

고속전철의 열차간 데이터 전송을 위한 전송로의 특성에 관한 연구

Study on the Characteristics of the Transmitter Line
for Data Transmitter between Vehicles for High speed train

최권희* 이병석** 임용규**
Choi, Kweon-hee Lee, Byung-seok Lim, Ryoung-kyu

ABSTRACT

Recently, the microprocessor with network function based controll system instead of conventional microprocessor is widely used for industrial applications, and also these technologies are widely adopted for train control and monitoring in modern rapid transit system.

The purpose of this paper is to propose a criteria for data transmission, which was designed and realized through Korea High Speed Train. Noise, distortion and attenuation are always present in data transmission system and strictly limit performance. This paper describes a method to calculate the propagation constant, attenuation constant, phase velocity and length of stub.

1. 서론

철도차량에서 통신장비가 채용된 시스템 인터페이스 문제는 시스템의 평형(balance), 쉴딩(shielding), 분리 혹은 격리(isolation), 접지(grounding), 임피던스 매칭(impedance matching) 및 신호선 한계 전압(threshold voltage) 등의 요인에 의해 생길 수 있으며, 그 영향은 유도된 신호선의 크기, 노이즈의 감쇄율, 케이블의 결합, 커넥터의 결합 방법 및 쉴드의 접지 형태에 따라 좌우된다. 특히 임피던스 매칭에서 오는 오류는 전송로의 반사 계수에 영향을 미치며, 이들은 전송로의 불안정한 요소를 유발하므로 최근에 이들에 대한 구체적인 연구의 필요성이 대두되고 있다[1].

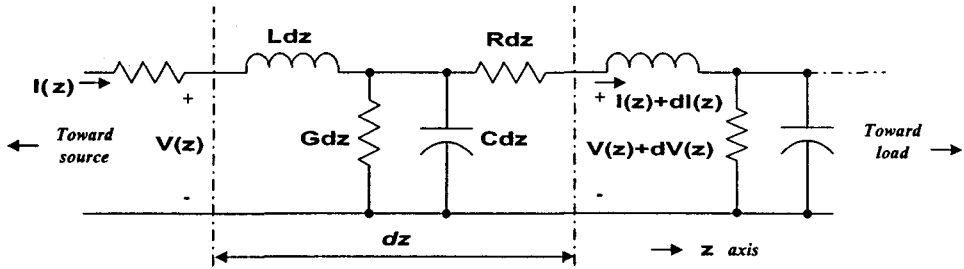
전송선로 케이블의 결합은 설계 사양보다 비효율적으로 전기 에너지를 전달하는 상태를 말한다. 절연체에 물이 스며들었거나 연결장치(커넥터, 단자대)를 잘 끼우지 않았거나 케이블을 잘못 이은 것 등이 전형적인 케이블 결합이라 할 수 있다[5].

본 연구에서는 전송로의 특성방정식으로부터 위상속도와 위상상수를 구하고, 스텝의 길이를 결정하는 방법과 시험실에서 전송로 없이 시험할 수 있는 방법을 제시한다. 뿐만 아니라, 시간 영역 반사 측정기(time-domain reflectometer)를 사용하여 전송로의 길이, 임피던스, 감쇄율을 측정할 일례에 대해 소개한다.

* (주)로템 중앙연구소 주임연구원, 비회원

** (주)로템 중앙연구소 책임연구원, 비회원

2. 전송로 특성
2.1. 전송선로방정식



[그림 1] 전송로 등가회로

[그림 1]과 같이 z방향으로 무한히 길고, 단면적이 일정한 2개의 평행도선의 전송선로가 있다고 하자. 이 선로를 따라 연속적으로 분포되어 있는 직렬 임피던스를 단위길이당 Z , 병렬 어드미턴스를 단위길이당 Y 로 한다. 이때 선로에 흐르는 전류를 $I(z)$, 2선간의 전압을 $V(z)$ 로 하고, 선로의 무한소구간 dz 의 변화에 대한 전류, 전압의 변화를 각각 $dI(z)$, $dV(z)$ 라 하면, 그 무한소구간에 옴의 법칙(Ohm's law)을 적용하므로 다음과 같은 2개의 식이 얻어진다[1][6].

$$V(z) - \{V(z) + dV(z)\} = ZdZ I(z) \quad (1)$$

$$I(z) - \{I(z) + dI(z)\} = Ydz V(z) \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Z &= R + j\omega L \\ Y &= G + j\omega C \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서 R, L, G 및 C 는 각각 단위길이당 저항, 인덕턴스, 콘덕턴스 및 정전용량이고 ω 는 각주파수이다. 그리고, 식(1)과 식(2)을 변형하면,

$$\frac{dV(z)}{dz} = -ZI(z) \quad (4)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -YV(z) \quad (5)$$

이 된다. 식(4)과 식(5)은 전송선로의 전압, 전류를 만족하는 미분방정식이다. 이것을 풀기 위하여 양변을 각각 z 로 미분하고 서로 대입하면

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} - \gamma^2 V(z) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) = 0 \quad (7)$$

이 된다. 여기서,

$$\gamma^2 = ZY \quad (8)$$

이다.

식(3)을 식(8)에 대입하여 정리하면

$$\gamma = \sqrt{(RG - \omega^2 LC) + j\omega(LG + RC)} = \alpha + j\beta \quad (9)$$

이 얻어진다. 여기서, γ 를 전파상수(propagation constant)라 하고 부호는 정(+)으로 한다. 또한 실수부를 α 감쇄상수(attenuation constant)라고 하며, 그것의 단위는 [1/m] 또는 [Np/m] 및 [dB/m]로 나타내며, 이들의 관계는 α [dB/m] = 8.686 \times α [Np/m]으로 표시된다. 또한, 허수부를 β 위상상수(phase constant)라 한다.

식(6)과 식(7)은 상미분방정식이므로 이를 풀면

$$V(z) = V_1 e^{-\gamma z} + V_2 e^{\gamma z} \quad (10)$$

$$I(z) = I_1 e^{-\gamma z} + I_2 e^{\gamma z} \quad (11)$$

이 된다. 여기서, V_1, V_2, I_1, I_2 는 임의의 상수이다. 그리고 식(4)과 식(5)의 전압과 전류와의 관계로부터 $I(z)$ 은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$I(z) = \frac{\gamma}{Z} (V_1 e^{-\gamma z} - V_2 e^{\gamma z}) \quad (12)$$

식(12)와 식(8)로부터

$$\frac{\gamma}{Z} = \frac{\sqrt{ZY}}{Z} = \sqrt{\frac{Y}{Z}} = \frac{1}{Z_0} \quad (13)$$

이 되고, 이 때의 Z_0 를 선로의 특성 임피던스(characteristic impedance)라 하며 다음과 같다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (14)$$

그러므로, (10)과 식(12)에 시간항을 포함하여 식(9)과 식(13)의 관계식을 포함한 표현식은 다음과 같다.

$$V(z, t) = V(z) e^{j\omega t} = [V_1 e^{-az + j(\omega t - \beta z)} + V_2 e^{az + j(\omega t + \beta z)}] \quad (15)$$

$$I(z, t) = I(z) e^{j\omega t} = \frac{1}{Z_0} [V_1 e^{-az + j(\omega t - \beta z)} - V_2 e^{az + j(\omega t + \beta z)}] \quad (16)$$

식(15)과 식(16)의 우변의 첫째 항으로부터 위상을 일정한 점에 고정하고, 이 점의 위상속도를 $\omega t - \beta z = \text{일정}$ 이라 하고, 양변을 미분하면 $d\omega t - d\beta z = 0$ 이 되므로 이것으로부터

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta} = v_{p1} > 0 \quad (17)$$

가 얻어진다. 여기서, ω 는 각속도(angular velocity)를 나타낸다. 이때의 v_{p1} 속도는 정방향으로 이동하는 속도를 표시하기 때문에 위상속도(phase velocity)라 하고 진행파 또는 입사파(incident wave)라 한다. 제2항도 같은 방법으로 풀면,

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{\omega}{\beta} = v_{p2} < 0 \quad (18)$$

이 얻어져 음의 방향으로 진행하는 위상속도를 나타내고 후진파 또는 반사파(reflected wave)라 한다. 통신선으로 사용되는 여러 가지 부도체의 위상속도는 재질에 따라 다르게 나타난다. 예를 들면, 폴리에틸렌(polyethylene)은 0.66, 펄프 절연체(pulp insulation)는 0.72, 반고체 PE(semi-solid PE)는 0.84이다.

2.2. 전송선로 파라미터 계산

진행파의 위상속도와 네트워크 케이블의 스텝(stub) 길이를 간단히 계산하기 위해 전송선의 손실을 무시하면, 식(14)는 다음과 같이 근사식으로 표시될 수 있다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (\because j\omega L \gg R, \quad j\omega C \gg G) \quad (19)$$

그리고 위상속도 v_p 도 근사식으로

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L_0 \times C_0}} \quad (20)$$

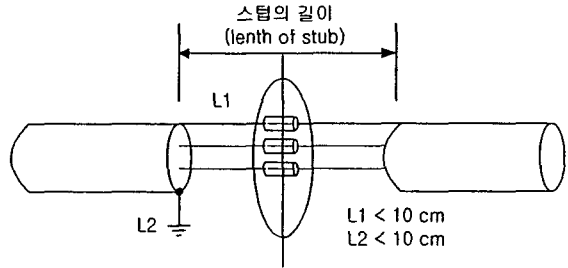
이 되며, 식(19)을 식(20)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$v_p = \frac{1}{Z_0 \times C_0} \quad (21)$$

식(21)을 통해서 우리는 전송 선로의 위상속도를 쉽게 구할 수 있다. 만일 전송로의 전이 시간이 13ns이고, 특성 임피던스가 120Ω, 선로 캐패시턴스가 65pF/m 일 때 위상속도는 식(21)으로부터 $v_p = 128 \times 10^6$ (m/s)가 된다. 이제 전송로의 스텝 길이를 계산하기 위해서 TI사에서 제시한 경험식(rule of thumb)을 적용하면 다음과 같다[1].

$$t_{pd} = \frac{t_{ID}}{10} \quad \text{and} \quad L_s = t_{pd} \times v_p \quad (22)$$

여기서, t_{pd} 는 선로의 전파지연시간(propagation delay time), t_{ID} 는 전이시간(transition time) 그리고 L_s 는 스텝의 길이(length of stub)이다. 주어진 값을 식(22)에 대입하면 $t_{pd} = 1.3 \times 10^{-9}$ 이고, $L_s = 1.3 \times 10^{-9} \times 128 \times 10^6 = 166$ (mm)이다. 이것은 각 스텝의 길이가 166mm를 초과해서는 안된다는 것을 의미한다. 실제로 국내전동차 및 KTX 사용된 사례를 살펴보면 대부분 이 스텝의 길이를 1m 이내로 규정하고 있다. [그림 2]는 열차의 인통선에 사용되는 전송선의 스텝의 길이를 규정하는 작업도를 보인 것이다[3][4].



[그림 2] 스텝 길이 작업도

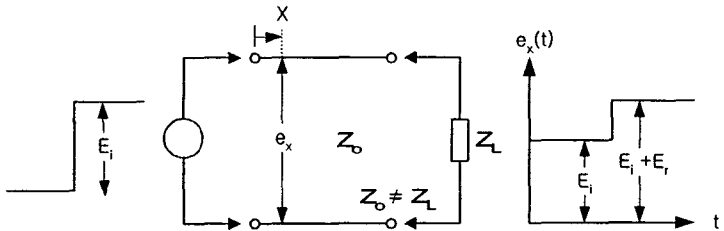
2.3. 반사 계수 및 반사 손실

반사 계수(reflection coefficient)는 케이블내의 한 점에서 생기는 임피던스의 변화를 측정하는 것이다. 이것은 한 점에서 반사되는 신호(E_r)를 그 점으로 들어가는 신호(E_i)로 나눈 비율이다. 즉 반사 계수는 ρ (rho)로써 다음과 같이 정의된다[6].

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (23)$$

여기서, Z_0 는 선로의 특성임피던스이고, Z_L 은 부하임피던스이다.

임피던스의 변화가 없는 이상적인 전송 시스템에서는 반사가 일어나지 않아 ρ 가 0이 된다. 자신의 특성 임피던스 내에서 한 정된 양질의 케이블은 이상적인 케이블에 가까우므로 계측기로 측정하면 평평한 선으로 나타난다. 반사 계수가 양수이면 반사전 케이블의 임피던스보다 높은 임피던스를 나타낸다. 이것은 파형이 위쪽으로 튀어나온 것으로 나타난다. 그리고 반사 계수가 음수이면 반사전 케이블의 임피던스보다 낮은 임피던스를 나타내며 아래로 들어간 것으로 나타난다.



[그림 3] 임피던스 불일치에 의한 전압대 시간 파형

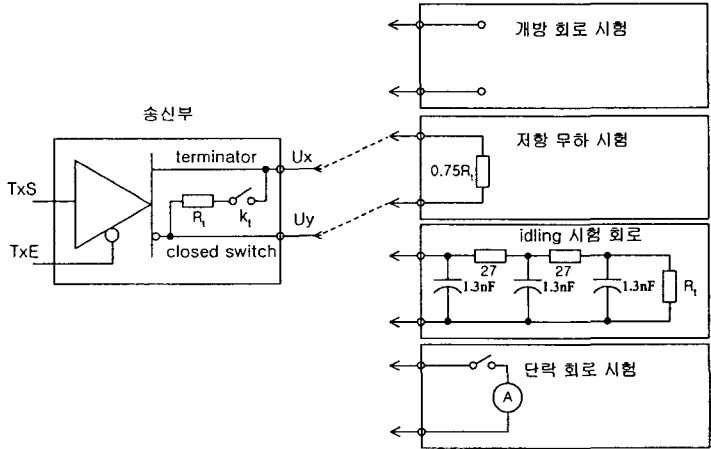
만일 케이블이 개방, 또는 단락되어졌다면 반사 측정기(reflectometer)에서 보내진 모든 에너지가 반사될 것이다. 이 말은 개방에 대하여는 $Z_L = \infty$ 이므로 식(23)으로부터 반사 계수가 $\rho = 1$ 이 되고, 단락에 대하여는 $Z_L = 0$ 이므로 $\rho = -1$ 이 된다. 또한, 반사 손실은 케이블내의 임피던스 변화를 측정하는 것이다. 수학적으로 반사 손실은 $-20 \log |E_r/E_i|$ 로 정의된다. 반사 손실이 크다는

것은 대부분의 펄스 에너지가 반사되지 않고 손실된다는 것을 의미한다. 손실된 에너지는 케이블로 보내지거나 종단기에서 흡수된다. 케이블에 맞는 종단기는 펄스의 대부분을 흡수하여 반사 손실을 커지게 한다. 개방이나 단락은 모든 에너지를 반사하여 반사 손실이 0이 된다.

3. 통신 네트워크 케이블 결함 측정 방법

3.1. 시뮬레이션 방법

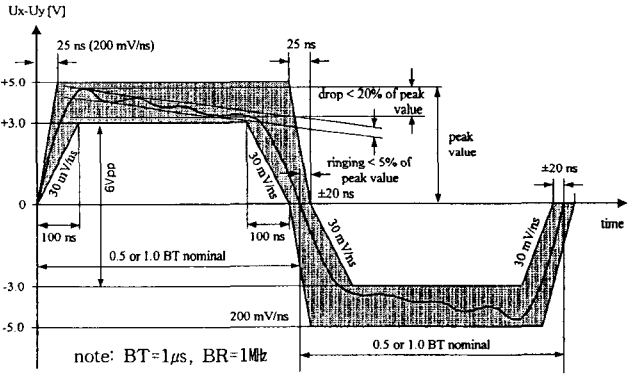
케이블과 노드(node)를 갖는 송신부를 시뮬레이션하기 위해 IEC61375에 규정되어 있는 시험 방법을 [그림 4]에 보였다. 개방 회로 시험은 출력단이 개방된 상태를 시험하기 위한 것으로 전체 저항은 송신부 출력단에 설치된 터미네이터 저항(R_t)과 같다. 저항 부하 시험은 송신부의 터미네이터 저항과 부하의 병렬 저항으로 터미네이터 저항의 0.42와 같다. idle 시험 회로는 저항 부하 없이 860m 길이의 통신 케이블을 시험하기 위한 것으로 커패시터는 $1.3nF \pm 10\%$ 이고, 저항은 $27\Omega \pm 1\%$ 가 각각 사용된다. 그리고 단락 시험은 선로의 결함을 시험하기 위한 것으로 단순히 전류의 측정회로만으로 구성된다[2].



[그림 4] 송신부 시험회로

[그림 5]는 통신 속도가 1Mbit/s±0.01%일 때 송신부의 출력 파형을 보인 것이다. 송신부가 개방, 단락, idle 회로 및 단락 회로 시험에 대하여 [그림 5]에서 규정된 사양을 만족하여야 한다.

만일 규정된 파형이 관측되지 않을 경우에는 송신부의 출력단을 구성하는 절연 트랜스포머 혹은 광결합기(opto-coupler), 전자장비의 내부 배선 및 전원 회로에 문제가 있음을 예측할 수 있다.

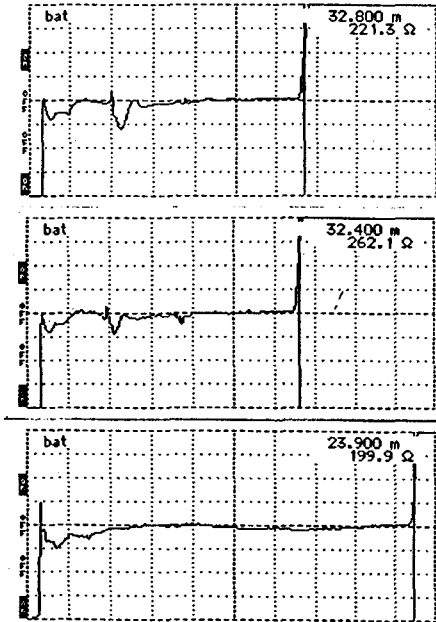


[그림 5] 송신부 펄스 파형 사양

3.2. 차량 상태에서 통신선 케이블 결함 측정 방법

전송선로 케이블의 결함이란 설계 사양보다 비효율적으로 전기 에너지를 전달하는 상태를 말한다. 절연체에 물이 스며들었거나 연결장치(커넥터, 단자대)를 잘 끼우지 않았거나 케이블을 잘못 이은 것 등이 전형적인 케이블 결함이라 할 수 있다.

반사 측정기(reflectometer)는 전기 펄스를 케이블로 보내어 비연속성에 의하여 발생하는 모든 반사를 감지한다. 이것은 시간 영역 반사 측정기(time-domain reflectometer)라 불린다. 반사 측정기는 임피던스 변화에 민감하게 반응하므로 케이블의 임피던스에 변화가 일어나면 이를 즉시 감지



하는 기능을 가지고 있다. 이들은 반사 펄스에서 마루와 골로 나타난다. 반사 측정기는 단락, 개방, 차폐막의 손상, 케이블내의 이물질, 꼬임 등등을 찾아낼 수 있다. [그림 6]은 반사 측정기로 현재 생산되고 있는 고속전철의 과형을 관측한 일례를 보인 것이다. 위쪽으로 튀어 오른 파형은 임피던스가 높을 때 나타나며, 아래쪽 파형은 임피던스가 낮은 경우를 나타낸다. 반사 측정기는 전송 선로의 총 길이, 임피던스 및 감쇄를 측정할 수 있어 회로의 결함 위치를 명확히 찾아낼 수 있는 장점을 가지고 있다[5].

K22 R12(CM2)		
차 종	K22 R12(CM2)	
항 목	pass criteria	fail criteria
길이	$42.3m \leq L \leq 51.7m$	$51.7m < L < 42.3m$
임피던스	$95\Omega \leq Z \leq 115\Omega$	$115\Omega < Z < 95\Omega$
감쇄	$< 15 \text{ dB}$	$> 15 \text{ dB}$

K22 R12(CM 3)		
차 종	K22 R12(CM 3)	
항 목	pass criteria	fail criteria
길이	$42.3m \leq L \leq 51.7m$	$51.7m < L < 42.3m$
임피던스	$95\Omega \leq Z \leq 115\Omega$	$115\Omega < Z < 95\Omega$
감쇄	$< 15 \text{ dB}$	$> 15 \text{ dB}$

K22 R12(CM 4)		
차 종	K22 R12(CM 4)	
항 목	pass criteria	fail criteria
길이	$24.3m \leq L \leq 29.7m$	$29.7m < L < 24.3m$
임피던스	$95\Omega \leq Z \leq 115\Omega$	$115\Omega < Z < 95\Omega$
감쇄	$< 15 \text{ dB}$	$> 15 \text{ dB}$

[그림 6] KTX 통신 네트워크 케이블 결함 측정 파형 일례

4. 결론 및 향후 계획

전송로의 등가 회로로부터 감쇄상수와 위상상수에 대해 알아보았다. 특히 위상상수로부터 스텝의 길이를 계산할 수 있는 이론적 근거를 제시하였으며, 송신부의 부하 시뮬레이션 기법과 반사 측정기를 이용하여 전송로의 케이블 결함 상태를 측정하는 방법을 보였다.

전송로 케이블의 주요 결함은 연결장치(커넥터, 단자대), 차폐선 처리(접지) 및 습기에 의한 절연 파괴로 요약될 수 있으며, 이들의 결과는 반사 계수에 영향을 미치고, 계측기의 위쪽 또는 아래쪽으로 파형이 급격히 변화되는 모양을 갖는다.

향후에는 다중의 노드가 결합된 상태(열차 편성 상태)에서 반사 측정기를 이용하여 결함 요소를 쉽게 발견할 수 있는 이론적 근거 및 시험 내용을 보이고자 한다.

참고문헌

- [1] Data Transmission, TI Data Book, 1993
- [2] IEC 61375 Electric Railway Equipment- Train Communication Network.
- [3] TIS Cabling rules for FIP network, ISA 기술사양서, 1998

- [4] 최권희, 최낙봉, 박계서, 열차간 데이터 전송을 위한 전송로의 접지 특성에 관한 연구
2000년도 한국철도학회 춘계학술대회 논문집 2000.4
- [5] 1502C Metallic Time-Domain Reflectometer User Manual, Tektronix, 1997
- [6] Time-Domain Reflectometer Theory, Application Note 1304-2, Agilent Technologies