

금속 메쉬 반사판 안테나의 Pillow Effect 구현과 성능 분석

Implementation and Performance Analysis of the Pillow Effect in Metal-Mesh Reflector Antenna

허준 · 박종민 · 유제우 · 채희덕 · 김동식 · 박종국

Jun Heo · Jongmin Park · Je-Woo Yu · Heeduck Chae · Dong-Sik Kim · Jongkuk Park

요 약

위성 탑재 안테나는 비용 제약으로 인해 고성능을 유지하면서도 부피와 무게의 최소화가 요구된다. 이러한 요구에 따라, 성능은 유지하면서 경량화가 가능하고, 수납 및 전개를 통해 부피를 최소화할 수 있는 금속 메쉬 반사판 안테나의 활용이 증가하고 있다. 그러나 금속 메쉬 반사판은 이상적인 연속 곡면을 형성하지 못하며, 메쉬를 지지하는 구조물에 의해 메쉬 표면이 국부적으로 위로 볼록해지는 pillow effect가 발생하여 전기적 성능을 열화시킨다. 본 논문에서는 금속 메쉬가 지지 구조물에 의해 반지름 및 방위각 방향으로 등방 장력을 가진다고 가정하여 pillow effect 형상을 구현했다. 또한, pillow effect가 반영된 반사판 모델을 TICRA社の GRASP 시뮬레이터를 이용하여 전기적 성능을 분석했다. 립의 개수에 따른 성능 열화 특성과 pillow effect의 발생 강도 변화에 따른 성능 열화 수준을 검토하였으며, 이를 통해 금속 메쉬 반사판 안테나 설계 시 성능 예측과 반사판 제작 정밀도 관리에 활용할 수 있는 분석 방법을 제시한다.

Abstract

Satellite-borne antennas are required to maintain high performance while minimizing volume and weight due to strict cost constraints. To meet these requirements, the use of metal-mesh reflector antennas has been increasing because they enable weight reduction while preserving performance and allow volume minimization through stowage and deployment. However, metal-mesh reflectors cannot form an ideal continuous curved surface, and the supporting structure induces a pillow effect that locally turns the mesh surface into a convex and degrades electrical performance. In this study, the pillow-effect shape is modeled by assuming that the metal mesh is subjected to isotropic tension in both the radial and azimuthal directions owing to the supporting structure. The electrical performance of reflectors incorporating the pillow effect was analyzed using the GRASP simulator developed by TICRA. The performance degradation characteristics with respect to the number of ribs and the level of performance degradation associated with variations in the pillow effect intensity were investigated. Based on these results, an analysis methodology is presented that can be utilized for performance prediction and managing the reflector surface accuracy in the design of metal-mesh reflector antennas.

Key words: Deployable Antenna, Metal Mesh, Mesh Antenna, Pillow Effect, Reflector Antenna

「이 연구는 2025년도 LIG 디펜스&에어로스페이스의 자체 연구비 지원으로 수행되었음.」

LIG 디펜스&에어로스페이스(LIG Defense&Aerospace)

· Manuscript received January 27, 2026 ; Revised February 19, 2026 ; Accepted May 6, 2026. (ID No. 20260127-003)

· Corresponding Author: Jun Heo (e-mail: jun.heo@ligdna.com)

I. 서 론

위성에 탑재될 안테나는 고성능과 동시에 부피 및 무게의 최소화가 요구된다. 이는 위성 발사 및 운용 시 발생하는 비용과 직결되기 때문이다. 이러한 이유로, 최근 위성 탑재 반사판 안테나는 금속 메쉬로 만든 반사판을 활용하여 동일 직경 대비 성능은 유지하고 무게를 낮추는 방법을 사용하고 있다. 또한, 메쉬로 만든 반사판은 수납과 전개가 쉬워, 전개형 안테나로 제작하는 경우 부피의 최소화도 달성할 수 있다.

메쉬를 이용해 원하는 반사판 곡면을 만들기 위해서는 트러스(truss)나 림(rib)과 같은 구조물이 활용된다^{[1][4]}. 하지만, 이러한 구조물에 의해서 메쉬에 장력이 가해지고, 메쉬는 구조물과 구조물 사이에서 위로 볼록한 형태를 가지게 된다. 이렇게 위로 볼록한 패턴이 반복되는 모양이 마치 베개(pillow)처럼 생겨서 이를 pillow effect 또는 pillow distortion이라고 부른다^[5]. 이 현상은 메쉬로 반사판 제작 시 반드시 발생하며, 그 형상이 원했던 반사판 곡면과 달라서 안테나의 전기적 성능을 열화시킨다. 따라서, 사전에 열화 수준을 예측해 설계에 반영해야 하지만, 현실적으로 메쉬에 분포된 장력은 제작할 때마다 달라지기 때문에, 예측이 쉽지 않다. 이러한 이유로, pillow effect의 형태를 구현하고 이에 대한 성능 분석에 대하여 연구가 충분히 시도되지 않았다.

본 논문에서는 림 구조물에 체결된 금속 메쉬 반사판 안테나에서의 pillow effect 형상을 구현하고, 성능 열화 수준을 예측하는 방법을 제안한다. 먼저, pillow effect 형상 구현을 위해서, 메쉬에 반지름과 방위각 방향으로 등방 장력 분포를 가정했다. 결과적으로 최소 곡면 형상인 catenoid 구조의 pillow effect 형상을 구현했다. Pillow effect가 고려된 최종 반사판 형상 구현은 MATLAB 기반의 in-house 코드를 제작하여 진행했다. 이를 통해 pillow effect의 발생 강도를 조절할 수 있도록 하였고, 구현된 반사판 안테나를 TICRA社の GRASP 시뮬레이터를 이용해 전기적 성능을 분석했다. 제안한 방법은 안테나 설계 시, 성능 예측, 반사판 제작 정밀도 관리 등에 활용할 수 있다.

II. Pillow Effect를 고려한 반사판 형상 구현

안테나 반사판 제작에 활용되는 금속 메쉬는 굽힘 강

성이 없는 2차원의 얇은 막(membrane)으로 모사할 수 있다. 이는 휘어짐에 대해 저항하는 자체 힘이 없어서, 오직 장력만이 그 하중을 견디게 됨을 의미한다. 트러스나 림 구조물에 체결된 메쉬는 반지름과 방위각 두 방향 곡률을 가진다. 각 곡률은 각자 자기 몫의 효과를 가지며, 서로 수직인 두 방향의 곡률 합은 전체 표면에 가해질 힘과 비례해 최종 형상을 결정한다^[6]. 결과적으로 메쉬의 형상은 식 (1)과 같이, 막에 인가된 인장력과 곡률의 선형 조합이 막 양면에 가해진 압력 차이와 같다고 정의하는 Young-Laplace 방정식으로 설명할 수 있다^[7].

$$T_r k_r + T_\theta k_\theta = \Delta p \approx 0 \quad (1)$$

T_r , T_θ 는 각각 반지름과 방위각 방향으로 인가된 장력을 의미하며, 장력이 인가된 경우 양의 값을 가진다. k_r , k_θ 은 각각 반지름과 방위각 방향으로 메쉬가 형성하는 곡률을 의미한다. 메쉬의 양면 압력 차 Δp 는 외부에서 별도로 눌러지거나 당겨지지 않는 경우라면, 압력 차이가 없다고 가정할 수 있어 0으로 근사할 수 있다. 따라서, 메쉬가 가지는 반지름, 방위각 방향 각각의 곡률은 반드시 서로 다른 부호를 가지게 된다. 이러한 경향을 쉽게 확인할 수 있도록, 림에 메쉬가 일부만 체결된 경우를 가정한 형상을 그림 1에 나타내었다.

반지름 방향 곡률 k_r 은 림에 의해 강제로 오목하게 되어 그림 1의 법선 $\vec{n}$ 기준 음의 값을 가지게 된다. 따라서, 방위각 방향 곡률 k_θ 은 식 (1)에 의해 자연스럽게 양의

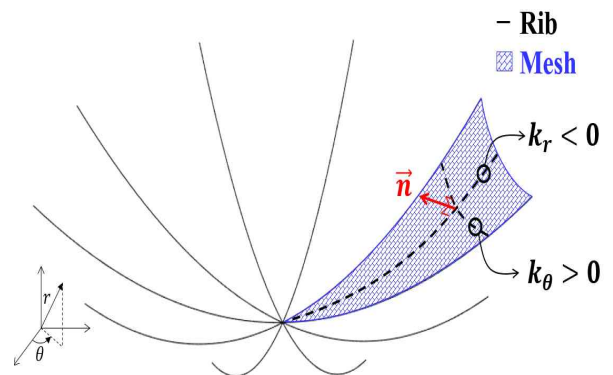


그림 1. 림에 체결된 메쉬의 곡률 형상

Fig. 1. Curvature geometry of a rib-supported mesh.

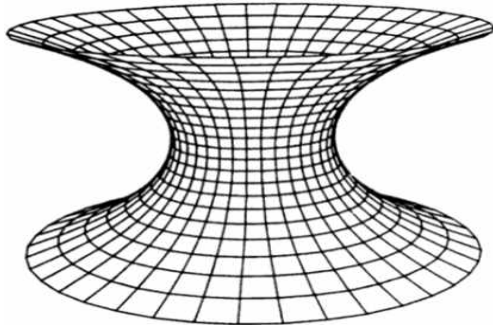


그림 2. 카테노이드 곡면 예시^[8]
Fig. 2. An example of the catenoid surface^[8].

값을 가진다. 결과적으로 립에 체결된 메쉬는 안장(saddle) 형태를 가지게 된다. 이와 같이, 압력의 평형을 위해 립과 립 사이 공간, 즉, 고어(gore)에서 메쉬가 위로 볼록한 형태를 가지는 pillow effect가 발생한다.

만약 외부에서 압력이 없고($\Delta p \approx 0$), 메쉬의 반지름과 방위각 두 방향 인장력이 동일한 세기라고 가정하면($T_r = T_\theta$), 식 (1)은 식 (2)와 같이 정리된다.

$$k_r + k_\theta = \Delta p \approx 0 \quad (2)$$

식 (2)에 의해 두 곡률의 평균이 0이 되는데, 이에 따라 메쉬의 형상은 최소 곡면인 카테노이드(catenoid) 구조가 된다. 카테노이드 구조는 그림 2의 예시와 같이 현수선(catenary)이 회전축을 따라 회전된 형태를 가지는 입체 곡면이다^[8].

메쉬가 pillow effect에 의해 볼록해지는 형상은 현수선의 형태를 가진다. 립과 립 사이 거리가 d 인 길이 방향 성분 l 에 대해서, 카테노이드 구조를 만들기 위한 현수선 $r(l)$ 은 식 (3)과 같이 hyperbolic cosine 형태로 정의된다^{[8],[9]}.

$$r(l) = a \times \cosh\left(\frac{l}{a}\right), l \in \left[-\frac{d}{2}, \frac{d}{2}\right] \quad (3)$$

식 (3)의 계수 a 는 현수선 형상을 구하는 위치에서, 길이 방향 양 끝점에 대한 경계 조건을 통해 구해진다. 양 끝 점 사이의 거리가 d 일 때, 해당 위치에서의 곡률 반지름과 현수선의 높이 $r(-\frac{d}{2})$ 와 $r(\frac{d}{2})$ 는 같다는 조건으로 계수 a 를 구할 수 있다. 정리하자면, 메쉬의 형상을 구하기 위해서는 그림 3과 같이, 거리 방향에 대해서 립의

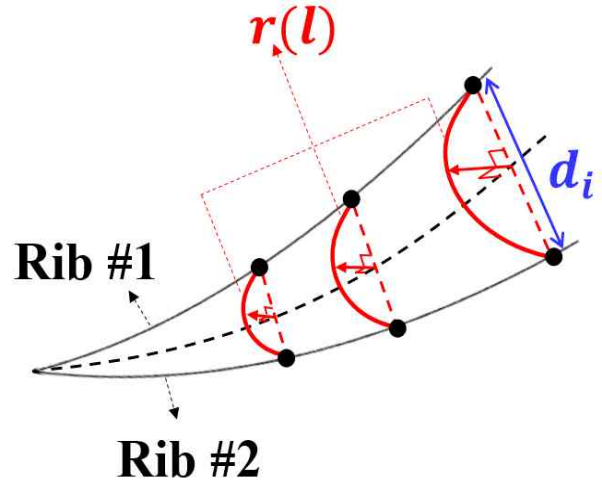


그림 3. 립과 립 사이에서 현수선 형상 정의
Fig. 3. Catenary form between adjacent ribs.

매 위치마다, 립과 립 사이의 거리 d_i 를 구해 식 (3)을 계산해 해당 위치에서의 메쉬가 볼록해지는 정도를 구해야 한다.

일반적으로 립에 금속 메쉬를 체결해서 만드는 반사판 안테나에서는 립의 개수가 많을수록 표면 왜곡과 성능 열화가 줄어드는 것으로 알려져 있다^{[10],[11]}. Pillow effect 발생에 대한 관점에서도, 립 개수가 많아질수록 립과 립 사이의 거리 d 가 작아지고, 이에 따라 현수선 $r(l)$ 이 가지는 최대 높이도 낮아지기 때문에 pillow effect가 발생하는 강도가 줄어 표면 왜곡도 덜 발생한다. 본 논문에서는 립의 수적 변화가 반사판의 형상 정밀도에 미치는 영향을 분석하기 위해, 반사판의 직경과 초점 거리를 고정된 상태에서 립의 개수를 변수로 설정하여 해석을 수행했다. 립의 개수는 최소 10개부터 최대 35개까지 5개 단위로 증가시키며 반사판의 형상을 구현하였으며, 그 결과는 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a) 및 그림 4(b)에서 확인할 수 있듯이, 립의 개수가 반사판의 직경 대비 상대적으로 적으면 개별 고어의 면적이 과도하게 넓어지게 된다. 이에 따라 립과 립 사이 메쉬가 설계 곡면 위로 돌출되는 pillow effect가 현저하게 발생하며, 이는 육안으로도 명확히 식별될 만큼의 형상 왜곡을 야기한다.

반면, 립의 개수가 점진적으로 증가함에 따라 고어의 단위 면적이 축소되면서, pillow effect가 억제되는 경향을 보

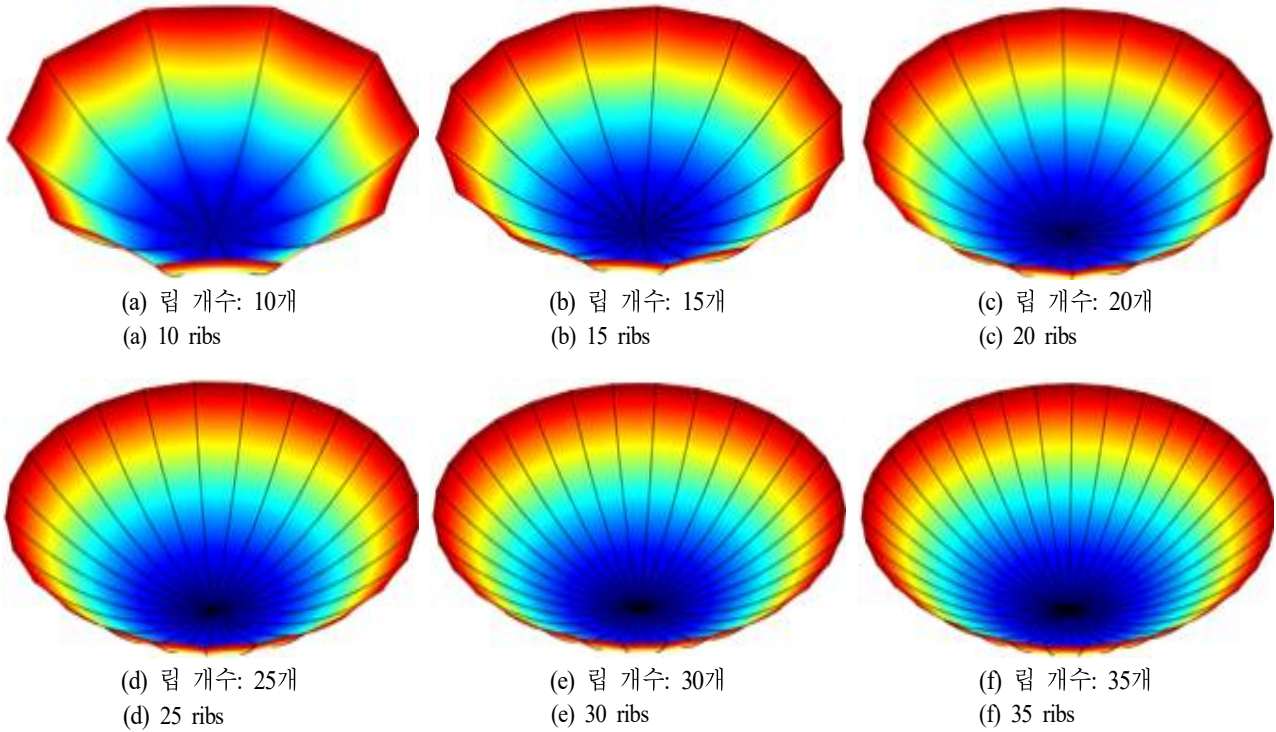


그림 4. 다양한 립 개수에 대한 반사판 형상 구현 결과
Fig. 4. Reflector geometry for different rib numbers.

였다. 결과적으로 립의 개수가 많아질수록 반사판의 전체적인 형상이 이론적인 이상 곡면에 더욱 근접하게 수렴함을 확인했다. 립의 개수에 따른 형상 왜곡 정도를 정량적으로 평가하기 위해, pillow effect가 반영된 반사판 형상과 이상적인 포물면 간의 높이 편차를 산출했으며, 이를 그림 5에 RMSE(root mean square error) 지표로 도식화했다.

RMSE 수치는 그림 6과 같이 립의 개수가 증가함에 따라 지수함수 형태로 감소하는 경향을 보인다. 이는 고어면적이 줄어들수록 메쉬의 최대 돌출 높이가 물리적으로 제한되기 때문이다. 초기 단계(립 10~20개)에서는 립 추가에 따른 RMSE 감소 폭이 매우 크게 나타나지만, 립이 일정 개수 이상 확보된 이후에는 감소율이 둔화되는 경향을 확인할 수 있다.

반사판의 표면 오차인 RMSE가 운용주파수의 파장에 비해서 커질수록 안테나 효율은 급격히 저하된다^[11]. 따라서, 고성능 안테나의 경우 RMSE를 파장 대비 특정 수치 이내로 유지하여 성능을 관리할 필요가 있다. 본 분석에

서 도출된 RMSE 데이터는 목표 주파수 대역에서 허용할 수 있는 최소 립 개수를 결정하는 설계 기준으로 사용할 수 있다. 하지만, 단순히 RMSE를 낮추기 위해 립의 개수를 무한히 늘리는 것은 전개형 안테나의 무게 증가와 수납 효율 저하를 초래한다. 따라서 그림 5 및 그림 6의 RMSE 분석 결과에서 감소율이 급격히 변화되는 지점에서의 안테나 성능을 고려하여 타협점을 도출해야 한다.

반사판의 표면 왜곡인 RMSE와 안테나 성능 사이의 관계를 정의하는 공식은 Ruze's equation이 대표적이다^{[10],[11]}. 이 공식에 의하면 표면 왜곡에 의해 발생하는 안테나 이득 손실은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$G(\epsilon) = g_0 - 685.81 \left(\frac{\epsilon}{\lambda} \right)^2 \quad (4)$$

g_0 은 이상적인 표면을 가진 반사판에서 달성 가능한 안테나 이득을, $G(\epsilon)$ 은 표면 왜곡 RMSE ϵ 가 발생한 반사판에서 달성되는 안테나 이득을 의미하며, λ 는 파장이다. 참고문헌 [1]에서 Ka-band 주파수 대역에서 50 %의

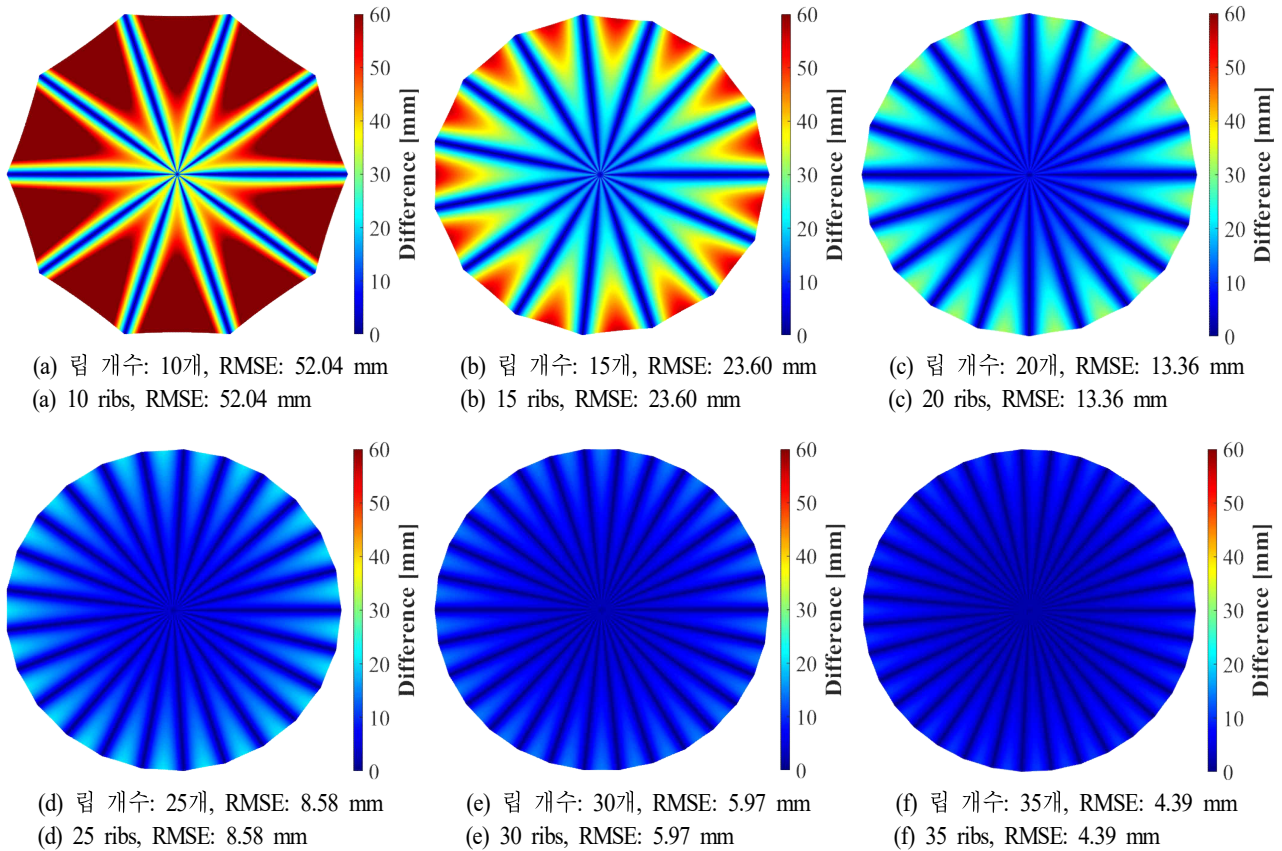


그림 5. 다양한 립 개수에 대한 반사판 형상 RMSE 결과

Fig. 5. RMSE of reflector geometry for different rib numbers.

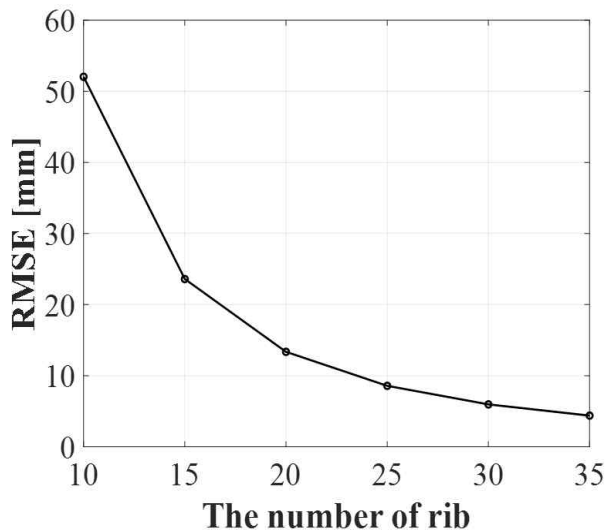


그림 6. 립의 개수에 대한 RMSE 수치 변화

Fig. 6. Variation of RMSE according to the number of rib.

효율, 즉, 3 dB의 손실로 성능을 내고자 하면, 반사판 RMSE가 0.57 mm 미만이어야 달성 가능하다는 표현이 있는데 식 (4)를 통해 계산해보면, 이 규격은 Ruze's equation을 사용해 설정된 것임을 알 수 있다.

하지만 pillow effect로 인한 RMSE가 안테나 성능에 미치는 영향을 분석하기에는 Ruze's equation은 한계가 있다. 이 공식은 표면 왜곡이 반사판 전체적으로 랜덤하게 분포하는 형태를 가정한다. 하지만, pillow effect가 발생한 반사판 형상은 반사판 외각에서 많은 왜곡이 발생하는 형태이기 때문에 분석에 적용하기 부적합하다. 또한, 안테나 성능에 따라 반사판 직경이 수 m로 커지게 되면 pillow effect에 의한 RMSE도 수 mm로 커지게 된다. Ruze's equation은 RMSE 값의 변화에 매우 민감하기 때문에, 이러한 경우 예상 손실 정도가 매우 커지게 된다. 따

라서, 안테나의 직경이 커질수록 Ruze's equation을 적용해서 pillow effect에 의한 RMSE의 성능 영향을 분석하는 것은 현실적이지 않다.

III. Pillow Effect를 고려한 안테나 성능 분석

본 연구에서는 반사판 안테나의 설계 및 성능 분석을 위해 GRASP 시뮬레이터를 활용하였다. GRASP는 그림 7과 같이 립의 개수를 설정함으로써, 메쉬 반사판에서 발생하는 pillow effect를 모사할 수 있다. 이를 통해, 반사판 형상의 왜곡됨을 고려하여 안테나의 방사 패턴과 같은 주요 전기적 성능을 분석하는 것이 가능하다.

하지만, GRASP는 pillow effect를 발생시킨 반사판 형상을 3차원 데이터로 추출하는 기능을 지원하지 않는다. 때문에, 반사판의 제작 정밀도를 평가하기 위한 지표인 RMSE를 분석하는 것이 불가능하다. 또한, 실제 메쉬 안테나에서 발생하는 pillow effect의 발생 강도는 메쉬를 립에 체결할 때의 장력과 상관관계를 가지는데, GRASP 환경에서는 pillow effect의 발생 강도를 조절할 수 없다. 이러한 제한 때문에, 온전히 GRASP만을 사용하여 안테나 성능 분석 및 정밀도 관리를 수행하기에는 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 안테나 성능 분석을 위해서 MATLAB으로 원하는 수준의 pillow effect를 발생시켜 왜곡된 안테나 형상을 만들고, GRASP에서 호환되는 3차원 데이터로 변환해 형상을 import시켜 전기적 성능만 GRASP로 분석을 수행하는 방식으로 사용했다.

먼저 립의 개수를 단계적으로 증가시키면서, pillow effect가 반사판 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 그림 8에 나타내었다. 검은색 실선으로 나타낸 결과는 립의 개수가 35개인 경우, 반사판 표면을 이상적인 포물면

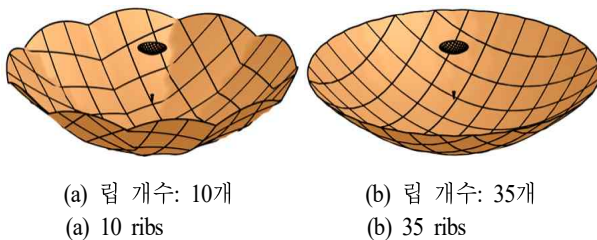


그림 7. GRASP의 pillow effect가 발생한 반사판 구현
Fig. 7. Geometry of reflector with pillow effect in GRASP.

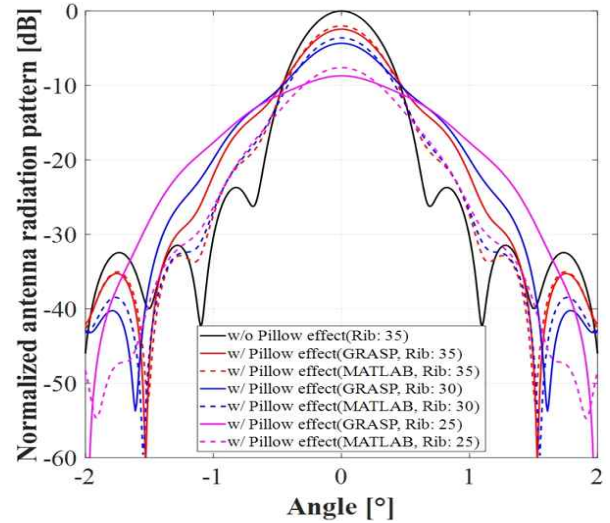


그림 8. 립의 개수에 대한 안테나 방사 패턴 비교
Fig. 8. Comparison of antenna radiation pattern according to the number of rib.

형상으로 가정했을 때의 안테나 성능을 의미한다. 그리고, 실선/점선으로 GRASP/MATLAB의 pillow effect가 반영된 반사판 표면의 성능 분석 결과를 나타내었다. 립이 35개인 경우에는 이상적인 형상의 반사판과 pillow effect에 의해 왜곡된 반사판 두 경우의 성능 분석 결과를 비교할 수 있다. 립이 35개일 때의 RMSE 수준은 그림 5와 같이 4.39 mm로 비교적 작은 편이지만, 이득 최대치가 감소하는 수준을 확인하면 안테나의 성능이 눈에 띄게 저하하는 것을 확인할 수 있다. 또한, GRASP와 MATLAB 두 방법 모두에서 공통으로 립의 개수가 감소할수록 최대 이득이 감소하고 주 빔의 빔폭이 증가하는 식의 패턴 왜곡이 발생하여 전체적인 방사 특성이 점차 열화되는 것을 확인할 수 있다. 두 방법의 안테나 형상 구현 방식이 완벽히 동일하지 않아서, 표면 변형의 크기나 분포가 완전히 동일하게 반영되지 않아 약간의 패턴 차이가 발생하는 것으로 보인다. 이러한 차이로 인해 GRASP와 MATLAB을 이용해 구현한 왜곡된 반사판 형상 중, 무엇이 실제 반사판의 형상을 유사하게 반영하고 있는지는, 본 연구 단계에서는 명확히 단정하기 어렵다. 따라서 향후 실제 제작된 안테나의 표면 오차 측정 결과 및 방사 성능 측정 데이터를 활용한 추가적인 검증이 필요할 것으로 보인다.

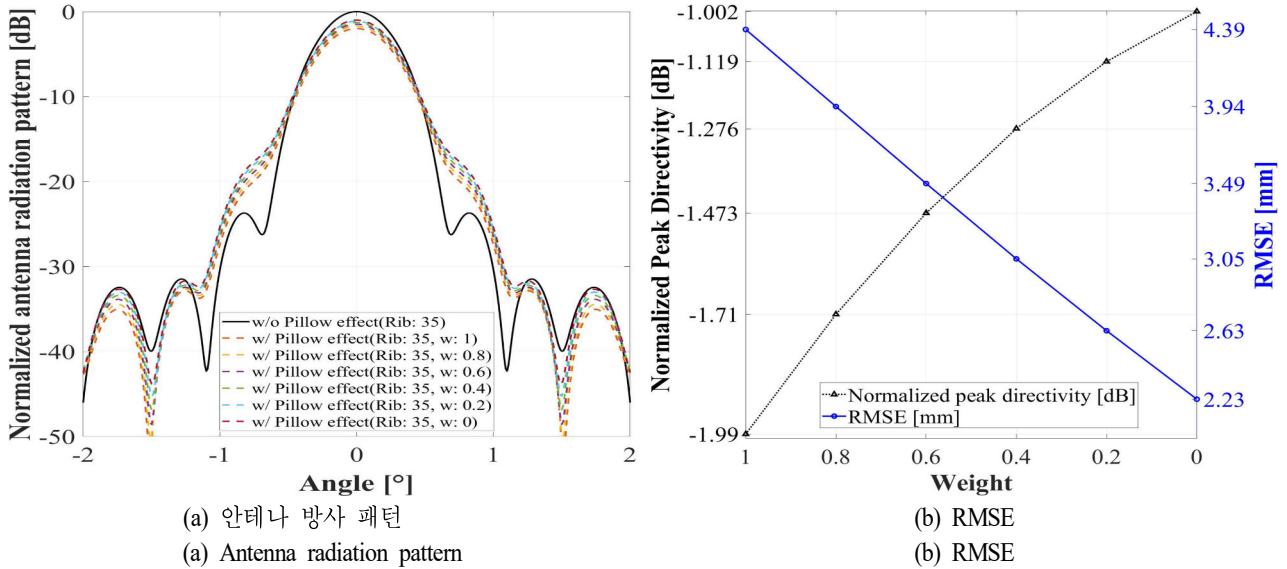


그림 9. Pillow effect 발생 강도 변화에 대한 안테나 방사 패턴 및 RMSE 분석
Fig. 9. Analysis of antenna radiation pattern and RMSE according to intensity of the pillow effect.

실제 안테나 제작 관점에서 보면, 반사판은 구조적 보강 및 장력 조절 등을 통해 pillow effect를 최대한 억제하고, 표면 오차를 최소화하는 방향으로 설계 및 제작된다. 즉, 반사판의 표면 형상은 가능한 낮은 RMSE를 가지도록 관리되는 것이 일반적이다. 이러한 점을 고려할 때, 식 (3)에 의해 정의되는 pillow effect 발생 강도를 억제하여 안테나 성능 분석을 수행하면, 더욱 실제와 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 하지만, GRASP 내부에는 pillow effect 발생 여부만 결정할 수 있고 발생 강도를 조절할 수 있는 기능은 지원하지 않는다. 이러한 한계를 해결하기 위해, MATLAB으로 식 (3)의 결과에 가중치 ω 를 곱하여 pillow effect 발생 강도를 조절했다. 식 (3)에 ω 를 곱한 형태인 아래 수식의 현수선 공식을 사용해 카테노이드 곡면을 만들고 pillow effect를 구현했다.

$$r'(l) = \omega \times a \times \cosh\left(\frac{l}{a}\right), l \in \left[-\frac{d}{2}, \frac{d}{2}\right] \quad (5)$$

ω 값의 변화가 pillow effect 형상 및 안테나 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, ω 를 1에서 시작하여 0.2 간격으로 단계적으로 감소시키며, 최종적으로 0이 되는 경우까지 해석을 수행하였고, 그 결과를 그림 9에 나타내었다. $\omega=1$ 경우는 식 (3)에 의해 계산되는 가장 기본적인

pillow effect 형상에 해당하며, ω 가 감소할수록 pillow effect의 발생 강도가 점차 약화됨을 의미한다. ω 변화에 따른 안테나 방사 패턴 분석 결과를 살펴보면, 그림 9(a)에 나타난 바와 같이 ω 가 감소함에 따라 안테나 방사 패턴이 이상적인 포물면 반사판의 경우에 점차 근접하고, 최대 이득 또한 점진적으로 회복되는 경향을 보인다. 이는 pillow effect에 의해 유발된 위상 오차가 ω 감소와 함께 줄어들기 때문으로 해석할 수 있다.

한편, $\omega=0$ 인 경우, 즉 pillow effect가 전혀 발생하지 않는다고 가정한 조건에서도 이상적인 포물면 반사판과 비교했을 때, 약 1 dB 수준의 이득 감소가 나타나고, 그림 9(b)에 나타난 바와 같이 RMSE가 약 2.23 mm 발생하는 것을 확인할 수 있다.

이것은 $\omega=0$ 일 때, 반사판 형상이 이상적인 연속 포물면

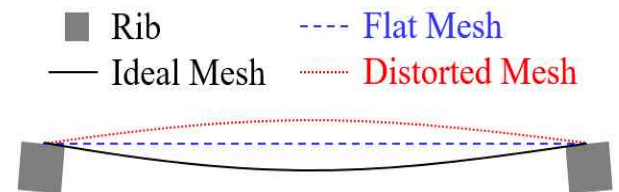


그림 10. 림에 체결된 메쉬가 형성 가능한 면의 형태
Fig. 10. Formable surface shapes of rib-attached mesh.

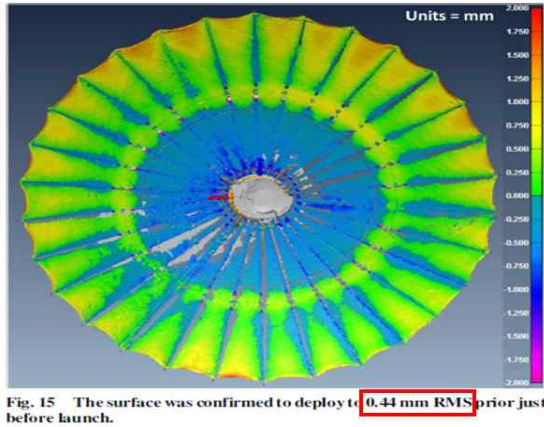
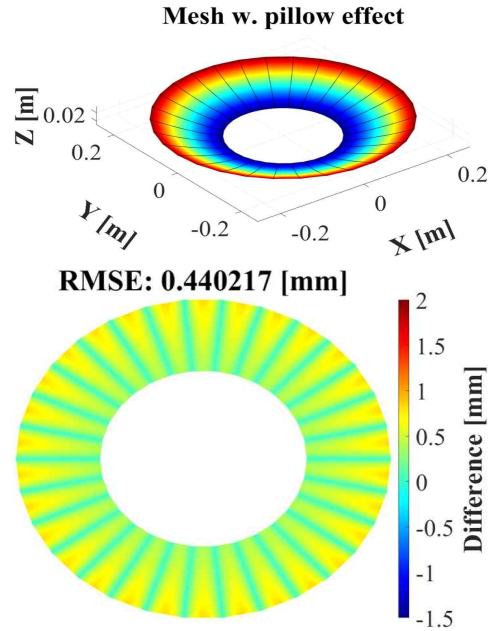


Fig. 15 The surface was confirmed to deploy to 0.44 mm RMS prior just before launch.

(a) 참고 논문 제시 안테나 RMSE
(a) RMSE of the reference antenna



(b) 모사 결과
(b) Simulation results

그림 11. 참고 논문 안테나 RMSE 모사 결과^[1]
Fig. 11. Implementation result of the antenna in reference^[1].

이 되는 것이 아니라, 그림 10과 같이 립과 립 사이를 메쉬 면이 직선 형태로 연결하는 구조(flat mesh)를 가지기 때문이다. 다시 말해, 립 사이 영역에서는 곡률을 가지는 포물면이 아니라 평면에 가까운 형상이 형성되며, 이로 인해 이상적인 형태와 비교하면, 국부적인 표면 오차가 발생하게 된다. 이러한 형상은 반사판 외부에서 별도의 구조적 보강을 통해 메쉬를 당겨주지 않는 한, 실제 제작 가능한 형상 중에서는 가장 이상적인 형태에 가까운 경우로 볼 수 있다. 즉, $\omega=0$ 인 경우는, 립에 의한 구조적 제약으로 인해 완전한 포물면을 구현하지 못하기 때문에 약간의 성능 열화가 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 성능 열화 수준은 구현한 안테나의 직경에 따라 달라지지만, 그림 9의 안테나 이득 결과로 비교해 보면, 이상적인 형상 대비 메쉬 면이 직선 형태로 연결된 flat mesh 구조의 경우 이득이 1 dB, pillow effect가 발생한 경우 1.99 dB 정도가 감소하였다.

본 논문에서 제안하는 방식이 실제 안테나의 왜곡 수준을 얼마나 모사할 수 있는지 확인하기 위해서, 참고문헌 [1]에 기술된 반사판 안테나를 모사하였고, 이 결과를

그림 11에 나타내었다. 참고 논문의 안테나는 직경 0.51 m이고, Ka-band에서 운용하는 것으로 기술되어 있다. 추가적인 수치 정보는 없고, 제시된 형상만으로 추측해 보았을 때, 반사판 안테나의 초점은 약 0.3 m 수준으로 예측되었다. 이 안테나의 형상을 모델링하고, $\omega=0.46$ 인 경우의 현수선을 사용해 구현한 안테나의 형상이 그림 11(b)와 같다. 참고 논문에서 제시한 바와 같이 안테나 표면에 대한 RMSE를 0.44 mm 수준으로 달성 가능했고, 본 논문에서 제시하는 방법을 통해 실제 안테나를 제작했을 때 발생할 수 있는 표면 왜곡 정도를 간단하게 모사할 수 있음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는, 메쉬 반사판 체결 과정에서 발생하는 pillow effect의 형상을 등방 장력을 고려한 카테노이드 형태의 수식을 통해 효과적으로 구현할 수 있으며, 이때 pillow effect의 발생 강도는 가중치를 곱해 임의로 제어할

수 있음을 확인하였다. 이러한 접근법을 통해 실제 안테나 제작 과정에서 형성될 가능성이 높은 반사판 표면 형상을 예측할 수 있고, 더 나아가 해당 형상에 대한 안테나 방사 패턴, 이득 등 전기적 성능 열화 특성을 사전에 정량적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 결과가 실제와 얼마나 유사한지 확인을 위해, 향후 실제 제작된 안테나의 표면 오차 측정 결과 및 방사 성능 측정을 통한 검증이 필요할 것으로 보인다. 검증 후 제안한 접근법을 메쉬 안테나 설계 시 성능 예측, 반사판 제작 정밀도 관리 등에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] J. F. Sauder, N. Chahat, R. E. Hodges, Y. Rahmat-Samii, and M. Thomson, "Design and implementation of a Ka-band folding rib mesh antenna for CubeSats," *ALAA Journal*, vol. 63, no. 1, pp. 309-322, Jan. 2025.
- [2] G. Park, D. W. Yang, M. W. Oh, J. S. Chae, H. Yoon, and J. H. Han, et al., "Deployable mesh reflector antenna for global navigation satellite system radio occultation within 1U CubeSat form factor," *Aerospace Science and Technology*, vol. 167, p. 110694, Dec. 2025.
- [3] Y. Zhang, J. Zhang, R. Zhang, S. Liu, J. Cai, and M. Li, et al., "Design of deployable mesh reflector antenna based on cable-dome tensegrity structure," *Structures*, vol. 68, p. 107150, Oct. 2024.
- [4] Y. Rahmat-Samii, V. Manohar, J. M. Kovitz, R. E. Hodges, G. Freebury, and E. Peral, "Development of highly constrained 1 m Ka-band mesh deployable offset reflector antenna for next generation CubeSat radars," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 10, pp. 6254-6266, Jun. 2019.
- [5] D. Wu, M. Wu, P. Xiang, and Z. Yan, "Surface accuracy analysis and optimization design of rib-mesh paraboloidal antenna reflectors," *Aerospace Science and Technology*, vol. 129, p. 107817, Oct. 2022.
- [6] Y. Thomas, "An essay on the cohesion of fluids," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 95, pp. 65-87, Dec. 1805.
- [7] P. Fratzl, F. Dieter Fischer, G. A. Zickler, and J. W. C. Dunlop, "Anisotropic Young-Laplace-equation provides insight into tissue growth," *arXiv preprint arXiv:2112.08502*, Dec. 2021.
- [8] U. Dierkes, S. Hildebrandt, A. Küster, and O. Wohlrab, *Minimal Surfaces*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2010.
- [9] T. H. Colding, W. P. Minicozzi II, "Shapes of embedded minimal surfaces," *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 103, no. 30, pp. 11106-11111, Jul. 2006.
- [10] J. H. Kim, S. A. Lee, T. Y. Park, H. S. Choi, H. Kim, and B. G. Chae, et al., "Analysis of radio frequency (RF) characteristics and effectiveness according to the number of gores of mesh antenna," *Journal of Space Technology and Applications*, vol. 1, no. 3, pp. 364-374, Nov. 2021.
- [11] J. Ruze, "Antenna tolerance theory: A review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, no. 4, pp. 633-640, Apr. 1966.

허 준 [LIG 디펜스&에어로스페이스/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0151-484X>



2018년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2024년 2월: 아주대학교 AI융합네트워크학과 (공학박사)
2025년 6월: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사후연구원
2025년 8월~현재: LIG 디펜스&에어로스

페이스 초고주파기술연구소 1팀 선임연구원

[주 관심분야] 장거리 전파 해석, 전자파 수치 해석, 안테나 설계 등

채 희 덕 [LIG 디펜스&에어로스페이스/팀장]

<https://orcid.org/0000-0003-4609-1764>



1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2007년 3월~현재: LIG 디펜스&에어로스

페이스 초고주파기술연구소 1팀 팀장

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이다 시스템, 초고주파 수동 회로 설계, 전자파 수치 해석 등

박 중 민 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0001-1961-8340>



2006년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
2008년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2014년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
2014년 9월~현재: LIG 디펜스&에어로스

페이스 초고주파기술연구소 1팀 수석연구원

[주 관심분야] 영상 레이다, 초고주파 시스템 등

김 동 식 [LIG 디펜스&에어로스페이스/팀장]

<https://orcid.org/0000-0001-7113-1460>



2000년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
2007년 3월~현재: LIG 디펜스&에어로스 페이스 정지궤도위성개발단 2팀 팀장
[주 관심분야] 원자시계, 초고주파 시스템, 레이다 시스템, 위성 시스템 등

유 제 우 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1204-074X>



2005년 8월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)
2008년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2008년 2월~현재: LIG 디펜스&에어로스 페이스 초고주파기술연구소 1팀 수석연구원

[주 관심분야] 레이다 및 영상레이다, 초고주파 시스템 등

박 종 국 [LIG 디펜스&에어로스페이스/연구소장]

<https://orcid.org/0000-0001-5834-9238>



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
2001년 11월~현재: LIG 디펜스&에어로스

페이스 초고주파기술연구소 연구소장

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이다 시스템, 초고주파 수동 회로 설계, 전자파 수치 해석 등