

다중 광섬유 링크를 갖는 IP over WDM 망에서 에너지 효율 향상을 위한 동적 경로 배정 및 파장 할당 알고리즘

이 기 범*, 강근영*, 김도영**, 김영천^o

Dynamic Routing and Wavelength Assignment Algorithm to Improve Energy Efficiency in IP over WDM Network with Multifiber

Ki-Beom Lee*, Keun-Young Kang*, Do Young Kim**, Young-Chon Kim^o

요 약

최근 인터넷 트래픽의 폭발적인 증가에 따라 다수의 광섬유 링크를 사용하는 광 네트워크에 관한 관심이 높아지고 있다. 그러나 네트워크에서의 트래픽 증가는 네트워크 장비의 에너지 소모를 증가시키는 문제점이 있다. 본 논문에서는 다중 광섬유로 구성된 대용량 IP over WDM 네트워크에서 에너지 절감을 위한 동적 경로 배정 및 파장 할당 (Dynamic RWA) 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 에너지 효율 향상을 위하여 V-like 함수를 이용한다. V-like 함수는 사용 파장 수에 따라 광섬유의 비용을 결정하여 네트워크의 에너지 소모와 블로킹 확률을 줄일 수 있도록 한다. 이를 기반으로 다수의 광섬유로 구성된 링크의 비용과 자원할당을 위한 광섬유를 결정한다. 마지막으로 파장단위의 그래프로 구성된 계층 그래프를 이용하여 에너지 소모를 줄일 수 있도록 경로배정 및 파장할당을 수행한다. 제안한 알고리즘의 성능평가를 위하여 OPNET Modeler를 이용한 모델링과 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과는 연결 요청 당 평균 전력 소모와 블로킹 확률 관점에서 기존 방식과 성능을 비교하고 분석한다.

Key Words : Green Network, Energy Efficiency, RWA, Fiber Selection, IP over WDM

ABSTRACT

Recently, the interest in optical network with multifiber link is continuing to rise since the network traffic has been growing exponentially. However, growing traffic in network leads to increasing the energy consumption of the network equipment. In this paper, we propose a dynamic routing and wavelength assignment (RWA) algorithm based on V-like cost function and layered graph to improve energy efficiency in IP over WDM network with multifiber link. The V-like cost function is used to decide the fiber cost according to the number of used wavelengths. The layered graph with multifiber link is used to select the energy efficient route and wavelength. The proposed RWA algorithm is compared and analyzed with conventional algorithm in view of average power consumption and blocking probability through OPNET modeler.

* 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0028509)

• First Author : Department of Computer Engineering, Chonbuk University, aresys@jbnu.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : Smart Grid Research Center, Chonbuk University, yckim@jbnu.ac.kr, 종신회원

* 전북대학교 컴퓨터공학과, kangkle@naver.com, 학생회원

** 전북대학교 IT정보공학과, dogenius01@naver.com, 학생회원

논문번호 : KICS2014-02-061, Received February 18, 2014; Revised April 11, 2014; Accepted April 11, 2014

1. 서 론

최근 IPTV와 모바일 사용자의 증가 및 다양한 네트워크 애플리케이션의 등장으로 네트워크 트래픽이 폭발적으로 증가되고 있다. 시스코의 보고에 따르면 글로벌 IP 트래픽이 지난 5년보다 4배 이상 증가되었으며, 2012년에서 2017년까지 23%의 연평균성장률이 전망된다. 또한 글로벌 IP 트래픽이 2015년에 1.0 제타바이트에 도달하고 2017년에는 1.4 제타바이트를 넘길 것이라고 예상되고 있다.^[1]

IEEE 802.1AX 표준은 두 노드의 전송 용량 증가를 위하여 다수의 물리 링크 집합에 대하여 정의하였다. 표준에 따르면 하나의 통합 링크는 다수의 광섬유로 구성되며, 각 광섬유는 다수의 파장으로 구성된다.^[2] 이런 노력으로 망에서 많은 트래픽 요구를 수용할 수 있게 되었지만 네트워크 장비의 수와 성능 증가는 전력소모의 증가를 의미하고 결국 운용비용(OPEX) 증가의 원인이 된다.^[3] 특히 링크가 다수의 광섬유로 구성되면, 광증폭기 등 추가적인 장비의 사용으로 인해 전력소모가 증가되는 문제점이 야기된다. 현재 정보통신 분야에서 전체 에너지의 약 14.8%를 라우터 등 네트워크 장비가 소모하며, 2020년에는 21.8%까지 증가된다고 보고되었다.^[4] 이러한 문제를 해결하기 위하여 에너지 소모에 효율적이고 친환경적인 네트워크를 구현하기 위한 그린터치 (GreenTouch)와 EARTH (Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies) 같은 국제 컨소시엄이 구축되는 등 그린 네트워크에 국제적인 관심이 집중되고 있으며 이에 관련된 많은 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다.^[5-8]

참고문헌[9]에서는 IP over WDM 망에서 소모되는 에너지를 줄이기 위해 광 경로(lightpath) 바이패스를 기반으로 한 MILP(Mixed-Integer Linear Programming)와 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 이 논문에서는 광 경로 바이패스를 이용하여 에너지 소모를 최소화할 수 있는 IP over WDM 망을 설계하였다. 성능 평가 결과는 바이패스의 사용이 바이패스를 사용하지 않는 것보다 25%에서 45%의 전력을 절감할 수 있다는 것을 보였다. 그러나 시뮬레이션은 모든 연결 요청이 사전에 알려진 정적인 환경에서 수행되었다. 그러나 실제 망에서의 연결 요청은 동적으로 발생되며 트래픽 부하가 시간에 따라 편차가 매우 크기 때문에 실제 망 상황에 적용할 경우 에너지 효율성을 기대하기 어렵다.

참고문헌[10]의 저자는 투명한 WDM (Transparent

WDM) 망에서 가중 전력 인지 경로 배정 및 파장 할당(Weighted Power-Aware RWA) 전략을 제안하였다. 제안한 전략은 사용 중인 링크에 0에서 1 사이의 가중치를 적용하고 k-shortest path 알고리즘을 이용하여 경로배정과 파장할당을 수행한다. 사용 중인 링크에 1보다 작은 가중치가 적용되면 사용되지 않은 링크를 사용하는 것보다 이미 사용되고 있는 링크를 이용하게 된다. 이를 통해 링크에서 사용되는 광증폭기의 수를 줄여 전력 소모를 줄일 수 있다. 성능 평가는 링크의 가중치를 변경하면서 블록킹 확률과 전력 절감의 관점에서 수행되었으며 시뮬레이션 결과를 통해 전력 절감과 블록킹 확률 사이에서의 타협점(trade-off)이 존재함을 밝혔다. 그러나 단일 광섬유 링크를 갖는 링크를 고려되었기 때문에 다중 광섬유 링크를 갖는 망에는 적용할 수 없다.

참고문헌[11]는 다수의 광섬유로 구성된 링크를 갖는 네트워크 구조에서 Dynamic Power Aware- RWA (PA-RWA) 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 V 형태의 광섬유 비용 함수인 Load Based Cost (LBC) 함수를 이용하여 링크의 전력 소모와 네트워크 성능을 동시에 고려한다. 이 광섬유 비용 함수는 다수의 광섬유로 구성된 링크에서 각 광섬유에 사용된 파장의 수를 고려하여 광섬유의 가중치를 계산한다. 참고문헌[10]과 [11]의 알고리즘은 먼저 송신 노드와 수신 노드 사이의 경로를 찾고, 후보 경로들에서 이용할 수 있는 파장을 찾는 일반적인 RWA 기법을 사용한다. 그러나 충분한 후보 경로가 없다면, 파장 연속성 제약으로 인하여 블록킹 확률이 증가될 수 있다. 또한 다수의 광섬유로 구성된 링크에서 적절한 광섬유를 선택하는 방법이 요구된다.

참고문헌[12]에서는 계층 그래프를 이용한 동적 RWA와 광섬유 선택 알고리즘을 제안하였다. 계층 그래프는 파장단위의 다수의 그래프로 구성되며, 각 그래프는 특정 파장의 토폴로지로 표현된다. 또한 가상 노드와 가상 링크를 이용하여 여러 계층으로 나뉜 그래프를 하나의 통합 그래프로 만들고 송신 노드와 수신 노드 사이의 최소비용을 갖는 경로를 탐색한다. 최소 비용 경로를 찾게 되면 그 경로가 어느 계층에 있는지에 따라 파장이 결정되기 때문에 경로배정과 파장할당을 동시에 수행할 수 있다. 그러나 이 알고리즘은 전력 소모를 고려하지 않았다.

본 논문에서는 다중 광섬유 링크를 갖는 대용량 IP over WDM 망에서 에너지 효율을 향상시키기 위한 동적 경로 및 파장 할당 알고리즘을 제안한다. 이를 위하여 변형된 V-like 함수와 파장 기반의 계층 그래

프를 이용하여 경로 배정 및 과장 할당을 수행할 수 있도록 한다. 변형된 V-like 함수는 과장과 광섬유 비용 결정에 사용함으로써 네트워크의 에너지 소모와 블로킹 확률을 동시에 고려할 수 있도록 하였다. 마지막으로 과장 단위의 그래프로 구성된 계층 그래프를 이용하여 에너지 소모를 줄일 수 있도록 경로 배정 및 과장 할당을 수행한다. 제안한 알고리즘의 성능평가를 위하여 연결 요청 당 평균 전력 소모와 블로킹 확률의 관점에서 최단 경로 알고리즘과 성능을 비교 분석한다.

본 논문의 2장에서는 네트워크 구조와 전력 소모 모델을 설명하고, 3장에서는 과장 및 광섬유의 비용 산정 방법 및 계층 그래프를 이용한 동적 경로 배정 및 과장 할당 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 비교 분석한다. 마지막으로 5 장에서 결론을 내린다.

II. 네트워크 노드 구조 및 전력 소모 모델

본 논문은 대용량의 네트워크 구성을 위해 IP over WDM 네트워크의 노드와 노드 사이에 다중 광섬유 링크를 적용한다. 그림 1에 보인 것처럼 노드는 크게 IP 라우터와 OXC(Optical Cross Connector)로 구성된다. 트랜스폰더(Transponder)는 IP 라우터와 OXC 사이에서 전기적 신호를 광 신호로 변환하고 반대로 광 신호를 전기적 신호로 변환하는 역할을 한다. IEEE 802.1AX 표준에 따라 두 노드는 다수의 광섬유 신호가 광섬유를 통해 전파될 때 광 신호로 구성된 통합 링크로 연결되며, 각 광섬유는 다수의 과장을 지원한다. 광 신호는 약 0.2dB/km의 감쇠를 겪는다. 이런 감쇠를 보상하고 장거리 전송을 보장하기 위하여 광 증폭기(Erbium Doped Fiber Amplifier : EDFA)의

표 1. 네트워크 장비의 전력 소모
Table 1. Power Consumption of network devices

Device		Power Consumption
Transponder	P^{Tr}	34.5W(10Gbps)
OXC	P^{OXC}	1.5W(10Gbps)
Pre-Amplifier	P^{Pre}	10W
Post-Amplifier	P^{Post}	20W
In-line Amplifier	P^{ILA}	15W

사용이 요구된다. 그러므로 각 광섬유 양 끝에 전/후 단 증폭기(Pre/Post-amplifier)와 광섬유 내장형 증폭기(In-line amplifier)가 80km 마다 배치된다. 따라서 각 광섬유는 $\lfloor L_{i,j}/d^{mpl} \rfloor + 2$ 개의 광증폭기의 사용이 요구된다.^[9,13] 표 1은 네트워크 장비의 전력 소모를 보였다.^[11,14,15]

연결 요청이 도착하면 송신 노드와 수신 노드 사이의 광 경로가 설정되고, 이때 네트워크 구조에 따라 중간 노드에서는 두 가지 방법으로 광 경로를 설정할 수 있다. 중간 노드에서 광 경로 바이패스 능력이 없는 경우에는 광 경로상의 각 중간 노드에서 트랜스폰더의 광전 변환 과정(OEO)과 IP 라우터를 이용해 전기적으로 스위칭 된다. 따라서 중간 노드에서 트랜스폰더와 IP 라우터의 전력 소모가 발생된다. 중간 노드에서 광 경로 바이패스가 가능한 경우 광 경로는 중간 노드에서 트랜스폰더와 IP 라우터의 사용이 요구되지 않으며 OEO 변환과정 없이 OXC를 통하여 광 도메인에서 직접적으로 스위칭 된다. 따라서 광 경로 바이패스의 사용으로 중간 노드에서 트랜스폰더와 IP 라우터의 전력 소모를 줄일 수 있다.

본 논문에서 두 인접 노드는 다수의 광섬유로 구성된 링크로 연결됨으로 다수의 광섬유로 구성된 링크

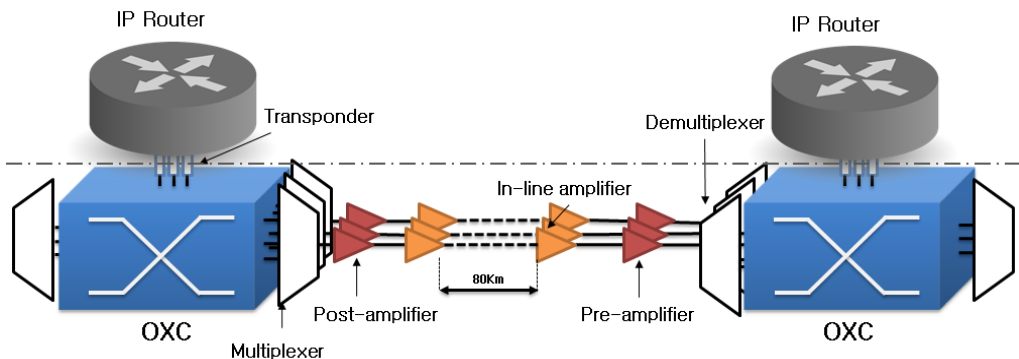


그림 1. 네트워크 노드 구조
Fig. 1. Network node architecture

에서는 연결을 설정할 때 다수의 광섬유가 후보로 선택될 수 있다. 이때 적절한 광섬유를 선택한다면 광증폭기에서 사용되는 전력 소모를 줄일 수 있다. 즉, 광경로가 사용 중에 있는 광섬유를 이용하게 되면 광증폭기의 전력 소모를 줄일 수 있다. 하지만 광 경로가 사용 중이 아닌 새로운 광섬유를 통해 연결된다면 망의 전력이 소모가 증가된다. 본 논문에서는 연결이 설정되는 과정에서 광섬유의 사용을 최적화하여 광증폭기의 사용을 줄일 수 있도록 한다. 수식 (1)은 P_{ij}^{EDFA} 는 노드 i 와 j 사이에 광증폭기의 전력소모를 나타낸다.

$$P_{ij}^{EDFA} = [L_{ij}/d^{amp}] \cdot P^{ILA} + (P^{Pre} + P^{Pbst}) \quad (1)$$

$$N_{sd} = \{n_s, n_i, n_j, \dots, n_d\}$$

$$L_{sd} = \{l_{st}^f, l_{ij}^f, \dots, l_{kd}^f\}, \quad 0 < f \leq f^{total}$$

$$P_{req} = 2P^{tr} + \sum_{n \in N_{sd}} P^{OXC} + \sum_{l_{ij} \in L_{sd}} l_{ij}^f \cdot P_{ij}^{EDFA} \quad (2)$$

네트워크에서 소모되는 전력을 측정하기 위하여 본 논문에서는 연결 요청 당 전력 소모를 측정한다. 즉 각 연결 요청을 설정할 때 요구되는 전력 소모를 측정한다. 수식 (2)는 연결 요청 당 전력 소모(P_{req})를 나타낸다. 첫 번째 항에서 P^{tr} 는 트랜스폰더의 전력 소모를 나타내며, 송신과 수신 IP 라우터에서 두개의 트랜스폰더가 사용된다. 두 번째 항에서 N_{sd} 는 설립된 광 경로에 있는 노드의 집합이며, P^{OXC} 는 OXC에서 소모되는 전력을 나타낸다. 마지막 세 번째 항에서 L_{sd} 는 광 경로에 있는 링크의 집합이다. l_{ij}^f 는 노드 i 와 j 사이에 있는 링크에 광섬유 f 가 현재 사용 중이면 0, 그렇지 않으면 1 값을 갖는 정수이다. P_{ij}^{EDFA} 는 수식 (1)에서 정의한 노드 i 와 j 사이에 광증폭기의 전력소모를 나타낸다. 따라서 새롭게 사용되는 광섬유의 수를 최소화하여 광증폭기의 전력 소모를 줄일 수 있다.

III. 에너지 효율 향상을 위한 동적 경로 배정 및 파장 할당 알고리즘

3.1 광섬유 비용 함수

본 논문은 계층 그래프를 이용한 경로 배정 및 파장 할당을 위해 광섬유 비용 함수는 중요한 역할을 한다. 새롭게 사용되는 광섬유의 선택을 최적화하기 위하여 광섬유의 파장 사용량을 기반으로 광섬유의 비용을 산정한다. 제안한 알고리즘에서는 참고문헌[11]

에서 제안한 V-like 함수인 Load Based Cost (LBC)를 수정하여 이용한다. 그림 2는 사용 파장 수에 따른 비용 함수를 나타낸다.

LBC는 파장이 적게 사용되거나 많이 사용된 광섬유에 높은 가중치를 적용하고, 중간 정도의 파장을 사용한 광섬유에 낮은 가중치를 할당한다. LBC의 성능을 평가하기 위해 파장이 가장 많이 사용된 광섬유에 작은 가중치를 할당하는 Most Loaded Fiber (MLF) 비용 함수와 파장이 가장 적게 사용된 광섬유에 적은 가중치를 할당하는 Least Loaded Fiber (LLF) 비용 함수를 비교한 결과 LBC의 전력소모와 블록킹 확률 면에서 좋은 성능을 보임을 확인하였다. 이는 LLF를 사용할 경우 블록킹 확률은 줄일 수 있으나 부하의 분배에 따른 에너지 소모는 증가한다. 반면에 MLF는 특정 광섬유의 이용률을 증가시켜 사용되는 광섬유의 수를 줄임으로써 에너지 소모를 절감할 수 있으나 블록킹 확률이 증가한다. 따라서 본 논문에서는 LBC를 광섬유 비용 함수로 이용하기 위하여 수식 (3)과 같이 비용 함수를 정의하였다.

$$FC_{ij}^f = \begin{cases} (\frac{1}{N_{th}^W})^2 \cdot (N_{curr}^W - N_{th}^W)^2 & , 0 \leq N_{curr}^W < N_{th}^W \\ -(\frac{1}{N_{max}^W - N_{th}^W})^2 \cdot (N_{curr}^W - N_{max}^W)^2 + 1 & , N_{th}^W \leq N_{curr}^W < N_{max}^W \end{cases} \quad (3)$$

수식 (3)은 노드 i 와 노드 j 사이의 물리 링크 E_{ij} 에 있는 광섬유 f 에 대한 가중치를 계산하는 비용 함수로 두 이차 함수로 정의되며 0에서 1 사이의 값을 갖는다. N_{curr}^W 는 현재 광섬유에서 사용 중인 파장의 수를 나타내며, N_{max}^W 는 광섬유 f 가 지원하는 파장의 총수이다. N_{th}^W 는 파장 임계 값으로 본 논문에서는 $N_{max}^W/2$ 로 정의하였으며 변경 가능하다. LBC는 사용된 파장이 임계 값에 가까울수록 적은 가중치가 할당되며, 파장이 적게 사용된 광섬유와 많이 사용된 광섬

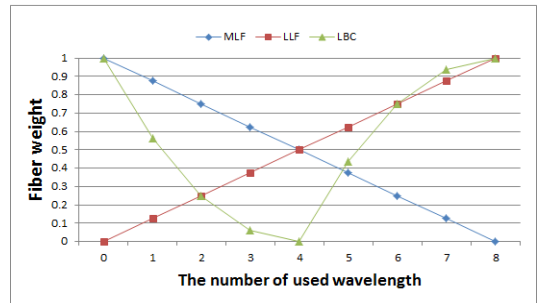


그림 2. 광섬유 비용 함수
Fig. 2. Fiber Cost Function

유에 대해서는 높은 가중치를 할당한다. 파장 사용이 적은 광섬유에 추가적인 사용 없다면, 연결 유지 시간이 지난 파장이 해제되기 때문에 광섬유의 사용을 줄일 수 있다. 반면 파장 사용이 많은 광섬유의 경우 광섬유의 파장이 과도하게 사용되는 것을 억제함으로써 블록킹 확률을 줄일 수 있다.

3.2 다중 광섬유 링크를 갖는 계층 그래프

본 논문에서는 동적으로 도착하는 연결 요청의 경로 배정 및 파장 할당을 위해 계층 그래프를 사용한다. 네트워크 토폴로지는 그래프 $G(V, E)$ 로 표현할 수 있으며, V 는 노드의 집합, E 는 링크의 집합으로 표현된다. 계층 그래프에서 네트워크는 지원되는 파장 수에 따라 λ 개의 그래프로 표현되며, 각 그래프는 $G_\lambda(V^\lambda, E^\lambda)$ 로 표현될 수 있다. 각 계층은 물리 토폴로지와 동일한 수의 노드와 링크로 구성된다. V_i^λ 는 파장 λ 의 계층에서 i 번 노드를 나타내며, $V_i^1, V_i^2, \dots, V_i^\lambda$ 는 모두 동일한 노드를 의미한다. 마찬가지로 E_{ij}^λ 는 계층 λ 의 노드 i 와 j 사이의 파장 링크를 나타내며, $E_{ij}^1, E_{ij}^2, \dots, E_{ij}^\lambda$ 는 모두 실제 물리 링크 E_{ij} 의 파장을 나타낸다. 즉 단일 광섬유로 구성된 네트워크에서 각 계층 그래프의 링크는 광섬유의 각 파장을 나타낸다. 본 논문에서는 계층 그래프 상의 링크를 파장 링크로 정의한다. 만약 연결 요청에 의해 파장 링크가 사용되면 해당 그래프에서 제거된다. 그림 3은 계층 그래프를 예를 보인다. 그림 3에서 각 링크는 하나의 광섬유를 갖고, 두 개의 파장을 지원하며 각 노드는 파장 변환 능력이 없다고 가정한다. 먼저 연결 요청 $R1(1,6)$ 이 도착하면 두 계층에서 적절한 경로를 통해 광 경로가 설정된다. 광 경로가 특정 그래프에서 결정되면 선택된 경로를 해당 그래프에서 제거한다. 그림에서는 λ_1 계층 그래프에서 경로 1-2-4-6

로 광 경로가 설정되었다. 이후 연결 요청 $R2(1,6)$ 가 도착하면 광 경로는 λ_1 의 계층 그래프의 경로 1-2-4-6이 이미 사용되어 제거되었기 때문에 선택할 수 없고, 경로 1-3-5-6 또는 λ_2 의 계층 그래프의 경로 1-2-4-6나 1-3-5-6을 선택할 수 있다. 예제에서는 λ_2 의 계층 그래프의 경로 1-3-5-6이 선택되고 마찬가지로 계층 그래프에서 제거되었다. 계층 그래프 상에서 경로를 찾는 것은 파장과 경로를 동시에 찾을 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 연결 요청 $R1(1,6)$ 에는 파장 λ_1 이 할당되며, $R2(1,6)$ 에는 파장 λ_2 가 할당된다.

그림 4는 다중 광섬유로 구성된 링크가 적용되고 전력 소모를 고려한 예를 보인다. 그림에서 각 링크는 두 개의 광섬유 f_1, f_2 로 구성되며 각 광섬유는 두 개의 파장을 지원하고 파장변환능력이 없다고 가정한다. 그림 3의 예제와 차이점은 각 계층의 파장 링크가 광섬유의 수만큼 존재한다는 점이다. 즉 λ_1 이 사용되지 않은 광섬유의 수만큼 λ_1 그래프 상에 표현된다. 먼저 연결 요청 $R1(1,6)$ 이 λ_1 의 계층 그래프에서 경로 1-2-4-6을 통해 설정되었다. 이후 새로운 연결 요청 $R2(1,6)$ 가 도착한다. Case 1은 λ_1 의 계층에서 경로 1-2-4-6으로 설정되고, 광섬유 f_1 과 광섬유 f_2 의 파장 λ_1 을 사용한다. 이 경우 사용된 광섬유의 수는 총 6개가 된다. Case 2는 λ_2 의 계층에서 경로 1-2-4-6으로 설정되고, 광섬유 f_1 의 파장 λ_1, λ_2 를 이용한다. 이 경우 이미 사용된 광섬유를 이용하여 총 3개의 광섬유만을 사용한다. 따라서 최적의 경로와 광섬유를 선택한다면 새롭게 사용되는 광섬유의 수를 줄여 전력 소모를 감소시킬 수 있다.

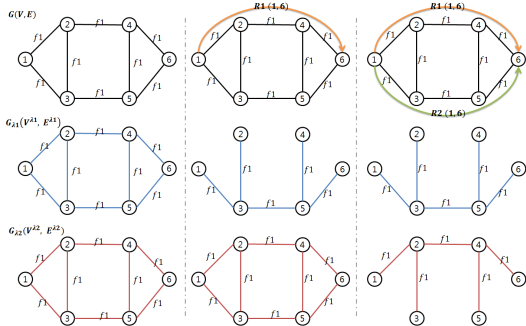


그림 3. 계층 그래프
Fig. 3. Layered graph

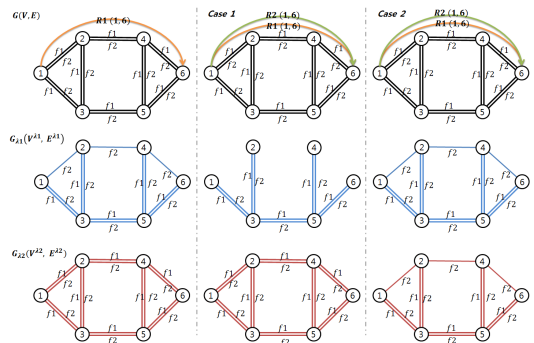


그림 4. 계층 그래프를 이용한 전력 효율 경로 선택
Fig. 4. Power efficient routing using layered graph

3.3. 계층그래프를 이용한 경로배정 및 파장할당

본 절에서는 계층 그래프를 이용한 경로 배정 및 파장 할당 알고리즘을 제안한다. 3장 1절에서 언급한

것과 같이 계층 그래프를 이용하면 경로 배정과 파장 할당을 동시에 수행할 수 있으며, 2절에서 광섬유 비용 함수를 이용하여 적절한 광섬유를 선택할 수 있다. 다수의 광섬유로 구성된 링크는 계층 그래프에서 다수의 파장 링크로 표현된다. 경로 배정과 파장 할당을 위해 각 계층 그래프에서는 파장 링크 E_{ij}^λ 에 존재하는 모든 광섬유의 상태를 반영할 수 있어야 한다. 이를 위해 수식 (3)을 이용하여 산출된 광섬유의 가중치 또는 파장 링크의 가중치의 평균과 해당 링크의 광증폭기의 전력 소모의 곱으로 여러 파장 링크의 대표 비용으로 결정된다. 이에 대한 수식을 수식 (4)에 정의하였다.

$$EC_{ij}^\lambda = P_{ij}^{EDFA} \cdot FC_{ij}^{Avg,\lambda} \quad (4)$$

수식 (4)는 계층 λ 의 파장 링크 E_{ij}^λ 의 비용을 계산하는 비용 함수다. 수식에서 $FC_{ij}^{Avg,\lambda}$ 는 링크 E_{ij} 에서 파장 λ 를 이용할 수 있는 광섬유의 평균 비용이고, P_{ij}^{EDFA} 는 링크 E_{ij} 에 배치된 광증폭기의 전력 소모를 나타낸다. 이 식을 이용하여 계층 그래프 상에 있는 모든 파장 링크의 비용을 계산한다. 추가적으로 모든 계층 그래프 상에서 경로를 찾기 위하여 가상 노드와 가상 링크가 추가된다. 가상 노드 V_s, V_D 는 송신 노드와 수신 노드 옆에 추가되며, 가상 링크 E_s, E_D 의 비용은 0으로 할당되고 가상 노드와 모든 계층 그래프를 연결하는 역할을 한다. 경로를 찾기 위해 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘을 이용하여 가상 노드 V_s 에서 V_D 로 가는 최소 비용을 갖는 경로를 찾는다. 다중 광섬유 링크를 갖는 망에서는 다수의 파장 링크가 존재하기 때문에 선택된 경로에서 자원 할당 위한 하나의 광섬유가 선택되어야 한다. 하나의 광섬유를 선택하기 위해서는 경로 선택 과정과 다르게 계층 그래프에서 선택된 경로에 존재하는 광섬유의 가중치만을 이용하여 최소 비용을 갖는 광섬유를 선택한다. 이때 같은 값을 갖는 광섬유가 다수 존재한다면 First-Fit 방식으로 광섬유가 선택된다. 만약 경로를 찾을 수 없다면 연결 요청은 블록 된다. 그림 5는 다중 광섬유 링크를 갖는 계층 그래프의 예를 보였다.

제안한 알고리즘은 아래와 같이 수행된다.

STEP 1. 계층그래프 생성 및 파장링크비용 초기화

STEP 2. 연결 요청 대기

- Case 1: 새 연결 요청 도착이면 STEP 3 수행
- Case 2: 이전 연결 요청 해제이면 STEP 6 수행

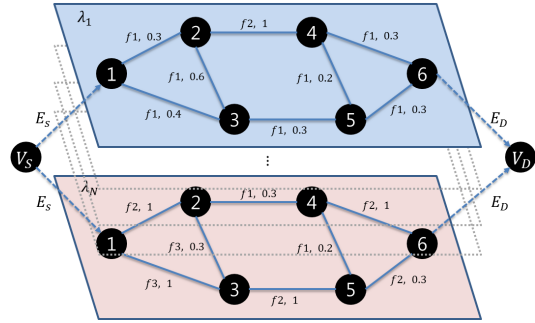


그림 5. 완성된 계층 그래프
Fig. 5. Layered graph for dynamic RWA

STEP 3. 루트 탐색

- 송신 노드와 수신 노드에 가상 노드 V_s, V_D 를 추가하고 가상 링크 E_s, E_D 를 이용하여 모든 계층 그래프 연결
- 다익스트라 알고리즘을 이용하여 가상 노드 V_s 에서 V_D 로 가는 최소 비용을 갖는 경로 탐색
- Case 1: 최소 비용 경로를 찾으면, 탐색된 경로에서 선택된 최소 비용 광섬유에 자원 할당
- Case 2: 적절한 경로를 찾지 못하면 블록킹, STEP 2 수행

STEP 4. 광섬유 링크 비용 계산

- 수식 (3)을 이용하여 모든 광섬유의 가중치 계산
- 수식 (4)를 이용하여 대표 파장 링크 비용을 계산하고 대표 광섬유 선택

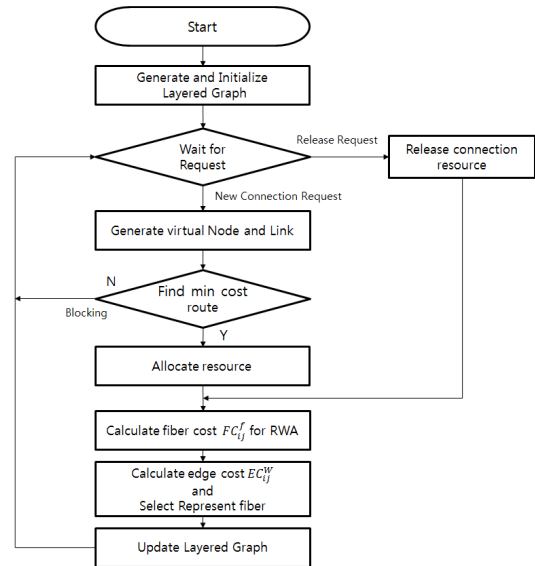


그림 6. 동적 RWA 알고리즘
Fig. 6. Flowchart of dynamic RWA algorithm

STEP 5. 계층 그래프 갱신

- STEP 3에서 추가된 가상 노드와 가상 링크 제거
- STEP 4에서 계산된 비용을 기반으로 계층 그래프 갱신

STEP 6. 자원 해제

- 연결 유지 시간이 지나면 자원을 해제하고 STEP 2 수행

제안한 알고리즘의 흐름도를 그림 6에 보였다.

IV. 시뮬레이션 및 성능 평가

4.1 시뮬레이션 환경

제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 본 논문에서는 OPNET Modeler를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위하여 24개 노드와 43개의 링크를 갖는 US 네트워크와 11개 노드와 26개의 링크를 갖는 COST239 네트워크 토폴로지를 사용하였다.^[16] 그림 7과 8은 각 네트워크 토폴로지를 나타내며 각 링크에 표시된 숫자는 링크의 거리를 나타낸다. 네트워크에서 링크는 단방향성(unidirectional) 링크이며, 방향 당 4개의 광섬유로 구성된다. 각 광섬유는 전송용량이 10Gbps인 8개의 파장을 지원한다고

가정하였다. 동적으로 도착하는 연결 요청은 $R(s, d, b, h)$ 로 표현하였으며, s 는 송신 노드, d 는 수신 노드, b 는 요구 대역폭, h 는 연결 유지 시간(holding time)을 나타낸다. 동적인 네트워크 환경을 위해서 각 연결 요청은 연결 요청 도착률 λ 의 푸아송 분포를 따르고 각 연결의 연결 유지 시간 $1/\mu$ 은 100 초를 평균값으로 하여 지수 분포를 따른다. 각 연결 요청의 송신 노드와 수신 노드 쌍은 균일분포(uniform distribution)를 따라 선택되며, 시뮬레이션의 복잡성을 줄이기 위해 각 연결 요청의 요구 대역폭은 10Gbps로 파장 전체가 사용되고 모든 노드는 파장 변환 능력이 없다고 가정하였다. 네트워크 부하는 λ/μ 로 계산되며, 150 얼랑(Erlang)에서 50 얼랑의 간격으로 1200 얼랑 까지 시뮬레이션을 수행하였다. 각 시뮬레이션에서 10,000번의 연결 요청이 동적으로 도착된다. 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 최단 경로 알고리즘과 연결 요청 당 평균 전력 소모와 블록킹 확률의 관점에서 비교 평가하였다.

4.2. 성능 평가

본 논문에서는 2장에서 정의한 수식 (2)를 이용하여 연결 요청 당 평균 전력 소모를 측정하였다. 이는 각각의 연결 요청에 대하여 광 경로가 설정되는 시점에서 기대되는 전력 소모를 의미한다. 결과를 얻기 위하여 총 전력 소모를 전체 연결 요청에서 블록킹 연결 요청을 제외한 연결 요청으로 나누어 평균 전력 소모를 구하였다.

그림 9와 10은 제안한 동적 RWA 알고리즘과 최단 경로 알고리즘의 연결 요청 당 평균 전력 소모를 비교한 결과이다. US 네트워크의 경우 낮은 트래픽 부하에서 약 52%의 전력 절감 효과를 보이며, COST239 네트워크에서는 약 36%의 전력 절감 효과를 확인할 수 있었다. 높은 트래픽 부하에서는 제안한 동적

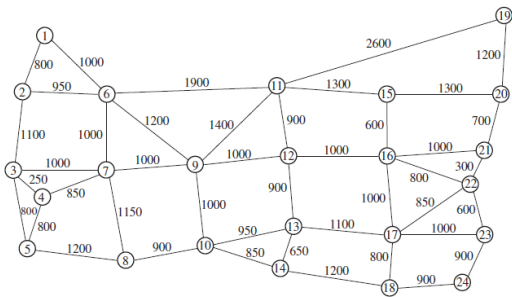


그림 7. US 네트워크 토폴로지
Fig. 7. US network topology

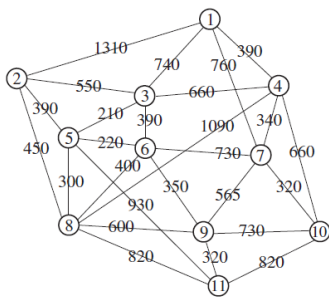


그림 8. COST239 네트워크 토폴로지
Fig. 8. COST239 network topology

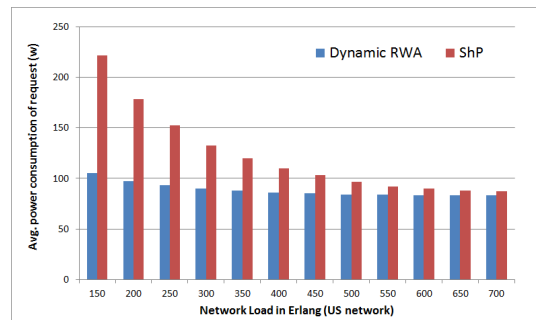


그림 9. 연결 요청 당 평균 전력 소모 (US network)
Fig. 9. Avg. power consumption

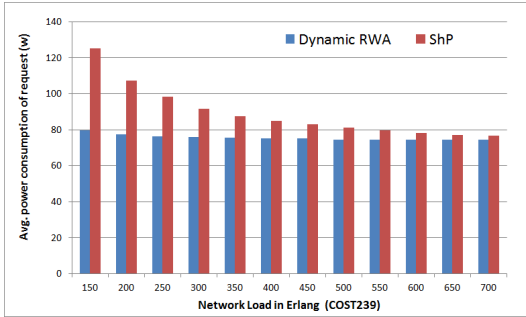


그림 10. 연결 요청 당 평균 전력 소모 (COST239)
Fig. 10. Avg. power consumption (COST239)

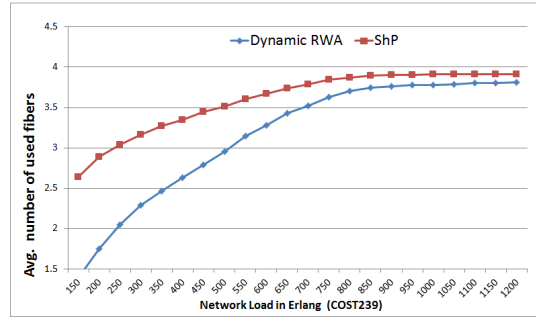


그림 12. 평균 사용 광섬유 (COST239)
Fig. 12. Avg. number of used fibers (COST239)

RWA 알고리즘이 최단경로 알고리즘과 같은 수준의 전력 소모를 보였다. 이 결과는 낮은 트래픽 부하에서 제안한 동적 RWA 알고리즘이 새롭게 사용되는 광섬유 수를 줄여 적은 수의 광섬유를 사용하기 때문에 최단 경로 알고리즘과 비교하여 높은 전력 절감 효과를 보인다. 일반적으로 트래픽 부하가 높아짐에 따라 더 많은 광 경로를 설정하고, 블록킹을 피하기 위하여 많은 광섬유가 사용된다. 따라서 에너지 효율을 고려하지 않는 최단 경로 알고리즘과 비슷한 수준의 광섬유를 사용하여 전력 절감 효과가 적음을 알 수 있었다. 각 링크에서 평균 사용 광섬유의 수에 대한 결과를 그림 11과 12에 보였다.

그림 11과 12는 각 링크에서 사용된 평균 광섬유 수를 나타낸다. 결과는 제안한 동적 RWA 알고리즘과 기존의 최단 경로 알고리즘 모두 낮은 트래픽 부하에서 적은 광섬유가 사용되고 트래픽 부하가 높아질수록 많은 광섬유가 사용되는 것을 볼 수 있다. 낮은 트래픽 부하에서 동적 RWA 알고리즘은 최단 경로 알고리즘과 비교하여 더 적은 광섬유 사용을 보이며, 트래픽 부하가 증가할수록 그 차이는 줄어들지만 전체적으로 적은 광섬유를 사용하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 제안한 동적 RWA 알고리즘이 낮은 부하에서 새

롭게 사용되는 광섬유의 수를 최소화하기 때문이다. 이러한 결과로 인하여 전력 절감 효과를 얻을 수 있었다.

그림 13과 14는 트래픽 부하 증가에 따른 블록킹 확률을 비교한 결과이다. 두 결과에서 동적 RWA 알고리즘은 최단 경로 알고리즘과 비슷한 수준의 블록킹 확률을 보임을 알 수 있다. 특히 COST239 네트워크의 결과에서는 동적 RWA 알고리즘이 더 좋은 결과를 보였다. 동적 RWA 알고리즘은 많이 사용된 광섬유에 높은 비용을 할당하고 경로선택 과정에서 전체적으로 자원이 많이 사용된 경로를 피하여 전력 소

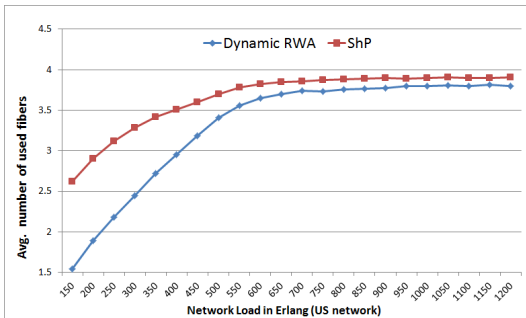


그림 11. 평균 사용 광섬유 (US network)
Fig. 11. Avg. number of used fibers (US network)

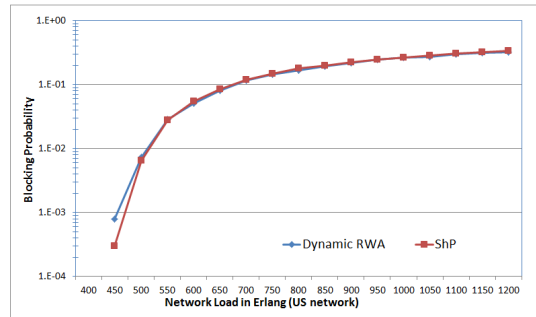


그림 13. 블록킹 확률 (US network)
Fig. 13. Blocking probability (US network)

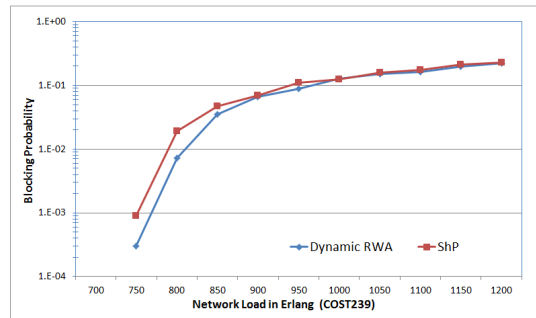


그림 14. 블록킹 확률 (COST239)
Fig. 14. Blocking probability (COST239)

모는 줄이지만 최단 경로 알고리즘과 비교하여 비슷한 블록킹 확률을 보임을 확인할 수 있다.

그림 15와 16은 트래픽 부하 증가에 따른 연결 요청 당 평균 홉 수를 보인다. 두 결과에서 동적 RWA 알고리즘은 블록킹이 발생하는 시점 이전까지 최단 경로 알고리즘과 비교하여 더 긴 경로를 선택하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전력 절감을 위해 새롭게 사용되는 광섬유를 줄이고 이미 사용 중인 광섬유를 이용하기 위하여, 우회 경로를 선택하기 때문에 더 긴 홉 수를 보인다.

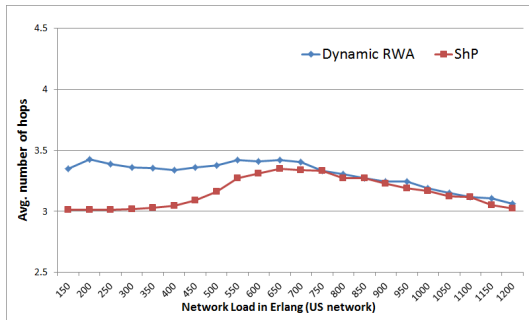


그림 15. 평균 홉 수 (US network)
Fig. 15. Avg. number of hops (US network)

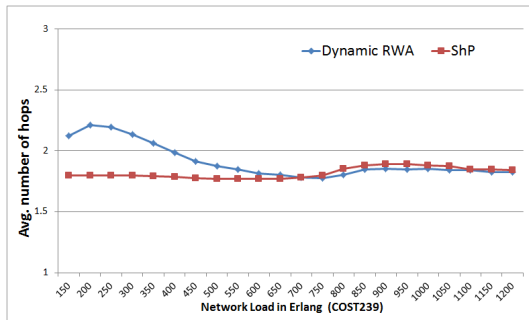


그림 16. 평균 홉 수 (COST239)
Fig. 16. Avg. number of hops (COST239)

V. 결 론

본 논문에서는 다중 광섬유로 구성된 대용량 IP over WDM 네트워크에서 에너지 절감을 위한 동적 경로 배정 및 과장 할당 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 기존 방식과 성능을 분석하였다. 제안한 알고리즘은 에너지 효율 향상을 위해 수정된 V-like 함수와 계층 그래프를 이용하였다. 성능을 평가하기 위하여 OPNET Modeler를 이용하여 네트워크 모델링 및 시뮬레이션을 실시하였다. 성능 평가는 네트워

크 부하에 따른 연결 요청 당 평균 전력 소모와 블록킹 확률의 관점에서 수행되었다. 제안한 알고리즘은 기존 방식과 비교하여 블록킹 확률의 증가 없이 낮은 트래픽 부하에서 36%에서 52%의 전력 절감 효과를 보였다.

향후 연구는 제안한 알고리즘을 국내망에 적용하여 시뮬레이션 및 성능 평가를 실시할 예정이다.

References

- [1] CISCO Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012-2017. (2013), Retrieved Oct. 12, 2013, from <http://www.cisco.com>.
- [2] W. Fisher, M. Suchara, and J. Rexford, "Greening backbone network: Reducing energy consumption by shutting off cable in bundled link," in *Proc. Green Networking*, pp. 29-34, New Delhi, India, Aug. 2010.
- [3] C. Lange, D. Kosiankowski, R. Weidmann, and A. Gladisch, "Energy consumption of telecommunication networks and related improvement options," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, no. 2, pp. 285-295, Mar./Apr. 2011.
- [4] M. Pickavet, W. Vereecken, S. Demeyer, P. Audenaert, B. Vermeulen, C. Davelder, D. Colle, B. Dhoedt, and P. Demeester, "Worldwide energy needs for ICT: The rise of power-aware networking," in *Proc. IEEE ANTS*, pp. 1-3, Mumbai, India, Dec. 2008.
- [5] GreenTouch. Retrieved Oct. 11, 2013, from <http://www.greentouch.org>.
- [6] EARTH(Energy Aware Radio and neTwork technologies). Retrieved Oct. 16, 2013, from <http://www.ict-earth.eu>.
- [7] D. K. Kang, W. H. Yang, K. B. Lee, and Y. C. Kim, "Transition decision algorithm for energy saving in OBS network with LPI," *J. KICS*, vol. 37B, no. 5, pp. 317-326, May 2012.
- [8] W. H. Yang, J. H. Jeong, and Young-Chon Kim, "Performance evaluation of energy saving in core router and edge router architectures with LPI for green OBS networks," *J. KICS*, vol. 37B, no. 2, pp.

130-137, Feb. 2012.

- [9] G. Shen and R. S. Tucker, "Energy-minimized design for IP over WDM networks," *J. Evolutionary Econ.*, vol. 1, no. 1, pp. 176-186, Jun. 2009.
- [10] P. Wiatr, P. Monti, and L. Wosinska, "Green lightpath provisioning in transparent WDM networks: Pros and cons," in *Proc. IEEE ANTS*, pp. 10-12, Mumbai, India, Dec. 2010.
- [11] A. Coiro, M. Listanti, and A. Valenti, "Dynamic power-Aware routing and wavelength assignment for green WDM optical networks," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1-6, Kyoto, Japan, Jun. 2011.
- [12] K. Elsayed, "Dynamic routing, wavelength, and fibre selection algorithms for multifibre WDM grooming networks," in *Proc. IEE Commun.*, vol. 152, no. 1, pp. 119-127, Feb. 2005.
- [13] F. Musumeci, M. Tornatore, J. L. Vizcaino, Y. Ye, and A. Pattavina, "Power-aware design of protected IP-over-WDM networks with sleep-mode devices," in *Proc. GreenCom*, pp. 20-25, Piscataway, NJ, Sept. 2012.
- [14] S. Yang and F. Kuipers, "Energy-aware path selection for scheduled lightpaths in IP-over-WDM networks," in *Proc. IEEE SCVT*, pp. 1-6, Ghent, Belgium, Nov. 2011.
- [15] B. B. Li, W. H. Yang, and Y. C. Kim, "Efficient mixed topology configuration algorithm for optical carrier ethernet," *J. KICS*, vol. 36, no. 9, pp. 1039-1048, Sept. 2012.
- [16] G. N. Bao, L. M. Li, H. F. Yu, Z. Z. Zhang, and H. B. Luo, "Power-aware provisioning strategy with shared path protection in optical WDM networks," *J. Opt. Fiber Technol.*, vol. 18, issue. 2, pp. 81-87, Mar. 2012.

이 기 범 (Ki-Beom Lee)

한국통신학회 논문지 제37권 제5호 참조
현재 : 전북대학교 컴퓨터공학과 석사과정

강 근 영 (Keun-Young Kang)



2013년 2월 : 전북대학교 컴퓨
터공학과 졸업
2013년 3월 : 전북대학교 컴퓨
터공학과 석사과정
<관심분야> 풍력발전단지 통신
망, 네트워크 운영

김 도 영 (Do Young Kim)



2010년 3월~현재 : 전북대학교
IT정보공학과 학사과정
<관심분야> 풍력발전단지 통신
망, Green network, 통신프
로토콜

김 영 천 (Young-Chon Kim)

한국통신학회 논문지 제35권 제7호 참조
현재 : 전북대학교 IT정보공학과 교수