

저주파 자기장 차폐를 위한 자기차폐실 설계

(Design of MSR for Magnetic Field Shielding of Low Frequency)

최학윤*

(Hak-Yun Choi)

요 약

본 논문에서는 0.1[Hz]에서 60[Hz]의 저주파 자기장을 차폐할 수 있는 경량의 자기차폐실을 설계하고, 차폐실을 제작하여 차폐율을 측정하였다. 자기차폐실의 크기는 산업용 측정기기가 들어갈 수 있는 3.0[m](W)× 3.0[m](L)×3.0[m](H)로 하였으며, 투자율이 높은 자성체의 직류차폐와 교류차폐특성, 도전성 물질의 와전류에 의한 차폐율을 계산하였고, 설계된 결과로부터 차폐실의 구조 값을 구하였다.

설계된 차폐실의 타당성을 검토하기 위하여 저주파 차폐실을 제작하고 차폐율을 측정하여 계산값과 비교하였다. 측정결과는 0.1[Hz]에서 5배 이상의 차폐율을 만족하였고, 60[Hz]에서는 86배였다. 따라서 본 논문에서 제작한 자기차폐실은 저주파 자기차폐실로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

Abstract

In this paper, the magnetically shielded room for low magnetic field shielding is designed and measured by fabricated. The size of magnetically shielded room was 3.0[m](W)×3.0[m](L)×3.0[m](H) to enter the industrial measuring instruments and analyzed DC and AC shielding characteristics of magnetic materials with a high permeability and AC shielding characteristics by eddy current of conductive materials. As a results, shielded room dimensions were obtained.

To verify the analysis results, magnetically shielded room is fabricated and the calculated results are compared with the measured results. The Measured results show good agreement with calculated results. According to measurements, 5 times of 0.1[Hz] and 86 times of 60[Hz] is achieved at low frequency. The fabricated shielding room can be used as the magnetically shielding room for low magnetic field shielding.

Key Words : Magnetic Shielding, Helmholtz Coil, Geomagnetic Field, Permalloy, Eddy Current, AC/DC Shielding

* 주저자 : 김포대학 IT학부 부교수
Tel : 031-999-4141, Fax : 031-999-4776
E-mail : hychoi@kimpo.ac.kr
접수일자 : 2010년 4월 27일
1차심사 : 2010년 4월 30일
심사완료 : 2010년 5월 19일

1. 서 론

자기차폐실(MSR : Magnetically Shielded Room)은

외부에서 발생한 전자파의 침투와 내부에서 발생한 전자파를 차폐 재료를 사용하여 자기장의 투과를 억제시키는 구조체이다[1].

현재 지자장(geomagnetic field)의 변동 및 인공적으로 발생하는 자기잡음은 정밀한 의료기기, 전자장비 및 산업계측기기의 성능을 저하시키거나 오동작을 일으키는 경우가 많이 발생하고 있다. 주된 자기잡음은 첫째, 약 50[μ T] 크기의 지자장이며 이는 건물 주위의 자성체가 지자장의 공간적 분포를 변형시켜 불균일한 자기장을 생성시키며, 건물 또는 장비가 지자장 하에서 진동을 하게 되면 교류자기 잡음이 발생된다. 둘째, 대부분의 건물 또는 그 주변에 존재하는 송배전선, 공조시스템, 모터, 엘리베이터, 자동차, 전차, 건물의 진동 등에 의한 교류자기 잡음이 발생한다. 특히 최근에는 대전력기기와 60[Hz]의 고압전력선으로부터 발생하는 교류자기장이 강력한 자기잡음의 원인이 되고 있다. 따라서 MRI와 같은 신체질환을 검진하기 위한 병원이나, 전자현미경등이 설치되어 있는 산업현장에는 외부 환경잡음을 제거하여 높은 신호 대 잡음비를 얻어야만 하는 자기차폐실이 필요하다[2]. 모든 현장에서 자기장 차단이 필요한 것은 아니지만, 도심에서 증가하고 있는 엘리베이터, 자동차, 전동차 및 전력선등은 모두가 극 저주파 자기장 발생의 직접적인 원인이 되고 있기 때문에 그 영향권이 계속 확대되는 추세이다.

현재 식의약청에서는 불요전자파에 대하여 고주파(MHz)대역은 100[dB] 이상의 차폐율을 규정하고 있으나 저주파 자기장에 대한 규제치는 없다[3]. 실제 전자현미경이나 전자빔리소그래피와 같은 정밀 산업용 측정기기는 0.1[μ T] 이하의 자기적 환경을 요구하는 상황이지만 도심의 여러 장소에서 0.5[μ T] 정도의 자기장이 발생하므로 약 5배 정도의 차폐가 필요하다. 자기차폐실의 차폐율은 차폐실을 구성하는 재료의 두께나 품질이 절대적인 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다[4].

본 논문에서는 저주파 자기장의 효과적인 차폐를 위해, 투자율이 높은 자성체에 의한 직류차폐와 교류차폐특성, 도전성물질의 와전류에 의한 차폐율을 조사하고, 0.1[Hz]에서 5배, 60[Hz]에서 100배 정도의 차폐를 이룰 수 있는 자기차폐실을 설계하고 제작하였다. 이

를 위해서 차폐실 외부에 자기장 발생장치를 제작하여 주파수별로 차폐율을 측정하고 차폐실의 성능을 평가하였다. 또한 자성체 재질을 퍼멀로이 80[%] Ni 합금을 1[mm] 두께로 설계하고 외부 자기장의 유입을 차단하기 위하여 HGO(High Grain-Oriented) Si-Fe를 1[mm] 두께로 동시에 부착하도록 설계하여 경량의 차폐실을 제작하였다.

2. 자기차폐율

외부의 자기장을 차폐시키기 위한 자기차폐실은 퍼멀로이(Permalloy)와 같은 고투자율 재료를 사용하여 자기장의 통로를 설정하여 그 자기장을 다른 곳으로 유도시키는 방법과, 차폐실 내부로 유입되는 자계의 역극성 자계를 만들어 소거시키는 방법이 있다.

본 논문에서 설계할 자기차폐실의 크기는 병원의 MRI나 전자현미경과 같은 산업용정밀측정기기가 차폐실 내부로 들어갈 수 있도록 3.0[m](W)×3.0[m](L)×3.0[m](H)의 직육면체의 구조로 하였다. 차폐실의 골격을 구성하는 자성체는 DC 및 1[Hz]까지 저주파 자기장 차폐에는 효과적이지만 전기전도도가 크지 못하므로 약 10[Hz] 이상의 교류영역에서는 차폐효과가 크지 않다. 또한 기계적 진동이나 압력에 투자율의 변화를 일으키는 단점이 있다고 알려지고 있다[4]. 따라서 60[Hz]의 교류 자기장은 전기전도도가 큰 알루미늄 또는 구리에 의한 와전류(eddy current) 차폐효과를 이용해야 하는데, 알루미늄이 구리에 비해 가공 및 기계적 강도가 양호하므로 차폐 재료로 사용한다. 차폐율은 자성체와 도체로 나누어 다음과 같이 계산하였다.

2.1 자성체의 의한 직류 차폐

두께 d , 변의 길이가 L , 투자율이 μ 인 정육면체 구조의 자기차폐실의 차폐율은 다음과 같다[5].

$$S_{ferromagnetic} = 0.75 \left(\frac{\mu d}{L} \right) + 1 \quad (1)$$

식 (1)을 보면 차폐율은 자성체의 투자율과 두께의

곱에 비례하므로 차폐율을 높이기 위해서는 투자율이 큰 재료를 사용하면서 동시에 두께를 크게 하는 것이 필요하다. 현재 투자율이 가장 높은 자기 차폐 재료는 Ni 78[%] Alloy이다. PC계열 Ni합금의 최대투자율은 100,000이지만 실제 차폐실에 부착하여 사용할 경우 부스러지기 쉬워 수소열처리과정을 거치게 되는데 이 과정에서 투자율이 20,000정도로 떨어지게 된다. 식 (1)을 이용하여 L 을 3[m], d 을 1[mm]로 하고 비투자율을 100,000으로 적용할 경우 차폐율은 28.30[dB]이고, 20,000으로 적용하여 계산하면 15.56[dB]가 된다. 본 논문에서는 PC계열의 78[%] Ni 합금을 1[mm] 두께로 설치하고 외부에 보자력이 지자장과 유사한 HGO(High Grain Oriented) Si-Fe를 1[mm] 두께로 동시에 부착하여 제작한다.

2.2 저주파에서 자성체의 의한 교류 자기 차폐

잡음으로서 작용하는 자기장은 기기의 손실, 효율, 용량 등에 영향을 미친다. 하지만 이 자속을 와전류에 의한 자속제어법을 사용하면 기능을 향상시킬 수 있다. 자성체에 교류자장이 가해지면 자성체 내부에도 와전류가 유도되며 외부자장과 반대방향의 자장을 형성시킴으로써 차폐효과를 가져오는데 차폐율은 다음과 같다.

$$S_{ferromagnetic} = \left(\frac{\mu d}{L} + 1 \right) \left(\frac{\delta}{2d} \left[\cosh\left(\frac{2d}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2d}{\delta}\right) \right] \right)^{1/2} \quad (2)$$

여기서 L 은 변의 길이를 나타내고, $\delta (> d)$ 는 표피깊이 이므로 자성체의 비저항 ρ , 비 투자율 μ , 진공 중 투자율 μ_0 , 주파수 f 에 의해 다음 식으로 주어진다.

$$\delta = \left(\frac{\rho}{\pi \mu \mu_0 f} \right)^{1/2} \quad (3)$$

자성체의 표피 깊이는 비 투자율을 20,000으로 사용할 경우, Ni합금은, 0.1[Hz]에서 8.39[mm], 10[Hz]에서 0.77[mm], 60[Hz]에서 0.34[mm]이다. 이를 이용하여

식 (2)의 자성체에 의한 차폐율을 구해보면 각각 14.69[dB], 16.65[dB], 24.70[dB]이다.

2.3 알루미늄에 의한 와전류차폐

교류자기장이 가해지면 알루미늄 내부에는 가해진 자장을 상쇄시키기 위한 와전류가 흘러 차폐효과를 가져오며, 차폐되는 정도는 식 (4)과 같이 알루미늄의 두께와 표피깊이와의 상대적인 크기에 따라 결정된다.

$$S_{aluminum} = \left[1 + \left(\frac{Ldf\pi\mu_0}{2\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (d < \delta) \quad (4)$$

여기서 L 은 변의 길이, d 는 두께, f 는 주파수, μ_0 는 진공 투자율, ρ 는 저항률을, δ 는 표피깊이를 나타낸다. 표피깊이는 알루미늄의 전기전도도 $\sigma = 3.6 \times 10^7 [S/m]$ 을 이용하여 주파수에 따라 계산하였다. 그림 1은 주파수변화에 대한 알루미늄의 표피깊이를 나타낸다.

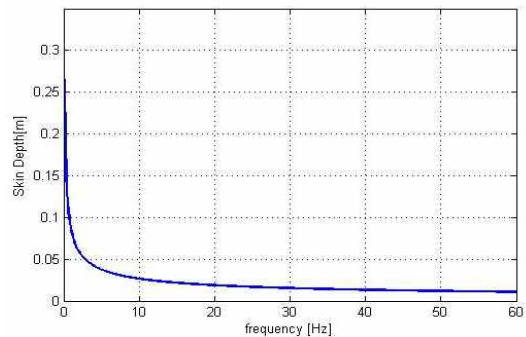


그림 1. 와전류 차폐를 위한 알루미늄의 표피깊이
Fig. 1. Skin Depth of Aluminum for eddy current shielding.

그림 1에서 알루미늄의 표피깊이는 0.1[Hz]에서 26.53[cm], 10[Hz]에서 2.65[cm]이고 60[Hz]에서는 1.08[cm]이다. 여기서 알루미늄으로만 0.1[Hz]를 차폐하려면 알루미늄의 두께가 26[cm]보다 두꺼워야 하는데 이 정도 두께의 차폐실은 300톤 이상이 되어 현실적으로 불가능하다.

따라서 1~10[Hz]의 자기장을 차폐하기 위해 자성체를 사용하고, 10[Hz] 이상의 차폐 효과를 위해 알루

미늄을 자성체에 부착하여 설계한다. 알루미늄은 최소한 두께 1[cm] 이상을 사용하여야 하지만, 차폐실의 제작 용이성 및 경량화를 우선하여 두께 3[mm]로 사용하였다. 3[mm]의 알루미늄으로 차폐율을 계산하면 0.1[Hz]에서 0.0013[dB]이고 60[Hz]에서는 0.36[dB]이다. 즉 알루미늄에 의한 차폐효과는 매우 미약하므로 알루미늄보다는 자성체에 의한 차폐효과가 우세하다. 전체차폐율은 자성체에 의한 차폐효과와 알루미늄에 의한 차폐효과를 곱한 양으로 다음과 같다.

$$S_{total} = S_{ferromagnetic} \times S_{aluminum} \quad (5)$$

표 1. 차폐율 계산치
Table 1. Calculation of Shielding Rate

주파수 ([Hz])	자성체에 의한 교류차폐율([dB])	와전류에 의한 차폐율([dB])	차폐율 ([dB])
0.1	14.69	0.0012	14.69
1	14.89	0.0013	14.89
6	15.08	0.07	15.15
10	16.65	0.12	16.77
12	17.03	0.15	17.18
30	20.16	0.32	20.48
60	24.70	0.68	25.38

3. 자기차폐실의 제작

자기차폐실의 제작은 자성체가 노출되는 자기장의 세기에 따라 보자력이 다른 재료를 사용하여 설계하였다. 차폐실의 외부는 보자력이 지자장의 세기와 유사한 HGO Si-Fe 재료를 사용하였고, 그 내부에 Ni 78[%] Alloy를 사용하였다. 니켈 합금은 금속 재료 중에서도 기계 가공성이 우수하면서도 최대의 투자율을 갖고 있으며, 자력선 차폐에 우수한 효과를 갖고 있다.

차폐실의 골조는 두께가 20[mm]인 Ga-패널을 사용하고, 연결 쇠는 자성체 특성을 갖는 재료로서 3[mm] 이상의 두께로 제작하였다. 알루미늄 외벽은 3[mm]의 두께를 사용하였으며, 알루미늄 판 사이에 이음매는 접촉저항을 작게 하고, 오염물질을 방지하기 위하여 산화막을 제거한 후 전도성 그리스로 표면을 보호하였다. 환기구 및 관측구 역할을 위한 공기구멍은 직경

150[mm]로 제작하였다. 150[mm]의 직경은 자기장의 유입과 유출량이 상당히 크므로 이를 차단하기 위해 직경 15[mm]의 균일한 벌집모양의 Ni-alloy를 가지고 이중으로 차단하였다. HGO는 3[%]의 Si이 함유된 방향성 재료를 사용하였는데, HGO는 방향에 따라 투자율의 차이가 크기 때문에 재료를 포개는 경우 상하층의 롤링방향이 서로 수직이 되도록 하였다. 모서리 부분에서는 “ㄱ”자 형태의 재료를 사용하는데 HGO의 경우 “ㄱ”자는 자성재료를 따라서 모서리를 가로지르는 자기장에 대해서는 우수한 자기적 저항을 갖지 않으나 모서리를 따라서 흐르는 자기장에 대해서는 비 방향적 특성이기 때문에 차폐 특성이 열해진다. 따라서 HGO 재료에 대한 “ㄱ”자는 Ni-alloy를 사용하였다. 표 2는 자기차폐실 제작을 위해 사용한 재료를 나타낸다.

표 2. 자기차폐실의 외벽재료
Table 2. The Materials of MSR

구 성	재 질	두께 ([mm])	최대 투자율 (적용투자율)
골 격	Ga Panel	20 (H-Beam)	-
내부 도전성재료	Al	3	-
HGO	Si-Steel	1	40,000 (4,000)
내부 자성재료	Ni-Alloy (80[%])	1	150,000 (20,000)
Honey-comb	Ni-Alloy (80[%])	30(15[mm]타공)	-

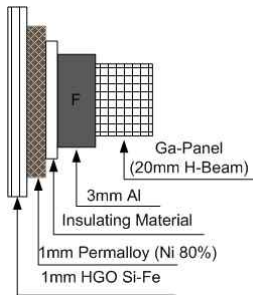
Ni-alloy는 두께가 얇을수록 투자율이 향상되는 특성이 있지만 부서지기 쉬운 성질이 있고 투자율이 변하는 성질이 있다. 특히 가공 및 공작과정에서 발생한 스트레스로 인해 투자율이 나빠져 있으므로 투자율의 회복을 위해 열처리 과정이 필수적이다. 열처리 조건에 따라서 재료의 투자율 특성이 달라지므로 열처리 온도와 수소의 순도 그리고 재료의 청결도 등은 매우 중요하다. 따라서 수소 열처리하여 사용하였다. Ni-alloy는 접촉할 3[mm] 알루미늄에서 형성된 맴돌이 전류의 유입을 차단하기 위하여 알루미늄과 Ni-alloy

저주파 자기장 차폐를 위한 자기차폐실 설계

사이에 절연층을 설치하였다. 모서리 부분에는 “ㄱ”자 형태의 재료를 제작하여 설치하며 이는 평면에 설치된 재료와 중첩되도록 설치하였다. 그림 2는 자기차폐실의 외관과 외부구조물의 사용재료를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 2. (a) 제작된 자기차폐실, (b) 자기차폐실의 외벽
Fig. 2. (a) Structure of MSR, (b) Schematic of MSR wall

4. 차폐율 측정

제작된 자기차폐실의 차폐율을 조사하기 위해서는 자기장을 발생시키는 장치(Helmholtz coil)와 차폐 후 자기장 측정을 위해 자기센서가 필요하다[6]. 현재 수 [m] 크기를 가지면서 다양한 주파수를 발생시키는 자기장 발생장치는 상용화 되어 있지 않아 제작하여 측정하였다. 자기장 발생장치의 중심에서의 자기장 $B[\mu T]$ 값은 다음과 같이 계산된다.

$$B = \left(\frac{1600}{D^2 + L^2} + \frac{1600}{D^2 + W^2} \right) \left(\frac{LWN}{(L^2 + W^2 + D^2)^{1/2}} \right) [\mu T] \quad (6)$$

여기서 $W[\text{mm}]$ 과 $L[\text{mm}]$ 는 각각 헬름홀츠 코일의 치수이고, $D[\text{mm}]$ 는 코일간 거리이며 N 은 한쪽 코일의 권선수이고, $I[\text{A}]$ 는 전류이다. 본 측정에서는 코일의 권선수가 20회인 헬름홀츠 코일을 제작하였다. 자기장 발생을 위해 W 와 L , 코일 간 치수 D 는 2,000으로 하였고, 전류는 1[A]로 하여 설계한 자기장의 세기는 $9.23[\mu T]$ 이다. 그림 3은 차폐율 측정을 위한 장치개념도이다. 함수발생기로 0.1[Hz]부터 60[Hz]까지 발생시키고 전류는 1[App]로 하여 $9.23[\mu T]$ 를 발생시켰다.

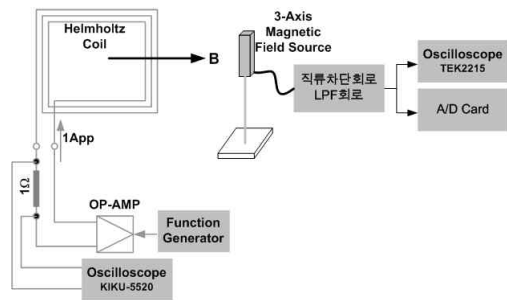


그림 3. 자기차폐율 측정도
Fig. 3. Schematic of the magnetic shielding measurement

표 3. 자기차폐율 계산치와 측정치
Table 3. Calculated and Measured values of shielding ratio

주파수 ([Hz])	측정값 ([μT])	측정 계산과 측정값		
		(배)	측정치([dB])	계산치([dB])
0.1	1.923	4.8	13.62	14.69
1	1.709	5.4	14.64	14.89
6	0.749	12.0	21.58	15.15
10	0.521	17.7	24.96	16.77
12	0.433	21.3	26.57	17.18
30	0.21	44.0	32.87	20.48
60	0.12	76.9	37.72	25.38

자기센서는 백색잡음이 10[pT]인 fluxgate 자력계 (Bartington, Mag-03MS)를 사용하였다. 3축 자기센서의 출력은 자체의 오프셋전압, 지구자기장의 직류성분 및 1,000[Hz]이상의 주위 잡음 자기장도 감지되어,

오프셋전압 및 순수한 직류성분은 500[μF]의 커패시터로 차단하고 1,000[Hz]이상의 교류잡음을 제거하여 자기장 발생장치에서에서 발생하는 0.1~60[Hz]을 측정하였다.

제작된 차폐실의 차폐율 측정값은 자기장 발생장치의 설치 전과 후의 3방향의 자기장의 크기를 측정하여 벡터합의 절대 값의 크기를 구하였다. 제작된 차폐실의 측정치는 0.1[Hz]에서는 차폐율이 약 13.62[dB] 이고, 주파수가 높아질수록 차폐율은 증가하며 대략 6[Hz]이상에서 차폐율이 개선되는 것은 알루미늄에 의한 와전류 차폐효과가 나타남을 보인다.

차폐율이 0.1[Hz]와 1[Hz]에서 측정값이 계산 값보다 작은 이유로는 26.53[cm]의 알루미늄 판을 3[mm]를 사용한 것에 원인이 있다. 즉 차폐실의 외벽을 구성하는 알루미늄의 두께를 표피깊이로 계산한 값으로 사용하였다면 차폐율의 개선효과를 가져올 수 있을 것이다. 6[Hz]부터 전원주파수인 60[Hz]의 경우에는 계산값보다 7~12[dB] 정도 개선된 21~38[dB]로 나타났다. 표 3은 차폐율의 계산값과 측정값을 나타낸다.

차폐율이 0.1[Hz]와 1[Hz]에서 측정값이 계산 값보다 작은 이유로는 26.53[cm]의 알루미늄 판을 3[mm]를 사용한 것에 원인이 있다.

즉 차폐실의 외벽을 구성하는 알루미늄의 두께를 표피깊이로 계산한 값으로 사용하였다면 차폐율의 개선효과를 가져올 수 있을 것이다. 6[Hz] 부터 전원주파수인 60[Hz]의 경우에는 계산값보다 7~12[dB] 정도 개선된 21~38[dB]로 나타났다. 표 3은 차폐율의 계산값과 측정값을 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 극 저주파인 0.1[Hz]부터 60[Hz]를 차폐시킬 수 있는 경량의 자기차폐실을 제작하고 차폐율을 측정하였다. 제작된 차폐실은 극 저주파수 대역인 0.1[Hz] 이하의 자기장에 대한 차폐율이 약 5배로 나타났고, 60[Hz]에서 77배 이상의 차폐율이 측정되어 극 저주파 자기장에 대한 차폐를 구현할 수 있었으며 6[Hz]이하를 제외하고는 계산치보다 향상된 차폐목적 달성을 달성할 수 있었다. 이는 3[mm]의 알루미늄

에 의한 차폐효과가 계산치보다 우수한 성능을 발휘하였고 자성체에 부착한 HGO를 계산에서 고려하지 않은 원인도 있다고 판단된다.

설계된 자기차폐실은 경량의 자성체와 알루미늄을 사용하여 차폐실의 단가와 제작기간을 줄일 수 있고, 설치 또한 단시간에 이루어질 수 있을 것으로 판단되며, 측정결과를 보면 MRI 차폐실과 같은 의료분야와 전자현미경 또는 전자선 리소그래피와 같은 정밀 산업측정분야에서도 활용될 수 있을 것이라 생각한다.

향후 차폐율이 더 우수한 차폐특성을 가지는 차폐율의 설계를 위해서는 차폐실의 외벽에 자성체를 다단으로 접합시키고, 표피효과를 고려한 도체의 적절한 선택 및 각 재료의 이음매 부분의 정밀제작 등이 필요할 것이다.

본 논문은 2010학년도 김포대학 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] 김기채 외 4인 ‘전자파환경공학’ 대영사, pp.97-98, 2006.
- [2] 유권규 외 4인, ‘생체신호 측정을 위한 최대의 신호대 잡음비를 가지는 검출코일의 형태와 자기차폐실의 최적 조합’, Progress in Superconductivity, 제 9권 1호, pp.45-49, 2007.10.
- [3] 식품의약품안전청 고시 제2007-32호, ‘의료기기의 전자파 안전에 관한 공통기준규격’ 2007.5.
- [4] P. Heinonen, “Properties of a thick-walled conducting enclosure in low-frequency magnetic shielding”, Journey of Physics, Vol.13, No.5, pp.569-560, 1980.
- [5] 이용호 외 6인, “생체자기계측을 위한 자기차폐실의 설치 및 특성”, 한국자기학회, 제6권 4호, pp.264-271, 1996.8.
- [6] 권중화 외 3인, “헬름홀쯔 코일을 이용한 자기장 차폐 성능 측정 시스템”, 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, 제21권 2호, pp.363-366, 1998.9.

◇ 저자소개 ◇



최학윤 (崔學潤)
 1963년 4월 21일생. 1985년 숭실대학교 전자공학과 졸업. 1987년 숭실대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1999년 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1996년~현재 김포대학 IT 학부 부교수.