

## 적층형 수중 용량성 전력 전송 커플러의 설계 및 수중 매질에서의 전파 분석

### Design of Stacked Underwater Capacitive Power Transfer Coupler and Analysis of Propagation in Underwater Medium

배 홍 국 · 박 상 욱\*

Hong-Guk Bae · Sang-Wook Park\*

#### 요 약

본 연구는 매질의 전기적 특성이 전기장 전파(propagation)에 미치는 영향을 이론적으로 분석한다. 전도도와 유전율을 지닌 매질은 전도 전류와 변위 전류의 비율에 따라 고전도체(highly conductive medium) 또는 저손실 유전체(low-loss dielectric)로 평가될 수 있다. 전도도가 높을수록 전기장의 세기가 전송 거리에 따라 급격히 감소한다. 이는 전도도가 다른 네 가지 유형의 물에 대해 분석하였다. 또한, 적층형 용량성 무선전력전송(CPT, capacitive wireless power transfer) 커플러 구조를 설계하고 수중 전송 특성을 분석하였다. 결론적으로, 유전율이 높은 매체조차도 전도도에 따라 시스템의 성능을 개선하는 데 적합하지 않을 수 있다. 또한 병렬형 CPT 커플러와 달리 적층형 CPT 커플러는 수중 환경에서의 활용이 상대적으로 불리함이 확인되었다.

#### Abstract

This study theoretically analyzes the effect of a medium's electrical properties on electric field propagation. A medium with conductivity and permittivity can be classified as a highly conductive medium or a low-loss dielectric depending on the ratio of conduction current to displacement current. As conductivity increases, the electric field intensity decreases significantly with transmission distance. This phenomenon was analyzed using four types of water with different conductivities. Additionally, a stacked capacitive wireless power transfer (CPT) coupler structure was designed, and its underwater transmission characteristics were examined. Consequently, even media with high permittivity may not be suitable for improving the performance of a system, depending on their conductivity. Furthermore, unlike a parallel CPT coupler, the stacked CPT coupler was found to be relatively disadvantageous for use in underwater environments.

Key words: Capacitive Power Transfer (CPT), Underwater, Wave Propagation, Electric Field, Stacked CPT Coupler

「본 연구는 순천향대학교 학술연구비 지원으로 수행하였음.」

순천향대학교 ICT융합학과(Department of ICT Convergence, Soonchunhyang University)

\*순천향대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Soonchunhyang University)

· Manuscript received January 26, 2025 ; Revised February 7, 2025 ; Accepted May 21, 2025. (ID No. 20250126-014)

· Corresponding Author: Sang-Wook Park (e-mail: wave@sch.ac.kr)

## I. 서 론

무선전력전송(WPT, wireless power transfer)은 전기적 접촉 없이 전력을 효과적으로 전송할 수 있는 유망한 방법으로 사용자 편의성을 개선한다<sup>[1]</sup>. WPT 방식은 금속판 구조의 커플러에서 생성된 교류 전기장을 사용하는 CPT<sup>[2]</sup>와 코일 구조의 커플러에서 생성된 교류 자기장을 사용하는 유도성 무선전력전송(IPT, inductive wireless power transfer)<sup>[3]</sup>이 대표적이다. 일반적으로 IPT 방식은 동일한 수준의 공극에서 CPT 방식보다 전력 밀도가 높아 전력전송 거리와 전력 레벨 측면에서 선호된다. 반면 높은 투자율의 코어 매질이 와전류 손실을 일으키고 높은 시스템 구성 비용이 필요하여 CPT 방식이 IPT 방식보다 실용적일 수 있다<sup>[4]</sup>.

특히, 실온에서 약 81 F/m의 높은 상대 유전율을 갖는 물 매질<sup>[5]</sup>에서 CPT 커플러 간의 더 큰 커패시턴스를 가질 수 있고, IPT 시스템보다 적은 비용으로 결합 요소를 개선할 수 있음을 나타낸다. 그러나 증류수를 제외한 물은 불순물에 의해 쉽게 이온화되기 때문에 전도성을 가지고 있다<sup>[6]</sup>. 유전율은 CPT 시스템에서 송신기와 수신기 사이에 적절한 전기장을 생성하지 못하게 한다<sup>[7]</sup>. 따라서 CPT 방식에서 공기를 대체할 적절한 매질을 선택하기 위해 매질의 유전율과 전도도를 동시에 고려할 필요가 있다.

일부 연구에서는 수중에서 80 % 이상의 높은 전력전송 효율을 달성하여 수중 CPT(UCPT, underwater capacitive wireless power transfer)의 효율성을 증명했다<sup>[8]</sup>. 그러나 대부분의 수중 CPT 연구에서는 병렬 CPT 커플러 구조를 사용하지만, 적층형 CPT 커플러 구조를 사용한 수중 무선전력전송은 지금까지 검증되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 전파 거리에서 매질의 유전율과 전도도가 전기장에 어떤 영향을 미치는지에 대한 이론적 분석을 제공하고자 한다. 또한, 적층형 CPT 커플러 구조를 설계하고 수중에서의 전송특성을 분석한다. 본 연구의 결과는 CPT 시스템의 성능을 개선할 수 있는 적절한 매질을 선택하는 데 도움이 될 수 있다.

## II. 적층형 UCPT 커플러 설계

### 2-1 적층형 UCPT의 실용 등가회로모델

송신기와 수신기의 금속판이 수평으로 배열된 4판 병렬 CPT 구조와 달리, 적층 CPT 구조는 각 커플러에 대해 수직으로 배열된다<sup>[9]</sup>. 그림 1은 적층 UCPT 구성을 나타낸 것이다. 송신부 금속판 P1, P2는 입력 전압, 수신부 금속판 P3, P4는 부하에 전기적으로 연결된다. 송신부와 수신부는 전기장 결합을 전력을 전송한다. 일반적으로 대면적 판(P1, P3)을 백(back) 플레이트, 소면적 판(P2, P4)을 프론트(front) 플레이트로 표현한다. 교류 전압에 의해 생성된 전류는 매칭 네트워크와 공진 인덕터  $L_{res}$ 를 통과하여 전기장을 생성한다.

그림 1에서 상호 결합이 발생하는 커플러 구조의 등가회로는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2(a)를 참고하면, 송신부와 수신부 각 2개의 금속판 사이 자기 커패시턴스  $C_1$ ,  $C_2$ 가 형성된다. 송신부와 수신부 사이는 상호 커패시턴스  $C_M$ 가 형성된다. 이 등가회로를 T모델로 변환하였을 때,  $C_M$ 은  $C_1$ ,  $C_2$ 와 병렬관계이다. 따라서 그림 2(b)와 같이 T형 등가회로로 나타낼 수 있다.

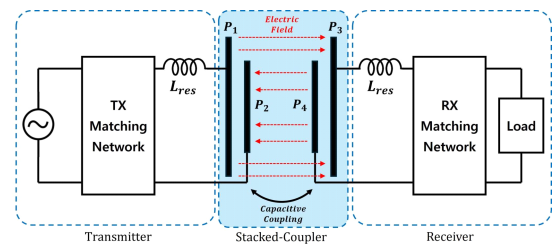


그림 1. 적층형 수중 CPT 시스템의 구성

Fig. 1. Configuration of stacked underwater CPT system.

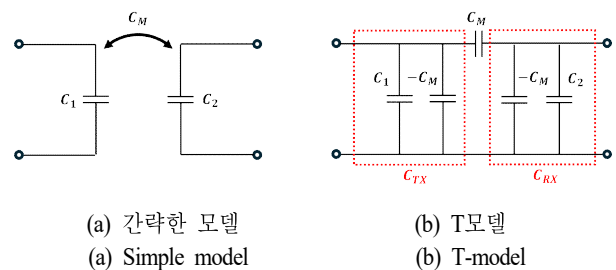


그림 2. CPT 커플러의 등가회로

Fig. 2. Equivalent Circuit of CPT coupler.

일반화된 4판 CPT의 자기 커패시턴스 및 상호 커패시턴스의 계산식<sup>[10]</sup>을 기반으로, 본 연구의 PEC 모델에서  $C_{TX}$ ,  $C_{RX}$ 는 식 (1)의 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} C_{TX} &= C_1 - C_M \\ C_{RX} &= C_2 - C_M \end{aligned} \quad (1)$$

그림 2 (b)의 등가회로에 매질의 손실 저항과 임피던스 정합회로를 포함하는 실용적 등가회로(PEC, practical equivalent circuit) 모델을 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 각 파라미터의 값은 표 1에 요약되어 있다.  $R_W$ 은 송수신 부 사이 간격이 20 mm인 경우의 값이다.

PEC모델의  $S$ -파라미터는 각 회로망에 대한  $S$ -파라미터의 곱으로 계산된다. 각 회로망에 대한 ABCD-파라미터의 임피던스 형태는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. ABCD-파라미터는  $t$ 에 대한  $2 \times 2$  행렬로 나타내고,  $S$ -파라미터 변환 공식을 정리하면 식 (3)과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 결과적으로 PEC모델의 각 회로망에 대한  $S$ -파라미터는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 각 회로망의  $S$ -파라미터를 모두 곱하여 식 (5)와 같이 PEC모델의 전체  $S$ -파라미터를 구할 수 있다.

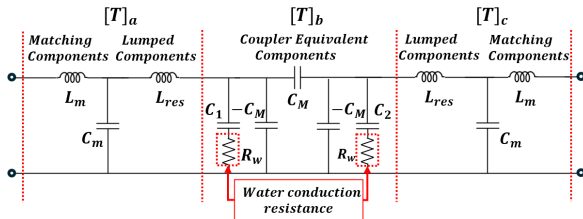


그림 3. 실용 등가회로모델

Fig. 3. Practical equivalent circuit model.

표 1. PEC 파라미터 요약

Table 1. PEC Parameter Summary.

Components	Notation	Value
Inductance of impedance matching	$L_m$	110 nH
Capacitance of impedance matching	$C_m$	300 pF
Resonant inductance	$L_{res}$	10.2 uH
Underwater conduction resistance	$R_W$	14 $\Omega$

$$\begin{aligned} [T]_a &= \begin{bmatrix} 1 - \omega^2 L_{res} C_m & j\omega(L_{res} + L_m - \omega^2 L_{res} C_m L_m) \\ j\omega C_m & 1 - \omega^2 L_{res} C_m \end{bmatrix} \\ [T]_b &= \begin{bmatrix} -\frac{C_2}{C_M} & -\frac{1}{\omega C_M} \\ j\omega(3C_M + 2(C_1 + C_2) + (C_1 C_2 / C_M)) + 2R_W & 2 + \frac{C_1}{C_M} \end{bmatrix} \\ [T]_c &= [T]_a \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} t_n &= t_{11} - t_{22}, & t_m &= t_{11} + t_{22}, \\ t_i &= \frac{t_{12}}{Z_0} - t_{21} Z_0, & t_j &= \frac{t_{12}}{Z_0} + t_{21} Z_0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{t_n + t_i}{t_m + t_j} & \frac{2(t_{11}t_{22} - t_{12}t_{21})}{t_m + t_j} \\ \frac{2}{t_m + t_j} & \frac{t_i - t_n}{t_m + t_j} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[S]_{TOTAL} = [S]_a \times [S]_b \times [S]_c \quad (5)$$

## 2-2 적층형 UCPT 시뮬레이션 모델

그림 4는 본 연구에서 분석된 적층형 UCPT 모델을 나타낸 것이다. 커플러의 상세 사양은 표 2에 나타내었다. 선로의 폭은 1 mm이고, 수동소자의 실제 크기가 고려된 소자의 위치가 표시되어 있다.

## Ⅲ. 물의 종류에 따른 계산 결과 및 논의

매질에서 전파되는 균일 평면파 방정식은 패러데이 법칙과 암페어의 맥스웰 방정식의 법칙을 결합하여 도출할 수 있다. 본 연구에서는 무손실 매질( $\sigma = 0$ )과 손실 매질( $\sigma \neq 0$ )을 고려하여 매질의 유전율( $\epsilon$ ), 투자율( $\mu$ ), 전도도( $\sigma$ )가

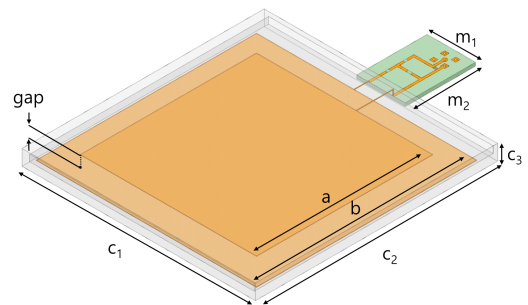


그림 4. 적층형 UCPT 단일 커플러의 쿼터뷰

Fig. 4. Quarter view underwater stacked CPT coupler.

표 2. 적층형 UCPT 커플러의 설계 사양

Table 2. Design specifications of stacked UCPT coupler.

Components	Notation	Value (mm)
Width of front plate	a	80
Width of Back plate	b	100
Length of the impedance matching circuit board	m <sub>1</sub>	18
Width of the impedance matching circuit board	m <sub>2</sub>	30
Length of acrylic case	c <sub>1</sub>	105
Width of acrylic case	c <sub>2</sub>	110
Height of acrylic case	c <sub>3</sub>	7.5
Gap between front plate and back plate	gap	2

전자기파의 감쇠에 어떤 영향을 미치는지 분석했다.

### 3-1 매질의 파동 전파

무손실 매질에서 전자기파는 감쇠 없이 전파된다. 전기장과 자기장은 거리에 따라 진폭을 유지하는 사인파로 설명된다. 무손실 매질에서 시간영역의 전기장과 자기장에 대한 해는 식 (6) 및 식 (7)로 나타낼 수 있다.  $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$  ( $\Omega$ )은 매질의 고유 임피던스이고,  $\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ 는 위상상수이다. 수식을 통해 전기장과 자기장이 +z 방향으로 전파되더라도 세기가 변하지 않는다는 것이 명확하다.

$$\hat{E}_x = \hat{E}_m^+ e^{-j\beta z} + \hat{E}_m^- e^{j\beta z} \quad (6)$$

$$\hat{H}_y = \hat{H}_m^+ e^{-j\beta z} + \hat{H}_m^- e^{j\beta z} = \frac{\hat{E}_m^+}{\eta} e^{-j\beta z} - \frac{\hat{E}_m^-}{\eta} e^{j\beta z} \quad (7)$$

반면, 손실 매질에서 전자기파는 매질의 전도도로 인해 감쇠를 포함한다. 식 (8)의 전파상수  $\gamma$ 는 감쇠 상수( $\alpha$ )와 위상 상수( $\beta$ )를 포함하는 복소수 값이 된다. 감쇠 상수를 포함한 전기장과 자기장의 해는 식 (8) 및 식 (9)와 같이 상미분 방정식을 풀어서 도출할 수 있다.

$$\hat{E}_x = \hat{E}_m^+ e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) + \hat{E}_m^- e^{-\alpha z} \cos(\omega t + \beta z) \quad (8)$$

$$\hat{H}_y = \frac{\hat{E}_m^+}{\eta_m} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) - \frac{\hat{E}_m^-}{\eta} e^{-\alpha z} \cos(\omega t + \beta z) \quad (9)$$

이를 식 (6) 및 식 (7)과 비교했을 때, 음의 지수 성분을 갖기 때문에 전기장과 자기장의 크기는 z축이 증가함에 따라 감소하며, 전도도에 따른 장의 감쇠는 매질의 유전율 및 투자율과 무관함을 알 수 있다.

### 3-2 매질의 손실 탄젠트

매질에서 에너지 손실의 정도는 손실 탄젠트로 정량화되며, 이는 전도 전류 대 변위 전류의 비율로 정의된다. 복소평면에 두 전류밀도 성분을 표시하면 두 전류밀도 크기 사이의 위상관계를 표현할 수 있다<sup>[11]</sup>.

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0\epsilon_r} \quad (10)$$

식 (10)에 따르면 손실 탄젠트는 매질의 유전율과 전도도, 전자기파의 주파수에 의해 결정된다. 결과적으로 전도도로 인한 매질의 손실량이 높은 유전율로 인한 이득보다 클 경우 동일한 CPT 구조에서 자유공간보다 전송 효율이 낮아질 수 있다. 이에 따라 4가지 유형의 물에 대한 손실 탄젠트가 CPT 시스템 성능 개선에 효과적인지 검토한다.

그림 5는 300 mm 이하의 전파거리에 따른 4 가지 유형의 물 매질에 대한 전기장 감쇠를 이론적으로 계산한 결과이다. 손실 탄젠트 계산을 위해 물 매질에 따른 유전율

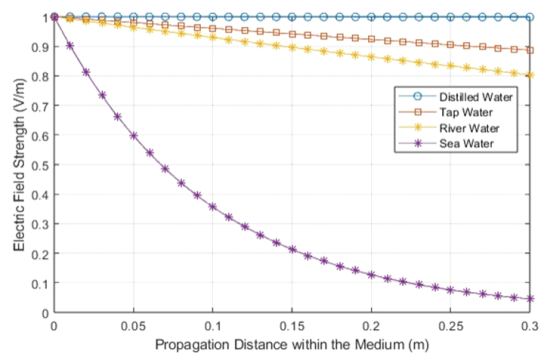


그림 5. 다양한 물 매질의 전기장 감쇠  
Fig. 5. The electric field attenuation for various types.

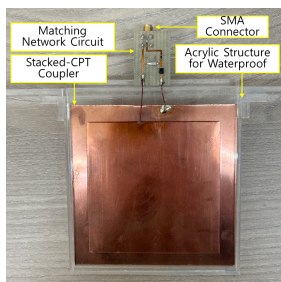
과 전도도를 표 3에 요약하였다. 증류수는 매질 간격에 따른 감쇠가 크게 발생하지 않는다. 하지만 수돗물과 강물의 경우 300 mm까지 각각 90 %, 80 %로 점진적 감쇠가 발생한다. 해수의 경우 전파 거리 50 mm에서 약 60 %, 300 mm에서 5 %로 전기장이 크게 감소하였다. 이는 해수가 CPT 시스템에서 유전체가 아닌 도체로 작용할 뿐만 아니라 MHz 대역에서 짧은 전송거리를 가져야 함을 증명한다.

#### IV. 실험 및 시뮬레이션 결과

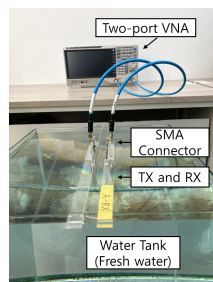
이 장에서는 적층형 UCPT 커플러의 VNA 측정결과, HFSS 시뮬레이션 결과, PEC 분석 결과를 비교한다. 그림 5는 본 연구에서 제안하는 적층형 UCPT 커플러 설계 모습을 나타낸다. 그림 6(a)는 단일 커플러를 나타낸 것으로, 그림 4와 동일한 규격을 갖는다. 임피던스 매칭회로가 구현된 FR-4 기판의 유전율은 4.4, 두께는 1.52 mm이

표 3. 25°C의 다양한 물 매질에 대한 전도도와 유전율  
Table 3. Conductivity and permittivity of various types of water at 25°C.

Type of water	Conductivity [S/m]	Relative permittivity
Distilled water	0.0002	81
Tap water	0.02	81
River water	0.04	81
Sea water	4	81



(a) 커플러  
(a) Coupler



(b) 측정 환경  
(b) Experimental setup

그림 6. 적층형 UCPT 실측모델  
Fig. 6. Fabricate model of Stacked UCPT.

다. SMA 커넥터는 매칭회로의 끝에 연결되고, 벡터 네트워크 분석기(VNA)에 연결되어 그림 6(b)와 같이 전송특성을 측정한다. 동일한 구조의 송신기와 수신기는 수중에서 서로 마주보게 배치된다. 본 연구에서는 송신기와 수신기 사이 거리를 10~200 mm 범위로 고려한다.

그림 7 송신기와 수신기 사이 거리가 20 mm일 때 3 가지 방법의  $S_{21}$ 을 나타낸다. 앞서 기술한 PEC 분석에 사용된 모든 회로 구성 요소는 RLC미터의 측정값이므로 비이상적 특성을 반영한다. HFSS 시뮬레이션 결과는 PEC 해석 결과와 매우 유사하여 시뮬레이션이 적절하게 수행되었음을 나타낸다. 그러나 VNA를 이용한 실제 측정 결과는 다른 두 결과에 비해 비교적 낮은 공진주파수와  $S_{21}$  값을 갖는다. 이는 커플러 제작 과정에서 발생한 추가 기생 저항 및 기생 커패시턴스에 의한 영향으로 판단된다.

그림 8은 송신기와 수신기 사이 거리를 10 mm에서 200 mm로 조정하며 커플러 등가 성분에 대한 변화를 관찰한 것이다. 송신기와 수신기 사이 거리가 10 mm일 때 C1과 C2는 약 5.8 pF이며, 50 mm까지 약 10 pF으로 급격

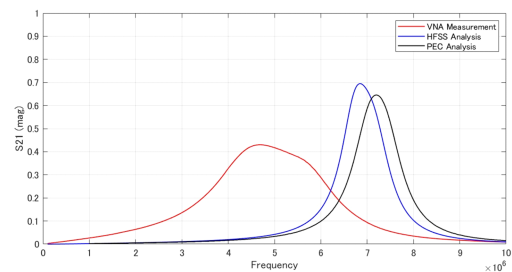


그림 7. 적층형 UCPT 커플러의 전송계수(d=20 mm)  
Fig. 7. Transmission Coefficient of underwater stacked CPT coupler (at d=20 mm).

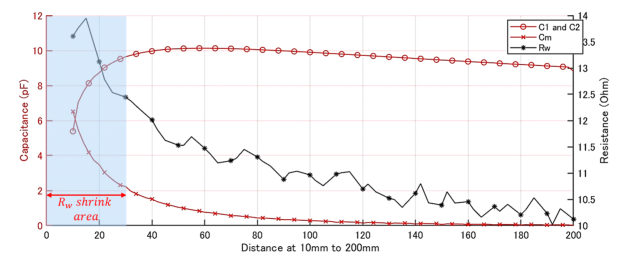


그림 8. 커플러 등가 성분 변화  
Fig. 8. Coupler equivalent components variation.

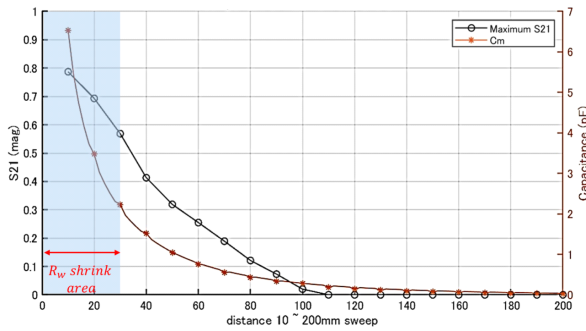


그림 9.  $S_{21}$  및  $C_m$ 의 최대치 비교

Fig. 9. Comparison of maximum  $S_{21}$  and  $C_m$ .

히 증가한다. 50 mm 이후에는 점진적으로 감소하는 경향을 보인다. 그러나  $C_m$ 의 경우 10 mm에서 약 6.4 pF의 가장 높은 값을 갖지만 100 mm까지 약 0.2 pF로 지수적으로 감소하였다. 100 mm 이후에는  $C_m$ 이 0에 가까워졌다.

$R_w$ 는 RLC 미터의 측정과정에서 물 흔들림에 가장 민감하게 반응하는 파라미터이다.  $R_w$ 는 20 mm에서 최대 14  $\Omega$ 를 가지며, 송신기와 수신기 사이 거리가 증가함에 따라 점차 10  $\Omega$ 으로 감소한다.

이러한 변화는 적층형 CPT 커플러가 수중에서 작동하기 어려운 이유를 나타낸다. 동일한 구성의 공기 중  $R_w$ 는 약 0.1  $\Omega$ 으로 무시할 만큼 낮은 값이지만, 수중에서는 비교적 높은 결합 계수를 갖는 경우에도 약 11  $\Omega$  이상의 높은 저항을 갖는다.

그림 9에 나타난 바와 같이, 최적 매칭 조건에서 상호 커패시턴스와  $S_{21}$ 의 최대치는 모두 송신부와 수신부 사이 거리가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 가장 가까운 거리인 20 mm 지점에서  $C_m$ 은 3.47 pF,  $S_{21}$ 은 0.79이며 100 mm 까지 지수함수 형태로 감소한다. 이는 거리가 멀어질수록 전기장 결합이 약화되며, 전송특성 또한 감소함을 의미한다. 반면 0~30 mm 구간에서는 효율을 저하시키는 전도저항  $R_w$ 이 거리에 따라 급격히 감소하지만,  $C_m$  또한 급격히 감소한다. 따라서 상쇄효과로 인해  $S_{21}$ 은 완만한 변화를 보이는 것으로 해석된다.

## V. 결 론

본 연구에서는 4가지 유형의 물 매질의 손실 탄젠트와

전기장 감쇠 특성을 분석하여, 각 매질이 안정적인 전송 특성을 유지하는 송수신 거리를 확인할 수 있었다. 또한 고전도체로 정의된 매질은 유전율이 높더라도 전파 거리에 따라 전기장 강도의 감쇠가 일어나고, CPT 커플러에서 사용하기에 적합하지 않을 수 있다.

또한 적층형 UCPT 커플러를 설계하고 매질 내부에서 전송특성을 분석했다. 공기에 비해 물의 전도 저항이 크기 때문에 전송계수가 크게 저하되었다. 이 연구의 결과는 적층형 UCPT가 수중 사용에 적합하지 않은 이유를 제시할 수 있다. 병렬형 UCPT의 경우 구조적 특성으로 인해 적층형 구조 대비 높은 상호 커패시턴스가 형성될 수 있다. 따라서 상대적으로 높은 전송효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 향후 개선을 위한 매질을 평가하는데 기여할 것으로 기대한다.

## References

- [1] Y. Wang, Z. Sun, Y. Guan, and D. Xu, "Overview of megahertz wireless power transfer," *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 5, pp. 528-554, May 2023.
- [2] M. Z. Erel, K. C. Bayindir, M. T. Aydemir, S. K. Chaudhary, and J. M. Guerrero, "A comprehensive review on wireless capacitive power transfer technology: Fundamentals and applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 3116-3143, Dec. 2021.
- [3] B. A. Rayan, U. Subramaniam, and S. Balamurugan, "Wireless power transfer in electric vehicles: A review on compensation topologies, coil structures, and safety aspects," *Energies*, vol. 16, no. 7, p. 3084, Mar. 2023.
- [4] H. Zhang, F. Lu, "Insulated coupler structure design for the long-distance freshwater capacitive power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 8, pp. 5191-5201, Aug. 2020.
- [5] A. Andryieuski, S. M. Kuznetsova, S. V. Zhukovsky, Y. S. Kivshar, and A. V. Lavrinenko, "Water: Promising opportunities for tunable all-dielectric electromagnetic metamaterials," *Scientific Reports*, vol. 5, no. 1, p. 13535, Aug. 2015.
- [6] T. S. Light, S. Licht, A. C. Bevilacqua, and K. R. Morash,



- "The fundamental conductivity and resistivity of water," *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 8, no. 1, p. E16, Nov. 2004.
- [7] L. Yang, Y. Zhang, X. Li, J. Jian, Z. Wang, and J. Huang, et al., "Analysis and design of four-plate capacitive wireless power transfer system for undersea applications," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 202-211, Sep. 2021.
- [8] H. Mahdi, B. Hoff, and T. Østrem, "Optimal solutions for underwater capacitive power transfer," *Sensors*, vol. 21, no. 24, p. 8233, Dec. 2021.
- [9] H. Zhang, F. Lu, H. Hofmann, W. Liu, and C. C. Mi, "A four-plate compact capacitive coupler design and LCL-compensated topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging application," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 12, pp. 8541-8551, Dec. 2016.
- [10] B. Luo, R. Mai, L. Guo, D. Wu, and Z. He, "LC -CLC compensation topology for capacitive power transfer system to improve misalignment performance," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 10, pp. 2626-2633, Aug. 2019.
- [11] W. H. Hayt Jr, J. A. Buck, *Engineering electromagnetics*, 9th ed., New York, NY, McGraw-Hill, 2018.

배 홍 국 [순천향대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0040-6831>



2022년 2월: 대구대학교 전자공학과 (공학사)  
 2024년 2월: 대구대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2024년 3월~현재: 순천향대학교 ICT융합학과 박사과정  
 [주 관심분야] WPT, EMF, Artificial Retina 등

박 상 옥 [순천향대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6996-5853>



2003년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
 2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2008년 3월: The University of Electro- Communications 정보통신공학과 (공학박사)  
 2008년 4월~2009년 8월: The University of Electro Communications 조교수  
 2009년 9월~2013년 4월: National Institute of Information and Communications Technology 연구원  
 2013년 6월~2018년 2월: 자동차부품연구원 전자기파연구센터 선임연구원  
 2019년 3월~2023년 2월 : 대구대학교 전자전기공학부 조교수  
 2023년 3월~현재: 순천향대학교 전자공학과 조교수  
 [주 관심분야] EMI/EMC, Microwave Transmission Circuits, Numerical Analysis, Biomedical EMC, WPT 등