

친환경 절연재 응용을 위한 미표백 크라프트 펄프 절연지의 여수도 기반 성능 평가

이찬용, 조한구, 이재형 

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Freeness-Dependent Performance Evaluation of Unbleached Kraft Pulp Insulation Paper for Eco-Friendly Electrical Insulation Applications

Chanyong Lee, Hango Cho, and Jaehyeong Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received September 12, 2025; Revised October 12, 2025; Accepted October 15, 2025)

Abstract: To ensure high-voltage stability and thermal resistance of insulation paper used in transformers, this study evaluated the structural and electrical properties of four types of insulation paper samples fabricated using unbleached kraft pulp (UKP). The samples were prepared under controlled conditions with different freeness levels (300–700 ml). Tensile strength, dielectric constant, breakdown strength (dry and oil), volume resistivity, water absorption, and oil absorption were quantitatively measured. The sample with a beating degree of 300 exhibited the highest breakdown strength (53.85 kV/mm) and volume resistivity ($1.49 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$), whereas the samples with higher beating intensity showed improved fiber bonding and densification. These findings demonstrate the practical applicability of UKP-based insulation paper as a high-performance, eco-friendly insulating material for transformer systems, providing a scientific foundation for process optimization in insulation paper design.

Keywords: Eco-friendly, Unbleached kraft pulp (UKP), Insulation paper, Freeness, Transformer insulation

1. 서론

전력기기의 고전압화, 소형화, 고신뢰성 요구가 증가함에 따라 절연 재료의 전기적 및 기계적 성능 확보는 변압기 및 전력 계통의 안정적인 운용에 필수적인 요소로 간주되고 있다 [1,2]. 특히, 변압기 내부에 적용되는 절연지는 고온·고전압 환경에서도 장기적인 유전 안정성과 구조적 신뢰성을 동시에 충족시켜야 한다 [3].

기존의 상용 절연지는 주로 표백 크라프트 펄프(bleached

kraft pulp) 또는 합성 고분자 기반 소재로 구성되어 있으나, 최근에는 탄소중립(carbon neutrality) 및 친환경적인 기술 전환 요구에 따라 생분해 가능하고 재생 가능한 소재인 셀룰로오스(cellulose)에 대한 관심이 높아지고 있다 [4,5].

셀룰로오스는 목재 기반 펄프에서 유래한 천연 고분자로서, 전 세계적으로 고효율화 및 친환경 절연 소재 수요에 대응하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 셀룰로오스 섬유는 면(cotton), 고무(rubber), 기타 목재 기반 재료에 비해 다공성 섬유 구조를 층층이 적층하여 형성된 복합 시트형 구조(laminated sheet structure)로 제작할 수 있으며, 기계적 강도 및 전기 절연 특성 면에서 탁월한 성능을 나타낸다 [6,7].

✉ Jaehyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
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.

절연지의 전기적 및 기계적 특성은 펄프의 종류 뿐만 아니라 섬유의 여수도(Canadian standard freeness, CSF), 첨가제의 종류 및 투입량, 습식 가공 조건, 그리고 시트의 조밀 구조 등 다양한 요소가 복합적으로 작용하여 결정된다 [8]. 여수도란 펄프 현탁액의 탈수 속도를 나타내는 지표로서, 섬유의 고해 정도를 정량적으로 평가하는 지수다. 고해도 처리(refining treatment)는 여수도로 표현되는 펄프의 수분 함유량과 섬유 표면 활성화를 의미하며, 이는 펄프를 기계적으로 처리하여 섬유를 미세화(fibrillation)하고, 섬유 표면에 물리적/화학적 결합 지점을 증가시키는 과정이다. 적절한 고해도는 섬유 간 결합력을 향상시켜 기계적 강도와 시트의 밀도를 증가시키지만, 과도한 고해도는 섬유 손상, 초미세 섬유의 손실, 기공률 증가 등의 문제를 유발하여 오히려 절연 성능을 저하시키는 원인이 될 수 있다 [9,10]. 이처럼 균일하면서도 기공이 적은(compact and less porous) 섬유 네트워크 구조는 높은 유전 안정성, 절연파괴강도, 체적저항률 등을 확보하기 위한 핵심 요소이다 [11]. 특히 셀룰로오스 기반 절연지의 유전 특성 및 기계적 강도는 고전압 환경에서의 절연 안정성과 직결되며, 이 특성들은 섬유 구조의 조밀성, 결합력, 표면 특성에 의해 정밀하게 좌우된다 [12].

전력기기의 고전압화, 소형화, 고신뢰성 요구가 증가함에 따라 절연 재료의 전기적·기계적 성능 확보는 변압기 및 전력 계통의 안정성 확보에 있어 필수적으로 요구되고 있다. 특히 변압기 내부에 사용되는 절연지는 전기 절연성과 기계적 특성을 동시에 갖추어야 하며, 고온·고전압 환경에서도 장기적인 안정성을 유지해야 한다. 기존 상용되고 있는 절연지는 주로 표백 크라프트 펄프 또는 합성 고분자 기반으로 제조되었으나, 최근에는 탄소중립 및 환경친화성 요구에 따라 지속 가능하고 생분해 가능한 소재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [13-15]. 전 세계적으로 고효율화 및 친환경 소재 요구에 대응하기 위한 셀룰로오스 섬유 복합펄프 기반의 고강도·고절연 절연물 개발이 요구되고 있다. 절연지의 전기적·기계적 물성은 섬유 종류 뿐만 아니라 섬유의 여수도, 첨가제의 종류 및 사용량, 그리고 구조적 조밀도 등에 따라 복합적으로 결정된다. 특히 고해도 처리는 펄프 섬유를 기계적으로 반복 절삭·압축하는 과정을 통해 섬유 표면을 활성화시키고, 섬유 외벽에서 미세 섬유를 발생시켜 섬유 간 접촉 면적을 확대하는 전처리 기술이다. 이러한 과정은 섬유의 표면 거칠기와 친수성을 증가시켜 수소결합 형성을 촉진하며, 결과적으로 절연지의 밀도와 기계적 강도를 향상시킨다. 그러나 일정 수준 이상으로 고해도를 높이면 섬유가 과도하게 절단되어 평균 길이가 감소하고, 내부 기공 구조가 불균일하게 형성될 수 있

다. 이는 시트 내부에 미세 공극을 증가시켜 전계 집중을 유발하고 절연파괴 강도를 낮출 수 있으며, 또한 수분 흡수 특성이 커져 체적 저항률 감소로 이어질 수 있다. 따라서 절연지 제조에서는 적절한 고해도 조건을 설정하여 섬유의 미세화와 결합력 증진 효과를 극대화하면서도 섬유 손상과 과도한 기공 형성을 억제하는 균형이 핵심적이다.

본 연구에서는 화학적 표백 공정을 거치지 않은 미표백 크라프트 펄프를 기반으로, 여수도를 조절하여 제작한 지속가능하고 친환경적인 절연지의 미세구조와 전기적, 기계적 특성을 종합적으로 분석하였다. 특히, 변압기와 같은 전력기기의 실질적 적용 가능성 평가를 위해 절연지로 요구되는 절연파괴강도, 인장 강도 등 다양한 특성들을 평가함으로써, 실제 전력기기 적용 가능성을 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 절연지 시편 제작을 위하여 미표백 크라프트 펄프(UKP, Model: S25C-0i24121912270, Moorim P&P Co., Ltd., Ulsan, Republic of Korea)를 주원료로 사용하였다. 펄프는 실험 전 수세(washing) 및 분산(dispersion) 처리를 거쳐 균질한 슬러리 상태로 준비하였으며, 이후 탈수 및 건조 공정을 통해 시편 제작에 사용되었다. 다른 종류의 섬유소 또는 충전제, 첨가제(CNF, 습강제 등)는 포함하지 않고, UKP 단일 구성으로 서로 다른 여수도 조건(700, 375, 360, 300 ml)에서 시편을 제작하였다. 고해도는 여수도 측정기(Schopper-Riegler freeness tester, ISO 5267-1 기준)를 이용하여 측정하였으며, 각 조건에서 목표 ml값에 도달할 때까지 고해도를 조절하였다. Canadian Standard Freeness는 펄프 슬러리의 여수도를 반영하는 지표로, 섬유의 분쇄·미세화 정도와 직접적으로 연관되며, 제작된 절연지의 조밀성 및 전기·기계적 특성에 큰 영향을 미친다. 절연지 제조공정은 그림 1에 도식화하였으며, 슬러리 준비 → 탈수 → 건조 → 절연지 완성의 순서로 이루어진다.

절연지 샘플의 인장강도 및 신율은 만능재료시험기(universal testing machine, UTM, Instron 5566, Instron Corp., USA)를 사용하여 측정하였다. 시편은 IEC 60641-2에 따라 폭 15 mm, 표점거리 100 mm로 절단하였으며, MD (machine direction) 및 CD (cross direction) 방향으로 시험을 진행하였다. 시험 속도는 20 mm/min으로 설정하였고, 각 샘플에 대해 5회의 반복 측정을 통해 평균값을 산출하였다. 또한, 파단 거동을 시각적으로 확인하기 위해 시험 후 시편의 파단면을 촬영하였

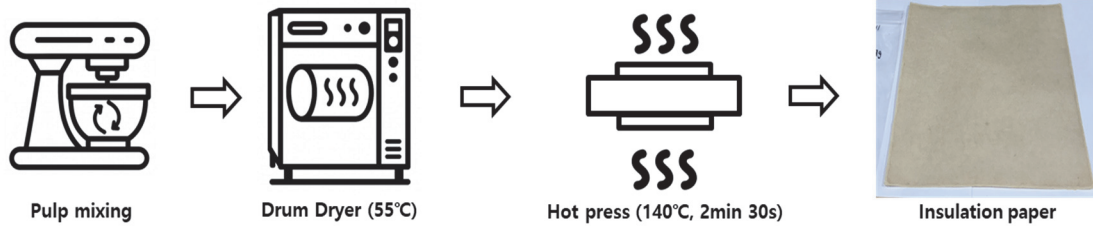


Fig. 1. Fabrication process of unbleached kraft pulp-based insulation paper.

으며, 모든 시편이 클립 근처가 아닌 표점거리 중앙 영역에서 파단되도록 시험 조건을 설정하였다. 신율(elongation)은 인장시험과 병행하여 측정된 파단 시 신장률(%)로, 재료의 연성과 변형 저항성을 평가하는 지표이다. 신율은 초기 표점거리(L_0) 대비 파단 시 변형된 길이(ΔL)의 비율로 계산하였으며, 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Elongation}(\%) = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

절연파괴강도는 IEC 60243-1 [16] 규격에 따라 측정하였으며, 전기 절연 특성 평가를 위해 절연지 샘플은 실리콘 오일 내에 함침된 상태로 전압 상승 속도 500 V/s 조건 하에 교류(AC) 전압을 가하여 측정하였다. 시험 전 모든 시편은 100 °C에서 12시간 건조한 후 실온에서 24시간 이상 안정화시켰다. 절연파괴강도는 절연지가 전기적으로 파괴될 때의 전압을 두께로 나누어 산출하였다.

체적저항률은 SM7120 슈퍼 메가옴미터(HIOKI, Japan)를 사용하여 500 V의 인가 전압에서 측정하였다. 측정은 IEC 60641-2 [17] 표준을 기준으로 진행하였으며, 시편은 절연된 고정 전극판에 장착한 후, 전류를 측정하여 체적저항률($\Omega \cdot \text{cm}$)로 계산하였다. 시편은 측정 전 100 °C에서 12시간 건조 후, 상온에 안정화시켰으며, 측정 온도는 23 ± 2 °C, 상대습도는 $50 \pm 5\%$ 에서 측정을 진행하였다.

유전율은 IM3536 정밀 LCR 미터(HIOKI, Japan)를 사용하여 60 Hz의 주파수에서 측정하였다. 측정은 ASTM D150 [18] 표준을 기준으로 진행하였으며, 시편은 전극 지름 25 mm의 전극판 사이에 삽입한 후 정전용량은 평행판 전극 구조에서 LCR 미터로 측정하였으며, 측정된 정전용량 값은 다음 식에 따라 상대 유전율(ϵ_r)로 환산하였다.

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (2)$$

흡수율 및 흡유율은 Cobb 사이징 테스터를 사용하여 TAPPI T 441 [19] 방법에 따라 측정하였으며, 흡수율의 경우, 각 시편의 한 면에 100 mL의 물을 60초간 접촉시킨

후, 흡수된 수분의 양을 측정하였다. 측정된 물의 무게 변화는 단위 면적(100 cm^2)당 수분 흡수량(g/m^2)으로 환산하였다. 흡유율의 경우 흡수율과 동일하되, 시험액으로 절연유(transformer oil)를 사용하였으며, 각 시편에 절연유를 60초간 접촉시킨 후 잔여 오일을 제거하고 무게 변화로부터 흡유량을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 미표백 크라프트 펄프의 여수도에 따른 인장강도 변화를 기계 방향(MD) 및 직각 방향(CD) 기준으로 나타낸 것이다. 여수도 700 ml 조건에서 MD와 CD 방향 모두에서 가장 낮은 인장강도를 나타냈다. 이후 고해가 진행됨에 따라 인장강도는 점진적으로 증가하였으며, 특히 여수도 300 ml 조건의 시편에서 가장 높은 인장강도 값을 나타내었다. 이는 고해에 따른 섬유 표면의 미세섬유화 및 접착면 확대가 섬유 간 결합력을 강화하여, 시트의 치밀화와 응력 전달 효율을 높인 결과로 사료된다 [20]. 또한 MD 방향의 인장강도가 전 구간에서 CD 방향보다 높은 값을 유지하는데, 이는 시트 내 섬유가 주로 MD 방향으로 배열되어 있어 하중 전달이 효율적으로 이루어진 결과로 사료된다 [21]. 반면 CD 방향에서는 상대적으로 낮은 강도를 보였으나, 고해가 진행됨에 따라 섬유 네트워크의 일체화가 향상되면서 두 방향 간 강도 격차가 점차 줄어드는 경향을 확인할 수 있었다.

신율의 경우, 인장강도 결과와 유사하게, 여수도가 낮을수록 신율이 증가하는 경향을 보였다. 여수도 700 ml 조건의 시편은 가장 낮은 신율을 보인 반면, 고해가 진행될수록 신율은 전반적으로 증가하였다. 이는 고해에 따라 섬유 표면의 미세섬유화와 순응성이 향상되어 섬유 간 접촉 면적과 결합수(결합점)가 늘고, 시트가 더 치밀해지면서 하중 전달이 균일해지기 때문이다. 그 결과 파단에 이르기까지의 변형 허용도가 커져 신율이 증가하는 경향이 나타났다. 따라서 일정 수준 이상의 고해는 절연지의 기계적 신율 향상에 긍정적인

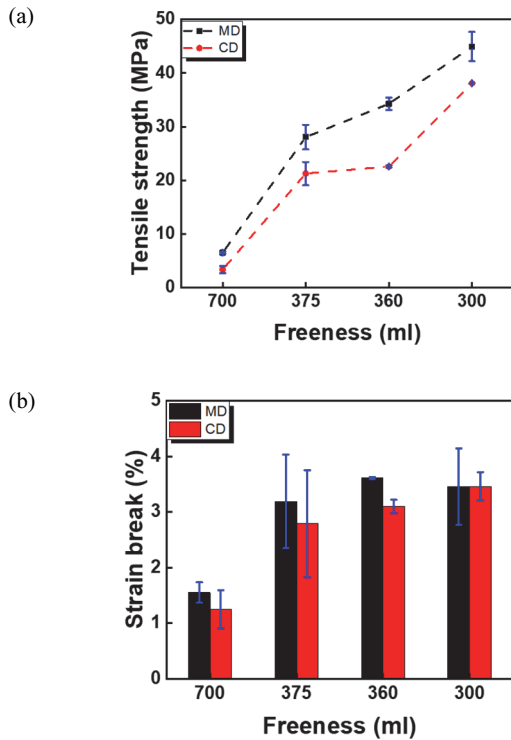


Fig. 2. Tensile strength and elongation of insulation papers at different beating degrees: (a) tensile strength and (b) elongation.

역할을 할 수 있으며, 이는 절연지의 유연성과 내변형성을 확보하는 데 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

그림 3은 서로 다른 여수도 조건으로 제조된 미표백 크라프트 펄프 시편에 대하여 건식(dry) 및 절연유(oil) 함침 상태에서 측정된 절연파괴강도(kV/mm)를 나타낸 것이다. 모든 시편은 절연유 함침 조건에서 건식 조건 대비 현저히 높은 절연파괴강도를 나타냈다. 또한 시편 간의 절연파괴강도는 구조적 특성에 따라 차이를 보였으며, 일부 시편에서는 상대적으로 낮은 값이 관찰되었다. 이러한 결과는 절연유가 섬유 간극을 충전하여 전계 집중을 완화하는 동시에, 시편의 치밀도와 기공 분포와 같은 구조적 요인에 의해 절연 특성이 영향을 받았을 거라 판단된다 [22,23]. 또한 절연파괴강도의 향상은 단순히 절연유 함침 효과 뿐만 아니라 시편의 구조적 특성과 밀도에 의해서도 영향을 받는다. 본 연구에서 밀도가 낮은 시편(여수도 700 ml : 0.36 g/cm^3)은 가장 낮은 절연파괴강도를 보였으며, 반대로 밀도가 높은 시편(여수도 375 ml : 0.54 g/cm^3 , 여수도 300 ml : 0.57 g/cm^3)은 건식 및 절연유 조건 모두에서 상대적으로 높은 절연파괴강도를 나타냈다. 이는 밀도가 높을수록 시트 내 기공률이 낮아지고 섬유 네트워크가 치밀화되어 전계 집중이 억제되기 때문으로 해석된다. 다만, 중

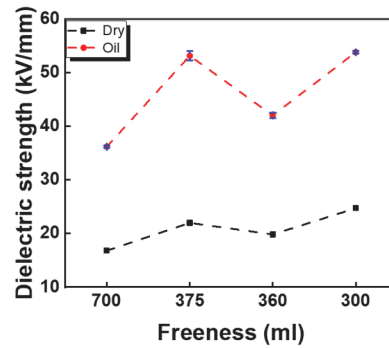


Fig. 3. Effect of freeness on the dielectric breakdown strength of insulating paper.

간 밀도 수준(여수도 360 ml : 0.48 g/cm^3)의 시편에서는 절연파괴강도가 일시적으로 감소하는 경향이 관찰되었는데, 이는 섬유 간 결합의 불균일성 또는 미세 공극의 부분적인 전계 집중을 유발했을 가능성이 크다고 사료된다. 실제로 동일한 밀도 범위에서도 섬유의 배향, 결합 강도, 미세기공 분포 등에 따라 절연유의 함침 정도가 달라질 수 있으며, 이러한 구조적 불균질성은 절연특성의 국소적 약화를 초래한다. 따라서 절연지의 절연 성능을 향상시키기 위해 적정 수준 이상의 밀도 확보가 필요함으로써 여수도 300 ml 조건에서 기계적 강도(인장강도, 신율)뿐만 아니라 절연 특성 측면에서도 우수한 균형을 보여, 고전압 절연재 응용에 적합한 최적 조건으로 제시될 수 있다고 판단된다.

그림 4는 서로 다른 여수도 조건에서 제조된 미표백 크라프트 펄프 시편의 체적저항률(volume resistivity)을 비교한 결과이며, 체적저항률은 여수도가 낮아질수록 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이는 고해 과정에서 섬유 표면이 미세화되고 섬유 간 결합력이 강화되어 전하 이동 경로가 효과적으로 차단되었기 때문으로 해석된다. 하지만, 375 ml에서 360 ml로의 변화 구간에서는 체적저항률이 일시적으로 낮아지는 현상이 관찰되었는데, 이는 단순한 여수도의 차이보다는 시트 내부의 섬유 결합 불균일성, 미세 기공의 재형성, 국소적 수분 잔류 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 또한 밀도가 높은 시편에서는 기공률이 감소하고 섬유 네트워크가 치밀하게 형성되어 전하 이동이 억제되지만, 상대적으로 밀도가 낮은 시편에서는 이러한 효과가 제한적이어서 체적저항률이 감소한 것으로 판단된다. 최종적으로, 여수도 300 ml 조건에서 가장 높은 체적저항률을 확보할 수 있었으며, 이는 절연 특성 향상을 위해 일정 수준 이상의 고해가 유효함을 보여준다.

그림 5는 서로 다른 고해도 조건에서 제조된 미표백 크라프트 펄프 시편의 유전율(dielectric constant) 및 유전

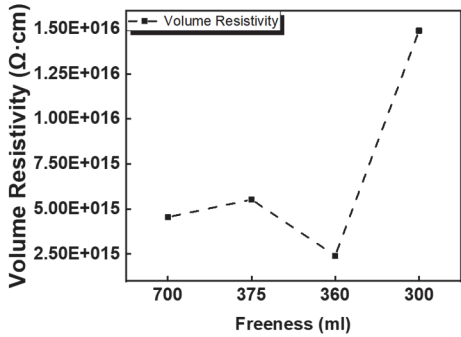


Fig. 4. Volume resistivity of insulating paper as a function of freeness.

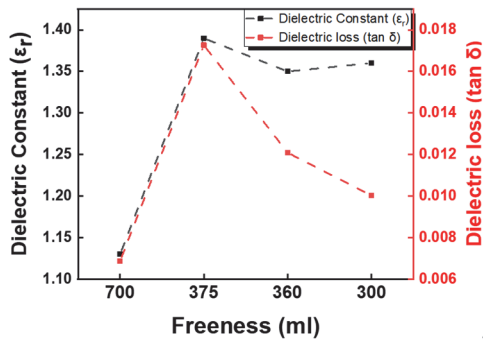


Fig. 5. Effect of freeness on the dielectric constant and dielectric loss of insulating paper.

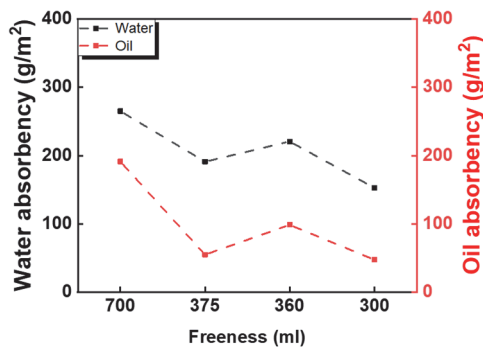


Fig. 6. Effect of freeness on the water and oil absorption of insulating paper.

손실(dielectric loss)을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 여수도 700 ml 시편의 유전율은 1.13로 가장 낮았으며, 375-300 ml은 유전율 1.35-1.39 범위로 비교적 유사한 수준으로 여수도 변화폭에 비해 유전율 차이가 크지 않은 경향을 나타냈다. 이는 시편 제조 과정에서 적용된 동일한 핫프레스의 열·압력 조건으로 압착되어 기공률 차이가 크

지 않았을 거라 판단된다 [24]. 유전 손실의 경우도 유전율과 유사한 경향성을 나타냈으며, 이는 내부 섬유 간 계면, 기공 구조, 흡수율 등의 복합적인 요소로 인해 전기적 손실 경로에 영향을 미쳤기 때문으로 사료된다 [25].

그림 6은 서로 다른 여수도 조건에서 제조된 미표백 크라프트 펄프 절연지의 흡수율(water absorption) 및 흡유율(oil absorption)을 비교한 결과, 여수도 700 ml 시편은 가장 높은 흡수율을 나타냈으며, 고해가 진행되어 여수도가 감소할수록 흡수율은 점차 낮아졌다. 이는 여수도가 증가할수록 섬유 네트워크가 느슨하고 기공률이 커서 물과 기름의 침투 경로가 증가하기 때문으로 해석된다 [26]. 반대로 고해가 진행된 375-300 ml 구간에서는 섬유 표면의 미세섬유화와 결합점 증가로 시트 구조가 치밀해져, 기공률 감소와 함께 흡수율도 현저히 억제되었다 [27]. 이러한 결과는 절연지의 절연유 함침 적합성을 평가하는 데 중요한 의미를 가지며, 특히 절연유의 효과적인 침투와 고절연성 확보를 위해서는 일정 수준의 기공성과 구조적 개방성이 필요할 것이라 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 미표백 크라프트 펄프 절연지를 대상으로 여수도 조건(700, 375, 360, 300 ml)에 따른 기계적·전기적·흡수 특성을 체계적으로 분석하였다. 연구 결과, 여수도가 낮아질수록 인장강도와 신율은 전반적으로 향상되었으며, 이는 섬유 표면의 미세섬유화와 결합력 증대에 기인함을 확인하였다. 절연파괴강도 역시 밀도와 밀접한 상관관계를 보이며, 고해가 충분히 진행된 300 ml 조건에서 최대값을 나타냈다. 또한 체적저항률은 시트 치밀화에 따라 상승하는 경향을 보였으나, 360 ml 조건에서는 국부적 불균일성으로 인해 일시적인 감소가 관찰되었다. 유전율과 유전손실은 여수도 변화에 따른 변동 폭이 크지 않았으나, 중간 구간에서 일시적 증가 후 다시 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 기공률 변화, 섬유 간 계면 특성, 흡수율 등의 복합적 요인에 기인하는 것으로 판단된다. 한편 흡수율과 흡유율은 여수도가 높을수록 크게 나타났으며, 고해가 진행됨에 따라 기공률이 줄어들면서 유입 경로가 감소하여 현저히 억제되었다. 이상의 결과를 종합하면, 절연지의 기계적 강도, 절연 파괴 특성, 체적저항률 및 흡수 특성은 여수도 조건과 밀도 변화에 의해 지배적으로 결정되며, 최적의 성능은 약 300 ml 수준에서 달성됨을 확인하였다. 본 연구는 고전압 절연재로서 크라프트 펄프 절연지의 성능

최적화를 위해 여수도 제어가 핵심적인 변수임을 규명하였으며, 향후 변압기 및 전력기기 절연 시스템 설계 시 유용한 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다.

ORCID

Jaehyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0001-7775-1142>

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부 산업기술평가관리원에서 지원하는 기술혁신사업(과제번호 RS-2024-00427007, 절연강도 40 kV/mm 및 고효율 변압기를 위한 CNF 복합 절연보드 개발)의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

REFERENCES

- [1] P. Jusner, E. Schwaiger, A. Potthast, and T. Rosenau, *Carbohydr. Polym.*, **252**, 117196 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117196>
- [2] IEC 60641-3:2021, *Pressboard and Presspaper for Electrical Purposes*, IEC, Geneva, Switzerland (2021).
- [3] S. Cherrak, T. Seghier, A. Benghia, F. A. Machuca, A. M. Mabwe, and S. Goumri-Said, *AIMS Environ. Sci.*, **11**, 831 (2024).
doi: <https://doi.org/10.3934/environsci.2024041>
- [4] A. Dufresne, *Mater. Today*, **16**, 220 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.06.004>
- [5] D. Klemm, B. Heublein, H. P. Fink, and A. Bohn, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **44**, 3358 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1002/anie.200460587>
- [6] M. M. Hamed, M. Sandberg, R. T. Olsson, J. Pedersen, T. Benselfelt, and J. Wohler, *Adv. Mater.*, **37**, 2415787 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202415787>
- [7] S. Lakshmanan, V. Jurečić, V. Bobnar, and V. Kokol, *Cellulose*, **31**, 8149 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06105-2>
- [8] TAPPI T227 om-99, *Freeness of Pulp (Canadian Standard Method)*, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA (1999).
- [9] Y. Duan, S. Wang, T. Xu, H. Bian, and H. Dai, *Polymers*, **16**, 1892 (2024).
doi: <https://doi.org/10.3390/polym16131892>
- [10] A. G. Teke, C. Atik, J. Bertoneclj, I. Poljanšek, and P. Oven, *Forests*, **14**, 2150 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/f14112150>
- [11] H. H. Park, C. H. Kim, J. H. Park, M. S. Park, and J. S. Lee, *Appl. Sci.*, **15**, 9160 (2025).
doi: <https://doi.org/10.3390/app15169160>
- [12] C. Méndez, C. Olmo, C. J. Renedo, A. Ortiz, and D. García, *Polymers*, **16**, 1196 (2024).
doi: <https://doi.org/10.3390/polym16091196>
- [13] S. Zhang, Z. Yang, R. Luo, and J. Lian, *Compos. Commun.*, **57**, 102478 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2025.102478>
- [14] S. A. Jose, N. Cowan, M. Davidson, G. Godina, I. Smith, J. Xin, and P. L. Menezes, *Nanomaterials*, **15**, 356 (2025).
doi: <https://doi.org/10.3390/nano15050356>
- [15] J. Shen, Z. Yang, J. Lian, J. Li, X. Li, Y. Xie, Y. Wu, Q. Feng, and X. Zhang, *Int. J. Biol. Macromol.*, **253**, 127222 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127222>
- [16] IEC 60243-1:2013, *Electric Strength of Insulating Materials—Test Methods—Part 1: Tests at Power Frequencies*, IEC, Geneva, Switzerland (2013).
- [17] IEC 60641-2:2004, *Pressboard and Presspaper for Electrical Purposes—Part 2: Methods of Test*, IEC, Geneva, Switzerland (2004).
- [18] ASTM D150-18, *Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation*, ASTM, West Conshohocken, PA, USA (2018).
- [19] TAPPI T441 om-13, *Water Absorptiveness of Sized (Non-Bibulous) Paper and Paperboard (Cobb Test)*, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA (2013).
- [20] J. Boudreau and U. Germgård, *BioRes.*, **9**, 2107 (2014).
doi: <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.2107-2114>
- [21] S. Leheny, T. C. Robbins, C. K. Robbins, F. Zhou, A. K. I. Hall, M. K. McGath, L. Pasternack, J. Wallace, T. C. O'Connor, and P. M. McGuiggan, *Mech. Mater.*, **162**, 104036 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.104036>
- [22] M. Umair, N. Azis, R. Halis, and J. Jasni, *Materials*, **13**, 5002 (2020).
doi: <https://doi.org/10.3390/ma13215002>
- [23] M. Umair, N. Azis, R. Halis, and J. Jasni, *Pertanika J. Sci. Technol.*, **31**, 1069 (2023).
doi: <https://doi.org/10.47836/pjst.31.2.22>
- [24] S. Simula, S. Ikäläinen, K. Niskanen, T. Varpula, H. Seppä, and A. Pauku, *J. Imaging Sci. Technol.*, **43**, 472 (1999).
doi: <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.1999.43.5.art00012>
- [25] Q. Luo, H. Shen, G. Zhou, and X. Xu, *Carbohydr. Polym.*, **303**, 120449 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120449>
- [26] Y. S. Perng and E.I.C. Wang, *BioRes.*, **7**, 3895 (2012).
doi: <https://doi.org/10.15376/biores.7.3.3895-3909>
- [27] M. A. Hubbe and P. Pruszynski, *BioRes.*, **15**, 1978 (2020).
doi: <https://doi.org/10.15376/biores.15.1.1978-2004>