

멀티미디어 CDMA에서 전송률 적응을 고려한 선택적 전력 제어 알고리즘

정회원 이재호*, 광경섭**

Selective Power Control considering Transmission Rate Adaptation for a Multimedia CDMA system

Jae-ho Lee*, Kyung-sup Kwak** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 이산적인 전송률 집합을 가진 실제 시스템에서 구현 가능한 가변 전송률 제어 및 전력 제어를 결합하는 알고리즘에 대하여 연구하였다. 이와 같은 연구는 문헌 [1]에서 선택적 전력 제어 (SPC)라는 알고리즘으로 제시되었지만, 사용자의 최소 전송률 보장과 신호대 간섭비의 변화에 따라 전송률 변화가 빈번하게 발생한다는 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 전송률 적응을 고려하여 기존의 선택적 전력 제어 방법의 문제점을 해결하기 위한 새로운 모델과 반복 연산 알고리즘을 제시하였다. 그리고, 수치 해석 및 모의 실험을 통해 보다 안정되고 낮은 전송 전력으로 향상된 효율을 가짐을 증명하였다.

ABSTRACT

In this paper, we studied on combining the control of transmission rates and power for the real system where a finite set of transmission rates are used. In [1], the combined control of transmission rates and power was first researched, and suggested the Selective Power Control (SPC) algorithm. However, it can't guarantee the minimum rate to each user and results in frequent changes of rate due to oscillation of the SIR (Signal to Interference Ratio) values. As a main purpose of this paper, we derive a formulation model and propose a distributed iteration algorithm to solve these problems. To evaluate the performance of the proposed algorithm, we carried out numerical analysis and computational experiments. The results indicate that the proposed algorithm achieves better throughput than conventional one by keeping the low average transmission power.

1. 서 론

현재의 CDMA 기반 셀룰러 시스템들은 음성 서비스에 기반을 두고 최적화되어 있다. 차세대 이동통신 시스템들은 다양한 전송률과 그에 따른 다양한 QoS(Quality Of Service) 사양을 가지는 멀티미디어 서비스들을 지원해야 한다. 이와 같은 서비스 환경하에서 효율적인 무선 자원 사용과 가변 전송률을 지원하기 위한 접근 방법으로는 전파 조건, 간

섭 상태, 트래픽/데이터 사양들에 따라 전송 전력과 전송률을 적응시키는 것이 요구된다^[1].

지금까지 전송률이 고정된 환경하에서 SIR (Signal to Interference ratio)을 제어하는 전력 제어 문제는 많은 문헌에서 연구되어 왔다^[10-14]. 또한, 최적의 전력 제어가 이루어진다는 가정하에서 가변 확산 이득 제어를 통한 전송률 제어에 관한 연구는 문헌 [6, 8, 9]등에서 제시되었다. 그러나, 가변 전송률과 전력을 동시에 결합하여 효율적으로 제어한 연구는 상대적으로 많은 진전이 이루어지지 않고

* 인하대학교 정보통신대학원 정보통신공학과 통신공학 연구실(navy010@dreamx.net),
논문번호 : 010331-1113, 접수일자 : 2001년 11월 13일

** 인하대학교 정보통신대학원

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-1999-00213) 지원으로 수행되었습니다.

있다. 해당 연구 문헌으로써 [2, 3, 4, 5]에서는 전체 전송된 전력합의 최소화와 전체 전송물의 합을 최대화하는 관점에서 수식 모델을 제시하고 분석하였다. 하지만 이러한 방법들은 수용 가능한 전송물들이 채널 상황에 따라 연속적으로 변하는 실수값을 가져야 되는 문제점을 가지므로 이산적인 전송물 집합을 가진 실제 시스템에서는 이와 같은 방법을 적용하여 최적 전송물 제어를 실현하기가 어렵다.

실제 시스템 (IS-95, W-CDMA 등)에서 수용 가능한 전송물은 제한된 개수의 이산적인 값들을 가진다^[7]. 그러므로 가변 전송물을 지원하는 멀티미디어 통신에서는 이산적인 가변 전송물과 전력 제어를 결합한 연구가 요구되고 있다. 이에 대한 연구로서는 분산 전력 제어 (Distributed Power Control)를 통해 전체 시스템 효율을 최대화도록 이산적으로 정해진 전송물을 선택하는 선택적 전력 제어 알고리즘이 [1]에서 제시되었다 (SPC: Selective Power Control). 하지만, 이 방법은 각 사용자가 전력 및 전송물 제어 기간에 시스템에서 정한 최소 목표 SIR값을 충족하기 위해 순간 최대 전력 이상이 요구되는 경우에는 통화가 없는 것으로 간주하고 전력을 할당하지 않아 각 사용자에게 최소한의 전송물을 보장하지 못한다. 또한 측정된 SIR 변화에 따라 전송물 변화가 빈번하게 발생하는 문제점들을 가진다.

본 논문에서는 [1]에서 제시한 선택적 전력 제어 알고리즘이 지니고 있는 문제점을 해결하고 최소의 전송 전력으로 전체 효율을 최대화하는 목적에 초점을 둔다. [1]과 달리 실제 시스템은 최악의 상황에서도 상향 링크에서 각 사용자가 셀 사이트와 동기를 유지하기 위해서 최소의 전력과 전송물을 보장해야 한다. 이러한 조건들을 기반으로 본 논문에서는 측정된 SIR과 현재 사용자의 전송물을 적용하는 방법을 적용한 개선된 선택적 전력 제어 알고리즘을 제안한다. 본 논문의 구성은 II절에서 제안된 방법을 설명하기 위한 시스템 모델이 제시되고 III절에서는 [1]에서 제시된 SPC 알고리즘을 설명한다. IV절에서는 본 논문에서 제안된 개선된 SPC의 수식 모델을 유도하고 반복 연산 알고리즘을 설명한다. V절에서는 가변 전송물과 목표 SIR 변화에 따른 전체 효율에 미치는 영향을 분석하고 제안된 방법의 성능 평가를 위해 수치 해석 및 모의 시험 환경을 제시하고 성능 분석 결과를 설명한다. 마지막

으로, VI절은 본 논문의 결과를 요약하고 차후 진행되어야 할 연구 과제를 제시한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 전체 A개의 셀 사이트에 N명의 사용자들이 존재하는 셀룰라 시스템에서의 상향 링크에 대해 고려한다. 물론, 하향 링크에서도 동일하게 적용이 가능하지만 멀티미디어 서비스하에서는 기지국과 통신하는 사용자들이 더욱 더 다양한 형태의 트래픽과 QoS 사양을 가지므로 하향 링크에서 보다 상향 링크에서의 전송물 및 전력 제어가 중요하기 때문이다. 시스템 모델을 표현하기 위한 파라미터들에 대한 설명은 그림 1과 같다.

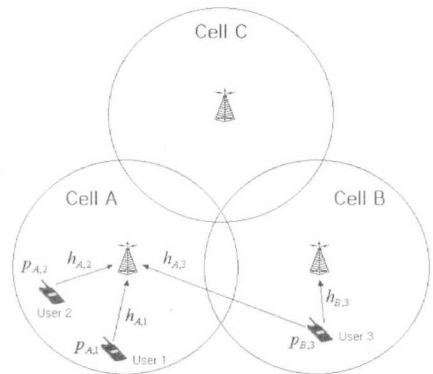


그림 1. 셀 모델

- $p_{a(i),i}^{(n)}$: 사용자 i 와 연결된 셀 사이트 $a(i)$ 에 전송된 전력, $1 \leq i \leq N$, $p_{\min} \leq p_{a(i),i} \leq p_{\max}$,
- n : 반복연산 번호
- $a(i)$: 사용자 i 가 연결된 셀 사이트
 $a(i) \in \{1, 2, \dots, A\}$
- $h_{a(i),i}^{(n)}$: 사용자 i 와 셀 사이트 $a(i)$ 사이의 링크 이득, $h_{a(i),i}^{(n)} > 0$
- $I_i^{(n)}$: 사용자 i 에 영향을 주는 총 간섭
(셀 간섭, 동일 셀 간섭, 배경 잡음)
- η_i : 셀 사이트 $a(i)$ 에서의 배경 잡음 전력 ($\eta_i > 0$)
- W : 전체 대역폭
- $R_i^{(n)}$: 사용자 i 의 n 번째 전송 데이터율
- $\gamma_i^{(n)}$: 사용자 i 의 n 번째 측정된 SIR

모든 사용자의 칩 속도는 고정되어 있고 전체 대

역폭 W 는 모든 사용자들에 의해 공유된다. 각 사용자는 정확하게 해당 셀 사이트와 동기가 성립되고 링크 이득 $h_{a(d),i}^{(n)}$ 은 주어진 짧은 전력 측정 시간에 안정(stationary)된다고 가정한다. DS-CDMA 시스템에서는 많은 사용자들이 동일 주파수 채널을 통하여 동일한 셀 사이트와 통신할 수 있으므로, 만약 사용자 i 와 j 가 동일한 셀 사이트에 연결된다면 동일한 물리적 채널을 공유할 수도 있다.

다양한 멀티미디어 서비스를 지원하기 위해서는 다양한 전송 테이아웃을 지원해야 하므로 사용자 i 가 이용할 수 있는 데이터율은

$R_{\min} < R_i^{(1)} < R_i^{(2)} < \dots < R_i^{(K)}$ 이다. 또한 데이터율 $R_i^{(k)}$ 에 대응되어 최소한으로 보장되어야 하는 목표 Eb/Io는 $0 < \Gamma_i^{T(1)} < \Gamma_i^{T(2)} < \dots < \Gamma_i^{T(K)}$ 이다. 실제 시스템과 동일한 적응을 위해 전송률은 확산 이득 ($WR_i^{(k)}$: Processing gain)에 따라 K 개의 이산적인 값들을 가진다.

사용자 i 의 n 번째 전력 제어 연산에서 측정된 SIR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_i^{(n)} = \frac{p_{a(d),i}^{(n)} h_{a(d),i}^{(n)}}{\sum_{j=1}^N p_{a(d),j}^{(n)} h_{a(d),j}^{(n)} + \eta_i}, \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

식 (1)에서 확산 이득을 고려하면 사용자 i 의 n 번째 전력 제어 연산에서 측정된 Eb/Io에 대한 QoS 조건은 다음과 같다.

$$\Gamma_i^{(n)} = \frac{W}{R_i^{(n)}} \frac{p_{a(d),i}^{(n)} h_{a(d),i}^{(n)}}{\sum_{j=1}^N p_{a(d),j}^{(n)} h_{a(d),j}^{(n)} + \eta_i} \geq \Gamma_i^{T(n)} \quad (2)$$

또한, 최적 조건에 충족되기 위한 전력 제어 및 전송률 조건은 다음과 같다.

$$p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max}, \\ R_{\min} \leq R_i \leq R_i^{(K)}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

식 (2), (3)조건에 충족하는 최적의 p_i 와 R_i 를 결정하는 것이 가변 전송률을 지원하는 전력 제어 문제에서 해결해야 될 과제이다. 즉, 임의의 순간에 모든 사용자들의 전송률을 최대화(효율 최대화)할 수 있는 최소의 전력을 구하는 것이다. 본 논문에서는 최소의 전력 할당을 통한 전송률 최대화와 사용자의 최소 전송률 보장에 초점을 둔다.

III. 선택적 전력 제어 알고리즘

[2]에 제시된 고정된 전송률에 대한 전력 제어 알고리즘을 이산적인 가변 전송률에 대해서 고려하여 최소 에너지 소비를 가지고 실제 전송률들의 합을 최대화하도록 하는 SPC 알고리즘을 [1]에서 수정하여 제안하였다.

임의의 수용 가능한 전력 벡터 $P(n)$ 에서 사용자 i 에 의해 사용되는 다음 전송 전력은 다음과 같이 계산된다.

$$p_i^{(n+1)} = \max_k \left\{ \frac{p_i^{(n)} \gamma_i^{T(k)}}{\gamma_i^{(n)}} \cdot \chi \left(\frac{p_i^{(n)} \gamma_i^{T(k)}}{\gamma_i^{(n)}} \leq p_{\max} \right) \right\}, \\ k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

여기에서 $\chi(E)$ 는 E 의 지시 함수이다.

현재 시점의 전력 레벨에서 다른 사용자들의 전력은 변하지 않는다고 가정하고 사용자 i 가 수용할 수 있는 전송률 범위내의 전력으로 다음 전력을 갱신한다. 그리고, 각 갱신 연산에서 최대 수용할 수 있는 전송률이 할당된다. n 번째 연산에서 사용자 i 가 다음 전송시 실제 전송 가능한 데이터율, $R_i^{(n+1)} = R_i^{k^*}$ 인 k^* 는 다음과 같이 계산된다.

$$k^* \stackrel{\text{def}}{=} \max \{ k : SIR_i(P(n)) \geq \gamma_i^{T(k)} \} \quad (5)$$

그러나, 전력 갱신 범위 ($0 \leq p_i^{(n+1)} \leq p_{\max}$)를 벗어난 경우에는 전송 전력을 할당하지 않으므로 $R_i^{(n+1)} = 0$ 이 되어 사용자의 최소 전송률 (R_{\min})을 보장하지 않는 문제점을 갖는다.

IV. 전송률 적응을 고려한 제안된 선택적 전력 제어 알고리즘

고정 전송률에 대한 전력 제어 문제와 달리 가변 전송률을 가지는 전력 제어 문제에서는 다른 최적화 조건을 가진다. 일반적인 분산 전력 제어 문제에서의 최적화 조건은 다음과 같다.

- 전송된 전력 합의 최소화
- 각 사용자가 요구하는 최소한의 QoS 조건을 충족 이하는 달리 가변 전송률에 대한 최적화 문제에서의 제약 조건들은 다음과 같다^[3].

$$\text{Maximize}_{P, R} \sum_{i=1}^N R_i \quad (6)$$

subject to:

$$\frac{W}{R_i^{(k)}} \sum_{j \neq i}^N p_j h_{a(i),j} \geq \Gamma_i^{T(k)}, \quad (7)$$

$$\Gamma_i^{T(k)} \in \{\Gamma^{T(1)}, \dots, \Gamma^{T(K)}\}, R_i^{T(k)} \in \{R^{(1)}, \dots, R^{(K)}\}$$

$$, i = 1, 2, \dots, N, k = 1, \dots, K$$

$$p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max}, R_{\min} \leq R_i^{(k)} \leq R_{\max}, i = 1, 2, \dots, N$$

이러한 최적화 문제에서 최적해 존재 여부는 [1][3] 등의 여러 문헌에서 선형 또는 비선형 계획법등으로 증명되어 있다. 본 논문에서는 위의 최적 조건식 (6)(7)을 충족하고 최소의 전력 전송으로 최대 전송률을 실현하면서 기존 SPC의 문제점을 해결하는 알고리즘을 제시한다.

1. 전력 및 전송률 갱신 수식 유도

전력 및 전송률 갱신 알고리즘에 있어서 n 번째 연산에서 사용자 i 의 측정된 Eb/Io는 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma_i^{(n)} = \frac{W}{R_i^{(n)}} \frac{p_{a(i),i}^{(n)} h_{a(i),i}^{(n)}}{\sum_{j \neq i}^N p_{a(i),j}^{(n)} h_{a(i),j}^{(n)} + \eta_i} \quad (8)$$

$$= \frac{W}{R_i^{(n)}} \frac{p_{a(i),i}^{(n)}}{(\sum_{j \neq i}^N p_{a(i),j}^{(n)} h_{a(i),j}^{(n)} / h_{a(i),i}^{(n)}) + \eta_i / h_{a(i),i}^{(n)}}$$

사용자가 i 가 QoS를 유지하기 위한 조건은 앞서 제시한 식 (7)과 같이 n 번째 연산에서 최소한으로 요구되는 Eb/Io, $\Gamma_i^{T(n)}$ (n 번째 목표 Eb/Io)조건으로 표시된다.

$$\Gamma_i^{(n)} = \frac{W}{R_i^{(n)}} \frac{p_{a(i),i}^{(n)}}{\Gamma_i^{T(n)}} > \Gamma_i^{T(n)}$$

$$(여기서 \Gamma_i^{T(n)} = (\sum_{j \neq i}^N p_j^{(n)} h_{a(i),j}^{(n)} + \eta_i) / h_{a(i),i}^{(n)}) \quad (9)$$

$$p_{a(i),i}^{(n)} > \Gamma_i^{T(n)} \frac{R_i^{(n)}}{W} \Gamma_i^{(n)} \quad (10)$$

$\Gamma_i^{(n)}$ 은 n 번째 연산에서 사용자 i 가 전송시 영향을 받는 간섭의 합 (인접 셀 및 동일 셀 사용자들의 간섭, 배경 잡음의 합)으로 정의되고 식 (9)를 n 번째 측정된 전력에 관한 수식으로 변경하면 식 (10)과 같이 표현된다. 또한, 식 (10)을 이용해 $n+1$ 번째 연산에 해당되는 전력을 식 (11)과 같이 얻을 수 있다.

$$p_{a(i),i}^{(n+1)} > \Gamma_i^{T(n+1)} \frac{R_i^{(n+1)}}{W} \Gamma_i^{(n+1)} \quad (11)$$

n 번째 연산에서 측정된 전력과 $n+1$ 째 전력의 비는 $p_{a(i),i}^{(n+1)} \geq p_{a(i),i}^{(n)}$ 인 가정하에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{p_{a(i),i}^{(n+1)}}{p_{a(i),i}^{(n)}} > \frac{\Gamma_i^{T(n+1)} \frac{R_i^{(n+1)}}{W} \Gamma_i^{(n+1)}}{\Gamma_i^{T(n)} \frac{R_i^{(n)}}{W} \Gamma_i^{(n)}} \quad (12)$$

식 (12)를 $n+1$ 번째 전력에 대한 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$p_{a(i),i}^{(n+1)} > \frac{\Gamma_i^{T(n+1)} R_i^{(n+1)} \Gamma_i^{(n+1)}}{\Gamma_i^{T(n)} R_i^{(n)} \Gamma_i^{(n)}} p_{a(i),i}^{(n)} \quad (13)$$

실제 시스템에서 전력 제어 단계는 일반적으로 짧은 시간 간격으로 이루어지므로, 전력 제어 간격하에서는 사용자와 셀 사이트 간에 수신된 총 간섭은 동일하다고 가정하면 $\Gamma_i^{(n+1)} \approx \Gamma_i^{(n)} = I$ 으로 정의될 수 있다.

그러므로, 식 (13)은 다음과 같이 변경될 수 있다.

$$p_{a(i),i}^{(n+1)} > \frac{\Gamma_i^{T(n+1)} R_i^{(n+1)}}{\Gamma_i^{T(n)} R_i^{(n)}} p_{a(i),i}^{(n)} \quad (14)$$

측정된 사용자 i 의 $\Gamma_i^{(n)}$ 이 식 (7)에서 제시한 QoS 제약 조건, $\Gamma_i^{(n)} > \Gamma_i^{T(n)}$ 을 만족한다면 $\Gamma_i^{T(n)}$ 대신에 $\Gamma_i^{(n)}$ 를 대입해도 식 (14)의 조건은 성립되므로 다음과 같이 표현 가능하다.

$$p_{a(i),i}^{(n+1)} > \frac{\Gamma_i^{T(n+1)} R_i^{(n+1)}}{\Gamma_i^{(n)} R_i^{(n)}} p_{a(i),i}^{(n)} \quad (15)$$

또한, $\Gamma_i^{T(n+1)} = \frac{W}{R_i^k} \gamma_i^{T(n+1)}$ (R_i^k : 미리 결정된 이산적 전송률)에서 확산 이득은 $\frac{W}{R_i^k} \geq 1$ 조건을 가지므로 $\Gamma_i^{T(n+1)} > \gamma_i^{T(n+1)}$ 과 $\Gamma_i^{(n)} > \gamma_i^{(n)}$ 이 되고 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\Gamma_i^{T(n+1)} \approx c_1 \gamma_i^{T(n+1)} \quad (16)$$

$$\Gamma_i^{(n)} \approx c_2 \gamma_i^{(n)} \quad (17)$$

(여기서 c_1, c_2 는 임의 상수)

그러므로 식 (16)(17)을 식 (15)에 적용하면 최종적으로 다음과 같이 표현된다.

$$p_{a(i),i}^{(n+1)} > \frac{c_1}{c_2} \frac{\gamma_i^{T(n+1)} R_i^{(n+1)}}{\gamma_i^{(n)} R_i^{(n)}} p_{a(i),i}^{(n)}$$

$$\approx \frac{\gamma_i^{T(n+1)} R_i^{(n+1)}}{\gamma_i^{(n)} R_i^{(n)}} p_{a(i),i}^{(n)} \quad (18)$$

식 (18)은 사용자 i 가 n 번째 전송한 전력 $p_i^{(n)}$ 셀 사이트에서 측정된 SIR $\gamma_i^{(n)}$, 측정된 전송률 $R_i^{(n)}$ 이 주어지면 $p_{a(i),i}^{(n+1)}$, $R_i^{(n+1)}$ 를 구할 수 있는 식이 된다. 즉, 목표 SIR $\gamma_i^{T(n+1)}$ 은 미리 정의된 이산적 전송률 집합에서 특정 전송률 $R_i^{(k)}$ 에 대응되는 값이므로 $p_{a(i),i}^{(n+1)}$ 과 $R_i^{(n+1)}$ 관계에 따른 QoS 제약 (7)을 충족하는 반복 연산 수식이 된다.

2. 제안된 선택적 전력 제어 알고리즘의 반복 연산 알고리즘

1절에서 유도한 갱신 수식을 바탕으로 최적화 조건식 (6)과 (7)을 충족하는 반복 연산 알고리즘은 다음과 같다.

단계 0: 초기화

- 연산 번호 $n=1$ 로 설정

단계 1: 갱신 수행

n 번째 전송률과 SIR, 전송 전력 측정

$$- p_i^{(n+1)} = \max_{k^*} \left\{ \frac{\gamma_i^{T(k)} R_i^{(k)}}{\gamma_i^{(n)} R_i^{(n)}} p_{a(i),i}^{(n)} \cdot \chi \left(\frac{\gamma_i^{T(k)} R_i^{(k)}}{\gamma_i^{(n)} R_i^{(n)}} p_{a(i),i}^{(n)} \leq p_{\max} \right) \right\}$$

, 여기서 $R_i^k \in \{R^{(1)}, R^{(2)}, \dots, R^{(K)}\}$
 , $k=1, 2, \dots, K$
 , $\gamma_i^{T(k)} \in \{\gamma^{T(1)}, \gamma^{T(2)}, \dots, \gamma^{T(K)}\}$ (19)

$$- \text{IF } p_i^{(n+1)} \neq 0 \quad \text{THEN } R_i^{(n+1)} = R_i^{k^*}$$

GOTO 단계 2

$$\text{ELSEIF } p_i^{(n+1)} = 0 \quad \text{THEN}$$

$p_i^{(n+1)} = p_{\min}$
 $R_i^{(n+1)} = R_{\min}$
 GOTO 단계 2

단계 2: 종료 조건 판별

$$- \text{IF } n = \text{종료 연산수} \quad \text{THEN } \text{END}$$

ELSE $n = n + 1$ GOTO 단계 1

단계 1에서 식(19)는 앞서 유도된 식 (18)을 적용하였고, 실제 시스템에서 존재하는 최대 전송 전력 제한의 제약 조건을 고려하였다^[13]. 최대 K 개의 이산적인 전송률들과 그에 대응되는 목표 SIR값들 중에 식(19)조건을 만족하는 k^* 를 결정하므로써 다음 전송에 사용될 전력 및 전송률을 결정할 수 있다.

III절에서 설명한 기존의 SPC는 측정된 SIR만 고려하여 연산을 수행하므로 SIR 변화에 따라 전송률 변화가 빈번하게 증감하고 그로 인해 수렴되는 SIR이 불규칙 편차를 가지는 악순환에 의하여 시스템 효율이 감소한다. 반면에, 본 논문에서 제안된 방법은 측정된 SIR 뿐만 아니라 전송률 변화에 따라 목표 QoS와 다음 전송률을 적응시킴으로써 기존 SPC가 갖는 문제점을 해결하고 시스템 효율을 향상시킨다. 그리고 기존의 SPC 알고리즘은 최대 전력이 할당되면 전송 전력과 전송률을 '0'으로 설정하여 전송이 없는 것으로 처리하였지만 제안한 SPC 방법은 단계 1과 같이 최악의 조건에서도 동기 유지를 위해 최소 전송률과 전력을 할당함으로써 각 사용자의 최소한의 전송률 유지를 보장한다. 위에서 설명한 모든 기능들은 최적화 문제 조건식 (7)을 만족하면서 반복 연산이 수행된다. 이에 대한 성능은 V절에서 분석 및 모의 실험을 통해 증명된다.

V. 수치 해석 및 모의 실험

먼저, 결합된 가변 전송률과 전력 제어에 관련된 신호대 간섭 (또는 Eb/Io)가 시스템 효율에 미치는 영향을 분석하고 모의 실험 환경을 통해서 [1]에서 제시된 SPC와 제안된 SPC의 성능 비교 분석을 수행한다.

1. 전송률과 SIR에 관련된 시스템 효율 수치 해석

IV절에서 제안한 개선된 SPC 모델에서 가변 전송률과 신호대 간섭비가 전체 시스템 효율에 미치는 영향을 분석하기 위해 참고 문헌 [6]에서 제시한 다음의 수식 모델을 적용하고 3절의 성능 분석에서 이를 고려하였다. 일반적으로 고정된 대역폭 (W)상에서 전송률과 확산 이득 (G)은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$R_i \propto \frac{1}{G_i} = \frac{R_i}{W}, \quad G_i = \frac{W}{R_i} \geq 1 \quad (20)$$

그러므로 전송률과 역확산 후의 신호대 간섭비 (Eb/Io)를 고려한 사용자 i 의 효율은 다음과 같이 표현된다.

$$T_i = \frac{R_i}{W} (1 - f(Eb/Io_i))^L \quad (21)$$

, $L = \text{Block length(Frame)}$, $f(x) = Q(\sqrt{x})$

$f(x)$ 는 사용자 i 의 측정된 E_b/I_0 에 대한 비트당 에러율 (BER)에 관련된 함수이다. 본 논문에서는 BPSK 변조 방식을 사용하는 부가 백색 잡음 채널 상에 대응되는 함수로 정의한다. 즉 식 (21)은 사용자 i 가 L 블록 또는 프레임 전송시 측정된 전송률과 E_b/I_0 에 대한 비트당 에러율에 대한 함수로서 사용자 효율 (T_i)을 정의한다. 전송 블록 $L=100$ 이라고 가정하고 다양한 R_i/W 와 E_b/I_0 에 대한 수치 해석 결과는 그림 1-a,b에 나타냈었다. 그림 2-a에서 효율은 각각의 할당된 R_i/W 값이 증가할수록 특정 E_b/I_0 값까지는 향상되다가 일정한 효율로 수렴됨을 알 수 있다. 또한 그림 2-b에서는 할당된 E_b/I_0 값들이 높을수록 R_i/W 값에 따라 효율이 향상되지만 특정 R_i/W 값을 지나면 오히려 효율이 감소됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 보이는 이유는 요구되는 목표 E_b/I_0 값들에 따라 최적 전송률을 초과하는 경우에는 시스템 용량 ($R_i/W \leq 1$)이 한정되어 있으므로 다른 사용자의 간섭 및 누설 확률이 오히려 증가되기 때문이다.

이에 따라 측정된 E_b/I_0 와 전송률에 따라 시스템 효율을 최적화하기 위해 최적 전송률과 그에 따른 목표 E_b/I_0 할당이 동적으로 이루어져야 함을 알 수 있다. 그러므로 다양한 서비스들을 요구하는 멀티미디어 환경하에서는 가변 전송률과 SIR을 제어하는 전력 제어가 성능 향상을 위해 요구됨을 알 수 있다.

2. 모의 실험 환경

기존의 SPC와 본 논문에서 제안된 SPC간에 성능 비교를 위해 [1]에서 수행한 동일한 모의 실험 환경을 고려한다. W-CDMA 시스템하에서 16개 (4x4)의 이상적인 사각형 셀 구성을 가정하였으며, 기지국은 각 셀의 중앙에 위치한다. 기지국 간의 거리는 1km로 구성되고 임의의 전력 제어 측정 시점에서 각 사용자는 전체 16개 셀상에서 균일 분포로 생성되어 위치된다.

상향 링크상에서 $R_i^{(k)} = R_{max} \frac{1}{2^{k-1}}$ Kbps, ($k=1,2,3,4$)인 4개의 이산적인 전송률들을 지원하고, 할당된 전송률 $R_i^{(k)}$ 에 대응되는 목표 SIR (또는 역 확산 전의 SIR)은 $\gamma_i^{(k)} = \gamma \frac{1}{2^{k-1}}$ 로 가정한다. γ 은 시스템의 트래픽 부하량 조건, 즉 light, medium, heavy 부하에 따라 각각 -14dB, -10dB, -6dB로 고려된다. 이러한 대응 관계로 인해 각 트래픽 부하량

표 1. 모의 실험 환경 파라미터

파라미터	값
총 셀수	16
기지국 간의 거리	1000 m
총 사용자 수	190
전송률 집합	60,120,240,480 Kbps
동기 유지를 위한 최소 전송률(Rmin)	30Kbps
최대 전송률(Rmax)	480Kbps
트래픽 부하(load)에 따른 목표 SIR	light load = -14dB medium load = -10dB heavy load = -6dB
채널 페이딩	lognormal 분포 평균 : 0dB, 표준 편차 : 6dB
경로 손실 factor	4
칩 레이트	3.84Mcps
최대 전송 전력(Pmax)	40dBm
최소 전송 파워(Pmin)	-30dBm
기지국 배경 잡음	-150dBm

에서 전송률에 상관없이 목표 E_b/I_0 는 일정한 상수 값을 가지게 된다. 채널 이득은 $h_{ij} = s_{ij} \cdot d_{ij}^{-4}$ 으로써 s_{ij} 는 음영 페이딩 항목이고 d_{ij} 는 사용자 i 와 기지국 j 사이의 거리이다. s_{ij} 는 평균 0, 표준 편차가 6dB인 로그 노말 분포로서 각각의 사용자에게 대해 동일한 특성을 가진 독립적인 분포(i.i.d)로 가정한다. 또한 전송률 집합의 최소 전송률 (60Kbps)을 부여 받을 수 없는 사용자에게는 동기 유지를 위해 최소 전력 (P_{min})과 최소 전송률 (R_{min})을 할당하게 했다.

기존의 SPC와 제안된 SPC의 성능 분석 요소로는 누설 확률, 평균 전송 전력, 평균 전송률이고 이들의 성능을 측정하기 위해 1000번의 모의 실험을 수행하여 평균치를 그래프로 표시하였다. 각 모의 실험 시행의 초기에 사용자들의 위치 변화를 고려하기 위해 모든 사용자의 위치와 페이딩은 다시 생성하고 전력 제어 및 전송률 제어 수렴성을 위해 반복 연산은 30번씩 (일반적으로 전력 제어 알고리즘들은 30번 이내에 수렴함) 수행하였다.

3. 성능 분석 결과

기존 SPC와 제안된 SPC의 성능 분석을 위해 누설 확률 (outage probability), 평균 전송률, 평균 전송 전력, 시스템 효율 측면으로 2절에 제시한 모의 실험 환경하에서 결과를 도출하였다. 먼저, 그림 3

은 반복 연산 횟수에 대해 각 트래픽 상태에 따른 누설 확률을 비교한 결과이다. 본 논문에서 누설 확률은 요구되는 목표 E_b/I_0 , 즉 가장 트래픽 상태가 좋은 light load 상태에서 최소 요구되는 E_b/I_0 (-5dB)을 보장받지 못하는 사용자의 비율로 계산하였다. 누설 확률은 그림 3과 같이 두 방법 모두 3가지 트래픽 상태에서 유사한 성능을 가짐을 알 수 있고 반복 연산수가 10회 이전일때는 제안된 방법이 다소 높게 나타나지만 반복 연산 수가 높아질수록 제안된 방법의 누설 확률이 미세한 차이로 향상됨을 알 수 있다.

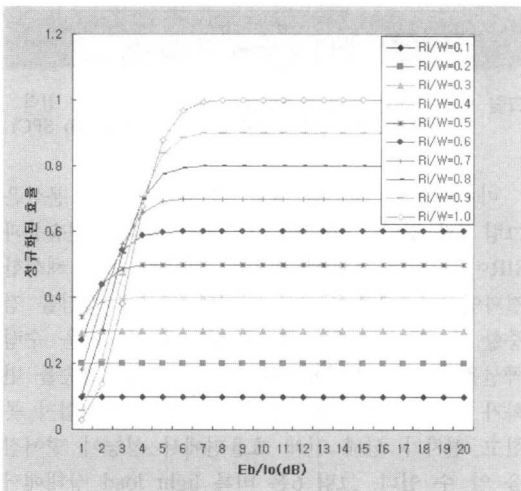


그림 2-a. 고정된 R_i/W 에 대한 E_b/I_0 변화에 따른 효율 분석

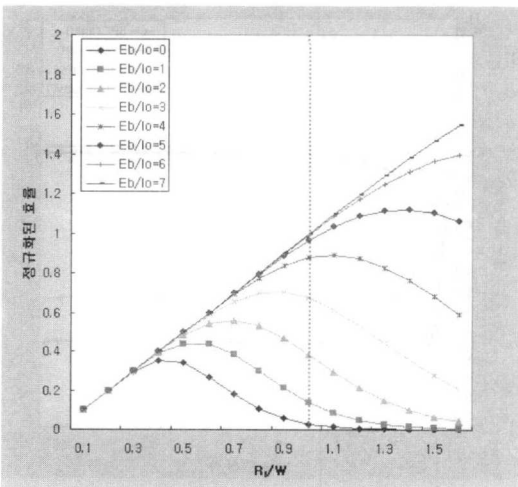


그림 2-b. 고정된 E_b/I_0 에 대한 R_i/W 변화에 따른 효율 분석

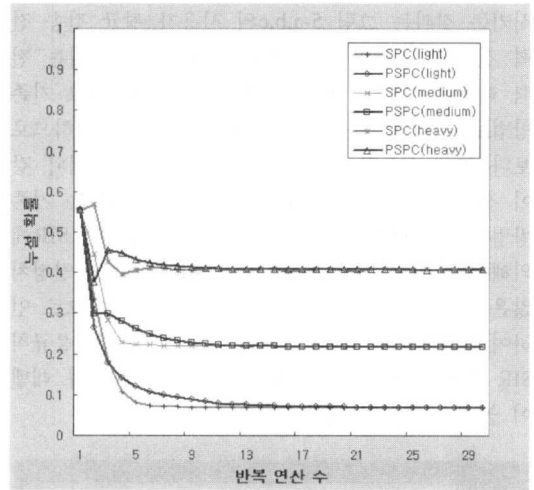


그림 3. 트래픽 상태(light,medium,heavy load)에 따른 누설 확률 (SPC: 기존 SPC, PSCP: 제안된(Proposed) SPC)

그림 4는 각 트래픽 상태에 따라 사용자 평균 전송률에 대한 결과를 나타낸다. light load 상태에서는 누설 확률과 마찬가지로 초기 반복 연산에서는 기존 방법의 성능이 다소 높지만 반복 연산 수 증가와 트래픽 상태가 심화(medium, heavy load) 될수록 제안된 방법의 전송률이 더 향상됨을 확인할 수 있다. 또한 기존 SPC 방법은 트래픽 상태가 심화될수록 수렴 곡선이 매끄럽지 못하고 수렴되는 편차가 제안된 방법보다 많이 발생한다.

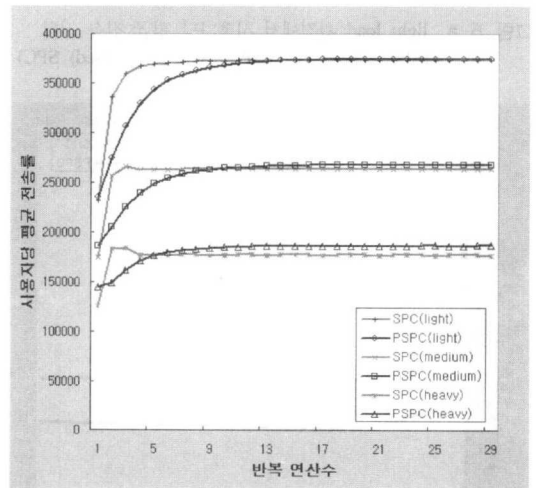


그림 4. 트래픽 상태(light,medium,heavy load)에 따른 사용자당 평균 전송률 (SPC: 기존 SPC, PSCP: 제안된(Proposed) SPC)

기존 SPC와 제안된 방법의 성능을 확연히 차별

시키는 결과는 그림 5-a,b,c의 사용자 평균 전송 전력 결과이다. 트래픽 조건에 상관없이 수렴되는 전력 레벨은 제안된 방법이 훨씬 낮게 나타나고 기존 방법보다 더욱 부드러운 수렴 곡선을 표시하므로 보다 높은 성능을 가짐을 확인할 수 있다. 이와 같이 전송 전력에서 확연히 차이가 나는 이유는 기존 방법은 Ⅲ절에서 언급한 것과 같이 측정된 SIR에 의해서만 전송률을 선택하므로 SIR 변화가 일정치 않은 경우 빈번한 전송률 변화를 가져오고 그로 인하여 그림 6과 같이 트래픽이 증가할수록 불규칙 SIR 수렴 편차를 가져 제안된 방법보다 수렴 레벨이 높게 나타나기 때문이다.

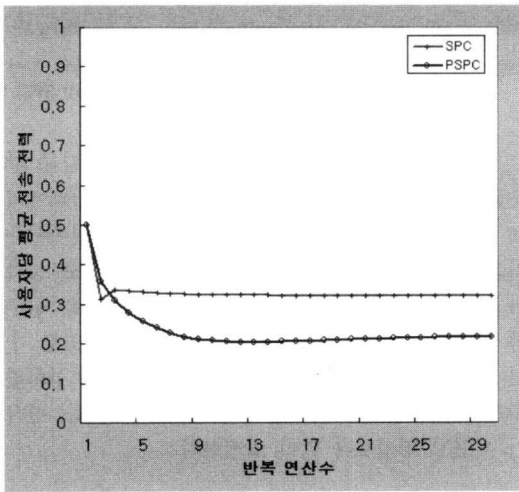


그림 5-a. light load 환경에서 사용자당 평균 전송 전력 (SPC: 기존 SPC, PSPC: 제안된(Proposed) SPC)

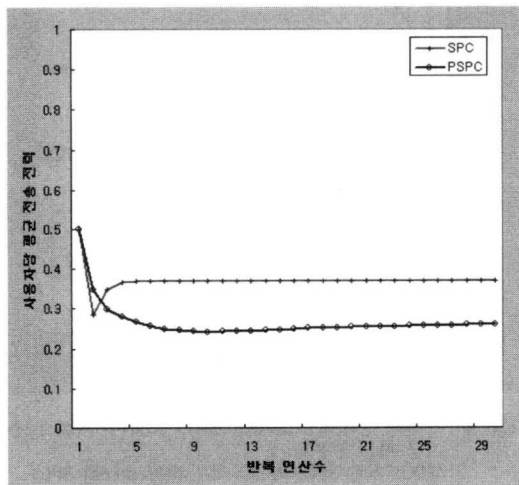


그림 5-b. medium load 환경에서 사용자당 평균 전송 전력 (SPC: 기존 SPC, PSPC: 제안된(Proposed) SPC)

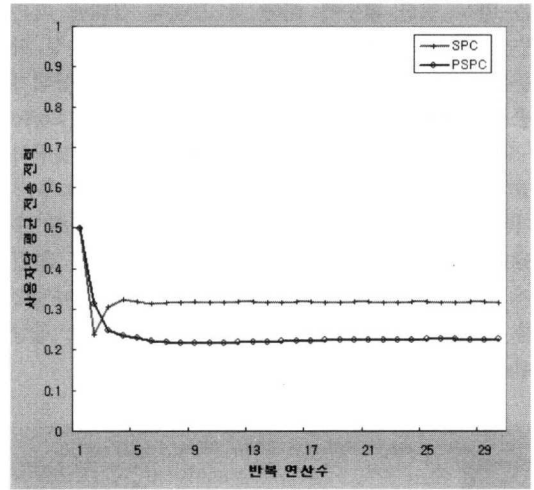


그림 5-c. heavy load 환경에서 사용자당 평균 전송 전력 (SPC: 기존 SPC, PSPC: 제안된(Proposed) SPC)

마지막으로, 시스템 효율 측면에서 성능 분석은 그림 7과 같다. 그림 7은 1절에서 설명한 전송률과 SIR이 시스템 효율에 미치는 영향을 수치 해석한 결과인 그림 2와 동일한 형태의 특성을 가짐을 검증할 수 있다. 또한 제안된 방법이 부드러운 수렴 곡선을 가지는 반면에 SIR 변화에 따른 전송률 변화가 민감한 기존 방법은 수렴 곡선이 매끄럽지 못하고 편차가 심해 전체 효율면에서 성능이 떨어짐을 알 수 있다. 그림 6은 비록 light load 상태에서만 표시했지만 트래픽 조건이 심화될수록 기존 SPC의 수렴되는 SIR 편차가 커지므로 더욱 성능의 차

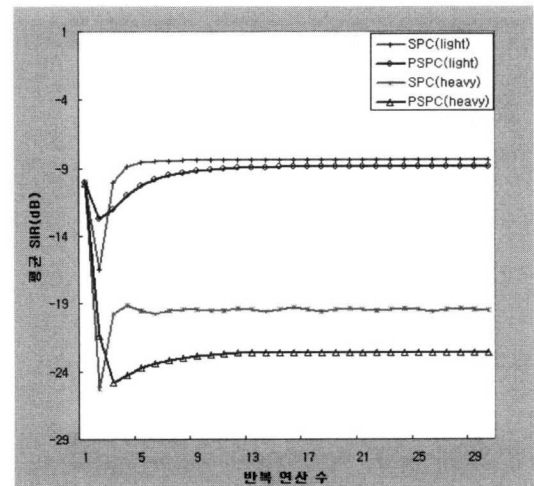


그림 6. 각 트래픽(light,heavy load)상태에 따른 시스템 평균 SIR 비교(SPC: 기존 SPC, PSPC: 제안된(Proposed) SPC)

이가 나타남을 충분히 예상할 수 있다.

위와 같은 성능 분석 결과에 의해 제안된 방법이 비록 누설 확률에서는 기존 방법과 유사한 성능을 가지지만 트래픽 조건이 심화될수록 평균 전송률 및 시스템 효율면에서 더욱 향상된 성능을 가짐을 알 수 있다. 특히, 기존 SPC의 문제점인 불규칙적인 SIR 변화에 따라 전송률이 빈번하게 변동되는 문제점을 해결하므로써 보다 낮은 전송 전력으로 보다 향상된 효율을 가져옴을 모의 실험을 통해 검증했다.

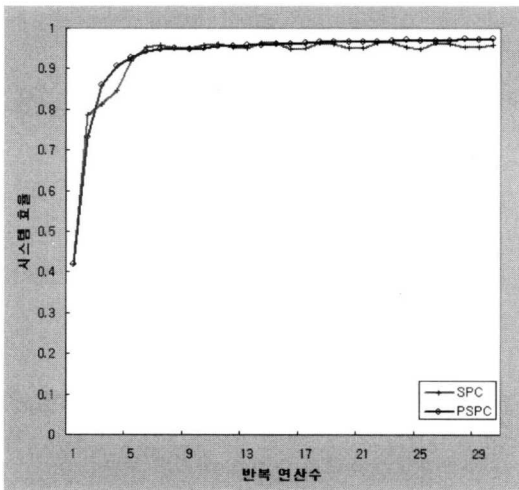


그림 7. light load 환경에서 시스템 효율 (SPC: 기존 SPC, PSPC: 제안된(Proposed) SPC)

VI. 결 론

본 논문에서는 가변 전송률을 지원하는 멀티미디어 CDMA 시스템 환경하에서 실제 시스템에 구현 가능한 이산적인 전송률과 전력 제어를 결합하여 최적의 전송률 제어 및 전력 제어 실현에 목적을 두었다. [1]에서 제시된 선택적 전력 제어 알고리즘은 불규칙적인 편차를 가지고 수렴되는 신호대 간섭비에 의해 전송률 변화가 민감하게 반응하는 문제와 최악의 조건에서 사용자의 최소 전송률을 보장하지 못하는 단점을 지니고 있다. 본 논문에서는 이산적인 전송률 적응을 고려하여 이러한 문제점을 해결하는 개선된 선택적 전력 알고리즘의 수식 모델과 반복 연산 방법을 제안했다. 그리고 수치 해석 및 모의 실험을 통해 다양한 기능을 분석한 결과 기존의 방법보다 안정되고 낮은 전력 소모로 보다 높은 시스템 효율을 얻을 수 있음을 증명하였다.

본 논문에서는 전력 갱신을 위한 연속된 반복 연산 기간을 짧은 기간으로 간주하고 각 연산에서의 총 간섭이 동일하다고 가정했지만, 실제 채널 환경이 급변하는 시스템에서는 적절치 못하므로 이를 보상하는 알고리즘 적용이 추후 연구 과제로 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] S.L.Kim and Jens Zander, "Combined Power Control and Transmission Rate Selection in Cellular Network," IEEE VTC., pp. 1653-1657, 1999.
- [2] X.Qiu and K.Chawia, "Throughput performance of adaptive modulation in cellular systems," Proc. IEEE ICUPC, pp. 945-950, 1998.
- [3] A.Sampath,P.J.M.Holtzman "Power Control and Resource Management for a Multimedia CDMA Wireless System," Proc. IEEE PIMRC, pp. 21-25, 1995.
- [4] C.W.Sung, "Power Control and Rate Management for Wireless Multimedia CDMA Systems," IEEE Trans. Comm., vol. 49, no.7, pp. 1215-1225, July 2001.
- [5] L.Song, N.B.Madayam, "Hierarchical SIR and Rate Control for CDMA Data Users on the Forward Link," IEEE, pp. 1514-1518, 2000.
- [6] S.Ulukus, L.J. Greenstein, "Throughput Maximization in CDMA Uplink Using Adaptive Spreading and Power Control," IEEE 6th Int. Symp. on Spread-Spectrum Tech., pp. 565-569, September 2000.
- [7] F.Adachi,M.Sawahashi, "Wideband DS-CDMA for next-generation mobile communications systems," IEEE Comm. Mag., vol.36, no.9, pp.56-69, September 1998.
- [8] Seong-Jun Oh, "Dynamic Spreading Gain Control in Multiservice CDMA Networks," IEEE Journal on Seleted Areas in Comm. vol. 17, no. 5, pp. 918-927. May 1999.
- [9] T.H.Lee, "Admission Control for Variable Spreading Gain CDMA Wireless Packet Networks," IEEE Trans. Comm., vol. 49, no.2, pp.565-575, March 2000.
- [10] Jens Zander, "Performance of optimum

transmitter power control in cellular radio systems," IEEE VTC., vol. 41, no. 1, pp. 57-62, 1992.

- [11] S.A. Grandhi, Jens Zander, "Centralized Power Control in Cellular Radio Systems," IEEE Trans. Comm., vol. 42, pp. 466-468, 1994.
- [12] N.Bamboos, G,J,Pottie, "On Power Control in High Capacity Cellular Radio Networks," Proc. 3rd WINLAB Workshop on 3G Wireless Information Networks, pp. 239-247, April 1992.
- [13] S.A. Gandhi,Jens Zander, "Constrained Power Control in Cellular Radio Systems," IEEE VTC., pp.824-828, 1994.
- [14] Roy D. Yates, "A Framework for Uplink Power Control in Cellular Radio Systems," IEEE Journal on Selected Areas in Comm., vol. 13, no. 7, pp. 1341-1347, Septemper 1995.

2000년 3월~2002년 2월 : 인하대학교 정보통신대학원 원장

2002년 1월~현재 : 통신학회 부회장

<주관심 분야> 위성 및 이동 통신, 멀티미디어 통신

이 재 호(Jae-ho Lee)

정회원



2000년 2월 : 인하대학교

산업 공학과 졸업

2002년 2월 : 인하대학교

정보통신대학원 정보통신

공학과 석사 졸업

<주관심 분야> CDMA, W-CDMA, cdma2000

곽 경 섭(Kyung-Sup Kwak)

정회원



1977년 2월 : 인하대학교

전기공학과 학사 졸업

1979년 2월 : 인하대학교

전기공학과 석사 졸업

1981년 12월 : 미국 University of Southern California

전자공학과 석사졸업

1988년 2월 : 미국 University of California 통신이론 및 시스템 박사

1988년 2월~1989년 2월 : 미국 Hughes Network Systems 연구원

1989년 2월~1990년 3월 : 미국 IBM Network Analysis Center 연구원

1995년 1월~12월 : IEEE Seoul Section 총무