

# 지중배전계통 보호를 위한 모의시험선로 서지특성 해석

## A Lightning Surge Analysis of Testing Line for Protection of Underground Distribution Systems.

李長根<sup>†</sup> · 李鍾範<sup>\*</sup> · 金炳藝<sup>\*\*</sup> · 韓秉誠<sup>\*\*\*</sup>

(Jang-Geun Lee · Jong-Beom Lee · Byong-Sook Kim · Byoung-Sung Han)

**Abstract** - This paper describes the overvoltage obtained by surge behavior analysis in testing underground distribution systems. Model systems consist of overhead distribution line and underground cable. Such model system considered various characteristics of actual distribution systems will be soon constructed at testing yard. Simulation is carried out under various states such as cable kinds, cable length, lightning wave and time, and branch circuits. Model is established by EMTP/ATPDraw. Line Constants are calculated by ATP\_LCC. When the direct lightning surge strikes on conductor of overhead line, the overvoltage is calculated using EMTP/ATPDraw in many cases. Simulation results will be compared with real testing results at testing yard in the near future. The compared results will be used to establish protection methods in actual underground distribution systems.

**Key Words** : EMTP, Lightning, Underground Distribution Systems

### 1. 서 론

최근 급속하게 팽창하는 도시화로 인하여 인구집중현상에 따른 대도시의 전력수요 밀도가 높아져 국내 배전계통은 급격하게 확대되고 있다. 뿐만 아니라 인구밀집도시의 원활한 전력공급과 건설부지의 해결 및 도시환경조화 등을 충족시키기 위하여 신규 배전계통은 물론 기존 가공계통의 지중화가 급격히 추진되고 있다. 따라서 지중배전계통에서 사용되는 기자재의 성능도 많은 발전을 이룩하였고, 고 신뢰성 배전계통 운용기술을 확보하기 위해 많은 투자가 이루어지고 있다. 그리고 특별히 각종 서지에 관련된 연구를 통한 신뢰도 수립 대책도 많은 발전을 거듭해 왔다. 그러나 이러한 과도현상에 관련된 연구 및 대책 수립은 대부분 가공계통을 대상으로 수행되어졌으며 지중계통이나 지중과 가공이 혼합된 계통에 대해서는 상대적으로 매우 미약한 수준에 있다[1]-[3]. 또한 국내외의 논문들은 가공에 중점을 두고 연구 하였거나 케이블의 서지특성 보다는 변압기 및 기타 기기의 서지특성 및 보호 연구 내용을 다수 포함 하고 있고, 배전계통 보다 송전계통에 연구가 집중 되어 왔다[4]-[10]. 따라서 국내의 지중배전계통 실정에 적합한 연구 및 보호방안 수립이 절실히 필요한 실정이다.

지중선로는 가공선로에 침입한 뇌서지로 인해 케이블의 열화를 촉진시키고, 영구 고장을 발생시키는 주요한 원인 중에 하나로 작용하고 있으며, 이로 인해 지중 선로에서 고장이 발생했을 경우 가공선로에 비해 상대적으로 큰 복구비용과 시간이 소요된다. 그러므로 국내에서 배전계통에서 과도현상 발생시 지중케

이블을 보호하기 위해 국내에서 사용되고 있는 케이블의 종류, 선로의 구조 및 특성, 기자재 특성 등을 고려하여 과도현상의 정확한 해석이 요구되며, 이 해석결과에 따른 피뢰기나 접지 등 계통과 기기들의 보호 협조 방안을 수립하는 것이 매우 시급하다고 하겠다[11]-[13].

따라서 본 논문에서는 지중배전계통에서의 서지특성을 해석하고 보호대책을 수립하기 위하여 현재 구축 중에 있는 실증시험장의 지중배전계통 실증선로를 모델로 하여 현재 배전계통에서 사용 중인 데이터를 이용하여 모델링 하였다[14]-[19]. 또한 다양한 조건에서 서지 해석을 통하여 얻은 해석결과를 바탕으로 실제 서지인가 시험 데이터와 비교 및 검토 자료를 삼을 필요가 있어 EMTP/ATPDraw를 이용하여 해석을 실시하였다. 본 논문에서 고려된 서지인가 뇌격은 실증시험을 고려하여 실증시험에 사용할 고전압 발생장치에서 가능한 뇌격파형을 선정하였으며, 뇌격전압은 과도현상의 형태를 분석하기 위해 무인가 전압 선로에서 작은 전압을 인가하였다. 선로는 뇌격파형, 케이블 길이 및 분기선로, 가공선로 등 여러 가지 시험선로를 고려한 실증선로 계획안을 바탕으로 모델링 하여 뇌격전압을 해석하였다. 여기서 얻어진 각종 해석 결과들은 추후 실증시험의 결과와 비교 검토할 예정이며, 이를 바탕으로 국내실정에 적합한 지중 배전계통의 보호대책을 수립할 예정이다.

### 2. 모의시험선로 구성

그림 1은 국내 지중배전계통 서지특성분석을 위해 구축이 추진되고 있는 실증시험선로이다. 이 시험 선로에서 사용될 케이블은 CNCV-W 60mm<sup>2</sup>와 CNCV-W 325mm<sup>2</sup>이며 두 종류의 케이블을 혼합하여 변압기 설치 선로에는 CNCV-W 60mm<sup>2</sup>를 사용하고 그 외 선로에는 CNCV-W 325mm<sup>2</sup> 케이블을 사용할 예정이고, 변압기는 3상 200KVA 22.9kV/400-230V 규격이고 3대를 사용할 예정이다. 한편 개폐기는 BIL이 125kV이고 3W-3S 방식의 수동형 개폐기를 사용할 예정이고, 가공 전주는 2개주이고, 입상전주에 피뢰기가 생략되어 있다. 케이블 접속재는 25kV 600A급

<sup>†</sup> 교신저자, 學生會員 : 圓光大 大學院 電氣工學科 碩士課程  
E-mail : jjang3506@hanmail.net

<sup>\*</sup> 正 會 員 : 圓光大 電氣電子및情報工學部 教授 · 工博

<sup>\*\*</sup> 正 會 員 : 韓電 電力研究院 配電研究所 所長

<sup>\*\*\*</sup> 正 會 員 : 全北大 電子情報工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2006年 3月 3日

最終完了 : 2006年 6月 29日

엘보 커넥터, 절연플러그, 접속단자, 케이블 어댑터 48개, 절연캡 24개 접속 플러그 24개를 사용할 예정이다.

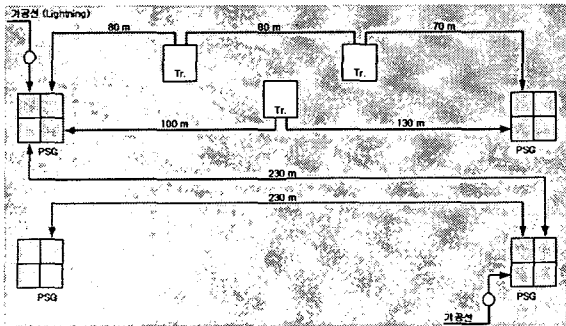


그림 1. 실증시험을 위한 시험선로  
Fig. 1. Testing line for field test

3. 모의시험선로 모델링

3.1 배전계통 모델

3.1.1 선로 모델링

가공선로는 1회선을 20m를 모의 하였고, 가공선로의 선종은 가공지선은 ACSR 32mm, 상도체는 ACSR 160mm, 중성선은 ACSR 95mm를 적용하였다. 그리고 지중케이블에서의 서지 특성을 보다 정확히 파악하기 위하여 반사파를 제거하였고, 이를 위하여 가공선로 말단은 정합으로 처리하였다. 지중선로는 60mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블과 325mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블을 혼합하여 현재 국내 지중 배전계통에서 가장 많이 사용하고 있는 관로식 삼각배열을 모의 하였고, 검토모델의 선로정수는 뇌서지 계산을 위하여 주파수 독립 모델인 분포정수를 이용하여 500kHz 선로로 모델링 하였으며, EMTP/ATPDraw의 선로정수 계산 프로그램인 ATP-LCC를 이용하여 계산하였다. 이때 가공선로 및 지중선로의 배치는 실제 상황과 동일하게 그림 2와 같이 모델링 하였다. 한편 그림 2(c)는 다회선 케이블 포설시 케이블 포설 순서를 나타낸 것이다[14]-[17].

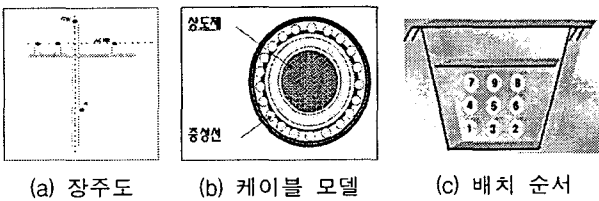


그림 2. 가공선로 장주도, 케이블 구조 및 케이블 포설 순서  
Fig. 2. Overhead line pole, cable structure and arrangement

3.1.2 선로 모델링

가공선로와 지중선로의 접지는 설계기준-3500(접지공사)에 의하여 가공선로의 가공지선과 중성선은 매 전주마다 접속하였다[18]. 현재 배전선로에서는 22.9kV 3상 4선식 다중 접지 방식을 채택하고 있고, 선로용 케이블의 동심 중성선은 접지 개소마다 각심 일괄하여 합성 저항값 5Ω/km 이하를 유지한다[19]. 가공지선과 케이블의 저항값은 식 (1)의 합성 저항식을 이용하여 설정하였고, 여기서, R은 합성 저항값이며, r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>, r<sub>3</sub>, .....r<sub>n</sub>은 매 접지점의 접지저항값을 나타낸 것이다. 그리고 그림 3은 다중접지모델을 나타내었다.

$$R = 1.2 \left( \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}} \right) \quad (1)$$

여기서,

R : 합성저항값, r<sub>k</sub> : 지점 k의 접지저항( k = 1, 2, ..., n)

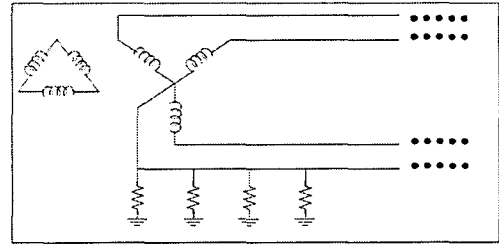


그림 3. 다중 접지 모델

Fig. 3. Model of multiple earth

3.2 뇌격 특성

인가 뇌격조건은 추후 실증시험 계획을 고려하여 선정하였고, 뇌격전압의 크기는 뇌격에 의하여 발생하는 과전압의 특성을 파악하기 위하여 100V 뇌격전압을 선정하였으며, 뇌격 파형은 케이블 계통에서 과두장 및 과미장의 시간에 따라 발생하는 뇌격전압의 크기에 영향을 미친다. 이에 따라 본 논문에서 사용할 뇌격 파형은 실제 실험용 고전압 발생장치의 규격에 따른 발생 가능한 파형 3종류 선정 하였고, 선정된 뇌격 파형의 과두장 및 과미장에 변화를 통하여 뇌격에 의한 특성을 분석하였다. 선정된 뇌격 전압 및 파형은 표 1과 그림 4와 같다.

표 1. 뇌격파형

Table 1. Model of the lightning stroke

뇌격 전압	100 V
뇌격 파형	0.5×4 μs
T <sub>f</sub> × T <sub>r</sub>	1.2×50 μs
	4×40 μs

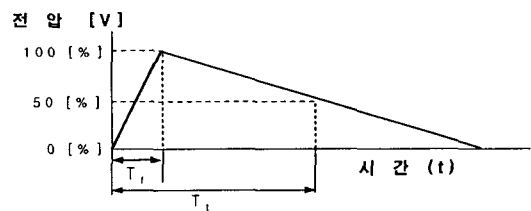


그림 4. 뇌격파형

Fig. 4. Model of the lightning stroke

4. 시뮬레이션 분석

4.1 검토 모델

뇌격은 3.2절에서 검토한 모델과 같고, 뇌격의 침입점은 실증시험 선로모델을 통하여 뇌격 침입시 최악의 경우를 고려하여 설정한 케이블 입상점 으로부터 20m 앞단에 위치한 접지가 이루어지지 않은 전주에 상정하였으며, 검토 모델은 지중케이블과 연계된 배전계통으로서 그림 5와 같다.

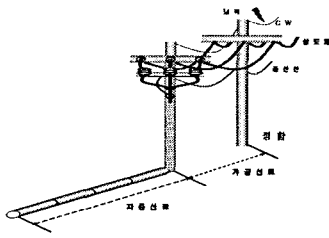


그림 5. 혼합배전계통의 검토 모델  
Fig. 5. Combined distribution testing model

본 논문에서의 모델링은 지중 배전계통에서 보다 정확하고 다양한 상황에서의 서지 특성을 파악하기 위하여 다양한 조건을 선정하여 해석을 수행 하였다. 검토한 모델은 표 2와 같이 총 4개의 Case로 Case 1,2는 가공선로와 지중선로가 혼합된 상태에서 구성하였고, Case 3,4는 가공선로와 지중선로가 혼합된 배전계통에서 분기선로를 모의 하여 시뮬레이션 하였다.

표 2. 검토 모델  
Table 2. Testing model

분류	조건
Case 1	가공(20m) + 지중 (230m, CNCV-W 60mm <sup>2</sup> ) 가공(20m) + 지중 (230m, CNCV-W 325mm <sup>2</sup> )
Case 2	가공(20m) + 지중 (460m, CNCV-W 60mm <sup>2</sup> ) 가공(20m) + 지중 (460m, CNCV-W 325mm <sup>2</sup> )
Case 3	가공(20m) + 지중 (230m, CNCV-W 60mm <sup>2</sup> ) 와 지중 (230m, CNCV-W 325mm <sup>2</sup> ) 분기
Case 4	가공(20m) + 지중 (230m, CNCV-W 60mm <sup>2</sup> ) 와 지중 (460m, CNCV-W 325mm <sup>2</sup> ) 분기

- 각 구성조건은
- Case 1 및 2 : 가공선로와 지중선로가 혼합된 계통에서의 케이블 종류와 길이의 변화에 따른 지중 계통의 서지 특성의 변화를 알아 볼 수 있다.
  - Case 3 및 4 : 기존의 실제 지중배전계통에는 분기선로가 상당히 많이 포함되어 있으므로 이와 유사한 분기선로를 실증시험선로에 포함시켰으며, 이와 같은 분기선로 모델링을 통하여 서지 특성을 해석함으로써 서지 침입시 분기선로에 미치는 영향을 파악할 수 있다.

4.2 시뮬레이션 분석결과

시뮬레이션은 각 모델별 3.2절의 모든 파형을 인가하여 시행 하였으며, 각 모델의 결과 분석은 각 케이스 별로 실시하였다.

4.2.1 Case 1

Case 1은 가공선로 상도체-ACSR 160mm<sup>2</sup>를 사용하여 20m를 모델링 하였고, 지중선로는 60mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블과 325mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블을 사용하여 230m 지중선로를 모델링 하였다. 뇌격파형은 무전압 인가 상태에서 뇌격 침입시 과전압의 발생 양상을 파악하기 위하여 과고치는 100V, 파형은 0.5×4μs, 1.2×50 μs, 4×40μs의 뇌격을 가하였으며, 검토 모델은 그림 6과 같다.

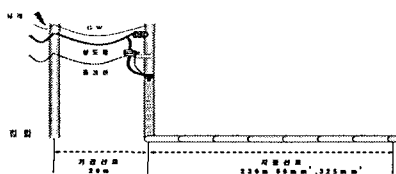
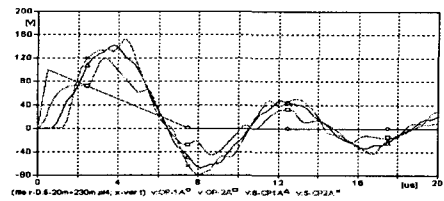
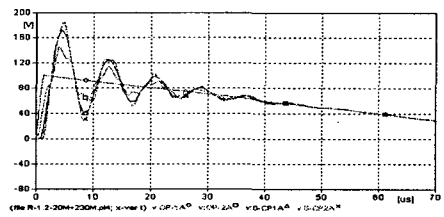


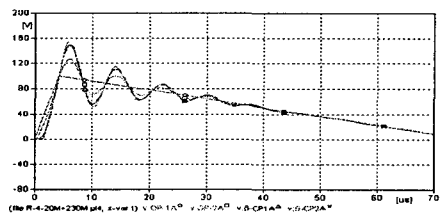
그림 6. Case 1 모델계통  
Fig. 6. Model system of Case 1



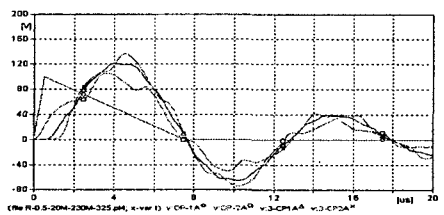
○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m × : 230m  
그림 7. 측정지점에서 과전압 파형(0.5×4μs, CNCV-W 60mm<sup>2</sup>)  
Fig. 7. Overvoltage according to location



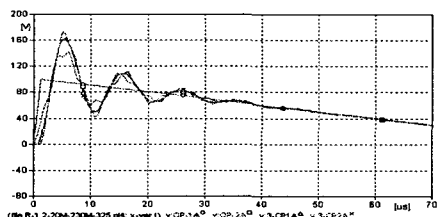
○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m × : 230m  
그림 8. 측정지점에서 과전압 파형(1.2×50μs, CNCV-W 60mm<sup>2</sup>)  
Fig. 8. Overvoltage according to location



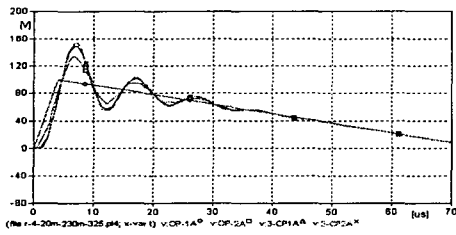
○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m × : 230m  
그림 9. 측정지점에서 과전압 파형(4×40μs, CNCV-W 60mm<sup>2</sup>)  
Fig. 9. Overvoltage according to location



○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m × : 230m  
그림 10. 측정지점에서 과전압 파형(0.5×4μs, CNCV-W 325mm<sup>2</sup>)  
Fig. 10. Overvoltage according to location



○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m × : 230m  
그림 11. 측정지점에서 과전압 파형(1.2×50μs, CNCV-W 325mm<sup>2</sup>)  
Fig. 11. Overvoltage according to location



○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m × : 230m

그림 12. 측정지점에서 과전압 파형(4×40μs, CNCV-W 325mm<sup>2</sup>)

Fig. 12. Overvoltage according to location

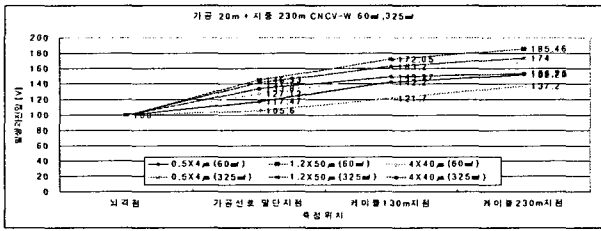


그림 13. 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압(Case 1)

Fig. 13. Overvoltage according to lightning stroke and location

그림 7~9는 Case 1의 가공선로 20m가 포함된 230m, 60mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블의 선로에서 뇌격파형별 측정점에서의 발생 과전압을 각각 나타내었고, 그림 10~12는 Case 1의 가공선로 20m가 포함된 230m, 325mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블의 선로에서 뇌격파형별 측정점에서 발생 과전압을 각각 나타내었으며, 그림 13은 Case 1에서 발생한 과전압의 결과를 종합적으로 비교하여 제시하였다.

그림 13에서 볼 수 있듯이 발생 과전압은 세종류의 뇌격 모두 케이블 말단에서 가장 크게 나타났고, 인가 뇌격조건 1.2×50μs의 뇌격시 가장 높은 과전압이 발생함을 알 수 있었으며, 발생과전압의 크기는 인가뇌격의 185% 이상의 큰 과전압이 발생함을 알 수 있었다. 그리고 325mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블 보다 60mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블의 과전압이 약간 높게 발생함을 확인 할 수 있었다.

또한 그림 7, 그림 10의 0.5×4μs 파형의 경우 가공선로 말단에서 과전압이 매우 낮게 발생함을 확인 할 수 있었는데, 이와 같은 원인은 급준한 파두장의 영향보다는 매우 짧은 파미장의 영향이라 사료된다. 0.5×4μs처럼 매우 짧은 파미장을 가지게 되면 말단에서의 반사로 인하여 발생하는 과전압의 중첩이 적게 발생하여 과전압의 크기가 작아지게 된다. 즉, 케이블 말단에서 반사되는 과전압이 접속부에 도달하기 이전에 이미 발생과전압이 상당 부분 감소된 상태에서 중첩되기 때문에 그림 7, 그림 10처럼 과전압의 크기는 작아지게 됨을 알 수 있다. 그림 9, 그림 12의 4×40μs 파형의 경우 1.2×50μs 파형의 과전압 보다 크기가 작게 나타남을 확인 할 수 있었고, 이 결과는 완만한 파두장의 기율기로 인하여 발생과전압의 크기가 작아 말단에서 반사되어 오는 반사파와의 중첩 후에도 크지 않은 과전압을 발생 하였다. 이 두 결과로부터 급준한 파두장이 과도과전압 발생에 크게 영향을 주지만 파미장 또한 과전압 발생에 크게 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4.2.2 Case 2

Case 2는 가공선로 상도체-ACSR 160mm<sup>2</sup>를 사용하여 20m를 모델링 하였고, 지중선로는 60mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블과 325mm<sup>2</sup>

CNCV-W 케이블을 사용하여 460m 지중선로를 모델링 하였다. 뇌격파형은 동일하게 100V 0.5×4μs, 1.2×50μs, 4×40μs 뇌격을 가 하였으며 검토 모델은 그림 14와 같다.

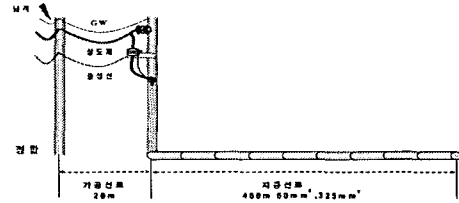
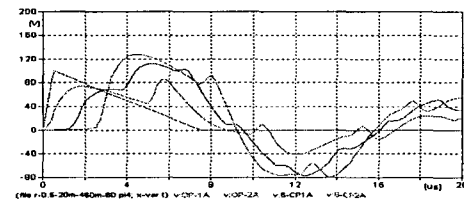


그림 14. Case 2 모델계통

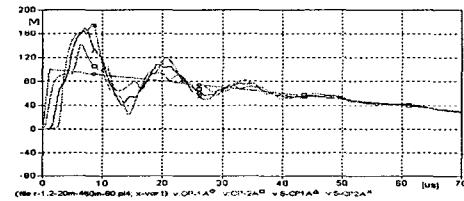
Fig. 14. Model system of Case 2



○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 230m × : 460m

그림 15. 측정지점에서 과전압 파형(0.5×4μs, CNCV-W 60mm<sup>2</sup>)

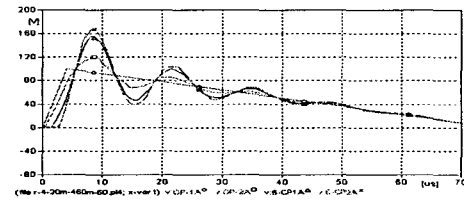
Fig. 15. Overvoltage according to location



○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 230m × : 460m

그림 16. 측정지점에서 과전압 파형(1.2×50μs, CNCV-W 60mm<sup>2</sup>)

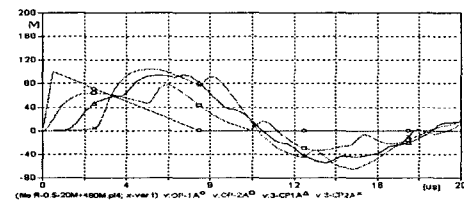
Fig. 16. Overvoltage according to location



○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 230m × : 460m

그림 17. 측정지점에서 과전압 파형(4×40μs, CNCV-W 60mm<sup>2</sup>)

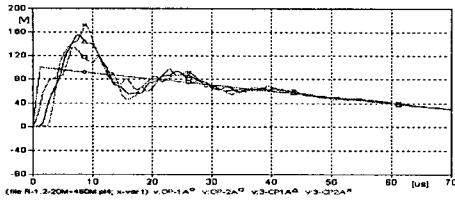
Fig. 17. Overvoltage according to location



○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 230m × : 460m

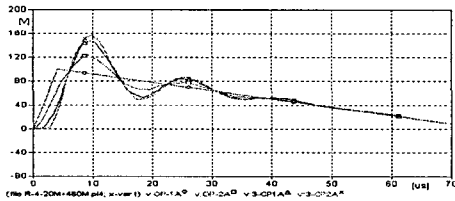
그림 18. 측정지점에서 과전압 파형(0.5×4μs, CNCV-W 325mm<sup>2</sup>)

Fig. 18. Overvoltage according to location



○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 230m × : 460m

그림 19. 측정지점에서 과전압 파형(1.2×50μs, CNCV-W 325mm<sup>2</sup>)  
Fig. 19. Overvoltage according to location



○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 230m × : 460m

그림 20. 측정지점에서 과전압 파형(4×40μs, CNCV-W 325mm<sup>2</sup>)  
Fig. 20. Overvoltage according to location

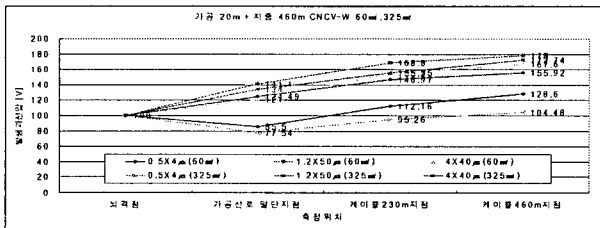


그림 21. 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압(Case 2)  
Fig. 21. Overvoltage according to lightning stroke and location

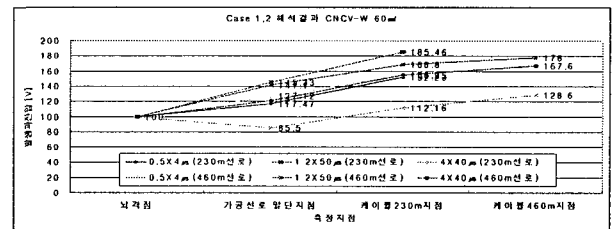
그림 15~17은 Case 2의 가공선로가 20m가 포함된 460m, 60mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블의 선로에서 뇌격파형별 뇌격전류와 측정점에서 과전압을 각각 나타내었고, 그림 18~20은 Case 2의 가공선로가 20m가 포함된 460m, 325mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블의 선로에서 뇌격파형별 뇌격전류와 측정점에서 과전압을 각각 나타내었으며, 그림 21은 Case 2에서 발생한 과전압의 결과를 종합적으로 비교하여 제시하였다.

Case 2에서도 Case 1과 같이 뇌격조건 1.2×50μs의 뇌격시 가장 높은 과전압이 발생함을 알 수 있었고, 발생과전압의 크기는 Case 1과 비교했을 경우 약간 작은 인가뇌격의 172% 이상의 큰 과전압이 발생함을 알 수 있었으며, 또한 Case 1과 같이 케이블 길이에 관계없이 325mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블 보다 60mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블의 과전압이 약간 높게 발생함을 확인 할 수 있었다.

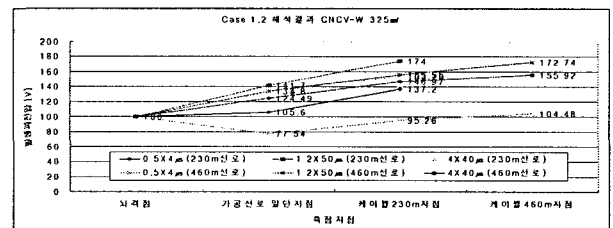
지금까지 분석한 그림 7~13과 그림 14~21의 파형처럼 가장 높은 과전압을 발생 시키는 뇌격조건은 1.2×50μs임을 알 수 있었고, 파두장과 파미장이 매우 짧은 뇌격조건 0.5×4μs와 파두장이 긴 뇌격조건 4×40μs 뇌격 또한 150% 이상의 과전압이 발생하였다. 가장 큰 과전압을 발생 시킨 뇌격조건 1.2×50μs에 비하여 뇌격조건 0.5×4μs의 경우는 급준한 파두장을 가졌으나 매우 짧은 파미장의 영향으로 낮은 과전압 발생되었고, 뇌격조건 4×40μs의 뇌격의 경우에는 완만한 파두장의 영향으로 0.5×4μs의 경우와 같이 낮은 과전압이 발생 되었으며, 결국 완만한 파두장은 과전압 증점이 적어 큰 과전압을 발생시킬 수 없음을 확인 할 수 있었다. 이것은 파두장과 파미장의 길이는 최대 발생 과전압의 크기에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

표 3. Case1,2의 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압  
Table 3. Overvoltage according to lightning stroke and location

분류	뇌격파형 [μs]	뇌격점 전압[V]	가공선로 말단 전압[V]	케이블		
				130m 지점 전압[V]	230m 지점 전압[V]	
Case 1	CNCV-W 60mm <sup>2</sup>	0.5×4	100	117.47	142.2	152.23
		1.2×50	100	145.33	172.05	185.46
		4×40	100	127.12	149.17	154.25
	CNCV-W 325mm <sup>2</sup>	0.5×4	100	105.6	121.7	137.2
		1.2×50	100	141.7	163.2	174
		4×40	100	133.8	149.3	153.76
Case 2	뇌격파형 [μs]		뇌격점 전압[V]	가공선로 말단 전압[V]	케이블	
					230m지점 전압[V]	460m지점 전압[V]
	CNCV-W 60mm <sup>2</sup>	0.5×4	100	85.5	112.16	128.6
		1.2×50	100	141.1	168.8	178
		4×40	100	120.98	155.2	167.6
	CNCV-W 325mm <sup>2</sup>	0.5×4	100	77.54	95.26	104.48
1.2×50		100	134	155.55	172.74	
4×40		100	124.49	146.97	155.92	



(a) 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압 (CNCV-W 60mm<sup>2</sup>)



(b) 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압 (CNCV-W 325mm<sup>2</sup>)

그림 22. Case 1,2 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압  
Fig. 22. Overvoltage according to lightning stroke and location

표 3과 그림 22는 Case1,2의 뇌격파형과 측정 위치별 발생 과전압을 비교하여 나타내었다. Case 1과 Case 2처럼 완전 개방되어 있는 선로의 경우 역시 케이블의 말단에서 가장 높은 과전압이 나타남을 확인 할 수 있었고, 같은 조건일 경우 케이블의 길이가 짧은 경우에서 과전압이 더 크게 발생함을 알 수 있었다. 또한 같은 뇌격 조건 및 같은 길이 조건에서는 CNCV-W 325mm<sup>2</sup> 케이블 보다 CNCV-W 60mm<sup>2</sup> 케이블의 과전압이 약간 높게 발생함을 확인 할 수 있었다.

### 4.2.3 Case 3

Case 3은 가공선로 상도체-ACSR 160mm<sup>2</sup>를 사용하여 20m를 모델링 하였고, 지중선로는 CNCV-W 60mm<sup>2</sup> 과CNCV-W 325mm<sup>2</sup> 케이블을 사용하여 각각 230m씩 가공 입상점으로부터 분기된 지

중선로를 모델링 하였다. 뇌격파형은 동일하게 100V 0.5×4μs, 1.2×50μs, 4×40μs 뇌격을 가하였으며 검토 모델은 그림 23과 같다.

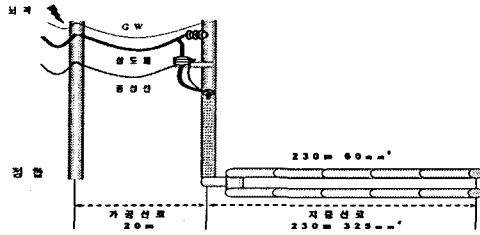
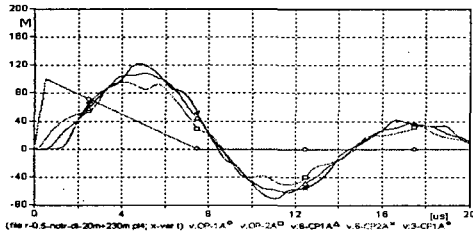
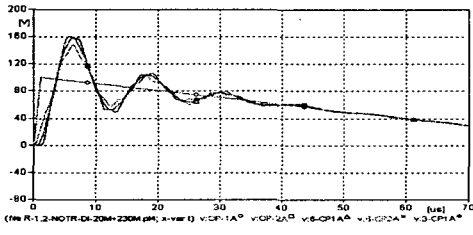


그림 23. Case 3 모델계통  
Fig. 23. Model system of Case 3



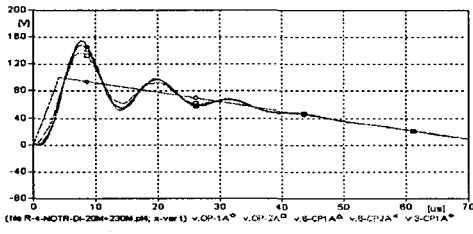
○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m CNCV-W 60mm<sup>2</sup>  
× : 230m CNCV-W 60mm<sup>2</sup> ◆ : 230m CNCV-W 325mm<sup>2</sup>

그림 24. 측정지점에서 과전압 파형(0.5×4μs)  
Fig. 24. Overvoltage according to location



○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m CNCV-W 60mm<sup>2</sup>  
× : 230m CNCV-W 60mm<sup>2</sup> ◆ : 230m CNCV-W 325mm<sup>2</sup>

그림 25. 측정지점에서 과전압 파형(1.2×50μs)  
Fig. 25. Overvoltage according to location

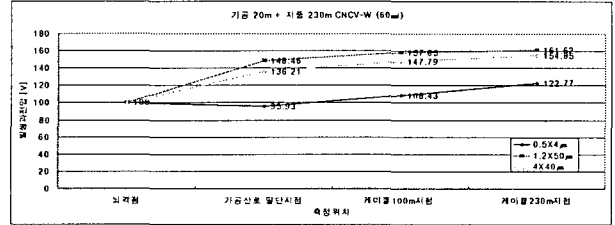


○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m CNCV-W 60mm<sup>2</sup>  
× : 230m CNCV-W 60mm<sup>2</sup> ◆ : 230m CNCV-W 325mm<sup>2</sup>

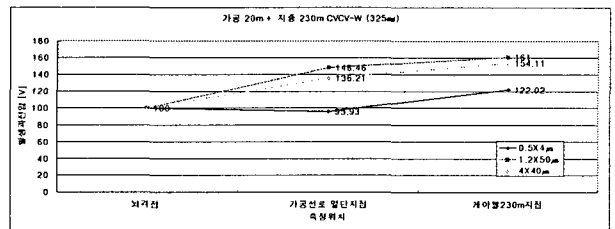
그림 26. 측정지점에서 과전압 파형(4×40μs)  
Fig. 26. Overvoltage according to location

그림 24~26은 Case 3의 가공선로 20m가 포함된 230m, 60mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블의 선로와 230m, 325mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블의 선로가 지중 입상 후 분기된 선로에서 측정위치에 따른 뇌격파형별 발생 과전압 파형을 나타낸 것이다. 그림 27

은 Case 3의 결과를 정리하였다. 그림 27에서 보는 것과 같이 케이블 종류는 다르나 같은 길이의 선로에서의 과전압은 거의 비슷하게 발생 하였으나 60mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블이 약간 크게 발생하였으며, 최대 발생과전압은 인가 뇌격의 160% 이상 발생하는 것으로 나타났다.



(a) 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압 (CNCV-W 60mm<sup>2</sup>)



(b) 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압 (CNCV-W 325mm<sup>2</sup>)

그림 27. 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압(Case 3)  
Fig. 27. Overvoltage according to lightning stroke and location

4.2.4 Case 4

Case 4는 가공선로 상도체-ACSR 160mm<sup>2</sup>를 사용하여 20m를 모델링 하였고, 지중선로는 60mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블 230m와 325mm<sup>2</sup> CNCV-W 케이블 460m를 사용하여 가공 입상점으로부터 분기된 지중선로를 모델링 하였다. 뇌격파형은 동일하게 100V 0.5×4μs, 1.2×50μs, 4×40μs 뇌격을 가하였으며 검토 모델은 그림 28과 같다.

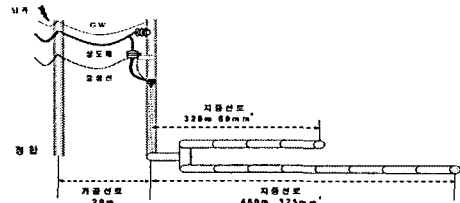
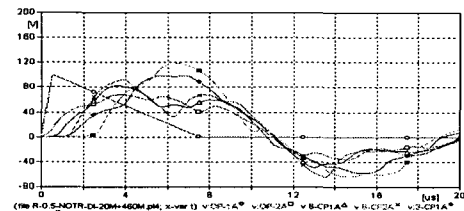
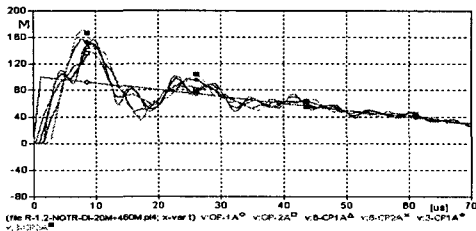


그림 28. Case 4 모델계통  
Fig. 28. Model system of Case 4



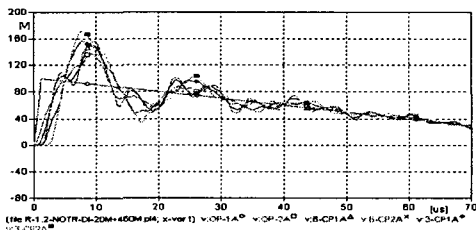
○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m CNCV-W 60mm<sup>2</sup>  
× : 230m CNCV-W 60mm<sup>2</sup> ◆ : 230m CNCV-W 325mm<sup>2</sup>  
■ : 460m CNCV-W 325mm<sup>2</sup>

그림 29. 측정지점에서 과전압 파형(0.5×4μs)  
Fig. 29. Overvoltage according to location



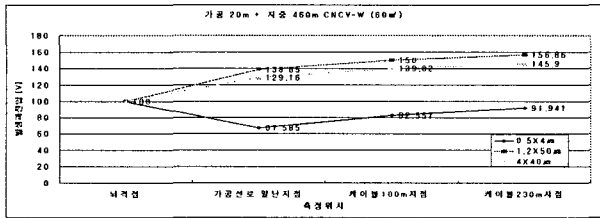
○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m CNCV-W 60mmf  
 × : 230m CNCV-W 60mmf ◆ : 230m CNCV-W 325mmf  
 ■ : 460m CNCV-W 325mmf

그림 30. 측정지점에서 과전압 파형(1.2×50μs)  
 Fig. 30. Overvoltage according to location

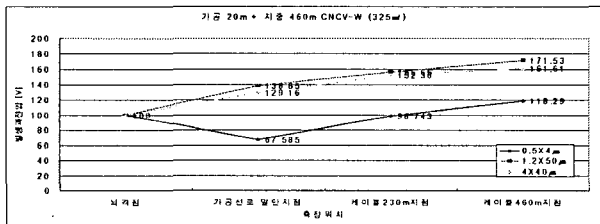


○ : 뇌격점 □ : 가공 말단 △ : 130m CNCV-W 60mmf  
 × : 230m CNCV-W 60mmf ◆ : 230m CNCV-W 325mmf  
 ■ : 460m CNCV-W 325mmf

그림 31. 측정지점에서 과전압 파형(4×40μs)  
 Fig. 31. Overvoltage according to location



(a) 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압 (CNCV-W 60mmf)



(b) 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압 (CNCV-W 325mmf)

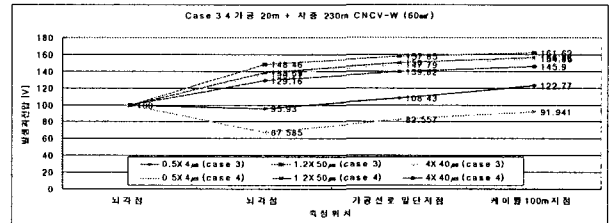
그림 32. 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압(Case 4)  
 Fig. 32. Overvoltage according to lightning stroke and location

그림 29~31은 Case 4의 가공선로 20m가 포함된 230m, 60mmf CNCV-W 케이블의 선로와 460m, 325mmf CNCV-W 케이블의 선로가 분기된 선로에서 측정위치에 따른 뇌격파형별 뇌격전류와 과전압 파형을 나타낸 것이다. 그림 32는 Case 4의 결과를 정리하였다. Case 4는 분기선로의 325mmf CNCV-W 케이블의 길이를 230m에서 460m로 연장하여 실험하였고, 그 결과 서로 다른 길이의 분기선로의 경우 선로길이 긴 쪽 선로 말단에서 발생 과전압이 더 크게 발생하였

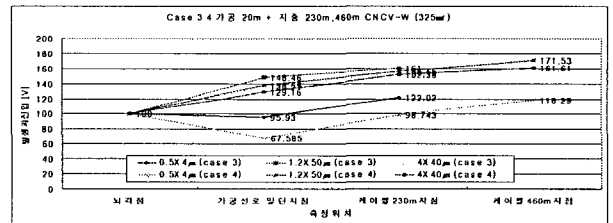
며, 두 분기선로의 같은 거리의 측정 지점에서도 발생 과전압은 약간 큰 것으로 나타났다.

표 4. Case 3,4의 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압  
 Table 4. Overvoltage waveform(Case3,4) from lightning stroke and measured location

분류	뇌격파형 [μs]	뇌격점 전압[V]	가공선로 말단 전압[V]	CNCV-W 60mmf 케이블		
				100m 지점 전압[V]	230m 지점 전압[V]	
Case 3	0.5×4	100	95.93	108.43	122.77	
				1.2×50	157.85	161.62
					4×40	147.79
	뇌격파형 [μs]	뇌격점 전압[V]	가공선로 말단 전압[V]	CNCV-W 325mmf 케이블		
				230m 지점 전압[V]	-	
				0.5×4	122.02	-
1.2×50	161	-				
4×40	154.11	-				
Case 4	뇌격파형 [μs]	뇌격점 전압[V]	가공선로 말단 전압[V]	CNCV-W 60mmf 케이블		
				100m 지점 전압[V]	230m 지점 전압[V]	
				0.5×4	82.55	91.941
	1.2×50	155	156.86			
	4×40	139.82	145.9			
	뇌격파형 [μs]	뇌격점 전압[V]	가공선로 말단 전압[V]	CNCV-W 325mmf 케이블		
				230m 지점 전압[V]	460m 지점 전압[V]	
				0.5×4	98.74	118.26
	1.2×50	156.65	171.53			
	4×40	152.35	161.61			



(a) CNCV-W 60mmf 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압(Case 3,4)



(b) CNCV-W 325mmf 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압(Case 3,4)

그림 33. 뇌격별 측정위치에 따른 발생 과전압(Case 3,4)  
 Fig. 33. Overvoltage according to lightning stroke and location

그림 33과, 표 4는 뇌격파형과 측정 위치별 Case 3,4의 발생 과전압을 비교하여 나타내었고, Case3,4 해석 결과 동일 선로길 이에서 발생 과전압은 거의 비슷하게 나타났고, 서로 다른 길 이의 분기선로의 경우 선로길이가 긴 쪽 선로 말단에서 발생 과전압 이 더 크게 발생 하였으며, 두 분기선로의 같은 거리의 측정 지 점에서의 발생 과전압 또한 약간 큰 것으로 나타났다. 한편, 가공

말단(입상주)에서의 발생 과전압 또한 위의 경우와 동일한 경향을 보인다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 수행중인 실증시험 계통도를 이용해 실증시험 조건 및 환경을 고려한 네 가지의 경우를 설정하여 실계통 데이터를 이용하여 모델링 후 다양한 분석을 하였고, 분석한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 1.2×50μs의 뇌격파형에서 가장 큰 과전압이 발생하였고, 케이블의 길이가 짧을수록 발생 과전압의 크기가 증가함을 확인 할 수 있었다.
- (2) 뇌격 파형의 변화에 따라 파두장의 길이가 짧을수록 그리고 파미장의 길이가 길수록 과전압은 크게 발생 되었으며, 파미장 길이가 짧을 경우 반사 과전압과의 중첩이 작아 과전압이 크게 발생 하지 않는다.
- (3) 파두와 파미장의 길이가 전체적으로 짧을 경우 케이블의 길이가 길어지게 되면 발생과전압의 크기는 줄어든다.
- (4) 같은 조건에서 CNCV-W 325mm<sup>2</sup> 케이블 보다 CNCV-W 60mm<sup>2</sup> 케이블의 과전압이 약간 높게 발생함을 확인 할 수 있었다.
- (5) 분기선로의 경우 동일 선로길이에서 발생 과전압은 거의 비슷하게 나타났다.
- (6) 서로 다른 길이의 분기선로의 경우 선로길이가 긴 쪽의 선로 말단에서 발생 과전압이 더 크게 발생 하였고, 두 분기선로의 같은 길이의 축점 지점에서도 발생 과전압은 약간 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 분석한 시뮬레이션 결과는 수행중인 실증시험의 선로구성 및 시험조건 확립에 활용할 계획이고, 실측을 통한 이상전압 발생 모의시험 결과와 비교검토를 통해 최적의 시뮬레이션 기법 및 모델링을 확립에 이용할 예정이다. 본 연구의 연구결과와 실증시험을 통한 데이터 비교를 통하여 개발 및 검증된 모델링 기법은 지중배전계통의 과도현상 메커니즘 분석은 물론 이론적 시뮬레이션 모델 구축을 통해 다양한 과도현상을 분석함으로써 지중배전계통의 서지 보호대책 마련 및 절연협조 기준 제정립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원으로 전력산업연구개발사업 (R-2005-0-030)의 한국전력공사 주관으로 수행 중인 과제임.

#### 참 고 문 헌

[1] K. Nakada, "Energy Absorption of Surge Arresters on Power Distribution Lines due to Direct Lightning Strokes" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, Oct. 1997

[2] 한국전력공사, "배전계통 절연협조 기준 정립에 관한 연구", 한국전력공사, 2003

[3] Juan A. Martinez, "Surge Protection of Underground Distribution Cables", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, April 2000

[4] Oka, K., Hirai, T., Murata, K., Hashimoto, E., Ariga, Y. "A calculation of transient overvoltage for rationalization of insulation design of 22kV cable system" Trans. and Distribution Conference and Exhibition 2002, Vol. 2, 6-10 Oct. 2002

[5] Li-Ming Zhou, Boggs, S.A. "Effect of shielded distribution cables on lightning-induced overvoltages in a distribution system", Power Delivery, IEEE Trans. on, Vol. 17, Issue 2, April 2002

[6] Lai, L.L., Yokoyama, R., "Analysis of sheath transients in specially bonded cable systems using EMTP Trageser", Energy Management and Power Delivery, Vol. 2, 3-5 March 1998

[7] Chen Min, Sekiguchi, Y., Mashio, S., Mitani, M., Jinno, A., "Study of ground-fault surge in buried EHV cable line based on EMTP simulation", Trans. and Distribution Conference and Exhibition 2002, Vol. 2, 6-10 Oct. 2002

[8] Kolcio, N., Halladay, J.A., "Transient overvoltages and overcurrents on 12.47kV distribution lines: computer modeling results", Power Delivery, IEEE Trans. on, Vol. 8, Issue 1, Jan. 1993

[9] Nakanishi H., Inoguchi H., Hashimoto I., Ito Y., Takehana, H., Nagaoka, N., Ametani, A., "A study of zero-sequence current induced in a cable system", Power Delivery, IEEE Trans. on, Vol. 6, Issue 4, Oct. 1991

[10] 정채균, 김상국, 이종범, "2회선 배전계통에서 피뢰기 설치방법에 따른 차폐효과 분석", 대한전기학회논문지, 제 55권 2호, 2004

[11] 한국전력공사, "배전선 절연설계에 관한 연구(I)", 한국전력공사 기술연구원, 1989

[12] 한국전력공사, "배전선 절연설계에 관한 연구(II)", 한국전력공사 기술연구원, 1992

[13] 한국전력공사, "배전계통 이상전압 측정 및 대책 연구", 2000

[14] 한국전력공사, "표준 구매시방서(2000-0133 단45 ES 100~130)", 2000

[15] 한국전력공사, "표준 구매시방서(2000-0133 단45 ES 140~900)", 2000

[16] 한국전력공사, "지중실무 I", 한국전력공사 중앙교육원, 2005

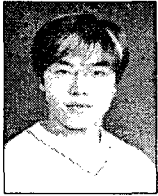
[17] 한국전력공사, "지중실무 II", 한국전력공사 중앙교육원, 2005

[18] 한국전력공사, "배전분야 설계기준-3500(접지공사)", 1999

[19] 한국전력공사, "배전지중편 설계기준-5300(지중구조물)", 2000



저 자 소 개



**이 장 근 (李 長 根)**

1979년 5월 10일생. 2004년 원광대 공대 전기전자및정보공학부 졸업. 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 063-850-6735

E-mail : jjang3506@hanmail.net



**이 증 범 (李 鍾 範)**

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

Tel : 063-850-6735

E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr



**김 병 숙 (金 炳 塾)**

1958년 3월 15일생. 1980년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 핀란드 헬싱키 경영대학원 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원(KEPRI) 배전연구소장.

Tel : 042-865-5900

E-Mail : kbsook@kepri.co.kr



**한 병 성 (韓 秉 誠)**

1951년 12월 22일생. 1975년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1988년 프랑스 루이 파스퇴르 대학 졸업(공학박사). 1988년 프랑스 CNRS(프랑스 국립과학연구소) 연구원. 2002년 9월~2004년 8월 전북대 공대 학장. 현재 전북대 공대 전자정보공학과 교수.

Tel : 063-270-2396

E-Mail : hbs@moak.chonbuk.ac.kr