

## 원자력 발전소의 전자기파 환경 분석

### Survey on Electromagnetic Environments of Nuclear Power Plants

황인구, 이동영, 차경호

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

정학영, 신만호

한국전력 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

본 논문은 국내 일부 원자력 발전소에서 측정된 복사방출전자기파세기(Radiated Emission) 및 전력선의 전도방출전기잡음분포(Conducted Emissions)의 측정결과에 관해 기술하고 이 측정결과를 미 전력연구소(EPRI)와 ORNL 에서 조사된 결과와 비교하여 현재 적용하려는 규제 지침 RG-1.180 의 내성시험기준(Operating Envelope)적용의 적합성을 확인하였다. 국내 발전소의 데이터는 고리, 영광, 울진, 월성의 일부 호기들로부터 한국원자력연구소, 한국원자력안전기술원, 한국전력 전력연구원, 한국전력기술(주) 등이 자체적으로 혹은 Wyle Lab. 등에 의뢰하여 측정한 것이다. 대부분의 경우 측정방법은 MIL-STD-462D 의 측정방법을 준용하였으나, 전도성 잡음의 경우에는 전류 Clamp 만으로 모든 측정 주파수 대역을 측정하였다. ORNL 은 자체적으로 제작된 무인 EMI 측정기를 사용하여 장기간에 걸쳐 측정하였다. 측정된 결과는 주파수 영역별로 스펙트럼 그래프로 국내외 데이터를 해당 내성시험기준과 함께 표시하여 용이한 비교를 할 수 있도록 하였다. 국내 발전소의 포괄적인 전자기환경을 확인하기 위해서는 좀더 추가적이고 광범위한 측정을 수행하여 전자기 환경 데이터를 축적함으로써 측정 데이터의 신뢰성과 유용성을 높여가는 것이 요구된다.

#### Abstract

This paper presents the result of the electromagnetic site survey conducted in Korean nuclear power plants. The measured data have similar patterns and strength levels with other survey result of EPRI and ORNL for US plants. It indicates that the operating envelopes of Regulatory Guide 1.180 is appropriate for the surveyed plants. The domestic data are the noise levels gathered from some of nuclear power units in Kori, Yonggwang, Ulchin and Wolsung by KAERI, KEPRI, KINS, KOPEC with support of testing laboratories such as Wyle Lab. and KTL. Although the measurement was performed according to MIL-STD-462D, the conducted emissions were mostly measured by a current probe through the entire frequency range. The measured values and profiles of the electromagnetic noise were represented on the frequency domain graphs with the related the equipment susceptibility level requirements such as Regulatory Guide 1.180 and EPRI guidelines. It is recommended that more plant-wide measurements should be carried out to identify the electromagnetic environments of nuclear plants and to build up the more reliable and various database.

## 1. 서론

원자력 발전소의 전자기환경 조사 혹은 측정(Electromagnetic Site Survey)은 디지털 안전기기를 교체 혹은 새로 도입하는 경우 디지털기기의 전자기파 내성이 설치되는 장소의 전자기환경보다 충분히 높다는 것을 증명하기 위해 사안별로 수행되어 왔다[1]. 국내 발전소의 경우 고리 1 호기 원자보호보호계통을 디지털기로 교체하기 위해서 주제어실 옆 기기실의 전자기환경 측정이 Wyle Lab 에 의뢰하여 한국전력기술(주)에 의해서 수행되었다[2,3]. 그러나 최근 미 전력연구소(EPRI: Electric Power Research Institute)와 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)등에서 신규 디지털기기의 대부분의 경우에 적용될 수 있는 일관된 EMI(Electromagnetic Interference) 기기검증기준 및 방안을 마련하기 위하여 미국의 다수 발전소에 대해 전기잡음의 강도를 측정하였다[4,5]. 이 전자기파 측정데이터와 다른 군사 및 산업규격을 기반으로 전자기환경 인허가 요건인 Regulatory Guide 1.180 과 EPRI TR-102323 이 작성 공표되었다[5,6,7].

이 논문은 한국전력 전력연구원(KEPRI)과 한국원자력연구소가 공동으로 측정한 월성원자력 2 호기[8] 및 고리 2 호기 방사선 감시기에 대한 측정결과와 원자력안전기술원 및 한국수력원자력(주)등이 측정한 국내 원전의 전자기 잡음강도[2,3,9]를 EPRI 와 ORNL 데이터와 비교 분석함으로써 국내 발전소의 전자기 환경 크기 정도를 확인하고 미국 인허가요건인 EPRI TR-102323 과 RG-1.180 의 적용성을 평가한다. 논문의 2 절은 전자기 환경 측정방법과 관련 기준을 기술하고 3 절은 측정된 데이터를 TR-102323 과 RG-1.180 의 기기 전자기 내성 시험수준과 함께 비교 분석하였다.

## 2. EMI(Electromagnetic Interference) Site Survey 개요

전자기환경(Electromagnetic Environment)은 전도(Conducted) 및 복사(Radiated)잡음의 수준을 주파수영역별 첨두치(Peak) 혹은 실효치(RMS : Root Mean Square)의 스펙트럼 형태로 나타낸다. Site Survey 를 위한 잡음측정 방법은 MIL-STD-462D[11]의 측정항목 CE101, CE102, RE101, RE102 를 적용하여 표 1 과 같은 주파수 범위로 측정한다.

표 1. 시험항목

시험항목	주파수범위	측정 지점	측정 단위
CE101: Conducted Emissions	30 Hz – 10 kHz	Power Leads	[dB $\mu$ A]
CE102: Conducted Emissions	10 kHz – 10 MHz	Power Leads	[dB $\mu$ V]
RE101: Radiated Emissions (Magnetic field)	30Hz – 100 kHz	기기 설치예상지점 혹은 최대 발생 예상 지점	[dBpT]
RE102: Radiated Emissions (Electric Field)	10kHz – 7GHz	다수 지점	[dB $\mu$ V/m]

표 1 에서 CE102 의 경우 MIL-STD-462D 는 전압단위를 명시하고 있지만 Site Survey 를 위해서는 대개 전류 프로브(probe)에 의한 dB $\mu$ A 단위로 측정한다. 이것은 측정할 때 선로의 단자 등에 직접 접촉할 필요가 없이 케이블의 바깥에 클램프를 걸기만 하면 되기 때문이다. 그림 1 과 그림 2 는 각각 전도방출 및 복사방출 전자기 잡음 측정을 위한 기기 배치도를 나타낸 것이다. 전계강도를 측정하는 RE102 의 경우는 측정 주파수의 범위가 매우 넓으므로 주파수 영역별로 여러 개의 안테나가 필요하다. 따라서 7GHz 까지 측정하려면 4 개 정도의

안테나들을 바꾸어 가면서 측정하여야 한다. 그림 2는 두개의 안테나를 EMI Receiver의 입력 1과 입력 2 단자에 연결하여 한번에 두개의 안테나가 사용될 수 있도록 설정한 것으로써 한번의 안테나 교체로서 넓은 주파수역의 측정이 될 수 있는 장점이 있다.

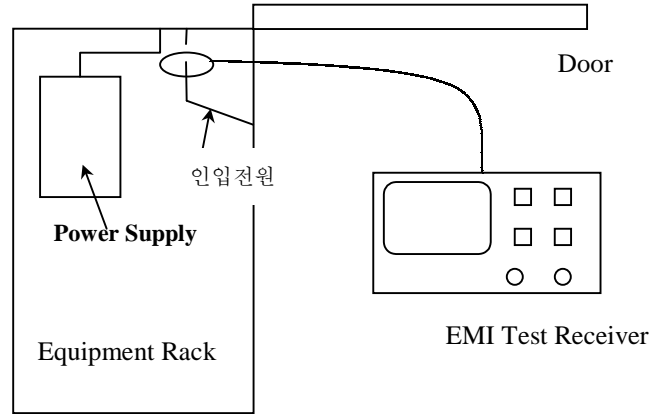


그림 1. 전류 Probe 를 사용하는 전도성 전자기 잡음 측정 배치도

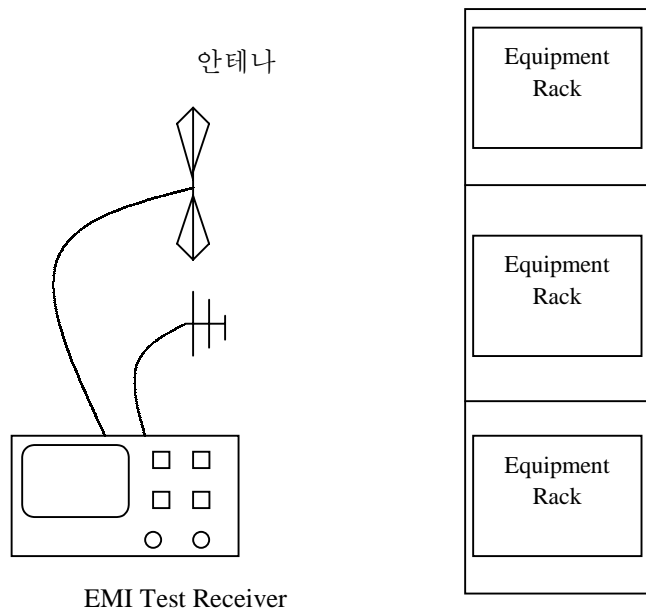


그림 2. 안테나를 사용하는 복사 전자파 강도 측정도

## 2.1. ORNL 및 EPRI 데이터

EPRI는 기기교체나 신규 설치시 실시해야 하는 설치장소에 대한 전자기환경 조사의 비용과 인력 부담을 줄이고, 모든 발전소에서 일관성 있게 적용하는 전자기파 시험표준을 확립하기 위해서 7개의 미 발전소에 대하여 1993년 전자기 환경을 측정하였다. 전도잡음의

경우 저주파영역(30Hz -15 kHz) 과 고주파영역(15kHz - 50MHz)을 전원선과 장비간 연결 케이블 및 도체에 대하여 전류 프로브를 사용하여 측정하였고, 복사방출잡음은 저주파영역(30Hz - 50kHz)은 자기장의 세기(magnetic field)를 고주파영역(14kHz - 1GHz)은 전기장의 세기를 측정하였다. 발전소에 따라 중앙제어실, 터빈테크, 스위치 기어 건물, 원격정지 판넬, 디젤발전기 건물, 케이블 배선 장소, 등의 위치에서 전자기파 세기를 측정 수집하였다.

ORNL 은 자체 제작한 무인 전자기환경 측정기를 이용하여 미 8 개의 발전소로부터 전자기 환경을 14 개월에 걸쳐 측정하였다. 장기간의 특수제작 EMI 수신기를 사용한 것은 IEEE Std. 473 이 전자기 환경 조사기간을 14 일로 권고하고 있고, 전자기의 불규칙 특성으로 인하여 단기간의 ‘Snapshot’형태의 측정결과는 전자기 환경의 ‘Worst Case’를 제대로 반영할 수 없다고 보기 때문이었다. ORNL 또한 전도방출잡음과 복사방출잡음 두 가지 모두에 대하여 측정하였으나, 주파수 범위에 있어서는 전도방출의 경우 305Hz 부터 5MHz 를 측정하였고, 복사방출의 경우는 자기장의 세기를 마찬가지로 305Hz 부터 5MHz 의 주파수 영역에 대해 조사하고, 전기장의 세기는 5MHz 부터 1GHz 의 영역을 측정하였다. ORNL 은 자기장 스펙트럼 수신기와 전기장 스펙트럼 수신기의 두 종류 장비를 이용하였고, 전도방출의 경우는 자기장 스펙트럼 수신기를 이용하였다.

## 2.2. 국내 발전소의 EMI 측정

국내 발전소의 전자기 환경 Site Survey 는 1994 년 Wyle Lab 에 의뢰하여 영광 3 호기가 전자기 환경을 측정 한 이래 1997 년 고리 1 호기, 2000 년에는 울진 3 호기와 월성 2 호기가 측정을 실시하였다.

영광 3 호기는 주제어실과 두 개의 계기실, 그리고 스위치기어실의 총 11 군데를 선정하여 복사 전기장방출을 측정하였다. 측정결과는 주제어실 및 스위치기어실보다 계기실의 ILS(Interposing Logic System) 주위에서 강한 전계가 분포하고 있었으나 최대값이 120db $\mu$ V/m 를 넘지는 않았다.

고리 1 호기는 디지털 보호계통을 디지털 제어기기인 Micro Spec 200 으로 교체하기 전 교체장소의 전자기파 환경조건을 규명하기 위하여 한국전력기술(주)이 Wyle Lab.에 의뢰하여 저주파 및 고주파 전도잡음, 그리고 복사전기장방출의 세 영역을 측정하였다. 복사전기장방출의 경우 최대 측정치는 50kHz - 90kHz 영역에서 100 db $\mu$ V /m 정도였다.

울진 3 호기의 경우는 2000 년 한국원자력안전기술원, 한국원자력연구소, 한국산업시험원, 울진원자력본부가 공동으로 계기실의 PCS(Plant Control System)과 CPCS(Core Protection Calculator System)캐비닛의 전원 인입선에 대한 전도방출잡음을 2 주간에 걸쳐 취득하였다.

월성 2 호기의 경우 한국전력 전력연구원과 한국원자력연구소에 의해 월성원자력본부의 요청으로 계기실의 공중파 즉 복사 전기장방출의 크기를 중심으로 현장측정이 이루어졌다. 이때 계기실의 자기장 세기 및 DCC(Digital Control Computer)의 전원인입선 전도잡음도 일부 함께 측정하였다. 또한 고리 2 호기의 RMS(Radiation Monitoring System)의 고장정비과정에서 접지선과 일부 신호선에 대한 전도성 잡음스펙트럼도 위의 두 기관에서 취득한 바 있다.

## 3. 전자기 환경의 비교 평가

EPRI 와 ORNL 의 미국 원자력 발전소에 대한 전자기 환경 데이터와 지금까지 국내원자력 발전소가 취득한 전자기파 측정 분포 중 가장 최대로 측정된 값들로만 그래프를 작성하여 각 주파수와 전자기파 종류별로 네 개의 그림(그림 3. - 그림 6.)으로 나타내었다. 또한 발전소의 측정데이터와 더불어 EPRI TR-102323 과 RG-1.180 에서 요구하는 안전기기의 전자기 내성시험허용기준을 함께 표시함으로써 이 시험기준과 현장 전자기 환경간의 여유도를 스펙트럼상에서 볼 수 있도록 하였다.

그림 3 의 그래프는 저주파영역에 대한 전도방출을 측정 데이터별로 최고점분포(envelope)를 표시하여 비교한 것이다. 그림에서 EPRI 라고 표시된 실선은 EPRI 가 7 개의 발전소에서

측정한 전자기 잡음 데이터 중에서 최고점을 포함하는 선이고, ORNL 이라 쓰인 것은 ORNL 이 측정한 데이터의 최고치 분포이다. 국내 발전소의 경우는 측정기관 대신 대상 발전소 호기를 표시하였다. 이러한 표시는 그림 4,5,6 에서도 같은 방식으로 표시하였다.

그림 3 에서는 고리 1 호기 및 월성 2 호기, 그리고 EPRI 가 측정한 데이터가 다른 발전소의 것보다 다소 높은 편이지만 모두 내성시험허용기준인 142db $\mu$ A 보다는 10db $\mu$ A 이상 여유가 있다.

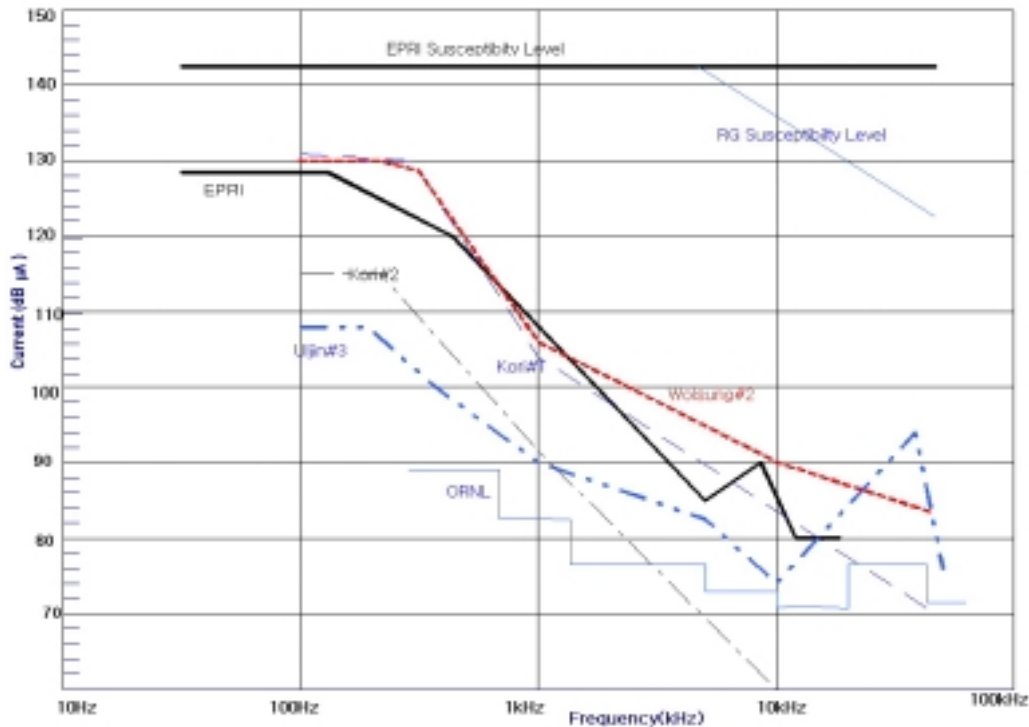


그림 3. 저주파영역의 전도방출 잡음분포비교 그래프

그림 4 는 고주파 영역에 대한 전도방출을 측정데이터별로 표시한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 전자기환경 측정치들이 MIL-STD-461D 의 내성시험허용기준을 넘어서고 있다. 따라서 원자력발전소에 적용할 계측제어기기의 고주파영역 내성시험기준은 MIL-STD-461D 의 시험허용기준보다 강화되어야 한다. EPRI 와 RG-1.180 은 이를 반영하여 103db $\mu$ A 의 내성시험기준을 요구하고 있다. 그러므로 원전 전자기파 기기검증 시험에서는 MIL-STD-461D 의 CS114 시험허용수준을 적용하지 말고 EPRI 혹은 RG-1.180 에서 명시한 수준 이상의 크기로 시험해야 한다.

그림 5 는 자기장의 최고치 분포를 나타낸 것이다. 국내 발전소의 전자기 환경 측정데이터 중에는 월성 2 호기의 계기실에 있는 120V Power Distribution Panel 뒷편의 50cm 떨어진 지점에서 계측한 것이 있다. 그림 5 의 EPRI 데이터는 디젤발전기가 운전되고 있는 상태에서 디젤제어판넬 부근의 자기장 분포이다.

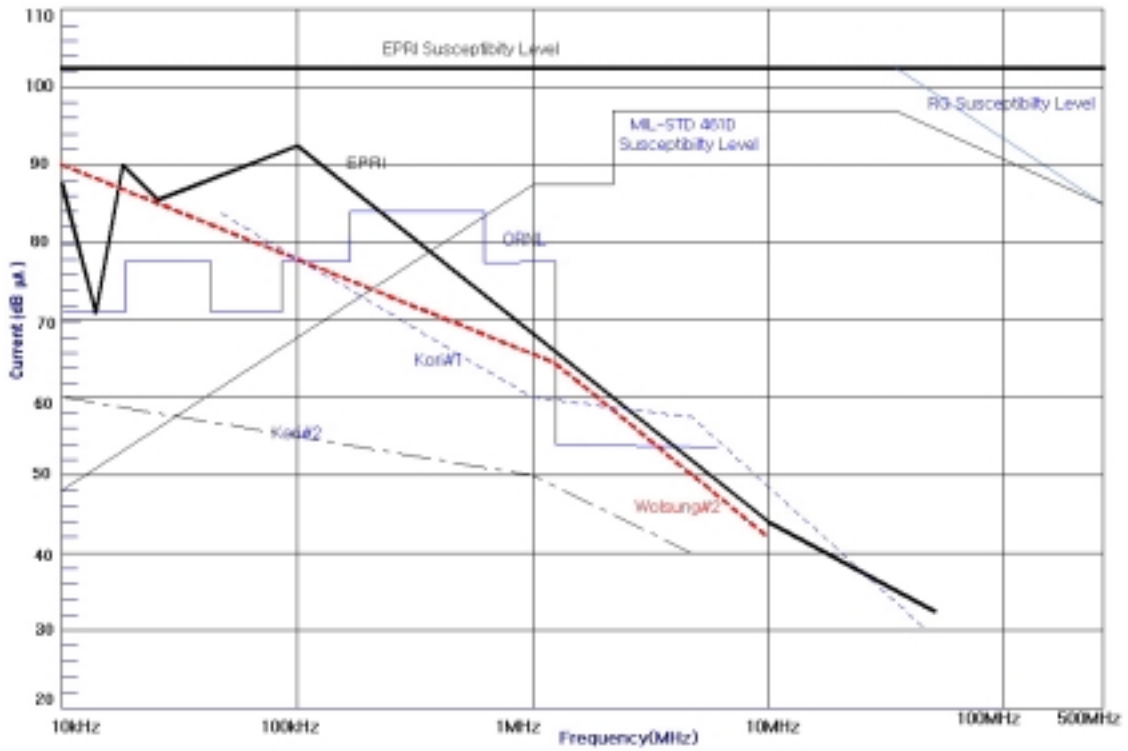


그림 4. 고주파영역의 전도방출 잡음분포비교 그래프

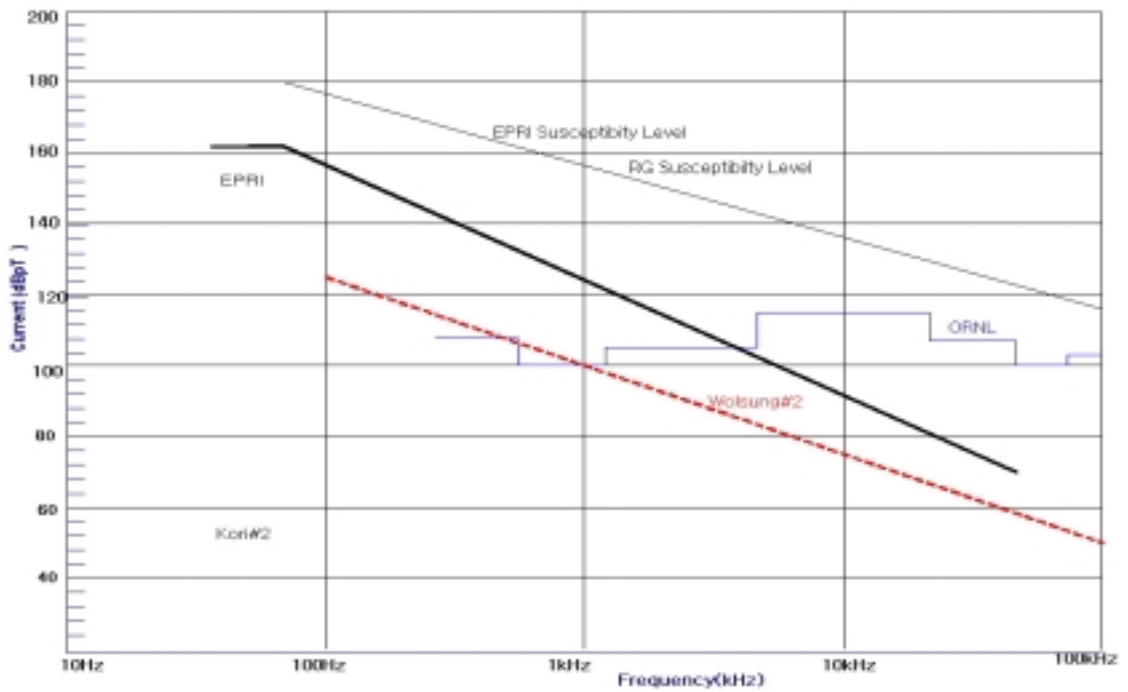


그림 5. 자기장(magnetic field)의 비교

그림 6은 전기장의 최고치 분포를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전기장의 분포는 각 발전소마다 그 크기와 양상이 서로 차이가 많이 난다. EPRI 데이터 중에서 100MHz-1GHz 영역에서의 큰 수치는 고의적으로 부근에서 발전소의 유지보수활동 중에 사용되는 휴대용 무선기를 작동한 경우의 측정치이다. 휴대폰 혹은 휴대용 무선기 등은 매우 큰 전파를 방출하여 그 크기가 EPRI TR-102323과 RG-1.180이 명시한 고주파 전기장에 대한 내성시험 기준 140dB $\mu$ V/m를 넘어선다. 따라서 위의 두 인허가문서는 각 발전소에서 휴대용 무선기 같은 강한 전자기 발생원을 적절한 금지 수칙을 세워 통제하도록 요구하고 있다.

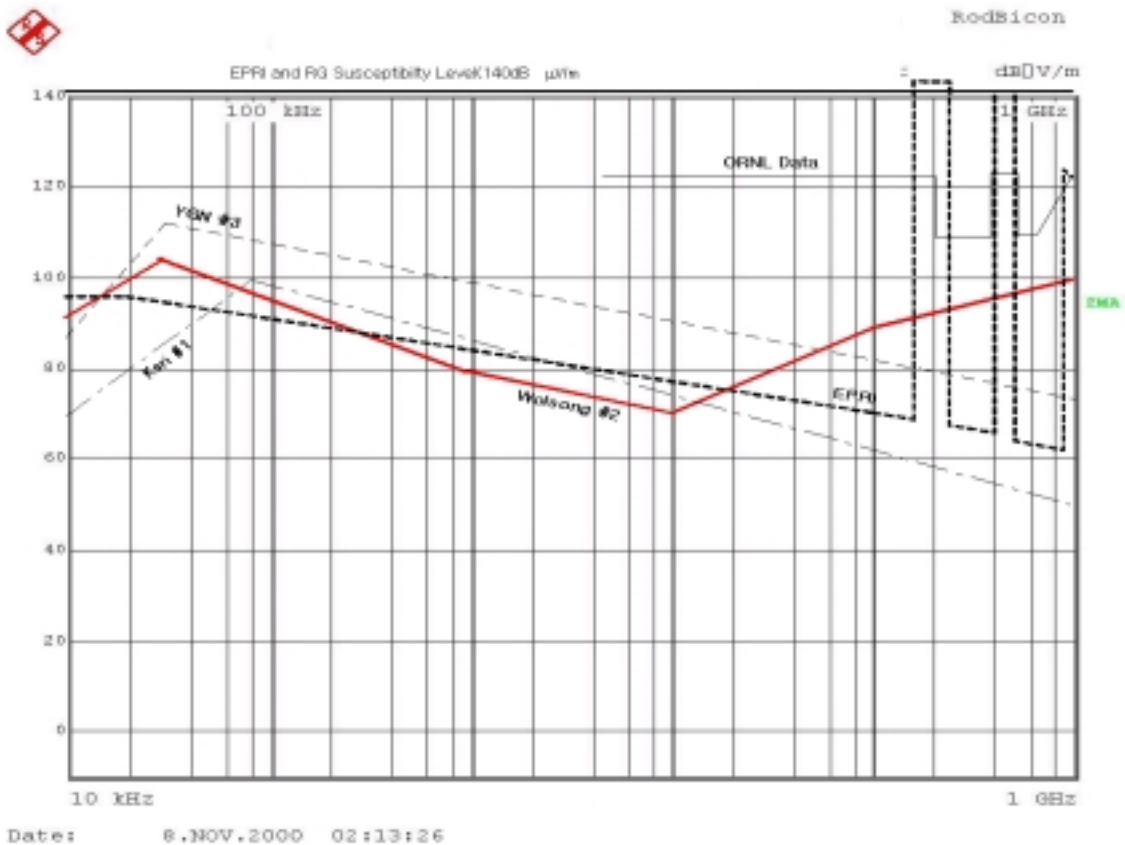


그림 6. 전기장의 세기분포 비교 그래프

#### 4. 결론

국내외 전자기 환경 데이터를 비교 평가한 결과 국내 발전소의 경우도 미국 발전소의 측정치와 비슷함을 알 수 있다. 1kHz 이하의 저주파 영역 전도방출 잡음의 크기는 대부분 전원 주파수의 기수 고조파 성분으로 인하여 기인된다. 이것은 발전소 전원의 품질이 향상되면, 즉 인버터, 및 AC 전원공급계통의 성능이 개선되어 가면, 이 저주파영역의 크기는 더욱 줄어들 것이다.

최근에 NRC에서 공표된 Regulatory Guide 1.180에서 명시하는 안전기기의 내성 시험기준은 국내 전자기 환경조건을 고려할 때 충분한 여유와 기술적인 근거를 가지고 있으므로 이를 적용하여 전자기파(EMI)검증 시험을 수행하는 것은 문제가 없다.

월성 1 호기 전기장 복사방출측정은 1 개월에 걸쳐 장소를 변경하면서 실시되었다. 이 측

정 데이터의 특징 중 하나로서 전자기파의 분포특성(Profile)이 시간 보다는 주로 측정 장소에 따라 더 많이 달라짐을 알 수 있었다.

국내 원자력 발전소에 대한 전자기 환경 측정은 원자력 발전소의 전자기파 장애(EMI)에 대한 적합성을 확인하는 하나의 중요한 정보이므로 종종 Site Survey 를 통하여 그 변동 추이를 살펴보는 것이 필요하다.

### Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업 일환으로 수행되었음.

### 참고문헌

- [1] Lee, E.J., "Understanding of EMI/RFI and Digital Updates," *The American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human Machine Interface Technologies*, Pennsylvania State University, USA, Volume II, pp. 1181-1187. 1996
- [2] Wyle Lab., Electromagnetic Interference(EMI) Test Report of A Site Survey at Kori #1 MCR Plant in Koea, 1998
- [3] 구철수, 외 "원자력발전소 전자기 환경," '99춘계원자력학회 학술발표회, 포항, 1999
- [4] Stephen W. Kerchel, "Survey of EMI Ambient Levels in Nuclear Power Plants," *The ANS International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human Machine Interface Technologies*, Pennsylvania State University, USA, Vol. II, pp.1181-1187, 1996.
- [5] EPRI-TR-102323-R1, Guidelines for Electromagnetic Interference Testing in Power Plants, Rev.1, EPRI, January 1997
- [6] Regulatory Guide 1.180, Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio-frequency Interference in Safety-related Instrumentation and Control Systems, NRC, January 2000
- [7] NUREG/CR-6431, Recommended Electromagnetic Operating Envelopes for Safety-Related I&C Systems in Nuclear Power Plants, ORNL, NRC, January, 2000
- [8] 황인구, 외 "월성 2호기 전자기 환경 측정 및 분석," 2001 원자력춘계 학술발표회, 2001.5
- [9] Wyle Lab. Electromagnetic Interference(EMI) Test Report on the Site Mapping of the Control and Equipment Room at Yonggwang Nuclear power Plant Unit 3, Wyle Laboratories, 1994.4.
- [10] MIL-STD-461D, Requirements for The Control of Electromagnetic Interference Emissions and Susceptibility, Department of Defense, January 1993.
- [11] MIL-STD-462D, Test Method Standard for Measurement of Electromagnetic Characteristics, Department of Defense, January 1993.