

# 전원주파수 교류자기장 내성평가용 대형 3-축 사각 헬름홀쯔 코일 시스템 제작

유권상 · 김창석 · 정낙삼

대전시 유성구 도룡동 1, 305-606

(1995년 9월 14일 받음, 1995년 10월 12일 최종수정본 받음)

전원주파수 교류자기장 내성평가를 위하여 유도코일용 대형 3-축 사각 헬름홀쯔 코일을 설계 · 제작하였다. 제작한 사각 헬름홀쯔 코일의 코일상수 및 자기장 균일도를 측정하였으며, 3축 방향의 자기장 균일도는 컴퓨터 모사에 의한 값과 잘 일치하였다. 자기장 균일도로부터 교류자기장 내성평가에서 요구하는 유효시험공간을 결정하였으며, 다회의 유도코일을 사용하므로써 낮은 전류로 큰 자기장을 요구하는 단속적 교류자기장 내성평가도 수행할 수 있음을 알 수 있었다.

## I. 서 론

국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission)에서는 IEC 1000-4 시리즈에서 11개 항목으로 전자기장 내성에 대한 국제규격을 제정하였는데, 자기장 내성(magnetic field immunity)에 대한 항목은 전원주파수 자기장(IEC 1000-4-8), 펄스 자기장(IEC 1000-4-9) 및 감쇠진동 자기장(IEC 1000-4-10) 등 3가지로 구분하여 제정하였다[1]. 유럽연합(EU)은 '96년 1월 1일부터 자국내에 수입하는 모든 전기 · 전자제품에 대하여 전자기장 내성시험이 핵심인 CE(Conformity European) 마크를 부착하도록 하였다. 이에 따라 국내에서도 전자기장 내성에 대한 관심이 대기업을 중심으로 고조되고 있고, 전자기장 내성에 대한 국제규격이 소개되었으며[2, 3], 또한 자기장 내성에 대한 연구도 진행되고 있다[4, 5].

IEC 규격에서는 자기장 내성평가용 유도코일(induction coil)로 1 m × 1 m인 단일 정사각형 코일(혹은 직경 1 m인 원형코일), 1 m × 2.6 m인 단일 직사각형 코일, 1 m × 1 m(혹은 직경 1 m인 원형코일) 정사각형 코일 2개를 사용한 간격이 0.8 m, 0.6 m인 두 종류의 사각 헬름홀쯔 코일 등을 추천하고 있다. 사각 헬름홀쯔 코일(square Helmholtz coil)은 원형 헬름홀쯔 코일에 비해, 첫째, 코일 프레임의 제작하기 쉽고, 둘째, 자기장 계산이 용이하며, 셋째, 사각 헬름홀쯔 코일인 경우 중심에 접근이 용이한 장점이 있다[6]. 또한 단일 정사각형 코일에 비하여 동일한 영역 내에서 ±3 dB 보다 좋은 자기장 균일도를 얻을 수 있으며, 넓은 영역에서 ±3 dB 영역을 구할 수 있다[1, 4]. 그리고, 단일 정사각형 및 직사각형 코일에서는 코일을 90° 회전시키면서 3축방향으로 전자제품을 시험검사하여야하나 3-축 사각 헬름홀쯔 코일인 경우는 코일을 고정시켜 둔 채 시험검사가 가능하다.

본 연구에서는 유도코일용으로 한변의 길이 각각 1.12 m, 1.00 m, 0.86 m이고 간격이 각각 0.9 m, 0.8 m, 0.7 m인 3-축 사각 헬름홀쯔 코일을 설계 · 제작한 후, 코일상수 및 ±3 dB 영역의 자기장 균일도를 측정하여 Biot-Savart 법칙으로 계산한 값[4]과 비교하고, 유효시험공간을 결정하였다. 그리고 연속적 모드의 전원주파수 교류자기장 내성시험 뿐만 아니라 높은 자기장을 요하는 단속적 모드의 내성시험도 수행할 수 있도록 측정시스템을 구성하였다.

## II. 대형 3-축 사각 헬름홀쯔코일 시스템의 설계 · 제작

사각 헬름홀쯔코일인 경우, 8개의 선분에 흐르는 전류에 의해 생성되는 자기장을 합하여 전체 자기장을 계산할 수 있다. Fig. 1과 같은 사각 헬름홀쯔 코일에서 코일의 두께 및 폭을 고려하지 않고 Biot-Savart 법칙

$$d\vec{H}(\vec{r}) = \frac{I}{4\pi} d\vec{l}_i \times \frac{\vec{R}}{R^3} \quad (1)$$

에서 z 축 방향의 자기장을 계산하면 다음과 같다[7].

$$H_z(x, y, z) = \frac{nl}{4\pi} \left[ -(y-y_0)(Q_1+Q_5) - (y+y_0)(Q_3+Q_7) + (x+x_0)(Q_2+Q_6) - (x-x_0)(Q_4+Q_8) \right] \quad (2)$$

여기서

$$Q_1 = Q_5 = \frac{x+x_0}{\{(y-y_0)^2+(z-z_0)^2\} \sqrt{(x+x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}} - \frac{x-x_0}{\{(y-y_0)^2+(z-z_0)^2\} \sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}$$

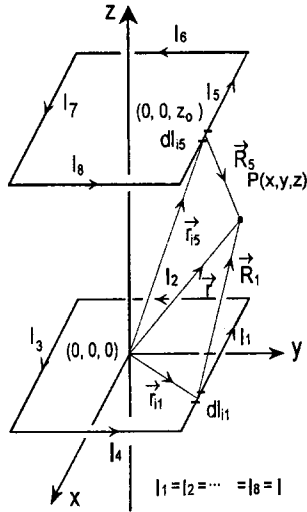


Fig. 1. Geometry of a square Helmholtz coil for the calculation of the magnetic field.

$$Q_3 = Q_7 = \frac{x-x_0}{\{(y+y_0)^2+(z-z_0)^2\} \sqrt{(x-x_0)^2+(y+y_0)^2+(z-z_0)^2}} - \frac{x+x_0}{\{(y+y_0)^2+(z-z_0)^2\} \sqrt{(x+x_0)^2+(y+y_0)^2+(z-z_0)^2}}$$

$$Q_2 = Q_6 = \frac{y+y_0}{\{(x+x_0)^2+(z-z_0)^2\} \sqrt{(x+x_0)^2+(y+y_0)^2+(z-z_0)^2}} - \frac{y-y_0}{\{(x+x_0)^2+(z-z_0)^2\} \sqrt{(x+x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}$$

$$Q_1 = Q_8 = \frac{y-y_0}{\{(x-x_0)^2+(z-z_0)^2\} \sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}} - \frac{y+y_0}{\{(x-x_0)^2+(z-z_0)^2\} \sqrt{(x-x_0)^2+(y+y_0)^2+(z-z_0)^2}}$$

$$I_1 = I_2 = \dots = I_8 = I$$

로  $Q_1, Q_2, \dots, Q_8$ 은 각각 1번, 2번,  $\dots, 8$ 번 코일의 전류가 자기장생성에 기여하는 항을 나타낸다.  $n$ 은 한 코일 각각의 권선수이며,  $I$ 는 한 권선에 흐르는 전류의 세기이다.  $x_0, y_0$ 는  $x$  및  $y$  축상 코일의 위치를 나타내며,  $z_0$ 는 정사각형 코일의  $z$  축상의 위치를 나타낸다.

한변의 길이가 각각 1.12 m, 1.00 m, 0.86 m인 코일 프레임틀을 2개씩 제작한 후, 폭이 5 mm이고, 두께가 2 mm인 코일을 7회 6겹으로 감아, 총 권선수가 42회인 사

각 헬름홀쯔 코일을 제작하였다[8]. 각 코일의 dimension 및 LCR meter (HP 4284A)로 50 Hz와 60 Hz에서 측정된 임피던스와 인덕턴스를 Table I에 나열했으며, 인덕턴스는 두 주파수에서 차이가 없었다.

Table I. The dimension of frames of 3-axis induction coil and the coil factors of induction coil.

	한변의 길이(m)	간격 (m)	코일상수 (계산값, m <sup>-1</sup> )	임피던스(Ω)		인덕턴스 (mH)
				50 Hz	60 Hz	
대(x 축)	1.12	0.9	43.26	3.9	4.5	9.0
중(z 축)	1.00	0.8	44.94	3.2	3.7	10
소(y 축)	0.86	0.7	47.04	3.4	2.8	12

그리고 제작한 3-축 사각 헬름홀쯔 코일의 사진이 Fig. 2에 주어져 있다. 이러한 코일 시스템에서 자기장 내성시험을 실시하면, 단일 정사각형 코일에서와 같이

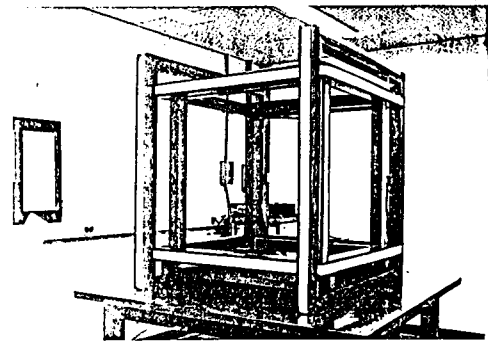


Fig. 2. Large 3 axis square Helmholtz coil.

EUT(equipment under test)나 코일 프레임틀을 회전시키지 않고 시험을 수행할 수 있는 장점이 있다.

IEC 규격에 의하면 1 m × 1 m인 단일 정사각형 코일로 연속적 모드의 내성평가를 실시하기 위해 최대 100 A/m의 자기장을 생성시켜야 하고, 1 ~ 3 s 동안 전류를 흘리는 단속적 모드에서는 최대 1,000 A/m의 자기장을 생성시켜야 한다[1]. 식 (2)에서 계산한 1 m × 1 m 단일 정사각형 유도코일의 원점에서 자기장의 세기는 0.9 n I이고, 단회(single turn)로 구성된 유도코일인 경우, 전원주파수 자기장 내성시험중 단속적 시험의 최대 자기장 세기 1000 A/m[1]를 생성시키기 위해 최대 1,100 A의 고전류를 흘려야 하므로 고출력 전류원이 요구되나, 25 A 정도의 저출력 전류원으로 요구하는 자기장을 생성

시킬 수 있도록 42회의 코일회수를 결정하였다. 전류원으로는 최대 20 A의 전류를 흘릴 수 있는 두 대의 전력증폭기를 병렬로 연결하여 최대 40 A의 전류를 흘릴 수 있도록 하여 단속적 전원 주파수 내성평가도 수행할 수 있도록 하였다.

### III. 코일상수 및 자기장 균일도 측정 시스템 구성

코일상수는 주어진 크기의 유도코일에 전류를 흘릴 때, 발생하는 자기장 세기와 전류의 비로써 EUT 없이 코일면의 중앙에서 측정되는데, 측정할 때 인가한 전류 파형과는 무관한 특성요소이다[1]. 전원주파수 교류자기장 내성평가 시스템의 개략도가 Fig. 3에 주어져 있으며, 이 시스템에서 코일상수를 측정하였다. 전원주파수 파형발생기(HP 3325B), 파형발생기에서 생성된 파형의 전력

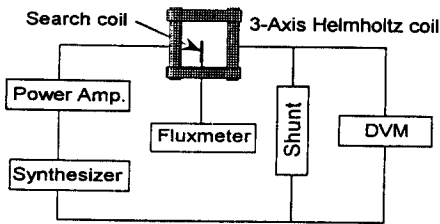


Fig. 3. Schematic diagram for the power frequency magnetic field immunity tester.

을 증폭시키기 위한 전력증폭기(Tecron 7560), 전류에 의해 자기장을 생성시키는 유도코일과 자기장을 측정하기 위한 자속계(RFL 916)와 탐지코일, 전류를 모니터링하기 위한 shunt와 DVM(Datron 1281)으로 구성시켰다. 4 A 이하의 전류를 측정하기 위해서는 Leeds & Northrup 사의 10 A용 0.01 Ω, 5 A 이상의 전류를 측정하기 위해서는 100 A용 0.1 Ω shunt를 사용하였다. 전력증폭기는 2대의 Tecron 7560을 병렬로 연결하였다. 탐지코일은 직경 40 mm, 길이 30 mm인 테프론 프레임에 직경이 0.1 mm인 에나멜선을 4,940회 감아 제작하였으며, 코일의 면적회수(area-turns) NA는 10 m<sup>2</sup>이다.

자기장 균일도(homogeneity)는  $H_z(x, y, z) / H_z(0, 0, 0)$ 으로 측정점과 원점의 자기장 세기의 비로써, dB 단위로 표시하면  $20 \log\{H_z(x, y, z) / H_z(0, 0, 0)\}$ 이고, EUT없이 측정된다. 원점의 자기장이 100 μT (1 G)일 때, 원점을 기준으로한 자기장 세기의 비  $H_z(x, y, z) / H_z(0, 0, 0)$ 은 +3 dB일 때 141 μT, -3 dB일 때 71

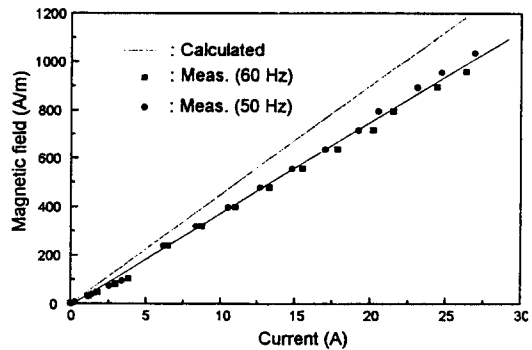
μT의 값을 갖는다. 교류자기장으로 자기장 균일도를 측정하는 경우, 탐지코일은 코일전체의 평균자기장을 측정하기 때문에 한 점에서의 자기장을 정확하게 측정하기 어렵다. 따라서 본 실험에서는 Fig. 3에서 자속계와 탐지코일 대신 홀 프로브와 가우스미터(F.W. Bell 9903)를 사용하여 직류 자기장을 인가한 헬름홀츠 코일의 자기장 균일도를 측정하였다. 직류 전류원으로는 dc voltage / current calibrator (Fluke 382A)를 사용하였다.

### IV. 결과 및 논의

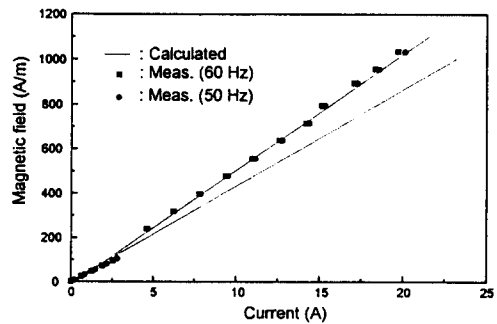
#### 1. 코일상수 결정

Fig. 4에 3축방향의 자기장 발생용 사각 헬름홀츠 코일에서 인가한 전류에 대한 자기장 세기가 주어져 있다. 사각 및 원형 점은 각각 60 Hz 및 50 Hz에서 측정된 값이고, 점선은 계산한 값이다. 두 주파수에서 자기장의 세기는 인가한 전류에 비례하고, 주파수에 따라 자기장의 세기가 변하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4 (a), (b), (c)에서 각각 z, x 및 y 축방향 헬름홀츠 코일의 코일상수를 최소제곱법으로 구하였으며, 그 값은 각각 44.94 m<sup>-1</sup>, 43.26 m<sup>-1</sup>, 69.00 m<sup>-1</sup>이다.



(a)



(b)

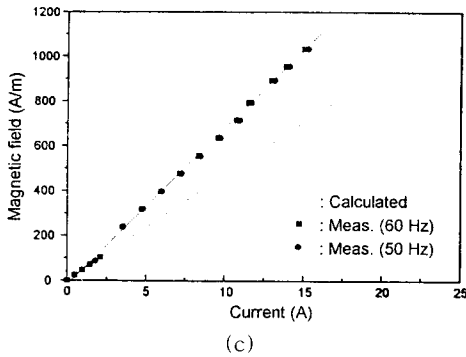


Fig. 4. Magnetic field vs. current at point (a) (0, 0, 0) in the z, (b) (0.45, 0, 0.4) in the x, and (c) (0, 0.35, 0.4) in the y directional square Helmholtz coil.

Table I에 주어진 계산값과 측정값이 다소 차이가 있으나 내성평가에 필요한 자기장을 발생시킬 수 있으므로 큰 문제는 없는 것으로 사료된다. Fig. 4 (a), (b) 및 (c)에서 각각 27 A, 19 A 및 15 A의 전류를 흘릴 경우 1000 A/m의 큰 자기장을 생성시킴으로, 구성된 시스템을 사용하여 연속적 및 단속적 자기장 내성평가시험을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

2. 유도코일의 자기장 균일도 측정

Fig. 5는 3축방향의 자기장 발생용 사각 헬름홀츠 코일에서 측정한 자기장 균일도이다. Fig. 5 (a)는 z 축 방향의 자기장 발생용 유도코일에서 원점의 자기장이 100  $\mu$ T일 때, 각 측정점의 y 값을 고정하고 z 값을 변화시키면서 71  $\mu$ T인 -3 dB를 측정한 균일도이며, 실선은 계산값, 사각 점은 측정값으로, 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 본 실험에 사용한 홀 프로브는 축(axial) 형으로 z 방향 자기장 생성용 유도코일로 인하여 +3 dB되는 위치에 홀 프로브를 위치시킬 수 없어 +3 dB는 측정할 수 없었다. 점 (0, 0, 0.4)를 중심으로 yz 평면상의 1, 2, 3, 4상한은 대칭이므로  $\pm 3$  dB영역은 0.66 m(x)  $\times$  0.66 m(y)  $\times$  1.26 m(z)로 나타났다. IEC 규격에서는 유도코일에서 0.2 m 떨어진 공간에서 시험점사를 수행하도록 권고하고 있으며, 이 권고에 따르면 유효시험공간은 0.60 m(x)  $\times$  0.60 m(y)  $\times$  1.26 m(z)이다.

Fig. 5 (b)는 x 축 방향의 자기장 발생용 유도코일에서 측정한 자기장 균일도이다. 측정점의 z 값을 고정시키고 x 값을 변화시키면서 -3 dB 및 +3 dB를 측정한 균일도로 계산값과 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 점 (0, 0, 0.4)를 중심으로 xz 평면상의 대칭을 고려하면  $\pm 3$  dB영역 및 유효 시험공간은 1.38 m(x)  $\times$  0.64 m(y)  $\times$  0.64 m(z)이다.

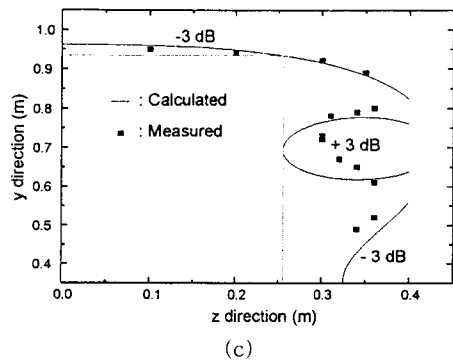
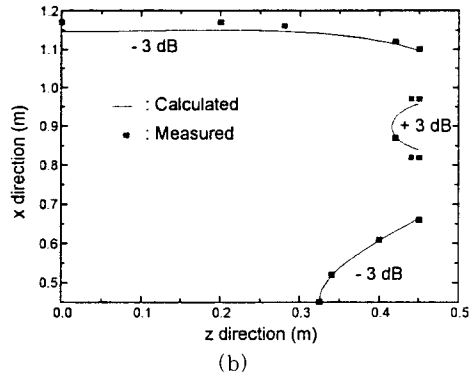
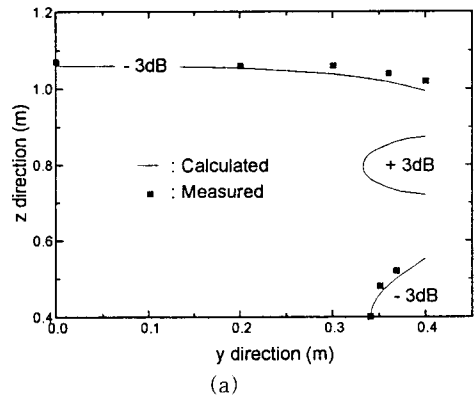


Fig. 5. Magnetic field homogeneities measured in the (a) yz plane for the z, (b) xz plane for the x, and (c) zy plane for the y directional square Helmholtz coil.

Fig. 5 (c)는 y 축 방향의 자기장 발생용 유도코일에서 코일면 중앙점 (0, 0.35, 0.4)의 자기장 세기가 100  $\mu$ T일 때, 측정점의 z 값을 고정시키고 y 값을 변화시키면서 +3 dB 및 -3 dB를 측정한 균일도이다. +3 dB 영역에서 측정값이 계산값과 차이를 보이는데, 이는 두 코일면이 미소하게 평행을 이루지 않는데서 기인하는 것으로 사료된다. 점 (0, 0, 0.4)를 중심으로 zy 평면상의 대칭을 고

려하면  $\pm 3$  dB 영역 및 유효시험공간은  $0.52 \text{ m}(x) \times 16 \text{ m}(y) \times 0.52 \text{ m}(z)$ 이다.

### V. 결 론

제작한 유도코일용 대형 3-축 사각 헬름홀쯔 코일의 코일상수를 주파수 60 Hz 및 50 Hz의 전원주파수를 갖는 교류자기장에서 탐지코일 및 자속계로 측정하였는데, 연속적 및 단속적 모드의 전원주파수 내성평가용으로 적당함을 알 수 있었다. 대형 3-축 사각 헬름홀쯔 코일의 자기장 균일도를 가우스미터로 측정하였는데, 계산치와 잘 일치하였고,  $\pm 3$  dB 공간 영역 및 유효시험공간을 결정할 수 있었다. z 축, x 축 및 y 축 방향의 사각 헬름홀쯔 코일의 유효시험공간은 각각  $0.60 \text{ m}(x) \times 0.60 \text{ m}(y) \times 1.26 \text{ m}(z)$ ,  $1.38 \text{ m}(x) \times 0.64 \text{ m}(y) \times 0.64 \text{ m}(z)$ ,  $0.52 \text{ m}(x) \times 1.16 \text{ m}(y) \times 0.52 \text{ m}(z)$ 이다. 제작한 3 축 사각 헬름홀쯔 코일을 사용하면 정사각형 코일에 비해 유효시험공간이 넓어질 뿐만 아니라, 코일을 고정시켜둔 채 시험검사를 수행할 수 있고, 연속적 및 단속적 자기장 내성평가를 수행할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] IEC Standard 1000-4-8, IEC Standard 1000-4-9, IEC Standard 1000-4-10.
- [2] 박동철, “국제표준화기구 기술동향 분석”, '91 통신학술연구과제 최종보고서, 한국전자파기술학회(1992).
- [3] 명노훈 외, “국의 EMS 규제 동향 연구”, 전자통신연구소 최종보고서(1994).
- [4] 유권상, 김창석, 한국전자파기술학회지, **5**(4), 64 (1994).
- [5] 유권상, 김창석, Digest of the 1995 Spring Conference, Korean Magnetics Society, **5**(1), 40 (1995).
- [6] A.H.Firester, Rev. Sci. Instrum., **37**, 1264 (1966).
- [7] J.K.Watson, “Applications of Magnetism”, John Wiley & Sons, New York. (1980) pp.71-79.
- [8] 정낙삼 외, “전자기내성 평가 및 대책기술 개발”, KRISS-95-083-IR(1995).

## Construction of Large 3-axis Square Helmholtz Coil system for the Power Frequency Magnetic Field Immunity Test

K. S. Ryu, C. S. Kim and N. S. Chung

*Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon 305-606*

(Received 14 September 1995, in final form 12 October 1995)

We constructed the large 3-axis square Helmholtz coil system for the power frequency magnetic field immunity test. We measured the coil factors and magnetic field homogeneities of the fabricated 3-axis square Helmholtz coil. The experimental results for the field homogeneities are in agreement with the theoretical data. From these results, we determined the effective areas for the immunity test. We also confirmed that the low current using the multi-turns coil can be applicable to the immunity test for the high field in short duration.