

## 극저온 헬륨가스의 절연파괴 및 연면방전 특성

## Electrical Breakdown and Flashover Characteristics of Gaseous Helium at Cryogenic Temperature

곽동순<sup>1\*</sup>Dong-Soon Kwag<sup>1\*</sup>

**Abstract:** Fixtures such as bushings in terminations of high temperature superconducting(HTS) power cable systems are subjected to high voltages, which have to transition from ambient to cryogenic temperatures. As such it is imperative to ensure the integrity of the dielectrics under all operating conditions, including thermal aspects brought about by the passage of current. Gaseous helium(GHe) at high pressure is regarded as a potential coolant for superconducting cables. The dielectric aspects of cryogenic helium gas are both complex and demanding. In this experimental study we looked at the interface between a smooth epoxy surface and high pressure helium gas in a homogeneous electric field. The alternating current(AC) flashover voltages of epoxy samples are presented. The results have been analyzed by using Weibull statistics. In addition to the behavior of the epoxy in gaseous helium as a function of pressure and temperature we also present data of the characteristics of the epoxy in mineral oil and in liquid nitrogen(LN<sub>2</sub>). The breakdown characteristics of a uniform field gap in gaseous helium as a function of pressure and temperature under AC, direct current(DC) and lightning impulse voltages are also given. Electric field calculations have been made for one of the experimental geometries in an attempt to explain some of the anomalies in the experimental results.

**Key Words:** cryogenics, dielectrics, flashover, breakdown, gaseous helium

## 1. 서 론

고온초전도 케이블의 단말은 상온에서부터 극저온 환경에까지 걸쳐있는 도체의 전기적인 절연을 제공하

므로, 이러한 상황은 고전압을 인가하는 동시에 공기 중에서부터 극저온 장치까지 대전류를 흘리는데 많은 어려움이 있다. 즉, 고온초전도 케이블용 단말은 극저온 냉매와 상온의 공기 사이에서 운전되므로 전기절연 뿐만 아니라 열적인 수축에 대해서도 견뎌야 한다[1]. 따라서 절연 전면의 전위경도를 균일히 해야 할 뿐만 아니라 대기에 대해 완전 밀봉되어야 하고 최악의 운전 상태 하에서 열적으로 안정되어야 한다.

고온초전도 케이블의 냉각을 위해 일반적으로 액체 질소를 사용하고 있지만, 63~77 K 사이의 온도에서 운전되어야 하는 제한이 있다[2]. 고온초전도체는 저온으로 내려갈수록 임계전류가 증가하기 때문에 케이블의 전류밀도를 현저히 높일 수 있다. 본 연구에서 냉매로 사용한 헬륨가스는 63 K 아래에서도 상변화 없이 운전이 가능하며, 외부 누출 시 낮은 질식 위험, 넓은 운전온도 범위, 시스템의 경량화 등과 같은 추가적인 이점이 있다. 반면, 헬륨가스를 사용한 냉각시스템은 액체질소 냉각방식에 비해 낮은 절연강도와 높은 압력에서 운전되어야하는 기술적인 어려움이 있다. 따라서 극저온 헬륨가스의 절연특성에 대한 검토가 이루어져야 할 것이며, 특히 기체 절연에서는 고체절연물과의 계면을 통해 발생하는 연면방전이 매우 취약하기 때문에 이에 대한 실험적인 연구가 필수적이라 할 수 있다. 액체질소 중에서의 연면방전에 대한 연구는 이미 많은 결과들이 보고되어 있지만[3], 고압의 극저온 헬륨가스에 대한 연구는 전무한 실정이다. 상온의 대기압 헬륨가스는 절연내력이 매우 낮아 전기 절연재료로 사용하기에는 적합하지 않다. 그러나 극저온에서 고압으로 가압된 헬륨가스의 밀도가 증가하게 되면 어느 정도의 절연성능을 확보하게 된다[4-6].

본 논문에서는 극저온 절연물로서 널리 사용되고 있는 Stycast 에폭시 수지의 극저온 가압 헬륨가스 중 연면방전에 관한 실험적인 결과를 중점적으로 제시하고 있으며, 동일한 실험을 액체질소 및 광유에서 실시하여 그 결과를 비교하여 나타내었다. 또한 다양한 압력 및 온도에서 순수한 헬륨가스의 교류 및 직류, 뇌임펄스에 대한 절연파괴 특성에 대해서도 조사하였다. 이러한 연구는 현재 개발 중인 극저온 헬륨가스 냉각 고온초전도 케이블용 단말의 설계와 제작에 있어서 매우 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 실험 방법

## 2.1. 시료의 제작

실험에 사용한 에폭시 시료는 Stycast 2850 FT 수지와 경화제 24 LV를 혼합하여 진공챔버 속에서 가스를 제거한 후 세 종류의 직경을 갖는 아크릴 튜브

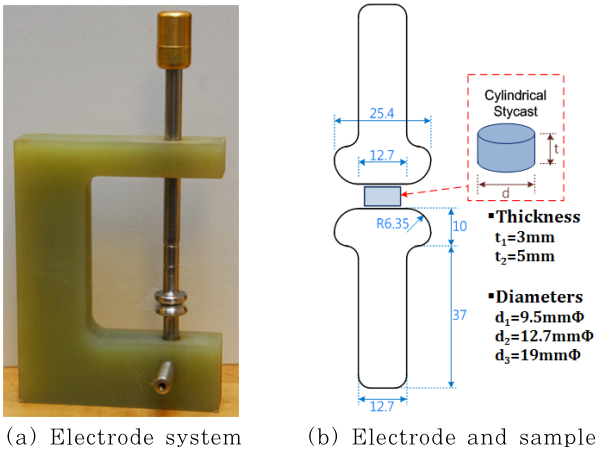
<sup>1</sup>정 회 원 : 경일대학교 소방방재학부 조교수

\*교신저자 : dskwag@kiu.ac.kr

원고접수 : 2012년 09월 05일

심사완료 : 2012년 09월 20일

게재확정 : 2012년 09월 20일



(a) Electrode system (b) Electrode and sample

Fig. 1. Electrode system for flashover test on epoxy surface in LN<sub>2</sub> and mineral oil.

에 주입하여 제작하였다. 에폭시 주입 후 진공 챔버 안에서  $1 \times 10^{-2}$  Torr의 압력에서 약 15분 동안 진공 배기 하였으며, 질소가스로 가압하여 1.54 MPa에서 24시간 동안 경화시켰다. 이후 액체질소에 침적하여 아크릴 튜브를 제거하고 에폭시 봉 막대만 남도록 하였다. 제작된 에폭시 봉 막대는 매우 깨끗한 표면을 형성하였고, 각 봉 막대의 길이 방향으로 직경의 오차는  $\pm 0.1\%$  이하를 유지하였다. 봉 막대는 수치제어 공작기계(numerically controlled machine tools)를 사용하여 3 mm와 5 mm의 두께로 각각 절단하였다. 측정된 두께의 표준오차는  $\pm 0.1\%$  이내였다. 실험에 앞서 원통형으로 제작된 시료는 알코올로 초음파세척기를 통해 세척하였고, 공기 중에서 건조하였다.

**2.2. 액체질소 및 광유 중에서의 연면방전 실험**

원통형의 에폭시 시료를 그림 1의 평판전극 사이에 고정하고, 액체질소 및 광유 중에서 교류 연면방전 전압을 측정하였다. 평판전극의 직경은 25 mm로 제작되었으며, 상부 전극에 고전압을 인가하고 하부 전극은 접지하였다. 인가전압 측정을 위해 저항형 전압 분배기가 전극계와 병렬로 연결되었고, 전압분배기의 저항 출력단은 오실로스코프(Tektronix, model TP2024)에 연결되었다. 하부전극의 접지선을 통해 연결된 유도형 토로이드 페라이트의 출력단을 오실로스코프의 외부 트리거(trigger)로 사용하였다. 고전압의 인가는 오실로스코프에서 연면방전이 발생하였음을 인지할 때까지 초당 500 V로 상승시켰으며, 고전압 인가장치를 제어하는 소프트웨어에 의해 그 때의 전압이 기록되었다. 에폭시 시료 각각의 두께와 직경에 대해 본 실험이 반복되었으며, 각 시료 종류별 8~10회의 실험을 실시하였다. 연면방전이 발생한 이후 시료 및 전극, 광유는 매번 새것으로 교체하고 다음 실험이 수행되었다.

**2.3. 극저온 헬륨가스 중에서의 연면방전 실험**

헬륨가스 중에서 연면방전 전압의 측정은 절대압력 1.8 MPa까지 가압할 수 있는 압력용기(pressure vessel) 내에서 수행되었다. 압력용기의 상부 플랜지에는 100 kV의 고전압을 인가할 수 있는 고전압 피드스루(feed-through)와 가압된 상태에서 회전할 수 있게 제작된 액추에이터(actuator), 가스 주입구 및 배기구, 압력계, 릴리프 밸브(relief valve), 온도 센서용 포트가 구성되어 있다. 가압된 상태에서 4회의 실험을 수행할 수 있도록 GFRP로 제작된 전극 홀더



Fig. 2. Carousel type electrode system made of GFRP for breakdown and flashover test.



Fig. 3. Pressure vessel in an open cryostat of LN<sub>2</sub>.

에 4쌍의 평판전극으로 이루어져 있다. 에폭시 시료를 각각의 전극 사이의 중앙에 고정하고, 그와 같은 높이의 전극과 가장 많이 이격될 수 있는 위치에 두 개의 온도센서(Lakeshore Platinum RTD)를 고정하여 온도모니터(Lakeshore Model 218)를 통해 실험이 이루어질 때의 온도를 측정하여 기록하였다. 시료 및 전극의 세팅이 완료되면 상부플랜지를 압력용기에 체결하였다. 그림 2에 가압된 상태에서 4회의 절연시험을 할 수 있도록 제작된 Carousel 타입의 전극 시스템을 보여준다.

그림 3에 실험준비가 완료된 상태의 시험 장치를 보여준다. 시료가 장착된 압력용기를 크레인을 이용하여 개방형 극저온용기 속에 위치시키고, 압력용기 내부를 순수한 헬륨가스로 채우기 위하여 진공 및 질소가스, 헬륨가스를 이용하여 수차례의 플러싱(flushing)을 실시하였다. 압력용기 내부의 플러싱 과정은 우선 상용의 질소가스와 초고순도 헬륨가스(0.9999%)의 실린더 두 개를 진공펌프의 차단 밸브(isolation valves)와 결합하여 압력용기에 연결하였다. 압력용기는 진공배기 후 질소가스와 헬륨가스를

통해 플라싱 되었으며, 이 과정을 수차례 반복한 후 진공게이지에서 압력용기 내부가 약  $10^{-3}$  Torr를 가리킬 때까지 진공배기 하였다. 그 후 진공펌프와 질소 가스 실린더를 압력용기에서 분리하고 헬륨가스를 필요한 압력에 도달할 때까지 주입하였다. 그리고 나서 압력용기가 충분히 잠길 때까지 극저온용기에 액체 질소를 채워 넣었고, 압력용기 내의 온도가 77 K에 도달할 때 까지 기다렸다. 온도가 내려감에 따라 일정 압력을 유지하기 위하여 헬륨가스를 계속 보충하였으며, 압력용기 내부가 77 K까지 냉각되어 충분히 안정될 때까지 3시간 이상이 소요되었다. 한 시료에 대해 연면방전이 발생하면 액추에이터를 회전하면서 4개의 시료에 대해 각각의 실험을 수행하였다. 각 시료에 대해 8회의 측정이 이루어 졌으며, 한번에 4개씩 2회에 걸쳐 위의 실험이 반복되었다. 상온에서의 연면방전 전압의 측정은 위의 압력용기가 액체질소에 침적된 것을 제외하면 모두 동일한 절차를 따랐다.

**2.4. 극저온 헬륨가스의 절연파괴 실험**

순수 헬륨가스의 온도 및 압력 변화에 따른 절연 파괴 전압의 측정은 상기한 극저온 헬륨가스 중에서의 연면방전 실험 과정과 거의 동일하게 이루어졌으며, 전극 사이의 간격은 5 mm로 하였다. 실험은 60 Hz 교류 및 직류, 뇌임펄스 전원에 의해 각각 수행되었으며, 교류와 직류는 초당 500 V의 속도로 전압을 상승시키고 뇌임펄스는  $1.2 \times 50 \mu s$ 의 표준 충격파를 사용하였다. 절연파괴 시험은 대기압에서 절대압력 1.54 MPa 사이의 압력범위 내에서 이루어 졌으며, 각각의 압력 및 온도에 대해 10회 이상의 실험을 수행하였다. 하나의 전극계로 약 60회의 절연파괴 실험이 이루어 졌으며, 경험적으로 절연파괴 전압에 영향을 미칠 만큼 전극 표면에 손상이 발생하였을 경우 전극을 교체하였다. 가압 질소가스 및 공기 중에서 이와 유사한 실험을 수행한 A. H. Howell [7]과 H. H. Skilling [8]의 경우에서도 이와 같이 보고되어 있다. 각 압력에서의 측정이 완료된 후 헬륨가스를 방출해 줌으로써 용기내의 압력을 변화시켜 주었으며, 압력이 내려감에 따라 낮아진 온도가 원래의 온도로 돌아올 때까지 기다린 후 다음 측정이 이루어 졌다. 실험을 반복하면서 절연파괴 전압의 오차가 약 1 kV의 범위를 벗어날 경우 새로운 전극으로 교체되었다.

뇌임펄스 절연파괴 실험에서 1회 방전 후 다음 측정을 위한 충전전압은  $\pm 2\%$  범위 내에서 조정되었으며, 각각의 온도 및 압력에서 약 30회 반복 측정하였다. 뇌임펄스 실험에서는 동일 전극계로 약 80회의 측정을 수행하였으며, 인지할 수 있을 만큼 측정값의 편차가 발생한다든지 또는 80회의 측정을 수행한 후 전극을 교체하였다.

**3. 실험결과 및 토의**

그림 4는 293 K 및 77 K의 온도에서 압력 변화에 따른 헬륨가스의 절연파괴 전계값을 보여준다. 실험결과와 파센의 법칙에 잘 부합하는 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 대부분의 기체절연물의 경우는 압력이 약 5기압을 초과할 경우 이 법칙에 크게 의존하지 않는다고 알려져 있지만, 본 실험을 통해 기체의 밀도에 대해서는 절연파괴 전계가 크게 의존하고 있음을 알 수 있다. 같은 압력일지라도 온도가 77 K인 헬륨가스의 경우가 상온의 경우보다 현저히 높은

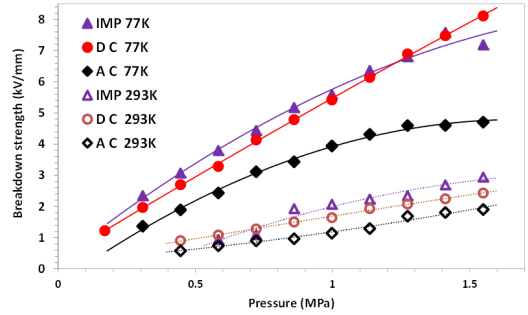


Fig. 4. Electrical breakdown strength of GHe as a function of pressure and temperature.

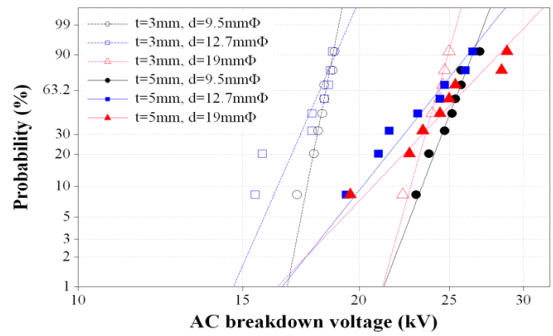


Fig. 5. AC flashover voltage along epoxy surface in GHe at a temperature of 77 K and a pressure of 1.54 MPa.

밀도를 가지게 되며, 절연파괴 전계도 매우 높게 조사되었다. 예로써 77 K인 헬륨가스의 밀도는 0.6 MPa에서  $3.81 \text{ kg/m}^3$ 이고, 1.6 MPa에서는  $9.9 \text{ kg/m}^3$ 로서 약 2.6배의 차이를 보인다[9]. 같은 조건하에서 교류 절연파괴 전계는 2.36배의 비율을 보이고 있으며, 직류와 뇌임펄스의 경우 약 2.42배를 나타내고 있다. 게다가 1.6 MPa의 압력에서 293 K과 77 K인 헬륨가스의 밀도 비율은 약 3.81배로 주어지며, 교류 절연파괴 전계값은 4.35배를 보이고 있다. 이것은 극저온 가압 헬륨가스가 전기절연체로서 적용 가능성이 충분히 있음을 분명히 보여주고 있다. 한편 밀도 변화에 따른 헬륨가스의 절연파괴 특성에 관한 연구 [4, 5]가 이미 보고되어 있으며, 본 실험은 극저온 기기 개발을 위해 반드시 수행되어야 할 헬륨가스 중 에폭시의 연면방전 특성에 대해 통찰하고 있다.

그림 5은 1.54 MPa의 압력 하에서 77 K으로 냉각된 헬륨가스 중 에폭시 시료 표면에서의 연면방전 전압에 대한 와이블 분포도를 보여준다. 63.2%의 신뢰수준에서 절연파괴 전압을 나타내는 척도모수(scale parameter)는 5 mm 두께의 시료에서 직경에 따른 신뢰값의 변화가 크지 않다. 그러나 3 mm 두께의 시료 중 19 mm의 직경을 갖는 것은 다른 9.5 mm와 12.7 mm의 직경을 갖는 것에 비해 33%의 증가를 보여주고 있다. 형상계수(shape factor)에 의한 신뢰성은 5 mm 두께의 시료는 3 mm 두께의 시료에 비해 거의 절반 수준인 것으로 조사되었다.

그림 6은 상온에서 1.54 MPa의 압력으로 가압된 헬륨가스 중 에폭시 시료 표면에서의 연면방전 전압에 대한 와이블 분포도를 보여준다. 척도모수에서 가장 높은 값을 보인 것은 19 mm의 직경을 갖는 시료에서 나타났으며, 이는 두께 3 mm와 5 mm인 시료 모두에서 동일한 경향을 보였다. 그러나 그 증가폭은 미미

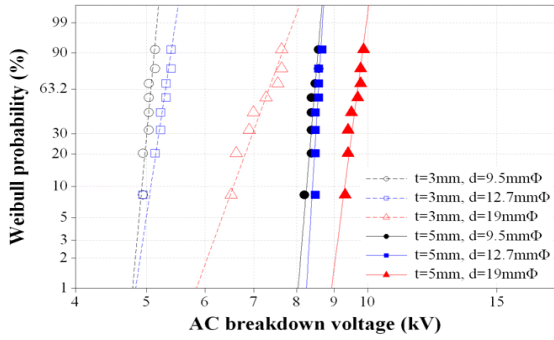


Fig. 6. AC flashover voltage along epoxy surface in GHe at a room temperature and a pressure of 1.54 MPa.

했으며, 두께 5 mm 시료의 경우 10%, 두께 3 mm 시료는 35~45% 정도 증가하였다. 두께 3 mm 시료의 경우 결과의 신뢰도가 낮은 편이었지만, 두께 5 mm의 경우는 상대적으로 높게 조사되었다. 특히 두께 5 mm, 직경 12.7 mm인 시료에서 가장 높은 값을 보여주었다.

그림 7과 그림 8은 액체질소와 상온의 광유 중에서 에폭시 표면에서의 연면방전 전압에 대한 와이블 분포도를 보여주고 있다. 두 조건 사이에서 척도모수의 차이는 거의 미미하였으며, 단지 두께 3 mm, 직경 9.5 mm의 시료에서 액체질소 중에서의 경우가 광유보다 약 45% 정도 높았고, 두께 5 mm, 직경 12.7 mm의 시료에서 액체질소 중에서의 경우가 광유보다 약 30% 정도 높은 값을 보인 차이가 있다. 액체질소 및 광유 중에서 가장 높은 신뢰도를 보여준 것은 두께 5 mm, 직경 19 mm 시료인 경우였으며, 다음으로 두께 3 mm, 직경 9.5 mm인 시료 순으로 나타났다.

표 1은 다양한 형상을 갖는 에폭시 시료에 대해 본 실험을 통해 취득한 헬륨가스 및 액체질소, 변압기유 중에서의 연면방전 전압에 대한 척도모수  $\alpha$ 와 형상계

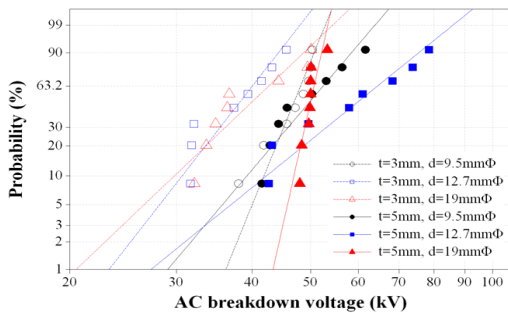


Fig. 7. AC flashover voltage along epoxy surface in LN<sub>2</sub>.

Table 1. Weibull parameters for AC flashover tests on the epoxy samples.

Thick. (mm)	Dia. (mm)	Scale parameter $\alpha$ (kV <sub>rms</sub> )				Shape factor $\beta$			
		GHe (77 K)	GHe (293 K)	LN <sub>2</sub> (77 K)	Oil (293 K)	GHe (77 K)	GHe (293 K)	LN <sub>2</sub> (77 K)	Oil (293 K)
3	9.5	18.4	5.1	48.2	32.9	48.4	80.2	16.2	9.2
	12.7	18.2	5.3	40.1	44.7	21.6	49.0	8.4	5.0
	19	24.3	7.3	42.7	39.3	33.6	20.2	6.3	7.3
5	9.5	25.6	8.5	52.5	51.7	24.8	87.6	7.8	11.3
	12.7	24.4	8.6	64.5	47.9	11.9	121.8	5.3	16.5
	19	26.0	9.7	50.7	49.3	10.0	55.9	29.3	18.0

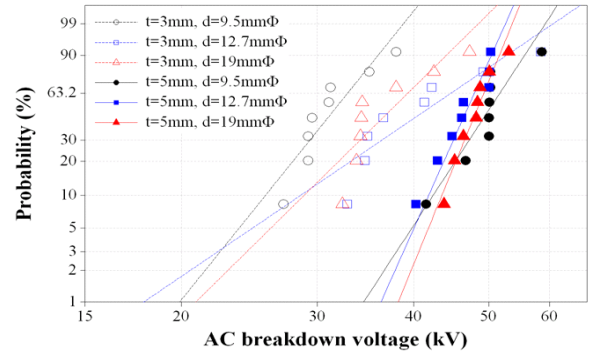


Fig. 8. AC flashover voltage along epoxy surface in mineral oil.

수  $\beta$ 를 통계분석프로그램인 Minitab을 통해 계산하여 나타내었다.

본 실험들을 통해 에폭시 시료의 연면방전 전압에 대한 결과를 조사해 본 결과 예상했던 것 보다 더 많은 변수가 연면방전 특성에 영향을 미치고 있음을 알게 되었고, 특히 가압된 극저온 헬륨가스에서 더욱 많은 요소들이 작용하고 있음을 확인할 수 있었다. 연면방전 특성에 영향을 미친다고 보이는 몇 가지 요소들에 대해 조사하여 분석하면 다음과 같다. 첫째, 에폭시 시료와 전극 제작 시 발생할 수 있는 형상 및 치수 차에 의한 오차를 추적하였으며, 점검결과 기계적 가공오차는  $\pm 0.1\%$  이내로 조사되어 실험결과에 큰 영향을 미쳤을 것이라고는 판단되지 않는다. 두 번째 요인으로는 실험에 사용된 전원장치의 오차를 들 수 있겠는데, 참고문헌 [8]에서와 같은 조건의 실험을 수행해 본 결과 가압 질소가스 중에서 1.54 MPa까지의 절연과피 전압을 비교해 보았을 때  $\pm 2\%$ 의 미미한 차이를 보임으로써 본 실험에 사용된 전원장치의 오차 또한 무시할 만 하였다. 마지막으로 에폭시 시료를 전극 사이에 고정시킬 때 배열 불량에 의한 오차 발생 가능성을 추정하여 그림 9와 같은 시료 배열을 모의하고 수치해석을 수행하였으며, 그림 10에 그 결과를 나타내었다. 그림 9는 전극 사이에 시료가 정렬되는 형상을 보여주며, 기울어진 각도  $\alpha$ 는 이해를 돕기 위해 다소 과장되게 표현되어 있다. 이러한 형상의 전계분포에 대한 유한요소해석을 수행하기 위해 COMSOL Multiphysics v4.3을 사용하였으며, 두께 3 mm인 에폭시 시료의 경우에 대해서만 조사하였다. 시료가 기울어진 경우를 모의한 시뮬레이션 결과 전극 표면에 시료가 접촉되지 않는 두 모서리 부분에서 전계집중이 가장 크게 조사되었으며, 이 지점에서 기울기가 0°에서 3° 사이를 모의한 경우의 시뮬레이션 된 전계값을 그림 10에 나타내었다. 실제로 전극 사이에서 시료가 3° 만큼 기울어지는 경우가 발생할 것으로 보기는 어

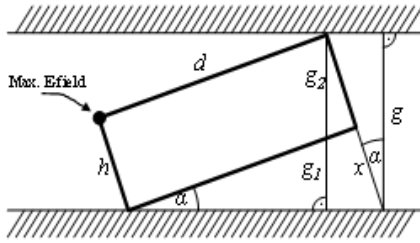


Fig. 9. Geometry of a misaligned epoxy sample between the surfaces of perfectly parallel plane electrodes.

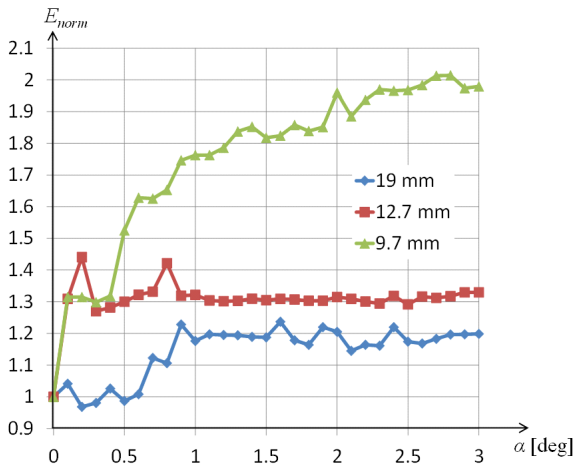


Fig. 10. Normalized electric field at the location of maximum field as a function of misalignment angle  $\alpha$  for all three diameter values of epoxy samples.

려우며, 가장 현실적인 영역은  $0 \sim 0.5^\circ$  사이의 값이 될 것으로 판단된다. 시뮬레이션 결과 실 영역에서의 전계는 작은 기울어짐에 대해서도 큰 영향을 보여주고 있으며, 본 해석을 통해 시료 표면을 통한 연면과파에 있어서는 절연물과 전극의 접촉 각도에 대해 상당한 영향이 있음을 확인할 수 있어 이 부분에서의 각별한 주의가 요구된다.

#### 4. 결 론

고온초전도 케이블 시스템의 냉매로써 헬륨가스의 적용은 운전 중 가스의 누출에 의한 질식 위험으로부터 자유로운 설계가 가능하게하고 액체질소보다 낮은 온도에서 운전할 수 있어 전류밀도를 현저히 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 본 실험을 통해 온도 77 K, 압력 1.54 MPa로 가압된 헬륨가스는 전기 절연적인 측면에서도 충분한 절연내력을 보여주었다. 본 연구는 초전도 케이블용 단말부의 부상을 설계하기 위하여 헬륨가스 중 절연체의 연면방전 특성에 대하여 조사하였으며, 연구 결과로써 기존 초전도케이블 시스템에 사용되는 액체질소에 비해서는 낮은 절연특성을 보여주고 있지만, 적절한 연면방전에 대한 구조물의 형상설계와 헬륨가스의 냉각온도 및 가압조건을 충족 시킨다면 중·저전압 범위의 초전도케이블 시스템에 적용하기에는 충분한 절연특성을 보여주고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 논문은 경일대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행하였음.

#### 참 고 문 헌

- [1] F. Schauer, "A capacitance-graded cryogenic high voltage bushing for vertical or horizontal mounting", *Cryogenics*, Vol. 24, No. 2, pp. 90-96, 1984.
- [2] 조진욱, "22.9kV 50MVA 초전도 케이블 시스템 개발 및 향후전망", *한국초전도·저온공학회논문지*, 9권, 2호, pp. 6-9, 2007.
- [3] 정종만, 백승명, 김상현, "액체질소 중 FRP의 절연과파 및 연면방전 특성 연구", *한국초전도·저온공학회논문지*, 4권, 1호, pp. 119-123, 2002.
- [4] R. J. Meats, "Pressurised-Helium Breakdown at Very Low Temperatures", *Proc. IEE*, Vol. 119, No. 6, pp. 760-766, 1972.
- [5] B. Fallou, J. Garland and B. Bouvier, "Dielectric Breakdown of Gaseous Helium at Very Low Temperatures", *Cryogenics*, Vol. 10, pp. 142-146, 1970.
- [6] H. Rodrigo, F. Salmhofer, D.S. Kwag, S. Pamidi, L. Graber, D.G. Crook, S.L. Ranner, S. Dale and D. Knoll, "Dielectric Studies of a Novel High Pressure Helium Gas Cooled DC Cable", *Cryogenics*, Vol. 52, pp. 310-314, 2012.
- [7] A. H. Howell, "Breakdown Studies in Compressed Gases", *AIEE Trans.*, Vol. 58, pp. 193-204, 1939.
- [8] H. H. Skilling and W. C. Brenner, "The Electrical Strength of Nitrogen and Freon Under Pressure", *AIEE Trans.*, Vol. 61, pp. 191-195, 1942.
- [9] D. B. Mann, "The thermodynamic properties of helium from 3 to 300 K between 0.5 and 100 atmospheres", *National Bureau of Standards technical note*, pp. 154, 1962.

#### 저 자 소 개



#### 곽동순(郭東洵)

1975년 9월 3일생, 2002년 경상대 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2011-2012 Florida State University 연구원, 현재 경일대학교 소방방재학부 조교수.