

부스닥트용 내열성 에폭시 분체도료의 절연 및 열화 특성 연구

강철화¹, 박지군², 박종규³, 주현돈¹, 김현희^{1,a}

¹ 한국국제대학교 소방방재학과

² 한국국제대학교 방사선학과

³ 경남도립남해대학 전기과

A Study on the Insulation and Electrical Degradation Properties of Heat Resistance Epoxy Powder for Busduct

Cheolhwa Kang¹, Ji-Koon Park², Jong-Kyu Park³, Hyun-Don Ju¹, and Hyun-Hee Kim^{1,a}

¹ Department of Fire & Disaster Engineering, International University of Korea, Jinju 660-759, Korea

² Department of Radiological Science, International University of Korea, Jinju 660-759, Korea

³ Department of Electricity, Gyeongnam Provincial Namhae College, Namhae 668-801, Korea

(Received August 12, 2013; Revised August 19, 2013; Accepted August 23, 2013)

Abstract: Reported here are results of the mechanical and electrical properties of both of intact and thermally degraded epoxy-coated copper busducts that are made by fluidized bed process. To elucidate and compare the properties mentioned above, electrical breakdown by thermal and water aging, v-t characteristic, bending test, impact test and cross cut test are carried out. Although the performance of electrical and mechanical properties are gradually decreased in increasing the severe conditions such as temperature, aging time, and so forth, sample C has a better performance in both mechanical and electrical properties.

Keywords: Compact busduct, Epoxy powder, Fluidized bed process, Degradation, Breakdown strength

1. 서 론

최근 대규모화 되고 있는 고층 빌딩 및 산업현장의 전력 공급에 있어서 각 부하로 많은 회선수를 요하는 전력 cable 보다는, 한 선로로 많은 대전류를 수송하면서 부하 가까이에서 간편하게 분기해 공급할 수 있는 부스닥트 배전 시스템이 효율적이고 유리할 수 있

다 [1-3].

부스닥트는 Bar 타입의 알루미늄이나 구리 도체에 PET film, PVC 압출튜브, 에폭시 등으로 절연한 뒤 금속 (Al) 보호 닥트 내에 설치 운영하는 형태로 cable과 유사하나 동일 단면적을 가정했을 때 전류 전송량이 상대적으로 크다는 장점이 있다 [4]. 부스닥트는 크게 절연물에 의해 절연이 되는 밀착형 (compact) 저압 부스닥트 (<1 kV)와 공기절연을 기본절연으로 하는 고압 부스닥트 (<36 kV)로 구분되며, 현재 전류량이 큰 저압용 밀착형 부스닥트의 수요가 증가하고 있다.

초기 밀착형의 절연방식으로는 PET film 혹은 PVC 압출튜브 형태가 주를 이루었지만, 절연등급의

a. Corresponding author; sky6905@hotmail.com

한계 (대부분 class E-최대 110℃)로 인해 도체의 단면적이 증가하고, 우수한 절연재질의 개발과 더불어 epoxy (class B-130℃)의 적용이 가능하게 되었다. 에폭시 코팅방식의 경우 단면적 축소와 더불어 원가 절감이 유리하므로 절연성능 향상 (class F-155℃)에 초점을 둔 연구 개발이 진행 중이다 [5].

에폭시 수지는 접착성, 탄성률, 부식에 대한 저항성, 인장강도, 내열성 등이 우수하여 접착제, 전기 절연재, 코팅, 고기능 복합재료의 매트릭스 등으로 산업 전반에 걸쳐 활용되고 있다 [6,7]. 최근에는 에폭시-폴리아미드계 코팅에 대한 열화 개선을 위한 연구 [8]와 에폭시 복합재료를 통한 전기적·기계적 특성 향상 연구 [9]가 진행되고 있다. 특히 밀착형의 경우, 유동침적방식 (fluidized bed process) [10,11]에 의한 에폭시 분체형 코팅방식을 적용하여 생산성 및 품질의 균일성 향상을 가능케 하고 있다.

부스닥트의 운용 상태를 고려한 수명 및 신뢰도 향상을 위해서는 가속열화를 통한 에폭시 분체 코팅방식의 전기적 특성 변화와 이에 대한 절연 특성 연구 [12]가 요구된다. 또한 부스닥트 system은 3 m 이하의 본체 단품과 접속 Kit 그리고 엘보 등을 이용하여 연결 설치하기 때문에 작업 및 운반 중에 발생할 수 있는 기계적 충격과 진동으로 문제가 된다. 따라서 에폭시의 충격흡수 및 기계적 굴곡률도 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 BPA (Bisphenol A)를 주재료로 한 내열성이 향상된 에폭시 분체도료 국산 개발제품 3종과 수입산 상용제품 2종을 절연 코팅하여 시험시편을 제작하고 수분열화에 따른 전기적 특성과 기계적 특성 변화를 비교 검토하였다. 이를 토대로 분체도료의 절연 특성 향상을 위한 기초 자료를 제시하였다.

2. 실험 방법

에폭시 분체도료의 전기적 특성 시험을 위한 시험시편의 제작과정을 그림 1에 나타낸다. 여러 다른 크기로 절단된 구리 기판 (108 mm × 108 mm × 6.35 mm, 195 mm × 41 mm × 6.35 mm, 73 mm × 73 mm × 6.35 mm)을 산세척 후 에틸알코올 (99.9%)에 함침하여 초음파 세척을 통해 불순물을 제거하였다. 금속기판을 전기로에서 200℃에서 20분 간 가열하였으며, 이때 비접촉식 적외선 온도계를 통해 확인하였으며 온도의 오차는 ±5% 이하였다. 가열된 기판을 수직 방향으로 유동조에 함침하였다.

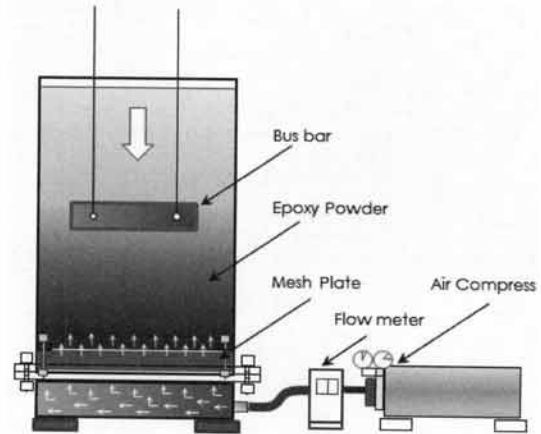


Fig. 1. Experimental setup epoxy powder coating.

그림 1에 유동침적법을 이용한 에폭시 분체도료의 코팅방법을 보여주고 있으며, 본 실험에 사용된 유동조는 스테인리스 원통형의 구조물 하단에 미세한 mesh형 다공판 구조로 설계되어져 있다.

유동조 하단의 주입구에서 외부 공기를 에어 콤프레서를 통해 주입하여 유동조 내의 에폭시 분체의 일정한 유동을 발생시킨 후 가열된 구리 기판을 수직으로 5초 간 침적시켜 코팅하였다. 상기의 방식으로 제작된 시료는 국내외 5개 사의 에폭시 분체도료를 이용하였으며, 기본적 물성의 특성은 표 1에 나타내었다. 측정된 각 시편은 20개 이상이며 코팅의 두께는 그 평균값으로 하였다.

에폭시 절연재료의 기본적인 물리적, 화학적 특성은 사용되어지는 에폭시 주재료 및 경화제의 종류, 경화 조건 등에 의하여 결정되며 실제 운전 시 주위 환경에 의해 (수분의 영향, 연수에 의한 영향) 크게 좌우된다. 고분자가 습한 환경에 장기간 노출될 경우 물 분자는 고분자 매트릭스에 침투하여 본연의 고분자 특성을 감소시킬 수 있다 [7]. 따라서 수분에 의한 시편의 화학적, 기계적, 전기적 특성 변화는 부스닥트의 실용적 적용에 주요한 변수로 작용할 수 있으며, 실제 운전 중에서 발생 가능한 핵심적인 문제를 검토하기 위해 열적인 가속열화 및 수중열화를 통해 각 시편의 전기·기계적 특성을 검토하였다.

본 실험에서는 열적 가속열화 및 수중열화를 통한 전기적, 기계적 특성을 미열화 샘플과 비교 분석하였다. 전기적 특성은 1) 절연 파괴 전계 2) V-t 수명특성을 사용하였으며 기계적 특성으로는 1) bending test 2) cross cut 3) impact test 4) 압출 실험 특성을 화학적 특성으로는 TGA 및 DSC를 통한 T_g 및 T_m 을 측

정하였다. 열적인 열화를 위해 유동침적법으로 만든 각각의 시편을 전기오븐기에 120℃로 20일, 40일, 60일 간 유지하여 가속열화를 했으며, 수중 가속열화를 위해서는 전기 가열 용기에서 80℃의 수중에서 동일 기간 동안 침적시켰다. 이와 같이 가속 열화된 시편들에 대한 전기적 및 기계적 특성을 검토함으로써 국산 에폭시 절연재료의 특성에 대한 기초 데이터를 확보하였다.

3. 결과 및 고찰

표 1은 열화 되지 않은 국내외 에폭시 분체도료의 교류 절연파괴 전계 값을 나타내었다. 절연파괴시험은 한국산업규격 (KS)에 따라 반구 (φ25 mm)-평판 (φ75 mm)전극을 사용하였다 [9].

Table 1. Properties of sample.

Sample Division	Domestic			Foreign	
	A	B	C	D	E
Cure Temp./Time	200℃ /20 min	200℃ /40 min	200℃ /20 min	200℃ /20 min	200℃ /20 min
Coating Color	glossyblack	black	black	green	sky blue
Thickness	570 μm	558 μm	574 μm	659 μm	773 μm
Averaged breakdown voltage	18.6 kV	19.6	21.0	24.3	19.2
Breakdown field	31.3 kV/mm	33.3 kV/mm	35.0 kV/mm	34.6 kV/mm	27.4 kV/mm

Table 2. Analysis of DSC & TGA.

Sample Name	Glass Transition Temperature[℃]	Weight Loss Temperature[℃]
A	107	385
B	108	380
C	115	380
D	118	360
E	101	320

표시된 데이터는 동일한 조건에서 10회 이상 실험값을 최소자승법에 의해 표시하였다. 전체적으로 외국

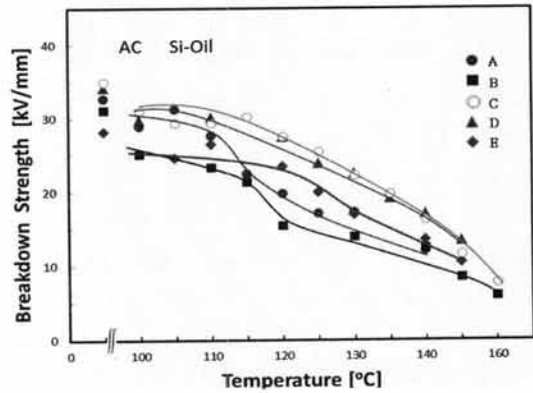


Fig. 2. AC Breakdown dependence on Temperature.

산 E를 제외한 다른 에폭시 분체도료는 30 kV 이상의 절연파괴전계를 보였으며 E의 경우 코팅 평균 두께가 상대적으로 두꺼워 절연파괴전계가 낮게 나타난 것으로 보인다. 에폭시 수지는 균일하거나 순수한 유전체가 아님으로 두께 변화에 무관한 자성파괴가 아니며 전자사태 (electron avalanche)에 의한 고체 구조의 파괴에 의한 절연파괴가 일어남으로 두께에 민감할 수밖에 없다. 시편 E의 경우 다른 시편에 비해 17~38% 더 두껍기 때문에 절연파괴 전계가 낮게 나타난다.

그림 2는 온도 의존성에 대한 AC 절연파괴를 나타내었다. 실험 결과로 부터 160℃ 이내에서 국내산인 C 시편이 절연파괴 전압이 가장 높았으며, 다음으로 외국산인 D, E 시편이 높게 나타났으며 국내산인 A, B는 낮은 온도인 110~120℃ 근처에서 급격한 절연파괴 전압이 하락을 보이고 있다. 일부 A, B 시편의 경우 온도가 증가함에 따라 표면에 미세하게 굴 껍질 같은 pimple 현상이 나타났으며 급격한 절연파괴 전압의 원인으로 사료된다. 모든 시편은 온도가 증가함에 따라 전반적으로 절연파괴 전압이 감소함을 보였다. 그 원인으로서는 외부 열에너지에 대한 에폭시 수지의 결합력 약화에 의한 거동으로 예상된다. 구리/고분자 계는 전반적으로 다른 금속에 비하여 상대적으로 접착력이 약한 것으로 알려져 있으며 [13], 이것은 구리나 구리 산화물로 인한 고분자의 퇴화, 구리의 부식으로 인한 접착력의 약화, 고온 과정을 거치는 동안 흡수한 수분의 증기화에 의한 구리/에폭시 간의 계면에서의 층 분리 발생 등의 문제 때문이다. 또한 온도 의존성에 대한 AC 절연파괴는 에폭시 수지의 유리전이온도 (Tg)와 밀접한 관계를 가지고 있다.

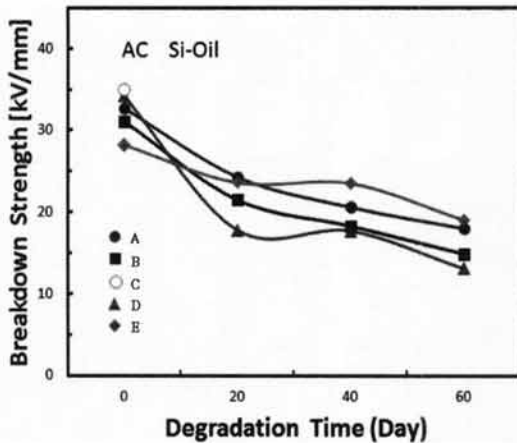


Fig. 3. AC breakdown depend on aging time.

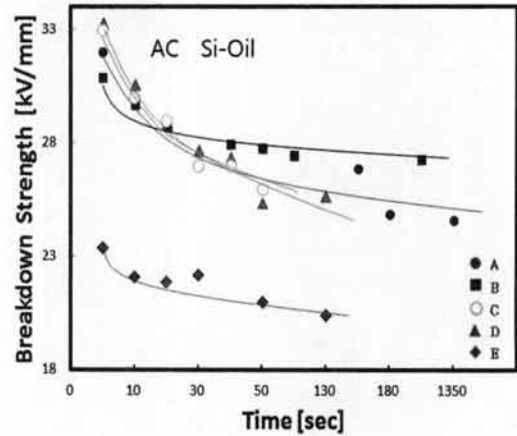


Fig. 4. V-t characteristics on degradation.

따라서 각 시편의 유리전이온도를 파악하기 위해 DSC (Q200, TA Instrumnets사 USA) 분석과 분해 온도 측정을 위해 TGA (Q600, TA Instruments사 USA) 분석을 실행하였으며, 이에 대한 결과를 표 2에 표시한다. 각 시편의 경우 온도에 대한 절연파괴 전압은 Tg 부근에서 하강하기 시작하여 온도의 증가에 대해 더욱 급격히 하락하는 경향을 보인다.

부스닥트는 수분과 온도에 대한 영향으로 인해 에폭시 절연재료의 중요한 열화 요인으로 보고되고 있다 [10,11]. 따라서 실제 운용을 위해 가속열화를 시킨 뒤 각 시편의 특성을 비교하였다. 시편의 흡습을 위해 전열기가 부착된 스테인리스로 제작된 용기에 증류수를 넣고 제작된 시편을 침적시켰으며, 온도는 80℃로 유지하였다.

그 결과 각 시편은 표면의 색상 변화와 더불어 열화 시간이 진행될수록 기포의 형상과 개수가 변화되었다. 기포의 개수는 열화 시간에 반비례하여 비록 줄어들었지만 기포의 직경은 점점 크게 변화되었다. 이는 초기 열화에 생성된 작은 기포가 흡습에 의해 크기가 증가하면서 주위의 작은 기포와 합체됨으로써 개수는 오히려 줄지만 직경은 커지는 결과를 나타내었다. 시각적으로 관찰하였을 때, 국내산의 경우 색상이나 표면에 큰 변화가 발견되지 않았지만, 외국산의 경우 현저한 차이를 보였다. 시편 D의 경우 대부분의 시편에서 색상이 변색되는 현상 (녹색이 갈색으로)을 보였으며 다수의 시편에서 crack을 볼 수 있었다. 시편 E의 경우 crack 현상은 발견되지 않았지만 색상이 현저하게 변색 (하늘색이 진한 녹색으로)되었다. 열화에 의한 교류 절연파괴 전계 실험에서는 crack이 발견된

시편은 실험에서 제외시켰다.

그림 3은 에폭시 분체도료의 80℃의 수중에서 장기간 열화에 따른 교류 절연파괴 전계 값을 보여주고 있다. 수중 열화시킨 시편의 경우 대부분의 시편이 열화 기간의 경과에 따라 외형상 변화뿐만 아니라 절연파괴 전계 값도 큰 폭의 감소를 보였다. A, B 시편의 경우 열화 시간에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 보였으며 상호 간의 AC 절연 전계 값의 차이가 열화 시간에 따라 큰 변화를 보이지 않았다. 시편 D의 경우 A, B 시편에 비하여 20일 간의 열화 기간 동안 급격한 전계 값의 변화를 보였으며 그 값 또한 가장 작았다. 20일 이후에는 큰 변화를 보이지 않았지만 점진적으로 감소하는 경향을 보였으며 수분에 가장 민감한 시편으로 보였다. E 시편은 AC 절연 전계 값이 크지는 않지만 열화 기간에 따른 변화폭이 가장 작았으며, 40일 간의 열화 기간 이후에는 가장 큰 절연파괴 전계 값을 보였다. E 시편이 가속 수중 열화에서 가장 안정하였다. 전기적 절연 및 열화통계에서는 Weibull 분포를 많이 취하고 있다.

그림 4에 에폭시 절연체의 수명 특성을 나타내었다 [12]. 본 실험에서는 구-평판의 준 평등전계를 구성하고 연면방전을 막기 위해 Si-oil 내에서 AC 전압을 인가하였다. 수명실험의 데이터는 인가전압의 20 점 이상의 결과를 취했다. 또한 각 시편의 인가전압의 경우 예상되는 절연파괴 전계 95%~65% 사이의 전압을 인가하여 절연파괴가 발생하는 시간을 측정하였다. 실험결과 절연파괴 전계 값은 10초 이내에 소폭의 감소를 보였으며 그 이후 그 값은 거의 변화가 발생하지 않아 우수한 특성을 보였다.

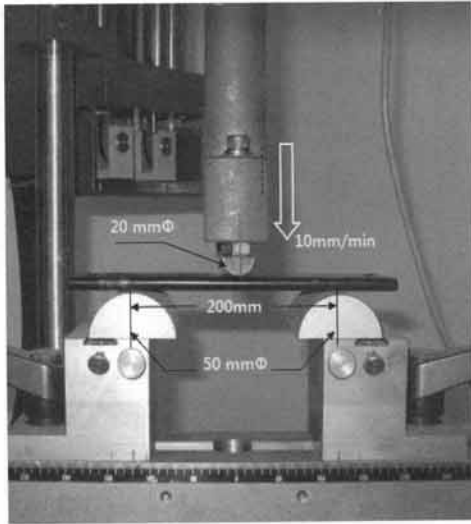


Fig. 5. Apparatus for bending test.

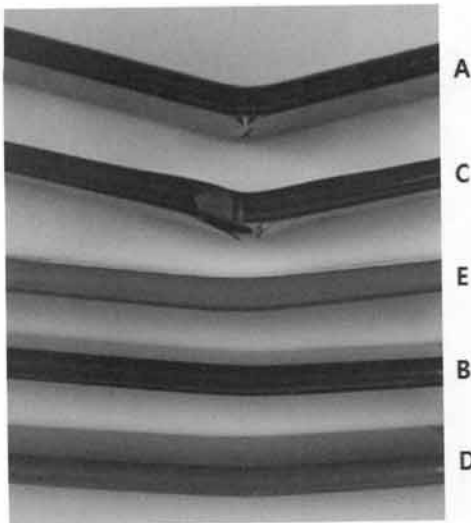


Fig. 6. Stress-strain of epoxy insulation.

10초 이내에 B 시편이 가장 급격한 변화를 보였으며 나머지 시편은 완만한 감소를 보였다. 국내산인 A, B 시편이 가장 긴 수명을 보였으며 시편 C가 가장 짧은 수명을 보였다. 본 실험에서는 기계적 영향 평가를 위해 기계적 스트레스와 충격 등에 대한 시험을 실시하였다.

그림 5는 기계적 굽힘의 측정을 위한 기계장비를 나타내었다. 사용된 시편은 (195 mm × 41 mm × 6.35 mm) 구리 부스바 형태의 도체에 동일한 유동침적법을 통해 제작되었다. 밴딩 시험은 Zwick사의 Material test 1494를 사용하였으며, 하부에 고정된 시편의

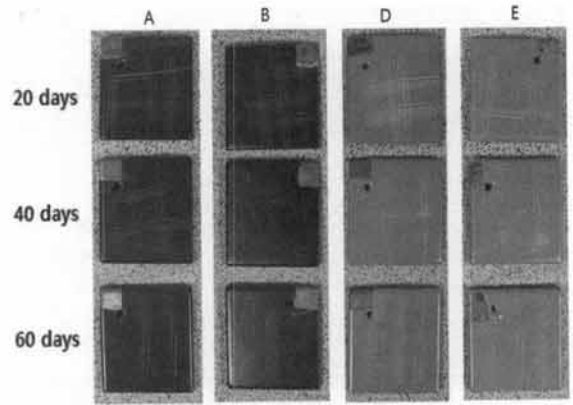


Fig. 7. Cross cut test.

Table 3. Mechanical bending stress and strain.

Sample	Domestic			Foreign	
	A	B	C	D	E
Intact	5.2 kN	5.2 kN	5.4 kN	4.6 kN	5.6 kN
	14.5 mm	6 mm	13 mm	4.2 mm	5.4 mm
Degradation for 60days	4.8 kN	4.5 kN	5.4 kN	4.8 kN	4.7 kN
	6.1 mm	4 mm	7 mm	4.2 mm	4.5 mm

받침대는 직경이 $\phi 50$ mm의 원통형 고정자를 사용했으며, 고정자의 중심에서 부터의 간격은 120 mm로 두고 상부 압입자 ($\phi 20$ mm)를 10 mm/min 속도로 진행하여 시편 중심부에 기계적 stress를 가하였다. 그 결과 열화되지 않은 A 시편의 경우 5,200 N의 압력과 14.5 mm의 변형률에서 코팅의 crack과 동시에 전체 파단을 관측할 수 있었으며, 수중 60일 경과된 시편의 경우 4,800 N의 압력과 6.1 mm의 변형률에서 파단이 발생하였다. 즉, 수중열화로 인해 기계적 굽힘 강도가 절반 이상 줄었으며 C 시편 역시 비슷한 경향을 보였다. 그러나 시편 B, D, E의 경우 전체적으로 낮은 굴곡 강도를 나타냈으며 수중열화로 인하여 기계적 굽힘 강도가 조금 혹은 거의 변화가 없었다.

또한 에폭시 절연체의 접착력시험을 위해 cross cut 시험을 실시하였으며, 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 구리 금속에 주석 도금을 처리한 뒤 에폭시 코팅 처리된 시편을 cross cutting용 6날 장치를 이용하여 수동으로 교차 시켰으며, 이때 발생한 좌우 25 개의 cell에 접착테이프를 통해 시험하였다. 20, 40, 과 60일 동안 수중 열화를 한 모든 시편에 탈거 현상은 일어나지 않았다.

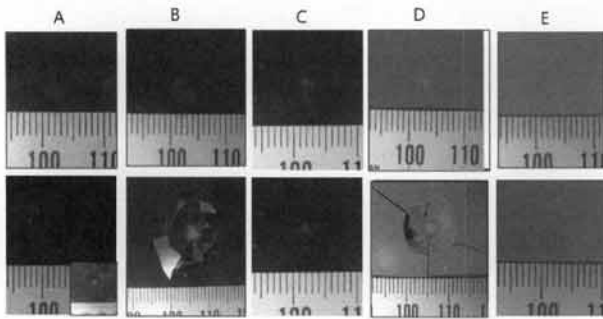


Fig. 8. Epoxy insulation of impact test.

Class-B 시편의 경우 수중 열화 시 대부분의 시편에서 탈거가 일어난 것에 비해 [14] 본 실험에서는 전혀 탈거가 일어나지 않았다. Class-B의 경우 에폭시 수지의 흡습 특성에 의한 기포 층의 발생이 구리의 산화막을 형성하고 산화막이 코팅의 접착력을 현저히 떨어뜨리는 것으로 판단되어 진다. 그리고 외부 충격에 의한 에폭시 절연재료의 특성을 비교하기 위해 자유 낙하를 이용한 Dupont impact 시험을 하였으며, 시험 후 표면의 형태 사진을 그림 8에 나타내었다. 사용되어진 Dupont impact 시험기는 1,000 g의 추를 50 mm 수직 낙하시켜 곡률반경 1/8" punching pin에 가격하였다. 그 결과 각 시편은 직경이 5 mm 정도의 원형 crater 형상과 더불어 crack이 발생되었다. 시편 B와 D의 경우 비교적 큰 crater와 더불어 움기된 가장자리에서 다소 많은 crack이 발생되었으며, 수중열화의 경우 움기의 높이와 크기가 큰 것을 관측하였다. 시편 A의 경우 일부 시편에서 crack이 발견되었으며 시편 C와 E에서는 미열화 및 수중 열화 모두에서 crack이 발견되지 않았다. 시편의 굴곡 강도는 그림 6에서 보듯이 $A > C > E > B > D$ 순으로 B와 D의 굴곡강도가 가장 낮게 나타났으며 이와 관련하여 B와 D시편의 충격강도 또한 낮게 나타났다. 이는 B, D 시편에 무기충진제가 다량 포함됨에 따라 기포의 유입이 많아졌고 수지와 충진제 사이에 계면 접착이 보다 불완전하게 이루어져 외력을 받았을 때 충격흡수가 원활하게 이루어지지 않고 결합 부위에서 crack 형성이 촉진되는 것으로 추정된다. 굴곡강도가 약한 이유 또한 시편이 굴곡하중을 받았을 때 응력의 분산을 무기충진제의 차단효과로 인하여 전체적으로 이루지 못하기 때문이다. 한편 굴곡강도 및 충격 강도 모두 뛰어난 성능을 보인 A, C 시편의 경우 충진제의 이러한 단점을 보완하기 위해 장쇄 환형 체인의

반응성 희석제를 첨가했을 것으로 보인다. 희석제를 첨가했을 때 충격강도 및 굴곡 강도가 증가하는 이유는 가교 단위가 큰 거대 그물 구조가 경화물 전체에 형성되어 재료가 외부로부터 충격력을 받았을 때 힘의 분산이 보다 광역적으로 이루어져 힘의 집중을 막아주기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 국내에서 개선 개발된 콤팩트 부스 닥트용 에폭시 분체도료의 다양한 열화조건에 따른 전기적·기계적 특성을 외국산과 비교, 분석하였다.

1. 에폭시 분체도료의 경화온도 및 시간, 표면상태, 수중열화 조건에서 국산 C시편이 외국산 제품에 비해 열화에 대한 전기적 특성 변화폭이 안정적이었다.
2. 온도 변화에 따른 절연내력 시험에서도 유리전이 온도 (T_g) 이전까지 안정적인 것으로 조사되었다. 시험시편 A, B, E의 경우 T_g 근처에서 급격한 절연내력의 감소가 시작되었다.
3. 수명 특성 ($V-t$)에서도 안정적인 절연특성을 유지하였으며, 열화 시간에 대한 절연과피 실험에서도 안정적인 특성을 유지했다.
4. 밴딩시험, 부착시험 및 충격 시험 등과 같은 기계적 시험의 경우에서 국산 시편 C의 특성이 비교되는 외국산 시편에 비하여 동등 혹은 월등한 성능을 보였다.
5. 5종의 에폭시 분체도료 제품의 열화에 대한 전기적·기계적 특성을 비교해 볼 때 국산 C 시편의 성능이 우수한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2011년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며, (No. 2011-0014287) 정기재 학생의 도움에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] K. C. Agrawal (Elsevier, 2001) p. 916
- [2] Kumar, G.V.N. Amarnath, J. Singh, and B. P.

- Chowdary (India Conference, 200, Annual IEEE/2, 2008) p. 465.
- [3] A. M. Matawie and E. M. Sadek, *Polym. Adv. Technol.*, 10, 223 (1999).
- [4] J. H. Bae and H. J. Kim, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers B*, 55, 628 (2006).
- [5] S. Skale, V. Dolecek, and M. Slemnik, *Prog. in Organic Coatings*, 62, 387 (2008).
- [6] K. Strzelec and P. Pospiech, *Prog. in Organic Coatings*, 63, 133 (2008).
- [7] C. Maggana and P. Pissis, *J. Polym. Sci.: Part B, Polym. Phys.*, 37, 1165 (1999).
- [8] B. S. Lee, I. K. Song, J. B. Lee, and S. O. Han, *J. KIEEME*, 16, 1136 (2003).
- [9] KS C IEC 60243-1, 2 (2002).
- [10] G. Z. Xiao and M. E. R. Shanahan, *J. Polym. Sci.: Part B, Polym. Phys.*, 35, 2659 (1998).
- [11] R. A. Perthric, E. A. Holins, I. McEwan, E. A. Pollock, and D. Hayward, *Polymer International*, 39, 275 (1996).
- [12] J. S. White, *Technometrics*, 11, 373 (1969).
- [13] V. Ashworth and Fairhurst, *J. Electrochem. Soc.*, 124, 506 (1977).
- [14] S. H. Kim, J. O. Choi, D. O. Kim, and H. H. Kim, *J. KIEEME*, 22, 210 (2009).