AT급전방식에서 AT간격에 따른 전압강하 및 대지누설전류에 대한 연구

논 문 60-9-11

A Study on the Voltage Drop and Earth Leakage Current according to Interval of AT in the AT Feeding Method

김 민 석*·최 승 혁**·이 종 우[†] (Min-Seok Kim·Seung-Hyuk Choe·Jong-Woo Lee)

Abstract - AT feeding system of the electric railway system is installed every about 10km at between the feeder and catenary in parallel and the mid-point of the transformer is connected to the rail The supply voltage of this system is doubled than rolling stock voltage. So the voltage drop is smaller than usual. And the other merit of this system is the decreasing inductive disturbance to the communication line because of the reduced current in rail which runs reversed in a point of view of rolling stock. Also, ATP(Auto Transformer Post) is installed to reduce the voltage drop and to mitigate the inductive disturbance, but still now the proper distance between the ATP and AT feeding system is not established which ranges from 2 to 10[km]. The stable result of simulation(which is set that the end of the line AT is installed) to the voltage drop and inductive disturbance can not analyzes the effect to the supply system due to the ATP. This paper analyzes the effect to the system depending on the location of ATP by forecasting the voltage drop and inductive disturbance.

Key Words: AT feeding method, ATP, Voltage drop, Inductive disturbance, Electrical railroad

1. 서 론

지구온난화, 물 부족, 생태계 파괴, 자원 고갈, 에너지 위 기 등 환경위기 타개를 위해 오늘날 세계 각국은 "지속가능 한 저탄소 녹색성장"을 국가 정책의 최우선으로 하고 있으 며, 우리나라에서도 2009년 "녹색성장 국가전략 및 5개년 계 획"을 수립, "효율적 온실가스 감축", "탈석유·에너지 자립 강화", "녹색국토・교통의 조성" 등 10대 정책을 수립, 추진 하고 있으며, 이에 대한 이상적인 해결책으로 전기철도가 대 두되고 있다[1]. 교류전기철도는 AT(Auto Transformer)급 전방식, BT(Booster Transformer)급전방식 및 직접급전방 식이 있으며, 최근 부하전류의 급증으로 대전력, 장거리 급 전 및 유도장해 측면에서 유리한 AT급전방식이 가장 많이 사용되고 있고, 고속철도에도 이 방식이 적용되고 있다[2]. AT급전방식은 변전소에서 급전선을 선로를 따라 가선하여 이 급전선과 전차선 사이에 약 10[km]간격으로 AT를 병렬 로 설치하여 변압기 권선의 중성점을 레일에 접속하는 방식 이다[4]. AT 급전방식은 대용량 열차 부하에서도 전압변동, 전압 불평형이 적어 안정된 전력공급이 가능하여 대부분의

 * 정 회 원 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신 호공학과 박사과정
 ** 비 회 원 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신 호공학과 석사과정
 * 교신저자, 정회원 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 교수
 E-mail : saganlee@seoultech.ac.kr

접수일자 : 2011년 1월 2일 최종완료 : 2011년 7월 27일 국가에서 채택하고 있으며 레일에 흐르는 전류는 차량을 중 심으로 각각 반대 방향의 AT쪽으로 흐르기 때문에 근접 통 신선에 대한 유도장해가 적게 되는 장점이 있다[3].

또한, 기존선 전철화 및 신선 건설 시에는 필연적으로 전 철화 구간의 단말이 발생하게 되며, 이 경우에는 선로 말단 의 전압강하 보상과 통신 유도장해 경감을 위해 단말보조급 전구분소용 AT를 설치하여 운영하고 있다[4].

그러나 일반적인 AT의 설치간격이 선로조건, 지리적여건 등 특수한 경우를 제외하고는 약 10[km]인데 반해, 현재 설 치되는 보조급전구분소와 단말보조급전구분소용 AT의 와의 설치거리는 약 2~10[km]로 일정한 기준 없이 Table 1과 같 이 다양하게 적용되고 있는 실정이다[5][6].

표 1 단말보조급전구분소용 AT의 설치거리

Table 1	Establishment	distance	of	ATP(Auto	Transformer
	Post)				

구분	설치거리[km]
중앙선 팔당	4
영동선 강릉	9.2
경전선 진주	2.8
경전선 마산	4.5
장항선 신창	3.5

단말보조급전구분소용 AT의 설치거리가 다양하다는 것 은 AT간격에 대한 전압강하 및 대지누설전류의 분석이 정 확히 이루어지지 않은 결과이다. 본 논문에서는 AT간격에 대한 전압강하 및 통신유도장해 측면에서 대지누설전류를 분석하여 AT설치거리 기준을 제시하였다.

2. AT급전방식에서의 단락 임피던스

AT급전회로에서 전압강하를 분석하기 위한 전차선과 레 일의 단락 임피던스를 계산하기 위해 Fig.2에서의 단선 간 이등가회로를 이용한다[7].



그림 2 AT급전방식의 등가회로 Fig. 2 Equivalent circuit in AT feeding method

Fig.2의 루프에서 키르히호프의 법칙에 의해 식(1)~식 (3)이 성립한다.

$$\frac{V}{2} = Z(I_1 + I_2) + Z_c(I_1 + I_2/2)m + Z_rI_1m$$
(1)

$$\frac{V}{2} - \frac{V_2}{2} = Z_c (I_1 + I_2/2)m - Z_c I_2/2(D-m) + Z_r I_1 m$$
(2)
- Z I_o (D-m)

$$\frac{V}{2} - \frac{V_2}{2} = Z_f(I_2/2)D - Z_rI_1m + Z_rI_2(D-m)$$
(3)

Z는 단락 임피던스를 의미하고, Z_c는 전차선 임피던스를 의미한다. Z_c은 레일의 임피던스를 의미하고, Z_f는 급전선 의 임피던스를 의미한다. 식(1)~식(3)을 이용하여 전차선 과 레일이 단락된 경우의 선로 임피던스를 계산하면 식(4) 와 같다.

$$Z_{AL} = 4Z + 4D(Bd - A^2d^2/G)$$
(4)

$$A = Z_c + 2Z_r \tag{5}$$

$$B = Z_c + Z_r \tag{6}$$

$$G = Z_c + Z_f + 4Z_r \tag{7}$$

$$d = m/D \tag{8}$$

식(4)에서 AT를 하나 지날 때마다 단락 임피던스는 4DH/G만큼씩 상승하게 된다.

 $H = Z_c Z_f + Z_c Z_r + Z_f Z_r \tag{9}$

3. AT간격에 대한 전압강하와 대지누설전류 분석

3.1 전압강하

AT간격에 따른 전압강하를 계산하기 위해 첫 번째 AT 와 두 번째 AT에 열차가 존재하는 경우를 이용하였다. 열 차전류를 이용함으로써 각 지점에서의 단락전류를 계산할 필요가 없으며, 열차가 움직이기 위한 전류는 크게 변하지 않으므로 계산식이 간소화 될 수 있다. 첫 번째 AT와 두 번째 AT사이에서의 열차가 존재하는 경우에 전류분포를 나 타내면 Fig.3과 같다.



그림 3 AT사이의 전류분포 Fig. 3 Current distribution between ATs

Z_s는 변전소 내 임피던스를 의미하고, m은 AT에서 열차 까지의 거리를 의미한다. D는 AT사이의 거리를 의미한다. 위의 그림에서 AT코일들은 열차가 운행되는 한 시점에서 AT는 열차에 전류를 공급하는 역할을 하기 때문에 독립적 인 전압 전원으로 표현이 가능하다[8]. 이를 적용하면 Fig.4 와 같다.



그림 4 AT사이의 등가회로 모델

Fig. 4 Equivalent circuit model between ATs

Fig.4에서 키르히호프 전압법칙을 이용하여 첫 번째 루프 에 흐르는 전류에 대해 전압방정식을 정리하면 식(10)과 같다.

$$\begin{split} V_1 &= Z_{A\,T}(I_1) + m Z_c(2I_1+I_2) + m Z_r(2I_1) - m Z_{cr}(2I_1) \\ &- m Z_{cf}(I_2) - m Z_{cr}(2I_1+I_2) + m Z_{fr}(I_2) \end{split} \tag{10}$$

두 번째 루프에 흐르는 전류에 대해 전압방정식을 정리 하면 식(11)과 같다

$$V_{2} = Z_{AT}(I_{2}) + (D-m)Z_{c}(I_{1}+I_{2}) + (D-m)Z_{r}(2I_{1})$$

$$-(D-m)Z_{cr}(2I_{1}) - (D-m)Z_{cf}(I_{2})$$

$$-(D-m)Z_{cr}(2I_{1}+I_{2}) + (D-m)Z_{tr}(I_{2})$$
(11)

세 번째 루프에 흐르는 전류에 대해 전압방정식을 정리 하면 식(12)와 같다.

$$\begin{split} V_s &= Z_s \left(I_1 + I_2 \right) + \frac{1}{2} Z_c (I_1 + I_2) + \frac{1}{2} Z_f (I_1 + I_2) + V_1 + Z_{A\,T} (I_1) \quad (12) \\ &+ m Z_c (2I_1 + I_2) + m Z_r (2I_1) - m Z_{cr} (2I_1) - m Z_{cf} (I_2) \\ &- m Z_{cr} (2I_1 + I_2) + m Z_{rf} (I_2) - Z_{cf} (I_1 + I_2) \end{split}$$

네 번째 루프에 흐르는 전류에 대해 전압방정식을 정리 하면 식(13)과 같다.

$$\begin{split} V_s &= Z_s(I_1+I_2) + \frac{1}{2} Z_c(I_1+I_2) + \frac{1}{2} Z_f(I_1+I_2) \ (13) \\ &+ m Z_c(2I_1+I_2) + (D-m) Z_r(2I_1) + Z_{AT}(I_2) \\ &+ V_2 - m Z_{cr}(2I_1) - m Z_{cf}(I_2) - (D-m) Z_{cr}(2I_2) \\ &+ (D-m) Z_{fr}(I_2) + (D-m) Z_{cr}(I_2) \\ &- (D-m) Z_{fr}(2I_2) - m Z_{cf}(2I_1+I_2) + m Z_{fr}(I_1) \end{split}$$

식(10)~식(13)을 이용하여 열차에 공급되는 전류를 I_T 라 하면, 등가회로 모델로부터 $I_T = 2(I_1 + I_2)$ 를 만족한다. I_2 를 두 번째 AT의 전압과 그 지점에서의 임피던스를 이용하면 $I_2 = V_2/Z_{AL}$ 를 만족한다. 그러므로 V_2 의 전압을 AT간격에 대한 식으로 나타내기 위해 정리하면 식(14)와 같다.

$$V_{2} = \frac{Z_{AL_{2}}I_{T}m(Z_{c} + 2Z_{r} - 3Z_{cr} + Z_{cf} - Z_{rf})}{2D\left(\frac{1}{2}Z_{c} + 2Z_{r} + \frac{1}{2}Z_{f} - 2Z_{cr} + Z_{cf} - 2Z_{rf}\right)}$$
(14)

식(14)를 통해 AT간격에 대한 다음 AT까지의 전압강하 를 일반화하면 식(15)와 같다.

$$V_{n+1} = \frac{Z_{AL_{n+1}}I_T m_n (Z_c + 2Z_r - 3Z_{cr} + Z_{cf} - Z_{rf})}{D_n (Z_c + 4Z_r + Z_f - 4Z_{cr} + 2Z_{cf} - 4Z_{rf})}$$
(15)

m,은 D,구간의 AT와 열차사이의 거리를 의미한다.

3.2 대지누설전류

AT급전방식에서 통신선이 매설되어 있는 경우에 대지누 설전류를 포함한 모델은 Fig.5와 같다[9].



그림 5 통신선을 포함한 모델

Fig. 5 Model including communication cable

레일전류는 열차의 위치에 대해 변화하므로 대지누설전류 는 식(16)과 같다.

$$I(x) = I_C - I_F - I_R(x)$$
(16)

레일전류는 열차가 위치한 전압강하에 열차위치에서의 임 피던스로 나눠서 계산한다. AT사이의 거리가 증가되면 AT 사이에서의 임피던스가 증가되므로 레일에 흐르는 전류는 감소하므로 대지누설전류는 증가하게 된다. AT급전방식에 서는 다수의 AT로부터 열차에 전류가 공급되어서 레일전류 를 계산하기에는 쉽지 않으므로 Amp·Km의 개념이 도입되 었다[10]. 식(17)과 같이 l_1 부터 l_2 에 걸쳐 유도를 주는 전류 를 적분한 값으로 계산한다.

$$Amp Km = \int_{l_1}^{l_2} I(x) dx = \int_{l_1}^{l_2} (I_C - I_F - I_R(x)) dx$$
(17)
$$= (I_C - I_F)(l_2 - l_1) - \int_{l_1}^{l_2} I_R(x) dx$$

(l₂-l₁)을 작게하면 Amp·Km는 (l₂-l₁)의 길이와 이 구간 의 평균 대지누설전류의 곱으로 계산된다. Amp·Km의 방법 에서 각 선로의 전류를 계산하기 위해 본 논문에서는 다도 체계산법을 사용하여 대지누설전류를 해석한다. 다도체계산 법은 AT급전방식의 전차선, 레일, 급전선을 각각 손실전송 선으로 등가화 시킨 후에, 등가 전송선 전체를 다중도체로 전환하고, 이 다중도체를 단편화하여 그 행렬에 해당되는 전 압 및 전류를 키르히호프 법칙을 적용하여 파생된 연립방정 식을 수립하여 해를 구하도록 하는 방법이다. 전기차가 운 행함에 따른 대지누설전류를 구하기 위한 급전계통을 해석 하기 위해 급전계통을 특성별로 구분하여 단위계통의 입력 단과 출력단을 식(18)과 같이 상·하행선을 모두 포함한 행렬 M_{10×10}을 이용해서 계산한다. 입력단과 출력단을 구분하기 위해 입력단은 '을 이용하고, 출력단은 "을 사용한다.



식(18)에서 변전소의 스코트변압기와 단권변압기, 전차선 로, 보조급전구분소의 단권변압기, 전차선로, 열차 임피던스, 전차선로, 보조급전보조구분소의 단권변압기, 전차선로, 급전 구분소의 단권변압기로 각 단위계통의 단자망 행렬을 각각 구하면 식(19)와 같다.



$$\begin{split} \mathbf{M}_{\mathrm{total}} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\mathrm{SS}_1} \\ (5 \times 10) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\mathrm{SS}_2} \\ (10 \times 10) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\mathrm{ds}\,\vartheta,\,\forall\,\vec{\varepsilon}\,\vec{\varepsilon}} \\ (10 \times 10) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{split}$$

식(19)를 통해 급전구분소에서 상하선의 전차선, 급전선 및 레일의 전압과 전류를 구할 수 있고, 이 값을 이용하여 모든 위치에서의 상하선 전차선, 급전선 및 레일의 전류를 계산한다. 변전소의 다도체 등가모델을 나타내면 Fig.6과 같다.



그림 6 변전소 모델 Fig. 6 Substation model

Fig.6을 이용하여 변전소 임피던스 Z_M과 변전소 전압 E_M을 포함한 행렬로 나타내면 식(21)과 같다.



선로의 다도체 등가모델을 나타내면 Fig.7과 같다.



그림 7 선로 모델 Fig. 7 Line model

Fig.7을 이용하여 다도체 등가행렬을 나타내면 식(22)와 같다.



보조급전구분소의 다도체 등가모델을 나타내면 Fig.8과 같다.



그림 8 보조급전구분소 모델

Fig. 8 SSP(Sub Sectioning Post) model

Fig.8을 이용하여 다도체 등가행렬을 나타내면 식(23)과 같다.



급전구분소의 다도체 등가모델을 나타내면 Fig.9와 같다.



그림 9 급전구분소 모델 Fig. 9 SP(Sectioning Post) model

Fig.9를 이용하여 다도체 등가행렬을 나타내면 식(24)와 같다.







그림 10 열차 모델 **Fig. 10** Train model

Fig.10을 이용하여 다도체 등가행렬을 나타내면 식(25)와 같다.



4. 시뮬레이션

AT급전방식에서 AT의 권선비를 1:1로 하였다. AT간격 에 대한 전압강하를 해석하기 위해 전철변전소에서 급전구 분소까지 30[km]이고 두 개의 보조급전구분소가 설치되어 각 보조급전구분소~급전구분소의 거리가 10[km]인 경우에 2[km]에서 10[km]까지 2[km]씩 증가하는 경우를 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다. AT급전계통의 전압강하와 대지 누설전류 대한 해석을 위한 시뮬레이션 조건은 Table 2와 같다[11].

표	2	시뮬레이션 조건
Table	2	Simulation conditions

구분	값
변압기 임피던스(<i>Z_M</i>)	0.264+8.218i[Ω]
급전선 임피던스(<i>Z_f</i>)	0.185+0.863i[Ω/km]
전차선 임피던스 (Z_c)	0.194+0.731i[Ω/km]
레일 임피던스 (Z_r)	0.1+0.443i[Ω/km]
전차선과 레일간의 상호 임피던스(Z_{cr})	0.058+0.373i[Ω/km]
레일과 급전선간의 상호 임피던스(<i>Z_{rf}</i>)	0.051+0.36i[Ω/km]
전차선과 급전선간의 상호 임피던스(Z_{cf})	0.058+0.369i[Ω/km]
변전소 전압 (E_M)	55[kV]
AT 임피던스(<i>Z_{AT}</i>)	0.35i[Ω]
레일-대지간 저항(R_{earth})	25[Ω]

4.1 전압강하 해석

AT간격에 대한 전압강하를 해석하기 위해 한 대의 17[MW]차량이 이동할 때의 집전전압을 분석하였다. 보조급 전구분소와 급전구분소사이의 간격을 10[km]에서 2[km]씩 증가시킨 경우 전압강하는 Fig.11과 같다.

Fig.11에서 AT간격이 멀어짐에 따라 전압강하가 감소되 었으며, 최고 20[km]까지 간격을 준 경우에 전차선 전압은 17.9[kV]이다. 기준 전차선 전압 19[kV]를 만족하기 위해서 는 AT간격이 14[km]까지 가능하다.



그림 11 AT간격에 대한 전압강하 Fig. 11 Voltage drop according to AT interval

4.2 대지누설전류 해석

보조급전구분소와 급전구분소 사이의 간격을 대지누설전 류는 열차위치에 따라 회로 전 구간에 분포하게 되므로, 전 압강하 평가시 고려한 계통구성으로 시뮬레이션을 수행하면 결과 도출이 불가능하므로, 통신유도에서는 AT간격을 변화 시키면서 1000[A]를 소비하는 상태를 고려하여 그에 따른 대지누설전류를 해석하였다. AT간격이 5, 10, 15[km]인 경 우, 열차의 위치를 변경함에 따라 대지누설전류의 크기를 해 석한 결과 Fig.12~Fig.14와 같다.



그림 12 대지누설전류(AT간격=5[km]) Fig. 12 Earth leakage current(interval of AT=5[km])



그림 13 대지누설전류(AT간격=10[km])





그림 14 대지누설전류(AT간격=15[km]) Fig. 14 Earth leakage current(interval of AT=15[km])

Fig.12~Fig.14를 분석한 결과, 열차의 위치에서 대지누설 전류의 크기가 가장 낮았으며 AT간격이 높아짐에 따라 대 지누설전류의 크기가 증가하였다. Fig.15는 Fig.12~Fig.14의 시뮬레이션 결과를 정리한 것으로 AT의 간격이 10[km]인 경우에 최대전류비를 1이라고 하였을 때, AT간격이 5[km] 와 15[km]로 변화함에 따라 최대 대지누설전류의 비율을 기 록한 결과이다.



그림 15 AT간격에 대한 최대 대지누설전류

Fig. 15 Maximum earth leakage current according to interval of AT

Fig.15에서 보듯이 AT간격이 멀어짐에 따라 최대 대지누 설전류의 크기가 증가하였으며 1[km]당 약 0.07배씩 비례적 으로 증가하였다.

5. 결 론

일반적으로 AT의 설치간격은 8~10[km]를 표준하고 있으 나 현재까지 단말보조급전구분소용 AT의 역할에 대한 충분 한 검토와 해석 없이 설치되어 왔다. 본 논문에서는 AT간 격에 대한 전압강하 및 대지누설전류를 해석하여 AT간격에 대한 기준을 제시하였다.

AT간격이 멀어짐에 따라 전압강하는 감소하였고, 기준 전압강하 19[kV]를 만족하는 AT의 간격은 14[km]로 분석 되었다. 전자유도현상에 영향을 미치는 대지누설전류는 AT 간격이 멀어짐에 따라 증가하였다. 현재 AT간격이 10[km] 인 경우를 기준으로 AT간격이 14[km]인 경우에는 최대 누 설전류는 약 1.3배 증가되었다. 전압강하 및 대지누설전류 분석 결과, 통신유도에 지장이 없는 산지, 장대터널 등의 경 우에서는 단말보조급전구분소용 AT를 설치할 경우에 급전 구분소와 4[km]이하의 거리에 있으면 설치할 필요가 없다. 이 결과는 Table 1의 영동선 강릉구간과 경전선 마산구간에 서 전압강하에 문제가 발생되어 추가적으로 AT를 설치한 결과를 뒷받침한다. 또한 Table 1의 다른 구간에서 통신선 이 부설되어 있는 경우에는 대지누설전류를 계산하여 통신 선과의 영향을 분석하여 산정한다. 급전구분소와 단말보조 급전구분소용 AT사이의 거리가 4[km]이상인 경우에는 단말 보조급전구분소용 AT를 설치해야 한다.

본 논문은 향후 AT간격에 대한 전압강하 해석 및 대지 누설전류의 분석하여 단말보조급전구분소용 AT의 설치여부 에 활용될 수 있다. 전자유도장해의 예측에 대해 대지누설 전류만을 고려하여 평가하였으므로, 향후 전차선로와의 병행 거리, 차폐선 설치유무 등에 대한 분석이 필요하다. 이 분석 을 통해 건설사업비 절감 등의 경제적 효과를 얻을 수 있 다. 또한 향후 산지 및 터널에 대한 정확한 데이터를 사용 하여 AT 전압강하 및 대지누설전류를 분석할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] 녹색성장 위원회, "녹색성장 국가전략 및 5개년 계획", pp.25-36, 2009.
- [2] Hyun-Soo Jung, "Analysis for Catenary Voltage of the ATs-Fed AC Electric Railroad System", Vol.52A, No.9, pp.493-499, 2003.
- [3] 한국철도기술연구원, "철도 전철화 효과 계량지표 개발 연구", 연구보고서, pp.156-165, 2006.
- [4] 건설교통부, "국가철도망 구축 기본계획", 건설교통부 고시 제 2006-418호, 2006.
- [5] 한국철도시설공단, "전철전력시설지침", pp.21-29, 2009.
- [6] 디투엔지니어링, "경춘선 금곡-춘천간 설계보고서", pp.145-149, 2009.
- [7] 강인권, "전기철도시스템 공학",성안당, pp.197-199, 2007.
- [8] 양병남, "최신전기철도공학", 성안당, pp.185-189, 2007.
- [9] 일본 전기통신학회, "유도(하)", pp.127-140, 2001.
- [10] 김정철, "급전계통해석과 한국철도전기의 이해", (주) 기다리, pp.264-284, 2008.
- [11] 한국철도시설공단, "철도설계편람 정보통신편", pp. 59-62, 2002.





김 민 석 (金 旼 奭)

1983년 4월 3일생. 2006년 서울기술대학 교 전자정보공학과 졸업. 2008년 서울과 학기술대학교 철도전문대학원 철도전기 신호공학과 졸업. 2008년~현재 철도전문 대학원 철도전기신호공학과 박사과정 Tel: 02-970-6874 Fax: 02-978-6874 E-mail: kms0403@seoultech.ac.kr



최 승 혁 (崔 乘 爀)

1962년 6월 10일생. 2004년 대불대학교 전기공학과 졸업. 2009년~2011년 서울과 학기술대학교 철도전기신호공학과 졸업 (석사). 1979년~현재 한국철도시설공단 팀장

Tel : 042-607-4539 Fax : 042-607-3629 E-mail : cshleokr@hanmail.net



이 종 우 (李 鍾 宇)

1959년 3월 20일생. 1983년 한양대학교 기계설계과 졸업. 1986년 Ecole Centrale de Nantes 졸업, 1993년 Paris VI 졸업 (공박). 2005년~현재 서울과학기술대학 교 철도전기신호공학과 교수 Tel: 02-970-6874 Fax: 02-978-6874 E-mail: saganlee@seoultech.ac.kr