

SDN/SFA 기반 미래 인터넷 연구자원 플랫폼 연동 구조

SDN/SFA-based Federation Architecture of Future Internet Testbeds

김성민¹, 이수강¹, 석우진², 김명섭¹

고려대학교 컴퓨터정보학과¹

KISTI²

{gogumiking, sukanglee, tmskim}@korea.ac.kr¹, wjseok@kisti.re.kr²

요 약

오늘날 전세계적으로 네트워크의 규모가 커지고 네트워크를 활용한 실험의 중요도가 높아짐에 따라 안정적이며, 고성능의 컴퓨팅 네트워크 환경이 요구되고 있다. 하지만 그러한 실험 환경을 개인 또는 소규모 연구진이 구축하기에는 여러가지 측면에서 제약사항이 발생하게 된다. 이러한 제약사항을 해결하기 위하여 세계의 다양한 연구 기관에서 연구자원 플랫폼을 구축하였으며, 대규모 실험 환경을 위하여 각 연구자원 플랫폼들을 연동하는 연구가 진행이 되었다. 하지만 현재 연구자원 플랫폼의 연동은 사용자의 요구에 맞춰 네트워크 환경을 동적으로 설정하지 못하는 한계점이 여전히 존재한다. 따라서 본 논문에서는 다수의 연구자원 플랫폼과 SDN 기술을 연동하여 연구자에게 동적인 네트워크 자원을 제공할 수 있는 시스템의 구조를 제안한다.

Keyword : Future Internet, Testbeds Federation, SFA, SDN

1. 서론

오늘날 전세계적으로 네트워크의 규모가 커지고 네트워크를 활용한 실험의 중요도가 높아짐에 따라 안정적이며 고성능의 컴퓨팅 네트워크 환경이 요구되고 있다. 하지만 그러한 환경을 개인 또는 소규모 연구진에서 구축하기에는 비용과 공간적인 측면에서 많은 제약사항이 발생하게 된다. 또한 타 연구진과의 공동연구를 진행함에 있어서 지리적인 차이로 인하여 연구를 원활하게 진행하지 못하는 어려움 역시 발생한다.

이러한 제약사항들을 해결하기 위하여 세계의 다양한 연구 기관에서 원격 접속이 가능한 실험 환경을 구축하여 연구자들에게 제공을 하고 있다. 그 대표적인 테스트베드로는 유럽에서 운영중인 FIRE[1, 2](Future Internet Research and Experimentation), PlanetLab[3, 4]과 미국에서 운영중인 GENI[5, 6](Global Environment for Network Innovations), Emulab[7] 등이 있으며, 국내에서는 KISTI의 KreonetEmulab[8]이 있다. 이렇게 다양한 기관에서 연구자원 플랫폼을 운영하고 있지만 대규모의 실험 환경을 구축하여 실험을 진행하지 못하는 한계가 있어 각 연구자원 플랫폼들의 연동 필요성이 증가하고 있다.

미래인터넷 테스트베드들의 연동을 위한 연구도 활발히 진행이 되었는데 서로 다른 연구자원 플랫폼간 커뮤니케이션의 괴리를 극복하기 위해 표준연동규약 SFA[9](Slice-based Federation

Architecture)를 정의하여 서로 다른 테스트베드들의 컴퓨팅 자원을 Slice 단위로 사용할 수 있다. 대표적으로 프랑스 Sorbonne 대학교의 UPMC(the Universite Pierre et Marie Curie)의 연구지인 UPMC에서 개발하여 서비스 하고 있는 MySlice[10]가 있다. 하지만 현재의 연구자원 플랫폼의 연동은 각 연구자원 플랫폼이 운영중인 다수의 컴퓨팅 자원을 빌려 제공하는 것은 가능 하지만, 네트워크를 사용자의 요구에 맞게 설정하지 못하여 동적인 실험 환경을 구축하지 못한다.

따라서 본 논문에서는 연구자원 플랫폼 연동시스템의 컴퓨팅 자원을 이용하여 사용자의 요구에 맞춰 동적인 네트워크 환경을 구축하는 방법과 구조를 제안한다. 미래 인터넷 연구자원 플랫폼의 동적인 네트워크 자원 연동을 위해서는 SDN[11](Software Defined Networking)기술과의 연동이 필수적이다.

본 논문의 2 장에서는 연구자원 플랫폼과 표준연동규약 SFA 및 연구자원 플랫폼 연동 시스템에 대하여 기술하며, 3 장에서는 현재 연구자원 플랫폼 분야의 문제점을 정의한다. 또한 4 장에서는 본 논문에서 제안하는 SDN 및 SFA 기반 연구자원 플랫폼 연동 시스템의 구조에 대하여 기술하며, 마지막으로 5 장에서는 결론과 향후 연구 계획에 대하여 기술한다.

2. 관련연구

본 장에서는 연구자원 플랫폼의 네트워크 자원을 연동하기 이전에 활발히 진행되어온 연구 및 실제 연구자들에게 서비스를 제공하고 있는 시스템에 대하여 기술한다. 연구자들에게 안정적인 실험 환경을 제공하기 위하여 세계의 다양한 연구기관에서는 원격 접속이 가능한 연구자원 플랫폼을 구축하여 연구자들에게 제공하였으며, 대규모 실험 환경의 수요에 의해 각 연구자원 플랫폼들 간의 연동을 위해 표준연동규약 SFA 를 정의하여 연구자원 플랫폼들의 연동을 이루었다. 이에 대한 내용은 이어서 기술한다.

2.1 연구자원 플랫폼

소규모 연구진에서 대규모의 컴퓨팅 실험환경을 구축하기에는 비용적, 공간적인 측면에서 많은 제약사항이 발생한다. 때문에 세계의 다양한 연구기관에서는 연구자원 플랫폼을 구축하여 연구자들에게 연구자원 이용 권한을 주어 컴퓨팅 자원을 제공하고 있다.

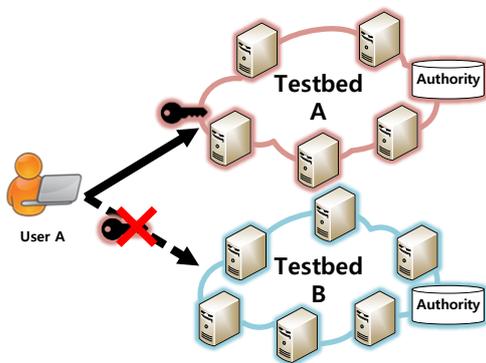


그림 1. 연구자원 플랫폼의 구조

그림 1 은 현재 다양하게 구축되어 있는 연구자원 플랫폼의 가장 기본적인 구조로 각 연구자원 플랫폼은 독립적으로 운영이 되며, 사용자는 이용하고자 하는 연구자원 플랫폼에 계정을 등록하여 권한을 받은 후에 연구자원을 이용할 수 있다. 만약 계정을 등록하지 않은 연구자원 플랫폼의 컴퓨팅 자원을 이용하기 위해서는 새로 계정을 생성해야 하며, 서로 다른 연구자원 플랫폼은 사용자의 계정을 독립적으로 관리하기 때문에 연동은 이루어질 수 없다. 또한 각 연구자원 플랫폼의 컴퓨팅 자원을 이용하기 위해서는 별도의 프로그램을 이용해야 하므로 접근이 용이하지 않다.

미래 인터넷 연구자원 플랫폼에 관한 연구는 미국과 유럽이 주축이 되어 연구를 진행하고 있는데, 미국 영역의 연구자원 플랫폼으로 Emulab[7]과 GENI[5, 6]등이 있으며, 유럽 영역의 연구자원 플랫폼으로는 FIRE[1, 2]와 PlanetLab[3, 4]등이 있다. Emulab 은 미국 Utah 대학에서 개발된 연구자원 프레임워크로 연구자에게 시스템을 개발, 디버

그와 평가를 할 수 있는 광범위한 환경을 사용자가 요구하는 네트워크 구조로 구성하여 제공하는 연구자원 플랫폼이다. Emulab 은 PlanetLab 과 비교되는 대표적인 미래인터넷 연구자원 플랫폼으로 사용자가 요구하는 가상의 네트워크 토폴로지를 생성하는 것이 가능하여 현재까지도 Emulab 을 이용한 연구가 활발히 진행중에 있다. 그리고 GENI 는 대표적인 미래인터넷 연구자원 플랫폼 프로젝트로 Emulab 을 확장하여 망 가상화를 통해 응용 계층 및 물리/제어계층 실험이 가능하다. 또한 FIRE 는 유럽의 미래 인터넷 관련 연구를 지원하는 프로젝트인 FP7[12](Future Internet in Framework Programme 7) 내에서 미래인터넷을 위한 기술개발 및 다양한 실험 인프라를 구축하는 프로젝트로 유럽의 다양한 국가에서 운영하고 있는 연구용 컴퓨팅 자원을 통합, 연동하는 연구를 진행중에 있다.

2.2 SFA 및 SFA 기반 연구자원 연동 시스템

세계의 다양한 연구기관에서 제공하는 연구자원 플랫폼은 수 많은 연구자들의 실험 환경 구축에 대한 부담을 어느정도 해소 시켜 주었지만 대규모의 실험을 진행하는 데에는 여전히 한계점이 존재하기 때문에 이를 해결하기 위해서 대부분 Stand-alone 형태로 서비스를 제공하는 연구자원 플랫폼 연동의 필요성이 증대되었다. 서로 다른 기관에서 운영하는 연구자원 플랫폼은 각각 다양한 구조와 기능을 가지기 때문에 효과적인 연동방안이 필수적인데, 그 방안으로 표준연동규약 SFA[9]가 정의되었다.

SFA 는 Princeton 대학의 Larry Peterson 을 주축으로 미국영역의 GENI 와 유럽영역의 FIRE 가 함께 정의하고 개발하였다. SFA 는 연동하고자 하는 연구자원 플랫폼들의 컴퓨팅 자원을 추상화 하여 연구자들에게 제공될 수 있도록 하는 역할을 하는데 이때 사용자는 다수의 컴퓨팅 자원을 Slice 단위로 묶어 제공 받을 수 있다.

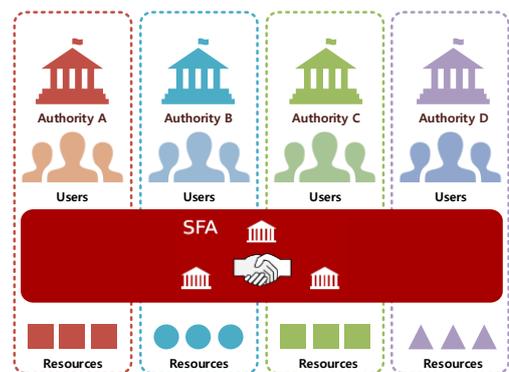


그림 2. SFA 의 역할

그림 2 는 다수의 연구자원 플랫폼에서 SFA 의 역할을 나타낸 것으로 SFA 는 서로 다른 기관에

서 구축한 연구자원 플랫폼들 간의 괴리를 한가지로 통일시켜 연동이 가능하게 해준다. 연동되지 않은 연구자원 플랫폼들은 각각의 정책과 Database 로 사용자를 관리하기 때문에 사용자는 다른 기관의 연구자원 플랫폼에 접근하기 위해서는 새로운 계정을 생성하는 것이 불가피 하다. 또한 각 연구자원 플랫폼이 소유하고 있는 자원의 종류 및 이들과 통신하는 방법이 서로 상이하기 때문에 이들을 통합해줄 수 있는 하나의 규약이 필요하며, 이를 극복하기 위한 방법이 표준연동규약 SFA 이다.

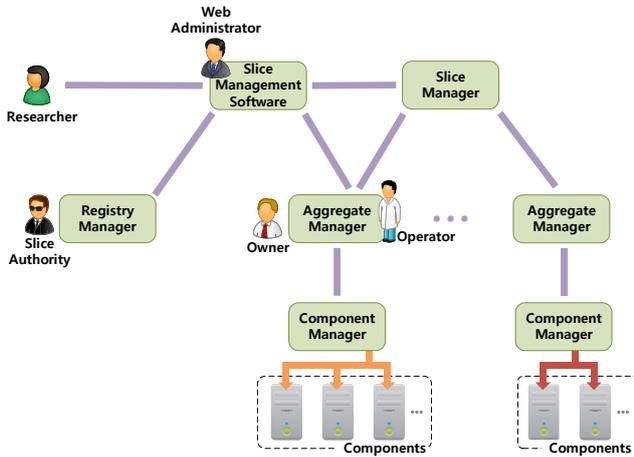


그림 3. SFA 기반 연구자원 플랫폼 연동구조

그림 3 은 SFA 를 통하여 연동을 한 연구자원 플랫폼의 구조를 나타낸 것으로 SFA 기반 연구자원 플랫폼 연동 시스템은 크게 네 가지로 구성요소를 나눌 수가 있는데 CM(Component Manager), AM(Aggregate Manager), SM(Slice Manager) 그리고 Registry 로 나뉜다. CM 은 연구자원 플랫폼의 HW 자원 정보를 수집, 분리 및 Sliver 기반으로 제어 하며, 자원에 관련된 정보를 AM 에 전달한다. AM 은 다수의 CM 을 관리하며, 각 CM 으로부터 Sliver 로 정의된 인프라 자원을 수집한다. 또한 전달받은 Sliver 를 사용자 조건 별로 분리하여 생성한 Slice 를 SM 에 전달한다. SM 은 AM 에서 생성된 Slice 를 초기화 및 공급 제어 등의 관리를 하며 웹 UI 를 통하여 Slice 모니터링 환경을 제공한다. 마지막으로 Registry 는 사용자 계정 및 인증 정보인 Certificate 와 Slice 생성 및 관리 정보인 Credential, Slice 에 대한 정보 역시 DB 또는 파일의 형태로 유지하고 해당 정보를 SM 으로 전달하여 Slice 제어가 가능하게 한다.

그림 4 는 SFA 기반의 연구자원 연동 시스템의 대표적인 예시와 연동 방법을 나타낸 것으로 SFI 는 유럽 영역에서 사용되는 연구자원 플랫폼 연동 시스템이다. MySlice[10]는 프랑스 Sorbonne 대학 UPMC 의 연구팀인 OneLab 에서 개발한 연구자원 플랫폼 연동 시스템으로 CLI 기반으로 사용

하는 SFI 를 발전시켜 웹 UI 로 사용자 입장에서 쉽게 이용 할 수 있다. 또한 OMNI 는 미국 영역에서 사용하는 CLI 기반 연구자원 연동 시스템으로 이를 발전 시킨 것이 Flack 이다. 각 연구자원 플랫폼은 고유의 문법(RSpec)으로 사용자의 요구를 전달하거나 연구자원의 현황 정보를 전달 하지만 SFA API 는 이를 통일된 포맷으로 변환시켜 연동이 가능케 한다. 또한 유럽과 미국 두 영역의 연구자원 플랫폼 연동 시스템은 모두 SFA 를 통하여 연동을 하기 때문에 한가지 시스템으로 서로 다른 영역의 연구자원 플랫폼 연동이 가능하다.

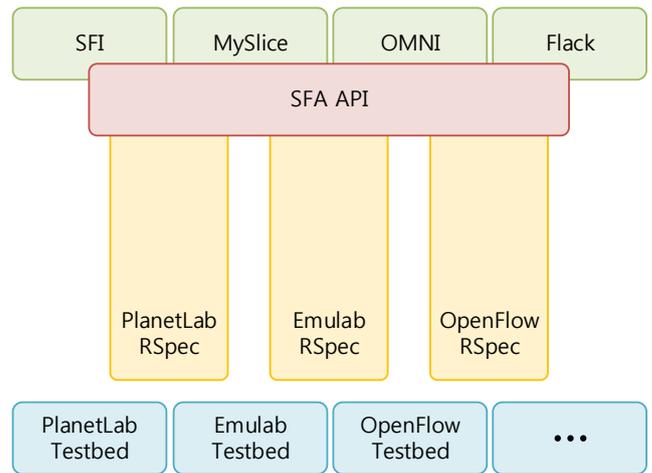


그림 4. SFA 기반 연구자원 플랫폼 연동 시스템

3. 문제 정의

연구자원 플랫폼을 연동함에 있어서 가장 중요한 요구사항은 지리적으로 분산되어 구축된 연구자원 플랫폼의 자원을 자신의 자원처럼 사용할 수 있어야 하는 점이다. 이에 대해서 사용자의 위치에 따른 제약이 없어야 하며, 사용자가 요구하는 실험환경 규모에 제약이 없어야 한다. 또한 사용자가 요구하는 실험환경의 구조적 제약이 없어야 한다. 이와 같은 요구사항을 충족시키기 위하여 원격지에서 접속하여 자신의 컴퓨터처럼 사용할 수 있는 연구자원 플랫폼, 다양한 연구자원 플랫폼을 통합하여 대규모 실험을 진행 할 수 있도록 하는 연구자원 플랫폼 연동 시스템 등 연구자들에게 양질의 실험 환경을 제공하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔지만, 여전히 모든 연구자들의 요구하는 실험환경을 제공하지 못하는 한계점이 몇가지 존재 한다.

첫째, 현재의 연구자원 플랫폼 연동 시스템을 통해서 통합된 연구환경을 생성할 수 없다. 다수의 컴퓨팅 자원을 Slice 로 생성할 수는 있지만 그들은 네트워크 상에서 독립적인 자원으로 인식이 되기 때문에 다수의 컴퓨팅 자원들을 이용한 네트워크 실험을 진행하지 못한다. 사용자가 다수의

컴퓨팅 자원을 동시에 요구하는 것은 그 만한 컴퓨팅 파워가 필요하다는 것이며, 독립적인 자원 하나가 그에 합당한 작업을 수행 하지 못한다면 연구자원 플랫폼을 연동하는 의미가 없다.

둘째, 사용자의 요구에 맞는 네트워크 환경을 구성하지 못한다. 사용자는 네트워크 실험을 진행할 때 필요한 토폴로지를 구성하여 실제로 구현하기 힘들기 때문에 가상으로 구현해야만 한다. 이를 위해서는 각 연구자원 플랫폼의 스위치의 플로우 테이블 설정을 변경하여 네트워크 트래픽의 경로를 설정할 수 있어야 한다.

셋째, 실험을 진행함에 있어서 높은 QoS 를 보장하지 못한다. 현재의 서로 다른 연구자원 플랫폼은 서로 직접적인 네트워크 선로가 연결이 되어 있지 않기 때문에 안정적인 QoS 를 보장하지 못하는 물론 정확한 실험 결과를 도출하기 어렵다. 이러한 문제를 해결 하기 위해서는 각 연구자원 플랫폼의 스위치 장비를 통합하여 제어할 수 있는 기술이 필요하다.

마지막으로 네트워크에 문제 발생 시 빠른 대응이 어렵다. 원거리로 떨어져 있는 연구자원 플랫폼의 자원 상태를 모니터링하는 것은 쉬운 일이 아니며, 문제 발생 시 이를 원격으로 복구하는 것 또한 불가능에 가깝다.

따라서 미래인터넷 연구자원 플랫폼의 네트워크 자원의 연동을 위해서는 실제 구성되어 있는 네트워크 구조와 관계 없이 사용자의 요구에 맞춰 동적으로 트래픽의 흐름을 변경하여 가상의 네트워크 구조를 생성해야 한다. 이를 위해서는 라우터, 스위치 등 네트워크 장비의 역할을 가상화 하여 소프트웨어로 정의할 수 있는 SDN[11]기술과의 연동이 필수적이다.

4. 연구자원 플랫폼의 네트워크 자원 연동 구조

본 장에서는 연구자원 플랫폼의 컴퓨팅 자원은 물론 네트워크 자원까지 연동할 수 있는 구조에 대하여 설명 한다. 컴퓨팅 자원의 연동은 원격지에서 다수의 CPU, RAM, Storage 등 컴퓨팅 자원을 하나의 서버랙에 있는 것처럼 사용이 가능 하도록 하는 것으로 사용자의 위치와 실험 환경의 규모에 대한 제약을 해결 할 수 있다. 하지만 실험 환경을 사용자의 요구에 따라 설정하지 못하는 구조적 제약이 존재한다. 반면에 네트워크 자원 연동이란 사용자의 요구에 따른 동적 네트워크 구조 설정이 가능 하도록 하여 다양한 네트워크 구조를 갖는 실험 환경을 구성할 수 있다.

그림 5 는 연구자원 플랫폼과 SDN 기술을 연동하는 구조를 나타낸 것으로 기존 컴퓨팅 자원의 연동이 완료된 연구자원 플랫폼 연동 시스템과 SDN 컨트롤러, 각 스위치가 연결된 형태이다. 이때, SDN 컨트롤러는 연구자원 연동 시스템 운영주체 측에서 관리 해야 하며, 연동이 약속된 모든 연구자원 플랫폼과 연결이 되어 있어야 한다. 각

연구기관에서 관리를 하게 되면 각 연구자원 플랫폼 간의 명령 체계의 괴리가 생겨 연동이 불확실 또는 불안정 하기 때문이다.

이와 같이 연구자원 플랫폼의 연동이 이루어지면 각 연구자원 플랫폼은 통상적인 인터넷 망과는 별개로 독립적인 물리망으로 직접 연결이 되기 때문에 다른 트래픽 흐름의 영향을 받지 않아 안정적인 QoS 를 보장받을 수 있다. 그리고 각 연구자원 플랫폼의 스위치 장비는 통합된 SDN 컨트롤러에 의해 Bandwidth, 플로우 테이블 등이 제어 되기 때문에 사용자가 요구하는 토폴로지를 SDN 컨트롤러에서 입력 받아 Slice 의 네트워크 환경을 구성할 수 있다. 또한 네트워크 장비에 문제가 발생하면, SDN 컨트롤러에서 동적으로 새로운 네트워크 경로를 설정 할 수 있기 때문에 네트워크 문제에 따른 실험 진행이 불가능한 상황에 대하여 빠른 대응이 가능하다.

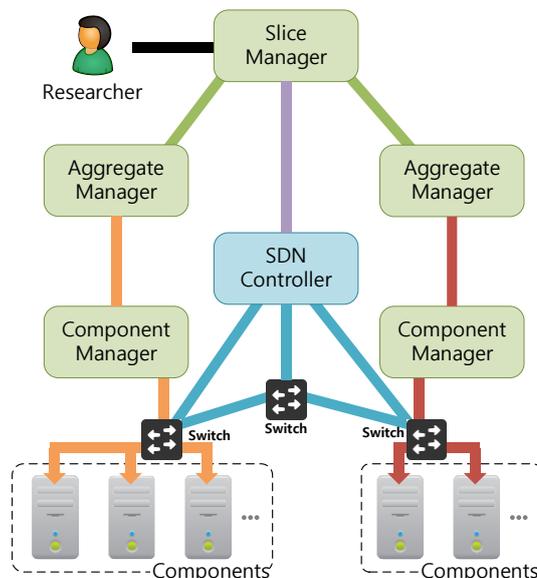


그림 5. 연구자원 플랫폼과 SDN 기술 연동 구조

본 논문에서 제안하는 방법은 기존 연구자원 플랫폼 연동 시스템과 마찬가지로 표준연동규약 SFA 를 통하여 다양한 연구자원 플랫폼의 컴퓨팅 자원을 Slice 로써 생성한다. 이어서 사용자의 요구에 맞는 네트워크 토폴로지를 입력 받아 SDN 컨트롤러의 플로우 테이블을 수정하여 Slice 에 포함 되어있는 컴퓨팅 자원들 간의 트래픽 흐름을 제어하여 가상의 토폴로지를 생성함으로써 네트워크 자원 연동을 이룬다. 이때 컴퓨팅 자원을 연동하는 것과 같이 네트워크 자원을 연동함에 있어서 SFA 를 통해 사용자의 요구를 전달하는 것이 아닌 SDN 컨트롤러에 명령을 전달하는 별도의 API 가 필요하다. 대표적으로 Restful API 는 ONOS[13] SDN 컨트롤러의 Northbound 와 연동이 가능하며, 실제로 연구자원 플랫폼 연동 시스템을 위의 방법을 통하여 구축할 계획이다.

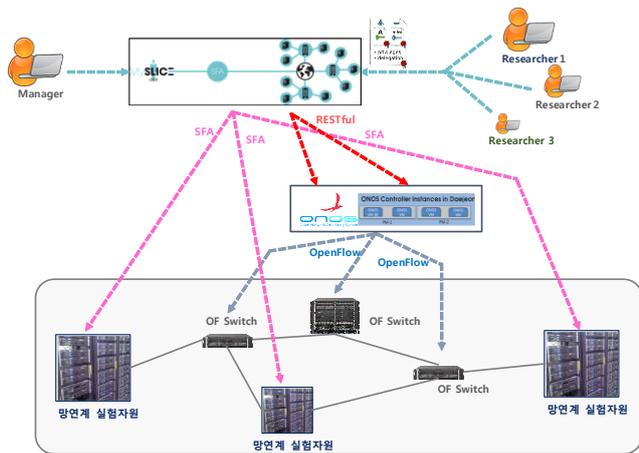


그림 6. 계획중인 연구자원 플랫폼 연동 시스템 구성도

그림 6 은 실제로 구축을 계획하고 있는 연구자원 플랫폼 연동 시스템의 구성도로 대표적인 오픈소스 연구자원 플랫폼 연동 시스템인 MySlice 와 ONOS SDN 컨트롤러의 연동 방안을 연구 중에 있다. ONOS SDN 컨트롤러는 Northbound API 를 통해 외부의 인터페이스와 통신이 가능하며, Restful API 는 ONOS 에 명령을 전달하는 기능을 지원한다. 따라서 향후 Restful API 를 이용하여 MySlice 와 ONOS SDN 컨트롤러를 연결해주는 인터페이스를 개발하여 연구자원 플랫폼의 완벽한 연동을 계획 중 이다.

또한 웹 UI 를 통하여 서비스를 제공하는 MySlice 를 활용하여 연동 중인 연구자원 플랫폼의 컴퓨팅 자원은 물론 네트워크 장비의 현황을 실시간으로 제공할 수 있어야 하며, 이를 토대로 사용자는 실험 환경을 손쉽게 설정 할 수 있어야 한다. 이를 위한 MySlice 내부에서 동작하는 실험 환경 설정 플러그인 개발을 계획 중이다.

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 연구자에게 실험환경을 제공하는 현재의 연구자원 플랫폼의 한계점을 극복하기 위하여 연구자원 플랫폼 연동 시스템과 SDN 기술을 연동하는 구조를 제안하였다. 현재의 연구자원 플랫폼은 대규모 실험을 진행하는데 있어서 비용적, 공간적인 제약사항이 많으며, 타 연구기관의 사용자에게 폐쇄적인 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 SFA 표준연동규약을 통하여 각 연구자원 플랫폼 간의 통신 문법과 사용자 인증 체계를 통일 시켰다. 하지만 사용자의 요구에 따른 다양한 네트워크 실험 환경을 구성하지 못하는 구조적 한계점이 존재하며, 실험결과에 큰 영향을 미치는 안정적인 QoS 를 보장하지 못하기 때문에 이를 극복하기 위해 연구자원 플랫폼 연동 시스템과 하드웨어로 구축되어 있는 네트워크를 소프트웨어로 정의하는 SDN 기술의 연동이 필요하다. 연구자원 플랫폼과 SDN 기술은 연동하기 위한 방법

으로 SFA 표준연동규약을 통하여 빌린 컴퓨팅 자원을 SDN 컨트롤러를 이용하여 네트워크 환경을 설정하는 구조를 제안하였다.

향후 본 논문에서 제안하는 구조를 실제 망에 적용시켜 그림 6 과 같이 연구자원 플랫폼 연동 시스템인 MySlice 와 SDN 컨트롤러인 ONOS 를 연동하는 연구를 진행 하여 연동 가능성을 검증할 계획이다. 이를 위해 ONOS SDN 컨트롤러와 MySlice 간 명령을 주고 받는 인터페이스를 Restful API 를 통해 구현해야 한다.

참고 문헌

- [1] Gavras, Anastasius, et al. "Future internet research and experimentation: the FIRE initiative." *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 37.3 (2007): 89-92.
- [2] Schwerdel, Dennis, et al. "Future Internet research and experimentation: The G-Lab approach." *Computer Networks* 61 (2014): 102-117.
- [3] Chun, Brent, et al. "Planetlab: an overlay testbed for broad-coverage services." *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 33.3 (2003): 3-12.
- [4] Lo, Shihmin, Ellen Zegura, and Marwan Fayed. "Virtual network migration on real infrastructure: A planetlab case study." *Networking Conference, 2014 IFIP. IEEE, 2014.*
- [5] Elliott, Chip. "GENI-global environment for network innovations." *LCN*. 2008.
- [6] Berman, Mark, et al. "GENI: A federated testbed for innovative network experiments." *Computer Networks* 61 (2014): 5-23.
- [7] Hibler, Mike, et al. "Large-scale Virtualization in the Emulab Network Testbed." *USENIX Annual Technical Conference*. 2008.
- [8] Lee, Minsun, Woojin Seok, and Kwan-Jong Yoo. "Challenges and Opportunities in the KREONET-Emulab Network Testbed." *한국콘텐츠학회 ICCS 논문집* (2014): 213-214.
- [9] Fdida, Serge, Timur Friedman, and Thierry Parmentelat. "OneLab: An open federated facility for experimentally driven future internet research." *New Network Architectures*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 141-152.
- [10] Baron, Loic, et al. "OneLab: Major computer networking testbeds open to the IEEE INFOCOM community." *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2015 IEEE Conference on. IEEE, 2015.*
- [11] Nunes, Bruno AA, et al. "A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks." *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* 16.3 (2014): 1617-1634.
- [12] Stuckmann, Peter, and Rainer Zimmermann. "Toward ubiquitous and unlimited-capacity communication networks: European research in framework programme 7." *Communications Magazine, IEEE* 45.5 (2007): 148-157.
- [13] Berde, Pankaj, et al. "ONOS: towards an open, distributed SDN OS." *Proceedings of the third workshop on Hot topics in software defined networking*. ACM, 2014.