

전기자동차용 대용량 다상 무선 충전 패드 형상 비교 분석

김채린, 심동현, 이주아, 조현우, 이병국†
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Comparison Analysis of High Capacity Multi-Phase Wireless Charging Pad for Electric Vehicles

Chae-Lyn Kim, Dong Hyeon Sim, Ju-A Lee, Hyeonu Jo, Byoung Kuk Lee†
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차의 대용량 무선 충전을 위한 다상 대전력 패드의 형상을 제안한다. 이를 위해 코일 형상 및 패드 사이즈 별 Finite element method (FEM) 시뮬레이션을 실시하며, 송·수신 패드의 정렬 오차에 따른 무선 충전 패드의 주요 파라미터를 도출한다. 이를 기반으로 코일 형상 및 사이즈에 따른 특징 비교를 통해 고효율 전력 전달이 가능한 최적 무선 충전 패드 모델을 선정한다.

1. 서론

최근 전기자동차의 시장 확대로 고속 충전의 필요성이 증가함에 따라 무선 전력 전송 (Wireless power transfer, WPT) 시스템의 대용량화에 관한 연구가 진행되고 있다. 현재 전기자동차 무선 충전 표준 규격 SAE J2954에서는 전력 용량에 따라 WPT 1~3 (3.3~11 [kW] 급)으로 분류하며, 향후 WPT 4 (22 [kW] 급 이상)의 기술 표준화를 위한 논의가 진행 중이다^[1]. WPT 1~3의 경우 상대적으로 낮은 전력 용량에 의해 단상 시스템 구성이 가능하다. 반면 대용량 WPT의 경우 기존 단상 패드 적용 시 패드가 부담해야 하는 전력 용량이 커짐에 따라 전력 분담이 가능하도록 송·수신 패드의 다상 구성이 요구된다. 하지만 다상으로 구성된 무선 충전 패드 형상에 관한 표준 규격이 정의되지 않았기 때문에 효율적인 WPT 시스템을 구성하기 위한 무선 충전 패드 형상 고안이 필요하다.

송·수신 패드 간 자기적 결합을 통해 전력 전달을 수행하는 WPT의 경우 패드 간 높은 결합계수 (k)가 형성될수록 고효율 전력 전달이 가능하다. k 는 패드 간 정렬 오차 조건과 더불어 패드의 형상 및 크기에 의해 결정되므로, 무선 충전 패드 설계 시 이에 따른 k 비교가 필수적이다. 대전력 WPT를 위한 다상 무선 충전 패드의 경우 패드를 구성하는 코일 간 결합이 발생함에 따라 송·수신 패드 간 k 뿐만 아니라 패드 내부 코일 간 결합계수 (k')가 형성된다. 이때, 패드 내부 코일 간 k' 이 높게 형성될 경우 전력 전달 효율 저하와 더불어 높은 패드 전압을 야기한다^[2]. 따라서 높은 효율을 갖는 대용량 WPT 시스템 설계를 위해서는 다상 패드의 형상 별 k 비교를 통해 패드를 구성하는 코일 간 k' 은 낮고 송·수신 패드 간 높은 k 를 가지며, 정렬 오차에 따른 파라미터 변동이 작은 패드 선정이 요구된다. 이와 더불어 실제 차량 탑재를 고려하여 패드 무게에 따른 차량의 전비 저하를 최소화하며, International commission on non-ionizing radiation protection (ICNIRP)에서 제시하는 외부 방출 방사선 세기 규격을 만족할 수 있도록 패드 사이즈에 따른 k 및 외부 방출 방사선 비교가 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 대용량 WPT를 위한 50 [kW] 급 다상 무선 충전 패드의 형상을 제안한다. 제안된 패드 모델에 대해 형상 별 Finite element method (FEM) 시뮬레이션을 수행하며,

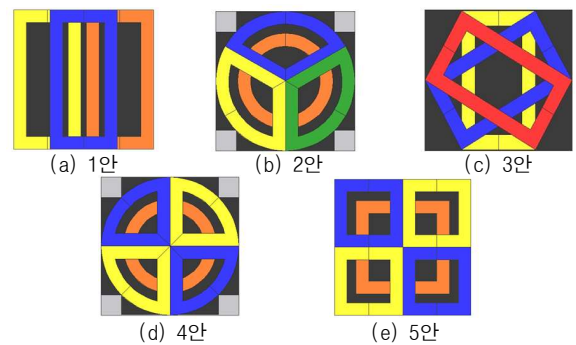


그림 1 제안하는 다상 무선 충전 패드 형상
 Fig. 1 Proposed multi-phase wireless charging pad shape

표 1 1~3안 패드의 정렬 오차에 따른 결합계수 변동 범위
 Table 1 Variation range in coupling coefficient of type 1~3 according to misalignment

| 결합계수 조건 | 1안 | 2안 | 3안 |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 송신 or 수신 패드 내 결합계수 (k') | 0.26~0.28 | 0.15~0.16 | 0.40~0.42 |
| 송·수신 패드 간 결합계수 (k) | 0.27~0.48 | 0.12~0.33 | 0.12~0.33 |

송·수신 패드 간 정렬 오차에 따른 무선 충전 패드의 주요 파라미터를 도출한다. 이를 기반으로 코일 형상 및 사이즈에 따른 특징 비교·분석을 수행하며 고효율 WPT에 적합한 최적 무선 충전 패드 모델을 선정한다.

2. 대용량 다상 무선 충전 패드 형상

2.1 제안하는 무선 충전 패드 형상 별 비교 및 분석

그림 1은 본 논문에서 제안하는 대용량 WPT를 위한 다상 무선 충전 패드 형상을 나타낸다. 제안된 패드의 전체 크기 및 코일의 외경은 가로 544 [mm], 세로 544 [mm]로 동일하게 구성하였다. 고효율 및 대용량 WPT 동작에 적합한 무선 충전 패드를 선정하기 위해 차량 주차 시 오정렬 조건을 고려하여 x축 ±100 [mm], y축 ±100 [mm], z축 100 [mm] 정렬 조건에서 패드 형상 별 FEM 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 기반으로 도출된 패드 간 k 및 인덕턴스 등 주요 파라미터에 대한 비교·분석을 실시한다.

1~3안 패드의 경우 수직 자속을 형성하는 코일 조합으로 구성되며, 1안 및 3안 패드는 그림 1(a), (c)와 같이 3상, 2안 패드는 그림 1(b)와 같이 4상으로 구성된다. 정렬 오차 조건에 따른 형상 별 k 및 k' 도출 결과는 표 1과 같다. 1~3안 패드 모두 송·수신 패드 간 k 보다 패드를 구성하는 코일 간 k' 이 높게 나타났다. 이는 패드

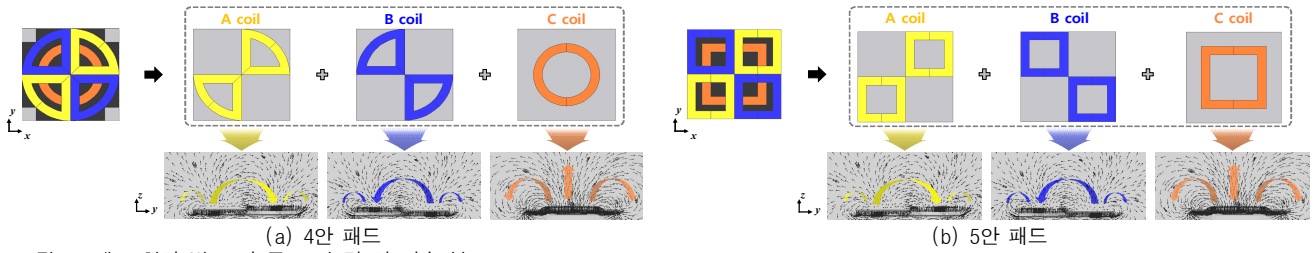


그림 2 패드 형상 별 코일 구조 및 각 상 자속 분포도
Fig. 2 Coil structure according to pad shape and magnetic flux generated in each phase

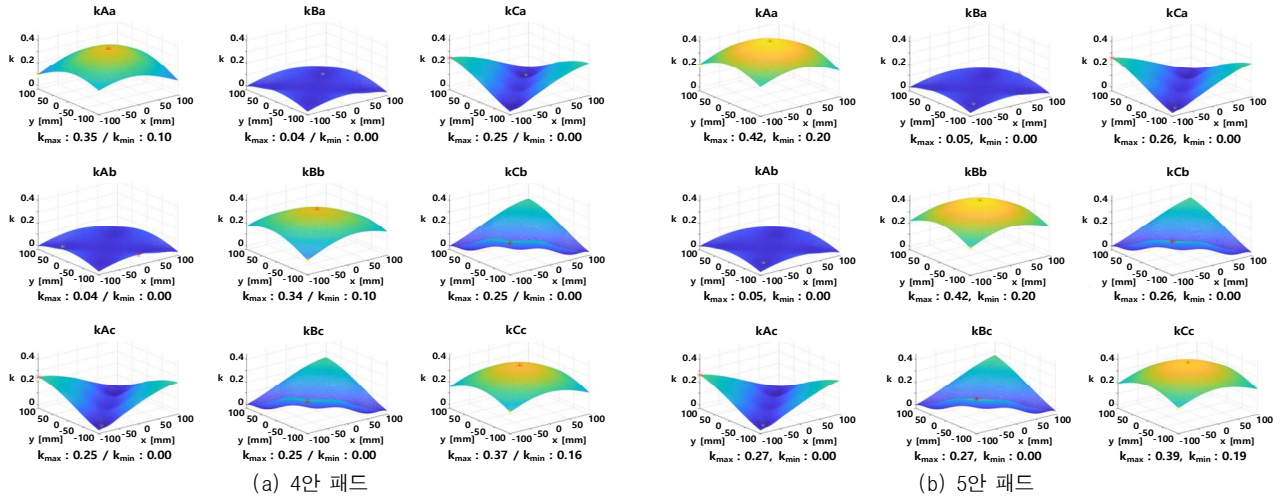


그림 3 정렬 오차에 따른 송·수신 패드 간 결합계수
Fig. 3 Coupling coefficient between GA and VA pads according to misalignment

표 2 4~5안 패드 형상 별 인덕턴스 도출 결과

Table 2 Results of deriving inductance by type 4~5

| 패드 형상 | 인덕턴스 [μH] | | |
|-------|------------------------|-------------|-------------|
| 4안 | GA coil A | GA coil B | GA coil C |
| | 24.98~25.6 | 24.98~25.72 | 24.23~24.34 |
| | VA coil a | VA coil b | VA coil c |
| | 24.96~25.68 | 25.05~25.73 | 24.24~24.37 |
| 5안 | GA coil A | GA coil B | GA coil C |
| | 32.42~33.53 | 32.36~33.52 | 29.24~29.43 |
| | VA coil a | VA coil b | VA coil c |
| | 32.37~33.55 | 32.34~33.53 | 29.44~29.60 |

내부에 높은 전압을 유발함에 따라 송신 패드에서 수신 패드로의 전력 전달보다 패드 자체에서 소모되는 전력이 크게 발생하기 때문에 높은 전력 손실의 원인이 된다.

4, 5안 패드의 경우 Double-D pad (DDP)와 같이 수평 자속을 형성하는 A, B 코일과 Circular pad (CP)와 같이 수직 자속을 형성하는 C 코일로 구성된다. 이때, A, B상 코일의 각 상에서 생성되는 수평 자속이 90° 차이를 갖도록 구성하며, 그림 2는 각 상의 코일 구조와 코일이 생성하는 자속을 나타낸다. A, B 코일 모두 수평 자속을 생성하지만 90° 차이를 갖는 패드 구성에 따라 두 코일 결합 시 서로 반대 방향의 자속이 쇄교하여 0에 가까운 k' 을 갖는다. 또한, 수평 자속을 생성하는 두 코일 (A, B)과 수직 자속을 생성하는 C 코일을 결합하여 패드를 구성할 경우 서로 다른 방향의 자속이 쇄교되므로 패드를 구성하는 코일 간 k' 이 0에 가까운 값을 갖게 된다. 이에 따라 패드를 구성하는 코일 간 높은 k' 형성 시 발생할 수 있는 문제점을 최소화할 수 있다. 4, 5안 패드는 동일한 구성을 갖기 때문에 구동 방식에 의한 차이는 존재하지 않는다. 하지만 코일 형상이 상이하기 때문에 이에 따른 파라미터 분석을 통한 4, 5안 패드 비교가 필요하다. 표 2는 형상 별 정렬 오차에 의한 인덕턴스를 도출한 결과이다. 일반적으로

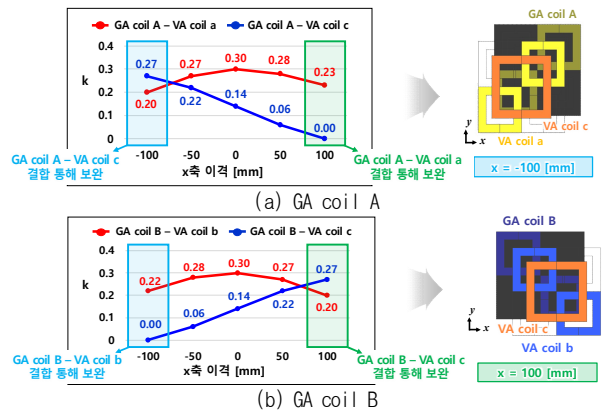


그림 4 5안 패드의 각 상 코일 별 결합계수
Fig. 4 Coupling coefficient for each phase coil of the type 5

사용되는 CP의 경우 8~10 [μH] 만큼의 변화량을 갖는 반면, 4안의 경우 최대 0.74 [μH], 5안의 경우 1.19 [μH]로 상대적으로 작은 변화량을 가진다. 이는 정렬 오차 조건에 의한 전기적 파라미터 변동이 작다는 것을 의미한다. WPT 시스템의 보상 네트워크는 모든 정렬 오차 조건에서 원활한 전력 전달을 위해 최소 결합계수 조건에서 설계되기 때문에 4, 5안 패드의 경우 파라미터 변동에 따른 설계 제약을 최소화할 수 있다. 그림 3은 패드 형상 및 정렬 오차에 따른 k 도출 결과를 나타낸다. 두 패드 모두 같은 구조로 구성되어 정렬 오차에 의한 k 변화 양상은 동일하지만, 더 넓은 코일 면적을 갖는 5안의 경우 4안에 비해 쇄교되는 자속량이 증가함에 따라 높은 k 특성을 가진다.

따라서 정렬 오차에 의한 파라미터 변동이 작아 WPT 시스템 설계 시 설계 제약에 의한 복잡성을 최소화할 수 있으며, 송·수신 패드 간 큰 k 를 갖는 5안 패드를 대용량 WPT를 위한 다상 무선 충전 패드로 선정하였다.

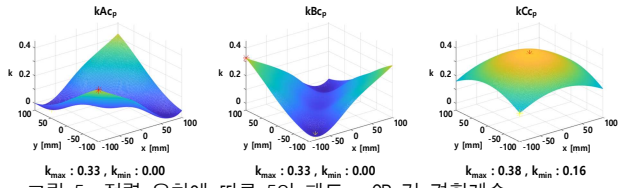
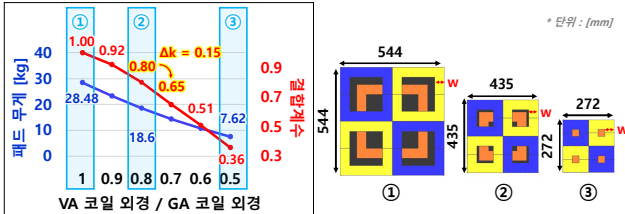


그림 5 정렬 오차에 따른 5안 패드 - CP 간 결합계수
Fig. 5 Coupling coefficient between type 5 pad - CP according to misalignment



(a) 패드 사이즈 별 파라미터 변화 (b) 수신 패드 코일 형상
그림 6 수신 패드 사이즈 선정 기준 및 코일 형상
Fig. 6 Criteria for selecting VA pad size and coil shape

이와 더불어 선정된 5안 패드에 대한 주요 특징 분석을 진행한다. 코일 구성에 따라 수평 자속을 형성하는 코일과 수직 자속을 형성하는 코일 간 결합 특성을 확인하기 위해 정렬 오차 별 k 를 분석하였다. 패드 형상을 통해 알 수 있듯이, 패드 간 수평 이격이 발생하면 수신 측 A 혹은 B 코일이 송신 측 C 코일에서 발생하는 수직 자속 쇄교에 유리한 위치로 이동함에 따라 동상 코일 간 k 는 감소하는 반면, A, B 코일과 C 코일 사이 k 는 증가하는 양상을 보이며, 수평 자속 형성 코일과 수직 자속 형성 코일이 서로 상호 보완 관계를 가진다. 그림 4는 y 축 최대 이격 조건 ($y=-100$ [mm])에서 x 축 이격만을 가변하여 도출한 k 를 나타낸다. 앞서 분석한 바와 같이, 수평 자속을 형성하는 코일과 수직 자속을 형성하는 코일은 서로 상호 보완 관계를 가지기 때문에 오정렬 조건에서도 높은 k 달성 가능성이 있음을 확인할 수 있다. 또한, 현재 연구되고 있는 전기자동차용 WPT의 경우 수직 자속을 생성하는 CP가 적용됨에 따라 5안 패드의 C 코일과 결합이 가능하며, 그림 5는 정렬 오차에 따른 상용 CP와 5안 패드 사이 k 도출 결과를 보여준다. CP와 동일하게 수직 자속을 생성하는 C 코일은 패드의 중앙 부분과 오정렬 시 수신 측 A 혹은 B 코일이 C 코일에서 발생하는 수직 자속 쇄교에 유리하게 정렬되는 부분에서 높은 k 가 측정됨에 따라 상용 CP와 높은 호환성을 가진다.

2.2 수신 패드 사이즈 별 비교·분석

차량 내 패드 탑재를 고려한 수신 패드의 최적 사이즈 선정을 위해 송·수신 패드 비율에 따른 수신 패드 무게 및 k 에 대해 분석한 결과는 그림 6(a)와 같다. 패드 사이즈에 따른 비교만을 수행하기 위해 동일한 종류의 코일과 턴 수를 적용한다. 이에 따라 코일의 너비 (w)는 50 [mm]를 가지며, 무게 도출 시 사용된 코일은 6 AWG type 2, 코어는 PL-13 재질로 가정한다. 파라미터 분석 결과 패드 사이즈 감소에 따라 패드 무게는 비교적 일정한 비율로 감소하였다. 반면, 송·수신 패드 크기의 비율이 0.8에서 0.7로 감소할 때 k 의 감소량이 급감하는 양상을 확인할 수 있었다. 따라서 그림 6(b)와 같이 송수신 패드가 동일한 크기인 경우, 수신 패드가 송신 패드의 절반인 경우 그리고 송신 패드 크기의 비율이 0.8인 경우를 선정하여 3가지 수신 패드 크기 구성안에 대한 FEM 시뮬레이션 기반 파라미터 비교·분석을 수행한다. 추가적으로, 차량에 탑재되는 수신 패드의 경우 ICNIRP에서 제시하고 있는 외부 자기장 규제 조건 만족 여부를 확인하기 위해 외부 자속 방출량을 측정하며, 정렬 오차에도 높은 k 를 갖는 최적 수신 패드 사이즈를 선정한다.

표 3 수신 패드 사이즈 별 정렬 오차에 따른 결합계수

Table 3 Coupling coefficient according to misalignment by VA size

| 패드 형상 | 결합계수 | | |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | GA A-VA a (kAa) | GA B-VA b (kBb) | GA C-VA c (kCc) |
| 1안 | 0.20~0.42 | 0.20~0.42 | 0.19~0.39 |
| 2안 | 0.12~0.27 | 0.12~0.27 | 0.13~0.27 |
| 3안 | 0.06~0.15 | 0.05~0.15 | 0.09~0.16 |

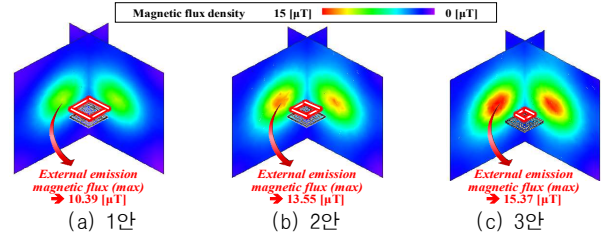


그림 7 수신 패드 사이즈 별 외부 자속 방출량 측정 결과
Fig. 7 Measurement of external magnetic flux emission by VA size

표 3은 수신 패드 사이즈 별 정렬 오차에 따른 송신 측 A, B, C 코일과 수신 측 a, b, c 코일 간 최대 및 최소 k 를 나타낸다. 패드의 사이즈가 클수록 결합 면적 증가에 따른 쇄교 자속량 증가로 송·수신 패드 간 높은 k 가 형성되어 전력 전달에 유리하다.

이후, 패드의 외부 자속 방출량을 확인하기 위해 최대 제한 전류를 73 [A_{rms}]로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 패드 중심으로부터 80 [cm] 떨어진 지점에서 외부 자속 방출량을 측정하며, 시뮬레이션 결과는 그림 7과 같다. 1~3안 수신 패드 모두 ICNIRP에서 제시하는 외부 자속 방출량 제한 조건 (≤ 27 [μ T])를 초과하지 않았으나, 패드 사이즈가 작을수록 외부 방출 자속이 증가하는 특징을 보인다. 이는, 패드 크기가 작을수록 상대적으로 작은 전류만으로 외부 방출 자속량이 크게 발생하기 때문에 대용량 전력 전달에 불리한 특징을 갖는다. 따라서 정렬 오차에 따른 k 및 외부 방출 자속량 비교·분석 결과 패드의 크기가 클수록 고효율 및 대용량 전력 전달에 유리하므로 1안이 적합하지만, 실제 차량 내 패드 탑재를 고려할 경우 무게로 인한 전비 손실을 최소화하며 사이즈 감소에 따른 급격한 k 변화가 발생하지 않는 2안 패드를 최적 수신 패드 사이즈로 선정하였다.

3. 결론

본 논문에서는 50 [kW] 급 대용량 WPT 시스템을 위한 다상 무선 충전 패드의 형상을 제안하였다. 최적 패드 형상을 선정하기 위해 패드 형상 및 사이즈 별 FEM 시뮬레이션을 실시하였으며, 정렬 오차에 따른 k 및 인덕턴스 등 주요 파라미터의 비교·분석을 수행하였다. 이를 기반으로 고효율 동작에 적합한 무선 충전 패드의 형상을 선정하였으며, 실제 차량 탑재를 고려하여 전비 감소를 최소화할 수 있는 최적 VA 사이즈를 선정하였다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0025182)

참고 문헌

[1] J. Pries, V. P. N. Galigekere, O. C. Onar and G.-J. Su, "A 50-kW Three-Phase Wireless Power Transfer System Using Bipolar Windings and Series Resonant Networks for Rotating Magnetic Fields," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 5, pp. 4500-4517, May 2020

[2] A. U. Ibrahim, W. Zhong and M. D. Xu, "A 50-kW Three-Channel Wireless Power Transfer System With Low Stray Magnetic Field" *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 9, pp. 9941-9954, Sept. 2021