

# 대용량 무선전력전송 환경 인근 메쉬구조 도전부 유도현상 특성 분석

## Characteristic Analysis of Induction Phenomena in the Nearby Mesh Structure Conductive Part of Large Capacity Wireless Power Transmission System

채 동 주\* · 이 건 호\* · 임 현 성\* · 조 성 구\*  
(Dong-Ju Chae · Geon-Ho Yi · Hyun-Sung Lim · Sung-Koo Cho)

**Abstract** - A large-capacity wireless power system is a technology that transmits electric power of kW or more in a noncontact type. Electric cars, electric buses, and electric railways. In order to increase the power transmission efficiency, a resonance method using a frequency of kHz is applied and the efficiency is 80~90%. In this case, the loss is 10~20% other than efficiency, and corresponds to several hundreds of W to several kW in kW class wireless power transmission. 35 kW wireless feed system environment, and induced current in the nearby conductive part was measured. As a result of analysis, it was confirmed that induction phenomenon is higher as the loop configuration of the conductive part per area is dense. The increase of the induced current in the mesh loop is characterized by the density of the nearby conductive part having a permeability per unit area. The concentration of the magnetic field by the permeability is increased and the induction phenomenon causing the induction current is increased. It was confirmed that induction phenomenon increases by about 2.7 times when 9 times dense structure is formed.

**Key Words** : - Wireless Power Transfer(WPT), Induction current, Permeability, Mesh structure

### 1. 서 론

무선전력전송 기술은 미래 유망기술로 포함되어, 상용화될 경우 큰 파급효과를 예상할 수 있다. 자기공진 방식 적용에 따른 기술적인 발전으로 전송효율과 이격거리가 증가된 무선전력전송이 가능하게 하였다. 이를 통하여 기존 유선전력전송 환경에서 발생할 수 있는 반복적인 접촉에 대한 유지보수 문제, 전력선 단락으로 인한 감전사고 문제를 해결할 수 있게 되었다.

이와 같이 무선전력전송은 기존 전력전송 환경의 문제를 개선하는데 적용되고 있으며, 특히 자유도가 요구되는 동적 상태의 부하에 전력을 공급하는 수요가 증가하고 있다. 전동차, 휴대폰 등 W 급 소용량 무선전력전송을 시작으로 용량 증가에 대한 문제가 해결됨에 따라 전기차, 전기버스, 전기철도 등 전기수송설비와 같은 kW 급 이상의 부하까지도 적용범위를 넓혀가고 있다. 최근 전기차 확산에 문제가 되고 있는 충전시간 문제를 해결하기 위한 방안으로 상시충전이 가능한 무선전력전송 기술이 고려되고 있다.

다양한 분야 적용을 위하여 효율개선 및 충전용량 증가 등 기술발전이 이루어지고 있지만, 비접촉 전력전송이라는 특성에 따라 10~20%의 손실은 불가피 하게 발생하고 있다. 특히, 전력전송 용량 증가에 따라 손실의 영향도 증가하게 된다. uW 급 에너

지를 사용하는 무선통신의 경우 손실이 크더라도 인근에 미치는 영향이 적으나, kW 급 에너지를 사용하는 무선전력전송의 경우 10%의 손실도 수백 W 에서 수 kW 크기로 인근에 미치는 영향이 크다. 따라서, kW 급 이상의 대용량 무선전력전송의 경우 인근에 미치는 영향 분석이 필수적이며, 전자기적 특성에 기반하여 도전성이 높은 물질에 대한 위해현상 도출이 필요하다. 본 논문에서는 무선전력전송 인근의 주요 도전부인 도로 하부에 존재하는 메쉬구조 철근의 위해성에 대해서 분석하였다[1].

무선전력전송 환경의 경우 급전부의 전력인버터로부터 상용전원이 kHz 주파수의 수백 A 전류로 변환되고, 이것이 급전케이블을 따라 흐르게 된다. kW 급 이상의 대용량 무선전력전송의 경우 전기자동차, 전기버스, 전기철도 등 대부분 도로에서 전력전송이 일어나게 되고 이를 위한 급전케이블은 도로에 위치하게 된다. 도로는 하중을 견디기 위하여 내부에 철근이 위치하게 되고 이것이 무선전력전송 환경에서 주요 도전부 역할을 하게 된다. 철근은 구조적 안정성을 확보하기 위하여 격자형태의 메쉬구조로 존재하며 이것이 페루프 역할을 하여 자기장의 영향을 받아 철근에 유도전류를 형성시킨다.

### 2. 시스템 구성

#### 2.1 무선전력전송 환경

무선전력전송을 위한 시스템 구성도를 그림 1에 도시하였다. 무선전력전송은 전력인버터, 급전케이블, 공진형 캐패시터 등으로

\* Corresponding Author : Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation, Korea.  
E-mail: chaedju@kesco.or.kr

\* Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation, Korea.

Received : October 29, 2018; Accepted : December 05, 2018

구성된 급전부에서 전력을 송신하며, 픽업코일 정류기 등으로 구성된 집전부에서 전력을 수신하는 형태로 구성된다. 손실은 급전부에서 집전부로 전달되는 무선전력전송 에너지 이외에, 인근 도전부에 에너지가 공급되며 발생한다. 인근 도전부는 무선 급·집전이 일어나는 주변에 위치한 도전성을 갖는 도체로 유도현상이 발생할 수 있는 곳이며 통상적으로 급전부 하단의 철근구조가 이에 해당하게 된다.

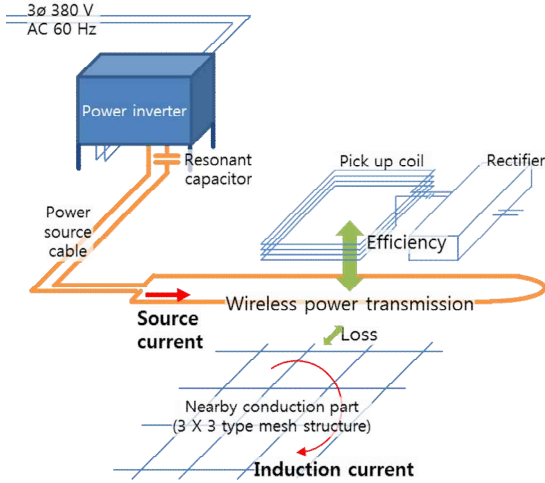


그림 1 무선전력전송 시스템 모식도  
Fig. 1 Schematic for wireless power transfer system

효율이 높을수록 손실과 위해성은 감소하나, 현재 무선전력전송 환경에서는 효율의 한계와 대용량 전송이라는 문제로 인하여 손실의 절대적인 값이 수백 W~수 kW로 인근에 전기적 열적 위해성을 유발시킬 수 있는 수준이다. 무선전력전송 효율의 수식적 계산은 입력측 전력 대비 출력측 전력으로 산출할 수 있다.  $I_1 V_1$ 은 급전부에 흐르는 전류와 전압 값이며,  $I_2$ 는 집전부에 흐르는 전류값이다.  $R_L$ 은 집전부 2차측의 부하,  $R_1$ 과  $R_2$ 는 급전부, 집전부 케이블 저항에 해당한다.

$$\eta = \frac{I_2^2 R_L}{I_1 V_1}$$

위 수식에 키르히호프 법칙과 공진상태를 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다[2].

$$\eta = \frac{1}{1 + \left( \frac{R_1 + R_L}{\omega M} \right)^2 \frac{R_1}{R_L} + \frac{R_2}{R_L}}$$

위 수식을 통하여, 효율은 공진주파수 ( $\omega$ )와 상호 인덕턴스 ( $M$ )가 증가할수록 좋아지며, 케이블 저항 값( $R_1, R_2$ )이 적을수록 증가한다.

상호 인덕턴스, 케이블 저항의 변화는 물질으로 변경이 어려우며, 주파수 증가가 현실적인 효율 향상 방법이다. 하지만 대용량

의 전류를 빠른 속도로 스위칭하기 위해서는 전력인버터의 방열 문제로 인하여 주파수를 증가시키는데 한계가 있다. 또한 국가별로 주파수가 할당되므로, 무선전력전송을 위한 주파수 결정을 위해서는 다양한 검토가 필요하다. 현재 효율 향상과 전력인버터 방열 용량을 고려하여 kW 급 이상의 무선전력전송 환경에는 20 kHz, 60 kHz, 85 kHz 등의 주파수가 사용되고 있고, 본 논문에서는 60 kHz 주파수를 적용하여 실험을 수행하였다.

## 2.2 유도현상

공진현상이 효율을 증가시키지만, 식2에 의해 효율이 100%일 수 없으며 손실이 발생하게 된다. 손실분은 인근 환경에 영향을 미치게 되며, 특히 투자율을 갖는 도전부에 영향을 미치게 된다. 인근 도전부는 공진현상이 발생하지 않으므로, 유도현상에 의해 전기적, 열적 영향을 받게 된다[3].

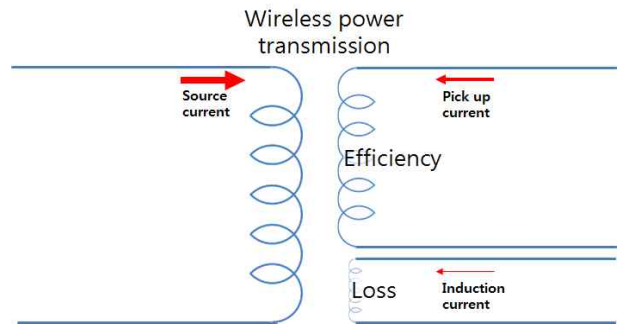


그림 2 무선전력전송 환경 효율과 손실에 대한 모식도  
Fig. 2 Schematic for efficiency and loss of wireless power transfer environment

유도전류는 유도기전력에 의해 발생되며, 유도기전력은  $E = -N \frac{d(B \cdot A)}{dt}$  ( $E = -N \frac{d\Phi}{dt}$ ,  $\Phi = B \cdot A$ )으로 결정되며, 유도전류는 투자율( $\mu$ ), 자기선속 ( $\Phi$ ), 자속밀도( $B$ ), 자기장의 면적 ( $A$ )에 영향을 받게 된다[4,5]. 유도전류는 루프가 형성될 때 자기장의 입사면에 수직인 면적을 갖음으로써 유도전류를 발생시키는 특성을 갖는다. 루프의 면적과 자속밀도에 의해 자기선속이 결정되어 유도전류가 발생한다. 단위면적당 루프의 수가 증가될 때, 루프의 수가 많아지더라도 단위면적은 동일하여 이론적으로는 자기선속이 동일하게 나타나지만, 투자율이 높은 물질에 의해 루프가 형성될 경우, 단위면적 안의 자속밀도 ( $B = \mu \cdot H$ ,  $\mu$ : 투자율)가 증가하여 자기선속이 증가하며 유도전류도 증가하게 된다[6].

## 3. 실험 설계

### 3.1 유도 현상 실험 설계

대용량 무선전력전송 환경을 구현하기 위하여, IEC 61980-1

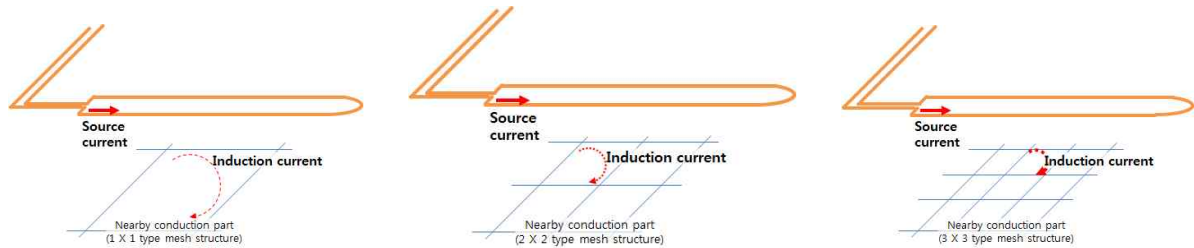


그림 3 다양한 메쉬구조 형상 (1 × 1, 2 × 2, 3 × 3 타입의 메쉬구조)  
 Fig. 3 Various type of mesh structure (1 × 1, 2 × 2, 3 × 3 type)

의 용량 분류에 의해 Heavy duty-WPT 4급인 35 kW급 실증 환경에서 실험을 수행하였다.

전력인버터에서 발생한 60 kHz 주파수의 500 A 전류가 급전케이블을 통해 흐르게 되고 급전케이블 상부에 위치한 집전부로 공진현상을 통해 무선전력전송이 일어나게 된다. 상호 인덕턴스, 케이블 저항 등에 의하여 손실이 발생하게 되고, 전송의 손실분 주변으로 전자기장 형태로 영향을 주어, 도전체에 유도기전력을 형성하게 된다. 유도기전력 차이가 발생하고, 페루프가 구성된 경우 유도전류가 흐르게 된다.

무선전력전송 유도현상 실험을 위해 급전부는 35 kW 급으로 설계하였으며, 급전케이블에 500 A와 70 V 전압을 공급하였다. 공진주파수를 위한 인덕턴스와 캐패시턴스 값을 결정하기 위하여, 급전케이블간 0.24 m의 이격거리를 두었다. 집전부 픽업코일에는 425 V와 80 A의 전압과 전류가 형성되며 정류기를 지나 모의부하를 통해 전력이 소모된다.

인근 도전부로의 유도현상을 실험하기 위하여 기준이 되는 페루프를 설계하였다. 실제 산업현장에서 주로 쓰이는 22 d 굵기의 철근을 대상으로 하였고, 길이는 1 m, 저항은 0.84Ω이었다. 1 m×1 m 사이즈로 페루프를 구성하여 실험을 수행하였다. 그림 3과 같이 페루프 내부의 메쉬구조를 설계하여, 각각 구성에 따른 유도전류를 측정하였다[7].

### 3.2 메쉬구조 실험 설계

콘크리트 구성 시 부피변화에 의한 균열 문제 해결과 인장력 보안을 위하여 메쉬구조 철근을 넣는다. 대부분의 콘크리트 구조물 내부에는 철근이 메쉬구조로 존재하며, 이는 무선전력전송시 주요 도전부 역할을 하게 된다. 메쉬구조의 경우 급전케이블과 평행한 부분들과 수직인 부분들로 나뉘는데 평행한 부분들은 급전케이블과 각각 다른 이격거리를 갖게 되어 유도기전력이 다르게 발생하고, 이것이 와이어 등으로 접촉될 때 유도전류를 형성할 수 있게 된다. 동일 면적당 메쉬의 갯수가 많아질수록 유도전류의 영향을 커지게 되고, 이것이 전기적 위해 문제를 일으키게 된다[8,9].

이와 같은 문제를 분석하기 위하여, 1 m × 1 m 사이즈의 단위 면적을 설정하였고, 그림 3과 같이 이 안에 1 × 1, 2 × 2, 3 × 3 구조의 메쉬를 설계하여 실험을 수행하였다. 22 d, 1 m, 0.84 Ω 특성을 갖는 철근을 사용하였다. 1 × 1에서는 선간 저항이 0.84

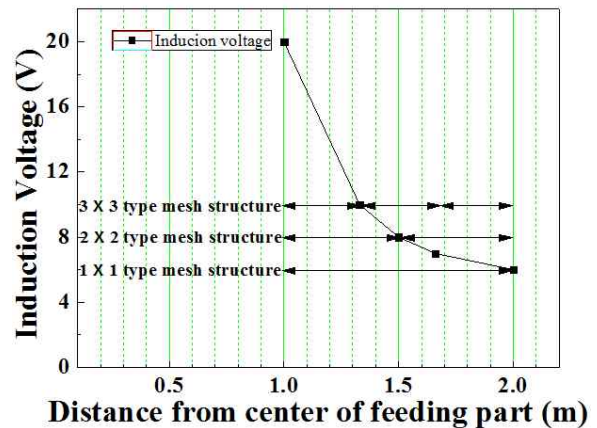


그림 4 거리에 따른 유도전압 차이 확인  
 Fig. 4 Examination of induced voltage difference by distance  
 Ω이며, 2 × 2에서는 선간 저항이 0.42 Ω이며, 3 × 3에서는 선간 저항이 0.28 Ω이다.

### 3.3 시뮬레이션

유도현상에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 P-spice 프로그램 사용하였다. 유도 현상에 대한 조건 설정을 위해 메쉬구조가 위치하는 구간의 유도전압 측정 실험을 수행하였고 그림 4의 결과를 적용하였다. 1 × 1 구조를 적용하기 위하여 급전부 중심으로부터 이격거리가 1 m와 2 m인 곳에서의 전압을 측정하였다. 2 × 2 구조를 적용하기 위해서 1 m, 1.5 m, 2.0 m인 곳에서의 전압을 측정하였다. 3 × 3 구조를 적용하기 위해서 1 m, 1.3 m, 1.6 m, 2.0 m인 곳에서의 전압을 측정하였다. 1 m 이격거리에서 20 V, 1.3 m 이격거리에서 10 V, 1.5 m 이격거리에서 8 V, 1.6 m 이격거리에서 7 V, 2 m 이격거리에서 6 V의 결과를 얻었다. 유도 현상은 거리에 따라 크기가 급격히 감소함을 확인할 수 있었고 유도 기전력 결과를 확인하여 시뮬레이션에 수행하였다.

시뮬레이션 결과 1 × 1 구조에서 유도전류를 확인하기 위하여 급전부 중심으로부터 1 m 이격거리에서 20 V와 2 m 이격거리에서 6V의 유도전압을 적용하고 저항은 철근의 단위구간인 0.84 Ω을 적용하여 시뮬레이션하였다. 그림 5와 같이, 메쉬는 1개가 형성되었고 여기에 8.4 A의 유도전류가 모의되었다.

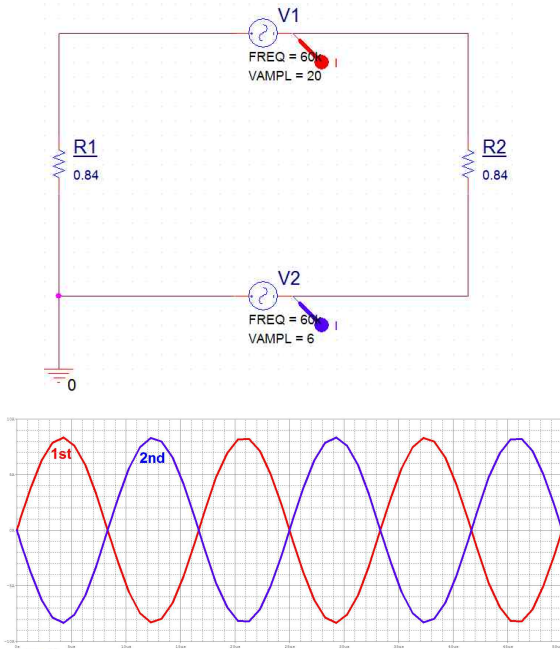


그림 5 1×1 구조 모의를 위한 회로와 결과 값  
 Fig. 5 Circuits and results for 1×1 structure simulation

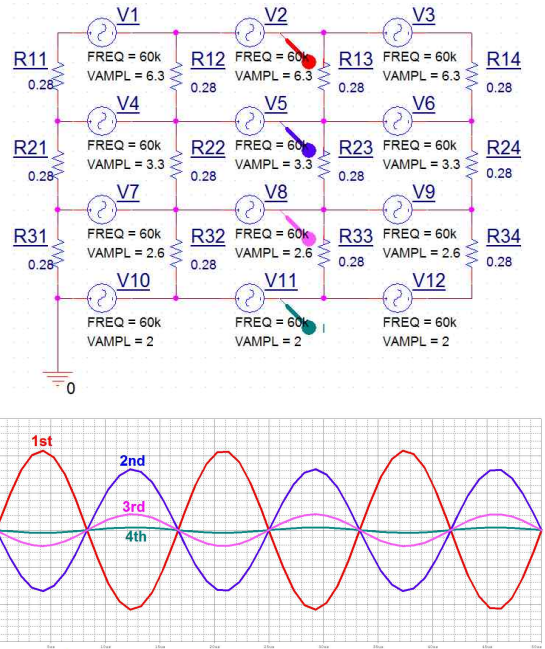


그림 7 3×3 구조 모의를 위한 회로와 결과 값  
 Fig. 7 Circuits and results for 3×3 structure simulation

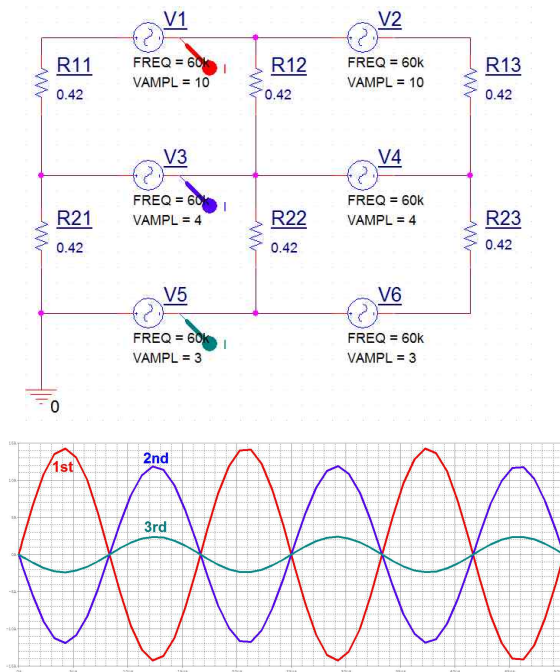


그림 6 2×2 구조 모의를 위한 회로와 결과 값  
 Fig. 6 Circuits and results for 2×2 structure simulation

시뮬레이션 결과 2×2 구조에서 유도전류를 확인하기 위하여 1 m 이격거리에서 20 V, 1.5 m 이격거리에서 8 V 와 2 m 이격거리에서 6 V 유도전압을 적용하고 저항은 철근의 단위구간당 절

표 1 메쉬구조에 따른 전기적 특성 분석 (시뮬레이션)  
 Table 1 Analysis of electrical characteristics according to mesh structure (simulation)

구조	단위 메쉬 사이즈	유도기전력	유도전류 (시뮬레이션 결과)
1×1	1m×1m	20V/6V	8.4A
2×2	0.5m×0.5m	20V/8V/6V	14.5A/12A/2.5A
3×3	0.33m×0.33m	20V/10V/7V/6V	20.8A/16A/4A/1A

반인 0.42Ω을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 6과 같이, 메쉬는 2개가 형성되었고 여기에 14.5 A, 12 A, 2.5 A의 유도전류가 모의되었다.

시뮬레이션 결과 3×3 구조에서 유도전류를 확인하기 위하여 1 m 이격거리에서 20 V, 1.3 m 이격거리에서 10 V, 1.6 m 이격거리에서 7V와 2 m 이격거리에서 6 V 유도전압을 적용하고 저항은 철근의 단위구간당 1/3인 0.28 Ω을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 6과 같이, 메쉬는 3개가 형성되었고, 여기에 20.8 A, 16 A, 4 A, 1 A의 유도전류가 모의되었다.

표 1에 시뮬레이션 결과를 정리하였고, 실험결과와 비교 참고 데이터로 사용하였다.

#### 4. 실험 분석

단위 면적당 메쉬구조에 따른 영향을 확인하기 위하여 기본이 되는 유도현상 조건을 설정하였다. 35 kW 급의 500 A 급전 전류



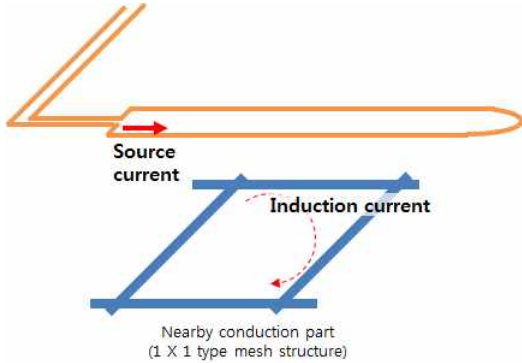


그림 8 1×1 구조 실증실험을 위한 실험 모식도  
 Fig. 8 Schematic for 1×1 structural demonstration experiment

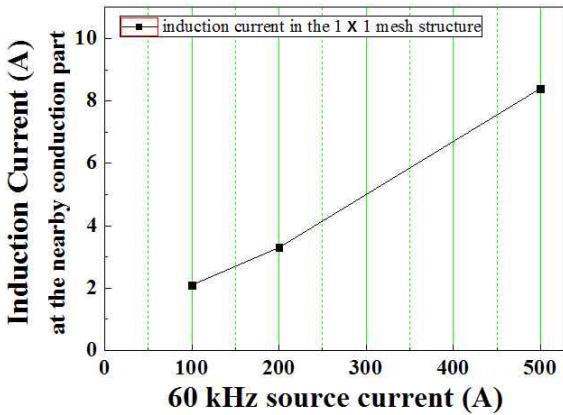


그림 9 1×1 구조 실증실험 결과  
 Fig. 9 Result for 2×2 structural demonstration experiment

조건으로 하였고, 집전부 중심 기준 (x축, y축)=(0.0 m, 1.0 m) 위치에서 측정하였고, 페루프는 22d 단면적, 1m 길이 철근 두 개를 1m 이격거리를 갖는 구조로 설계하였다. 메쉬구조에 따른 유도전류 크기를 측정하였다.

#### 4.1 메쉬구조(1×1) 철근에 미치는 유도전류 분석

급전케이블 중심부와 페루프 사이는 1.0 m 이격되어 있고, 1.2 m의 집전부 폭을 고려할 때, 반쪽인 0.6 m 이외의 부분에 해당하는 집전부와 페루프 사이는 0.4 m 이격되어 있다. 급전전류는 100 A, 200 A, 500 A 조건이며, 1×1 구조 메쉬구조를 갖는 인근 도전부에 흐르는 유도전류를 측정하였다[10,11].

그림 9와 같이 1×1 메쉬구조 페루프에 흐르는 전류는 급전전류가 500 A일 때 8.1 A가 측정되었다. 급전전류가 100 A일 때 유도전류가 1.9 A, 급전전류가 200 A일 때 유도전류가 3.1 A 흐르는 것을 확인하여, 유도현상이 급전전류에 비례한다는 것을 확인할 수 있었다. 급전전류 500 A 조건에서 시뮬레이션 값인 8.4 A 인 값과 96 % 일치하였고, 오차는 실제조건에서 철근과 철근사이 접속부 저항 발생에 의한 것으로 판단된다.

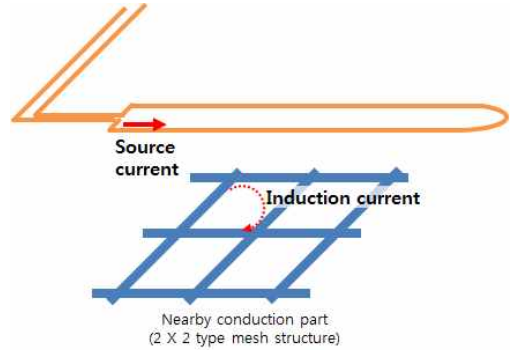


그림 10 2×2 구조 실증실험을 위한 실험 모식도  
 Fig. 10 Schematic for 2×2 structural demonstration experiment

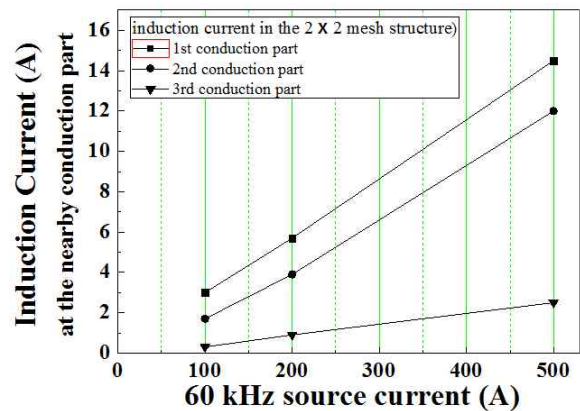


그림 11 2×2 구조 실증실험 결과  
 Fig. 11 Result for 2×2 structural demonstration experiment

#### 4.2 메쉬구조(2×2) 철근에 미치는 유도전류 분석

급전케이블 중심부와 페루프 사이는 1.0 m 이격되어 있고, 급전전류는 100 A, 200 A, 500 A 조건이며, 2×2 구조 메쉬구조를 갖는 인근 도전부에 흐르는 유도전류를 측정하였다.

그림 11과 같이 2×2 메쉬구조 페루프에 흐르는 전류는 급전케이블과 가까운 첫번째 도전부에서 급전전류가 500 A일 때 14.1 A가 측정되었다. 급전전류가 100 A일 때 유도전류가 3.0 A, 급전전류가 200 A일 때 유도전류가 5.5 A 흐르는 것을 확인하였다. 두번째 도전부에서 급전전류가 500 A일 때 11.7 A가 측정되었다. 급전전류가 100 A일 때 유도전류가 1.7 A, 급전전류가 200 A일 때 유도전류가 3.7 A 흐르는 것을 확인하였다. 세번째 도전부에서 급전전류가 500 A일 때 2.2 A가 측정되었다. 급전전류가 100 A일 때 유도전류가 0.3 A, 급전전류가 200 A일 때 유도전류가 0.7 A 흐르는 것을 확인하였다. 급전전류 500 A 조건에서 시뮬레이션 값인 14.5 A와 실제 측정 결과가 14.1 A로 97 % 일치하였고, 오차는 실제조건에서 철근과 철근사이 접속부 저항 발생에 의한 것으로 판단된다.

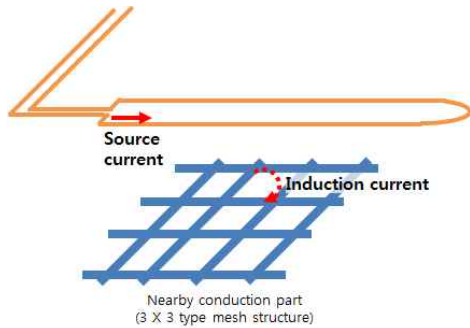


그림 12 3×3 구조 실증실험을 위한 실험 모식도  
 Fig. 12 Schematic for 3×3 structural demonstration experiment

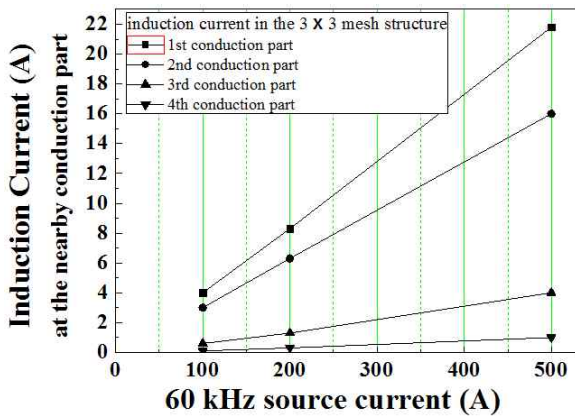


그림 13 3×3 구조 실증실험 결과  
 Fig. 13 Result for 2×2 structural demonstration experiment

실험결과에 따라 도전부가 급전전류가 흐르는 케이블과 가까울수록 유도전류가 증가하고, 유도현상이 급전전류에 비례한다는 것을 확인할 수 있었다. 1×1 구조보다 유도전류가 증가한 이유는 투자율 영향으로 분석되었다. 4개의 단위면적이 각각 1/4배 되어 전체 단위면적은 동일하나, 메쉬구조 사이에 존재하는 철근 구조가 높은 투자율을 갖음으로써 자기장이 밀집되어, 더 많은 자기선속을 유도하게 된다. 결론적으로 유도전류의 증가를 확인할 수 있었다.

### 4.3 메쉬구조(3×3) 철근에 미치는 유도전류 분석

급전케이블 중심부와 페루프 사이는 1.0 m 이격되어 있고, 급전전류는 100 A, 200 A, 500 A 조건이며, 3×3 구조 메쉬구조를 갖는 인근 도전부에 흐르는 유도전류를 측정하였다.

그림 13과 같이 3×3 메쉬구조 페루프에 흐르는 전류는 급전 케이블과 가까운 첫 번째 도전부에서 급전전류가 500 A일 때 20.3 A가 측정되었다. 급전전류가 100 A일 때 유도전류가 4.0 A, 급전전류가 200 A일 때 유도전류가 8.1 A 흐르는 것을 확인하였다. 두 번째 도전부에서 급전전류가 500 A일 때 15.3 A가 측정되었다. 급전전류가 100 A일 때 유도전류가 3.0 A, 급전전류가 200

A일 때 유도전류가 5.9 A 흐르는 것을 확인하였다. 세번째 도전부에서 급전전류가 500 A일 때 3.7 A가 측정되었다. 급전전류가 100 A일 때 유도전류가 0.6 A, 급전전류가 200 A일 때 유도전류가 1.3 A 흐르는 것을 확인하였다. 네번째 도전부에서 급전전류가 500 A일 때 0.9 A가 측정되었다. 급전전류가 100 A일 때 유도전류가 0.1 A, 급전전류가 200 A일 때 유도전류가 0.3 A 흐르는 것을 확인하였다. 급전전류 500 A 조건에서 시뮬레이션 값인 20.8 A와 실제 측정 결과가 20.3 A로 98 % 일치하였고, 오차는 실제조건에서 철근과 철근사이 접속부 저항 발생에 의한 것으로 판단 된다.

실험결과에 따라 도전부가 급전케이블과 가까울수록 유도전류가 증가하고, 유도현상이 급전전류에 비례한다는 것을 확인할 수 있었다. 1×1 구조보다 유도전류가 증가한 이유는 투자율 영향으로 분석되었다. 9개의 단위면적이 각각 1/9배 되어 전체 단위면적은 동일하나, 메쉬구조 사이에 존재하는 철근구조가 높은 투자율을 갖음으로써 자기장이 밀집된다. 단위면적에 더 많은 자기선속을 유도하게 되어 도전부에 흐르는 유도전류가 증가함을 확인할 수 있다.

표 2에 실증실험 결과를 구조별로 정리하였다. 시뮬레이션 결과와 실증실험결과가 2~4 % 오차 범위로 확인되었으며, 오차는 실증실험에서 메쉬구조 접속부의 저항값 증가에 따른 차이로 분석된다.

표 2 메쉬구조에 따른 전기적 특성 분석 (실증실험)

Table 2 Analysis of electrical characteristics according to mesh structure (demonstration experiment)

구조	단위 메쉬 사이즈	유도기전력	유도전류 (실증실험)
1×1	1m×1m	20V/6V	8.1A
2×2	0.5m×0.5m	20V/8V/6V	14.1A, 11.7A, 2.2A
3×3	0.33m×0.33m	20V/10V/7V/6V	20.3A/15.3A/3.7A/0.9A

## 5. 결 론

본 연구는 무선전력전송 환경에서 발생하는 유도현상이 인근 도전부로 미치는 영향을 분석하였다. 급전부가 위치하는 콘크리트 하부에 존재하는 메쉬구조 철근을 인근 도전부로 가정하였다. 메쉬구조 철근은 안정성 향상에 도움이 되지만, 페루프 형태로 유도전류를 발생시켜 전기적 위태상황을 발생시킬 수 있다. 특히, 밀집된 구조일수록 단위면적당 투자율을 갖는 비율이 높아져서 유도현상 발생이 증가된다.

P-spice를 통하여 시뮬레이션을 수행하였다. 500 A 급전전류 환경을 기준으로, 1×1 구조는 최대 8.4 A, 2×2 구조는 최대 14.5 A, 3×3 구조는 최대 20.8 A의 유도전류가 측정되었다. 유도전류는 급전케이블로부터 동심원 형태로 발생하는 자기장이 수직으로 입사하는 페루프의 면적에 영향을 받는다. 본 실험에서는

단위면적을 설정하여 페루프의 면적은 동일하나,  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  구조를 적용함으로써 면적을 분할하였다. 투자율이 없는 물질로 분할시 전체적인 유도현상은 동일하나, 투자율이 있는 물질로 분할시킬 경우, 투자율 영향으로 분할된 영역 주변으로 자기장이 증가하게 되어, 유도현상이 증가하게 된다. 결국 투자율이 높은 물질이 밀집되면 단위면적당 자기장 형성이 많아져 유도전류가 증가하게 된다.

35 kW 급 무선전력전송 환경에서 실험을 수행하였다. 급전케이블에 60 kHz, 500 A 급전전류를 투입하였다. 유도현상을 만들기 위하여 급전케이블 중심부로부터 1 m 이격된 거리에서 페루프를 구성하였다. 페루프는 실제 현장에서 많이 사용되는 22 d 철근을 사용하였으며,  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  단위면적당  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  형태의 페루프를 형성시켰다.  $1 \times 1$  구조는 최대 8.1 A,  $2 \times 2$  구조는 최대 14.1 A,  $3 \times 3$  구조는 최대 20.3 A의 유도전류가 실측되었다. 이는 시뮬레이션 결과와 유사한 양상을 보였다. 단위면적당 1개의 페루프보다 4개의 페루프가 있는 상황에서 유도전류가 1.9배 증가하였고, 9개의 페루프가 있는 상황에서 유도전류가 2.7배 증가하여, 단위면적당 투자율을 갖는 도전체가 차지하는 비중이 높을수록 영향력이 증가함을 확인할 수 있었다.

이와같은 유도전류는 실제현장에서 콘크리트 하부에서 존재하면서, 접지를 통한 노이즈로서의 영향, 침수시 인축에 전기적 위해를 미치는 등 인근 전력설비 및 인축에 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 잠재적인 영향은 밀집된 구조일수록 위해성이 높아짐을 확인할 수 있다. 무선전력전송 환경에서 급전부가 위치하는 도로 하부의 메쉬구조 복잡도 증가가 전기적 위해성 증가에 영향이 있으므로, 구조적-전기적 상호 관계를 고려한 설계가 필요하다.

**감사의 글**

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(과제번호 18RTRP-B097066-04)에 의해 수행되었습니다.

**References**

[1] Chen, S Liu, "An Optimizable Circuit Structure for High-Efficiency Wireless Power Transfer", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 1, pp. 339, 2013.  
 [2] Jae Hee Kim, "Development of 1-MW inductive Power Transfer System for a High-Speed Train", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 10, pp. 6242, 2015.  
 [3] H. W. Ott, *Electromagnetic compatibility engineering*, John Wiley & Sons, 2011.  
 [4] J.T. Boys, G.A. Covic, and A.W. Green, "Stability and control of inductively coupled power transfer systems",

*IET Electr. Power Appl.*, vol.147, No. 1, pp. 37-43, 2000.  
 [5] Daun Ryu, "Performance Measurement of the Wireless Charging Devices Using Electromagnetic Induction Techniques" *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 19, No. 3, pp. 237-243, 2015.  
 [6] Suh, In-Soo, "Intelligent Wireless EV Fast Charging with SMFIR. Technology" *Journal of Integrated Design and Process Science*, Vol. 15, No. 3, pp. 3-12, 2011.  
 [7] Dong-Ju Chae, "Study for Human body protection method caused by induction effect in the wireless power transfer environment" *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 31, No. 2, pp. 1-9, 2017.  
 [8] Kyung Choi, "A survey of electromagnetic shielding effect of tunnel and bridge structure in the high speed electrified railway to telecommunication line", *CICS'12*, 484, 2012.  
 [9] Xi Nan, "An equivalent complex permeability model for litz-wire windings", *Industry Applications Conference*, Vol. 3, pp. 2229  
 [10] Cazenave, Lions, "Orbital stability of standing waves for some nonlinear Schrodinger equations", *Communications in Mathematical Physics*, Vol. 85, No. 4, pp. 549.  
 [11] Joon-Hyun Lee, "Finite Element Analysis for Eddy Current Signal of Aluminum Plate with Surface Breaking Crack", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 10, pp. 1336, 2005

**저 자 소 개**



**채 동 주 (Dong-Ju Chae)**

1981년 7월 27일생. 2008년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2011년 동 대학원 전기전자전파공학과 졸업(석사). 2014년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 주임연구원.



**이 건 호 (Geon-Ho Yi)**

1971년 3월 1일생. 1999년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 2001년 한양대학교 대학원 기전공학과 졸업(석사). 2001년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원.



**임 현 성 (Hyun-Sung Lim)**

1981년 2월 18일생. 2006년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년 전북대학교 IT응용시스템공학과 수료(박사). 2009년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.



**조 성 구 (Sung-Koo Cho)**

1983년 1월 3일생. 2009년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 주임연구원.