

각면 반사판 안테나의 해석

곽창수*, 엄만석*, 엄인복* 정회원

Analysis of Faceted-Reflector Antenna

Changsoo Kwak*, Manseok Uhm*, Inbok Yom* *Regular Members*

요 약

개인용 휴대단말을 이용한 위성 방송통신 서비스에 대한 폭발적인 수요증가로 인해 초대형 안테나를 사용하는 방송통신 위성의 필요성이 증대되고 있다. 이와 같은 위성 안테나는 여러 가지 타입의 전개형 안테나로 구현되는데, 그 전개방식에 상관없이 각면이 반사면을 이루는 형태를 취한다. 이러한 반사판을 좀더 정확하게 해석하기 위해 기존의 광선추적법을 개선하였다. 이 방법에서는 각 광선이 반사면에서 반사되어 서로 교차하는 특성을 반영할 수 있도록 하였으며 개구면에서 전파의 세기와 위상의 불균일한 점도 반영할 수 있도록 하였다. 또한 개구면에서의 적분도 직각좌표계에서 수행할 수 있도록 광선들을 생성하도록 하였다. 이러한 알고리즘을 이용하여 각면의 배치에 따른 방사특성을 연구하기 위해 각면 형성 알고리즘을 고안하였다. 해석 결과, 반지름 방향의 각면의 수가 지향성 및 부엽파를 결정하는 주요 파라미터이며 원주방향의 각면의 수는 부엽파에만 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Key Words : faceted-reflector antenna, deployable antenna, ray-tracing, satellite communications

ABSTRACT

Due to big demand for satellite and communication service using personal handheld terminals, demand for satellites with huge antennas is increasing correspondingly. While such large antennas are realized by various types of deployable antennas, the reflecting surface is made by many facets irrespective of deploying mechanisms. In order to analyze the faceted-reflector more accurately, an existing ray-tracing method is improved. The algorithm allows the rays to cross each other, which is the main characteristic of the faceted-reflector, and takes unevenness of amplitude and phase over the aperture plane into consideration. For the study of the effect of facet configuration, facet generating algorithm is devised. From the analysis algorithm and the facet-generating algorithm, it has been found that the number of facets in a radial direction affects both directivity and sidelobe level. On the other hand, the number of facets in a circumferential direction affects sidelobe level only.

I. 서 론

각면 반사판은 반사판 안테나의 한 종류로서 반사면이 다수의 평면 또는 곡면의 각면(facet)으로 이루어진 반사판을 말한다. 이러한 각면 반사판은 주로 통신위성의 대형 전개 안테나로 사용되고 있으며 지상의 이동 안테나 또는 초대형 안테나에도 사용되고 있다.

이러한 반사판의 방사패턴을 해석하는 방법은 두 가지가 있다. 하나는 광선추적법으로 개구면의 필드를 계산하고 이를 적분하는 방법[1]이고 다른 하나는 상유도법

[2](Image Induction Method)이다. 상유도법은 광선추적법보다 빠르게 해를 제공하지만 편평한 각면에만 적용할 수 있다. 실제로 전개형 우주 안테나와 같은 경우 pillow effect로 인해 각면이 편평하지 않고 곡면을 이루기 때문에 이와 같은 방법은 근사해만을 제공하게 된다.

광선추적법은 편평한 각면이나 구부러진 각면 모두를 해석할 수 있다. [1]의 저자들은 광선추적법을 사용하여 각면 반사판을 해석하였는데, 각면 반사판의 바로 앞에 부분 개구면(sub-aperture)을 도입하여 그 개구면에서의 필드를 계산하였다. [1]에서는 각각의 각면을 별도의 반사판 안테나로 간주하여 각 각면에서 방사되는 전파를 모두

*한국전자통신연구원 무선RF탑재기술연구팀 (cswak@etri.re.kr, msuhm@etri.re.kr, ibyom@etri.re.kr) ※ 본 연구는 지식경제부 지원으로 수행하였음.
접수일자 : 2010년 8월 26일, 수정완료일자 : 2010년 9월 15일, 최종게재확정일자 : 2010년 10월 6일

합하여 전체 각면 반사판의 방사패턴을 계산하였는데 각면들은 포물면과 같은 연속적으로 부드러운 곡면이 아니기 때문에 각 각면에서 반사되어 나오는 광선들은 서로 교차될 수밖에 없다. 이러한 이유로 [1]의 저자들은 각 각면에 부분 개구면을 도입하여 각면에서 반사되어 나오는 광선들이 서로 교차하기 전에 개구면에 도달하도록 한 것이다. 하지만 이러한 방법은 각면 반사판의 가장 큰 특징인 광선들이 서로 교차한다는 특성을 무시한 방법이다. [1]의 다른 한 가지 특징은 각면에서 방사된 각각의 필드를 적분하는데 있어 양자화를 도입하여 급전부의 구면좌표계로부터 개구면의 직교좌표계의 좌표계 변환을 시도하였다는 점이다.

본 논문에서는 광선들이 서로 교차하는 것을 해석에 반영하였고 새로운 광선 생성법을 사용하여 개구면의 필드를 적분할 때 양자화를 하지 않아도 되도록 하였다. 또한 이와 같은 해석 알고리즘을 이용하여 여러 가지 각면 분포를 생성하고 이에 따른 방사패턴의 변화를 연구하였다.

II. 각면 반사판의 방사 패턴 계산

1. 각면 반사판의 전자기적 특성

반사면이 이상적인 포물면이라면 급전부로부터 동일한 간격으로 방사되는 광선들은 서로 교차하지 않으면서 동일한 간격으로 개구면에 도달하게 된다. 하지만 반사면이 그림 1과 같은 각면 반사판인 경우 광선들은 더 이상 Z축에 평행하지 않고 서로 교차하게 된다. 이로 인해 그림 1에서와 같이 개구면의 어떤 부분에서는 광선들이 더 많이 도달(Dense area)하게 되고 어떤 부분에서는 적게 도달(Coarse area)하게 된다. 그림 5는 이러한 불균일한 광선들의 분포 현상의 예들을 보이고 있다.

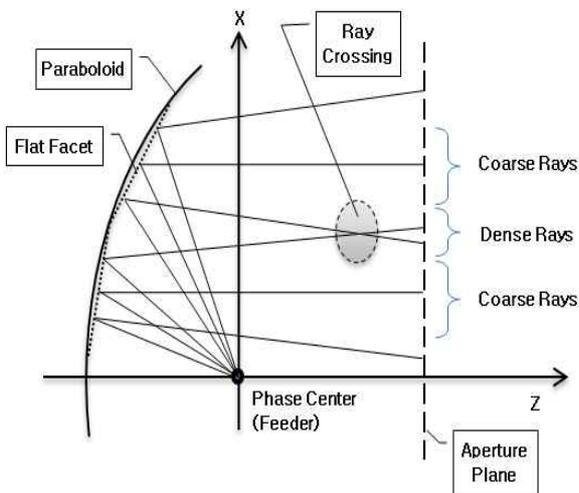


그림 1. 각면 반사판의 방사 특성

반사면이 포물면이 아니기 때문에 급전부로부터 나온 광선들이 개구면에 도달하는 경로의 길이는 서로 다르게

되고 이에 따라 개구면에서의 위상도 불균일하게 분포하게 된다. 따라서 개구면에서 필드의 적분을 수행할 때 이러한 특성을 반영하기 위해 다음과 같은 방법을 고안하였다.

2. 원역장 방사패턴의 계산

2.1 개구면 그리드 형성

다음 식을 사용하여 원역장 방사패턴을 계산할 수 있다 [3].

$$P_x = \iint_{S_a} E_{ax}(x', y') e^{j\beta(x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi)} dx' dy' \quad (a)$$

$$P_y = \iint_{S_a} E_{ay}(x', y') e^{j\beta(x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi)} dx' dy'$$

$$E_\theta = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{2\pi r} (P_x \cos\phi + P_y \sin\phi) \quad (b)$$

$$E_\phi = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{2\pi r} \cos\theta (P_y \cos\phi - P_x \sin\phi)$$

$$E_{cp} = E_\theta \sin\phi + E_\phi \cos\phi \quad (c)$$

$$E_{xp} = E_\theta \cos\phi + E_\phi \sin\phi$$

여기서 S_a 는 개구면, E_{ax} 와 E_{ay} 는 개구면에서 전기장의 x와 y 성분이며 E_{cp} 와 E_{xp} 는 원역장에서의 동일편파 성분과 교차편파 성분을 나타낸다. β 는 위상상수이며 r 은 급전부에서 원역장까지의 거리이다. 직교좌표계 x' 과 y' 은 개구면에서 정의되는 좌표계이고 x, y 는 전역좌표계이다.

(a)의 계산, 즉 개구면에서의 필드 적분은 균일한 정사각형 요소면적, $dx'dy'$ 를 미소요소로 하여 직교좌표계에서 수행된다. 급전부로부터의 광선들이 직교좌표계의 관점에서 동일한 간격으로 개구면에 도달하게 하기에 광선들을 요소면적에서부터 생성하기로 한다. 만약 기존의 방법대로 급전부에서 동일한 사잇각으로 광선들이 생성되면 개구면의 중앙부에서는 상대적으로 밀집된 광선들이 존재하고 가장자리부에서는 광선들의 밀집도가 작아지기 때문이다.

개구면의 그리드 형성을 그림 2에서 보이고 있다. 우선, 개구면을 (a)의 $dx'dy'$ 에 해당하는 '그리드(grid)'로 나누는 다음, 그리드들을 다시 2×2 또는 3×3 등의 부그리드(subgrid)로 나눈다. 그림 2에서는 그리드는 실선으로, 부그리드는 파선으로 나타내고 있으며 2×2 부그리드를 보이고 있다. 이와 같이 부그리드를 사용하는 이유는 다음 단계에서 설명한다.

2.2 광선의 생성

개별 광선들은 그림 2에서와 같이 그에 해당하는 부그리드의 중심에서 기원한다. 각 광선들은 부그리드에 수직인 방향으로 나와 이상적인 포물면의 축, 즉 Z축에 평행한 방향으로 진행하여 포물면에서 반사된다. 반사면이 이

상적인 포물면이기 때문에 반사된 광선은 포물면의 초점에 모이게 되며 각 광선의 방향벡터로서 급전부 좌표계인 구면좌표계 상에서 θ 와 ϕ 를 가지게 된다. 이러한 θ 와 ϕ 값과 급전부의 방사패턴 정보에 따라 각 광선은 위상과 크기를 배정받게 된다.

광선이 급전부가 아닌 그리드로부터 생성하도록 하였는데 만약 하나의 그리드가 하나의 광선만을 생성하도록 한다면 어떤 그리드는 각면 반사판으로부터 반사되어 오는 광선을 하나도 받지 못하는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 불연속적인 필드의 분포는 비현실적이며 이는 비현실적인 부엽파를 발생시키는 원인이 된다 [4]. 이를 방지하기 위해 하나의 그리드에 복수의 부그리드를 생성하고 복수의 부그리드로부터 광선을 생성하도록 함으로써 반사되어 돌아오는 광선을 하나도 받지 못하는 그리드가 발생할 확률을 줄이는 것이다.

2.3 개구면 필드의 생성

이제 이상적인 포물면은 각면 반사판으로 대체되고 광선들은 초점에서부터 방사된다. 각 광선은 서로 다른 각면에 도달하여 반사되기 때문에 각 광선이 어떤 각면에 도달하는지 찾아야 한다. 각 광선이 반사되는 각면을 찾은 후에는 그 각면의 법선벡터와 광선의 입사 각도, 그리고 스넬의 법칙을 이용하여 각 광선이 어떠한 방향으로 반사되는지 계산한다. 그림 2에서 실선은 포물면에 의해 반사된 광선이고 파선은 각면에 의해 반사된 광선이다.

이제는 각 광선들이 원래 생성되었던 그리드가 아닌 다른 그리드에 도달할 수 있기 때문에 각 광선이 어느 그리드에 도달하는지 알아내야 한다. 이러한 과정을 거쳐 각 그리드에 몇 개의 광선들이 어떠한 위상을 가지고 도달했는지 알아낸다. 즉 개구면의 필드, E_{ax} 와 E_{ay} 를 구한다.

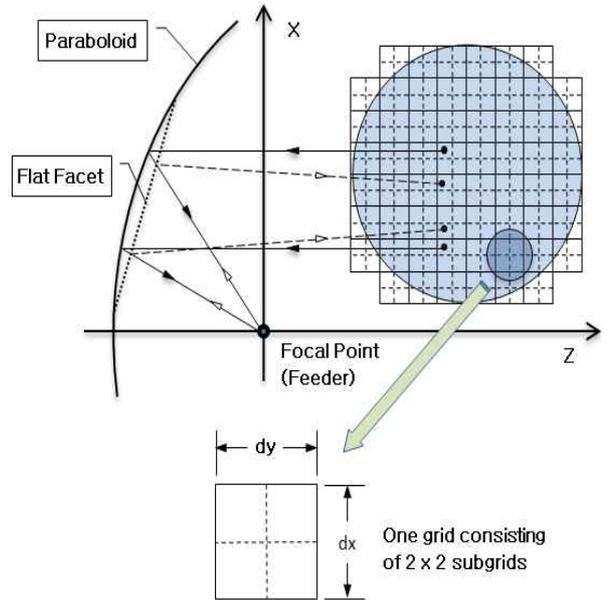


그림 2. 개구면 분할: 그리드와 부그리드

2.4 개구면 필드의 적분과 방사패턴 계산

식 (a)에 의한 개구면 필드의 적분은 그리드, 즉 $dx'dy'$ 을 기초로 수행된다. 각 그리드에 대하여, 그 그리드에 도달한 광선의 수만큼, 피적분 함수값이 $dx'dy'$ 와 곱해져 더해진다. 이렇게 하면 개구면 상에서의 광선의 밀집도와 위상이 모두 반영된다. 원역장 방사패턴은 식 (a)에 의해 구해진 값과 식 (b), (c)에 의해 구해진다.

3. 해석의 예

그림 3은 개구면이 원형인 직경 20미터 반사판 안테나의 해석 결과를 보이고 있다. F/D 는 0.8, 급전부의 방사

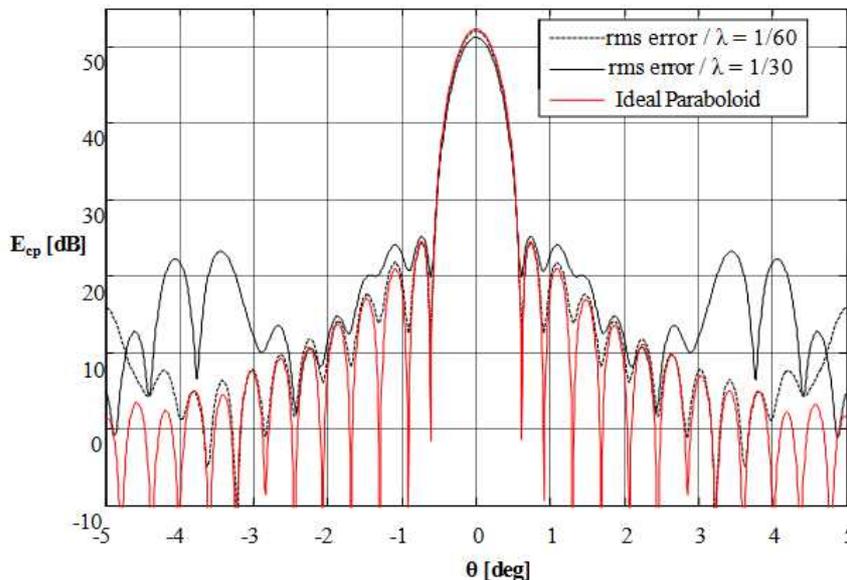


그림 3. 두 종류의 평면한 각면 반사판과 이상적인 포물면의 방사패턴 비교

패턴은 edge taper 12dB를 갖는 Gaussian 패턴이며 주파수는 2.2 GHz이다. 두 경우의 삼각형 각면 반사판 해석 결과를 이상적인 포물면의 경우와 비교하고 있는데, 하나는 삼각형의 한 변의 길이가 1,429 mm인 경우로서 표면의 rms 오차(포물면에 대한 각면의 근사 오차)가 2.29 mm인 경우이다. 이 오차는 파장의 1/60에 해당한다. 해석 결과 이상적인 포물면에 비해 지향성의 감소는 미미하지만 5도 부근에서 부엽과가 나타난다. 다른 하나는 각면의 크기가 2,500 mm인 경우로서 표면의 rms 오차가 4.48 mm인 경우이다. 이 값은 파장의 1/30에 해당하는 값으로 지향성이 1.1 dB 정도 감소하고 3~4도 부근에서 부엽과가 매우 커지는 것을 알 수 있다.

Ⅲ. 각면 분할과 방사 패턴

1. 각면 분할 방법

우선 원형 개구면을 동일하 원주각을 갖도록 원주방향으로 나누어 복수의 '베이(bay)'를 만든다. 그림 4에서는 8개의 베이로 나눈 것을 보이고 있다. 다음으로 각 베이를 반지름 방향으로 나누어 복수의 링(ring)을 만든다. 각 링의 폭은 서로 다를 수 있다. 그림 4는 하나의 베이이 네 개의 링으로 나누어진 경우이다. 마지막으로 각 링의 바깥쪽 원주가 원주방향으로 나누어지는데 이를 '링분할'이라 칭한다. 그림 4에서는 각 링이 안쪽에서부터 1, 2, 4, 8개의 링분할이 되어 있다. 요약하면, 각면의 크기는 원주방향으로는 베이 수 또는 링분할로 조절되고, 반지름 방향으로는 링 폭에 의해 조절된다.

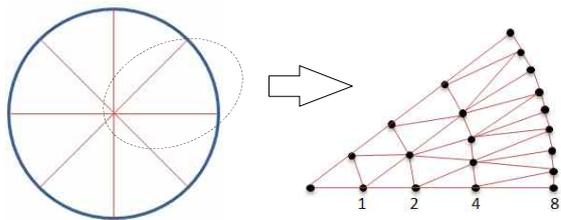


그림 4. (왼쪽) 8개의 베이로 나뉜 원형 개구면, (오른쪽) 4개의 링과 각 링이 {1,2,4,8}개로 나뉜 하나의 베이

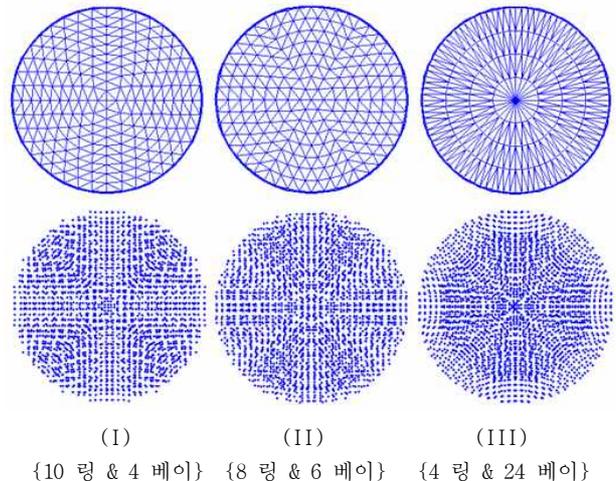
2. 각면 분할과 방사패턴

그림 5에서는 이러한 방식으로 생성된 세 가지 경우의 각면 분할들의 예를 보이고 있다. 여기서 모델링 된 대상은 그림3에서 보인 해석의 예와 같은 반사판이다. 그림 5의 세 가지 경우는 약 400개의 비슷한 수의 각면을 갖고 있지만 서로 다른 링의 수와 베이 수를 갖고 있다. 즉 첫 번째 경우는 많은 수의 링과 적은 수의 베이를 갖는 경우이고, 세 번째의 경우는 적은 수의 링과 많은 수의 베이를 갖는 경우이다. 여기서 각 링의 폭은 모두 균일하고 동일하다. 각 경우에 따른 광선의 분포 형태도 그림 5에서 보

이고 있는데, 베이의 수와 광선밀도의 주기 수가 동일한 것을 알 수 있다. 다만 24 베이의 경우 베이의 수가 너무 많아 원주방향의 주기성을 명확히 나타내지 못하고 있다. {4 링 & 24 베이}는 반지름 방향으로 분명하게 불균일한 광선분포를 보이고 있으며 성능은 가장 나쁜 결과를 보인다. 표 1은 {8 링 & 6 베이}의 경우가 표면 오차에서도 가장 좋은 결과를 보이고 있음을 알려준다.

이와 같은 세 가지 경우의 방사패턴을 그림 6에서 보이고 있다. 반지름방향 분할이 충분하지 않은 {4 링 & 24 베이}의 경우 지향성이 줄어들고 부엽과가 커지는 것을 알 수 있다. 반지름 방향 분할이 충분하다 하더라도 원주방향 분할이 충분하지 않은 {10 링 & 4 베이}의 경우 부엽과가 역시 커진다. {8 링 & 6 베이}의 경우 상대적으로 균일한 광선분포를 가지고 있으며 원주방향으로는 짧은 주기성의 광선분포를 가지며 가장 좋은 성능을 보인다.

결론적으로 반지름 방향으로 균일한 광선분포를 갖는 것이 지향성과 부엽과의 양 관점에서 중요한 요건이며 원주방향 분할이 충분하지 못하면 부엽과가 커진다는 것을 알 수 있다.



(I) {10 링 & 4 베이} (II) {8 링 & 6 베이} (III) {4 링 & 24 베이}

그림 5. 세 가지 개구면 각면 분할(위 그림)과 그에 따른 광선 분포(아래 그림)

표 1. 그림 5의 세 가지 분할에 따른 결과 비교

| | 10 링 & 4 베이 | 8 링 & 6 베이 | 4 링 & 24 베이 |
|-----------|-------------|------------|-------------|
| rms 표면 오차 | 2.03 mm | 1.75 mm | 6.05 mm |
| 지향성 | 52.1 dB | 52.1 dB | 50.5 dB |
| 각면의 수 | 400 | 384 | 400 |

원주방향 분할과 반지름방향 분할이 방사패턴에 미치는 영향에 관한 더 많은 데이터를 얻기 위해 파라미터 연구를 실시하였다. 그림 7을 보면 지향성은 링의 수 즉, 반지름 방향의 분할 수에 크게 영향 받음을 알 수 있다. 반면

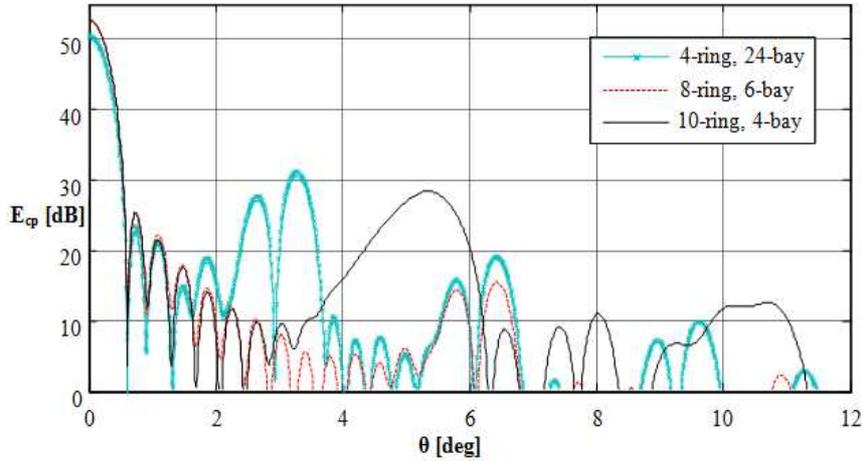


그림 6. 비슷한 수의 각면을 갖는 서로 다른 각면 분할에 따른 방사패턴의 비교

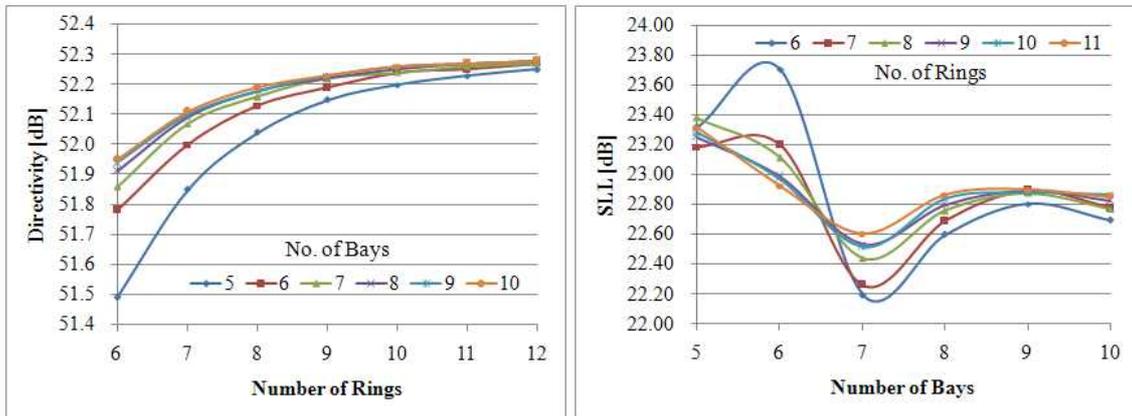


그림 7. 링 수와 베이 수에 따른 지향성과 첫 번째 부엽과의 변화

에 첫 번째 부엽과는 베이 수 즉, 원주방향 분할 수에도 영향을 받는 것을 알 수 있다.

3. 반지름 방향의 표면오차 분포와 방사패턴

위의 해석 결과들은 각 링들의 폭이 동일하고 균일한 경우였다. 하지만 각 링들의 폭이 부위에 따라 달라지면 어떻게 될 것인가? 이를 알아보기 위해 그림 8과 같이 3 가지로 각면분할된 반사판의 방사패턴을 구하였다. 표 2 와 그림 9가 그 결과를 보이고 있다. 대체로 급전부 방사 패턴이 중앙에 큰 파워를 가지고 있기 때문에 반사판의 중앙부의 오차가 적은 그림 8의 (II)가 가장 좋은 성능을 보일 것으로 판단하였으나 해석 결과를 보면 표면오차가 균일하고 전체 평균 표면 오차가 가장 작은 그림 8의 (I)의 경우가 가장 좋은 결과를 보였다.

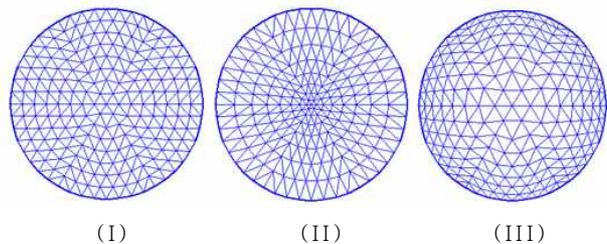


그림 8. (I) 표면오차 균일함, (II) 중앙부의 표면오차가 적음, (III) 가장자리의 표면오차가 적음

표 2. 그림 8의 세 가지 분할에 따른 결과 비교

| | 그림 8의 Case (I) | 그림 8의 Case (II) | 그림 8의 Case (III) |
|----------|----------------|-----------------|------------------|
| rms 표면오차 | 1.75 mm | 3.79 mm | 3.23 mm |
| 지향성 | 52.1 dB | 51.7 dB | 51.6 dB |
| 첫 번째 부엽과 | 24.4 dB | 30.6 dB | 29.6 dB |
| 3dB 빔폭 | 0.46 ° | 0.47 ° | 0.46 ° |

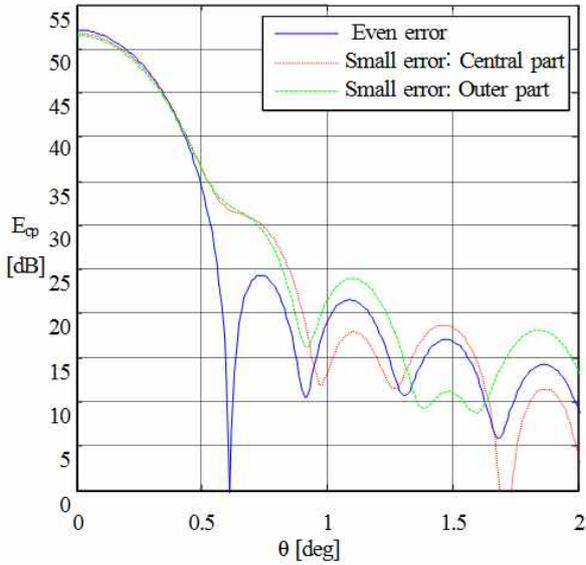


그림 9. 표면오차 분포에 따른 방사패턴 (그림 8 참조)

IV. 결론

본 논문에서 제시한 해석 알고리즘은 각면 반사판의 주요 특성인 광선의 교차성을 고려하고 개구면에서의 불균일한 광선 분포를 반영하였으며 개구면 필드 적분 시 양자화를 하지 않음으로써 좀 더 정확한 해석을 결과를 제공할 수 있다.

반사판 분할 형상이 방사 패턴에 미치는 영향에 관하여, 반지름 방향의 분할은 지향성과 부엽파에 큰 영향을 미치는 반면 원주방향의 분할은 부엽파에만 영향을 미치고 지향성에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 보였다. 또한 각면의 크기는 중앙부나 가장자리부 모두 균일한 표면오차를 갖도록 설계하는 것이 가장 좋은 성능을 갖는다는 것을 보였다.

이러한 결과는 각면 반사판을 이해하고 설계하는데 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

[1] C. G. Christodoulou, A. B. Botula, and J. F. Kauffman, "On an Algorithm for Analysis of the Radiation Patterns of Dual Reflector and Segmented Reflector Antennas," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-33, no. 10, pp. 1101-1108, October 1985.

[2] A. C. Brown, Jr., and W. K. Kahn, "Comparison of Various Image Induction (II) Methods with Physical Optics (PO) for the Far-Field Computation of Flat-Sectioned Segmented

Reflectors," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 44, no. 8, pp. 1133-1141, August 1996.

[3] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, Antenna Theory and Design, John Wiley and Sons, New York, 1981.

[4] C. J. Sletten, Reflector and Lens Antennas: Analysis and Design Using Personal Computers, Artech House, Inc., 1988.

저 자

곽 창 수 (Changsoo Kwak)

정회원



1996년 2월 : 연세대학교 기계공학
학사 졸업

1998년 2월 : 한국과학기술원
기계공학 석사 졸업

2000년~현재 : 한국전자통신연구원
선임연구원

2009년~현재 : 한국과학기술원 전기및전자공학 박사과정

<관심분야> 안테나, 필터, 구조해석

엄 만 석 (Manseok Uhm)

정회원



1987년 2월 : 중앙대학교 전자공학
학사 졸업

1989년 2월 : 중앙대학교 전자공학
석사 졸업

2007년 2월 : 중앙대학교 전자공학
박사 졸업

1992년~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 위성시스템, 탑재체, 능동소자, 수동소자, 안테나

엄 인 복 (Inbok Yom)

정회원



1990년 2월 : 한양대학교 전자공학
학사 졸업

2004년 2월 : 충남대학교 전자공학
석사 졸업

2007년 8월 : 충남대학교 전자공학
박사 졸업

1990년~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 위성시스템, 탑재체, 능동소자, 수동소자, 안테나