

## 발전소 계측기 생존성 평가를 위한 중요 회로 모델링에 의한 주파수 분석과 신호 개선

### Signal Improvement and Frequency Analysis by the Important Circuit Modeling Simulation for Assessment of Existing Plant Instrumentation

구길모, 김상백, 김희동, 강희영, 정용무, 김현  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150  
부천대학교  
경기도 부천시 원미구 심곡동 242

#### 요 약

발전소 계측기 생존성 평가를 위해서 개발된 방법론은 계측기기 성능을 입증하기 위한 3 단계 상황(phase)에 따라 그 대체 방법으로서 계산 지원(calculation aids) 방법을 적용할 수 있다. 이 계산지원 방법에는 회로 모델링에 의한 모의실험을 통하여 출력 지시 값을 얻게 되며, 이 출력 신호의 이상 징후 분석을 주파수 분석법을 적용하여 중대사고 환경조건에서 계측기 고장의 복잡한 시간적 진단 정보를 단순한 주파수 정보로 변환하여 얻게 된다. 이 등가회로 모의실험은 계측 기기가 비정상 판독값을 지시할 때 장비 회로 요소의 변화량을 얻게 된다. 이때 계측기 생존의 설계기준 범위는 환경의 물리적 변화량으로 이들 변화량은 일부 설정된 전기회로 R-L-C 소자의 변형 특성 값으로 변환되며 이들 소자들 값의 변화는 계측기 출력의 변화량으로 표현된다. 이러한 물리적 변화관계를 이용하여 모의실험은 중대사고 환경 조건으로부터 다양한 비정상 징후를 가지는 출력 지시 신호 및 회로 특성을 조사 및 진단하기 위해서 유용하게 사용된다. 이때 이들 등가회로는 보다 실제 회로 구성에 접근한 능동소자를 포함한 등가 회로 모델화 하였다. 또한 이들 등가회로의 출력 신호는 새로운 신호 진단 방법으로서 빠른 후리어 주파수 분석을 적용하여 실시간으로 주파수 응답 특성의 특징 축출이 가능하도록 신호 처리하였다. 다시 출력신호는 강등된 신호 복원 처리를 위해서 강등된 R-L-C 회로의 주파수 응답특성을 분석하여 그 역함수를 FIR(fine impulse response) 여파회로에 적용하여 개선된 복원 신호를 얻을 수 있었다.

#### Abstract

Signal improvement and frequency analysis by the important circuit modeling simulation for assessment of existing plant instrumentation was researched. The simulation for frequency analysis and new diagnostic of the important circuits modelling including active elements under severe accident conditions has been performed. Unlike for design basis accidents, there are inherently some uncertainties to instrumentation capabilities under severe accident conditions. Various methods to obtain information during the severe accident have been suggested. An eleven-step process for obtaining information from a malfunctioning instrument or the abnormal value of the parameter was reviewed. The circuit simulation analysis and diagnosis methods are used to assess instruments in a detail when they give apparently abnormal reading. The simulations can be useful to investigate what the signal and circuit characteristics would be similar to variety of symptoms that can result from severe environment conditions. In this paper, circuit simulations are performed for respective circuit types. Furthermore these equivalent circuit

are composed of the passive elements and active elements which were modelled equivalent to real circuit composition. Output signals were processed by the Fast Fourier Transforms technique to get frequency domain informations, new feature expulsion for abnormal signals from the malfunction instruments as a real time would be obtained.

## 1. 서론

TMI-2 사고 이후 원전 사용자와 원자력 규제위원회는 중대사고 관리에 관련한 다양한 이슈와 관련한 SECY 88-147에서 중대사고가 발생하는 동안에 발전소 기기들의 사고관리 중요성과 SECY 89-012 원자력 규제위원회의 사용자에게 대한 사고 관리계획으로 중요 요소로서 기기의 입증을 요구하였다[2]. 이 보고서는 중대사고가 발생하는 동안 발전소 기기가 생존할 수 있는 일정한 범위의 설정위한 방법론을 제시한다. 이 방법론은 중대사고 관리 지침으로, 각 발전소 시험에 의해 준비된 정보들은 다음의 항목들을 포함한다. 중대사고 관리를 위한 입증된 정보, 발전소 기기 입증에 위한 방법론의 정보 필요 설정, 예상된 파라미터 범위와 그들의 적절성 및 생존성을 결정하기 위한 대체 장비 적용 등 이들 발전소에 접근 방법과 사고 관리를 위한 정보 필요에 적절한 생존 능력 평가 등이 포함된다. 발전소 계측기 생존성 평가를 위해서 개발된 방법론은 계측기기 성능을 입증하기 위한 3 단계 상황(phase)에 따라 그 대체 방법으로 계산 지원(calculation aids) 방법을 적용할 수 있다[1]. 이 계산지원 방법에는 회로 모델링에 의한 모의실험을 통하여 출력 지시 값을 얻게 되며, 이 출력 신호의 이상 징후 분석을 주파수 분석법을 적용하여 중대사고 환경조건에서 계측기 고장의 복잡한 시간적 진단 정보를 단순한 주파수 정보로 변환하여 얻게 된다[2]. 이 등가회로 모의실험은 계측 기기가 비정상 판독값을 지시할 때 장비 회로 요소의 변화량을 얻게 된다. 이때 계측기 생존의 설계기준 범위는 환경의 물리적 변화량으로 이들 변화량은 일부 설정된 전기회로 R-L-C 소자의 변형 특성 값으로 변환되며 이들 소자들 값의 변화는 계측기 출력의 변화량으로 표현된다. 본 논문에서는 이러한 물리적 변화관계를 이용하여 모의실험은 중대사고 환경 조건으로부터 다양한 비정상 징후를 가지는 출력 지시 신호 및 회로 특성을 조사 및 진단하기 위해서 그 유용성을 확인하였다. 이들 회로 모의실험을 통하여 계측기 생존성 평가를 위한 방법론과 그 진단 방법에 따라 관련 사항을 검토하였으며, 모의실험에 선정된 대표 회로는 4~20mA 회로 유형인 RTD 등가회로에 적용하였다. 또한 이 모의실험을 통하여 회로 진단은 환경조건의 변화에 따라서 회로 손상에 따른 오동작의 범주로서 출력 지시값의 비정상 지시 또는 측정 범위를 초과할 경우에 진단의 정보로서 유용하게 사용될 수 있었다. 이때 이들 등가회로는 보다 실제 회로 구성에 접근한 능동 소자를 포함한 등가 회로 모델화 하였다. 이때 이들 등가회로의 출력 신호는 새로운 신호 진단 방법으로서 빠른 후리어 주파수 분석을 적용하여 실시간으로 주파수 응답 특성의 특징 축출이 가능하도록 신호 처리하였으며, 이들 출력신호는 다시 강등된 신호 복원 처리를 위해서 강등된 R-L-C 회로의 주파수 응답특성을 분석하여 그 역함수를 FIR(fine impulse response) 여파회로에 적용하여 개선된 복원 신호를 얻을 수 있었다.

## 2. 방법론 개요 및 적용

중대사고 정보 필요(Information need)와 생존성 및 필요 범위를 만족하는 발전소 계측 기기의 성능을 입증하는데 목적이 있으며 3개의 별개 상황 단계(phase)로서 분류한다.

Phase 1 : 중대사고 관리를 위한 정보 필요의 입증

Phase 2 : 중대사고 환경 및 처리 조건의 입증

Phase 3 : 요구에 따라 필요 측정의 대체 방법의 입증/정보 필요에 접근한 계측기기 평가

## 2.1 상황 2 단계 : 중대사고 환경 및 조건 설정

정보필요, 파라미터 설정을 위해서 각 예상 파라미터의 양적 정보 및 환경 조건을 결정하기 위해서 이들 방법론 절차들을 나타낸다. 확률론적 위험 평가(PRA)는 노심 손상에 영향을 주는 소형 LOCA, ECCS 주입 또는 재순환 손실에 의한 대형 LOCA, ATWS, Station Blackout 와 같은 발전소 손상 상태 또는 등급 분류로서 구분 할 수 있다. 다양한 컴퓨터 코드들의 모의 결과는 사건 시나리오 분석을 통해서 처리 조건 및 환경을 재현할 수 있다. 대부분은 사용자들은 그들의 발전소 시험의 일부로서 MAAP 4를 사용하여 이들 사고 등급을 분류하여 환경 조건 및 파라미터 범위 설정하는데 사용된다. 또한 MAAP 4를 이용하여 국내 표준원전의 원자로 건물 내부의 환경 분석과 격실별 온도 압력 수위레벨 등의 계산 데이터를 시나리오 시간에 따라서 도표로서 획득하였다.

## 2.2 상황 Phase 3 단계 : 대체 방법의 입증 및 정보 필요에 적합한 기기 평가

각 사고 시간 시나리오 단계 동안에 최대 환경 조건과 예상된 파라미터 범위, 관련 파라미터, 정보 필요를 설정하기 위해서 Phase 3은 대체 방법 기기의 범위 설정 및 입증이 수행되어야 한다. Phase 3은 기기의 생존성 결정, 예상된 조건에서 기기의 설계 능력 비교, 필요 파라미터를 제공하기 위한 기기 설정으로 구성된다. 계측기기가 주어진 정보 필요에 적절치 않을 경우 정보 필요 측정하기 위한 대체 방법을 결정하기 위해서 시험되어야 한다. 적절한 대체 방법이 없다면 한 방법으로서 필요한 정보를 유추할 수 있는 계산 지원을 입증하는 기술이 추가된다. 결과적으로 그들 기기가 고장난 후에 더 이상 필요치 않게 되면 대체 방법이나 특수 정보 필요 결정을 위한 일들이 필요 없게 된다.

## 2.3 계측기 점검 리스트 및 진단 방법

중대사고 관리 정보를 제공하는 장비가 기능을 상실했을 때 연속의 진단 단계는 파라미터의 값을 결정하는 간접 방법과 장비를 이용한 직접 진단 등, 모두를 포함할 수 있다. 이 연구는 오동작 장비 진단을 11단계 처리 절차 방법을 적용한다[1]. 이 처리 절차는 회로의 간접 방법 또는 직접 여유 장비 채널의 비교로서 논리 처리에 따른다. 또한 5 단계 동작 지원은 진단 조치와 또 다른 측정 방법의 조합이며, 이것들은 장비의 판독이 의심스럽거나 망실되었을 때 적용된다. 이때 5단계 유형 중 4 단계로서 회로 진단은 지시값이 비정상 또는 벗어날 경우, 회로가 기능의 상실, 손상, 또는 유용한 정보를 얻기 위해서 모의 회로 실험의 결과를 이용한다.

## 3. 잡음과 잡음여과

중대사고 이슈인 안전 규제 목적 달성을 위해서 발전소 사고관리 능력은 중요한 사항이다. 사고 발생기간에 발전소 계측장비의 데이터와 정보는 발전소 상태 및 발전소 응답 모니터를 평가하여 발전소 운영자와 기술 지원 참모에게 필수적인 자료가 된다[2]. 기본 설계 사고의 범위를 벗어난 중대사고 조건에서는 장비 능력의 한계를 초과할 수 있으며, 원전의 설계 기준을 초과한 환경조건 때문에 계측기기의 설계기준의 사양범위를 초과한 계측기기는 불안전성 출력 신호로서 나타나게 된다. 이때 이들 계측기기의 출력신호는 계측기기의 회로 성능의 강등과 신

호의 왜곡 현상이 발생하여 원신호에 접근하는 신호의 복원 및 보완 기술 개발과 이 기술을 적용하여 신호의 타당성 평가가 요구된다[3]. 신호의 복원 및 보완기술의 발전은 새로운 디지털 신호처리 기술의 발달로서 코드를 이용한 등가 모의 회로를 이용하여 구현이 가능하다. 이 기술은 순수 2포트 수동소자 R-L-C 등가회로의 입출력 특성의 회로 분석이 가능하다. 계측기기 등가회로를 해석하기 위한 첫 단계는 원전의 환경조건 분석이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 중대사고시 사고 관리적인 측면에서 중요 계측기의 생존성 평가를 위한 단계적 방법론과 그 일부 진단방법을 적용하고, 이때 주요 환경조건으로는 특별히 고온 조건에서 RC회로의 열잡음 특성을 분석하여 계측기기의 손상 요인을 점검하였다. 이러한 환경조건에서 계측 회로는 회로 요소들의 기능의 강등과 외부 잡음신호에 방해를 받게 된다. 회로요소들의 기능이 강등됨에 따라서 그 원인을 원전의 계측기기의 루프회로로서 입력단인 센서단과 전송회로단과 출력신호 검출단으로 구분하여 각각의 회로 특성을 분석하고 전체 회로망으로 합성하였다. 원전의 사고 환경에 따른 신호 대 잡음비를 개선하기 위해서 주파수영역의 후리어 변환을 통하여 잡음영역을 측정하였으며, 그 잡음 영역을 제거하기 위해서 FIR(fine impulse response) 여파기를 설계하여 개선된 신호 대 잡음비를 얻었으며, 회로 소자 기능의 강등에 따른 왜율을 개선하고자 입력 캐패시턴스 소자와 순수저항 소자의 변화에 따라 신호를 복원하였다. 전원의 다양성 때문에 생기는 원치 않는 전기신호는 일반적으로 인공적인 간섭이나, 자연적으로 발생하는 잡음으로 분류한다. 인공적인 간섭은 60Hz 일반 전원잡음과 열잡음으로 구분하여 분석을 하였다.

### 3.1 저항의 열잡음 등가회로

열잡음은 전도매체 내에 있는 하전입자의 랜덤 운동에 의한 잡음이다. 위치 에너지 정리로부터 절대온도  $\mathcal{F}$ 에서 입자의 평균에너지는  $k\mathcal{F}$ 에 비례한다. 여기에서  $k$ 는 볼츠만의 상수이다. 실제로 잡음전력의 척도는 온도에 관계되는 항으로 전개할 수 있다. 금속저항 R와 온도 T일 때 랜덤전압  $\mathfrak{u}(t)$ 가 랜덤전자에 의해서 회로의 개방단자에 나타난다. 중심 극한정리에 의해서  $\mathfrak{u}(t)$ 는  $\mathfrak{u} = 0$ 인 가우시안분포를 갖는다. 실제 실내온도 또는 표준온도는 다음 식으로 정의한다.

$$\mathcal{F}_0 \approx 290 \text{ K} \text{ (63 F)} \tag{3-1}$$

$$k\mathcal{F} \approx 4 \times 10^{-21} \text{ Watt.sec} \tag{3-2}$$

여기에서  $\mathcal{F}_0$  : 절대온도,  $k$  : Boltzmann 상수이다.

식(3-1)과 식(3-2)을 이용하여 열저항에 대한 테브닌의 등가회로를 구성하기 위해 저항은 가상 저항으로 대치하고 그 때 잡음 신호는 평균상승 전압발생기로 표현할 수 있다.

## 4. 회로 모의실험 및 진단 방법

회로 모의실험은 계측 기기가 비정상 판독값을 지시할 때 상세한 장비 진단 접근을 위한 한 방법이다. 이 모의실험은 중대사고 환경 조건으로부터 다양한 징후를 가지는 신호 및 회로 특성을 조사하기 위해서 유용하게 적용된다[3]. 회로 모의실험은 중요한 대표 회로 유형에 대해서 수행되며, 진단 점검 목록도 개발한다. 회로 모의실험을 통하여 회로의 진단은 회로의 동작이 손상이 됐을 경우나 지시값이 비정상 또는 범위를 벗어날 경우 유용한 정보를 얻을 수 있다. 기기 회로는 모의실험 프로그램을 이용하여 상용의 회로를 모델화 하고 시험된다. 기기 회

로의 강등 조건은 기기 회로 모델의 값을 수정 또는 가변하여 얻게 된다. 회로의 강등 조건은 진단 점검 리스트 데이터를 근거로 하여 모의 기기 회로의 응답 특성이 분석된다. 그 점검리스트는 강등된 기기 루프로부터 필요한 정보를 얻기 위한 단계 리스트이며, 검출기의 초기조건은 타당한 신호를 유지하고 있다고 가정한다. 회로 모의실험은 그 조건으로부터 기기루프의 강등 또는 망실의 결과를 얻게 되며, 실제 처리 과정은 이 회로를 평가하기 위해서 진단 단계를 결정해야한다. 격납 건물 내부 환경이 강등의 원인이 될 경우 그 영향을 제거하기 위해서 격납 건물 외부로부터 시도하고 그 결과를 평가한다. 이 연구에서는 순방향의 결과 진단 점검리스트 및 간단한 기기 강등 모델을 얻고자 한다.

#### 4.1 회로 모의실험 방법

회로의 모델링은 강등되는 메카니즘과 회로 모델의 모의실험이 가능한 기술 지원이 요구된다. 이것들은 회로 내에 구성원의 값이 변화를 할 수 있는 능력, 온도와 습도 영향의 모의실험 및 잡음 원의 추가, 회로에서 이들 환경 변화에 대한 결과의 비교 분석 기술, 입출력 전달함수 및 주파수 분석기술 등을 포함한다. 이 기능을 갖는 피스파이스 코드의 특징은 반복과 수정을 최소화 할 수 있는 정밀한 설계, 검증기능, 모의실험 등 연속처리방식이 적용 되며, 최신 버전 까지 지속적으로 개정이 되었다. 이 코드의 모의회로 종류는 아날로그 디바이스와 아날로그 및 디지털 혼재 디바이스로 구분이 된다. 기능면에서 피스파이스 코드의 연구는 배선의 개발, 분석 및 표현 능력 등을 포함하며, 이 코드의 특징은 실시간 도움 및 풀다운 메뉴 방식으로 “Control Shell” 내에 통합된다. 이 설계 개발 패키지는 회로 내에 5,000개 이상의 아날로그 디바이스가 초과하여도 손쉽게 설치할 수 있으며, 편집자는 새로운 디바이스 속성을 정의할 수 있고, 새로운 디바이스와 심볼을 만드는데 가능하다. 한 회로는 전체 구성원에 의해서 정의되고, 피스파이스는 “netlist”를 만들거나 회로의 본문 설명, 회로의 “전기회로의 규칙 등 디지털 회로의 논리 점검, 아날로그 회로의 입출력 특성, 등을 점검도 수행 할 수 있다. 이 netlist는 어떤 분석이 수행될지, 어떤 출력이 표현 될 지에 대한 서술이 포함된다. 회로분석용 패키지는 사전 정의 될 뿐만 아니라 사용자 정의 분석의 여러 유형의 회로 응답 계산이 가능하다. 이 코드는 bias point, 시간 응답, 주파수 응답, 잡음 동작, 온도 응답 등이 계산될 수 있다. 파형 편집자의 기능은 불연속 선형과, 단일 주파수 FM, 지수 펄스, 반복 펄스, 정현과 들을 포함하는 입력과의 발생이 가능하며, 불규칙성 임의의 파로 사용될 수 있다. 또 다른 선택 사양은 몬테 칼로, worst case, 감도 분석 기능이 포함하고, 아날로그 동작 모델링을 위한 선택 사양은 선형 및 비선형 전달함수의 정의가 가능하다. 출력 파형 표시 기능의 패키지는 고 분해능 모니터에 모의실험의 상호 작용을 실시간 관측이 가능하다. 모든 회로의 노드 전압의 키르히 호프 2법칙과 디바이스 전류의 키르히 1법칙은 적용 분석이 가능하며, 그 결과를 저장하고, 그 진행 절차는 PC 화면을 통하여 직접 관찰할 수 있다.

##### 4.1.1 피스파이스 코드 적용 절차 및 범위

이코드의 목표는 전체 파라메타 정의하기, 파라메터 모의실험 셋업하기, 중간 점검 하기, 함수 사용법 적용하기로 구분한다. 파라메타 분석은 파라메터가 변수범위에서 스윙될 때 변할 수 있는 파라메터는 전압원, 전류원, 온도, 모델 파라메터, 전체 파라메타 등이 있다. 파라메타의 분석은 한번에 한 개의 파라메타를 스윙할 수 있고, 선형, 옥타브, decade 같은 정규적인 진행을 기초로 하여 수유허할 수 있다. 파라메타 분석의 기본단계는 스윙 값의 정의, 전체 파라메터

인 경우 구성원 값, 모델 값, 혹은 아나로그 동작 모델링 표현 값을 적용, 기본 분석사양 셋업 및 파라메타 분석사양 셋업, 설계회로의 모의실험, 출력 값 표현 등의 절차로 진행된다.

#### 4.1.2 회로 모델링위한 요건 검토

전기회로 모의실험의 모델은 기기 전체의 루프를 구성한다. 모의실험은 검출기, 송신기, 현장 전치 증폭기, 신호 컨디셔너, 중단 블럭, 연결 단자, 케이블, 격납용기 침투 지역으로 구성된다. 각각의 회로 보드 구성원들은 세부 구성을 위한 모델화 보다는 등가 전기회로로 구성된 기기 루프의 기본 블럭을 모델링하여 구성된다. 각각의 환경에 대한 부분 강등 상태 또는 완전 망실 상태 등을 각 회로에 적용한다. 중대사고 현장 조건에서는 외부 조건의 지속적인 변화에 대한 기기 강등에 의한 진폭이 변화가 우선적으로 관심을 갖는다. 다음은 모의실험의 일반적인 단계 및 절차를 정리하였다. 어떤 장비를 동작시킬 것인지 결정하고 중단 박스, 연결단자의 수, 형태, 그리고 실제 발전소의 상세한 케이블 통로, 길이를 결정하기 위해서 선 다이어그램을 정리한다. 발전소로부터 기기 정보 보고서들은 일반적인 모델을 만드는데 적용된다. 아나로그 장치는 구성원으로 모델화 하며, 실제 장치의 설치 상태, 연결 조건, 케이블 연결의 특성, 차폐의 효과, 설치 방법의 평가 등이 포함된다. 이것은 케이블의 절연 저항 값, 중단 박스 및 연결 상태, 연결 저항 값, 케이블의 분포 저항 및 용량의 순차적 모델링이 가능하다. 이들 소자들의 물리적인 값은 시험보고서, 기기 품질 데이터, 엔지니어링 판단 자료들을 적용한다. 설치된 기기의 모든 소자들은 모의실험 모델의 회로 구성원으로서 나타내며, 그 모델은 측정 범위의 입력을 적절한 변화로서 출력의 시험 응답을 얻는다. 마지막 단계는 회로의 강등조건에서 그 출력의 결과 응답을 관측한다. 구성원 강등 특성을 모델링 하는 방법은 공학적 판단, 기기품질 데이터, 시험보고서를 참고하여 유도한다. 그밖에 간섭도 강등 조건을 모델화 하는데 이용한다. 이것은 지시의 원인을 가정하여 회로의 대표성 오류로서 적용하고 그 결과를 관측하는 시험을 수행 한다. 또 다른 모델로서 유도 잡음은 다른 기기 루프에서 나타나므로 유도 잡음에 의해서 계산된 전류 및 전압도 고려된다. 이들 개발된 모델은 의심스런 오류 조건을 결정하기 위해서 사용되었다. 한 접지가 케이블의 연결부나 침투 통과된 한점이 의심스러울 때, 한 접지는 한 모델 내에 삽입될 수 있고, 그 결과 응답은 관측된 기기 응답과 부합되는지를 관측한다. 여기에서 “접지에 저항” 값의 타당성, 실제 “접지”로 나타나는 비 동질성이 함께 존재한다. 소프트웨어 모델로서 여러 값으로 연속적으로 반복 시험이 가능하고, 관측된 응답을 유도할 수 있다. 일반 회로의 시스템 평가를 위해서 6 종류의 비정규 조건을 정의 할 수 있다.

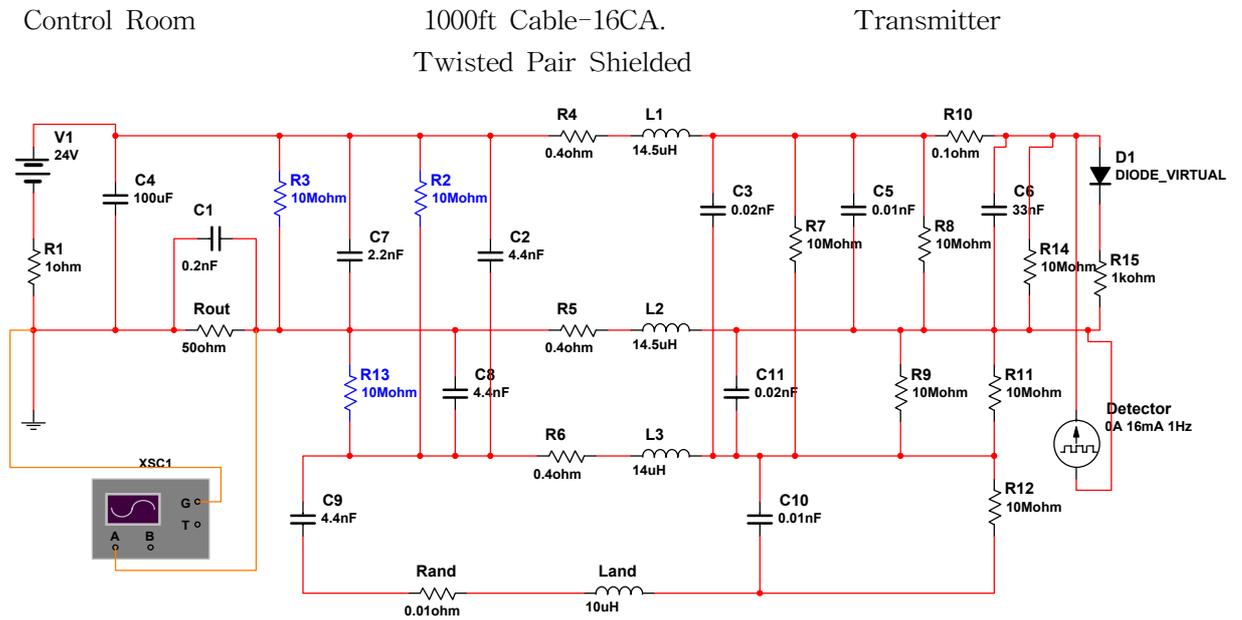
또한 회로가 보다 상세한 경우 다음과 같은 부가적인 조건이 고려된다. 측정 유형이 상세한 회로는 간단한 모델로 변환이 등가 회로로 가능하며, 그 간단한 모델은 중대사고의 극한적인 환경 조건에서 하드웨어의 강등을 회로의 정 및 동 특성으로 적절히 기술된다. 과거에는 주요 전기 파라메타인 절연저항, 유전 상수, 절연 전압 유지가 중요한 삼 요소 선 절연 저항이다. 절연선에 열 손상 및 습도 침투영향으로 절연 저항 및 유전 상수는 중대사고 환경 조건에서 중요한 연구 과제이며, 환경 요건의 하나로서 선 및 연결 저항은 습도 침투에 의한 부식의 영향을 받게 된다. 피스파이스 코드를 이용하여 이 모의실험을 입증하기 위해서, 그 전송 신호는 회로의 시간 응답이 적절한 시간 간격 범위로 변화함을 확인한다. 모의실험의 적절한 타당성을 위해서 수신단의 출력은 송신단 출력과 진폭 및 주파수 응답이 상응되어야 한다. 또한 간단한 등가 회로의 잡음원은 가동 발전소로부터 전형적인 강등 요소로서 개발이 되어야한다.

#### 4.1.3 피스파이스 코드 모의실험

피스파이스 코드의 회로 분석 프로그램은 측정기기 루프 하드웨어의 강등 영향 연구에 사용되었다. 이 실험 결과는 실제 회로 조건이 제어룸에서 관측된 것들로부터 서로의 상관성을 얻기 위해서 매우 유용하게 적용된다. 등가 모델의 개발, 적절한 파형의 개발 및 회로내부에 야기되는 잡음 영향의 복잡성은 다음과 같이 netlist를 이용하여 선 내부 강등된 회로 루프로 곧 변환된다. 원자로 냉각 압력을 측정하기 위해서 사용되는 4~20 mA 계측기기는 피스파이스 코드에서 동작하기 위한 압력 기기의 수정된 회로로서 나타낸다. 이 회로는 접속 부에 대한 피스파이스 코드의 간단한 규칙을 확인하기 위해서 두 개의 뭉치 소자 케이블, 한 단위의 내부 격납부의, 한 단위의 외부 격납 부의, 접지 연결 단자 등이 준비된 수 개 이상의 수동소자로 구성 및 뭉치 소자들이 준비되며, 각각의 이것들은 습도 침투에 변화될 수 있다. 1000MΩ 저항이 선 절연으로 나타날 경우, 0.001Ω 저항은 접점이나 연결단자 위치에서 나타낸다. 이들 두 현상은 정상회로에서 영향이 작지만 절연 저항의 손실 및 강등된 연결 단자에서는 회로에 중요한 영향을 미친다.

#### 4.1.4 전송단 신호와 잡음원의 정의

이 전송 신호는 10ms 지연 시간 30ms 상승 시간, 30ms 하강 시간, 300ms 펄스 폭, 1 PPS 반복율과 0-16mA 펄스 진폭을 가지는 불연속선형 함수로서 정의한다. 수신단에서 전류와 전압 변환기로서 측정된 출력 전압 펄스이다. 그림 4.1은 완성된 압력 기기 모의 회로도 이다.



Notes : Cotrol Room Voltage Source Subcircuit

그림 4.1 압력 기기 모의 회로

이 그림에서 이 펄스의 진폭은 0.2 ~1.0 V 펄스로서 나타난다. 잡음원의 3가지 유형은 60 Hz 접지 전위 차 잡음, 접지를 통하는 전압 스파이크 잡음, 회로 내부의 전압 유도 잡음으로 구분한다. 10에서 50 V사이의 전위 차 잡음 발생 회로는 가동 중 발전소에서는 드문 경우이다. 60

Hz 접지 전위차 잡음은 접지 단에 직렬로 놓으며, 보통 10 V 가 사용된다. 125 VDC 릴레이에 개 스위치로 만든 전압 스파이크 잡음은 2000 V까지 확장관측 될 수 있다. 입력 전압원은 1 $\mu$ s 상승 및 하강 시간을 가지는 1000 V 전압 스파이크이며, 이것은 결합 캐패시턴스로 여파하여 기기 루프로 볼 수 있는 결과 스파이크는 7  $\mu$ s 대역폭에 약 800 V이다. 잡음의 3번째 유형은 자기 유도이다. 신호 루프내에 스파이크는 기기의 루프에서 접지 전류 서지 확장에 의해서 원인이 된다. 이 잡음은 케이블이 접지 연결까지 열린 차폐의 강등 조건일 때 또는 회로 루프의 차폐에 의해서 나타난다.

#### 4.1.5 강등 루프 징후 만들기

압력용기 냉각 압력 루프의 회로에서 강등된 루프 징후는 제어룸 관측으로부터 다음과 같이 결정된다. 습기 침투는 지역의 선들 사이에 캐패시턴스 증분으로 모델되며, 이 변화는 nF에서  $\mu$ F 범위이고, 저항은 M $\Omega$ 에서 k $\Omega$ 범위의 저항 감소된다. 상기의 변화량에 의한 잡음증가 모델을 적용한다. 손상된 압력 전송단은 물리적 조건에 영향을 받지 않는 일정한 검출기 출력을 갖고, 열린 차폐 접지에 연결하고, 잘못된 연결, 고 저항 또는 개회로와 같은 경우는 0.001 $\Omega$  선 저항 값으로 간단히 모델화할 수 있다. 잡음 문제가 발생되면 잡음을 고려하여 고장 및 강등의 위치가 결정될 수 있다. 이러한 결정 및 분석을 위해서 잡음원은 수신단 위치에 모델화 하며, 이 잡음의 원인들은 케이블의 공간 분산, 제어룸 캐비닛의 전기적 구조, 및 분산된 위치에서 결합하여 발생한다.

#### 4.1.6 4~20 mA 아날로그 회로 모델링, 모의실험 및 평가

루프의 설명 및 모의실험 모델링을 위해서 원자로 냉각 압력 회로는 4~20 mA 전류 루프의 대표적 회로로 선정하였다. 계측기기 채널들은 차등 압력으로부터 유도되는 수위 및 유속 측정을 포함한다. 다양한 계측 종류의 기기 루프는 사고 환경에 의한 물리적 강등의 가능성에 의해서 출력 신호에 영향을 받게 된다. 모의실험 모델과 루프에 대한 설명은 다음과 같다. 압력용기 냉각 압력은 0 에서 최대 교정 압력을 나타내기 위해서 4~20 mA 측정 기기로부터 전류 출력을 압력 셀로부터 얻게 된다. 압력 셀의 종류는 스트레인 게이지, 압전 셀, 캐패시턴스 셀 등이 있다. 선택된 셀은 초과 압력 조건의 가능성과 센서 환경의 영향을 받게 된다. 일반적으로 원자로 압력용기의 냉각 압력은 캐패시턴스 셀을 이용하여 측정한다. 이 전송자의 유형은 캐패시턴스 브리지를 동작하기 위해서 내부에서 30~40 kHz 신호를 발생한다. 각 압력 전송자의 출력은 4~20 mA 동작 범위에서 대략 3~30 mA 범위 전류로서 표현된다. 4~20 mA 전류 루프는 발전소의 환경적인 전기장 잡음 때문에 전류 측정 회로를 더욱 선호하게 되었다. 이 회로의 적절한 동작을 위한 중요 설계 요소는 발전소 접지 연결이 단지 한 개를 포함한다. 신호 전송을 위해서 부수의 차폐가 필요 없는 표준 꼬인 쌍 케이블을 사용하고, 기기의 표준 건설 사양의 일부분으로서 포함이 된다. 사고 환경에 따라 루프 감도의 구성원들은 압력용기 냉각 파이프 가까이 설치된 전송단, 전송단과 함께 침투되는 케이블, 케이블의 일부분 침투 등이 포함된다. 두 케이블 및 전송단은 격납용기의 온도, 물의 분무, 증기 분무에 의해서 영향을 받게 된다. 케이블이 손상된 지역은 케이블을 보호용 관을 이용한다. 이 도관의 사용은 증기나 수소 화재로부터 보호를 받는다. 과거에 이들 전송 단은 셀 내부에 이동성 구성원의 기계적인 고정과 습도에 의한 야기되는 것이 주된 문제였다. 일반적으로 보호관 사용을 권고하고 기기는 정규 동작 중에는 이들 문제점들을 제거할 수 있다. 전송단 및 케이블링의 침투부분의 구성원의 기능은 강

등되는 동작 분석이 고려된다. 모든 진단 시험은 제어룸의 중단 보드까지 범위로 정의한다. 만약 단선단자가 필요하면, 그때 측정을 위해서 회로의 전송단 단자를 만든다.

#### 4.1.7 고속 후리에 변환(FFT)

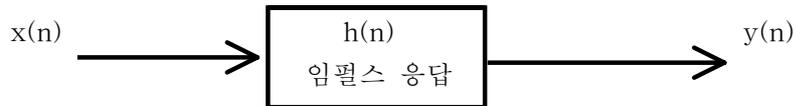
고속 후리에 변환의 목적은 DFT(discrete fourier transform)를 효과적으로 빠른 알고리즘을 개발하는데 있다. 이 알고리즘은 수학적 계산의 수를 줄인다.  $\{X(m)\}$ ,  $m=0,1,\dots,N-1$ 은 대역 제한신호  $x(t)$ 를 샘플링하여 얻어지는 데이터 열이다. 여기에서 계산하고자하는 알고리즘을 얻기 위한 계수식은 식(4-1)으로 놓는다.

$$C_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) W^{km} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4-1)$$

여기에서  $W = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ , 이고  $j = \sqrt{-1}$ 이다.

#### 4.1.8 FIR 디지털 필터

1) 선형 시불변 시스템(Linear time-invariant system : LTI)에서 입력  $x(n)$ 과 출력  $y(n)$  사이에서 출력 임펄스 응답 식은 식(4-2)와 같다.



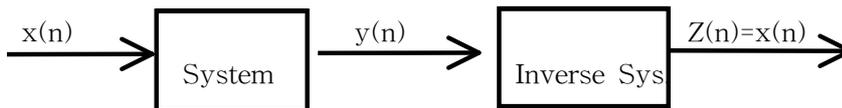
$$y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)h(n-m) \quad (4-2)$$

여기에서  $h(n)$ 은 이산 임펄스 응답으로서 입력  $x(n)$ 이  $\delta(n)$ 으로 공급되었을 때 출력  $y(n)$ 은 곧  $h(n)$ 이 된다. 이때  $\delta(n)$ 는 다음수식으로 표현된다.

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases} \quad (4-3)$$

이를 Z 변환하면  $Y(z) = H(z) \cdot X(z)$  (4-4)

#### 2) Invertibility and Inverse System



출력 시스템  $y(n) = \sum_{k=-\infty}^n x(k)$ 이면, 역 시스템함수  $Z(n) = y(n) - y(n-1) = x(n)$ 로 놓을 수 있다.

3) LTI 시스템은 순환(recursive)와 비순환(nonrecursive) 방식으로 나뉘어 있으며 순환방식이

란 현재의 출력값  $y(n)$ 은 현재의 입력값  $x(n)$ 과 이전의 입력값  $x(n-m)$ 과 출력값  $y(n-m)$ 에 의해서 결정되는 시스템을 말한다.

$$y(n) = h[y(n-1), y(n-2), \dots, y(n-m), x(n), x(n-0), x(n-1), \dots, x(n-m)] \quad (4-5)$$

여기에서  $m=1, 2, \dots$  이다.

식(4-5)를 선형 상수 계수(linear constant coefficient)로 표시하는 차분 방정식은

$$y(n) = \sum_{m=0}^k a_m x(n-m) - \sum_{m=1}^k b_m y(n-m) \quad (4-6)$$

가 된다. 이를  $Z$  변환하면

$$Y(z) = \sum_{m=0}^k a_m X(z) Z^{-m} - \sum_{m=1}^k b_m Y(z) Z^{-m} \quad (4-7)$$

식(4-7)이 된다. 식(4-4)에 의해서  $H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}$  이므로 식(4-7)은 식(4-8)로 변형한다.

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{m=0}^k a_m Z^{-m}}{\sum_{m=0}^k b_m Z^{-m}} = H(z) \quad (4-8)$$

가 되어  $H_k(z)$ 의 값을 차등방정식으로 표현된 항에서  $k$  값이 주어지면 순환형 FIR 디지털 필터를 구현할 수 있다.

#### 4.1.9 실험 회로 특성 조사

1) 4~20 mA 전송단은 저항, 캐패시터, 인덕터로 구성된 간단화한 등가 회로로인 전형적인 압력 전송자이다. 이것은 전압 전류원을 포함하고 격납 용기내에 환경 변화에 실제 회로 응답을 얻기 위한 회로 분석 프로그램을 통하여 가변 할 수 있다. 상세한 파라미터는 다음 과 같다. 입력 누설 저항은 케이블 상호 연결 손상에 영향을 준다. 연결단자 입력 직렬 저항은 부식에 의해서 영향을 받게 된다. 케이블 또는 전송단 보호관 속으로 물의 침투는 입력 캐패시턴스를 증가시킨다. 접지에 연결된 캐패시턴스는 물의 침투에 따라서 증가한다. 전류 공급원의 다이오드 및 부하 저항 고려한다. 실제 전송 출력 신호를 나타내는 전류 발생기 고려한다.

2) 꼬인 차폐된 쌍 연결 케이블은 전형적인 케이블로서 선 인덕턴스, 저항 및 유전체 캐패시턴스로 나타낸다. 차폐는 세 번째 전도체로서 나타낸다. 케이블은 모든 저항을 제거하고 단지 인덕턴스와 캐패시턴스로 모델화 한다. 연결 저항 손실은 압력 전송자를 간단화한 등가 회로의 경우 케이블의 격납 장치 끝 부분에서 관계가 있다.

3) 4~20 mA 수신기는 1Ω 내부 저항 및 100 μF 분로 캐패시턴스와 24 VDC 전압원으로 나타낸다. 전압원은 전송자에 직렬로 연결된 전류/전압 감지 저항에 공급한다. 전압원 및 차폐의

“-”은 이 분석을 위해서 접지에 연결된다. 실제로 감지 저항 및 접지의 위치는 발전소마다 다르며, 격납용기내부 환경적으로 야기되는 강등 조건에 따라서 회로 감도에 직접적인 영향을 준다.

4) 4~20 mA 송수신기의 회로 모델링은 능동 소자를 포함한 중요 회로 모델링에 대한 새로운 진단과 주파수 분석을 적용하였다. 불규칙한 패턴과 시간함수에 임펄스 패턴으로 발생하면 기존의 수동소자 구성원의 등가회로의 모의실험은 이러한 문제점 때문에 진단과 분석의 한계가 있다.

5) 모의실험 시험 및 결과 검토로서 회로의 간단화를 결정하기 위해서 압력 전송자는 케이블 회로를 통해서 수신회로에 연결하고 적절한 동작이 설명된다. 출력 표시는 압력 전송자의 응답으로 나타나며, 이 응답은 주어진 타당한 입력 전류 파형의 범위 및 증가 시간의 정보를 포함한다. 이 경우 압력 수신단의 아나로그 출력은 최소 30ms 내에 전체 범위에서 300ms 간격, 30ms 주기에서 전송자의 최소에서 최대 범위까지 압력 변화에 대한 응답으로서 결정된다. 이것은 1Hz 에서 10Hz 범위의 주파수 응답을 나타낸다. 전송자의 16mA 전류범위는 0에서 3000 psig로 나타낸다. 예상된 수신단 응답은 저항에 따른 전류를 전압으로 변환하는 전류 시간의 진폭에 해당하는 전압 진폭으로 동일하게 하고, 구동 전류로서 동일한 모양을 갖는 출력 전압 파형이다. 이 분석을 위해서 출력의 전압은 0.2V 에서 1.0 V 범위이다.

6) 모의실험을 통하여 발생된 4~20mA 루프회로 출력신호의 강등 결과를 분석하여 신호의 타당성을 유지하기위한 복원기술로서 FIR R-C 여파기를 설계하여 강등된 출력신호를 개선하였다.

(1) 실험 I : 모의실험 결과 1kΩ 이하에서는 출력 전압이 2V이상이 출력되고 특히 최저 저항에 대한 부분이 1.3V이상으로 출력되고 있다. 따라서 출력 전압이 1.3V이상 나타나는 경우는 이상 증후군으로 판별할 수 있다. 이후 가정되는 시나리오는 저항에 대한 부분이 열로 인하여 단락이 될 것으로 예측되며 이때 출력 전압은 최대 바이어스 전압이하로 출력된다. 출력신호의 개선을 위해서 입력 저항 R2의 변화에 따른 V1, V2 전압 변화량의 역함수로 여파기를 구성하였다.

(2) 실험 II : 모의실험에서는 저항의 변화와 더불어서 캐패시터를 변화시켜보았으나, 출력 전압에 대해서는 변화가 다르게 나타나지 않았다. 이는 캐패시터나 코일이 수동회로에서는 시변신호에 대한 반응변화에는 관련이 되나 출력DC에는 영향을 주지 않기 때문이다. 따라서 출력전압의 시간변화로서는 관찰이 어렵다. 단지 스케일 이상으로 출력 전압이 나오기 이전 상태로서 1V-1.2V의 출력전압이 나타나는 상황에서 캐패시터의 용량을 측정하면 현재 원전에서 진행 상태를 유추할 수 있는 근거 자료로 활용이 가능하다. 출력신호의 개선을 위해서 입력 저항 R2와 C1(nF)의 동시 변화에 따른 V1, V2 전압 변화량의 역함수로 여파기를 구성하였다.

(3) 실험 III : 출력파형에서 우선적으로 검사되는 사항은 교류파형이 잡음으로서 출력되는 현상이 나타난다. 그러나 출력파형을 스펙트럼으로 분석하기 전까지는 다른 잡음과 구분하기가 어렵다. 스펙트럼 분석을 통하여 주파수가 60Hz임을 분석하고 이를 확인하면 다시 임피던스를 측정한다. 이때 측정부분은 차폐 부분을 측정해야 하며, 또한 캐패시턴스에 대한 용량을 동시에 측정해야 한다. 다음그림은 출력에서 60Hz의 잡음이 발생되고, 출력전압이 저하되고 타 장치에서 오류가 발생하는 증후군에 대해서 시간 및 주파수 분석을 병행하였다. 원도우잉 취하지 않은 형태 주파수 응답의 리플의 원인은 펄스형태로서 주기를 갖기 때문이다

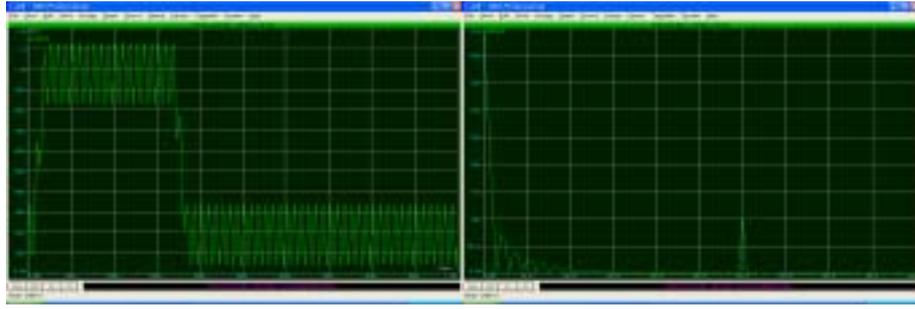


그림 4.2(a) 60Hz 전원 잡음과 임펄스 신호  
합성된 시간 영역신호

그림 4.2(b) 60Hz 전원 잡음과 임펄스 합성된  
진폭의 주파수응답

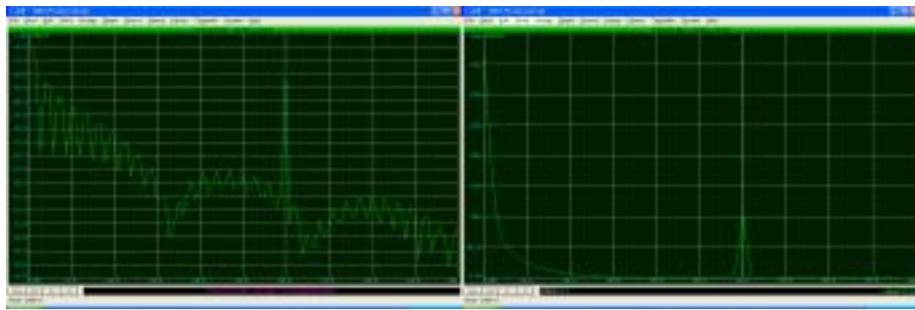


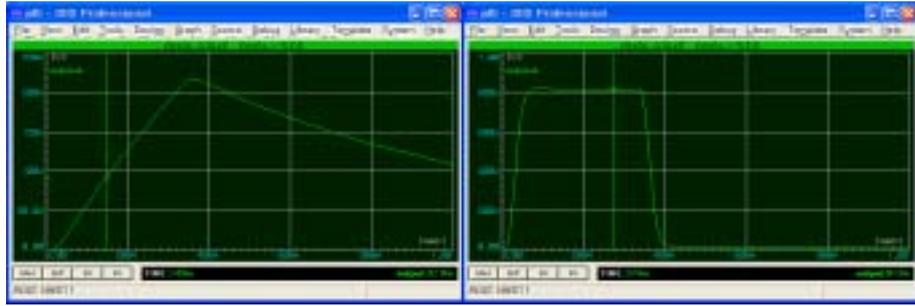
그림 4.2(c) 60Hz 전원 잡음과 임펄스 합성된  
3mA의 전류 진폭의 로그 스케일

그림 4.2(d) 60Hz 전원 잡음과 임펄스 합성된  
3mA의 전류 진폭의 Hanning Window  
스케일



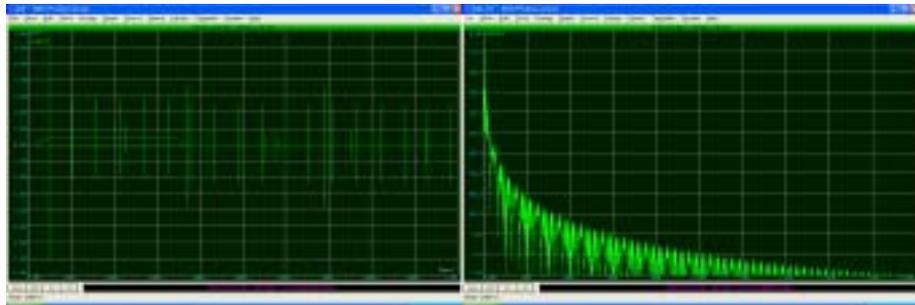
그림 4.2(e) 60Hz 전원 잡음이 여파된 임펄스 신호의 개선된 시간 영역신호

(4) 실험 IV : R3 변화량에 따른 출력 파형의 전압 감소로 나타나는 경우로서 200mV이하의 출력이 나타날 경우 의심해야 한다. 시뮬레이션 상에서는 가정된 파형의 형태가 변형되어 나타나고 있으나, 실제의 상황에서는 이러한 파형변화를 기계적으로 감지하기는 어렵다. 따라서 200mV이하의 전압이 감지될 경우, 임피던스를 측정하고 100k옴 이상이 측정되면 상황을 의심할 수 있다. R3 역 변화량을 여파기 함수를 적용하여 개선된 출력파형을 복원하였다.



(a) R3 변화에 따른 위상 변형 신호 (b) R3 변화에 따른 복원된 위상 변형 신호

그림 4.3 R3 변화량에 따른 출력 파형



(a) 스파이크성 잡음과 임펄스 합성신호 (b) 스파이크성 잡음과 임펄스 합성신호  
진폭의 주파수응답



(c)

그림 4.4 (a) 스파이크성 잡음이 여파된 복원된 임펄스 출력

(5) 실험 V : 가장 복잡한 형태로서 가정된 파형의 특성 분석이 가장 어려운 형태라고 볼 수 있다. 현재 가정된 형태는 파형이 스파이크성 잡음이 발생된 경우를 가정하고 있다. 이러한 스파이크성 잡음의 특성은 규칙성을 갖고 있다면, 스펙트럼 분석을 통하여 이상 현상을 감지할 수 있으나, 불규칙적인 신호인 경우에는 간단한 형태로서 이를 분석하는 것은 어렵다. 가장 간단한 형태로서는 그림 4.4에서 고주파수 대역 파워스펙트럼의 밀도를 분석하여 정성적으로 평가할 수밖에 없다. 참고로 이러한 스파이크성 잡음이 나타나게 된다면, 보조적으로 R-C 여파기를 사용하거나 기타 접지연결부분을 개방하여 측정할 수 있다. 주파수 분석한 측정 데이터를 이용하여 개선된 복원신호를 얻을 수 있다.

(6) 모의실험 결과분석 : 실험에서는 6개의 단순화된 모델에서 각 성분을 가변 시키면서 출력 특성 곡선의 변화를 분석하였다. 저항성분의 변화는 출력되는 부분에서 직류변화로 나타나기 때문에 바로 이상 증후군을 발견할 수 있었다. 하지만 이러한 변화는 최종적인 결과에서 나타나는 것으로 중간과정에서는 발견하기가 곤란하였다. 이를 보조하기 위해서는 캐패시터의 변화를 같이 관찰한다면 보다 정밀한 원전의 상태분석이 가능할 것이다. 또한 스펙트럼 분석을 통하여 측정된 신호의 분석도 가능하다. 하지만 이러한 변화는 한 가지 현상에서 일어나는 것이 아니고, 중대사고인 경우 순차적이면서 복합적으로 나타날 것이라는 게 문제이다. 따라서 현재의 모델링을 기반으로 하여 순차적인 시나리오를 개발하여 시뮬레이션을 한다면 출력파형에 대한 스펙트럼 분석 방법과 대처방안을 연구할 수 있다고 판단된다.

## 5. 결 론

발전소 계측기 생존성 평가를 위한 중요 회로 모델링에 의한 주파수 분석과 신호 개선을 하였고, 중요 계측기의 모의실험을 통하여 새로운 진단 방법으로서 빠른 주파수 분석법을 적용하여 신호의 강등과 왜곡현상을 분석하고 그 분석 결과를 이용하여 개선된 신호를 얻을 수 있었다. 이 모의 실험을 통하여 다양한 징후를 가지는 신호 및 회로 특성을 조사하여 중대사고 관리를 위해서 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 회로 모의실험은 결정된 대표 회로 유형에 대해서 일부 수행되었으며, 진단 점검 목록도 함께 검토하였다. 회로 모의실험을 통하여 회로 진단은 회로의 오동작이나 손상이 됐을 경우 또는 지시값이 비정상 또는 범위를 벗어날 경우 유용한 정보를 얻을 수 있다. 이들 등가회로는 수동 소자 R-L-C 회로 구성되어 보다 실제 회로 구성과 유사하도록 모델화 하였다. 또한 이들 등가회로의 출력 신호는 새로운 신호 진단 방법으로서 빠른 후리어 주파수 분석을 적용하여 실시간으로 주파수 응답 특성의 특징 측출이 가능하도록 신호 처리하였으며, 그 진단 결과를 R-C 대역 FIR 디지털 여파회로를 설계 구성하였으며, 이때 여파기의 주요 매개 변수는 강등조건에 변화량의 역수 값을 대입하여 신호를 개선하여, 이 기술의 사고관리를 위한 현장 적용의 전초 단계로서 기본 틀을 제공할 수 있을 것이다. 또한 이미 검토된 모의실험은 회로가 사고 영향에 따라서 손상된 불안정 조건에 대한 진단 로직을 개발하여 사용할 수 있을 것이다. 본 논문에서 기술한 예제 및 방법은 국내 원전의 대표 장비회로서 4~20mA 아날로그 회로를 전형적인 모의실험 도구로 사용될 수 있을 것이다. 본 논문을 통하여 계측기 생존성 평가의 주된 결론적 의미는 비록 계측장비가 그 사고 환경조건에서 초기의 사양의 범위의 적절성과 생존성에 충분히 만족 못하더라도 계측기의 모든 정보의 필요성을 입증 및 설정하여 발전소 장비 생존성을 평가하여 그 대체 방법의 가능성을 확보하고 그 결과로서 출력지시치의 타당성 판단 기준을 위해서 최적의 개선 및 보완 연구가 지속되어야 할 것이다.

후기

이 연구는 과학기술에서 시행한 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. EPRI(1993), A. J. Horn, R. W. James, D. E. True, W. R. Victor, "Assesment of Existing

Plant Instrumentation for Severe Accident Management" EPRI TR-103412 December 1993. [report]

2. EPRI (1992). Fauske & Associates. "Severe Accident Management Guidance, Technical Basis Report", EPRI TR-101869 December 1992. Volume 1. [report]
3. INEL (1991). P.Kuan & D.J.Hanson. "Managing Water Addition to a Degraded Core.," PK-42-91.[report]
4. NUREG/CR-5444. "Instrumentation Availability During severe Accidents For a Boiling Water Reactor With a MARK 1 Containment", (EGG-2661) February 1992. [report]
5. NUREG/CR-5691. "Instrumentation Availability for a pressurized Water Reactor With a Large Dry Containment During Severe Accidents", (EGG-2638) March 1991. [report]
6. NSAC -80-1 (NSAC - 1 revised March 1980),Appendix CI,pp 7-10. [report]
7. R.L Andeson, L.A. Banda, and D.G.Cain. (1981). "In-Core Thermocouple Performance Under Simulated Accident Conditions." IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol NS-28.NO.1. [report]
8. Meininger, Richard D., "Three Mile Island Technical Information and Examination Program Instrumentation and Electrical Summary Report", July,1985. [report]
9. Cain,D,Et al, NSAC-28, "Interpretation of TMI-2 Instrumentation Data", Final Report, May 1982. [report]
10. IDCOR Technical Report 17(p 4-11). [report]
11. EPRI (1985). Achenbach J. Et al, "Large-Scale Hydrogen Burn Equipment Experiments", EPRI NP-4354. Decemver 1985.[report]
12. EPRI (1988). Achenbach J. Et al, "Large-Scale Hydrogen Combustion Experiments", EPRI NP-3878 October 1988. [report]