

이온화된 소금물을 이용한 ASA 구조의 고 투명 평면형 다이폴 안테나

판쥐동, 정창원*

서울과학기술대학교 나노IT디자인융합기술대학원

High Transparent Planar Dipole Antenna using Ionized Salt-water of ASA Structure

Phan Duy Tung, Chang Won Jung*

Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology

요약 본 논문에서는 액체 소금물을 전도체로써 이용한 평면형 투명 안테나의 구현 가능성을 연구 하였다. 소금물을 이용한 투명 안테나 구현의 가장 큰 이유는 기존 고체 투명전극의 광투과도 indium tin oxide (ITO:> 73%) 또는 multi-layer films (MLF: > 78%) 대비 높은 소금물의 광투과도 (> 95% @ 40 ppt)에 있다. 제안된 다이폴안테나의 양쪽 팔의 소금물 층을 평면형으로 고정하기 위해 투명 아크릴($\epsilon_r = 2.61$, $\tan\delta = 0.01$, $OT_{av} > 90\%$)을 사용하였으며, 소금물의 표면장력을 이용하여 (ASA: 아크릴/소금물/아크릴) 형태의 평면형 ASA층으로 구현 하였다. 전기적, 광학적으로 ASA 전도체 구조를 분석하기 위해, 표면장력을 통한 평면형 구조 유지 시, 소금물 두께에 따른 면저항과 광투과도를 분석 하였다. 소금물을 이용한 투명 평면형 다이폴 안테나는 UHF(Ultra high frequency) 대역(470-771 MHz)에서 1.72 dBi의 평균 방사이득 및 74 %의 방사효율을 가지며, 향후 소금물을 이용한 평면형 투명안테나로서의 활용 가능성을 확인 하였다.

Abstract This feasibility study evaluated an optically transparent planar antenna using liquid salt-water as the conducting material. The most significant reason behind using liquid salt-water for transparent antenna applications is its excellent average optical transparency (OT_{av}) (> 95% at a salinity of 40 ppt) compared to other typical solid transparent thin-film electrodes, such as indium tin oxide (ITO:> 73%) or multi-layer films (MLF: > 78%). Each conductive arm of the proposed dipole is constructed from a salt-water layer held between two clear planar acrylic layers ($\epsilon_r = 2.61$, $\tan\delta = 0.01$, $OT_{av} > 90\%$) (acrylic/salt-water/acrylic: ASA) due to surface tension. To examine the electrical and optical properties of the ASA structure, the surface tension was measured to determine the thickness of the salt-water layer that finalized its sheet resistance and OT_{av} . The average gain and efficiency of the antenna were 1.72 dBi and 74%, respectively, in the operating UHF (Ultra high frequency) band (470-771 MHz). Therefore, the proposed antenna can be a good candidate for applications as a transparent planar antenna using salt-water.

Keywords : Transparent antenna, Salt-water, Dipole, Surface tension, Optical transparency

본 논문은 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Chang Won Jung(Seoul National University)

email: changwoj@snut.ac.kr

Received November 13, 2020

Revised December 8, 2020

Accepted March 5, 2021

Published March 31, 2021

1. 서론

최근 광학적으로 투명한 안테나는 그 투명한 특성 때문에 이론적으로 그리고 실제 응용 측면에서 관심을 받아왔다 [1-4]. 현존하는 투명 안테나는 전도성 도체로써 일반적으로 고체금속을 이용하며, 상용으로 디스플레이 등에 가장 많이 사용하고 있는 인듐주석산화물(ITO: indium tin oxide), 그리고 ITO의 전기적, 기계적 성능을 향상시킨 다층(ML: multi-layered), 그리고 전도도가 매우 우수한 메탈메쉬(MM: metal mesh) 투명전극(TE: transparent electrode)등을 사용하여 왔다. 그러나 이러한 투명전극들은 가시광선 대역 (400 nm ~ 700 nm)에서 일반적으로 92 % 이하의 평균 광 투과도(OT_{av})를 가지며, 전기적 특성, 광학적 특성, 가격, 공정 난이도 측면에서 장단점을 갖는다 [4].

최근 새로운 높은 광투과도를 갖는 소금물을 이용한 투명 안테나에 대한 연구가 시도 되고 있으며, 이러한 소금물을 이용한 고 투명 안테나는 이온형태의 전하입자 이동을 이용한 전극을 사용하며 소금물 농도 40 ppt에서 95 % 이상의 광투과도를 가지며, 낮은 재료비, 쉬운 재료 접근성 등의 장점을 가진다[5]-[9]. 간단한 광대역 액체 모노폴 안테나[6]가, 그리고 광대역화를 위해 소금물에 유전체 베이스를 물과 그라운드사이에 설계한 안테나[7] 등이 소개 되었으며, 또한, 동작대역내 효율 63 % 이상을 갖는 고효율 안테나[8]가 연구 되었다. 위에 언급된 논문들의 소금물은 전반적으로 낮은 전도도를 가지며 부피 증가를 통해 면저항을 낮추기 위해 실린더 형태로 설계 되며, 이러한 일정한 부피를 갖는 실린더 형태의 안테나는 등근 표면의 가시광선 입사에 따른 수직과 사각입사가 공존 하는 형태를 가지며[9], 그에 따른 가시광선 반사 그리고 소금물 두께에 의한 굴절 현상을 가지며, 결과적으로 소금물 자체의 광투과도는 높다 할지라도, 이러한 또 다른 광학적 단점이 존재한다.

이러한 소금물을 사용한 안테나의 구조적 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 광투과도를 극대화 하며, 소금물과 아크릴 및 유리와 같은 유전체 투명 케이스의 접촉을 기계적으로 유지하기 위해 표면장력을 이용하여 평면 형태의 (ASA: 아크릴/소금물/아크릴)구조를 가진다. 이러한 ASA 구조는 평면형 구조를 유지하여 광학적으로는 반사 및 굴절을 최소화 하고, 표면적을 비교적 넓게 할 경우 낮은 면저항을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 표면장력으로 ASA를 유지할 때 소금물의 농도와 면저항 그리고 광투과도와의 상관관계를 분석하였다. 또한, 이러한

ASA를 기본 전극으로 하여 전자기적 성능 검증 및 응용을 위해 ASA를 이용한 UHF(Ultra high frequency) 대역의 투명 평면형 다이폴 안테나를 설계 제작 측정 하였다.

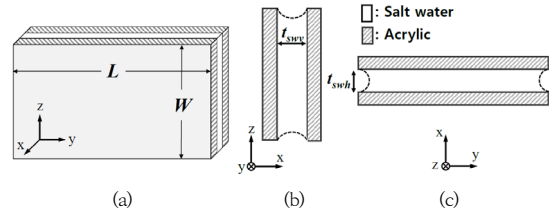


Fig. 1. ASA Structure (a) 3D view, (b) vertical view, and (c) horizontal view.

2. 투명 평면형 소금물(ASA)의 특성

Fig. 1은 본 논문에서 전도체로 사용되는 액체 소금물의 평면구조를 기계적으로 유지하기 위한 아크릴/소금물/아크릴(ASA: Acrylic/Salt-water/Acrylic) 구조이며, Fig. 1. (a)는 ASA의 3D, Fig. 1. (b)는 수직 ASA, Fig. 1. (c)는 수평 구조에 대한 그림이며, 본 논문에서는 평면형 소금물의 앞 과 뒤(수직구조) 또는 위 와 아래(수평구조)에 상대 유전율(ϵ_r) 2.61, 손실 탄젠트 ($\tan \delta$) 0.01인 두께 2 mm의 투명 아크릴을 사용하였으며, 각 수직, 수평구조의 ASA는 표면장력을

유지하기 위한 소금물의 수직(t_{sw}) 수평(t_{swh}) 두께가 소금물의 농도, 아크릴의 무게 등에 의해 정해지며[6], 따라서 ASA의 치수, 길이(L)와 넓이(W) 또한 이 두께에 영향을 준다. 본 논문에서 제안된 UHF 대역(470 ~ 771 MHz) 다이폴 안테나의 각 팔은 Fig. 1. (a)에서 정의된 길이 L 과 넓이 W를 가지며, 다이폴 안테나의 팔 길이(L)는 UHF 중심주파수에서의 1/4 파장의 길이인 ~ 120 mm이며, 넓이는 대역폭에 따라 달라지며, 본 논문에서는 80 ~ 100 mm를 갖는다. 이때, 수직(t_{sw}) 수평(t_{swh}) 소금물 두께는 다이폴 팔의 길이와 넓이에 따라 Table 2와 같은 두께를 갖게 된다. Table 1에서처럼 표면장력 하에서 ASA 구조 소금물의 두께(t)는 ASA의 넓이(W)가 증가 할수록 감소하며, 본 논문에서의 수직 두께(t_{sw})는 0.4 ~ 0.51mm 이고 수평 두께(t_{swh})는 아크릴무게(중력)하에서 수직구조에 비해 약 20배 정도 두꺼운 9.18 ~ 9.26 mm 이다.

ASA 구조상 소금물의 전기적 특성은 소금물의 면저항 (R_s)으로 정의될 수 있으며, 다음의 식 (1)로 나타내어질 수 있다. 여기서 σ 는 소금물의 전도도 그리고 t 는 소금물의 두께이다.

$$R_s = \frac{1}{\sigma t} \quad (1)$$

Table 1. Thickness(t) of salt-water layer under surface tension conditions.

| L (mm) | W (mm) | t_{swv} (vertical) (mm) | t_{swh} (horizontal) (mm) |
|--------|--------|---------------------------|-----------------------------|
| 120 | 80 | 0.51 | 9.26 |
| 120 | 85 | 0.48 | 9.24 |
| 120 | 90 | 0.45 | 9.22 |
| 120 | 95 | 0.42 | 9.20 |
| 120 | 100 | 0.40 | 9.18 |

또한, Fig. 2에서처럼 소금물의 전도도는 소금물의 농도(S)와 온도(T)에 따라 변한다. 전도도는 농도 또는 온도가 증가 할수록 증가하며, 이는 소금물 내의 이온(ions)의 수가 농도에 따라 증가하며 또한, 전하의 이동도(mobility) 또한 온도에 따라 증가하기 때문이다[8]. 본 논문에서의 온도는 상온, 20 °C 이다.

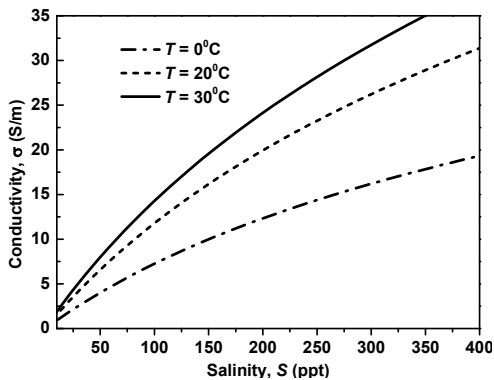


Fig. 2. Conductivity(σ) versus salinity(S) of salt-water at temperatures(T) (0, 20, 30 °C).

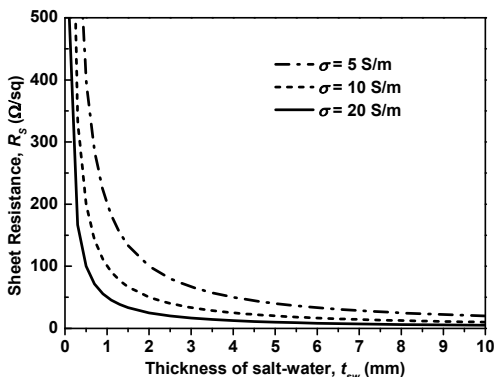


Fig. 3. Sheet resistance(R_s) of the salt-water versus its thickness(t_{sw}) at conductivities(5, 10, 20 S/m).

Fig. 3은 소금물의 전도도가 5, 10, 20 S/m 일 때, 소금물 두께와 면저항과의 관계를 나타낸 그래프 이다. 이 때 소금물의 면저항은 두께 또는 전도도가 증가할수록, 개선 (감소) 된다. 또한, 다이폴 안테나의 팔 치수가 $L \times W = 120 \times 90 \text{ mm}^2$ 일 때를 기준으로 하여, 수직 두께($t_{swv} = 0.45 \text{ mm}$) 그리고 수평 두께 ($t_{swh} = 9.22 \text{ mm}$)에서의 면저항(R_s) 값을 Table 2에 나타내었다. 소금물은 농도 약 35, 80, 200 ppt 에서 각각 5, 10, 20 S/m의 전도도를 가지며, 전도도가 증가할수록 면저항은 낮아지며, 표면장력을 이용한 ASA 수직, 수평구조의 두께 (t_{swv} , t_{swh})에 따라 동일 전도도 상에서, 수직구조에 비해 20배가량 두꺼운 수평구조의 면저항이 20배가량 낮은 (우수한) 면저항 값을 가진다. 따라서 전도도 10 S/m 기준 수직ASA의 면저항은 약 200 (Ω/sq), 수평ASA의 면저항은 이보다 훨씬 우수한 약 10 (Ω/sq)이며, 이 때 수평 ASA의 면저항은 기존 고체 범용 투명전극인 ITO 및 MLF에 비해 우수하다고 볼 수 있다 [1-4].

Table 2. Sheet resistance(R_s) of ASA structure with salinities(S) at thicknesses(t_{sw}) of vertical and horizontal posture.

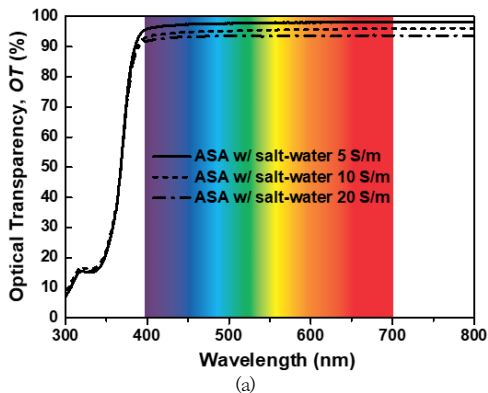
| t_{sw} (mm) | S (ppt) | σ (S/m) | R_s (Ω/sq) |
|---------------|---------|----------------|------------------------------|
| 0.45 | 36.7 | 5 | 444.4 |
| | 81.9 | 10 | 222.2 |
| | 200.8 | 20 | 111.1 |
| 9.22 | 36.7 | 5 | 21.69 |
| | 81.9 | 10 | 10.85 |
| | 200.8 | 20 | 5.42 |

ASA 구조의 광학적 성능인 광투과도(OT)를 분석하기 위해, ASA 샘플을 제작 하였고, 이 때 사용된 투명 아크릴의 두께는 2 mm 이며, ASA 제작에 적용된 소금물은 농도 36.7, 81.9, 200.8 ppt의 소금물을 사용하였으며, 이는 각 전도도, 5, 10, 20 S/m를 갖기 위한 소금물의 농도 이다. 가시광선 파장 대역 (400 ~ 700 nm)의 OT 측정결과는 Fig. 4(a)에 나타내었고, 평균 OT는 전도도 5, 10, 20 S/m에서 각각, 96 %, 95 %, 94.2 %의 높은 광 투과도를 갖는다. 또한, ASA구조의 OT는 전도도 증가에 따라 감소하며, 이는 농도 증가에 따른 소금물 이온 (ion)의 수 증가에 기인한다. 또한, 400 nm 이하(자외선 대역)에서의 OT는 아크릴 층의 흡수에 의해 급격히 감소하며, 제작된 높은 광투과도를 갖는 ASA의 사진은 Fig. 4 (b)에 나타 내었다. OT는 아래 식 (2)의 프레넬

투과도(T : transmittance) 식으로 계산 할 수 있다[10].

$$T = \frac{2n_1 \cos \gamma_1}{n_1 \cos \gamma_1 + n_2 \cos \gamma_2} \quad (2)$$

빛이 매질 1에서 2로 입사할 때, n_1, n_2 는 각 1, 2 번 매질의 굴절율이며, γ_1 과 γ_2 는 입사각 이다. 입사각을 측정 시와 동일한 경계면 수직 입사로 하였을 때, $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ 이 되며, 이 때 광 투과도는 두 매질의 굴절률만으로 구할 수 있으며, 아크릴의 굴절율 1.5 (파장 500 nm) 그리고 소금물 굴절율 1.3 (전도도 10 S/m)[10] 일 때, 프레넬 공식을 이용한 ASA의 광 투과도의 계산 값은 95.5 %이며, 이는 동일 상황에서 측정된 값보다 0.5 % 포인트 높은 값이다. ASA의 이론 및 측정값은 모두 ITO, MLF, MMF 등과 같은 기존 고체 투명전극들(TE)들 비해 높은 값을 갖는다 [1-4].



(a)



(b)

Fig. 4. (a) OT measurement result of ASA (conductivity: 5, 10, 20 S/m) (b) fabricated photograph of ASA sample (front view)

Table 3에서는 ASA의 소금물 전도도가 20 S/m 일 때, 다른 투명전극 (ITO 및 MLF)과의 광학적, 전기적 특성 비교를 정리 하였다. ASA의 OT는 기존 TE에 비해 매우 우수한 값을 가지며, 이는 액체 소금물을 TE 전도체로 사용할 수 있는 주요 고려사항 이 될 수 있다. 면저항

의 경우, 소금물 층이 수평구조일 때 수직구조에 비해 20배 이상 두꺼우므로 수직 과 수평구조에 따라 면저항은 22배 이상 많은 차이가 있으며, 수평구조일 때의 면저항은 기존 ITO, MLF TE보다 우수하며, 성능지수 FOM(Figure of merit) 또한 수평구조 ASA일 때 기존 TE 및 수직구조 ASA 대비 매우 우수한 99.3 ($10^{-3} \Omega^{-1}$)의 FOM 값을 갖는다.

Table 3. Summarized optical and electrical properties of ASA, ITO and MLF

| Transparent Electrode | OT_{AV} (%) | R_s (Ω /sq) | FoM ($10^{-3} \Omega^{-1}$) |
|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------------------------|
| ITO [3] | 73 | 12 | 3.5 |
| MLF [3] | 78 | 20 | 4.1 |
| ASA(vertical) | 94.2 | 111.1 | 5.0 |
| ASA(horizontal) | 94 | 5.42 | 99.3 |

3. 투명 평면형 다이폴 안테나

3.1 투명 평면형 다이폴 안테나의 구조

Fig. 5는 평면형 소금물과 아크릴을 이용한 ASA구조의 양팔 ($W \times L$)을 갖는 투명 평면형 다이폴 안테나의 구조도 이다. 확대 그림에서와 같이 상대 유전율(ϵ_r) 2.61, 두께(t_a) 2 mm인 투명 아크릴 기판 사이에 두께, t_{sw} 의 소금물이 표면장력에 의해 갇혀 있는 구조이다. 제안된 투명 다이폴 안테나의 치수는 아래 Table 4에 정리 되었다.

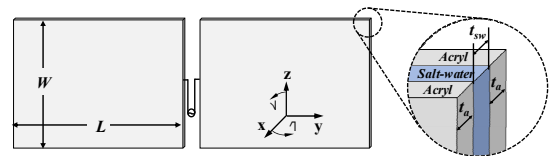


Fig. 5. Geometry of the transparent planar salt-water dipole antenna with a closer view.

Table 4. Optimized dimensions of the proposed dipole antenna.

| Parameter | Value (mm) |
|---|------------|
| Length of each arm (L) | 120 |
| Width of each arm (W) | 90 |
| Thickness of sea-water layer (t_{sw}) | 0.45 |
| Thickness of acrylic (t_a) | 1 |

일반적인 다이폴 안테나의 대역폭이 3 % [11] 이지만 본 논문에서는 DTV용 UHF대역(대역폭 48 %, 470 MHz ~771 MHz) 외장형 안테나 용도로써 안테나 팔의 넓이를 비교적 넓게 하여 대역폭을 늘리고 또한, 소금물의 저항손실을 줄이기 위해 넓은 팔 ($W/L = 75 \%$)의 안테나로 설계 하였다.

Fig. 6은 제작된 투명 안테나의 사진이다. 급전부의 전도도를 증가시키기 위해 급전 커넥터와 소금물의 접촉면에 얇은 구리시트를 도포 하였다^[9]. 또한 실제 제작된 ASA 구조의 투명 다이폴 안테나의 투명도를 시각적으로 확인하기 위해 텍스트 상에 위치한 후 찍은 사진이다.

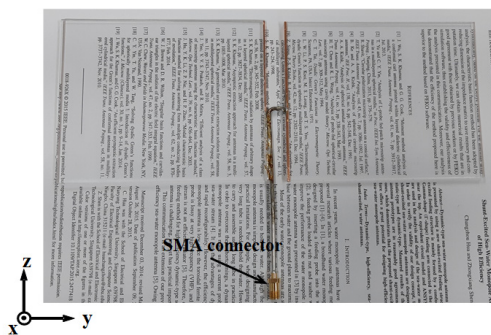


Fig. 6. Photograph of the fabricated transparent salt-water dipole antenna over texts

3.2 투명 안테나의 시뮬레이션 및 측정결과

제안된 안테나는 CST 마이크로웨이브 스튜디오의 유한적분법(FIT: finite integral technique)으로 시뮬레이션 되었다. 시뮬레이션에서는 다이폴 급전에 디스크리트 포트를 사용하였다. Fig. 7(a)는 ASA구조의 소금물 전도도에 따른 방사효율을 보여주며, 예상대로 전도도가 증가할수록 면저항이 감소함으로(Fig. 3 참조) 전도도와 안테나 효율이 비례함을 볼 수 있으며, 전반적으로 UHF 대역 내에서 상용 가능한 75 % 이상의 우수한 효율을 갖는다. 평균 효율은 전도도 5, 10, 20 S/m에서 77 %, 78.6 %, 82.5 % 이다. Fig. 7 (b)의 최대이득 또한 전도도와 최대이득이 비례하며, UHF대역 내 최대이득은 전도도 5, 10, 20 S/m에서 1.8, 2.1, 2.5 dBi 이다. 이는 ASA 구조의 다이폴 안테나의 전도도가 제일 낮은 5 S/m 일 때도, 안테나의 효율 및 최대이득은 전형적인 고체 투명전극 ITO를 사용한 다이폴안테나에 비해 우수한 이득 값을 갖는 것을 알 수 있다 [11]. 이에 따라, 전도도는 5 S/m로 낮지만 투명도가 우수한 농도 36.7 ppt의 소금물을 사용한 ASA를 이용하여 Table 4에서 언급된

치수를 갖는 안테나를 이용하여 실제, Fig. 6의 투명 안테나를 제작 하였다.

Fig. 8은 제작된 투명 다이폴 안테나의 시뮬레이션 및 측정된 반사계수(S_{11}) 이다. 시뮬레이션 및 측정된 반사계수는 UHF 대역에서 -10 dB 이하이며, 비교적 잘 일치함을 보여준다. 또한, 안테나는 광대역 구현을 위해 각 UHF 대역 끝 주파수 470 MHz 와 775 MHz 근처에서 두 개의 공진 폴을 갖는다.

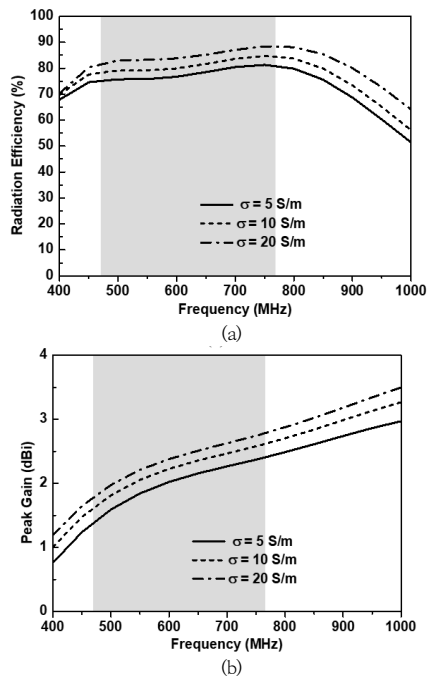


Fig. 7. Simulated (a) radiation efficiency and (b) peak gain

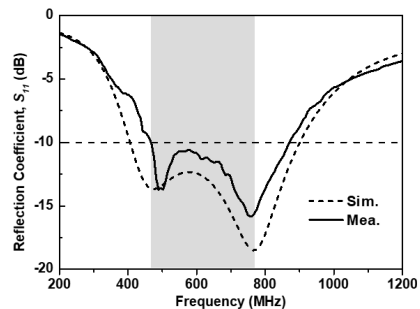


Fig. 8. Simulated and measured reflection coefficient (S_{11})

Fig. 5에서와 같이 안테나가 y축 상에 있으므로 E 평면은 xy 평면, 그리고 H 평면은 xz 평면이다. 안테나의

패턴은 전방향 방사의 특성을 잘 보여주고 있으며, 측정 시 ASA 투명 다이폴 안테나의 이득은 1.7 dBi, 효율은 74 %이며, 앞서 언급 한 것처럼, 전형적인 고체 투명전극 ITO를 사용한 다이폴안테나에 비해 우수한 이득 값을 갖는다[11]. 또한, 예상할 수 있듯이, 일반적인 구리 도체를 이용한 CS 다이폴 안테나의 이득은 3 dBi, 효율은 95 %로 ASA 투명 다이폴 안테나에 비해 우수한 값을 갖는다.

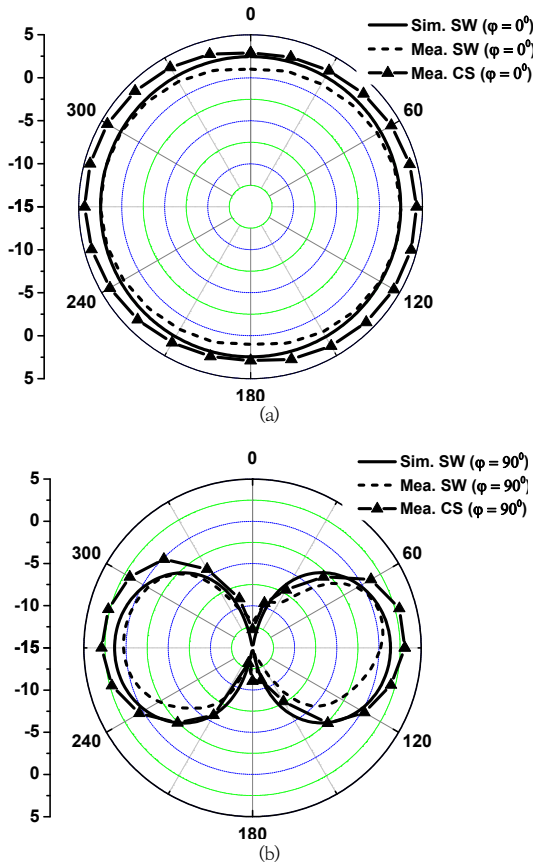


Fig. 9. Simulated and measured radiation patterns of the dipole antenna (a) xz -plane, (b) xy -plane.[SW: ASA dipole, CS: CS dipole]

3. 결론

본 논문에서는 일정한 전도도를 갖는 이온화된 액체 소금물을 투명 액체 전극으로 활용하기 위해 투명 아크릴 판을 이용하여 (ASA: 아크릴/소금물/아크릴) 구조의 평면형 액체 투명전극을 구현하였으며, 이러한 ASA 구조

의 광학적, 전기적 특성이 이론적, 실험적으로 분석 되었으며, 그 결과 ASA는 94 % 이상의 높은 평균 광투과도 (OT_{AV})를 갖는 액체 투명전극의 구현을 가능하게 하였다. 소금물 두께, 소금물 농도에 따른 ASA의 전기적특성이 분석 되었고, 수평형 ASA의 경우, ITO, MLF등의 기존 범용 고체 투명전극과 유사한 $5.42 (\Omega / sq)$ 의 면저항 (R_s) 값을 가지며, $99.3 (10^{-3} \Omega^{-1})$ 의 높은 성능지수 (FOM)를 갖는 것을 확인 하였다. 이러한 ASA 구조의 안테나, 전자파 차폐 등 전자기 소자 활용 가능성을 확인하기 위해, 전도도 5 S/m인 소금물을 이용한 ASA 구조로 평면형 다이폴 안테나를 구현 하였으며, 제안된 안테나는 방사효율 74 % 최대이득 1.7 dB를 가지며 상용 안테나로 활용 될 수 있음을 확인 하였다. 이러한 ASA는 높은 광 투과도, 재료의 낮은 가격, 안정성, 쉬운 재료 접근성 등의 장점을 가지며 추후 다양한 투명 전자기 응용에 적용 되어질 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] M. R. Haraty, M. N. Moghadasi, A. A. L. Neyestanak, and A. Nikfarjam, "Improving the efficiency of transparent antenna using gold nanolayer deposition," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 4-7, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/LAWP.2015.2424918>
- [2] S. Hong, Y. Kim, and C. W. Jung, "Transparent microstrip patch antennas with multilayer and metal-mesh films," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 772-775, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/LAWP.2016.2602389>
- [3] S. Hong, Y. Kim, and C. W. Jung, "Transparent UWB antenna with IZTO/Ag/IZTO multilayer electrode film," Hindawi, *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2016, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/6751790>
- [4] Y. Kim, C. Lee, S. Hong, C. W. Jung, and Y. Kim, "Design of transparent multilayer film antenna for wireless communication," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 1, pp. 12-14, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1049/el.2014.3831>
- [5] C. J. Y. Kosta, "Liquid antenna systems," in *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, Jun. 2004, vol. 3, pp. 2392-2395. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/APS.2004.1331854>
- [6] H. Fayad and P. Record, "Broadband liquid antenna," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 3, pp. 177-178, 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1049/el:20063633>
- [7] L. Xing, Y. Huang, S. S. Alja'afreh, and S. J. Boyes, "A monopole water antenna," in *Proc. Loughborough Antennas Propagation Conf.*, 2012, pp. 1-4. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/LAPC.2012.6402985>

- [8] C. Hua, Z. Shen, and J. Lu, "High-efficiency sea-water monopole antenna for maritime wireless communications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 12, pp. 5968-5973, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TAP.2014.2360210>
- [9] P. D. Tung, and C. W. Jung, "Optically transparent sea-water monopole antenna with high radiation efficiency for WLAN applications," *Elec. Lett.*, vol. 55, no. 24, pp. 1269-1271, 2019.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1049/el.2019.2664>
- [10] Sh. A. Furman, A. V. Tikhonravov, *Basics of optics of multilayer systems*. Edition Frontieres, Gif-sur-Yvette, 1992. ISSN: 0982-5657
- [11] P. D. Tung, and C. W. Jung, "Optically Transparent Wideband Dipole and Patch External Antennas Using Metal Mesh for UHD TV Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1907-1917, 2020.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TAP.2019.2950077>

판 주 동(Phan Duy Tung)

[정회원]



- 2015년 6월 : Tula State University, Radio Science Engineering, Russia (공학석사)
- 2015년 9월 ~ 2018년 8월 : Vinh University, Electrical Engineering, Vietnam, Lecturer

- 2018년 9월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교, NID융합기술 대학원, 박사과정

<관심분야>

안테나, EMI/EMC, 통신이론, 투명전극 등

정 창 원(Chang Won Jugn)

[정회원]



- 2001년 12월 : University of Southern California, 전자공학과 (공학석사)
- 2005년 6월 : University of California, Irvine, 전자공학과 (공학박사)
- 1997년 1월 ~ 2000년 6월 : LG 정보통신, 연구원
- 2005년 7월 ~ 2005년 10월 : University of California, Irvine, Post Doctor
- 2005년 11월 ~ 2008년 4월 : 삼성종합기술원, 전문연구원
- 2008년 5월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교, NID융합기술 대학원, 교수

<관심분야>

안테나, RF, EMI/EMC, RF-MEMS, 무선전력전송, 투명전극, 센서 등