

고온/고압환경에서 적용 가능한 밀리미터파 혼 렌즈 안테나 설계

Design of a Millimeter-Wave Horn Lens Antenna Applicable to High-Temperature and High-Pressure Environment

김태훈¹ · 유도흥² · 오수영³ · 이상훈^{4*} · 홍순기⁵

Taehoon Kim¹ · Doheung Yu² · Sooyoung Oh³ · Sang Hoon Lee^{4*} · Sun K. Hong⁵

요약

최근 정밀 산업의 발전으로 인해 액체 탱크 내부 고온/고압 환경의 정밀한 수위 측정에 대한 기술적 요구가 증가하고 있다. 본 논문에서는 고온/고압의 액체 탱크 환경에서의 수위 레벨 레이더 센서에 적용 가능한 유전체 렌즈가 결합된 혼 렌즈 안테나를 제안하였다. 유전체 렌즈가 적용되었을 때 혼 안테나 내/외부의 압력 차이로 인해 발생할 수 있는 렌즈의 손상 및 변형을 방지하기 위해서는 유전체 렌즈를 안테나의 내부의 일정 부분까지 충전하여 압력에 견딜 수 있도록 설계해야 한다. 본 연구에서는 최대 260°C의 고온을 견딜 수 있는 PTFE 기반의 렌즈를 활용한 64 GHz 대역의 원형 혼 렌즈 안테나를 설계하였으며, 해당 안테나가 2 MPa의 압력을 견딜 수 있는 것을 응력 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 안테나 측정 결과, 안테나 이득은 28.94 dBi로 측정되었으며, E-plane과 H-plane에서 각각 4.4°와 6.3°의 반전력 빔폭 (HPBW, half-power beamwidth)을 확인하였다.

Abstract

With advancements in precision industries, the demand for accurate liquid level measurements in high-temperature and high-pressure tank environments has increased significantly. This study presents the design of a horn antenna integrated with a dielectric lens for challenging applications. To prevent deformation and damage to the lens due to pressure differences between the interior and exterior of the horn, the shape of the dielectric lens was designed to partially fill the horn to enhance its pressure resistance. A PTFE-based lens, known for its stability at temperatures up to 260°C, was employed to design a circular horn lens antenna operating at 64 GHz. Stress simulations confirmed that the antenna could withstand pressures up to 2 MPa. The antenna achieved a measured gain of 28.94 dBi, with a half-power beamwidth (HPBW) of 4.4° in the E-plane and 6.3° in the H-plane.

Key words: Precision Industries, Liquid Level Measurement, Horn Antenna, Dielectric Lens, PTFE

I. 서론

레이더 기반의 비접촉식 수위 측정 센서는 다른 종류의 센서들과 비교하였을 때 다양한 환경에 폭넓게 적용

될 수 있다는 측면에서 범용성이 우수하다^[1]. 접촉식 센서 및 소나 센서는 그림 1과 같은 고온/고압 환경의 탱크 내부에서 내구성을 유지할 수 없으므로 레이더 기반의 비접촉식 센서가 고온/고압 환경에서 적합하다. 그러나,

「본 연구는 2024년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [RS-2024-00415055].」

송실대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Soongsil University)

*대한센서(주)(Daehan Sensor Co., Ltd.)

1: 석사과정(<https://orcid.org/0009-0000-2563-6935>), 2: 석사과정(<https://orcid.org/0009-0006-6242-6447>),

3: 석·박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-7984-5377>), 4: 연구소장(<https://orcid.org/0009-0004-9403-1533>),

5: 부교수(<https://orcid.org/0000-0002-3794-3171>)

· Manuscript received January 23, 2025 ; Revised January 30, 2025 ; Accepted February 4, 2025. (ID No. 20250123-013)

· Corresponding Author: Sun K. Hong (e-mail: shong215@ssu.ac.kr)

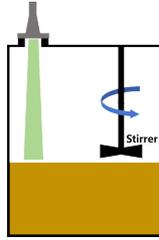


그림 1. 탱크 내부 환경 개략도
Fig.1. Schematic of the tank environment.

레이다 기반의 비접촉식 센서는 탱크 내부의 특성에 의해 발생하는 몇가지 문제들을 야기한다. 예를 들어, 탱크 내부의 액체 물결이나 거품과 같은 클러터(clutter)들이 전파의 불필요한 반사를 일으키며, 산업용 탱크 내부는 일반적으로 금속이기 때문에 넓은 빔폭을 형성하는 안테나가 적용되었을 때, 반사된 전파가 탱크 내부에서 중첩을 일으켜 레이더 시스템을 교란시킬 우려가 있다. 이러한 방해 요소들을 최소화하여 정확한 수위를 측정하기 위해선 좁은 빔폭을 형성하는 안테나가 요구된다. 하지만, 좁은 빔폭을 형성하기 위해서는 안테나의 길이 및 개구면이 물리적으로 커야하기에 무거운 안테나가 제작되어야 한다. 특히 이것은 레이더 레벨 센싱 산업에서 허가된 상대적으로 낮은 주파수 대역인 24~26 GHz 대역에서 비용 문제뿐만 아니라 물리적 크기로 인해 실제 환경에서도 적용상의 문제를 야기한다^[2]. 이러한 문제들을 해결하기 위해 혼 렌즈 안테나가 일반적으로 활용된다^[3]. 하지만, 혼 렌즈는 안테나의 내/외부를 분리시켜 안테나 안팎으로 기압 차이를 유도하기 때문에 강한 압력이 발생할 때 렌즈의 손상을 발생시킬 수 있으며 이는 결과적으로 렌즈 안테나의 성능 저하를 일으킨다.

본 연구에서는 고온/고압의 환경에 적용될 수 있는 혼 안테나 및 렌즈의 구조를 착안하여 설계를 진행하였다. 중심 주파수는 산업용 레이더 레벨 센싱 분야에서 활용되는 64 GHz로 설정하였으며 일반적인 산업용 탱크에 삽입 가능하도록 10 cm 이하의 지름을 가진 원형 개구면을 갖도록 설계되었다. 또한, 산업용 탱크 내부의 액체 및 기체 성분들과 낮은 화학적 반응성을 가지며 260°의 고온에서 안정성을 유지할 수 있는 PTFE를 유전체 렌즈의 재질로 선택하였다^[4]. 고압에서의 안정성을 위해 parabolic 형태의 렌즈를 안테나 내부까지 충전하였으며 충전 형태에

맞는 안테나 내부를 설계하였다. 설계된 렌즈 안테나는 8° 이하의 좁은 반전력 빔폭(HPBW, half-power beamwidth)을 가지도록 설계되었으며 렌즈 안테나의 고압 환경에서의 변형 정도를 시뮬레이션을 통해 확인 후, 안테나를 제작하여 측정을 통해 방사특성을 확인하였다.

II. 혼 안테나 설계

레이다 기반의 비접촉식 레벨 센서는 액체 탱크 내부에 전파를 방사하여 액체의 수면으로부터 반사된 전파를 수신하는 원리로 수위를 측정한다. 혼 안테나는 실제 적용 시 송·수신용 피드 안테나가 탑재된 칩과 결합되어 사용되며, 이는 피드 안테나로부터 방사되는 빔을 혼 안테나로 집속시켜주기 위함이다. 그림 2는 설계된 원형 혼 안테나의 단면을 보여주며, 개구면 근처에 4 mm의 단차가 존재한다. 해당 단차는 추후에 충전될 렌즈가 안테나 외부에서 가해지는 강한 압력에 견딜 수 있게 한다.

그러나, 단차를 거치며 안테나 내부 구조의 불연속성으로 인해 전파가 회절하여 단차 부근에서 전파의 위상 오차가 발생한다. 그림 3(a) 및 그림 3(b)에서 확인할 수 있듯이 단차를 안테나의 도파부에 가까이 설계할수록 전파가 혼 안테나를 통과할 때 전파의 위상 오차가 누적되어 위상 분포가 일그러지는 현상을 확인할 수 있다. 이때 발생하는 전기장 분포의 균일성 저하 및 세기 약화 현상을 그림 3(c) 및 그림 3(d)의 비교를 통해 확인하였다. 그림 3(c)의 전기장 세기에서 볼 수 있듯이 개구부에서 하나의 빔이 형성되는 것이 아닌 개구부 중심을 기준으로 두 개의 빔이 형성되는 패턴을 확인할 수 있다. 이러한 경우, HPBW 8° 이하의 렌즈 안테나를 설계하는 것에 무리가 있어 단차를 개구부에 가까이 설계하였다. 또한, 고온/고압 환경에서 발생하는 강한 압력을 렌즈가 견디기 위해서는 충분한 두께의 렌즈가 충전되어야 하므로 방사 패턴 및 렌즈의 충전 정도를 고려하여 단차를 개구면으로

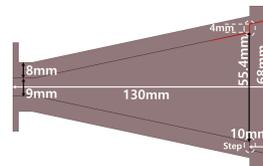


그림 2. 설계된 혼 안테나 단면도
Fig. 2. Cross section view of the designed horn antenna.

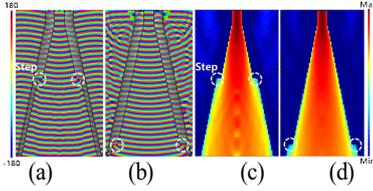


그림 3. 단차의 위치에 따른 전기장 분포 (a) 도파부 근접 전기장 위상 및 (b) 개구부 근접 (c) 도파부 근접 전기장 세기 및 (d) 개구부 근접

Fig. 3. E-field distribution based on the position of the step (a) phase distribution in the case where the step is near the waveguide and (b) near the aperture (c) amplitude distribution where the step is near the waveguide (d) near the aperture.

부터 10 mm 위치에 설계하였다.

III. 렌즈 설계

일반적인 parabolic 렌즈는 그림 4와 같이 설계된다. S_1 은 렌즈의 입사면으로서 식 (1)과 그림 4에서 볼 수 있듯이 t_1 과 z_1 으로 구성된다. S_2 는 렌즈의 곡면으로, t_2 와 z_2 로 구성되며 전파가 렌즈를 투과하였을 때 동일 평면에서 동위상이 되도록 설계되었다. 하지만 설계된 혼 안테나의 경우 단차로 인해 F의 정확한 계산이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 식 (2)~식 (4)를 활용하여 안테나의 예상 초점거리를 80 mm부터 120 mm까지 10 mm 간격으로 조절하며 그에 따른 렌즈 두께를 변화시켜 HPBW가 최소화되고 이득이 높은 최적의 렌즈를 설계하였다^[5].

$$z_1 = F, F \leq z_2 \leq F + T, 0 \leq t_1 \leq D/2, 0 \leq t_2 \leq D/2, \quad (1)$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r}, \quad (2)$$

$$z_2 = \frac{[(n-1)T - \sqrt{F^2 + t_1^2}] \sqrt{(n^2-1)t_1^2 + n^2F^2} + n^2F\sqrt{F^2 + t_1^2}}{n^2\sqrt{F^2 + t_1^2} - \sqrt{(n^2-1)t_1^2 + n^2F^2}}, \quad (3)$$

$$T = \frac{\sqrt{4F^2 + D^2} - 2F}{2(n-1)}. \quad (4)$$

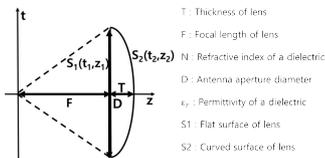


그림 4. 포물선 렌즈의 개략도
Fig. 4. Schematic of parabolic lens.

IV. 시뮬레이션 및 측정 결과

본 연구의 목표는 고압 환경에서도 적용이 가능한 렌즈 안테나이기 때문에 강한 압력에서 발생하는 렌즈의 변형 정도를 확인하고자 Femtet Murata의 응력 시뮬레이션을 활용하였다. 실제 액체 탱크 내부의 환경과 유사하게 안테나의 위치는 고정되어있는 상태에서 렌즈의 앞면 전체에 2 MPa의 균일한 압력이 가해지는 환경을 그림 5(a)와 같이 구축하였다. 설계된 렌즈의 압력 분석 결과는 그림 5(b)에서 확인할 수 있으며 렌즈에서 최대 0.144 mm의 미미한 변형을 확인할 수 있었다.

압력에 의해 변형이 되기 전과 후의 반사 계수와 방사 패턴을 비교하기 위하여 CST Studio Suite 시뮬레이션을 활용하였다. 압력에 의해 렌즈가 변형되었으므로 기존 렌즈 디자인에 변형 정도를 반영하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 6의 반사 계수 비교에서 볼 수 있듯이 변형된 정도는 반사 계수에 영향을 주지 못하였으며 그림 7(a) 및 그림 7(b)에서 확인할 수 있는 E-plane, H-plane에서의 방사패턴 또한 거의 유사함을 확인하였다. 2 MPa의 강한 압력에서의 안테나 성능을 검증한 후 안테나를 제작하였다.

제작된 혼 렌즈 안테나는 그림 8(a)에서 확인할 수 있

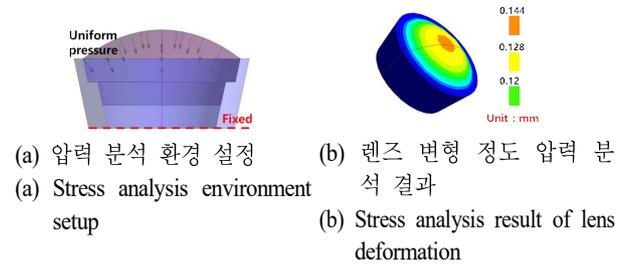


그림 5. 압력 분석 환경 설정 및 렌즈 변형 정도 분석 결과
Fig. 5. Pressure analysis environment setup and lens deformation analysis result.

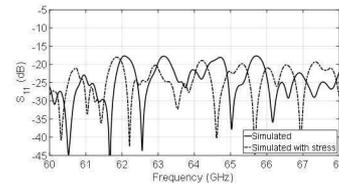
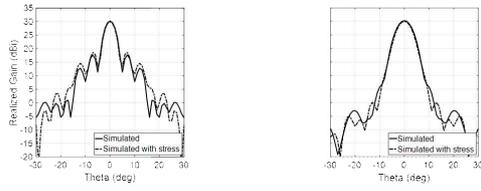


그림 6. 렌즈 안테나 반사 계수 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results of reflection coefficient for lens antenna.



(a) E-plane (b) H-plane

그림 7. 렌즈 안테나 방사 패턴 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation results of radiation patterns for lens antenna.



(a) 제작된 안테나 (a) Fabricated lens antenna
(b) 무반사 환경에서의 렌즈 안테나 방사 패턴 측정
(b) Lens antenna under measurement in anechoic environment

그림 8. 제작된 안테나 및 안테나 방사 패턴 측정
Fig. 8. Fabricated antenna and antenna radiation pattern measurement.

으며 방사 패턴은 그림 8(b)와 같은 무반사 환경에서 측정하였다. 그림 9에서 시뮬레이션과 실측 반사 계수 비교 결과를 확인할 수 있으며 실측 반사 계수 또한 -15 dB 이하에서 형성됨을 확인하였다. 그림 10(a) 및 그림 10(b)은 렌즈 안테나 방사 패턴의 시뮬레이션 및 측정 결과를 보여준다. 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 거의 흡사함을 확인하였으며 측정 결과, HPBW는 목표치였던 8° 이하인 4.4° (E-plane)와 6.3° (H-plane) 인 것을 확인하였다. 이는 렌즈 안테나가 본 연구의 목적에 맞게 설계 및 제작되었으며, 측정 또한 성공적으로 이루어졌음을 의미한다.

V. 결론

본 논문에서는 고온/고압 환경에서의 액체 레벨 센싱을 위한 렌즈 안테나를 설계하였다. 고온/고압 환경에서의 강한 내구도를 위해 렌즈를 안테나 내부에 충전한 후 렌즈를 지지하기 위한 단차를 만들었으며, 시뮬레이션을 통해 최적의 렌즈 안테나를 설계하였다. 또한, 설계된 렌즈 안테나가 2 MPa의 고압 환경에서 렌즈의 변형이 일어나는 정도를 응력 시뮬레이션을 통해 확인하였으며, 변형 정도를 반영한 시뮬레이션을 통해 비교한 결과, 영향이

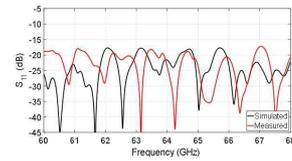
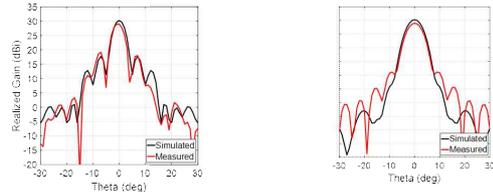


그림 9. 렌즈 안테나 반사계수 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 9. Simulation and measurement results of reflection coefficient for lens antenna.



(a) E-plane (b) H-plane

그림 10 렌즈 안테나 방사패턴 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 10. Simulation and measurement results of radiation patterns for lens antenna.

미미함을 확인하였다. 측정 결과, HPBW는 E-plane 4.4° , H-plane 6.3° 를 만족하며 안테나 이득은 28.94 dBi로 측정되었다. 따라서 설계된 렌즈 안테나는 고온/고압의 액체 탱크 환경에서 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] B. T. Sivaprakasam, C. V. Krishnamurthy, and K. Arunachalam, "Design and demonstration of a radar gauge for in-situ level measurement in furnace," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 10, pp. 4081-4088, May 2018.
- [2] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. New York, NY: John Wiley & Sons, pp. 385-388, 2012.
- [3] J. Thornton, K. C. Huang, *Modern Lens Antennas for Communications Engineering*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.
- [4] E. Dhanumalayan, G. M. Joshi, "Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene(PTFE): A review," *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 1, pp. 247-268, Feb. 2018.
- [5] C. J. Guo, J. Z. Chen, L. Li, and J. Chen, "Design of mm-wave dielectric lens antenna for liquid level gauge radar," in *2021 IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, Xi'an, Aug. 2021, pp. 193-195.