

헬륨가스 냉각 고온초전도 케이블의 절연특성 평가 시스템 개발 및 성능평가

Development and Test results of the Dielectric Evaluation System for a Helium Gas Cooled HTS Cable

곽동순^{1,*}, Horatio Rodrigo²

Dong-Soon Kwag^{1,*}, Horatio Rodrigo²

Abstract: The novel type of cable under consideration is cooled by gaseous Helium at elevated pressure. Helium is known for having poor electric breakdown strength; therefore the dielectric capabilities of this type of cable must be tested under conditions similar to the envisaged operation. In order to study the dielectric performance we have designed and built a novel high pressure cryostat rated at 2.17 MPa which has been used for testing model cables of lengths of up to 1 m. The cryostat is an open system where the gas is not re-circulated. This allows maintaining a high purity of the gas. The target temperature range is between 40 K and 70 K. This substantially increases the critical current density of the HTS compared to 77 K, which is the typical temperature of cables cooled by liquid nitrogen. The cryostat presented allows for adjusting the temperature and keeping it constant for the time necessary to run a complete dielectric characterization test. We give a detailed description of the cryostat. Measurements of partial discharge inception voltages as well as the temperature distribution along the model cables as a function of time are presented.

Key Words: cryogenics, dielectrics, HTS cable, helium gas, partial discharge.

1. 서 론

기존 송배전시스템에 사용되는 전력케이블의 도체는 구리나 알루미늄을 사용하고 있으며, 일반적으로 0.5 A/mm²에서 10 A/mm²의 최대전류밀도를 가진다. 또한 도체의 저항손실로 인해 발생하는 열을 줄이기 위하여 전력케이블의 용량을 제한할 필요가 있다. 따라서 대전력 응용을 위해서는 도체의 단면적을 키우거나 시스템의 고전압화가 필수적이라 할 수 있겠지만, 이는 균함이나, 항공, 우주선 등과 같이 부피와 무게가 중요한 요소로 작용하는 분야에 적용하기에는 부적합하다고 할 수 있다. 최근 이러한 문제점들에 대한 대안으로

대전류밀도, 저전압화, 경량화가 가능한 고온초전도 케이블이 고려되고 있다. Haugan[1]에 의하면 270 V/20 kA급 구리케이블을 동일 용량의 고온초전도케이블로 교체할 경우 1 m당 대략 80 kg의 질량 감소와 10배의 부피감소가 이뤄질 수 있다고 보고하고 있다.

고온초전도 케이블을 위한 일반적인 냉각방식은 액체질소를 냉매로 사용하고 있지만, 운전온도가 63 K에서 77 K 사이로 제한된다[2]. 고온초전도체는 저온으로 냉각될수록 임계전류가 증가하여 전력밀도를 현저히 높일 수 있다. 본 연구에서 냉매로 사용한 헬륨가스는 63 K 아래에서도 운전이 가능하게 하며, 상변화의 생략, 밀폐된 공간에서 운전될 경우 낮은 질식 위험, 넓은 운전온도 범위 등과 같은 추가적인 이득이 있다. Fitzpatrick[3]과 Kephart[4]은 해군의 군함에 고온초전도 전력케이블을 적용하기 위해 헬륨가스로 냉각된 고온초전도 시스템을 제안하고 있으며, 이러한 시스템을 위한 최적의 운전온도 조건을 55 K으로 보고하고 있다.

한편, 헬륨가스를 사용한 냉각시스템은 액체질소 냉각방식에 비해 낮은 절연강도와 높은 압력에서 운전되어야 하는 기술적인 어려움이 있다. 이는 실험적인 연구를 통해 최대전계 및 절연특성에 대한 면밀한 검토가 필요한 부분이라 하겠다. 극저온으로 냉각된 헬륨가스는 고온초전도체의 냉매로서 작용하며, 적층된 절연지와 복합절연을 이루어 케이블 절연시스템에서 중요한 절연구성을 형성한다. 따라서 본 연구는 헬륨가스를 사용한 고온초전도 전력케이블의 절연특성을 평가하기 위한 시스템을 개발하고 그 성능을 평가하는 것이 주요 목적이라 할 수 있다. 현재 진행 중인 프로젝트는 대용량·경량화·소형화가 가능한 직류전압 하에서 운전되는 고온초전도 케이블을 개발하고 있으며, 1 kV/3 kA 용량의 30 m, 단극 DC 케이블 개발을 목표로 하고 있다. 또한 40~70 K 사이의 온도에서 최대 압력 2.17 MPa로 가압된 헬륨가스 환경 하에서 운전하게 된다.

극저온 절연연구를 위한 필수적인 장치는 실험환경에 최적화된 극저온용기(cryostat)라고 할 수 있다. 최종 응용에 따라 실험환경이 결정되며, 그에 따라 극저온용기의 최종 형태에 영향을 주기 때문이다. 헬륨을 이용한 기존의 극저온 절연에 대한 선행 연구[5]는 극저온용기 속에 액체헬륨조를 포함하고 있으며, 그 속에 전극을 침적시켜 실험하는 구조가 대부분이었다. 본 연구에서는 2.17 MPa까지 가압할 수 있는 극저온용기를 설계 및 제작하였으며, 극저온 실험을 위한 매질은 고순도 헬륨가스를 사용하고 다양한 압력 하에서 40~70 K 사이의 온도에 도달 및 유지할 수 있다.

본 연구에서는 헬륨가스로 냉각되는 고온초전도 케

¹정 회 원 : 경일대학교 소방방재학부 조교수

²비 회 원 : Florida State University, Scientist

*교신저자 : dskwag@kiu.ac.kr

원고접수 : 2012년 02월 10일

심사완료 : 2012년 02월 28일

게재확정 : 2012년 02월 28일

이들의 절연특성 평가를 위하여 사용되는 액체헬륨의 소모량, 피시험물(모델케이블)에서의 온도 상승, 고전압 인가를 위한 부싱의 부분방전 개시전압 등과 같은 요소들에 근거하여 새로 고안된 극저온용기의 성능을 평가하였다.

2. 실험장치의 구성

2.1. 극저온용기

그림 1은 본 연구에서 고온초전도 케이블의 절연특성 평가를 위해 사용된 고압 극저온용기의 구성과 시험용 모델케이블의 구성, 온도 측정을 위해 부착된 센서들의 위치를 보여준다. 내조인 압력용기(pressure vessel)는 2.17 MPa의 압력에 견딜 수 있으며, 내부 직경은 265 mm, 높이는 1.5 m이다. 압력용기는 외부로부터의 열 침입을 막기 위하여 액체질소 재킷(LN₂ jacket)을 포함하는 진공 재킷(vacuum jacket)에 의해 둘러싸여 있다. 진공 재킷은 약 7.5×10^{-7} Torr로 진공 배기하여 유지되었다. 극저온용기의 뚜껑(lid of cryostat)은 반구형을 하고 있으며 진공층을 두어 압력용기를 둘러싸고 있는 것과 같은 진공도를 유지하고 있다. 뚜껑은 7개의 포트를 가지고 있으며, 6개의 70 mm 플랜지(2.75인치 ConFlat flange)와 1개의 152 mm 플랜지(6인치 ConFlat flange)로 구성되었다. 뚜껑에서 가장 큰 중앙에 위치한 포트는 고전압 부싱이 결합되었다. 다른 포트들은 중앙의 포트 주위에 균등하게 분포하고 있으며, 액체헬륨 주입 및 헬륨가스 배기, 가압 가스 주입, 펌핑, 배기, 계측 등을 위하여 사용되었다. 압력용기내 액체헬륨 및 열교환기를 통한 헬륨가스 유입부는 압력용기의 바닥 근처에까지 내려지도록 연장되어 있으며, 직경 10 mm의 스테인리스 튜브가 사용되었다. 뚜껑과 압력용기는 대형 플랜지를 통해 결합되며, 테프론 개스킷(teflon gasket)을 사용하여 기밀을 유지하였다. 그림 2는 극저온용기의 사진을 보여준다.

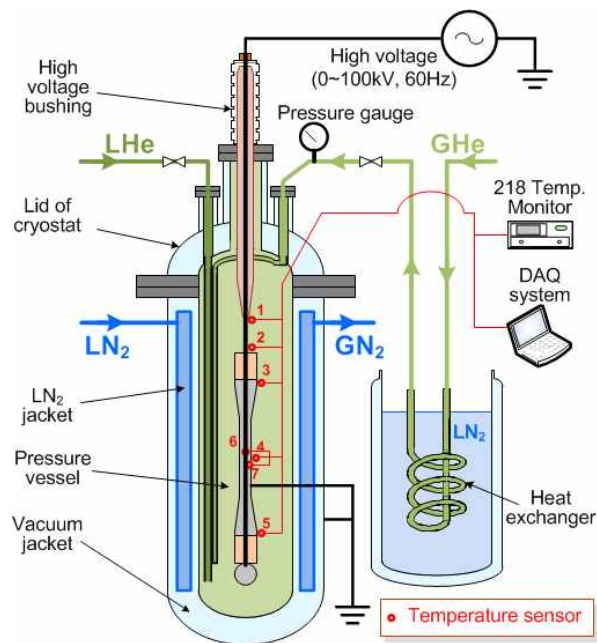


Fig. 1. Schematic diagram of the high pressure cryostat and temperature sensor locations.



Fig. 2. Photograph of cryostat. The flexible steel hose connects the pressure vessel with the vacuum pump(not shown).

2.2. 고전압 부싱

고온초전도 전력기기의 개발에 있어서 대두되는 가장 큰 문제는 초전도 기기의 극저온 영역에서 고전압을 인가하는 것이다. 극저온용 부싱은 상온에서부터 저온 환경에까지 걸쳐있는 도체의 전기적인 절연을 제공하므로, 이러한 상황은 고전압을 인가하는 동시에 상온에서부터 극저온 장치까지 대전류를 흘리는데 많은 어려움이 있다. 또한 극저온용 부싱은 상온과 극저온 영역에 걸쳐 운전되므로 열적인 수축에 대해서도 견뎌야만 한다[6,7]. 따라서 극저온 부싱은 절연 전면의 전위경도를 균일히 해야 할 뿐 아니라 대기에 대해 완전 밀봉되고 최악의 운전 상태에서도 열적으로 안정되어야 할 것이다.

본 연구의 초기에 그림 3 (a)에서와 같이 DN40 플랜지를 적용한 액체질소용 세라믹 피드스루(feed-through)를 사용하였다. 실험결과 60 K의 2.17

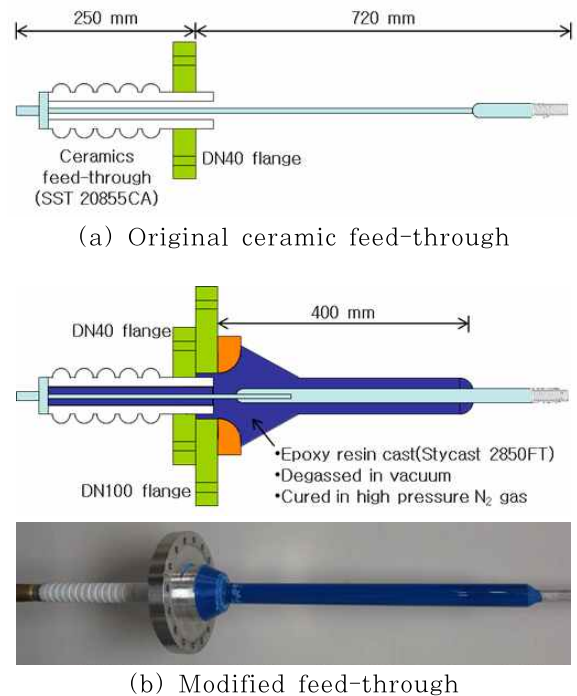
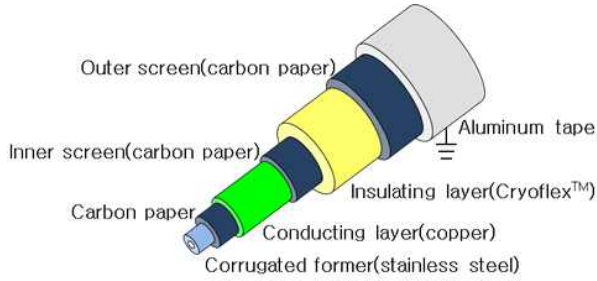
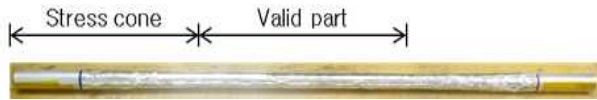


Fig. 3. Original ceramic feed-through and modified feed-through with all cavities filled with epoxy resin and extending the cast to increase creepage distance.



(a) Layout



(b) Photograph

Fig. 4. Layout of the model cable.

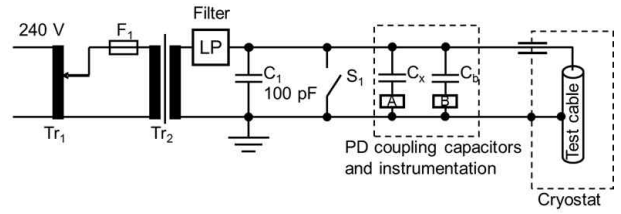
MPa로 가압된 헬륨가스 내에서 부분방전 개시전압은 5.6 kV_{peak}로써 매우 낮은 절연성능을 보여주었다. 고전압이 인가되는 도체부가 헬륨가스에 노출되어 있는 구조를 하고 있기 때문에 낮은 전압에서 부분방전이 발생한 것으로 판단되었으며, 모델케이블의 절연시험을 위해서는 보다 높은 절연성능을 갖는 부싱이 요구되었다. 따라서 그림 3 (b)에서 보여주는 것과 같이 도체부와 세라믹 사이의 빈 공간을 에폭시 수지(Stycast® 2850FT)로 채워주었으며, 충분한 연면방전 거리를 확보하기 위하여 플랜지에서 400 mm 지점까지 연장하였다. 도체와 플랜지 사이의 전계집중 완화를 위하여 코로나링을 삽입하였으며, 유한요소해석(FEA)을 통해 각 파트의 최적 형상을 결정하였다. 수정된 부싱은 60 K, 2.17 MPa의 헬륨가스 내에서 16 kV_{peak}의 부분방전 개시전압을 보여줌으로써 모델케이블의 절연시험을 위해 충분히 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

2.3. 모델케이블

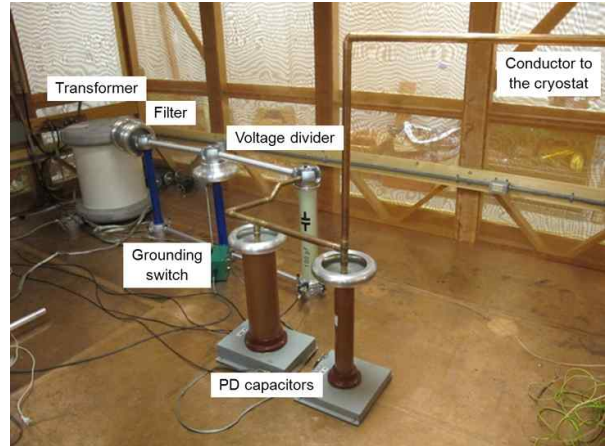
실험에 사용된 1 kV 정격의 모델케이블은 스테인리스 포머(former)에 반도체성 카본지 2매를 감은 후 2층의 도체 선재를 감고, 그 위에 다시 카본지를 2매 감아 내도체부를 구성하였다. 절연층은 일정폭으로 절단된 절연지를 butt-gap 방식으로 30%씩 중첩하여 6매 절연하였다. 절연층 위에 반도체성 카본지 2매를 감고, 알루미늄 테이프를 감아 외도체부(shield layer)를 구성하였다. 모델케이블 제작에 사용된 도체는 고온초전도 선재와 같은 치수로 제작된 구리 선재를 사용하였으며, 케이블의 절연특성 평가를 위한 시험이기 때문에 경제성과 취급 용이성이 고려되었다. 절연지는 100 μm 두께의 Cryoflex를 사용하였다. 케이블의 단부는 전계집중을 완화시키기 위하여 스트레스콘을 만들었다. 절연시험을 위한 모델케이블은 극저온용기의 고전압 부싱에 연결되며, 부싱에 연결된 모델케이블의 반대편은 전계완화를 위하여 50 mm 직경의 금속구를 연결하였다. 그림 4에 실험에 사용된 모델케이블의 구성을 보여준다.

2.4. 부분방전 측정시스템

부분방전은 전압 스트레스로 인한 절연물의 열화를 진전시킬 수 있기 때문에 케이블 종류에 관계없이 중



(a) Circuit diagram



(b) Photograph

Fig. 5. System configuration of the partial discharge measurement system.

요한 요소라 할 수 있다. 모든 전력기기는 계통 최고 전압에서 부분방전이 발생하지 않도록 설계되어야 하며, 비록 개발 중인 케이블이 직류전압 하에서 운전된다 할지라도 부분방전 특성은 케이블 절연설계시 가장 중요하게 고려되어야 할 부분이다.

본 연구에서 사용된 부분방전 측정시스템은 100 kV/ 5 kVA 용량의 변압기, 인라인필터(inline filter), 전압분배기(voltage divider), 100 kV/ 100 pF 용량의 커패시터(capacitor), 제어 콘솔(control console) 등으로 구성되며, 스위스의 Haefely사에서 제작되었다. 변압기로부터 피시험물에 인가되는 전압의 크기는 커플링 커패시터(coupling capacitor)에 의해 측정된다. 극저온용기 및 부분방전 측정시스템의 모든 구성은 Faraday cage 안에 설치되어 있으며, 그림 5에 부분방전 측정시스템의 회로도 및 사진을 보여준다.

2.5. 온도 측정시스템

적절한 온도범위 내에서 모델케이블의 극저온 절연 특성 시험이 이루어 졌는지 평가하기 위하여 실제 실험과 동일한 환경을 모의하여 극저온용기내 온도를 측정하였으며, 온도측정시스템의 구성 및 센서의 부착 위치는 그림 1에서 보여주는 것과 같다. 사용된 센서의 종류는 Lakeshore Cryogenics에서 만든 E-type 열전대(thermocouple)와 100Ω RTDs가 사용되었다. 열전대를 주 온도측정을 위한 센서로 사용하였으며, 열전대는 절연과피시 전자기파에 강하고 상대적으로 가격이 저렴하다는 이점을 가지고 있다. 열전대에서의 온도측정을 위해 National Instruments 카드(NI SCXI-1112)가 사용되었고, RTDs에 의한 온도측정은 Lakeshore사의 온도모니터(Model 218)를 이용하였다.

실험에 사용된 RTD는 14 K까지 보정되었으며, 열전대에 비해 더 높은 정확도를 가지고 있기 때문에 열전대의 온도측정 값을 보정하기 위해 사용되었다. 모델케이블의 온도측정을 위해 케이블 축선을 따라 쉘드층의 표면 상(3)·중(4)·하단(5)에 각각 센서를 부착하였다. 모델케이블 중간에는 내도체층 표면(6)과 절연층 내부(7)에도 각각 하나씩의 센서를 부착하여 케이블 내부 온도변화를 관찰하였다.

3. 실험방법 및 결과

3.1. 절연특성

헬륨가스 냉각 고온초전도 케이블의 절연특성 평가 연구는 그림 6의 시험절차에 의해 수행되어졌다. 시험용 모델케이블을 설치한 후 압력용기내의 수분제거와 순수 헬륨가스 환경을 만들어주기 위하여 진공배기 및 헬륨가스와 질소가스를 이용한 flushing 과정을 2회 반복하였다. 압력용기를 다시 7×10^{-7} Torr까지 진공배기한 후 모델케이블 하단부 온도가 14 K에 도달할 때까지 액체헬륨 약 53 L를 주입하였다. 이 후 열교환기를 통해 연결된 고순도 헬륨가스(순도 99.9999%)를 압력용기내 압력이 2.17 MPa에 도달할 때까지 주입하였으며, 이때 온도는 60 K까지 상승하였다. 부분방전 측정 시스템의 변압기에서 고전압 부싱을 통해 모델케이블에 전압이 인가되었으며, 인가전압은 0.5 kV씩 단계적으로 상승시켰다. 각 전압레벨마다 방전 전하량을 측정하였으며, 방전 전하량이 약 50 pC에 도달할 때까지 전압을 상승시켰다. 그 이후 인가전압을 0.5 kV씩 단계적으로 줄여가면서 부분방전 소멸전압을 측정하였다. 부분방전 측정시 내부 압력은 2.17 MPa에서 시작하여 0.45 MPa에 이르기까지 헬륨가스를 0.344 MPa씩 단계적으로 배출하였으며, 각 압력별 부분방전 전하량을 측정하였다.

이후 다시 액체헬륨을 주입하여 2차 냉각시켰으며, 헬륨가스를 주입하여 2.17 MPa까지 압력을 상승시켰다. 이때 압력용기내 온도는 약 50 K에서 안정되게 유지되었으며, 전과 동일한 과정으로 부분방전 개시 및 소멸전압을 측정하였다. 모든 압력 영역에서의 부분방전 측정을 완료하는데 까지는 약 40분의 시간이 소요되었다.

그림 7은 50 K의 헬륨가스에서 측정한 압력별 모델케이블의 부분방전 개시전하량을 보여주고 있다. 시스템의 개회로(open circuit)에서 백노이즈(back noise)는 1~2 pC이다. 모델케이블에 전압을 상승시키에 따라 부분방전 전하량은 서서히 증가하고 있으며, 10 pC의 방전 전하량을 기준으로 하였을 때 2.17 MPa에서 모델케이블의 부분방전 개시전압은 약 7.4 kV로 조사되었다. 부분방전 개시전압은 압력의 감소에 따라 점차 줄어들고 있다.

3.2. 열적특성

부분방전 시험을 수행하는 동안 약 40분의 시간이 소요되었으며, 이때 모델케이블의 길이방향 및 단면방

향에서의 온도가 실제 케이블의 운전온도(40~70K)와 비교하여 적절한 수준에서 유지되었는지를 검토할 필요가 있다. 이를 위해 그림 1에서 보인 것과 같이 모델케이블에 7개의 온도센서를 부착하고 전과 동일한 냉각과정을 거쳐 압력용기에 부착된 모델케이블의 온도변화를 관찰하였다.

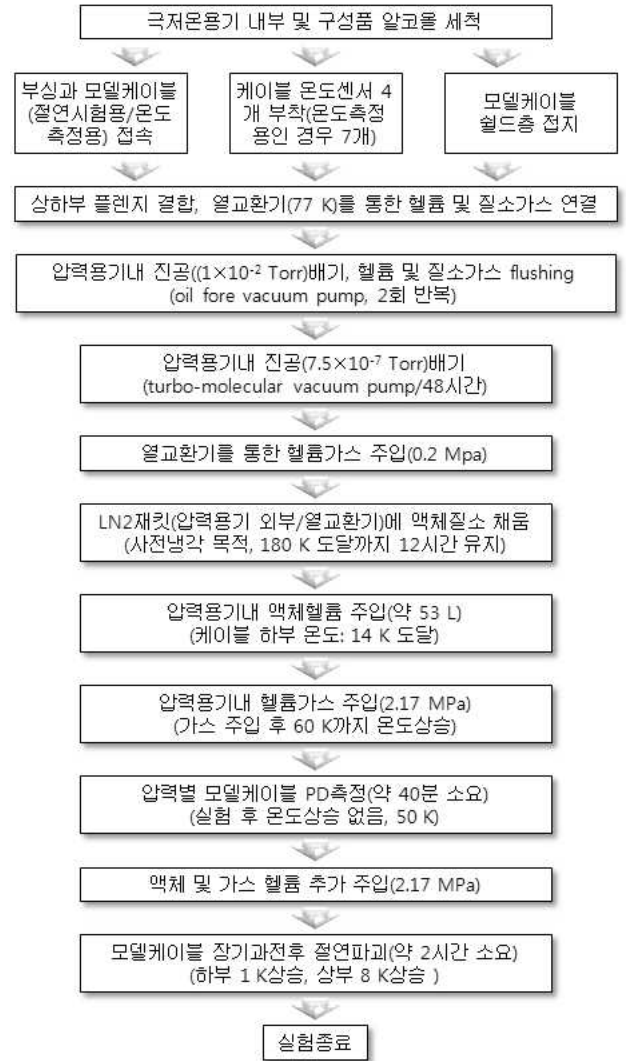


Fig. 6. Procedures for evaluating the dielectric and thermal properties of a helium gas cooled HTS cable.

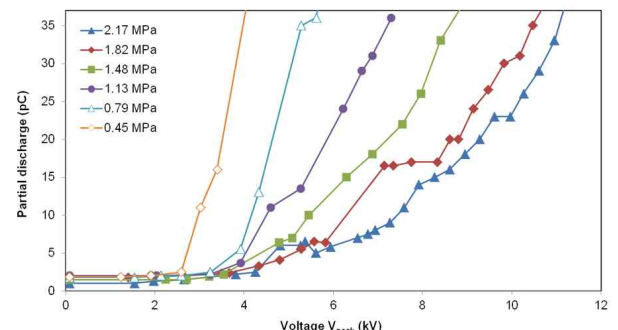


Fig. 7. Partial discharge measurement of the model cable.

참 고 문 헌

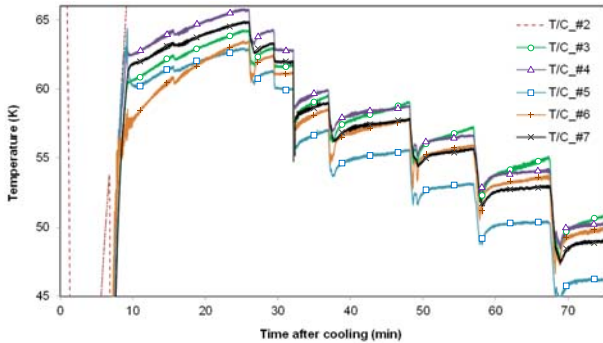


Fig. 8. Temperature data over time along dummy cable diameter and length. Numbers correspond to positions given in Fig. 1.

그림 8은 액체헬륨 주입 후 헬륨가스로 가압된 압력 용기의 시간에 따른 온도변화를 보여주고 있다. 액체 헬륨을 14 K까지 주입한 후 액체질소 열교환기를 통해 냉각된 헬륨가스를 주입하여 2.17 MPa의 압력으로 가압하였다. 이때 온도는 센서의 위치별 약 60~65 K에 도달하였다. 이후 부분방전 시험환경과 동일하게 0.344 MPa씩 단계적으로 가스를 배출하면서 압력을 줄여나감에 따라 온도 역시 단계적으로 내려가고 있음을 확인할 수 있다. 0.45 MPa까지 압력을 줄였을 경우 약 45~50 K 사이의 온도를 보여주고 있다. 이는 본 연구를 위해 고안된 극저온용기가 케이블 절연시험을 위해 요구되는 온도범위를 만족하고 있음을 확인할 수 있다. 한편 액체헬륨을 2차 투입하여 냉각하였을 경우에는 2.17 MPa에서도 약 50 K으로 더욱 안정된 온도를 유지할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 헬륨가스로 냉각되는 고온초전도 케이블 시스템의 절연특성을 평가하기 위하여 새로운 개념의 극저온용기가 고안되어 제작되었으며, 실제 케이블의 운전환경을 모의하여 제작된 모델케이블의 절연 특성 및 열적특성 시험에 대해 기술하고 있다.

절연특성 평가를 위해 보완하여 제작된 극저온용 고전압 부싱은 모의된 케이블 운전조건 하에서 16 kV의 부분방전 개시전압을 보임으로써 모델케이블의 절연특성 시험을 위해 충분히 만족하는 결과를 얻었다. 새로이 고안된 극저온용기를 이용하여 모델케이블의 압력별 부분방전 개시전압을 측정할 수 있었으며, 50 K, 2.17 MPa의 실제 운전조건에서 7.4 kV의 값을 보여주었다. 또한 극저온용기의 열적특성 시험을 통해 실제 케이블 운전온도 범위내의 적절한 수준에서 유지되고 있음을 확인함으로써, 제작된 극저온용기가 헬륨가스 냉각 고온초전도 케이블 시스템의 절연특성 평가에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 경일대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행하였음.

- [1] T. J. Haugan et al., "Design of Compact, Lightweight Power Transmission Devices for Specialized High Power Applications", SAE Int. J. Aerosp. 1(1), pp. 1088-1094, 2008.
- [2] 조진욱, "22.9kV 50MVA 초전도 케이블 시스템 개발 및 향후전망", 한국초전도·저온공학회, 9권, 2호, pp. 6-9, 2007.
- [3] B. K. Fitzpatrick et al., "Characterization of Gaseous Helium Flow Cryogen in a Flexible Cryostat for Naval Applications of High Temperature Superconductors", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 17, no. 2, pp. 1752-1755, 2007.
- [4] J. T. Kephart et al., "High Temperature Superconducting Degaussing From Feasibility Study to Fleet Adoption", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 21, no. 3(2), pp. 2229-2232, 2011.
- [5] R. J. Meats, "Pressurized-helium breakdown at very low temperature", IEEE Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, IEEE 1972, vol. 119, no. 6, 760-765, 1972.
- [6] F. Schauer, "A capacitance-graded cryogenic high voltage bushing for vertical or horizontal mounting", Cryogenics, vol. 24, Issue 2, pp. 90-96, 1984.
- [7] 곽동순, 천현권, 최재형, 김해중, 조진욱, 김상현, "154 kV급 고온초전도 케이블 및 단말의 전기절연 설계", 한국초전도·저온공학회, 9권, 1호, pp. 61-66, 2007.

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), 현재 경일대학교 소방방재학부 조교수.



Horatio Rodrigo

Dr. Rodrigo graduated with a Ph.D. in high voltage engineering and physics of gas discharges in 1982 from the University of Liverpool. He joined the Center for Advanced Power Systems, Florida State University as a Scientist in 2005.