

IP/WDM 트래픽 엔지니어링 모델의 분석

임석구^{1*}

Analysis of IP/WDM Traffic Engineering Model

Seog-Ku Lim^{1*}

요 약 트래픽 엔지니어링(Traffic Engineering)은 트래픽을 네트워크 전체에 가능한 균등히 분배하여 사용자들이 원하는 서비스 품질을 보장해주면서 동시에 네트워크 자원의 활용도를 극대화시키는 기술이다. 트래픽 엔지니어링의 주요 목적은 트래픽 레벨과 자원 레벨에서 네트워크의 성능을 향상시키는 것인데, 이것은 네트워크 자원을 경제적으로 그리고 신뢰성 있게 이용하면서 트래픽에 관련된 성능 요구사항을 만족해야 한다. 본 논문에서는 IP/WDM 트래픽 엔지니어링을 구현하기 위한 두 가지 모델에 대해서 비교 분석하고 마지막으로 IP/WDM 트래픽 엔지니어링의 기능 구조에 대해서 설명한다.

Abstract Traffic engineering is a technology that guarantees quality of service that users want and maximize inflection degree of network resources at the same time as evenly distributing traffic to whole network. To improve performance of network at traffic and resources level, traffic engineering aims at utilizing network resource efficiently and effectively and must be satisfied performance requirement concerned with traffic. In this paper, two models to embody traffic engineering are analyzed and finally functional structure of IP/WDM traffic engineering is explained.

Key Words : 광 네트워크, IP/WDM, 트래픽 엔지니어링

1. 서 론

트래픽 엔지니어링(Traffic Engineering)은 네트워크 자원을 효율적으로 사용하면서 트래픽을 네트워크 전체에 가능한 균등하게 분배하여 사용자들이 원하는 서비스 품질을 보장해주면서 동시에 네트워크 자원의 활용도를 극대화시키는 기술이다[1][2]. 트래픽 엔지니어링의 주요 목적은 트래픽 레벨과 자원 레벨에서 네트워크의 성능을 향상시키는 것인데, 이것은 네트워크 자원을 경제적으로 그리고 신뢰성 있게 이용하면서 트래픽에 관련된 성능 요구사항을 만족해야 함을 의미한다.

지금까지 네트워크의 전송 속도를 향상시키기 위해 사용한 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저 전송량을 늘리는 방법과 다른 방법은 전송 절차를 간소화 시켜

서 라우터와 같은 중간 노드에서 처리 속도를 증가하는 방법이다. 전송량을 늘리는 방법으로는 다중 파장을 이용하는 DWDM(Density Wavelength Division Multiplexing) 방식을 들 수 있고, 전송 절차를 간소화시키는 방법으로는 통합 라우팅 방식(Integrated Routing)에 기반을 둔 MPLS(Multi-Protocol Label Switching)를 들 수 있다. 오늘날에는 이 두 방식을 하나로 통합하는 방식, 즉, GMPLS(Generalized MPLS) 방식이 거론되고 있다. 따라서 장래의 데이터 및 전송망은 라우터, 스위치, DWDM 시스템, ADM(Add-Drop Multiplexor), 그리고 PXC(Photonic cross-connect) 혹은 OXC(Optical cross-connect) 등의 망 요소들로 이루어질 것이다. MPLS에서의 제어 평면을 이러한 다양한 장치의 스위칭과 전달(Forwarding) 기술 및 계층을 포함할 수 있도록 확장한 것이 GMPLS이다. 초기에 MPLS란 이름으로 람다 스위칭(Lambda Switching)을 지원하는 방안이 거론되었지만, 곧 보다 더 일반화된 GMPLS라는 이름으로 람다 스위칭뿐만 아니라 다른 기술들까지 포괄하는 방향으로 발전하였다. 이러한

¹천안대학교 정보통신학부

*교신저자: 임석구(sklim@cheonan.ac.kr)

일반화의 결과로 SONET ADM 등의 시분할(Time-division), 파장분할(Lambda), 공간 스위칭(포트 혹은 fiber 간) 등의 각 기술로 구현된 망들의 계층적 중첩 형태로 이루어진 망들이 하나의 제어평면으로 연결될 수 있게 하였다. GMPLS는 이러한 복합적으로 구성된 망 환경에서도 하나의 제어평면으로 망 자원을 동적으로 제공하고 망 보호(Protection) 및 복구(Restoration) 등의 기술을 사용하여 망의 생존성(Survivability)을 지원할 수 있게 한다.

수년 전, LAN이나 캠퍼스 망 등에서 LANE이나 Classical IPOA, MPOA 등의 오버레이 모델(Overlay Model)의 IP/ATM 방안들이 확산되고 있는 상황에서 통합모델의 MPLS가 활발히 부상하게 되었던 가장 큰 이유는 망의 확장성과 QoS(Quality of Service) 보장방안 및 트래픽 엔지니어링의 필요성, 경제적인 고속 IP 스위칭, VPN 서비스 지원 등이라 할 수 있다. 이러한 상황에서 태동한 MPLS WG(Working Group)은 레이블 스위칭(Label Switching)의 사용과 다양한 링크 레벨 기술들 위에서 LSP(Label Switched Path)를 구성하는 기술에 관련된 표준화를 담당해 왔다. MPLS가 처음 소개될 당시에 자연스럽게 MPLS의 외형적 특징부터 파악하게 되다보니 경제적인 고속 IP 스위칭 수단을 제공하는 것이 마치 MPLS의 대표적인 장점처럼 인식되기도 했지만, 사실은 QoS 보장 및 트래픽 엔지니어링, VPN 서비스 지원, 확장성은 처음부터 MPLS 태동의 이유들로 파악되어 있었다. 그리고 망 환경과 기술의 변천에 따라, 많은 측면에서 다양한 수단을 제공하는 MPLS의 기능성들이 가시화되면서 그것들의 비중이 부각되어 드러나게 된 것이다. 그리고 MPLS는 위에서 열거한 요구사항들을 단독으로 해결하는 것이 아니다. 트래픽 엔지니어링을 위해서는 OSPF(Open Short Path First)/IS-IS(Intermediate System to Intermediate System) extensions 및 CSPF(Constrained SPF)와 QoS 및 대역폭의 확장을 위해서는 OSPF/ISIS extensions, CSPF 그리고 DiffServ와, BGP/MPLS VPN을 위해서는 BGP, address extensions, multiple forwarding table 등과 연계하여 동작한다. 따라서 MPLS 및 GMPLS는 위에서 열거한 목표들을 달성하기 위해 다른 표준들과 함께 동작하는 하나의 요소로 이해하는 것이 타당하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 2장에서는 IP/WDM 트래픽 엔지니어링의 정의와 IP/WDM 트래픽 엔지니어링을 구현하기 위한 두 가지 모델에 대해서 설명하고 3장에서는 IP/WDM 트래픽 엔지니어링의 기능 구조에 대해서 설명하며, 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

2. IP/WDM 트래픽 엔지니어링 기능모델

2.1 IP/WDM 트래픽 엔지니어링이란?

IP/WDM 트래픽 엔지니어링은 IP 흐름이나 패킷을 전달하기 위하여 IP 라우터, 버퍼, WDM 스위치, 광섬유, 파장 등과 같은 IP/WDM 자원들을 효율적으로 사용함을 목적으로 한다. 그림 1에 보여준 바와 같이 IP/WDM 트래픽 엔지니어링은 IP/MPLS 트래픽 엔지니어링과 WDM 트래픽 엔지니어링을 포함한다.

MPLS 트래픽 엔지니어링은 흐름할당과 레이블 경로 설계에 관한 문제들을 다루며, MPLS-명시적 경로제어를 사용하여 기존의 IP 토폴로지 상에 부하를 균형하게 제공한다[3]. MPLS LSP는 가상경로(Virtual Paths)로 동작한다. WDM 트래픽 엔지니어링은 WDM 망 내의 IP 토폴로지가 동적이라고 가정하여 광경로(Lightpath) 토폴로지 설계와 IP 토폴로지 변경(Migration) 문제를 처리한다. 재구성이 가능한(Reconfigurable) WDM 망에서 MPLS 트래픽 엔지니어링과 WDM 트래픽 엔지니어링은 서로 다른 계층(Layer)에서 동작한다. 즉, 하나는 IP 계층(IP Layer)에서 다른 하나는 WDM 계층(WDM Layer)에서 동작한다. 광패킷교환망(Optical Packet Switched Networks)에서 MPLS 트래픽 엔지니어링과 WDM 트래픽 엔지니어링은 오버레이(Overlay) 방식이나 통합(Integrated) 방식 중 하나로 적용될 수 있다. 오버레이 방식에서 MPLS LSP(가상 경로)는 WDM 광회선(Light Circuits)에 할당된다. 통합 방식에서는 광경로를 구성하여 흐름들을 광경로에 할당하며, 통합된 형태로 트래픽을 전달한다.

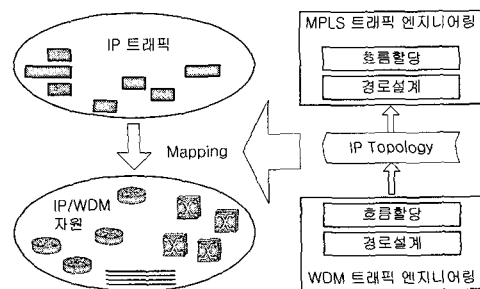


그림 1. IP/WDM 트래픽 엔지니어링

2.2 IP/WDM 트래픽 엔지니어링 모델

IP/WDM 망에서의 트래픽 엔지니어링은 두 가지 형태 즉, 오버레이 트래픽 엔지니어링과 통합 트래픽 엔지니어링 형태로 연구될 수 있다[4][5]. 오버레이 방식에서는 IP 계층과 WDM 계층 각각에 대한 트래픽 엔지니어링 모듈이 있다. 하나의 망에서의 동작은 다른 망에서의 동작과는 독립적이며, IP 망 또는 WDM 망을 위해 개발된 트래

픽 엔지니어링 방법은 각 계층에 각각 직접적으로 이용될 수 있다. 오버레이 트래픽 엔지니어링은 오버레이 클라이언트-서버 망의 개념과 일치한다. 통합 방식에서 성능 최적화는 IP 망 요소와 WDM 망 요소가 동등하게 수행된다. 최근에는 IP와 WDM 기능을 통합한 보다 복잡한 하드웨어가 등장함에 따라 통합 트래픽 엔지니어링은 보다 효율적으로 수행될 수 있다.

2.2.1 오버레이 모델

오버레이 트래픽 엔지니어링에서 최적화는 단계적으로 한 계층씩 수행될 수 있다. 이것은 순차적으로 서로 다른 차원에서 최적의 해를 구함으로써 Multi-dimensional 공간에서의 최적의 해가 얻어짐을 의미한다. 이러한 형태의 최적화는 해를 구하는 순서에 따라 다르므로 시스템 전체의 최적화를 보장하지는 않는다. 오버레이 트래픽 엔지니어링의 장점은 특정 계층(IP 또는 WDM)의 요구를 충분히 만족시키기 위한 메커니즘을 만들 수 있다는 것이다. 그림 2는 오버레이 트래픽 엔지니어링을 보여준다.

오버레이 트래픽 엔지니어링은 IP 라우터들을 OADM(Optical Add-Drop Multiplexor)을 통해서 OXC-기반 WDM 망을 연결함으로써 구성할 수 있다. 이러한 형태로 구성된 IP/WDM 망은 OXC-기반 WDM 망이 되며, 서버 계층은 광 망요소(NE: Network Element)와 광섬유로 이루어진다. 각 광섬유는 다수의 광 파장을 운반하며, 광 파장의 라우팅은 융통성 있게 재구성이 가능하다. IP 라우터들로 구성된 클라이언트 계층(가상망)은 물리망 내에 있는 광 경로에 의해 연결된다. 가상망의 토폴로지는 서버 계층 내에 있는 광경로의 재구성 기능에 의해 다시 구성하는 것이 가능하다. OADM에 연결된 IP 라우터의 인터페이스는 재구성이 가능한 인터페이스이며, 재구성 가능한 인터페이스에 연결된 IP Neighbours는 광경로 변경에 의해 변화될 수 있다.

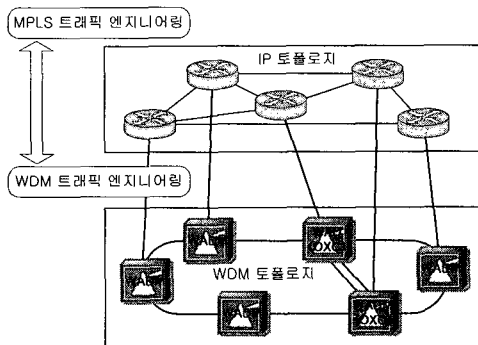


그림 2. 오버레이 트래픽 엔지니어링 모델

IP/WDM 망에서 폭주제어(Congestion Control)는 흐름 레벨 뿐만 아니라 토폴로지 레벨에서도 실현될 수 있다. 따라서 트래픽 소스는 망으로 패킷을 전송하기 이전에 패킷의 흐름을 조절할 수 있을 뿐만 아니라 일정 간격 동안 트래픽 패턴을 유연하게 조절할 수 있다. IP 계층에서 폭주제어는 트래픽 엔지니어링의 근간을 이루며, 비트 스트림을 목적으로 어떻게 빨리 전송하느냐를 의미한다. WDM 계층에서 할당제어(Allocation Control)는 망 자원(파장 등)을 관리하고 망 자원을 가상 IP 링크에 할당하는데 이용된다. WDM 계층에서의 할당제어는 접속 초기 요구 시 고정되어 있는 정적으로 동작하거나 접속 중간에 변경되는 동적으로 동작될 수 있다. 이것은 WDM 계층이 다른 서비스 품질로 융통성 있게 상위 계층에 접속할 수 있음을 의미한다.

2.2.2 통합 모델

통합 트래픽 엔지니어링에서 최적화는 IP 망과 WDM 망에서 동시에 고려한다. 이것은 시스템 전반적인 최적화를 다양한 각도에서 고려하는 것을 의미한다. 통합 트래픽 엔지니어링은 IP와 WDM 모든 기능이 각 망 요소에 통합된 망에 적합한 방식이다. IP와 WDM 기능이 통합될 때, 하나의 통합제어평면이 가능해지며, 이것은 통합 트래픽 엔지니어링 개념과 일치한다. IP 트래픽 관리와 WDM 자원 제어 및 관리가 동시에 고려되며, 그림 3은 통합 트래픽 엔지니어링을 보여준다.

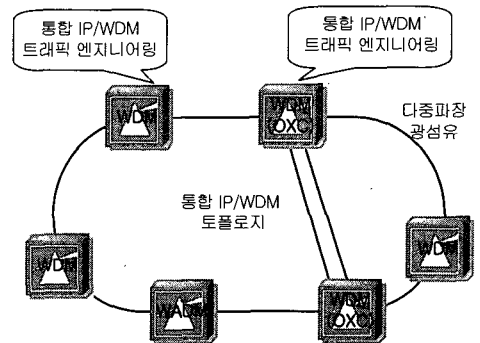


그림 3. 통합 트래픽 엔지니어링 모델

2.2.3 두 모델의 비교

트래픽 엔지니어링은 성능 최적화와 자원할당간의 관계에 의해 오버레이 방식과 통합방식으로 분류할 수 있다. 오버레이 방식에서 부하분산 및 트래픽 라우팅과 같은 성능최적화는 IP 계층에서 수행될 수 있는데, 이것은 WDM 계층에서 수행되는 자원할당과는 본질적으로 분리된다. 이러한 이유로 인해 IP 계층에서의 성능최적화는

기존의 메커니즘뿐만 아니라 재구성 기능을 이용할 수 있다. 재구성 기능이 포함되지 않을 경우 성능최적화는 고정된 자원만으로 이루어진다. 재구성 기능이 포함될 때에는 가상 토폴로지에 의해 동적으로 자원할당이 이루어진다. 다음 단계인 IP 계층에서의 성능최적화는 WDM 계층(물리적인 자원할당이 발생)의 자원상태를 고려하여 이루어진다. 이에 반해 통합 방식에서 성능 최적화와 망 자원할당은 통합하여 수행된다. 성능최적화로 인해 망 자원이 변화된다면 자원할당은 자동적으로 최적화에 포함된다.

트래픽 엔지니어링 모델은 중앙집중 형태나 분산 형태로 이용될 수 있으며, 표 1에 가능한 4가지 경우를 나타내었다. 직관적으로 오버레이 방식은 중앙 집중적이거나 계층적인 방안이 유리한데, 이 방식에서는 IP 계층 트래픽 엔지니어링과 WDM 계층 트래픽 엔지니어링이 각각 있으며 이 두 개의 트래픽 엔지니어링은 WDM Edge UNI(User Network Interface)나 IP NMS(Network Management System)와 WDM NMS간의 인터페이스를 통하여 통신한다. 중앙집중적인 오버레이 방안에서 중앙의 IP 계층 NC&M(Network Control & Management) 관리자와 중앙의 WDM 계층 NC&M 관리자는 각각 자신의 계층에 관한 상태정보를 수집한다. 그러나 이러한 방식은 확장성에 문제가 있으며, 이는 IP와 WDM의 NC&M 관리자의 병목현상 때문이다. 통합방안은 분산 트래픽 엔지니어링에 자연스럽게 이용된다. 지역적으로 유지되는 IP/WDM 망의 상태정보를 토대로 각 사이트는 폭주제어와 자원할당을 수행한다. 분산형태로 트래픽 엔지니어링을 수행하는 것은 가용성(Availability)과 융통성(Flexibility)을 향상시키지만 복잡한 동기화 문제에 직면한다.

표 1. 트래픽 엔지니어링 모델 적용방안

방안	오버레이 모델	통합 모델
중앙집중식	중앙집중식 오버레이 트래픽 엔지니어링	중앙집중식 통합 트래픽 엔지니어링
분산식	분산식 오버레이 트래픽 엔지니어링	분산식 통합 트래픽 엔지니어링

요약하면 오버레이 방안은 망의 크기가 커짐에 따라 효율성에 문제가 있으며 이는 IP와 WDM NMS 서버가 병목이 될 가능성이 있기 때문이다. 통합 방안은 실제 적용 시 복잡도가 매우 높다. 망의 상태와 구성정보에 대한 많은 IP/WDM 노드간의 동기를 맞추는데 상당한 시간이 소요된다. 오버레이와 통합, 각각의 적용방안 중에서 하

나를 선택하는 것은 운용하려는 망과 트래픽 특성에 따라 다르다. 그러나 본 논문에서 제시하는 기능적인 트래픽 엔지니어링 골격은 두 가지 적용방안과 두 가지 모델을 포함한다. 골격 내 구성요소들은 IP/WDM 망의 트래픽 엔지니어링에 일반적으로 이용되기 때문이다.

3. IP/WDM 트래픽 엔지니어링 기능 구조

트래픽 엔지니어링 골격 중에서 기본적인 메커니즘은 광경로와 가상경로이다. 고유한 WDM 망의 특성은 광경로와 가상적으로 토폴로지를 재구성할 수 있다는 것이다. 즉, 물리적인 광 토폴로지에 대해 물리적인 WDM 망은 광경로로 구성된 다수의 토폴로지를 지원할 수 있다. 그림 4에 보여준 바와 같이 트래픽 엔지니어링 주요 기능요소는 다음과 같다.

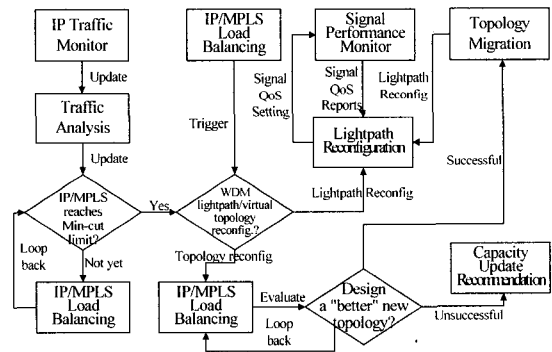


그림 4. IP/WDM 트래픽 엔지니어링 기능 구조

3.1 광경로 토폴로지 설계

광경로 토폴로지는 트래픽 측정치와 예측치를 토대로 구성된다. 이것은 주어진 요구 매트릭스에 대해 특정 제한사항을 만족하면서 특정 목표치를 위한 그래프를 최적화하는 것으로 간주될 수 있다. 예를 들어 망에 인가되는 트래픽 부하에 대해 Nodal Degree나 인터페이스 용량을 고려하여 수율을 극대화하기 위한 WDM 계층에서 광경로상의 IP 라우터를 최적화하는 것이다. 일반적으로 이러한 문제는 NP-complete 문제이다[6]. 최적 그래프를 얻기 위해 탐색하는 데에는 많은 계산량이 소요된다. 트래픽 패턴의 변화에 의해 재구성이 시작되기 때문에 재구성이 실제 완료될 시점에서 최적 그래프는 더 이상 최적이지 아니다. 실제적인 접근방안은 전체 시스템의 최적화 대신에 가격대비 효율성, 빠른 수렴도, 서비스 중인 트래픽의 영향을 최소화하는 것과 같은 특정 목표치를 주 대상으로

하는 휴리스틱 알고리즘(Heuristic Algorithm)을 사용하는 것이다.

3.2 토폴로지 변경

토폴로지 변경(Topology Migration)은 기존 토폴로지에서 신규 토폴로지로 망을 변경하기 위한 알고리즘으로 구성된다. 심지어 WDM 계층의 자원이 충분하더라도 우선적으로 고려할 문제가 있다. 예를 들면, WDM 재구성이 대용량 채널(파장당 OC-192 까지)을 다루는 경우 자원할당의 변경은 많은 종단 가입자 트래픽에 많은 영향을 미친다. 변경 과정은 각 WDM 광경로를 제거하고 설정하는 과정으로 이루어진다. 트래픽 흐름은 각 변경단계의 중간과 종료 후에 광경로 변화에 적응하여야만 한다.

3.3 광경로 재구성

광경로 재구성(Lightpath Reconfiguration)에서의 구성 요소는 각 광경로를 제거하거나 설정하기 위해 사용되며, 광경로 라우팅 알고리즘, 경로 설정/해제 메커니즘, 그리고 인터페이스 관리 모듈로 구성되어 있다.

3.3.1 광경로 라우팅 알고리즘

이 모듈은 광경로 계산에 필요하다. 광경로 루트가 나타나 있지 않은 경우 이 구성요소는 명시적인 라우팅 경로를 계산한다. 예를 들어 OSPF 알고리즘이 사용되는 경우, Local 라우팅 테이블로부터 라우팅 경로가 계산된다.

3.3.2 경로 설정/해제 메커니즘

이 모듈은 경로의 제거 및 설정에 필요하다.

3.3.3 인터페이스 관리

이 모듈은 인터페이스에 관련된 정보를 갱신한다. 광경로 재구성은 WDM 클라이언트 인터페이스를 하나의 다른 광경로로 재할당할 수도 있다. 이것은 WDM 인터페이스가 IP 망에 영향을 미칠 것이다. IP 라우팅은 IP 어드레싱을 필요로 하며 또한 하나의 IP 서브 망(Subnet)내에서의 패킷 전달을 허용한다. 새로운 IP 토폴로지는 IP 인터페이스 주소 변화를 수반하기도 한다.

4. 결론

트래픽 엔지니어링은 트래픽을 네트워크 전체에 가능한 균등히 분배하여 사용자들이 원하는 서비스 품질을 보장해주면서 동시에 네트워크 자원의 활용도를 극대화

시키는 기술이다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 IP/WDM 트래픽 엔지니어링의 정의에서 시작하여 IP/WDM 트래픽 엔지니어링의 전반적인 문제에 관해서 설명하였으며, 제시한 IP/WDM 트래픽 엔지니어링의 관점은 IP/MPLS와 WDM 트래픽 엔지니어링 관점이었다.

WDM 트래픽 엔지니어링은 물리적인 WDM 망이 많은 가상 광경로 토폴로지를 지원할 수 있다는 사실을 이용한다. IP/WDM 망에서 각 가상 토폴로지는 IP 토폴로지를 의미한다. 또한 IP/MPLS 트래픽 엔지니어링은 부하 균형과 망 제공의 두 가지 목적으로 이용되며, 이를 위해 최적 라우팅과 흐름 할당을 처리한다.

본 논문에서 제안한 IP/WDM 망에서의 트래픽 엔지니어링 모델은 성능 최적화와 자원할당 관점에서 오버레이 트래픽 엔지니어링과 통합 트래픽 엔지니어링 모델이었다. 오버레이 트래픽 엔지니어링에서 부하균형 및 트래픽 라우팅과 같은 성능최적화는 IP 계층에서 수행될 수 있는데, 이것은 WDM 계층에서 수행되는 자원할당과는 본질적으로 차이가 있다. 이로 인해 IP 계층에서의 성능최적화는 기존의 메커니즘뿐만 아니라 재구성 기능을 이용할 수 있다. 재구성이 포함되지 않을 때, 성능최적화는 고정된 자원만으로 이루어지며, 포함될 때에는 가상 토폴로지에 대한 동적인 자원할당이 포함된다. 다음 단계인 IP 계층에서의 성능최적화는 WDM 계층의 자원상태를 고려하여 이루어진다. 반면에 통합 트래픽 엔지니어링에서 성능 최적화와 망 자원할당은 통합된다. 성능최적화가 망 자원의 변화를 포함한다면 자원할당은 자동적으로 최적화에 포함된다. 또한 트래픽 엔지니어링 모델은 중앙집중적인 형태나 분산 형태로 이용될 수 있음을 제시하였다.

마지막으로 트래픽 엔지니어링을 위한 주요 기능요소는 광경로 토폴로지 설계, 토폴로지 변경, 광경로 재구성이 있음을 제안하였으며, 추후 재구성 기능을 고려한 네트워크 성능 분석이 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

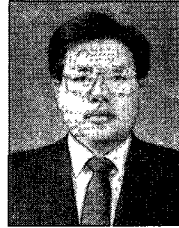
- [1] Awduche et al, "Requirements for Traffic Engineering Over MPLS", RFC 2702, September 1999
- [2] Crawley et al, "A Framework for QoS-based Routing in the Internet", IETF RFC 2386, August 1998
- [3] Jamoussi et al, "Constraint-Based LSP Setup using LDP", September 2001
- [4] N. Chandhok, A. Duresi, R. Jagannathan, R. Jain

and IC Vinodkrishnan, "IP over Optical Networks: A Summary of Issues," IETF Draft, March 2001.

- [5] J. Luciani, B. Rajagopalan, D. Awduche, B. Cain, and B. Jamoussi, "IP over optical networks: a framework", IETF draft, draft-many-ip-optical-framework-01.txt, July 2000
- [6] S. Kalidindi and M. Zekauskas, 'Surveyor: An Infrastructure for Internet Performance Measurements', Proc. INET'99, 1999.

임 석 구(Seog-Ku Lim)

[정회원]



- 1983년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1987년 1월 ~ 1992년 2월 : LG 전자 중앙연구소

- 1992년 2월 ~ 1994년 2월 : 한국전자통신연구원
- 1994년 3월 ~ 2001년 2월 : 주성대학
- 1994년 7월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 초빙연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 천안대학교 정보통신학부 부교수

<관심분야>

트래픽 엔지니어링, 시뮬레이션, 이동통신시스템 성능분석, 광 네트워크