

## 케이블 길이 연장에 따른 고속철도 무절연궤도회로 경계구간 전기특성 향상에 관한 연구

### A Study on Analysys Electrical Characteristics improvement of cable lenght extension about ESJ(Electrical Separation Joint) of High speed Railroad AF track circuit

최재식\*<sup>†</sup>, 김희식\*\* , 박주훈\* , 김범곤\* , 신영식\* , 노성찬\*\*\*

JaeSik Choi\*<sup>†</sup>, HieSik Kim\*\* , JuHun Park\* , Bumgon Kim\*, YoungSik Sin\* , SungChan Rho\*\*\*

**Abstract** UM71C track circuit detects a train by the Audio frequency(AF) signal through rails on the KTX. The track circuit does not use a physical insulating joint, but is electrically isolated using a passive LC filter. The passive LC filter used in the boundary of the track circuit is composed of the L and C in series or in parallel to separate the tracks. The filters are selected by using the resonant filter that cut-off or passes frequencies. Therefore, the change in the boundary characteristic of track is generated by changing the line of the track circuit constants and L, C characteristic of the filters. To analyze the circuit 4-port network analysis using Transmission line theory and uses Matlab Simulink.

**Keywords :** AF track circuit, track constant, detecting train, track circuit on electrical separation joints

**초 록** 경부고속선에서 사용중인 AF 무절연궤도회로(UM71C)는 가청주파수(Audio Frequency) 신호를 레일로 보내 열차를 검지하는 장치이다. 무절연궤도회로의 경계부는 전기적인 절연으로 LC 수동필터를 사용하여 인접궤도회로와 분리된다. 궤도회로의 경계부에 사용하는 수동필터는 궤도의 선로정수와 경계를 이루기 위한 L 과 C 를 직렬 또는 병렬로 구성하여 궤도 주파수의 차단과 통과를 선별하는 공진형 필터를 사용한다. 따라서 궤도회로 선로정수의 변화 및 L, C 수동필터의 특성변화에 의하여 경계특성의 변화가 발생한다. 본 논문은 궤도회로경계부에서 케이블길이 연장에 따른 LC 수동필터의 특성값을 조정하여 궤도회로경계구간 전기특성 품질을 향상하고자 하는 연구로 전송선로 이론을 이용한 회로망 해석으로 회로를 분석하고 Matlab Simulink 를 활용하여 이를 확인하고자 한다.

주요어 : UM71C AF 궤도회로, 동조유닛, 공심유도자, 양극차블록, 임피던스

## 1. 서 론

고속철도 무절연궤도회로의 경계부에서 전기적 절연을 위하여 레일내측에 궤도회로 구성품(DB, BU, SVAC 등)이 설치되어 있다. 겨울철 혹한기 차량하부 낙빙 및 선로보수 차량 기계작업시 구성품 파손으로 열차운행에 지장을 초래하는 사례가 있어 선로내측에 있는 구성품을 선로외측으로 이설이 요구되었다. 궤도회로 구성품을 선로외측으로 옮길 경우 레일과 구성품을 연결주는 케이블의 길이가 필연적으로 연장시켜야 한다.

- \*† 교신저자: 서울시립대학교, 한국철도공사 연구원(khsrman@korail.com)
- \* 한국철도공사 연구원 기술연구처
- \*\* 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수
- \*\*\* 한국교통대학교 철도전기제어학과 조교

따라서 케이블 길이 변화에 따른 궤도회로경계부의 전기특성 변화로 궤도회로 송착전전압이 강해진다. 따라서 본 연구에서는 Matlab Simulink를 사용하여 케이블길이 변화에 따른 이론적인 선로정수에 대한 전기특성을 예측하였으며, 고속선 현장에서 실제로 케이블의 길이를 연장시켜 궤도회로 특성을 분석하였으며, 케이블 연장시 발생하는 인덕턴스 증가에 대한 해결방안과 궤도회로사구간 축소방법을 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 Matlab 시뮬레이션을 통한 궤도회로의 전기적 특성분석

전기적 절연부 특성을 확인하고자 전기적 절연부를 독립적으로 구성하고 이에 대한 회로 분석을 하였다. 이를 통해 개략적인 전기적 절연부 특성을 확인하였고 전기적 절연부의 전선 변경으로 전기적 절연부 특성이 달라져서 수신 BU의 수신전압이 저하되는 문제점을 확인하였다. 수신전압이 낮아짐으로 인해 발생할 수 있는 문제점을 좀 더 살펴보고자 실제 현장궤도와 유사하게 시뮬레이션을 구성하고 전기적 절연부에서의 변화를 분석하였다.

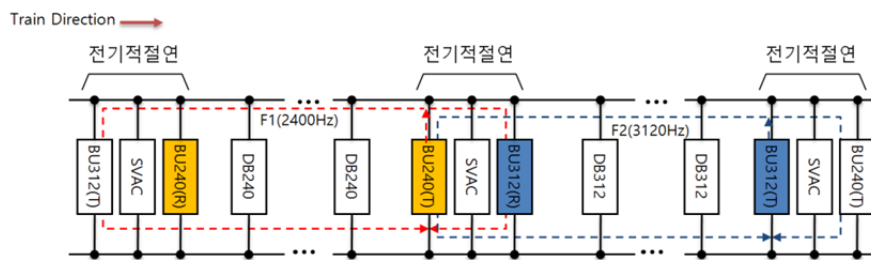


Fig. 1 연속된 궤도회로 경계부의 전기적 절연 구성도

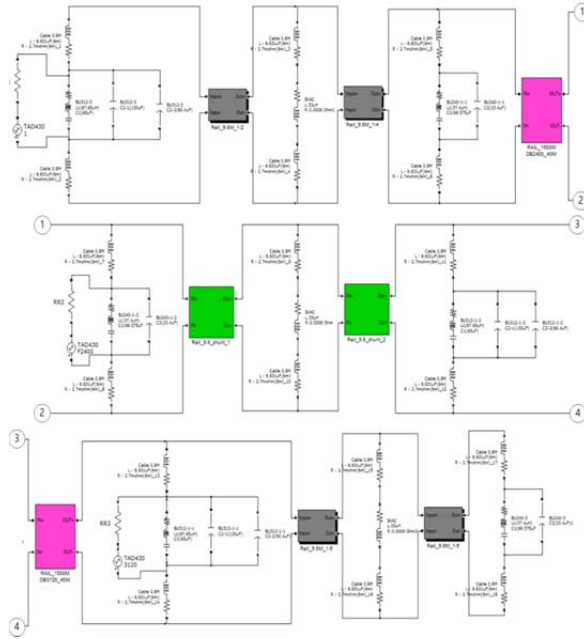


Fig. 2 연속된 퀘도회로 경계부의 MATLAB 시뮬레이션 회로도

그림 1과 같이 실제 퀘도와 같이 연속적인 퀘도의 전기적 절연부 특성을 확인하기 위해 구성한다. 퀘도간 거리는 1500m를 기준으로 하고 퀘도주파수는 F1(2400Hz), F2(3120Hz)를 가진다. 각각의 BU와 DB간의 거리는 40m, SVAC와 BU간의 거리는 9.8m, 퀘도의 전기적 절연부 사이에 위치하는 보상커패시터의 거리는 80m로 한다. 그림 2는 시뮬레이션을 현장조건에 유사한 조건으로 시행하기 위하여 수신 BU3120(R)에 인가되는 3120Hz의 전압은 현장 측정시 얻은 전압으로 시행하였으며, 최대값 1.52V, 실효값으로는 1.06V를 인가하였고, 2400Hz 주파수의 신호는 같은 전압을 인가하는 조건으로 시뮬레이션을 구성하였다. 현장에서 측정된 퀘도계전기(광명역 상선 TC0448, 3120Hz)가 낙하될 때의 BU3120의 전압은 490mV이하였으며, 여자될 때의 전압은 490mV 이상이였다. 실제로 현장 TAD에서 현장 전압을 수신할 시 탭을 이용하여 분배 비율을 기계실 퀘도 계전기의 수신전압에 알맞게 조정한다. 측정된 전압을 기준으로 송신 전압을 조정 후 시뮬레이션을 하였고 그 결과는 표 1과 같다.

Table 1 BU312 수신전압 및 계전기 상태(0.8m 케이블)

Shunt 위치 (SVAC 기준)	BU312 수신전압[V]	퀘도계전기 상태	비고
단락전	1.372	여자	사구간 1m미만 (현장 검측시 1.5m에서 퀘도계 전기 최초 낙하)
SVAC 단락	0.4995	여자	
1m 단락	0.4287	낙하	
2m 단락	0.3675	낙하	
3m 단락	0.3139	낙하	
4m 단락	0.2685	낙하	

5m 단락	0.2297	낙하
6m 단락	0.1974	낙하
7m 단락	0.1683	낙하
8m 단락	0.1456	낙하
9.8m 단락	0.1174	낙하

표 1에서 SVAC를 기준으로 1m간격으로 단락을 시켰을 때 BU3120의 수신전압을 기준으로 궤도계전기 상태를 판단하였다. 해당 궤도의 낙하 전압인 490mV이하는 1m 단락시부터 궤도계전기를 낙하시켜서 열차 위치를 검지할 수 있음을 보여준다. 시뮬레이션 결과는 중복단락 구간에서 열차 위치를 검지할 수 없는 사구간이 1m미만이다. 표 2는 BU2400, BU3120에 연결된 전선을 0.8m에서 6m로 변경하여 시뮬레이션 한 결과이다. 궤도계전기 낙하 전압을 기준으로 하였을 때 SVAC에서 5m구간에서 궤도계전기는 낙하하게 되고 4m까지는 사구간이 발생함을 알 수 있다. 이는 전선 연장으로 인한 선로정수의 극점이동으로 인해 궤도회로 검지 주파수에 해당하는 주파수에서는 임피던스의 변화가 크게 발생하지 못하게 된다. 이로 인해 궤도계전기가 낙하할 거리가 증가하고 사구간이 길어지게 된다.

Table 2 BU312수신전압 및 계전기 상태(6m 케이블)

Shunt 위치 (SVAC 기준)	BU312 수신전압[V]	궤도계전기 상태	비고
단락전(BU312교체)	0.9338	여자	4m사구간
BU312, BU240교체	0.8003	여자	
SVAC 단락	0.7875	여자	
1m 단락	0.7408	여자	
2m 단락	0.6759	여자	
3m 단락	0.6007	여자	
4m 단락	0.521	여자	
5m 단락	0.4456	낙하	
6m 단락	0.3764	낙하	
7m 단락	0.3161	낙하	
8m 단락	0.2665	낙하	
9.8m 단락	0.2046	낙하	

## 2.2 고속선 현장시험을 통한 궤도회로의 전기특성 분석

표 3과 같이 시뮬레이션의 결과가 실제 궤도에서 같은 결과를 보이는지 확인하기 위해 현장 시험을 수행하였다. 현장시험시 구성품 이동전 단락 시험을 통해 1.5m 위치에서 궤도계전기가 여자됨을 확인하였다. 표 3에서 현장 검측 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였을 때 SVAC에서 BU3120 방향으로 1m씩 검측한 결과의 추이가 비슷한 수준으로 감소하였으며, 궤도계전기 낙하 위치가 시뮬레이션에서는 5m 지점에서 낙하하였고, 현장 검측시에는 6m 지점에서 낙하하였다. 시뮬레이션에서 발생하는 오차의 원인으로서는 현장 궤도 선로정수가 시험시 선로정수와 시뮬레이션의 파라미터에서 차이가 있을 수 있다.

Table 3 BU3120 수신전압 및 계전기 상태 비교

시험결과 Shunt 위치	시뮬레이션 결과		현장검측 결과		비 고
	수신전압 [V]	궤도계전기	수신전압[V]	궤도계전기	
단락전(BU312교체)	0.9338	여자	1.35	여자	
BU312, BU240교체	0.8003	여자	1.30	여자	
SVAC 단락	0.7875	여자	1.19	여자	
1m 단락	0.7408	여자	1.13	여자	
2m 단락	0.6759	여자	1.05	여자	
3m 단락	0.6007	여자	0.965	여자	
4m 단락	0.521	여자	0.752	여자	
5m 단락	0.4456	낙하	0.761	여자	
6m 단락	0.3764	낙하	0.43~0.49	낙하	
7m 단락	0.3161	낙하	-	-	
8m 단락	0.2665	낙하			
9.8m 단락	0.2046	낙하			

일반 철도궤도 자갈도상의 누설저항은 평상시 4~5Ω/m이지만 강우시 2.5~4 Ω/m, 콘크리트 도상의 누설저항은 평상시 0.8~4.5 Ω/m, 강우시 0.4~1.5 Ω/m이다. 위의 예와 같이 현장 선로정수의 경우 날씨 및 습도에 따라 파라미터의 차이가 발생한다. 표 4에서는 고속철도 궤도회로의 지형특성에 따른 선로정수를 비교한 표이다. 표 4에서 선로정수의 조건에 따른 차이로 인해 시뮬레이션과 현장 시험에서 1m의 오차가 발생하였지만 궤도회로의 전기적 절연부의 구성품을 선로외측으로 이동시 발생하는 전선 길이의 연장으로 인해 사구간의 길이가 증가할 수 있음을 시뮬레이션과 현장시험 모두에서 알 수 있다. 하지만 CSEE에서 제공된 SVAC를 중심으로 좌우 1.5m구간에서 열차검지를 보증

하지 못하는 구간(사구간)을 충족시키지 못하는 결과이다. 따라서 기존 궤도회로의 임피던스 특성을 보상할 수 있는 방안이 요구되었다.

Table 4 고속철도 궤도회로 선로정수 파라미터 비교

구분	반송주파수	R( $m\Omega/m$ )	L( $\mu H/m$ )	S( $\mu S/m$ )	C( $nF/m$ )
토공구간	2400Hz	1.456	1.305	0.276	0.280
터널구간	2400Hz	1.382	1.274	508	19.28

### 2.3 캐패시터 보상한 전기적절연부의 전기특성 분석

BU3120의 수신전압이 낮아짐으로 인한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 BU3120의 커패시터를 변경한다. 이를 위해 L2(42.28uH), 대역통과주파수(3120Hz)를 이용하여 병렬커패시터를 구하면 155.76uF 이 된다. 기존 C2를 155.76uF로 변경한 후 시뮬레이션 하였다. 임피던스의 변화가 수신전압에 미치는 영향을 좀 더 자세히 확인하기 위해 전기적 절연부 구성품의 선로외측으로 이설 전, 이설 후, 커패시터 보상 후에 따른 각각의 동조유닛 수신전압을 비교하기 위하여 표 5와 그림 3, 4, 5로 나타냈다.

Table 5 동조유닛(BU) 수신전압 비교

동조유닛 기본주파수	선로외측 이설전(Vp)	선로외측 이설후(Vp)	병렬 커패시터보상(Vp)	비고
BU2400	2400Hz	1.503V	1.502V	1.503V
	3120Hz	4.174mV	5.681mV	6.323mV
BU3120	2400Hz	7.934mV	6.113mV	15.29mV
	3120Hz	5.025V	1.83V	12.85V

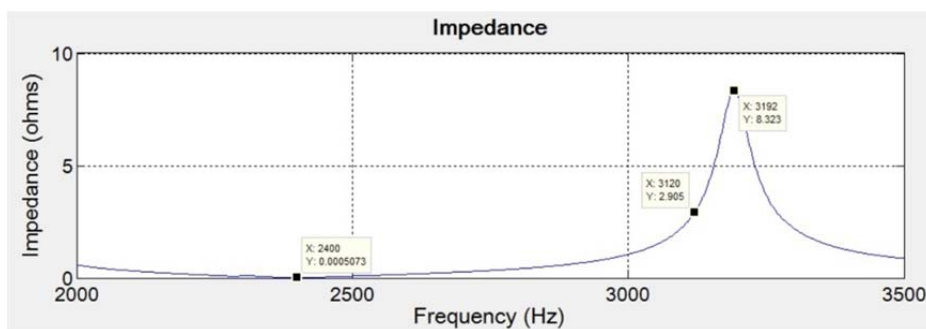


Fig. 3 BU3120의 임피던스

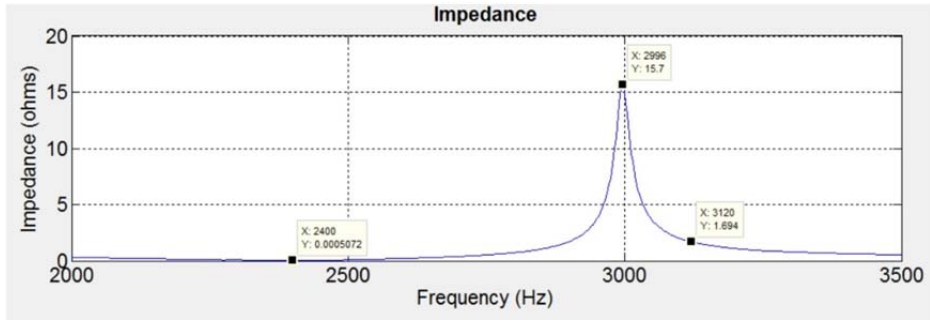


Fig. 4 케이블(L) 연장후 BU3120 의 임피던스

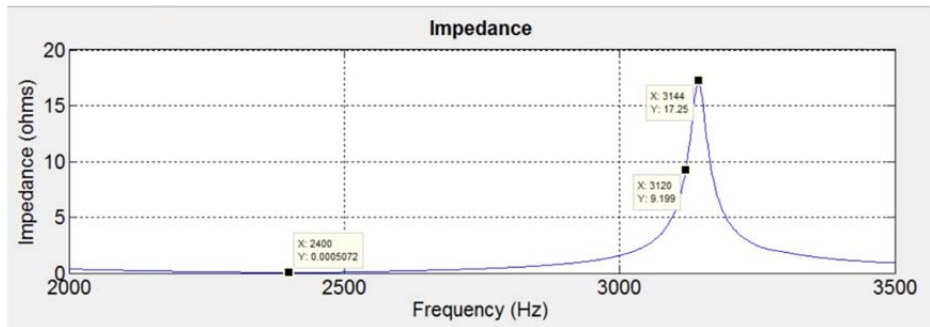


Fig. 5 C2 변경후 BU312 의 임피던스 변화

그림 3 은 전기적 절연부 구성품이 선로 사이에 있을 때의 주파수에 관한 BU3120 임피던스의 변화이고, 그림 4 는 구성품을 선로 외측으로 옮겼을 때의 임피던스 변화이다. 그림 5 는 구성품을 선로 외측으로 이동 시 기존 임피던스 정합을 보상하기 위한 C2 파라미터 변경 후의 임피던스이다. 그림 3 의 최고점 주파수는 3192Hz 이고 그림 4 의 최고점 주파수는 2996Hz 이고, 그림 5 의 최고점 주파수는 3144Hz 이다. 이는 수신 동조유닛(BU3120)의 수신 주파수 3120Hz 에서의 임피던스를 비교하였을 때 최고점 주파수가 3120Hz 와 가까울수록 높은 임피던스를 가진다. 표 5 는 3120Hz 에서 수신전압의 변화를 나타낸 것이다. 수신전압 비교를 분석한 결과 케이블로 인한 인덕턴스의 변화를 커패시터 파라미터의 변경으로 전기적 절연부 특성을 보상할 수 있음을 표 5 와 그림 5 를 통해 확인할 수 있었다.

하지만 위의 전기적 절연부 특성 분석과 보상방안은 궤도의 전기적 절연부 구성품(BU, SVAC)의 이동에 대한 경우로 한정하여 수행되었다. 궤도회로의 전기적 절연부 외의 특성을 반영한 분석은 추가적으로 수행되어야 한다. 또한 시뮬레이션을 통해 커패시터 파라미터에 대한 보상 가능성에 대해 궤도의 전기적 절연부 동조유닛에서의 수신전압으로 확인은 하였지만 실제 현장과 같이 좀 더 복잡한 구성의 시뮬레이션과 실제 궤도에서의 시험도 추가적으로 필요하다고 사료된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 케이블 길이변화에 따라 고속철도 무절연AF궤도회로 전기적인 절연경계구간의 전기적인 특성을 개선하는 방법을 제시하고자 하는 연구로 무절연궤도회로의 전기적인 절연경계 특성상 궤도회로 사구간은 필연적으로 존재한다. 궤도회로 구성품을 선로외측으로 이설시 케이블 길이를 6m로 연장할 경우 사구간은 4배로 증가하였다. 사구간을 줄이기 위하여 인덕턴스값이 적은 케이블로 교체시 기존보다 2배정도 확대하였다. 사구간을 정상값으로 복원하기 위하여 궤도회로구성품중 동조유니트의 내부소자값을 조정하여 시뮬레이션을 시행한 결과 사구간이 길이는 정상치 수준으로 되돌릴 수가 있었다. 향후 재설계된 동조유니트의 현장 시험을 통하여 신뢰성을 검증하는 연구가 요구된다.

### 참고문헌

- [1] 박기범, 박재영, 장문성, 임명섭, 김성환, “고속선 궤도회로(UM71-C)의 내부모델링에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2006
- [2] 윤인모, 김민석, 고영환, 이종우, “궤도회로의 단자망 모델링 및 목적목적 저항 특성 해석” 한국철도학회 논문집 제13권 제6호(2010년 12월) pp.565-569
- [3] 최재식, “무절연 AF궤도회로 경계부의 전기적 특성분석에 대한 연구”, 서울시립대학교 석사논문, 2002
- [4] 한승진, 정용운, 천기하, 이기서, 박영수, 유광균, “궤도회로의 전기적 특성에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회, 1996.
- [5] 고속철도신호기술( I ), 철도경영연수원, pp25 ~ 76, 115-154, 2002
- [6] 신호제어시스템 기술개발, 한국철도기술연구원, 1998
- [7] Hill, R.j., "Train position detection and track-train data transmission using audio frequency track circuits", Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australin -IE Aust. and IREE Aust., 1985, 5, 267-276
- [8] Grose, B.H. "Jointless track circuits and electrified railways", pp110 ~ 126 Proceeding of the Institution of Railway Signal Engineer, 1972-73
- [9] Brown, C.R. "A review of track circuits", pp111-128 Proceedings of the Institution of Railway Signal Engineer, 1984-85