

철도 신호 시스템을 위한 고장 허용 스위치드 이더넷 구조의 성능 평가

Performance Evaluation of Fault Tolerant Switched Ethernet Architecture for Railway Signal System

황종규, 이재호, 조현정, 김만호, 박지훈, 이석*, 이경창
 (Jong Gyu Hwang, Jae Ho Lee, Hyun Jeong Jo, Man Ho Kim, Ji Hun Park, Suk Lee, and Kyung Chang Lee)

Abstract : In high reliability systems for industrial network such as railway signal system, fieldbus protocols have been known to satisfy the real-time and fault tolerant requirements. But, the application of fieldbus has been limited due to the high cost of hardware and software, and the difficulty in interfacing with multi-vendor products. Therefore, as an alternative to fieldbus, the computer network technology, especially Ethernet (IEEE 802.3), is being adapted to the industrial network. In this paper, we propose a switched Ethernet based railway signal system because of its very promising prospect for industrial application due to the elimination of uncertainties in the network operation. In addition, we propose the redundancy architecture for the reliability of network components. More specifically, this paper presents an analytical performance evaluation of switched Ethernet for railway signal system, and shows experimental evaluation of redundancy architecture.

Keywords : railway signal system, reliability, fieldbus, fault tolerant, switched Ethernet, redundancy, performance evaluation, throughput, network interface card, switching hub, bus

I. 서론

최근, 한국과 러시아는 한반도 중단 철도(Trans Korea Railway: TKR)와 시베리아 횡단 철도(Trans Siberian Railway: TSR)의 연결을 위한 공동 협력에 합의하면서, 철도를 대륙 육상 운송 수단으로 발전시키기 위한 노력이 활발하게 진행되고 있다. 이처럼 철도가 대형화됨에 따라, 철도 차량 및 철도 신호 시스템에서 사용되는 센서, 액추에이터 및 제어기와 같은 필드 장치들의 수가 급속도로 증가되고 있다. 그러나, 센서나 액추에이터와 같은 필드 장치와 스위치를 점대점(point-to-point) 방식으로 연결하는 전통적인 배선 체계는 전선이 기하급수적으로 증대되는 결과를 초래한다. 이러한 전선의 증가는 배선 체계를 더욱 복잡하게 함으로써 정비 및 유지 보수 문제와 시스템 성능 향상 및 확장을 어렵게 할 뿐만 아니라, 중량을 증가시켜 성능을 약화시키는 결과를 야기한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여, 필드 장치와 스위치를 공유된 전선으로 연결하는 네트워크 시스템이 개발되고 있다. 예로, 그림 1은 네트워크를 이용한 철도 신호 시스템의 구성을 나타내고 있다. 그림에서, 필드 장비와 제어 장치 간의 제어 정보 및 상태 정보를 FS-LAN(Fail Safe Local Area Network) 네트워크를 이용하여 공유함으로써, 효율적인 철도 신호 시스템의 관리가 가능하게 되었다.

그러나 산업용 네트워크는 철도 신호 시스템에서 실시간 요구 성능을 만족시킬 수 있다는 장점을 가지고 있지만 점대

점 배선 방식에 비하여 설치가 어렵고 프로토콜에 따른 호환성 문제를 가지고 있다. 따라서, 산업용 네트워크는 아직까지 철도를 비롯한 산업 전반에 광범위하게 적용되기에는 한계를 가지고 있다. 또한, 철도 시스템은 고장이 발생하면 많은 인명 피해를 가져오는 대형 사고가 되기 때문에, 네트워크를 비롯한 네트워크 인터페이스 모듈의 고장을 허용할 수 있는 적극적인 방법도 부족하다[1,2].

최근에, 철도 차량 및 철도 신호 시스템과 관련하여 철도 신호 설비 상호간 정보 전송을 위한 통신 프로토콜의 검증 시험[3]과 데이터 링크 프로토콜의 성능 해석[4]에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한, 고장 허용(fault tolerant)을

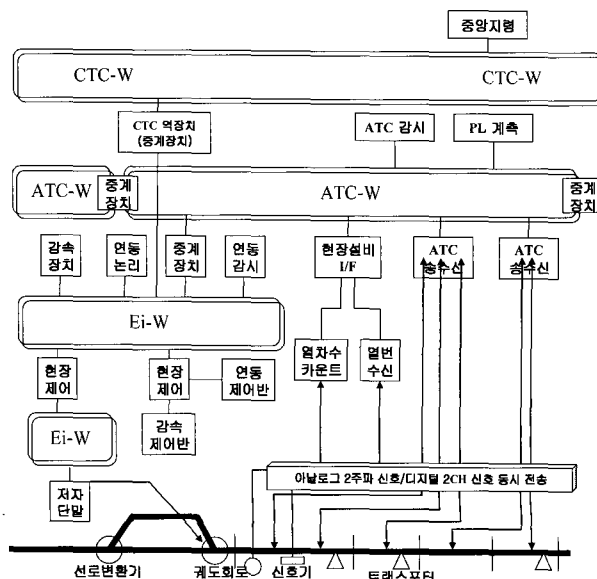


그림 1. 철도 신호 시스템의 네트워크 구성.
 Fig. 1. Network architecture of railway signal system.

* 책임저자(Corresponding Author)
 논문접수 : 2006. 9. 11., 채택확정 : 2006. 10. 16.
 황종규, 이재호, 조현정 : 한국철도 기술 연구원
 (jghwang@kri.re.kr/jhlee1@kri.re.kr/hjjo@kri.re.kr)
 김만호, 박지훈, 이석 : 부산대학교 기계공학부
 (kmh@pnu.edu/network@pnu.edu/slee@pnu.edu)
 이경창 : 부경대학교 제어자동화공학과(gclee@pknu.ac.kr)

위한 설계 방법[5] 및 FTA/ETA 기법을 이용한 철도 신호 시스템의 위험 분석 및 위험성 평가 방법[6]이 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 철도 신호 시스템을 위한 고장 허용 기법의 하나로써, 철도 신호 시스템에 적합한 고장 허용 구조 기반 스위치드 이더넷의 구조를 제안한다. 또한, 철도 신호 시스템에서 요구되는 실시간 요구 조건을 스위치드 이더넷이 만족시킬 수 있는 가를 검증하기 위하여 이론적인 분석 기법으로 성능 평가를 수행한다. 마지막으로, 철도 신호 시스템의 고장을 허용하는 방법으로서 중복 구조(redundancy)를 제안하고, 제안된 중복 구조의 고장 허용 성능을 실험적인 방법으로 검증한다.

본 논문은 서론을 포함하여 5장으로 구성되어 있다. 2장에서는 철도 신호 시스템에 대하여 설명하고, 3장에서는 스위치드 이더넷 및 스위치드 이더넷을 적용한 철도 신호 시스템에 대하여 설명한다. 4장에서는 스위치드 이더넷 기반 철도 신호 시스템의 고장 허용 구조를 제안하고 그 성능을 평가한다. 마지막으로, 5장에서 결론 및 향후 과제를 제시한다.

II. 철도 신호 시스템

일반적으로, 국내의 철도 신호 시스템은 그림 2와 같이 구성되어 있다. 그림에서, 철도 신호 시스템은 철도 시스템을 중앙 제어하는 열차 집중 제어 장치(Centralized Traffic Control, CTC)와 각각의 역으로 구성되어 있으며, 철도 용품 표준 규격(철도 6330-3349)으로 정의된 철도 전용 네트워크를 통해 연결되어 있다[7].

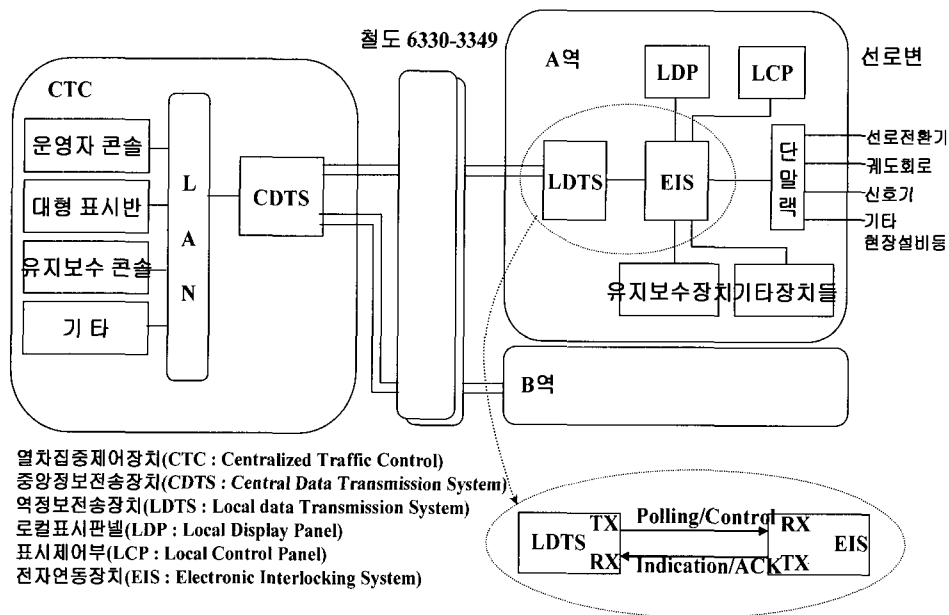
CTC는 중앙 사령실에서 여러 개의 신호 장치를 일괄적으로 집중 제어하는 장치로서 열차의 안전 운행과 선로 용량의 효율성을 증대시키는 기능을 담당한다. CTC는 기본적으로 운영자 콘솔, 대형 표시판, 유지 보수 콘솔 및 기타 정보 전송 장치(Central Data Transmission System, CDTS)로 구성되어

있다. CTC에서 CDTS와 운영 장비는 LAN 네트워크를 통해 연결되어 있으며 CDTS는 외부로 데이터를 전송하고 수신하는 기능을 수행한다.

철도 역의 신호 시스템은 CTC의 제어 정보에 따라 선로 변의 신호기나 선로 전환기를 제어하고 역사 및 철도 차량의 진행 정보를 CTC에 제공하는 기능을 담당한다. 철도 역사는 신호 기기나 선로 전환기를 제어하여 열차 진로의 안전성을 확보하는 전자 연동 장치(Electronic Interlocking System, EIS)와 EIS와 CTC 사이의 통신을 수행하는 역 정보 전송 장치(Local Data Transmission System, LDTS)로 구성되어 있다. 여기서, EIS는 정보 제공을 위한 로컬 표시 패널(Local Display Panel, LDP), 표시 제어부(Local Control Panel, LCP), 철도 신호 기계가 점대점으로 연결된 단말락과 유지 보수 장치로 구성되어 있다. LDTS는 역의 상태 정보를 EIS로부터 받아 CTC로 전송하는 통신 허브 기능을 수행한다. 여기서, LDTS에 고장이 발생하면 역사는 CTC로부터 제어 정보를 수신 받지 못하여 심각한 사고를 초래할 수도 있다.

현재, LDTS와 EIS 사이는 여러 가지 통신 프로토콜이 적용되고 있으며, I/O 프로토콜이 가장 많이 적용되고 있다. I/O 프로토콜은 디지털 전용 통신 프로토콜로 설계되지 못하고, 전기식 EIS를 전자식 EIS로 교체하는 과정에서 만들어진 불완전한 통신 구조를 가지고 있다. 즉, 전기식 EIS를 전자식 EIS로 교체하여 디지털 통신으로 바뀌었음에도 불구하고 기존의 전기식처럼 I/O 보드 별 점대점 통신 방식을 사용한다. 기형적으로 개발된 I/O 프로토콜 방식은 추가적인 데이터 필드 문제와 전송 메시지의 바이트 형식이 일반적인 형식과 다르다는 문제점을 가지고 있다.

특히, 철도역사에서 선로 전환기, 궤도 회로, 신호기 및 기타 현장 설비와 단말락은 점대점 방식으로 연결되어 있기 때문에 정비 및 유지 보수 문제, 시스템 성능 향상 및 확장을 어렵게 하고 있다.



열차집중제어장치(CTC : Centralized Traffic Control)
 중앙정보전송장치(CDTS : Central Data Transmission System)
 역정보전송장치(LDTS : Local data Transmission System)
 로컬표시판(LDP : Local Display Panel)
 표시제어부(LCP : Local Control Panel)
 전자연동장치(EIS : Electronic Interlocking System)

그림 2. 한국 철도의 신호 시스템 구조.
 Fig. 2. Architecture of signal system of KNR.

여기서, 단말랙과 선로 전환기와 같은 신호기기를 스위치드 이더넷 네트워크로 대체함으로써 전통적인 점대점 방식의 연결에서 발생하는 문제점을 해결할 수 있다. 또한, 스위치드 이더넷은 산업용 네트워크에 비해 설치가 용이하고 호환성이 뛰어나기 때문에 단말랙과 신호기기를 네트워크로 구성하기 용이하다는 장점을 가지고 있다.

III. 스위치드 이더넷의 철도 신호 시스템 적용

1. 이더넷과 스위치드 이더넷

이더넷은 사무용 네트워크로 널리 사용되고 있으며, 그림 3(a)과 같이 네트워크에 접속된 모든 스테이션들이 하나의 허브를 공유한다. 이더넷은 공유된 하나의 회선만을 이용하여 송수신이 이루어지는 반이중(half duplex) 방식을 사용한다. 반이중 방식은 근원지 스테이션(source station)이 프레임 송신하면 그 프레임이 허브에 연결되어 있는 모든 스테이션으로 송신되는 구조를 가지고 있다. 이 때, 해당 프레임이 수신되기 전에 다른 스테이션들이 송신을 하게 되면, 두 프레임 간의 충돌이 발생한다[8,9].

그러나 스위치드 이더넷은 그림 3(b)과 같이 송신 회선과 수신 회선이 별개로 이루어진 전이중(full duplex) 방식을 사용한다. 따라서, 근원지 스테이션에서 송신된 프레임이 목적지 스테이션(destination station)에 수신되기 전에 다른 스테이션들이 송신을 하더라도 충돌이 발생하지 않는다. 뿐만 아니라,

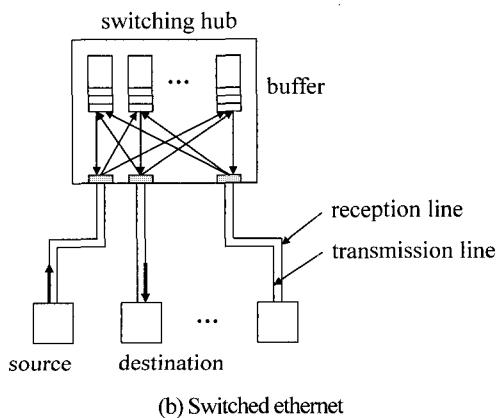
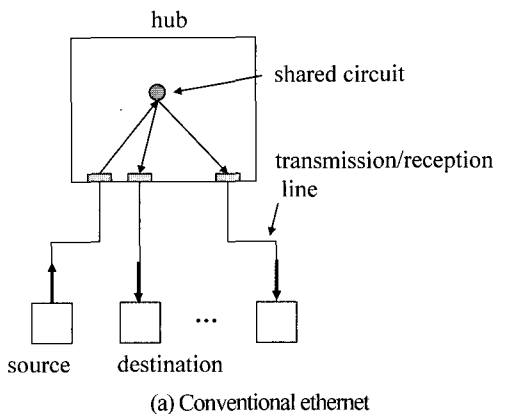


그림 3. 이더넷과 스위치드 이더넷의 전송방식 비교.
Fig. 3. Comparison of transmission methods of ethernet and switched ethernet.

스위치드 이더넷은 스위칭 기술을 사용함으로써 두 개 이상의 스테이션이 하나의 목적지 스테이션으로 프레임을 전송하려고 하는 경우에 발생할 수 있는 스위칭 허브의 충돌이 방지된다. 즉, 스위칭 기술의 대표적인 방식인 축적 및 전송(store and forward) 방식은 스위칭 허브는 근원지 스테이션의 송신 회선으로부터 프레임을 수신하면 해당 목적지 스테이션의 수신 회선이 사용 중인지를 검사한다. 만약, 수신 회선이 사용 중이지 않으면 바로 전송을 하지만 수신 회선이 사용 중이면 해당 스테이션에 연결된 버퍼에 저장한 후 수신 회선의 사용이 끝날 때까지 기다린다. 또한, 스위칭 허브에 동일한 목적지 스테이션을 가진 다수의 프레임이 수신되면 스위칭 허브의 송수신 버퍼에 저장된 후 수신된 순서대로 목적지 스테이션으로 전송한다. 이러한 방법으로 인하여, 스위칭 허브에서 발생하는 충돌을 제거한다[10].

2. 스위치드 이더넷을 적용한 철도 신호 시스템

철도 신호 시스템에서 철도 역사의 단말랙과 신호기기 사이의 구성으로 그림 4와 같은 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷 계층 구조를 제안한다. 그림에서, 각 계층의 센서, 액츄에이터, 스위치, 선로 전환기, 궤도 회로 및 모니터링 PC는 스위치드 이더넷을 서버 네트워크로 사용하고, 상하 계층의 서버 네트워크 간의 데이터 교환을 위하여 스위칭 허브를 사용한다.

여기에서, 제안된 철도 신호 시스템 계층 구조에서 발생하는 최대 전송 지연이 실시간 요구 조건을 만족하는지를 이론적으로 검증할 필요가 있다. 그림에서, 최대 전송 지연은 A 스테이션과 C나 D 스테이션처럼 서로 다른 서버 네트워크에 접속되어 있는 두 노드 사이에서 발생한다.

서로 다른 서버 네트워크에 접속되어 있는 두 노드의 최대 전송 지연을 계산하기 위하여 본 논문에서는 그림 5(a)와 같은 2단 스위칭 허브 구조를 이용하였다. 그림에서, 스위칭 허브 s11에는 n1과 n2 스테이션이 접속되어 있으며 스위칭 허브 s12에는 n3과 n4 스테이션이 접속되어 있다. 또한, s11과 s12는 스위칭 허브 s21에 연결되어 있다. 일반적으로, 최대 전송 지연은 네트워크에 접속된 모든 스테이션이 하나의 스테이션으로 전송할 때 발생한다. 따라서, n1과 n2, n3 스테이션이 n4 스테이션으로 메시지를 전송하는 구조는 그림 5(b)와 같은 펼친 구조(unfold structure)로 변경할 수 있으며, 그림 5(c)와 같은 타이밍 다이어그램을 이용하여 최대 전송 지연을 계산할 수 있다.

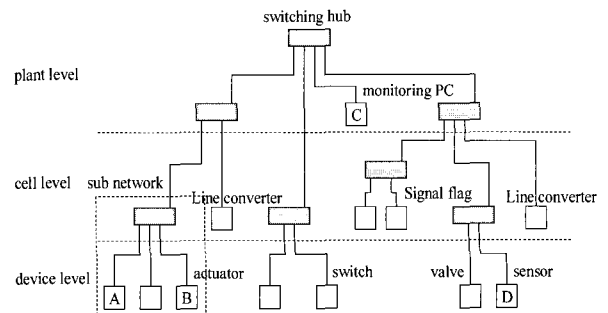
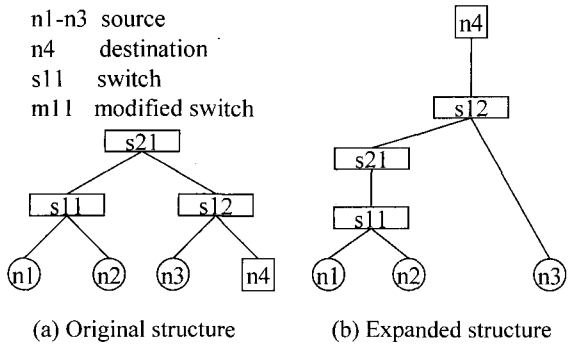
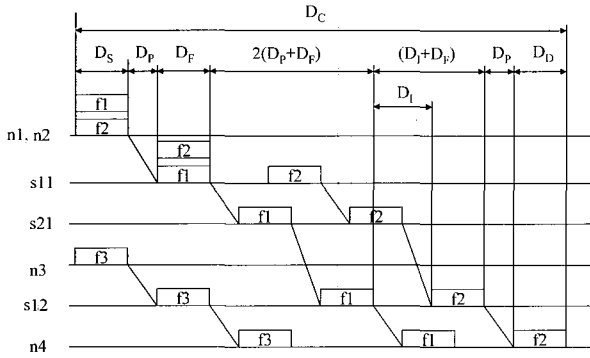


그림 4. 철도 신호 시스템의 계층 구조.
Fig. 4. Layer architecture of railway signal system.



(a) Original structure (b) Expanded structure



(c) Communication delay of expanded structure

그림 5. 다계층 스위칭 허브를 가지는 스위치드 이더넷의 전송 지연 계산 예.

Fig. 5. Example of calculation of communication delay of railway signal system with multiple switching hubs.

먼저, 그림 5(c)에서 n1과 n2, n3에서 메시지가 동시에 생성되면 n1과 n2에서 생성된 메시지 m1과 m2는 s11에 전달되고, n3에서 생성된 메시지 m3은 s12에 전달된다. 다음으로, m1은 s11에서 s21로 전달되고, m2는 스위칭 허브 s12에서 기다리고, m3은 n4로 전달된다. 마지막으로, m1은 s21에서 n4로 전달되고, m2는 인터프레임 시간을 기다린 후 s12로 전달된다. 이러한 방법으로 전송 지연을 계산하면, (1)과 같다.

$$D_C = C_{Cmin} + (N_{Smax} - 1)(D_p + D_f) + (N_{Qmax} - 1)(D_l + D_f) \quad (1)$$

(1)에서, C_{Cmin} 는 송신자와 수신자 사이에 1개의 스위칭 허브가 존재하는 경우에 발생하는 최소한의 전송 지연이다. 다음으로, $(N_{Smax} - 1)(D_p + D_f)$ 는 송신자와 수신자 간에 존재하는 스위칭 허브의 개수에 따라 결정되는 전송 지연이다. 여기에서, N_{Smax} 는 네트워크에서 송신자와 수신자 사이에 거칠 수 있는 최대의 스위칭 허브 개수다. 또한, D_p 는 송신자의 물리 계층에서부터 허브까지, 허브에서 수신자의 물리계층까지 전파되는 데 소요되는 전파 지연을 의미하고, D_f 는 프레임 전송에 소요되는 전송 지연을 의미한다.

마지막으로, $(N_{Qmax} - 1)(D_l + D_f)$ 는 스위칭 허브에 저장되는 메시지의 개수에 의하여 발생하는 전송 지연이다. 여기에서, N_{Qmax} 는 네트워크에 존재하는 스위칭 허브 중에서 동시에 저장될 수 있는 메시지의 최대 개수로서, (송신자의 총 개수 - 1)로 계산한다. 예로, 그림 5(b)와 같은 구조에서, n1과 n4 간

에 3개의 스위칭 허브가 존재하므로, N_{Smax} 는 3이 되고, 스위칭 허브 s12에 2개의 메시지가 동시에 저장되어 N_{Qmax} 는 2가 된다. 또한, D_l 는 하나의 프레임을 전송하고 나서 다음 프레임을 전송하는데 까지 기다려야 하는 시간 지연을 의미한다. 따라서, 그림 5(b)와 같은 구조에서 발생할 수 있는 전송 지연은 다음과 같이 계산된다[11].

$$D_c = C_{Cmin} + 2(D_p + D_f) + (D_l + D_f) = 382.6\mu s \quad (2)$$

일반적으로, 철도 신호 시스템에서 발생하는 실시간 메시지의 생성 주기는 10ms에서 100ms 주기로 생성되며 긴급한 메시지도 10ms 이내에 전송되면 실시간 요구 조건을 만족된다고 알려져 있다. 따라서, (1)을 통해 계산된 약 0.4ms의 전송 지연은 철도 신호 시스템에서 생성되는 실시간 메시지의 실시간 요구 조건을 충분히 만족시킬 수 있음을 알 수 있다.

스위치드 이더넷 기반 철도 신호 시스템에서 발생하는 최대 전송 지연은 (1)과 같이 계층의 크기와 네트워크에 접속되어 있는 스테이션의 수에 따라 결정된다. 따라서, 실시간 요구 조건을 10msec, 교환되는 메시지의 길이는 이더넷에서의 최소 전송 길이인 144비트로 정하고 스위칭 허브의 계층 구조를 그림 4에서 보여준 3단계로 구성한다면 이론적인 스테이션의 수를 계산할 수 있다. 이 때, 가장 최하위 계층에 접속되어 있는 두 개의 스테이션이 거칠 수 있는 스위칭 허브의 개수는 5개가 된다. 따라서, 주어진 실시간 요구 조건을 만족할 수 있는 이론적인 스테이션 수는 (3)과 같이 143개로 계산된다. 일반적으로, 산업용 네트워크인 Profibus의 경우 하나의 서브 네트워크에 접속될 수 있는 스테이션의 수가 127개라는 사실과 비교할 때, 143개는 작은 스테이션의 개수는 아님을 알 수 있다[11].

$$D_C = C_{Cmin} + (N_{Smax} - 1)(D_p + D_f) + (N_{Qmax} - 1)(D_l + D_f) \\ 10,000 = 200 + [(5 - 1)(1 + 576) + (N_{Qmax} - 1)(96 - 576)] \times 0.1 \\ N_{Qmax} \approx 143.4 \quad (3)$$

결론적으로, 실시간 요구 조건이 만족되도록 적절한 스테이션 수가 결정된다면 스위치드 이더넷이 철도 신호 시스템에서 요구되는 실시간 요구 조건을 충분히 만족시킬 수 있음을 알 수 있다.

IV. 스위치드 이더넷 기반 고장 허용 구조 및 성능 평가

1. 스위치드 이더넷을 위한 고장 허용 구조

본 절에서는 스위치드 이더넷을 적용한 철도 신호 시스템에서 고장에 능동적으로 대처할 수 있는 그림 6과 같은 고장 허용 구조를 제안한다. 그림에서, 고장 허용 구조는 철도 신호 시스템에서 단말택으로 사용될 수 있는 마스터(master) 스테이션과 선로 전환기나 신호기기로 사용될 수 있는 다수의 슬레이브(slave) 스테이션, 마스터 스테이션과 슬레이브 스테이션의 통신을 연결하는 상호 연결된 두 개의 스위칭 허브 (switching hub)으로 구성되어 있다.

우선, 각 스테이션은 동일한 기능을 가지는 네 개의 네트워크 인터페이스 카드(Network Interface Card, NIC)를 가지며

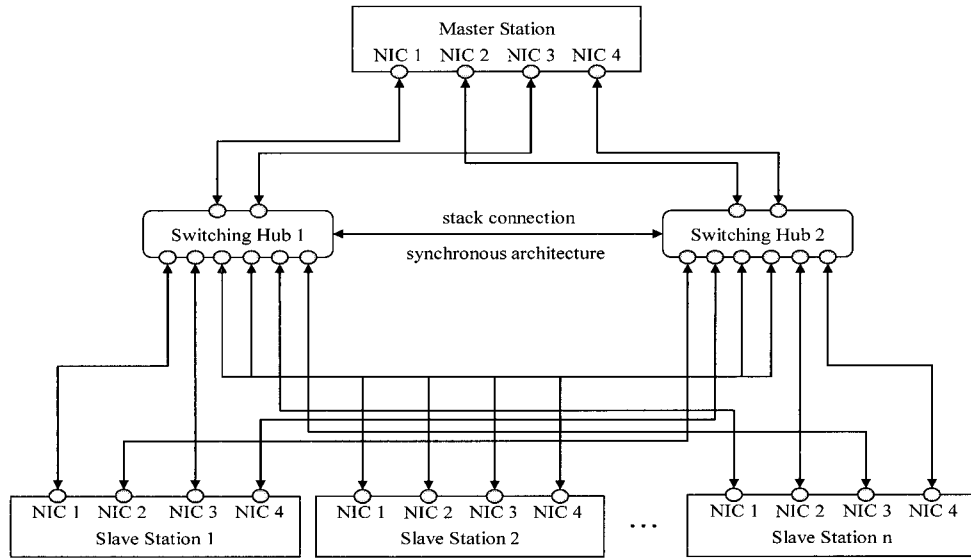


그림 6. 철도 신호 시스템의 스위치드 이더넷을 위한 고장 허용 구조.
 Fig. 6. Fault tolerant architecture for switched Ethernet in railway signal system.

동일한 메시지를 네 개의 NIC를 통해서 각각의 스위칭 허브를 통해 메시지를 송수신한다. 예로, 슬레이브 스테이션 1에서 1번과 3번 NIC는 스위칭 허브 1을 통해 동일한 메시지를 송수신하고 2번과 4번 NIC는 스위칭 허브 2를 통해 동일한 메시지를 송수신한다. 이러한 이유는, 네 개의 NIC에서 동일한 메시지를 송수신함으로써, NIC의 중복 구조를 구성할 뿐만 아니라, 통신 버스과 스위칭 허브의 중복 구조를 구성할 수 있기 때문이다. 또한, 네 개의 NIC 구조는 고장 난 값을 포함한 메시지가 수신될 때 각각의 NIC에서 수신되는 메시지를 비교하여 고장 난 값을 제거할 수 있는 기능을 제공하며, 정상적인 값의 메시지를 수신할 수 있게 한다. 즉, 수신된 네 개의 메시지 중에서 한 개의 메시지 값이 틀리면 수신 스테이션은 틀린 메시지 값을 고장 난 메시지로 판단하여 그 메시지를 제외한 나머지 메시지를 이용하여 최종 결과값을 출력한다. 특히, 산업 현장에서 사용하는 산업용 PC 전용 NIC 카드가 제조되고 있으며, 32bit 전용의 PCI (Peripheral Component Interconnect) 슬롯을 지원하는 제품을 판매하고 있어 중복 NIC 구조를 간단하게 구축할 수 있다.

다음으로, 중복 버스 구조는 통신 버스의 고장을 허용하는 기능을 담당한다. 여기서, 각각의 스테이션은 네 개의 NIC에서 중복 버스를 통해 동일한 메시지를 두 개의 스위칭 허브로 송수신한다. 즉, 슬레이브 스테이션 1의 1번 NIC와 3번 NIC가 중복된 버스를 통해 스위칭 허브 1로 송수신하기 때문에 1번이나 3번 버스 라인 중 하나에 고장이 발생하여도 메시지는 정상적으로 송수신될 수 있다. 특히, 본 논문에서 제안한 중복 버스 구조는 중복 NIC 구조를 네 개로 가짐에 따라 얻을 수 있는 기능이기 때문에 중복 버스 구조를 구축하는데 추가적인 비용이나 장비가 필요하지 않다는 장점을 가지고 있다.

마지막으로, 두 개의 스위칭 허브 구조는 마스터 스테이션과 슬레이브 스테이션 사이의 통신을 중계하는 스위칭 허브의 고장을 허용하는 기능을 담당한다. 각각의 스테이션은 두

개의 스위칭 허브를 통해 동일한 메시지를 중복으로 송수신한다. 즉, 슬레이브 스테이션 1의 1번 NIC와 2번 NIC는 각각 스위칭 허브 1과 2를 통해 다른 스테이션과 송수신한다. 따라서, 스위칭 허브 1이나 2 중에서 하나에 고장이 발생하여도 스테이션에서 송신한 메시지는 정상적으로 수신될 수 있다.

결론적으로, 본 논문에서 제안한 NIC, 버스과 스위칭 허브의 중복 구조는 각각의 요소에서 발생하는 고장을 허용할 수 있다. 특히, 안전과 밀접한 관련이 있는 철도 신호 시스템에 제안한 고장 허용 구조를 적용한다면 철도 신호 시스템에 구성하는 요소에서 발생할 수 있는 고장을 적극적으로 허용할 수 있다. 또한, 쉽게 구현이 가능한 일반 제품을 통해 중복 구조를 구현할 수 있어 비용적인 측면과 구현적인 측면에서 이점을 가질 수 있다.

2. 스위치드 이더넷 기반 고장 허용 구조의 성능 평가

본 논문에서 제안한 스위치드 이더넷 기반 철도 신호 시스템의 고장 허용 구조 성능을 평가하기 위하여, 스위치드 이더넷 기반의 실험 모델을 구성하였다. 실험 모델에서, 하나의 마스터 스테이션과 세 개의 슬레이브 스테이션은 일반 PC를 사용하였고, NIC는 4개의 독립형 트랜시버 제어기(transceiver controller)를 지원하는 독일 Beckhoff사의 FC 9004를 사용하였다. 스위칭 허브는 축적 및 전송 방식으로 최대 16 포트까지 지원하는 3com사의 3C16470 Super Stack@3을 사용하였다.

실험은 슬레이브 스테이션의 각각의 NIC에서 1ms 간격으로 5,000개의 메시지를 전송하는 방법으로 수행하였다. 첫 번째 메시지는 1값을 전송하고 하나씩 증가하여 5,000번째 메시지는 5,000값을 전송하도록 하였다. 또한, 고장 허용 성능을 평가하기 위하여 처리율을 계산하였다. 처리율은 생성된 메시지와 송신에 성공한 메시지의 비로 정의하고, 1,000개의 메시지가 송신되는 1초 간격으로 계산하였다. 단, 마스터 스테이션에서 처리율은 생성된 메시지와 수신에 성공한 메시지의 비로 정의하였다. 마지막으로, 실험은 NIC, 통신 버스과 스위칭 허브에 순서대로 고장을 발생시킨 후 각각의 고장 허

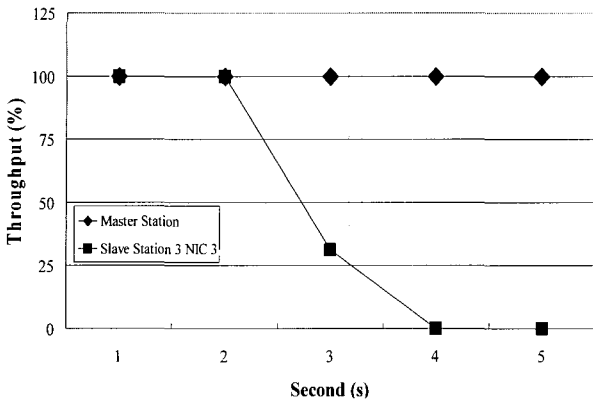


그림 7. NIC 고장에 대한 고장 허용 성능 평가 결과.
Fig. 7. Result of performance evaluation of fault tolerant with NIC fault.

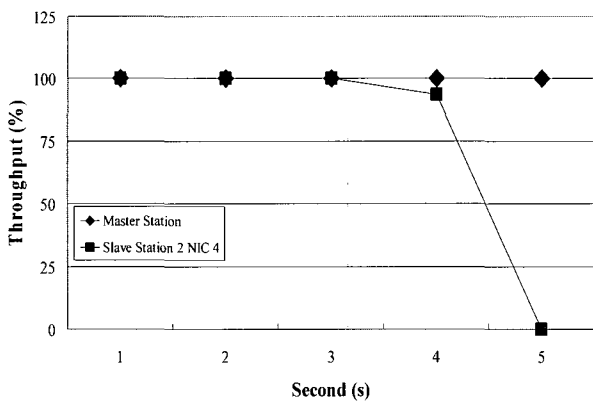


그림 8. 버스 고장에 대한 고장 허용 성능 평가 결과.
Fig. 8. Result of performance evaluation of fault tolerant with bus fault.

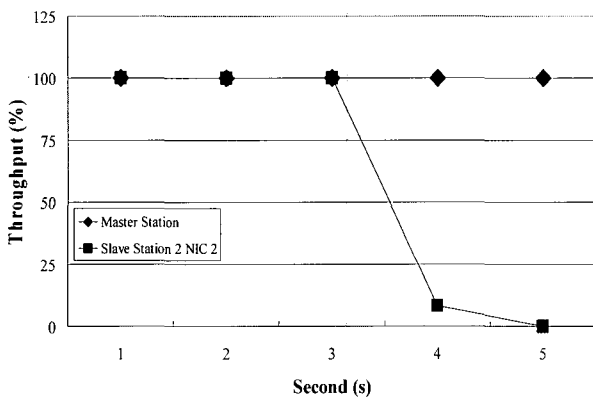


그림 9. 스위칭 허브 고장에 대한 고장 허용 성능 평가 결과.
Fig. 9. Result of performance evaluation of fault tolerant with switching hub fault.

용 성능을 평가하였다[12].

그림 7은 NIC의 고장 허용 성능을 평가하기 위하여 임의의 시점에서 슬레이브 스테이션 3의 세 번째 NIC를 강제로 종료한 경우의 처리율 결과를 나타내고 있다. 그림에서, 슬레이브 스테이션 3의 세 번째 NIC는 대략 2,312번째 메시지가 송신되는 순간에 강제로 종료가 되었으며, 처리율이 31.2%가

지 낮아짐을 확인하였다. 이후, 슬레이브 스테이션 3의 세 번째 NIC는 정상적으로 메시지를 송신하지 못하여 처리율이 0%로 유지됨을 확인하였다. 하지만, 슬레이브 스테이션 3의 세 번째 NIC를 제외한 나머지 NIC는 정상적으로 메시지를 송신하였기 때문에, 마스터 스테이션의 처리율은 5,000번째 메시지가 수신될 때까지 100%로 유지됨을 확인하였다. 즉, 본 논문에서 제안한 중복 구조는 NIC에 고장이 발생하여도 다른 NIC에서 송신되는 메시지를 통해 정상적인 NIC 기능을 수행할 수 있음을 확인하였다.

그림 8은 통신 버스의 고장 허용 성능을 평가하기 위하여 임의의 시점에서 슬레이브 스테이션 2의 네 번째 NIC와 연결되어 있는 버스를 절단한 경우의 처리율 결과를 나타내고 있다. 그림에서, 슬레이브 스테이션 2의 네 번째 버스는 대략 3,936번째 메시지가 송신되는 순간에 절단되었으며, 100%의 처리율을 가지고 있던 네 번째 NIC는 4초에서 93.6%로 낮아짐을 확인하였다. 이후, 슬레이브 스테이션 2의 네 번째 버스는 정상적으로 메시지를 송신하지 못하여 처리율이 0%로 낮아짐을 확인하였다. 하지만, 슬레이브 스테이션 2의 네 번째 버스를 제외한 나머지 버스는 정상적으로 메시지를 송신하였기 때문에 마스터 스테이션의 처리율은 계속해서 100%를 유지하였다. 역시, 제안한 중복 구조는 버스에 고장이 발생하여도 정상적인 기능을 수행할 수 있는 구조임을 확인하였다.

마지막으로, 그림 9는 스위칭 허브의 고장 허용 성능을 평가하기 위하여 임의의 시점에서 스위칭 허브 2의 전원을 강제로 종료시킨 경우의 처리율 결과를 나타내고 있다. 그림에서, 스위칭 허브 2는 대략 3,084번째 메시지 송신되는 순간에 강제로 종료되었으며 3초 이후 처리율이 8.4%까지 낮아짐을 확인하였다. 이후, 스위칭 허브 2는 수신되는 메시지를 정상적으로 송신하지 못하여 처리율이 0%로 낮아짐을 확인하였다. 하지만, 스위칭 허브 1은 정상적으로 마스터 스테이션에 메시지를 송신하였기 때문에 마스터 스테이션의 처리율은 계속해서 100%를 유지하였다.

이상의 실험 결과를 통하여, 본 논문에서 제안한 스위치드 이더넷 기반 고장 허용 구조는 고장이 발생하여도 고장을 허용하여 정상적인 기능을 수행할 수 있음을 확인하였다. 또한, 스위치드 이더넷 기반 철도 신호 시스템을 제안한 중복 구조로 설계한다면, 철도 신호 시스템의 고장에 대한 높은 신뢰성을 가질 수 있을 것이다.

V. 결론

본 논문은 스위치드 이더넷을 기반으로 철도 신호 시스템 구조를 제안하였으며, 최대 전송 지연을 이론적으로 계산하여 적용 가능성을 확인하였다. 또한, 스위치드 이더넷 기반 철도 신호 시스템의 고장 허용을 위한 중복 구조를 제안하였으며, 그 성능을 실험적으로 평가하였다. 본 논문은 성능 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 스위치드 이더넷의 타이밍 선도를 이용한 이론적인 최대 전송 지연을 계산한 결과, 스위치드 이더넷은 철도 신호 시스템에서 요구하는 실시간 조건을 충분히 만족함을 확인하였다. 특히, 철도 신호 시스템에서 요구되는 스테이션의 수와 실시간 요구 조건을 적절히 조정한다면, 보다 우수한 성능을 가질 수 있음을 확인하였다.

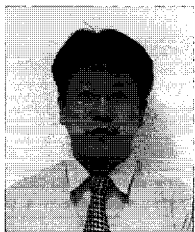
둘째, 스위치드 이더넷 기반 철도 신호 시스템의 고장 허용을 위한 중복 구조는 실험을 통하여 시스템에서 발생될 수 있는 고장을 허용할 수 있음을 확인하였다. 특히, 제안한 중복 구조는 기존에 판매되는 제품을 이용하여 쉽게 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그러나, 본 논문에서 제안한 스위치드 이더넷 기반 철도 신호 시스템의 중복 구조는 실제 신호 기기를 이용하여 성능을 평가하지 못하였다. 따라서, 철도 신호 기기로 구현된 실험 모델에서 고장이 발생할 경우에 고장 허용 성능의 검증이 필요하다. 그리고, 열악한 철도 신호 시스템 환경에서의 발생될 수 있는 다양한 고장 유형에 대한 연구가 필요하다. 또한, 산업용 네트워크에서 고장에 안전한 네트워크에 대한 표준규격인 IEC61784-3에서 정의된 고장 유형을 만족시킬 수 있는 중복 구조에 대한 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

[1] K. C. Lee and S. Lee, "Performance evaluation of switched Ethernet for real-time industrial communications," *Computer Standard & Interface*, vol. 24, no. 5, pp. 411-423, 2002.
 [2] G Kaplan, "Ethernet's winning ways," *IEEE spectrum*, vol. 38, no. 1, pp. 113-115, 2001.
 [3] 황종규, 이재호, 윤용기, 신덕호, "철도신호설비 상호간 정보전송을 위한 통신 프로토콜 검증시험," 한국철도학회논문집, 제7권, 제2호, pp. 114-119, 2003.
 [4] 황종규, 이재호, "전자연동장치와 역 정보전송장치간 인터페이스를 위한 데이터링크 프로토콜 성능해석," 한국

철도학회논문집, 제6권, 제2호, pp. 135-141, 2003.
 [5] 황종규, 이종우, 오석문, 김영훈, "자동열차제어장치의 Fault-tolerant 설계안," 1999년도 춘계학술대회논문집, pp. 299-306, 1999.
 [6] 백연구, 박영수, 이재훈, 이기서, "FTA/ETA 기법을 이용한 철도신호시스템의 위험 분석 및 위험성 평가에 관한 연구," 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 473-480, 2002.
 [7] 황종규, 박진용, 박귀태, "철도 신호시스템을 위한 새로운 통신 프로토콜의 성능해석 및 검증," 대한전기학회 논문집, 제56권, 제6호, pp. 380-387, 2004.
 [8] "Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications," *IEEE Standard 802. 3*, 2000.
 [9] W. Stalling, *Local and Metropolitan Area Networks*, 6th Ed. Macmillan Publishing Company, 2000.
 [10] B. Y. Choi, S. Song, N. Birch and J. Huang, "Probabilistic approach to switched Ethernet for real-time control applications," *Proc. of Seventh International Conference on Real-Time Computing Systems and Applications*, pp. 384-388, 2000.
 [11] 이경창, 이 석, "다계층 구조를 가진 산업용 스위치드 이더넷에서의 실시간 전송 특성," 제어·자동화·시스템공학회 논문집, 제 10권, 제 8호, pp. 718-725, 2004.
 [12] 박지훈, 박종규, 한일석, 김학배, "서버 독립적 LAN 이중화 모듈을 통한 네트워크의 속도 및 가용성 향상 방안," 제어·자동화·시스템공학회 논문집, 제8권, 제3호, pp. 264-269, 2002.



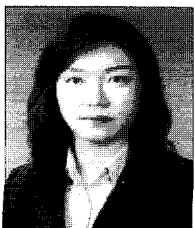
황종규

1994년 건국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 석사. 2005년 한양대학교 전자통신전파공학과 박사. 1995년~현재 한국철도기술연구원 열차제어연구팀 선임 연구원. 관심분야는 철도 신호 통신 기술, 컴퓨터 통신 및 네트워크 기술, 열차 제어 안전성 기술.



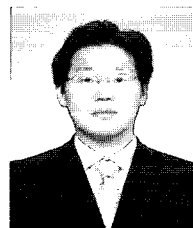
이재호

1987년 광운대학교 전자공학과 졸업. 1989년 동 대학원 석사. 2005년 고려대학교 메카트로닉스학과 박사. 1995년~현재 한국철도기술연구원 열차제어연구팀 책임 연구원. 관심분야는 철도 신호 통신 기술, 고속 철도 신호 안전성 기술.



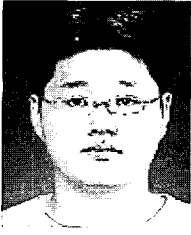
조현정

2003년 한국항공대학교 항공전자공학과 졸업. 2005년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과 석사. 2005년~현재 한국철도기술연구원 열차제어연구팀 연구원. 관심분야는 철도 신호 통신 기술, 열차제어 안전성 기술.



김만호

2001년 동아대학교 기계공학부 졸업. 2002년~현재 부산대학교 지능기계공학과 석박사 통합 과정 재학중. 2006년~현재 기계공학연구정보센터 전임연구원. 관심분야는 차량용 네트워크, 임베디드 시스템, 고장 허용을 위한 중복 구조.



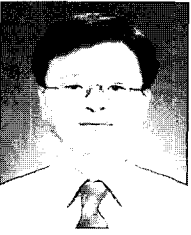
박지훈

2004년 부산대학교 기계공학부 졸업.
2004년~현재 지능기계공학과 석박사 통합과정 재학중. 관심분야는 산업용 네트워크, 산업용 무선 네트워크, 홈 네트워크.



이석

1984년 서울대학교 기계공학과 졸업.
1985년 펜실바니아 주립대학교 석사.
1990년 동 대학원 박사. 1990년~1993년 신시내티 대학교 기계공학과 조교수.
1993년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 필드버스, 차량용 네트워크, 홈 네트워크.



이경창

1971년 5월 1일생. 1996년 부산대학교 생산기계공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사. 2003년 동 대학원 박사. 1998년~2003년 기계공학연구정보센터 전임연구원. 2003년~2005년 울산대학교 네트워크기반 자동화 연구센터 전임연구원.

2005년~현재 부경대학교 제어자동화공학과 전임강사. 관심분야는 필드버스, 산업용 이더넷, 차량용 네트워크, 홈 네트워크.