

# 영구 자석이 적용 된 바이어스드 인덕터 신규 형상 설계 및 특성 분석

안효민, 조제형, 강정일<sup>†</sup>  
삼성전자

## Novel Geometry Design and Characterization of Permanent Magnet Biased Inductor

Hyo Min Ahn, Je-Hyung Cho, and Jeong-il Kang<sup>†</sup>  
Samsung Electronics Co., Ltd

### ABSTRACT

본 논문은 페라이트 코어와 영구 자석을 활용한 영구 자석 바이어스드 인덕터 (Permanent magnet biased inductor)의 새로운 구조를 제안하고, 그 성능을 이론적 분석과 실험적 검증 등을 통해 평가한다. 기존 영구 자석 바이어스드 인덕터는 코어 공극 내부 또는 외부에 영구 자석을 배치하는 방식으로 구성되어 있다. 그러나 기존 구성 방법은 영구 자석의 발열, 감자 문제나 회로의 전자파 간섭 (Electromagnetic Interference; EMI) 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 영구 자석 바이어스드 인덕터의 새로운 구조를 제안한다. 그리고 유한요소 해석 프로그램인 Altair Flux를 이용하여 자기장 분포 및 전류에 따른 포화 특성을 분석하고, 실험을 통해 제안된 구조의 타당성을 검증한다.

부착하면, 히스테리시스 곡선을 우측으로 이동 시킬 수 있다<sup>[1-2]</sup>. 이를 영구 자석 바이어스드 인덕터(Permanent Magnet Biased Inductor)라고 하며, 기존 연구에서는 그림 2와 같은 형상이 제안되었다<sup>[1-2]</sup>.

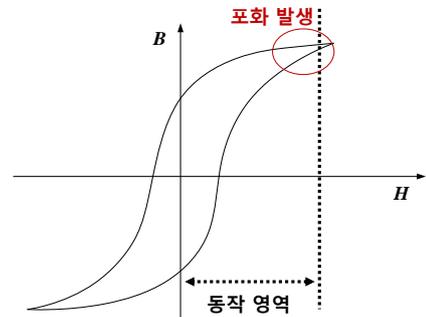
하지만 기존 연구에서는 영구 자석에 반대로 인가되는 자속으로 인한 발열과 감자(Demagnetization), 그리고 전자파 간섭(Electromagnetic Interference, EMI) 문제 등의 단점이 존재한다.

따라서, 본 논문에서는 영구 자석에 직접적으로 코일의 자속이 통과하지 않도록 하여 발열 및 감자 문제를 해결하고, 외부에 공극이 없어 EMI 문제를 방지할 수 있는 신규 형상을 제안한다. 제안된 신규 형상의 특성은 자기 해석 시뮬레이션 프로그램인 Altair Flux를 이용해 분석하고, 그 타당성을 검증한다.

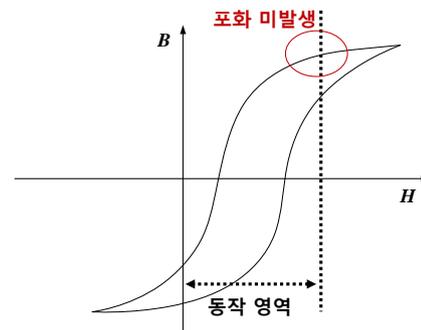
### 1. 서론

많은 전력 변환 회로에서 자성체는 큰 부피를 차지하기 때문에, 높은 전력 밀도를 달성하기 위해 자성체의 부피를 줄이는 것이 매우 중요하다. 이를 위한 대표적인 방법 중 하나는 스위칭 주파수를 높여 자성체에 흐르는 리플 전류를 감소시키고, 회로에서 요구되는 인덕턴스를 낮추는 것이다. 이러한 방식은 자성체에 교류(AC) 전류가 흐르는 공진형 컨버터의 변압기에 효과적으로 적용될 수 있다. 그러나 스위칭 주파수를 높이더라도 Boost PFC 컨버터의 인덕터, Buck 컨버터의 인덕터, 그리고 Flyback 컨버터의 변압기와 같이 교류 리플 전류와 더불어 직류 전류가 인가되는 자성체의 경우, 코어의 DC-bias 특성으로 인해 자성체 부피를 줄이는 데 한계가 존재한다. 따라서, 이러한 자성체의 부피를 더욱 줄이기 위해서는 스위칭 주파수 증가 외에도 추가적인 해결책이 필요하다.

그림 1(a)는 일반적인 자성체의 히스테리시스 곡선을 나타낸다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 직류 전류가 자성체에 인가되는 컨버터의 동작 영역은 주로 히스테리시스 곡선의 1사분면과 4사분면에 위치한다. 자성체를 설계할 때에는 이러한 동작 영역이 히스테리시스 곡선의 포화 영역 내에 위치하도록 설계하는 것이 필수적이다. 자성체의 부피가 증가할수록 포화되는 자계 세기가 증가하게 되며, 컨버터의 동작 영역이 넓어질수록 코어의 부피 또한 증가하게 된다. 그러나, 그림 1(b)와 같이 히스테리시스 곡선이 우측으로 이동하면, 동일한 동작 영역 내에서 포화를 방지할 수 있다. 코일에 반대 방향으로 자속이 형성 되도록 영구 자석을



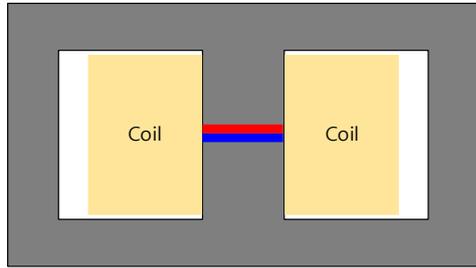
(a) 일반 코어



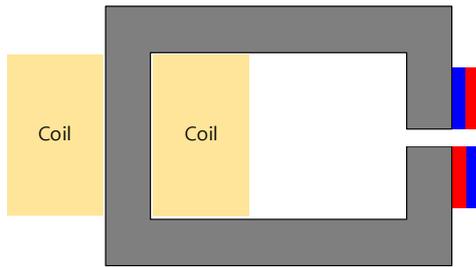
(b) 자석이 부착된 코어

그림 1 자석 유무에 따른 히스테리시스 곡선

Fig. 1 Hysteresis loop with and without permanent magnets



(a) 자석 센터 폴 공극 부착 조건



(b) 자석 외부 부착 조건

그림2 기존 바이어스드 인덕터  
Fig.2 Conventional biased inductor

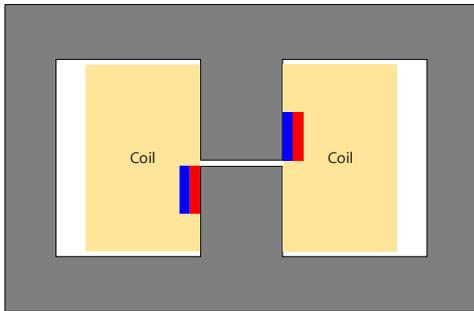


그림3 제안하는 바이어스드 인덕터  
Fig.3 Proposed biased inductor

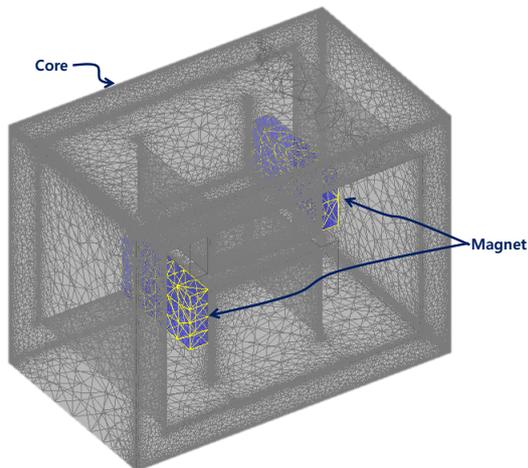


그림4 제안하는 바이어스드 인덕터 Altair Flux 시뮬레이션 모델  
Fig.4 Altair Flux simulation model of proposed biased inductor

## 2. 제안하는 바이어스드 인덕터 형상

그림 3은 본 논문에서 제안하는 바이어스드 인덕터의 형상이다<sup>[3]</sup>. 이 구조는 코어의 중앙 폴(center pole)에 공극(air gap)을 두고, 폴의 측면에 영구 자석을 부착하는 형태로 구성된다. 영구 자석의 극성은 코일에 의해 생성되는 자속과 반대 방향이 되도록 결정된다. 이때, 코일에 의해 발생하는 기자력(magnetomotive force, MMF)과 코어 및 공극의 자계 세기(magnetic field intensity, H)는 수식 (1)과 같다. 수식 (1)에서 공극과 코어의 자속밀도가 거의 같고 코어의 비투자율이  $\mu_0$ 보다 매우 크다고 가정하면, 수식 (2)가 되고, 수식 (1-2)를 통하여 도출한 전체 자계 세기는 수식 (3)과 같다.

$$NI = H_t l_t = H_c l_c + H_g l_g \quad (1)$$

$$B_g \approx B_c \rightarrow H_c = \frac{\mu_0}{\mu_c} H_g \approx 0 \quad (2)$$

$$\therefore H_t \approx H_g = \frac{NI}{l_g} \quad (3)$$

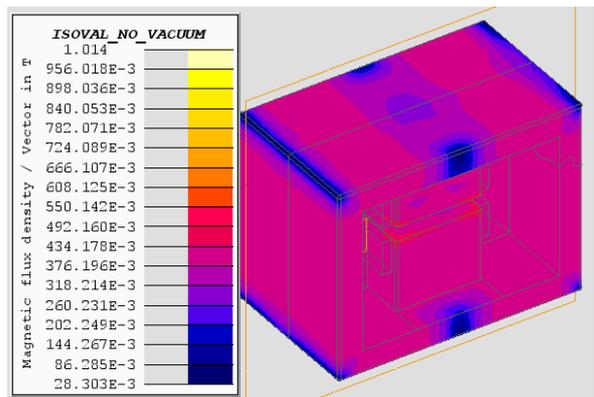
영구 자석의 투자율은 코어의 투자율에 비해 매우 낮기 때문에, 그림 3과 같은 구성을 사용할 경우 코일에 의해 생성된 자속이 대부분 코어를 통해 흐르며, 자석을 직접 통과하지 않는다. 이러한 설계는 자석에 직접 자속이 인가되지 않기 때문에, 자석에서 감자나 발열이 발생하지 않는 장점이 있다. 또한, 외부에 공극이 없기 때문에, 공극이 존재하는 기존 구성에 비해 인덕터에서 방출되는 자속으로 인한 전자파 간섭 문제도 상대적으로 감소한다.

따라서 본 연구에서 제안하는 신규 형상은 기존 방식에서 발생하는 문제점을 효과적으로 개선할 수 있다.

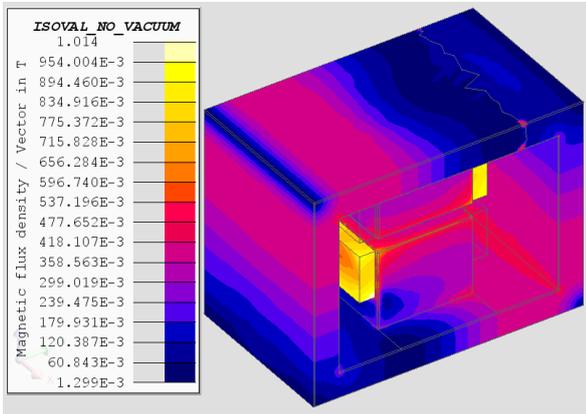
## 3. 시뮬레이션 및 실험 검증

### 3.1 시뮬레이션 검증

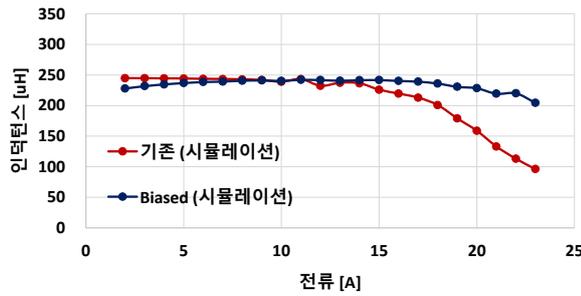
제안한 바이어스드 인덕터의 타당성을 검증하기 위해, 그림 4와 같이 자기 해석 시뮬레이션인 Altair Flux를 사용하여 모델을 구성하였다. 인덕터의 형상 및 재질은 EE 타입 페라이트 코어를 사용하였으며, 센터 폴에 영구 자석을 부착한 형태로 설계하였다.



(a) 20A 조건 자속 밀도 (자석 미부착)



(b) 20A 조건 자속 밀도 (자석 부착)



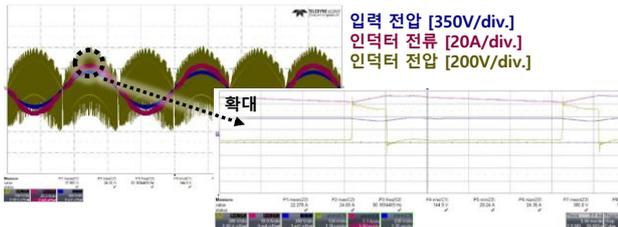
(c) 전류에 따른 인덕턴스 시뮬레이션 결과

그림5 자석 부착 여부에 따른 시뮬레이션 결과  
Fig.5 Simulation results with and without permanent magnet

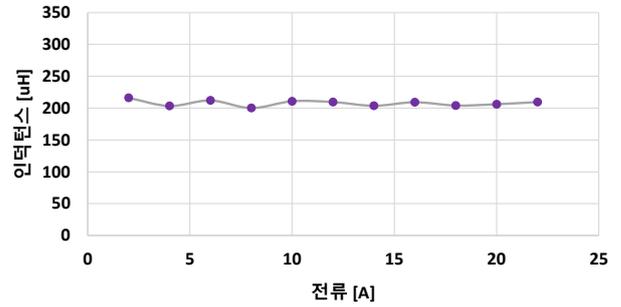
그림 5 (a)와 (b)는 자석 유무에 따른 직류(DC) 전류 20A에서 코어의 자속 밀도를 보여준다. 시뮬레이션 결과 자석이 적용된 코어가 포화되지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림 5 (c)는 전류에 따른 인덕턴스 변화를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 자석이 부착되지 않은 인덕터의 경우, 15A 이상의 전류에서 인덕턴스가 급격히 감소하는 반면, 제안한 인덕터는 23A까지 인덕턴스 변화가 크지 않아 포화 특성이 크게 개선된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 제안된 설계가 기존 인덕터 대비 포화 전류 한계를 크게 향상시켰음을 보여준다.

### 3.2. 실험 검증

대표적으로 인덕터에서 DC 바이어스 특성이 중요한 회로는 Boost PFC 컨버터이다. 이 회로는 실제 가전제품에 많이 적용되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 Boost PFC 컨버터에 제안된 방식으로 제작된 인덕터를 적용하여 그 성능을 검증하였다.



(a) 최대 전류 조건 바이어스드 인덕터 전압/전류 파형



(b) 전류에 따른 인덕턴스 실험 결과

그림6 자석 부착 여부에 따른 실험 결과  
Fig.6 Experimental results with and without permanent magnet

그림 6 (a)는 최대 부하 조건에서의 Boost PFC 컨버터에 적용된 제안하는 바이어스드 인덕터의 주요 전압과 전류 파형이다. 최대 부하 조건에서 최대 전류가 인덕터에 도통 됨에도 불구하고 인덕터의 포화가 발생하지 않음을 확대한 파형을 통하여 확인할 수 있다.

그림 6 (b)는 전류에 따른 인덕턴스 측정 결과를 보여준다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로, 높은 전류에서도 포화 없이 일정한 인덕턴스를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션과 실험 결과 모두 기존 인덕터에 비해 포화 특성이 크게 개선되었음을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 인덕터의 포화 특성 개선을 위한 새로운 방법을 제시하였다. 제안하는 방법은 코어 내에 코일에 의해 형성되는 자속을 상쇄시키는 방향으로 영구 자석을 코어에 부착하여 코어 내의 자속을 감소시키는 방법이다.

제안한 방식으로 구성된 인덕터를 영구 자석 바이어스드 인덕터라 하며, 기존 방식에서 발생하던 영구 자석에서의 발열 및 감자, 그리고 전자파 간섭 문제를 개선하기 위한 신규 구조를 제안하였다.

제안한 형상은 Altair Flux 자계 해석 시뮬레이션과 실제 제안한 형상으로 제작된 인덕터를 Boost 컨버터에 장착하여 실험을 통하여 타당성을 검증하였다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과 모두 제안된 코어 구성 방법을 적용할 경우 코어의 포화 특성이 크게 개선됨을 확인할 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] G. M. Shane and S. D. Sudhoff, "Design and optimization of permanent magnet inductors," 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, USA, 2012, pp. 1770-1777.
- [2] A. R. Aguilar and S. Munk-Nielsen, "Method for introducing bias magnetization in ungaped cores: "The Saturation-Gap", 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, Fort Worth, TX, USA, 2014, pp. 721-725.
- [3] 안효민, 강정일, 조제형, "바이어스 자석을 채용한 인덕터를 포함하는 가전장치," 출원 번호 10-2024-0065359, 출원일 2024.05.20