o_{ij}	total number of power-on cables in link(i, j)
T	set of all traffic demands
t	traffic demand number: $t = 1, 2, \dots, T $
s_t	source node of traffic t
d_t	destination node of traffic t
a_t	amount of traffic t
p_t	path used to route the flow in traffic t

번들 링크를 가진 네트워크에서 에너지 인식 라우팅 문제를 최적화하기 위한 네트워크 모델은 다음과 같다. 본 논문에서 사용된 네트워크 모델은 가중치를 가진 방향성 그래프 $G=(V, E)$ 로 나타낼 수 있으며, V 는 n 개의

노드를 가진 집합을 나타내며, E 는 노드 간의 연결을 나타내는 m 개의 링크 집합을 의미한다. 각 노드는 라우터이며, 노드 i 에서 j 로의 링크(i, j)는 제한된 용량 c_{ij} 을 가진 통신 채널로써 하나의 번들 링크를 의미한다. 따라서 링크(i, j)는 한 개 이상의 물리적인 케이블을 가지며, 그 케이블의 수를 번들 크기로 정의하며, b_{ij} 로 표현한다. 각 케이블은 독립적으로 전원을 제어할 수 있으며, b_{ij} 개의 케이블을 가진 링크에서 활성 상태의 케이블 수를 o_{ij} 로 나타낸다. 네트워크에서 소스 노드 s_t 와 목적지 노드 d_t 간에 요구되는 트래픽 T 가 존재하며, 본 논문에서는 각 트래픽을 (s, d, a) 형식으로 나타낸다. 여기서 a_t 는 소스 노드와 목적지 노드 간에 교환되는 트래픽 양을 나타낸다. 각각의 트래픽에 따라 소스 노드에서 목적지 노드까지 데이터 전송에 사용되는 경로 p_t 가 결정되며, (s, d) 형식으로 나타낸다.

위에서 언급한 네트워크 $G=(V, E)$ 와 트래픽 T 가 주어졌을 때, 본 논문에서 사용되는 최적화 문제는 활성화된 케이블의 수를 최소화하고, 활성화된 케이블을 이용하여 트래픽 T 에 대하여 경로를 설정하는 문제이다. 따라서 번들 링크를 가진 네트워크에서 에너지 인식 라우팅 문제는 다음과 같이 목적함수를 최소화하는 조합 최적화 문제로 정식화할 수 있다.

Minimize

$$\sum_{(i,j) \in E} o_{ij} \quad (1)$$

object to

$$f_{ij} = \sum_{t \in T} a_t x_{ij}^t \quad (2)$$

$$x_{ij}^t = \begin{cases} 1, & \text{traffic is routed via link}(i,j) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$o_{ij} = \lceil f_{ij} / (c_{ij} / b_{ij}) \rceil \quad (4)$$

$$0 \leq o_{ij} \leq b_{ij}, \quad \forall (i,j) \in E \quad (5)$$

식 (1)은 번들 링크를 가진 네트워크에서 활성화된 케이블의 수를 최소화하는 목적함수를 나타낸다. 식 (2)는 각 링크 상의 모든 트래픽을 나타내며, 제한식 (3)은 트래픽이 링크(i, j)를 통해 전송되면 1, 그렇지 않으면 0을

나타내는 이진 변수를 나타낸다. 식 (4)는 링크(i, j)에서 활성화되는 케이블의 수를 링크 용량과 케이블의 수, 사용되는 트래픽을 이용하여 계산한 식이다. 제한식 (5)는 활성화된 케이블의 수는 각 링크의 번들 크기보다는 작거나 같아야 함을 나타낸다.

IV. 제안된 타부서치 알고리즘

본 장에서는 번들 링크를 가진 네트워크에서 전송에너지를 최소화하기 위한 에너지 인식 라우팅 문제에 대하여 케이블의 수를 최적화하는 타부서치 알고리즘을 기술한다. 제안된 타부서치 알고리즘은 다음과 같은 절차에 따라 수행된다.

- (a) 알고리즘에 적용되는 해의 인코딩 설계
- (b) 한 개의 초기해 생성
- (c) 초기해를 이용한 이웃해 생성
- (d) 새로 생성된 이웃해 중 타부리스트에 없는 해 중 가장 우수한 해를 하나 선택
- (e) 정의된 종료 기준을 만족하면 종료하고, 그렇지 않으면 (c)로 이동

위에서 기술한 타부서치 알고리즘의 자세한 내용은 다음과 같다. 최적의 해를 구하기 위해 우선 타부서치 알고리즘에 사용되는 해의 인코딩을 설계한다. 해의 인코딩은 적용되는 입력자료와 문제에 따라 설계된다. 다음은 설계된 해의 인코딩과 문제의 제약 조건을 만족한 하나의 초기해를 생성한다. 초기해는 주로 무작위 방식으로 생성되지만, 최적해에 빠르게 도달하기 위해 휴리스틱 방식을 사용하기도 한다. 처음 생성된 초기해는 타부리스트라는 메모리에 저장되고, 처음으로 생성된 해는 임시최적해로 저장된다. 다음 단계로 초기해를 이용하여 다양한 이웃해 생성방식에 의해 새로운 이웃해를 생성한다. 생성된 이웃해 중 성능이 가장 우수한 해를 선택하여 타부리스트에 저장된 해와 비교한다. 만약 선택된 가장 우수한 해가 타부리스트에 이미 저장되어 있다면, 다음으로 우수한 해를 선택하여 다시 타부리스트의 해와 비교한다. 같은 방식으로 타부리스트에 저장되지 않은 해가 나올 때까지 반복한다. 이와 같은 방법을 거쳐 선택된 해는 현재의 임시최적해와 비교하고, 임시최적해보다 성능이 좋으면 선택된 해를 임시최적해로

저장한다. 임시최적해와의 비교 결과와 관계없이 선택된 해는 다음 단계에서 이웃해를 생성하기 위한 초기해로 사용된다. 타부서치 알고리즘은 이웃해 생성방식을 반복함으로써 최적에 가까운 해에 도달하며, 미리 정해진 종료 기준에 의해 종료된다.

4.1. 해의 인코딩

메타휴리스틱 알고리즘에서 해의 인코딩은 문제의 조건과 입력을 바탕으로 설계된다. 번들 링크를 가진 네트워크에서 에너지 인식 라우팅을 위하여 제안된 해의 인코딩은 그림 1과 같다. 각 트래픽에 대한 경로를 나타내기 위해 경로에 사용된 노드의 번호를 해의 요소로 구성한다. 그림 1에서 t_i 는 i 번째 트래픽을 의미하며 각 트래픽에 대하여 경로를 구성하는 소스 노드와 중간 노드, 목적지 노드를 연결리스트로 만든다. 또한, 모든 경로에서 사용되는 각 링크의 케이블 수를 저장하기 위해 또 다른 저장 구조를 사용한다. 본 논문에서는 각 링크의 케이블 수를 저장하는 리스트 Q 를 연결리스트로 구성하고, ((송신 노드, 수신 노드), 케이블의 수) 형식으로 나타낸다.

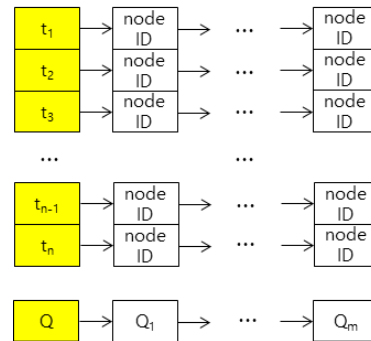


Fig. 1 Solution encoding and Q list

4.2. 초기해 생성

제안된 해의 인코딩을 이용하여 에너지 인식 라우팅 문제의 제약 조건에 맞는 초기해를 한 개 생성한다. 본 논문에서는 초기해를 생성하기 위해 휴리스틱 방식을 적용한다. 본 논문에서 초기해 생성방식은 다음과 같은 절차에 따라 수행된다.

- (a) 각 트래픽에 대하여 소스 노드와 목적지 노드를 기준으로 최단 거리 알고리즘을 적용한다.
- (b) 모든 트래픽에 대한 경로가 설정되면 경로에서 사용되는 노드 번호를 해의 요소로 추가한다.

- (c) 각 경로에 사용된 트래픽 양을 계산하여 사용된 링크의 케이블 수를 계산한다. 계산된 케이블의 수가 변들 링크의 크기보다 클 때는 변들 링크의 크기를 고려하여 경로를 수정하고 초기해에 적용한다.
- (d) 생성된 초기해를 이용하여 모든 트래픽에 적용된 링크를 하나의 리스트로 만든다. 앞서 기술한 각 링크의 케이블 수를 저장하는 집합 Q 를 연결리스트로 구성한다.

한 가지 예로써, 그림 2와 같이 모든 링크에 대하여 $c_{ij} = 6, b_{ij} = 2$ 인 변들 링크를 가진 네트워크에서 다음과 같은 6개의 트래픽을 고려한다. 각 트래픽은 (소스 노드, 목적지 노드, 트래픽 양)을 나타낸다.

$$T = \{(1, 6, 1.05), (1, 7, 0.88), (1, 9, 2.31), (2, 8, 1.75), (3, 7, 1.53), (4, 9, 1.33)\}$$

위의 트래픽에 대한 경로의 집합 P 와 각 경로 p_i 를 다음과 같이 생성한다.

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\}$$

$$p_1 = ((1, 3), (3, 6))$$

$$p_2 = ((1, 5), (5, 7))$$

$$p_3 = ((1, 2), (2, 5), (5, 6), (6, 9))$$

$$p_4 = ((2, 5), (5, 8))$$

$$p_5 = ((3, 5), (5, 7))$$

$$p_6 = ((4, 5), (5, 6), (6, 9))$$

생성된 경로를 통해 각 링크에 적용되는 트래픽을 계산한다. 다음은 경로에 대한 트래픽 양을 계산한 결과이다. $\{(1, 2), 2.31), ((1, 3), 1.05), ((1, 5), 0.88), ((2, 5), 4.06), ((3, 5), 1.53), ((3, 6), 1.05), ((4, 5), 1.33), ((5, 6), 3.64), ((5, 7), 2.1), ((5, 8), 1.75), ((6, 9), 3.64)\}$

계산된 트래픽 양이 $c_{ij} / b_{ij} = 3$ 보다 크면 활성 케이블을 하나씩 증가시킨다. 따라서 계산된 케이블 수를 적용하여 다음과 같은 리스트 Q 를 생성한다.

$$Q = \{((1, 2), 1), ((1, 3), 1), ((1, 5), 1), ((2, 5), 2), ((3, 5), 1), ((3, 6), 1), ((4, 5), 1), ((5, 6), 2), ((5, 7), 1), ((5, 8), 1), ((6, 9), 2)\}$$

이러한 절차에 의해 생성된 초기해는 목적함수인 활성 케이블 수를 계산하면 다음과 같은 값을 가진다.

$$\sum_{(i,j) \in E} o_{ij} = 1+1+1+2+1+1+1+2+1+1+2 = 14 \quad (6)$$

지금까지 기술한 내용을 그림 2에서 나타내었다. 그림처럼 변들 링크를 가진 네트워크에서 6개의 트래픽이 주어졌을 때 제약 조건에 맞게 하나의 초기해와 Q 리스트를 생성할 수 있다.

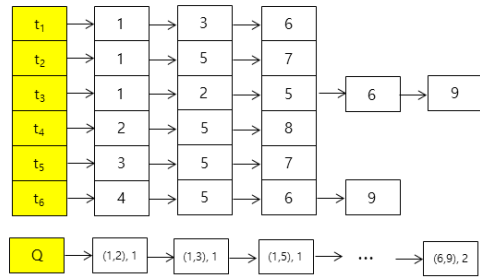
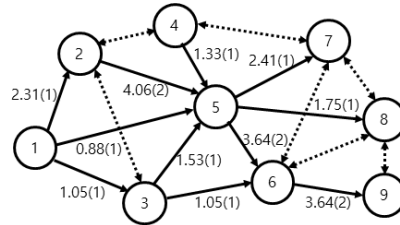


Fig. 2 Network Example and initial solution

4.3. 이웃해 생성

앞서 생성된 초기해를 이용하여 이웃해를 생성한다. 메타휴리스틱 알고리즘은 일반적으로 초기해를 이용하여 이웃해를 생성하고 이웃해 중 우수한 해를 이용하여 반복적으로 이웃해를 생성함으로써 최적해를 찾아낸다. 제안된 타부서치 알고리즘에서는 2가지 이웃해 생성방식을 사용한다. 본 논문에서 사용된 이웃해 생성방식은 교환이동(replace move)방식과 추가이동(add move)방식이다.

먼저 교환이동방식은 현재의 초기해에서 하나의 요소를 다른 요소로 바꾸는 방식을 사용한다. 즉 트래픽 경로상에 있는 노드를 다른 노드로 바꾸는 방식이다. 예를 들어 그림 3은 그림 2의 네트워크와 초기해에 대하여 교환이동방식을 나타낸 것이다. 초기해에서 첫 번째 트래픽 경로의 링크(1, 3)을 링크(1, 5)로 바꾸어 이웃해를 생성한다. 따라서 그림에서도 링크(1, 3)의 트래픽 양은 0으로 바뀌고, 링크(1, 5)는 0.88에서 1.93으로 변경됨을 볼 수 있다. 또한, 활성 케이블에서 링크(1, 3)은 0으로 바뀌지만, 링크(1, 5)는 그대로 1을 유지한다. 즉 네트워크 전체 활성 케이블의 수는 1이 감소하게 된다.

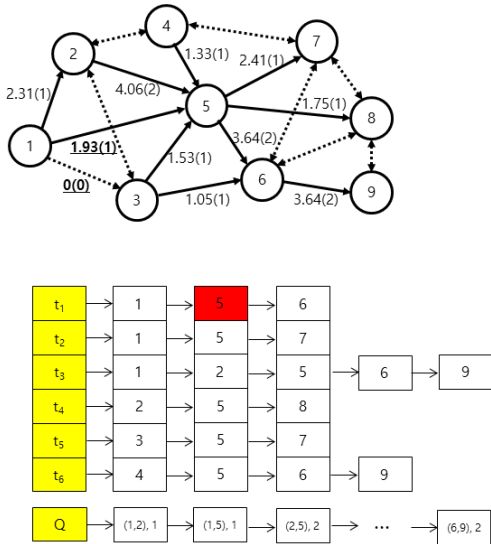


Fig. 3 Replace move of the proposed Tabu search algorithm

다음은 추가이동방식으로 현재의 경로에서 새로운 경로를 추가하는 방식이다. 추가이동방식으로 경로의 길이는 증가할 수 있지만, 네트워크 트래픽을 분산할 수 있다는 의미에서 활성 케이블의 수를 줄일 수 있다. 그림 4는 추가이동방식을 나타낸 것이다. 그림 2의 초기해에 대하여 여섯 번째 트래픽에서 링크를 추가한 경우이다. 링크(6, 9)에 노드 8을 추가하여 링크(6, 8)과 링크(8, 9)로 변

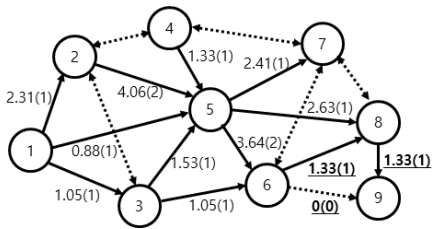


Fig. 4 Add move of the proposed Tabu search algorithm

경한다. 추가이동방식을 적용함으로써 기존의 경로와 같은 활성 케이블 수는 그대로 유지하고 있으나 새로운 트래픽이 발생했을 때 케이블 수가 증가하지 않을 수 있다.

4.4. 타부리스트

타부서치 알고리즘은 새로운 이웃해를 생성하고 그 중의 가장 우수한 해를 다시 이웃해 생성에 사용한다. 반복되는 과정에서 이전에 생성된 해가 다시 선택되어 지역해에 빠지는 오류를 해소하기 위해 이전에 생성된 적이 있는 해를 새로운 메모리에 저장한다. 이 메모리를 타부서치 알고리즘에서는 타부리스트라고 칭한다. 타부리스트는 지역해에 빠지는 것을 방지하는 것과 동시에 검색영역을 확장하여 이전에 방문 되지 않은 검색영역을 탐색할 수 있도록 해 준다. 또한, 타부리스트의 크기를 동적으로 변경함으로써 좀 더 효과적으로 해를 검색할 수 있게 한다. 제안된 타부서치 알고리즘에서도 매 20번의 이웃해 생성 주기마다 타부리스트를 $[n/20, n/10]$ 사이의 크기로 변경시켜 동작시킨다. 유한 크기를 가진 타부리스트에 새로 생성된 해가 추가되었을 때 타부리스트가 가득 차면 가장 오래된 해를 삭제하고 새로 추가된 해를 저장하는 큐 구조를 사용한다.

4.5. 알고리즘 종료

제안된 타부서치 알고리즘의 종료 기준은 미리 정해진 횟수에 의해 결정된다. 즉 이웃해 생성방식에 의해 생성된 가장 좋은 해가 현재까지의 임시최적해와 비교했을 때, 더 우수한 성능 결과가 정해진 횟수만큼 연속적으로 발생하지 않으면 제안된 타부서치 알고리즘은 종료한다. 만약 정해진 횟수보다 적은 횟수에서 더 좋은 결과가 발생하면 다시 카운트를 0에서 설정한다.

V. 성능평가

본 논문에서는 번들 링크를 가진 네트워크에서 에너지 인지 라우팅 문제를 최적화하는 제안된 타부서치 알고리즘에 대하여 성능평가를 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성능평가를 수행하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션은 윈도우 환경의 3.6GHz CPU와 8GB 메모리로 구성된 컴퓨터에서 수행되었으며, 제안된 타부서치 알고리즘은 C++ 언어로 구현되었다. 본 논문에서 사용된

성능평가항목은 트래픽 전송시에 활성화된 케이블의 수와 링크 효율이며, 각 항목에 대하여 메타휴리스틱 알고리즘인 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)과 기존에 제안된 최단 경로를 이용한 라우팅 알고리즘 [11]과 비교 평가하였다.

컴퓨터 시뮬레이션에서 사용된 네트워크 환경은 다음과 같다. 100 × 100 크기의 네트워크에서 노드는 무작위로 배치하였으며, 다양한 노드 밀도를 가진 네트워크를 구성하기 위해 노드의 수 n 을 200에서 1000까지 200 단위로 배치하였다. 각 링크(i, j)의 전체 링크 용량 $c_{ij} = 50$, 케이블 수 $b_{ij} = 3, 4, 5$ 로 가정하였다. 시뮬레이션에 사용된 트래픽은 100개를 발생시켰으며, 각 트래픽의 소스 노드 s_i 와 목적지 노드 d_i 는 $[1, n]$ 사이의 정수로 무작위로 생성하고, 트래픽의 양 a_i 은 $(0, 5)$ 사이의 실수로 무작위로 생성하였다. 본 논문에서 수행한 성능평가는 각 알고리즘에 대하여 10번씩 수행하여 평균값과 표준편차로 결과를 도출하였다.

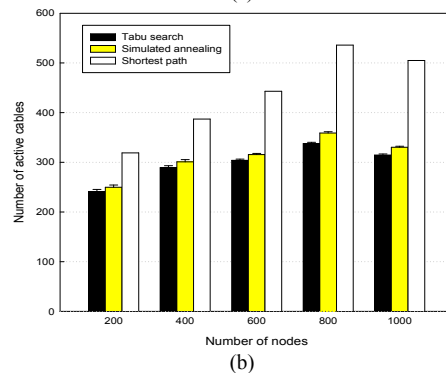
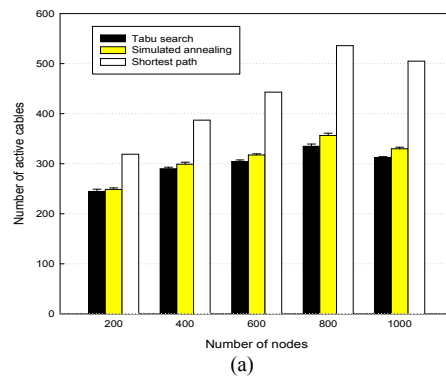
첫 번째 성능평가항목으로 트래픽 전송시에 소모되는 에너지와 관련된 활성화된 케이블의 수를 비교하였다. 그림 5는 다양한 노드 수를 가진 네트워크에서 각 링크의 케이블 수가 3, 4, 5일 때, 제안된 타부서치 알고리즘을 같은 메타휴리스틱 알고리즘인 시뮬레이티드 어닐링과 기존에 제안된 최단 거리를 이용한 라우팅 알고리즘을 비교한 것이다. 성능평가 결과에서 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 더 적은 수의 케이블을 이용하여 트래픽을 전송함을 알 수 있다. 이것은 활성화된 케이블의 수가 적게 사용됨으로써 트래픽 전송에 더 적은 전송에너지가 사용됨을 알 수 있다. 제안된 타부서치 알고리즘이 같은 종류의 메타휴리스틱 알고리즘인 시뮬레이티드 어닐링보다 성능이 우수한 이유는 제안된 이웃해 생성방식이 효과적으로 동작함으로써 최적에 가까운 해에 수렴하기 때문이다. 즉 제안된 이웃해 생성방식인 교환이동방식과 추가이동방식이 지역해에 빠지지 않고 전체 검색영역을 효과적으로 탐색하였기 때문이다.

두 번째 성능평가항목으로 링크 효율을 측정하였다. 본 논문에서는 번들 링크를 가진 네트워크 환경에서 평균 링크 효율을 다음과 같이 정의한다.

$$LU = \left(\sum_{(i,j) \in E} ((f_{ij}b_{ij}) / (o_{ij}c_{ij})) \right) / O \quad (7)$$

여기서 O 는 활성화된 링크의 전체 개수를 나타낸다. 평균 링크 효율은 전송을 위해 케이블이 사용되지 않는 링크는 링크 효율에서 제외되고, 활성화된 링크에서 전체 링크 용량 대비 전송되는 트래픽 양을 나타낸다. 그림 6은 그림 5에서 사용된 같은 네트워크 환경에서 각 알고리즘에 대하여 링크 효율을 비교한 것이다. 전체 케이블의 수와 비슷하게 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 링크 효율이 우수한 것을 볼 수 있다. 즉 제안된 타부서치 알고리즘이 효율적으로 케이블을 사용하고 있음을 알 수 있다.

앞서 기술한 바와 같이 메타휴리스틱 방식인 제안된 타부서치와 시뮬레이티드 어닐링은 최단 경로를 이용하여 초기해를 생성함으로써 최단 경로를 이용한 라우팅 알고리즘보다는 더 우수한 성능을 보임을 성능평가 결과에서 볼 수 있었다. 그리고 타부서치 알고리즘은 제안된 이웃해 검색 방식에 의하여 다른 메타휴리스틱 방식인 시뮬레이티드 어닐링보다 더 많은 인접해 검색과 성능이 우수한 최적해에 접근을 할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 타부서치 알고리즘은 번들 링크를 가진 네트워크에서 에너지 소모를 적게 사용할 수 있는 라우팅에 효과적임을 알 수 있다.



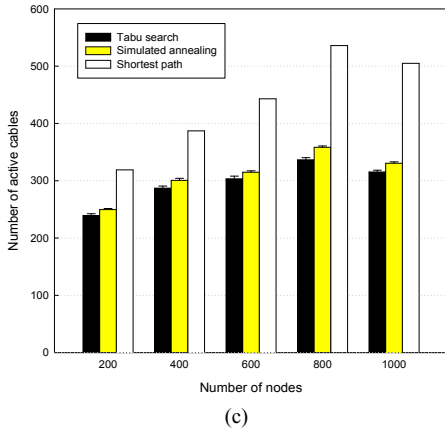


Fig. 5 Total number of active cables($c_{ij} = 50$) (a) $b_{ij} = 3$ (b) $b_{ij} = 4$ (c) $b_{ij} = 5$

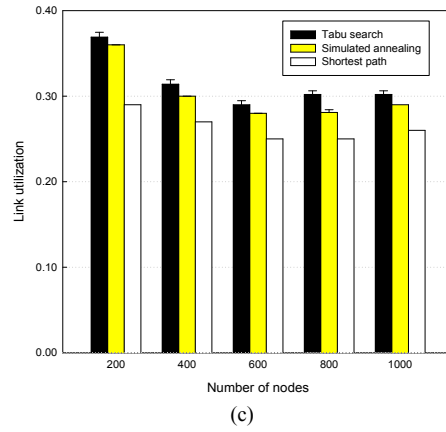
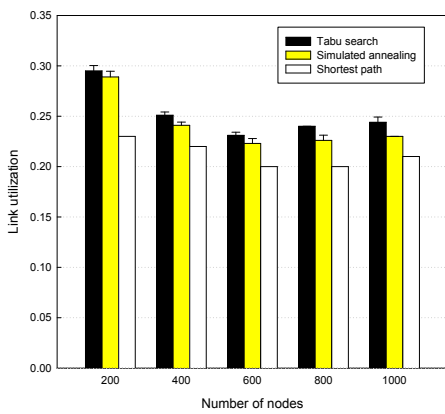
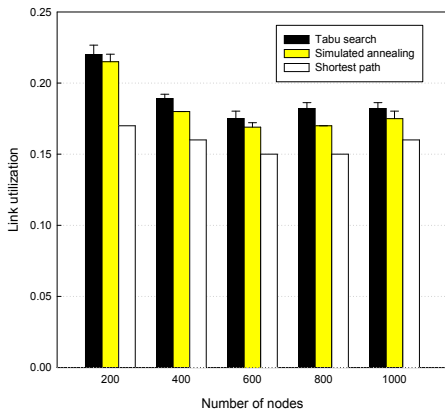


Fig. 6 Average link utilization($c_{ij} = 50$) (a) $b_{ij} = 3$ (b) $b_{ij} = 4$ (c) $b_{ij} = 5$

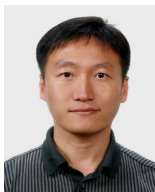


VI. 결론

본 논문은 다수의 물리적 케이블로 이루어진 번들 링크를 가진 네트워크에서 트래픽 전송시에 에너지 소모를 최소화하는 최적화 알고리즘을 제안하였다. 최적화 알고리즘으로 메타휴리스틱 방식인 타부서치 알고리즘을 사용하였으며, 트래픽 전송시 사용되는 케이블의 수를 최소화할 수 있도록 설계하였다. 제안된 타부서치 알고리즘은 전송되는 트래픽의 경로를 해의 인코딩으로 설계하였으며, 이를 적용하여 하나의 초기해를 생성하고, 초기해를 기반으로 2가지 이웃해 생성방식을 제안하였다. 지역해에 빠지지 않고 최적에 가까운 해를 효율적으로 탐색하기 위하여 타부리스트를 동적으로 운용하여 최적해에 접근하였다. 제안된 타부서치 알고리즘은 트래픽 전송에 대한 에너지 소모를 측정하기 위해 활성화된 케이블의 수와 링크 효율 관점에서 시뮬레이터드 어닐링 및 최단 거리를 이용한 라우팅 알고리즘과 비교하였다. 성능평가에서 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 방식에 비해 적은 케이블의 수를 이용하여 트래픽을 전송하고 링크를 효율적으로 이용하고 있음을 알 수 있었다. 결론적으로 제안된 타부서치 알고리즘이 번들 링크를 가진 네트워크에서 NP-complete 문제인 에너지를 효율적으로 이용한 라우팅 문제를 효과적으로 해결하고 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] J. Guichard, F. L. Faucheur, and J. P. Vasseur, *Definitive MPLS Network Designs*, Cisco Press, 2005.
- [6] W. H. Qu, L. Xu, G. H. Qu, Z. J. Yan, and J. X. Wang, "The impact of energy consumption on environment and public health in china," *Natural Hazards*, vol. 27, no. 87, pp. 675-697, Feb. 2017.
- [7] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsang, and S. Wright, "Power awareness in network design and routing," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 1130-1138, Apr. 2008.
- [8] IEEE 802.1AX-2020, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Link Aggregation*, IEEE, 2020.
- [9] G. Lin, S. Soh, K. W. Chin, and M. Lazarescu, "Efficient heuristics for energy-aware routing in networks with bundled links," *Computer Networks*, vol. 57, no. 8, pp. 1774-1788, Mar. 2013.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] A. P. Bianzino, C. Chaudet, F. Larroca, D. Rossi, and J. L. Rougier, "Energy-aware routing: a reality check," in *Proceedings of the IEEE Globecom Workshops*, pp. 1422-1427, Dec. 2010.



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