

GIS내 금속이물 존재시 에폭시 절연코팅의 효과

(Effect of Epoxy Dielectric Coating on existing metal Particles in GIS)

곽희로* · 구교선 · 김영찬

(Hee - Ro Kwak · Kyo - Sun Koo · Young - Chan Kim)

요 약

본 논문에서는 모의 GIS를 에폭시로 코팅하고, 금속이물 혼입시의 부분방전, 부상전압, 절연파괴전압 등을 측정하여, 코팅하지 않았을 경우와 비교·분석하였다. 또한, 여러 경우의 절연사고를 모의하기 위해, SF₆/N₂가스 혼합비, 금속이물의 재질, 직경, 코팅두께, 압력 등을 변화시키면서 전기적특성을 관찰하였다.

실험결과, 코팅두께가 증가할수록 부분방전개시전압이 증가하였으며, 부분방전의 크기는 감소하였다. 또한 철합금 파티클의 부상전압이 구리파티클보다 높았으며, 직경이 증가할수록 부상전압도 증가하였으며, 코팅두께가 두꺼워질수록 절연파괴 전압이 증가하였다. 이상의 연구결과 GIS를 에폭시로 코팅함으로써 절연성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, partial discharges(PDs), lift off and breakdown voltages were measured when metal particles existed in a model GIS coated with epoxy resin on its bottom electrode, and the measured results were analyzed after comparing with the model GIS not coated. In order to presume the various fault case in GIS, we measured the experimental values with changing some experimental factors, such as the mixture ratio of SF₆/N₂, the pressure of the gases, the kinds and diameter of the metal particles, and the coating thickness of the epoxy resin.

As a result, the PDIV increased with the thickness of the epoxy resin, while the magnitude of PDs decreased at the same condition. The lift off voltages of steel alloy particles were higher than that of copper particles, and increased with diameter of particles. Furthermore, the lift off voltages in the case of the electrode coated with epoxy resin were higher than that in the case of the uncoated one. In addition, the thicker the thickness of the epoxy resin was, the higher the breakdown voltages were. Thus, it was confirmed that the GIS coated with epoxy resin on its inner surface could be improved in insulation performance.

Key words : GIS, coating, epoxy, particle

* 주저자 : 송실대학교 전기제어시스템공학부 교수
Tel : 02-820-0644, Fax : 02-825-7549
E-mail : hrkwak@ee.ssu.ac.kr
접수일자 : 2003년 2월27일
1차심사 : 2003년 2월28일
심사완료 : 2003년 3월15일

1. 서 론

고전압 가스절연개폐기(Gas Insulated Switchgear; GIS)의 절연소호 매체로 이용되는 SF₆ 가스는 절연

GIS내 금속이물 존재시 에폭시 절연코팅의 효과

내력과 고온에서의 열적 특성이 우수하여 1966년 프랑스 EDF사의 변전소에서 최초 사용된 이후, 전 세계에서 널리 사용 중에 있다[1-4]. 그러나 GIS는 통상 운전시에는 부분방전이 발생하지 않는 충분한 절연내력으로 설계되고 있으나, 제조시의 부정확한 조립공정, 또는 운용 중의 기계적 응축 등으로 발생하는 금속이물의 존재로 인하여 전계왜곡을 일으키고 이에 따라 금속이물 주변에서 전리작용을 야기한다. 또한 GIS 내에서 대전된 금속이물의 말단에서 미소한 방전이 발생하고 결국 절연설계치를 넘어 전극간에 절연파괴로 이어진다[5-7].

현재 국내외에서 금속이물에 의한 절연사고를 예방하기 위해서 크게 두가지 방향으로 연구되어지고 있다. 첫 번째 방식은 GIS 사고 방지를 위한 예방진단에 의한 방법이다. GIS 예방진단과 관련하여 사용되는 기법으로는 부분방전에 수반되는 전자파 신호 검출, 초음파센서를 이용한 초음파신호의 검출법, 가스누출의 검출 등이 주로 사용된다[8-10]. 두 번째 방식으로는 GIS 설계시 사고를 억제할 수 있는 방안을 도입하는 것이다. 특히 GIS의 경우 금속이물의 자유운동에 의한 사고가 많이 발생하므로 자유운동하는 금속이물을 효과적으로 억제하거나 금속이물을 수집하는 방법이 연구되어지고 있다. 금속이물을 효과적으로 억제하는 방법으로는 GIS내 도체표면에 금속이물의 부상 및 절연파괴를 억제하기 위한 어떤 물질을 코팅(coating)하는 방법이다. 이 방식은 코팅된 물질에 의해 금속이물에 대전(charge)되는 전하량을 줄임으로써 부상을 억제하는 방법이다[11-14]. 그러나 GIS에 금속이물 존재시 절연코팅에 따른 전기적 특성에 대한 연구가 아직 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 GIS의 신뢰도를 향상시키는 방안의 일환으로 GIS내 금속이물 존재시, 에폭시 코팅으로 인한 절연내력 향상을 조사하기 위하여 금속이물의 자유운동시의 결함을 모의하고, 에폭시 코팅의 두께를 달리함에 따라 나타나는 절연특성을 비교·분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 논문에서 구성한 실험장치는 전원공급장치, 계

측분석장치(부분방전 측정장치, 전압측정장치), 모의 GIS 챔버로 구성되어 있다. 그림 1은 본 논문에서 사용된 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다.

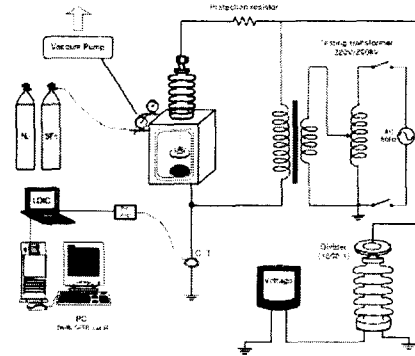


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

그림 1에 나타낸 것처럼 전원인가장치는 AC 최대 전압 200[kV]이고, 용량은 5[kVA]이다. 계측분석장치는 부상전압과 절연파괴 전압을 측정하기 위한 장치와 부분방전 측정장치(LDIC)로 구별되고, 부상전압 및 절연파괴전압의 측정은 1000:1 분압기를 통하여 측정하였다. 챔버 내의 공기를 제거하기 위해 진공펌프와 진공게이지를 설치하였고, SF₆ 가스(99.9%) 및 N₂ 가스(99.999%)를 주입하고 정확한 압력을 측정하기 위해 압력계를 설치하였다.

그리고 챔버안에 평판전극으로 준평등 전계를 형성시키고, 금속이물에 의한 사고를 모의하기 위하여 챔버내에 금속이물을 삽입하였다. 실험에 사용된 금속이물은 길이 5[mm], 직경 0.1[mm], 0.2[mm], 0.3[mm], 0.56[mm]로 변화시켰고, 끝 부분을 라운드 처리하고, 실험전 수차례 방전시켜 부정현상을 방지하였다. 하부전극의 에폭시 코팅은 spin coater (Chemat Tec.;KW-4A)를 이용하여 코팅의 두께를 0[μ m] (Uncoating), 9 \pm 2[μ m], 30 \pm 2[μ m], 60 \pm 3[μ m]로 코팅하였고, 코팅두께는 코팅두께 측정기(KETT Electric Lab.; LC-300C)를 사용하여 측정하였다. 모의 GIS 챔버는 외부를 접지하였으며, 외부에서 금속이물의 거동상태를 관찰하기 위하여 관찰창을 설치하였다. 또한 시험용 변압기의 보호를 위하여 보호저항을 직렬로 삽입하였다.

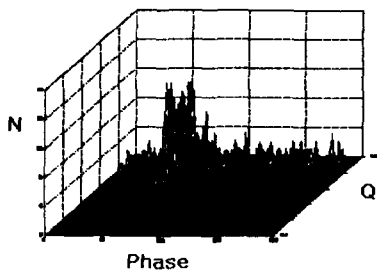
본 실험에서는 준평등전계를 형성하고 있는 전극 사이에, 고전압 발생장치를 이용하여 60[Hz] AC전압을 2~3[kV/sec] 상승률로 인가하였다. 이때, 하부 전극표면에 에폭시코팅을 적용하고, 에폭시 코팅두께 및 SF₆ 가스, 압력을 변화시키면서 금속이물에 의한 부분방전, 부상전압, 절연파괴전압을 측정하였고, 이 결과를 코팅을 하지 않은 일반전극에서의 결과와 비교 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

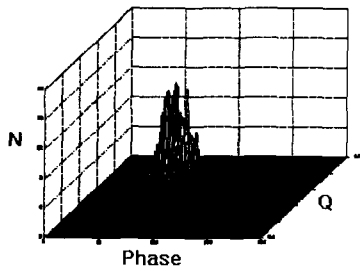
본 논문에서는 GIS내 금속이물이 자유운동 할 때 나타나는 특성치를 부분방전, 부상전압, 절연파괴전압으로 나타내어 실험하고자 하였다.

3.1 부분방전

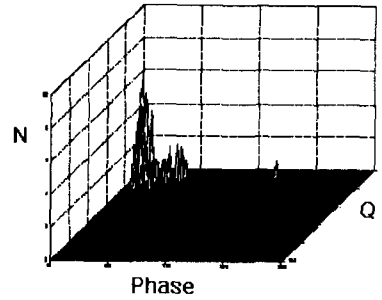
그림 2는 모의 GIS 챔버에 길이 5[mm], 직경 0.3[mm]의 금속이물 혼입시, 에폭시 코팅두께가 0[μ m], 9[μ m], 30[μ m], 60[μ m]인 경우에 각 코팅두께에서 발생하는 부분방전개시전압(PDIV)에서의 Φ -Q-N 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 X축은 위상(Φ)을, Y축은 방전량(Q)을, Z축은 방전횟수(N)를 나타내고 있다.



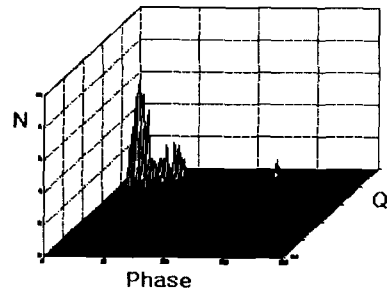
(a) 0[μ m] coated electrode (14[kV])



(b) 9[μ m] coated electrode (20[kV])



(c) 30[μ m] coated electrode (50[kV])



(d) 60[μ m] coated electrode (70[kV])

그림 2. 에폭시 코팅두께에 따른 PDIV에서의 Φ -Q-N 분포
Fig. 2. Φ -Q-N distribution with coating thickness of the epoxy at PDIV

그림 2에서 보는바와 같이 에폭시 코팅두께가 0 [μ m], 9[μ m], 30[μ m], 60[μ m]로 증가할때, 방전개시전압도 약 14[kV], 약 20[kV], 약 50[kV], 약 70[kV]로 증가하였다. 그림 3은 코팅두께별 부분방전량의 피크치를 나타낸 것이다.

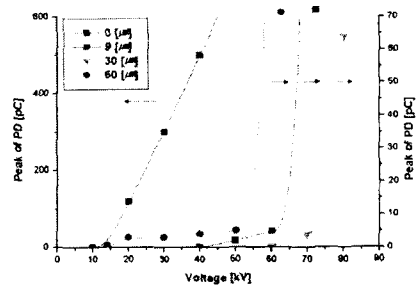


그림 3. 에폭시 코팅두께에 따른 부분방전
Fig. 3. PDs with thickness of the coated epoxy

GIS내 금속이물 존재시 에폭시 절연코팅의 효과

그림 3에 나타난 바와 같이 에폭시 코팅 두께가 증가함에 따라 방전개시전압은 증가하는 것을 알 수 있고, 또한 코팅전극과 코팅하지 않은 일반전극에서의 부분방전의 피크치를 비교해 볼 때, 같은 전압이 인가되었을 경우 코팅을 한 경우의 부분방전의 피크 값이 현저히 낮아지는 것이 나타났다.

3.2 부상특성

그림 4와 표 1은 모의 GIS 챔버에 길이 5[mm], 직경 0.3[mm]의 금속이물 함유시, 0.2[MPa]의 SF₆/N₂ 혼합가스에서 혼합비를 20/80, 40/60, 60/40으로 하였을 때 일반전극과 180[μm] 두께의 에폭시 코팅전극에서의 부상전압을 나타낸 것이다.

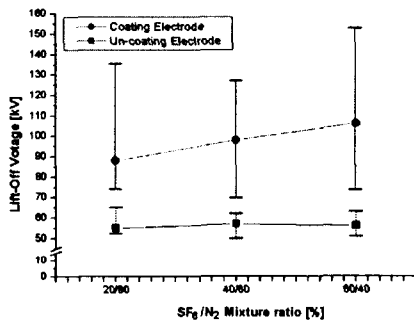


그림 4. SF₆/N₂ 혼합비에 따른 부상전압
Fig. 4. Lift-off voltages with mixture ratio

표 1. SF₆/N₂ 혼합비에 따른 부상전압
Table 1. Lift-off voltages with mixture ratio
단위 : [kV]

구분 SF ₆ / N ₂	Uncoating		Coating		평균 증가율 (coating / uncoating)
	최소/최대	평균(표준편차)	최소/최대	평균(표준편차)	
20/80[%]	52-65	55(±5.1)	75-135	88(±14.8)	160[%]
40/60[%]	50-62	57(±3.5)	70-126	98(±24.9)	170[%]
60/40[%]	51-63	56(±3.1)	74-153	108(±23.7)	190[%]

표 1에서 알 수 있듯이 일반전극과 코팅전극의 부상전압 평균치의 비를 보았을 때, 혼합가스의 비율이 20/80, 40/60, 60/40일 때 각각 60[%], 70[%],

90[%] 증가하는 것을 알 수가 있다. 이는 혼합가스의 비율에 상관없이 혼합된 금속이물의 정전력에 관계되는 전하의 충전을 에폭시 코팅이 억제하고 있기 때문이라고 볼 수 있다.

그림 5와 표 2는 모의 GIS 챔버에서 금속이물의 길이 5[mm], 직경을 0.1[mm], 0.2[mm], 0.3[mm], 0.56[mm]로 변화시켰을 때, 0.2[MPa]의 SF₆가스에서 일반전극과 에폭시 코팅전극에서의 부상전압을 나타낸 그림이다.

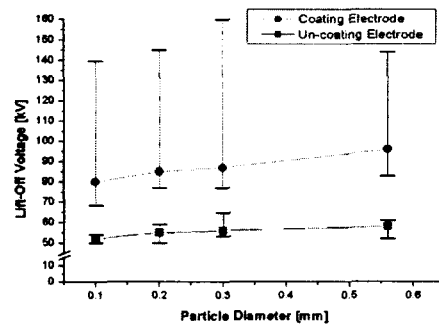


그림 5. 금속이물의 직경에 따른 부상전압
Fig. 5. Lift-off voltages with particle diameter

표 2. 금속이물의 직경에 따른 부상전압
Table 2. Lift-off voltages with particle diameter
단위 : [kV]

구분 직경	Uncoating		Coating		평균 증가율 (coating / uncoating)
	최소/최대	평균(표준편차)	최소/최대	평균(표준편차)	
0.1 mm	50-54	52(±1.4)	68-140	80(±28.7)	150[%]
0.2 mm	50-59	55(±3.5)	77-145	85(±24.9)	150[%]
0.3 mm	53-65	56(±0.8)	77-160	87(±15.5)	160[%]
0.56 mm	52-61	58(±0.9)	83-144	96(±31.2)	170[%]

표 2에서 보는 바와 같이 금속이물의 직경이 증가할수록 부상전압은 상승하였다. 코팅 유무에 따라서는 금속이물의 직경에 상관없이 코팅전극에서 일반전극보다 약 50~70[%] 가량 부상전압이 상승함을 볼 수 있었다.

그림 6과 표 3은 모의 GIS 챔버에 길이 5[mm], 직

경 0.3[mm]인 구리(밀도:8.96×103[kg/m³]), 철합금(밀도:14.67×103[kg/m³])으로 된 금속이물을 혼입시켰을 때, 0.2[MPa]의 SF₆ 가스에서 일반전극과 에폭시 코팅전극에서의 부상전압을 나타낸 그림이다.

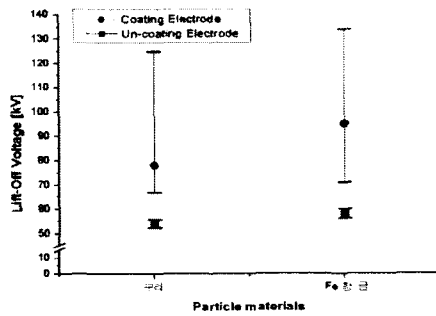


그림 6. 금속이물의 재질에 따른 부상전압
Fig. 6. Lift-off voltages with particle materials

표 3. 금속이물의 재질에 따른 부상전압
Table 3. Lift-off voltages with particle materials
단위 : [kV]

구분 재질	Uncoating		Coating		평균 증가율 (coating / uncoating)
	최소/최대	평균(표준편차)	최소/최대	평균(표준편차)	
Cu	53-55	54(±0.8)	67-125	78(±15.5)	140%
Fe합금	57-60	58(±1.1)	71-134	95(±23.9)	160%

표 3에서 보는 바와 같이 비중이 큰 철합금의 파티클에서 비중이 낮은 구리 파티클에서 보다 높은 부상전압이 나타나는 것을 볼 수가 있다. 이는 비중이 큰 물질이 더 큰 중력을 받게 되어, 부상하는데 그만큼 더 많은 힘이 필요하기 때문이다. 또한, 일반전극과 에폭시 코팅전극에서의 부상전압을 비교해 보면 구리 파티클인 경우는 약 40[%], 철합금 파티클인 경우는 약 60[%] 상승되었다.

3.3 절연파괴특성

그림 7과 표 4는 전극간격 10[mm], 길이 5[mm],

직경 0.3[mm]의 구리 파티클을 모의 GIS 챔버에 혼입시켰을 때의 에폭시 두께에 따른 절연파괴 전압을 SF₆가스의 압력별로 나타낸 것이다.

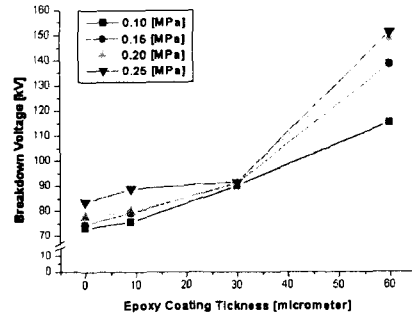


그림 7. 압력별 에폭시 코팅 두께에 따른 절연파괴 전압
Fig. 7. Breakdown voltages with coated thickness and pressure

표 4. 압력별 에폭시 코팅 두께에 따른 절연파괴 전압
Table 4. Breakdown voltages with coated thickness and pressure
단위 : [kV]

코팅두께 가스압력	Uncoating (0μm)	9μm	30μm	60μm	평균 증가율 (%)
0.10[MPa] 평균(표준편차)	71.3-75.0 73.3(±1.2)	71.9-84.4 75.4(±3.9)	77.7-127.0 90.1(±14.5)	104.9-130.9 115.2(±7.7)	157%
0.15[MPa] 평균(표준편차)	72.8-75.2 74.4(±0.8)	72.6-85.0 79.2(±4.1)	78.5-118.1 91.2(±12.2)	117-151 138.5(±11.9)	188%
0.20[MPa] 평균(표준편차)	74.7-83.1 77.7(±2.6)	73.3-88.0 79.7(±5.1)	84.4-101.5 90.8(±4.9)	124-155 143.5(±13.1)	191%
0.25[MPa] 평균(표준편차)	78.4-87.6 83.7(±2.8)	82.6-96.1 88.8(±4.3)	86.9-96.7 91.6(±3.3)	137-169 151.2(±10.7)	181%

표 4에서 볼 수 있듯이 코팅이 되지 않은 일반전극과 비교해 볼 때 코팅의 두께가 증가함에 따라 절연파괴 전압이 상승하는 것을 볼 수가 있다. 그리고, 압력이 증가함에 따라 절연파괴 전압은 증가하였다. 그러나 30[μm] 코팅두께에서는 압력이 증가함에도 불구하고 절연파괴 전압이 거의 변화하지 않은 것은 실험오차로 생각된다.

4. 결 론

GIS내 금속이물 혼입시, 에폭시 코팅에 따른 절연 성능 향상을 연구·검토하기 위하여 부분방전의 피크치, 부상전압, 절연파괴전압 등을 측정하고, 코팅되지 않았을 때와 비교·분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 부분방전 개시전압은 코팅두께가 0[μ m], 9[μ m], 30[μ m], 60[μ m]으로 증가함에 따라 약 14[kV], 20[kV], 50[kV], 70[kV]로 증가하였고, 또한 같은 인가전압에서 코팅두께가 증가할수록 부분방전의 피크치는 낮아지는 것으로 나타났다.
- (2) SF₆/N₂ 가스혼합비의 변화시, 일반전극에서는 부상전압의 큰 변화가 없었으나, 코팅전극에서는 SF₆ 가스의 혼합비율이 증가할수록 부상전압이 증가하였다. 또한, 코팅전극에서 일반전극보다 약 60[%]~90[%] 가량 부상전압이 상승하였다.
- (3) 금속이물의 직경변화시, 직경이 증가함에 따라 부상전압도 상승하는 것을 알 수가 있었고, 코팅전극과 일반전극에서의 부상전압을 비교해볼 때, 코팅전극에서 약 50[%]~70[%] 가량 부상전압이 상승하였다.
- (4) 금속이물의 재질변화시, 구리와 철 합금의 부상전압은 비중이 상대적으로 큰 철합금의 부상전압이 더 높게 나타났다. 코팅전극에서의 부상전압은 일반전극에서의 부상전압보다 철합금은 약 60[%], 구리는 약 40[%] 가량 상승하였다.
- (5) 코팅두께에 따른 절연파괴 전압은 압력에 상관없이 코팅두께가 상승함에 따라 상승하였다.

따라서, GIS 내부에 금속이물 혼입시, 에폭시 코팅의 유무에 따라 부분방전, 부상전압, 절연파괴전압 등의 전기적 특성을 여러 조건에서 분석해본 결과 GIS 외함내부에 에폭시 코팅 적용 시 절연능력의 향상을 가져옴을 확인할 수 있었다.

- 감사의 글 -

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

(연구소-세부과제-3)

References

- [1] P. Gregor, A. Diessner and G.F. Luxa, "420kV SF₆-Insulated Tubular Bus for the Wehr Pumped-Storage Plant", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 2, pp. 469-476, March/April 1986.
- [2] T. Ishii, "Future Expectations of Transformer toward 21st Century", T.IEE Japan, Vol. 115-B, No. 4, pp. 304-307, 1995.
- [3] A. Inui, et al., "Dielectric Characteristics of Static Shield for Coil-End of Gas-Insulated Transformer", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 3, pp. 572-577, June 1992.
- [4] M. Nakada, et al., "Gas Cooling Performance in Disc Winding of Large-Capacity Gas- Insulated Transformer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PAS-11, No. 2, pp. 903-908, April 1996.
- [5] 광희로 외 3인, "SF₆ 가스챔버내 금속이물에 의한 부분방전 및 절연파괴 현상", 한국조명·전기설비학회 논문지, Vol. 14, No.1, pp. 75-81, 2000. 1.
- [6] L. Ming, et al., "Behaviour and Effect of Conducting Spiral Particles under AC Voltage in a Gas Insulated Electrode System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, pp. 159-164, 1988.
- [7] T. Hattori, "A Study on Effects of Conducting Particles in SF₆ Gas and Test Methods for GIS", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, pp. 197-204, 1988.
- [8] A.G. Sellars, O. Farish and M.M. Peterson, "UHF Detection of Leader Discharges in SF₆", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 1, pp. 143-154, February 1995.
- [9] A.G. Sellars, S.J. MacGregor and O. Farish, "Calibrating the UHF Technique of Partial Discharge Detection using a PD Simulator", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2, No. 1, pp. 46-53, February 1995.
- [10] J.S. Pearson, B.F. Hampton and A.G. Sellars, "A Continuous UHF Monitor for Gas-insulated Substations", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 26, No. 3, pp. 469-478, June 1991.
- [11] S. Zhang, et al., "The Impact of Electrode Dielectric Coating on the Insulation Integrity of GIS/GTL with Metallic Particle Contaminants" IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 17, No. 2, pp. 318-325, April 2002.
- [12] S. Zhang, at al., "On the Particle-contaminated GIS/GTL Systems with Dielectric Coated Electrodes", IEEE Power Engineering Review, Vol. 21, No. 8, pp.

- 52-54, August, 2001.
- [13] MM Morcos, et al., "Dynamics of Metallic Particle Contaminants in QS with Dielectric-coated Electrodes", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, pp. 455-460, April 2000.
- [14] 곽희로 외 6인, "SF₆/N₂ 혼합가스 내 전극코팅시 파티클 부상특성", 대한전기학회 고전압 및 방전 응용기술 연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 146-148, 2002. 4.

◇저자소개◇

곽희로(郭熙魯)

1942년 3월 1일생, 1967년 서울대 전기공학과 졸(학사), 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸(박사). 1986년 MIT Visiting Scientist. 현재 송실대 전기제어시스템공학부 교수 및 대학원장. 당학회 평의원.

구교선(具敎善)

1974년 9월 27일생. 2001년 송실대 전기공학과 졸(학사), 2003년 동대학원 전기공학과 졸(석사).

김영찬(金永燦)

1957년 10월 21일생, 1985년 서울산업대 전기공학과 졸(학사), 1989년 송실대학교 대학원 전기공학과 졸(석사), 1999년 송실대 대학원 전기공학과 수료(박사과정). 현재 산업자원부 기술표준원 공업연구원.