

# 인체보호기준에 관한 전자기장 세기 측정방법

한국전자파학회

## I. 저주파수 대역(< 10 kHz)의 전자기장 세기

### 1-1 개요

우리 주위에 퍼져있는 전자기장이 기준레벨에 적합한지를 평가할 때는 사람의 머리나 몸통이 차지하는 위치에서 수행되어야 한다. 이러한 전자기장 레벨의 평가는 계산 또는 측정으로 할 수 있다.

계산은 일반적으로 전력선과 같이 전자기장 복사원이 단순한 구조를 가지는 경우로 국한한다. 전력선의 경우, 전기장을 계산하기 위해서는 전압을 알아야 하고, 자기장(또는 자속밀도)을 계산하기 위해서는 전류를 알아야 한다. 전력선 전압은 일반적으로 일정하다고 할 수 있지만, 전력선 전류는 부하에 따라 크게 변화한다. 따라서 단순한 구성일지라도 계산으로 평가하는 것은 적절하지 않을 수가 있어, 필요한 경우에는 측정에 의해 검증하여야 한다. 그렇지만 단순화된 전력선의 모델은 대체적으로 보수적으로 설정되므로, 최악의 노출조건을 평가하는데 도움이 될 수 있다. 단순한 구조의 전력선에 대한 전자기장 계산을 위하여 컴퓨터 프로그램도 사용할 수 있다. 다만, 프로그램에 의한 계산의 정확성을 확인하기 위하여 실제 측정치와의 비교검증이 필요하다.

### 1-2 측정기

측정기는 국제기관에서 정한 기준이나 국제적으로 널리 쓰이고 있는 방법에 의거하여 적합한 것을 선택하고 적절한 교정된 것을 사용해야 한다.

#### 1-2-1 기기의 선택

측정기는 기능적인 특성에 의해 분류된다. 이러한 특성

은 측정될 변수에 대해서는 물론, 기후적인 조건(온도, 습도 등)에 대해서도 적합하여야 한다. 측정기의 주파수 범위를 알아야 하고, 측정코자 하는 주위 전자기장의 주파수 범위와 고조파 함유량을 비교하여야 할 것이다. 고조파 함유량을 사전에 파악하지 못하면, 측정될 전자기장에 대한 기기의 적합성을 검사하기 위해 주파수 분석을 할 필요가 있을 수 있다.

측정기의 전체적인 불확도는  $\pm 10\%$  이내이어야 한다.

기본적으로, 전자기장 측정기는 두 부분으로 이루어진다: 프로브 또는 전자기장 센서와 신호 처리 회로 그리고 아날로그 또는 디지털 표시기로 이루어진 검파기 부분이다.

기기도 크게 두 종류로 나뉜다. 첫 번째 종류는 등방성 프로브(3개의 서로 직교하는 감지부분)가 장착되어 유효 전자기장의 세기<sup>1)</sup>를 직접적으로 결정하는 것이고, 두 번째 종류는 유효 전자기장 세기를 계산하기 전에 3개의 직교하는 전자기장 성분을 각각 분리해서 측정을 하기 위한 비등방성 프로브(하나의 축에 대한 감지부분을 가진 경우)를 가지고 있는 기기이다. 이 경우에는 프로브가 3개의 직교방향을 정확하게 가리키게 설계된 적절한 장비와 함께 사용되어야 한다(타원 편파 전자기장의 경우, 유효 전자기장의 세기는 중심축의 방향에 있는 전자기장 성분의 실효 전자기장 세기보다 크다. 원형편파의 경우, 유효치는 어느 한 방향의 반경을 따른 전자기장 성분의 실효치의  $\sqrt{2}$  배가 되어야 한다.).

대부분의 프로브는 인체에 유도된 전류밀도에 비례하는 양인 시변 전자기장의 시간 도함수에 반응한다. 어떤 경우에는, 유도 전류밀도를 직접 측정하면, 기준레벨에 부합 여부를 직접적으로 확인할 수 있다.

#### 1-2-2 교 정

전자기장을 측정하는 기기의 교정은 균일 전자기장을 받

1) 유효 전자기장 세기 : 교류의 전자기장은 일반적으로 타원편파를 이루고, 각각은 3개의 직교 축을 따라 시변(時變)의 사인 또는 코사인 성분으로 표현할 수 있다. 여기서 유효(root mean square : rms-실효치) 전자기장의 세기란 아래와 같이 세 성분의 평균제곱(mean square)의 합의 제곱근으로 표현된다.

$E_{rms} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ ,  $H_{rms} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$  여기서  $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ 는 온전한 주기에 대해 취해진 3방향의 전자기장 성분의 실효치를 의미한다.

생시키는 시스템에서 실시되어야 한다. 두 개의 평행판 면적을 평행판 사이의 간격보다 훨씬 넓게 하면 균일 전기장을 얻을 수 있고, 프로브에 의해 분포된 전기장의 형태가 크게 교란되지 않도록 충분한 간격을 유지하여야 한다. 균일 자기장은 적절한 크기의 사각형 코일을 이용하거나, Helmholtz 코일을 이용해서 얻을 수 있다.

### 1-2-3 전기장 측정 절차

전력선 주파수의 전기장 측정은 참고문헌 [2], [3] 및 [4]에서 주어진 방법에 따라 각각의 경우에 적절한 방법으로 측정되어야 한다. 본 측정방법은 전기장을 측정하는데 있어서의 문제점, 주로 이용되는 측정기의 동작원리와 종류 뿐만 아니라 측정기를 교정하는 절차 및 측정절차에서도 측정에 영향을 미칠 수 있는 다양한 변수를 정확하게 설명하기 위해 필요한 기본정보를 소개하고 있다. 참고문헌 [3]과 같이, 전력선의 전기장 측정은 지상 1m 높이에서 하는 것이 바람직하다.

다른 주파수대의 전기장에 대한 측정도 선택된 측정장비의 주파수 응답특성이 적절하면, 상기 문헌에서 주어진 지시사항에 따라 수행되어야 한다.

도전복과 같이 개인용 보호장비가 이용되는 곳에서는, 보호장비를 갖춘 개인이 느끼는 잔류 전기장의 영향은 섭동<sup>1)</sup>되지 않은 곳에서 보호장비 없이 느끼는 전신노출기준으로 주어진 전기장 세기보다 작아야 한다.

### 1-2-4 자기장 측정절차

60 Hz의 자기장(또는 자속밀도)의 측정은 참고문헌 [3]과 [4]에서 주어진 지침과 명시된 사항에 따라 실시되어야 한다. 참고문헌 [6]에서 부가적으로 유용한 내용을 참조할 수 있다.

다른 주파수의 자기장에 대한 측정은 선택된 측정기의 주파수 응답이 적절하면 참고문헌 [3]과 [5]에서 주어진 지침을 따라서 실시되어야 한다.

측정하고자 하는 자기장의 세기가 기준 레벨에 부합되는 지에 대한 측정을 할 때, 자기장 세기의 측정치는 인체의 머리나 몸통이 위치하는 체적에 대해 평균을 취하는데, 이러한 평균치를 구하는 작업이 불가능하면, 이들이 위치하는 체적의 중심에서의 측정치로 대체할 수 있다.

프로브의 능동적인 부분의 전체 크기가 0.2m를 초과하

지 말아야 한다. 그래야만 비균일성 자기장에 대해 적절한 분해능력을 얻을 수 있다. 개인적인 노출 측정기(가끔 조사량(照射量) 측정기라고 불린다)는 이들의 성능이 적절할 경우에만 자기장 측정에 이용될 수 있다. Hall 효과 프로브는 정자기장(지자계를 포함해서)에 민감하므로 이용할 때 주의해야 한다.

## II. 고주파수 대역( $10 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$ )의 전자기장 세기

### 2-1 개요

본 장에서는 실제 전자기장의 위험성 정도를 평가하기 위한 측정방법을 제시한다. 노출된 조직과 인체모형 내부에서의 전기장 또는 자기장 측정과 온도에 기반을 둔 조사량 측정은 현장측정의 제한성 때문에 여기서는 고려하지 않는다.

주파수 영역 10 kHz와 300 GHz 사이에서의 노출량을 측정하기 위해서는 몇 가지 기술과 장비의 구성이 필요하다. 측정방법과 장비의 선택은 주파수, 전자기장의 특성(근거리 또는 원거리 장), 변조형태와 복사원의 수에 따라 결정된다. 노출측정은 주로 전자기장의 세기 또는 전력속(電力束) 밀도 측정에 기반을 두었지만, 인체 유도전류 측정, 발에 흐르는 전류와 접촉전류 측정도 또한 취급하고 있다.

수많은 노출상황에 대하여, 전기장과 자기장간의 관계를 간단한 수학적식으로 표시할 수는 없다. 근거리장 조건에서는 두 종류의 양 사이의 변환은 유효하지 못하므로, 각 양은 개별적으로 측정되어야 한다.

측정장비의 성능, 즉, 측정하는 센서와 표시기, 그리고 측정원리에 관해 적절히 알려져야 한다. 다른 주파수의 변조, 고조파 및 에너지 등과 같이 측정에 영향을 미치는 모든 부가적인 사항들도 고려되어야 한다. 평균값이 요구될 때에는 보호개념을 충족시키기 위해 측정시간은 충분히 길어야 하며 평균시간은 본 측정방법을 따라야 한다.

이러한 원칙적인 관점으로부터 측정을 협대역으로 수행할 것인지 광대역으로 수행할 것인지 결정할 수 있다. 더욱이 실제 측정되는 주파수와 파형으로 실효치, 첨두치 또는 둘 다 적절한지를 결정한다.

#### 2-1-1 광대역 측정

복사원의 주파수를 알고, 기준레벨들이 측정하고자 하는

2) 여기서 섭동(perturbation)이라는 단어가 의미하는 것은 어떤 주어진 전기장의 공간 분포가 변하게 되는 현상.

주파수 영역에서 일정하다면, 침투치/실효치가 광대역 측정 장비로 측정될 수 있어야 한다. 대역은 모든 관련된 주파수를 측정할 만큼 충분히 넓어야 하며, 측정된 실효치는 파형과 무관해야 한다. 또한 측정시간은 침투치가 발생하는 최대값을 기록할 만큼 충분히 길어야 한다.

### 2-1-2 협대역 측정

복사원의 주파수를 알고 기준레벨들이 측정하고자 하는 주파수 범위에서 일정하지 않다면 침투치/실효치가 주파수 선택 측정장비로 측정되어야 한다. 대역폭은 각각의 개별 주파수 성분을 정확하게 측정할 수 있도록 좁아야 한다.

변조된 반송파의 측정이 시간영역에서 과도현상 기록기로 기록되고 주파수 스펙트럼이 푸리에변환으로 계산된다면, 결과 값의 정확한 평가를 위해 적절한 주파수 분해도를 채택하여야 한다.

### 2-1-3 수치 해석 절차

수치해석은 노출상황을 평가하기 위해 이용될 수 있지만, 측정에 대신할 수는 없다.

## 2-2 측정기

### 2-2-1 측정기의 형태

전자기장 세기의 측정 또는 전력밀도 측정에 이용되는 장비는 프로브, 연결 선, 계측기의 3가지 주요 부분으로 이루어진다. 전자기장을 감지하는 소자는 프로브 내에 포함되어 있다. 다이폴 안테나는 전기장을 감지하는데 이용되고, 루프안테나는 자기장을 검출하는데 이용된다. 고주파 전압의 감지는 프로브내에서 또는 계측기내에서 수행된다. 다이오드 또는 열전대는 보통 검파기 내부에 포함된다. 도선은 측정된 신호를 프로브에서, 신호를 처리하거나 표시해 주는 계측기로 연결하는데 이용된다.

1 MHz 이하의 주파수에서 측정기는 보통 전기장 E와 자기장 H의 세기를 측정한다.

1 MHz에서 300 MHz까지의 주파수영역에서 일반적으로 측정되는 양은 전기장 프로브 또는 자기장 프로브가 부착된 측정기에 의해 지시되는 것과 같이 각 성분을 제공하여 더한 후 제곱근을 구한 전기장 및 자기장의 세기(실효치)를

측정하거나, 또는 등가적인 평면파의 전력밀도를 평균한 값을 측정한다. 300 MHz이상에서는 전력밀도를 전기장 감지기로 측정한다. 인체의 유도전류는 인체가 올라설 수 있는 평행판 전극이나, 손으로 쥐고 접촉전류를 측정하는 기기 또는 전류변환기를 사용함으로써 측정될 수 있다. 인체가 올라설 수 있는 전극, 전류변환기, 접촉전류측정기에 요구되는 주파수 영역은 10 kHz~50 MHz 이다.

### 2-2-2 일반적인 요구사항

측정장비는 본 측정방법에서 지정한 기본관계와 기준레벨에 대해 측정되는 양을 적절하게 기록해야 한다. 장비는 특별하게 응용되는 경우를 위해 충분한 동작범위와 주파수 대역을 가져야 한다. 측정결과를 고려할 때, 측정상태에서의 불확도<sup>3)</sup>는 포함시켜야 한다.

측정결과는 다음과 같은 조건에 의해 심각하게 영향을 받아서는 안된다.

- 환경적인 조건, 예를 들어 온도나 습도 등
- 측정을 위한 장비구성
- 측정하는 사람이 근처에 있으므로 해서 발생하는 간섭
- 부적절한 간섭내성(耐性)
- 연결 케이블에 의한 전자파 유도.

프로브의 크기는 일반적으로 파장의 4분의 1보다 작거나 10 cm보다 작아야 한다. 1 MHz이하의 자유공간조건에서 프로브의 최대 크기는 20 cm가 되도록 해야 한다. 표준 프로브는 모든 상황에서 요구되는 조건을 충족시키지 않을 수 있으며, 그래서 기준레벨을 충족시키지 못하는 검증하기 위한 몇 가지 상황에서는 특수한 프로브가 필요할 때가 있다. 이상적으로 프로브는 실질적으로 평탄한 주파수 응답특성을 가져야 하며 정의된 주파수 범위의 전자기장에 대해 민감하게 반응을 해서는 안된다. 모든 환경조건에서 응답특성이 알려져 있어야 하며 잘 교정되어야 한다. 전자기장 프로브는 심하게 자기장에 대해 반응해서는 안되며 마찬가지로 자기장 프로브는 전기장에 대해서도 예민하게 반응해서는 안된다. 근거리장 측정에서 프로브 특성의 비 등방성이  $\pm 2$  dB 보다 작아야 하며 출력은 전기장의 편파와 방향에 무관해야 한다. 프로브와 도선은 가능한 한 기존의 전자기장 분포를 교란시키지 말아야 한다. 도선 또는 측정장치로의 전자기장의 유도도 가능한 한 작게 발생하여야 하며, 도선과 측정기

3) 측정결과와 정확성에 대한 측정 불확도(uncertainty)는 측정결과가 측정되어지는 값을 얼마나 잘 나타내고 있는가를 나타내는 양이다. 이 측정결과에 대한 신뢰 정도는 사용된 측정기술, 측정장비의 질적 수준, 그리고 측정자의 측정 숙련 정도에 좌우되며, 측정결과가 명확한 의미를 지니기 위하여는 피측정체에 대한 시험조건과 측정오차에 기인하는 불확도를 반드시 포함하여야 한다.

모두 측정하고 있는 전자기장과 정전하에 대하여 적절히 차폐되어야 한다.

### 2-2-3 전기적 특성

측정기는 가능한 내장된 전원으로 동작하는 것이 좋다. 그리고 주위 강전계로부터 영향을 받지 않도록 차폐가 잘 되어 있어야 한다. 내장된 전지를 쓸 경우에는 전지의 상태를 측정기에서 알아 볼 수 있도록 하는 것이 좋다. 전지의 재충전이나 교체 없이 적어도 8시간 연속동작이 이루어져야 한다. 거의 모든 노출측정이 근거리장에서 이루어지기 때문에 측정기는 전기장과 자기장 성분의 실효치와 또는 첩두치를 측정할 수 있어야 한다. 만약 측정기가 rss<sup>4)</sup>값을 측정한다면 보정치가 필요할 수 있다. 주파수범위와 측정기의 종류에 따라, 다음의 양을 측정하는 것이 가능해야 한다.

- 전기장의 실효치와 첩두치(단위: V/m)
- 자기장의 실효치와 첩두치(단위: A/m)
- 자속밀도의 실효치와 첩두치(단위: T)
- 전력속 밀도의 평균값과 첩두치(단위: W/m<sup>2</sup>)
- 전기장의 등가평면파 전력속밀도(단위: W/m<sup>2</sup>)
- 자기장의 등가평면파 전력속밀도(단위: W/m<sup>2</sup>)
- 접촉전류의 실효치와 첩두치(단위: mA)
- 인체전류의 실효치와 첩두치(단위: mA)
- 에너지 밀도(단위: J/m<sup>2</sup>)

부가적으로 측정기는 복사된 전자기장의 의무주기(duty cycle)을 보여줄 수 있거나 또는 동작시간율은 별도의 측정기로 측정될 수 있다.

모든 근거리장의 조건에 대해 전기장과 자기장 성분과 전력속밀도의 정확한 측정을 위해 주의를 해야 한다.

여러 종류의 시간평균방법이 본 측정방법에 전체적으로 적용되었다. 여러 종류의 방법들은 주파수 대역전체를 통해 다양한 생물학적 영향과 인체조직에 흡수되는 성질이 다르기 때문이다. 1 kHz 이하의 주파수에서는 시간평균값을 취하지 않는다.

가능하다면 첩두전력밀도 또는 첩두전자기장세기는, 첩두치를 측정할 수 있는 장비로 측정할 수 있다. 이러한 데이터에 기반을 두고, 평균적인 전자기장 세기와 전력밀도는 기본적으로 제한된 범주내에서 계산될 수 있다.

a) 기본한계를 전류밀도로 표현되어야 하는 700 kHz 이하의 평균적인 전자기장;

$$E_{avg} = \frac{1}{T_c} \sum_i E_i t_i, \quad H_{avg} = \frac{1}{T_c} \sum_i H_i t_i$$

평균시간,  $T_c = 0.1$ 초

b) 38 kHz 이상에서의 평균전력(기본한계가 SAR로 표현되는 경우):

$$E_{avg} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \sum_i E_i^2 t_i}, \quad H_{avg} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \sum_i H_i^2 t_i},$$

$$S_{avg} = \frac{1}{T_s} \sum_i S_i t_i \quad \text{평균시간, } T_s = 6 \text{분}$$

여기서  $E_{avg}$ 와  $H_{avg}$ 는 본 기준의 기준레벨과 같거나 작아야 하는 평균된 전자기장이다.  $S_i$ 는  $t_i$ 의 노출시간에서  $i$  번째 노출의 전력밀도,  $E_i$ 와  $H_i$ 는 전기장과 자기장의 실효치이다.

더욱이 전류클램프, 인체에 흐르는 유도전류와 접촉전류 측정기는 위의 a) 그리고 b)와 같이 본 측정방법에 따른 평균시간을 측정할 수 있는 기능을 가져야 한다.

측정기의 진폭에 대한 동작범위는 측정되는 전자기장의 파형에 좌우된다. 대부분의 경우 노출기준에 상대적으로 -10 dB에서 +5 dB까지면 충분하나 매우 짧은 의무주기에 대해서는 충분하지 않을 수 있다.

스캐닝 또는 회전하는 안테나에 의해 복사되는 전자기장은 스캐닝하지 않는 안테나로 측정될 수 있다. 스캐닝 안테나로부터의 의무주기는 안테나의 복사패턴과 스캐닝 주파수에 좌우된다. 이상적으로 장비의 응답시간은 안테나의 스캐닝을 멈추지 않고 첩두 전력밀도에 도달하는 상태를 보여주기 위해 허용되는 펄스폭보다 더 짧아야 한다.

### 2-2-4 물리적 특성

직접 유도되는 영향을 최소화하기 위해서는 복사체로부터 어느 정도 떨어진 거리에서 측정하는 것이 필요하다. 측정오차<sup>5)</sup>를 줄이기 위해서는 선택적으로 교정된 프로브의 한 부분으로서 프로브의 공간거리를 이격시키는 부속품이 기본세트로서 사용될 수 있다.

4) rss(root sum square) 2-5-3항에서 보인 바와 같이 전자기장의 각 성분의 제곱을 합하여 제곱근을 취하여 계산하는 것을 의미한다.

5) 측정오차의 정의 : 참값이  $t$ 인 양을 측정하여  $x_i$ 라는 측정값을 얻었을 때, 이 두 값의 차이  $\epsilon_i$ 를 측정오차라 정의한다.

$\epsilon_i = x_i - t$ . 이 값은 + 또는 -가 될 수 있으므로 그 절대값  $|\epsilon_i|$ 를 잡아서 오차를 표시한다.

## 2-3 측정절차

### 2-3-1 복사원과 전파특성

측정하기 전에, 측정자는 복사원의 기술제원에서 주어진 정보를 활용하여 복사원의 전기적 특성과 전파특성을 숙지하도록 권고한다<sup>[7]</sup>. 이것은 전자기장의 레벨을 평가하는데는 물론, 측정기의 선택과 측정방법에 도움이 된다. 이러한 절차를 따르면 사람과 측정기에 대해 가능한 위험성을 예측할 수 있는 충분한 데이터를 줄 것이다.

다음에 나열된 복사원의 전기적인 특성과 전파특성을 파악하는 것이 요구된다.

- 신호발생기의 종류와 출력
- 반송파 주파수, 스퓨어리스 주파수와 변조특성
- 동작시간율, 펄스 폭, 펄스반복주파수
- 편파를 포함한 복사원의 수
- 안테나 또는 복사원의 종류와 크기 그리고 이득
- 도체의 전류와 전압
- 복사원에서 측정지점까지의 거리
- 노출시간
- 측정지점 근처의 산란체 또는 흡수체의 존재

통신 송신기의 고조파항들은 보통 기본반송주파수에 대해 상대적으로 감쇄가 크므로 고려할 필요가 없다.

### 2-3-2 전자기장의 세기 또는 전력밀도 크기의 추정

본 항은 측정하는 사람과 측정기에 대한 위험 가능성을 평가한다. 복사원에 대한 상세한 전기적인 특성과 전파특성에 대한 정보를 알고 있으면 예측되는 전자기장의 크기와 전력밀도를 계산할 수 있다. 계산방법은 참고문헌 [8]~[13]에 있다.

가능하다면, 측정인과 측정기 모두 안전하도록 보호적인 측정이 이루어져야 한다. 즉, 전력감소와 노출시간의 제한을 두거나 보안경과 보호복과 같은 개인보호장비를 착용하는 경우라고 할 수 있겠다.

### 2-3-3 측정기의 선택

측정기의 선택은 주파수, 또는 응답시간, 침투치의 한계 그리고 전자기장의 편파에 좌우된다. 측정기의 운영범위는 복사원의 주파수 범위를 커버할 수 있어야 한다. 복사 전자

기장이 많은 주파수로 이루어져 있고 상대적인 기준레벨이 같거나 보상되어진다면 광대역 특성의 프로브가 사용될 수 있다. 다른 방법으로는 각각의 성분이 주파수 선택성 측정기로 분리 측정되어야 하며, 이것에 해당되는 기준레벨이 주파수에 좌우된다면 특히 중요하게 고려되어야 한다. 보통, 본 기준에 의하면 평균 또는 실효치는 일정한 응답시간을 가진다.

전자기장이 천천히 또는 주기적으로 변화한다면 긴 주기(초, 분)에 의한 평균값이 전자적으로 계산 또는 추정될 수 있다. 반대로 스캐닝 레이더 안테나와 같이 갑작스럽게 변화하는 전자기장의 경우, 검파기의 반응시간은 신뢰성 있는 침투치 측정을 하기 위해 1  $\mu$ s보다 짧아야 한다.

평균전력 레벨이 낮더라도 순간적인 침투치가 높은 전자기장에서는 프로브가 영향을 받을 수 있으므로, 프로브의 침투치 한계를 알아둘 필요가 있다.

복사원과 안테나의 편파가 정확히 알려져 있지 않다면 등방성 프로브를 추천한다. 가능한 한 금속구조와의 접촉 또는 접지와와의 용량성 또는 갈바닉(galvanic<sup>6)</sup>) 접촉의 경우, 접촉과 유도된 인체전류는 전류의 실효치를 보여주는 측정기로 측정되어야 한다. 30 MHz 이하에서는 인체의 임피던스와 등가되는 대체저항  $R$ 을 통해 흐르는 접촉전류를 측정하는 것이 가능하다<sup>[14]</sup>:

$$R = (-45 \log_{10} F_{MHz} + 370) \Omega$$

측정된 전류는 본 기준에 의거하여 평균되어야 한다.

### 2-3-4 현장측정

측정을 하기 전후, 측정기의 기능은 다른 측정기, 계산된 결과, 또는 다른 알려진 측정결과 등을 이용하여 검사되어야 한다.

전자기장과 전류는 전형적인 노출조건하에서 측정되어야 한다. 여러 개의 조건이 있다면 최악의 조건을 선택하여야 한다. 측정자와 측정기를 보호하기 위해 측정은 복사원으로부터 안전한 거리에서 시작되어야 한다. 이러한 거리는 간략하게 계산된 전자기장의 세기를 기본으로 정해진다. 복사 레벨을 측정해서 결정되면, 측정은 복사원에 천천히 가까이하면서 계속적으로 행해질 수 있다.

전력속 밀도와 전자기장의 세기는 머리와 가슴이 위치하는 보통의 공간범위에서 측정되며, 인체의 전 부분이 전자

6) 갈바닉 접촉이란 두 개의 다른 전도성 물질이 접촉하여 발생된 전압으로 인해서 전류가 흐르게 되는 현상을 일으키는 접촉을 의미한다.

기장에 노출되어 있다면 측정결과를 인체가 점유한 전체공간에서 평균해야 한다.

그렇지만, 직접적인 유도영향을 최소화하고 신뢰성있는 측정을 위해서는 프로브와 복사원은 주파수와 관련된 최소 거리만큼 떨어져 있어야 한다. 선택적으로 이것은 주파수에 좌우되는 크기를 가진 대체 가능한 프로브 이격기(spacer)를 사용함으로써 얻어질 수 있다.

### 2-4 측정기의 교정

#### 2-4-1 일반사항

측정장비는 적어도 3년에 한번 교정되어야 하며 수리 후에는 바로 교정되어야 한다.

#### 2-4-2 교정오차

교정오차는 ±1 dB 이내에 있어야 한다.

#### 2-4-3 방법

교정방법은 주파수와 측정되는 전자기장에 좌우된다.

1 MHz이하에서 전기장 프로브는 개방된 평형판 스트립선로 또는 커패시터를 사용하여 교정될 수 있다. 자기장 프로브는 한번 또는 여러 번 감은 코일을 사용함으로써 교정될 수 있다. 50 Ω의 특성 임피던스를 가진 TEM 셀은 500 MHz까지 사용될 수 있으며, 반면 옆면에 한 개의 구멍을 가진 직각도파관은 1,000 MHz까지 사용될 수 있다. 1,000 MHz 이상에서 교정은 전자파 무반사실에서 교정된 안테나를 이용하여 할 수 있다. 누설 전자기장 측정기를 교정할 때, 방사성 도파관 슬롯이 이용될 수 있다.

전류 측정기는 알고 있는 주파수 대 전류특성을 적용함으로써 교정될 수 있다.

좀더 상세한 방법의 설명과 발생하는 전자기장의 계산은 참고문헌 [8], [9], [15], [16]을 참조하기 바란다.

#### 2-4-4 교정의 불확도

추정된 교정의 불확도는 통상 ±1 dB이내이어야 한다.

### 2-5 측정의 불확도

#### 2-5-1 일반사항

자주 경험하는 전자기장 측정에서 최악의 불확도는 ±5 dB이다. 변조특성을 좀 더 자세히 정의하면 불확도를 ±3

dB까지 감소시킬 수 있다. 불확도는 다음에 설명하는 인수에 좌우된다.

#### 2-5-2 프로브의 비등방성(非等方性)

근거리장에서 사용된 프로브의 각도에 대한 응답은 ±2 dB까지 변화할 수 있다. 결국 프로브의 각도 응답은 교정되는 동안에 측정될 수 있다.

#### 2-5-3 프로브의 rss값 읽기

많은 프로브는 rss값을 가리키며 그것은 세 개의 직각좌표계 x, y, z에서 측정된 개개의 전자기장 세기 값의 합으로 얻어지나 각각의 위상을 고려하지 않는다면;

$$E_{rss} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \text{와 } H_{rss} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$$

측정된 rss값은 최대 가능치(worst case: 최악의 경우)이며 위상관계를 포함하면 참값과 다를 수 있다.

#### 2-5-4 급전선의 유도

낮은 주파수(10 MHz 이하)에서 짧은 다이폴 안테나의 임피던스는 저항성 급전선의 저항보다 훨씬 크다. 부가적으로 급전선은 고주파 전류를 다이오드 검파기까지 전달하는 안테나로서 동작하며 이것은 다이폴 안테나 주위의 전자기장을 교란시켜 결국 측정오차를 일으킨다. 프로브가 고정된 위치에 있는 동안 측정기가 지시하고 있는 측정값이 급전선을 움직일 때 변화된다면 주위의 전자기장이 급전선에 유도되는 것이다. 급전선상의 유도현상은 급전선의 길이를 짧게 하거나 광케이블 급전선을 사용하면 피할 수 있다.

#### 2-5-5 응답영역을 벗어난 대역의 특성

자기장 프로브는 설계된 주파수 대역 이외의 주파수에 대해 공진반응을 일으킬 수 있다. 예를 들어 다중 주파수의 전자기장의 경우에서, 기본 주파수의 자기장 측정동안 너무 높은 지시치를 보일 수 있다. 전기장의 프로브도 낮은 주파수(전력선, TV 주사선 주파수 등)에서 잘못된 지시치를 유발하는 반응이 일어날 수 있다.

#### 2-5-6 프로브에 유도되는 비의도적(非意圖的)인 전자기장

전기장이 자기장 프로브에 유도될 수 있는데 이는 적절하게 측정하면 피할 수 있다.

### 2-5-7 정전하장(靜電荷場)

높은 임피던스와 고이득 입력전류 회로를 가진 전기장 프로브가 정전하장에서 움직이면 측정의 정확성에 영향을 주는 전압이 유도될 수 있다.

### 2-5-8 금속물체에 대한 검침부의 유도

복사원을 포함한 금속물체에 대해 프로브 소자의 유도현상으로부터 발생된 오차는 측정대상으로부터 거리가 일정하게 유지된다면 최소화 할 수 있다. 이러한 최소거리는 주파수와 프로브의 크기에 좌우된다. 하나의 예로 참고문헌 [9]에 의하면, 다음의 최소거리가 유지된다면 100 mm 프로브에 대해 오차가 1 dB까지 줄어들 수 있다.

- ① 주파수 영역 10 kHz에서 100 kHz까지에 대해 300 mm
- ② 주파수 영역 100 kHz에서 3 MHz까지에 대해 250 mm
- ③ 주파수 영역 3 MHz에서 10 MHz까지에 대해 150 mm
- ④ 주파수 영역 10 MHz이상에 대해 100 mm

본 기준 측정절차를 위해 위에서 언급한 최소거리가 측정하는 프로브와 복사원 사이에 필요하다. 그렇지만, 전자기장 세기의 급격한 공간상의 변화로 인해 잘못된 프로브의 지시치는 가능한 작은 프로브를 사용하거나 금속물체에 대해 최소거리를 떨어져서 관측함으로써 최소화할 수 있다.

### 2-5-9 다이오드 검파기의 스푸리어스 반응

낮은 레벨에서 다이오드는 출력전압이 입력전력에 비해 합으로 자승검파기라고 불린다. 높은 레벨에서는 출력전압은 입력전압에 비례하여 선형검파기로서 작용한다. RC 적분회로(저항성 도선)를 함께 사용할 때 프로브는 측정기의 지시치로 요구되는 실효치를 지시하는 것보다 높은 레벨의 침투치 검파기로 동작한다. 다이오드 검파기가 다중주파수 변조 또는 진폭변조 된 전자기장 측정에 사용될 때 1 dB~2 dB정도 오차가 날 수 있다. 자승 법칙영역에서 동작하는 열전대 검파기 또는 평형 다이오드 검파기의 이용은 이와 같은 오차를 제거하거나 감소시킬 수 있다. 펄스 전자기장의 경우(펄스파를 이용하는 레이더의 경우)에는 평균 전력 밀도 측정을 위해 다이오드 검파기를 사용함으로써 큰 오차를 유발시킬 수 있다. 펄스복사전자기장의 평균 전력밀도를 측정할 때는 다이오드 검파기 대신에 열전대 또는 이와 비슷한 검파기가 사용되어야 한다.

### 2-5-10 프로브의 비안정성(非安定性)

열전대 검파기로 제작된 프로브는 보통 주위의 온도변화 때문에 시간적으로 안정하지 못하며 이것이 감도를 변화시킨다.

### 참 고 문 헌

- [1] "Electric and magnetic fields produced by transmission systems, description of phenomena, practical guide for calculation," Working Group 36.01 CIGRE Paris, 1980.
- [2] IEC Specification 833-1987, "Measurement of power-frequency electric fields."
- [3] ANSI/IEEE Standard 644-1987, "IEEE standard procedures for measurements of power-frequency electric and magnetic fields from ac power lines."
- [4] "Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields: a practical guide," International Labour Office, Geneva, 1994.
- [5] IEEE ac field working group draft standard, "Recommended practice for instrumentation: specifications for magnetic flux density and electric field strength meters~10 Hz to 3 kHz."
- [6] Magnetic field task force of the IEEE ac field working group, "Measurement of power-frequency magnetic fields away from power lines," IEEE Transactions on Power Delivery, PD-6(2), 901-911, 1991.
- [7] International Telecommunication Union(ITU), General Secretariat : Radio Regulations, Genf, 1985(ISBN 92-61-01221.3).
- [8] IEC Draft Standard, 12C(SEC) 210, Radio transmitting equipment. Measurement of exposure to radio frequency electromagnetic fields. Field strength in the frequency range 100 kHz~1 GHz, January 1993.
- [9] CLC/TC111 (SEC)14, Safety in electric, magnetic and electromagnetic fields: measurement and calculation procedure, January 1993.
- [10] Harrington, R. F., Matrix Methods for Field Problems, *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 2, Feb. 1967.
- [11] Harrington, R. F., Field Computing by Moment Me-

thod. The Macmillian Company, N. Y., 1968.

[12] Burke, G. J. and Poggio, A. J., Numerical Electromagnetics Code(NEC) - Method of Moments, NOSC Techn. Doc. 116, vol. 1, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, CA, 1981.

[13] Hafner, C., Numerische Berechnung Electromagnetischer Felder, Springer, Berlin, 1987.

[14] Stuchly, M. A., Koziowski, J. A., Symon, S. and Lecuyer, D. W., Measurements of contact current in radiofrequency fields, Health Physics, vol. 60, no. 4, 1991, pp. 547-557.

[15] IEEE C95.3-1991, IEEE Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields - RF and Microwave.

[16] Standard Association of Australia : Australian standard AS 2772.2-1988, Radio frequency radiation part 2, Principle and Methods of Measurement 300 kHz to 100 GHz, North Sydney, Australia, 1988.

## 부 록 1 : 전자기장의 복사원

### I. 서 론

복사원은 의도적인 복사체와 비의도적인 복사체로 구분될 수 있다.

송신기의 안테나는 의도적인 복사원 중 큰 부분을 차지하고, 안테나 모두는 반송파 전력, 주파수 안정성, 스퓨리어스 고조파 복사 등으로 특성지워 진다. 비의도적인 복사는 케이블과 커넥터와 같은 액세서리에서는 물론 불완전한 차폐로 인해 발생하는 결과이다.

복사원의 바로 근처 주위의 지역은 리액티브 성분들이 원거리장 성분보다 많은 부분을 차지한다. 리액티브 전자기장 성분들은 에너지복사에 영향을 미치지 못하지만, 근처에 존재하는 구조에 유도되어 에너지 흡수현상을 유발시킨다. 결과적으로 리액티브 전자기장을 측정하는 것이 중요하지만, 복사원(또는 이차 복사원) 근접지역에서의 측정은 특히 어려운 문제가 될 수 있다. 높은 임피던스의 복잡한 전자기

장 경우에 한해서 프로브를 삽입하면 매우 심한 전자기장 섭동을 발생시킨다. 높은 임피던스의 전자기장 내에서의 측정에 적절하지 않은 측정기가 있으므로 주의해서 측정기를 선택하여야 할 것이다.

### II. 의도적인 복사체(안테나와 RF<sup>1)</sup>발생장치)

안테나 또는 타복사원으로부터 복사된 전자기장은 전기장과 자기장 성분으로 구성된다. 이들 모든 전자기장은 복사원으로부터 이격거리, d에 따라 감쇄된다. 원거리장에서는, 전자기 성분은  $\frac{1}{d^2}$ 에 따라 감쇄된다.

그렇지만, 근거리장에서 복사된 전자기장은 안테나 설계에 따라 원거리장에서와는 다르게 감쇄한다. 즉:

1) 다이폴 안테나 : 전기장이  $\frac{1}{d^3}$ 로 감쇄하고 자기장은  $\frac{1}{d^2}$ 로 감쇄한다.

2) 루프 안테나 : 자기장이  $\frac{1}{d^3}$ 로 감쇄하고 전기장은  $\frac{1}{d^2}$ 로 감쇄한다.

이 같은 사실은 근거리장에서의 전자기장 성분의 특성이 복사원의 구조와 안테나 또는 RF 발생장치로부터의 거리에 의해 크게 변한다는 것을 나타낸다. <표 1>에서 여러 종류의 복사원에 대한 예를 보여주고 있다.

### III. 비의도적(非意圖的)인 복사(누설 복사장)

전기, 전자, 전파장비로부터의 비의도적인 복사는 차폐 캐비닛내의, 불충분한 유도방지설비, 또는 잘못 종단된 연결 케이블과 같은 비정상적인 문제에서 발생된다. 그리고 복사된 전기장이 의도적이든 아니든 같은 문제가 모든 근거리장 측정에 존재할 수 있다.

### IV. 간섭 패턴

자연적 그리고 인공적인 구조물의 반사특성이 정재파 또는 다른 모양의 간섭패턴을 형성해서 비균일성 전자기장 세기를 발생시킨다. 이러한 전자기장 세기의 공간적인 변화는 다수의 복사원에서 복사된 에너지가 흐를 때 물리적 환경내

1) RF(Radio Frequency: 전파, 무선주파수): 무선통신용으로 사용되는 주파수를 말하여 대략 30 kHz에서 300 GHz의 범위의 주파수를 말하지만 법규상(ITU RR)으로는 10 kHz에서 3000 GHz의 주파수를 의미하지만, 본 측정방법에서는 10 kHz~300 GHz의 영역만을 대상으로 한다.



〈표 1〉 전자기장의 복사원과 복사 주파수

복사원	대역명	주파수	파장
Television Time Base(TV 시간동기) Induction Furnaces(유도 가열기)	(Very Low Frequency)VLF	10 kHz~30 kHz	33 km~10 km
Induction Loop System(유도루프시스템) Video Display(영상 디스플레이)	(Low Frequency) LF	30 kHz~300 kHz	10 km~1 km
AM Broadcast(중파방송)	(Medium Frequency) MF	300 kHz~3 MHz	1 km~100 m
RF Heat Processing(RF 가열처리)	(High Frequency) HF	3 MHz~30 MHz	100 m~10 m
FM Broadcast(FM 방송) Television(TV 방송)	(Very High Frequency)VHF	30 MHz~300 MHz	10 m~1 m
Mobile Radio(이동전화) Cellular Telephones(셀룰라전화) Microwave Ovens(전자렌지)	(Ultra High Frequency)UHF	300 MHz~3 GHz	1 m~10 cm
Radio Communication/Link(전파통신링크)	(Super High Frequency)SHF	3 GHz~30 GHz	10 cm~1 cm
Radar(레이다)	(Extremely High Frequency)EHF	30 GHz~300 GHz	1 cm~1 mm
	Infrared	>300 GHz	<1 mm

의 돌출된 물체에서 반사로 인한 상호 작용으로부터 기인된 것이다.

전자기장 분포에서 침투치는 반파장 거리만큼 떨어져서 발생된다. 즉, 반파장의 거리란 간섭파의 도달각과 복사원의 주파수에 따라 전자기 에너지 분포에 큰 변화를 일으킬 수 있다.

측정하고자 하는 지역은 여러 방향에 있는 다른 특성의 복사원들에 의해 노출될 수 있고, 정재파를 발생시키거나 전자기장을 결합시키는 구조를 포함할 것이다. 이러한 조건은 다른 주파수에 대해서 여러 위치에서 복잡한 전자기장 분포를 유기시킬 것이다. 비록 공간의 어느 한 점이 복사원의 복사 근거리장 또는 원거리장이 될 수 있지만, 또한 다른 복사원의 리액티브 근거리장도 될 수 있다. 모든 복사원의 특성을 알고 있다 하더라도 어떤 구조는 편파 방향을 변화시킬 수 있어서, 고려하고 있는 지역의 간섭패턴도 변화시킬 수 있다. 반면에, 물리적 환경이 정적으로 움직이지 않더라도, 전자기장의 세기를 측정하는 측정자가 측정지역에 진입하게 되면, 기준에 분포된 전자기장에 영향을 미칠 수 있다. 확실하게 안전사항을 만족시키기 위해서, 어떤 측정활동도 이러한 또 다른 이유의 전자기장 분포의 변화의 가능성을 고려해야 한다.

[부 록 2 : 전자기장 측정시 실제적으로 고려할 사항]

측정시 실제적인 지침으로 아래의 내용을 열거한다. 대부분의 측정작업을 함에 있어서 아래의 절차가 가장 편리하다고 할 수 있다.

- 1) 아래와 같은 전자기장의 복사원에 대한 정보를 확보
  - 주파수
  - 전력 또는 전자기장 세기
  - 변조
  - 복사특성
  - 전도전류와 전압
- 2) 노출조건(즉, 측정지점, 노출시간)
- 3) 측정방법과 관련된 측정기선택
- 4) 가변동작변수를 가진 복사원에 대해 평가 가능한 운영상태를 결정.

레이다 노출의 경우, 최대의 전자기장 세기가 측정되는 것을 확실하게 하여야 한다. 복사 안테나의 자동회전과 음

직임을 고정시켜서 안테나를 측정지점으로 향하게 한 후 측정하면 가능하다.

5) 측정자와 측정기에 대한 위해(危害) 가능성을 계산, 경험, 그리고 사전에 측정한 데이터 등을 이용하여 평가하라. 필요하다면, 전력감소, 노출시간 제한, 도전복 그리고 보안경과 같은 개인용 보호장비를 이용하여 보호적인 측정을 수행하여야 한다.

6) 측정, 기록 그리고 분석

측정 시스템의 정확도를 제 2의 측정기, 계산결과 또는 다른 알려진 측정결과와 매 측정전후 비교·점검하여야 한다.

측정기는 적절한 시간주기 후에는 자격이 있는 자에 의해 재교정되어야 한다.

부가적인 측정의 불확도를 피하기 위해, 측정 센서와 근처의 어떤 도체와도 최소거리가 유지되어야 한다.

파장에 비해 작은 대칭성의 전기장 측정센서는 측정센서 크기의 적어도 두 배가 되는 최소거리만큼 떨어져야 함을 경험적으로 알 수 있다.

측정공간을 스캐닝할 때, 측정지점과 측정지점수가 전자기장 분포를 정확하게 나타낼 수 있도록 선택되어야 한다. 어떤 물체나 구조의 경계에서 전자기장 레벨을 파악하고자 할 때 기준치를 초과하는지를 확인할 수 있도록 그 물체나 구조의 경계에 최대한 가까이 가서 측정하여야 한다.

표시된 방향성 특성을 가진 센서(예를 들면, horn 안테나)를 가지고 측정이 수행될 때 전자기장의 세기는 한번의 측정으로는 결정될 수 없다.

파이프, 덕트, 철로, 전력선과 같은 물체들이 복사원 근처에 있을 때, 이들이 파장의 길이와 비슷한 길이의 전도성 구조를 가진다면, 예상치 못한 높은 전자기장 세기를 유도할 수 있다. 그러므로 측정지점을 선택할 때 이러한 점을 고려해야 하는 것이 필요하다.

측정치들 추후에 평가하기 쉽게 그리고 재현성 있는 측정을 하기 위해 모든 자세한 측정관련 내용을 기록하는 것이 필요하다.

### [부 록 3 : 전자기장의 측정 시스템에 관련된 내용]

전자기장 세기를 측정하는 시스템은 일반적으로 다음과

같은 요소로 구성된다.

- 측정센서, 즉, 다이폴, 루프 또는 혼 안테나
- 검파기, 즉 다이오드, bolometer(열저항계), thermoelement
- 측정값의 전송, 즉, 케이블, 도파관, 광파이버
- 디스플레이 부분

## I. 측정 센서

측정센서는 예를 들면, 공진 특성과 같이 정해진 주파수 범위 외의 주파수에 민감도를 보여줄 수 있다. 불충분한 차폐로 인하여 대역외에서 낮은 세기에도 반응할 수 있다.

## II. 검 파 기

낮은 레벨의 전자기장 세기에 대하여, 다이오드 검파기에서 출력되는 검파된 신호는 입력되는 전자기장 레벨의 제곱에 비례한다. 높은 레벨에서 측정된 신호는 전자기장 자체에 비례한다. 다수의 주파수를 가진 여러 전자기장이 동시에 존재한다면, 또는 전자기장이 펄스의 형태일 때 다이오드 검파기를 사용하면 부정확한 측정 결과를 초래한다.

반도체는 빛과 광전현상, 온도변화의 영향을 받기가 쉽다. 그래서 zero offset을 하면 온도변화에 따른 감도 변화를 유발하여 오차를 발생시킬 수 있다. bolometer 검파기도 온도 변화의 영향을 받기 쉬워서 zero offset을 하게 하면 오차를 일으키는 원인이 된다.

열소자검파기는 주위 온도 변화에 상대적으로 민감하지 않지만, 상대적으로 짧은 기간동안 또는 미소한 과부하(측정기가 꺼져 있을지라도)에 쉽게 파괴된다. 그래서, 특히 펄스 전자기장을 측정할 때 주의하여야 한다.

## III. 측정치의 전송

동축케이블의 손실이 가능한 적어야 한다.

측정된 신호를 전송하기 위한 급전선은 전자기장 분포를 크게 찌그러뜨릴 수 있다. 저항성 케이블(예, 격리된 탄소 파이버)은 전자기장 분포가 찌그러지지 않기 위해 이용되고, 이 기술은, 케이블의 저항값으로 좌우되지만, 몇 MHz 이상까지 이용될 수 있다. 부가적인 측정오차는 열 전압 또는 케이블이 물리적으로 움직일 때 또는 마찰이나 외부 정전기장내에 위치할 때 케이블의 위치변화로 인해서 생성되는 정

---

전하로 인해 발생될 수 있다.

#### IV. 표시기 부분

표시기 부분이 전자기장 내에 위치하더라도, 측정범위의 주파수성분으로부터 간섭을 받지 말아야 한다.

#### [부 록 4 : 복사 전자기장내의 전자기장을 계산하기 위한 수치해석 절차]

전자기장 복사와 분산 문제는 상대적으로 매우 단순한 몇 가지 경우에서만 간단한 계산에 의해 풀 수 있다.

입의 구조를 가진 실제 문제의 해답을 구하기 위해서는 수치해석 방법을 적용할 수 있는 크고 빠른 컴퓨터에서 동작하는 적절한 프로그램이 필요하다.

이러한 수치해석 방법은 공간의 모든 점에서 전자기장의 세기와 전력속 밀도 그리고 전류, 전압, 임피던스의 크기와

위상 등을 계산할 수 있다.

주파수 범위와 구조의 크기에 따라, 아래의 계산방법을 적용하였다.

- ① 물리광학(PO : Physical Optics)
- ② 회절에 관한 물리이론(PTD : Physical Theory of Diffraction)
- ③ 기하광학(GO : Geometric Optics)
- ④ 기하학적 회절이론(GTD : Geometrical Theory of Diffraction)
- ⑤ 회절의 균일성 이론(UTD : Uniform Theory of Diffraction)
- ⑥ 등가전류방법(MEC : Method of Equivalent Current)
- ⑦ 모멘트법(MOM : Method of Moment)
- ⑧ 혼합 MOM/GTD(HMG : Hybrid Moment and Geometric Theory of Diffraction)

최적의 계산 방법을 선택하려면 어느 특정한 문제에 대해 평가가 실시되어야 한다.