EFT(Electrical Fast Transient)내성 시험시 발생되는 전원선 복사 잡음에 관한 연구

A Study on the Radiated Noise from Power Line during EFT Immunity Test

정삼영* · 이중근**

Sam-Young Chung* · Joong-Geun Rhee**

요 약

전기적인 빠른 과도 현상에 대한 내성 시험 시, 전원선 또는 신호선을 통해 과도한 전압을 인가하게 되는데, 이때, 이들 전원선 또는 신호선을 통해 복사되는 불요 복사파가 인근 피시험체에 직, 간접적으로 영향을 주게 되어 시험 결과의 신뢰성을 떨어 뜨리게 된다. 따라서 본 논문에서는 피시험체에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 근방계 영역에서 불요 전자파의 세기와 특성에 대해서 실제 측정과 전송선 모델을 이용한 수치 해석적 방법으로 고찰하였다. IEC 61000-4-4의 시험조건과 동일한 상태에서 평가를 했을 때, 전원선으로 부터의 불요 복사파가 피시험체에 상당한 장해를 유발할 수 있는 약 2.4 kV/m 정도의 전계 세기로 나타나는 것으로 확인되었다.

Abstact

During the EFT immunity test, the fast transient voltage is injected to the power or signal line. The radiated noise from these lines influences the near-by EUT, and consequently, the reliability of the test result can be jeopardized. The measured data of the field strength and wave shape of the noise were compared with the result of the mathematical analysis using transmission line model. When the tests were performed by the conditions the same as stated in IEC 61000-4-4, the results showed that the magnitude of the radiated electric field strength was about 2.4 kV/m, and it can cause severe interference to the intended operation of EUT.

I. 서 론

현재 국제전기표준위원회(IEC: International Electrotechnical Commission)에서 제정된 내성시험 항목은 크게 복사성 내성과 전도성 내성으로 구분할 수 있는데 전도성 내성시험으로 전기적 빠른 과도 현상(EFT: Electrical Fast Transient)에 대한 시험을 하도록 규정되어 있다. EFT 시험은 유도저항이 계전기(Relay)에 연결되지 않았을 때 전원선 및 신호선에 나타나는 실제적인 문제를 모의 시험하게 된다.

EFT/Burst 내성시험에 관한 기본규격인 IEC 61000-4-4에 따르면 반복적 급속 과도현상에 대한 전기 전자 장비의 내성 평가를 위하여 전원공급 포트, 신호포트, 제어포트에 발생 가능한 Burst를 반복적으로 인가(표 1)하여 그 성능을 평가하고 있다[1].

EFT 내성시험 중 발생되는 연속적인 고전압 버스트는 케이블을 따라 높은 세기의 전류를 발생시킨

* 전파연구소 EMC 연구실

** 한양대학교 전자공학과 EMI/EMC연구실

· 논 문 번 호 : 990907-070

· 수정완료일자 : 1999년 11월 8일

표 1. EFT 시험을 위한 인가레벨
Table 1. EFT test levels.

개방회로 출력 시험 전압(±10 %)과 임펄스 반복율(±20 %)		
레벨	전원공급기, 보호접지(PE)	
	전위의 첨두값(kV)	반복율(KHz)
1	0.5	5
2	1	5
3	2	5
4	4	2.5
x	special	special

다. 이들 각각의 버스트는 극히 짧은 상승시간의 특성을 갖는 많은 펄스로 구성되어 있으며, 따라서 여기에서 발생되는 불요 복사파의 스펙트럼(그림 4)은 케이블이 유효 안테나가 될 수 있는 주파수 범위까지 확장된다[2]. 이러한 강한 전자기장의 출현으로 인하여 피시험체(EUT: Equipment Under Test)는 정상적인 전도성 내성의 시험을 받을 수가 없으며, 결과적으로 EUT의 내성 부적합 판정을 받을 경우 필터에 문제가 있는지 아니면 차폐에 문제가 있는지에 대한 정확한 판단을 내리기가 어렵게 된다.

따라서 실제의 EFT 내성시험시 심각한 문제를 야기 시킬 수 있는 불요 복사파의 특성을 밝히고자 실측과 이론적 해석방법을 통하여 조사 분석하였다.

본 논문에서는 EFT 내성시험시 발생하는 불요 복사파의 세기를 평가하고자 크게 두 영역으로 조사를 하였다. 첫째로 EFT 내성시험시 발생되는 복사성 전자계가 EUT에 직접 영향을 줄 수 있는 근방계 영역, 그리고 둘째로 원방계 영역인 30 m 야외시험장에서 EFT 내성시험시 발생되는 불요 복사파 세기를 조사하였는데, 이는 EFT 내성 시험 항목이 전기적 빠른 과도 현상에 대한 전도성 내성 시험이라는 특성을 고려한다면 EFT 발생기 뿐만 아니라 전원코드 부분까지를 EFT 내성시험을 위한 장치로 볼 수 있기 때문이다. 따라서 내성평가용 시험장치로 사용되기 위해서는 EMI/EMS 시험장비에 대하여 복사성 전자파 장해 허용기준치를 규제하고 있는 IEC/CISPR 11 규격에 적합하여야 한다[3].

Ⅱ. 전자 오르간(Electric organ)에 대한 EFT 내성 평가

IEC 61000-4-4의 규정에 따라 EFT 내성시험을 수행하기 위하여 EUT로는 국내에서 생산되고 있는 전자 오르간 키보드를 사용하였으며, 시험의 정확성을 위하여 완전 무반사실(Full Anechoic Chamber)에서 측정을 하였다. 시험 레벨은 IEC 규정에 따라 0.5 kV에서부터 4 kV까지 변화시켰으며, 설치상태는 그림 1에서와 같이 전원선 길이는 1 m로 고정하였고 높이는 완전도체인 기준면 위로부터 수평을 유지하며 약 0.1 m 높이로 하였다.

EUT로 사용된 전자 오르간은 녹음상태에 의해 자동으로 동작되도록 하였으며, EFT 모의 신호 발생기는 IEC 61000-4-4 시험기기의 규격 특성을 만족하는 HAEFELY Burst-Tester 발생기를 사용하였다. 시험 결과 EUT는 최소 인가 레벨인 0.5 kV일

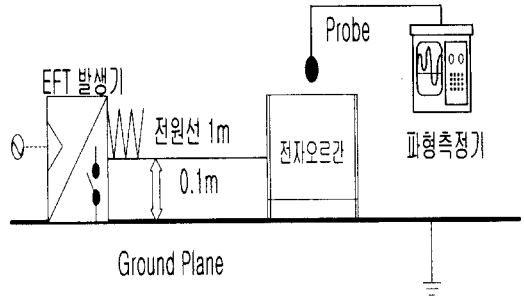

그림 1. 근방계 복사파 측정 시스템
Fig. 1. Near field measurement set-up.

표 2. 전자 오르간 키보드 EFT 내성시험 결과
Table 2. EFT test results of an electric organ.

인가레벨	EUT상태	EUT상에서 최대 전계강도(V/m)
배경 잡음	-	-
0.5 kV	비정상적인 소음 발생	-
1 kV	짧고 강한 톤의 소음 발생 후 작동 안됨	-
2 kV	〃	1,000
4 kV	〃	2,200

때부터 오동작이 발생하였으며, 인가레벨이 1 kV 이상에서는 한차례 강한 톤의 소음이 발생한 후 전혀 작동이 되지 않았다.

Ⅲ. EFT 전원선 주변의 전자계 분포

EFT 발생기의 전원에 EUT의 전원 코드를 연결하여 규정 시험 레벨 값을 인가하였을 때 전원선으로부터 근방계 영역인 EUT의 위치에서 발생되는 전자계의 세기와 파형 분포를 확인하고자 실측치와 이론적 수치 해석 결과를 비교하였다.

단순한 전송선 모델과 Maxwell 방정식을 이용[2], 컴퓨터 프로그램화 하여 EUT 위치에서의 복사 전자계 세기와 시간축 상의 파형[4]에 대한 계산치를 구하였으며, 주파수 스펙트럼 상 광대역 특성을 갖는 전·자계 프로브와 디지털 오실로스코프를 사용하여 시간축 상 전자계 분포의 실측치를 구하였다.

3-1 이론적 계산

EFT 시험에 사용되고 있는 셋업 상태를 고려할 때 단순한 전송선 모델로 생각할 수 있으며 실제 시험에서 반복 주기(~200 nsec)를 가지고 연속적으로 인가되는 전압 파형 중 해석의 단순화를 위하여 한 개의 파형만을 고려하여 해석하였다[2].

IEC 61000-4-4에 의하면 EFT 인가 전압 파형의 상승시간(10~90 %) t_r은 5 ns±30 %이고 지속시간(50 % V_{peak}) t_d은 50 ns±30%이다.

EFT 인가 전압 파형은 일반적으로 많이 적용되는 다음과 같은 표현을 사용하였다[2].

$$v_g(t) = 0 \qquad t < 0$$
$$V_0(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \qquad t \geq 0 \tag{1}$$

여기서 $\tau_1 = 48$ns, $\tau_2 = 4.1$ns이며, V_0와 V_{peak} 값은 다음과 같은 관계가 있다.

$$V_{peak} \approx V_0(e^{\tau_1/\tau_2 \ln(\tau_1/\tau_2)} - \tau_1/\tau_2) \approx 0.725\, V_0$$

한 개의 단순 파형만을 고려했을 때, 전압 특성은 그림 3에서와 같은 파형을 갖게 되며, 이러한 파형에서 복사 가능한 장(場)의 스펙트럼 특성은 시간축 상 전압 파형을 퓨리에 변환함으로써 구해질 수 있는데, 그 결과 그림 4에서와 같이 상당히 넓은 주파수 대역에서 잡음이 발생할 수 있다는 사실을 알 수 있다.

EUT를 단순한 저항 성분으로 가정한다면 폐회로를 따라 흐르는 전류는 진행파와 반사파의 중첩을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i(t, z') = \sum_{n=0}^{\infty} i_n(t, z') \tag{2}$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_g\left(t - nT_0 - (-1)^n \frac{z' - \delta_n L}{c}\right)}{R_g + Z_0} \times \Gamma_G^{Int[n/2]} \Gamma_L^{Int[(n+1)/2]} \tag{3}$$

여기서 $T_0 = \frac{L}{c}$, L은 전송선 길이이며, c는 광속도 3×10^8 m/s 이다.

EUT인 저항성분에서 반사계수 $\Gamma_L = \frac{Z_0 - R_L}{Z_0 + R_L}$ 이며, 전원 입력단에서 반사계수 $\Gamma_G = \frac{Z_0 - R_g}{Z_0 + R_g}$ 이다.

$0 < z' < L$, $\quad \delta_n = 0 \quad$ n even

$\qquad\qquad\quad 1 \quad$ n odd

$Int[x]$ = integer part of x,

이것으로부터 단위 길이당 전하분포는 다음과 같다.

$$q(t, z') = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i_n(t, z')}{c} (-1)^n \tag{4}$$

그림 2의 P(x, y, z)점에서 전자계 세기를 얻기 위해 ground 면은 영상성분으로 고려할 수 있으며 따라서 전류와 전하분포는 상측 전송선에 대해서는 (3), (4)로 표현되며, 영상성분인 하측 전송선에 대해서는 반대방향의 전류와 전하의 분포를 가지게 된다. 따라서 구하고자 하는 복사장은 벡터 및 스칼라 포텐셜을 이용하여 얻어질 수 있다.

$$e(P, t) = -\nabla \Phi - \frac{\partial A}{\partial t},$$
$$h(P, t) = \frac{1}{\mu} \nabla \times A \tag{5}$$

여기서 A와 Φ는 각각 벡터와 스칼라 포텐셜

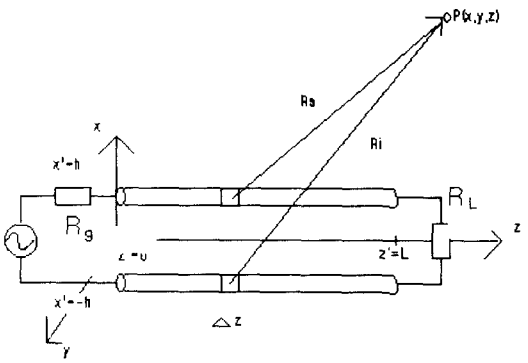

그림 2. EFT 전원선 수치해석 모델

Fig. 2. Transmission line model of the EFT power cord.

항이다.

계산을 쉽게 하기 위하여 전송선을 길이 Δz의 다이폴이 M개로 구성된 형태로 볼 수 있으며 총 전자계 세기는 M개의 다이폴에 의해 복사된 장(場)들의 중첩으로 구할 수 있다. 여기서 Δz는 $\Delta z/c \ll t$, 조건을 만족해야 한다. m번째 다이폴에 의해 복사된 전자계의 x성분은 다음과 같이 구해진다.

$$h_{xm} = -\frac{\triangle z}{4\pi}\left[\frac{i'\left(t-\frac{R_s}{c}\right)}{c}\frac{y}{R_s^2} + i\left(t-\frac{R_s}{c}\right)\frac{y}{R_s^3} - \frac{i'\left(t-\frac{R_i}{c}\right)}{c}\frac{y}{R_i^2} - i\left(\frac{t-R_i}{c}\right)\frac{y}{R_i^3}\right] \quad (6a)$$

$$e_{xm} = \frac{\triangle z}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{q'\left(t-\frac{R_s}{c}\right)}{c}\frac{x-h}{R_s^2} + q\left(t-\frac{R_s}{c}\right)\frac{x-h}{R_s^3} - \frac{q'\left(t-\frac{R_i}{c}\right)}{c}\frac{x+h}{R_i^2} - q\left(\frac{t-R_i}{c}\right)\frac{x+h}{R_i^3}\right] \quad (6b)$$

여기서 $R_s=\sqrt{(x-h)^2+y^2+(z-z')^2}$, $R_i=\sqrt{(x+h)^2+y^2+(z-z')^2}$, $f'(\theta)=\frac{\partial f(\theta)}{\partial\theta}$, $z'=\frac{(2m-1)L}{2M}$ $\quad m=1, 2, \cdots, M$

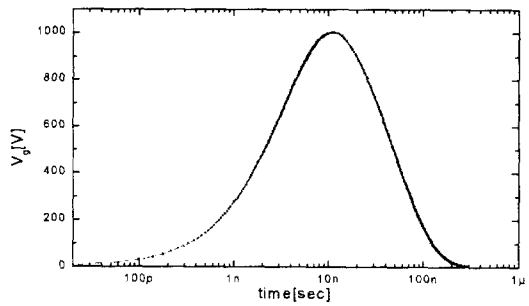

그림 3. 50 Ω 저항에 인가된 EFT 전압 파형

Fig. 3. EFT voltage single waveform into a 50 Ω load.

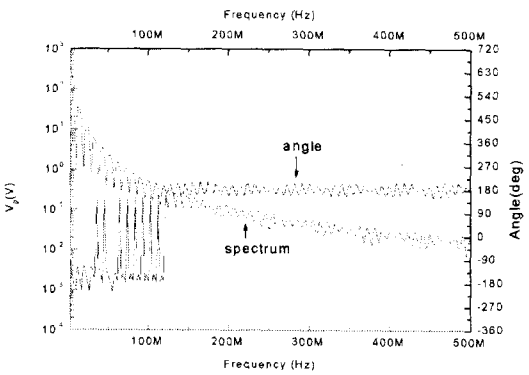

그림 4. EFT 전압 인가 파형의 퓨리어 변환 특성

Fig. 4. Fourier transform characteristics of EFT voltage waveform.

따라서 M개의 다이폴에 의한 P점에서 전자계 x성분은 다음과 같다.

$$e_x(t,P)=\sum_{m=1}^{M} e_{xm}, \quad h_x(t,P)=\sum_{m=1}^{M} h_{xm} \quad (6c)$$

3-2 근방계 전자계 분포

EFT 전원선에서 복사되어 EUT상에 분포하는 전계 세기의 시간축 상 특성을 얻기 위하여[4],[5]전계 프로브와 디지털 오실로스코프를 이용하였다.

전원선에서 복사되는 전자파는 아주 짧은 지속시간을 갖기 때문에 순간적으로 포착하기가 쉽지 않다. 따라서 본 측정에서는 5 GHz의 분해능을 갖는 Tektronix TDX 680B 오실로스코프와 비교적 Flat한 주파수 응답 특성[6]을 갖는 전계 프로브를 사용

하여 전원선으로부터 복사되는 전계 세기를 측정하였다. 사용된 전계 프로브는 표준 전자파 발생용 TEM Cell을 이용하여 교정하였으며[7], 그 결과 주파수 30~150 MHz 대역에서 비교적 Flat한 주파수 응답 특성을 보였다.

EFT 전원선으로부터 복사된 전계 세기와 파형 특성을 조사하기 위하여 그림 1과 같은 배치에서 전원선 중심으로부터 0.9 m 떨어진 EUT상 높이 0.1 m에서 측정을 하였다.

EUT로 사용한 전자 오르간 키보드 중간 지점에서 EFT 전원 인가레벨 0.2, 2.0, 4.0 kV 각각에 대해 발생된 불요 복사파의 전계 분포를 측정하였다.

EFT 전원선으로부터 발생된 불요 복사파를 측정한 결과 전계의 최대값에 있어서 계산치와 비교적 잘 일치하고 있으며 그림 5, 그림 7의 결과를 살펴보면 전원 인가레벨이 0.2 kV일 경우 최대 0.12 kV/m, 4 kV일 경우 최대 2.4 kV/m의 세기를 보이고 있고, 자계의 경우 수식적 결과에서 전원 인가레벨이 0.2 kV일 경우 최대 0.65 A/m, 그리고 4 kV일 경우 최대 13 A/m의 세기를 나타내고 있다. 따라서 IEC 61000-4-3에서 규정하고 있는 복사 전자계에 대한 내성시험의 최대 인가레벨이 1 V/m~10 V/m인 것을 고려한다면, EFT 전원선에서 발생되는 불요 복사파는 피시험체에 심각한 오동작을 유발시킬 가능성이 있으며, 아울러 EFT 내성시험시 요구되는 시험결과의 정확성과 재현성을 보장할 수 없다.

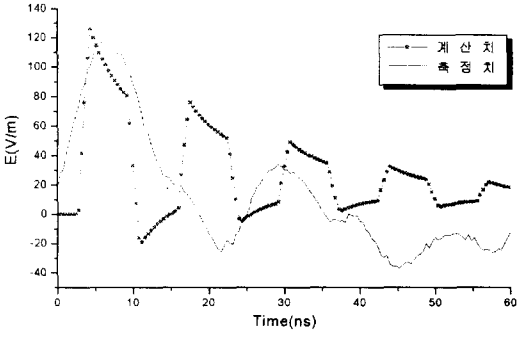

그림 5. EFT 전원 인가레벨 0.2 kV에 대한 EUT상에 발생된 복사 전계

Fig. 5. Computed and measured electric field over EUT for test level of 0.2 kV.

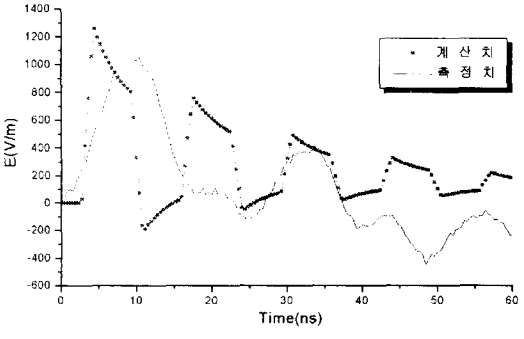

그림 6. EFT 전원 인가레벨 2 kV에 대한 EUT상에 발생된 복사 전계

Fig. 6. Computed and measured electric field over EUT for test level of 2 kV.

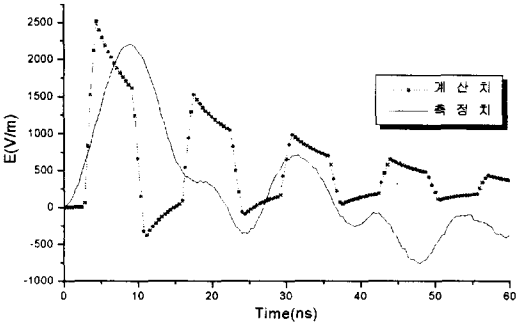

그림 7. EFT 전원 인가레벨 4 kV에 대한 EUT상에 발생된 복사 전계

Fig. 7. Computed and measured electric field over EUT for test level of 4 kV.

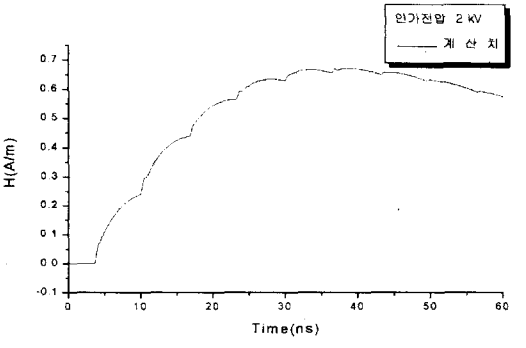

그림 8. EFT 전원 인가레벨 0.2 kV에 대한 EUT상의 복사 자계 계산치

Fig. 8. Computed magnetic field over EUT for test level of 0.2 kV.

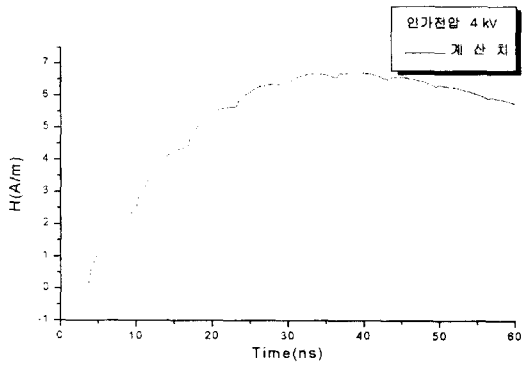

그림 9. EFT 전원 인가레벨 2 kV에 대한 EUT상의 복사 자계 계산치

Fig. 9. Computed magnetic field over EUT for test level of 2 kV.

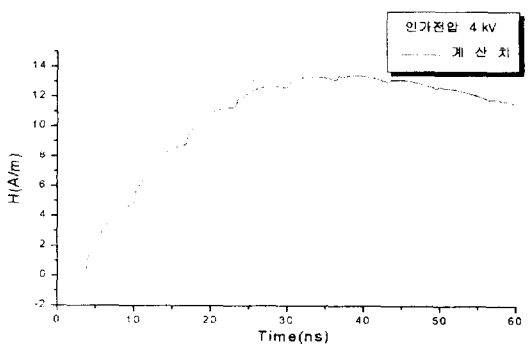

그림 10. EFT 전원 인가레벨 4 kV에 대한 EUT사의 복사 자계 계산치

Fig. 10. Computed magnetic field over EUT for test level of 4 kV.

Ⅳ. 원방계에서 불요 복사파의 평가

EFT 내성시험기기는 CISPR(International Special Committee on Radio Interference) 11의 ISM(Industrial, Scientific and Medical) RF이용 기기에 대한 방해파 특성 허용기준 및 측정방법 등에 관한 기준으로 적용이 가능하며 또한 시험기기로서 이용되기 위해선 이 기준에 적합하여야 한다[3]. 따라서 EFT기기에 대한 원방계 불요 복사파 세기를 조사함에 있어서 CISPR 11에서 제시한 측정방법과 허용기준치 레벨을 적용하여 평가하였다.

적용되는 허용기준치는 30 m의 야외시험장(Open Area Test Site)에서 준첨두치 검파기(Quasi-Peak

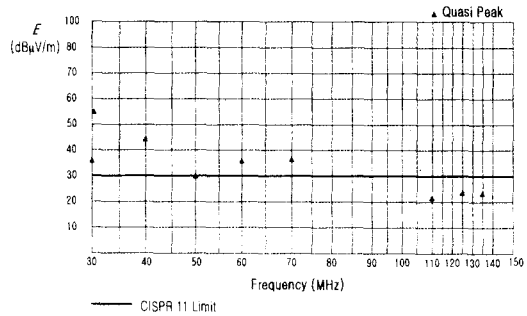

그림 11. 전원 인가레벨 0.5 kV일 때 30 m 야외시험장에서 측정값

Fig. 11. Measurement result for test level of 0.5 kV at 30 m open site.

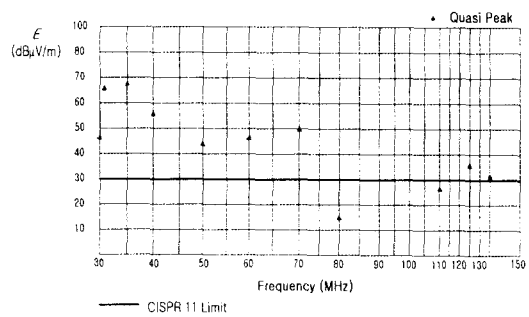

그림 12. 전원 인가레벨 2 kV일 때 30 m 야외시험장에서 측정값

Fig. 12. Measurement result for test level of 2 kV at 30 m open site.

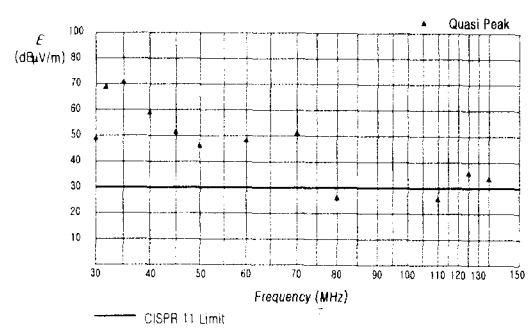

그림 13. 전원 인가레벨 4 kV일 때 30 m 야외시험장에서 측정값

Fig. 13. Measurement result for test level of 4 kV at 30 m open site.

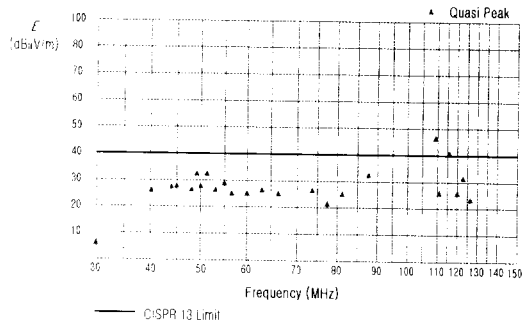

그림 14. 전자 오르간의 복사전계 세기(3 m, Anechoic Chamber, 30 MHz~150 MHz)

Fig. 14. Electric field intensity radiated from electric organ(3 m, Anechoic Chamber, 30 MHz~150 MHz).

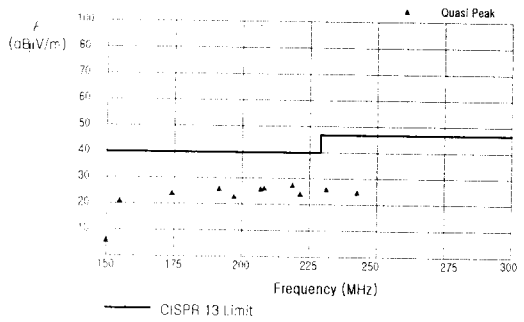

그림 15. 키보드의 복사전계 세기(3 m, Anechoic Chamber, 150 MHz~300 MHz)

Fig. 15. Electric field intensity radiated from electric organ.(3 m, Anechoic Chamber, 150 MHz~300 MHz)

Detector: 충방전 시상수 각각 1 ms와 550 ms)로 측정을 하였을 경우 주파수 30 MHz~230 MHz 범위에서 30 dB(μV/m)를 초과하지 않아야 한다.[3],[8]

본 실험을 위하여 전파연구소 이천 분소의 30 m 야외 시험장을 이용하였으며, 측정 안테나는 바이코니칼 안테나를 사용하였다.

EFT 발생기와 전자 오르간은 전원이 연결된 상태에서 IEC 61000-4-4 EFT 내성 시험의 조건으로 시험 테이블 위에 설치하였다.

측정결과 전자 오르간 키보드의 경우, CISPR 13 (음성, 텔레비젼 방송 수신기 및 관련장치의 전파방해 허용기준과 측정방법에 관한 국제규정)을 적용하여 3 m Anechoic Chamber에서 불요 복사파를 측정하였을 때 주파수 110~120 MHz대역에서 기준을 초과하나 전체적으로 EFT와 전원선으로 연결된 상태에서 발생하는 불요 복사파 세기와는 비교가 되지 않을 정도로 낮은 분포를 보였다[9]. EFT 전원선에서 복사되는 불요 복사파의 세기는 넓은 주파수 범위에서 CISPR 11의 허용기준치를 훨씬 초과하고 있으며, 또한 임펄스성 특성을 가지고 있어 내성시험 중 심각한 장해원이 될 수 있다.

V. 결 론

EFT 전압 파형의 스펙트럼 특성 및 원방계 측정결과 EFT 내성시험시 전원선으로부터 발생하는 불요 복사파는 주파수 30 MHz~150 MHz범위에 걸쳐 광범위하게 분포하며, 전계강도 세기도 허용기준치를 훨씬 초과하는 것으로 판명되었다.

내성시험시 EFT 발생기와 EUT 사이의 거리가 1 m이내인 점을 고려하면 전원선 부근 EUT 중간지점에서 최대 2.4 kV/m 이상의 복사 전자계가 발생한다는 사실은 EFT 내성 시험결과의 신뢰성에 심각한 문제점이 있다고 판단된다.

EFT 내성시험은 전기적 빠른 과도현상이 전원선 또는 신호선을 통해 들어올 때 기기의 전자기적 내성을 평가하는 시험 항목이라는 사실을 감안할 때 전원선이나 신호선을 통해 불요 복사파가 복사되어 인접 피시험체에 장해를 일으킨다면 올바른 시험이 될 수 없다. 따라서 앞의 실험 결과들을 고려할 때 EFT 내성시험시 시험결과의 정확성을 얻기 위해선 전원선을 차폐하든지 또는 EUT를 차폐하여 불요 복사파에 대한 영향을 최소한으로 줄이는 별도의 방안이 강구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] IEC 61000-4-4, "Electromagnetic Compatibility Part4: Testing and measurement techniques ; Section 4: Electrical fast transient/burst immunity test," 1995.

[2] Graziano Cerri, Roberto De Leo, and Valter Mariani Primiani, "Investigation of radiated

susceptibility during EFT tests," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 39, no. 5, pp. 298-303, Nov., 1997.

[3] CISPR 11, "Industrial, Scientific and Medical (ISM) Radio Frequency Equipment Electromagnetic Disturbance Characteristics Limit and Methods of Meaurement," 1997.

[4] J. J. Goedbloed, "*Electromagnetic Compatibility*," Prentice Hall NY, 1990.

[5] Clayton R. Paul, "*Introduction to Electromagnetic Compatibility*," John Wiley & Sons, Inc., 1992.

[6] M. Kanda, "Standard antennas for electromagnetic interference measurements and method to calibrate them," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol, pp. 261-273, Nov., 1994.

[7] 조원서, 김정민, 장태헌, "표준 전자파 발생용 GTEM Cell의 개발에 관한 연구," 산업기술시험평가연구소(PES 98020), Jan., 1999.

[8] CISPR 16-1, "Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods, Part 1: Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus," 1997.

[9] CISPR 13, "Limits and Methods of Measurement of Radio Interference Characteristics of Sound and Television Broadcast Receivers and Associated Equipment," 1996.

정 삼 영

1985년 2월: 동아대학교 물리학과 (이학사)
1988년 8월: 연세대학교 물리학과 (이학석사)
1998년 3월~현재: 한양대학교 전자공학과 박사과정
1991년 6월~현재: 전파연구소 EMC 기준연구실, IEC/TC77 국내전문위원
[주 관심분야] EMI/EMC, 국제표준, 전자파 측정 및 해석

이 중 근

1967년: 서울대학교 전기공학과(공학사)
1973년: 미국 플로리다 주립대학교 (공학석사)
1979년: 미국 플로리다 주립대학교 (공학박사)
1979년~1988년: 국방과학연구소 책임연구원
1989년~1991년: 한국전자파학회 회장
1988년~현재: 한양대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] EMI/EMC, 전자파