

대기압 하의 액체질소중 방전 진전과정에 따른 방사전자파의 특성연구

박광서*, 최병주**, 이광식*, 이동인*
*영남대학교, **서라벌대학

The Characteristics of Frequency Spectrum of Radiated Electromagnetic Waves with Discharge Progress in LN₂

Kwang-Seo Park*, Byoung-Ju Choi**, Kwang-Sik Lee*, Dong-in Lee*
*Yeungnam University, **Sorabol College

Abstract - In this paper, a relationship between AC discharge progress and the radiated electromagnetic waves was investigated by measuring electromagnetic waves using a biconical antenna and a spectrum analyzer at the atmospheric pressure in LN₂.

From the results of this study, according to the consideration of the mutual relation between frequency spectrum of the radiated electromagnetic waves and discharge progress, it was confirmed that detecting partial discharge and estimating discharge progress can be possible.

It is considered that these results obtained from this investigation may be used as the fundamental data for diagnosis and prediction of insulation on superconducting and cryogenic power equipments.

1. 서 론

초극저온·초전도 기술은 장래의 전력에너지의 발생 및 저장뿐만 아니라, 변전 및 수송기기 등 미래의 전력계통에 광범위하게 채택 운용될 전망이다.

현재 선진국을 중심으로 21세기의 핵심기술의 하나로서 초전도·극저온 전력설비에 관하여 많은 연구를 하고있고 실제 전력설비의 개발도 상당부분 이루어졌다. 국내에서도 1[MVA]급 초전도 발전기와 154[kV] 800[MVA] 극저온 케이블 개발, 154[kV] 3[GVA] Nb₃Sn 초전도 케이블 요소기술 개발 등의 성과를 올리고 있으며 현재에도 많은 연구를 진행하고 있다.

그러나 실제 계통상에 적용하는 실용화에는 해결해야할 과제가 많이 남아있다. 그 과제중 전기적 사고에 관한 신뢰성 확보가 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 그 예로서 실험실적 규모의

기기 및 현장에 설치된 초전도·극저온 기기의 운전 결과, 전기적 요인에 의한 사고가 전체의 약 50[%] 이상을 차지하고 있다.

전력설비나 기기의 전기적 이상에 수반되는 방사전자파를 비 접촉센서인 안테나를 이용하여 검출하는 방법은 부분방전의 검출감도가 좋고, 검출범위가 넓으며 하나의 센서로 광범위한 진단이 가능하므로 센서의 수를 작게 할 수 있어서 경제적이란 것 등의 많은 이점이 있다. 그러나 검출감도가 높기 때문에 역으로 방송파 등의 불요 노이즈가 수반되며, 또 신호의 감쇠나 반사등으로 검출이 곤란한 점 등의 단점이 있지만 기존의 절연진단 기술법 보다 많은 이점이 있으므로 현재 많은 연구가 진행되고 있다.

이러한 관점에서 본 논문은 장래 실용화 될 초전도·극저온 전력설비의 신뢰성을 확보하기 위해 극저온 냉매인 액체질소 중에서 불평등 전극계를 형성하여 초전도·극저온 전력설비의 전기적 이상상태를 모의하였다. 이때 발생하는 방사전자파를 안테나와 스펙트럼 분석기 등을 이용하여 극저온 냉매에서 교류방전진전 과정에 따른 방사전자파의 주파수 스펙트럼 특성을 연구하였다. 또한 방사전자파 측정에 의해 방전전류의 파형 추정에 관하여 이미 발표한 논문에서 근거하여 방사전자파 측정에 의한 절연진단 가능성을 충분히 확인하였다.

이러한 연구를 바탕으로 초전도·극저온 전력설비의 절연진단 시스템 개발을 위해 안테나의 종류, 최적 측정주파수 범위, 방사전자파 측정 방법, 데이터의 처리 방법, 방전상태의 예측 및 판별방법 등을 제시하고자 한다.

이러한 연구 결과는 장래 초전도·극저온 전력설비의 절연진단 시스템 구성을 위한 중요한 자료로 활용 될 수 있을 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 액체질소중 침대 평판 전극계를 사용한 실험 장치의 개략도이다. 전극계는 대기압

하의 액체질소중 절연내력에 영향을 많이 주는 정전기포의 효과를 고려하여 구성하였다 [4][10]. 침단 각도는 30° 이고 평판의 직경은 $40[\text{mm}]$ 이다. 전극간의 Gap은 $5 [\text{mm}]$ 로 일정하게 하였다. 점선 부분은 전원부분으로 교류 고전압(Input : AC 200V 60Hz, Output: AC 50kV 60mA)을 사용하였다. 그림에서 L은 블로킹 코일이고 C는 결합 콘덴서이며 이들은 고주파 필터의 역할을 한다. 또한 출력되는 고전압을 측정하기 위해 고전압 분압기($R_2:R_3=5000:1$)를 사용하였다.

회로도에서 $R_1(50\Omega)$ 은 방전진전에 따른 부분 방전의 전류파형을 측정하기 위한 무유도 저항이며 전류 파형의 측정은 Digital Oscilloscope (Lecroy 9350AL, $500[\text{MHz}]$)와 미소전류를 측정하기 위해 증폭기가 내장된 Active probe(bandwidth :DC ~ $1[\text{GHz}]$, Leroy AP020)를 사용하였다. 그리고 방전진전에 따라 방사되는 전자파의 측정과 분석을 위하여 Biconical 안테나 (EMCO model 3110) 및 스펙트럼 분석기 (Advantest R4131D)를 이용하였다.

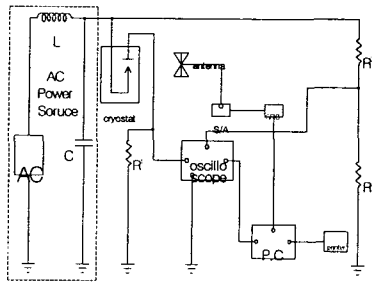


Fig. 1. Schematic diagram of the Experimental apparatus

실험방법은 먼저 전압 인가속도를 $1[\text{kV}/\text{sec}]$ 의 속도로 일정하게 상승하면서 절연파괴전압은 5회 측정하여 평균한 전압을 측정하였다. 한번 절연파괴 후 전원을 끄고 액체질소가 안정화 되도록 충분한 시간이 지난 후 다시 교류고전압을 인가하여 실험을 행하였다. 액체질소중 부분방전을 모의하면서 부분방전의 발생에서 절연파괴 되는 단계별로 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 관찰하기 위해 절연파괴전압 보다 낮은 전압을 $1[\text{kV}]$ 씩 상승인가 후, 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용하여 다양한 기초실험을 통해 방사전자파의 측정에 유리한 안테나의 종류, 최적 측정주파수, 방사전자파 측정방법 등을 설정 후 실험을 행하였다. 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 측정한 데이터를 스펙트럼 분석기에서 GPIB로 데이터를 컴퓨터에 전송하여 분석하였다.

이 때 전극 중심부와 안테나 사이의 거리는 방사전자파의 감쇄특성 및 실험상 안전거리등을 고려하여 $1[\text{m}]$ 로 고정하여 두고 실험을 하였다. 안테나의 각도는 전계강도를 측정하기에 유리하도록 전류의 흐름 방향과 동일하게 대지에 대하여 수직으로 배치하였다. 부분방전시 방사되는 전자파의

주파수 분포는 수 MHz에서 수십 GHz대역까지 광범위하다. 이러한 방사전자파를 관찰하기 위해서는 광대역 안테나가 필요하나 이러한 안테나는 제작이 어렵고 높은 비용이 요구된다.

좁은 대역만으로 액체질소중 방전상태의 예측이 가능한 대역을 찾기 위해 본 연구에서는 $1[\text{GHz}]$ 대역 이하의 주파수 범위에서 여러 가지 기초실험을 실시한 결과 $30\sim 80 [\text{MHz}]$ 대역범위가 적당하다는 판단아래 이 주파수 대역에서 부분방전의 발생과 진전에 따른 방사전자파를 측정·분석하였다. 절연진단을 위한 안테나의 측정 주파수 대역을 줄일 수 있다면 실제 전력설비에 적용 가능한 안테나의 형태로 변형이 가능하고 안테나의 크기 또한 줄일 수 있는 장점 등이 있다.

또한 실제 전력설비의 절연진단에 응용하기 위해서 노이즈가 존재하는 일상의 공간에서 부분방전시 방사전자파를 측정 분석하여 방사전자파의 주파수 스펙트럼 분포를 연구함이 필요할 것이다. 그러므로 그림 2에 보는 바와 같이 측정시 주변환경의 기저 외부 잡음을 측정하여 방사전자파의 분석에 유용하게 적용하고자하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 측정주파수 대역에서 주변 노이즈의 주파수 스펙트럼을 측정한 그림이다. 스펙트럼 분석기를 이용한 방사전자파 데이터의 측정방법은 10초간 취득한 데이터 중에서 최대값을 취득하는 Maxhold 방법을 사용하여 700개의 데이터를 측정하였다. 물론 측정시간이 커지면 불요 노이즈의 침입가능성이 그 만큼 높아지게 되므로 여러 기초실험을 통하여 측정시간을 10초로 정하였다.

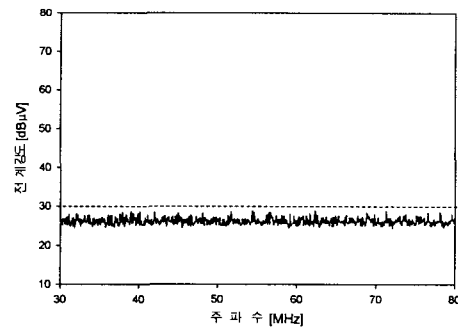


Fig. 2. Background Noise

Maxhold 방법을 채택하면 주변환경의 전자기기의 Switching 노이즈가 존재하지 않으면 그 밖의 배경 노이즈는 전계강도 $30[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}]$ 를 넘지 않음이 관측되었다. 주변기기의 스위칭 동작에 의해 주변에 불요 노이즈가 침입하더라도 스펙트럼의 분포특성으로 부분방전 신호와 쉽게 구별되고 불요 노이즈는 특히 주기성을 갖지 않음으로 반복하여 측정하면 불요노이즈는 연속하여 측정되지 않았다.

이러한 점에 착안하여 전압을 서서히 상승시

켜(0.3[kV/sec]정도) 방전진전과정을 모의 할 때 주파수 스펙트럼 분포 특성과 전계강도가 30dB 이상이 되는 데이터(이하 E_{30dB})의 수와 평균전계강도, 전계강도 40dB 이상의 데이터(이하 E_{40dB})의 수 등을 분석하였다.

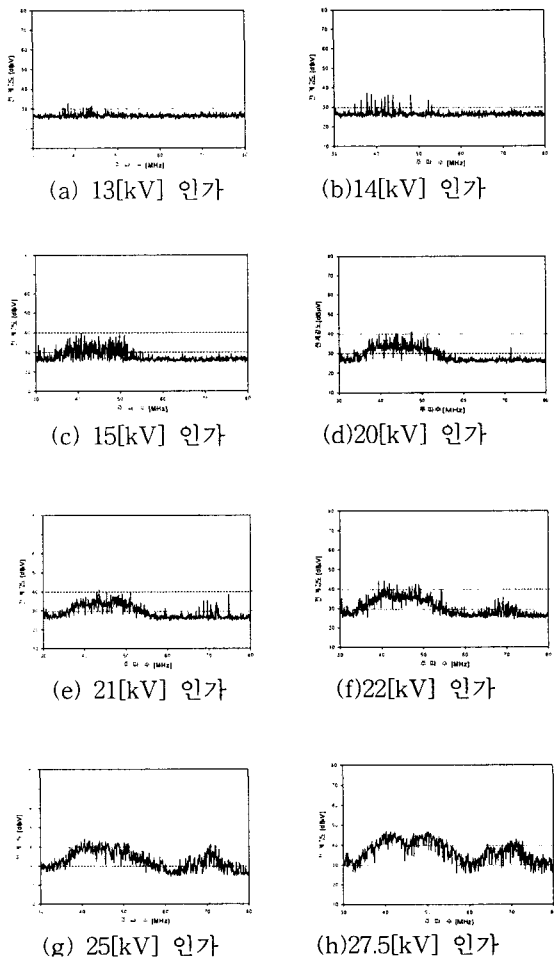


Fig. 3. Distribution of frequency spectrum of radiated electromagnetic waves with discharge progress

그림 3은 액체질소중 방전진전에 따른 방사전자파의 주파수 스펙트럼 분포이다. 액체질소중 gap간에 완전히 절연과파가 발생하는 평균절연과파전압은 약 30[kV] 정도임을 확인하였다.

그림3의 (a)는 13[kV]전압을 인가 후 최초의 부분방전(이하 PD) 신호로 판단되는 펄스성 신호가 35~45[MHz] 부근에 나타남을 보여주며 이때 E_{30dB}의 수는 8개이다. 평균전계강도는 26.4dB로서 외부잡음과 0.4dB 정도 높았다. 그림3의 (b)에서는 14[kV] 전압을 인가한 경우로서 E_{30dB}의 수의 증가 경향이 뚜렷하였고 19[kV] 전압까지 그 경향이 유사하였다.

즉 방전진전의 초기단계라 판단되는 13~19[kV] 인가한 경우, 주파수 스펙트럼 상에서 30~50[MHz] 부근에 E_{30dB}의 검출로서 방전진전의 초기단계의 진단이 가능하다.

방전진전이 많이 진전되었다고 판단되는 그림3

의 (d)의 20[kV]를 인가한 경우에는 70~80[MHz] 부근에 펄스성 PD신호가 관측되기 시작하였다. PD 신호는 인가전압이 상승할수록 70~80[MHz] 부근의 PD 신호가 증가하였다. 또한 그림 (d)의 경우부터 E_{40dB} 이상의 데이터의 검출이 시작되며 인가전압을 높여 방전을 더욱 진전시킬수록 E_{40dB} 이상의 데이터 수는 증가하였다. 이러한 경향은 24[kV] 전압인가까지 유사한 경향이였다.

즉 방전진전의 중기단계라 판단되는 20~24[kV] 인가의 경우는 주파수 스펙트럼 상에서 70[MHz] 부근에 E_{30dB}의 데이터 검출과 30~55[MHz] 부근에서 E_{40dB} 이상의 데이터 검출로서 진단이 가능하다.

절연과파 직전의 단계라고 사료되는 그림3의 (g)와 (h)의 경우 평균전계강도가 32.9[dB]와 36.8[dB]로서 Background Noise(26[dB])보다 약 7[dB]와 11[dB] 이상 크게 증가하였다. 또한 주파수 스펙트럼 상에서 70[MHz] 부근에 전계강도 40dB 이상의 데이터 검출이 되기 시작하였다.

즉 방전진전의 말기단계인 절연과파 직전의 단계라 판단되는 25~30[kV] 인가의 경우는 Background Noise보다 평균전계강도가 약 7dB 이상 증가와 70[MHz] 부근의 40dB 이상의 데이터 검출로서 진단이 가능하다

본 논문에서 제안한 방사전자파 측정방법으로 같은 실험조건하에서 반복실험을 한 결과 그 경향은 동일하였으나 방전 개시 초기, 중기, 말기 단계의 전압 범위가 ±5[%] 정도의 편차를 나타내었습니다. 즉 고전압 방전 실험 특성상 완전한 재연성을 얻기가 어려웠습니다. 그러나 침대 평판 전극을 이용한 부분방전의 발생에서 절연과파 단계까지 방사전자파 주파수 스펙트럼 분포의 경향은 동일하게 나타나 각 방전 진전단계의 구분이 가능함을 확인하다.

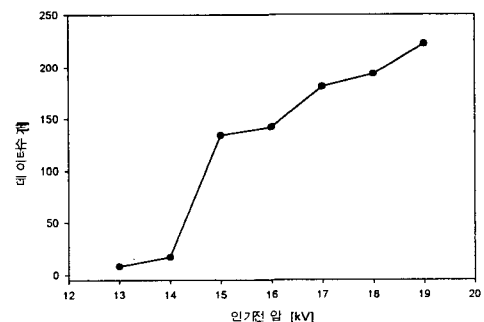


Fig. 4. Number of E_{30dB} with increasing voltage

그림 4는 방전진전에 따른 방사전자파의 주파수 스펙트럼에서 E_{30dB}의 데이터 수를 나타낸 것이다. 전압을 인가하여 방전을 진전시킬수록 E_{30dB}의 데이터 수는 증가하였다.

이러한 분석법으로 스펙트럼 상에 30~55[MHz] 부근에서 E_{30dB} 데이터의 검출로서 부분방전의 발생을 알 수 있고 또한 70[MHz] 부근에서 E_{30dB}의 데이터 검출로서 방전진전의 중기단계의 판단이 가능하다

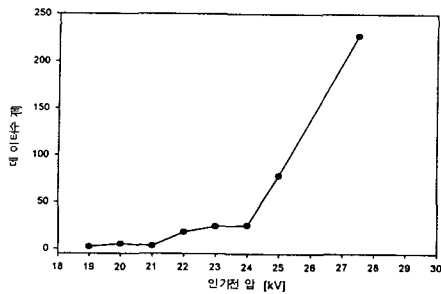


Fig. 5. Number of E_{40dB} with increasing voltage

그림 5는 방전진전에 따른 E_{40dB} 이상의 데이터 수를 나타낸 것이다. 방전진전의 초기단계까지는 E_{40dB} 이상의 데이터가 거의 나타나지 않으나 방전진전 중기단계부터 나타나기 시작하여 절연파괴 직전에는 급격히 증가한다. 이러한 분석법으로 스펙트럼 상에 30~35[MHz] 부근에 E_{40dB} 이상의 데이터 검출로서 방전진전의 중기 단계라고 판단 할 수 있고 또한 70[MHz] 부근에 E_{40dB} 이상의 데이터 검출은 방전진전의 말기단계인 절연파괴 직전의 단계라는 판단이 가능하다.

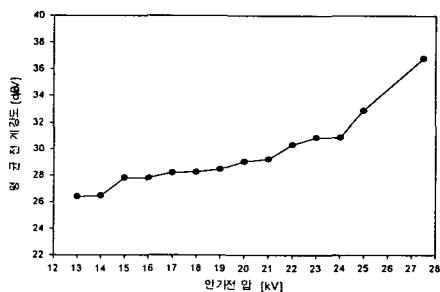


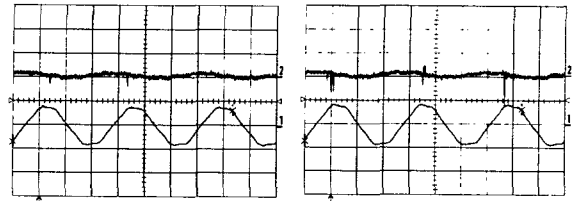
Fig. 6. Mean value of electric field strength with increasing voltage

그림 6은 방전진전에 따른 평균전계강도를 나타낸 것이다. 전압을 증가시킬수록 방전진전에 따른 방사전자파의 크기가 증가하여 평균전계강도가 증가하였다. 특히 Background Noise의 평균전계강도(26.0 [dB μ V/m]) 보다 약 7dB 이상 커지면 방전진전의 말기단계인 절연파괴 직전의 단계라 판단할 수 있다.

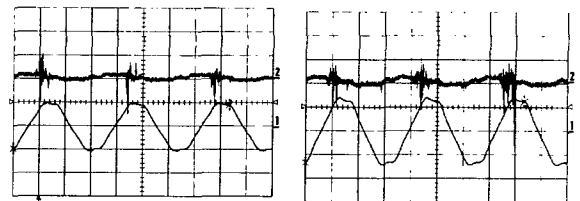
그림7은 액체질소중 부분방전시 방전 전압 전류를 측정하기 위하여 오실로스코프와 Active Probe를 이용하여 방전의 발생과 진전에 따른 전압 전류파형을 측정한 것이다.

현재 부분방전 검출 방법 중 신뢰성이 가장

높은 전기적 접촉식 방법의 하나인 접지선 저항에 의한 부분방전 전류 검출법으로 검출한 그림7의 부분방전 및 방전진전 과정과 본 실험방법에서 비 접촉센서인 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용한 부분방전의 검출 및 방전진전 상태를 파악한 그림 3의 결과를 서로 비교하여보면 본 실험



2 [mA/div], 25[kV/div], 5[ms/div]
(a) 인가전압: 13[kV] (b) 인가전압: 15[kV]



2 [mA/div], 25[kV/div], 5[ms/div]
(c) 인가전압: 18[kV] (d) 인가전압: 25[kV]

Fig. 7. Waveform of PD current and voltage in LN₂

방법의 검출감도가 접지선 전류 검출법에 근접할 정도로 좋음을 알 수 있었다.

또한 일반적으로 공기중 방전의 부분방전 전류 파형은 방전진전에 따라 트리첵 펄스 형태의 부분방전 전류 파형이 부극성 전압 부근에 나타나지만 극저온 액체질소 중에서는 이러한 전류 파형이 나타나지 않음을 알 수 있었다. 이것은 공기중 안정된 부 코로나 방전을 일으키는 부극성 방전이 액체질소 중에서는 액체질소의 극히 낮은 온도와 일반 공기중보다 극히 높은 소호능력 때문에 액체질소 중에는 안정된 부 코로나 방전이 유지되지 못하기 때문이라 사료된다.

4. 결 론

액체질소중 침대 평판전극을 배치한 후 절연파괴전압보다 낮은 교류고전압을 인가해서 부분방전의 발생과 방전진전 과정을 모의한 경우 본 실험의 방법으로 방전진전에 따른 방사전자파를 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용하여 방사전자파의 주파수 스펙트럼 분포 특성과 데이터 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 실험 방법에 의해 방사전자파의 스펙트럼 분포특성과 전계강도 30dB 이상의 데이터 수와 평균전계강도, 40dB 이상의 데이터 수 등을 고려하면 전기적 직접접촉식인 접지선 전류 검출법

에 근접할 만큼 액체질소중에서 부분방전 검출감도가 상당히 좋으며 부분방전의 발생에서 절연파괴 직전의 단계까지 방전진전 상태의 예측이 가능함을 확인하였다.

부분방전의 발생 및 방전진전의 초기단계는 30~50[MHz] 부근에서 E_{30dB} 이상의 데이터 검출로서 판단이 가능하다. 또한 방전진전의 중기단계는 70[MHz] 부근의 E_{30dB} 이상의 데이터 검출과 30~55[MHz] 부근에 40dB 이상의 데이터 검출로서 진단이 가능하며 방전진전의 말기단계인 절연파괴 직전의 단계는 Background Noise 보다 평균전계강도가 약 7dB 이상 높아지거나 70[MHz] 부근에 40dB 이상 데이터 검출로서 판단이 가능하였다.

이러한 연구결과를 향후 보완하여 적극 활용하면 안테나를 사용하여 방사전자파를 측정·분석에 의한 초전도·극저온 전력설비의 절연진단 시스템 개발에 중요한 기초 자료가 되리라 판단된다.

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호:R01-2000-00245)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] Matumura et.al, : Method of diagnostic detection by radiated magnetic fields, Tech. Report of IEE Japan, HV83-52, 1983.

[2] B. F. Hampton and R. J. Meats: Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations , IEE Proc., 135, Pt. C, No.2, 1988.

[3] K .Arai, X.Guoxiang and O. Sugimoto: Micro-gap discharge waveshapes and radiated electromagnetic waves in atmospheric air and sulphur hexafluoride gas ,Trans. of IEE Japan, Vol.109-A, No.3, pp. 103-110, 1989.

[4] P. F. Wilson and M. T. Ma: Field radiated by electrostatic discharges , IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 33, no. 1, pp. 10-18, Feb. 1991.

[5] O. Fujiwara: An analytical approach to model indirect effect caused by electrostatic discharge , IEICE Trans. Commun., vol. E79-B, no. 4, Apr. 1996.

[6] Y.Takahashi, "Diagnostic Measurements at UHF in Gas Insulated Substation", IEE proceeding Vol. 135, PT.C, No2, March 1988, pp 137~145.

[7] 한국공업표준협회, " 전기·전자기기의 전자파장해 - KS C 0262 ", 1992

[8] Ki-Chai Kim, Kwang-Sik Lee and Dong-In Lee, "Estimation of ESD current waveshapes by radiated electromagnetic fields" IEICE Trans. commun., Vol.E83-B, No.3, pp.608-612, March 2000.