

노내 핵계측 제어 시스템 통신망 성능 분석

Network Performance Analysis for In-Core Flux Mapping Control System

이광대, 문병희, 신창훈

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력 발전소의 원자로 핵분열 분포 값은 노심 내부의 국부적인 핵분열 상태 정보를 제공하여 원자로를 안전 제한치 내로 운전하게 하는 매우 중요한 변수이며 이를 3차원적으로 측정하는 시스템이 노내 핵 계측 시스템이다. 이 시스템은 4개 핵분열 검출기를 노심 내부로 삽입 혹은 인출할 수 있는 구동용 모터, 엔코더 등으로 구성된 구동 시스템과 검출기 위치 제어, 검출 신호 취득 기능의 제어 시스템으로 구성된다.

본 논문에서는 고리1호기 노내 핵계측 제어 시스템을 기존 릴레이 제어 시스템에서 Programmable Controller와 통신망 기반의 디지털 제어 시스템으로 설계하기 전에 수행하는 성능 분석 결과를 정리한 것이다. 먼저, 개발 중인 노내 핵계측 제어 시스템 구조와 각 구성 기기에 대한 Function Segmentation, 입출력 신호 종류를 정리하고 각 기기 사이의 Information Flow와 Ethernet 통신망 기반의 Data Flow와 형식을 정의하였으며, 통신망에서 최대 부하가 발생할 경우의 지연 시간을 분석하였다. 결과로부터, 개발 중인 핵 분포 제어 시스템은 통신망 트래픽 지연 시간에서 충분한 성능 여유를 나타내며, 제어기와 Display Station 처리 시간을 적절히 배분 시, 만족할 만한 성능이 기대됨을 분석을 통하여 입증하였다.

Abstract

The neutron flux information of the nuclear power plant provides important reactor local power distribution data. The in-core flux mapping system has 4 fission chamber neutron detectors, 4 independent drive motors, and independent control systems. The new control system has been developing for the replacement of the previous relay-based system and has several design features such as network-based, programmable controller application, improved man-machine interfaces. In this paper, the performance of network-based control system was analysed and confirmed the requirements of the performance criteria.

1. 서론

원자력 발전소의 원자로 핵분열 분포 값은 노심 내부의 국부적인 핵분열 상태 정보를 제공하여 원자로를 안전 제한치 내로 운전하게 하는 매우 중요한 변수이며 이를 3차원적으로 측정하는 시스템이 노내 핵 계측 시스템이다. 한국 표준형 원전의 고정형 계측 시스템과 달리 여기서 분석한 웨스팅하우스형은 검출기를 노심 내부로 수직 이동하면서 측정하는 이동형 계측 시스템이다. 이 시스템은 4개 핵분열 검출기를 노심 내부로 삽입 혹은 인출할 수 있는 구동용 모터, 엔코더 등으로 구성된 구동 시스템과 검출기 위치 제어, 검출 신호 취득 기능의 제어 시스템으로 구성된다.

고리1호기 노내 핵계측 제어 시스템은 1978년 상업 운전이후 운전되어 온 릴레이 기반의 노내 핵 분포 측정용 제어 시스템으로서 릴레이 접점 불량, 설정 스위치 접촉 불량 등으로 운전 장애가 다수 발생하는 시스템으로 현재 디지털 제어 시스템으로 개발 중에 있다. 개발 중인 제어 시스템은 Programmable Controller와 상위 MMI 컴퓨터로 구성된 통신망 기반의 2계층 구조를 가지며 향상된 운전 및 상태 정보 제공을 통하여 운전성과 유지 보수성을 대폭 개선할 예정이다.

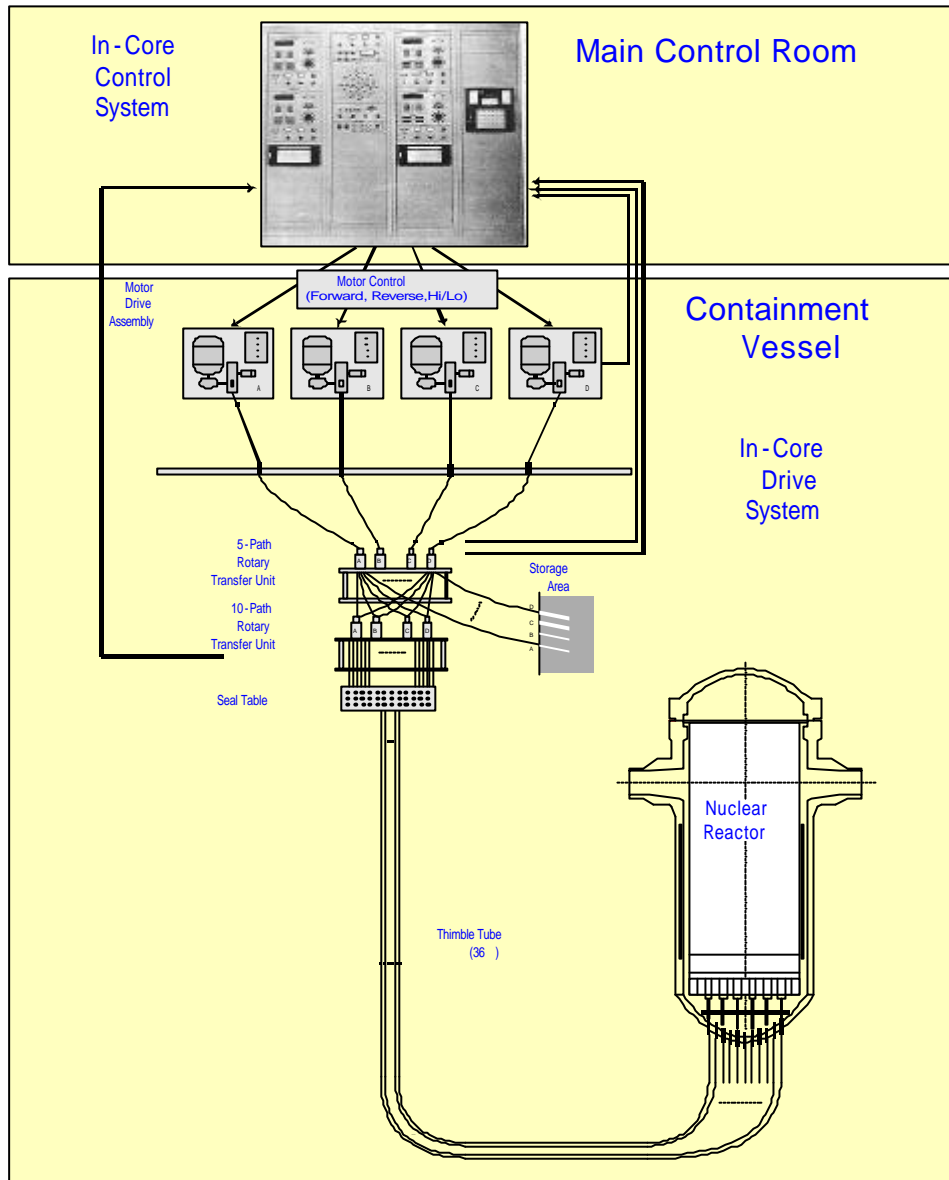
본 논문에서는 고리1호기 노내 핵계측 제어 시스템을 기존 릴레이 제어 시스템에서 Programmable Controller와 통신망 기반의 디지털 제어 시스템으로 설계하기 전에 수행하는 성능 분석 결과를 정리한 것이다. 먼저, 개발 중인 노내 핵계측 제어 시스템 구조와 각 구성 기기에 대한 Function Segmentation, 입출력 신호 종류를 정리하였다. 또한, 각 기기 사이의 Information Flow와 Ethernet 통신망 기반의 Data Flow를 정의하고, 상위 Display Station과 제어기 사이의 통신망 Traffic도 분석하였다. 결과로부터, 개발 중인 핵 분포 측정 시스템은 통신망 Traffic 지연 시간에서 충분한 성능 여유를 나타내며, 제어기와 Display Station 처리 시간을 적절히 배분 시, 만족할 만한 성능이 기대됨을 분석을 통하여 입증하였다.

2. 노내 핵계측 제어 시스템 구조

(1) 노내 핵계측 시스템 구조

노내 핵계측 시스템(In-Core Flux Mapping System)은 [그림 1]과 같이, 검출기를 원자로 내부로 수직 이동시키면서 36개 위치 각각에 대하여, 수직 위치에 대한 중성자 속을 측정하여 각 Thimble에서의 국부 출력이 규정 값 이내로 안전한 지를 확인가능 하게 한다.[3]

시스템은 크게, 원자로 격납용기 내부에 위치한 구동 모터 시스템과 중앙 제어실에 위치한 제어 시스템으로 구성된다. 4개 Fission Chamber 검출기를 이용하여 36개 위치의 핵 분포를 측정하기 위하여 4조의 “검출기 → 구동 모터 → 5-Path Transfer Device → 10-Path Transfer Device” 와 이를 제어하는 4조의 제어 기기로 구성된다.



[그림 1] 노내 핵계측 계통 개략도

(2) 노내 핵계측 제어 시스템 구조

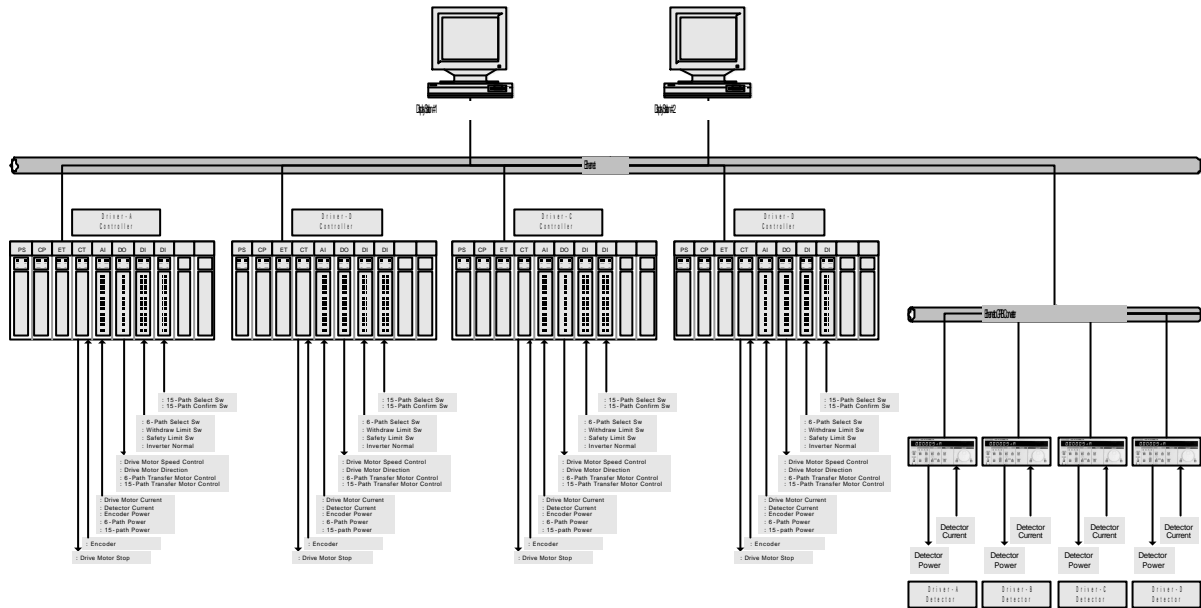
개발 중인 노내 핵계측 제어 시스템은 기존의 릴레이 제어반 구조에서 Programmable Controller와 통신망을 가지는 구조로 설계된다 [그림 2].

제어 시스템은 크게 Control Section, Information Section, Detector Section으로 나누어지며 각각의 Function Segmentation은 다음과 같다.

(가) Control Section

Control Section은 Drive-A, B, C 및 D 각각에 대하여 단일 Path에 대한 독립적인 제어와 보

호 기능을 수행하는 4 조의 제어기로 구성되며 다음의 기능을 수행한다. (여러 Path를 Mapping하는 순서에 관한 통합 제어는 Display Station에서 수행한다.)



[그림 2] 노내 핵계측 제어 시스템 구조

- ① 제어 논리 수행 : Display Station에서 명령하는 Drive Motor Insert/Withdrawal, 5-Path 및 10-Path Transfer 등 수행.
- ② 보호 논리 수행 : Display Station에서 명령하는 Drive Motor Insert/Withdrawal, 5-Path 및 10-Path Transfer 수행 중 발생하는 긴급 정지 등의 보호 기능을 수행하며 Display Station과 독립적으로 수행.
- ③ 상태 정보 전송 : 제어기(CPU 및 I/O 모듈 등) 상태뿐만 아니라 모든 Input/Output 측정값을 Display Station으로 전송하여 운전원에게 제공 함.

(나) Information Section

Information Section은 운전원에게 운전 정보를 제공하며 Flux Mapping의 종합적인 관리, 제어를 수행한다.

- ① Path Sequence 통합 제어 : Drive Sequence, Path Sequence를 종합적으로 관리, 제어하며 Drive Select, Path Select, Mapping Start/Stop, Drive Motor Forward/Reverse 등의 명령을 제어기에 전송, 수행하게 함.
- ② Detector 전압 제어 : Detector 공급 전압 제어를 Ethernet-GPIB 변환기를 통하여 제어함.
- ③ 제어, 보호 설정 값 입력, 변경 : 제어, 보호 설정 값을 운전원이 키보드를 통하여 입력하고 보호 설정 값은 제어기로 Down하여 긴급 보호 파라미터로 사용되게 함.
- ④ 운전 상태 정보 표시 : Display Station 화면상에 제어기, Pico-Ammeter, Drive Motor 등 주요 기기 상태, 검출기 구동 위치, 운전 상태 경보 등을 그래픽으로 표시, 운전원에게 제공하여 종

합적인 제어 및 감시가 가능하게 함.

(다) Detector Section

Detector Section은 Fission Chamber 검출기에 약 100V 직류 전원을 인가하고 검출 전류(수 μ A)를 증폭하며 직류 전압으로 변환한다. 또한, Pico-Ammeter는 GPIB 통신을 통하여 검출기 공급 전압을 제어가능 하게 하며, 상위 Information Section과는 Ethernet-GPIB 변환기를 통하여 연결된다.

- ① 검출기 공급 전압 제어 : 검출기 공급 전압을 GPIB를 통하여 Display Station에서 제어함.
- ② 검출기 전류-전압 변환 : 검출기 검출 전류(수 μ A)를 직류 전압 0~2V로 변환함. (직류 전압은 제어기 아날로그 입력에 연결됨)

(3) 입출력 신호

노내 핵계측 제어 시스템의 제어기에 사용되는 입출력 신호 종류와 수량은 [표 1]과 같다. 여기서, DI(Digital Input)는 위치 제어 및 확인을 위한 Proximity Limit Switch와 5-Path, 10-Path Select Switch들이며, DO(Digital Output)는 Drive 모터의 정역 회전, 속도 제어 명령에 사용된다. AI(Analog Input)은 검출기 측정 값, 검출기 전원 등이 연결되고, PI(Pulse Input)는 위치 확인을 위한 광학 Encoder로부터 2상 Pulse 신호를 받는다.

	Drive A	Drive B	Drive C	Drive D	공통 변수	합계
DI	40	40	40	40		160
DO	9	9	9	9		36
AI	8	8	8	8		32
PI	2	2	2	2		8
Integer					198	198
Logic					90	90
합계	59	59	59	59	288	524

[표 1] 노내 핵계측 제어 입출력 신호

3. Information Flow

통신망 기반의 제어 시스템 성능 분석은 제어 나 감시, 보호 행위가 필요할 때 소요되는 수행 시간을 해석함으로써 가능하다. 제어 시스템이 적절한 성능을 가지고 있는가는 최악의 시나리오에서 시스템이 요구되는 시간 내에 제어 및 데이터 처리가 완료되는가를 비교함으로써 판단할 수 있다. 통신망을 가진 Programmable Controller로 구성된 제어 시스템의 경우, 최악의 운전 상태는 제어기 사이클

시간이 가장 길게 요구되면서 긴급 안전 보호 동작이 필요한 경우이다. [2]

따라서, 여기에서는 노내 핵계측 제어 시스템의 운전 모드 중 어떤 모드에서 가장 긴 사이클 타임이 요구되며, 또한 제어기와 Display Station 사이 통신망 부하가 많은 지를 알아보기 위하여 각각의 운전 모드 (Diagnostic, Configuration, Manual Scan, Auto Scan)에 대하여 제어기와 Display Station 사이의 Information Flow를 순서적으로 정의하였다.

이 결과로부터, Information Flow는 “Auto Scan” 모드에서 가장 많은 것으로 평가되었으며 이때의 Flow는 [표 2]와 같으며, [표 2]를 수행하기 위한 절차는 다음과 같다.

내용	Information Flow	
	From	To
1. “Automatic Scan”의 “ALL” 선택	×	×
2. DS는 각 Drive Configuration 표시	×	×
3. 사용자는 각 Drive에 검출기 지정	×	×
4. Automatic Scan “Start” 선택	×	×
5. DS는 Drive-A,B,C,D 제어기에 통신 연결 요청	DS	C-ABCD
6. Drive-A,B,C,D 제어기는 DS에 통신 연결 허용	D-ABCD	DS
7. DS는 Drive-A,B,C,D 제어기에 각 Drive 첫째 Path 설정 값을 보냄.	DS	C-ABCD
8. DS는 각 Drive Path 상태를 읽음.	D-ABCD	DS
9. DS는 제어기에 Drive Speed 설정	DS	C-ABCD
10. DS는 제어기에 검출기 전압 설정	DS	D-ABCD
11. DS는 제어기에 Insert 명령	DS	C-ABCD
12. 제어기는 Withdraw에 도달 시 Stop 후 DS에게 알림	C-ABCD	DS
13. DS는 6-Path Transfer 명령	DS	C-ABCD
14. DS는 제어기로부터 확인	C-ABCD	DS
15. DS는 15-Path Transfer 명령	DS	C-ABCD
16. DS는 제어기로부터 확인	C-ABCD	DS
17. DS는 Insert 명령	DS	C-ABCD
18. “Top of Core”에서 제어기는 Stop 후 DS에 알림	C-ABCD	DS
19. DS는 제어기에 Drive Speed 설정	DS	C-ABCD
20. DS는 제어기에 검출기 전압 설정	DS	C-ABCD
21. DS는 제어기에 Withdraw 명령	DS	C-ABCD
22. DS는 제어기로부터 검출기 신호 고속 취득	C-ABCD	DS
23. “Bottom of Core”에서 고속 취득 멈춤	C-ABCD	DS
24. Withdraw LS에 도달하면 Stop	C-ABCD	
25. DS는 다음 Path에 대해 “7~23” 까지 반복	C-ABCD	

[표 2] 정보 흐름 테이블(Auto Scan)

① 각 Thimble Group에 대하여 검출기를 선택한다.

Thimble Group은 Drive-A,B,C,D Group이 있으며, Default는 Drive-A,B,C,D Group 각각에 대하여 검출기-A,B,C,D 가 선택된다. 사용자가 Thimble Group과 검출기를 임의로 각각 설정할 수도 있으며, 동일 Thimble Group을 서로 다른 검출기가 Mapping 할 수는 없다. 마찬가지로 동일 검출기가 서로 다른 Thimble Group을 Mapping 할 수는 없다.

② 각 Thimble Group 내에서 Mapping 할 Thimble에 대하여 Enable/Disable을 선택한다.

Thimble Group의 각 Thimble에 대하여 "Configuration" Menu를 통하여 Enable/Disable 표시를 한다. (Disable 표시된 Thimble은 Mapping 없이 Skip하게 된다.)

③ Mapping을 "Start" 한다.

각 검출기는 이미 지정된 Thimble Group을 자동으로 순서대로 Mapping한다. 여기서, 자동이란 사용자 관점의 자동이며, 내부적으로는 다음과 같은 정보 흐름을 가진다.

"Display Station에서 Mapping할 Thimble 선택 → Thimble에 관련된 Configuration 값(각종 Limits)을 Controller로 전송한다. → 검출기가 Withdraw 상태에서 5-Path, 10-Path Transfer 명령을 제어기로 보낸다. → Transfer가 완료되면 Drive-A Insert 명령을 제어기로 보낸다. → Top-of-Core에서 제어기는 Display Station에게 상태를 알린다. → Display Station은 Storage/Slow Scan 명령을 제어기에 보낸다. → Withdraw Limit에 도달하면 정지하고 Display Station으로 다음 Thimble 정보를 기다린다."

4. Data Flow

[표 2]의 Information Flow에 대하여 바이트 단위의 통신망 데이터가 정의되면 통신망을 통한 트래픽 분석이 가능하고 통신망을 통한 전송 성능 분석이 가능하다. 통신망을 통한 데이터 프레임 구조를 [표 3] [표 4]와 같이 정의하였다.

Header		Application Data Format	
IP Header	TCP Header	Application Header Format (20Byte)	Application Instruction Format

[표 3] 데이터 프레임 구조

Header	명령어	데이터타입	예약영역	데이터
22 Byte	3 Byte	4 Byte	2 Byte	Variable

* Display Station → 제어기로 요구 형식

Header	명령어	데이터타입	예약영역	에러 상태	데이터
22 Byte	3 Byte	4 Byte	2 Byte	2 Byte	Variable

* 제어기 → Display Station 응답(Ack)

[표 4] 응용 명령 형식

제어기는 Display Station과 Ethernet, TCP/IP Protocol로 연결된다. Ethernet은 CSMA/CD 방식의 통신망 제어 기능을 가지나 여기서 사용되는 통신 기기는 Collision이 거의 발생하지 않는 Ethernet Switch를 사용한다고 가정하였다. Ethernet Switch는 Store & Forward 방식으로 동작시킨다고 가정하였으며 이때, Switch에서 Frame을 처리하는데 소요되는 시간인 Latency Time은 64 Byte Frame의 경우에는 64 μ s, 1,514 Byte의 경우에는 약 1,224 μ s 가 소요되어 계산에서는 간략하게 1 μ s/Byte를 사용하였다. [1]

성능이 설계 요건을 만족하는지의 판단은 최고의 응답이 요구될 때를 기준으로 한다. 노내 핵계측 제어 설비는 노심 내 중성자 속 자료를 "Auto Scan"으로 취득할 때, 가장 많은 데이터와 높은 성능이 요구되며 이때, 100ms 미만의 주기로 모든 제어기 상태 정보와 측정 데이터를 상위 Display Station으로 전송하여야 한다.

각 제어기는 입출력 신호수와 공통 변수, 여기에 상태 정보를 포함한 데이터 량을 Display Station으로 전송하여야하며 설계 상의 여유를 고려하여 계산된 정보의 200%를 전송하는 것으로 가정하였다. 따라서, [표 1]의 값으로부터 각 제어기가 Display Station으로 전송하여야 할 데이터 Byte는 다음과 같다. [4][5]

제어기 당 전송 데이터 Byte

$$= (DI \times 1\text{Byte} + DO \times 1\text{Byte} + AI \times 2\text{Byte} + PI \times 2\text{Byte} \\ + \text{Integer}/4 \times 2\text{Byte} + \text{Logic} \times 1\text{Byte}) \times 200\% \\ = 516 \text{ Byte}$$

여기에 [표 3]의 TCP/IP Header인 18Byte, Application Data Format Header인 31Byte(Response인 경우, 33Byte)를 포함하면 각 제어기는 565(567) Byte를 전송하게된다.

각 제어기로부터 Display Station 까지 정보가 전송되기 위해서는 "Display Station 요구 \rightarrow Ethernet Switch \rightarrow 제어기 Response \rightarrow Ethernet Switch \rightarrow Display Station"의 과정을 거친다.

따라서, 각 제어기 정보가 Display Station 요구에 의하여 제공되는 총 전송 시간은 "Display Station \leftrightarrow Ethernet Switch" 사이 전송 시간, Ethernet Switch의 Latency Time, "Ethernet Switch \leftrightarrow Display Station" 사이 전송 시간의 약 2배가 된다. 이것을 계산하면

◎ Display Station \leftrightarrow Ethernet Switch 전송 시간

$$(565 \times 8) / 10\text{Mbps} = 452 \mu\text{s}$$

◎ Ethernet Switch Latency Time = 565 μ s

◎ Ethernet Switch \leftrightarrow Display Station 전송 시간

$$(565 \times 8) / 10\text{Mbps} = 452 \mu\text{s}$$

◎ 총 전송 시간 = 2,943.2 μ s

위의 결과로부터, 각 제어기 정보의 통신망 전송 지연은 약 3ms이며, 이때 통신망 Utilization은

10Mbps의 약 0.06%로서 통신망에서의 데이터 충돌은 발생하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서, 4개 제어기에서 거의 동시에 Display Station으로 정보를 전송할 때에는 각 Frame 사이에 Frame Gap Time $9.6\mu s$ 를 포함하면 되므로 $11,831.6\mu s$ 의 전송 시간이 소요되게 된다.

통신망 전송 시간, 제어기 프로그램 사이클 시간이 분석되면 각 구성 기기 운영 시간의 최적 분포가 가능하며 최적의 성능을 보장하기 위하여 개선되어야 할 구성 요소를 도출할 수 있다. 노내 핵계측 제어 시스템의 제어기 프로그램 사이클 시간은 10ms 미만이므로 제어 시스템 전체 실행 주기인 100ms에 대해 약 80ms 시간이 Display Station에 데이터 처리 시간으로 주어질 수 있으며 만족할 만한 성능이 기대된다.

6. 결론

원자력 발전소의 원자로 핵분열 분포 값은 노심 내부의 국부적인 핵분열 상태 정보를 제공하여 원자로를 안전 제한치 내로 운전하게 하는 매우 중요한 변수이며 이를 3차원적으로 측정하는 시스템이 핵 분포 측정 시스템이다. 이 시스템은 4개 핵분열 검출기를 원자로 내의 36개 위치에 수직 방향으로 위치 제어를 함으로서 핵분열 분포 측정을 3차원적으로 수행하게 되며, 고온 고압 고방사능의 원자로 내부를 통하여 측정하게 되므로 안전 제어가 특히 중요하다.

고리1호기 노내 핵계측 제어 시스템은 1978년 상업 운전이후 운전되어 온 릴레이 기반의 노내 핵 분포 측정용 제어 시스템으로서 릴레이 접점 불량, 설정 스위치 접촉 불량 등으로 운전 장애가 발생하는 사례가 많은 시스템이다. 또한, 릴레이 제어 논리가 사용됨에 따른 운전 정보 제공 미흡은 운전원 및 정비 요원에게 운전 상태 정보를 제공해주지 못하므로 운전 및 유지 보수 편의성이 매우 낮은 설비이다.

본 논문에서는 고리1호기 노내 핵계측 제어 시스템을 기존 릴레이 제어 시스템에서 Programmable Controller와 통신망 기반의 제어 시스템으로 설계하기 전에 수행하는 성능 평가 결과를 정리한 것이다.

먼저, 개발 중인 노내 핵계측 제어 시스템 구조와 각 구성 기기에 대한 Function Segmentation, 입출력 신호 종류를 정리하였다. 또한, 각 기기 사이의 Information Flow와 Ethernet 통신망 기반의 Data Flow를 정의하고 상위 Display Station과 Network Traffic도 분석하였다. 결과로부터 노내 핵계측 제어 시스템은 데이터 전송을 위한 통신망에 약 12ms의 전송 지연이 발생하며, 전체 제어 시스템의 주기적 데이터 처리 주기 기준인 100ms에 비하여 충분히 작은 값으로 분석되었다. 이 분석 결과는 제어 시스템 기기에서의 데이터 처리 시간 분배 최적화에 매우 중요한 자료로 사용 될 것이며, 향후, 프로토타입을 통하여 시험, 검증할 예정이다.

7. 참고 문헌

- [1] Gilbert Held, "High Speed Networking with LAN Switches", Wiley & Sons, pp 63-104, 1997.
- [2] Robert Buchanan Jr, "The Art of Testing Network Systems", Wiley & Sons, pp 63-80, 1996.
- [3] Westinghouse Nuclear Energy System, "Technical Manual for In-Core Instrumentation", Westinghouse Co, Vol I, II - Korea Electric Company KORI Unit No.1, 1974
- [4] 이광대, 문병희, 정학영, "차세대 원전 정보 통신망 프로토타입 응답 시간 분석", '99 한국 원자력 학회 춘계 학술 발표회 논문집, 5, 1999.
- [5] 이광대, 정학영, 이순성, 신용철, "차세대 원전 계측 제어 Network Load Modelling 및 성능 분석", '98 한국 자동 제어 학술 회의 논문집, 10, 1998.