

차세대권선형한류기를 위한 함침용 재료의 열전도도 및 절연 내력 측정

Thermal Conductivity and Dielectric Strength Measurement of the Impregnating Materials for the Next Generation Winding Type Superconducting Fault Current Limiter

양성은*, 배덕권*, 안민철*, 강형구*, 석복렬**, 장호명***, 김상현#, 고태국&

Seong Eun Yang*, Duck Kweon Bae*, Min Cheol Ahn*, Hyoungku Kang*,
Bok-Yeol Seok**, Ho-Myung Chang***, Sang-Hyun Kim#, Tae Kuk Ko&

Abstract: The resistive type high temperature superconducting fault current limiter (HTSFCL) limits the fault current using the resistance generated by fault current. The generated resistance by fault current makes large pulse power which makes the operation of HTSFCL unstable. So, the cryogenic cooling system of the resistive type HTSFCL must diffuse and eliminate the pulse energy very quickly. Although the best way is to make wide direct contact area between HTS winding and coolant as much as possible, HTS winding also needs the impregnation layer which fixes and protects it from electromagnetic force. This paper deals with the thermal conductivity and dielectric strength of some epoxy compounds for the impregnation of high temperature superconducting (HTS) winding in liquid nitrogen. The measured data can be used in the optimal design of impregnation for HTS winding. Aluminar filling increased the thermal conductivity of epoxy compounds. Hardener also affected the thermal and electric characteristic of epoxy compounds.

Key Words: HTSFCL, thermal conductivity, dielectric strength, epoxy.

1. 서 론

최근 2G 선재인 CC(Coated Conductor)의 빠른 개발 속도로 인하여 Bi-2212 벌크를 이용한 저항형 한류기와 더불어 새로운 형태의 고온초전도한류기 개발이 활발히 진행되고 있다. CC 선재는 재료의 활발한 연구개발 추세와 높은 임계전류, 고자장하에서의 임계전류 특성, 좋은 스위칭 특성 등 초전도한류용 재료로서의 많은 장점을 보유하고 있기 때문에 차세대 초전도한류기용 재료로서 사용되기에 충분하다[1]. 대한민국의 21

세기 프론티어 사업에서 개발 중인 고온초전도한류기의 연구에 참여하고 있는 연세대는 지난 3년간의 유도형 고온 초전도 한류기의 개발 기술을 바탕으로 CC를 이용한 차세대 무유도 권선형 한류기 개발을 시작했다.

차세대 무유도 권선형 한류기는 기본적으로 저항형 한류기와 같은 한류 매커니즘을 갖고 있지만 기존의 저항형 한류기와는 다르게 CC 선재를 이용한 무유도 권선을 한류소자로 사용한다. 그러므로 선재의 퀘칭시 발생하는 질소 기포의 거동에 따라 절연 능력이 현저하게 떨어질 수 있기 때문에[2] 선간 절연을 위한 에폭시 함침이 필요하다. 하지만 함침 재료의 열전도도(Thermal Conductivity)가 낮을 경우 선재에 손상을 줄 수 있기 때문에 함침 재료의 열적 특성을 파악하는 것이 필수적으로 요구된다[3]. 또한 함침 재료의 열전도도뿐만 아니라 절연 내력의 측정 역시 중요하다. 에폭시 함침은 전기적 절연 이외에 고온초전도 권선의 기계적 고정의 역할도 담당한다[4].

본 논문은 차세대 무유도 권선형 한류기 개발의 기초 연구로 차세대 권선형 한류기용 함침 재료의 열전도도 및 절연 내력을 측정, 분석하였다. 현재 극저온기에 주로 사용되고 있는 절연 재료 중에 CTD, Stycast® 2850FT Blue/9와 Stycast® 2850FT Blue/23LV의 열전도도와 절연 내력을 측정하였다.

2. 시편 제작 및 실험 방법

2.1. 시편 제작 및 실험 방법론

본 연구에서는 효과적으로 열전도도와 절연 내력을 측정하기 위하여 각각 시편을 원통형과 평판으로 제작하였다. Fig. 1은 열전도도 측정 실험을 위하여 제작한 에폭시 시편의 구조도이다. 에폭시 내부에 일정한 에너지를 발생시키기 위하여 2W-100Ω 저항을 사용하였다. 내부의 온도를 측정하기 위하여 보정된 T-Type 열전대를 사용하였다. 에폭시가 경화되면 내부에 온도 센서를 설치할 수 없으므로 몰당하기 전에 미리 저항 표면에 Thermal Grease를 바르고 고정시켰다. Fig. 2는 에폭시의 절연 내력을 측정하기 위한 시편의 구조도이다. 절연 내력 측정은 구-평판 전극 구조로 절연 파괴 대상 영역에 평등 전계를 구현하였다. 상부 전극은 지름 5 mm구형 SUS를 사용하였고 하부 전극은 Silver paste를 이용하였다. Fig. 3은 에폭시 제작 과정이다. 시편 내부에 보이어나 공동이 생성되면 열전도도에 영향을 미칠 수 있으므로 모든 에폭시는 탈기 후

* 학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정
** 정 회 원 : 현대중공업(주) 기계전기연구소 책임연구원
*** 정 회 원 : 홍익대 기계·시스템디자인공학과 교수
정 회 원 : 경상대 전기공학과 교수
& 정 회 원 : 연세대 전기전자공학과 교수
원고접수 : 2005년 2월 15일
심사완료 : 2005년 3월 10일

진공 오븐에서 각각의 적정한 온도에서 경화시켰다. 제작 과정은 실험 대상 에폭시 종류에 따라 조금씩 차이가 있다. CTD는 Part A(resin), Part B(hardener), Part C(accelerator)로 구성되며 각각의 구성비는 질량비를 기준으로 100 : 90 : 1.5 이다.

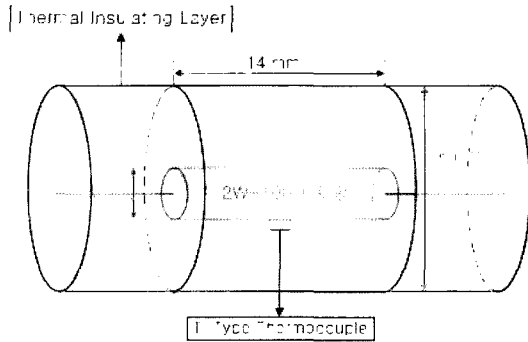


Fig. 1. Model for measurement of thermal conductivity.

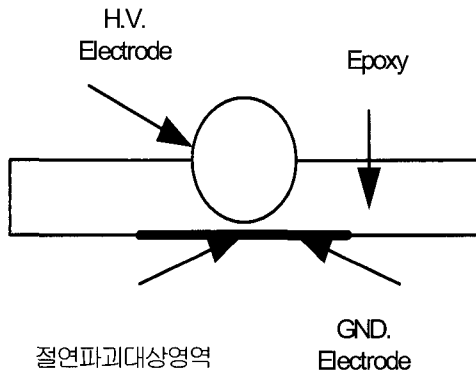


Fig. 2. Model for measurement of dielectric strength.

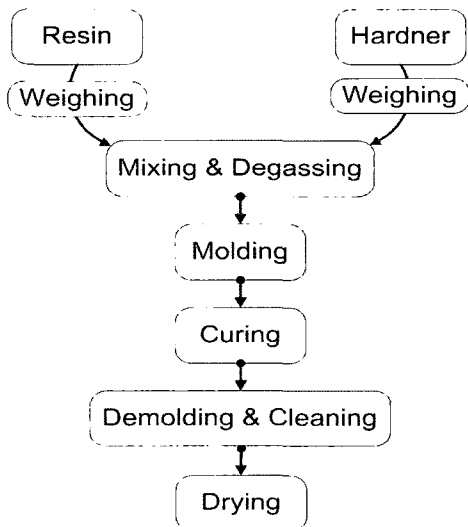


Fig. 3. Procedure of Epoxy manufacture.

CTD는 110°C에서 6시간 동안 1차 경화를 시킨 뒤에 130°C에서 5시간 동안 2차 경화시켰다. Stycast® 2850FT Blue는 두 가지의 경화제, 즉 Catalyst 9 와 Catalyst 23LV를 이용하여 제작하였다. Stycast® 2850FT Blue/23LV는 50°C에서 5시간 동안 경화시켰고, Stycast® 2850FT Blue/9는 50°C에서 1시간 반 동안 경화시켰다. Stycast® 2850FT Blue/23LV의 구성비는 질량비를 기준으로 100 : 7.5였고, Stycast® 2850FT Blue/9의 구성비는 역시 질량비를 기준으로 100 : 3.5 였다. 세 가지의 시편의 resin : hardener의 구성비는 모두 제조사의 권장비율을 따랐다. 경화제의 비율이 에폭시의 열적 특성과 전기적 특성에 영향을 줄 수 있다는 가정 하에, 세 가지의 시편 중 가장 높은 열전도도를 가진 Stycast® 2850FT Blue/23LV의 경우에는 질량비를 100 : 8.25, 100 : 6.75로 바꾸어가면서 그 열전도도의 변화를 측정하였고 각각의 절연 내력 또한 측정하였다.

2.2. 열전도도 측정 실험 방법

에폭시의 열전도도 측정 실험의 구성도는 Fig. 4와 같다. 제작된 시편을 상온이나 액체 질소 안에 담근 후 DC Power Supply를 이용하여 저항 양단에 전압을 걸어주었다. 액체 질소 안에서는 저항의 표준인 2W의 두 배인 4W를 걸어줘도 저항에 손상이 없으므로 저항 양단에 14V와 20V를 가하여 2W와 4W의 내부에너지에 의한 열전도도를 측정하였다. 에폭시 내부 즉, 저항의 표면과 에폭시 외부에 열전대를 설치하여 에폭시 내부와 외부의 온도를 측정하여 온도차를 구하였다.

본 실험에서 중요한 것은 에폭시의 열전도도 측정이기 때문에 액체 질소에 시편을 담글 때 열 충격(Thermal Shock)에 의하여 시편 내부에 균열이 생기지 않도록 예비 냉각을 충분히 해주어야 한다. 그러므로 본 실험을 수행 할 때에는 예비냉각 중에도 계속 내부, 외부 온도를 측정하였다. 또한 열전대로 온도를 측정할 때는 기준점이 반드시 필요하기 때문에 기준점의 온도를 0°C로 유지하였다.

정상 상태에서는 일정한 위치에서 시간에 따른 온도 변화가 없다. 즉, 원통 옆면을 통해 나가는 열전달률은 일정하다.

열전도도 k , 내부반경 r_1 , 외부반경 r_2 , 길이 L 인 원통에서 내부 표면의 온도가 T_1 , 외부 표면의 온도가 T_2 로 일정하게 유지될 때 열전도도는 다음과 같이 구할 수 있다[5].

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (W)$$

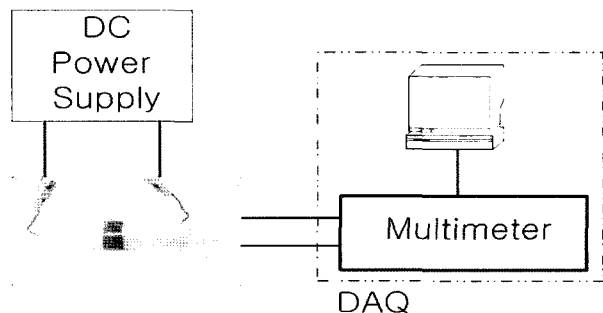


Fig. 4. Block diagram for measurement thermal conductivity.

A는 위치 r에서의 열전달 면적 $2\pi rL$ 이다. 변수를 분리하고 적분하면,

$$\int_{r=r_1}^{r_2} \frac{\dot{Q}}{A} dr = - \int_{T=T_1}^{T_2} kdT$$

이고, \dot{Q} 는 일정하므로 따라서 열전도도 k는 다음과 같다.

$$k = \frac{\dot{Q} \cdot \ln(r_2/r_1)}{2\pi L \cdot (T_1 - T_2)} \text{ W/m} \cdot \text{ }^\circ\text{C} \quad [1]$$

2.3. 절연 내력 측정 실험 방법

Fig. 5는 에폭시의 절연 내력을 측정하기 위한 실험 구성도이다. 에폭시 시편은 GFRP로 만든 지지대로 고정시키고 절연 내력 측정은 액체 질소 안에서 이루어졌다. 전압은 수동으로 초당 5kV씩 증가시키면서 절연 내력을 측정하였다. 시편을 액체 질소에 담글 때는 열 충격에 의해 손상이 안가도록 충분한 예비 냉각을 해주었다. 3장에서 언급하겠지만 현미경으로 절연 파괴가 일어난 부분을 확대한 면을 보면 CTD는 10분 이상의 충분한 예비 냉각을 했음에도 불구하고 열 충격에 의해 표면이 갈라진 것을 관찰 할 수 있었다.

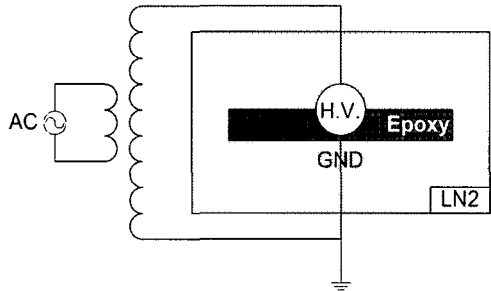


Fig. 5. Block diagram for measurement electrical breakdown strength.

3. 실험 결과 및 분석

3.1. 에폭시 종류에 따른 실험 결과

Fig. 6은 에폭시의 종류에 따른 열전도도 측정 결과이다. 그래프에 나타난 전압은 시편 내부의 저항에 부착된 열전대에서 측정한 것이다. 열전도도 계산은 온도차가 정상상태에 이르렀을 때 측정하게 되는데, 정상상태의 그래프는 아직 정상상태에 이르지 못했음을 볼 수 있다. 이는 CTD의 열전도도가 Stycast® 2850FT Blue에 비해 현저하게 나빠서 정상상태에 이르는 시간이 더욱 오래 걸리기 때문이다. 실제로 800초가 지나서 정상상태에 이른다. 내부의 온도가 많이 올라가는 것은 열전도도가 상대적으로 낮음을 말해준다. Table 1은 에폭시의 종류에 따른 열전도도를 계산한 값이다. 각각의 열전도도는 6개의 시편에 각각 2W와 4W의 열을 가했을 때 측정된 열전도도 값의 평균치이다. 표에서 알 수 있듯이 Stycast® 2850FT Blue가 CTD에 비하여 4배 이상의 열전도도를 보임을 알 수 있다. 이는 Stycast® 2850FT Blue에 충전 되어 있는

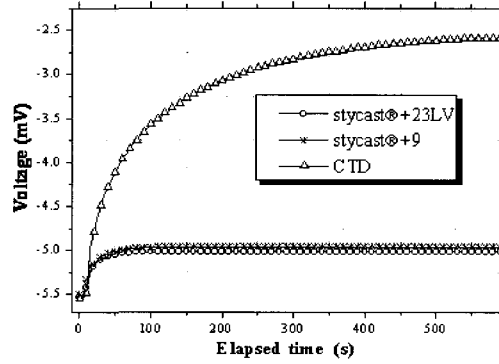


Fig. 6. Voltage rising of the thermocouple mounted on the resistor.

Table 1. Thermal conductivity of specimen.

시편	열전도도 (W/m · °C)	평균오차값
CTD	0.37115	0.03517
Stycast® 2850FT Blue/Catalyst 9	1.31592	0.111408
Stycast® 2850FT Blue/Catalyst 23LV	1.64691	0.08588

알루미늄이 에폭시의 열전도도를 향상시켜주기 때문이다. 일반적인 알루미늄의 열전도도는 77K에서 보통 에폭시의 800배 이상이다[6]. 또한 경화제의 종류가 역시 열전도도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

3.2. 경화제 비율에 따른 실험 결과

Fig. 7은 열전도도가 가장 좋은 Stycast® 2850FT Blue/23LV의 에폭시 경화제 비율을 변화시켜 제작한 시편들의 측정 결과이다. Stycast® 2850FT Blue/23LV는 다른 종류의 에폭시에 비하여 극저온에서 좋은 열전도도를 보였지만, 경화제의 비율이 적절하지 못할 경우 현저하게 열전도도가 나빠지는 것을 볼 수 있다. 계산된 열전도도는 Table 2에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 경화제의 비율이 표준비율인 6.98 weight % 보다 10% 많거나 적으면, Stycast® 2850FT Blue/9보다도 안 좋은 열전도도를 보였다.

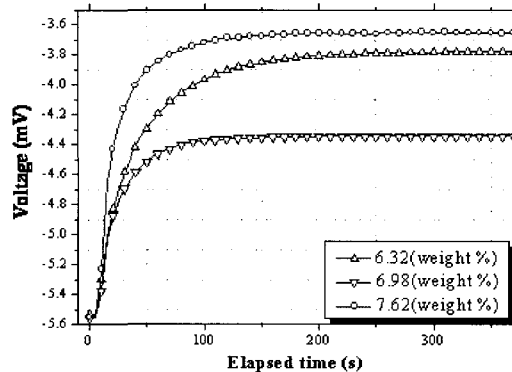


Fig. 7. Voltage rising of the thermocouple mounted on the resistor.

Table 2. Thermal conductivity of Stycast® 2850FT Blue/23LV according to the weight % of hardener.

경화제비율 (weight %)	열전도도 ($W/m \cdot ^\circ C$)	평균오차값
6.98	1.64691	0.08588
7.62	1.04219	0.026786
6.32	1.10468	0.119137

3.2. 절연 내력 측정 결과

Catalyst 9는 열전도도가 Catalyst 23LV 보다 상대적으로 낮아 절연 내력 실험에서 제외하였다. Fig. 8은 측정된 절연 내력을 그래프로 나타낸 것이다. CTD는 Stycast® 2850FT Blue/23LV에 비하여 아주 높은 절연 내력을 갖지만 취약한 열적 특성을 갖기 때문에 안정적으로 극저온에서 사용하기 힘들다. 예비 냉각의 시간을 10분 이상 해주었지만, 절연 파괴가 일어나기 전에 이미 시편에 금이 가있는 것을 현미경으로 확대했을 때 확인 할 수 있었다. Stycast® 2850FT Blue/23LV는 경화제의 비율에 의해 약간의 차이는 있지만 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

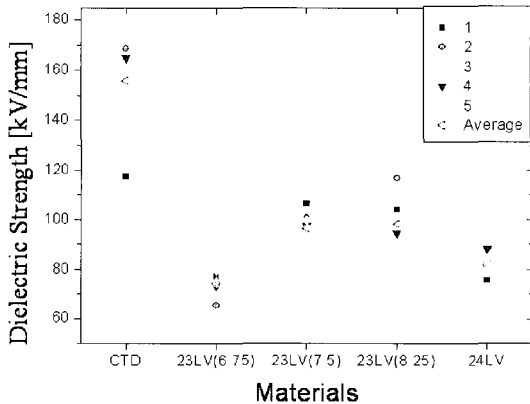


Fig. 8. Test results of dielectric strength.

4. 결 론

차세대 무유도 권선형 한류기를 위한 절연 합침용 재료의 극저온에서 열전도도 및 절연 내력은 초전도 선재의 보호 및 시스템의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 기본적인 데이터 확보는 필수적이다. 본 연구를 통하여 에폭시의 열전도도와 절연 내력을 측정하여 보았다. 에폭시의 종류 및 충전제에 따라 열전도도는 크게 영향을 받는다. 또한 경화제의 종류와 비율 역시 열전도도에 영향을 주는 요인으로 분석되었다. 효과적으로 내부 열을 방출하기 위한 합침용 재료는 Stycast® 2850FT Blue와 23LV를 질량비로 100 : 7.5로 혼합하여 제작한 것이었다. 이 열전도도는 일반적인 에폭시의 열전도도 보다 8배 정도 좋은 값이다. 또한 CTD는 높은 절연 내력을 갖지만 열적으로 취약하고 낮은 열전도도로 인하여 무유도 권선형 한류기에는 적합하지 않다. 무유도 권선형 한류기에서는 Stycast® 2850FT Blue와 23LV로 제작한 에폭시가 가장 효과적

인 열 방출과 충분한 절연 내력을 갖는 합침용 재료이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Watanabe, T., Shiohara, Y., Izumi, T. , "Progress and future prospects of research and development on coated conductors in Japan", IEEE Transactions on Applied Superconductivity , Volume: 13 , Issue: 2,Pages:2445 - 2451, 2003.
- [2] Hara, M.; Suehiro, J.; Maeda, H.; Nakashima, H., "DC pre-breakdown phenomena and breakdown characteristics in the presence of conducting particles in liquid nitrogen", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 9 , Issue: 1 , Pages:23 - 30, 2002.
- [3] Nieberlein, V., "Thermal Conductivity Enhancement of Epoxies by the use of Fillers", IEEE Transactions on [see also IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, B, C] , Volume: 1 , Issue: 2 , Pages:172 - 176, 1978.
- [4] James, D.R.; Sauers, I.; Pace, M.O.; Ellis, A.R., "High voltage breakdown of solid epoxies at room temperature and in liquid nitrogen", 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena , 20-24 ,Pages:542 - 545, 2002.
- [5] Yunus A., "Heat Transfer : a practical approach. 2nd ed.", 한국맥그로힐, 2004.
- [6] Yukikazu Iwasa, "Case studies in superconducting Magnets : Design and operating Issues", Plenum Press, 1994.

저 자 소 개



양성은(梁盛銀)
1978년 12월 3일생, 2003년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



배덕권(裴德權)
1971년 8월 16일생, 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정.



안민철(安敏哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



장호명(張鎬明)

1960년 9월 21일생, 1983년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1984년 University of Michigan M.S.E 졸업(공학석사), 1988년 M.I.T. 졸업(공학박사), 현재 홍익대학 기계시스템 디자인공학과 교수 및 F.S.U. NHMFL 객원교수.



강형구(姜亨求)

1973년 8월 4일생, 1997년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기전자컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 1982년~1986년 일본 오사카대학 대학원 공학박사, 현재 경상대 전기전자공학부 교수.



석복렬(石福烈)

1971년 2월 16일생, 1994년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1994년 10월~1995년 8월 국제단기교환유학생(일본 큐슈대학), 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 3월 일본 큐슈대학 시스템 정보과학연구과 졸업(공학박사), 2000년 4월~2001년 3월 일본 통상산업성 공업기술원 특별연구원(AIST fellow), 현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 책임연구원.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 석사 졸업(M.Sc), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 박사 졸업(Ph. D), 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.