

Impulse Tests for a Composite Solid Insulator for High Voltage Superconducting Power Applications

W. S. Kim*, S. D. Ryu, O. B. Hyun, H. R. Kim, S. W. Yim, S. E. Yang, and H. S. Kim
KEPCO Research Institute, Daejeon, Korea

(Received 7 July 2011 revised 3 August 2011 accepted 3 August 2011)

복합고체절연물의 극저온 절연성능 평가를 위한 임펄스 내전압시험

김우석*, 유승덕, 현옥배, 김혜림, 임성우, 양성은, 김희선

Abstract

High voltage insulation in cryogenic environment is one of big issues for development of superconducting power application, such as superconducting fault current limiter, transformer, transmission cable, and so on. We had proposed a composite solid insulator composed of plastics and polymer insulation sheets for a use of high voltage superconducting power applications. It is well known that the G10 FRP keeps its mechanical strength at very low temperature and the PPLP is very good insulator adopted as insulations for superconducting transmission cables. The composition of these two materials will show very good electrical and mechanical properties adequate for the insulation components of superconducting power applications, such as bushing, insulation barrier, and even for a cryostat. Dielectric strengths of prepared samples were measured at the temperature of boiling point of liquid nitrogen at atmospheric pressure, which will be presented in this paper to show a usefulness of this technique.

Keywords : High Voltage, Insulator, Cryogenics, PPLP

I. Introduction

최근 고온초전도 선재를 사용한 전력기기의 개발이 국내외에서 많이 이루어지고 있다. 초전도 변압기, 회전기, 한류기등의 전력기기는 이미 배전급에서는 실용화 수준으로 개발이 완료되어

있으며, 특히 초전도한류기의 경우에는 한국전력과 LS산전의 공동연구로 하이브리드형 배전급 고온초전도 한류기가 개발이 완료되었으며 현재 국내 이천변전소의 실계통에 적용하는 시범사업이 진행되고 있다. 그러나, 일반적으로 기존의 전력기기에 비하여 초전도 전력기기는 용량이 증가할수록 냉각이 차지하는 비중이 줄어들뿐더러, 부피감소의 효과가 커지므로 최근에는 각종 고온초전도 전력기기의 정격 전류

*Corresponding author. Fax : +82 42 865 5809
e-mail : wskim@kepri.re.kr

및 전압을 증대시키는 연구가 국내외에서 중점적으로 진행 중이다. 특히, 송전급 전력계통을 위한 고온초전도 전력기기를 위하여 정격전압을 154 kV 급 이상으로 올리기 위한 연구가 국내외에서 진행 중이다. 일반적으로 초전도 기기는 77 K 이하의 극저온에서 운전되기 때문에 전압 레벨이 초 고압으로 올라가는 경우에는 냉매 및 절연매질로 주로 사용되는 액체질소의 안정화, 극저온용기 내부 기체부의 절연, 극저온용 절연물, 그리고 상온 부에서 극저온 부로 전원을 인가하는 부싱 등에서 매우 많은 문제점들이 발생한다.

액체 질소는 자체적으로 좋은 냉매이자 비교적 뛰어난 절연매질로 알려져 있으나, 냉매 내부의 초전도체에서 발생하는 교류손실이나 상변이가 일어날 때 발생할 수 있는 주울 손실, 또는 부싱을 통한 전류리드부에서 발생하는 전도열 및 주울 손실 등에 의하여 국부적으로 액체질소의 비등점을 넘는 경우가 발생할 수 있으며, 이 때 냉매의 내부에서 생성되는 기체질소 기포는 초 고압 절연에 매우 치명적인 결함을 초래하게 된다. 이를 방지하기 위하여 극저온용기 내부를 수 기압 이상으로 가압하여 비등점을 높이고 기포발생을 억제하는 방법을 주로 사용하기도 하나, 액체질소의 안정성이 보장되지 않으므로 초 고압 절연을 위해서는 고체절연물을 동시에 사용하는 것이 권장되곤 한다. 그러나, 이러한 극저온에서 사용될 수 있는 고체절연물은 그 종류에 한계가 있으며 재료의 제작이 매우 어렵고 고가의 공정이 필요할뿐더러 대형 구조물의 제작이 곤란하다. 따라서, 본 논문에서는 이를 해결하기 위하여 저비용 공정으로 제작이 가능하며 극저온에서 사용 가능한 복합고체절연물을 제안하였으며, 샘플 제작 및 임펄스 절연과괴 시험을 통하여 제안된 재료의 절연내력을 측정하여 성능을 검증하고자 하였다.

II. Idea of a composite solid dielectric

고온초전도 전력기와 같이 극저온에서 운전되는 경우, 내부에 사용되는 각종 구조물들은 매우 낮은 온도에 의하여 구조가 심하게 변형되거나 절연특성이 저하되기 매우 쉽다. 따

라서, 현재 극저온에서 절연 구조물을 제작하기 위해서는 주로 섬유강화플라스틱의 일종인 G10 FRP(Fiber Reinforced Plastic)를 사용하는 것이 보통이다. 이는 유리섬유를 에폭시로 함침시켜 제작하는 것으로, 기계적인 특성이 매우 우수하며 극저온에서도 변형이 매우 적다는 장점과 더불어 우수한 절연내력을 가지고 있으므로 현재까지 초전도 전력기기 내부의 초전도 코일을 위한 보빈 등에 많이 사용되어 왔다. 그러나, 전압 등급이 매우 높아지면 에폭시 함침시에 내부에 잔존하게 되는 기포들이 절연성능을 저하시키므로, 이를 초고압 절연에 사용하기 위해서는 반드시 진공 탈포 과정 등의 공정을 거쳐야 한다. 이러한 공정은 제조비용을 증가시킬 뿐 아니라 대형 구조물을 제작하기 매우 어렵게 한다. 따라서 이런 G10 FRP로는 대형 구조물을 만든 사례가 없다.

따라서, 본 논문에서는 극저온에서 강도를 유지하는 섬유강화플라스틱과 극저온에서 우수한 절연내력을 가지는 절연지를 복합 구성함으로써 극저온 고전압환경에서 사용할 수 있는 복합고체절연물을 저비용으로 제조할 수 있는 방법을 제안하였다. Fig. 1에 제안된 복합고체절연물의 구성을 간략하게 나타내었다. 즉, 구조적으로 강도가 강하고 극저온에서 기계적 특성이 매우 우수하다고 검증되어 있는 유리섬유강화플라스틱과 같은 폴리머 계통의 플라스틱을 구조체로 사용하고, 극저온에서 이미 고전압 절연재료로 사용되고 있어서 그 절연내력이 확보되어 있으나 기계적인 강도가 부족한 PPLP (Polypropylene laminated paper) 혹은 Nomex와 같은 절연지를 포함하도록 복합재료를 제작함으로써 기계적 강도와 절연내력을 동시에 확보하고자 하였다. 제안된 복합고체절연물의 제조 공정은 일반적인 유리섬유 강화플라스틱의 제조 공정을 그대로 사용할 수 있으며, 진공탈포의 과정을 없애는 대신에 유리섬유와 절연지를 병행 적층하며 각 층을 에폭시 함침 후 가열 소성하여 제작할 수 있다.

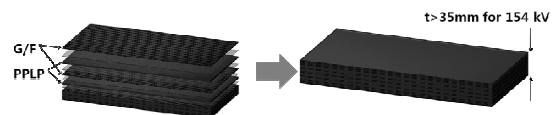


Fig. 1. Arrangement for layers of proposed solid insulator.

III. Fabrication of samples

제안된 공정을 사용하면 고비용의 진공탈포과정을 거치지 않기 때문에 저렴한 제작이 가능할 뿐 더러 대형 구조물의 제작이 가능하다는 장점을 가진다. Fig. 2에 원통형의 섬유강화플라스틱을 제작하는 장비의 모습을 보였으며, 동일한 장비와 유사한 공정으로 복합고체절연물 역시 제작이 가능하였다. 유리섬유와 더불어 사용할 절연지로는 PPLP를 사용하였다. PPLP에 아무런 조치를 취하지 않은 상태에서 샘플을 제작한 결과, Fig. 3 (a)에서 보는 바와 같이 일부 영역에서 층간 박리 현상이 관찰되었다. 이 현상은 PPLP와 에폭시 계면의 접착성과 PPLP 내부로의 에폭시 침투의 문제라고 판단되었으므로, 이를 방지하기 위하여 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 PPLP에 미세한 구멍들을 가공한 후 다시 샘플 제작을 시도하였다. 결과적으로 Fig. 3 (b)에서 보는 바와 같이 육안으로 관찰하였을 때 박리현상이 전혀 보이지 않는 샘플 제작이 가능하였다. 동일한 공정을 사용하여 Fig. 5와 같이 원통형 샘플 역시 제작할 수 있었다. 샘플들의 제작 시 절연내력의 비교를 위하여 PPLP를 넣지 않고 진공탈포과정을 거쳐서 제작된 유리강화섬유플라스틱을 같은 두께와 크기로 제작하여 동일 조건에서 시험하여 성능을 비교하고자 하였다.



Fig. 2. Facilities for the fabrication of cylinder samples.

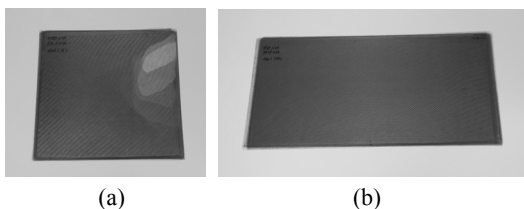


Fig. 3. Fabricated samples. (a) without holes on PPLP layers and (b) with holes on PPLP layers.

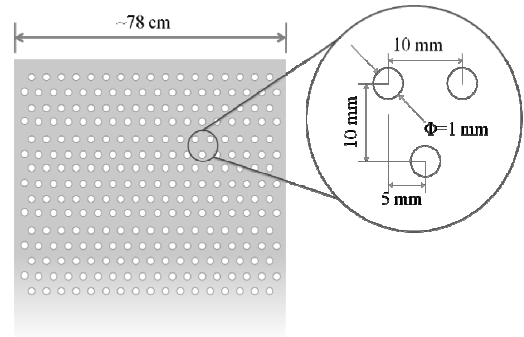


Fig. 4. Design of holes on PPLP layers.



Fig. 5. Fabricated samples in cylinder shape.

IV. Experiment

여러 가지의 두께 별로 제작된 샘플의 절연내력을 파악하기 위하여 임펄스 절연파괴 시험을 시행하였다. 전극의 구조는 봉-평판 전극을 사용하였으며, Fig. 6 (a)에 시험을 위하여 제작된 전극과 전극 사이에 설치된 관형 샘플의 모습을 나타내었다. 임펄스 장비를 사용한 절연파괴 시험은 비등점에 있는 대기압의 액체질소 내부에 샘플이 설치된 전극을 함침한 상태에서 실시하였으며, Fig. 6 (b)에 시험장면을 나타내었다.

임펄스 절연파괴 시험 결과 본 논문에서 제안한 복합고체절연물의 절연내력은 액체질소 내부에서 약 38.6 kV/mm로 측정되었다. 반면, PPLP 없이 순수하게 제작된 샘플의 경우에는 약 45 kV/mm로 측정되었으며, 복합고체절연물의 절연내력이 기존의 고비용 공정으로 제작된 샘플에 비하여 약 25 % 정도의 성능 저하를 보이는 것으로 추정된다. Fig. 7에 절연파괴 직후에 액체질소에서 꺼낸 샘플의 모습을 나타내었으며, Fig. 8에 두 가지 종류의 샘플의 임펄스 절연내력 측정 결과의 비교치를 나타내었다.

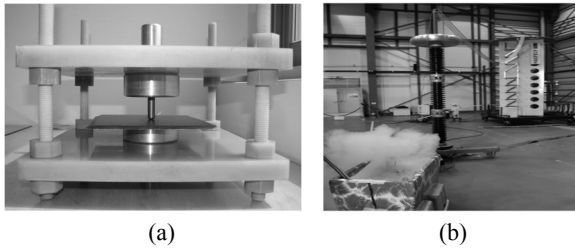


Fig. 6. (a) Electrode and (b) experimental setup for high voltage impulse test.

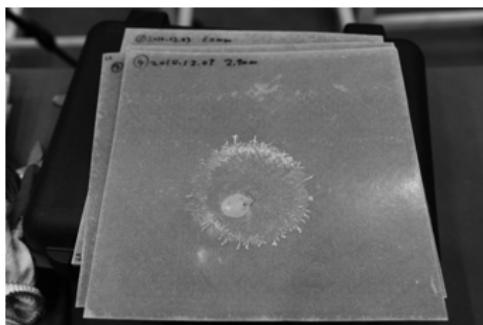


Fig. 7. Samples right after a break down.

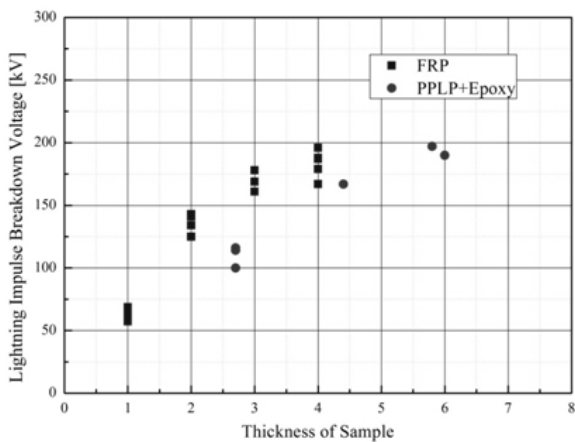


Fig. 8. Impulse breakdown voltages of samples.

V. Conclusions

제안된 복합고체절연물의 절연내력을 측정, 비교하기 위하여 액체질소 내부에서 임펄스 절

연과괴시험을 실시한 결과 약 38.6 kV/mm의 절연내력을 가지는 것으로 추정되었다. 이는 진공탈포 과정을 거친 품질이 우수한 섬유강화플라스틱의 절연내력보다 다소 낮은 것으로 측정되었다. 그러나, 제안된 방법은 간단한 공정으로 비교적 매우 저렴하게 제작할 수 있을 뿐만 아니라, 탈포를 위한 진공 챔버가 필요 없기 때문에 대형 구조물의 제작이 용이하다는 장점을 가지므로, 경제성에서 매우 유리하다. 결론적으로 대용량 고전압 초전도 전력기기와 같이 극저온에서 고전압 절연이 필요한 대형 기기의 경우 초전도 코일을 위한 보빈을 위한 재료나, 절연 베리어 제작을 위한 고체절연물로 충분히 활용 가능함을 보인다고 할 수 있다. 향후, 더 충분한 개수의 샘플 제작 시험으로 측정의 신뢰성을 확보하고 제조 공정의 개선을 통하여 절연성능의 향상을 추구할 방법을 제안할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

References

- [1] 백승명, 곽동순, 천현권, 최재형, 김상현, 김현희, “고온초전도 기기를 위한 극저온 액체 중 절연물의 전기적 특성”, 한국전기전자재료학회 2006년도 하계학술대회 논문집, pp. 263-264, 2006.
- [2] 나진배, 고태국, 강형구, 석복렬, 김태중, “액체질소를 사용하는 초전도 고전압 전력기기의 절연 특성 연구”, 한국초전도 저온공학회논문지, 13권, 1호, 2011년 3월.
- [3] D.S. Kwag, H.G. Cheon, J.H. Choi, H.J. Kim, J.W. Cho, and S.H. Kim, “Research on the insulation design of a 154 kV class HTS power cable and termination”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, June 2007.