

논문 22-3-4

컴팩트 부스덕트용 에폭시분체도료의 전기적·기계적 특성연구

A Study on the Electrical and Mechanical Properties of a Epoxy Powder for Compact Bus Duct

김상현¹, 최진욱¹, 김동욱², 김현희^{3,a}

(Sang-Hyun Kim¹, Jin-Wook Choi¹, Dong-Wook Kim², and Hyun-Hee Kim^{3,a})

Abstract

Insulated methods of compact bus duct has been applied a way of coating Epoxy powder. The problem which is caused by degradation during operation is very important in severe environment. Therefore, this study compared and verified many kind of properties ; electrical breakdown by thermal and water aging, v-t characteristic, arc discharge, mechanical properties, bending test and cross cut. Sample D was stable before the Tg to be about 7~10 % decrease in the breakdown test according to temperature change. In case of V-t and arc discharge, it had been kept up suitable characteristic. Also, in case of electrical and mechanical characteristic, both sample D and A have excellent capacity.

Key Words : Bus duct, Epoxy powder, Degradation, Breakdown strength, Crack

1. 서론

최근 대형화된 건축물 시스템으로 인해 대용량의 에너지를 필요로 하고 있으며, 이에 대한 건축물 및 대용량 기기의 효율적이고 콤팩트한 전력 공급이 매우 중요하다. 이러한 요구에 의해 부스덕트(Bus Duct)는 기존의 전력 케이블과 같이 전력을 공급하는 매개체로서 구조가 비교적 단순하고 에너지의 손실성과 경제성 등의 다양한 장점으로 대규모 공장 및 빌딩, 아파트, 연구단지, 소평물, 신공항, 조선험만 등의 다양한 분야에 다각도로 공급되고 있다.

부스덕트는 지중송전 케이블과 유사한 도체와 절연체로 구성되어 있으며, 이들을 체결하고 외부로부터의 보호를 위한 금속덕트(Steel Housing)를 갖고 있다. 즉 아연도금강판인 금속덕트 내에 E중

(120 ℃)인 에폭시(Epoxy) 절연체를 도장(coating)한 알루미늄(혹은 구리)도체들을 접합시킨 구조이다[1]. 일반적인 부스덕트 도체의 절연방법은 얇은 고분자필름을 여러 겹 감고 테이핑으로 마무리하는 절연하는 방식과 에폭시 분체도료를 이용한 유동침적법으로 절연하는 코팅방식으로 적용하고 있으나, 제작공정의 자동화로 인한 경제성뿐만 아니라 규격성의 이유로 점차 에폭시 분체도료를 코팅하여 절연 방식이 보편화되어가고 있는 추세이다[2].

에폭시 수지는 도료, 전기, 토목, 건축, 접착 등 산업 전 분야에 걸쳐 사용되는 범용 수지로서 주로 아민 또는 산 무수물 등의 경화제와 함께 사용되고 있으며, 이들 분야에 대부분은 내 용제성(solvent resistance properties)과 내 화학성(chemical resistance properties), 내식성(corrosion resistance) 등의 물성이 우수한 용제형(solvent-based coating)이 적용되고 있다[3,4]. 최근에는 에폭시-폴리아미드계 코팅에 대한 열화 개선을 위한 연구[5]와 에폭시 복합재료를 통한 전기적·기계적 특성 향상 연구[6]를 진행하고 있다.

한편 상용 부스덕트의 전기절연을 위한 에폭시 분체도료는 지금까지 수입에 의존하고 있으나 시스템의 생산 단가를 낮추기 위해 국산화가 필수적이라 할 수 있다. 특히 부스덕트의 설치장소 및 운전

1. 경상대학교 전기공학과 및 ERI
2. LS전선(주) 중앙연구소 전력기술그룹
3. 한국국제대학교 소방방재학부
(경남 진주시 문산읍 상문리 산 270)
a. Corresponding Author : sky6905@hotmail.com
접수일자 : 2009. 1. 19
1차 심사 : 2009. 2. 16
심사완료 : 2009. 2. 23

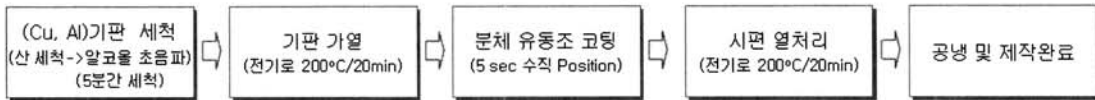


그림 1. 시편 제조 공정도.
Fig. 1. The diagram of sample manufacture process.

상태를 고려한 장기수명 및 신뢰도 향상을 위해서는 가속열화를 통해 에폭시 절연체의 물리적 특성 변화와 이에 따른 문제점 해결이 절실하다. 그러나 현재로서는 운전 중에 발생할 수 있는 열화에 의한 절연특성 연구가 매우 부족한 실정이다. 이는 분체도료의 특성 향상 및 실제 적용에 있어서 필수적인 사항이다.

따라서 본 연구에서는 부스덕트의 전기절연을 위한 에폭시 분체도료 국산 2 종과 수입산 3 종을 각각 유동침적법으로 절연 코팅하여 시험시편을 제작하고 열 및 수분열화에 따른 전기적 특성과 기계적 특성변화를 비교 검토하였다. 이를 토대로 분체도료의 절연특성 향상을 위한 기초 자료를 제시하였다.

2. 시편 제작 및 실험방법

에폭시 분체도료의 전기적 특성 시험을 위한 시험시편의 제작과정을 그림 1에 나타낸다.

일정 크기로 절단된 구리 또는 알루미늄 기판 (100 mm×100 mm×4 mm)을 산세척 후 에틸알코올 (99.9%)에 함침하여 초음파 세척을 통해 불순물을 제거하였다. 금속기판을 전기로에서 200 °C에서 20 분간 가열 하였으며, 이때 비접촉식 적외선 온도계를 통해 확인하였으며 온도의 오차는 ±5 % 이하였다. 가열된 기판을 수직방향으로 유동조에 함침 하였다.

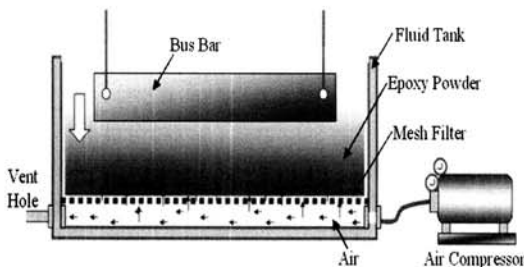


그림 2. 에폭시 분체도료의 실험장치.
Fig. 2. Experimental setup for epoxy powder.

그림 2에 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 유동을 발생 시킨 후 가열된 구리 기판을 수직으로 5 초간 침적시켜 코팅하였다. 상기의 방식으로 제작된 시료는 국내외의 5 개사의 에폭시 분체도료를 이용하였으며, Amine계로서 기본적인 물성의 특성은 표 1에 나타내었다.

표 1. 시편의 특성.

Table 1. Properties of sample.

| 시편 구분 | 외국산 | | | 국내산 | |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | A | B | C | D | E |
| 경화온도 /시간 | 200 °C /20 min | 200 °C /40 min | 200 °C /20 min | 200 °C /20 min | 200 °C /20 min |
| 표면색상 | 흑색 | 진갈색 | 분홍색 | 갈색 | 갈색 |
| 도막 평균두께 | 410 μm | 730 μm | 597 μm | 630 μm | 440 μm |
| 표면상태 | 약간 거칠 | 매끈함 | 다소 거칠 | 보통 | 보통 |
| 절연과피 전계 | 36.1 kV/mm | 28.5 kV/mm | 40 kV/mm | 31.7 kV/mm | 40 kV/mm |

또한 에폭시 절연재료의 경화도와 물성은 수지 및 경화제의 종류와 경화조건에 의해 결정되며, 환경 중 수분의 영향도 크게 받는다. 고분자가 조습한 환경에 노출될 경우 물 분자는 쉽게 고분자 매트릭스에 침투하여 밀착성과 유리전이온도를 저하시키고, 기계적 전기적 물성을 감소시킬 수 있다[7]. 따라서 수분에 의한 시편의 구조적, 기계적, 전기적 특성 변화는 부스덕트의 실용적 적용에 주요한 변

수로 작용할 수 있으며, 실제 운전 중에서 발생 가능한 핵심적인 문제를 검토하기 위해 열적인 가속 열화 및 수중열화를 통해 각 시편의 전기·기계적 특성을 검토하였다. 열적인 열화를 위해 유동침적법으로 만든 각각의 시편을 전기오븐기에 120 °C로 20 일, 40 일, 60 일간 유지하여 가속열화를 했으며, 수중 가속열화를 위해서는 전기 가열 용기에서 80 °C의 수중에서 동일기간 동안 침적 시켰다. 이와 같이 가속 열화된 시편들에 대한 전기적 및 기계적 특성을 검토함으로써 국산 에폭시 절연재료의 특성에 대한 기초 데이터를 확보 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 열화 되지 않은 에폭시 분체도료의 온도변화에 따른 교류 절연파괴 전계 값을 나타내고 있다. 실리콘 오일에 시편을 침적시키고 전기히터를 통해 실리콘 오일과 시편의 온도를 변화시켰으며[8], 절연파괴시험은 한국산업규격(KS)에 따라 반구(φ25 mm)-평판(φ75 mm)전극을 사용하였다[9]. 그림에 표시된 데이터는 동일한 조건에서 10 회 이상 실험값을 최소자승법에 의해 표시 하였다. 실험 결과로써 140 °C 이내에서는 외국산 A시편이 절연 파괴 전압이 가장 높았으며, 국내산인 D, E 시편과

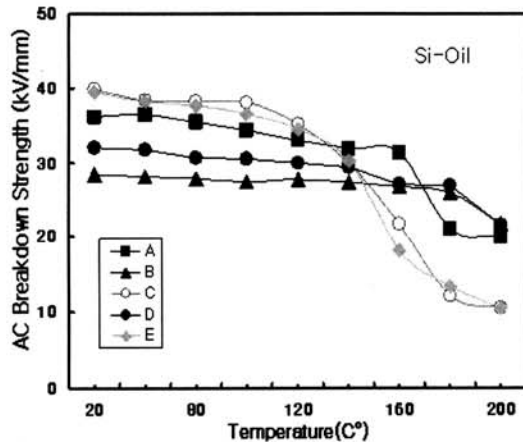


그림 3. 온도 의존성에 대한 AC 절연파괴.

Fig. 3. AC Breakdown depend on temperature.

외국산 C가 다소 높게 나타났으며, 다음으로 B시편 순으로 조사되었다. 반면 약 150 °C 이상에서는 실

사용 영역에서 가장 높은 절연내력을 보여준 외국산 A 시편과 국내산 D 시편의 외형상 변화와 함께 C와 E 시편의 경우 급격한 절연내력의 변화를 보였다.

그 원인으로서의 외부 열에너지에 대한 에폭시 수지의 결합력 약화에 의한 거동으로 예상되며, 특히 에폭시 수지의 유리전이온도(T_g)와 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 각 시편의 유리전이온도를 파악하기 위해 DSC(Q200, TA Instrumnets사 USA)분석과 분해온도 측정을 위해 TGA(Q600, TA Instruments사 USA)분석을 실행하였으며, 이에 대한 결과를 표 2에 표시한다. 각 시편의 경우 온도에 대한 절연파괴 전압은 T_g 부근에서 하강하기 시작하여 온도의 증가에 대해 더욱 급격히 하락하는 경향을 보인다.

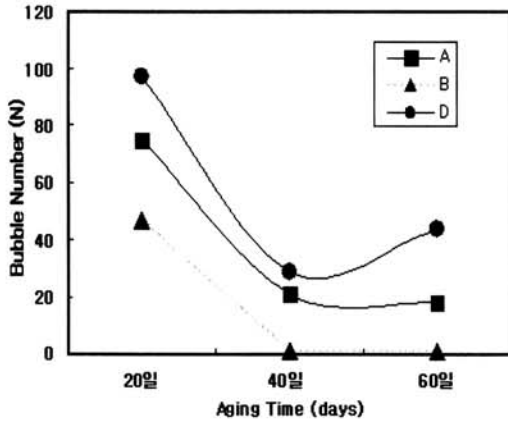
표 2. DSC 및 TGA 분석.

Table 2. Analysis DSC & TGA.

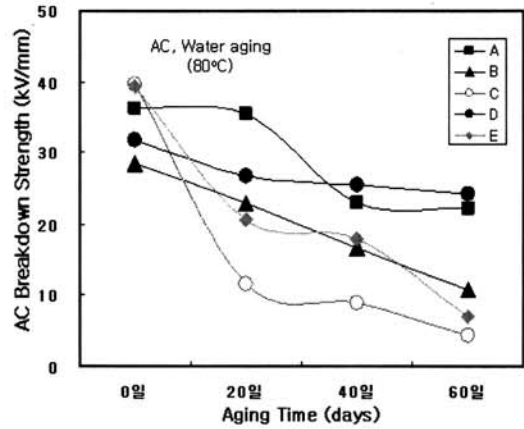
| Sample Name | Glass Transition Temperature[°C] | Weight Loss Temperature[°C] |
|-------------|----------------------------------|-----------------------------|
| A | 110 | 350 |
| B | 108 | 310 |
| C | 110 | 280 |
| D | 125 | 270 |
| E | 120 | 320 |

부스덕트는 수분과 온도에 대한 영향으로 인해 에폭시 절연재료의 중요한 열화 요인으로 보고되고 있다[10,11]. 따라서 실제 운용을 위해 가속열화를 시킨 뒤 대표적인 시편의 특성 중 수중 열화에 의해 생성된 기포의 크기와 기포의 개수에 대한 것을 그림 4에 표시한다.

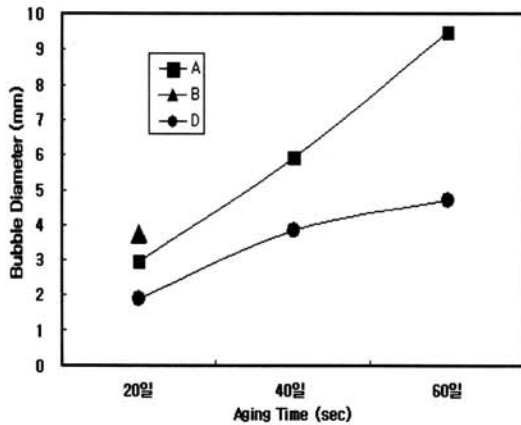
시편의 흡습을 위해 전열기가 부착된 스테인레스로 제작된 용기에 증류수를 넣고 제작된 시편을 침적시켰으며, 온도는 80 °C로 유지하였다. 그 결과 각 시편은 표면의 색상 변화와 더불어 열화시간이 진행 될수록 기포의 형상과 개수가 변화되었다. 기포의 개수는 열화시간에 반비례하여 비록 줄어들었지만 기포의 직경은 점점 크게 변화되었다. 이는 초기 열화에 생성된 작은 기포가 흡습에 의해 크기가 증가 하면서 주위의 작은 기포와 합체됨으로써



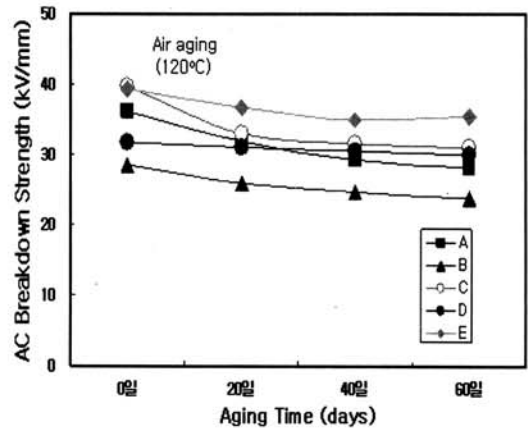
(a) 열화시간에 대한 기포의 수
(a) Bubble number on aging time



(a) 공기중 열화
(a) Degradation in air



(b) 열화시간에 대한 기포의 크기
(b) Bubble size on aging time



(b) 수중 열화
(b) Degradation in water

그림 4. 수중 열화의 기포 크기 및 개수.
Fig. 4. Bubble size and number on water degradation.

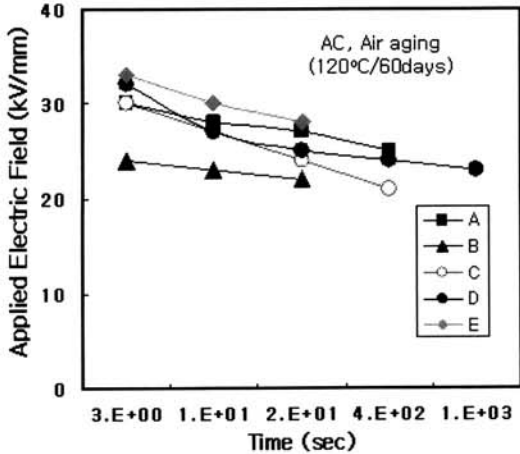
그림 5. 열화시간에 대한 AC 절연파괴.
Fig. 5. AC breakdown depend on aging time.

개수는 오리라 줄지만 직경은 커지는 결과를 나타내었다. 또한 시편 C의 경우 가속열화시간 20 일이 지난 후 다량의 기포수가 급격한 수분 흡습으로 인해 전체 시편으로 확장되어 에폭시 절연재료와 Cu 도체와의 공극이 발생하였다. 이 때 각 시편에 대한 절연파괴 전계는 열화시간에 반비례하여 낮아졌으며 이에 대한 결과를 그림 5에 나타낸다.

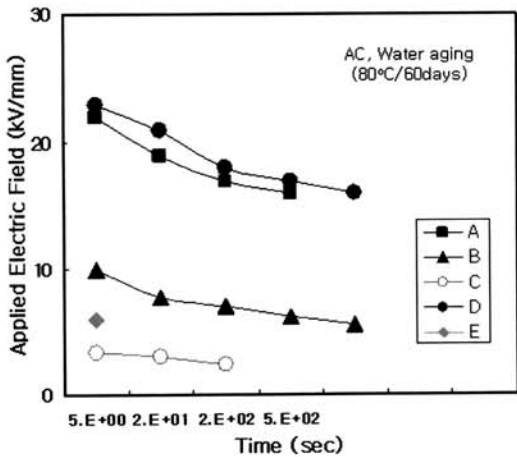
에폭시 분체도료의 120 °C의 공기 중 및 80 °C의 수중에서 장기간 열화에 따른 교류 절연파괴 전계 값을 보여주고 있다. 공기 중에서 열화 시킨 시료는

열화기간이 경과함에 따라 대부분의 시편에서 외형상 큰 변화는 없었으나 절연파괴 전계 값은 소폭의 감소를 보였다. 특히 국내산 시편은 거의 변화가 발생하지 않을 정도로 우수한 특성을 보였으며, 반면 C 시편은 상대적으로 가장 큰 변화가 관찰되었다. 수중 열화 시킨 시편의 경우에는 대부분의 시편이 열화기간의 경과에 따라 외형상 변화뿐만 아니라 절연파괴 전계 값도 큰 폭의 감소를 보였다. 공기 중 열화 결과와 마찬가지로 수중 열화에서도 D 시편이 열화기간에 따른 변화폭이 가장 작았으며, C 시편의 변화폭이 가장 크게 조사되었다.

전기적 절연 및 열화통계에서는 Weibull 분포를 많이 취하고 있다. 그림 6에 에폭시 절연체의 수명 특성을 나타내었다[12].



(a) 공기중 열화
(a) Degradation in air



(b) 수중 열화
(b) Degradation in water

그림 6. 열화에 대한 V-t 특성.

Fig. 6. V-t characteristics on degradation.

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 D 시편은 공기 중 가속열화의 경우 수명특성의 기울기가 완만하게 진행함에 따라 우수한 특성을 나타내고 있으며, 수중열화의 경우에서도 상대적으로 우수한 특성을 나타내고 있었다. 그리고 A 시편에서 고전계의 경우 다소 기울기가 급격히 강하되나 저전계의 경우 다소 안정된 수명특성을 나타낸다. 그러나 C 시편의 경우 고전계 및 저전계에서도 다소 급격한 기울기 특성을 나타냄에 따라 마모, 고장형에서도 다소 문제점을 드러내고 있으며, 수중 열화의 경우에도 절연내력이 급격히 감소되었다.

부스덕트의 특성상 고전압에 의한 영향보다는 절연재료의 결합 또는 표면상의 문제점에 의해 누설전류의 진전이 아크방전으로 진행될 수 있다[13]. 따라서 본 실험은 연면방전에 의한 아크방전 실험을 통해 각 시편의 표면절연특성을 비교 검토하였다. 표 3은 에폭시 절연재료의 아크방전에 대한 실험조건을 나타내었다[14].(Superior Electric사, 전류가변범위 : 10~40 mA) 그리고 그림 7에 에폭시 분체도료의 아크방전 특성을 나타내었다.

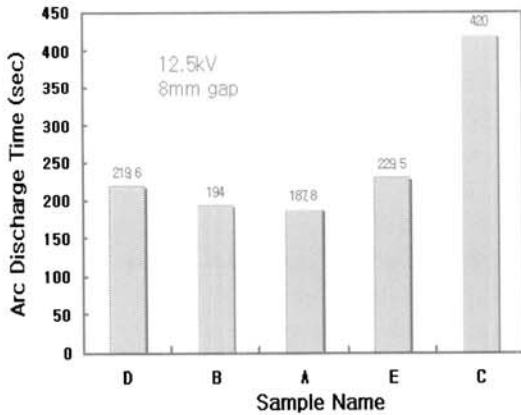
에폭시 분체도료의 표면에 전극 간격을 8 mm로 고정시킨 후 12.5 kV를 인가하여 표 3의 시험조건에 따라 아크방전 시간을 측정하였다. 시험은 각 단계별 60 초씩 인가하여 최종 7 단계까지 이루어졌다.

시험결과로써 열화 되지 않은 초기시료의 경우 C시편이 최종 7단계(420초)까지 견디어 가장 우수한 특성을 보였으며, 다른 시편의 경우 3~4단계인 200초 부근에서 Flash Over가 발생되었다. 또한 열화된 시편의 경우 40일을 기점으로 시편A 및 C의 경우 급격한 감소가 발생되었고 시편C의 60일 열화시킨 경우 아크방전에 대해 매우 취약한 특성을 보였다. 그러나 시편 B, D, E의 경우 열화에 대한 큰 변화 없이 안정된 성능을 보여주었다.

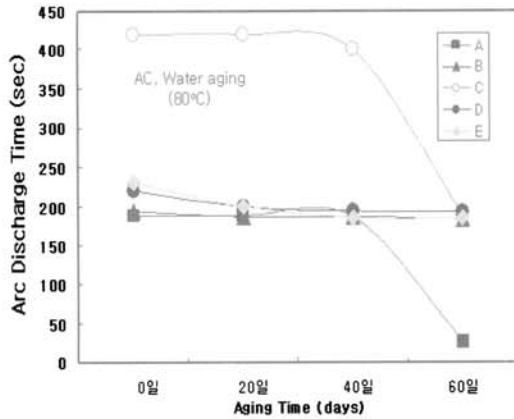
표 3. 단계별 전류 진행절차.

Table 3. Sequence of current steps.

| Step | Current, mA | Time Cycle | Total Time, s |
|--------|-------------|--------------------------|---------------|
| 1/8 10 | 10 | 1/4 s on, 1 1/4 s 10 off | 60 |
| 1/4 10 | 10 | 1/4 s on, 1/4 s 10 off | 120 |
| 1/2 10 | 10 | 1/4 s on, 1/4 s 10 off | 180 |
| 10 | 10 | Continuous | 240 |
| 20 | 20 | Continuous | 300 |
| 30 | 30 | Continuous | 360 |
| 40 | 40 | Continuous | 420 |



(a) 초기(비열화)시편
(a) Non-degradation samples



(b) 열화 시편
(b) Degradation samples

그림 7. 아크방전 특성.

Fig. 7. Characteristic on arc discharge.

본 시험에서는 기계적 영향평가를 위해 기계적 스트레스와 충격 등에 대한 시험을 실시하였다. 그림 8에 기계적 굽힘에 대한 에폭시 절연체의 영향을 나타내었다.

사용된 시편은 (200 m × 25 m × 4 m) 알루미늄 부스바 형태의 도체에 동일한 유동침적법을 통해 제작되었다. 밴딩 시험은 Zwicks사의 Material test 1494를 사용하였으며, 하부에 고정된 시편의 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 가하였

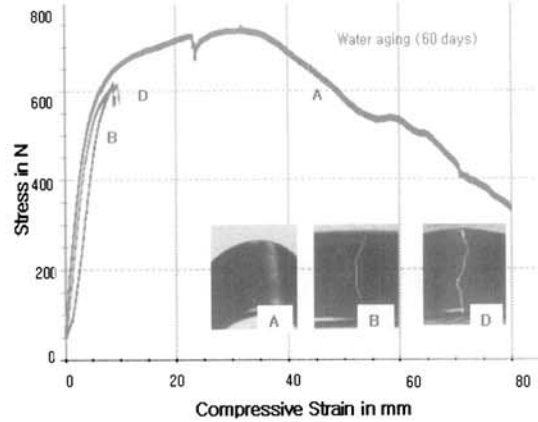


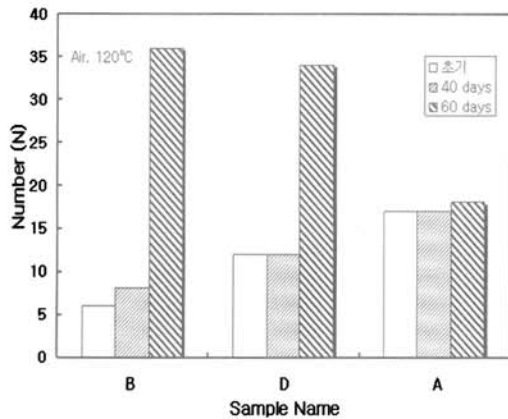
그림 8. 에폭시 절연체의 변형률.

Fig. 8. Stress-strain of epoxy insulation.

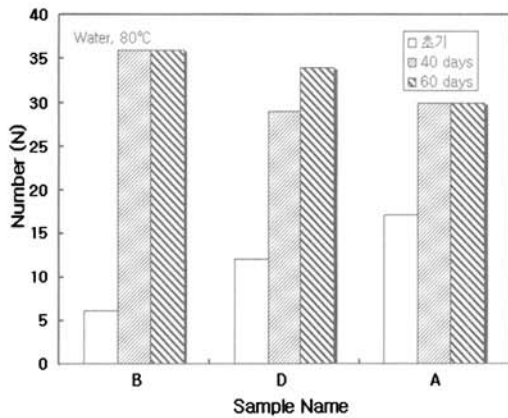
다. 그 결과 열화 되지 않은 D 시편의 경우 750 N의 압력과 22 mm의 변형률에서 도막의 crack과 동시에 전체 파단을 관측할 수 있었으며, 수중 60일 경과된 시편의 경우 610 N의 압력과 11 mm의 변형률에서 파단이 발생하였다. 즉 수중열화로 인해 기계적 굽힘 강도가 다소 줄었으며 B 시편 역시 비슷한 경향을 보였다. 그러나 시편 A의 경우 장비 한계치의 stress와 더불어 80 mm의 변형률이 진행됨에 있어서도 crack과 파단은 발생하지 않았고 곡면에 일부에서 고분자 백화현상이 다소 관측되었고 수중열화의 경우도 마찬가지로 우수한 특성을 보였다.

또한 에폭시 절연체의 접착력시험을 위해 cross cut 시험을 실시하였으며, 그 결과를 그림 9에 나타내었다.

Cu 도체에 Sn 도금을 처리한 뒤 에폭시 도막처리된 시편을 cross cutting 용 6 날 장치를 이용하여 수동으로 교차 시켰으며, 이때 발생된 좌우 36개의 cell에 접착테이프를 통해 시험하였다. 그 결과 열적 열화에 비해 수중 열화의 경우 대부분의 시편에서 상대적으로 많은 cell이 탈착이 되었으며, 이는 에폭시 수지의 흡습 특성에 의한 기포 층의 발생이 도막의 접착력을 현저히 떨어뜨리는 것으로 판단되어진다. 특히 기포의 사이즈가 수중 열화의 경우 큰 시편 B의 경우 각 cell이 독립적으로 탈착되는 것이 아니라 전체가 거의 떨어져 나감을 확인하였고, 수중열화 뿐만 아니라 열적열화의 경우에도 대부분 탈착되었다. 시편 D의 경우 60 일 경과한 경우를 제외하고는 다소 우수한 특성을 보였으며, 시편 A의 경우에도 비교적 우수한 특성을 나타내었다.



(a) 공기중 열화
(a) Degradation in air



(b) 수중 열화
(b) Degradation in water

그림 9. Cross cut 시험.

Fig. 9. Cross cut test.

공기중 열화 60일



수중 열화 60일



그림 10. 에폭시 절연체의 충격시험.

Fig. 10. Epoxy insulation of impact test.

그리고 외부 충격에 의한 에폭시 절연재료의 특성을 비교하기 위해 자유낙하를 이용한 Dupont impact 시험을 하였으며, 시험 후 표면의 형태 사진을 그림 10에 나타내었다.

사용되어진 Dupont impact 시험기는 1000 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 E의 경우 비교적 큰 crater와 더불어 용기된 가장자리에서 다소 많은 crack이 발생되었으며, 수중열화의 경우 용기의 높이와 크기가 큰 것을 관측하였다. 시편 C와 D의 경우 용기부분에서 일부 crack 발생되었으나 시편 A의 경우 crater 직경도 작고 crack은 발생되지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 국내에서 개발된 콤팩트 부스덕트용 에폭시 분체도료의 다양한 열화조건에 따른 전기적·기계적 특성을 5종의 상용제품을 통해 비교, 검토하였다.

1. 에폭시 분체도료의 경화온도 및 시간, 표면상태, 수중열화 조건에서 국산 D시편이 외국산 제품에 비해 열화에 대한 전기적 특성 변화폭이 안정적이었다.
2. 온도변화에 따른 절연내력 시험에서도 유리전이 온도 (T_g) 이전까지 7~10 %의 절연파괴 전계의 감소로 매우 안정적인 것으로 조사되었다. 시험시편의 대부분은 T_g 근처에서 급격한 절연내력의 감소가 시작되었다.

- 3. 수명특성(V-t)에서도 안정적인 절연특성을 유지하였으며, 아크방전 특성의 경우, 60일 경과된 열화시편에서도 안정적인 특성을 유지했다.
- 4. 밴딩시험, 부착시험 및 충격시험 등과 같은 기계적 시험의 경우에서도 국산 D시편의 특성이 비교되는 제품과 동등한 성능을 유지하였다.
- 5. 5종의 에폭시 분체도로 제품의 열화에 대한 전기적·기계적 특성을 비교해 볼 때 국산 D시편과 외국산 A시편의 성능이 우수한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 LS전선의 산학연구지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- [1] K. C. Agrawal, "Industrial power engineering handbook", ELSEVIER, p. 916, 2001.
- [2] "機械工學便覽事典, 엔지니어링편, C", 일본기계학회, p. 723, 1996.
- [3] A. M. Matawie and E. M. Sadek, "Adhesives and coatings based on phenolic/epoxy resins", Polym. Adv. Technol., Vol. 10, No. 4, p. 223, 1999.
- [4] 谷口他, "高分子絶縁物の澁雷器容器への適用", 電力中央研究所報告, 研究報告W89024, p. 1, 2000.
- [5] 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.
- [6] K. Strzelec and P. Pospiech, "Improvement of mechanical properties and electrical

- conductivity of polythiourethane-modified epoxy coatings filled with aluminium powder", Progress in Organic Coatings, Vol. 63, Issue 1, p. 133, 2008.
- [7] C. Maggana and P. Pissis, "Water sorption and diffusion studies in an epoxy system", J. Polym. Sci.: Part B, Polym. Phys., Vol. 37, No. 11, p. 1165, 1999.
- [8] 이병성, 송일근, 이재봉, 한상욱, "가속열화 방법에 의한 주상변압기 절연물의 열 열화특성 평가", 전기전자재료학회논문지, 16권, 12호, p. 1136, 2003.
- [9] KS C IEC 60243-1, "절연 재료의 절연 내력-시험 방법-제1부: 상용 주파수 시험", 2002.
- [10] G. Z. Xiao and M. E. R. Shanahan, "Water absorption and desorption in an epoxy resin with degradation", J. Polym. Sci: Part B, Polym. Phys., Vol. 35, No. 16, p. 2659, 1998.
- [11] R. A. Perthric, E. A. Holins, I. McEwan, E. A. Pollock, and D. Hayward, "Effect of cure temperature on the structure and water absorption of epoxy/amine thermosets", Polymer International, Vol. 39, No. 4, p. 275, 1996.
- [12] J. S. White, "The moments of log-weibull order statistics", Technometrics, Vol. 11, p. 373, 1969.
- [13] 최인혁, 최연규, 이동일, 이원교, 강병규, 박준호, "송전용 13,000 lbs 자기애자의 수명 예측 연구", 전기전자재료학회논문지, 20권, 7호, p. 636, 2007.
- [14] ATD·ASTM, "Standard Test Method for High-voltage, Low-current, Dry Arc Resistance of Solid Electrical Insulation", American Society for Testing and Materials, D 495-99, p. 1, 1999.