

네트워크 가상화에 대한 고찰

충남대학교 | 김대영*

한국과학기술원 | 문수복*

연세대학교 | 박성용*

한국전자통신연구원 | 변성혁 · 이순석 · 신명기

한국외국어대학교 | 정일영*

1. 서론

지난 30년간 인터넷은 1980년 “제 3의 물결”에서 앨빈 토플러가 정의한 정보화 사회를 실질적으로 구현하는데 핵심적인 요소의 역할을 해왔다. 기존의 데이터 통신망에 비해서 개방형이고 상위 계층과 하위 계층이 독립적으로 개발될 수 있는 특성으로 인해 비약적인 속도로 확산되어 이제는 전력망, 도로망 등과 같이 없어서는 안되는 사회 간접자본의 일부가 되었다. 인터넷의 비약적인 발전으로 기존의 다양한 매체들이 개별 통신망을 통해 전달되던 방식을 벗어나 하나의 통신망에서 다양한 매체를 전송하는 서비스 집약화의 현상이 급격하게 진행되어가고 있다. 지금까지의 인터넷은 이렇게 고도화된 통신망으로 발전해왔는데 앞으로 통신망을 어떻게 이용하는가에 제 2의 도약의 관건이 있다. 지금까지 많은 투자를 통해 통신망의 고도화가 이뤄졌다고 한다면, 다음 단계로의 paradigm shift는 단순히 통신망의 스피드를 높이는 것이 아니라, 통신망을 최대한 이용해서 다양한 응용프로그램을 만들어 실생활에 더욱 큰 변화를 이루는 것을 목표로 한다. 즉 단순히 통신망의 Bandwidth를 사용한다는 측면으로 부족하다. 개발자와 연구원들이 통신망의 구조를 깊이 이해하고, 현재의 통신망 구조를 개선하기 위해선, 직접적인 실험과 연구가 필수 불가결하다. 90년대의 ATM(Asynchronous Transfer Mode) network 등과 같이 다양한 전송기술을 기반으로 한 네트워크와 경쟁하던 시대에서 이제는 유일무이한 통신망으로써의 인터넷이 석화(ossification)되지 않으려면 신개념의 시도들이 필요한 때가 온 셈이다.

제 2의 paradigm shift인 통신망 이용 기술의 발전

을 위해선, 연구자가 통신망을 들여다보고, 이를 운용도 해보며, 또한 여러 가지 실험을 할 수 있는 환경이 절대적으로 중요하다. 그러나, 현실적으로 연구자가 기업의 실제 통신망을 운용하는 것은 현실적으로 불가능하고, 차선책으로 실험 연구망을 이용한다 하더라도, 상업용 라우터로 구성된 연구망 라우터를 액세스하거나 자신이 원하는 프로그램을 설치하는 것은 불가능하다. 이를 극복하기 위해 학계에서 의논되고 있는 것이 하드웨어 또는 소프트웨어를 통한 네트워크 가상화이다. 이런 네트워크 가상화는, 일반 연구자라도 자신만의 통신망을 구성해 새로운 알고리즘과 기능을 자유롭게 구현할 수 있게 하면서도, 다른 사용자들에게는 전혀 영향을 미치지 않는 장점을 지닌다.

이를 위해 우리가 뽑은 필수 요소는 다음과 같다. 실험 및 연구를 위한 가상 네트워크망, 실험 및 개발을 위한 programmable 라우터, 모바일과 센서네트워크를 비롯한 다양한 신규 기술을 유연하게 광대역망에 접속시키는 기술 등이다. 이러한 주제에 대해서 지난 여름 미래 인터넷 포럼(Future Internet Forum)에서 국내 연구 방향에 대해 활발한 토론이 있었다. 저자 중 2명은 동기간 중 미국 시애틀에서 열린 ACM SIGCOMM 학회와 PRESTO 워크샵에서 참석하면서 학회 발표내용을 요약보고 하면서 토론에 참가하였다. 본 기고문은 포럼에서 토론된 내용을 발췌 정리한 것이다.

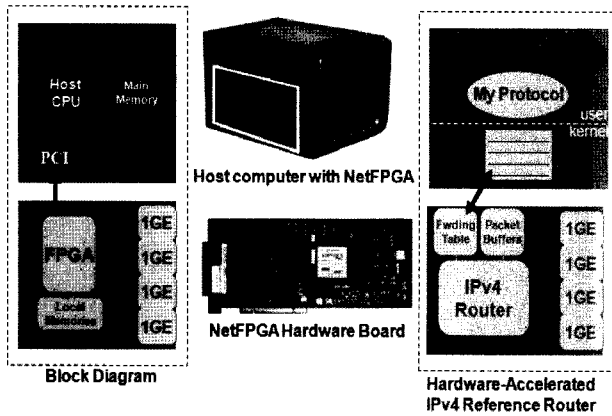
2. 하드웨어에 기반한 네트워크 가상화

2.2 Architecture of NetFPGA

NetFPGA는 본질적으로 4-port 이더넷 카드이다. 이더넷이라는 널리 알려진 표준을 따르기 때문에 처음 접하는 사람이라도 이더넷을 기반으로 쉽게 시작할 수 있는 장점을 가진다. NetFPGA가 여니 이더넷 카드와

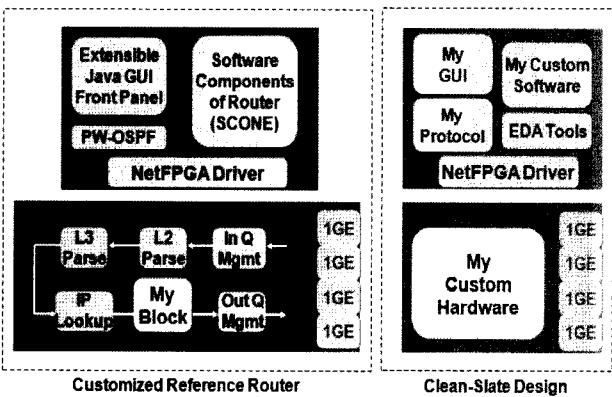
* 종신회원

다른 점은 아래 그림의 왼쪽에 나와 있듯이 소프트웨어와 하드웨어의 분리에 있다. 연구자는 소프트웨어에서 사용자 레벨 및 커널 레벨 프로그램을 통해 자유롭게 새 프로토콜과 실험망을 꾸미고 커널 레벨의 라우팅 테이블을 NetFPGA에 있는 forwarding table로 전송한다면, NetFPGA는 forwarding table에 따라 패킷을 전송한다. 따라서 연구자는 하위 계층의 하드웨어에 신경쓰지 않고 새로운 소프트웨어와 알고리즘 개발에 집중할 수 있다.



[출처: http://netfpga.org/netfpgawiki/images/9/90/System_Diagram_1.gif]

또한, NetFPGA의 하드웨어 부분은 확장이 가능하게 되어 있어, 새로운 모듈을 만들어 구성하면, 전혀 새로운 구조의 라우터도 구성할 수 있다. 아래의 그림에서 완전 customize된 구조와 clean slate 디자인 예를 보였는데, 이런 구성이 가능하다는 점이 NetFPGA의 장점이다.



[출처: http://netfpga.org/netfpgawiki/images/4/41/System_Diagram_2.gif]

기존의 연구에서는 소프트웨어 라우터를 사용함으로써, 결과에 변수가 많고, 또 결과의 어떤 부분이 소프트웨어 때문인지, 또는 하드웨어 때문인지 객관적으로 분리해서 분석하는 것이 힘들었는데 NetFPGA를

사용하면 소프트웨어와 하드웨어 요소들간의 성능을 분리 측정할 수 있다.

2.1 OpenFlow

최근에 ACM SIGCOMM 학회와 GENI CIO 미팅 등에서 크게 공격적인 데모를 하고 있는 OpenFlow 기술을 살펴보자면 NetFPGA와 OpenFlow 콤보는 당장 이더넷을 기반으로 하여 다양한 실험을 대학에서 저가로 실험하는데 아주 좋은 short-term solution이다. 예를 들어, Type 0(추후에 Type 1 정의될 예정) OpenFlow Switch을 이용하면, 쉽게 패킷 header들을 rewrite 할 수 있어서, indirection architecture(예, I3, ID/Location split)[1], Xcast[2], IPvX[3] (중국에서 제안한 IPv9 이 실험하기 좋은 예일 것 같음) 등 IP의 새로운 버전이나 새로운 라우팅, 어드레싱 프로토콜 등을 실험하기에 아주 용이할 것이다.

실제로 NetFPGA를 적극적으로 활용하고 있는 Stanford 대학에선 신진 연구 인력과 아이디어 창출이라는 측면에서 상당히 성과를 올리고 있다. Stanford 대학에선 NetFPGA를 강의 실험에서 사용해 라우터에 대한 학생들의 이해도를 높이는데 성공하였다. 아래는 지난 2008년 8월 4일부터 8일 까지 진행된 NetFPGA Summer Camp에서 학생들이 완성한 프로젝트이다.

- 802.1q VLANs
- Hardware-Accelerated Mathematics Library for NetFPGA
- MACinMAC
- Heavy Hitter Identification using Multistage filters
- Layer 2 Load Balancing
- TCP Traffic Analysis for Passive End-to-End Bandwidth Measurement
- Assessment of Prototyping an AFDX Policy Switch Leveraging NetFPGA, Ethane, and OpenFlow Switch

위의 예에서 알 수 있듯이 기존의 프로토콜(802.1q, L2 load balancing)과 새로운 규격(이더넷 상의 Open-Flow)을 모두 실험 할 수 있다는 점이 매력적이고, 또한 Stanford 학생들의 실력 향상에 이런 프로젝트들이 많은 도움을 주리라는 것을 예상해 볼 수 있다.

하드웨어의 모든 요소를 programmable하게 만들어 제공한다는 장점이 있지만, 현재의 NetFPGA 플랫폼은 아직 이더넷 스위치의 기본적인 기능만 제공하고 있다. 따라서 궁극적으로 GENI와 같이 clean-slate 기반의 모든 실험을 지원하고, OSI 7 layer에 걸쳐, “Programmable + Virtualizable” 해야 한다는 long-term solu-

tion까지 가기 위해서는 Research community의 많은 기여가 필요하다. 또한, NetFPGA를 설계한 John Lockwood 교수도 인정하듯이 현재의 NetFPGA가 미래 인터넷의 표준이라기보다는 미래 인터넷 설계 연구의 가능성 및 validity를 입증하는 도구이다. NetFPGA가 향후 얼마나 발전하는 가는 좀 더 지켜봐야 할 것이다. 10월말에 있을 GEC3 회의에서 현재 진행되고 있는 29개의 GENI 관련 prototyping에 대해 발표될 예정인데, 실제 미국 대학 등에서 구현이 많은 부분 진행되었더라도(GEC3 마지막날 OpenFlow 데모가 있을 예정임), Working Group 차원의 스탠더드 작업은 아주 더디게 가는 이유가 같은 맥락에서 해석될 수 있다.

2.3 NetFPGA의 확장성

NetFPGA는 하드웨어적인 확장성과 소프트웨어적인 확장성을 어느 정도 만족시켜 준다. 첫번째로, 하드웨어적인 확장성에 대해선, Verilog를 이용하여 원하는 기능을 추가할 수 있다. 2.2장에서 언급되듯, Verilog 모듈을 통해 non-IP 프로토콜도 지원하게 만들 수 있다. 만일 그렇다면, USN이나 기타 다른 프로토콜을 지원하는 기능도 가능하다. Stanford 대학의 Nick McKeown 교수가 말하는 0-byte queue의 기본 아이디어는 버퍼 크기가 크면 packet switching을 구현하는 셈이고, 크기를 0으로 만들면 결국 flow switch 내지는 circuit switch를 만드는 것이니 스위치 레벨(Layer 1?)에서 부터 자기 나름대로의 아이디어를 구현해 보고 싶은 사람들에게는 더 없이 좋다. Verilog에 익숙하다면 쉽게 구현할 수 있다. \$499 가격의 보드를 이용해서 연구자가 자신의 아이디어를 적은 노력으로 직접 하드웨어로 구현할 수 있는 장점을 국내 학계에서 적극 활용하길 추천한다.

두번째로 소프트웨어적인 확장성에 대해 언급하자면, NetFPGA의 하드웨어적인 개념이 워낙 간단하기 때문에, 아무리 혁신적인 소프트웨어를 만들어도, 하드웨어 dependency를 고려하지 않아도 되는 점이 확장성에 긍정적인 요소가 된다. 소프트웨어와 하드웨어의 분리(separation)가 잘 이루어진 탓이다. 대부분 소프트웨어로 한다는 것도 결국 Routing & Forwarding (or Switching)을 구별해 생각할 때에 Control에 해당하는 Routing algorithm 등은 소프트웨어로 처리하고 (그래서 다양하게, 여러 라우팅 방법을 시험해 볼 수 있고), 그 계산 결과에 따른 패킷의 forwarding/switching table을 Linux Kernel 에서 NetFPGA로 다운로드 하면, NetFPGA는 forwarding/switching table에 따라 incoming 패킷을 forwarding/switching 한다. 이렇

게 소프트웨어와 하드웨어가 분리됨으로 인해 NetFPGA 상에서 다양한 프로토콜과 네트워크 알고리즘을 실험해 볼 수 있다.

또, 그 밖의 확장 요인으로 OpenFlow Switch를 지원할 수 있다는 점이다. 여러 장의 NetFPGA 카드를 PCI slot에 설치하고, 한 장은 OpenFlow용, 다른 한 장은 일반 라우팅 프로토콜 용, 이런 식으로 할당할 수 있다. 하지만, NetFPGA가 partitioning되는 virtualization까지 지원하기 위해선 많은 작업이 필요할 것으로 예상된다. NetFPGA는 virtualization을 어느 하위 계층까지 원하느냐에 따라 편리할 수도 아닐 수도 있다. NetFPGA가 완벽한 solution을 제공하기 보다는, 이제부터 연구자들이 실험을 통해 새로운 아이디어를 낼 수 있게 해주는 도구로 생각해야 한다. 이런 목적을 위해 전략적으로 모든 소스를 공개하는 방침이 세워졌다(주석: 소스 공개 정책은 미국의 거의 모든 테스트베드 활동의 방향이다. PlanetLab도 전체를 공개하고 있고, GENI prototyping project들도 하드웨어 및 소프트웨어를 모두 공개하겠다는 동의서에 서명해야 한다). ACM SIGCOMM PRESTO 워크샵 참석자들이 향후 연구 내용을 발표하면서 NetFPGA를 이용한 확장을 많이 언급하는 것으로 볼 때, NetFPGA를 근간으로 하는 Utility나 Verilog component들도 많이 나올 것으로 예상된다.

이상 확장성에 대해 논의를 마치고, 여담을 전하자면, Cisco Catalyst 6500, HP Procurve 시리즈, NEC의 라우터가 OpenFlow를 지원하는 연구를 하고 있는데 ACM SIGCOMM 데모에는 Cisco 6500에 OpenFlow 기능을 넣은 제품을 사용했다. Non-Disclosure Agreement(NDA) 때문에 사용자 매뉴얼을 보여주거나, OpenFlow용 IOS를 공개할 수는 없지만, OpenFlow IOS를 사용하면 OpenFlow에서 정의하고 있는 라우터 기능 parameter를 다 볼 수 있다고 한다. 그 밖에, NEC는 스탠포드와 2년 계약을 맺고 연구원을 파견해 OpenFlow 라우터를 만들고 있다.

3. 소프트웨어에 기반한 네트워크 가상화

이번 ACM SIGCOMM PRESTO 워크샵에서 Intel Research는 Software & PC-based architecture도 scalable 하다고 발표하였다. NetFPGA를 굳이 쓰지 않아도 고성능 PC로 어지간한 성능은 구현할 수 있음을 보인다. 영국 University College London의 Mark Handley 교수팀에서는 Virtual Router로 Xen Hypervisor 위에서 돌아가는 VR 성능을 발표했다. VR의 core compo-

nents는 UCLA 대학의 Eddie Kohler 교수가 만든 Click 이다[4]. 고성능 PC의 가능성을 극대화한 예라고 생각 된다.

4. 앞으로의 방향

세계 각국의 연구기관과 산/학계에서 현재 인터넷의 장단점에 대해 많은 논의가 이뤄지고 있다. 그 중 많은 논의들이 만일 인터넷을 처음부터 새로 설계한다면 어떤 식으로 설계하는 것이 좋을 것인가에 대한 논의들이다. 그렇지만, 이런 논의들에도 불구하고, 이미 많은 투자가 이뤄진 인터넷 인프라를 다 무효로 하고 전면적으로 새로 설계한 인프라를 구축하는 일은 가까운 시일에 일어날 가능성이 적다. 대신 이런 논의 과정을 통해 기존의 인터넷 구조에 추가할 새로운 아이디어와 새로운 구조에 대한 혁신이 일어날 가능성이 높다.

현재 국제적 미래 인터넷 연구는 각 참여자들이 미래 인터넷의 궁극적인 아키텍처에 대한 consensus를 이뤄가는 과정에 있다. 이런 합의 과정을 통해 다양한 아이디어를 수렴하고 또 그런 아이디어에 대한 실험을 통해 validity를 입증하는 긴 과정이다. 물론 이런 환경을 우리 산/학계 스스로 만들어 나아가는 것도 해 볼 일이지만, 우선은 이렇게 매우 매력적인 방법과 그룹이 형성되고 있다면 그 활동에 신속하고 적극적으로 동참해 국제 협력 하에 우리의 연구 아이디어를 국제적 consensus 과정에 반영해 나가는 것도 좋겠다. Architecture 자체 설계는 아니더라도 핵심 프로토콜 기술에서 참신한 아이디어를 제공할 수 있길 기대해본다. 이런 측면에서 우리 산/학계가 국제 사회에 제시할 수 있는 아이디어에 대한 몇가지 연구 과제에 대해 여기서 살펴보는 것도 의미 있을 것 같다.

우리 입장에서는 현재 일반적인 미래 인터넷 연구 테스트베드로 쓰이는 PlanetLab의 virtualization, slicing, federation이 최근 나타나는 서비스 특성들 그리고 서비스 방향 등을 고려할 때, 얼마나 적절히 User Requirements 및 Business Trends 그리고 하부 전달망의 기능 및 구조 등과 조화를 이루어 능동적으로 적용할 수 있는 구조인가 생각해볼 수 있다. 또, 당분간 네트워크의 추세가 Transport 제어 기능 및 서비스 제어 기능이 구분되어 signaling 메커니즘에 의하여 Fixed-Mobile Convergence(FMC)가 구현되는 Quadruple Play Service(QPS) 환경으로 발전될 것으로 보이는 데, 이러한 구조를 현재의 테스트베드에서 실험 할 수 있도록 잘 지원할 수 있을 것인가 하는 것도 중요한 문제이다. 또, 가까운 미래에 Telco/인터넷 서비스 구분

이 없어지는 것이 분명해 보인다. 이런 경우 서비스 비즈니스 활성화 측면에서 우리나라 미래 인터넷 연구가 PlanetLab 기반에서 벗어나 PlanetLab++ 등 등 우리 연구 아이디어에 맞는 구조의 새로운 선택/집중은 필요하지 않은가 궁금하다. 이러한 문제에 대하여 검토된 사항이 있다면 논의해보면 좋겠다. 이에 따른 Transport 네트워크 장비의 개발 구조도 미래 지향적인 구조로 설정되어야 한다.

미래 인터넷 테스트베드 관점에서 보면, 미래 인터넷에서는 Global Inter-network를 먼저 추구하고 있기에 실험을 위한 Testbed는 기존의 연구 결과물들을 최대한 활용하여 먼저 꾸며보는 것이 좋을 것 같다. 그렇다고 이것이 반드시 고급 장비를 사용해야 할 필요는 없고, KOREN 이나 KOREN의 upgrade위에 VM 기능이 있는 서버들을 붙여서 기본적인 Testbed를 충분히 구축할 수 있을 것으로 본다. 그 보다도 중요한 것이 Inter-network 이전에 우리 나름의 아키텍처로 Intra-Network를 먼저 시도해보는 노력이 훨씬 좋지 않나 생각된다.

ACM SIGCOMM PRESTO에서도 미래 인터넷 설계에 대한 아래와 같은 많은 질문들이 나왔다. Router를 어떻게 더 reliable하게 설계할 수 있다가 어려운 문제다(Albert Greenberg). 30년 전 main frame에서는 어떻게 이 문제를 해결했는지 다시 살펴봐야한다(Paul Gleichauf). Router configuration을 쉽게 할 수 있는 방법을 개발해서 다양한 configuration을 쉽게 실험해 볼 수 있으면 큰 도움이 될 것이다(Bruce Davie). Cloud computing market에서는 쉽게 하는 일이 Enterprise network market에서는 아직 잘 안 되지 않고 있다(Albert Greenberg). 우리가 필요로 하는 게 Xen 수준의 가상화인가, 아니면 PlanetLab 수준인가?(Jeff Mogul). PlanetLab에서는 스케줄링을 원하는대로 할 수가 없어서 네트워크 layer에서는 Xen 수준이라고 생각된다(Michael Freeman).

이렇듯이 미래 인터넷 연구는 아직 풀리지 못한 많은 문제들이 남아 있고 많은 실험과 아이디어가 필요한 실정이다. 이때 네트워크 가상화는 하위 계층에서 상위 계층까지 vertical하게 자원을 공유할 수 있는 기능을 제공해줌으로 인해 연구자로 하여금 실제 망과 같은 환경에서 다른 연구자들에게 불편을 주지 않고 다양한 아이디어를 실험을 할 수 있게 해준다. 본 기고문은 미래 인터넷에 관련된 수많은 질문에 대한 정답을 제시하기 보다는 우리가 생각하고 있는 방향과 아이디어를 정리해보자는 취지로 편집되었다. 앞으로도 이러한 토론이 국내 학계 및 업계에서 활

발하게 진행되길 기대해본다.

마지막으로 ACM SIGCOMM의 여담을 곁들이자면, OpenFlow 데모에 참석한 NEC연구원에게 “Openflow가 상업화 되려면 10년이 걸릴 수도 있는데, 영리회사가 그런 곳에 투자하고 핵심 직원들을 몇 년씩 대학 연구소에 파견 할 수 있나”라고 물었더니, “우리(NEC)는 길게 보고 연구한다. 10년 후에 상용화 될 연구를 위해 지금 자금 투입하는 건 당연하다.”라고 답했다. 일본 회사의 장기적 안목을 볼 수 있었던 일화이다.

참고문헌

- [1] I. Stoica, D. Adkins, S. Zhuang, S. Shenker, S. Surana, Internet Indirection Infrastructure, ACM SIGCOMM, 2002.
- [2] R. Boivie et al., Explicit Multicast(Xcast) Basic Specification, <draft-ooms-xcast-basic-spec-00.txt>, 2000.
- [3] RFC 1606: A Historical Perspective On The Usage Of IP Version 9, April 1, 1994.
- [4] The Click modular router, Eddie Kohler, Ph.D. Thesis, MIT, November 2000.



김대영

1975 서울대 전자공학과 학사
 1977 KAIST EE 석사
 1983 KAIST EE 박사
 1983 충남대학교 정보통신공학과 교수
 현재 미래인터넷포럼(FIF) 부의장, APAN 부의장,
 ISO/IEC JTC1/SC6 의장

E-mail : dykim@cnu.kr



문수복

1988 서울대 컴퓨터공학과 학사
 1990 서울대 컴퓨터공학과 석사
 2000 U. of Massachusetts at Amherst CS 박사
 1999~2003 Sprint 전임연구원
 2003 KAIST 전산학과 교수
 E-mail : sbmoon@kaist.edu



박성용

1991 연세대 전자공학 학사
 1996 U. of Illinois at Urbana-Champaign, ECE 석사
 2001~2004 Cisco Systems Senior 소프트웨어 엔지니어
 2006 U. of Illinois at Urbana-Champaign, ECE, 박사
 2004~2007 삼성전자 수석엔지니어

2007 연세대 전기전자공학과 연구 교수

E-mail : park.sy@yonsei.ac.kr



변성혁

1990 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사
 1992 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
 1999 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사
 1999~현재 한국전자통신연구원 방송통신융합
 부문 미래기술연구부 선임연구원

E-mail : shbyun@etri.re.kr



이순석

1988 성균관대학교 산업공학과(공학사)
 1990 성균관대학교 산업공학과(공학석사)
 1993 성균관대학교 산업공학과(공학박사)
 1993~현재 한국전자통신연구원 융합네트워크
 연구팀장

관심분야 : Network Architecture 설계, 네트워크
 진화 전략, All-IP 융합 네트워크, 차세대 광인터넷, 개방형 통신
 기술, 네트워크 최적설계, 트래픽 엔지니어링, 네트워크 및 통신
 시스템 성능평가

E-mail : ssllee@etri.re.kr



신명기

2000~2003 충남대학교 컴퓨터공학과 공학박사
 2004~2005 미국 NIST(National Institute of Standards
 and Technology) 초빙연구원
 1994~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 표준연
 구센터 책임연구원
 2008~현재 한국기술연합대학원대학교(UST) 겸

임부교수

2008~현재 대한전자공학회 학회지 편집위원
 2005~현재 (International) IPv6 Forum CIO Executive Committee Member
 2003~현재 TTA 국제표준전문가(RFC3338, RFC4038, RFC4489, RFC5181
 표준저자)

관심분야 : IPv6, IP Mobility, Multicast, 미래인터넷, 네트워크 가상화
 기술

E-mail : mkshin@etri.re.kr



정일영

1980 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1989 미국 Univ. of Massachusetts Lowell 전산학 석사
 1992 미국 Univ. of Massachusetts Lowell 전산학
 박사

1980~1996 한국전자통신연구원(ETRI) 책임연
 구원, 실장

1996~현재 한국외국어대학교 컴퓨터 및 정보통신공학부 교수

2002~2003 한국정보과학회 정보통신연구회 위원장

2002~2006 독일 Springer LNCS Journal Editor

2006~2006 (사)개방형컴퓨터통신연구회 회장

관심분야 : 네트워크 트래픽 이론 및 분석, 인터넷 네트워킹 프로토콜
 및 보안, Application 및 서비스 Networking

E-mail : iyehong@hufs.ac.kr