

원자력 발전소 계측제어시스템의 정보취득장치 설계

(Data Acquisition System Design of I&C System in Nuclear Power Plant)

조정환* · 이동희

(Jeong - Hwan Cho · Dong - Hee Lee)

요 약

본 논문에서는 SDAS(Signal Data Acquisition System)를 설계하여 정밀도와 응답특성을 향상시킨 새로운 정보 취득장치를 제안한다. 원자력 발전소에 적용되는 계측제어시스템은 안전에 직접 또는 간접적으로 영향을 미치는 장치이므로 이들 기기는 안전등급의 분류에 따라 기기 검증의 절차에 의하여 현장 적용 이전에 주요 제어 설비가 설계수명 기간동안에 의도된 기능을 수행할 수 있음이 검증되어야 한다. 본 논문에서는 국제 기준 규격인 IEEE 규격과 Nuclear Regulatory Guide의 규격에 명시되어 있는 성능시험방법과 절차에 의한 기기 검증에서 필수적인 장비인 정보취득장치를 제안하였고, 기존에 사용되고 있는 정보취득장치와 성능을 비교 분석하였다. 이론과 실험적인 연구가 수행되었고, 그 결과는 제안된 정보취득장치의 정밀도 성능이 개선되었음을 입증한다. 따라서 제안된 시스템은 고성능 계측제어시스템에 적용될 수 있다.

Abstract

This paper presents a new Data acquisition system that can improve a accuracy and response characteristics by designing a SDAS(Signal Data Acquisition System). I&C(Instrumentation and Control) system, which is applied for Nuclear Power Plant, affects for safety either directly or indirectly. It should be assessed by the equipment qualification procedure to confirm the functionality during design life before it apply on the nuclear power plant depending on safety classification. This paper proposes data acquisition system that required as an essential measurement equipment in the method and procedure of equipment qualification following of standards and codes of IEEE and Nuclear Regulatory Guide. It provides comparable performance analyzing between the existing commercial products and new designed system. The theoretical and experimental studies have been carried out. The presented results from the above investigation show considerably improved accuracy performance in the data acquisition system. This circuit will be able to be used in high performance I&C system.

Key Words : data acquisition system, nuclear power plant, instrumentation and control system, ANSI/IEEE standard

* 주저자 : 김포대학 전자정보계열 조교수
Tel : 031-999-4142, Fax : 031-989-4387
E-mail : jhcho@kimpo.ac.kr
접수일자 : 200년 3월 3일
1차심사 : 200년 3월 4일
심사완료 : 200년 3월 17일

1. 서 론

원자력 발전소에 적용되는 계측제어시스템은 안전에 직접 또는 간접적으로 영향을 미치는 중요한

장치가므로 안전등급의 분류에 따라 현장 설치 이전에 시스템의 수명기간 동안에 설계된 기능을 수행할 수 있음이 검증되어야 한다. 이러한 원자력 발전소 계측제어시스템의 기기 검증은 원자력 발전소의 안전과 각종 기기 등에 미칠 수 있는 모든 환경 조건(온도, 습도, 압력, 방사선, 전자기파, 진동 등)과 지진, 자연현상 및 가상의 사고에 의한 영향을 평가하여 제어 시스템의 설계 및 제작에 이를 반영함으로써 어떠한 환경조건에서도 시스템이 손상되지 않고 제기능을 유지할 수 있음을 입증하는 것이다[1].

일반적으로 원자력 발전소용 계측제어시스템의 기기 검증에서 사용되는 정보취득장치는 피시험 시스템 보다 최소 10배 이상의 정밀도 및 분해능을 가지고 있어야 하며, 순간적으로 변동되는 정보의 취득을 위하여 고속의 인식 속도 및 취득된 정보를 저장할 수 있는 저장 장치로 구성되어야 한다. 그러나 현재까지 개발되어 있는 정보 저장방식은 카드 모듈이나 데이터 로거 기능을 가진 시스템으로 외부 컴퓨터 시스템과의 연결을 통하여 취득된 정보를 저장하는 방식으로 정밀한 정보 취득 및 실시간 저장이 어렵다[2].

따라서 이러한 정보취득장치의 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서 제안되는 SDAS(Signal Data Acquisition System)는 자체 정보 저장 기능을 보유하고 있고 향상된 정밀도와 고속의 정보 취득 특성을 갖고 있다. 제안된 SDAS를 사용한 원자력 발전소 계측제어시스템은 성능 검증에서 피시험 시스템의 미세한 변화량을 측정하여 측정 정밀도를 향상시켜 취득된 정보의 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 실험을 통하여 검증하였다.

2. 제안된 SDAS의 설계

원자력 발전소에 사용되는 계측제어시스템은 시스템의 안정성과 정밀도를 충분히 확보되어야 하는 시스템이며 이들 시스템의 성능을 평가하기 위하여 우수한 정밀도가 보장되고 환경적인 변화에 대응하여 충분한 안정도가 유지되는 정보취득장치가 필요하다[3]. 정보취득을 할 수 있는 장비로는 보통 사용되는 정보취득 보드와 PLC를 통해 아날로그를 받는 방식, DCS장비를 통해 받는 방식 등 여러 가지가 있다. 일반적으로 많이 사용되는 데이터 로거 방식은

독립 설치형으로 사용하며 설치가 간편하고, 이동이 편리한 제품으로 현장의 센서로부터 신호를 받아들여 PC 등으로 다운 로딩하여 데이터를 분석하는데 사용되는 기기이다. 그러나 이러한 방식은 외부 컴퓨터 시스템을 통하여 정보를 저장하는 방식으로 정밀한 정보 취득 및 실시간 저장이 어렵다[4]. 따라서 본 논문에서는 자체 정보 저장 기능을 보유하고 있으며 정밀도와 정보 취득 특성을 향상시킨 SDAS를 제안한다.

2.1 설계 기준

본 논문에서 제안된 SDAS의 설계기준은 크게 시스템의 기능적 요구사항과 성능적인 요구사항으로 구분하였다. 기능적인 요구사항은 표1과 같이 현재까지 개발되었던 시스템의 기능을 수용하고 경험에 의한 사용자의 편의성을 고려하여 작성하였다. 성능적인 요구사항은 표2와 같이 측정 도중 주변 장치로부터의 영향을 받지 않도록 독립된 안정성을 유지하며 정밀 정확도를 보장할 수 있도록 작성하여, 부품의 선정에서부터 회로의 설계 및 제작 단계에 이르기까지 지속적인 관리가 이루어지도록 하였다[5]-[7].

표 1. 기능적 요구사항에 의한 설계기준
Table 1. Design standard by functional requirement

| 항 목 | 요 구 사 항 |
|---------|--------------------------|
| 모니터링 | 시험전에 입력의 이상 여부 확인 |
| 입력 범위 | 입력 범위를 자동과 수동 모드로 조절 |
| 샘플 속도 | 각 채널의 샘플 속도를 조절 |
| 파형 출력 | 한 화면에 최대 8개 파형을 출력 |
| 줌 기능 | 저장된 파형의 원하는 부분을 확대 및 축소 |
| 커서 기능 | 각 파형의 데이터 값을 커서를 이용하여 파악 |
| 하드카피 | 화면에 보이는 파형을 프린트 |
| 이상현상 검색 | 저장된 파형에서 일정 범위 초과 위치 검색 |

2.2 하드웨어 설계

제안된 시스템의 하드웨어 회로는 아날로그부 회로와 전원부 회로로 구분하였으며 아날로그부 회로는 그림1과 같이 전압 제한부, 감쇠부, 캘리브레이터부, 1차 OP-Amp부, 트림머 감쇠부, 2차 OP-Amp부로 구성되어 현장에서 입력된 신호를 처리하고 그 결과를 A/D 변환기로 신호를 전송한다. 전원부 회로는 그림2와 같이 시스템 내부에 안정된 전원을 공급

원자력 발전소 계측제어시스템의 정보취득장치 설계

하기 위하여 스위칭 레귤레이터부, 트랜스포머부, 가변 레귤레이터부로 구성하였다.

2.3 소프트웨어 설계

시스템의 기능적인 요구사항을 만족하고 사용자의 편의성을 고려하여 설계된 소프트웨어는 각각의 기능을 모듈단위로 구성하였고 C++ 소프트웨어를 사용하여 설계하였다.

표 2. 성능적인 요구사항에 의한 설계기준
Table 2. Design standard by performance requirement

| 항목 | 요구사항 |
|--------|---|
| 채널수 | 48 channel(8개 channel 구성 모듈 6개) |
| 입력범위 | $\pm 50 \text{ mV} \sim \pm 250 \text{ V}$ |
| 입력저항 | 1 G Ω 이상(입력범위 10 V 이하) 10 M Ω (입력범위 10 V 이상) |
| 입력대역폭 | 500 kHz(-3dB) |
| 입력 커플링 | DC |
| 입력 커넥터 | BNC + 단자/채널(두입력 형태) |
| 입력보호 | 서지 보호기 |
| 비트수 | 채널당 16 bit |
| 정밀도 | 0.01% |
| 절연성능 | 채널간 500V 이상 |
| 샘플링 | <ul style="list-style-type: none"> - 최대 샘플 속도 1, 2 모듈: 채널당 1MS/s 기타: 채널당 20KS/s - 실시간 하드디스크 저장 1KS/s (최대 16채널) - 샘플 모드 고속 동시 샘플링 모드 실시간 하드디스크 저장 모드 - 메모리 1, 2 모듈: 채널당 96MB 기타: 채널당 24MB - IMS/s 모듈: 최고 1MS/s 동작시: 45초 최저 500S/s 동작시: 25시간 - 20kS/s 모듈: 최고 20kS/s 동작시: 10분 최저 1S/s 동작시: 139일 - 시간 정확도: 50ppm |
| 캘리브레이션 | warm-up 시간 자동 캘리브레이션 |
| 인터페이스 | PCI |
| 소프트웨어 | 운영체제: Windows 2000/NT 이상 48채널 DAQ 분석 소프트웨어 |
| 하드웨어 | 6개의 plug-in 샘플링 모듈 8채널 500S/s ~ 1MS/s 모듈 2개 8채널 1S/s ~ 20kS/s 모듈 4개 산업용 컴퓨터 모듈 |

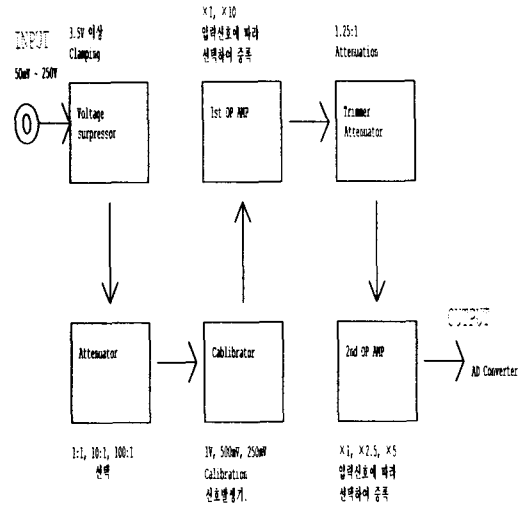


그림 1. 아날로그부의 구성
Fig. 1. Block diagram of analog section

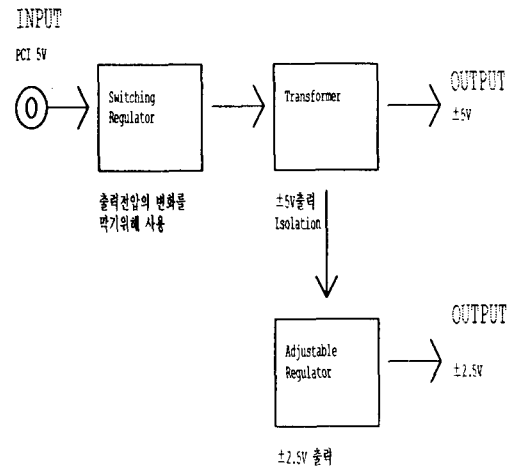


그림 2. 전원부의 구성
Fig. 2. Block diagram of power supply section

2.3.1 초기화 모듈

- (1) 상태 변수(샘플링 속도, 샘플링 시간)의 자동 저장 기능 및 저장 및 로딩 기능이 가능하다.
- (2) 시험 전 모니터링 기능은 사용하는 채널을 모두 연결하고, 단시간에 수집된 파형을 화면에

출력하여 정상적인 입력 신호를 확인할 수 있도록 하였다.

- (3) 5초 이내의 짧은 시간에 데이터를 수집해서 화면에 표시하는 기능이 가능하다.
- (4) 전채널에 대한 모니터링 기능 및 선택된 채널에 대한 모니터링 기능 추가하였다.

2.3.2 데이터 샘플 설정 및 표시 모듈

- (1) 입력 범위 조절은 수동 모드(Volt/Div 선택 기능, 50[mV]~250[V]까지 12단계로 구현)와 자동 모드(자동으로 Volt/Div을 선택해서 화면에 적당히 표현하는 기능)로 구분된다.
- (2) 샘플링 속도 조절 기능(1MS/sec channel : 500S/s~1MS/s, 20KS/sec channel : 1S/s ~ 20KS/s)은 샘플 속도에 맞추어서 최대 샘플 시간을 변경할 수 있도록 설계하고 최고 샘플 속도(1MS/sec, 20KS/sec)에서 60초동안 샘플링 한다. 예를 들면, 1MS/sec의 채널의 샘플 속도가 100KS/sec로 변경되면 최대 샘플 시간도 600초로 변경한다. 최대 샘플 시간에 따라서 10단계로 시간 조절 기능이 가능하도록 하였다. 또한 샘플 시작하기에 앞서 선택된 채널에 대한 샘플 변수(샘플 시간, 샘플 속도)를 설정하고, 동시에 샘플링을 시작 한다.
- (3) 파형 출력은 한 화면에 최대 8개 파형 표시할 수 있도록 하고 채널 번호, 샘플링 속도, 샘플링 시간 표시 기능이 가능하다.
- (4) 저장된 파형의 원하는 부분 확대/축소(Zoom in/out)가 가능하도록 설계하였다.

2.3.3 데이터 분석 모듈

- (1) 커서 기능은 각 채널 파형의 전압/시간 정보를 커서를 이용하여 볼 수 있도록 하였다.
- (2) 이상현상 검색우는 저장된 파형에서 일정 범위를 넘는 위치 검색 할 수 있다.

2.3.4 데이터 불러오기 및 저장 모듈

- (1) 파일 불러오기 기능이 있으며 압축된 파일을 불러올 경우 자동으로 압축을 해제하여 불러온다

- (2) 파일 저장하기 기능이 있으며 데이터량이 많을 경우 압축 옵션을 설정한다.
- (3) 실시간 하드디스크 저장 모드로써 5초마다 데이터를 수집하고 하드디스크에 실시간 저장한다.

2.3.5 캘리브레이션 모듈

계인과 오프셋의 반복 실행을 통한 캘리브레이션 알고리즘을 실행하는 자동 캘리브레이션 기능이 있으며, 이때 모든 캘리브레이션 변수는 저장된다.

2.3.6 기타 기능

- (1) 하드카피 기능으로 화면에 보이는 파형을 프린트 할 수 있다.
- (2) OLE 기능으로 화면에 보이는 파형을 Word /Excel로 전환이 가능하고 그림 파일(BMP)로 도 출력이 가능하다.

3. 실험 및 고찰

3.1 PSpice 시뮬레이션

제안된 시스템의 설계 검증을 위하여 그림 3과 같이 섹션 스키매틱(Section Schematic)을 구성하여 PSpice를 이용한 시뮬레이션을 수행하고 시간 영역과 주파수 영역에서 결과를 분석하였다. 실제 모듈의 제작 이전에 사전 시뮬레이션 검증을 실시하여 설계 조건을 만족하는 결과를 확인하였다.

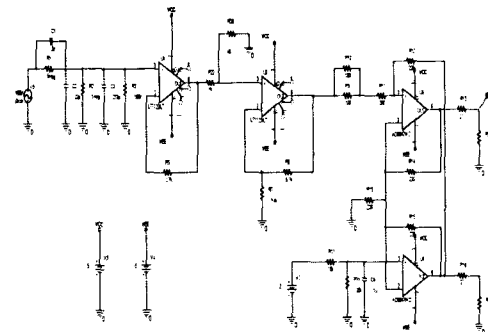


그림 3. 아날로그부의 구성회로
Fig. 3. Schematic diagram of analog section

시간 영역에서 정현파 구현 시뮬레이션을 수행한

원자력 발전소 계측제어시스템의 정보취득장치 설계

결과 그림 4와 같이 입력조건에 일치하는 결과를 확인할 수 있었다. 또한 주파수 영역에서 대수적 소인(Logarithm sweep)을 이용한 시뮬레이션을 수행하여 그림 5와 같이 입력 조건에 일치하는 결과를 확인하였다.

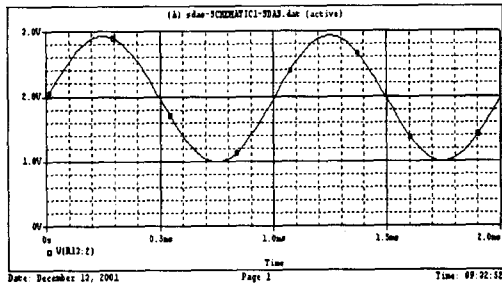


그림 4. 시간영역 PSpice 시뮬레이션
Fig. 4. PSpice simulation in time domain

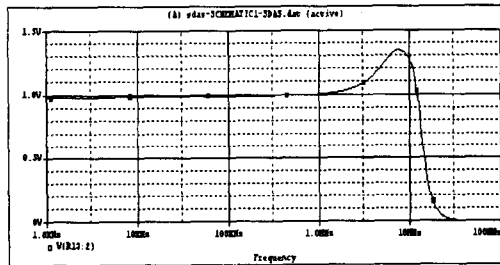


그림 5. 주파수 영역 PSpice 시뮬레이션
Fig. 5. PSpice simulation in frequency domain

3.2 제작 및 비교 실험

Pspice 시뮬레이션을 통하여 성능을 검증한 제안된 SDAS(Signal Data Acquisition System)를 그림 6과 같이 제작하였다. 제안된 SDAS의 하드웨어적인 사양은 기존의 정보취득장치와 비교할 때 우수한 성능을 구현할 수 있도록 부품의 선정에서부터 신중하게 정밀급 부품들로 구성하였다. 실제 시제품 성능의 우수성을 검증하기 위하여 본 논문에서 제안된 SDAS와 Fluke Co.의 NetDAQ, 그리고 National Instrument Co.의 PCI-6031E를 각각 비교 실험을 수행하였다. 먼저 성능의 비교 검증을 위하여 각 정보취득장치의 하드웨어 사양을 비교하고 교정된 공통된 입력 전원 소스를 이용하여 저전압 레벨(100

mV)과 일반적으로 신호처리에 많이 사용되는 10[V] 이하의 전압 레벨을 3단계(1V, 5V, 10V)로 나누어 실험하여 결과를 각각 비교하였다.

실험에 공통적으로 적용된 신호원은 출력 정밀도 0.001%@F.S급의 캘리브레이션 소스를 사용하였으며 3시간동안 매초단위로 데이터를 취득하여 측정 정밀도를 분석하였다. 그림 7은 제안된 SDAS를 이용하여 저전압 100[mV] 레벨의 입력신호의 관측 결과를 자동으로 생성된 그래프로 출력한 결과이며, 이때의 정밀도를 분석하면 0.00274%@F.S~0.00488%@F.S의 결과로 시스템의 요구사양인 정밀도 0.01%를 만족하는 결과를 나타낸다.

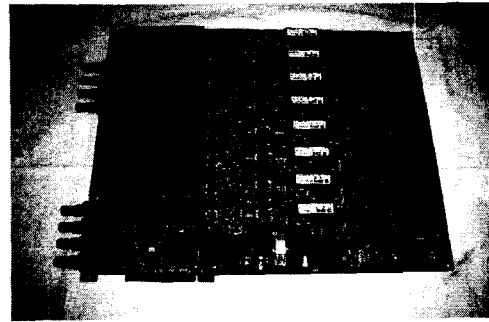


그림 6. 제안된 SDAS
Fig. 6. Proposed SDAS

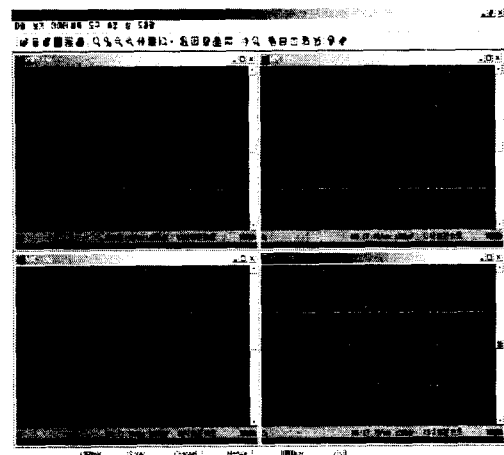


그림 7. SDAS를 사용한 실험 결과(100mV 레벨)
Fig. 7. Experimental results using SDAS (100mV level)

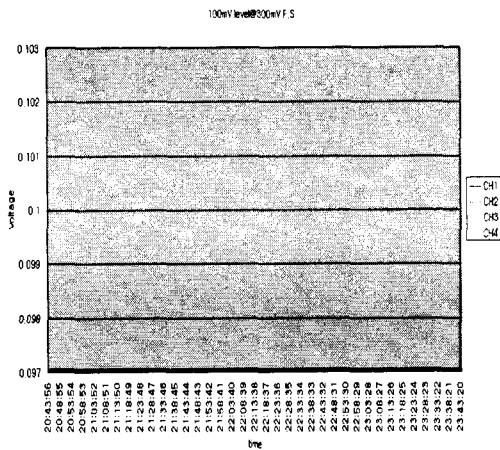


그림 8. NetDAQ를 사용한 실험 결과(100mV 레벨)
Fig. 8. Experimental results using NetDAQ (100mV level)

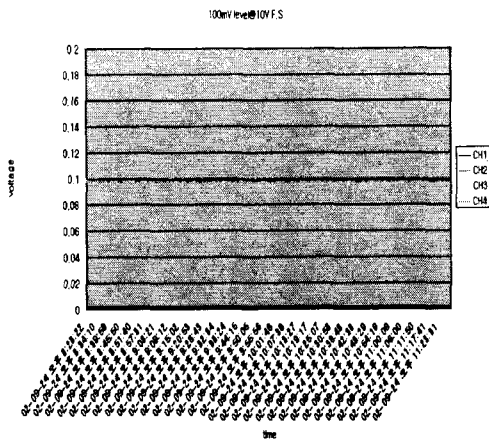


그림 9. PCI-6031E를 사용한 실험 결과(100mV레벨)
Fig. 9. Experimental results using PCI-6031E (100mV level)

그림 8은 Fluke Co.의 NetDAQ를 사용하여 100[mV] level의 입력신호를 관측한 데이터를 Excel을 사용하여 그래프를 생성하여 출력한 결과이며 이때의 정밀도를 분석하면 0.003833%@F.S~0.005% @F.S의 결과로 시스템의 요구사항인 정밀도 0.01%를 만족하는 결과를 나타낸다. 그림 9는 National Instrument Co.의 PCI-6031E를 사용한 100mV 레벨의 입력 신호를 관측한 결과의 데이터를 Excel을 사

용하여 그래프를 생성하여 출력한 결과이다. 이때의 정밀도를 분석하여 보면 0.023%@F.S~0.03%@F.S의 결과로 시스템의 요구사항인 정밀도 0.01%를 만족하지 못하는 결과로 정밀 계측장치의 기기 검증에 적용하기에는 부적합한 결과를 나타낸다.

표 3은 100[mV] 입력에서 정보취득장치의 정밀도를 비교 분석한 결과이다. 제안된 SDAS가 가장 우수한 정밀도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

표 3. 정밀도 비교 분석(100mV 레벨)
Table 3. Analysis of compared accuracy (100mV level)

| Sample | SDAS | NetDAQ | PCI-6031E |
|------------------|---------|---------|-----------|
| Reference (mV) | 100 | | |
| Max (mV) | 100.013 | 100.010 | 100.300 |
| Min (mV) | 99.998 | 99.990 | 97.700 |
| Accuracy (%@F.S) | 0.00274 | 0.00383 | 0.02300 |

이러한 실험 과정을 1[V], 5[V], 10[V] 전압 입력에 대하여 각각 비교 실험을 수행 하였다. 그 결과를 정밀도 측면에서 분석해 보면 제안된 SDAS는 최고 0.00194%@F.S(10V레벨)에서 최저 0.00488@F.S(100mV 레벨)의 범위를 보이고 있어 설계요구사항인 정밀도 0.01%@F.S를 만족하는 것으로 분석 되었다. National Instrument Co.의 PCI-6031E는 저장장치 일체형이나 정밀도가 0.02%이상으로 낮아 고 정밀도를 요구하는 계측제어시스템의 성능 검증에는 부적합하다. 또한 PCI-6031E은 측정 범위를 선택할 수 있는 기능이 없어 시스템의 고정 입력 최대 범위인 10[V]로 정밀도를 계산하여야 하므로 데이터의 분산 대역이 제안된 SDAS보다 광대역으로 계측의 신뢰도가 감소함을 알 수 있었다. Fluke Co.의 NetDAQ 장치는 전범위에 걸쳐 정밀도 요구사항을 만족하고 있으나 그래픽 분석을 위해서는 별도의 Excel 소프트웨어 등을 이용하여야 하므로 측정상의 오차를 발생시킬 수 있는 문제점이 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 자체 정보 저장 기능을 보유하고 있고 정밀도와 정보 취득 특성을 향상시킨 SDAS를 제안하였다. 제안된 SDAS를 사용한 원자력 발전소 계측제어시스템은 성능 검증에서 피시험 시스템의 미세한 변화량을 측정하여 측정 정밀도를 향상시켜 취득 정보의 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 그리고 기존 시제품과의 비교 실험을 통하여 0.00109%@F.S 만큼 향상된 정밀도의 우수성을 검증하였다. 또한 원자력 발전소용 계측제어시스템의 성능 검증을 위한 정보취득장치는 단순히 시스템의 정보를 취득하는 기능 이외에도 분석을 얼마나 효율적으로 할 수 있는가 하는 기능도 포함된다. 제안된 SDAS의 하드웨어 설계는 기존의 정보취득장치와 비교할 때 향상된 성능을 구현하고 설계기준을 만족하도록 부품의 선정에서부터 신중하게 정밀급 부품들로 구성하였고 사전 시뮬레이션을 통하여 회로 설계의 우수성을 검증한 후에 실제 시제품을 제작하였다. 또한 기능 및 분석의 편의성을 제공하는 소프트웨어는 기존의 정보취득장치는 정보를 취득한 후 실시간 분석이 불가능 하였으나 SDAS에서는 최대, 최소값을 실시간으로 화면에 출력하고 간단한 연산을 통하여 사용자에게 정밀도를 즉시 계산할 수 있는 기능을 제공한다.

따라서 본 논문에서 제안된 SDAS는 기존 외국 제조사의 정보취득장치에 의존한 기기 성능 검증을 국산화된 정보취득장치로 대체할 수 있는 기술력을 입증하였으며, 이를 활용하여 고성능 계측장비 개발에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문은 2003학년도 김포대학 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- (1) William Putnam and R. Benjamin Knapp, Input/Data Acquisition System Design for Human Computer Interfacing, Stanford University, 1996.
- (2) National Instruments, Measurement and Automation Catalogue, pp244-246, 1999.
- (3) Peter Bedson and Mike Sargent, "The Development and Application of Guidance on Equipment Qualification of Analytical Instruments," Journal of Accreditation and Quality Assurance, 1996.
- (4) EPRI, Generic Qualification of Digital Components for Nuclear Applications, 2002.
- (5) ANSI/IEEE Std 323-1983, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, 1983.
- (6) ANSI/IEEE Std 344-1987, IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, 1987.
- (7) ANSI/IEEE Std 650-1990, IEEE Standard for Qualification of Class 1E Static Battery Chargers and Inverters for Nuclear Power Generating Stations, 1990.

◇ 저자소개 ◇

조 정 환 (趙正煥)

1963년 12월 12일생. 1988년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1990년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2003년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1990~1991년 LG전자 중앙연구소. 1991~1996년 생산기술연구원. 1996~현재, 김포대학 전자정보계열 조교수. 공업계측제어기술사.

이 동 익 (李東熙)

1965년 10월 2일생. 1988년 한양대학교 전자공학과 졸업. 2003년 한양대학교 산업대학원 전자공학과 졸업(석사). 1990~1999년 (주)포스콘 시스템사업부. 1999~현재, 산업기술시험원 신뢰성평가센터 선임연구원.