

축소 모의된 22.9 kV-Y 배전선로의 유도 전압에 대한 신뢰성 검증

김점식 · 최충석[†]

전주대학교 소방안전공학과

(2015. 3. 27. 접수 / 2015. 5. 21. 수정 / 2015. 6. 2. 채택)

Verification of Reliability by the Induced Voltage of a Downscaled and Simulated 22.9kV-Y Distribution Line

Jeom-Sik Kim · Chung-Seog Choi[†]

Department of Fire Safety Engineering, Jeonju University

(Received March 27, 2015 / Revised May 21, 2015 / Accepted June 2, 2015)

Abstract : The purpose of this paper is to measure the induced voltage of the downscaled and simulated overhead ground wire of a 22.9kV-Y distribution line. This study performed a test of the downscaled and simulated distribution line according to whether it is grounded or not and the value of the ground resistance. In order to verify the reliability of the data measured by the test, the data was analyzed using the Minitab 17 program. It was found that the induced voltage of the downscaled and simulated distribution line is influenced by the value of the ground resistance. It was also found that the ground resistance obtained at a certain point is closely related to whether electric poles are grounded or not. The analysis results of the measured test data with a statistical method showed that the Anderson Darling (AD) was analyzed to be the smallest as 0.188 when the ground resistance of the electric poles had been maintained at 10Ω. In addition, the P value analyzed to be 0.894 which is in the proximity of the theoretical value of 1 and verified the reliability of the test data. It could be seen that the data measured by the downscaled simulation test forms a linear graph. It is thought that if a distribution line is installed in the same manner as the downscaled, simulated distribution line, the mean induced voltage will be reduced and reliability will be increased.

Key Words : reliability, induced voltage, 22.9 kV-Y distribution line, ground wire, grounding, minitab 17

1. 서론

배전선로의 가공지선은 낙뢰 차폐를 위해 사용하는 것으로 특별고압 전력선 상부에 계주(繫柱)형태로 설치하고 있다. 그리고 특별고압 전력선 하부에 특별고압 중성선을 설치하여 불평형 전류 및 고장 전류의 귀로(歸路)로 운영하고 있다¹⁻²⁾. 특별고압 배전선로에 대한 가공지선의 접지는 200 m 이내마다 특별고압 중성선과 공용하여 접지저항 50 Ω 이하로 접지하고 있다. 또한 설치된 전주의 특별고압 중성선과 가공지선을 상호 접속하여 시공함으로써 전기적 병렬 회로가 구성됨으로써 불평형 전류 및 고장 전류의 귀로와 같은 기능을 동시에 수행하게 된다³⁻⁴⁾. 다만, 가공지선의 설치 위치만 다를 뿐 통신선 공가 설비와 함께 전주의 하중을 증가시키고 있는 것도 현실이다. 배전선로에 사용되는 가공

지선의 종류는 임피던스가 큰 아연도강연선(GSWS; Galvanized Steel Wire Stranded)을 사용함으로써 낙뢰뿐 아니라 불평형 전류 및 고장 전류에 의해서도 가공지선에 열이 발생하여 평상시에도 단선 고장의 원인이 되기도 한다⁴⁾.

대한민국의 배전계통과 동일한 형태를 갖고 있는 미국을 비롯한 유럽의 여러 국가에서 배전선로의 가공지선은 낙뢰 차폐 효과가 없는 것으로 보는 측면이 있고, 경제성 역시 미미하다는 이유로 가공지선 설치를 생략하거나 불필요한 시설로 간주하고 있는 실정이다⁵⁾. 대한민국의 현행 배전선로 운영 실태를 살펴보면 22.9 kV-Y 중성선 다중접지 계통에서는 접지개소 또는 접지의 유무 및 접지 저항값의 크기가 낙뢰 차폐에 큰 영향을 미치는 것으로 예측하고 있다. 현행 특별고압 배전선로의 가공지선은 평균 4 경간인 200 m 마다 50 Ω 이하

[†] Corresponding Author : Chung-Seog Choi, Tel : +82-63-220-3119, E-mail : enetek@naver.com
Department of Fire Safety Engineering, Jeonju University, 303, Cheonjam-ro, Wansan-Gu, Jeonju-si 55069, Korea

로 접지하고 있어서 접지된 전주와 비접지된 전주로 구분되고 있다. 그리고 접지 저항값을 50 Ω 이하로 시공하고 있어서 배전선로의 공사비가 많이 소요되는 것이 현실이다.

따라서 본 논문에서는 현행 22.9 kV-Y 배전선로를 축소 모델로 구성하여 접지의 유무와 접지 저항값의 크기에 따른 낙뢰에 대한 유도 전압을 측정하고자 한다. 또한 측정된 데이터의 신뢰성 검증은 미니탭(Minitab 17) 프로그램을 이용하여 분석하며, 향후 배전선로의 안전한 운용 및 효율적 시공을 위한 자료를 확보하는 데 있다.

2. 실험조건 및 방법

본 논문에서는 22.9 kV-Y 배전선로를 1/50 비율로 축소하여 모의 실험 장치를 구성하였다. 그리고 배전선로에 임펄스 장치(Impulse Generator)를 활용하여 규칙적으로 낙뢰를 인가시켜 축소된 모의 배전선로의 유도 전압 특성을 측정하였다^{6,8)}. Table 1은 본 연구에서 적용된 22.9 kV-Y 배전선로의 축소 모의된 배전선로의 제원을 나타낸 것이다. 실험의 신뢰성을 확보하기 위해 모든 설비를 동일한 비율로 축소하여 제작하였다. 즉, 본 실험에서 배전선로는 일정 비율로 축소하고, 적용된 저항값은 동일하게 적용함에 따라 실제 모드와 동일한 조건이라고 단언할 수 없으나 향후 연구 및 실증 등을 위한 지식기반 구축 및 해석기술을 확보하기 위해 실험이 진행되었다. 또한 실험은 대기압 상태에서 온도는 20~24 °C, 습도는 40~60 %로 일정하게 유지시켜 실험의 안정성을 확보하였다.

Table 2는 22.9 kV-Y 배전선로의 축소 모의된 실험 조건을 나타낸다. 접지 저항값은 10 Ω, 50 Ω, 100 Ω를 각각 유지시키고 실험이 진행되었다. 그리고 전주의 접지 및 비접지 등에 따른 실험 조건을 설정하여 유도 전압과 유도 전류를 각각 측정하였다. 접지 개소는 1개소, 2개소 등으로 설정하였고 각각의 합성 저항을 측정하였다.

Table 1. Specification of the downscaled 22.9kV-Y distribution line

Division	Real D/L	Down-scale D/L	Rate
Pole Length	16 m	0.32 m	50:1
Line Span	50 m	1 m	50:1
Lightning Applied Current	2/78 μs	40/150 ns	50:1
Ground Resistance	10/50/100 Ω	10/50/100 Ω	1:1

Table 2. Test conditions of the downscaled 22.9kV-Y distribution line

Ground Resistance	Ground Condition	Ground Points	Total Resistance
10 Ω	Grounding	1 Point(Pole#4)	8.3 Ω
	Non Grounding	2 Points(Pole#2,#6)	4.7 Ω
50 Ω	Grounding	1 Point(Pole#4)	36.8 Ω
	Non Grounding	2 Points(Pole#2,#6)	21.8 Ω
100 Ω	Grounding	1 Point(Pole#4)	56.0 Ω
	Non Grounding	2 Points(Pole#2,#6)	36.4 Ω

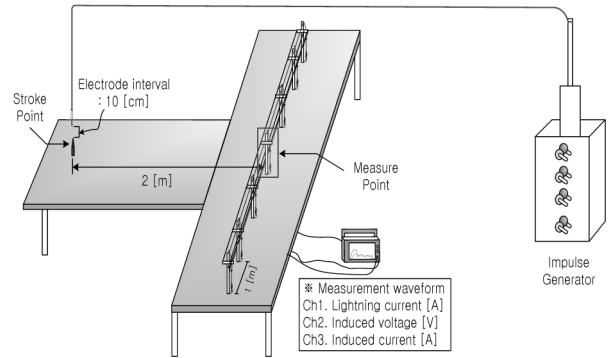
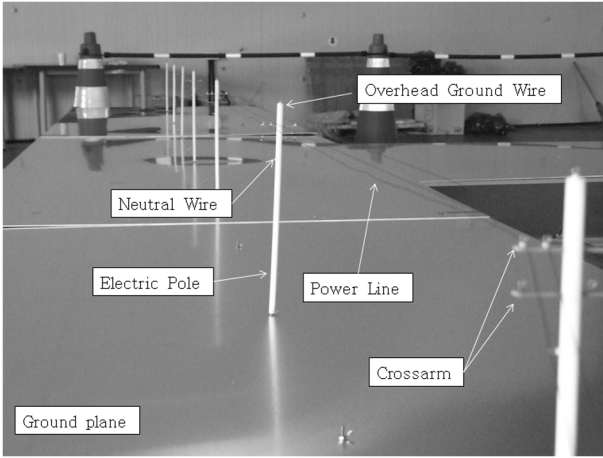


Fig. 1. Schematic diagram of the downscaled 22.9kV-Y distribution line.

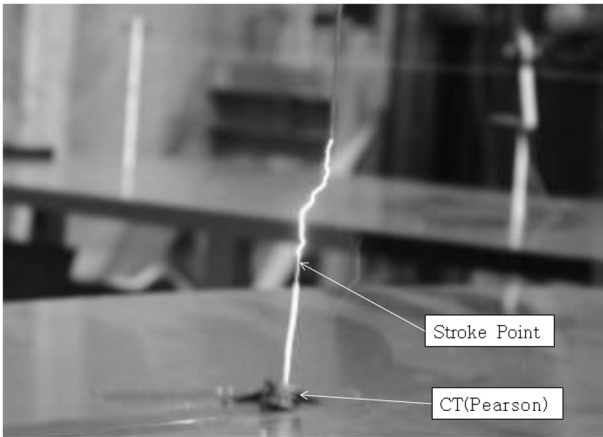
Fig. 1은 축소 모의된 실험 장치의 구성을 나타낸 것이다. 현행 22.9 kV-Y 배전선로를 축소 모의한 실험 장치의 개략도이며, 7개의 전주로 구성하였다. 전주의 간격은 실제 경간 50 m를 1 m로 축소하여 제작한 것이며, 임펄스 장치에 의해 발생된 낙뢰 전류로부터 전자계 영향을 받지 않도록 배전선로와 직각으로 2 m 떨어진 지점의 전극에서 10 cm의 간격으로 접지면(Ground Plane)에 인가되도록 회로를 구성하였다⁹⁾.

실험이 진행될 때 발생된 유도 전압 및 유도 전류의 측정은 오실로스코프(TDS 3014, Tektronix, 100 MHz, 1.25 GS/s)를 이용하였다. 측정지점 전주의 전력선 A 상에서 유도 전압(Tek P5100, Tektronix, DC to 250 MHz 10 ft, 100x, 2,500 Vpk 1.75 ns, 10 MΩ/2.75 pF)과 유도 전류(TCP 202, Tektronix, 15 A peak DC to 50 MHz 50 A MAX pulse)를 측정하였다. 축소 모의된 배전선로의 인가 전류는 CT(2878, Pearson, 0.1 V/A, 400 A MAX 10 Arms, 6 ns)를 사용하여 실시간 측정하였다⁹⁾.

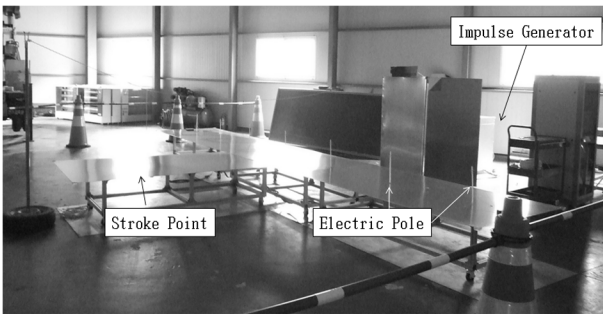
Fig. 2는 축소된 22.9 kV-Y 배전선로의 모의 실험 장치의 실제 사진이다. Fig. 2(a)는 축소 모의된 배전선로를 나타낸 것이며, Fig. 2(b)는 축소된 배전선로에 낙뢰를 인가하는 과정을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 2(c)는 축소된 모의 실험 장치의 전체를 나타낸 실제 사진이다.



(a) downscaled line



(b) struck by lightning



(c) downscaled system

Fig. 2. Photograph of the downscaled 22.9kV-Y distribution line.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 22.9 kV-Y 배전선로의 축소된 모의 실험 장치를 이용하여 접지 저항값 10 Ω, 50 Ω, 100 Ω 과 접지 및 비접지 등에 따른 조건으로 유도 전압 및 유도 전류 등을 각각 측정하였다.

3.1 실험 결과

Table 2의 22.9 kV-Y 배전선로의 축소 모의 실험에 따른 측정 결과 데이터를 Table 3에 나타냈다. 22.9 kV-Y 배전선로의 축소된 모의 실험의 데이터는 각각 30회씩 측정된 평균값이다. 이때 인가 전류는 평균 235 A 정도이며, 접지 저항값 10 Ω, 50 Ω, 100 Ω의 크기와 측정지점 전주의 접지 및 비접지 등의 조건에 따라 측정된 평균값을 나타냈다. 그 결과 측정 지점 전주의 접지된 경우가 비접지된 경우보다 유도 전압이 낮게 측정되었으며, 접지 저항값은 작을수록 유도 전압이 낮게 측정되었다. 접지 저항 10 Ω으로 접지된 전주의 평균 유도 전압은 1,139 V로 가장 낮았고, 100 Ω일 때 비접지된 전주에서 1,393 V로 가장 높게 나타났다. 10 Ω으로 접지된 전주에 비해 50 Ω 및 100 Ω 등으로 접지된 전주의 평균 유도 전압이 높은 것으로 해석되었다. 그리고 50 Ω 및 100 Ω 등으로 접지된 전주의 평균 유도 전압은 각각 1,193 V, 1,210 V로 약 4.7%와 6.2% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 반면, 10 Ω으로 접지된 전주에 비해 10 Ω으로 비접지된 전주의 평균 유도 전압은 약 10.2% 증가하였고, 50 Ω으로 접지된 전주에 비해 50 Ω으로 비접지된 전주는 약 11.5%, 100 Ω으로 접지된 전주에 비해 100 Ω으로 비접지된 전주는 15.1% 증가하여 접지된 전주에 비해 비접지된 전주의 유도 전압이 크게 높아졌다. 축소된 모의 실험 결과 접지 저항값의 크기에 따라 유도 전압은 영향이 있음을 알 수 있었다. 또한 측정지점 전주의 접지 유무에 따라 유도 전압의 크기는 더 밀접한 영향이 있음을 알 수 있었다.

3.2 측정 데이터의 통계 분석

축소된 22.9 kV-Y 배전선로의 유도 전압을 통계적 추론을 통한 신뢰성 검증을 실시하였다. 측정지점 전주의 접지 유무 및 접지 저항값에 따라 Table 4와 같이

Table 3. Measurement results of the downscaled 22.9kV-Y distribution line

Ground Resistance	Ground Condition	Mean Applied Current	Mean Induced Voltage	Mean Induced Current
10 Ω	Grounding	236 A	1,139 V	17.7 A
	Non Grounding	234 A	1,255 V	16.2 A
50 Ω	Grounding	234 A	1,193 V	15.7 A
	Non Grounding	236 A	1,330 V	15.5 A
100 Ω	Grounding	236 A	1,210 V	15.2 A
	Non Grounding	234 A	1,393 V	14.6 A

Table 4. Data classification according to ground resistance and whether the line is grounded or not

Ground Resistance	10/50/100 Ω	10/50/100 Ω
Ground Condition	Grounding	Non Grounding
Measurement	30 Times measured by the applied current	30 Times measured by the applied current
Number of data	30 Each (Total 90)	30 Each (Total 90)

데이터를 분류하여 평균, 표준편차 등의 검정통계량을 분석하고자 한다¹⁰⁾.

축소된 22.9 kV-Y 배전선로의 통계 분석은 미니탭 (Minitab 17) 프로그램을 이용하였다. 이 분석 방법은 경영 과학 통계 분석 도구 및 품질 관리 분야 적용 통계 패키지이다. 그리고 통계 해석에서 적용되는 AD는 Anderson Darling의 약자로서 AD 통계량은 데이터가 특정 분포에 얼마나 적합한가를 나타낸다.

AD 값이 작을수록 해당 분포가 데이터에 더 적합하다는 것을 나타낸다. AD 검정은 경험적 누적 분포 함수를 기초로 한 검정 방법으로 우수한 검정력을 가지며, 분포의 높은 값과 낮은 값 사이에서 정규 분포로부터 이탈을 탐지하는 데 효과적이다. 미니탭 프로그램의 통계 분석 프로그램은 Fig.3의 축소 모의 실험 측정 데이터 통계 분석 순서도에 따라 측정값의 통계적 가설 검정을 위하여 귀무가설을 선택하여 유의 수준에 적합한 신뢰도를 분석하였다¹⁰⁾.

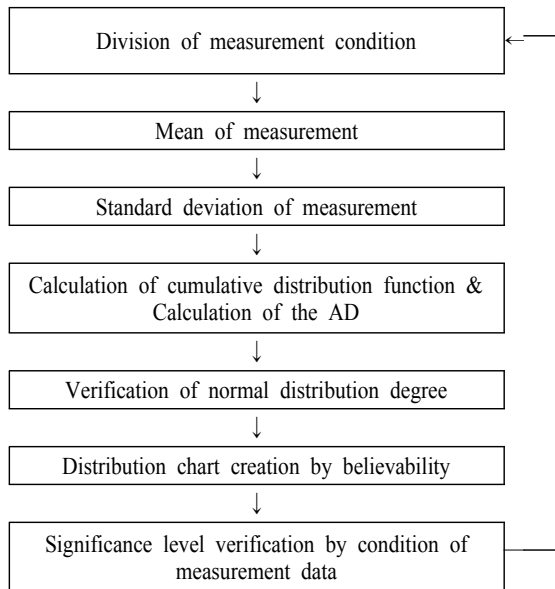


Fig. 3. Sequential diagram of the statistical analysis for the downscaled 22.9kV-Y distribution line.

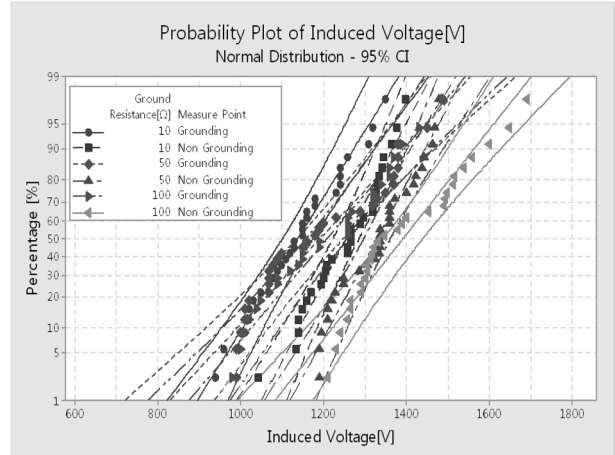


Fig. 4. Analysis of the probability of the induced voltage obtained through the downscaled simulation test.

AD 통계값이 작을수록 혹은 P 값이 클수록 특정 분포를 잘 따르는 것이고, 검정 통계량으로부터 계산된 P 값이 0.05보다 작으면 귀무가설이 기각되므로 일부 데이터는 유의성이 없다고 볼 수 있다. 특히 데이터가 일직선에 가까울수록 정규분포에 가깝다고 할 수 있다. 95% 신뢰구간(CI; Confidence Interval)은 예측된 구간 내에 실제의 모평균이 존재할 가능성이 있는 확률이 95%를 의미하고 있다. 측정값을 30개로 한정하는 것은 실제 모든 측정 가능한 조건에서 측정을 할 수 없는 한계성으로 인하여, 동일한 확률 분포를 갖는 독립 확률 변수 n개의 평균값은 n이 적당히 크다면(n ≥ 30) 정규분포에 가까워진다는 중심극한 정리를 이용한 것이다¹⁰⁾.

Table 5는 축소된 모의 실험 결과에 따른 AD와 P 값을 나타낸 것이다. 특히 10 Ω으로 접지된 전주의 경우 AD가 0.188로 가장 작고, P 값이 0.894로써 일직선에 근사해서 전체 데이터의 대표성을 가진다고 볼 수 있다. 반면 50 Ω으로 접지된 전주와 100 Ω으로 비접지된 전주의 P 값은 각각 0.016 과 0.018 로 0.05 보다 작아 귀무가설을 기각하므로 데이터로서 부적절함을 보여주고 있다. 그러나 10 Ω으로 접지된 전주일 때 데이터로서 평균 유도 전압도 가장 작은 것으로 측정되었고, 신뢰성 역시 높으므로 해석된 배전선로의 안전성은 우수하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 축소 모의 실험 결과 유도 전압에 대한 누적 분포 함수를 나타낸 그래프이다. 각각의 조건에서 비교적 유사한 패턴을 나타내는 것으로 보아 측정의 정밀도는 양호한 것으로 판단된다. 그러나 100 Ω의 비접지 선로의 약 850~1,200 V의 변화가 완만하고 약 1,300 V 근처에서 급격한 변화가 있는 것으로 분석되었다. 또한 50Ω의 접지된 선로가 가장 완만한 변화를 나타낸 것으로 해석되었다.

Table 5. AD and P value of the 22.9kV-Y obtained through the downscaled simulation test

Ground Resistance	Ground Condition	Mean Induced Voltage	Standard Deviation (σ)	AD	P
10 Ω	Grounding	1,139 V	104.2	0.188	0.894
	Non Grounding	1,255 V	155.9	0.455	0.250
50 Ω	Grounding	1,193 V	143.1	0.927	0.016
	Non Grounding	1,330 V	87.4	0.552	0.142
100 Ω	Grounding	1,210 V	89.9	0.459	0.244
	Non Grounding	1,393 V	132.7	0.909	0.018

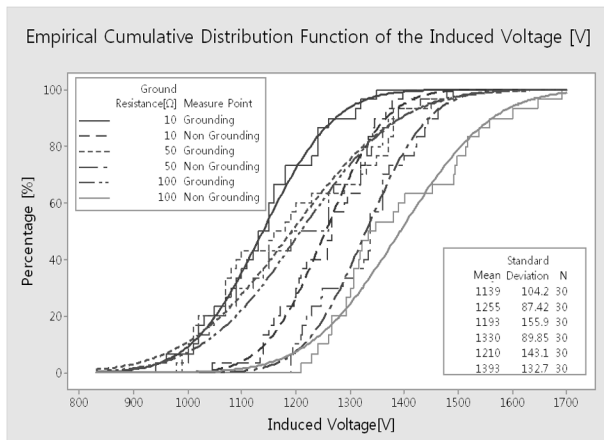


Fig. 5. Cumulative function of the induced voltage obtained through the downscaled simulation test.

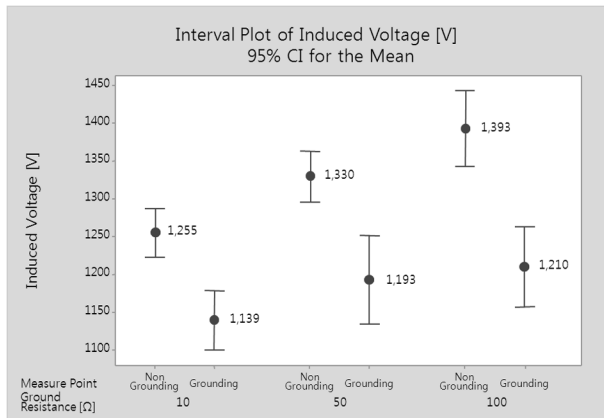


Fig. 6. Variation of the induced voltage of the downscaled and simulated 22.9kV-Y distribution line depending on the ground resistance and whether the line is grounded or not.

Fig. 6은 유도 전압의 측정 결과를 구간 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 측정지점의 접지 유무에 따라 접지된 경우가 비접지된 경우보다 평균 유도 전압이

상대적으로 매우 낮음을 보여주고 있다. 100 Ω 으로 접지된 전주일 때 10 Ω 으로 비접지된 전주보다 평균 유도 전압이 낮았다. 이는 접지 저항값이 크더라도 접지된 경우가 접지 저항값이 작아도 비접지된 경우보다 유도 전압이 더 낮아짐을 알 수 있다.

4. 결론

낙뢰 보호를 위한 가공지선의 접지 저항값 및 접지 유무에 따른 22.9 kV-Y 배전선로의 축소 모의 실험에 대한 신뢰성 통계 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 축소된 모의 실험 결과 접지 저항값이 커질수록 유도 전압도 높아진다. 10 Ω 으로 접지된 전주에 비해 50 Ω 으로 접지된 전주가 4.7% 유도 전압이 높고, 50 Ω 으로 접지된 전주에 비해 100 Ω 으로 접지된 전주일 때 6.2% 유도 전압이 높아졌다.

(2) 측정지점 전주의 접지 및 비접지 등에 따라 유도 전압은 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 10 Ω 으로 접지된 전주에 비해 10 Ω 으로 비접지된 전주는 약 10.2% 유도 전압이 높고, 50 Ω 으로 접지된 전주에 비해 50 Ω 으로 비접지된 전주는 11.5%, 100 Ω 으로 접지된 전주에 비해 100 Ω 으로 비접지된 전주는 15.1% 유도 전압이 높게 나타났다.

(3) 접지 저항값을 100 Ω 에서 10 Ω 으로 낮추는 것보다 접지 저항값이 100 Ω 일 때 비접지된 전주를 접지된 전주로 만들어주는 것이 안전성과 경제성 측면에서 보다 효과적임을 보여주고 있다.

(4) 미니탭 프로그램을 이용하여 측정 데이터를 통계적 분석으로 신뢰성을 평가한 결과 10 Ω 으로 접지된 전주를 하였을 때 AD 값은 0.188, P 값은 0.894로 신뢰성이 가장 높았다.

(5) 결과적으로 22.9 kV-Y 배전선로의 낙뢰 보호를 위해 가공지선을 설치 운영하기 위해서는 매 전주마다 접지를 하고, 가능한 접지 저항값을 작게 유지하는 것이 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 본 실험은 축소 모의된 실험이므로 실증 설비에 적용하는 데는 일부 한계가 있음을 알 수 있다. 따라서 향후 실험은 본 실험의 한계점을 개선하여 실증 모드와 동등 이상의 조건에서 실험 및 검증이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

References

1) KEPCO “Design Criteria of Distribution Line 3500 (Grounding)”, 2014.

- 2) KEPCO “Design Criteria of Distribution Line 3800 (Lightning Protection)”, 2014.
- 3) KEPCO, “Distribution Facilities Construction Industry”, Distribution Line Division, 2003.
- 4) Daewon Electric Corp., “A Feasibility Study on Using the Overhead Ground Wire both as a Neutral Line and Ground Wire”, Power Industry R & D Projects Final Report, 2007.
- 5) IEC 60071-2(Third edition), “Insulation Coordination - Part 2”, p.107, 1996.
- 6) Alexandre Piantini et al 4, “A Scale Model for the Study of the LEMP Response of Complex Power Distribution Networks”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.22, No.1, pp.710-720, 2007.
- 7) C. A. Nucci, “Lightning-Induced Voltages on Distribution Systems: Influence of Ground Resistivity and System Topology”, Journal of Lightning Research, Vol.1, pp.148-157, 2007.
- 8) C.A. Nucci et al, “Lightning-induced Voltages on Overhead Lines”, IEEE Trans. on Electro- magnetic Compatibility, Vol.35, No. 1, pp.75-88, 1993.
- 9) J. S. Kim and C. S. Choi, “Accident Cause Analysis and Prevention Countermeasure of 22.9 kV-Y Extra-high Voltage Distribution Lines”, Proceedings of Spring Conference of KOSOS, pp.154, 2014.
- 10) J. O. Lee, “A study on the Operating Pattern Analysis and Optimized Model Setup of an Access Door to a Smoke Control Zone”, Ph.D Dissertation, The Graduate School of Jeonju University , pp.36-38, pp.94-116. 2014.