

GIS 립 스페이스에 대한 전계해석 및 절연특성 개선에 관한 연구

(A Study on the Electric Field Analyses and Improvement of Insulation Characteristics on the Ribbed Spacer for GIS)

류성식* · 최영찬 · 곽희로

(Sung-Sic Ryu · Young-Chan Choi · Hee-Ro Kwak)

요 약

본 논문에서는 전계해석을 통하여 금속성 파티클이 GIS 스페이스의 여러 위치에 부착되었을 경우 립이 파괴 전압특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 립-스페이스의 여러 위치에 금속성 파티클을 부착하고 립의 모양, 길이, 두께 등의 변화에 따라 얻은 파괴전압특성 실험결과를 전계해석의 결과와 비교·검토하였다. 전계해석의 결과 립의 연면에서의 전계집중이 다른 부분에 비하여 완화되어 절연파괴시 발생된 스트리머의 진전이 억제될 수 있다는 것을 알 수 있었으며, 실험을 통하여 파괴전압이 상승된다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 립의 길이와 두께 등에 따라서도 파괴전압 특성이 달라짐을 알 수 있었다. 또한 립의 끝단을 라운드 처리함으로써 파괴전압 특성을 더욱 향상시킬 수 있음을 전계해석과 실험을 통하여 알 수 있었다.

Abstract

This paper analyzed the effect of ribs on the breakdown characteristics when a metallic particle attaches on the various spot of GIS spacer, using electric field analysis. Also, it was compared with the experimental result of breakdown voltage characteristics for the spacer with a metallic particle on its various spot and with the shape, the length, and the thickness of the ribs varying.

The results of electric field analysis show that the electric field concentration of the rib is more weakened than other parts and therefore it restrains the proceeding of streamer, which occurs at the breakdown. And it is verified through experiments that the breakdown voltage of the spacer with rib is higher than that of the spacer without rib. The breakdown characteristics depend on the shape, the length, and the thickness of the rib as well. Also, it is confirmed by the electric field analysis and the experimental results that the electric breakdown characteristics could be improved by rounding the rib edge.

Key Words : GIS, rib, spacer, electric field analysis, breakdown voltage, streamer

1. 서 론

SF₆ 가스를 절연매체로 사용하는 대표적인 전력기기인 GIS는 높은 절연내력과 밀폐화에 의한 소형화, 고신뢰화 등의 장점을 가지고 있는 기기이다. 특히 절연설계의 합리화에 관한 연구가 수행되어, 더 한층 전력기기의 소형화 및 고신뢰화가 시도되고 있다. 그러나 GIS는 SF₆가스를 금속용기에 밀폐시킨 매우 콤팩트한 구조를 가지므로, 내부에 존재하는 금속성 파티클이 절연특성에 미치는 영향을 분석하고, 이를 개선하는 연구가 필요하다.

* 주저자 : 현대중공업 기전연구소 연구원
Tel : 031-289-5321, Fax : 031-289-5027
E-mail : researchist@weppy.com
접수일자 : 2001년 12월 26일
1차심사 : 2001년 12월 28일
심사완료 : 2002년 2월 14일

팩트(compact)한 기기이기 때문에 절연거리의 축소로 인하여 고전계 상태에서 금속성 파티클이 존재하게 되면 GIS의 절연성능은 상당한 영향을 받게 된다. 즉, GIS의 제작, 조립, 운반 과정 및 운전 중에 파티클 등이 발생하게 되면 전계에 의하여 파티클이 가스공간을 부상·비행하기도 하고, 절연물 표면에 부착하여 기기의 절연성능을 현저히 저하시켜 절연파괴로 이어지게 된다. 특히 스페이스에 금속성 파티클이 부착되어 있을 때가 GIS 사고에서 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 보고되고 있다[1,2].

스페이스에 부착된 금속성 파티클이 절연특성에 미치는 영향을 개선하기 위한 방법의 하나로써 립-스페이스(ribbed spacer)가 제안되어 여러 연구자들에 의해서 연구되어왔다. Tokio Yamagiwa 등의 연구에 따르면, 립-스페이스의 상단에 부착된 파티클에 의한 립-스페이스의 파괴전압특성은 립의 길이와 개수 등에 의하여 그 특성이 많이 달라졌다. 그러나 이러한 기존의 연구에서는 립-스페이스의 직경보다 작은 전극을 사용하여 실제 매우 긴 원통형 도체를 사용하는 GIS의 구조와 상이한 조건에서 실험을 시행하였고, GIS 공간내에서 여러 복잡한 운동 패턴에 따라 스페이스의 여러 위치에 부착될 수 있는 파티클의 부착위치도 특정 부위에만 국한되었으며, 전계 해석 시물레이션을 통한 분석이 충분이 이루어지지 않았다[3,4,5].

따라서, 본 논문에서는 보다 정확한 전계해석을 위하여 실제의 GIS 전극에 가깝게 직경이 충분히 큰 전극을 모의하여 여러 형상의 립-스페이스에 대한 전계해석을 수행하였으며, 실험을 통하여 얻은 절연 파괴전압 측정결과를 전계해석의 결과와 비교·검토함으로써 립-스페이스의 전반적인 특성을 밝히고자 하였다[6,7].

2. 전계해석

2.1 모의 립-스페이스

본 논문에서는 유한요소법(FEM)을 이용한 전계해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여, 선형 도전성 파티클(직경: 0.57[mm], 길이: 2[mm], 재질: 구리)이 립-스페이스에 부착되었을 경우, 립의 길이와 두께 및 모양 등의 변화에 따른 전계분포 변화를 검토하였다.

그림 1은 전계해석 및 파괴전압시험을 위하여 모

의된 원통형 립-스페이스의 형태를 보여준다. 편의상 형태에 따라 A, B, C의 세가지로 분류하였다. 스페이스-A와 B가 립-스페이스이며 스페이스-B는 스페이스-A의 립의 끝단을 라운드 처리한 것이다. 스페이스-C는 립이 없는 일반적인 스페이스를 모의한 것이다. 절연파괴시험을 위한 립-스페이스의 재질은 아크릴로 제작하였으며, 립을 제외한 각 스페이스의 직경 및 높이는 각각 30[mm]로 하였다. 립은 실험의 목적에 따라 스페이스에서의 위치, 두께 등을 달리하여 다양한 형태로 제작하였다. 단, 전계해석시에는 실제 스페이스에 사용되는 재질인 에폭시를 적용하였다.

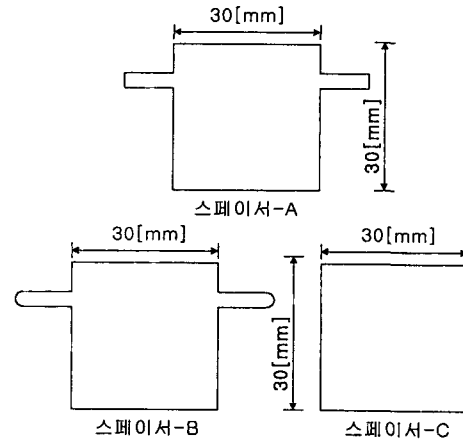


그림 1. 립-스페이스
Fig. 1. Ribbed spacer

2.2 전계해석 결과

그림 2는 스페이스-A에 대한 3차원 전계해석 결과이다.

파티클은 립-스페이스의 상단 즉, 파티클이 상부 전극으로부터 1[mm] 정도 떨어져 립-스페이스에 부착되어 있는 것으로 모의하였다. 그림을 살펴보면 파티클의 끝단에 전계가 집중되며 립은 스페이스의 몸통보다 상대적으로 전계분포가 완만하게 분포하며, 특히 립의 중간부분에서 전계집중이 가장 완만하게 분포되는 것을 볼 수 있다. 따라서 스페이스에 립의 형상을 만들어 줌으로써 스페이스에서의 방전거리를 증가시키고 더불어 립 자체가 스페이스의 연면을 따라 진행하게 되는 스트리머의 진전을 억제하는 역할을 하게 되며, 립의 길이가 길어질수록 이러한 효과는 더욱 커질 수 있음을 추정할 수 있다[8].

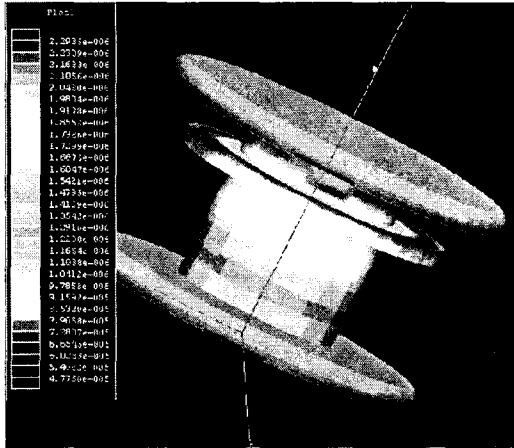


그림 2. 스페이서-A의 전계분포도
Fig. 2. Illustration of electric field distribution of spacer-A

그림 3은 립의 길이 변화에 의한 영향을 알아보기 위한 전계해석 결과이다. 각각의 립의 길이는 1:2:3의 비율로 설정하였다.

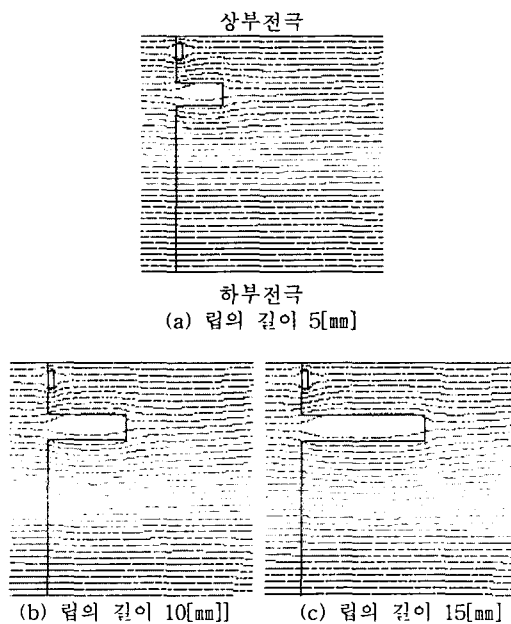


그림 3. 스페이서-A의 립의 길이 변화에 따른 전위분포도
Fig. 3. Illustration of potential distribution with rib length of spacer-A

그림 3 (a)를 보면 파티클과 함께 립의 시작단과 립의 끝단에 전계가 집중되며 립의 중간영역에서 전

계가 약화되는 것을 볼 수 있다. 그림 3 (b)와 그림 3 (c)와 같이 립의 길이가 길어질수록 립의 중간부분에 전계의 집중이 다소 완화되는 영역이 넓어지고 있다. 따라서 립의 길이가 길어질수록 방전경로가 늘어남과 동시에 립의 중간에서 전계의 집중이 다소 완화되므로 스트리머의 진전이 방해될 받게 되어 파괴전압이 올라갈 수 있음을 추정할 수 있다.

그림 4는 스페이서-A형에서 전극으로부터 가상스트리머(imaginary streamer)가 발생하여 각각 립의 시작단과 립의 중간부분, 그리고 립의 끝단까지 진행하였다고 가정했을 때의 전위분포도이다[4].

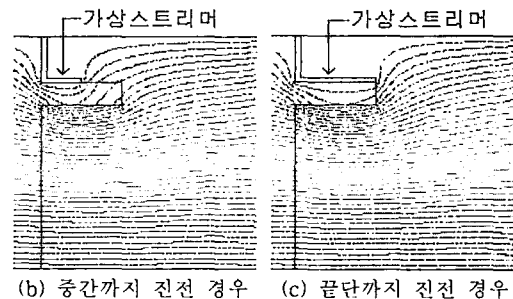
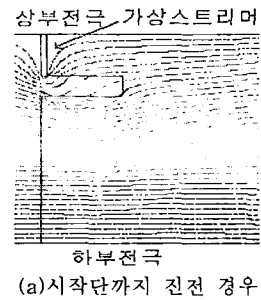


그림 4. 스페이서-A의 가상스트리머 진전에 따른 전위분포도
Fig. 4. Illustration of potential distribution with imaginary streamer progress of spacer-A

그림 4 (a)와 같이 가상스트리머가 립의 시작단에 도달하였을 경우 전위분포가 상당히 밀집되어 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 4 (b)와 같이 가상스트리머가 립의 중간부분에 도달하게 되면 스트리머 주위의 전위분포가 상당히 완화되는 것을 볼 수 있다. 이것은 그림 2, 그림 3의 전계해석에서 보인 바와 같이 립의 중간부분에서 전계분포가 가장 낮게 집중되는 것과 연관지을 수 있다. 그림 4 (c)와 같이

가상스트리머가 립의 끝단에 도달하게 되면 가상스트리머가 립의 중간부분까지 도달하였을 때보다는 상대적으로 전위분포가 약간 밀집되는 것을 볼 수 있다.

그림 5는 립의 끝단을 라운드 처리한 스페이스-B에서 가상스트리머 진전에 따른 전위분포도이다. 가상스트리머가 립의 시작단과 중간부분까지 진행하였을 경우의 전위분포는 그림 4 (a), (b)와 같은 경향을 보이지만 가상스트리머가 립의 끝단에 도달하였을 경우의 전위분포가 그림 4 (c)의 경우보다는 상당히 완만한 것을 볼 수 있다. 따라서 립의 끝단을 라운드 처리함으로써 립의 끝단에 전계가 집중되는 것을 다소 개선할 수 있음을 알 수 있다.

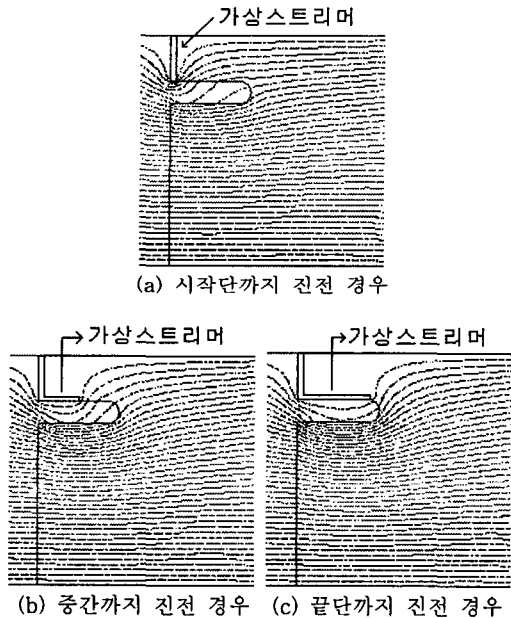


그림 5. 스페이스-B의 가상스트리머 진전에 따른 전위분포도
Fig. 5. Illustration of potential distribution with imaginary streamer progress of spacer-B

그림 6은 앞에서 보여진 전계해석 결과를 토대로 절연파괴전압 실험을 수행하기 위하여 제작된 모의 GIS 챔버의 개략적인 구조를 보여준다. 스페이스는 모의 챔버 내의 전극 사이에 놓여 있으며 파티클을 각각 스페이스의 상단(i), 중단(ii), 하단(iii)에 부착시켜 이 세 가지 위치에서의 파괴전압을 측정하였다. 챔버

내부는 충분한 진공상태를 만든 후 SF₆ 가스와 N₂ 가스가 1:9의 조성비를 갖는 혼합가스를 1[bar]의 압력으로 충전하였다. 각각의 실험에서 파괴전압은 5회 이상 측정하였으며 그 평균값을 대표값으로 하였다.

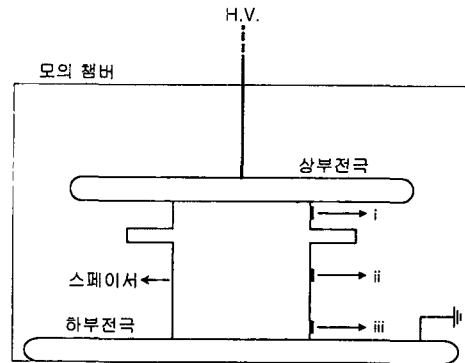


그림 6. 모의 GIS 챔버
Fig. 6. Model GIS chamber

그림 7은 그림 6의 실험장치를 이용하여 얻은 스페이스-A와 립의 끝단을 라운드 처리한 스페이스-B, 그리고 립이 없는 일반적인 형상의 스페이스-C에 대한 절연파괴 실험결과를 보여준다. 결과에서 나타난 바와 같이, 립이 없는 스페이스-C보다는 립의 형상을 가지고 있는 스페이스들에서 파괴전압이 전체적으로 증가한 것을 볼 수 있다.

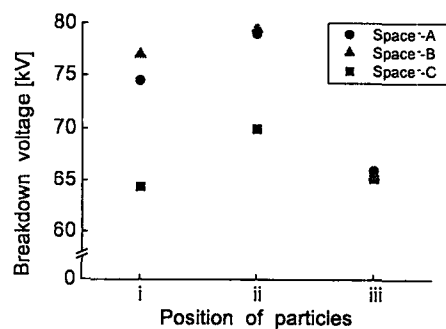


그림 7. 파티클 위치별 각 스페이스에서의 파괴전압
Fig. 7. Breakdown voltage by particle states on each spacer

파티클이 스페이스의 상단에 부착되어 있는 경우 스페이스-A는 스페이스-C에 비하여 파괴전압이 약

15[%] 정도 증가하였으며, 립의 끝단을 라운드 처리한 스페이스-B의 경우에는 약 18 [%] 정도까지 증가하였다. 또한 파티클이 스페이스의 중앙에 위치할 경우에도 스페이스-A와 B의 파괴전압은 스페이스-C에 비하여 약 15[%] 정도 증가하였으며 이는 앞서 보인 전계해석의 결과와 일치하는 것이다. 반면에 파티클이 스페이스의 하단에 부착된 경우 스페이스-A, B, C에서의 파괴전압은 거의 동일하게 나타났다.

그림 8은 립의 길이 변화에 따른 파괴전압 특성을 살펴보기 위하여 스페이스-A형의 립-스페이스를 이용하여 얻은 파괴전압 실험결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이 립의 길이가 증가할수록 파괴전압이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 립의 길이가 길어질수록 저전계영역을 가지고 있는 립에 의한 방전경로가 늘어나기 때문이다.

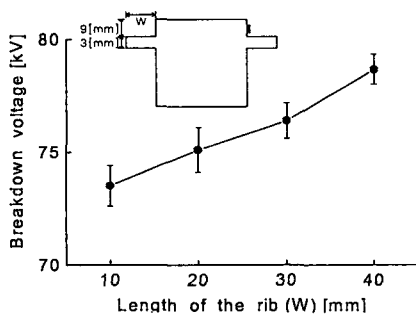
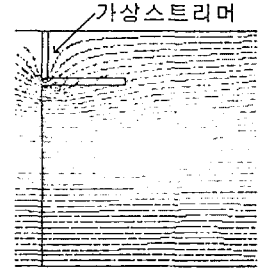
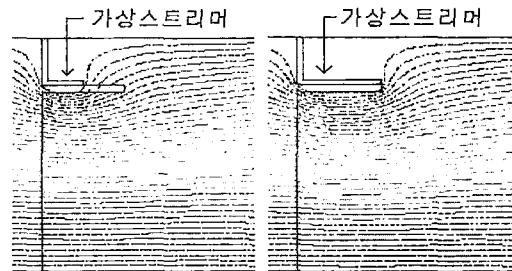


그림 8 스페이스-A의 립의 길이 변화에 따른 파괴전압
Fig. 8 Breakdown voltage by rib length (spacer-A)

그림 9는 립의 두께에 따른 효과를 분석하기 위하여 스페이스-A형의 립의 두께를 1/4로 축소하여 가상스트리머의 진전에 따른 전위분포도를 구한 것이다. 그림 4와 비교해 보면 립이 얇아질 경우, 립이 두꺼운 경우보다는 가상스트리머가 진전되는 곳을 따라 전위가 매우 밀집하여 분포되는 것을 알 수 있다. 그림 4의 경우는 립이 가스에 비하여 유전율이 상대적으로 높으므로 유전율과 반비례 관계에 있는 전계가 립의 내부와 그 주변에서 많이 악화되는데 비하여 그림 9의 경우는 립의 두께가 그림 4의 경우에 비하여 상대적으로 얇기 때문에 립 내부와 그 주변에서 전계집중이 악화되는 정도가 비교적 덜하기 때문이다.



(a) 시작단까지 진전 경우



(b) 중간까지 진전 경우 (c) 끝단까지 진전 경우

그림 9. 스페이스-A의 얇은 립에 대한 가상스트리머 진전에 따른 전위분포도
Fig. 9. Illustration of electric field distribution with imaginary streamer progress of thin rib of spacer-A

3. 결 론

본 논문에서는 GIS의 스페이스에 금속성 파티클이 부착되었을 경우 GIS의 절연파괴특성 저하를 최대한 억제할 수 있는 방법 중의 하나인 립-스페이스에 대한 전계해석과 절연파괴 실험을 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) FEM을 이용한 3차원 전계해석의 결과 립의 중간부분에서의 전계분포가 다른 부분보다 현저히 낮음을 확인할 수 있었다.
- 2) 전계해석을 통하여 립의 길이를 길게 할수록 립 중간부분의 저전계 영역이 길어짐을 알 수 있었으며, 파괴전압 실험결과 립의 길이가 길어질수록 파괴전압이 상승함을 확인할 수 있었다.
- 3) 가상스트리머를 이용한 전계해석의 결과, 가상스트리머가 립의 중간까지 진전되었을 경우에 그 주위의 전계분포가 가상스트리머가 립의 시작단과 끝단에 도달하였을 때보다 낮게 나타났다.
- 4) 파괴전압 실험 결과, 립-스페이스를 사용함으로써 금속성 파티클이 스페이스에 부착될 경우 립이

없는 스페이서보다 파괴전압이 높게 나타났다.

5) 전계해석을 통하여 립의 끝단을 라운드 처리할 경우 가상스트리머에 의하여 립의 끝단에 전계가 강하게 집중되는 것이 완화된 것을 확인할 수 있었으며, 파괴전압 실험을 통하여 립의 끝단을 라운드 처리한 립-스페이서가 립의 끝단을 라운드 처리하지 않은 립-스페이서보다 파괴전압이 높게 나타남을 알 수 있었다.

6) 전계해석을 이용하여 립의 두께가 얇은 경우가 립의 두께가 두꺼운 경우보다 립 주위에서의 전계집중이 강하게 나타났으며, 이를 통하여 립의 두께가 두꺼울수록 파괴전압이 상승할 수 있다는 것을 추정할 수 있었다.

이상의 전계해석과 파괴전압 실험을 통하여 스페이서에 립의 형상을 만들어줌으로써 립이 없는 스페이서보다 파괴전압특성을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 립의 길이를 길게 하고 립에서 각이 지는 부분을 둥글게 라운드 처리함으로써 립의 효과를 더욱 크게 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

References

- (1) 권동진 외, "변전설비 진단기술 개발 연구(최종보고서)", 전력연구원, pp. 69-108, 1998.
- (2) 윤덕량 외, "GIS 무정전 점검기법 연구(최종보고서)", 한국전기안전공사, pp. 1-131, 1996.
- (3) Fumihiko Endo et al, "Enhancement of Insulation Reliability of GIS", Japan-Korea Symposium on ED and HVE, pp. 5-10, 1997.
- (4) Tokio Yamagiwa et al, "Particle-initiated Breakdown Characteristics on a Ribbed Spacer Surface for SF₆ Gas Insulated Switchgear", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp. 954-960, 1988.
- (5) 류성식, 최영찬, 곽희로, "GIS 립 스페이서에 의한 파괴전압 특성 개선", 조명·전기설비학회 논문지, Vol. 15, No. 5, pp. 28-33, 2001.
- (6) 류성식, 곽희로 외, "GIS 립-스페이서의 형상에 대한 전계해석 및 파괴전압특성", 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계학술발표대회 논문집, pp. 107-109, 2000.
- (7) 류성식, 곽희로 외, "개선된 GIS 스페이서의 전계해석 및 파괴전압 특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, C권, pp. 1921-1923, 2000.
- (8) 김익모 외, "765kV GIS 기초설계기술 개발", 현대중공업 연구보고서, HEMRI-01-02-D007, pp. 152-155, 2001.

◇ 저자소개 ◇

류 성 식 (柳盛植)

1971년 7월 20일생. 1999년 숭실대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 현대중공업 기전연구소 연구원

최 영 찬 (崔永燦)

1962년 6월 11일생, 1988년 단국대 공대 전자공학과 졸업, 1994년 일본 동해대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1997 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) 현재 현대중공업 기전연구소 책임연구원

곽 희 로 (郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 MIT Visiting Scientist. 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수.

전력시설물에서의 접지시스템은 전력시설물 고장