

자기장 내성평가용 유도코일의 자기장 균일도 계산*

(Calculation of the Magnetic Field Homogeneity in the Induction Coil for the Magnetic Field Immunity Test)

유 권 상** · 김 창 석***
(Kwon Sang Ryu** · Chang Suk Kim***)

요 약

전력주파수 자기장, 펄스 자기장 및 감쇠진동 자기장 내성평가에 대한 규격이 국제전기기술위원회(IEC)에서 제정되어 전기·전자제품들의 자기장내성에 대한 평가가 이루어질 전망이다. 이를 위해 본 연구에서는 IEC 규격에서 정하고 있는 자기장 내성평가용 유도코일인 정사각형 코일 1m×1m, 직사각형 코일 1m×2.6m와 코일사이의 간격이 0.8m 및 0.6m인 이중 정사각형 코일 1m×1m에 대한 자기장의 세기 및 균일도를 계산하여 IEC 규격에서 규정한 유도코일의 유효 시험평가 영역을 도출하였다.

abstract

The magnetic field homogeneities of the induction coils of various sizes and shapes were investigated in order to prepare for the magnetic field immunity test under the power frequency, the pulse and the damped oscillatory fields recommended by the IEC. For this purpose, we analyzed the magnetic field homogeneities in the two induction coils with 1m×1m and 1m×2.6m, and the double square coils with 0.8m and 0.6m spaced. The testing volume within ±3dB in the double square coil with 0.8m spaced is twice bigger than single square coil with 1m side in the z-direction.

I. 서 론

전자파 장애현상(EMI /EMC)중 방출과 관련된 사항은 이미 80년도 초반부터 선진국에서 자국민의 안전한 생활보장과 무역장벽의 차원에서 활용되어 왔는데, '96년부터는 EC국가에 수출하는 모든 전기·전자제품과 자동차 같은 공산품은 전자파 내성시

험(immunity test)에 필수적으로 합격되어야 하도록 규제하고 있다. 이를 위해 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission)에서는 자기장 내성에 대하여 전력주파수 자기장(power frequency magnetic field), 펄스 자기장(pulse magnetic field) 및 감쇠진동 자기장(damped oscillatory field) 등 3가지로 구분하여 규격을 제정하였다(1, 2). 그러나 국내에서는 아직 자기장 내성에

* 본 연구는 '94 출연기관연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

** 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science)

*** 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science)

대한 연구가 전무한 상태이며, 이에 대한 대응책이 시급한 상태이다. IEC 규격에서는 자기장 내성 평가용 유도코일(induction coil)로 1m×1m인 단일 정사각형 코일(혹은 직경 1m인 원형코일), 1m×2.6m인 단일 직사각형 코일, 1m×1m(혹은 직경 1m인 원형코일) 정사각형 코일 2개를 사용한 간격이 0.8m, 0.6m인 두 종류의 이중 정사각형 코일을 추천하고 있다.

이중 정사각형 코일(double square coil)은 원형 헬름홀츠 코일에 비해, 첫째, 코일 포머를 제작하기 쉽고, 둘째, 자기장 계산이 용이하며, 셋째, 3축 이중 정사각형 코일인 경우 중심에 접근이 용이한 장점이 있다(3). 또한 단일 정사각형 코일에 비하여 동일한 영역내에서 ±3dB보다 좋은 균일도를 얻을 수 있으며, 넓은 영역에서 ±3dB 영역을 구할 수 있다(1). 그리고, 단일 정사각형 및 직사각형 코일에서는 코일을 90° 회전시켜 3축방향으로 시험검사를 하여야 하나 3축 이중 정사각형 코일인 경우는 고정시켜 둔 채 시험검사가 가능하다.

본 연구에서는 이중 정사각형 및 단일 사각형 유도코일에 대하여 Biot-Savart 법칙으로 자기장의 세기 및 균일도를 계산하여 IEC 규격에서 추천하고 있는 값들을 도출하였으며, 이를 토대로 자기장 내성평가에 필요한 각종 유도코일을 설계 제작하기 위한 기초로 삼을 계획이다.

II. 자기장 및 자기장 균일도 계산 및 분석

1. 이중 정사각형 유도코일

이중 정사각형 코일인 경우, 8개의 선분에 흐르는 전류에 의해 생성되는 자기장을 합하여 전체 자기장을 계산할 수 있다. [그림 1]과 같은 이중 정사각형 코일에서 코일의 두께 및 폭을 고려하지않고 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 z축 방향의 자기장을 계산하면 다음과 같다(4).

$$\begin{aligned} \vec{H}_{tz}(\vec{r}) &= \vec{H}_{tz1}(\vec{r}) + \vec{H}_{tz2}(\vec{r}) \\ &= \frac{n}{4\pi} \left[- (y - y_0) (I_1 Q_1 + I_5 Q_5) \right. \\ &\quad - (y + y_0) (I_3 Q_3 + I_7 Q_7) \\ &\quad + (x + x_0) (I_2 Q_2 + I_6 Q_6) \\ &\quad \left. + (x + x_0) (I_4 Q_4 + I_8 Q_8) \right] \hat{z} \quad (2) \end{aligned}$$

여기서

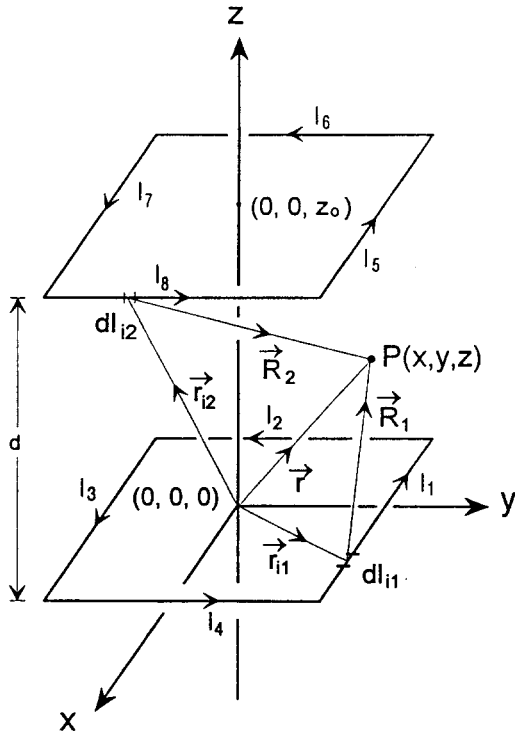
$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_5 \\ &= \frac{x + x_0}{\{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2\} \sqrt{(x + x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \\ &\quad - \frac{x - x_0}{\{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2\} \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \\ Q_3 &= Q_7 \\ &= \frac{x - x_0}{\{(y + y_0)^2 + (z - z_0)^2\} \sqrt{(x - x_0)^2 + (y + y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \\ &\quad - \frac{x + x_0}{\{(y + y_0)^2 + (z - z_0)^2\} \sqrt{(x + x_0)^2 + (y + y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \\ Q_2 &= Q_6 \\ &= \frac{y + y_0}{\{(x + x_0)^2 + (z - z_0)^2\} \sqrt{(x + x_0)^2 + (y + y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \\ &\quad - \frac{y - y_0}{\{(x + x_0)^2 + (z - z_0)^2\} \sqrt{(x + x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \\ Q_4 &= Q_8 \\ &= \frac{y - y_0}{\{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2\} \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \\ &\quad - \frac{y + y_0}{\{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2\} \sqrt{(x - x_0)^2 + (y + y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \end{aligned}$$

으로 Q_1, Q_2, \dots, Q_8 은 각각 1번, 2번, ..., 8번 전류가 자기장생성에 기여하는 항을 나타낸다. $I_1 = I_2 = \dots = I_8 = I$ 이므로 z방향의 자기장 세기는 식 (2)에서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H_{tz}(x, y, z) &= \frac{nI}{4\pi} \left[- (y - y_0) (Q_1 + Q_5) - \right. \\ &\quad (y + y_0) (Q_3 + Q_7) + \\ &\quad (x - x_0) (Q_2 + Q_6) + \\ &\quad \left. (x - x_0) (Q_4 + Q_8) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

여기서 n 은 한 코일 각각의 권선수이며, I 는 한 권선에 흐르는 전류의 세기이다. 또한 (x, y, z) 는 자기장의 세기를 측정하는 임의의 점이고, x_0, y_0 는 전류

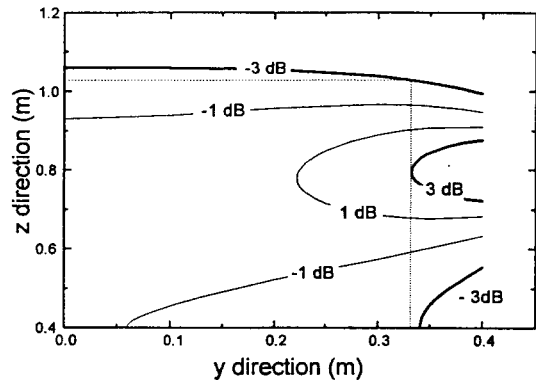
원이 놓여있는 x 축상 및 y 축상의 위치를 나타내며, z_0 는 정사각형 코일의 z 축상의 위치를 나타낸다. 간격 d 가 0.8m인 경우 $\vec{H}_{1z1}(\vec{r})$ 와 $\vec{H}_{1z2}(\vec{r})$ 은 [그림 1]에서 각각 $z_0=0m$, $z_0=0.8m$ 위치에 있는 정사각형 코일(1m×1m)에 의해 생성되는 자기장을 나타낸다. $z_0=0m$ 인 아랫코일의 xy 평면상에서 I_1, I_2, I_3, I_4 는 $y_0=0.5m, x_0=-0.5m, y_0=-0.5m, x_0=0.5m$ 에 위치해있고, $z_0=0.8m$ 인 윗 코일의 xy 평면상에서 I_5, I_6, I_7, I_8 은 $y_0=0.5m, x_0=-0.5m, y_0=-0.5m, x_0=0.5m$ 에 위치해 있다. 원점 $(0, 0, 0)$ 및 점 $(0, 0, 0.8)$ 에서 자기장의 세기 $H_{1z}(0, 0, 0), H_{1z}(0, 0, 0.8)$ 은 각각 1.068nI A/m이다.



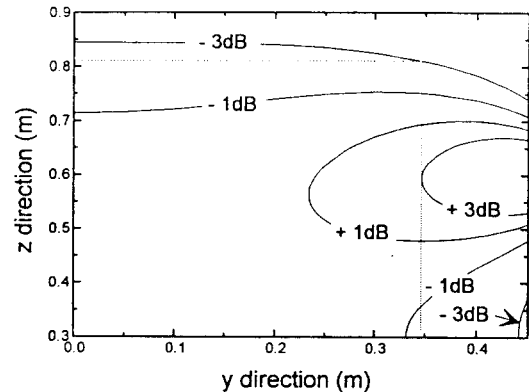
[Fig. 1] Geometry of a double square coil for the calculation of the magnetic field.

두 정사각형 코일 사이의 간격 d 가 0.6일때, 즉, $z_0=0m, z_0=0.6m$ 에 위치한 코일 중심에서 자기장의

세기 $H_{1z}(0, 0, 0), H_{1z}(0, 0, 0.6)$ 은 각각 1.182nI A/m으로 $d=0.8m$ 인 이중 정사각형 코일보다 약 1.1배 크다.



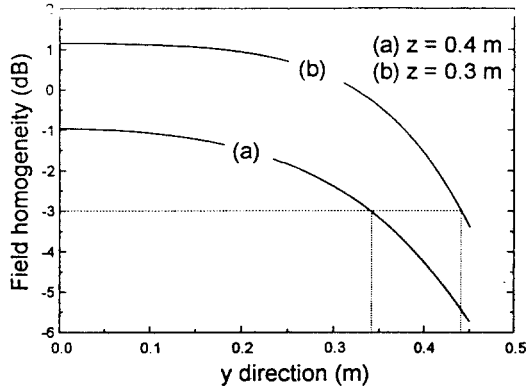
[Fig. 2] (a) Field homogeneities calculated in the yz plane for the double square coil (1m side) with 0.8m spaced coils.



[Fig. 2] (b) Field Homogeneities calculated in the yz plane for the double square coil (1m side) with 0.8m spaced coils.

[그림 2] (a) 및 (b)는 코일사이의 간격이 0.8m 및 0.6m인 이중 정사각형 코일의 yz 평면에서 계산한 $\pm 1dB, \pm 3dB$ 영역의 자기장 균일도이다. $d=0.8m$ 인 경우 점 $(0, 0, 0.4)$ 을 중심으로 1, 2, 3, 4 상한은 대칭이므로 $\pm 3dB$ 영역은 약 $0.66m(x) \times 0.66m(y) \times 1.26m(z)$ 이다. 여기서 dB은 $20\log_{10}\{H_{1z}$

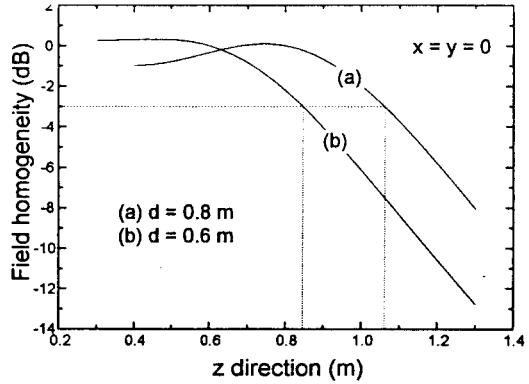
$(x, y, z) / H_{tz}(0, 0, 0)$ 으로 정의되는데, 원점을 기준으로한 자기장의 세기 비율 $\{H_{tz}(x, y, z) / H_{tz}(0, 0, 0)\}$ 는 $+3\text{dB}$ 일때 1.41, -3dB 일때 0.71의 값을 갖는다. 그리고, $d=0.6\text{m}$ 인 경우 $\pm 3\text{dB}$ 영역은 약 $70\text{m}(x) \times 0.70\text{m}(y) \times 1.02\text{m}(z)$ 이다. $d=0.6\text{m}$ 인 경우 $z=0.3\text{m}$ 에서 y 축 상에서의 -3dB 되는 영역은 $d=0.8\text{m}$ 인 경우 $z=0.4\text{m}$ 에서 y 축상에서의 -3dB 되는 영역과 비슷하나 z 방향에서는 약 0.81배 좁음을 알 수 있다.



[Fig. 3] Field homogeneities of the double square coils along the y axis at (a) $z=0.4\text{m}$ for the 0.8m spaced coil and (b) $z=0.3\text{m}$ for the 0.6m spaced coil.

[그림 3] (a), (b)는 $d=0.8\text{m}$ 및 0.6m 인 두개의 이중 정사각형 코일에서 $z=0.4\text{m}$ 및 0.3m 인 xy 평면상에서 y 축을 따라 각각 계산한 자기장 균일도인데, 점 $(0, 0, 0.4)$ 및 점 $(0, 0, 0.3)$ 에서 y 축을 따라 멀어질수록 자기장의 세기가 작아짐을 알 수 있다. $d=0.8\text{m}$ 0.6m 인 이중 정사각형 코일에서 -3dB 가 되는 점은 각각 $(0, 0.34, 0.4)$, $(0, 0.44, 0.3)$ 이다. [그림 4] (a) $d=0.8\text{m}$ 인 이중 정사각형 코일에서 z 축을 따라 점 $(0, 0, 0.4)$ 에서 점 $(0, 0, 1.3)$ 까지 계산한 자기장 균일도로써, 자기장이 서서히 증가하다가 점 $(0, 0, 0.8)$ 에서 0dB 가 된 후 다소 급격히 떨어짐을 알 수 있다. -3dB 가 되는 점은 $(0, 0, 1.06)$ 이

다. [그림 4] (b) $d=0.6\text{m}$ 인 이중 정사각형 코일에서 z 축을 따라 점 $(0, 0, 0.3)$ 에서 점 $(0, 0, 1.2)$ 까지 계산한 자기장 균일도로써, 점 $(0, 0, 0.3)$ 에서 0.27dB 의 자기장 균일도에서 서서히 증가하여 점 $(0, 0, 0.45)$ 에서 최대값 0.33dB 를 갖고, 점 $(0, 0, 0.6)$ 에서 0dB 가 된 후 다소 급격히 떨어짐을 알 수 있다. -3dB 가 되는 점은 $(0, 0, 0.84)$ 로 계산되었다.



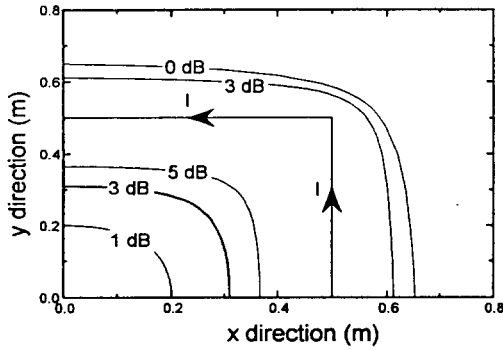
[Fig. 4] Field homogeneities of the square coils along the z axis at $x=y=0$ for the (a) 0.8m and (b) 0.6m spaced coils.

2. 단일 사각형 코일

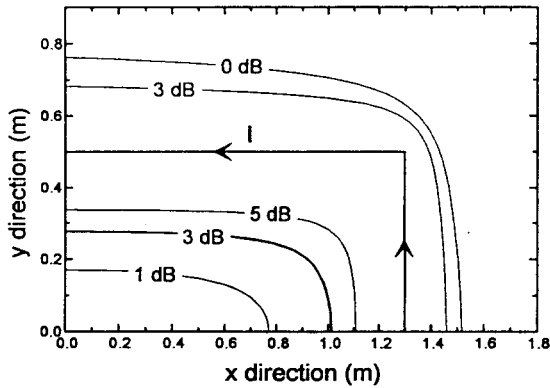
이중 정사각형 코일에서 $z_0=0\text{m}$ 에 위치한 사각형 코일 한개가 있는 경우 z 축 방향의 자기장의 세기는 다음과 같다.

$$H_{tz}(x, y, z) = \frac{n}{4\pi} \{ -(y-y_0)I_1Q_1 - (y+y_0)I_3Q_3 + (x+x_0)I_2Q_2 + (x-x_0)I_4Q_4 \} \quad (4)$$

정사각형 코일 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 에서 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 는 각각 $y_0=0.5\text{m}$, $x_0=-0.5\text{m}$, $y_0=-0.5\text{m}$, $x_0=0.5\text{m}$ 인 1번, …, 4번 전류가 자기장 생성에 기여하는 항을 나타내며, $I_1=I_2=I_3=I_4=I$ 이다. $1\text{m} \times 1\text{m}$ 인 코일 원점에서 자기장의 세기 $H_{tz}(0, 0, 0)$ 는 0.900mT



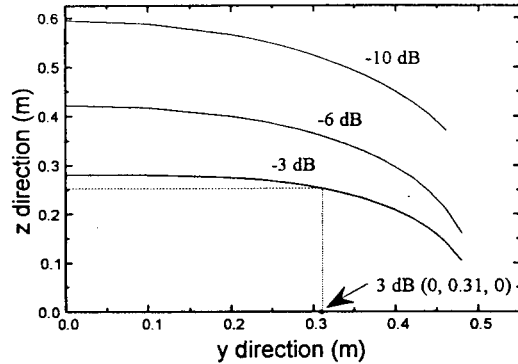
[Fig. 5] (a) Field homogeneities calculated in the xy plane for the $1\text{m} \times 1\text{m}$ single square coil.



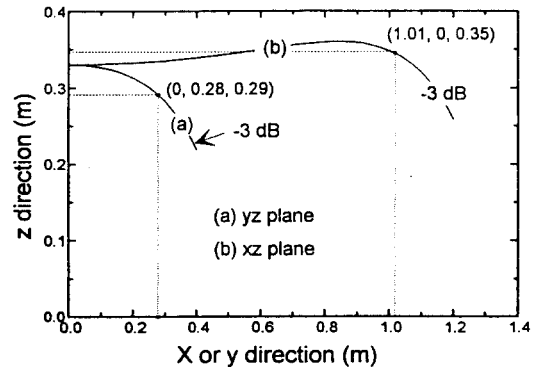
[Fig. 5] (b) Field homogeneities calculated in the xy plane for the $1\text{m} \times 2.6\text{m}$ single rectangular coil.

A/m로 $d=0.8\text{m}$ 및 0.6m 인 이중 정사각형 코일의 경우보다 각각 16% 및 24%정도 낮음을 알 수 있다. xy 평면상에 놓여있는 단일 정사각형 코일 1 상한에서 계산한 1, 3, 5dB 영역의 자기장 균일도를 [그림 5] (a)에 나타내었는데, 1, 2, 3, 4 상한은 대칭이므로 코일내 +3dB 영역은 x 축 및 y 축상에서 각각 0.62m 임을 알 수 있다. $1\text{m} \times 2.6\text{m}$ 인 직사각형 코일 원점에서 자기장의 세기 $H_{zz}(0, 0, 0)$ 는 0.538nI A/m 로 $d=0.8\text{m}$ 및 0.6m 인 이중 정사각형 코일의

경우보다 각각 50% 및 55%정도 낮음을 알 수 있다. [그림 5] (b)는 xy 평면상에 놓여있는 $1\text{m} \times 2.6\text{m}$ 인 직사각형 코일 1 상한에서 계산한 1, 3, 5dB 영역의 자기장 균일도를 나타내었는데, 1, 2, 3, 4 상한은 대칭이므로 +3dB 영역은 x 축상에서 2.02m , y 축상에서 0.56m 임을 알 수 있다. 여기서, xy 평면상에 놓여있는 단일 사각형코일 내부의 자기장 방향은 $+z$ 방향이고, 사각형코일 외부의 자기장 방향은 내부 자기장 방향과 반대인 $-z$ 방향이다.



[Fig. 6] Field homogeneities calculated in the yz plane for the $1\text{m} \times 1\text{m}$ single square coil.



[Fig. 7] Field homogeneities calculated in the (a) yz plane and (b) xz plane for a $1\text{m} \times 2.6\text{m}$ single rectangular coil.

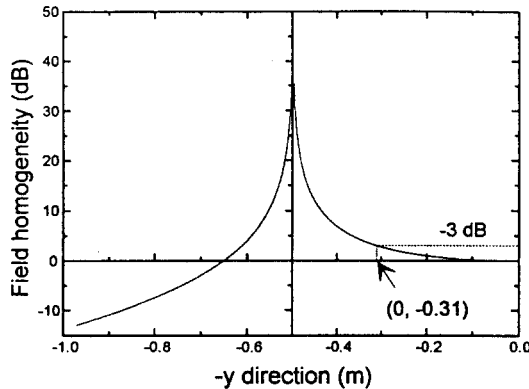
[그림 6]은 1m × 1m 정사각형 코일의 yz 평면상에서 계산한 -3, -6, -10dB 영역의 자기장 균일도인데, 1, 2, 3, 4 상한은 대칭이므로 [그림 5] (a)와 [그림 6]에 의하여 ±3dB 영역은 약 0.62m(x) × 0.62m(y) × 0.50m(z)임을 알 수 있다. [그림 7]은 xy 평면상에 놓여있는 1m × 2.6m 직사각형 코일의 yz 평면 및 xz 평면상에서 계산한 -3dB 영역의 자기장 균일도인데, 1, 2, 3, 4 상한은 대이이므로 [그림 5] (b)와 7에 의하여 ±3dB 영역은 약 2.02m(x) × 0.

56m(y) × 0.58m(z)임을 알 수 있다.

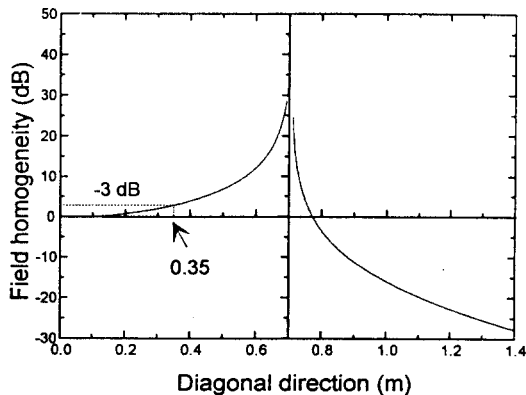
[그림 8] (a), (b)는 1m × 1m 정사각형 코일에서 각각 -y 방향 및 xy(대각선) 방향에 따라 계산한 자기장 균일도이다. 원점에서 코일방향으로 가까이 감에 따라 자기장이 서서히 증가하다가 코일 가까이에서는 급격히 증가함을 알 수 있고, 코일밖으로 멀어짐에 따라 자기장은 급격히 감소함을 알 수 있다. [그림 8] (a)에서 3dB가 되는 점은 (0, -0.31, 0)이다. [그림 8] (b)에서 3dB가 되는 점은 대각선방향으로 원점에서 0.35m 떨어진 위치에 있는데, 직각좌표계로 표시한 위치는 (0.25, 0.25, 0)이다.

III. 결 론

IEC 규격에서 정하고 있는 자기장 내성평가용 유도코일에 대한 자기장 및 자기장 균일도를 Biot-Savart 법칙으로 계산하였는데, 간격이 0.8m 및 0.6m인 이중 정사각형, 단일 정사각형 및 직사각형 코일에서 ±3dB 영역은 각각 0.66m(x) × 0.66m(y) × 1.26m(z), 0.70m(x) × 0.70m(y) × 1.02m(z), 0.62m(x) × 0.62m(y) × 0.50m(z), 2.02m(x) × 0.56m(y) × 0.58m(z)이다. 그러나 IEC 규격에서는 유도코일에서 0.2m 떨어진 공간에서 시험검사를 수행하기를 권고하고 있는데, 이 권고에 따르면 유효 시험공간은 각각 0.60m(x) × 0.60m(y) × 1.26m(z), 0.60m(x) × 0.60m(y) × 1.02m(z), 0.60m(x) × 0.60m(y) × 0.50m(z), 2.02m(x) × 0.56m(y) × 0.58m(z)가 된다. 그리고 1m × 1m인 정사각형 코일보다 간격이 0.8m인 이중 정사각형 코일을 사용하면 시험평가 공간이 z방향에서 2배이상 넓어짐을 알 수 있다. 또한 간격이 0.8m인 3축 이중 정사각형 코일을 사용하면 단일 정사각형 코일에 비해 유효시험공간이 넓어질뿐 아니라, 코일을 고정시켜둔채 시험검사를 수행할 수 있는 이점이 있다.



[Fig. 8] (a) Field homogeneities calculated along the -y direction in the xy plane of a single square coil.



[Fig. 8] (b) Field homogeneities calculated along the -y diagonal direction in the xy plane of a single square coil.

참고문헌

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. A.H.Firester, Rev. Sci. Instrum., 37, 1264 (1966).
4. J.K.Watson, Applications of Magnetism, John Wiley & Sons, New York. (1980) pp.71-79.