DBpia

Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2015) 29(5) : 65~70
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2015.29.5.065 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)
논문 29-5-9

고속철도시스템에서 낙뢰로 인해 전차선에 유도되는 서지전압의 해석

(Analysis on Induced Surge Voltage of Electric Car Line affected by Lightning in Rapid-Transit Railway System)

이성근* · 이건아 · 고광철**
(Sung-Gyen Lee · Kun-A Lee · Kwang-Cheol Ko)

Abstract

Lightning is one of hazards affecting the rapid-transit railway system. There are two effects, which are direct lightning surge to electric car line and induced lightning surge. Protection methods for the direct lightning surge are studied with various occasions, however, study of induced lightning surge is insufficient in spite of a large or small effects. In this paper, it is analysed the way that serge voltage is induced to electric car line by lightning strikes. By modeling the propagation process and the coupling phenomenon of electromagnetic wave produced by lightning strikes, it is achieved to make integrative circuit model combined with existing electric car model. The study is conducted into three different waveform of electromagnetic wave produced by lightning; rectangular wave, double exponential distribution wave, triangle wave. It is also simulated that the inducing serge is coupled to electric car line in an arbitrary location. The simulation results in that, when rapidly changing rectangular wave is supplied, maximum power is induced to electric car line.

Key Words : Lighting, Iinduced Lightning Surge, Rapid-Transit Railway System, Electric Car Line

1. 서 론

낙뢰는 고속철도시스템에 큰 피해를 줄 수 있는 위협 중 하나이다. 이런 이유로 고속철도 차량의 전력설비 또는 전차선의 보호 및 차폐에 대한 많은 연구들이 선행되어 왔다[1-3]. 설비나 선로를 보호하기 위한 피뢰설비 및 기타 보호 회로들이 있음에도 불구하고, 낙뢰를 흡수 또는 차폐하는 과정에서 주변에 2차 피해가 발생할 수 있다[4]. 낙뢰에 의해서 발생하는 전자기파는 전파되는 거리에 따라 파형의 형태가 변하게 되는데, 낙뢰 지점에 따라 유도되는 전력 크기 뿐 아니라 설비가 받는 영향이 다르기 때문에, 다양한 파형이 전차선에 유기되었을 때 현상을 해석할 필요가 있다.

본 논문에서는 전차선로 주변에 떨어진 낙뢰에 의해 발생하는 다양한 파형의 전자기파가 전차선에 유기되

* Main author : Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea
** Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea
Tel : 02-2220-0348, Fax : 02-2220-1886
E-mail : kwang@hanyang.ac.kr
Received : 2014. 12. 2
Accepted : 2015. 3. 13

Copyright ⓒ 2015 KIIEE All right's reserved
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

www.dbpia.co.kr

는 과정을 회로모델링하였다. 기존의 전자기파에 의한 전송선로의 커플링 모델이 연구되었다[5-6]. 이 논문은 전송선로 모델링뿐만 아니라 전자기파의 발생부터 커플링까지 통합적 회로모델링을 구현하였다. 또 전차선에 대한 유도서지전압 현상을 개략적으로 해석하는 것을 목표로 하고, 추가적인 연구를 통해 비선형적인 유도서지전압 현상을 회로해석으로 분석할 것이다.

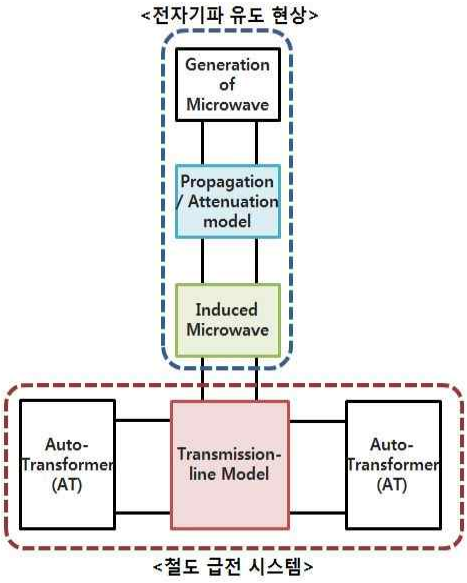


그림 1. 전체 시스템 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the whole system

그림 1은 전체 시스템 개략도를 나타낸다. 여기서 전체 시스템이란 이 논문에서 다루고 있는 전체 대상으로써, 전자기파의 발생부터 철도선에 영향까지를 의미한다. 논문은 크게 철도 급전 시스템 모델링과 전자기파가 공기 중에서 전파하여 철도선에 커플링되는 과정인 전자기파 유도 모델링이 제시되어 있다. 낙뢰로 발생된 전자기파가 전송선에 유기되는 현상을 쉽고 간단하게 예측하기 위해, 전 시스템을 회로 모델링하였다. 이 연구에서 사용되는 회로모델링은 과도 현상 해석에 강점을 가지고 있는 EMTP(Electro Magnetic Transients Program)가 이용되었고[7], ATP Draw 5.6 버전을 사용하였다.

2. 모델링

2.1 근방 낙뢰에 의해 전차선에 유도되는 전압 메커니즘

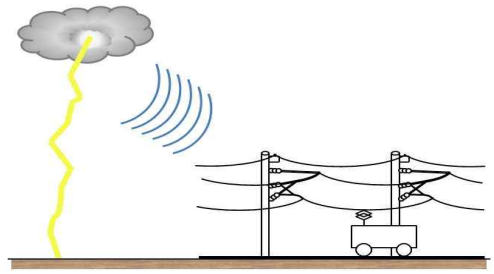


그림 2. 유도 뇌 서지에 의한 전차선 영향
Fig. 2. Electric car line affected by induced lightning surge

그림 2는 유도 뇌 서지에 의한 전차선 영향을 보여준다. 이 현상을 회로 해석하기 위해 낙뢰에서 발생되는 전자기파를 집중된 소스에 의해 발생하는 것으로 가정하였다. 집중된 소스에 의한 거리에 따른 전자기파 전력의 변화는 식 (1)과 같다.

$$P_l = \frac{1}{4\pi r^2} P_t \tag{1}$$

여기서 P_t는 초기 전자기파의 전력, P_l는 전파거리(r) 만큼 떨어진 거리에서의 전자기파 전력이고 단위는 W이다. 전자기파가 충분히 먼 거리를 전파한다면 평면파로 고려할 수 있다. 이 때 전자기파의 전력과 전계, 자계의 관계는 공기의 특성임피던스(377Ω)과 관계가 있다[8]. 식 (1)을 전계에 대해 바꾸면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$E_l = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\, r} E_t \tag{2}$$

위 식에서 E_l, E_t의 단위는 V/m이다. 감쇠 모델에서는 낙뢰에 의해 발생된 전자기파가 특정 거리를 전파하여 감쇠된 현상을 회로의 수동소자를 이용해 구현하였다. 낙뢰에 의해 발생된 전계의 크기를 회로에서

www.dbpia.co.kr

전압으로 표현하였다. 저항으로 구성된 감쇠모델은 그림 3과 같다.

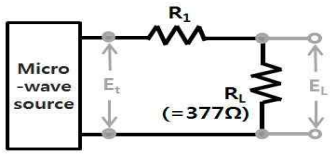


그림 3. 공기 중 전자기파의 감쇠 모델
Fig. 3. Attenuation model of microwave in the air

이 회로 모델에서 부하는 공기의 특성임피던스를 고려하여 377Ω으로 하였다. 전계 크기의 감쇠를 전압(V) 분배를 이용하여 표현하면 식 (3)과 같다[9].

$$V_l = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\, r} \times V_t \tag{3}$$

전압 분배를 저항으로 계산하여 R_1Ω을 구하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{1}{2\sqrt{\pi}\, r} \times V_t = \frac{377}{R_1 + 377} \times V_t \tag{4}$$

$$R_1 = 377 \times (2\sqrt{\pi}\, r - 1)$$

이 모델은 하나의 낙뢰에 의해 생성된 전계가 여러 거리에 떨어진 물체에 영향을 줄 때, 응용해서 이용가능하다.

전파거리를 거쳐 감쇠된 전자기파는 전차선에 커플링 된다. 이 때 전자기파가 진행해온 방향과 전차선의 방향 간의 각에 의해 전차선에 유효한 영향을 줄 수 있는 유효 전계 값이 결정된다. 전파된 전계가 입사각에 따라 유효 전계로 감쇠되는 결합비를 회로적으로 변압기를 이용하여 모델링하였다.

2.2 철도 급전 시스템 모델링

철도 급전 시스템의 전차선로를 회로로 나타내기 위해서, 전송선 이론(Transmission line theory)을 도입하였다. 식 (5)는 각각 two parallel open wire line에서 단위거리 당 커패시턴스, 인덕턴스, 임피던스를 의미한다. 실제 전차선의 저항은 거의 0에 수렴하기 때문에 무손실인 경우의 관계식을 이용하였다.

$$C \approx \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln(2b/a)} \tag{5}$$

$$L \approx \frac{\mu_0 \mu_r \times \ln(2b/a)}{\pi}$$

$$Z_0 \approx 120 \times \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \times \ln(2b/a)$$

여기서 C와 L, Z_0의 단위는 각각 $F/m, H/m, \Omega$이다. 또 a는 각 도선의 지름, b는 두 도선 사이의 거리를 나타낸다. 본 논문에서 모델링된 전차선은 표 1과 같은 특성을 가지고 있다[10].

표 1. 전차선 물리 · 전기적 특성
Table 1. Physical and electrical characteristic of electric car line

직경(mm)	13.6	단면적(mm^2)	150
도전율(%)	98	저항(Ω/km)	0.17593

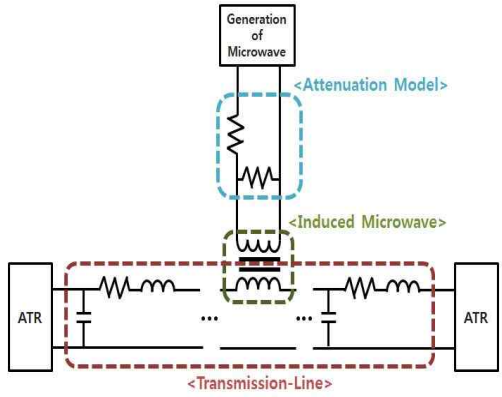


그림 4. 전체 시스템의 회로모델링
Fig. 4. Circuit modeling of the whole system

그림 4는 전체시스템의 회로모델링을 보여준다. 앞서 설명한 것과 같이 Attenuation model과 Induced microwave model이 표현되어 있다. 또 철도 급전 시스템은 transmission line theory에 의해 모델링되었다[11].

www.dbpia.co.kr

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

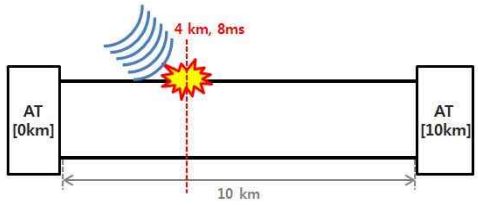


그림 5. 전자기파 결합 시뮬레이션의 조건
Fig. 5. Microwave coupling simulation condition

그림 5는 전자기파 결합 시뮬레이션의 조건을 보여준다. 실제 철도 시스템에서 AT(Auto Transformer) 사이의 거리(8~10km)를 반영하였고, 결합지점 및 시간(4km, 8ms)은 대칭되지 않은 임의의 값으로 설정하였다. 여기서는 음전하 낙뢰를 기준으로 시뮬레이션 하였다.

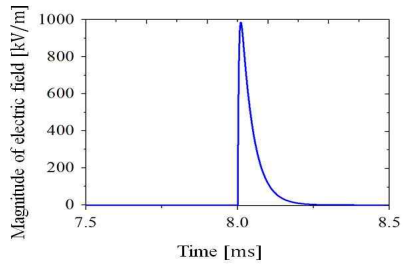
표 2는 전자기파 결합 시뮬레이션 조건의 값을 나타낸다. 본 논문은 뇌격지점 및 뇌격의 진전속도 등에 의해 시뮬레이션 조건과 같은 전자기파가 생성되었다고 가정하여 진행하였다.

표 2. 전자기파 결합 시뮬레이션 조건의 값
Table 2. Value of microwave coupling simulation condition

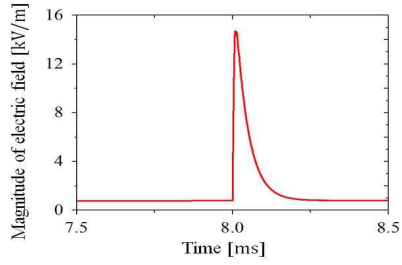
전자기파 모델링	크기	1000kV/m
	펄스폭	40μs
	파형	Simulation 1
		구형파
		Simulation 2
		이중지수분포파
		Simulation 3
		삼각파
커플링	전파거리	20m
	결합비	0.866
	결합지점	4km
	결합시간	8ms

3.2 시뮬레이션 결과

그림 6과 그림7은 각각 전자기파 감쇠 모델의 파형과 초기유기전압을 보여 준다.



(a) 입력 전계 파형



(b) 감쇠 전계 파형

그림 6. 전자기파 감쇠 모델의 파형
Fig. 6. Waveform of attenuation model of microwave

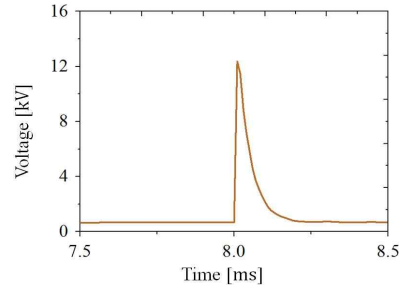


그림 7. 초기 유기 전압
Fig. 7. Initial induced voltage

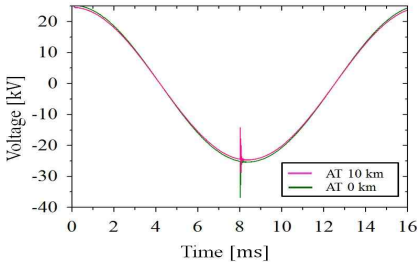
파형은 낙뢰 응용에 가장 적합한 이중지수분포파로 시행되었다. 이 감쇠 모델은 앞서 유도된 수식에 의한 값(14.1kV/m)과 잘 매치되는 것을 볼 수 있다. 또 전차선에 처음 유기되는 초기 유기 전압은 시뮬레이션

www.dbpia.co.kr

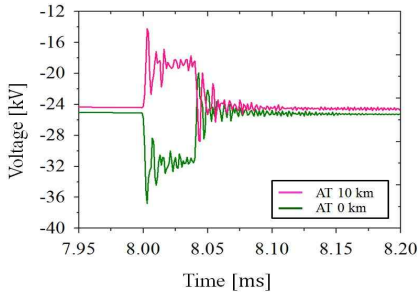
결합비(0.866)에 맞게 최고값 12.2kV를 갖는 것을 알 수 있다.

그림 8, 그림 9, 그림 10은 각각의 세 가지 시뮬레이션 파형에 따른 전차선의 유도된 전압 파형을 보여주는 그래프이다. 측정은 AT(0km), AT(10km)에서 시행하였다.

그림 8, 그림 9, 그림 10에서 (a)는 전차선의 입력 전압(25kV)에 전자기파 커플링 현상을 전체 파형으로 보여 주고 있고, (b)는 커플링 된 부분(7.95ms~8.20ms)을 확대한 파형을 보여 주고 있다.



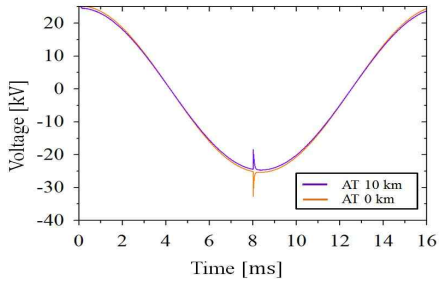
(a) 전체 파형



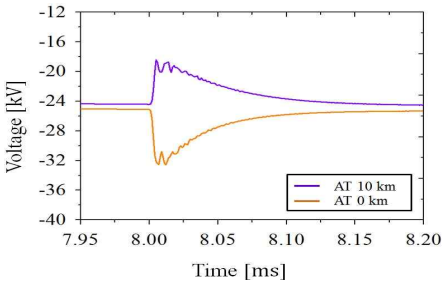
(b) 확대 파형

그림 8. 구형파에 의한 유도 전압 파형
Fig. 8. Induced voltage waveform affected by square wave

세 가지 시뮬레이션 모두 커플링된 전자기파가 AT 10km 방향은 양의 펄스, AT 0km는 음의 펄스로 나뉜 것을 볼 수 있다. 전차선의 입력 전압이 음의 값을 가질 때 전자기파가 커플링되었으므로, 각 파형의 최저값을 알아보면 다음과 같다; (구형파 : -36.8kV), (이중지수분포파 : -32.6kV), (삼각파 : -31.7kV). 각각 -11.8kV, -7.6kV, -6.7kV의 차이를 보여 준다.

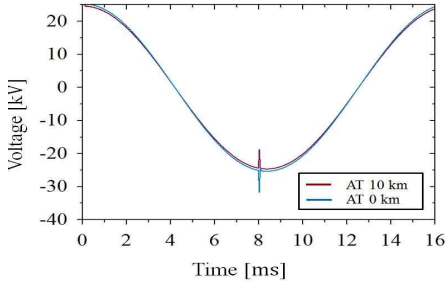


(a) 전체 파형

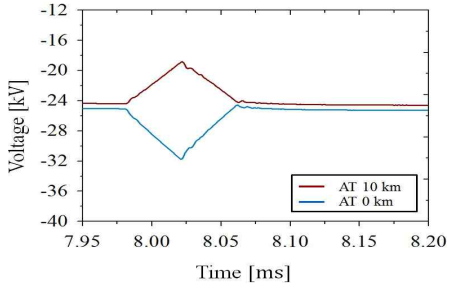


(b) 확대 파형

그림 9. 이중지수분포파에 의한 유도 전압 파형
Fig. 9. Induced voltage waveform affected by double exponential wave



(a) 전체 파형



(b) 확대 파형

그림 10. 삼각파에 의한 유도 전압 파형
Fig. 10. Induced voltage waveform affected by triangular wave

www.dbpia.co.kr

파형에 따른 경향성을 살펴보면 급격한 변화를 가지는 파형일수록 더 큰 진폭을 나타냄을 볼 수 있다. 구형파가 상승 및 하강에서 가장 빠른 변화를 가지고 있어서 큰 영향을 주고 있고, 이중지수분포파는 빠른 상승 시간과 느린 하강 시간에 따른 영향을 보여 주고 있다. 삼각파는 가장 느린 상승 및 하강 시간을 가지고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 고속철도시스템의 전차선에 영향을 미치는 유도 서지 전압을 해석하였다. 연구는 크게 감쇠 모델, 전자기파 유도 모델, 철도 급전 시스템 모델로 나뉘어 있다. 낙뢰로 인한 전자기파를 3가지 파형으로 나뉘어 시뮬레이션하였고, 상승 및 하강시간이 가장 빠른 구형파에서 가장 큰 진동을 알 수 있었다. 이 논문에서 제시하는 모델들을 이용하여, 기존의 전차선 모델과 결합하여 통합적인 회로모델링을 구현하였다. 또 이 모델들은 낙뢰로 인한 전차선의 영향을 회로로 분석하는 데 큰 효용가치가 있을 것으로 예상된다. 마지막으로 기존의 전송선로 커플링 모델을 응용하여 전차선의 정밀한 모델을 구현하는 추가 연구가 필요하다.

References

[1] K. I. Park, S. H. Chang, C. K. Choi, "Fault Location Estimation Algorithm in the Railway High Voltage Distribution Lines Using Flow Technique", Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 22 (2), pp. 71-79, 2008.

[2] M. A. Haddad, V. A. Rakov, and S. A. Cummer, "New measurements of lightning electric fields in Florida: Waveform Characteristics, interaction with the ionosphere, and peak current estimates", Jour. of Geophysical Research, 117 (D10101), 2012.

[3] S. J. Rim, J. C. Kim, D. W. Choo, Y. C. Chong, S. H. Chang, "Shielding Effects of an Overhead Ground Wire in the Electric Railway Systems due to Direct Lightning Strokes", Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 15 (3), pp. 91-96, 2001.

[4] B. H. Lee, S. M. Kang, J. H. Eom, S. C. Lee, S. G. Kim, "Wet Flashover Characteristics and Reform Measure of a Conventional Lightning Rod against Lightning Impulse Voltages", Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 16 (3), pp. 93-100, 2002.

[5] F. Rachidi, "A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models With Special Emphasis to Lightning-Induced Voltage on Overhead Lines", IEEE Trans. Electromagn. Compat., 54 (4), pp. 898-911, 2012.

[6] C. A. Nucci, R. Rachidi, "On the Contribution of the Electromagnetic Field Components in Field-to-Transmission Line Interaction", IEEE Trans. Electromagn. Compat., 37 (4), pp. 505-508, 1995.

[7] K. T. Kim, J. S. Kwak, D. J. Kweon, K. S. Koo, J. W. Woo, "A Study on the Effects of Line Constants Models for the Overvoltage Analysis in EMTP", Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 24 (10), pp. 33-41, 2010.

[8] David K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics 2nd : Plane Electromagnetic Waves, pp.357, Addison Wiley. 1989.

[9] S. G. Lee, Y. M. Cho, K. C. Ko, "The Influence on Traction Return Current by Pantagraph Detachment Frequency of High-speed Train", Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 28 (9), pp. 8-13, 2014.

[10] K. A. Lee, K. C. Ko, "Propagation Model of High-Power Electromagnetic Pulse by Using a Serial-Parallel Resistors Circuit", IEEE Trans. Plasma Sci., 42 (10), pp. 3309-3312, 2014.

[11] Paul W. Smith, Transient Electronics : Pulsed circuit technology, pp.41-70, John Wiley & Sons Ltd, 2002.

◇ 저자소개 ◇

이성근 (李誠根)
1957년 5월 17일생. 1986년 서울시립대 전자공학과 졸업. 2010년 한양대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한양대 일반대학원 전기공학과 박사과정. 1987~1994년 서울시 공무원. 1994~2012년 서울시 도시철도공사 팀장. 2012년~현재 (주)디투엔지니어링 전무.

이건아 (李建亞)
1985년 5월 13일생. 2009년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 2011년 한양대 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

고광철 (高光哲)
1959년 1월 31일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동경공업대학 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(박사). 1990~1995년 가천대 전기공학과 조교수. 1995~2005년 한양대 전기공학과 조교수/부교수. 2005년~현재 한양대 전기·생체공학부 교수.

www.dbpia.co.kr