

## 원형편파로 급전되는 포물면 반사기 안테나에서의 빔 편이현상

김한철, 김흥수

### Beam Squint in Parabolic Reflector Antennas with Circularly Polarized Feeds

Han-Cheal Kim and Heung-Soo Kim

#### ABSTRACT

The beam squint phenomenon is an important factor to design parabolic reflector antennas. This paper aims to suggest the general squint-predicting formular and squint-free condition in circularly feed paraboloidal antennas. Squint-free condition is suggested to avoid the squint phenomenon that can be affect the antenna pointing performance in the long-distance communication, deep-space telemetry, radioastronomy, etc. Squint-free antennas can be designed by this squint-free condition.

#### 서 론

반사기 안테나는 포물면 반사기의 초점에서 급전된 입사파가 일정한 방향을 향하여 반사하는 지향성을 이용하여 장거리 통신이나 레이더 등에 널리 사용되고 있다. 우주통신과 같은 장거리 통신이나, 정확한 방위와 거리를 요하는 레이더 시스템 등에서 빔 편이현상의 발생은 안테나 지시성능 (Antenna Pointing Performance)에 영향을 주

기 때문에 성능저하가 생긴다. 이것을 피하기 위하여 반사기 안테나를 설계할 때 편이현상에 의한 영향을 보정하여야 한다. 편이현상은 선형편파로 급전되는 안테나에서는 발생하지 않고 단지 원편파로 급전되는 안테나에서 만 발생한다. 또한 우선회편파 (RHC : Right-Hand Circular-Polarized) 로 급전된 경우는 반사기에 의하여 좌선회편파 (LHC : Left-Hand Circular-Polarized) 로 되고 이 편파는 오른쪽으로 편이된다. 또한 좌선회편

파(LHC)로 급전된 경우는 반사기에 의하여 우선회 편파(RHC)로 되고 이것은 왼쪽으로 편이된다. 여기서 우선회, 좌선회, 왼쪽, 오른쪽이라는 용어는 관찰자가 전파의 진행 방향으로 볼 때 정의된 것이다.

지금까지 편이 현상에 관한 연구는 T. S. Chu and R. H. Turrin 에 의해 급전점이 촛점상에 있는 오프셋(offset) 포물면 반사기에 대해서만 연구되어 왔다.<sup>(1)</sup> A. A. Adatia and A. W. Rudge는 촛점에서 오프셋 포물면 반사기에 원편파로 급전하는 경우에 대한 빔 편이각도를 구할 수 있는 공식을 제시하였다.<sup>(2)</sup> 그러나 실제 반사기가 오프셋(offset)이 아닌 대칭(Symmetric)인 경우에도 편이현상은 발생하며 급전점이 촛점을 벗어난 경우에도 동일한 현상이 발생하고 있다.

본 연구에서는 촛점 급전 시스템에서 편이현상을 파악하고 포물면 반사기 안테나에서 편이현상이 발생하는 모든 경우 즉, 촛점에서 급전되는 오프셋 포물면 반사기, 오프셋점에서 급전되는 대칭 포물면 반사기, 오프셋점에서 급전되는 오프셋 포물면 반사기에 대해서 편이각도를 구할 수 있는 일반적인 공식을 제시하여 포물면 반사기 안테나에서 나타나는 편이현상을 보정하고, 이 공식으로부터 오프셋에서 급전되는 대칭 포물면 반사기 안테나에서 편이 현상이 발생하지 않는 조건을 제시하고자 한다.

### 편이현상

촛점에서 급전되는 오프셋 포물면 반사기와 좌표 시스템을 그림 1에 나타내었다. 반사기를 나타내는 중요한 파라미터는 포물면 반사기의 촛점길이  $F$ , 포물면을 향하여 비추는 급전각  $\theta_0$ 이다. 최대투영각  $\theta^*$ 와 촛점에 원점을 갖는 구형 극좌표계  $(\rho, \theta, \phi)$ 를 나타내었다. 촛점에서 포물면까지 거리  $\rho$ 는

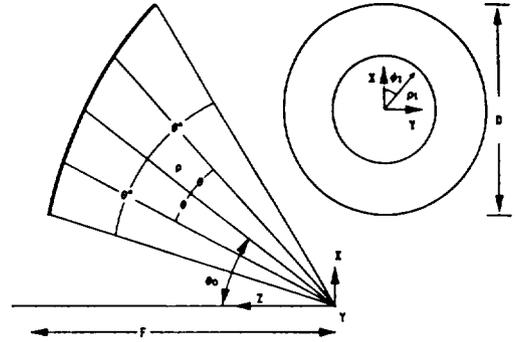


Fig. 1. Offset-parabolic reflector antenna geometry.

다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{2F}{1 + \cos\theta \cos\theta_0 - \sin\theta \sin\theta_0 \cos\phi} \quad (1)$$

포물면 표면과 투영각  $\theta$  값이 일정한 원주의 단면 곡선은 타원이다. 그러나  $(x, y)$  면상에 투영된 것은 원으로 중심  $x_c$ 와 반경  $\rho_1$ 는 다음과 같다.

$$x_c = \frac{2F \sin\theta_0}{\cos\theta + \cos\theta_0} \quad (2a)$$

$$\rho_1 = \frac{2F \sin\theta}{\cos\theta + \cos\theta_0} \quad (2b)$$

포물면 촛점에서 원형편파로 오프셋 리플렉터에 급전할 때 오프셋 리플렉터로부터의 방사패턴을 구한다. 편이상 촛점에서 리플렉터 가장자리까지 대응되는 최대 투영각 내에서 원형편파로 방사할 때 리플렉터에 입사되는 전계  $E_i$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_i(\rho, \theta, \phi) = \frac{f(\theta)}{\rho} (\hat{a}_\theta \pm j\hat{a}_\phi) \exp[-j(k\rho + \phi)] \quad (3)$$

여기서  $\hat{a}_\theta$ 와  $\hat{a}_\phi$ 는 구형좌표 단위벡터이다. 부호의 선택은 각각 입사편파의 우선회 또는 좌선회에 대

응된다. 리플렉터에 의해 반사된 전계분포는 다음과 같다.

$$\mathbf{E}_i(\rho, \theta, \phi) = \frac{f(\theta)}{\rho} \exp[\mp jT(\theta, \phi)] (\hat{a}_\theta \pm j\hat{a}_\phi) \quad (4)$$

여기서

$$T(\theta, \phi) = \tan^{-1} \frac{\sin\phi [c \cos\phi + (b - a \cos\phi)]}{c \sin^2\phi - (b - a \cos\phi) \cos\phi} \quad (5)$$

$$a = 1 + \cos\theta \cos\theta_0$$

$$b = \sin\theta \sin\theta_0$$

$$c = \cos\theta + \cos\theta_0$$

이다.

포물면 반사기 안테나의 방사패턴  $\mathbf{E}_t$ 는 푸리에 변환 적분을 이용하여 구할 수 있다.

$$\mathbf{E}_t = K \iint_A \mathbf{E}_r(\theta, \phi) \exp[jk \sin\psi (x \cos\phi + y \sin\phi)] dA \quad (6)$$

여기서  $K$ 는 상수,  $(\psi, \phi)$ 는 관측점의 구형 극좌표이며,  $(x, y)$ 는 촛점으로부터 측정된 투영 개구면점의 직각좌표이다. 식(2)를 이용하여 식(6)의  $x, y$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$x = x_c + \rho_1 \cos\phi_1 \quad (7a)$$

$$y = \rho_1 \sin\phi_1 \quad (7b)$$

여기서  $\rho_1, \phi_1$ 은 그림 1에서 정의하였다. 이러한 변환식을 이용하여 촛점에서 포물면까지의 거리를 나타내는 포물선 표면 방정식은 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$\rho(\theta, \phi_1) = \frac{2F}{c^2} (a + b \cos\phi_1) \quad (8)$$

미소표면  $dA$ 는 Jacobian 변환으로 얻을 수 있고 그 값은  $dA = \rho \rho_1 d\theta d\phi_1$ 이다.

식(6)의 원형편파 성분은 아래와 같이 된다.

$$\mathbf{E}(\psi, \phi) = K \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta} f(\theta) \exp[j(kx_c \sin\psi \cos\phi \mp T(\theta, \phi_1) + k\rho_1 \sin\psi \cos(\phi - \phi_1))] \rho_1 d\theta d\phi_1 \quad (9)$$

여기서,  $T$ 의 부호는 각각 우선회, 좌선회 성분을 나타낸다. 그리고

$$T(\theta, \phi_1) = \tan^{-1} \left[ \frac{c \cos\phi_1 - (b + a \cos\phi_1) \sin\phi_1}{c \sin^2\phi_1 + (b + a \cos\phi_1) \cos\phi_1} \right] \quad (10)$$

이고,  $T$ 값이 작은 경우 다음과 같이 근사식으로 쓸 수 있다.

$$T(\theta, \phi_1) \approx \left[ \frac{c \cos\phi_1 - (b + a \cos\phi_1)}{c \sin^2\phi_1 + (b + a \cos\phi_1) \cos\phi_1} \right] \sin\phi_1 \quad (11)$$

대괄호안에 있는 항들은 방위좌표  $\phi_1$ 에 의한 영향이 거의 없다. 또한  $\phi_1 = \pi/2$ 면에서 최대값을 갖고 이러한 면에서 위상편이의 값은 다음과 같다.

$$T(\theta, \pi/2) \approx -\frac{b}{c} \quad (12)$$

빔편이에 대한 근사적 표현을 얻기 위해서, 위상편이는 투영개구면내에서 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$T(\theta, \phi_1) = -\frac{b}{c} \sin\phi_1 \quad (13)$$

$\frac{b}{c} = \frac{\rho_1 \sin\theta_0}{2F}$ 를 이용하면 식(9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{E}(\psi, \phi) = K \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta} f(\theta) \exp[j(kx_c \sin\psi \cos\phi + k\rho_1 \times [$$

$$\sin \Psi \cos(\Phi - \phi_1) \pm \frac{\sin \theta_0}{2Fk} \left[ \sin \phi_1 \right] \rho_1 d\theta d\phi_1 \quad (14)$$

최대방사빔 편이효과 즉, 안테나 boresight로부터 빔이동은  $\Phi = \pi/2$ 면에서 관찰되며 이면에서 식 (14)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\Psi, \pi/2) = & K \int_0^{\theta_0} \rho_1 f(\theta) d(\theta) \int_0^{2\pi} \exp \left[ jk \rho_1 \sin \phi_1 \right. \\ & \left. (\sin \Psi \pm \frac{\sin \theta_0}{2Fk}) \right] d\phi_1 \quad (15) \end{aligned}$$

$\sin \theta_0 / 2Fk$ 항은 방사패턴의 선형위상 편이를 나타낸다. 식 (15)로부터  $\Psi = \Psi_s$ 값에서 방사패턴이 최대가 됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \sin \Psi_s = & \mp \frac{\sin \theta_0}{2Fk} \\ \Psi_s = & \mp \sin^{-1} \frac{\sin \theta_0}{2Fk} \quad (16) \end{aligned}$$

여기서  $k$ 는 파수로서  $k = 2\pi/\lambda$ 이다.

그림 2는 윗셀점에서 급전되는 대칭 포물면 반사기이다. 급전점은 촛점에서 거리  $\delta$ 만큼 떨어져 있고 입사빔이  $\theta_0$ 만큼 경사지고 방사빔은 반사기에 의해 반사되어  $\theta_B$ 의 각을 이룬다. 일반적으로  $\theta_B$ 는  $\theta_0 = \arctan(\delta/F)$ 보다 작은 값이다.<sup>(4)(5)</sup> 이러한 구성에서 편이현상은  $y$ - $z$ 면에 발생되지 않고 그림 2에 나타낸 것과 같이 방사빔의 진행방향과 평행을 이루며  $x'$ - $z'$ 면에 수직인 즉,  $y'$ - $z'$ 면에서 발생한다.

그림 2와 같이 윗셀점에서 급전되는 경우 입사각  $\theta_0$ 와 반사각  $\theta_B$ 의 합을 입사빔과 방사빔 사이의 각  $\theta_0$ 와 동일하게 볼 수 있다. 윗셀점에서 급전되는 경우 편이각도를 구할 수 있는 식은 식 (16)을 변형하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

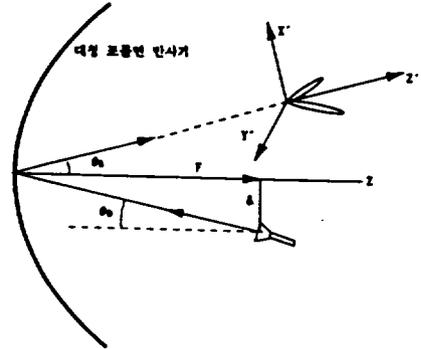


Fig. 2. Beam squint in a symmetric paraboloidal reflector antennas with offset feed.

$$\Psi_s = \mp \sin^{-1} \left[ \frac{\sin(\theta_0 + \theta_B)}{2Fk} \right] \quad (17)$$

식 (17)의 우변에서  $\theta_B$ 를 제외한 모든 값들은 안테나 구성과 운용주파수가 주어지면 쉽게 알 수 있다. 방사각도  $\theta_B$ 는 BDF를 적용하여 구할 수 있다.<sup>(5)</sup>

그림 3은 윗셀 포물면 반사기에 윗셀 급전한 경우로서 촛점에서  $\delta$ 만큼 떨어진 급전점에서 포물면

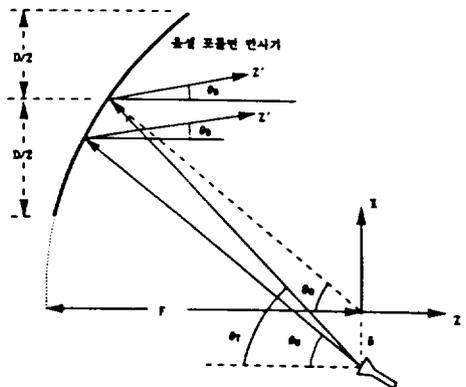


Fig. 3. Beam squint in an offset paraboloidal reflector antennas with offset feed.

경을 향하여 입사되는 빔이  $\theta_0$ 만큼 경사지고 방사 빔은 반사기에 의해 반사되어  $\theta_B$ 의 값을 이룬다. 그림 3의 경우에서도 입사각  $\theta_0$ 와 반사각  $\theta_B$ 의 합을 입사빔과 방사빔 사이의 각으로 하여 식 (17)을 이용하여 편이각도  $\varphi_s$ 를 얻을 수 있다.

일반적으로 육셀 포물면 안테나에서  $\theta_0$ 는  $\theta_B$ 보다 더 크다. 식 (17)의  $\mp$  부호는 RCP 빔은 왼쪽, LCP 빔은 오른쪽으로 편이됨을 나타낸다. 그러나 대칭 포물면 반사기에서는 이러한 규칙이 항상 적용되지 않는다. 만일 그림 2에서 급전점이 반사기 정점을 향하여 상향으로 경사지지 않고 하향으로 경사진다면  $\theta_0$ 는 부의 값이 된다. 부의 값을 갖는  $\theta_0$ 를 식 (17)에 적용하여  $|\theta_0| = |\theta_B|$ 의 경우는 편이현상이 없어진다. 이 조건을 이용하여 편이가 없는 포물면 안테나를 설계하면 편이 영향을 피할 수 있고 장거리 통신, 천체관측 등에 응용하여 유용하게 사용할 수 있다. 만일 급전점이 더 하향된다면  $-\varphi_s$  값이 된다. 이것은 RCP 빔이 오른쪽으로 편이되고 LCP 빔은 왼쪽으로 편이되는 것을 의미한다.

### 계산 및 고찰

그림 2와 같이 축점에서  $\delta$ 만큼 떨어진 육셀점에서 급전되는 대칭 포물면 반사기에서 편이현상이 발생하는 다양한 경우에 대한 계산 결과를 그림 4, 그림 5, 그림 6으로 나타내었다.

그림 4는  $D=20\lambda$ 일 때 반사기 정점에 급전한 경우로서 축점길이  $F$ , 육셀길이  $\delta$  값의 변화에 따른 결과를 계산한다. 그림 4에서는  $\delta$ 를 증가시킴에 따라 편이각도  $\varphi_s$ 가 증가함을 알 수 있다.  $\delta$  값이 일정할 때  $F/D$ 의 비가 증가함에 따라 편이각도  $\varphi_s$ 가 작아지고 있음을 알 수 있다.

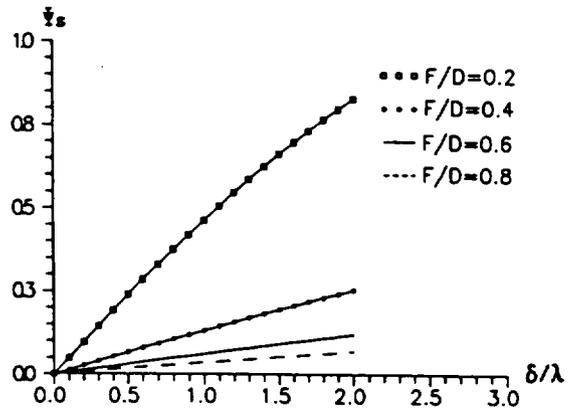


Fig. 4. Squint Angles for Focal-Length and Offset-Distance Variations. ( $D=20\lambda$ )

그림 5는  $\delta$ 를  $0.5\lambda$ 로 고정하고 급전각이 리플렉터 축과 일치한 경우 즉,  $\theta_0=0$ 로 하였을 때  $F/D$

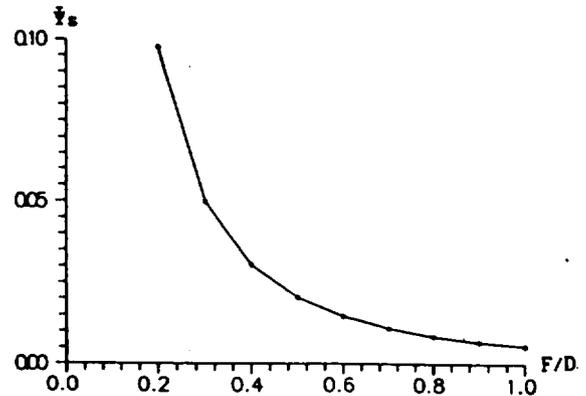


Fig. 5. Squint Angles for  $F/D$  Ratio Variations. ( $D=20\lambda$ ,  $\delta=0.5\lambda$ )

의 값을 변화시킴에 따른 결과를 계산하였다. F/D의 비가 증가함에 따라  $\Psi_s$  값은 감소하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은  $D=20\lambda$ ,  $F=8\lambda$ ,  $\delta=0.5\lambda$  일 때 급전각  $\theta_0$  값의 변화에 따른 결과를 계산하였다. 그림 6에서는 급전각  $\theta_0$ 가 감소함에 따라 편이각도  $\Psi_s$

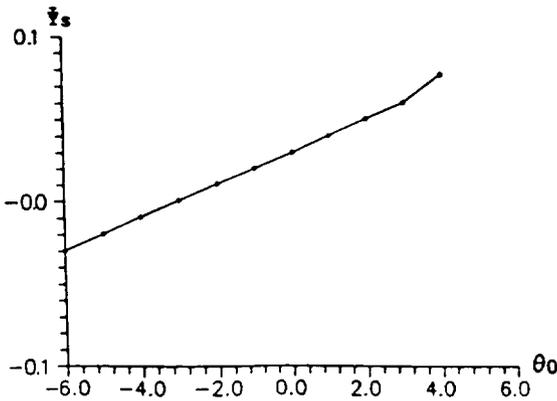


Fig. 6. Squint Angles for Offset-Feed Angle Variations.  
( $D=20\lambda$ ,  $F=8\lambda$ ,  $\delta=0.5\lambda$ )

가 감소하고 있다.  $\Psi_s > 0$ 인  $-3.0570^\circ < \theta_0 < 4^\circ$ 에서는 RCP 빔은 왼쪽으로 편이하고 LCP 빔은 오른쪽으로 편이한다.  $\Psi_s=0$ 인  $\theta_0=-3.0570^\circ$ 에서는  $\theta_0+\theta_B=0$ 가 되어 편이현상이 발생하지 않는 경우가 나타난다.  $\Psi_s < 0$ 인  $\theta_0 < -3.0570^\circ$ 에서는  $\theta_0+\theta_B < 0$ 가 되어 RCP 빔이 오른쪽으로 편이하고 LCP 빔이 왼쪽으로 편이되는 것을 나타낸다.

그림 3과 같이 윗셀점에서 윗셀 포물면 반사기에 급전될 때 발생하는 편이각도에 대한 계산 결과를 그림 7에 나타내었다.

그림 7은 급전각이  $\theta_0=\theta_{u}$ 인 비경사급전인 경우와  $\theta_0=\theta_{T}$ 인 경사급전인 경우에서 급전각  $\theta_0$ 의 변화에 따른 결과를 계산하였다. 그림 7에서는 급전각이 작은 경우 비경사급전의 경우가 경사급전의

경우보다 편이 현상이 적게 발생하지만 급전각이 큰 경우에는 거의 같은 값을 갖는다.

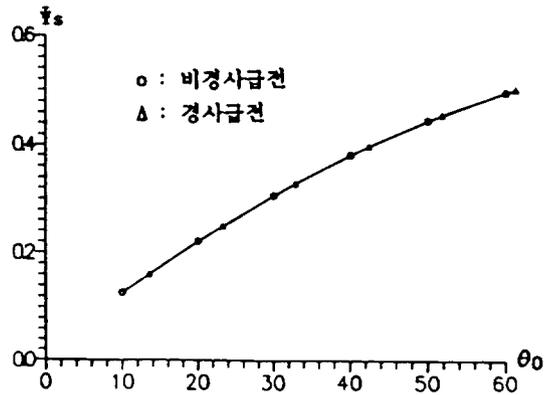


Fig. 7. Squint Angles for Offset-Feed Angle Variations.  
( $D=20\lambda$ ,  $F=8\lambda$ ,  $\delta=0.5\lambda$ )

## 결 론

본 연구에서는 포물면 반사기에 원형편파로 급전하는 경우 대칭 포물면 반사기와 윗셀 포물면 반사기에서 발생하는 편이각도를 식 (17)를 이용하여 구하였다. 이러한 편이각도는 윗셀길이  $\delta$ 와 입사되는 급전각  $\theta_0$ 가 증가할수록 커지고 F/D의 값을 증가시킴에 따라 작아진다. 편이각도는 매우 작은 각도이나 포물면 반사기 안테나를 이용하는 레이다나 장거리 통신, 천체관측 안테나에서는 매우 큰 영향을 미친다. 이러한 영향을 줄이기 위해 본 연구에서 제시한 수식에 의하여 계산되는 편이 각도를 보정하면 안테나 지시성능을 높일 수 있고 식 (17)에 근거한 편이가 없는 포물면 안테나를 설계할 수 있으며 향후 다반사기 안테나까지 적용하기 위한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Chu T. S. and R. H. Turrin, 1973. "Depolarization properties of offset reflector antennas," IEEE Trans. Ant. Prop., AP-13, 339-345.
- [2] Adatia N. A. and A. W. Rudge, 1975. "Beam squint in circularly-polarized offset-reflector antennas," Electronics Letters, 11, 513-515.
- [3] Rudge, A. W. 1975. "Multiple-beam antennas : offset reflectors with offset feeds", *ibid.*, AP-23, 317-322.
- [4] Lo, Y. T. 1960. "On the beam deviation factor of a parabolic reflector," IRE Trans. Ant. Prop., AP-8, 347-349.
- [5] Rahmat-Samii, Y. 1988. "Reflector antennas", in Y. T. Lo and S. W. Lee (eds), Antenna Handbook, Chapter 15, New York, Van Nostrand Reinhold Company.
- [6] Balanis, Constantine A. 1982. "Antenna Theory Analysis and Design," John Wiley and Sons Inc., Singapore, 593-636.