

Dry-Air 중의 전극형상 및 에폭시수지의 크기변화에 따른 연면방전특성 연구

(Surface Discharge Characteristics for Epoxy Resin in Dry-Air with Variations of
Electrode Features and Epoxy Resin Size)

박혜리* · 최은혁 · 김이국 · 이광식**

(He-Rie Park · Eun-Hyeok Choi · Lee-Kook · Kim, Kwang-Sik Lee)

요 약

본 논문은 친환경 절연재료인 Dry-Air 중 에폭시 수지의 연면절연특성을 구명하여 Dry-Air를 절연매체로 사용한 각종 절연설계 시에 응용 가능한 기초자료를 제공하고자 한다. 사용한 전극은 침 대 평판, 구 대 평판, KS M3015 전극으로써, 동일한 조건 하에서 전극의 종류에 따른 연면절연과피전압, 연면거리, 연면방전 전계강도를 비교하였다. 연면전계강도는 침 대 평판 전극 하에서 가장 높게 나타났다. 또한 에폭시 수지의 두께와 지름을 변화시켰을 때의 연면절연특성은 에폭시 수지의 두께가 두꺼울수록, 지름이 길수록 연면절연과피전압이 높게 나타남을 확인하였다.

Abstract

This paper shows a basic data of the surface discharge characteristics for epoxy resin in Dry-Air as being focused on environmentally friendly insulating Gas. Used electrodes are needle to plane, sphere to plane and KS M3015 electrodes. With the changing electrodes in same condition, we can obtain different creeping lengths, surface discharge voltages and surface dielectric strengths, respectively. Surface dielectric strengths of Needle to plane electrodes are more higher than the others. Moreover, it is considered that the surface discharge characteristics with variation of epoxy resin thickness and diameter. Surface discharge voltage increases as the thickness and the diameter of epoxy resin.

Key Words : Dry-Air, Epoxy Resin, Surface Discharge

1. 서 론

최근 지구온난화 및 기상이변 등의 영향으로 환경 문제에 대한 관심이 전 세계적으로 집중되고 있다. 특히 산업화로 인한 대기오염이 지구온난화의 원인임이 밝혀짐에 따라 지구온난화계수가 높은 CO₂,

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
Tel : 053-810-3953, Fax : 053-810-4767
E-mail : kslee@yu.ac.kr
접수일자 : 2008년 12월 10일
1차심사 : 2008년 12월 16일
심사완료 : 2008년 12월 30일

N_2O , CH_4 , PFC, HFC, SF_6 가스는 교토의정서에서 감축대상 가스로 지정되었으며, 따라서 그 사용량의 감소가 불가피한 실정이다.

SF_6 는 안정된 열적·화학적 특성 및 우수한 절연성과 차단성으로 인하여 고전압 전력기기 내의 절연매체·소호매체로써 주로 사용되어져 왔으며, 전력기기의 소형화 및 고신뢰화에 많은 기여를 해오고 있다[1-2]. 전력설비에서 SF_6 의 사용량을 줄이기 위해서는 SF_6 의 회수량을 증가시키는 기술을 개발하거나, SF_6 를 대체할 수 있는 친환경 물질을 개발하는 것이 고려될 수 있으며[3], 이에 대한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다.

SF_6 를 대체할 수 있는 친환경 물질로서는 N_2 , CF_3I , N_2/O_2 혼합가스, Dry-Air 등이 대두되고 있으며, 고체 및 진공을 매질로 사용하는 절연개폐장치에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

특히, Dry-Air를 절연매질로 사용하는 친환경 가스절연개폐장치(Environment-Friendly Gas Insulated Switchgear, EGIS)가 국내·외적으로 크게 각광받고 있다[4,6].

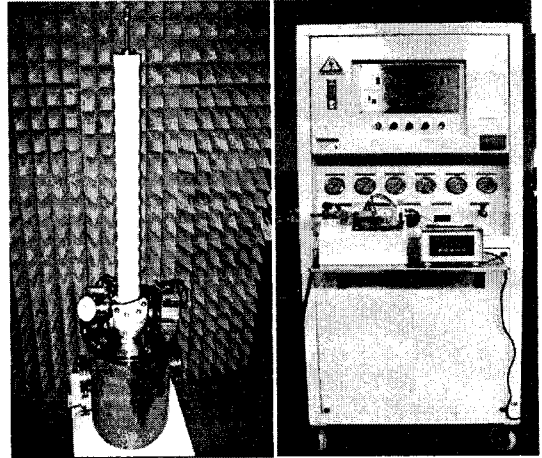
이러한 관점에서 본 논문은 친환경 절연재료인 Dry-Air 중 에폭시수지의 연면방전특성을 구명하여 친환경 전력설비의 절연설계에 응용 가능한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

사진 1 (a)는 본 연구에 사용한 모의 GIS 챔버이다. 두께 20[mm]의 스테인레스로 만들어졌으며, 내·외부 2중 구조로 이루어져 있다. 내부 챔버는 내직경 260[mm], 높이 460[mm]로서 체적은 약 25 [ℓ]이며, 외부 챔버의 경우 내직경 460[mm], 높이 500[mm], 체적은 약 83 [ℓ]이다. 또한, 외부에 챔버 내부를 관측할 수 있는 원형 아크릴 관측창(직경 110[mm], 두께 20[mm])이 설치되어 있다. 챔버는 $-90\sim 100^\circ C$ 의 온도 범위를 견딜 수 있으며, 10기압까지 가압하여도 내·외부 챔버의 안전에 이상이 없도록 설계·제작되었고, 300[kV]까지 인가 가능하다.

절연매질인 Dry-Air는 Dry-Air 제조장치를 이용

하여 제조하였으며, 이 장치는 세 단계의 필터를 가지고 있어 공기가 각 필터를 거치는 동안 공기의 노점과 불순물의 함량을 줄여, 최종적으로 노점 $-60^\circ C$ 이하의 순수한 Dry-Air를 제조가능한 장치이다. 그 외관은 사진 1 (b)와 같다.



(a) 모의 GIS 챔버

(b) Dry-Air 제조장치

사진 1. 모의 GIS 챔버와 Dry-Air 제조장치
Photo 1. Experimental GIS chamber and Dry-Air product device

챔버 내부에 절연가스를 가압하기 전, 진공펌프(SINKU KIKO Co. Ltd, GUD-050A, Pumping seed 60[l/min])를 챔버에 연결하여 내부압력을 5×10^{-4} [Torr]로 배기시킬 수 있으며, 가압시 압력을 측정하기 위하여 압력계(WISE, 0~15기압)를 사용하였다.

표 1은 각종 전극의 모양과 그 주요사양을 나타낸다. 그림 중 (a)는 스테인리스 스틸제 구전극(Sphere electrode, S), 평판전극(Plane electrode, P) 및 침전극(Needle electrode, N)의 모양과 주요사양을 보여주고 있다.

각 전극의 직경(D)는 41, 59 및 20[mm]이다. 또한 침전극의 침단각(θ)은 20° 로 제작하였다.

황동제 KS M3015전극(KS전극)에 관한 각종사양은 같은 표 1의 (b)와 같다.

연면방전을 위한 고체절연물은 지름(Φ)이 60, 100[mm], 두께(t)가 2, 3[mm]의 에폭시 수지를 사용하였다.

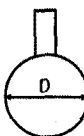

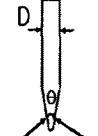
Dry-Air 중의 전극형상 및 에폭시수지의 크기변화에 따른 연면방전특성 연구

또한, 실험에 사용한 전원장치는 AC용 DY-106 (AC 300[kV]/120[mA])이다.



Dry-Air 내의 에폭시수지의 전극 형상별 연면방전 실험을 위해 챔버 내부의 전극 배치를 N-P(N : 상부, P : 하부), S-P(S : 상부, P : 하부) 전극으로 수직배치하였으며, 황동제 KS전극도 Rod를 상부에 배치하고, P를 하부에 수직배치하였다. 에폭시수지를 전극 사이의 중앙부에 두었으며, 에폭시수지의 크기별 연면방전 실험에서는 KS전극을 사용하였다.

표 1. 전극 모양
Table 1. Electrode feature

(a) 스테인리스 스틸제 전극

	Diameter(D) [mm]			Angle (θ) [°]
	41	59	5	20
Shape				
Kind of electrode	Sphere (S)	Plane (P)	Needle (N)	
Material	Stainless steel			

(b) 황동제 KS M3015전극

	Diameter(D) [mm]	
	5	10
Shape		
Kind of electrodes	KS electrode (Rod)	KS electrode (Plane)
Material	Brass	

Dry-Air를 GIS 챔버 내에 주입하기 전 진공펌프를 이용하여 챔버 내부와 가스 주입 호스 내부를 5×10^{-4} [Torr]의 진공상태로 만들었다. 이후, Dry-Air 제조장치를 통과하여 노점 $-50 \sim -53$ [°C]가 된 Dry-Air를 1~7[atm]까지 챔버에 주입하여 각 압력에 대한 연면방전 특성을 연구하였다.

챔버에 AC전압을 인가하여 연면방전전압을 5회 측정하여 그 평균값을 평균연면방전전압(V_B)으로 취급하였다. 이 V_B 를 그래픽에 사용하였다. 또한, 이때의 전압상승 속도는 3.15[kV/s]로 하였다. 연면방전 측정방법은 리더방전에 의한 초기방전전압을 이용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Dry-Air 중의 전극형상별 고체절연물의 연면방전특성

그림 1은 Dry-Air를 매질로 하였을 때, 매질의 압력변화에 따른 전극형상별 에폭시수지($\Phi=100$ [mm])의 연면방전전계강도(E_d)의 변화를 나타낸다. E_d 는 다음 식과 같이 평균연면방전전압, 즉 V_B 를 구하여 평균 연면거리로 나눈 값이다.

$$E_d[\text{kV/mm}] = \frac{\text{평균연면방전전압}[\text{kV}]}{\text{평균연면거리}[\text{mm}]}$$

그림 1의 (a), (b)에서 각종 전극 중 N-P전극의 E_d 가 가장 높고, S-P가 중간이며 KS전극이 가장 낮은 특성을 보이고 있으며, 압력의 증가에 따라 V_B 는 거의 선형적인 증가추세를 보이고 있는 것이 그 특성이다.

또한 t가 3[mm]인 경우의 그림 1의 (b)의 값이 t가 2[mm]인 그림 1의 (a)의 값보다 상대적으로 약간 높은 특성을 보여줌이 또 하나의 특성이다.

N-P와 S-P전극인 경우는 전극재질이 스테인리스 스틸로 같기 때문에 연면거리가 큰 N-P전극이 높게 나타나는 것은 일반적인 특성으로 평가될 수 있다. 그러나 KS전극인 경우는 연면거리 값이 상대적으로

가장 큰 경우이나 E_d 가 가장 낮은 것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 전극을 황동으로 사용한 경우는 전압을 인가하면 황동 전극에서 파티클이 튀어나와 에폭시수지 표면에 앉게되어 연면의 도전성을 증대시킴에 기인된다고 사료된다.

압력의 증대에 따라서 E_d 가 상승하는 것은 압력이 증가하면 에폭시수지 연면에 접하는 Dry-Air의 절연내력이 상승하게 되어 매질효과가 발생하므로 E_d 가 상승하게 된다.

표 2는 전극종류와 압력변화에 따른 평균 연면절연과피전계강도를 단위(P.U.)법으로 표현한 수치이다.

여기서 P.U.는 Dry-Air 1[atm] 중에 KS 전극배치

시의 에폭시수지의 평균 연면방전전계강도를 1[P.U.]로 정의하며 1[P.U.]보다 크다는 의미는 상대적으로 그 강도가 높음을 나타내고 있다.

표 2에서 보는 바와 같이 표 (a)는 $t=2$ [mm]일 경우이고, 표 (b)는 $t=3$ [mm]일 경우이며, 압력이 높을수록 P.U.값이 증대되어 가는데 이것은 압력이 높아지면 에폭시 표면을 둘러싸고 있는 Dry-Air의 절연 성능이 증대되어 연면방전의 진전을 억제시킴에 기인한다.

표 2. Dry-Air 중의 전극종류별 평균 연면방전전계강도의 P.U.값

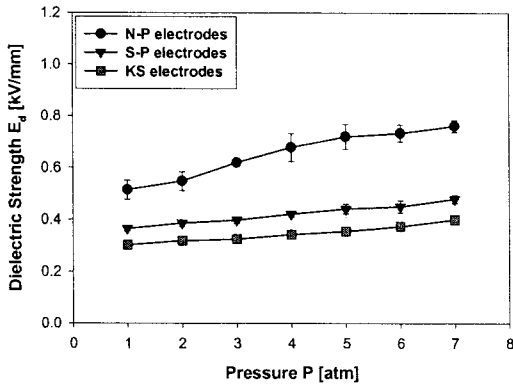
Table 2. P.U.value of average surface discharge dielectric strength in Dry-Air using different kind of electrodes

(a) $t = 2$ (mm)

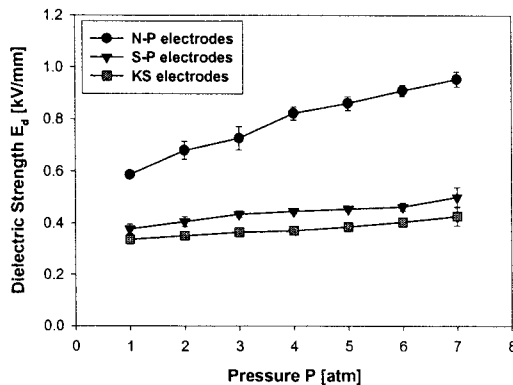
Kind of electrode	Pressure[atm]						
	1	2	3	4	5	6	7
N-P	1.7	1.81	2.05	2.24	2.38	2.43	2.52
S-P	1.21	1.28	1.31	1.39	1.46	1.49	1.58
KS	1	1.06	1.08	1.13	1.17	1.23	1.32

(b) $t = 3$ (mm)

Kind of electrode	Pressure[atm]						
	1	2	3	4	5	6	7
N-P	1.76	2.02	2.16	2.45	2.56	2.71	2.84
S-P	1.13	1.21	1.29	1.33	1.35	1.38	1.49
KS	1	1.04	1.09	1.11	1.15	1.2	1.27



(a) 고체절연물의 $t=2$ (mm), $\Phi=100$ (mm)인 경우



(b) 고체절연물의 $t=3$ (mm), $\Phi=100$ (mm)인 경우

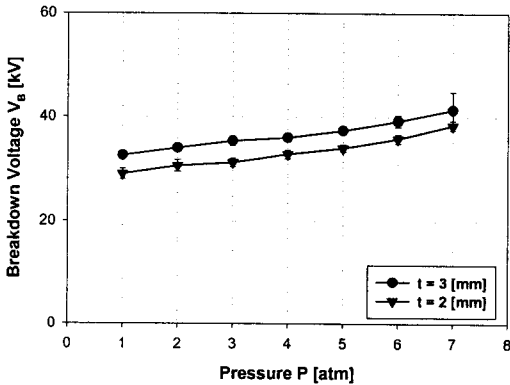
그림 1. Dry-Air 중의 전극형상별 연면방전 전계강도
Fig. 1. Surface discharge dielectric strength in Dry-Air using variety electrodes

그림 1 (a), (b)와 표 2 (a), (b)를 비교할 때 에폭시수지의 두께가 연면방전특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있는데 이는 3.2절에서 기술하겠다.

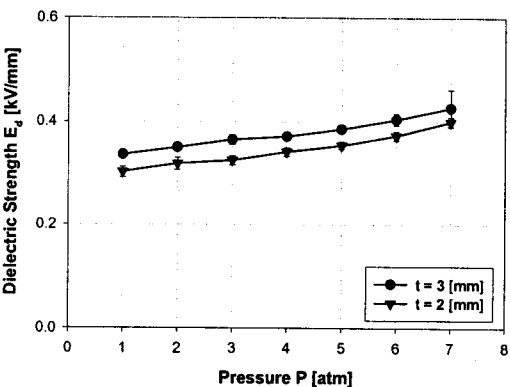
3.2 Dry-Air 중 고체절연물의 두께변화에 따른 연면방전특성

그림 2는 KS전극을 배치한 후, Dry-Air의 주입압력을 1~7[atm]으로 1[atm]씩 상승시켰을 때 지름이 100[mm]인 에폭시수지의 두께를 매개변수로 한 경우의 연면방전특성을 표현한 그래프이다.

그림 2 (a)는 연면절연파괴전압 V_B 를 나타내며, 고체절연물의 두께가 두꺼울수록 V_B 가 높음을 알 수 있다. 이는 두께가 증대되면 연면거리가 증대되어 연면절연파괴전압이 더 높게 되는 것으로 판단된다.



(a) 연면절연파괴전압 V_B



(b) 연면방전 전계강도 E_d

그림 2. KS전극배치 시 Dry-Air 중 고체절연물의 두께별 연면방전특성

Fig. 2. Surface discharge characteristics with variation of solid dielectric thickness in Dry-Air using KS electrodes

그림 2 (b)는 연면방전 전계강도 E_d 를 나타낸다. 절연파괴전압을 연면거리로 나눈 값으로써, 에폭시수지의 두께가 2[mm]일 때의 연면거리는 96[mm]이고, 두께가 3[mm]일 때의 연면거리는 97[mm]이다. t=3[mm]일 경우 연면거리가 더 크므로 그림과 같이 E_d 도 더 높게 나타난다.

KS전극 배치 시 Dry-Air의 압력변화에 따른 에폭시수지의 두께별 연면전계강도의 상승비율은 표 3에 나타내었다. 압력이 1[atm]씩 상승하면 전계강도도 표 3과 그림 2에서 보여주는 바와 같이 1.7~7.3[%]의 상승비율을 가지며, t=2[mm]일 경우와 t=3[mm]일 경우 양자 공히 같은 특성을 가진다. 이때 평균상승율은 t=2[mm]일 때 4.1이며, t=3[mm]일 때는 4.8로 나타났다.

표 3. KS전극 배치 시 고체절연물의 두께에 따른 Dry-Air 기압별 연면방전전계강도 상승비(%)
Table 3. Increasing rate of dielectric strength in each Dry-Air pressure increasing with variation of solid dielectric thickness using KS electrodes

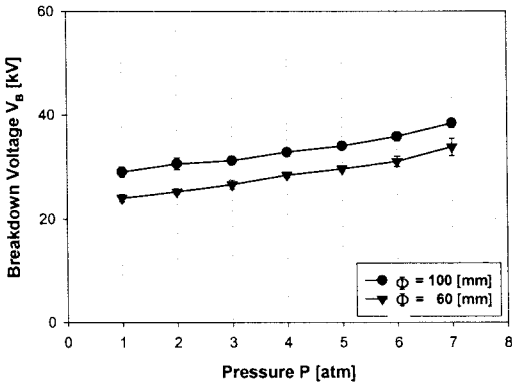
Thickness of epoxy resin [mm]	Pressure[atm]						Average
	1→2	2→3	3→4	4→5	5→6	6→7	
2	5.5	2	5.1	3.7	5.3	7.3	4.1
3	4.3	4.1	1.7	3.9	4.8	5.6	4.8

3.3 Dry-Air 중 고체절연물의 지름변화에 따른 연면방전특성

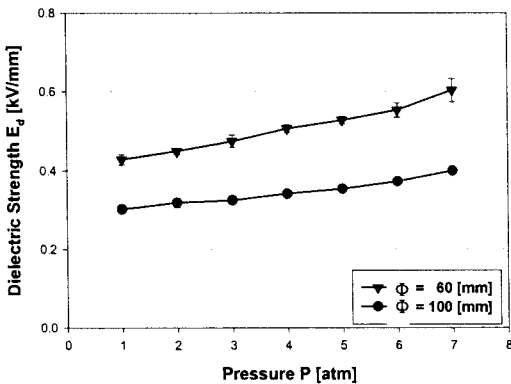
그림 3은 KS전극을 배치한 후, Dry-Air의 주입압력을 1~7[atm]으로 1[atm]씩 상승시켰을 때 두께가 2[mm]인 에폭시수지의 지름을 매개변수로 한 경우의 연면방전특성을 표현한 그래프이다.

그림 3 (a)는 연면절연파괴전압 V_B 를 나타낸다. 고체절연물의 지름이 길수록 절연파괴전압 V_B 가 더 높게 나타나는데, 이는 연면거리에 기인함을 알 수 있다. 다시 말해, 에폭시수지의 지름이 60[mm]일 때의 연면방전거리는 56[mm]이고, 지름이 100[mm]일

때의 연면거리는 96[mm]이므로, 더 짧은 연면거리를 가지는 지름 60[mm]인 에폭시수지에서의 연면절연파괴전압이 더 낮게 나타난다.



(a) 연면절연파괴전압 V_B



(b) 연면방전 전계강도 E_d

그림 3. KS전극배치 시 Dry-Air 중 고체절연물의 지름별 연면방전특성

Fig. 3. Surface discharge characteristics with variation of solid dielectric diameter in Dry-Air using KS electrodes

그림 3 (b)는 연면방전전계강도 E_d 를 나타낸다. 절연파괴전압을 연면거리로 나눈 값으로써, V_B 특성에서는 $\Phi=100$ [mm]일 경우가 더 높게 나타나며 E_d 특성에서는 $\Phi=60$ [mm]일 경우가 더 높게 나타남이 특이한 사항이다.

V_B 특성의 경우, $\Phi=100$ [mm]일 경우가 더 높은 것은 연면거리가 상대적으로 크기 때문이며, E_d 특성은 $\Phi=60$ [mm]일 경우가 $\Phi=100$ [mm]일 경우보다 더

높은 결과인데 이것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 연면거리 증대에 따라 V_B 의 상승률이 연면거리 증가율보다 상대적으로 적음에 기인된다. 이상의 각 특성에서 연면절연파괴강도, 즉 E_d 를 증대시키고자 할 경우 고체유전체 주위의 매질의 종류, 연면거리 및 형상, 인가전계 형태, 고체유전체의 물성, 고체유전체의 형상 및 배치, 전극의 형상 및 전극의 재료 등 다양한 인자를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 각종 전력설비에서 SF₆ 가스를 대체할 수 있는 친환경 절연가스로 주목받고 있는 Dry-Air를 절연 매질로 할 때의 고체절연물의 연면방전특성을 연구하였다. 특히, 챔버 내의 전극 형상과 고체절연물의 두께 및 지름이 연면방전에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

- 1) Dry-Air 중의 전극의 형상에 따른 연면방전 전계강도 E_d 는 침 대 평판전극일 때 가장 높고, 구 대 평판전극, KS전극의 순서로 확인되었다.
- 2) KS전극 배치 시 Dry-Air 중 고체절연물의 두께가 2[mm]에서 3[mm]로 두꺼워질수록 연면절연파괴전압 V_B 및 연면전계강도 E_d 가 높아진다.
- 3) 고체유전체 표면의 매질의 압력이 증대되면 연면방전전계강도 및 연면방전전압이 상승하게 된다. 이것은 액체유전체에서 흔히 볼 수 있는 매질효과로 인식된다.
- 4) 연면방전전계강도를 상승시키려면 다음 사항을 고려하여야 할 것으로 판단된다.
 - 연면거리, 연면의 형상, 고체유전체의 물성, 고체유전체의 형상 및 배치, 인가전압의 종류와 인가방법, 전극형상 및 전극의 재료, 고체유전체의 매질의 종류 등

이상의 연구 결과는 Dry-Air를 절연매질로 사용하는 전력설비 중 연면방전 가능성이 있는 설비의 절연설계시 유용한 기초자료가 될 것이다.

References

- [1] L.G. Christophorou, J.K. Olthoff and R.J. Van Brunt, "Sulfur Hexafluoride and the Electric Power Industry", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 5, pp. 20-24, September/October, 1997.
- [2] L.G. Christophorou and R.J. Van Brunt, "SF₆/N₂ Mixtures Basic and HV Insulation Properties", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2, No.5, pp.952-1003, October 1995.
- [3] Toshiaki Rokunohe, Yoshitaka Yagihashi, Kenji Aoyagi, Takashi Oomori and Rumihiro endo, "Development of SF₆-Free 72.5 kV GIS", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.22, No.3, pp.1869-1876, July 2007.
- [4] Y.H. Do, E.H. Choi, C.U. Lee, K.S. Park, L.K. Kim, K.S. Lee, "Breakdown Characteristics Assess of Imitation-Air for Distribution Power Facilities", KIIEE, vol.22, No.2, pp.114-119, February 2008.
- [5] S.K. Jung, D.C. Lee, "High voltage engineering", Munundang, pp.172-177, 1982.
- [6] H. Park, J.H. Lee, E.H. Choi, S.G. Park, K.S. Park, K.S. Lee, "Surface discharge Characteristics for epoxy resin in Dry-Air with different electrode features", KIIEE Autumn Annual Conf., pp.253-255, October 2008.

◇ 저자소개 ◇

박혜리 (朴惠利)

1984년 8월 14일생. 2006년 University of Cergy-Pontoise 전기공학과 졸업. 2007년 영남대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

최은혁 (崔殷赫)

1977년 2월 19일생. 2003년 경일대 전기공학과 졸업. 2005년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 박사수료.

김이국 (金利國)

1946년 9월 30일생. 1969년 영남대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 졸업(석사). 2002년 동 대학원 졸업(박사). 현재 경일대학교 전기공학과 교수.

이광식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전고전압연구회 간사장 역임. 한국조명전기설비학회 편수위원장·부회장 역임. 현재 한국조명·전기설비학회 회장. 영남대학교 전기공학과 교수.