

SF₆ 가스 동축원통전극 내의 금속이물이 절연파괴에 미치는 영향

(The Effect on Breakdown of the Conducting Particles Between Coaxial Cylindrical Electrodes in SF₆ Gas)

조국희* · 권동진** · 이강수*** · 곽희로****

(Kook-Hee Cho · Dong-Jin Kweon · Kang-Soo Lee · Hee-Ro Kwak)

요 약

본 논문에서는 AC 전압 하에서 자유 도전성 금속이물 혼입에 의한 SF₆ 가스로 압축된 GIS의 절연특성에 관하여 연구하였다. GIS 내에서 자유 도전성 금속이물이 혼입되면 절연파괴 전압을 낮추는 결정적인 역할을 할 수 있으므로, 금속이물의 재질과 크기에 따른 부상전계 및 절연파괴전압을 측정하였다. 구리, 철, 알루미늄의 선형 금속이물에서의 부상전계 계산값과 측정값을 비교, 분석하였다. 압축된 SF₆ 가스로 절연된 동축원통전극간에 금속이물이 혼입될 경우의 절연파괴전압은 금속이물이 없을 때보다 낮게 나타났으며, 금속이물의 재질과 크기에 상당히 의존하였다. 따라서 자유도전성 금속이물은 GIS의 절연파괴 특성에 매우 중요한 요소로 작용함을 알 수 있었다.

Abstract

This paper describes the breakdown characteristics of GIS by the free conducting particles under alternating voltage. If the conducting particles are present within the GIS, they can cause decrease in breakdown voltages. Various materials and sizes of free conducting particles were used to study the lift-off electric field and breakdown voltage. The measured lift-off electric fields were compared with the calculated ones for copper, steel and aluminium wire-type conducting particles. As an experimental result, it is shown that the breakdown voltages of the GIS chamber with conducting particles were lower than those without conducting particles, and were markedly dependent on the particle material and the particle sizes. Free conducting particles are important factor in particle-triggered breakdown of the GIS.

*정회원 : 전기연구소 선임연구원

***정회원 : 숭실대학교 전기공학과 박사과정

**정회원 : 전력연구원 선임연구원

****정회원 : 숭실대학교 전기공학과 교수

접수일자 : 1998. 3. 2.

1. 서 론

전력공급의 신뢰도 향상을 위해 GIS(Gas Insulated Switchgear)의 사용이 급격히 증가하고 있다. GIS는 모선, 차단기, 단로기, 접지장치 등을 조합하여, 충전부를 스페이서로 지지하고 높은 절연내력을 가지는 SF₆ 가스로 충전된 금속재 합에 수납한 콤팩트하고 안전한 고신뢰성 기기다. 이와 같은 장점 때문에 GIS는 기간계통 및 도시과밀 지역의 중추 변전소에 적용이 확대되고 있다. 이와 같이 GIS는 고장이 적은 특징을 가지고 있어 확대 적용되는 추세에 있으나, 내부 사고 시에 용이하게 상황이 파악되지 않으므로, 전력공급 정지시간이 길고, 사고부분의 추정이나 복구작업이 어렵다[1]. 따라서 GIS에서 발생하는 이상의 징후를 초기단계에서 찾아내어 사고를 미연에 방지하기 위한 예방진단 기술이 점점 중요시되고 있다[2].

GIS는 내부의 고전압 충전부 도체와 접지된 외부도체로 구성된 동축원통형 전극으로 전극간은 준평등전계를 형성하고 있어, 통상의 운전상태에서는 부분방전이 발생하지 않는 충분한 전계강도로 설계되어 있다. 그러나 GIS의 금속가공, 연마작업, 운반, 현장조립, 가스주입 등에 의하여 도체에서의 돌기, 스페이서 중의 크랙 및 도전성 이물질 등이 발생할 수 있으며, 이러한 결함에 의한 부분방전은 용이하게 절연파괴에 도달할 가능성을 갖고 있다[3~4]. 특히 GIS 내의 금속이물은 전계의 영향으로 기립, 부상(lift-off), 비행(hovering) 및 왕복비행(crossing)하거나, 절연 스페이서에 부착 또는 돌기의 형태로 탱크 내면에 부착하여 절연에 큰 영향을 미치며, GIS의 절연내력이 치명적으로 감소되어 사고에 이르는 경우가 보고되고 있다[5]. 따라서, GIS의 신뢰성을 향상시키고 경제적인 운용을 위해 금속이물의 영향을 분석하기 위한 연구가 선진외국에서는 많이 수행되어 왔으나, 국내에서는 아직까지 이에 대한 연구가 미진한 실정이며, 절연성능에 영향을 미치는 도전성 금속이물의 영향을 규명하고 대책을 수립하는 것이 시급하다.

금속이물에 의한 사고를 방지하기 위해서는 금속

이물의 혼입을 방지하는 것이 중요하며, 절연내력 저하를 억제하는 기술로 선진외국에서는 내부도체 및 탱크 내부표면의 코팅과 트랩장치의 설치 등에 대한 연구가 수행되고 있다[6]. 그러나 자유 도전성 금속이물의 거동, 부상 및 절연파괴에 대한 연구가 수행되어야, GIS 설계 및 안정적인 운전을 하기 위한 근본적인 대책이 제시될 수 있을 것이다[7~8].

따라서 본 연구에서는 GIS에 사용되고 있는 동축원통전극을 모의한 가스 챔버를 제작하여 SF₆ 가스로 절연하고, 교류전압을 인가하였을 때 GIS 내부에 존재할 가능성이 큰 금속재질의 이물에 대한 부상 및 절연파괴 특성을 분석하였다. 또한 금속이물의 부상을 해석하기 위해 이론적인 부상전계 값과 실험으로 측정된 부상전계를 비교·분석하고, 금속이물의 길이와 직경이 부상전계 및 절연파괴에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 SF₆ 가스 압력을 변화시켜 금속이물 재질에 따른 절연파괴 전압을 측정하여 SF₆ 가스의 절연내력 특성에 관하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 논문에서의 실험장치는 그림 1과 같이 고전압 전원장치 및 제어장치, 실험용 모의 GIS 챔버, 초음파 센서 및 진동 가속도계, 프리앰프, 오실로스코프, 측정신호 및 관련정보를 수집, 분석하기 위한 컴퓨터로 구성하였다. 고전압 발생장치에서 실험용 가스 챔버의 부상까지는 부분방전이 발생하지 않도록 동관을 사용하여 연결하였다.

금속이물이 제조과정이나 운용중에 혼입될 경우,

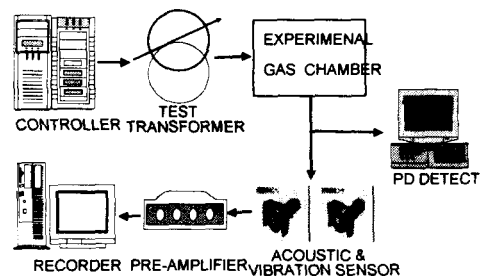


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

전압이 인가되면 금속이물이 부상하여 전극사이에서 반동운동을 하며, 이 상태에서 전압을 상승시키면 금속이물에서 부분방전이 발생하거나 절연과괴가 일어난다. 이와 같이 GIS에서 금속이물은 절연과괴를 일으키는데 상당한 영향을 미치므로 금속이물의 영향을 분석하기 위해 그림 2와 같이 동축원통 전극구조의 금속이물 부상실험용 GIS 모의 챔버를 제작하였다. GIS에서 발생할 수 있는 금속이물의 최대길이를 고려해 전극간의 거리는 마이크로미터를 이용하여 10~35[mm]까지 조절이 가능하도록 설계하였다. 모의 원통전극 내에서 금속이물의 부상에 따른 음향 신호 및 부분방전과 절연과괴에 따른 음향신호를 검출하기 위해 외부 원통전극에 센서를 취부할 수 있도록 하였고, 금속이물의 부상, 부분방전 및 절연과괴를 관찰하기 위해 챔버 외부원통을 투명 아크릴로 제작하였으며, 고전압선, 센서 리드선, 접지선 및 가스 주입구 등을 취부하여 밀폐하였다. 모의 원통전극은 평동전계에 근사하도록 설계하였다.

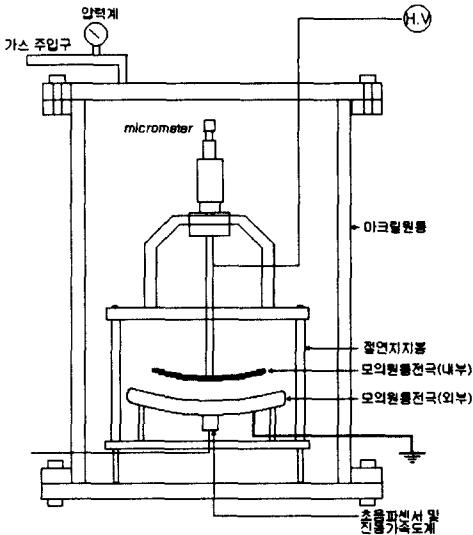


그림 2. 모의 동축원통전극을 내장한 가스 챔버
 Fig. 2. The gas chamber with the coaxial cylindrical electrodes

실험에 사용된 금속이물은 선형 금속이물로 구리, 철, 알루미늄을 사용하였으며, 직경 및 길이를 변화시켰다. 모의 원통전극 내에서 금속이물에 의한 절연과괴에 미치는 가스압력의 영향을 파악하기 위해

SF₆ 가스압력을 1[bar]~2[bar]까지 조절하면서, 길이 10[mm], 직경 1[mm]인 선형의 구리 및 알루미늄과 직경 0.95[mm]인 철을 사용하여 부상전계를 측정하였다. 또한 금속이물 재질에 따른 길이별 부상 전압 및 구리의 직경별 부상전압 측정값을 계산값과 비교, 분석하였으며, 금속이물 재질의 직경과 길이를 변화시켜 절연과괴 전압을 가스압력 1[bar]의 조건에서 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 금속이물의 부상전계

GIS의 제작과정이나 설치작업 및 정기 점검시에 혼입되는 금속이물의 종류로는 절연성 금속이물, 도전성 금속이물로 나눌 수 있으나, GIS의 절연성능에 영향을 미치는 종류로는 도전성 금속이물(선형, 구형 및 불규칙한 형상을 가진 금속이물)이다. 도전성 금속이물이 GIS 내에 존재하는 경우는 절연물의 연면에 부착된 경우와 자유상태로 놓여 있는 경우로 구분할 수 있다.

도전성 금속이물이 자유로이 놓여 있는 경우, 주변전계에 의하여 도전성 금속이물에는 전하(Q)가 축적된다.

금속이물의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{2\epsilon_0 E^2(t)}{\rho} - g \tag{1}$$

여기서 x : 금속이물의 이동거리, $E(t)$: 주변 전계, ϵ_0 : 유전율, ρ : 금속이물의 밀도, γ : 금속 이물의 직경, g : 중력가속도

AC 전압 인가시의 $E(t)$ 는 다음과 같다.

$$E(t) = E_m \sin \omega t \tag{2}$$

그러므로

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{2\epsilon_0 E_m^2 \sin^2 \omega t}{\rho} - g \tag{3}$$

금속이물이 정적인 상태에서 부상할 때의 해를 구

SF₆ 가스 동축원통전극 내의 금속이물이 절연파괴에 미치는 영향

하면 다음과 같다.

$$x = \frac{\epsilon_0 E_m^2}{8\rho r f^2} - \frac{g}{8f^2} \quad (4)$$

여기서 반 사이클 즉 $t=1/2f$ 동안 파티클이 부상하여 이동한 거리 x 를 구한 다음 $x>0$ 인 경우에 인가전계를 구하면 식 (5)로 나타나며, 이 값보다 크게 되면, 금속이물이 전극으로부터 부상한다.

$$E_m = \sqrt{\frac{\rho g}{\epsilon_0}}, \text{ 또는 } E_{rms} = \sqrt{\frac{\rho g}{2\epsilon_0}} \quad (5)$$

식 (5)에서 금속이물의 부상은 인가한 AC 전압의 주파수와 금속이물의 길이에 무관하고, 금속이물의 밀도와 직경의 함수임을 알 수 있다.

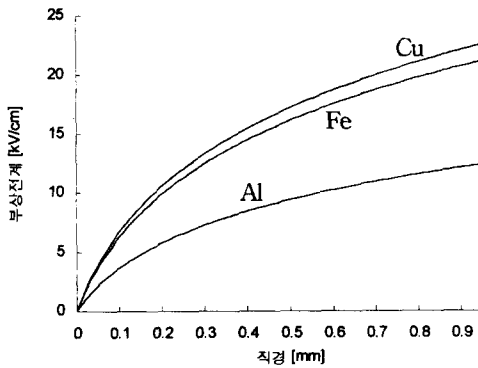


그림 3. 금속이물의 재질에 따른 부상전계 계산값
Fig. 3. Calculated AC lift-off electric field to the various particles

그림 3은 AC 인가시 구리, 철, 알루미늄의 부상전계를 계산하여 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 직경이 커짐에 따라 부상전계는 지수 함수적으로 커지고 있으며 재질에 따른 부상전계는 구리, 철, 알루미늄의 순으로 크게 나타났다. 이는 본 연구에서 사용한 금속이물의 밀도가 알루미늄이 2.699×10^3 [kg/m³], 철은 7.874×10^3 [kg/m³], 구리는 8.96×10^3 [kg/m³]으로 금속이물의 밀도가 클수록 더 큰 부상전계가 필요함을 알 수 있다.

그림 4는 SF₆ 가스압력에 따른 부상전계를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 금속이물의 길이는 7[mm]이고, 직경은 구리와 알루미늄이 1.0[mm], 철이 0.95[mm]이며, 전극거리는 15[mm]이다. 그림 4에 나

타난 것과 같이 구리의 부상전계가 가장 높고, 알루미늄의 부상전계가 가장 낮다. 이는 구리의 밀도가 알루미늄이나 철보다 크기 때문이다. 또한 SF₆ 가스압력에 따른 금속이물의 부상전계는 거의 일정하게 나타났으며, 이는 식 (5)에 보인 바와 같이 부상을 일으키는 정전기력은 주위의 가스압과는 무관하기 때문이다.

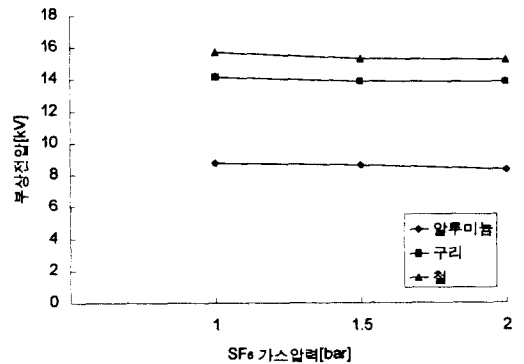


그림 4. SF₆ 가스압에 따른 부상전계
Fig. 4. Lift-off electric field to the SF₆ gas pressure

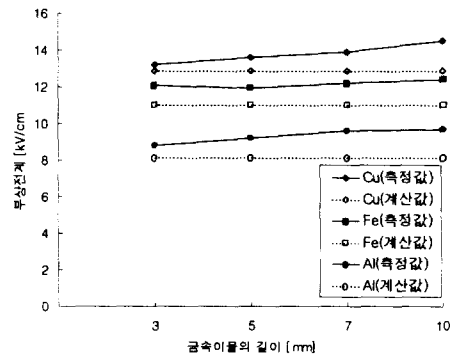


그림 5. 금속이물의 길이에 따른 부상전계의 계산값과 측정값
Fig. 5. The comparison between calculated and measured value of lift-off electric field with particle length

그림 5는 금속이물의 길이에 따른 부상전계의 측정값과 계산값을 비교하여 나타낸 것이다. 이때 금속이물의 직경은 구리, 알루미늄이 1.0[mm], 철이 0.95[mm]이며 전극거리는 15[mm]이다. 그림 5에 나타난 바와 같이 길이가 증가함에 따라서는 약간의 편차는 있으나 부상전계는 거의 일정하다. 금속이물의 길이에 따라 부상전계가 일정하게 나타난 것은 금속이물의 부상을 지배하는 정전기력과 중력의 상관관

계에서 알 수 있다. 정전기력 F 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = QE \quad (6)$$

여기서 Q 는 금속이물에 축적된 전하량으로 길이에 비례하여 증가한다. 즉 금속이물의 길이가 커지면 중량이 길이에 비례하여 증가하나, 축적 전하량도 금속이물의 길이에 비례하여 증가하여 정전기력이 커지므로 부상전계는 일정하게 나타난다. 부상전계의 측정값이 계산값보다 크게 나타나고 있는 것은 금속이물과 전극사이의 점도에 의한 힘이 작용하기 때문인 것으로 사료된다.

그림 6은 동축원통전극간에서 금속이물이 부상하여 상부전극에 부착한 것을 촬영하여 나타낸 것이며, 전극거리는 15(mm)이다.

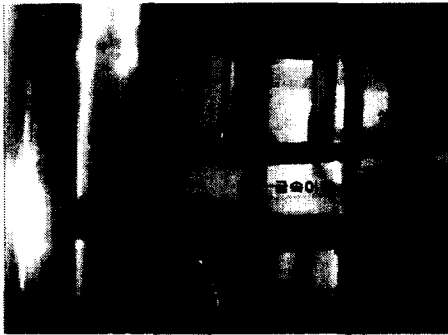


그림 6. 전계에 의한 금속이물의 부상
Fig. 6. Particles lift-off due to electric field between electrodes

3.2 금속이물 혼입시 절연파괴전압

SF_6 가스 절연기기 내부에 혼입되는 금속이물의 재질에 따른 절연특성을 분석하기 위해 SF_6 가스압력을 1(bar)로 하고, 구리, 철, 알루미늄의 금속이물을 혼입하였다. 이때 모의 동축원통전극의 갭 간격은 15(mm)로 하였으며, 금속이물의 길이는 모두 10(mm)를 사용하였다. 실험에 사용된 각 금속이물의 직경은 구리는 0.26, 0.5, 0.8, 1.0(mm), 철은 0.22, 0.6, 0.95(mm), 알루미늄은 0.8, 1.0, 1.2(mm)를 사용하였다.

그림 7은 금속이물의 직경에 따른 교류 절연파괴전압을 나타낸 것이다. 실험결과 밀도가 작은 알루

미늄이 가장 낮은 전압에서 절연파괴가 일어났으며, 밀도가 큰 구리의 절연파괴전압이 가장 높게 나타났다. 밀도가 커지면 부상전계가 커지므로 절연파괴전압은 커지는 것으로 생각된다. 또한 직경에 따른 절연파괴 전압은 구리, 철, 알루미늄 모두 직경이 커짐에 따라 완만한 감소를 나타내고 있다.

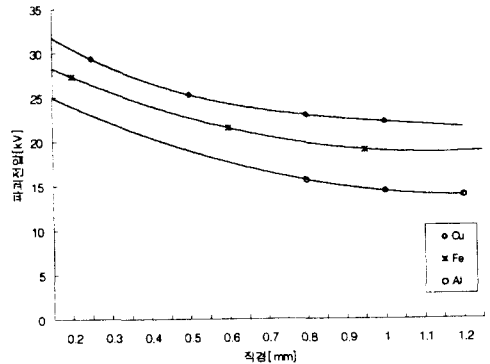


그림 7. 금속이물의 직경에 따른 절연파괴전압
Fig. 7. Breakdown voltage to the diameter of particle

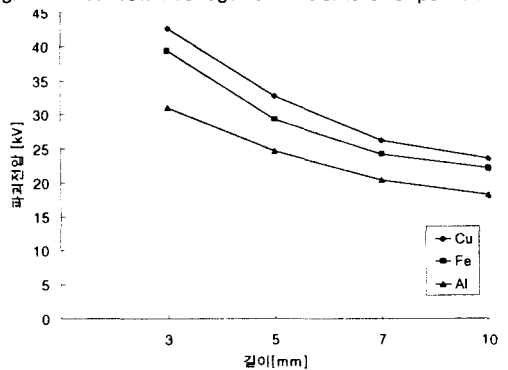


그림 8. 금속이물의 길이에 따른 절연파괴전압
Fig. 8. Breakdown voltage to the length of particle

그림 8은 금속이물의 길이에 따른 절연파괴전압을 나타낸 것이다. 금속이물의 직경은 0.1(mm), 가스압은 1(bar)이다. 그림에 보인바와 같이 금속이물의 길이가 증가할수록 절연파괴 전압은 감소하고 있다. 이것은 금속이물의 부상시 전극간의 거리가 감소하는 효과를 나타내고, 또한 금속이물이 부상하면 전극도 침대 평판 전극의 효과를 나타내기 때문에 심한 전계집중이 일어나 절연파괴전압은 낮아지기 때문이다. 따라서 길이가 긴 금속이물이 혼입한 경우에는 가스 절연기기의 절연내력에 더 큰 영향을 미

SF₆ 가스 동축원통전극 내의 금속이물이 절연파괴에 미치는 영향

친다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

모의 동축원통전극을 설치한 가스챔버 내에 금속 이물 존재시 부상전계와 절연파괴전압에 관하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1) 길이와 압력에 따른 금속이물들의 부상전계는 거의 일정하고, 직경이 커질수록 부상전압은 증가한다. 금속이물의 부상전계가 길이에 따라 일정하게 나타나는 것은 금속이물에 축적된 전하량이 길이에 비례하여 증가하기 때문이다.

2) GIS내에 금속이물 혼입시 절연파괴전압은 금속이물의 길이가 증가할수록 급속하게 낮아진다.

3) 금속이물의 부상전계 및 절연파괴전압은 밀도가 클수록 크게 나타난다.

4) 금속이물 부상전계의 계산값과 측정값은 거의 일치하나, 측정값이 계산값보다 약간 높게 나타났다. 이는 금속이물과 전극 면과의 점도(점성력)에 의한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Li Ming et. al, "Behaviour and Effect of Conducting Spiral Particles under AC Voltage in a Gas Insulated Electrode System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, pp. 159~164, 1988.

[2] 곽 희로, 조 국희, 권 동진, "동축원통 전극내의 파티클에 의한 음향신호 분석", 한국조명 전기설비학회지, Vol. 11, No. 6, pp. 104~110, 1997. 12.

[3] 가스絶縁開閉装置の直流絶縁調査専門委員會, "ガス絶縁開閉装置の直流絶縁", 電氣學會技術報告, 第397, 1991.

[4] T. Hattori et. al, "A Study on Effects of Conducting Particles in SF₆ Gas and Test Methods for GIS", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, 1988.

[5] Alan H. Cookson et. al, "Particle-Initiated Breakdown between Coaxial Electrodes in Compressed SF₆", IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-93, No. 3, pp. 343~349, 1973.

[6] H. Anis and K. D. Srivastava, "Breakdown Characteristics of Dielectric Coated Electrodes in Sulphur Hexafluoride Gas with Partide Contamination", 6th ISH 32. 06, 1989.

[7] 곽 희로, 조 국희, 권 동진, "GIS 가스 챔버내에서 파티

클 부상 특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1850~1852, 1997. 7.

[8] 곽 희로, 조 국희, "모의 GIS내에서 파티클 재질에 따른 절연파괴 특성", 한국조명 전기설비학회 추계학술대회 논문집, pp. 67~69, 1997. 11.

[9] M.M. Morcos et. al, "Dynamics of Metallic Contamination in Compressed Gas Insulated Power Apparatus", 4th ISH (Int. Sympto. on High Voltage Engi.), Athens, No. 34. 02, 1984.

◇ 著 者 紹 介 ◇



조 국 희(趙國熙)

1960년 1월 13일생. 1987년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 숭실대 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 한국전기 연구소 선임연구원.



권 동 진(權東震)

1963년 1월 20일생. 1986년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전력연구원 전력연구실 선임연구원.



이 강 수(李康壽)

1970년 2월 19일생. 1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1998년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대 대학원 전기공학과 박사과정.



곽 희 로(郭熙魯)

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