

# 경로 추정 기반의 지연시간을 고려한 저비용 유니캐스트 라우팅 알고리즘

## On Unicast Routing Algorithm Based on Estimated Path for Delay Constrained Least Cost

김 문 성\*  
Moonseong Kim

방 영 철\*\*  
Young-Cheol Bang

추 현 승\*\*\*  
Hyunseung Choo

### 요 약

특정 시간 내에 데이터 전송이 이루어져야 하는 실시간 멀티미디어 응용 서비스의 특성은 네트워크의 QoS(Quality of Service) 보장을 위한 중요한 요소이다. 종단간(End-to-End) 지연시간 제한 조건을 만족하면서 최소 비용을 갖는 (Delay Constrained Least Cost, DCLC) 경로를 찾는 문제는 이미 NP-hard 문제로 알려져 있다. DCLC 문제의 해법은 경로 지연시간과 비용간의 적절할 선택으로 해결해야 한다. 그러나 최적에 가까운 알고리즘으로 알려진 Salama의 DCUR 알고리즘(1)은 알고리즘의 단순성을 위하여 임의의 노드에서 경로 선정 시 목적 노드까지의 최소 비용 경로나 최소 지연시간 경로상의 다음 노드로만 제한을 하여 라우팅 경로의 비용측면에서 다소 비효율적이다. 일반적으로 최소 지연시간 경로의 비용은 최소 비용 경로의 비용보다 상대적으로 높은 경로 비용을 갖으며, 역으로 최소 비용 경로의 지연시간은 최소 지연시간 경로의 지연 시간보다 상대적으로 높은 지연시간을 갖는다. 본 논문에서는 이러한 점에 착안하여 DCLC문제를 해결하기 위해 확률적 추정 기법을 사용한다. 최근 발표한 독립적 두 변수간의 확률적 조합 알고리즘은 이러한 현상을 극복하기에 충분한 알고리즘이다(2). 따라서 확률적 새로운 변수에 기반한 경로 추정 기법을 사용하였으며, 그에 대한 성능평가를 하였다.

### Abstract

The development of efficient Quality of Service (QoS) routing algorithms in high speed networks is very difficult since divergent services require various quality conditions. If the QoS parameter we concern is to measure the delay on that link, then the routing algorithm obtains the Least Delay (LD) path. Meanwhile, if the parameter is to measure of the link cost, then it calculates the Least Cost (LC) path. The Delay Constrained Least Cost (DCLC) path problem of the mixed issues on LD and LC has been shown to be NP-hard. The path cost of LD path is relatively more expensive than that of LC path, and the path delay of LC path is relatively higher than that of LD path in DCLC problem. In this paper, we propose the algorithm based on estimated path for the DCLC problem and investigate its performance. It employs a new parameter which is probabilistic combination of cost and delay. We have performed empirical evaluation that compares our proposed algorithm with the DCUR in various network situations.

□ Keyword : Unicast Routing, Delay Constrained Least Cost (DCLC) Path Problem, and Delay Constrained Unicast Routing (DCUR) Algorithm

## 1. 서 론

멀티미디어 기술은 네트워크의 고속화와 더불어

어 수많은 인터넷 응용 기술들을 발생시킨다. 화상회의, 주문형 미디어 서비스, 인터넷 방송, 원격 쇼핑, 원격 교육등과 같은 멀티미디어 서비스가 보편화됨에 따라 실시간 멀티미디어 기술은 그 중요성이 매우 커져갔다. 멀티미디어 응용 서비스의 특정 시간 내에 데이터 전송이 이루어져야 하는 실시간 특성은 네트워크 QoS(Quality of Service) 보장을 위한 중요한 요소이다.

종단간(End-to-End) 지연시간 제한 조건을 만족

\* 정 회 원 : 성균관대 지능형HCI융합연구센터 연구원  
moonseong@ece.skku.ac.kr

\*\* 정 회 원 : 한국산업기술대학교 컴퓨터공학과 부교수  
ybang@kpu.ac.kr

\*\*\* 종신회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 부교수  
choo@ece.skku.ac.kr

[2006/08/09 투고 - 2006/09/01 심사 - 2006/09/26 심사완료]

하면서 최소 비용을 갖는(Delay Constrained Least Cost, DCLC) 경로를 찾는 문제는 이미 NP-hard[4] 문제로 알려져 있다. Salama가 제안한 DCUR 알고리즘[1]은 DCLC 문제의 해법으로 널리 알려진 알고리즘이다. 그러나 알고리즘의 단순성을 위하여 임의의 노드에서 경로 선정 시 목적 노드까지의 최소 비용 경로나 최소 지연시간 경로상의 다음 노드로만 제한을 하여 라우팅 경로의 비용 측면에서 다소 비효율적이다. 최근 본 저자가 소개한 링크 추정 기법의 알고리즘[3]은 링크의 지연시간과 비용을 확률적으로 균등하게 영향을 미칠 수 있도록 새로운 변수를 만들어 경로상의 링크 중 조화롭지 못한 링크를 추정하여 그 링크를 대체할 새로운 경로를 찾아 DCLC 문제의 해법을 선보였다.

본 논문에서는 이전 연구에서 더 나아가, 경로 추정 기법으로 확장하였고 이를 DCLC 문제의 해법으로 활용한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 네트워크의 모델 및 이전 알고리즘들에 대한 간단히 알아보고, 3장에서는 제안한 알고리즘에 대한 소개와 예를 기술한다. 4장에서는 시뮬레이션에 대한 설명과 그 결과에 대해 분석하고, 5장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

## 2. 관련연구

### 2.1 네트워크 모델

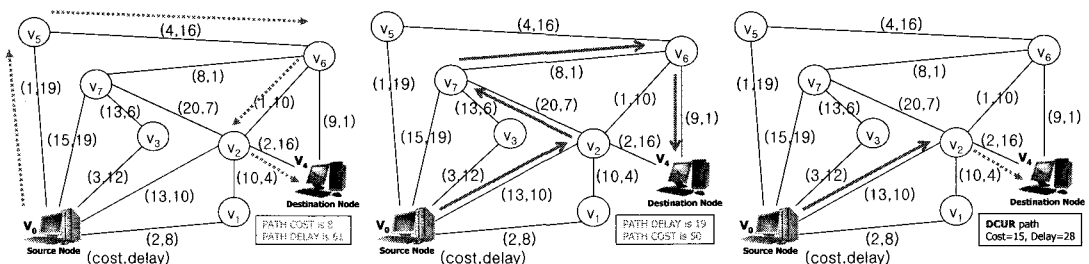
$n$ 개( $|V|$ )의 노드와  $l$ 개( $|E|$ )의 링크를 지닌 그래프  $G=(V, E)$ 에 의해 표현하는 네트워크를 생각한다. 각 링크  $e=(i, j) \in E$ 는 링크비용  $c(e)$ 와 지연시간  $d(e)$ 를 갖는다. 하나의 링크가 갖는 지연시간은 그 링크의 전송지연, 전파지연, 대기지연의 합이다. 노드  $i_0$ 에서  $i_k$ 까지 경로를  $P(i_0, i_k) = \{(i_0, i_1), (i_1, i_2), \dots, (i_{k-1}, i_k)\}$ 로 나타내자. 시작노드  $s$ 와 목적노드  $d$ 에서,  $(2^{s \rightarrow d}, \infty)$ 는  $s$ 에서  $d$ 까지 가능한 모든 경로들의 집합이다.

$(2^{s \rightarrow d}, \infty) = \{ P_a(s, d) \mid s \text{에서 } d \text{까지 가능한 모든 경로들, } \forall s, d \in V, \forall a \in \Lambda \}$

여기서  $\Lambda$ 는 첨자들의 집합(Index Set)이다. 우리는 경로 비용과 경로 지연함수를 다음과 같이 정의한다.

$$\Phi_C(P_a) = \sum_{e \in P_a} c(e), \Phi_D(P_a) = \sum_{e \in P_a} d(e)$$

여기서  $\forall P_a \in (2^{s \rightarrow d}, \infty)$ .  $(2^{s \rightarrow d}, \Delta)$ 는  $s$ 에서  $d$ 까지 종단간 지연시간이  $\Delta$  지연 제한을 만족하는 경로들의 집합이다. 따라서, 다음을 만족하는 경로  $P_k$ 를 찾았다면 DCLC문제를 해결하는 것이다.



(a) Unconstrained least cost path

(b) Least delay path

(c) DCUR path,

$\Delta : 29$

〈그림 1〉 경로 선택에 대한 여러 선행 알고리즘들

〈표 1〉 그림 2 예제의 결과 비교

| 가중치 $\omega$       | 각각의 $\omega$ 에 대한 $P(v_0, v_4)$                                  | $\phi_c$ | $\phi_D$ |
|--------------------|--|----------|----------|
| LD                 | $\{(v_0, v_2), (v_2, v_7), (v_7, v_6), (v_6, v_4)\}$             | 50       | 19       |
| 0.0                | $\{(v_0, v_1), (v_1, v_2), (v_2, v_7), (v_7, v_6), (v_6, v_4)\}$ | 49       | 21       |
| 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 | $\{(v_0, v_1), (v_1, v_2), (v_2, v_6), (v_6, v_4)\}$             | 22       | 23       |
| 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 | $\{(v_0, v_1), (v_1, v_2), (v_2, v_4)\}$                         | 14       | 28       |
| 0.9, 1.0           | $\{(v_0, v_5), (v_5, v_6), (v_6, v_2), (v_2, v_4)\}$             | 8        | 61       |
| LC                 | $\{(v_0, v_5), (v_5, v_6), (v_6, v_2), (v_2, v_4)\}$             | 8        | 61       |

$$\min\{\phi_C(p_k) \mid p_k \in (2^{s-d}, \Delta) \quad \forall k \in \Lambda\}$$

## 2.2 DCLC에 대한 선행 알고리즘들

그림 1은 시작노드  $v_0$ 와 목적노드  $v_4$ 에 대한 지연한계시간( $\Delta$ ) 29를 고려한 경로설정 예제이다. 그림 1의 (a)는 LC 경로로서 경로비용이 가장 우수하지만 지연한계시간  $\Delta = 29$ 를 만족 못한다. 그림 1의 (b)는 LD 경로로서 경로지연시간이 가장 우수하지만 경로비용이 매우 높다. 즉, 두 개의 예는 하나의 측도만을 고려하는 것이 DCLC 문제에 적합하지 않음을 보인다.

그림 1의 (c)는 DCUR 알고리즘을 보여준다. 먼저, 시작노드  $v_0$ 는 목적노드  $v_4$ 를 향해 LD 경로를 찾아 지연한계시간  $\Delta$ 의 조건을 만족하는지 판단 후, 만족하므로 LC 경로를 찾아 다음 노드의 후보  $v_5$ 를 선택한다. 또다시 노드  $v_5$ 에서 목적 노드  $v_4$ 를 향해 LD 경로를 찾아 지연시간이 잔여 지연시간의 조건을 만족하는지 판단 한다. 판단한 결과 적합하지 못함을 발견하고 노드  $v_0$ 에서 다음 노드의 후보로서 LC경로를 활용하지 않고 LD 경로를 활용하여 노드  $v_2$ 를 선택한다. 같은 방법으로 계속하여 다음 노드로  $v_4$ 를 선택하여 알고리즘을 완료한다.

## 2.3 가중치에 따른 경로 찾기 알고리즘

그림 1에 주어진 네트워크에서 시작노드  $v_0$ 와 목적노드  $v_4$  간의 통신 시 고려해야 할 인자는 링크비용과 지연시간 두 가지가 있다. 즉, 각각의 인자만을 고려하면, 최소비용경로  $P_{LC}$ 와 최소지연시간 경로  $P_{LD}$ 를 찾는다. 경로  $P_{LC}$ 는 높은 경로 지연시간을 갖고, 반대로 경로  $P_{LD}$ 는 높은 경로 비용을 갖는다. 단지, 링크비용이나 지연시간 하나만을 고려하여 경로를 구한다면 두 인자 중 하나로 치우친 결과를 얻는다. 따라서 두 인자의 trade-off는 필수이며 조율을 하여 상황에 맞는 결과를 얻어야 한다. 논문 [2]에서는 주어진 네트워크의 독립 변수 링크비용과 지연시간을 다음과 같이 확률적으로 조합하여 가중치( $\omega$ )에 따른 여러 경로를 그림 2처럼 찾는다. 그림 2의 링크에 표현된 숫자는 다음과 같은 새로운 변수

$$Cfct(w, e) = \max\left\{ 1, 1 + (c(e) - post_{LD}) \frac{w}{0.5} \right\}$$

$$Dfct(w, e) = \max\left\{ 1, 1 + (d(e) - post_{LC}) \frac{(1-w)}{0.5} \right\}$$

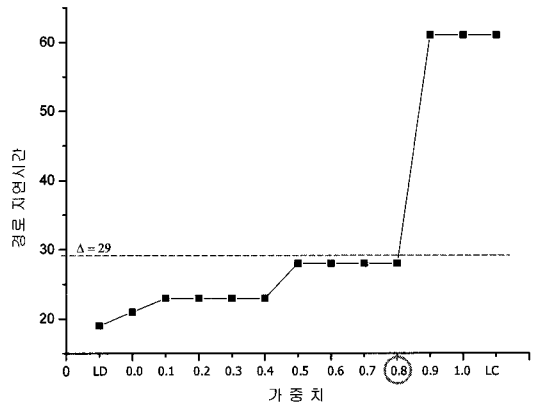
에 대한  $Cfct \times Dfct$ 을 의미하며 자세한 내용은 논문을 참고하기 바란다. 따라서 새로운 변수에 대한 최단경로알고리즘(Dijkstra's Algorithm[5])을 사용하면 표 1의 결과를 계산 할 수 있다.

$$\phi_C(P_{w=1.0}) \leq \phi_C(P_{w=0.7}) \leq \phi_C(P_{w=0.3}) \leq$$

$\Phi_C(P_{w=0.0}) \leq \Phi_C(P_{LD})$ 이며, 경로 지연시간은  $\Phi_D(P_{LD}) \leq \Phi_D(P_{w=0.0}) \leq \Phi_D(P_{w=0.3}) \leq \Phi_D(P_{w=0.7}) \leq \Phi_D(P_{w=1.0}) \leq \Phi_D(P_{LC})$ 이다. 따라서 가중치만으로도 시간복잡도가 높은 k차 최단경로 알고리즘과 유사함을 알 수 있다.

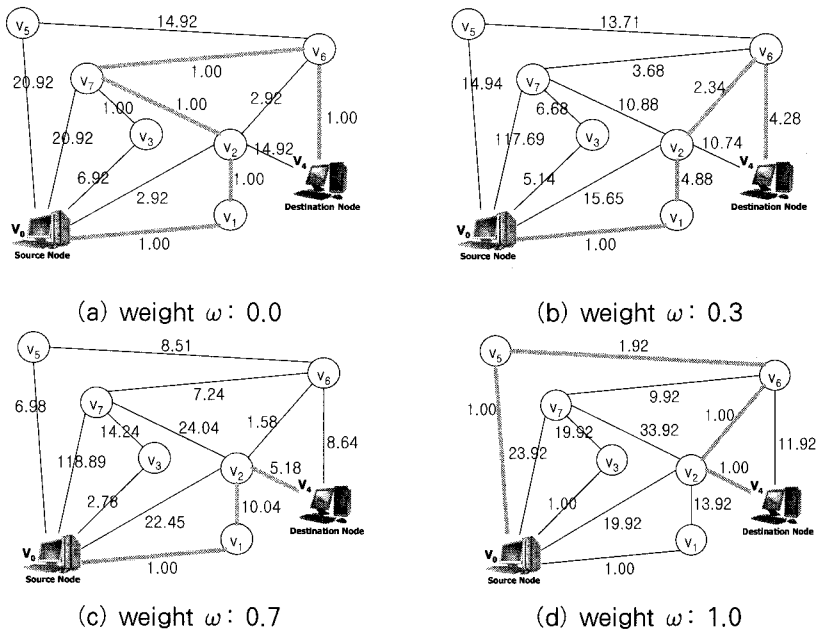
### 3. 경로 추정 기반의 제안 알고리즘

최근 본 저자가 소개한 링크 추정 기법의 알고리즘[3]은 2.3절에서 소개한 새로운 변수의 가중치  $\omega$ 가 0.5인 경우로 링크의 지연시간과 비용을 확실적으로 균등하게 영향을 미친다. 따라서 경로상의 링크 중 조화롭지 못한 링크를 추정하여 그 링크를 대체할 새로운 경로를 찾아 DCLC 문제의 해법을 선보였다. 본 방법은 링크를 추정하는 알고리즘이지만, 본 논문에서는 가중치의 변화로 다양한 경로를 추정한 뒤 제약된 지연시간을 적절하게 만족하며 최소의 경로비용을 갖는 경로를 선택하는 방법을 제안한다.



〈그림 3〉 적절한 가중치  $\omega$ 의 선택

제안하는 알고리즘을 간단한 예제로 설명하겠다. 만약 그림 1의 예제에서 지연시간한계  $\Delta$ 가 29로 주어지면, 일단 2.3절의 방법대로 각각의 가중치에 대하여 표 1을 구한다. 표 1을 그림 3으로 표현하고,  $\Delta$ 를 고려하여 살펴보면 적절한 가중치는 0.8보다 작은 모든 가중치이다. 그러나 이 중에서 0.8을 선택하는 이유는 새로이 변환한 측도



〈그림 2〉 각각의 가중치  $\omega$ 에 따른 여러 경로들

는 경로 지연시간 값이 증가하는 모습을 보이면, 반대로 경로 비용은 감소하는 경향[2]을 갖고 있기에 최대한 가장 큰 가중치 0.8을 선택하는 것이다. 그림 1의 (c)에서 DCUR의 경로 비용은 15인 반면, 제안한 알고리즘의 경로 비용은 14로 우수하다. 다음의 정리는 제안한 알고리즘이 항상 가중치  $\omega$ 를 찾을 수 있기에 알고리즘의 정확성 (correctness)에 대한 증명이다.

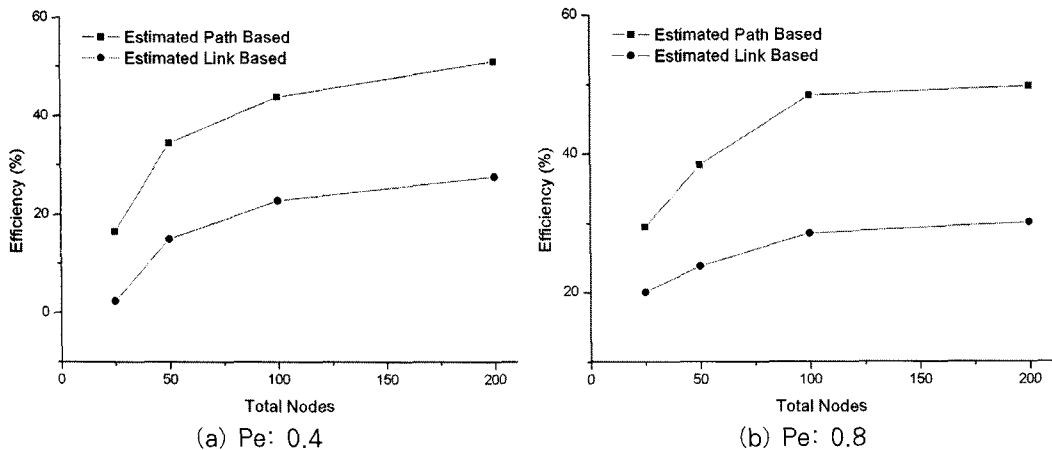
[정리]  
 임의의 네트워크  $G(V, E)$ 에 대해 시작노드  $s$ , 목적노드  $d$ 가 있다. 지연시간한계는  $\Delta$ 이다.  $\omega \in [0, 1]$ 에 대하여, 함수  $\psi$ 을 연속함수  $\psi(s, d, \omega) = \phi_D(P_\omega(s, d))$ 라 가정하자. 만약  $\phi_D(P(s, d)) \leq \Delta$ 을 만족하는 경로  $P$ 가 존재하면, 제안 알고리즘은  $\min\{\Delta - \psi(s, d, \omega), \text{non negative}\}$ 을 만족하는  $\omega$ 를 항상 찾는다.

[증명]  
 $\delta$ 를 상수함수  $\delta(\omega) = \Delta$ 로 정의하자. 그리고,  $\xi$ 를 연속함수  $\xi(\omega) = \delta(\omega) - \psi(s, d, \omega)$ 으로 정의하자. 첫째, 만약  $\psi$ 이  $\delta$ 과 평행하다면  $\xi$ 은 상수함수이다.

따라서,  $\xi$ 의 최소값은 항상 존재한다. 둘째, 만약  $\psi$ 이  $\delta$ 과 평행하지 않다면  $\xi$ 는 커브라 하자.  $\frac{d\xi}{d\omega}$ 를  $\xi'$ 라 정의하면,  $\xi'(\omega_\gamma - \epsilon) < 0 < \xi'(\omega_\gamma + \epsilon)$ 을 만족하는  $\omega_\gamma$ 가  $\epsilon > 0$ 에 대해 존재한다. 즉,  $\xi(\omega_\gamma)$ 는 커브에 대한 극소값이다.  $\omega_\alpha$ 를  $\min\{\xi(\omega_\gamma)\}$ 라 하면,  $\xi(\omega_\alpha)$ 는 함수  $\xi$ 에 대한 최소값이다. 따라서  $\omega$ 를  $\max\{\omega_\gamma\}$ 으로 취하면 우리의 알고리즘에 적합한  $\omega$ 이며 항상 존재한다.

#### 4. 성능평가와 분석

랜덤 네트워크 토폴로지(Real Random Network)는 두 노드사이에 링크가 존재할 확률  $P_e$ 를 변수로 사용하여 생성한다[6]. 제안한 경로추정 기반 알고리즘의 성능평가를 위해서 경로 추정과 링크 추정기반 알고리즘 그리고 DCUR 알고리즘은 C로 구현한다. 네트워크 전체 노드 수  $|V|$ 는 25, 50, 100 그리고 200개에서 링크 간 확률  $P_e$ 는 0.4, 0.8에 대해서 각각 10개의 서로 다른 네트워크를 생성한다. 소스노드와 목적노드는 균일분포로 선정 하며 각 네트워크에 대하여 100번의 시행, 총 1000번( $10 \times 100 = 1000$ )의 시뮬레이션



〈그림 4〉 DCUR 알고리즘과 경로비용 측면에서의 비교

을 한다. 지연시간 제한 조건( $\Delta$ )은 폐구간  $[\phi_D(P_{LD}), \phi_D(P_{LC})]$  에서 랜덤으로 선택한다. 더욱이 DCUR과의 비교를 위해 다음과 같은 Efficiency 함수를 사용한다.

$$\frac{\phi_C(P_{DCUR}) - \phi_C(P_{\text{비교대상 알고리즘}})}{\phi_C(P_{\text{비교대상 알고리즘}})}$$

또한, 평균 Efficiency  $\times 100$ 으로 하여, 백분율(%)로 계산을 한다. 그림 5를 보면, 200개의 노드에서는 무려 제안한 경로추정 기반의 방법이 51%까지 우세함을 볼 수 있다. 또한 네트워크의 노드 수가 증가함에 따라 그 값이 증가한다는 것을 흥미롭게 살펴 볼 수 있다.

## 5. 결 론

우리는 시작노드에서 목적노드까지 데이터를 전송할 때, 지연시간이 제한되어 있는(DCLC) 문제에 대해 연구했다. DCLC 경로를 찾는 문제는 이미 NP-hard 문제로 알려져 있으며, 본 논문에서는 DCLC문제에 접근하기 위해 링크비용과 지연시간을 확률적으로 조합한 인자를 사용하여 적합한 경로를 추정하는 알고리즘을 연구하였다. DCLC 문제의 해법으로 제안한 알고리즘은 최적에 가깝다는 DCUR 알고리즘과 비교하여 노드 수 200에서 최대 51%까지의 효과를 보았다. 또한 이 알고리즘을 멀티 캐스팅에 적용시키는 것은 향후 연구과제이다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. IITA-2006-(C1090-0603-0046).

교신저자 : 추현승

## 참 고 문 헌

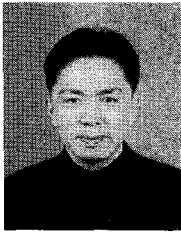
- [1] D. S. Reeves and H. F. Salama, "A distributed algorithm for delay-constrained unicast routing," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, pp. 239-250, April 2000.
- [2] M. Kim, Y.-C. Bang, and H. Choo, "On Algorithm for Efficiently Combining Two Independent Measures in Routing Paths," *Springer-Verlag Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3483, pp. 989-998, May 2005.
- [3] M. Kim, Y.-C. Bang, and H. Choo, "Estimated Link Selection for DCLC Problem," *IEEE International Conference on Communications 2004, Proc. ICC'04 vol. 4*, pp. 1937-1941, June 2004.
- [4] M. Garey and D. Johnson, *Computers and intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, New York: Freeman, 1979.
- [5] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269-271, 1959.
- [6] A. S. Rodionov and H. Choo, "On Generating Random Network Structures: Connected Graphs," *Springer-Verlag Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3090, pp. 483-491, August 2004.

## ● 저자 소개 ●



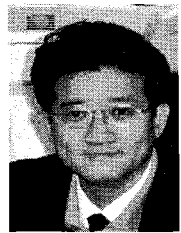
### 김 문 성 (Moonseong Kim)

1999년 건양대학교 수학과 졸업(학사)  
2001년 성균관대학교 수학과 졸업(석사)  
2006년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(박사)  
2002~2006 한국산업기술대학교 대학강사  
2004~2006 성균관대학교 대학강사  
2005년 한국전자통신연구원(ETRI) 위촉연구원  
2005~현재 정보통신부ITRC 지능형HCI융합연구센터 연구원  
관심분야 : 라우팅 프로토콜, 모바일컴퓨팅, 정보보호, 성능평가, 수치해석  
E-mail : moonseong@ece.skku.ac.kr



### 방 영 철 (Young-Cheol Bang)

1994년 University of Oklahoma 전산학과 졸업(학사)  
1997년 University of Oklahoma 대학원 전산학과 졸업(석사)  
2000년 University of Oklahoma 대학원 전산학과 졸업(박사)  
2000~2002년 한국전자통신연구원 선임연구원  
2002~현재 한국산업기술대학교 컴퓨터공학과 부교수  
관심분야 : 유/무선 라우팅 프로토콜, 홈네트워크, 멀티미디어 전송, 차세대 영상시스템  
E-mail : ybang@kpu.ac.kr



### 추 현 승 (Hyunseung Choo)

1988년 성균관대학교 수학과 졸업(학사)  
1990년 University of Texas 컴퓨터공학과 졸업(석사)  
1996년 University of Texas 컴퓨터공학과 졸업(박사)  
1997년 특허청 심사4국 컴퓨터심사담당관실(사무관)  
1998년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 부교수  
2001년~현재 한국인터넷정보학회/한국시뮬레이션학회 이사  
2004년~2006 대통령직속 교육혁신위원회 전문위원  
2004년~현재 한국인터넷정보학회 논문지편집위원장  
2005년~현재 건강보험심사평가원 전문위원  
2005년~현재 한국정보과학회 논문지편집위원  
2005년~현재 정보통신부ITRC 지능형HCI융합연구센터장  
관심분야 : 유/무선/광네트워킹, 모바일컴퓨팅, 임베디드SW, 그리드컴퓨팅  
E-mail : choo@ece.skku.ac.kr