

대용량 무선전력전송 환경 유도현상 감쇄를 위한 차폐 특성 분석

Analysis of Shielding Characteristics for Induction Phenomenon Attenuation of Large Capacity Wireless Power Transmission Environment

채 동 주* · 김 영 석* · 정 진 수* · 임 현 성* · 조 성 구* · 홍 성 준*

(Dong-Ju Chae · Young-Seok Kim · Jin-Soo Jung · Hyun-Sung Lim · Sung-Koo Cho · Seong-Jun Hong)

Abstract - As the capacity of the wireless power transmission increases, a higher supply current which may induce current in nearby conductive parts requires. Induced current may affect electric shock to the human body and malfunction of the electrical equipment. In order to prevent such induced phenomena as a risk factor, shielding is required between the source of the wireless power transmission and the conductive parts. The resonance frequency for the large capacity wireless power transmission has the wavelength of several hundred meters, so most environments are included in the near-field area. By wave impedance, the electric field has higher density in the near-field area and needs to be analyze for protecting. For this purpose, it is necessary to select a substance having a larger electric conductivity and optimized shielding structure. In this paper, an aluminum base shielding structure was presented to conduct experiments on thickness, position, and heat dissipation. In the 35 kW, 60 kHz environments, the optimized 5T Al base shielding structure attenuates the induced current to 43 %.

Key Words : Wireless Power Transfer(WPT), Induction current, Metal shielding, Electrical conductivity

1. 서 론

무선 환경에 안정적인 전력 공급을 위한 방법으로 무선전력전송 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 기존 무선 전기기기들은 배터리의 주기적인 충·방전을 통하여 전력 공급이 가능하였으나, 충전시간과 같은 시간적 제약, 특정 위치에 존재하는 전원공급장치와 같은 공간적 제약 문제를 해결하고자하는 요구가 높아짐에 따라 저장 기술의 한계가 나타나고 있다. 이에 따라 상시 전력공급이 가능하며 공간적 활용도가 높고 방수·방진 등 유지관리가 용이하여 전기기기의 내구성 향상 등의 장점이 있는 무선전력전송 기술이 차세대 전력 공급방식으로 활발히 연구되고 있다. 특히 공진 방식을 통한 거리적 제약의 문제를 개선함으로써 활용분야를 급속히 늘려가고 있다[1].

최근 무선전력전송 기술 중 특정 공진주파수를 이용한 자기공진 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자기공진 방식의 경우 공진주파수에 따라 전력 전송 밀도 및 효율 제어가 가능함에 따라 kW 이상의 전력까지도 전송시킬 수 있으며, 최근 1 MW 급 대전력도 무선으로 공급할 수 있는 시스템이 개발되었다. 또한 기존 자기유도방식의 경우 효율문제로 접촉식에 가까웠으나

자기공진방식의 경우 수십 cm까지 이격이 가능한 비접촉방식으로 공간적 자유도를 충분히 확보할 수 있는 장점이 있다. 이를 활용하여, 최근 전기차 확산과 더불어 무선충전 자동차, 버스, 철도 등과 같은 대용량 무선전력전송에 대한 연구개발이 관심이 높아지고 있다.

하지만, 전자기장 환경을 이용한 무선전력전송 기술에 대한 안전적 요소에 대한 연구가 부족한 실정이며, 위해현상 도출 및 이를 보호하기 위한 방안 제시가 필요하다. 기존 신호 중심의 무선통신에서 고려한 전자파 적합성(EMC, Electro Magnetic Compatibility), 전자기 장애(EMI, Electro Magnetic Interference) 등과 더불어, 에너지를 전달하는 대전류 환경의 무선전력전송의 경우 유도전류, 유도과열 과 같은 유도현상에 대한 추가적인 검토가 필요하며, 대용량화가 될수록 이에 대한 중요성은 높아지고 있다. 유도현상의 위해성 분석 및 보호기술인 차폐의 유효성 검토에 대한 실험을 진행하였고 특히, 위치에 민감한 특성을 고려하여 기준을 설정하여 실험을 진행하였다.

2. 무선전력전송 환경 특성 분석

2.1. 유도현상 발생 원인 및 특성

무선전력전송 최대 전력전달 용량 결정을 하는데, 식 (1)과 같이 급전부 송신 코일의 전류와 송신 코일 전류의 각주파수가 중요한 요소이다[2].

† 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 19, 2017; Accepted : November 13, 2017

$$P = w |I_p|^2 \frac{M^2}{L_s} Q_{L,sec} \quad (1)$$

(P : 최대전력전달 용량, ω : 송신 코일 전류의 각주파수, I_p : 송신 코일 전류, $Q_{L,sec}$: 수신측 Q 인자, M : L_p, L_s 상호인덕턴스, L_s : 집전부 인덕턴스)

송신 코일 전류의 경우, 인근 도전부로 동심원 형태의 자기장을 발생시켜 유도현상이 일어나는데 직접적인 영향을 준다. 무선전력전송의 용량이 증가할수록 송신 코일에 높은 전류가 필요하고 이를 위한 케이블 단면 지름이 증가하게 된다. 단면 지름 증가는 송신 코일의 곡률 반경을 증가시켜 케이블 턴 수에 제한을 두게되고 직선형태가 우세하게 된다. 따라서 무선전력전송 송신 코일 인근의 유도기전력은 식 (2)와 같이 직선전류에 의한 자기장 유도수식이 반영된 전류에 비례하는 형태를 띠게 된다[3].

$$E = -N \frac{d}{dt} (k \frac{I}{r} \cdot A) \quad (2)$$

(N : 단위미터 당 턴 수 N, t : 단위시간, ϕ : 자기선속, I : 송전 전류, r : 이격 거리, A : 단면적)

용량 증가에 따라 급전부에 흐르는 전류가 증가하게 되고, 이것이 유도현상을 증가시키는 원인이 된다.

유도현상은 비오사바르의 법칙에 따라 전류원과 인근 도전부 사이의 이격거리에 민감하게 영향을 받는다. 송신 코일인 급전케이블에 전류만 공급하는 경우인 무부하 상태에서는 전류 자체로 인한 유도현상만 발생하게 되고 이것은 거리의 제곱에 반비례하여 크기가 감소하는 특성을 보인다. 전력을 수신받는 집전부가 설치된 부하 상태인 경우 전류 자체로 인한 유도현상과 더불어 무선전력전송의 손실분이 더해지게 된다. 손실분은 대부분 전자기장 형태로 인근 도전부에 유도현상으로 영향을 미치고, 일부 코로나 방전 등으로 빛이나 소리 형태로도 나타나게 된다[4].

유도현상은 무선전력전송의 효율 이외의 손실분에 의해서 급

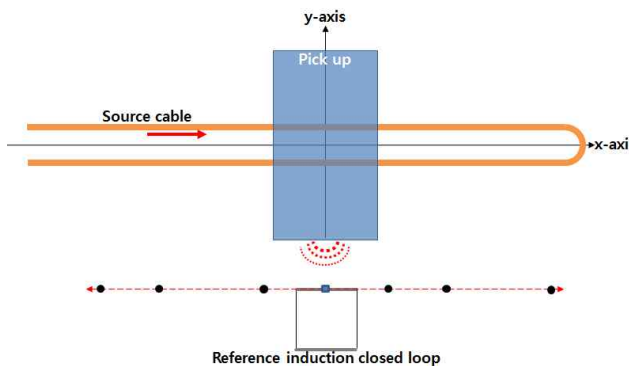


그림 1 급전케이블과 집전부 위치에 따른 다양한 유도전류 측정 지점

Fig. 1 Various induction current measuring points according to source cable and pick up position

전부와 집전부 사이에 집중되어 나타나게 되며, 집전부와 일정영역 이격된 공간에서는 무부하 상태와 유사한 정도의 영향을 나타낸다. 그림 1의 경우 급전케이블과 집전부 교차점을 중심으로 x축과 y축을 설정하고 각각의 위치에 따른 유도전류를 확인하였다. 또한 집전부의 pick up 이 위치한 부하 상태와 위치하지 않은 무부하 상태를 구분하여 측정하였다.

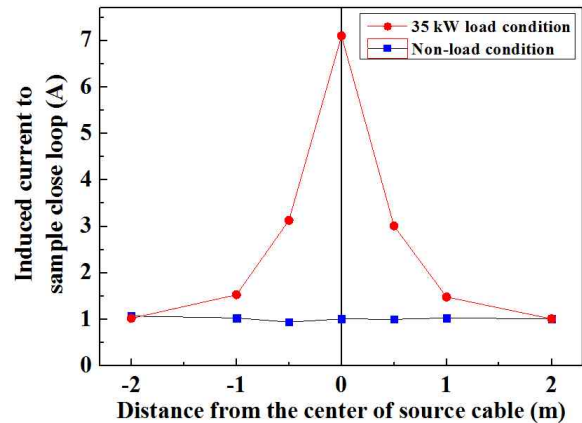


그림 2. x축 위치에 따른 유도전류(y=1.2 m) 측정 및 부하 상태의 차이 비교

Fig. 2 Measurement of induction current according to x-axis position(y=1.2 m) and comparing of load states

그림 2와 같이 부하 상태의 경우 집전부 중심 (x축, y축) = (0.0 m, 1.2 m)에서 유도현상이 가장 큼을 확인할 수 있었다. 집전부 y축 중심으로부터 이격거리가 늘어날수록 (x축 값이 증가할수록) 유도현상이 감소하여 x축 값이 2 m 이상의 경우 무부하 상태와 유사한 특성을 확인할 수 있었다. 이를 통하여, 무선전력전송의 전기안전 확보에 있어서 전력전송이 일어나는 집전부 인근에 유도현상이 집중됨을 확인할 수 있었고 이에 대한 적극적인 보호방안이 필요하다.

2.2. 주파수에 의한 유도영향 범위 분석

대용량 무선전력전송에서는 전력 전송 밀도를 통한 최대 전력전달 용량 증가의 이유로 상용주파수 보다 높은 송신 코일 전류의 각주파수를 사용하고 있다. 할당 가능한 주파수와 송신을 위한 급전 설비의 설계 가능성을 고려하여 20, 60, 85 kHz 주파수가 검토되고 있으며, 국내 대용량 무선전력전송에 있어서는 60 kHz 가 주로 연구되고 있다.

60 kHz 의 경우 파동과 주파수의 상호관계에 의해 근거리장 영역($r = \frac{v}{2\pi f}$)이 800 m 이내로 결정되어, 영향을 받는 대부분의 인체 및 설비들이 근거리장에 위치하게 된다.

공간상 전자기파가 전파되는 비율을 나타내는 파동임피던스의 특성상, 근거리장의 경우 파동임피던스가 작은 자기장의 경우 전파가 용이하나, 파동임피던스가 큰 전기장은 전파가 어려워 근거

리장 인근에 밀집되어 나타난다. 따라서 대용량 무선전력전송을 위한 60 kHz 대전류 환경에 있어서 전기장 차폐 위주의 연구가 필요하다[4].

유도현상 감쇄를 위하여, 자기장의 경우 높은 투자율을 갖는 물질을 적용함으로써 자속밀도를 변경하고 자기장의 경로를 제어하여 주변에 비해 상대적인 감소를 일으키는 방식으로 적용이 제한적이다. 반면, 전기장의 경우 전기전도도가 높은 물질로 차폐함으로써 차폐막 중심으로 부분적인 가우스 폐곡면을 형성시켜 외부로 전기장의 전파를 줄이는 방식으로 적용이 용이하다[5].

근거리장 영역에서 유도현상 감소를 위하여 전기장 영향의 우세성과 상대적 감소가 아닌 절대적인 감소가 가능한 점을 고려할 때, 전기전도도가 우수한 금속물질 위주의 전기장 차폐에 대한 검토가 필요하다[6].

3. 실험 설계

3.1. 유도 현상 실험 설계

무선전력전송 환경에서의 유도현상이 미치는 영향력을 확인하기 위하여 35 kW 급 전력인버터를 사용하였다. 이는 IEC 61980에 의해 MF-WPT5에 해당하는 22 kW 이상의 대용량 무선전력 전송으로 분류된다. 공진주파수는 60 kHz로 하였다. 그림 3과 같이 급전인버터에서 발생한 60 kHz 주파수의 전류가 급전케이블을 통해 흐르게 되고 급전케이블 상부에 위치한 집전부로 무선전력전송이 일어나게 된다. 이때 전송의 손실분이 주변으로 전자기장 형태로 방사되게 되며, 기준이 되는 도전체 페루프를 설정하여 여기에 유도되는 정도를 통하여 유도현상을 측정하였다.

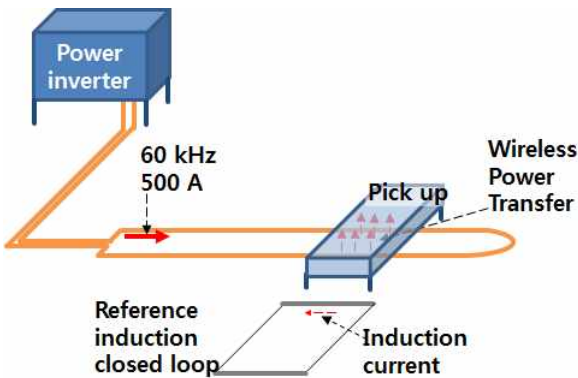


그림 3 무선전력전송 환경 유도현상 실험 모식도
 Fig. 3 Induction phenomenon experimental diagram in wireless power transmission environment

유도전류 실험에 있어서 전기적 정보는 급전부, 픽업2차측(정류기 1차측), 정류기 2차측으로 구분할 수 있다. 급전부는 35 kW 급으로 500 A와 70 V 전압을 공급해주고 있다. 무선전력전송 구간에서 픽업에 약 35 kW의 전력이 공급되고 이때 픽업 2차측(정류기 1차측)에는 425 V 80 A의 전압 전류가 형성된다. 정류기

를 지나 정류기 2차측에는 425 V 80 A의 DC 전압 전류가 발생되어 모의부하를 통해 전력이 소모된다. 표 1과 표 2과 같이 실험에 관련된 전기적 특성과 물리적 특성을 설계하였다[7].

표 1 무선전력전송 급전부와 집전부 전기적 정보

Table 1 Electrical information for wireless power transmission source and receiver

구분	항목	설정 값
급전 (35 kW)	전압	70 V
	전류	500 A
	주파수	60 kHz
픽업 2차측 (정류기 1차측)	전압	425 V
	전류	80 A
	주파수	60 kHz
정류기 2차측	전압	425 V
	전류	80 A
	주파수	DC

표 2 무선전력전송 급전부와 집전부 물리적 정보

Table 2 Physical information for wireless power transmission source and receiver

물리적 정보	설정값
급전케이블간 이격거리	0.24 m
급전케이블과 Pick up(집전부)간 이격거리	0.10 m~0.15 m
Pick up(집전부) 크기	1.2 m(w)×0.7 m(d)×0.2 m(h)

유도전류 측정을 위해서는 유도기전력 차이를 통해 유도전류가 흐를 수 있는 페루프가 필요하며, 다양한 조건에 따른 영향을 비교하기 위해서는 가로 세로 굵기에 따른 기준페루프가 필요하다. 기준페루프 구성에 있어서 급전부와 평행하게 1 m 길이의 철근을 사용하였고, 유도기전력 차이를 내기 위하여 두 개의 철근 사이에는 1 m 이격을 두었다. 두 철근은 전선으로 연결하여 기준 페루프를 구성하였다. 또한 패러데이의 전자기 유도법칙의 자기 선속과 관련하여 유도되는 철근의 단면적(A)이 유도현상에 영향을 미치는 특성을 고려하였다. 통상적으로 사용되는 8d, 16d, 22d 단면적을 비교한 결과 동일 조건에서 식 (3)와 같이 단면적에 비례하여 유도현상이 증가함을 확인하였고 명확한 유도전류 영향 차이를 측정을 위하여 22d를 적용하여 기준페루프를 구성하였다[8].

$$E = -N \frac{d}{dt} (B \cdot A) \quad (3)$$

(E : 유도기전력, N : 단위미터 당 턴 수, B : 자속밀도, A : 단면적)

급전부와 집전부 사이의 무선전력전송 이외 손실분의 유도현상을 확인하기 위하여 상기 설계된 급전부와 집전부의 물리적 기

준과 기준폐루프를 적용하여 기준값을 설정하였고, 기준폐루프에 흐르는 유도전류를 차폐가된 홀센서를 통하여 값을 측정하였다.

3.2. 차폐 영향 실험 설계

차폐 영향은 전기전도도 및 투자율에 입각한 물성적인 변수와 차폐막 두께 및 방열구조 적용여부, 수직구조 차폐막 위치, 수평구조 차폐막 위치 등의 물리적인 변수에 대한 특성을 고려하여 분석하였다. 물성적인 특성 분석에 있어서는 전기전도도가 우수한 Al, Cu와 투자율이 우수한 Fe를 선정하였다. 이를 유도영향을 차폐할 수 있는 1m×0.5m 크기의 판 모양으로 제작하여 실험하였다. 또한 자기장 포화 및 표피효과를 확인하기 위하여 Al의 경우 1T, 3T, 5T 두께로 제작하여 차폐막 두께에 따른 실험과 위치 및 방열여부에 따른 실험을 설계하였다.

그림 4와 같이 무선전력전송이 일어나는 인근에서 발생하는 유도현상에 있어서 다양한 형태로 존재하는 차폐막이 미치는 영향에 대해서 실험을 수행하였다[9].

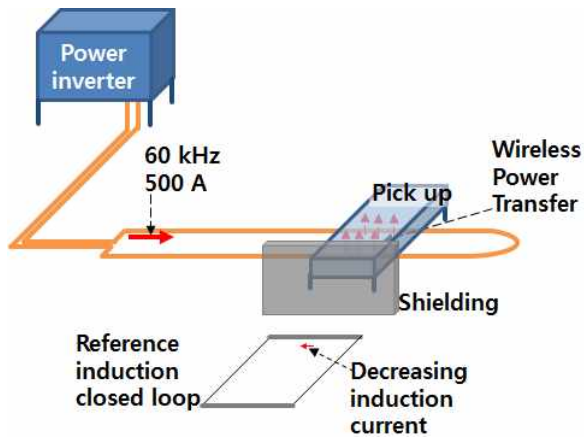


그림 4 차폐막 설치에 따른 유도현상 감쇄 실험 모식도
 Fig. 4 Experimental diagram for induction phenomenon attenuation by shielding structure installation

표 3 차폐 물질의 물성 비교

Table 3 Comparing properties of shielding materials

물질	전기전도도 (σ (S/m) at 20°C)	투자율 (H/m)
Al	3.50×10^7	1.26×10^{-6}
Cu	5.96×10^7	1.26×10^{-6}
Fe	6.99×10^6	1.26×10^{-4}

4. 실험 분석

차폐 조건에 따른 영향을 확인하기 위하여 기본이 되는 유도현상 조건을 설정하였다. 35 kW급의 500 A 급전 전류 조건으로

하였고, 집전부 중심 기준(x축, y축) = (0.0 m, 1.2 m) 위치에서 측정하였고, 기준폐루프는 22d 단면적, 1m 길이 철근 두께를 1m 이격거리를 갖는 구조로 설계하였다.

차폐막의 물성, 두께, 방열구조 적용여부, 수직구조, 수평구조 적용에 따른 영향을 분석하여 유도현상 감쇄를 위한 최적 조건을 실험하였다.

4.1 차폐막 물질에 따른 영향 분석

급전케이블 중심부와 기준폐루프 사이는 1.2 m 이격되어 있고, 집전부와 기준폐루프 사이는 0.6 m 이격되어 있다. 차폐가 되지 않은 상태에서 기준폐루프에 유도되는 전류는 7.1 A이다. 그림 5와 같이, 5T 두께의 Al, Cu, Fe 각각의 차폐막을 집전부와 기준폐루프 중간인 집전부로부터 0.3 m 이격된 곳 (급전케이블 중심부에서 0.9 m)에 위치시키고, 기준폐루프에 유도되는 전류를 측정하였다.

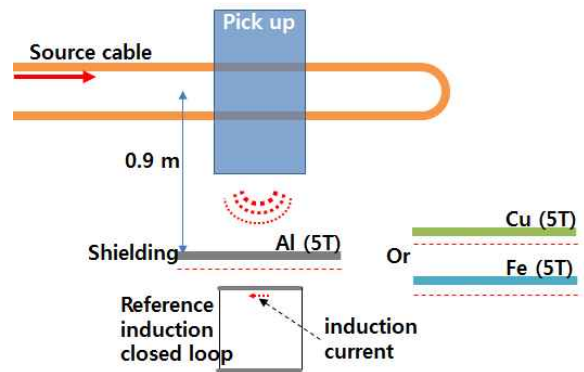


그림 5 차폐 물질에 따른 유도영향(붉은 점선) 모식도
 Fig. 5 A diagram of the induction effect(red dotted line) by shielding materials

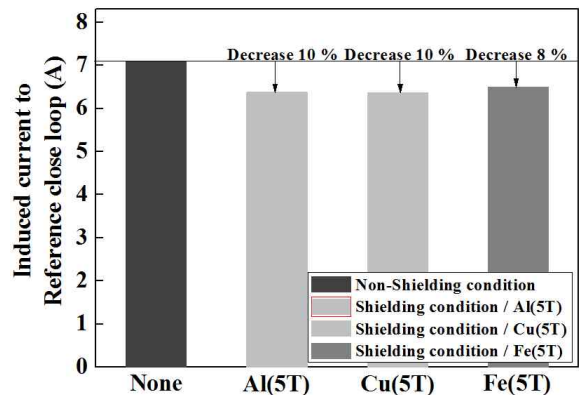


그림 6 차폐 물질에 따른 유도현상 감쇄 영향
 Fig. 6 Influence of the induction effect attenuation by shielding materials

그림 6과 같이, 측정결과 Cu와 Al는 차폐막 없이 노출된 공간의 측정값인 7.1 A에서 약 10% 감소한 6.35 A와 6.38 A가 측정되었고, Fe는 8% 감소한 6.5 A가 측정되었다. Cu의 전기전도도가 Al보다 약 1.7배 Fe 보다 약 8.5배 큰 값을 갖아서 유도기전력 발생에는 영향을 미칠 수 있으나, 유도기전력 차이로 인한 유도전류의 크기에는 영향이 미비하였다. Al과 Cu가 유사한 물질적 특성을 보이나, Al이 Cu보다 밀도가 작아 단위면적, 동일두께당 무게가 가벼워 차폐막 적용에 적합한 특성을 보였다.

4.2 차폐막 두께에 따른 영향 분석

차폐 물질에 따른 유도현상 감소 영향을 토대로 Al이 Cu, Fe와 비교하여 전반적으로 우수한 특성을 보임을 확인하였다. Al을 기준차폐 물질로 선정하고, 그림 7과 같이, 두께에 따른 차폐 영향을 측정하였다. 1T, 3T, 5T 두께의 Al 차폐막을 급전케이블 중심부로부터 0.9 m 이격시킨 곳에 위치시키고, 기준폐루프에 유도되는 전류를 측정하였다.

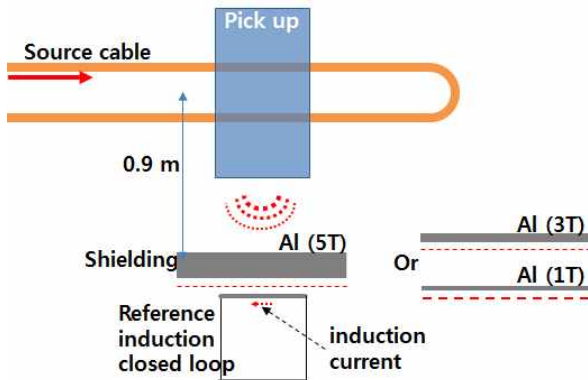


그림 7 차폐막 두께에 따른 유도영향(붉은 점선) 모식도
 Fig. 7 A diagram of the induction effect(red dotted line) by shielding thickness

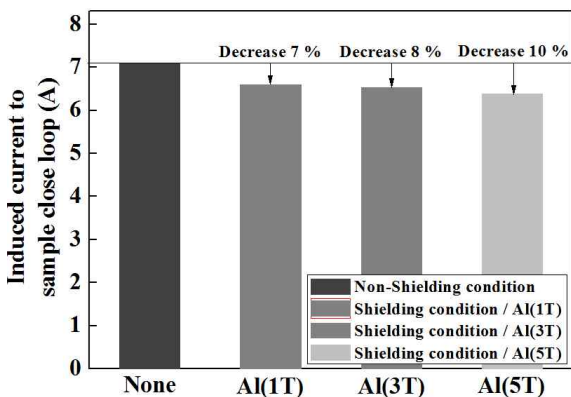


그림 8 차폐막 두께에 유도현상 감소 영향
 Fig. 8 Influence of the induction effect attenuation by shielding thickness

그림 8과 같이, 측정결과 급전케이블 중심부로부터 1.2 m 이격된 곳에서 차폐가 되지 않은 상태에 기준폐루프에 7.1 A가 유도되었고, 집전부와 기준폐루프 사이 중간에 Al 차폐막을 삽입하였을 경우 7%~10% 감소를 확인할 수 있었다. 1T의 경우 7% 감소한 6.60 A가 측정되었고, 3T의 경우 8% 감소한 6.53 A가 측정되었고, 5T의 경우 10% 감소한 6.39 A가 측정되었다. 5T 이상의 경우에도 약 10% 감소함을 확인하여 5T에서 특성이 포화됨을 확인할 수 있었다.

표피효과에 따른 Al 침투 두께는 60 kHz에서 0.6 mm로 이론적으로 1T 두께의 차폐막으로 차폐가 가능하나, 실제 500 A의 높은 소스 전류를 고려하고 Al 차폐막 자유전자의 오비탈 배치 및 이로인한 침투 효과 등을 감안할 때 5T 이상의 차폐막이 필요하다고 판단하였다[10, 11].

4.3 방열 구조에 따른 영향 분석

전기장 차폐의 경우, 소스케이블로부터 발생한 전기장이 전기전도도가 높은 차폐막으로 유도된 이후 차폐막의 자유전자가 와전류형태의 전류를 형성하고 이것은 일부 전기적 특성과 대부분의 열적 특성으로 손실된다. 효과적인 차폐를 위하여 열적 특성을 지속적으로 제거시켜 주는 것이 필요하며, 이를 위하여 그림 9와 같이 차폐 물질 사이에 Air 층을 삽입하여, 방열 구조에 대한 차폐 효과를 분석하였다. 이를 위하여 Al(5T), Al(1T)-Air(3T)-Al(1T)와 Al(2T)-Air(1T)-Al(2T) 구조의 차폐막을 설계하여 특성을 분석하였다[12].

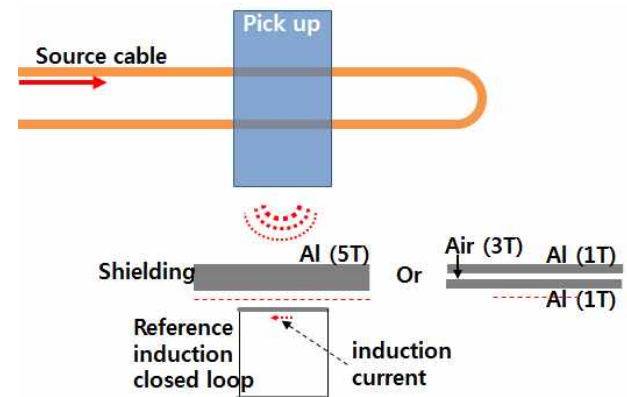


그림 9 방열 구조에 따른 유도영향(붉은 점선) 측정 모식도
 Fig. 9 A diagram of the induction effect(red dotted line) by thermal dissipation structure

측정결과 그림 10과 같이 방열 구조를 적용한 것이 차폐 영향이 우수함을 확인할 수 있었다. 급전케이블 중심부로부터 0.9 m 이격시킨 경우 기준폐루프에 유도되는 전류는 Al(5T) 차폐막의 경우 6.39 A, Al(1T)-Air(3T)-Al(1T) 차폐막의 경우 5.96 A, Al(2T)-Air(1T)-Al(2T) 차폐막의 경우 5.75 A로 동일한 5T 두께에서, 단일 차폐막의 경우 10% 감소하였던 것이 방열 차폐막의 경우 16~19% 감소함을 확인할 수 있었다.

차폐막으로 유도된 전기장은 전위차가 형성되지 않고 대부분 열적 손실로 소멸되게 된다. 특히 주파수가 높을수록 표면으로 전류가 밀집되는 표피효과에 의해 심부보다 표면에 이와같은 유도 가열현상이 집중되게 된다.

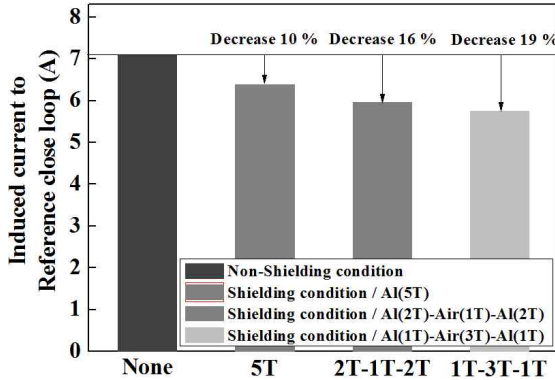


그림 10 방열 구조에 따른 유도현상 감쇄 영향
 Fig. 10 Influence of the induction effect attenuation by thermal dissipation structure

효율적인 차폐를 위하여 유도 가열로 인한 온도 증가를 억제하기 위한 방열이 필요하게 되었고, 두꺼운 차폐 물질보다는 중간에 공간을 갖고 있는 다층의 차폐 물질이 열적 에너지 제거에 효율적이며, 차폐 성능도 우수함을 확인하였다.

4.4 수직구조 차폐막 이격거리에 따른 영향 분석

동심원 모양의 전자기 특성에 따라, 전자기 중심부로부터의 이격거리가 차폐에 영향을 미칠 것으로 가정하였다. 집전부와 기준 페루프 사이의 공간에서 집전부로부터의 위치를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 그림 11과 같이 급전케이블 중심부로부터 0.7 m ~ 1.1 m 사이에 위치시켜 차폐 영향을 확인하였다.

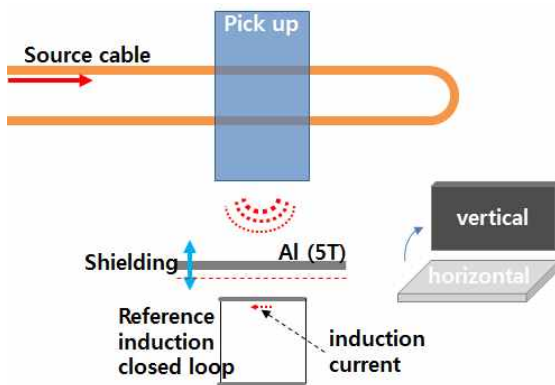


그림 11 수직구조 차폐막 이격거리에 따른 유도영향(붉은 점선) 측정 모식도
 Fig. 11 A diagram of the induction effect (red dotted line) by shielding structure distance at vertical position

측정결과 그림 12와 같이 무선전력전송 환경에 노출된 경우 보다 4~14% 감소함을 확인할 수 있었다. 급전케이블 중심부로부터 0.7 m 이격시킨 경우가 14% 감소한 6.11 A로 측정되었고, 0.9 m와 1.1 m 이격시킨 경우 6.39 A, 6.60 A로 측정되어 각각 10%, 4% 감소함을 확인하였다.

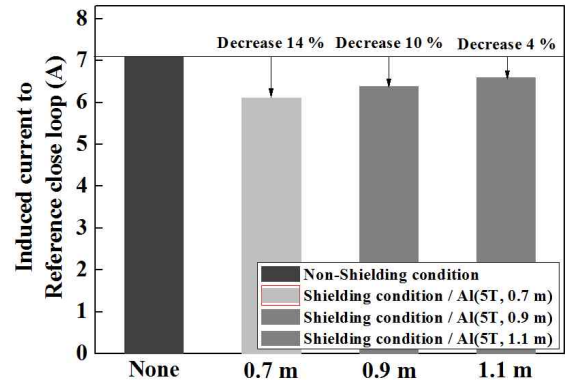


그림 12 수직구조 차폐막 이격거리에 따른 유도현상 감쇄 영향
 Fig. 12 Influence of the induction effect attenuation by shielding structure distance at vertical position

공기와 콘크리트의 투자율이 유사하여 동심원 형태의 전자기장이 바닥면을 통과하여 차폐막을 넘어 유도되는 성분으로 인한 것으로 판단하고 집전부와 가까운 위치일수록 강한 자기장을 차폐할 수 있어 차폐효율이 높은 것으로 판단하였다.

4.5 수평구조 차폐막 이격거리에 따른 영향 분석

차폐막을 수직으로 위치시켜서 차폐하는 영향과 더불어 수평으로 위치시킨 경우의 영향을 실험하였다. 그림 13의 경우 차폐막을 수평으로 위치시킨 형태의 모식도를 나타내며, 이 상태로 집전부와 기준페루프와 사이를 이동시키며 차폐 영향을 확인하였다.

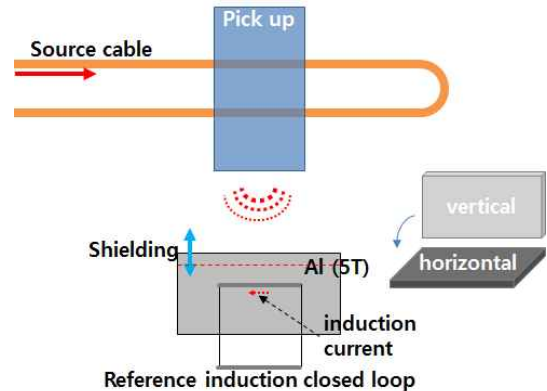


그림 13 수평구조 차폐막 이격거리에 따른 유도영향(붉은 점선) 측정 모식도
 Fig. 13 A diagram of the induction effect (red dotted line) by shielding structure distance at horizontal position

차폐막을 수평 형태 바닥면에 위치시킨 경우 유도현상이 최대 37% 까지 감소함을 확인할 수 있었다. 측정결과 그림 14와 같이 급전케이블 중심부로부터 0.9 m 동일하게 이격시킨 위치에서, 차폐막을 수직으로 위치시킨 경우 6.39 A 유도되어 10% 감소하였으나 수평으로 위치시킨 경우 5.04 A 유도되어 29% 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 수평으로 위치시킨 차폐막을 집전부쪽으로 이동시키수록 유도현상이 감소함을 확인할 수 있었다. 급전케이블 중심부로부터 0.7 m, 1.1 m 이격시킨 경우 각각 4.47 A와 5.47 A로 37%, 29% 감소함을 확인할 수 있었다.

급전케이블로부터의 동심원이 수평구조의 차폐막에 막혀 차폐의 효율성이 높아진다고 판단하였다. 수평구조의 경우 전기장의 진행방향과 수직되는 위치에 존재함으로써 전기장의 전파를 효과적으로 차폐할 수 있음을 확인하였다.

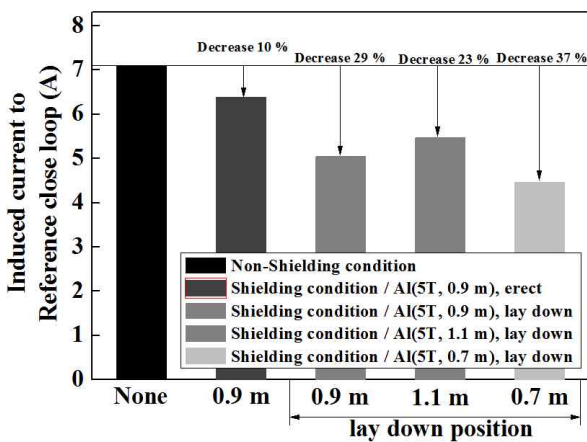


그림 14 수평구조 차폐막 이격거리에 따른 유도현상 감쇄 영향
 Fig. 14 Influence of the induction effect attenuation by shielding structure distance at horizontal position

5. 결 론

본 연구는 무선전력전송 환경에서 발생하는 유도현상으로부터 전기안전성을 확보하기 위하여 최적 차폐막 구조를 도출하였다. 실험 결과, 무선전력전송시 발생하는 유도현상이 차폐막의 물질, 두께, 방열여부, 수직구조, 수평구조 등에 따라 변화함을 확인할 수 있었다. 60 kHz 기반, 35 kW 급의 전력인버터를 사용하여 대용량 무선전력전송 환경을 만들었다. 기준폐루프 구성에 있어서는 급전부와 평행하게 1 m 길이의 22d 철근을 사용하였고, 유도기전력 차이를 내기 위하여 두 개의 철근 사이에는 1 m 이격을 두었다.

60 kHz 환경에서 전기안전이 필요한 대부분의 영역은 근거리장에 포함되고 파동임피던스가 큰 전기장이 밀집되는 특성을 갖는다. 전기장 차폐를 위하여 전기전도도가 높은 AI를 대상으로 하였고, 대전류로 인한 큰 유도전류를 차폐하기 위하여 5T 두께의 차폐막을 선정하였다. 특히, 60 kHz 주파수로 인한 표피효과를 고려하여 차폐 구조에 방열 구조를 도입하여 동일 두께 대비 우수함을 확인할 수 있었다. 차폐막의 설치 위치에 있어서도 무

선전력전송이 일어나는 집전부와 가까울수록, 수직구조보다는 수평구조일수록 차폐 효율은 높아짐을 확인할 수 있었다.

표 4 차폐조건에 따른 유도현상 감쇄의 유효성

Table 4 Effectiveness of the induction effect attenuation according to shielding conditions

구분		차폐 유효성 (감소)
기본구조	물질(Fe, Cu, Al)	8%, 10%, 10%
	두께(1T, 3T, 5T)	7%, 8%, 10%
방열구조 air 삽입(0T, 1T, 3T)		10% %, 16%, 19%
수직구조 이격 (1.1 m, 0.9 m, 0.7 m)		4%, 10%, 14%
수평구조 이격 (1.1 m, 0.9 m, 0.7 m)		23%, 29%, 37%
최적구조 적용		43.3%

위와 같은 결과를 통하여 표 4와 같이 조건에 따른 유도현상 감쇄효과를 확인할 수 있었고, AI 기반의 방열구조를 갖는 5T 두께의 수평구조 차폐막을 최적 차폐구조 확인하였다. 이를 적용하였을 경우 35 kW 급 무선전력전송시 인근 기준폐루프에 인가되는 유도전류가 최대 43% 감소함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(과제번호 17RTRP-B097066-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Young-Sang Song, "A Study on Installation of Monitoring System of Wireless Power Transmission System" Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 29, No. 4, pp. 47-53, 2015.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] H.W. Ott, Electromagnetic compatibility engineering, John Wiley & Sons, 2011.
- [5] 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.

- [6] Park Jung Yeol, "A study on the Evaluation Method of Electromagnetic Shielding Effectiveness using Near Field Scanning in Near Field Tests"
- [7] Jiseong Kim, "Coil Design and shielding Methods for Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System" Proceedings of the IEEE, Vol. 101, No. 6, pp. 1332, 2016.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Xi Nan, "An equivalent complex permeability model for litz-wire windings", Industry Applications Conference, Vol. 3, pp. 2229
- [11] Cazenave, Lions, "Orbital stability of standing waves for some nonlinear Schrodinger equations", Communications in Mathematical Physics, Vol. 85, No. 4, pp. 549
- [12] 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 연구원.



김 영 석 (Young-Seok Kim)

1974년 4월 27일생. 1996년 경상대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2002년 야마구치대학 전기전자공학과 객원연구원. 2003년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.



정 진 수 (Jin-soo Jung)

1976년 9월 12일생. 2003년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004년~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 연구원.



홍 성 준 (Seong-Jun Hong)

1985년 2월 21일생. 2010년 강원대학교 물리학과 졸업. 2015년 과학기술연합대학원대학교 에너지변환공학과 졸업(석사). 2016년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구원.