

고온초전도 기기용 냉매의 절연파괴 특성

김상현*, 정종만*, 이진호*, 김현희**, 김천오***, 백승명**
 *경상대학교(공학연구원), **진주전문대, ***진주직업전문학교

Electrical Breakdown Properties of Coolant for High Temperature Superconducting Apparatus

Kim Sang-Hyun*, Baek Seung-Myeong**, Jung Jong-Man*, Lee Jin-Ho*, Kim Hyun-Hee**, Kim Cheon-Oh***
 *Gyeongsang Univ.(Engineering research center), **Chinju College, ***Jinju Vocational Training Institute

Abstract - 고온초전도 기기의 냉매로 사용되는 액체질소(LN₂)의 절연파괴 특성을 평가하고 기존 변압기에 사용되는 변압기유의 절연파괴 특성에 대하여 비교하였다. 켄치에 따른 기포발생을 모의하여 순수 액체와 기포가 포함된 액체의 절연내력을 평가하였으며, 기포의 거동에 따른 절연내력을 고찰하였다. 또한, 고온초전도 변압기, 케이블 및 한류기 등은 켄치 발생위치가 명확하지 않으므로 기포의 발생위치를 세 부분으로 모의하여 절연파괴 특성을 고찰하였다.

기포의 크기와 기체의 양을 정밀하게 조절할 수 있는 외부에서 인위적으로 기포를 주입하는 방법을 선택하였다.

1. 서 론

에너지 수요의 증대로 대용량화, 고집적화 되고 안정하고 쾌적한 전력 수요욕구가 증대되면서 임계온도 및 임계전류밀도가 높아 기기의 소형화, 고효율화, 대용량화가 가능한 고온초전도체를 전기에너지 시스템에 응용하려는 연구가 활발히 전개되었다. 최근에는 고온초전도체 본연의 기계적 취약성을 보강한 선재가 많이 개발되면서 케이블, 변압기, 한류기 등 그 응용범위가 더욱 확대되고 있다. [1], [2]

LN₂는 경제성이 높고 절연내력이 높으며 유지, 운전이 편한 장점이 있으므로 고온초전도 기기용 냉매로 많이 사용되고 극저온 분야 연구자들에 의해 기기의 안정성 확보를 위해 절연파괴 성질에 대한 연구가 이루어졌다. [3] 하지만 초전도체에는 초전도 상태에서 상전도 상태로 전이되는 켄치[4]라는 특수한 현상이 존재하고 켄치 발생 시 초전도기기에 기포[5]와 함께 이상 고전계가 야기되어 절연 내력이 낮은 기포는 냉매의 절연성능을 악화시킨다. 이러한 켄치에 의한 기포발생과 이상 고전압에 의한 전기적 스트레스는 초전도기기의 수명과 안정성에 치명적인 영향을 미치므로 극저온 환경에서 전기 절연기술에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 Pancake coil형 고온초전도 변압기, 초전도 한류기, 초전도 변압기 등 고온초전도 기기의 수명과 안정성확보를 위하여 냉매로 사용되는 LN₂의 절연파괴특성을 고찰하고 켄치 발생을 모의하여 기포의 크기와 발생부분에 대하여 기포를 포함한 액체의 절연파괴특성 등 LN₂의 전기적 특성에 대하여 고찰하여 현재 실제통에 사용되는 변압기의 변압기유의 기포 거동에 따른 절연파괴특성과 비교하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험 장치를 그림 xx1에 나타낸다. 유리로 제작된 극저온용 cryostat에 전극을 배치하였으며 기포의 거동과 절연파괴 현상을 관측하기 위해 폭 25(mm)의 관측창을 두었다. 전극은 원통형을 침전극으로 제작한 원형침전극과 평판전극의 불평등전계로하여 특성을 고찰하였다. 고온초전도 테이프를 이용하여 제작된 Pancake coil의 켄치시 발생하는 기포에 의해 절연체로도 쓰이는 냉매의 절연내력의 영향을 고려하기 위해

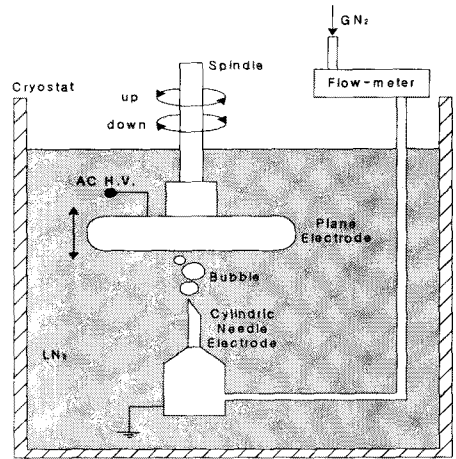


그림 1 기포의 영향을 측정하기 위한 전극계.
 Fig. 1 The electrode system for measuring of bubble effect.

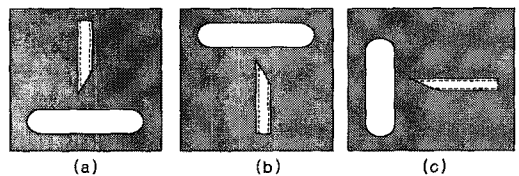


그림 2 전극배치 : (a) 상부원통형침-하부평판, (b) 상부평판-하부원통형침, (c) 좌측평판-우측원통형침

Fig. 2 Electrode arrangement. : (a) Upper cylindric needle-lower plane(UN-LP), (b) Upper plane-lower cylindric needle(UP-LN), (c) Left plane-right cylindric needle(LP-RN)

초전도기기에서 켄치가 발생하는 위치는 불특정한 곳이며 Double pancake coil형 변압기의 경우 코일의 상부, 하부 또는 모서리 부분이 될 수 있다. 또한 전류리드부분이나 코일의 접합부에서 기포가 발생되어 전자력에 의해 기포가 코일에 포집 될 수 있다[6]. 따라서 기포가 발생하는 위치를 크게 세 부분으로 나누어 전극을

배치하였다. 즉, 하부에서 켄치가 발생한 경우를 모의하여 상부에 평판전극을 하부에 원통형침전극을 배치하였고 상부에서 켄치가 발생한 경우를 모의하여 상부에 원통형침전극을 하부에 평판 전극을 배치하였다. 그리고 모서리 부분에서 켄치가 발생한 경우를 모의하여 원통형 침전극과 평판전극을 수직으로 배치하였다. 그림 2에 전극배치를 나타낸다. 전극은 기포가 발생하는 부분을 모의하여 원통형침전극과 다른 한쪽은 평판전극으로 불꽃 등전계를 모의한 것이다. 평판전극은 직경 50[mm]의 스테인레스(SUS304)로 표면 거칠기 0.098[μ m]로 경면 처리하였다. 원통형침전극은 외부에서 기체를 주입하는 동시에 기포의 크기를 조절하기 위하여 내경 0.1~0.4[mm]의 SUS전극을 사용하였다. 기포 발생을 위해 주입한 기체는 가스질소(GN₂)이고 기포의 속도조절 및 측정은 기체용기에 부착된 압력조절기와 flow-meter를 이용하였다. 기포의 크기에 따른 영향을 고려하기 위하여 원통형침전극의 내경을 변화시켜 크기가 다른 기포를 발생시켰다. 전압은 교류전원을 사용하여 1[kV/sec]의 일정한 속도로 인가하여 절연파괴 시켰으며 동일 조건에서 10번 반복하였다.

2.2 실험결과 및 고찰

그림 3은 기포 크기에 따른 절연파괴전압을 나타낸 것이다. 기포 크기는 원통형침전극의 내경을 변화시켜 조절하였으며, 기체질소의 유속은 100[ml/min], 전극 간격은 1[mm]로 일정하게 유지하였다. 그림 3에서 기포의 크기가 클수록 절연파괴 전압은 완만하게 감소하는 경향을 알 수 있다. 전극 사이의 액체에 기포가 주입됨에 따라 액체층과 기체층의 복합체가 되고 주입되는 기체가 증가함에 따라 절연내력이 약한 기체층이 증가되어 절연파괴 전압이 감소됨을 알 수 있다.

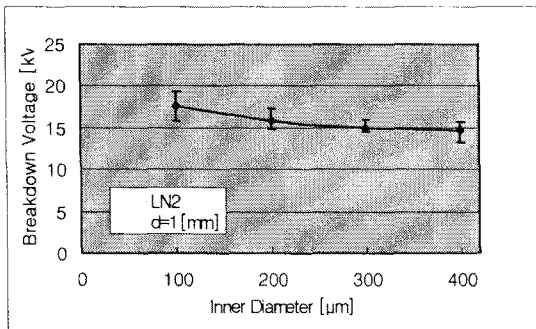


그림 3 내경의 변화에 따른 파괴전압.

Fig. 3 Breakdown voltage vs. inside diameter.

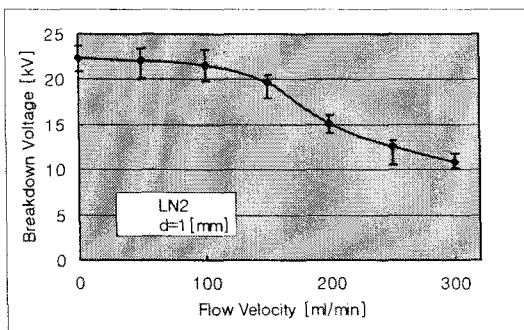


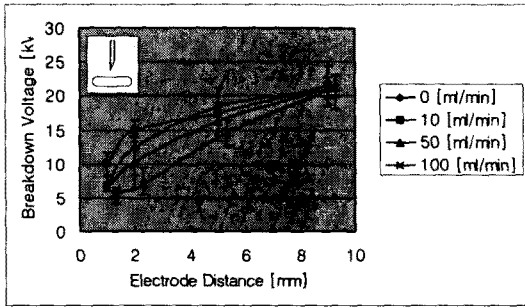
그림 4 유속에 따른 파괴전압.

Fig. 4 Breakdown voltage vs. flow velocity.

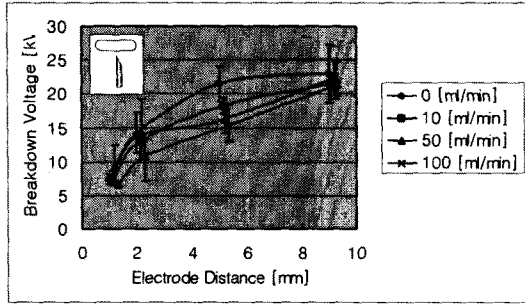
그림 4는 LN₂의 절연파괴전압에 미치는 기포 흐름속도의 의존성을 나타낸 것이다. 원통형침전극의 내경은 그림 3에 절연파괴전압이 고찰되기 시작하는 300[μ m]을 선택하였으며 전극 간격이 1[mm]로 고정하였다. 기포 흐름속도에 따른 절연파괴전압은 완만히 감소하는 I 영역과 급격히 감소하면서 포화되는 II영역으로 나타났다. I영역의 경우 LN₂ 내의 기포는 다소존재하나 기포의 유출이 불연속적임에 따라 기포에 의한 절연파괴의 영향은 적은데 반해 II영역의 경우, 연속적으로 기포가 유출됨에 따라 양전극간에 기체의 채널이 형성되고 그 내부에서 방전경로가 형성됨에 따라 그 절연파괴 특성이 액체의 절연파괴 보다 기체의 절연파괴 특성에 가까워지게 된다. 따라서 절연파괴 전압은 기포에 의한 기체층이 양전극 사이에 채널의 형성 여부에 따라서 결정된다고 사료된다. 또한 II영역에서 기포의 거동은 전압이 높아짐에 따라 직경이 작게 쪼개지고 이동속도가 증가되면서 평판전극으로 당겨져 갔다. 이는 두 전극사이의 전자력에 의한 것으로 사료된다.

전극배치에 따라 발생하는 기포에 의한 LN₂의 절연파괴전압을 고찰하기에 앞서 기존 변압기의 절연용과 냉각용으로 사용되는 변압기유의 전극배치에 따라 발생하는 기포에 의한 절연파괴특성을 고찰하였다. 그림 5에 변압기유의 전극배치와 기포 흐름속도에 따른 절연파괴전압을 나타낸다. 상부 원통형침전극-하부 평판전극(UN-LP) 배치인 경우 두 전극의 거리가 2[mm]이하 일 때 기포 흐름속도에 의한 영향이 커 절연파괴전압이 낮게 나타나지만 전극의 거리가 점점 멀어질수록 절연파괴전압은 기포 흐름속도의 영향을 적게 받아 9[mm]일 때 절연파괴전압이 거의 비슷한 값을 나타낸다. 따라서, 두 전극의 거리가 가까울수록 기포 흐름속도의 영향이 많은 것으로 사료된다. 상부 평판전극-하부 원통형침전극(UP-LN) 배치인 경우 두 전극의 거리가 2[mm]이하 일 때 절연파괴전압은 기포 흐름속도에 의한 영향을 적게 받고 5[mm]인 경우 기포의 흐름속도가 빠를수록 절연파괴전압이 낮게 나타나지만 9[mm]일 때 절연파괴전압은 다시 기포 흐름속도에 영향을 적게 받아 절연파괴전압은 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서, 두 전극의 거리가 멀어질수록 기포 흐름의 영향이 커지다가 약 10[mm] 정도 거리에서는 UN-LP 배치와 마찬가지로 거의 영향이 없는 것으로 사료된다. 좌측 평판전극-우측 원통형침전극(LP-RN) 배치한 경우 기포의 흐름속도가 50[ml/min]이내는 절연파괴 전압이 UN-LP, UP-LN의 배치와 유사한 값을 나타내지만 100[ml/min]의 경우 절연파괴전압이 매우 낮은 값을 나타내었다. 즉, 전극거리가 5[mm] 이내인 경우 50[ml/min]일 때의 전

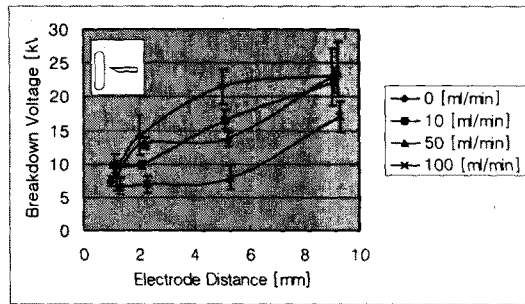
압은 $\frac{V_{50}}{V_0} = 0.637$ 로 V_{50} 는 V_0 의 약 64[%]의 절연파괴 전압을 나타내지만 100[ml/min]일 때 전압은 $\frac{V_{100}}{V_0} = 0.36$ 으로 V_{100} 는 V_0 의 약 36[%]의 매우 낮은 절연파괴전압을 나타내었다. 9[mm]일 때는 V_{50} 은 V_0 의 약 100[%]의 절연파괴전압을 나타내지만 V_{100} 은 $\frac{V_{100}}{V_0} = 0.74$ 로 V_0 의 약 74[%]의 낮은 절연파괴 전압을 나타낸다. 따라서 LP-RN 배치의 경우 기포 흐름속도의 영향이 제일 큰 것으로 고찰되었다. 여기서, V_0 , V_{50} , V_{100} 은 0, 50, 100[ml/min]의 기포 흐름속도일 때의 평균 절연파괴전압을 나타낸다. 변압기유 중에서 UN-LP, UP-LN, LP-RN의 세 가지 전극배치를 고찰한 결과 UN-LP와 UP-LN의 전극배치인 경우 비슷한 절연파괴특성을 나타냈으며, LP-RN의 전극배치는 다른 절연파괴특성이 고찰되었으므로 LN₂의 절연파괴특성을 고찰하기 위해 UP-LN와 LP-RN의 전극배치를 비교 분석하였다.



(a)



(b)



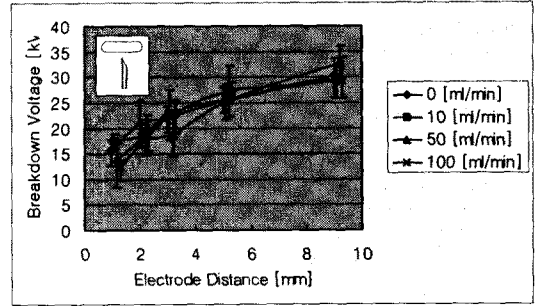
(c)

그림 5 변압기유의 전극배치와 기포 흐름속도에 따른 파괴전압. : (a) 상부원통형침-하부평판, (b) 상부평판-하부원통형침, (c) 좌측평판-우측원통형침

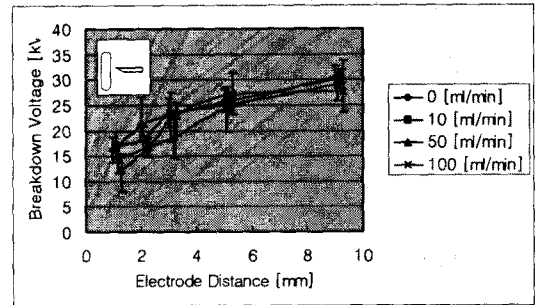
Fig. 5 Breakdown voltage of transformer oil as function of Electrode arrangement and flow velocity. : (a) UN-LP, (b) UP-LN, (c) LP-RN

그림 6에 LN₂의 전극배치와 기포 흐름속도에 따른 절연 파괴 특성을 나타낸다. 그림 5에서 고찰된 변압기유의 절연 파괴 특성과는 달리 LN₂에서는 UP-LN과 LP-RN의 전극배치 모두 비슷한 절연 파괴 특성을 나타내지만 상하부 두 전극 사이의 거리가 5[mm]이하의 짧은 거리 일 때 기포에 의한 절연 파괴전압은 기포가 발생하지 않은 순수한 LN₂보다 낮은 값을 나타낸다. 또한 그림 6의 (a)와 (b)에서 전극간 거리가 9[mm]이고, 기포 흐름속도가 100[ml/min]일 때 파괴전압이 다시 낮아지는 것으로 관찰됨으로 이후에 전극간 거리를 9[mm]이상보다 더

크게 하여 절연 파괴특성의 고찰이 요구되며 실용상이나 사고발생의 경우를 고려하여 고온초전도 전기기기의 절연 설계할 때 매우 신중히 고려해야 할 부분으로 사료된다.



(a)



(b)

그림 6 LN₂의 전극배치와 기포 흐름속도에 따른 파괴 전압 : (a) 상부평판-하부원통형침, (b) 좌측 평판-우측원통형침.

Fig. 6 Breakdown voltage of LN₂ as function of Electrode arrangement and flow velocity. : (a) UP-LN, (b) LP-RN.

3. 결 론

본 고온초전도 기기용 냉매의 절연 파괴특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

LN₂의 절연 파괴전압은 기포가 존재하는 경우 기포가 없는 경우보다 낮으며 기체층에 의한 방전경로의 형성에 의해 절연 파괴전압이 매우 감소되었다. LN₂의 절연 파괴 전압은 기포의 크기에 비례하여 감소하며, 기포의 흐름 속도에 따라 초기에는 완만한 감소를 나타내지만 100[ml/min] 이후에는 급격히 감소하다가 포화한다. LN₂의 경우 전극의 배치에는 무관하나 양전극간 거리가 5[mm]이하로 가까울수록 기포의 영향이 크게 나타났다. 그리고 약 10[mm]이후에 다시 낮아지기 시작하는 것으로 관찰됨으로 이에 대한 연구가 더욱 필요하다. 원통형 침전극에서 분사된 기포는 전극간 전압이 높아질수록 평판전극 쪽으로 이동함과 동시에 초기 크기보다 작은 기포로 분리되고 흐름속도는 증가한다. 고온초전도 기기를 실용상에 응용할 경우 초전도체 내부의 쉘이나 열 침입, 이상전압 등에 의한 기포 발생에 따라 기기의 절연내력이 급격히 감소하므로 이에 대한 깊은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] H. Zueger, "630kVA high temperature superconducting transformer", Cryogenics, 38, 1169-1172, 1998

[2] M. J. Gouge, J. A. Demko, P. W. Pisher, C. A. Foster, J. W. Lue, J. P. Stovall, U. Sinha, J. Armstrong, R. L. Hughey, D. Lindsay, and J. Tolvert, "Development and Testing of HTS Cables and Terminations at ORNL", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 11, NO. 1, 2351-2354, MARCH 2001

[3] J. Gerhold, "Electrical Insulation in Superconducting Power Systems", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.8, No.3, 14-21, May/June 1992

[4] Nishijima, S. and Hara, M., "Mechanical influence on long term dielectric performance of insulants", Cryogenics, 38(11), 1105-1113, 1998

[5] Hara, M. and Wang, Z-C., "An analytical study of bubble motion in liquid nitrogen under DC non-uniform fields", Proceedings of the 4th ICPADM, no 5105, Brisbane, Australia, 1994

[6] B. Y. Seok, N. Tamuro and M. Hara, "A Study of Thermal Bubble Behavior in the Simulated Electrode System of High Temperature Superconducting Coils", IEEE Trans. on DEI, Vol. 6, No. 3, pp. 109-116, 1999