

한국형 차세대 무선통신 열차제어시스템 네트워크 성능평가

방준호¹ · 채성윤¹ · 김형진¹ · 박성준¹ · 조영종^{1†} · 오세찬² · 윤용기² · 김용규²

Performance Analysis on Next Generation Korea Radio Train Control System Network

June-ho Bang · Sung-yoon Chae · Hyung-jin Kim · Seong-joon Park · Young-Jong Cho ·
Seh-chan Oh · Yong-ki Yoon · Yong-kyu Kim

ABSTRACT

In this paper, we analyze the performance and reliability of the next-generation KRTCS (Korea Radio Train System) network. The KRTCS has been designed to manage and control the overall status of trains including location, speed, stop position, door open/close status and interior monitoring and so forth. System faults of the KRTCS operation can lead to the disruption of smooth train flow, even to terrible traffic accident. Prior to installation we need to assure the reliability of the designed KRTCS system. For this purpose, we simulated and analyzed the KRTCS network using QualNet simulator, assuming the various environmental operation data of train flows and communication faults that can be found in real telecommunication networks.

Key words : KRTCS network, Reliability, Performance

요약

본 논문은 차세대 열차제어 시스템인 KRTCS (Korea Radio Train Control System)의 네트워크의 안정성에 대하여 연구한다. KRTCS는 철로 상에 운행중인 모든 열차들의 위치, 이동속도, 정위치 정차, 차량 문 개폐, 차량 내부 상황 등을 전체적으로 관리 감독하는 시스템으로 시스템의 동작 오류는 열차 운행에 지장을 초래할 뿐만 아니라 경우에 따라서 큰 사고로 이어질 수 있기 때문에 안정성에 대한 다각적인 검증을 반드시 필요로 한다. 이를 위해 본 논문에서는 실제 열차 운행이 이루어지는 환경과 운행 방식, 그리고 네트워크 장비에서 발생할 수 있는 동작 오류 패턴을 조사하고 이를 토대로 QualNet [1]을 활용하여 다양한 환경에서 시뮬레이션을 실행한다.

주요어 : KRTCS 네트워크, 신뢰성, 성능

1. 서론

컴퓨터와 통신기술이 발전함에 따라 열차제어시스템의 무인자동화와 고밀도화가 가능해졌으며 중앙의 지상중심에서 분산형인 차상중심으로 변화되고 있다. 통신 관점에서 보면 궤도회로기반의 기존 열차제어시스템은 차상에서

지상으로만 전송하는 단방향 통신만 가능하였지만 최신의 무선통신기반의 열차제어시스템은 차상과 지상간 양방향 통신이 가능해졌다. 철도 통신네트워크를 크게 지상 통신네트워크, 차상 통신네트워크 그리고 지상과 차상을 연결해주는 차·지상간 통신네트워크로 구분할 수 있다.

지금까지 철도분야에서 차상 통신네트워크는 IEEE-1473 (또는 IEC-61375)의 TCN 규격을 비롯하여 다수의 연구가 보고되고 있다. 마찬가지로 차·지상간 통신네트워크는 현재 CBTC (Communication based Train Control) 시스템 및 ETCS (European Train Control System)의 ERTMS/ETCS 시스템의 채택과 더불어 보편화되고 있다. 일례로 CBTC 시스템은 보통 무선랜 방식을 적용하

접수일(2013년 5월 24일), 심사일(2014년 3월 18일),

게재 확정일(2014년 3월 19일)

¹⁾ 아주대학교 컴퓨터 공학과

²⁾ 한국 철도기술 연구원

주 저 자 : 방준호

교신저자 : 조영종

E-mail; yjcho@ajou.ac.kr

고 있으며 유럽의 ETCS는 특화된 GSM-R의 통신방식을 적용하고 있다. 이처럼 철도 통신네트워크는 기술발전과 함께 새로운 기술을 접목하기 위해 체계적이고 다양한 연구가 진행되고 있으나 지상 통신네트워크의 경우 상대적으로 체계적인 안정성과 성능에 관한 연구가 부족한 실정이다. 본 연구는 무선통신기반 열차제어시스템 표준체계 구축 시 필요한 열차제어시스템과 연동되어야 하는 지상 설비와의 통신네트워크의 구성에 대하여 연구한다. 다양한 변수가 존재하는 네트워크를 안정성 측면에서 테스트하기 위해서 상용의 네트워크 시뮬레이터 상에 대규모 네트워크 토폴로지 및 트래픽을 모델링하고 적용하였다. 본 연구에서 시뮬레이션을 통해 수집한 결과는 제시한 네트워크의 안정성을 검증하고 향후 안정성이 보장된 네트워크 구성을 위한 가이드라인으로 활용할 것을 목표로 한다.

2. KRTCS 네트워크 구성

2.1 네트워크 기본 구성

KRTCS 네트워크는 Fig. 1과 같이 모든 역들과 중앙 관제실을 연결하는 콤플렉스 네트워크(①), 차상 단말들에게 연결을 제공하는 선로변 네트워크(②), 전 ATP (Automatic Train Stop) 제어 영역에 걸쳐 구축되는 ATP-

EI (Automatic Train Stop-Electronic Interlocking)네트워크(③)로 구성된다.

콤플렉스 네트워크는 중앙의 관제설비와 역 설비 간에 데이터 전송을 담당하며, 열차제어시스템의 제어 데이터 외에 운영에 필요한 영상 및 음성 데이터도 처리하고 있다. ATP-EI 네트워크는 ATP와 EI간 송수신하는 데이터만을 처리하는 네트워크로 ATP-EI간에 교환되는 데이터는 열차제어정보를 담고 있어 높은 신뢰성을 필요로 하기 때문에 이들 데이터를 별도의 네트워크로 운영하고자 ATP-EI간의 데이터 교환만을 담당하도록 설계하였다. 선로변 네트워크는 차상 단말들의 접속을 매개하는 네트워크로 주로 무선접속점들로 구성된다.

각각의 네트워크는 하나의 네트워크에서 동작 오류가 발생하더라도 운영에 지장 없이 동작할 수 있도록 이중계로 구성되어 있고 열차제어시스템을 구성하는 각 단말들도 이중화 되어 각 네트워크의 1계와 2계에 연결된다. 이중화된 한 쌍의 단말들은 활성화 단말과 대기 단말로 구분되며 평시에는 활성화 단말이 주어진 임무를 수행하지만 활성화 단말이 동작이상을 일으키면 대기 단말이 이 역할을 넘겨받아 주어진 역할을 수행한다.

열차 운행계획 관리, 열차운행상태 감시, 원격 제어 등의 관제기능을 수행하는 ATS (Automatic Train Stop)와

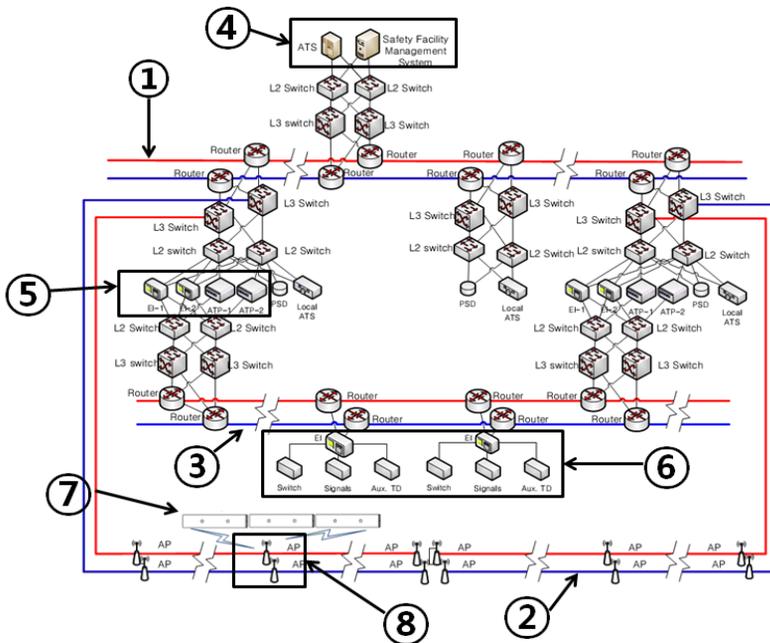


Fig. 1. KRTCS network

안전관리시스템(④)은 ATS 네트워크 1계와 2계에 모두 연결되어 있다. 열차 위치 실시간 추적, 열차 이동권한 결정, 속도 프로파일 작성, 열차속도감시 및 비상 제동 등의 기능을 하는 지상 ATP와 진로와 선로전환기 동작을 담당하는 역내 EI (⑤)는 ATP-EI 네트워크와 콤플렉스 네트워크 1계 2계 모두와 연결되어 있다. 지상 ATP는 각 네트워크와 연결 시 하나의 인터페이스를 통해 연결되는 반면 역내 EI는 각 네트워크에 대해 2개의 인터페이스로 연결이 되어 있다. 역내 EI들이 총 2개의 네트워크에 연결된 것과 달리 일반 EI (⑥)들은 하나의 네트워크(ATP-EI 네트워크)의 1계와 2계에만 연결 되어 있다. 차량에 탑재되는 단말은 차상 ATP와 ATO (Automatic Train Operation) (⑦)가 있다.

차상 ATP는 지상 ATP에 실시간 위치보고를 수행하며 지상 ATP로부터 부여받은 이동권한과 속도프로파일을 기준으로 목표 정차점을 계산하고 현재 차량의 위치로부터 목표 정차점까지의 속도프로파일을 계산하고 차량의 속도가 계산된 속도 프로파일 내에서 동작하는지를 감시한다. 만약 미리 계산된 속도프로파일을 초과하게 된다면 초과된 정도에 따라 경고음 발생 또는 차량의 추진 제어 장치에 자동으로 전 상용제동 또는 비상제동을 명령한다. 이 밖에도 출입문 개폐 허가 등 안전과 관련된 기능을 수행한다. ATO는 ATP 속도 프로파일을 기준으로 자동열차운행이 가능하도록 속도를 제어하고 정위치 정차, 출입문 개폐 등의 기능을 수행한다. 차상 ATO와 ATP들은 무선 접속 링크(⑧) (IEEE 802.11n 또는 LTE)를 통해 선로변 네트워크와 연결된다. 선로변 네트워크에 무선접속점들도 동작이상에 대비하여 설치 지점마다 이중화 되어 있다.

본 시스템에서 고려하는 네트워크는 이처럼 이중제로 구성되어 시스템 작동 중 물리적인 문제가 발생하였을 때에도 열차제어시스템이 이상 없이 동작하도록 한다. 이와 같이 이중화된 네트워크는 견고성이 매우 뛰어나다는 장점이 있으나 초기에 네트워크를 구성하는데 많은 비용이 든다는 단점이 역시 수반한다.

2.2 제안하는 네트워크 구성

본 연구에서는 KRTCS 기본 토폴로지를 응용하여 18가지 네트워크 토폴로지를 제안하고 각 네트워크의 데이터 전달 안정성과 성능을 평가한다. 각 토폴로지들은 Table 1과 같이 구성된다.

LTE eNodeB (E-UTRAN Node B)는 자신의 신호범위 내에 다른 eNodeB가 위치하지 않도록 설계되어 있어 하나의 지점에 2개의 eNodeB를 설치하여 선로변 네트워

Table 1. Network configuration

	Complex network	ATP-EI network	Wayside network	Access scheme
1	Duplicated	Duplicated	Duplicated	802.11n
2	Duplicated	Duplicated	Singular	802.11n
3	Duplicated	Singular	Duplicated	802.11n
4	Duplicated	Singular	Singular	802.11n
5	Duplicated	None	Duplicated	802.11n
6	Duplicated	None	Singular	802.11n
7	Singular	Duplicated	Duplicated	802.11n
8	Singular	Duplicated	Singular	802.11n
9	Singular	Singular	Duplicated	802.11n
10	Singular	Singular	Singular	802.11n
11	Singular	None	Duplicated	802.11n
12	Singular	None	Singular	802.11n
13	Duplicated	Duplicated	Singular	LTE
14	Duplicated	Singular	Singular	LTE
15	Duplicated	None	Singular	LTE
16	Singular	Duplicated	Singular	LTE
17	Singular	Singular	Singular	LTE
18	Singular	None	Singular	LTE

크를 이중화 하는 시나리오에 대해서는 고려하지 않는다.

3. 시나리오 설계

3.1 역간 거리

본 연구에서 시나리오를 설계하기 위해 1호선 전철의 서울역에서 수원역까지의 구간 환경과 열차운행, 그리고 이 구간에서의 KRTCS 차기 열차제어시스템 구성계획을 참조한다. 이 구간은 총 41.5 km로 총 16개의 정차역이 존재하며 서울역과 각 정차역간 거리는 Table 2와 같다.

차량은 역간 구간에 최대 1대의 차량이 진입할 수 있으므로 이 구간에서 최대 16대의 차량이 운행할 수 있다. 이 구간에서 운행되는 차량을 제어하기 위한 무선접속기술 후보에는 IEEE 802.11n와 LTE가 있다. IEEE 802.11n을 활용하는 경우 IEEE 802.11n 무선접속점은 선로를 따라 400 m 간격으로 설치되며 700 MHz 대역의 주파수를 활용하는 LTE를 활용하는 경우 LTE 무선 접속점인 eNodeB는 1.5 km 간격으로 설치된다. 따라서 LTE가 적용된다면 eNodeB는 IEEE 802.11n 무선접속점 보다 더 많은 차량의 통신을 매개하게 된다.

Table 2. Distance from Seoul Station

order	station	distance (km)
1	Seoul station	0.000
2	Yongsan station	3.169
3	Noryangjin station	5.835
4	Daebang station	7.250
5	Singil station	8.050
6	Yeongdeungpo station	9.102
7	Sindorim station	10.542
8	Guro station	11.700
9	Gasan digital complex station	14.100
10	Doksan station	16.100
11	Geumcheon-gu office station	17.253
12	Anyang station	23.900
13	Geumjeong station	27.500
14	Gunpo station	29.700
15	Uiwang station	33.900
16	Suwon station	41.500

3.2 트래픽 유형

KRTCS 열차제어시스템 네트워크에서 발생하는 모든 트래픽은 Table 3과 같이 정리할 수 있다. 지상 ATP들은 각각 제어를 담당하는 영역을 가지고 있다. 각 구간 내의 열차들은 자신이 위치한 구간을 담당하는 지상 ATP와 제어정보를 교환한다. 제어정보를 교환하는 패턴은 다음과 같다. 차량에 탑재된 활성화 상태의 차상 ATP는 활성화 상태의 ATP와 대기 상태의 ATP에게 열차상태정보를 주기적으로 전송한다. 활성화 상태에 있는 지상 ATP는 자신의 관할 구역 내 열차들이 전송한 열차상태정보를 활용하여 열차들의 상황을 파악하고 각 열차들에게 열차제어 정보를 전송한다.

지상 ATP는 자신의 관할구간 내에서 운행중인 열차의 운행 정보를 종합하여 활성화 상태의 지상 ATP가 활성화 상태의 ATS와 대기상태의 ATS에게 전송한다.

각 활성화 되어있는 차상 ATO는 활성화된 ATS와 대기상태의 ATS에게 3초 주기로 1 Kbyte의 운행 정보 데이터를 전송한다.

지상 ATP와 EI는 상호간 열차진로제어 데이터를 주기적으로 교환한다. 이 데이터는 열차 선로변경을 제어하기 때문에 중요도가 매우 높은 데이터로 분류되며 이 세션에서 ATP와 EI는 5초 이내에 최소 1개 이상의 진로제어 데이터를 교환할 것을 요구한다. 5초 이상 데이터를 교환하

Table 3. Traffic pattern

Session	Sender	Receiver	transmission interval
train ATP-ground ATP	train ATP	ground ATP	0.5s
	ground ATP	train ATP	0.5s
ground ATP-EI	ground ATP	EI	0.5s
	EI	ATP	0.5s
ground ATP-ATS	ground ATP	ATS	1s
train ATO-ATS	train ATO	ATS	3s
Multimedia	Multimedia data handler	ATS	-
Handover traffic	ground ATP	ground ATP	Every handover occurrence

지 않으면 열차제어시스템에 치명적 문제가 발생한 것으로 간주하여 열차제어시스템은 열차 운행을 중단한다. 이러한 치명적 상황이 발생하는 지의 여부를 면밀히 관찰할 필요가 있다.

KRTCS 열차제어시스템 네트워크에는 앞에서 설명한 열차제어시스템 제어 메시지 이외에도 영상 및 음성트래픽과 ATP 핸드오버 트래픽이 존재한다. 각 기차역과 열차상에는 다수의 CCTV가 설치되어 있다. CCTV를 통해 수집되는 영상과 음성정보는 각 차상과 지상의 멀티미디어 처리단말에게 취합되어 ATS에게 전송된다. 각 멀티미디어 처리단말은 현재 40 Kbps로 데이터를 전송하며 향후 영상과 음성기기의 발전과 더불어 더 높은 데이터 전송율을 필요로 할 것으로 예상된다.

차량이 하나의 지상 ATP의 관할구간에서 다른 지상 ATP의 관할구간으로 이동할 때 지상 ATP간에는 해당 차량의 제어권 이양이 발생한다. 이 때 차량 제어와 관련된 데이터가 발생한다.

3.3 동작 오류

열차제어시스템 네트워크는 장비(라우터, 스위치 및 무선접속점)와 이들을 연결하는 회선들로 구성되어 있다. 이러한 구성요소들이 일시적으로 기능이 정지되는 것을 동작 오류라고 정의한다. 네트워크를 구성하는 요소들은 항상 날씨의 영향, 장비 재부팅, 외부 전파의 간섭 등의 위협에 끊임없이 노출되어 있으며 이들의 영향을 받아 발생한 동작 오류는 네트워크 성능을 떨어뜨린다.

무선 채널에서 오류가 발생하는 요인은 다음과 같이 분

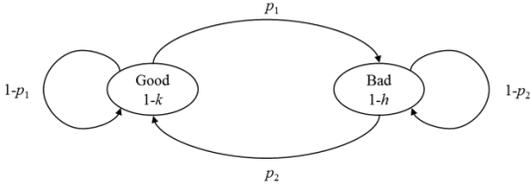


Fig. 2. 2-state Markov chain

석할 수 있다. 송신자의 신호가 수신자에게 도달하기까지 떨어진 거리에 따라 송신자의 신호 세기는 감소한다. 일반적으로 수신자에 도달하는 신호의 세기 $P_r = P_t \cdot \xi \cdot d^{-\alpha}$ 으로 나타낸다. 여기서 P_t 는 송신자의 신호 세기, d 는 송신자와 수신자 간의 거리, ξ 는 상수, α 는 2 (좋은 상태)와 5 (나쁜 상태)로 설정된다. 또한, 무선 노드의 이동으로 인한 고속 페이딩과 장애물로 인한 저속 페이딩이 있다. 잡음과 간섭은 주변의 다른 무선 노드의 신호에 의해 발생한다.

위와 같은 경우에 무선 채널은 채널 상태가 좋아서 비트 오류 확률이 낮은 경우와 채널 상태가 좋지 않아 비트 오류 확률이 높아진 상태에서 동작하게 된다. 이렇게 실제 무선 환경에서는 오류가 묶음으로 발생하기 때문에 이러한 오류발생을 모델링하기 위해 무선 채널의 상태를 두 개의 상태, 좋은 상태 또는 나쁜 상태로 Hasslinger et al.^[2]의 Gilbert-Elliott 모델을 사용한다. 두 개의 상태를 가지는 무선 채널을 Fig. 2와 같은 마르코프 체인으로 표현할 수 있다.

채널이 좋은 상태일 때 비트 오류 확률을 $1-k$, 나쁜 상태일 때 비트 오류 확률을 $1-h$ 로 정의한다.

채널이 좋은 상태 또는 나쁜 상태 상태일 때 비트 오류는 독립적으로 발생하기 때문에, 채널의 상태를 이산 시간 마르코프 체인으로 모델링하여 상태 천이행렬을 구할 수 있다. q_t 가 t 시간일 때 상태를 나타낸다면 상태 천이행렬 A 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 p_1 &= P(q_t = \text{Bad} | q_{t-1} = \text{Good}); \\
 p_2 &= P(q_t = \text{Good} | q_{t-1} = \text{Bad}); \\
 A &= \begin{pmatrix} 1-p_1 & p_1 \\ p_2 & 1-p_2 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

좋은 상태/나쁜 상태일 때의 정주 상태 확률을 각각 π_G, π_B 로 정의하면 오류율 p_E 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 p_E &= (1-k)\pi_G + (1-h)\pi_B \\
 \pi_G &= \frac{p_2}{p_1 + p_2} \\
 \pi_B &= \frac{p_1}{p_1 + p_2}
 \end{aligned}$$

또한, 채널이 좋은 상태에 머무르는 평균 시간과 나쁜 상태에 머무르는 평균 시간은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_G &= \frac{1}{1-p_1} \\
 T_B &= \frac{1}{1-p_2}
 \end{aligned}$$

Gilbert-Elliott 모델을 무선 네트워크에 적용한 연구는 다음과 같다. Fantacci et al.^[3]의 연구결과에서는 $1-k=10^{-4}$, $1-h=10^{-3}$, $1-p_1=0.995$, $1-p_2=0.96$ 일 때, 평균적으로 good 상태에 머무르는 시간은 200 msec, 나쁜 상태에 머무르는 시간은 25 msec로 구하였다. Wang et al.^[4]의 연구논문에서는 $1-k=10^{-5}$, $1-h=10^{-2}$, $1-p_1=0.9999918$, $1-p_2=0.999184$ 를 적용하였고, 이때의 전송 속도는 8 Mbps, 타임 슬롯 크기는 8 바이트로 설정하였다. Bhagwat et al.^[5]의 연구에서는 시뮬레이션을 통한 결과 값을 도출하였는데, 좋은 상태에 머무르는 시간은 1~10 초이고 나쁜 상태에 머무르는 시간은 50~500 msec이다. 각 상태에 머무르는 시간은 지수분포를 따르고, 전송 속도는 10 Mbps로 설정하였다.

스위치와 라우터를 포함하는 유선 노드는 외부 날씨의 영향, 재부팅(장비 관리상 발생) 등으로 인해 동작오류를 일으킨다. 장비의 동작오류는 연결된 모든 회선의 동작오류와 같은 의미이기 때문에 단일 회선오류에 비해 네트워크 성능 저하에 큰 영향을 미치며 매우 낮은 발생빈도를 가지고 있다. 본 연구에서는 최근 미국 Sprint 네트워크에서 발생한 네트워크 동작오류 패턴 연구 결과인 Markpoulou et al.^[6]을 활용하여 유선노드가 정상상태와 오류상태를 번갈아가며 취하도록 하며 유선노드가 오류상태에 있을 때에는 패킷 처리가 이루어지지 않도록 모델링한다.

3.4 이동성

KRTCS 네트워크에서 각 열차들은 선로를 따라 이동한다. 이때 차상 단말들인 차상 ATP와 ATO는 열차를 따라 같이 이동하게 되므로 본 연구에서 열차들의 이동성을

고려하여 시뮬레이션을 진행할 필요가 있으며 시뮬레이션 상에 적용될 이동성 모델이 유효하기 위해선 실제 열차가 어떠한 이동패턴을 가지는 지 파악해야 한다. 서울 지하철 운행현황 [7]을 통해 파악된 열차들의 운행 패턴은 다음과 같다. 열차는 34 km/h 정도의 표정속도와 80 km/h 정도의 운행최고 속도를 가진다. 역간 평균 거리는 1.15 km 이며 역 사이에는 한 대의 열차만 주행이 가능하다. 열차는 계속 속력의 가감이 이루어지기 때문에 각 열차들은 정차역을 출발할 때에는 가속을 하다가 최고 속도에 이르면 그 속도를 유지하고 다음 정차역이 가까워지면 감속을 한다.

평균 80 km/h 속력을 가지는 열차가 1 km 간격으로 배치된 8개의 정차역을 이동하며 순방향과 역방향으로 이루어진 선로들이 이루는 폐곡선을 따라 열차들이 왕복한다. 각 열차들은 각 정차역 사이의 구간 내에 최대 1대의 열차가 이동하고 있으며 각 열차들은 1 km 구간의 초반부에서는 가속을 하고 구간의 후반부에서는 감속을 한다.

4. 성능평가

앞서 제시된 실제 철도 시스템의 운영환경을 토대로 QualNet 시뮬레이터를 활용해 성능과 안정성을 평가하였다. 본 연구에서는 위에서 기술한 12가지 토폴로지들의 성능과 안전성을 시험하고자 상기 토폴로지들을 QualNet 시뮬레이션에 반영하며 각 단말들과 네트워크 장비들의 특성, 단말들이 발생시키는 트래픽의 특성은 위에서 기술한 바를 토대로 하였다. 본 연구에서 제안하는 네트워크 토폴로지들은 구성 네트워크의 형태에 따라 분류되었고 각 토폴로지들은 편의상 Table 4와 같이 콤플렉스 네트워크, 선로변 네트워크, ATP-EI 네트워크의 구성 형태를 활용하여 표기하였다.

Fig. 3은 무선 접속 기술 IEEE 802.11n이 적용된 네트워크에서 각 세션별 패킷 전달율을 보였다. 전체적으로 평균 패킷 전달율은 콤플렉스, 선로변, ATP-EI 네트워크가 안정적으로 구성됨에 따라 높아지는 결과를 얻었다. 세부적으로 보면, 최소 구성인 110 토폴로지에서는 약 96%의 패킷 전달율을 보이지만 최대한의 구성인 222 토폴로지의 패킷 전달율은 약 99.5%이다.

이러한 결과로 볼 때 이중화된 네트워크 구성은 패킷의 안정적인 전달에 중요한 요소로 작용하는 것으로 판단할 수 있다.

각 세션별로는 ATP-EI 제어메시지 교환을 위한 ATP-EI

Table 4. Topology name

Network ID	Complex network	Wayside network	ATP-EI network
110	Singular	Singular	None
111	Singular	Singular	Singular
112	Singular	Singular	Duplicated
120	Singular	Duplicated	None
121	Singular	Duplicated	Singular
122	Singular	Duplicated	Duplicated
210	Duplicated	Singular	None
211	Duplicated	Singular	Singular
212	Duplicated	Singular	Duplicated
220	Duplicated	Duplicated	None
221	Duplicated	Duplicated	Singular
222	Duplicated	Duplicated	Duplicated

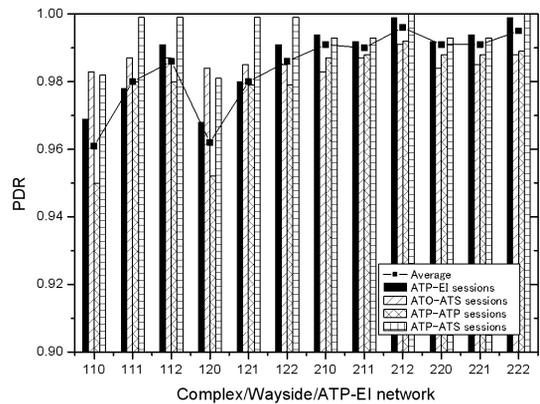


Fig. 3. Packet delivery ratio under IEEE 802.11n configurations

네트워크는 다른 네트워크와는 별도로 구성하고 이중화된 구성을 적용할 때에 안정적인 메시지 교환이 이루어졌다. 다른 메시지의 4~5%의 손실은 큰 영향을 미치지 않지만, ATP-EI 제어메시지의 경우에 5% 정도의 메시지 손실은 열차 운행에 심각한 영향을 줄 수 있다. ATP-EI의 세션 이외에는 네트워크 토폴로지가 최소화된 경우를 제외하고는 전체적으로 98% 이상의 패킷 전달율로 안정적인 성능을 보였다.

Fig. 4는 무선 접속 기술 LTE가 적용된 네트워크에서 각 세션별 패킷 전달율을 보인다. 평균적으로 95% 이상의 패킷 전달율을 보이지만 ATP-EI 네트워크의 구성에 따라 ATP-EI 제어 성공율이 92%까지 감소하였다. 110 토폴로지서 가장 낮은 전달율을 보이는데, 이것은 ATP-EI 네트워크가 콤플렉스 네트워크와 병합되어 ATP-EI

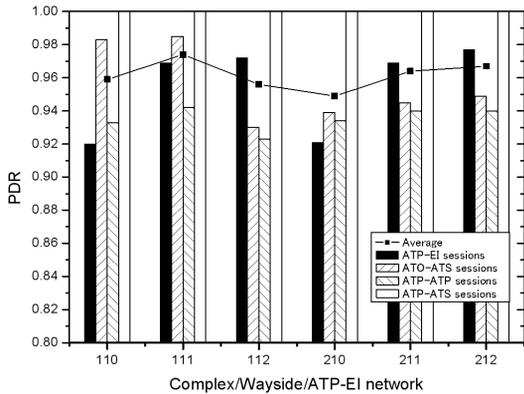


Fig. 4. Packet delivery ratio under LTE wayside configurations

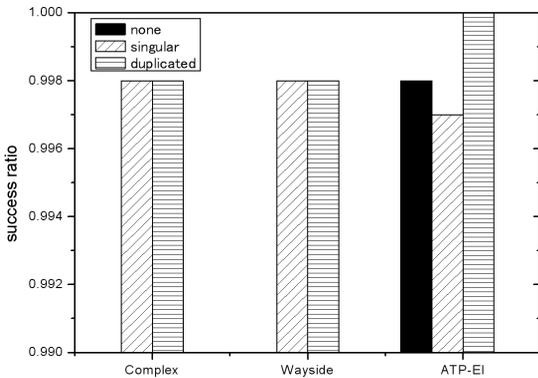


Fig. 5. ATP-EI control success ratio under IEEE 802.11n wayside configurations

제어 메시지가 다른 메시지와 함께 처리되기 때문인 것으로 보인다. 특히 각 역마다 위치하는 ATP와 EI의 경우 노드의 수가 많고, 처리하는 메시지의 수가 열차의 수와 비례하기 때문에 110 토폴로지로 구성했을 때 전달율이 급격히 낮아지는 것으로 판단된다.

IEEE 802.11n으로 구성된 네트워크 토폴로지의 결과와 마찬가지로 ATP-EI 네트워크 구성을 다른 네트워크와 분리시키고 이중화된 구성을 적용해야 안정적인 열차 운영을 보장할 수 있다고 볼 수 있다.

Fig. 5는 IEEE 802.11n이 적용된 네트워크에서 ATP-EI 제어 성공율을 나타낸다. ATP-EI 제어메시지가 5초 이내에 하나 이상 성공적으로 전달되었을 때 ATP-EI 제어메시지 전달이 성공했다고 정의한다. 5초 이내에 ATP-EI 제어 메시지를 수신하지 못하면 열차의 안전거리 확보를 위해 시스템이 운영을 중단하기 때문에 단 1회의 제어 실패라도 전 구간 열차의 운영에 큰 피해를 주기 때문에,

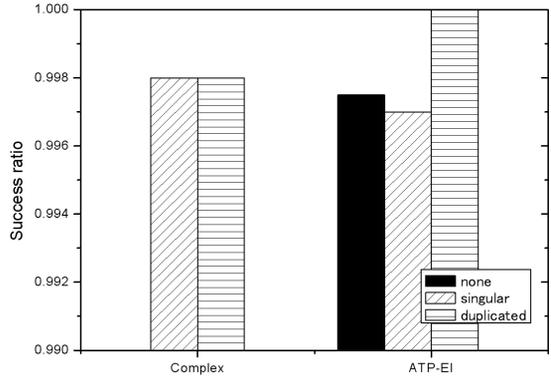


Fig. 6. ATP-EI control success ratio under LTE wayside network configurations

ATP-EI 제어 성공율은 지상 통신네트워크의 안정성을 측정하는 가장 중요한 지표라고 볼 수 있다. ATP-EI 제어 성공율은 콤플렉스 네트워크와 선로변 네트워크의 단일화/이중화와는 상관없이 ATP-EI 네트워크 단일화/이중화에 영향을 받는다. ATP-EI 네트워크가 독립적으로 존재하고 이중화되었을 때 100%의 성공율을 보였다. 또한, 독립적으로 존재하더라도 단일화된 네트워크는 100% 안정된 열차 운영을 보장하지 못하는 결과를 보였다. 따라서 열차 운영에 중요한 메시지를 전달하는 ATP-EI 네트워크의 경우는 메시지의 크기가 작고 발생하는 메시지의 양이 많지 않더라도 안정성을 보장하기 위해 기존의 네트워크와 독립적으로 운용하고, 이중화된 네트워크로 구성하여 열차 제어 실패 확률을 최소화해야 한다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 LTE가 적용된 네트워크에서 ATP-EI 제어 성공율을 나타낸다. IEEE 802.11n을 적용한 네트워크의 결과에서 나타났듯이, 콤플렉스 네트워크의 단일화/이중화 여부는 ATP-EI 제어 성공율에 큰 영향을 미치지 않았다. LTE를 적용한 네트워크에서도 100%의 제어 성공율을 보장하기 위해서 독립된 ATP-EI 네트워크 구성, 이중화된 구성이 필요하다.

Fig. 7을 통해 ATP-EI의 안정성에 대하여 종합해 보자. ATP-EI 제어 성공율은 오직 ATP-EI 네트워크 구성 방법에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한, 독립된 구성을 하였지만 단일화된 ATP-EI 네트워크를 구성했을 경우, 오히려 ATP-EI 네트워크를 콤플렉스 네트워크와 병합한 경우보다 안정성이 떨어지는 것을 알 수 있다. 역마다 존재하는 EI 장비와 유선 네트워크 장비의 동작에서 동작 오류가 일어났을 때 단일화된 ATP-EI 네트워크는 가장 낮은 안정성을 보이기 때문에 ATP-EI 네트워크는

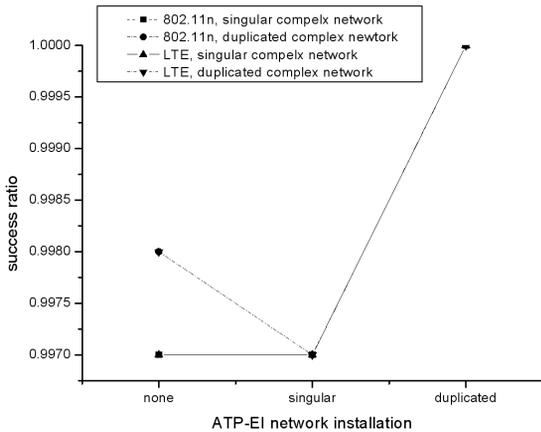


Fig. 7. ATP-EI control success ratio with respect to network configurations

어떤 형태로든 이중화된 구성을 적용해야 한다고 볼 수 있다.

5. 결론

IEEE 802.11n을 적용한다면 모든 네트워크를 이중화하여 구성하는 것(222 토폴로지)이 가장 적합하지만, 네트워크 설비비용을 최소화 시키고 네트워크 안정성을 극대화 하고자 한다면 ATP-EI 네트워크를 이중화하여 구성하고 콤플렉스 네트워크와 선로변 네트워크는 단일화하는 것이 적합하다고 볼 수 있다.

ATP-EI 네트워크를 이중화한 경우 콤플렉스 네트워크와 선로변 네트워크의 구성은 패킷 전송율과 전송 지연성능에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 LTE를 활용하는

경우에도 모든 네트워크를 이중화하는 것이 안정성과 성능 측면에서 가장 적합하지만 비용을 고려한다면 콤플렉스 네트워크와 선로변 네트워크를 단일화 하고 ATP-EI 네트워크를 이중화 한 뒤 안정성과 성능에 대한 추가적인 요구 발생 시 콤플렉스 네트워크를 이중화 하여 운영하는 것이 적합하다고 볼 수 있다.

References

1. QualNet, <http://web.scalable-networks.com>
2. G. Hasslinger, O. Hohlfeld, "The Gilbert-Elliott Model for Packet Loss in Real Time Services on the Internet," in Proc. Measuring, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB), pp.1-15, 2008.
3. R. Fantacci, M. Scardi "Performance evaluation of preemptive polling schemes and arq techniques for indoor wireless networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.45, no.2, May. 1996.
4. H. S. Wang, N. Moayeri, "Finite state Markov channel - a useful model for radio communication channels," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.44, no.1, Feb. 1995.
5. P Bhagwat, P. Bhattacharya, A. Krishma, S. K. Tripathi "Using channel state dependent packet scheduling to improve TCP throughput over wireless LANs," Wireless Networks, vol.3, no.1, Mar. 1997.
6. A. Markpoulou, I. Gianluca, Bh. Supratik, C. Chen-Nee, C. Diot, "Characterization of Failures in an Optical IP Backbone network," IEEE Transactions on Networking, vol 16, no. 4, pp.749-762, Aug 2008.
7. Seoul Metro web site, <http://www.seoulmetro.co.kr/page.action?mCode=G030020000>



방 준 호 (june3731@ajou.ac.kr)

2012 아주대학교 컴퓨터공학과 석사
2012~현재 아주대학교 컴퓨터공학과 박사과정

관심분야 : 네트워크 성능 최적화, 시뮬레이션 모델링



채 성 운 (unichae@ajou.ac.kr)

2009 아주대학교 컴퓨터공학과 석사
2009~현재 아주대학교 컴퓨터공학과 박사과정

관심분야 : 네트워크 성능 최적화, 시뮬레이션 모델링



김 형 진 (gilsium@gmail.com)

2012~현재 아주대학교 컴퓨터공학과 석사

관심분야 : 네트워크 성능 최적화, 시뮬레이션 모델링



박 성 준 (narcissus721@gmail.com)

2012~현재 아주대학교 컴퓨터공학과 석사

관심분야 : 네트워크 성능 최적화, 시뮬레이션 모델링



조 영 중 (yjcho@ajou.ac.kr)

1985 한국과학기술원 전자공학과 석사
1990 한국과학기술원 전자공학과 박사
1996~현재 아주대학교 교수

관심분야 : 멀티캐스트, 무선 네트워크, 트래픽 모델링



오 세 찬 (soh@krii.re.kr)

2004 광주과학기술원 정보통신공학과 석사
2004~현재 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실 선임연구원

관심분야 : 열차제어시스템, 네트워크



윤 용 기 (ykyoon@krii.re.kr)

1996 충북대학교 전기공학 석사
2005~현재 한양대학교 제어공학 박사수료
2002~현재 한국철도기술연구원 무선통신열차제어연구단 선임연구원

관심분야 : 자동제어, 지능형시스템, 제어계측



김 용 규 (yjkim1@krii.re.kr)

1987 단국대학교 전자공학과 석사
1993 DEA in Control Engineering from Institute National Polytechnique de Lorraine, France
1997 Ph.D in Control Engineering from Institute National Polytechnique de Lorraine, France

관심분야 : 자동제어, 지능형시스템, 제어계측