

# MPLS기반의 Optical VPN 제공을 위한 기술적 이슈

김진영, 이현태

목원대학교

## Technical Issues for Optical VPN provisioning based on MPLS

Jin-Young Kim, Hyeun-Tae Lee

Mokwon University

E-mail : m4011046@mokwon.ac.kr

### 요 약

최근 Internet의 가장 보편적이고 저렴한 Backbone Network 기술이다. 이러한 Internet의 전달 능력은 그대로 이용하면서 보안이 우수한 가상 사설망(VPN)을 구축하는 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 본 논문에서는 MPLS 기반의 터널링을 이용한 VPN망 구축 방안과 광 경로(Lightpath)를 갖는 Optical VPN에서 고려해야 할 사항에 대해 제시하였다.

### 1. 서 론

Internet은 가장 보편적이고 저렴한 백본 기술이다. 이러한 Internet의 전달 능력을 그대로 이용하면서 보안이 우수한 가상 사설망(VPN)을 구축하는 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 많은 회사에서는 이러한 가상사설망 구축 기술에 대한 연구를 하고 있으며 VPN을 제공하는 상용제품도 출시되고 있다. VPN(Virtual Private Network)은 누구에게나 개방되어 있는 공중망에서 논리적인 회선을 설정하여 가상 사설 통신망을 구축하는 기술로서, 인터넷과 같은 공중망을 경유하여 데이터가 전송되더라도 외부인으로부터 안전하게 보호되도록 주소 및 라우팅 체계의 비공개, 데이터 암호화, 사용자 인증 및 사용자 액세스 권한 제한 등의 기능을 제공한다.

VPN은 터널링 방식을 이용하여 여러 개의 사이트를 연결한다. 터널링 기법으로는 IP-over-IP, IPSec, GRE, ATM VCC, MPLS(Multi Protocol Label Switching) 등을 사용할 수 있다 [1][2][3]. MPLS는 IP 기반의 다른 터널링 프로토콜이 IP 네트워크를 통하여 IP 패킷을 부하(payload)처럼 취급하여 캡슐화한 패킷을 전달하는 것과 달리 특정한 링크 계층의 하나로 인식될 수 있다. 따라서 MPLS를 기반으로 하는 VPN은 터널을 생성하기 위한 특별한 프로토콜 없이 LDP(Label Distribute Protocol)를 실행하면 IP 터널과 비슷한 LSP(Label Switch Path)가 만들어진다. MPLS

기반의 VPN을 구현함으로써 IP 기반의 VPN보다 성능을 향상시킬 수 있게 된다.

본 논문에서는 VPN의 네트워크 모델과 VPN 서비스를 위한 터널링 기술하고 MPLS의 개념을 그대로 확장하여 파장 레이블을 할당하는 가상 레이블링을 통한 Optical VPN을 제공하는 기술에 대하여 연구하고 기술적으로 고려해야 할 사항에 대해 기술한다.

### II. VPN의 네트워크 모델

VPN은 일반적으로 설명하여 공중망을 설비하여 이용하여 사설망을 구축하는 기술이다. 주로, 공중 인터넷이나 ISP가 구축한 백본망을 이용하여 구축된다. VPN은 지역적으로 떨어져있는 사이트(corporate network site)를 연결하여 하나의 사설 통신망으로 운용하기 위한 경제적인 대안으로 사용되고 있다[4].

VPN을 적용 측면에서 다음과 같은 대표적인 응용으로 구분할 수 있다.

첫째, "access VPN"이다. 이는 원격의 이용자가 안전하게 해당 Intranet으로 연결하기 위한 서비스이다. 예를 들면 PPP 프로토콜을 통하여 접속하는 이용자 단말이 L2TP와 같은 터널링 프로토콜을 이용하여 Intranet에 접근한다.

둘째로, 'Intranet/Extranet VPN' 유형은 지역적으로 떨어진 본사의 네트워크와 지사의 네트워크 간의 연결을 제공한다. 'Intranet VPN'은 여러 개의 지역적으로 떨어진 사이트간을 하나의 VPN 고객의 운영 하에 있는 경우를 말하고, 'Extranet VPN'은 VPN이 서로 다른 VPN 고객의 운영 하에 복수개의 사이트간을 연결하여 서비스를 제공

\* 본 논문은 한국과학재단의 ERC(OIRC) 프로그램의 지원으로 수행되었음

할 경우를 말한다. 그림 1은 두 개의 사이트를 연결하는 VPN을 나타낸다. PE1과 PE2는 서비스사업자의 망의 PE(Provider Edge) 장치이다. CE1, CE2, CE3는 사용자 망의 CE(Customer Edge) 장치이다. R1,R2,R3,R4는 사용자 사이트내의 IP 라우터이다.

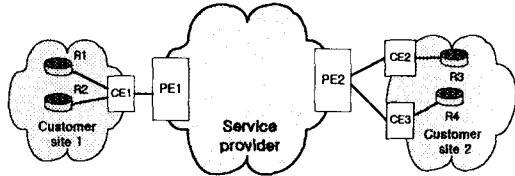


그림 1. 두 사이트를 연결하는 VPN

VPN은 다양한 형태를 가질 수 있다. IETF에서 정의하고 있는 VPN의 형태는 다음과 같다[4].

가. CPE 기반 VPN

이용자 망에 대한 정보가 이용자 장치로만 제한되는 경우로 서비스 제공자는 이용자 망의 존재에 관심이 없다.

CPE(Customer Premises Edge) 기반 VPN에서는 CPE 장치간에 터널을 구성하여 이용자망간의 VPN 서비스를 제공한다. 이와 같이 CPE간에 설정되는 터널링 방식은 네트워크 기반에 비해 간단하다. 터널은 ATM이나 Frame Relay와 같은 단순 링크 계층 연결로 제공될 수도 있고 IP 기반에서는 IP-IP, GRE, IPSec, L2TP, MPLS 터널이 제공될 수 있다. CPE 장치의 관리는 이용자가 할 수 있으나 망사업자가 CPE 장치의 관리 기능을 수행할 경우도 있을 수 있다.

나. Network 기반 VPN

Network 기반 VPN(NBVPN)은 서비스 제공자(SP) 망에서 VPN을 제공하는 경우로 VPN의 존재를 CPE 장치에서 알지 못한다. 이 경우의 터널은 PE(코아망의 라우터)간에 제공되는 방식으로 코아망을 운영하는 망사업자(혹은 ISP 사업자) 관점에서 확장성이나 경제적인 측면을 고려하면 유리한 방법이다.

NBVPN은 제공되는 서비스에 따라 다음과 같은 유형으로 다시 구분할 수 있다. 즉, 서비스제공자가 패킷을 계층 2 주소(예를 들어, Frame Relay, ATM, 혹은 MAC 주소)를 기반으로 전달되는 경우와 계층 3의 정보를 기반으로 전달하는 가에 따라 구분한다.

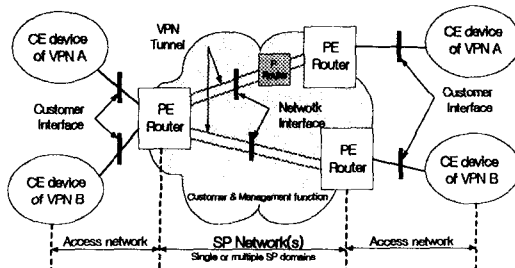


그림 2 L3NBVPN 참조 모델

그림 2는 L3NBVPN의 참조 모델을 나타낸다. PE Router는 CE 장치와 연결되고 하나 이상의 VFI(VPN Forwarding Instance)이 구현되고 VPN 마다 상태를 관리한다.

이와같이 L3NBVPN은 이용자가 VPN 관리의 부담을 덜어줄 수 있는 장점이 있고 이용자 사이트(n 개 사이트)간에 n의 제품에 비례하는 점대점 링크의 부담을 줄일 수 있다[4].

III. VPN 서비스를 위한 터널링 기술

VPN은 여러 가지 터널링 메카니즘으로 구현될 수 있다. IP 터널은 IP 백본망 위에 overlay 형태로 동작한다. 이때, IP 터널을 통과하는 트래픽은 하부 IP망에 무관하게 전달된다. 즉, IP 백본이 마치 링크 계층 기능처럼 사용되고 점대점 링크를 제공한다. VPN을 지원하는 장치는 다수의 VPN 터널을 종단하고 해당 사이트의 네트워크 인터페이스에 맞게 패킷을 전달한다. VPN의 유형은 패킷을 전달하는 방식에 따라 구분될 수 있다.

현재 IP 터널링 메카니즘으로 사용되는 프로토콜은 IP/IP[1], Generic Routing Encapsulation[2], Layer 2 Tunneling Protocol(L2TP)[3], IPSec, MPLS 등이 있다. 여기서, MPLS는 IP 기반의 다른 터널링 프로토콜이 IP 네트워크를 통하여 IP 패킷을 부하(payload)처럼 취급하여 캡슐화한 패킷을 전달하는 것과 달리 특정한 링크 계층의 하나로 인식될 수 있다. 따라서, IP 기반의 터널링 프로토콜이 IP 네트워크의 도달 정보 메카니즘의 확장으로 동작하는 반면 MPLS는 MPLS가 구현된 범위에서 제한적으로 동작할 수 있다. 그러나 MPLS가 다양한 링크 계층에 적용되고 MPLS 네트워크를 통한 VPN간의 다양한 연동 방식이 제안되고 있다.

IV. MPLS 기반의 VPN 기술

그림 1과 같이 기본 VPN 네트워크의 모델은 CE 장치가 PE 라우터에 연결되어 있고, 이 연결은 직접 IP 연결(한 개의 IP 홉)을 제공하여야 한다. CE 장치는 PE 라우터와 어떠한 형태의 데이터 링크(ATM VCC, Frame Relay Circuit, POS, L2TP Session, GRE 혹은 IPSec 터널 등)를 통하여 연결될 수 있다.

CE 장치가 연결된 특정 사이트는 하나의 호스트 장치가 연결될 수도 있고 하나의 IP subnet을 구성할 수도 있다. 일반적으로 CE 장치는 라우터인 경우로 볼 수 있다. PE 라우터는 각 이용자 사이트의 도달하기 위한 IP 주소를 알아서 다

른 PE 들간에 교환한다. PE 라우터간에는 VPN 데이터 트래픽을 전달하기 위한 터널이 설정되고 관리된다. MPLS기반의 IP VPN에서는 이 터널이 LSP이다. 그림 3은 MPLS기반의 IP VPN의 모델을 나타낸다. LSP를 설정하기 위해 필요한 레이블을 교환하기 위해서는 제어 프로토콜을 필요로 하며 이는 명시적인 것과 기존의 프로토콜을 확장한 것으로 나눌 수 있고, 또한 토폴로지 기반, 요구 기반, 트래픽 기반으로 나눌 수 있다. 명시적인 것은 LDP(Label Distributed Protocol), CR-LDP(Constraint-based LDP)가 있고, 기존의 프로토콜을 확장한 것으로는 RSVP(Reservation Protocol), BGP-4가 있다.

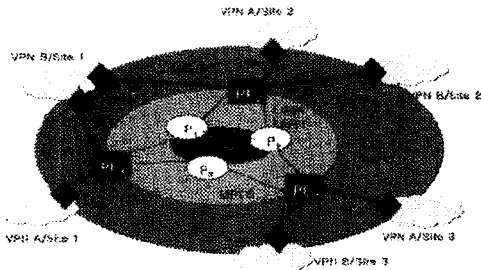


그림 3 MPLS 기반 IP VPN 모델

MPLS에서 중요한 개념 중의 하나는 레이블(Label)이다. MPLS 레이블은 여러 용도로 사용된다. 첫째, 패킷이 전송되어야 할 다음 홉(Next Hop) 라우터를 찾기 위해 패킷 헤더대신 사용된다. 둘째, 레이블은 전송되는 트래픽의 세밀한 정도(granularity)를 결정하는데 사용된다. 레이블은 하나의 트래픽 스트림에 주어지는데, 이 스트림의 세밀한 정도는 네트워크 prefix에서 TCP/IP의 port-to-port 연결까지 나타낼 수 있다. 또한 레이블 스택 기술은 기존의 레이블에 새로운 공통의 레이블을 추가하여 부차함으로 트래픽의 집선을 가능하며 계층화된 네트워크 구성을 지원한다[5]. 이러한 MPLS의 레이블 스택 기능을 이용하여 각각 서로 다른 고객을 위한 복수개의 가상사설망을 제공할 수 있을 것이다. 이러한 개별 사설망에게 VPN 구별자를 할당하고 에지 라우터에서 레이블 스택 기능을 수행한다.

### V. Optical VPN 제공 기술

IV에서는 MPLS의 레이블에 의한 VPN에 대해 논의하였다. 이러한 개념을 그대로 확장하여 파장 레이블을 할당하는 가상 레이블링을 통하여 'Optical VPN' 서비스를 제공할 수 있을 것이다. 즉, 코어 MPLS망과 고객의 기업망의 2개의 LSP 라우팅에 관한 문제로 MPLS에서 논의된 여러 가지 고려사항을 그대로 Optical VPN에 적용할 수 있을 것이다.

MPλS(Multiprotocol Lambda Switching)는 OXC(Optical Crossconnect)로 이루어진 광 전달 망을 가정하며 MPLS의 제어방식을 그대로 사용하였다. 이러한 접근 방식은 파장을 레이블로 인식하고 기존에 MPLS 연구를 통해 표준화되고 상용화된 개념과 기술을 쉽게 적용하고자 하는 접근 방법이다. MPLS의 레이블과의 차이점은 MPLS의 LSP가 논리적인 의미의 레이블이 연결되어 생기는 경로이지만, MPλS의 LSP는 데이터들의 전송경로가 되는 물리적인 의미의 파장이 연결되어 생기는 광 경로이다. 결국, 광 경로가 하나의 LSP를 구성하게 되고 광 레벨에서의 두 파장은 하나의 파장으로 병합되기 어렵기 때문에 MPLS의 병합 방법을 MPλS에 적용하는데 큰 문제점을 안고 있다. 또한 MPλS에서는 레이블이 파장이기 때문에 레이블 수의 부족현상이 더욱더 심각하다.

### 1. Lambda LSP Tunneling

전자적으로 구현된 MPLS LSR 노드 시스템은 도착된 패킷의 레이블에 대해 여러 가지 처리를 수행한다. 이러한 처리에는 그림 4에서와 같이 레이블 add/drop, 레이블 교환(swapping), 레이블 병합(merging), 레이블 스택 쌓기/덜기 등을 포함한다. add/drop 처리는 인입 LSP를 일단 중단하고 다음 노드로 새로운 LSP를 시작한다. 레이블 교환은 레이블을 일단 읽은 다음 새로운 레이블을 부착하는 절차를 포함한다. 레이블 병합은 두 개 이상의 레이블을 하나의 레이블로 결합하는 절차이고 일종의 트래픽 집선이 이루어진다. 레이블 스택킹 기술은 기존의 레이블에 새로운 공통의 레이블을 추가하여 부차함으로 트래픽의 집선을 가능하게 하는 기술이다. 광 LSR에서는 레이블 스택, 레이블 병합과 같은 처리를 할 수 없는 한계를 갖고 있다. 따라서, 광 LSP는 파장 하나의 전체 용량을 사용하는 규모가 큰 LSP가 될 수밖에 없다. 트래픽의 집선은 전자적인 기능과 광 레벨의 처리가 혼합되는 에지 광 LSR에서 필요하게 된다. 그림 4는 전자적인 LSR 기능과 혼합된 에지 광 LSR의 기능을 보여준다. 이러한 혼합 기능에서는 레이블 스택, 교환, 병합 기능 등이 수행될 수 있다. 특히, 에지 광 LSR에서 수행되는 레이블 스택 기능은 복수의 전자적인 LSP를 하나의 광 LSP로 터널링하는 것을 가능하게 한다. 이때 광 LSP로 터널링에서의 레이블은 전자적인 경우에 추가적으로 부착되던 것과 달리 광 LSP의 파장이 전자적인 레이블 스택의 상단에 추가된 하나의 레이블로 취급된다. 이 과정을 가상 레이블 쌓기라고 부르는 이유도 여기에 있다. 이러한 레이블 스택의 개념을 통하여 전자적인 MPLS와 광 MPLS가 효과적으로 연동할 수 있다..

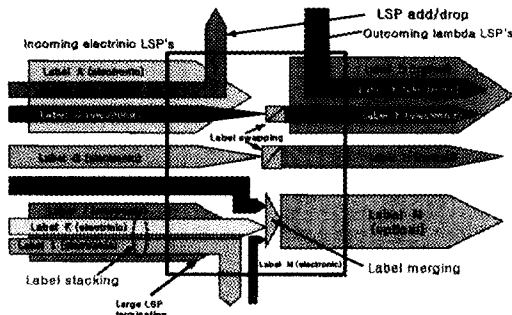


그림 4 전자적인 LSR 기능과 에지 광 LSR 기능

2. Virtual Topology Design

광 경로(Lightpath)는 여러 개의 물리적인 링크를 통해 연결되지만 중단간의 정보 전달 경로를 제공한다. 이러한 광 경로는 물리적인 링크의 선택과 링크의 특정한 파장을 할당하여 이루어진다. 이때, 파장의 변환이 없다면 이 광 경로는 하나의 파장으로 구성된다. 네트워크에서 사용가능한 파장의 수는 제한되어 있고 노드에서의 하드웨어의 제한이 있으므로 모든 노드 쌍 간의 완전한 채널(Clear Channel)을 설정하는 것은 불가능하다. 이때 물리적인 네트워크에서 노드간에 가능한 광경로를 설정하여 구성된 네트워크 토폴로지를 가상 토폴로지(virtual topology)라고 한다. 그림 5은 가상 토폴로지와 물리적인 토폴로지와의 관계를 설명한다[6].

하나의 파장을 사용하는 점대점의 광링크로 구성된 네트워크에서 WDM을 통하여 가능한 대역폭을 늘이고 효과적인 라우팅을 통하여 지연을 줄일 수 있다.

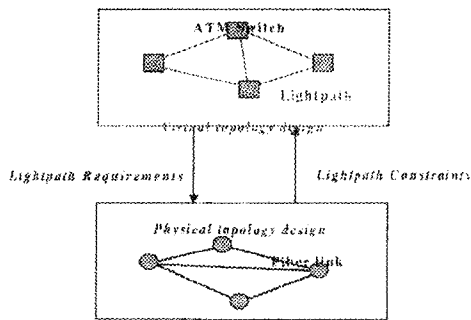


그림 5 가상 토폴로지 설계

주어진 물리적 토폴로지에서 여러 가지의 가상 토폴로지가 가능하다. 따라서, 네트워크 노드간의 평균 트래픽과 같은 네트워크 조건이 주어질 때 보다 높은 성능을 얻을 수 있는 토폴로지를 선택하는 것이 필요하다. 일반적으로, 가상 토폴로지 설계 문제는 네트워크의 성능 혹은 다른 성능 측정치를 최대화하는 문제로 둘 수 있다. 일반적으로 최적의 해답을 얻는 것은 NP-hard 문제이다. 따

라서 Heuristic 방법을 사용한다[6].

이와 같이 네트워크의 성능과 관련된 처리율(throughput)이나 지연을 최적화하기 위한 문제뿐만 아니라 가상 토폴로지에서 고려해야할 점이 있다.

첫째는, 망을 구성하고 운영하는 데 요구되는 비용이다. 이것은 매우 현실적인 측면에서 중요하다. 비록 한 토폴로지가 성능 면에서 우수하다고 하여도 다른 토폴로지가 망의 요소 장치의 비용이 싸다면 전체적인 비용 측면에서 이것이 유리한 것으로 평가될 수 있다.

둘째는, 가상 토폴로지를 이용한 광 네트워크의 재구성이다. 가상 토폴로지는 트래픽의 형태와 물리적인 토폴로지를 기반으로 설계된다. 가상 토폴로지의 설계는 트래픽 패턴의 변화에 대응할 수 있는 능력, 네트워크 장치의 장애로 인한 물리적인 토폴로지의 변동이 필요할 때의 자기-치유 네트워크 기능, 네트워크 장치의 추가나 업그레이드로 인한 토폴로지 변환 능력을 제공한다.

3. Traffic Aggregation과 Merging

IP 패킷을 처리하는 Edge LSR에서는 IP 흐름에 레이블을 할당한다. IP 흐름은 네트워크에서 같은 경로를 통하여 일련의 패킷이다. 이러한 일련의 LSP 패킷 흐름은 전자적인 LSR 기능과 혼합된 Edge 광 LSR에서는 훨씬 큰 단위의 광 레벨의 λSP 흐름으로 모아져서 전달된다. 이러한 패킷의 흐름은 발신지와 목적지의 TCP나 UDP의 포트와 같이 응용 프로그램간에 정의된 소밀한 흐름(fine-grain flow)과 두 호스트간의 흐름으로 같은 발신지와 목적지 주소를 갖는 여러 개의 가는 흐름을 모아놓은 보통규모흐름(medium-grain)을 정의할 수 있고 백본 관점에서 백본의 Edge 장치간의 흐름으로 여러 개의 보통규모흐름을 모아 구성되는 굵은 흐름(coarse flow)을 정의할 수 있다[7].

MPLS에서는 레이블이 파장이기 때문에 논리적으로 구분되는 MPLS의 레이블과는 달리 한 레이블의 대역폭이 연결의 흐름 단위와 비교 할 때 매우 크고 하나의 광 링크에 가능한 파장의 수가 제한되므로 레이블의 수가 매우 부족하다. 따라서 적은 트래픽의 흐름 단위가 전기적인 LSR 기능을 가진 에지 광 LSR에서 레이블의 병합이 일어나게 된다. 그러나 광 레벨의 처리만을 수행하는 코어의 광 LSR에서는 레이블의 병합 즉, 파장 병합은 매우 어렵다.

가. 파장 병합 기술

광 네트워크에서 데이터를 파장에 실어 보낼 때 서로 겹쳐지지 않게 보내져야 한다. 따라서, 서로 다른 fiber로부터 같은 파장을 출력 fiber의 하나의 파장으로 다중화하여 보내려면 이를 위한 메카니즘이 필요하다.

이러한 메카니즘은 병합할 파장을 수용할 수 있도록 여러 가지 방법으로 미리 마련된 전달 능력을 갖도록 설계되어야 한다. 즉, 일반적인 스위

치 설계에서 speed-up factor를 얻을 수 있는 설계를 말한다. 물론 광 레벨에서 Header를 갖고 있고 이 헤더에 따라 광 레벨에서 교환이 실현되면 기존의 패킷 교환기처럼 다중화할 수 있을 것이다. 다음은 현재 연구되고 있는 파장병합 기술이다. 주로 시간과 공간적으로 광교환 자원을 공유하는 방식이다. 자세한 내용은 참고문헌을 참조한다[8][9][10].

- 1) Packet Compression
  - 2) Optical Chirping techniques
  - 3) Sub-carrier Multiplexing
  - 4) Wavelength Shifting
  - 5) All optical Header Recognition & Switching
- 나. 파장 병합 효과

그림 6은 병합 능력을 갖고 있는 경우의 모델을 나타내고 있다. 그림 6과 같이 주어진 네트워크 토폴로지에서 입력  $\lambda SR[A,B]$ 에서 출력  $\lambda SR[C]$ 로의  $\lambda SP$  설립 요구가 있을 때 그림 7은 병합 기능이 없는 경우로서 6개의 파장을 이용하여 광 경로를 설정하였다. 경로의 파장에 제한이 있는 경우나 로드를 분산하려면 그림 8과 같이 다른 경로를 찾아야 한다. 즉, 라우팅 문제를 해결하여야 한다.

광 네트워크를 구성하는 노드의 수가 N개일 때, uniform traffic 환경에서 이들 노드로 구성된 입의 물리적인 네트워크 토폴로지에서 모든 노드간에 완전 연결(full mesh)의 가상 토폴로지의 네트워크를 구성하고자 할 때 요구되는 파장의 수는 병합 기능이 없는 경우  $O(N^2)$ 이하이고, 병합 기능이 있는 경우  $O(N)$ 이하의 파장의 수를 요구한다[7].

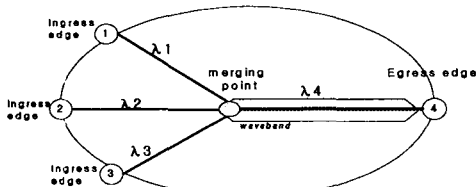


그림 6 병합 기능이 있는 망의 모델링

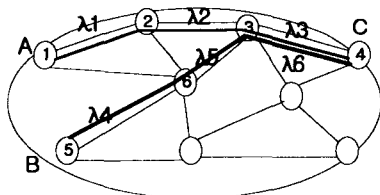


그림 7 병합 기능이 없는 망 (로드 불균형)

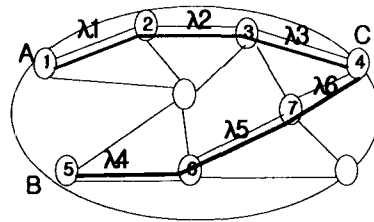


그림 8 병합 기능이 없는 망 (로드 균형)

## VI. 결 론

본 논문에서는 Optical VPN 서비스를 제공하기 위해 광 LSR의 기능과 가상 토폴로지의 설계, 파장 병합 기술에 대해 제안하였다.

복수의 전자적인 LSP를 하나의 광 LSP로 터널링하는 것을 가능하게 하며 광 LSP에서 터널링에서의 레이블은 전자적인 경우에 추가적으로 부착되던 것과 달리 광 LSP의 파장이 전자적인 레이블 스택의 상단에 추가된 하나의 레이블로 취급하므로 전자적인 MPLS와 MPλS가 효과적으로 연동할 수 있다.

네트워크 성능과 관련된 처리율이나 지연을 최적화하기 위한 문제뿐만 아니라 가상 토폴로지에서 고려해야 할 비용적 측면과 광 네트워크 구성에 대한 방안을 제안하였다.

파장 병합 기술에 의해 가상 토폴로지의 네트워크에서의 병합이 있는 경우와 없는 경우의 파장 수 요구에 대한 병합 효과를 제안하였다. 이러한 파장 병합 성능은 차후에 시뮬레이션을 통한 성능 평가를 할 것이다.

## 참고문헌

- [1]Perkins, C., "IP Encapsulation within IP", RFC 2003, October 1996.
- [2]Hanks, S., Li, T., Farinacci, D. and P. Traina, "Generic Routing Encapsulation (GRE)", RFC 1701, October 1994.
- [3]Townsend, W., Valencia, A., Rubens, A., Pall, G., Zorn, G. and B. Palter, "Layer Two Tunneling Protocol "L2TP"", RFC 2661, August 1999.
- [4]Reuven Cohen, Gideon Kaempfer, "On the Cost of Virtual Private Networks," IEEE/ACM Transac. on Networking, Vol. 8, No.6, Dec. 2000.
- [5]IETF. "Multiprotocol Label Switching Architecture", IETF, draft-ietf-mpls-arch-03.txt. Feb.1999.
- [6]R. Ramaswami, K. Sivarajan, Optical Network: A Practical Perspective, Morgan

- Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 1998.
- [7] J. Bannister, et al, "How Many Wavelengths Do We Really Need? A Study of the Performance Limits of Packet Over Wavelength", Optical Networks Magazine, April 2000.
- [7] J. Bannister et al., "How Many Wavelengths Do We Really Need in a Internet Optical Backbone? Proc. Pfh'99, pp.44-60, Salem, Mass., Aug. 1990.
- [8] S. Havstad et al., "Dynamic fiber-loop-mirror-filter(LMF) based on pump-induced saturable gain or absorber gratings", Proc. OFC '99, San Diego, Jan. 1999.
- [9] W. Shieh, E. Park and A. Willer, "Demonstration of Output-Port Contention Resolution in a WDM Switching Node Based on All-Optical Wavelength Shifting and Subcarrier-Multiplexed Routing Control Headers", IEEE Photonics Tech. Lett., vol. 9, pp. 1023-1025, 1997.