

탄성 광 네트워크에서의 효율적인 동적 경로배정, 변조방식 및 스펙트럼 할당

이 기 범*, 김 영 천^o

Dynamic Routing, Modulation Format, and Spectrum Assignment to Improve Efficiency in Elastic Optical Networks

Ki-Beom Lee*, Young-Chon Kim^o

요 약

최근 대용량 트래픽과 유연성 있는 대역폭 할당이 가능한 차세대 광 네트워크 기술로 광 교차 주파수분할다중화 기술 기반의 탄성 광 네트워크가 유망한 솔루션으로 연구되고 있다. 탄성 광 네트워크에서는 비정형 대역폭 요청을 설정하고 해제함으로써 인하여 스펙트럼 단편화 문제가 발생할 수 있다. 스펙트럼 단편화 문제는 네트워크 자원의 이용률과 블록킹 확률을 증가시키는 원인이 된다. 본 논문에서는 탄성 광 네트워크에서의 스펙트럼 단편화 문제를 줄이기 위한 경로배정, 변조방식 및 스펙트럼 할당 알고리즘을 제안한다. 경로배정과 스펙트럼 할당을 위하여 슬롯 상태와 점유시간을 고려한 스펙트럼 블록 비용함수를 정의하였다. 또한 제안한 알고리즘은 전송 거리에 따른 신호간섭 및 스펙트럼 사용의 효율성을 높이기 위하여 다양한 변조방식을 선택 사용할 수 있도록 한다. 제안한 알고리즘의 성능을 평균 대역폭 블록킹 확률과 스펙트럼 이용률의 관점에서 평가하였다.

Key Words : Elastic Optical Network, Spectrum Allocation, Modulation Format, Fragmentation, Routing

ABSTRACT

The elastic optical network(EON) based on the optical orthogonal frequency-division multiplexing technology has been studied as a promising solution with large transport capacity and bandwidth flexibility for next-generation optical networks. In EON, setting up and tearing down of non-uniform bandwidth requests in the optical path may result in spectrum fragmentation. The spectrum fragmentation reduces the spectrum utilization and increases the blocking probability. In this paper, we propose a routing, modulation format and spectrum assignment algorithm to reduce fragmentation in EON. We define the spectrum block cost function based on the state of slot and holding time to determine spectrum block for the request. Also, the proposed algorithm uses the different modulation formats according to transmission distance. The performance of proposed algorithm is evaluated in terms of blocking probability and spectrum utilization.

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning (2017-004868).

• First Author : (ORCID:0000-0002-7251-0953)Department of Computer Engineering, Chonbuk National University, keywii@jbnu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-1736-0710)Smart Grid Research Center, Chonbuk National University, yckim@jbnu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201806-B-151-RN, Received March 12, 2018; Revised June 28, 2018; Accepted October 18, 2018

I. 서 론

최근 다양한 대용량 어플리케이션의 등장으로 인터넷 사용량이 증가하고 있으며, 비디오 스트리밍, 클라우드 컴퓨팅 등 다양한 크기의 트래픽을 효율적이고 유연성 있게 수용할 수 있는 EON(Elastic Optical Network)이 미래에 광 네트워크를 위한 유망한 기술로 떠오르고 있다^[1]. 기존 WDM (Wavelength Division Multiplexing)망에서는 ITU grid(International Telecommunication Union)의 고정된 50GHz 파장을 사용하여 연결 요청을 처리하기 때문에 작은 대역폭을 요구하는 경우 스펙트럼 자원을 비효율적으로 활용하게 된다^[2]. EON에서는 대역폭을 변경할 수 있는 트랜스폰더와 BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift keying), 8QAM (8-Quadrature Ampulitude Shift keying), 16QAM 등 다양한 변조형식을 이용할 수 있는 Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (O-OFDM) 기술을 사용한다^[3, 4]. EON에서는 기존 파장 단위의 슬롯을 6.25GHz 또는 12.5GHz의 작은 단위의 스펙트럼 슬롯으로 나누어 사용하며 대용량 대역폭을 요구하는 경우에 여러 개의 슬롯을 결합하여 사용할 수 있다^[5,6]. 이러한 특성으로 다양한 대역폭을 갖는 트래픽에 대한 자원 할당에 유연성을 갖기 때문에 스펙트럼을 효율적으로 사용할 수 있다.

EON에서는 기존 WDM망의 파장 연속성(Wavelength-Continuity) 제약과 마찬가지로 경로상의 모든 링크가 동일한 대역을 사용해야하는 스펙트럼 연속성(Spectrum-Continuity) 제약을 만족시켜야 하며 추가적으로 스펙트럼 인접성(Spectrum-Contiguity) 제약사항을 동시에 고려해야 한다^[7-9]. 이러한 제약사항으로 EON에서는 자원을 할당과 해제 과정에서 단편화 문제가 야기될 수 있다^[10]. 이러한 단편화 문제는 네트워크의 스펙트럼 효율성을 떨어뜨리고 블록킹 확률을 증가시키는 원인이 된다. 논문[10-13]는 단편화 문제를 해결하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 논문[10]에서는 단편화 문제를 해결하기 위하여 요구 대역폭에 따라서 사전에 설정된 우선순위 영역에 자원을 할당하는 방법을 제안하였다. 하지만 제안한 알고리즘은 단일 변조기법만을 사용하였다. 논문[11]에서는 기존에 할당된 연결을 재구성하는 방법을 제안하였다. 그러나 연결의 재구성을 위해서는 많은 처리 시간이 요구되며 정적 트래픽 환경에서 시뮬레이션이 수행되었다. 논문[12]은 동적 트래픽 환경에서 경로 상에 모든 링크의 슬롯 상태를 반영하는 비용함수를 제안

하고 연결 요청의 점유시간을 고려하지는 않았다. 논문[13]에서 저자는 스펙트럼의 가용성과 점유 시간을 고려한 알고리즘을 제안하였다. 하지만 단편화에 대한 각 링크의 슬롯 상태를 반영하지는 않았다.

본 논문에서 EON의 스펙트럼 단편화를 감소시키기 위하여 동적 경로배정, 변조방식 및 스펙트럼 할당(DRMSA: Dynamic Routing, Modulation format and Spectrum Assignment) 알고리즘을 제안한다. 이를 위해 K-최소 경로 알고리즘을 사용하여 경로를 탐색하고 단편화를 최소화할 수 있는 스펙트럼 블록을 선정한다. 또한 스펙트럼 블록을 선정하기 위하여 블록 양단의 스펙트럼 점유 시간과 슬롯의 상태를 고려하여 스펙트럼 블록 비용 함수를 제안한다. 제안한 알고리즘의 성능 평가를 위하여 기존의 방법과 블록킹 확률 및 평균 홉 수 관점에서 성능을 비교한다.

II. 탄성 광 네트워크

본 장에서는 EON의 스펙트럼 할당과 단편화 문제를 다룬다. 그림 1은 WDM망과 EON망의 스펙트럼 할당을 비교한 그림이다. WDM망은 50GHz의 고정된 스펙트럼 슬롯으로 자원을 할당하기 때문에 10Gbps와 같이 낮은 전송률을 갖는 연결 요청을 할당할 때에 네트워크의 자원을 비효율적으로 할당하게 된다. EON의 경우 작은 단위의 스펙트럼 슬롯으로 자원을 할당하고 여러 슬롯을 결합하여 사용하기 때문에 자원을 효율적으로 사용할 수 있다.

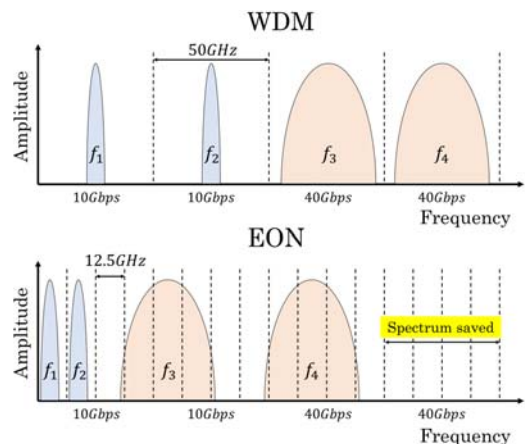


그림 1. WDM과 EON 스펙트럼 할당 비교
Fig. 1. Comparison of WDM and EON

2.1 경로배정, 변조방식 및 스펙트럼 할당

EON의 경로배정 및 스펙트럼 할당에서는 각 연결 요청이 동적으로 도착할 때, 송신 노드와 수신 노드에 따라서 경로를 찾는다. WDM망의 경우 단일 파장을 선택하여 연결을 설정하지만, EON에서는 연결 요청이 요구하는 대역폭에 따라서 동적으로 스펙트럼 슬롯의 개수를 결정하여 경로상의 모든 링크 상에서 공통으로 사용가능한 스펙트럼 슬롯에 연결을 설정한다. 그림 2는 EON에서의 스펙트럼 할당에 대한 예이다.

그림 2에서 총 4개 노드에 3개 링크를 갖는 네트워크에 3개의 연결 요청이 할당되어 있으며 각 링크는 총 10개의 스펙트럼 슬롯으로 구성되어 있다고 가정한다. 연결 요청 R1은 링크 A-B와 B-C의 슬롯 S1, S2에 할당되었다. R2와 R3도 경로 상에 있는 링크는 같은 슬롯에 할당되며 이는 스펙트럼 연속성 제약을 만족한다. R3의 경우 2개의 슬롯이 할당되며 요구 대역폭에 따라 n 개의 연속한 슬롯이 사용되어야 하는 스펙트럼 인접성 제약을 만족하며 EON에서는 이 두 가지 제약사항을 반드시 만족시켜야한다.

그림 3은 그림 2의 예에서 추가로 연결 요청 R4가 도착했을 때의 예이다. R4의 경로가 A-B-C로 선택되고 스펙트럼 연속성과 지속성 제약을 만족시키기 위해서 공통으로 사용가능한 슬롯을 탐색한다. 링크를 관리하기 위하여 OR 연산을 통한 패스에 대한 통합 슬롯을 구성하여 경로상의 모든 링크에서 공통으로 이용할 수 있는 슬롯을 찾을 수 있다. 그림에서는 총 3개의 슬롯 블록에 할당이 가능하다. 단편화를 줄이기

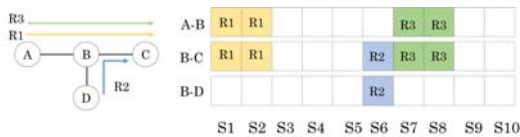


그림 2. 스펙트럼 연속성 및 인접성 제약의 예
Fig. 2. Spectrum Continuity and Contiguity Constraint



그림 3. 슬롯 상태 기반 스펙트럼 할당
Fig. 3. Spectrum assignment based on slot status

표 1. 변조방식에 따른 특성
Table 1. Characteristics of modulation formats

Modulation Format	Spectrum Efficiency (bps/Hz)	Data Rate/Subcarrier (Gb/s)	Reach (km)
BPSK	1	12.5	4000
QPSK	2	25	2000
8QAM	3	37.5	1000
16QAM	4	50	500

위해서는 자원할당 이후에 가능한 한 연속적으로 사용할 수 있는 슬롯의 크기를 크게 만들어 다양한 크기의 대역폭을 요구하는 연결 요청을 수용할 수 있도록 하여야 한다.

표 1은 변조방식에 따른 특성을 나타낸다⁴⁾. EON에서는 O-OFDM 기술을 적용함에 따라서 다양한 변조방식을 사용할 수 있다. 변조방식은 전송 거리에 따른 신호 간섭의 영향을 받는다. 따라서 전송 경로 상의 거리를 고려하여 변조방식을 선택하여 단위 슬롯당 높은 전송률을 선택할 수 있으며 스펙트럼 자원을 조금 더 효율적으로 사용할 수 있다.

2.2 스펙트럼 단편화 문제

EON에서의 단편화 문제는 네트워크상에서 사용가능한 스펙트럼의 이용률을 감소시키는 원인이 된다. 그림 3의 예에서 단편화 문제를 확인할 수 있다. Case1을 선택한 경우 링크 B-C에서는 슬롯 S5, S9, S10이 사용가능하지만, 슬롯 S5는 이후 2개 이상의 슬롯을 요청하는 연결 요청을 수용할 수 없다. 반면 Case3을 선택한 경우 최대 3개 슬롯을 요구하는 연결 요청도 수용할 수 있는 가능성이 있다.

그림 4는 그림 3을 점유 시간을 고려한 스펙트럼 할당으로 확장한 예이다. 그림에서 세로축은 각 연결

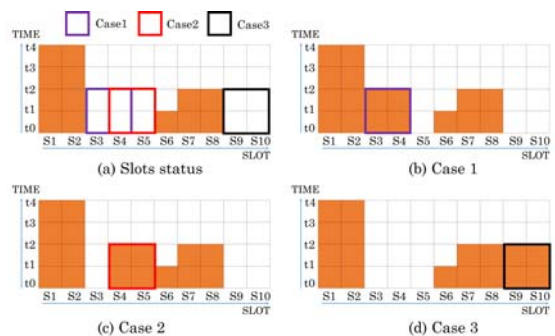


그림 4. 점유 시간 기반 스펙트럼 할당
Fig. 4. Spectrum assignment based on holding time

요청의 점유 시간을 나타낸다. 새롭게 도착한 연결 요청이 2개의 단위시간동안 슬롯을 점유한다고 가정한다. Case3은 연결 요청에서 요구하는 점유 시간과 같은 슬롯을 선택하여 연속적인 슬롯을 최대로 유지하고 동시에 단편화를 줄이는 것을 알 수 있다. 그러므로 단편화 문제에서 점유 시간도 고려해야한다. 따라서 본 논문에서는 단편화를 줄여 네트워크 성능을 향상시키기 위하여 슬롯과 점유 시간을 고려한 스펙트럼 블록 비용함수와 알고리즘을 제안한다.

III. 단편화 감소를 위한 DRMSA 알고리즘

3.1 스펙트럼 블록 비용함수

각 연결 요청은 $R(s, d, b, t^h)$ 로 표기한다. s 는 송신노드, d 는 수신노드, b 는 요구 대역폭, t^h 는 점유 시간을 나타낸다. 수식 (1)은 요청 대역폭에 따른 스펙트럼 슬롯의 수를 계산하는 식이다.

$$n = \left\lceil \frac{b(\text{Gbps})}{m(\text{bps/Hz}) \times \text{FSwidth}(\text{GHz})} \right\rceil + n_g \quad (1)$$

여기서 n 은 요청 대역폭 b 를 할당하기 위하여 필요한 슬롯의 수이며, m 은 변조 효율을 나타내며 변조 방식에 다른 변조 효율은 표 1을 따른다. FSwidth 는 슬롯의 길이를 의미하며, 본 논문에서 각 슬롯의 길이는 12.5GHz로 가정한다. 또한 n_g 는 인접한 스펙트럼과의 신호 간섭을 피하기 위하여 사용되는 가드밴드 슬롯으로 모든 연결 요청의 오른쪽에 1개의 가드밴드 슬롯이 사용된다고 가정한다.

수식 (2)에서 LSC_i^l 는 경로상의 링크 l 의 i 번째 슬롯이 사용가능하면 0, 사용 중이면 1로 정의하여 스펙트럼 슬롯의 상태를 표현한다.

$$LSC_i^l = \begin{cases} 0, & \text{Idle} \\ 1, & \text{Occupied} \end{cases} \quad (2)$$

FBC_j^k 는 경로 k 상에 있는 슬롯 상태를 고려한 j 번째 스펙트럼 블록 비용을 나타낸다. 수식 (3)에서 블록 비용은 블록의 위치에 따라 세 가지 경우로 나뉜다. 경로 k 상에 있는 모든 링크의 스펙트럼 슬롯의 상태를 통합하여 표현하기 위하여 경로 상에 있는 링크의 LSC_i^l 를 합한 값인 SC_i^k 가 사용된다. 즉, SC_i^k 값이 0인 경우에 사용 가능한 슬롯임을 의미한다.

$$FBC_j^k = \begin{cases} \frac{(H^k - SC_{j+n}^k)}{H^k}, & j=0 \\ \frac{(H^k - SC_{j-1}^k) + (H^k - SC_{j+n}^k)}{H^k}, & j > 0 \cap j+n < N \\ \frac{(H^k - SC_{j-1}^k)}{H^k}, & j+n = N \end{cases} \quad (3)$$

수식에서 H^k 는 선택된 k 번째 경로의 사용 홉 수를 나타내며, n 은 수식 (1)을 이용하여 계산된 연결 요청의 요구 슬롯 수, N 은 한 링크의 총 슬롯 수를 나타낸다. 그림 3의 예에서 선택된 경로가 두개의 홉을 사용함으로 H^k 는 2가 된다. case1에서 SC_2^k 의 값은 2, SC_5^k 의 값은 0이며 수식 (3)에 따라서 FBC_3^k 는 1이다. case2에서 SC_3^k 의 값은 0, SC_6^k 의 값은 1이며 FBC_4^k 는 0.5, case3의 경우 SC_8^k 은 2 FBC_9^k 는 0이다. 따라서 단편화가 발생되지 않는 case3의 경우가 가장 적은 FBC 값을 갖는다. 여기서 FBC 는 최대 0에서 2의 값을 갖는다.

2장 2절에서 언급했듯이 연결 요청의 점유 종료 시간과 기준에 할당된 슬롯의 점유 종료 시간이 비슷한 스펙트럼 블록에 할당함으로써 단편화 문제를 완화시킬 수 있다. 이러한 개념을 스펙트럼 블록의 시간 비용 함수로 정의하기 위하여 수식 (4)와 (5)가 사용된다. 수식에서 GT_j^L 과 GT_j^R 는 j 번째 블록 왼쪽과 오른쪽의 점유 종료 시간과 연결 요청의 유지시간의 차이를 값을 이용하여 시간비용을 계산하는데 사용된다.

$$GT_j^R = \frac{|t^c + t^h - T_{j+n}^c|}{t^h}, \text{ if } GT_j^R > 1 \text{ then } GT_j^R = 1 \quad (4)$$

$$GT_j^L = \frac{|t^c + t^h - T_{j-1}^c|}{t^h}, \text{ if } GT_j^L > 1 \text{ then } GT_j^L = 1 \quad (5)$$

두 식에서 t^c 는 현재 시간을 T_i^c 는 경로 상의 모든 i 번째 슬롯의 최종 점유종료시간을 나타낸다. 모두 최대 1을 넘지 못하고 요청 점유 시간을 기준으로 비용을 산출한다. 시간 블록 비용은 수식 (4)와 (5)를 기반으로 블록의 위치에 따라 수식 (6)과 같이 결정된다.

$$TBC_j^k = \begin{cases} GT_j^R, & j=0 \\ GT_j^L + GT_j^R, & j > 0 \text{ and } j+n < N \\ GT_j^L, & j+n = N \end{cases} \quad (6)$$

수식 (6)은 수식 (3)과 마찬가지로 스펙트럼 블록의 위치에 따라서 블록의 왼쪽과 오른쪽 슬롯의 GT 값을 이용하여 계산된다. TBC 는 FBC 와 마찬가지로 0

에서 2의 값을 갖는다.

스펙트럼 할당을 위해서 그림 3과 같이 여러 개의 스펙트럼 후보 블록이 있을 수 있다. 최종적으로 여러 후보 블록 중에서 단편화 문제를 줄일 수 있는 적절한 블록을 선택하기 위하여 수식 (7)을 사용한다. 스펙트럼 블록 비용 BC_j^k 는 FBC_j^k 과 TBC_j^k 의 합으로 슬롯 상태와 점유 시간을 동시에 고려한 블록비용이 된다. 수식 (7)에서 각 두 항의 적용비율에 따른 영향을 분석하기 위하여 0~1 사이의 계수 α 값을 적용한다. α 값이 0인 경우 슬롯의 사용 여부를 고려하는 FBC 의 영향은 무시하며 점유시간을 고려한 TBC 의 영향만을 적용하여 블록의 비용을 계산한다. α 값이 0.5인 경우 FBC 와 TBC 의 영향을 고루 반영하여 블록 비용을 산출한다.

$$BC_j^k = \alpha \times FBC_j^k + (1 - \alpha) \times TBC_j^k \quad (7)$$

3.2 DRMSA 알고리즘

제안한 동적 경로배정, 변조방식 및 스펙트럼 할당 알고리즘의 흐름도는 그림 5와 같다. 먼저 그래프 및 변수를 초기화를 수행한다. 이후 점유시간이 만료된 연결 요청이 있는 경우 자원을 해제한다. 새로운 연결

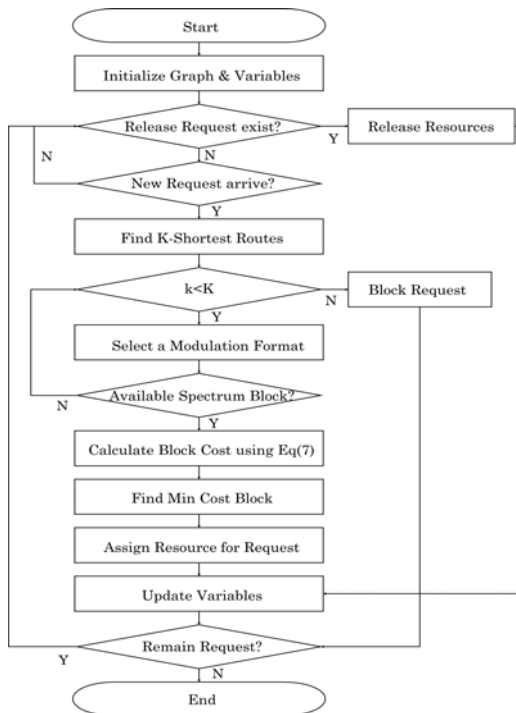


그림 5. DRMSA 알고리즘 흐름도
Fig. 5. Flowchart of proposed DRMSA algorithm

요청이 도착하면 송수신 노드 사이에 K 개의 최단 경로를 탐색한다. k 번째 경로의 거리를 기반으로 이용 가능한 변조방식을 선택한다. 변조방식은 변조 효율이 높은 방식을 우선적으로 선택한다. 변조방식과 수식 (1)에 따라 계산된 요구 슬롯에 수를 기반으로 선택된 후보 경로 상의 모든 링크에서 공통으로 사용가능한 스펙트럼 블록이 있다면 수식 (7)을 이용하여 블록 비용을 계산한다. 사용가능한 블록 가운데 최소 비용을 갖는 최소비용 스펙트럼 블록에 연결 요청을 할당하고 네트워크 상태를 업데이트한다. 만약, 모든 후보 경로에서 이용 가능한 스펙트럼 블록이 없다면, 해당 연결 요청은 블록처리 된다. 모든 연결 요청에 대하여 이 과정을 반복 수행한다.

IV. 시뮬레이션 및 성능평가

4.1 시뮬레이션 환경

제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 본 논문에서는 C++ 개발 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 14개 노드와 42개 단방향 링크를 갖는 NSFNET 토폴로지를 사용하였다. 그림 6은 사용된 토폴로지이며 숫자는 각 링크의 거리를 나타낸다. 각 링크는 12.5GHz의 대역폭을 갖는 320개의 스펙트럼 슬롯을 갖는다고 가정하였다.

연결 요청은 총 18,000회 발생하고 8,000회까지는 시뮬레이션 초기화를 위하여 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 이후 10,000회 동안 측정하였다. 연결 요청 $R(s, d, b, t^h)$ 에서 송신 노드와 수신 노드인 s 와 d 는 균일 분포(uniform distribution)를 따라 선택되며, 요청 대역폭 b 는 12.5~200Gbps로 균일 분포를 따른다. K 값은 5로 5개의 후보 경로를 찾는다. 각 연결 요청은 도착률 평균 λ 의 포이송 분포를 따르며 연결 점유 시간 $1/\mu$ 은 50초를 평균값으로 하여 지수 분포를 따르도록 하였다. 네트워크 부하는 얼랑(Erlang)으로 λ/μ 로 계산된다. 표 2는 시뮬레이션 변수를 나타낸다.

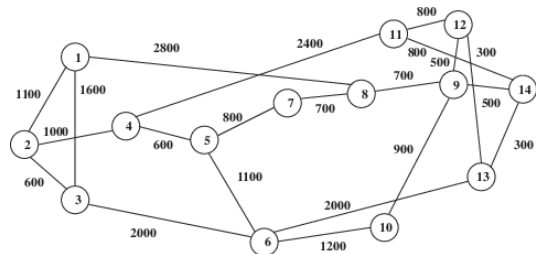


그림 6. NSF 네트워크
Fig. 6. NSF Network

표 2. 시뮬레이션 변수
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
Number of candidate path(K)	5
Number of FS(N)	320
Spectrum Slot Bandwidth	12.5GHz
Avg. Holding Time	50s
Required Bandwidth	12.5~200Gbps

4.2 성능평가

제안한 알고리즘의 슬롯 상태와 점유시간의 비율로 정의되는 α 값에 따른 성능평가를 위하여 평균 대역폭 블록킹 확률로 성능을 평가한다. 또한, 기존의 방식 (FF: First-Fit, BF: Best-Fit)과 평균 대역폭 블록킹 확률과 평균 스펙트럼 이용률의 관점에서 비교 평가하였다. 평균 대역폭 블록킹 확률과 평균 스펙트럼 이용률은 네트워크 성능 평가에 중요한 기준이 된다. 또한 단일 변조방식(BPSK)과 다중 변조방식을 비교하여 변조방식 사용에 따른 영향을 분석한다.

그림 7과 8은 α 값에 따른 평균 대역폭 블록킹 확

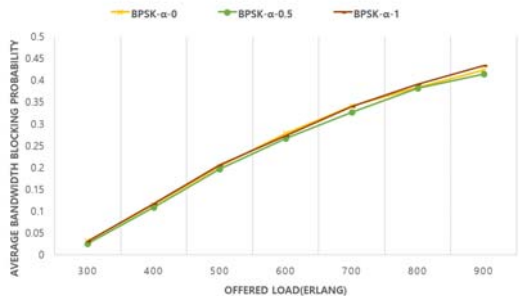


그림 7. 단일 변조방식에서 α 값에 따른 평균 대역폭 블록킹 확률
Fig. 7. Average bandwidth blocking probability according to α in BPSK

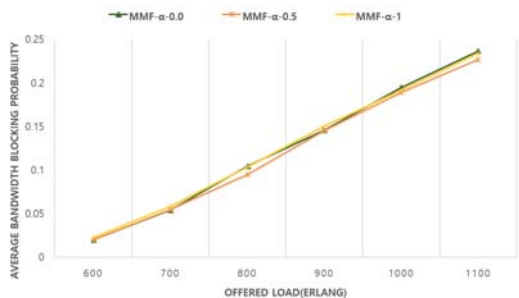


그림 8. 다중 변조방식에서 α 값에 따른 평균 대역폭 블록킹 확률
Fig. 8. Average bandwidth blocking probability according to α in MMF

률을 비교한 결과이다. 그림 7의 경우 단일 변조방식을 사용한 결과이며, 그림 8은 다중 변조방식을 사용한 결과이다. α 값이 0인 결과는 점유 시간만을 고려한 결과를 나타내며, 1인 결과는 슬롯 상태만을 고려한 결과 값이다. 두 결과 모두에서 α 값이 0.5인 경우에 더 낮은 평균 대역폭 블록킹 확률을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 단순히 슬롯 상태만을 고려하거나, 점유 시간만을 고려하는 것보다는 두 가지 요소를 적절한 비율로 고려하는 것이 더 좋은 성능을 얻을 수 있다는 것을 보여주는 결과이다.

그림 9는 트래픽 부하 증가에 따른 평균 대역폭 블록킹 확률을 비교한 결과이다. 제안한 알고리즘의 α 값 중 가장 좋은 결과를 보인 0.5의 결과를 FF와 BF와 비교하여 제안한 알고리즘이 모든 구간에서 낮은 블록킹 확률을 보이는 것을 확인할 수 있다. 부하가 낮을 때 제안한 알고리즘은 BF와 비슷한 성능을 보이지만 부하 증가에 따라 더 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 BF의 경우 점유 시간을 고려하지 않고 제안한 알고리즘의 경우 주변 점유 시간까지 고려하여 자원 해제 이후에 단편화를 줄여 연속적으로 사용가능한 슬롯의 수를 확보할 수 있기 때문이다. 단일 변조방식과 다중 변조방식을 비교한 결과에서 단위 슬롯 당 더 많은 대역폭을 지원할 수 있는 다중 변조방식이 더 낮은 블록킹 확률을 보인 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 평균 스펙트럼 이용률을 비교한 결과이다. 낮은 부하에서 단일 변조방식을 사용하는 경우 더 많은 스펙트럼 슬롯을 사용하기 때문에 다중 변조방식과 비교하여 더 높은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만 트래픽 부하 증가에 따라서 비슷한 수준으로 수렴하는 결과를 보인다. 제안한 알고리즘은 낮은 부하에서 비슷한 이용률을 보이지만 높은 부하에서 기존 방식과 비교하여 약 2~3%의 높은 이용률을

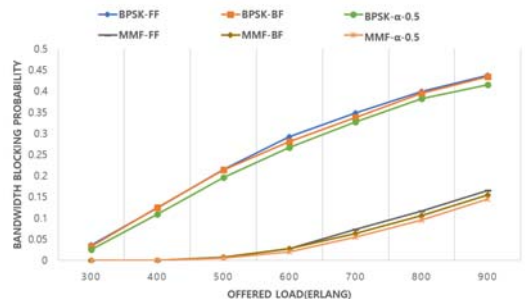


그림 9. 평균 대역폭 블록킹 확률
Fig. 9. Average bandwidth blocking probability

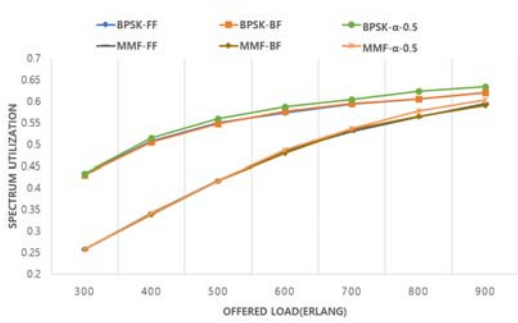


그림 10. 평균 스펙트럼 이용률
Fig. 10. Average spectrum utilization

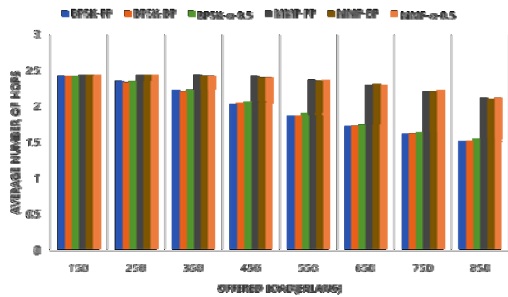


그림 11. 평균 홉 수
Fig. 11. Average number of hops

보인다.

평균 홉 수의 결과는 그림 11과 같다. 결과에서 부하가 증가함에 따라서 모든 결과에서 홉 수가 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 부하의 증가로 인하여 긴 홉을 사용하는 경로를 갖는 연결 요청의 블록킹 확률이 증가하여 평균적으로 홉 수가 감소된다. 다중 변조방식 사용한 결과 값은 단일 변조방식을 사용한 결과와 비교하여 더 높은 홉 수를 보이며, 이는 블록킹 확률의 영향이다. 결과에서 스펙트럼 할당 알고리즘에 따라 결과 값이 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 모든 알고리즘에서 최단경로를 기반으로 경로를 찾기 때문에 스펙트럼 할당 알고리즘에 따른 홉 수의 변화는 크지 않다.

V. 결론

EON은 효율적이고 유연성 있는 대역폭 할당으로 광 네트워크 분야에서 유망한 기술이다. 하지만 EON에서의 단편화 문제는 네트워크 블록킹 확률을 증가시키고 스펙트럼 이용률을 떨어뜨리는 원인이 된다. 본 논문에서는 단편화 문제를 줄이기 위하여 링크의 슬롯 상태와 점유 시간을 고려한 스펙트럼 블록 비용

함수를 정의하였다. 또한 거리에 따른 변조방식을 선택하여 효율적 자원 활용이 가능한 DRMSA 알고리즘을 제안하였다. DRMSA 알고리즘에서 α 값에 따른 성능을 평가하기 위하여 평균 대역폭 블록킹 확률 관점에서 비교하였으며, α 값이 0.5인 경우에 가장 좋은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 기존의 방식인 First-Fit과 Best-Fit과 비교하여 모든 구간에서 낮은 대역폭 블록킹 확률을 보였다. 또한 평균 스펙트럼 이용률 관점에서 더 좋은 결과를 보이는 것을 확인하였다.

References

- [1] B. C. Chatterjee, et al., "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 17, no. 3, pp. 1776-1800, May 2015.
- [2] O. Gerstel, et al., "Elastic optical networking a new dawn for the optical layer?," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 20, no. 2, pp. s12-s20, Feb. 2012.
- [3] G. Zhang, et al., "A survey on OFDM-based elastic core optical networking," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 15, no. 1, pp. 65-87, Feb. 2013.
- [4] S. Bandyopadhyay, et al., "SEM RSA: Spectrum efficient modulation-aware dynamic routing & spectrum allocation in elastic optical network," in *Proc. ICCMS'17*, pp. 170-174, Canberra, Australia, Jan. 2017.
- [5] N. Kadu, S. Shakya, and X. Cao., "Modulation-aware multipath routing and spectrum allocation in elastic optical networks," in *Proc. ANTS'14*, pp. 1-6, 2014.
- [6] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Mat-suoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 66-73, Nov. 2009.
- [7] K.-B. Lee, K.-Y. Kang, D. Y. Kim, and Y.-C. Kim, "Dynamic routing and wavelength assignment algorithm to improve energy efficiency in IP over WDM network with multifiber," *J. KICS*, vol. 39C, no. 4, pp.

370-379, Apr. 2014.

- [8] S. Talebi, et al., "Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey," *Optical Switching and Networking*, vol. 13, pp. 34-48, Jul. 2014.
- [9] X. Wang, et al., "Consecutiveness loss-aware routing and spectrum assignment algorithm in flexible bandwidth optical networks," in *Proc. CHINACOM'12*, pp. 262-266, Kun Ming, China, Aug. 2012.
- [10] Y. Hirota, et al., "Dynamic spectrum allocation based on connection alignment for elastic optical networks," in *Proc. 10th APSITT'15*, pp. 1-3, Colombo, Sri Lanka, Aug. 2015.
- [11] S. K. Singh, et al., "Efficient spectrum defragmentation with holding-time awareness in elastic optical networks," *J. Optical Commun. and Netw.*, vol. 9, no. 3, pp. B78-B89, Apr, 2017.
- [12] Y. Xu and Y.-C. Kim, "Dynamic routing and spectrum allocation to minimize fragmentation in elastic optical networks," in *Proc. Fruct'17*, pp. 512-518, St. Petersburg, Russia, Apr. 2017.
- [13] N. Wang, et al., "Holding-time-aware scheduling for immediate and advance reservation in elastic optical networks," in *Proc. ICC'15*, pp. 5180-5185, Jun. 2015.

이 기 범 (Ki-Beom Lee)

한국통신학회 논문지 제37권 제5호 참조
현재: 전북대학교 컴퓨터공학과 박사과정

김 영 천 (Young-Chon Kim)

한국통신학회 논문지 제35권 제7호 참조
현재: 전북대학교 IT정보공학과 교수