

트리지연제 첨가에 의한 전력 Cable용 XLPE의 절연특성에 관한 연구

김규식, 류부형*, 박수길
 충북대학교 공업화학과, *동국대학교 안전공학과

A Study on Insulation Characteristics of XLPE by Treeing Inhibitor

Gyu-Sik Kim, Boo-Hyung Ryu*, Soo-Gil Park
 Dept. of Industrial & Chemical Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.
 *Dept. of Safety Engineering, Dongguk University.

Abstract - Treeing inhibitors are added in XLPE matrix to investigate the effect on electrical properties of XLPE. The treeing inhibitors are barbituric acid, 4-(4-Nitrophenylazo) resorcinol and 4-(4-Nitrophenylazo) naphthol. Added amount of each treeing inhibitors were varied from 0phr to 2.0phr. In order to know the changes of electrical properties, break down strength, $\tan \delta$, and ϵ_r were measured. Experimental results showed that electrical properties of each sample was slightly changed by amount of additives.

1. 서 론

현재 절연재료로서 가장 많이 이용되고 있는 절연재료는 XLPE(cross-linked polyethylene)로, 절연내력, 체적고유저항이 높고 유전정접 및 유전율이 매우 작으며 PE보다 연속 최고 허용온도가 높으며 물리적, 기계적 특성이 월등히 우수하며 내약품성이 좋기 때문에 PE가 전기적 특성이 우수함에도 불구하고 XLPE를 고압전력 케이블에 사용하고 있다.

XLPE는 전기트리(electrical tree)에 의해 케이블의 조기 열화가 촉진되며, 이에 따라 전기적 파괴강도 및 전기적 제 특성의 저하 원인이 되어 궁극적으로는 케이블의 절연파괴를 유발하기까지도 한다. 따라서 이러한 트리현상을 억제하는 방법이 현재 널리 연구 중에 있다. XLPE에 화합물을 첨가하여 그 특성을 개선하는 방법에는 절연체에 산소를 함유하는 방향족 화합물, 질소화합물 또는 ferrocene, hydroquinone과 ethoxyterminated siloxane oligomer의 복합 첨가제를 넣어주거나, 극성을 띠는 EVA와 소량 blend 또는 밀도가 아주 낮은 polyethylene(VLDPE)를 첨가해 주는 방법도 있다. TR-XLPE(Tree-Retardant XLPE)에는 여러 가지 첨가물 즉, 트리지연제(treeing retardant), 산화방지제(anti-oxidant), 난연제, UV안정제 등을 첨가함으로써 그 전기적 성능의 향상을 기하고 있으며, 그에 따른 TR-XLPE의 특성은 기존의 TR-XLPE와 다른 특성을 보이게 된다.

본 연구에서는 XLPE에 여러 가지 첨가물을 첨가함으로써 그 첨가물이 XLPE에 미치는 영향을 알아보고자 하였으며, 그 중 트리지연제의 한 부류인 방향족 화합물을 XLPE에 첨가하여 전기적 특성변화 즉, 절연파괴강도, 비유전율(ϵ_r), $\tan \delta$ 등을 측정하여 첨가제가 XLPE에 어떠한 영향을 미치는가를 관찰하고자 하였다.

2. 실험

2.1 시편의 제작

본 실험에서는 밀도 $0.923g/cm^3$ 의 LDPE 수지에 가교제인 DCP(dicumyl peroxide)를 2.0phr을 혼합

한 후 첨가제로서 barbituric acid(Aldrich Chemical Co.), 4-(4-Nitrophenylazo) resorcinol (Aldrich Chemical Co.), 그리고 4-(4-Nitrophenylazo)naphthol(Aldrich Chemical Co.)를 각각 0에서 2.0phr까지 그 조성을 변화시켜가면서 XLPE에 첨가하였다. LDPE에 첨가제의 첨가는 roller-mill을 사용하여 DCP가 완전히 혼합되도록 하였다. DCP와 XLPE의 혼합이 끝났으면 다시 각각의 트리지연제를 원하는 양만큼 넣은 후 다시 10분간 혼합을 하였다. 시료의 혼합을 마친 후에는 가교반응을 통해 XLPE를 제작하는데 가교반응은 hot press를 이용하였으며 이때의 온도는 DCP의 분해온도인 $180^\circ C$ 로 하였으며 가교시간은 10분으로 하였다. 트리지연제의 조성에 따른 각각의 시료를 Table 1에 나타내었다. 첨가제가 첨가는 XLPE를 sheet 형태로 제작하였다. 우선 절연파괴 강도 측정을 위한 시편은 3×3 [cm]의 크기로 제작하였고, 측정시 그 두께를 측정하였다. $\tan \delta$ 와 비유전율(ϵ_r)의 측정을 위한 시편은 1×1 [cm]의 크기로 제작하여 각각의 측정을 하였다.

Table 1. The Composition of Specimen

	4-(4-Nitrophenylazo) naphthol	Barbituric acid	4-(4-Nitrophenylazo) resorcinol
XLPE	0 phr	0phr	0phr
	0.5phr	0.5phr	0.5phr
	1.0phr	1.0phr	1.0phr
	1.5phr	1.5phr	1.5phr
	2.0phr	2.0phr	2.0phr

2.2 절연파괴강도의 측정

절연파괴강도는 절연유내압 시험기를 사용하여 평등 전계를 형성하는 구 대 구 전극사이에 $30 \times 30 \times 0.3$ [mm]의 크기로 시편을 만들어 1 [kV/s]의 속도로 교류전압을 상승시키면서 절연파괴가 발생할 때까지 실험을 하여 절연파괴강도를 측정하였다. 측정 시 같은 조성의 시편에 대해 3번의 측정을 하였으며 그 평균값을 결과 값으로 채택하였다. 절연파괴강도는 높을수록 절연재료로서의 좋은 성능을 나타낸다고 할 수 있다. 또한 이 값은 시편의 두께와 매우 밀접한 관계를 가지고 있으므로 시편의 두께를 0.3 [mm]로 일정하게 제작하였고, 제작된 시편에 대해서도 측정부위에 대해 3번의 두께측정을 하였으며, 그 측정값을 평균값을 시편의 두께로 채택하였다.

2.2 유전손각 및 비유전율의 측정

시편을 1×0.9 [cm] 인 정사각형으로 만든 후 구리전극을 붙인 후 리드선을 붙여 Hewlett packard 4194A Impedance analyzer 측정장치를 사용하여 각

각의 시편에 대해 C 값과 $\tan \delta$ 값을 측정하였다. 이때 전압은 교류 1[kV]로 일정하게 하였다.

시편을 제작함에 있어서 불순물의 영향을 최소한으로 줄이기 위해, 측정 전에 10분 동안 초음파세척을 하였으며, 60°C에서 30분 건조시킨 후, 다시 아세톤으로 표면을 세척한 후 시편을 제작하였다. 구리전극은 copper foil의 형태로 되어있는 것을 사용하였으며, 리드선은 얇은 전선을 사용하여 구리전극 사이에 붙였다. ϵ_r 값은 구해진 C 값을 다음의 식(1)에 대입함으로써 얻어진다.

$$\epsilon_r = \frac{C \times d}{\epsilon_0 \times A} \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ [F/m]

A : 시편의 면적[cm²]

d : 시편의 두께[cm]

C : 정전용량[pF]

2.3 트리개시전압의 측정

시편은 20×30×1 [mm]로 일정하게 제작하였고, 트리판측용 침을 시편내에 넣은 후 시편의 바닥부분에 silver paste를 고르게 발랐다. 트리개시전압은 시편을 실리콘유에 함침한 후 절연유 내압시험기를 이용하여 측정하였고, 교류전압 1kV를 1분간 인가한 후 트리가 200 μ m 이상 관측되었을 때의 값을 트리개시전압 값으로 하여 측정하였다. 시편의 구성방법은 Fig. 1에 나타내었다.

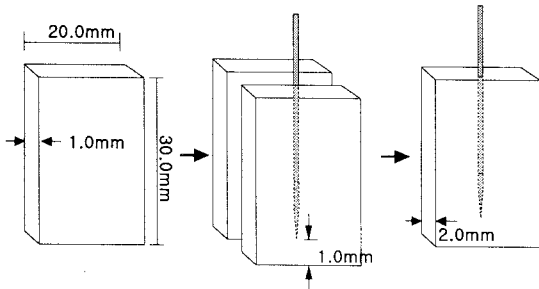


Fig. 1. Schematic diagram of specimen for tree test.

3. 결과 및 고찰

3.1 절연파괴강도 측정결과

Fig. 2에 절연파괴 강도의 측정결과를 나타내었다. 첨가제의 함량에 따른 절연파괴강도는 4-(4-Nitrophenylazo) naphthol을 1.0phr 혼합하였을 때 가장 높은 값을 나타내었으며, 각각의 첨가제의 함량에 따라 각기 다른 절연파괴강도를 나타내었다. 특히, 4-(4-Nitrophenylazo) naphthol를 첨가함에 따라 절연파괴강도가 증가하는 것은 질소화합물에 포함되어 있는 NO₂기의 전자친화도에 기인하는 것으로 사료된다.

한편, 각각 첨가제의 함량이 2.0phr이 되었을 때는 절연파괴 강도가 감소하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 그 양이 과도하여 첨가제 본래의 역할을 하지 못하고 수지 내부에 과량 존재함으로써 역효과를 낸 것으로 사료된다.

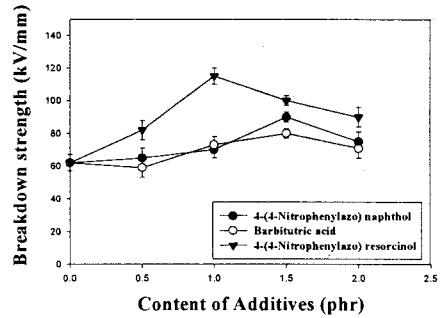


Fig. 2 Breakdown strength of XLPE by content ratio of additives.

3.2 비유전율(ϵ_r), $\tan \delta$ 의 측정결과

Fig. 3에는 각각의 첨가제와 그 함량에 따른 $\tan \delta$ 값의 측정결과를 나타내었다. 각 첨가제의 종류 및 함량에 따라서 그 값이 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 가장 좋은 특성을 보이는 첨가제와 그 때의 조성은 4-(4-Nitrophenylazo) resorcinol이 1.0phr 첨가되어 있을 때이며, 약 0.0042의 값을 갖는다. 첨가제가 이 $\tan \delta$ 값에 미치는 영향을 전체적으로 볼 때 초기의 값보다 약간씩 증가하는 경향을 보이는데, 이는 이들 첨가제가 유극성 물질이므로 배향분극의 기여가 증가되기 때문으로 사료된다. 절연재료에서 $\tan \delta$ 의 증가는 실용적으로 바람직하지 못하다고 할 수 있다.

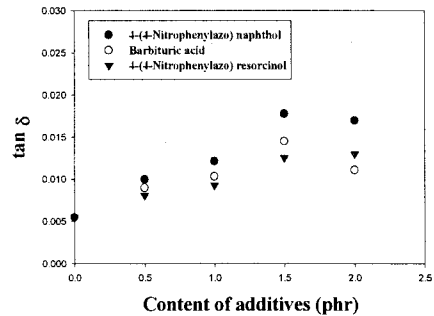


Fig. 3. $\tan \delta$ value of XLPE by content ratio of additives.

Fig. 4에는 각각의 첨가제와 그 함량에 따른 비유전율의 측정결과를 나타내었다. 초기의 첨가제가 첨가되지 않았을 때의 비유전율이 가장 낮은 것을 알 수 있었으며, 첨가제를 첨가했을 때 가장 작은 값을 나타낼 때의 첨가제 종류와 그 함량은 4-(4-Nitrophenylazo) resorcinol이 0.5phr 첨가되어 있을 때이며, 약 2.61의 값을 갖는다. 이 비유전율 또한 값이 작을수록 절연체로서 적합하다고 할 수 있다. 유전체의 비유전율은 항상 1보다 크다. 첨가제를 첨가하였을 때 XLPE의 비유전율은 첨가하지 않았을 때보다 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 전의 $\tan \delta$ 값의 측정실험결과와 마찬가지로 첨가제가 유극성 물질이므로 배향분극의 기여가 증가되기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

첨가물 첨가에 따른 XLPE의 전기적 특성의 변화를 관찰하기 위하여 XLPE에 트리지연제인 barbituric acid, 4-(4-Nitrophenylazo)resorcinol 그리고 4-(4-Nitrophenylazo)naphthol을 각각 조성이 다르게 첨가하여 그에 따른 XLPE의 전기적 특성변화 즉, 절연파괴강도, 비유전율(ϵ_r), $\tan \delta$ 등을 측정하여 첨가제가 XLPE에 어떠한 영향을 미치는가를 관찰하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. XLPE에 세 가지 종류의 트리지연제를 각각 조성이 다르게 첨가한 후 절연파괴강도를 측정된 결과 4-(4-Nitrophenylazo) naphthol을 1.0phr 혼합하였을 때 가장 높은 값을 나타내었으며, 각각의 첨가제의 함량에 따라 각기 다른 절연파괴강도를 나타내었다.
2. $\tan \delta$ 값을 측정된 결과 4-(4-Nitrophenylazo)resorcinol이 1.0phr 첨가되어 있을 때 가장 낮은 $\tan \delta$ 값이 나왔으며, 첨가제의 양이 증가함에 따라 그 값이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 첨가제가 유극성 물질이므로 배향분극의 기여가 증가되기 때문이다.
3. 비유전율을 측정된 결과 4-(4-Nitrophenylazo)resorcinol이 0.5phr 첨가되어 있을 때, 약 2.61의 가장 낮은 비유전율을 얻을 수 있었으며, 첨가제가 혼합되지 않았을 때보다 비유전율은 약간 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

위의 결과를 종합해 보면 XLPE에 첨가제를 가함으로써 전기적인 특성을 개선할 수 있다는 것을 알 수 있었으며, 그 첨가제의 양이 과도할 경우에는 역효과를 유발한다는 것을 알 수 있었다. 현재까지의 실험 data를 고려해 볼 때 (4-Nitrophenylazo) naphthol이나 4-(4-Nitrophenylazo)resorcinol 등의 질소화합물 계통의 트리지연제가 XLPE의 전기적 특성을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다.

(감사의 글)

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관(과제관리번호 : 제 00-지-10호)으로 수행되었기에 감사 드립니다. 또한 실험에 큰 도움을 주신 충남대학교 손원근 박사님과 충북대학교 전기공학과 임기조 교수님께 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] W. C. Choi, K. S. park, S. O. Han, "Breakdown Characteristics of XLPE/EPDM on the treatment condition of the Interfacial layer", *5th ICPADM*, Vol. 1, pp. 345-348, 1997.
- [2] Steennis, E. F. and Kreuger, F. H., Vater "Treeing in polyethylene cables", *IEEE Trans. Elec. Ins.*, Vol. 25, pp. 989-992, 1990.
- [3] S. Nagasaki et al., "Philosophy of Design and Experience on High Voltage XLPE Cables and Accessories in Japan", *CIGRE Report*, No. 21-01, 1988
- [4] E. M. Sherif, A. E. Vlastos, "Influence of Aging on the Electrical Properties of Composite Insulators", *5th ISH*, 51.01, pp. 1-5, 1987.

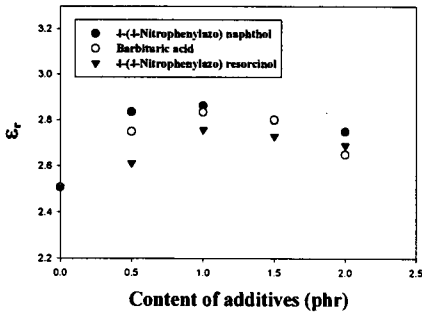


Fig. 4. The characteristics of ϵ_r by content ratio of additives in XLPE.

3.3 트리개시 전압의 측정결과

Fig. 5는 각각 첨가물의 함량에 따른 트리개시 전압을 나타낸 것이다. 아무 것도 첨가되지 않은 XLPE의 경우 약 10kV에서 최초의 tree가 발생하였으나 트리지연제를 첨가함에 따라 트리개시 전압이 약간씩 상승하는 것을 관찰할 수 있다. 가장 높은 트리개시전압을 보이는 첨가제와 함량은 (4-Nitrophenylazo) naphthol이 1.0 phr 함유되어 있을 때 약 13.5kV로 가장 높은 값을 보였다. 이것은 앞에 측정된 결과인 $\tan \delta$ 와 ϵ_r 측정결과에서 질소화합물이 좋은 특성을 보였던 것과 거의 일치하는 결과를 나타낸 것으로서 전기적 성질이 향상됨에 따라 트리개시 전압도 함께 상승되는 것으로 사료된다.

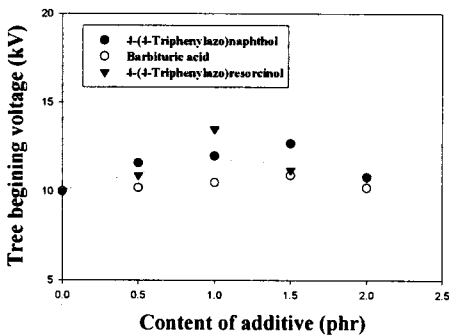


Fig. 5. The tree beginning voltage by content ratio of additives in XLPE.



Fig. 6. The image of water tree in XLPE at the tip of needle.