

안테나 패턴에 대한 CDMA 셀룰러 시스템 용량 효율 분석

이 종 현

SK Telecom 중앙연구원

안테나의 특성은 셀룰러 시스템의 서비스 품질에 직접적으로 영향을 미치는 요소가 되며, 특히 섹터화로 인한 용량의 증가를 기할 수 있는 CDMA 시스템의 경우에는 매우 중요한 의미를 갖는다. 본 논문은 지향성 안테나를 이용하여 전력 제어된 CDMA 셀을 섹터화할 경우 얻을 수 있는 용량의 이득을 논의한다. 용량의 측면에서 이상적인 안테나 패턴과 비교할 때 실제 안테나 패턴의 역방향 링크 용량 효율을 해석적으로 구한다. 셀룰러 CDMA 시스템의 용량은 동일한 주파수 대역을 사용할 수 있는 최대 통신 채널의 수이므로 용량 효율은 결국 주파수 스펙트럼 이용 효율을 의미한다. 측정된 반사판 섹터 안테나 패턴을 대상으로 분석한 결과를 제시하고 패턴 특성과 섹터 셀의 배치 구조에 따라 용량 효율이 86~97%로 변화함을 보인다.

I. 서론

이동통신 서비스의 수요가 급증함에 따라 셀룰러 시스템의 용량 문제 즉, 주파수 스펙트럼 이용 효율 문제는 매우 중요한 쟁점이 되고 있다. 이러한 측면에서 섹터화와 음성 활성도를 이용한 용량 증가 이득은 CDMA 시스템의 큰 장점으로 부각된 바 있다^[1]. 섹터화에 의한 용량 이득이란 이상적인 안테나 패턴을 가정할 때 CDMA 셀룰러 시스템의 용량이 섹터의 수에 비례하여 증가하는 것을 말한다. 그러나 실제 안테나를 사용할 때는 빔 패턴에 매우 민감하게 의존하게 되며 이에 대한 분석이 이루어져야 한다.

Newson 등은 실제 안테나 패턴 중 대표적인 1가지 경우에 대해 용량을 분석, 비교하였으며^[3], Ja-

nson 등은 부채꼴 형태의 이상적 안테나 패턴이 섹터 경계 영역에서 중첩된다는 가정을 바탕으로 용량을 산출하였다^[4]. 그러나 Jansen의 가정은 실제적인 경우에는 적합하지 않으며, Newson의 분석 또한 해석적으로 명확하지 못하기 때문에 일반적인 경우에 안테나 패턴과 섹터화 용량 이득의 관계를 산출할 수 있는 방법을 제시하지 못하고 있다.

본 논문은 섹터 안테나 패턴과 CDMA 셀룰러 시스템의 용량과의 관계를 규명하는 것을 목적으로 한다. 주어진 안테나 패턴의 용량 효율을 구하기 위하여 새로운 계산식을 도출하며, 이때 이상적인 전력 제어와 최적한 빔 하향 조정 (beam tilting)이 이루어짐을 가정한다. 측정된 3 섹터용 반사판 안테나의 패턴에 대하여 분석한 예를 제시하여 빔 폭, 전후방비, 섹터 셀 배치에 따라 용량 효율이 변화함을 보인다.

II. 전력 제어된 CDMA 셀룰러 시스템의 역방향 링크 용량

가용한 채널의 수가 고정된 TDMA나 FDMA와는 달리 CDMA 시스템의 용량은 잡음과 간섭 전력의 양에 따라 결정된다. 전력 제어된 CDMA 셀룰러 시스템에서 제어 영역 내에 위치한 이동 단말로부터 기지국으로 수신되는 신호전력은 S 로 모두 동일하다. 간섭 전력은 전력 제어 영역 내부와 외부로 구분하여 생각할 수 있다. 따라서 잡음을 무시하면 신호 S 대 총 간섭 I 의 비는

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{I_i + I_o} \quad (1)$$

이며, 여기서 I_i 는 전력제어 영역 내부에서의 간섭 전력이고 I_o 는 외부로부터의 간섭전력이다. 식 (1)을 비트 에너지 E_b 대 간섭 밀도 I_o 의 비로 나타내면

$$\frac{E_b}{I_o} = \frac{S/R}{(I_s+I_o)/W} = \frac{W/R}{(I_s+I_o)/S} \quad (2)$$

이 된다. 여기서 W 은 대역폭이고 R 은 비트율이며, W/R 을 CDMA 시스템의 처리 이득 (processing gain)이라고 한다.

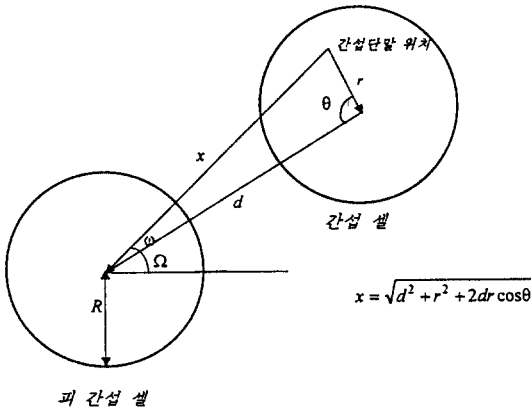
외부 셀에 존재하는 단말로부터의 간섭은 [그림 1]에 나타난 기지국과 간섭 단말과의 거리 x 와 단말의 송신 전력으로 결정되며, N 개의 단말기가 반경 R 인 셀내에 균일하게 분포되어 있다면

$$I_a = \frac{NS}{\pi R^2} \sum_{i=1}^k \int_0^{2\pi} \int_0^R J_i(r, \theta) dr d\theta \quad (3)$$

이다. 여기서 k 는 간섭을 주는 셀의 수이며

$$J_i(r, \theta) = \frac{r^{\alpha+1}}{(d_i^2 + r^2 + 2dr \cos \theta)^{\alpha/2}}$$

이다. 또 N 은 셀 내에서 동시 통화할 수 있는 사용자 수이며, α 는 감쇠지수(decay index)로서 자유



[그림 1] 타 셀로부터의 간섭

공간의 경우 2가 된다^[3].

한편, $N \gg 1$ 이라면

$$I_i = (N-1) S \approx NS \quad (4)$$

이므로 식(2)에 식(3)과 식(4)를 대입하여 N 에 대해 풀면

$$N = \frac{W/R}{E_b/I_o} \frac{1}{1 + \frac{1}{\pi R^2} \sum_{i=1}^k \int_0^{2\pi} \int_0^R J_i(r, \theta) dr d\theta} = \frac{W/R}{E_b/I_o} F \quad (5)$$

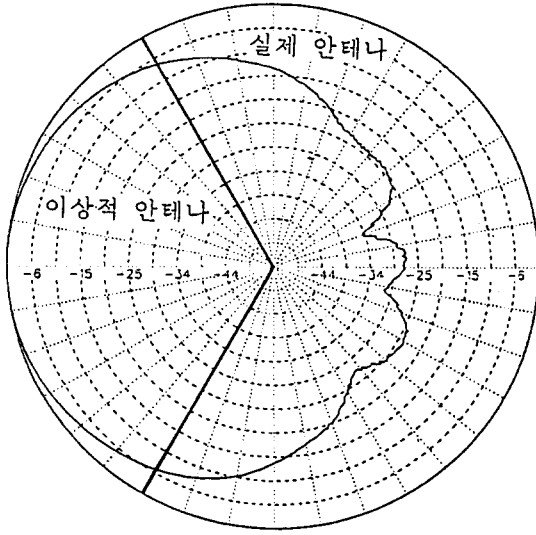
가 되며, 여기서 F 를 주파수 재사용 효율이라고 부른다^[2].

식(5)는 섹터 셀에도 그대로 적용할 수가 있으며 단, 이때 N 은 섹터 내 사용자 수가 된다.

III. 섹터 안테나의 용량 효율

셀룰러 시스템의 셀은 지향성 안테나를 이용하여 분할할 수 있으며 이를 섹터화 셀이라고 한다. 섹터화의 관점에서 이상적인 안테나의 패턴은 [그림 2]에 나타난 부채꼴 형태를 갖는 것으로서, 섹터 내의 모든 방향에 대해 동일한 이득을 나타내며 그 밖의 방향에 대해서는 이득이 0이어야 한다. 현재 섹터화를 위해 사용되고 있는 지향성 안테나는 평면 반사판이나 코너 반사판을 이용하여 패턴에 지향성을 부여하는 것이 대부분이다. 이러한 반사판 안테나는 반사판의 크기가 무한대라고 가정하여도 [그림 2]와 같은 이상적인 빔 패턴을 가질 수 없으며^[5], 반사판의 크기가 유한한 실제적인 경우에는 [그림 2]에 나타난 바와 같이 해당 섹터 외부에서 안테나의 이득이 0이 되지 않는다.

실제 반사판 안테나를 사용하여 섹터화 하면 패턴의 측엽(side lobe), 후엽(back lobe)에 의한 타

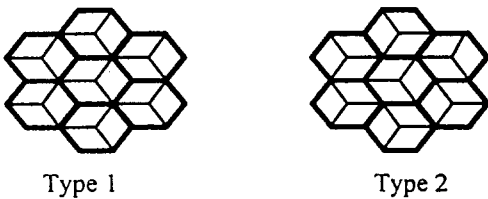


[그림 2] 실제 안테나와 이상적 안테나의 패턴

섹터로부터의 간섭 전력이 증가하게 된다. 따라서 셀 내의 간섭 전력은 섹터 내에 위치하는 전력 제어된 단말기들로 인한 간섭과 타 섹터에 위치하는 단말기들로 인한 간섭의 합으로

$$I_{ip} = N_p S + \frac{(m-1)N_p S}{\pi R^2} \int_{\frac{2\pi}{m}}^{2\pi} \int_0^R g(\theta) r dr d\theta \quad (6)$$

이 된다. 여기서 m 은 섹터 수이고 N_p 는 섹터 내 동시 통화할 수 있는 사용자 수이다. 또 $g(\theta)$ 는 안테나의 방위각(azimuth angle) 패턴이다. 식 (6)은



[그림 3] 섹터 셀 배치

식 (4)에 셀 내의 타 섹터로부터의 간섭 전력을 더한 것이다. 식 (6)의 두 번째 항의 적분 구간이 $2\pi/m \sim 2\pi$ 인 것은 해당 섹터 외부에 위치하여 전력 제어를 받지 않는 단말기들에 대해서만 간섭이 $g(\theta)$ 가 가중치로 작용하여 수신되기 때문이다.

한편, 섹터 각도 내에 이득이 상대적으로 낮은 방향에 위치하는 단말은 전력 제어 과정을 통해 그만큼 높은 전력으로 송신하게 된다. 따라서 이와 같이 단말의 증가된 송신 전력으로 인하여 타 셀로 미치는 간섭 전력도 증가한다. 이때 타 셀로부터의 간섭 전력은 섹터 셀의 배치에 따라 다르며 예를 들어 이상적 6각형 셀 패턴의 경우에 [그림 3]과 같이 2가지 형태를 생각할 수 있다. Type 1의 경우는 인접 셀의 섹터 안테나와 주엽(main lobe)이 정면으로 마주보는 형태이고, Type 2는 Type 1에 비해 60° 천이된 형태이다.

거리 d_i 만큼 떨어진 k 개의 셀로부터 수신되는 총 간섭 전력은

$$I_{ip} = \frac{mN_p S}{\pi R^2} \sum_{i=1}^k \int_0^{2\pi} \int_0^R J_i(r, \theta) \frac{g(\Theta)}{G(\theta+\psi)} dr d\theta \quad (7)$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서 인접한 6개의 셀을 간섭 셀로 가정하면 $k=6$ 이고

$$\begin{aligned} \Theta &= \omega + (i-1) \frac{2\pi}{k} + \Omega \\ &= \sin^{-1} \left(\frac{2}{x} \sqrt{\sigma(\sigma-x)(\sigma-d_i)(\sigma-r)} \right) \\ &\quad + (i-1) \frac{2\pi}{k} + \Omega \\ \sigma &= \frac{1}{2} (d_i + x + r) \end{aligned}$$

이다. 또, $m=3$ 이라면

$$G(\theta+\Psi) = \max \left\{ g(\theta+\Psi), g(\theta+\Psi + \frac{\pi}{3}), \right.$$

$$\left. g(\theta+\Psi + \frac{2\pi}{3}) \right\}$$

으로서 $1/G(\theta+\Psi)$ 는 해당 기지국으로부터 전력 제어를 받은 단말의 송신 전력에 대한 가중치로 작용한다. 여기서 $\max\{x, y, z\}$ 는 x, y, z 중에서 최대 값을 취한다. 또 Ψ 는 섹터 셀 배치에 따른 위상 천이량으로 [그림 3]의 Type 1의 경우는 0° , Type 2의 경우는 60° 이다.

식 (2), (6), (7)을 이용하면 섹터 내 사용자 수는

$$N_p = \frac{W/R}{E_b/I_o} \frac{1}{1 + \frac{m-1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R g(\theta) r dr d\theta + \frac{m}{\pi R^2} \frac{\sum_{i=1}^k \int_0^{2\pi} \int_0^R J_i(r, \theta) \frac{g(\Theta)}{G(\theta+\Psi)} dr d\theta} } \quad (8)$$

로 구할 수 있다. 용량 효율 ρ 를 실제 안테나 패턴에 대한 용량과 이상적 안테나 패턴을 가정한 경우 용량의 비율로 정의하면

$$\rho = \frac{N_p}{N} = \frac{F}{1+\Lambda_i+\Lambda_o} \times 100[\%] \quad (9)$$

이 되며, 여기서 F 는 2장에서 설명한 이상적 패턴을 가정할 때 셀룰러 시스템의 주파수 재사용 효율이다. 또

$$\Lambda_i = \frac{m-1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R g(\theta) r dr d\theta$$

$$\Lambda_o = \frac{m}{\pi R^2} \sum_{i=1}^k \int_0^{2\pi} \int_0^R J_i(r, \theta) \frac{g(\Theta)}{G(\theta+\Psi)} dr d\theta$$

각각 정규화된 타 섹터 간섭과 타 셀 간섭을 의미한

다. $g(\theta)$ 가 이상적인 패턴일 때 $\Lambda_i = 0$ 이 되고

$$\frac{g(\Theta)}{G(\theta+\Psi)} = \frac{1}{m}$$

이 되어 $\rho=100\%$ 가 된다.

보다 실질적인 용량을 산출하기 위해서는 대수-정규 분포의 장구간 페이딩의 영향을 고려하여야 하며 이를 위해서는 식 (7)의 피적분항에 페이딩을 반영하는 항이 곱해져야 한다^[3]. 그러나 식 (9)의 용량 효율은 정의에 따라 분모, 분자의 페이딩 항이 서로 상쇄된다. 따라서 식 (9)는 페이딩을 고려하여도 변화하지 않는 용량 효율의 의미를 갖는다.

IV. 수치 분석

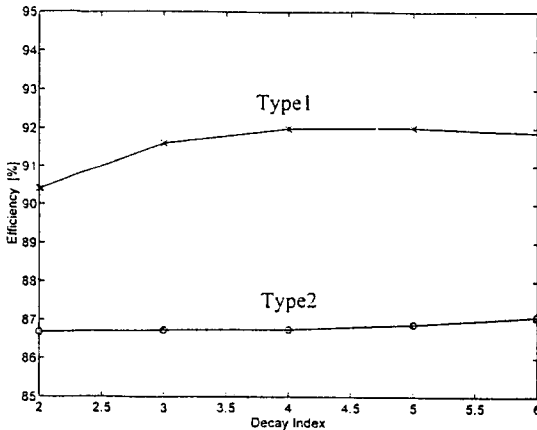
3 섹터용 안테나의 실측 패턴에 대하여 3장에서 논의한 용량 효율을 수치 계산한다.

이때 안테나 패턴의 참고문헌[6]에 제시된 방법으로 측정하였다. <표 1>은 전형적인 8개 안테나 패턴에 대한 분석 결과를 정리한 것이다. <표 1>에서는 반치폭(half power beam width)과 전후방비(front to back ratio)를 사용하여 안테나의 특성을 구분하였으나, 이들 파라미터만으로 안테나 패턴을 특징 지을 수는 없다. 그러므로 부록에 수록된 각 안테나 패턴도를 참조하는 것이 바람직하다.

<표 1>은 전파경로 손실의 감쇠지수 $\alpha=4$ 로 가정하였고 1-tier 셀 패턴의 6개 인접 간섭 셀을 고려한 것이다. <표 1>을 살펴보면 3장에서 예상한 대로 Type 1이 Type 2보다 용량 효율이 높으며 최고 7%까지 차이가 난다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 패턴의 형태뿐만 아니라 섹터 셀의 배치 관계도 용량 효율에 큰 영향을 미친다는 점을 지적할 수 있다. 또한 패턴의 반치폭이 동일하여도 전후방비에 따라 용량 효율이 상이하다는 것을 알 수 있으며, Λ_i 가 Λ_o 보다 항상 작아 주변 셀로부터의 간섭이 CDMA 시스템의 용량을 제한

〈표 1〉 분석결과

	반치폭	전후방비	용량효율, ρ		Λ_0		Λ_i
			Type 1	Type 2	Type 1	Type 2	
ANT 1	84°	-28 dB	96.90 %	89.08 %	0.2710	0.3874	0.0542
ANT 2	95°	-31 dB	93.18 %	88.08 %	0.2875	0.3673	0.0907
ANT 3	100°	-30 dB	93.59 %	88.56 %	0.2830	0.3608	0.0892
ANT 4	104°	-32dB	91.95 %	87.34 %	0.2922	0.3660	0.1043
ANT 5	105°	-16 dB	91.99 %	86.74 %	0.2902	0.3747	0.1057
ANT 6	105°	-22 dB	92.59 %	87.82 %	0.2853	0.3608	0.1016
ANT 7	105°	-25 dB	93.30 %	88.55 %	0.2820	0.3559	0.0943
ANT 8	110°	-15 dB	92.30 %	87.89 %	0.2809	0.3523	0.1084



〔그림 4〕 감쇠 지수에 대한 용량 효율의 변화

하는 주 요소임을 알 수 있다.

감쇠 지수로 인한 용량 효율의 변화를 알아보기 위해 ANT 5에 대해 α 를 2에서 6까지 변화시켜 비교한 결과를 [그림 4]에 나타내었다. Type 2의 경우에는 α 의 영향이 거의 없으며 Type 1의 경우에도 $\alpha=4$ 이상에서는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 실제 사용되는 섹터 안테나 패턴의

CDMA 역 방향 링크 용량 효율을 해석적으로 구하고 수치 계산 예를 통해 분석한 것이다. 유도된 용량 산출식은 안테나의 패턴 형태와 섹터 셀 배치 형태를 모두 반영할 수 있어 일반적인 용량 분석에 이용할 수 있다.

실측한 패턴을 대상으로 분석한 결과, 용량 효율은 패턴 형태와 섹터 셀 배치 구조에 따라 약 86~97%까지 변화함을 알 수 있었다. 또한 반치폭이 좁고 전후방비가 낮은 패턴이 용량 효율이 높은 것으로 나타났다. 그러나 반치폭이 좁으면 서비스 영역 내의 이득이 낮으므로 이러한 결과만으로 반치폭이 좁은 안테나가 우월하다고 단정할 수는 없다.

섹터 셀의 배치 구조는 통화량 분포나 지형 및 전파전파 특성을 고려하여 결정된다.

그러나 섹터 셀의 배치 구조가 패턴의 측면에서 적절하지 못하면 인접 셀 간섭 전력이 증가하여 용량 효율이 저하될 수 있음을 보였으며, 이것은 CDMA 셀룰러 엔지니어링의 새로운 측면을 지적하는 것이다. 다시 말하면 최적한 패턴을 갖는 안테나의 이용과 섹터화 구조를 통해 CDMA 시스템의 용량을 최고 14%까지 증가시킬 수 있음을 의미한다.

본 논문은 최적한 빔 하향 조정이 이루어진 것으로 가정하여 안테나의 양각(elevation angle) 패턴을 고려하지 않았으나 보다 실제적인 상황을 고려

하려면 이에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다. 특히, 정규화된 간섭 전력 Λ_c, Λ_s 을 비교해볼 때 동일 셀 내 타 섹터로부터의 간섭보다 타 셀로부터의 간섭이 3배 이상 크며 이것은 양각 패턴을 조절하여 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

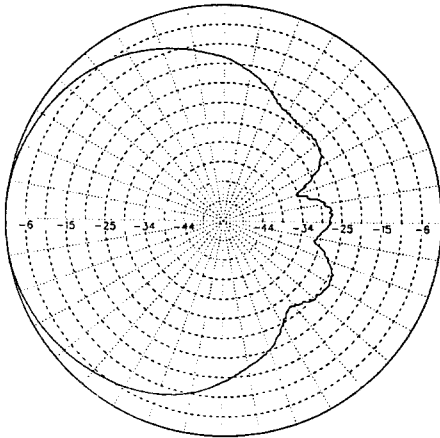
1. Gilhousen, K. S., Jacobs, I. M., Padovani, R., Viterbi, A. J., Weaver, L. A., Wheatley III, C. E., "On the Capacity of a Cellular CDMA System," *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 303-312, May 1991.
2. Kim, K. I. "CDMA Cellular Engineering Issues," *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, vol. 42, no. 3, pp. 345-350, Aug. 1993.
3. Newson, P., Heath, M. R. "The Capacity of a Spread Spectrum CDMA System for Cellular Mobile Radio with Consideration of System Imperfections," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 4, pp. 673-683, May 1994.
4. Jansen, M. G., Prasad, R. "Capacity, Throughput, and Delay Analysis of a Cellular DS CDMA System with Imperfect Power Control and Imperfect Sectorization," *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 67-75, Feb. 1995.
5. Kraus, J. D., "Antennas", McGraw-Hill, pp. 543-621, 1988.
6. 권범, 이은기, 고성선, "이동통신용 안테나 측정을 위한 측정 시험장 설계," *KMT Tech.* 1995. 5.

저자소개

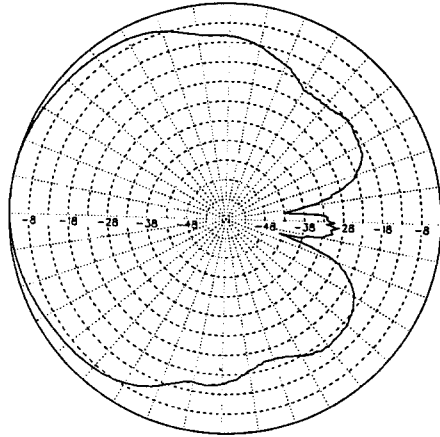
1985년 : 경희대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1987년 : 경희대학교 대학원 전자공학과 졸업
 (공학석사)
 1993년 : 경희대학교 대학원 전자공학과 졸업
 (공학박사)
 1994년 ~ 1995년 : British Columbia 대학교
 (Canada) Post-Doctoral Fellow
 1996년 ~ 현재 : SK Telecom 중앙 연구원 근무



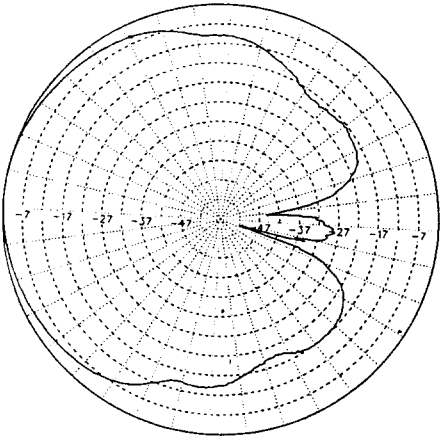
부록 : <안테나 패턴도>



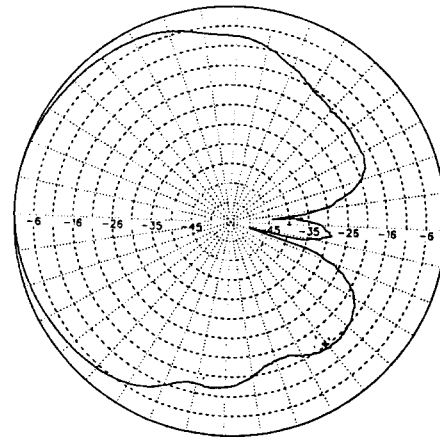
ANT 1



ANT 2

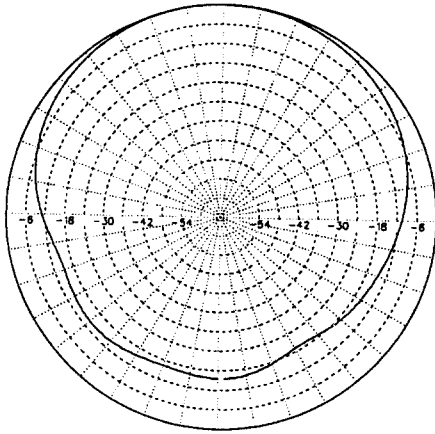


ANT 3

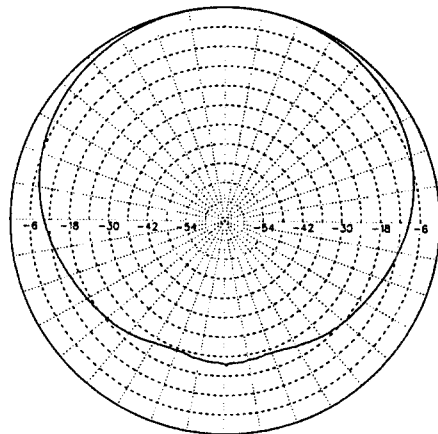


ANT 4

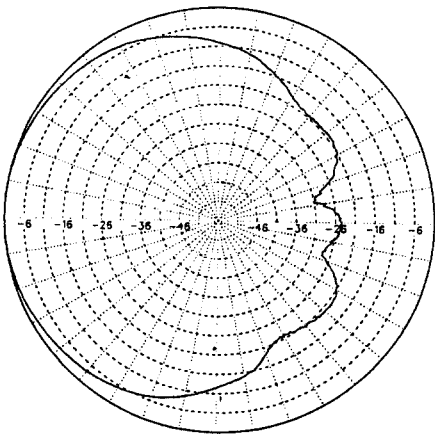
부록 : <안테나 패턴도>계속



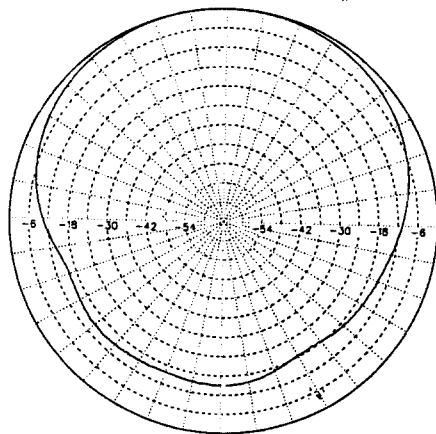
ANT 5



ANT 6



ANT 7



ANT 8