
필드 밀을 이용한 대지전장 측정장치 개발

송재용* · 김명진* · 길경석* · 천상규** · 송동영***

Development of Measuring Device for Electric Field on the Ground Level Using a Field Mill

Jae-Yong Song* · Myung-Jin Kim* · Gyung-Suk Kil* · Dong Young Song** · Sang-Gyu Cheon***

요약

본 논문은 뇌운의 접근에 따라 변화하는 대지전장 측정을 위하여 필드 밀을 이용한 대지전장 측정장치의 개발에 관하여 기술하였다. 필드 밀은 두 개의 절연된 전극으로 구성되며, 회전전극과 고정전극이 있다.

고정도 필드 밀 개발을 위하여 회전형 필드 밀의 원리 및 설계기법에 관하여 연구하였으며, 교정실험장치로 원통형 가드전극계 및 평행평판 전극계의 두 가지 방법을 이용하여 주파수 대역 및 응답감도 특성을 조사하였다.

교정 실험결과로부터 주파수 대역 및 응답감도는 DC ~ 200 [Hz], 0.267 [mV/V/m]로 얻어졌으며, 73 [V/m] ~ 18.7 [kV/m] 범위의 대지전장 변화의 측정이 가능하다.

ABSTRACT

This paper describes a rotation-type field mill to measure the electric field intensity caused by thunderclouds on the ground level. The field mill developed is consisted of two isolated electrode vanes, a grounded stator and a rotor.

To develop a high sensitive field mill, the principles and design rules of a rotation-type field mill are studied. Also, two types of calibration system, such as a cylindrical guard electrodes and a parallel-plate electrodes, are proposed to determine the sensitivity and frequency bandwidth of the field mill.

From the calibration experiment, the frequency bandwidth and the sensitivity of the field mill are DC ~ 200 [Hz] and 0.267 [mV/V/m], respectively. Therefore, it can measure the electric field intensity from 73 [V/m] to 18.7 [kV/m].

1. 서론

산업구조의 고도화로 전력수요가 급증함에 따라 전력계통에서 송전효율의 극대화를 위한 전력설비의 대용량화와 초고압화가 진행되고 있다. 전력계통에서의 일시적인 사고가 발생하면 유·무형의 막대한 경제적 손실을 초래하므로 전력

* 한국해양대학교 전기전자공학부

** (주)나눔스부설 기술연구소

*** 포항 1대학 자동차학과

공급의 고신뢰성이 요구되고 있는 실정이다. 특히, 전력계통에서 절연과파 및 고장을 일으키는 원인으로서는 자연현상의 낙뢰에 의한 것이 대부분이다.

낙뢰는 뇌운에 의해 발생하는데, 뇌운의 접근에 따라 급격한 대지전장의 변화가 발생하므로 대지전장의 측정에 의해 낙뢰를 포함한 뇌운의 접근과 낙뢰 경보에 대한 대책 마련이 가능하다. 그러므로 낙뢰 발생 전후의 전장 측정은 뇌방전에 관한 연구뿐만 아니라 전력계통의 신뢰성 확보에도 대단히 중요하다[1],[2].

전장을 측정하는 방법으로는 코로나침단 전류를 이용한 방법, 평판형 안테나를 이용하는 방법 및 필드 밀을 이용하는 방법 등이 있다. 대지전장의 변화는 주로 수 [Hz]정도로 대단히 낮은 주파수 대역을 가지므로 상술한 세 가지 방법 중 필드 밀을 이용하는 방법이 가장 효과적이다.

따라서 본 연구에서는 회전형 필드 밀의 설계 방법을 이론적으로 검토하고, 필드 밀을 이용한 대지전장 측정장치를 설계·제작하였다.

제안된 대지전장 측정장치는 원통형 가드전극계 및 평행평판 전극계를 사용하여 고정실험을 수행하였으며[3], 실험결과로부터 대지전장 측정에 충분한 감도와 주파수 대역을 가짐을 확인하였다.

II. 회전형 필드 밀의 원리

회전형 필드 밀을 이용한 전장 측정 장치는 정전계는 물론 아주 느린 전장 변화를 측정할 수 있고 감도가 우수하기 때문에 지상에서의 대지전장뿐만 아니라, 기구나 비행선상에서의 대기전장 측정이 가능하다[4].

본 연구에서는 지표면에서의 대지전장을 측정하기 위하여 회전형 필드 밀을 적용하였으며, 그림 1에 기하학적 구조를 나타내었다.

필드 밀은 두 개의 부채꼴 모양의 날개를 가진 회전전극과 고정전극으로 구성되고, 두 전극간은 서로 절연상태로 되어 있다. 전장 검출의 원리로는 회전전극이 중심축을 따라 수평으로 회전하면서 고정전극에 의해 노출과 차폐를 반복하는데, 그림 (a)와 같이 회전전극이 전장에 완전히 노출되는 순간에는 전극이 접지되고, 이후 90° 회전하여 회전전극이 완전히 차폐되어질

때 증폭기에 연결되어 전장 신호가 검출된다. 이러한 동작원리를 그림으로 도해하면 그림 2와 같다.

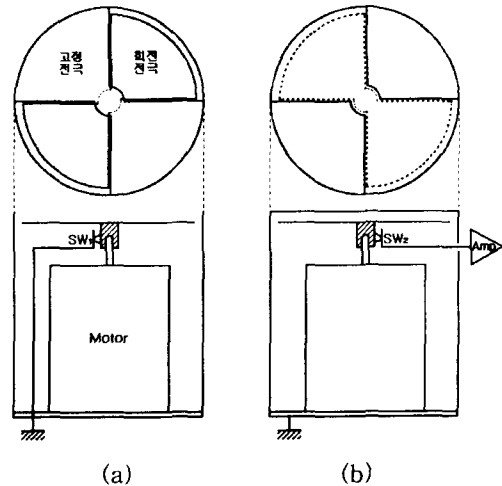


그림 1 필드 밀의 구조
Fig. 1 Construction of the Field Mill

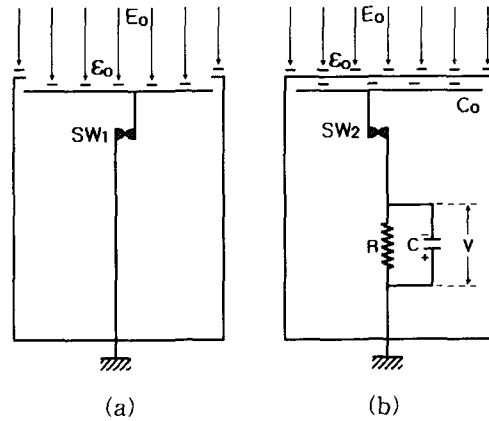


그림 2 필드 밀의 동작원리
Fig. 2 Principle of the Field Mill

그림 2에서 회전전극이 전장에 대해 노출되는 면적을 S 라 하면, 회전전극이 완전히 외부전장에 노출되어질 때, 전극 표면에 대전되는 전하 Q_0 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Q_0 = \epsilon_0 E_0 S [C] \quad (1)$$

여기서, ϵ_0 는 진공중(공기중) 유전율, E_0 는 회전전극 표면에 입사되는 전장의 세기이다.

접지면과 연결이 끊긴 후 대전된 전하 Q_0 는 회전전극 표면에 포획되고, 회전전극의 이동에 의해 완전히 차폐된 상태에서는 C_0 (회전전극과 고정전극 사이의 정전용량)에 운반됨과 동시에 스위치 SW_2 에 의해 증폭기의 입력에 연결된다. 그림 3은 C_0 에 충전된 전하가 증폭기로 전달되는 과정을 나타낸 것으로서, R 과 C 는 각각 필드 밀에서 증폭기로의 신호를 전송하는 동축케이블의 누설저항과 정전용량이다.

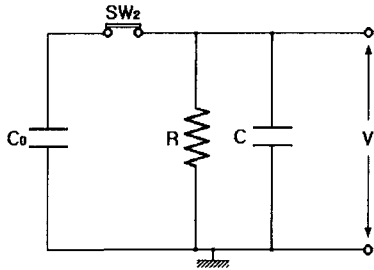


그림 3 포획된 전하의 전달과정
Fig. 3 Transfer process of the trapped charge

이 때 증폭기의 입력전위 V_0 는 다음과 같이 주어진다.

$$V_0 = \frac{Q_0}{C_0 + C} = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} \quad [V] \quad (2)$$

연속적인 동작으로 회전전극이 90° 회전하게 되면 SW_2 가 열리고, 증폭기의 입력 신호는 식 (3)과 같이 감소하게 된다.

$$V_1 = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} e^{-t_1/\tau} \quad [V] \quad (3)$$

여기서, $\tau = RC$ 이고, t_1 은 C 에 첫 번째 충전된 후 감쇠되는 시간이다.

회전전극은 다시 외부전장에 노출되고 대전된 전하를 포획한 다음 증폭기의 입력 회로에 연결되어지는데, 이 때 콘덴서 C 에서의 충전하량은 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon_0 E_0 S + CV_1 = \epsilon_0 E_0 S + \frac{C\epsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} e^{-\frac{T}{\tau}} \quad [C] \quad (4)$$

여기서, T 는 사용된 motor의 1/2회전 주기이다. SW_2 가 열려 있을 때, C 에서의 전하량은 이 값의 $C/(C_0 + C)$ 배로 주어진다. 따라서, 두 번째 충전한 후 증폭기의 입력전위는

$$V_2 = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} \left(1 + \frac{C}{C_0 + C} e^{-\frac{T}{\tau}}\right) e^{-\frac{2T}{\tau}} \quad [V] \quad (5)$$

가 되므로 n 번째 충전 후의 전위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_n = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} \left(\sum_{n=1}^n r^{n-1}\right) e^{-nT/\tau} \quad [V] \quad (6)$$

여기서

$$r \equiv \frac{C}{C_0 + C} e^{-T/\tau} \quad (7)$$

$|r| < 1$ 의 관계는 항상 성립하므로 식 (6)의 급수는 다음과 같이 수렴되어진다.

$$\sum_{n=1}^n r^{n-1} = \frac{1 - r^n}{1 - r} \quad (8)$$

C 와 R 의 값을 $\tau \gg T$ 가 되도록 선택한다면, $e^{-T/\tau} \approx 1$ 의 관계가 성립하므로, $n \rightarrow \infty$ 로 될 때

$$V_\infty = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0} e^{-t_n/\tau} \quad [V] \quad (9)$$

와 같이 되고, 주기 T 동안 지수항은 1이 되기 때문에, 증폭기에 걸리는 입력 전압은 결국 다음과 같이 주어진다.

$$V = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0} \quad [V] \quad (10)$$

이상의 결과와 같이 필드 밀을 통해 얻어진 신호는 회전전극의 총면적에 비례하고 정전용량 C_0 에 반비례함을 알 수 있다.

III. 대지전장측정장치의 구성

필드 밀을 이용한 전장 측정은 일정한 면적의 도체 표면에 유기되는 전하량을 측정하여 입사되는 전장을 측정하는 방법의 일종으로써, 인위적으로 입사 전장을 변화시킨다는 주요한 특징을 갖고 있다. 입사되는 전장을 변화시키기 위해서는 도체 표면을 노출/차폐시키기 위한 기계적인 장치가 필요하기 때문에 입력 전압이 DC 5.6[V]인 1,800[rpm]의 직류 motor를 이용하여 그림 4와 같은 필드 밀을 제작하였다. 그림 4에 필드 밀의 개략적인 구성을 나타내었다. 회전전극과 고정전극은 도전성과 가공성이 우수한 알루미늄판을 사용하였으며, 외형적인 사양은 표 1과 같다.

표 1 필드 밀의 사양
Table 1 Specifications of the field mill

구 분	기호	치 수 [mm]
외 함 직경	a	110
외 함 높이	b	190
회전전극 직경(외부)	c	94
" (내부)	d	24
고정전극 직경(외부)	e	92
" (내부)	f	25
전 극 간 겹	g	3.5
전 극 두 계	t	1.5

여기서 τ 는 신호입력회로의 시정수로서 $\tau \gg T$ 의 관계가 성립되고, 필드 밀은 고입력 임피던스를 가지므로 임피던스 변환기가 필요로 하게 된다. 필드 밀로부터 얻어진 신호는 동축케이블(RG-58)을 통해 임피던스 변환기로 전송되며, 증폭기, A/D 변환기를 거쳐 디지털 표시장치에 측정된 값을 표시한다. 필드 밀을 이용한 대지전장 측정장치는 그림 5와 같이 구성되며, 외부의 불필요한 전자파 잡음과 오차를 최소화하기 위하여 전극부를 제외한 모든 부분은 차폐 구조로 설계하였다.

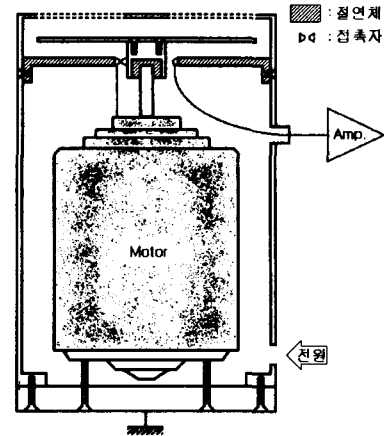


그림 4 필드 밀을 이용한 전장 측정장치
Fig. 4 Electric field measuring device utilizing the field mill

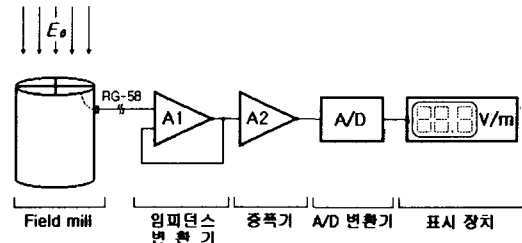


그림 5 대지전장 측정장치의 구성
Fig. 5 Configuration of the electric field measuring device

IV. 교정실험방법

교정실험장치는 교정용 전극계와 외부 노이즈에 의한 전장의 왜곡이 없는 평등전장을 얻을 수 있도록 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계로 구성하여 특성을 비교하였다[5]. 시제작한 뇌경보장치의 주파수 대역과 응답감도를 측정하기 위하여 최대출력전압이 15[V]인 합수발생기(FG-2002C, LG)와 직류고전압 발생장치(MHV12, 0~1.5[kV], Bellnix)를 사용하였으며, 본 연구에 사용된 교정실험계의 개략도를 그림 6에 나타내었다.

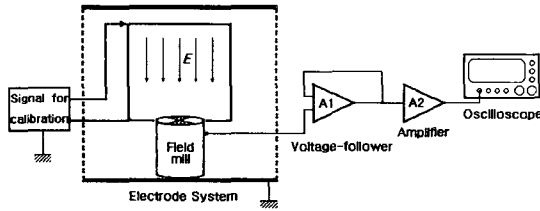


그림 6 교정실험장치의 개략도
Fig. 6 Schematic diagram of the experimental apparatus for calibration

V. 결과 및 고찰

대지전장 측정장치의 주파수 대역은 원통형 가드전극계의 교정용 전극에 인가되는 전압을 15 [V]로 유지하여 회전형 필드 밀의 감지전극 표면에 형성되는 전장의 세기가 60 [V/m]가 되도록 설정하고, 주파수를 가변하면서 이에 대한 대지전장 측정장치의 출력전압을 비교하여 측정하였다.

그림 7은 대지전장 측정장치의 주파수 응답특성을 나타낸 것으로 -3 [dB]의 상한 주파수는 약 200 [Hz]로 평가되었다. 따라서 본 측정장치는 35 [Hz] 이하의 주파수를 갖는 전장의 입사에 대해 감쇠 없는 정확한 값을 나타내지만 60 [Hz]의 교류전장에서는 6 [%] 감소한 값을 나타낼 것이다.

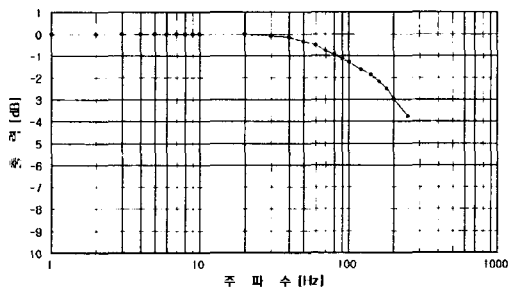


그림 7 대지전장 측정장치의 주파수 응답 특성
Fig. 7 Frequency response characteristics of the electric field measuring device

그림 8은 대지전장 측정장치의 응답특성으로, 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계에 직류전압을 인가하여 형성된 전장의 세기와 측정장치의 출력전압을 나타낸 것이다. 회전형 필드 밀에 입사되는 전장의 세기를 100 [V/m]에서 1[kV/m]까지 변화시켰으며, 이에 대한 대지전장 측정장치의 출력전압은 그림 8과 같이 선형적인 특성을 나타내었다. 300 [V/m] 이하의 전장에서는 두 교정장치에 의한 결과가 약간의 오차를 나타내는데, 이것은 평행평판 전극계의 경우 외부 입사 전장에 영향을 받기 때문이다.

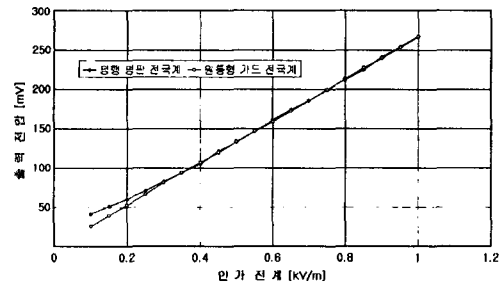


그림 8 입사전계에 따른 측정장치의 응답특성
Fig. 8 Response characteristics of the electric field measuring device to change of the applied electric field

실험결과로부터 본 대지전장 측정장치의 응답감도는 100 [V/m]의 전장입력에서 출력전압이 26.7 [mV]이므로 0.267 [mV/V/m]임을 알 수 있다.

VI. 결론

본 연구에서는 대지전장의 변화를 측정하기 위하여 필드 밀의 원리를 해석하고, 이를 이용한 대지전장 측정장치를 설계·제작하였다. 제작한 대지전장 측정장치의 감도특성을 파악하기 위한 교정장치로 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계의 두 가지 방법을 이용하였다. 실험결과로부터 회전형 필드 밀을 이용한 대지전장 측정장치는 주파수 대역이 DC~200 [Hz]로 평판 안테나로써 측정할 수 없는 정전계 영역의

전장 측정이 가능하였다. 또한, 본 연구에서 제작한 전장 측정장치의 최대감도는 0.267 [mV/V/m]로 인가전장에 비례하는 선형적인 응답을 나타내며, 최소 73 [V/m]에서 최대 18.7 [kV/m]까지의 전장변화를 측정할 수 있다.

송재용(Jae-Yong Song)

1997년 2월 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1999년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
현재 한국해양대학교 전기공학과 박사과정 재학중
신동아전기(주)부설 기술연구소 연구원

[참 고 문 헌]

- [1] J. N. Chubb, "Two New Designs of 'Field mill' type Fieldmeter not Requiring Earthing of Rotating Chopper", IEEE Trans. Ins. Appl., Vol. 26, No. 6, pp. 1178~1181, 1990.
- [2] J. N. Chubb, "The Calibration of Electrostatic Field meters and the Interpretation of their Observations", Electrostatics '87, Inst. Phys. Conf. Series, No. 85, pp. 261~266, 1987.
- [3] "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Field From AC Power Lines", ANSI/IEEE Std. 644., 1987.
- [4] M. A. Uman, E. P. Krider, "A Review of Natural Lightning : Experimental Data and Modeling", IEEE Trans., Vol. EMC-24, No. 2, pp.79~105, 1982.
- [6] 길경석, 송재용, 김일권, "휴대용 극저주파 전장 측정기 개발", 한국센서학회지, Vol. 9, No. 2, pp. 120~126, 2000.

김명진(Jin-Myung Kim)

2000년 2월 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학사)
현재 한국해양대학교 전기공학과 석사과정 재학중

길경석(Gyung-Suk Kil)

1984년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1987년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
현재 한국해양대학교 전기전자공학부 조교수

천상규(Sang-Gyu Cheon)

1999년 2월 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학사)
2001년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
현재 (주)나눅스 기술연구소 연구원

송동영(Dong-Young Song)

1980년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업(공학사)
2001년 2월 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학석사)
1980년~1992년 포항제철근무
현재 포항 1대학 자동차학과 전임강사