

# Train Ethernet Backbone(TEB) 구성에 따른 신뢰도 분석

## Reliability Analysis of Train Ethernet Backbone

김준교\* · 박재현† · 오용국\*\* · 황현철\*\*\*

(Joonkyo Kim · Jaehyun Park · Yongkuk Oh · Hyeoncheon Hwang)

**Abstract** - As the usage of the electric power train increases, the importance of the control network between the electric control devices grows. IEC proposed a revision of IEC-61375, a standard of the networking among electric devices within a train, to adopt Ethernet as a backbone of train network. This paper performed the reliability analysis of three configurations of Ethernet-based networking within a electric power train that are recommended in IEC-61375 standard. The analysis results show that MTTF(mean time to failure) of the redundant configuration is 20,086 hours, which is a about 3 times longer than the linear configuration.

**Key Words** : Train ethernet backbone, Train Communication Network(TCN), Reliability, IEC-61375

### 1. 서 론

전동열차는 정시성, 안전성 등의 특징으로 인하여 대량 운송 수단의 중요한 역할을 담당하고 있으며, 최근에는 고속 전철, 도시철도, 경전철 등의 다양한 형태로 사용 범위가 계속 확대되는 추세이다. 특히 근래에 개발되는 모든 종류의 전동열차의 제어시스템은 과거의 공압 혹은 유압과 같은 기계적인 제어시스템에서 탈피하여 컴퓨터 기반의 고도의 전자 제어시스템으로 구현되고 있다. 이에 국제 표준화 기구인 IEC (International Electrotechnical Commission)에서는 전동차의 제어 특성을 고려하여 전동차용 통신 프로토콜인 Train Communication Network(TCN)을 IEC-61375 국제표준으로 제정하였다[1,2].

TCN 표준은 분산된 제어기간 빠르고 정확한 데이터 교환과 플러그인 장비들간 상호운용성 및 유연성을 기본적인 목적으로 두고 있는데, IEC-61375 표준의 초기 모델은 Wired Train Bus(WTB)와 Multi-function Vehicle Bus(MVB)로 구성된 두 가지의 통신 프로토콜을 근간으로 하고 있다. 그러나 최근의 고속전철을 포함한 전동열차에는 실시간 TV와 같은 멀티미디어 및 고속 인터넷을 지원하는 여객 편이 설비가 계속 확대됨에 따라, 기존 TCN에 정의된 제어목적의 네트워크 뿐 아니라, 다양한 응용 범위를 가지는 고속의 네트워크의 필요성이 증대되고 있다. IEC에서는 이를 반영하기 위해서 IEC-61375 표준을 개편하여 이더넷(Ethernet) 기반의 단일 네트워크를 활용하여 제어 신호 및

범용 데이터를 동시에 전송하려는 노력을 진행하고 있다 [2,3,4].

새로 제안된 표준은 이더넷 기반의 단일 네트워크에 실시간 제어 신호와 비실시간 범용 데이터를 동시에 전송하는 방법으로 초기에는 Ethernet/IP, EtherCAT, FIP 등 다양한 종류의 실시간 이더넷이 검토되었으나, 최종적으로는 Token Passing 기반의 Time Division Multiple Access(TDMA) 방식의 실시간 프로토콜을 기반으로 표준을 확립 중에 있다. 표준에 따르면, 네트워크의 구성을 직선구조(Linear), 링구조(Ring), 사다리구조(Ladder) 등으로 구성토록 하고 있으나, 각 구조에 따라 내고장성과 신뢰도가 확연히 차이가 날 수밖에 없다. 따라서 신뢰성 있는 네트워크의 구현을 위해서는 네트워크 구성에 따른 신뢰성을 자세히 분석하는 것이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 IEC에서 새로 제안한 이더넷 기반의 제어네트워크인 Train Ethernet-based Backbone(TEB)의 구성에 따른 결합 분석과 이에 따른 신뢰도를 해석적 방법으로 산출하였다.

### 2. 네트워크 오류 분석

#### 2.1 전동차용 네트워크 구성

전동차는 물리적으로 일직선 형태를 취하므로, 네트워크 구성은 직선의 형태를 취할 수밖에 없다. 각 객차는 Backbone 통신망으로 연결되고, 객차 내부에는 백본과 단위 제어기기를 연결하는 네트워크 노드(Consist switch)가 위치하게 되는데, 각 객차간의 통신을 담당하는 네트워크노드를 중심으로 네트워크의 구성을 살펴보면 그림 1과 같다. 그림 1(a), (b), (c)는 각각 선형구조(Linear), 링구조(Ring), 사다리구조(Ladder)를 나타내고 있다. 선형구조의 경우 네트워크 연결선(링크) 혹은 네트워크 노드에 고장이 발생하는 경우, 네트워크가 단절되므로 고장에 취약한 구성이며, 링구조의 경우 링크에서의 단일 고장에 대해서는 내고장성을 가지나, 두 개 이상의 오류에는 역시 취약성을 가지는 구

\* School of Information and Communication, Inha University, Korea

† Corresponding Author : School of Information and Communication, Inha University, Korea

E-mail : jhyun@inha.ac.kr

\*\* Korea Railroad Research Institute, Korea

\*\*\* Korea Railroad Research Institute, Korea

Received : January 3, 2013; Accepted : February 22, 2013

조이다. 사다리구조의 경우 단일 고장뿐 아니라, 복수 개의 고장에도 강인한 내고장성을 가지고 있다. 특히 열차 네트워크의 구성을 고려하면 사다리구조와 같이 이중구조의 배선을 연결하는 것이 어려운 일이 아니므로 고속전철과 고신뢰성이 요구되는 열차의 경우 내고장성 보장을 위하여 사다리구조의 네트워크 구성이 표준 구성으로 사용된다.

### 2.2 내고장성 네트워크 구성의 고장모드

IEC-61375에서 제시하고 있는 사다리구성은 그림 1(c)와 같다. 네트워크상의 고장은 네트워크노드 자체의 고장과, 네트워크노드를 연결하는 케이블(혹은 링크), 이들 두 가지에서 발생할 수 있는데, 링크의 고장인 경우 해당 링크만 영향을 받지만, 네트워크노드에 고장이 있는 경우 해당 네트워크노드 뿐 아니라 직접 연결된 모든 링크의 데이터 통신이 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 고장의 위치에 따른 영향이 상이하며 이를 고려한 신뢰도 분석이 필요하다. 또한 두 개 이상의 링크, 혹은 네트워크 노드가 고장이 나더라도 다양한 조합의 대체 경로를 통하여 전체 네트워크에 미치는 영향을 제거할 수 있다.

## 3. 네트워크 신뢰도 분석

### 3.1 선형구성의 네트워크 신뢰도

네트워크 구성이 그림 1(a)와 같이 선형으로 구성되어 있는 경우 링크와 노드 중 하나라도 고장이 발생하는 경우 전체 시스템에 영향을 미친다. 링크와 노드의 고장률을 각각  $\lambda_l$ 과  $\lambda_n$ 로 표시하고 모든 고장은 상호 독립적이며 지수분포를 따른다는 가정 하에 링크의 신뢰도 및 노드의 신뢰도는 식 (1)과 (2)를 따른다.

$$R_l(t) = e^{-\lambda_l t} \tag{1}$$

$$R_n(t) = e^{-\lambda_n t} \tag{2}$$

열차구성이 N량 편성인 경우 N개의 노드와 N-1개의 링크로 구성되므로 전체 시스템의 신뢰도는 식 (3)과 같다.

$$R_L(t) = \prod_{k=1}^N R_n(t) \cdot \prod_{k=1}^{N-1} R_l(t) \tag{3}$$

$$= e^{-N\lambda_n t} e^{-(N-1)\lambda_l t} = e^{-(N\lambda_n + (N-1)\lambda_l)t}$$

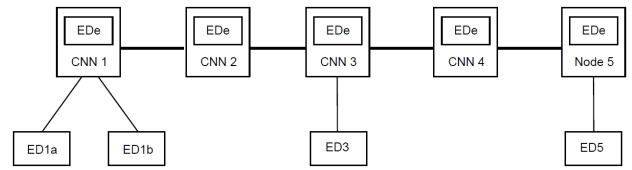
### 3.2 링구성 네트워크 신뢰도

네트워크 구성이 그림 1(b)와 같이 링형으로 구성되어 있는 경우 노드 고장에 대한 내고장성은 존재하지 않으나 한 개의 링크 고장에 우회 링크를 통하여 시스템의 동작이 유지되므로 N량 편성 시스템의 신뢰도는 식 (4)와 같다.

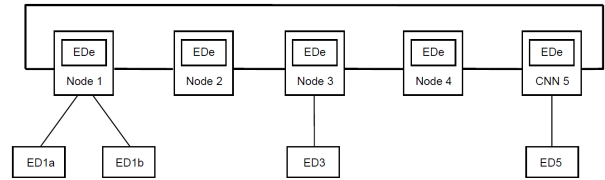
$$R_R(t) = \prod_{k=1}^N R_n(t) \cdot \sum_{i=1}^N \binom{N}{i} R_l(t)^i (1-R_l(t))^{N-i} \tag{4}$$

$$= e^{-N\lambda_n t} [N e^{-(N-1)\lambda_l t} (1-e^{-\lambda_l t}) + e^{-N\lambda_l t}]$$

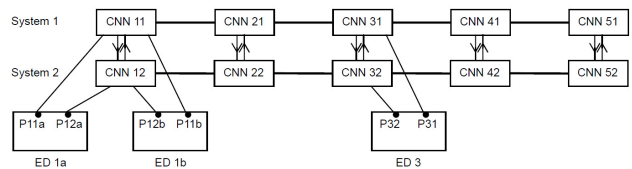
$$= N e^{-(N\lambda_n + (N-1)\lambda_l)t} (1-e^{-\lambda_l t}) + e^{-N(\lambda_n + \lambda_l)t}$$



(a) 선형구조(Linear topology)



(b) 링구조(Ring topology)



(c) 사다리구조(Ladder topology)

그림 1 네트워크 노드 구성

Fig. 1 Network configuration

### 3.3 사다리구성 네트워크 신뢰도

#### (1) 객차간 링크에 고장 발생

객차간 링크에 고장이 발생하는 경우 이중화된 우회 경로가 있으므로 두 개의 링크가 동시에 고장이 난 경우만 시스템 동작이 정지된다. 따라서 이 경우 하나의 객차에 대한 신뢰도는 식 (5)과 같으며, 총 N개의 객차로 이루어진 전체 열차 시스템에 대한 신뢰도는 식 (2)와 같다.

$$R_{l2}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_l t})^2 = 2e^{-\lambda_l t} - e^{-2\lambda_l t} \tag{5}$$

#### (2) 네트워크 노드에 고장 발생

네트워크 노드에 고장이 발생하는 경우 관련된 3개의 링크가 동시에 동작을 하지 못하므로, 동일 객차의 이중화된 네트워크 노드와 이를 연결하는 링크에 오류가 발생하는 경우 시스템의 동작이 정지하게 된다. 따라서 이 경우 시스템의 신뢰도는 식 (6)과 같다.

$$R_{n2}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_l t})(1 - e^{-\lambda_l t} + 3(1 - e^{-\lambda_l t})) \tag{6}$$

$$= 5e^{-\lambda_l t} + 3e^{-\lambda_l t} - e^{-2\lambda_l t} - 3e^{-(\lambda_n + \lambda_l)t} - 3$$

이를 토대로 N량 편성 시스템의 신뢰도를 구하면 N량 편성의 경우 N쌍의 네트워크노드와 N-1쌍의 링크로 구성되어 있고, 이들이 모두 직렬로 연결되어 있으므로 전체 시스템의 신뢰도는 식(7)와 같다.

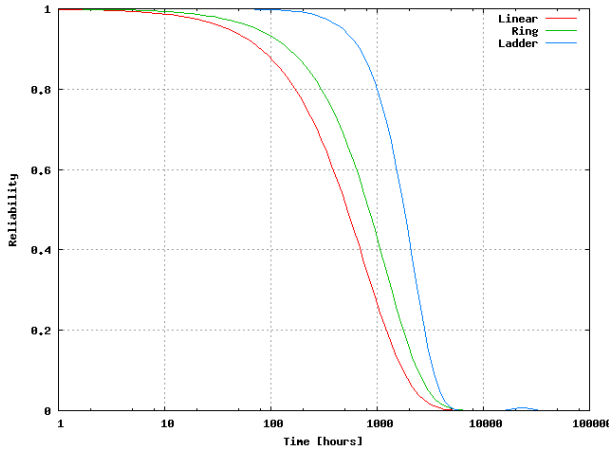


그림 2 신뢰도 곡선  
Fig. 2 Reliability curve

$$R_D(t) = \prod_{k=1}^N R_{e2}(t) \cdot \prod_{k=1}^{N-1} R_{l2}(t) \quad (7)$$

$$= (5e^{-\lambda_c t} + 3e^{-\lambda_c t} - e^{-2\lambda_c t} - 3e^{-(\lambda_c + \lambda_l)t} - 3)^N \cdot (2e^{-\lambda_c t} - e^{-2\lambda_l t})^{N-1}$$

위에서 산출된 최종 신뢰도 함수를 바탕으로 신뢰도 곡선을 구하면 그림 2과 같다. 신뢰도 곡선을 구하기 위하여 사용한 고장율은 MIL-HDBK-217F 핸드북을 참고하여 구하였다[5]. 그림 2에서 보는 것처럼, 링구조의 네트워크 구성에 비하여 사다리형 네트워크 구성이 신뢰도를 비약적으로 향상시킴을 알 수 있다. 또한 세 가지 구성에 대한 MTTF를 구해보면 각각 7,587시간, 11,031시간, 20,086 시간으로 계산되어 사다리 구성이 단일 구성에 비하여 약 3배의 MTTF를 가짐을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문은 전동차량용 네트워크 표준인 IEC-61375 네트워크의 구성에 따른 신뢰도를 예측하였다. IEC-61375에 제안된 선형, 링형, 사다리형의 세 가지 구성에 따른 신뢰도를 분석하였으며, 특히 고속전철과 같이 고신뢰성이 요구되는 환경에 적합한 사다리형의 경우 고장 발생 유형에 따른 분석을 별도로 수행하여 전체 시스템의 고장율을 예측하였다. 예측된 고장율을 기반으로 사다리형의 MTTF는 20,086시간으로 선형구조의 7,587시간에 비하여 약 3배 이상의 신뢰성을 보일 것으로 예측된다. 다만, 이들 예측은 일반적인 이더넷카드의 구현을 가정된 것으로, 고속전철 전용의 신뢰도가 높은 네트워크 카드를 구현할 경우, 신뢰성은 더욱 증가할 것으로 예상된다.

### References

[1] H. Kirrmann and P. A. Zuber, "IEC/IEEE Train Communication Network", 1996.  
[2] IEC 61375-1 Standard, Train Communication Network:

Part (1) General Architecture (2) Real-time Protocol (3) Multifunction Vehicle Bus (4) Wire Train Bus (5) Train Network Management (6) Train Communication Conformance Testing, 1999.

[3] Manfred Schmitz, "Ethernet as a Train Bus," MEM Mikro Elektronik GmbH, <http://www.mem.de>, Feb. 2010.  
[4] Keiichi Kamata, Hideyuki Takahashi, "T-Ethernet: The next international standard candidate for train communication network," Toshiba Corporation, <http://www.uic.org>, 2008.  
[5] MIL-HDBK-217F, "Reliability, prediction of electronic equipment," Department of Defence, USA, 1995

## 저 자 소 개



### 김 준 교 (金 俊 敎)

2010년 인하대학교 정보통신공학부 학사, 2012년 동 대학원 석사, 2012~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 임베디드소프트웨어, 운영체제



### 박 재 현 (朴 宰 賢)

1986년 서울대학교 제어계측공학과 학사, 1988년 동 대학원 석사, 1994년 동 대학원 박사, 1995년~현재 인하대학교 정보통신공학부 교수, 관심분야는 임베디드시스템, 고신뢰성 컴퓨터시스템



### 오 용 국 (吳 龍 國)

2005년 한양대학교 전기전자컴퓨터공학부 학사, 2007년 동 대학원 석사, 2010년~ 현재 한국철도기술연구원, 주임연구원, 관심분야는 차량추진 제어시스템



### 황 현 철 (黃 鉉 喆)

1997년 인하대학교 전자공학과 학사, 1999년 동 대학원 석사, 2006년 동 대학원 박사, 2006년 ~ 현재 한국철도기술연구원, 선임연구원, 관심분야는 철도신호통신시스템