

열차간 데이터 전송을 위한 전송로의 접지 특성에 관한 연구

Study on the Earth Characteristics of the Transmitter Line for the Data Transmitter between Vehicles.

최권희* 최낙봉** 박계서***
Choi, Kweon-hee Choi, Nak-bong Park, Gye-Seo

ABSTRACT

Recently, the microprocessor with network function based-controlled systems instead of conventional microprocessors is widely used to industrial applications, and also those technologies are widely adopted for train control and monitoring in modern rapid transit systems such as railway vehicles.

The purpose of this paper is to propose a high quality data transmission line of railway vehicle system controlled by a microprocessor, which was designed and realized through SMG 7&8 and ISA project. 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 시스템의 인터페이스 문제는 시스템의 Balance, Shielding, Isolation, Grounding, Impedance Matching 및 신호선 Threshold 등의 요인에 의해 생길 수 있으며 그 영향은 유도된 신호선의 크기 노이즈의 감쇄율 및 접지 형태에 따라 좌우된다. 일반적으로 전송로에서 전송품질에 영향을 줄 수 있는 노이즈(noise), 신호왜곡(signal distortion) 및 신호 감쇄(signal attenuation)는 데이터 전송시스템에서 항상 존재하며 시스템의 성능을 저하시키는 원인이 되고 있다.

최근에는 열차에 탑재되는 Electric Rack의 성능의 진보에 기인하여 전송로의 성능 향상과 전송 품질에 대한 요구가 더욱 증대되고 있어 이에 대한 대책 연구의 필요성을 느끼게 되었다.

본 연구에서는 전송로의 감쇄상수와 위상상수로부터 stub length를 계산하는 방법과 열차내 혹은 열차간 전송선로의 shielding 처리방법에 대해 알아보려고 한다.

* 한국철도차량 중앙연구소 주임연구원, 비회원

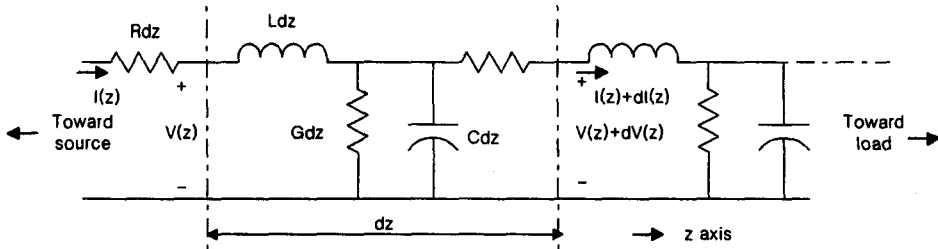
** 한국철도차량 중앙연구소 책임연구원, 비회원

*** 한국철도차량 중앙연구소 수석연구원, 비회원

2. 전송로 특성

2.1. 전송선로 방정식

[그림 1]은 z 방향으로 무한히 길고, 단면적이 일정한 2개의 평행도선에서 미소 길이에 대한 전송선로 등가회로를 보인 것이며 이에 대한 전압 전류식은 다음과 같이 유도된다.



[그림 1] 전송로 등가회로

$$I(z) - \{I(z) + dI(z)\} = Ydz \cdot V(z) \quad (1)$$

$$V(z) - \{V(z) + dV(z)\} = Zdz \cdot I(z) \quad (2)$$

여기서

$$Z = R + j\omega L \quad (3)$$

$$Y = G + j\omega C \quad (3)$$

식(1)과 식(2)을 변형하면

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

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

로 된다. 식(4)과 식(5)의 양변을 각각 z 로 미분하고 서로 대입하면

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

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

여기서

$$\gamma^2 = Z \cdot Y \quad (8)$$

이다. 식(3)을 식(8)에 대입하여 정리하면

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

이되며, γ 를 전파상수(propagation constant)라 하고 γ 의 부호는 정(+)으로 한다.

또한 α 를 감쇄상수(attenuation constant), β 를 위상상수(phase constant)라 한다.

식(6)과 식(7)은 상미분방정식이므로 이를 풀면

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

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

이된다. 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.

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

가 얻어진다.

식(12)와 식(8)로부터

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

이고, 이 때의 Z_0 를 선로의 특성 임피던스(characteristic impedance)라 한다.

즉

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R+jwL}{G+jwC}} \quad (14)$$

식(10)과 식(12)에 시간 항을 포함하여 식(9)과 식(13)의 관계식을 포함한 표현식은 다음과 같다.

$$V(z, t) = V(z)e^{jwt} = [V_1e^{-az+j(wt-\beta z)} + V_2e^{az+j(wt+\beta z)}] \quad (15)$$

$$I(z, t) = I(z)e^{jwt} = \frac{1}{Z_0} [V_1e^{-az+j(wt-\beta z)} - V_2e^{az+j(wt+\beta z)}] \quad (16)$$

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

$$\frac{dz}{dt} = \frac{w}{\beta} = v_{\beta 1} > 0 \quad (17)$$

가 얻어진다. 여기서 w 는 각속도(angular velocity)를 나타낸다. 이때의 $V_{\beta 1}$ 속도를 정방향으로 이동하는 속도를 표시하기 때문에 위상속도(phase velocity)라 하고 진행파 또는 입사파(incident wave)라 한다. 제2항도 같은 방법으로 풀면

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{w}{\beta} = v_{\beta 2} < 0 \quad (18)$$

이 얻어져 음의 방향으로 진행하는 위상속도를 나타내고 후진파 또는 반사파(reflected wave)라 한다.

2.2. 전송선로 파라미터 계산

[그림 1]의 전송로 등가회로 모델로부터 전송로의 중요한 파라미터를 유도되는 과정을 보였다. 이들 유도된 식과 실제 열차에서 사용되고 있는 전송 케이블의 사양을 [표1]과 [표2]에 보였다.

[표 1] ISA 1호선에 사용된 network cable 사양

Characteristics	Value	Remarks
Type of cable	twisted shielded pair with controled impedance	
Characteristics impedance	1200hm ± 10%	from 0.25 and 2.5MHz
Transmissoin loss	< 1.5dB/100m < 2.0dB/100m	from 0.25 and 2.5MHz at 2.0MHz
Differential transmission loss between 1.25 and 0.25MHz	< 0.8dB/100m	
Transfer impedance	< 20 mΩ/m	from 0.25 and 20MHz Coaxial Cable을 사용하여 측정된 값임.

[표 2] IEC61375, TCN 규격에 명시된 network cable 사양

Characteristics	Value	Remarks
Type of cable	twisted shielded pair with controled impedance	
Characteristics impedance(Z_0)	120Ohm \pm 10%	
attenuation(α) (Transmission in loss)	< 15dB/km	10dB/km at 1.0MHz 14dB/km at 2.0MHz
capacitive unbalance to shield	< 1.5pF/m	at 1.0MHz
distributed capacitance(C_s)	< 65pF/m	at 1.0MHz
crosstalk rejection	> 55dB	(if 2 pairs in the same cable from 0.5MHz to 2.0MHz)

식(9)에서 유도된 전파상수 γ 는 감쇄상수와 위상상수로 표시되며 이것의 특성은 전송로의 신호 감쇄에 영향을 주는 상수이다. [표 1]과 [표 2]에서 감쇄상수는 < 2.0dB/100m(at 2.0MHz), 14dB/km (at 2.0MHz)를 각각 나타내고 있다. 또한 식(14)의 특성 임피던스 Z_0 는 120Ohm \pm 10%로 동일하다.

이제 진행파의 위상속도와 cable의 stub의 길이를 간단히 계산하기 위해서 전송로의 손실을 무시하고 짧은 거리(RS485 통신거리)라 할 때 식(14)의 특성 임피던스는 다음과 같이 근사식으로 표시될 수 있다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (19)$$

왜냐하면 실제 상황에서는 $j\omega L \gg R$, $j\omega C \gg G$ 이므로 R 과 G 는 무시될 수 있다. 하지만 전송로가 매우 긴 경우에는 R 이 존재하므로 반드시 고려해서 계산해야 된다. 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(19)을 통해서 우리는 전송 선로의 위상속도를 쉽게 구할 수 있다. 만일 전송로의 transition time이 13ns이고 위의 [표 2]에서 제시한 특성 임피던스가 120 Ω , 선로 캐패시턴스가 65pF/m 일 때 위상속도는

$$V_p = \frac{1}{120 \times 65 \times 10^{-12}} = 128 \times 10^6 \text{ (m/s)} \quad (22)$$

이 된다.

이제 전송로의 stub length를 계산하기 위해서 TI사에서 제시한 경험식(rule of thumb)을 적용해 보기로 하겠다.

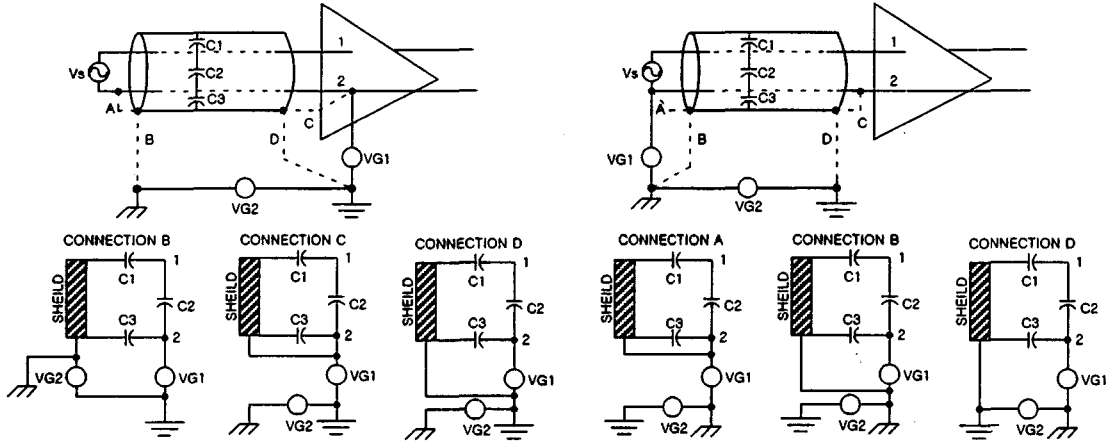
$$t_{pd} = \frac{t_{ID}}{10} \quad \text{and} \quad L_s = t_{pd} \times V_p \quad (23)$$

여기서, t_{pd} 는 선로의 propagation delay time, t_{ID} 는 transition time 그리고 L_s 는 length of the stub 이다. 위에서 주어진 값을 식(23)에 대입하면 $t_{pd} = 13 \times 10^{-9} / 10 = 1.3 \times 10^{-9}$ 이고

$L_s = 1.3 \times 10^{-9} \times 128 \times 10^6 = 166 \text{ (mm)}$ 이것은 각 stub의 길이가 166mm를 초과해서는 안 된다는 것을 의미한다. stub의 길이를 이와 같이 선정했을 경우에는 기대하지 않았던 반사의 요인에 영향을 미치지 않을 것이다. 이 경우에 각 stub는 선로의 Capacitance loading을 최소화 시키는데 주요한 영향을 미친다. 실제로 국내전동차에 응용한 사례를 살펴보면 이 stub length를 1m 이내로 규정하고 있다.

3. Grounding of Cable Shield

Cable Shielding은 Source 측에서 접지하는 방법과 Receiver측에서 접지하는 방법 또는 양쪽에서 접지하는 Coaxial Cable등을 들 수 있으며 이들의 연결 방법과 특성을 비교하고자 한다.



[그림1] When Amplifier is Grounded, the best connection is (C)

[그림2] When Source is Grounded, the best connection is (A)

Receiver측이 Grounding 되었을 때

① Connection B

$$V_{12} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} (V_{G1} + V_{G2})$$

② Connection C

$$V_{12} = 0$$

③ Connection D

$$V_{12} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{G1}$$

Source측이 Grounding 되었을 때

① Connection A

$$V_{12} = 0$$

② Connection B

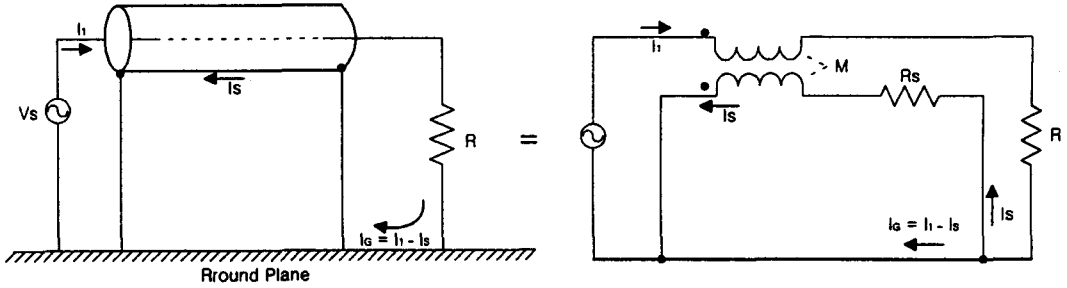
$$V_{12} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{G1}$$

③ Connection D

$$V_{12} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} (V_{G1} + V_{G2})$$

Receiver측(amplifier)에서 Connection A는 Shield Noise가 신호의 단자로 흐르므로 불합리하고, Connection C는 $V_{12} = 0$ 이므로 V_{G1} 과 V_{G2} 와는 무관함을 알 수 있다. 여기서 V_{G1} 과 V_{G2} 는 선과 earth ground간의 전위차, 두 ground사이의 전위차를 각각 나타낸다. Receiver측이나 Source측에서 가장 좋은 연결방법은 Connection C와 Connection A임을 알 수 있고 어느 곳에서 Ground 처리를 해도 같은 효과를 얻을 수 있다.

양쪽 모두 Grounding 되었을 때



[그림 4] 고주파에서 무방사 회로

$$I_s = I_1 \left(\frac{j\omega}{j\omega + R_s/L_s} \right) = I_1 \left(\frac{j\omega}{j\omega + W_c} \right)$$

여기서

$$W_c = R_s/L_s$$

$$\begin{aligned} \text{만일 } W \gg W_c, \quad I_s &= I_1 \\ I_s &> I_G \end{aligned}$$

(24)

$$\text{만일 } W < 5W_c, \quad I_G > I_s$$

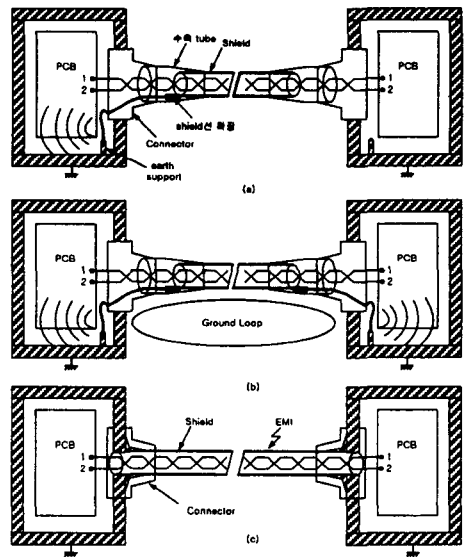
(25)

식(24)은 좋은 무방사를 갖고 식(25)은 주파수가 $5W_c$ 이하에서는 magnetic coupling에 는 의미가 없음을 알 수 있다. Shield와 Conductor 사이의 인덕턴스 때문에 고주파에서는 ground plane와 Shield를 타고 흐르는 전류가 더 많다.

실제 1Mhz이하의 경우에는 cable의 한쪽을 Grounding시키고 1Mhz 이상이거나 Cable의 길이가 파장의 1/20을 넘으면 한 점 이상에서 Grounding 하는 것이 효과적이다.

주파수가 높아질수록 표피효과(skin effect)에 의해, 주파수가 높은 노이즈는 Cable의 표면으로 주파수가 낮은 신호는 그 안쪽으로 흐르는 경향이 있다. 따라서 높은 주파수에서는 한점 접지보다도 다중접지(multi-point ground)의 효과가 크다. 또 높은 주파수에서 한 점에 대해서만 Ground할 경우에는 Stray Capacitor에 의해 Ground Loop가 형성될 수 있으므로 넓은 주파수 범위에서 사용하려면 작은 Capacitor를 종단에 붙이는 것이 좋다.

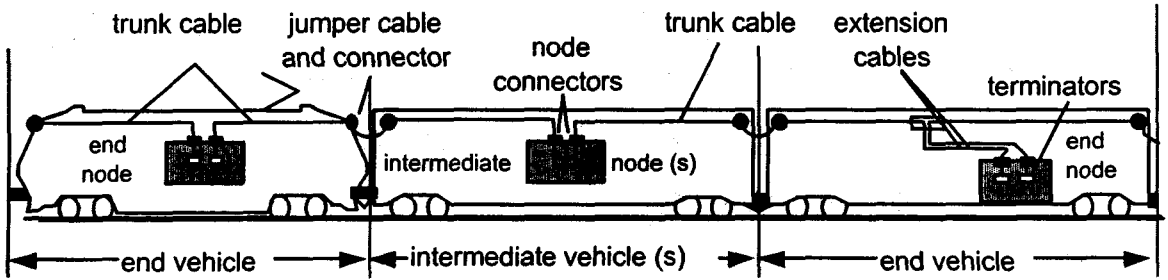
[그림 5]는 shield선 처리 방법에 따라 방사 노이즈 및 ground loop에 대한 그림을 보인 것이다. 현재 선 진국의 전송로 접지 방법은 [그림 5-(c)] 방법이 가장 많이 사용되고 있다.



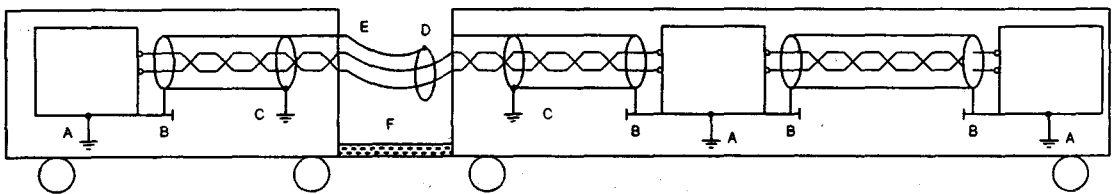
[그림 5] Shield 처리 일례

4. 철도차량에서의 열차간 전송 선로 처리방법

[그림 6]은 IEC61375에서 제시한 열차간 혹은 열차내에서 전송선로에 대한 그림을 보인 것이다. [그림 6]에 대해 보다 상세하게 전송선로의 접지에 대해 논하기 위해 [그림 7]과 같이 다시 각 부에서 접지시의 주의점 및 방법에 대해 상세히 표현하였다.



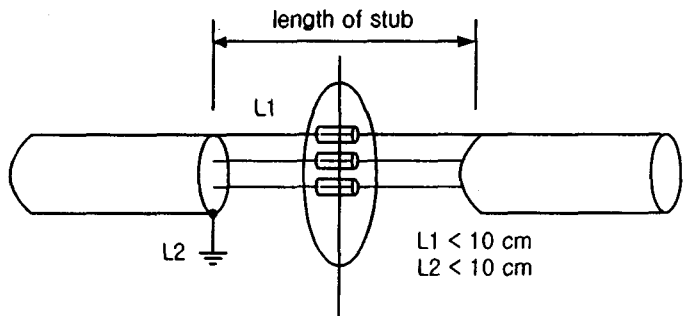
[그림 6] 열차내 혹은 열차간 전송선로 연결방법



[그림 7] General earthing layout

- A: Equipment box earthing → braid 혹은 screw를 통해서 강제적으로 접지한다.
- B: Equipment end earthing → screw를 통해서 강제적으로 접지한다.
- C: Jumper end earthing → [그림 8] 상세도 참조
- D,E: Intercar shielding → One point에 접지한다 (earthing continuity 사양에 준한 작업을 한다)
- F: Intercar earth continuity braids or bars → high current에 대한 대책 설계가 요구된다.

Intercar Jumper의 One point를 통해서 Screen 연속접지는 가장 중요한 작업이며 [그림 8]에 보인 상세 작업방법에 따라야 한다. [그림 8]에서 L1은 stub length의 1/2값에 해당되며 식(23)에서 구할 수 있다.



[그림 8] Intercar earthing details

[표 3]은 국내 열차에서 사용되는 전송선로의 속도에 대해 보인 것이다. [표 3]에서와 같이 열차의 전송로 속도는 최근에 1Mbps이상을 요구하고 있으며 이는 열차에 설치되는 Electric Rack의 성능이 급진적으로 진보되고 있음을 짐작할 수 있다. 전송로의 속도가 증가 되면 그로 인해 차량의 제어대상이 다양화되고 그로 인해 보다 강인한 시스템 설계 사양의 요구가 대두된다.

[표 3] 국내 열차에서 사용되고 있는 전송로 속도

	SMSC 4호선/과천선	SMG 5호선	SMG 7&8호선(1차)	SMG 7&8호선(2차)	ISA 1호선	KNR 1호선 (VVVF 차량)	K-TGV
장치명	TGIS	TCMS	TCMS	TCMS	TIS	TIS	OBCS
제작사	GEC-A	Adtranz	GEC-A	TOSHIBA	Alsthom	TOSHIBA	Alsthom
전송율	38.4kbps	153kbps	38.4kbps	2Mbps	1Mbps	1kbps	1Mbps
통신방식	HDLC multi-drop	←	←	HDLC Token-ring	FIP	SPC	Tornad
통신선	twisted pair shielded cable	←	←	←	←	일반 전선	twisted pair shielded cable

5. 결론 및 향후 계획

전송로의 등가회로로부터 감쇄상수와 위상상수에 대한 실제 응용 일례에 대해 알아보았다. 특히 위상상수로부터 stub의 길이를 계산할 수 있었으며 접지 형태에 따라 시스템의 특성이 달라지는 것에 대해서도 예시를 통해 재차 확인할 수 있었다.

차량간의 전송로 신호접지에 있어서는 차량간 Jumper 처리 문제가 가장 중요한 요인으로 밝혀졌고 이를 해결할 수 있는 구체적인 방법을 제시하였다.

전송케이블의 Shield접지 처리에 있어서는 과거에는 One Point를 선호하였지만 최근에는 case와 전송케이블을 마치 파이프관 모양으로 처리할 경우에는 외부의 EMI에 대한 대책과 함께 접지 특성이 보다 양호한 것으로 나타났다.

향후에는 열차 전송로의 접지특성을 시험할 수 있는 보다 상세한 시험장치에 대해 연구하고자 한다. 이는 열차를 제작한 후 전송로의 올바른 상태를 검사하는데 필수적인 장비가 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 金映權, 마이크로파공학, 협신문화사, 1988.3
- [2] Data Transmission, TI Data Book, 1993
- [3] IEC 61375 Electric Railway Equipment- Train Communication Network.
- [4] TIS Cabling rules for FIP network, ISA 기술사양서, 1998
- [5] SMG line 7&8 Interface Specifications, 1996
- [6] SMG line 5 functional specifications, 1995