

신 기술 신 제품

환경저부하형 신절연/소호매체 개발 동향



요 약

우수한 절연성능과 소호성능을 가진 SF₆ 가스의 사용이 지구온난화문제를 배경으로 국제적으로 규제되는 경향에 있다. 이 과정에서 환경을 배려한 차세대의 전력기기·시스템을 구축하기 위해 새로운 절연·소호매체의 개발이 시급한 과제로 대두되어 있다. 본 고에서는 SF₆ 가스와 지구온난화문제 그리고 SF₆ 가스의 배출상황 등으로부터 에너지와 환경 간의 관계를 살펴보고, SF₆ 대체가스의 절연특성에 관한 연구 동향과 SF₆ 대체가스의 아크 차단특성에 관한 연구 동향 등을 살펴보고, 향후 환경저부하형 신절연/소호매체 개발을 위한 연구 과제 등에 대해 기술해 보았다.

1. 서 론

SF₆ 가스는 1900년에 파리약학대학에서 세계에서 최초로 합성된 이후, 그 우수한 절연성능과 차단성능에 의해 고전압변전소에서 사용되고 있는 전력기기의 절연매체나, 고장전류로부터 전력계통을 보호하는 차단기의 소호매체로서 널리 사용되어, 전력기기의 소형화, 고성능화에 지대한 공헌을 해 오고 있는 물질이다[1]. SF₆ 가스는 그 자체가 안전할 뿐만 아니라 무해한 기체이나, 최근 지구환경보호에 대한 의식이 높아지면서 이 가스가 극히 온실효과가 높은 물질임이 알려져 그 사용에 대해 전세계적으로 규제되는 경향을 보이고 있다. 1994년에는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)로부터, SF₆ 가스는 '과거에 평가되었던 가스 중 가장 온실효과가 높은 가스'로 지적되었다[2]. 여기서 온실효과를 나타내는 지표로서 다음 식으로 나타내는 GWP(Global Warming Potential)이 이용된다[3].

$$GWP = \frac{\int_0^{t_1} \Delta F(i,t)c(i,t)dt}{\int_0^{t_1} \Delta F(CO_2,t)c(CO_2,t)dt}$$

윗 식에서 $\Delta F(i,t)$ 는 1kg의 가스 i를 대기 중에 주입한 직후의 적외선흡수분, 소위 방사강제력(radiative forcing)이라 불리는 양으로서, 주입전의 대기중 농도가 낮고, "대기의 창(atmospheric window)"이라 불리는 8~13 μ m의 파장영역(파수로 800~1200cm⁻¹)에서 적외선흡수력이 강할수록 그 값이 큰 것으로 알려져 있다. 또한 c(i,t)는 시간 t 후의 잔류가스 i의 농도이다. 한편 시간 t₁은 GWP를 산출하는 기간으로서, 통상 100년으로 되어 있다. 윗식으로부터 GWP는 CO₂ 가스의 GWP를 기준으로 한 값을 알 수 있다. 참고문헌 [2]에 의하면, SF₆ 가스의 GWP는 100년 경과한 시점에서 CO₂ 가스의 24,900배로 극히 높은 것으로 보고되어 있으며, 이는 SF₆ 분자의 수명이 3,200년으로 길고, 또한 SF₆ 분자는 "대기의 창"에서 큰 적외선흡수특성을 가지므로 그 방사강제력이 크기 때문으로 알려져 있다.

현 시점에서 각종 온실효과가스의 온난화에 대한 기여율은, CO₂ 가스가 약 64%를 점하는 반면, SF₆ 가스는 기껏해야 약 0.01%, 인공가스 전체로는 0.07%로 알려져 있다. 그러나 100년 후 SF₆ 가스의 사용량이 현재와 동일하다고 가정하는 경우, SF₆ 가스의 대기중 농도가 상승하기 때문에 기여율은 현재의 10배인 약 0.1%로 상승할 것으로 예측되고 있다[4]. 이와 같이 SF₆ 가스의 온실효과는 대기 중의 농도의 증가, 즉 배출량의 증대에 의해 누적되어, 온실효과를 저감시키는 것은 실질적으로 불가능하다. 이 때문에 1997년 12월 일본 Kyoto에서 개최된 제3차 당사국회의(COP3, 지구온난화방지 Kyoto 회의)에서, 온실효과를 가진 배출규제 대상가스로서, CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC에 더하여 SF₆ 가스도 지정되었다.

한편 SF₆ 가스의 대기중 농도는 과거 10년간 약 2배로 증가하여, 연간 약 6.9±0.2%(0.24±0.01ppt)의 증가를 계속하여, 1996년도 기준으로 그 농도는 약 3.7pptv(pptv : parts per trillion by

volume)으로 알려져 있다[1~4].

세계의 SF₆ 가스 생산량은 1995년 기준으로 약 8,500톤으로 추정되고 있다. 일본의 경우에는 약 30%인 연간 약 2,500톤이 생산되었으며, 그 중 약 650톤이 대기 중으로 배출되는 것으로 알려져 있다 [1]. 그 요인으로서, 주로 중전기 제조업체 측에서의 수송시 기기분해에 의한 배출, 공장 내에서의 개발 시험 및 현지에서의 설치시험시의 배출 등(연간 약 400톤)을 들 수 있으며, 또한 가스 제조업체 측에 의한 제조 공정 중에서의 배출(연간 약 200톤), 전력회사에서의 내부해방점검에 의해 회수되지 않는 누설분(연간 약 50톤) 및 GIS 등으로부터의 자연누설(연간 수톤 정도) 등이 거론되고 있다[1].

이러한 배경에 의해 일본의 경우 전력업계는 기기 점검시의 SF₆ 가스의 회수를 향상이나 점검내용, 주기 등을 재평가함으로써 그 배출 삭감을 목표로 하고 있다. 그러나 SF₆ 가스 자체의 사용량을 삭감하기 위해서도 SF₆ 가스를 대체할 새로운 가스, 또는 SF₆ 가스와 타가스에 의한 혼합가스의 연구개발이 강력하게 요구되고 있는 실정이다.

2. SF₆ 대체가스의 절연특성에 관한 연구 동향

2.1 혼합가스 중의 갭간 절연특성

SF₆ 가스는 우수한 절연특성을 가짐과 아울러 무독무해, 더욱이 불연성 및 높은 화학적 안정성을 가져, 오늘날까지 실용적인 절연매체로서 고전압 전력기기 분야에서 적극적으로 이용되고 있다. 그러나 SF₆ 가스는 고액화온도, 고가격, 불평등전계 하에서의 절연성능 저하 등의 약점과 더불어 앞에서 기술한 온실효과에 관한 문제가 장래의 지구 환경을 고려할 때 심각한 문제로 되어 있다. 또한 최근의 가스절연변압기 [5] 나 가스절연송전선(GIL : Gas Insulated Line)[6]이 도입됨에 따라 SF₆ 가스를 대량으로 사용하게 될 가능성이 커짐에 따라, SF₆ 가스를 대체할 절연가스의 개발이 사회적으로 강력히 요청되고 있다.

이와 같은 요청에 부응하기 위해 지금까지 각종 가스의 절연성능에 대한 조사·검토 결과, 2-C₄F₈, CCl₃F 등의 플루오르카본계물 중심으로 하여, SF₆ 가스를 능가하는 절연내력을 가진 단독 가스가 몇 종류 보고되었다[7~9]. 그러나 독성, 화학적 안정성, 오존층파괴, 지구온난화 등의 여러 측면을 종합적으로 평가해 볼 때 SF₆ 가스를 대체할 수 있는 절연가스로서의 적용 가능성을 찾을 수 없음이 현 실정이다

[10, 11].

이와 같은 과정에서 최근 SF₆ 가스/타가스에 의한 혼합가스는, SF₆ 가스의 사용량 삭감에 효과적인 대책으로서 주목받고 있다. SF₆ 가스를 포함한 혼합가스의 큰 이점은 절연성능에 있어서 (+)의 상승효과(synergism)가 나타나는 점이다[12]. 특히 SF₆/N₂ 혼합가스는, 지구온난화에 기여하지 않는 무해·안정한 질소 가스의 사용에 의해 (+)의 상승효과가 현저히 나타난다는 점에서 SF₆ 가스의 대체가스로서 가장 주목받고 있다. 유럽에서는 EdF사와 ABB가 400kV GIL의 절연가스로서 SF₆/N₂ 혼합가스의 도입을 검토하고 있다[13].

SF₆/N₂ 혼합가스 중의 갭간 절연특성에 관한 연구 동향으로서, 전력기기의 절연설계의 기본이 되는 준평등전계 하에서, 주로 뇌임펄스 인가시의 절연파괴 전압 측정 등이 수행되고 있다.

실용 전력기기의 경우에는, 금속이물질 등의 혼입에 의해 기기 내에서 불평등전계가 형성되고 부분방전(PD)을 경유하여 절연파괴가 발생할 가능성이 있다. 이에 대해서는 Gallimberti [14] 등이 공기 및 SF₆ (1%)/air(99%) 혼합가스 중 PD의 전류파형과 발광상 관측 결과로부터 PD의 진전특성을 검토한 바 있다.

또한 SF₆/N₂ 혼합가스 이외의 혼합가스에 대해서는 준평등전계 하에서의 절연파괴특성에 관한 연구 [15~17]나, 절연파괴특성을 해석하기 위한 각종 가스의 유효전리계수 등의 스웜파라미터(swarm parameter), 충돌단면적 등의 기초연구 [18~26]가 이루어져 있다.

이와 같이 SF₆ 대체가스의 갭간 절연특성에 관한 연구는 SF₆/N₂ 혼합가스를 중심으로 활발히 진행되고 있다. 그러나 현재로서는 준평등전계 하에서의 절연파괴특성에 관한 보고가 많고, 실용적인 측면에서 이루어져야 할 불평등전계 하에서의 연구보고는 적은 실정이다. 즉 SF₆/N₂ 혼합가스의 적용이 주목되는 중에서, 불평등전계 하에서의 절연파괴특성 및 부분방전특성의 파악이 중요한 시점이라 하겠다.

2.2 혼합가스 중의 연면절연특성

전력기기 내의 고전압도체와 그 지지물인 고체절연물(스페이서)와의 접촉부(triple junction)에서는 불평등전계가 형성되어 가스절연 전력기기의 연면절연성능에 대한 약점으로 될 수 있다[27]. 따라서 혼합가스 중의 연면절연특성에 대해서는 여러 종류의 전극 구성을 이용한 조사가 이루어져 있다.

우선 평등전계에 대해서는 Hoshina 등이 평판 및 매입전극에 의해 에폭시 스페이서 상에 평등전계를

형성하고, 스페이서 연면에서의 (-)극성 뇌임펄스 전압 인가시의 절연파괴강도에 대해 조사한 바 있다 [28, 29]. 이에 의하면, 동일한 압력에서도 N_2 가스 중에 SF_6 가스를 소량 혼합함으로써 절연파괴전압은 대폭적으로 상승되어 순 SF_6 가스 중의 값에 가깝게 된다. 또한 절연파괴전압의 SF_6 가스 혼합비 의존성은 Qiu 등이 제시한 평등전계 갭중 절연파괴특성의 근사식과 잘 일치함도 확인되어 있다 [30].

불평등전계의 경우에 대해서는, Diarra 등이 GIL 을 모의한 전극계를 이용하여 SF_6/N_2 혼합가스 중에서 스페이서 상의 뇌임펄스 절연파괴강도에 대해 조사한 결과 [31], N_2 가스에 대한 SF_6 가스의 혼합비를 0~8%로 변화시킨 경우, 절연파괴전압이 (+)극성 임펄스에 대해서는 35% 정도 상승함이 확인되어 있다.

이와 같이 혼합가스 중에서의 평등전계 및 불평등전계 하의 연면절연특성에 있어서는, SF_6 가스보다 절연내력이 낮은 가스에 SF_6 가스를 소량 혼합시킴으로써 절연내력이 급격히 상승함이 보고되어 있다. 그러나, 이와 같은 연면절연특성의 조사는 실용 기기의 절연설계에 필수불가결함에도 불구하고, 가스 갭 중에서의 절연특성에 대한 보고와 비교하면 극히 적은 실정이다. 더욱이 절연내력에 대해서는 연구 결과가 다수 보고되어 있음에 대해 연면방전 진진기구에 대해서는 아직 해명되어 있지 못한 부분이 많다.

3. SF_6 대체가스의 아크 차단특성에 관한 연구동향

현재의 송전계통에 이용되고 있는 전력용 차단기는, 전류 영점에서 소호매체 가스를 아크에 불어넣어 소호하는 방식을 채용하고 있다. 가스를 불어넣는 방식에는 2압식과 Puffer식이 있으며, 현재는 후자가 주류로서, 소호매체 가스로 SF_6 가 사용되고 있다.

SF_6 가스를 대체할 소호매체 가스로서, SF_6/N_2 혼합가스가 1970년대부터, 경제성 및 한냉시 사용을 목적으로 하여, 그 차단특성이 검토되어 왔다. 소호매체를 SF_6 가스로부터 단순히 SF_6/N_2 혼합가스로 치환한 경우에는 전류차단능력이 20% 정도 저하하나, 혼합가스용으로 적절히 설계를 변경함으로써 그 저하 효과를 억제할 수 있어, 경제적으로 유리한 설계가 가능하다는 보고가 있다 [32].

한편 과도회복전압 상승률에 대한 차단능력은 N_2 가스의 혼입에 의해 순수한 SF_6 가스의 경우보다 40% 이상 개선된다는 보고도 있다 [33].

SF_6 가스와의 혼합기체로서는 N_2 외에 He, Air, C_2F_2 , CF_4 등이 검토되고 있으나, 열적인 차단에 대해서는 CF_4 만이 혼합에 의해 차단성능이 약간 상승

되는 것으로 알려져 있다 [34]. 열적차단모드에 대해서는 소호가스의 비열, 엔탈피, 점성계수 등이 그 주된 물성으로 고려되어, 각종 혼합가스의 열역학, 수송특성의 수치 해명이 Gleizes 등 [35]을 비롯하여 많은 연구자에 의해 진행되어 있다.

위에서 살펴본 바와 같이 SF_6 가스 대체 소호매체에 대해서는 경제성 측면에서 주로 검토되어 왔으며, 환경 측면에서의 재검토는 최근에 이르러 시작된 정도에 불과하다고 하겠다.

또한 SF_6 가스를 전혀 사용하지 않는 소호가스로서는, 순수한 N_2 가스 등을 고기압에서 사용하는 방안이 고려되고 있으나, 순수한 N_2 나 이를 베이스로 한 혼합가스 등의 차단성능에 관한 검토 등의 과제에 대해서는 거의 연구가 착수되어 있지 않은 실정이다.

현재의 전력용 차단기는 SF_6 가스를 베이스로 하여 그 소호능력이 최대한 발휘될 수 있도록 설계되어 있다. SF_6 가스를 전혀 사용하지 않는 경우에는, 현재의 차단기와는 다른 방식에 대해서도 감안한 검토가 필요하다고 하겠다. 이를 위해서는 대전류 아크 소호시의 거시적 및 미시적특성을 파악해야 할 필요가 있다. 또한 대전류 차단에 있어서는 점점 간의 아크에 대해 가스를 불어넣어 소멸시키는 방식을 취하고 있으므로, 점점에서의 전극현상에 대한 상세한 파악도 새로운 소호매체의 개발에 필요 불가결한 과제라 하겠다.

4. 앞으로의 과제

(1) 극미량 SF_6 가스 혼합시의 절연파괴특성 및 PD 특성

절연파괴전압의 SF_6 가스 혼합비의존성으로부터 1~5%의 미량 SF_6 가스의 혼합에 의해 절연파괴전압이 급격히 상승한다. 이 현상을 물리적으로 해명하기 위해서는 SF_6 가스 혼합비 1% 이하의 극미량 혼합시에서의 절연파괴특성 및 PD 특성의 검토가 불가결하다.

(2) SF_6/PFC 혼합가스 중의 절연파괴특성 및 PD 특성

PFC 가스는 SF_6 가스보다 온난화계수가 낮고, 절소가스보다 절연성능이 높으며, 무독무해한 가스가 많다. 따라서 SF_6 가스와 PFC가스를 혼합시킨 경우의 절연파괴특성 및 PD 특성을 조사할 필요가 있다.

(3) 혼합가스 중의 PD 발광 스펙트럼

단발 PD에서의 시계열적 발광스펙트럼 분석은 PD 발생기구 해명에 극히 중요하다. 따라서 혼합가스 중의 PD 측정시스템을 재고안하여 단발 PD에 대한 발광상, 전류파형, 발광강도파형, 발광스펙트럼을

동시관측할 필요가 있다.

(4) SF₆ 가스를 포함하지 않는 신-혼합가스의 개발
SF₆ 가스를 포함하지 않는 환경저부하형 혼합가스로서 N₂/O₂ 혼합가스에 주목하여, 갭간 절연특성 및 연면절연특성을 조사함과 동시에, 최적가스압력, 최적혼합비에 대해 고찰할 필요가 있다. 또한 각종 가스의 적외선흡수특성을 고려한 환경저부하형 신/혼합가스의 선정을 시도해 보아야 할 것이다.

(5) 각종 혼합가스 중에서 아크의 전극강하전압 SF₆ 대체가스로서 질소를 주체로 한 혼합가스 사용될 가능성이 크다. 따라서 질소 및 그 혼합가스 중에서의 아크의 전극현상의 파악, 전극강하전압을 측정해 볼 필요가 있다. 또한 전극 근방 미소공간에서의 광학적 관측을 수행하여, 전극 근방의 마이크로구조를 명확하게 하는 것도 중요하다.

(6) 평판상 아크 차단 기구
SF₆ 대체가스 의 차단기구를 파악하기 위해 평판상 아크 소호장치에서의 상세한 아크차단과정을 분광학적 기법 및 마이크로파 계측에 의해 명확하게 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] 電氣協同研究會 電力用 SF₆ 가스取扱基準專門委員會編 : 電力用 SF₆ 가스取扱基準, 電氣協同研究 第54卷 第3號(1998).

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) : "Radiative Forcing of Climate Change", The 1994 Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC, p. 33, 1994.

[3] U. Siegenthaler, E. Sanhueza : "Greenhouse Gases and Other Climate Forcing Agents", *Climate Change : Science, Impacts and Policy(Proceedings of the Second World Climate Conference)*, pp. 47-57, 1991.

[4] L. G. Christophorou, R. J. Van Brunt : "SF₆ Insulation : Possible Greenhouse Problems and Solutions", NISTIR 5686, NIST, p. 5, 1995.

[5] C. T. Wan, A. Kudo, M. Asakura, Y. Murakami, K. Itoh, T. Nishitani, T. Yoshikawa : "Development of 275kV Gas Cooled Type Gas-Insulated Power Transformer", *Gaseous Dielectrics VII*, pp. 539-545, 1994.

[6] H. Okubo, T. Hoshino, T. Takahashi, M. Hikita, A. Miyazaki : "Insulation Design and On-site Testing Method for a long Distance, Gas Insulated Transmission Line(GIL)", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 14, No. 6, pp. 13-22, 1998.

[7] 電氣學會 : 新版放電ハンドブック, p. 264, 1995.

[8] D. J. James, L. G. Christophorou, R. Y. Pai, M. O. Pace, R. A. Mathis, I. Sauers, C. C. Chan : "Dielectric Strengths of New Gases and Gas Mixtures", *Gaseous Dielectrics I*, pp. 224-257, 1978.

[9] L. G. Christophorou, L. A. Pinnaduwege : "Basic Physics of Gaseous Discharges", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 1, pp. 55-74, 1990.

[10] 宅間 : "가스絶縁および가스絶縁機器の基礎", 電氣學會論文誌 B, Vol. 116, No. 10, pp. 37-41, 1996.

[11] 宅間 : "가스絶縁への新가스・混合ガスの應用", 電氣學會誌, Vol. 106, No. 6, pp. 37-41, 1986.

[12] S. R. Hunter, L. G. Christophorou : "Pressure-dependent Electron Attachment and Breakdown Strength of Unitary Gases, and Synergism of Binary Gas Mixture : A Relationship", *Gaseous Dielectrics IV*, pp. 115-127, 1984.

[13] X. Waymel : "Low SF₆ concentration SF₆/N₂ mixtures for GIL", *Gaseous Dielectrics VIII*, pp. 345-351, 1998.

[14] I. Gallimberti : "Breakdown Mechanism in Electronegative Gases", *Gaseous Dielectrics V*, pp. 61-79, 1987.

[15] L. G. Christophorou, D. R. James, I. Sauers, M. O. Pace, R. Y. Pai, A. Fatheddin : "Ternary Gas Dielectrics", *Gaseous Dielectrics III*, pp. 151-163, 1982.

[16] Th. Aschwanden and R. Schmid : "The Dielectric Strength of Dichlorotetrafluoroethane(1, 2-C₂Cl₂F₄) Determined in a Combined Swarm/Breakdown Study", *Gaseous Dielectrics V*, pp. 272-280, 1987.

[17] I. D. Chalmers, X. Q. Qui and P. Coventry : "The study of SF₆ Mixtures

- with Buffer Gases”, *Gaseous Dielectrics VIII*, pp. 189-195, 1998.
- [18] D. X. Xiao, H. Gao and Q. X. Zhu : “Swarm Parameters Measured in SF₆ and Carbon Dioxide Gas Mixtures using The Time-resolved Discharge Method”, *10th International Symposium on High Voltage Engineering*, Vol. 2, pp. 379-382, 1997.
- [19] M. Zhou and J. P. Reynders : “Synergy Between SF₆ and Other Gases to Enhance Dielectric Strength”, *10th International Symposium on High Voltage Engineering*, Vol. 2, pp. 379-382, 1997.
- [20] 電氣學會 : 「氣中放電に関するデータベースの検討」, 電氣學會技術報告, Vol. 465, 1993.
- [21] Th. Aschwanden : “Swarm Parameters in SF₆/N₂ Mixtures Determined from Time Resolved Discharge Study”, *Gaseous Dielectrics IV*, pp. 24-33, 1984.
- [22] Y. Ohmori, M. Shimozuma and H. Tagashira : “Boltzmann Equation Analysis of Electron Swarm Behavior in Nitrogen”, *Journal of Physics D” Applied Physics*, Vol. 21, pp. 724-733, 1988.
- [23] R. D. Hake, Jr. and A. V. Phelps : “Momentum-Transfer and Inelastic-Collision Cross Sections for Electrons in O₂, CO, and CO₂”, *Physical Review*, Vol. 158, No. 1, pp. 70-84, 1967.
- [24] 伊藤, 松村, 佐藤, 鈴木, 中尾, 田頭 : 「CF₄を含む混合ガスの電子輸送特性」, 電氣學會論文誌 A, Vol. 116, No. 4, pp. 328-333, 1996.
- [25] R. J. Van Brunt and J. T. Herron : “Fundamental Process of SF₆ Decomposition and Oxidation in Glow and Corona Discharges”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 1, pp. 75-94, 1990.
- [26] 伊藤, 松村, 佐藤, 中尾, 田頭 : 「SF₆を含む混合ガスの絶縁耐力に関する相乗効果」, 電氣學會論文誌 A, Vol. 113, No. 2, pp. 91-97, 1993.
- [27] 千葉, 日高 : 「絶縁材料表面の沿面放電と帯電」, 静電氣學會誌, 第2巻, 第3號, pp. 141-144, 1998.
- [28] Y. Hoshina, J. Sato, H. Murase, H. Aoyagi, M. Hanai and M. Kaneko : “The Surface Flashover Characteristics of Spacer for GIS in SF₆ gas and Mixtures”, *Gaseous Dielectrics VIII*, pp. 473-479, 1998.
- [29] 保科, 佐藤, 花井, 金子 : 「混合ガスにおける絶縁物沿面の絶縁破壊特性」, 平成 10年電氣學會全國大會, No. 164, 1998.
- [30] Y. Qiu and Y. P. Feng : “Calculation of Dielectric Strength of The SF₆/N₂ Gas Mixture in Macroscopically and Microscopically Non-uniform Fields”, *4th International Conference on Properties and Application of Dielectrics*, pp. 87-90, 1994.
- [31] T. B. Diarra, A. Beroual, F. Buret, E. Thuries, M. Guillen, Ph. Roussel : “N₂-SF₆ Mixtures for High Voltage Gas Insulated Lines”, *10th International Symposium on High Voltage Engineering*, Vol. 2, pp. 105-108, 1997.
- [32] Electric Power Research Institute : “Gases superior to SF₆ for Insulation and interruption”, *Report EPRI EL-2620*, September, 1982.
- [33] L. G. Christophorou, J. K. Olthoff, D. S. Green : “Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption : Possible Present and Future Alternatives to Pure SF₆”, *NIST Technical Note 1425*, pp. 1-44, 1997.
- [34] R. Middleton, V. Koschik, P. Hogg, P. Kulkarni and H. Heiermeier : “Development Work for the Application of 245kV Circuit Breakers Using a SF₆/CF₄ gas mixture on the Manitoba Hydro System”, *Canadian Electrical Association Station Equipment Subsection, Engineering and Operation Division*, Toronto, Canada, March, 1994.
- [35] A. Gleizes, M. Razafinimanana and S. Vacque : “Calculation of Thermodynamic Properties and Transport Coefficients for SF₆/N₂ Mixtures in Temperature Range 1,000~30,000 K”, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 6, pp. 65-78, 1986.

<이동희(수원대학교 전기전자공학부)>