

CDMA망에서 시스템 용량과 트래픽 부하의 변화를 반영한 핸드오프 영역 비율에 대한 성능분석

정성환¹ · 홍정완² · 이상천^{3*} · 이창훈¹

¹서울대학교 산업공학과 / ²한성대학교 산업시스템공학과

³경상대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

Performance Analysis of Soft Handoff Region Ratio in CDMA System Considering System Capacity and Traffic Load

Sung Hwan Jung¹ · Jung-Wan Hong² · Sang-Cheon Lee³ · Chang Hoon Lie¹

¹Department of Industrial Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742

²Department of Industrial and Systems Engineering, Hansung University, Seoul 136-792

³Division of Industrial and Systems Engineering, ERI, Gyeongsang National University, Jinju 660-701

In code-division multiple-access (CDMA) systems with soft handoff, mobile station (MS) within soft handoff region can use multiple radio channels and receive their signals from multiple base stations (BSs) simultaneously. In this paper, the effects of soft handoff region ratio (SHRR) on reverse link of a CDMA cellular system are analytically investigated. In order to analyze the network performance and quality of service (QoS) perceived by users more realistically, both the soft capacity increasing factor and the traffic load variation affected by SHRR are jointly considered and a two-dimensional continuous time Markov chain (CTMC) model is built. In the numerical example, it is observed that the optimal guard channel exists according the variations of the traffic load and propagation conditions when the proper value of SHRR is determined.

Keyword: CDMA, soft handoff, soft handoff region ratio, QoS, CTMC

1. 서론

셀룰라 망의 무선단말기가 한 셀 영역에서 다른 셀 영역으로 이동할 때, 교신하는 기지국을 변경하게 된다. 이 때 무선 단말기가 셀 간의 경계지역에서 두 개 이상의 기지국과 동시에 교신이 이루어지는 것을 소프트 핸드오프(soft handoff)라고 한다. 소프트 핸드오프는 CDMA(Code Division Multiple Access) 시스템의 가장 큰 특징 중의 하나이며, 소프트 핸드오프가 IS-95와 같

은 CDMA 시스템의 성능에 미치는 영향에 대한 연구들이 1990년대 중반 이후 많이 이루어져 왔다. 소프트 핸드오프에 대한 초기 연구들은 소프트 핸드오프가 무선 링크 다이버시티(diversity)를 제공하며 특히 역방향 링크에서 간섭효과 감소로 인한 셀 용량의 증가와 셀 커버리지(cell coverage)의 확장효과를 가져다준다는 것을 보여주었다(Viterbi *et al.*, 1994). 여기서 셀 커버리지는 기지국과 무선 단말기 사이에 신뢰할 수 있는 전파 수신 강도를 유지할 수 있는 최대 거리로 정의된다.

본 연구는 2007년도 한성대학교의 연구비지원에 의해 연구되었음.

*연락처 : 이상천 교수, 660-701 경상남도 진주시 가좌동 900 경상대학교 산업시스템공학부, Fax : 055-762-6599,

E-mail : scllee@gsnu.ac.kr

2006년 10월 접수, 1회 수정 후 2007년 03월 게재확정.

소프트 핸드오프의 성능 평가 기준으로 일반적으로 사용되는 척도는 전체 셀 영역 중 소프트 핸드오프가 이루어지는 영역의 넓이가 차지하는 비율로 정의되는 소프트 핸드오프 영역 비율(SHRR: Soft Handoff Region Ratio)이다. SHRR은 소프트 핸드오프 파라미터의 값을 조절해 줌으로 제어할 수 있게 된다. 따라서 소프트 핸드오프 성능 분석에 대한 연구들 중 한 영역은 소프트 핸드오프 파라미터 값들을 적절히 조절해 줌으로써 소프트 핸드오프 영역의 크기를 조절하는 것과 연관된 것이었다.

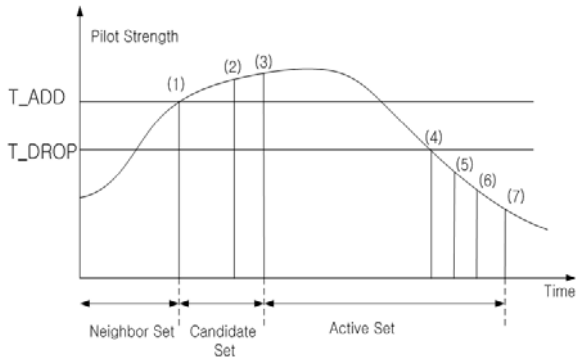


Figure 1. Example of mobile station-base station message exchange sequence in IS-95

<Figure 1>은 무선단말기에서 수신한 기지국의 전파수신 세기에 따른 핸드오프 절차의 한 예를 보여 주고 있다(Ahmed, 2002). 차후로 무선단말기를 이동국(MS: Mobile Station)이라고 명명하기로 하자. (1)시점에서 이동국에서 수신한 파일럿 전파의 세기가 T_ADD 값을 넘으면, 해당 기지국에 PSMM(Pilot Strength Measurement Message)를 보내고, 그 기지국을 Neighbor Set에서 Candidate Set으로 변경한다. (2)시점에서 해당 기지국으로부터 HDM(Handoff Direction Message)가 전송되면, 이동국은 그 기지국을 Neighbor Set에서 Active Set으로 변경하고, HCM(Handoff Completion Message)을 그 기지국에 전송한다. 이후에 통화가 진행되다가, (4)시점에서 파일럿 크기가 T_DROP 이하로 떨어지면, 이동국에서는 handoff drop timer가 작동하기 시작한다. (5)시점에서 T_TDROP 시간동안 파일럿의 크기가 T_DROP 이상으로 회복되지 않으면, 이동국은 해당 기지국에 PSMM을 전송한다. (6)시점에서 해당 기지국으로부터 HDM이 전송되면, (7)시점에서 이동국은 해당 기지국의 파일럿을 Active Set에서 Neighbor Set으로 변경한 후 HCM을 해당 기지국에 전송하게 된다.

이 과정에서 Active Set에 있는 기지국의 개수가 실제 교신이 이루어지는 기지국이며, 2개의 기지국과 교신이 이루어질 수 있는 경우를 2-way, 3개의 기지국과 동시에 교신이 이루어질 수 있는 경우를 3-way 핸드오프라고 한다. 여기서, T_ADD , T_DROP , T_TDROP 등의 핸드오프 파라미터 값을 적절히 조정해 줌으로써 이동국이 핸드오프영역에 머무르는 시간을 제어할 수 있다. 예를 들어, T_ADD 값을 증가시키고, T_DROP 값을 감소시키면, 기지국이 Active Set에 머무르는 시간이 길어지

게 되는데 이것은 결국 소프트 핸드오프 영역의 확장으로 이해할 수 있다. 이와 비슷하게 T_TDROP 값을 증가시키는 것도 비슷한 효과를 가져다준다.

다양한 무선 환경에서 역방향 링크에 대하여 소프트 핸드오프 파라미터와 핸드오프영역 크기의 관계에 대해서 시뮬레이션에 의한 방법과 분석적인 방법을 통한 연구가 많이 이루어져 왔다(Zhang and Holtsman, 1998; Jovanovic and Cuberovic, 2000; Hong and Lu, 2001; Liu, 2003; Avidor, 2006).

CDMA 소프트 핸드오프에 대한 연구에서 트래픽 부하가 호 수준의 사용자 품질 척도, 예를 들어 신규호 차단확률(NBP: New Call Blocking Probability)이나, 호의 강제 종료확률(FTP: Forced Termination Probability)에 미치는 영향을 분석적인 방법을 통해 연구한 논문들은 시뮬레이션에 기초한 연구들에 비해 상대적으로 많지 않다(Su *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 1999; Narrainen and Takawira, 2001; Ma *et al.*, 2006). 그 이유 중의 하나는 트래픽 부하와 무선망 상황을 동시에 고려할 경우 가변적인 CDMA 시스템의 용량을 수학적으로 엄밀하게 계산하기가 복잡하기 때문이다.

Su *et al.*(1996)의 논문에서는 한 셀의 영역이 정상 영역(normal region)과 핸드오프 영역으로 나누어지고, 전체 셀 영역 중에서 소프트 핸드오프 영역이 차지하는 비율이 소프트 핸드오프 영역비율로 처음 정의되었다. 또한 사용자가 셀 내에 균일하게 분포한다는 가정 하에 신규호의 도착률은 각 영역의 넓이에 비례한다고 가정하여 3차원의 CTMC(Continuous Time Markov Chain)를 구성하였고 SHRR과 신규호의 변화에 따른 시스템의 성능척도의 변화를 보여주었다. 그러나 이 과정에서 SHRR의 크기에 관계없이 기지국의 커버리지는 변함이 없다고 가정함으로써 트래픽 부하에 관계없이 SHRR이 커질수록 호의 차단확률이 개선되는 결과를 보여주었다. 이것은 소프트 핸드오프 시 이웃셀과의 경계지역에 있는 사용자들이 셀의 신규호로 들어오는 사건의 개수가 증가하게 되어 결국, 트래픽 부하가 증가하게 되는 측면을 간과한 단점이라고 볼 수 있다.

Kim *et al.*(1999)은 망 전체 차원에서의 소프트 핸드오프의 성능을 수학적으로 모델링하기 위하여 동질한 사각형(homogeneous square shape)의 셀 모양을 가정하여, 신규호의 도착률이 알려진 상황에서 핸드오프 도착률을 추정하였고, 이에 따라 신규호 도착률의 변화에 따라 호의 차단확률값의 변화를 도출하였다. Narrainen and Takawira(2001)는 CDMA 시스템의 가변적인 용량을 구하기 위하여 간섭효과(interference effect)를 수학적으로 모델링하는데 기여하였다. Ma *et al.*(2006)은 소프트 핸드오프 하에서 새로운 호 수락제어(CAC: Call Admission Control) 정책을 제시하고, 이의 효과를 보이기 위하여 일차원의 CTMC로 시스템을 모델링하여 호의 차단확률 등을 구하기 위한 닫힌 해와 이의 효과적인 계산 알고리즘을 제안하였다. 그러나 지금까지의 연구들은 소프트 핸드오프 영역의 크기를 고정하여 분석한 것이 대부분으로 소프트 핸드오프 영역의 변화가 시스템 성능에 미치는 영향에 대한 연구가 미흡하였다. 소프

트 핸드오프 영역의 크기가 증가할 경우 무선 링크 다이버시티의 증가로 셀 용량이 증가하는 긍정적인 측면이 있는 반면, 서비스해야 하는 사용자의 수의 증가나 기타 네트워크 자원의 사용 증가로 인한 부정적인 측면도 같이 고려되어야 할 것이다. 이를 위해서는 시스템의 용량뿐 아니라 트래픽 부하의 변화를 동시에 고려한 연구가 필요하다. 따라서 소프트 핸드오프의 영역의 변화에 따라 시스템의 용량과 트래픽 부하를 동시에 고려한 연구는 사용자의 QoS 관점에서, 그리고 이미 기지국이 설치되어 있는 상황에서 최적의 운영 정책을 수립해야 하는 망 관리자 입장에서 중요한 의미가 있는 것이라 하겠다.

본 연구는 기지국간의 거리가 고정되어 운영되고 있는 시점에서, SHRR의 변화가 CDMA 시스템 성능에 미치는 효과를 시스템의 용량과 트래픽 부하의 변화를 동시에 고려하여 분석한다. 즉, SHRR이 증가하면 시스템의 용량은 증가하는 반면 셀의 관할지역이 확대되는 효과로 인해 신규호의 발생과 서비스해야 하는 호가 동시에 증가하는 상충 상황을 동시에 반영하여 분석적인 방법으로 CDMA 시스템을 모델링 한다. 본 연구에서는 망 관리자의 호 수락 제어 정책과 핸드오프 영역에서 발생하는 호에 대한 처리 등의 정책에 따라 유동적으로 적용 가능한 모델을 제안함으로써 이미 기지국이 설치되어 운영되고 있는 상황에서 트래픽의 변화에 따른 최적의 소프트 핸드오프 영역과 CAC 정책의 결정에 도움이 될 것으로 기대된다.

2. 시스템 상황 및 모델 가정

2.1 CDMA 셀룰러망

기지국 간의 거리는 셀 커버리지보다 작아서 소프트 핸드오프 영역 크기의 변화를 충분히 반영할 수 있다고 가정한다. 소프트 핸드오프 영역의 크기는 T_ADD, T_DROP, T_TDROP 등의 핸드오프 파라미터 값에 의해 결정될 수 있다(Ahmed, 2002). 본 연구에서는 역방향(uplink)의 소프트 핸드오프 효과만을 고려한다.

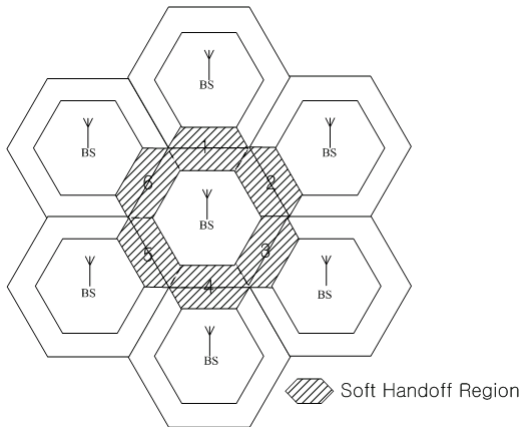


Figure 2. Soft Handoff Region in CDMA Cellular System

<Figure 2>에서와 같이 CDMA 셀룰러 망의 구조는 기지국 간의 거리가 일정하며 동질적인 트래픽 패턴을 따르는 육각형(hexagonal)의 셀 모양을 가정하고, 각 셀들은 비 핸드오프 영역(S_n)과 주변 셀들과 인접한 6개의 소프트 핸드오프 영역(S_s)으로 구성된다.

본 연구에서는 이동국과 동시에 교신되는 기지국의 수가 2개까지 만을 허용하는 2-way 소프트 핸드오프를 가정하며 소프트 핸드오프(soft handoff)의 효과는 고려하지 않는다. SHRR은 다음과 같이 정의된다.

$$SHRR = \alpha = \frac{\text{핸드오프영역의 넓이}}{\text{셀영역의 넓이}} = \frac{6S_s}{S} \quad (1)$$

시스템의 용량은 채널수로 나타내고, 소프트 핸드오프에 의한 용량증가를 반영한 시스템의 용량은 다음과 같이 표현된다.

$$C(\alpha) = \lfloor C_0 \times \eta(\alpha) \rfloor \quad (2)$$

식 (2)에서 C_0 는 하드 핸드오프 일 때의 시스템 용량이고, $\eta(\alpha)$ 는 소프트 핸드오프에 의한 용량 증가 계수로서 α 의 함수로 나타낼 수 있다. 이 값을 계산하기 위하여 Viterbi et al.(1994)가 사용한 방법론을 본 연구의 모델에 맞게 수정하여 계산하였으며 <부록 A>에 수록하였다.

기지국에서 소프트 핸드오프 영역까지의 최단 거리를 d 라 하자. <Figure 3>에서 기지국간의 거리(D)와 소프트 핸드오프 영역비율(α)이 정해지면 d 값도 비교적 간단한 연산에 의해서 다음과 같은 식으로 결정된다.

$$d = \sqrt{\frac{(1-\alpha)}{2(2-\alpha)}} \cdot D \quad (3)$$

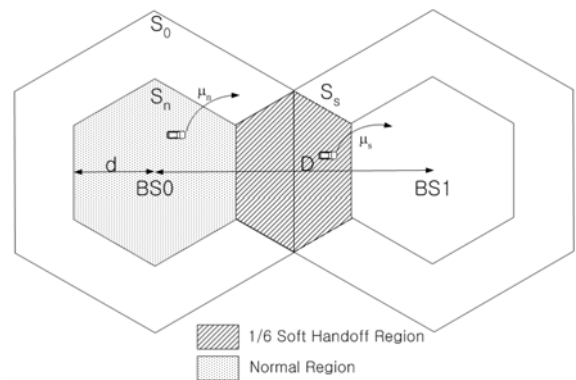


Figure 3. Soft Handoff Region Modeling

하드 핸드오프인 경우 원래 셀의 넓이를 S_0 라 하고, 소프트 핸드오프에 의해 확장된 셀의 넓이를 S 라 하면 이들의 관계는 간단한 계산에 의해 식 (4)와 같아짐을 확인할 수 있다.

$$S = \frac{2}{2-\alpha} S_0 \quad (4)$$

식 (4)에서, SHRR을 α 로 결정하면, 분석 셀의 관할지역이 $\frac{2}{2-\alpha}$ 배 만큼 확장되는 효과를 가져오게 된다고 볼 수 있는 것이다.

2.2 트래픽 가정과 호 수락 제어 정책

하드핸드오프만을 적용했을 때, 셀 S_0 에서의 신규호의 도착은 도착률이 λ_0^{NC} 인 Poisson 분포를 따르며, 셀 내의 전 지역에 균일(uniform)하게 분포한다고 가정한다. 소프트 핸드오프 적용 시에는 셀 관할지역의 확장이 일어나게 된다. 이 경우 소프트 핸드오프 영역에서 발생하는 신규 호를 관련된 기지국들에서 어떻게 처리할 것인가는 망 관리자의 정책적인 측면이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 모델 전개의 필요상 소프트 핸드오프 영역에서 발생한 신규 호는 인접한 두 개의 기지국 모두에서 신규호로 인식되어 접속이 시도된다고 가정하고 신규 호 도착률을 계산하였다. 그러나 실제 망 관리자의 정책이 주어지면 이것은 식 (5)를 적절히 변화시킴으로서 본 모델에서 수용 가능할 것으로 기대된다. 본 연구의 가정에 의하면, 소프트 핸드오프영역이 증가하면, 증가된 면적에 비례하여 각 기지국에서의 신규호의 도착률이 증가하게 된다. 증가된 신규호의 도착률을 λ_1^{NC} 라 나타내면, 이것은 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_1^{NC} = \frac{S}{S_0} \cdot \lambda_0^{NC} = \frac{2}{2-\alpha} \lambda_0^{NC} \quad (5)$$

하드 핸드오프인 경우에 사용자가 셀에 머무르는 평균 시간과 평균 통화 시간은 각각 $1/\mu_0$, $1/\mu_C$ 인 지수분포를 따른다고 하자. 그리고 <Figure 3>에서 셀 내의 비 핸드오프 영역(S_n)과 6개의 소프트 핸드오프 영역(S_s) 중 하나의 영역에 머무르는 체류시간은 평균이 각각 $1/\mu_n$, $1/\mu_s$ 인 지수분포를 따른다고 하자. 사용자의 이동을 random walk 모델로 가정했을 때, 각 영역에 머무르는 평균체류시간은 핸드오프영역비율의 함수로 나타낼 수 있다고 가정할 수 있다(Su *et al.*, 1996). 본 연구에서는 이동자가 특정 영역에 머무르는 체류시간은 그 영역의 넓이에 가장 큰 영향을 받는다고 가정하여 다음과 같은 관계식을 유도하였다.

$$\frac{1}{\mu_n} = \left(\frac{2-2\alpha}{2-\alpha} \right)^{k_1} \frac{1}{\mu_0} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\mu_s} = \left(\frac{\alpha}{6-3\alpha} \right)^{k_2} \frac{1}{\mu_0} \quad (7)$$

위 식에서 괄호 안의 값은 원래 셀 영역면적(S_0)과 각각의 영역 면적 (S_n , S_s)의 면적의 비율 값을 나타내며, k_1 , k_2 의 값은 셀 영역의 모양과 넓이 그리고 이동국의 이동 패턴(mobility pattern)등에 종속되어 이동성의 특징을 반영해 주는 값으로 본 연

구에서는 시뮬레이션을 통해서 얻은 값을 사용하였다. <부록 B>에서 위 식 (6), 식 (7)의 시뮬레이션을 통한 검증 과정이 소개되어 있다.

각 셀의 기지국에서는 핸드오프 호에게 우선권을 주기 위해서 전체 시스템의 가용 채널(C)에서, 핸드오프를 위한 가드 채널(g)을 확보해 둔다. 즉, $C-g$ 개의 채널까지는 신규 호와 핸드오프 호를 모두 접속시킬 수 있으나, 사용채널이 $C-g$ 를 넘으면, 핸드오프 호만을 수락하고, 신규 호는 차단시키게 된다 (Guerin, 1988).

2.3 핸드오프 도착률의 계산

핸드오프호의 도착률은 셀의 넓이, 이동국의 속도, 호 차단 확률 등에 영향을 받는 함수이다. 주변 셀들의 상황이 동질적(homogeneous)이라는 가정 하에, 한 기지국에 핸드오프호의 도착률은 다음 식에 의해 추정될 수 있다.

$$\lambda^{HC} = \mu_n \cdot E[n_1] + \left(\frac{1}{2} P_s \right) \mu_s \cdot E[n_2] \quad (8)$$

식 (8)에서, 우변의 첫 제항은 $\mu_n \cdot E[n_1] = 6 \times \left(\frac{1}{6} \right) \times \mu_n \cdot E[n_1]$ 로 구성되는데, 이것은 6개의 이웃 셀의 비 소프트 핸드오프 영역에서 분석 셀의 소프트 핸드오프 영역으로 이동국이 이동해 오는 확률 값에 비 소프트 핸드오프 영역을 떠나게 되는 빈도를 곱해준 값으로 이웃 셀의 이동국에 의해 핸드오프 요청이 발생하는 도착률을 나타낸다. 여기서, $E[n_1]$ 은 비 소프트 핸드오프 영역에 있는 평균 사용자 수이다. 이 값은 이동국이 분석 셀의 비 소프트 핸드오프 영역을 벗어나서 이웃 셀의 기지국에 핸드오프 요청을 하는 도착률과 동일하다는 것을 알 수 있다. 우변의 두 번째 항은 $\left(\frac{1}{2} P_s \right) \mu_s \cdot E[n_2] = 6 \times \left(\frac{1}{6} \right) \times \left(\frac{1}{2} P_s \right) \mu_s \cdot E[n_2]$ 로 구성되어, 분석 셀과 이웃한 6개의 이웃 소프트 핸드오프 영역에서 분석 셀의 소프트 핸드오프 영역으로 이동국이 이동해 오는 도착률을 나타낸다. 여기서 $E[n_2]$ 는 소프트 핸드오프 영역에 있는 평균 사용자 수를 나타내며, $\frac{1}{2} P_s$ 값은 분석 셀과 이웃한 소프트 핸드오프 영역에 있는 다른 셀의 이동국이 자신의 영역을 떠날 때, 분석 셀의 소프트 핸드오프 영역으로 이동해 올 확률을 나타낸다. 여기서 P_s 는 소프트 핸드오프 영역에 있는 이동국이 자신의 영역을 떠날 때 인접한 다른 소프트 핸드오프영역으로 넘어갈 확률 값으로 <Figure 4>에 도시되어 있다. 이 값은 SHRR과 이동국의 이동패턴에 의존하는 값이다. 본 연구에서는 이동국이 random walk 을 한다는 가정 하에 P_s 값을 <부록 C>에서 α 에 대한 함수로 추정하였다. P_n 는 소프트 핸드오프 영역의 이동국이 자신의 영역의 떠날 때 인접한 비소프트 핸드오프영역으로 넘어갈 확률값으로 $P_s + P_n = 1$ 의 관계가 있다.

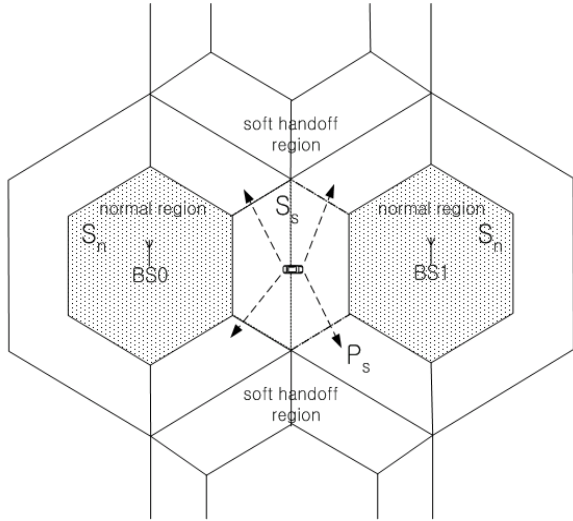


Figure 4. Definition of P_s

3. 성능 척도의 계산

3.1 하드 핸드오프인 경우

하드 핸드오프인 경우 시스템의 상태변수를 분석셀 내에 있는 음성사용자의 수라고 하자. 한 사용자가 한 채널만을 사용한다고 가정하면 상태전이도는 <Figure 5>와 같이 나타낼 수 있다.

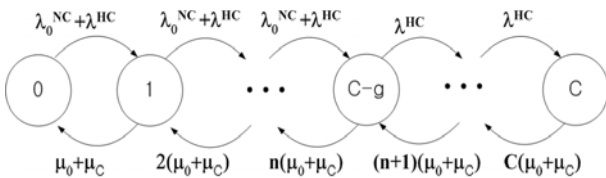


Figure 5. State Transition Diagram of Hard Handoff Case

분석 셀에 들어오는 핸드오프호의 도착률은 사용자의 셀 체류시간과 통화지속 시간을 지수분포로 가정했을 때 다음과 같이 나타낼 수 있다(Lin, 1994).

$$\lambda^{HC} = \frac{\mu_0(1 - P_B)}{\mu_C + \mu_0 P_{hf}} \lambda_0^{NC} \quad (9)$$

위 식 (9)에서 P_B 는 NBP를 P_{hf} 는 핸드오프 실패확률을 나타낸다. 이 성능 척도들은 M/M/m/m Loss system에 의하여 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\pi(n) = \begin{cases} \frac{(\lambda_0^{NC} + \lambda^{HC})^n}{n!(\mu_0 + \mu_C)^n} \pi(0) & , 1 \leq n < C-g \\ \frac{(\lambda_0^{NC} + \lambda^{HC})^{C-g} (\lambda^{HC})^{n-(C-g)}}{n!(\mu_0 + \mu_C)^n} \pi(0) & , C-g \leq n \leq C \end{cases} \quad (10)$$

$$\pi(0) = \left[1 + \sum_{n=1}^{C-g-1} \frac{(\lambda_0^{NC} + \lambda^{HC})^n}{n!(\mu_0 + \mu_C)^n} + \sum_{n=C-g}^C \frac{(\lambda^{NC} + \lambda^{HC})^{C-g} (\lambda^{HC})^{n-(C-g)}}{n!(\mu_0 + \mu_C)^n} \right]^{-1} \quad (11)$$

$$P_B = \sum_{n=C-g}^C \pi(n) \quad (12)$$

$$P_{hf} = \pi(C) \quad (13)$$

$$CT = \sum_{n=0}^C n \cdot \pi(n) \quad (14)$$

식 (14)는 평균 채널 사용량(CT: Carried Traffic) 을 의미한다. 식 (9)에서 식 (14)까지의 값들을 구하기 위해서는, 먼저 식 (9)에 P_B 와 P_{hf} 에 대한 임의의 초기 값을 주고 초기 핸드오프 도착률($\lambda^{HC(0)}$)을 계산한 후, 이 값을 식 (10)~식 (14)에 대입하여 P_B , P_{hf} 를 개선한다. 이 값들이 수렴할 때까지 대입을 반복하여 최종 성능척도 값을 얻을 수 있다(Ma et al., 2006).

3.2 소프트 핸드오프인 경우

소프트 핸드오프인 경우, 비록 핸드오프가 실패했다라도 (P_{hf}) 기존 기지국과 교신이 진행되고 있으므로 통화가 바로 끊어진다고 할 수 없다. 오히려 한번 핸드오프에 실패한 사용자가 기존 기지국과의 교신을 지속하면서 다른 소프트 핸드오프 영역으로 이동하여 다시 핸드오프가 성공할 확률이 존재하게 되는 것이다. 따라서 하드 핸드오프와는 달리, 기존의 핸드오프 실패확률보다는 FTP가 사용자 입장의 QoS 척도로서 더 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시스템의 성능 척도 값으로 NBP와 FTP를 계산하였다.

소프트 핸드오프인 경우 성능척도들을 구하기 위하여 상태변수를 $s = (n_1, n_2)$ 로 정의한다. 여기서 n_1 은 비 소프트 핸드오프영역에 있는 사용자 수를, n_2 는 소프트 핸드오프 영역에 있는 사용자 수를 각각 의미한다.

비 핸드오프 영역에서의 호의 도착은 신규호의 도착만 가능함으로 신규호 도착률과 비 소프트핸드오프 영역 비율의 함수 형태로 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_n(n_1, n_2) = \begin{cases} (1-\alpha)\lambda_1^{NC} & (0 \leq n_1 + n_2 < C-g) \\ 0 & (n_1 + n_2 \geq C-g) \end{cases} \quad (15)$$

소프트 핸드오프 영역에 들어오는 호의 도착은 신규 호와 핸드오프 호 모두 가능하며, 정해진 가드 채널 값에 의해 다음 식 (16)과 같이 결정된다.

$$A_s(n_1, n_2) = \begin{cases} \alpha\lambda_1^{NC} + \lambda^{HC} & (0 \leq n_1 + n_2 < C-g) \\ \lambda^{HC} & (C-g \leq n_1 + n_2 < C) \\ 0 & (n_1 + n_2 \geq C) \end{cases} \quad (16)$$

<Figure 6>은 소프트 핸드오프인 경우의 상태변수의 전이도이다.

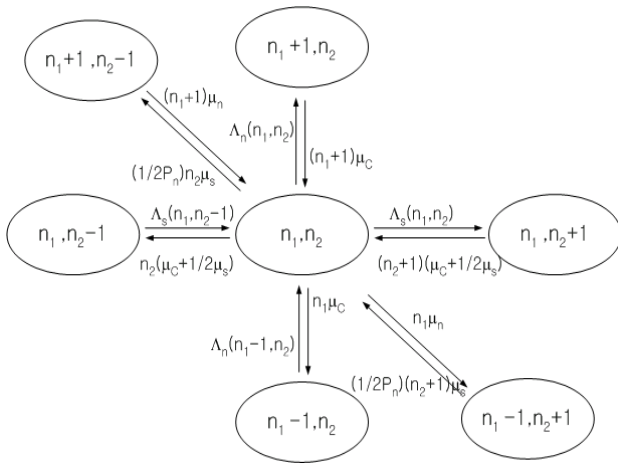


Figure 6. State Transition Diagram of Soft Handoff Case

<Figure 6>에서 세로방향의 전이는 비 소프트 핸드오프 영역에서 신규호가 도착하거나(윗 방향) 호가 종료되는 경우(아래 방향)에 발생하는 사건을 나타낸다. 가로축 방향의 전이는 소프트 핸드오프 영역으로의 호의 도착사건(오른쪽 방향)과 통화의 종료 또는 다른 영역으로의 이동에 의해 호가 소프트 핸드오프 영역을 떠나는 사건(왼쪽 방향)을 나타내고 있다. 여기서 $1/2\mu_s$ 의 값이 의미하는 것은 이동국이 소프트 핸드오프 영역을 떠날 때, 분석 셀이 아닌 이웃 셀 영역으로 넘어가게 될 전이율을 나타낸다. <Figure 6>에서 대각선 방향의 전이는 이동국이 비 소프트 핸드오프 영역에서 소프트 핸드오프 영역으로 넘어가거나(대각선 아래 방향) 역으로 소프트 핸드오프 영역에서 비 소프트 핸드오프 영역으로 넘어가는 사건(대각선 윗 방향)을 나타내고 있다. 여기서 $1/2P_n$ 의 값은 분석 셀의 이동국이 소프트 핸드오프 영역을 떠날 때 분석 셀의 비 소프트 핸드오프 영역으로 넘어가게 될 확률을 나타낸다.

<Figure 6>의 상태전이도를 이용하여 안정 상태확률 값 $\pi(s)$ 을 구할 수 있다. 즉, 안정 상태에서는 각 상태에서 나가는 전이율과 들어오는 전이율이 같다는 사실을 이용하여 <Figure 6>의 상태전이도로부터 Ω 개만큼의 평형방정식(rate balance equation)을 얻을 수 있다. 여기서 총 상태변수의 개수를 Ω 라고 하자. 또한 확률의 정의에 의하여 식 (17)을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=0}^C \sum_{j=0}^{C-i} \pi(i, j) = 1 \quad (17)$$

위에서 $\Omega-1$ 개만큼의 서로 선형 독립인 평형방정식에 식 (17)을 포함하여 총 Ω 개의 선형 독립 연립방정식을 풀면, 안정 상태 확률 값을 구할 수 있다. 실제 시스템에 적용하여 연립방정식을 풀 때는 이 차원의 각 상태변수를 일차원에 대응시켜야 한다. 따라서 상태변수를 사전편찬식(lexicographically)으로

$(0, 0), (0, 1), (0, 2), \dots, (0, C), (1, 0), (1, 1), \dots, (C-1, 0), (C-1, 1), (C, 0)$ 과 같이 나열한 후 각 상태변수가 나열된 순서에 대응되도록 하면, 식 (18)과 같은 벡터 행렬식을 구할 수 있다.

$$\Phi \cdot Q = 0 \quad (18)$$

식 (18)에서 Q 는 $\Omega \times \Omega$ 차원의 상태전이행렬이 된다. 식 (18)을 풀어서 얻은 $1 \times \Omega$ 의 확률변수 벡터(Φ)의 값을 역으로 사전편찬식으로 대응시켜, 최종적으로 모든 i, j 값에 대한 $\pi(i, j)$ 값을 구할 수 있다.

성능척도 값들을 구하기 위하여 먼저 분석 셀의 사용자수가 가드채널을 제외한 수보다 커져서 신규 호를 받아들일 수 없는 확률 값인 P_B 와 분석 셀의 사용자수가 총 사용가능채널수와 같아서 핸드오프 호를 받아들일 수 없게 되는 확률 값인 P_{hf} 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_B = \sum_{B_0} \pi(i, j) \text{ where } B_0 = \{(i, j) | C-g \leq (i+j) \leq C\} \quad (19)$$

$$P_{hf} = \sum_{i=0}^C \pi(i, C-i) \quad (20)$$

소프트 핸드오프의 성능 평가 척도는 식 (19)와 식 (20)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$CT = \sum_{i=0}^C \sum_{j=0}^{C-i} (i+j) \pi(i, j) \quad (21)$$

$$MBP = (1-a)P_B + aP_B^2 \quad (22)$$

$$FTP = P_{hf} \cdot P_V \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \quad (23)$$

식 (23)에서 소프트 핸드오프인 경우 핸드오프의 실패 확률 (P_{hf})이 곧바로 FTP 값으로 이어지지 않는다. 즉, 호의 강제 종료가 발생하려면, 핸드오프 실패가 일어난 후에 소프트 핸드오프 영역에 있는 이동국이 통화를 진행하면서 분석 셀이 아닌 이웃한 다른 셀 영역으로 이동할 사건이 발생해야 한다. 식 (23)에서 P_V 는 이동국이 통화를 진행하면서 소프트 핸드오프 영역을 떠날 확률로서 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_V = \frac{\mu_s}{\mu_C + \mu_s} \quad (24)$$

또한 $\left(\frac{1}{2}\right)$ 값은 $\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2}P_n + \frac{1}{2}P_s$ 로 구성되어 분석 셀과만 교신이 되던 이동국이 교신하고 있지 않은 이웃 셀의 비 소프트 핸드오프 영역 또는 소프트 핸드오프 영역으로 넘어가게 될 확률 값을 의미한다.

4. 실험 예제

실제 CDMA 시스템의 성능을 평가하기 위해서는 간섭효과

(interference effect)를 추정할 수 있는 전송모델(propagation model)이 주어져야 한다. 본 실험에서는 Viterbi *et al.*(1994)에서 사용한 무선 전송 모델을 사용하였다. 즉, 기지국에서 r 만큼 떨어져 있는 사용자에게 전달되는 전파의 감쇠는 식 (25)와 같이 주어진다.

$$\alpha(r, \zeta) = r^{-z} 10^{\zeta/10} \quad (25)$$

여기서, z 는 거리로 인한 경로감쇠 상수이고, ζ 는 shadowing에 의한 감쇠효과로 평균이 0 이고 표준편차가 σ 이며, dB단위를 사용한다. 기지국간의 거리는 2Km이며, 육각형의 동질적인 트래픽 패턴을 따른다고 가정한다. 초기의 셀 용량(C_0)은 20개로 하였다. 그리고 이동국이 셀에 머무르는 평균 시간과 평균 통화 시간은 각각 $\mu_0 = 0.04$, $\mu_C = 0.03$ 의 역수 값을 평균값으로 하는 지수분포를 따른다고 가정하였다(Ma *et al.*, 2006).

<Figure 7>은 신규호의 도착률, 즉 트래픽 부하에 따른 NBP 값을 도시한 것이다. 트래픽 부하가 커질수록 NBP 값도 증가하는 것을 확인할 수 있다. SHRR의 크기에 따른 NBP 값의 변화를 보면, 신규호의 도착률이 일정할 때, SHRR이 커질수록 NBP 값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 소프트 핸드오프 영역의 증가로 인한 트래픽 부하의 증가보다, 소프트 핸드오프 효과로 인한 용량증가가 NBP 값에 더 많은 영향을 주기 때문이라고 할 수 있다.

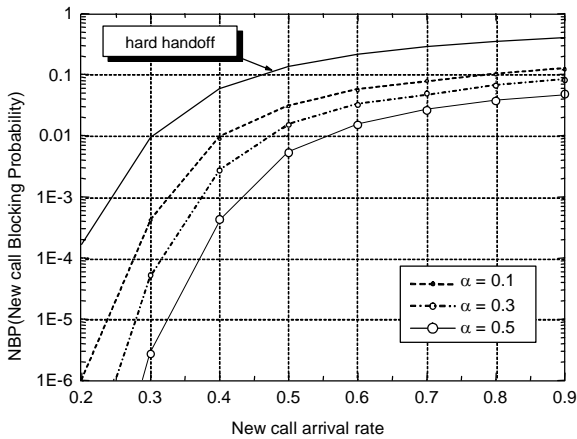


Figure 7. New call blocking probability vs. soft handoff region ratio ($z = 4, \sigma = 8, g = 2$)

<Figure 8>은 신규호의 도착률, 즉 트래픽 부하에 따른 FTP 값을 도시한 것이다. 트래픽 부하가 커질수록 FTP 값도 증가하는 것을 확인할 수 있다. SHRR의 크기에 따른 FTP 값의 변화를 보면, 신규호의 도착률이 일정할 때, SHRR이 커질수록 FTP 값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 NBP 값과 마찬가지로 소프트 핸드오프 영역의 증가로 인한 트래픽 부하의 증가보다, 소프트 핸드오프 효과로 인한 용량증가가 FTP 값에 더 많은 영향을 주기 때문이라고 할 수 있다.

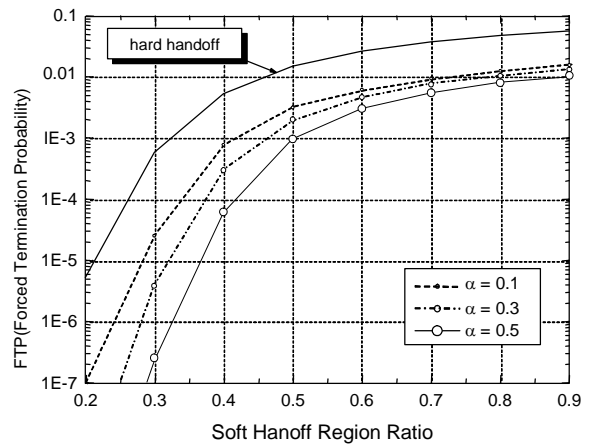


Figure 8. Forced termination probability vs. soft handoff region ratio ($z = 4, \sigma = 8, g = 2$)

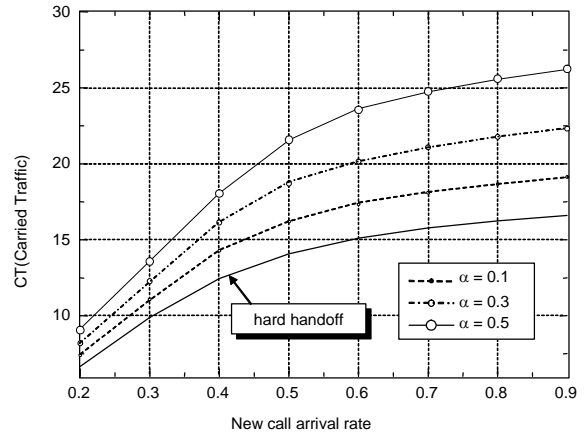


Figure 9. Carried traffic vs. soft handoff region ratio ($z = 4, \sigma = 8, g = 2$)

<Figure 9>는 트래픽 부하의 증가에 따라 CT의 변화를 도시하고 있다. 트래픽 부하가 증가할수록 CT는 증가하며, 소프트 핸드오프 영역이 증가할수록 CT가 증가함을 확인할 수 있다. 이것은 소프트 핸드오프로 인하여 CT가 증가하고, CT의 증가로 인한, 무선망자원의 추가적인 증가가 수반되어야 함을 의미하는 것이다. 따라서 핸드오프영역 비율은 QoS 관점에서뿐만 아니라, 망 자원 할당(resource allocation) 관점에서도 정책적으로 결정되어야 함을 시사해 주고 있다.

<Figure 10>은 핸드오프 호에 우선권을 주는 가드채널의 크기 변화에 따른 차단확률 값의 변화를 도시한 것이다. 가드채널이 증가할수록 NBP 값은 증가하는 반면, FTP 값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. <Figure 10>에서 만약 정책적으로 NBP 값의 상한을 10^{-4} 으로 제한한다면, 최적의 가드채널 값은 2가 됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 모델을 이용하면, 무선망의 전송환경, QoS와 망 자원 배분 관점에서 SHRR 값을 먼저 정하고, 이후에 사용자의 QoS 측면에서 NBP 값의 상한을 제약으로 두고, FTP 값 또는 핸드오프호의 차단확률 값을 최소화하는 최적의 가드채널 값을 찾을 수 있을 것이다.

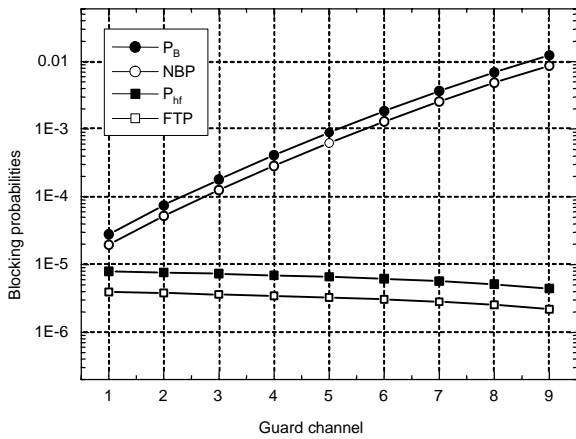


Figure 10. Blocking probabilities vs. guard channel
($z = 4, \sigma = 8, \alpha = 0.3, \lambda_0^{NC} = 0.3$)

5. 결론

본 논문에서는 CDMA 역방향 링크에서 소프트 핸드오프 영역 비율의 변화가 사용자의 QoS에 미치는 영향을 수리적으로 분석하였다. 소프트 핸드오프 영역 비율이 증가하면, 시스템의 용량은 증가하는 반면에, 셀 커버리지의 증가로 인하여 시스템의 트래픽 부하는 증가하는 상충되는 효과가 나타나게 된다. 동질의 육각형 셀 모양 하에서 이 두 가지 효과를 반영하기 위하여 셀 영역을 비 소프트 핸드오프 영역과 소프트 핸드오프 영역으로 나누어, 두 영역에 머무르는 사용자의 수를 상태변수로 하는 2차원의 마코프 체인을 구성하였다. 실험예제에서 신규호의 증가와 SHRR이 NBP나 FTP와 같은 QoS에 미치는 영향이 도시되었다. 본 연구에서 제안한 모델은 최적의 소프트 핸드오프 영역과 호 수락제어정책에서 가드채널 값을 결정하는데 유용할 것으로 기대된다. 본 연구는 분석 셀을 중심으로 이웃 셀들의 트래픽 특성이 동질적이라는 가정을 사용하였다. 그러나 더 실제적인 상황을 반영하기 위해 각 셀들의 트래픽 특성이 이질적인 경우에 대한 분석이 요망되며, 이를 위해서는 계산 복잡도를 낮출 수 있는 새로운 모델링 기법이나 수치 해석적인 방법의 개발이 필요할 것이다.

부 록

A. $\eta(\alpha)$ 값의 계산

시스템의 용량 증가 계수는 식 (A1)와 같이 나타낼 수 있다 (Viterbi *et al.*, 1994).

$$\eta(\alpha) = \frac{1 + f_{hard}}{1 + f_{soft}(\alpha)} \quad (A1)$$

식 (A1)에서 f_{hard} 와 $f_{soft}(\alpha)$ 는 각각 하드 핸드오프시와 소프트 핸드오프시에 다른 셀 영역의 사용자들이 분석셀의 기지국에 미치는 총 간섭의 크기를 셀 당 평균 사용자 수로 정상화(normalize)한 값이다. 위 값들을 계산하기 위하여 Viterbi *et al.* (1994)의 식 (18)을 본 논문에서 채택한 육각형의 셀 모양에 적용하였다.

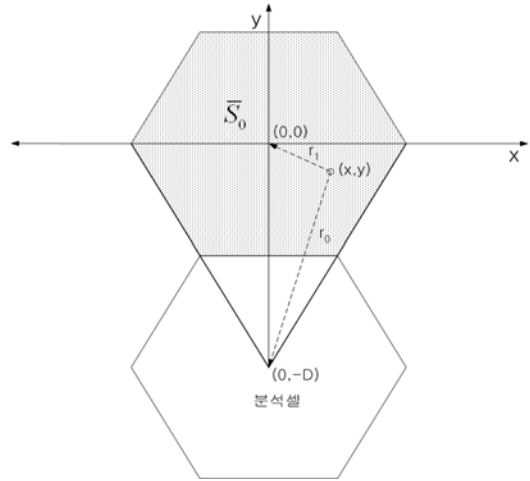


Figure A.1. The regions for hard handoff

하드 핸드오프의 경우 f_{hard} 는 식 (A2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{hard} = e^{(\beta\sigma)^2/2} \cdot \left[\frac{1}{S_0} \cdot \int \int_{S_0} (r_1/r_0)^z dA \right] \quad (A2)$$

식 (A2)에서 S_0 는 <Figure A.1>에서 분석 셀의 넓이이며, \bar{S}_0 는 분석 셀의 위 삼각형 영역에 영향을 주는 이웃 셀의 영역의 넓이이다. 여기서, $\beta = \ln(10)/10$ 이며, $z = 4, \sigma = 8$ dB로 설정하였다.

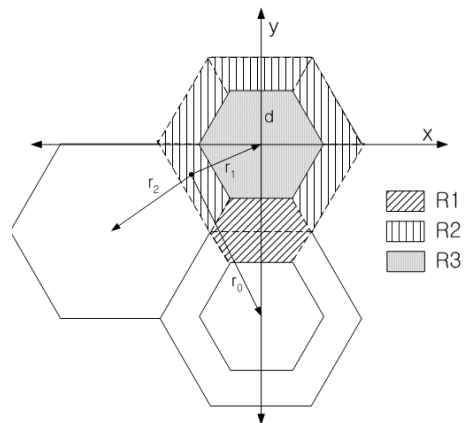


Figure A.2. The regions for soft handoff

소프트 핸드오프의 경우 $f_{soft}(\alpha)$ 는 식 (A3)과 같이 구성된다.

$$f_{soft}(\alpha) = f_{R1}(\alpha) + f_{R2}(\alpha) + f_{R3}(\alpha) \quad (A3)$$

식 (A3)의 구성인자들은 다음과 같이 정의된다.

$f_{R1}(\alpha)$: 분석 셀과 이웃 셀과 소프트핸드오프 상태인 사용자 중에서 이웃 셀로부터 전력제어를 받는 사용자로 인한 간섭

$f_{R2}(\alpha)$: 이웃 셀과 또 다른 이웃 셀과의 핸드오프상태인 사용자로 인한 간섭

$f_{R3}(\alpha)$: 이웃 셀의 비 소프트 핸드오프영역에 있는 사용자로 인한 간섭

$$f_{R1}(\alpha) = e^{(\beta\sigma)^2/2} \left[\frac{1}{S_0} \int \int_{R_1} (r_1/r_0)^z Q \left(\beta\sigma + \frac{M_1 - M_0}{\sigma} \right) dA \right]$$

$$f_{R2}(\alpha) = e^{(\beta\sigma)^2/2} \left[\frac{1}{S_0} \int \int_{R_2} (r_1/r_0)^z Q \left(\frac{\beta\sigma}{2} + \frac{M_1 - M_2}{\sigma} \right) dA + \frac{1}{S_0} \int \int_{R_2} (r_2/r_0)^z Q \left(\frac{\beta\sigma}{2} + \frac{M_2 - M_1}{\sigma} \right) dA \right]$$

$$f_{R3}(\alpha) = e^{(\beta\sigma)^2/2} \left[\frac{1}{S_0} \int \int_{R_3} (r_1/r_0)^z dA \right]$$

여기서 $M_i = 10z \log_{10} r_i$, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2/2} dy$ 로 각각 정의된다.

<Figure A.3>은 소프트 핸드오프 영역 비율의 증가에 따른 용량증가계수(capacity increasing factor)의 변화를 shadowing 효과의 변화에 따라서 나타낸 것이다.

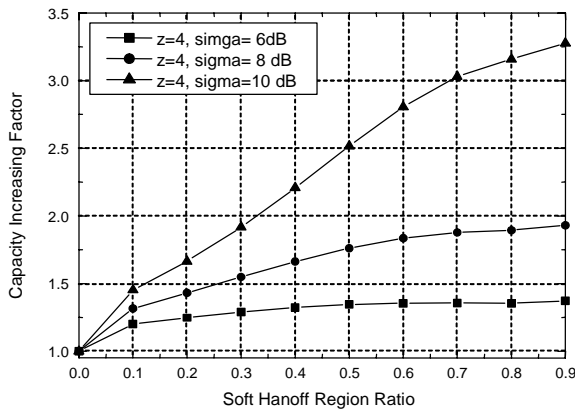


Figure A.3. Capacity increasing factor vs. soft handoff region ratio

본 연구에서 시스템 용량 분석의 기초 모델로 삼았던 Viterbi et al.(1994)의 논문에서는 $z=4$, $\sigma=6$ 일 때, 용량증가계수가 1.37 이었고, $z=4$, $\sigma=8$ 일 때는 1.91 그리고, $z=4$, $\sigma=10$ 일 때 3.14로 각각 계산됨을 확인할 수 있다. 이 값들은 <Figure A.3>에서 보는 바와 같이 SHRR 값이 최대가 된 경우(0.8, 0.9)와 비슷한 값임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 SHRR을 반영하여 용량증가를 계산한 것이 Viterbi et al.(1994)의 연구에서 모든 셀 영역이

핸드오프 영역이라는 가정을 완화시켜, 좀 더 세부적인 단계로 용량변화를 나타낼 수 있다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 또한 <Figure A.3>을 통해 shadowing의 표준편차(σ)가 작아지면 시스템의 용량변화가 크지 않음을 알 수 있다. 즉, σ 가 작은 경우에는 SHRR을 크게 하는 것이 호의 차단확률 값만 증가시킬 뿐, 용량증가의 효과가 크지 않다는 것을 보여주고 있는 것이다.

B. 비 소프트와 소프트 핸드오프 영역에 머무르는 평균시간의 계산

SHRR에 따라서 이동국이 비 소프트 핸드오프 영역과 소프트 핸드오프 영역에 머무르는 평균 시간의 관계는 다음의 식과 같이 가정하였다.

$$\frac{T_n}{T_0} = \left(\frac{S_n}{S_0} \right)^{k_1} = \left(\frac{2-2\alpha}{2-\alpha} \right)^{k_1} \tag{A4}$$

$$\frac{T_s}{T_0} = \left(\frac{S_s}{S_0} \right)^{k_2} = \left(\frac{\alpha}{6-3\alpha} \right)^{k_2} \tag{A5}$$

식 (A4), 식 (A5)에서 T_n , T_s 는 이동국이 각각 비 소프트 핸드오프 영역과 소프트 핸드오프 영역에 머무르는 평균 시간을 나타내고, T_0 는 하드 핸드오프 시 본래 셀 영역에 머무르는 평균 시간을 나타내며 이미 알고 있는 값이라고 가정한다. 위 식은 각 영역에 머무르는 평균 시간은 각 영역의 넓이에 비례한다는 것을 의미하고 영역의 넓이외의 다른 환경요인들을 반영하기 위하여 k_1 과 k_2 의 제곱차수 형태를 취하였다.

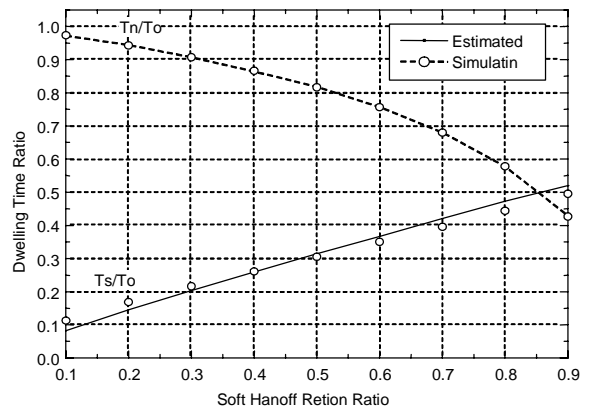


Figure A.4. Dwelling time vs. soft handoff region ratio

k_1 과 k_2 값을 추정하기 위하여, 0에서 60km/h 사이의 임의의 이동 속도를 갖는 이동국이 random walk 한다고 가정하여 각 영역에 머무르는 평균 시간을 시뮬레이션을 통해 측정한 결과 평균값으로 $k_1 = 0.5$, $k_2 = 0.54$ 의 값을 각각 얻었다. 이 값을 식 (A4)와 식 (A5)에 대입하여 SHRR 값에 따라 이동국이 각 영역에 머무르는 평균 시간의 추정 값을 계산하였을 때, <Figure A.4>와 같이 추정된 결과를 얻을 수 있었다.

C. P_s 확률값의 계산

이동국이 random walk 한다는 가정 하에 P_s 값을 추정치를 구해 보자. <Figure A.5>에서와 같이 이동국이 소프트핸드오프 영역의 임의의 한 점 (x, y) 에 있을 때, 인접한 소프트 핸드오프 영역으로 향하게 될 확률을 다음 식 (A6)과 같이 정의할 수 있다.

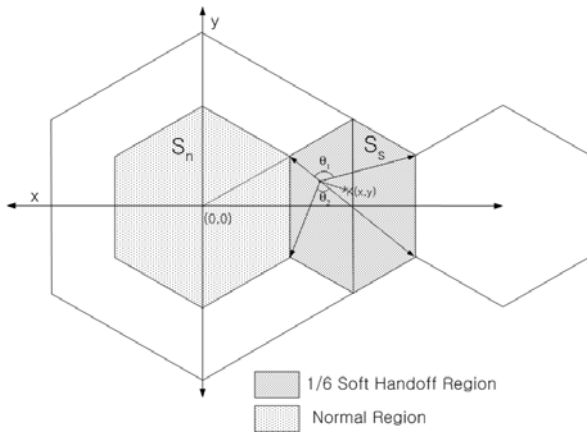


Figure A.5. $p_s(x, y)$ for P_s calculation

$$p_s(x, y) = \frac{\theta_1(x, y) + \theta_2(x, y)}{2\pi} \quad (A6)$$

식 (A6)의 값을 식 (A7)과 같이 소프트 핸드오프 영역에 대해 적분하여 그 면적으로 나누면, 소프트 핸드오프 영역에서 임의의 점을 선택하였을 때, 그 위치에서의 이동국이 인접 소프트 핸드오프 영역으로 이동하게 될 확률이 된다.

$$P_s = \frac{1}{S_s} \int \int_{S_s} p_s(x, y) dx dy \quad (A7)$$

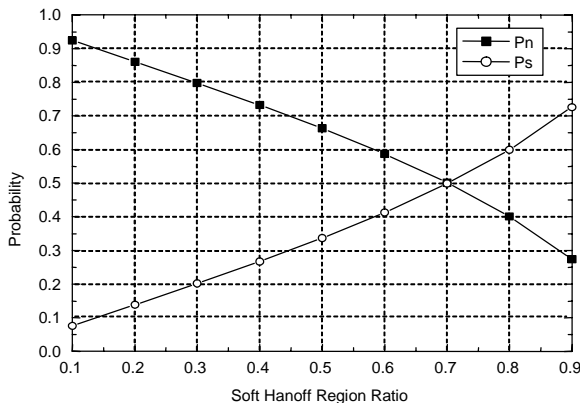


Figure A.6. P_s and P_n vs. soft handoff region ratio

<Figure A.6>은 식 (A6)과 식 (A7)을 이용하여, SHRR에 따라서 수치 해석적으로 구한 P_s 와 P_n 의 값의 변화를 도시한 것이

다. SHRR이 커질수록 인접한 소프트 핸드오프 영역으로 넘어 갈 확률은 커지는 반면에 인접한 비 소프트 핸드오프 영역으로 이동할 확률은 작아짐을 확인할 수 있다.

참고문헌

Ahmed, W. K. M. (2002), Simulation and Performance Evaluation of IS-95 Handoff Algorithms, *Bell Labs Technical Journal*, 7(1), 165-185.

Avidor, D., Mukherjee, S., and Hedge, N.(2006), On the Impact of Soft Handoff Threshold and Maximum Size of the Active Group on BS Transmit Power in the UMTS System, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55(2), 597-605.

Chun, H. G., Kwon, O. J., and Kang, C. E. (2001), Effects of Soft Handoff Region Ratio on the Reverse Link Capacity of a DS-CDMA Cellular System, *The Journal of Korean Institute of Communication Science*, 26(11B), 1534-1539.

Guerin, R. (1988), Queueing-Blocking System with Two Arrival Streams and Guard Channels, *IEEE Transactions on Communications*, 36(2), 153-163.

Hong, S. J. and Lu, I. T. (2001), Soft Handoff Algorithm Parameter Optimization in Various Propagation Environments, *IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings*, 2549-2553.

Jovanovic, V. M. and Cuberovic, D. (2000), Theoretical and Experimental Analysis of the New Soft Handoff Algorithm for CDMA Systems, *IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings*, Tokyo. 1757-1762.

Kim, D. K. and Sung, D. K. (1999), Characterization of Soft Handoff in CDMA Ssystems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48(4), 1195-1202.

Kishore, S., Greenstein, L. J., Poor, H. V., and Schwartz, S. C. (2005), Soft Handoff and Uplink Capacity in a Two-Tier CDMA System, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(4), 1297-1301.

Lee, C. C. and Steele, R. (1998), Effect of Soft and Softer Handoffs on CDMA System Capacity, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 47(3), 830-841.

Lin, Y. B., Mohan, S., and Noerpel, A. (1994), Queueing Priority Channel Assignment Strategies for PCS Hand-Off and Initial Access, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 43(3), 704 -712.

Liu, Z., Wang, Y., and Yang, D. (2003), Effect of Soft Handoff Parameters and Traffic Loads on Soft Handoff Ratio in CDMA Systems, *International Conference on Communication Technology Proceedings*, 2003, 782-785.

Ma, X., Cao, Y., Liu, Y., and Trivedi, K. S. (2006), Modeling and Performance Analysis for Soft Handoff Schemes in CDMA Cellular Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55(2), 670-680.

Narrainen, R. P. and Takawira, F. (2001), Performance Analysis of Soft Handoff in CDMA Cellular Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 50(6), 1507-1517.

Su, S. L., Chen, J. Y., and Huang, J. H. (1996), Performance Analysis of Soft Handoff in CDMA Cellular Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(9), 1762-1769.

Viterbi, A. J., Viterbi, A. M., Gilhausen, K. S., and Zehavi, E. (1994), Soft Handoff Extends CDMA Cell Coverage and Increases Reverse Link Capacity, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 12(8), 1281-1288.

Wong, D. and Lim, T. J. (1997), Soft Handoffs in CDMA Mobile Systems, *IEEE Personal Communications*, 4(6), 6-17.

Zhang, N. and Holtzman, J. M. (1998), Analysis of a CDMA Soft-Handoff Algorithm, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 47(2), 710-714.

**정성환**

서울대학교 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사
 서울대학교 산업공학과 박사
 서울대학교 BK21 해양기술 인력양성사업단
 연수연구원
 관심분야: 통신망의 성능분석, Stochastic
 Modeling, Queuing Theory, 센서 네트워크

**이상천**

서울대학교 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사
 서울대학교 산업공학과 박사
 현재: 경상대학교 산업시스템공학부 부교수
 관심분야: 정보통신시스템, 신뢰성 공학,
 대기이론

**홍정완**

서울대학교 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사
 서울대학교 산업공학과 박사
 현재: 한성대학교 산업시스템공학과 교수
 관심분야: 정보통신시스템, Queuing Theory,
 산업정보시스템

**이창훈**

서울대학교 공과대학 학사
 캔사스주립대학 산업공학과 석사
 캔사스주립대학 산업공학과 박사
 서울대학교 산업공학과 교수
 관심분야: 신뢰성 공학, 확률 및 통계, 품질
 관리, 통신 및 네트워크 분석