DBpia

파장분할다중화 광통신망에서 산재-부분-제한영역 파장 변환기의 효율적인 배치 알고리듬

종신회원 정 한 유*, 서 승 우**, 정회원 최 윤 호***°

An Efficient Converter Placement in Wavelength-Routed WDM Networks with Sparse-Partial-Limited Wavelength Conversion

Han-You Jeong*, Seung-Woo Seo** *Lifelong Members*, Yoon-Ho Choi***° *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 산재-부분-제한영역 파장 변환 방식의 파장분할다중화 광통신망의 불통 확률을 정확하게 계산할 수 있는 수학적 성능분석 모형을 제안하고, 이를 기반으로 파장 변환기를 효율적으로 배치하는 파장 변환기 배치 알고리듬을 제시한다. 제안하는 성능분석 모형은 파장 변환기의 제한된 파장 변환 영역으로 발생하는 영역 불통(Range Blocking)과 파장 변환기의 개수 제약으로 발생하는 용량 불통(Capacity Blocking)을 이론적으로 도출하는 최초의 성능분석 모형이다. 유럽 광통신망에서 수행한 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 성능분석 모형이 광통신망의 불통확률을 정확히 예측함을 보인다. 또한, 기존에 알려진 산재 파장 변환 방식, 부분 파장 변환 방식, 또는 제한영역 파장 변환 방식들과 비교할 때, 이들을 효율적으로 결합한 산재-부분-제한영역 파장 변환 방식이 최소의 파장 변환 비용으로 주어진 광통신망의 불통 성능을 달성할 수 있음을 보인다.

Key Words : 파장분할다중화 광통신망, 불통 확률, 파장 변환기 배치, 산재-부분-제한영역 파장 변환

ABSTRACT

In this paper, we present a new analytical model that can precisely estimate the blocking performance of wavelength-routed WDM networks with sparse-partial-limited wavelength conversion (SPLWC). The proposed model accounts for the two sources of call blocking in a wavelength converter: range blocking originated from the limited conversion range of a wavelength converter; and capacity blocking induced from the limited number of wavelength converters. Based on the proposed model, we also present a new converter placement algorithm that minimizes the amount of wavelength conversion capability, while satisfying the given constraint on the network-wide blocking probability. From the numerical results obtained from the EON, we demonstrate that the blocking probability of the analytical model closely matches with that of the simulation. We also show that, by efficiently combining the existing sparse, partial, and limited wavelength conversion, the SPLWC can achieve the required blocking performance with the least amount of wavelength conversion cost.

Ⅰ. 서 론

파장분할다중화 광통신망은 기간 망에서 인터넷 트래픽을 효율적으로 전달하기 위한 전달 망 기술로 광범위하게 연구되어 왔다. 각각의 노드(node)들은 IP 혹은 MPLS 라우터와 연결하는 전기적 인터페이스와

※ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음
* 부산대학교 차세대물류IT기술연구사업단 (hyjeong@pusan.ac.kr), * 서울대학교 전기공학부 (sseo@snu.ac.kr)
*** 삼성전자 DMC연구소 (yuno_choi@gmail.com) (° : 교신저자)
논문번호 : KICS2010-08-421, 접수일자 : 2010년 08월 30일, 최종논문접수일자 : 2010년 11월 12일

www.dbpia.co.kr

광섬유로 다른 노드들과 연결된 광 인터페이스로 구성된다. 특정 노드 쌍에게 광경로(lightpath)를 제공하기 위해서 광통신망은 출발지 노드에서부터 목적지 노드까지 모든 중간 노드와 파장을 결정하는 라우팅 및 파장할당(Routing and Wavelength Assignment, RWA)을 수행한다.[1]

파장분할다중화 광통신망에서는 중간 노드에서 파장 변환 능력 여부가 광통신망의 불통 확률을 결정하는데 중요한 요인이 되기 때문에 이에 대한 연구가 1990년대 후반부터 활발히 이루어져 왔다. 만약 파장 변환능력이 없을 때(**No Wavelength Conversion; NWC**), 주어진 경로 상의 모든 링크에서 공통적으로 사용 가능한 파장이 있는 경우에만 광경로가 설정될 수 있다. 반면, 모든 노드가 완벽한 파장 변환 능력을 갖추고 있을 때(**Full Wavelength Conversion; FWC**), 특정 링크의 모든 파장이 사용되지 않는 경우 광경로 설정이 가능하다. 초기 연구들은 광통신망에서 FWC 방식의 파장 변환 기술을 도입할 경우 불통확률을 획기적으로 줄일 수 있음을 보였다.[2,3]

1.1 파장 변환의 중도적 접근 방식

FWC 방식의 파장 변환 기술은 비용이 매우 크고 비효율적이기 때문에, 최근의 많은 연구들은 FWC와 비슷한 불통 성능을 가지는 동시에 구현 비용을 획기적으로 줄일 수 있는 중도적인 접근 방식들을 제안하였다.[4-16] 그림 1은 이러한 중도적 접근 방식에 대한 개념적 도식을 나타내었다.

1) 소자 수준의 접근 방식 (Device-level Approaches): 그림 1의 X 축은 파장 변환 소자가 변환 가능한 파장의 범위를 나타낸다. 본 논문에서 이 범위를 파장 변환 영역(conversion range)라고 정의한다. 그래프에서 점들이 원점(NWC)에서 전영역 파장변환(Whole-range Wavelength Conversion; WWC)로 진행함에 따라 파장 변환 영역이 점점 증가하게 된다. 이 두 극점(NWC와 WWC) 사이의 구간을 통틀어 **제한영역 파장변환(Limited Wavelength Conversion; LWC)**이라 정의한다.[4,5] 현재 소자 기술 수준을 고려할 때, 파장변환 영역이 증가할수록 광신호의 품질이 급격히 저하되기 때문에 LWC가 WWC보다 훨씬 매력적이다. [4,5]에서 작은 파장변환 영역을 가지는 LWC가 FWC와 비슷한 불통 확률을 얻을 수 있음을 보였다. 그러나, 이들 논문에서는 그림 1의 오른쪽 면의 위쪽 수평 모서리로 나타낸 바와 같이 모든 노드들에 충분한 개수의 파장 변환기가 있다고 가정하여 매우 많은 개수의 파장 변환기를 필요로 하는 단점이 있다.

2) 구조적 수준의 접근 방식 (Architecture-level Approaches): 그림 1의 Y축은 노드 내부에서 파장 변환기가 입출력 파장 포트(port)들에 의해 공유되는 정도를 나타낸다. 개별 파장 변환(Dedicated Wavelength Conversion; DWC) 방식은 특정 출력 파장 포트(Port)가 각각의 파장 변환기를 가지고 있는 노드 구조를 나타낸다. 그림 1에서 개별 파장변환(DWC) 점에서 원점(NWC)으로 진행함에 따라 더 많은 개수의 출력 파장 포트들이 한 개의 파장 변환 소자를 공유하게 된다. NWC와 DWC의 두 극점 사이의 영역을 일반적으로 **부분 파장변환(Partial Wavelength Conversion; PWC)**라고 정의한다. 논문 [6]은 처음으로 부분 파장변환 방식을 제안하였으며, 계층 그래프(layered graph)를 이용한 라우팅 및 파장할당 알고리즘을 제시하였다. 부분 파장변환 방식에서 파장 변환기 배치에 관한 문제는 논문 [7]에서 수행하였다. 그러나, 부분 파장변환 방식은 그림 1의 전면의 위쪽 수평 모서리로 나타낸 바와 같이 모든 파장 변환기들이 전영역 파장변환(WWC)을 가정하므로, 파장 변환 소자의 구현이 어려운 단점을 가지고 있다.

3) 통신망 수준의 접근 방식 (Network-level Approaches): 그림 1의 Z축은 광통신망에서 파장 변환 능력이 있는 노드와 그렇지 않은 노드들 간의 비율을 나타낸다. 예를 들어, 그림에서 나타낸 바와 같이, 모든 노드들이 파장 변환 능력이 있는 경우를 완전 파장변환(Complete Wavelength Conversion; CWC)라고 정의한다. 원점(NWC)에서 완전 파장변환(CWC)로 이동하면 파장 변환 능력을 갖춘 노드들의 비율이 점점 증가하게 된다. 일반적으로 NWC와 CWC 사이의 구간을 **산재 파장 변환(Sparse Wavelength**

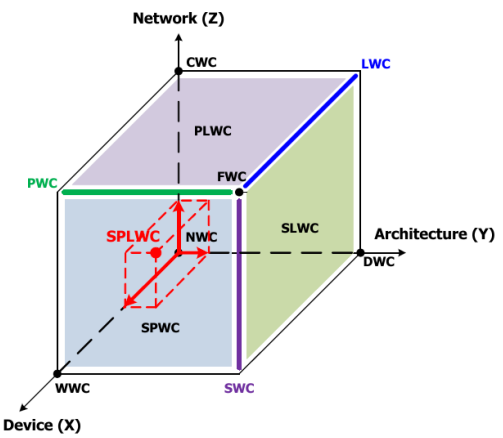

그림 1. 파장 변환 기술의 개념적 도시

www.dbpia.co.kr

Conversion; SWC)로 정의한다. 논문 [8,9]에서는 산재 파장변환에서 링크 부하의 상관관계(correlation)를 고려한 새로운 불통확률에 관한 성능분석 모형을 제시하였다. 기존의 파장 변환기 배치 문제에 관한 논문들은 대부분 산재 파장 변환을 가정하여 문제를 정의하였다.[10-13] 그러나 이들 논문들은 그림 1의 전면의 수직 모서리로 나타낸 바와 같이 모든 노드들이 전영역-개별 파장변환(Whole-range Dedicated Wavelength Conversion; WDWC)을 가정하기 때문에 구현의 어려움 및 파장 변환기 사용의 비효율성을 동시에 가지고 있다.

최근 연구 결과들은 산재-부분 파장 변환(Sparse Partial Wavelength Conversion; SPWC)[14] 혹은 산재-제한영역 파장변환(Sparse Limited-range Wavelength Conversion; SLWC)[15,16] 등과 같은 더욱 복잡한 상황에서 파장 변환기의 성능을 검증한다. 산재-부분 파장 변환에 관해서는 [15]에서 처음으로 근사적인 성능분석 모형과 파장 변환기 배치 알고리듬을 제시하였다. 논문 [18]에서는 새로운 성능분석 모형을 기반으로 최적의 파장 변환기 배치를 수행할 수 있는 이진 선형 프로그램(binary linear program)을 제시하였다. 비록 이러한 논문들이 이전의 세 가지 접근 방식보다 파장 변환기를 더욱 효율적으로 사용하지만, 이들 또한 그림 1에서 보인 바와 같이 한 개의 면(SPWC: 전면, SLWC: 오른쪽 면)만을 고려하기 때문에, 그 성능 향상이 제한적인 문제점을 여전히 가지고 있다.

반면, 그림 1의 정육면체의 표면 및 내부의 모든 점들은 **산재-부분-제한영역 파장 변환(Sparse-Partial-Limited Wavelength Conversion; SPLWC)** 방식으로 표현될 수 있다. SPLWC 파장 변환 방식을 사용할 경우, 세 가지 중도적 접근 방식을 효율적으로 결합하여 FWC와 유사한 불통 성능을 나타내는 동시에 전체 파장 변환 비용을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 지금까지 SPLWC 방식의 파장분할다중화 광통신망에 대한 연구는 알려진 바가 없다.

1.2 본 논문의 주요 내용 및 구성

본 논문에서는 산재-부분-제한영역 파장 변환 방식 기반 광통신망의 새로운 성능분석 모형을 제시하고, 이를 기반으로 효율적인 파장 변환기 배치 알고리듬을 개발한다. 제시하는 성능분석 모형은 파장 변환기의 제한된 파장 변환 능력에서 기인하는 **영역 불통(Range Blocking)**과 제한된 파장 변환기 개수에서 발생하는 **용량 불통(Capacity Blocking)**을 이론적으로 도출하는 최초의 수학적 성능분석 모형이다. 또한, 제안된 성능 분석 모형을 기반으로 순차적 파장 변환기 배치 알고리듬을 제안한다. 제안하는 알고리듬은 파장 변환기의 파장 변환 영역을 먼저 결정하고, 이를 기반으로 용량 불통이 가장 큰 노드에 파장 변환기를 한 개 추가하는 방식이다. 이벤트 기반의 시뮬레이션을 통해 제안하는 성능분석 모형이 시뮬레이션 결과와 정확히 일치함을 보이고, SPLWC 방식이 가장 효율적인 파장 변환 방식임을 검증한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 본 논문이 가정하는 네트워크의 모형을 제시한다. 3장에서는 수학적 성능분석 모형을 제시하고, 4장에서는 파장 변환기 배치 알고리듬을 제시한다. 5장에서는 시뮬레이션을 통해 성능 분석 모형의 정확도 및 산재-부분-제한영역 파장 변환 방식의 성능을 검증하고, 6장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

Ⅱ. 네트워크 모형 및 정의

본 논문에서는 N 개의 노드와 L 개의 링크로 이루어진 파장분할다중화 광통신망을 고려한다. 각 링크는 0에서부터 $W-1$까지 W 개의 파장으로 구성된다. 본 논문에서 노드 내의 광 교환기에서 발생하는 불통은 없다고 가정한다. 파장 변환 능력에 따라 노드들은 파장 변환 노드(Wavelength Convertible Node)와 파장 선택 노드(Wavelength Selective Node)로 구분된다. 파장 선택 노드는 특정 입력 포트의 특정 파장을 임의의 출력 포트의 동일한 파장으로 연결 가능하다. 반면, 파장 변환 노드는 특정 입력 포트의 특정 파장을 임의의 출력 포트의 인접한 몇 개의 파장으로 연결 가능하다. 각각의 파장 변환 노드는 내부에 입/출력 포트들로부터 공유되는 파장 변환기 풀(Wavelength Converter Pool)을 가지고 있다. 본 논문에서는 파장 변환기의 공유를 극대화하기 위해 노드 공유(Shared-per-Node) 방식을 가정한다.[6] 그리고, 파장 변환기 풀에서 파장 변환기의 개수를 n으로 나타낸다. 특정 입력 파장 λ에 대하여 파장 변환 영역이 d인 파장 변환기가 변환할 수 있는 출력 파장의 영역 $\Gamma(\lambda)$는 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma(\lambda) = \{\lambda' | \Gamma_{MIN}(\lambda) \le \lambda' \le \Gamma_{MAX}(\lambda)\} \quad (1)$$

위의 수식에서 최소값은 $\Gamma_{MIN}(\lambda) = \max(0, \lambda - d)$이고, 최대값은 $\Gamma_{MAX}(\lambda) = \min(\lambda + d, W-1)$이다.

본 논문에서 광경로는 임의의 시점에서 동적으로

www.dbpia.co.kr

설정되고 해지되는 동적 시나리오를 따른다고 가정한다. 추가로, 성능 분석의 편의를 위해 다음과 같은 가정을 고려한다.

1) 호는 고정된 최단 경로 상으로 설정된다.
2) 호 설정 시에 사용 가능한 파장들 중에서 하나의 파장이 임의(random)로 선택된다.

경로 r 상에 인입하는 호는 평균 인입률(arrival rate)이 α_r인 포아송(Poisson) 분포를 따르고, 호의 지속 시간은 평균값 1의 지수(Exponential) 분포를 따른다고 가정한다. 따라서, 경로 r의 평균 부하(load)는 α_r이 된다. 또한, 각 링크에서의 사용 가능한 파장들의 분포는 다른 링크들의 사용 가능한 파장 분포와는 서로 독립이다. 그림 2에서 경로 r은 $(H+1)$ 개의 노드와 H 개의 링크로 구성되며, 여기에서 H는 홉(hop) 수를 의미한다. $\vec{v}(r)=\{v_0,v_1,\cdots,v_H\}$는 경로 r 상의 노드들의 집합을 나타내며, 중간 노드들의 집합인 $\vec{v}(r;I)=\{v_1,v_2,\cdots,v_{H-1}\}$와 출발지/도착지 노드 집합인 $\vec{v}(r;E)=\{v_0,v_H\}$로 분할(partition)된다. 경로 r 상의 링크들의 집합을 $\vec{e}(r)=\{e_0,e_1,\cdots,e_{H-1}\}$로 나타내며, 여기에서 e_j는 노드 v_j와 노드 v_{j+1}을 연결하는 링크를 나타낸다. $(0\le j\le H-1)$ 경로 r의 부분 경로는 $\vec{v}(r)\cup\vec{e}(r)$의 부분 집합으로 정의되며, 경로 r 상의 연속된 링크들과 노드들로 구성된다. 부분 경로 $(x_j\rightarrow x_{j'})$은 노드(혹은 링크) x_j에서 노드(혹은 링크) $x_{j'}$까지의 노드 및 링크를 나타낸다. 예를 들어, 그림 2에서 부분 경로 $(v_0\rightarrow e_{j-1})$는 출발지 노드로부터 링크 e_{j-1}까지의 세부 경로 상에 존재하는 모든 노드들과 링크들로 이루어진다.

마지막으로, 호가 불통이 되면 그 호는 즉시 손실(loss)로 처리됨을 가정한다.

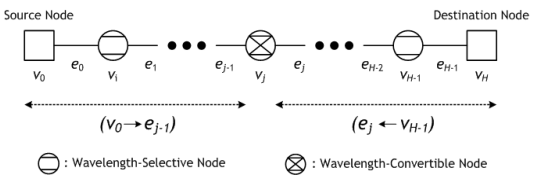

그림 2. 광경로 r 및 부분 경로의 예제

Ⅲ. 성능 분석 모형

본 장에서는 SPLWC 방식의 파장분할다중화 광통신망에서 불통 확률을 근사하기 위한 새로운 성능분석 모형을 제시한다. 본 논문에서는 파장분할다중화 광통신망의 불통확률을 계산하기 위하여 감소 부하 근사(Reduced-Load Approximation; RLA) 방식을 기반으로 하는 새로운 성능분석 모형을 제시한다.[3,16] 제안하는 성능분석 모형은 다 변수 방정식의 해를 아래와 같이 반복 대입(Repeated Substitution) 방법을 적용하여 성능을 근사한다.[3,16]

3.1 광섬유의 점유 분포

광경로 r 상의 링크 e_j에서의 트래픽 부하는 다른 링크 혹은 노드에서의 불통으로 인해 감소한다. 또한, 이러한 감소량은 링크 e_j에서 사용 가능한 파장의 개수와도 관련이 있다. 링크 e_j에서의 사용 가능한 파장의 개수를 X_j라고 정의하자. $B_{r|X_j=m}$을 링크 e_j에서 사용 가능한 파장 개수가 m일 때의 경로 r의 불통 확률로 정의하면, 경로 r의 링크 e_j에서 다른 링크의 불통으로 인한 입력 부하의 감소량은 정의에 의해 $\alpha_r(1-B_{r|X_j=m})$로 주어진다. 따라서, $X_j=m$일 때 링크 e_j의 전체 입력 부하 $\alpha_j(m)$은 해당 링크를 지나는 모든 광경로들의 입력 부하의 합으로 주어진다.

$$\alpha_j(m)=\sum_{\forall r:e_j\in\vec{e}(r)}\alpha_r(1-B_{r|X_j=m}) \tag{2}$$

링크 e_j에서의 입력 부하인 $\alpha_j(m)$이 주어졌을 때, 링크 e_j에서의 사용 가능한 파장의 분포는 생성-소멸(birth-death) 프로세스로 모형화할 수 있다. 정상 상태에서 $X_j=m$일 확률 $P_j(m)$은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_j(m)=\frac{W(W-1)\cdots(W-m+1)}{\alpha_j(1)\alpha_j(2)\cdots\alpha_j(m)}P_j(0), \tag{3}$$

$$P_j(0)=\left[1+\sum_{m=1}^{W}\frac{W(W-1)\cdots(W-m+1)}{\alpha_j(1)\alpha_j(2)\cdots\alpha_j(m)}\right]^{-1}. \tag{4}$$

3.2 파장 변환 노드

파장 변환 노드의 파장 변환기 풀에서는 파장 변환기의 제한된 파장 변환 영역 혹은 파장 변환기의 제한된 개수 때문에 불통이 발생할 수 있다. 본 논문에서 전자를 **영역 불통**으로, 그리고 후자를 **용량 불통**으로 정의한다. 본 절의 목표는 위의 두 가지 불통 원인으로 인한 광통신망의 성능을 수학적으로 모형화하는데 있다. 본 절에서 파장 변환 노드 v는 경로 r 상의 j번째 중간 노드를 나타낸다.

www.dbpia.co.kr

1) 제한영역 파장변환 (Limited Wavelength Conversion): 파장 변환기의 역할은 파장 연속성의 제약 조건을 완화하여 보다 높은 확률로 호를 설정하는데 있다. 그러나, 파장 변환 이후의 파장 분포는 링크 e_{j-1}에서 사용 가능한 파장의 개수 및 그 분포에 영향을 받게 된다. 여기에서, 파장 변환기의 파장 변환 이후에 사용 가능한 파장의 개수를 살펴보자. $LB(m)$과 $UB(m)$을 각각 링크 e_{j-1}에서 사용 가능한 파장이 m일 때, 파장 변환을 통해 사용 가능하게 되는 출력 파장의 개수의 하한(Lower Bound)과 상한(Upper Bound)이라고 정의하자.

$$LB(m)=\begin{cases}0, & \text{if } m=0;\\ \min(m+d, W), & otherwise.\end{cases} \quad (5)$$

(5)에서 하한 값은 모든 m 개의 사용 가능한 파장이 양쪽 끝 파장을 시작으로 연속적으로 나열되어 있을 경우에 발생한다. 반면, 상한 값은 모든 m개의 사용 가능한 파장들이 충분히 떨어져 있어서 파장 변환 영역이 서로 중복되지 않을 때 발생하며 그 값은 아래와 같이 주어진다.

$$UB(m)=\min((2d+1)m, W). \quad (6)$$

이 절에서의 목표는 링크 e_{j-1}에서의 사용 가능한 파장의 개수가 m일 때, 파장 변환 이후에 사용 가능한 파장의 개수가 l 일 조건부 확률 $Q(l|m)$을 구하는 것이다. 임의 파장할당(Random Wavelength Assignment)의 경우, 모든 파장의 사용 확률이 동일함을 가정할 수 있다. 이러한 가정으로부터 W 개의 전체 파장으로부터 사용 가능한 m 개의 파장을 뽑는 $\binom{W}{m}$ 가지의 경우의 수는 모두 동일한 확률을 가지게 된다. 이러한 특징을 활용하여 위의 조건부 확률을 순열/조합 문제로 치환한다. 즉, $\Phi^{U}(l|W,m)$을 W 개의 파장에서 m 개의 파장을 뽑는 경우에 있어 파장 변환 후 사용 가능한 파장이 l 개가 되도록 하는 경우의 수로 정의한다. 정의에 의해 $Q(l|m)$은 다음과 같이 주어진다.

$$Q(l|m)=\frac{\Phi^{U}(l|W,m)}{\binom{W}{m}}, LB(m)\le l\le UB(m) \quad (7)$$

본 논문에서는 [16]에서 유도한 $\Phi^{U}(l|W,m)$의 재귀적 수식을 활용하여 계산하였다. 조건부 확률 $Q(l|m)$은 파장 변환 영역에만 의존하므로, 특정 파장 변환 영역에 관해 이 값들이 구해지면, 동일한 파장 변환 영역을 가지는 다른 모든 노드들에서도 공통적으로 적용이 가능하다.

2) 파장 변환기 풀 (Wavelength Converter Pool): 위에서 언급한 바와 같이, 파장 변환기 풀은 n 개의 파장 변환기로 구성되어 있다. 이들은 파장 변환 노드 v와 직접 연결된 두 링크 사이에서의 파장 충돌(Wavelength Conflict)을 해결하는데 사용된다. 따라서 본 논문에서는 파장 변환 노드 v가 중간 노드인 경우($v\in\vec{v}(r;I)$)만 고려한다.

그림 3은 파장 변환기 풀에 부과되는 트래픽의 부하를 도시하였다. 여기에서 δ_S와 δ_C는 각각 파장 충돌으로 인한 전체 트래픽의 부하와 파장 변환기 풀이 있는 경우 영역 불통으로 인한 부하를 나타낸다. 확률변수 Y_j는 파장 변환기 풀의 상태를 나타낸다. 즉, 파장 변환기 풀 내의 모든 파장 변환기들이 사용 중인 경우 $Y_j=1$이고, 그 이외의 경우에 $Y_j=0$으로 설정된다. 이 때, δ_S 및 δ_C는 광섬유 링크의 경우와 유사하게 아래와 같이 주어진다.

$$\delta_S=\sum_{\forall r: v\in\vec{v}(r;I)}\alpha_r B_{r|Y_j=1}, \quad (8)$$

$$\delta_C=\sum_{\forall r: v\in\vec{v}(r;I)}\alpha_r B_{r|Y_j=0}. \quad (9)$$

여기에서 $B_{r|Y_j=k}$는 $Y_j=k$일 때 노드 v를 지나가는 경로 r의 불통 확률을 나타낸다.

영역 불통으로 인한 트래픽의 양은 파장 변환 영역이 증가함에 따라 감소하게 된다. 여기에서 β를 파장 변환기 풀로 인입되는 입력 부하로 정의한다. 그림 3에서 β는 아래와 같이 두 영역 불통 트래픽 부하의 차이로 정의된다.

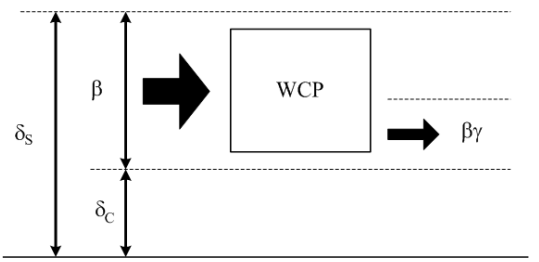

그림 3. 파장 변환기 풀의 입력 부하

www.dbpia.co.kr

$$\beta = \delta_S - \delta_C. \quad (10)$$

파장 변환기 풀 내에서 제한된 개수의 파장 변환기 때문에 발생하는 용량 불통을 모형화하기 위해 γ를 파장 변환기 풀에서 모든 파장 변환기가 사용 중일 확률로 정의하자. 파장 변환기 풀은 n 개의 파장 변환기로 구성되므로 파장 변환기들의 점유 분포는 입력 부하가 β인 $M/M/n/n$ 대기 시스템으로 나타낼 수 있다. 파장 변환기 풀의 용량불통 확률 γ는 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma = \frac{\beta^n}{n!}\left[1+\sum_{i=1}^{n}\frac{\beta^i}{i!}\right]^{-1}. \quad (11)$$

즉, 파장 변환 노드에서 파장 변환기 풀의 **용량 불통**으로 인한 입력 부하는 $\beta\gamma$로 주어진다.

3.3 다중 홉 경로에서의 불통 확률

본 절에서는 다중 홉 경로에서의 불통 확률에 관한 수학적 모형을 제시한다. 우선, 성능 분석에 이용되는 용어들을 다음과 같이 정의한다.

$U_j^-(m)$: 부분 경로 $(v_0 \rightarrow e_j)$에 m 개의 사용 가능한 파장이 있을 확률
$U_j^+(m)$: 부분 경로 $(e_j \rightarrow v_H)$에 m 개의 사용 가능한 파장이 있을 확률
$V_j^-(n)$: 부분 경로 $(v_0 \rightarrow v_j)$에 n 개의 사용 가능한 파장이 있을 확률
$V_j^+(n)$: 부분 경로 $(v_j \rightarrow v_H)$에 n 개의 사용 가능한 파장이 있을 확률

1) 경로 불통 확률 (Path-Blocking Probability): 경로 r에서의 불통확률 B_r은 왼쪽 부분 $(v_0 \rightarrow e_H)$ 혹은 오른쪽 부분 $(e_0 \rightarrow v_H)$에서 사용 가능한 파장이 하나도 없을 확률로 나타낼 수 있다. 즉,

$$B_r = U_{H-1}^-(0) = U_0^+(0) \quad (12)$$

본 절에서는 왼쪽 부분 경로에 관한 수식만 유도한다. 참고로 오른쪽 부분 경로의 경우에도 동일한 방법을 적용하여 수식을 유도할 수 있다.

본 절의 아이디어는 $(j+1)$ 번 째 홉의 수식들을 j 번 째 절의 수식들로 표현하는 것이다.[3,7,11,12,14] 이는 $V_j^-(n)$을 $U_{j-1}^-(m)$으로 나타내는 세부 문제와 $U_j^-(f)$를 $V_j^-(n)$으로 나타내는 세부 문제로 나눌 수 있다. 우선, 첫 번째 세부 문제를 고려하기로 한다. 부분 경로 $(v_0 \rightarrow e_{j-1})$에서의 사용 가능한 파장의 개수를 m 이라고 하자. $I(cond.)$을 $cond.$이 참일 때 1, 거짓일 때 0의 값을 가지는 함수라고 정의하면 $V_j^-(n)$은 다음과 같이 주어진다.

$$V_j^-(n) = \sum_{m=0}^{W} U_{j-1}^-(m)\{\gamma I(n=m) + (1-\gamma)Q(n|m)\} \quad (13)$$

다음으로 두 번째 세부 문제를 고려한다. 이 문제는 두 개의 부분 경로 간의 공통된 사용 가능한 파장을 찾는 문제로 정의할 수 있다. 즉, 첫 번째 부분 경로 $(v_0 \rightarrow v_j)$에서의 사용 가능한 파장의 개수를 n, 그리고 두 번째 부분 경로 e_j에서 사용 가능한 파장의 개수를 m이라고 정의하면, 두 부분 경로에 공통으로 사용 가능한 파장의 개수가 f일 확률 $U_j^-(f)$는 다음과 같이 주어진다.

$$U_j^-(f) = \sum_{n=f}^{W} V_j^-(n) \sum_{m=f}^{W} P_j(m) R(f|n,m) \quad (14)$$

여기에서 $R(f|n,m)$은 첫 부분에서 사용 가능한 파장이 n 개이고 두 번째 부분에서 사용 가능한 파장이 m 개일 때, 공통적으로 사용 가능한 파장의 개수가 f일 조건부 확률을 나타낸다.[3,7,11,12,14]

2) 조건부 불통 확률 (Conditional Blcoking probability) : 본 절에서는 조건부 불통 확률을 계산하기 위한 수학적 모형을 유도한다. 우선, 3.1 절에서 링크 조건부 불통 확률인 $B_{r|X_j=m}$에 관한 수식을 도출한다. 수식 (2)에서 링크 e_j에서의 트래픽 인입률 $\alpha_j(m)$을 계산하기 위해 조건부 확률 $B_{r|X_j=m}$의 값을 계산해야만 한다. $B_{r|X_j=m}$의 값을 얻기 위하여 경로 r을 다음의 세 부분 경로로 분할한다: 왼쪽 부분 경로 $(v_0 \rightarrow v_j)$, 링크 e_j, 오른쪽 부분 경로 $(v_{j+1} \rightarrow v_H)$. 왼쪽 부분 경로 $(v_0 \rightarrow v_j)$에서의 사용 가능한 파장의 개수를 x라 하고, 오른쪽 부분 경로 $(v_{j+1} \rightarrow v_H)$에서 사용 가능한 파장의 개수를 y라고 하자. 왼쪽 부분 경로 $(v_0 \rightarrow v_j)$와 오른쪽 부분 경로 $(v_{j+1} \rightarrow v_H)$에서 공통으로 사용 가능한 파장의 개수

www.dbpia.co.kr

를 z라고 정의한다. 경로 r이 불통이기 위해서는 세 부분 경로에서 공통으로 사용 가능한 파장이 존재하지 않아야 한다. 따라서,

$$B_{r|X_j=m}=\sum_{x=0}^{W}V_j^{-}(x)\sum_{y=0}^{W}V_{j+1}^{+}(y)\sum_{z=\max(0,x+y-W)}^{\min(x,y)}R(z|x,y)R(0|z,m). \quad (15)$$

다음으로 파장 변환기 조건부 불통 확률 $B_{r|Y_j=k}$를 유도한다. 링크 조건부 불통 확률과 같이, 경로 r을 세 개의 부분 경로로 분할한다: 왼쪽 부분 경로 $(v_0 \rightarrow e_{j-1})$, 파장 변환 노드 v_j, 오른쪽 부분 경로 $(e_j \rightarrow v_H)$. 왼쪽 부분 경로 $(v_0 \rightarrow e_{j-1})$에서의 사용 가능한 파장의 개수를 x, 오른쪽 부분 경로 $(e_j \rightarrow v_H)$에서 사용 가능한 파장의 개수를 z, 그리고, 파장 변환 노드 v_j에서 사용 가능한 파장 변환기의 개수를 y라고 정의하면,

$$\begin{aligned}B_{r|Y_j=1}&=\sum_{x=0}^{W}U_{j-1}^{-}(x)\sum_{j=0}^{W}U_j^{+}(z)R(0|x,z),\\ B_{r|Y_j=0}&=\sum_{x=0}^{W}U_{j-1}^{-}(x)\sum_{y=LB(x)}^{UB(x)}Q(y|x)\sum_{j=0}^{W}U_j^{+}(z)R(0|y,z).\end{aligned} \quad (16)$$

3.4 성능 분석 알고리듬

본 연구에서 성능 분석을 위해 수행하는 알고리듬은 아래와 같다.

STEP Ⅰ - 경로의 불통 확률 및 조건부 불통 확률들을 초기화한다. $Q(n|m)$의 값을 계산한다.

STEP Ⅱ - 수식 (2)-(4)를 이용하여 링크 e_j에서 입력부하 $\alpha_j(m)$을 계산하고, 사용 가능한 파장들의 개수에 관한 확률분포 $P_j(m)$을 계산한다.

STEP Ⅲ - 파장 변환 노드 v에 대하여 수식 (8)-(11)을 이용하여 영역 불통(δ_S, δ_C), 파장 변환기 풀의 용량불통 확률(γ)을 계산한다.

STEP Ⅳ - 수식 (12)-(14)를 이용하여 경로 r에 대해 불통 확률을 계산하고, 네트워크 평균 불통 확률 B를 계산한다.

STEP Ⅴ - 연속된 두 네트워크 평균 불통 확률이 미리 정의된 상수 값 η보다 작아지면 ($|1-B'/B| \le \eta$) 수행을 중단한다. 그렇지 않으면 STEP Ⅵ으로 이동한다.

STEP Ⅵ - 수식 (15), (16)을 이용하여 조건부 불통 확률값을 계산하고($B_{r|X_j=m}$, $B_{r|Y_j=k}$) STEP Ⅱ로 이동한다.

위의 알고리듬의 복잡도는 STEP Ⅳ에 의해 결정된다. 광통신망에서 가장 긴 경로의 홉 수를 H 라고 정의하면, 위의 성능 분석은 $O(N^2HW^3)$으로 이루어진다. 그런데, 이는 파장 변환기가 없는 경우의 수행 시간과 같은 수준으로 증가하므로, SPLWC 방식 파장 변환기의 성능을 계산하는데 필요로 하는 시간은 전체 알고리듬 수행 시간에 큰 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다.

Ⅳ. 파장 변환기의 효율적인 배치 알고리듬

본 장에서는 다양한 파장 변환 방식들을 비교하기 위한 지표로 네트워크 파장 변환 비용을 제시하고, SPLWC 방식의 파장 변환기의 최적 배치 문제를 해결하는 알고리듬을 제시한다.

4.1 네트워크 파장 변환 비용

기존에 알려진 파장 변환기 배치 문제는 광통신망의 파장 변환 능력이 주어졌을 때 불통 확률을 최소화하는 배치를 결정한다.[7,10-15] 반면, [16]에서는 특정한 불통 확률(B_{CP})을 만족하기 위한 최소의 파장 변환 노드의 개수를 결정하는 문제를 고려하였다. 여기에서 B_{CP}는 가중치 α를 기반으로 NWC와 FWC 파장 변환 방식 불통 확률 값들의 기하급수적 내분점을 나타낸다.

$$B_{CP}=(B_{NWC})^{1-\alpha}(B_{FWC})^{\alpha}. \quad (17)$$

여기에서 α 값이 증가함에 따라 광통신망의 불통 확률은 NWC 방식의 불통 확률에서 FWC 방식의 불통 확률로 이동하게 된다.

그런데, 전자의 성능 분석 지표를 사용하여 그림 1의 다양한 파장 변환 방식들을 비교하고자 할 경우, 불통 확률을 도출하기 위한 공정한 실험 조건을 설정하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 위의 후자 성능 지표를 고려하기로 한다. 그런데, [16]에서는 부분 파장 변환을 고려하지 않았기 때문에, 서로 다른 파장 변환 방식들의 성능을 객관적으로 비교하지 못한다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위한 새로운 성능 지표로 네트워크 파장 변환 비용(Network-wide

www.dbpia.co.kr

Conversion Cost; NCC)을 정의하여 모든 파장 변환 방식들을 비교하기로 한다.

$$NCC = \sum_{i=1}^{N} n(i) \times d(i), \tag{18}$$

여기에서 $n(i)$는 노드 i에 있는 파장 변환기의 개수를 나타내고, $d(i)$는 그 파장 변환기들의 파장 변환 영역을 나타낸다. NCC는 불통 확률 성능 B_{CP}를 만족하기 위해 필요로 하는 파장 변환기의 비용을 나타내는 성능 지표이다. 또한, NCC는 소자/구조/통신망 수준의 다양한 파장 변환 방식들의 성능을 객관적으로 비교할 수 있는 정량적 기준이 된다.

4.2 파장 변환기 배치 알고리즘

본 절에서는 SPLWC 파장 변환 방식 광통신망에서 파장 변환기 배치 문제를 해결하기 위한 순차적 파장 변환기 배치 알고리즘을 제시한다. 제시하는 알고리즘에서 불통 성능 조건 B_{CP}를 만족하는 최소의 파장 변환 영역(d)을 우선 결정한다. 그 후, 파장 변환 능력이 없는 광통신망에서 시작하여, 각 노드에서의 용량 불통으로 인해 손실되는 입력 부하를 계산하고, 가장 큰 용량 불통 입력 부하를 가지는 노드에 한 개의 파장 변환기를 추가하는 과정을 계속해서 반복한다. 아래에서 제시하는 파장 변환기 배치 알고리듬은 3장의 성능분석 모형을 기반으로 설계하였다.

STEP I - LWC 방식의 파장 변환 방식을 가정하고 $d=0$에서부터 순차적으로 d 값을 증가시키면서 불통 확률 B가 B_{CP}보다 작아지는 최소의 d 값을 구한다.

STEP II - SPLWC 방식의 파장 변환 방식을 가정하고, 모든 노드에 파장 변환이 없는 상태를 가정한다. ($n(i)=0, \forall i$)

STEP III - 3장에서 제시한 성능분석 모형을 기반으로 계산된 광통신망 불통 확률 B와 불통 확률의 상한값 B_{CP}를 비교한다. $B < B_{CP}$인 경우 파장 변환기 배치 알고리듬을 종료한다. 그 이외의 경우에는 STEP IV로 이동한다.

STEP IV - 각 노드에서 용량 불통으로 인한 입력 부하 $\beta\gamma$값을 계산하고, 그 중 가장 큰 값을 가지는 노드 i^*의 파장 변환기 풀에 파장 변환기를 하나 추가하고 STEP III으로 이동한다. ($n(i^*) = n(i^*)+1$)

위의 파장 변환기 배치 알고리듬의 성능은 SWC, PWC, LWC 등의 다른 파장 변환 방식의 배치 알고리듬으로 쉽게 확장할 수 있는 장점이 있다. 5 장에서는 실험을 통해 다양한 파장 변환 방식의 성능을 정량적으로 비교한다.

V. 실험 및 성능 평가

본 장에서는 3 장의 성능 분석 모형의 정확도를 검증하고, 다양한 파장 변환 방식들의 네트워크 파장 변환 비용을 정량적으로 비교한다. 실험 결과는 그림 4에서 나타낸 바와 같이 19개의 노드와 39개의 링크로 구성된 유럽 광통신망 형상을 기반으로 수행하였다. 모든 실험에서 각각의 링크는 32개의 파장을 지원한다. ($W=32$) 임의의 노드에 인입되는 호들의 부하는 ρ로 주어지고, 각각의 호는 동일한 확률로 ($N-1$)개의 목적지 노드들과 연결을 설정한다.

5.1 성능 분석 모형의 검증

본 절에서는 광통신망의 불통 확률에 관한 성능 분석 모형의 정확도를 살펴본다. 성능 검증을 위하여 SPLWC 방식의 파장 변환 실험 환경을 다음과 같이 설정한다. 그림 4에서 PAR, AMS, BER, MIL 노드들은 파장 변환 영역이 1인 ($d=1$) SPLWC 방식의 파장 변환기 10개로 구성된 파장 변환 노드를 나타내며, 그 이외의 노드들은 파장 선택 노드를 나타낸다. 성능 분석 모형을 검증하기 위해 개발한 이벤트 기반의 광통신망 시뮬레이터는 10^7개의 호를 발생시킬 때까지 시뮬레이션을 수행한다. 성능 분석 모형의 경우, 통신망의 불통 확률에 대한 연속된 두 계산 값의 오차 비율이 10^{-3} 이내로 수렴할 때까지 수행한다. ($\eta = 10^{-3}$)

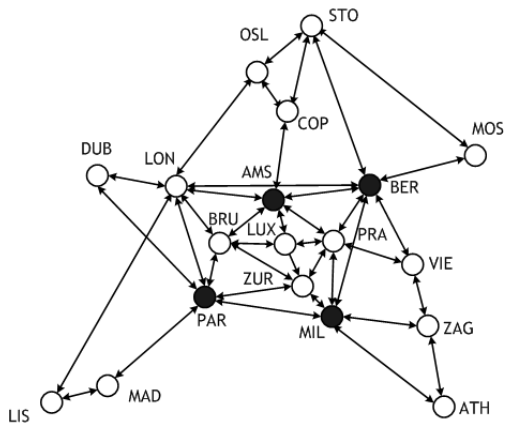

그림 4. 유럽 광통신망 형상

www.dbpia.co.kr

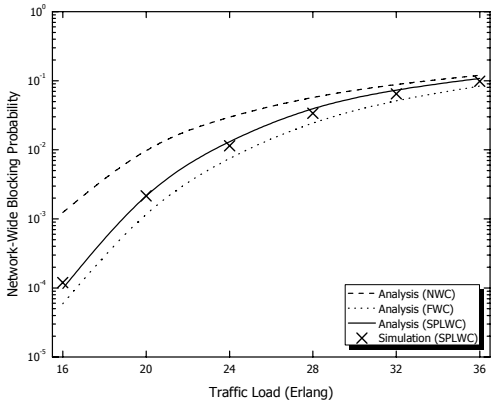

그림 5. 입력 부하에 따른 네트워크 불통확률

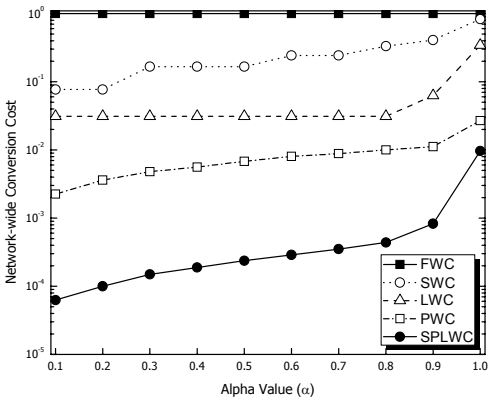

그림 6. α 값에 따른 네트워크 파장 변환 비용

그림 5는 노드 별 입력 부하에 따른 SPLWC 방식 광통신망의 불통 확률에 대한 성능 분석 및 시뮬레이션 결과를 비교하였다. SPLWC 방식의 결과 값들의 적절성을 검증하기 위해, 각 입력 부하에 대한 불통 확률의 상한 값인 파장 변환기를 사용하지 않는 경우(NWC) 성능 분석 결과와 하한 값인 모든 노드가 완벽한 파장 변환 능력을 갖춘 경우(FWC)의 성능분석 결과도 함께 도시하였다. 그림을 통해 3장에서 제시하는 성능 분석 결과가 시뮬레이션 결과에 매우 근사함을 확인할 수 있다. SPLWC 기반의 광통신망의 불통 확률은 입력부하가 낮은 경우 모든 노드가 완벽한 파장 변환 능력을 갖추고 있을 때의 불통 확률에 가깝고, 입력 부하가 증가함에 따라 파장 변환 능력이 없는 경우의 불통확률에 가까워짐을 관찰할 수 있다. 또한, 모든 범위의 입력 부하 값에 대하여 성능 분석 모형은 SPLWC 기반의 광통신망 불통 확률을 정확하게 근사함을 확인할 수 있다. 다음 절에서는 성능분석 모형을 기반으로 파장 변환기의 효율적인 배치 알고리듬의 성능을 검증하기로 한다.

5.2 다양한 파장 변환 방식들의 파장 변환 비용

본 절에서는 α 값에 의해 결정되는 불통 확률 B_{CP}를 만족하기 위해서 필요로 하는 광통신망의 파장 변환 비용(NCC)을 비교한다. 본 논문에서는 SPLWC 파장 변환 방식과 기존의 FWC, SWC, PWC, 그리고 LWC 파장 변환 방식을 비교하기로 한다.

그림 6에서는 노드 당 입력 부하(ρ)가 24일 때, 다양한 파장 변환 방식들의 파장 변환 비용과 FWC 방식의 파장 변환 비용의 비율을 나타낸다. 그림에서 FWC 방식의 경우, α 값에 무관하게 항상 1의 값을 가진다. 그림 1에서 보인 서로 다른 세 축의 파장 변환 방식들은 FWC 방식보다는 작은 파장 변환 비용으로 동일한 불통 성능을 얻을 수 있음을 나타낸다. 노드 단위로 파장 변환 능력을 할당하는 SWC 방식이 가장 큰 파장 변환 비용을 가지고, 그 다음으로 파장 변환 영역을 변경하는 LWC 방식이 그 다음으로 큰 파장 변환 비용을 가진다. 그림 1의 다른 축과 비교했을 때, 구조적 수준에서의 중도적 파장 변환 방식인 PWC 방식이 가장 낮은 파장 변환 비용을 가진다. 이러한 결과는 PWC 방식의 자원 할당을 수행하는 단위(granularity)가 전영역 파장 변환기 한 개이므로 가장 세밀하게 자원을 할당할 수 있기 때문이다. 또한, 본 논문에서 제시하는 SPLWC 방식의 파장 변환 방식은 위의 세 가지 특징을 모두 결합하여 파장 변환을 수행하므로 가장 낮은 파장 변환 비용으로 불통 확률 조건 B_{CP}를 만족함을 알 수 있다. 구체적으로 SPLWC 방식은 PWC 방식과 비교할 때, $\alpha < 0.9$인 영역에서 약 30배 정도 더 낮은 파장 변환 비용만을 필요로 함을 알 수 있다. 결과적으로, 본 논문에서 제시하는 SPLWC 방식이 가장 효율적인 파장 변환 방식임을 확인할 수 있다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 산재-부분-제한영역 파장 변환 방식의 파장분할다중화 광통신망의 불통 확률을 정확히 예측할 수 있는 성능분석 모형을 제시하였고, 이를 기반으로 효율적인 파장 변환기 배치 알고리듬을 제안하였다. 본 논문의 성능 분석 모형은 파장 변환기에서 발생하는 영역 불통과 용량 불통에 관한 최초의 수학적 모형을 제시하였다. 또한, 제시하는 SPLWC 파장

www.dbpia.co.kr

변환 방식은 기존의 알려진 다양한 파장 변환 방식을 효율적으로 결합하여 가장 뛰어난 성능을 나타냄을 보였다. 파장 변환기의 비용이 상당히 고가인 점을 감안할 때, SPLWC 파장 변환 방식은 광통신망 구축 비용을 획기적으로 줄이는데 기여할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

〔1〕 R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, “Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks,” *IEEE Trans. Networking*, Vol.3, No.5, pp.489-500, Oct. 1995.

〔2〕 R. A. Barry and P. A. Humblet, “Models of Blocking Probability in All-Optical Networks with and without Wavelength Changers,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.14, No.5, pp.858-867, June 1996.

〔3〕 A. Birman, “Computing Approximate Blocking Probabilities for a Class of All-Optical Networks,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.14, No.5, June 1996.

〔4〕 T. Tripathi and K. N. Sivarajan, “Computing Approximate Blocking Probabilities in Wavelength Routed All-Optical Networks with Limited-Range Wavelength Conversion,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.18, No.10, Oct. 2000.

〔5〕 V. Sharma and E. A. Varvarigos, “An Analysis of Limited Wavelength Translation in Regular All-Optical WDM Networks,” *IEEE/OSA J. Lightwave TechNo.*, Vol.18, No.12, pp.1606-1619, Dec. 2000.

〔6〕 K.-C. Lee and V. O. K. Li, “A Wavelength-Convertible Optical Network,” *IEEE/OSA J. of Lightwave TechNo.*, Vol.11, No.5/6, pp.962-970, May/June 1993.

〔7〕 G. Xiao and Y.-W. Leung, “Algorithms for Allocating Wavelength Converters in All-Optical Networks,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.7, No.4, pp.545-557, Aug. 1999.

〔8〕 S. Subramaniam, M. Azizoglu, and A. K. Somani, “All-Optical Networks with Sparse Wavelength Conversion,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.4, No.4, pp.544-557, Aug. 1996.

〔9〕 M. E. Houmaidi and M. A. Bassiouni, “Dependency-based analytical model for computing connection blocking rate and its application in the sparse placement of optical converters,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol.54, No.1, pp.159-168, Jan. 2006.

〔10〕 S. Subramaniam, M. Azizoglu, and A. K. Somani, “On Optimal Converter Placement in Wavelength-Routed Networks,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.7, No.5, pp.754-766, Oct. 1999.

〔11〕 S. Gao, X. Jia, C. Huang, and D.-Z. Du, “An Optimization Model for Placement of Wavelength Converters to Minimize Blocking Probability in WDM Networks,” *IEEE/OSA J. of Lightwave TechNo.*, Vol.21, No.3, March 2003.

〔12〕 A. S. Arora and S. Subramaniam, “Converter Placement in Wavelength Routing Mesh Topologies,” in *Proc. IEEE ICC*, June 2000, pp.1282-1288.

〔13〕 X. Chu, B. Li, and I. Chlamtac, “Wavelength Converter Placement Under Different RWA Algorithms in Wavelength-Routed All-Optical Networks,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol.51, No.4, pp.607-617, Apr. 2003.

〔14〕 X. Chu, J. Liu, and Z. Zhang, “Analysis of Sparse-Partial Wavelength Conversion in Wavelength-Routed WDM Networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM’04*, Apr. 2004.

〔15〕 K. R. Venugopal, M. Shivakumar and P. S. Kumar, “A Heuristic for Placement of Limited Range Wavelength Converters in All-Optical Networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM’99*, March 1999, pp.908-915.

〔16〕 H.-Y. Jeong and S.-W. Seo, “A Binary (0-1) Linear Program (BLP) Formulation for the Placement of Limited-Range Wavelength Converters in Wavelength-Routed WDM Networks,” *IEEE/OSA J. Lightwave TechNo.*, Vol.23, No.10, pp.3076-3091, Oct. 2005.

www.dbpia.co.kr

정 한 유 (Han-You Jeong) 종신회원

1998년 2월 서울대학교 전기공학부
2000년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2005년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2008년 1월~8월 미네소타대학 박사후 연구원
2008년 9월~현재 부산대학교 차세대물류IT기술연구사업단 조교수
<관심분야> 무선 메쉬 네트워크, 광통신망, 차량 통신망

서 승 우 (Seung-Woo Seo) 종신회원

1987년 2월 서울대학교 전기공학과
1989년 2월 서울대학교 전기공학과 석사
1993년 12월 펜실베니아주립대학 전산기공학과 박사
1997년 9월~현재 서울대학교 전기공학부 교수
<관심분야> 네트워크 보안, 무선 네트워크 설계, 스위칭 및 라우팅

최 윤 호 (Yoon-Ho Choi) 정회원

2002년 8월 경북대학교 전자전기공학부 졸업
2004년 8월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2008년 8월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2009년 펜실베니아주립대학 박사후연구원
2010년 3월~현재 삼성전자 DMC연구소
<관심분야> 네트워크 보안, 스위칭 및 라우팅

www.dbpia.co.kr