

# 낙뢰 현상과 EMI 문제

낙뢰 현상은 오랫동안 인류에게 신의 분노와 같은 것으로 여기며 신비스럽고 두려운 자연현상 중의 하나로 생각했으나, 자연과학의 발달로 요즘은 대기중의 전기 방전으로 자연스럽게 받아들인다. 그러나 최근 문제가 되고 있는 EMI / EMC 관점에서 보면 낙뢰 현상은 EMI 를 일으키는 대표적인 발생원으로서 여전히 두려움의 대상이다.

낙뢰나 외부의 전기적인 신호원에 의한 통신선로 및 통신장비의 오동작 또는 파손에 관해서는 많은 연구가 행하여 졌다 [1-5]. 이미 140여년 전 최초의 전신망이 구축되었던 당시부터 낙뢰에 의해 전신전달 장애나 심하면 전신선로 및 전신 단말장치의 손상이 발생하였으며, 현재까지도 낙뢰에 의한 통신장애나 통신선로 및 통신단말장치가 오동작 및 파손되는 경우가 있다.

국내 개발된 전자교환기 TDX -1의 보급은 주로 농어촌 지역에 이루어 졌는데, 지역 특성상 가입자 선로의 길이가 수 km 이상 되는 곳이 많으며 주로 가공선로를 이용하고 있다. 이러한 가입자 선로에 낙뢰로부터 발생되는 강한 전자파 펄스가 입사될 경우 가입자 선로에 유기되는 낙뢰서어지 ( lightning surge )로 인하여 교환기의 단말부하에 과전압이 걸리고 과전류가 흐르게 된다. 물론 이러한 과전압과 과전류를 억제하기 위하여 교환기 인입단의 주배전반에 비선형 임피던스 특성을 갖는 보호소자들을 부착시키고 있으나, 충분한 과전압과 과전류의 차단이 안되는 경우도 있어서 교환기의 오동작 또는 단말부분이 손상을 입는 사례도 있다.

본 기술 해설안에서는 먼저 낙뢰시 발생하는 전자파의 세기와 파형에 대해 살펴보고, 이러한 전자파에 의한 EMI 문제 사례로서 전화가입자 선로에 유기되는 낙뢰서어지로 부터 교환기 보호라는 관점에 관해 기술하기로 한다.

## II. 낙뢰시 발생하는 전자파

여러가지의 번개 ( lightning ) 현상중에서 구름과 지상 간의 방전으로 생기는 낙뢰가 지상의 통신선로 및 장비에 가장 극심한 피해를 준다. 이러한 낙뢰가 생성되고 진행되는 과정에 관한 대표적인 설명이 그림1 이다 [6]. 먼저 매우 습한 공기가 상승기류를 따라 급격히 올라가 구름으로 변하며, 이것이 더욱 발달함에 따라 수 km 이상의 두께를 갖는 적란운 ( cumulo - nimbus )이 되어 점차 전하가 구름의 각 부분에 분리되어 축적된다. 이때 음전하가 점차 구름하부에 집중됨에 따라 구름내부에 강



金世潤

韓國科學技術研究院 應用電子研究室

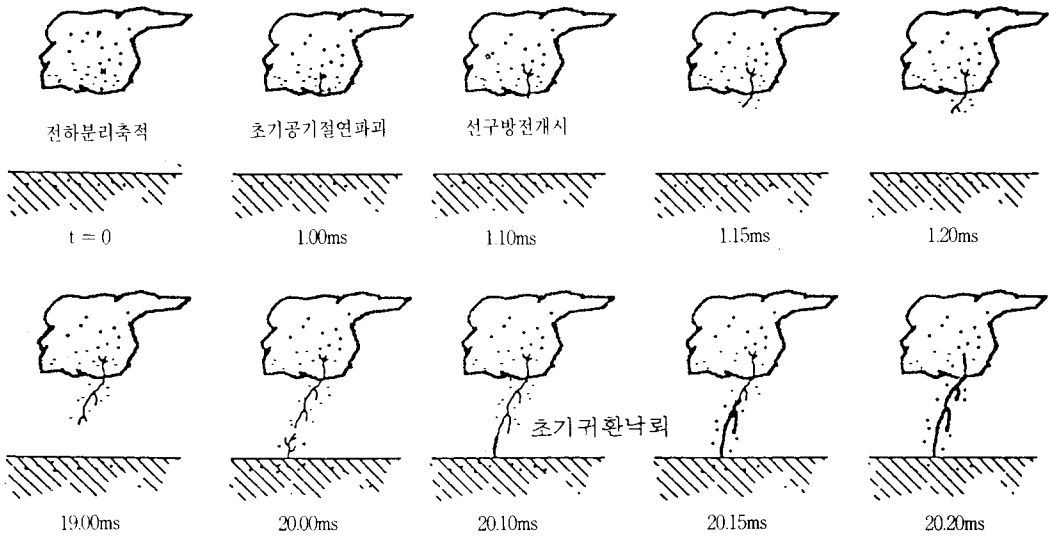


그림 1. 낙뢰의 형성 및 진행과정

한 전계가 걸리게 되는데, 수  $\text{KV/cm}$  이상의 전계가 형성되면 그 주변공기의 예비절연 파괴 (preliminary breakdown)가 시작되어 스트리머 (streamer)가 생긴다. 이러한 스트리머 전방의 전계강도가 더욱 커져서 계단형태로 점차 지상으로 내려가는데 이를 계단형 선구낙뢰 (stepped leader stroke)라 하며 평균 전류가 약 100내지 1000 A 정도 된다. 이러한 선구낙뢰가 지상에 가까이 오에 따라 음전하를 가진 선구낙뢰의 앞 부분과 양전하를

가진 지상간의 전위가 10 MV 까지 올라간다. 이때 지상에 있는 물체중 방출탑과 같이 높은 위치에 날카로운 끝을 가진 금속체의 근방에서의 전계강도는 증가하여 이 부근의 공기를 절연파괴시켜 이러한 물체 끝에서 부터 선구낙뢰쪽으로 양전하를 올려보내는 스트리머가 생긴다. 이러한 스트리머를 귀환낙뢰 (return stroke)라고 부르는 데 상승되는 속도는 광속의 1/3정도로 빠르며 약  $100 \mu\text{sec}$  정도 지속하고, 이때 흐르는 전류는 최

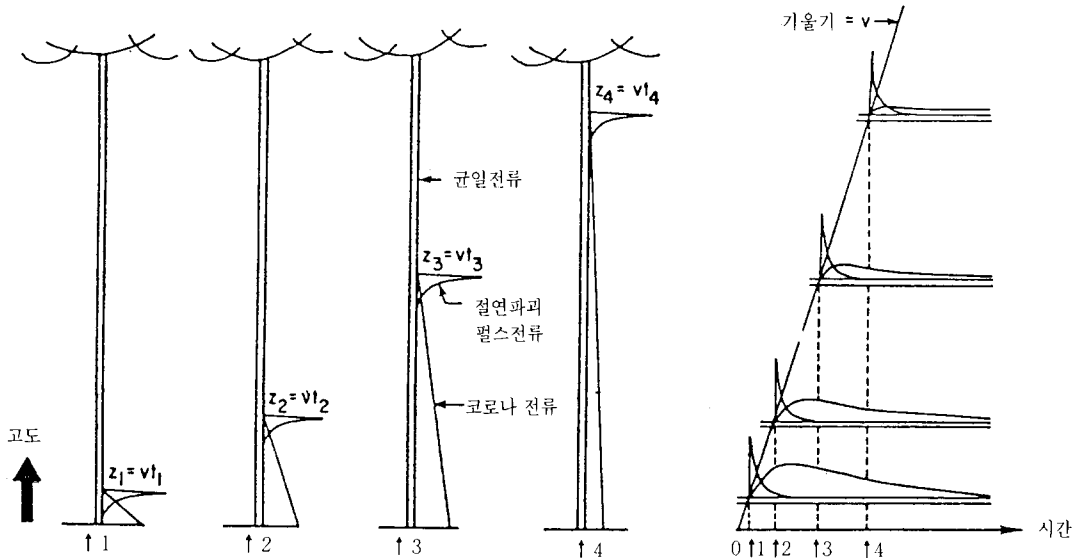


그림 2. 귀환 낙뢰의 전류 성분 및 진행 모형

고 수직 KA 이다. 이러한 귀환낙뢰는 곧 위에서 내려오는 계단상 선구낙뢰와 만나 선구낙뢰의 경로를 따라 상승하여 구름과 지상간의 방전이 완성된다.

그림1 에서와 같은 낙뢰진행과정에서 지상에 미치는 영향은 주로 귀환낙뢰로 부터 생긴다 [7]. 이러한 귀환낙뢰의 상승현상을 설명하는 이론적인 모형이 그림2 [8]

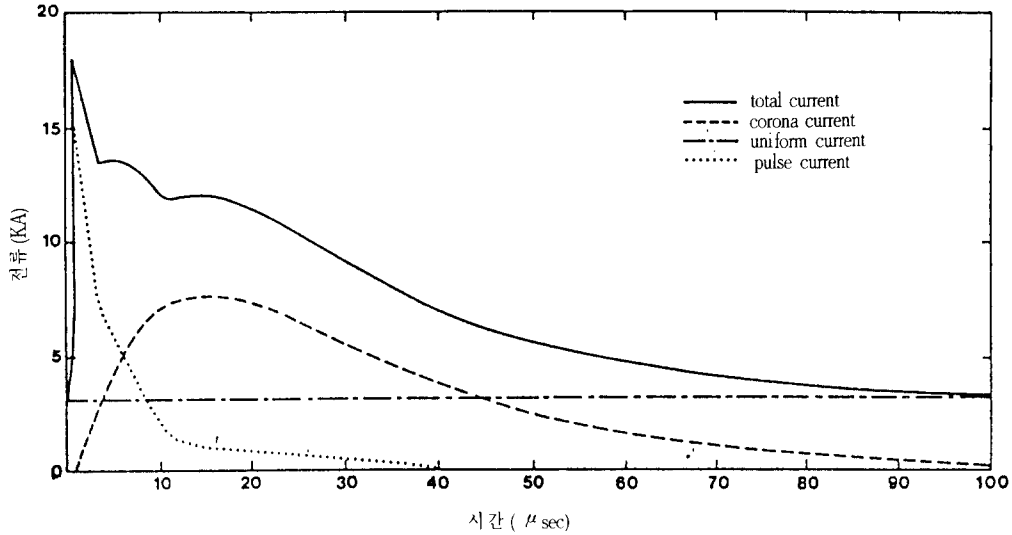


그림 3. 귀환 낙뢰에 대한 지상에서의 등가전류파형

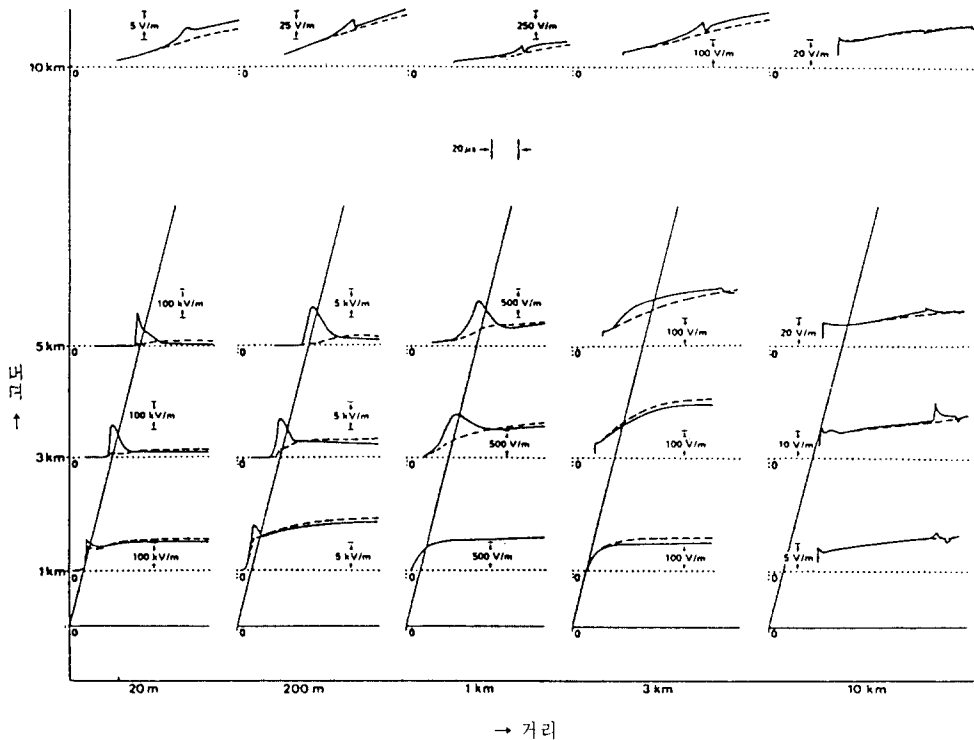


그림 4. 귀환 낙뢰에 의해 방사된 전기의 거리 및 고도별 변화

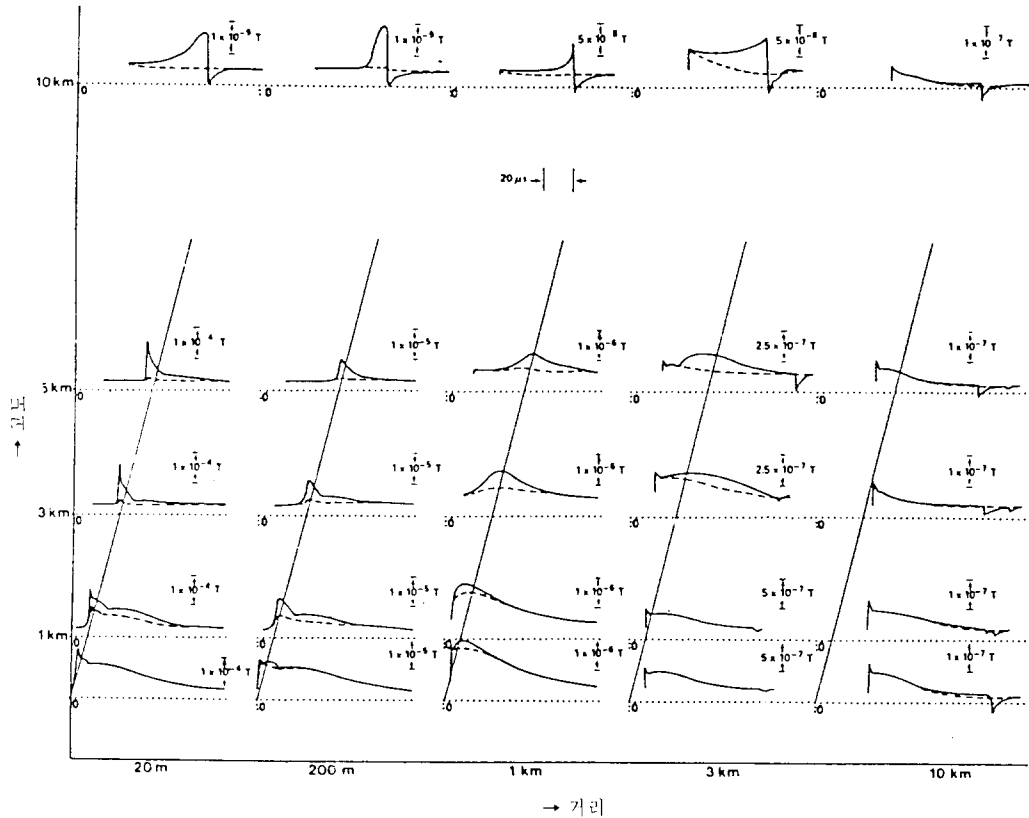


그림 5. 귀환 낙뢰에 의해 방사된 자계의 거리 및 고도별 변화

이다. 귀환낙뢰의 전류는 다음과 같은 세 성분의 합으로 표시된다. 균일전류 (uniform current)는 선구낙뢰에 의해 생긴 일정한 크기의 성분이며, 절연과파 펄스전류 (breakdown pulse current)는 귀환낙뢰가 상승하면서 전면의 공기를 절연시켜 순간적인 방전으로 발생하는 성분으로 일정한 크기와 파형을 갖으며 상승하고, 코로나 전류 (corona current)는 귀환낙뢰의 선두부분이 통과한 배후경로에서 코로나 방전으로 생기는 성분이다. 실제 각종 귀환낙뢰로부터 복사된 전자파의 측정자료를 이용하여 귀환낙뢰가 시작되는 지상에서의 전류파형을 재구성한 대표적인 결과가 그림3[8]이다. 그림3과 같은 파형을 갖는 귀환전류로부터 복사되는 전자파를 지상에서의 거리와 고도별로 계산한 결과는 그림4와 5[8]와 같다. 그림4는 전계의 파형과 크기를 보여주고, 그림5는 자속 밀도를 보여준다. 그림4와 5에서 점선은 그림 2와3의 모형을 쓰지않고 Master 등 [9]에 의해 수정된 모형으로부터 계산한 결과이다. 따라서 낙뢰가 생기는 지점에서 부터 1km정도 떨어진 지상에서의 전계강도는 약 500V/m 정도이고, 자속밀도는 약  $10^6 T$  (tesla) 정도로 볼 수 있다.

그러나 낙뢰가 항상 존재하는 것도 아니며, 낙뢰가 발생하더라도 지역특성에 따라 통신선로 및 장비에 미치는 영향이 다르다. 일반적으로 낙뢰의 영향을 다룰 경우 주로 다음과 같은 세가지 변수가 중요하다.

- N = 연간 1평방 km당 낙뢰수 [ $km^{-2} yr^{-1}$ ]
- R = 대지의 고유저항 (resistivity) [ $\Omega m$ ]
- S = 주변의 구조물, 전력선, 수도관 및 다른 통신선로 등에 의한 차폐 (shielding) 정도 [dB]

먼저 세계각국에서 수년간 측정된 낙뢰빈도에 관한 자료를 표 1 [10]에 보였다. 표 1에서 알 수 있듯이 연간 평방 km당 낙뢰빈도 N은 지역에 따라 크게 다르지만 평균적으로 보면 N = 35 정도로 간주된다. 다음 대지의 고유저항 R은 대지의 수분함유량과 토질에 따라 크게 다른데, 표 2는 대표적인 물과 토질에 대한 R값을 보였다[11]. 보통  $R=1000 \Omega m$  이상일 경우 대지의 고유저항이 높다고 하는데, R이 클수록 접지상의 어려움이 많을 뿐 아니라 이러한 대지 위나 지하에 놓인 도선에 유기되는 낙뢰서어지가 커져서 보호대책 마련이 더욱 심각

표 1. 지역에 따른 낙뢰 빈도

국 가	년간천둥 날짜(day)	년 간 낙뢰횟수	반 경 (km)	빈 도 (km <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	비 고
호 주	5-107	3-5	30	0.2-3.9	
카 나 다	26	5	19	1	최저치
중앙아프리카	79	6	30	3.4	
핀 랜 드	17	14	17	1.5	
노 르 웨 이	8	4	12.5	0.4	
싱 가 포 르	171	-	30	12	
남 아 프 리 카	73	7	36	6.5	
스 웨 덴	13	5	12.5	0.9	
태 국	100	-	-	9	근사치
영 국	17	11	4	0.6	
미 국	30	2	16	3.3	
독 일	23-35	3	17.5	3-5.5	

표 2. 각종 지상 매질의 저항도

상 태	종 류	저항도(Ω m)
물	바다	0.1-0.5
	지하수	10-150
	호수 또는 하천	100-400
	빗물	800-1,300
	일반정류수	1,000-4,000
	순수정류수	250,000
토 질	흙	25-70
	모래흙	40-300
	늪지대 또는 농경지 흙	50-250
	모 래	1,000-3,000
	퇴 석	1,000-10,000

해 진다. 마지막으로 주변 구조물등에 의한 차폐 정도를 나타내는 S는 인위적으로 파괴구조물을 만들므로써 크게 할 수 있지만, 실제 상황에서 복잡한 주변 구조물의 파괴효과를 충분히 계산하기는 매우 어렵다.

### Ⅲ. 낙뢰에 의한 EMI-전자교환기 경우

앞 장에서 기술한 바와 같이 낙뢰시 여기서 방사되는 전자파 펄스는 주변의 전기 및 통신선로에 입사하여 선로에 낙뢰 서어지가 유기기되어 흐르게 한다. 이러한 유도 전류들이 선로에 연결된 단말기에 인입되면, 단말기의 오동작 및 손상 까지도 일으킬 수도 있다. 이러한 문제

는 그림 6 과 같은 전송선 구조로 나타내어 해석한다. 이 때 e(t)가 낙뢰로 부터 방사되는 전계를 의미한다.

실제 낙뢰 및 각종 전기설비의 결합으로부터 야기되는 전화가입자 선로 및 교환기의 오동작 및 손상으로 부터 이들을 보호하기 위한 여러가지 방안에 대해 국제기구인 ITU 산하 CCITT 의 연구위원회 SG V에서 다루고 있으며, 연구된 결과를 CCITT K 계열의 권고안으로 발표하고 있다 [12]. 우리나라에서도 이 권고안을 많이 받아들이고 있다. 그림 7은 전자교환기 보호회로의 구성예이다. 여기서 Z<sub>v</sub>와 Z<sub>g</sub>가 낙뢰서어지로부터 교환기 단말부하 Z<sub>l</sub>를 보호하기 위한 비선형 소자이다.

그런데 낙뢰로 부터 교환기측을 보호하기 위하여 각종 보호소자 [13-17] 들을 크기와 비용에 상관없이 성능이 우수한 소자 들만 선택하여 사용하면 충분한 보호기능을 갖는 보호회로를 만들 수 있다. 그러나 낙뢰가 항상 존재하는 것도 아니고, 교환기에 인입되는 수많은 가입자 선로마다 모두 보호회로를 부착시켜야 함으로 보호소자의 선정에 있어서 보호기술이라는 면과 함께 경제적인 면도 고려해야 만 한다. 따라서 우리나라에서 사용하는 교환기중, 전화가입자선로망 특성, 낙뢰빈도 및 강도 등을 충분히 고려하면서 경제적인 면에서도 효과적인 보호소자를 선정할 수 있는 판단기준이 필요하다. 이러한 판단기준을 만들기 위해서는 다양한 낙뢰현상, 전화가입자선로의 구조, 보호소자의 특성등에 대해 실제 교환기측 입력임피던스에 걸리는 낙뢰서어지의 영향에 관한 충분한 자료가 필요하다.

그러나 낙뢰로 부터 전화가입자선로 및 교환기를 보호하기 위한 방안을 연구하는 데에는 다음과 같은 근본적

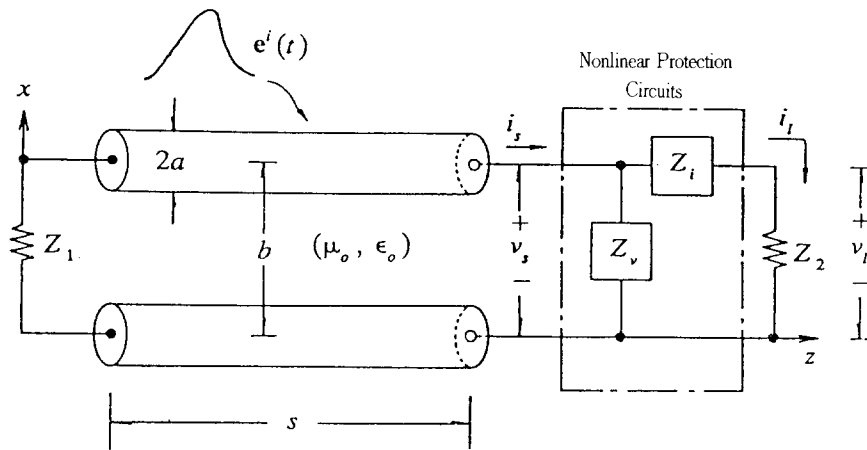
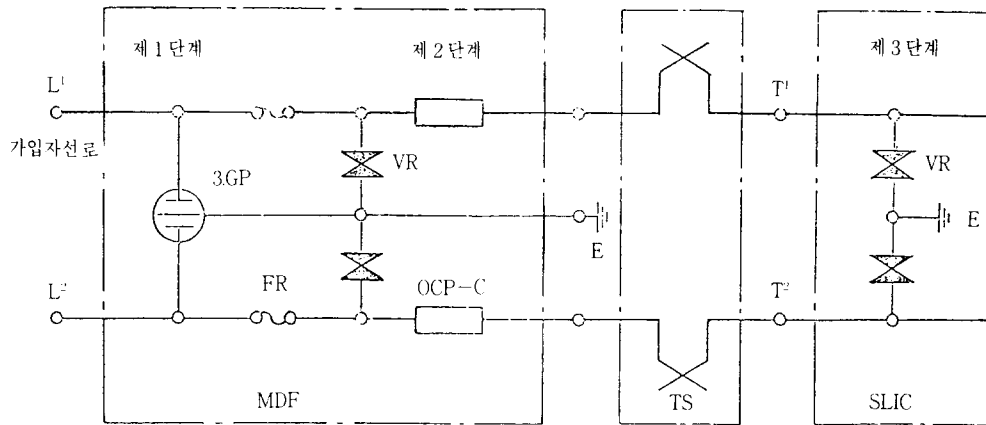


그림 6. 두 도선으로 구성된 통신선로에 의한 유도 서어지 계산시의 등가모형



(E: 접지, 3GP: 3극 가스튜브방전관, VR: 가변저항, OCP-C: 과전류보호소자, TS: 검사 스프링)

그림 7. 전자교환기 보호회로의 구성예

인 어려움들이 있다. 첫째로 앞 장에서 이미 기술한 바와 같이 낙뢰발생이 다양한 물리적인 상황 하에서 일어나므로 일정한 모델을 취하기 어렵다. 특히 낙뢰의 빈도, 세기, 지속시간등은 지역과 시간에 따라 다른데, 국내에서는 낙뢰에 대한 장기간 정말 측정된 자료가 축적되어 있지 않아서 우리나라에 맞는 적절한 낙뢰모형을 취하기 어렵다. 둘째로 낙뢰가 직접 또는 간접적으로 전화가입자 선로로 인입 또는 유도될 경우 주변 구조물등에 따라 그영향이 매우 크게 변한다. 따라서 이러한 주변환경을 충분히 고려한 전송선 모델을 취하기가 어렵다.

셋째로, 비선형 임피던스 특성을 갖는 보호소자를 주배전반에 장치하였을 경우 낙뢰로부터 전화가입자 선로에 유기되는 낙뢰 서어지를 계산할 수 있는 해석방법이 없다는 점이다. 즉 기존의 해석 방법은 보호소자가 없을 경우 부하측에 걸리는 낙뢰서어지를 계산하는 전자기적인 문제 [18-20] 와 이때 구한낙뢰서어지를 전원으로 두고 비선형 임피던스 특성을 갖는 보호소자를 거쳐 실제 교환기 단말측 부하에 걸리는 과전압과 과전류를 계산하는 비선형 회로 문제로 나누어서 푼다. 그러나 실제로는 전화가입자 선로의 전자파 유도 문제와 낙뢰서어지를 억제하기 위한 보호회로문제는 서로 분리해서 다룰

수 없다. 왜냐하면 전송선 이론에 의하면 전화가입자 선로에 유기되는 낙뢰서어지는 선로구조 뿐만 아니라 부하인 교환기측 입력임피던스에 따라 달라지게 되는데, 보호소자가 달려 있을 경우 교환기측 입력임피던스는 인입되는 낙뢰서어지의 크기에 따라 비선형으로 변하기 때문이다.

#### IV. 결 론

낙뢰시 발생하는 전자파 펄스의 입사 범위가 광범위하고, 이로부터 각종 통신선로에 유기되는 서어지의 크기 또한 선로끝의 단말기에 치명적인 손상을 입힐 수도 있다. 따라서 장차 닥쳐올 정보화시대의 핵심기동인 정보전송 선로에 유기되는 낙뢰서어지를 충분히 억제할 수 있는 방안을 확립할 필요성이 있다. 이를 위해서는 우리나라에서도 실제 낙뢰에 관한 충분한 측정자료를 축적하여, 우리나라 실정에 적합한 낙뢰 모형을 수립하도록 해야 할 것이다.

#### 참고문헌

- (1) D. W. Bodle and P.A. Gresh, "Lightning surges in paired telephone cable facilities," *Bell. Syst. Tech. J.*, Vol.40, pp.547 - 576, 1961
- (2) E. Bennison, A.J. Ghazi, and P. Ferland, "Lightning surges in open wire, coaxial, and paired cables," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, Vol. COM - 21, pp.1136 - 1142, 1973
- (3) J. D. Nordgard and C.L. Chen, "Lightning - induced transients on buried shielded transmission lines," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. EMC - 21, pp.171 - 181, 1979
- (4) J. Dutt, "Overvoltages on subscriber lines," *Elec. Commun.*, Vol. 54, pp.115 - 119, 1979
- (5) H. Koga and T. Motomitsu, "Lightning - induced surges in paired telephone subscriber cable in Japan," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. EMC - 27, pp.152 - 161, 1985
- (6) M. A. Uman, *The Lightning Discharge*, Academic Press: Orland, FL, 1987
- (7) M. A. Uman, *Lightning*, McGraw - Hill: New York, 1969
- (8) Y. T. Lin, M.A. Uman, and R.B. Standler, "Lightning return stroke model," *J. Geophys. Res.*, Vol. 85, pp.1575 - 1583, 1980
- (9) M. T. Master, M.A. Uman, Y.T. Lin, and R.B. Standler, "Calculation of lightning return stroke electric and magnetic fields above ground," *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, pp.12127 - 12132, 1981
- (10) S. A. Prentice, *Frequency of Lightning Discharge, in Lightning*, R.H. Golde, ed., Vol. 1, Ch. 14, Academic Press: New York, 1977
- (11) E. K. Saraoja, *Lightning Earths, in Lightning*, R. H. Golde, ed., Vol. 2, Ch.18, Academic Press: New York, 1977
- (12) CCITT Blue Book, Vol. IX, *Protection Against Interference*, ITU: Geneva, 1988
- (13) CCITT Manual, *The Protection of Telecommunication Lines and Equipment against Lightning Discharge*, ITU: Geneva, 1978
- (14) V. W. Vodicka, "Voltage transients tamed by spark - gap arresters," *Electronics*, Vol.39, pp.109 - 113, 1966
- (15) C. B. Barksdale, "New gas tube protector technique for circuits," *Telephony*, Vol. 171, pp. 21 - 28, 1970
- (16) R. H. Golde, *Lightning Protection*, Etward Arnold: London, 1973
- (17) F. Deguchi and H. Yamada, "Lightning surge protection design for subscriber line interface circuits in D70 digital switching system," *Review of the ECL*, NTT, Japan, Vol. 33, pp.332 - 338, 1985
- (18) C. D. Taylor, R. S. Satterwhite, and C. W. Harrison, Jr., "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, 1965
- (19) A. A. Smith, Jr., *Coupling of External Electromagnetic Fields to Transmission Lines*, Wiley: New York, 1977
- (20) H. J. Price and A. K. Agrawal, "The response of a transmission line illuminated by lightning - induced electromagnetic fields," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. EMC - 22, pp.150 - 156, 1980