

## 원전 극한환경적용 센서 통신망 구조

조재완, 이준구, 허섭, 구인수, 홍석봉  
한국 원자력 연구원 원자력 산업 기술개발 본부

### Sensor Communication Network Architecture for Harsh Environments of Nuclear Power Plant

Jai Wan Cho, Joon-Koo Lee, Seop Hur, In Soo Koo, and Seok-Boong Hong  
Division of Nuclear Technology Project Development, Korea Atomic Energy Research Institute

**Abstract** - 원자력 발전소 격납구조(containment) 내에 설치되는 센서, 구동기(actuator) 및 설비는 원전의 안전운전과 함께 방사능 누출사고와 같은 중대사고(severe accident)를 예방하기 위한 것이다. 격납구조 내부는 Category I 등급으로 분류되며, 격납구조 내부에 설치되는 센서, 구동기, 기기 및 통신망은 IEEE Std. 323-1974 에서 정의하는 극한환경(harsh environment) 요건에서 생존할 수 있는 내환경성이 요구된다. 이러한 엄격한 내환경성 요건으로 인해 일반 산업의 IT 기반 센서통신망이 원전 격납건물 내부에는 적용되지 않고 있다. 최근에 이르러 독일을 중심으로 신규로 건설 중이거나 계획 중인 원전에서는 일반 산업의 IT 기반 센서 통신망 적용이 검토되고 있다. 본 논문에서는 IT 기반의 첨단 센서 통신망 기술을 격납구조내부와 같은 극한 환경에 적용하기 위한 방안을 제시하고자 한다. 정상운전중의 원전 격납 건물 내부의 환경(온도, 감마선, 습도) 특성과 중대 사고를 가정한DBA(설계 기준사고) 요건에서의 환경 특성을 조사하였다. 또한 설계기준사고에서 정의한 감마선 조사 환경에서 통신 시스템의 생존성을 실험하였다. 이를 토대로 격납구조 내부의 원전 극한 환경 통신망의 개선방안을 제시하고자 한다.

개 이상의 채널에서 설정 기준치 이상의 신호가 감지되면 CP(Coincidence Processor)는 ESF(공학적 안전설비) 작동 개시 신호를 보내고 제어봉 낙하 신호를 발생시켜 원자로를 정지시킨다.

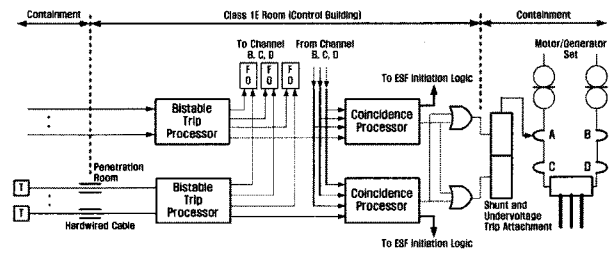


그림 1. 원자로 보호계통 개념도

그림 1에 나타낸 바와 같이 아날로그 형태의 BTP, CP 등의 I&C 통신망은 마이크로프로세서, 컴퓨터에 기반한 디지털 I&C 센서 통신망으로 변경되고 있다. 디지털 I&C 통신망의 품질 등급은 안전 필수(Safety Critical) 계통일 경우 IEEE에서 규정한 Class-1E 요건을 만족해야 한다. 제어실이 원자로 격납건물 외부에 위치하고 있으므로 환경요건은 격납건물 내부보다 완화된 환경에 속한다. 그림 2에 정상가동 중의 원자로 격납구조 내의 감마선 선량을 준위를 나타내고 있다[6].

## 1. 서 론

원전 I&C 통신망은 원자력 발전소의 신경망에 해당한다. 원전 운전원이 원자력 발전소의 안전성과 관련한 모든 현상들을 감시하고 필요한 보호 및 비상 대응 조치를 취할 수 있도록 지원한다. IT 기술 발전에 의해 원자력 발전소에 구축되어 있는 아날로그 형태의 I&C 통신망이 마이크로프로세서와 컴퓨터에 기반한 디지털 I&C 시스템으로 개선되고 있다[1]. 현재 일반 산업의 형태가 디지털 기술에 의한 IT 기반 산업 구조로 변경되면서 아날로그 기기 및 소자들이 소용없게 되거나 수요가 감소하여 단종되는 추세에 있다. 이러한 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 시범적으로 변경하고 있으며 변경된 디지털 계통의 신뢰성이 우수한 것으로 평가 및 검증됨에 따라 디지털 계통의 개선(upgrade) 범위를 넓혀가고 있다[2][3]. 한편 건설 중에 있거나 계획 중인 원전의 경우는 디지털 I&C 통신망의 적용을 우선적으로 고려하고 있다. 일반 산업에서 활용도가 높은 필드버스(field bus) 통신망을 원전 센서 통신망에 적용하기 위한 검토가 시도되고 있다. 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[4][5]. 이들 필드버스 통신망도 원전의 물리적인 환경을 고려하였을 때에는 상대적으로 온화한(mild) 환경에 해당하는 제어실(control building), BOP 등에 설치된다. 격납구조 내부는 Category 1(A) 등급으로 분류되며 격납구조 내부에 설치되는 센서, 구동기, 기기 및 통신망은 IEEE Std. 323-1974 에서 정의하는 극한환경(harsh environment) 요건에서 생존할 수 있는 내환경성이 요구된다. 내환경성 요건으로 인해 일반 산업의 IT 기반 센서통신망이 원전 격납건물 내부에는 적용되지 않고 있다.

본 논문에서는 IT 기반의 첨단 센서 통신망 기술을 격납 구조내부와 같은 극한 환경에 적용하기 위한 방안을 제시하고자 한다. 정상운전중의 원전 격납 건물 내부의 환경(온도, 감마선, 습도) 특성과 LOCA(냉각재 상실 사고)를 가정한 DBA(설계 기준사고) 요건에서의 환경 특성을 조사하였다. 설계기준사고 요건에서 정의한 감마선 조사 환경에서 통신 시스템의 생존성을 실험하였다. 이를 토대로 격납구조 내부의 원전 극한 환경 통신망의 개선 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 원전 주요 구조물 내부의 물리적 환경

그림 1은 PWR 원자로 보호 계통을 간략화한 것이다. 격납구조 내에 위치한 트랜스미터는 온도, 압력, 수위 및 유량 데이터 등을 BTP(Bistable Trip Processor)에 전송한다. BTP는 센서 데이터를 처리하여 설정 기준치보다 이상이면 원자로 정지(trip) 신호를 생성한다. 4x2 논리 연산을 통해 2

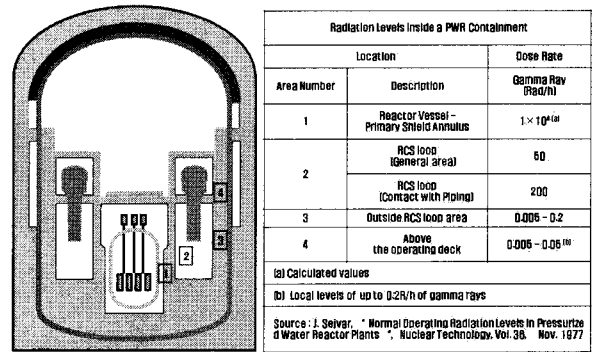


그림 2. 정상 가동 중의 원자로 격납구조 내부의 방사선 준위

표 1. Control Building의 환경특성

Environmental Conditions in Selected Areas of the Example PWR						
Area	Condition <sup>(1)</sup>	Temperature (°F)		Humidity (%)		Radiation <sup>(2)</sup> (rads)
		Max.	Min.	Max.	Min.	
Main Control Room	Normal	75	70	60	30	1 x 10 <sup>3</sup>
	Abnormal	75	-	-	-	
	Accident	75	-	60	-	
Cable Spreading Room	Normal	104	55	60	3	1 x 10 <sup>3</sup>
	Abnormal	95	-	-	-	
	Accident	95	-	60	-	
Switchgear Room	Normal	104	55	60	3	1 x 10 <sup>3</sup>
	Abnormal	104	-	-	-	
	Accident	104	-	60	-	

(1) Normal : Full Power Operating Condition.  
Abnormal : LOOP(Loss Of Offsite Power) at Full Power Operating Condition.  
Accident : LOCA(Loss Of Coolant Accident) Coupled with a LOOP Event  
(2) Cumulative Dose over 40 years  
Source: NUREG/CR-6679, Digital I&C Systems in Nuclear Power Plants, 1998

IEEE Class 1E 요건의 원전용 기기 및 소자는 5-40 년 운용주기의 품질 보증 요건을 만족해야 한다. 트랜스미터는 5-10년의 운용주기를 품질보증

요건으로 규정하고 있다[7]. 따라서 그림 2의 RCS 계통에 사용되는 트랜스미터 센서는 Class 1E의 품질보증 요건(5-10년)을 고려할 경우 TID 기준으로 2MRad~20Mrad의 내방사선 특성이 요구된다. 표 1, 2는 제어빌딩과 격납구조내의 사고(LOCA) 시의 환경특성을 나타내고 있다[8][9].

표 2. SAR로부터 추론한 원전 주요 건물의 환경 특성

Typical normal and accident conditions in nuclear power plants estimated from SAR reports						
Physical Location in Plant	Operating Temperature (°F)		Humidity (%)		Dose (rad/h)	
	Normal	Accident	Normal	Accident	Normal	Accident
Containment Floor	50 - 120	250 - 300	50 - 100	100	$3.5 \times 10^6$ (~ 10 mR/h)	$2 \times 10^6$
Steam Generator	50 - 120	250 - 300	50 - 100	100	$9 \times 10^6$ (~ 17 R/h)	$1 \times 10^6$
Reactor Core	50 - 120	250 - 300	50 - 100	100	$3.5 \times 10^6$ (~ 10 mR/h)	$2 \times 10^6$
Auxiliary Building	50 - 120	100 - 325	5 - 70	70 - 100	$10^2 - 10^6$	
Control Building	60 - 104	84 - 120	10 - 70	70 - 95	< 200	
Turbine Building	60 - 110		5 - 95		< 200	
Diesel Generator Building	60 - 122	122	5 - 95	95	< 200	< 500

a) For both normal and accident parameters, the table gives a range (minimum and maximum) values.  
b) Following a postulated main steam line break, containment temperature may exceed 380 for a brief period of time but settle down considerably below this value. Thus, the values given should be considered conservative.  
c) Normal dose values are derived by integrating dose rates over 40 years. However, accident values are derived by integrating dose rates over 6 months following the accident.  
Source: Qualification of Microprocessor-Based Equipment for Nuclear Power Plant Environments, USNRC 2001

표 3. 전자부품 방사선 특성 평가 (NASA)

Comparison of radiation susceptibility for Microcircuits of Different Technologies (MIL-HDBK-970-B)			
Technology	Total Dose Hardness Level Rads (SI) <sup>[1]</sup>	Relative Susceptibility To: <sup>[2]</sup>	
		Soft Error	Latch-Up
CMOS/Bulk (unhardened)	1 kRad - 10 kRad	Moderate to High	Immune
CMOS/Bulk (hardened)	2 kRad - 1 Mrad	Low	Low
CMOS/SOS	1 kRad - 10 kRad	Very Low	Immune
MMOS	500 kRad - 10 kRad	High	Immune
TTL, Low Power TTL	100 kRad - 10 Mrad	Low to High	Low
Schottky TTL, Low Power Schottky TTL	100 kRad - 10 Mrad	Low to High	None to Low
Advanced Low Power Schottky TTL	20 kRad - 1 Mrad	Moderate	Low
TTL	20 kRad - 1 Mrad	Moderate	None to Low
ECL	> 5 Mrad	Low	None to Low
CMOS (unhardened)	1 kRad - 100 kRad	No Data Available	
CMOS (hardened)	3 kRad - 1 Mrad		
Bipolar, Bi-HE	6 kRad - 10 Mrad		

[1] These figures define process averages. However, some devices may not meet these levels while others may exceed them. For example, some Schottky TTL RAM's fall much below the low limit listed in the Table while most other devices with this technology fell within the range shown.  
[2] The single event susceptibility "ratings" listed here are relative to each other. However, a "moderate" error rate in a specific application may be unacceptably high if the application is critical. Also, circuit orientation and/or use of error detection and correction can considerably "harden" soft parts in some applications.

격납 구조내의 트랜스미터와 제어 빌딩의 RPS(BTP & CP) 사이에 연결된 실배선(hardwired)을 필드버스 통신망으로 구축할 경우 격납구조내의 고선량 방사선에 노출되는 전자소자 (CMOS 공정의 FPGA, DSP, ASIC)가 Class 1E에서 요구되는 품질보증 기간 동안의 누적 방사선 피폭선량(TID)에 미치지 못함을 알 수 있다. 표 2, 3으로부터 LOCA 사고를 가정한 설계 기준사고 요건의 고 선량 율 피폭환경에서 CMOS기반 마이크로프로세서 및 컴퓨터 소자는 생존할 수 없음을 알 수 있다. 원자력 발전소 격납구조 내부는 Category I(A)의 극한 환경으로 정의되고 이와 같은 극한 환경에 필드버스 센서 통신망을 적용하기 위해서는 원격 통신모듈(RIO-remote input/output)이 그림 2의 RCS loop 계통에 위치하여야 한다. 따라서 원격 통신 모듈의 핵심소자인 FPGA, DSP, ASIC Chip 등이 표 2에 나타내고 있는 DBA 기준의 극한 환경에서 생존성을 보장하여야 한다.

3. ASIC FPGA 소자의 원전 극한 환경 생존성 실험

필드버스 센서 통신망이 격납구조 내부의 극한환경 (Category I)에 적용되기 위해서는 표 2에 나타낸 바와 같이 설계기준사고 요건의 온도, 습도 및 감마선 환경 하에서 센서 통신망의 강건성이 입증되어야 한다. 필드버스 센서 통신망의 정상 가동 중 요건을 고려하면 센서 통신망의 핵심 소자인 ASIC FPGA 소자는 감마선 피폭 환경하에서 생존성(강건성)이 검증되어야 한다. 본 연구에서는 표 2의 설계기준사고(DBA) 환경 요건들 중에서 방사선(감마선) 요건만 고려한다. 그림 3에 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 관통거리가 15m 이므로 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 1/100 로 감소시켰다. 감마선 선량 율은 RTD 센서의 DBA 피폭 요건인 4kGy/h 로 설정하였다[10] 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. 실험은 표 4에 나타낸 바와 같이 고 선량 율로 대략 1시간 동안 수행되었다. 그 결과를 표 4에 나타낸다.

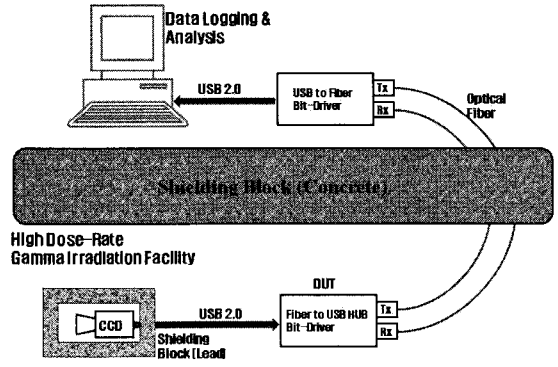


그림 3. 감마선 영향 평가 실험 장치 구성도

표 4. ASIC FPGA 소자의 감마선 피폭 영향 평가

DUT	Sony CCD Camera (FCB-PV460)	HD49815TF, TI 2A4035HDT	USB2.0 HUB to Fiber Bit Driver Incl. USB2.0 Driver Chip
Dose Rate (kRad/h)	2.55 (Harsh Environment EQ)	68.6	160
Distance (cm)	74.1	81.1	87.5
Gamma effect	Shielded by Lead	-	-
Recovery test (After irradiation)	Normal operation	Fail	Normal operation (time reduced)

표 4에서 거리는 Co-60(1.17/1.3MeV) 감마선 선원과 DUT 사이의 거리이다. Sony CCD 카메라의 예에서 보듯이 감마선을 적절히 차폐하면 원전 격납구조 내부와 같은 Category I 이상의 극한 환경에서도 필드 센서 통신망이 적용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 Category I 이상의 등급에 해당하는 원전 격납구조 내부에 있는 RCS Loop의 주요 센서, 트랜스미터 등을 필드버스 센서 통신망으로 연결하기 위한 방안을 검토하였다. 이를 위해 격납구조 내부의 물리적 환경 특성을 조사하였다. DBA 요건의 고 선량 율 감마선 피폭 환경 하에서 필드버스 센서 통신망의 핵심 소자인 ASIC FPGA 칩의 생존성을 실험 평가하였다. 격납 구조 내의 극한 환경에서 RPS 계통의 실배선을 필드버스 센서 통신망으로 연결할 경우 정상 가동 중에는 상용의 Foundation, ProfiBUS 시스템을 적정 두께의 납으로 차폐하면 Class 1E의 품질보증 요건을 만족할 수 있다. LOCA와 같은 설계 기준사고(DBA) 요건에서 요구되는 감마선 ( $\leq 1 \times 10^6$  Rad/h), 온도 (260° 이상), 습도 (100% 상대습도) 분위기에서 PAM(사고 후 감시) 기능을 충족하는 필드버스 센서통신망이 격납구조 내에서 강건성을 갖기 위해서는

1. 필드버스 통신망의 핵심 ASIC FPGA Chip 들이 실리콘 물질에 기반한 CMOS 공정을 채택하고 있으므로 DBA 요건의 고온 분위기에서는 누설 전류 증가문제 소자로써의 기능을 상실한다.
2. ASIC FPGA 소자의 기판(substrate)이 고온 및 내방사선 특성이 우수한 SiC 물질기반의 공정으로 설계 제조되어야 DBA 요건에서의 생존성이 보증된다.
3. 실리콘 기반의 DSP, ASIC FPGA 칩으로 필드버스 센서 통신망을 구축할 경우, 격납건물 내에 설치되는 RIO(원격 통신모듈)은 일정 두께의 감마선 차폐 체와 향온(냉각모듈) 장치로 보호되어야 한다.
4. 격납구조 내의 극한환경에서의 다중성(Redundancy) 개념을 4×2에서 2×1로 변경하여 RPS 실배선 4 채널 중 2 채널은 기존의 실배선으로 구축하고 나머지 2 채널은 필드버스 센서 통신망으로 구축하는 방안도 검토될 수 있다.

[참고 문헌]

[1] EPRI Report 1015087, "Instrumentation and Control Strategies for Plant-Wide and Fleet-Wide Cost Reduction", 2007  
[2] EPRI Report 1003567, "Qualification of the Framatome ANP TXS Digital Safety I&C System-Revision to EPRI TR-114017", 2002  
[3] EPRI TR-110045