

철도신호시스템에서 고신뢰성을 갖는 이더넷 기반 네트워크

조현정, 황종규, 이강미, 이재호
한국철도기술연구원

Reliable Ethernet-based Network for Railway Signaling Systems

Hyun-Jeong Jo, Jong-Gyu Hwang, Kang-Mi Lee, Jae-Ho Lee
Korea Railroad Research Institute (KRII)

Abstract - 철도 신호제어시스템은 철도의 선로변에 위치하면서 열차의 안전운행을 책임지는 매우 중대한 시스템이다. 이러한 신호제어장치들은 각자의 고유의 기능을 수행하면서 다른 제어장치들과 링크되어 하나의 신호제어시스템으로 구성되어진다. 요즘 철도신호시스템에 사용되는 각 장치들이 전자화되어감에 따라 철도신호장치들간 정보전송을 위한 네트워크에 대한 중요성이 증대되었다. 철도신호시스템과 같은 고신뢰성이 요구되는 시스템에서 실시간 요구조건과 신뢰도를 만족시킬 수 있는 네트워크 기술에 대한 필요성 또한 증대되고 있다. 가장 널리 쓰이는 기술인 이더넷은 프로토콜 자체의 랜덤 특성으로 인해 실시간 요구사항을 만족하지 못하였으나, 최근 들어 스위치드 이더넷으로 진화하면서 산업용 제어시스템에 이더넷 기술이 적용되고 있다. 본 논문에서는 이러한 스위치드 이더넷의 이론적 해석을 통해 철도신호시스템에 적용 가능성을 확인하였고, 네트워크에 결합발생 시 결합검지 및 회복 알고리즘이 포함된 높은 신뢰성을 가진 이더넷 기반 네트워크 알고리즘과 모의시험을 통한 그 성능을 분석하였다.

1. 서 론

철도 신호제어시스템은 열차의 속도제어 및 진로제어 등을 담당하고, 특히 열차 충돌 방지 기능을 담당하는 안전운행을 최종적으로 책임지는 바이탈한 시스템이다. 신호제어장치들은 각자의 기능을 수행하면서 다른 제어장치들과 링크되어 하나의 신호제어시스템으로 구성된다. 이러한 철도신호용 제어장치간의 링크는 현재 대부분 점대점 통신을 사용하고 있어 유지보수나 새로운 장치의 추가 시 확장성의 문제점을 가지고 있다. 최근 들어 철도선전국을 중심으로 이러한 철도신호장치간의 링크를 네트워크로 구성하기 위한 연구가 시도되고 있고, 일부는 이미 적용하여 사용 중이다 [1][2]. 철도신호시스템에서 네트워크와 관련한 연구가 등장하게 된 배경으로 고신뢰성이 요구되는 시스템에서 실시간 요구조건과 신뢰도를 만족시킬 수 있는 네트워크 기술에 대한 필요성이 증대된 점을 들 수 있다.

산업용 네트워크 기술은 1980년대 중반 이후부터 본격적으로 개발되어 현재는 Profibus, Fieldbus Foundation, WorldFIP 등과 같은 프로토콜을 포함하는 IEC 61158 국제 표준이 최근에 제정되었고, 실시간 트래픽을 지원하기 위한 MAC 계층의 메커니즘으로 RETHER, HP AnyVG LAN, IEEE 802.1p과 같은 이더넷을 기반으로 한 산업용 제어시스템을 위한 네트워크 기술들이 연구되고 있다. 이러한 산업용 네트워크를 철도신호시스템에 적용하기 위해 어떤 프로토콜을 선정해야 하는지는 다양한 요소를 고려해야 할 사안이다. 이러한 특징을 고려해서 철도신호시스템을 위한 네트워크는 이더넷 기반의 프로토콜을 기반으로 개발하기로 하였다. 그러나 이더넷 프로토콜은 랜덤 특성으로 인해 실시간 요구사항을 만족

하지 못하여 산업용 제어시스템에 적용이 불가능 하였으나 [3], 최근 들어 이더넷이 스위치드 이더넷으로 진화하면서 산업용 제어시스템에 이더넷 기술이 적용되고 있다. 이러한 스위치드 이더넷의 이론적 해석을 통해 철도신호시스템에 적용 가능성을 확인하였다.

철도신호시스템과 같은 바이탈한 제어시스템은 일반 산업용 제어시스템보다 더 높은 신뢰성이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 네트워크에 결합발생 시 결합검지 및 회복 알고리즘이 포함된 높은 신뢰성을 가진 이더넷 기반 네트워크 알고리즘과 모의시험을 통한 그 성능을 분석하였다. 이러한 제한한 이더넷 기반 고신뢰성의 네트워크 알고리즘이 철도신호시스템들간 인터페이스에 적용될 경우 확장성, 유지보수 측면에서 많은 성능향상이 예상되며, 또한 통신시스템의 신뢰성 확보에 따른 신호제어시스템의 안정적인 운용이 예상된다.

2. 철도 신호시스템을 위한 이더넷의 이론적 분석

이러한 이더넷을 바로 철도신호시스템에 적용한다면 전송되는 데이터들이 일정한 전송지연을 가지지 못하고 랜덤한 전송지연을 가지는 문제, 즉, 전송 지연에 대한 불확실성 문제가 생긴다. 이에 따라, 이더넷을 아무런 수정없이 바로 산업용 네트워크로 응용하기에는 문제가 있다고 알려져 있다. 또한 이러한 이더넷에서의 충돌을 줄이기 위한 다양한 방법들은 데이터링크 계층이나 TCP/IP 계층을 직접적으로 수정해야 한다는 문제점을 가지고 있었다. 본 연구에서는 이더넷에서의 전송 지연에 대한 불확실성을 해결하기 위한 방법의 하나로서, 스위칭 기술을 이더넷에 도입하여 해결하였다. 스위칭 기술은 주로 오피스 네트워크를 위하여 개발 및 적용되어 왔으나, 스위칭 기술이 보편화되고 스위치의 가격이 하락해 감에 따라, 스위치를 산업용 네트워크에 적용하려는 시도가 증가되고 있는 추세이다.

2.1 이더넷과 스위치드 이더넷

이더넷으로 언급되는 IEEE 802.3은 IEEE에 의해서 1970년대 초반에 컴퓨터 데이터 통신을 위해 개발되었으며, 오피스 통신의 물리계층과 데이터링크 계층의 토대가 되었다. CSMA/CD(Carrier Sensing & Multiple Access/Collision Detection)는 IEEE 802.3의 전송매체 접속 제어 방법이다. 전송할 데이터를 가지고 있는 소스 스테이션은 전송매체가 사용 중인지 검사한다. 이더넷에서는 이러한 CSMA/CD 알고리즘에 의해 트래픽이 많아지면 충돌이 자주 발생하게 되며, 충돌 횟수만큼의 백오프 시간동안 기다림으로써 전송지연이 증가하게 된다. 또한 BEB (truncated Binary Exponential Backoff) 알고리즘에 따라 랜덤시간동안 대기함으로써 인해 지연시간을 예측할 수 없다는 특성을 가진다.

스위치드 이더넷은 기존의 이더넷과는 다른 점을 가진

다. 스위치드 이더넷에서는 스위치에 의하여 통신하려는 두 스테이션간에 전송의 가상회선이 설정됨으로써, 다른 스테이션들간의 충돌이 방지된다. 즉, 소스 스테이션이 프레임을 전송하면, 스위치가 해당되는 목적지 스테이션으로만 프레임을 전송하기 때문에, 여러 개의 스테이션이 동시에 전송을 하는 경우에도 충돌이 발생하지 않는다. 또한, 스위치드 이더넷에서는 송신과 수신을 각각의 회선으로 수행하는 full duplex 방식을 사용하기 때문에, 목적지에서 근원지로부터 송신된 프레임이 수신되기 전에 목적지가 송신을 하더라도 충돌이 발생하지 않는다.

2.2 이더넷과 스위치드 이더넷의 이론적인 최대전송 지연 분석

이더넷에 대한 성능분석은 1970년대부터 다수의 연구자들에 의하여 이루어져 오고 있다. 그러나 CSMA/CD에서 사용되는 BEB 알고리즘의 확률적 특성으로 인하여, 아직까지 전송 지연에 대한 정확한 해석은 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 분석 방법의 하나로서, 데이터링크 계층에 대한 타이밍 분석을 수행하여 CSMA/CD에 대한 이론적인 최대 전송 지연을 분석하였다 [4].

기존의 이더넷의 최대 전송 지연은 다음과 같은 3가지 상황에서 발생한다. 즉, 최대 전송 지연은 1) 전송 프레임이 16회의 충돌이 발생한 후에 전송되고, 2) 백오프 시간이 최대값인 2min(시도횟수, 10)을 가지고, 3) D_{DET} 가 최대값인 근원지와 목적지간 전파지연이 2배인 경우에 발생한다. 이러한 경우, 이론적인 최대 충돌 지연은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$D_C = \sum_{k=1}^{16} (D_{DEF} + D_{JAM} + D_{BOmax}) \\ = 16(4D_{PROP} + D_{JAM}) + \sum_{k=1}^{16} 2^{\min(k, 10)} t_b \\ \approx 418.6 \text{ msec} \quad (1)$$

여기서, t_b : 비트 시간(1/전송속도)

D_{BOmax} : BEB 알고리즘의 최대 백오프 시간

D_{JAM} : Jam 전송시간

D_{PROP} : 전송지연

D_{DET} : 충돌 감지 시간

이상의 분석으로부터 이더넷에서 발생하는 이론적인 최대 전송 지연은 약 418.6msec임을 알 수 있다. 이러한 결과는 이더넷의 경우 트래픽이 높아지게 되면, 충돌이 빈번하게 발생하고 전송 지연이 급격하게 증가한다는 것을 의미한다. 따라서 이더넷을 직접적으로 산업용 네트워크에 사용한다는 것이 적합하지 않다는 것을 보여준다.

스위치드 이더넷에서의 이론적인 최대 전송 지연은 네트워크에서의 트래픽과 스위치의 버퍼 용량에 따라 결정되는 N_q 가 최대일 때 발생한다. 이상과 같은 조건을 고려하여 최대전송지연시간 D_Q 를 계산하면 다음 식 (2)과 같다.

$$D_Q = \sum_{k=1}^{N_q} (D_{IF} + D_{TK}) \\ = \sum_{k=1}^{N_q} (D_{IF} + \max(L_k + L_h, 576) t_b) \\ = 13 \times 672 \times t_b = 873.6 \mu\text{sec} \quad (2)$$

여기서, D_{IF} : 인터프레임 지연

D_{TK} : k번째 메시지의 길이

N_q : 임의의 시간에 스위치에 저장되는

프레임의 개수

L_k : k번째 생성된 데이터 크기

L_h : 전송프레임의 오버헤드

위의 식에 의해 스위치드 이더넷을 쓸 경우, 매우 작은 전송 지연을 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 이론적으로 스위치드 이더넷에서 충돌이 발생하지 않기 때문이며, 스위치드 이더넷이 산업용 네트워크에서 요구하는 실시간 요구조건을 충분히 만족시킬 수 있고 철도신호시스템에도 충분히 사용이 가능하다는 것을 보여준다.

3. 철도신호용 네트워크 알고리즘

본 논문에서는 스위치드 이더넷을 안전성이 보장되어야만 하는 철도신호시스템에 적용하기 위해 신뢰성을 향상시키는 방법에 대한 연구를 진행하였다. 앞 장에서 스위치드 이더넷에서 설명한 것과 같이 스위치드 이더넷은 실시간 요구조건을 충분히 만족시키며 널리 사용되고 있어 응용계층의 개발이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 반면, 네트워크를 구축하고 있는 시스템 구성요소인 네트워크 인터페이스 카드(NIC)와 스위치 허브, 통신 라인 등이 유기적으로 동작하고 있어, 각각의 구성요소에서도 고장이 발생하게 되면 전체 네트워크에서의 신뢰성을 보장할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 각각의 구성요소를 중복하는 다중화 구조를 제안하고 이에 대한 성능을 평가하였다.

3.1 하드웨어 잉여구조

■ 스위치 허브

이더넷 통신에서는 데이터 케이블을 공유하기 때문에 네트워크상의 모든 노드는 고유의 어드레스를 가지며, 또한 이 어드레스를 기준으로 스위칭 허브를 통해 통신한다. 스위칭 허브 초기에는 패킷 전체를 버퍼링 하지 않고 다만 목적지 주소만을 가지고 상대방에게 전송하는 방식으로 구현이 되어있어, 트래픽이 높아짐에 따라 충돌이 불가피하게 생길 수 있었다. 그러나 현재 구현되어 있는 대부분의 스위칭 허브는 포트 당 2개 이상의 독립적인 큐를 가지고 있으며, Store & Forward 방식으로 스위치로 들어온 데이터 전체를 메모리에 저장한 후, 목적지 주소를 보고 전송을 하기 때문에 스위치에서의 큐 지연을 제외하고는 충돌이 거의 발생하지 않는다.

■ 결합 허용을 위한 다중 포트 네트워크 인터페이스 카드 (NIC)

결합 허용이란 시스템 내의 어느 한 부품 또는 어느 한 모듈에 결합이 발생하더라도 시스템 운영에 전혀 지장을 주지 않도록 설계된 시스템이다. 결합 허용 시스템은 어떠한 결합이 발생하더라도 아무런 데이터의 손실 및 파괴없이 시스템이 정상동작을 계속 하도록 하는 것에 목표를 두고 있다. 결합 허용은 크게 3가지 단계를 거치면서 이루어지며, 이러한 단계들은 동작중인 응용 소프트웨어와 연계하여 동작하게 된다.

1) 결합 감지

결합 감지는 주로 하드웨어로 구성된 비교기를 통하여 이루어진다. 시스템 내에서 결합이 발생되면 해당 모듈 또는 시스템은 결합 상태로 들어가게 된다. 결합이 발생되면 OS는 각 모든 하드웨어 모듈들의 상태를 분석하여 어느 모듈이 결합을 유발시켰는가를 분석하여 알아낸다.

2) 결합 진단

결합은 일시적이거나 영구적일 수 있다. 만약 결합이 영구적이라면 그 모듈을 시스템 구성에서 제거한다. 만약 결합이 일시적이라면 즉, 결합이 발생하여 자기 진단을 수행한 결과 아무런 문제가 없다고 판단되면, 시스템은 일단 그 결합을 일시적 결합으로 인식하고 모든 동작을 계속 수행한다.

3) 결합 회복

결합 회복이란 결합을 유발한 모듈을 시스템에서 제거하여 시스템을 재구성하는 것을 의미한다. 결합 허용을 유지할 수 있는 중요한 기능 중 하나는 데이터를 항상 두 개 이상 복사 해놓음으로써 결합 허용을 유지시킨다는 점이다. 즉, 응용프로그램에서 데이터가 생성되면 항상 두 개의 메모리에 저장시킨 후 전송을 하는 방식을 취한다. 어느 한 모듈의 메모리에 있는 데이터가 이상이 생기더라도 계속해서 두 개 이상의 메모리를 유지하고 전송하며, 데이터를 수신하는 측에서는 데이터를 비교하는 작업을 통해 올바른 데이터를 찾아내는 방식으로 다른 시스템에 영향을 전혀 주지 않고 결합 허용을 유지할 수 있다. 본 논문에서는 4개의 모듈을 가지는 NIC을 사용하여 잉여 시스템을 구현하였다.

■ 결합 허용의 시스템 구조

위에서 열거한 것과 같이 결합 허용 시스템을 구성하기 위해서는 복수개의 통신포트, 통신선을 구성하여야 한다. 다중 포트 NIC을 이용해서 모듈 잉여를 구현하고, 스위치 허브를 이중으로 연결하여 스위치 단에서의 잉여도 같이 구현되어야 한다. 만약 스위치를 하나만 사용하면 모듈단에서의 잉여가 보장된다 해도 스위치에서 결합이 발생하면 전체 네트워크에 장애가 발생하게 된다. 하나의 포트에 하나의 통신선을 연결하는 것 또한 전체 네트워크에서는 피해야 할 일로, 통신선의 예러가 발생할 소지가 충분히 있기 때문이다. 이러한 요구조건을 만족시킬 수 있는 시스템 구조는 그림 1과 같다.

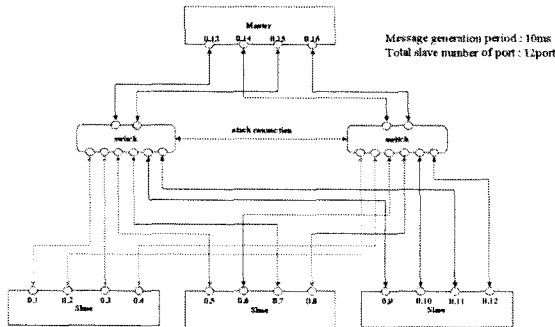


그림 1. 전체 결합 허용 시스템 구조

3.2 통신노드의 결합 검지 및 운영 알고리즘 개발

스위치드 이더넷 네트워크에서 각각의 구성요소를 이중으로 구현하기 위해서는 하드웨어상의 시스템 프레임워크 외에도, OSI 레퍼런스의 7계층에 해당하는 응용계층에서 이를 지원하기 위한 소프트웨어가 필수적으로 필요하다. 첫째, 네트워크 카드의 이중화를 위해서는 하나의 스테이션에서 2개 이상의 네트워크 카드의 바인딩을 지원하여야 하고, 2개 이상의 포트, 2개 이상의 통신에 사용되는 소프트웨어적 버퍼가 필요하다.

본 논문에서 제안한 시스템 구조는 4개의 통신포트와 4개의 통신선, 2개의 스위치를 사용하고 있기 때문에, 성능평가를 하기 위한 소프트웨어도 이상과 같은 시스템 구조를 지원할 수 있어야 한다. 그림 2는 스위치드 이더넷의 전체적인 잉여를 위한 소프트웨어의 개략적인 프로그램 다이어그램이다. 개략적으로 설명을 하면 메시지를 생성하는 슬레이브는 10ms 주기로 메시지를 계속 생성하게 되고, 메시지 발생루틴은 메시지가 발생되면 슬레이브 메시지 송신 루틴으로 메시지 발생 이벤트를 발생시킨다. 이 이벤트를 받은 슬레이브 메시지 송신 루틴에서는 각각의 바인딩된 포트를 통해 메시지를 전송하는 방식으로 구성되어 있다. 메시지를 수신한 마스터 쪽에서는 개별 수신버퍼에 들어온 데이터를 보팅 루틴으로

복사해서 데이터를 비교한 후, 완전한 데이터를 응용계층으로 올리는 역할을 한다.

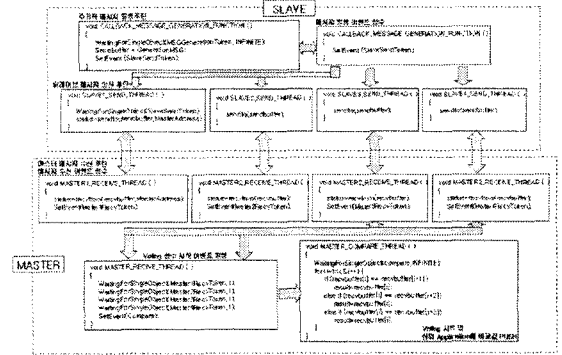


그림 2. 제안한 이더넷 구조의 프로그램 다이어그램

4. 결 론

철도신호시스템은 각자의 고유의 기능을 수행하면서 다른 제어장치들과 링크되어 하나의 신호제어시스템으로 구성되어지므로 그것들간 신뢰성 확보는 필수적인 요소이다. 이러한 철도신호용 제어장치간의 링크는 현재 대부분 점대점 통신을 사용하고 있어 새로운 장치의 추가 시 등에 있어서 유지보수에 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 철도신호설비들간의 인터페이스를 기존의 점대점 통신이 아닌 네트워크 기술의 적용을 한다면, 전송매체의 공유로 인해 설치 및 유지보수 비용의 절감되고 새로운 장치의 추가 및 삭제 등 확장성 등의 장점이 있다.

철도신호시스템과 같은 안전성이 보장되어야만 하는 시스템에서는 데이터의 전송 지연과 함께 데이터의 신뢰성이 중요하다. 이를 위하여 자동차, 항공기등과 같이 네트워크를 적용함에 있어, 고신뢰성을 요구하는 환경에서는 결합 허용을 필수적으로 구현한다. 본 논문에서는 4개의 모듈을 가지는 NIC을 사용해서 스위치드 이더넷의 잉여 시스템 구조를 제안하고 성능을 평가하였다.

통신선의 신뢰성을 위한 버스 잉여, 통신모듈의 신뢰성을 확보하기 위한 모듈 잉여, 스위치 허브의 신뢰성을 위한 스위치 잉여에 대해 실험을 수행하였다. 슬레이브와 마스터간의 통신 중 통신회선을 임의로 절단한 경우, 같은 환경에서 모듈의 사용을 임의로 중지한 경우, 스위치의 전원을 강제로 껐을 경우의 모든 예러 회복율은 100%였으며, 고장감지시간도 1ms미만으로 제안한 시스템을 철도 신호시스템에 적용하는데 충분한 신뢰성을 보여준다고 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Hideo Nakamura, "Development of Computerized Interlocking SMLNET", RTRI Report, 1986.
- [2] Nishida Shigenobu and etc., "Replacement of Tokaido Shinkansen Signalling System Providing Advanced Train Controls in the 21st Century", KYOSAN CIRCULAR, Vol. 53, No. 2, 2002.
- [3] IEEE standard 802.3, Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications, 2000.
- [4] Kyung Chang Lee, Suk Lee, "Performance Evaluation of Switched Ethernet for Real-time Industrial Communications", Computer Standards & Interfaces, Vol. 24, No. 5, pp. 411-423, Nov. 2002.