

스마트 네트워크 환경에서의 자원 및 경로 최적화 연구

서동원¹ · 윤승현² · 장병윤^{3*}

Resource and Network Routing Optimization in Smart Nodes Environment

Dong-Won Seo · Seung Hyun Yoon · Byeong-Yoon Chang

ABSTRACT

In this research, we dealt with an optimization problem which aims to minimize total cost of resources usage and network routing in a smart node environment. Toward this, we briefly introduced technology trends in smart nodes, methods in resource optimization fields, economic effects of smart network and content delivery (or distribution) network (CDN). Moreover, based on CDN we proposed and implemented a mathematical (mixed integer) programming model to combine replica placement and requests distribution problem (RPRDP) and routing problem. Computational result of an example on RPRDP+Routing problem is also provided.

Key words : CDN, Resource Usage, RPRDP, Smart Node, Network Routing

요약

본 연구에서는 네트워크 총 비용 최소화의 관점에서 스마트 노드 자원사용과 네트워크 트래픽 경로를 함께 결정하는 최적화 문제를 고려하였다. 이를 위해, 스마트 노드의 기술 추세와 자원 최적화에 대한 분석방법, 스마트 네트워크의 경제적 효과와 CDN에 대해 살펴보았다. CDN에 대한 분석을 기반으로 혼합정수계획법 모형을 제안하였으며, 이는 기존에 알려진 복제위치선정과 고객요청 분배문제(RPRDP)와 경로 결정문제가 결합된 형태로 볼 수 있다. 제안된 혼합정수계획법 모형을 구현하고 그 결과를 소개함으로써 제안된 모형의 유효성을 밝혔다.

주요어 : 콘텐츠전송네트워크, 자원사용량, RPRDP, 스마트노드, 네트워크 라우팅

1. 서론

최근의 인터넷 환경은 인터넷 사용자의 폭발적인 증가와 고품질 멀티미디어 콘텐츠 트래픽의 급증으로 인하여 초광대역, 지능형 “스마트 네트워크” 구축이 필요하다. 트래픽 추세분석 자료에 따르면, 최근 스마트폰, 스마트TV,

스마트패드 등과 같은 스마트기기로 인해 인터넷을 통한 동영상 서비스의 증가로 인하여 유선 인터넷 트래픽은 연평균 33% 이상 증가되어, 전 세계적으로 2015년 월 63EB, 국내백분 트래픽은 연평균 31% 이상 증가되어 2015년 월 5.9EB에 도달할 것으로 전망된다^[10]. 또한 무선 트래픽은 세계적으로 연평균 92% 증가, 국내의 경우는 연평균 103% 증가하여 현재 추세를 기준으로 2020년에는 2010년 대비 약 189배의 증가가 예상된다^[2].

네트워크 사업자는 대용량 비디오 콘텐츠 트래픽의 수익화 연계방안으로 고품질 미디어 콘텐츠 전달 기능이 추가된 스마트 네트워크로의 전환을 추진하고 있으며^[10], 방송통신위원회도 트래픽 폭증에 효율적으로 대응하는 네트워크 구축과 관련 기술의 글로벌 경쟁력 확보를 위하여 현존하는 기술을 기반으로 인터넷 혁신 기술을 수용함으

*본 연구는 미래창조과학부가 지원한 2013년 정보통신·방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음
접수일(2013년 11월 29일), 심사일(2013년 12월 13일),
게재 확정일(2013년 12월 23일)

¹⁾ 경희대학교 경영대학 경영학부, 경영연구원

²⁾ 한국전자통신연구원, 스마트노드연구팀

³⁾ 아주대학교 경영대학 경영학부

주 저 자 : 서동원

교신저자 : 장병윤

E-mail; bychang@ajou.ac.kr

로써 첨단 기술개발과 동시에 상용성을 고려하는 스마트 노드 기술개발을 적극적으로 추진하여 스마트네트워크 진화를 전략적으로 진행하고 있다^[2].

스마트 네트워크는 콘텐츠 중심 네트워크의 개념을 현재의 IP 네트워크 위에서 오버레이 형태로 콘텐츠를 인지하여 콘텐츠별 최적 네트워크 자원을 할당하고 네트워크 사업자의 네트워크 제어능력을 추가하여 end-to-end로 고품질 콘텐츠 전달이 가능하도록 하는 기술이다^[1].

기술적으로 스마트노드는 네트워크 장비의 데이터 전달 및 서버의 데이터 저장, 프로세싱 기능을 동시에 제공하는 차세대 다목적 네트워크 장비로서 대용량 콘텐츠의 효율적인 처리와 같은 다양한 응용서비스를 위한 네트워크 기능을 제공해야 한다^[3]. 다음 Fig. 1은 기존 인터넷 노드와 스마트노드를 개념적으로 비교한 것이다. 이러한 스마트 노드의 가장 큰 차이점은 기존의 라우터 기능에 더하여 서버기능을 동시에 가지고 있는 것이다. 따라서 스마트노드에 필요한 여러 가지 기술 중 중요한 기술이 자원 및 경로를 동시에 최적화 하는 기술이다.

대용량 콘텐츠를 효율적으로 전달하기 위해서 콘텐츠 정보와 네트워크 정보를 결합하여 서비스를 제공하는 “콘텐츠 중심 네트워크”로 망의 진화를 요구한다. 이를 위해 인터넷 데이터센터를 중심으로 하는 현재의 트래픽 중앙 집중형태에서 벗어나 트래픽이 분산 전달되는 구조로의

변환이 필요하다. 지역적인 분산 배치를 통해 이용자와 근접한 곳에서 콘텐츠가 서비스되도록 구성하는 콘텐츠 이름 기반의 콘텐츠 라우팅 기술 도입이 검토되고 있다.

이를 위해서는 네트워크 효율성을 높이기 위한 서버/스토리지/네트워크 통합 최적화 기술 연구가 필요하며, 또한 네트워크 장치 및 서버가 결합된 통합플랫폼인 스마트 노드 개발을 위하여 서버/스토리지/네트워크 통합 계산 최적화 모델 수립 및 최적화 알고리즘 개발이 필요하다. 따라서 본 연구는 이와 같은 폭발적인 트래픽 증대에 대처하기 위해 향후 스마트노드 개발 시점에서 네트워크 자원들의 활용률을 높이고, 또한 최적화된 경로로 트래픽을 운송함으로써 고객 서비스증대 및 운영비용 최적화라는 두 가지 목표를 달성하기 위한 기초 연구로, 스마트노드 자원 및 경로를 통합한 수리모형을 제시하고자 한다.

2장에서는 스마트노드 및 자원 최적화 분야의 연구동향을 간단히 살펴보고, 3장에서는 스마트노드 및 CDN (Content Distribution Network)의 최적화 모형과, 본 연구결과인 스마트노드 자원 및 경로 최적화 모형과 실험결과를 제시한다. 4장에서는 결론과 함께 향후 연구주제인 Networked Multi-Site Data Centers에 대한 개념을 소개 한다.

2. 스마트노드 및 자원 최적화 분야 연구동향

2.1 스마트노드

트래픽 폭증에 효율적으로 대응하기 위해서는 스마트 노드는 네트워크 장비의 데이터 전달 및 서버의 데이터 저장, 프로세싱 기능과 같은 다양한 응용서비스를 위한 네트워크 기능을 제공해야 한다. 방송통신위원회는 스마트노드 기술개발에 대하여 3단계로 추진전략을 세우고 1 단계 서비스노드에서는 효율적인 콘텐츠 유통 및 트래픽 폭증 조기 대응을 위한 사업을 2011년에 시작하였다. 또한 국내 ICT 산업 생태계의 조기 혁신 및 스마트 장비 시장 선점을 위하여 3단계 완전통합형 스마트노드의 프로토타입 시스템 개발을 위한 사업을 2012년에 착수하였다^[2].

콘텐츠 유통 효율화를 위해 콘텐츠를 이해하고 이를 효율적으로 전달하기 위한 콘텐츠 서비스노드 기술개발이 필요하다. 콘텐츠 서비스노드는 통신사업자와 콘텐츠 및 서비스 사업자 그리고 서비스 이용자 모두의 요구사항을 만족하여야 한다. 다음 Fig. 2는 콘텐츠 서비스 노드의 활용 예를 보여준다. 콘텐츠 서비스노드는 콘텐츠를 효과적으로 전달하고 캐싱하여 콘텐츠 중복전송을 방지함으로써 네트워크 구축비용을 절감시키고, 서비스 이용자에

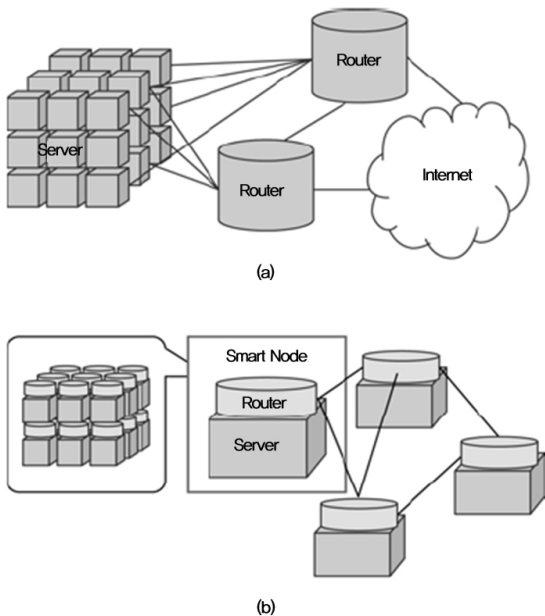


Fig. 1. (a) Internet Node, (b) Smart Node^[3]

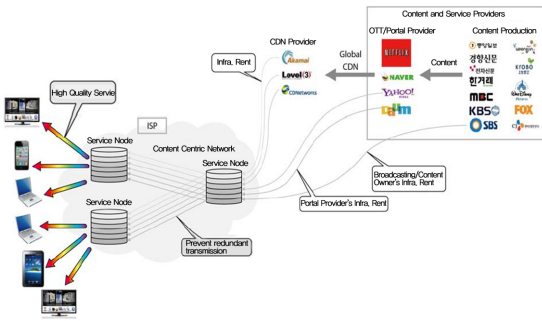


Fig. 2. An Example of Contents Service Node^[3]

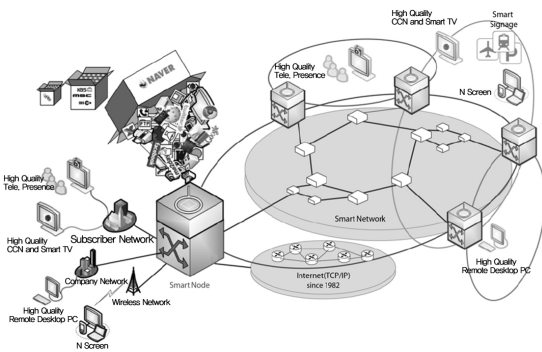


Fig. 3. Smart Network^[3]

계 근접한 위치에서 콘텐츠를 서비스하여 이용자의 품질을 보장하도록 구성된다.

콘텐츠 서비스노드는 다양한 콘텐츠 라우팅, 스트리밍 방법을 독립적으로 사용할 수 있도록 하여 기존의 CDN 사업자 및 OTT 사업자, 콘텐츠 및 서비스 사업자가 손쉽게 이를 대역할 수 있도록 하며, 네트워크 정보를 제공함으로써 각 사업자가 보다 효과적으로 서비스할 수 있는 환경을 제공한다.

다음 Fig. 3은 스마트네트워크에서 스마트 노드의 역할을 보여주고 있다.

기존 네트워크에서는 네이버, 페이스북, YouTube 등과 같은 콘텐츠 사업자들이 각기 독자적인 서버를 구축하고 이를 기반으로 가입자 관리, 미디어 처리를 수행하고 있으며, 자체적인 서비스 스위칭 장비를 확보하여 인터넷을 통한 서비스를 제공하고 있다. 그러나 스마트 네트워크에서는 네트워크의 기능을 고도화시켜 서비스 및 콘텐츠 기능을 네트워크에서 제공함으로써 콘텐츠 사업자들이 개발한 서비스를 쉽게 사업화 가능하도록 만들어 주는 환경구축을 목표로 한다. 이러한 스마트 네트워크를 구성하기 위한 핵심 장비인 융합 전달시스템(스마트노드 플랫폼)

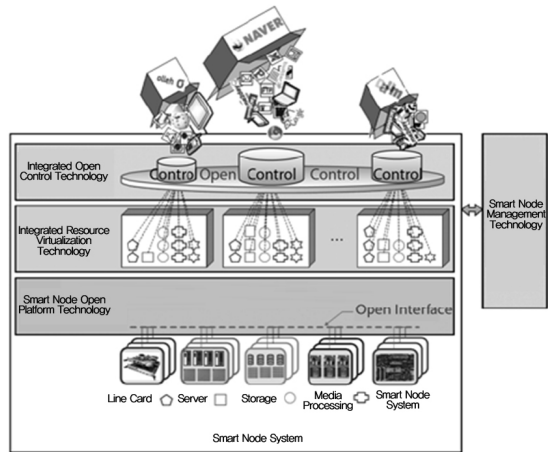


Fig. 4. Concept of Smart Node Systems^[3]

폼)은 비즈니스 사업자들에게 네트워킹 기술을 포함한 ‘통합형 단말-네트워크-컴퓨팅 자원’으로 구성된 유연한 가상 인프라를 제공하여 프리미엄 IT 서비스를 만들 수 있도록 하는 시스템이다. 다음 Fig. 4는 스마트노드 시스템의 개념도를 나타낸다. 이러한 융합 전달시스템은 통합 개방 제어기술, 통합 자원 가상화기술 및 스마트노드 개방 플랫폼 기술의 3가지 핵심기술로 구성되어 있다.

2.2 자원 최적화

자원 최적화 모형은 다양한 경영의사결정에 대한 수리적 분석법을 다루는 경영과학(OR/MS)의 한 분야로, 본 연구에서는 최적화 기법 중 선형계획법(LP: Linear Programming)과 혼합정수계획법(MIP: Mixed Integer Programming)을 적용 및 응용하였다. 구체적으로 말하면, 최적화기법 중 최단경로기법(Shortest Route Method)을 사용하여 자원의 효율적 배분을 고려함과 동시에, 시스템의 효율성(Utility or Usage)을 극대화를 고려하였다.

잘 알려진 전통적인 최단경로계산 알고리즘인 Dijkstra와 Bellman-Ford 알고리즘은 두 노드 사이의 최단 경로를 계산함에 있어 단순하면서도 빠른 결과를 도출해주는 장점으로 인해 현재까지도 지속적으로 활용이 되고 있으며, 이를 기반으로 새로운 Heuristic 기법이 접목된 변형된 형태의 새로운 알고리즘에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 조사결과 다수의 제약사항을 고려한 경로계산 알고리즘에 대한 연구가 다 수를 차지하고 있으며, 알고리즘에 대한 검증은 수학적 분석을 이용하거나 시뮬레이션을 통한 구현 및 비교를 통해 이루어지고 있다.

전통적인 경로계산 알고리즘으로부터 파생된 알고리즘

들은 다양한 형태로 분류가 가능하다. Dijkstra 알고리즘과 Bellman-Ford 알고리즘을 정적(static) SPT(Shortest Path Tree) 알고리즘으로 분류된다. 한편, 이들의 변형인 동적(dynamic) SPT 알고리즘을 제안한 연구에서는 OSPF나 IS-IS 라우팅 프로토콜에서 구성하는 SPT는 link state가 변경될 때마다 매번 새롭게 재구성되는 단점이 있는데, 매번 SPT를 재구성함에 따라 발생하는 비효율성과 상당한 양의 CPU 소모 시간을 개선하고자 새로운 동적 SPT 재구성 알고리즘을 제안하였다. 이러한 알고리즘의 목적은 SPT를 업데이트할 때 계산 복잡도를 최소화하고, 이미 존재하는 SPT 토폴로지의 변경을 최소화 하여 라우팅 안정성을 유지하는 것으로 볼 수 있다.

Dijkstra와 Bellman-Ford 알고리즘을 활용한 주요 알고리즘으로는 WSP(Widest-shortest path) 알고리즘과 SWP(Shortest-widest path) 알고리즘이 있다. WSP는 min-hop 알고리즘을 개선한 것으로써, 네트워크 트래픽의 로드 밸런싱(load balancing)을 위한 목적으로 만들어진 알고리즘이다. WSP는 전체 네트워크 그래프 상에서 최소 홉을 가지는 경로를 찾으며, 만일 동일한 홉 카운트(hop count)를 가지는 경로가 여러 개 있을 때에는 가용한 대역이 가장 큰 것을 선택하고, 많은 로드가 걸려있는 링크는 고려 대상에서 제외시킨다. 만일 가용 대역까지 동일한 경로가 여러 개인 경우에는 임의로 선택한다. 반면에 SWP는 가용한 모든 경로 중에 사용 가능한 대역이 가장 큰 것을 선택하는 알고리즘이며, 만일 동일한 조건의 경로가 다수 개인 경우에는 홉 카운트가 가장 적은 것을 선택한다. 만일, 홉 카운트까지 동일한 경로가 여러 개인 경우에는 임의로 선택한다.

경로계산 알고리즘이 처음 등장할 시기에는 고려될 제약사항들이 단순한 수준에 머물렀으나, 망의 규모가 커지고 QoS(Quality of Service)를 보장하는 트래픽 엔지니어링(Traffic Engineering)에 대한 관심이 증대되면서, 고려해야 할 제약사항들도 더 다양하고 복잡한 모습으로 변화되었다. 현재 경로계산에서 고려하는 제약사항들의 예로 다음을 들 수 있다: 비용, 지연, 호트러짐(jitter), 대역폭, 우선순위, 신뢰성, 링크효율, 경로 및 링크품질, 위치와 인터페이스 용량차이, 특정 노드 및 링크의 회피, 유지보수성, 다양한 서버(플랫폼)지원가능성, 전송품질지원 등.

어떤 연구에서는 QoS 제약사항을 Bottleneck QoS 제약(BC)와 Additive QoS 제약(AC)로 분류하기도 한다. BC에는 대역폭 등과 같이 비교적 다루기가 쉬운 제약사항이 포함되며, AC에는 지연, 호트러짐 등과 같이 다루기가 쉽지 않은 제약사항들이 포함된다. 특히 AC를 고려한

경로계산 문제는 NP-hard 문제에 해당된다.

많은 연구에서 경로계산 알고리즘의 목적함수로 다음과 같은 다양한 함수를 제안하였다: 경로비용 최소화, 경로로드 최소화, 잔여대역폭 최대화, 통합소비대역폭 최소화, 최대로드링크 최소화, 경로합누적비용 최소화 등.

클라우드 컴퓨팅(Cloud Computing)의 주요 논제인 자원 최적화 분야에 경로 최적화 기법 외에 선형계획법(LP), 혼합정수계획법(MIP)과 같은 다양한 수리계획법(Mathematical Programming)이 활용 가능할 것이다. 기존 연구들은 클라우드 컴퓨팅 서비스를 위한 하드웨어 또는 소프트웨어에 대한 기술적 연구가 주를 이루고 있다. 망 전체의 자원 효율적 운영을 고려한 연구는 많지 않으며, 또한 특정 모형을 위한 사례연구, 단순 구조를 갖는 모형을 대상으로 한 연구에 집중되어 있다. 특히, 네트워크의 자원과 경로를 동시에 고려한 최적화 모형에 대한 이론적인 연구결과는 찾아보기 어렵다.

3. 스마트노드 자원 및 네트워크 경로 통합계산 최적화 모형

스마트노드에 대한 주요 연구는 동향파악(개념), 경제성분석, CDN 최적화 연구로 나눌 수 있다. 동향파악에 관한 연구로는 Yoon et al.^[3]과 Lim^[4]의 연구로서 이들 연구에서는 주로 스마트노드 기술에 대한 정책 소개 및 현재 추진 중인 사업소개, 미래인터넷 R&D 추진 전략으로서의 스마트 네트워크 등을 설명하고 있다.

경제성 평가에 대한 주요논문으로는 Jung et al.^[5]과 Kim^[6]의 논문을 들 수 있으며 이들 논문은 주로 인터넷 트래픽에 대한 스마트 네트워크의 영향평가, 스마트 네트워크 구축사업의 경제적 파급효과 분석 등을 설명하고 있다.

CDN 최적화 모형으로는 Neves et al.^[7] 논문을 주요 문헌으로 볼 수 있으며, 그들은 CDN overlay network에서 총 트래픽을 최소화하는 최적화 문제, 잠재적 노드에서 proxy 서버의 수와 위치, proxy 서버에서 콘텐츠 복제를 결정하는 문제, 총 비용을 최소화 하면서 적절한 proxy 서버에 요청된 콘텐츠를 routing하는 문제 등을 다루고 있다.

다음으로 경제성평가 모형과 CDN 최적화 모형을 살펴본 후, 스마트노드 자원 및 네트워크 경로 통합계산 최적화 모형을 소개한다.

3.1 스마트노드 경제성 분석

Jung et al.^[5]은 스마트 네트워크 도입에 따른 트래픽

감소를 여러 상황에 대하여 분석함으로써 스마트 네트워크의 경제성 및 효과를 입증하고자 하였다 (단순한 캐싱, ISP와 CDN 사이에서의 경쟁 및 협력에 대한 상황, ISP 간의 경쟁과 협력에 대한 상황 등). 그들은 α (cacheable traffic), h (hit ratio)과 β (non-cacheable traffic)로 정의될 때, Smart Caching에 대한 망 트래픽 감소효과 R 은 $R = 1 - [\alpha \times (1 - h) + \beta]$ 로 정의하였다. 그들의 정의에 따르면 $h = 0.6$ 이고, $\alpha = 0.4$ 이면 Smart Caching의 효과는 약 24%가 된다.

또한 ISP-CDN간의 협력, 그리고 ISP-ISP간의 협력에 의한 스마트네트워크의 효과를 살펴보기 위한 ISP망 모형을 제시하였다. 노드 집합 (V)과 서버집합(S)에 대해, 각 ISP와 CDN 사업자가 독립적으로 역할을 수행하는 경우 다음의 수리모형을 수립하였다.

일반적으로 ISP는 주어진 트래픽 흐름을 각 링크 ($l \in L$)에 어떤 비율로 전송할 것인지 r_l^{st} (서버 s 에서 유저 t 로 흐르는 flow의 트래픽 양 중 링크 l 을 지나는 비율)를 결정하며(라우팅), CDN 사업자는 주어진 라우팅 프로토콜에서 각 서버($s \in S \subset V$)와 사용자($t \in T \subset V$) 사이의 트래픽 양을 얼마만큼 분배할 것인지 x_{st} (서버 s 에서 유저 t 로 흐르는 flow의 트래픽 양)를 결정한다(트래픽 매트릭스).

다음의 ISP 모형은 서비스 품질을 보장하면서 혼잡현상을 예방하기 위해 트래픽 경로를 효율적으로 제어하는 라우팅정책(r_l^{st})을 결정하며 전체 링크를 흐르는 총 트래픽 양을 최소화하는 것을 목표로 한다.

· ISP의 트래픽 엔지니어링 모형^[5]

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_l f_l \\ & \text{s.t. } f_l = \sum_{st} x_{st} r_l^{st} \leq C_l \\ & \sum_{l \in \text{In}(v)} r_l^{st} - \sum_{l \in \text{Out}(v)} r_l^{st} = I_{v=t} \\ & 0 \leq x_{st} \leq 1 \end{aligned}$$

여기서 목적함수에 포함된 f_l 은 링크 l 을 흐르는 총 트래픽 양을 의미하며, C_l 은 링크 l 의 용량이고, $I_{v=t}$ 는 $v=t$ 인 경우에만 1의 값을 갖는 벡터이다. 첫 번째 제약식은 링크 l 에 대한 제약, 두 번째 제약식은 끝단 노드에 대한 제약을 표현한다. 반면에, CDN 사업자는 사용자들의 지연시간을 최소화하기 위해 각 사용자의 콘텐츠 트래픽 수요량을 각 서버에 얼마만큼 분산 담당할 것인지 트래픽 매트릭스(x_{st})를 결정한다.

· CDN 사업자의 트래픽 분배 모형^[5]

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_l h_l(f_l) \\ & \text{s.t. } f_l = \sum_{st} x_{st} r_l^{st} \leq C_l \\ & \sum_s x_{st} = \alpha D_t \\ & \sum_t x_{st} \leq B_s \\ & 0 \leq x_{st} \end{aligned}$$

여기서 B_s 는 서버 s 의 스토리지 용량, D_t 는 유저 요구량, $\text{In}(v)$ ($\text{Out}(v)$)는 노드 v 로 유입(출) 되는 링크 집합, αD_t ($\text{Out}(v)$)는 내(외)부 ISP로부터 제공받는 양, 그리고 $\sum_{t \in T} (1 - \alpha) D_t$ 는 IX 트래픽양을 나타낸다. 또한, 두 번째와 세 번째 제약식은 서버 s 에서 유저 t 로 흐르는 flow양에 대한 제약, 목적함수의 $h_l(f_l)$ 는 링크 l 에서의 지연시간을 의미한다.

다음으로 ISP가 스마트 네트워크를 운용함으로써 CDN의 역할을 같이 수행하는 Telco-CDN의 역할을 수행하는 경우, 트래픽 엔지니어링과 서버 선택에 필요한 정보 교환이 자유로움에 따라, 보다 효율적인 결정을 수행한다. 트래픽 양의 최소화에서 중점을 두고 Telco-CDN 역할을 수행하기 위한 최적화 문제^[5]는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_l f_l \\ & \text{s.t. } f_l = \sum_{st} x_l^{st} \leq C_l \\ & \sum_l h_l(f_l) \leq SS_0 \\ & \sum_s \left(\sum_{l \in \text{In}(v)} x_l^{st} - \sum_{l \in \text{Out}(v)} x_l^{st} \right) = D_t \cdot I_{v=t} \\ & \sum_s \sum_{t \in \text{Out}(s)} x_l^{st} \leq B_s \\ & 0 \leq x_l^{st} \end{aligned}$$

여기서 SS_0 는 지연시간의 최대 허용치이며, x_l^{st} 는 서버 s 에서 링크 l 을 지나 유저 t 로 흐르는 flow의 트래픽 양을 말한다.

미래지향적인 관점에서 ISP간의 협력 관계(α : ISP간의 협력율)를 통해 Global 스마트네트워크를 운용할 경우, ISP간 서버 캐싱 교환을 통해 IX트래픽의 감소를 통한 트래픽 감소효과를 알 수 있으며 이의 수리적 모형^[5]은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \sum_l f_l \\
 & \text{s.t. } f_l = \sum_{st} x_l^{st} \leq C_l \\
 & \quad \sum_l h_l(f_l) \leq SS_0 \\
 & \quad \sum_s \left(\sum_{l \in In(v)} x_l^{st} - \sum_{l \in Out(v)} x_l^{st} \right) = \alpha D_t \cdot I_{v=t} \\
 & \quad \sum_s \sum_{t \in Out(s)} x_l^{st} \leq B_s \\
 & \quad 0 \leq x_l^{st}
 \end{aligned}$$

Jung et al.^[5]은 그들의 연구에서 제시한 모형을 통해 매년 34%증가하는 트래픽과 스마트 네트워크를 통해 감소한 트래픽을 비교하여 트래픽 감소효과에 따른 비용감축을 비교한 결과, ISP가 전체 망의 40%를 차지하고 있는 경우 약 4천억원에서 최대 1조원의 망 구축비용 절감 효과를 얻을 수 있음을 언급하였다.

3.2 CDN 최적화 모형

현재까지 다양한 종류의 CDN 최적화 문제들이 연구되어 왔다(Neves et al.^[7], reference therein). CDN 최적화 문제는 서버배치문제(Server Placement Problem), 콘텐츠복제문제(Contents Replication Problem), 복제배치문제(Replica Placement Problem), 복제배치 및 요구배분문제(RPRDP: Replica Placement and Requests Distribution Problem) 등으로 크게 분류될 수 있다. 다음은 이들에 대한 설명을 나타낸 것이다.

이들 중 본 연구와 관련이 깊은 Neves et al.^[7]의 RPRDP는 네트워크 상에서 복제의 최적 위치를 결정함과 동시에 네트워크의 로드를 줄이기 위해 고객의 요청을 서버에 재분배하는 모형이다. RPRDP 최적화 모형의 수리 계획법 모형을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 정수계획법(IP: Integer Programming) 모형에 사용된 변수와 모수는 다음과 같이 정의된다.

- c_{ij} : 서버 j가 요청 i를 처리할 때 발생하는 비용
- R : 요청에 대한 집합
- S : CDN내의 서버 집합
- C : 복제되는 콘텐츠의 집합
- T_k : 콘텐츠 k의 크기
- E_j : 서버 j의 가용 디스크 용량
- BS_j : 서버 j의 발신 대역폭
- BR_i : 요청 i의 필요 대역폭
- NR_k : 콘텐츠 k의 가용 복제수

• $K(i)$: 요청 i에서 요구되는 콘텐츠 결정함수

또한, 의사결정변수 y_{jk} 는 콘텐츠 k가 서버 j에 복제된다면 $y_{jk} = 1$, 그렇지 않으면 $y_{jk} = 0$ 로, 의사결정변수 x_{ij} 는 요청 i가 서버 j에서 처리된다면 $x_{ij} = 1$, 그렇지 않으면 $x_{ij} = 0$ 로 정의된다.

Neves et al.^[7]이 소개한 RPRDP 최적화 모형에 대한 정수계획법 모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } z = \sum_{i \in R} \sum_{j \in S} c_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in S} \sum_{k \in C} T_k y_{jk} \\
 & \text{s.t. } \sum_{j \in S} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in R \\
 & \quad \sum_{i \in R} BR_i x_{ij} \leq BS_j \quad \forall j \in S \\
 & \quad x_{ij} \leq y_{jk(i)} \quad \forall i \in R, j \in S \\
 & \quad \sum_{j \in S} y_{jk} \leq NR_k \quad \forall k \in C \\
 & \quad \sum_{k \in C} T_k y_{jk} \leq E_j \quad \forall j \in S \\
 & \quad x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in R, j \in S \\
 & \quad y_{jk} \in \{0,1\}, \forall j \in S, k \in C
 \end{aligned}$$

3.3 스마트노드 자원 및 네트워크 경로 통합계산 최적화 모형

본 절에서는 기존 RPRDP 모형에서 다루지 않았던 네트워크 Routing 문제를 네트워크 경로결정시에 포함하는 통합 최적화 모형을 제시한다. 즉, 제시되는 통합 최적화 모형은 RPRDP 모형의 최적해가 네트워크의 트래픽을 고려하지 않고, 서버와 고객의 요청을 만족하도록 콘텐츠 복제 서버의 위치와 복제 콘텐츠의 개수를 결정한다는 문제점을 해결하기 위한 모형으로 RPRDP+Routing Problem 모형으로 볼 수 있다. 이에 대한 수리적 모형은 다음과 같다.

앞 절에서 소개한 RPRDP 모형에 대한 동일한 환경을 가정한다면, 기본 RPRDP 최적화 모형에서 목적함수가 다음과 같이 마지막 항이 추가된 형태로 대체된다. 새로운 목적함수에서 추가된 의사결정변수 z_{ij} 는 링크 (i,j) 사이의 트래픽의 양을 나타내며 $z_{ij} \geq 0$ 이고, α_{ij} 는 링크 (i,j) 의 전송비용이다.

$$\text{Min } z = \sum_{i \in R} \sum_{j \in S} c_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in S} \sum_{k \in C} T_k y_{jk} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \alpha_{ij} z_{ij}$$

또한, 네트워크의 트래픽에 대한 제약사항은 다음의 3개의 제약식으로 표현되며, 이를 앞 절에서 소개한 기본 모형에 추가된 모형이 최종 수리모형이 된다. 상수 γ_{ij} 는 링

크 (i, j) 의 대역폭의 용량을 나타낸다.

1) 링크의 용량에 대한 제약식

$$z_{ij} \leq \gamma_{ij} \quad \forall (i, j) \in L$$

2) 서버가 아닌 노드에 대한 flow 제약식

모든 노드 $i \in V, i \notin S$ 에 대해서,

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \notin S}} z_{ij} - \sum_{j \in V} z_{ij} = I_j$$

3) 서버 노드에 대한 flow 제약식

서버 $j \in S$ 에 대해서,

$$\sum_{i \in V} z_{ij} - \sum_{j \in S} z_{ij} = \sum_{k \in C} T_{kMjk}$$

제안된 수리모형을 성능을 검증하기 위해 GLPKLAB에서 제공하는 MathProg (freeware)를 이용하여 구현하고, 실행해본 결과 의도한 바와 같이 네트워크 전체의 트래픽을 고려한 복제 서버의 선택과 복제 콘텐츠의 개수를 결정할 수 있었다. 수치예제의 모형에 대한 대략적인 정보는 다음과 같다. 예제는 서버 10개, 콘텐츠 5개, 10개의 고객요청(request)으로 구성되어 있다. 이들 서버, 콘텐츠, 고객요청 사이의 링크는 100개 이상을 링크를 통해 연결되어 있으며, 각 링크의 전송용량은 다양한 크기로 설정하였다. 또한, 각 콘텐츠의 용량은 100, 150, 50, 100, 90MB이고 목적함수는 총 비용을 최소화하는 모형으로 구현하였다. 실험결과는 서버 1은 요청 9를, 서버 3은 요청 1과 5를, 서버 4는 요청 4와 7을, 서버 5는 요청 10을, 서버 7은 요청 2를, 서버 9는 요청 3을, 서버 10은 요청 6과 8을 처리하도록 결정되었다. 콘텐츠 1은 서버 3과 10에, 콘텐츠 2는 서버 3과 7에, 콘텐츠 3은 서버 1, 3, 9에, 콘텐츠 4는 서버 4와 6에, 콘텐츠 5는 서버 5와 10에 복제되는 해를 얻었다. 또한, 링크간 트래픽에 대해서는 콘텐츠 1은 서버 3과 50MB, 서버 7과 150MB의 트래픽을, 콘텐츠 2은 서버 1, 3과 50MB, 서버 4, 6과 100MB의 트래픽을, 콘텐츠 3은 서버 5와 60MB, 서버 9와 50MB, 서버 10과 40MB의 트래픽을, 콘텐츠 4는 서버 3과 50MB, 서버 10과 150MB의 트래픽을, 콘텐츠 5는 서버 3과 150MB, 서버 8과 30MB의 트래픽을 전송하게 된다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 인터넷 사용자와 콘텐츠 트래픽의 급증으로 인한 초광대역, 지능형 “스마트 네트워크” 구축이 필요한 시점에 스마트 네트워크의 중요한 요소가 될 스마트노드의 자원 및 네트워크 경로 통합계산 알고리즘을 연구하였다. 스마트노드 및 자원최적화 분야에 대한 현재의 기술동향과 스마트노드의 경제성 평가 및 CDN 최적화 모형에 기존 연구결과를 살펴보았다. 또한 RPRDP 모형과 Routing 문제를 동시에 고려하는 최적화 문제(정수계획법 모형)를 제안하고 모형의 확장성에 대해 언급하였다. 제시된 MIP 모형을 freeware인 MathProg 언어를 활용하여 구현하고 제안된 모형의 실효성을 확인하였다. 연구결과인 스마트노드 자원 할당을 위한 통합계산모형은 향후 개발될 스마트노드의 자원 할당 및 경로 최적화에 활용될 것으로 기대된다.

Data center에 관한 연구는 single site에서의 입지 가상화보다는 networked multi-site data center에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, multi-site 연구의 경우 data center 입지 및 interconnected multi-site data centers에 관한 연구로 구분될 수 있다. John Rath^[8], Cisco^[9], 그리고 Kwon^[11]에 따르면 data center 입지 선정시 주요 선택 기준으로 자연재해와 날씨, 인력 및 기업환경을 제시하였다. 현재 data center 입지에 관한 연구는 계량적 모형의 부재 및 intercommunication을 고려한 모형의 부재, 주로 논문형식이 아닌 white paper 형식으로 AHP, 회귀분석, 최적화 모형을 이용한 다양한 접근방법을 활용한 연구가 필요하다. 또한 interconnected multi-site data centers에 대한 연구는 Krishna Kant^[12]와 Graupner et al.^[13]와 같은 개념적 연구모형만 제시되었을 뿐, 수리적 분석방법을 통한 계량적 분석이 부족하다.

References

1. Park, C., Lee, Y. and Joo, Y., “An Implementation of Smart Network for High-Quality Media Contents Delivery, The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Societies,” Vol. 8, No. 1, pp. 85-91, 2013.
2. Korea Communications Commission, “Internet Development Strategy for the Future (Korean)”, 2011. www.kcc.go.kr.
3. Yoon, S., Song, H., Lee, B. and Lee, S., “R&D on Smart Node Technology,” 2012 Electronics and Telecommunication Trends, pp. 110-119, 2012.

4. Lim, Y., "R&D Strategy for the Future Internet (Korean)", Korea Communications Commission, 2012.
5. Jung, J., Chang, H., Lee, Y. and Mo, J., "Economic Value of Smart Network," Korean Institute of Industrial Engineers/The Korean Operations Research and Management Science Society 2012 Spring Joint Conference, pp. 431-435, 2012.
6. Jung, O. and Kim, S., "An Analysis of the Economic Effects on the Projects to Construct Smart Network" Korean Society for Internet Information, Vol. 12, No. 4, pp. 61-71, 2011.
7. T. A. Neves, L. S. Ochi, L. M. A. Drummond and E. U. Albuquerque, "Optimization in Content Distribution Networks," International Conference on Engineering Optimization, pp. 1-9, 2008.
8. J. Rath "Data Center Site Selection" Rath Consulting.
9. Cisco "Setting Your Sights on a Data Center" Cisco Trends in IT Article.
10. Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2010-2015". http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360_ns827_Networking_Solutions_White_Paper.html.
11. Kwon, H., "Geographical Location Analysis for Green Data Center (Korean)," Rural Administration Policy Research Vol. 1, No. 2, 2011.
12. Krishna Kant, "Data center evolution: A tutorial on state of the art, issues, and challenges", Computer Networks 53, pp. 2939-2965, 2009.
13. S. Graupner, V. Kotov and H. Trinks, "Resource Sharing and Service Deployment in Virtual Data Centers" ICDCSW'02, pp. 666-671, 2002.



서 동 원 (dwseo@khu.ac.kr)

1991 성균관대학교 산업공학과 학사
 1996 성균관대학교 대학원 산업공학과 석사
 2002 Georgia Institute of Technology, 산업공학 박사
 2003~현재 경희대학교 경영대학 경영학부 부교수

관심분야 : 확률과정론, Series Expansion, (Max,+)-algebra, 시뮬레이션



윤 승 현 (shpyoon@etri.re.kr)

1991 성균관대학교 산업공학과 학사
 1993 성균관대학교 대학원 산업공학과 석사
 1997 성균관대학교 대학원 산업공학과 박사
 1997~현재 한국전자통신연구원 책임연구원

관심분야 : 통신망 설계, 망관리, 통신망 최적화, 스마트노드



장 병 윤 (dwseo@khu.ac.kr)

1995 성균관대학교 산업공학과 학사
 2000 Georgia Tech. Operation Research 석사
 2002 Georgia Tech. Applied Statistics 석사
 2004 Georgia Tech. Industrial and Systems Engineering 박사
 2004~2006 Georgia Tech. Post Doc.
 2006~2009 KT 네트워크 연구소 선임 연구원
 2009~현재 아주대학교 경영대학 경영학과 부교수

관심분야 : 정보통신경영, BPM, OR/OM, SCM, Simulation, Applied Statistics