무선통신기반열차제어시스템의 핸드오프 최적화 연구

A Study on Optimal Handoff of Wireless Network for Communication Based Train Control(CBTC)

이화윤*　　최규형**

ABSTRACT

According to the conventional train control system, the area of each train is detected by plural track circuits located in a constant distance on railway lines in order to control a distance between trains. The conventional train control system has the difficulty in making use of the substructure thoroughly and transmitting enormous amount of information. To solve those problems, the wireless CBTC system has been a global issue.

To apply wireless CBTC system to train system, the following two requirements are preferentially necessary: (1) Dualizing wireless CBTC system to control trains ceaselessly in a system accident, (2) Improving dependency of transmitted information for location and velocity to protect collision and derailment of lightweight trains in advance.

1. 서론

기존의 열차제어시스템은 주행선로에 궤도회로를 일정한 간격으로 설치하여 열차의 위치를 감지하고, 감지해낸 열차의 위치(area)에 의하여 각 열차에 대한 속도코드 생성 및 지상에 설치된 선로방향전환기 및 신호기를 제어한다. 또한 선로를 전송매체로 하여 속도제어정보 등을 열차에 전송함으로써 열차사이의 간격을 제어하는 방법을 사용하고 있다. 이에 반해 무선통신기반 열차제어시스템(이하 무선 CBTC : 무선 Communication Based Train Control)에서는 각 열차가 열차속도감지기(열차자체의 속도 및 위치 검지), 비어콘(열차의 절대위치 보정) 등 센서를 사용하여 열차의 속도 및 위치를 검출하며 검출해낸 위치(point)정보를 무선을 통해 전송하고 지상에서 열차의 간격을 제어한다. 또한 궤도회로 및 신호기 등 지상설비가 불필요하기 때문에 선로변 신호시스템 구축비용 및 유지비용을 대폭 줄일 수 있다. 그래서 무선CBTC가 세계적으로 연구되고 있다. 무선CBTC를 도입하기 위해서는 우선적으로 다음과 같은 문제점을 해결해야 된다고 본다. 첫 번째로 무선시스템(선로변 시스템 또는 차상 시스템)에 고장이 발생하여도 열차를 연속적으로 제어할 수 있도록 무선CBTC시스템을 이중화해야 한다. 두 번째로 차량의 충돌 및 탈선을 방지하여야 하기 때문에 열악한 무선 환경에서 정보(열차의 위치 및 속도)의 전송에 대한 신뢰성을 보장해야 한다. 빈번한 핸드오프는 데이터를 안정적으로 전송하기 위한 무선통신네트워크의 신뢰성에 있어서 무엇보다도 중요하다. 이에 본 논문에서는 열차가 이동 중에 필요한 정보를 끊김없이 제공하기 위한 CBTC 무선통신시스템 및 구성에 요구되는 사양에 대하여 논하고, 고속의 열차주행에 따라 빈번하게 발생하게 되는 핸드오프 회수를 최소화 할 수 있는 핸드오프 최적화 알고리즘을 제안하여 시뮬레이션 프로그램을 통하여 분석해 보았다.

2. CBTC 통신망 구성

CBTC에서의 통신망은 그림1 에서 보이는 것처럼, 선로를 따라 주행하는 차상과 지상간의 원활한 무선통신을 수행하고, 자동열차운행관리시스템(ATS)과 영역제어기(Zon Controller)의 원활한 유선통신을 수

† 책임저자 : 비회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 석사과정
E-mail : Leehy0312@naver.com
TEL : (02)2183-8046　FAX : (02)2128-8049
** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 교수

행하기 위한 유무선 통신 인프라로서, CBTC시스템에서 무선망의 범위는 지상의 고정무선장치와 차상의 이동무선장치간의 무선링크 및 각각의 네트워크와의 인터페이스부분까지이다.

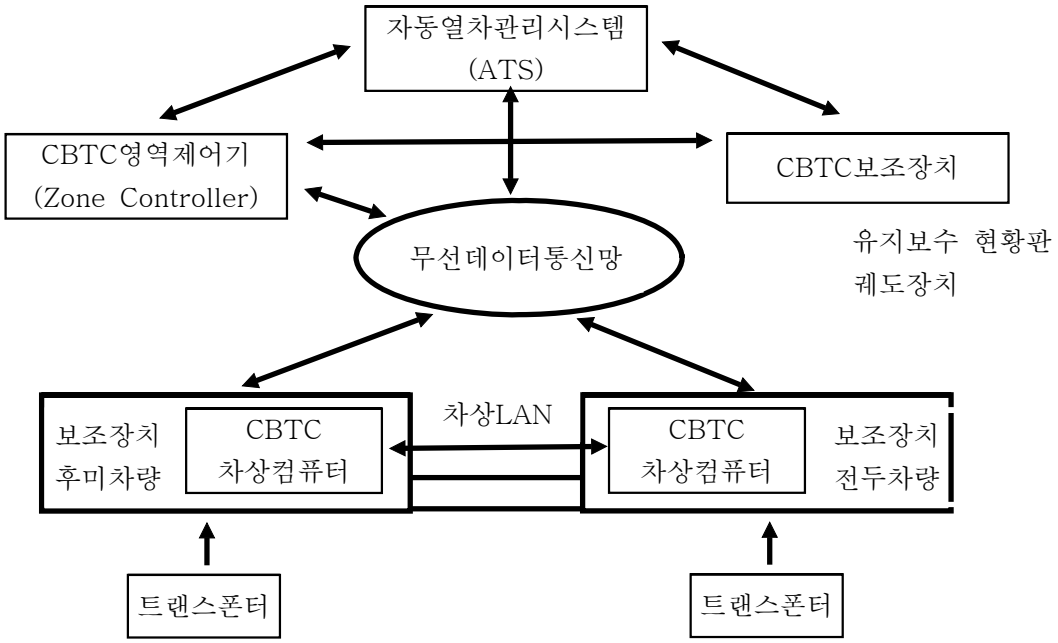

그림1. CBTC기능 및 통신망

지상무선통신망 구성에 있어서, 데이터의 빠른 전송과 결함발생시 고장 발생역역을 최소화하기 위해서는, 인프라스트럭쳐 구서의 무선 LAN망에서 트리형 토폴로지로 AP망을 구성하는것이 바람직하다. 특히, 백본망의 구성의 링 토폴로지이고 AP망의 연결이 링 토롤로지일 경우에는 데이터의 손실 발생가능성이 있으므로 AP망을 트리형 토폴로지로 구성할 필요가 있다.

이 경우, 유선 백본 네트워크에 접속되는 AP와 같은 지상무선장치는 광케이블과 접속하기 위해 몇 단계의 신호변환과정을 처리하기 위한 네트워크 접속기기 들이 필요하다. 이상과 같은 검토를 통해 구성된 CBTC 통신시스템 구성도를 그림2 에 보인다.

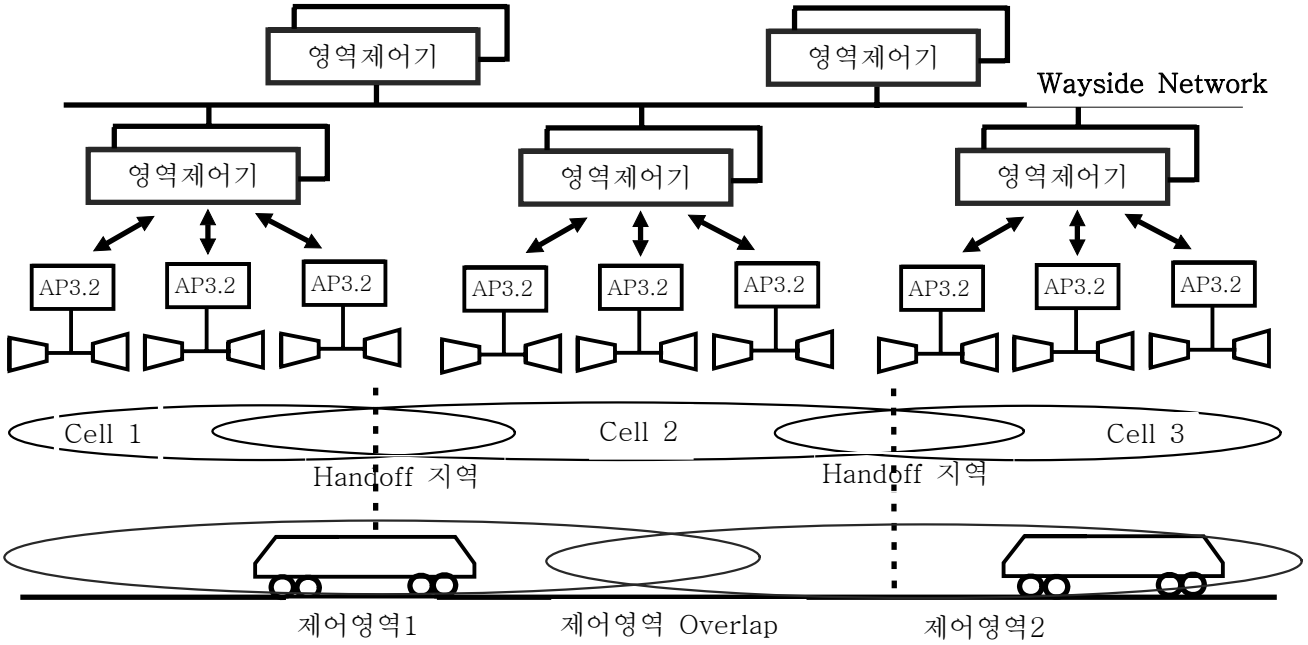

그림2. CBTC 통신시스템 구성도

3. CBTC 무선네트워크를 위한 요구사항

CBTC에 대한 기술적 요구사항을 감안하여 CBTC용 무선네트워크에 대한 목표성능은 표1과 같이 설정하였다. 한편 해외 사례를 보면, 미국 뉴욕지하철의 CBTC 프로젝트에서 무선데이터 전송속도 최대 1.4Mbps, BER 10^{-4}를 목표성능으로 하고 있으며, 프랑스 파리지하철의 CBTC프로젝트에서는 무선데이터 전송속도 1Mbps(최대 3Mbps), BER10^{-4}, 시속90Km에서의 고속로밍 구현을 목표성능으로 하고 있는 등 표1과 큰 차이가 없다.

항 목	목표성능	비 고
무선데이터 전송속도	1Mbps 이상	
고속로밍 가능 최대 속도	100Km/h	
데이터 링크 실패율	1%	BER10^{-4}
순수 유무선링크 반응시간	0.2초 이하	

BER : Bit Error Rate(비트 오류율)

표1. CBTC무선네트워크 사양

3-1. CBTC무선네트워크 구축시 고려사항

CBTC무선네트워크을 구축하는데 있어 기본적으로 고려하여야 할 사항은 다음과 같다.

1) 무선망을 포함하여 전체 통신만을 단일 서브넷(subnet) 네트워크로 구성함으로써, 차상 이동국의 이동에 따른 지상기지국의 핸드오프에 대한 부담을 최소화하고, 열차의 고속주행에 효과적으로 대응하도록 한다.

2) 열차운행관리장치와 지상장치, 지상장치간의 통신경로에 중복성(redundancy)를 확보함으로써 통신신뢰도를 향상시키도록 한다.

3) 전송경로에 오류 발생시 경로 복구가 빠를 것 등이다.

3-2. CBTC무선네트워크 구성

1) 2중화

무선네트워크의 신뢰성과 안전성을 보장하기 위한 방법으로 그림3과 같이 이중화한다. 이와 같이 이중화에 의하여, 하나의 무선링크가 실패하는 고장이 발생할 경우에도 별도의 복구시간 없이 통신 접속이 유지됨으로써 무선링크의 지속시간이 증가되고 가용성이 향상되는 효과를 얻을 수 있다.

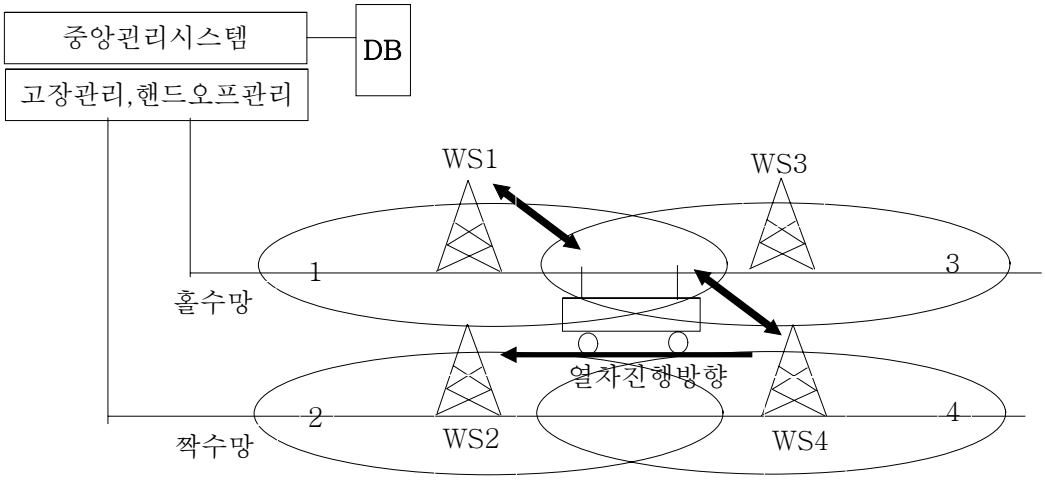

그림3. 무선망 2중화 구성도

2) 고속로밍

열차가 주행하면서 한 통신구간에서 인접한 통신구간으로 이동하게 되는데, 이때 통신이 단절되지 않고 송수신이 유지되는 것이 매우 중요하며, 차상 이동국과 지상무선기지국간의 통신범위(cell coverage) 및 로밍(roaming)을 정확하게 규정할 필요가 있다.

로밍은 일반적으로, 차량 시스템이 지상 인접 cell들로부터의 수신된 전계강도(RSS : Received Signal Strength)를 비교하여 수신신호강도가 우세한 cell을 선택하여 자동적으로 통신 채널을 맞추어 핸드오프 하는 방식으로 수행된다. 이때, 핸드오버의 결정 기준으로는 수신 신호 강도 외에도, 문턱값(일반적으로 회선 품질 문턱값)과 히스테리시스 마진을 사용한다.

IEEE 801.11b 무선랜 표준규격의 무선장치에서 허용할 수 있는 최소 수신감도가 -80dBm으로 보고 되어 있고, 안정적인 로밍을 위한 히스테리시스 마진을 15dB라고 하면, 셀간격 즉 안테나 배치를 위한 기지국 간격을 산정하기 위한 수신 감도 허용치는 다음과 같이 된다.

수신감도 허용치 = -80dBm + 15dB
= -65dB

4. 핸드오프 최적화

본 장은 핸드오프 최적화를 위한 핸드오프 회수 최소화 알고리즘을 살펴보고 이를 시뮬레이션을 통하여 적용가능여부를 검증해 보았다.

4.1 CBTC 무선네트워크에서의 핸드오프 문제점

차량이 고속으로 주행하는 철도환경에서의 빈번한 핸드오프 및 지연으로 발행하는 통신의 신뢰성 저하는 철도안전을 저해하는 중요한 요인으로 작용한다. 그래서 BS(Base Station)에 안전한 이동성을 지원하기 위한 다양한 핸드오프 기법이 개발되어 발표되었으며 핸드오프 지연에 대한 문제점을 해결하기 위한 많은 연구들이 있었다. 대부분의 경우 재인증에서 발생하는 지연을 줄이는데 있었다. 비록 이러한 연구들이 IEEE 802.11 WLAN의 핸드오프 지연에 많은 개선을 가져왔지만 근본적인 문제점이 해결되지는 못하였다. 주된 이유는 IEEE 802.11 WLAN에서의 핸드오프 지연의 90% 이상을 차지하는 부분이 스캐닝에서 발생하는 지연 시간이기 때문이다. 따라서 IEEE 802.11 WLAN에서는 BS에서 현재 이용가능한 새로운 AP(new Access Point)를 탐색하는 과정인 스캐닝 과정(Scanning Phase)과 새로 접속한 AP에서 채널에 대한 사용 권한을 확보하는 재인증 과정(Reauthentication Phase)에서 핸드오프 지연(Handoff Delay or Latency)이 주로 발생한다.

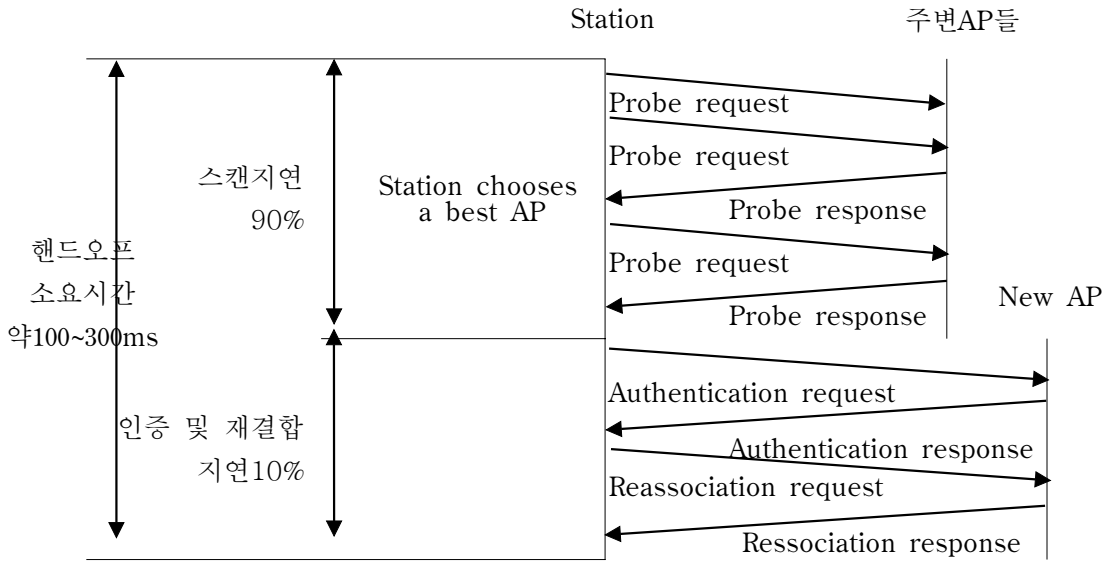

그림4. 802.11 WLAN 핸드오프 수행절차

4.2 핸드오프 회수 최소화 알고리즘

IEEE 802.11규격에 의한 무선랜시스템에서는 발사할 수 있는 전파강도가 작기 때문에, 이를 보완하기 위하여 선로를 따라 다수의 지상기지국(AP)을 설치하여야 한다는 문제가 있고, 이에 따라 열차의 고속주행시 핸드오프 회수가 매우 빈번하게 발생할 개연성이 있다. 따라서 핸드오프 회수와 제어방식을 최적화하여 데이터 손실을 최소화하는 핸드오프 알고리즘의 개발이 매우 중요하다.

프로그램의 처리과정을 그림5의 흐름도에 보인다. 기본적으로는 선로를 따라 열차를 주행시켜서 열차의 위치를 진행시키고, 그에 따른 전파 수신감도의 변화를 계산으로 갱신하고, 핸드오프 필요성이 있을 때에는 핸드오프 알고리즘에 따라 새로운 AP를 검색하고 기준에 적합한지를 판정한 다음 조건이 일치할 경우 인증하는 과정을 걸쳐 새로운 AP로 핸드오프하도록 하는 과정을 프로그램으로 구현하였다.

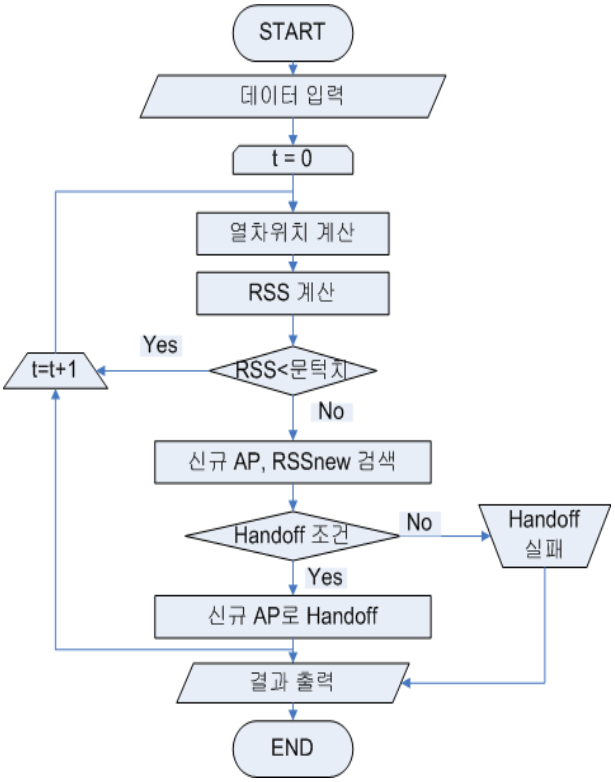

그림5. 프로그램 흐름도

4.3 시뮬레이션

프로그램이 작성 완료된 후, 표2와 같은 case #1를 상정하여 시뮬레이션을 수행하고 프로그램을 평가하였다. 본 고에서는 철도선로에서 다수의 지상기지국이 설치되어 있는 무선네트워크상에서,열차 주행에 따라 발생하게 되는 핸드오프 회수 및 통신접속되는 지상기지국의 개수 등을 평가하는 시뮬레이션 프로그램을 제안하여 선로에 대한 기하학적인 모델링에서 시작하여, 무선통신네트워크의 모델링, 핸드오프 제어 알고리즘의 모델링을 통하여, 선로상에서 열차의 주행시 발생하는 통신상황을 시뮬레이션 하였다

항 목	내 용	비 고
선로길이	5.2Km	
열차주행속도	60[Km/h]	
AP 수	36	
핸드오프 알고리즘	문턱치+ 히스테리시스 마진	

표2. Case #1 시뮬레이션 파라메터

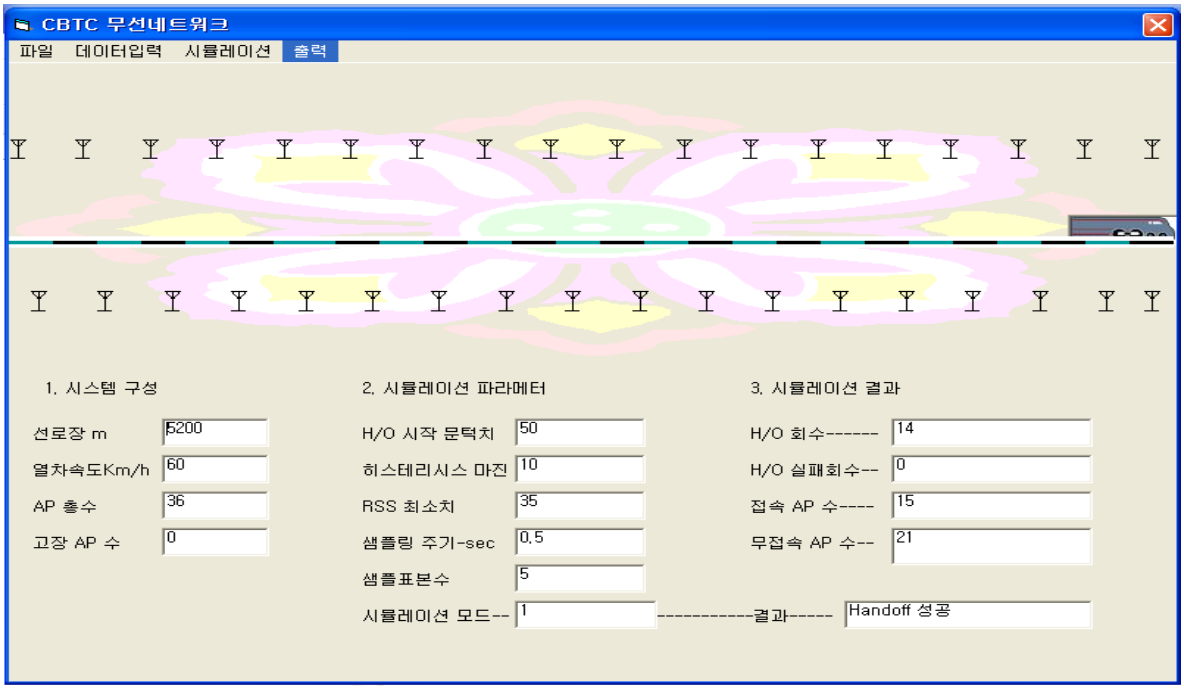

그림6. Case #1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과를 그림6 에서 보는 것처럼, 열차가 전 선로를 주행하는 동안 핸드오프를 14회 수행하면서 단절없이 성공적으로 통신이 연결되었다는 것을 알 수 있다. 즉, 핸드오프 14회중에서 실패한 핸드오프는 없었다는 것을 알 수 있다. 이때, 선로에 설치된 총 36개의 AP 중에서, 실제로 열차와의 통신에 사용된 것은 15개로써, 나머지 21개는 열차와 통신이 연결되지 않고 사용되지 않았음을 알 수 있다.

5. 결론

본 고에서는 철도선로에서 설치되어 있는 CBTC무선네트워크에서 열차주행에 따라 발생하게 되는 핸드오프 회수를 최적화하여 데이터손실 및 지연을 최소화 하는 핸드오프 방법을 제안하고 이를 시뮬레이션을 통해 결과를 확인하였다. 향후 평가 프로그램의 작성 완료된 후, 실제 선로 모델에 대하여 시뮬레이션 및 시험을 수행하여 그 타당성을 검증하고 프로그램 모델을 보완 완료하도록 할 계획이다.

참고문헌

1. IEEE Std 1474.1-2004, IEEE Standard Method for CBTC Performance and Function Requirements
2. 임시호(2007) “CBTC 무선통신 장비의 통신장애 분석 및 개선에 관한 연구” 석사학위논문, 연세대학교
3. 권경남, 이채우(2004) “가변적인 탐색시간을 이용한 IEEE 802.11 무선랜의 고속 핸드오프 알고리즘 한국통신학회지
3. 송중호(2006) “CBTC 무선안테나 최적 배치 프로그램 개발에 관한 연구” 서울산업대학교 철도전문대학원
4. 김윤배(2005) “CBTC를 위한 고속로밍 알고리즘과 통신장비 위치 최적화 연구” 석사학위논문, 서울산업대학교
5. 김종기(2006) “무선통신기반 열차제어를 위한 통신시스템 구축방안에 관한 연구” 한국철도학회논문집
6. Internet Website "http://www.tsd.org" CBTC를 위한 홈페이지