

디지털제어시스템의 물리계층 통신 프로토콜 설계

이성우

한국전력공사 전력연구원

Design of a Communication Protocol for the Physical Layer of the Digital Control System

S.W. Lee

Korea Electric Power Research Institute

Abstract - A distributed real-time system that is being used now is usually divided into three level : higher level, middle level, and lower level. The higher level network is usually called an information network, the middle level is called a control network, and the lower level is called a field network or a device network. This dissertation suggests and implements a middle level network which is called PICNET-NP (Plant Implementation and Control Network for Nuclear Power Plant). PICNET-NP is based partly on IEEE 802.4 token-passing bus access method and partly on IEEE 802.3 physical layer. For this purpose a new interface, a physical layer service translator, is introduced. A control network using this method is implemented and applied to a distributed real-time system.

1. 서 론

분산 제어 시스템의 통신망은 적용범위에 따라서 계층 구조를 가지는 경우가 많은데, 이런 경우 보통 IEEE 802.4 토큰 버스 규약[1], IEEE 802.5 토큰 링 규약 [2], 그리고 FDDI 규약[3] 등의 통신 규약들은 중위권을 담당하고, 프랑스에서 제안된 FIP[4], 독일에서 제안된 Profibus[5], 그리고 자동차의 통신 규약으로 제안되어 국제 표준으로 자리잡은 CAN[6] 등 많은 필드 버스들은 하위 계층의 센서, 구동기 부분의 통신을 담당한다. 하지만, 각 네트워크 프로토콜들의 특성으로 볼 때 중위 계층 하위 계층의 구분이 모호하다.

이러한 프로토콜들을 원자력 발전소 분산 제어 시스템의 중위 계층 통신망에 바로 적용하기에는 어려움이 많다. 원자력 발전소와 같은 안전 관련 시스템의 경우에는 빠른 시간내에 데이터를 정확히 보낼 수 있는 버스형태의 통신망이나 링 형태의 통신망이 물리 계층으로 적당하다. 버스 형태의 통신망과 링 형태의 통신망 사이에는 장점과 단점이 있기 때문에 어느 하나가 좋다고 단정할 수는 없으나 다음과 같은 특징을 가진다. 버스 형태의 통신망의 경우에는 링 형태의 통신망에 비해 멀티 캐스팅과 브로드 캐스팅 성능이 일반적으로 '좋다. 또한 보다 단순한 접속(interface)방식을 필요로 한다. 그리고 통신망상의 한 노드가 고장이 났을 경우에 복구 능력이 있어 일반적으로 버스 형태가 링 형태 보다 원자력 발전소의 안전성과 신뢰성 측면에서는 좋다.

본 논문에서는 전력연구원에서 제안한 원자력 발전소 분산 제어시스템 프로토타입인 KNX-5[7]의 제어 네트워크를 대상으로 하여 2장에서는 원자력 발전소용 통신망 설계시 요구사항을 분석하여 설계시 반영하였으며 3장에서는 원자력 발전소 DCS의 중위 계층 통신 프로토콜의 전체 구조를 제안하였으며, 고장이 나기 쉬운 물

리 매체를 이중화하여 신뢰성 있는 송신 기능, 수신 기능 및 관리 기능을 수행하도록 하였다. 그리고, 데이터 링크 계층의 MAC 부계층은 IEEE 802.4 토큰 버스 방식을 채택하므로 MAC 부계층과 물리 계층 사이의 서비스가 IEEE 802.4와 IEEE 802.3 방식을 각각 만족하도록 하였다. PICNET-NP의 물리적 신호(physical signaling) 방식은 IEEE 802.3의 방식을 그대로 따르면서 IEEE 802.4 방식의 MAC 부계층-물리 계층 접속 서비스 규격을 만족했다[8]. 마지막으로 4장에 결론이 있다.

2. 원자력 발전소용 통신망 설계시 요구 사항

이 절에서는 원자력 발전소용 통신망을 설계할 때 고려해야 할 요구 사항들을 기술한다.[9]

- 통신망이 상태기반(stated-based)인가 사건기반(event-based)인가를 파악하고 알맞은 형태의 통신망 규약을 선택한다.
 - 안전한 고신뢰 시스템이어야 한다.
 - 적용하려는 시스템이 정해져 있어야 한다.
 - 통신 시스템은 결정적(deterministic)이어야 한다.
 - 그 시스템을 구성하는 노드들간의 데이터 송수신과 관련된 사항이 알려져 있어야 한다.
 - 통신망은 안전성을 위해 이중화 및 분산형으로 되어 있어야 한다.
 - 원자력 발전소에서 많이 사용하는 PID(Proportional Integral Differential)알고리즘을 이용하는 실시간 제어를 위하여 수십 msec대의 반응 지연이 요구된다. 따라서 OSI의 7계층 중에서 3계층 정도만 사용하여야 한다.
 - 통신망에서 최악의 트래픽인 경우에도 최대 응답시간이 보장되어야 한다. 이 최대 응답시간은 원자력 발전소 안전 계통에 영향을 미치지 않는 최대시간 보다 충분히 작은 시간이어야 한다.
 - 통신망의 규약, 그 통신망에 사용되는 실제 매체와 관련된 요구사항을 파악하고 이에 맞게 설계하여야 한다.
- 본 논문에서는 위와 같은 설계시 요구사항을 바탕으로 원전에 사용할 DCS를 대상으로 하는 통신망을 설계한다.

3. PICNET-NP의 물리 계층 설계

3.1 원자력발전소 분산 제어 시스템의 구조

KNX-5를 제어 네트워크를 중심으로 분산 제어 시스템 측면에서 다시 그리면 그림 1과 같은 형태를 갖는다. 이 때 제어 네트워크와 관련된 분산 제어 시스템은 다음과 같은 부분들로 이루어진다.

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 감시 제어 관련 설계 자료 및 프로그램을 작성할 수 있는 기능을 제공한다. 공정 제어 유닛 (PCU: Process Control

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

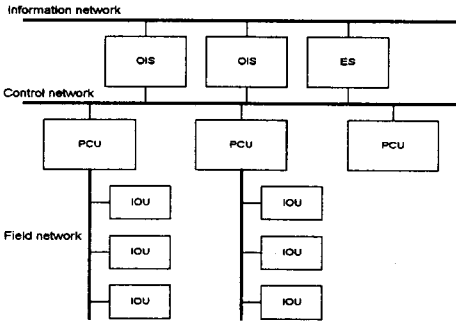


그림 1. 원자력 발전소 분산 제어 시스템의 전체 계층 구조

3.2 PICNET-NP 통신 프로토콜의 전체구조

이 절에서는 원자력 발전소 DCS의 중위 계층 통신 프로토콜의 전체 구조를 제안한다. 전체 계층 구조는 3계층의 구조를 가진다. 일반적으로 통신망은 3계층 또는 7계층 구조를 가지고 때에 따라서는 3계층에서 응용 계층을 거의 없앤 2계층 구조를 가지는 경우도 있다. 그림 2는 PICNET-NP 통신 프로토콜의 전체구조를 나타낸 것이다.

본 논문에서는 원자력 발전소의 특수성을 감안하고 적절한 데이터 처리를 하기 위해 7계층 중 물리 계층, 데이터 링크 계층, 응용 계층에 대해서 기술하였고, 각 부분의 역할을 간단히 정리하면 다음과 같다.

응용 계층	네트워크 관리
데이터 링크 계층 - LLC(Logical Link Control)	
데이터 링크 계층 - MAC(Medium Access Control)	
물리층	

그림 2. PICNET-NP 통신 프로토콜의 전체 구조

물리층은 실제적인 전송을 담당한다. 데이터 링크 계층의 MAC(medium access control) 부분은 여러 시스템이 하나의 매체를 공유하여 사용할 수 있도록 매체를 제어하는 기능을 담당한다. 데이터 링크 계층의 LLC(logical link control) 부분은 데이터 전송에서의 기본 신뢰성을 확보하도록 해 준다. 응용 계층은 기본 데이터 전송 및 고급 서비스 기능을 제공한다. 네트워크 관리는 전체 통신망의 구성을 관리하는 기능을 제공하며 동시에 네트워크에서 오류가 발생하였을 때 이들 오류를 발견하고 수정하는 기능을 제공하게 된다. 또한 전체적

인 네트워크의 성능도 관리하게 된다. 따라서 네트워크 관리는 아주 중요한 역할을 하게 된다.

3.3 물리 계층의 구성

송신 기능으로 상위 계층인 데이터 링크 계층으로부터 전송할 데이터를 전달받아, 물리 계층 하드웨어를 이용하여 전송에 적합한 신호로 만들어, 통신 채널인 물리 매체에 전기적인 신호를 출력한다. 수신 기능으로 통신 채널인 물리 매체에서 전기적인 신호를 검출하여, 물리 계층 하드웨어를 이용하여 데이터로 변환한 후, 상위 계층인 데이터 링크 계층이 편발할 수 있는 데이터의 형태로 만들어서 데이터 링크 계층에 전달한다. 위에서 언급한 송신 기능과 수신 기능을 수행하기 위해 물리 계층 하드웨어를 제어하거나, 물리 계층 하드웨어와 물리 매체의 상태를 점검하여 상위 계층에 보고한다. 또한, 물리 매체를 이중화함으로써 물리 계층의 구성 요소에 고장이 발생한 경우에도 차질 없이 송신 기능, 수신 기능 및 관리 기능을 수행하기 위해 물리 계층의 각 구성 요소를 다중화 할 수 있다.

특히, 본 논문에서는 고장이 나기 쉬운 물리 매체를 이중화하여 신뢰성 있는 송신 기능, 수신 기능 및 관리 기능을 수행하도록 하였다. 그리고, 데이터 링크 계층의 MAC 부계층은 IEEE 802.4 토큰 버스 방식을 채택하므로 MAC 부계층과 물리 계층 사이의 서비스가 IEEE 802.4와 IEEE 802.3 방식을 각각 만족하도록 하였다. PICNET-NP의 물리적 신호(physical signaling) 방식은 IEEE 802.3의 방식을 그대로 따르면서 IEEE 802.4 방식의 MAC 부계층-물리 계층 접속 서비스 규격을 만족했다.

IEEE 802.3 물리 계층은 다음의 그림 3과 같은 구조로 구성되어 MAC와 접속된다.

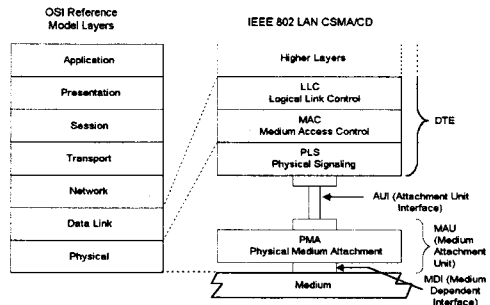


그림 3. LAN 모델과 비교한 서비스 규격

3.4 물리 계층의 기능 및 특성

PICNET-NP 프로토콜의 물리 계층이 갖추어야 할 기능과 특성에 대하여 살펴보기로 하자.

3.4.1 PICNET-NP의 기본 사양

PICNET-NP는 제어 네트워크를 위해 개발한 버스 형태의 네트워크 프로토콜이다. 전송 매체로는 동축케이블과 꼬임 쌍선(twisted-pair) 케이블을 사용한다. 그리고 트랜시버 등의 장비를 이용하여 광섬유 케이블도 이용할 수 있도록 한다. 최대전송거리는 별도의 확장 기기가 없이 꼬임 쌍선 케이블의 경우 100m, 동축케이블의 경우 500m이며 리피터 등의 별도의 확장 기기를 사용하는 경우 3km이다. 전송 속도는 5 Mbps이다. 최대 250개의 스테이션을 연결할 수 있으며, 최대 15개의

그룹으로 분할할 수 있고 한 그룹은 최대 64개의 스테이션으로 이루어질 수 있다. PICNET-NP의 통신망의 구성은 그림 4와 같다.

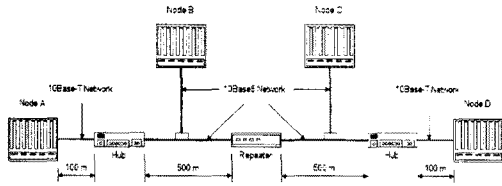


그림 4. PICNET-NP 통신망의 구성

3.4.2 물리 계층의 기능

PICNET-NP의 서비스 변환기로부터 10MHz의 변조되지 않은 데이터를 수신하여 20MHz의 맨체스터 코딩된 데이터로 변조하여 AUI(attachment unit interface) 케이블 및 꼬임 쌍선(twisted pair) 케이블을 통해 10BASE5 매체를 전송한다. AUI 케이블 또는 꼬임 쌍선 케이블을 통해 전송된 20MHz의 맨체스터 코딩된 데이터로 디코딩하여 10MHz의 변조되지 않은 데이터로 복조하고 이를 이중 채널 관리기로 전달한다.

IEEE 802.3 10BASE5 형식을 만족하고, 물리계층 회로와 AUI 커넥터 사이에는 펄스 변압기(pulse transformer)로 절연된다. AUI 커넥터에는 10BASE5 물리 매체를 연결한다. IEEE 802.3 10BASE-T 형식을 만족하고, 물리 계층 회로와 10BASE-T 물리 매체를 연결시킨다. 매체와 연결할 때 필터 및 펄스 변압기를 사용하여 절연한다.

3.4.3 물리 계층의 특성

본 논문에서는 현재 널리 사용하는 IEEE 802.3 방식의 물리 계층을 채택함으로써, 물리 계층에 관련된 다양한 하드웨어, 예를 들면 통신망 접속 회로, 탭, 케이블, 리피터(repeater), 종단기(terminator) 등을 손쉽게 구입할 수 있고, 기존에 IEEE 802.3용 통신망이 설치되어 있다면, 이 케이블들을 그대로 사용하면서 통신망을 재구성할 수 있어 호환성이 좋다.

즉, 통신망 접속 장치(network interface unit, NIU)를 PICNET-NP용으로 교체하면 기존의 IEEE 802.3 통신망을 PICNET-NP로 재구성하는 것이 가능하다. 또한 원자력 발전소에서 요구하는 통신망은 고 신뢰성과 실 시간성을 충족시키는 통신 방식으로서 토큰을 전달함으로써 정확하게 보내고자 하는 목적지로 데이터를 보낼 수 있는 토큰 전달 방식을 채택하였고, 그 중에서도 통신망의 설치와 관리가 비교적 손쉬운 버스 방식인 토큰 버스 방식, 즉 IEEE 802.4 방식이 채택하였다.

이 기술 자체가 물리 계층의 하드웨어 부분이 베이스 밴드 방식을 사용하므로 정밀한 기술을 요구하지 않아 다양한 제품군을 형성할 수 있다. 또한, 그간의 연구 결과에 의하면 원자력 발전소의 분산 제어 시스템용 중위권 통신망 시스템의 통신 속도는 5-10MHz 정도가 적절하므로, IEEE 802.3 방식이나 IEEE 802.4 방식은 모두 이전 전송 속도를 만족한다. 그러므로, PICNET-NP의 물리 계층으로는 10MHz의 IEEE 802.3 방식을 채택하고, IEEE 802.4 방식의 MAC 부 계층과 접속하도록 하였다.

3.5 물리 계층의 VMEbus용 PICNET-NP 모듈 보드의 구성 및 구현

본 절에서는 설계에서 언급한 내용을 바탕으로 하여

PICNET-NP의 물리 계층의 프로토콜에 대해 실제적인 구현방법을 기술한다. 그림 5는 PICNET-NP의 물리 계층을 구현한 하드웨어 모듈 보드의 구성이다. 이 모듈 보드는 VMEbus용으로 개발되었다. 이 보드는 VPM(VMEbus PICNET-NP modem board)라고 부른다.

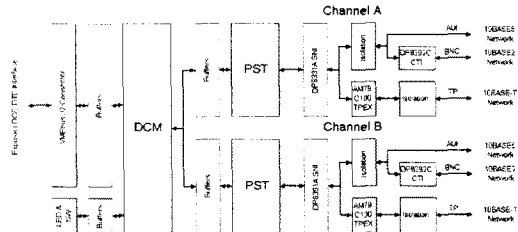


그림 5. VMEbus용 PICNET-NP 모듈 보드의 블록도

3.5.1 VMEbus용 PICNET-NP의 통신망 접속 장치(NIU)

하드웨어 구현상의 편의를 위하여 PICNET-NP의 물리 계층의 하드웨어는 통신망 접속 장치와 분리된 별도의 모듈 보드에 구현된다. 그리고, 통신망 접속 장치와는 노출된 DTE-DCE(data terminal equipment data communication equipment) 인터페이스를 통하여 접속된다.

3.5.2 노출된 DTE-DCE 인터페이스(exposed DTE-DCE interface)

DTE-DCE 인터페이스는 두 가지의 동작 모드를 지원한다. 하나는 MAC 모드이고 다른 하나는 관리 모드이다. MAC 모드에서는 일반적인 송수신 기능을 수행한다. 관리 모드에서는 요구와 지시 채널을 통하여 관리 기능을 수행한다. 여기서는 관리 기능에 대해서만 논하고자 한다.

- Reset : DCE를 초기화하고, 전송을 금지하고, 루우프백 모드(loopback mode)로 지원한다. 리셋 명령은 다른 모든 명령에 우선한다. 리셋 명령에 대해 NAK(nonacknowledgement)가 오면 에러가 지시된다.
- Disable Loopback : 루우프백을 금지시킨다. 루우프백이 지원되지 않는 경우, ACK(acknowledgement)나 NAK중에 아무거나 응답한다.
- Enable Transmitter : 전송을 허용시킨다. DCE를 리셋한 후에, 루우프백 금지와 허용할 수 있는 전송 명령을 내린 후 전송을 시작한다.
- Serial Station Management (SM) Data : 고기능의 DCE(흔히 브로드밴드 모듈 등)의 관리를 위해 사용되는 것으로서, 데이터 관리가 직렬로 전송된다.
- IDLE : SM 데이터 모드가 선택되고 직렬 데이터 회로가 휴지인 상태.
- Physical Layer Error - DCE fault를 나타낸다.

3.5.3 이중 채널 관리기(dual channel manager)

구현된 하드웨어는 매체 이중화 기능을 갖추고 있다. 이를 위해, 모듈 보드 내에는 매체 이중화 관리 하드웨어가 위치한다. 이 하드웨어는 DCM(dual channel manager)과 버퍼(buffer) 회로 등으로 구성하였다. DCM은 Xilinx사의 CPLD(complex programmable

logic device)인 XC7372-12PC68 1개를 사용하여 구현하였다.

이중 채널 관리기에서는 두 개의 IEEE 802.3 물리 계층 부분에서 동시에 신호를 수신하고, 그 중 한 부분의 신호를 선택하여 PICNET-NP의 서비스 변환기로 데이터를 전달한다. 또한 IEEE 802.3 물리계층 부분으로부터 즉, 10BASE5 물리 매체 또는 10BASE-T 물리 매체 관리 신호로부터 이상 상태를 감지하고, 내부 상태 레지스터에 기록한다. 만약에 이상이 발생하면 네트워크 관리와 물리계층 접속부를 통해 전달되는 네트워크 관리의 명령에 의해 수신 중인 통신 채널을 전환할 수 있다. 통신 채널 전환이 성공하면 이중 채널 관리기는 네트워크 관리에 보고한다. 즉, 내부 상태 레지스터에 현재의 상태를 기록하여 네트워크 관리와 물리계층 접속부가 내부 상태 레지스터를 읽어 갈 수 있도록 하였다.

3.5.4 PST(PICNET-NP service translator)

PST ASIC은 PICNET-NP의 물리 계층 중 PICNET-NP의 서비스 변환 기능을 담당하는 회로로서, IEEE 802.4 MAC 부계층과 IEEE 802.3 물리 계층을 연결하는 서비스 변환기이다. Xilinx사의 CPLD인 XC7372-12PC68 1개를 사용하여 구현하였다. PICNET-NP의 서비스 변환기는 데이터 링크 계층과 물리계층 접속부에서 전달받은 5MHz 전송 속도의 MAC 부호로부터 10MHz 전송 속도의 변조되지 않은 데이터를 생성하여 SNI(serial network interface)로 전달한다. 또한, 10MHz 전송 속도의 변조되지 않은 데이터를 SNI로부터 수신하여 5MHz의 MAC 부호로 변환하고 TBC(token bus control)로 전달한다.

3.6 물리 계층의 구현시 고려 사항

PICNET-NP의 물리 계층을 구현하는 것은 결국 IEEE 802.3 물리 계층과 IEEE 802.4 MAC 부계층을 접속시키는 것이다. 따라서, 본 절에서는 이 두 계층을 접속시키는데 발생할 수 있는 문제점과 그 해결책에 대해 기술한다.

3.6.1 NON_DATA의 처리 문제

IEEE 802.4에서 시작 구분 문자(start delimiter)와 종료 구분 문자(end delimiter)에서 사용되는 non_data신호를 IEEE 802.3에서는 제공하지 않는다. 이것을 해결하기 위해 IEEE 802.3 물리 계층을 10Mbps로 동작시키고 IEEE 802.4 MAC를 5Mbps에 맞춰 동작시킨 후, 2비트의 신호를 1개의 MAC 부호 인코딩과 디코딩(encode/decode)을 한다.

3.6.2 BAD_SIGNAL의 처리 문제

IEEE 802.4의 bad_signal은 IEEE 802.3의 신호 품질 에러(signal_quality_error)를 이용해야 한다. 이것은 실제적으로 충돌의 검출(collision detect)로 감지할 수 있다. 그러나, 이 충돌 검출은 IEEE 802.3의 신호 품질 에러 시험의 동작에 의해서도 감지되므로, 신호 품질 에러가 출력 기능마다 수행된다면 적용이 어렵다. 따라서, PICNET-NP의 물리 계층에서는 이더넷에서의 적용하는 것과 같은 신호 품질 에러 시험(또는 Heart-beat) 기능을 사용하지 않는다. PICNET-NP의 물리 계층에서 bad_signal이 발생하는 경우는 캐리어가 감지된 이후, 데이터의 상태에 관계없이 충돌 신호(collision signal)가 발생한 경우는 MAC 부계층에 bad_signal을 보고한다.

4. 결론

본 논문에서는 원자력 발전소 분산제어 시스템의 새로운 통신 프로토콜을 제안하였다. 이러한 통신 프로토콜

의 제안을 위해서 요구사항을 분석하고 설계시 반영하였다. 고장이 나기 쉬운 물리 매체를 이중화하여 신뢰성 있는 송신 기능, 수신 기능 및 관리 기능을 수행하도록 하였다. 그리고, 데이터 링크 계층의 MAC 부계층은 IEEE 802.4 토큰 버스 방식을 채택하므로 MAC 부계층과 물리 계층 사이의 서비스가 IEEE 802.4와 IEEE 802.3방식을 각각 만족하도록 하였다. IEEE 802.4 토큰 버스 방식을 사용하여 미디어를 제어하고, 신뢰성과 결정론적 데이터를 전송할 수 있었다.

PICNET-NP의 물리적 신호(physical signaling) 방식은 IEEE 802.3의 방식을 그대로 따르면서 IEEE 802.4 방식의 MAC 부계층-물리 계층 접속 서비스 규격을 만족했다.

[참 고 문 헌]

- [1] *Token Passing Bus Access Method Physical Layer Specification*, ANSI/IEEE Standard 802.4, 1985.
- [2] *Token Ring Access Method and Physical Layer Specification*, IEEE Standard 802.5, 1983.
- [3] *FDDI Token Ring Media Access Control*, ANSI Standard X3.139, 1987.
- [4] *General Purpose Field Communication System*, prEN 50170, WorldFIP, 1995.
- [5] *DIN 19 245 Profibus Standard*, Profibus Trade Organization, 1993.
- [6] *Road vehicles Interchange of digital information - Controller area network (CAN) for high-speed communication*, ISO 11898, 1993.
- [7] "한국형 원전 DCS (KNX-5) 개발", 전력연구원, 1996.1.
- [8] 이성우, 임한석 "원자력 발전소 분산제어 시스템을 위한 중위 계층 통신망의 성능 분석", 대한전기학회 하계 학술대회, pp. 2537-2539, 1998. 7.
- [9] 이성우, 임한석 "원자력 발전소 분산제어 시스템을 위한 네트워크의 실시간 특성 해석", 대한전기학회 논문지 제 48권 5호, pp.650-657, 1999.