

안전한 전력전달을 위한 새로운 형태의 자기케이블

李宇寧*, 許晉**, 崔水壩***, 林春澤†

A New Concept of Magnetic Cable for Safe Mobile Power Delivery

Woo-Young Lee, Jin Huh, Su-Yong Choi, and Chun-Taek Rim

요 약

본 논문에서 방전 또는 스파크로 인한 전기화재, 폭발사고 및 감전 사고의 위험 없이 고주파 고전력을 안전하게 전달할 수 있는 새로운 형태의 실용적인 자기케이블을 처음으로 제안하였다. 또한, 케이블 사이에서 발생하는 누설 자속에 대한 자기저항을 주변효과(fringe effect)까지 고려하여 정량적으로 해석하였다. 자기케이블에 상쇄코일, 상쇄 금속판, 상쇄금속관과 같은 상쇄실드 적용함으로써 자기케이블 사이의 누설자속을 급격히 줄여 콤팩트한 자기케이블을 구현하였고, 장거리 전력전송을 가능하게 하였다. 입력전류 $10A_{rms}$ (20kHz)에서 상쇄금속관이 적용된 1.5m길이, 5cm의 케이블 사이의 간격을 갖는 자기케이블로 353.8W의 전력을 68%효율로 전달하였다. 이는 상쇄금속관을 적용하지 않았을 때에 비해 출력전력은 약 25배, 효율은 약 7배 높은 수치이다. 본 논문에서는 제안된 자기케이블의 성능 특성을 실험과 자장 시뮬레이션을 통해 분석 및 검증하고 비교하였으며, 기대했던 우수한 성능을 실제로 확인하였다.

ABSTRACT

A magnetic cable that can safely deliver high frequency AC electric power in flammable or sensitive workplaces by preventing from arcs and electric shocks is firstly proposed in this paper. Several new magnetic cable structures with magnetic shields, which are composed of such cancel coil, cancel copper plate, and cancel copper pipe, were compactly implemented by considering and analyzing fringe field and thus the parallel leakage flux is drastically reduced. The output power and efficiency of a prototype magnetic cable with 1.5 m length and 5 cm gap were measured as 353.8 W and 68 %, where the source current and switching frequency were 10 A_{rms} and 20 kHz, respectively. The proposed magnetic cables are fully analyzed and verified by finite-element method (FEM) simulations and experiments. The results are in a good agreement.

Key Words : Magnetic cable, Mobile power delivery, Magnetic shields

1. 서 론

전기는 매우 다양한 분야에서 인류에 편리함을 가져

다주었다. 또한, 현대 문명은 전기가 없으면 얼마 지나지 않아 붕괴할 정도로 전기는 우리 삶 속 깊숙이 자리 잡고 있고, 인류가 살아가는데 필수불가결한 요소 중 하나가 되었다. 이처럼 전기는 인류를 이롭게 하고 있지만, 사실 굉장히 위험한 것 중 하나다. 표 1과 같이 해마다 전기사고로 인해 국내에서만 수백 명이 다치거나 목숨을 잃고, 많은 재산피해도 발생하고 있다. 특히, 가연성 가스, 폭발성 물질을 사용하는 많은 작업장에서는 방전 또는 스파크로 인한 전기화재, 폭발

†교신저자 : 정희원, KAIST 원자력 및 양자공학과 부교수
E-mail : ctrim@kaist.ac.kr

*학생회원, KAIST 전기 및 전자공학과 석사과정

**학생회원, KAIST 전기 및 전자공학과 박사과정

***학생회원, KAIST 원자력 및 양자공학과 석박사 통합과정

접수일자 : 2011. 8. 17 1차 심사 : 2011. 9. 9

2차 심사 : 2011. 10. 7 심사완료 : 2011. 10. 27

표 1 국내전기사고 통계

Table 1 The statistics of domestic electric accident

	2003	2004	2005	2006
누전에 의한 화재 (건)	633	455	430	448
정전기에 의한 화재 (건)	47	54	43	45
감전사망자 (명)	42	87	78	56
폭발사망자 (명)	18	37	14	24

사고 및 감전 사고의 위험에 항상 노출되어 있어 대폭이 시급하다.

이러한 전기사고의 위험에서 벗어나기 위해 밀폐형 전력선 및 밀폐형 콘센트와 플러그가 사용되고 있으나, 이들은 여전히 기계적 단선 및 누전과 감전에 취약한 단점을 갖고 있다^{[11][2]}. 이 문제를 해결하기 위해서, 전기적 접촉이나 전력선의 노출이 없는 자기유도 및 자기공진 기술을 이용한 무선 전력전송이 제안되었다^{[3]-[27]}. 이 기술은 전력선에 의해 이물질이 유입될 가능성이 높은 클린룸이나 전력선이 꼬일 우려가 있는 컨베이어 벨트에 유용하게 사용될 수 있으나 이동기와 같이 경로를 예측하기 힘든 시스템에는 적합하지 않다. 게다가, 자기유도나 자기공진을 이용한 무선 전력전송 시스템은 여전히 기계적 단선 및 누전에 취약한 문제점이 있다.

본 논문에서는 이러한 한계를 극복하여 방전 및 스파크로 인한 전기사고를 예방하고자 기존의 구리선이 아닌 자기코어로 이루어진 새로운 형태의 자기케이블을 제안하였다^{[28][29]}. 자기케이블은 높은 투자율을 갖는 자기코어로 구성되어 있으며, 상쇄실드를 적용함으로써 자기코어 사이에서 발생하는 누설자속을 상쇄시켜 고주파 대전력을 먼 거리까지 전송할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 자기케이블의 원리를 간단히 소개하고 실용적인 구조를 제안하였다. 또한, 자기케이블의 성능 특성을 실험과 시뮬레이션을 통해 분석 및 검증하고 증명하였다.

2. 자기케이블 설계

2.1 자기케이블의 원리

그림 1은 자기케이블의 개념도다. 자기케이블은 반지름 r , 단면적 A , 길이 l , 케이블 사이를 거리 d 를 가지는 원통형상으로 가정하였다. \mathcal{R}_s 는 전달자속 자기저항이고, \mathcal{R}_p 는 누설자속 자기저항이며, \mathcal{R}_L 는 출력코어 자기저항이다. 또한, N_s 와 N_L 은 각각 입력코일선과 출력코일선의 턴 수다.

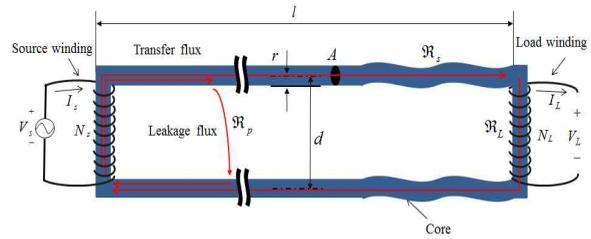


그림 1 자기케이블의 개념도

Fig. 1 A concept of the magnetic cable

자기케이블은 기본적으로 자기코어, 입력코일선, 출력코일선으로 구성된다. 자기케이블의 전력전달 원리는 비교적 간단하다. 입력코일선에 인가된 입력전원에 의해 발생한 자속이 자기코어를 따라 출력코일선을 통과하여 출력코일선에 전압과 전류를 유도시킴으로써 결국 입력에서 출력으로 전력이 전달된다.

입력에서 발생하는 자속은 출력으로 전달되는 전달자속과 출력으로 전달되지 않고 케이블의 반대편으로 누설되는 누설자속으로 나뉜다. 누설자속이 증가함에 따라 출력은 감소하므로 누설자속을 감소시키는 것이 매우 중요하다. 즉, 원활한 전력전달을 위해서는 (1)과 같이 누설자속에 대한 자기저항이 전달자속에 대한 자기저항과 출력코어의 자기저항보다 매우 커야한다.

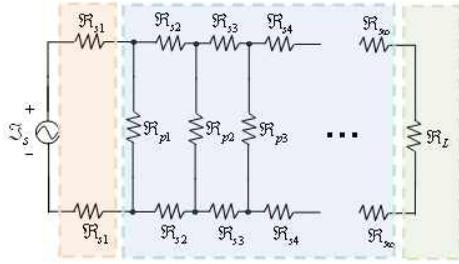
$$\mathcal{R}_s \ll \mathcal{R}_L \ll \mathcal{R}_p \tag{1}$$

2.2 자기케이블의 특성 분석

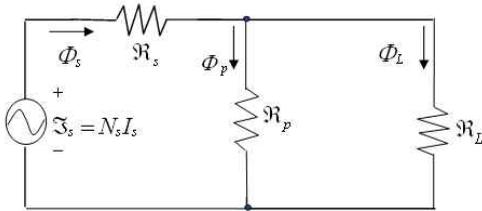
그림 2는 자기케이블의 등가자기회로를 나타내고 있다. 자기케이블은 그림 2. (a)와 같이 입력자속에 전달자속 자기저항 \mathcal{R}_s 가 직렬로 연결되고, 누설자속 자기저항 \mathcal{R}_p 가 병렬로 연결되어 반복되는 자기회로로 등가 할 수 있다. 이 복잡한 등가자기회로를 간소화하기 위해, (1)조건을 적용하면 그림 2. (b)와 같이 매우 단순한 등가자기회로로 변환할 수 있다. 이때 발생하는 작은 해석적 오차는 무시한다. 여기서 전달자속 자기저항 \mathcal{R}_s 와 출력코어 자기저항 \mathcal{R}_L 은 코어의 길이에 비례하고, 코어의 투자율과 단면적에 반비례하므로 다음과 같이 간단히 계산할 수 있다.

$$\mathcal{R}_s = \frac{2l+d}{\mu_s \mu_o A}, \quad \mathcal{R}_L = \frac{d}{\mu_s \mu_o A} \tag{2}$$

그러나 케이블 사이에서 발생하는 누설자속에는 주변효과(fringe effect)가 존재하기 때문에 이를 고려한 누설자속 자기저항을 계산하기 어려운 문제가 있다.



(a)



(b)

그림 2 (a) 자기케이블의 등가자기회로
 (b) 단순화된 자기케이블의 등가자기회로
 Fig. 2 (a) The equivalent magnetic circuit of the magnetic cable
 (b) The simplified equivalent magnetic circuit of the magnetic cable

케이블의 반지름 r 과 케이블 사이의 거리에 따라 변하는 누설자속의 등가단면적의 폭 W 를 얻기 위해 선전하와 평판전하의 커패시턴스 수식을 이용하였다. 즉, 자기케이블을 두 개의 선전하로 가정하여 얻은 커패시턴스와 두 개의 평판전하로 가정하여 얻은 커패시턴스가 같다는 조건으로 누설자속의 등가단면적의 폭 W 를 계산하였다.

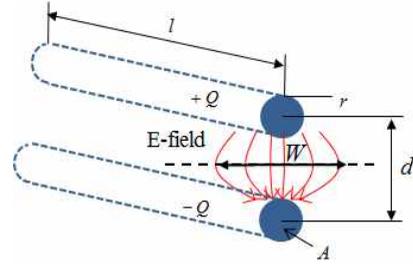
그림 3과 같이 자기케이블을 두 개의 선전하와 평판전하로 가정하여 얻은 각각의 커패시턴스는 다음과 같다.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\pi \epsilon l}{\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)} \quad (3)$$

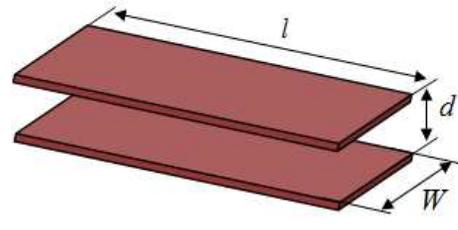
$$C = \epsilon \frac{lW}{d} \quad (4)$$

두 커패시턴스가 같다는 조건에 의해 누설자속의 등가단면적의 폭 W 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$W = \frac{Cd}{\epsilon l} = \frac{\pi d}{\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)} \quad (5)$$



(a)



(b)

그림 3 (a) 두 개의 선전하로 가정한 자기케이블
 (b) 두 개의 평판전하로 가정한 자기케이블
 Fig. 3 (a) The magnetic cable modeled as two line charges
 (b) The magnetic cable modeled as two plate charges

또한, 누설자속의 등가단면적의 폭 W 를 통해 누설자속 자기저항을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mathfrak{R}_p = \frac{d}{\mu_o l W} = \frac{\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)}{\mu_o l \pi} \quad (6)$$

원활한 전력전달을 위해서는 누설자속 자기저항이 전달자속 자기저항보다 매우 커야하는데, 두 자기저항에 영향을 주는 파라미터를 알아보기 위해 다음과 같이 두 자기저항의 비를 계산하였다.

$$\gamma = \mathfrak{R}_p / \mathfrak{R}_s = \frac{\mu_s A}{l^2 \pi} \ln\left(\frac{d-r}{r}\right) \quad (7)$$

두 자기저항의 비가 일정하다는 조건에서, 자기케이블의 길이를 2배 늘리려면, 코어의 단면적을 4배 넓혀야 한다는 사실을 얻었다. 또한, 자기코어의 투자율이나 단면적이 매우 크면, 자기케이블의 길이를 충분히 길게 할 수 있다는 사실도 알아내었다.

그림 2. (b)에서, 자기케이블의 출력자속과 출력전압은 (2)와 (6)를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\phi_L = \frac{N_s I_s}{R_s + R_L // R_p} \times \frac{R_p}{R_p + R_L} \quad (8)$$

$$V_L = N_L \omega \phi_L = \frac{\omega N_s N_L I_s}{R_s + R_L // R_p} \times \frac{R_p}{R_p + R_L} \quad (9)$$

$$\cong \frac{\omega N_s N_L I_s}{R_s + R_L} = \frac{\omega N_s N_L I_s \mu_s \mu_o A}{2(l+d)}$$

(9)를 통해, 출력 전압은 입력전원의 주파수와 코어의 단면적과 투자율에 비례하고, 자기케이블의 길이와 길어질수록 감소한다는 것을 알 수 있다.

(6)과 (7)에서, 케이블 사이의 거리 d 가 증가할수록 누설자속 자기저항이 증가하여, 원활한 전력전달 조건인 (1)을 상대적으로 쉽게 만족시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 케이블 사이의 거리 d 가 증가할수록 자기케이블의 부피가 커지므로 실용성이 떨어지는 문제점이 발생한다.

이에 본 논문에서는 자기케이블 사이의 거리 d 를 최소화하면서도, 누설자속 자기저항은 최대화시켜 전력전달이 잘 이루어질 수 있는 실용적인 자기케이블 구조를 제안하였다.

2.3 실용적인 자기케이블 구조

그림 4에 누설자속 자기저항을 증가시키는 자기케이블의 다양한 구조가 제안되었다. 그림 4. (a)에서 누설자속 자기저항이 증가하는 원리는 다음과 같다. 케이블 사이에서 발생하는 시변 누설자속이 케이블 사이에 위치한 코일을 통과함에 따라, 패러데이의 법칙에 의해 코일에 전압이 유도된다. 그리고 유도전압과 코일의 임피던스에 의해 코일에 상쇄전류가 흐르고, 상쇄전류는 상쇄자속을 발생시킨다. 코일의 임피던스가 인덕턴스만으로 구성될 때, 상쇄자속과 누설자속의 위상차는 180° 가 된다. 따라서 누설자속은 상쇄자속에 의해 대부분 상쇄되고, 결과적으로 누설자속 자기저항 R_p 가 증가하게 된다.

그림 4. (b)와 같이 상쇄코일에 보상커패시터를 연결하여 상쇄코일을 공진시키면, 상쇄코일에 흐르는 유도전류가 증가하여, 보다 강한 상쇄자속이 발생한다. 이로 인해, 좀 더 많은 누설자속이 상쇄되어 결국 누설자속 자기저항이 더욱 증가하게 된다. 또한, 상쇄코일을 상쇄금속판으로 대체해도 같은 원리에 의해 누설자속 자기저항을 증가시킬 수 있다. 상쇄코일이나 상쇄금속판을 사용하여 누설자속 자기저항이 증가하는 효과를 충분히 얻으려면 모든 누설자속이 상쇄코일을

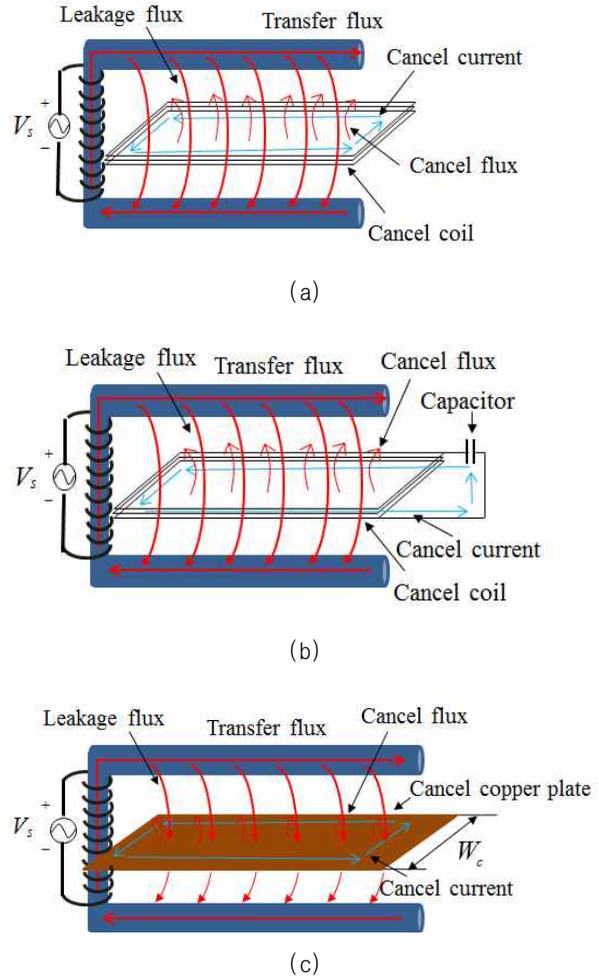


그림 4 (a) 상쇄코일을 적용한 자기케이블
 (b) 공진된 상쇄코일을 적용한 자기케이블
 (c) 상쇄금속판을 적용한 자기케이블
 Fig. 4 (a) The magnetic cable with the cancel coil
 (b) The magnetic cable with the resonated cancel coil
 (c) The magnetic cable with the cancel core plate

통과해야만 한다. 따라서, 상쇄코일의 폭 W_c 가 누설자속의 등가단면적의 폭 W 보다 넓어야만 한다.

자기케이블에 상쇄코일이나 상쇄금속판을 적용하면, 케이블 사이의 거리 d 를 감소시켜도 누설자속 자기저항이 큰 값을 유지하므로 (1)조건을 충분히 충족시킬 수 있어 결과적으로 원활하게 출력으로 전력을 전달할 수 있다. 하지만, 넓은 폭의 상쇄코일이나 상쇄금속판을 사용해야 하므로 여전히 전체 자기케이블의 부피가 커지는 문제가 존재한다. 누설자속 자기저항을 증가시

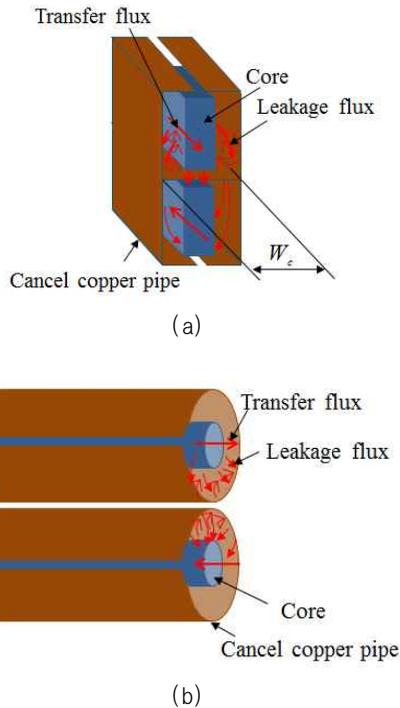


그림 5 (a) 사각 상쇄금속관을 적용한 자기케이블
 (b) 원형 상쇄금속관을 적용한 자기케이블
 Fig. 5 (a) The magnetic cable with the square-type cancel copper pipe
 (b) The magnetic cable with the cylinder-type cancel copper pipe

키면서 자기케이블의 부피까지 최소화시킬 수 있는 가장 실용적인 자기케이블 구조는 다음과 같다.

그림 5는 최소의 부피로 누설자속 자기저항을 충분히 증가시킬 수 있는 가장 실용적인 자기케이블 구조다. 한쪽이 터진 상쇄금속관으로 자기케이블을 감싸면, 누설자속을 충분히 상쇄시켜 누설자속 자기저항을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 넓은 상쇄금속관을 사용하지 않아도 되므로 콤팩트한 자기케이블을 구현할 수 있다. 상쇄금속관을 사용할 때의 주의점은 반드시 한쪽이 터진 금속관으로 자기케이블을 감싸야 한다는 것이다. 만약, 짝 막힌 금속관으로 자기케이블을 감쌀 경우, 전달자속에 의해 금속관에 전류가 유도되고, 이 유도전류에 의해 발생하는 상쇄자속이 전달자속을 상쇄시켜 출력으로 전력이 전달되지 않는 문제가 발생한다.

이처럼 상쇄코일, 상쇄금속관, 상쇄금속관등의 상쇄실드를 적용하면 콤팩트한 자기케이블을 구현할 수 있으나, 상쇄실드에 흐르는 상쇄전류에 의해 열이 발생하고 손실이 증가하는 문제가 있다. 하지만 자기코어

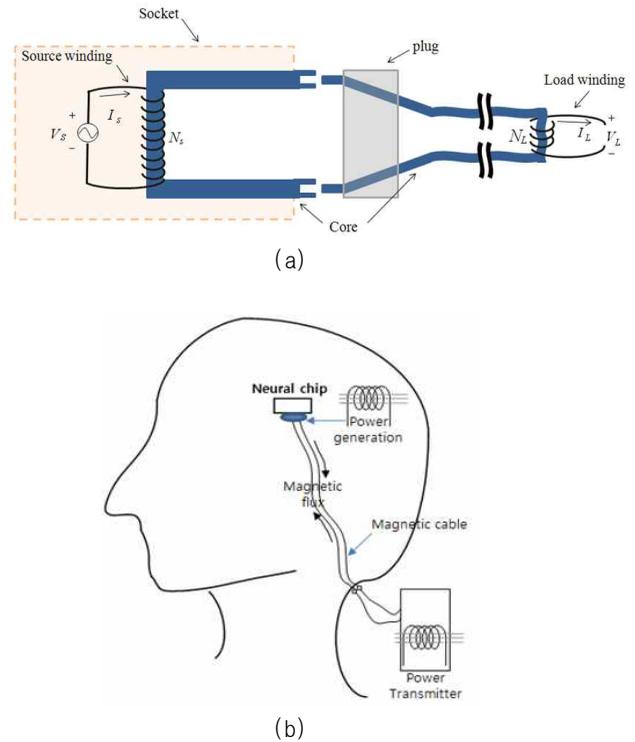
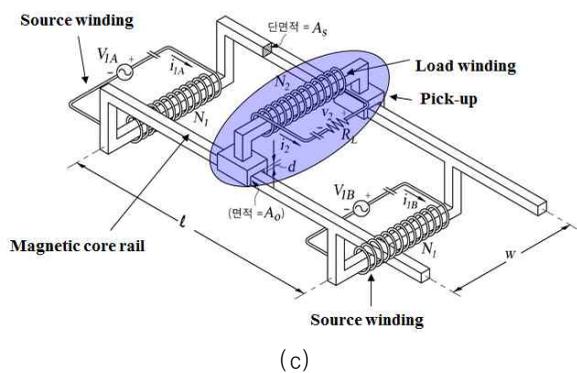


그림 6 (a) 자기플러그와 자기콘센트
 (b) 생체 삽입형 의료기기 전력전달용 자기케이블
 (c) 철도용 무선전력 자기레일
 Fig. 6 (a) The magnetic plug and magnetic socket
 (b) The magnetic cable for the power transfer to bio-implant devices
 (c) The magnetic rail for trains

와 상쇄실드 사이의 거리를 5cm 이상 늘리면 발열 및 손실문제의 영향에서 벗어날 수 있다. 일례로 20kHz의 입력주파수를 사용하는 온라인전기자동차에서^[7] 6kW 전송시 코어와 알루미늄판 사이의 거리가 1~2cm로 가까울 경우 온도가 수십도(°C) 증가하지만, 5cm 이상



떨어뜨릴 경우 증가온도는 불과 5도(°C) 미만이었다. 이를 통해 50W 미만의 손실이 발생하고 있음을 추측하였고, 이는 6kW 전송전력의 약 1%에 해당하는 수치이므로 무시할 수 있었다. 그러나 정확한 손실을 파악하고 효율을 계산하기 위해 위치에 따라 달라지는 누설자속에 의해 유도되는 상쇄전류에 의한 손실을 계산할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

2.4 자기케이블의 응용분야

그림 6은 본 논문에서 제안된 자기케이블을 응용하여 사용할 수 있는 분야를 나타내고 있다^{[28][29]}.

자기케이블은 방전 및 스파크, 감전의 위험이 없어 그림 6. (a)와 같이 가정용이나 산업용 자기콘센트와 자기플러그로 안전하게 사용할 수 있다. 특히 사고가 많이 발생하는 폭발성, 인화성 물질을 취급하는 작업장에서 유용하다. 자기플러그와 자기콘센트는 기존의 콘센트, 플러그와 유사한 구조이지만, 기존의 구리선 접촉이 아닌 자기코어의 접촉으로 전력을 전달하는 구조다.

최근에 생체 삽입형 의료기기가 각광받고 있으나, 의료기기의 전력문제를 해결하지 못해 배터리 교체를 위한 주기적인 외과수술이 필요함에 따라 생체 내 의료기기의 사용이 제한되고 있다. 생체 내 의료기기에 그림 6. (b)와 같이 매우 얇은 고투자율의 자기코어를 사용하는 자기케이블을 적용하면, 감전 없이 안전하게 전력을 전달할 수 있어 생체 삽입형 의료기기의 보급화를 촉진시킬 수 있을 것이다.

자기케이블은 그림 6. (c)와 같이 철도용 무선전력 자기레일에도 적용할 수 있다. 현재 대부분의 지하철도를 비롯한 중전철 및 고속철에서 열차에 전력을 공급하기 위해 현수가선과 팬터그래프를 사용하고 있다. 이는 철도 인프라 구축비용을 상당히 높일 뿐만 아니라, 넓은 공사면적으로 인한 환경파괴의 원인이 되고 있다. 기존의 철 레일을 자기케이블 개념이 적용된 자기레일로 대체하고 전력전달용 픽업을 열차 하부에 장착하면, 현수가선과 팬터그래프를 제거 할 수 있어 철도인프라 구축비용을 감소시킬 수 있고, 인프라 구축공사로 인한 환경파괴를 최소화 시킬 수 있다.

3. 자장 시뮬레이션과 실험을 통한 증명

본 논문에서 제안된 자기케이블의 특성과 누설자속 자기저항을 증가시키기 위한 여러 종류의 상쇄실드의 효과를 확인하기 위해 자장 시뮬레이션과 실험을 진행하였다.

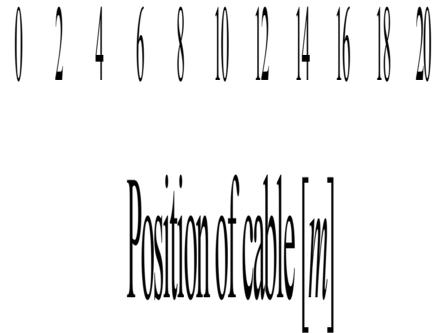


그림 7 자기코어의 투자율에 따른 자기케이블 내부의 자속밀도 변화

Fig. 7 The magnetic flux density inside the magnetic cable along the relative permeability

그림 7은 길이 20m, 케이블 사이의 거리 0.5m, 케이블의 반지름 1cm, 입력전원 20kHz (10A_{rms}, 10턴)의 출력이 오픈된 자기케이블에 대해 자기코어의 투자율에 따른 자기케이블 내부의 자속밀도 변화를 나타내는 시뮬레이션 결과다. 자기코어의 투자율이 증가함에 따라 케이블 내부의 자속밀도가 증가하는데, 투자율이 약 2×10⁴이상 증가하면 자속밀도는 더 이상 가파르게 증가하지 않는다. 특히 투자율이 10⁵이상이면 자속밀도가 거의 증가하지 않는다. 현재 가용한 최대 투자율은 10⁵정도이므로, 이러한 자기코어를 사용하여 자기케이블을 제작하면 먼 거리까지 문제없이 전력을 전달할 수 있다는 것을 알 수 있다^[30].

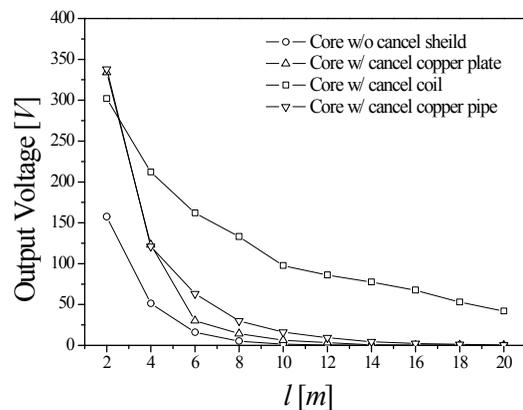


그림 8 상쇄실드 종류별 케이블 길이에 따른 무부하 출력전압 시뮬레이션 결과

Fig. 8 Simulation results of the open-circuit output voltage depending on types of cancel shields along the length of the magnetic cable

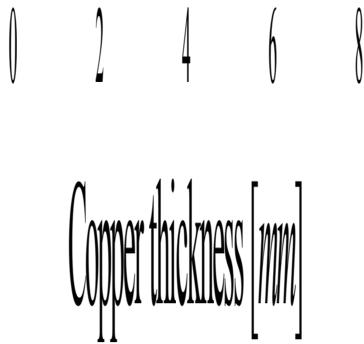


그림 9 상쇄금속판의 두께에 따른 무부하 출력전압 시뮬레이션 결과

Fig. 9 Simulation results of the open-circuit output voltage along the thickness of the cancel copper plate

그림 8은 자기코어의 투자율 2500, 케이블 사이의 거리 5cm, 케이블의 반지름 1cm, 입력전원 20kHz (10A_{rms}, 10턴), 출력코일 30턴의 자기케이블에 그림 4. (a), (d)와 그림 5. (a)에 제안된 상쇄실드를 적용했을 때 케이블 길이에 따른 무부하 출력전압 시뮬레이션 결과다. 누설자속 자기저항은 케이블 길이에 반비례하므로, 케이블이 길어짐에 따라 누설자속 자기저항이 감소하여 출력전압도 감소하게 된다. 투자율이 2500밖에 되지 않기 때문에 길이에 따른 출력전압의 감소 폭이 상당히 크지만, 투자율이 높은 자기코어를 사용하면 케이블의 길이를 충분히 늘려도 높은 출력을 유지시킬 수 있다. 상쇄실드가 적용된 자기케이블의 출력전압이 상쇄실드가 없는 자기케이블의 출력전압보다 케이블 길이에 관계없이 항상 약 2배 이상 높게 나타났다. 케이블의 길이가 짧을 때에는 상쇄금속판이 출력전압을 증가시키는데 유리하고, 케이블의 길이가 길어짐에 따라 상쇄코일이 출력전압을 증가시키는데 가장 우수하다는 사실을 확인하였다.

그림 9는 앞의 시뮬레이션과 같은 조건에서 상쇄금속판이 적용된 2m의 자기케이블에 상쇄금속판의 금속판 두께에 따른 무부하 출력전압을 나타낸다. 예측한 대로 금속판의 두께가 얇아질수록 출력전압은 감소하였다. 20kHz에서 5.7×10^7 의 도전율을 갖는 구리의 유효 도전깊이(Skin depth)는 약 0.47mm이고, 이 때의 출력전압은 194V로 8mm 두께를 사용할 때 출력전압의 약 54%에 해당한다. 1mm 두께의 구리를 사용할 경우, 출력전압은 238V로 8mm 두께를 사용할 때 출력전압의 약 70%에 해당하므로 상쇄금속판의 역할에

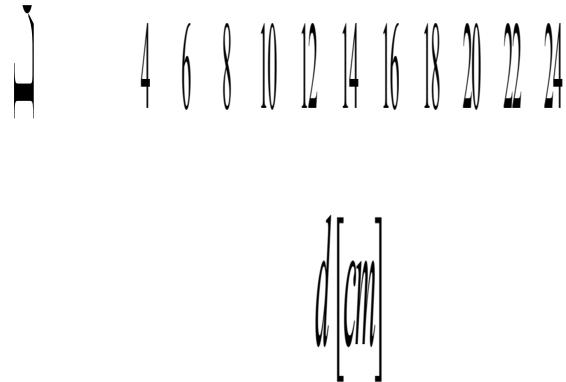
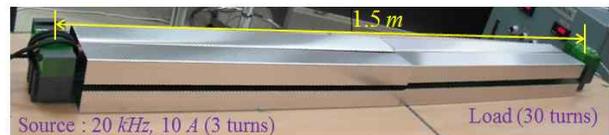


그림 10 케이블 사이의 거리에 따른 누설자속 자기저항 시뮬레이션 결과

Fig. 10 Simulation results of the leakage flux magnetic reluctance along the distance between magnetic cables



(a)



(b)

그림 11 (a) 상쇄실드를 적용하지 않은 자기케이블
(b) 알루미늄(AL) 상쇄금속관을 적용한 자기케이블

Fig. 11 (a) The magnetic cable without cancel shields
(b) The magnetic cable with the cancel aluminum pipe

무리가 없다. 또한, 2mm 두께의 구리를 사용할 경우, 출력전압은 8mm 두께를 사용할 때 출력전압의 약 88%까지 상승하므로 구리두께가 2mm 이상이면 누설자속을 상쇄시키는데 충분하다고 할 수 있다. 구리의 두께가 5mm를 넘으면 구리의 두께를 늘려도 출력전압은 큰 변화가 없다.

그림 10은 케이블 사이의 거리와 5mm 두께의 상쇄금속판 적용 유무에 따른 누설자속 자기저항의 변화를 나타내고 있다. (6)과 같이 케이블 사이의 거리가 멀어질수록 누설자속 자기저항은 증가하는 것으로 나타났

고, (6)의 계산결과와 시뮬레이션 결과가 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 자기케이블에 상쇄금속관을 적용한 경우 누설자속 자기저항이 약 10배 이상 증가하는 것을 확인하였다. 이 결과는 상쇄금속관이 누설자속 자기저항을 충분히 증가시킨다는 것을 증명한다.

자기케이블을 이용한 전력전달 실험을 위해 그림 11과 같이 투자율 2500의 자기코어로 길이 1.5m, 단면적 0.0015m²의 자기케이블을 제작하였다. 입력으로 20kHz, 10A_{rms}의 정전류원을 사용하였고, 입력코일선과 출력코일선의 턴 수는 각각 3턴과 30턴이다. 또한, 출력에 최대 전력을 전달하기 위해 입력코일선과 출력코일선에 각각 직렬로 보상커패시터를 연결하였다. 실험을 통해 5mm 두께의 상쇄금속관 적용 유무에 따른 자화 인덕턴스와 출력전압 및 출력전력을 비교하였다.

정전류원을 입력으로 사용하는 자기케이블의 등가회로를 그림 12에 나타내었다^{[4][6]}.

L_{11} 과 L_{12} 는 입력코일선과 출력코일선의 누설인덕턴스이고, L_m 은 자화인덕턴스다. C_1 과 C_2 는 입력코일선과 출력코일선의 보상커패시터다. 또한, N_s 와 N_L 은 각각 입력코일선과 출력코일선의 턴 수다. 그림 12. (a)에서 입력코일선의 보상커패시터 C_1 의 공진조건은 다음과 같다.

$$j\omega L_{11} + \frac{1}{j\omega C_1} \cong 0 \quad (10)$$

통상 입력코일선의 누설인덕턴스와 보상커패시터에 의한 공진주파수를 입력전원의 공진주파수보다 약간 높게 하거나 낮게 하여 입력코일선에 정전류가 흐르도록 제어한다. 그러므로 그림 12. (b)와 같이 입력부분을 전류원으로 등가변환 할 수 있다. 변압기를 제거하기 위해 출력코일선의 누설인덕턴스, 보상커패시터, 부하저항을 입력코일선으로 등가변환하면 그림 12. (c)와 같이 등가회로가 단순화된다. 여기에 테브낭 등가변환을 적용하여, 입력전류원과 자화인덕턴스의 병렬회로를 그림 12. (d)와 같이 테브낭전압원과 자화인덕턴스 직렬회로로 변환시킬 수 있다. 이 때, 테브낭전압은 (11)과 같다.

$$V_{th} = j\omega L_m I_s \quad (11)$$

$$j\omega L_m + \frac{j\omega L_{12}}{n^2} + \frac{1}{j\omega n^2 C_2} = 0 \quad (12)$$

그림 12. (d)에 (12)와 같이 출력코일선의 보상커패시터 C_2 의 공진조건을 적용하면, 그림 12. (e)와 같이

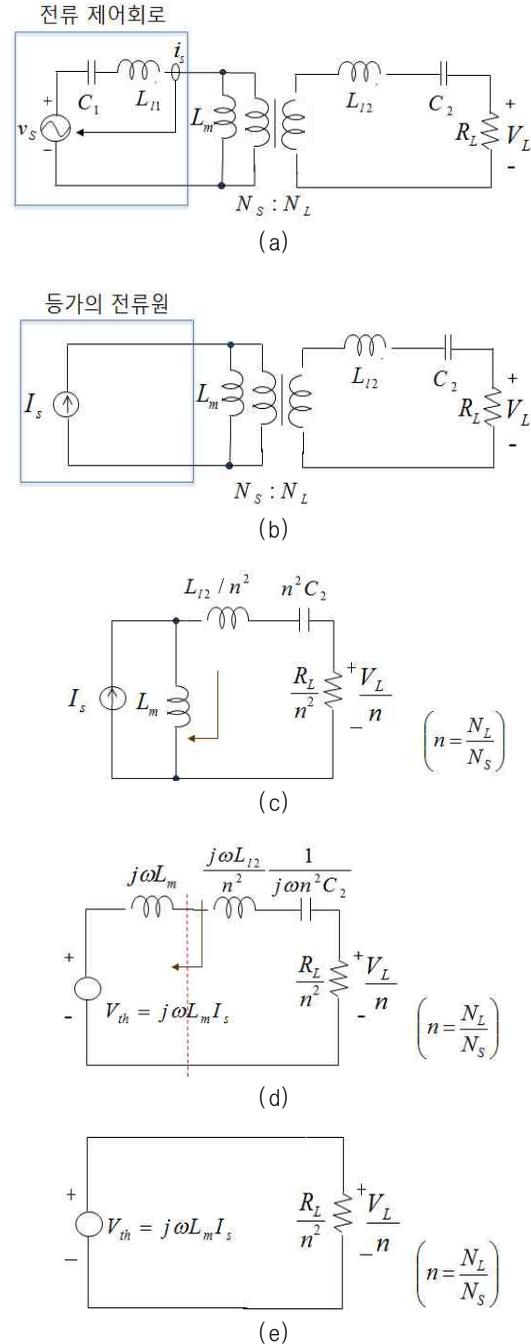


그림 12 정전류원을 입력으로 사용하는 자기케이블의 등가회로

Fig. 12 The equivalent circuit of the magnetic cable using the constant current as input source

등가회로에 테브낭전압원과 부하저항만 남게 된다. 그러므로 출력전압과 출력전력을 다음과 같이 매우 간단하게 계산할 수 있다.

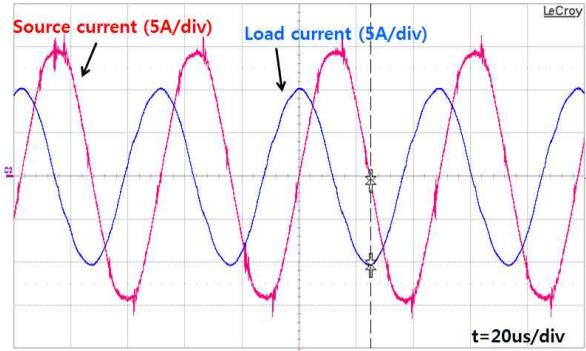


그림 13 입력코일선과 출력코일선의 전류파형
 Fig. 13 The current waveform of the source and load windings

$$V_L = jn\omega L_m I_s, P_L = \frac{(n\omega L_m I_s)^2}{R_L} \quad (13)$$

(13)의 출력전압식을 통해, 출력전압의 위상이 입력 전류의 위상보다 90° 빠르다는 사실을 알아내었다. 또한, 저항부하일 때 출력전압과 출력전류는 동위상이므로 출력전류의 위상 역시 입력전류의 위상보다 90° 빠르다는 사실도 알아내었다.

입력전류와 출력전류 사이의 위상관계를 증명하기 위해 그림 11과 같이 제작된 자기케이블의 입력코일선과 출력코일선에 각각 (10)과 (12)의 공진조건을 적용한 후 입력전류와 출력전류를 측정하였다. 그림 13의 측정결과를 통해, 출력전류의 위상이 입력전류의 위상보다 90° 앞서 있는 것을 확인하였다^{[4][6]}.

그림 14과 그림 15는 케이블 사이의 거리에 따른 자화인덕턴스 L_m 과 결합계수(Coupling coefficient) 측정 결과다. 상쇄금속관을 적용하지 않은 자기케이블에서 케이블 사이의 거리가 멀어짐에 따라 누설자속 자기저항이 증가하여 자화인덕턴스가 증가한다. 그러나 케이블 사이의 거리가 17cm 이상 멀어지게 되면, 전달자속 자기저항과 출력자속 자기저항이 증가하게 되어 자화인덕턴스는 감소하기 시작한다. 자기케이블에 상쇄금속관을 적용했을 때, 케이블 사이의 거리에 관계없이 자화인덕턴스가 약 2배 이상 증가하였다. 또한, 상쇄금속관이 적용된 자기케이블은 누설자속 자기저항이 충분히 크기 때문에 케이블 사이의 거리가 멀어짐에 따라 전달자속 자기저항과 출력자속 자기저항의 증가로 인한 자화인덕턴스 감소만 나타나는 것을 확인하였다. 케이블 사이의 거리에 따른 결합계수 변화는 자화인덕턴스 변화와 매우 유사하게 나타났다. 상쇄금속관을 적용하지 않았을 때 결합계수는 자화인덕턴스 변화에

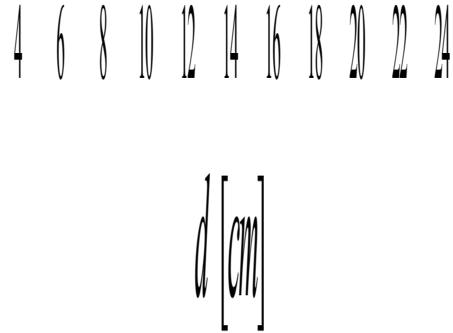


그림 14 케이블 사이의 거리에 따른 자화인덕턴스
 Fig. 14 The magnetize inductance along the distance between magnetic cables

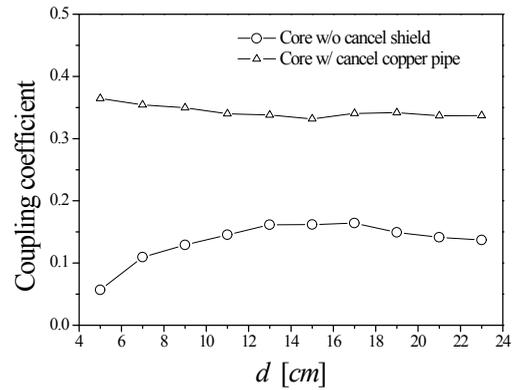


그림 15 케이블 사이의 거리에 따른 결합계수
 Fig. 15 The coupling coefficient along the distance between magnetic cables

서와 같은 이유로 케이블 사이의 거리가 증가함에 따라 서서히 증가하다가 17cm를 넘어서면서 감소하였고, 상쇄금속관을 적용했을 때 결합계수는 케이블 사이의 거리가 멀어짐에 따라 역시 서서히 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 상쇄금속관을 적용했을 때 결합계수가 약 2배 이상 높게 나타나는 것도 확인하였다.

자기케이블 사이의 거리에 따른 무부하 출력전압 측정결과, 시뮬레이션 결과, 계산결과를 그림 16에 비교하였다. 또한, 상쇄금속관이 적용된 자기케이블의 출력전압 측정결과와 시뮬레이션 결과도 함께 비교하였다. 자기케이블의 출력전압은 자화인덕턴스에 비례하므로 그림 14의 결과와 비슷한 그래프 유형을 나타내고 있다^[6]. 케이블 사이의 거리가 5cm일 때, 상쇄금속관을 적용한 자기케이블의 출력전압은 218V로 상쇄금속관을 적용하지 않은 경우의 출력전압 39V보다 5배 이상

4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24



그림 16 케이블 사이의 거리에 따른 무부하 출력전압
Fig. 16 The open-circuit output voltage along the distance between magnetic cables

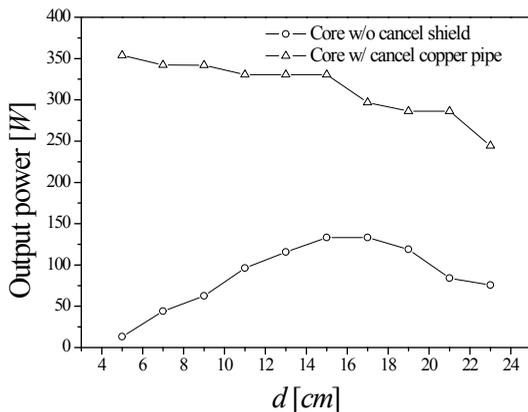


그림 17 케이블 사이의 거리에 따른 출력전력
Fig. 17 The output power along the distance between magnetic cables

높게 측정되었다. 또한, 케이블 사이의 거리가 짧을수록 상쇄금속관의 효과가 더욱 크게 나타났으며, 시뮬레이션 결과도 거의 일치하였다.

그림 17는 상쇄금속관을 적용했을 때와 적용하지 않았을 때의 자기케이블 사이의 거리에 따른 출력전력 측정결과다. 출력전력은 자화인덕턴스의 제곱에 비례하므로, 무부하 출력전압과 마찬가지로 그림 14의 자화인덕턴스의 특성과 상당히 비슷하다. 케이블 사이의 거리가 5cm일 때, 상쇄금속관을 적용한 자기케이블은 353.8W의 전력을 68% 효율로 전달한 반면, 상쇄금속관을 적용하지 않은 자기케이블은 13.2W의 전력을 9%의 효율로 전달하였다. 상쇄금속관을 사용함으로써 25배 이상 높은 전력을 전송하였고, 효율도 7배 이상 증가하였다. 출력전력도 무부하 출력전압과 마찬가지로

로 케이블 사이의 거리가 짧을수록 상쇄금속관의 효과가 크게 나타났다.

4. 결 론

두 개의 평행한 자기코어와 누설자속 자기저항을 증가시켜주는 상쇄실드를 사용한 새로운 형태의 자기케이블이 제안되고, 시뮬레이션과 실험을 통해 자기케이블의 특성과 상쇄실드의 효과를 증명하였다. 상쇄실드를 사용함으로써 누설자속 자기저항이 충분히 증가하였고, 출력전력과 효율도 상당히 개선되었다. 출력전력 및 효율을 더욱 증가시키기 위해 먼저 위치에 따라 달라지는 누설자속에 의해 발생하는 상쇄실드 표면의 상쇄전류에 의한 정확한 손실을 계산할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다. 다음으로는 높은 투자율의 자기코어 개발이나 자기코어 재료의 특성을 개선시키는 것이 필요하다. 전송전력을 증가시키기 위해 높은 주파수를 사용하는 것도 하나의 방법이다. 자기케이블은 매우 안전하고 악조건의 주변 환경에서도 좋은 내구성을 가지므로, 마이크로 와트 수준의 임플란트 칩에서 전기 기차 또는 산업기계와 같은 메가와트 수준의 시스템까지 많은 분야에서 응용하여 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 장용덕 외 1명, "공동주택의 감전방지형 콘센트 박스" 대한민국 특허, 출원번호 10-2008-0020665, 2008. 3. 5.
- [2] 김영규, "감전방지용 □b기구를 갖춘 공동주택용 전원공급기구" 대한민국 특허, 출원번호 10-2010-0107321, 2010. 10. 29.
- [3] N. P. Suh, D. H. Cho, C. T. Rim, "Design of On-Line Electric Vehicle (OLEV)", Plenary lecture at the 2010 CIRP Design Conference in Nantes, France, April 19-21, 2010.
- [4] Jin Huh, Sungwoo Lee, Changbyung Park, Gyu-Hyeong Cho, Chun-Taek Rim, "High Performance Inductive Power Transfer System with Narrow Rail Width for On-Line Electric Vehicles", ECCE 2010, pp. 647-651, 2010. Sep.
- [5] Sungwoo Lee, Jin Huh, Changbyung Park, Nam-Sup Choi, Gyu-Hyeong Cho, Chun-Taek Rim, "On-Line Electric Vehicle using Inductive Power Transfer System", ECCE 2010, pp. 1598-1601, 2010. Sep.
- [6] Jin Huh, Wooyoung Lee, Gyu-Hyeong Cho, Byunghun Lee, Chun-Taek Rim, "Characterization of

- Novel Inductive Power Transfer Systems for On-Line Electric Vehicles”, IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition, pp. 1975-1979, 2011. Mar.
- [7] Sungwoo Lee, Wooyoung Lee, Jin Huh, Hyun-Jae Kim, Changbyung Park, Gyu-Hyeoung Cho, Chun-Taek Rim, "Active EMF Cancellation Method for I-Type Pick-up of On-Line Electric Vehicles," IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition, pp. 1980-1983, 2011. Mar.
- [8] Jin Huh, Chun-Taek Rim, "KAIST Wireless Electric Vehicles - OLEV," JSAE Annual Congress, 2011. May.
- [9] Jin Huh, Wooyoung Lee, Suyong Choi, Gyu-Hyeong Cho, and Chun-Taek Rim, "Explicit Static Circuit Model of Coupled Magnetic Resonance System," ECCE-Asia, pp. 2233-2240, 2011. May.
- [10] J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and C. T. Rim, "Narrow-width inductive power transfer system for On-Line Electrical Vehicles," in IEEE Trans. on Power Electron., to be published.
- [11] 이성우, 박창병, 조정구, 조규형, 임춘택 "온라인 전기자동차용 초박형의 U-I형 및 W-I형 급집진코일 설계", 전력전자학회논문지, pp. 274-282, 2011. 6.
- [12] 허진, 박은하, 정구호, 임춘택, "온라인전기자동차용 고효율 자기유도 전력시스템(High Efficient Inductive Power Supply System Implemented for On Line Electric Vehicles)" 전력전자학회 추계 학술대회, 성균관대학교, 서울, pp. 159-163, 2009. 11.
- [13] 정구호, 이경훈, 김형국, 조양진, 송보윤, 손영동, 박은하, 최주영, 공병호, 허진, 손호섭, 조정구, 임춘택, 전성준, "온라인 전기 자동차를 위한 급전 및 집진 시스템", 전력전자학회 하계 학술대회, 강원도 평창, pp. 218-219, 2010. 7.
- [14] 이성우, 박창병, 조정구, 조규형, 임춘택, "온라인 전기자동차용 초박형 급집진코일", 전력전자학회 하계 학술대회, 2010년 7월 8일, 강원도 평창, pp. 353-354.
- [15] 허진, 이우영, 조정구, 조규형, 임춘택, "전류원 급전-변압기 공진형 자기유도 전력전달시스템 특성연구", 전력전자학회 하계 학술대회, 강원도 평창, pp. 355-356, 2010. 7.
- [16] 허진, 이우영, 이성우, 조규형, 조정구, 임춘택, "넓은 좌우 허용편차를 갖는 EV 정착중 무선충전용 급집진코일", 전력전자학회 추계 학술대회, 명지대학교, pp. 54-55, 2010. 11.
- [17] 서남표 외 4명, "전기자동차용 초박형 급전장치와 집진장치" 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-0029671, 2009. 4. 6.
- [18] 임춘택, "전기자동차 시스템", 대한민국 특허, 출원번호 10-2008-0135426, 2008. 12. 29.
- [19] 서남표 외 6명, "전기자동차용 급전장치 및 집진장치", 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-0088773, 2009. 9. 19.
- [20] 임춘택 외 6명, "전기자동차용 급전장치 및 집진장치", 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-091802, 2009. 9. 28.
- [21] 서남표 외 6명, "전기 자동차용 급전 레일 장치", 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-095761, 2009. 10. 8.
- [22] 서남표 외 11명, "EMF 감소장치를 구비한 전기자동차용 모노레일방식 급전장치", 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-098977, 2009 10 16.
- [23] 서남표 외 9명, "콘크리트 구조물에 의해 보호되는 전기자동차용 급전장치", 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-098982, 2009. 10. 16.
- [24] 임춘택 외 6명, "온라인 전기자동차용 듀얼레일 급전 시스템의 전자기장 차폐장치 및 방법", 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-0131285, 2009. 12. 24.
- [25] 임춘택 외 6명, "온라인 전기자동차용 가변전력 송출 시스템 및 방법", 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-0134970, 2009. 12. 30.
- [26] 임춘택 외 3명, "온라인 전기 자동차용 DC-DC 컨버터", 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-0134971, 2009. 12. 30.
- [27] 임춘택 외 6명, "전류원 입력 자기공명 전력전달장치의 공진장치", 대한민국 특허, 출원번호 10-2010-067162, 2010. 7. 13.
- [28] 임춘택, 허진, 이우영, "자기케이블 전력전달 장치 및 이를 이용한 충전장치", 대한민국 특허, 출원번호 10-2011-0003778, 2011. 1. 4.
- [29] 임춘택, 허진, 이우영, "자기케이블을 이용한 전동차 전력전달 장치", 대한민국 특허, 출원번호 10-2011-0019486, 2011. 3. 4.
- [30] 바쿰슈멜체 게엠베하 운트 코, 카게, "변류기에 사용하기에 적합한 자기코어, 상기 자기 코어의 제조 방법 및 상기 자기 코어를 구비한 변류기", 대한민국 특허, 출원번호 10-2001-7006033, 2001. 8. 22.

저 자 소 개



이우영(李宇寧)

1984년 10월 13일생. 2010년 아주대 전자공학부 졸업. 2010년~현재 KAIST 전기 및 전자공학과 석사과정.



허진(許晉)

1972년 8월 4일생. 2002년 KIT(국립) 전자공학과 졸업. 2004년 POSTECH 전자공학과 졸업(석사). 2004년~2009년 LG display 연구원. 2009년~현재 KAIST 전기 및 전자공학과 박사과정.



최수용(崔水壙)

1987년 4월 12일생. 2011년 부산대 기계공학부 졸업. 2011년~현재 KAIST 원자력 및 양자공학과 석박사 통합과정.



임춘택(林春澤)

1963년 2월 11일생. 1984년 기술고등고시 합격. 1985년 KIT(국립) 전자공학과 졸업. 1987년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학). 1989년~1995년 ROTC 장교 국방부/육군 근무. 1995년~2003년 국방과학연구소 선임연구원. 2003년~2007년 청와대 안보실 행정관(국방정책). 2007년~2009년 KAIST 항공우주공학과 전문교수. 2009년~현재 KAIST 원자력 및 양자공학과 부교수. 당 학회 무선전력전문위원장.