

차세대 원전 정보 통신망 프로토타입 응답 시간 분석

Response Time Analysis of Information Network Prototype for Korean Next Generation Reactor

이광대, 문병희, 정학영

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

차세대원자로 계속 제어 계통의 특징은 모든 계통의 디지털화, 데이터 통신망을 통한 제어 및 운전 정보 전달, 이를 바탕으로 한 다양한 운전 정보 제공을 통한 운전 지원 향상에 있다. 따라서, 차세대원자로 2 단계 계속 제어 분야 설계에서는 디지털 시스템의 성능 및 신뢰도 요건을 개발하였으며, 성능 및 신뢰도 검증을 위하여 데이터 통신망 계통을 포함한 8개 계통의 프로토타입을 개발하고 성능과 신뢰도를 검증하기 위한 시험을 수행하였다. 본 논문에서는 하위 계속 제어 계통으로부터 비안전성 정보 계통으로 운전 정보를 제공하는 데이터 통신망에 대하여 전체 발전소 통신망 구조와 프로토타입 범위, 통신망 부하 모델, 응답 시간 분석 결과와 시험 절차, 방법을 정리하였다. 시험 결과, 정상 운전 통신망 부하 모델의 100, 200, 300%까지는 분석된 응답 시간과 시험 결과가 거의 일치하였으며 시험 기준인 $50 \pm 5\text{ms}$ 보다 적은 8ms 미만으로 측정되어 충분한 시간 여유가 있음이 확인되었다.

Abstract

The characteristics of the instrumentation and control(I&C) systems for Korean Next Generation Reactor(KNGR) lie in the full use of digital computer-based equipments and communication network. In addition, the diverse information systems provide a improved support for the control and operation of the nuclear power plant. KNGR Phase II design activities include the development of the performance and reliability requirements of the digitalized I&C systems. Eight individual prototype systems have been developed based on the requirements. This paper presents the network load model and test procedures to evaluate the performance of the proposed information network. The results show that response time is less than 8ms even with 300% of normal transmission load, satisfying the performance

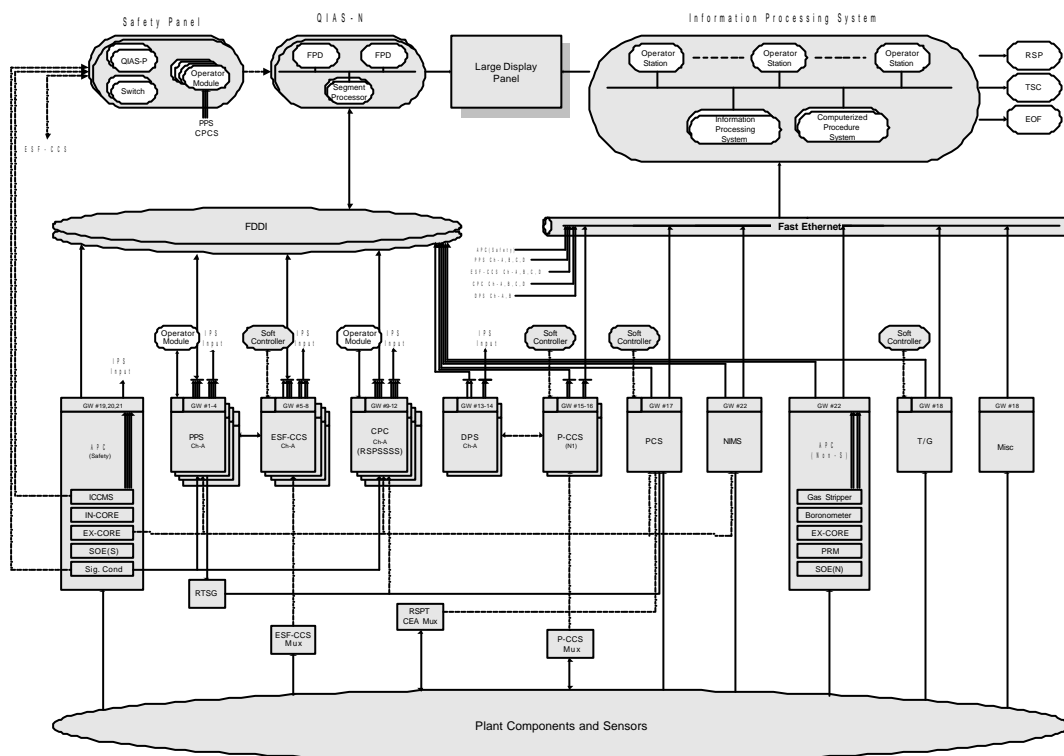
requirements.

1. 서론

차세대원자로 계속 제어 계통의 특징은 모든 계통의 디지털화, 데이터 통신망을 통한 제어 및 운전 정보 전달, 이를 바탕으로 한 다양한 운전 정보 제공을 통한 운전 지원 향상에 있다. 따라서, 차세대원자로 2 단계 계속 제어 분야 설계에서는 디지털 시스템의 성능 및 신뢰도 요건을 개발하였으며, 성능 및 신뢰도 검증을 위하여 데이터 통신망 계통을 포함한 8개 계통의 프로토타입을 개발하고 성능과 신뢰도를 검증하기 위한 시험을 수행하였다. 본 논문에서는 하위 계속 제어 계통으로부터 비안전성 정보 계통으로 운전 정보를 제공하는 데이터 통신망에 대하여 전체 발전소 통신망 구조와 프로토타입 범위, 통신망 부하 모델, 응답 시간을 분석하였으며 프로토타입을 통한 실험 결과와 비교 분석하였다.

2. 차세대원자로 계속 제어 구조

차세대 원자력 발전소의 전체 계속제어 통신망 구조는 [그림 1]과 같다.



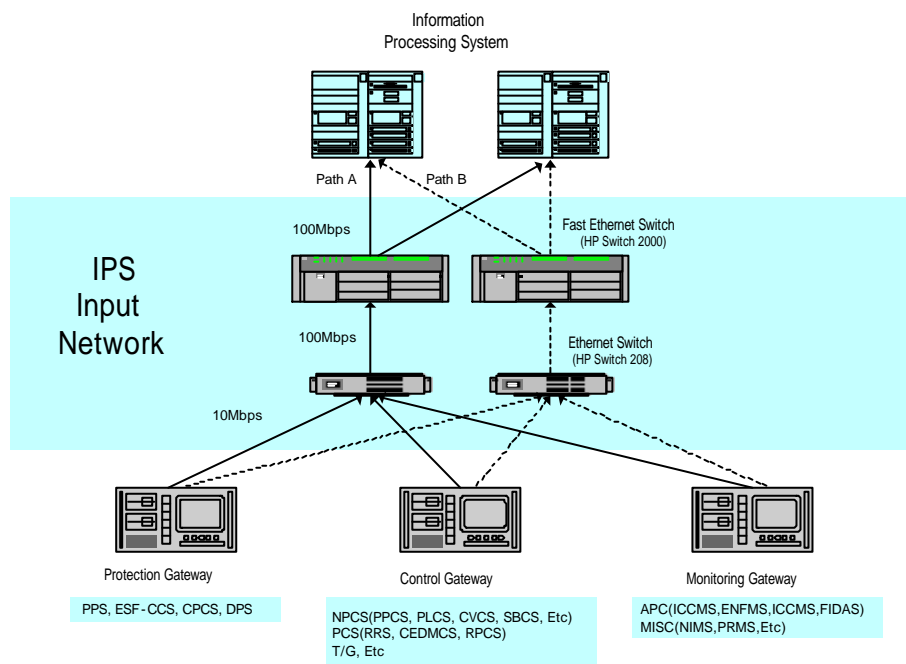
[그림 1] 차세대 원자력 발전소 계속제어 통신망 구조

차세대 원전 계속 제어 구조는 발전소 안전성과 기능에 따라 4 분면 구조를 가진다. 수직적으로

는 운전 정보를 운전원에게 제공하는 상위 정보 계통과 제어 보호 기능을 직접 수행하는 하위의 제어 보호 계통으로 나눌 수 있다. 수평적으로는 발전소 안전성에 따라, 안전성 정보 계통과 비안전성 정보 계통, 하위에서는 보호 계통과 제어 계통으로 나누어지며, 공통 모드 고장을 방지하기 위하여 하드웨어와 소프트웨어의 다양화 설계가 적용된다. 비안전성 정보 계통은 IPS(Information Processing System)와 CPS(Computerized Procedure System), 안전성 정보 계통은 QIAS(Qualified Indication & Alarm System), PAMS(Post Accident Monitoring System)등으로 구성되고, 보호 계통은 PPS(Plant Protection System), ESF-CCS(ESF-Component Control System), CPCS(Core Protection Calculator System), 제어 계통은 NPCS(NSSS Process Control System)등으로 구성된다.

3. 비안전성 정보 통신망 프로토타입 구조

비안전성 정보 계통인 IPS에 운전 정보를 제공하는 통신망은 [그림 2]와 같다.



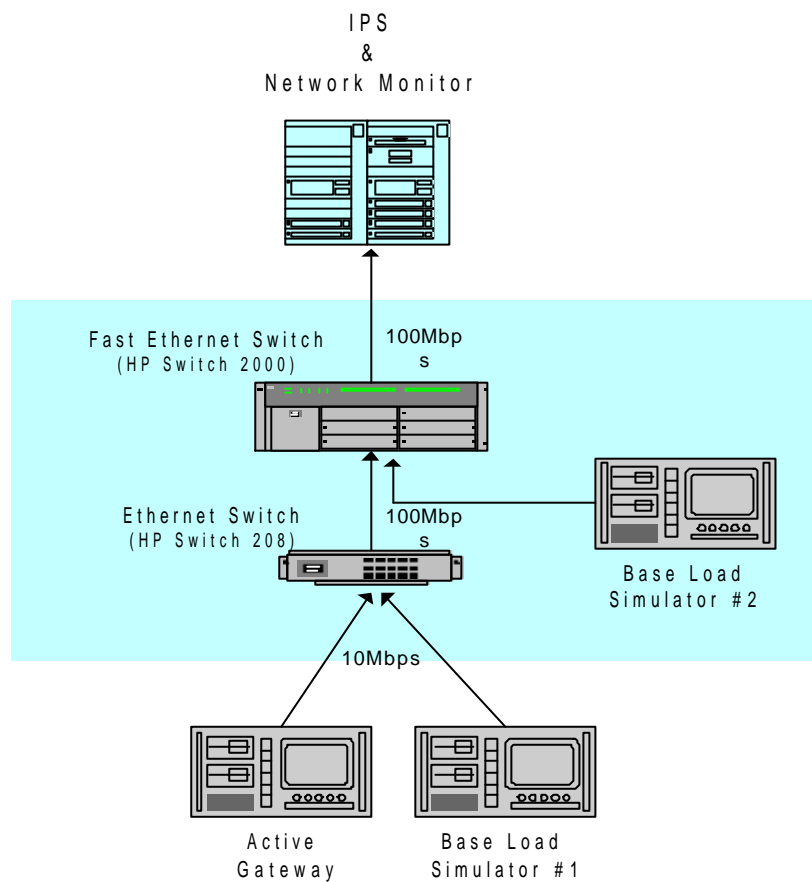
[그림 2] 비안전성 정보 통신망 프로토타입 구조

하위 각 계측 제어 및 보호 계통 게이트웨이로부터 광케이블로 10Mbps Ethernet Switch에 연결되고, Ethernet Switch의 100Mbps Up-Link Port는 상위의 100Mbps Fast Ethernet Backbone Switch에 연결된다. 또한, 통신망 기기나 케이블 이상에 의한 데이터 전송 연속성을 확보하여 상위 정보 계통의 High Availability, High Reliability를 지원하기 위하여 A와 B의 물리적, 전기적으로 격리된 2개 데이터 경로를 가진다. Ethernet Network의 High Availability는 IEEE 802.1d Spanning Tree Protocol이나 통신망 기기 공급자가 제공하는 Backup Link 방법 혹은 상위의

Server와 함께 제공되는 High Availability Service Package(예를 들면, HP의 Service Guard Solution)등을 통하여 구현될 수 있으며, 차세대 원자로에서는 상위 서버에서 통신망 건전성을 판단하고 경로를 선택한다고 가정한다.

4. 통신망 응답 시간 시험 절차

통신망 응답 시간 시험은 차세대 원자로 하위 계측 제어 계통인 제어, 보호 및 감시 계통의 게이트웨이로부터 상위 비안전성 정보 계통인 IPS 사이의 통신망을 통한 발전소 운전 데이터의 응답 시간을 측정하는데 목적이 있다. 통신망 응답 시간 시험을 위한 프로토타입 구성도는 [그림 3]과 같다.



[그림 3] 응답 시간 시험 구성도

실제 차세대원자로 통신망은 Path-A, Path-B 2개 동일한 구조의 독립적인 Path로 구성되어 있으나, 프로토타입 응답 시간 시험에서는 하위 게이트웨이에서 상위 IPS까지 시간을 측정하는 것이므로 어느 Path에 적용하여도 거의 동일한 결과를 얻을 것으로 판단되어, Path-A에만 시험하는 것으로 하였다.

시험은 정상 운전 시 통신망 부하에 100% 여유 분을 포함한 통신망 부하를 100%로 하고(즉, 실제 정상 운전 시 통신망 부하의 200%), 200, 300, 400 및 500% 통신망 부하에서 하위 게이트웨

이에서부터 상위 IPS까지 응답 시간을 측정하고, 설계 기준 값에 대하여 비교함으로써 만족 여부를 결정한다.

5. 통신망 부하 모델

응답 시간 시험을 위한 차세대원자로 계속 제어 계통 전체 통신망 부하 모델은 [표 1]과 같다.

분류	계통	게이트웨이 수량	데이터 수량		Load 합계(bit)	100% Load
			아날로그	디지털	아날로그*4Byte*8bit 디지털*2Byte*8bit	Load합계*2 (kbit)
안전	CPCS	4	702	62	23,456	47
	PPS	4	72	172	5,056	10
	ESFACS	4	0	24	384	1
	APC(S)	4	569	6	18,304	37
	합계					95
비안전	NPCS	2	43	92	2,848	6
	PCS	2	198	107	8,048	16
	NIMS	1	0	28	448	1
	APC(N)	2	10	16	576	1
	APS	2	6	20	512	1
	합계					25
BOP	BOP-CCS	6	811	1200	45,152	90
	MISC	1	283	300	13,856	28
	합계					118
NMS	NMS	1				

[표 1] 차세대원자로 전체 계속제어 통신망 부하 모델

안전 계통 통신망 부하에는 CPCS, PPS, ESFACS, APC(S), 비안전 계통 통신망 부하에는 NPCS, PCS, APC(N), NIMS 등의 데이터를 포함하였다. 그리고, BOP 계통 통신망 부하는 영광 5,6호기 PMS(Plant Monitoring System) 데이터베이스를 참고로 추출된 BOP 계통의 예상 데이터량을 추정하여 작성하였고, NMS(Network Management System)에 대한 데이터 부하는 시뮬레이션 데이터가 아닌 실제 HP OpenView Node Manager를 구동하도록 하였다. 또한 실제 차세대원자로 통신망과 프로토타입 사이의 불확실성을 보상하기 위하여 예상 통신망 부하에 100% 부하를 추가하였다.

응답 시간 시험을 축약된 프로토타입 기기로 수행하기 위하여 Active Gateway에는 안전 계통 채널 A 중에서 가장 통신망 부하가 많은 CPCS 채널 A 부하를 사용하였다. Ethernet Switch 208은 안전 계통 채널 A의 CPCS-A, PPS-A, ESFACS-A, APC(N)-A가 연결되는 것으로 가정하였다. Base Load Simulator #1은 Ethernet Switch에 연결되는 CPCS-A 부하를 제외한 나머지 Base Load를 발생시키도록 하였다. Base Load Simulator #2에는 다수 Ethernet Switch가 안전 계통 채널 A Ethernet Switch에서 발생하는 통신망 부하를 제외한 나머지 발전소 전체 통신망 부하를

Base Load로 발생하도록 하였다.

차세대원자로 통신망은 State-Based로 운영되므로 정상 운전이나 비정상 운전 중에도 통신망 부하가 일정하도록 설계된다. 그러나, 차세대원자로 2 단계 설계는 표준 설계로서 데이터 모델에는 어느 정도의 불확실성이 존재한다. 따라서, 여기서는 (정상 운전 중 부하 + 100% 여유 부하)를 100%로 하였을 때, 200, 300, 400, 500% 통신망 부하에서의 응답 시간을 측정하였다. 이때 프로토타입 각 기기의 통신망 부하 근사 값은 [표 2]와 같다.

부하률(%)	Active Gateway (Byte)	Base Load Simulator #1 (Byte)	Base Load Simulator #2 (Byte)	합계 Load (Kbyte)	Utilization (100Mbps) (%)
100	1,500	3,000	25,000	29,500	0.24
200	3,000	6,000	50,000	59,000	0.47
300	4,500	9,000	75,000	88,500	0.71
400	6,000	12,000	100,000	118,000	0.94
500	7,500	15,000	125,000	147,000	1.18

[표 2] 프로토타입 통신망 부하 근사 모델

6. 응답 시간 분석

(1) 실제 전송 데이터 량 계산

100% 통신망 부하에서 Active Gateway로부터 전송해야할 데이터 블록은 1,500바이트이며, Ethernet 헤더인 54 바이트를 고려하면, 데이터 블록은 두 개 패킷 즉, 1,514바이트(데이터 1,460 바이트와 헤더 54바이트 포함)와 94바이트(데이터 40바이트와 헤더 54바이트 포함)로 나누어져 전송된다. 이것은 Ethernet으로 전송 시, Ethernet의 최대 Packet 길이인 1,514 바이트를 초과한 데이터에 대해서는 Fragment되어 전송되고, 1,514바이트에 포함된 1,460바이트를 제외한 40바이트가 두 번째 패킷으로 전송됨을 알 수 있다. Active Gateway에서 Ethernet Frame 형식과 TCP/IP 프로토콜을 사용했을 때, 헤더 정보를 포함한 실제 전송 데이터 량은 [표 3]과 같이 계산할 수 있다.

부하률(%)	Active Gateway (Byte)	Packet 수	실제 전송 바이트 수 (헤드 포함)
100	1,500	2	$(1460+54)+(40+54) = 1,608$
200	3,000	3	$(1460+54)*2+(80+54) = 3,162$
300	4,500	4	$(1460+54)*3+(120+54) = 4,716$
400	6,000	5	$(1460+54)*4+(160+54) = 6,270$
500	7,500	6	$(1460+54)*5+(200+54) = 7,824$

[표 3] 실제 전송 데이터 량

(2) 프로토타입 응답 시간 분석

Active Gateway에서 10Mbps Ethernet으로 IPS까지 전송 시 응답 시간과 모든 게이트웨이가

모여서 IPS로 전송되는 100Mbps Fast Ethernet상의 전송 시간 계산 값은 [표 4]와 같다.

여기서, Frame 사이 Gap 시간으로 10M Ethernet의 경우는 $9.6\mu s$, 100M Fast Ethernet의 경우는 $0.96\mu s$ 를 사용하였다. Ethernet Switch와 Fast Ethernet Switch의 Frame 처리 지연 시간인 Latency Time은 현재 프로토타입 개발에 사용중인 HP AdvanceStack Fast Ethernet Switch 2000의 미국 Data Communication Lab 실험 자료(Frame Size 1,514바이트, 100% 포트 부하, Store and Forward 방식 사용시)를 사용하였으며, Ethernet Switch 208 자료는 입수가 불가능하여 Switch 2000 자료를 대신 사용하였다.

응답 시간 계산에는 Ethernet Switch의 Collision Free 장점을 고려하여, 포트 사이에는 충돌이 발생하지 않으며, 통신망 부하가 매우 낮아 실시간에 가까운 전송이 이루어지며 전송 오차가 발생하지 않는다고 가정하였다.

계산 결과를 보면, Network Media상에서의 전송 시간은 (10M+100M+100M) 전송 시, Active Gateway 통신망 부하에 대해, 약 4ms ~ 10ms가 소요되는 것으로 분석되었다. 또한, 첫 번째 패킷이 게이트웨이에서 IPS까지 도달하는데 소요되는 시간은 약 3.9 ms로 일정하다. 따라서, 실제로 IPS에서 캡처한 마지막 패킷 도달 시간과 최초 캡처된 패킷 도달 시간차에 첫 번째 패킷이 도달하는 시간을 합하면 응답 시간이 된다.

부하률 (%)	Active Gateway (Byte)	Packet 수	실제 전송 바이트 수 (헤드 포함)	전송시간 (1) (μs)	전송시간 (2) (μs)	Latency Time (μs)	총 전송시간 (μs)	첫 번째 Packet 도달시간
100	1,500	2	1,608	1,296	129.6	1224.5	4,004.2	3,903.64
200	3,000	3	3,162	2,550.8	255.08	1224.5	5,510.0	3,903.64
300	4,500	4	4,716	3,795	379.5	1224.5	7,003.0	3,903.64
400	6,000	5	6,270	5,058.4	505.84	1224.5	8,519.1	3,903.64
500	7,500	6	7,824	6,312.2	631.22	1224.5	10,023.64	3,903.64

[표 4] 계산된 데이터 전송 시간

* 전송시간 (1) : 게이트웨이에서 Ethernet Switch 까지 10Mbps로 전송 시 전송 시간

$$= ((1514 * 8 / 10 \text{Mbps}) * (\text{Packet} - 1) + (\text{Packet} - 1) * 9.6 \mu s + (\text{나머지Byte} * 8 / 10 \text{Mbps})) * 1000000$$

* 전송시간 (2) : Ethernet Switch에서 Fast Ethernet Switch 및 Fast Ethernet Switch에서 IPS 까지 100Mbps로 전송 시 전송 시간

7. 응답 시간 시험 결과 및 분석

(1) 데이터 도달 시간 시험 결과

프로토타입의 IPS에서 데이터 패킷 캡처 시간은 [표 5]와 같다.

(2) 응답 시간 시험 결과 및 분석

프로토타입의 Active Gateway에서 IPS까지, 데이터 블록을 전송하였을 때 IPS 내부의 Network Monitor로 캡처한 패킷의 캡처 시간과 분석 값 차이 비교표는 [표 6]과 같다.

% Load	Capture Time (ms)										최소	최대	평균	기준시간 (ms)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
100	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.2	<50 ±5
200	1	1	1	1	2	1	1	1	1		1	2	1.1	<50 ±5
300	3	4	3	3	3						3	4	3.2	<50 ±5
400	612	610	610	608							608	612	610	<50 ±5
500	580										580	580	580	<50 ±5

[표 5] 통신망 부하에 따른 패킷 캡처 시간 시험 결과

% Load	실제 측정된 데이터 블록 전송 값 (ms) ①	계산된 데이터 블록 전송 값 (ms)	첫 번째 Packet 도달시간 (ms) ②	Response Time 계산값 (ms)	Response Time 측정값 (ms) ①+②	기준시간 (ms)
100	0.2	0.1	3.9	4.0	4.1	<50 ±5
200	1.1	1.6	3.9	5.5	5.0	<50 ±5
300	3.2	3.1	3.9	7.0	7.1	<50 ±5
400	610	4.6	3.9	8.5	613.9	<50 ±5
500	580	6.1	3.9	10.0	583.9	<50 ±5

[표 6] 응답 시간 계산 값과 측정 값 비교

이 표로부터 통신망 부하가 300%까지는 계산된 응답 시간과 측정된 응답 시간 값이 거의 일치함을 알 수 있으며, 통신망 부하가 1%미만 Utilization(100Mbps)에서는 Ethernet이 이상적인 분석 값과 일치하는 결과를 나타내어 기준 시간인 50 ±5 ms보다 매우 작았다.

그러나, 400% 이상의 부하에서는 통신망이 1% 미만 Utilization임에도 불구하고 응답 시간이 급격히 길어졌으며, 원인으로는 시험에 사용한 게이트웨이, Base Load Simulator의 부적절한 운영, IPS Operating System의 Network Service 기능 미흡 등으로 생각해 볼 수 있으며, 실제 발전소와 유사한 통신 환경일수록 측정 값 신뢰도가 높아 질 것으로 판단된다.

8. 결론

차세대원자로에 사용되는 계측 제어 계통의 특징은 모든 계통의 디지털화, 데이터 통신망을 통한 제어 및 운전 정보 전달, 이를 바탕으로 한 다양한 운전 정보 제공을 통한 운전 지원 향상에 있다. 따라서, 차세대원자로 2 단계 계측 제어 분야 설계에서는 디지털 시스템의 성능 및 신뢰도 요건을 개발하였으며, 성능 및 신뢰도 검증을 위하여 데이터 통신망 계통을 포함한 8개 계통의 프

로토타입을 개발하고 성능과 신뢰도를 검증하기 위한 시험을 수행하였다. 여기에서는 하위 계층 제어 계통으로부터 비안전성 정보 계통으로 운전 정보를 제공하는 데이터 통신망에 대하여 전체 발전소 통신망 구조와 프로토타입 범위, 통신망 부하 모델, 응답 시간을 분석하였으며 프로토타입을 통한 시험 결과와 비교 분석하였다. 시험 결과, 정상 운전 통신망 부하 모델의 100, 200, 300%까지는 분석된 응답 시간과 시험 결과가 거의 일치하였으며 시험 기준인 $50 \pm 5\text{ms}$ 보다 적은 8ms 미만으로 측정되어 충분한 시간 여유가 있음이 확인되었다.

9. 참고 문헌

- [1] Robert Buchanan Jr, "The Art of Testing Network Systems", Wiley & Sons, 1996.
- [2] KEPRI, "차세대원자로 Network Load Model 개발 및 분석", TM.95ZJ16.P1998.508, 1998.
- [3] KEPRI, "차세대원자로 Network 전송 시간 측정 방법 개발", TM.95ZJ16.P1998.701, 1998.
- [4] KOPEC, "KNGR I&C Overall Analysis & Design Report", N-740-EJD460-001, 1998.
- [5] KOPEC, "Analysis Report for NSSS Instrumentation and Control Systems for KNGR", N0797-IC-RR716-01, 1998.
- [6] KOPEC, "Guideline For The Preparation of The Plant Database for The Plant Monitoring System for Y5&6", N0594-IC-GD710, 1998.
- [7] KOPEC, "Programmer's Guideline to Design Specification Format for the PCS Software for YGN 5&6", N0594-IC-GP710-04, 1998.
- [8] Hewlett Packard, "AdvanceStack Switch 2000 Installation and Configuration Guide", 1998
- [9] Hewlett Packard, "AdvanceStack Switch 208 Installation and Configuration Guide", 1998
- [10] Hewlett Packard, "OpenView Network Node Manager Technical Manual", 1998
- [11] Microsoft, "Windows NT Server Networking Guide", Microsoft Press, 1996
- [12] ANSI/IEEE, "IEEE Standard for Software Test Documentation", ANSI/IEEE Std 829-1983, 1983.
- [13] KOPEC, "Test Evaluation for the ICCMS for UCN 3&4", 91691-IC-TE750-00, 1998.