

# 네트워크 기반 제어시스템의 통신부하 시험방법

## Traffic Test Method for Networked Control System

유 광 명\* · 김 중 안\* · 류 호 선\*  
(Kwang-Myung Yu · Jong-An Kim · Ho-Sun Ryu)

**Abstract** - Networked Control Systems(NCS) contain the structure which controllers, actuators and sensors are connected to communication network. And they have been adopted in large and complicated plant area due to the advantages of mitigating computational bottleneck and maintenance. Although this structure provides many benefits, it brings in problems of unpredictable communication delay, data loss and corruption. This phenomena have to be considered in designing NCSs since it affects on overall control system stability. This paper introduces network traffic test method for ethernet based NCSs to find out maximum network usage which guarantee stable control operation. Test results shows this methods can be adopted in various types of NCSs and contributes economical system design and effective system operation

**Key Words** : Networked control system, NCS, Network traffic test, Distributed control system, DCS

### 1. 서 론

네트워크 기반의 제어시스템(Networked Control System)은 제어 연산의 집중화를 완화시키고 유지보수 상의 장점으로 인해 석유화학이나 발전 등과 같은 대형공정 분야에 널리 적용되고 있다. 이 경우 각종 조작 값이나 명령신호의 교환은 네트워크로 수행하여 제어연산을 다수의 제어기가 분담하는 분산제어시스템(Distributed Control System, DCS) 형태가 주를 이루고 있다. 이러한 제어시스템의 네트워크로 이더넷이 주로 사용되고 있는데 이 경우 제어시스템 안정도를 보장하는 네트워크의 성능한계를 추정하기가 쉽지 않다. Lian[4], [7]은 네트워크 기반 제어시스템 운용 시 예상되는 시간지연(Time Delay)과 제어성능을 고려한 설계방안에 대해 설명하고 제어시스템에 사용되는 네트워크 별로 시뮬레이션을 통한 성능분석 결과를 기술하였다. Lee[5]는 Switched 이더넷 기반 제어시스템의 예상 시간지연을 분석하고 시뮬레이션으로 검증하였다. 하지만 대부분의 연구는 네트워크 시간지연이 제어성능에 미치는 영향을 이론적으로 제시하는데 머물고 있어 시스템 개발 시 참고하기에 부족한 점이 많고 네트워크 성능판별 및 트래픽 여유를 확인하는 실용적인 방안은 제시하지 못하고 있다. 또한 대형 공정에 사용되는 두 개 이상의 상이한 네트워크를 적용한 제어시스템의 성능을 분석하는 방법에 대한 연구는 부족한 편이다.

이에 본 논문에서는 전력연구원에서 정부지원 사업으로 개발된 통합감시제어시스템의 안정성에 영향을 미치는 네트워크 시간지연 한계를 분석하고 네트워크 성능을 검증하기

위한 통신부하 시험방법을 소개한다. 또한 시험을 통해 확인된 제어시스템 네트워크 성능을 분석하고 이를 통해 확인된 네트워크 기반 제어시스템의 주요특성을 설명한다.

### 2. 통합감시제어시스템 개요 및 네트워크 성능분석

#### 2.1 네트워크 기반 제어시스템 개요

네트워크 기반 제어시스템은 시스템 내부에 상호 연계되는 제어기, 운전 조작반(Human Machine Interface, HMI), 경우에 따라 구동기(Actuator)와 센서까지 네트워크로 연결된 것으로 단일 회선(Point to Point) 제어시스템의 단점으로 지적되어 오던 유지보수 및 확장, 업그레이드의 한계를 극복함으로써 크고 복잡한 공정에 널리 채택되고 있다.

단일 회선 방식의 비 네트워크 기반 제어시스템의 경우 센서에서 측정된 공정의 출력, 즉 제어변수가 단일 전기회선으로 디지털 제어기의 주기에 따라 취득되고 이를 기반으로 알고리즘에 의해 연산된 제어 출력이 별도의 단일 전기회선을 통해 구동기에 입력된다.

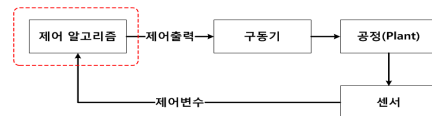


그림 1 단일 회선(Point to Point) 방식의 제어시스템 구조  
Fig. 1 Structure of Point to Point type control system

이러한 형태는 구조적으로 문제가 없으나 실제 현장에 운영되면서 다음과 같은 운용상의 문제점을 지니게 된다.

- 제어 알고리즘이 단일 하드웨어에 수행되므로 공정의 규모가 커지고 복잡해질수록 입출력 단에 데이터가 집중되

\* Corresponding Author : Dept. of Green Energy Lab., KEPCO Research Institute, Korea

E-mail : kmyu@kepco.co.kr

\* Dept. of Green Energy Lab., KEPCO Research Institute, Korea

Received : February 8, 2013; Accepted : April 2, 2013

- 고 계산 량이 증가하는 병목현상(Bottleneck Effect) 발생
- 대형 공정에서 장거리를 이동하는 신호가 존재할 경우 노이즈에 영향을 받음
  - 제어 알고리즘이 단일 컴퓨팅 시스템에 의해 운용되므로 유지보수가 어려움
  - 센서나 구동기를 증설하거나 제어 알고리즘의 추가 또는 수정하는 작업이 거의 불가능하므로 유연성이 떨어짐

이에 대안으로 네트워크 기반 제어시스템 구조가 제안되어 산업현장에서 분산제어시스템이라는 이름으로 널리 사용되고 있다. 이 시스템의 제어 알고리즘은 단일회선 방식의 것과 유사한 반면 제어기 노드, 구동기, 센서 등이 네트워크에 연결되어 제어연산과 관련된 데이터가 네트워크를 통해 이동한다. 네트워크 기반 제어시스템 개발 초기에는 이더넷, ControlNet(Token Passing), DeviceNet(Control Area Net, CAN) 등의 다양한 네트워크 프로토콜이 적용되었으나 최근에는 이더넷을 사용한 네트워크 제어시스템으로 통합되고 있는 추세이다.

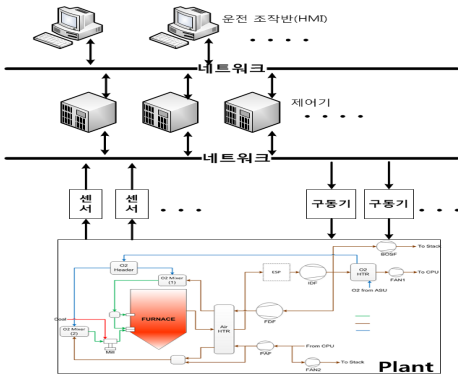


그림 2 네트워크 기반 제어시스템 구조  
Fig. 2 Structure of networked control system

이 방식은 기존 제어시스템의 단점을 해소해 주었으나 이전에는 예상하지 못했던 다음과 같은 새로운 문제점을 발생시키게 된다.

- 네트워크를 사용함으로써 데이터 시간지연 발생
- 여러 호스트가 동일 회선에 데이터를 송수신함으로써 인하여 데이터 충돌, 손실 발생
- 제어 알고리즘 분할 기준이 성립되지 않고 있으며 일부 공정의 경우 분할 방식이 적합하지 않는 경우도 있음

특히 네트워크에 기인한 데이터 전송지연, 충돌 및 손실 등은 제어루프의 시간지연을 초래하고 결과적으로 제어루프의 안정도에 영향을 미친다. 공정 제어시스템은 실시간 데이터를 기반으로 연산, 동작되어야 하는데 지연 전송된 데이터로 인해 시스템 전체의 안정성을 저하시키게 되는 것이다. 이더넷 기반의 제어시스템의 경우 매체접속 방식으로 CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) 방식을 사용하므로 트래픽 증가 시 시간지연 데이터의 발생으로 비롯한 제어시스템 안정도 영향을 더욱 예측하기가 어렵다. 시간지연 문제를 해결하기 위한 한 방법

으로 전송속도를 개선하는 방법이 있다. 예를 들어 100Mbps 네트워크를 1Gbps로 업그레이드함으로써 시간지연 개선효과를 얻을 수 있다. 하지만 작은 수량의 호스트 추가를 위해 고가의 통신장비 전체를 업그레이드하는 방법은 경제적이지 못하다. 또 한 가지 고려할 사항은 1Gbps 전송속도를 지닌 네트워크를 구축하더라도 네트워크에 연결된 호스트들의 트래픽 합계가 1Gbps가 될 때까지 시스템을 운용할 수 없다는 점이다. 이더넷 기반 제어시스템의 경우 Throughput의 40% 미만의 저 부하 영역에서만 제어루프가 안정적으로 동작하는 것으로 나타난다. 이처럼 제어시스템 네트워크의 성능을 고려하기 위해 Throughput 외에 시간지연(Latency) 또한 중요하게 고려되어야 할 사항으로 대두되고 있다. 하지만 네트워크 트래픽 증가로 인한 시간지연이 제어시스템 안정도에 영향을 미치기 시작하는 임계점을 찾는 것은 쉽지 않다. 지금까지도 네트워크 기반 제어시스템의 트래픽 한계지점을 확인할 수 있는 방법에 대한 지침은 개발되지 않고 있는 실정이다. 따라서 효율적인 시스템 운용과 경제적인 시스템 설계 및 개발을 위해 적절한 네트워크 트래픽 성능분석 및 시험방법이 절실히 요구되고 있다.

2.2 통합감시제어시스템(Integrated Monitoring and Control System, IMCS) 개요



그림 3 통합감시제어시스템 현장설치 사진 (태안화력 1호기)  
Fig. 3 Installation of IMCS (Tae'an unit 1)

통합감시제어시스템은 한전전력연구원과 두산중공업이 정부지원으로 개발한 500MW급 석탄 화력발전용 제어시스템이며 현재 태안화력 1호기에 설치되어 상업운전 중에 있다.

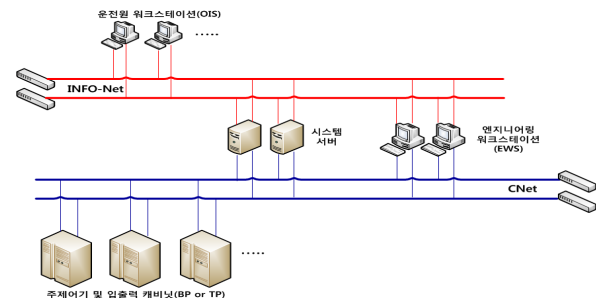


그림 4 통합감시제어시스템 네트워크 구성 1 (INFO-Net, CNet)  
Fig. 4 IMCS network architecture 1 (INFO-Net, CNet)

보일러와 BOP(Balance Of Plant) 제어 알고리즘은 BP라고 하는 제어 판넬에, 터빈제어 알고리즘은 TP라고 하는 제

어 판넬에 구현되고 서로 구분된 네트워크에서 동작한다. 통합감시제어시스템은 크게 3개의 네트워크로 구분되는데 운전원 워크스테이션(Operator Interface Station, OIS)과 시스템 서버(System Server) 간 구성된 네트워크를 INFO-Net, 시스템 서버와 제어기 판넬의 CPU와 구성된 네트워크를 CNet, 제어기 판넬 내의 CPU Rack과 IO모듈 간 구성된 네트워크를 INet이라고 한다. INFO-Net과 CNet은 이더넷 기반의 TCP-IP 프로토콜을 채택하였고 INet은 CPU 랙(Rack)의 통신모듈과 IO모듈 간 RS-485 기반의 시리얼 통신을 사용한다.

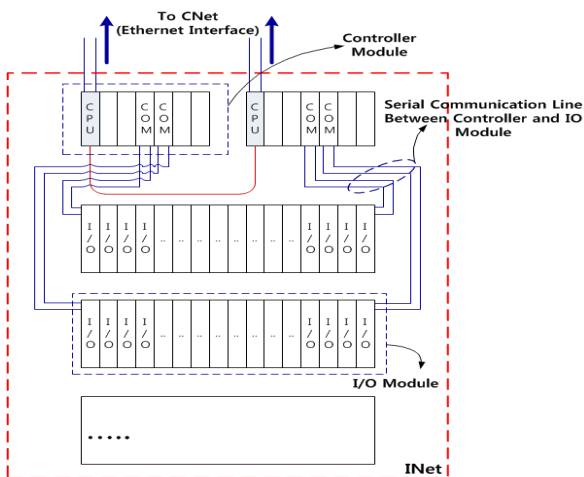


그림 5 통합감시제어시스템 네트워크 구성 2 (INet)  
Fig. 5 IMCS network architecture 2 (INet)

2.3 통합감시제어시스템 네트워크 구조 및 성능분석

- INet(Internal Network)

INET은 10Mbps 전송속도를 지원하는 RS-485 기반의 제어기 통신 모듈과 IO모듈 간 구성된 네트워크이다.

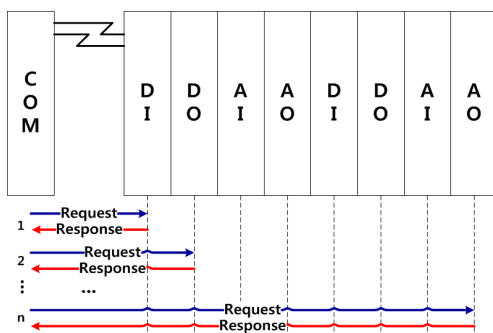


그림 6 INet 데이터 교환방식  
Fig. 6 Data exchange method of INet

위 그림 6에서 보는바와 같이 시리얼 포트 당 16개의 IO 모듈과 Polling 방식에 의한 데이터 교환을 수행한다.

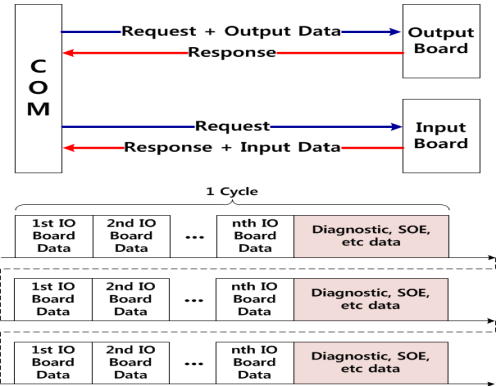


그림 7 INet 통신모듈과 IO모듈 간 통신주기  
Fig. 7 Period between communication module and IO module

IO모듈 당 1ms의 스캔 타임이 소요되고 1개 통신 포트 당 16개 IO모듈을 담당하므로 진단, SOE(Sequence Of Event)를 포함하면 입출력 포인트 관점에서 데이터 전송 시간 지연은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{CTRL-Output} &= \tau_{Input-CTRL} \quad (1) \\ &= D_{CTRLCom} \times Max\ Channel + D_{etc} + D_{IOCom} + D_{prop} \\ &= 1 \times 16 + D_{etc} \approx 20(ms) \end{aligned}$$

- $\tau_{CTRL-Output}$  : 출력신호 시간지연
- $\tau_{Input-CTRL}$  : 입력신호 시간지연
- $D_{CTRLCom}$  : 제어기 통신모듈 Computing 지연
- $Max\ Channel$  : 통신포트 당 지원 가능 IO 채널 수(16채널)
- $D_{etc}$  : 기타 진단, SOE 데이터 전송시간
- $D_{IOCom}$  : IO모듈 Computing 지연
- $D_{prop}$  : 전기적 신호 전파지연(Propagation Delay)

- INFO-Net, CNet

시스템 서버를 기준으로 운전원 워크스테이션(OIS)과 연결된 네트워크를 INFO-Net, 제어기 CPU와 연결된 네트워크를 CNet이라고 하며 두 네트워크 모두 기가비트 이더넷(Gigabit Ethernet)으로 구성되어 있다.

표 1 기가비트 이더넷 주요사양

사양(Specification)	크기
전송속도(Data Rate, Mb/s)	1000
최대 전송거리(m)	200
최대 프레임 사이즈(bytes)	1500
최소 프레임 사이즈(bytes)	512
최소 프레임 전송시간( $\mu$ s)	4.096

운전정보 감시와 제어루프 설정 값 조정은 OIS에서 수행된다. 시스템 서버는 OIS로부터 받은 설정 값 및 명령신호

와 제어기로부터 받은 공정정보를 태그 DB에 업데이트하고 설정 값과 명령신호를 제어기, 공정정보를 OIS에 전송한다. 시스템 서버는 OIS와 제어기에 40ms 주기( $T_{SSscan}=40ms$ )로 정보요청을 하여 태그정보를 업데이트 한다.

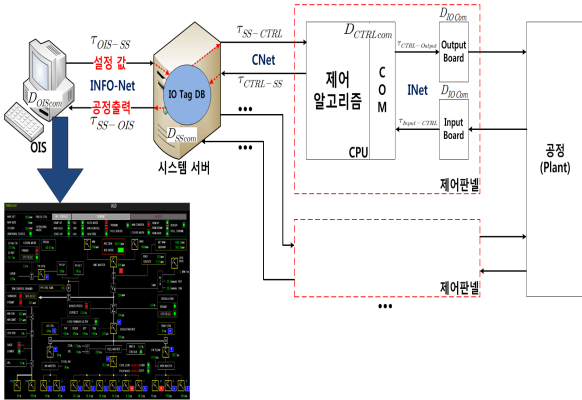


그림 8 통합감시제어시스템 네트워크 데이터 흐름  
Fig. 8 Data flow in IMCS network

따라서 OIS로부터의 데이터가 시스템 서버에 도달하기 위해 소요되는 시간지연( $\tau_{OIS-SS}$ )은 다음과 같다.

$$\tau_{OIS-SS} = \tau_{SS-OIS} = D_{OIScom} + T_{wait} + T_{frame} + 2D_{prop} + D_{SScom} \quad (2)$$

- $D_{OIScom}$  : OIS 컴퓨팅 시간지연
- $T_{wait}$  : 데이터 전송을 위한 대기시간
- $T_{frame}$  : 데이터 프레임 전송시간
- $D_{prop}$  : 데이터 전기적 전파지연(Propagation Delay, 소스 노드에서 허브까지)
- $D_{SScom}$  : 시스템 서버 컴퓨팅 시간지연

시스템 서버의 데이터가 제어기에 도달하기 위해 소요되는 시간지연( $\tau_{SS-CTRL}$ )은 다음과 같다.

$$\tau_{SS-CTRL} = \tau_{CTRL-SS} = D_{SScom} + T_{wait} + T_{frame} + 2D_{prop} + D_{CTRLcom} \quad (3)$$

- $D_{OIScom}$  : OIS 컴퓨팅 시간지연
- $D_{CTRLcom}$  : 제어기 컴퓨팅 시간지연

컴퓨팅 시간지연  $D_{OIScom}$ ,  $D_{SScom}$ ,  $D_{CTRLcom}$ 은 하드웨어 사양, CPU 부하 등에 따라 가변적이다. 특히 제어기 컴퓨팅 지연시간  $D_{CTRLcom}$ 의 경우 제어기 별로 부담하고 있는 제어 알고리즘 수량에 따라 CPU 부하가 상이하여 추정하기가 어렵다. 하지만 이 값들은 제어시스템 네트워크가 정상적으로 설계되었다면 이를 고려하여 원하는 시간경계 내에 데이터가 전송되어야 한다. 또한 통신선 전기신호의 전파속도는

$2 \times 10^8 m/s$ 로서 매우 빠르므로 전파지연  $D_{prop}$ 는 무시 가능하다. 또한 통합감시제어시스템의 경우 각 호스트가 약 1024byte 크기의 프레임을 주기적으로 전송하는 Static Sending 방식을 사용하고 있다. 따라서  $T_{frame}$ 은 다음과 같다.

$$T_{frame} \approx \text{Frame Size} / \text{Data Rate} = 1024 \times 8 / (1000 \times 10^6) = 8192 \times 10^{-9} \text{ (sec)} = 8.192 \mu\text{s} \quad (4)$$

결국 제어시스템 내 호스트나 트래픽 증가로 인해 데이터 전송시간 지연에 영향을 미치는 요소는  $T_{wait}$ 이다. 일반 허브(Dummy Hub)로 구성된 이더넷 네트워크의 경우  $T_{wait}$ 는 다음과 같다.

$$T_{wait} = \sum_{k=1}^{N_c} (T_{det} + T_{zam} + T_{backoff}), \quad \text{단 } N_c \leq 16 \quad (5)$$

- $N_c$  : 데이터 전송 시 충돌횟수
- $T_{det}$  : 충돌감지 시간(=round trip Propagation Delay,  $4D_{prop}$ )
- $T_{zam}$  : Zam 전송시간(=32Bit Times)

그리고 백오프(Back Off) 대기시간  $T_{backoff}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{backoff} = (\text{uniform}[1, 2^{\min(k,10)}] - 1) * \text{Slot Time} \quad (6)$$

여기서  $\text{uniform}[,]$  함수는 두 구간 사이의 임의의 정수를 발생시키는 균등분포(Uniform Distribution) 함수이며  $\min(,)$  함수는 두 정수 중에서 작은 값을 선택하는 함수이다. 그리고 기가비트 이더넷의 경우 슬롯타임(Slot Time)은 4096비트타임(Bit Times)이다.

통합감시제어시스템의 경우 충돌 도메인을 분리하는 기능을 가진 스위칭 허브(Switching Hub)로 네트워크가 구성되어 있다. 이 경우 두 개 이상의 호스트의 전송 데이터 충돌로 인한 시간지연은 발생하지 않으나 복수의 호스트가 데이터를 전송할 때 데이터 프레임이 스위치에 버퍼에 대기함으로써 발생하는 큐잉 지연(Queing Delay)이 발생하게 되며 이 때  $T_{wait}$ 는 다음과 같다.

$$T_{wait} = \sum_{k=1}^{N_q} (T_{i-frame} + T_{frame}) * \text{Bit time} \quad (7)$$

- $N_q$  : 스위치 버퍼에 저장된 프레임 수
- $T_{i-frame}$  : 인터프레임 시간(=96 비트타임)

따라서 네트워크의 스위칭 허브를 사용해도 네트워크의 트래픽 증가 시  $T_{wait}$  값이 증가하게 되고 데이터 시간지연 증가에 영향을 미칠 수도 있다.

- 제어기 안정운동을 위한 시간지연 한계분석과 검증  
 정상운전 상태에서 통합감시제어시스템의 시스템 서버는 OIS와 각 제어기에 40ms 주기( $T_{SSscan} = 40ms$ )로 데이터 요청을 하여 받은 정보를 DB에 업데이트 한다. 따라서 서버 DB에 정보가 주기적으로 정상 업데이트되기 위한 시간지연 한계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{SS-CTRL}, \tau_{CTRL-SS} &\leq T_{SSscan}, \\ \tau_{OIS-SS}, \tau_{SS-OIS} &\leq T_{SSscan} \end{aligned} \quad (8)$$

통합감시제어시스템 정상운전 시 루프 테스트를 통해 실제 확인한 데이터 전달시간은 다음과 같다.

**표 2** 전달경로 별 시간지연 측정 결과 1 (항목별 10회 측정)

**Table 2** Result of time delay measurement 1

전달경로	최소	평균	최대	지연한계
$\tau_{SS-CTRL}$	1ms 미만	1.25ms	2ms	40ms
$\tau_{CTRL-SS}$	1ms 미만	1.25ms	2ms	40ms
$\tau_{OIS-SS}$	1ms 미만	0.8ms	1ms	40ms
$\tau_{SS-OIS}$	1ms 미만	0.8ms	1ms	40ms

제어 알고리즘이 해당 샘플링 시점에 연산되어 정상적으로 IO모듈에 전달되기 위해서는 제어기 외부에서 입력되어야 하는 설정 값, 공정출력 등의 데이터가 제어기 컴퓨팅 시간을 고려한 제어기 샘플링 시간( $T_{CTRLscan}$ )내에 도달해야 한다. 따라서 해당 샘플링 시점에 제어 알고리즘이 정상적으로 연산되기 위한 시간지연 한계는 다음과 같다.

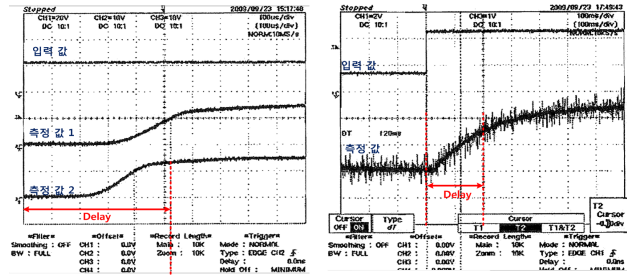
$$\begin{aligned} \tau_{INFO, CNet} \\ = \tau_{OIS-SS} + \tau_{SSscan} + \tau_{SS-CTRL} + T_{CTRLcom} &\leq T_{CTRLscan} \\ \tau_{INet} = \tau_{Output-CTRL} + T_{CTRLcom} &\leq T_{CTRLscan} \end{aligned} \quad (9)$$

태안 1호기 통합제어시스템의 보일러 BP는 500ms의 샘플링 주기( $T_{CTRLscan} = 500ms$ )로 운용되므로 정상운전 시 식(9)의 좌변의 합은 500ms 보다 작아야 한다. 통합감시제어시스템 정상운전 시 루프 테스트를 통해 실제 확인한 데이터 전달시간은 다음과 같다.

**표 3** 전달경로 별 시간지연 측정 결과 2 (항목별 10회 측정)

**Table 3** Result of time delay measurement 2

전달경로	최소	평균	최대	지연한계
$\tau_{INFO, CNet}$	55ms	59ms	95ms	500ms
$\tau_{INet}$	64ms	67ms	68ms	500ms



**그림 9** 시간지연 측정 시험 화면

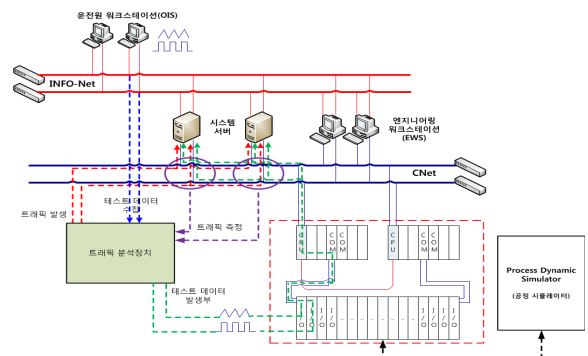
**Fig. 9** Monitor display of time delay measurement

제어기의 샘플링 시간이나 시스템 서버의 스캔타임 내에 두 개 이상의 데이터가 도착하는 경우 이전에 도착한 데이터는 버리고 가장 최근에 도착한 데이터를 사용하며 이를 Message Rejection이라고 한다. 제어시스템이 정상적으로 설계된 경우 이는 제어시스템 전체 안정성에 부정적인 영향을 끼치지 않는다. 반면 네트워크상의 데이터 충돌이나 손실로 인해 다음 샘플링 시간 전에 데이터가 제어기로 도착하지 못하여 다음 시점 제어를 위한 측정이 이루어지지 못하는 Vacant Sampling이 발생할 수가 있으며 시스템 전체의 안정성 저하를 초래할 수가 있다.

### 3. 통합감시제어시스템 통신부하 시험

#### 3.1 통합감시제어시스템 통신부하 시험 환경

지금까지 설명한 바와 같이 이더넷 기반의 네트워크 제어 시스템은 저 트래픽 영역에서는 데이터 시간지연 발생이 적어 제어성능 저하에 영향이 적다. 반면 고 트래픽에서는 데이터 전송 시간지연 빈도가 증가하여 제어시스템 전체 안정성 저하에 영향을 미친다. 또한 이더넷 고유의 경쟁기반의 매체접속 방식으로 인해 제어시스템의 안정성에 영향을 미치기 시작하는 트래픽 임계지점 추정이 어렵다. 이 네트워크의 트래픽의 임계값을 추정할 수 있다면 시스템을 안정적으로 운영하면서 추가 증설 가능한 호스트 수량을 정확히 예측할 수 있으며 시스템 설계단계에서 마진을 정확하게 설정할 수가 있어 경제적이고 효율적으로 시스템 개발이 가능하다.



**그림 10** 통합감시제어시스템 통신부하 시험 환경

**Fig. 10** IMCS traffic test environment

통합감시제어시스템 네트워크의 트래픽 한계지점을 확인하기 위해 별도의 테스트 데이터를 입력하고 데이터가 집중되는 병목지점(Bottleneck Point)에 별도의 트래픽을 주입하였다. 그리고 트래픽을 서서히 증가시키며 테스트 데이터 손상여부를 확인하는 방법을 사용하였다.



그림 11 주요 시험장치 : 트래픽 분석장치(좌), 트래픽 발생장치(우)  
 Fig. 11 Test equipment : traffic analyzer(left), traffic generator(right)

그림 10은 통신부하 시험 환경을 나타낸 것이다. 먼저 통합감시제어시스템과 화력발전 공정 시뮬레이터 간 IO를 연계하여 실제 운전환경과 동일한 정상출력 500MW 상태를 유지한다. 그리고 삼각파나 구형파와 같은 디지털, 아날로그 테스트 신호를 입력하고 호스트의 증가대신 트래픽 발생기로 데이터가 집중되는 시스템 서버의 상하단에 패킷을 발생시켜 제어시스템이 정상동작하는 트래픽 발생 한계지점을 측정하였다. 테스트 데이터를 사용한 이유는 운전화면에서의 공정 데이터만으로 제어시스템 안정 여부를 판별하기 어려워 상대적으로 확인이 용이한 구형파와 삼각파형을 통해 판단하기 위함이다. 테스트 신호는 제어 판넬당 DI, AI 신호를 한 세트로 설정하며 DI 신호 주기는 시스템에서 식별 가능한 최소 resolution(20ms) 펄스파형을 주입하고 AI 신호는 10초 주기 삼각파형을 입력하였다.

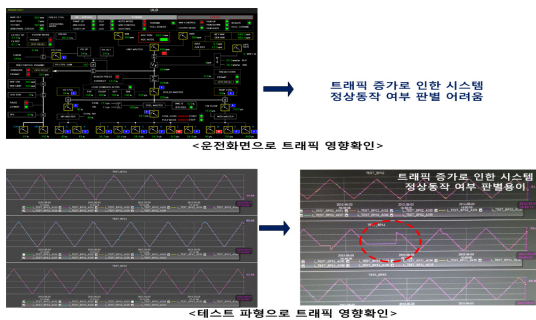


그림 12 테스트 파형 입력을 통한 안정성 판별 방법  
 Fig. 12 Stability evaluation method via test wave form input

본 시험은 트래픽이 집중될 것으로 예상되는 병목지점을 찾는 것이 중요하다. 데이터 교환이 가장 많은 지점이 트래픽 증가에 영향을 가장 크게 받는 것으로 예상할 수 있으므로 이 지점의 트래픽 한계치가 네트워크 전체의 트래픽의 한계치로 판단될 수가 있다.

CNET에 구성된 제어 판넬 수량은 18세트이며 판넬당 2개의 CPU를 탑재하고 있다. 각 CPU 모듈은 시스템 서버와

통신하기 위해 2개의 통신단을 구축하고 있으며 정상동작 시에는 Secondary CPU 모듈은 데이터를 전송하지 않는다. Primary CPU 모듈의 첫 번째 통신 단자는 Primary Network의 시스템 서버와 두 번째 통신 단자는 Secondary Network의 System Server와 데이터를 교환한다. 만약 Primary CPU 모듈의 동작이 정지되면 해당 판넬과 서버의 통신은 Secondary CPU 모듈이 담당하도록 자동절체 된다. EWS, 사무용 프린터 등과 같이 네트워크 부하에 큰 영향을 주지 않거나 정상운전 시 연속적인 트래픽을 발생하지 않는 설비는 시험대상에서 제외하였다.

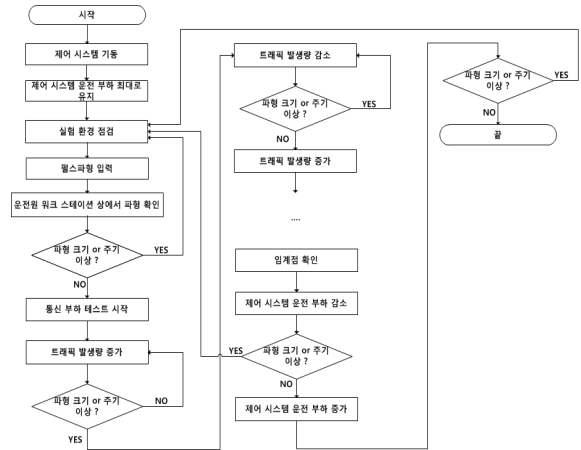


그림 13 통신부하 시험 순서도  
 Fig. 13 Flow chart of traffic test

그림 10과 같은 실험환경에서 트래픽 발생장치 패킷 발생을 증가시키다가 테스트 파형에 왜곡이 생기기 직전, 다시 말해 정상 운전이 보장되는 최대 트래픽 발생 시점에서 패킷 발생을 그대로 유지한다. 이 상태에서 통합감시제어시스템 OIS에서 MW 출력 증감발, 런백(Run Back) 등과 같은 동적 상태나 비정상 운전 상태를 발생시켜 테스트 파형 왜곡여부를 확인하고 파형 이상이 없을 시 현재 패킷 발생량을 통합감시제어시스템이 안정적으로 운전되기 위한 네트워크 트래픽 여유로 확정한다. 동적 상태나 비정상 운전 상태에서 테스트 파형의 왜곡이 발생하면 트래픽 발생량을 조금 감소시켜 이를 반복한다.

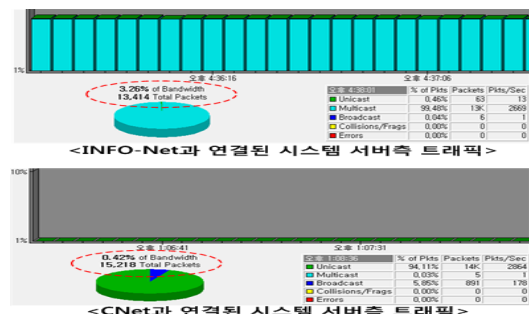


그림 14 정상 운전 시 네트워크 트래픽 분석 결과 : INFO-Net 32.6Mbps , CNet 4.2Mbps  
 Fig. 14 Result of network traffic analysis on normal operating condition : INFO-Net 32.6Mbps , CNet 4.2Mbps

통합감시제어시스템 정상운전 상태에서 INFO-Net의 네트워크 사용량은 평균32.6Mbps(1Gbps 네트워크 대비 3.25%), CNet의 경우 평균 4.2Mbps(1Gbps 네트워크 대비 0.42%) 정도였다. 통합감시제어시스템의 호스트는 Event-Driven 방식이 아닌 Static Sending 방식을 사용하므로 각 호스트는 매 시간마다 동일한 양의 트래픽을 발생시킨다. 따라서 측정된 네트워크 사용량에 운용중인 호스트 수를 나누면 호스트 당 트래픽 발생량을 추정가능하고 통신부하 시험을 통해 통합감시제어시스템의 트래픽 한계지점이 파악되면 시스템 정상운전을 보장하는 최대 호스트 수량을 예측할 수가 있다.

### 3.2 통신부하 시험 결과분석

지금까지 설명한 절차에 따른 통합감시제어시스템 통신부하 시험에 따른 정상운전 트래픽 한계치는 표 4와 같다.

**표 4** 실험 항목별 트래픽 한계치 결과표(X: 트래픽 미입력)

**Table 4** Traffic limits following of test items

CNET (Mbps)		INFO (Mbps)	패킷 사이즈 (byte)	발생 유형	이중화 상태
P	S	P			
385	X	X	1024	브로드캐스트	이중화
553	X	X	1518	브로드캐스트	이중화
697	726	X	1024	유니캐스트	이중화
X	X	720	1024	브로드캐스트	이중화
X	X	960	1518	브로드캐스트	이중화
348	X	450	1024	브로드캐스트	이중화
450	X	550	1518	브로드캐스트	이중화
139	141	X	1024	브로드캐스트	이중화
129	131	X	1518	브로드캐스트	이중화
40	off	X	1024	브로드캐스트	No

실험 결과표를 보면 네트워크 별 트래픽 발생, 2개 네트워크 동시발생, 트래픽 패킷 사이즈, 발생유형, 이중화 상태 등에 따라 네트워크 성능변화를 확인하였음을 알 수가 있다. 또한 트래픽 발생 중에 이중화 스위치를 다운하여 이중화 동작여부도 확인하였다. 각 실험 항목 별 확인사항은 다음과 같다.

- 네트워크별 트래픽 발생에 따른 성능 분석

트래픽 증가에 따른 제어시스템 정상동작 한계는 INFO-Net이 CNet보다 큰 것으로 확인되었다. 정상운전 상태에서 INFO-Net에서 교환되는 데이터양이 CNet에 비해 크지만 전체적으로 보았을 때 둘 다 제어시스템 정상동작 한계에 비해 극히 적은 양이고 INFO-Net에 비하여 CNet에 데이터를 전송해야하는 Sender의 수가 많아서 트래픽이 상대적으로 적은 양이 발생해도 Sender의 재전송 횟수 증가로 전송지연이 발생하기 때문이다.(Sender 수 INFO-Net : 서버

2 EA, CNet : 제어 캐비넷 18EA) 또한 시스템 서버에 비해 제어기의 CPU는 상대적으로 처리속도가 떨어지므로 이 같은 현상이 발생한 것으로 추정된다. 그림에서 불구하고 CNet이 다중 망 상태에서 385Mbps 트래픽 발생시점까지 정상동작을 유지할 수 있는 이유는 1회선이 트래픽 증가로 전송지연이 발생해도 Secondary 회선으로 이를 만회하는 것으로 판단된다.

- 2개 네트워크에(CNet, INFO-Net) 동시 트래픽 발생 성능 분석

1회선씩 분리하여 테스트를 실시했을 때보다 CNet과 INFO-Net 동시에 트래픽을 발생했을 경우 트래픽 여유가 감소한 것으로 확인되었다. 하지만 패킷 사이즈 1024byte 기준으로 봤을 때 서버를 기준으로 약 800Mbps(348+450) 트래픽 발생상황에서도 제어시스템이 안정적으로 동작함을 확인하였다.

- 발생 트래픽 패킷 사이즈에 따른 성능 분석

트래픽의 패킷 사이즈를 1024byte와 1518byte로 구분하여 테스트를 실시한 결과 1024byte 트래픽 발생 시 상대적으로 성능저하를 초래함을 확인 하였다. 이는 작은 패킷 사이즈로 전송 시 같은 전송률을 유지하기 위해 상대적으로 많은 횟수의 전송시도를 해야 하므로 네트워크에 더 큰 부담을 주는 것으로 판단된다. 개별 호스트가 전송하는 데이터 프레임 사이즈는 약 1024byte 이므로 본 시험의 성능 기준은 1024byte 패킷 사이즈로 설정하였다.

- 트래픽 발생 유형에 따른 성능 분석

트래픽 발생을 브로드캐스트(Broadcast) 방식으로 하는 것보다 서버에 유니캐스트(Unicast)로 발생시키는 방식이 높은 트래픽 발생량에서 정상 동작이 가능한 것으로 확인되었다. 이는 브로드캐스트 트래픽이 발생되면 모든 호스트들이 이를 관측해야하므로 호스트의 통신장치의 부담이 증가하기 때문이다

- CNet의 이중화 네트워크 모두에 트래픽 발생 시 성능 분석

CNet의 두 회선에 모두 트래픽을 발생을 하였을 경우 최대 약 280bps(141+139) 트래픽 발생시점까지만 정상 동작이 가능한 것으로 확인되었다. 이는 1회선 발생 상황처럼 전송지연을 만회할 회선이 없으므로 상대적으로 여유가 줄어든 것이다.

- CNet Secondary 스위치 정지 후 트래픽 발생 시 성능 분석

CNet에 이중화로 구성된 스위치 한 개를 정지 시킨 후 트래픽 발생 시 정상 동작이 가능한 트래픽 발생량이 40Mbps 정도인 것으로 확인되었다. 이중화 네트워크를 제거할 때 성능이 급격하게 저하되는 이유는 전송지연으로 만회할 이중화 회선이 없고, 서버 이중화 알고리즘으로 인한 Secondary 회선을 확인하려고 하는 신호를 보내고 대기하는 프로시저 진행 중에 트래픽 발생 또한 증가하여 CPU 연산에 부담이 생긴 것으로 판단된다. 제어시스템 운전은 130Mbps 이상에

서도 정상적으로 동작했으나 테스트 과정 확인 결과 일시적인 전송 누락을 보여 이 상태에서 SOE신호나 MFT와 같은 보호장치 시퀀스의 오동작 문제발생을 야기할 수도 있는 것으로 예상된다.

- 트래픽 증가로 인한 과정 왜곡의 특징

CNet에서 트래픽 증가 시 한계점을 초과하면 AI 삼각파형의 변형되어 OIS에 표시된다. 이는 재전송이나 패킷 드롭으로 인해 전송이 지연되어 정해진 시간 내에 데이터가 업데이트 되지 않아 발생한 현상이다. 반면 INFO-Net에 트래픽 증가 시 과정의 변화는 확인되지 않으나 일시적으로 과정이 표현되지 않는 깜박임 현상이 발생한다. 이는 CNet의 데이터가 서버의 DB에 정상적으로 업데이트되지만 DB를 OIS에 표현하는 과정에 지연이 생기기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

네트워크 기반 제어시스템은 설비 간 데이터 전달을 네트워크를 통해 수행함으로써 제어연산의 중앙 집중화 해소하고 설비 추가 증설 및 유지보수 측면에서 많은 이점을 제공한다. 반면 네트워크 데이터의 시간지연은 제어시스템 전체의 안정성에 영향을 미칠 수도 있으며, 최근 적용추세가 증가하고 있는 이더넷의 경우 높은 네트워크 트래픽 발생 시 제어시스템 안정도 영향을 예측하기가 어려워진다.

본 논문은 이더넷 기반 화력발전용 통합감시제어시스템의 안정운용에 영향을 미치는 트래픽 한계지점을 추정하는 방법에 대하여 소개하고 실험결과와 주요 특징을 분석하였다. 대형 공정제어분야에 분산제어시스템과 같은 네트워크 기반 제어시스템의 적용이 증가하고 있는 추세이나 제어시스템의 안정적인 운영을 위한 네트워크 트래픽 부하제한 기준을 제시하는 Code나 Standard는 없다. 다만 제어시스템 제작사별로 네트워크에 연결할 수 있는 상이한 호스트 수량제한 기준이 적용되고 있다. 따라서 본 통신부하 시험방법을 통해 네트워크 기반 제어시스템의 안정도에 영향을 미치지 않는 네트워크 최대 트래픽 추정을 가능하게 함으로써 경제적인 제어시스템 설계 및 개발, 효율적인 시스템 운용에 기여할 것으로 기대된다.

References

[1] ANSI/ IEEE Std 802.3, "Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection(CSMA/ CD) Access Method and Physical Layer Specifications", 1996  
 [2] IEEE Std 802.3z, "Media Access Control(MAC) Parameters, Physical Layer, Repeater and Management Parameters for 1000 Mb/s Operation", 1998  
 [3] IEEE Std 802.3ab, "Physical Layer Parameters and Specifications for 1000 Mb/s Operation Over 4-Pair of Category 5 Balanced Copper Cabling, Type 1000Base-T", 1999  
 [4] F.-L. Lian, J. Moyne, D. Tilbury, "Network Design Consideration for Distributed Control Systems", IEEE

Trans. on Contr. Syst. Technol., Vol.10, No. 2, 2002, pp. 297-307

[5] K. C. Lee, S. Lee, "Performance evaluation of switched Ethernet for real-time industrial communications", Computer Standards & Interfaces 24, 2002, pp. 411-423  
 [6] M.-Y. Chow, Y. Tipsuwan, "Network-Based Control System: A Tutorial", IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001, pp. 1593-1602  
 [7] F.-L. Lian, J. Moyne, D. Tilbury, "Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet", IEEE Contr. Syst. Mag., Vol.21, No.1, 2001, pp. 66-83  
 [8] "Communication Traffic Test of IMCS", KEPRI, Technical Memo, 2012

저 자 소 개



유 광 명 (劉 光 明)

1980년 5월 28일생. 2006년 부산대학교 전자전기통신공학부 졸업. 2008년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 현재 한전전력연구원 일반연구원  
 Tel : 042-865-5656  
 E-mail : kmyu@kepco.co.kr



김 종 안 (金 鍾 安)

1957년 10월 3일생. 1985년 원광대학교 전자공학과 졸업. 현재 한전전력연구원 책임연구원.  
 Tel : 042-865-5641  
 E-mail : jakim@kepco.co.kr



류 호 선 (柳 皓 善)

1970년 7월 21일생. 1993년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전전력연구원 선임연구원.  
 Tel : 042-865-5647  
 E-mail : hsryu@kepco.co.kr