

원전 안전관련 계측기기의 써지 잡음 시험기준 평가

**Evaluation of Surge Test Criteria Applicable to Safety-related
Instrumentation in Nuclear Plants**

윤 원영, 구 철수, 윤 문원

한국 원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

본 논문에서는 원전 안전관련 계측기기의 써지 잡음 시험기준으로 사용되는 Mil-Std 461D CS 116 과 IEC 1000-4-5 의 내용을 비교 분석하였다. 본 연구의 목적은 각 각의 시험기준에 제시된 써지 잡음 발생기, 신호 결합기/감 결합기 및 실험장치 구성을 비교 평가함으로써 국내 차세대 원전 규제요건 설정의 기술적 근거를 제시하기 위함이다. 분석 결과 IEC 1000-4-5 기준의 시험 내용이 Mil-Std 461D CS 116 기준의 시험 내용에 비하여 디지털계통 써지 잡음 성능검증에 적합함을 확인하였다.

Summary

In this paper, the MIL-Std 461D CS 116 and the IEC 1000-4-5 which have been used as electrical surge test criteria for safety-related instrumentation in nuclear plants are evaluated. The purpose of this study is to suggest a technical basis for the establishment of a regulatory position applicable to the safety related digital instrumentation involved in the Korean next generation reactor. For this purpose, the surge generator, signal coupler/decoupler and test facility set-up described in each standard are comparatively evaluated. Result shows that the IEC 1000-4-5 is more practical than the MIL-Std 461D CS 116 for verifying the surge immunity of the digital system.

1. 서론

1.1 개요

써지 잡음이란 계측기기의 신호 선로 또는 전원공급 선로에 외부로부터 전자계 간섭현상에 의한 순간적인 과도 전압/전류가 유입되는 것을 의미하며 이는 계측기기의 오 동작과 고장을 유발하는 주 요인으로 알려져 있다. 써지 잡음의 발생요인은 대기 중에 발생하는 낙뢰와 같이 자연 발생적인 것과 발전소 내 고압 계전기의 작동, 고압 방전 전류의 흐름 등과 같이 인공 발생적인 것이 있다. 이들 잡음의 특징은 발생 시기와 발생 파형의 형태를 예측하기 어렵다는 것이며 1 회 발생으로

도 계측기기의 운전에 치명적인 영향을 줄 수 있다는 점이다. 국내 원전의 경우에도 썬지 잡음 발생에 의한 계측 기기 고장이 간헐적으로 발생되고 있으며 특히 1984년 고리 2호기에서는 전기 용접기 사용으로 발생한 썬지 잡음에 의해 수차례 원자로 제어봉이 낙하되는 사례를 경험한 바 있다.

본 연구에서는 현재 원전 안전기기의 썬지잡음 검증시험 기준으로 널리 적용되고 있는 Mid-Std 461D CS 116 시험 내용과 IEC 1000-4-5 시험 내용을 비교, 분석함으로써 디지털 계측제어 계통설계에 대한 국내 규제기준 설정 방향을 제시하였다.

1.2 썬지 잡음원의 특성

썬지 잡음원을 전기적 특성에 따라 분류하면 과도 전압원(Transient Voltage Source)과 과도 전류원(Transient Current Source)으로 구분되며 보유 에너지 특성에 따라 분류하면 감쇄형 발진파(Ring Wave)와 복합형 임펄스파(Combination Wave)로 구분되어진다. 이 중 과도 전압원의 경우에는 전류의 량이 적은 경우에도 고 임피던스 계측기기에 민감하게 작용하여 과도 전류원의 경우에는 전위가 낮은 경우에도 저 임피던스 계측 기기 운전에 상당한 영향을 주게 된다. 또한 감쇄형 발진파의 경우 일반적으로 보유에너지가 크게 나타남으로서 계측기기의 손상을 유발시키며 복합형 임펄스 파의 경우 고주파 성분에 의한 계측 기기 오 동작을 유발하게 된다.

2 상세 시험내용 비교

2.1 잡음 신호발생기 (Surge Generator)

현장에서 발생하는 썬지 잡음의 수식적 표현은 일반적으로 다음과 같은 4가지 형태로 나타낼 수 있다.

$$V(t) = V_p [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_1})] \exp(-\frac{t}{\tau_2}) \cos(\omega t) \dots \dots \dots (1)$$

$$I(t) = I_p \exp(-\frac{t}{\tau_3}) \sin(\omega t) \dots \dots \dots (2)$$

$$V(t) = V_p [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_4})] \exp(-\frac{t}{\tau_5}) \dots \dots \dots (3)$$

$$I(t) = I_p t^3 \exp(-\frac{t}{\tau_6}) \dots \dots \dots (4)$$

위의 내용에서 식 (1), (2)는 감쇄형 발진파(Ring Wave, Damped Oscillation Wave)를 나타낸 것이며 식 (3), (4)는 복합형 펄스파(Combination Wave)를 나타낸 것이다. 감쇄형 발진파의 경우는 썬지 잡음원이 비교적 계측기로부터 먼 곳에서 인가되어 계측기기 선로를 통하여 전달되는 경우에 나타나는 형태이며 복합형 펄스파의 경우는 썬지 잡음원이 계측기에 근접한 곳에서 발생되어 직접 전달된 형태를 의미한다. 따라서 실제 현장조건을 정확히 구현하기 위하여는 각각의 파형

에 대한 다양한 세기 및 시정수를 고려한 시험이 수행되어야 한다.

그러나 이러한 조건을 모두 적용하는 것은 현실적인 제약이 따르게 되므로 대개의 경우 위의 내용 중 대표적인 파형에 대한 시험만을 수행하게 된다. 이러한 측면에서 Mil-Std 461D CS 116 에서는 10 KHZ ~ 100 MHZ 주파수에 대하여 식 (2)의 감쇄형 발진파를 인가하는 방법을 규정하고 있으며 IEC 1000-4-5 에서는 식(3)으로 표시되는 복합형 펄스파를 분 당 1 회의 반복율로 인가하는 방법을 규정하고 있다. 또한 신호 파형의 최대 크기에 대하여도 Mil-Std의 경우에는 그림 1과 같이 신호 주파수에 따른 제한치를 적용하도록 요구하는데 비하여 IEC-Std의 경우에는 피측정 기기의 설계내용 및 설치환경에 따라 0.5 KV, 1 KV, 2 KV, 4 KV 로 서로 다른 준위의 값을 선택적으로 적용할 수 있도록 규정하고 있다. 각각에 대한 잡음신호 발생기 파형과 시험준위 적용 내용은 표 1, 2 에 나타내었다.

1. 잡음신호 발생기 출력특성 비교

Mid-Std 461D CS116	IEC 1000-4-5
적용함수 식 (2)	적용함수 식 (3)
$\tau_3 = 0.05 \mu \text{ sec} \sim 500 \mu \text{ sec}(5/f)$	open-circuit voltage
$\omega = 2\pi \times 10^4 \text{ rad/sec} \sim 2\pi \times 10^8 \text{ rad/sec}$ (10 KHz, 100 KHz, 1 MHz, 10 MHz, 30 MHz, 100 MHz)	$\tau_4 = 0.4074 \mu \text{ sec}$
$I_p = 10/5 \text{ Amp (Air Force/Army \& Navy)}$ for 1 MHz ~ 30 MHz 기타 주파수 대역은 그림(1) 참조	$\tau_5 = 68.22 \mu \text{ sec}$
허용오차 = $\pm 10 \%$	$V_p = 0.5 \text{ KV} \sim 4.0 \text{ KV}$ 기기 등급에 따라 차등적용 상세 내용은 표 (2) 참조
	반복율 = 1 per min
	허용오차 = $\pm 10 \%$

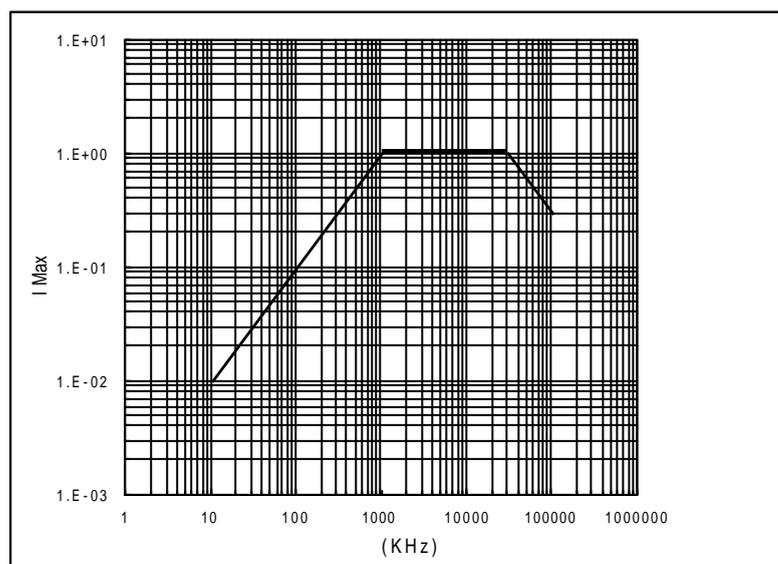


그림 1. CS 116 Limit

표 2. 계측기기 설치조건에 대한 시험준위(IEC 1000-4-5)

설치등급	시 험 준 위(V ₀ KV)					
	전원 공급기		현장 신호선로		계측회로	
	선로간	선로-접지	선로간	선로-접지	선로간	선로-접지
0	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1	NA	0.5	NA	0.5	NA	0.5
2	0.5	1.0	0.5	1.0	NA	1.0
3	1.0	2.0	1.0	2.0	NA	2.0
4	2.0	4.0	2.0	4.0	NA	2.0
5	S	S	2.0	4.0	NA	4.0

- 주 : S : 전원 공급기 등급에 따라 별도 지정
 등급 0 : 전자계 간섭에 영향을 받지 않는 설치환경
 등급 1 : 외부로부터 적절히 보호되는 설치환경
 등급 2 : 선로격리가 적절히 유지되는 설치환경
 등급 3 : 선로가 평행하게 통과하는 설치환경
 등급 4 : 신호선과 전원선이 교차되는 설치환경
 등급 5 : 신호선과 통신선, 전원선이 교차되는 설치환경

2.2 신호 결합기/감 결합기 (Coupler/Decoupler)

신호 결합기의 설치 목적은 신호발생기와 피측정 기기 간에 적절한 전기적 격리를 유지하면서 신호발생기 출력신호를 피 측정기기에 전달하기 위함이다. 따라서 신호 결합기의 회로 특성은 발생신호 성분을 정확하게 전달할 수 있어야 하며 시험 전 후에는 신호 결합기 설치로 인한 피 측정 기기 운전에 지장을 초래하지 않아야 한다. 신호 결합기의 연결 방식은 그림 2 에 나타낸 바와 같이 직렬 결합방식(Series Coupling)과 병렬 결합방식(Shunt Coupling)이 있다.

신호 감 결합기의 설치 목적은 신호발생기 출력 전압 또는 전류가 피 측정 기기 이외의 방향으로 전달되어 주변 기기에 영향을 주는 것을 차단하기 위한 것으로 설계 내용은 고주파 차단 특성이 우수한 주파수 필터회로 또는 소자로 구성되어 있다.

Mil-Std 461D CS 116 에서는 직렬 결합방식에 의한 정현파 신호잡음을 인가하는 것으로 나타나 있으나 신호 결합기에 대한 구체적인 규격이 제시되고 있지 않다. 그러나 신호 감 결합기 회로의 경우 그림 3 에 나타낸 바와 같이 Hybrid 회로 형태의 고주파 차단필터(선로 임피던스 안정화 회로망 : LISN)를 규정하고 있다. 이에 비하여 IEC 1000-4-5에서는 박막형 Capacitor 또는 Capacitive Coupling Device를 사용한 병렬 결합방식을 규정하고 있으며 신호 감 결합기로서는 코일형 Inductor 또는 고주파 차단 특성이 우수한 Ferrite 소자를 채택하고 있다. 각각에 대한 상세 내용은 표 3 에 나타내었다.

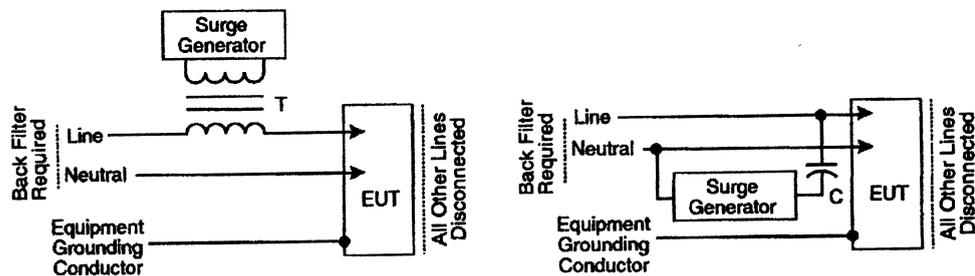


그림 2. 직렬신호 결합 및 병렬신호 결합

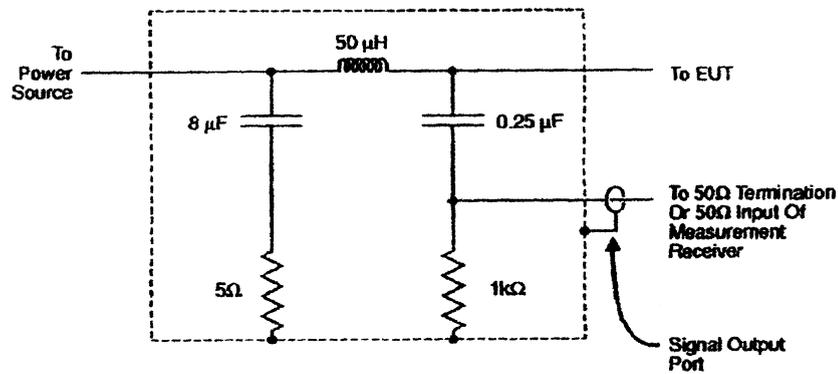


그림 3. MIL-Std 선로 안정화 회로망(LISN)

표 3. 신호결합기/감결합기 설계 내용 비교

Mil-Std 461D CS 116	IEC 1000-4-5
신호 결합방식 : 직렬 신호결합	신호 결합방식 : 병렬 신호결합
신호 결합기 : 상세 규격에 대한 기술이 없음	신호 결합기 :- Coupling arrester -Coupling capacitor 1 MF/ 18 MF(전원공급기)
입력 임피던스 : 50 Ω (고정값)	입력 임피던스 : 10/40 Ω (기기 특성에 따라 선택)
신호 감결합기 : - Hybrid Network 그림 3 LISN 참조	신호 감결합기 :- Decoupling Inductance 1.5 mH (전원공급기) 20 mH (신호 선로) - Ferrite

2.3 시험장치 구성(Test Setup)

피측정 기기에 대한 써지 잡음 검증시험을 수행하기 위하여는 특수 설계된 실험실 또는 보호시설 내에 시험장치를 배치하여야 한다. 이는 외부로부터 불필요한 전자계 잡음을 차단하여 시험 결과의 신뢰성을 증진시킴과 동시에 시험 수행과정에서 발생할 수 있는 과 전류 흐름에 의한 화재 또는 폭발에 대비하기 위함이다. 또한 시험구역 내에는 시험 목적 이외의 불필요한 도구나 기기 등이 제거되어야 하며 피 측정기기 또는 시험선로 간에는 충분한 간격이 유지되어야 한다. 이를 위하여 시험구역 내에는 충분한 크기의 실험탁자를 설치하게 되며 이러한 사항은 각 각의 기술기준에서 별도로 지정하고 있다. 표 4 에는 Mil-Std 461D CS 116과 IEC 1000-4-5에 기술된 시험장치 구성 요건을 나타내었다.

표 4 시험장비 구성요건 비교

Mil-Std 461D CS 116	IEC 1000-4-5
<p>시험실 조건 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 전자계 차폐 재질 사용 - 실제 설치 조건과 유사한 재질 또는 금속 접지면 사용(바닥면) - 실내 온도, 습도, 압력 조건에 대한 별도 규정이 없음. <p>피 측정기기 선로 배치</p> <ul style="list-style-type: none"> - 실제 설치조건과 동일하거나 최소 2m 이상 선로배치 - 개별 선로간 2 cm 이상 이격 - 전원선로에 신호 감결합기 설치 (2.5m 이내) - 전원 선로와 접지면 간 5cm 이상 이격 	<p>시험실조건 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 전자계 영향이 없는 지역 금속 접지면 사용 (바닥면) - 실내온도 : 15°C ~ 35°C - 실내습도 : 10 % ~ 70 % RH - 실내 압력 : 86 K Pa ~ 106 K Pa <p>피 측정기기 선로 배치</p> <ul style="list-style-type: none"> - 시험장비 및 선로 구성은 제작사 사양에 따라 설치 - 전원 선로/신호선로에 신호 감결합기 설치 (2m 이내)

3. 결론

이상에서 기술한 내용을 요약하여 정리하면 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다. Mil-Std 의 경우 자연 발생적인 낙뢰 신호가 피측정 기기 선로를 통하여 유입되는 과도 전류원을 모의한 것으로 아날로그 방식 전력제어 기기의 견전성 확인에 적합하다. 이에 비하여 IEC-Std 의 경우 운전 중인 발전소 내에서 발생하는 스위칭 잡음 등이 피 측정 기기 선로를 통하여 유입되는 과도 전압원을 모의한 것으로 디지털 계측기기의 견전성 확인에 적합하다.

일반적으로 원전 제어실 지역에 설치된 계측 기기의 경우 철저한 접지회로 구성에 의하여 외부 유입의 잡음 신호가 엄격히 차단되고 있으므로 낙뢰 신호에 의한 영향은 경미할 것으로 평가되었다. 또한, 원전 안전관련 기기의 경우 고주파 저전압

구동 기기가 보편화되고 있으며 기기의 운전특성도 다양화되고 있으므로 보다 탄력적인 성능검증 기법의 도입이 요구되는 것으로 평가되었다.

따라서 차세대 원전 제어실 지역에 설치되는 디지털 기기의 경우 IEC 1000-4-5의 시험 방법을 적용하는 것이 바람직하며 설치 환경에 대한 시험등급은 보수적인 평가기준에 따라 결정되어야 할 것이다.

4. 참고자료

- 1 IEEE C 62.41-1991 IEEE Recommended Practice on Surge Voltage in Low-Voltage AC Power Circuits.
- 2 IEEE C62.45-1992 IEEE Guide on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage AC Power Circuits.
- 3 Mil-Std-461D Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Emission and Suceptibility
- 4 Mil-Std-462D Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics
- 5 IEC 1000-4-5 Electromagnetic Compatibility(EMC)- Part 4 : Testing and Measurement Techniques - Section 5 : Surge Immunity Test
- 6 EPRI TR-102323 Guide for Electromagnetic Interference Testing in Power Plants.