

논문 2005-42TC-12-2

# MPLS 트래픽 엔지니어링을 위한 간섭 예측 기반의 online 라우팅 알고리즘

(Interference-Prediction based Online Routing Algorithm  
for MPLS Traffic Engineering)

이 동 훈\*, 이 성 창\*\*, 예 병 호\*\*\*

(Donghoon Lee, Sungchang Lee, and Byungho Ye)

## 요 약

인터넷 규모의 확장과 트래픽의 증가로 인해 발생하는 망 혼잡 상황을 해결하기 위해 본 연구는 망 제어 기술의 일환으로서 간섭 예측 정보를 이용한 online 라우팅 알고리즘을 제안한다. 차세대 통합망은 사용자 서비스별 요구 수준에 따라 종단간의 QoS를 보장해야 한다. 이를 위해 동적 대역폭 할당이 효율적으로 이루어져야 하며, 망 전체 성능을 고려한 경로 설정 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 현재 라우팅 요청이 요구하는 대역폭의 양이 미래의 잠재적인 트래픽을 간섭하는 정도를 예측하여, 이를 최소화시키는 방안을 제시한다. 망 전체 성능을 최대화하고, 한정된 자원이 낭비되는 것을 방지하기 위해 제안 알고리즘은 요구 대역폭, link 상태정보, 그리고 ingress-egress pair 정보 등을 복합적으로 고려한다. 또한 간섭을 예측하는 것은 동적으로 변화하는 망 상황에서 보장된 대역폭을 제공하게 함으로써 사용자의 요구를 최대한 수용할 수 있게 한다. 본 논문에서는 Internet traffic engineering에 적합한 최적 경로 설정 알고리즘을 제안하기 위해 라우팅 알고리즘이 갖추어야 할 요구 조건과 최근 연구동향을 분석하였으며, QoS 라우팅의 대표적인 연구사례를 분석하였다. 그리고 이를 기반으로 기존의 알고리즘의 문제점을 파악하고 최적의 해결 방안을 제시한다. 개선된 사항은 시뮬레이션을 통해 기존 알고리즘과 비교 및 분석되었다.

## Abstract

A new online routing algorithm is proposed in this paper, which use the interference-prediction to solve the network congestion originated from extension of Internet scope and increasing amount of traffic. The end-to-end QoS has to be guaranteed in order to satisfy service level agreements (SLAs) in the integrated networks of next generation. For this purpose, bandwidth is allocated dynamically and effectively, moreover the path selection algorithm is required while considering the network performance. The proposed algorithm predicts the level of how much the amount of current demand interferes the future potential traffic, and then minimizes it. The proposed algorithm considers the bandwidth on demand, link state, and the information about ingress-egress pairs to maximize the network performance and to prevent the waste of the limited resources. In addition, the interference-prediction supports the bandwidth guarantee in dynamic network to accept more requests. In the result, the proposed algorithm performs the effective admission control and QoS routing. In this paper, we analyze the required conditions of routing algorithms, the aspect of recent research, and the representative algorithms to propose the optimized path selection algorithm adequate to Internet traffic engineering. Based on these results, we analyze the problems of existing algorithms and propose our algorithm. The simulation shows improved performance by comparing with other algorithms and analyzing them.

**Keywords :** Interference-Prediction, Online Routing, Traffic Engineering, QoS routing

\* 학생회원, 한국항공대학교 대학원 정보통신공학과

(Department of Information and Telecommunication Engineering, Graduate School of Hankuk Aviation University)

\*\* 평생회원, 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부

(School of Avionics and Telecommunications, Hankuk Aviation University)

\*\*\* 정회원, 한국전자통신연구원

(Electronics and Telecommunications Research Institute)

접수일자: 2005년11월30일, 수정완료일: 2005년12월10일

## I. 서 론

차세대 전달망은 웹, 멀티미디어 스트리밍, 피어-투-피어 등의 다양한 인터넷 서비스를 통합 전달망 환경에서 제공하며, 이를 위해 다양한 프로토콜과 라우팅/스위칭 장비, 네트워크 제어 기술에 대한 연구가 현재 활발히 진행 중이다. 여러 가지 QoS 서비스 제공 기술 중, Traffic Engineering (TE)을 원활하게 수행할 수 있도록 하는 기반 기술로서 Multi Protocol Label Switching (MPLS) [4]가 광범위하게 수용되고 있다. MPLS 네트워크는 전달되는 패킷 헤더에 label을 붙여 전달함으로써 전송 경로를 explicit하게 구성할 수 있다. 이렇게 패킷이 전송되는 경로를 Label-Switched Path (LSP)라고 부른다. 서비스 제공자는 ingress 라우터에서 label encapsulation을 수행하고, LSP를 이용하여 가상의 회선을 생성함으로써 Virtual Private Wired Service (VPWS)와 Virtual Private LAN Service (VPLS) 등과 같은 가상의 전용회선 서비스를 제공할 수 있다. VPN 서비스 이외에도, 서비스 제공자와 사용자 간에 협상된 Service Level Agreement (SLA)에 따라 사용자가 요구한 대역폭, 딜레이, jitter, loss rate 등의 요구를 만족시킬 수 있는 메커니즘을 제공한다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 백본 전달망과 ISP 네트워크에서 동적으로 대역폭을 할당해 주는 서비스 제공자의 요구 사항을 만족시킬 수 있도록 설계되었다. 기본적으로 explicit 경로 설정이 가능한 MPLS 네트워크에 수용될 수 있으나, 제안 알고리즘의 활용 영역은 MPLS 네트워크에 국한되지는 않는다. ATM 등과 같이 가상 회선 기반의 서비스 제공이 가능한 영역에서도 효과적으로 활용될 수 있다.

제안한 알고리즘은 Minimum Interference Routing Algorithm (MIRA) [7]을 기반으로 설계되었다. 제안한 경로 설정 알고리즘은 기본적으로 MIRA와 같이 online 방식으로 동작한다. 즉, 라우팅 요청이 있을 때 마다 경로를 찾아주는 call-by-call 라우팅을 수행한다. 실제 통합 전달망 환경에서, 서비스 제공자는 User Network Interface (UNI)의 라우팅 요청에 따라 가능한 경로를 설정해 주어야 한다. 이 때, 현재 망의 상황과 요구 대역폭의 양을 고려하지 않는 기존의 최단 경로 알고리즘은 최적의 경로를 찾지 못하는 한계를 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 MIRA 등 최근에 제안된 경로 설정 알고리즘은 [18],[19] 등과 같은 프로토콜에 의해 수집된 정보를 바탕으로 망의 현재 상황을 고려하여 경로를 설정한다. 또한 경로 설정 시, 라우팅 요청의 ingress-

egress pair 정보 같은 quasi-static 정보를 활용하여 망의 활용성을 최대화시킬 수 있다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 이러한 정보들과 요구된 대역폭의 양을 효과적으로 활용하여 기존의 online 라우팅 알고리즘보다 한 단계 진화된 "admission control"과 QoS 라우팅의 기능을 수행한다. 또한 사용자의 요구를 적절하게 수용하면서, 전체 망 성능도 최대화할 수 있도록 경로를 설정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안된 알고리즘에 대한 관련 연구에 대해 간략히 소개하고, III장에서는 본 논문에서 제안하는 online 라우팅 알고리즘이 소개되며, IV장에서는 제안 알고리즘과 기존 알고리즘의 성능이 시뮬레이션을 통해 비교 및 분석되었다. 끝으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. RELATED WORKS

본 장에서는 몇 가지 Traffic Engineering(TE)을 다룬 기존의 연구 내용을 소개하고, 제안 알고리즘의 도출 배경에 대해 설명한다. TE에 관한 연구는 주로 network designing, provisioning, tuning of Internet에 관한 주제를 다루며, 최근 Internet Engineering Task Force (IETF)는 인터넷의 TE를 위한 기술과 메커니즘에 관한 표준화를 진행하였다. 특히, [1]에서는 네트워크의 자원 사용률과 성능을 최적화하는 일반적이고 기초적인 개념을 정의하였다. 이는 Internet TE 메커니즘에 관한 연구의 지침이 되기도 한다. 또한, [8]에서는 TE를 위한 MPLS의 주요 특징을 설명하고 MPLS 망을 기반으로 하는 TE의 요구조건을 기술하였다. MPLS TE의 가장 중요한 특징은 트래픽과 망 상황을 고려해서 최적의 LSP를 결정할 수 있는 메커니즘이라 할 수 있다. 최근에는 IST 프로젝트의 일환으로서, TE framework를 제안하는 TEQUILA<sup>[9]</sup> 프로젝트가 진행되었다. [10]에서는 자원의 활용도를 최대화하면서 요구되는 트래픽을 최대한 수용할 수 있는 TE 기술과 컨트롤 시스템이 제안되었다. 제안된 기법은 time-dependent offline TE 범주에 해당하며, non-linear programming formulation을 활용한 경로설정 알고리즘을 제안하였다.

순수한 offline 경로설정 방식의 단점은 동적으로 변화하는 망 토폴로지에 유연하게 반응하지 못하는 점과 최적의 경로를 찾기 위한 알고리즘의 복잡도가 높다는 점이다. 이를 보완하기 위해 offline으로 결정된 경로를 활용하여, 현재 망 상황에 능동적으로 대처할 수 있는 online 경로설정 모델에 관한 연구들이 진행되었다. 첫

번째 대표적인 모델은 Profile-Based Routing (PBR)이다<sup>[11]</sup>. PBR의 주요 특징은 경로설정 과정이 pre-processing phase와 online phase로 구분되어 있다는 것이다. pre-processing 단계에서는 traffic profile을 이용하여 각각의 ingress-egress pair 그룹에 대한 flow blocking을 예상한다. 이러한 계산은 전통적 기법인 multi-commodity flow [12]에 의해 이루어지며, 여기서 commodity는 traffic class에 해당한다. 선형적인 비용계산함수에 의해 각각의 링크에 최대 bandwidth가 결정되며, 트래픽 클래스에 비례하는 bandwidth가 할당된다. 이후 online phase에서 pre-processing 단계에서 클래스에 할당된 대역폭을 기준으로 경로 요청에 따른 온라인 라우팅 알고리즘을 수행한다.

또 하나의 online 경로설정 모델은 Design-Based Routing (DBR)<sup>[13]</sup>이다. DBR을 소개한 논문에서는 GMPLS 망 환경에서, 망 상태에 대한 정보를 이용하는 offline TE 기법이 SPF나 CSPF같은 라우팅 알고리즘에 기반한 online TE 기법보다 망 활용성 측면에서 성능이 더 나음을 보여준다. 이러한 PBR과 DBR의 단점으로 지적되는 사항은 망의 동적인 변화에 민감하게 반응하지 못한다는 것과 효과적으로 최적 경로를 결정하기 위하여 데이터 수집과 트래픽 요구량 분석 같은 추가적인 컴포넌트를 필요로 한다는 것이다.

다음으로 소개할 알고리즘은 본 논문에서 제안하는 알고리즘과 가장 관련이 깊은 CSPF와 MIRA이다. CSPF의 주 아이디어는 대역폭 등의 특정 제약조건을 충족시키지 못하는 모든 링크를 제거한 상태에서 최단 경로 연산을 수행하는 알고리즘이다. 대표적인 CSPF 알고리즘인 Widest Shortest Path(WSP)<sup>[14]</sup>는 가용 대역폭이 가장 큰 링크를 최단경로로 선택하여 현재 가장 작은 가용 대역폭을 가진 링크의 대역폭이 최대화 되도록 한다. 이 알고리즘은 ingress-egress pair 또는 미래 잠재적인 트래픽을 고려하지 않기 때문에 병목을 유발할 수 있다. 최근에는 Kodialam and Lakshman[7]에 의해 개선된 online routing algorithm인 MIRA가 제안되었다. ingress-egress pairs 정보를 이용하는 MIRA는 다른 최단 경로 알고리즘이나 WSP에 비해 보다 진화된 알고리즘이라 할 수 있다. MIRA에서는 소스와 목적지간에 경로 설정이 요구될 때 각 pair의 maximum flow, critical link 및 source-destination 간의 가중치를 고려하여 간섭을 최소화 하는 경로를 선택한다. MIRA에서 소개된 critical link의 개념은 특정 link의 대역폭 용량이 감소할 때, 임의의 pair의 maxflow 값이 감소하여 결과적으로 간섭의 효과를 미치게 되는 link를 의미

한다. 즉, 다른 pair들의 maxflow 크기를 많이 감소시키는 경로를 피하여 미래의 잠재적인 트래픽이 수용될 수 있도록 한다. 그러나 MIRA 또한 동적인 대역폭 요구에 유연하게 대처하는 데에는 한계가 있다.

### III. PROPOSED ALGORITHM

본 장에서는 제안 알고리즘의 개념을 기술하고, 라우팅 경로의 선택방식을 상세히 설명한다. 제안 알고리즘은 MIRA<sup>[7]</sup>와 마찬가지로 간섭 현상을 최소화시키며, 동적인 변화 상황에 대처하기 위해 online방식으로 동작하고, 동시에 현재 요구된 대역폭의 양을 실시간으로 모니터링 하여 미래의 망 상황에 어떻게 영향을 미치는가를 고려한다. [7]에 언급된 것과 같이 MIRA는 라우팅 경로를 선택하기 위해, MAX-MIN-MAX와 WSUM-MAX라는 두 가지 방식으로 link weight를 산출한다. 두 방식 모두 현재 링크에 남아있는 가용한 대역폭 용량을 일컫는 maximum flow (maxflow)를 활용하는데, 이 maxflow 값은 결국 소스에서 목적지까지 라우팅 될 수 있는 대역폭의 최대값을 결정하게 된다. 먼저 MAX-MIN-MAX의 목적함수는 모든 ingress-egress pair 사이에 존재하는 가장 작은 maxflow 값을 최대화 시키는 것이고, 두 번째 목적함수인 WSUM-MAX는 maxflow 값의 가중치된 합을 최대화 시킬 수 있는 경로를 선택하는 방식이다. 최근 [7]은 LEX-MAX<sup>[15]</sup>라는 새로운 방식을 제안했는데, 제안된 목적함수는 가장 작은 maxflow 값을 가능한 최대화 시키며 그와 동시에 순차적으로 두 번째로 작은 maxflow 값이 다음 우선순위로 가능한 최대화 될 수 있는 경로를 선택하는 방식이다. 기존의 방식보다 진화된 LEX-MAX 방식은  $\Delta$ -critical link라는 개념을 도입하였다. 토폴로지에 존재하는 특정 link의 대역폭이  $\Delta$  용량만큼 감소하였을 때, 다른 pair의 maxflow에 간섭효과를 미치게 된다면 이는  $\Delta$ -critical link에 해당한다. 제안된 알고리즘은 이러한  $\Delta$ -critical link 개념에 기반한 방식을 통해 간섭을 최소화할 수 있는 라우팅 경로를 선택하게 된다. 제안 알고리즘의 동작 방식을 설명하기에 앞서 본 논문에서 사용된 용어를 정의한다.

#### 3.1 Notations

$G(N,L,B)$ 는 노드 집합을 의미하는  $N$ , link 집합을 의미하는  $L$ , 그리고 대역폭의 양이  $B$ 로 이루어진 토폴로지를 의미한다.  $G(N,L,B)$  토폴로지에 존재하는 노드의

개수는  $n$ 으로, link의 개수는  $m$ 으로 표현한다. 그리고 ingress-egress 라우터들의 집합을  $P$ 로 나타낸다. 각각 pair를 이루는 ingress 노드와 egress 노드는  $(s,d)$ 로 나타낸다. 라우팅 경로의 결정은 라우팅 요청에 의해 이루어지는데, 현재 요구된 라우팅 요청은  $a$ 와  $b$  노드의 경로를 결정하는 것이라고 가정하고  $(a,b) \in P$ 과 같이 표현될 수 있다. 요구된 대역폭은  $D$ 로 표현하고,  $P(a,b)$ 는  $(a,b)$ 를 제외한 나머지 pair의 집합을 의미한다.  $\theta_{sd}$ 는  $s$ 와  $d$  노드 사이의 maxflow 값을 나타내고,  $R(l) \leftrightarrow$ 은 특정 link  $l$ 의 가용한 대역폭 용량을 의미하며,  $R_{\theta, sd}(l)$ 는 link  $l$ 의 가용한 대역폭과  $(s,d)$  pair의 maxflow 값의 차를 의미한다.  $\alpha_{sd}$ 는 특정 pair의 가중치를 의미하는데, 본 논문에서는 모든 pair의 가중치가 동일하다고 가정한다. 이러한 가중치는 망 관리자에 의해 정의되는 상대적인 중요도를 의미한다.

### 3.2 Relationship between $\Delta$ -critical link and dynamic traffic demand

LEX-MAX에서 소개된  $\Delta$ -critical link의 개념은 동적으로 변화되는 망 혼잡 상황을 고려해서 min-cut 이외의 link들도  $\Delta$  양에 따라 critical link가 될 수 있음을 보여준다. 즉, 이는 경로 후보 상에 존재하는 link들 중에서 각 pair의 min-cut link 이외의 link로 라우팅 되어도  $\Delta$  값에 따라 특정 pair의 maxflow 값에 영향을 줄 수도 있다는 것을 의미한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘에서는  $\Delta$  값을 현재 라우팅 요청의 요구 대역폭 값으로 정의한다. 이를 통해 제안 알고리즘은 시시각각 변화하는 요구 대역폭에 의해 발생하는 간섭의 정도를 정량적으로 예상할 수 있게 된다. 제안 알고리즘은 매번 라우팅 요청이 있을 때마다 경로를 결정하는 online 방식으로 동작하는데, 이때 동적으로 변화하는 요구 대역폭의 크기는 간섭의 정도를 결정하는 중요한 인자가 된다. 따라서 제안 알고리즘은 간섭 현상을 최소화시키기 위해 maxflow 값, 각 link에 남은 대역폭 등의 정보뿐만

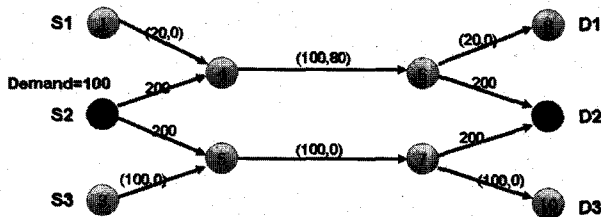


그림 1. 동적인 트래픽 요구량과  $\Delta$ -critical 링크  
Fig. 1.  $\Delta$ -critical link & dynamic traffic demand.

아니라 요구된 대역폭의 크기를 이용하여 특정 link의 가중치를 계산하고, 비용을 최소화할 수 있는 경로를 선택하게 된다. 그림 1은 동적인 트래픽 요구량과  $\Delta$ -critical 링크와의 관계를 보여준다. 그림의 예에서  $(S1,D1)$ ,  $(S2,D2)$ ,  $(S3,D3)$ 는 ingress-egress pair를 의미하며,  $S2$ 와  $D2$  사이에 100 units 만큼의 대역폭을 요구하는 라우팅 요청이 있다고 가정한다. 각 링크의 가용 대역폭과 maxflow이 그림에 나타나 있으며,  $(S2,D2)$ 의 라우팅 경로 설정이 망 전체 성능에 어떻게 영향을 미치는가를 분석하고자 한다.  $(S2,D2)$ 의 라우팅 경로는 4-6, 5-7이 될 수 있으며, 두 경로 모두 다른 pair의 maxflow에 영향을 미칠 수 있으므로  $\Delta$ -critical link가 된다. 하지만, network가 수용할 수 있는 미래의 트래픽 양을 고려해 보았을 때 두 링크는 서로 다른 criticality를 갖는다. 왜냐하면  $(S2,D2)$ 의 라우팅 경로가 2-4-6-9로 결정될 경우 미래의 잠재적인 트래픽의 양에 간섭하는 양이 20 unit밖에 되지 않으나, 2-5-7-9로 결정될 경우 간섭할 수 있는 양이 100 unit이 되기 때문이다. 따라서 두 링크의 criticality와 간섭의 상관관계를 규명하기 위해서는 현재 요청된 트래픽양이 다른 pair의 maxflow 값을 감소시키는 정도를 측정해야 한다. 제안 알고리즘은 이러한 criticality에 비례하는 간섭의 양을 고려하여 적절한 링크 비용을 계산한다.

### 3.3 Interference-Prediction based Online Routing algorithm

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 앞서 언급한 바와 같이 각 pair의 maxflow 값 및 각 링크의 가용한 대역폭, 현재 요구된 대역폭의 크기를 이용하여 각 링크의 criticality를 링크 비용으로 나타낸다. [15]에서 소개된 것처럼  $\Delta$ -critical link는 Eq(1)의 조건식을 반드시 만족시켜야 한다.

$$\Delta > R_{\theta, sd}(l), \quad R_{\theta, sd}(l) = R(l) - \theta_{sd} \quad \text{Eq(1)}$$

제안된 알고리즘에서  $\Delta$ -critical link를 찾는 방법은 [7]에 기술된 방법을 사용한다. 그리고, 제안 알고리즘에서는  $\Delta$ -critical link를 찾는 연산과  $\Delta$  값에 따른 차등적인 criticality의 계산이 기존의 알고리즘과 동일한 복잡도로 산출될 수 있다. 즉, 특정 link가  $\Delta$ -critical link일 경우에만 해당 링크의 criticality가 산출된다. 제안된 알고리즘에서 criticality를 구하는 equation은 Eq.(2)와 같다.

$$\sigma_{sd}(l) = \Delta - R_{\theta, sd}(l) \quad \text{Eq(2)}$$

표 1. 간섭 예측 기반 온라인 알고리즘 (IPOR)

Table 1. Interference-Prediction based Online Routing algorithm (IPOR).

ALGORITHM:

1.  $\Delta$  -is the bandwidth of a current request
2. For all  $(s, d) \in P$ , use MODIFIED APPROX  $\Delta$ -CRITICAL LINKS to compute the maxflow, the set of  $\sigma_{sd}(\Delta)$ , the set of  $C_{sd}(\Delta)$
3. Compute the weights  $w(l, \Delta) = \frac{1}{R(l)} \sum_{(s, d): l \in C_{sd}(\Delta)} \sigma_{sd}(\Delta)$
4. Eliminate all links which have residual bandwidth less than  $D$  and form a reduced network
5. Using Dijkstra's algorithm compute shortest path in reduced network using  $w(l, \Delta)$  as the weight in link  $l$
6. Route the demand of  $D$  units from a to b along this shortest path and update the residual

해당 ingress-egress pair에 대해 구해진 link들의 criticality를 계산한 후에 Eq(3)에 의해  $\Delta$ -critical link의 비용을 구할 수 있다

$$w(l, \Delta) = \frac{1}{R(l)} \sum_{(s, d): l \in C_{sd}(\Delta)} \sigma_{sd}(\Delta) \quad \text{Eq(3)}$$

$C_{sd}(\Delta)$ 는  $\Delta$ -critical link의 집합을 의미한다. 링크들의 가중치가 결정되면 a에서 b까지 최단경로 라우팅 알고리즘에 의해 경로가 선택된다. 최단경로 라우팅 알고리즘을 수행할 때, 링크  $l$ 의 비용이 Eq(3)의 값이 된다. 표1은 제안된 알고리즘 Interference-Prediction based Online Routing algorithm (IPOR)의 link 비용 산출과정을 요약한 내용이다.

#### IV. 성능 평가

본 장에서는 제안된 알고리즘 IPOR과 기존의 online 라우팅 알고리즘인 MIRA, CSPF의 성능을 비교한다. 성능평가 비교 항목은 [7]에서 측정했던 항목과 동일하며, 개선된 성능을 보이기 위해 요구 대역폭이 동적으로 변화하도록 환경을 구성하였다. 시뮬레이션 토폴로지 또한 [7]에서 사용한 토폴로지 (그림2)를 이용한다. 각 ingress-egress pair는 그림에 표시되어 있으며, 얇게 표현된 link의 capacity는 1200unit(OC-12)를 나타내고 굵게 표현된 link의 capacity는 4800unit(OC-48)을 나타낸다. 또한, maxflow의 연산은 기존의 연구에서 주로 사용된 방식인 highest label preflow push algorithm<sup>[16]</sup>을 사용하였다. 이 알고리즘에서 두 노드간의 maximum flow의 계산은  $O(n^2\sqrt{m})$ 의 복잡도를 갖는다. 주어진 토폴로지는 시뮬레이션이 완료되는 시점까지 변하지 않으며, 알고리즘 한번 수행으로  $\Delta$ -critical link와 해당 ingress-egress pair의 criticality가 동시에 산출된다.

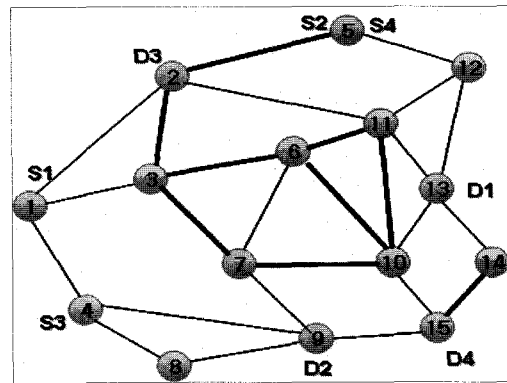


그림 2. 시뮬레이션 토폴로지  
Fig. 2. Simulation topology.

표 2. 시뮬레이션 파라미터  
Table 2. Simulation parameter.

	Request demand	Network load
Small demand size Exp. SD	Uniform[1,5]	14,000 request
Medium demand size Exp. MD	Uniform[1,50]	1,400 request
Large demand size Exp. LD	Uniform[1,100]	1,000 request

표 2.에서와 같이 요구 대역폭은 uniform하게 분포하도록 설계되었으며, 망 전체 자원이 포화될 때까지 라우팅 요청을 발생시켰다. 각 pair들 간에 발생하는 라우팅 요청도 uniform하게 분포하도록 생성시켰다. 제안된 알고리즘이 동적인 환경에서 기존의 알고리즘보다 최적의 성능을 보이는 것을 확인하고자 요구 대역폭 크기를 세 단계( small demand size, medium demand size, and large demand size)로 나누어 실험 하였고 시뮬레이션 토폴은 NS2<sup>[17]</sup>를 사용하였다.

##### 4.1. Accepted requests

그림 3, 그림 4는 각각 Exp. SD와 Exp. MD의 시뮬레이션 결과, 경로설정에 성공하여 할당된 대역폭을 보

여준다. 모든 알고리즘에 대해서, 전체 토폴로지가 수용하는 대역폭이 라우팅 요청의 개수에 비례하여 점차적으로 증가하였고, 결국 라우팅 요청의 개수가 각각 약 8000개, 약 1000개가 되었을 때 포화되는 것을 볼 수 있다. Exp. SD의 경우 제안 알고리즘과 MIRA의 성능차이가 크게 나타나지 않지만, Exp. MD의 경우 제안 알고리즘이 MIRA에 비해 전체 네트워크 자원을 보다 효율적으로 사용하여 saturation 상태가 다른 알고리즘에 비해 느리게 도달하는 것을 볼 수 있다. CSPF 알고리즘은 두 가지 환경 모두에서 비효율적인 성능을 보인다.

두 번째 성능 비교 항목은 경로설정에 성공한 라우팅 요청의 개수를 측정하였다. 그림 5, 그림 6은 각각 Exp. SD, Exp. MD 경우에 대하여 전체 라우팅 요청 대비 수용된 라우팅의 개수를 보여준다. 두 실험 모두 할당된 대역폭에 대한 실험과 비교했을 때, 전체적인 순위에는 크게 변동이 없음을 확인할 수 있다. 따라서 트래픽의 요구 대역폭의 변화량이 큰 Exp. MD의 경우 할당된 라우팅의 대역폭과 라우팅의 요청개수 모두 IPOR이 다른 알고리즘에 비하여 더 나은 성능을 보임을 확인할 수 있다.

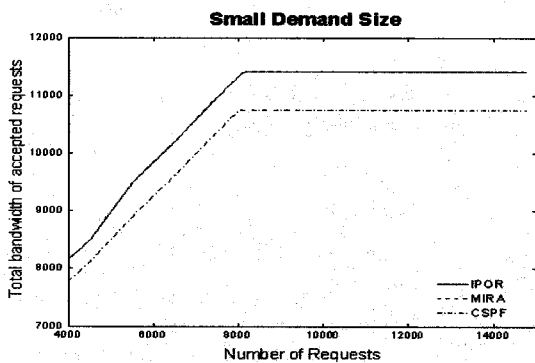


그림 3 전체 토폴로지가 수용한 대역폭: small demand size

Fig. 3. Bandwidth of accepted requests : small demand size.

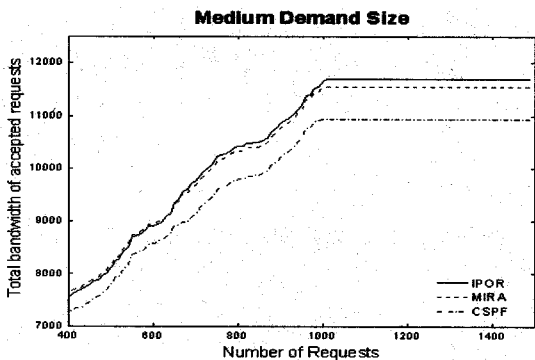


그림 4 전체 토폴로지가 수용한 대역폭: Medium demand size

Fig. 4. Bandwidth of accepted requests : Medium demand size.

다음 실험에서는 요구 대역폭이 더욱 넓은 범위에서 변화하도록 환경을 구성하였다. 그림 7, 그림 8은 각각 Exp. LD의 할당된 라우팅의 대역폭과 라우팅 요청의 개수를 보여준다. 결과에서 보듯이 Medium demand size 에서의 결과와 큰 차이는 saturation point에 대한 라우팅 요청의 개수가 약 500개인 것을 제외하고

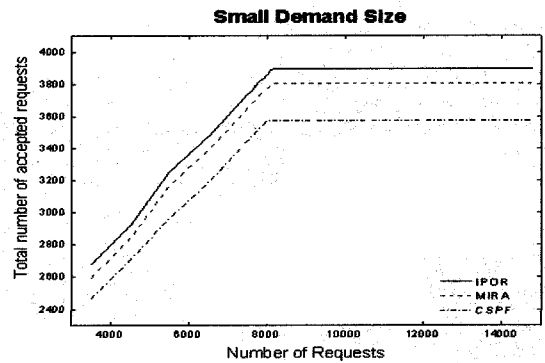


그림 5. 전체 라우팅 요청대비 수용된 라우팅 개수: small demand size

Fig. 5. Number of accepted requests : small demand size.

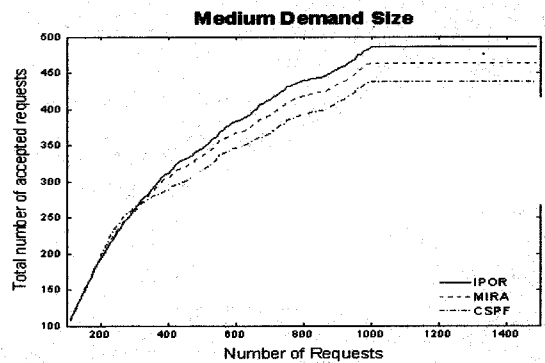


그림 6. 전체 라우팅 요청대비 수용된 라우팅 개수: Medium demand size

Fig. 6. Number of accepted requests : Medium demand size.

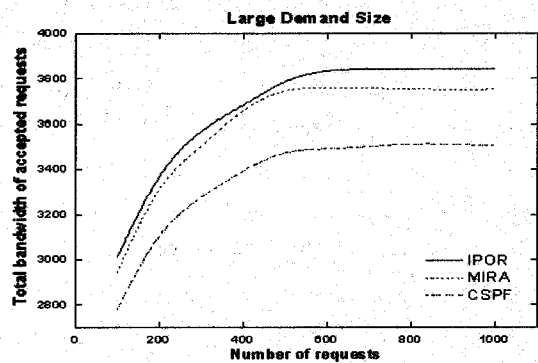


그림 7. 전체 토폴로지가 수용한 대역폭: Large demand size

Fig. 7. Bandwidth of accepted requests : Large demand size.

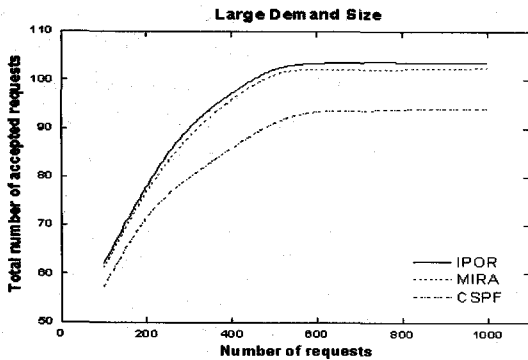


그림 8. 전체 라우팅 요청대비 수용된 라우팅 개수: Large demand size  
 Fig. 8. Number of accepted requests : Large demand size.

Exp. SD, Exp MD의 결과와 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

#### 4.2. Interference

그림 9, 그림 10은 각 라우팅 요청에 대한 경로 설정이 완료된 후, 모든 ingress-egress pair의 maxflow 값의 합과 maxflow 값 중 최소값을 나타낸 그래프이다. 결과에서 IPOR의 maxflow 값이 합과 최소값 모두에서 MIRA, CSPF의 값보다 높게 나타남을 확인할 수 있다.

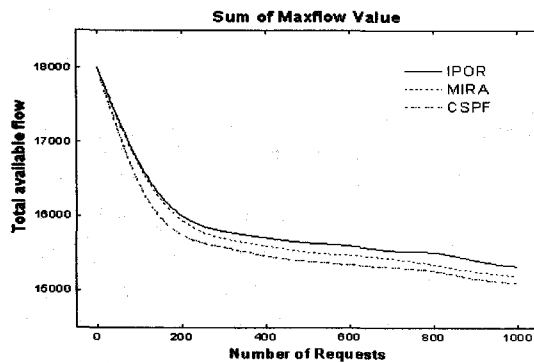


그림 9. 전체 maxflow 값의 합  
 Fig. 9. Sum of Maxflow value.

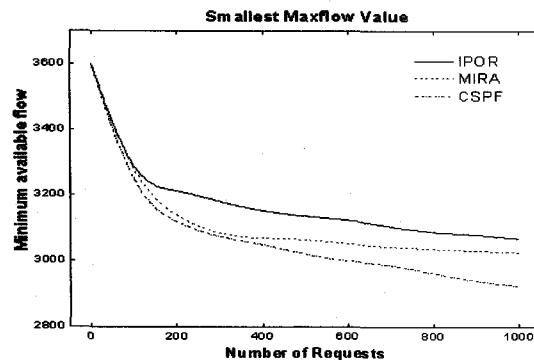


그림 10. 전체 maxflow 값 중 최소값  
 Fig. 10. Smallest Maxflow value.

maxflow 수치가 높게 나타나는 것은 잠재적으로 수용할 수 있는 flow가 많다는 것을 의미하며, 이는 제안된 알고리즘의 간섭이 적게 나타나는 것을 의미한다.

### V. 결 론

본 논문에서는 경로의 대역폭을 보장하는 동적 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘은 미래의 잠재적인 요청을 최대한 수용할 수 있도록 "minimum interference"의 개념에 기반하여 라우팅 경로를 결정한다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 효과적으로 측정된 성능평가에서 확인한 바와 같이 동적인 트래픽 요구에 적합한 경로설정 알고리즘이라고 할 수 있었다.

MIRA<sup>[7]</sup>의 경우 경로 요청의 대역폭 요구에 따른 링크간 서로 다른 criticality를 염두에 두지 않는 반면 제안된 알고리즘은 링크의 가중치를 계산할 때 잔여 수용량 뿐 아니라 현재의 대역폭 요구량까지 고려하여 네트워크의 활용성을 높이며, 다른 알고리즘에 비하여 보다 많은 라우팅 요청을 수용할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 확인한 것처럼, 제안된 알고리즘은 현재 요구된 대역폭 크기를 고려하지 않는 CSPF나 MIRA에 비해 훨씬 더 많은 대역폭을 수용할 수 있으며, 다른 알고리즘에 비하여 간섭이 적게 유발함을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 MPLS 망의 LSPs 경로설정 알고리즘 또는 GMPLS 망의 프로비저닝 방식으로 활용될 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] Awduche, D., Chiu, A., Elwalid, A., Widjaja, I., Xiao, X., "Overview and Principles of Internet Traffic Engineering", RFC 3272, May 2002.
- [2] Moy, J., "OSPF Version 2", RFC 2328, April 1998.
- [3] Callon, R., "Use of OSI IS-IS for Routing in TCP/IP and Dual Environments", RFC 1195, December 1990.
- [4] Rosen, E., Viswanathan, A., Callon, R., "Multiprotocol Label Switching Architecture", RFC 3031, January 2001.
- [5] About-Magd, O., "Documentation of IANA assignments for Constraint-Based LSP setup using LDP (CR-LDP) Extensions for Automatic Switched Optical Network", RFC 3475, March 2003.
- [6] Awaduche, D., Berger, L., Gan, D., Li, T., Srinivasan, V. and G. Swallow, "RSVP-TE:

- Extensions to RSVP for LSP Tunnels", RFC 3209, prop, December 2001.
- [7] Kodialam and Lakshman, "Minimum Interference Routing with Applications to MPLS TrafficEngineering," IEEE Infocom 2000. March 2000.
- [8] Awduche, D., Malcolm, J., Agogbua, J., O'Dell, M., McManus, J., "Requirements for Traffic Engineering Over MPLS", RFC 2702, September 1999.
- [9] E.Mykoniati et al., "Admission Control for Providing QoS in DiffServ IP Networks: The TEQUILA approach", IEEE Communications Magazine, January 2003.
- [10] Panos Trimintzios, Timothy Bauge, George Pavlou, Paris Flegkas, Richard Egan, "Quality of service provisioning through traffic engineering with applicability to IP-based production networks", computer communications, 2003.
- [11] Subhash Suri, Marcel Waldvogel, Daniel Bauer, Priyank Ramesh Warkhede, "Profile-based routing and traffic engineering", computer communications, 2003.
- [12] R.K. Ahuja, T.L. Magnanti, J.B. Orlin, "Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications", Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1993.
- [13] I. Widjaja, I. Saniee, A. Elwalid and D. Mitra, "A New Approach for MPLS Traffic Engineering", computer communications, 2003.
- [14] Roch A. Guerin, Ariel Orda, Douglas Williams, "QoS Routing Mechanisms and OSPF Extensions", GLOBECOM, 1997.
- [15] Koushik Kar, Murali Kodialam. T. V.Lakshman, "MPLS Traffic Engineering Using Enhanced Minimum Interference Routing: An Approach Based On Lexicographic Max-Flow", IWQOS, 2000.
- [16] A. V. Goldberg, R. E. Tarjan, "Solving Minimum Cost Flow Problem by Successive Approximation", Proceedings of the 19th ACM Symposium on the Theory of Computing, pp.7-18, 1987.
- [17] ns-2 network simulator. URL : <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [18] R. Guerin, D. Williams, G. Apostolopoulos, S. Kamat, A. Orda, T. Przygienda, QoS Routing Mechanisms and OSPF extensions, IETF RFC 2676, 1999.
- [19] H. Smit, T. Li, Intermediate System to Intermediate System (IS-IS) Extensions for Traffic Engineering (TE), IETF RFC 3784, June 2004.

---

 저 자 소개
 

---



**이 동 훈**(학생회원)  
 2003년 한국항공대학교 정보통신 공학과 학사 졸업.  
 2005년 한국항공대학교 정보통신 공학과 석사 졸업.  
 <주관심분야 : 네트워크 프로토콜, RFID, 센서 네트워크>



**이 성 창**(평생회원)  
 1976년~1983년 경북대학교 전자공학과 학사  
 1983년~1985년 한국과학기술원 전기및전자 공학과 석사  
 1985년~1987년 한국과학기술원 시스템공학센터 연구원  
 1987년~1991년 Texas A&M University 공학박사  
 1992년~1993년 한국전자통신연구원  
 1993년~현재 한국항공대학교 정보통신공학과 교수  
 <주관심분야 : BcN, 홈 네트워크, 유비쿼터스 네트워크>



**예 병 호**(정회원)  
 1982년 2월 경북대학교 전자공학과(학사)  
 1984년 2월 경북대학교 전자공학과(석사)  
 2001년 8월 한국항공대학교 통신정보공학과(박사)  
 1984년 3월~2001년 1월 한국전자통신연구원 교환기술연구단 책임연구원  
 2002년 2월~현재 한국전자통신연구원 광대역통합망연구단 팀장  
 <주관심분야 : 통신망 관리, 유무선 통합, QoS 제어>