경제성을 고려한 이동통신망의 최적 주파수 운용 방안*

양 원 석**

Economical Approach to Optimal Spectrum Operation in Mobile Networks

Won Seok Yang**

■ Abstract ■

We consider an economic approach for spectrum operations in mobile networks. We present the investment function of base stations according to the number of FAs assuming the linearity of cell splitting. We show that there is an economic amount of spectrum which corresponds to the optimal number of FAs that minimizes the investment. We analyze the impact of the cost structure and the traffic distribution in base stations on the economic amount of spectrum. This paper is applicable to an economic spectrum operation for mobile operators. In addition, the national regulatory authority can use the economic amount of spectrum as the minimal amount for spectrum allocation.

Keywords : Economic Analysis, Spectrum, Allocation, Mobile Network

1. 서 론

주파수는 이동통신 사업을 위해 반드시 필요한 자원이다. 반면, 주파수를 확보하기 위해서는 막대한 비용이 소요된다. 따라서 이동통신 사업자는 통화량을 수용함과 동시에 사업성을 확보할 수 있는 경제적인 주파수 운용방안이 필요하다. 한편, 주파수는 국가적으로 한정된 자원이다. 따라서 정부에서도 주파수 분배 시 사업자가 이윤을 극대화할 수 있도록 주파수 할당량 및 대가를 산정하여 효율적인 주파수 이용의 인센티브를 제공해야한다.

현재까지 이동통신 주파수를 할당하는 경우 ITU-

논문접수일 : 2009년 02월 18일 논문수정일 : 2009년 11월 27일 논문게재확정일 : 2009년 11월 30일
* 이 논문은 2010년도 한남대학교 교비학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.
** 한남대학교 경영학과

R 모형을 기반으로 주파수 소요량을 산출하였다[4, 5]. ITU-R 모형은 대표적인 주파수 소요량 산출 방법론으로 IMT-2000 및 WiBro 통신망의 주파수 소요량 산출에 적용되었다. 이후 Chung et al.[1], Irnich and Walke[3]는 ITU-R 모형을 패킷망으로 확장하여 WiMAX등 다양한 이동통신망의 주파수 소요량을 산출하였다.

ITU-R 모형에서는 주파수 소요량 산출 시, 통화량, 기지국 용량, 셀 반경, 주파수 효율 등의 기술적인 특성만을 고려하며 투자비와 같은 경제적인 요소를 고려하지 않는다. 한편, 기존 연구에서는 통화밀도가 가장 높은 셀의 주파수 소요량을 산출한다. 가입자의 이동성을 고려하면 논리적으로 최소한 고밀도 셀의 필요 주파수량이 요구된다. 하지만, 최근 이동통신 기술에서는 셀분할을 통해 통화량을 분산할 수 있으므로 필요 주파수량이 감소할 여지가 있다. 따라서 기존의 주파수 소요량이 과대 추정치일 수도 있다. 실증적으로도 국내 이동통신 사업자의 주파수가 부족했던 경우는 없다.

우리나라에서는 2G 기술인 IS-95A, cdma2000 1x를 비롯하여 3G 기술인 WCDMA가 상용화되었다. 2008년 9월 기준으로 3G 가입자는 전체 이동통신 가입자 대비 32% 수준으로 3G로의 전환이 진행되고 있다. 국내 2G, 3G 이동통신망은 설계 및 운영 측면에서 크게 두 가지 특징을 갖고 있다.

첫째, 이용자가 현재 기지국의 통화영역을 벗어나 인접 기지국으로 이동하는 경우 소프트 핸드오버 기술을 적용한다. 소프트 핸드오버에서는 가입자가 이동하는 인접 기지국과의 통화를 연결한 뒤 기존 기지국과의 연결을 끊는다[2]. 소프트 핸드오버를 적용하면 절단률이 감소하고 핸드오프 이득을 통해 통화품질을 향상시킬 수 있다. 소프트 핸드오버를 적용하기 위해서는 인접 기지국을 모두 동일한 개수의 FA(Frequency Allocation)로 운영해야 한다. FA는 대역확산을 위한 주파수 대역폭을 의미한다. FA 1개의 주파수 대역폭은 IS-95A와 cdma2000 1x에서는 1.25MHz이고 WCDMA에서는 5MHz이다. 동일 개수의 FA로 기지국을 운영하는 동일 FA 권역은 기지국의 통화량 분포에 영향을 받으며 일반적으로 시, 군 규모의 크기를 갖는다. 이동통신망에서는 기지국들의 통화량이 다르므로 기지국별로 필요 FA 개수가 상이하다. 따라서 통화량이 작은 기지국은 필요 이상의 FA를 이용하므로 주파수 자원의 낭비와 불필요한 FA 투자비가 발생한다. 예를 들어, 500개의 4FA 기지국으로 서울특별시를 서비스한다고 가정하자. nFA는 FA n개를 의미한다. 통화량 증가에 의해 50개 기지국에 과부하가 발생했다고 하자. 이 경우 과부하 기지국과 함께 과부하가 아닌 450개 기지국의 FA도 동시에 증설해야한다. 3G 망의 경우, 5MHz의 주파수와 450개 기지국의 1FA 증설 비용이 낭비된다. 결과적으로 통화밀도가 가장 높은 기지국을 기준으로 주파수 소요량을 산출하면 주파수 및 투자비의 낭비가 발생할 수 있다.

둘째, 2G, 3G, Mobile WiMAX 등 최근 이동통신기술에서는 주파수 재사용 계수가 1이다[6]. 인접 셀에서 동일한 주파수를 사용할 수 있으므로 복잡한 주파수 배치계획 없이 손쉽게 기지국을 재배치할 수 있다. 통화밀도가 높은 셀의 통화영역을 다수의 작은 셀로 분할하여 트래픽을 분산 수용하여 필요 FA 개수를 줄일 수 있다. 따라서 셀분할을 통해 기지국의 필요 FA 개수 또는 주파수 소요량을 낮춰 주파수의 이용 효율을 높일 수 있다.

기지국 투자비는 고정비와 변동비로 구분된다. 고정비는 FA에 무관하나 변동비는 FA 개수에 따라 변화한다. 고정비에는 기지국 부대장비, 철탑 비용이 포함된다. 변동비에는 트래픽 처리를 위한 채널카드 투자비가 포함된다. 동일 FA 권역의 FA 개수가 큰 경우에는 기지국 용량이 증가하므로 통화량을 수용하기 위한 기지국 수가 줄고 고정비도 감소한다. 반면, FA 개수가 증가하므로 변동비가 증가한다. FA 개수가 작은 경우에는 변동비가 감소한다. 반면, 통화량을 수용하기 위해 셀 분할이 필요하므로 기지국 수가 증가하고 고정비도 증가한다. 결과적으로 동일 FA 권역의 FA 개수에 따라 기지국 투자비가 변화하므로 이동통신망에서 주파수

운영의 경제적 효율성을 추구할 수 있다.

본 논문에서는 지역 내 모든 기지국의 FA 개수가 동일하고 셀분할이 가능한 2G, 3G 이동통신망을 고려한다. 주파수 재사용계수를 1로 가정하여 셀분할에 따른 통화품질 저하 등의 기술적인 측면을 배재하고 경제적인 측면만을 고려하여 기지국 투자비를 분석한다. 기지국 단가를 고정비와 변동비로 구분하고 선형적인 셀분할을 가정하여 FA 개수에 따른 기지국 투자비를 수리적으로 표현한다. 수리적인 분석과 수치 예를 통해 기지국 투자비를 최소화하는 최적 FA 개수가 존재함을 밝힌다. FA 개수에 대역폭을 곱하면 주파수량이 산출되므로 최적 FA 개수로부터 경제적 주파수량을 산출할 수 있다. 기지국 비용구조와 기지국 통화량 분포가 경제적 주파수량에 미치는 영향을 분석한다.

현재까지는 2G, 3G 이동통신 시스템의 FA 개수와 기지국 투자비의 관계가 수리적으로 분석되지 않았다. 이동통신 사업자는 망설계 프로그램을 이용하여 기지국을 설계하고 투자비를 산출할 수 있다. 일반적으로 망설계 프로그램에서는 전파전파모델을 이용하여 기지국의 커버리지만을 설계하므로 기지국의 통화량과 비용구조가 기지국 투자비에 미치는 영향을 명확히 파악하기 어렵다. 결과적으로 망설계 프로그램을 통해 FA 개수에 따른 기지국의 투자비 구조와 경제적인 주파수량의 일반적인 특성을 도출하기에는 한계가 있다.

이동통신 사업자는 본 논문에서 제시한 방법론을 통해 주파수 운영 시 경제적인 측면에서 이동통신망의 효율성을 제고할 수 있다. 사업자의 이익을 극대화하고 통화 수요를 충족시키는 주파수 운영방안 수립 및 실행에 경제적 주파수량을 활용할 수 있다. 규제당국은 주파수 회수 및 신규할당 시 경제적 주파수량을 활용하여 주파수 소요량 산출에 경제성 개념을 도입할 수 있다. 경제적 주파수량은 사업에 필요한 최소한의 주파수량이라 할 수 있으므로 주파수 할당량의 최소치로 활용 가능하다.

이후 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 기지국 투자비 모형을 기술한다. 제 3장에서는 FA 개수에 따른 기지국 투자비를 유도하고 경제적 주파수량의 특징을 분석한다. 제 4장과 제 5장에서는 수치 예와 결론을 다룬다.

2. 기지국 투자비 산출 모형

본 논문에서는 다음 네 가지 가정 하에서 FA 개수에 따른 기지국 투자비를 수식으로 표현한다. 첫째, 동일 FA 권역의 기지국 별 통화량이 주어졌다고 가정한다. 둘째, 선형적인 셀분할을 가정한다. x개의 yFA 기지국을 y개의 xFA 기지국으로 셀분할하여 통화량을 수용할 수 있다고 가정한다. 셋째, 기지국 투자비를 고정비와 변동비로 구분한다. 변동비는 FA 개수에 비례한다. 마지막으로 셀분할에 따른 간섭증가 및 통화품질 저하와 같은 기술적인 측면은 배재하고 경제적인 측면만을 고려한다. 투자비 산출을 위한 가정 및 모형의 구체적인 내용은 다음과 같다.

동일 FA 권역에 기지국이 n개 있다. i번째 기지국의 통화량을 t_i로 표기한다. 1FA 기지국의 링크용량(link capacity)을 M이라 표기한다. 링크용량은 동시사용 가능자 수이므로 1FA 기지국에서 M명이 동시에 통화할 수 있음을 의미한다. 2G, 3G 이동통신망의 링크용량은 다음과 같이 표현된다[2].

$$M = \frac{W}{R}\frac{s_g f \rho}{(E_b/N_0)v}.$$

여기에서 W는 주파수 대역폭, R은 데이터속도, s_g는 섹터화이득, f는 주파수 재사용 계수, E_b/N_0는 신호대 잡음비, v는 음성 활성화율, 그리고 ρ는 셀로딩 계수이다. 국내 이동통신 사업자는 특수한 지형이나 일부 외곽지역을 제외한 대부분의 도심지역을 3섹터 기지국으로 운영한다. FA 개수에 대한 경제성분석은 통화량이 많은 도심 지역에서 유용하다. 따라서 본 논문에서는 모든 기지국이 3섹터로 구성되어 있다고 가정하고 3섹터의 섹터화 이득을 적용한다.

통신 시스템에서는 일반적으로 얼랑모형을 적용하여 시스템의 용량을 분석한다. 얼랑모형에서는 GoS(Grade of Service)인 차단률에 따른 얼랑용량을 제공한다. 링크용량 M과 차단률을 적용하여 얼랑모형에서 산출한 1FA 3섹터 기지국의 용량을 B라 표기한다. i번째 기지국에 필요한 FA 개수를 f_i로 표기한다. f_i는 다음과 같다.

$$f_i = [t_i/B]+1.$$

여기에서 $[x]$는 x를 넘지 않는 최대 정수이다. 동일 FA 권역에서 최대 FA 개수를 K라 표기한다. K는 다음과 같이 표현된다.

$$K = \max\{f_i\},\ i=1,\cdots,n.$$

kFA인 기지국 수를 n_k로 표기한다. n_k는 다음과 같이 산출된다.

$$n_k = \sum_{i=1}^{n} I_i^{(k)}.$$

여기에서 $f_i = k$이면 $I_i^{(k)} = 1$이다. 셀분할은 주변 기지국의 통화영역과 통화량에 영향을 받는다. 특수한 경우에는 망 최적화와 이설재배치를 통해 통화영역을 조정하여 셀을 분할하지 않고도 통화량을 분산할 수 있다. 본 논문에서는 기지국이 현재 위치에 고정되어 있다고 가정하므로 망 최적화 및 이설재배치는 고려하지 않는다.

2G, 3G 이동통신망에서는 이론 및 현실적인 측면에서 선형적인 셀분할을 고려할 수 있다. 첫째, 동일 FA 권역에 yFA 기지국이 x개 있다고 하자. xyFA를 통해 지역 내의 통화량을 수용하므로 권역의 전체 용량을 xyFA라 할 수 있다. 한편, xFA 기지국이 y개 있는 경우에도 해당 권역에 xyFA 용량을 제공한다. 선형적으로 셀분할을 하더라도 해당 권역의 통화량을 수용할 수 있다. 둘째, 선형적인 셀분할에서는 분할 국소수가 소수일 수 있다. 3FA 기지국 3개를 2FA 기지국으로 분할하면 기지국 수가 4.5개가 된다. 소수점 국소가 12.5% 차지한다. 기지국 수가 증가하면 이러한 영향이 미미해진다. 예를 들어, 4FA 기지국 611개를 3FA 기지국으로 분할하는 경우, 기지국 수가 814.7개가 된다. 소수점인 0.7국은 전체의 0.1%이므로 투자비 측면에서 소수점인 국소 수의 영향이 미미하다. 사업자의 주파수 소요량은 통화량이 가장 큰 지역에 의해 결정되므로 국내에서는 서울의 필요 주파수량이 가장 중요하다. 서울에 3G 기지국 수가 600개 이상이므로 현실적으로 소수점 국소수의 영향이 미미하다. 마지막으로 선형적 셀분할의 현실적 가능성에 대해 살펴본다. 4FA 기지국 600개를 1FA로 셀분할하면 1FA 기지국 2400개가 생성된다. 2G, 3G의 주파수 재사용 계수가 1이므로 이론적으로 2400개의 기지국으로 셀분할을 할 수 있다. 한편, 이동통신 사업자는 중계기를 이용하여 기지국의 전파가 미치지 못하는 음영지역에 커버리지를 제공한다. 국내에서는 일반적으로 광중계기를 이용하여 옥외 커버리지를 확장한다. 3G의 경우 서울에 2000여 개의 광중계기가 운영되고 있다. 서울에서는 기지국이 밀집되어 있기 때문에 기지국의 셀 반경이 작아 기지국과 광중계기의 커버리지가 크게 차이나지 않는다. 따라서 현재 대비 4배 이상으로 기지국을 셀분할 할 수 있다. 국내 3G 이동통신망은 4FA가 최대이므로 현실적으로도 선형적인 세분할이 가능하다. 더욱이 기지국별로 부하가 다르기 때문에 통화 밀집도가 높은 지역을 제외하면 셀분할 가능성이 증가한다.

기지국 투자비는 고정비와 변동비로 구분된다. 고정비는 기지국을 신설하는 경우 FA 개수와 무관하게 소요되는 비용이다. 정류기, 냉방기, 축전지 등의 부대장비, 안테나, 급전선 등의 사급자재, 철탑 및 기본 랙 등의 자재비와 더불어 전원, 환경 등의 공사비가 고정비에 포함된다. 변동비는 FA 개수에 따라 변화한다. 기지국의 FA 증설 시에는 주파수 변환, 디지털 신호 처리 등의 기능을 수행하는 채널카드를 추가해야 한다. 따라서 변동비에는 채널카드 및 관련 설비 투자비와 증설 공사비가 포함된다. 본 논문에서는 변동비가 FA 개수에 비례한다고 가정한다. 고정비를 c_F, FA 1개 증설비를

c_V, kFA 기지국의 단가를 c_k라 하자. c_k는 다음과 같이 표현된다.

$$c_k = c_F + kc_V. \tag{1}$$

3. 경제적 주파수량 분석

지역 전체를 1FA로 설계한다고 가정하자. 모든 기지국을 1FA 기지국으로 분할했을 때 1FA 기지국 수를 Ω라 표기하자. 선형적인 셀분할에 따라 2FA 기지국 n_2개는 1FA 기지국 $2n_2$개로 분할된다. n_k개의 kFA 기지국은 kn_k개의 1FA 기지국으로 분할되므로 Ω는 다음과 같다.

$$\Omega = (n_1 + 2n_2 + \cdots Kn_K). \tag{2}$$

동일 FA 권역이 kFA인 경우 기지국 투자비를 $T(k)$라 하자. 식 (1)과 식 (2)을 이용하면 동일 FA 권역이 1FA인 경우 기지국 투자비는 다음과 같다.

$$T(1) = \Omega c_1 = \Omega(c_F + c_V). \tag{3}$$

동일 FA 권역을 2FA로 설계하는 경우를 살펴보자. 1FA만으로 통화량을 수용할 수 있는 기지국도 2FA로 운영하므로 1FA 기지국의 투자비는 n_1c_2이다. 3FA 이상인 기지국은 셀분할된다. 2FA로 셀분할하므로 kFA 기지국은 $k/2$개의 2FA 기지국으로 분할된다. 동일 FA 권역을 2FA로 설계할 때 총 투자비는 다음과 같다.

$$T(2) = n_1c_2 + (n_2 + 3n_3/2 + \cdots + Kn_K/2)c_2.$$

식 (1)과 식 (2)를 이용하며 $T(2)$를 정리하면 다음을 얻는다.

$$T(2) = (n_1 + \Omega)(c_F/2 + c_V). \tag{4}$$

동일 FA 권역을 kFA로 설계하는 경우 기지국 투자비는 다음과 같다.

$$T(k) = \left[n_1 + \cdots + n_k + \frac{k+1}{k}n_{k+1} \cdots + \frac{K}{k}n_K\right]c_k.$$

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 $T(k)$를 식 (4)와 같은 형태로 정리하면 다음을 얻는다.

$$T(k) = [(k-1)n_1 + (k-2)n_2 + \cdots + n_{k-1} + \Omega)]. \times (c_F/k + c_V) \tag{5}$$

식 (5)는 근사적으로 다음과 같이 표현된다.

$$T(k) \approx (a'k^2 + b'k + c')(c_F/k + c_V). = ak^2 + bk + c + d/k \tag{6}$$

k가 실수인 경우 식 (6)의 $T(k)$가 오목(concave) 함수이므로 $T(k)$를 최소화하는 최적해가 존재한다. 제 4장 <그림 2>와 같이 k가 정수인 경우에도 동일한 결과를 얻는다. 결과적으로 기지국 투자비를 최소화하는 최적 FA 개수가 존재한다. 주파수량은 FA 개수와 대역폭의 곱이므로 이동통신 시스템에서 경제적 주파수량을 산출할 수 있다.

이동통신 사업자와 규제당국은 경제적인 주파수 운영 및 효율적인 주파수 이용 촉진 측면에서 경제적 주파수량을 활용할 수 있다. 이동통신 사업자는 본 논문에서 제시한 방법론을 통해 주파수 운영 시 경제적인 측면에서 이동통신망의 효율성을 제고할 수 있다. 이동통신 사업자는 일반적으로 망품질 등의 기술적인 특성만을 고려하여 통신망을 설계하므로 주파수 운영의 경제적 효율성이 낮을 수 있다. 현재 주파수 사용량과 경제적 주파수량을 비교하면 현재 주파수 운용의 경제적 효율성을 측정하고 이를 바탕으로 경제적인 측면에서 이동통신망의 효율성을 제고할 수 있다. 기술적인 측면의 주파수 운영방안과 경제적 주파수량을 함께 고려하면 기술 및 경제적으로 최적인 주파수 운용 방안을 도출할 수 있으리라 기대된다. 규제당국은 주파수

자원 배분 시 경제적 효율성을 달성할 수 있도록 적정한 경제적 가치를 회수하여 소비자 후생을 극대화해야 한다. 현재 국내에서는 통화량과 이동통신망의 특성만을 반영하여 주파수 소요량을 산출한다. 주파수의 경제적인 측면을 고려하지 않는다. 따라서 본 연구의 경제적 주파수량을 활용하면 주파수 회수 및 할당 대역폭 산정에 경제성 개념을 도입할 수 있다. 규제당국은 사업자가 주파수를 효율적으로 활용하도록 유도해야 한다. 사업자가 적정한 이윤을 창출할 수 있도록 주파수량을 할당해야 한다. 사업자가 과대 주파수량을 할당받는 경우에는 주파수의 낭비와 과도한 주파수 대가로 인한 사업성 저하가 발생한다. 사업자가 과소 주파수량을 할당받는 경우에는 주파수 부족으로 인해 지속적인 사업 확장이 불가능하다. 경제적 주파수량은 통화 수요를 충족시키며 비용을 최소화하는 주파수량이므로 이를 주파수 할당에 활용하면 사업자의 효율적인 주파수 이용을 촉진할 수 있다. 망품질 등의 기술적인 특성을 고려하면 경제적 주파수량은 통신사업에 필요한 최소한의 주파수량이라 할 수 있으므로 주파수 할당량의 최소치로 경제적 주파수량을 활용할 수 있다.

고정비와 증설비의 비율을 r로 표기하자. r은 다음과 같이 정의된다.

$$r = c_F / c_V.$$

$D(k)$를 다음과 같이 정의한다.

$$D(k) = T(k+1) - T(k). \tag{7}$$

식 (3)과 식 (4)를 식 (7)에 대입하면 다음을 얻는다.

$$D(1) = c_V\left[n_1 - \frac{(\Omega - n_1)}{2} r\right].$$

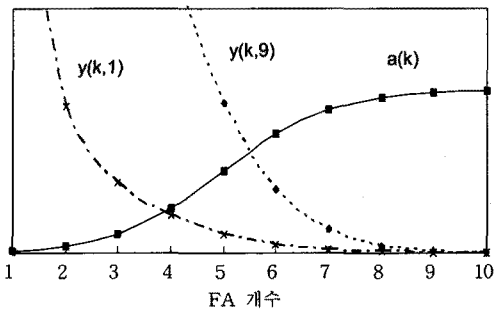
$D(1)$에서 n_1, Ω는 상수이므로 $D(1)$의 부호는 r에 영향을 받는다. $D(1)$이 투자비의 차이이므로 최적 FA 개수가 r에 영향을 받게 된다. $k=1,\cdots,K$에 대해 $D(k)$는 다음과 같이 표현된다.

$$D(k) = c_V[a(k) - y(k, r)]. \tag{8}$$

이때 $a(k)$와 $y(k, r)$는 다음과 같다.

$$a(k) = \sum_{i=1}^{k} n_i,\ b(k) = \sum_{j=1}^{k} jn_j,\ y(k, r) = \frac{[\Omega - b(k)]r}{k(k+1)}.$$

$b(k)$가 k에 대한 증가함수이므로 $y(k, r)$의 분자인 $\Omega - b(k)$는 k에 대한 감소함수이다. $y(k, r)$의 분모 $k(k+1)$은 k에 대한 증가함수이다. 따라서 k가 증가하면 $y(k, r)$은 감소한다. 한편, $b(K) = \Omega$, $y(K, r) = 0$이다. 결과적으로 $y(k, r)$은 k가 증가함에 따라 감소한다. $k=1$에서 최대값을 갖고 $k=K$에서 0이 된다. 아울러 r이 증가하면 $y(k, r)$이 증가한다. 한편, $a(k)$는 k에 대한 증가함수이고 r과 무관하다. $a(k)$와 $y(k, r)$은 <그림 1>과 같다.



〈그림 1〉 $a(k)$와 $y(k, r)$

최적 FA 개수를 α라 하자. $T(\alpha+1) > T(\alpha)$이므로 식 (7)에서 다음을 얻는다.

$$D(\alpha - 1) < 0,\ D(\alpha) > 0. \tag{9}$$

r이 증가하면 $y(k, r)$이 증가하므로 $D(\alpha) < 0$이 될 수 있다. 따라서 r이 증가하면 최적 FA 개수가

α보다 증가한다. <그림 1>에서 4FA가 최적해이나 r이 증가하면 6FA가 최적해이다. 결과적으로 $r=c_F/c_V$가 증가하면 최적 FA 개수가 증가한다. 경제적 주파수량은 기지국의 비용구조에 영향을 받는다.

FA를 낮추면 셀을 분할해야 하므로 필요 기지국 수가 증가하고 FA를 증설하면 필요 기지국 수가 감소한다. FA를 증설하면 FA 증설비가 증가하나 기지국 수가 감소하므로 기지국 신설 비용이 감소한다. 고정비 대비 증설비가 작은 경우에는 FA 증설 비용이 기지국 신설 비용 감소분보다 작을 수 있다. 따라서 r이 큰 경우에는 FA 증설이 경제적이므로 최적 FA 개수가 증가한다. 반면, r이 작은 경우에는 FA 증설 비용이 기지국 수 신설비용 감소분보다 클 수 있으므로 최적 FA 수가 감소한다.

이동통신 사업자에 따라 기지국 장비 제조사가 다르고 장비의 납품 시기 및 수량에 따라 장비의 원가구조가 변할 수 있다. 기지국의 고정비와 변동비의 상대적 비율이 사업자 간에 다를 수 있다. 따라서 동일 지역의 동일 통화 수요라 하더라도 사업자 간 경제적 주파수량이 상이할 수 있다. 결과적으로 규제당국에서는 주파수 할당 시 신규, 후발 및 선발 사업자간 비용 구조에 대한 고려가 필요하다.

식 (8)의 $a(k)$와 $y(k,r)$는 n_k의 함수이므로 최적 FA 개수는 n_k의 분포에 영향을 받는다. 최적 FA 개수는 기지국에 필요한 FA 개수 분포에 영향을 받든다. k에 대해 n_k가 증가함수와 감소함수일 때 $a(k)$를 각각 $a_I(k)$와 $a_D(k)$로 표기하자. $a(K)$는 동일 FA 권역의 기지국 수 이므로 n_k의 형태와 무관하며 상수이다. 따라서 k가 작은 경우 $a_I(k)$가 $a_D(k)$보다 작다. <그림 1>에서 $a(k)$가 감소하면 최적해가 증가한다. 따라서 n_k가 증가함수인 경우에는 최적 FA 개수가 증가한다. 반면, n_k가 감소함수인 경우에는 k가 작은 값을 가질 때 $a_D(k)$가 $a_I(k)$보다 크다. <그림 1>에서 $a(k)$가 증가하면 최적해가 감소한다. n_k가 감소함수인 경우에는 필요 FA 개수가 작은 기지국이 상대적으로 많다. 즉 1, 2FA로 통화량을 수용할 수 있는 기지국의 비율이 높다. 이 경우 FA 개수가 증가할수록 불필요한 용량증설 투자비가 증가한다. 동일 FA 권역의 FA 개수가 작은 경우에는 셀을 분할해야 하는 기지국 수가 감소하여 기지국 신설 투자가 감소한다. 따라서 n_k가 감소함수인 경우에는 최적 FA 개수가 감소한다. n_k가 증가함수인 경우에는 필요 FA 개수가 큰 기지국이 상대적으로 많다. 동일 FA 권역의 FA 개수가 작으면 셀분할이 필요한 기지국 수가 증가하므로 신설 투자비가 증가한다. 따라서 n_k가 증가함수인 경우에는 최적 FA 개수가 증가한다. 결과적으로 경제적 주파수량은 기지국 통화량 분포에 영향을 받는다. 가입자의 통화 특성에 따라 사업자 별로 기지국의 통화량이 상이하다. 망 설계 및 치국 방법에 따라 기지국의 개수와 위치가 다르다. 따라서 동일 지역을 서비스하더라도 각 사업자의 기지국 통화량 분포가 상이하므로 사업자별로 경제적인 주파수량에 차이가 발생할 수 있다.

4. 수치 예

동일 FA 권역에 200개의 기지국이 있다고 하자. 기지국별 필요 FA 개수가 <표 1>과 같다고 가정한다.

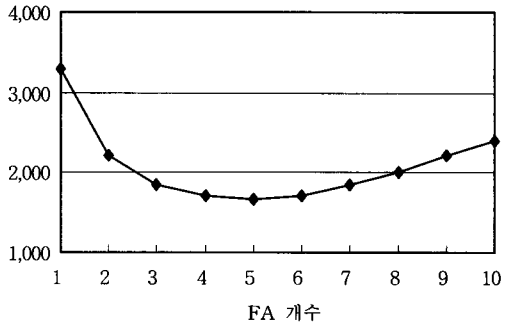
〈표 1〉 필요 FA 개수 별 기지국 수

필요 FA 개수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	합계
기지국 수	2	7	15	30	46	46	30	15	7	2	200

<표 1>에서 1FA가 필요한 기지국은 2개이고 2FA가 필요한 기지국은 7개이다.

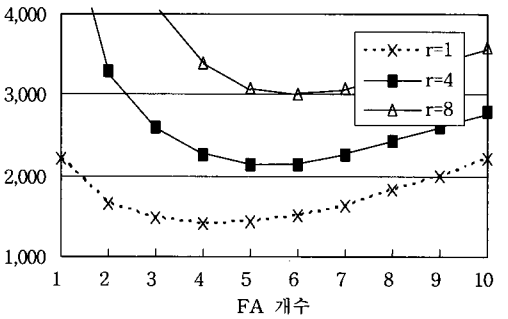
기지국의 고정비와 증설비를 $c_F=2$이고 $c_V=1$라 가정한다. 식 (5)에서 동일 FA 권역의 FA 개수별 기지국 투자비를 산출하면 <그림 2>를 얻는다. 제3장에서 기술한바와 같이 기지국 투자비는 FA 개수에 따라 오목하고 투자비를 최소화하는 최적 FA 개수가 존재한다. <그림 2>에서 5FA에서 기지국 투자비가 최소화된다. 경제적 주파수량이 5FA이

다. FA 개수가 경제적 주파수량보다 작은 경우 셀 분할에 따른 기지국 신설이 증가한다. 따라서 FA 개수가 작은 경우, FA 개수가 증가함에 따라 기지국 투자비가 급격하게 감소한다.



〈그림 2〉 FA 개수에 따른 기지국 투자비

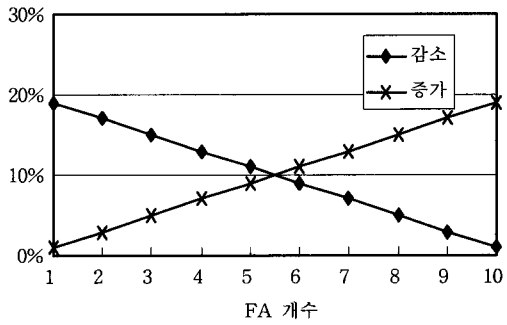
$c_V=1$이고 r이 1, 4, 8인 경우, 기지국 투자비는 <그림 3>과 같다. r이 1, 4, 8인 경우, 기지국 투자비는 각각 4FA, 5FA, 6FA에서 최소화된다. r이 증가할수록 경제적 주파수량이 증가한다.



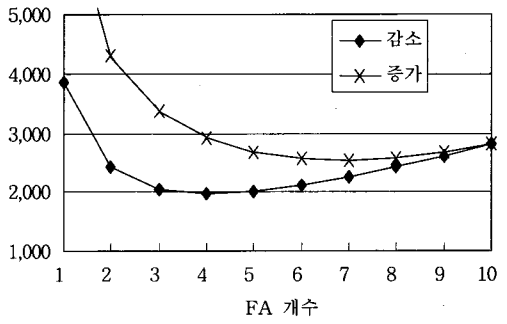
〈그림 3〉 r에 따른 기지국 투자비

<그림 4>와 같이 k에 따라 n_k가 증가 또는 감소함수인 경우를 고려한다. 두 경우 모두 기지국 수는 200개이다. $c_F=4$이고 $c_V=1$이라 가정한다.

<그림 5>에서 n_k가 증가함수 또는 감소함수인 경우 각각 7FA와 4FA에서 기지국 투자비가 최소화된다. n_k가 증가함수인 경우 상대적으로 경제적 주파수량이 크다. n_k는 기지국 통화량 분포에 의해 결정되므로 경제적 주파수량은 통화량 분포에 영향을 받는다. n_k가 증가함수인 경우 감소함수 대비 필요 FA 개수가 큰 기지국이 많으므로 낮은 FA로 셀분할 시 신설 기지국 수가 증가한다. 따라서 <그림 5>에서 n_k가 증가함수인 경우 감소함수 대비 투자비가 크다.



〈그림 4〉 n_k의 분포

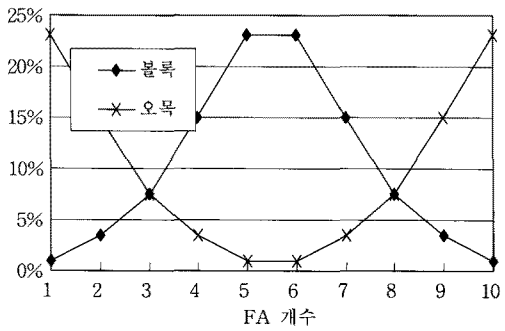


〈그림 5〉 n_k가 증가 또는 감소인 경우 기지국 투자비

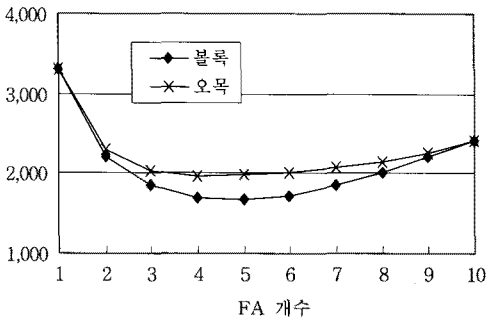
<그림 6>과 같이 n_k가 볼록 또는 오목한 형태를 살펴보자. n_k가 볼록인 경우 필요 FA 분포는 <표 1>과 같다. 두 경우 모두 기지국 수는 200개이다. $c_F=2$이고 $c_V=1$이라 가정한다.

<그림 7>에서 n_k가 볼록 또는 오목함수인 경우 최적 FA 개수는 각각 5FA와 4FA이다. 경제적 주파수량이 기지국 통화량 분포에 영향을 받는다. n_k가 오목함수인 경우 필요 FA 개수가 큰 기지국이 많으므로 낮은 FA로 셀분할을 하는 경우 상대적

으로 셀분할 기지국 수가 많다. 따라서 <그림 7>과 같이 n_k가 오목함수 일 때 볼록함수 대비 투자비가 크다.



〈그림 6〉 n_k의 분포



〈그림 7〉 n_k가 볼록 또는 오목인 경우 기지국 투자비

5. 결 론

본 논문에서는 2G, 3G 이동통신망의 경제적인 주파수 운용 방안을 다루었다. 지역 내 모든 기지국의 FA 개수가 동일하고 셀분할이 가능한 2G, 3G 이동통신망에 대해 FA 개수에 따른 기지국 투자비를 수리적으로 유도했다. 수리적인 분석과 수치예를 통해 기지국의 비용구조와 통화량 분포에 따라 경제적 주파수량이 상이할 수 있음을 밝혔다.

이동통신 사업자는 기술적인 측면에서의 주파수 운영방안과 경제적 주파수량을 함께 고려하면 기술 및 경제적으로 최적인 주파수 운용 방안을 도출할 수 있다. 현재 주파수 사용량과 경제적 주파수량을 비교하면 경제적인 통신망 운영 방안에 대한 시사점을 얻을 수 있으리라 생각한다. 규제당국은 경제적 주파수량을 통해 주파수 회수 및 할당 대역폭 산정에 경제성 개념을 도입할 수 있다. 경제적 주파수량은 통화 수요를 충족시키며 비용을 최소화하는 주파수량이므로 이를 주파수 할당에 활용하면 사업자의 효율적인 주파수 이용을 촉진할 수 있다. 아울러 주파수 자원 배분 시 경제적 효율성을 달성할 수 있는 적정한 경제적 가치 회수 및 소비자 후생 극대화라는 정책목표를 달성할 수 있다. 마지막으로 경제적 주파수량은 통신사업에 필요한 최소한의 주파수량이라 할 수 있으므로 경제적 주파수량을 주파수 할당량의 최소치로 활용할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Chung, W.G., E. Lim, J.G. Yook, and H.K. Park, "Calculation of Spectral Efficiency for Estimating Spectrum Requirements of IMT-Advanced in Korean Mobile Communication Environments," *ETRI Journal*, Vol.29, No.2 (2007), pp.153-161.

[2] Grag, V.K., *IS-95 CDMA and cdma2000 : Cellular/PCS Systems Implementation*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ 07458, 2000.

[3] Irnich, T. and B. Walke, "Spectrum Estimation Methodology for Next Generation Wireless Systems : Introduction and Results of Application to IMT-2000," *PIMRC 2004*, Barcelona, Spain, 2004.

[4] Rec. ITU-R M.1390, *Methodology for the Calculation of IMT-2000 Terrestrial Spectrum Requirement*, ITU, 1999.

[5] Rep. ITU-R M.2023, *Spectrum Requirements for IMT-2000*, ITU, 2000.

[6] WiMAX Forum, *Mobile WiMAX-Part II : A Comparative Analysis*, 2006.