

# 지중배전계통 보호설비 적정위치 선정을 위한 실증시험과 해석

論 文

57-5-7

## Field Test and Analysis for Proper Location of Protective Equipment in Underground Distribution System

尹 昶 燮\* · 李 鍾 範†

(Chang-Sub Yun · Jong-Beom Lee)

**Abstract** - This paper describes the method for proper location of protective equipment in underground distribution cable through field test and analysis at testing lines. To prove the reliability for analysis simulated by EMTP/ATPDraw, the testing results obtained by the real test and the analysis for the same test lines were compared each other. The accuracy of analysis was proved by the comparison. Over voltages were measured and analyzed at each point of cable and switches in case of which lightning surge current was applied. The analysing method was applied to real distribution systems to select the proper location of protective equipment. It is evaluated that the location of protective equipment was properly selected.

**Key Words** : Underground Distribution System, EMTP, Cable, Modeling, Field test.

### 1. 서 론

전력계통에서 이상전압에 대한 연구는 주로 가공선로를 대상으로 진행되어 왔다. 그러한 가운데 지중배전계통이 증가하고 있는 추세에 있어 지중배전계통에서 발생하는 과도현상 해석이나 보호방안 등의 연구가 크게 요구되고 있다. 그러나 지중배전계통에서의 이상전압 발생에 대한 분석이나 적절한 보호 기준의 정립이 이루어지지 않아 지중설비가 높은 절연내력을 유지하고 있음에도 불구하고 원인불명의 고장이 빈번하게 발생하고 있다.[1] 또한 지중배전계통의 고장은 중요 고객의 정전과 복구시간의 장시간 소요 등 고장에 따른 영향이 매우 크다.

현재 국내 지중배전계통에서의 보호기준은 체계적인 해석을 통한 것이기 보다는 단편적인 검토에 의한 절연강도를 선정한 예가 대부분이고 지중배전계통의 보호는 가공배전계통과 다름에도 불구하고 입상주에 피뢰기를 설치하는 것이 전부이다.[2]-[5] 이러한 방법은 지중배전계통에서 발생하는 이상전압을 효과적으로 억제할 수 없으며, 이러한 영향은 고장 발생의 빈도가 증가되는 결과로 나타나고 있다. 따라서 국내 지중배전계통에 대한 과학적인 해석 기법을 정립하고 적절한 보호기준을 정하여 지중배전계통에 대한 합리적인 절연협조 방안을 제시하여 지중배전계통의 신뢰도를 향상시킬 필요가 있다.[6]

본 논문에서는 지중배전계통과 유사한 모의 선로를 구축하여 각종 뇌임펄스에 의한 과도현상을 시험하여 계측된 데

이터를 EMTP 시뮬레이션의 결과와 비교하여 EMTP 시뮬레이션에 사용된 해석모델을 검증하였다. 그리고 검증된 해석 모델을 이용하여 지중배전계통을 보호하는 설비의 적정 위치를 선정하기 위하여 실제계에 적용하였다. 그 결과를 통해 지중배전계통에 대한 과도해석에 대한 모델링 기법의 정확성을 향상시켜 보호설비의 적정위치 선정방법을 제안하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 실증시험을 통한 과도현상해석과 실험 조건

뇌임펄스 전류시험에서는 지중배전선로의 피뢰기설치에 따라 발생하는 과전압을 해석하기 위해 충격전류 발생기에 배전급 피뢰기를 연결하고 케이블선로와 가공, 케이블 혼합선로를 구성하여 모의시험을 실시하였다. 또한 실측한 데이터를 디지털 시뮬레이션과 비교분석하기 위해 EMTP/ATP를 사용해 피뢰기를 시변저항으로 모델링하고 피뢰기의 특성은 실측된 피뢰기의 V-I 특성을 사용하였다.

뇌임펄스 전류 시험을 위해 크게 9개의 Case로 나누어 분석하였으며, Case마다 시험장의 뇌임펄스 기기에서 인가한 8/20 $\mu$ s, 5kA의 전류 임펄스를 동일하게 적용하였다. 서지 해석을 위한 실증시험과 비교하기 위해 지중배전계통의 선로는 Bergeron모델을 사용하여 500kHz의 주파수영역에서 선로정수를 계산하였다. 이와 같이 EMTP모델링에 적용된 파라미터는 시험장설비의 실제조건과 동일하게 적용하였다. 실증시험에 사용된 케이블은 CNCV 60mm와 326mm 두가지 종류이며 변압기 500kVA 2대, 300kVA 1대가 사용되었다. 또한 시험을 구성하는 케이블 접속에는 그림 1과 같이 선로 절체를 위한 개폐기 4대가 사용되었으며 시험동인출선에서 시험장의 SW<sub>1</sub>까지 선로접속을 위해 편조선, ACSR 가공선,

† 교신저자, 圓光大 電氣電子情報工學部 教授 · 工博

E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr

\* 學生會員 : 圓光大 大學院 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2007年 11月 15日

最終完了 : 2008年 3月 17日

CNCV 지중케이블, 강관주를 사용하여 접속하였다.[7] 이러한 시험설비 파라미터를 통해 모의된 케이스 선정기준을 요약하면 표 1과 같다.

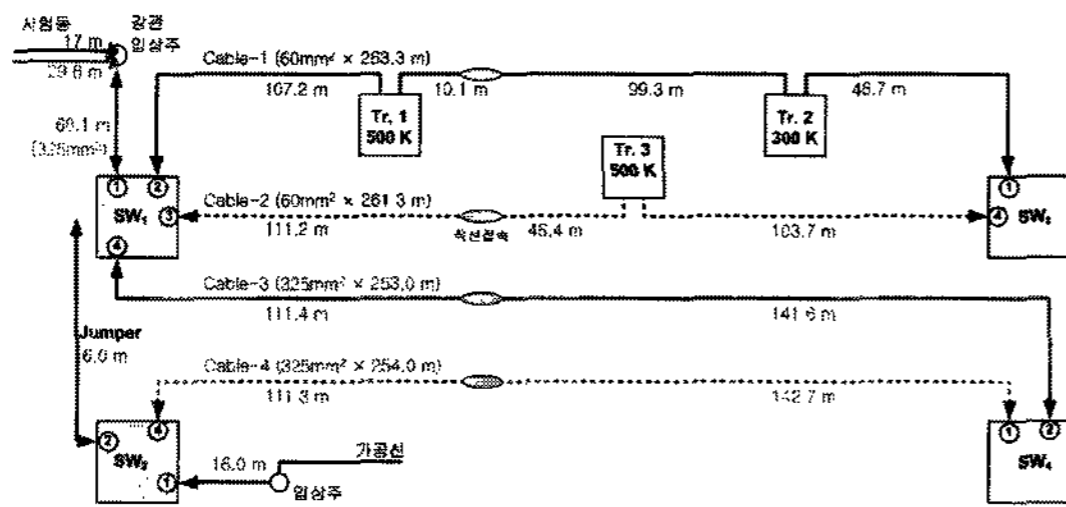


그림 1 지중배전계통 실측시험 선로  
Fig. 1 Underground distribution system for field test

2.2 뇌임펄스 전류시험

뇌임펄스 전류시험은 뇌임펄스 장치에 배전급 피뢰기를 설치하여 시험하였다. 시험장에 설치되어있는 모의 지중배전 케이블에는 피뢰기가 설치되어있지 않기 때문에 뇌임펄스 전류 발생장치(ICG : Impulse Current Generator)에 피뢰기를 설치하여 피뢰기의 제한 전압과 전류, 시험선로가 연결되는 개폐기에 전압을 측정하였다.[8] 시험장에서 사용된 뇌임펄스 발생장치의 규격은 아래와 같으며, 실증 시험실에서 시험준비를 마친 상태의 뇌임펄스 발생장치를 그림 2에 나타내었다.

- Total Charging Voltage: 300kV
- Stored Energy at max. Charging Voltage: 30kJ
- Lightning Current Impulse: 8/20 $\mu$ s 10 kA이하, 4/10 $\mu$ s 25 kA 이하
- Switching Current Impulse: 30 $\mu$ s < T1 < 100 $\mu$ s, T2= approx. 2  $\times$  T1 2kA이하
- Damped Capacitive Impulse Voltage Divider: 100kV, 1  $\mu$ F



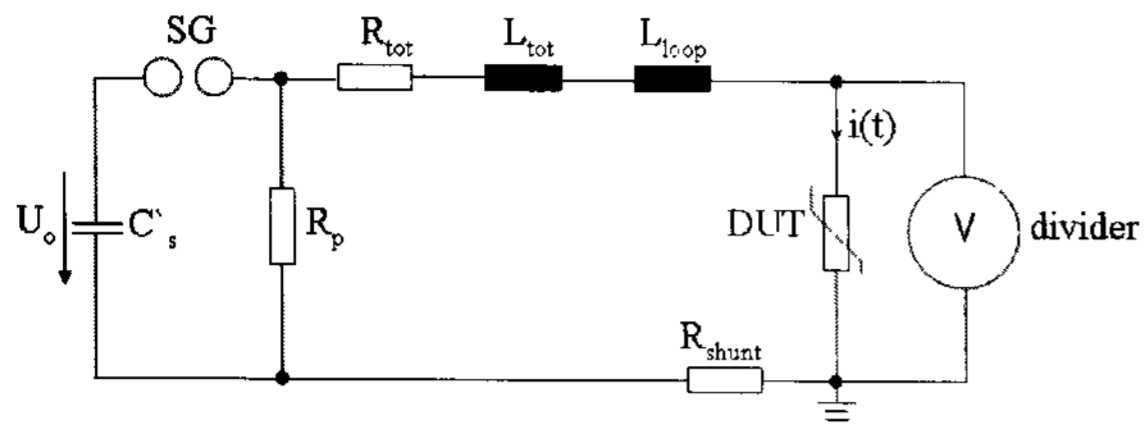
그림 2 실제 뇌임펄스 전류 발생기  
Fig. 2 Lightning impulse current generator

표 1 시험 종류

Table 1 Test cases

사례	선로구성	SW연결	서지 경로의 총 거리	비고(서지투입)
Case 1	ICG-Cable 0	SW <sub>1</sub>	97.7m	지중배전케이블
				가공선로
Case 2	ICG-Cable 0-1	SW <sub>1</sub> -SW <sub>3</sub>	362m	지중배전케이블
				가공선로
Case 3	ICG-Cable 0-2	SW <sub>1</sub> -SW <sub>3</sub>	359.1m	지중배전케이블
				가공선로
Case 4	ICG-Cable 0-3	SW <sub>1</sub> -SW <sub>4</sub>	351.7m	지중배전케이블
				가공선로
Case 5	ICG-Cable 0-1-2	SW <sub>1</sub> -SW <sub>3</sub> -SW <sub>1</sub>	623.3m	지중배전케이블
				가공선로
Case 6	ICG-Cable 0-3-4	SW <sub>1</sub> -SW <sub>4</sub> -SW <sub>2</sub>	605.7m	지중배전케이블
				가공선로
Case 7	ICG-Cable 0-3-4-가공	SW <sub>1</sub> -SW <sub>4</sub> -SW <sub>2</sub>	805.7m	지중배전케이블
				가공선로
Case 8	ICG-Cable 0-1 // 0-2	SW <sub>1</sub> -SW <sub>3</sub> // SW <sub>1</sub> -SW <sub>3</sub>	623.3m	지중배전케이블
				가공선로
Case 9	ICG-Cable 0-1 // 0-3	SW <sub>1</sub> -SW <sub>3</sub> // SW <sub>1</sub> -SW <sub>4</sub>	615m	지중배전케이블
				가공선로

본 논문에서 사용된 뇌임펄스 전류시험의 등가회로 회로는 그림 3과 같다.



- $C'_s$  : 임펄스 발생기의 커패시턴스 총 합  $C'_s:Cs \cdot p/s$
- $C_s$  : Stage당 임펄스 커패시턴스
- $p$  : 병렬로 연결된 임펄스 발생기 Stage의 수
- $s$  : 직렬로 연결된 임펄스 발생기 Stage의 수
- SG : 섬락 갭
- $R_p$  : 병렬저항
- $R_{tot}$  : 직렬 저항의 합
- $L_{tot}$  : 직렬 인덕턴스의 합
- $L_{loop}$  : 시험회로의 고유 인덕턴스
- DUT : 피뢰기
- $R_{shunt}$  : 임펄스 전류 측정을 위한 Shunt
- Divider: 피뢰기의 제한전압 측정을 위한 분배기

그림 3 피뢰기에 대한 뇌임펄스 전류 시험회로

Fig. 3 Lightning impulse circuit for arrester

뇌임펄스 전류시험에 사용된 뇌임펄스 파형의 파두시간인  $T_1$ 은  $8\mu s$  파미시간인  $T_2$ 는  $20\mu s$ 를 사용하였다. 피뢰기는 국내에서 사용되고 있는 국산 폴리머 배전피뢰기를 선정하였고, 피뢰기의 규격과 실제 모습을 그림 4를 통해 나타내었다.

정격전압	18 kVrms
공칭방전전류	5 kA
최대연속운전전압(MCOV)	15.3 kVrms
제한전압(8/20 $\mu s$ )	66 kV 이하
동작개시전압(1mA, dc)	28.5 ~ 31.5 kV



그림 4 폴리머 피뢰기

Fig. 4 Polymer arrester

뇌임펄스 전류 발생기의 뇌임펄스 전류 파형은 국내 배전급 피뢰기(폴리머피뢰기, ZnO 소자 사용)의 규격을 참조하여 시험하였으며 뇌임펄스 전류 시험장치를 구축하고 뇌임펄스 전류시험을 수행한 후 전압과 전류를 측정하여 피뢰기의 설계파형을 충실하게 발생시키는 것으로 나타났다.

뇌임펄스 전류시험을 위해 다양한 상태조건을 고려한 시험선로에서 시험하였다. 시험은 지중배전케이블과 가공선로

를 통해 임펄스를 인가하였으며 이러한 실측시험을 과도현상해석 프로그램인 EMTP의 시뮬레이션과 비교 검토하여 해석기법의 신뢰도를 확보하였다.

표 2 지중배전케이블에 뇌임펄스 전류 인가시 각 지점의 전압 (실측시험)

Table 2 Voltage of each point in case of lightning impulse current applied to underground distribution cable.

선로구성	각 측정점에서 최대전압(kV)					
	ICG	SW <sub>1-1</sub>	SW <sub>1-3</sub>	SW <sub>2</sub>	SW <sub>3</sub>	SW <sub>4</sub>
ICG-Cable 0	56.71	68.74	-	-	-	-
ICG-Cable 0-1	58.05	77.49	-	-	100.62	-
ICG-Cable 0-2	58.27	77.91	-	-	-	-
ICG-Cable 0-3	57.82	79.58	-	-	-	98.12
ICG-Cable 0-1-2	57.38	76.24	105.61	-	98.74	-
ICG-Cable 0-3-4	57.60	79.99	-	101.87	-	98.74
ICG-Cable 0-3-4-가공	56.60	66.24	-	-	-	93.53
ICG-Cable 0-1//0-2	57.82	81.24	-	-	100.62	-
ICG-Cable 0-1//0-3	58.49	79.37	-	-	103.74	-

표 3 지중배전케이블에 뇌임펄스 전류 인가시 각 지점의 전압 (EMTP해석)

Table 3 Voltage of each point in case of lightning impulse current applied to underground distribution cable.

선로구성	각 측정점에서 최대전압(kV)					
	ICG	SW <sub>1-1</sub>	SW <sub>1-3</sub>	SW <sub>2</sub>	SW <sub>3</sub>	SW <sub>4</sub>
ICG-Cable 0	57.0	71.1	-	-	-	-
ICG-Cable 0-1	58.1	74.3	-	-	104.7	-
ICG-Cable 0-2	58.1	73.7	-	-	-	-
ICG-Cable 0-3	58.5	75.9	-	-	-	98.2
ICG-Cable 0-1-2	57.7	74.1	100	-	101	-
ICG-Cable 0-3-4	58.1	75.2	-	98.3	-	97.0
ICG-Cable 0-3-4-가공	58.1	73.8	-	-	-	95.8
ICG-Cable 0-1//0-2	58.6	73.8	-	-	101.4	-
ICG-Cable 0-1//0-3	58.6	73.7	-	-	99	-

ICG에서 지중배전케이블을 통한 뇌임펄스 전파특성시험 결과와 EMTP 뇌임펄스 전파특성시험 결과를 표 2~3에 나타내었다. 각 ICG 측정점의 전압은 배전급 피뢰기의 설치로 인한 선로 제한전압이다. ICG에서 인가한 뇌임펄스에 의한 측정전압의 결과와 EMTP를 이용한 시뮬레이션 측정전압 결과는 사례별로 비슷한 상승을 보이나 최대전압의 크기는 측정지점에 따라 서로 다른 것으로 나타났다.

표 4 가공선로에 뇌임펄스 전류 인가시 각 지점의 전압 (실측시험)

Table 4 Voltage of each point in case of lightning impulse current applied to ACSR.

선로구성	실측시험의 경우 각 측정점에서 최대전압(kV)					
	ICG	SW <sub>1-1</sub>	SW <sub>1-3</sub>	SW <sub>2</sub>	SW <sub>3</sub>	SW <sub>4</sub>
ICG-가공26m-Cable 0	54.48	97.49	-	-	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-1	55.37	111.86	-	-	103.32	-
ICG-가공26m-Cable 0-2	55.48	111.86	-	-	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-3	55.71	118.74	-	-	-	102.49
ICG-가공26m-Cable 0-1-2	54.59	114.36	113.11	-	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-3-4	53.92	126.03	-	109.78	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-3-4-가공	53.59	119.15	-	98.53	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-1/0-2	55.60	119.15	-	-	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-1/0-3	55.15	121.65	-	-	-	-

표 5 가공선로에 뇌임펄스 전류 인가시 각 지점의 전압 (EMTP해석)

Table 5 Voltage of each point in case of lightning impulse current applied to ACSR.

선로구성	시뮬레이션의 경우 각 측정점에서 최대전압(kV)					
	ICG	SW <sub>1-1</sub>	SW <sub>1-3</sub>	SW <sub>2</sub>	SW <sub>3</sub>	SW <sub>4</sub>
ICG-가공26m-Cable 0	56.9	93.2	-	-	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-1	57.3	98.9	-	-	108.3	-
ICG-가공26m-Cable 0-2	57.4	96.1	-	-	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-3	57.3	96.5	-	-	-	100.3
ICG-가공26m-Cable 0-1-2	56.7	94.4	104.7	-	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-3-4	55.4	110.9	-	126.0	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-3-4-가공	56.7	88.5	-	104.6	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-1/0-2	58.1	109.9	-	-	-	-
ICG-가공26m-Cable 0-1/0-3	57.5	111.2	-	-	-	-

ICG에서 가공선로를 통한 뇌임펄스 전파특성시험 결과와 EMTP 뇌임펄스 전파특성시험 결과를 표 4~5에 나타내었다. 각 ICG 측정점의 전압은 배전급 피뢰기의 설치로 인한 발생하는 제한전압이다. 실측된 측정점의 최고전압이 시뮬레이션의 최고전압보다 최대 +16kV의 수준의 높은 전압을 나타내었다. 이러한 차이는 실측시험의 피뢰기 설치지점이 실제 배전 입상주가 아닌 뇌임펄스 장비에 설치되어 있을 때 발생하는 차이라고 사료되며 오차의 범위를 크게 벗어나지 않음으로 EMTP 시뮬레이션의 근사값 추정에 유효하다고 사료된다. 또한 ICG에서 인가한 뇌임펄스의 결과와 EMTP 시뮬레이션을 통한 결과의 값이 짧은 선로에는 그 크기와 값이 유사하나 시뮬레이션에서 측정된 전압이 다소 낮게 나타났다.

2.3 실계통 모델 적용

지중배전계통은 실제로 매우 다양한 분기선로로 이루어져 있으며 그 길이 또한 다양하게 포설 되어있다. 가공선로와 접속점은 입상주에 설치된 피뢰기의 효과로 인하여 보호가 이루어지지만 지중배전선로 케이블의 말단은 침입된 서지의 반사영향으로 높은 과전압이 발생되게 된다. 이로 인해 케이블 말단에 스트레스가 증가하게 되고 열화로 이어져 절연파괴에 이를 가능성이 높다. 따라서 지중케이블의 말단 또는 분기점에 피뢰기를 설치함으로써 입상주 피뢰기를 통해 보호되지 못하는 지중케이블선로의 말단과 같은 취약부분을 보호할 수 있다. 본 연구를 위해 실계통을 선정하였으며, 계통도는 그림 5와 같다.

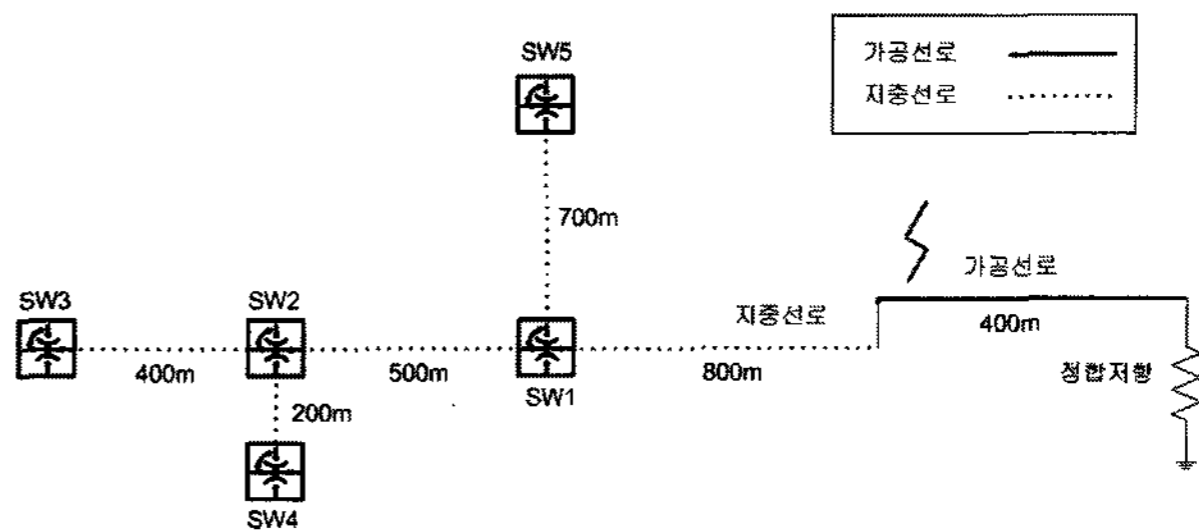


그림 5 해석 선로 계통도

Fig. 5 Underground distribution line for analysis

지중배전계통에 입상주 피뢰기만 설치되어 있을 때 뇌격지점을 가혹하게 모의하여 20m로 선정하고 뇌격파형의 파두시간을 2 $\mu$ s와 1 $\mu$ s로 변화시키고 뇌격 크기를 5kA와 10kA로 나누어 해석하였다. 고려한 뇌격조건을 표 6에 나타내었다.

표 6 입상주 피뢰기 설치시 뇌격조건

Table 6 Lightning surge condition in case of installed riser pole arrester

	뇌격지점	뇌격파형	뇌격크기
Case1	20m	2/70 $\mu$ s	5kA
Case2	20m	2/70 $\mu$ s	10kA
Case3	20m	1/70 $\mu$ s	5kA
Case4	20m	1/70 $\mu$ s	10kA

2.3.1 Case 1

분기선로에 입상주로부터 20m인 곳에 2/70 $\mu$ s의 뇌격파형 형태와 5kA의 크기를 가진 뇌격이 침입하는 것으로 모의하였다. 피뢰기는 입상주에 설치되어 있으며 지중케이블에는 설치하지 않았다. 케이블이 분기되는 분기점과 각 케이블의 말단의 전압을 측정하였다.

5kA의 뇌격이 침입하였을 때 측정된 과전압 파형을 그림 6에 나타내었으며 측정점의 최고전압을 표 7에 나타내었다. 뇌과전압이 가장 높게 나타나는 곳은 지중케이블에서 가장 멀리 떨어진 케이블 말단인 SW<sub>3</sub>에서 99.3kV로 나타났다. 또한 짧은 분기선로로 이루어진 SW<sub>4</sub>에서도 89.9kV의 전압이 측정되었다. 말단의 전압이 100kV에 근접하는 것을 통해 지중배전선로의 말단 보호를 위해 보호설비가 필요한 것으로 사료된다.

표 7 뇌격조건 (20m 2/70 $\mu$ s - 5kA)

Table 7 Lightning surge Condition (20m 2/70 $\mu$ s - 5kA)

측정 개폐기	전압 [kV]	비고
SW <sub>1</sub>	81.6	분기점
SW <sub>2</sub>	85.6	분기점
SW <sub>3</sub>	99.3	말단점
SW <sub>4</sub>	89.9	말단점
SW <sub>5</sub>	86.3	말단점

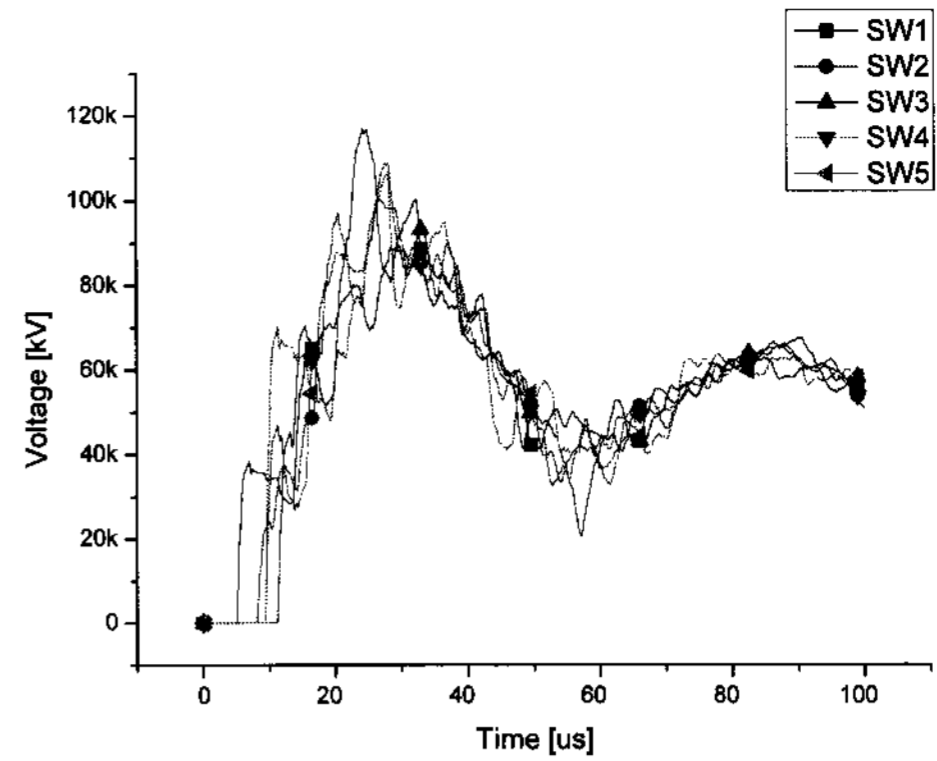


그림 7 뇌격조건 (20m 2/70 $\mu$ s - 10kA)

Fig. 7 Lightning surge Condition (20m 2/70 $\mu$ s - 10kA)

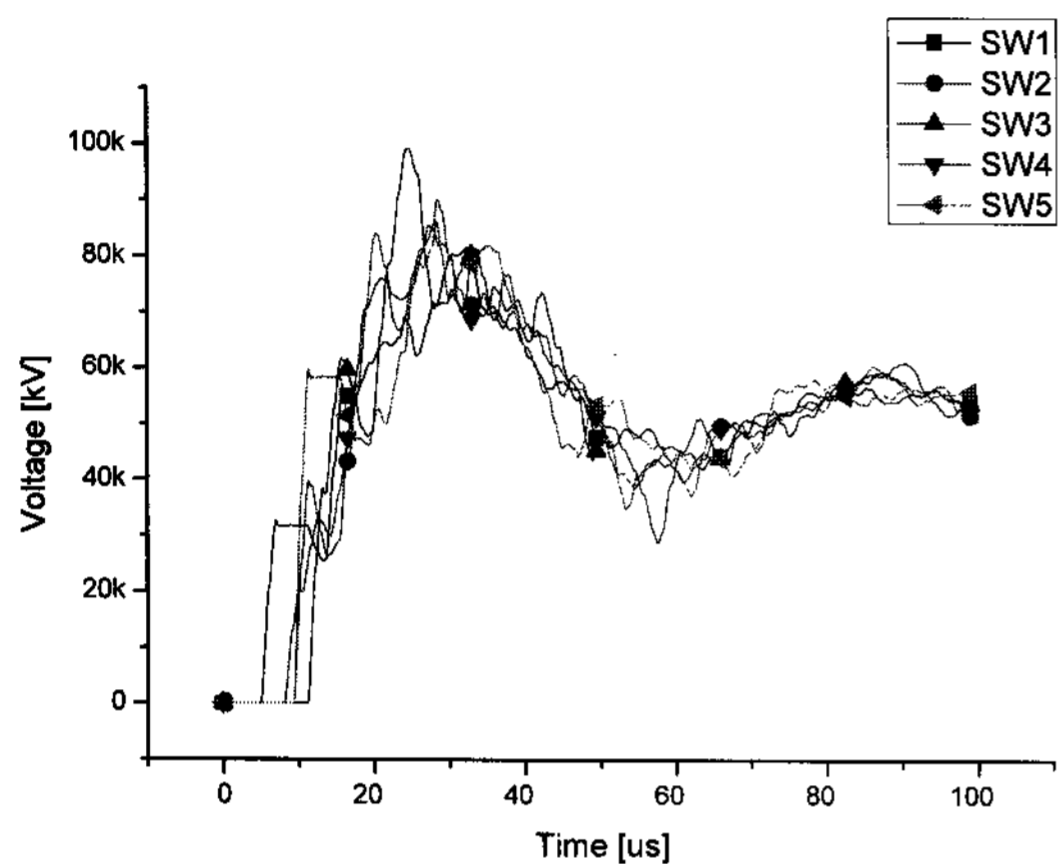


그림 6 뇌격조건 (20m 2/70 $\mu$ s - 5kA)

Fig. 6 Lightning surge Condition (20m 2/70 $\mu$ s - 5kA)

### 2.3.2 Case 2

20m의 뇌격지점과 2/70 $\mu$ s의 동일한 뇌격파형에서 뇌격전류의 크기를 10kA로 증가시켜 지중배전계통에 발생하는 뇌과전압을 해석하였다. 그림 7과 같이 뇌격전류가 증가함에 따라 발생하는 과전압은 높게 나타났다. 10kA의 뇌격전류가 침입하였을 경우도 지중케이블선로에서 가장 멀리 떨어진 말단인 SW<sub>3</sub>에서 가장 높은 전압이 측정되었다. 또한 표 8에 나타낸 것처럼 모든 측정점의 전압이 100kV보다 높게 나타났다. 지중배전계통의 케이블 보호를 위한 특별한 보호설비가 없음을 고려할 때 이와 같은 현상이 케이블 말단과 분기점에 절연 열화 가능성이 발생하는 것을 알 수가 있다.

표 8 뇌격조건 (20m 2/70 $\mu$ s - 10kA)

Table 8 Lightning surge Condition (20m 2/70 $\mu$ s - 10kA)

측정 개폐기	전압 [kV]	비고
SW <sub>1</sub>	100.3	분기점
SW <sub>2</sub>	100.0	분기점
SW <sub>3</sub>	117.1	말단점
SW <sub>4</sub>	108.8	말단점
SW <sub>5</sub>	106.5	말단점

### 2.3.4 Case 4

뇌격파형의 파두시간이 2 $\mu$ s보다 1 $\mu$ s일 때 선로에 더 높은 전압이 발생함을 앞선 검토에 따라서 확인 하였다. 단일 케이블에서는 파두시간의 영향이 케이블 말단에 발생하는 전압의 크기에 많은 영향을 주었으나 지중배전선로가 분기선로로 구성되어 있을 때는 현저한 차이가 발생하지는 않았다. 그러나 가공선로와 가장 멀리 떨어진 케이블의 말단인 SW<sub>3</sub> 및 SW<sub>4</sub>, SW<sub>5</sub>에서는 전압이 다소 상승 되었다. 이를 통해 뇌격전류의 파두시간이 1 $\mu$ s에서 2 $\mu$ s의 범위 내에서는 지중배전선로의 케이블에 발생하는 뇌과전압이 비슷하며, 뇌격전류가 증가됨에 따라 증가되는 뇌과전압을 감소시키기 위한 보호설비 등의 대책이 필요한 것으로 사료된다.

표 10 뇌격조건 (20m 1/70 - 10kA)

Table 10 Lightning Condition (20m 1/70 - 10kA)

측정 개폐기	전압 [kV]	비고
SW <sub>1</sub>	100.4	분기점
SW <sub>2</sub>	100.8	분기점
SW <sub>3</sub>	118.3	말단점
SW <sub>4</sub>	110.6	말단점
SW <sub>5</sub>	107.7	말단점

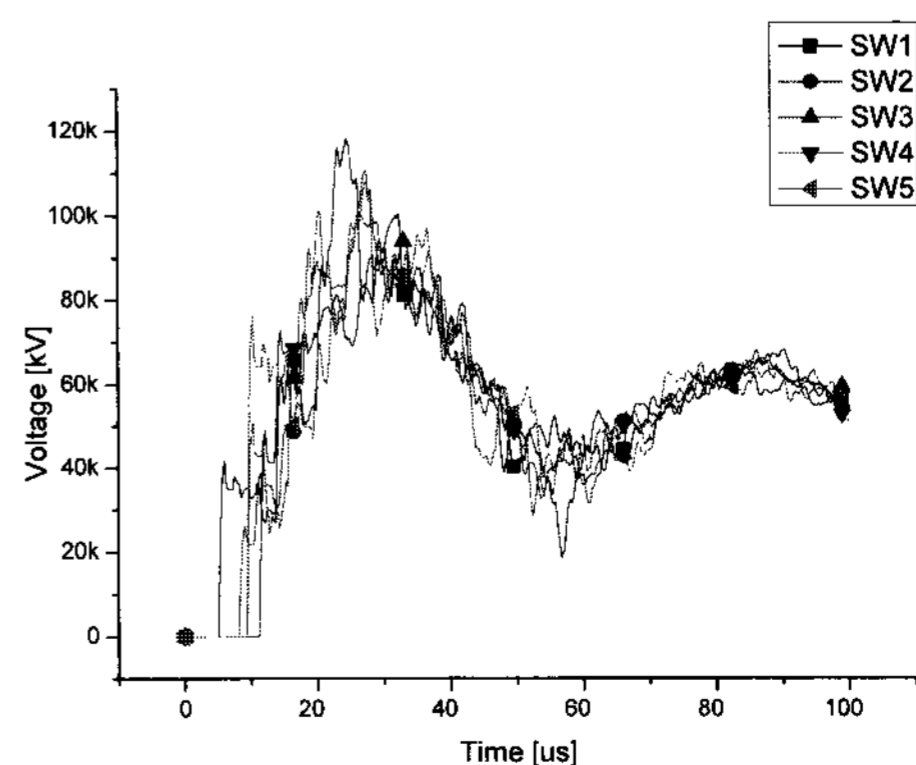


그림 9 뇌격조건 (20m 1/70 - 10kA)

Fig. 9 Lightning surge Condition (20m 1/70 - 10kA)

2.3.5 입상주 피뢰기의 지중케이블선로 보호효과

입상주에 피뢰기를 설치하였을 때 지중배전계통에 가혹한 조건을 고려하여 뇌격침입 거리를 20m로 선정하고 뇌격파형 및 뇌격전류의 크기를 변경하여 케이블의 분기점과 말단에 발생하는 뇌과전압을 정리하여 그림 10에 나타내었다. 지중배전계통을 구성하고 있는 분기점과 말단점에 발생하는 뇌과전압을 비교 할 때 분기점인 SW<sub>1</sub>, SW<sub>2</sub>에서는 5kA의 뇌격전류에서는 최고 86.3kV의 전압이 발생하였으며 10kA의 뇌격전류인 경우에는 100.8kV가 발생하였다. 이로서 케이블의 분기점이 말단에 비해 낮은 과전압이 발생하는 것으로 미루어 볼 때 말단의 보호가 우선적으로 필요한 것으로 사료된다. 또한 보호가 필요한 케이블의 말단 중에 SW<sub>3</sub>의 말단이 가장 높은 전압을 나타낸다. 따라서 SW<sub>3</sub>과 같은 조건의 케이블 말단 보호가 지중배전계통 고장예방을 위해 필요하다.

10kA의 뇌격전류에서는 뇌격파형의 시간특성과 관계없이 모든 분기점과 말단에 100kV를 초과하는 전압이 발생한다. 이를 통하여 케이블에 피뢰기등 보호설비를 설치하지 않을 경우 각 말단에서의 과전압이 100kV 이상으로 나타나게 된다. 따라서 각 말단에 효과적인 보호대책의 방안으로 뇌과전압을 감쇠 시킬 수 있는 최적 위치에 피뢰기 설치가 필요한 것으로 사료된다.

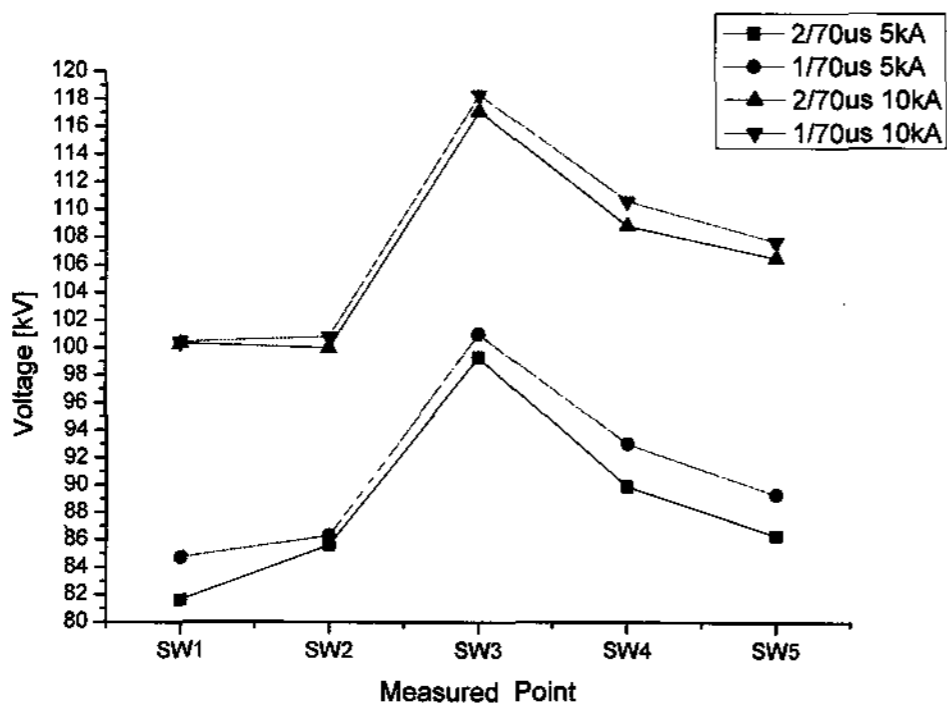


그림 10 입상주 피뢰기 설치시 SW에서의 최대전압  
Fig. 10 Maximum overvoltage of SW with riser pole arrester

2.4 보호설비 적정 위치 선정

앞의 해석 결과 가공선로의 접속점에서 가장 멀리 떨어진 SW<sub>3</sub>에서 다양한 조건에도 가장 높은 전압이 발생하였으며, 케이블 보호를 위해 지중배전계통의 말단 및 분기점에 대한 보호대책이 필요함을 알 수 있다. 따라서 케이블 말단과 분기점에서의 과전압을 감쇠시키기 위하여 피뢰기를 각각 설치하여 지중배전계통의 모든 측정 위치에서 가장 낮은 과전압이 발생되도록 최적의 피뢰기 위치를 선정할 필요가 있다.

2.4.1 케이블 말단에 보호설비 설치후 과전압 해석

지중배전계통에서 가장 거리가 먼 케이블 말단인 SW<sub>3</sub>에서 뇌격전류의 크기와 관계없이 가장 높은 뇌과전압이 발생하였다. 따라서 SW<sub>3</sub>에 우선적인 보호방안으로 피뢰기를 설치하여 이에 따른 보호효과를 확인하고자 하였다.

SW<sub>3</sub>에 피뢰기를 설치한후 각 분기점과 말단점에 전압을 측정하여 그림 11~12에 나타내었다. 전압파형을 통해 크기가 가장 높았던 케이블 말단인 SW<sub>3</sub>의 전압이 53.2kV로 크게 낮아졌다. 또한 10kA의 뇌격크기에도 90kV를 초과하는 전압은 발생하지 않았다. 한편 다른 케이블의 말단점인 SW<sub>5</sub>는 최고 88.7kV 까지 상승되며 비교적 높은 전압이 발생되었다.

표 11 피뢰기 설치지점 SW<sub>3</sub>  
Table 11 Arrester location SW<sub>3</sub>

측정 개폐기	전압[kV]		비고
	5kA	10kA	
SW1	61.8	70.9	분기점
SW2	64.9	74.2	분기점
SW3	53.2	54.0	말단점
SW4	68.5	79.3	말단점
SW5	74.5	88.7	말단점

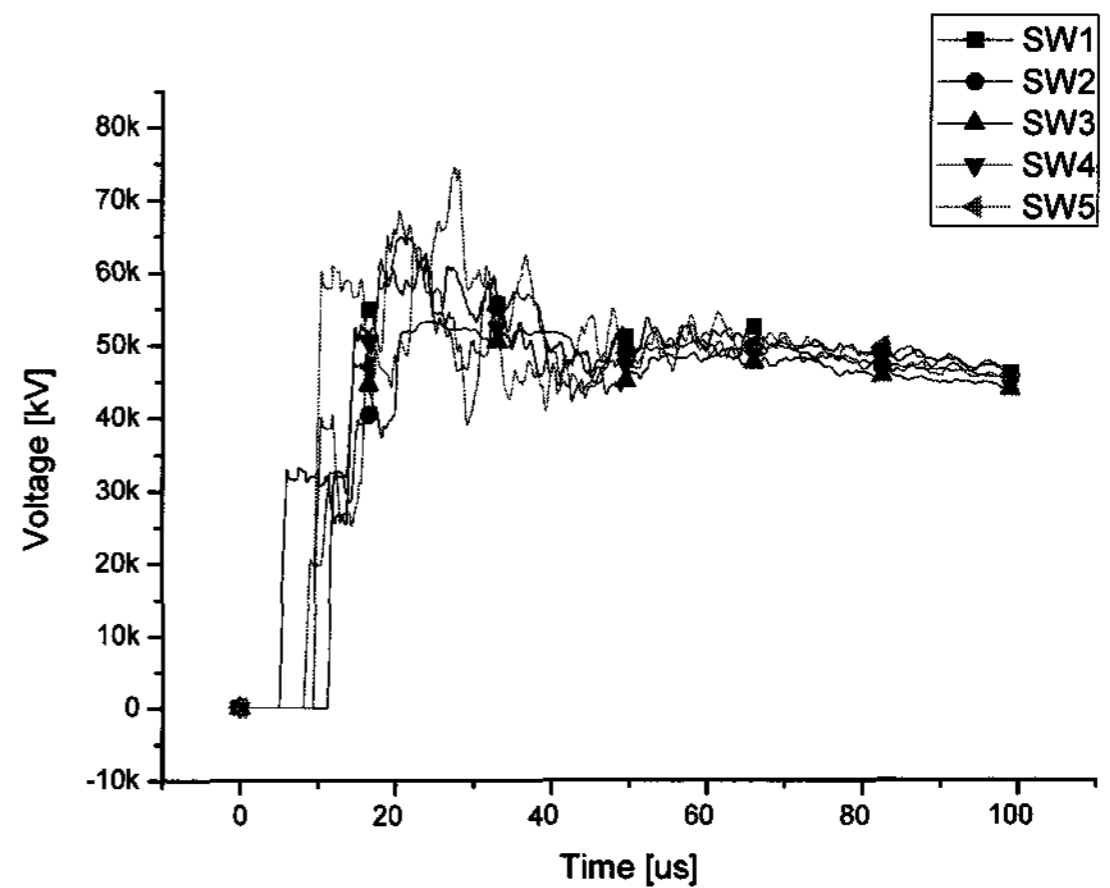


그림 11 SW<sub>3</sub>에 설치 - 5kA  
Fig. 11 Installation in SW<sub>3</sub> - 5kA

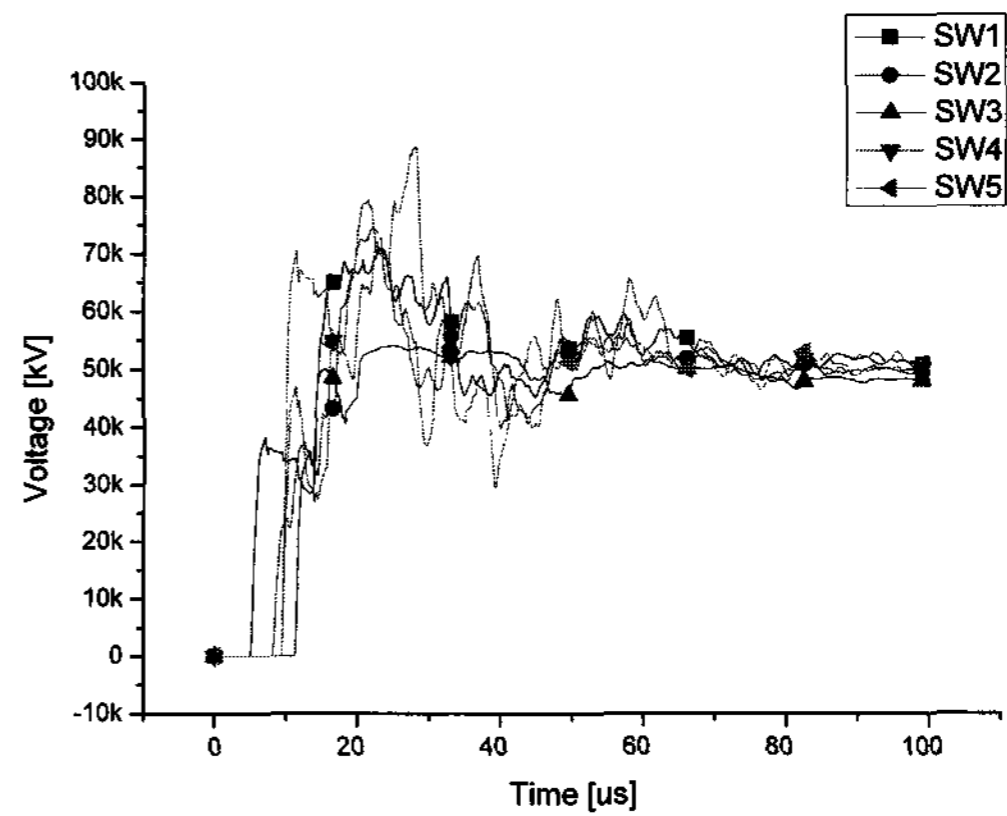


그림 12 SW<sub>3</sub>에 설치 - 10kA  
Fig. 12 Installation in SW<sub>3</sub> - 10kA

각 케이블 말단에 피뢰기를 설치하였을 때 최고의 보호효과가 나타나는 최적설치 위치를 검토하기 위해 SW<sub>4</sub>에 피뢰기를 설치하였다. SW<sub>4</sub>는 가장 높은 과전압이 발생하는 SW<sub>3</sub>의 근방에서 분기되는 짧은 분기 케이블의 말단점이다. SW<sub>4</sub>에 피뢰기를 설치하여 발생된 뇌과전압의 측정파형을 그림 13~14에 나타내었다. 피뢰기가 설치된 지점인 SW<sub>4</sub>는 피뢰기의 정상동작으로 인하여 최고전압이 54.6kV로 제한되었으나 SW<sub>3</sub>에 피뢰기를 설치하였을 때 보다 말단과 분기점의 전압이 다소 높게 나타났다.

표 12 피뢰기 설치지점 SW<sub>4</sub>  
Table 12 Arrester location SW<sub>4</sub>

측정 개폐기	전압 [kV]		비고
	5kA	10kA	
SW1	63.4	70.5	분기점
SW2	61.1	68.2	분기점
SW3	68.9	78.9	말단점
SW4	53.1	54.6	말단점
SW5	69.3	83.1	말단점

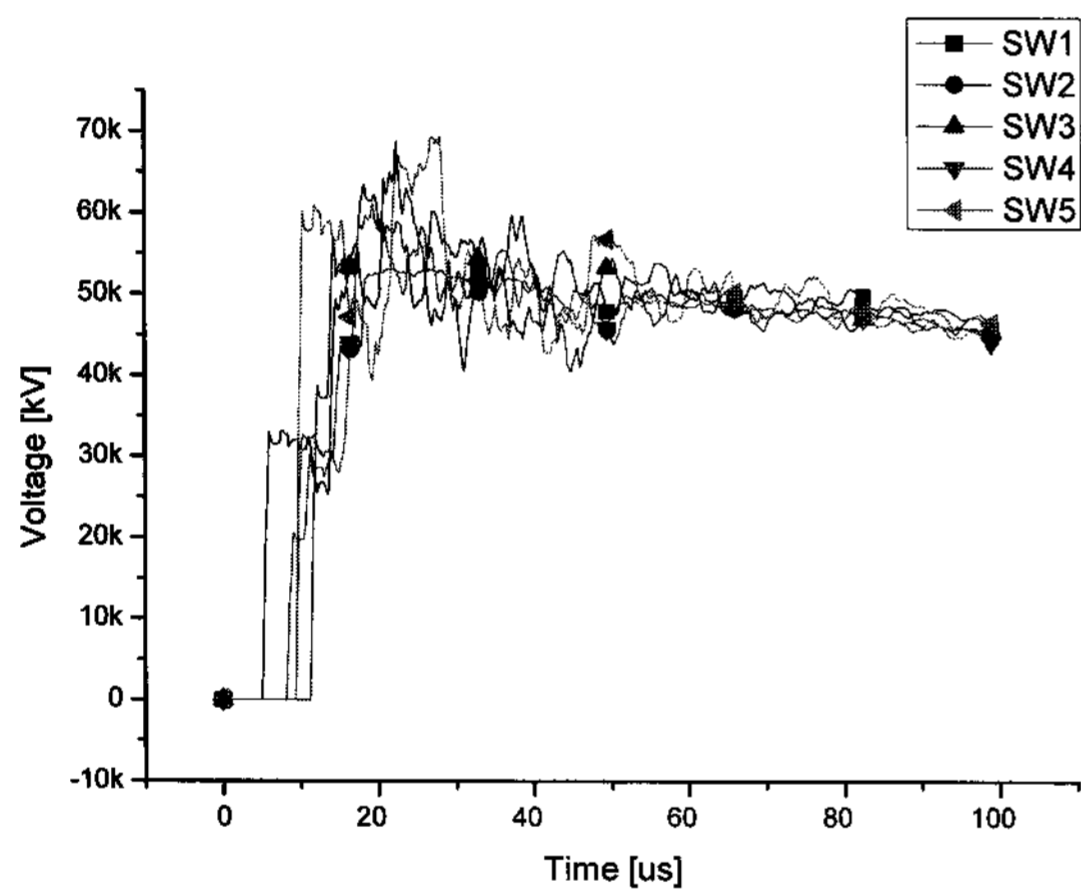


그림 13 SW<sub>4</sub>에 설치 - 5kA  
Fig. 13 Installation in SW<sub>4</sub> - 5kA

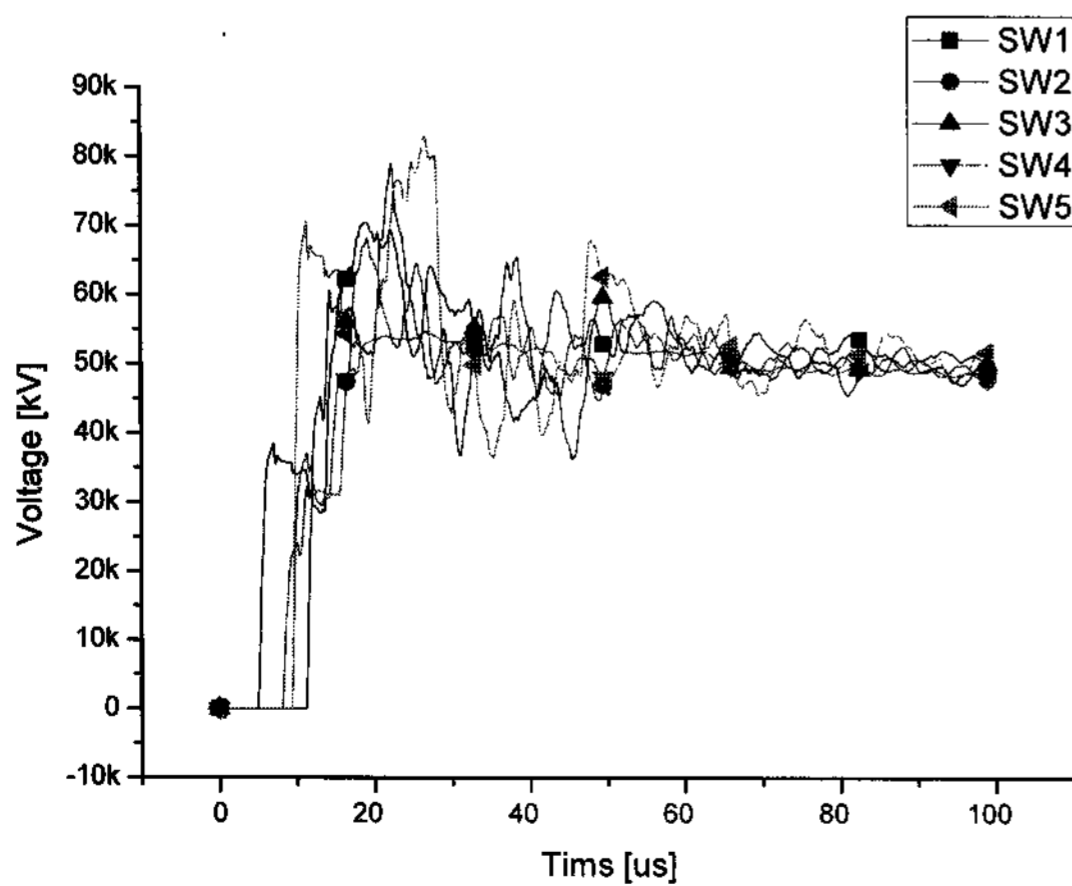


그림 14 SW<sub>4</sub>에 설치 - 10kA  
Fig. 14 Installation in SW<sub>4</sub> - 10kA

입상주 피뢰기가 설치된 접속점과 가장 가까운 케이블 말단인 SW<sub>5</sub>에 피뢰기를 설치하여 발생된 뇌과전압을 측정하여 그림 15~16에 나타내었다.

피뢰기가 설치된 SW<sub>5</sub>는 최고 54kV로 전압이 크게 제한되었으나 다른 말단점인 SW<sub>3</sub>에서 97.8kV로 가장 높은 전압이 나타나고 SW<sub>4</sub>의 말단에서도 94.8kV로 나타나고 분기점인 SW<sub>2</sub>에서도 84.8kV의 비교적 높은 전압이 발생하여 케이블 말단에 대해 효율적인 보호가 되지 않는 것으로 사료된다.

표 13 피뢰기 설치지점 SW<sub>5</sub>  
Table 13 Arrester location SW<sub>5</sub>

측정 개폐기	전압 [kV]		비고
	5kA	10kA	
SW1	64.2	74.1	분기점
SW2	73.4	84.8	분기점
SW3	85.6	97.8	말단점
SW4	80.8	94.8	말단점
SW5	52.9	54.0	말단점

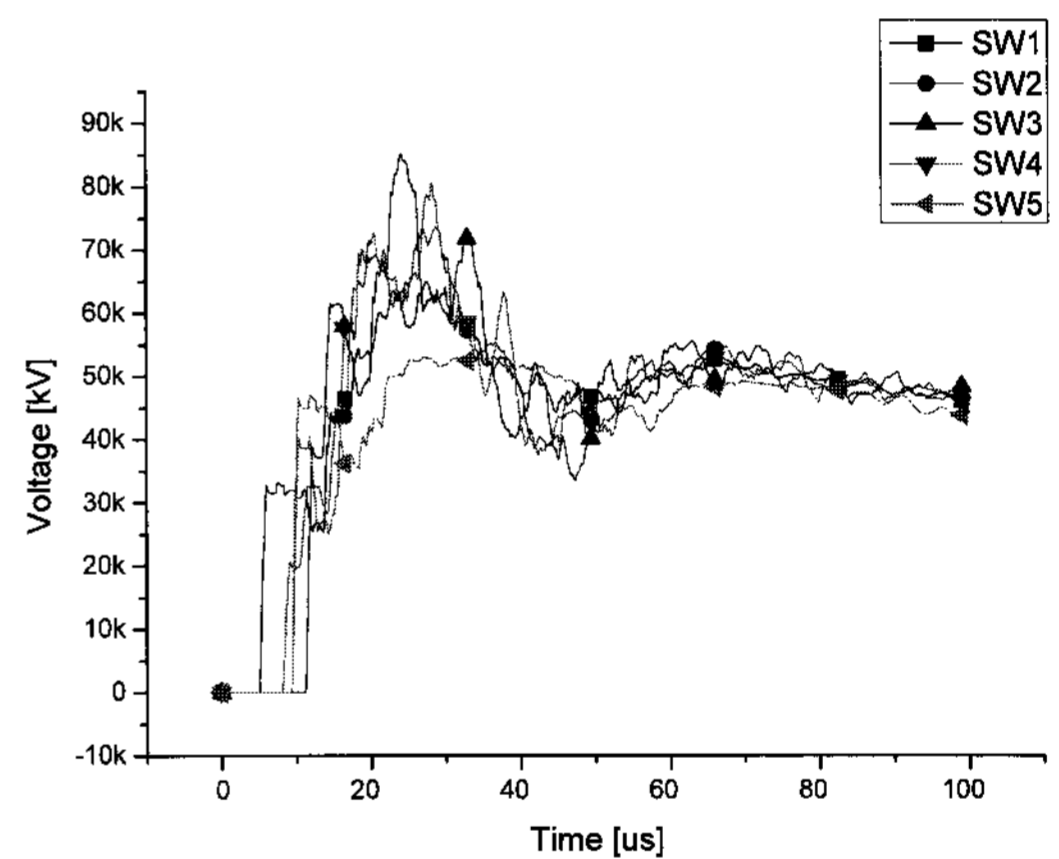


그림 15 SW<sub>5</sub>에 설치 - 5kA  
Fig. 15 Installation in SW<sub>5</sub> - 5kA

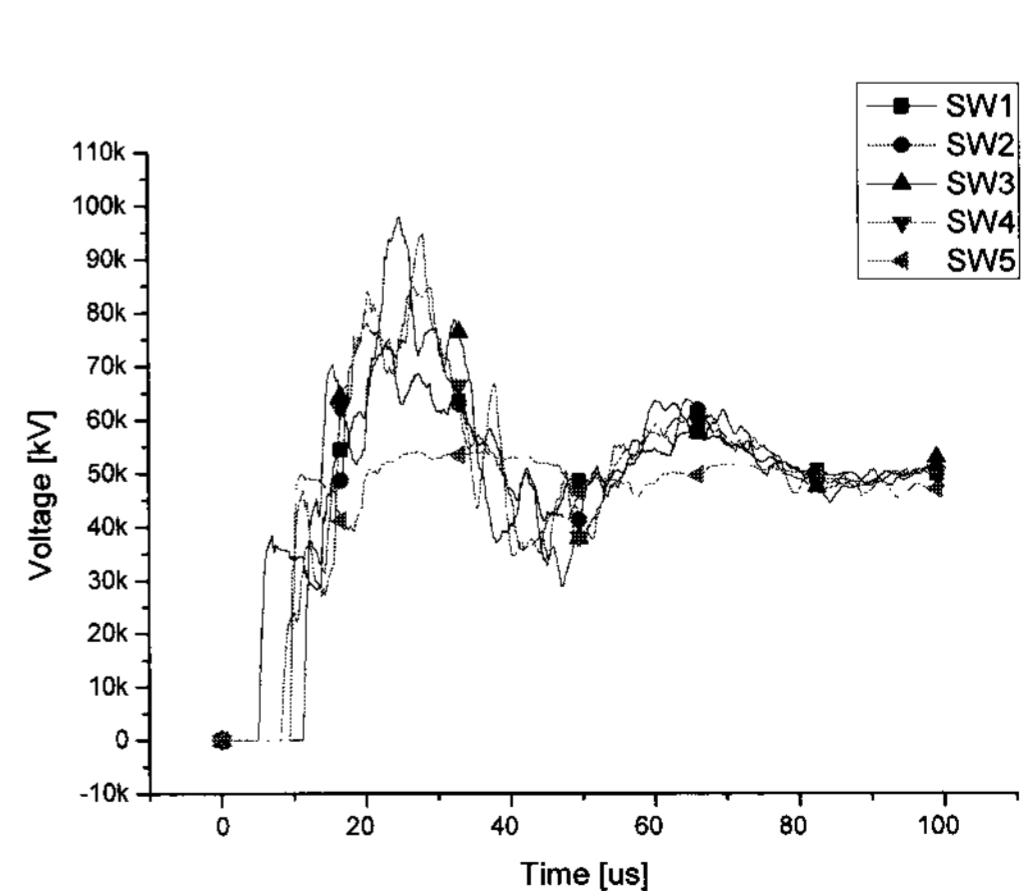


그림 16 SW<sub>5</sub>에 설치 - 10kA  
Fig. 16 Installation in SW<sub>5</sub> - 10kA

2.4.2 분기점에 보호설비 설치 후 과전압 해석

케이블의 말단에 피뢰기를 설치하였을 때를 검토한 내용을 보면 가장 높은 과전압이 발생하는 말단에 직접 피뢰기를 설치하는 것이 효과적이며, 피뢰기의 설치가 필요한 곳은 입상주로부터 원거리에 있는 말단부로 판단된다. 이 때 보호효과의 극대화를 위해 말단에 피뢰기를 설치하는 것과 달리 각 말단으로 분기되는 분기점에 피뢰기를 설치하여 보호효과를 검토할 필요가 있다.

분기점에 피뢰기를 설치하여 발생하는 과전압을 검토하기 위해 계통도의 분기점에 해당하는 SW<sub>1</sub>과 SW<sub>2</sub>에 피뢰기를 설치하여 케이블의 말단과 분기점에 발생하는 과전압을 측정하였다.

표 14 피뢰기 설치지점 SW<sub>1</sub>

Table 14 Arrester location SW<sub>1</sub>

측정 개폐기	전압 [kV]		비고
	5kA	10kA	
SW1	54.5	56.6	분기점
SW2	70.2	75.6	분기점
SW3	87.4	93.6	말단점
SW4	75.4	79.9	말단점
SW5	65.0	67.2	말단점

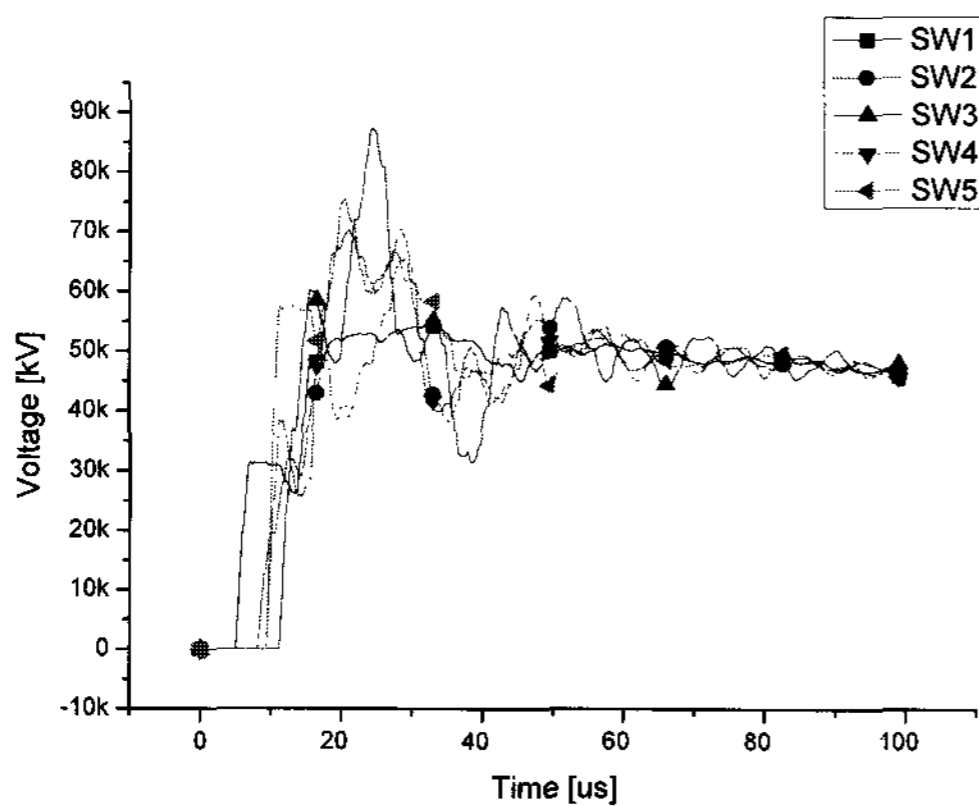


그림 17 SW<sub>1</sub>에 설치 - 5kA

Fig. 17 Installation in SW<sub>1</sub> - 5kA

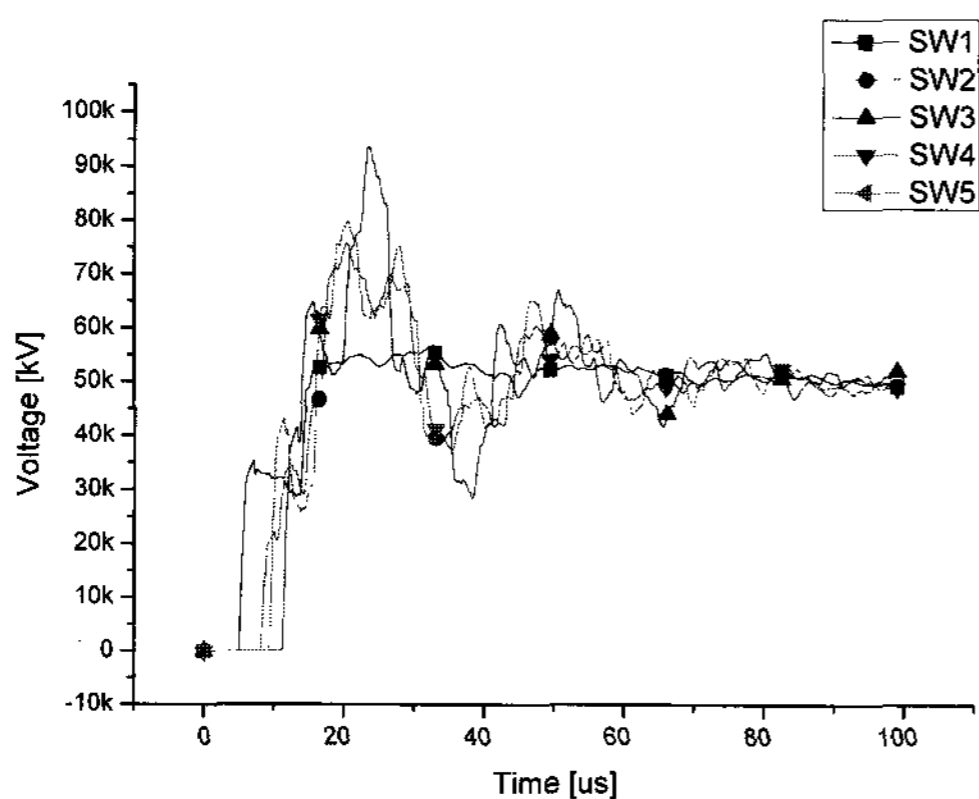


그림 18 SW<sub>1</sub>에 설치 - 10kA

Fig. 18 Installation in SW<sub>1</sub> - 10kA

먼저 입상주 피뢰기와 가장 가까운 분기점인 SW<sub>1</sub>에 피뢰기를 설치하여 전압을 측정하고 그림 17~18에 나타내었다. 분기점의 피뢰기 설치로 SW<sub>1</sub>에서 분기되는 SW<sub>5</sub>의 전압도 크게 제한되었으나 SW<sub>3</sub> 말단의 전압은 93.6kV 까지 상승하여 지중배전계통의 개폐기 모든 지점을 보호하기에는 부족하였다.

가장 높은 과전압이 발생하는 케이블의 말단인 SW<sub>3</sub>이 분기되는 지점인 SW<sub>2</sub>에 피뢰기를 설치하여 SW<sub>3</sub>과 SW<sub>4</sub>의 과전압을 효과적으로 감소시킬 수 있었다. 측정된 전압 파형을 그림 19~20에 나타내었다.

과전압이 비교적 높게 발생된 케이블 말단인 SW<sub>3</sub>과 SW<sub>4</sub>가 분기되는 SW<sub>2</sub>에 피뢰기를 설치함으로써 인해 두 곳의 케이블 말단을 보호하는 효과를 동시에 수렴하여 지중배전계통 전체에 나타나는 과전압이 효과적으로 감소되었다. 10kA의 뇌격전류에서 대부분의 측정점에서 70kV이상의 과전압이 발생하는 것을 고려해 볼 때 SW<sub>5</sub>에서만 최고 72.4kV가 발생함으로써 절연여유에도 크게 유리하며, 동일하게 피뢰기 한기를 설치하였을 때 우수한 보호효과를 나타내는 설치지점으로 사료된다.

표 15 피뢰기 설치지점 SW<sub>2</sub>

Table 15 Arrester location SW<sub>2</sub>

측정 개폐기	전압 [kV]		비고
	5kA	10kA	
SW1	60.0	67.8	분기점
SW2	53.6	55.1	분기점
SW3	62.7	64.8	말단점
SW4	58.4	60.2	말단점
SW5	63.3	72.4	말단점

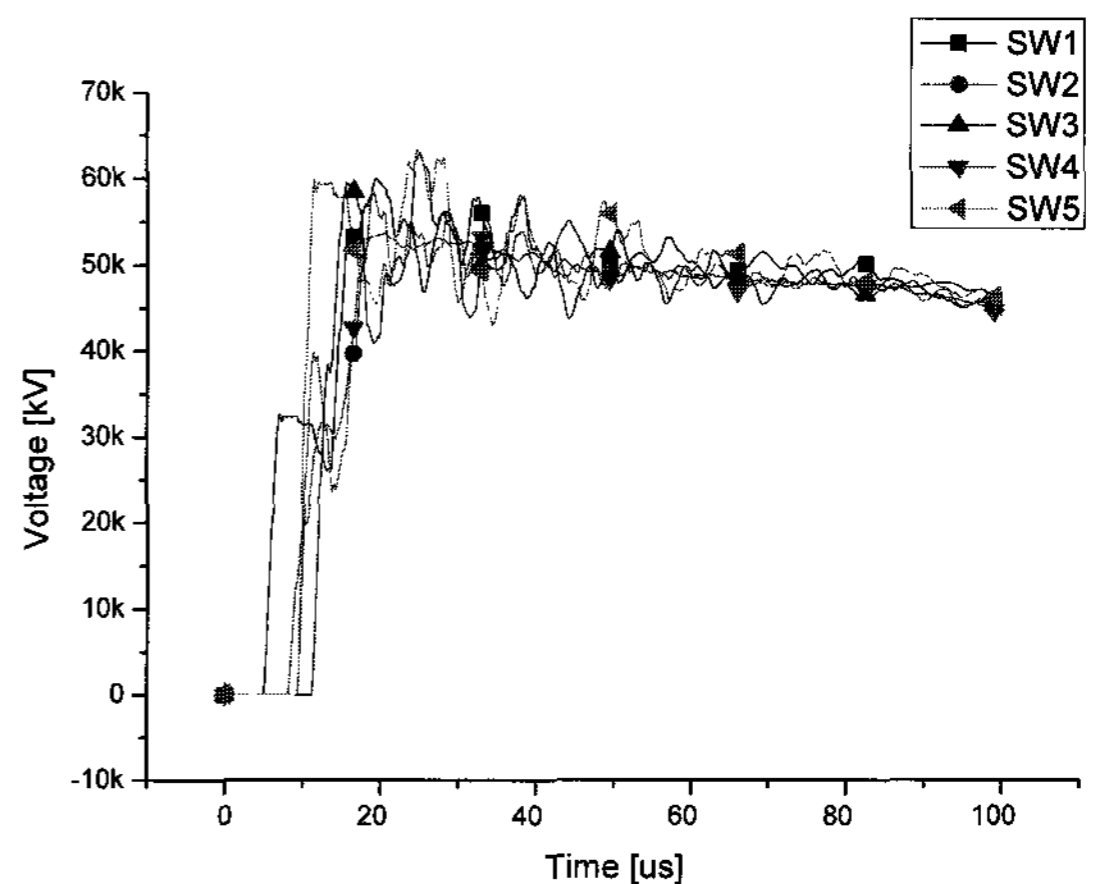


그림 19 SW<sub>2</sub>에 설치 - 5kA

Fig. 19 Installation in SW<sub>2</sub> - 5kA



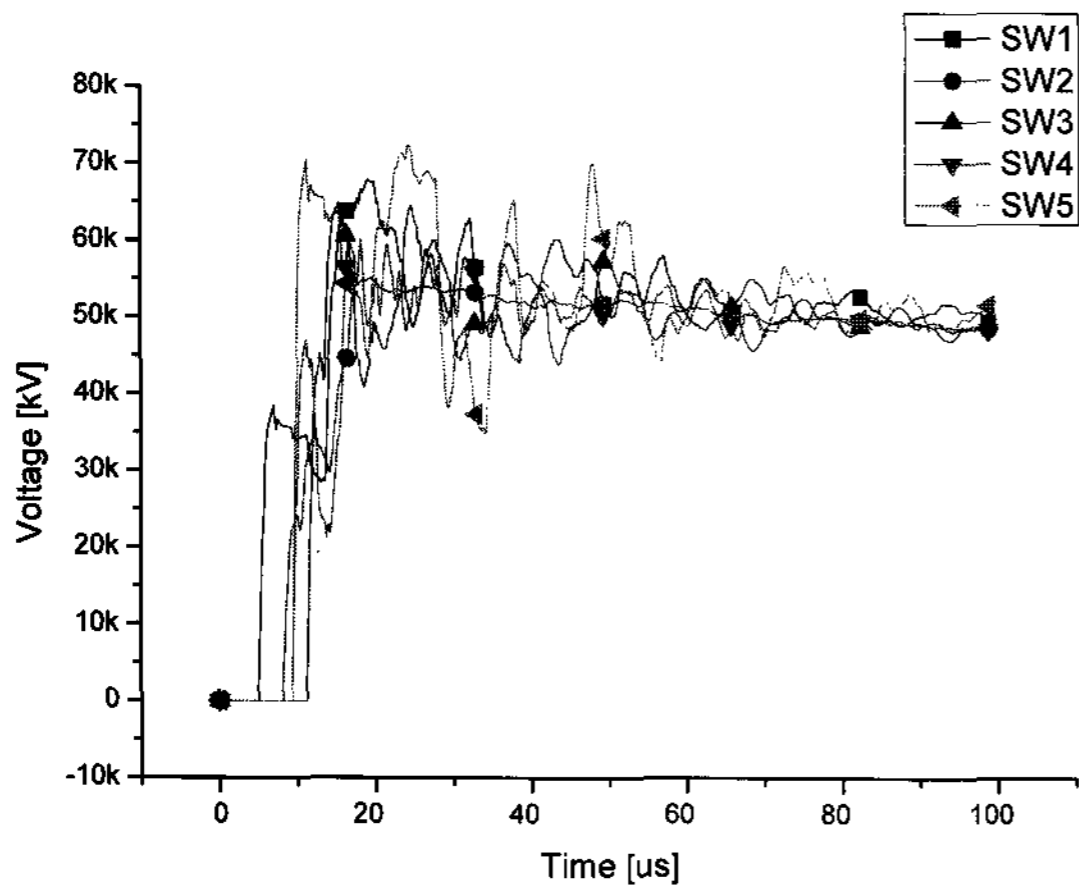


그림 20 SW<sub>2</sub>에 설치 - 10kA  
 Fig. 20 Installation in SW<sub>2</sub> - 10kA

2.4.3 보호설비의 적정위치

입상주 피뢰기에 가까운 케이블 말단에 피뢰기를 설치할 경우 가장 멀리 떨어진 케이블 말단의 과전압 감소를 위한 보호 효과가 부족하다. 또한 가장 멀리 떨어진 SW<sub>3</sub>의 케이블 말단에 피뢰기를 설치하였을 경우 전체적인 과전압감소 효과는 향상되어 절연여유 확보에는 유효하다. 한편 SW<sub>5</sub>의 전압은 다소 높게 나타난다. 그러므로 지중배전계통에 동일한 피뢰기를 한 곳에 설치하였을 경우 효과가 높은 곳을 선택하여 설치하는 것이 필요하다.

전체적인 선로 과전압 감소와 절연스트레스 감소에 유리한 조건을 만족하기 위해 취약한 케이블 말단 두 곳을 동시에 수렴할 수 있는 지점에 피뢰기를 설치함으로써 높은 과전압 감쇠 효과를 얻을 수 있었다. 계통도에서 과전압이 높게 발생되어 절연여유에 취약한 케이블 말단 SW<sub>3</sub>와 근접하여 짧은 분기선로인 SW<sub>4</sub>가 연결된 SW<sub>2</sub>의 분기점에 피뢰기를 설치하였을 경우 케이블 말단을 비롯한 분기점과 같은 모든 측정점의 전압이 72kV 이하로 발생하며 보호효과가 가장 우수한 것으로 사료된다.

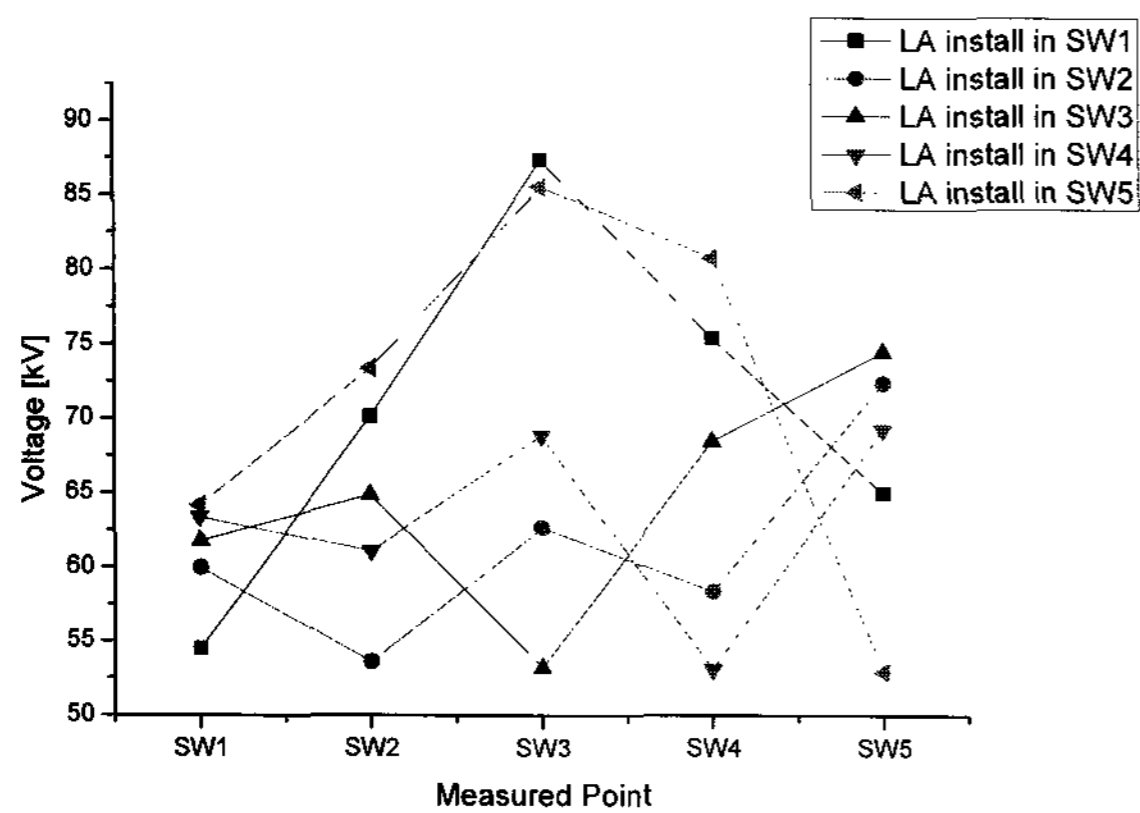


그림 21 피뢰기 설치에 따른 최대 발생전압 - 5kA  
 Fig. 21 Maximum overvoltage according to install arrester - 5kA

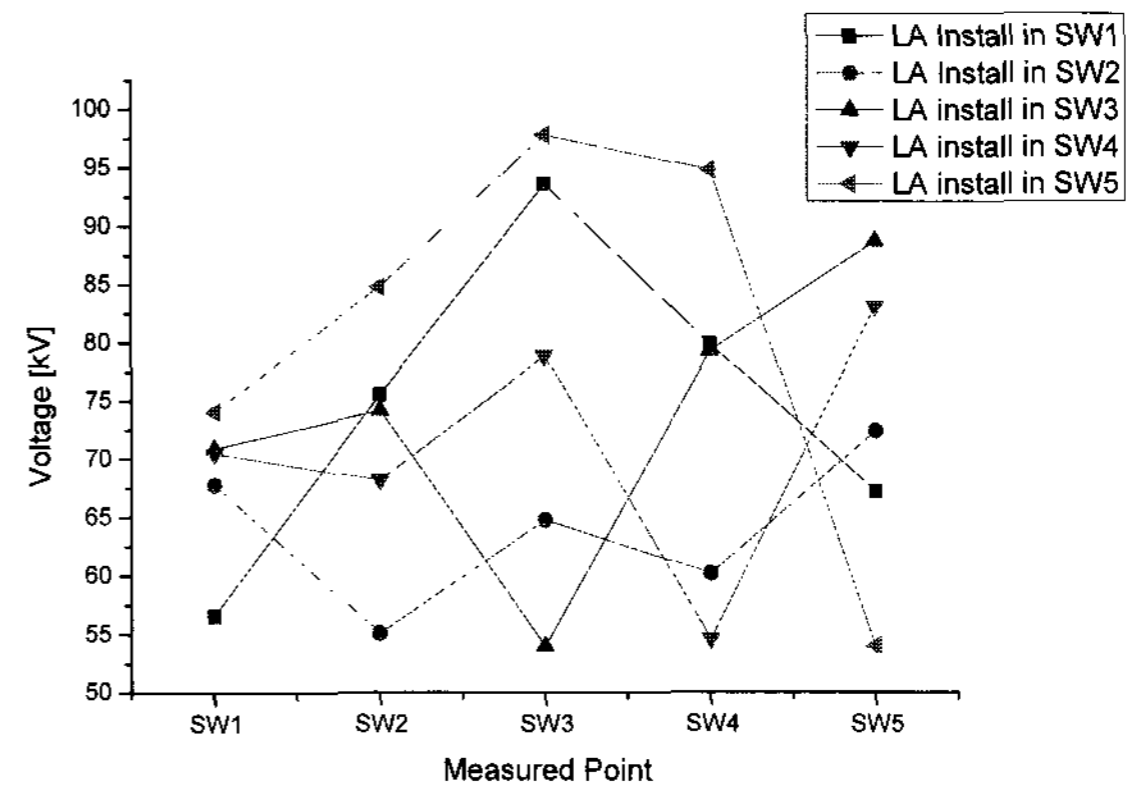


그림 22 피뢰기 설치에 따른 최대 발생전압 - 10kA  
 Fig. 22 Maximum overvoltage according to install arrester - 10kA

3. 결 론

본 논문에서 뇌임펄스 전류시험을 통한 실증시험으로 신뢰성 있는 EMTP모델링 해석 기법을 정립하여 실제 지중배전계통에 대하여 해석함으로써 효과적인 보호설비 위치를 선정하였다. 그 결과 국내 지중배전계통의 보호설비로 적용 중인 입상주 피뢰기로는 폭넓은 보호효과가 어려울 것으로 사료되며, 케이블의 말단과 분기점에 지중배전계통 보호를 위한 보호설비를 적용하여 이러한 문제점을 해결하는 방안을 제시하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 입상주 피뢰기를 통한 배전계통의 보호효과는 10kA의 뇌격전류 크기를 가질 때 입상주로부터 먼 거리의 지중배전선로 케이블 말단에서 비교적 높은 과전압이 나타나며, 보호효과 또한 지중배전계통의 모든 영역을 수렴하지 못한다.

2) 지중배전케이블의 상시개방점인 말단에 피뢰기를 설치하였을 때 지중배전케이블에 발생하는 과전압을 크게 감쇠시켜 입상주 피뢰기로 보호되지 못하는 케이블 말단의 과전압 상승을 억제해 절연과피 및 절연열화 가속화를 예방할 수 있다.

3) 최소한의 보호설비 설치로 경제적 효과를 요구하는 보호설비의 절연협조를 위해 다수의 케이블 말단으로 통하는 분기점에 피뢰기를 설치할 경우 지중배전선로의 과전압을 크게 억제하며 가장 높은 과전압 억제 효과를 나타낼 수 있는 것으로 사료된다.

본 논문의 결과는 실측시험과 EMTP 해석을 이용하여 지중배전계통해석의 정확성을 높인 것으로 향후 지중배전계통 보호방안 수립을 위한 기초자료로서 사용될 것이다.

**감사의 글**

본 논문은 2008년도 교비지원에 의해서 수행되었습니다.

**참 고 문 헌**

- [1] 한국전력공사, “배전계통 이상전압 측정 및 대책 연구 - 최종보고서”, 2000
- [2] IEC 60071-1, “Insulation Coordination - Part 1, Definitions, principles and rules”- Edition 8. 2006
- [3] IEEE Std 1313-1993, “IEEE Standard for Power Systems - Insulation Coordination” 1993
- [4] IEEE Std. 1299/C62.22.1-1996 “IEEE Guide for the Connection of Surge Arresters to Protect Insulated, Shielded Electric Power Cable Systems” 1996
- [5] IEEE Std. C62.22-1997 “IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating Current Systems” 1997
- [6] 한국전력공사, “지중배전계통의 과도현상 해석 및 보호 대책 연구-최종보고서”, 2007
- [7] 한국전력, “設計 基準”, 97본사단-181, 1997
- [8] HAEFELY, SSG-ZUS Impulse Current Addition for SGS, HAEFELY High Voltage Test, 2006

**저 자 소 개**



**윤 창 섭 (尹 昶 燮)**

1980년 12월 8일생. 2006년 원광대 공대 전기전자정보공학부 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (063)850-6735

E-mail : ziben@hanmail.net



**이 종 범 (李 鍾 範)**

1955년 7월 12일생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987~1990년 한국전기연구원 지중송전연구실 실장. 1997~1998년 미국 Texas A&M University 객원교수. 현재 원광대 공대 전기전자정보공학부 교수.

Tel : (063)850-6735

E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr