衝擊疲勞를 받은 架橋폴리에틸렌 誘電體의 交流絶緣破壞 特性에 關한 硏究

論 文
29—9—1

A Study on the A.C. Breakdown Charactistics of Cross-Linked Polyethylene Dielectrics Subjected to the Impulse Fatigue.

郭 永 淳* · 孫 濟 奉**
(Young-Soon Kwak, Je-Bong Son)

Abstract

This paper is intended to analyze the characteristics of breakdown of polyethylene dielectrics, which was caused by A.C. voltage after impulse fatigue, by using weibull distribution.

The impact of impulse fatigue upon the accurance and development of tree and the impact of void upon treeing are investigated.

From the results of experiment, it is found that the life of polyethylene subjected to impulse voltage is shorter than that not subjected to impulse voltage.

And in the case of void existence, it's life comes to be short remarkably, and the breakdown is almost concentrated on its initiation. From the results observed by the microscope, it is found that the treeing phenomena varies according as whether impulse voltage was applied to polyethylene before being applied to A.C. voltage and whether polyethylene has void or not.

1. 緖 論

高分子 系統의 絶緣材料의 開發과 더불어 近年에는 폴리에틸렌 誘電體가 電力系統의 絶緣케이블로서 많이 이용되고 있다. 더우기 最近에는 電力系統의 증대와 超高壓化 추세에 따라 高分子 絶緣材料 中에서 電氣的 特性이 우수한 架橋 폴리에틸렌 誘電體에 대한 硏究[1~14]가 活發히 進行되고 있다. 電力系統에서는 雷擊 혹은 開閉서어지등의 衝擊電壓에 의한 疲勞를 받는 경우가 많고, 常規運轉 狀態에서도 經年劣化에 의한 誘電體의 內部劣化가 생겨 絶緣耐力을 弱化시키는 경우가 많으므로, 本 硏究에서는 架橋 폴리에틸렌 誘電體에다 衝擊電壓을 印加하여 破壞시키지 않고 衝擊疲勞만을 준 狀態에서 交流電壓을 印加하여 破壞시켰을 때 衝擊電壓과 交流電壓의 各 스트레스 레벨에 따라서 생기는 絶緣破壞 特性을 Weibull 分布[16]를 이용하여 解析하고, 衝擊電壓을 받은 경우가 받지 않은 경우에 比해 交流電壓에 의해 絶緣破壞될 때 絶緣破壞 現象을 比較檢討를 하고, 絶緣破壞에 영향을 끼치는 보이드 効果 및 絶緣破壞 機構를 트리잉(Treeing) 現象으로서 考察하였다.

2. 試料와 實驗方法

2.1 試 料

本 實驗에 使用한 試料는 國內에서 製作된 23kv, 60mm² 電力케이블에 使用된 絶緣體인 低密度 架橋 폴리에틸렌으로서 22mm 길이로 切斷하고 그림 1과 같이 切削加工한 試片을 만들어 使用하였다. 이와 같이 만들은 試片을 80°C의 물속에서 15分間 加熱하여(周

* 正會員 : 釜山大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博
** 正會員 : 盛智工業 專門大學 電氣科 助敎授
接受日字 : 1980年 6月 30日

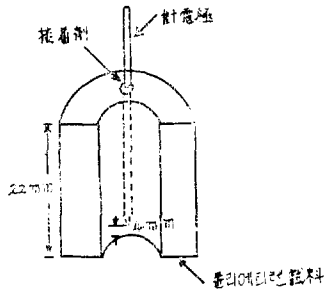

그림 1. 試 料
Fig. 1. Specimen

邊溫度 26°C~28°C) 針電極을 삽입한 뒤 이 狀態에서 서서히 常溫까지 冷却시켰다. 특히 Water Tree發生을 고려하여 長時間 放置한 후 實驗토록 하였다. 架橋 폴리에틸렌의 軟化溫度가 130°C 이상[17]이므로 恒溫槽內에서 構造의 變化가 일어나지 않았을 것으로 思料된다 또 이때 使用한 針電極은 木綿針(特號)으로서 曲率半徑 20μm, 길이 6cm, 直徑 1.05mm이다. 이때 人工的 보이드인 針狀보이드 길이는 500μm되게 하였다. 그리고 針電極과 架橋 폴리에틸렌 誘電體 表面에는 電壓의 印加 課程에서 폴리에틸렌 內部의 空氣의 散逸을 放止하기 위하여 에폭시 樹脂系 接着劑로서 接着하였다. 또한 試料는 시리콘 油槽속에 담가 電壓印加時 沿面코로나 放電을 放止하도록 하였다. 本 實驗에 使用된 實驗裝置로서 針 對 平板電極을 使用하였고, 平板電極을 接地시켰으며, 針과 平板電極의 間隔은 4mm로 하였다. 또 平板電極은 直徑 5cm, 두께 5mm의 黃銅圓板을 使用하였다. 衝擊電壓을 加하기 위한 衝擊電壓發生裝置는 多段式 直列充電方式이며 最大發生 衝擊電壓이 300kv로서 1×40μs의 衝擊波를 發生한다.

2.2 實驗方法

위의 方法으로 製作한 試料를 各各 보이드 無와 有로 나누어 먼저 보이드 無를 기초로 하여 正極性의 1×40μs의 衝擊電壓을 絕緣破壞가 일으날때 까지 階段昇壓法에 의한 豫想破壞 스트레스을 求하고 이 破壞스트레스의 平均値E_B (36kv/mm)를 豫想破壞 스트레스로 定하고, 이것을 基準으로 하여 스트레스레벨 E_L를 定했다. $\left(\frac{E_L}{E_B}=S_{LB}\right)$ 여기서 E_B를 基準으로 하여 얼마의 스트레스 레벨의 衝擊電壓에 의해서 이니셜 트리(Initial Tree)가 發生하는가를 50倍의 현미경을 使用하여 觀察한 結果, 스트레스 레벨 S_{LB}=0.6 정도에서 나타나기 시작하였다. 또 上記의 衝擊電壓에 의해 疲勞를 받은 試料에다 60Hz의 正弦波 交流電壓을 印加한다. 이때 印加하는 交流電壓은 衝擊電壓을 받지 않고 보이드無의 試料의 交流破壞電壓 平均値(36kv)에 대한 스트레스 레벨 0.8(28kv)과 0.9(32kv)에 상당하는 電壓을 各 試料群과 交流破壞 스트레스 레벨에 따라 30개의 試料에다 印加하여 絕緣破壞될때 까지의 時間을 測定하였다. 各 試料群에 대하여 各各 고유번호를 表示하여 分類하면 表 1과 같다.

表 1. 試料의 分類
Table 1. Groups of specimen

試料群番號	보이드 有 無	衝擊電壓 스트레스 레벨(S_{LB})	交流電壓 스트레스 레벨(S_{LA})
試料群 1	無	0.7	0.8 0.9
試料群 2	無	0.85	0.8 0.9
試料群 3	有	0.7	0.8 0.9
試料群 4	有	0.85	0.8 0.9

衝擊 및 交流電壓이 印加된 試料는 各各 1.5~2.0 mm 두께의 薄片을 만들어 28~50倍의 현미경을 使用하여 이니셜 트리 및 트리의 形狀을 觀察하고 촬영하였다.

3. 實驗結果와 考察

3.1 電壓印加 時間에 대한 絕緣破壞 頻度分布

本實驗의 結果値로서 絕緣破壞까지의 電壓印加 時間에 대한 破壞分布를 히스토 그램으로 나타내면 그림2, 그림 3과 같다. 스트레스 레벨 0.9의 交流電壓에서 試料群 1은 最高破壞頻度點인 5초 以下에서 試料의 60%가 破壞되었으며 거의 正規分布에 가깝고 試料群 2는 最高破壞頻度點인 3초 以下에서 40%정도가 破壞되었으며 試料群 3은 最高破壞頻度點인 2초 以下에서 대략 60%가 破壞되었으며, 試料群 4는 最高破壞頻度點인 1초 以下에서 50%가 破壞되어 거의 電壓印加 초기에 破壞가 集中되는 狀態를 나타냈다. 다음 스트레스 레벨 0.8의 交流電壓에서는 試料群 1은 最高破壞頻度點인 15초 以下에서 50% 破壞되었고, 試料群 2는 最高破壞頻度點인 10초 以下에서 약 40%가 破壞되었으며, 試料群 3은 最高破壞頻度點인 6초 以下에서 약 70%가 破壞되었고 試料群 4는 最高破壞頻度點인 1초 以下에서 약 30%가 破壞되었다.

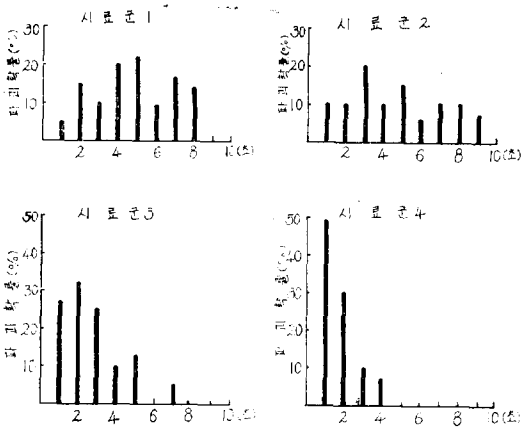

그림 2. 印加電壓時間에 對한 絶緣破壞 頻度分布 (S_{LA}=0.9)

Fig. 2. Histogram of times of applied A.C. voltage to XLP disruped (S_{LA}=0.9)

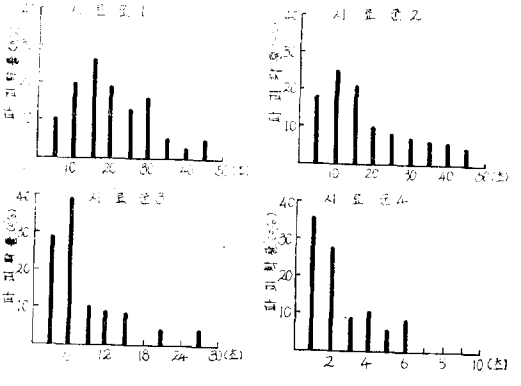

그림 3. 印加電壓時間에 對한 絶緣 破壞 頻度分布 (S_{LA}=0.8)

Fig. 3. Histogram of times of Applied A.C. voltage to XLP Disrupted (S_{LA}=0.8)

위의 試料群의 結果分布를 더욱 자세하게 Weibull 分布 파라메타에 의하여 考察해 본다.

3.2 Weibull 分布에 의한 考察

그림 4와 그림 5는 電壓印加時間 t 對 累積破壞確率 $F(t)$에 대한 Weibull分布[16]이며 各 試料群에 대한 分布파라메타는 表 2에 一括하여 表示하였다. 그림 4, 그림 5와 表 2에 나타난 結果를 各 試料群에 대하여 그 特徵을 考察하면 다음과 같다. 試料群1의 Weibull 分布는 交流스트레스 레벨 0.9 및 0.8에서 모두 直線的으로 나타났고 모두 $m>1$로 나타났으며, 스트레스

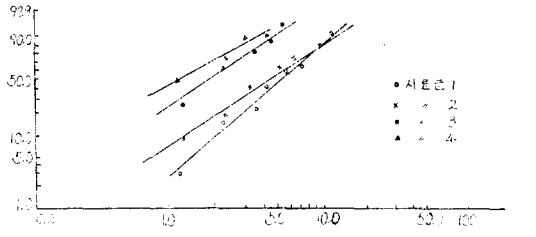

그림 4. t對 $F(t)$의 Weibull Plot S_{LA}=0.9

Fig. 4. Plot of data on Weibull graph illustrating a relation between t and $F(t)$ (S_{LA}=0.9)

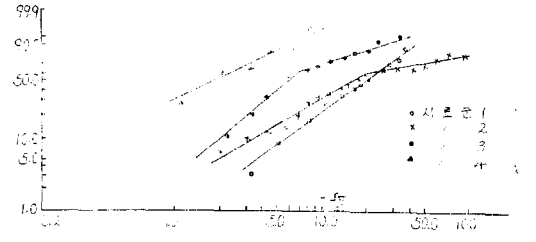

그림 5. t對 $F(t)$의 Weibull Plot S_{LA}=0.8

Fig. 5. Plot of data Weibull graph illustrating a relation between t and $F(t)$ (S_{LA}=0.8)

레벨 0.9인 경우가 더욱 摩耗形으로 나타났으며, 壽命에 있어서는 交流 스트레스 레벨이 낮은 試料가 길게 나타났다. 또한 이것은 衝擊電壓을 받지않은 狀態[13,14]보다 壽命이 짧고 m의 값이 작아지는 것으로 나타났다. 試料群 1보다 높은 스트레스 레벨의 衝擊電壓을 받은 試料群 2는 스트레스 레벨 0.9의 交流電壓에서는 直線的으로 나타났고, $m>1$이며, 스트레스 레벨 0.8의 交流電壓에서는 기울기가 다른 두개의 直線으로 나타나 複合的 分布로 나타났다. 보이드가 存在하지 않는 狀態에서 높은 衝擊스트레스를 받고 낮은 스트레스 레벨의 交流電壓에 의한 破壞는 單一하지 않고 摩耗形에다 初期形으로 된 複合的 分布로 나타났다. 試料群 3은 보이드有의 경우로 스트레스 레벨 0.9의 交流電壓에 의해서는 m≒1로 나타나 破壞의 形態가 거의 一定形으로 되어 偶發的 破壞形으로 나타났으며, 0.8인 경우에는 두개의 기울기를 가진 摩耗形과 偶發形에 가까운 複合的 分布로 나타났다. 試料群 3보다 높은 衝擊電壓을 받은 試料群 4는 交流電壓의 스트레스 레벨에 關係없이 모두 破壞形이 偶發的 破壞로 나타났다. 즉 높은 衝擊電壓의 印加는 交流電壓의 스트레벨에 關係

表 2. 分布 파라메타의 實測値
Table 2. Estimated values of parameter

試料群 No.		交流印加電壓		形狀 parameter m		尺度 parameter α		平均壽命 μ	
		電壓(kv)	스트레스 레벨	m_1	m_2	α_1	α_2	μ_1	μ_2
試料群 1	보이드無 충격 스트레스 레벨 0.7(100kv)	28	0.8	1.71		134.29		17.4	
		32	0.9	1.81		24.53		4.72	
試料群 2	보이드無 충격 스트레스 레벨 0.85(120kv)	28	0.8	1.41	0.6	47.4	5.47	14.58	25.59
		32	0.9	1.54		11.13		4.32	
試料群 3	보이드有 충격 스트레스 레벨 0.7(100kv)	28	0.8	1.88	0.82	24.53	4.06	4.88	6.05
		32	0.9	1.1		3.00		2.12	
試料群 4	보이드有 충격 스트레스 레벨 0.85(120kv)	28	0.8	0.911		2.59		2.52	
		32	0.9	0.86		1.35		1.42	

없이 偶發的 破壞로 됨으로 衝擊電壓의 영향이 나타났음을 實證한다. 또 보이드有의 경우는 대체적으로 偶發形 破壞分布로 되고 보이드 無의 경우는 대체적으로 摩耗形 破壞分布로 됨을 알 수 있다. 또 各試料群의 平均壽命은 보이드無의 경우 스트레스 레벨 0.9의 交流電壓을 比較하면, 衝擊電壓의 스트레스 레벨이 높은 쪽이 낮은 쪽보다 짧고, 보이드有의 경우에 있어서도 역시 同一한 現象임을 알 수 있다. 이는 衝擊電壓에 의한 疲勞의 영향이 나타나고 있음을 말하고 있다.

3.3 Treeing 現象에 의한 考察

衝擊電壓에 의하여 發生하는 이니셜 트리를 衝擊電壓의 스트레스 레벨에 따라 50倍의 현미경으로 그 現象을 觀察한 結果, 스트레스 레벨 0.6의 衝擊電壓에서 이니셜 트리가 觀察되었다. 그림 6~8은 衝擊電壓을 받은 試料의 이니셜 트리를 40倍의 현미경을 통해 촬영한 사진을 나타낸 것이다.

實驗結果에서와 같이 衝擊電壓을 받은 試料는 衝擊電壓을 받지 않은 경우[13,14]보다 破壞壽命이 짧고, 衝擊電壓을 받지 않은 경우의 破壞路는 대개 몇개의 幹에 해당하는 分岐와 微細가지가 많은데[14] 比해 衝擊電壓을 받은 경우의 交流電壓에 의한 破壞路는 대부분 한개의 幹으로 나타났으며, 微細가지도 적게 觀察되었다. 또 이것은 衝擊電壓을 받은 경우가 받지 않은 경

그림 6. 보이드無, 衝擊스트레스레벨 S_{LB}=0.7에서 觀察된 이니셜 트리
Fig. 6. Initial tree observed in S_{LB}=0.7 with nonvoid.

그림 7. 보이드無, 衝擊스트레스 레벨 S_{LB}=0.85에서 觀察된 이니셜 트리
Fig. 7. Initial tree observed in S_{LB}=0.85 with nonvoid.

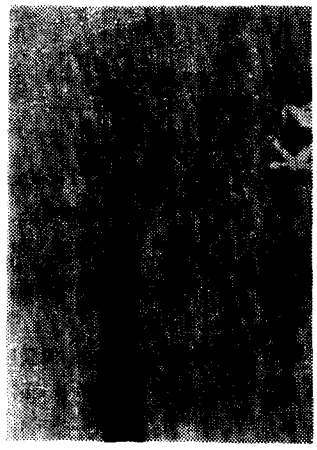

그림 8. 보이드有. 衝擊스트레스 레벨 S_{LB}=0.85에서 觀察된 이니셜 트리
Fig. 8. Initial tree observed in S_{LB}=0.85. with void.

우에 比해 덜 摩耗的임을 보여주는 것이며 Weibull分布 上에서도 衝擊電壓을 받지 않은 경우[13,14]보다 m의 크기가 작게 나타났다. 이것은 針電極 尖端部에 衝擊電壓에 의한 이니셜 트리가 發生하면 放電에 의하여 發生된 荷電粒子가 이 트리의 尖端에 集中되어 針電極을 이니셜 트리의 放電路의 尖端으로 移動한 것으로 된다. 그러므로 일단 트리가 發生하면 電極間의 間隔이 짧아지는 效果를 나타내는 結果로 되어 여기에 交流電壓이 印加되면 트리의 尖端部位에는 交流電壓에 의한 高電界의 形成이 容易해져 트리의 進展을 助長하기 때문인 것으로 思料된다.

그림 9~12는 보이스有, 無 時의 衝擊電壓을 받은 경우의 交流破壞의 트리現象을 倍率 28倍의 현미경 사진으로 나타낸 것이다. 보이드無의 試料에서는 Bush 狀의 트리가 나타나는데 比해 보이드有의 경우는 나무뿌리 모양의 트리가 생기며 보이드無의 경우보다 微細가지가 疎한 傾向을 나타낸다. 또 보이드有나 보이드無의 경우 모두 衝擊電壓의 스트레스 레벨이 높을수록 그 微細가지가 疎하다. 특히 衝擊스트레스 레벨 0.85의 경우는 微細가지가 없이 한個의 幹으로서 全路破壞가 나타나는 것이 觀察되었다.

本 實驗에 있어서 衝擊電壓을 印加하면, 衝擊電壓에

그림 10. 보이드無, 衝擊스트레스레벨 S_{LB}=0.85와 A.C. 스트레스레벨 S_{LA}=0.8에서 觀察된 트리잉
Fig. 10. Treeing observed in S_{LB}=0.85 and S_{LB}=0.8 with nonvoid.

그림 9. 보이드無, 衝擊스트레스레벨 S_{LB}=0.7와 A.C. 스트레스레벨 S_{LA}=0.9에서 觀察된 트리잉
Fig. 9. Treeing observed in S_{LB}=0.7 and S_{LA}=0.9 with nonvoid.

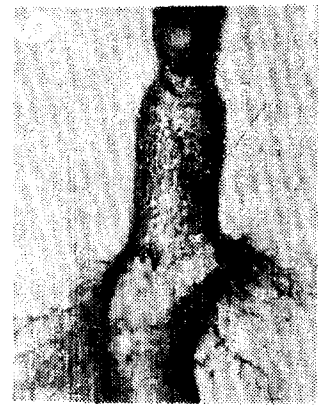

그림 11. 보이드有, 衝擊 S_{LB}=0.7 및 S_{LA}=0.8에서 觀察된 트리잉
Fig. 11. Treeing observed in S_{LB}=0.7 and S_{LA}=0.8 with void.

그림 12. 보이드有, 衝擊 S_{LB}=0.85 A.C. S_{LA}=0.9 에서 觀察된 트리잉

Fig. 12. Treeing observed in S_{LB}=0.85 A.C. S_{LA}=0.9 with void.

의하여 發生된 이니셜트리中의 氣體空間內의 陽 Ion이 放電路의 尖端에 蓄積된다. 이것이 폴리에틸렌內를 進展할려고 할 것이나 進展하기 어려우면 에너지가 더욱 더 蓄積된 후에 따라서 電界의 增加되면 이로 인하여 局部破壞로서 放電路를 伸長할 것이다. 이때 보이드의 有無는 그림 6~그림 8에 表示된 바와 같이 衝擊電壓 印加시 보이드가 存在하는 쪽이 없는 것 보다 가지가 적은 現狀을 보이고 있고 특히 衝擊電壓에 의하여 發生된 트리에 交流電壓을 印加하였을 경우의 보이드의 存在如否는 보이드 및 衝擊電壓에 의한 트리內의 旣存 가스의 多少가 交流電壓에 의한 트리의 放電尖化現象에 影響을 미치고 따라서 電界緩和現象 및 가스에 의한 트리內의 壓力에 影響을 미쳐 트리의 進展 및 形狀에 影響을 미치는 것으로 思料된다. 즉 보이드 存在時의 트리의 伸長은 트리內部의 放電으로 因해 發生한 가스의 容易한 放散으로 壓力効果도 低減될 것이 豫想됨으로 따라서 部分放電이 容易해지며 이 部分放電에 의한 放電스트리마의 成長이 보이드無의 경우에 比해 그림 9~그림 10과 그림 11~12(특히 그림 12와 같이)를 比較해서도 알 수 있는 바와 같이 보이드가 存在하고 높은 스트레스 레벨의 衝擊電壓이 印加된 경우는 幹狀의 全路破壞가 可能한 것으로 思料된다. 이와는 反對로 보이드無의 경우는 衝擊電壓에 의하여 發生된 트리의 進展이 트리 內部의 發生가스에 의한 抑制作用으로 放電스트리마가 進展이 阻害되어 다른 가지로 移行하는 結果 많은 가지 즉 Bush狀의 트리의 形成이 일어나나 여기서 큰 에너지의 貯蓄後 幹狀의 全路破壞가 일어나는 것으로 思料된다. 따라서 보이드가 없는 경우는 衝擊電壓이 印加되더라도 摩耗性 破壞로 되나 보이드가 存在하면 偶發的 破壞形으로 나타나기 쉬움을 보여주는 것이라 할 수 있겠다.

4. 結 論

以上 架橋폴리에틸렌 誘電體에 1×40μs의 衝擊電壓을 준 狀態에서 여기에 다시 스트레스 레벨 0.9 및 0.8의 交流電壓을 印加하여 絕緣破壞 시켰을 때의 特性을 Weibull分布 및 Treeing 現象으로 考察한 結果는 다음과 같다.

(1) 보이드有인 경우에 있어서는 偶發形 分布를 나타내는 경향을 보이고 있으며 대부분 課電初期에 破壞가 集中되었고 보이드無의 경우는 대체적으로 摩耗形 破壞로 되었다.

(2) 衝擊電壓을 받은 試料가 衝擊電壓이 印加되지 않은 것에 比해 壽命이 짧은 것으로 나타났고, 衝擊電壓을 받지 않은 경우의 破壞路는 2個 以上의 幹部位와 微細가지가 많은데 比해 衝擊電壓을 받은 경우는 破壞路가 대부분 한個의 幹으로 觀察되었다.

(3) 보이드無의 試料에서는 Bush狀의 트리로 나타나는데 比해 보이드有의 경우는 幹모양의 트리가 생기며 微細트리는 적어지고 거의 가지가 없는 나무가둥 모양의 形態로 全路破壞가 나타남이 觀察되었다.

參 考 文 獻

1. R. Kaneko and K. Suglyama; "Statistical Considerion on Impulse Breakdown Characteristics of Cross-linked Polyethylene Insulated Cable". IEEE Vol. PAS-94, No. 2 pp. 367~377, 1975.
2. G. Bahder, C. Katz, J. Lawson, W. Vaklstrom; "Electro-Chemical Treeing Effect in Polyethylene and Cross-linked Polyethylene Cables". IEEE PAS Vol.-93 pp. 977~990, 1974.
3. William D. Wilkens; "A Study of Treeing in Medium Voltage Power Cables". IEEE PAS Vol.-93, pp. 1201~1207 1974.
4. B. Yoda and Y. Sekii; "Deterioration by Treeing of Rubber and Plastic Insulated". IEEE PAS Vol.-90, pp. 2682~2691, 1971.
5. A.L Mckeam; "Breakdown Mechanism Studies in Cross-linked Polyethylene Cables". IEEE PAS Vol.-95, pp. 253~260, 1976.

6. Yoshimura, Noto; "Voltage and Frequency Dependence of Initiation and Growth of Tree in Polyethylene". IEEJ Vol. 94-A No.8 pp.347~353 1974
7. F. Noto, N. Yoshimura, K. Shibata; "Growth and Forms of Tree in Polyethylene by Means of Intermittent Applied Voltage". IEEJ Vol. 93-A No. 10 pp.1~7 1973.
8. Ito, Kinoshita, Sakai, Toriyama; "The Time Dependencies of the Internal Partial Discharge Characteristics in the Artificial Void in Polyethylene". IEEJ Vol. 91 No. 12 JIEEJ pp.2358~2364 1971.12.
9. T. Hayami; "Effect of Mechanical Strain on the Treeing Resistance Property of cross-linked Polyethylene". IEEJ Vol. 94-A, No. 12, pp.40~46, 1974.
10. M. Nawata, H. Kawamura, M.Idea:, "Voltage and Temperature Dependence of Treeing Breakdown in the Organic Solid Insulators. IEEJ Vol.91 No.7 pp.208~216 1971.
11. 郭永淳："熱劣化된 폴리에틸렌 케이블의 衝擊電壓에 依한 破壞特性에 關한 硏究(Ⅰ)" 電氣學會誌, Vol. 24 No. 1
12. 郭永淳："熱劣化된 폴리에틸렌 케이블의 衝擊電壓에 依한 破壞特性에 關한 硏究(Ⅱ)" 電氣學會誌, Vol. 24 No. 3 pp.291~304
13. 郭永淳："폴리에틸렌의 공격이 絶緣破壞에 미치는 영향" 電氣學會誌, Vol. 26, No. 3, pp.59~62 1977.
14. 郭永淳・李染成・曺井守："架橋폴리에틸렌의 內部放電・効果에 의한 絶緣破壞特性" 電氣學會誌 1978.
15. J.H Mason; Proc. Inst Elect Engrs. 98 1951.
16. 直 壁："Weibull 確率紙의 사용법"日本規格協會 1972.
17. プテスチツケ加工 技術便覽, 日刊工業新聞社 p.445.