

파장 분할 다중화 (WDM) 망을 위한 적응 분산 파장 라우팅 알고리즘

정회원 이 쌍수*, 정한유*, 서승우*

An Adaptive Distributed Wavelength Routing Algorithm in WDM Networks

Ssang-soo Lee*, Han-you Jeong*, Seung-woo Seo* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 파장 분할 다중화 (WDM) 망에서 중앙 집중식 제어 방식을 연구해 왔던 기존의 논문과는 달리 분산 제어 방식으로 동작하는 휴리스틱 파장 라우팅 알고리즘을 제안한다. 동적 트래픽 요구에 적절히 대응하기 위해 파장의 일부를 사용하여 필요한 연결성을 가지는 불완전 가상 망 형상을 효율적으로 설계하는 방식을 제안한다. 이러한 연결성은 하나 이상의 광 경로를 경유하여 임의의 시작 노드에서 임의의 목적 노드로 데이터 전송을 가능하게 한다. 또한, 불완전 가상 망 형상을 바탕으로 동적 트래픽 요구에 적응하는 고속 분산 파장 라우팅 알고리즘을 제안하고 파장의 평균 사용률에 대한 일반적인 인계 값을 분석한다. 끝으로, NSFNET[1]과 동적 핫-스팟 (hot-spot) 트래픽 모델을 사용하는 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 성능이 고정된 최단 경로 파장 라우팅 알고리즘보다 더 좋을 것을 보이고, 블로킹 (blocking) 성능, 제어 트래픽 부하, 그리고 계산상의 복잡도의 관점에서 분산 파장 분할 다중화 망을 위한 효율적인 파장 라우팅 알고리즘임을 보인다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a heuristic wavelength routing algorithm for IP datagrams in WDM (Wavelength-Division Multiplexing) networks which operates in a distributed manner, while most previous works have focused centralized algorithms. We first present an efficient construction method for a loose virtual topology with a connectivity property, which reserves a few wavelength to cope with dynamic traffic demands properly. This connectivity property assures that data from any source node could reach any destination node by hopping one or multiple lightpaths. We then develop a high-speed distributed wavelength routing algorithm adaptive to dynamic traffic demands by using such a loose virtual topology and derive the general bounds on average utilization in the distributed wavelength routing algorithms. Finally, we show that the performance of the proposed algorithm is better than that of the FSP (Fixed Shortest-Path) wavelength routing algorithm through simulation using the NSFNET[1] and a dynamic hot-spot traffic model, and that the algorithm is a good candidate in distributed WDM networks in terms of the blocking performance, the control traffic overhead, and the computation complexity.

* 서울대학교 전기공학부(secretin@wm.lge.co.kr, sseo@snu.ac.kr, bururu2@snu.ac.kr),
논문번호 : 99486-1207, 접수일자 : 1999년 12월 7일

* 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(97-0100-04-01-3) 지원으로 수행되었음

I. 서론

인터넷은 망 층의 라우팅 프로토콜로써 IP를 사용하며, 지리적으로 분산되어 있는 많은 하위 망들을 하나의 상위 망으로 연결한다. IP는 이러한 상위 망에서 임의의 시작 (source) 노드로부터 임의의 목적 (destination) 노드로 데이터를 전송하는 서비스를 제공한다. 최근에 화상 전화, 화상 회의, 그리고 주문형 비디오 (VOD) 등과 같은 멀티미디어 서비스가 보급됨에 따라 IP 트래픽의 양이 폭발적으로 증가하고 있다. 전체 IP 트래픽은 고속의 전송 및 스위칭 기술을 요구한다.

파장 분할 다중화 (WDM)는 하나의 광 섬유에 전송 속도가 각각 초당 수 기가 비트인 여러 개의 파장을 전송 채널로 사용하므로 광대역 장거리 망에 사용되는 유망한 기술이다. 파장 분할 다중화 망에서 광 경로 (lightpath)는 각 노드의 파장 라우팅 기능을 가진 광 스위치를 사용함으로써 설정된다. 즉, 파장 분할 다중화 망은 가상 망 형상 (virtual topology)이라고 하는 임의의 광 경로 구조가 주어진 물리적 망 형상 (physical topology)에서 구현될 수 있도록 파장 분기/결합 다중화기 (add/drop multiplexer) 와 광 회선 분배기 (cross-connect)를 사용한다^{[1],[2]}. 물리적 망 형상과 임의의 시작 노드에서 임의의 목적 노드까지의 평균 트래픽 양을 표시하는 망의 평균 트래픽 행렬이 주어지면, 효율적인 가상 망 형상을 설계하는 것은 필수적이며 파장 분할 다중화 망의 성능에 많은 영향을 미친다. 가상 망 형상을 설계하는 문제는 많이 연구되었고, 여러 가지 알고리즘이 제안되었다^{[3]-[8]}.

지금까지 파장 분할 다중화 기술은 주로 회선 스위칭 (circuit-switching) 통신 망에서 물리적 전송 층으로 고려되어 왔다. 이것은 파장 분할 다중화 층이 전통적인 SONET/SDH 층으로부터 시작되는 종합적인 트래픽을 점 대점의 대용량 전송에 사용되는 것을 의미한다. 그러나 파장 분할 다중화 기술이 발전함에 따라 데이터 망에 사용되기 시작하였으며, IP 트래픽을 SONET/SDH 또는 ATM과 같은 중간 층을 사용하지 않고 파장 분할 다중화 층에서 직접 전송하는 방법이 연구되고 있다. 이러한 개념을 *IP over WDM*이라고 한다. *IP over WDM*의 초기 단계에서는 파장 분할 다중화 기술이 인접한 노드 사이의 광 전송이었으나, 광 다중화기와 광 스위치를 사용하여 진정한 광 네트워킹 방식으로 옮겨 갈 것

이다. 그러한 단계에서는 IP 트래픽이 물리적 망 형상이 아니라 가상 망 형상 위에서 목적 노드로 전달되기 때문에 효율적이고 유연한 가상 망 형상을 설계하는 것이 중요하다. 가상 망 형상은 라우팅 및 파장 할당 (Routing and Wavelength Assignment; RWA) 알고리즘에 의해 설계된다. 라우팅 및 파장 할당은 정적 (static) 라우팅 및 파장 할당과 동적 (dynamic) 라우팅 및 파장 할당으로 나누어지는데, 정적 라우팅 및 파장 할당은 평균 트래픽 행렬을 기준으로 망 동작 전에 미리 수행할 수 있으나 동적 라우팅 및 파장 할당은 동적 트래픽을 기준으로 망 동작 중에 수행된다. 본 논문에서는 가상 망 형상을 불완전 (loose) 가상 망 형상과 완전 (full) 가상 망 형상의 두 가지로 분류한다.

- 불완전 가상 망 형상 : 정적 라우팅 및 파장 할당 방식에 의해 사용 가능한 파장 중에서 일부 파장을 사용하여 설계되는 가상 망 형상이다. 불완전 가상 망 형상을 설계할 때 사용되지 않는 파장은 동적 라우팅 및 파장 할당 방식에 의해 변하는 트래픽 요구에 적응하여 광 경로를 설정하는데 사용된다. 본 논문에서는 정적 파장 할당 방식에 의해 설정되는 광 경로를 정적 광 경로라 정의하고 동적 라우팅 및 파장 할당 방식에 의해 설정되는 광 경로를 동적 광 경로라 정의한다.

- 완전 가상 망 형상 : 정적 라우팅 및 파장 할당 방식에 의해 사용 가능한 모든 파장을 사용하여 설계되는 가상 망 형상이다. 따라서, 완전 가상 망 형상은 정적 광 경로만을 가진다. 정적 라우팅 및 파장 할당 방식은 평균적인 트래픽 요구 값에 의존하므로 변하는 트래픽 요구에 적절한 대응을 하지 못한다.

불완전 가상 망 형상이 완전 가상 망 형상 보다 연결성은 더 좋지 않지만 가상 망 설계에 사용되지 않은 파장을 이용하여 변하는 트래픽에 적응하는 동적 광 경로를 설정하게 해 준다.

본 논문에서는 첫째, 불완전 가상 망 형상의 설계 방식에 대해 기술한다. 기존의 연구는 완전 가상 망 형상의 설계 방식에 관한 것이다^{[3]-[8]}. 제안된 방식은 시행착오 없이 적은 파장을 가지고 불완전 가상 망 형상을 효율적으로 설계한다. 둘째, 불완전 가상 망 형상을 사용하여 *IP over WDM*을 위한 고속 적용 파장 라우팅 알고리즘을 제안한다. 한편, IP

over WDM에서 불완전 가상 망 형상의 유용성은 [9]에 기술되어 있다. 기존의 연구는^{[3]-[8]} 주로 중앙 집중식 제어 방식의 파장 라우팅 알고리즘에 관한 것으로 수반하는 부하를 고려하지 않고 단지 블로킹 (blocking) 성능만을 언급해 왔다. 그러나 블로킹 성능과 관련된 부하 사이에 적절하게 절충하는 것은 망의 전체적인 성능을 개선하기 위해 필요하다. 제안된 알고리즘은 동적 라우팅이며 파장 분할 다중화 망에서 기존의 중앙 집중식 제어 방식과는 달리 분산적으로 실행된다. 물리적 망 형상에서 동적 광 경로를 라우팅할 때, 라우팅 노드는 트래픽 부하가 링크 사이에서 균형 있게 분산되어 파장의 재사용률이 증가하고 광 경로의 물리적 홉 (hop) 거리가 감소되도록 두 개의 후보 링크 중에서 한 링크를 선택한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제II 장에서는 불완전 가상 망 형상의 설계 방식을 기술한다. 제 III 장에서는 고속 적응 파장 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제 IV 장에서는 분산 파장 라우팅 알고리즘에서 파장의 사용률 (utilization)에 대한 일반적인 임계 값을 분석한다. 제 V 장에서는 NSFNET^[1]과 핫-스팟 (hot-spot) 트래픽 모델을 통해 파장의 평균 사용률, 파장의 재사용률 (reuse), 그리고 블로킹 확률에 대한 시뮬레이션 결과를 기술한다. 끝으로, 제 VI 장에서 결론을 맺는다.

II. 불완전 가상 망 형상 설계

기존의 파장 라우팅 알고리즘에서는^{[3]-[8]}, 모든 파장의 라우팅은 정적 라우팅 및 파장 할당 알고리즘을 사용하여 완전 가상 망 형상을 설계할 때 이미 고정되므로 동적 트래픽 요구에 적응하여 동작하지 않는다. 이 장에서는 성능 향상을 위해 변하는 트래픽 요구에 적응하여 동적 광 경로 설정이 가능한 불완전 가상 망 형상의 설계 방식을 제안한다. 불완전 가상 망 형상을 설계함에 있어 정상적인 데이터 전송을 위해 다음과 같은 연결성을 요구한다.

정의: 불완전 가상 망 형상은 임의의 시작 노드에서 하나 또는 다수의 광 경로를 통하여 임의의 목적 노드까지 연결되어 있다면 필요한 연결성을 가진다고 한다

위에서 정의된 연결성은 임의의 노드가 단일 홉 (hop) 또는 다중 홉을 거쳐 다른 모든 노드에 도달

하기 위한 망의 최소한의 요구 사항이다. 제안된 방식은 이러한 연결성을 가지는 불완전 가상 망 형상을 설계함에 있어 기존의 휴리스틱 (heuristic) 알고리즘 또는 LP, ILP, 그리고 MILP와 같은 최적 알고리즘^{[3]-[8]}보다 더 작은 파장을 요구한다는 점에서 효율적이다. 가상 망 형상 설계 방식을 요약하면 다음과 같다.

procedure VirtualConnect($\bar{\lambda}$)

```

count ← 1; /* count : 노드 수 변수 */
CS ← ∅; /* CS : 시작 노드 집합 */
while ( count ≤ N )
  If (count == N) d ← sinit;
  /* N번째 목적 노드 색인 ← sinit */
  else  $\bar{\lambda}_{s,d} \leftarrow \max(\bar{\lambda}_{s,d}(\in CS))$ ;
  end_if
  시작 노드에서 목적 노드까지 광 경로 설정;

  /* 정적 라우팅 및 파장 할당 */
   $\bar{\lambda}_{s,d} \leftarrow \bar{\lambda}_{s,d}$  - 위에서 설정된 광 경로의 전송 용량;
  CS ← CS ∪ {s};
  If ( count == 1 )
    sinit ← s; /* 초기의 시작 노드 색인 */
  end_if
  s ← d; /* 시작 노드 색인 갱신 */
  count ← count + 1;
end_while
call procedure MaxSingleHop (  $\bar{\lambda}$  )[1];
end_VirtualConnect
    
```

불완전 가상 망 형상을 설계하는 것은 두 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계에서는, 평균 트래픽 행렬 $\bar{\lambda}$ 과 파장 분할 다중화 망의 노드 수 N 이 주어지면, 프로시저 VirtualConnect는 우선 N 개의 광 경로만을 가지는 기본적인 불완전 가상 망 형상을 설계하기 위해 N 개의 시작/목적 노드 조합을 찾는다. 처음에는 평균 트래픽 행렬에서 가장 큰 값을 가지는 시작/목적 노드 조합의 트래픽 양 $\bar{\lambda}_{s,d}$ 을 찾아 내어 시작 노드 s 에서 목적 노드 d 까지 광 경로를 설정한다. 그러한 광 경로를 설정한 다음 이미 선택된 시작/목적 노드 조합의 트래픽 양 $\bar{\lambda}_{s,d}$ 을 설정된 광 경로의 전송 용량만큼 줄여서 평균 트래픽 행렬을 수정한다. 그 다음, 위에서 선택된 d 를 사용

하여 수정된 평균 트래픽 행렬의 d 행에서 가장 큰 값을 가지는 시작/목적 노드 조합의 트래픽 양 $\bar{\Lambda}_{s,d(\in CS)}$ 을 찾는다. 여기서, CS는 앞의 과정에서 선택되었던 모든 시작 노드의 집합으로 N 개의 광 경로만으로도 연결성을 보장하기 위해 두 번째에서 $N - 1$ 번째 선택될 목적 노드는 CS에 속하여서는 안된다. 그렇지 않다면, 일부 노드로 구성된 링 (ring) 구조가 발생하여 N 개의 광 경로만으로도 불완전 가상 망 형상이 필요한 연결성을 가질 수 없다. N 번째 시작/목적 노드 조합은 $N - 1$ 번째의 목적 노드가 시작 노드가 되고 첫 번째 시작 노드가 목적 노드가 되어 연결성을 가지는 기본적인 불완전 가상 망 형상은 모든 노드를 포함하는 단 방향 링 구조가 된다. 두 번째 단계에서는 단일 홉 트래픽을 최대화하는 기존의 MaxSingleHop을^[1] 사용하여 이미 설계된 기본적인 불완전 가상 망 형상에 추가로 필요한 만큼의 광 경로를 설정하여 점점 더 많은 광 경로로 이루어진 불완전 가상 망 형상을 설계한다.

기본적인 가상 망 형상을 설계할 때 N 개의 시작/목적 노드가 어떻게 선택되는지를 보이기 위한 예를 보인다. $N = 5$ 이고 평균 트래픽 행렬은 [Gbps] 단위로 다음과 같이 주어진다고 하자.

$$[\bar{\Lambda}_{s,d}] = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 & 3 & 5 \\ 3 & 0 & 5 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 6 & 4 \\ 2 & 7 & 3 & 0 & 2 \\ 4 & 1 & 3 & 2 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $\bar{\Lambda}_{s,d}$ 는 시작 노드 s 로부터 목적 노드 d 에 도달하는 평균 트래픽 양을 나타내며 평균 트래픽 행렬 $[\bar{\Lambda}_{s,d}]$ 의 s 번째 행과 d 번째 열에 해당하는 값이다. 그러면, $\max(\bar{\Lambda}_{s,d(\in CS)}) = \bar{\Lambda}_{4,2} = 7 \rightarrow \max(\bar{\Lambda}_{2,d(\in \{4\})}) = \bar{\Lambda}_{2,3} = 5 \rightarrow \max(\bar{\Lambda}_{3,d(\in \{2,4\})})$

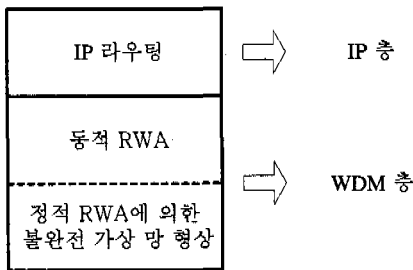


그림 1. 본 논문에서 사용되는 IP over WDM의 계층적 라우팅.

$= \bar{\Lambda}_{3,5} = 4 \rightarrow \max(\bar{\Lambda}_{5,d(\in \{2,3,4\})}) = \bar{\Lambda}_{5,1} = 4 \rightarrow \bar{\Lambda}_{1,4} (s_{init} = 4)$. 따라서, 파장 분할 다중화 망의 노드 수와 같은 5개의 정적 광 경로가 $(s,d) \in \{(4,2), (2,3), (3,5), (5,1), (1,4)\}$ 인 시작 노드 s 로부터 목적 노드 d 까지 설정된다.

일반적으로 불완전 가상 망 형상이 완전 가상 망 형상에 가까워질수록 설계할 때 사용되는 파장의 수는 증가한다.

정의: NVTD(Normalized Virtual Topology Density) - 완전 가상 망 형상의 정적 광 경로의 수에 대한 불완전 가상 망 형상의 정적 광 경로 수의 비율이다.

NVTD는 제 V 장의 시뮬레이션 결과를 기술할 때 가상 망 형상의 불완전 정도를 나타내는데 사용된다.

III. 적응 파장 라우팅

본 논문에서 사용되는 IP over WDM을 위한 계층적 라우팅은 그림 1과 같이 세 부분으로 나누어진다. 첫째, 시작/목적 노드 조합 사이에 트래픽의 요구가 생기면, IP 라우팅 알고리즘은 가상 망 형상 위에서 라우팅 경로를 정한다. 둘째, 그 경로 위에 있는 목적 노드를 제외한 각 노드는 불완전 가상 망 형상 설계 시 이미 설정되어 있는 정적 광 경로의 실제 사용 여부를 조사한다. 셋째, 정적 광 경로가 이미 사용되고 있어서 이용할 수 없을 경우는 정적 라우팅 및 파장 할당에 의해 이미 설계된 불완전 가상 망 형상을 바꾸지 않도록 동적 라우팅 및 파장 할당에 의해 동적 광 경로를 추가로 설정하여 이용한다.

본 논문에서는 파장 변환기가 있는 분산 파장 분할 다중화 망을 위한 고속 적응 파장 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 망의 성능을 좋게 하기 위해 링크 선택 함수를 통하여 두 개의 제어 가능한 요소인 각 링크의 파장 사용률과 광 경로의 물리적 홉 거리를 고려하여 광 경로를 라우팅한다. 그러한 라우팅 경로는 트래픽 부하가 각 링크 사이에서 균형되게 분산시키고 물리적 홉 거리를 짧게 하여 망에서 파장의 재사용을 높인다. 제안된 알고리즘은 변하는 트래픽의 요구에 적응하여 동적 광 경로를 설정하기 위해 몇 개의 파장을 사용하지 않고 남겨 둔 불완전 가상 망 형상을 사용

한다. 알고리즘을 정형화하기 위해 몇 개의 용어를 정의한다. 노드 N_i 와 노드 N_j 가 각각 설정하고자 하는 동적 광 경로의 시작 노드와 끝 노드라고 하고 노드 N_k 를 노드 N_i 와 노드 N_j 사이에 있는 라우팅 노드라고 하자.

• $C_1(k, j), C_2(k, j)$: $C_1(k, j)$ 는 물리적 망 형상에서 노드 N_k 에서 노드 N_j 까지의 최단 경로 위에 있고 노드 N_k 에 인접한 노드 색인이다. $C_2(k, j)$ 는 노드 N_k 에서 $C_1(k, j)$ 까지의 링크가 제거된 수정된 물리적 망 형상에서 노드 N_k 에서 노드 N_j 까지의 최단 경로 위에 있고 노드 N_k 에 인접한 노드 색인이다.

• $I(k, C_1(k, j)), I(k, C_2(k, j))$: $I(k, C_1(k, j))$ 는 노드 N_k 에서 노드 $C_1(k, j)$ 까지의 링크 위에서 사용되지 않는 파장의 집합이다. $I(k, C_2(k, j))$ 는 노드 N_k 에서 노드 $C_2(k, j)$ 까지의 링크 위에서 사용되지 않는 파장의 집합이다. 한편, 1·1는 해당 집합에 속하는 파장의 수를 나타낸다.

• $D_1(k, j), D_2(k, j)$: $D_1(k, j)$ 는 노드 $C_1(k, j)$ 을 지나가는 노드 N_k 에서 노드 N_j 까지의 최단 경로 위에 있는 링크의 수이다. $D_2(k, j)$ 는 노드 $C_2(k, j)$ 를 지나가는 노드 N_k 에서 노드 N_j 까지의 최단 경로 위에 있는 링크의 수이다.

노드 N_k 는 두 개의 노드 $C_1(k, j), C_2(k, j)$ 중에서 파장의 사용률과 광 경로의 물리적 홉 거리의 관점에서 한 노드를 선택한다. 즉, $|I(k, C_1(k, j))|$ 이 클수록 블로킹 성능은 더 좋다. 따라서, 파장의 사용률의 관점에서 노드 $C_1(k, j)$ 와 노드 $C_2(k, j)$ 중에서 어느 것이 유리한지를 알 수 있다. 유사하게 $D_1(k, j)$ 가 클수록 라우팅 되고 있는 광 경로의 블로킹 성능은 나빠진다. 그러므로, 두 개의 블로킹 성능 요소를 고려한 다음 관계식이 만족하면 제안된 알고리즘은 노드 $C_1(k, j)$ 를 경유하여 광 경로를 라우팅하고, 그렇지 않다면 노드 $C_2(k, j)$ 를 경유하여 라우팅한다.

$$\frac{I(k, C_1(k, j))}{I(k, C_2(k, j))} \geq \frac{D_1(k, j)}{D_2(k, j)} \quad (2)$$

위의 식에서 분모가 0인 경우를 고려하여 양변에

$|I(k, C_2(k, j))| \cdot D_2(k, j)$ 을 곱하여 다음과 같이 링크 선택 함수 F_k 를 정의한다.

$$F_k = \frac{|I(k, C_1(k, j))| \cdot D_2(k, j)}{|I(k, C_2(k, j))| \cdot D_1(k, j)} \quad (3)$$

따라서, $F_k \geq 0$ 면, 노드 N_k 는 노드 $C_1(k, j)$ 를 선택하고 그렇지 않으면, 노드 $C_2(k, j)$ 를 선택한다. 즉, F_k 는 파장의 사용률과 광 경로의 물리적인 홉 거리를 같은 비중으로 고려한다. 만약, 노드 N_k 에서 나가는 링크의 수 (out-degree)가 1이면, $C_1(k, j)$ 과 $C_2(k, j)$ 은 같으며 이 경우는 링크 선택 함수를 사용할 필요가 없다. 제안된 알고리즘을 사용하여 동적 라우팅 및 파장 할당 방식을 요약하면 다음과 같다.

- 1) $k \leftarrow i$; /* k : 현재 라우팅 노드의 색인, i : 시작 노드의 색인 */
- 2) 노드 N_k 에서 F_k 를 내부적으로 계산한다;
- 3) $F_k \geq 0$ 면 $C_1(k, j)$ 를 선택하고, 그렇지 않으면 $C_2(k, j)$ 를 선택한다.
- 4) 선택된 노드의 색인이 목적 노드의 색인 j 와 같다면, 동적 광 경로 위의 각 링크에 사용되지 않는 파장을 인증 (acknowledge) 동작 동안에 설정한다. 선택된 노드의 색인이 목적 노드의 색인 j 와 같지 않다면, 위의 단계 2) ~ 4)를 반복한다.

제안된 알고리즘에 있어서 라우팅 경로가 무한히 반복되는 상태를 방지하기 위해 광 경로를 라우팅 할 때는 같은 노드가 두 번 이상 경유되지 않도록 한다. 따라서, 계산상의 복잡도는 $O(N)$ 의 값을 가진다. 광 경로가 지나가는 한 노드가 선택되면, 그 노드가 새로운 라우팅 노드로 갱신되고 라우팅 노드가 물리적 망 형상에서 라우팅되는 동적 광 경로의 끝 노드와 같게 될 때까지 단계 2) ~ 4)을 반복해서 실행한다. 이리하여, 동적 광 경로의 물리적 홉 거리가 h 라고 하면 제안된 알고리즘은 물리적 망 형상에서 $O(2^h)$ 만큼 많은 경로 중에서 라우팅 경로를 찾는다. 라우팅 시, 고려되는 경로의 수가 증가함에 따라 성능 개선의 효과는 점점 줄어들어 경로의 수가 어느 정도가 되면 성능은 거의 포화 상태가 된다^[10]. 따라서, 제안된 알고리즘에서 고려되는 광 경로의 수 $O(2^h)$ 는 성능 향상을 위해 충분하다.

일반적으로, 분산 휴리스틱 알고리즘과 비교하여 볼 때, 중앙 집중식 휴리스틱 알고리즘은 최적 해에 더 가까운 값을 구할 수 있지만, 하나의 제어 노드(supervisory node)가 전체 망의 상태에 정보를 관리해야 하므로 다른 노드와의 정보 교환을 위해서 훨씬 더 큰 부하를 추가적으로 야기한다. 또한, 노드의 수가 많아질수록 계산상의 복잡도가 크기 때문에 망을 고속으로 제어하는데 제약이 된다. 제안된 분산 알고리즘에서는 각 노드 N_k 가 초기에 각 노드 N_j ($1 \leq j \leq M$)에 대해 $C_1(k, j)$, $C_2(k, j)$, $I(k, C_1(k, j))$, $I(k, C_2(k, j))$, $D_1(k, j)$ 그리고 $D_2(k, j)$ 를 내부 메모리에 저장하며, 동작 중에는 다른 노드와 무관하게 $I(k, C_1(k, j))$ 와 $I(k, C_2(k, j))$ 를 갱신한다. 그러므로, 동적 광 경로를 설정함에 있어서 작은 제어 트래픽 부하를 가지고 동적 트래픽 요구에 적응하여 고속으로 분산 라우팅을 수행할 수 있다.

그림 2를 통해 동작 예를 보인다. 각 링크 위에서 사용할 수 있는 모든 파장의 수를 4라고 하자. 그러면, 초기의 라우팅 노드는 시작 노드인 N_i 가 된다. 또한, 정의에 의해 $C_1(k, j) = 8$, $C_2(k, j) = 6$, $I(k, C_1(k, j)) = 1$, $I(k, C_2(k, j)) = 3$, $D_1(k, j) = 2$, 그리고 $D_2(k, j) = 3$ 이다. 따라서, $F_k = -3 < 0$ 이기 때문에 N_i 는 $N_8 (= C_1(k, j))$ 과 $N_6 (= C_2(k, j))$ 중에서 N_6 를 선택한다. 이제 라우팅 노드는 N_6 으로 갱신되어 위의 과정과 유사하게 링크 선택 함수 F_k 를 계산하여 두 개의 인접한 노드 중에서 하나의 노드를 선택한다. 라우팅 노드가 N_j 와 같게 될 때까지 위의 라우팅 과정을 반복함으로써, 동적 광 경로의 라우팅은 끝나고 파장 할당을 실행된다^[10],^[11]. 다음 장에서는 분산 파장 라우팅 알고리즘에서 파장의 평균 사용률에 대한 일반적인 임계 값을 분석한다.

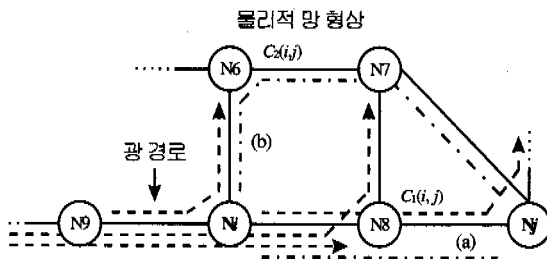


그림 2. 제안되는 파장 라우팅 알고리즘의 동작

IV. 일반적인 임계 값 분석

이 장에서는 라우팅 노드에서 k 개의 링크 중에서 하나의 링크를 선택하는 분산 파장 라우팅 알고리즘에서 라우팅 경로 위에 있는 링크에서 파장의 평균 사용률에 대한 일반적인 임계 값을 분석한다. 파장 분할 다중화 망에 있는 모든 노드는 파장 변환 기능이 있다고 가정하자. 이러한 분석은 동적 광 경로의 블로킹 확률은 파장의 평균 사용률이 크면 클수록 커진다는 결과에 바탕으로 한다^[11],^[12]. ρ_u 를 파장 분할 다중화 망의 임의의 링크 위에서 파장의 평균 사용률이라 정의하고, ρ 를 제안된 분산 파장 라우팅 알고리즘에 의해 라우팅되는 경로 위에 있는 링크에서 파장의 평균 사용률이라 정의한다. ρ_u 는 고정된 최단 경로 파장 라우팅 알고리즘과 같이 동적 광 경로를 선택할 때, 트래픽 부하의 균형된 분산을 고려하지 않는 파장 라우팅 알고리즘에 의해 라우팅되는 경로 위에 있는 링크에서 파장의 평균 사용률이다. 따라서, ρ 의 상위 임계 값은 ρ_u 이다.

하위 임계 값을 얻기 위해 앞에서 기술된 링크 선택 함수에서 물리적 홉 거리를 무시한다. 즉, 라우팅 노드는 물리적 홉 거리와는 무관하게 k 개의 링크 중에서 사용되고 있는 파장의 수가 가장 작은 링크를 선택하여 동적 광 경로가 지나가게 한다. 이러한 접근 방식은 임의의 물리적 망 형상에서 물리적 홉 거리를 일반적으로 정형화하는 것이 어렵기 때문이다. 임의의 변수 n_i ($1 \leq i \leq k$)와 임의의 변수 n_r 을 다음과 같이 정의한다. n_i 는 라우팅 노드에서 고려되는 인접한 링크 중에서 i 번째 링크 위에서 사용되고 있는 파장의 수이고, n_r 은 라우팅 노드에서 링크 선택 함수에 의해 선택된 링크 위에서 사용되고 있는 파장의 수라고 정의한다. 또한, 하나의 링크 위에서 하나의 파장 사용률은 다른 링크와 다른 파장의 상태와 독립적으로 분포한다고 가정한다. 파장 분할 다중화 망에서 허용되는 모든 파장의 수를 W 라고 하면, n_r 은 다음과 같이 주어진다.

$$n_r = \min[n_1, n_2, \dots, n_k] \tag{4}$$

평균 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E(n_i) &= \sum_{n=1}^W n \cdot P_{n_i}(n) \\ &= \sum_{n=1}^W n \cdot \binom{W}{n} \rho_u^n (1-\rho_u)^{W-n} \\ &= \rho_u W \end{aligned} \tag{5}$$

$$E(n_r) = \sum_{n=1}^W n \cdot P_{n_r}(n) = \rho_l W \quad (6)$$

여기서, $P_{n_r}(n) = \Pr(n_i=n)$, $P_n(n) = \Pr(n_r=n)$ 이고 ρ_l 은 ρ 의 하위 임계 값이다. 이리 하여, ρ_l 는 $E(n_r)$ 로부터 구할 수 있다. 한편,

$$E(n_r) = \left. \frac{d\Phi(z)}{dz} \right|_{z=1} \quad (7)$$

여기서, $\Phi(z)$ 는 $\Pr(n_r=n)$ 의 특성 (characteristic) 함수이고 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi(z) = \sum_{n=0}^W P_{n_r}(n) \cdot z^n \quad (8)$$

n_r 의 정의에 의해서,

$$P_{n_r}(n) = \Pi_{i=1}^k \Pr(n_i \geq n) - \Pi_{i=1}^k \Pr(n_i \geq n+1) \quad (9)$$

이제, $f(n)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$f(n) = \begin{cases} \Pr(n_i \geq n), & 0 \leq n \leq W \\ 0, & n > W \end{cases} \quad (10)$$

그러면,

$$\Phi(z) = \sum_{n=0}^W ([f(n)]^k - [f(n+1)]^k) \cdot z^n \quad (11)$$

이리하여, ρ 의 하위 임계 값은 다음과 같다.

$$\rho_l = \frac{E(n_r)}{W} = \frac{[dM(z^{-1})/dz]_{z=1}}{W} = \sum_{n=1}^W [f(n)]^k \quad (12)$$

$\rho_u = [\sum_{n=1}^W f(n)]/W$ 이고 $0 < f(n)^k < f(n) < 1$ 이기 때문에

$$\frac{\rho_u}{\rho_l} = \frac{\sum_{n=1}^W [f(n)]}{\sum_{n=1}^W [f(n)]^k} > 1 \quad (13)$$

위의 일반적인 하위 임계 값에서 k 대신에 2를 대입하면 제 3장에서 제안된 파장 라우팅 알고리즘에 의해 설정된 동적 광 경로 위의 링크에서 파장의 평균 사용률에 대한 하위 임계 값을 얻을 수 있다. 다음 장에서 파장의 평균 사용률에 대한 분석적 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하고 제안된 알고리즘의 성능을 기존의 알고리즘과 비교한다.

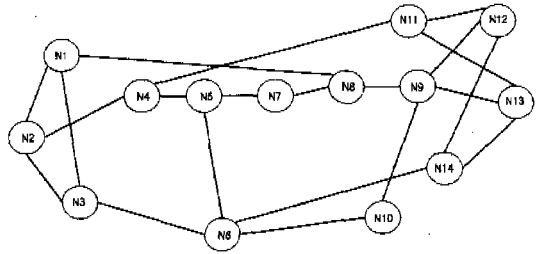


그림 3. 시뮬레이션 되는 NSFNET의 물리적 망형상

0	23940	10408	2417	17475	785	4782	22133	8040	1644	27715	8535	3528	17015
83800	0	54231	25792	52124	23271	35446	137261	10177	10201	71048	91880	48102	65806
9706	42284	0	41431	7504	32528	7807	76151	18115	4108	45902	2520	12973	19102
6540	5520	12154	0	1897	542	822	2540	1777	2867	11853	10908	2124	6105
109108	142213	19608	3257	0	3291	8582	85516	21257	15928	64007	105388	11715	15342
1635	14702	3045	4005	3322	0	2380	2301	782	3440	5388	4254	1308	6786
32887	55120	80642	3682	19291	7022	0	101408	17828	10520	130615	88960	21040	145871
13888	208488	186777	7573	25294	2373	88928	0	80055	29342	80053	62563	17988	75022
75493	17724	32300	6346	22213	8053	22284	54240	0	38217	86391	13128	40065	58124
1883	37271	9120	3354	18857	9428	4438	60737	8088	0	32284	23282	11885	12779
3828	32431	51822	4528	8400	11546	16722	33680	18204	22228	0	53040	28853	33057
27780	117191	17882	12885	38222	6365	15365	80851	35200	26180	188124	0	24888	88640
34805	49191	18525	6702	7484	755	5651	21688	104804	31724	81483	70408	0	48400
72800	201786	48557	20406	76380	28284	25068	81844	27308	1475	115288	123311	65777	0

그림 4. A' 의 트래픽 행렬

V. 시뮬레이션

이 장에서는 NSFNET^[1]을 사용하여 제안된 적응 파장 라우팅 알고리즘의 성능을 보인다. 기존의 핫스팟 트래픽 모델^[14] 다음과 같이 수정하여 사용한다. $H(t)$ 를 시각 t 에서 임의로(randomly) 선택된 서로 다른 노드의 집합이라고 하자. 제안되는 핫스팟 함수 $hs_{s,d}(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$hs_{s,d}(t) = \begin{cases} 2, & \text{if } (s \text{ and } d) \in H(t) \\ 0.5 & \text{else if } (\text{either } s \text{ or } d) \in H(t) \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

여기서,

$$E[H(t)] = N/2. \quad (15)$$

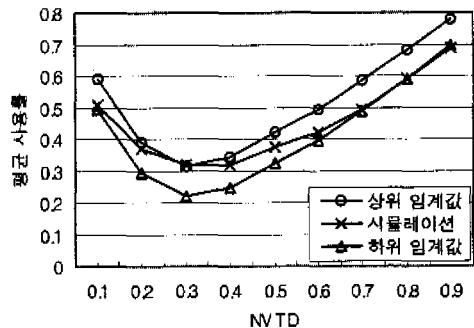


그림 5. W=8 일 때 평균 사용률

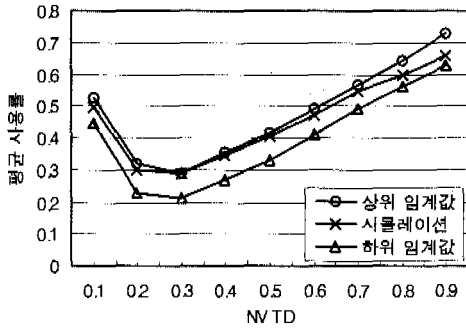


그림 6. W=12 일 때 평균 사용률

$$E[hs_{s,d}(t)] = 1 \quad (16)$$

그러면, 위에서 주어진 핫스팟 함수를 사용하여 시작 t 에서 시작 노드 s 로 부터 목적 노드 d 까지의 동적 트래픽 양 $\Lambda_{s,d}$ 을 다음과 같이 모델한다.

$$\Lambda_{s,d}(t) = \begin{cases} E[\Lambda_{s,d}(t)] \cdot hs_{s,d}(0), & 0 \leq t < t_0 \\ E[\Lambda_{s,d}(t)] \cdot hs_{s,d}(t_n), & t_n \leq t < t_{n+1} \end{cases} \quad (17)$$

여기서, $(t_n - t_{n-1})$ 은 평균값이 300 [sec]인 "geometrical distribution" 을 가지며 각각의 시작/목적 노드 조합별로 독립적으로 정해진다. 광 경로의 서비스 시간 또한 평균값이 60 [sec]인 "exponential distribution" 을 가진다. 본 논문에서는 평균 트래픽 행렬은 $\bar{\Lambda} = E[\Lambda_{s,d}(t)] = a \cdot \Lambda'$ 로 주어지며, 조정하는 값인 a 는 $W = 8$ 과 $W = 12$ 일 때 각각 5,000, 10,000을 사용한다. 한편, Λ' 은 그림 4에 기술되어 있으며 트래픽의 단위는 [bps]이다. 이러한 평균 트래픽 행렬은 실제적인 트래픽 요구량을 얻기 위해 [1]에서 기술되어 있는 NSFNET의 실험적인 트래픽 통계값에 근거하였다. 한 파장은 2.5 [Gbps]의 속도로 데이터를 전송한다고 가정한다^{[2], [13]}. 시뮬레이션의 복잡도를 줄이기 위해 다음과 같은 부가적인 가정을 사용한다.

- 물리적 가상 망 형상에서 각 링크는 양방향 통신이 가능하다.
- "First-Fit" 파장 할당 방식을 사용한다^[11].
- 최단 경로 IP 라우팅 방식을 사용한다^[15].

그림 5와 그림 6은 각각 $W = 8, 12$ 일 때, 시뮬레이션을 통해 얻어지는 파장의 평균 사용률(ρ)이 앞 장에서 제시된 일반적인 임계 값 분석으로부터

얻어지는 하위 임계 값(ρ_l)과 상위 임계 값 (ρ_u) 사이에 있다는 것과 제안된 알고리즘이 기존의 고정된 최단 경로 파장 라우팅 알고리즘 보다 트래픽의 부하가 링크 사이에서 더 균형되게 분산되는 것을 보여준다. 일반적으로, 정적 광 경로가 지나가는 링크는 파장 분할 다중화 망에서 분산되지므로 불안전 가상 망 형상 위의 정적 광 경로의 수가 많아질수록 즉, NVTD가 1에 가까워질수록 트래픽의 부하는 링크 사이에서 더 균형되게 분산된다. 따라서, 시뮬레이션에 의한 파장의 평균 사용률(ρ)은 $W = 12$ 보다 $W = 8$ 일 때, 링크 사이에 트래픽 부하의 편차가 더 크게 되므로 하위 임계 값(ρ_l)에 더 가까운 것을 알 수 있다.

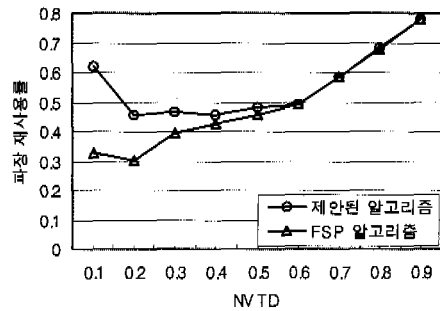


그림 7. W=8 일 때 파장 재사용률

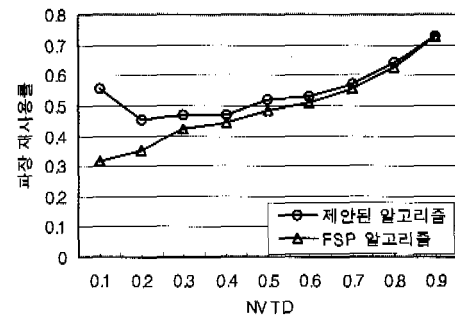


그림 8. W=12 일 때 파장 재사용률

또한, 링크 사이에서 트래픽 부하를 균형되게 분산시키는 제안된 알고리즘은 고정된 최단 경로 파장 라우팅 알고리즘에 비해 [5]에서 정의된 파장의 재사용률이 더 좋음을 그림 7과 그림 8을 통해 보여준다. 그림 9와 그림 10은 각각 $W = 8, 12$ 일 때, 동적 트래픽의 블록킹 확률의 관점에서 성능을 보여준다. 두 그림에서 제안된 알고리즘의 성능이 모든 NVTD에서의 고정된 최단 경로 파장 라우팅 알

고리즘의 성능보다 더 좋은 불완전 가상 망 형상이 존재함을 알 수 있다. 그림 9와 그림 10에서는 제안된 알고리즘의 성능이 NVTD가 각각 0.3인 불완전 가상 망 형상에서 제일 좋음을 알 수 있다. 또한, 동적 트래픽 요구하에서는 불완전 가상 망 형상이 완전 가상 망 형상 (NVTD = 1)보다 성능이 더 좋음을 보여준다.

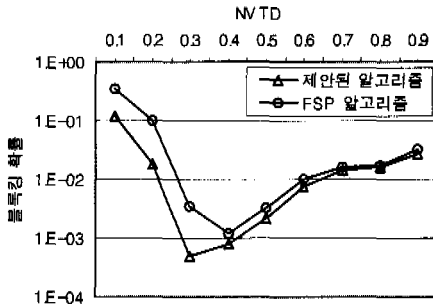


그림 9. W=8 일 때 블로킹 확률

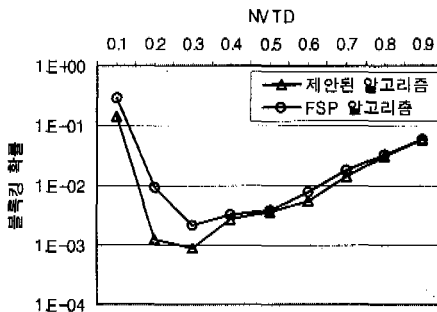


그림 10. W=12 일 때 블로킹 확률

V. 결론

본 논문에서는 모든 시작/목적 노드 조합에 대해 정상적인 데이터 전송을 하기 위해 각 노드간의 연결성을 보장하는 불완전 가상 망 형상을 효율적으로 설계하는 방식을 제안하였다. 기존의 방식은 가상 망 형상을 설계할 때 각 노드간의 연결성을 고려하지 않으므로 각 노드간의 정상적인 데이터 전송이 불가능한 불완전 가상 망 형상을 설계할 수 있다. 또한, 제안된 방식에 의해 설계된 불완전 가상 망 형상을 사용하여 IP over WDM을 위한 동적 트래픽 요구에 적용하는 고속의 파장 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 파장 분할 다중화 망에서 각 링크상의 트래픽 부하가 균형되게 분산되고 파장의 재사용률이 증가되도록 동적 트래픽

요구에 적용하여 파장 라우팅 경로를 선택한다. 동적 광 경로는 전체 망 상태에 대한 정보가 없어도, 각 노드에서 분산적으로 설정이 되므로 제어 트래픽에 의한 부하가 중앙 집중식 제어 방식 보다 훨씬 더 작다. 또한, 내부 메모리에 저장된 정보를 바탕으로 실행되는 간단한 링크 선택 함수는 계산상의 복잡도가 작아 고속의 파장 라우팅이 가능하게 한다. 특히, 수학적 분석을 통해 제안된 분산 제어 알고리즘에서 파장의 평균 사용률에 대한 일반적인 임계값을 유도하였다.

끝으로 NSFNET^[1]와 동적 핫-스팟 (hot-spot) 트래픽 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 불완전 가상 망 형상에 적용된 제안된 알고리즘이 완전 가상 망 형상에 적용된 고정된 최단 경로 파장 라우팅 알고리즘보다 성능면에서 더 좋다는 것을 보였다. 결론적으로 블로킹 성능, 제어 트래픽 부하, 그리고 계산상의 복잡도를 고려해 볼 때, 제안된 파장 라우팅 알고리즘이 분산 파장 분할 다중화 망에서 동적 트래픽 요구하에서 효율적으로 사용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] B. Mukherjee, *Optical Communication Networks*, New York: McGraw-Hill, 1997.
- [2] R. Ramaswami, *Optical Networks: A Practical Perspective*, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [3] Imrich Chlamtac and Tao Zhang, "Lightpath (Wavelength) Routing in Large WDM Networks," *IEEE JSAC*, vol. 14, no. 5, pp. 909-913, June 1996.
- [4] Aura Ganz and Xudong Wang, "Efficient Algorithm for Virtual Topology Design in Multihop Lightwave Networks," *IEEE/ACM Trans. On Networking*, vol. 2, no. 3, pp. 217-225, June 1994.
- [5] Rajiv Ramaswami and Kumar N. Sivarajan, "Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 3, no. 5, pp. 489-500, Oct. 1995.
- [6] Rajiv Ramaswami and Kumar N. Sivarajan, "Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed Optical Networks," *IEEE JSAC*, vol.

14, no. 5, pp. 840-851, June 1996.

[7] B. Mukherjee, S. Ramamurthy, D. Banerjee, and A. Mukherjee, "Some Principles for Designing a Wide-Area Optical Network," *Proc. IEEE INFOCOM' 94*, 1994.

[8] D. Mukherjee, "Wavelength-Routed Optical Network: Linear Formulation, Resource Budgeting Tradeoffs, and a Reconfiguration Study," *Proc. IEEE INFOCOM' 97*, 1997.

[9] M. Veeraraghavan, "Integrated Routing Strategies in IP-over-WDM Networks," *Proc. Fourth IEEE COMSOC Workshop on Management of Multiwavelength Optical Networks*, 1998.

[10] A. Mokhtar and M. Azizoglu, "Adaptive Wavelength Routing in All-Optical Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 197-206, April 1998.

[11] S. Subramaniam and R. A. Barry, "Wavelength Assignment in Fixed Routing WDM Networks," *Proc. IEEE ICC' 97*, pp. 406-410, 1997.

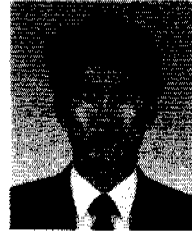
[12] R. A. Barry and P. A. Humblet, "Models of Blocking Probability in All-Optical Networks with and without Wavelength Changers," *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, vol. 14, no. 5, pp. 858-867, June 1996.

[13] T. Durhuus, R.J.S. Pedersen, B. Mikkelsen, K.E. Stubkjaer, M. Oberg, and S. Nilsson, "Optical Wavelength Conversion over 18nm at 2.5 Gbps by DBR-Laser," *IEEE Photonics Technology Letter*, vol. 5, Jan. 1993.

[14] S. Urushidani, "Rerouting Network: A High-Performance Self-Routing Switch for B-ISDN," *IEEE JSAC*, vol. 9, no. 8, pp. 1194-1204, Oct. 1991.

[15] A. S. Tanenbaum, *Computer Networks*, New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

이 쌍 수(Ssang-soo Lee)



1988년 2월 : 서울대학교
제어계측공학과 졸업

1990년 2월 : 서울대학교
제어계측공학과 석사

1990년 1월~현재 :
(주) LG전자 DTV
연구소 책임연구원(보)

1998년 3월~현재 : 서울대학교 전기공학부 박사과정
<주관심 분야> 광 통신망(WDM), 무선 통신, CDMA

정 한 유(Han-you Jeong)



1998년 2월 : 서울대학교
전기공학부 졸업

2000년 2월 : 서울대학교
전기 공학부 석사

2000년 3월~현재 : 서울대학교
전기공학부 박사과정

<주관심 분야> 고속 통신망, 광 통신망(WDM), 광 교환

서 승 우(Seung-woo Seo)

정회원



1987년 2월 : 서울대학교
전기공학과 졸업

1989년 2월 : 서울대학교
전기공학과 석사

1990년 3월~1991년 6월 :
서울대학교 기초전력
연구소 및 제어계측
공학과 연구원

1993년 12월 : 미국 펜실베니아 주립대학교 전기공
학과 박사

1993년 8월~1994년 7월 : 미국 펜실베니아 주립대
학 전산기공학과 조교수

1994년 8월~1996년 7월 : 미국 프린스턴 대학 전기
공학과 및 POEM연구소 연구원(미국
과학 재단 선발 연구원)

1996년 9월~현재 : 서울대학교 전기공학부 조교수
<주관심 분야> 고속 통신망, 광 통신망, 유/무선 교
환 시스템