

# 분말 자성 코어의 형상에 따른 인버터용 인덕터의 소음특성

## Acoustic Noise Characteristics of Inductor According to Magnetic Powder Core Building Structure for Inverter Application

유 광 용\* · 이 병 국\* · 김 동 희†

(Kwang-Yong Yoo · Byoung-Kuk Lee · Dong-Hee Kim)

**Abstract** - In power electronics applications which switching frequency is below audible frequency, the acoustic noise and vibration design of magnetics are as important as the efficiency. In the case of the powder core, which is widely used in grid-connected inverters, many researches have been progressed in terms of efficiency. However, there are only few research have been progressed related with acoustic noise and vibrations. In this paper, the Sendust(Fe-Si-Al) powder core material which has low magnetostriction and low core loss is analyzed in terms of acoustic noise and vibration induced by Maxwell force and magnetostriction. Three building structures such as, rectangular, toroidal, and oval shape are designed for 4kW grid-connected inverter, because magnetic properties and the audible noises of the inductor are varied by magnetic core building structures. The effects of the Maxwell force and magnetostriction behaviors varied with core shapes are analyzed by finite element method and experiments. In addition, experiment results of the inductor efficiency are presented according to core building structures.

**Key Words** : Inductor, Transformer, Magnetostriction, Maxwell force, Vibration, Acoustic noise

### 1. 서 론

최근 친환경 에너지의 요구와 더불어 화석연료 저감을 위한 전기자동차 및 태양광 발전과 같은 신재생 에너지 전력변환 시스템의 발전과 수요는 가속화 되고 있다. 이러한 추세에 맞춰 전력 변환 시스템의 고효율, 고전력 밀도를 달성하기 위한 전력용 반도체 소자의 발전과 함께 스위칭 주파수를 증가시킴으로써 시스템의 소형화, 경량화를 위한 노력을 하고 있으며 시스템 용량도 높아지고 있다. 그러나 경제적인 부분과 전력반도체 및 수동소자의 손실을 고려한다면 스위칭 주파수의 상승과 전체 시스템 밀도 향상은 제한적이다. 많은 전력전자 응용분야에서는 가청 주파수 대역인 20kHz 이하의 스위칭 주파수를 채택하고 있으며, 이에 적용되는 수동소자인 인덕터의 설계 변수의 중요한 요소인 인덕턴스와 자성체 손실 외에 진동에 의한 소음 발생 부분을 고려하지 않을 수 없다. 이는 전력변환 장치와 인접한 사람의 청각에 민감한 문제를 야기하기 때문이다. 최근까지 이러한 자성체의 진동과 진동의 매개체인 공기중의 음압으로 나타나는 소음의 근원과 이를 줄이기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔다.

기존의 전자기력에 의한 자성체의 진동, 소음 특성에 대한 연

구는 적층된 철심 소재를 기반으로 공극에서의 자기력, 누설자속에 의한 도체에 작용하는 응력과 진동을 다루고 있으며, 이를 줄이기 위한 적층 방법과 조인트 구조 [1,2], 공극의 분포와 공극 소재의 경도 [3-6], 적층 코어의 형상에 따른 소음의 변화 [7, 8]를 중심으로 진행되었다. 주로 20kHz 이하의 스위칭 주파수 대역에서는 자성체 특성으로 인해 자성분말 코어를 사용하여 많은 연구가 되었지만, 자성체의 소음 측면에서는 오직 Fe-Si (MegaFlux) 코어의 강도에 따른 자기왜곡 특성의 변화만이 연구되었다[9].

자성 분말 코어는 소재의 합금 종류에 따라 표 1과 같이 다양한 종류를 만들 수 있으며, 이 중 저손실과 낮은 자왜상수, 그리고 Al, Si 등 상용적인 합금 재료로 구성된 Fe-Si-Al (Sendust) 코어를 20kHz 스위칭 영역의 응용분야에서 널리 사용하고 있다. 또한, 시스템 사양에 따라서 Rectangular, Toroidal 및 다양한 형상으로 제조되어 사용되고 있다. 하지만, 동일한 소재를 사용하여도 코어의 형상에 따라 동작 특성은 상이하지만, 이에 대한 손실과 소음 측면에서 자세한 분석 및 활용에 대해서는 연구가 진행되지 않았다.

본 논문에서는 자성체의 진동, 소음 특성을 전자기력과 자기변형의 특성을 중심으로 PWM 고주파 인덕터에 널리 쓰이고 있는 코어 소재에 따른 특성을 비교하여, 자성 분말 코어 중 Sendust 재료를 중심으로 코어의 형상별 자속분포와 전자기력 및 자기 왜곡력을 유한 요소 해석을 통해 확인하고, 자속밀도의 증가에 따른 코어 재료의 고유 특성인 자기왜곡을 스트레인 변형계이저로 측정하였다. 코어의 형상은 기존에 널리 사용되고 있

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Korea.  
E-mail: kimdonghee@jnu.ac.kr

\* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Korea.

Received : September 15, 2017; Accepted : October. 16, 2017

표 1 고주파 인덕터용 연자성 코어재료의 특성

Table 1 Properties of soft magnetic core materials for high frequency inductor applications

| Magnetic Material | Manufacturer   | Product name  | Composition   | Relative permeability | B <sub>s</sub> [T] | λ <sub>s</sub> [μm/m] | Core Loss 0.1T,20kHz [kW/m <sup>3</sup> ] | Curie temp. [°C] | Density [g/cm <sup>3</sup> ] | Lamination Thickness [mm] | Specific Resistivity [μΩ·m] | Relative Cost |
|-------------------|----------------|---------------|---------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|---|------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|
| Silicon Steel     | JFE            | 10JNEX900     | 6.5%Si-Fe     | 900                   | 1.8                | 0.1                   | 180                                       | 700              | 7.49                         | 0.1                       | 0.82                        | Low           |
| Silicon Steel     | JFE            | 10JNH600      | 6.5%Si-Fe     | 600                   | 1.88               | -                     | 140                                       | -                | 7.53                         | 0.1                       | -                           | Low           |
| Amorphous         | Hitachi Metal  | 2605SA1       | Fe-Si-B       | 600                   | 1.56               | 27                    | 65  | 399              | 7.18                         | 0.025                     | 1.3                         | Medium        |
| Amorphous         | Hitachi Metal  | 2605S3A       | Fe-Si-B-Cr    | 800                   | 1.41               | 20                    | 17  | 358              | 7.29                         | 0.018                     | 1.2                         | Medium        |
| Nanocrystalline   | Vaccumschmelze | Vitroperm500F | Fe(CuNb)(SiB) | 15000-150k            | 1.2                | 10 <sup>-6</sup>      | 0.4                                       | 600              | 7.3                          | 0.02                      | 1.15                        | High          |
| Ferrite           | Toda Isu       | PM12          | Mn-Zn         | 3200                  | 0.52               | 0.03                  | 8   | 210              | 4.9                          | Bulk                      | 7×10 <sup>6</sup>           | Low           |
| Powder Core       | Changsung      | MPP           | Fe-Ni-Mo      | 26-200                | 0.7                | 10                    | 55  | 450              | 7.0-8.3                      | Bulk                      | 0.55                        | High          |
| Powder Core       | Changsung      | HighFlux      | Fe-Ni         | 26-160                | 1.5                | 30                    | 65  | 500              | 6.8-7.9                      | Bulk                      | 0.45                        | Medium        |
| Powder Core       | Changsung      | MegaFlux      | Fe-Si         | 26-90                 | 1.6                | <15                   | 200                                       | 700              | 6.5-7.1                      | Bulk                      | 0.6                         | Low           |
| Powder Core       | Changsung      | Sendust       | Fe-Si-Al      | 26-160                | 0.84               | ≅0                    | 100                                       | 500              | 5.6-6.1                      | Bulk                      | 0.6                         | Low           |

는 Rectangular 및 Toroidal을 채택하였다. 추가로, 기존의 형상에서 성능을 향상시킬 수 있는 Oval 형상의 코어를 제안하여 해석 및 성능 검증을 진행하였다. 효율적인 측면에서는 Oval 형상의 코어가 우수하였으며, 소음적인 측면에서는 Toroidal 형상의 코어가 우수하였다. 모든 형상의 인덕터는 19kHz의 스위칭 주파수로 동작하는 4kW급 태양광 인버터의 출력 필터에 적용하여 성능을 검증하였으며, FFT Analyzer를 통해 각 주파수별 음압 레벨을 측정하였다.

2. 자성코어의 전자기력과 자기왜곡 특성

인덕터 및 트랜스포머의 소음은 자성체의 변형에 기인하며, 이는 권선에 작용하는 로렌츠 힘, 코어에 작용하는 전자기력, 그리고 코어 재료별 고유특성인 자기왜곡에 의한 변형이다. 첫째로 도선에 흐르는 전류는 Magnetic field를 형성하며, Electromagnetic force로 작용한다.

$$f_m = J \times B \tag{1}$$

$$F_m = \int f_m dV \tag{2}$$

f<sub>m</sub>은 전자기력 밀도이며, 도체의 체적 적분한 로렌츠힘은 전류와 자속밀도 사이에서 내적방향으로 작용한다. 일반적인 인덕터에서는 투자율이 높은 코어의 자기포화를 막기 위해 공극(Air gap)이 삽입된다. 하지만, 코어 사이에 벌크(Bulk)형태로 삽입된 공극은 누설(Fringing)되는 자속으로 인해 자속과 도선이 쇄교되어 동선에 변형되는 힘이 작용한다. 권선에 작용하는 힘은 코어에 발생하는 응력에 비해 매우 작으며, 대부분의 인덕터에서는 권선의 테이핑 또는 에폭시 수지의 함침 등을 통하여 억제된다.

두 번째로 자성체의 변형은 표면력 밀도에 기반을 둔 코어간 작용하는 전자기력에 기인하며 자성체의 표면에 작용하는 전자기

력은 맥스웰 텐서(T)로 다음과 같이 나타난다[10, 11].

$$F_m = \int_V f dV = \int_V \nabla \cdot T dV = \oint \hat{n} \cdot T dS \tag{3}$$

$$T = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{1}{2}B^2 & B_x B_y & B_y B_z \\ B_y B_x & B_y^2 - \frac{1}{2}B^2 & B_y B_z \\ B_z B_x & B_z B_y & B_z^2 - \frac{1}{2}B^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

코어간 공극을 가정하면 맥스웰 응력은 자속의 수직방향으로 코어의 공극에 응력을 작용하며, 이로 인한 자성체의 변형을 막기 위해 세라믹 또는 비자성체의 경도가 높은 공극 재료를 삽입하며, 적층된 수 μm - mm 두께의 강판 소재는 서로 에폭시 수지로 접착하여 변형을 방지한다.

마지막으로 자성체의 자기왜곡(Magnetostriction) 현상으로 코어에 자기장이 가해졌을 때 코어의 치수변화가 발생하며, 자기왜곡은 자구(domain)의 회전에 의하여 기인한다. 자성체의 자기왜곡은 일반적으로 전체 코어의 길이에서 변화된 길이의 비로 아래와 같이 정의하며, 일반적으로 자기 포화시의 자왜상수 λ<sub>s</sub>로 나타낸다.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \tag{5}$$

자왜상수는 코어의 소재, 합금에 따라 수축방향, 또는 인장방향의 다른 값을 가지며, 통상 사용되는 연자성 코어재는 수 μm/m로 ppm 수준의 변형율을 갖는다. 자계의 변화에 따른 전체 자성체 체적은 동일하게 유지되므로 자성체의 길이 변화와 수직하는 교차방향의 반대방향 절반의 크기로 수축 또는 인장하게 된다.

$$\lambda_t = -\frac{1}{2}\lambda \quad (6)$$

코어가 교류자계에 놓여졌을 때, B-H 커브를 따라 변화하는데 역방향 자계시 자기변형은 정방향으로 나타나기 때문에 전체 자성체의 변형되는 주파수는 2배로 나타나게 되어, 인버터용 50/60Hz의 인덕터 및 트랜스포머의 진동과 소음은 2배수인 100/120Hz의 주파수가 된다.

이러한 자성체의 변형 및 진동에 기인하는 요소를 고려하며, 20kHz 이하의 가청주파수 영역에서 적용되는 인덕터의 진동과 소음을 줄이기 위한 포화 자기왜곡  $\lambda_s$  특성이 작으며, 코어 사이의 공극에 작용하는 전자기력을 줄일수 있는 코어재료의 선정은 중요하다. 또한, 시스템 효율을 높이기 위한 고주파 코어 손실이 작으며, 직류 중점 특성과 포화자속 밀도가 높은 코어재료를 선정하는 것이 바람직하며, 표 1의 Sendust 코어가 전반적으로 우수한 성능을 가진다.

### 3. 인덕터 설계 및 모델링

그림 1은 3-6kW급 가정용 단상 비절연형 태양광 인버터의 회로구조를 나타내고 있다. 가청 주파수 영역인 20kHz 이하에서 스위칭 동작하는 인버터 및 컨버터에서 인덕터의 소음은 앞서 기술한 코일의 로렌츠힘, 코어의 전자기력, 그리고 코어의 자왜에 의한 변형으로 발생하며, 특히 인버터의 필터 인덕터에 인가되는 50/60Hz의 정현파와 함께 10-20kHz의 스위칭 주파수에서 발생하는 교번되는 자계에 따른 코어의 높은 자속변화는 소음발생의 주된 근원이다.

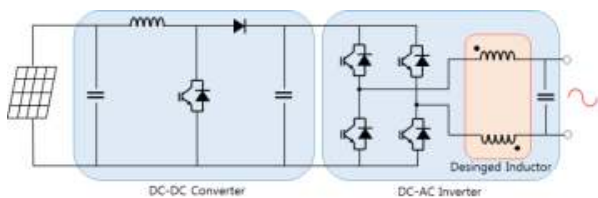


그림 1 단상 태양광 인버터 시스템 구성도  
 Fig. 1 Schematic of the single phase photovoltaic inverter system

Sendust (Fe-Si-Al) 금속분말 합금코어는 자왜상수와 자기 이방성이 낮은 특성을 가지며, 코어손실이 작은 장점을 가지고 있다. 금속분말 합금코어는 원료분말을 혼합하여 세라믹으로 금속분말 표면을 절연코팅하고 금형 내에 삽입되어 프레스설비로 고압으로 성형된다. 성형된 분말코어는 열처리와 함침을 통해 최종 완성되며, 적층강판 소재에 비해 다양한 형상을 구현할 수 있다는 장점이 있다. 그림 2와 3은 일반적으로 제조된 투자율  $60\mu_r$ 을 갖는 Sendust 코어의 B-H 특성과 코어손실을 나타낸다. 4kW급 단상 태양광 인버터용 출력 인덕터의 코어 형상별 최적화 설계를 위한 그림 4의 순서로 Sendust 합금분말 코어를 적용한

인덕터를 설계하였다.

인덕터용 코어 형상은 Toroidal, Rectangular, Oval의 3가지 타입으로, 요구되는 시스템 사양은  $P_o=4kW$ ,  $V_o=202V_{AC}$ , 50/60 Hz,  $I_{rms}=19.8A$ ,  $I_{peak}=32A$ ,  $f_s=19kHz$ 이며, 인덕터의 인덕턴스는 최대 전류에서  $600\mu H$  사양으로 설계되었다.

코어내 필드 변화는 자속밀도의 변동으로, 인덕터의 포화에 의한 자속밀도의 증가와 함께 투자율의 감소, 그리고 진동 및 소음의 원인이 되는 코어의 진동을 유발한다. 인덕터 진동 및 소음의 가장 큰 영향을 미치는 코어의 자기 왜곡은 자속밀도의 제곱에 비례하므로, 최대 자속밀도가 낮은 인덕터의 설계는 코어의 변형을 작게 가져올 수 있다. 또한, 코어에 작용하는 큰 필드는 투자율 감소와 함께 인덕턴스의 감소, 코어 손실의 증가를 수반한다. 이를 위한 설계로 에너지 저장능력이 큰 코어, 즉, 단면적이 큰 코어가 유리하나 실제 제한된 공간 및 무게에 적합하며 코스트를 고려한 인덕터의 설계가 필요하다.

자계의 변화에 따른 전체 자성체 체적은 동일하게 유지되므로 자성체의 길이 변화와 수직하는 교차방향의 반대방향 질반의 크기로 수축 또는 인장하게 된다. 하지만, Toroidal 형상의 코어는 권선되는 공간에 제약이 있어 Fill factor 50% 이상의 권선은 불가능하며, 이와는 반대로 각형의 코어에서는 코어 안쪽의 권선되는 창 면적을 최대한 활용할 수 있다는 장점이 있다. 상기 두 가지 관점에서 코어 내 자속밀도의 균일한 분포와 최대 권선 면적

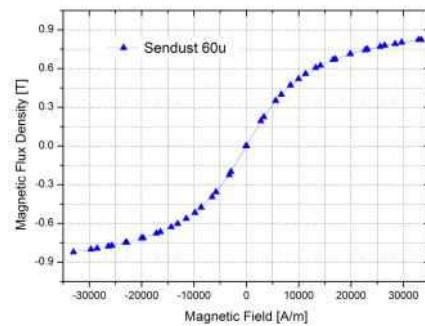


그림 2 Sendust  $60\mu_r$  코어의 B-H 곡선  
 Fig. 2 B-H Curve of Sendust  $60\mu_r$  core

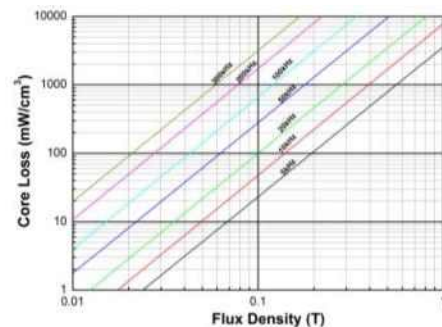
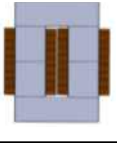




그림 3 Sendust  $60\mu_r$ 의 주파수별 코어 손실  
 Fig. 3 Sendust  $60\mu_r$  core loss dependent on frequencies

표 2 코어 형상별 인덕터 설계 비교

Table 2 Comparison of inductor design with core shapes

| Core Shape<br>Parameter                       | Rectangular   | Toroidal  | Oval<br>(Proposed)  |
|---|---|---|---|
| Magnetic path length [cm]                     | 24.33   | 20.00   | 24.59   |
| Permeability [ $\mu_r$ ]                      | 60  | 60  | 60  |
| Core cross sectional area [cm <sup>2</sup> ]  | 6.00  | 7.08  | 6.00  |
| Core volume [cm <sup>3</sup> ]                | 159.79  | 141.60  | 147.51  |
| Window area [cm <sup>2</sup> ]                | 12.16   | 17.99   | 12.77   |
| Number of turns                               | 122   | 116   | 110   |
| Bmax [T]                                      | 0.61  | 0.63  | 0.60  |
| Hmax [A/m]                                    | 16,075  | 18,542  | 14,483  |
| Inductance at 0A [ $\mu H$ ]                  | 2,767   | 3,660   | 2,225   |
| Inductance at 32A <sub>peak</sub> [ $\mu H$ ] | 641   | 592   | 599   |
| Cross sectional view                          |  |  |  |

을 활용하기 위한 Oval형의 코어 형상을 제안하여 비교하도록 한다. 각 코어재는 Sendust 분말코어로 코어 간 별도의 공극이 없으며, 투자율은  $60\mu_r$ 을 기준으로 설계되었다. 각 형상의 인덕터는 그림 4의 일반적인 분말 자성 코어를 적용한 최적화 인덕터 설계 순서에 따라 표 2와 같이 제작되었다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 5는 설계된 Sendust 코어 형상별 자속밀도의 분포, 그리고 그림 6은 코어 형상별 전자기력의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 자속밀도의 분포는 토로이달 형이 코어 내에 균일하게 분포되어 있으며, 자속밀도의 최대-최소 편차가 적어 작용하는 전자기력은 코어 내측으로 전 구간에 걸쳐 분포되어 있다. 이에 반해 각형의 경우 코어의 기동부분의 권선부에서 발생하는 기자력으로 인해, 자속밀도는 권선되는 기동부와 자료가 급격히 변하는 코어의 내측 코너 부분에 집중되어지며 자기 포화된 부분이 나타난다. 또한, 이로 인한 전자기력도 가장 높은 수치를 보인다.

타원형의 코어는 자속밀도 및 전자기력은 토로이달 형과 각형의 중간 수준을 보이며, 이는 권선의 높은 점적율로 전력밀도를 높일 수 있으며, 더불어 높은 자계에도 자기포화를 낮출 수 있는 자성체 형상을 가지고 있음을 보인다.

그림 7은 각형 타입 코어의 상, 하로 각 0.5mm의 공극이 있을 때의 자속밀도와 전자기력의 분포를 나타낸다. 에어갭의 존재

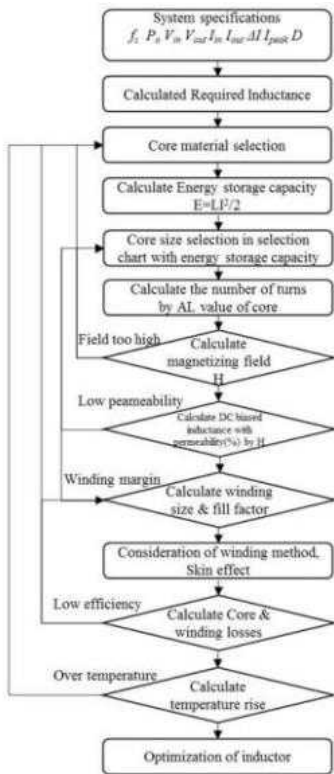


그림 4 인덕터 설계 및 최적화 순서도

Fig. 4 Inductor design and optimization flow

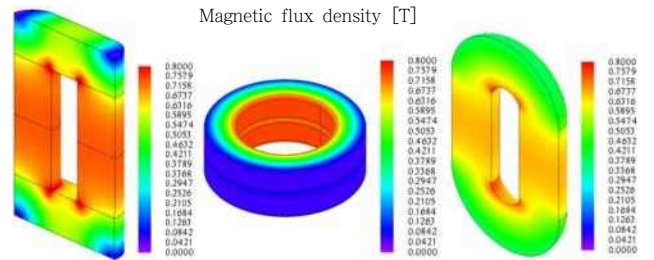


그림 5 자속밀도 분포의 3차원 대칭부 (a) 각형 (b) 토로이달 (c) 타원형

Fig. 5 Distribution of magnetic flux density in 3D symmetric view; (a) Rectangular (b) Toroidal (c) Oval

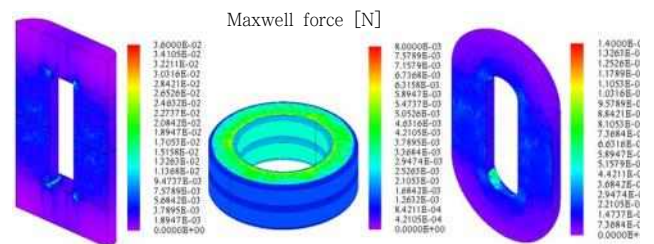


그림 6 전자기력 분포의 3차원 대칭부 (a) 각형 (b) 토로이달 (c) 타원형

Fig. 6 Distribution of electro-magnetic force in 3D symmetric view; (a) Rectangular (b) Toroidal (c) Oval



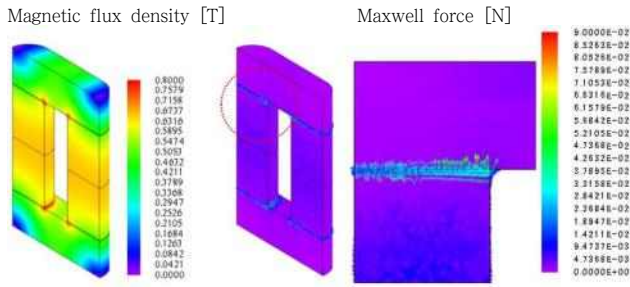


그림 7 0.5mm 에어갭을 삽입한 Sendust 각형 코어의 (a) 자속 밀도 분포 (b) 전자기력 분포

Fig. 7 Distribution of (a) magnetic flux density and (b) electro-magnetic force in rectangular shape Sendust core by inserted 0.5mm air-gaps

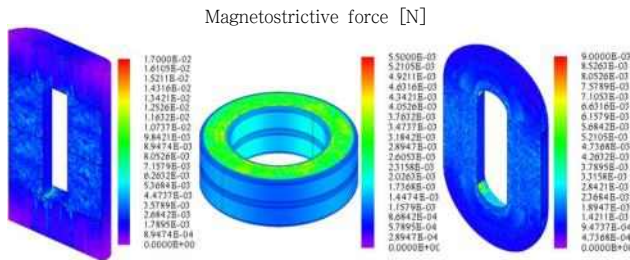


그림 8 자기 왜곡력 분포의 3차원 대칭부 (a) 각형 (b) 토로이달 (c) 타원형

Fig. 8 Distribution of magnetostrictive force in 3D symmetric view; (a) Rectangular (b) Toroidal (c) Oval

에 따라 Sendust 코어의 최대 자속밀도는 줄어들게 되어 자기포화를 방지할 수 있다. 하지만, 코어 표면에 발생하는 전자기력은 공극 사이에서 3배 이상 커지며 자속 방향의 코어 면적을 따라 큰 변형을 수반할 수 있어 이러한 벌크 공극이 코어의 진동과 소음의 근원이 된다.

본 논문에서는 이러한 전자기력으로 인한 소음을 줄이기 위한 인덕터의 코어 소재 중 분말 자성 코어에 초점을 두고 연구하였다. 분말 자성코어는 금속 합금 분말을 절연 세라믹 코팅하여 미세한 공극을 형성하며, 이러한 미세한 코팅이 자기포화 방지를 위해 삽입되는 벌크 공극을 대신하게 되어, 분말 자성 코어에서는 전자기력에 의한 변형을 줄일 수 있다. 이로 인해 합금 재료의 고유특성인 자왜상수가 인덕터의 변형과 소음에 주된 요인이 되기 때문에 자왜상수가 가장 작은 Sendust 재질의 코어가 인덕터 진동 및 소음의 영향을 최소화할 수 있다.

Sendust 코어의 각 코어 형상별 자왜상수에 의해 작용하는 자기 왜곡력은 그림 8과 같이 나타난다. 이는 전자기력의 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 토로이달에서 가장 작고, 각형에서 가장 높은 수치를 보이며, 타원형의 코어는 토로이달 형과 각형의 중간 수준을 나타내고 있다. 자기 왜곡에 의해 코어에 작용하는 힘은 Sendust 코어의 낮은 자왜 상수로 인하여 전자기력의 영향에 비해 작게 나타났다.

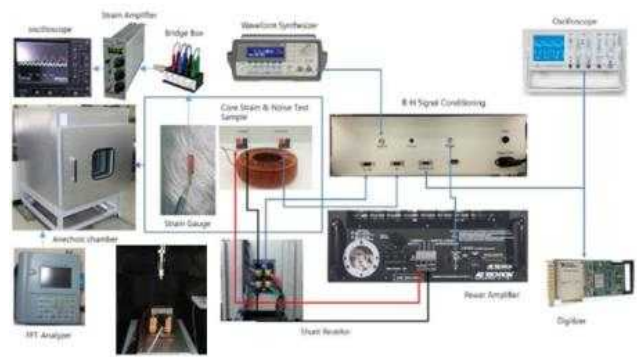


그림 9 인덕터 소음 및 자왜 측정을 위한 실험 장치

Fig. 9 Experimental platform for the measurement of magnetostriction and audible noise for an inductor

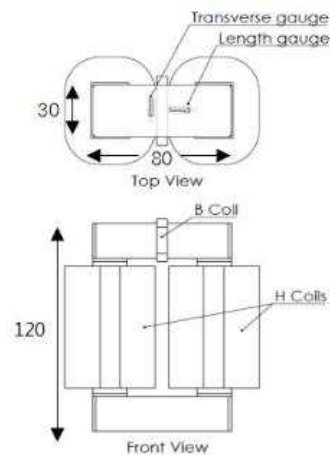


그림 10 자왜 분석을 위한 코어 상면에 스트레인 게이지를 부착한 모델 구조

Fig. 10 Model structure for magnetostriction analysis with strain gauge attached on the top core surface

### 5. 실험 및 분석

코어의 변형에 영향을 미치는 요소 중 전자기력 외에 자성체가 자화될 때 자기 도메인의 회전에 의해 코어의 길이 변화를 수반하게 되는데 이러한 길이의 변화는 자성 재료별 고유값을 가진다. 분말 자성 코어의 자기 왜곡은 등방성의 형태로 나타나게 되며, 이러한 코어의 자기변형에 대한 변형율을 스트레인 게이지의 길이 변화를 통한 실험으로 확인하였다. 본 논문에서 제한한 Sendust 분말 자성 코어를 그림 10과 같이 블록 형태의 코어 상단 표면에 반도체형 스트레인 게이지를 부착하여 자왜상수를 측정하였다. 반도체 스트레인 게이지는 휘트스톤 브릿지에 연결되어 게이지 길이의 변화는 저항의 변화로 나타나며 앰프로 증폭되어 전압으로 변환되어 기록된다. 전체 측정 장비의 개략도는 그림 9와 같다.

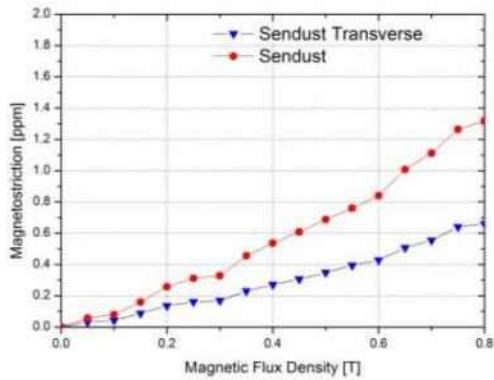


그림 11 측정된 Sendust 코어의 자기 왜곡 특성  
**Fig. 11** Measured magnetostriction of Sendust Core

코어에 가해지는 교류 자계는 B-H Analyzer를 사용하여 자계의 증가에 따른 자속밀도의 증가와 함께 코어의 변형율을 측정하였다. 또한, 코어의 치수의 변화는 진동과 함께 공기의 매질을 통해 음압으로 나타나게 되며, 음압은 인덕터코어에 가해지는 교류 자계는 B-H Analyzer를 사용하여 자계의 증가에 따른 자속밀도의 증가와 함께 코어의 변형율을 측정하였다. 또한, 코어의 치수의 변화는 진동과 함께 공기의 매질을 통해 음압으로 나타나게 되며, 음압은 인덕터를 무향 박스 내에 장착하여 마이크로폰을 통해 Fast Fourier transform (FFT) Analyzer로 주파수별 소음 레벨을 측정하였다. 마이크로폰은 코어로부터 10cm 상단에 위치하였다.

스트레인 게이지로 측정된 Sendust 코어의 자왜상수는 그림 11과 같다. Sendust 코어의 포화 자속밀도에 가까운 0.8T에서 자왜상수( $\lambda_s$ )는 1.3ppm로 분말 자성 코어 중에서 가장 작은 변형율을 갖고 있다. 코어의 길이  $l$ 의 변형율  $\epsilon_m$ 은 자속밀도  $B$ 의 제곱과  $\alpha$ 에 비례로 변화하며, 코어는  $u_m$ 의 변위를 갖는다.

$$u_m = \epsilon_m l = \alpha B^2 l \quad (7)$$

자성체의 이러한 변형은 진동과 음압으로 변화되어, 사람의 청각으로 진동음이 들리게 된다. 음압 레벨(L)은 아래와 같이 데시벨 [dB]로 표현되며, 음압의 단위는 파스칼 [Pa]로 실제 측정된 음압은  $p_n$ , 기준 음압을  $p_o$ 로 하며 아래와 같이 표현되며, 사람의 청각이 모든 주파수 대역을 듣지 못하기에 가중 주파수 영역인 A-가중 데시벨로 변환하여 사용한다.

$$L = 10 \log_{10} \left( \frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{p_o^2} \right) \text{ [dB]} \quad (8)$$

$$A(f) = 20 \log_{10} \left[ \frac{f^2 \cdot f^4}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^{1/2}(f^2 + f_3^2)^{1/2}(f^2 + f_4^2)} \right] + 2 \text{ [dBA]} \quad (9)$$

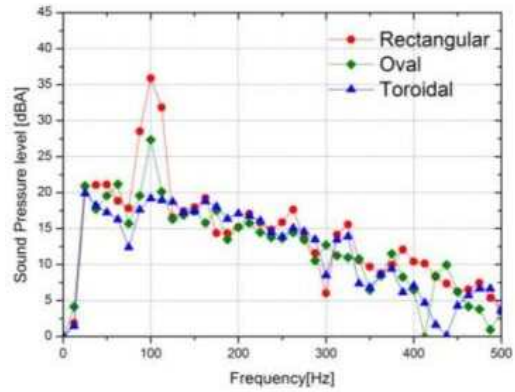


그림 12 50Hz, 0.6T에서 측정된 센더스트 코어 형상별음압 레벨  
**Fig. 12** Measured sound pressure level of Sendust cores with different shapes excited at 50Hz, 0.6T

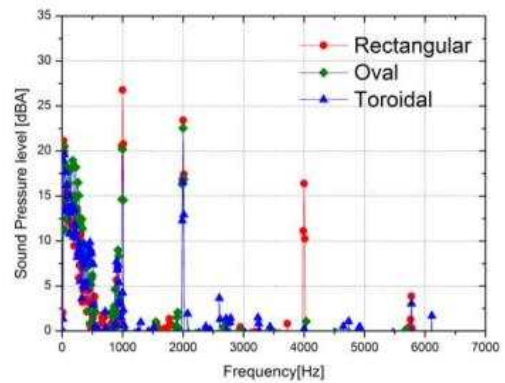
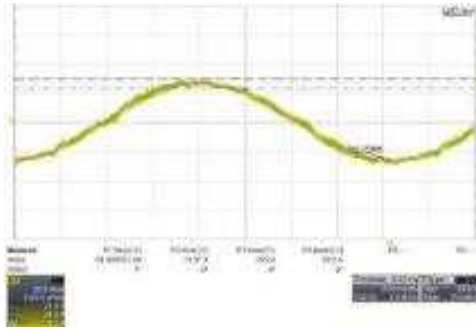


그림 13 1kHz, 0.1T에서 측정된 센더스트 코어 형상별 음압 레벨  
**Fig. 13** Measured sound pressure level of Sendust cores with different shapes excited at 1kHz, 0.1T

여기서  $f_1$ 은 20.6 Hz,  $f_2$  107.7 Hz,  $f_3$  737.9 Hz, 그리고  $f_4$ 는 12,194 Hz이다.

본 논문에서 제안한 Sendust 코어의 형상별 소음을 마이크로폰을 통하여 FFT Analyzer로 주파수별 분석하여 비교하였다. 표 2에서 설계된 4kW 인버터용 인덕터로 제작된 3가지 형상의 제품들은 설계사양과 같은 50Hz, 0.6T에서 소음 레벨이 측정되었으며, 측정 결과는 그림 12와 같다. 주파수 100Hz에서 Rectangular 형상의 소음이 36dB로 가장 높게 나타나며, Oval 형상은 27.5dB, 그리고 Toroidal 형상의 코어는 20dB이하로 가장 낮게 나타났으며, 이는 Toroidal 형상이 자기 변형의 영향을 최소로 받는 구조로 되어 있음을 알 수 있다. 주파수 특성에 따른 소음특성을 확인하기 위해 주파수 1kHz, 0.1T로 소음 레벨을 측정하였으며, 측정 결과는 그림 13과 같다. 50Hz의 시험과 마찬가지로 Sendust 재료의 Rectangular, Oval, Toroidal 코어 형상의 순으로 소음레벨의 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 특이할 점



(a) 4kW 인버터 전류파형  
(a) 4kW inverter current form



(b) 측정된 인덕터 샘플  
(b) Measured inductor wave samples

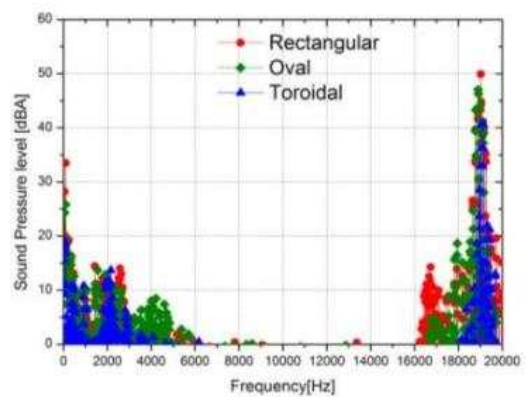


(c) 소음 측정 시스템  
(c) Sound pressure measurement system

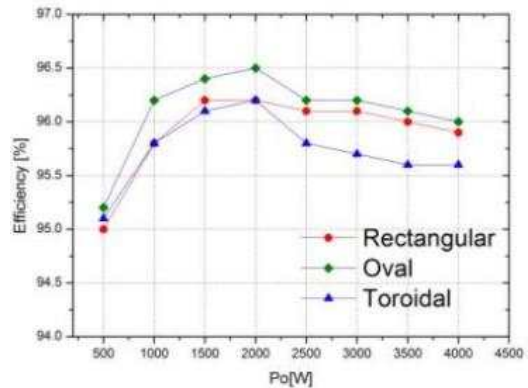
**그림 14** 태양광 인버터 동작에서 인덕터 소음 측정 시스템  
**Fig. 14** Inductor sound pressure measurement system for Photovoltaic inverter operation

은, Rectangular 형상 코어의 경우 인가된 2배수의 주파수인 2kHz 외에 4kHz에서도 소음이 발생하였으며, 이는 코어의 자기 왜곡에 의한 높은 진동이 코어의 고유 진동수와 공진으로 발생하는 소음으로 확인되어진다.

Sendust 코어로 표 2와 같이 설계된 3가지 형상의 인덕터는 단상 PWM 인버터용 출력단 인덕터로 장착되어 소음을 비교하였다. 시스템 사양은  $P_o=4kW$ ,  $V_o=202VAC$ , 60Hz,  $I_{rms}=19.8A$ ,  $I_{peak}=32A$ ,  $f_s=19kHz$  이며, 동작파형 및 시스템 구성은 그림 14



**그림 15** 4kW 인버터에서 동작하는 Sendust 인덕터의 형상별 소음 측정 레벨  
**Fig. 15** Measured sound pressure level of Sendust inductor with different shape operated in 4kW inverter



**그림 16** 4kW 인버터에서 동작하는 Sendust 인덕터의 시스템 효율 측정 비교  
**Fig. 16** Measured efficiency of Sendust inductor with different shape operated in 4kW inverter

와 같다. 인덕터는 무향 박스 내에 장착되어 측정되어지며, 암소음은 25dBA 내외 수준으로 나타난다.

Sendust 코어로 제작된 각 형상별 인덕터의 소음 측정 결과는 그림 15와 같다. 가장 큰 소음이 발생하는 주파수는 스위칭 주파수인 19kHz이며, Rectangular, Oval, Toroidal 형상의 순서대로 소음의 크기가 측정되었다. 최대 50dBA 수준의 고주파 소음은 발생 주파수가 19kHz 영역이므로, 대부분의 사람에게는 거의 들리지 않으나, 민감한 청각을 가진 사람에게는 큰 불편감을 준다. 실내에서 사용되는 가정용 인버터는 30dBA 이하의 소음으로 규정되며, 60dBA 이내의 Sendust 코어로 제작된 인덕터는 인버터 내부에 장착시 30dBA 이하로 나타나게 된다. 이러한 고주파 PWM 스위칭 인버터에서 가장 문제가 되는 진동음은 기본파의 주파수인 50/60Hz와 그 2배수인 100/120Hz에서 발생하는 소음이다. 낮은 주파수 대역의 코어의 변형은 진동과 함께 무거운 소음을 유발하므로, 고주파 소음 대비 소음의 최대 첨단부는 낮지

만 주파수 범위가 넓고 쉽게 노출되어진다. 이러한 소음을 억제하기 위해서는 필드 변화가 작은 균일한 자로를 형성하는 인덕터형상 설계가 필요하며, 자기 포화 방지를 위해서 자성체 간에 삽입되는 에어갭에서 발생하는 코어 사이의 전자기력을 줄일 수 있는 설계, 그리고 자왜상수가 작은 자성코어 재료를 선정하는 것이 중요하다.

Sendust 코어로 설계된 3종류 형상의 인덕터는, 효율을 비교하기 위하여 전력 분석기(Power Analyzer)로 부하의 증가에 따라 측정되었으며, 그 결과는 그림 16과 같다. 측정된 결과는 Oval, Rectangular, Toroidal의 순으로 효율이 높게 측정되었으며, 이는 Toroidal 코어의 경우 다른 두 가지 코어의 형태보다 Fill factor가 낮으므로, 동손의 영향이 크게 작용하였다. 부하의 증가에 따라 발열과 함께 동손은 더욱 증가하여 전체 효율 저하에 영향을 미치게 된다. 또한, Oval 형상의 코어는 높은 Fill factor로 동손의 감소와 함께 코어 형상의 유선형으로, 자속밀도의 집중을 낮추어 전 영역에서 높은 효율을 나타내고 있다.

Sendust 분말 자성 코어를 적용한 3가지 형상의 인덕터를 적용한 실험 결과를 통하여, 소음 측면에서는 Toroidal 형상이 가장 낮은 특성을 보이나, 낮은 Fill factor로 인하여 효율 측면에서는 좋은 특성을 보이지 못하였다. Oval 형상은 소음 특성은 중간 특성을 보이나, 효율 측면에서 우수한 특성을 나타내고 있으며, 다만 인버터내 한정된 공간내에 장착하기 위한 구조적인 기구설계가 별도로 필요하다는 단점이 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 PWM 인버터 시스템에 적용되는 인덕터에서 가칭 주파수 영역인 20kHz 이하의 코어의 변형과 소음에 대해 논의되었다. 소음의 주요한 요인으로 코어에서 발생하는 변형과 소음을 줄이며, 또한, 시스템 효율을 높이기 위한 인덕터 설계로 Oval 형상의 Sendust 코어를 제안하였다. Sendust 분말 자성 코어는 코어내부에 미세 공극이 형성되어 있어 코어 사이의 벌크한 공극이 없으며, 낮은 자왜상수, 그리고 낮은 코어 손실을 가진 소재로 고주파용 인덕터에 적합하다. Sendust 소재를 적용한 4kW 급 PWM 인버터용 출력 인덕터를 Rectangular, Toroidal, Oval 형상으로 설계하고, FEM을 통해 각 코어 형상별 전자기력과 자기 왜곡력을 비교하였다. Sendust 분말 자성 코어의 자왜상수를 B-H Analyzer와 스트레인 변형계이저를 이용하여 측정하고, 그 영향을 소음 레벨로 확인하였다. Sendust 코어 형상별 제작된 인덕터는 FFT Analyzer를 이용한 주파수 분석으로 인덕터에서 발생하는 소음의 주파수와 소음 레벨을 통해 비교하였다. 19kHz의 스위칭 주파수로 동작하는 4kW급 PWM 인버터에 장착하여 각 형상별 소음 레벨뿐만 아니라 효율도 비교하였다. 본 연구는 계통 연계형 인버터에 널리 사용되고 있는 Sendust 분말 자성 코어의 효율적인 측면에서 형상 선택뿐만 아니라, 소음적인 형상 선택에도 도움이 될 것으로 판단된다.

## References

- [1] M. Mizokami, Y. Kurosaki, "Variation of Noise and Magnetostriction Associated with Joint Types of Transformer Core," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 194, No. 2, 2016.
- [2] W. Kitagawa, Y. Ishihara, T. Todaka, "Analysis of Structural Deformation and Vibration of a Transformer Core by Using Magnetic Property of Magnetostriction," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 172, No.1, 2010.
- [3] Y. Gao, K. Muramatsu, "Vibration Analysis of a Reactor Driven by an Inverter Power Supply Considering Electromagnetism and Magnetostriction," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 10, Oct. 2009.
- [4] Mathieu Rossi and Jean Le Besnerais, "Vibration Reduction of Inductors Under Magnetostrictive and Maxwell Forces Excitation," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 51, No. 12, Dec. 2015.
- [5] Y. Gao, M. Nagata, K. Muramatsu, "Noise Reduction of a Three-Phase Reactor by Optimization of Gaps Between Cores Considering Electromagnetism and Magnetostriction," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 47, No. 10, Oct. 2011.
- [6] O. Barre, B. Napame, M. Hecquet, P. Brochet, "Acoustic noise emitted by passive components in magnetic devices and design of a low-noise industrial inductor," *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 27, No. 5, pp. 1053-1068, 2008.
- [7] I. Tesuhiro, et al. "Reactor vibration analysis in consideration of coupling between the magnetic field and vibration," *Industry Applications Conference, 2004, 39th IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2004 IEEE*. Vol. 2.
- [8] Y. H. Chang, et al. "Magnetomechanical vibrations of three-phase three-leg transformer with different amorphous-cored structures," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 10, pp. 2780-2783, 2011.
- [9] P. Jang, G. Choi, "Acoustic noise characteristics and magnetostriction of Fe-Si powder cores," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 4, pp. 1549-1552, 2012.
- [10] H. S. Choi, I. H. Park, W. K. Moon, "On the Physical Meaning of Maxwell Stress Tensor", *Transaction on KIEE*, Vol. 58, No. 4, Apr, 2009.
- [11] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, New York: McGraw Hill Book Co., 1941.



저 자 소 개



**유 광 용 (Kwang-Yong Yoo)**

1976년 5월 18일생. 2003년 국민대학교 재료공학과 졸업. 2008~현재 (주)창성 재직 중. 2016~현재 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정.



**이 병 국 (Byoung-Kuk Lee)**

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년~2003년 Postdoctoral Research Associate, Texas A&M University. 2003년~2005년 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자그룹 선임연구원(팀장). 2006년~현재 성균관대 정보통신공학부 교수. 2004년~현재 IEEE Senior Member, IEEE VPPC2012 조직위원장. 2016년~현재 국제전기기술위원회(IEC) 적합성평가위원회(CAB) 이사. 당 학회 회원교육이사 및 전기기기 및 에너지변환시스템 학술위원장.



**김 동 희 (Dong-Hee Kim)**

1984년 5월 27일생. 2009년 성균관대학교 전자전기공학과 졸업(학사). 2011년 동대학원 태양광시스템협동과정 졸업(석사). 2015년 동대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업 (박사). 2015년~2016년 성균관대학교 박사후연구원. 2016년~2017년 동명대학교 전기공학과 조교수. 2017년~현재 전남대학교 전기공학과 조교수. 당학회 부산지회 총무이사.