

열차운행 중 측정된 ATC 신호 정밀분석

The Precise Analysis for ATC Signal Measured in Movement

이상용*, 강봉완*[†], 김성춘*, 고재진*, 최종수*, 김중기*, 임준기*Sangyong Lee*, Bongwan Kang*[†], Seongchun Kim*, Jaejin Ko*, Jongsoo Choi*, Junggi Kim* In
and Jungi Lim*

Abstract There is ATC(Automatic Train Control) signal in urban railway at Seoul Metropolitan Rapid Transit, which enables not only to have trains be moved automatically, but also to have trains stop forcibly by disconnecting it in case of emergency. That is why the ATC signal is important and related with safety. However, a discontinuous signal of ATC causes trains not to be operated appropriately. Therefore, this study is going to describe the management plan of ATC signal for the safe operation of trains and stability of the system by analyzing the data obtained with the device, which was developed with our own technology for line 7 at 2015, on a train while it is operating, and examining the amplitude of the signal among tracks and the variations of ATC signal as speed code changes.

Keywords : ATC, analyzing, management, operation, speed

초 록 서울도시철도 구간에는 ATC(Automatic Train Control) 신호시스템으로 구성되어, 자동운전이 가능할 뿐만 아니라 돌발상황 시에는 관제에서 비상정지 함으로써, 전동차 운행을 중지시킬 수 있어 안전과도 밀접한 관련이 있다. 그러나 불연속적인 신호가 발생될 때에는 무신호로 인식하여 원활한 전동차의 운행을 방해하는 요인이 되기도 한다. 본 논문에서는 2015년전동차에 탑재가 가능한 7호선용 ATC 자체개발 측정기를 활용하여 실제 운행 중에 수집된 ATC 신호데이터를 정밀 분석하여, 궤도와 궤도 사이의 신호의 크기 및 속도코드 변경 시 ATC 신호의 변화를 분석하고, 이 분석데이터를 활용하여 열차 안전운행을 위한 ATC 신호 관리방안을 제시하고자 한다.

주요어 : ATC, 분석, 관리, 운행, 속도

1. 서 론

1.1 연구동기 및 목적

도시철도 구간에는 ATC(Automatic Train Control) 시스템이 있어 자동운전이 가능하고 운행 상황에 맞게 적절하게 전동차 속도를 제어할 수 있다. 그런데, 이렇게 중요한 신호를

[†] 교신저자: 서울도시철도공사 기술연구소(bwkang@smrt.co.kr)

* 서울도시철도공사 기술연구소

그 동안 열차가 운행중인 상태에서는 제대로 측정하지 못했다. 그런데, 2014년 개발된 측정기를 활용하여 ATC 신호를 전동차 운행 중에 수집하여 저장할 수 있게 되었다. 수집된 데이터는 신호의 크기 뿐만 아니라, 노이즈 정도와 안정성 정도도 판단할 수 있는 정보를 제공한다. 이 정보를 분석하면 속도코드 변화 시와 반송파 주파수 변동시 전동차의 수신 신호변화, 궤도와 궤도 구간에서의 신호 크기 변화 등을 확인할 수 있다.

이 논문은 지금까지 확인하지 못했던 전동차 운행 중 수집된 신호 분석을 통해 운행구간의 신호 변화상태와 불연속 신호 발생 신호 분석을 통해 미래 고장예측 구간 등을 진단하고, 열차의 안정적인 운영을 위해 전체적인 열차신호의 관리방안에 대해 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 ATC(Automatic Train Control) 열차신호

열차로 전송되는 신호는 Cab carrier, Train detection carrier, code rate 등이 포함된 Compositd signal 인데, 이 신호에서 열차의 ATC/ATO 운행과 관련된 신호는 Cab carrier와 code rate이다. Fig.1(a)에서 Composite output은 Train detection output과 Cab output이 합성된 신호로 AF궤도회로에서 전동차로 전달되는 신호이다. Fig.1(b)는 열차가 궤도 점유시 전동차에서 수신하는 신호를 계측장비를 사용해서 측정된 데이터이다.

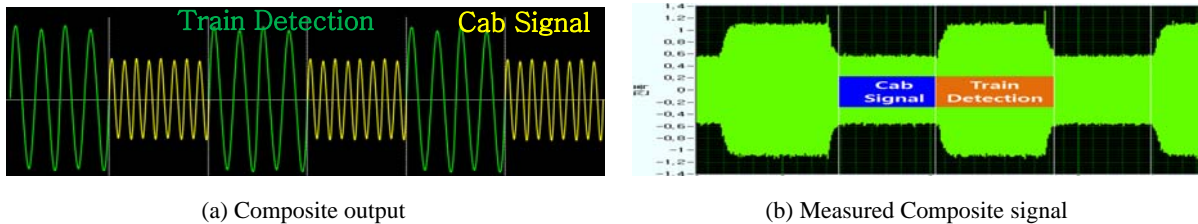


Fig. 1 Comparison of the two signal

전동차에서는 수신된 Compositd signal을 아날로그 필터를 거쳐 처리한 후 하드웨어적인 과정을 거쳐 Cab carrier 주파수와 Code rate 주파수를 분리한다.

Cab carrier의 주파수는 4550Hz와 5525Hz로 구성되어 있고, Code rate 주파수는 2.0 Hz, 3.0 Hz, 4.5Hz, 6.83Hz, 10.1Hz, 15.3Hz, 21.5Hz, 27.5Hz로 구성되어 있어, Table 1처럼 Cab carrier 주파수와 Code rate 주파수의 조합에 의해 열차의 속도제한 및 출입문 열림을 가능하게 한다.

Table 1 Speed code

	Carrier Freq	Code rate	Maximum speed [per hour]
1	4550Hz/5525Hz	2.0Hz	K-DOWN/K-UP
2	4550Hz/5525Hz	3.0Hz	01/YD
3	4550Hz/5525Hz	4.5Hz	35km/70km
4	4550Hz/5525Hz	6.83Hz	35km/70km
5	4550Hz/5525Hz	10.1Hz	45km/75km
6	4550Hz/5525Hz	15.3Hz	55km/80km
7	4550Hz/5525Hz	21.5Hz	60km/90km
8	4550Hz/5525Hz	27.5Hz	Left/Right door open

2.2 데이터 수집 방법

2.2.1 열차신호 데이터 수집

서울도시철도공사에서 자체 개발한 ATC 신호측정기를 전동차에 탑재하여, 운행 중 지상 궤도회로에서 발생하는 신호를 수집한다. 차량에 부착된 ATC안테나를 사용한 것이 아니라, 독립적인 안테나를 통해 열차신호를 수신하기 때문에 전동차 운행에 영향을 미치지 않고 전동차가 수신하는 신호를 측정하게 된다.

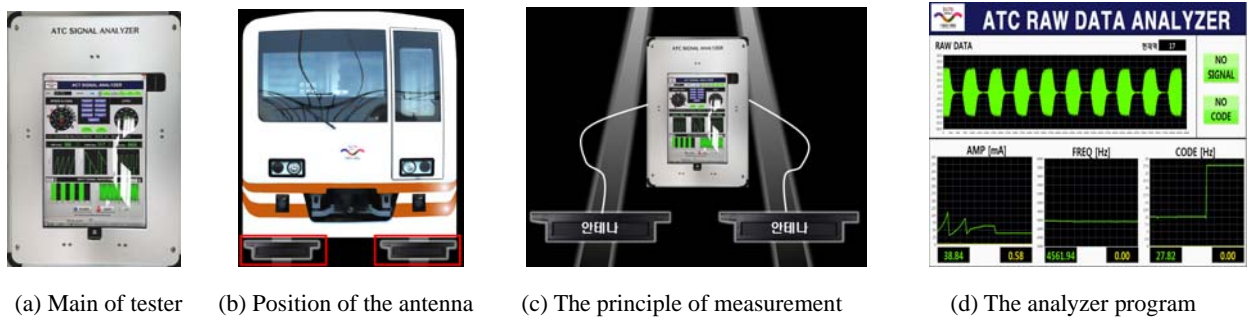


Fig. 2 The tester, principle of measurement and analyzer program

(1) 측정장치 사양

- 측정주파수 : FL(4,450Hz ± 10%), FH(5,525Hz ± 10%)
- 측정방식 : Pickup Coil Antenna를 통해 ATC Signal Frequency 및 Amplitude 측정
- Sampling speed : 100k samples/sec
- 측정 단위 : mA (기존 열차신호 측정기와 동일한 값을 현시하도록 교정)

(2) 데이터 수집 개요

- 데이터 수집 구간 : 서울도시철도공사 운행구간
- 안테나 설치 높이 : 레일로부터 22.5cm 높이에 설치
- 분석방법 : RAW DATA 분석 프로그램 개발

(3) RAW DATA 분석 프로그램

ATC Signal과 관련된 신호의 크기, 주파수, Code Rate 정보를 집중적으로 분석 가능하고, 위치확인을 위해 현재역 정보를 포함한다. 또한, RAW DATA는 4550Hz대역과 5525Hz대역을 정밀하게 분석할 수 있도록 표시하고 수신신호의 노이즈상태를 상세하게 분석가능하다.

(4) 측정방식 비교

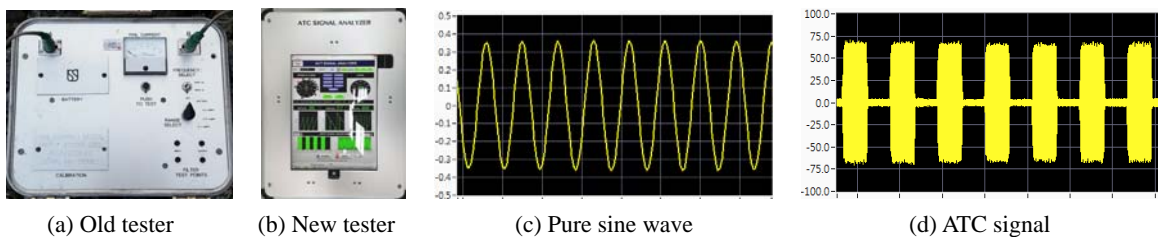


Fig. 3 The tester, principle of measurement and analyzer program

기존 측정기는 아날로그 방식의 display 장치를 사용하고 있어, 측정신호의 노이즈 간섭 여부를 확인할 수 없다. 뿐만 아니라, 아날로그 특성상 신호의 크기 측정 시 열차가 수신하는 cab carrier와 code rate가 합성된 신호가 아닌 Fig.3(c)와 같은 순수한 sine wave만을 측정 가능하다. code rate가 21.5hz이상 되는 변조된 신호를 측정 시 제대로 측정되는 것처럼 눈금이 특정 point를 가리키는 것처럼 보이지만, 이러한 현상은 CAB 신호만 측정하기 위해 실제 표시해야 하는 값의 절반만 표시된다.

반면에, 개발 측정기는 16비트의 resolution과 sampling 속도 100k samples/sec를 가지고 있어 신호의 노이즈 성분 측정이 가능할 뿐만 아니라, 측정하고자 하는 최대 Carrier frequency 5,525Hz도 정확하게 측정할 수 있는 성능을 가지고 있다. 또한 순수한 Sine wave 측정도 가능하고, code rate가 포함된 Fig.3(d)의 변조된 신호 측정 시에도 amplitude의 감소없이 정밀하게 측정 가능하다.

2.3 데이터 정밀분석

2.3.1 Raw data 분석

전동차가 운행 중 레일의 열차신호에는 Train Detection 신호, Cab 신호 그리고 Code rate신호가 포함되어 있다. 일반적으로 Track Detection 신호는 Cab 신호보다는 신호의 크기가 크게 전송되고, ATC와 관련된 신호는 Cab 신호이다.

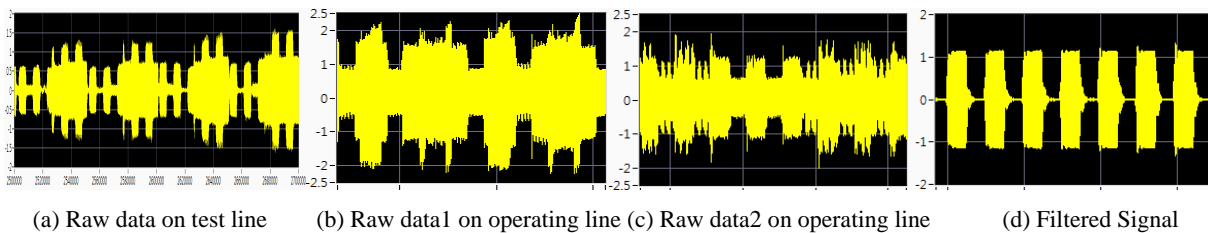


Fig. 4 Raw data and filtered signal

(1) 시험선 측정 데이터

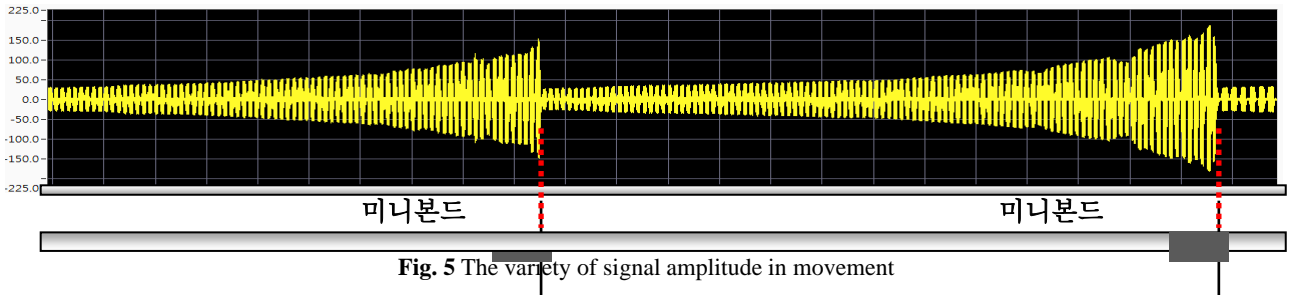
Fig.4(a)는 Cab signal 과 train detection signal 상태가 노이즈 없이 경계가 뚜렷하고 시험선 구간 전체에서 일관성있는 유사한 형태가 반복되고 있다. 수신된 신호를 cab 신호만 추출하기 위해 digital filter 처리하면 Fig.4(d)와 같은 파형을 얻을 수 있다.

(2) 본선 측정 데이터

신호의 잡음정도가 주변의 환경에 따라 상대적으로 많은 영향을 받는 본선구간에서는 Fig.4(b)와 Fig.4(c)처럼 여러 형태의 Raw data를 확인할 수 있다. 그러나 cab signal을 추출하는 filtering 처리 후에는 Fig.4(d)와 같이 양호한 신호를 얻을 수 있어 Raw data만으로 cab signal의 noise 간섭 여부를 단언하기는 어렵다.

2.3.2 폐색구간 내에서 파형

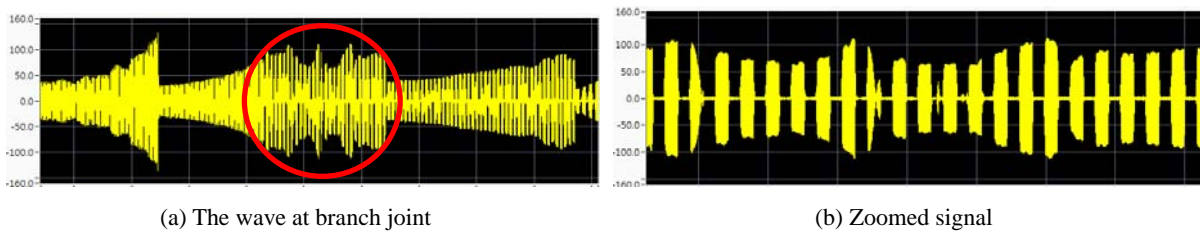
(1) 운행 중 신호크기 변화 분석



신호의 크기는 Fig.5처럼 송신측 미니분드와 가까워질수록 커지게 된다. 그리고 폐색구간이 변경되는 순간에 신호의 크기가 급격히 작아지는 것은 열차신호를 송신하는 미니분드의 거리가 폐색구간 변경으로 인해 멀어졌기 때문이다.

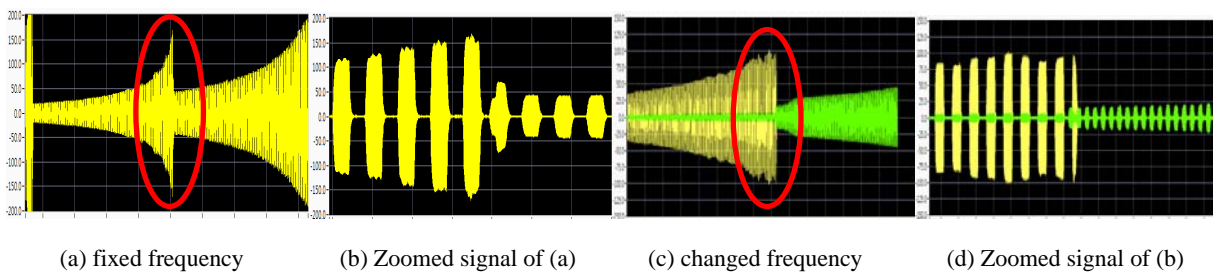
또한, 폐색구간 내에서 최대신호의 크기가 다른 것은 레일길이와 연관이 있다. 예를 들어, 직선구간의 긴 폐색구간일 경우 최끝단까지 일정신호가 도달해야 하기 때문에 신호의 세기를 강하게 해야 하지만, 폐색구간이 짧을 경우에는 신호를 상대적으로 약하게 하더라도 저항성분이 적어 충분한 신호가 도달하게 된다.

(2) 레일 분기부에서 신호파형



운행 중 분기부에서 신호변화는 미니분드에서 송신하지 않고 loop coil에서 신호를 송신하기 때문에 Fig.6처럼 측정된다.

2.3.3 폐색구간 변경 시 파형



폐색구간 이동 시 전동차가 미니본드를 지나게 되는데, Cab Carrier 주파수 변화가 없을 때는 Fig.7(a)와 (b)처럼 측정이 되었고, 신호의 불연속 구간은 발생되지 않았다.

Fig.7(c)와 (d)처럼, Cab signal의 주파수가 5525hz에서 4450hz로 변경되는 순간에서도 역시 수신신호의 불연속 구간은 발생되지 않는 것을 확인할 수 있다. 폐색구간이 변경되는 시점에서 신호의 불연속 구간 발생 확률이 높아 열차신호 시스템의 적절한 Cab 신호레벨 관리가 필요하다.

2.3.4 Open Door Loop

2.3.4.1 역별 Open Door Loop 신호 크기

ODL(Open Door Loop)는 루프 커플링 장치를 통해 와이어 루프가 포설된 궤도회로에 연결되어, 출입문 개방 명령을 정지된 열차로 송신하고, 열차의 출입문이 개방되도록 한다.

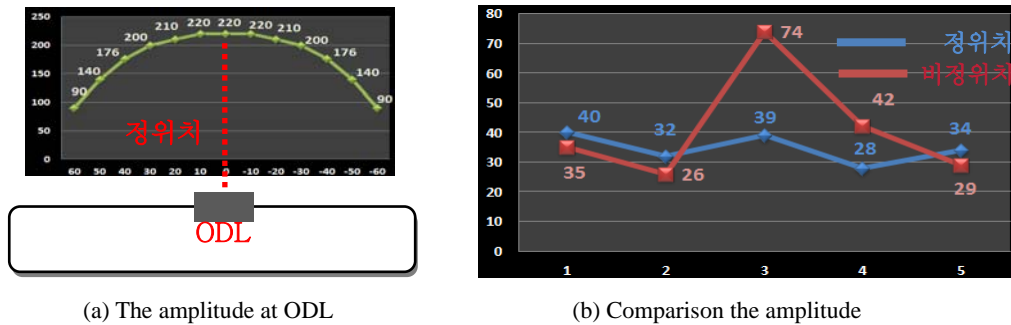


Fig.8 The amplitude of the signal

Table 2 The amplitude of signal at each position

Station	Amplitude	Position	Station	Amplitude	Position
1 Sangbong	40	0	Sangbong	35	-200
2 Junggok	32	0	Junggok	26	-200
3 Nonhyen	39	0	Nonhyen	74	-200
4 Namguro	28	0	Namguro	42	-200
5 Gasan	34	0	Gasan	29	-200

Fig.8(a)처럼 ODL에서 신호의 크기는 정위치 시 가장 신호가 크고 중앙에서 벗어날수록 작아진다. Fig.8(b)는 정위치 정차와 정위치에서 200mm 떨어져 정차했을 경우 측정된 신호의 크기를 비교하는 그래프인데, 같은 위치에 정차하더라도 table 2처럼 신호의 크기가 편차가 크고, 오히려 정위치하지 않은 역에서 더 큰 신호가 측정되기도 한다.

2.3.3.4 Open Door Loop 파형 및 분석

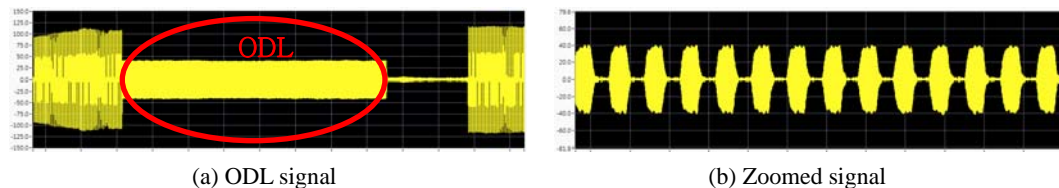


Fig.9 The wave pattern on the Open Door Loop

전동차가 역에 도착한 후 출입문 열림신호를 받는 구간이 Open Door Loop이고, 이 때 Code Rate는 27.5Hz이다. 그리고 cab signal의 주파수에 따라 5525hz일때는 오른쪽문이 열리고, 4450hz일때는 왼쪽문이 열린다.

ODL에서는 열차의 이동이 없기 때문에, 다른 폐색구간과 달리 신호의 크기 변화가 거의 없는 것이 특징이고, 출입문 열림 신호가 끝나면 다시 미니본드에서 송신하는 신호를 수신하는데, 이때 일정시간 동안 신호없음 구간이 발생된다.

2.4 주파수 변동에 따른 신호상태 분석

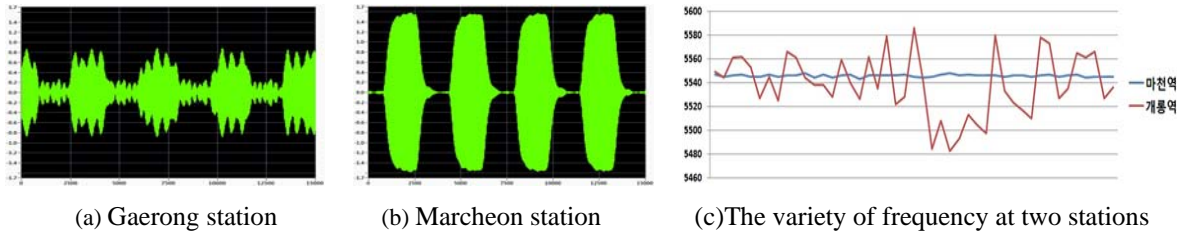


Fig.10 The wave pattern at branch joint

개롱역과 마천역 주파수 변동 그래프를 보면, 개롱역에서 주파수 편차가 크고, 마천역은 상대적으로 주파수가 안정적이다. 2개 역에서 신호파형을 비교해보면, 주파수 변동이 심했던 개롱역에서는 파형의 일그러짐이 심하고 크기도 작은 반면, 주파수 편차가 적었던 마천역에서는 신호의 크기도 크고 파형도 깨끗하다.

그러므로, 데이터 처리과정에서 주파수의 변동 상태를 확인하면 신호의 일그러짐과 파형의 상태를 예상할 수 있는데, 신호의 일그러짐은 신호의 크기가 작다고 발생하는 것이 아니라, 터널 및 레일 등 주변 상황에 따라 간섭을 받는 것으로 판단된다

2.5 불연속 구간 분석

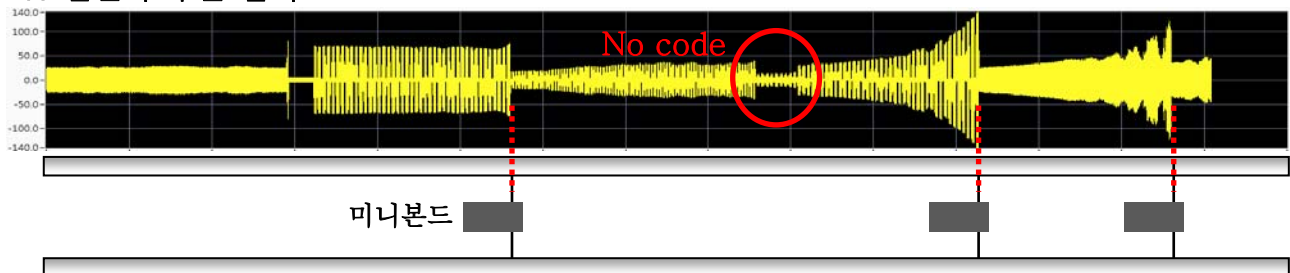


Fig.11 The section of no signal

Fig.11은 열차신호 데이터 측정 중 발생된 무코드 현상으로 무코드 발생은 7호선 어린이 대공원역에서 출발 직후 발생되었다. 무코드 발생 직후 측정기와 전동차 모두에서 무코드 현상 및 알람이 울렸다.

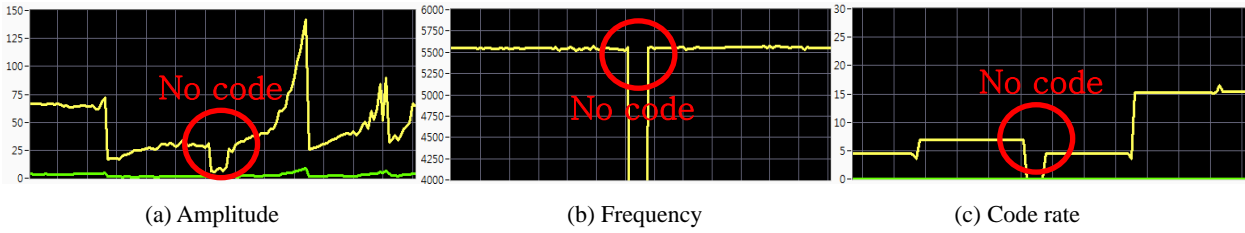


Fig.12 The result graph

Fig.12(a)에서 신호의 크기는 무코드 발생 시 현저히 감소하였고, Fig.12(b)에서 주파수는 5537Hz로 양호한 상태였으며, Fig.12(c)에서 CODE RATE는 6.83Hz에서 4.5Hz로 변경되는 상황이었다. 무코드 발생 위치가 폐색 변경구간이 아닌, 동일한 폐색에서 발생한것으로 보아 전방 열차 접근 등 이례상황 발생으로 인해 시스템에서 속도코드를 변경하는 과정에서 발생된 무코드로 판단된다.

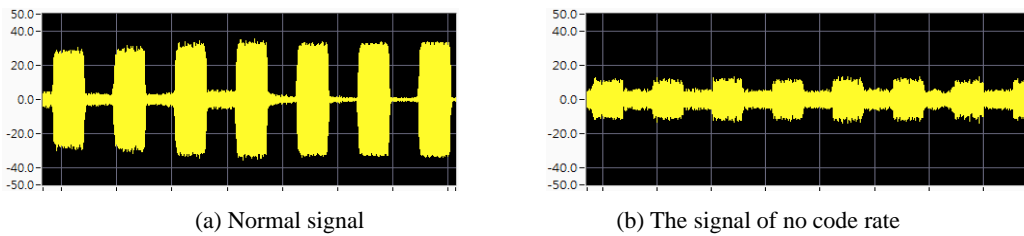


Fig.13 The comparison of two signal

Fig.13처럼 무코드 발생 전후 정상파형의 크기는 현재 측정기 설치 위치에서 28mA 이상이며, 무코드 발생 시에는 13mA 정도로 측정되어, 향후 무코드 감지의 기준이 되는 신호로 활용되었다.

2.6 불연속 예측 구간

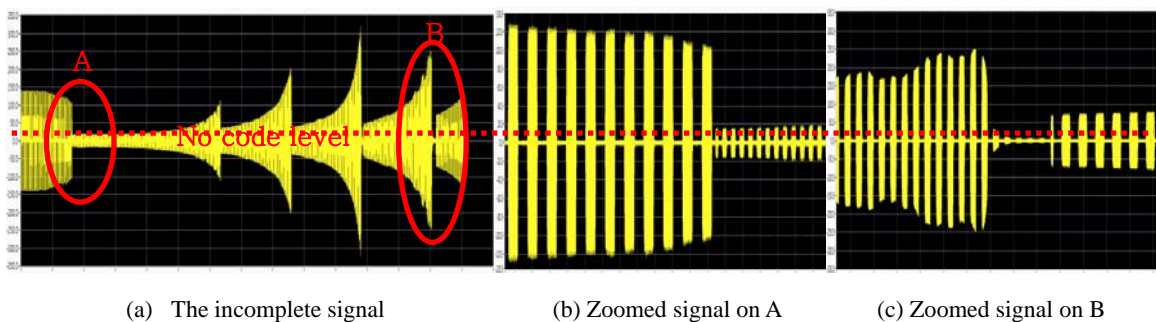


Fig.14 The prediction section of discontinuous signal

Fig.14처럼 무코드 level보다 작은 신호가 수신되면 전동차에서 무코드로 인식하기 때문에 앞열차의 안전거리가 확보된 조건이라면 운행중 신호는 무코드 기준선보다 커야 한다. 그런데 분석된 데이터를 보면, 구간 A에서 무코드 기준선과 거의 같은 신호가 수신되었다. 실제

이때 전동차가 무코드를 인식하지 않았고, 자체개발 측정기에서도 무코드로 처리하지는 않았지만, 최저레벨에 가까워 무코드 발생 확률이 높아 해당 폐색구간의 미니본드 출력을 높일 필요가 있다.

구간 B에서 자체개발 측정기에서는 무코드를 검지했지만, 전동차에서는 무코드 알람을 울리지 않았다. 이는 무코드 발생구간이 1sec로 짧아 전동차에서 무코드 알람을 울리지 않고 지나갔기 때문이다. 이와 같은 유형은 릴레이 점검 또는 사전단락 조정이 필요할 것을 판단된다.

3. 결론

ATC 신호 정밀 분석을 통해 시스템의 무결점 상태유지를 위해 다음과 같은 관리방안을 제시한다.

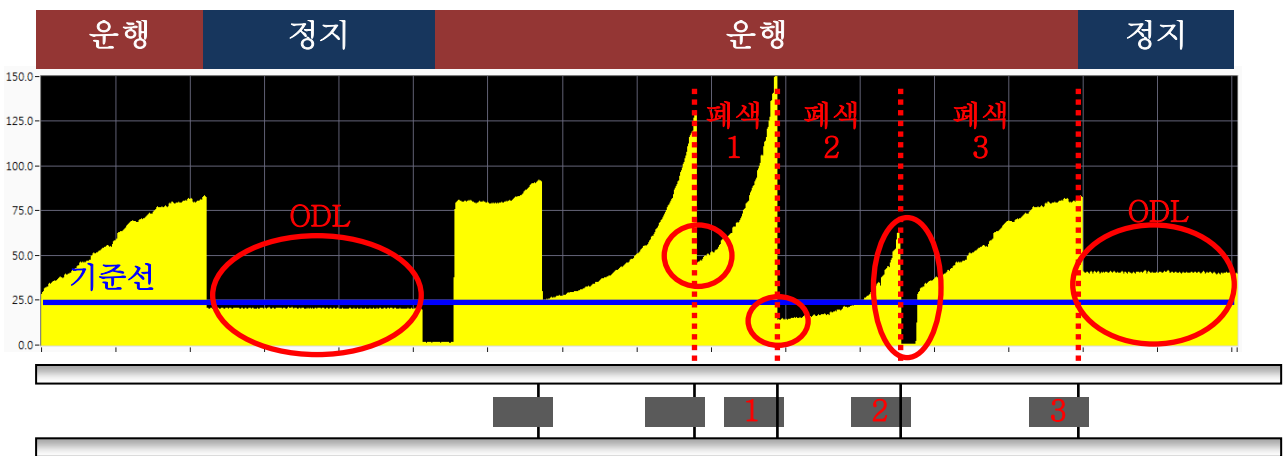


Fig.15 The data from field

첫째, ATC 열차 신호의 일률적인 관리를 위해 측정기 설치 위치에서 적절한 신호 크기의 기준을 정하고 유지보수를 해야한다. 신호 크기의 기준은 무코드로 인식되는 값보다 커야하고, 열차간 안테나 수신 감도나 안테나 높이 등을 고려해 송신레벨을 높게 설정해야 한다.

Fig.15에서 폐색1 구간을 보면, 신호의 최소 크기가 기준선보다 높기 때문에 미니본드1에서 송신되는 신호의 크기를 기준선까지 낮추어야 한다. 폐색 구간내에서 최소전압은 장치들의 내구성과 에너지 절감을 고려하여 필요이상으로 높을 필요는 없다.

그러나, 폐색2 구간에서는 최소 신호 크기가 기준선보다 아래에 있기 때문에 미니본드2의 송신 출력을 기준선까지 높여야 한다. 기준선보다 신호의 크기가 작다는 것은 무코드가 발생할 확률이 높아짐을 의미한다.

또한, 차상 측정기의 기준레벨이 지상에서 유지보수자의 레벨과의 적정기준레벨을 정해야 한다. 그래서 무코드 발생시 적정레벨이 올라오지 않는다면 지상레벨을 조정하고, 적정레벨이라면 차상 수신감도를 유지보수 하여야 한다.

둘째, ATC 열차신호는 불연속 구간이 발생하지 않아야 한다. 폐색3 구간에 신호의 불연속 구간이 발생하였지만, 개발 측정기에서만 신호가 없음을 인식했고 전동차에서는 불연속 구간

이 매우 짧아 급정지가 발생하지 않았다. 그러나 이러한 구간은 무코드 발생 확률이 매우 높기 때문에 유지보수 시 사전단락 구간 조정이나 계전기 점검을 통해 장애 요인을 제거해야 한다.

셋째, OPEN DOOR LOOP내에서의 크기도 역별로 일정하게 유지되어야 한다. 본문에서 언급했듯이 현장의 역사별로 ODL에서 신호의 크기는 역사별로 다소 차이가 있는 것을 확인되었는데, 일부역에서는 신호 크기가 너무 작아서 개발 측정기에서 무코드 알람이 간헐적을 발생되기도 했었고, 또 다른 역에서는 신호 크기가 매우 큰 역도 있었다. 이것은 하나의 AF궤도회로에서 ODL과 미니본드를 함께 사용하며 DOL레벨에 맞추거나 수신미니본드 레벨에 유지보수자가 설정했느냐의 오차로 인한 것으로 판단된다.

그러므로, 이상적인 ATC 열신신호는 다음과 같아야 한다.

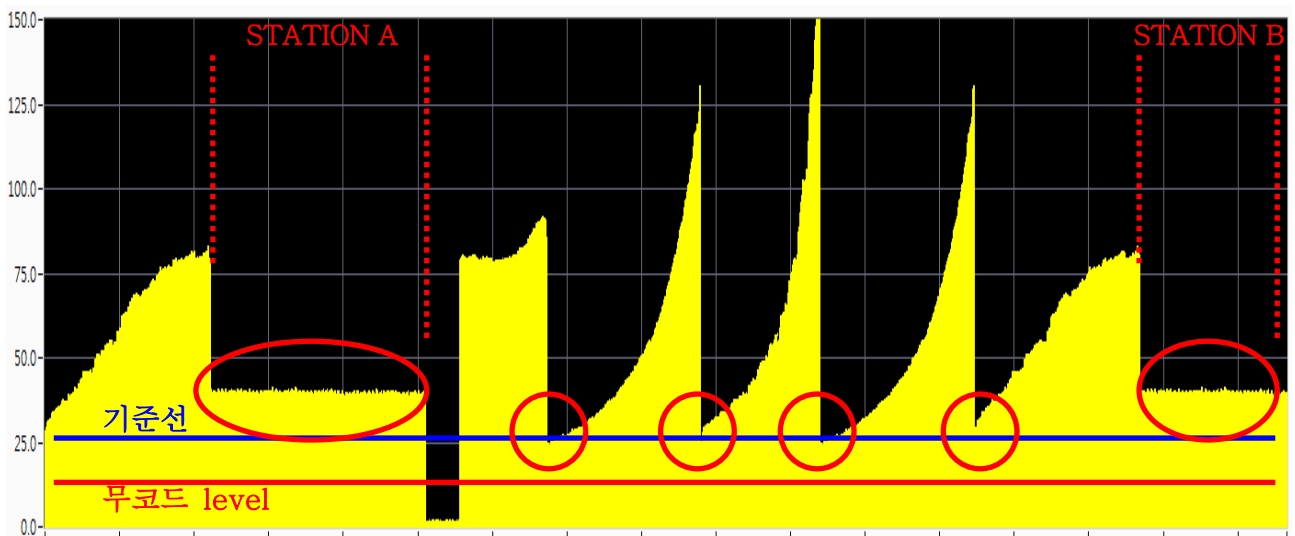


Fig.15 The model of management for ideal ATC signal\

Fig.15처럼 각 열차마다 수신감도의 차이를 고려하여 무코드 level 보다 높은 기준선을 지정하고, 폐색 구간 내에서 최소 신호의 크기가 기준선보다 커야함은 물론이고, 운행 중 신호의 불연속 구간이 발생하지 않아야 한다. 또한 역별로 ODL에서 신호의 크기는 열차의 정위치 정차여부에 따라 차이가 있지만, 정위치를 기준으로 모든역에서 신호의 크기가 일정하게 유지되어야 한다.

지금까지 기존 측정기를 사용하여 신호 크기 측정 시, 열차가 실제 수신하는 신호와 다른 신호를 임의로 발생시켜 측정했지만, 이제는 고정밀 측정기에서 측정된 데이터를 분석해서 장애 발생가능성이 높은 곳을 선별하여 신호의 크기를 조정할 수 있다. 특히, Fig.16와 같이 2개의 frequency band에서 동시에 측정된 Noise 성분은 직원이 직접 들고 다니면서 측정하는 기존 아날로그 측정기로는 확인할 수 없었는데, 개발 측정기는 전동차에 탑재하여 궤도회로에서 발생하는 신호를 실시간으로 측정하기 때문에 가능하다.

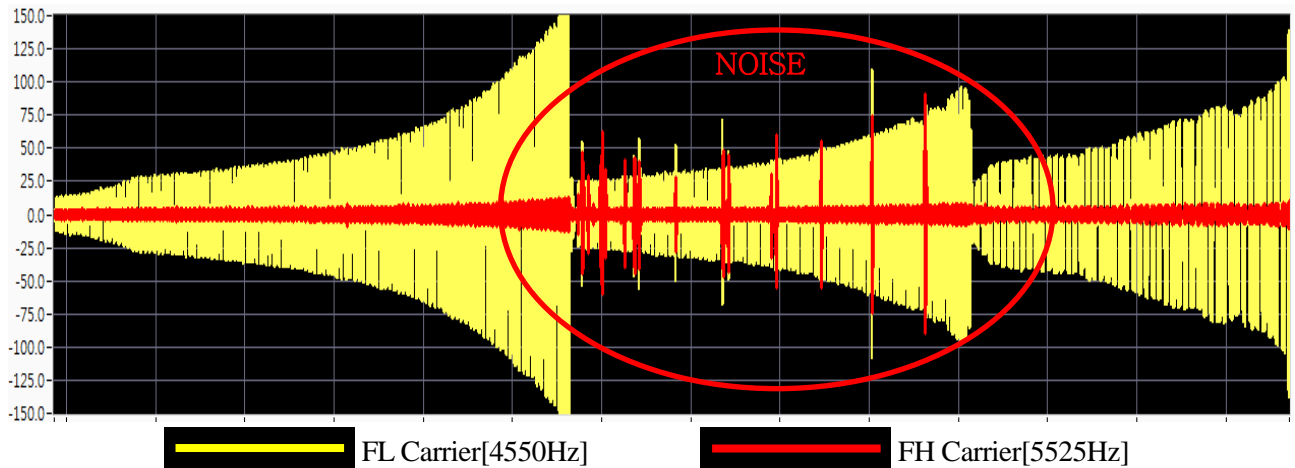


Fig.16 The signal involved noise, displaying at both FL and FH frequency

이 데이터 분석의 가장 큰 장점은 바로 고장예측이 가능하다는 것이다. 현장 시스템에서 최적의 유지보수 업무는 장애가 발생하기 이전에 고장을 예측하고 미리 보수하는 것이다. 이 측정기를 개발 당시 수집된 데이터 분석을 통해 장애 발생 예상 구간을 예측했지만, 실제는 이 보다 더 큰 효과를 기대할 수 있다. 만약, 이러한 데이터를 매일 수집하여 저장하고 누적한다면, 향후 중대한 장애를 예방 할 수 있다. 데이터 분석을 통해 장애 발생 구간에 발생되었던 전조 증상을 분석하고, 예방 보수를 실시한다면, 열차신호 시스템의 무결성을 완성시키게 될 것이다. 이것이 실현 가능한 이유는 열차 신호의 파형을 직접 확인할 수 있기 때문이다.

참고문헌

[1] D.Y. Gwak, *The Control and Measurement LabVIEW 2009 of a Computer Base*, Chap. 6~7, pp.329~400, 2009.