

# Software-Defined WAN and Exchange for Edge-to-Edge Network Softwarization

김동균, 조현훈  
한국과학기술정보연구원

## 요약

최근 네트워크 기술 동향에 있어서 이른바 핫 이슈 중 하나인 소프트웨어 정의 네트워킹(SDN, Software-Defined Networking)은 바야흐로 데이터센터, 기업, 캠퍼스 등의 근거리 데이터 네트워크(LAN, Local Area Network) 환경을 넘어서 통신망 사업자(캐리어)와 서비스 제공자를 통해 원거리 데이터 네트워크(WAN, Wide Area Network)로 진화하고 있다. 본고에서는 종단간 SDN 프로덕션 서비스를 위한 소프트웨어 정의 원거리 네트워크(SD-WAN, Software-Defined WAN)의 개요 및 적용 사례를 소개하고, SD-WAN의 핵심 서비스 기술로 인식되고 있는 네트워크 최적화, 가상화, 자동화, SDX(Software-Defined Exchange) 등의 요소 기술과 연구 동향을 알아본다.

## I. 서론

최근 다양화되는 인터넷 사용자, 디바이스, 애플리케이션을 통하여 멀티미디어와 모바일 데이터가 폭발적으로 증가하는 한편 사물인터넷 등을 위한 능동화된 네트워크의 필요성이 지속적으로 대두되면서, 바야흐로 소프트웨어 정의 네트워킹은 캠퍼스, 데이터센터, 기업 등의 근거리 데이터 네트워크(LAN)로부터 종단간 망 서비스를 위한 원거리 데이터 네트워크(WAN)로 확대되고 있다. 소프트웨어 정의 원거리 네트워크(SD-WAN)는 특히 지역적으로 분산된 데이터센터와 데이터센터, 캠퍼스와 캠퍼스, 기업과 기업 간 원격 네트워킹의 최적화와 가상화, 자동화 등 기존의 WAN 환경으로 만족시키기 어려운 새로운 요구 사항을 충족할 수 있을 것으로 기대되므로, 계속해서 그 필요성이 증가하고 있는 추세이다.

전통적인 WAN 환경은 일반적으로 프레임릴레이, ATM, SONET/SDH, MPLS 등과 같은 전송 계층의 기술로 구성되며 대부분 장비제조사(벤더)의 운영/관리 소프트웨어 및 전용 도구

에 종속되어 있기 때문에, WAN의 최적화, 자동화 등을 위한 자체적 혹은 써드파티(third-party) 소프트웨어 개발이나 사용자 중심의 새로운 서비스 개발이 매우 제한적일 수 밖에 없었다.

이외에도 다양한 캐리어나 서비스 제공자가 SD-WAN에 관심을 갖는 주요 이유는 시장이 요구하는 서비스의 신속한 적용과 제공을 통한 비용 절감과 수익의 확대가 가능할 것으로 보기 때문이다. 즉, SD-WAN의 최적화, 가상화, 자동화 등을 통해서 네트워크 자원(망 대역폭 등) 및 인프라 고도화 주기가 길어지고 시장 적시성(time-to-market) 있는 서비스의 개발과 적용이 가능하며, 망 관리·운영이 자동화되어 운영 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그리고 새로운 사용자 인터페이스(GUI)와 소프트웨어 개발을 통한 망 이용자의 사용 편의성, 성능, 보안 등을 개선할 수 있으므로, 서비스 가입자의 확대에 의한 수익의 증가를 예상할 수 있다.

따라서 최근 AT&T, Colt, 구글, Internet2 등과 같은 선도적인(영리 및 비영리) 통신망 사업자(캐리어)와 네트워크/클라우드 등의 서비스 제공자는 SD-WAN의 개발과 구축을 위한 계획을 수립하는 한편, 실질적인 서비스 구현과 제공을 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 실제로 AT&T의 경우 Domain 2.0 계획을 수 년 전부터 수립하여 SD-WAN에 대한 체계적인 연구 개발과 구축을 진행하고 있다[1]. 또한 본문에서 보다 자세하게 소개한 구글의 사례를 보면(2.1절), 지리적·국가적으로 분산된 수 많은 데이터센터 간 최적화된 고성능의 데이터 전송을 위하여 SD-WAN 기술을 개발 및 적용하였다. 구글은 자사의 데이터센터 간 연동을 위해서 사설 WAN을 전 세계적으로 구축 및 운영하고 있으며, 해당 인프라의 소프트웨어 버전인 B4 네트워크[2]는 현존하는 SD-WAN 인프라 중에서 SDN기반 네트워크 최적화 기술을 실질적으로 적용한 최초이자 가장 대표적인 활용사례(Use Case)로 꼽히고 있다.

AT&T 및 구글과 더불어 Colt, Internet2 등(우리나라에는 KT, SKT, LG U+ 등과 국가연구망의 사례가 있다)이 지속적으로 SD-WAN 인프라와 기술의 개발을 진행 중이고, 가장 선도적인 국가연구망 중 하나인 미국의 Internet2는 2014년도 말에 국가연구망 커뮤니티에서 최초로 SD-WAN을 활용한 네트

워크 가상화 구조를 발표하고 관련 서비스를 시작하였다[3].

본고에서는 이와 같은 SD-WAN의 연구 동향과 기술 및 서비스를 설명하고자, 주요 SD-WAN 적용 사례 및 관련 요소 기술과 함께 개별적인 SD-WAN 도메인을 상호 연동하여 사용자를 위한 종단간 서비스를 가능케하는 소프트웨어 정의 교환노드(SDX)에 대해 기술한다.

## II. 본론

이번 장에서는 SD-WAN의 기본적인 구조와 동향을 몇 가지 사례와 함께 소개하고, 네트워크 최적화와 네트워크 가상화 및 사용자/응용기반 망 가시화, 자동화 등에 대한 내용을 각각 기술한다. 이어서 SD-WAN의 안정적 서비스를 위한 주요 기술인 분산 SDN 제어 및 다중 계층 네트워크 제어 기술과 망 자동화의 일환인 서비스 오케스트레이션을 논하며, 마지막으로 SDX 기술을 다룬다.

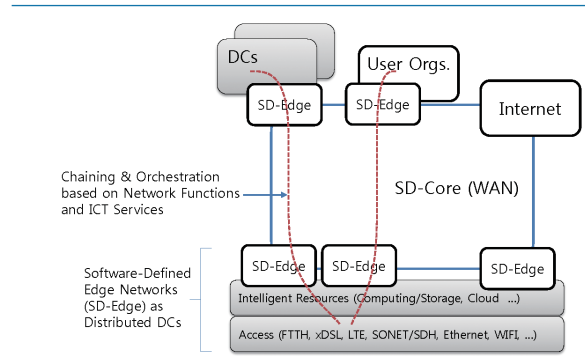
### 1. Software-Defined WAN의 기본 구조

SD-WAN은 기존 WAN환경 및 인프라와 비교하여 두 가지 구조로 소개할 수 있다. 바로 소프트웨어화 된 코어망과 에지망이다[4]. 물론 최종적으로 코어망과 에지망을 모두 하나의 소프트웨어화된 스위칭 패브릭으로 보는 견해도 있지만, 본고에서는 SD-WAN의 기본 구조를 설명하기 위하여 주요 요소인 소프트웨어 정의 코어망과 에지망으로 나누어 소개하도록 한다.

먼저 소프트웨어 정의 에지망(SD-Edge)은 SD-WAN 서비스를 제공받는 데이터센터, 캠퍼스, 기업 등의 고객 혹은 사용자 네트워크와 직접 연계되는 SDN기반 네트워크이다. SD-Edge의 경우 네트워킹 인프라와 더불어 전통적인 인터넷에서 단말(end-host)이 가지고 있던 데이터 저장 및 처리 등의 지능화 기능을 수용할 수도 있으며<그림 1>, 다양한 지역별/특성별 사용자 네트워크와 연동되므로 한 SD-WAN 도메인 내에 물리적으로 수십 개 이상 존재할 수 있다.

따라서 이와 같이 분산된 SD-Edge들을 상호 연동할 수 있는 망 구조가 필요하게 되는데, 이를 소프트웨어 정의 코어망(SD-Core)이라 할 수 있다. SD-Core는 운영 효율성을 높이기 위해 서브 코어들로 나누어질 수도 있으나 일반적으로 캐리어 네트워크나 서비스 제공자 별로 개별적인 물리적 망 구조를 가지며, SD-Edge들에게 특정한 망 자원(대역폭 등)을 할당하여 이들을 독립적으로 연결(isolation)할 수 있도록 가상화된 코어 네트워크를 제공할 수 있어야 한다.

예를 들어 <그림 1>을 보면, SD-Core의 경우 오픈플로우와



같은 표준 SDN 프로토콜을 기반으로, 데이터센터, 캠퍼스, 기업 등이 연결된 SD-Edge와 더불어, 소프트웨어화된 자체적인 (지역)망센터(PoPs) 등을 에지망 간(edge-to-edge) 물리적·가상적으로 연동하는 구조를 가지고 있다. SD-Edge는 주로 사용자 네트워크와 연동하는 액세스 망 계층(Ethernet, LTE 등)과 클라우드 기반의 지능화된 리소스 계층을 바탕으로, 점차적으로 분산형 데이터센터화 되고 있다. 따라서 SD-Core, SD-Edge 및 네트워크 기능 가상화(NFV, Network Functions Virtualization)를 통하여 이른바 서비스 체이닝과 오케스트레이션을 통한 에지망 간 서비스 조합이 가능하며, 결과적으로 망 자동화를 제공할 수 있다.

그렇다면 이러한 소프트웨어 기반 구조를 채택한 SD-WAN의 주요 이점은 무엇일까? 주로 사용자 측면과 캐리어/서비스 제공의 측면에서 몇 가지로 설명할 수 있다. 먼저 사용자 측면에서 살펴보면, 주로 성능과 보안성, 그리고 사용자 중심의 네트워크 이용 편의성의 향상을 들 수 있고, 이와 같은 주요 혜택은 SD-WAN 요소 기술인 네트워크 최적화와 가상화, 사용자 기반 네트워크 가시화 등을 통해 얻을 수 있다. 예를 들어 네트워크 최적화는 효율적인 트래픽 분산을 통해서 사용자의 체감 망 사용 성능을 향상시킬 수 있고, 가상화와 가시화는 이용자 및 응용/서비스 별로 분리된 가상망의 동적 구축과 사용자중심 모니터링/관리 환경의 제공을 바탕으로, 성능뿐만 아니라 보안성 및 새로운 네트워크 활용 경험을 부여한다.

한편 캐리어/서비스 제공자의 입장에서 보면 가장 핵심적인 혜택은 네트워크 구축과 운영 비용의 절감이다. 이는 네트워크를 최적화하고 자동화함으로써 각각 망 자원 이용의 효율성을 증가시키고 네트워크 운용을 효과적으로 수행할 수 있으므로 가능해진다.

물론 캐리어/서비스 제공자가 사용자에게 SD-WAN 서비스를 제공하고, 비용 절감 효과를 얻기 위해서는 SDN 인프라의 구축과 더불어 주요 요소 기술을 우선적으로 개발 및 적용해야

한다. 이를 위한 주요 요소 기술 SDN 제어 부문 안정성 기술, SDN과 IP/Internet 연계 기술, 다중 계층 제어 기술 등이 있으며, 이외에도 보안, 응용/서비스의 검증, 기존 레거시망 통합 기술 등이 포함된다. 주요 캐리어 네트워크인 AT&T는 언급된 주요 기술을 바탕으로 2020년까지 75% 이상의 SD-WAN 구조를 채택하여 궁극적으로 사용자 정의 네트워크 클라우드를 제공하고, 이를 통한 신규 서비스 제공과 수익의 증대를 기대하고 있다[1]. 그리고 유럽의 주요 네트워크 서비스 공급자인 Colt[5]는 주로 오픈플로우를 활용하여 중단간 대역폭을 주문형(on-demand)으로 할당하고자 하며, SD-WAN을 통한 다중 계층 네트워크 제어와 레거시 망의 통합/관리 등을 주요한 목표로 추진 중이다. 본고에서는 아래의 2.2절부터 관련된 상세 내용을 기술하도록 한다.

## 2. SD-WAN 최적화 기술 및 주요 사례

최근 들어 원거리 데이터 통신망인 WAN의 최적화 요구가 더욱 커지고 있는데, 특히 클라우드 컴퓨팅 서비스가 주요 요인으로 간주된다. 사용자에게 클라우드 서비스를 적시에 제공하기 위하여 수십~수백 Gbps의 네트워크 대역폭이 필요하고, 글로벌하게 분산된 데이터센터 간에 데이터를 빠르고 안정적으로 복제하고 동기화해야 하는 요구사항이 발생했기 때문이다. 이를 감당하기 위해서는 네트워크 대역폭이 지속적으로 증가해야 하나, 이는 네트워크 하드웨어와 광 설비의 구축, 대역폭의 오버프로비저닝, 운영 인력 확충 등의 추가적 비용 부담을 발생시키므로 이를 해결하기 위한 방안으로 SD-WAN기반 네트워크 최적화가 제안되었다.

SD-WAN을 통한 네트워크 최적화 기술의 목적은 주로 중앙 집중화된 자동적 트래픽 엔지니어링을 통해 WAN 네트워크 상의 트래픽 부하를 분산함으로써 결과적으로 망 대역폭의 활용도를 높여 초기투자비용(CapEX) 및 운영비용(OpEX)을 절감하고, 사용자에게는 성능 향상 등의 이익을 가져다 주는 것이다. 요컨대, SD-WAN의 주요 목적을 크게 세 가지로 정리하면 다음과 같다.

- WAN 연결을 통한 원격 데이터 전달 성능 향상(제로 패킷 손실, 낮은 응답 시간 등) 및 망 트래픽 관리/운용 자동화
- 네트워크 대역폭을 위한 투자수익(ROI) 극대화(망 대역폭 확장 주기의 연장)
- 단말 사용자(end-user)의 체감 서비스 차별화(대역폭 사용료 절감, 성능 향상 등)

WAN최적화 기술을 개발 및 적용하기 위한 주요 요소 기능으로는 논리적으로 중앙집중화된 WAN 경로 제어와 결함 감내(fault-tolerance) 기능, 링크 트래픽 부하 분산 및 조절

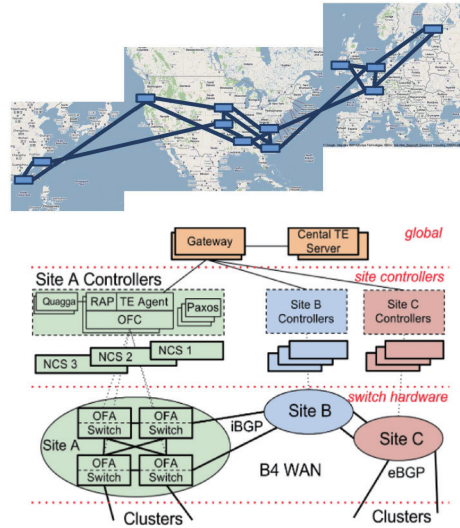


그림 2. SD-WAN 최적화 사례 : 구글 B4 네트워크 및 분산 제어 구조[2]

(balancing) 기능, 운영관리의 자동화 기능, 망 유연성 제공 기능 등이 있고, 이러한 여러 요소 기능이 잘 조합되어 실질적으로 운영되는 사례 중 하나로 구글의 B4 네트워크[2]를 들 수 있다. 구글은 사실상 SD-WAN을 활용하여 네트워크 최적화를 구현하고 서비스에 적용한 최초의 사례로 볼 수 있으며, 이 서비스 모델은 본고에서 추후 설명할 SDN-IP/Internet의 연계와 더불어 안정적인 SD-WAN 운영을 위한 분산 제어 환경의 개발에도 많은 영향을 끼쳤다.

구글의 B4 네트워크는 SDN표준기술인 오픈플로우 기반의 WAN 소프트웨어화를 통해 자사의 수 많은 데이터센터를 연결하는 사설 WAN의 모든 링크 활용도를 약 100%로 끌어올리기 위해 개발 및 구축되었다. B4 네트워크는 <그림 2>와 같이 2011년도 기준으로 최소 12개 이상의 글로벌한 데이터센터를 SD-WAN으로 연결하고 있으며, 크게 세 가지 계층으로 구성되어 SD-WAN의 최적화를 달성하였다<그림 3>.

B4 네트워크의 첫 번째 계층은 스위치 하드웨어 계층이다. B4의 스위치는 모두 머천트 실리콘을 기반으로 한 화이트박스 스위치로, 오픈플로우 에이전트를 기본적으로 장착하고 있으며, 전체 B4 네트워크는 오픈플로우 화이트박스 스위치가 설치된 복수 개의 서브 사이트 네트워크로 구성된다.

두 번째 계층은 각 서브 사이트 네트워크 별로 구축된 제어 계층으로, 안정적인 SD-WAN서비스를 위하여 기본적으로 다중의 네트워크 제어 시스템(NCS, Network Control System)을 운용하는 분산 제어 환경을 가지고 있다. 그리고 각각의 NCS는 <그림 2>와 같이 BGP (Border Gateway Protocol) 라우팅 서비스시스템(Quagga), 오픈플로우 서브시스템, 분산 환경 제어 서브시스템(Paxos) 등으로 구성되어 있다. 이 중에서 BGP 라우



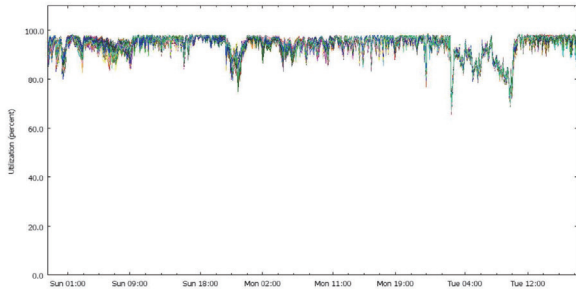


그림 3. 구글 B4 네트워크의 트래픽 분산 최적화 및 활용도[6]

팅 서브시스템은 B4네트워크의 서브 사이트 네트워크(Site A, B, C) 및 데이터센터 네트워크(LAN)와 각각 iBGP와 eBGP 연동을 수행한다. 즉, B4 네트워크는 근본적으로 IP 라우팅 프로토콜과 SD-WAN의 스위칭 패브릭을 연동하여 데이터센터 네트워크 사이의 트래픽을 전달(Transit) 하도록 설계되었다. 분산 환경 제어 서브시스템은 Paxos 프로토콜을 통해 복수 개의 NCS 중에서 리더 NCS를 선출하고 분산 데이터 스토어를 바탕으로 후보 NCS 들과 상태 동기화를 수행함으로써 SD-WAN 제어 환경에 장애 극복 기능(failover)을 부여해 준다.

마지막으로 세 번째 계층은 중앙집중화된 트래픽 엔지니어링 시스템으로 B4 네트워크의 전체 트래픽 유통 상태 정보를 SDN 게이트웨이를 통하여 획득하고, 플로우 관리자, 경로 할당 알고리즘, 토폴로지 관리자, 경로 선택기 등의 세부 기능을 통하여 모든 링크의 트래픽 부하를 분산 운용하는 역할을 담당한다.

캐리어급의 개방형 제어플랫폼인 ONOS (Open Network Operating System)[7]는 구글 B4 네트워크의 두 가지 주요 특징인 BGP 라우팅을 통한 SDN-IP 연계 기술과 분산 제어플랫폼 기술을 개발하고 있다. 후자인 분산 제어플랫폼 기술은 본고의 2.4절에서 다룬다. ONOS의 SDN-IP 연계 기술[8]은 구글 B4와 유사하게 BGP 라우팅을 위한 서브시스템(Quagga)을 가지며, 내부의 ONOS/SDN-IP 응용과 iBGP로, 외부의 IP/Internet 네트워크 도메인(데이터센터 포함)과 eBGP로 연동한다.

〈그림 4〉에 따르면, ONOS SDN-IP와 구글 B4의 상이한 점은 외부 네트워크가 데이터센터 네트워크(사설 WAN)로 한정되어 있지 않고 공용 WAN을 대상으로 한다는 점과 더불어, ONOS의 NBI (Northbound Interface)를 통해 단순한 IP/Internet 도메인의 경유(transit) 스위칭 패브릭으로써의 SD-WAN 기능을 극복할 수 있다는 점이다. 즉, ONOS의 API를 이용하면 SD-WAN에 연결된 사용자나 기관이 인터넷 이용자와 통신할 수 있는 응용을 개발할 수 있고, 물론 성능과 보안의 이슈를 해결해야만 하겠지만 SD-WAN이 생성한 가상망에 인터넷 이용자가 참여(opt-in)할 수 있는 등의 활용사례가 가능할 것으로 사료

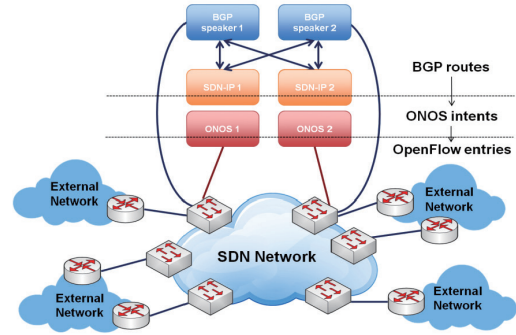


그림 4. ONOS의 SDN-IP 상호연계 구조[8]

된다. 따라서 SD-WAN의 최적화에 더하여, 향후 새로운 SD-WAN과 현존하는 IP네트워크의 상호 운용 및 연계를 실질적인 서비스를 위한 하나의 연구개발 주제로 살펴 볼 수 있다.

### 3. SD-WAN 가상화 및 응용중심 가시화

SD-WAN을 위한 네트워크 가상화 기술은 (주로 에지망 간) 컴퓨팅과 네트워킹 인프라의 주요 기능으로 제안되었고, 흔히 인프라 가상화 서비스(IaaS, Infrastructure as a Service)의 일환으로 고려되기도 한다. 네트워크 슬라이싱으로도 언급되는 네트워크 가상화 기술의 가장 핵심적인 부분은 (엄격히) 분리된 가상 네트워크의 생성과 마이그레이션, 스냅샷 등을 수행하는 것과 더불어 짧은 시간 내에 네트워크 토폴로지를 구성하고 여기에 주문형으로 컴퓨팅 리소스를 통합할 수 있는 기능과 서비스를 제공하는 것이다.

SD-WAN의 주요 가상화 기능도 일반적으로 다르지 않으나, 소프트웨어화된 에지망(SD-Edge)을 코어망(SD-Core)를 통하여 동적으로 가상화하고 상호 연동 및 분리할 수 있어야 하는 것이 가장 큰 특징이라 할 수 있다. 그리고, 이러한 가상화 기능에는 주로 토폴로지 가상화와 제어 가상화가 포함된다. 주소(address) 가상화 역시 주요 기능으로 제안되고 있지만 이 기술은 앞서 언급된 두 가지 부분의 가상화와 함께 통합될 수 있는 것으로 사료된다.

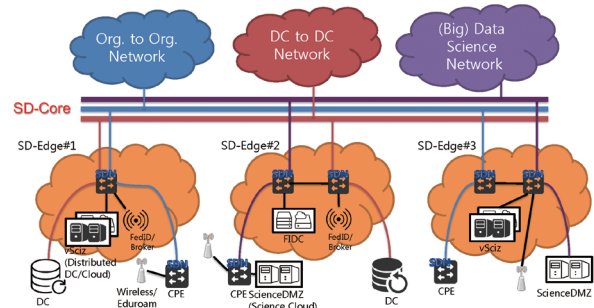


그림 5. SD-Core를 통한 Edge-to-Edge 가상화

〈그림 5〉를 보면 다중의 지능화된 분산형 SD-Edge들이 사용자와 응용, 서비스 별로 SD-Core를 통해 가상화된 네트워크 환경에서 연동될 수 있음을 보여준다. 예를 들어 SD-Edge#1은 SD-Edge#3과 이용자 기관 간 가상 SD-WAN을 구성할 수 있고, SD-Edge#2는 각각 SD-Edge#1, SD-Edge#3과 데이터센터간 가상망 및 데이터집약형 사이언스 응용 전용의 가상망을 (소프트웨어 정의형 코어를 거쳐) 구축할 수 있다.

오픈플로우를 이용한 SDN 가상화 기술로는 플로우바이저[9]와 이를 계승/발전시킨OVX (Open VirteX) [10] 등이 있다. 하지만 SD-WAN에서 이들을 운용하기 위해서는 단일 장애점 (single point of failure) 등과 같은 문제의 해결이 선행되어야 하므로, 현실적으로 안정적인 SD-WAN 가상화 서비스를 제공하기 위해서는 앞서 언급된 분산된 제어 시스템을 기반으로 한 전용 애플리케이션의 개발과 적용이 필요할 것으로 사료된다.

한편 국가연구망 커뮤니티에 있어서 SD-WAN 가상화 부문의 선두 주자인 Internet2의 경우는 다소 다른 접근 방법을 취하고 있다. 즉, 플로우바이저와 OVX 를 모두 이용하되, 레거시 운용/관리 시스템과 통합할 수 있고 심지어 복수 개의 컨트롤러를 동시에 수용할 수 있는 구조를 연구 개발하여 SD-WAN 중심 가상 네트워크를 위한 프로덕션 서비스를 연구망 계에서 최초로 시작하였다. Internet2가 개발한 구조의 핵심은 자체적으로 개발한 오픈플로우 기반의 플로우 스페이스 파이어월 (FlowSpace Firewall)[9]로써, 레거시 도구를 포함한 다양한 제어시스템의 플로우 설치 및 제거와 같은 요구를 정책에 따라 수용하거나 거부할 수 있는 기능을 가진다. 따라서 플로우 스페이스 파이어월은 Internet2의 자체적인 SD-WAN 검증 도구의 역할을 가지고, 플로우기반 가상망의 타당성 검사 및 검증을 수행한다. 이는 정책 중심의 운용이 가능하다는 장점을 지니지만, 전체적으로 구조가 복잡하여 관리 운용상의 비용이 증가할 수 있다는 단점도 가지고 있다.

SD-WAN을 통하여 가상화된 네트워크는 특히 사용자와 응용의 관점에서 운영 및 관리되어야 하므로, 네트워크 가시화 (visibility) 기능과 통합되어야 할 필요성이 존재한다. SD-WAN의 네트워크 가시화는 통신망 사업자 및 서비스 제공자의 측면과 사용자/응용 측면에서 차별화된 기능을 제공할 수 있다.

〈그림 6〉을 보면, 첫 번째 네트워크 가시화 방법의 경우, 전체 물리적 네트워크 토폴로지를 대상으로 하며 일반적으로 통신망 사업자와 서비스 제공자가 요구하는 기능으로써 운영/관리의 자동화를 통한 비용 절감 방안이 될 수 있다. 그리고 이에 더하여 2.4절에서 설명할 SD-WAN 다중 계층(IP, 이더넷, 광네트워킹 계층 등)에 대한 가시화와 통합된 망 운영 관리 및 자동화 역시 캐리어 관점에서 운영 비용 절감을 위해 추구하는 주

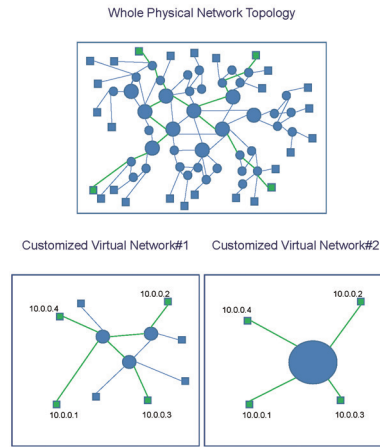


그림 6. 통신망 및 서비스 제공자와 응용/사용자 관점의 SD-WAN 가상화 및 가시화 기법

요 목표 중 하나이다.

사용자나 응용의 관점에서는 어떠한 네트워크 가시화 기법을 택할 수 있을지 살펴보자. 〈그림 6〉의 두 번째와 세 번째에 위치한 오버레이 네트워크 토폴로지를 보면 첫 번째 보다 간소화된 형태로 네트워크를 가시화한다. 두 번째 토폴로지는 특정한 가상 네트워크의 단말 호스트와 함께, 이들과 직접 연결된 CPE (Customer Premise Equipment) 및 해당 CPE를 공유하는 다른 단말 호스트들을 가시화해 준다. 이러한 방법의 이점은 단말 호스트 간 가상망 연결 토폴로지의 가시화를 단순화시킴으로써 사용자가 원하는 중단간 네트워킹 서비스 환경에 보다 용이하게 집중할 수 있으며, 쉽고 빠르게 특정 부분의 장애 탐지나 모니터링을 할 수 있다는 점이다. 세 번째 토폴로지 가시화의 경우 두 번째 보다 더 간략화된 형태를 보이는데, 단말 호스트와 호스트 간의 모든 네트워크 노드가 하나의 추상화된 가상망으로 보이므로, 단말-네트워크-단말의 형태로 호스트에 집중하여 더 단순하고 쉽게 가상망 모니터링이 가능하다.

사용자/응용 관점의 네트워크 가시화에서 추가적으로 요구되는 사항은 (가상화된) 네트워크 노드와 링크로 이루어진 망 토폴로지 가시화와 더불어 해당 토폴로지에 연계된 모니터링 속성들을 보여주어야 하는 것이다. 기본적인 모니터링 속성에는 특정 링크나 중단간 경로의 트래픽 사용량, 실시간 가용 대역폭, 지연시간, 노드의 상태 정보(up/down) 등이 있으며, 이들 정보는 가시화된 가상 혹은 물리 네트워크의 토폴로지 형태에 따라 맞춤형으로 제공될 수 있다. 예를 들어, 〈그림 6〉의 첫 번째 망 토폴로지에 노드와 링크별 상태 및 성능에 관련된 모니터링 속성의 조합이 적합하다면, 두 번째와 세 번째 오버레이 네트워크 토폴로지의 경우 단말 호스트 간의 중단간 지연 시간과 단말 호스트 간 가용 대역폭 등 보다 사용자/응용에 친밀한 형태의 운영·모니터링 속성이 통합될 수 있다.

그리고 <그림 6>과 같은 GUI 형태의 가시화뿐만 아니라 OpenAPI 등의 SD-WAN 프로그래머빌리티를 통해 토폴로지 및 다양한 모니터링 속성 정보의 제공이 가능하다면, 애플리케이션이 직접 해당 정보를 획득하여 활용할 수 있다. 즉, 다양한 응용별로 요구되는 세분화된 모니터링 속성을 요청 및 수집하여 애플리케이션 중심의 SD-WAN 가시화와 운영 관리를 수행할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 SD-WAN은 사용자와 응용 별로 특화된 가상망의 모니터링과 운영/관리를 위한 새로운 환경을 제공할 수 있으며, 캐리어의 경우도 자사의 특성에 맞는 네트워크 운영/관리 및 자동화를 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

다만, 레저시 네트워크 노드/링크의 가시화 부문과 이러한 기존 망에 연결된 단말 호스트의 가시화 부문에 대해서는 해결책이 요구된다. 현재 ODL (OpenDayLight) [10]과 ONOS[8]와 같은 개방형SDN 제어플랫폼의 경우, SDN/SD-WAN과 레저시 네트워크의 토폴로지 탐색을 위하여 LLDP (Link Layer Discovery Protocol)과 BDDP (Broadcast Domain Discovery Protocol)에 의존하고 있다. 그러므로 레저시 네트워크가 SDN 네트워크와 동일한 브로드캐스트 도메인에 위치하는 경우라 할지라도, BDDP의 프로브 메시지가 레저시 망 노드와 링크를 통과(bypass)하여 오직 SDN 토폴로지만 탐지할 수 있다는 한계가 존재한다. 따라서 SD-WAN의 SD-Edge에 연결되어 있으나 SDN이 활성화되어 있지 않은 사용자 사이트(캠퍼스, 오피스 등) 네트워크를 가시화해야 한다면, 이른바 non-SDN (혹은 non-OpenFlow) 네트워크의 탐색과 추상화 등을 위한 추가적인 가시화 기법이 연구되거나, 기존에 운영되고 있는 OSS/BSS (Operation Support System/Business Support System) 등과 연계할 수 있는 개방적 기술과 방안이 마련될 필요성이 있다.

#### 4. SD-WAN의 제어부문 안정성을 위한 논리적 중앙 집중/다중분산 제어

이번 절에서는 SD-WAN의 가장 근본적이며 핵심적인 제어부문 안정성(control resiliency)에 대하여 기술한다. 제어부문 안정성이 SD-WAN의 가장 핵심적인 기능인 이유는 사람에게 가장 중요한 부분이 두뇌라는 것으로 설명될 수 있다. 만약 SD-WAN의 제어플랫폼이 시스템 장애나 보안 등의 이슈로 제대로 기능을 하지 못한다면, 앞서 언급한 SD-WAN의 최적화나 가상화 등 관련 서비스를 신뢰성 있게 수행하거나 제공할 수 없다. 따라서 SDN 제어플랫폼의 안정화는 SD-WAN 혹은 캐리어 SDN의 프로덕션 서비스를 위해서 연구 및 적용이 가장 선행되어야 하는 기술로 고려되어야 할 것이다.

SD-WAN의 제어부문 안정화 관련 기술은 크게 논리적 중앙 집중형 제어와 다중 분산 제어로 나눌 수 있으며, 주로 SDN 제

어플랫폼의 장애 극복(failover)와 장애 복구(failback)를 통한 고가용성과 컨트롤러의 스케일아웃(scale-out) 및 확장성 등을 보장하기 위해 제안되었다[11][12]. 먼저 논리적 중앙집중형 제어는 복수 개의 SDN 제어 인스턴스가 하나의 클러스터를 이루고, 이 중에서 리더 인스턴스를 동적 혹은 정적인 방법으로 선출하는 방식으로 이루어진다. 선출된 리더가 클러스터를 대표하여 SD-WAN의 모든 제어를 담당하는 중에 만약 리더 제어 인스턴스에 장애(OS, 응용, 디바이스(서버), 네트워크 링크 장애 등)가 발생하면, 후보 인스턴스 중에서 두 번째 리더가 선출되어 SD-WAN에 대한 제어가 회복된다. 관련된 실제 사례로써 구글 B4 네트워크의 경우<그림 2>, Paxos 프로토콜을 활용하여 각각의 사이트 네트워크에서 운영되는 여러 개의 NCS 간에 리더를 선출하는 구조를 기반으로 제어부문 안정성을 향상시키고 있다[2].

논리적 중앙집중형 제어 방식이 모든 제어 인스턴스를 단일한 네트워크와 클러스터 도메인에 두고 이들 중에 선택된 리더를 통해 제어부문의 안정성을 꾀하고 있다면, 분산 제어 방식은 SD-WAN을 여러 개의 서브 도메인 네트워크 나누고, 개별적인 제어 인스턴스 클러스터를 각각의 서브 도메인 네트워크에 할당함으로써, 클러스터들로부터 선출된 복수 개의 리더가 상호 통신 및 동기화하여 운영되는 형태이다. 분산 제어 방식의 장점은 논리적 중앙집중형 제어 방식보다 향상된 제어부문의 안정성이다. 예를 들어 한 도메인을 담당하는 클러스터 내의 모든 제어 인스턴스가 장애로 인해 중단 되더라도, 다른 클러스터의 리더 인스턴스가 해당 도메인의 제어권을 넘겨받아 정상적인 운영을 시도할 수 있다.

두 가지 제어 방식은 현재 대표적인 개방형 SDN 제어 플랫폼인 ODL과 ONOS에서 채택하고 있으며, 특히 ONOS의 경우 분산 코어기반 설계를 기본적으로 채용하고 있다. 표 1은 2015년 4월 말의 개발 버전을 토대로, 두 가지 제어 플랫폼에서 활용되는 클러스터링 및 분산 제어 방식과 제어 시스템을 위해 활용되는 분산 컴퓨팅/분산 스토어 기술인 Hazelcast, Akka, Gossip 등을 소개한다.

언급된 두 가지 제어 방식을 바탕으로 제어부문의 안정성을 달성하기 위한 주요 연구 분야는 고성능의 분산 제어 및 보안 부문을 포함한다. 분산 제어를 위한 최적화된 분산 스토어의 설계, 클러스터 내의 신속한 리더 인스턴스 선출, 장애 발생시 낮은 지연시간을 갖는 제어권 이양, 분산된 리더 인스턴스간 고성능의 제어 정보 동기화 등이 주요 연구 분야로 간주될 수 있으며, 분산 환경을 이용하여 보안 공격과 해킹을 목적으로 하는 악의적인 제3자 제어 인스턴스의 침입을 방지하는 등의 보안 이슈 역시 간과할 수 없는 분야로 사료된다.



표 1. ONOS와 ODL의 분산 제어 방식 비교

	ONOS	ODL
개발 버전	Blackbird 1.1.0	Helium SR3
클러스터링	다중분산형 & 중앙집중형	다중분산형 & 중앙집중형
설정방법	동적/정적	동적/정적
리더 선출 방법*	Hazelcast-based (strongly consistent)	Akka-based (eventually consistent)
분산 로그/스토어*	Hazelcast + gossip (eventually consistent)	Akka + gossip (eventually consistent)

\* 향후 RAFT 알고리즘[13]을 채택할 계획(ONOS는 2015. 6월에 신 버전을 발표하며 채택하였음)

### 5. SD-WAN 다중 계층 제어와 자동화 및 SD-Edge 기반 서비스 오케스트레이션

기존 WAN 환경은 네트워크 자동화 구현과 활용에 있어 여러 가지 제약사항을 지니고 있으며, 운영/관리자와 사용자의 서비스 요구에 신속하게 대응할 수 있는 새로운 소프트웨어의 개발과 적용이 어렵다는 근본적인 한계를 가진다. 요컨대, 운영/관리자의 경우 보다 깊은 수준의 네트워크 가시화와 제어를 통한 자동화를 희망하고 이용자는 망 성능과 보안을 향상시킬 수 있는 새로운 서비스를 요구하지만, 수 많은 개별 제조사의 장비와 다양한 네트워크 계층으로 이루어져 있는 기존 WAN인프라를 통합 제어·관리하고 자동화하는 것은 사실상 거의 불가능 하였다.

이번 절에서는 SD-WAN을 이용한 네트워크 자동화의 일환으로 네트워크 다중 계층의 통합적인 제어 기술을 소개한다. 이 기술을 위해서 현재 여러 네트워크 벤더가 연구 개발을 추진 중이며, 개방형 제어플랫폼인 ONOS 역시 적극적으로 기술 개발을 진행하고 있다. 관련된 다양한 연구 주제가 있겠지만, 본고에서는 실제 활용사례를 바탕으로 한 패킷 스위칭과 광 네트워크 계층의 통합 제어와 자동화에 따른 다중 계층의 네트워크 최적화에 대해서 알아본다.

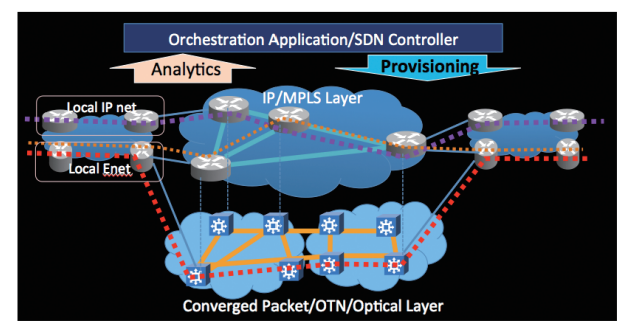


그림 7. 패킷 망과 광 네트워크의 통합 제어

먼저 패킷 스위칭과 광 네트워크의 통합 제어 기술은 <그림 7>과 같이 단일한 SDN 제어플랫폼을 이용하여 IP 및 옵티컬 망의 리소스 관리를 자동화하고, 이를 사용자의 요구에 맞게 제공할 목적으로 활용될 수 있다. 유럽의 주요 캐리어인 Colt, 일본의 NTT 등과 더불어 시스코, 시에나, 인피네라, 화웨이 등의 주요 벤더가 이 기술에 많은 관심을 가지고 있으며, 이 중에서도 인피네라의 경우 미국의 주요 연구망인 ESNNet (Energy Science Network) 등과 협력하여 OTS (Open Transport Switch)[14]를 개발하였다. OTS는 광 네트워크 계층을 추상화하는 일종의 가상 스위치 모듈로써 이를 오픈플로우를 통해 제어할 수 있도록 지원하고 있다.

한편 ONOS는 시에나, 화웨이 등의 주요 벤더와 연구협력을 수행하여 새로운 SBI (Southbound Interface)를 개발하고 있다. 이들은 기존의 오픈플로우와 NETCONF 같은 SBI 관련 프로토콜 외에도 TL1 (Transaction Language 1), PCEP (Path Computation Element Communication Protocol) 등을 포함한다. 현재 TL1은 다양한 벤더의 광/전송 계층 장비를 위한 실질적인 표준 관리 프로토콜이며, PCEP의 경우 화웨이가 제안한 프로토콜로써 IETF, ONF, ITU-T 등을 통해 표준화가 진행 중이다. ONOS의 SBI를 이용하여 패킷망과 광 네트워크와 같은 멀티 계층을 통합 제어할 수 있다면, 광/전송 계층의 SDN을 바탕으로 운영/관리자에게 자동화된 네트워크 관리 환경을, 사용자에게 전송 계층의 추가적 제어를 통한 보다 세밀하고 자동화된 네트워크 QoS 보장 환경을 제공할 수 있다. <그림 8>은 ONOS의 분산 제어플랫폼을 통한 다중 네트워크 계층의 가시화/관리 시스템을 보여주며, 시험 환경을 위해서 패킷 스위치로 OVS (Open Virtual Switch), 광/전송 네트워크 장비 (ROADM, Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer)로 Infoblo의 LINC-OE 에뮬레이션 스위치가 사용되었고, IP망과 광 네트워크의 토폴로지는 Mininet 기반으로 통합되었다[15].

앞서 언급된 망 자동화 기술 외에도 서비스 중심의 SD-WAN네트워크 자동화를 위한 주요 구성 요소로는 에지망(SD-

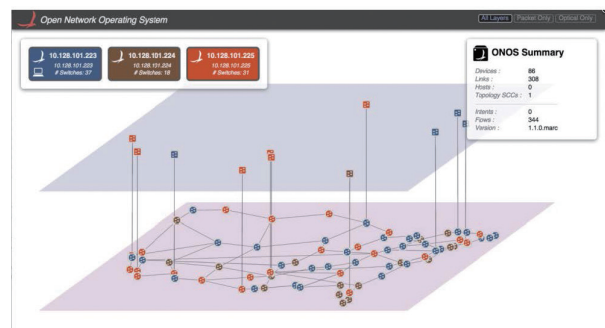


그림 8. ONOS의 IP-Optical망기반 SDN 제어

Edge)의 자동화 및 분산된 SD-Edge 간 서비스 오케스트레이션이 있다. SD-Edge의 서비스 시나리오는 <그림 1>에서 기술하였듯이 다양한 네트워크 노드, 장치와 같이 네트워크의 에지 및 액세스에 위치한 기반 요소들과 사용자 주변 장치를 포함하여 매우 동적인 가상 네트워크를 생성하는 SD-WAN의 기본 원리를 활용하는데 주안점을 둔다. SD-Edge와 연결되는 요소로는 이용자 네트워크 노드 뿐만 아니라 통신 기능을 포함하고 있는 자동차, 로봇, 드론, 그리고 스마트폰 같은 다양한 사용자 장치 혹은 스마트 오브젝트가 있다. 이러한 수 많은 스마트 장치들은 애플리케이션이 주도하는 방식으로 이른바 “패브릭”의 구성 요소가 된다.

패브릭은 흔히 고 대역폭의 네트워크를 통해서 느슨하게 연결된 저장장치, 네트워킹, 컴퓨팅 기능을 포괄하는 분산 컴퓨팅 시스템을 의미하기도 하고, 서버와 서버 간 연결의 개념을 바탕으로 수평적 트래픽 플로우에 최적화된 데이터센터의 내부 망을 뜻하기도 한다. 따라서 이를 소프트웨어 기반의 SD-Edge에 적용하면 패브릭은 메트로 네트워크 등의 에지망으로 확대될 수 있고, 마치 분산데이터센터와 같은 개념도 가질 수 있다. 캐리어나 서비스 제공자의 패브릭 활용사례를 보면, 자사의 에지망에 연결된 사용자들에게 종단간 정보통신서비스를 제공하기 위해서 서로 다른 에지망에서 사용 가능한 가상 리소스 및 기능을 연결하고 관리하며 오케스트레이션할 수 있는 서비스 플랫폼이 있다.

그리고 이러한 서비스 오케스트레이션을 통해서 데이터와 정보통신서비스가 사용자를 따라 SD-WAN 인프라 전반에 걸쳐 움직이는 “팔로우 미(follow-me)” 서비스가 가능하며 주로 가상머신의 체이닝을 통해 실행되는 애플리케이션의 형태를 띄게 된다. 이와 같은 “스마트 에지망” 혹은 SD-Edge를 통한 서비스 오케스트레이션 및 자동화는 크게 네 가지 구성 요소로 구성될 수 있으며, 이들은 SD-WAN 네트워크의 운영과 제어 플랫폼 연계 서비스, 클라우드 운용 및 연계 서비스, 네트워크 가상화 서비스, 소프트웨어기반 네트워크 기능 (가상화) 제공 서비스 등을 포함할 것으로 사료된다.

## 6. Software-Defined Exchange (SDX)

본문에서 기술하였듯이 현재 SD-WAN을 위하여 여러 벤더와 캐리어, 서비스 제공자 등이 개별적인 소프트웨어기반 네트워크 도메인을 구축하고 서비스를 제공하고자 많은 노력을 기울이고 있다. 따라서 마치 현재의 인터넷을 구성하는 Tier-1 혹은 Tier-2 네트워크 서비스 제공자들이 BGP 프로토콜과 인터넷 교환노드(IX, Internet Exchange)를 통해 각자의 독자적 네트워크 도메인을 상호 연동하듯이, 향후에는 다양한 SD-WAN

사업자와 관련 서비스 제공자들이 종단간 사용자 서비스를 위하여 각각의 SDN 도메인을 연동해야 하는 시대가 올 것으로 예상된다.

SDX는 복수 개의 개별적 SD-WAN/SDN 도메인을 대등 접속(peering)하기 위한 소프트웨어 기반의 교환노드(Exchange)로써, 다중 도메인의 분산형 SD-WAN 리소스 탐색, 인터도메인 SDN 네트워크 프로비저닝, 운영 및 장애 탐지/복구 등의 기능과 더불어, 특정 응용 중심의 고성능 SD-WAN 도메인 연동과 트래픽(플로우) 교환 등을 제공할 수 있는 새로운 기반으로 제안되었다[16]. 이에 따르면 SDX의 가용 자원은 소프트웨어기반 네트워킹뿐만 아니라 클라우드와 그리드, 슈퍼컴퓨터, 스토리지, 센서, 다양한 거대 실험장비 등으로 확대될 수 있을 것이다.

SDX의 연구 및 활용 분야로는 서로 다른 IP 네트워크(BGP) 도메인의 최적화된 상호 연동, 원격 제어, 정책기반 인터도메인 라우팅 및 비디오 스트리밍 등의 응용별 플로우 교환을 통한 종단간 성능 보장을 들 수 있다[17]. 다시 말해서, SDX는 이미 존재하는 인터넷 서비스 제공자의 개별 도메인 네트워크를 도메인 간 대등접속 시킬 수 있는 새로운 방안이 될 수 있으며, 기존의 IX와 차별화된, 프로그래머블하고 가상화 가능한 교환노드 제어 기술을 탑재함으로써 자동화된 동적 대등접속과 정책 관리, 도메인 간 동적인 트래픽 엔지니어링, 자동화된 라우팅 경로(prefix) 우선순위 설정 등을 가능케 한다.

이와 같은 방식의 SDX 기술은 구글의 CARDIGAN 프로젝트 [18]를 기반으로 뉴질랜드 국가연구망인 REANNZ (Research and Education Advanced Network New Zealand)와 WIX (Wellington Internet Exchange) 상에서 시험되었다. 또한 2.1절에서 언급된 구글의 B4 SD-WAN과 더불어 ONOS의 SDN-IP 기술 역시 비슷한 방식으로 확장 혹은 변경함으로써, 다중의 SDX 노드를 기반으로 한 환경으로 개발 가능할 것으로 사료된다.

국가연구망 커뮤니티에서 진행되는 SDX 프로젝트는 위와 비슷한 접근 방법과 함께 새로운 SDX기반 서비스를 위하여 보다 높은 수준의 아키텍처를 설계하고 있다. 새로운 SDX는 다음과 같은 몇 가지 주요 기능 요소를 포함하며 - 다중 도메인 통합형 경로 제어, 도메인 간 콘트롤러 및 에지망(SD-Edge) 시그널링, SDN/오픈플로우 중심의 다중 네트워크 계층 트래픽 교환, 인터도메인 리소스 광고 및 탐지, 도메인 간 망 토폴로지 교환, 에지망(클라우드) 리소스 접근 및 제어, 대용량 네트워크 스트리밍용 프로그래머빌리티, 오픈플로우/레거시 네트워크 경로 통합 등 - 해당 연구 및 글로벌 협업을 위해서 글로벌연구망 교환노드의 선두 주자인 GLIF (Global Lambda Integrated Facility) [19]와 미국의 StarLight [20]을 중심으로 한국을



포함한 다양한 국가연구망이 참여하고 있다. 그리고 국제적인 테스트베드인 GENI (Global Environment for Network Innovation), HPDMNet (High Performance Digital Media Network), iGENI (International GENI)와 클라우드 테스트베드(Chameleon 등)가 해당 협업연구를 현재 진행 중이거나 앞으로 수행할 예정이다.

이와 더불어, 관련된 연구 방향 중 하나로 본고의 2.4절에서 기술한 분산 제어플랫폼 기술 개발을 들 수 있다. 단일한 SD-WAN 도메인에서 분산된 제어플랫폼이 안정적으로 운영될 수 있다면, 이 환경에 적용된 분산스토어 및 동기화 기법 등이 도메인 간 제어플랫폼의 연동에 활용될 수 있을 것이다. 물론 인터넷도메인의 정책기반 대등접속, 운영, 보안, 성능 등의 추가적인 고려 사항이 있으므로 향후 지속적으로 연구개발을 진행해야 할 것으로 사료된다.

### III. 결론

SDN은 데이터센터와 기업/캠퍼스 등의 내부 (근거리) 데이터 네트워크로부터 바야흐로 원거리 통신망 인프라 전체로 확장 구축되고 있는 추세이다. 본고에서는 캐리어 SDN으로 일컬어 지기도 하는 SD-WAN에 대하여 전반적인 구조 및 기술 동향과 함께 네트워크 최적화, 가상화, 가시화 및 자동화에 관련된 여러 기술적 이슈와 사례를 기술하였다. 그리고 본문의 각 절에서 기존의 기술과 사례를 소개한 후 연구 방향과 시사점을 요약하였다.

향후 SD-WAN은 SDX와 같은 기술을 통하여 각 도메인이 상호 연동되는 것과 더불어 네트워킹 자원뿐만 아니라 컴퓨팅과 스토리지 등 다양한 클라우드 기반 인프라와 연계되어 보다 새로운 형태의 종단간 사용자 중심 서비스를 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 최근 우리나라에서도 국가연구망[21], 통신사업자들을 토대로 해당 인프라와 기술에 대한 구축 및 연구개발이 추진 중이므로 조만간 SD-WAN의 프로덕션 서비스가 시작될 수 있으리라 기대된다.

### 참고 문헌

[1] AT&T Vision Alignment Challenge Technology Survey - AT&T Domain 2.0 Vision White Paper, November 2013 (<http://www.att.com>)

[2] Sushant Jain et al., "B4: Experience with a Globally-Deployed Software Defined WAN," ACM SIGCOMM Communication Review, Vol. 43, Issue 4, October 2013

[3] Internet2 Virtualizes Its Network Backbone (October 2014), <https://www.sdxcentral.com/articles/news/internet2-virtualizes-network-backbone/2014/10/>

[4] IEEE SDN4FNS Whitepaper (January 2014), <http://sites.ieee.org/sdn4fns/whitepaper>

[5] Javier Benitez, "Colt's SDN/NFV Evolution," NFV & SDN Summit, March 2014 (<http://www.slideshare.net/ColtTechnologyServices/colts-sdn-nfv-evolution>)

[6] Amin Vahdat, "A Software Defined WAN Architecture," Open Networking Summit (ONS) 2012, March 2012, (<http://opennetsummit.org/archives/apr12/vahdat-wed-sdnstack.pdf>)

[7] Open Network Operating System (ONOS), <http://onosproject.org>

[8] ONOS SDN-IP Use Case, <https://wiki.onosproject.org/display/ONOS/SDN-IP>

[9] John Hicks, "Internet2 SDN," Asia Pacific Advanced Network (APAN) 39 Meeting, March 2015 (<https://www.apan.net/meetings/Fukuoka2015/Sessions/4/APAN39-FIT-SDN-SDX.pdf>)

[10] OpenDayLight Project, <http://www.opendaylight.org>

[11] Dan Levin et al., "Logically Centralized? State Distribution Trade-offs in Software Defined Networks," ACM SIGCOMM Hot Topics in Software Defined Network (HotSDN) Workshop, August 2012

[12] Bob Lantz et al., "ONOS: Towards an Open, Distributed SDN OS," ACM SIGCOMM Hot Topics in Software Defined Network (HotSDN) Workshop, August 2014

[13] RAFT Algorithm, [http://en.wikipedia.org/wiki/Raft\\_\(computer\\_science\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Raft_(computer_science))

[14] Abhinava Sadasivarao et al., "Open Transport Switch - A Software-Defined Networking Architecture for Transport Networks," ACM SIGCOMM Hot Topics in Software Defined Network (HotSDN) Workshop, January 2013

[15] ONOS Packet-optical Use Case, <http://onos.wpengine.com/wp-content/uploads/2014/11/SDN->

Control-of-Packet-Optical-Use-Case.pdf

- [16] Joe Mambretti, "International Inter-Domain SDX," TERENA Network Conference, June 2015
- [17] Arpit Gupta et al., "SDX: A Software Defined Internet Exchange," Proc. of 2014 ACM Conference on SIGCOMM, August 2014
- [18] Scott Whyte, "Project CARDIGAN, An SDN Controlled Exchange Fabric," NANOG (The North America Network Operators Group) 57 Meeting, February 2013
- [19] Global Lambda Integrated Facility, <http://www.glif.is>
- [20] StarLight, <http://www.startap.net/starlight>
- [21] Korea Research Environment Open Network (KREONET), <http://www.kreonet.net>

## 약 력



김 동 균

1996년 한남대학교 공학사  
 1999년 충남대학교 이학석사  
 2005년 충남대학교 이학박사  
 2006년~2007년 미국 UT/오크리지국립연구소 Associate Researcher III  
 2000년~현재 한국과학기술정보연구원(KISTI) 첨단연구망센터 책임연구원  
 관심분야: SD-WAN/인터도메인 SDN, 미래인터넷, 국가연구망



조 현 훈

2009년 경북대학교 공학사  
 2011년 경북대학교 공학석사  
 2015년 경북대학교 공학박사  
 2011년~현재 한국과학기술정보연구원(KISTI) 첨단연구망센터 연구원  
 관심분야: SDN 분산형 컨트롤러, SDN기반 네트워크 가상화, 네트워크 성능향상