

# 안정성과 신뢰성을 고려한 무선통신기반 열차제어시스템 (Radio CBTC) 구조 및 핸드오프 방법

## Radio Communication Based Train Control system architecture and handoff scheme for supporting the safety and reliability

윤용기\*, 정락교\*, 이병송\*, 최규형\*, 황현철\*\*, 이재호\*\*, 곽경섭\*\*

Yoon Y K, Jeong R G, Lee B S, Choi K H, Hwang H C, Lee J H, Kwak K S

### Abstract

Communication Based Train Control System supports the easy maintenance & management and also have the capability to send more informations than the existing one but is less expensive. Tolerance against fault/failure and reliable data transmission are very important issues with this system since it has the responsibility of man's safety. In this paper, we suggested the schemes to support the reliable transmission quality and fault safety. Also we verified through simulation.

### 1. 서론

기존의 열차제어시스템은 주행선로에 궤도회로를 일정한 간격으로 설치하여 열차의 위치(area)를 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.

무선통신기반 열차제어시스템 (이하 무선 CBTC : 무선 Communication Based Train Control)에서는 각 열차가 열차속도검지기(열차자체의 속도 및 위치 검지), 비이콘(열차의 절대위치 보정) 등 센서를 사용하여 열차의 속도 및 위치를 검출하며 검출해낸 위치(point)정보를 무선을 통해 전송하고 지상에서 열차의 간격을 제어한다. 즉 기존의 열차 검지방식은 열차의 위치가 공간적으로 검지하지만 무선CBTC에서는 열차의 위치를 연속적인 점으로 검지한다. 또한 궤도회로 및 신호기 등 지상설비가 불필요하기 때문에 선로변 신호시스템 구축비용 및 유지비용을 대폭으로 줄일 수 있다[1].

또한 기존의 열차제어시스템은 열차 보호를 제공하는데 효과적이지만 하부 구조물을 최대한 사용하는 데는 비효율적이며 전송할 수 있는 정보량도 한정된다. 이러한 문제를

\* 한국 철도 기술 연구원

\*\* 인하대학교

해결하기 위해 무선 CBTC가 세계적으로 연구되고 있으며 유럽에서는 ETCS(European Train Control System), 미국에서는 고밀도 지역에서 사용하기 위한 Hughes사의 EPRLS, 일본에서는 ATACS(Advanced Train Administration and Communication System)이 있다.

무선 CBTC를 경량전철시스템에 도입하기 위해서는 우선적으로 다음과 같은 문제점을 해결해야 한다. 첫 번째로 무선 시스템(선로변 시스템 또는 차상 시스템)에 고장이 발생하여도 열차를 연속적으로 제어할 수 있도록 무선 CBTC시스템을 이중화해야 한다. 두 번째로 경량전철의 충돌 및 탈선을 방지하여야 하기 때문에 열악한 무선 환경에서 정보(열차의 위치 및 속도)의 전송에 대한 신뢰성을 보장해야 한다.

본 논문에서는 무선 시스템의 고장에 대한 내성을 제공하기 위해 무선망의 이중화 방안을 제안한다. 또한 정보 전송 품질의 악화를 가져오는 빈번한 핸드오프와 지연을 방지하기 위해 열차시스템이 측정된 위치 정보를 활용하는 방법을 제안하고 모의 실험을 통해 이를 검증한다.

## 2. 본문

### 2.1 선로변 무선환경

경량전철시스템에 무선 CBTC를 적용하기 위해서 전파손실을 예측하였다. 이동전파환경에서 전파손실의 요인으로는 무선시스템이 설치될 선로의 주변 지형의 불규칙, 기후변화 및 나무·건물 등이 있다.

전파손실을 예측하기 위해서 전파도달거리를 측정하여 검증된 Okumula/Hata 모델을 적용하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

#### 1) 예측조건

- 주파수 : 2.4GHz, 지상안테나 높이 : 10m, 차상안테나 높이 : 3m
- 송신안테나 이득 : 11dBi, 수신안테나 이득 : 9dBi

#### 2) 예측결과

송신 전력(dBm)	Pt	30
수신 감도(dBm)	Ps	-98
링크 마진(dB)	M	6
송신 안테나 이득(dB)	Gt	14
수신 안테나 이득(dB)	Gr	9
중심 주파수(MHz)	f	2400
송신 안테나 높이(m)	ht	10
수신 안테나 높이(m)	hr	3

허용 수신 전력(dBm)	Pr	-92
도심 지역에서의 허용 전파 경로 손실(dB)	L	145
대도시( $f > 200\text{MHz}$ ) 지역별 수정치	A(hr)	2.690
	log(d)	0.092
전파경로거리(km)	d	1.236

또한 집중적인 강우에 의한 전파의 전계강도의 감쇄발생의 경우 10GHz 대역이상으로 주파수가 높아질수록 대기중의 수증기나 강우에 의한 영향이 매우 커지는 특성이 있는데 2.4GHz대역에서는 심각한 문제를 발생할 것으로 보이지 않는다.

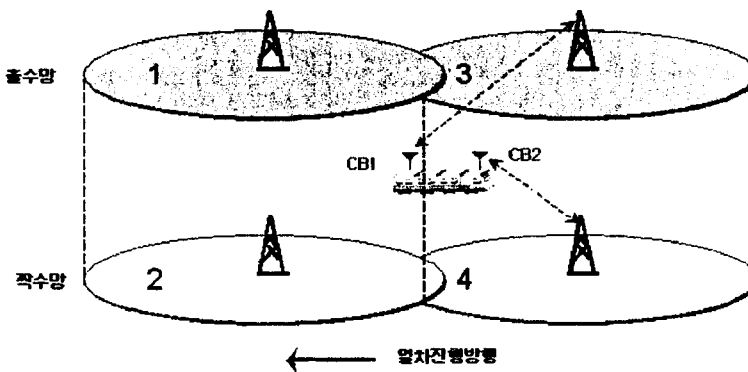
## 2.2 무선망 이중화 방안

무선망 이중화는 선로변 무선시스템 이중화 및 차상에 장착되는 무선시스템 이중화로 구분되며 [그림1]과 같이 나타낼 수 있다.

선로변 무선시스템은 이동 통신에서와 같이 하나의 셀을 형성하고 셀내에 위치한 차량 시스템에 무선 링크를 제공한다. 만약 선로변 시스템이 고장나면 담당하던 셀에 위치한 열차들은 선로변 시스템과 교신을 하지 못하기 때문에 중앙국은 열차를 제어할 수 없다. [그림 1]에서처럼 한 셀을 담당하는 선로변 시스템으로써 두 대를 설치하고 각각이 다른 무선 채널에서 독립적으로 동작하도록 하면 이것을 방지할 수 있다. 한 선로변 시스템에 고장이 발생해서 교신하던 열차에 무선 링크를 제공하지 못하면 다른 시스템이 이를 대신하여 수행한다.

차상 무선시스템의 이중화는 선두 차량(CB1)과 후미 차량(CB2)에 서로 독립적으로 동작하는 차상 무선시스템을 설치하여 구현할 수 있다. 정상상태에서는 선두 차량 시스템의 송수신 데이터만을 실효 데이터로 처리하고 만약 선두 차량 시스템에 고장이 발생하면 후미 차량의 송수신 데이터를 유효 데이터로 처리하도록 한다.

정상 상태에서 CB1은 홀수망(셀 ID = 1, 3, 5,...)과만 교신을 수행하도록 하며 마찬가지로 CB2는 짝수망(셀 ID = 2, 4, 6,...)과만 교신하도록 한다. 이것을 통해 CB1과 CB2의 독립적인 동작을 보장하고 무선 자원을 균일하게 분배할 수 있다. 만약 CB1이 3번 셀의 선로변 무선시스템과 교신중에 1번 및 2번 셀로 이동하면 1번 셀로 핸드오프를 수행한다. 마찬가지로 CB2는 4번 셀에서 2번 셀로 핸드오프를 수행한다.

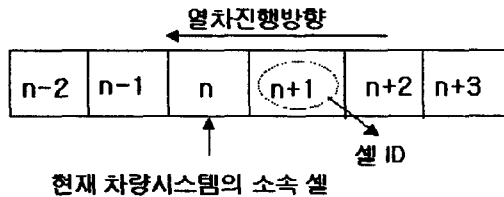


[그림 1] 무선 망 이중화 방안

## 2.3 핸드오프 방안

### 1) 정상 상태 핸드 오프 방안

이동 통신에서 핸드오프는 대부분 이웃 셀의 수신전계강도(RSS : Received Signal Strength)를 비교하여 핸드 오프 시점을 결정한다[2]. 본 논문의 핸드오프 방법은 이것을 바탕으로 한다. 차량 시스템은 주기적으로(보통 0.5초)마다 이웃 셀들의 RSS를 표본화한다[3]. 이 때, 각 셀의 N 표본값들의(1~5 표본값) 평균값을 특정 기준에 따라 비교하여 RSS가 우세한 셀을 선택한다[2]. [그림 1]과 같은 셀 구조에서 핸드오프를 위해 차량 시스템은 적어도 6개 셀들([그림 2])의 RSS를 측정해야 한다.



[그림 2] RSS 측정 계획

지상 중앙국은 각 셀에 소속한 열차의 수와 위치를 알 수 있기 때문에 지상 중앙국이 핸드오프 여부를 결정하는 것이 차량 시스템이 결정하는 것보다 유리하다. 부연하면 차량 시스템이 이동하려는 셀이 들어오는 차량 시스템에 할당할 수 있는 채널이 없을 경우 핸드오프를 할 수 없는데 이것을 중앙국은 미리 채널사용상태를 알기 때문에 차량에 특정 조치를 취할 수 있기 때문이다. 이 특정조치는 열차가 셀경계 이전의 특정위치까지만 운행하도록 하고 여분의 채널이 생기면 핸드오프를 수행하도록 하는 것이다.

또한 무선 CBTC에서 중앙국은 열차의 위치 정보를 알 수 있기 때문에 핸드오프시점을 결정하는 알고리즘에 이 정보를 활용할 수 있다. 이동 통신에서는 빈번한 핸드오프를 줄이기 위해 히스테리시스( $H$ )와 문턱값( $T$ )를 함께 적용하지만 핸드오프 지연을 가져오며 연쇄적으로 무선 링크 품질 저하 및 동일 채널 간섭(Cochannel Interference)이 발생한다 [2][4]. 이 때문에 열차의 안전 운행을 보증해야 하는 열차신호시스템에서 감시하던 열차를 잃어버릴 수 있으며 최악의 결과로 열차가 충돌할 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서  $H$  및  $T$ 와 더불어 위치 정보를 함께 활용함으로써 핸드오프 지연과 빈번한 핸드오프를 동시에 줄일 수 있다. 위치정보를 활용한 핸드오프 방식과 일반적인 핸드오프 방식은 다음과 같다.

가. 일반 이동 통신 시스템의 핸드오프 기준[4]

$$\begin{aligned}
 & \text{If } (P_{new} > P_{old} + H \text{ and } P_{old} < T) \\
 & \quad \text{choose } BS_{new} ; \\
 & \text{else} \\
 & \quad \text{maintain } BS_{old} ;
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $P_{old}$ 와  $BS_{old}$ 는 현재 소속 셀의 RSS와 철로변 시스템을 각각 나타내며  $P_{new}$ 와  $BS_{new}$ 는 이동하려는 셀의 RSS와 철로변 시스템을 표시한다.  $H$ 와  $T$ 는 각각 히스테리시스와 문턱값이다.  $H$ 는 셀경계에서 발생하는 pingpong effect를 줄이기 위해 사용한

다. 하지만 이것은 셀경계가 아닌  $BS_{new}$ 내에서 핸드오프가 발생하게 하여 과도한 셀 겹침을 유발하는 단점이 있다.

나. 제안된 핸드 오프 기준

```

handoff_state=0;
If (train location < cell boundary)
{
    If (Pnew > Pold+H and Pold < T)
    {
        choose BSnew ;
        Invert handoff_state;
    }
    else
        maintain BSold ;
}
else If (handoff_state == 0 & Pnew > T)
{
    choose BSnew ;
    Invert handoff_state;
}
else If (Pnew > Pold+H and Pold < T)
{
    choose BSnew ;
    Invert handoff_state;
}
else
    maintain BSold ;
}
    
```

(2)

열차의 위치가 셀 경계를 넘어가면 새로운 셀로의 핸드오프가 반드시 일어나도록 하여 핸드오프 지연을 제거한다. 만약 그 전에 새로운 셀로 핸드오프가 발생했으면 상태를 그대로 유지한다. 그 외의 영역에서는 고장발생에 대비하여  $H$ 와  $T$ 를 사용하여 핸드오프를 수행한다. 여기서 handoff\_state은 소속 셀과 진행방향에 있는 셀을 구별하는 기준이 된다.

## 2) 고장 발생시 핸드오프

앞에서 기술한 바와 같이 차량 시스템은 정상상태에서 적어도 6개 셀의  $RSS$ 를 주기적으로 측정하여 중앙국에 보고한다. 차량 시스템들이 보고하는  $RSS$ 와 차량 시스템의 위치를 활용해서 중앙국은 고장난 선로변 시스템을 확인할 수 있으며 그 셀로 이동중인 차량 시스템에게 이중화된 다른 선로변 시스템으로 핸드오프를 수행하도록 한다. 중앙국이 고장난 선로변 시스템을 확인하는 간단한 방법은 차량 시스템이  $aR$  ( $a < 1$ ,  $R$ : 셀반경)에 위치하였을 때  $RSS \ll Mean(RSS)$  at  $aR$ 를 만족할 경우 고장으로 판별하는 것이다.

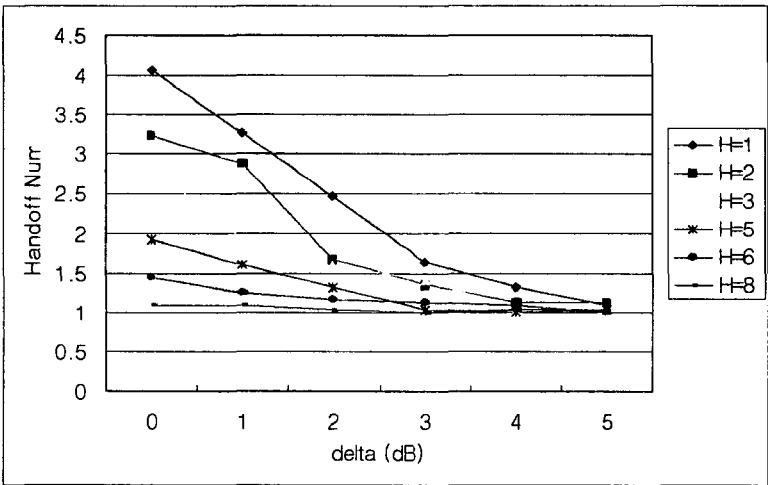
## 2.4 모의 실험

이동 통신에서 활용하는 모의 실험모델을 통해 위치를 활용한 핸드오프 방안의 성능을 검증하였다. 여기에서 사용하는 모의 실험 모델[3][4][5][6]은 [표 1]과 같이 이동 통신에서 일반적으로 사용하는 모델을 가정하였다.

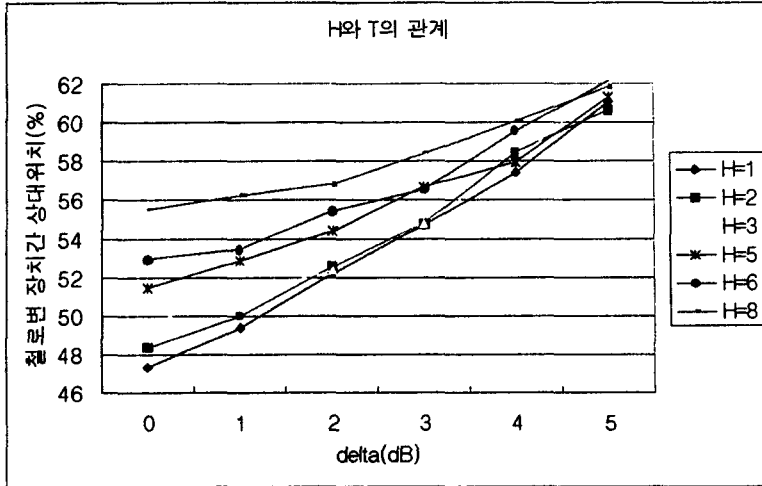
먼저 일반 이동 통신의 핸드오프 방식과 비교하기 위해 핸드오프 지연과 불필요한 핸드오프 발생수[9]를  $H$ 와  $T$ 에 대해 모의 실험을 통해 구하였다. [그림 3]으로부터 불필요한 핸드오프( $Handoff\ Num-1$ )를 줄이기 위해  $H=6\sim 8\text{ dB}$ 일 때  $T=4\sim 5\text{ dB}$ 이어야 한다. 이때 핸드오프 지연이 셀 간 거리의 10%만큼 발생함을 [그림 4]로부터 알 수 있다. 이것을 요약하면  $H$ 와  $T$ 를 증가하여 불필요한 핸드오프를 제거할 수 있지만 핸드오프 지연이 발생함을 알 수 있다. [그림 4]와 [그림 5]는 위치를 이용한 핸드오프 방안에 대한 핸드오프 발생수와 핸드오프 지연을 나타낸다.  $H=14\text{ dB}$ 이고  $T=3\sim 5\text{ dB}$ 이면 핸드오프 발생은 한번 발생하며 핸드오프 지연이 전혀 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 위치를 이용한 핸드오프 방안은 불필요한 핸드오프와 핸드오프 지연을 동시에 제거할 수 있는 방안임을 확인할 수 있다.

경로 손실 모델	Okumura & Hata Model [7][8]
음영 페이딩 모델	Lognormal Distribution ( $\sigma=4\text{dB}$ ) with exponential correlation function
셀 수	2
셀간 거리	2km
열차 이동 속도	60km
상관 거리	10m
RSS 표본화 주기	0.5초
표본 평균 주기	2.5초(5 표본값)

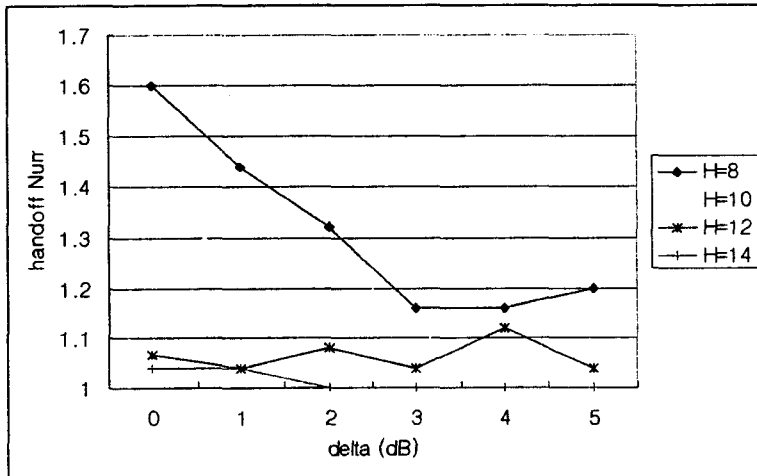
[표 1] 모의 실험 모델



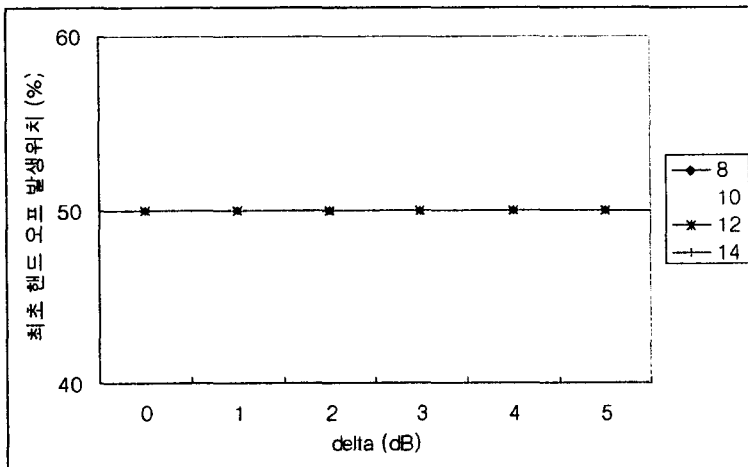
[그림 3] 델타(T)와 히스테리시스(H)에 따른 핸드오프 발생수



[그림 4] 델타(T)와 히스테리시스(H)에 따른 최초 핸드오프 발생 위치



[그림 5] 위치를 활용한 핸드오프 방안에서 핸드오프 발생수



[그림 6] 위치를 활용한 핸드오프 방안에서 핸드오프 발생 위치

### 3. 결론

본 논문에서는 Okumula/Hata의 경로손실 모델 및 선로변 무선환경을 바탕으로 무선망의 이중화 방안과 이중화된 망과 연계한 고장 시 핸드오프 방법 그리고 위치를 활용한 핸드오프 방법을 제안하였다. 또한 차량 장치가 측정한 위치를 활용한 핸드오프 방법에 대해 모의 실험을 통해 성능을 평가하였고 기존 핸드오프 방식에서 발생하는 지연 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다. 추후 고장 탐지 방법에 대한 자세한 연구와 핸드오프 방법과 열차 자동 제어 알고리즘을 연계한 알고리즘에 관해 연구할 것이다.

무선 시스템을 활용한 열차 제어 시스템은 비용과 시설 유지/보수 측면에서 많은 장점이 있지만 인간의 안전을 위해서 시스템의 신뢰성은 매우 중요하기 때문에 무선망의 신뢰성을 위한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다.

### 참고 문헌

- [1] 최성규외 9명, 경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과보고서(분야 : 신호제어 시스템기술개발), 건설교통부, 1999.12.
- [2] G.P. Pollini, "Trends in Handover Design," IEEE Commun., Mag., Mar., 1996, pp.82-90.
- [3] M. Gudmundson, "Analysis Handover algorithm," Proc., 41st IEEE VTC, 1991, pp. 537~554.
- [4] Nishith D. Tripathi, "Handoff in Cellular Systems," IEEE Personal Commun., Mag., Dec., 1998, pp.26~37.
- [5] M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems," Elect.Lett., vol. 27, no. 23, Nov. 1991, pp.2145~46.
- [6] C.Loo and N. Secord, "Computer models for fading channels with applications to digital transmission," IEEE Trans. Vehic. Tech., vol. VT-40, 1991, pp. 70~707.
- [7] Theodore S. Rappaport, Wireless Communications, Prentice Hall, 1996.
- [8] SAMPEI, Applications of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Communicaton, Prentice Hall, 1997.
- [9] P. Dassanayake, "Dynamic adjustment of propagation dependent parameters in handover algorithms," Proc. 44th IEEE VTC, 1994, pp. 73~76.