

# FEM 시뮬레이션 기반 고효율 AGV용 코일 최적 설계 연구

김선호, 이재민, 이은수  
 한양대학교 ERICA 전자공학부

## Optimal Coil Design for High-Efficiency AGV Based on FEM Simulation

Seonho Kim, Jaemin Lee, Eunsoo Lee  
 Hanyang University ERICA, Electrical Engineering

### ABSTRACT

본 논문에서는 AGV용 송수신 코일의 최적 설계를 통해 열 안정성과 고효율 구동이 가능한 코일 최적 설계 방법론을 제시하였다. 제안하는 방법을 통해 코일과 코어의 재료 특성, 인덕턴스, 결합계수 등을 고려하여 FEM 및 회로 시뮬레이션을 통해 코일 손실을 줄이고 전력 전달 효율을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 3.3kW급 AGV를 대상으로 코일 최적 설계를 진행하였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안하는 방법론이 유효함을 확인하였다.

### 1. 서론

Auto-Guided Vehicles (AGV)는 전세계적으로 공장자동화를 위해 필수적으로 사용되는 중요한 Electric Vehicles (EV)이다. AGV 충전은 사용자가 직접 배터리를 교체하는 방식보다는, AGV가 직접 충전 스테이션으로 이동하여 conductive power transfer (CPT) 방식으로 충전하거나, Inductive power transfer (IPT) 방식으로 충전하는 것이 일반적이다. CPT의 경우 직접 충전 단자에 접촉하여 충전하므로 고효율 충전이 가능하나, 정확한 충전지점에서 정확히 단자를 꽂도록 가이드해야 하는 단점이 있다. 이로 인해 현재 대부분의 AGV는 IPT 충전 방식을 채용하고 있으며, CPT 대비 효율이 열세이더라도 어느 정도 정렬편차 허용 (Misalignment Tolerance) 이 가능하다는 장점이 있다. AGV 고속 충전의 경우 코일 발열의 열 전도로 인해 배터리 온도가 상승하고, 이로 인해 배터리 수명 및 효율 저하라는 단점이 있으므로, 입출력 전압 및 전력조건에 따른 충전코일의 최적화 설계가 중요하다 [1].

본 논문에서는 코일 최적화를 위한 디자인 방법론을 제안하였으며, 이를 통해 원하는 전력조건에서 구동할 수 있는 코일 구동 솔루션을 제공한다. 제안하는 디자인 방법론을 통해, AGV IPT 최적 설계 및 구동이 가능하며, 본 논문에서는 이를 FEM 및 회로 시뮬레이션 기반 방법론을 제안하였다.

## 2. 제안하는 AGV용 IPT 코일

### 2.1 FEM 시뮬레이션 모델링

제안하는 코일은 그림 1과 같이  $T_x$  코일은 12턴, 10턴의 2층 구조를 적용하였고,  $R_x$  코일은 10턴 단일 층을 적용하였다. 양측 모두 와전류로 발생하는 표면 효과를 줄이기 위해 Stranded Coil을 사용하였고, 사각형 코일 구조를 사용하였다.

### 2.2 AGV용 IPT 시스템 회로 설계

제안하는 IPT 시스템 회로는 그림 2와 같이 S-S 보상 토폴로지를 사용하였으며, DC Source, 풀브릿지 인버터 (Full-bridge inverter), 정류기(Rectifier), 부하 저항 및 전압으로 구성된다. S-S 보상 토폴로지에서 품질 계수(Quality

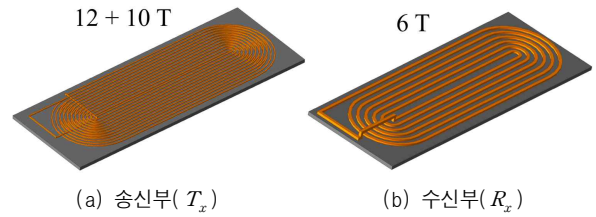


그림 1. 제안하는 송수신부 코일 구조

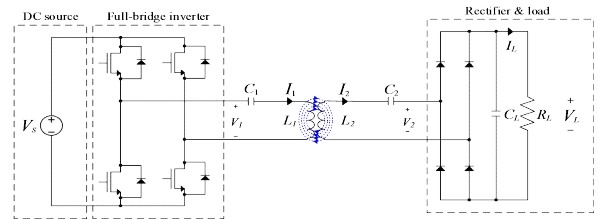


그림 2. 제안하는 AGV용 IPT 시스템 회로

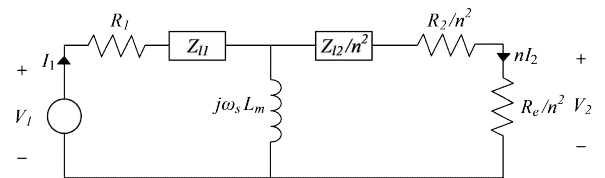


그림 3. 제안하는 AGV용 IPT 시스템 등가 회로

$$V_1 = \alpha_s V_s, V_2 = \alpha_L V_L \quad (1)$$

$$\alpha_s = \alpha_L = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cong 0.9 \quad (2)$$

Factor, Q)는  $\omega_s L / R_L$  로 정의되는데, 본 논문에서 사용하는 회로는 낮은 부하 저항 조건을 가지고 있고, 회로 해석에서 비교적 간단하기 때문에 S-S 보상 토폴로지를 사용하였다. 그림 2에서  $V_s, V_1, V_2, V_L$ 을 변환 비율  $\alpha$ 를 이용하여 정리하면 식 (1), (2)로 표현할 수 있다. 그림 2의 회로를 테브난의 정리 (Thevenin's Theorem)를 이용하여 등가 회로로 정리하면 그림 3을 얻을 수 있다. 그림 3을 통해  $Z_{11}, Z_{12}, I_1, I_2, P_1, P_2$ 를 순서대로 구하면 식 (3), (4), (5), (6)과 같다.

$$Z_{n1} = j\omega_s L_{n1} + \frac{1}{j\omega_s C_1}, Z_{n2} = j\omega_s L_{n2} + \frac{1}{j\omega_s C_2} \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{V_1}{j\omega_s L_m // \left( \frac{Z_{n2}}{n^2} + \frac{R_2}{n^2} + \frac{R_c}{n^2} \right) + (R_1 + Z_{n1})} \quad (4)$$

$$L_2 = \frac{jn\omega_s L_m}{(Z_{l2} + R_2 + R_c) + jn^2\omega_s L_m} I_1 \quad (5)$$

$$P_1 = \text{Re}\{V_1 I_1^*\}, P_2 = |I_2|^2 R_c \quad (6)$$

스위칭 주파수를 제외한 다른 파라미터들은 FEM 시뮬레이션을 통해 추출한 값 또는 주어진 값을 사용하기 때문에 식 (3), (4), (5), (6)은 스위칭 주파수  $f_s$ 만으로 제어할 수 있다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 부하 저항 및 다른 파라미터 값들을 고정한 상태에서 주파수만 제어하면 필요한 전력 값을 얻을 수 있다.

제안하는 코일 설계 프로세스는 FEM 시뮬레이션을 통해 추출한 기본 파라미터(R, L, k)를 이용해 회로 시뮬레이션 모델링을 진행한다. 이때의 손실 값과 FEM 시뮬레이션 결과가 일치하도록 코일 구조를 다시 모델링하고 코어의 자기 포화화 온도 특성을 확인하며 설계과정을 마무리한다. 이 과정을 그림 4에 제시하였다.

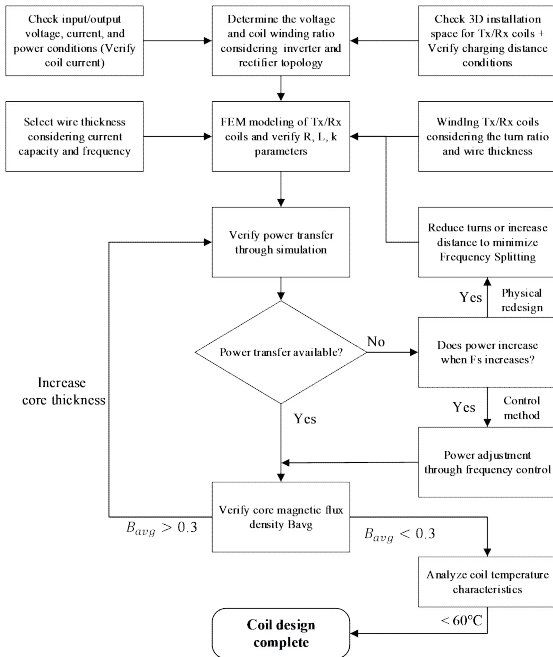


그림 4. 제안하는 AGV용 코일 최적 설계 프로세스

표 1 제안하는 AGV용 IPT 시스템 파라미터

$R_1$ [ $\Omega$ ]	0.20	$R_2$ [ $\Omega$ ]	0.05
$L_1$ [ $\mu\text{H}$ ]	121.0	$L_2$ [ $\mu\text{H}$ ]	8.5
$C_1$ [ $\text{nF}$ ]	20.9	$C_2$ [ $\text{nF}$ ]	298.0
$V_{dc}$ [V]	365	$R_L$ [ $\Omega$ ]	3.1
$f_s$ [kHz]	117	$N_1:N_2$	22:6

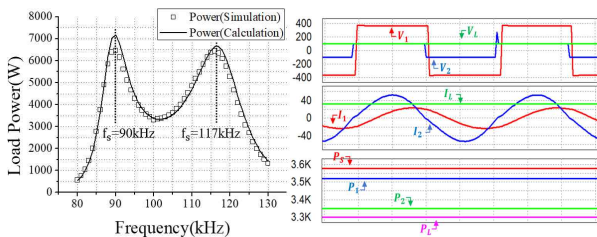


그림 5. 주파수별 부하 전력 변화 및 IPT 시뮬레이션 파형 결과

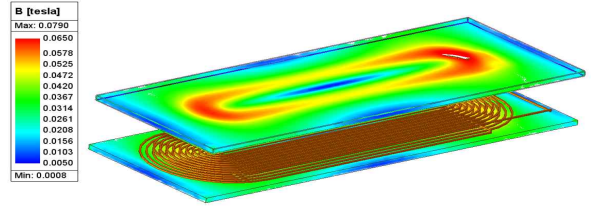


그림 6. 자기장 분포에 대한 FEM 시뮬레이션 결과

### 3. 시뮬레이션 및 결과

IPT 시스템 회로에서 스위칭 주파수  $f_s$ 만을 제어하여 90, 117kHz에서 높은 전력 값을 가지는 것을 확인하였다. 이를 토대로 90, 117kHz에서 회로 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, 117kHz에서 AC 효율 95.14%로 최대가 나오는 것을 확인하였고, 이를 그림 5에 표현하였다. 또한, FEM 시뮬레이션을 통해  $B_{avg}$ 가 약 0.035 [T]로 코일 구조가 적절함을 확인하였다.

### 4. 실험을 통한 검증

제안하는 AGV용 코일의 성능을 확인하기 위해 표 1의 값들을 이용하여 실험을 진행하였다. 송신부와 수신부의 전압과 송신부 코일 전류를 측정하여 시뮬레이션 파형과 유사함을 확인하였고, 코일과 코어의 온도를 측정하여 모두 60°C 이하의 값이 나온다는 사실을 확인하였다.

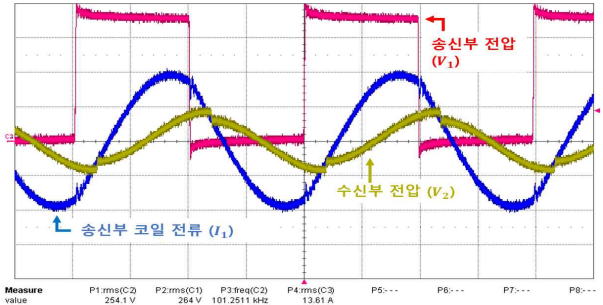
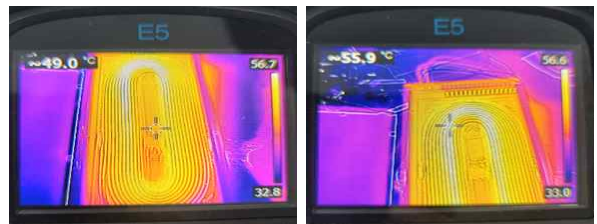


그림 7. AGV용 코일 실험 파형 결과



(a) 송신부 ( $T_x$ ) 코어 온도 (b) 송신부 ( $T_x$ ) 코일 온도

그림 8. AGV용 코일 및 코어 온도 특성 분석 결과

### 5. 결론

본 논문에서는 FEM 시뮬레이션, 회로 시뮬레이션을 통해 AGV용 최적 코일 구조 및 프로세스를 제안하였다. 제안하는 방법론을 통해 AGV용 3.3kW급 IPT 무선 충전 시스템을 최적 설계하였고, 시뮬레이션 및 실험을 통해 전력 전달 효율, 자기장 분포 및 온도 특성을 확인하여 제안된 구조의 우수성을 확인하였다.

### 참고 문헌

[1] E. S. Lee and S. H. Han, "2-D Thin Coil Designs of IPT for Wireless Charging of Automated Guided Vehicles," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 2, pp. 2629-2644, April 2022.