

---

# 경계선 게이트웨이 프로토콜의 의사 결정 속성과 공개된 문제점 분석

이강원\* · 함영만\*\*

BGP Decision Making Process and Open Problem Analysis

Kang-won Lee\* · Young-marn Ham\*\*

## 요 약

본 논문의 목적은 인터도메인 라우팅 프로토콜인 BGP의 '최근동향'을 조사하는 것이다. 먼저 BGP를 BGP 정책과 의사 결정 과정 중심으로 살펴보았다. 그리고 인터도메인 라우팅의 'open question(공개된 문제점)'으로 남아 있는 문제들을 1) 프로토콜의 안정성, 2) 트래픽 엔지니어링, 3) QoS(Quality of Service) 관점에서 조사하고, 왜 이 문제들이 현재 해결하기 어려운지를 살펴보았다. 또 이 문제들을 해결하기 위한 BGP 분야의 가장 최근 연구 동향을 조사하였다.

## ABSTRACT

The objective of this paper is to investigate the 'state of the art' of the interdomain routing protocol BGP. First, BGP is critically reviewed focusing on the BGP policy and decision making process. And then the problems which still remain as open questions are investigated in the areas of 1) protocol stability, 2) traffic engineering and 3) quality of service. The recent research trend to answer the open questions is discussed.

## 키워드

BGP속성, 라우팅 정책, 인터도메인, 트래픽 제어

## Key word

BGP, interdomain, IGP, EGP, Business relationship, Traffic engineering.

---

\* 정회원 : 서울과학기술대학교 (kwlee@seoultech.ac.kr)

\*\* 정회원 : 서울과학기술대학교

접수일자 : 2011. 10. 10

심사완료일자 : 2011. 10. 26

## I. 서 론

인터넷의 초창기에는 최종 목적지로 패킷의 경로를 설정하는 문제가 지금보다 훨씬 단순한 문제였다. 오늘날의 기준에서 보면 인터넷의 크기도 매우 작았고, 운영 주체도 NSFNET 하나였기 때문에 인터넷 라우팅 프로토콜에 대한 요구조건도 매우 단순하여 최단 경로 라우팅으로 충분하였다. 인터넷의 상업화가 시작되고 이용자 수가 폭발적으로 늘어남에 따라 ISP(Internet Service Provider)들은 경제적인 혹은 정책적인 이유로 인터넷 트래픽의 흐름을 제어하는데 관심을 갖기 시작하였다. BGP(Border Gateway Protocol)는 ISP가 경로 선택(패킷을 어디로 전송할지)과 경로 전파(경로를 누구에게 전파 할지)를 제어하고자 하는 필요로부터 탄생되었다.

현재의 인터넷은 전 세계에 걸쳐 분산된 컴퓨터 네트워크의 집합이다. 이들 네트워크 각각은 도메인 혹은 AS(Autonomous System)로 불린다. AS는 같은 라우팅 정책을 사용하는 네트워크나 네트워크의 모임인데, 하나의 기관(Authority)에 의해 운영된다. 이들 AS들 각각은 AS내에서 라우팅 정보의 교환을 위해서 IS-IS(Intermediate System to Intermediate System)나 OSPF(Open System Path First)와 같은 IGP(Interior Gateway Protocol)들을 사용하는데 이들은 인트라도메인 라우팅으로 불린다. 한편 AS간에는 인터도메인 라우팅으로 구분되는 EGP(Exterior Gateway Protocol)인 BGP가 사용된다.

한 AS내에서 사용되는 IGP와 AS간에 사용되는 EGP의 목적이 서로 다르기 때문에 서로 다른 프로토콜이 사용되는 것은 당연하다. 모든 IGP 프로토콜은 출발지에서 목적지까지 패킷을 가능한 빠르게 효율적으로 전송하는 것을 목표로 삼을 뿐 정책적인 측면은 전혀 고려하지 않는다. 반면에 AS간 사용되는 EGP 라우터들은 정책적인 측면을 많이 고려해야 한다. 예로 AS A는 AS B에서 발생하여 AS C로 향하는 패킷이, AS A가 AS B와 AS C 사이의 최단 경로 상에 존재한다고 할지라도, AS A 경유를 허용하지 않을 수 있다. 반면에 AS B와 C가 경유 서비스를 위해 AS A에게 일정액을 지불하는 customer들이라면 AS A는 provider 입장에서 AS B와 C에게 기꺼이 패킷 경유 서비스를 제공할 것이다. 일반적으로 EGP 특히 BGP는 interAS 트래픽 처리 시 강요되는 여러 종류의

라우팅 정책을 허용하도록 설계되어 왔다. 이 라우팅 정책은 매우 광범위하여 일일이 열거하기는 곤란하지만 크게 다음의 4가지로 분류할 수 있다[1].

- **business relationship policy**: AS가 자신의 이웃과 맺고 있는 경제적인 그리고 정책적인 관계로부터 발생.
- **traffic engineering policy**: 정체를 피하고 좋은 서비스 품질을 제공하기 위해 ISP 내에서, 혹은 AS간 peering 링크들의 트래픽 흐름을 제어할 필요로부터 발생.
- **scalability policy**: 제어 트래픽을 줄이고 라우터의 과부하를 피하기 위한 필요로부터 발생.
- **security 관련 policy**: 고의적이거나 우연적인 공격으로부터 ISP를 보호하기 위한 목적으로부터 발생.

아직도 인터도메인 라우팅 방법인 BGP는 매우 어렵고 힘든 연구 분야로 남아 있다. 그 이름이 나타내는 것처럼 인터도메인 라우팅은 서로 다른 AS들 사이에 라우팅을 나타낸다. 이 AS들은 완전히 독립적인 주체로서 단지 지역적인 중요도를 갖는 정책들을 기반으로 그들 자신의 라우팅을 수행한다. 이러한 환경 하에서 AS들 사이에 사업과 경쟁과 같은 조건들은 AS별로 서로 상충되는 정책들을 사용하여 완전히 독립적으로 운영하는 라우팅과 아울러 인터도메인 라우팅 문제를 매우 어렵게 만든다.

과거 수년간에 걸쳐 BGP에 나타나는 여러 문제들, 즉 route oscillation[2,3,4], slow convergence[5], forwarding loop [3], security[6,7,8,9,10], 제한된 traffic engineering 능력[11,12,13,14,15], 그리고 QoS(Quality of Service) 문제 [16,17] 등을 해결하기 위하여 많은 노력이 있었다. 주로 어떤 특정 문제를 해결하기 위한 노력이 개별적으로 진행되어 왔는데 이는 해당 문제를 어느 정도 해결해 주었지만 다른 문제점들을 야기 시키고 전반적으로 복잡성을 증가 시켰다[18]. 이와 같은 짜깁기 식의 접근 방법은 문제 해결에 도움이 되었다기 보다는 오히려 근본적인 문제 해결을 가로 막아 왔다고 볼 수 있다.

본 논문의 목적은 인터도메인 라우팅 프로토콜인 BGP의 ‘최근동향’을 조사하는 것이다. 먼저 BGP를 BGP 정책과 의사 결정 과정 중심으로 살펴보았다. 그리고 인터도메인 라우팅의 ‘open question’으로 남아 있는 문제들을 1) 프로토콜의 안정성, 2) 트래픽 엔지니어링, 3) QoS(Quality of Service) 관점에서 조사하고, 왜 이 문제들

이 현재 해결하기 어려운지를 살펴보았다. 또, 이 문제들을 해결하기 위한 BGP 분야의 가장 최근 연구 동향을 조사하였다.

## II. Border Gateway Protocol

본 절에서는 먼저 BGP에 대해 간단히 살펴보고 BGP의 속성과 라우팅 정책, 그리고 의사 결정 과정에 대하여 조사하였다.

### 2.1. BGP

인터넷의 라우팅은 인접한 한 블록의 IP 주소를 나타내는 prefix 수준에서 이루어진다. 이웃하는 AS들은 한 쌍의 edge 라우터 사이에 BGP 세션을 설정함으로써 라우팅 정보를 교환한다. 두 개의 라우터들은 특정 목적지 prefix에 도착하는 방법에 관한 새로운 정보를 획득하면, 한 세션을 설정하고 변경(Update) 메시지를 교환한다. 주어진 prefix에 대해서 라우터는 목적지 prefix로 가는 새로운 경로를 이웃 AS에게 알리기 위하여 광고(Advertisement)를 하거나 그 prefix로 가는 경로가 더 이상 존재하지 않는다는 것을 나타내기 위해 삭제(Withdrawal) 메시지를 보낸다.

BGP 라우팅은 한 AS에서 국지적으로 구축된 정책에 의존한다. BGP 라우터는 동일한 목적지 prefix에 대하여 다수개의 경로를 수신할 수 있다. 경로 광고를 수신하자마자 라우터는 원하지 않는 경로를 걸러 내거나, 그 경로와 관계된 속성을 변경시키기 위해 수입(Import) 정책을 적용하는데 이는 망 운영자들이 경로 선택에 영향을 미치게 하기 위함이다. 라우터는 그것이 들른 모든 경로들 사이에서 목적지 prefix로 가는 가장 최선의 경로를 선택하기 위하여 의사결정 과정(Decision Process)을 사용한다. 라우터는 가장 좋은 경로의 속성을 조정하거나, 이 경로를 인접 AS들에게 광고할지의 여부를 결정하기 위하여 수출(Export) 정책을 사용한다. 망 운영자는 인접하는 AS들 사이에 상업적인 관계를 토대로 인접 AS들에게 경로들의 분배를 제한하기 위하여 수출 정책을 종종 사용한다. 예로 peer나 provider로부터 배운 경로들을 다른 peer나 provider에게 재 광고하지 않는다.

대규모의 backbone 망은 다수개의 BGP 라우터들과 인접한 AS와 다수개의 BGP 세션을 갖고 있다. 예로 라우팅 정보를 교환하는 두 개의 대규모 AS들은 다수개의 지리적 위치에서 서로 BGP 세션을 가질 수 있다. 인접한 도메인들과 BGP 메시지들을 교환하는 것 외에 AS는 그것의 라우터들 사이에 라우팅 정보를 분배하기 위하여 iBGP를 사용할 수 있다. 가장 간단한 접근 방법은 각 쌍의 라우터들 사이에 iBGP 세션을 구축하는 것이나, 대부분의 대규모 망은 보다 나은 확장성을 달성하기 위하여 경로 reflector나 confederation을 사용하여 계층적 형상을 구축한다. iBGP 세션은 iBGP 이웃으로부터 배운 경로들은 다른 iBGP 이웃에게 광고되지 않는다는 것을 제외하면 eBGP와 같은 방법으로 작동한다. 모든 라우터는 다수의 eBGP와 iBGP 이웃들로부터의 광고들 가운데 각 목적지 prefix를 위한 가장 좋은 경로를 선택한다. 라우터가 선택하는 최선의 경로는 망 내의 위치에 의존하기 때문에 각 라우터는 똑 같은 최선의 경로를 선택하지 않는다.

### 2.2. BGP 속성과 라우팅 정책

서론에서 언급했듯이 BGP 라우팅 정책은 해당 정책의 목적에 따라, 크게 4가지 즉, business relationship, traffic engineering, scalability, 그리고 security 정책들로 구분된다. 이 정책들의 목적을 달성하기 위하여 BGP는 다양한 방법들을 사용한다. 본 절에서는 먼저 BGP에서 사용하는 속성들을 살펴보았다. 그리고 각 정책들이 소기의 목적을 달성하기 위하여 어떤 속성, 혹은 방법들을 사용하는지 살펴보았다.

#### 2.2.1 BGP 속성

##### 1) Local Preference

다른 경로에 비해 어떤 특정 경로의 선호도를 나타내기 위하여 사용하는 척도이다. 이 값은 각 목적지 prefix를 위해 어떤 BGP 경로가 선택되는지에 영향을 미친다. 이 척도의 변경은 BGP 광고에서 경로 속성을 추가, 삭제 혹은 수정함으로써 수행된다.

##### 2) AS-Path

이 속성은 특정 prefix를 위한 광고가 거쳐 간 AS들을 포함한다. prefix가 한 AS로 통과되어 질 때 AS는 자신의 AS 경로 속성에 AS 번호를 추가한다.

### 3) Community

복잡한 라우팅 정책의 구성을 간단히 할 수 있도록 BGP에 추가된 속성으로 한 경로를 특정 식별자(Identifier)로 결부시킨다. 이 community 속성은 높은 표현력을 갖고 있어서 다른 방법으로 표현하기 어려운 다양한 종류의 정책들을 쉽게 나타내 준다. 예로 한 community 속성 값을 수신 라우터가 'local preference' 값을 결정하는데 영향을 미칠 수 있고 다른 값은 특정 경로가 다른 라우터에서 삭제되도록 할 수 있다.

### 4) MED

이 속성은 두 개의 인접한 AS 사이에서 만 사용되고, 이 두 개의 AS들을 넘어서 다른 AS들로는 전파되지 않는다. 이런 이유로 입력 트래픽을 균형화 하는데 MED의 사용은 두 AS 사이에 하나 이상의 연결이 있는 경우에 국한된다. 한 경로에 높은 MED 값을 주는 것은 트래픽이 다른 경로로 흐르도록 한다. 이 속성은 연결 링크 중의 하나는 높은 대역폭을 갖고, 다른 링크는 낮은 대역의 backup 링크일 때 유용하게 사용될 수 있다.

### 5) Next-Hop

이 속성은 'AS-path'를 시작하는 라우터 인터페이스의 IP 주소를 나타내는데 패킷을 목적지로 보내기 위하여 패킷을 전송할 next-hop 라우터 인터페이스의 IP 주소를 나타낸다. 이 속성 값을 AS내의 한 라우터가 출구 라우터로 패킷을 전달하고자 할 때 forwarding table을 구축하는데 사용된다.

### 6) IGP Metric

5)에서 언급한 것처럼 next-hop 속성 값을 이용하여 forwarding table을 구축하기 위하여 라우터는 next-hop 속성 값인 IP 주소를 IGP에게 제공한다. 이때 사용되는 IGP는 OSPF나 IS-IS 등인데 next-hop 라우터 인터페이스로 가는 최소 비용 경로를 찾기 위하여 적절한 IGP 측도를 사용한다.

### 7) Origin Type

이 속성은 prefix가 origin AS로 BGP에 의해 어떻게 전송되었는지를 나타낸다. prefix들은 직접 연결된 인터페이스나 수동으로 구축되는 정적 경로로부터, 혹은 IGP나 EGP를 통하여 습득될 수 있다.

### 8) eBGP over iBGP

목적지 prefix로 향하는 경로 선택 시, iBGP를 통해 얻은 AS내를 통과하는 경로는 AS내의 트래픽을 증가시키는 요인이 되기 때문에, 바로 AS를 떠나는 eBGP를 통해 얻은 경로를 선호한다.

#### 2.2.2 BGP 정책과 사용 속성

BGP 라우팅 정책은 매우 광범위하여 일일이 열거하기는 곤란하지만, 서론에서 언급했듯이 크게 4가지로 분류할 수 있다. 본 절에서는, 각 정책들이 소기의 목적을 달성하기 위하여 어떤 속성들과 기법들을 사용할 수 있는지 살펴보았다.

#### 1) Business Relationship Policy

한 AS가 인접 AS와 갖는 관계는 크게 customer-provider, peer-peer, 그리고 backup 세 가지다. AS는 인접 AS와의 관계에 따라 한 경로보다 다른 경로를 선호할 수 있는데 이를 구현하기 위하여 다음의 속성들을 이용한다.

##### - Local Preference

AS는 peer나 provider로부터 배운 경로보다 customer에게서 배운 경로를 선호한다. 이는 customer를 통하여 트래픽을 전송하면 수익이 발생하지만 provider를 통해 트래픽을 전송하면 비용이 발생하기 때문이고, peer를 통한 트래픽 전송은 한쪽 편이 더 많은 트래픽을 받게 되어 peer 관계가 깨지거나 비용 지불을 요구받을 빌미를 제공하기 때문이다. AS는 해당 경로가 인접 AS와 갖는 관계에 따라 서로 겹치지 않는 local preference 값을 할당함으로써 이 정책을 구현할 수 있다.

##### - Community

provider나 peer로부터 배운 경로는 다른 provider나 peer로 전달되지 않는다. 이는 AS가 한 provider나 peer로부터 받은 트래픽을 다른 provider나 peer에게 전달할 경제적인 이유가 없기 때문이다. 이것은 해당 세션의 business relationship을 나타내는 community 속성을 광고하고, 경로를 전파할 때 특정 community 속성 값을 갖는 경로를 삭제함으로써 수행될 수 있다.

#### 2) Traffic Engineering Policy

AS들은 지연 시간을 줄이거나 신뢰도를 개선하기 위하여 여러 지점에서 서로 연결되어 가능한 경로의 수가 증

가한다. BGP 정책의 두 번째 목적은 성능을 최대화하기 위하여 같은 business relationship 군 안에서 여러 속성 값들을 적절히 사용하여 트래픽 흐름을 조정하는 것이다.

- IGP Cost (출력 트래픽 제어)

망 운영자는 IGP 링크 비용을 수정함으로써 출력 트래픽 흐름을 조절할 수 있다. 가장 일반적인 방법은 'hot potato' 라우팅이라 불리는 'early-exit' 라우팅인데 AS는 패킷이 거쳐 가는 링크 수를 최소화 함으로써 내부망의 정체를 최소화하기 위하여 가장 가까운 출구점으로 패킷 트래픽을 전달한다.

- Local Preference (출력 트래픽 제어)

또 다른 일반적인 방법은 이웃 AS로 가는 출력 링크의 정체를 줄이는 것이다. 이는 여러 링크들 사이에 부하분배(Load Balance)를 통해 이루어지는데, local preference 값을 변화시킴으로써 수행된다. 예로 AS B가 출력 트래픽을 AS A로 가는 링크로부터 AS C로 가는 링크로 바꾸기를 원한다고 하자. 이때 AS B는 A를 거쳐 가는 경로의 local preference 값을 줄이거나 C를 거쳐 가는 경로의 local preference 값을 증가시킴으로써 AS A로 가는 트래픽 양을 줄이거나 AS C로 가는 트래픽 양을 늘릴 수 있다.

- MED (입력 트래픽 제어)

각 링크별 입력 트래픽 양을 조절하기 위해서 AS는 각각의 링크로부터 수신하는 트래픽 양을 조절하는 장치를 필요로 한다. 이는 다수개의 링크를 통해, 서로 연결된 한 쌍의 AS 사이에 MED 속성 값을 수정함으로써 수행된다.

- AS-Path (입력 트래픽 제어)

BGP는 여러 hop 떨어져 있는 AS들의 경로 선택을 제어할 수 있는 장치를 갖고 있지 않다. 그러나 AS는 AS-path 길이를 인위적으로 증가시키기 위하여 AS-path에 자신의 AS 번호를 여러 번 덧붙이는 간접적인 방법을 이용할 수 있다. 예로 AS B가 AS A로부터 오는 트래픽을 AS C로부터 받고 싶다고 하자. AS B는 AS A로 보내는 BGP 광고의 AS-path 속성에 자신의 AS 번호를 여러 번 덧붙인다. 이는 이 광고에 AS-path 길이를 증가시키고, AS C에 의해 다른 AS에게 광고된 경로들이 더 선호되게 만든다. 결국 AS B는 AS C로부터 트래픽을 받게 된다.

- Community

AS는 원하는 정책을 수행하기 위하여 특정 라우터를

원격 제어할 필요가 있다. AS A는 그것의 라우터들이 어떤 community 속성들에게 특정 local preference 값을 할당하게 함으로써 AS B가 자신의 경로에 관하여 AS A의 라우팅 정책을 조정하게 할 수 있다.

3) Scalability Policy

인접 AS들에서 설정 오류나 고장은 과도한 update를 발생시킨다. 너무 자주 update를 보내면 경로 불안정(Route Instability)이 되어 낮은 서비스 품질을 불러오거나 라우터의 처리능력이나 메모리 용량에 과부하가 걸린다. 이는 결국 사고나 라우터 고장을 야기시킨다. 적절하게 구축된 BGP 정책들은 이런 문제들에 대한 망의 회복력을 증가시킬 수 있다. 일반적으로 사용되는 방법은 다음과 같다.

- Filtering이나 Community 속성

filtering이나 community 속성을 이용하여 라우팅 테이블 크기를 제한할 수 있다. 한 AS가 이웃 AS들로부터 오는 과도한 광고를 차단하는 방법과 자신이 광고하는 prefix의 수를 줄이는 방법이 있다.

- Flap Damping

라우팅 안전성(Stability)을 개선하는데 사용하는 주요 방법은 flap damping인데, 불안정한 경로의 확산을 제한하는 방법이다. update가 수신될 때 마다 해당 경로와 연관된 penalty 값이 증가하는데, 이 값이 일정 임계치를 초과하면 해당 경로는 일정 기간 동안 억제된다.

4) Security Policy

AS는 BGP update의 잘못된 정보에 매우 취약하다. 잘못된 정보를 보냄으로써, AS는 인접 AS의 라우팅 목적을 바꿔 놓을 수 있고, 라우터들이 과부하가 걸리거나 오작동하게 만들어, 서비스 품질을 저하시킬 수 있다. 잘못된 정보는 정보의 근원지가 여러 AS hops 떨어져 있다 하더라도 AS 내의 라우팅에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 잘못된 정보는 라우터 결함이나 오류 혹은 인접 AS들에 의해 악의적으로 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 일반적으로 사용되는 방법들은 다음과 같다.

- Import Filtering

AS들은 customer들이 잘못되거나 불법의 경로를 배운 것을 막기 위하여 update 내용을 내부에 전파하기 전

에, 그들이 정당하고 합법적인 경로인지를 import filtering을 통해 검사한다. 한편 denial-of service 공격으로부터 자신을 보호하기 위하여 import filtering을 수행할 수 있다.

- Export Filtering

AS는 외부에서 도달해서는 안 되는 목적지들을 위한 BGP 광고를 제한하는 export 정책을 구축함으로써 외부에서 내부의 특정 자원에 접근하는 것을 막을 수 있다. 그리고 망 관리 소프트웨어를 돌리는 호스트의 주소 광고를 filtering하는 등의 과정을 거쳐 특정 내부 서비스들을 보호할 수 있고 비정상적인 경로들에 대한 export filtering을 수행한다.

2.3. BGP 의사결정 과정

BGP 라우터는 eBGP나 iBGP를 통해 인접 라우터들로부터 같은 목적지 prefix로 가는 다수개의 경로들을 얻는다. 최적 경로의 선택이 BGP 광고의 속성 값들에 의존하지만 의사결정 과정의 세부적인 사항은 프로토콜에 나타나 있지 않다. AS 경로 내에 순환이 있거나 도달할 수 없는 다음 홉, 혹은 수입 정책에 의하여 일부 경로들이 고려 대상에서 제거된 후에 라우터는 대상 경로들의 집합으로부터 최적 경로를 선택하기 위하여 일련의 단계를 밟아 나간다.

1. 가장 높은 local preference 값: 가장 높은 local preference 값을 갖는 경로를 선호한다. 여기서 local preference 값은 수입 정책에 의해 할당되고 iBGP에 의해 전달된다.
2. 최단 AS-path: 최단 AS 경로 길이를 갖는 경로를 선호한다.
3. 가장 낮은 origin 형태: 가장 낮은 origin 형태를 갖는 경로들을 선호한다. 일반적으로 IGP는 EGP보다 선호된다.
4. 가장 낮은 MED: 같은 다음 홉을 갖은 경로들 가운데 가장 낮은 MED 값을 갖는 경로를 선호한다.
5. iBGP 보다 eBGP 선호: iBGP를 통해 배운 경로들 보다 eBGP를 통해 얻은 경로를 선호한다. AS를 바로 떠나는 것이 AS내의 다른 라우터로 트래픽을 전달하는 것 보다 선호되기 때문이다.
6. 가장 낮은 IGP 측도: 다음 홉에 도착하기 위하여 가장 작은 인트라도메인(IGP) 측도를 갖는 경로를 선호한다. 이는 각 라우터가 가장 가까운 출구점 선택을 가능하게 한다.

7. 가장 오래된 경로: 오래된 경로 일수록 안정 상태에 있을 가능성이 많기 때문에 가장 먼저 수신된 경로를 선호한다.

8. 가장 낮은 라우터 ID: 가장 낮은 라우터 ID를 가진 라우터로부터 배운 경로를 선호한다.

시간에 걸쳐, 각 라우터는 AS 내에 있는 다른 라우터들이 알고 있는 최적의 경로들을 위한 iBGP 광고뿐만 아니라 인접한 도메인들로부터 eBGP 메시지들을 수신한다. 각 라우터는 위의 의사 결정 과정 중 6번째인 IGP를 토대로 최적의 출구점을 갖는 경로를 선택한다. 각 라우터는 BGP와 IGP로부터 나온 정보들의 조합을 토대로 해서 패킷을 전달한다. 전달 테이블(Forwarding Table)은 라우터가 들어오는 패킷을 적당한 출력 링크로 어떻게 보내는 지를 결정한다. 예로 한 라우터가 목적지 prefix 192.0.2.0/24로 가는 트래픽을 특정 출력 링크 L1으로 전달하는 경우를 고려해 보자. 라우터는 AS 경로와 경계 라우터(Border Router)의 next-hop IP 주소를 선택하기 위하여 BGP 의사 결정 과정을 사용한다. 라우터는 OSPF나 IS-IS와 같은 인트라도메인 라우팅 프로토콜을 이용하여 next-hop IP 주소에 도착하는 방법을 배운다. IGP가 중치를 토대로 라우터는 BGP next-hop으로의 최단 경로를 계산하고, 최단 경로 상에 있는 출력 링크 L1을 찾아낸다. 패킷이 도착하면 라우터는 적당한 출력 링크를 찾아내기 위하여 목적지 주소 192.0.2.147에 대해 longest prefix match를 시행한다. 다음 라우터도 이 과정을 반복하고 트래픽을 목적지를 향한 다음 단계로 보낸다.

본 절에서 언급한 표준적인 의사 결정 과정 이외에도 망 운영자의 필요에 따라 다양한 방식의 의사 결정 과정이 존재할 수 있다[19,20,21,22,23].

III. BGP 문제점들

많은 노력과 연구에도 불구하고 BGP는 여러 문제점들을 내포하고 있다. 본 절에서는 BGP의 문제점을 크게 다음의 3가지 측면에서 살펴보았다.

- 프로토콜 진동
- 트래픽 엔지니어링
- 서비스 품질(Quality of Service)

어떤 문제점들이 BGP의 어떠한 특이한 성질로부터 연유했는지, 그리고 궁극적인 한계점은 무엇인지를 살펴 보았다. 또한 제시된 문제점을 해결하기 위한 최근의 연구 동향도 조사하였다.

### 3.1. 프로토콜 진동 (Protocol Oscillation)

프로토콜 불안전성은 다음 2가지 이유에 기인한다: i) 정책 분쟁(Policy Dispute)에 의해 야기되는 inter-AS 진동이고 ii) MED에 의해 야기되는 intra-AS 진동이다.

#### 3.1.1. 정책 분쟁

인터넷의 각 AS들은 자기 자신의 중요도에 따라 설정한 정책들을 토대로 완전히 독자적인 방법으로 자신의 트래픽을 처리한다. 따라서 BGP 경로가 인터넷을 통하여 광고되어 지는 방법이라든지 라우팅이 수행되는 방법은 서로 독립적으로 설정된 정책들을 사용한 결과물이다. 여러 서로 다른 도메인에서 사용되는 정책들 사이에 전체적인 상호협력의 부재는 현 인터넷도메인 라우팅 프로토콜의 가장 큰 취약점이다. 도메인들 사이에 상호협력 부재의 주된 이유는 첫째 BGP 정책 표현의 특성에 있고, 둘째 AS들이 정책과 내부 구성에 대한 세부 사항을 드러내지 않고자 하는데 있다. 과거 여러 연구 [24,25,26]들은 상호 협력 없이는 서로 독립적인 정책들은 전체적인 라우팅 문제, 즉 링크 고장 시 일관된 회복을 못한다든지 경로 진동 문제를 야기 시킬 수 있다는 것을 보여준다.

다음 (그림 1)은 이런 라우팅 문제의 일면을 보여준다. 이런 망 구성은 ‘bad gadget’으로 알려져 있는데 독자적인 정책에 기반하는 BGP가 수렴하지 못하는 것을 보여준다[27].

‘bad gadget’ 예에서 라우팅 정책은 AS 0에 도착하기 위해서 직접 경로보다 시계반대 방향의 간접 경로를 더 선호하는 것이다. 예로 AS 2는 경로 {AS 2, AS 0}보다 경로 {AS 2, AS 1, AS 0}를 더 선호한다. AS 1과 AS 3도 같은 라우팅 정책을 갖는다고 하자. 이제 AS 2가 경로 {AS 2, AS 1, AS 0}를 선택했다고 하자. 이 경로는 AS 3에게 전파되는데, AS 2가 직접 경로를 이용하지 않기 때문에 AS 3는 가장 선호하는 경로 {AS 3, AS 2, AS 0}를 선택할 수 없다. 따라서 AS 3는 차선의 경로 {AS 3, AS 0}를 선택하게 된다. AS 3가 이 경로를 AS 1에게 전파하면 AS 1은 가장 선호하는 경로 {AS 1, AS 3, AS 0}를 선택할 수

있고, 이 경로를 AS 2에게 전파한다. AS 1이 직접 경로를 이용하지 않기 때문에 AS 2는 처음 사용했던 가장 선호하는 경로 {AS 2, AS 1, AS 0}를 이용할 수 없고, 차선의 경로인 {AS 2, AS 0}를 선택한다. 이 사이클을 한 번 더 반복하면 AS 2는 다시 {AS 2, AS 1, AS 0}를 선택한다. 결국 AS 2는 두 개의 경로를 끝없이 왔다 갔다 하는 선택을 하며 진동하고 BGP는 수렴하지 않는다.

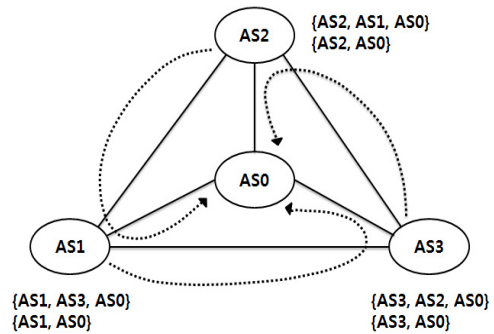


그림 1. Bad Gadget 문제  
Fig. 1 Bad Gadget Problem

#### 1) Dispute Wheel

Griffin[28]은 ‘bad gadget’을 일반화 한 ‘dispute wheel’ 개념을 제시하였다. (그림 2)는 테와 바퀴살로 구성된 일반적인 ‘dispute wheel’을 나타내는데, 노드와 에지들이 하나의 바퀴에 여러 번 반복적으로 나타난다.

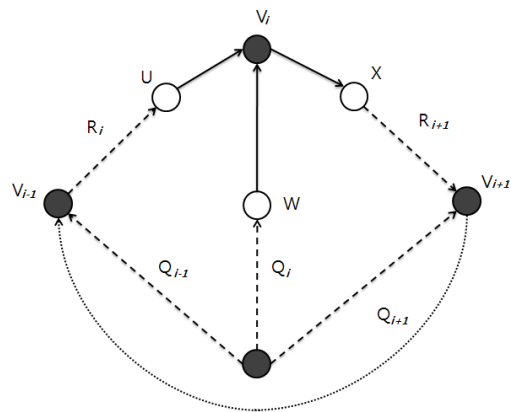


그림 2. 일반적인 ‘Dispute Wheel’  
Fig. 2 General ‘Dispute Wheel’

여기서 각 노드  $v_i$ 는 인접한 노드  $w$ 로부터 목적지로 가는 경로  $Q_i$ 를 배우지만  $u$ 를 거쳐  $v_{i-1}$ 로 시계 반대 방향으로 바퀴테를 따라간 후 다음 바퀴살  $Q_{i-1}$ 로 내려가는 경로  $R_i$ 를 선호한다. 즉 각 노드는 목적지로 가는 직접 경로보다 시계반대 방향의 노드에서 광고한 간접 경로를 더 선호한다. Griffin은 ‘dispute wheel’이 존재하지 않는 정책들은 진동하지 않는다는 것을 보였다.

## 2) Robust BGP

‘dispute wheel’이 존재하지 않는 망은 진동하지 않고 항상 예측 가능하다. 그런데 ‘dispute wheel’이 존재하지 않을 조건은 국지적(local)인 조건이 아니라 라우터의 국지적인 라우팅 정책들이 어떻게 상호 작용하는가를 전체적(global)인 관점에서 살펴봐야 한다. 과거 수년간 경로 벡터 라우팅 프로토콜에 대한 분석과 연구를 통하여 연구자들은 망에 ‘dispute wheel’이 나타나는 것을 방지할 국지적인 조건들을 찾아냈다.

Gao와 Rexford[29]는 모든 AS가 인접 이웃 AS를 provider나 customer 혹은 peer중 하나라고 고려하고 경로 선호와 export 정책에 대한 어떤 국지적인 조건들을 만족한다면 BGP는 항상 수렴한다는 것을 밝히고, 다음의 Gao-Rexford 조건을 제시하였다.

- ① peer 혹은 provider 경로보다 customer 경로를 선호한다. (선호 조건): 목적지를 위한 경로 선택 시 AS는 peer나 provider를 통한 경로보다 customer를 통한 경로를 선호한다.
- ② peer 혹은 provider에게 customer 경로만을 전파한다. (전파 조건): AS는 자신의 customer에게는 어떠한 이웃 AS로부터 배운 경로를 전파할 수 있다. 그러나 peer나 provider에게는 customer로부터 배운 경로만을 전파할 수 있다. 즉, AS는 자신의 customer에게만 transit 서비스를 제공한다.
- ③ customer-provider 관계의 순환(cycle)이 존재하지 않는다. (위상 조건): 어떤 AS도 자기 자신의 간접적인 customer가 될 수 없다.

Rao-Rexford 조건은 인터넷에서 일반적인 사업 관행을 나타내는데, 이는 현재 사용되는 인터넷메인 라우팅 시스템이 전반적으로 안정적인 이유를 설명한다. 그러나 제안된 조건들이 항상 만족된다고 할 수 없고, 제시된

지침을 따르지 않을 여러 타당한 이유들이 존재한다 [27]. 또한 다수개의 AS들이 같은 provider에 의해서 운영될 때 AS 간의 경제적 이해관계에 따른 자연적인 법칙들이 성립하지 않는다[30]. Wang[31]은 위의 3가지 조건 중 첫 번째인 customer 경로 선호 조건이 위배될 수 있는 경우를 제시하였는데, 인접한 이웃 AS가 서로 다른 경로 선호도를 갖거나 심지어는 peer나 provider 경로를 선호할 수 있다. 예로 금융기관은 가장 보안이 잘되는 경로를 선호하고 온라인 게임과 같은 서비스 제공자나 VoIP는 적은 지연시간을 갖는 경로를 선호한다.

만약 이 같은 대안 경로가 존재한다면 그것이 peer 경로나 provider 경로더라도 선택될 수 있다. Wang은 NS-BGP(Neighbor-Specific BGP)를 제안하였는데, 기존 BGP가 각 목적지 prefix를 위하여 최선의 경로 하나만을 선정하는데 반해 NS-BGP는 각 인접 AS의 특성에 맞게 경로 선정을 AS 별로 특성화 한다. NS-BGP에서는 customer 경로 선호 조건이 더 이상 필요치 않다. 즉, 개별 AS들은 전체적 안정성(Global Stability)을 해치지 않고도 전송받은 임의의 경로를 자유롭게 선택할 수 있다. 다시 말하면 Gao-Rexford 조건보다 훨씬 자유로운 조건하에서도 전체적인 경로 수렴을 이룰 수 있다. 다음(그림 3)은 NS-BGP를 나타내는데, 기존 BGP의 우선순위 함수  $\lambda$ 가 노드인 라우터에서 정의되는 반면에 NS-BGP는 각 edge 별로 정의된다.

예로  $\lambda_{uv}^v$ 는 노드  $v$ 의 edge  $(u,v)$  상, 모든 가능한 경로의 우선순위를 나타내는 함수다.

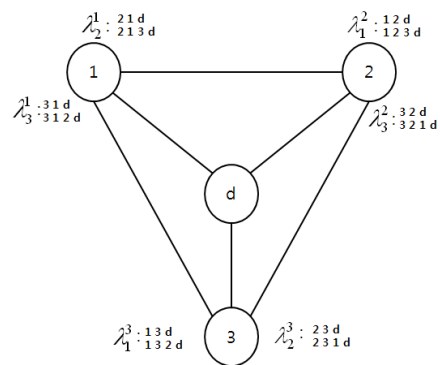


그림 3. NS-BGP  
Fig. 3 NS-BGP



이 외에도 path-vector policy system[32], path-vector algebra[33] 그리고 class-based system[34] 등이 BGP의 불안정성 문제를 해결하기 위하여 제안되었다. 한편 망의 신뢰도를 늘리기 위한 backup 라우팅의 경우 BGP의 안정성을 보장하는 모델도 제안되었다[35].

### 3) Multiple Destination

지금까지는 각 AS가 단일 목적지만을 위한 경로 선정을 고려하였다. Yang[36]은 AS가 다수의 목적지를 위한 경로 선정 시, BGP 진동 문제를 조사하였다. 주어진 목적지를 위한 경로를 선정하기 위해서는 어떤 경로가 가용하고, 또 다른 목적지를 위해서는 어떤 경로가 선정되었는지가 고려되어야 한다. 만약 각 AS가 각 목적지를 위한 경로 선택을 다른 목적지들이 선택한 경로나 가용한 경로를 고려하지 않고 독립적으로 결정한다면 최악의 경우, 모든 목적지를 위해 같은 링크를 선택할 수 있고, 이로 인해 회선 용량을 초과하거나 부하 불균형 문제를 야기시킬 수 있다.

다음 (그림 4)는 다수개의 목적지를 위한 경로 선정 문제를 보여준다. 노드 A에서 목적지 D<sub>1</sub>과 D<sub>2</sub>를 위한 경로 우선순위는 (ABD<sub>1</sub>, AED<sub>2</sub>), (AD<sub>1</sub>, AD<sub>2</sub>) 그리고 (ABFD<sub>1</sub>, AED<sub>2</sub>)이고, B의 경로 우선순위는 (BD<sub>1</sub>, BAD<sub>2</sub>), (BFD<sub>1</sub>, BD<sub>2</sub>) 그리고 (BD<sub>1</sub>, BAED<sub>2</sub>)라고 가정하자.

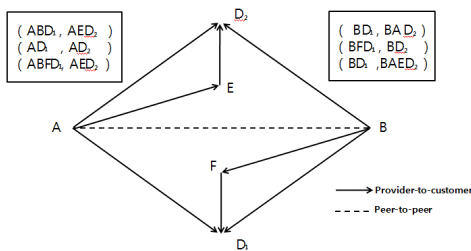


그림 4. 다수의 목적지를 고려하는 경로선정 문제  
Fig. 4 Path selection problem to consider multiple destinations

목적지 D<sub>1</sub>과 D<sub>2</sub>로 가는 경로를 서로 독립적으로 고려한다면 노드 A와 B는 경로 (ABD<sub>1</sub>, AED<sub>2</sub>) 그리고 (BD<sub>1</sub>, BD<sub>2</sub>)에 수렴한다. 그런데 목적지 D<sub>1</sub>과 D<sub>2</sub>로 가는 경로를 동시에 고려하고, 각 노드에서의 경로 우선순위는 (그림 4)와 같이 주어지면 경로 선정은 수렴하지

않는다. 먼저 노드 A에게 경로 (AD<sub>1</sub>, AD<sub>2</sub>)는 B의 경로 선정과 무관하게 항상 가용하다. 따라서 수렴하지 않는다는 것을 보이기 위해서는 A가 경로 (AD<sub>1</sub>, AD<sub>2</sub>)나 (ABD<sub>1</sub>, AED<sub>2</sub>)를 선정할 때 안정적인 경로가 존재하지 않는다는 것을 보이면 된다. 먼저 A가 경로 (AD<sub>1</sub>, AD<sub>2</sub>)를 선택하면 B는 (BD<sub>1</sub>, BAD<sub>2</sub>)를 선택하게 되고, 이는 다시 A가 (ABD<sub>1</sub>, AED<sub>2</sub>)로 변경하게 만들기 때문에 (AD<sub>1</sub>, AD<sub>2</sub>)는 안정적인 해가 아니다. (ABD<sub>1</sub>, AED<sub>2</sub>)도 안정적인 경로가 아니다. (ABD<sub>1</sub>, AED<sub>2</sub>)가 A에게 가용하기 위해서 B는 D<sub>1</sub>을 위해서 BD<sub>1</sub>을 선택해야만 한다. 그런데 (BFD<sub>1</sub>, BD<sub>2</sub>)가 A의 경로 선택과 무관하게 B에게 항상 가용하기 때문에 B는 (BD<sub>1</sub>, BAD<sub>2</sub>)를 선택할 것이다. 이는 다시 A가 AD<sub>2</sub>를 선택하게 하고, 처음의 선택 (ABD<sub>1</sub>, AED<sub>2</sub>)와 일치하지 않는다. 결국 망은 안정적인 경로를 갖지 못한다.

목적지를 개별적으로 고려한 경우, 국지적인 조건만으로 경로 수렴을 보장하는 조건을 제시한 Gao-Rexford의 연구와 마찬가지로 Yang은 망에서 BGP가 수렴하는 안정 경로를 가질 조건을 제시하였다.

#### 3.1.2. MED에 의한 진동

BGP는 'hot potato routing'이라고 알려진 기법을 사용하여 가장 가까운 출구점을 선택한다. 그러나 'hot potato routing'이 적절하지 않을 경우에 BGP의 MED 속성은 AS들 간에 'cold potato routing' 방법을 제공한다. 그러나 MED 사용은 지속적인 BGP 진동을 야기시키는 것으로 알려져 있다.

경로설정 단계에서 MED 단계를 무시한다면 BGP 경로 설정은 먼저 모든 경로들의 순서를 매긴 후 가장 높은 순위를 갖는 경로를 선정하는 단계를 거친다. 그러나 MED를 고려하면 문제는 복잡해진다. 이 경우 경로의 순위는 다른 경로들의 존재 여부에 따라 변할 수 있다. 따라서 새 경로는 비록 그것이 가장 좋은 경로가 아닐지라도 현재의 가장 좋은 경로를 대체할 수 있고, 이로 인해 BGP는 진동하게 된다. Griffin [37]은 다음 (그림 5)를 이용하여 BGP가 진동하는 과정을 단계별로 제시하였는데, 라우터 A와 B는 안정 상태에 도달하지 못하고 끊임 없이 update 메시지를 교환하게 된다. AS 1에 있는 숫자는 IGP 링크비용을 나타내며 괄호 안에 있는 숫자는 MED 값을 나타낸다.

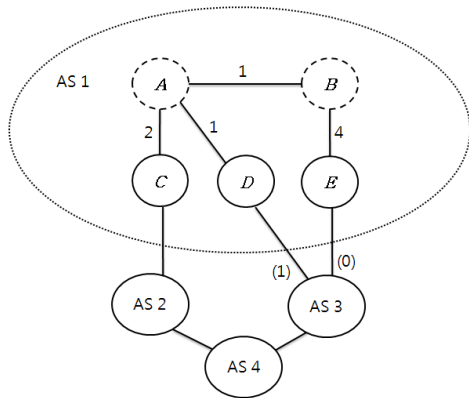


그림 5. MED로 인한 BGP 진동  
Fig. 5 BGP Frequency caused by MED

### 3.2. Traffic Engineering의 한계

#### 3.2.1. Traffic Engineering의 필요성

트래픽 엔지니어링에 대한 여러 연구와 조사는 대부분 한 AS 내에서의 경로 선정을 제어하는 OSPF나 IS-IS와 같은 IGP에 초점을 맞추고 있다. 망 운영자들은 주어진 망에서 IGP에 참여하는 모든 라우터를 관리하기 때문에 인트라도메인 라우팅에 대해 완전한 제어가 가능하다. 예로 망 운영자들은 OSPF나 IS-IS 라우팅에서 최단 경로 선정을 제어하기 위해서 링크 비용을 이용할 수 있다. 그러나 대규모의 IP backbone 망에 의해 전달되는 트래픽의 대부분은 다수개의 AS들을 거쳐 나가는데, 이 점이 인터도메인 라우팅을 트래픽 엔지니어링의 중요한 관심 사항으로 만든다[38,39]. AS들 사이의 연결 링크들은 이들에 대한 제어가 서로 경쟁 관계에 있을 수도 있는 두 개 이상의 AS들 사이에 공유되기 때문에 항상 정체의 장소가 된다. 따라서 인터도메인 라우팅에 대한 주의 깊은 제어는 end-to-end 성능을 개선하거나 망 자원을 효율적으로 이용하는데 매우 중요하다. 망 운영자는 망에서 발생할 수 있는 다음의 여러 변화에 효율적으로 대처하기 위하여 BGP 트래픽 엔지니어링을 필요로 한다[40].

- 트래픽 부하의 변화: 트래픽은 동적이기 때문에 어떤 목적지로 가는 트래픽의 양이 갑자기 변하여 망 회선들에 트래픽 분포의 변화를 야기 시킨다. 트래픽이 급증하는 website로 인접한 AS를 통해 트래픽을 전달하는 경우, 그 목적지로 향하는 출력 링크에 정체가 있을 수 있다. 따라서 망 운영자는 정체를 줄이기 위하여

BGP 라우팅 정책을 새롭게 세울 필요가 있다.

- 링크 용량 변화: 링크는 더 많은 용량을 갖도록 수시로 개선된다. 망 운영자는 용량을 개선한 회선이 더 많은 트래픽을 처리하도록 라우팅 정책을 수정할 필요가 있다.
- 연결 상태 변화: 한 AS가 연결되는 인접 AS들 뿐만 아니라 인접 AS들과 연결되는 지점들은 변해 나간다. 다른 AS들로 가는 회선들이 생성되거나 없어질 때, 망 운영자들은 많은 양의 트래픽을 한 링크에서 다른 링크로 이동시켜야 한다.
- 가용 경로 변화: 프로토콜의 변화나 AS들 간 상업적 계약의 변동으로 인해 한 AS는 갑자기 기존 경로가 없어지거나 목적지로 가는 다른 경로를 받을 수 있는데, 이는 트래픽 흐름을 갑자기 변하게 만든다. 이런 사건들은 망 운영자들이 트래픽 흐름의 균형을 다시 맞추게 할 것을 요구한다.
- 망 유지 보수: 망 운영자는 망의 일부분에 대해서 정기적인 유지보수를 수행하는데, 이 때 유지 보수를 받는 망의 일부분으로부터 트래픽을 다른 곳으로 돌리기 위하여 라우팅 링크 비용이나 BGP 구성을 조절할 필요가 있다.

#### 3.2.2. 제한된 Traffic Engineering 능력

현재의 인터도메인 라우팅 모델은 다음의 여러 이유로 매우 제한된 트래픽 엔지니어링의 능력을 갖고 있다 [27].

- BGP는 ‘reachability’ 정보를 분배하는 프로토콜로 설계되었다. 특정 목적지로 가는 오직 하나의 경로만을 광고하는 BGP는 고장난 부분을 피하여 패킷을 다른 곳으로 돌리는데 사용되는 대체 경로의 수와 질이 제한된다. 또한 여러 AS들에 걸쳐 트래픽의 균형을 맞추는데 상당한 어려움이 있다.
- BGP 정책들에 대한 독자적인 관리와 정책들을 표현하는데 있어서 제한들로 인해 AS들이 인터도메인 트래픽의 흐름을 제어하고 관리하는데 상당한 제약이 따른다. 예로 BGP는 AS가 비교적 유연하게 그것의 출력(outbound) 트래픽 제어를 가능하게 한다. 그러나 입력(inbound) 트래픽을 제어하는 것은 매우 복잡한 일이고, 이 과정이 어떻게 최적으로 수행될 수 있는지는 아직 명확하게 알려져 있지 않다. 이의 주된 이유는 여러 AS들에서 사용되는 정책들 사이에 전체적인 조정이 없는

데 있다. 즉 어떤 주어진 경로에 있는 각 AS는 자신의 국지적인 정책을 사용하여 원하는 대로 출력트래픽의 경로를 선정하는데, (이 출력트래픽이 결국 다른 AS의 입력트래픽이 됨) 이때 다른 AS들의 요구조건이나 경로 광고는 무시될 수 있다.

- 인터넷은 single-homed stub AS, multi-homed stub AS 그리고 transit AS의 세 가지 형태 AS들로 구성되는데, 인터넷도메인 트래픽 엔지니어링의 목적은 AS 형태에 따라 틀리다. 이 3 가지 형태의 AS들의 분류는 이 AS들의 요구조건과 당면 문제들이 서로 다르기 때문에 당연히 보인다. 예로 multi-homed stub AS들은 짧은 시간 내에 운영될 수 있는 이기적인 트래픽 엔지니어링 기법을 배치하는 반면 transit AS들을 위하여 제안된 트래픽 엔지니어링 기법들은 주나, 월단위의 비교적 장기간에 걸쳐 운영되도록 설계되는데 hot potato 라우팅 기법을 주로 사용한다.

### 3.2.3. 인터넷도메인 Traffic Engineering

위절에서 언급된 제한된 트래픽 엔지니어링 능력에도 불구하고 BGP는 제한된 범위 하에서 트래픽 제어를 수행한다. 특정 목적지에 도착하기 위하여 어떤 경로를 선택할 지의 여부는 어느 정도 해당 AS의 제어 하에 있기 때문에 출력트래픽 제어는 비교적 수월하다. 반면에 해당 AS의 입력트래픽이 되는 인접 AS의 출력트래픽에 대한 제어는 해당 AS의 요구 조건이나 경로 광고가 무시될 수 있으므로(인접 AS는 자신의 국지적인 정책을 사용하여 원하는 대로 출력트래픽의 경로 선정) 입력트래픽 제어는 단지 한정된 범위 안에서만 가능하다[41].

#### 1) 출력트래픽 제어

트래픽이 망을 떠나는 방법을 제어하기 위하여 AS는 특정 목적지에 도착하기 위하여 어떤 경로를 사용할지를 선택할 수 있어야 한다. AS는 BGP 경로 선택에서 의사결정과정을 제어할 수 있기 때문에 최적 경로의 선택을 쉽게 제어할 수 있다. 일반적으로 두 개의 기법이 사용된다.

- 첫째 기법은 local preference 속성을 이용하는 것이다. 이 속성 값은 AS 내에서만 전파되는데 BGP 의사 결정과정의 첫 번째 기준으로 경로들의 순위를 매기는데 사용된다. 예로 상위 provider로 높은 대역의 링크와 낮

은 대역의 링크 두개를 가진 stub AS를 생각하자. 이 경우 이 AS의 BGP 라우터는 낮은 대역 링크를 통해 전파된 경로에게는 낮은 local preference 값을, 높은 대역 링크를 통해 알게 된 경로에게는 높은 값을 주도록 설정할 수 있다. 싼 상위 provider와 더 비싼 상위 provider 모두에게 연결된 stub AS에게도 비슷한 방법을 사용할 수 있다.

- 두 번째는 주로 대형 transit ISP에서 사용되는 기법으로 트래픽이 transit ISP를 거쳐 나가는 방법을 제어하기 위하여 인트라도메인 라우팅 프로토콜을 이용한다. BGP 의사 결정 과정 단계에서 iBGP를 경유하여 수신된 다수개의 경로들을 비교할 때 가장 가까운 IGP 라우터를 선택한다(hot potato routing). 이 라우터를 exit border 라우터로 결정함으로써 해당 트래픽이 망을 거쳐 나갈 때 가장 적은 시스템 자원을 이용하게 된다. 만약 transit AS가 인트라도메인 라우팅 프로토콜의 링크비용을 적당하게 조정할 수 있다면 출력트래픽을 제어할 수 있다.

#### 2) 입력트래픽 제어

- AS에 들어오는 트래픽을 제어하기 위해 사용할 수 있는 첫 번째 방법은 선택적 광고(Selective Advertisement)를 사용하는 것인데, 다른 링크에 서로 다른 경로 광고를 하는 것이다. 예로 AS1이 AS2로부터 두 개의 링크를 통해 들어오는 트래픽의 균형을 맞추기 위해서는 한 링크에는 자신의 내부 경로만을 광고할 수 있고, 다른 링크에는 또 다른 AS3로부터 알게 된 경로만을 광고한다. 이를 통해 각 링크를 거쳐 AS1에 유입되는 트래픽 양을 어느 정도 제어할 수 있다. Wang[42]은 AS의 라우팅 정책을 추정하고 규명하는 방법을 제시하였다. 이로부터 customer들은 트래픽 부하의 균형을 맞추기 위하여 provider에게 그들의 prefix들을 선택적으로 광고한다는 사실을 밝혀냈다.

- 두 번째 방법은 선택적 광고의 변형으로 조금 더 구체적인 prefix를 광고하는 것이다. 이 방법에서 IP 라우터는 각 패킷을 위한 경로 선정 시 'longest prefix match'를 이용한다. 예로 prefix 16.0.0.0/8이 AS1에게 속하고, 다른 중요한 서버들은 subnet 16.1.2.0/24의 부분이라고 가정하자. 만약 AS1이 특정 링크로 이 서버들을 향한 트래픽을 받고 싶다면 AS1은 이 특정 링크로 16.0.0.0/8과 16.1.2.0/24를 광고하고 다른 링크로 16.0.0.0/8를 광고

- 한다.
- 세 번째 방법은 BGP 의사 결정 과정에 사용되는 기준 중 하나인 'AS-path' 속성의 길이를 이용하는 것이다. 다른 AS들의 경로 선택에 영향을 줄 수 있는 가능한 방법은 'AS-path' 속성의 길이를 인위적으로 늘이는 것이다. 예로 AS1의 주 인터도메인 링크는 a이고, backup 링크로 b를 사용한다고 하자. 이때 AS1은 주 링크인 a에 AS-path AS1을 가진 경로를 광고하지만 backup 링크인 b에는 AS-path 속성에 AS1을 여러 번 포함시켜 광고한다. 이렇게 함으로써 주 링크에 광고된 경로는 다른 모든 라우터들에 의해 최선의 경로로 간주된다.
  - AS가 입력 트래픽을 제어할 수 있게 하는 마지막 방법은 MED 속성을 사용하는 것이다. 이 속성은 다른 AS와 여러 지점에서 서로 연결된 AS에 의해 사용 가능하데, 다른 AS가 특정 목적지로 패킷을 전달하기 위해 사용할 링크를 결정하는데 영향을 미치게 하기 위해 사용된다.

### 3.2.4. Cooperative 인터도메인 Traffic Engineering

AS의 입, 출력 트래픽을 제어하기 위하여 BGP는 앞에서 언급한대로 단지 제한된 범위의 방법만을 제공한다. 그러나 이러한 방법들은 트래픽에 대한 일방적인 제어만을 가능하게 하여 AS 간에 바람직하지 않는 상호 작용을 발생시킬 수 있다. 이는 결국 불안정한 라우팅 [43], 낮은 성능[44], 그리고 망 트래픽의 예측치 못한 급격한 변동[45]을 불러일으킨다. 따라서 안정적이고 효율적이며 예측 가능한 방법으로 인터도메인 트래픽에 대한 동적인 제어가 가능하기 위해서는 AS 간에 명시적인 상호 협력에 기반을 둔 새로운 인터도메인 traffic engineering 구조를 필요로 한다[46,47,48]. 이 방법에서 서로 이웃하는 AS들은 인터도메인 트래픽 양과 경로에 대한 정보를 서로 교환하고, 그들 사이의 트래픽에 대해 상호 수용 가능한 경로에 도달하기 위해 간단한 협상(Negotiation) 프로토콜을 이용한다. 이 같이 AS 간 명시적인 상호 협조는 양쪽에 모두 도움이 된다는 것이 밝혀졌다[47,48]. 그러나 인접 AS들이 서로 경쟁 관계에 있을 수 있다는 점을 고려하면 AS들 사이에 상호 협조를 한다는 것은 현실적으로 간단한 일이 아니다. 따라서 위에서 언급한 협상 프로토콜과 같은 인터도메인 traffic engineering에 대한 단순한 접근 방법은 많은 AS들이 사용하기가 쉽지 않다.

따라서 Shimali[49]는 'Pareto-efficient'하고 공정(Fair)하며, 외부에 누출하기 민감한 AS 내부정보들(망구조, 링크용량, 링크비용 등)은 공개하지 않는 새로운 접근 방법을 제안하였는데 Nash bargaining[50,51]과 같은 게임 이론과 비선형계획법(Nonlinear Optimization) [52]들을 이용하였다.

### 3.2.5. 기타 방법

인터도메인 traffic engineering을 위한 경로선택 시 다수개의 목적지를 위한 경로 선택이 동시에 이루어져야 한다. 만약 각 AS가 각 목적지를 위한 경로 선택을 다른 목적지들이 선택한 경로나 가용한 경로를 고려하지 않고 독립적으로 결정한다면 최악의 경우, 모든 목적지를 위해 같은 링크를 선택할 수 있고, 이로 인해 회선 용량을 초과하거나 부하 불균형 문제를 야기시킬 수 있다. 이를 위해 Wang[53]은 다수개의 목적지를 동시에 고려할 경우 BGP의 인터도메인 traffic engineering에 관한 모델을 제시하였다. 망에 고장이 발생할 경우 BGP는 트래픽 분포의 불균형을 초래할 수 있다. Qiu[54]는 망에 고장이 발생할 경우, 트래픽이 균일하게 분포되도록 인터도메인 traffic engineering을 위한 알고리즘을 제안하였다. 한편 Feamster[55]는 AT&T backbone망의 라우팅과 트래픽 자료를 토대로 인터도메인 트래픽 관리를 위한 구체적인 지침을 제시하였다.

## 3.3. QoS(Quality of Service)지원의 한계점

### 3.3.1. 인터도메인 QoS 라우팅의 필요성

QoS 라우팅에 관한 대부분의 연구는 인트라도메인에 초점이 맞추어져 왔다. 인트라도메인 라우팅도 중요하지만 인터도메인 수준에서 QoS 라우팅 문제가 훨씬 더 중요한 문제로 인식되고 있다. 그 이유는 서로 다른 AS들을 연결하는 peering 링크들이 트래픽의 주된 정체 지점으로 알려져 있기 때문이다[55]. 이 정체 지점에서 효율적으로 망 자원 사용을 관리하는 것은 end-to-end QoS를 제공하는데 아주 중요하다. 한편 망의 신뢰도를 증가시키기 위하여 multi-homed stub AS가 일반화 되었고, 이는 목적지로 도착하는 다양한 경로를 제공한다. 따라서 경로선택 과정에서 QoS 정보를 고려하여 라우팅 성능을 개선하는 것이 가능하다. 그러나 BGP는 단지 인터도메인 간 'reachability' 정보를 전달하기 위한 프로토콜로 설계되었기 때문에 QoS 능력을 갖추고 있지 않다.

따라서 QoS 정보를 전달하고 분배하지 못하는 BGP 라우터들은 그들이 수신하는 광고로부터는 원하는 QoS 정보를 거의 얻을 수 없기 때문에 BGP 경로 선정 과정에서는 지연시간, 대역폭 등과 같은 실제적인 end-to-end QoS 측도들을 거의 고려할 수 없다. 따라서 QoS 관점에서 보면 최적 경로가 선택되지 않을 수 있다. 예로 (그림 6)의 라우터 R은 network A로 가는 경로로 AS4, AS5를 선택하는데 (짧은 AS-path 길이) 이는 AS2, AS3, AS5의 경로의 지연시간 100msec보다 더 큰 150msec의 지연시간을 갖는다. 그러므로 인터도메인 QoS 정보를 광고할 수 있도록 BGP를 확장할 필요성이 대두되었다.

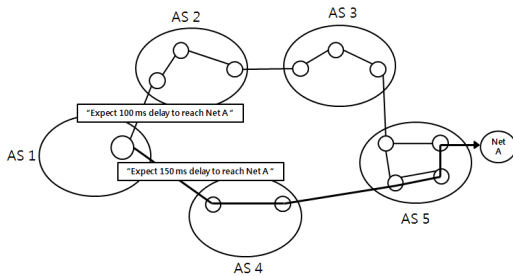


그림 6. BGP에서 QoS  
Fig. 6 QoS in BGP

BGP가 QoS 정보를 고려할 수 있다면 여러 이점이 있다. 먼저 인터도메인 패킷 전송 성능을 최적화할 수 있다. BGP 메시지 내에 QoS 라우팅 정보를 적당하게 사용함으로써 데이터 패킷을 전송하는데 높은 가용 대역과 낮은 트래픽 부하를 갖는 경로를 찾을 수 있다.

그리고 인터도메인 traffic engineering을 더 효율적으로 수행할 수 있다. 만약 전체적(Global)인 망의 트래픽 상태를 알 수 있다면 국지적(Local)인 IP 트래픽을 더 효율적으로 관리할 수 있다. 또한 라우팅 계층으로부터 QoS 지원을 필요로 하는 다른 인터도메인에 연관된 프로토콜에 필요한 정보를 제공할 수도 있다.

### 3.3.2. 인터도메인 QoS 라우팅의 문제점

인터도메인 QoS 라우팅은 인트라도메인 라우팅에 존재하지 않는 여러 문제점들이 있다. 도메인의 망 운영자들은 자기 내부의 망 구조나 형상을 독립적인 정보로 인식하여 서로 공유하지 않기 때문에 인터도메인 라우팅은 전체적인 망 구조에 대한 세부적인 지식 없이

수행되어야 한다. 그리고 전체적인 인터넷의 엄청난 규모는 망 구조나 전체 인터넷의 자원 가용도에 대한 세부적인 정보를 전파하고 분배하는 것을 거의 불가능하게 한다.

BGP가 QoS 정보를 포함하여 광고하는 데는 크게 2 가지 중요한 문제점이 있다. 먼저 규모성(Scalability) 문제다. BGP는 원래 목적지의 'reachability' 정보를 교환하기 위하여 설계되었다. QoS 측도 정보가 추가되더라도 인터넷 라우팅의 규모성이 QoS 정보의 동적인 성질로 인해 훼손되어서는 안 된다. 둘째 인터도메인 라우팅에서 링크나 경로들의 이질성(Heterogeneity) 문제를 다룰 수 있어야 한다. BGP 라우터들 사이에 연결은 여러 가지 형태일 수 있다. 예로 어떤 연결은 직접 물리적인 링크일 수 있고, 다른 연결은 IGP 경로와 같이 인트라도메인 라우팅에 의해 제공된 경로를 사용할 수 있다. 또한 경로수정 기간이나 사용하는 QoS 측도도 도메인마다 다를 수 있고, 경로 통합 광고 시, 두 개의 서로 다른 도메인으로부터 받은 QoS 정보는 이질적일 수 있으며, 서로 다른 AS들로부터 받은 QoS 정보는 서로 다른 수준의 정확도를 가질 수도 있다.

### 3.3.3. 제안된 인터도메인 QoS 라우팅

Cristallo[56]는 AS 간 QoS 정보를 교환하기 위한 BGP 사용을 조사하였는데, QoS NLRI(Network Layer Reachability Information)이라 불리는 새로운 BGP 속성을 제안하였다. QoS 정보는 지연시간, 손실률, 대역정보 등을 포함할 수 있다. 한편 Ho[57]는 대역(Bandwidth) 보장에 초점을 맞추고 end-to-end QoS 지원을 하는 인터도메인 라우팅을 위한 모델을 제시하였다. End-to-end 대역 조건을 고려하면서 목적지로 향하는 고객 트래픽을 위한 출구 라우터의 선택 문제를 다루었다. 그러나 위 두 방법 모두 scalability 문제에 대한 구체적인 언급이 없고, 경로 통합 광고 시, QoS 정보 처리 문제 등이 남아있다.

앞에서 인터도메인 QoS 라우팅의 문제점들로 규모성과 이질성을 언급하였다. 이를 해결하기 위하여 Xiao[58]는 BGP가 광고할 QoS 측도로서 통계적 측도 즉, 가용 대역 지수(Available Bandwidth Index), 지연 시간 지수(Delay Index), 가용 대역 히스토그램, 지연 시간 히스토그램 등을 제안하였다. 제안된 통계적 측도들을 통해 이질적이고 동적인 QoS 측도들이 좀 더 유연하고

정확하게 표현될 수 있고, QoS 광고와 라우팅의 규모성 문제도 어느 정도 해결된다고 주장한다.

규모성 문제와 목적지까지 연결을 제공하면서 QoS 조건을 만족하는 경로를 발견하는 두 문제를 해결하기 위하여 Okumus[59]는 지역(Region)을 토대로 하는 link state 인터도메인 QoS 라우팅 방법을 제안하였는데, 지역은 다수개의 AS 집합을 나타낸다. 지역의 크기와 평균 최단 경로 길이, 규모성 등은 서로 연관되어 있는데, 규모성에서 얻은 이득이 평균 최단 경로 길이에서 발생한 손실을 능가한다고 주장한다. 한편 Beben[60]은 인터도메인 QoS 라우팅 프로토콜, EQ-BGP를 제안하였다. 기존의 BGP에 다음의 4가지 QoS 요소를 추가하였다: 1) 경로의 QoS에 대한 정보를 전달하는 새 경로 속성, 2) 경로 상에 있는 도메인들과 인터도메인 링크를 토대로 QoS를 계산하기 위한 QoS 통합 함수, 3) QoS를 고려하는 경로 결정 알고리즘, 그리고 4) 다수개의 라우팅 테이블이다. EQ-BGP는 대규모의 망에서 운영되도록 설계되었기 때문에 규모성과 수렴성이 중요한데, 모두 BGP-4와 비슷한 수준으로 분석되었다.

QoS 라우팅도 본래 어려운 문제인데 인터도메인 QoS 라우팅은 서로 별개로 독립적으로 운영되는 AS들 사이의 문제이기 때문에 더욱 어렵다. 따라서 AS들 사이의 조정을 통해 QoS를 보장하는 방법이 있을 수 있다. Stub AS가 지연시간 QoS를 고려하는 기본적인 방법은 이기적인 라우팅 방법을 사용하는 것이다. 이를 통해 출력 트래픽에 한해 국지적인 최적 경로를 발견할 수는 있다. 그러나 경로 상에 존재하는 transit AS에 선택된 경로가 미치는 영향에 대해서는 전혀 알 수가 없고, 또 이 선택으로 인해 떨어져 있는 intra, 혹은 인터도메인 링크에 혼잡이 발생할 수도 있다. 따라서 AS들 사이의 협력은 이기적인 라우팅 방법에 의해 야기될 수 있는 성능 저하나 경로 불안정성 문제를 해결하기 위한 주요 열쇠가 될 수 있고, 이는 QoS를 고려하는 미래의 인터넷에 아주 중요한 문제이다. 이런 관점에서 Nanda[61,62]는 BGP 라우팅 정책이 QoS에 어떻게 영향을 미치는지 조사하고 AS들간 정책 조정이 규모성 문제와 QoS 지원에 어떤 역할을 하는지 조사하였다. 이를 토대로 인터넷에서 AS들 사이에 정책 분규를 해결하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 한편 Fonte[63]는 다수개의 QoS 제한 조건과 라우팅 선호도를 동시에 고려하면서 stub AS와 transit AS들 사이에 협력을 통해 조정 인터도메인 QoS 라우팅인 QoSSR을 제

안하였다. 그러나 이 방법들은 서로 독립적으로 운영되는 AS들이 내부 정보 노출을 꺼리는 문제와 보안 문제 등, 실제 사용에 이르기까지 해결해야 할 여러 문제들을 갖고 있다. Fonte[64]는 인터도메인 QoS 라우팅에 관한 전체적인 조사를 수행하였다. 먼저 QoS 지원과 관련하여 인터도메인 QoS 라우팅의 주요 문제점들을 지적하였다. 그리고 제시된 인터도메인 QoS 라우팅 중 가장 적절한 방법들을 제시하고 논의하였다. 기술적으로 어려운 점들에 주안점을 두고 QoS를 지원하기 위하여 기존 BGP-4를 확장할지 아니면 다른 것으로 대체해야 하는지에 대한 보다 근원적인 문제들에 대해 광범위한 논의를 수행하였다.

Masip-Bruin[65]은 xDSL, UMTS, WiFi 그리고 LAN 등 다양한 이질적인 액세스 망에 걸쳐서 전체적인 QoS 체계를 구축하는 연구를 수행하였다. 한편 He[66]는 인터도메인 라우팅 프로토콜의 성능을 평가하기 위한 망구조 모형을 제시하였다. 라우팅 정책이 인터도메인 라우팅에서 중요한 역할을 함에도 불구하고 현재 시뮬레이션 모델에서는 주로 간과되었는데, 제시된 망 구조는 라우팅 정책을 고려한 보다 실제적인 모형이다.

#### IV. 결 론

인터넷의 상업화로 이용자 수가 폭발적으로 증가됨에 따라 ISP(Internet Service Provider)들은 경제적인 또는 정책적인 이유로 인터넷 트래픽의 제어를 목적으로 인터도메인 라우팅 프로토콜인 BGP를 사용하고 있다. 본 논문의 목적은 BGP의 ‘최근동향’을 조사하는 것으로, 먼저 BGP를 BGP 정책과 의사 결정 과정 중심으로 살펴 보았다. 그리고 인터도메인 라우팅의 ‘open question’으로 남아 있는 문제들을 프로토콜의 안정성, 트래픽 엔지니어링 그리고 QoS(Quality of Service) 관점에서 조사하고, 왜 이 문제들이 현재 해결하기 어려운지를 살펴 보았다. 또 이 문제들을 해결하기 위한 BGP 분야의 최근 연구 동향을 조사하였다.

BGP의 또 다른 큰 문제점은 보안(Security) 분야이다. 보안에 BGP의 취약성과 이로 인한 문제점은 BGP의 중요한 문제로 인식되고 있다[6,67]. 보안 분야는 자체만으로도 매우 광범위한 분야이기 때문에 본 연구에 포함시키지 않았지만 추후 많은 연구가 필요한 분야다.

## 참고문헌

- [1] M. Caesar and J. Rexford, "BGP Routing Policies in ISP Networks," *IEEE Network*, 19(6), pp.5-11, November/ December, 2005.
- [2] T. Griffin, F. Shepherd, and G. Wilfong, "The Stable Path Problem and 인터넷도메인 Routing," *IEEE/ACM Trans. Networking*, 10(1), pp. 232-243, 2002.
- [3] T. Griffin, and G. Wilfong, "On the Correctness of IBG Configuration," in *Proc. of ACM SIGCOMM*, August 2002.
- [4] K. Varadhan, R. Govindan, and D. Estrin, "Persistent Route Oscillations in 인터넷도메인 Routing," *Computer Networks*, 32(1), pp.1-16, 2000.
- [5] C. Labovitz, A. Ahuja, A. Bose, and F. Jahanian, "Delayed Internet Routing Convergence," *IEEE/ACM Trans. Networking*, 9(3), pp.293-306, June 2001.
- [6] K. Butler, T. Farley, P. Mcdaniel, and J. Rexford, "A Survey of BGP Security Issues and Solutions," *Proceedings of the IEEE*, 98(1), pp.100-122, January 2010.
- [7] O. Nordstrom and c. Dovrolis, "Beware of BGP Attacks," *ACM SIGCOMM*, 2004.
- [8] S. Murphy, "BGP Security Vulnerabilities Analysis," Internet Draft, draft-ietf-idr-bgp-vuln-01.txt, work in progress, October 2004.
- [9] M. Zaho, S. Smith, and D. Nicol, "The Performance Impact of BGP Security," *IEEE Network*, November/December, 2005.
- [10] Y. Hu, A. Perrig, and M. Sirbu, "SPV: Secure Path Vector Routing for Securing BGP," *ACM SIGCOMM*, September 2004.
- [11] R. Chang and M. Lo, "Inbound Traffic Engineering for Multihomed ASes Using AS Path Prepending," *IEEE Network Magazine*, March 2005.
- [12] B. Quotin, S. Tandel, S. Uhlig, and O. Bonaventure, "인터넷도메인 Traffic Engineering with Tedistribution Communities," *Computer Communication*, 27(4), 2004
- [13] F. Guo, J. Chen, W. Li, and T. Chiueh, "Experiences in Building a Multihomed Load Balancing System," *INFOCOM*, 2004.
- [14] B. Quotin and O. Bonaventure, "A Cooperative Approach to 인터넷도메인 Traffic Engineering," *Next Generation Internet Networks Traffic Engineering*, 2005.
- [15] A. Agarwal, A. Nucci, and S. Bhattacharyya, "Controlling Hot Potato in Intra Domain Traffic Engineering," *SPRINT ATL Research Report*, PR04-ATL-070677, July 2004.
- [16] M. Morrow, V. Sharma, T. Nadeau, and L. Anderson, "Challenges in Enabling Interprovider Service Quality in the Internet," *IEEE Communication Magazine*, 43(6), June 2005.
- [17] L. Xiao, K. Lui, J. Wang, and K. Nahrstedt, "QoS Extensions to BGP," *ICNP 2002*, November 2002.
- [18] N. Feamster, H. Balakrishnan, and J. Rexford, "Some Foundational Problems in 인터넷도메인 Routing," in *Hotnets*
- [19] L. Vanbever, B. Quotin, and O. Bonaventure, "A Hierarchical Model for BGP Routing," *PRESTO '09*, August 2009.
- [20] K. Levanti, H. Kim, and T. Wong, "Netpolis: Modeling of Inter-domain Routing Policies," *IEEE Globecom*, 2008.
- [21] W. Xu and J. Rexford, "MIRO: Multi-path 인터넷도메인 Routing," *SIGCOMM '06*, September 2006.
- [22] L. Subramanian, M. Caesar, C. Ee, and M. Handley, "HLP: A Next Generation Inter-domain Routing Protocol," *SIGCOMM '05*, August 2005.
- [23] Y. Liao, L. Gao, R. Guerin, Z. Zhang, "Reliable 인터넷도메인 Routing Through Multiple Complementary Routing Processes," *ReArch '08*, December 2008.
- [24] K. Varadhan, R. Govindan, and D. Estrin, "Persistent Route Oscillations in Inter-Domain Routing," *Computer Networks*, 32(1), pp.1-16, 2000.
- [25] R. Govindan, C. Alaettinoglu, G. Eddy, D. Kessens, and S. Kumar, "An Architecture for Stable, Analyzable Internet Routing," 13(1), pp.29-35, 1999.
- [26] T. Griffin, F. Shepherd, and G. Wilfong, "Policy Disputes in Path Vector Protocols," *Proceedings of ICNP'99*, pp.21-30, 1999.
- [27] M. Yannuzzi, X. Bruin, and O. Bonaventure, "Open

- issues in 인터넷도메인 Routing: a Survey, 19(6), pp.49-56, 2005.
- [28] T. Griffin, F. Shepherd, and G. Wilfong, "The Stable Path Problem and 인터넷도메인 Routing," IEEE/ACM networking, 10(2), pp.232-243, 2002.
- [29] L. Gao and J. Rexford, "Stable Internet Routing Without Global Coordination," IEEE/ACM Networking, 9(6), pp.681-692, 2001.
- [30] A. Jagard, V. Ramachandran, "Toward the Design of Robust 인터넷도메인 Routing Protocols, IEEE Network, 19(6), pp.35-41, 2005.
- [31] Y. Wang, M. Schapira, and J. Rexford, "Neighbor-specific BGP: More Flexible Routing Policies While Improving Global Stability," SIGMETRICS/performance'09, 2009.
- [32] T. Griffin, A. Jagard, and V. Ramachandran, "Design Principles of Policy Languages for Path-Vector Protocols," ACM SIGCOMM '03, pp.61-72, 2003.
- [33] J. Sobrino, "Network Routing with Path Vector Protocols: Theory and Applications," ACM/SIGCOMM '03, pp.49-60, 2003.
- [34] A. Jagard and V. Ramachandran, "Robustness of Class Based Path-Vector System," Proceedings of ICNP '04, pp.84-93, 2004.
- [35] L. Gao, T. Griffin, and J. Rexford, "Inherently Safe Backup Routing with BGP," IEEE INFOCOM '01, pp.547-556, 2001.
- [36] Y. Yang, H. Xie, H. Wang, and L. Li, "Stable Route Selection for 인터넷도메인 Traffic Engineering," IEEE Network, November/December 2005.
- [37] T. Griffin and G. Wilfong, "Analysis of the MED Oscillation Problem in BGP," ICNP '02, pp.90-99, 2002.
- [38] N. Feamster and J. Rexford, "Network-Wide BGP Route Prediction for Traffic Engineering," Scalability and Traffic Control in IP Networks II, 2002.
- [39] C. Ludwig, "Traffic Engineering with BGP," Seminar Internet Routing, Technical University Berlin, July 2009.
- [40] N. Feamster, J. Winick, and J. Rexford, "A Model of BGP Routing for Network Engineering," SIGMETRICS, Perf. Eval. Rev., 32(1), pp.331-342, 2004.
- [41] B. Quoitin, S. Uhlig, C. Pelsser, L. Swinnen, and O. Bonaventure, "인터넷도메인 Traffic Engineering with BGP," IEEE Comm. Magazine, 41(5), pp. 122-128, may 2003'
- [42] F. Wang and L. Gao, "Inferring and Characterizing Internet Routing Policies," ACM SIGCOMM Intrenet Measurement Workshop, 2003.
- [43] R. Mahajan, D. Wetheral, and T. Anderson, "Toward Coordinated 인터넷도메인 Traffic Engineering," Hotnets-III, 2004.
- [44] N. Spring, R. Mahajan, and T. Anderson, "Quantifying the cause of Internet Path Inflation," SIGCOMM, August 2003.
- [45] R. Teixeira, T. Griffin, G. Voelker, and A. Shaikh, "Network Sensitivity to Hot Potato Disruptions," SIGCOMM, 2004.
- [46] J. Winick, S. Jamin, and J. Rexford, "Traffic Engineering between Neighboring Domains," Manuscript, 2002.
- [47] R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, "Negotiation-Based Routing Between Neighboring ISPs," Proceedings of Second Networked Systems Design and Implementation, may 2005.
- [48] R. Mahajan, "Practical and Efficient Internet Routing with Competing Interests," Ph.D. Dissertation, Univ. of washington, 2005.
- [49] G. Shrimali, A. Akella, and A. Mutapcic, "Cooperative Inter-Domain Traffic Engineering Using Nash Bargaining and Decomposition," IEEE INFOCOM, pp.330-338, 2007.
- [50] J. Nash, "The Bargaining Problem," Econometric, 28, pp.155-162, 1950.
- [51] R. Myerson, Game Theory: Analysis of Conflict, Harvard Univ. Press, 1991.
- [52] S. Boyd and L. Vanderberghe, Convex Combinations, Cambridge University Press, 2004.
- [53] H. Wang, H. Xie, and Y. Yang, "Stable Egress Route Selection for 인터넷도메인 Traffic Engineering: Model and Analysis, ICNP'05, pp.14-29, 2005.



[54] J. Qiu and L. Gao, "Robust Egress 인터도메인 Traffic Engineering," ICNP'06, pp.200-309, 2006.

[55] N. Feamster, J. Borkenhagen, and J. Rexford, "Guideline for 인터도메인 Traffic Engineering," ACM SIGCOMM Comp. Comm. Rev, 33(5), 2003.

[56] G. Crisallo and C. Jacquenet, "An Approach to 인터도메인 Traffic Engineering," WTC '02, September 2002.

[57] K. Ho, N. Wang, P. Trimintzios, and G. Pavlou, "Traffic Engineering for Inter-domain Quality of Service, Proceedings of London Telecommunication, 2003.

[58] L. Xiao, J. Wang, K. Lui, K. Nahrstedt, "Advertising 인터도메인 QoS Routing Information," IEEE JSAC, 22(10), December 2004.

[59] I. Okumus, H. Mantar, J. Hwang, and S. Chapin, "Inter-domain QoS Routing on Diffserv Networks: A Region Based Approach," Computer Communication, 28(2), pp.174-188, 2005.

[60] A. Beben, "EQ-BGP: an Efficient Inter-domain QoS Routing Protocol," AINA'06, 2006.

[61] P. Nanda and J. Simmonds, "Policy based QoS Support using BGP Routing," International Conf. on Comm. in Comp., CIC, June 2006.

[62] P. Nanda, "Supporting QoS Guarantees using Traffic Engineering and Policy based Routing," International Conf. on Comp. Sci. and Software Engg, 2008.

[63] A. Fonte, E. Monteiro, M. Yannuzzi, X. Bruin, and J. Pascual, "A Framework for Cooperative 인터도메인 QoS Routing," 2008.

[64] A. Fonte, M. Curado, and E. Monteiro, "인터도메인 Quality of Service Routing: Setting the Grounds for the Way Ahead," Annals of Telecommunication, 63(11-12), pp.683-695, 2008.

[65] X. Masip-Bruin, Jose Enriquez-Gabeiras, and Luis Cordeiro, "The EuQoS System: A Solution for QoS Routing in Heterogeneous Networks," IEEE Comm. Magazine, February 2007.

[66] Y. He, M. Faloutsos, S. Krishnamurthy, and M. Chrobak, "Policy-Aware Topologies for Efficient Inter-Domain Routing Evaluation," IEEE 2008 Ingocom. pp.2342-2350, 2008.

[67] K. Butler, T. Farley, P. Mcdaniel, and J. Rexford, "A Survey of BGP Security," ACM, April 2005.

저자소개

**이강원(Kang-won Lee)**



1980년: 서울대학교 공과대학  
산업공학과(공학사)  
1982년: 서울대학교 대학원  
산업공학과(공학석사)

1985년: Kansas State Univ. U.S.A 산업공학(공학박사)  
2012년 현재: 서울과학기술대학교 IT정책전문대학원  
산업정보시스템공학과 교수, IEEE Transaction  
paper referee, 한국경영과학회 이사(학술부장)  
대한산업공학회 편집위원장  
※ 관심분야: 정보통신, 품질 및 신뢰성, O.R.

**함영만(Young-marn Ham)**



1994년: 서울산업대학교  
전자공학과(공학사)  
1996년: 한양대학교 공학대학원  
전자통신공학과(공학석사)

2012년 현재: 서울과학기술대학교 IT정책전문대학원  
박사과정(산업정보시스템 전공)  
2012년 현재: 영인 IT 기술사 사무소 대표 정보통신  
기술사, 전자응용기술사, 전자기기기능장,  
대한민국 무선통신 명장  
※ 관심분야: 무선통신, 방송통신, 정보통신