

# 원자력 발전소 분산 제어 시스템을 위한 네트워크의 실시간 특성 해석

論 文
48A-5-23

## Real-Time Characteristic Analysis of a DCS Communication Network for Nuclear Power Plants

李 聖 雨\* · 任 漢 錫\*\*

( Sung-Woo Lee · Han-Suck Yim )

**Abstract** - In this paper, a real-time communication method using a PICNET-NP (Plant Instrumentation and Control Network for Nuclear Power plant) is proposed with an analysis of the control network requirements of DCS (Distributed Control System) in nuclear power plants. The method satisfies deadline in case of worst data traffics by considering aperiodic and periodic real-time data and others.

**Key Words** : Distributed Control System, Aperiodic and Periodic Real-Time Data, Token Rotation Time, Token Hold Time.

### 1. 서 론

운전 신뢰도 향상, MMI (Man Machine Interface) 강화, 기동, 정지의 자동화 그리고 수명 연장을 위해서 원자력 발전소에 디지털 기술이 적용된 계측 제어(I&C, Instrumentation and Control) 시스템을 도입하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예로서 ABB-CE사의 차세대원전 모델인 Nuplex 80+ 설계의 경우 완전 전산화된 계통설계를 개발 완료하여 미국의 원자력 규제위원회(NRC)의 설계 인증을 취득하였으며[1], Westinghouse사에서도 이와 유사한 개념의 Eagle 21이라는 종합화된 디지털 제어 및 보호계통을 개발하여 영국의 Sizewell B 원전의 안전 및 비 안전 계통에 적용하였다[2]. 또한 프랑스의 Merlin-Gerin사에서도 디지털 원자로 계측 및 보호계통을 적용하여 원자로 노심 과 1차 냉각 계통의 운전변수를 신호처리 하여 필요시 원자로를 긴급 정지시키기 위한 신호를 발생시키는 보호 계통을 개발하여 Chooze B 원전에 적용하였다[3]. 이러한 연구들은 대부분 원자력 발전소 분산 제어 시스템을 중심으로 이루어지고 있으며, 대부분 최종 결과물만이 공개되고 주요 연구 결과는 공개되지 않고 있는 것이 현실이다. 특히 분산 제어 시스템을 가능하게 하는

동시에 분산 제어 시스템의 성능에 매우 중요한 영향을 주는 네트워크에 대한 연구 결과는 거의 없다.

분산 제어 시스템에 있어 네트워크는 매우 중요한 부분이다. 여러 가지 형태의 네트워크 프로토콜이 제시되어 사용되고 있다. 분산 제어 시스템의 통신망은 적용 범위에 따라서 계층구조를 가지는 경우가 많은데, 이런 경우 보통 IEEE 802.4 토큰 버스 규약[4], IEEE 802.5 토큰 링 규약[5], 그리고 FDDI 규약[6] 등의 통신 규약들은 중위권을 담당하고, 프랑스에서 제안된 FIP[7], 독일에서 제안된 Profibus[8], 그리고 자동차의 통신 규약으로 제안되어 국제 표준으로 자리잡은 CAN[9]등 많은 필드버스들은 하위 계층의 센서, 구동기 부분의 통신을 담당한다. 하지만 각 네트워크 프로토콜들의 특성으로 볼 때 중위 계층 하위 계층의 구분이 모호하다. 특히 필드 버스의 경우에는 중위 계층에 사용되는 경우가 종종 있어 하위 계층이라고 규정지을 수는 없다.

중위권 통신망 규약의 대부분은 논리적 혹은 물리적인 토큰 링 통신망이라고 할 수 있다. 동시에 대부분 광섬유를 통신매체로 지원하여 빠른 전송과 원거리 응용을 지원한다. IEEE 802.5 토큰 링 규약이나 FDDI는 물리적으로 통신망이 링 구조를 가지고 있으며, IEEE 802.4 토큰 버스 규약의 경우도 통신망 자체는 버스 형태를 가지지만 통신망에 연결된 스테이션들은 논리적 링을 구성하게 된다. 따라서 이들 통신망에서는 전송 권한을 나타내는 토큰이 통신망 전체를 회전하는 시간인 토큰 회전 시간이 중요한 성능 지표가 된다.

중위권 통신망과 관련된 네트워크에 대한 연구는 많이 이루어졌다. 동기(synchronous) 데이터 프레임의 전송한도 시간을 보장하는데 필요한 최악의 경우의 토큰 회전 시간에 대한

\*正 會 員 : 電力研究員 原子力研究室 前任研究員

\*\*正 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1998년 12월 1일

最終完了 : 1999년 3월 17일

연구가 있다. FDDI 통신망에서의 최악의 경우의 토큰 회전 시간의 바운드에 대한 성질들이 증명되었다 [10, 11]. 실시간 데이터 프레임의 전송한도 시간을 보장하기 위해 다킷토큰 회전 시간, 토큰 보유시간, 버퍼의 수 등의 통신망 매개 변수를 정하는 방법이 제시되었다[12]. 토큰 보유시간을 할당하는 몇 가지 방법이 [13]에서 제시되었다. 이렇게 최악의 경우의 토큰 회전 시간에 대한 연구는 주로 동기 데이터 프레임을 대상으로 이루어졌다.

하지만 이러한 결과들을 안전 관련 시스템인 원자력 발전소 분산 제어 시스템에 바로 적용하기에는 어려움이 많다. 원자력 발전소의 경우에는 비 주기 실시간 데이터의 데드라인을 보장할 수 있는 네트워크 프로토콜을 사용하거나, 혹은 경성 실시간 주기를 보장할 수 있는 방법을 제공하는 네트워크를 사용하여야 한다. 동시에 연성 실시간 주기 데이터의 전송도 보장할 수 있는 방법을 제공할 수 있어야 한다. 하지만 기존의 결과들만으로는 이러한 요구사항을 보장할 수가 없다.

본 논문에서는 전력연구원에서 제안한 원자력 발전소 분산 제어시스템 프로토타입인 KNX-5[14]의 제어 네트워크를 대상으로 하여 비 주기 실시간 데이터와 경성 실시간 주기 데이터의 주기를 보장할 수 있는 방법을 제안한다.

2장에서는 제어 통신망의 요구사항들을 분석하고, 3장에서는 문제 설정을 하였다. 4장에서는 경성 실시간 주기 통신을 지원할 수 있는 방법을 제안하였다. 5장에서는 제안한 방법에 대한 실시간 특성을 해석하였다. 마지막으로 6장에 결론이 있다.

## 2 원자력발전소 분산 제어 시스템의 구조

### 2.1 대상 시스템

전력 연구원에서는 KNX-5라는 원자력 발전소 분산 제어 시스템 프로토타입을 설정하여 연구를 수행하고 있다. KNX-5는 그림 1에 보인 것처럼 4 계층으로 구성된다. 각 계층의 역할은 다음과 같다.

#### 제 1 계층

스테이션 계층으로 여러 유닛의 모든 운전 정보 데이터를 감시하고 기술지원센터에도 스테이션 버스에 연결된 컴퓨터로부터 데이터를 제공한다. 스테이션 버스는 플랜트의 여러 지역을 통과하기 때문에 전자파 간섭으로부터 보호하기 위하여 광섬유(Optical Fiber)를 사용한다.

#### 제 2 계층

유닛 계층으로서 각 유닛의 운전 조작에 관련된 신호와 데이터를 처리하는 MMI (Man Machine Interface) 기능의 계층이다. 중앙제어실과의 각종 데이터는 유닛 네트워크에서 제공되는데 이 네트워크에는 데이터 통신 유닛과 데이터 수집 컴퓨터와 링크 된다. 한편 여기에서 스테이션 네트워크에도 필요한 데이터를 제공한다. 유닛 네트워크에는 중앙제어실의 CRT 디스플레이를 담당하는 대형 컴퓨터와 연결되어 있고 데이터 로깅, 운전지원기능, 플랜트 효율계산 등을 수행하는 유닛전체관리 시스템의 컴퓨터와도 링크 된다.

#### 제 3,4 계층

시스템과 현장의 데이터 처리와 제어기능을 수행하는 단계이고 두 개의 중간 네트워크를 갖추고 유닛 계층과는 데이터 통신 유닛과 데이터 수집 컴퓨터를 통하여 링크 된다.

본 논문이 대상으로 하고 있는 제어 네트워크는 KNX-5에서 2계층과 3계층을 연결하는 네트워크이다. 이 네트워크는 원자력 발전소용 통신망 설계시 요구사항을 바탕으로 하여 제안되었으며 분산제어 시스템의 중위 계층을 담당한다.

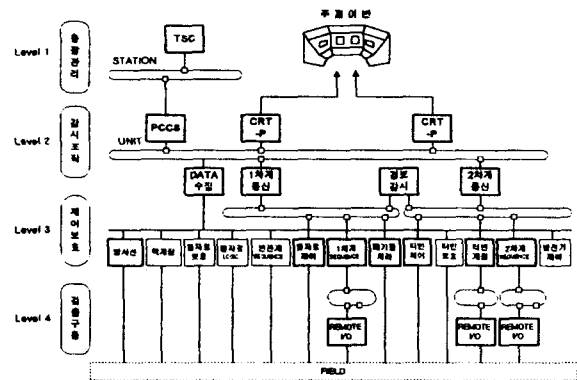


그림 1. KNX-5의 프로토타입

Fig. 1. Prototype of KNX-5

이 통신망을 PICNET-NP(Plant Instrumentation and Control Network for Nuclear Power plant)라고 한다[15]. PICNET-NP는 IEEE 802-3 물리 계층에 IEEE 802.4 데이터 링크 계층(MAC, LLC)을 접속하고 그 위에 응용 계층을 얹은 구조를 갖는다[16]. KNX-5를 제어 네트워크를 중심으로 분산 제어 시스템 측면에서 다시 그리면 그림 2와 같은 형태를 갖는다. 이 때 제어 네트워크와 관련된 분산 제어 시스템은 다음과 같은 부분들로 이루어진다.

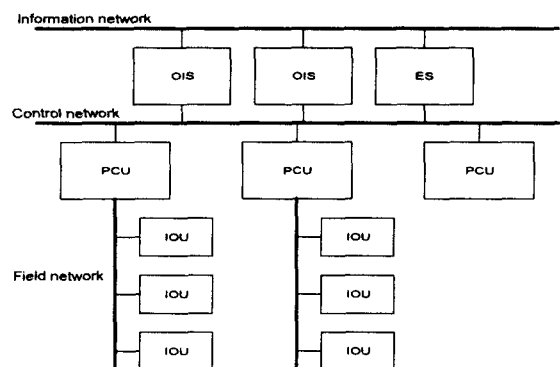


그림 2. 원자력 발전소 분산 제어 시스템의 계통 구조

Fig. 2. System architecture of DCS in nuclear

운전원 스테이션 (OIS; Operator Interface Station)은 운전자가 전체 시스템에 대한 제어, 감시 기능을 할 수 있게 하는 장치이다. 엔지니어 스테이션 (ES; Engineer Station)은 공정 제어 및 감시제어 관련 설계 자료 및 프로그램을 작성할 수

있는 기능을 제공한다. 공정제어 유닛 (PCU; Process Control Unit)은 입출력 유닛으로부터 신호를 입력받아 제어 및 감시 기능을 수행하고, 처리된 결과를 입출력 유닛으로 전송하는 기능을 갖는다. 공정제어 유닛간의 데이터 교환을 통한 연계동작 및 운전원 스테이션과의 연계동작이 일어날 수 있다. 입출력 유닛 (IOU; I/O Unit)은 현장에서 수집한 신호를 공정 제어기 쪽으로 보내거나 공정제어기에서 보낸 신호를 현장으로 출력하는 기능을 수행한다. 입출력 유닛에서는 signal conditioning 및 기본적인 제어기능을 수행할 수 있다.

## 2.2 제어 네트워크의 요구사항

여기서는 PICNET-NP가 대상으로 하고 있는 제어 네트워크에서 요구되는 특성들을 분석한다. 데이터 트래픽, 클럭 동기, 멀티캐스팅과 브로드캐스팅 등에 대한 특성들을 분석하였다.

### 2.2.1 데이터 트래픽

하나의 네트워크 프로토콜은 보통 주기적인 데이터나 비주기 데이터 중 한 가지를 효과적으로 전송한다. 주기적인 데이터를 전송하는 경우에는 네트워크에 발생하는 지터를 줄이는 것이 중요하다. 그리고 주기적인 데이터의 경우에는 미리 각 데이터의 주기를 알 수 있기 때문에 네트워크에 대한 경쟁을 미리 막도록 사전 스케줄링을 할 수 있다. 스포라딕 데이터를 전송하는 경우에는 네트워크에 의한 지연을 줄이는 것이 중요하고, 데이터가 사건에 의해 발생하기 때문에 네트워크의 서비스를 요구하는 시간을 미리 알 수 없다. 따라서 통신요구는 중요도에 따라 우선 순위를 설정할 수 있어야 하며, 경보 보고나 사고조치 등과 같이 중요한 통신요구가 중요하지 않은 일반통신요구에 의해 지연되어 처리되는 일이 발생하지 않아야 한다. 이처럼 데이터의 특성에 따라 네트워크에 대한 요구사항이 다르기 때문에 하나의 네트워크 프로토콜이 두가지를 모두 효과적으로 지원한다는 것은 매우 어려운 일이다.

### 비 주기 실시간 데이터 (Aperiodic real-time data)

정해진 데드라인을 만족시켜야 하는 데이터이다. 데이터의 특성에 따라 데이터링크 계층의 확인(Acknowledgement)을 받는 경우와 받지 않는 경우로 나뉜다. 1대1 통신, 멀티캐스팅, 브로드캐스팅 모두 사용할 수 있어야 한다.

### 경성 실시간 주기 데이터(Hard-real-time periodic data)

정해진 주기 내에 한 번 이상 전송되도록 한다. 전송시의 부하를 줄이기 위해서 주기 데이터 초기화 과정에서 전송 스케줄을 최적화 하여야 한다. 데이터링크 계층의 확인을 받지 않는다. 1대1 통신, 멀티캐스팅, 브로드캐스팅 모두 사용할 수 있어야 한다.

### 연성 실시간 주기 데이터(Soft-real-time periodic data)

정해진 주기 내에 한 번씩 서비스가 처리되도록 하되 약간 정도의 시간지연을 허용한다. 데이터링크 계층의 확인을 받지 않는다. 긴급 통신 서비스의 영향이 없는 경우에는 주기를 맞출 수 있도록 최대한 노력(Best effort) 한다. 전송시의

부하를 줄이기 위해서 주기 데이터 초기화 과정에서 전송 스케줄을 최적화 하여야 한다.

### 비 실시간 데이터 (Non-real-time data)

데이터의 특성에 따라 데이터링크 계층의 확인(Acknowledgement)을 받는 경우와 받지 않는 경우로 나뉜다. 1대1 통신, 멀티캐스팅, 브로드캐스팅 모두 사용할 수 있어야 한다.

### 2.2.2 클럭 동기 (real-time clock synchronization)

PICNET-NP는 PICNET-NP에 연결되는 모든 스테이션 사이에 실시간 시간 동기가 이루어 질 수 있도록 하는 기능을 제공한다. 시간 동기의 정확도는 10ms이다. PICNET-NP는 내부에 실시간 clock을 가지고 주기적으로 실시간 동기를 하여 정확도를 유지하여 사용자에게 실시간을 알려주어야 한다.

### 2.2.3 멀티캐스팅과 브로드캐스팅

2개 이상의 스테이션에 데이터를 전송해야 할 경우 멀티캐스팅 혹은 브로드캐스팅 방법을 사용한다. 멀티캐스팅의 경우에는 미리 지정한 그룹에 데이터를 전송하는 경우에 사용하고, 브로드캐스팅의 경우에는 모든 스테이션에 데이터를 보내는 경우에 사용한다. 멀티캐스팅을 사용하기 위해서는 미리 그룹을 결정해서 송신측에서 데이터를 해당 그룹 주소를 사용하여 보내면 된다.

## 3. 문제 설정

국내·외적으로 매체제어 방식으로 사용하고 있는 통신 프로토콜은 LG사에서 사용한 Mini-MAP, Foxboro의 Node-Bus, Bailey의 Infi-Net, 웨스팅하우스사의 Westnet II 등 여러 가지 형태의 네트워크가 IEEE 802.4 프로토콜을 사용하여 제안되었다[17]. 그 중에서 대표적으로 MAP (Manufacturing Automation Protocol) [18]이 제안되었다. 하지만 MAP은 성공을 하지 못하였다는 것이 일반적인 결론이다. 여러 가지 이유 중에서 하나는 실시간 특성을 보장하기가 어렵다는 것이다. 이는 IEEE 802.4 프로토콜의 특성으로부터 나온다.

IEEE 802.4 토큰 버스 네트워크에서는 네트워크의 전송권한이 토큰에 의해 제어된다. 토큰을 소유한 노드만이 통신 매체를 사용할 수 있는 권한이 있다. 네트워크상의 각 노드들은 물리적으로 버스를 통해 연결되어 있으며, 논리적으로는 링을 형성하여 토큰을 다음 노드에 전달한다. 토큰의 전달 과정이 논리적인 링을 통해 이루어지기 때문에 물리적인 순서는 논리적인 토큰 전달 순서와는 무관하다. 그리고 토큰 버스 프로토콜은 4개의 우선 순위 0, 2, 4, 6(가장 높은 우선 순위 6)을 제공한다. 토큰을 받으면 우선 순위 6부터 차례로 전송을 하게 된다. 이 때 시간 제어는 타이머에 의해 이루어진다. IEEE 802.4에서는 이를 위해 토큰보유시간 (THT, Token Hold Time), 목적토큰회전시간 (TTRT, Target Token Rotation Time), 토큰회전시간 (TRT, Token Rotation Time)에 대한 타이머를 제공한다. THT는 다른 우선 순위와는 관계가 없으며, 우선 순위 6에 대한 시간 제어를 하는데 사용한다. 네트워크 상의 노드가 토큰을 받으면 항상 THT

만큼의 시간 동안 우선 순위 6에 해당하는 데이터를 네트워크로 전송할 수 있는 권리를 가지게 된다.

TRT는 TTRT와 함께 우선 순위 0, 2, 4에 해당하는 데이터의 전송 시간을 제어하는데 사용된다. TRT는 논리적인 링상에서의 다음 노드로 토큰을 넘겨준 다음부터 시작하여 흘러간다. 토큰을 다시 받으면 이 때의 TRT 값이 토큰회전시간을 나타내게 된다. TTRT는 우선 순위 0, 2, 4에 대해 각각 존재하며 (TTRT4, TTRT2, TTRT0) 이름에서 알 수 있듯이 예상되는 토큰회전시간을 나타낸다. 우선 순위 4에 해당하는 데이터의 전송은 토큰을 받은 다음 우선 순위 6에 해당하는 데이터를 전송하고 (우선 순위 6에 해당하는 데이터를 모두 전송하였거나, 혹은 THT 시간이 끝났을 경우), 그 다음에 이루어진다. 이 때 전송 가능한 시간은 (TTRT4 - TRT)이다. 만일 (TTRT4 - TRT) 값이 양수가 아니면 우선 순위 4는 이번 토큰 회전에 데이터 전송할 수 없고 다음 번 토큰을 대기해야 한다. 우선 순위 2와 0의 경우도 우선 순위 4의 경우와 동일하다. 단지 TTRT4 대신에 TTRT2와 TTRT0를 사용하며, TRT는 계속 증가한다.

IEEE 802.4의 이러한 특성으로 다음과 같은 문제들이 발생한다.

### 3.1 최대 지연 시간 문제

토큰회전시간은 다른 노드의 데이터 트래픽에 의해 영향을 받는다. 따라서 토큰회전시간이 일정하지 않게 된다. 다른 노드들이 데이터를 보내지 않을 경우에는 토큰회전시간이 작아서 긴 시간 동안 데이터를 보낼 수 있다. 반면에 다른 노드들이 데이터를 많이 보내는 경우에는 토큰회전시간이 커져서 짧은 시간 동안만 데이터를 보낼 수 있다. 또한 토큰회전시간이 일정하지 않기 때문에 개개의 노드에서 데이터를 보내는 시점이 보통 일정하지 않고, 예측을 하기가 매우 어렵다. 이러한 문제로 인해 네트워크에서 소요되는 최대 지연 시간을 결정하기가 어렵다.

### 3.2 주기적인 전송 문제

주기적인 전송은 주기라고 하는 일정한 시간마다 데이터를 전송하는 것이다. 이는 주기 안에 한 번 이상 전송하는 것을 보장하면 지원할 수 있다. 하지만 토큰회전시간이 일정하지 않기 때문에 주기성을 보장하는 것이 어렵다.

### 3.3 문제해결

본 논문에서는 3.1과 3.2에 언급한 문제를 해결할 수 있는 방법을 제안한다. 4 장에서는 이 문제들을 해결하기 위해 제안된 PICNET-NP에 대해 기술한다. PICNET-NP는 IEEE 802.4를 사용하여 비주기 실시간 데이터의 전송과 경성 실시간 데이터의 전송을 가능하도록 한 네트워크이다. 5 장에서는 PICNET-NP에서 실시간 전송을 보장하도록 하는 방법을 제안한다.

## 4. PICNET-NP를 사용한 실시간 통신

### 4.1 PICNET-NP의 기본 사양

PICNET-NP는 그림 2에서 보인 제어 네트워크를 위해 개발한 네트워크 프로토콜이다. PICNET-NP는 버스 형태의 네

트워크 프로토콜이다. 전송 매체로는 동축(coaxial) 케이블과 꼬임 쌍선(twisted-pair) 케이블을 사용한다. 그리고 트랜시버 등의 장비를 이용하여 광섬유(fiber optic) 케이블도 이용할 수 있도록 한다. 최대전송거리는 별도의 확장 기기 없이 꼬임 쌍선 케이블의 경우 100m, 동축케이블의 경우 500m이며 repeater 등의 별도의 확장 기기를 사용하는 경우 3km이다. 전송률은 5 Mbits/s이다. 최대 250개의 스테이션을 연결할 수 있으며, 최대 15개의 그룹으로 분할할 수 있고 한 그룹은 최대 64개의 스테이션으로 이루어질 수 있다.

### 4.2 PICNET-NP의 통신 서비스

PICNET-NP는 비주기 실시간 데이터 전송을 위한 긴급 통신 서비스, 경성 실시간 주기 통신 서비스, 연성 실시간 주기 통신 서비스 및 여러 통신 기능을 제공하는 고급 통신 서비스를 제공한다.

#### 긴급 통신 서비스

비 주기적으로 긴급한 내용을 담고 발생하는 통신 요구를 처리할 수 있는 긴급 통신 서비스를 제공한다. 일정한 전송 시간 및 확인(Acknowledgement)을 포함하는 응답시간을 보장한다. 필요한 경우 데이터 링크 계층 레벨의 acknowledge를 확인하는 과정을 제공할 수 있다.

발생한 사건의 종류나 전송하고자 하는 데이터의 종류를 나타내는 정보 및 필요한 경우 데이터의 내용과 상태를 보낼 수 있다.

#### 경성 실시간 주기 통신 서비스

주기적으로 일정한 데이터를 보내는 통신 요구를 처리하기 위해 경성 실시간 주기 통신 서비스를 제공한다. 이 서비스는 통신장애가 발생하지 않을 경우, 주기성을 엄격히 보장한다. 여기서 주기성을 엄격히 보장한다는 것은 정해진 주기 내에 한 번 이상 서비스가 처리되는 것을 의미한다. 주기 통신 서비스에서는 전송시의 부하를 줄이기 위해서 주기 데이터 초기화 과정에서 데이터 전송에 대한 스케줄링을 한다.

#### 연성 실시간 주기 통신 서비스

주기적으로 일정한 형식의 내용을 보내는 통신 요구를 처리하기 위해 연성 실시간 주기 통신 서비스를 제공한다. 이 서비스는 정해진 주기 내에 한 번씩 서비스가 처리되도록 하되 약간 정도의 시간지연을 허용한다. 하지만 긴급 통신 서비스의 영향이나 일시적인 통신장애가 발생하지 않는 경우는 주기성을 지킨다. 주기 통신 서비스에서는 전송시의 부하를 줄이기 위해서 주기 데이터 초기화 과정에서 데이터 전송에 대한 스케줄링을 한다.

#### 고급 통신 서비스

비 주기적으로 발생하는 사용자의 다양한 통신 요구를 처리할 수 있도록 하는 고급 통신 서비스를 제공한다. 고급 통신 서비스는 기본적으로 다음의 기능을 포함한다.

- 시스템 정보 관련 서비스 : 시스템 식별 요구/응답, 상태 요구/응답
- 각종 긴 데이터의 신뢰성 있는 전달 및 획득 : 업로드, 다운로드

- 통신망을 통한 프로그램의 원격 제어 : 생성, 시작, 정지, 재시작, 삭제, 제거

PICNET-NP 고급 통신 서비스는 최대 1 Mbyte의 데이터를 전달할 수 있다.

#### 4.3 PICNET-NP에서의 우선 순위 할당

PICNET-NP에서는 비주기 실시간 데이터를 위한 긴급 통신 서비스와 경성 실시간 주기 데이터를 위한 주기 서비스에 우선 순위 6을 사용하고, 연성 실시간 주기 통신 서비스에는 우선 순위 4를 사용한다. 그리고 고급통신 서비스에는 우선 순위 2를 사용한다.

#### 4.4 데이터의 정의 및 길이 규정

여기서는 PICNET-NP에서 사용하는 프레임의 구조를 기술한다. 기술된 프레임은 분산 제어 시스템에서 요구되는 데이터를 고려하여 결정하였으며 5장에서 실시간 특성을 분석할 때 사용된다.

##### 4.4.1 토큰 프레임 구조

IEEE 802.4 토큰버스 규격[4]에 정의되어 있는 프레임을 사용한다. 21 옥텟으로 이루어지며, 토큰 프레임의 전송 시간은 33.6  $\mu$ sec이다.

Preamble	SD	FC	DA	SA	FCS	ED
10	1	1	2	2	4	1

##### 4.4.2 데이터 프레임

(21+L) 옥텟으로 이루어지며, 전송시간은 (21+L)\*8\*0.2  $\mu$ sec이다. 여기서 데이터 부분인 L은 데이터의 특성에 따라 다른 구조를 가진다.

Preamble	SD	FC	DA	SA	Data	FCS	ED
10	1	1	2	2	L	4	1

##### 긴급 데이터

비주기적으로 발생하는 사건(Event)에 의한 데이터는 시간 기록(Time Stamp), 사건 식별자(e. ID), 사건 데이터 (e. Data), 상태(Status) 등을 포함하도록 하였다. 이렇게 해서 10 바이트로 이루어지며 구조는 다음과 같다. 따라서 긴급 데이터 전송을 위한 프레임의 길이는 31바이트가 되며 31 옥텟 타임의 시간이 소모된다.

Dsap	Ssap	Ctrl	ID	Time Stamp	e. ID	e. Data	Status
1	1	1	2	2	1	1	1

##### 확인 데이터(ACK)

IEEE 802.4 토큰버스 규격[4]에 정의되어 있는 프레임을 사용한다. 3바이트로 이루어지며 구조는 다음과 같다. 따라서 긴급 데이터에 대한 ACK 전송을 위한 프레임의 길이는 24 바이트가 되며 24 옥텟 타임의 시간이 소모된다.

Dsap	Ssap	Ctrl
1	1	1

##### 주기 데이터

경성 실시간 주기 데이터와 연성 실시간 주기 데이터 모두 같은 구조를 가진다. 주기 데이터는 여러개가 한 번에 전송될 수 있는 구조로 되어있다. 주기 데이터는 데이터 식별자(ID), 데이터(Data), 그리고 상태(Status) 정보로 이루어진다. 이렇게 하여 한 개 데이터의 길이는 5바이트로 이루어지며 k개의 주기 데이터가 합쳐진 형태의 구조는 다음과 같다. 따라서 k개의 주기 데이터를 포함한 주기 데이터의 전송을 위한 프레임의 길이는 (21+4+5k)바이트이며 (21+4+5k) 옥텟 타임의 시간이 소모된다. 프레임의 최대 길이는 1K 바이트로 제한된다. (이 값은 시스템에 따라 달라질 수 있으며 설정 가능하다. 본 논문에서는 기본 값인 1K 바이트를 사용한다.)

Dsap	Ssap	Ctrl	#ofData	ID	Data	Status	...	k 번째 주기데이터
1	1	1	1	2	2	1	...	5

##### 고급 데이터

긴급 데이터나 경성 실시간, 연성 실시간 주기 데이터와는 달리 일정한 길이를 가지지 않는다. 하지만 한 번에 보낼 수 있는 최대 프레임 크기는 1K 바이트로 제한된다.

Dsap	Ssap	Ctrl	고급 데이터
1	1	1	

#### 4.5 PICNET-NP에서의 데이터의 전송

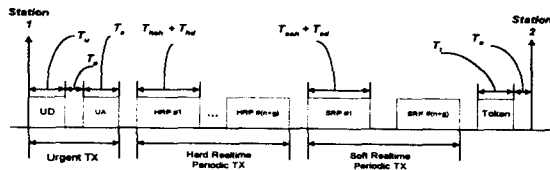
PICNET-NP에서의 데이터 전송은 그림 3과 같은 순서로 이루어진다. 우선 비주기 실시간 데이터와(Urgent TX) 경성 실시간 주기 데이터를(Hard Realtime Periodic TX) 전송한다. 그 다음에 연성 실시간 주기 데이터를 전송(Soft Realtime Periodic TX) 한다. 그 다음에 시간 여유가 있으면 고급 데이터를 전송한다. 그림 3에는 연성 실시간 주기 데이터의 전송까지만 나타내고 있다.

### 5 PICNET-NP에서의 실시간 전송 보장

#### 5.1 알고리즘

앞에서 언급하였듯이 PICNET-NP는 IEEE 802.4 토큰버스 프로토콜을 사용한다. IEEE 802.4 프로토콜에서 실시간 전송을 보장하기 위해서는 전송과 관련된 타이머들을(THT, TTRT) 잘 설정해야 한다. 기본적으로 THT는 비주기 실시간 데이터와 경성 실시간 주기 데이터를 모두 전송할 수 있도록 설정한다. TTRT는 최악의 경우의 TRT를 미리 계산하여 설정한다. PICNET-NP에서는 TTRT4와 TTRT2 만을 사용한다. 또한 TTRT2는 실시간 특성을 요구하지 않기 때문에 여기서는 고려하지 않는다. 주어진 데이터 정보를 사용하여 각 노드의 THT와 TTRT4를 결정하는 알고리즘은 다음과 같다.

첫째, 네트워크 상의 모든 노드에 대해 비주기 실시간 데이터와 주기 데이터, 그리고 비실시간 데이터의 전송에 필요한 최대 통신 대역을 미리 계산한다. 주기 데이터인



- $n$  : 스테이션의 총개수
- $a$  : 비주기 실시간 데이터의 총개수
- $b$  : 경성 실시간 주기 데이터의 총개수
- $c$  : 연성 실시간 주기 데이터의 총개수
- $g$  : 통신망에 정의된 그룹의 총개수
- $T_u$  : 비주기 실시간 데이터 전송시간
- $T_a$  : 비주기 실시간 데이터에 대한 확인 응답 전송시간
- $T_{hoh}$  : 경성 실시간 주기 데이터 오버헤드 전송시간
- $T_{soh}$  : 연성 실시간 주기 데이터 오버헤드 전송시간
- $T_{hd}$  : 경성 실시간 주기 데이터 전송시간
- $T_{sd}$  : 연성 실시간 주기 데이터 전송시간
- $T_t$  : 토큰 전송시간
- $T_p$  : 전송 프레임들 사이의 공백시간
- $T_o$  : 토큰 전달에 필요한 사이시간

그림3. 데이터 전송에 세 가지 방식을 사용  
Fig. 3. The three methods for data transmission

경우에는 경성 실시간 주기 데이터와 연성 실시간 주기 데이터로 구분하여 통신 대역을 계산한다.

둘째, 비주기 실시간 데이터와 경성 실시간 주기 데이터는 최고 우선순위(6)로 설정한다. 연성 실시간 주기 데이터는 우선 순위 4로 설정한다.

셋째, 계산된 실시간 비주기 데이터의 전송에 필요한 최대 통신 대역과 경성 실시간 주기 데이터의 전송에 필요한 최대 통신 대역을 더하여 토큰보유시간(THT, Token Hold Time)으로 설정한다. 식은 다음과 같다.

$$THT_i = a_i (T_u + T_p + T_a + T_p) + (n + g)(T_p + T_{hoh}) + b_i T_{hd} \quad (1)$$

넷째, 첫째에서 계산한 최대 통신 대역을 모두 더한다. 이 값을 TTRT4로 설정하면 다음과 같은 식이 된다. ( $T_{non-real-time}$ 은 비 실시간 데이터(고급 데이터)에 대해 필요한 통신 대역)

①  $n \cdot (n+g) \leq b$  와  $n \cdot (n+g) \leq c$  가 성립하면 TTRT4는 다음과 같다.

$$TTRT4 = a \cdot (T_u + T_p + T_a + T_p) + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{hoh}) + b \cdot T_{hd} + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{soh}) + c \cdot T_{sd} + n \cdot \{T_t + T_o\} + T_{non-real-time}$$

②  $n \cdot (n+g) \leq b$  와  $n \cdot (n+g) > c$  가 성립하면 TTRT4는 다음과 같다.

$$TTRT4 = a \cdot (T_u + T_p + T_a + T_p) + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{hoh}) + b \cdot T_{hd} + c(T_p + T_{soh} + T_{sd}) + n \cdot \{T_t + T_o\} + T_{non-real-time}$$

③  $n \cdot (n+g) > b$  와  $n \cdot (n+g) \leq c$  가 성립하면 TTRT4는 다음과 같다.

$$TTRT4 = a \cdot (T_u + T_p + T_a + T_p) + b(T_p + T_{hoh} + T_{hd}) + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{soh}) + c \cdot T_{sd} + n \cdot \{T_t + T_o\} + T_{non-real-time}$$

④  $n \cdot (n+g) > b$  와  $n \cdot (n+g) > c$  가 성립하면 TTRT4는 다음과 같다.

$$TTRT4 = a \cdot (T_u + T_p + T_a + T_p) + b(T_p + T_{hoh} + T_{hd}) + c(T_p + T_{soh} + T_{sd}) + n \cdot \{T_t + T_o\} + T_{non-real-time}$$

다섯째, 넷째에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 작고, 동시에 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다도 작으면 넷째에서 계산한 TTRT4를 그대로 사용한다. 만일 넷째에서 계산한 TTRT4가 실시간 비주기 데이터의 데드라인보다 크거나, 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다 크면, 넷째에서 계산한 TTRT4에서 비 실시간 데이터에 대한 통신 대역을 빼서 계산한 값을 다시 TTRT4로 설정한다. 이 때 비 실시간 데이터의 전송은 실행도중에는 사용하지 않는다.

여섯째, 다섯째의 두 번째 경우에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 작고, 동시에 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다도 작으면 다섯째에서 계산한 TTRT4를 그대로 사용한다. 만일 다섯째에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 크거나, 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다 크면, 다섯째에서 계산한 TTRT4에서 연성 실시간 주기 데이터에 대한 통신 대역을 빼서 계산한 값을 다시 TTRT4로 설정한다. 이 때 연성 실시간 주기 데이터의 전송은 실행도중에는 사용하지 않는다.

일곱째, 여섯째의 두 번째 경우에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 작고, 동시에 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다도 작으면 여섯째에서 계산한 TTRT4를 그대로 사용한다. 만일 여섯째에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 크거나, 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다 크면 주어진 데이터 트래픽에 대해서 PICNET-NP로 실시간 전송을 보장할 수 없다.

5.2 PICNET-NP에의 적용

최악의 경우를 고려하기 위해 다음과 같이 가정을 하였다. 긴급 데이터는 LLC의 L\_DATA\_ACK 프리미티브를 사용한다. 모든 주기 데이터(경성 실시간 데이터, 연성 실시간 데이터)의 주기는 똑같다. 따라서 토큰 회전 시간은 주어진 주기보다 작도록 보장되어야 한다. 그리고 주기 데이터의 경우, 유니캐스팅, 멀티캐스팅, 브로드캐스팅 3가지 전송방법을 사용한다. 이 때, 한 스테이션이 최대로 주기 전송을 하는 경우에는 (n-1)의 유니캐스팅, g번의 멀티캐스팅, 1번의 브로드캐스팅을 하게 된다. 따라서 최대 주기 전송의 횟수는 (n+g)가 된다. 그리고  $T_p = 10 \mu s$ ,  $T_t = 33.6 \mu s$ ,  $T_o = 40 \mu s$ 에 앞의 데이터 구조를 적용시키면,  $T_{hoh} = 25$  (octet time) =  $40 \mu s$ ,  $T_{soh} = 25$  (octet time) =  $40 \mu s$ ,  $T_u = 31$  (octet time) =  $49.6 \mu s$ ,  $T_a = 24$  (octet time) =  $38.4 \mu s$  이다. 이 값들을 식 (2)에 대입하면 최악의 경우의 TRT를 구할 수 있으며 이 값이 TTRT4가 된다.

예를 들어 스테이션의 수가 32개이고 주기 데이터가 4개의 그룹으로 나누어져 있을 때, 100개의 긴급 데이터가 사용되고, 1000개의 경성 실시간 주기 데이터와 2000개의 연성 실시간 주기 데이터가 사용된다고 하면

TTRT4

$$= 100(0.0496+0.01+0.0384+0.01) + 1000(0.01 + 0.04 + 0.008) + 2000(0.01 + 0.04 + 0.008) + 32(0.0336+0.04) = 182.1952 \text{ msec}$$

이 경우 긴급 데이터를 183 msec 안에 보낼 수 있고, 주기 데이터를 최소 183 msec의 주기로 보낼 수 있다. 즉, 긴급 데이터의 최소 전송 한도나 경성 실시간 주기 데이터의 최소 주기가 200 msec인 경우 최소 주기를 만족할 수 있으나 182 msec 이하라면 보장할 수 없다.

5.3 최대 전송 지연에 대한 분석

5.3.1 긴급 데이터의 최대 전송 지연 시간

L\_DATA를 사용하는 경우

L\_DATA를 사용하는 경우, 응답 시간은 사건이 발생한 후 상대 스테이션에 전달될 때까지의 시간이다. 이 경우 최대 응답 시간은 사건이 발생한 스테이션이 토큰을 획득하여 데이터를 전송할 때까지의 시간이 된다. 따라서 TTRT4가 된다.

L\_DATA\_ACK를 사용하는 경우

L\_DATA\_ACK를 사용하는 경우, 응답 시간은 사건이 발생하는 시점부터 사건에 대한 데이터를 받은 스테이션으로부터 확인을 받을 때까지의 시간이다. 이 시간은 사건 발생 후 L\_DATA\_ACK 전송 스테이션이 토큰을 획득할 때까지의 시간과 확인을 보낼 스테이션이 토큰을 획득하는 시간을 합한 것이다. 이 시간은 각각 최대 TTRT4이다. 따라서 최대 응답 시간은 2TTRT4이하이다.

$T_p$ 의 크기

이 값은 Receiver Blanking의 크기를 기준으로 설정되어 24 MAC symbol time이 걸리게 되어 있다. 즉  $4.8 \mu s$  이다.

그런데 실제로 구현 시 필요한 여유 분을 생각해서  $T_p$ 는  $10 \mu s$ 이하를 보장하도록 하였다.

5.3.2 주기데이터의 주기 조정

실제 시스템에서 주기 데이터의 주기는 여러 종류이다. 각 주기 데이터의 주기는 최소값의 배수 형태로 한다. 즉, 최소값이 50ms인 경우 나머지 전송 한도 또는 주기가 100ms, 150ms 등으로 되어야 한다. 최소 값이 50ms인 경우 다른 값이 75ms가 될 수는 없다. 만약 주기가 50ms이고 주기가 60ms, 70ms, 75ms인 주기 데이터가 있다면 주기를 50ms라고 생각하고 처리한다. 이는 최악의 경우의 토큰 회전 시간의 배수로 주기들을 맞추고자 함이다. 이렇게 처리하면 정해진 주기 내에 적어도 한 번 주기 데이터가 전송되므로 주기성을 보장할 수 있다.

6 결론

원자력 발전소 분산 제어시스템 등의 중위 통신망에는 크게 나누어서 주기적으로 데이터를 수집하는 통신망과 사건에 의해 비주기적으로 발생하는 데이터를 처리하는 통신망으로 구성된다. 또한 주기적으로 발생하는 데이터들을 사용하여 제어를 하는 시스템도 있다. 본 논문에서는 이러한 중위 통신망을 IEEE 802.4 프로토콜을 사용하여 구성, 데이터 전송을 효과적으로 지원할 수 있는 데이터 전송 방식을 제시하였다.

데이터 수집 통신망의 경우에는 주로 연성 실시간 주기 데이터의 전송을 사용하고, 제어를 위한 주기 데이터의 경우에는 경성 실시간 주기 데이터의 전송을 사용한다. 사건에 의해 발생하는 데이터 중 시스템의 안전과 신뢰성에 중요한 영향을 끼치는 데이터는 비주기 실시간 데이터의 전송을 사용한다. 이러한 경우에 IEEE 802.4 프로토콜을 사용함으로써 하나의 통신망을 사용하여 실시간 비주기 데이터의 전송과 경성 실시간 주기 데이터의 전송을 보장하며, 또한 연성 실시간 주기 데이터의 전송도 보장을 확인할 수 있는 방법을 제공하였다.

본 논문에서는 원자력 발전소 분산 제어 시스템의 제어 네트워크의 요구사항을 분석하고, PICNET-NP를 사용한 실시간 통신방법을 제안하였다. 네트워크 자원을 사전에 스케줄링하여 토큰 회전 시간을 일정한 제한 내에 유지하는 방법을 제안하여 사용함으로써 네트워크에 정의된 최악의 데이터 트래픽 상황에서도 비주기 실시간 데이터의 데드라인과 경성 실시간 주기 데이터에 주기를 만족시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

참 고 문 헌

[1] Westinghouse Technical Description for an Eagle 21 Process Protection System 46700-92-120.  
 [2] System 80+ Standard Design Volume 9, Chapter 7.  
 [3] B. Appell, Putting in a Replacement for Controlbloc P20 at Chooze B, Nuclear Engineering International, p.p 45-47, July 1992

- [4] *Token Passing Bus Access Method Physical Layer Specification*, ANSI/IEEE Standard 802.4, 1985.
- [5] *Token Ring Access Method and Physical Layer Specification*, IEEE Standard 802.5, 1983.
- [6] *FDDI Token Ring Media Access Control*, ANSI Standard X3.139, 1987.
- [7] *General Purpose Field Communication System*, prEN 50170, WorldFIP, 1995.
- [8] *DIN 19 245 Profibus Standard*, Profibus Trade Organization, 1993.
- [9] *Road vehicles -- Interchange of digital information - Controller area network (CAN) for high-speed communication*, ISO 11898, 1993.
- [10] Marjory J. Johnson, "Proof that Timing Requirements of the FDDI Token Ring Protocol are Satisfied", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-35, No. 6, June 1987.
- [11] Kenneth C. Sevick and Marjory J. Johnson, "Cycle Time Properties of the FDDI Token Ring Protocol", *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. SE-13, No. 3, March 1987.
- [12] Nicholas Malcolm and Wei Zhao, "The Timed-Token Protocol for Real-Time Communications", *IEEE Computer*, Vol. 27, No. 1, January, 1994.
- [13] Gopal Agrawal, Biao Chen, Wei Zhao, and Sadegh Davari, "Guaranteeing Synchronous Message Deadlines with the Timed-Token Medium Access Control Protocol", *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 43, No. 3, March 1994.
- [14] "한국형 원전 DCS (KNX-5) 개발", 전력연구원, 1996. 1.
- [15] 이성우, 임한석 "원자력 발전소 분산제어 시스템을 위한 중위 계층 통신망의 성능 분석", 대한전기학회 하계 학술대회, pp. 2537-2539, 1998. 7.
- [16] Jae-Young Lee, Hong-Ju Moon, Sang-Yong Moon, Wook Hyun Kwon, Sung Woo Lee, and Ik Soo Park, "Token Passing Bus Access Method on the IEEE 802.3 Physical Layer for a Distributed Control System", DCCS'98, pp. 31-36, 1998.
- [17] 한국전력기술(주), "원전 DCS 설계 기준서 개발", Volume 7-2, 통신계통. 1998. 8
- [18] A. Valenzano, C. Demartini, L. Ciminera, "MAP and TOP Communications: Standards and Applications", Addison-Wesley, 1992.

## 저 자 소 개



**이성우 (李聖雨)**

1960년 9월 29일생. 1987년 대전산업대 전기공학과 졸업, 1989년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 동 대학원 박사과정. 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

Tel : (042) 865-5641

E-mail : swlee@kepri.re.kr



**임한석 (任漢錫)**

1935년 12월 21일생. 1962년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1972년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1986년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 건국대 공대 전기공학과 교수

Tel : (02) 450-3483

E-mail : yimhs@kkucc.konkuk.ac.kr