

액체 소금물을 이용한 투명 전자파 차폐

Transparent Electromagnetic-Wave Shielding Using Liquid Saltwater

판 쥐 똥¹ · 정 창 원²

Tung Phan Duy¹ · Chang Won Jung²

요 약

광학적으로 투명한 ITO, MLF, 메탈메쉬 등의 기존 고체 투명전극(transparent electrode: TE)을 이용한 투명 안테나, 전자파 차폐(electromagnetic-wave shielding)등에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 본 논문에서는 기존 고체 투명전극(TE) 대비 광학적으로 우수하며, 가격이 저렴하고, 주변에서 쉽게 구할 수 있는 소금물을 이용한 액체 투명전극에 대한 광학적, 전기적 특성을 이론적, 실험적으로 분석하였다. 농도 35 ppt의 전도도 5 s/m을 갖는 소금물은 평균 95 % 이상의 가시광선 대역 광투과도를 가지며, 3 mm 두께의 평면형 소금물에서 22 dB 이상의 전자파 차폐도(shielding effectiveness: SE) 성능을 갖는다.

Abstract

Transparent antennas and electromagnetic-wave shielding using existing optically transparent electrodes (TEs) such as indium tin oxide, MLF, and metal mesh were investigated. We analyzed the optical and electrical characteristics of a liquid TE using saltwater compared to those of conventional solid TEs. Saltwater with a salinity of 35 ppt (conductivity=5 s/m) has an average transparency of >95% in the visible band. A planar saltwater layer with a 3 mm thickness has a shielding effectiveness performance of >22 dB.

Key words: Transparent Electrode, Salt Water, Optical Transparency, Sheet Resistance, Em Shielding

I. 서 론

최근 광학적으로 투명한 도체는 우수한 전기적, 광학적 성능으로 다양한 광·전기 응용에서 활용되어왔다^{[1][2]}. 인듐 주석 산화물(indium tin oxide: ITO)은 현재까지 가장 활용도가 높은 투명전극으로 사용되고 있으나, 부식되기 쉽고 희토류인 인듐의 가격이 높은 단점이 있다^{[1][2]}. 이러한 ITO를 대체하기 위해 다층투명전극(multi layered transparent electrode: MLF), 흑연(graphene)등의 투명전극에 대

한 연구가 진행되어 왔다^{[1][2]}. 그러나 MLF는 ITO에 비해 기계적인 유연성과 전도도를 개선하기는 하였으나, 광투과도(optical transparency: OT)가 ITO에 비해 낮고, 흑연 또한 ITO에 비해 광투과도(OT)가 낮으며, ITO대비 가격 상승의 단점을 가지고 있다. 이에 비해 가격 및 전기적 측면에서 우수한 메탈메쉬(metal mesh film: MMF)의 경우, 기계적으로도 안정정인 면이 있으나, 광학적 측면에서는 상대적으로 낮은 OT를 갖는다^[1].

최근 소금물은 증류수에 가까운 우수한 OT(> 95 % @

「이 연구는 서울과학기술대학교 교내 연구비의 지원으로 연구되었음.」

서울과학기술대학교 나노IT디자인융합기술대학원 (Graduate School of Nano IT Design Fusion, Seoul National University of Science and Technology)

1: 박사과정(<https://orcid.org/0000-0003-1783-2519>), 2: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-8030-8093>)

· Manuscript received November 13, 2020 ; Revised November 29, 2020 ; Accepted December 9, 2020. (ID No. 20201113-097)

· Corresponding Author: Chang Won Jung (e-mail: changwoj@snu.ac.kr)

salinity 35 ppt)와 비교적 낮은 재료 가격, 안전성 등으로 인하여 잠재적인 액체 투명전극으로 고려되고 있다^[2]. 이온(ion) 형태의 전하입자를 가지는 소금물은 높은 OT를 가지며, 증류수에 비해 높은 전도도를 갖는 도체로써의 역할을 하며, 이로 인한 투명 안테나 및 전자파 차폐로써의 활용가능성이 있으며^[2], 본 논문에서는 평면형 소금물의 광학적, 전기적 특성을 분석하였고, 소금물의 투명 전자파 차폐 활용 가능성을 조사하였다.

II. 광학적 분석

2-1 이론적 예측

일반적인 매질에서 입사된 가시광선은 매질 표면에서 반사하며, 또한 매질 내부에서 흡수되며, 가시광선의 투과는 $OT=1-A-R$ 로 표현될 수 있으며, 이때 OT(optical transmittance)는 투과, A(absorption)는 흡수, R(reflection)은 반사성분이다. 여기서 그림 1은 두께(t_{sw})를 갖는 평면 소금물의 OT, A, R을 나타내며, n_{air} , n_{sw} 는 각각 공기(air)와 소금물(sw)의 굴절율을 나타낸다. 공기와 물의 서로 다른 굴절률에 의해 입사되는 가시광선의 반사가 발생하며, 이때 그림 1의 가시광선의 입사면에서 보았을 때, 평면형 소금물의 왼쪽 입사경계면 (공기→소금물) 그리고 오른쪽 두 번째 경계면 (소금물→공기)의 두 개의 경계면이 존재하고, 두 평행 경계면에서 반사 및 투과가 발생하며, 소금물과 공기에서의 가시광선 반사(R)에 대한 수식은 아래의 프레넬 공식 (1)에 의해 정의될 수 있다. 여기서, n_{sw} 와 n_{air} 는 앞에서 언급한 소금물과 공기의 굴절율이며, 일반적으로 n_{air} 은 “1” 그리고, n_{sw} 는 가시광선의 파장, 소금물의 농도(salinity), 온도(T), 압력에 의해 결정되어진다^[3].

$$R = \left(\frac{n_{air} - n_{sw}}{n_{air} + n_{sw}} \right)^2 \quad (1)$$

가시광선은 그림 1에서처럼, 소금물의 표면을 통과하여 소금물로 흡수되며, 이때 소금물 내부 흡수는 비어-램버트법칙(Beer-Lambert's law)^[4]에 의해 소금물의 농도와 두께에 의해 결정된다. 평면형 소금물의 흡수도(A)와 두께(t)의 선형관계에서 두께 3 mm인 소금물의 흡수도는

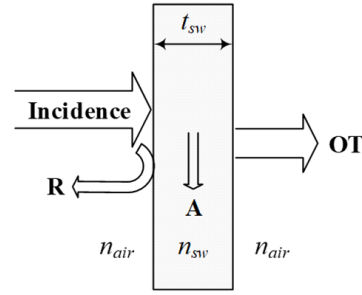


그림 1. 평면형 소금물상의 가시광선 입사(Incidence), 반사(R), 흡수(A), 투과(OT)

Fig. 1. Reflectance(R), absorbance(A), and optical transmittance (OT) of the incident light through a planar salt-water.

전체 입사 가시광선 에너지의 0.06 %로 계산되며, 이는 반사 또는 투과되는 가시광선의 양에 비해 아주 작은 값으로 무시할 수 있으며, 따라서 대부분의 가시광선은 반사와 투과이며, 투과되는 가시광선의 양(OT)은 식 (2)에 정의되었다.

$$OT = 1 - \left(\frac{n_{air} - n_{sw}}{n_{air} + n_{sw}} \right)^2 \quad (2)$$

소금물의 굴절율(n_{sw})은 그림 2에서와 같이 농도(S)와 온도(T)에 의해 결정되며, 농도와 온도가 증가할수록 증가하며, 상온(20°C)에서 농도 35 ppt, 200 ppt일 때 각각 1.34,

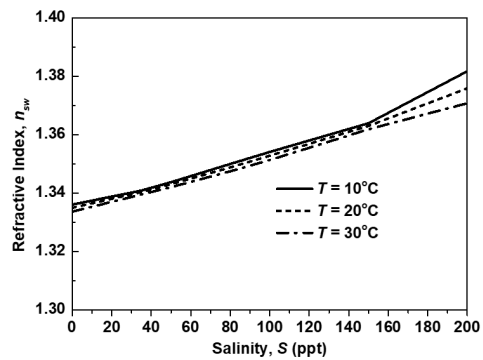


그림 2. 파장 632.8 nm인 가시광선의 소금물 농도(S), 온도(T)에 따른 소금물의 굴절율(n_{sw})

Fig. 2. Refractive index of salt-water as a function of salinity and temperature at a radiation wavelength of 632.8 nm.

표 1. 평면형 소금물로 수직 입사되는 632.8 nm 파장의 가시광선 농도(OS)와 온도(T)에 따른 광투과도(OT)

Table 1. Predicted OT of planar salt-water at the wavelength of 632.8 nm with different salinities and temperatures.

T(°C) \ S(ppt)	0	35	80	200
10	97.93	97.88	97.78	97.43
20	97.94	97.88	97.79	97.50
30	97.96	97.89	97.81	97.55

1.37의 굴절율을 가진다. 또한 식 (2)와 같이 소금물의 OT는 소금물의 농도와 온도의 함수가 되며, 표 1은 소금물로 수직 입사되는 파장이 632.8 nm인 가시광선의 소금물 농도(S) 및 온도(T)에 따른 광투과도(OT) 값이다. 이때 OT는 전반적으로 97 % 이상의 높은 값을 가지며, 농도가 낮을 때 온도가 높을 때 소폭 증가함을 알 수 있다.

2-2 측정 결과

액체 전도도 미터 (HI 8633, Hanna Instrument Co.)를 이용하여 소금물의 농도가 35, 200 ppt일 때의 전도도 측정 시 각각 5, 20 S/m의 전도도 값을 갖는다. 그림 3(a)는 두 가지 35, 200 ppt 농도를 갖는 소금물의 측정된 OT이다. OT는 모두 91 % 이상의 높은 값을 가지며, 400~700 nm의 가시광선 대역에서는 비교적 일정한 값을 갖는다. 또한, 측정된 광투과도는 앞 절에서 언급한 대로 소금물 농도가 증가하면 소금 분자 증가에 의해 OT가 낮아짐을 알 수 있다. 또한, 이러한 경향은 소금물 농도 증가에 따른 소금물과 공기의 임피던스 정합이 어긋나며 발생한다.

가시광선 대역 내 평균 광투과도(OT_{av})는 각각 농도 35, 200 ppt에서 95.5 %, 91.8 %이며, 이 값은 표 1에서의 예측 값보다는 낮으며, 이는 예측 시 NaCl의 물질량(molar-mass)이 58.5 g/mol 인데, 실제 측정시 소금물의 물질량과의 차이 때문에 발생한다고도 볼 수 있으며, 광투과도 측정 시 진공이 아닌 공기 상에서의 측정 등에 기인한다고도 볼 수 있다. 그림 3(b)는 UV스펙트로미터 (UV-spectrophotometer: T60 model)를 이용한 소금물의 OT 측정의 예이며, 측정 시 투명 용기의 영향은 보정(calibration)되었다.

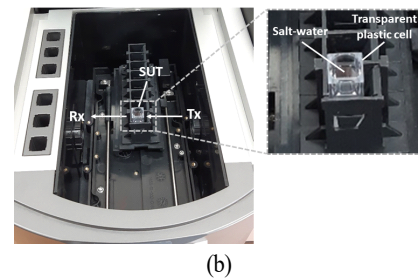
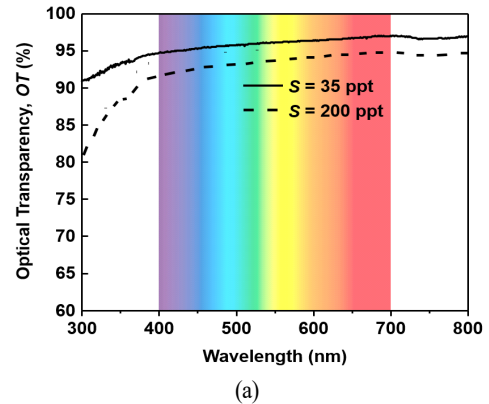


그림 3. (a) 소금물 농도(S: 35, 200 ppt)에서의 OT 측정 결과, (b) UV스펙트로미터를 이용한 소금물 OT 측정 예

Fig. 3. (a) Measurement results of OT with salt-water salinity (S: 35, 200 ppt), (b) Example of OT measurement of salt water using UV spectrophotometer.

III. 전자파 차폐를 위한 전기적 분석

그림 4는 PSS-78 스텐다드^[5]의 면저항 값 데이터와 비교하기 위하여, 평면형 소금물의 소금물 두께(t) 변화(1, 3, 5 mm)에 따른 전도도(σ)와 면저항(R_s)을 나타낸 것이며, 그림상의 측정값은 면저항 계산 시 측정된 전도도값을 사용한 것이며, 측정값은 PSS-78의 측정 데이터와 잘 일치함을 보여준다^[5]. 평면형 소금물의 면저항(R_s)은 그림 4에서와 같이 소금물의 두께(t_{sw})와 전도도(σ)가 증가함에 따라 감소한다. 두께 3 mm의 평면형 소금물은 전도도 20 S/m일 때 16.98 ohm/m²의 면저항값을 갖는다.

그림 5는 농도 200 ppt, 전도도 20 S/m, 두께 3 mm를 갖는 평면형 소금물의 전자파 차폐(shielding effectiveness: SE) 시뮬레이션 및 측정 결과이다. 여기서 SE [dB] = $-S_{21}$ [dB]이며, 시뮬레이션은 EM 시뮬레이터인 HFSS를 사용

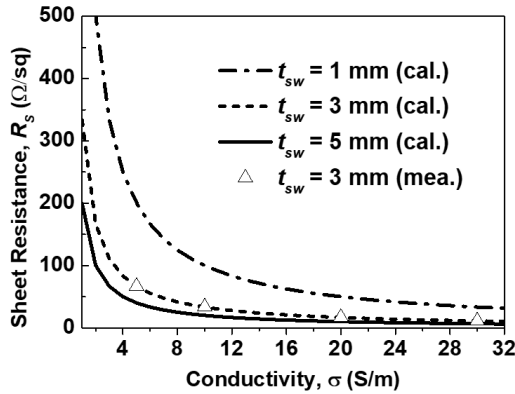


그림 4. 두께(t) (1, 3, 5 mm)와 전도도(σ)의 함수인 평면형 소금물의 면저항(R_s) 계산값과 측정값

Fig. 4. Calculated and measured sheet resistance(R_s) of planar salt-water as a function of conductivity and thickness.

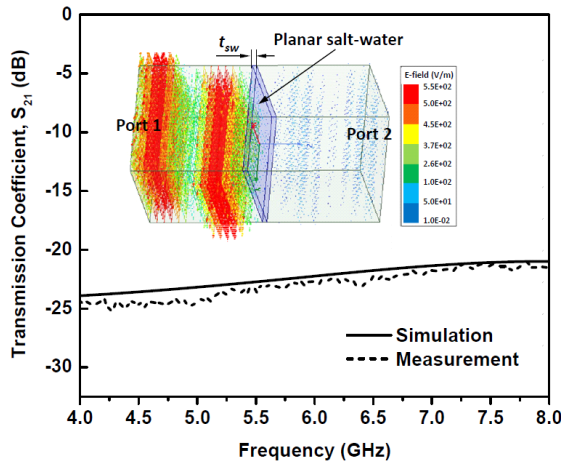


그림 5. 농도 200 ppt, 전도도 20 S/m, 두께 3 mm를 갖는 평면형 소금물의 투과계수 (S_{21} : SE) 시뮬레이션 및 측정결과, 그리고 E-field 분포 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Simulation and measurement results of transmission coefficient through the planar salt-water with a thickness of 3 mm and salinity of 200 ppt and conductivity 20 S/m and simulated E-field distribution.

하였다. 측정은 C 대역(4~8 GHz)용 도파관과 8 GHz까지 측정 가능한 네트워크 분석기(E5071B)를 사용하여 4~8

GHz 대역을 측정하였으며^{[1],[2]}, 평면형 소금물의 SE는 4~8 GHz 대역에서 22 dB 이상이며, 이 값은 평면형 소금물이 향후 고 투명 민용, 군용 전자파 차폐 창호 등에 적용되어질 수 있음을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 평면형 소금물의 광학적, 전기적 특성을 이론적, 실험적으로 분석하였으며, 평면형 소금물의 투명 전자파차폐 활용 가능성을 연구하였다. 소금물은 기존 상용 고체 투명전극에 비해 광학적으로 우수한 평균 광투과도($OT_{av}=91.8\%$ @ salinity: 200 ppt, conductivity: 20 S/m)를 가지며, 비교적 저렴하고, 안전하며, 쉽게 구할 수 있으며, 농도 200 ppt, 전도도 20 S/m을 갖는 두께 3 mm의 평면형 소금물의 경우, 4~8 GHz 주파수 대역에서 22 dB 이상의 전자파 차폐(SE) 성능을 가지며, 추후 다양한 민용, 군용 전자파 차폐 등에 활용되어질 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] P. D. Tung, C. W. Jung, "High optical visibility and shielding effectiveness metal mesh film for microwave oven application," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 4, pp. 1076-1081.
- [2] D. T. Phan, C. W. Jung, "Optically transparent sea-water monopole antenna with high radiation efficiency for WLAN applications," *Electronics Letters*, vol. 55, no. 24, pp. 1269-1271, Nov. 2019.
- [3] M. A. Aly, E. Esmail, "Refractive index of saltwater: Effect of temperature," *Optical Materials*, vol. 2, no. 3, pp. 195-199, Jul. 1993.
- [4] N. G. Jerlov, *Marine Optics*, Amsterdam, Elsevier Science, 1976.
- [5] E. L. Lewis, R. G. Perkin, "The practical salinity scale 1978: Conversion of existing data," *Deep-Sea Research*, vol. 28, no. 4, pp. 307-328, Apr. 1981.