

헬기 장착 항행 레이더용 Ka-대역 렌즈 안테나 설계

The Design of the Ka-band Lens Antenna for Navigation Radar on Helicopter

문상만*
Moon, Sang-Man

김현경*
Kim, Hyounk-Young

김인규*
Kim, In-Kyu

이상종*
Lee, Sang-Jong

김태식*
Kim, Tae-Sik

이해창*
Lee, Hee-Chang

ABSTRACT

In this paper, the radar antenna of navigation radar on helicopter was suggested to Ka-band lens antenna. It is type of the streamlined convex lens to reduce the air resistivity when helicopter was navigated. Although aperture area is smaller than the standard antenna just like horns, the gain is higher and beamwidth is smaller than standard horns. We made the lens by using maximum flare angle of the horn and dielectric constant of the lens. As a result, when aperture diameter was 280mm and focal length was 145mm, the return loss -21.25dB , the gain was 32.2dBi , E and H beamwidth was 1.8° (E-plane), 1.4° (H-plane), nearly 1.5° , and side-lobe level was -18.4 dB (E-plane), -19.5dB (H-plane) lower were presented. So this suggested type can be used for the radar antenna of navigation radar on helicopter, and it will possible just a little some sidelobe suppression by using the choked horn as a feeder horn.

주요기술용어(주제어) : Antenna(안테나), Radar(레이더), Convex Lens(볼록렌즈), Helicopter(헬리콥터)

1. 서론

항공기 탑재용 안테나로 많은 종류의 안테나가 개발되어져 왔다. 항공기에 장착되는 안테나는 그 사용 목적 및 부착 장소에 따라 재질 및 외형적인 제약을 일반적인 안테나보다도 더욱 특별히 요구된다. 항공기 안테나의 부착 장소는 대부분 항공기의 코, 날개,

답, 랜딩기어 및 착륙장치 부근, 후방 꼬리 날개 등이 있으며, 이 장소들에 안테나의 사용목적 및 항공기의 구조에 따라 안테나가 장착된다.

먼저 사용목적에 따라서는 전방 표적 탐지 및 추적 목적용 레이더는 항공기의 전방, 그리고 헬기와 같은 경우엔 프로펠러 위 등으로 전파전파시 전파의 시야가 목적하는 방향으로 항공기의 전방을 충분히 확보할 수 있는 위치를 선호하며, 지상 감시를 위한 SAR (Synthetic Aperture Radar)에서는 항공기 날개 아래 부분, 후방으로의 양호한 통신망 확보를 위해서는 항공기의 날개 뒷부분 및 꼬리(Fin) 위치를 선호한

† 2004년 9월 8일 접수~2004년 12월 13일 심사완료

* 한국항공우주연구원(KARI) 비행선그룹

주저자 이메일 : msm@kari.re.kr

다.^[1]

그리고 항공기의 구조에 따라서는 로켓 및 미사일과 같은 공기 저항을 최소로 하기 위한 구조에서는 항공기의 코 부분에 레이돔을 부가한 형태로 장착하기도 하며 부분적으로는 꼬리(Fin) 및 몸체 자체 및 날개 표면 등에 장착하는 것을 선호한다.

이렇듯 대부분의 경우 항공기용 안테나는 외부 부착물로써 항공기의 항행시 공기 저항을 극한으로 받게 된다. 따라서 공기저항을 최대한 줄이기 위해서 부착위치가 중요하듯이 안테나의 형태도 중요하다.^[1]

그러므로 본 논문에서 설계하고자 하는 안테나는 항공기중에서 저속 항행을 하는 항공기로 헬기에 부착하는 안테나로써 항행 레이더용 안테나에 대해 논하고자 한다. 헬기에 부착 가능한 위치는 헬기 전방 아랫부분 및 헬기의 회전익 윗부분으로 들 수 있다. 본 논문의 항행 레이더용 안테나는 충돌방지 및 회피를 목적으로 사용하는 레이더용 안테나이기 때문에

전방에 대한 탐지가 주목적이며, 이러한 이유로 회전익 윗부분 보다는 전방 아래 부분(nose)에 장착하는 안테나를 설계하고자 한다. 그 부착 위치를 그림 1에 나타내었다.

2. 항행 레이더용 안테나의 제원

가. 안테나의 외형선정

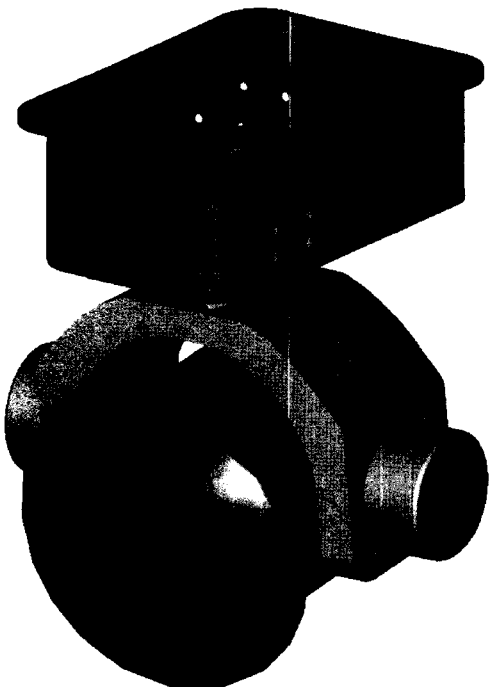
헬기가 비록 저속이긴 하지만, 항행 속도가 항행시 200Km/hour 되므로 외부 부착물인 안테나로써는 많은 공기 저항을 받는다. 이로 인한 헬기의 안전 운항에도 그 영향이 있으리라 사료되어 안테나의 형태는 유선형이 적당하다 판단되었다.

또한, 안테나의 사용목적이 항행 레이더용이기 때문에 레이더의 효율과 적용에 맞도록 타당한 고이득, 그리고 그때의 이득 및 분해능을 얻기 위한 좁은 빔폭 및 클러터 억제를 위한 낮은 사이드 로브 성능을 가져야 한다. 부가적으로 크기 및 부피면에서도 될 수 있는 한 작은 형태이어야 하며, 무게 역시 작아야 기존 헬기의 부착물로써도 사용이 가능하리라 사료된다.

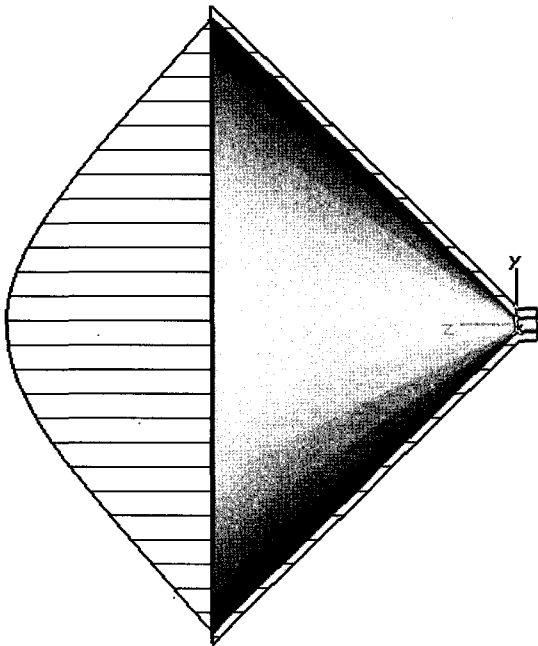
따라서 안테나의 고이득과 좁은 빔폭을 나타내기 위해서는 넓은 개구면을 갖는 안테나가 필요하다. 이러한 개구면 안테나의 대표적인 것들로는 반사판 안테나와 혼 안테나 등으로 들 수 있다. 물론 마이크로 스트립을 이용한 어레이 안테나도 가능하지만 소형의 레이더용 고출력을 견뎌야 하기 때문에 여기서는 적절하지 못하다고 판단되었다.

이러한 개구면 안테나에서 안테나의 크기 및 부피를 줄이기 위한 다양한 방법중에, 대표적인 예로 렌즈를 사용한다. 렌즈는 형태에 따라 다소 다른 특성을 나타내지만, 일반적으로 같은 크기의 개구면을 갖는다면, 이득은 향상되고, 빔폭이 약 1/4로 줄어드는 것으로 알려져 있다.^[2]

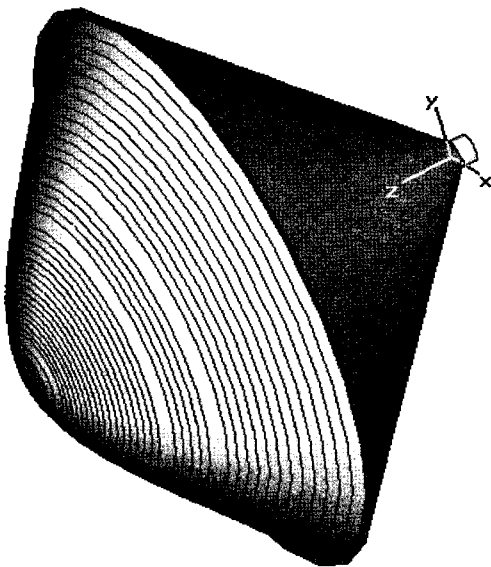
그러므로 본 논문에서는 항행 레이더용 헬기 장착 안테나로 렌즈가 부가된 혼 안테나를 제안하였으며, 렌즈의 형태는 유선형임을 감안하여 볼록 렌즈의 형태를 취하였다. 또한, 전체적인 무게 및 부피 감소를 위해 혼 안테나는 wide flare angle(90°)로 선정하였



[그림 1] 헬기 탑재형 레이더 안테나의 장착 형상의 예(The sample of radar antenna on the helicopter)



(a) 렌즈 안테나의 평면도(y-z 2D)
(Lens antenna cut plane(y-z 2D))



(b) 렌즈 안테나의 입체도(3D)
(Lens antenna structure(3D))

[그림 2] 제안된 안테나의 구조
(Suggested antenna structure)

으며, 그 구조를 그림 2에 나타내었다.

그림 2에 나타난 안테나는 기존의 광대역 급전을 이용한 주름형 렌즈 혼 안테나^[3]의 변형 형태로써 표면 주름에 의한 공기저항을 감소시키기 위해 매끄러운 표면이 되도록 외부와 마주하는 면은 매끄럽게, 내부에는 매칭을 위한 홈이 있는 구조이다. 주름이 있음으로 인한 Ray의 변형은 전자기파의 밀집에 영향을 주는 것으로 알려져 있어 매칭에 의해 전자기파적인 밀집을 이용하여 사이드로브 억제 효과도 다소 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 본 논문에서는 매칭을 위한 주름은 사이드로브 억제보다는 송수신기로의 반사신호를 작게 하는 return loss 개선 효과를 목표로 한다.

나. 안테나의 사양 선정

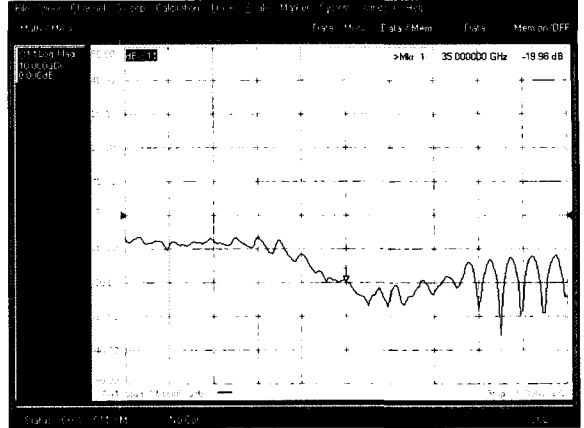
세부 설계 사양을 세우기 위해 서론에서 언급하였듯이 항행 레이더용 안테나는 레이더 설계 및 사용 목적에 맞는 그 사양이 정해지므로 표 1 및 일반적인 레이더 방정식인 수식 (1)을 통하여 간략하게 레이더 안테나의 이득을 예산하였으며, 이를 토대로 대략적인 빔폭을 구하였다.^[4] 표 2는 계산된 안테나의 설계 목표 사양을 나타내었다.

$$R_{\max} = \left(\frac{P_t \lambda^2 G^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right)^{1/4} \quad (1)$$

따라서 항행모드시 안테나의 이득은 최소 탐지 신호에 따라 다소 달라지는데 일반적으로 최소 탐지 신호의 선택은 수신기 성능에 따라 좌우되며 그 크기는 대략 -96dBm에서 -106dBm 사이의 값으로 잘 알려져 있다.^[4] 또한, 탐지 물체의 평균 유효 단면적은 각도별 RCS의 평균치로 나타내었는데, 여기서는 항행용이므로 물체의 반사각도가 ±5도 범위내에서 높게 나타나도록 사용주파수가 35GHz로 설정하여 높은 RCS를 갖는 탐지 물체로 인지하도록 하였다. 따라서 이러한 사항을 만족하기 위해 항행모드시에서의 안테나의 이득은 수신 신호 및 RCS가 좋은 경우로써, RCS 30 dBsm, 최소탐지 신호가 -106dBm 이상일 때 31dBi 이상이 필요하고, 탐지거리가 2Km의 이착륙 모드인

[표 1] 레이더의 설계 사양(Radar design parameter)

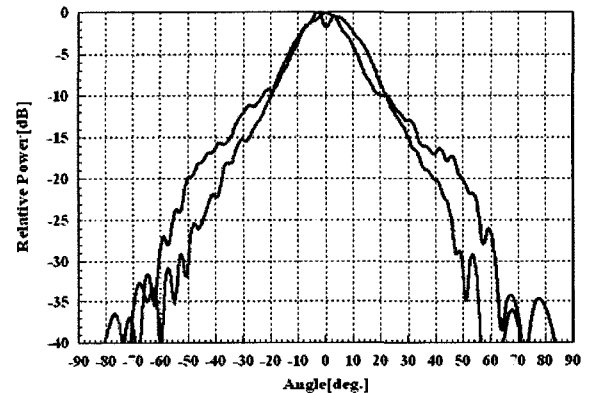
R_{max}	최대탐지거리	2(이착륙모드) 8(항행모드)	Km
P_t	송신첨두전력	2.5	Kw
λ	파장($f=35$ GHz)	0.00857	m
RCS	평균유효단면적	16~30 이상	dBsm
$(4\pi)^3$	상수	1984.4	
S_{min}	최소탐지신호	-96~-106 이상	dBm
G	안테나이득	31 이상	dBi



(a) 반사손실(Return Loss)

[표 2] 레이더 안테나의 설계 목표(Design goal of radar antenna)

Gain	32 dBi	이상
E, H-plane Beamwidth	$\approx 1.5^\circ$	이득에 따라
Side-lobe level	-25 dB	이하
REturn Loss	-15 dB	이하



(b) 방사패턴(Radiation Pattern)

경우에서의 안테나의 이득은 수신신호가 좋지 않은 경우로써, (RCS 16dBsm 최소탐지 신호가 -96dBm 이상일 때)는 31dBi 이상 이어야 한다. 따라서 적절한 수신기의 수신신호를 선택해야 하며, 표적의 RCS 선택을 한다면, 2~8Km내의 표적을 탐지하여 항행안 전성과 이착륙 위험물로부터의 안전성을 보장받을 수 있는 레이더 안테나가 될 수 있을 것이다. 표 1에서는 위와 같이 선택 및 사용 가능한 수준의 신호 레벨 과 RCS에 대한 정보를 고려하여 나타내었다. 또한, 빔폭은 방위 분해능과 관련이 있으므로 적절한 이득 과 빔폭을 동시에 고려해야 한다. 이를 바탕으로 표 2에 본 시스템에서 필요한 안테나의 설계 목표 사양 을 요약하였다.

[그림 3] 급전안테나 특성(Feed Antenna Characteristics)

3. 렌즈 부가 혼 안테나의 설계

가. 급전부 구조 및 제작 측정

본 논문에서 제안한 혼 안테나는 conical 혼 안테

나로서 flare angle에 따라 빔폭 초점 길이(OL)가 달라지며, 초점길리와 개구면 직경과는 quadrature phase error로 인하여 최적의 이득을 나타내는 각도가 있다.^[5] 하지만, 본 논문에서는 서론에서 언급하였 듯이 개구면에 유선형 렌즈를 부가할 것이고, 혼 전체 길이의 감소 및 무게 감량을 위하여 90° flare angle을 갖는 wide conical horn을 사용 할 것이다. 또한, 급전 부분에 choked horn을 사용하여 혼 내부의 power 분포를 변화함으로써 side lobe 억제를 도 모하였다. Choked horn의 제작 결과를 그림 3에 나타내었다. 제작 측정 결과, 수직 편파시 main lobe에서 E plane의 elevation 방향의 power 감소가 있지

만, 이는 E, H의 power 분포를 같도록 만들기 위한 과정에서의 결과로 나타났다. 제작 측정된 값의 정규화 값을 그림 3(b)에 나타내었는데, ±40도 근처에까지 E, H power 크기가 거의 같음을 알 수 있다. 이는 power 분포가 horn flare의 edge 부부까지 n 차의 cosine 분포를 나타냄을 알 수 있고, 이로써 Taylor Power Distribution처럼 사이드로브 억제가 가능할 것으로 판단되었다.

나. 렌즈의 설계

렌즈의 설계는 광학적인 방법으로 경계면에서의 E field의 수직 입사시 두 매질간의 경계 및 전파 경로를 고려하여 동일 거리 이동이 일어나는 관계로 렌즈의 곡면을 설계하였다. 여기서, 설계 방법은 기존의 방식과는 같으나 고려되어야 할 flare angle과 초점거리와의 관계식으로 수식을 재정리하여 실제 설계 제작시 필요한 horn flare angle과 초점 길이만으로도 렌즈의 곡면을 산출 가능한 수식으로 변형하여 실 제작시 바로 데이터화하여 활용할 수 있도록 하였다.

그림 4는 렌즈의 곡면을 산출하기 위한 개념도이다. 렌즈는 볼록 렌즈 형상으로 비유전율(ϵ_r)을 2.6으로

로 설정하였으며, 안테나의 개구면의 직경이 280mm, 초점과 안테나의 렌즈와의 거리가 145mm로 설정하였다. 위 그림에서 각 RF 경로의 길이는 모두 같으므로 식 (2)와 같다.

$$\overline{Path123} = \overline{Path45} = \overline{Path67} \tag{2}$$

또한, 각 path는 다음 식 (3)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda_0} \cdot \frac{L}{\cos\theta} + \frac{1}{\lambda_d} \cdot \frac{R-L}{\cos\theta_d} + \frac{d-(R-L)}{\lambda_0} \\ = \frac{L}{\lambda_0} + \frac{d}{\lambda_d} = \frac{L}{\cos\theta_{max}} \cdot \frac{1}{\lambda_0} + \frac{d}{\lambda_0} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\cos\theta_d = \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon_r} \sin^2\theta} \tag{4}$$

이를 정리할 때 θ 와 θ_d 의 관계는 식 (4)의 Snell's Law를 적용하면 위 식을 간단히 재정리 할 수 있다.

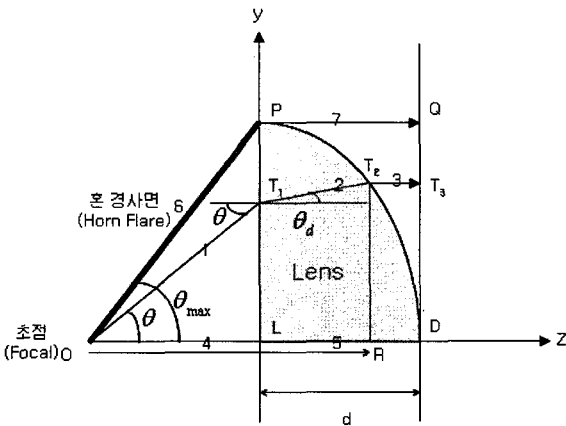
위 두 식 (3)과 식 (4)을 이용하면 초점과의 거리 L과 semi-flare angle(θ_{max})과의 관계로 나타낼 수 있는데, 식 (5)은 렌즈의 두께, 식 (6)~(7)은 θ 에 대한 렌즈의 곡면 자취에 대한 식이다.

$$d = \frac{L}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta_{max}} - 1 \right) \tag{5}$$

$$C = \left(\frac{LA}{\epsilon_r - A} \right) \left(\frac{\epsilon_r}{A} + \frac{1}{\cos\theta_{max}} - \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \tag{6}$$

$$A = \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta} \tag{7}$$

위 식은 horn flare angle의 최대각과 유전율을 알면 그 위치에 따른 곡면 좌표를 알 수 있다는 결론을 얻게 되었다. 따라서 주파수에는 독립적이고 위치 및 유전율에 따라 종속적인 식으로써 실제 제작시 필요한 데이터를 바로 획득 할 수 있는 수식으로 표현되어 있다. 위 식에 따른 센터 d=98mm이며, 커브 C를 만족하는 포물면 렌즈 안테나로 설계됨을 알 수 있다.

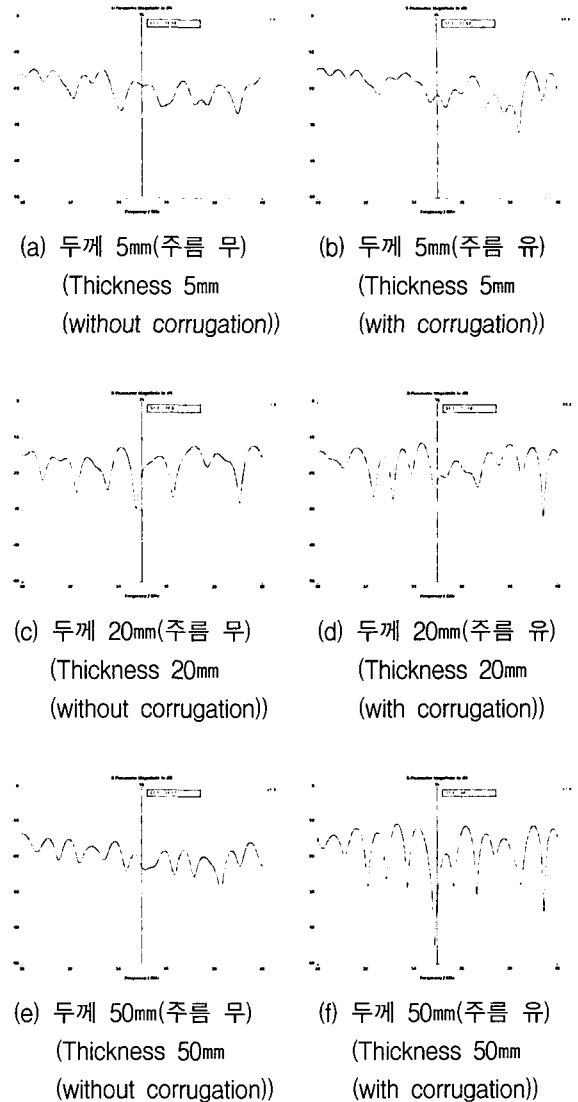


d	렌즈 두께 (Lens thickness)	Path 123	OT ₁ T ₂ T ₃
L	초점과 렌즈와의 거리(Distance between focal and lens center)	Path 45	OLRD
R	임의의 직선거리(Arbitrary distance)	Path 67	OPQ

[그림 4] 렌즈 곡면 산출용 개념도(The concept for lens curvature calculation)

5. 개구면 matching

다음으로 고려해야 할 사항은 공기와 렌즈의 접합면이다. 이러한 접합면에서는 전파 진행의 불연속면이 생기고 이러한 불연속면은 전파 반사를 일으킨다. 따라서 이러한 반사를 최대한 억제해야 한다. 본 논문에서 사용되는 레이더의 송신 첨두 출력은 2.5Kw로써 송신시 반사되는 양을 최대한 막아야 송신단 VSWR이 나빠지는 것과 수신단의 포화를 막을 수 있다. 이를 위해 송신시 혼의 내부와 렌즈와의 접촉면에는 매칭면을 두었으며, 렌즈와 외부공간은 공기저항을 고려하는 것이 더 중요하기에 매끄럽게 구현하였다. 따라서, 송신시 반사를 억제하기 위해서는 개구면 정합을 해야 하는데, 개구면 정합에는 대략 3가지가 있다. 첫째는 두 매질의 중간 매질을 선택하여 1/4 파장 두께로 두 매질 사이를 매우는 것이다. 이는 효과적이긴 하지만, 적절한 비유전율을 만들거나 찾는다는 것이 그리 쉬운 일이 아닐 것이다. 둘째로는 렌즈 면에서 전 투과가 일어나도록 렌즈 면을 조절하는 일이다. 이 경우 렌즈 두께 변화에 의해 제작이 힘들어지는 경우가 있다. 실 제작시에는 가공기에 물렸을 때의 좌임 압력을 버틸정도의 두께가 필요하기 때문에 작거나 큰 크기의 가공물에는 적절하지 못하다. 셋째로는 렌즈와 공기와의 경계면에 구조를 조정하여 전파의 진행시 매질의 임피던스를 조정하는 것으로써 흔히 주름(corrugation)을 넣는 방법이 있는데 이러한 구조는 가공면에서 다소 시간이 걸리지만, 렌즈의 주름으로 인해 경계면의 표면 임피던스 변화가 있고, 이러한 임피던스가 두 매질 사이의 임피던스 매칭을 이루어 반사파의 감소를 만든다. 본 논문에서 제시된 안테나의 개구면은 주름의 구조 및 홈 깊이, 주름 폭 및 간격 등에 대한 자료는 기존 문헌을 참조하여, 여 주름의 구조는 원형 반복이고, 홈은 $\lambda_g(\text{관내파장})/4$ 로써 1.9mm, 주름 간격은 4mm, 주름 폭은 2.4mm로 하였다.^{[2][3]} 일반적인 확장된 도파관(개구면 직경 100mm, flare angle 45°, 개구면에 직경 100mm, 두께 5, 20, 50mm인 유전체 실린더 덮개) 구조에서 홈 유무에 따른 반사손실 특성을 시뮬레이션을 통해 확인해 보았다. 시뮬레이션은 제작 측면에서 비용 및 개발 시간 단축을 위해 사용하였으며, 사용된



[그림 5] 렌즈 두께 및 주름 유무에 따른 반사손실 특성(The characteristics for return loss Lens thickness and aperture corrugation)

개발 도구는 CST사의 Microwave studio 3.4를 사용하였다.

그림 5에서 나타내었듯이 두께가 두꺼워 질수록, 전체적으로 반사손실에서 리플의 개수가 많아지는데, 35GHz 대역으로 설계된 주름이 있는 경우엔 리플의 개수가 많아져도 해당대역 근처에서는 -20dB 이하의

균일한 반사손실 특성을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 주름의 존재로 인해 반사손실이 다소 향상되는 것으로 판단되어, 개구면 매칭을 위한 주름 구조를 적용함으로써 제작상 주파수 변경 및 기타 요소에 의해 다소 나빠질 수 있는 반사손실 값에 마진을 둘 수 있을 것으로 판단되었다.

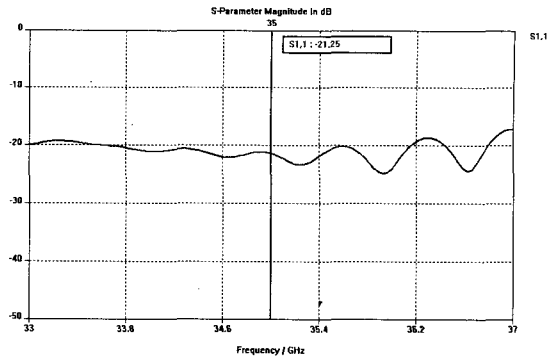
6. 안테나의 특성 예측

이상으로 블록 렌즈 설계 및 급전용 혼 안테나에 대해 제작 측정, 반사를 줄이기 위한 주름의 구조에 대한 설계 및 시뮬레이션 검증을 하였다. 시뮬레이션을 통한 검증은 파장에 비하여 크기가 큰 안테나이기 mesh 수 증가에 따른 해석이 불가능하여 앞서 설계한 주름에 대한 특성을 입력하지 않았다. 하지만, 일정 개구면 크기에 대한 시뮬레이션을 비교함으로써 최종 제작시에는 해당 주름을 넣어 제작 하였다.

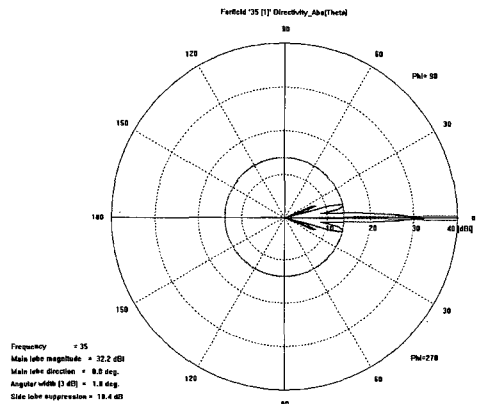
그림 6에서는 시뮬레이션을 통해 제안 설계된 안테나의 특성을 나타내었다. 그 결과, 반사손실은 -21.25 dB로 나타났다. 이는 첨두 전력이 2.5Kw일 경우 반사 계수는 1.17로 송신시 되돌아오는 전력이 약 157W 이므로 수신단 입력부분에 서큘레이터(-25dB 이상 isolation)와 스위치 등으로 송·수 절환을 철저히 해야 함을 나타낸다. 실제 구현시에는 이와 더불어 STC를 이용한 시간 조절로써 송수신을 분리하기도 한다. 그리고 안테나의 지향도는 32.2dBi. E-plane 빔폭은 1.8°, H-plane 빔폭은 1.4°를 나타내었으며, side-lobe level은 E-plane -18.4dB, H-plane -19.5dB로 나타내어, 본 논문에서 제안된 레이더용 안테나로써 사용 가능하기 위해서는 사이드로브를 낮추기 위해 개구면 매칭을 이루어 E-plane 및 H-plane 사이드로브 억제가 더욱 필요함을 알 수 있었다.

7. 결론

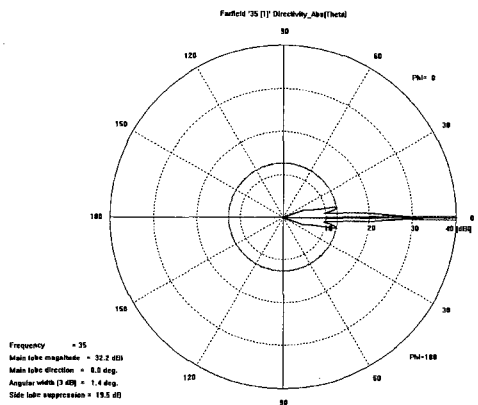
본 논문은 저속 항공기인 헬기에서 사용될 수 있는 항행 레이더용 안테나를 설계하는 것에 그 목적이 있



(a) 반사손실(Return Loss)



(b) 방사패턴(E-plane)(Radiation pattern(E-plane))



(c) 방사패턴(H-plane)(Radiation pattern(H-plane))

[그림 6] 안테나의 특성(시뮬레이션 결과)
(Antenna characteristics(Simulated))

다. 설계시 항행용이므로 공기 저항을 줄일 수 있는 블록 렌즈 형태를 개구면에 부가하였으며, 이를 이용하여 같은 크기의 개구면일 때와 비교 하였을 경우 이득 증가 및 빔폭 감소를 렌즈의 특성을 이용하면 가능하다 판단되었다.

성능 검증을 위한 시뮬레이션을 통한 설계 예측결과, 반사손실 개선을 위한 주름이 없는 형태(중간 부분 최대 두께 98mm, 식 (3)에 의한 커브 곡선)에서는 지향도가 32.2dBi, 빔폭은 E-plane 1.8°, H-plane 1.4°를 나타내었으며, 사이드 로브는 E-plane -18.4 dB, H-plane -19.5dB를 나타내어 일반적인 다소 높은 사이드 로브 레벨을 나타내었지만, 지향도가 31 dBi 이상을 충분히 만족하여 수신 power 측면에서는 Ka-대역 헬기용 외부 장착용 렌즈 안테나로 사용 가능함을 확인하였다.

사이드로브 억제면에서는 급전부분에 choked horn 을 사용함으로써 내부 field에서 power 분포를 Taylor의 n차 cosine 형태($\pm 45^\circ$ 까지)로 나타남을 제작을 통해 확인 할 수 있었으며, 이는 사이드로브 억제가 가능함을 충분히 예측할 수 있다. 그리고, 내부에 주름을 사용함으로써 렌즈 양면에 주름을 사용하는 것보다는 다소 저감되는 반사손실 특성이 예상되지만, 렌즈의 두께가 두꺼워져도 설계 주파수 대역에서는 평탄한 특성을 나타내어 양호한 설계가 되었음을 알 수 있었다. 설계 치수로는 주름 홈은 λ_g (관내파

장)/4로써 1.9mm, 주름 간격은 4mm, 주름 폭은 2.4mm로 설계 되었다.

추후, 실 제작을 통한 측정으로 설계 결과를 검토해야 할 것이며, 성능 변화에 요인이 되는 각 parameter에 대한 성능을 분석해야 할 것이다. 또한, 무게 감량 및 표면 주름 이용시 사이드로브 개선이 어느 정도 있는지에 대한 확인 작업이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 문상만, 이종환, 우종명, 신현철, 이기완, “평면형 모노폴 야기-우다 안테나”, 제 10차 유도무기학술대회논문집, pp.413~417, 2000. 11.
- [2] Richard C. Johnson, Antenna Engineering Handbook Third Edition, McGraw-Hill, 1993.
- [3] 문상만, 김상기, 광병철, 김기오, 김진형, “Quadruple Ridge 형태의 광대역 혼 안테나 설계 연구”, 2002 추계 전파 및 광과학대회 논문집, pp.23~26, 2002. 10.
- [4] 이상설, 강정수, 레이더 공학, 보성출판사, 1995.
- [5] Constantine A. Balanis, Antenna Theory and Design 2nd, 1997.