

원전 극한 환경적용을 위한 필드버스 통신망 요건

조재완* · 이준구* · 허 섭* · 구인수* · 홍석봉*

Fieldbus Communication Network Requirements for Application of Harsh Environments of Nuclear Power Plant

Jai Wan Cho* · Joon-Koo Lee* · Seop Hur* · In Soo Koo* · Seok-Boong Hong*

■ Abstract ■

As the result of the rapid development of IT technology, an on-line diagnostic system using the fieldbus communication network coupled with a smart sensor module will be widely used at the nuclear power plant in the near future. The smart sensor system is very useful for the prompt understanding of abnormal state of the key equipments installed in the nuclear power plant. In this paper, it is assumed that a smart sensor system based on the fieldbus communication network for the surveillance and diagnostics of safety-critical equipments will be installed in the harsh-environment of the nuclear power plant. It means that the key components of fieldbus communication system including micro-processor, FPGA, and ASIC devices, are to be installed in the RPV (reactor pressure vessel) and the RCS (reactor coolant system) area, which is the area of a high dose-rate gamma irradiation fields. Gamma radiation constraints for the DBA (design basis accident) qualification of the RTD sensor installed in the harsh environment of nuclear power plant, are typically on the order of 4 kGy/h. In order to use a fieldbus communication network as an ad-hoc diagnostics sensor network in the vicinity of the RCS pump area of the nuclear power plant, the robust survivability of IT-based micro-electronic components in such intense gamma-radiation fields therefore should be verified. An intelligent CCD camera system, which are composed of advanced micro-electronics devices based on IT technology, have been gamma irradiated at the dose rate of about 4.2 kGy/h during an hour up to a total dose of 4 kGy. The degradation performance of the gamma irradiated CCD camera system is explained.

Keyword : Fieldbus, Harsh Environments, Design Basis Accident, Gamma Radiation, Sensor Network

1. 서 론

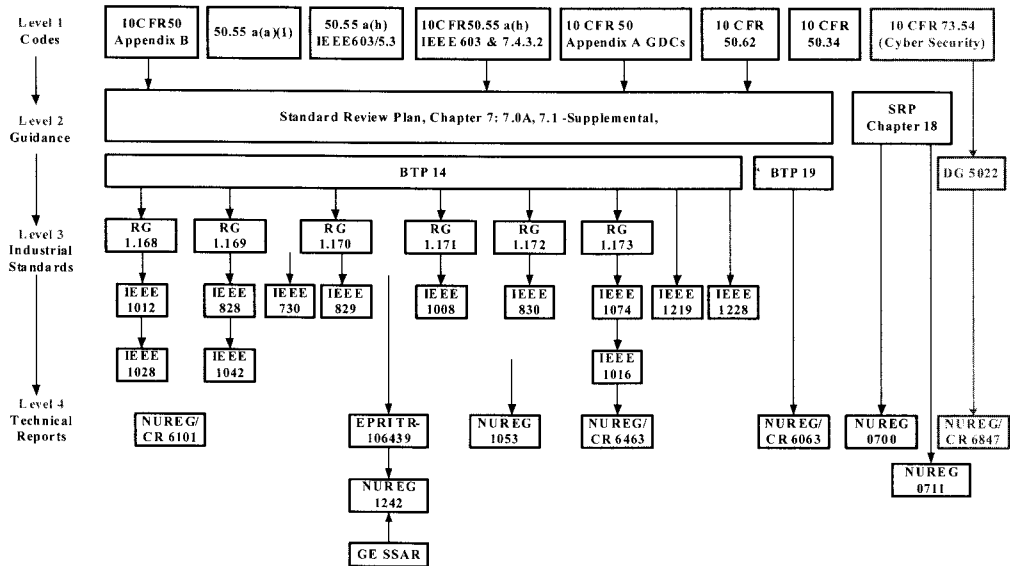
IT 기술과 센서가 융합되는 구조의 스마트 센서, 필드 버스 등이 일반 산업 현장에서는 유지보수, 품질관리 효율화, 생산성 향상을 목적으로 신규 증설되는 플랜트를 중심으로 설치되거나 운영 중에 있다. 디지털 기술에 의한 IT 기반 산업 구조로 변경되면서 아날로그 기기 및 소자들이 소용없게 되거나 수요가 감소하여 단종 되는 추세에 있다. 아날로그 형태의 기기 및 소자의 공급 불확실성이 기존의 아날로그 기기 및 소자로 구성되어 있는 원자력 발전소 I&C 통신망의 건전성을 위협하는 요인이 되고 있다. 상업 운전 중인 원전 I&C 통신망의 경우 안전성 측면에서 비교적 위험도가 낮은 일부 아날로그 계통을 디지털 계통으로 변경하고 있으며 변경된 디지털 계통의 신뢰성이 우수한 것으로 평가 및 검증됨에 따라 디지털 계통의 개선(upgrade) 범위를 넓혀가고 있다[1, 2]. Westinghouse, Siemens, Triconex 등은 원전 I&C 통신망에 적용할 수 있는 Class 1E 규격의 기술 검증 기준을 통과한 필드버스 통신망을 개발하여 시장에 출시하고 있다. 이들 필드버스 시스템은 미국 NRC 로부터 안전성 평가 보고서(SAR)를 획득한 상태이므로 가동 중이거나 건설 중인 원전에 적용될 수 있다[3, 4]. 이들 필드버스 통신망도 원전의 물리적인 환경을 고려하였을 때에는 상대적으로 온화한(mild) 환경에 해당하는 제어 건물(control building), BOP 등에 설치된다. 격납 건물 내부는 Category A 등급으로 분류되며 격납 건물 내부의 원자로 압력용기, 원자로 안전계통 주변에 설치되는 센서, 구동기, 기기 및 통신망은 IEEE Std. 323-1974에서 정의하는 극한환경(harsh environment) 요건에서 생존할 수 있는 내환경성이 요구된다.

본 논문에서는 스마트 센서, 필드 버스 등 IT 기반의 센서 통신망 기술을 원전 격납 건물내부의 극한 환경에 적용하기 위한 방안을 검토한다. 필드버스 통신망이 원전 격납건물 내부에 적용된다는 것은 마이크로프로세서, FPGA, ASIC 등의 IT

기반 핵심소자가 고 선량을 방사선 피폭환경인 원자로 압력용기, 원자로 냉각재 계통의 주변에 설치됨을 의미한다. 건설 중에 있는 원자력발전소의 I&C 통신망을 IT 기반 첨단 통신망으로 구축하기 위하여 위험도 기반 확률론적 신뢰성 평가 기법을 이용하여 마이크로프로세서, FPGA, ASIC 등의 오류 발생 확률을 분석한 NUREG 보고서를 검토한다. 원전 안전 계통의 주요 기기에 적용되고 있는 IEEE 323-1983, IEC 60780 등의 요건들을 통신망 기기 관점에서 비교 분석하고 IT 기술 발전에 따라 개선의 필요성이 있는 요건을 검토한다. 또한, 정상운전 중의 원전 격납 건물 내부의 환경(온도, 감마선, 습도) 특성을 조사하고 냉각재 상실 사고를 가정된 DBA(설계 기준사고) 요건의 감마선 피폭 환경에서 IT 소자의 동작 특성을 실험하였다.

2. 원전 통신망의 규제요건

[그림 1]은 2009년에 상업운전을 시작하는 대만의 Lungmen 원자력발전소(ABWR1350MW) I&C 통신망의 법령 및 표준 체계이다[5]. 원전 통신망에 사이버 보안에 대한 규제 요건이 추가되고 있다. NRC는 NUREG/CR-6847("cyber security self-assessment method for U.S. nuclear power plants"), NEI 04-04("cyber Security Program for Power Reactors") 내용을 보완하여 10CFR 73.54 ("protection of digital computer and communication systems and networks")를 공표하였다. 10CFR 73.54를 지원하는 지침 DG-5022("cyber security programs for nuclear facilities")를 제정 검토 중에 있다. 스마트 센서 또는 필드 버스가 격납 건물 내에 적용된다는 것은 사이버 공격 목표가 원전 안전계통의 핵심 센서, 구동기로 확대되는 것이다. 격납 건물 적용을 위한 스마트센서, 필드버스를 설계할 경우 환경요건 뿐만 아니라 10CFR 73.54, DG5022, NUREG/CR-6847 체계로 구성되는 사이버보안 지침을 반영해야 한다. NRC, ORNL 등은



[그림 1] 원전 통신망 규제 요건

마이크로세서 기반의 원전 통신망 기기들이 설치되는 장소에 대한 환경의 정의를 보다 엄격히 하고 있다[6]. 극한 환경(harsh environment)과 온화 환경을 3개의 카테고리 A, B, C로 세분화 하고 있다. <표 1>에 카테고리에 대한 정의를 나타내고 있다.

3. 원전 극한환경의 물리적 환경

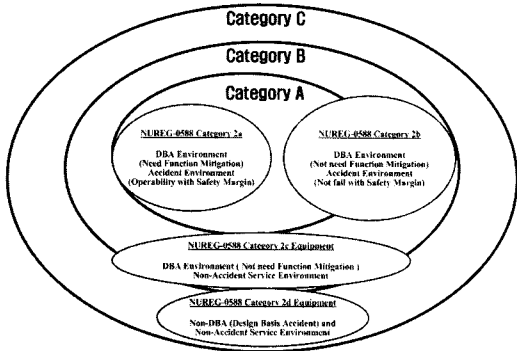
[그림 3]은 PWR 원자로 보호 계통을 간략화한 것이다. 격납 건물 내에 위치한 트랜스미터는 온

도, 압력, 수위, 유량 및 중성자 계측데이터 등을 실배선으로 연결된 BTP(bistable trip processor)에 전송한다. BTP는 센서 데이터를 처리하여 설정 기준치보다 높거나 낮으면 원자로 정지(trip) 신호를 생성한다. 4x2 논리 연산을 통해 2개 이상의 채널에서 설정 기준치 이상의 신호가 감지되면 CP (coincidence processor)는 ESF(공학적 안전설비) 작동 개시 신호를 보내고 제어봉 낙하신호를 발생시켜 원자로를 정지시킨다.

아날로그 형태의 BTP, CP 등은 마이크로프로

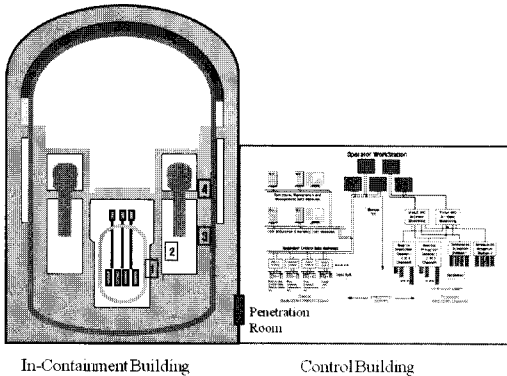
<표 1> 원자력발전소 카테고리 영역의 환경요건

카테고리	정 의	
A	격납 건물(containment) 내부 ≥ Category B 환경요건	
B	격납 건물 외부/적용 환경 요건	
	Radiation(TID/40년)	4 Gy ≤ TID ≤ 100 Gy
	온도	정상 운전 ≤ 38°C(100°F) 사고 운전 ≤ 제조 업체 보증 최대 동작온도의 90%
	습도	정상 운전 ≤ 80% 비정상 및 사고 운전 ≤ 95%
C	격납 건물 외부/적용 환경요건	
	방사선	TID ≤ 4 Gy(400 Rad)
	온도	정상, 사고 ≤ 38°C(100°F)
	습도	정상 운전 ≤ 80% 비정상 및 사고 운전 ≤ 95%



[그림 2] NUREG-0588의 Category 분류

세서, 컴퓨터에 기반한 디지털 IT 시스템으로 개선되고 있다. 제어 건물은 온화(mild) 환경에 해당하는 원자로 격납건물 외부에 위치하고 있다. 이를 [그림 4]에 나타낸다.



[그림 4] 원자로 격납건물 및 제어 건물

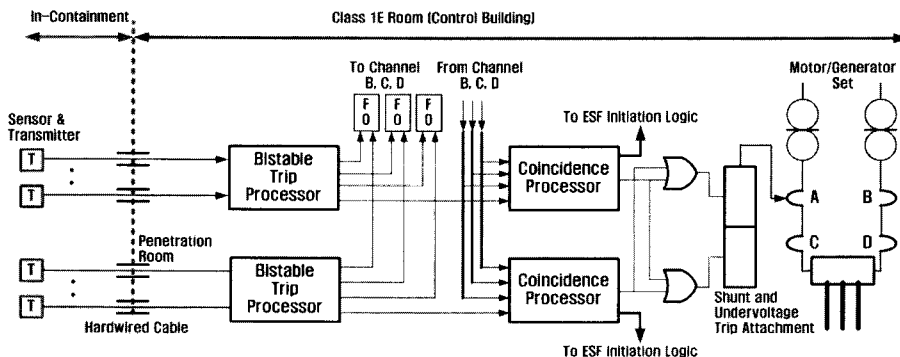
좌측 그림에서 숫자로 표시한 것은 극한환경인 격납 건물에 위치한 원전 안전 계통 기기를 나타내고 있다. <표 2>에 정상 가동 조건에서의 안전 계통기기 주변의 방사선 준위를 나타내고, <표 3>은 제어 건물의 정상가동/사고시의 물리적 환경 특성을 나타낸다[7, 8].

<표 2> 안전계통 기기 주변의 감마선 준위

Radiation Levels Inside Containment		
Location		Dose Rate
Area	Description	Gamma [Rad/h]
1	Reactor Vessel Primary Shield Annulus	1×10^4 (a)
2	RCS Loop (General area)	50
	RCS loop (Piping Area)	200
3	Outside RCS Loop	0.005~0.2
4	Operating Deck	0.005~0.05

[a] Calculated values

원전용 트랜스미터는 5~10년의 운용주기를 품질보증요건으로 규정하고 있다[9]. 따라서 [그림 4]의 안전계통에 사용되는 Class 1E 트랜스미터의 운용주기를 5~10년으로 규정하면 누적방사선선량



[그림 3] 원자로 보호계통 개념도

〈표 3〉 제어 건물의 환경 특성

영역	상태	온도(°F)	습도(%)	방사선(Rads/40년)
주 제어실	정상	75	60	1×10 ³
	이상	75	-	
	사고	75	60	
케이블 관통구	정상	104	60	1×10 ³
	이상	95	-	
	사고	95	60	
스위치 기어	정상	104	60	1×10 ³
	이상	104	-	
	사고	104	60	

정상 : 전 출력 운전 조건

이상 : 전 출력 운전 상태에서의 전원상실사건
LOOP(Loss Of Offsite Power) at Full Power Operating Condition

사고 : 전원상실사건과 결합된 냉각재 상실사고
LOCA(Loss Of Coolant Accident) Coupled with a LOOP Event

(TID) 기준으로 2MRad~20Mrad의 내방사선 특성이 요구된다.

원자력 발전소 주요건물의 사고시의 환경특성을 안전성 분석보고서(SAR-safety analysis report)에 의해 추정된 값을 <표 4>에 나타내고 있다[10].

<표 5>는 마이크로 전자회로의 제조 공정에 따

른 내방사선 특성을 나타내고 있다[11].

<표 4>, <표 5>로부터 마이크로프로세서, ASIC, FPGA 소자를 TTL 공정으로 설계/제조할 경우 RLAT(radiation lot acceptance test)를 통해 10 MRad의 내방사선 특성을 갖는 소자를 선택하여 필드버스를 설계/제작할 수 있다. 누적방사선 피

〈표 4〉 원자력발전소 주요건물의 사고시 환경

영역		온도(°F)	습도(%)	방사선(Rads/6개월)
원자로 건물	S/G Loop 내부	250~385	100	8×10 ⁶
	S/G Loop 외부	250~385	100	8×10 ⁶
보조 건물		100~325	70~100	
제어 건물		84~120	70~95	
터빈 건물		-	-	-
디젤 발전기		122	95	< 500

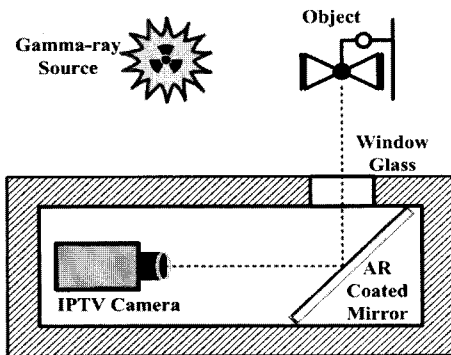
(※) 주 증기관 파단사고를 가정할 경우, 격납건물은 잠시 동안 380°F 이상의 온도분포를 가진다. 그 후 온도는 380°F 보다 상당히 낮은 온도분포를 갖는다.

(※) 방사선은 사고 후 6개월까지의 누적 방사선 피폭량이다.

폭선량기준만을 고려하면 격납건물 내의 센서통신망에 필드버스를 적용할 수 있음을 알 수 있다. DBA(설계기준사고) 시의 고 선량을 피폭요건도 함께 고려하여야 하므로 실리콘 물질에 기반한 마이크로 전자회로 구성에 의해 설계/제작되는 필드버스, 스마트 센서를 원전 극한 환경에 적용하기 위해서는 [그림 5]와 같은 감마선 차폐 구조 내부에 필드버스 통신시스템의 핵심 소자들이 수용되어 외부의 방사선 피폭 영향으로 부터 소자의 강건성이 확보되어야 한다.

<표 5> 공정에 따른 전자소자의 내방사선 특성

공 정	내방사선 특성 (rad)
NMOS	500~10k
CMOS/Bulk	1k~100k
CMOS/Bulk(내방사화)	2k~1M
CMOS/SOS	1k~100k
TTL, 저전력	100k~10M
Schottky TTL, 저전력	100k~10M
Advanced Schottky TTL, 저전력	20k~1M
I ² L	20k~1M
ECL	≥ 5M
Bipolar, BI-FET(Linear)	6k~10M



[그림 5] 감마선 차폐 구조

<표 6>은 Lungmen 원자력 발전소 I&C 시스템

의 주 계약자인 GE 사가 위험도기반 신뢰성 평가 기법으로 디지털 I&C 계통의 주요 모듈에 대한 고장발생빈도를 측정된 것을 나타내고 있다. <표 7>에서 고장율의 95%는 30분 간격으로 수행되는 자가 진단 시험(self-testing)에서 검출되는 오류이며, 나머지 5%는 분기별로 수행되는 감시 시험(surveillance test)을 통해 검출된다. 디지털정지모듈(DTM)의 경우 고장율은 1.2×10^{-4} 이다. 이는 원전 I&C 시스템의 가동일이 165일을 경과하면 DTM에서 고장이 발생함을 의미한다. 4x2의 다중성 개념을 적용하면 DTM 모듈 2개가 동시에 고장을 일으켜 원자로를 자동 정지시키는 사건이 발생할 확률은 1.44×10^{-8} 이다. 2개의 디지털트립모듈의 동시 고장으로 인한 원자로 정지 사건은 3,700년에 한번 발생하므로 원자력 발전소 수명 60년 동안 거의 발생하지 않는 사건이다. 하나의 DTM에서 고장이 발생되면 4x2 다중성 논리가 3x2 논리로

<표 6> 디지털 I&C 주요 모듈의 고장율

NPP	Module	Failure Rate
Lungmen	DTM	1.2×10^{-4}
	MUX	1.66×10^{-3}
GE ESBWR	TLU	9×10^{-4}
	TLU BLC	
	DTM (Safety System)	6×10^{-4}
	DTM/TLU and MUX (Non-Safety)	9×10^{-4}
	RMU	$5 \times 10^{-6}/h$
	EMS	$1 \times 10^{-5}/h$
	VLC	2.8×10^{-5}
	1/N Logic Card	3×10^{-4}
	Electro-Mechanical Relay	1×10^{-4}

DTM : Digital Trip Module
 MUX : Multiplexer
 TLU : Trip Logic Unit
 RMU : Remote Multiplexing Unit
 EMS : Essential Multiplexing System
 VLC : Voting Logic Card
 BLC : Bypass Logic Card

변경된다. 정상 운전 중에도고장난 DTM 모듈을 교체하거나 유지보수할 수 있다. 운전 중 유지보수가 가능한 것은 원전 디지털 I&C 시스템의 핵심 모듈들이 사람의 출입이 가능한 온화(mild) 환경에 해당하는 제어 건물에 위치하기 때문이다. 원자로 가동 중에 사람이 격납건물 내부로 진입하는 것이 불가능하다. 따라서 <표 7>에 나타내고 있는 DTM 고장으로 설계되는 펠드버스, 스마트 센서는 격납건물 내부의 극한 환경에 적용될 수 없다. 원자력발전소 상업 운전주기를 18개월로 규정하면 마이크로프로세서, ASIC, FPGA 등으로 설계제작되는 펠드버스, 스마트 센서의 고장율은 대략적으로 추산하면 $3,62 \times 10^{-5}$ 이하이다. 제어빌딩에서 허용되는 고장율 보다 3배 이상 강건성이 보증되어야 함을 알 수 있다.

<표 7>은 원자력 발전소에 사용되는 Class 1E 주요 기기의 품질보증 수명을 나타내고 있다[12].

<표 7> Class 1E 기기의 품질보증 수명 요건

기기	보증수명 (년)	환경	
Junction Box	20	극한환경 (harsh)	
Solenoid Valve	8~20		
Motor Operated Valve	5~40		
Motor	20~40		
Limit Switch	10~20		
Transmitter	5~10		
RTD	20~40		
Cable	40		
전기 기기	Circuit Breaker	5~20	온화환경 (mild)
	Potentiometer		
	Capacitor		
	Switch		
	Relay		

<표 6>, <표 7>로부터 40년의 품질보증 수명요건을 명시한 케이블을 제외하고는 일반 기기의 경우 20년의 품질보증수명을 만족해야한다. 격납건

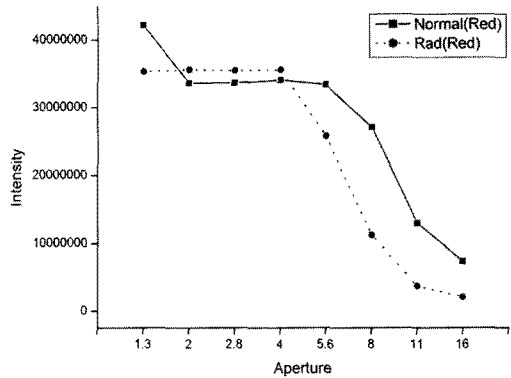
물 내부에 적용하기 위한 펠드버스는 ESBWR I&C 계통에 적용되는 RMU, EMS 기기의 고장율 이하로 강건하게 설계 제작되어야 한다. 향후 건설 중인 원자력발전소의 경우 상업운전수명을 60년으로 설계하고 있으므로 펠드버스 모듈간의 데이터 전송선로인 케이블의 품질 보증수명 요건도 60년으로 상향 조정되어야 할 것으로 판단된다.

4. CCD 카메라 모듈의 원전극한환경생존성 실험

펠드버스 스마트 센서 통신망이 격납구조 내부의 극한환경에 적용되기 위해서는 설계기준사고 요건의 온도, 습도 및 감마선 환경 하에서 센서 통신망의 강건성이 입증되어야 한다. 펠드버스 센서 통신망의 정상 가동 중 요건을 고려하면 센서 통신망의 핵심 소자인 ASIC FPGA 소자는 감마선 피폭 환경에서 생존성(강건성)이 검증되어야 한다. 본 연구에서는 설계기준사고(DBA) 환경 요건들 중에서 방사선(감마선) 요건만 고려한다. [그림 6]에 ASIC FPGA 소자의 감마선 영향 평가 실험 구성도를 나타낸다. 일반적으로 DSP, FPGA 칩 등의 감마선 영향 평가 실험에서는 DSP, FPGA 칩의 병렬 신호(I/O) 단자를 모두 연결하여 cell 단위로 로직의 동작특성을 분석하여 감마선 영향을 평가한다. 본 연구에 이용한 고 선량 감마선 조사시설의 Co-60(1.17/1.3MeV) 선원이 1m×1m 크기의 면 선원이고 감마선 선원으로부터 데이터 분석실까지의 관통구거리가 15m이므로 FPGA 칩 평가에 필요한 Function Generator, 관련 하드웨어의 차폐가 용이하지 않다. 또한 고속 로직 신호를 15m 이상 관통구를 통해 전송 해야 하는 shield 케이블 문제 등으로 인하여 본 연구에서는 신호의 선원으로 CCD 카메라를 이용하였다. CCD 카메라를 8.4mm 두께의 납으로 차폐하여 CCD 카메라에 노출되는 감마선 세기를 1/100로 감쇠시켰다. 감마선 선량율은 RTD 센서의 DBA 피폭 요건인 4 kGy/h로 설정하였다. CCD 카메라의 2차원 영상

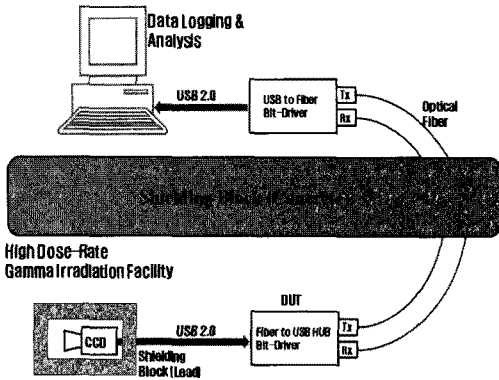
데이터를 USB2.0의 직렬신호로 전송하고 이를 광신호로 변환하여 50m 길이의 광섬유 케이블을 관통구를 통해 데이터 분석실과 연결한다. 데이터 분석실에서 CCD 카메라의 직렬 전송 데이터를 복원하여 영상의 열화 정도를 관측함으로써 DUT(Device Under Test)에 내장되어 있는 ASIC FPGA 소자의 감마선 피폭 영향 특성을 간접적으로 평가할 수 있다. 그 결과를 <표 8>에 나타낸다. <표 8>에서 거리는 Co-60(1.17/1.3MeV) 감마선 선원과 DUT 사이의 거리이다. Sony CCD 카메라의 예에서 보듯이 감마선을 적절히 차폐하면 원전 격납구조 내부와 같은 극한 환경에서도 필드 센서 통신망이 적용될 수 있음을 알 수 있다. [그림 5]의 차폐 구조 실험에서 IPTV 카메라의 관측 창(glass

window)과 비반사 거울(anti reflection coated mirror)은 4kGy/h의 선량을 직접 받는다.



[그림 7] Red 성분의 밝기 비교

관측 창과 같은 물질인 유리 성분의 렌즈에 4kGy/h의 고 선량을 감마선을 1시간여 조사하였을 때 렌즈에 칼라 센터가 형성되어 렌즈의 밝기가 1/2로 감소하였음을 확인하였다. 이를 [그림 7]에 나타낸다. [그림 7]에서 x축은 렌즈의 조리개를 나타내고 y축은 칼라 영상의 RGB 성분 중 R성분의 밝기를 나타낸다. 실선으로 표시한 정상 렌즈의 경우 f5.6에서 감도(밝기)가 감소하는데 비해 점선으로 표시된 감마선 조사렌즈의 경우 정상 렌즈보다 2배 밝은 f4.0에서 밝기가 감소함을 보이고 있다.



[그림 6] 감마선 영향 평가 실험 장치 구성도

<표 8> CCD 센서 모듈의 감마선 피폭 영향 평가

DUT	Sony FCB-PV480	Hitachi HD49815TF
Dose Rate (Gy/h)	25.5	696
Distance(cm)	74.1	81.1
Gamma effect	Shielded by Lead	-
Recovery test (After irradiation)	Normal operation	Fail

5. 결 론

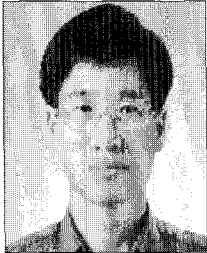
본 논문에서는 원전 극한 환경에 위치한 원전안전계통의 센서, 트랜스미터, 구동기 등을 필드버스로 연결하기 위한 요건을 검토하였다. 필드버스 통신망이 원전 극한 환경에 적용된다는 것은 마이크로프로세서, FPGA, ASIC 등의 IT 기반 핵심소자가 고 선량을 방사선 피폭환경인 원자로 압력용기, 원자로 냉각재 계통의 주변에 설치됨을 의미한다. 건설 중에 있는 원자력발전소의 I&C 통신망을 IT 기반 첨단 통신망으로 구축하기 위하여 위

험도 기반 확률론적 신뢰성 평가 기법을 이용하여 마이크로프로세서, FPGA, ASIC 등의 오류 발생 확률을 분석한 NUREG 보고서를 검토하였다. 원자로 가동 중에 사람이 원자로 건물 내부로 진입하는 것이 불가능하다. 따라서, 원자력 발전소 상업 운전주기를 18개월로 규정하면 마이크로프로세서, ASIC, FPGA 등으로 설계 제작되는 필드버스 통신망의 고장율은 3.62×10^{-5} 이하의 강건성이 확보되어야 한다.

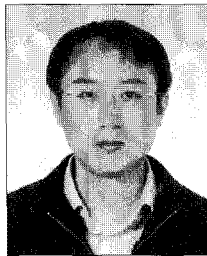
참 고 문 헌

- [1] Chang-Fu Chuang, Swu Yih, et al., "Preliminary Evaluation of NRC Digital I&C Regulations Based on Lungmen Licensing Experiences", *NPIC&HMIT*, 2000.
- [2] Chuang, C. F. and Y. Chen, "Investigation of Data Communication Systems in Lungmen Nuclear Power Plant Project", *IEEE Trans. on Nuclear Science*, Vol.53, No.3(2006), pp. 1443-1449.
- [3] Schoerner, O., *Qualification of the Framatome ANP TXS Digital Safety I&C*, EPRI TR-114017, Palo Alto, 2002.
- [4] Collette, P., *Generic Qualification of the Westing-house Common Qualified PLC-Based Platform for Safety-Related Applications*, EPRI TR-110045, Palo Alto, 2002.
- [5] Chuang, C. F. and Y. Chen, "Regulatory Overview of Digital I&C in Taiwan Lungmen Project", *NRC 19th Annual Regulatory Information Conference*, 2007.
- [6] Korsah, K. and R. T. Wood, "Application of Microprocessor-Based Equipment in Nuclear Power Plants Technical Basis for a Qualification Methodology", ORNL TM-2000/236.
- [7] Sejvar, J., "Normal Operating Radiation Levels In Pressurized Water Reactor Plants", *Nuclear Technology*, Vol.36, Nov(1977), pp.48-55.
- [8] Hassan, M., "Digital I&C Systems in Nuclear Power Plants", NUREG/CR-6579, 1998.
- [9] Kofi Korsah, "Qualification Issues Associated with the Use of Advanced I&C Control System Hardware in Nuclear Power Plants", *IAEA Specialists Meeting*, 1993.
- [10] Korsah, K., "Technical Basis for Environmental Qualification of Microprocessor-Based Safety-Related Equipment in Nuclear Power Plants", NUREG/CR-6479, 1998.
- [11] "Comparison of Radiation Susceptibility for Microcircuits of Different Technologies", MIL-HDBK-978-B.
- [12] Jabs R. H. and D. E. Rygg, "Extending Qualified Life of Class 1E Equipment", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.4, No.2 (1989), pp.211-215.

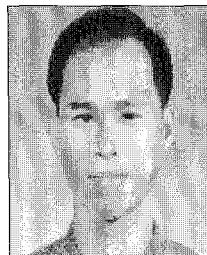
◆ 저 자 소 개 ◆

**조 재 완** (jwcho@kaeri.re.kr)

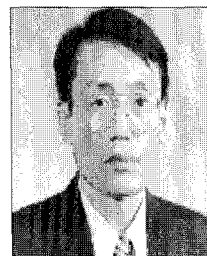
경북대학교 전자공학 석사졸업. 현재는 한국원자력 연구원에서 IT 기반 통신망기술개발과제에 참여하고 있으며 주요 관심분야는 고 방사선 환경 센서통신망설계임.

**이 준 구** (jkleee@kaeri.re.kr)

충남대학교 전기공학 석사졸업. 현재는 한국원자력 연구원에서 일체형 원자로 (SMART) I&C 시스템 설계과제에 참여하고 있으며 주요 관심분야는 MMIS 시스템 개발임.

**허 섭** (shur@kaeri.re.kr)

충남대학교 물리학 박사. 현재는 한국원자력 연구원에서 한국형 디지털 원전 제어계통 국산화 과제에 참여하고 있으며 주요 관심분야는 원전 통신망 프로토콜 설계임.

**구 인 수** (iskoo@kaeri.re.kr)

충남대학교 전자공학 박사. 현재는 한국원자력 연구원에서 일체형 원자로 (SMART) I&C 시스템, 연구용 원자로 I&C 시스템 설계에 참여하고 있으며 주요 관심분야는 원전 통신망 국제표준화 설계임.

**홍 석 봉** (boong@kaeri.re.kr)

성균관대학교 전자공학 박사. 현재는 한국원자력 연구원에서 IT 기반 통신망 기술개발과제를 책임지고 있으며 주요 관심분야는 미래형 원전 통신망의 국제 표준 프로토콜 개발임.