

# 지역 네트워크에서 QoS 관리를 위한 모델링 및 트래픽 피드백 제어

## The Modeling and Traffic Feedback Control for QoS Management on Local Network

박 종 진\*      허 의 남\*\*      문 영 성\*\*\*  
Jong-jin Park      Eui-Nam Huh      Young-song Mun

### 요 약

네트워크에서 QoS를 지원하기 위한 적응제어 구조를 개발하기 위해서는 대역폭 할당에 따른 전송율 응답특성을 모델링하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 네트워크의 대역폭 할당에 따른 전송율의 동적 특성을 구현하는 "동적 시스템 모델"을 제안하고 적응 피드백 제어 구조를 제안된 모델에 적용시켜 시뮬레이션 및 모델의 최적화를 수행하였다.

### Abstract

Throughput response characteristics depending on the network bandwidth allocation is needed to be modeled to devise adaptive control mechanism to support QoS of the local network. In this study, we propose a dynamic system model that reveals the response characteristics of network. The adaptive traffic feedback control is applied to this model. And we simulate this system for optimization of adaptive control mechanism.

· Keyword : QoS, Network, Feedback Control, Modeling

## 1. 서 론

최근 보편화된 초고속 인터넷을 기반으로 한 각종 인터넷 서비스가 활성화되어 있다. 특히 전자상거래, 주식거래, 동호회활동 및 각종 홈페이지를 활용한 홍보 및 정보교환이 인터넷의 보급으로 널리 이용되고 있다. 그러나 최근 추가적으로 요구되고 있는 이슈로서 보안, 이동환경의 지원 및 차별화된 품질(QoS; Quality of Service) 등이 있으며 이를 지원하는 많은 연구개발이 진행 중인 상황이다. 인터넷의 표준화 기구인 IETF [1]에서는 기존의 인터넷이나 차세대 인터넷을 위한

QoS를 제공하는 방법에 대하여 표준화 작업을 진행했으며 또한 계속 진행중이다. 특히 IntServ (Integrated Services) 모델[2], DiffServ (Differentiated Services) 모델[3] 등은 IETF에서 제안된 대표적인 인터넷에서의 QoS를 지원하는 방안이다.

일반적으로 QoS라고 하는 것은 컴퓨터시스템의 자원을 확보하는 것을 의미하며, 즉시성(timeliness), 데이터의 신뢰성 및 보안과 관련된 요구사항으로 구분할 수 있으며, 특히 네트워크에 있어서는 대역폭(bandwidth)의 확보와 일정한 지연시간(delay)의 유지가 주 요구사항이다.

보통 컴퓨터에서 처리되는 어플리케이션들은 시스템의 자원을 공유하면서 동작하고 있다. 그러므로 특정 어플리케이션이나 특정 대상과 관련하여 QoS를 지원하기 위해서는 우선순위에 의해 자원을 할당하는 방식이 일반적이다. 그러나 대부

\* 정 회 원 : 한림정보산업대학 컴퓨터응용학과 초빙교수  
pjj@jongjin.pe.kr(제1저자)

\*\* 종신회원 : 서울여자대학교 컴퓨터공학부 조교수  
huh@swu.ac.kr(공동저자)

\*\*\* 종신회원 : 숭실대학교 컴퓨터학부 부교수  
mun@computing.ssu.ac.kr(공동저자)

본의 방식이 네트워크의 트래픽과 같은 환경변화에 관계없이 일정한 방식으로 동작한다.

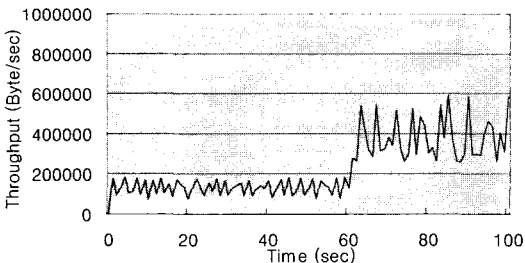
본 연구에서는 QoS 지원과 관련하여 네트워크의 대역폭 특성을 살펴보고 네트워크의 환경변화에 따라 적응적인 QoS 지원을 위해 필요한 모델을 개발하고자 한다.

## 2. 대역폭 응답특성 및 모델링

### 2.1 대역폭 지정에 의한 응답 분석

리눅스에서 제공되는 트래픽 제어 모듈인 tc (Linux kernel 2.2부터 지원) [4]를 사용하여 특정 컴퓨터로 전송되는 데이터의 대역폭을 조절하여 그 응답(전송율)을 살펴보았다. 그림1은 대역폭을 실험 시작시 1Mbps로 지정하고 60초 후 5Mbps로 지정하여 총 100초 동안의 단위시간(1초)당 데이터 전송량을 그래프로 표시한 것이다.

그림1을 살펴보면 1Mbps를 할당할 경우 실제 시스템의 응답이 평균 약 0.99Mbps의 응답을 보여준다. 그러나 5Mbps를 할당하였을 경우에는 평균 약 3.00Mbps의 응답을 나타내 실제 할당량과는 많은 차이를 보여준다. 이는 트래픽 제어시스템인 tc모듈의 경우 클래스(우선순위) 기반의 버퍼제어를 하기 때문에 이더넷(ethernet)망의 트래픽 부하에 따라 할당량의 상대적인 크기에 따라 우선순위를 조절하는 결과로 해석된다. 즉, 할당량이 1Mbps로 이더넷망의 최대부하인 10Mbps에 비해 상대적으로 적은 경우 거의 그대로 반영되



(그림 1) 대역폭 할당에 따른 응답 (실제 네트워크)

지만 5Mbps의 경우에는 상대적으로 커 할당량만큼 반영되지 못하고 있는 것을 결과는 보여준다.

또한 데이터 전송율의 변화폭이 거의 200Kbps에 달하고 있음을 알 수 있다. 이는 네트워크의 전송율이 매우 변동이 심한 동적인 시스템을 보여준다.

### 2.2 응답 특성의 모델링

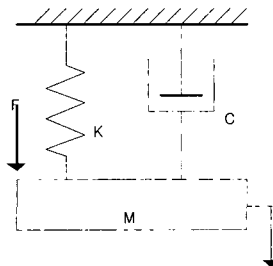
그림1에서 살펴본 바와 같이 대역폭 할당에 따른 네트워크의 응답특성이 동적인 시스템을 알 수 있다. 고전적인 제어시스템에서 사용되는 동적인 시스템은 그림 2와 같이 표현할 수 있다.

그림 2에서 외력  $F$ 가 질량  $M$ 에 작용하게 되면 세 가지 반작용이 발생한다. 먼저 질량이 움직인 변위  $x$ 에 비례하는 힘이 스프링( $K$ )에서 발생한다. 그리고 질량의 속도에 비례하는 힘이 댐퍼( $C$ )에서 발생하며, 마지막으로 가속도에 비례하는 힘이 질량( $M$ )에 발생한다.

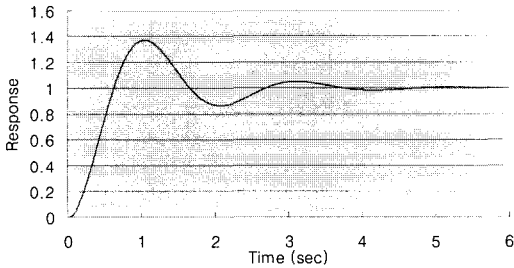
이를 뉴턴의 제3의 법칙인 작용 반작용의 법칙을 사용하여 정리하면 식1과 같이 2차 미분방정식으로 표현된다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = F(t) \quad (1)$$

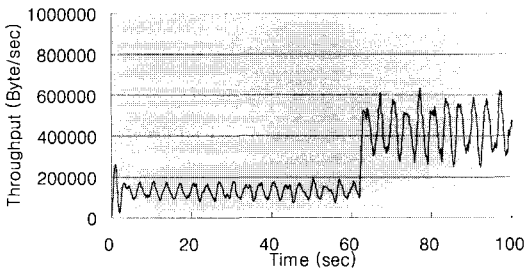
그림 2와 식 1은 “질량-스프링-댐퍼”라고 잘 알려져 있는 기계계이다. 질량의 움직임인  $x(t)$ 는 외력  $F$ 나 초기 조건  $x(0)$ 와  $\frac{dx(0)}{dt}$ 에 따라 변화한다.



(그림 2) 동적 시스템 모델



(그림 3) 단위 계단 응답



(그림 4) 대역폭 할당에 따른 모델의 응답

네트워크에서 대역폭의 할당은 그림2의 기계계에서 질량  $M$ 에 힘  $F$ 가 계단입력으로 작용하는 것과 유사하다. 만약 힘  $F$ 가 단위 계단 입력으로 작용하고 초기조건 정적인 상태( $x(0) = \frac{dx(0)}{dt} = 0$ )이면 식1의 미분방정식의 해를 오일러 방식에 의해 그림3과 같이 구할 수 있다.

그러나 그림 3의 결과에서는 실제 네트워크 상황에서 전송율을 측정된 결과인 그림1과 다른 형태를 보여주고 있음을 알 수 있다. 대체적인 추세는 일치하지만 그림1과 같은 동적인 변동을 나타내기 위해서는 식1에서 왜란(noise) 효과를 추가해야 한다.

그림 1에서 나타난 왜란이 어느 정도 주기적임을 알 수 있으므로 왜란을 주기함수로 적용하여 그림 1을 구한 것과 같은 조건으로 네트워크의 대역폭을 할당한 후 모델의 응답으로 구한 데이터 전송율은 그림 4와 같이 나타난다.

여기서 그림 1과 그림 4를 비교해보면 그 결과가 상당히 유사함을 알 수 있다. 즉, 네트워크의 대역폭 할당에 따른 응답 특성인 데이터 전송율

은 고전적인 동적 시스템 모델링으로 간단히 상사시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 이 모델을 사용하면 네트워크의 트래픽과 관련된 여러 기법을 다양한 조건으로 검토할 수 있다.

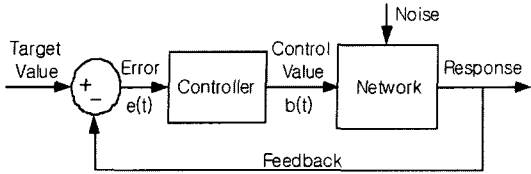
### 3. 네트워크의 피드백 제어 시스템 시뮬레이션

#### 3.1 피드백 제어 시스템의 설계

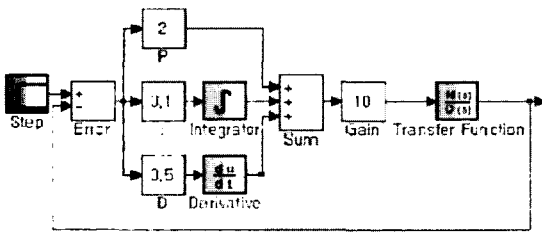
리눅스의 트래픽 제어 모듈인 tc를 사용하여 네트워크의 대역폭 할당에 의해서 QoS를 지원하는 메커니즘은 열린 루프 제어 시스템(open loop control system)이라고 볼 수 있다. 즉, 대역폭 할당 후 네트워크의 상황 변화에 대해서는 추가적으로 할당 값을 조절할 수 있는 기능은 없는 것이다. 이에 반하여 대역폭을 할당한 후 그 결과를 적극적으로 반영하는 메커니즘을 닫힌 루프 제어 시스템(closed loop control system)이라고 할 수 있으며 그 핵심은 응답 결과의 피드백(feedback) 구조에 있다.

네트워크 환경에 있어서 가장 일반적인 응답 상태 변수 즉 메트릭(metric)으로는 전송율(throughput), 지연시간(delay time), 응답시간(response time) 및 손실률(loss rate) 등이 있다. 본 연구에서는 제어를 수행하는 해당 시스템에서 가장 측정이 간편한 전송율을 유일한 피드백 상태 변수로 선택하였으며, 이에 따른 피드백 제어 시스템은 그림5와 같이 구성하였다.

본 연구에서 채택한 피드백 제어 시스템의 제어기 구조로는 고전적인 제어 시스템에서 가장 보편적으로 사용되는 PID 피드백 제어 방식을 선택하였다[5]. 여기서 P는 비례제어(proportional control), I는 적분(integrate control), D는 미분(derivative control)을 의미한다. 비례(P) 제어 부분의 역할은 목표값과 실제 값과의 차이인 오차에 비례하는 제어를 수행하며 가장 기본적인 제어량이다. 적분(I) 제어 부분의 역할은 비례제어를 수행할 때 발생



(그림 5) 피드백 제어 시스템



(그림 6) PID 피드백 제어 시스템 구조

할 수 있는 정상상태 오차를 제거하는 기능을 하며, 미분(D) 제어 부분은 잘 활용하면 예측 기능이 있어 응답속도를 빠르게 하는 역할을 한다. 하지만 잡음(왜란)이 있는 경우 도리어 안정성에 나쁜 영향을 미치기도 한다.

본 연구에서는 PID 제어기의 구성을 그림6과 같이 설계하고, 제어시스템 해석 도구인 CEMTOOL [6]로 각 제어기의 상수를 결정하였다.

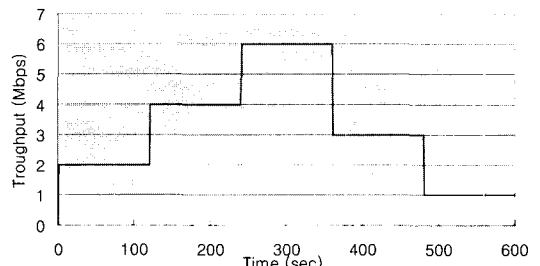
### 3.2 시뮬레이션

전체 시뮬레이션 시간은 600초로 설정하였으며, 매 120초마다 그림 7과 같이 대역폭 할당 값을 변화시켰다.

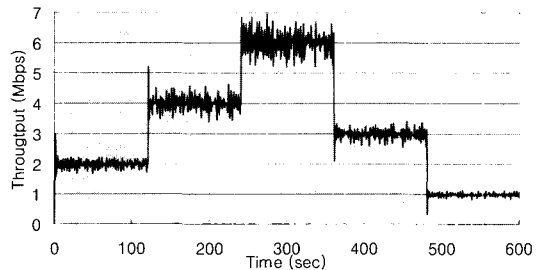
2.2절에서 제안한 동적 시스템 모델을 사용하여 그림 7의 조건하에서 네트워크의 응답을 구해 보면 그림 8과 같이 구해진다.

동일한 대역폭 할당 조건(그림 7) 하에서 실제 네트워크의 응답인 전송율을 측정해 보면 그림 9와 같은 결과를 얻을 수 있다.

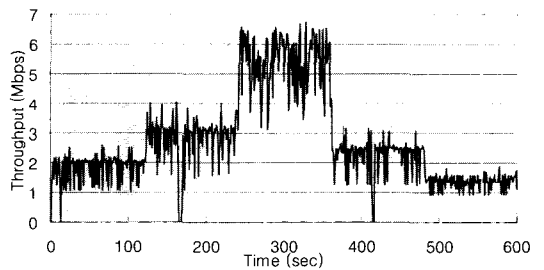
그림 8과 그림 9를 비교해 보면, 전체적인 경향은 비슷하나 평형 상태에서의 측정 데이터의 안정성면에서 크게 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 실제 네트워크의 대역폭 할당에 따른 응답인



(그림 7) 대역폭 할당 값



(그림 8) 동적 시스템 모델의 응답

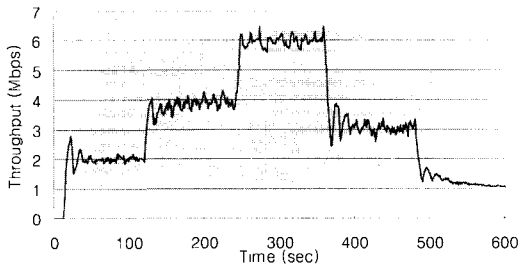


(그림 9) 실제 네트워크의 응답

측정된 전송율이 제안한 동적 시스템 모델의 응답보다 훨씬 불안정하다고 할 수 있다.

또한 대역폭 할당 값과 측정된 혹은 구해진 전송율 데이터와의 차이를 오차로 정의 하면, 대역폭 할당 값의 크기에 오차가 비례함을 알 수 있다. 그렇지만 제안한 모델이 실제 네트워크의 특성을 비교적 잘 구현한다고 할 수 있다.

그림 6과 같이 CEMTOOL에 의해 설계된 PID 피드백 제어 시스템을 본 연구에서 제안한 동적 시스템 모델에 적용시키고, 그림 7과 동일한 조건으로 시뮬레이션을 수행하여 얻은 결과가 그림 10과 같이 구해진다.



(그림 10) 피드백 제어시스템을 적용한 모델의 응답

그림 10을 살펴보면 피드백 제어 시스템이 없는 경우의 결과인 그림 8에 비해서 정상상태 오차가 많이 감소했음을 알 수 있으며 또한 오차의 크기가 대역폭 할당값과 관계없이 일정한 상태를 유지함을 알 수 있다. 그리고 피드백 제어 시스템에 의해 원하는 대역폭 할당값을 잘 유지하고 있어 제어기능이 잘 적용되고 있음을 알 수 있다.

그러나 제어기능의 수행은 상태변화가 훨씬 빈번해 졌음을 의미한다. 즉, 매 샘플링 시간마다 전송율을 측정하여 목표치와의 오차를 줄이기 위해 제어 시스템이 새로운 대역폭 할당을 수행해야 한다는 것으로 이는 시스템의 부하가 늘어난다는 것을 의미하므로 바람직하다고는 할 수 없다. 그러므로 이를 보완할 추가적인 연구가 필요하다고 하겠다.

#### 4. 결론

본 연구는 네트워크의 전송율 응답 특성을 구현하여 제어 시스템을 적용 가능하게 하는 동적 시스템 모델을 제안하였다. 그리고 네트워크의 QoS를 지원하기 위해 PID 피드백 제어 구조를 채택하였으며, 최종적으로는 PID 피드백 제어 시스템을 제안한 동적 시스템 모델에 적용하여 시뮬레이션을 통해 그 성능을 고찰하고자 하였다.

이를 위해 리눅스에서 제공하는 트래픽 제어 모듈인 tc를 사용하여 대역폭을 실제로 할당한 후 그 응답으로 전송율을 실시간으로 측정하였다. 그리고 이 결과를 그대로 재현할 수 있도록 동적

시스템 모델의 파라미터를 결정하였으며, 제어시스템 해석 도구인 CEMTOOL로 PID 제어 시스템을 설계하였다.

지속적이고 안정적인 QoS 지원을 위해 가장 전통적인 PID 제어기법을 네트워크의 트래픽 제어에 응용하기 위해 앞에서 구한 동적 시스템 모델을 대상으로 하여 시뮬레이션을 수행하여 트래픽 관리에 피드백 제어가 유용함을 알아보았다. 추후 이 제어기법을 실제 네트워크에 적용하여 그 결과를 비교 검토할 것이다.

그러나 실험에 사용한 방식이 TCP를 사용한 트래픽이기 때문에 전송율의 변화가 많았다고 추정하였으나 만약 UDP를 사용한 데이터 전송율의 경우에는 다른 결과가 예상된다. 그러므로 추후 모델링에 TCP/UDP 모두 지원하도록 모델을 확장할 필요가 있다.

TCP 트래픽의 경우 제어결과는 상당히 안정된 상태를 보이고 있어 피드백제어의 효과가 있음을 알 수 있으나 트래픽의 변동주기가 훨씬 높아지는 현상도 나타난다. 이는 실제로 제어신호의 발생횟수가 증가함을 의미하며 시스템의 부하가 증가한다는 것을 의미한다. 그러므로 PID 제어기법에 제어횟수를 감소시키는 기법의 연구가 필요하다고 판단된다.

그리고 차후 피드백 상태변수를 전송율뿐만 아니라 지연시간(응답시간)이나 손실률 등도 추가하여 연구를 진행할 계획이다.

#### 참고문헌

- [1] <http://www.ietf.org>, IETF Homepage
- [2] R. Barden, D. Clark, and S. Shenker, "Integrated Services in the Internet Architecture: An Overview," RFC 1633, June 1994.
- [3] S. Brake, et. al., "An Architecture for Differentiated Services," RFC 2475, Dec. 1998.
- [4] <http://snafu.freedom.org/linux2.2/iproute-notes.html>.
- [5] <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/PID/PID.html>.

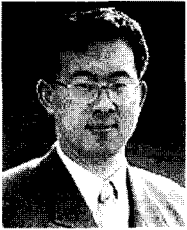
- [6] <http://www.cemtool.co.kr>.
- [7] A. Campbell, G. Coulson, D. Hutchison, "A Quality of Service Architecture," ACM Computer Communications Review, April 1994.
- [8] Lonnie R. Welch, Behrooz A. Shirazi, Binoy Ravindran and Carl Bruggeman, "DeSiDeRaTa: QoS MANAGEMENT TECHNOLOGY FOR DYNAMIC, SCALABLE, DEPENDABLE, REAL-TIME SYSTEMS," IFAC:7-11, 1998.
- [9] H.S. Hilier, G. J. Lieberman, Introduction to Operation Research 5th ed., McGraw-Hill, 1990.
- [10] John J. Kinney, Probability: An Introduction with Statistical Application, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [11] K. Ogata, Modern Control Engineering 3rd ed., Prentice-Hall, 1997.
- [12] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation," Proceeding of SIGCOMM '98, 1988.
- [13] J. Padhye, J. Kurose, D. Towsley, and R. Koodli, "TCP-Friendly Rate Adjustment Protocol for Continuous Media Flows over Best Effort Networks," UMASS CMPSCI Technical Report, 1999.
- [14] R. Brockett, "Stochastic control," Lecture Note, Harvard University.
- [15] C. V. Hollot, V. Misra, D. Towsley and W. Gong, "A control theoretic analysis of RED," Proceedings of IEEE INFOCOM'2001., Vol. 3, pp. 1510~1519.
- [16] C.V. Hollot, V. Misra, D. Towsley and W. Gong, "On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows," Proceedings of IEEE INFOCOM'2001., Vol. 3, pp. 1726--1734.
- [17] A. O'Dwyer, "PI and PID controller tuning rules for time delay process: a summary," Tech. Rep., AOD-00-01, Edition 1.
- [18] Jitendra Padhye, Victor Firoiu, "Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation," ACM SIGCOMM, 1988.
- [19] Srinivasan Keshav, "A Control-Theoretic Approach to Flow Control," Proceedings of the conference on Communications architecture & protocols, pp. 3~15, 1993.
- [20] S. Keshav, A.K. Agrawala and S. Singh, "Design and Analysis of a Flow Control for a Network of Rate Allocating Servers," Protocols for High Speed Networks II, Elsevier Science Publishers/ North-Holland, April 1991.
- [21] D.L. Jagerman, B. Melamed, and W. Willinger, "Stochastic modeling of traffic processes," Frontiers in Queuing: Models, methods and Problems, J. H. Dshalalow, Ed. 1996.

## ◎ 저 자 소개 ◎



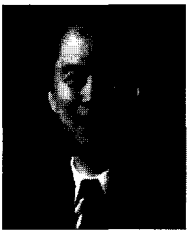
### 박 종 진

1984년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사)  
1986년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사)  
1999년 상명대학교 정보통신대학원 정보통신학과 졸업(석사)  
2002년 숭실대학교 대학원 컴퓨터학과 수료(박사과정)  
2003년~현재 : 한림정보산업대학 컴퓨터응용학과 초빙교수  
관심분야 : Mobile IP, IPv6, QoS, 이동통신, 성능분석  
E-mail : pj@jongjin.pe.kr



### 허 의 남

1990년 부산대학교 전산통계학과 졸업(학사)  
1995년 텍사스대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사)  
2002년 오하이오대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사)  
2003~현재 : 서울여자대학교 컴퓨터공학부 조교수  
관심분야 : 네트워크 QoS, 그리드, 유비쿼터스 컴퓨팅, 실시간, 분산 시스템 etc.  
E-mail : huh@swu.ac.kr



### 문 영 성

1983년 연세대학교 전자공학과 졸업(학사)  
1986년 알버타대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)  
1999년 텍사스대학교 대학원 컴퓨터학과 졸업(박사)  
1994년~현재 : 숭실대학교 컴퓨터학부 부교수  
관심분야 : Mobile IP, IPv6, GRID, QoS, 성능분석, 이동단말 인증, Honeypot  
E-mail : mun@computing.ssu.ac.kr