

## Analysis on Voltage Rise of Rail in High speed Railway System

李 鍾 宇\*  
(Lee Jong Woo)

**Abstract** - In electric railway system, potential of rail has been risen, for return-current flows through rail. The magnitude of rising voltage is different to railway feed system, ground admittance of rail and the load current. If rising voltage of rail is large, electric shock can be occurred to passengers and maintenance- worker. In this paper, we estimate the rising voltage of rail in high speed railway system and check the safety to human beings.

**Key Words** : Electric Railway System, Return-Current, Rising Voltage, Ground Admittance, Electric Shock, VDE

### 1. 서 론

전기철도에서는 전기차량의 전류가 레일을 귀회로하여 흐르게 되므로 레일의 특성임피던스와 부하전류에 의한 전위가 생기며 그 크기는 급전방식, 회로구성, 레일의 대지어드미턴스 및 부하전류의 크기와 위치 등에 따라 다르다. 레일 전류가 클 경우에는 승객이 승하차시에 전격을 받거나, 레일 보수원이 전격을 받는 일 등이 발생할 수 있다. 고속철도의 레일 전위 계산을 위해서는 전차선, 레일, 피더 세가지 선로가 상호 관련되어 전력을 공급하므로 이 주요 세가지 선로 각각의 대지귀로 자기 임피던스와 도체간의 상호 임피던스를 사용하게 된다. 본 연구에서는 레일 전위 상승의 가혹한 경우를 계산하기 위하여 AT간격 7km, 열차간격 3km로 하면 하나의 AT구간 내에는 3대의 열차가 운행된다고 가정하고 레일의 대지어드미턴스는 일반적으로 AT 급전계통의 경우 (0.2 - 2.0) S/Km 이므로 레일의 대지어드미턴스를 0.2, 1.2, 2.0의 3가지 경우를 가정하여 시뮬레이션 하였으며, 이의 결과가 인체에 미치는 전격 안전성에 대하여 검토하고자 한다. 전기철도의 레일전위 상승은 일반승객이나 선로보수원의 안전을 위해 제한치 (또는 목표치)가 고려되어야 한다. 레일전위의 목표치를 고려할 때는 역 플랫폼과 일반구간으로 나누는 것이 바람직하다. 즉 역의 플랫폼은 불특정다수의 승객이 대상이므로 어느 정도 큰 인체저항을 기대할 수 없는 반면, 역 이외의 일반구간에서는 장갑이나 안전화를 착용한 작업원을 대상으로 하기 때문이다. 본 논문에서 안전을 위해 제한치는 독일의 전기규

격 VDE 0141/264에 나타난 제한전압으로 단시간 계속의 전압허용치를 기준으로 하였다.

### 2. 교류 AT 급전방식의 레일 전압 계산 이론

그림 1에서  $AT_1$ 과  $AT_2$ 에서 단일부하에 급전하는 경우 부하에는  $AT_1$ 에서  $I_1$ ,  $AT_2$ 에서  $I_2$  전류가 공급된다고 가정한다.  $AT_2$ 에 공급되는 전류 ( $I_2/2$ )는 전차선과 급전선에 흐르고 이 전류에 의해 레일에 발생하는 유도전류  $i$ 는

$$i = \frac{I_2}{2} \frac{Z_{TR} - Z_{FR}}{Z_{RR}} \quad (1)$$

여기서  $Z_{FR}$ 는 피더와 레일간의 상호유도임피던스이고  $Z_{TR} \approx Z_{FR}$  이므로 ( $I_2/2$ )에 의해 레일에 발생하는 유도전류는 무시할 수 있다. 따라서 그림 1의 회로는 그림 2의 회로도와 같이 간소화 되며 레일의 유도전류에 관해서는 전차선에  $I_1, I_2$  가 단독으로 흐르는 것으로 생각할 수 있다.

또한, 양 AT의 전류분담은 다음 식(2)와 같이 근사적으로 부하점거리에 반비례하므로 AT급전회로의 전류분포는 AT점을 급전점으로 생각할 수 있다.

$$I = I_1 + I_2$$

$$I_1/I_2 = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \quad (2)$$

\* 正 會 員 : 韓 國 鐵 道 技 術 研 究 院 責 任 研 究 員 · 工 博

接 受 日 字 : 2003年 5月 8日

最 終 完 了 : 2003年 6月 15日

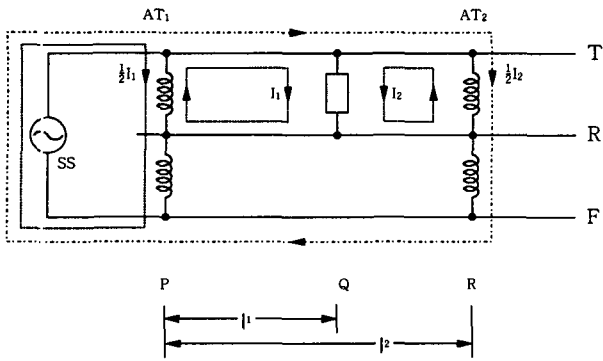


그림 1 AT급전의 전류분포  
Fig. 1 Current distribution of railway on AT system.

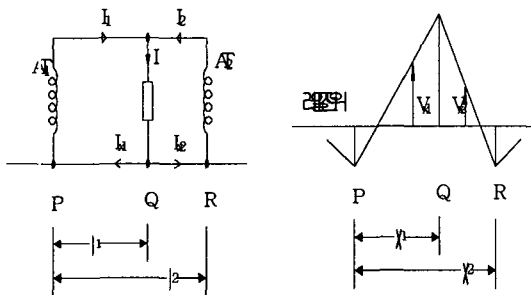
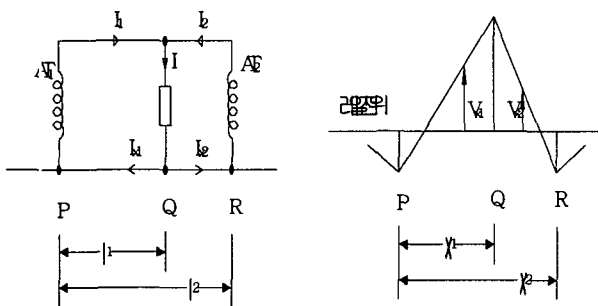


그림 2 AT급전의 전위분포  
Fig. 2 Voltage distribution of railway on AT system.

AT점과 부하간의 레일전위는 다음 그림 3과 같으며 레일 전위는 각 구간에서 전송선로이론에 의해 식(3)과 같이 표현된다.

PQ간 :

$$V_x = \frac{1}{2} (1-n_0) I_1 Z_0 \left\{ -\frac{l_2-l_1}{l_2} \epsilon^{-rx_1} + \frac{l_2-l_1}{l_2} \epsilon^{-r(l_1-x_1)} + \frac{l_1}{l_2} \epsilon^{-r(l_1-x_1)} - \frac{l_1}{l_2} \epsilon^{-r(l_2-x_1)} \right\} \quad (3.a)$$

QR간 :

$$V_{x2} = \frac{1}{2} (1-n_0) I_1 Z_0 \left\{ \frac{l_2-l_1}{l_2} \epsilon^{-r(x_2-l_1)} - \frac{l_2-l_1}{l_2} \epsilon^{-rx_2} - \frac{l_1}{l_2} \epsilon^{-r(l_2-x_2)} + \frac{l_1}{l_2} \epsilon^{-r(x_2-l_1)} \right\} \quad (3.b)$$

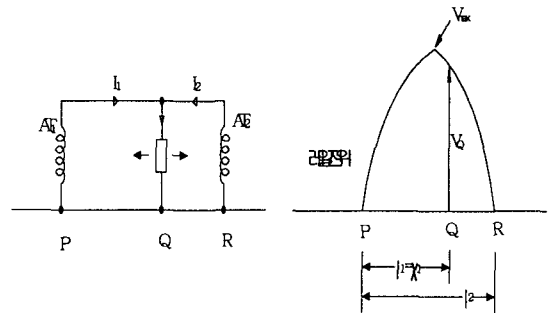
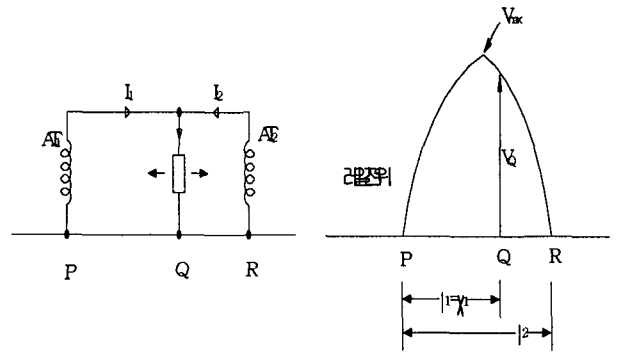


그림 3 부하점의 레일전위  
Fig. 3 Voltage distribution at load point on AT system.

식 (3.a)에서  $X_1=l_1$ 을 대입하면 부하점의 레일전위는 다음식 (4)와 같이 표현된다.

$$V_Q = \frac{1}{2} (1-n_0) I \cdot Z_0 \frac{1}{l_2} \left[ (l_2-l_1)(1-\epsilon^{-rl_1}) + l_1(1-\epsilon^{-r(l_2-l_1)}) \right] \quad (4)$$

특히 부하점 Q가 양 AT의 중앙에 있을 때  $l_1=l_2/2$ 를 대입하면 다음식 (5)와 같이 레일전위가 가장 높다.

$$V_{max} = \frac{1}{2} (1-n_0) I \cdot Z_0 (1-\epsilon^{-r \frac{l_2}{2}}) \quad (5)$$

실제의 AT 방식에서는 다음 그림 4와 같이 급전회로 보호상 OPC(보호선)을 설치하고 AT점과 AT간 중앙점에서 OPC를 레일과 접속하면 레일전류는 OPC로 분류되며, 특히 부하가 AT중앙점에 있을 경우 AT 중앙점의 레일전위는 약 2/3로 저하된다.

부하점의 레일전위 최고치를 간단히 구하려면 중앙점 부하시의 레일전위 식(5)에 OPC에 의한 분류효과를 고려해서 다음 식(6)에서 구할 수 있다.

$$V_{max} = \frac{1}{K_p} \frac{1}{2} (1-n_0) I \cdot Z_0 (1-\epsilon^{-r \frac{l_2}{2}}) \quad (6)$$

여기서  $K_p$ 는 OPC의 분류효과계수이며 선구간에 따라 다소 다르지만  $K_p=1.36$ 정도이다.

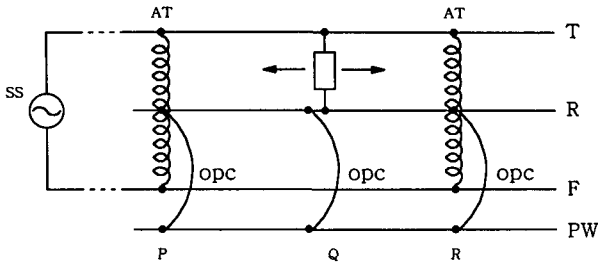


그림 4 AT 급전방식(OPC 포함)  
Fig. 4 AT electrical feed system

3. 레일전위의 안전치

전기철도의 레일전위상승은 일반승객이나 선로보수원의 안전을 위해 제한치 (또는 목표치)가 제정되어야 한다. 레일전위의 목표치를 고려할 때는 역 플랫폼과 일반구간으로 나누는 것이 바람직하다. 즉 역의 플랫폼은 불특정다수의 승객이 대상이므로 어느 정도 큰 인체저항을 기대할 수 없는 반면, 역 이외의 일반구간에서는 장갑이나 안전화를 착용한 작업원을 대상으로 하기 때문이다.

표 1은 독일의 전기규격 VDE 0141/264에 나타난 제한 전압으로 단시간 계속의 전압허용치를 나타낸다.

표 1. VDE 허용 접촉전압  
Table 1. Toleratation of VDE's contact voltage

구분 \ 통전시간(s)	1.0	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
VDE허용보폭전압(V)	90	100	-	105	-	140	170
VDE허용접촉전압(V)	60	75	80	95	110	135	185

위 표에 의하면 통전시간 1.0초인 경우의 허용접촉전압을 상용주파교류로는 60V이며 역 플랫폼에서의 일반공중 허용 접촉전압을 정하는 데에 참고가 된다.

일반구간인 경우에는 선로보수작업시 장갑과 안전화를 착용하는 것을 조건으로 하면 젖은 상태에서도 인체저항은 40 kΩ정도이므로 플랫폼에서의 제한전압의 1.5 ~ 2.0배 정도는 허용될 것으로 생각되므로 레일전압의 안전치는 플랫폼에서는 60V, 일반구간에서는 교류구간 120V 정도가 타당하다고 생각된다.

4. 고속철도의 레일 전위 계산 및 안전성 평가

고속철도의 레일 전위 계산을 위해서는 전차선, 레일, 피이더 세가지 선로가 상호 관련되어 전력을 공급하므로 이 주요 세가지 선로 각각의 대지귀로 자기 임피던스와 도체간의 상호 임피던스를 사용하게 된다.

급전계통 임피던스는 다음 표2와 같은 급전계통 선로정수(상행선 단선트랙, 축약 3×3행렬)를 이용하였다.

표 2. 급전계통 선로정수

Table 2. Line parameter of AT electrical feed system

도체군	전차선 도체군	피더 도체군	레일 도체군
전차선 도체군	0.1431 + 0.1899i	0.0302 - 0.1498i	0.0271 - 0.1123i
급전선 도체군	0.0302 - 0.1498i	0.0629 - 0.0644i	0.0256 - 0.1451i
레일 도체군	0.0271 - 0.1123i	0.0256 - 0.1451i	0.1355 + 0.3116i

레일 전위 상승의 가혹한 경우를 계산하기 위하여 AT간격 7km, 열차간격 3km로 하면 하나의 AT구간 내에는 그림 5와 같이 3대의 열차가 운행된다고 가정한다. 3대의 열차가 운행될 때의 레일전위는 각 열차가 단독으로 운행되는 경우의 레일전위를 구하여 중첩하면 구할 수 있다.

그리고 레일의 대지어드미턴스는 일반적으로 AT 급전계통의 경우 (0.2 - 2.0) S/Km 이므로 아래의 각 계산과정에서는 레일의 대지어드미턴스를 0.2, 1.2, 2.0의 3가지 경우를 가정하여 시뮬레이션 하였으며 그 결과는 그림 6에서 부터 그림 10까지에 나타내었다.

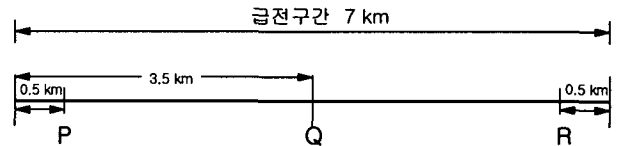


그림 5 열차의 위치  
Fig. 5 Position of Train

계산 결과 레일전위가 상승값은 열차가 중앙점 Q 위치에 1대만 있는 경우에는 최대 10~23V, 열차가 P 나 R 위치에 1대만 있는 경우에는 최대 5~7V, 열차가 중앙점 Q 위치와 P 나 R 위치에 2대 있는 경우에는 최대 11~25V, 열차가 P 위치와 R 위치에 2대 있는 경우에는 최대 4.8~5.2V, 열차가 중앙점 Q 위치와 P 위치 및 R에 3대 모두 있는 경우에는 최대 11~26V로 계산되었다.

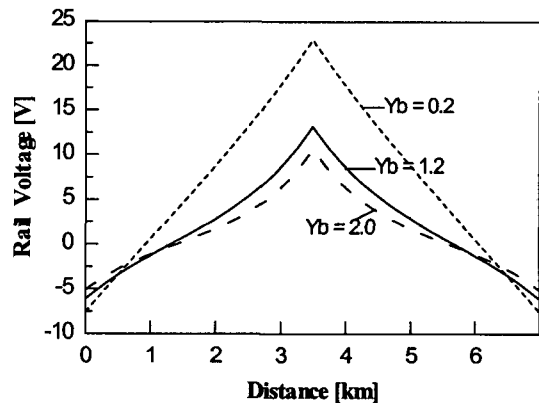


그림 6 열차가 중앙점 Q 위치에 1대만 있는 경우  
Fig. 6 Case of train located at center point Q

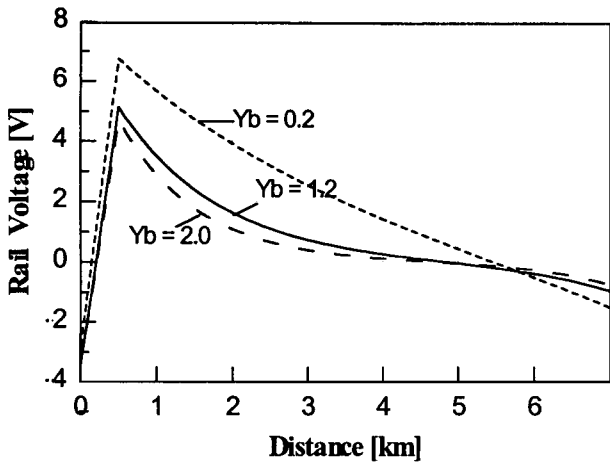


그림 7 열차가 P 위치에 1대만 있는 경우  
Fig. 7 Case of train located at point P

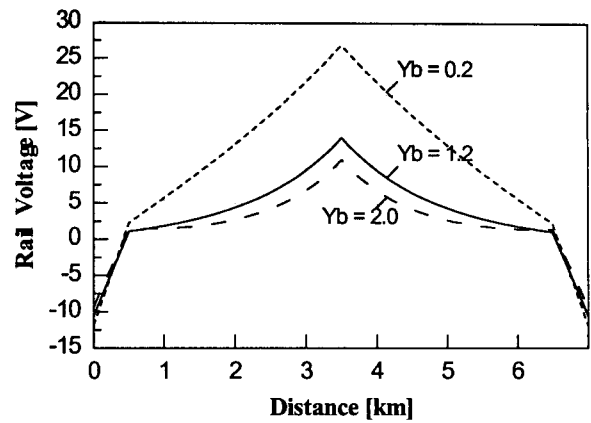


그림 10 열차가 중앙점 Q 위치와 P 위치 및 R에 3대 모두 있는 경우  
Fig. 10 Case of train located at point Q and point P and point R

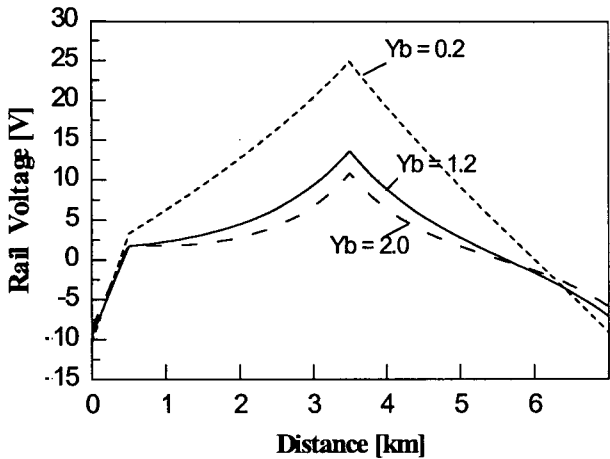


그림 8 열차가 중앙점 Q 위치와 P 위치에 2대 있는 경우  
Fig. 8 Case of train located at point Q and point P

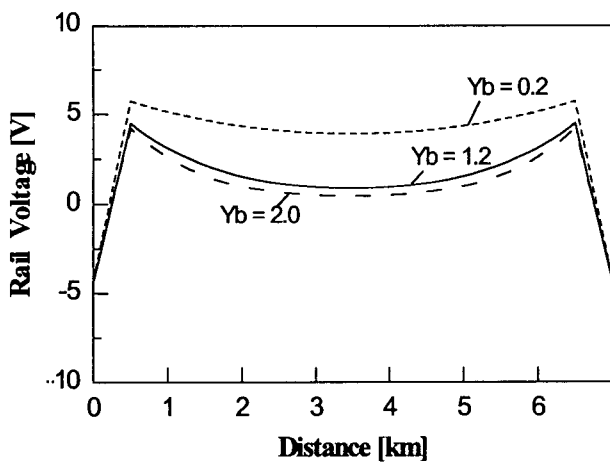


그림 9 열차가 P 위치와 R 위치에 2대 있는 경우  
Fig. 9 Case of train located at point P and point R

### 5. 고속철도의 레일 전위 계산 프로그램

본 논문에서는 고속철도의 레일 전위 계산을 위하여 사용자 위주의 MMI 프로그램을 작성하였다. 그림 11은 레일 전위를 계산하기 위한 파라미터를 입력하는 화면창으로서 여기에서 입력 조건은 전차선과 레일의 상호임피던스, 레일의 자기임피던스, 대지 어드미턴스, AT 구간 간격 및 보호선의 분류효과계수이다. 그림 12는 열차의 운행조건과 계산지점을 입력하는 화면창으로서 입력조건은 열차 부하전류, 열차 위치 및 레일전위 계산지점이다. 이와 같은 레일 전위 상승 계산조건을 입력하면 그림 13과 같이 레일전위 계산 결과가 화면창에 표시된다.

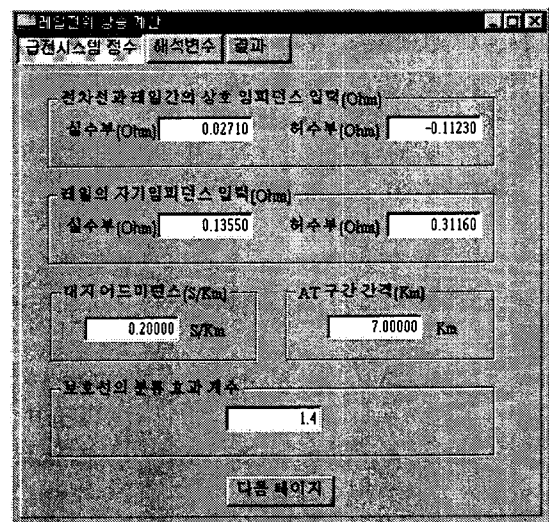


그림 11 레일전위 계산 파라미터 입력 화면창  
Fig. 11 Window of input parameter

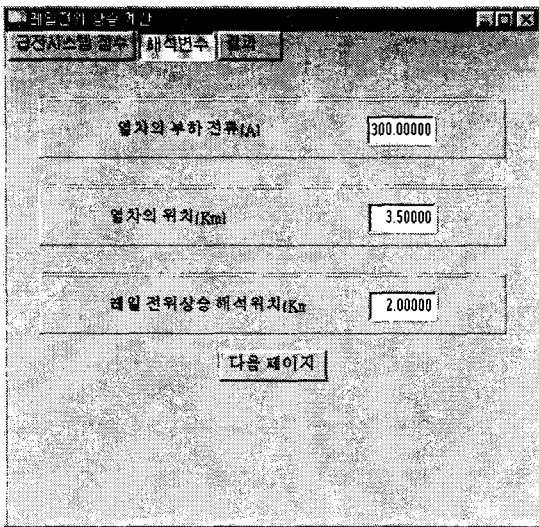


그림 12 열차의 운행조건과 계산지점 입력 화면창  
Fig. 12 Window of operation condition of train

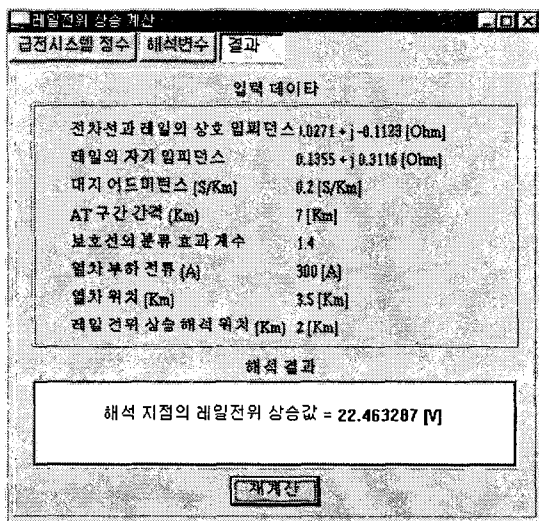


그림 13 레일전위 계산 결과 화면창  
Fig. 13 Window of calculation result

## 6. 결 론

본 논문에서는 레일 전위 상승의 가혹한 경우를 계산하기 위하여 AT간격 7km, 열차간격 3km로 하면 하나의 AT구간 내에는 3대의 열차가 운행된다고 가정하고 레일의 대지어드미턴스는 일반적으로 AT 급전시스템의 경우 (0.2 - 2.0) S/Km 이므로 레일의 대지어드미턴스를 0.2, 1.2, 2.0의 3가지 경우를 가정하여 시뮬레이션 하였다. 계산 결과 레일전위가 상승값은 열차가 중앙점 위치에 1대만 있는 경우에는 최대 10~23V, 열차가 AT 변압기 위치에 1대만 있는 경우에는 최대 5~7V, 열차가 중앙점과 AT 변압기 위치에 2대 있는 경우에는 최대 11~25V, 열차가 AT 변압기 양 위치에 2대 있는 경우에는 최대 4.8~5.2V, 열차가 3대 모두 있는 경우에는 최대 11~26V로 계산되어 안전 제한목표인 60V 미만으로써 문제가 없는 것으로 판명되었다.

## 감사의 글

본 연구는 1996년도~2002년도 G7 고속철도개발사업에 의해서 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] “電氣鐵道要覽”, 鐵道電化協會, (昭48)
- [2] 渡辺, “交流き電回路の保護, 電力と鐵道”, 鐵道電化 20, No.7 (183),
- [3] “레일전위와 그 대책”, 철도기술연구보고, 1989
- [4] 황치우, “과천선 건설 전기방식 검토 최종보고서”, 한국전기연구소, pp100-127. 1990

## 저 자 소 개



### 이 중 우(李 鍾 宇)

1959년 3월 20일생. 1983년 한양대학교 공과대학 기계설계과 졸업, 1986 Ecole Centrale de Nantes 석사, 1993 Universite de Paris VI 공학박사, 1994년~현재 한국철도기술연구원 전기신호본부 책임연구원

Tel : 031-460-5433

Fax : 031-460-5459

E-mail : jwlee@krri.re.kr