

## 초고압 초전도 변압기용 고온 초전도 연속전위도체의 절연특성

### Insulation tests of Continuously Transposed Coated Conductors for a high voltage superconducting transformer

김영일<sup>1</sup>, 김우석<sup>2</sup>, 박상호<sup>1</sup>, 박 찬<sup>2</sup>, 이세연<sup>1</sup>, 천현권<sup>3</sup>, 김상현<sup>3</sup>, 이지광<sup>4</sup>, 최경달<sup>1,\*</sup>

Y. Kim<sup>1</sup>, W.S. Kim<sup>2</sup>, S.H. Park<sup>1</sup>, C. Park<sup>2</sup>, S Lee<sup>1</sup>,  
H.G. Cheon<sup>3</sup>, S.H. Kim<sup>3</sup>, J.K. Lee<sup>4</sup>, K. Choi<sup>1,\*</sup>

**Abstract:** A cryogenic insulation technique for a high voltage and a large current capacity of a conductor are now two big issues in a field of recent R&D projects of superconducting power devices, especially a superconducting power transformer. For the large rated currents of the power transformer, it is well known that lots of 2nd generation superconducting conductor, so called coated conductor, should be stacked together with transpositions in order to get an even distributions of the currents. We had come up with an idea of a CTCC (Continuously Transposed Coated Conductor) as a conductor for a large power superconducting transformer, and keep trying to verify the usefulness of the conductor. As one of the efforts of verifying, we prepared and tested a sample CTCC with insulations for high voltage, which includes the epoxy coating and Nomex® wrapping. This paper contains the insulation process and dielectric breakdown test results. We expect the results obtained from this experiment to improve an insulation technique for high voltages in various cryogenic environments[1,2].

**Key Words:** cryogenic insulation technique, superconducting power transformer, CTCC, epoxy coating, Nomex®.

## 1. 서 론

현재 개발 단계에 있는 초고압 초전도 변압기에 쓰이는 선재가 갖춰야 할 중요한 요소기술로 절연이 있다. 극저온상태에서 고전압이 인가되었을 때, 변압기 권선에서의 턴 간 절연은 필수적이다. 왜냐하면 초고압 초전도 변압기에 사용된 선재를 보호하고 사고가 나지 않도록 안정성을 확보해야 하기 때문이다. 모든 전력 설비가 그렇듯 안정성이 확보되지 않은 설비는

현장에 투입될 수가 없다.

본 논문에서 언급한 초고압 초전도 변압기에 사용될 고온 초전도 선재도 연속전위도체의 형태로서 권선될 예정이다. 연속전위도체를 도입해야 하는 이유로 교류 손실의 저감, 그리고 대전류 통전이라는 점이 있다. 그러나 대전류 통전 시 소선 간 균등 전류 분포를 위하여 연속전위도체의 소선 간 절연이 필수적이므로 이를 위하여 각 소선을 에폭시 코팅으로 절연하였다. 본 논문에서는 10 개의 코팅된 소선을 제작하고, 이를 연속전위하여 연속전위도체를 만든 후 Nomex® 테이프를 3 중 지절연을 가하여 송·배전급 고온 초전도 변압기 권선으로의 적용가능성을 검토하였다[3].

## 2. 본 론

### 2.1. 연속전위도체 제작

초고압 초전도 변압기에 사용되는 선재는 고온 초전도 선재이지만, 본 논문에서는 절연 특성만을 고려 할 목적으로 스테인리스 스틸로 대체하여 진행하였다. 표 1에 스테인리스 스틸의 제원을 표시하였다. 절연 특성을 파악하려면, 고온 초전도 선재로 만든 연속전위도체 와 동일한 폭을 가져야 하기 때문에, 12 mm 폭을 가지는 스테인리스 스틸 테이프를 사용했고, 초고압 초전도 변압기에 사용될 연속전위도체

Table 1. Stainless Steel Specification.

Specification	연속전위도체 소선
재료	스테인리스 스틸
두께	60 μm
폭	12 mm
저항	0.753 μΩ · m

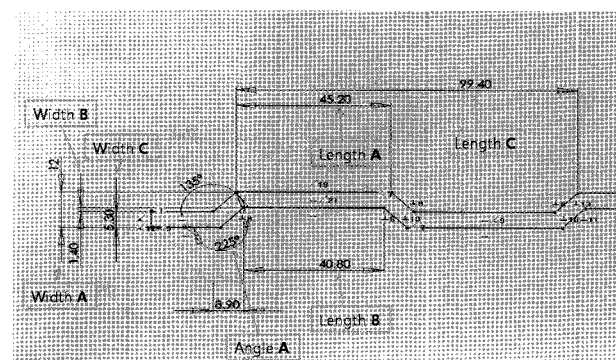


Fig. 1. Design of CTCC Wire.

<sup>1</sup>학생회원 : 한국산업기술대학교 지식기반기술에너지대학원

<sup>2</sup>정 회원 : 서울대학교 재료공학부

<sup>3</sup>정 회원 : 경상대학교 전기공학과

<sup>4</sup>정 회원 : 우석대학교 소방안전학과

\*교신저자 : kyeongdal.choi@gmail.com

원고접수 : 2010년 05월 07일

심사완료 : 2010년 07월 30일

게재확정 : 2010년 08월 16일

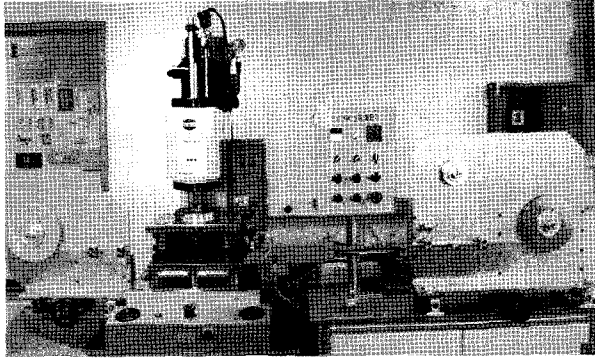


Fig. 2. Wire Puncher for CTCC.

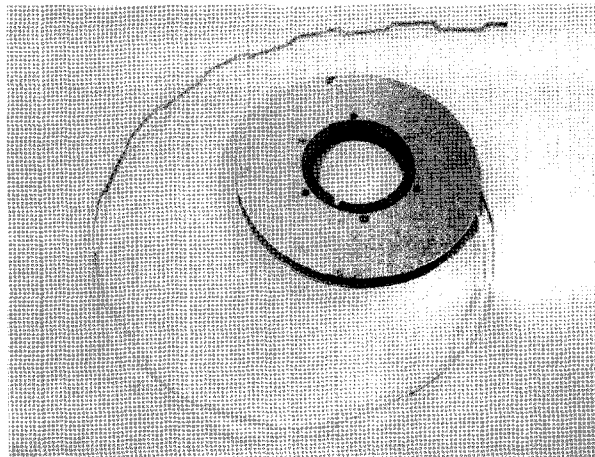


Fig. 3. Produced strand for CTCC.

소선의 설계된 모습을 그림 1에 나타내었다. 연속전위도체 소선과 같은 모양으로 재단하기 위해서, 12 mm 폭의 선재를 그림 2의 연속전위 선재 재단기의 왼쪽 보빈에 권선하고, 재단된 선재가 권선될 오른쪽 보빈까지 연결한다. 일직선으로 연결된 선재는 공기 압착기와 공기 급선기, 롤러들을 통해 연속적인 공정이 이루어지게 된다. 이와 같은 공정을 통해 제작된 연속전위도체 소선을 그림 3에 나타내었다.

2.2. 에폭시 코팅

소선 간 겹치는 부분의 절연을 위해 에폭시 코팅을 하게 된다. 사용될 에폭시는 UTOMASK Resin이며, 투명한 색을 띄지만, 색상구분을 위해 초록색의 안료를 첨가하였다. 표 2에 에폭시의 사양에 대해 나타내었다. 코팅의 진행순서는 컨트롤 박스 위에 위치한 코팅 할 소선을 권선한 보빈부터 롤러, 용기, 열처리기, 롤러, 코팅된 소선이 권선되는 보빈 순이다. 그림 4에 연속전위도체 소선을 위한 에폭시 코팅장치의 코팅과정을 나타내었다. 안료가 섞인 에폭시와 경화제를 섞은 후 용기에 담아 소선 표면에 접촉될 때 중력에 의하여 균일한 두께의 코팅이 가능하게 된다. 또한 중력과

Table 2. Epoxy Specification.

Product name	UTOMASK Resin
Color	Transparency
Acid value	59-62 (KOH-mg/g)
Molecular Weight	Mn 1,000-2,000 Mw 10,000-25,000
Viscosity	5P (Poise=dpa.s)+1(혼합점도)
Solid Content(%)	70-79 (at 80°C)
Solvent	Carbital, Cellosolve)

Table 3. Nomex® Specification.

Nominal thickness(mm)	0.05
Dielectric strength AC rapid rise(kV/mm)	18
Full wave impulse(kV/mm)	39
Dielectric constant at 60 Hz	1.6
Dissipation factor at 60 Hz(*10 <sup>-3</sup> )	4

더불어 권선속도에 따라 에폭시가 코팅되는 정도가 다르므로 안정적인 코팅을 위해서 0.7-0.8 mm/s의 속도로 코팅을 진행하였다. 에폭시가 묻은 소선이 지나가는 양면으로 총 9 개의 할로젠 램프가 있는 열처리기를 통과하게 된다. 코팅 시의 할로젠 램프의 온도는 섭씨 300°C로 고정하였다. 소선이 열처리기를 통과하면서 발생하는 가스는 열처리기 위에 위치한 환풍기를 통해 밖으로 배출된다. 약 160 m 길이의 코팅된 소선을 동일한 길이로 절단하여 약 10 m 길이의 연속전위도체로 제작되었다. 그림 5에 코팅된 동일한 길이의 소선 10 가닥을 나타내었다.

2.3. Nomex® 절연 종이 절연

제작된 10 m 길이의 연속전위도체는 에폭시 코팅을 통해 소선 간 절연을 확보하였다. 그러나 10 가닥의 소선으로 꼬여진 연속전위도체의 턴 간 절연도 확보하기 위해 Nomex® 절연 종이로 절연 하였다. Nomex® 절연 종이는 25 mm 폭을 가진다. Nomex® 절연 종이의 제원은 표 3에 나타내었다. 절연은 총 3 회를 하였으며, 절연지가 겹치는 오버랩(Overlap) 방식으로 중첩율은 30~50 (%)로 1, 2 및 3 층으로 절연하였다. 이때, 절연지의 풀림을 방지하기 위하여 마지막 층은 반대방향으로 감았으며, 그림 6과 그림 7에 종이 절연 개념도와 절연된 모습을 나타내었다.

2.4. 절연 파괴 시험

변압기의 턴 간에 걸리는 전압은 1 권선 당 유기되는 전압을 의미하며 실제 설계에서는 전압/권선 수에 따라 철심의 크기 및 권선수가 결정된다. 본 연구팀

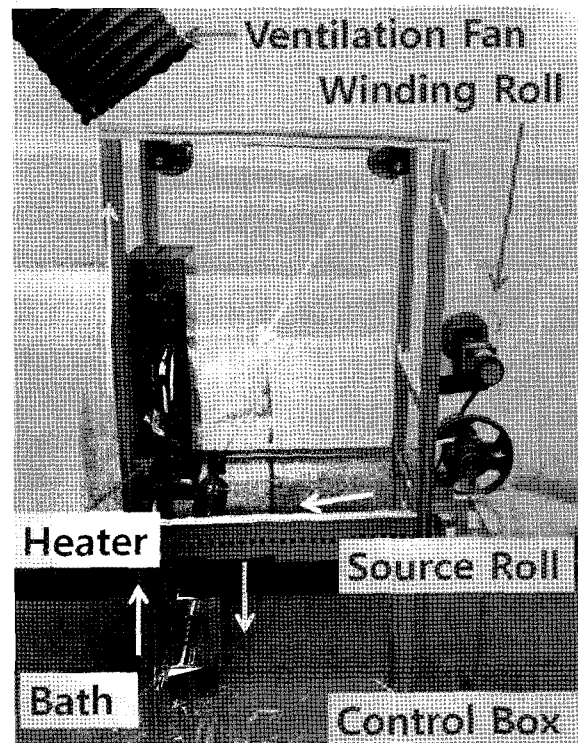


Fig. 4. Epoxy Decoater for CTCC.

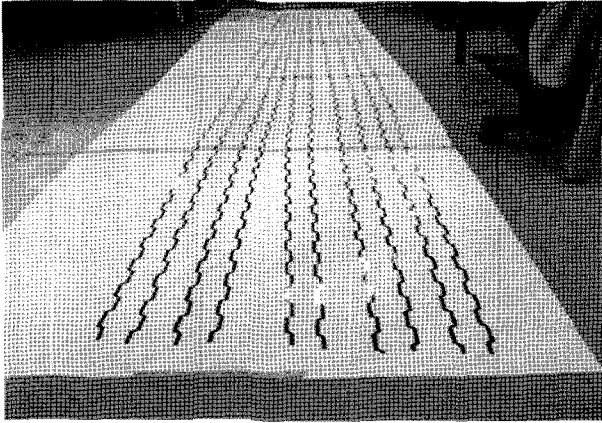


Fig. 5. Coated Wire for CTCC.

에서 연속전위도체를 적용하여 설계한 154 kV, 33 MVA급 고온 초전도 변압기의 설계 결과에 의하면 초전도 권선의 전압/권선 수는 약 138 V이다. 그림 8은 Nomex® 절연 종이 층수에 따른 AC 절연파괴 결과를 Weibull 확률분포로 나타내었다. AC 절연파괴 시험은 대기압, 극저온 냉각(77.3K) 하에서 이뤄졌으며, 턴 간 절연모델 25 mm 평판 전극계를 이용하여 절연 파괴 전압을 측정 한 후 이 절연파괴 전압을 Weibull 통계처리를 통해 0.1 % 절연파괴 전압값을 획득하였다. 그림 8에서 실선 주위에 분포한 각 점들은 Nomex® 절연 종이의 관통파괴 특성을 나타낸다. 위상단과 좌하단의 점은 각각 최대값과 최소값을 의미한다. 각 절연 종이 매 수에 따른 절연 파괴 시험에서 연면 절연 파괴는 일어나지 않고, 전부 관통 파괴가 일어났다. Nomex® 절연 종이의 층수에 따른 AC 0.1 % 절연파괴 확률 전압은 각각 3.25 kV, 6.95 kV, 8.96 kV 이다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 초고압 초전도 변압기 설계에 활용할 극저온 환경에서의 고전압 절연특성 기초실험을 수행하였다. 절연특성 파악을 위해 초전도 선재와 같은 폭

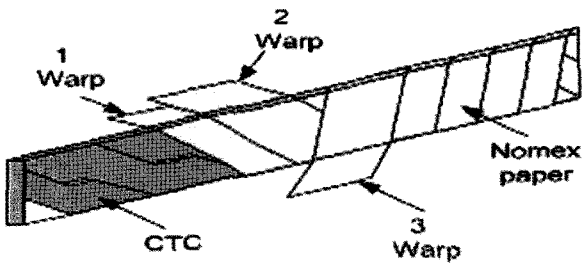


Fig. 6. Nomex® Wrapping key map.



Fig. 7. 3th Wired with Nomex® Paper.

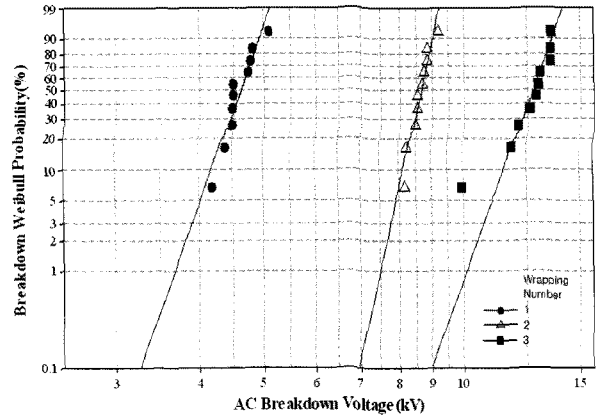


Fig. 8. Results of dielectric strength test of AC breakdown voltage.

과 두께를 가지는 스테인리스 스틸 테이프를 연속전위도체의 형태로 제작하여 에폭시 코팅 및 Nomex® 절연 종이로 절연하였다. 소선 간 절연을 위해 에폭시 코팅을 할 때, 안정적인 코팅을 도모하기 위해 섭씨 300°C에서 0.7-0.8 mm/s의 속도로 코팅을 진행하였다.

턴 간 절연을 위해서 Nomex® 절연 종이로 3회 절연하였고, 극저온 절연파괴 시험 결과 절연 횟수에 따라 AC 0.1 % 절연파괴 확률 전압이 달라졌고, 각각 3.25 kV, 6.95 kV, 8.96 kV으로 나타났다. 송·배전급 변압기의 일반적인 턴 간 전압을 고려해 볼 때, 본 절연시험에서 확인된 절연파괴 확률 전압은 충분히 높은 것으로 판단된다.

### 감사의 글

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

### 참 고 문 헌

- [1] 이지광, 변상범, 한병욱, 박상호, 최석진, 김우석, 박찬, 최경달, "분할형 YBCO CC들을 전위한 적층도체의 수직 자화손실 저감 특성", 한국초전도·저온공학회, 11권 3호, 15 페이지, 2009년.
- [2] 김우석, 박상호, 이세연, 한병욱, 이지광, 이상화, 이방욱, 박찬, 송정빈, 이해근, 최경달, 한송엽, "Case design for an 154 kV, 33 MVA HTS power transformer", EUCAS2009, 2009년.
- [3] 이지광, 변상범, 한병욱, 김우석, 박상호, 최석진, 박찬, 최경달, "Reduction Effect on Magnetization Loss in the Stacked Conductor With Striated and Transposed YBCO Coated Conductor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 19, Issue 9, pp. 3340-3343, June 2009.



김영일(金榮一)

1984년 8월 30일생, 2009년 한국산업기  
술대 전자공학과 졸업, 현재 한국산업기  
술대 지식기반기술 에너지대학원 전기공  
학과 석사과정.



천현권(千賢權)

1978년 6월 2일생, 2004년 경상대 공대  
전기공학과 졸업, 2006년 동 대학원 전  
기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학  
원 전기공학과 박사과정.



김우석(金佑錫)

1970년 6월 12일생, 1996년 서울대학교  
공과대학 전기공학과 졸업, 1998년 동  
대학원 졸업(공학석사), 2002년 동대학원  
졸업(공학박사), 2006~2008 FBML/MIT  
Post Doc. Fellow, 현재 한국전력연구원  
선임연구원.



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대 공대  
전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전  
기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본  
오사카대학교 대학원 전기공학과 졸업  
(공학박사), 현재 경상대 공대 전기공  
학과 교수.



박상호(朴相浩)

1969년 2월 10일생, 1996년 한국해양대  
전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 졸  
업(공학박사), 현재 한국산업기술대 겸임  
교수.



이지광(李志光)

1966년 6월 1일생, 1989년 서울대 전기  
공학과 졸업, 1992년 동 대학원 전기공  
학부 졸업(공학석사), 1997년 동 대학  
원 전기공학부 졸업(공학박사), 현재 우  
석대학교 소방안전학과 교수.



박 찬(朴 燦)

1964년 4월 30일생, 1986년 서울대학교  
무기재료공학과 졸업, 1988년 동 대학원  
졸업(공학석사), 1996년 New York State  
College of Ceramics at Alfred University  
박사, 현재 서울대학교 재료 공학부 교수.



최경달(崔景達)

1962년 2월 12일생, 1984년 서울대학교  
공과대학 전자공학과 졸업, 1986년 동  
대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1993  
년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박  
사), 현재 한국산업기술대학교 에너지대  
학원 교수.



이세연(李世淵)

1979년 2월 25일생, 2008년 성균관대학  
교 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한  
국산업기술대학교 위촉연구원.