

**400kV급 반합성지 전력케이블용 절연지(PPLP)의 팽윤현상이 전기적 성능에 미치는 영향**

박세은\*, 이상진, 김동욱  
 \*LS전선 중앙연구소 고분자기술그룹  
 LS전선 중앙연구소 전력기술그룹

**The Effect of Swelling Rate for 400kV PPLP Insulated Oil-Filled Electric Power Cable**

Se-Eun Park\*, Sangjin Lee, DongWook Kim  
 \*Polymer Technical Gr. R&D Center, LS Cable Ltd.  
 EHV Gr. Electric Power R&D Center, LS Cable Ltd.

**Abstract** - PPLP를 절연지로 사용하는 OF 케이블 절연지의 팽윤 특성은 전력 케이블 절연특성에 크게 영향을 줄 뿐만 아니라, 케이블 제조나 운전 시에도 영향을 미치므로 매우 중요한 설계 관리 요소이다. 특히 PPLP 케이블 제조시 PPLP의 팽윤 정도에 따라 지권장력의 설정이 달라지므로 반드시 고려해야만 한다. 기존의 일반적인 Kraft지를 절연지로 사용하는 OF 케이블의 경우는 팽윤 현상이 거의 없어 지권장력 설정시 이를 고려하지 않아도 되지만, PPLP는 이를 고려하지 않고 지권을 한다면 케이블 제조 후 절연지의 끊어짐 현상, 절연층의 butt-gap 현상 등 Polypropylene laminated paper를 절연지로 사용하는 케이블의 경우, 팽윤 현상의 발생으로 인해 절연파괴가 일어날 수 있다. 그러나 PPLP 절연지를 사용하는 이유는 케이블의 장거리 운전시 기존 Kraft지를 사용했을 때 보다 유전손실이 더 개선될 뿐만 아니라 절연체의 두께를 저감하여 포설이 용이하기 때문이다. 이에 본 논문에서는 PPLP에서 고분자의 팽윤이 일어나는 정도에 따라 결정화도의 변화와 전기적인 성능(체적저항, AC 파괴강도)과의 연관성을 검토하였다.

**1. 서 론**

1970년에 일본의 SUMITOMO 전기에서 개발한 PPLP(Polypropylene laminated paper)는 높은 절연내력과 낮은 유전손실을 가진 새로운 절연지로서 기존의 절연지인 크라프트지(celulosic kraft paper)를 대신하게 되었다. PPLP의 개발은 그 후 계속되어 1993년에 캐나다에서 Hydro Quebec의 IREQ's test-yard에서 800kV AC 케이블을 개발하는 수준에 이르렀다.<sup>[1]</sup> 그러나 크라프트지에 비해 많은 장점을 가진 PPLP는 절연지의 팽윤현상 때문에 설계시 아주 신중하게 다뤄야 한다. 실제 PPLP를 상온에서 유침시킬 경우에는 완전팽윤이 되는데 많은 시일이 걸린다. 따라서 본 논문에서는 PPLP 절연지의 팽윤현상을 일으키는 직접적인 요인은 무엇이며, 팽윤 정도에 따른 PP의 결정화도의 변화와 전력 케이블에서의 매우 중요한 요소인 체적저항과 AC 파괴강도의 변화를 살펴보고자 한다.

**2. 실험**

**2.1 시료 및 실험방법**

본 연구에 사용된 시료는 미국의 PPLP 제조업체인 A사의 전체 두께 170um이며 PP의 비율이 약 52% 인 절연지를 사용했으며, 함침 절연유로는 dodecylbenzene(DDB)을 사용했다.

시료는 1Kg/cm<sup>2</sup>의 하중을 가할 수 있는 팽윤 측정기에 장착하여 120°C에서 24시간 진공 건조시킨 후, 95°C에서 DDB를 넣어 유침시켰다. 시료는 건조된 시료와 함침 직후의 시료, 중간정도 팽윤된 시료, 완전히 팽윤된 시료를 채워하였다.

**2.2 팽윤 현상을 일으키는 인자**

팽윤 현상을 일으키는 직접적인 요인을 알아보기 위해 micro-meta와 현미경을 이용하여 각각의 시료에 대한 두께를 측정했다.

**<표 1> PPLP 두께 변화와 PP 비율**

| 시료        | 분리 후 PPLP 두께 (μm) |       |       | PP의 비율 (%) |
|-----------|-------------------|-------|-------|------------|
|           | Kraft             | PP    | Kraft |            |
| 건조 시료     | 50.3              | 110.0 | 50.7  | 52.1       |
| 함침 직후 시료  | 51.0              | 110.3 | 51.3  | 51.9       |
| 중간 팽윤된 시료 | 51.7              | 113.0 | 51.3  | 52.3       |
| 완전 팽윤된 시료 | 52.0              | 118.3 | 52.3  | 53.1       |

<표1>은 micro-meta로 두께를 측정된 결과와 각각의 시료들의 PP의 비율을 구한 것이다. PPLP를 분리하는 과정에서 현미경 관찰 결과, 크라프트지의 섬유질이 PP에 엉겨 붙어 있어 실제 두께 측정시에는 더 두껍게 측정되었다.

**2.3 PP의 결정화도와 전기적 특성**

PP의 결정화도는 FT-IR로 분석하였고, AC 파괴강도와 체적저항은 PHENIX(USA)사의 AC DIELECTRIC TESTER(100kV)를 사용하여 분석하였다.

FT-IR 스펙트럼에서 917cm<sup>-1</sup>을 기준으로 하여 972cm<sup>-1</sup> 피크와 997cm<sup>-1</sup>의 피크를 분석했으며, 결정화도는 다음의 식에 따라 구했다.

$$R = \frac{[A(997\text{cm}^{-1}) - A(917\text{cm}^{-1})]}{[A(972\text{cm}^{-1}) - A(917\text{cm}^{-1})]}$$

$$X (\text{crystallinity}) = 109 \times R - 31.4$$

그리고 각각의 실험치들은 10회 평균을 그 결과치로 하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1 PPLP 팽윤현상의 직접적인 요인**

DDB oil 함침 후 PP와 kraft 모두 팽윤 현상이 일어나나, kraft의 팽윤의 변화는 팽창히 미비한 반면, PPLP 전체 두께 대비 PP의 비율이 증가하므로 PPLP 절연지의 팽윤 현상에는 kraft paper 보다는 PP film의 팽윤이 더 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 팽윤에 따른 PP의 결정화도와 전기적 특성의 변화는 <표2>에 나타났다.

**<표 2> PP의 결정화도와 전기적 특성들**

| 시료 | 결정화도 | 체적저항 (Ω)                 | AC BDV (kV/mm) |
|----|------|--------------------------|----------------|
| A  | 62.4 | 7.725 x 10 <sup>15</sup> | 94.9           |
| B  | 62.8 | 1.162 x 10 <sup>16</sup> | 128.8          |
| C  | 61.7 | 1.286 x 10 <sup>16</sup> | 119.0          |

<표2>의 시료A는 건조된 시료이며 시료B는 중간정도 팽윤된 시료, 시료C는 완전히 팽윤된 시료이다. 시료 B, C의 팽윤 정도에 따라 결정화도의 변화는 거의 없다. 또한 체적저항과 AC 파괴전계도 큰 차이를 보이지 않는다. 즉, 이것은 PP 분자 사이로 DDB가 침투해 들어감에 따라 저분자들이 오일로 빠져나오는 것이 결정화도나 체적저항, AC BDV에 거의 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 반면, 시료A와는 차이가 보이는데 그 이유는 PP 고분자 분자들 사이에 공기로 채워져 있는지와 오일로 채워져 있는지에 대한 차이가 크다는 것을 알 수 있게 해 준다. 참고로, L. Y. Gao와 D. M. Tu는 그들의 연구에서 100°C에서 DDB에 40일 유침했을 때 결정화도는 단지 7% - 16% 정도만 변화한다고 보고한 바 있다.<sup>[2]</sup>

**3. 결 론**

본 연구는 전력 케이블에 사용되는 PPLP 절연지에서 팽윤현상을 일으키는 직접적인 요인이 무엇인지와, 팽윤의 정도에 따른 PP의 결정화도와 체적저항, AC BDV의 변화를 조사하였다. 실험 결과, kraft 지는 PPLP 전체의 팽윤에 거의 영향을 주지 않고 고분자인 PP가 결정적인 역할을 한다는 것을 증명했다. 그리고 건조 상태일 때 보다 오일에 유침을 하게 되면 체적저항과 AC 파괴강도가 높아진다는 것을 알게 되었으며, 팽윤이 되는 정도에 의한 전기적 성능의 차이는 거의 보이지 않는다. 이것은 전력 케이블의 제조에서 포설까지의 기간 설정에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

**[참 고 문 헌]**

[1] Ryosuke Hata, "Solid DC Submarine Cable Insulated with PPLP", Sumitomo Electric Industries, Ltd., Osaka, Japan  
 [2] L. Y. Gao와 D. M. Tu, "The Influence of Morphology on the Electrical Breakdown Strength of Polypropylene Film", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.25, 535, 1990