

절연지의 기계적 및 전기적 물성에 대한 연구

논문
8-4-3

Study on the Electrical and Mechanical Properties of Insulating Paper

엄승욱*, 김귀열*

(Seung-Wook Eom, Gwi-Yeol Kim)

Abstract

In order to elucidate the electrical and mechanical properties of insulating paper, it is desirable to study the performances of tensile strength, dielectric constant, dielectric strength.

In this work, we constructed the characteristics depending on change of fabrication condition, and these specimens were manufactured by hot press method. As a result, tensile strength was about 75MPa and breakdown was above 5 kV/mm at the minimum value.

Key words(중요용어) : Insulating Paper(절연지), Pressboard(프레스 보드), Dielectric Strength(절연내력), Tensile Strength(인장 강도), Dielectric Constant(유전 특성).

1. 서론

산업의 발달과 국민 경제 수준의 향상으로 전력의 수요는 폭발적으로 증가하고 있으며, 전력 시스템의 대용량화, 고전압화 및 장기간 안정화에 수반하여 요구되는 물성이 급격히 변화되고 있다.

또한 전기, 전자 기기의 고신뢰화, 경량화, 고성능화 및 사용환경의 확대가 급속히 진전됨에 따라 현재 사용되고 있는 절연재료의 개선 혹은 신절연재료의 개발이 요청된다.^{1), 2)}

절연지는 주로 전력 케이블, 유입 콘덴서, 통신 케이블 및 전기 기기의 절연등에 사용되지만, 종이는 원래 다공질이고 흡습성이 크며, 또 수분에 의해 절연성이 저하되므로 감압 건조하여 사용하며, 고압 전계중에서는 절연유를 충전하여 사용한다.^{1)~5)}

프레스보드는 주로 습지를 겹쳐서 압력을 가해 제조한 것으로서 전압의 대용량화, 전력수요의 증가에 수반하는 전력기기에서 중요한 절연재료중의 하나이다.

한편 이 프레스보드는 전기적, 기계적, 화학적 특성이 우수하며 변압기, 차단기류에 사용되는 훌륭한 절연성을 가질 뿐만 아니라 유증기기의 절연과 회전기 코일의 절연물에 크게 기여한다.^{1), 6)~9)}

프레스보드는 국산화가 전혀 되어있지 않은 중요 절연 재료로서 전량 수입에 의존하고 있으며, 국산화율은 진무한 상태이다.¹⁰⁾

따라서 본 연구에서는 조건을 달리하면서 제작된 프레스보드의 기계적 및 전기적 물성을 분석하고자 한다.

2. 사용 재료 및 시편 제작

2.1. 사용 재료

절연지는 미표백 크라프트 펄프(kraft pulp)를 원료로하고 있으며, 수종은 북유럽, 북미등의 나라에서 자라는 소나무 계통, 전나무등이 고기밀도의 종이를 얻을 수 있고 절연과피 강도가 증가하는 특징이 있기때문에 적당하다.¹⁰⁾

본 연구에서 펄프는 스웨덴에서 생산된 소나무 계통을 원료로 사용하였다. 한편 Alky Ketene Diner를 size제로 사용하여 화학적으로 안정하고 내구성이 우수한 중성초지를 만들었으며 이들 약품을 잘 정착시키기 위해서 보류 향상제로

* : 한국전기연구소 전기재료연구부
접수일자 : 1993년 11월 20일
심사완료 : 1995년 5월 11일

polyacrylamide계 약품을 이용하였다.

또한 양성전분과 에폭시 수지를 첨가함으로써 층간 결합 능력을 향상시켰다. 그리고 그림 1에 일반적인 cellulose의 화학적 구조를 나타내고 있다.

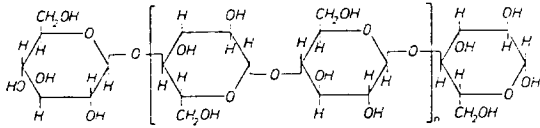


그림. 1 cellulose의 화학적 구조.

Fig. 1 Chemical structure of cellulose.

2.2. 시편 제작

실험용 시편은 펄프 용수의 종류, 고해도, sizing 처리, 층간 결합제의 사용 유무 및 종류에 따른 여러가지 인자를 달리하여 표 1의 제조 공정도에 따라 표 2와 같이 제작하여 그 특성을 분석하였다.

Cellulose 섬유는 그 자체의 상태로는 좋은 결합력을 얻을 수 없기 때문에 고해도에서 섬유를 기계적으로 처리함으로써 세포막을 fibril화 하는 동시에 섬유의 비표면적을 크게하였다.

수 조지하여 얇게 만든 sheet를 소정의 두께에

표 1. 절연지의 제조 공정

Table 1. Fabrication processing of insulating paper

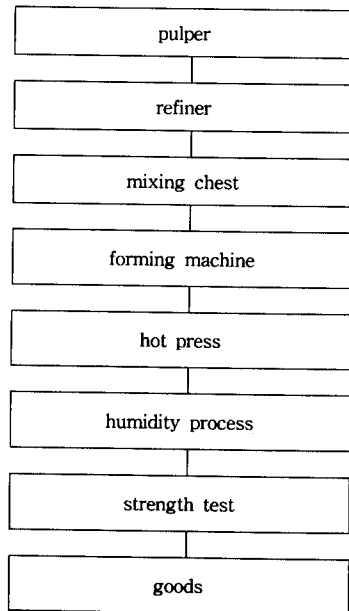


표 2. 사용시료의 물성

Table 2. Properties of Specimens

Sample	특 정	두께 (μm)	밀도 (g/cm ³)
1	300-N-2	886	0.89
2	400-N-2	847	0.88
3	500-N-2	921	0.89
4	300-S-2	912	0.90
5	400-S-2	933	0.88
6	500-S-1	956	0.87
7	I-N-8-1	915	0.93
8	I-S-8-1	871	0.95
9	I-N-16-2	1677	1.03
10	O-N-8-2	907	0.92
11	O-N-16-1	1688	0.97
12	I-N-ST-8-2	907	0.93
13	I-S-ST-8-2	913	0.92
14	I-N-E-8-1	916	0.94
15	I-S-E-8-1	992	0.93
16	I-S-PV-8-2	1149	0.72
17	I-H-S-8-1	930	0.91

S : sizing , N : no sizing , ST : starch spray , E : epoxy , PV : polyvinyl alcohol

필요한 배수를 겹쳐서 1매의 두꺼운 wet sheet를 만든다. 그리고 hot press를 사용하여 밀도 0.95~1.10 g/cm³의 절연지가 되도록 온도 약 150℃에서 압력을 가하면서 성형 건조시켜 실험에 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1. 기계적 강도 특성

본 실험에서는 인장강도 실험장치로서 Instron Limited (England) 제품인 model Instron 6022 (100kV, Max, Load)을 사용하였다.

본 연구에서는 인장강도 특성에 많은 영향을 미치는 고해도의 정도, sizing 유무 및 starch와 epoxy 첨가 그리고 제작 방법들을 달리하면서 만들어진 시차품들의 기계적 성질을 분석, 고찰하였다. 그림 2에서 대부분의 시편들은 75MPa 이상의 우수한 인장강도를 나타내고 있다.

한편 동일 고해도에서 sizing을 하지 않았을 때 인장강도는 밀도가 큰 시편과 starch 및 epoxy 즉 열경화성 수지를 첨가한 시편에서 인장강도가 향상됨을 알 수 있다. 그리고 동일 고해도에서 sizing

시에 인장강도의 영향은 밀도가 큰 시편과 순수를 사용하고 starch를 첨가한 시편에서 강도가 향상됨을 알 수 있으며, epoxy 첨가시는 no sizing시와는 달리 강도가 저하되는데, 이는 sizing을 하기 위해서 AKD를 첨가하는데 이 AKD와 epoxy와의 관계로 인해 인장강도가 저하되는 것으로 사료된다.

수분 흡수를 적게하기 위해서 sizing 유무에 따른 인장강도의 변화는 거의 비슷한 수치지만 첨가물에 따라 다소 크기의 변화는 있음을 알 수 있다. 다음 pulp의 종류에 따른 인장강도의 차이를 살펴보면 절연용 kraft pulp를 사용했을 때가 일반 pulp를 사용했을 때 보다 높은 인장강도를 나타내고 있다.

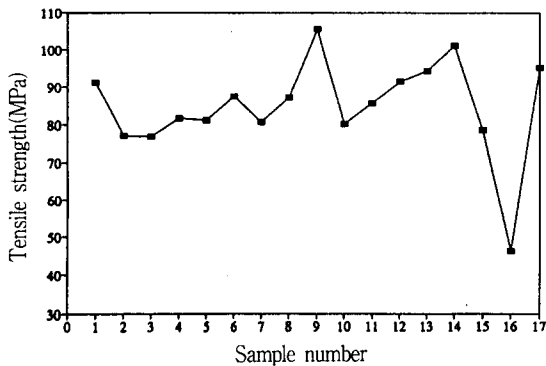


그림 2. 시작품의 인장강도 특성.

Fig. 2. Tensile strength of specimens.

3.2. 절연저항 특성

절연지의 전기적 특성은 제조 조건과 공정에 밀접한 관련이 있으며 절연저항 특성, 유전 특성 및 절연파괴 특성등의 분석을 통한 고찰이 필요하다.

본 실험에서 pressboard 시작품의 저항율 (체적 저항율, 표면 저항율) 을 알기 위해서 그림 3, 4와 같은 전극 구성을 하여 고저항을 측정기 (High Resistance Meter, Type 4329AHP)를 사용하였다.

절연체 표면은 외부 오손이나 흡습의 영향을 민감하게 받기 쉬우므로 표면 전류는 체적 전류에 비하여 분위기에 강하게 지배된다. 체적 전류는 그림 4 전극에서 전극 1-3 사이에서 측정하고 표면 전류는 전극 1-2 사이에서 측정하는데, 각각 저항 Ra 와 Rs를 다음의 식 3-1과 식 3-2에 대입하여 체적 저항율과 표면 저항율을 각각 구하였다.

$$\text{Volume resistivity}(\rho) = \frac{19.6}{t} R_v [\Omega \cdot \text{cm}] \quad (3-1)$$

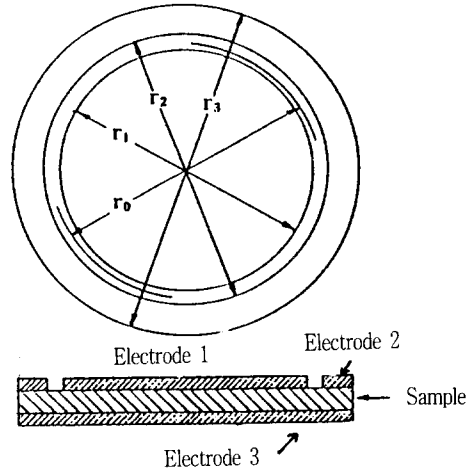


그림 3. 저항율 측정용 전극 형태.

Fig. 3. Electrode for resistivity measurement.

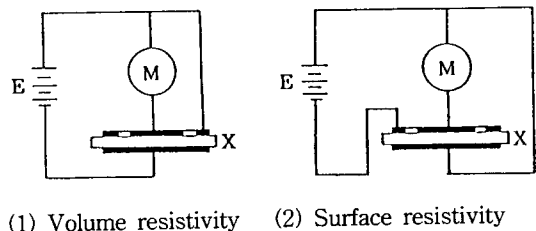


그림 4. 체적고유 저항 및 표면고유 저항율 측정 회로.

Fig. 4. Measurement circuit of surface resistivity and volume resistivity.

R_v : 저항 $[\Omega]$

t : thickness $[\text{cm}]$

$$\text{Surface resistivity}(\delta) = 18.8 R_s [\Omega] \quad (3-2)$$

R_s : 표면 저항 $[\Omega]$

한편 표 2 에 그 결과 측정치를 나타내는데, 체적 고유 저항율은 대부분 시작품이 $10^{11}[\Omega \cdot \text{cm}]$, 표면 고유 저항율 $10^{12}[\Omega]$ 의 크기를 나타내었으며 sizing을 한 시편의 체적 저항율이 높았으며 starch 와 epoxy를 첨가하고 또 제조시 순수를 사용한 시편이 우수한 저항을 나타내고 있다.

3.3. 유전 특성

본 시험장치에 사용된 유전 특성 고찰용 실험장치는 Hewlett Packard, 4194A Impedance/Gain-phase Analyzer 제품을 사용하였다.

그림 5, 6 에서 각 시작품들은 주파수 120Hz ~

표 3. 저항률 측정결과

Table 3. Resistivity results

sample	체적 고유저항 (ρ) [$\Omega \cdot \text{cm}$]	표면 고유저항 (δ) [Ω]
1	1.5×10^{11}	4.3×10^{12}
2	2.1×10^{11}	14×10^{12}
3	1.6×10^{11}	3.5×10^{12}
4	2.3×10^{11}	1.3×10^{12}
5	1.5×10^{11}	2.1×10^{12}
6	2.8×10^{11}	0.9×10^{12}
7	1.9×10^{11}	1.6×10^{12}
8	2.9×10^{11}	3.2×10^{12}
9	0.6×10^{11}	0.3×10^{12}
10	1.7×10^{11}	3.0×10^{12}
11	0.9×10^{11}	0.2×10^{12}
12	2.8×10^{11}	2.6×10^{12}
13	2.5×10^{11}	2.8×10^{12}
14	3.4×10^{11}	1.7×10^{12}
15	3.9×10^{11}	2.4×10^{12}
16	10×10^{11}	5×10^{12}
17	2.9×10^{11}	4.5×10^{12}

4MHz 측정온도 15°C에서 ϵ_r , $\tan\delta$ 를 측정한 결과를 나타내고 있는데, 이 그림에서 대부분의 시편들은 ϵ_r 의 값이 5~7 이며, 또한 $\tan\delta$ 의 수치는 0.07 정도를 표시한다. 이 그림에서 유전 특성은 밀도가 큰 시편에서 높은 ϵ_r 과 $\tan\delta$ 를 나타내므로서 밀도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

3.4. 절연파괴 특성

절연파괴 강도 특성 연구를 위해서 본 실험에서는 AC 절연파괴 시험은 High Voltage Test Set (Keihin Densokki Co. Ltd, Japan)를 사용하였다. 한편 시험은 KSC 2105에 따라 주변에 2.5mm의 둥글기를 가진 지름 25mm 인 밀면이 평활한 스테인레스강으로 된 평판-평판 전극 사이에 시험편을 약 0.5Kg의 힘으로 끼워서 절연파괴가 발생하도록 일정속도로 상승시켜서 절연파괴 전압을 측정하였으며 그 결과치가 그림 7 이다.

그림 7 에서 보면 공기중에서 AC 절연파괴 강도는 밀도에 큰 영향을 받아 밀도가 가장 큰 9, 11번 sample에서 가장 우수한 절연파괴 강도를 나타내고 있다. 그리고 고해도를 상승함에 따라 밀도를 높인 경우에는 밀도의 증대에 수반하여 현저한 절연파괴 강도의 향상을 가져온다. 한편 제조시에 starch 와 epoxy를 첨가한 시편에서 뚜렷한 절연

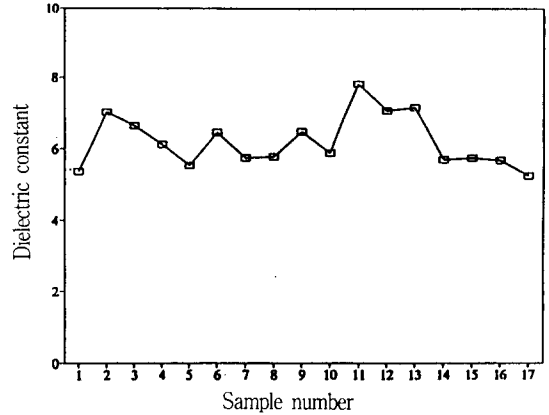


그림 5. 각 시작품의 비유전율 특성.

Fig. 5. Dielectric constant of specimens.

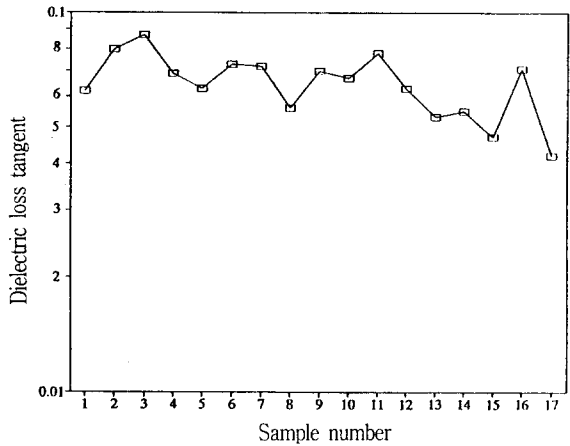


그림 6. 각 시작품의 유전정접 특성.

Fig. 6. Dielectric loss tangent of specimens.

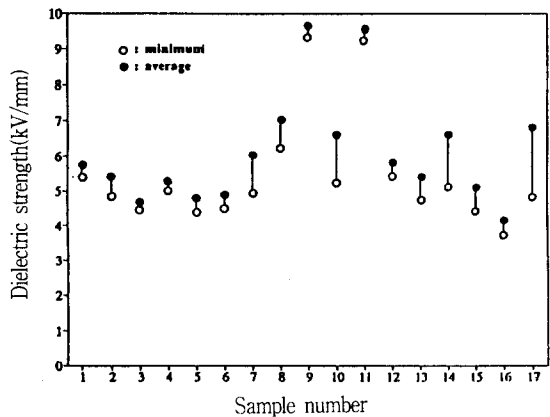


그림 7. 시작품의 AC 절연파괴 특성.

Fig. 7. Dielectric strength of specimens.

파괴 강도의 향상은 확인할 수 없다. 그림 7 에서 보는 바와 같이 전반적으로 절연파괴 강도의 최저치는 5[KV/mm] 전후를 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구는 변압기 절연재료로 널리 사용되는 절연지 (프레스보드)의 전기적 물성에 대하여 기초적인 자료를 얻기 위해 수행하였다.

기계적 강도 특성에서는 제작된 여러 종류의 시판제품에 대하여 분석한 결과, 대부분 시편들이 75[MPa] 이상의 우수한 특성을 나타내었다.

저항율 특성 및 유전 특성으로부터 대부분 시편들의 체적 고유 저항율은 $10^{11}[\Omega \cdot \text{cm}]$, 표면 고유 저항율은 $10^{12}[\Omega]$ 의 크기를 나타내었고, 비유전율은 5~7이며, 유전정점은 0.07 정도를 얻었다.

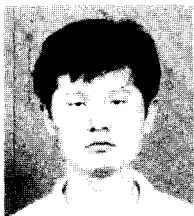
AC 절연파괴 특성에서 각 시편들은 절연파괴 세기가 최저치 5[KV/mm]를 확보하였다.

※ 본 연구는 온양 팜프(주)의 협력으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. H. P. Moser et al, "Transformerboard" .pp. 93, 1979
2. K. Karsai D. Sc et al, "Large Power Transformer" .pp. 295, 1987
3. 長井佳一 외, " 전기전자 절연재료 ", 전기신문, 1978
4. 小林良生 외, "고기능지의 개발과 응용" .pp. 173, 1988
5. 武祐一郎, "전기 절연지", Corona 사, pp.203, 1969
6. D. H. Shroff et al, " A review of paper aging in power transformer ", IEE Proceedings, pp. 312, 1985
7. H. Tsu Kioka et al, "Development of low dielectric constant pressboard", 전기학회 학술대회, pp. 311, 1988
8. A. C. Franklin and DP Franklin, " The J & P Transformer book " .pp. 398, 1983
9. Y. Makino et al, " Absorption Phenomena of CO₂ and CO in Insulating paper " ,전기학회 학술대회, pp. 285, 1991
10. 김귀열, "절연지의 응용 현황", 한국전기전자재료학회지, pp. 491, vol. 6, No. 6, 1993

저자소개



엄승욱

1967년 7월 30일생. 1990년 2월 한양대 공대 공업화학과 졸업. 1992년 2월 동 대학원 공업화학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 전기재료연구부 절연재료 연구실 연구원.



김귀열

1959년 4월 20일생. 1982년 2월 조선대학교 공대 전기공학과 졸업. 1985년 8월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구소 전기재료 연구부 절연재료연구실 선임연구원.