

# CTC와 SCADA간 정보전송 프로토콜에 대한 프레임 에러율 분석

## Analysis for Frame Error Rate of a Data Transmission Protocol between CTC and SCADA

강문호<sup>1</sup> · 이재호<sup>2</sup> · 황종규<sup>2</sup> · 박영수<sup>3</sup>

Moon-Ho Kang · Jae-Ho Lee · Jong-Gyu Hwang · Young-Soo Park

### Abstract

This paper addresses an analysis for a railway data transmission protocol - Ethernet based data transmission between the CTC(Centralized Traffic Control System) and the SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) system. Frame error rates of the data transmissions are calculated and compared for the two cases that the CTC/SCADA has an extra data transmission error control(CRC16) besides the inherent error control of the Ethernet(CRC32), and that the CTC/SCADA has no extra data transmission error control. With simulation results it has been verified that the extra data transmission error control(CRC16) contributes to lowering the frame error rate.

**Keywords** : Railway Data Transmission(철도정보전송), Ethernet(이더넷), CTC(열차집중제어장치), SCADA(전철전력원 격감시제어장치), Frame Error Rate(프레임에러율)

### 1. 서론

컴퓨터를 통한 시뮬레이션은 통신 시스템의 구성, 통신 방식 및 성능 등 제반 요소들에 대해 객관적인 검증 방식을 제공하는 한편, 향후 제안되어지는 방식들에 대한 비교 분석을 행하고 나아가 표준방식을 제공하는 효율적인 틀이 될 수 있다. 현재 철도 통신장치들에 있어서도 다양한 정보의 수집과 전송을 위해서 통신기간의 정보전송 네트워크화가 요구됨에 따라, 네트워크 기반 정보전송 장치들에 대해 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 적용하여 성능 분석을 행하기 위한 연구가 진행되고 있다. 철도용 통신장치에 있어서 기존의 컴퓨터 시뮬레이션 적용사례로는, Matlab을 이용한 철도용 통신 프로토콜 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 철도 선로변에 설치되는 LDTS(Local Data Transmission System)와 EIS(Electronic Interlocking System) 사이의 인터페이스를 위한 점대점(peer-to-peer) 정보 전송 프로토콜에 적용하여 성능분석을 행한 바가 있다[1].

이후 프로그램의 성능을 네트워크 기반 정보전송 시뮬레이션이 가능하도록 확장하였고, 본 논문에서는 네트워크 기반 철도용 정보전송 사례로서 이더넷(Ethernet)을 이용한 열차 집중제어장치(CTC)와 전철전력원격감시제어장치(SCADA)간 정보전송 네트워크[2]에 적용하여, 전송 데이터의 프레임 에러율에 대해 분석하였다.

선정된 CTC/SCADA 시스템간 정보전송 사례에서는 데이터 전송시의 신뢰성을 높이기 위해 이더넷에서 기본적으로 제공되는 데이터 에러 제어방식인 CRC32(Cyclic Redundancy Check 32)와 별도로, CTC/SCADA 측에서 CRC-16을 부가적으로 사용하도록 제시하고 있는데[3,4], 성능향상에 대한 정량적인 분석이 되어있지 않은 상태이다. 따라서 본 논문에서는 CTC/SCADA간 데이터 전송시 이더넷에서 제공되는 CRC32만을 사용하는 경우와 별도의 CRC16가 부가되는 경우에 대해 프레임 에러율을 구하고 결과를 비교분석하였다. 시뮬레이션 프로그램은 Matlab과 Matlab GUI 툴[5]을 이용하여 작성하여 사용자가 손쉽게 시뮬레이션 파라미터들을 조정할 수 있도록 하였고, 독립형 C++ 프로그램으로 변환하여 Matlab이 설치되지 않은 컴퓨터에서도 프로그램 사용이 가능하도록 하였다.

1 정회원, 선문대학교, 제어계측공학과, 조교수

2 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원, 선임연구원

3 정회원, 건설교통부 철도정책과 사무관

## 2. 이더넷 기반 CTC/SCADA간 정보전송 방식

철도청에서 운용하는 열차집중제어장치(CTC)와 전철전력원격감시제어장치(SCADA) 사이의 열차정보와 전차선 가압 상태정보의 전송을 위한 정보전송방식에 관한 규격[2]에 있어서, CTC와 SCADA간 인터페이스 링크 구성은 라우터를 통한 LAN 접속방식을 기본 조건으로 한다. 이에 대한 세부사항은 다음과 같고 링크 구성 개요를 보이면 그림 1과 같다.

- 접속방법 : Ethernet(TCP/IP)
- 통신속도 : 10/100 Mbps
- 네트워크모델 : Client-Server(Server : CTC장치, Client : 전력 SCADA 장치)
- 링크회선 수 : 2회선(주 링크/ 예비 링크)

이더넷상에서 두 장치간 전송되는 데이터 패킷구조는 헤더들과 메시지를 포함하여 그림 2(a)와 같고, 그림에서 보이

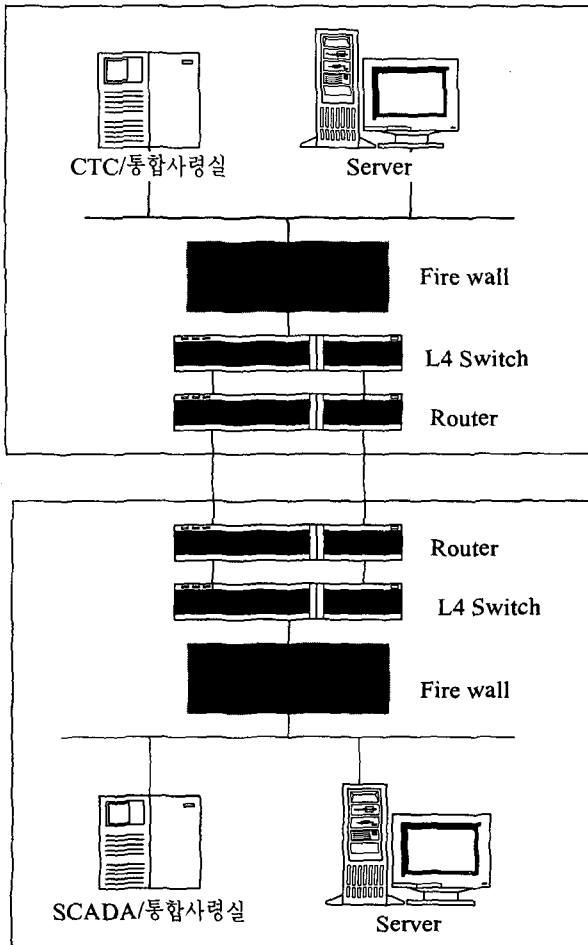


그림 1. 전력 SCADA와 CTC 간 링크 구성

Ethernet 정보	IP Header	TCP Header	장치간 송수신 메시지 (Header + Information)	Ethernet 정보
-------------	-----------	------------	------------------------------------	-------------

(a) 데이터 패킷 기본 구조

길이(byte)	의미
Header	1 STX(start of text)
	2 Data Length
Information	1 Sequence Number
	1 Message Type
	n(variable) Data
	2 CRC16

(b) 장치간 송수신 메시지 구조

그림 2. SCADA와 CTC 간 전송되는 데이터 패킷 기본구조와 송수신 메시지 구조

는 장치간 송수신 메시지는 메시지 헤더와 메시지 정보 부분으로 구성되어 5에서 10초를 전송주기로 하여 주기적으로 전송된다. 메시지의 헤더부는 송수신 메시지의 시작을 나타내는 STX 1바이트, CRC를 제외한 송수신 메시지의 정보부문 바이트수를 나타내는 Data Length값 2바이트로 구성된다. 메시지 정보부는 메시지 전송 순서를 나타내는 Sequence Number 1바이트, 메시지 형식을 나타내는 Message Type 1바이트, 전송 데이터를 나타내고 전송내용에 따라 가변 길이를 갖는 Data n바이트, 전송 메시지 에러 검출을 위한 CRC16 2바이트 등으로 구성된다. CRC16은 메시지 헤더부의 Data Length 필드부터 메시지 정보부의 Data 필드까지의 프레임에 대한 에러검출을 수행한다.

## 3. CTC/SCADA간 정보전송시 프레임 에러를 분석

CTC/SCADA 시스템간 정보전송 사례에서는 Fail-safe 기능을 높이기 위해 별도의 에러제어(CRC16)가 CTC/SCADA에서 부가된다[3,4]. 따라서 이더넷에서 기본적으로 사용되는 CRC32 이외에, CTC/SCADA에서 별도의 에러제어를 행하는 경우와 행하지 않는 경우 각각에 대해 프레임 에러율을 구하고 결과를 고찰한다.

### 3.1 통신채널 잡음에 따른 데이터비트 에러율[6]

열잡음은 모든 통신 시스템에 존재하고 대부분의 시스템에서 가장 현저하게 나타난다. 열잡음의 일차적인 특징은 전력 스펙트럼 밀도가 대부분의 통신시스템에 있어서 관심대상이 되는 주파수 영역에 대해 일정하다는 것으로, 모든 주파수대역에서(dc~약  $10^{12}$  Hz) 단위 대역폭당 동일한 잡음 전력을 발생한다. 이 경우, 잡음전력이 모든 주파수 대역에 대해서 일정한 스펙트럼 밀도를 가지므로 백색광의 특성과

의 유사성을 들어 이러한 특성을 가지는 잡음을 백색잡음(White Noise)이라고 부른다. 열잡음은 식 (1)과 같이 평균값이 '0' 인 가우시언(Gaussian) 확률 분포를 가지는 랜덤 프로세스로 표현되고 잡음의 크기는 확률적으로 결정된다(Gaussian Noise). 가우시언 분포가 시스템의 잡음모델로 사용되는 이유는 시스템에 인가되는 개별적인 잡음 분포가 어떤 형태를 갖는가와 무관하게, 개별잡음들의 종류가 증가될수록 개별잡음들의 총합에 대한 분포가 가우시언 분포에 접근하기 때문이다.

$$p(n_o(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{n_o(t)}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1)$$

$\sigma$  : 잡음표준편차,  $n_o$  : 시간에 따른 잡음크기 ( $\sigma^2 = \overline{n_o(t)^2}$ )

식 (1)과 같은 잡음이 존재하는 2진 데이터 통신채널의 수신부에 출력의 신호대 잡음비가 최대가 되도록 수신필터(Matched filter)가 설계되어 있는 경우, 수신 데이터상에 비트 에러가 발생할 확률은 전송신호의 형태에 따라 다르고, 신호대 잡음의 크기가 증가할수록 비트 에러율이 감소하여 다음과 같이 결정된다.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{N_o}}\right) \quad (2)$$

$\rho = 0$ : orthogonal(uniphase) signalling

$\rho = -1$ : antipodal(biphase) signalling

$E_b$ : 신호의 비트당 에너지  $N_o$ : 밴드폭 1Hz당 잡음전력

$Q$ : 누적 표준 정규분포 함수

### 3.2 CTC/SCADA에서 에러제어를 하지 않는 경우 프레임 에러율

이더넷을 이용하여 데이터 전송을 행하는 경우, 그림 3에 보이는 것과 같이 CTC/SCADA간 전송데이터 N 바이트에 대해, 이더넷 통신 프로토콜에 의해 각 층에서 약 80 바이트의 헤더들과 4바이트의 CRC32를 합하여 총 84바이트가 추가된다. 네트워크연결카드(Network Interface Card : NIC)는 최종 프레임인 이더넷 프레임에 대해 CRC32 코드를 이용하여 에러검지를 수행하는데, 이때 이더넷 프레임의 프리앰블(7바이트), SFD(1바이트), FCS(CRC32 4바이트)를 합한 12바이트를 제외한 N(전송 데이터)+72(부가 바이트) 바이트에 대한 에러가 검지된다. 식 (1)과 같은 잡음이 존재하는 이진대칭채널(Binary Symmetric Channel : BSC)에서 잡

음에 따른 수신 메시지의 비트에러율( $P_b$ )은 식 (2)와 같고, CRC32 에러 검지코드에 대한 에러검지 성능[4]은 BSC에 대해서 식 (3)과 같으므로, N+72 바이트를 메시지 바이트수로 하고, 이 메시지와 CRC32의 4바이트를 합한 N+76 바이트를 코드워드 바이트수로 하면 식 (3)의 마지막 식으로부터 프레임 에러율을 구할 수 있다.

$$P_c = (1 - P_b)^{n_b},$$

$$P_{ud} \leq 2^{-k_b} [1 + (1 - 2P_b)^{n_b} - 2(1 - P_b)^{n_b}],$$

$$P_d = 1 - P_c - P_{ud}, \quad P_{fe} = \frac{P_{ud}}{1 - P_d} \quad (3)$$

$P_c$  : 프레임 에러가 없을 확률,  $P_{ud}$  : 프레임 에러를 검지 못할 확률,  $P_d$  : 프레임 에러를 검지할 확률,  $P_{fe}$  : 프레임 에러 발생 확률,  $P_b$  : 비트에러 발생 확률,  $n_b$  : 코드워드 비트수,  $k_b$  : 메시지워드 비트수

### 3.3 CTC/SCADA에서 에러제어를 하는 경우 프레임 에러율

Fail-safe 기능을 높이기 위해 NIC에서의 CRC32와는 별도로 CTC/SCADA에서 최종 수신데이터에 대한 에러검지 및 흐름제어 기능이 추가된다. CTC/SCADA에서 전송되는 전체 데이터는 헤더부 3바이트와 정보부 4+n 바이트로 구성되고(그림 3), 헤더부의 데이터길이필드 2바이트와 데이터부의 데이터필드까지의 2+n 바이트를 포함하는 총 4+n 바이트에 대해 CRC16코드를 이용하여 에러 검지를 행한다. NIC에서 일차로 이더넷 프레임에 대해 CRC32 코드를 이용하여 에러검지를 수행하므로, CTC/SCADA에서 CRC16에 의한 별도의 에러검지시 프레임 에러가 발생할 확률은 CRC 32 코드에서 프레임 에러가 발생하는 확률을 확률 전제조건으로 한다.

CRC32와 CRC16 각각에 대해서, CRC32 코드에서 프레임 에러가 발생할 확률을  $P_{fe32}$ , CRC16 코드에서 프레임 에러가 검지될 확률을  $P_{d16}$ , CRC16 코드에서 프레임 에러 발생시 이를 검지하지 못할 확률을  $P_{ud16}$ 라고 정의하면, CRC16에 의해서 프레임 에러가 검지될 확률은 CRC32 코드에서 프레임 에러가 발생됨을 전제조건으로 하는 경우  $P_{fe32}P_{d16}$ 이 되고, 프레임 에러를 검지하지 못할 확률은  $P_{fe32}P_{ud16}$ 가 되어 이들을 식 (3)의 마지막 수식에 대입하면 최종적인 프레임 에러율은

$$P_{fe} = \frac{P_{fe32}P_{ud16}}{1 - P_{fe32}P_{d16}} \quad (4)$$

$P_{fec32}$  : CRC32 코드에서 프레임 에러가 발생할 확률,  
 $P_{d16}$  : CRC16 코드에서 프레임 에러가 검지될 확률,  
 $P_{ud16}$  : CRC16 코드에서 프레임 에러를 검지하지 못할 확률

이 된다. 식 (4)를 변형하면

$$\begin{aligned}
 P_{fe} &= \frac{P_{fec32}P_{ud16}}{1 - P_{fec32}P_{d16}} \\
 &= P_{fec32} \frac{P_{ud16}}{1 - P_{fec32}P_{d16}} \\
 &= P_{fec32} \frac{P_{ud16}}{P_{ud16} + P_{c16} + P_{d16} - P_{fec32}P_{d16}} \quad (5) \\
 &= P_{fec32} \frac{P_{ud16}}{P_{ud16} + P_{c16} + P_{d16}(1 - P_{fec32})}
 \end{aligned}$$

<  $P_{fec32}$

$P_{c16}$  : CRC16 코드에서 프레임에러가 발생하지 않을 확률이 되어, 이는 CRC16을 추가함에 따라 프레임 에러율이  $P_{fec32}$ 보다 작게 되어 전체적인 프레임 에러율을 떨어뜨릴 수 있게 됨을 알 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션

##### 4.1 통신 프로토콜 시뮬레이션 프로그램

통신시스템 프로토콜 시뮬레이션을 행하기 위하여 그림 1과 같이 Matlab과 Matlab GUI를 이용한 윈도우 기반 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다[5].

전체 프로그램은 데이터 시그널링 방식과 신호대잡음의 크기(Eb/No)에 따라 식 (2)로부터 비트에러율을 계산하고 초기 기본 파라미터를 설정하는 BEP/PARAMs부, 에러검지 코드들을 시뮬레이션하기 위한 ED부, 전향에러정정(Forward Error Correction : FEC)코드들을 시뮬레이션 하기 위한 FEC부, 메시지 자동 재전송요구(Automatic Repeat Query : ARQ) 방식들에 따른 처리율 등 제반 성능들을 시뮬레이션 하기 위한 ARQ/LU부, FEC와 ARQ를 결합하여 처리율을 시뮬레이션 하기 위한 HARQ/LU부, 이더넷의 처리율과 지연시간 등을 시뮬레이션하기 위한 Ethernet부, 토큰-링의 방식별 처리율을 시뮬레이션하기 위한 Token Ring부, tolerance, 큐 등 일반적인 네트워크의 성능들을 시뮬레이션하기 위한 Tolerance부, 및 네트워크 적용사례에 대한 시뮬레이션을 위한 Exam부 등으로 구성되어, 각각 독립적으로 사용하거나 연계하여 시뮬레이션을 행할 수 있도록 작성하였다. 각 시뮬레이션 파트에 대한 실행은 기본적으로 해당 버튼을 클릭하면 필요한 파라미터 설정 다이얼로그가 생성되고, 다이얼로

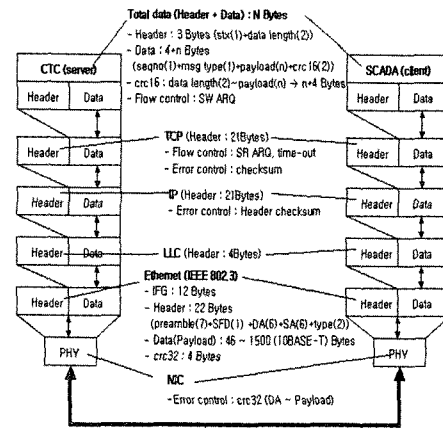


그림 3. CRC와 SCADA사이의 데이터 전송 프로토콜 개략도

그상에서 필요한 파라미터들을 설정한 후 실행버튼을 누르면 수행되어 수행된 결과가 메인 화면상에서 플로팅 및 저장되도록 작성하였다. 그림 4는 시뮬레이션 프로그램의 메인화면을 보인다.

##### 4.2 시뮬레이션 결과 고찰

CTC/SCADA에서 전송하는 데이터의 바이트수를 5->50->500 바이트로 증가시키면서 CTC/SCADA에서 CRC16 에러제어를 하지 않는 경우와 하는 경우 각각에 대해, 신호대잡음비에 따른 프레임 에러율에 대한 시뮬레이션을 행하였다. 바이트수를 5->50->500 바이트로 증가시키는 경우, 3절에서 설명한 바와 같이 총72바이트의 헤더바이트가 부가되어 이더넷 프레임은 총 77->122->572 바이트가 되고, 이에 대한 CRC32가 수행된다. 따라서 메시지 바이트 수는 77->122->572가 되고, 코드워드 바이트수는 CRC32 4바이트를 포함하여 (77->122->572)+4가 된다. antipodal 신호를 가정하는 경우, 식 (2)와 (3)을 이용하여 구한 CRC32 코드에 의한 이더넷 프레임의 프레임에러율을 보이면 그림 5와 같다.

CTC/SCADA에서 에러제어를 하여, 메시지의 데이터 필드의 바이트수를 5->50->500으로 증가시키는 경우, 3절에서 설명한 바와 같이 각각에 대해 메시지 길이에 해당하는 2바이트와 시퀀스번호, 메시지 형태와 관련된 2바이트가 부가되어 CRC16이 행하여진다. 즉, 메시지 바이트수는 (5->50->500)+4가 되고, 코드워드 바이트수는 CRC16 2바이트를 포함하여 (5->50->500)+6이 된다. 그림 6은 Biphase 신호를 가정하는 경우, 식 (2)와 (3)을 이용하여 구한 CRC16 코드에 의한 CTC/SCADA 메시지 프레임의 프레임 에러율을 보인다.

그림 7은 메시지의 바이트를 5->50->500으로 증가시키며 전송하는 경우, 이더넷의 CRC32와 CTC/SCADA의 CRC16

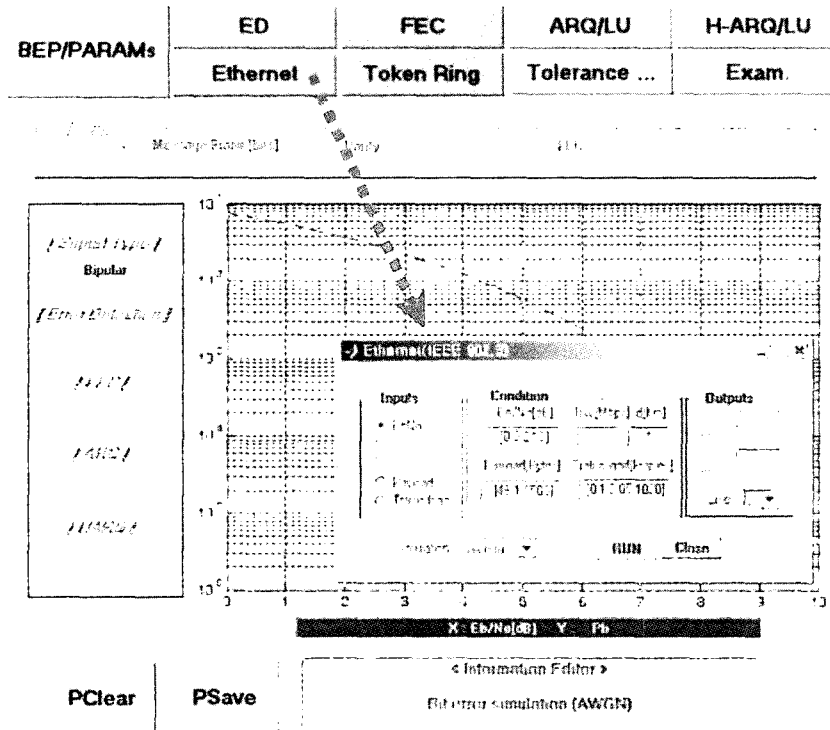
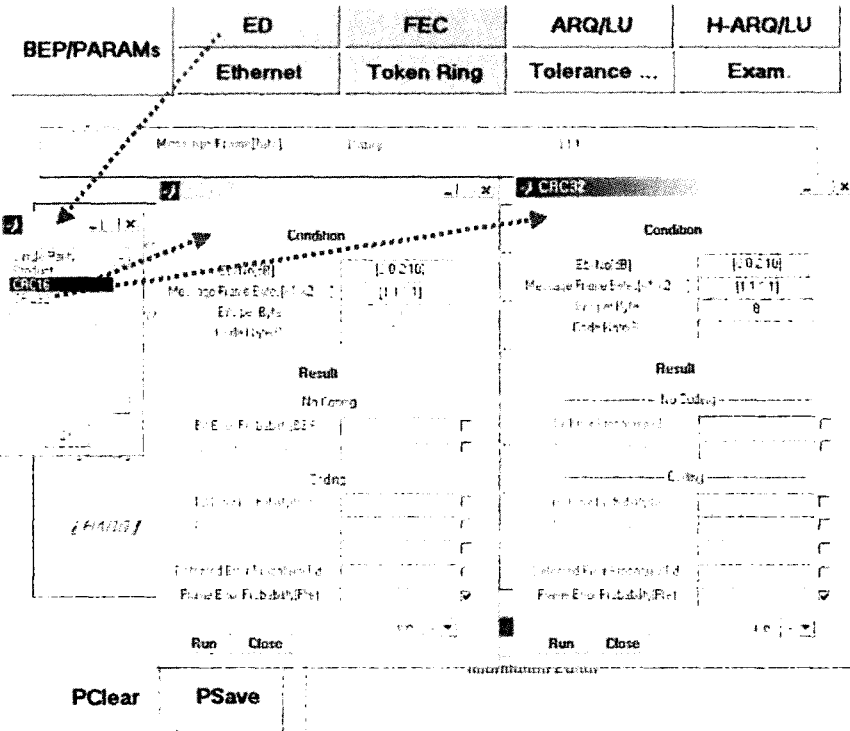


그림 4. 시뮬레이션 프로그램 메인화면

을 모두 고려하여 식 (4)를 이용하여 구한 프레임 에러율을 보인다. 성능 비교를 위하여 그림 5의 CRC32만을 사용한 프

레이م 에러율 결과와 함께 도시하였다. CRC16을 병행하므로써 전체적으로 프레임 에러가 현저히 낮아진 모습을 보인다.

### 5. 결론

본 논문에서는 네트워크 기반 철도용 정보전송 사례로서 이더넷을 이용한 열차집중제어장치(CTC)와 전철전력원격 감시제어장치(SCADA)간 정보전송 네트워크를 선정하고, 이에 대한 성능분석 시뮬레이션을 행하였다. 이더넷에서 기본적으로 사용되는 CRC32 이외에 CTC/SCADA에서 별도의 CRC16 에러제어를 행하는 경우와 행하지 않는 경우 각각에 대해 프레임 에러율을 구하고 결과를 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과 메시지의 바이트를 증가시키며 전송하는 경우, 이더넷의 CRC32와 CTC/SCADA의 CRC16을 모두 사용하므로써 이더넷의 CRC32만을 사용하는 경우에 비해 프레임 에러를 현저히 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

### 후기

본 논문은 2003년도 한국철도기술연구원 신호설비 유지 보수 효율화를 위한 정보전송방식 기술연구의 위탁과제연구결과입니다.

### 참고 문헌

1. "GUI 기반 철도용 통신 프로토콜 시뮬레이션 프로그램 개발", 철도기술개발 연구사업 2차년도 연구보고서, 한국철도기술연구원, 2003.
2. "열차집중제어장치(CTC)와 전철전력 원격감시제어장치(SCADA)간 정보전송방식(Protocol)", 시험규격, 한국철도기술연구원, 2004.
3. S. B. Wicker, *Error Control System for Digital Communication and Storage*, Prentice Hall, pp.99-128, 1995.
4. T.Kasami, T.Klove, and S.Lin, "Error Detection with Linear Block Codes", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.IT-29, pp.131-136, Jan. 1983.
5. "Using Matlab Version 6", Math Works, 2000. 2.
6. B. Sklar, *Digital Communications-Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, pp.104-136, 2001
7. IEEE-802.1D-1998, *Local Area Network MAC(Media Access Control) Bridges*, may 25, 1998.

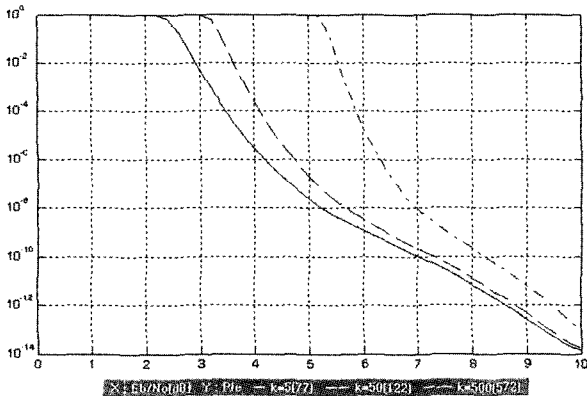


그림 5. CTC/SCADA 간 메시지 바이트(N)를 5->50->500으로 증가시키며 전송하는 경우, CRC32에 의한 이더넷 프레임 에러율(X : Eb/No[dB] Y : Pfe32)

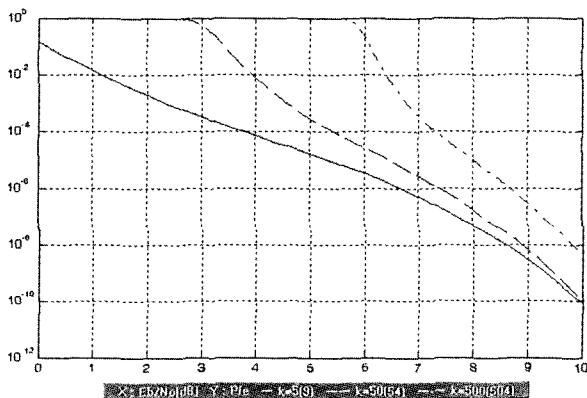


그림 6. CTC/SCADA 간 메시지 바이트(N)를 5->50->500으로 증가시키며 전송하는 경우, CRC16에 의한 프레임 에러율(X : Eb/No[dB] Y : Pfe16)

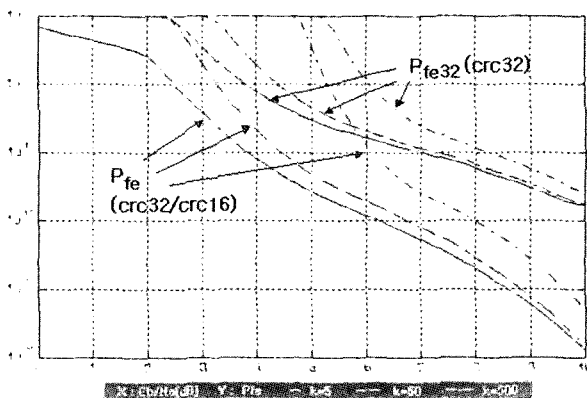


그림 7. CTC/SCADA 간 메시지 바이트(N)를 5->50->500으로 증가시키며 전송하는 경우, CTC/SCADA의 CRC16과 이더넷의 CRC32를 모두 고려한 프레임 에러율과 CRC32만을 고려한 프레임 에러율 비교(X : Eb/No[dB] Y : Pfe, Pfe32)