

가입자 통신 선로에서의 뇌격 파라미터 분석과 측정

Analysis and Measurement of Lightning Parameters on Subscriber Telecommunication Lines

오 호 석 · 박 동 철*

Ho-Seok Oh · Dong-Chul Park*

요 약

본 논문은 낙뢰에 의해 전송 선로에 유도되는 유도뢰 전압을 해석하고 낙뢰 위치 및 선로 길이에 따른 유도뢰 전압의 크기, 파두장, 파미장 등에 대한 낙뢰 파라미터 변화를 분석하였다. 분석한 결과를 확인하기 위해 실제 통신 선로를 대상으로 유도뢰 전압을 측정하였다. 선로 길이가 길어짐에 따라 그리고 낙뢰 위치가 선로와 멀어짐에 따라 파두장, 파미장이 증가하는 경향을 확인하였다. 전체 선로 길이보다는 가공 선로 길이가 상대적으로 유도 전압 크기에 영향을 끼침을 확인하였다.

Abstract

In this paper, the induced voltage on transmission line by lightning was calculated using FDTD method and the lightning parameters such as peak voltage, rise time, and decay time for the lightning location and line length were analyzed. To verify the results, lightning induced voltage was measured in the field using real telecommunication line. Results from the collected data were compared with the calculated results. It was found that the rise time and the decay time were increased as the line length and the distance between the line and lightning location were increased. Also, the peak voltage was affected more by the overhead line length than by the total line length, while the rise time and the decay time were more affected by the total line length.

Key words : Lightning, Surge, Induced Voltage, Telecommunication Line

1. 서 론

통신 선로 근방에서 발생하는 낙뢰에 의해 통신 회선에 발생하는 유도 전압은 통신 회선 단말에 접속되어 있는 장치 즉, 교환기 인터페이스 회로, 가입자 댁내에 설치되어 있는 단말기 등의 소손을 발생시키고 심한 경우에는 통신 선로 자체가 파손됨에 따라 통신 중단이 발생하기도 한다. 이러한 영향으로부터 통신 설비를 보호하기 위해 여러 단계의 서지 보호 장치를 통신 회선 단말 또는 장치 내에 삽입하게 되며, 지리적, 환경적으로 설치 조건을 고려하

여 경제적인 보호대책을 강구하게 된다^{[1]-[3]}. 낙뢰 전자파에 의해 전송 선로에 유도되는 전압에 대한 연구는 이론적으로 또는 실험적으로 지금까지 많이 진행되어 왔다. 낙뢰와 같은 외부 전자파와 전송 선로간의 결합 현상은 전송 선로에서 TEM(Transverse Electromagnetic) 모드 진행을 가정하는 전송선 방정식을 이용하여 해석할 수 있다^{[4]-[9]}.

유도뢰 전압 계산 이론 및 실험에 대한 대다수의 연구는 통신 선로보다 높게 설치되어 있어 많은 피해에 노출되어 있는 송전선, 배전선과 같은 전력선을 대상으로 하고 있다. 통신시설의 경우에는 유도

KT 미래기술연구소(Advanced Technology Laboratory, KT)

*충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20070913-103

· 수정완료일자 : 2007년 10월 30일

뢰 전압 측정 및 이를 기초로 한 낙뢰 서지 시험 회로 연구 등이 수행되어 왔고, 최근에는 아열대 지역에서 통신 국사 내에서 나타나는 낙뢰 서지 특성에 대한 연구 결과가 발표되고 있다^{[10]~[13]}.

귀환 뇌격 전류에 의해 통신 선로에 유도되는 전압을 계산하는 것은 설비의 보호 및 인명 안전 대책에 매우 중요하다. 따라서 낙뢰 전류에 대한 정보를 바탕으로 유도 전압을 예측하고, 통신 선로에서 발생하는 유도 전압의 크기, 파두장, 파미장, 파두장에 대한 기율기와 같은 낙뢰 파라미터를 분석하기 위해 유도뢰 전압을 측정하고 통계적으로 분석하는 것이 주요 관심 사항이다.

본 논문은 낙뢰에 의해 전송 선로에 유기되는 유도뢰 전압을 시간 영역 유한 차분(Finite Difference Time Domain: FDTD) 법으로 해석하고 낙뢰 위치, 선로 길이, 대지 도전율에 따른 유도뢰 전압의 크기, 파두장, 파미장 등 낙뢰 파라미터 변화를 분석하였다. 분석한 결과를 확인하기 위해 실제 통신 선로에서 나타나는 유도뢰 전압을 측정하여 유도뢰 전압의 특징을 살펴보고 통신 선로 조건에 따른 낙뢰 파라미터 변화를 분석하여 계산 결과와 비교하였다.

II. 낙뢰 전자파에 의한 유도 전압 해석

2-1 낙뢰 채널 전류 모델링

낙뢰로부터 방사되는 전자파를 계산하기 위한 과정은 다음과 같다. 먼저 귀환 낙뢰 채널은 대지면 위에 수직인 직선형 안테나(vertical unidimensional antenna)로 가정하고 낙뢰 채널에서의 낙뢰 전류 분포를 모델링한다. 대지면에서의 귀환 낙뢰 전류, $i(0, t)$ 를 식 (1), (2)로 표현할 수 있다^{[14],[15]}.

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \exp(-t/\tau_2) \quad (1)$$

$$\eta = \exp[-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{(1/n)}] \quad (2)$$

여기서 I_0 는 대지면에서의 전류 크기이고 τ_1 은 파두장 상수, τ_2 는 파미장 상수, η 는 크기 보정 상수(amplitude correction factor), n 은 지수(exponent)이다. 이 상수 값들을 변화시켜 전류 크기나 최대 전류 변화량(maximum current derivative) 등을 조절하여 여

러 형태의 낙뢰 전류 파형을 표현할 수 있다.

본 논문에서는 참고문헌 [14]와 [16]에서 제안된 modified transmission line 모델을 활용하여 낙뢰 전자파를 계산하였다. 이 모델에서는 낙뢰 채널의 전류가 대지면에서 구름 쪽으로 이동함에 따라 크기가 지수함수로 감소하게 되어 식 (3)과 같이 표현된다.

$$i(z', t) = \exp(-z'/\lambda) i(0, t - z'/\nu) \quad (3)$$

여기서 λ 는 감쇠 상수(1,700)이고, ν 는 낙뢰 전류의 속도(1.3×10^8 m/s)이다.

귀환 뇌격의 전류 파형을 만들기 위해 참고문헌 [14]에서 활용했던 표 1과 같은 두 가지 파라미터를 각각 식 (1)에 대입하여 얻어진 2개 파형의 합으로 전류 파형을 모델링하였다(그림 1).

2-2 대지 손실을 고려한 유도뢰 전압

실제 대지의 손실을 고려하게 되면 이미지 효과가 달라져 낙뢰 전자파의 파형이 달라지게 된다. 본 논문은 1996년 Rubinstein이 대지의 손실을 고려하여

표 1. 대지면에서의 귀환 뇌격 전류 파형 생성을 위한 두 가지 파라미터

Table 1. Parameters to reproduce the channel-base current waveshape of a typical subsequent return stroke.

Parameters 1	I_{01} (KA)	τ_{11} (μ s)	τ_{21} (μ s)	n_1
		10.7	0.25	3.5
Parameters 2	I_{01} (KA)	τ_{12} (μ s)	τ_{22} (μ s)	n_2
		6.5	2.1	230

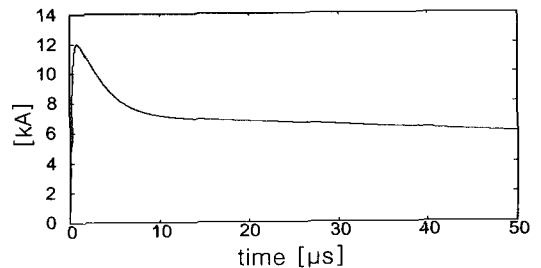


그림 1. 귀환 뇌격의 채널 기저부 전류 파형
Fig. 1. Channel-base current for a typical lightning return stroke.

낙뢰 전기장의 수평 성분을 계산하는 방법^[17]과 참고 문헌 [9]의 방법을 이용하여 유도뢰 전압을 계산하였다. 계산된 결과를 검증하기 위해 참고문헌 [18]과 비교하였다. 계산 조건은 대지 도전율 0.001 S/m, 유전율 10, 전송 선로 길이 1,000 m, 전송 선로 높이는 10 m이었고 양단이 정합된 단일 도체의 경우를 가정한 것이다. 양단의 정합된 저항은 534 Ω(전송 선로의 특성임피던스 계산값)이었다. 이 때 낙뢰 위치는 전송 선로의 중앙으로부터 50 m 떨어져 있는 곳이다. 그림 2는 본 논문에서 계산된 결과로서 이는 참고문헌 [18]에 제시된 결과와 동일함을 확인하였다. 계산 결과로부터 대지의 손실을 고려하게 되면 단말에서의 유도 전압은 대지를 완전 도체로 고려한 경우의 파형, 크기, 극성과 다른 형태를 가지게 됨을 알 수 있다.

2.3 조건에 따른 낙뢰 파라미터 분석

낙뢰 위치, 전송 선로의 길이, 대지의 도전율에 따라 선로에 나타나는 유도뢰 전압을 계산하기 위해 그림 3과 같이 여러 조건의 구성을 고려하였다. 유전율은 10으로 고정하였고, 전송 선로의 높이는 7 m, 도체 직경은 5 mm로 양단이 정합된 하나의 도체인 경우로 가정하여 유도뢰 전압을 계산하였다.

그림 3에서 (a)는 낙뢰 위치가 한 쪽 단말에 가까운 경우이고, (b)는 낙뢰 위치가 전송 선로의 중앙인 경우이며, (c)는 낙뢰 위치가 고정되고 전송 선로 길

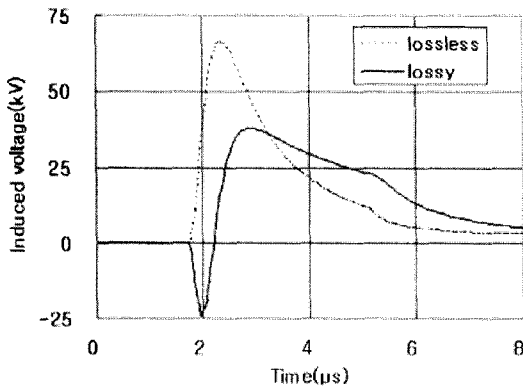


그림 2. 정합된 전송 선로 단말에 나타나는 낙뢰 유도 전압 계산 결과

Fig. 2. Calculated voltage on a matched overhead line induced by a typical return stroke.

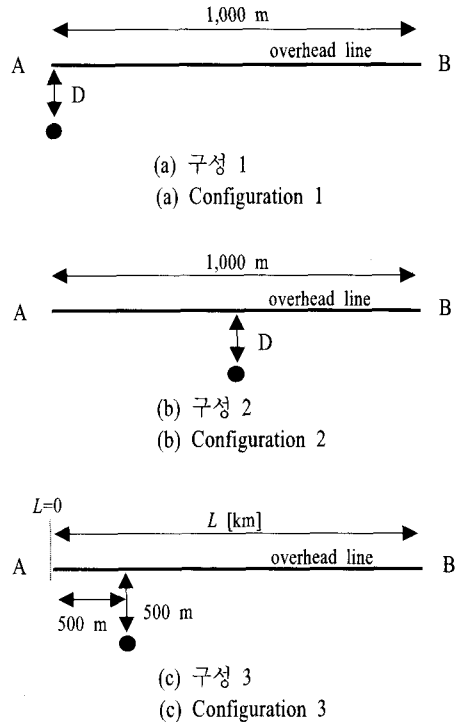


그림 3. 낙뢰 위치와 전송 선로의 구성

Fig. 3. Configuration of transmission line and lightning location.

이가 다른 경우이다.

그림 4는 그림 3(a) 구성 1에서 $D=50$ m인 경우, 단말 A, B에 나타나는 유도뢰 전압 계산 결과이다. 대지 도전율이 0.001 S/m인 경우와 완전 도체인 경우를 비교할 때 대지 도전율을 고려한 경우가 첨두 전압이 큰 결과를 보였다. 대지 도전율을 고려한 경우, 낙뢰 지점으로부터 원거리에 있는 B 지점에서의 유도 전압 파형은 완전 도체인 경우와 달리 반대 극성을 보였다. 이는 대지 손실을 고려하게 되면 원거리 단말에서는 작은 (+)극성의 수직 전기장 성분과 (-)극성의 수평 전기장 성분에 의해 반대 극성을 보이는 것이다. 그림 5는 그림 3(a) 구성 1에서 대지 도전율이 0.001 S/m일 때 낙뢰 위치가 $D=100, 300, 500$ m인 경우 양쪽 선로 단말에 나타나는 유도뢰 전압 계산 결과이다. 낙뢰 위치가 전송 선로로부터 멀어짐에 따라 첨두 전압은 작아지고 파두장, 파피장은 점차 증가하는 경향을 보였다. 그림 6은 그림 3(b) 구성 2에서 대지 도전율이 0.001 S/m인 조건에서 낙

회 위치가 전송 선로 중앙에 위치하고 $D=100, 300, 500$ m인 경우 통신 선로의 양쪽 단말에서 나타나는 유도 전압 계산 결과이다. 거리가 멀어짐에 따라 침투 전압은 작아지며 파형은 낙뢰가 단말 지점 가까이 발생한 경우와 달리 (-)극성과 (+)극성이 동시에 나타나는 양극성(bipolar) 경향을 보였다. 이는 대지 손실 영향에 의해 뇌격 위치로부터 멀어짐에 따라 유도 전압에 기여하는 수평 전기장의 파형이 초기에는 (-)에서 (+)로 왜곡되고, 거리에 따라 (-)값이 커지게 됨에 따라 나타난다. 파두장, 파미장은 증가하며 양쪽 단말에서의 유도 전압 파형은 낙뢰 위치가 전송 선로 중앙이기 때문에 동일하다. 그림 7, 그림 8은 그림 3(c) 구성 3의 고정된 낙뢰 위치에 대해 전송 선로 길이가 다른 경우($L=1, 2, 3, 4$ km)에 대해 각각 단말 A, 단말 B에서 나타나는 유도 전압을 계산한 결과이다. 1 km 선로의 경우에는 낙뢰가 선로 길이 방향의 중앙에 위치하는 경우이므로 양쪽 단말에서 나타나는 유도 전압 형태는 동일하게 나타나는 반면 2, 3, 4 km의 경우에는 그림 4와 같이 단말 A와 단말 B의 극성이 반대로 나타났다. 또한, 낙뢰 위치와 인접한 단말 A에서의 유도 전압 크기는 선로의 길이가 2 km 이상이 되면 큰 차이가 없는 반면, 단말 B에서는 길이가 길어짐에 따라 점차 증가하는 경향을 보였다. 이는 최초 결합된 유도 전류와 이 전류가 전송 선로를 따라 단말로 진행하며 방사상으로 전파되는 뇌격 전자파와의 결합에 의한 것으로 해석할

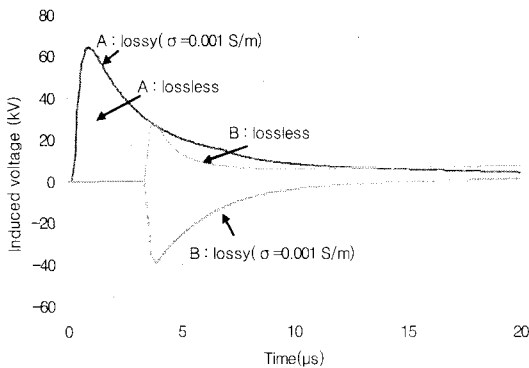


그림 4. 구성 1의 $D=50$ m인 경우, 대지도전율에 따른 유도 전압
Fig. 4. Calculated lightning-induced voltage for different soil conductivity in Configuration 1($D=50$ m).

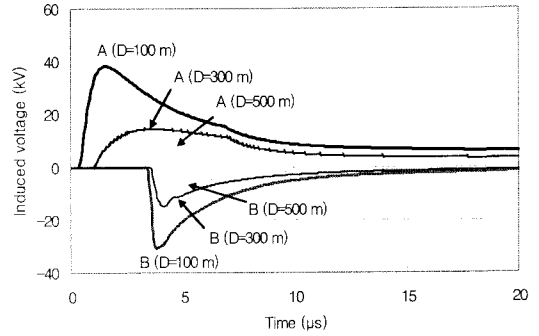


그림 5. 구성 1의 D 의 변화에 따른 유도 전압($\sigma=0.001$ S/m)
Fig. 5. Calculated lightning-induced voltage for different lightning location in Configuration 1($\sigma=0.001$ S/m).

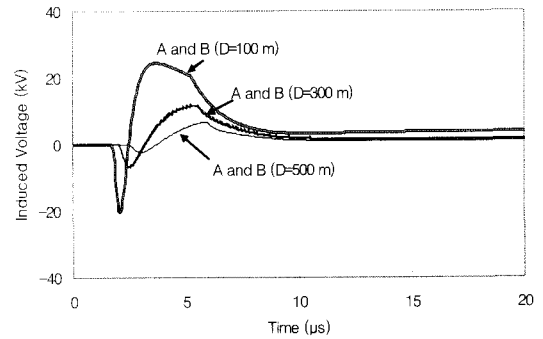


그림 6. 구성 2의 D 의 변화에 따른 유도 전압($\sigma=0.001$ S/m)
Fig. 6. Calculated lightning-induced voltage for different lightning location in Configuration 2($\sigma=0.001$ S/m).

수 있다. 낙뢰와 인접한 단말 A에서의 파두장, 파미장은 길이에 따라 증가하는 경향을 보였다.

III. 통신 선로에서의 유도된 전압 측정

통신 선로에 나타나는 유도된 전압을 측정하기 위해 그림 9와 같이 국사에서부터 가입자까지 지하 및 가공으로 구성되어 있는 통신 선로를 대상으로 국사내에 측정 시스템을 구축하였다. 측정 회선의 단말은 300 Ω의 접지 저항을 갖는 전극에 연결된 상태에서 국사측의 측정기는 통신 선로에 나타나는 유도 전압을 저장하게 된다. 측정된 통신 선로는 그림 10과 같이 2개 경로이고, 각 선로의 길이는 표 2

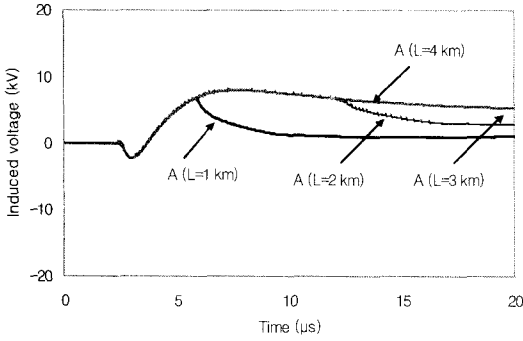


그림 7. 구성 3의 길이 L 에 따른 단말 A에서의 유도 전압($\sigma=0.001$ S/m)
 Fig. 7. Calculated lightning-induced voltage at A for different line length in Configuration 3($\sigma=0.001$ S/m).

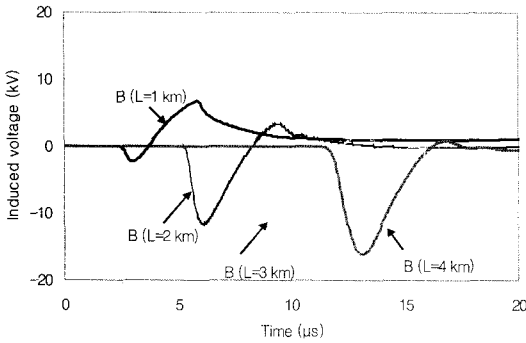


그림 8. 구성 3의 길이 L 에 따른 단말 B에서의 유도 전압($\sigma=0.001$ S/m)
 Fig. 8. Calculated lightning-induced voltage at B for different line length in Configuration 3($\sigma=0.001$ S/m).

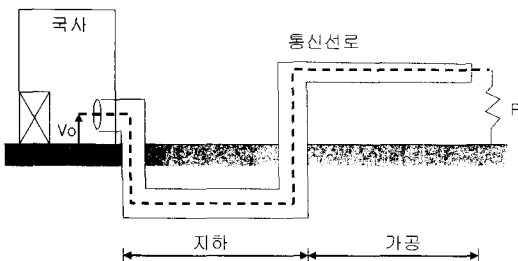


그림 9. 가입자 통신 선로 구성
 Fig. 9. Configuration of subscriber telecommunication line.

와 같다. 그림 10의 ‘경로 1’은 국사로부터 약 200 m까지는 지하에 설치되어 있고, 나머지 구간은 지상

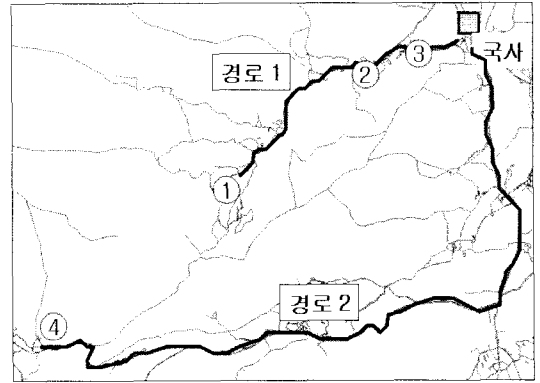


그림 10. 측정된 통신 선로의 지리적 구성
 Fig. 10. Map of telecommunication lines under test.

약 7 m 높이의 전주 위에 가공으로 설치되었다. 또 다른 ‘경로 2’의 총 거리는 5.3 km이고 국사에서부터 약 4 km까지는 지하에 설치되어 있고, 나머지 구간 1.3 km는 가공으로 설치된 것이다. 그림 10에서 ①~④는 측정 회선의 단말 위치로서 동일 낙뢰에 대해 발생하는 유도 전압 특성을 비교하기 위한 것으로 측정 회선의 단말은 약 300 Ω 의 접지 저항을 갖는 접지 전극에 연결하였다. 측정 지역은 대도심 외곽에 위치한 산간 지역으로 대지 도전율은 약 0.0014 S/m(대지저항을 환산 값: 약 700 Ω m)이었다.

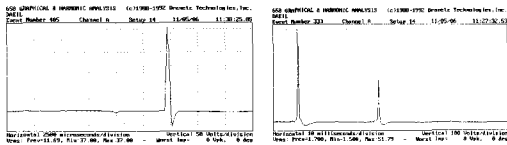
IV. 측정 데이터 분석

낙뢰는 벼락이라고도 하는데, 구름과 대기 사이의 불꽃 방전을 일컫고 있다. 낙뢰는 구름으로부터 지면을 향해서 하강하는 비교적 약한 빛의 계단형 선구 방전(steped leader stroke)과 이것이 지면에 도달하는 순간 같은 경로를 통해 지면으로부터 구름을 향해서 상승하는 매우 밝고 빠른 속도의 방전, 즉 귀환 뇌격(return stroke)로 구성되며, 단 한번의 뇌격으로 끝나는 것과 몇 회로부터 수십 회의 뇌격을 반복하는 다중 낙뢰가 있다. 측정된 파형의 예를 그림 11에 보였다. 낙뢰 파형을 보면 단독으로 (+)극성 또는 (-)극성을 갖는 경우가 있고, 매우 짧은 시간에 연속적으로 발생하는 경우도 나타났다.

유도된 전압 파라미터는 침투 전압 크기, 파두장, 파미장 등이 있다. 파두장은 침투 전압 크기의 30%와 90% 사이에 해당하는 시간의 1.67배로 정의된

표 2. 국사로부터 단말까지의 통신 선로 길이
Table 2. Length of telecommunication line from central office to terminal.

측정 선로 단말	①	②	③	④
전체 선로 길이 (km)	2.3	1.3	0.6	5.3
가공 선로 길이 (km)	2.1	1.1	0.23	1.3



(a) 양극성 유도 전압 (a) Bipolar induced voltage
(b) 다중 낙뢰 유도 전압 (b) Multiple stroke induced voltage

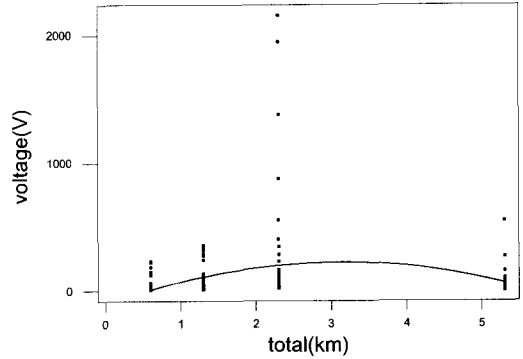
그림 11. 측정된 유도뢰 전압 파형 예
Fig. 11. Measured lighting induced voltage wave-shapes.

다. 본 논문에서는 1.67배를 하지 않은 값으로 모든 데이터를 분석하였다. 파미장은 유도 전압 파형에서 첨두 전압의 30 % 가 되는 상승 지점에서 첨두 전압 크기의 50 % 되는 하강 지점 사이의 시간으로 정의한다^[19].

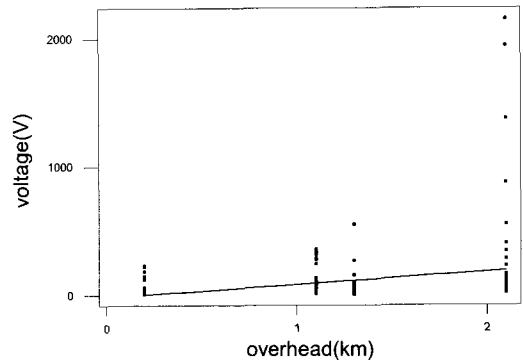
본 측정 결과는 2006년 8월~11월 중 측정된 유도뢰 전압을 분석한 것이다. 실제 통신 선로는 완전한 직선 경로가 아니고 수직 또는 수평 방향의 굴곡이 존재하여 전송 선로 경로의 불연속성에 의한 반사 또는 에너지 방사 현상을 고려할 수 있지만, 낙뢰 전자파는 1 MHz 이하의 저주파수 대역으로서 이를 무시할 수 있다. 또한, 자연 발생적인 낙뢰의 위치, 전류 크기, 파두장 등을 정확히 알 수 없기 때문에 측정된 유도뢰 전압으로부터 통신 선로 길이와 각 파라미터와의 상관 관계를 알아보았다. 상관 관계는 식 (4)와 같이 정의하는 통계값이다.

$$\text{상관계수} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

여기서 n 은 데이터 개수, \bar{x}, \bar{y} 는 각각 변수 x, y 의 평균값이고, σ_x, σ_y 는 각각 변수 x, y 의 표준편차이다.



(a) 전체 선로 길이와 첨두 전압
(a) Total line length and peak voltage



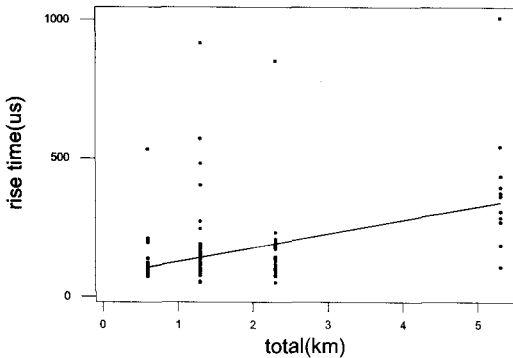
(b) 가공 선로 길이와 첨두 전압
(b) Overhead line length and peak voltage

그림 12. 측정된 유도 전압
Fig. 12. Measured induced voltages.

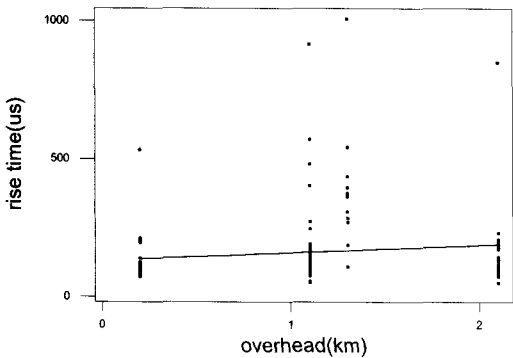
먼저 그림 12(a)는 전체 선로 길이와 측정된 첨두 전압 분포이고, 그림 12(b)는 전체 선로 길이에서 지상에 노출된 가공 선로 길이를 가로축으로 한 첨두 전압 분포이다. 여기서 전체 선로 길이와 첨두 전압과의 상관계수는 0.021이고, 지상에 노출된 가공 선로 길이와 첨두 전압과의 상관계수는 0.265로서 전체 선로 길이보다는 가공 선로 길이가 첨두 전압에 더 큰 영향을 끼치는 것을 확인하였다. 이는 낙뢰 전자파가 대지의 차폐 역할로 인해 지하에 설치된 통신 선로와 결합되는 양이 작기 때문인 것으로 추론할 수 있다. 그림 13과 그림 14는 각각 통신 선로 길이에 따른 측정된 파두장과 파미장의 분포이다. 파두장의 경우 전체 선로 길이와의 상관계수는 0.417이고, 가공 선로 길이와의 상관계수는 0.132로 나타났다. 또한, 파미장의 경우, 전체 선로 길이와의 상

관계수는 0.398이고, 가공 선로 길이와의 상관계수는 0.105로서 두 경우 모두 전체 선로 길이와 상관관계가 가공 선로 길이보다 크게 나타났다. 이는 선로 길이가 증가함에 따라 파두장, 파미장은 증가하며 전체 선로 길이가 파두장, 파미장에 더 큰 영향을 주는 것을 의미한다.

본 논문 II장에서 계산된 침투 전압 크기, 파두장, 파미장 등 통신 선로 길이에 따른 낙뢰 파라미터에 대한 변화를 측정값과 비교해 보면 본 논문 II장에서 계산된 침투 전압의 경우 선로 길이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고, 낙뢰 위치에 인접한 단말에서는 2 km 이상이 되면 상대적으로 큰 차이를 보이지 않는 경향과 비교할 때 측정값의 경우 가공 선로 길이와 침투 전압과의 상관계수가 0.265로서 선로 길이에 따라 크기는 증가하지만, 낮은 상관

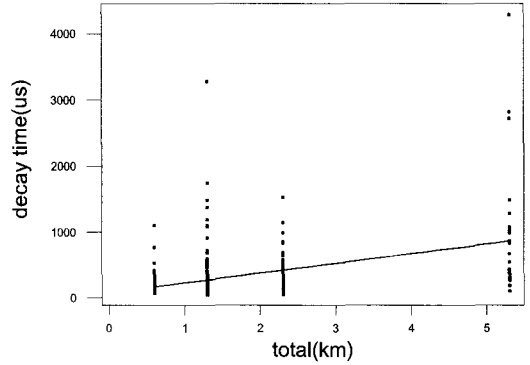


(a) 전체 선로 길이와 파두장
(a) Total line length and rise time

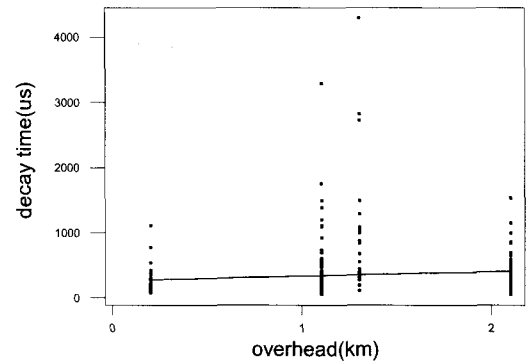


(b) 가공 선로 길이와 파두장
(b) Overhead line length and rise time

그림 13. 측정된 파두장
Fig. 13. Measured rise times.



(a) 전체 선로 길이와 파미장
(a) Total line length and decay time



(b) 가공 선로 길이와 파미장
(b) Overhead line length and decay time

그림 14. 측정된 파미장
Fig. 14. Measured decay times.

관계를 보여 계산 결과와 유사한 경향을 확인하였다. 또한, 파두장, 파미장의 경우, 계산 결과가 전송 선로로부터 낙뢰 위치가 멀어짐에 따라 그리고 전송 선로의 길이가 길어짐에 따라 증가하는 경향을 보였는데, 실제 측정에서는 낙뢰 위치와 통신 선로와의 거리를 확인할 수 없었기 때문에 선로 길이와의 관계만을 비교한 결과, 선로 길이가 길어짐에 따라 파두장, 파미장 모두 양의 상관 관계를 보여 계산 결과와 동일한 경향이 나타남을 확인하였다.

V. 결 론

낙뢰로 인해 전송 선로에 나타나는 유도뢰 전압을 시간 영역 유한 차분법(FDTD)을 이용하여 해석하고 낙뢰 위치, 대지도전율, 전송 선로 길이 등 여

러 조건에 따라 낙뢰 파라미터의 변화를 분석해 보았다. 계산 결과로부터 파두장, 파미장의 경우, 전송 선로로부터 낙뢰 위치가 멀어짐에 따라, 그리고 전송 선로의 길이가 길어짐에 따라 증가하는 경향을 보였고, 유도 전압의 크기는 선로 길이에 따라 증가하는 경향을 보이지만 낙뢰 위치에 인접한 단말에서는 2 km 이상이 되면 상대적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 계산 결과를 확인하기 위해 실제 통신 선로에 나타나는 유도된 전압을 측정하였다. 측정된 낙뢰 데이터로부터 계산된 낙뢰 파라미터의 변화와 동일한 경향을 보임을 확인하였다. 유도된 전압은 가공에 설치된 길이가 전체 선로 길이에 비해 상대적으로 큰 영향을 주고, 파두장, 파미장의 경우에는 전체 선로 길이가 주요 요소로 작용함을 확인하였다. 향후 누적된 데이터를 바탕으로 유도된 전압의 크기 등 각종 파라미터의 통계적 분포를 도출하여 통신 선로 및 이에 접속되어 있는 장치의 보호를 위한 장치 설계 등 경제적인 낙뢰 대책에 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] ITU-T Recommendation K.20, *Resistibility of Telecommunication Equipment Installed in a Telecommunications Centre to Overvoltages and Overcurrents*, 2003.
- [2] ITU-T Recommendation K.21, *Resistibility of Telecommunication Equipment in Customer Premises to Overvoltages and Overcurrents*, 2003.
- [3] ITU-T Recommendation K.67, *Expected Surges on Telecommunications and Signaling Networks due to Lightning*, 2006.
- [4] C. D. Taylor, R. S. Satterwhite, and C. W. Harrison, "The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-13, pp. 987-989, Nov. 1965.
- [5] A. K. Agrawal, H. J. Price, and S. H. Gurbaxani, "Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field", *IEEE Trans. on EMC*, vol. EMC-22, pp. 119-129, May 1980.
- [6] F. Rachidi, "Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation field", *IEEE Trans. on EMC*, vol. 35, no. 3, pp. 404-407, 1993.
- [7] C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, J. Wiley & Sons, New York, 1994.
- [8] F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson, *EMC Analysis Methods and Computational Models*, J. Wiley & Sons, New York, 1997.
- [9] 주재철, "시간영역 유한 차분법을 이용한 외부 전자파와 가공통신 선로의 결합 현상 해석", 충남대학교 박사학위논문, 2001년.
- [10] Hiroaki Koga, Tamio Motomitsu, "Lightning-induced surges in paired telephone subscriber cable in Japan", *IEEE Trans. on EMC*, vol. 27, pp. 152-161, Aug. 1985.
- [11] N. Kuwabara, H. Koga, T. Motomitsu, "A new lightning surge test circuit for telecommunications equipment in Japan", *IEEE Trans. on EMC*, vol. 30, pp. 393-400, Aug. 1988.
- [12] H. Yamane, M. Sato, T. Ideguchi, and M. Tokuda, "New lightning surge test method for subscriber telecommunication equipment considering nearby lightning return stroke", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E78-B, pp. 193-197, Feb. 1995.
- [13] T. Tominaga, N. Kuwabara, J. Kato, A. Ramli, A. Halim, and H. Ahmad, "Characteristics of lightning surge induced in tele-communication center in tropical area", *IEEE Trans. on EMC*, vol. 45, no. 1, pp. 82-91, Feb. 2003.
- [14] C. A. Nucci, F. Rachidi, M. V. Ianoz, and C. Mazzetti, "Lightning-induced voltages on overhead lines", *IEEE Trans. on EMC*, vol. EMC-35, pp. 75-86, Feb. 1993.
- [15] F. Heidler, "Traveling current source model for LEMP calculation", *6th Int. Symp. Tech. Exhibition on Electromag. Compat.*, pp. 157-162, Zurich, Mar. 1985.
- [16] C. A. Nucci, F. Rachidi, "Experimental validation of a modification to the transmission line model

for LEMP calculation", *8th Int. Symp. Tech. Exhibition on Electromag. Compat.*, pp. 389-394, Zurich, Mar. 1989.

- [17] M. Rubinstein, "An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long Range", *IEEE Trans. on EMC*, vol. 38, no. 3, pp. 531-535, Aug. 1996.

- [18] F. Rachidi, C. A. Nucci, M. Ianoz, and C. Mazze-
tti, "Influence of a lossy ground on lightning-in-
duced voltages on overhead lines", *IEEE Trans. on
EMC*, vol. 38, no. 3, pp. 250-264, Aug. 1996.
- [19] ITU-T handbook, *The Protection of Telecommu-
nications Lines and Equipment Against Lightning
Discharges (Chapter 10)*, 1995.

오 호 석



1991년 2월: 충남대학교 전자공학
과 (공학사)
1993년 2월: 충남대학교 전자공학
과 (공학석사)
1993년~현재: KT 미래기술연구소
수석연구원
[주 관심분야] 통신시스템의 EMI/

EMC, FTTH, OSP

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 전자공학
과 (공학사)
1976년 2월: 한국과학기술원 전기
전자공학과 (공학석사)
1984년 12월: Univ. of California,
Santa Barbara (공학박사)
1977년~1978년: Ruhr University, Bo-
chum, Germany 방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson

1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson

2000년~2001년: 한국전자과학회 회장

1976년~현재: 충남대학교 전자공학과 교수

2005년 4월~현재: 대덕 Wireless 포럼 회장

[주 관심분야] Microwave and millimeterwave passive com-
ponents, Antennas, EMI/EMC