ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol.66, No.11, pp. 1651~1656, 2017
http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.11.1651

세라믹 코팅 Al 부스바의 열적·기계적 특성

Thermal and Mechanical Properties of Ceramic Coated Al Bus Bar

곽 동 순* · 백 승 명** · 곽 민 환†
(Dong-Soon Kwag · Seung-Myeong Baek · Min Hwan Kwak)

Abstract - This paper deals with the thermal and mechanical properties of ceramic coating material for bus bars. A ceramic coated samples were prepared for the mechanical properties test. There are two types of samples. One is a square shape and the other is a busbar shape. Each sample was deteriorated for 30 days to compare the thermal and mechanical properties with the non-degraded samples. Two thermal properties tests are TGA and flammability tests, and four mechanical properties tests are drop impact test, cross cut, tensile test, and bend test. The ceramic coating material was never damaged by impact and did not separate from aluminum in the cross cut test. In the tensile test, the breakage of the insulating material did not occur until aluminum fractured, and the breakage of the insulating material did not occur until the maximum load in the bending test. The decomposition temperature (melting point) of the ceramic coating material was higher than that of other epoxy insulators. This ceramic coating material is nonflammable and it has excellent fire stability.

Key Words : Bus bar, Ceramic coating material, Thermal and mechanical properties

1. 서 론

부스바(Bus bar)는 케이블과 같은 도체이지만 케이블보다 많은 양의 전기에너지를 전달할 수 있는 장점이 있기 때문에 전기에너지를 전달하는 매개체로 부스바를 많이 사용하고 있다. 부스바는 다양한 분야에 다각도로 공급되어 사용되고 있으며, 통상적으로 대전류가 흐르기 때문에 일정 크기의 부스덕트 안에 구비된다. 부스덕트 안에 구비되는 도체인 부스바에 전류를 통전시킬 경우 주울열이 발생하고 이 열로 인해 온도가 상승하며, 전류의 통전용량과 도체인 부스바의 사이즈는 부스바를 감싸고 있는 절연체의 허용온도 영역내에서 제한을 받아 결정되어 진다. 부스바의 절연 방식에는 사출커버 방식, 테이핑 방식, 열수축 튜브 방식 등이 있지만 표면에 에폭시 절연용 분체도료로 정전 스프레이 방식 또는 디핑 방식으로 코팅막을 형성함으로써 친환경적이고 장기간 사용에도 코팅막이 손상되지 않는 분체절연 방법이 보편화되고 있다.

부스바 절연에 사용되는 에폭시는 산업 전분야에 범용수지로 사용되고 있으며, 에폭시를 활용하여 절연하는 방법은 최근 에폭시 분체도장 방식이 일반적으로 사용되고 있다. 에폭시와 함께 폴리아미드계와 복합 재료를 결합하여 기계적 성능이 보장된 전기적 절연재료에 대한 연구가 진행 중에 있다[1]. 또한 부스바의 신뢰도 향상을 위해 절연재료인 에폭시 복합 절연체의 전기적, 기계적, 열적 특성 향상이 필수적이며 이를 위해 세라믹을 이용한 연구도 진행되고 있다[2-3]. 상용 에폭시 분체도료를 사용하여 유동침지법으로 절연코팅된 시험시편을 제작하여 열화조건에 따른 전기적, 열적 및 기계적 특성을 비교 분석하여 상용 에폭시 도료의 특성이 연구보고 되기도 하였다[4].

부스바는 동이나 은도금된 동을 이용하여 판형, 바형, 환형으로 제작되었으나, 최근에는 동보다 가격의 경쟁력을 갖추면서 가공성, 기계적 강도, 전도율 등을 고려한 알루미늄을 활용한 부스바의 개발연구가 진행 중이다. 부스바는 도체의 재질에 따라서 흐르는 전류의 값이 다르고 열적·기계적 특성이 다르기 때문에 알루미늄을 활용한 부스바의 개발에 열적·기계적 특성 연구는 필연적이라 하겠다.

따라서 본 연구에서는 전기적 특성이 향상된 세라믹 코팅 소재를 적용하여 알루미늄 부스바 시편을 제작하여 TGA (Thermo-Gravimetric Analysis) 시험, 난연성 시험을 통해 열적 특성과 낙하 충격 시험, Cross cut 시험, 인장 시험, 굽힘 시험을 통하여 기계적 특성을 연구하였다.

2. 시료 제작

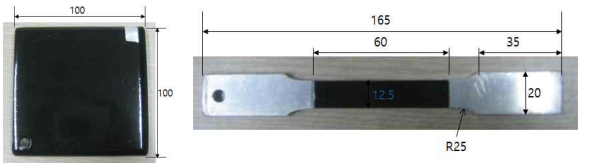
열적·기계적 특성을 향상시키기 위하여 새로운 세라믹 물질을 첨가한 세라믹 코팅재료를 개발하였으며, 세라믹 코팅재의 분석은 국제공인시험기관인 한국고분자시험연구소에서 실시하였다. 평균입자의 크기는 약 0.5~0.6μm로 성분구성은 주성분이 약 30%,

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Changwon Moonsung University, Korea.
E-mail: mhkwak@cmu.ac.kr
* Dept. of Fire Safety Engineering, KyungIl Univerity, Korea.
** Dept. of Electrical Engineering, Changwon Moonsung University, Korea.
Received : September 11, 2017; Accepted : October 20, 2017

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용매성분이 약 55%, Cabon black 약 4%, 무기성분이 약 11%이다. 그림 1에 열적·기계적 특성 연구를 위해 제작된 시편 나타낸다. 시편은 두 가지 형태로 제작되었으며, 하나는 알루미늄 판(100mm×100mm×12mm)을 이용한 것과 알루미늄 부스바(165mm×20(12.5)mm×5mm)를 이용한 것이 있다. 표 1에 시편에 따른 시험법을 나타낸다. 시편 절연을 위한 분체 고팅은 유동침지법을 응용한 적층 절연법이다. 그림 2에 각 시료의 절연체 두께를 측정한 부위를 나타내고 도막측정기(Model: QuaNix 4500)를 사용하였다. A형 시편은 앞면 8곳, 뒷면 8곳의 두께를 측정하였고, 측정 회수는 총 320회이다. 최저 두께는 54㎛, 최대 두께는 134㎛, 평균 두께는 90.03㎛이다. 시료 중심부의 절연두께는 70~100㎛ 정도로 비교적 균일한 절연두께를 나타내었다. 시료의 열화는 제작된 시료를 전기오븐을 이용하여 120℃ 분위기에서 30일 동안 가속열화를 하였고, 열화된 시료와 열화되지 않은 시료의 전기적 특성을 비교·분석하였다. B형 시편은 그림 2에서 보듯이 부스바 절연부분 ①, ②, ③번 부분의 앞뒤 면의 절연 두께를 총 30회 특정하였으며, 최저 두께는 58㎛, 최대 두께는 120㎛, 평균 두께는 88.8㎛이다. 표 2에 각 시편 별 측정 회수와 절연 두께를 나타낸다.



(a) Type A (b) Type B

그림 1 열적·기계적 시험 시편
Fig. 1 Test specimens for thermal and mechanical experiment

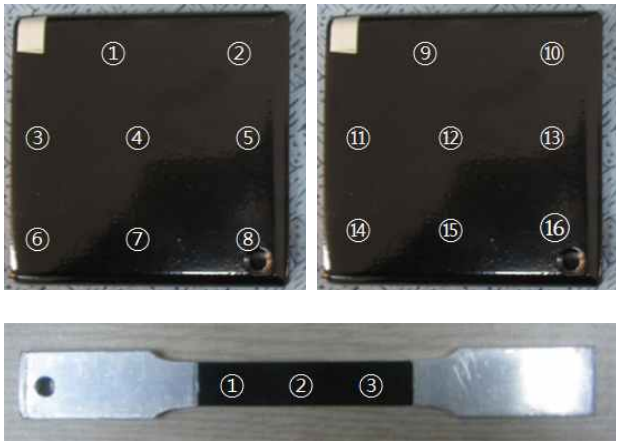


그림 2 두께 측정 시편
Fig. 2 Thickness measurement

표 1 시편 및 시험 종류
Table 1 Specimens and test types

구분	크기 [mm]	열화	시험 종류
Type A	100×100×12t	미열화	낙하충격시험, Cross cut, TGA분석, 난연시험
		30일 열화 (120℃ in air)	
Type B	165×20(12.5)×5t	미열화	인장시험, 굽힘시험
		30일 열화 (120℃ in air)	

본 연구는 한국산업규격에 준하여 실험이 진행되었으며, 표 3에 열적·기계적 특성 시험을 위하여 인용한 규격을 나타낸다. 기계적 시험은 낙하충격시험, Cross cut, 인장시험과 굽힘 시험이고, 열적 시험은 TGA(Thermo-Gravimetric Analysis)과 난연성 시험이다.

3. 열적 시험 방법 및 결과 고찰

3.1 TGA(Thermo-Gravimetric Analysis) 시험

절연체의 TGA 시험을 위해 알루미늄 부스바에서 절연체를 분리하여 7.2470mg의 절연물 시편을 적출하였다. 열 중량 분석기를 이용하여 600℃까지 10℃/min으로 온도를 상승시키면서 시편의 무게 변화를 측정하여 산화 안정성 및 열적 안정성을 분석하였다. 그림 3에 TGA 시험용 시편 사진과 그림 4에 TGA 시험 결과를 나타낸다.

TGA 시험 결과 알루미늄 부스바에 사용된 세라믹 코팅재에서 적출한 시편의 분해온도(녹는점)가 380℃로써 우수한 열적 특성을 나타내었다.

표 2 두께 측정 결과
Table 2 Thickness measurement result

타입	측정횟수 [회]	평균절연두께 [㎛]	Min. [㎛]	Max. [㎛]
Type A	320	90.03	54	134
Type B	30	88.8	58	120

표 3 열적 · 기계적 시험 항목별 한국산업규격
Table 3 Korean industrial standard by mechanical and thermal test item

구분	시험항목	인용규격
기계적 시험	낙하충격시험	KSMISO6272-1
	Cross cut	KSMISO2409
	인장 시험	KSB0802
	굽힘 시험	KSB0804
열적 시험	TGA	KSMISO11357
	난연성 시험	KSCIEC60331

그림 3 TGA 시험용 시편
Fig. 3 Specimen for TGA test

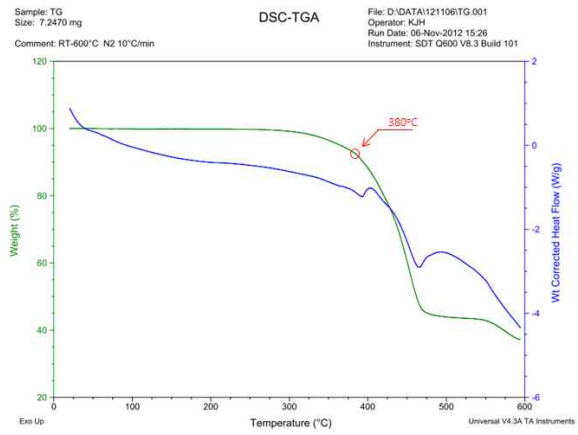


그림 4 TGA 시험 결과
Fig. 4 Result of TGA test

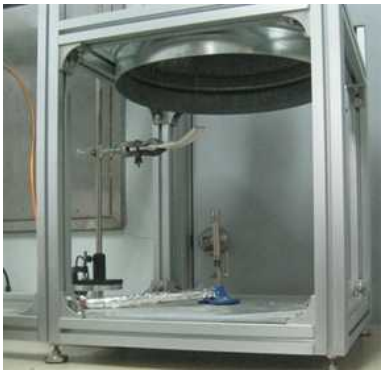


그림 5 연소 시험 장치
Fig. 5 Combustion test equipment

3.2 난연성 시험

난연성 시험을 실시하기 위하여 난연성시험법(KSCIEC60331)에 따라 연소 시험 장치를 사용하여 1,500℃의 열을 가열하여 절연재의 연소성 시험을 행하였다. 그림 5에 연소 시험 장치를 나타내고 그림 6에 연소 후의 절연재의 형상 사진을 보인다.

그림 6 연소 시험 후 형상
Fig. 6 Shape of sample after combustion test

그림 6에 보듯이 연소 시험 장치의 화염에 대해 절연재는 전혀 연소되지 않았음을 볼 수 있다. 또한 연소 시험 시 유해성 가스가 발생하지 않아 본 절연재는 불연성으로써 열적 특성이 매우 우수하고, 화재 안정성이 탁월하다고 판단할 수 있다.

4. 기계적 시험 방법 및 결과 고찰

4.1 낙하 충격 시험

낙하 충격 시험은 듀폰충격기를 사용하여 시편을 밑단에 고정시킨 후 추를 자유낙하로 떨어뜨려 시편의 깨짐 정도를 확인하는 것이다. 본 시험에서는 추의 무게는 1,000g, 높이는 643mm이고, 외경은 각 3.9mm, 6.9mm, 9.9mm이다. 그림 7에 낙하 충격 시험 방법을 나타내고, 표 4에 낙하 시험 후 형상을 나타낸다. 표 4에서 보듯이 미열화 시편이나 열화 시편이나 낙하 충격 후 절연재의 깨어짐, 파단, 박리 등 충격에 의한 손상이 발생하지 않았다.

1) 추 무게 / 곡률반경
추 무게 : 1,000g
높이 : 643mm
외경둘레: 3.9mm
자유낙하직접타격방식

2) 추 무게 / 곡률반경
추 무게 : 1,000g
높 이 : 643mm
외경둘레: 6.9mm
자유낙하직접타격방식

3) 추 무게 /곡률반경
추 무게 : 1,000g
높이 : 643mm
외경둘레: 9.9mm
자유낙하직접타격방식

그림 7 낙하 충격 시험 방법
Fig. 7 Drop impact test method

표 4 낙하 충격 시험 형상
Table 4 Shape of after drop impact test

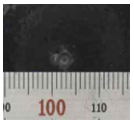
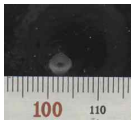
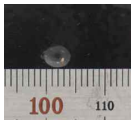
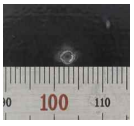
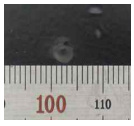
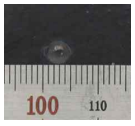
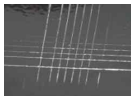
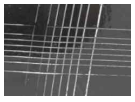
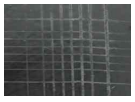
구분	Dia. of impactor		
	3.9mm	6.9mm	9.9mm
미열화			
30일 열화 (120℃ In air)			

표 5 Cross cut 실험 후 형상
Table 5 Shape of after Cross cut test

구분	Sample		
	#1	#2	#3
미열화			
30일 열화 (120℃ in air)			

4.2 Cross cut 시험

Cross cut 시험은 크로스 커터기를 이용하여 절연층의 접착력 시험을 시험하는 방법으로 탁상바이스에 시료를 고정한 후 크로스커터를 이용하여 시편을 상하로 긁고 90도 돌려 좌우로 긁어서 도체 표면이 노출되도록 커팅한 후 커팅면에 접착테이프를 부착시켜 몸쪽 방향으로 당김으로써 커팅 조각의 분리되는 개수를 확인 하는 시험이다. 그림 8에 Cross cut 시험 방법과 표 5에 시험 후 형상을 나타낸다. Cross cut 시험 결과 미열화 시편과 열화 시편 모두 절연재의 박리가 전혀 일어나지 않았으며, 열화에 대해 접착력 손상이 전혀 없음을 확인할 수 있다.

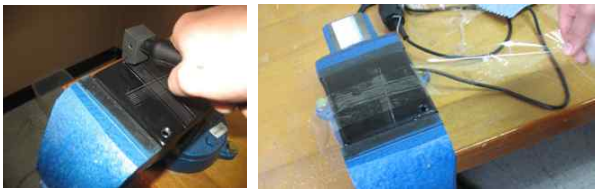


그림 8 Cross cut 시험 방법
Fig. 8 Cross cut test method

4.3 인장 시험

인장 시험은 인장피로시험기를 이용하여 코팅된 시편의 절연재의 인장 파단강도를 측정하는 것이다. 시험에서는 B형 시편을 인장피로시험기에 장착한 후 시편의 파단시까지 인장력을 가하여 시편과 절연재의 파단 특성을 분석하였다. 동일한 사이즈의 시편을 총 15개 제작하여 동일한 인장시험을 행하였다. 그림 9에 인장 시험 방법, 그림 10에 인장 시험용 시편, 그림 11에 인장 시험 결과와 그림 12에 파단 형상을 각각 나타낸다.

그림 9 인장 시험 방법
Fig. 9 Tensile test method

그림 10 인장 시험용 시편
Fig. 10 Specimen for tensile test

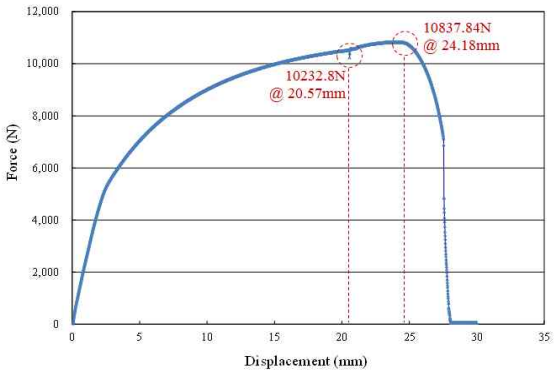


그림 11 인장 시험 결과
Fig. 11 Result of tensile test

그림 12 파단 형상
Fig. 12 Broken shape

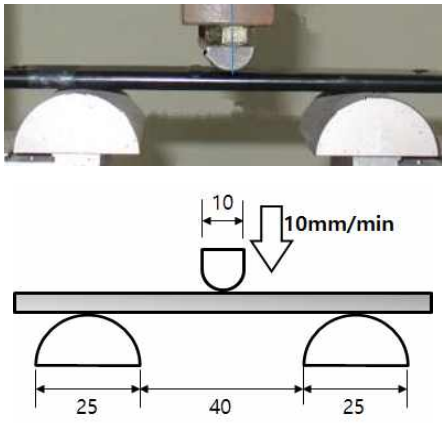


그림 13 굽힘 시험 방법
Fig. 13 Bending test method

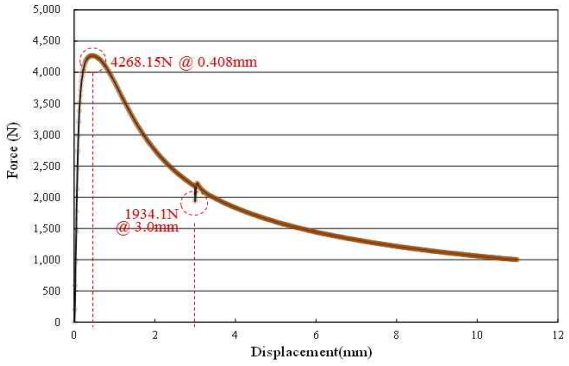


그림 14 굽힘 시험 결과
Fig. 14 Result of bending test

알루미늄 부스바 시료는 10837.84N에서 파단되었으며, 알루미늄 강도의 94.4%인 지점에서 코팅된 절연재의 박리 및 미약한 옅어짐(백화현상)이 발생하였나, 파단 흔적은 관찰되지 않았다. 코팅 절연재는 알루미늄 부스바에 잘 코팅되어서 인장 시험시 모재인 알루미늄에서 거의 분리되지 않았다. 알루미늄이 파단됨과 동시에 절연재가 파단 될 정도로 우수한 인장특성 및 연신율을 보였다.

4.4 굽힘 시험

굽힘 시험은 굽힘 시험기를 이용하여 코팅된 절연재의 굽힘

그림 15 굽힘 시험 후 형상
Fig. 15 Shape of sample after bending test

파단강도를 측정하는 것으로, B형 시료를 굽힘 시험기(Zwick Material test 1494)를 이용하여 10mm/min의 속도로 굽힘을 하였다. 총 15개의 시료에 대하여 동일한 시험을 실시하였다. 그림 13에 굽힘 시험 방법, 그림 14에 굽힘 시험 결과와 그림 15에 굽힘 시험 후 형상을 각각 나타낸다.

굽힘 시험 결과 최대하중에서 절연재의 파단이 발생하기 않고 에폭시 분체의 경우 하중 750N에서 도막의 크랙과 동시에 전체 파단이 발생하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 부스바용 세라믹 코팅제를 개발하여 두 가지 형상의 알루미늄 부스바 시료를 제작하고 TGA 시험, 난연성 시험, 낙하 충격 시험, Cross cut, 인장 시험, 굽힘 시험을 통해 열적·기계적 특성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

개발된 세라믹 코팅제는 입자의 평균 크기가 약 0.5~0.6μm로 주성분이 약 30%, 용매성분이 약 55%, Cabon black 약 4%, 무기성분이 약 11%로 구성되어 있다.

알루미늄 부스바에 사용된 세라믹 코팅재의 분해온도(녹는점)가 380℃로써 우수한 것으로 나타났다. 연소 시험을 통하여 세라믹 코팅재는 연소하지 않고, 유해가스도 발생하지 않는 재료로 열적 특성이 매우 우수하였다.

낙하 충격 시험에서 세라믹 코팅재는 충격을 받아도 파단, 박리 등이 발생하지 않았고, Cross cut 시험에서도 박리가 일어나지 않아 모재인 알루미늄과 접착력이 아주 우수한 것으로 나타났다. 인장 시험에서 모재인 알루미늄 강도의 94.4%에서 박리 및 백화현상이 나타났지만 파단은 알루미늄과 함께 발생하였다. 굽힘 시험을 통해 최대 하중에서도 절연재는 모재에서 박리, 파단이 발생하지 않았다.

위의 결과를 종합하였을 때 세라믹 코팅소재의 열적·기계적 특성은 매우 우수하다는 결론을 얻었다.

References

[1] Skale S., Dolecek V., and Slemnik M., "Electrochemical impedance studies of corrosion protected surfaces covered by epoxy polyamide coating systems," Progress

in Organic Coatings, Vol. 62, No. 4, p. 387, 2008.
[2] K. Strzelec and P. Pospiech, “Improvement of mechanical properties and electrical coductivity of polythiourethane-modified epoxy coatings filled with aluminium powder”, Progress in Organic Coatings, Vol. 63, Issue 1, p. 133, 2008.
[3] ATD · ASTM, “Standard Test Method for High-voltage, Low-current, Dry Arc Resistance of Solid Electrical Insulation”, American Society for Testing and Matericals, D 495-99, p. 1, 1999.
[4] Sang-Hyun Kim, Jin-Wook Choi, Dong-Wook Kim, and Hyun-Hee Kim, “A Study on the Electrical and Mechanical Properties of a Epoxy Powder for Compact Bus Duct,” Journal of the KIEEME, Vol. 22, No. 3, pp.210-217, March 2009.

저 자 소 개

곽 동 순(Dong-Soon Kwag)

2002년 경상대학교 전기전자공학부 졸업(공학사). 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2004년 경상대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2011~2012년 Research Scholar, Center for the Advanced Power Systems. 2008년~현재 경일대학교 소방방재학과 교수.

백 승 명(Seung-Myeong Baek)

1998년 경상대학교 전기공학과 졸업(공학사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2005년~현재 창원문성대학교 전기공학과 교수.

곽 민 환(Min-Hwan Kwak)

1995년 경상대학교 전자재료공학과 졸업(공학사), 1998년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학석사), 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2002~2012년 한국전자통신연구원 선임연구원. 2012~현재 창원문성대학교 전기공학과 교수.