

원자력발전소 안전계통용 고신뢰성 MVB 네트워크 구현

Implementation of High-Reliable MVB Network for Safety System of Nuclear Power Plant

설재윤* · 김기창** · 김유성*** · 박재현†

(Jae-Yoon Sul · Ki-Chang Kim · Yoo-Sung Kim · Jaehyun Park)

Abstract - The computer network plays an important role in modern digital controllers within a safety system of a nuclear power plant. For the reliable and realtime data communication between controllers, this paper proposes a modified high-reliable MVB(multi-function vehicle bus) as a main control network for a safety system of a nuclear power plant. The proposed network supports the state-based communication in order to ensure the deterministic communication latency, and very fast network recovery when the bus master fails compare to the standard MVB. This paper also shows the implementation results using a FPGA-based testbed.

Key Words : Real-time network, Nuclear power plant, Fault-tolerant network, IEC 61375 TCN, MVB (Multi-function Vehicle Bus)

1. 서론

원자력발전소 제어기를 구성하는 여러 요소 중, 원자로 보호계통 시스템은 시스템의 오류나 고장이 바로 심각한 재해로 이어질 수 있기에 높은 수준의 안전성이 요구된다. 따라서 이와 같은 고수준의 안전성이 요구되는 제어계통을 안전계통이라 구분하며, 이들 제어시스템에 쓰이는 기기들은 전기적 노이즈에 강한 내구성, 물리적 격리, 내고장성, 유지보수성과 같은 고수준의 안전성 요건들을 만족해야 한다 [2,4,5]. 과거에는 안전계통시스템을 제어하는 제어기는 아날로그 방식으로 구현되었으나, 최근에는 디지털 제어방식을 도입하고 있으며, 컴퓨터를 이용한 디지털 제어방식에는 필연적으로 제어기기간의 데이터 전달을 위한 컴퓨터 네트워크의 필요성이 대두된다. 현재 운용중이거나 설계중인 원자력발전소에는 다양한 컴퓨터 네트워크가 구현되고 있으며, 모든 네트워크는 원자력 발전소의 안전성을 위하여 IEEE에서 규정한 규제지침에 따라 고신뢰성 및 실시간성을 만족하도록 설계되고 운영되어야 한다[1,3].

원자력발전소용 네트워크를 설계하기 위하여 원자력발전소 안전계통의 특성을 살펴보면, 안전계통은 그 특성상 한정된 고정 기능을 수행하게 된다. 즉 원전 안전 계통은 소수의 공정변수를 수집, 비교적 단순한 처리 알고리즘을 수행하여 고정된 결과를 출력하도록 한다. 이에 따라 다음과 같은 특성을 가지게 된다[6,12].

- 고정적 구조: 원전 안전계통은 40년의 생명주기 동안 수행기능과 구성 모듈의 수가 거의 고정적이기에 데이터 교환을 위한 전송 데이터나 통신노드 수의 변화가 미미하다.
- 단순 전송기능: 원전 안전계통 통신망은 데이터를 주고받는 고유기능 외의 복잡한 고 기능을 배제한다. 원전 안전 통신망은 전송기능의 신뢰성과 검증성을 최우선으로 여기며 고유기능 이외의 부가적 기능이나 성능으로 인하여 복잡성이 증대, 고장요소의 확대를 초래하지 않도록 단순화 되어야 한다.
- 실시간 고속전송: 사고 시 신속하게 정해진 응답시간 내에 작동해야 하는 안전 계통 기능을 위하여 안전 계통 통신망은 제한된 시간 안에 요구하는 데이터를 전송하는 하드리얼타임 특성을 갖는다.
- 짧고 주기적인 데이터: 원전 안전계통 통신망은 상태 기반의 주기적인 짧은 데이터를 전송한다.

이러한 특성에 따라 안전계통 통신망은 통신망식과 구조 및 설계요소에 대한 모든 특성이 계산 및 예측 가능하도록 되어야 하며 이는 통신상의 모든 방법과 기술, 구현 등이 투명해야 하는 것으로 데이터의 양과 속도 전송지연 시간 및 데이터의 경로가 확정적인 특성을 보유하고 통신상의 어떠한 불확실성도 배제하도록 한다. 따라서 사건기반의 비 결정론적인 전송 특성을 배제하고 가능하면 발생가능성을 모두 고려한 고정적인 상태기반의 전송구조를 갖도록 한다. 또한 안전계통의 계통 및 채널 간 독립성 보장을 위하여 이들 간 전송경로인 통신망이 분리 및 격리되게 된다. 주목적은 고장 격리이며 이를 보장하기 위해 통신경로의 물리적 분리, 일대일 논리적 전송, 전기적 격리를 위한 광케이블의 사용 및 송수신 분리에 의한 단방향 전송 구조 개념을 적용한다. 안전 통신망을 위한 모든 구조는 확인 및 검증이 가능해야 한다. 확인 및 검증을 위해서는 가능하면 이미 증명된 기술이나 방법론을 이용하는 것이 바람직하며, 불확실한

* 정 회 원 : LS산전 연구원

** 비 회 원 : 인하대학교 정보통신공학부 교수

*** 비 회 원 : 인하대학교 정보통신공학부 교수

† 교신저자, 종신회원 : 인하대학교 정보통신공학부 교수

E-mail : jhyun@inha.ac.kr

접수일자 : 2012년 1월 20일

최종완료 : 2012년 5월 22일

동작이나 검증이 불가능한 복잡한 방법론을 배제하고 단순하며 전송이 확실히 보장되는 구조로 설계되어야 한다[11].

전동차용 네트워크 프로토콜로 개발되고 국제 표준이 된 IEC 61375 TCN(Train Communication Network) 네트워크는 차량간 통신 버스인 WTB(Wired Train Bus)와 차량 내 통신버스인 MVB(Multifunction Vehicle Bus)로 나뉜다. 이 중 MVB는 시간 제약적인 데이터를 주기적 데이터 전송구간에 할당하여 상태기반으로 데이터 전송을 가능하게 하며, 이중 선로를 이용하여 데이터를 전송함으로써 전송라인의 물리적 오류나 결선의 문제를 견딜 수 있도록 개발되었다. 또한 통신을 관장하는 버스 마스터의 오류가 발생하더라도 버스 관리자 중 한 노드가 마스터 권한을 이양 받아 전체 네트워크에서 오류가 발생함을 방지하도록 한다. 이 외에 정보전송을 위하여 맨체스터 코딩을 이용, 광섬유와 꼬임 선을 전송매체로 이용하여 전기적 노이즈에 강한 특성을 가지고 있다[1,7]. 이와 같은 특성을 고려할 때 MVB 통신망은 원자력발전소 안전계통에 사용되는 통신망으로서 기본적인 요건에 부합하고 있다고 생각한다. 하지만 MVB 통신망은 원자력 발전소 안전계통에는 전혀 사용하지 않는 비주기적 데이터 전송을 허용함으로써 IEC 표준 규약을 그대로 적용하는 것은 네트워크의 사용효율이 떨어질뿐더러, 안정성에도 영향을 받을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 원자력 발전소의 안전계통에 사용될 수 있는 컴퓨터 네트워크로서 IEC 표준 통신망인 MVB의 개선된 형태의 네트워크를 제안하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 통신 프로토콜은 MVB의 비주기적 데이터 전송구간을 배제하여 효율적인 실시간 통신이 가능하도록 하며, 네트워크를 관리하는 마스터노드의 고장 시 마스터노드의 교체시간을 단축하는 알고리즘을 추가하여 보다 더 안정적인 네트워크의 운용이 가능하도록 하고 있다.

본 논문은 2장에서 원전 안전계통 통신망으로서의 수정된 MVB 제어기를 제안하도록 하며 3장에서는 제안된 제어기의 구현과 실험결과들을 기술하고, 마지막 장에서 결론을 언급한다.

2. HR-MVB(High-Reliable Multi-function Vehicle Bus)

본 장에서는 표준 MVB를 개선하여 고신뢰성이 요구되는 원자력 발전소에 적용가능한 HR-MVB(High-Reliable Multi-function Vehicle Bus)를 제안한다.

2.1 상태기반 통신망(State-based Communication)

MVB는 철도 차량 국제 표준필드버스인 TCN에서 차량 내 기기들간의 통신을 책임지는 버스로 MVB의 통신은 하나의 버스 마스터에 의해서 주관되고 있으며 주기적인 데이터 구간과 비주기적 데이터 구간으로 나뉘게 된다. 주기적 데이터 구간은 시간 제약적인 데이터전송에 초점을 맞춰 데이터 전송이 이뤄지며 상태기반의 데이터 전송 특징을 가지고 있다. 비 주기적 데이터 전송 구간은 사건 중심적인 시간 제약이 덜한 데이터의 전송이 주를 이루고 있다.

MVB의 텔레그램은 버스마스터의 데이터 폴링을 위해 만들어진 마스터 프레임과 이에 대한 응답인 슬레이브 프레임으로 구성된다. 마스터와 슬레이브 프레임은 그림 1에서 보

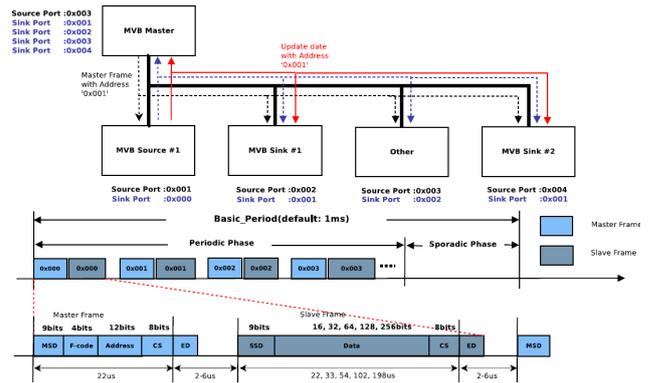


그림 1 IEC 61375: MVB 통신과 텔레그램
Fig. 1 Communication and telegram of IEC 61375: MVB

는 것과 같이 각 경계기호(Delimiter)로 구분되며 마스터 프레임은 9비트의 시작 경계기호와 슬레이브 프레임의 타입과 크기를 결정하는 4비트의 F_Code, 12비트의 논리주소 및 8비트의 체크섬으로 이뤄진다. 통신망에 연결된 버스마스터를 제외한 모든 기기는 슬레이브 기기로 동작하며 수신된 마스터 프레임을 번역하여 트래픽 스토어라고 불리는 프레임 저장소에서 마스터 프레임에 적재된 논리주소와 F_Code에 해당되는 송신노드(Source)에 해당될 경우 데이터를 전송하게 된다. 실제 데이터를 포함하는 슬레이브 프레임은 33~297비트의 크기를 가지며 9비트의 슬레이브 시작 경계기호와 12~256비트의 데이터 그리고 8~32비트의 체크섬으로 구성된다. 텔레그램의 길이는 마스터 프레임의 F_Code에 의해서 결정되며 F_Code는 데이터 서비스에 따라 16개로 분류된다. 그림 1은 또한 MVB 버스의 전송대역폭을 사용하는 방법을 보여준다. 버스 마스터는 일정한 시간 간격으로 65%의 시간 영역을 주기적 데이터 전송(Periodic Phase)에 사용하고 35%의 구간을 비 주기적 데이터 전송(Sporadic Phase)에 사용하게 된다. 그러나 원자력발전소의 안전계통에 사용되는 통신망은 IEEE 규제 지침에 의하여 모든 통신은 상태기반(State-base)로 이루어져야하며, 비주기적인 사건기반(Event-driven) 방식에 의한 비결정적인 요소를 완전히 배제하여야 한다[3]. 따라서 MVB에 규정된 35%에 달하는 비주기적 전송구간은 원자력발전소에서는 사실상 사용될 수 없는 구간으로 배제될 수 있는 구간이다. 본 논문에서는 이 구간의 대부분을 주기적 전송구간에 편입시켜 사용하고, 일정부분(1% 미만)을 기본주기(Basic period)와 같은 기본 정보를 버스관리자가 전송함으로써, 모든 노드간의 정보 공유를 할 수 있도록 수정하였다. 이와 같은 수정을 통하여 비결정적인 요소를 근원적으로 배제함으로써, IEEE에서 규정한 상태기반의 결정론적 통신망을 구현할 수 있으며, 통신망의 대역폭도 52%가량 증대시키는 효과가 있다. 아울러 매 주기마다 기본 정보를 브로드캐스팅함으로써 모든 노드가 동일한 네트워크 정보를 공유할 수 있는 기회가 추가되었다. 이는 2.2절에서 설명하는 마스터권한 이양 알고리즘을 개선하는 목적 등으로 사용된다.

2.2 고속 마스터 권한 이양 알고리즘

표준 MVB에서는 내고장성을 위한 방안으로 이중 전송

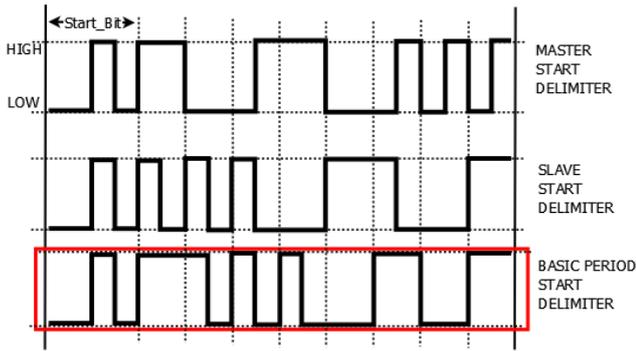


그림 2 기본 주기 데이터 전송을 위한 경계 기호
Fig. 2 Delimiter for basic period data transmission

선로와 버스관리자 다중화를 통한 버스 마스터 오류에 대처하는 방안을 쓰고 있다. 이와 같은 다중화는 원자력발전소 제어시스템에서는 필수적인 요소로서 반드시 구현되어야 하는 요건이다. MVB에서의 데이터 교환은 버스 상에서 데이터 충돌을 회피하여 결정론적 통신을 구현하기 위하여 버스 마스터의 주관 하에 이뤄진다. 그러나 이와 같은 중앙 집중적 통신망에서는 버스 마스터의 오류가 전체 네트워크의 통신이 두절되는 상황으로 이어질 수 있다. 이러한 결과를 방지하기 위해 MVB 표준에서는 여러 개의 버스관리자 (Administrator)를 두고, 이들이 상호 감시를 통하여 버스 마스터의 고장을 감지하고 버스 마스터의 권한을 이양 받을 수 있도록 하여 통신망의 통신 두절을 막고 있다. MVB 버스 마스터는 주기적 데이터 전송 구간에서 트래픽 스토어에 정의된 사이클 리스트 정보를 참조하여 기본 주기 내에서 최대 11개의 프로세스 데이터 전송을 주관하게 된다. 사이클 리스트 특성상 주기적 데이터 전송이 시작될 때, 버스 마스터는 첫번째 사이클에 해당하는 마스터 프레임의 항상 전송하게 된다. IEC 표준에 규정된 버스 마스터의 고장 감지 방법은 일정 시간($T_{standby}$) 동안 마스터의 동작이 없을 경우 마스터의 오류로 판단하는 방법을 사용하고 있다. IEC 표준에는 $T_{standby}$ 를 최소 5.2ms로 규정되어 있다. 이는 MVB가 주기적 통신이외에도 사건 기반의 비주기적 통신이 가능하도록 비주기 데이터 구간(Sporadic)을 보장하기 때문이며 따라서 마스터가 고장날 경우에는 최소 $T_{standby}$ 동안에는 데이터 통신이 두절될 가능성이 존재하게 된다. 본 논문에서 제안하는 HR-MVB는 원자력 발전소 안전계통을 대상으로 제안되는 네트워크로서 2.1에서 기술한 것과 같이 전적으로 상태기반 통신망이며 사건기반의 비 주기적 데이터 구간이 배제된다. 이에 따라 버스 마스터의 오류에 대응하는 $T_{standby}$ 시간을 줄이기 위한 방안을 제안하고자 한다.

버스 마스터 노드는 기본주기(basic period)내에 적어도 1 개 이상의 마스터 프레임을 발생시켜야 하며, 만일 기본주기 동안 마스터 프레임을 받지 못한다면 버스 마스터에 이상이 발생했음을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 $T_{standby}$ 를 기본주기(basic period)로 축소하여 결과적으로 기본주기 동안 마스터 프레임이 감지되지 않는 경우, 바로 마스터십을 이양하도록 프로토콜을 수정한다. 단 이 경우, 기본주기는 시스템마다 다를 수 있으며, 이를 고정된 값으로 할 경우, 시스템의 유연성이 매우 떨어지므로, 소프트웨어적으로 변경

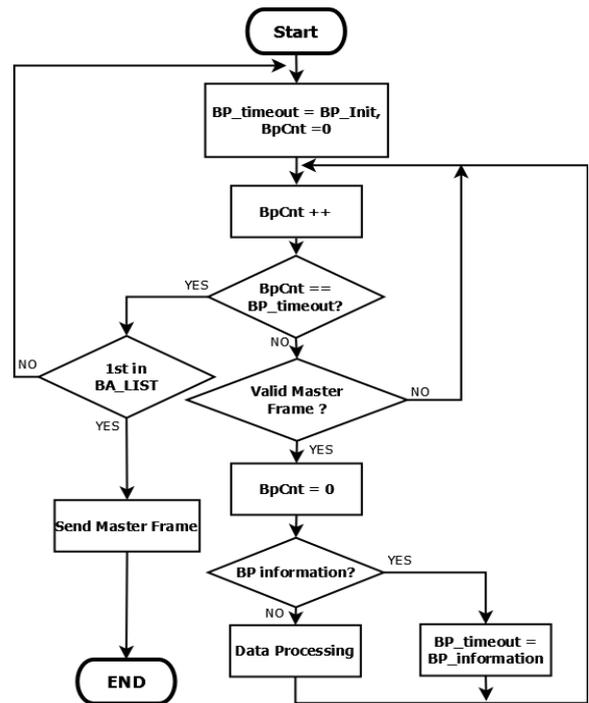


그림 3 제안된 마스터 권한 이양을 위한 버스관리자 감시 흐름도

Fig. 3 Bus administrators flow chart to transfer proposed mastership

될 수 있도록 하기 위하여 본 논문에서는 기본주기를 주기적으로 업데이트하고, 이를 모든 노드가 공유하도록 설계하였다. 기본 주기를 공유하는 방법으로는 기본 주기마다 주기적 전송 구간이 종료되었을 때, 버스 마스터는 통신망에 연결된 모든 기기에게 기본주기 정보를 송신함으로써 모든 기기가 기본주기를 공유할 수 있게 하였다. 기본 주기 정보는 어플리케이션 단에서 업데이트 되는 16비트의 정보로서 일반 데이터와 동일한 형태로 전송할 경우, 별도의 F_Code를 부여하여야 하며, 이는 슬레이브 기기들이 어플리케이션 단에서 판독하게 된다. 그러나 $T_{standby}$ 는 MVBC 제어기가 소프트웨어를 배제한 상태에서 내고장상태를 위하여 마스터 권한을 이양할 때 사용되는 파라미터이므로 이를 어플리케이션에서 재정의하는 방식으로 구현할 경우, 많은 오버헤드가 수반될뿐더러, 경우에 따라서는 정확한 동작을 보장할 수 없을 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 2에서 보이는 기본 주기 전송을 위한 프레임 경계기호(frame delimiter)를 재정의하여 슬레이브 기기에서 마스터에서 전송하는 기본주기 프레임을 구분할 수 있도록 하였다.

이와 같은 기본주기전송을 통하여 하나의 기본 주기가 끝날 경우, 통신망에 연결된 모든 기기는 버스 마스터의 기본 주기를 알게 되고 기본 주기 동안 마스터 프레임이 수신되지 않을 경우 버스 마스터의 동작에 이상이 생겼다고 판단하게 된다. 현재 마스터 기능을 수행하고 있지 않은 버스관리자(Bus administrator) 기기는 그림 3과 같은 알고리즘에 따라 버스관리자 리스트 중 첫 번째 랭크된 기기가 자동적으로 마스터 권한을 이양 받도록 한다.

2.3 성능 분석

본 절에서는 2.2절에서 제안한 고속 마스터권한 이양 알고리즘에 걸리는 시간을 분석하고자 한다. 우선 이를 위하여 다음과 같은 파라미터를 정의한다.

- t_m : 마스터 프레임의 전송시간
- t_s : 슬레이브 프레임의 평균 전송시간
- t_t : 텔레그램 하나의 평균 전송시간
- t_{t^n} : n 번째 사이클로 인한 텔레그램 전송시간
- t_c : 기본 주기당 서브 사이클들의 전송시간
- t_p : 주기적 데이터 전송으로 인해 소모되는 평균시간
- t_{bp} : 기본 정보 전송 시간
- T_{ms} : 마스터 프레임과 슬레이브 프레임 간의 간격
- T_{BP} : 기본 주기

텔레그램 평균 전송시간 t_t 는 아래 수식과 같이 표현될 수 있다.

$$t_t = t_m + t_s + 2T_{ms} \quad (1)$$

주기적 전송구간을 구성하는 2~1024의 10개의 서브사이클에 의하여 전송시간 t_c 는 수식 (2)와 같게 된다.

$$t_c = \sum_{k=0}^{10} \frac{k \cdot e^{-\lambda} \cdot \lambda^k \cdot t_t}{k!} = e^{-\lambda} \cdot t_t \cdot \sum_{k=0}^{10} \frac{k \cdot \lambda^k}{k!} \quad (2)$$

수식 (2)에서 하나의 기본 주기에 전송되는 서브사이클 수는 프아송 분포(poission distribution)으로 가정하고, 평균을 λ 로 한다. 또한 주기적 전송 구간 동안 보내지는 데이터에 의한 전송 시간 t_p 는 첫 번째 사이클에 의한 텔레그램 전송과 t_c 로 계산되어 수식 (3)과 같다.

$$t_p = t_{t^1} + t_c + t_m + T_{ms} \quad (3)$$

따라서 어플리케이션에서 설정된 기본 주기 값을 전송하기 위해서는 수식 (4)를 만족하면 된다.

$$T_{BP} - (t_p + t_m + T_{ms}) \geq t_{BP} \quad (4)$$

여기서 기본 주기를 1ms로 하고, MVB의 전송 속도를 표준에 따라 1.5Mbps 가정하면 t_m , t_s , T_{ms} , t_{bp} 는 각각 22us, 75.7us, 4us, 44us 로 계산되며, 기본 주기에서의 평균적인 슬레이브 프레임의 전송에서는 서브 사이클이 10개 이상이 되지 않을 경우 식(4)는 98.15%의 확률로 만족하고 있다. 또한 최악의 전송시간을 가진 슬레이브 프레임(256비트의 페이로드)를 가진 경우에도 첫 번째 서브사이클을 제외한 3개 이하의 서브사이클이 존재할 경우 식(4)는 만족되며 이는 최악의 전송시간을 가지는 경우의 43.35%에 해당한다. 결론적으로 전체 전송시간의 98.15%의 경우 매 주기마다 기본주기를 전송할 수 있으며, 최악의 경우에도 2주기마다 한번꼴로 기본주기에 대한 정보를 전송할 수 있다. 이는 제안된 구조에 의하여 비주기적 데이터 전송 구간의 할당이

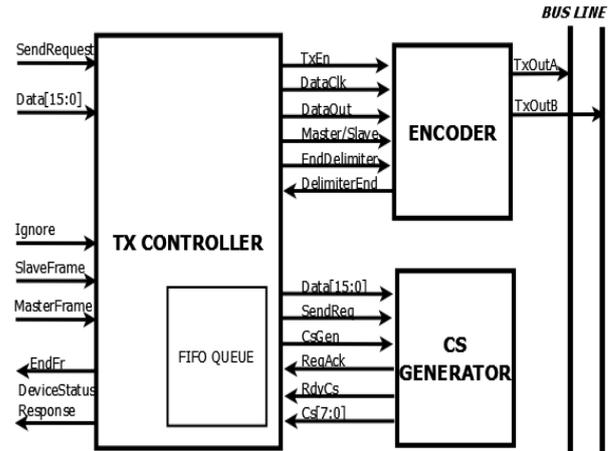


그림 4 송신부 블록도
Fig. 4 Block diagram of data source

기본주기에서 이뤄지지 않기 때문에, 시간적 제약이 강한 주기적 데이터의 대역폭 할당 범위가 53.8% 늘어나고 주기적 데이터 전송이 끝난 후, 기본 주기 정보를 공유함으로 인하여 버스 관리자 기기들이 버스 마스터의 고장에 대응하는 시간인 $T_{standby}$ 가 줄어들게 됨을 의미하며, 이로 인하여 버스 마스터의 고장에 기인된 통신망 복구에 걸리는 시간은 기존에 비하여 19.2~48.1%까지 줄일 수 있음을 보인다.

3. 구현 및 결과

3.1 내부 구조

2장에서 제안된 HR-MVB의 가능성을 확인하기 위해 HR-MVB의 주요 부분을 FPGA로 구현하여 확인을 하였다. HR-MVB 제어기는 크게 송신부, 수신부, 주 제어부의 3부분으로 나누어 구현되었다. 이는 일반적인 MVB제어기 구현 구조와 유사한 파티셔닝으로 볼 수 있다[8,9,10]. 송신부는 송신 제어기, 맨체스터 코드 엔코더, 체크섬 생성기로 나뉘며 주 제어기에서 전송되는 데이터를 버퍼에 저장하고 데이터를 송신하기 전에 저장된 데이터를 체크섬 생성기를 통하여 체크섬을 생성한 후, 맨체스터 코드 엔코더를 통하여 주제어기 동작에 따른 경계기호를 삽입하여 데이터를 전송 라인을 통하여 전송한다. 특히 HR-MVB의 경우에는 기본 주기를 전송하기 위한 별도의 프레임이 정의되어 있으므로, 이를 처리하기 위한 별도의 코덱이 추가되어 구현되었다. 그림 4는 구현된 송신부의 블록 다이어그램이다.

수신부는 맨체스터 코드 디코더, 수신 제어기, 체크섬 생성기 및 이중라인 제어기로 이뤄져 있다. MVB는 내고장성을 위하여 이중화된 통신라인을 사용하고 있으며, 따라서 수신부는 두 개의 분리된 전송선로를 통하여 수신된 데이터는 각각의 독립된 맨체스터 코드 디코더에서 해석하여 각각의 수신 제어기에 보내지게 된다. 수신 제어기는 디코더를 통해 분석된 데이터를 버퍼에 저장하고 체크섬 확인 및 프레임의 오류 여부를 판별, 정상 프레임이 수신될 경우, 주제어기로 신호(ValidFrame)를 전달하여 주 제어기에서 오는 데이터 요청(DataReq)을 기다린다. 주 제어기에서 데이터 요

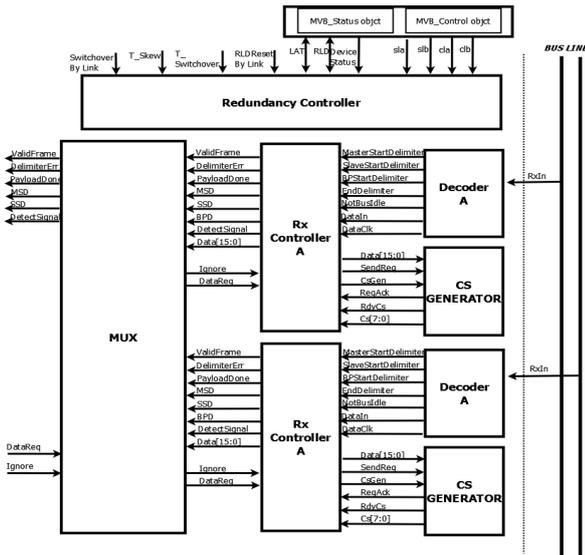


그림 5 수신부 블록도
Fig. 5 Block diagram of data sink

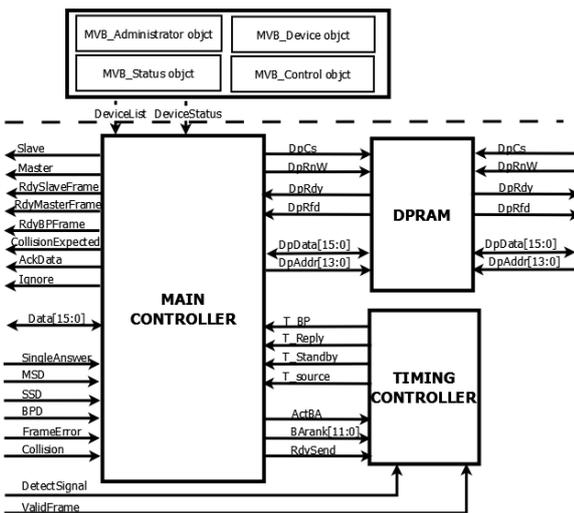


그림 6 주 제어부 블록도
Fig. 6 Block diagram of main control

청 신호가 전달되면 이중라인 제어기는 수신 선로(Trusted_Line)과 예비 선로(Observed_Line)을 감시하여 정상적인 프레임이 수신된 선로의 데이터를 선택하여 주 제어기로 전달한다. HR=MVB의 경우 수신된 프레임 중, 기본정보의 전달을 위한 프레임의 경우, 이를 별도로 해석하여 주 제어기에 전달함으로써, 하드웨어적으로 $T_{standby}$ 타이머를 관리할 수 있도록 구현하였다. 그림 5은 구현된 수신부의 블록다이어그램이다.

제어부는 마스터와 슬레이브의 역할을 주제어기, 레지스터의 값을 저장하는 레지스터 부, 표준에 명시된 타이밍을 체크하기 위한 타이머로 나뉘지게 된다 통신망에 연결되어 기기의 동작을 결정하고 각각의 동작에 따른 프레임 전송 및 수신된 데이터를 처리하는 부분으로 표준에 명시된 프레임 간의 지연시간 및 전송대기 시간 등의 요구사항에 부합

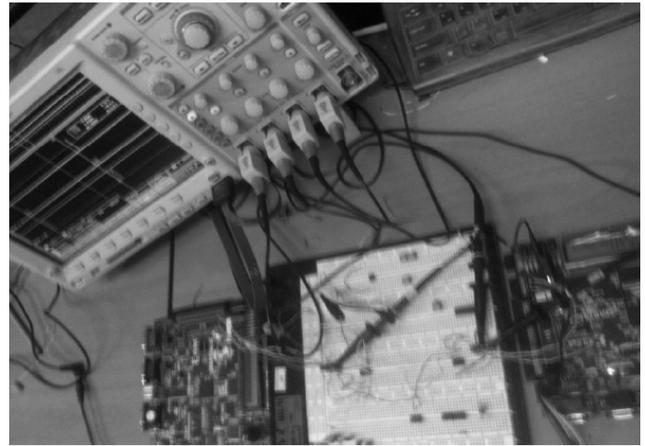


그림 7 실증 시험
Fig. 7 Verification test

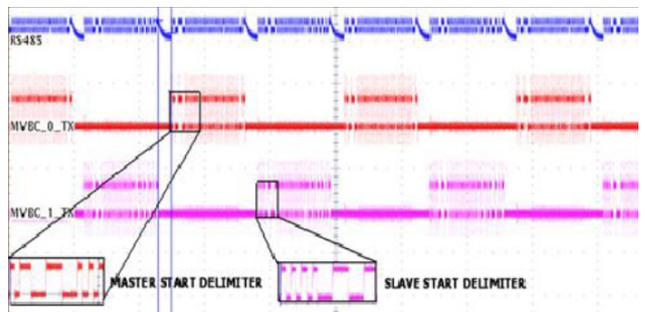


그림 8 구현한 제어기의 전송 파형
Fig. 8 Data transmission waveform of implemented controller

하기 위해 타이머와 연계되어 있다. 그림 6은 제어부의 블록다이어그램을 보여준다.

3.2 실험 및 검증

설계된 HR-MVB 제어기는 Xilinx사의 SPARTAN 3E FPGA에 구현되어 실증시험을 실시하였다. 개발 및 합성 툴로 Xilinx사의 ISE 9.1i를 사용하였으며 시뮬레이션을 위하여 Modelsim SE 6.2b를 이용하였다. 실증 실험을 위한 실험 환경은 그림 7과 같이 Xilinx사의 SPARTAN 3E 평가 보드를 활용하여 구축하였다. 그림 7에서 보는 것과 같이 두 대 이상의 보드를 통신망으로 연결하고, 보드 간 연결된 전송선로의 파형으로 데이터 교환이 이뤄짐을 확인할 수 있었으며 버스 마스터에서 전송되는 신호와 각 프레임의 시작 지점에 시작 경계기호가 삽입되어 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 주기적으로 전송되는 마스터 프레임과 슬레이브 프레임의 파형을 보여주고 있는 것으로 프레임의 시작 지점에 시작 경계 기호가 삽입되어 있음을 확인할 수 있다. 이 밖에 표준에 정의된 시간 제한 값을 위반 하지 않음을 확인할 수 있었으며 기본주기 정보에 따른 마스터 권한 이양 또한 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 원자력발전소 안전계통에 활용될 수 있는

내고장성 통신망의 구현을 위하여 원자력발전소 안전계통 통신망의 특성과 설계기준에 대하여 연구 하였으며, 안전성과 신뢰성 확보가 중요한 설계 요건이 되는 안전계통 통신망의 특성이 국제표준 규격인 IEC61375 MVB통신망과 많은 부분에서 유사함을 알 수 있었다. 하지만 사건기반의 통신을 배제해야 하는 안전계통 통신망의 규제안에 따라, 비주기적 데이터 전송이 가능한 IEC 표준안을 그대로 적용할 수 없으며, 본 논문에서는 MVB를 기초로 하여 원자력발전소에 적합한 고신뢰성 HR-MVB를 제안하였다. HR-MVB는 비주기적인 통신 가능성을 제거함으로써, 원자력 안전규제지침에 규정된 결정론적 특성을 만족하고 있으며 기존 MVB에 비하여 최대 52% 대역폭을 추가로 확보할 수 있었다. 또한 매 기본주기마다 기본주기 정보를 모든 기기에 전송하고 이를 기초로 마스터 권한 이양 알고리즘을 개선함으로써 표준 MVB에 비하여 버스 마스터 고장 시 네트워크 복구 시간을 19.2~48.1%까지 줄일 수 있게 되었다. 본 논문에서 제안된 HR-MVB는 FPGA에 구현된 결과와 이를 사용한 실증시험 및 평가를 포함한다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 원전기술혁신사업 연구 과제입니다. (No. 2010161010001G)

참 고 문 헌

[1] IEC 61375-1 Standard, Train Communication Network, 1999.
 [2] G. G. Preckshot, "Data Communications", NUREG/CR-6082, 2000.
 [3] IEEE 7-4.3.2 "Standard Criteria for Digital Computers in Safety Systems of Nuclear Power Generating Stations", 2010.
 [4] IEEE 323 "Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", 2003.
 [5] IEEE 344: Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, 1993.
 [6] IEEE 352: "IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Safety System", 1987.
 [7] H. Kirrmann and P. A. Zuber, "The IEC/IEEE Train Communication Network", IEEE Journal, vol.21, issue:2, pp.81-92, May, 2001.
 [8] J. Jimenez, J. L. Martin, C. Cuadrado, J. Arias and J. Lazaro, "A top-down design for the train communication network", Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology 2003, vol.2, pp.1000-1005, Dec, 2003.
 [9] J. Jimenez, J. L. Martin, A. Zuloaga, U. Bidarte and J. Arias "Comparison of two designs for the multi-

function vehicle bus" IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 25, pp.797-805, May, 2006.

[10] J. C. Moreno, E. Laloya, J. Navarro, "A Link-Layer Slave Device Design of the MVB-TCN Bus (IEC 61375 and IEEE 1473-T)", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.56, pp.3457-3468, Nov. 2007.
 [11] Dong-Hoon Kim, Sung-Woo Park, "Deterministic Data Communication Architecture for Safety-Critical Networks in Nuclear Power Plants" Transactions of KIEE, vol.55D, no. 5, pp. 199-258, May, 2006.
 [12] Dong-Hoon Kim, et al, "Development of Design method of Network in Nuclear Power plant", KAERI/TR- 700/96, 1996.

저 자 소 개



설재운 (薛在倫)

1983년 1월 생, 2009년 인하대학교 정보통신학과 졸업, 2012년 인하대학교 정보통신공학 석사, 현재 LS산전 미래사업부문 연구원. 관심분야: 임베디드시스템, 실시간네트워크



김기창 (金基昌)

1958년 생. 1986년 California Polytechnique State Univ. 전산과 학사. 1992년 UC Irvine 전산과 박사. 1992년 IBM T. J. Watson 연구소 방문연구원. 1994년-현재 인하대학교 정보통신공학부 교수.



김유성 (金裕成)

1964년 생, 1986년 인하대학교 전자계산학 학사, 1988년 한국과학기술원 전산학 석사, 1992년 동대학원 박사. 1996 Purdue Univ. 방문연구원, 1992-현재 인하대학교 정보통신공학부 교수.



박재현 (朴宰賢)

1963년 생, 1986년 서울대학교 제어계측공학과 학사, 1988년 동대학원 석사, 1994년 동대학원 박사. 1995 Univ. of Michigan 연구원, 1995-현재 인하대학교 정보통신공학부 교수.