

XLPE 케이블 절연체에서의 가지형 전기트리 성장에 따른 부분방전 위상 특성 연구

論 文
51C-5-6

A Study on the Partial Discharge Phase Properties with Branch Type Electrical Tree Growth in XLPE Cable Insulation

姜 東 植* · 宣 鍾 好** · 金 緯 泳*** · 李 弘 植§ · 朴 正 后§§
(Dong-Sik Kang · Jong-Ho Sun · Wee-Young Kim · Hong-Sik Lee · Chung-Hoo Park)

Abstract - In order to improve the reliability of XLPE cables, it is necessary to find the useful diagnostic parameter according to long term aging. This paper described the change of partial discharge(PD) phase properties of XLPE cable insulation with branch type electrical tree degradation for long term aging. To understand the PD properties with ϕ -q-n distributed shape of XLPE insulation, specimens were prepared by 22.9kV distribution cable and made in a type of block(16 x 16 x 3[mm]). Ogura needles having tip radius of 10 μ m were inserted into each block pieces. The measuring system was consisted of PD detector, digitizer for digital conversion, VXI system for signal processing. The PD properties of the specimens were measured from initiation of tree to breakdown and their characteristics were analyzed. We analyzed the relationship between electrical properties(PD quantity, PD initiation angle, PD extinction angle, PD occurrence angle ; (PD extinction angle - PD initiation angle)) and the normalized aging rate. We found PD parameter, PD initiation angle and occurrence angle, which are a useful diagnostic parameter in estimating the branch type electrical tree for XLPE insulation condition.

Key Words : Electrical tree, XLPE, Partial discharge, Aging, ϕ -q-n, normalized aging rate

1. 서 론

전력용 케이블의 절연재료의 하나인 XLPE(cross-linked polyethylene)의 열화에 관한 많은 연구가 행하여져 왔다. 이러한 XLPE 케이블은 절연성능 향상을 위하여 절연재료 컴파운드에서부터 이물(impurity)이 관리되고, 제조과정 중에서도 이물·돌기(protrusion) 및 보이드(void)의 발생이 최소화되도록 내부반도전층·절연층·외부반도전층을 동시에 압출하는 3중 동시압출 방식으로 제조된다[1]. 그러나 제조과정의 향상 및 주의에도 불구하고 케이블 절연체 내에는 규정치 이하의 이물 및 제조불량으로 인한 큰 이물과 보이드가 존재할 수 있으며, 반도전층 경계면에서는 돌기 및 공극(air gap) 등의 발생도 나타난다. 이러한 케이블 제조과정 중에 생성된 보이드, 이물 및 돌기에 높은 전계강도가 가해지면 XLPE 절연체 내에는 부분방전(partial discharge)이 발생하게 되어 전기트리(electrical tree)로 열화 진전되기 시작하며, 장시간의 열화 현상 후 최종적으로는 전극간 절연파괴를 일으키게 된다. 전기트리 발생에 관하여는 국부적 고전계에 의한 진성파괴 발생설[2]과 국부방전에 의한 이온충격 발생원인설[3]이 있다.

또한 이러한 결점을 지닌 케이블이 수분이 존재하는 환경조건에서 장시간 사용되면 수트리(water tree)가 발생되어 절연 열화를 촉진시켜 절연성능에 나쁜 영향을 주게 된다[1,4-6].

전기트리는 인가전계의 세기에 따라 부시형트리, 가지형트리 등 여러 가지 형태로 분류되며 진전속도 및 방전형태도 다른 것으로 알려져 있다[5,7]. 장기간 사용된 케이블에서 발생하는 전기트리는 직경 수 μ m 정도의 미세한 채널구조를 가지며, 고전계 영역에서는 부시형(bush type)으로 진전되거나 단시간에 원형으로 나타난다. 상대적 저전계 영역에서 전기트리는 가지형(branch type)으로 진전된다. 또한 가지형이 부시형보다 트리 진전속도가 빠른 것으로 나타났[8,9]. 부시형 전기트리는 진전됨에 따라 최대 부분방전량도 증가되지만, 가지형 전기트리의 진전 길이는 최대 부분방전량과 상관성이 나타나지 않는 연구결과도 보였다[7]. 트리 성장에 대한 방전 에너지를 파악 할 수 있는 발광현상 측정실험 예를 살펴보면, 저전계 하에서는 시간경과에 따라 가지형 트리로 진전하면서 발광량의 증대현상을 보이나 발광량의 변동이 심한 것으로 나타났으나, 고전계 하에서는 시간경과에 따라 부시형 트리로 진전하면서 발광량의 증대현상이 적으나 발광량의 변동은 크지 않은 것으로 나타났[8]. 또한, 트리형상은 전극간 거리에 따라 달라지는 것으로, 거리가 긴 경우에는 가지형 \rightarrow 부시형 \rightarrow 원형 순으로 진전된 연구 결과도 나타나 있다[10]. 이와 같이 인가전계에 따라 트리성장이 변화되므로 전기적특성도 변화되는 것으로 알려져 있다. 그러므로 여러 가지 진단 인자를 사용하여 트리 종류 및 진전형태에 따른 부분방전 필스의 변화를 분석하여 최적의 진단기법을 찾아내는 것이 필요하다.

* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 院 新 電 力 機 器 組 團 先 任 研 究 員

** 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 院 新 電 力 機 器 組 團 先 任 研 究 員

*** 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 所 高 電 壓 研 究 室 先 任 技 術 員

§ § 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 所 電 氣 物 理 組 團 組 長

§ 正 會 員 : 釜 山 大 學 校 工 大 電 子 電 氣 通 信 工 學 部 教 授

接受日字 : 2002年 1月 22日

最終完了 : 2002年 3月 8日

케이블 절연열화를 검출하는 여러 가지의 측정기법이 현재 까지 개발되어 일부 사용되고 있지만, 아직 정확한 진단장치는 개발되지 못한 상태에서 많은 연구 및 현장적용 과정에 있다[4,11,12]. 최근 들어 부분방전의 측정 및 분석기술은 전자산업 및 통계처리 프로그램의 발달로 인하여 비약적으로 발전하였다. 디지털 측정기술은 고전적인 아날로그 측정에서는 행하지 못하였던 부분방전 펄스에 대한 위상, 크기 및 개수를 측정하는 ϕ - q - n 분포특성을 신경망 알고리즘과 접목하여 결함종류를 구별하는 연구 등을 가능하게 하였다 [4,13-15]. 이에 의하면 결함의 형태 및 열화정도에 따라 ϕ - q - n 분포특성이 달라지므로, ϕ - q - n 분포특성의 변화로부터 절연체의 상태분석이 가능한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 가지형 전기트리 성장에 관련성을 지닌 부분방전 인자를 도출하기 위하여, 실제 22.9kV 케이블에서 사용되고 있는 XLPE 케이블 절연층을 일정형태(16 x 16 x 3[mm])로 만든 다음 Ogura 침전극을 삽입하여 전압의 크기를 변화시켜 가지형의 전기트리를 발생시켰다. 전기트리의 진전 특성으로 초기상태에서부터 전기트리가 성장하여 절연층이 파괴될 때까지의 부분방전 펄스의 ϕ - q - n 분포특성을 파악하고자 디지털 부분방전 측정시스템을 통하여 관찰하고, 이와 관련된 각종 열화관련 인자(부분방전 크기, 방전 발생위상, 방전 소멸위상, 방전 발생위상폭)를 분석하였다.

2. 실험

2.1 시료제작 및 관측장치 구성

XLPE 케이블의 전기적 열화인자 도출을 위한 실험은 크게 2단계로 준비하였다. 하나는 측정시료전극의 제작 및 준비과정이며, 다른 하나는 측정시스템의 구성이다.

시료로 이용되는 시편 절연물로는 국내 지중배전 선로에 이용되는 22.9kV급 XLPE 전력케이블의 절연체로부터 16 x 16 x 3[mm]씩 잘라내어 시편으로 사용하였다. 전기트리 발생을 위한 침전극은 전기트리 실험용으로 많이 사용되고 있는 Ogura 바늘(곡률 반경은 10[μ m], 선단 각도는 30[$^{\circ}$])을 이용하였다. 전극의 형태는 그림 1과 같이 침대 평판 구조로 하여 시편의 중앙 부위에 바늘을 삽입하였으며, 바늘 끝에서 대향전극까지의 갭 길이는 1.5 - 2.5[mm] 사이로 설정하였다. 바늘을 일정 깊이로 삽입하기 위한 취부공구를 그림 2와 같이 제작하고, 그 중앙에 시편을 고정하였다. 바늘 삽입시 시편의 미세 균열을 방지하기 위하여, 열풍기로 시편의 온도를 90 - 100[$^{\circ}$ C]로 유지시킨 다음 서서히 바늘을 갭 길이 일정 지점까지 삽입한 다음 상온으로 서냉한다. 이때 냉각도중 바늘이 밀려나오는 것을 방지하기 위하여 시료와 전극의 경계를 에폭시 수지로 견고하게 유지시켰으며, 완전히 냉각된 다음 취부공구에서 제작된 시료를 분리하였다. 전극이 삽입되지 않은 반대쪽 표면은 실버 페이스트(Dotite D-500)를 얇게 도포하여 대향전극을 형성하였다. 이와 같이 준비된 침전극 시료는 전압인가 시 발생하는 연면방전을 방지하기 위하여 실리콘유가 들어있는 아크릴 측정용기(300 x 150 x 50[mm])에 담근 후 시험용 변압기로 전압을 인가하여 인공적으로 전기트리를 발생되게 구성하였다.

시편에 전압이 인가된 후 발생 진전되는 전기트리의 형상 및 성장길이를 관측하기 위하여 그림 3과 같이 광원, video camera, optical microscope, image processor 및 컴퓨터로 구성된 전기트리 진전 관측 시스템을 구성하였다.

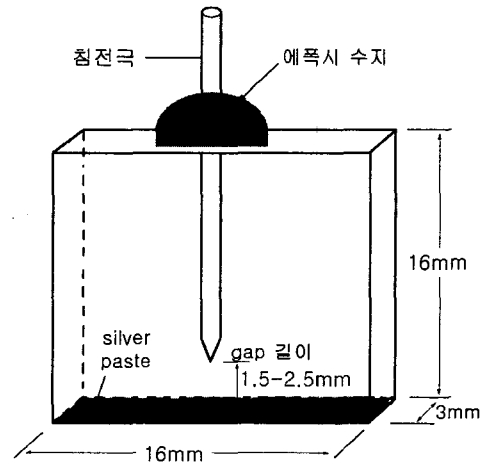


그림 1 전기트리용 시료 형상

Fig. 1 Configuration of the specimens for electrical tree

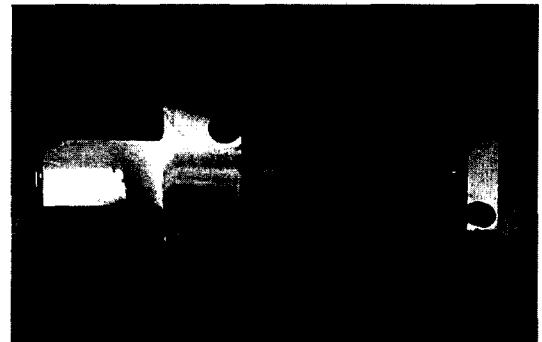


그림 2 바늘삽입용 취부공구

Fig. 2 The fittings of needle insertion

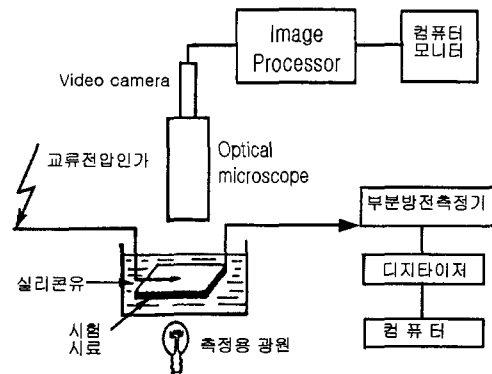


그림 3 전기트리 진전 관측 시스템

Fig. 3 Observation system on growth of electrical tree

2.2 부분방전 측정시스템 구성

부분방전 측정시스템은 그림 4와 같이 50kV급 시험용 변압기, 분압비가 2000:1인 분압기, 변압기 및 분압기 보호용 blocking 저항, 정전용량이 667[pF]인 결합콘덴서, IEC 60270에 따른 결합콘덴서를 사용한 고전적 걸보기 부분방전 전하량 측정기법에 필요한 주파수 대역이 수십 kHz에서 수백 kHz 사이인 RLC 공진형 검출 impedance 회로를 지닌 아날로그형 상용 부분방전 측정기(NIHON model CD-5), 측정 샘플링수가 256-15,000개 사이로 가변이 가능한 부분방전 펄스의 디지털 변환용 디지털타이저(Tettex model TVS610), 통신용 VXI bus, 측정용 시료 및 컴퓨터로 구성하였다. 이와 같이 구성된 측정시스템을 차폐율이 75[dB] 이상인 실험실에 설치하여 실험하였다.

본 연구는 XLPE 절연체에서 발생하는 전기트리 발생펄스의 발생 위상, 방전량 및 발생수량에 대한 연속적인 측정을 위하여 자체 구성한 디지털 부분방전 시스템으로, 시료에 인위적으로 발생시킨 부분방전 펄스의 ϕ -q-n 변화를 관측하여 특성을 분석하는 것이다. 이를 위하여, 일차적으로 분압기 전원을 통하여 위상동기화 회로를 구성하였으며, 인가전압의 위상이 항상 0도에서 일정하게 트리거 전압을 발생시켜 sweep하도록 하였다. 부분방전 측정기를 통하여 측정된 방전 펄스는 디지털타이저로 전송되며, 시료에 인가된 전원위상과 동기화 시킨다. 사용된 디지털타이저는 측정 샘플링수가 256-15,000개 사이에서 26단으로 가변이 가능한 기능을 지니므로, 측정조건을 최적화를 위하여 구형과 입력전압에 대한 부분방전 펄스 최대치 분포를 파악한 결과, 샘플링을 250[kS/s] 및 샘플링수 4168 이상인 경우에는 방전펄스 최대치의 표준편차를 2[%] 이하로 나타냈다. 또한, 발생된 방전펄스의 최대치 및 위상정보를 파악하고 일정회수 측정 후 자동으로 저장하는 프로그램을 LabWindows/ CVI로 작성하였다 [16].

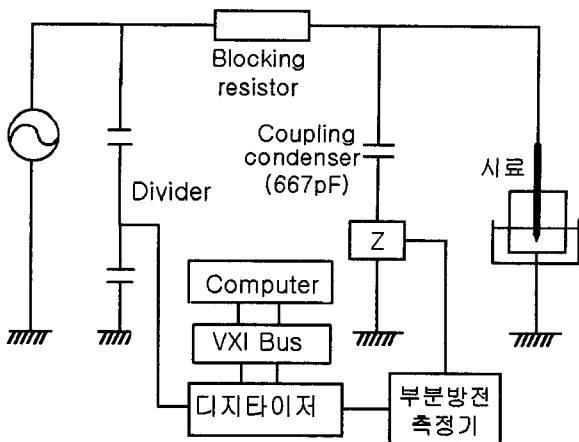


그림 4 부분방전 측정 실험회로

Fig. 4 Schematic diagram of PD measurement system

2.3 부분방전 실험방법

동일한 고체절연재료에서 모의된 부분방전 펄스 형상은 비슷한 상승시간 및 폭을 지니므로 부분방전량은 부분방전 펄스 최대전압과 비례하게 된다[16]. 그러므로, 디지털타이저에 나타나는 부분방전 펄스의 최대크기를 부분방전량으로 교정하였다. 교정용 펄스는 PD calibrator(NIHON model NPG-2)를 사용하였으며, 펄스 상승시간이 30[ns]이고 부분방전량이 50, 100, 200, 500[pC]을 그림 4와 같이 구성한 시료에 인가하여 방전펄스의 최대전압 크기로 교정한 것으로 표 1에 그 결과를 나타내었다.

표 1 부분방전 펄스 크기 교정

Table 1 Calibration of PD pulse peak value

부분방전량 [pC]	50	100	200	500
방전펄스 최대 크기 [V]	0.75	1.50	2.90	7.30

시료에 삽입된 침전극에 가해지는 인가전압은 교류 6-10 [kV] 사이에서 시료두께에 따라 일정하게 연속으로 인가하여 전기트리의 발생 및 성장이 가능하게 하였으며, 이용한 시료수는 6개이다. 각 시료에서 전기트리가 발생하기 시작하여 절연층이 파괴될 때까지 부분방전 펄스의 ϕ -q-n 변화 및 트리의 진전형태를 연속하여 측정하였다. LabWindows/ CVI로 작성한 프로그램을 통하여 측정간격을 10분으로 설정하여 매 10분마다 연속으로 측정되게 하였으며, 한번 측정 때마다 반복 sweep 회수를 30회로 설정하였다. 1회 sweep 시간은 60 Hz 인가전압의 한 주기인 16.67[msec]로 설정하였으며, 측정은 샘플링을 250[kS/s] 및 샘플링수 4168개로 선정하여 방전펄스 최대치의 표준편차를 2[%] 정도가 되게 함으로 측정결과의 정확도를 부여하였다[16]. 측정시 threshold level을 10[pC]으로 설정하여 back noise를 최소화하였다.

3. 실험결과 분석

3.1 부분방전 실험결과 처리

그림 5에는 8kV를 인가한 5번 시료(전극간거리: 2.0mm)에 있어서 열화시간에 따른 트리의 성장 형태를 나타내었다. 전체 시료에 가해진 인가전압, 전극간 거리, 절연과피가 발생할 때까지의 파괴시간, 트리 형상 및 파괴발생 직전의 부분방전 최대크기는 표 2와 같이 나타냈다. 측정되어 저장되어지는 파일은 부분방전 펄스의 반복회수, 샘플링 위치, 인가전압 크기 및 방전펄스 크기로 이들로부터 방전펄스의 위상, 크기 및 개수 정보를 제공받게 된다. 측정된 결과로부터 처리되어진 2차원 결과 예를 그림 6에 나타내었다.

본 연구에서 나타난 시료들의 파괴시간이 각각 다르므로, 전체 시료에 대한 열화특성을 고찰하기 위하여 표준화 열화율(normalized aging rate)로 나타내어 비교 분석하기로 하였다. 표준화 열화율은 모든 시료에 대하여 열화시작 시점을 0으로 두고 파괴가 발생하는 시점을 1로 정의하여, 시료의 초기시점과 최종 파괴시점을 등가화 함으로서 전체 시료의 초

기상태와 말기상태를 동일한 X축 상에서 표현함으로써 시료의 열화율에 따른 각종 부분방전 인자를 비교 가능토록 설정한 것이다.

표 2 부분방전 실험 조건 및 결과

Table 2 PD test conditions and results

시료구분	전극간 거리	인가전압	파괴시간	트리형상	최종 PD량
No. 1	2.5 mm	10 kV	315 분	가지형	510 pC
No. 2	1.5 mm	7 kV	810 분	가지형	40 pC
No. 3	2.3 mm	10 kV	166 분	가지형	420 pC
No. 4	1.9 mm	8 kV	370 분	가지형	400 pC
No. 5	2.0 mm	8 kV	388 분	가지형	110 pC
No. 6	1.5 mm	6 kV	1720분	가지형	150 pC

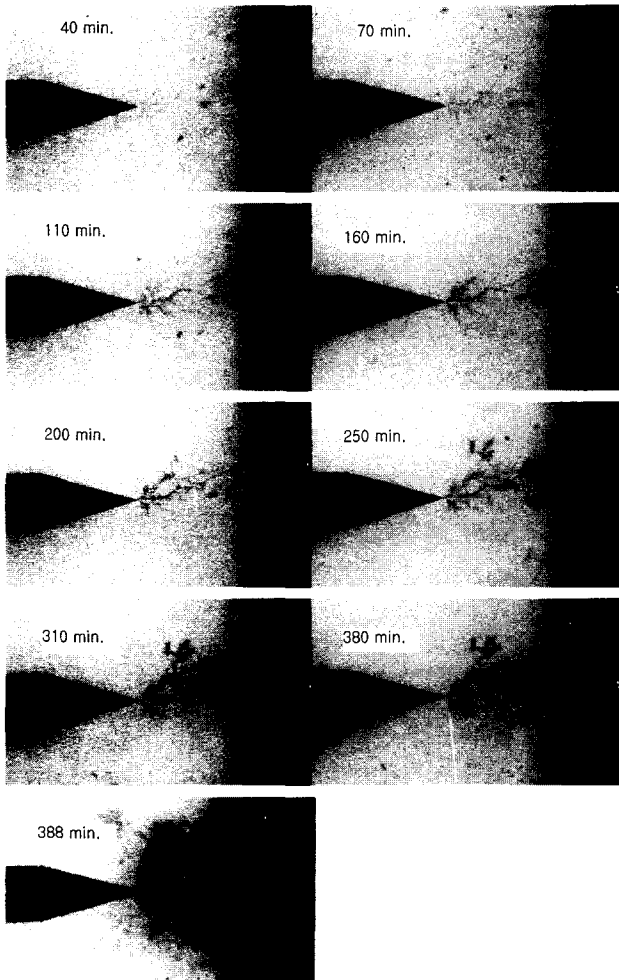
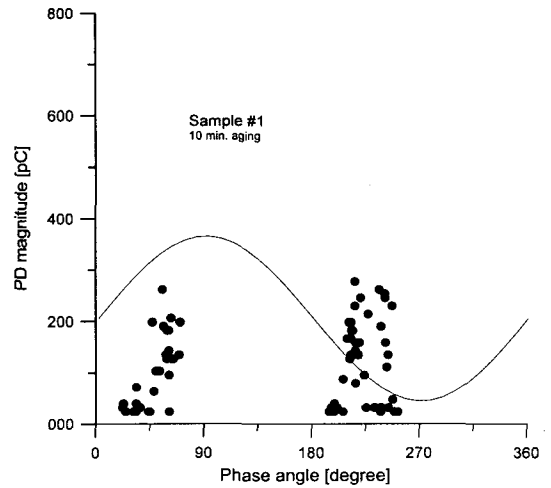
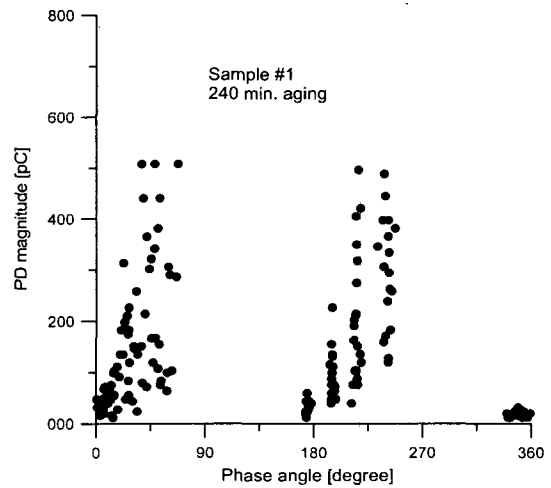


그림 5 열화시간에 따른 전기트리 형상 (시료 #5)
Fig. 5 Electrical tree structures according to aging time



(a)



(b)

그림 6 φ -q-n 분포로 측정된 부분방전 결과

- (a) 10분 열화 (시료 #1)
- (b) 240분 열화 (시료 #1)

Fig. 6 PD measuring result using φ -q-n distribution

- (a) 10 minutes aging (Sample #1)
- (b) 240 minutes aging (Sample #1)

3.2 부분방전 크기 분석

표 2에 나타난 것과 같이 전체 6개 시료는 모두 가지형 트리형상을 지니며, 부분방전 최대크기 도 일정하게 증가되지 않는 것으로 나타났다. 이들 중 3개 시료에 대한 열화시간에 따른 최대 부분방전 크기의 변화를 나타낸 것이 그림 7이다. 이는 저전계 영역에서 나타나는 가지형 트리의 부분방전량 크기변화와 일치된 경향을 보였다[7]. 그림 8은 전체 6개 시료에 대한 최대부분방전량의 변화를 규준화 열화율로 나낸 것으로, 규준화 열화율에 따른 최대부분방전량의 관련성 설명력이 약한 것으로 보여진다. 이는 저전계강도에서의 방전에너지가 적어 트리길이에 해당하는 부분방전이 계속 일어나지 못하고 간헐적으로 발생되며 트리 채널중 부분적으로 작은 방전이 일어나기 때문인 것으로, 발광현상을 통하여 측정된 실험결과와도 잘 일치되는 것으로 보여진다[7,17].

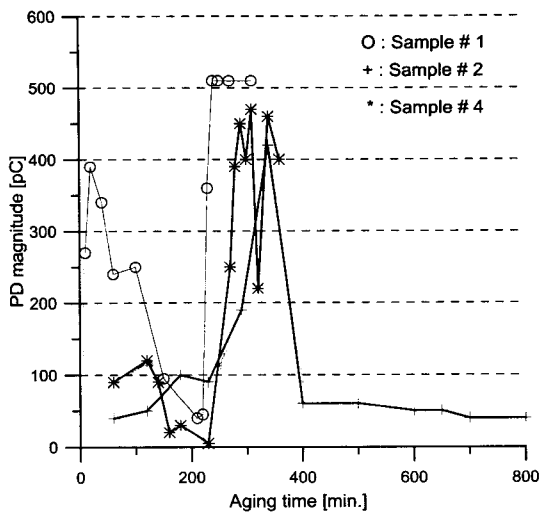


그림 7 열화시간에 따른 최대 부분방전 크기
Fig. 7 Maximum PD magnitude vs. aging time

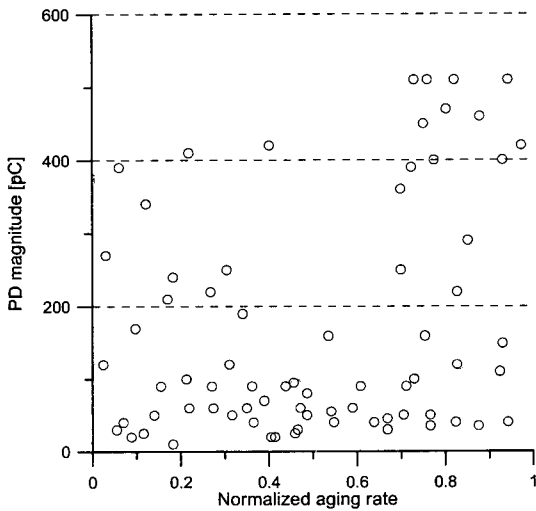


그림 8 표준화 열화율에 따른 최대 부분방전 크기
Fig. 8 Maximum PD magnitude vs. normalized aging rate

3.3 부분방전 발생전압 및 소멸전압 위상 분석

저전계 영역인 실험조건에서 부분방전 최대크기 변화와 열화시간의 상관관계 규명이 어려우므로, 새로운 인자인 방전발생 및 소멸전압 위상을 파악하였다. 방전발생 및 소멸전압 크기의 threshold를 10[pC], 50[pC] 및 100[pC]으로 두고 위상의 분포를 보았으나, 그림 8에 나타난 것과 같이 50[pC] 및 100[pC] 이하로 나타나는 최대 부분방전량 측정지점이 많아 threshold를 10[pC]로한 부분방전 발생위상 및 소멸위상을 분석하였다.

1번 시료에 대한 열화시간에 따른 부분방전 발생위상(+++) 및 소멸위상(ooo)의 변화를 나타낸 것이 그림 9이다. 부분방전 발생위상은 열화시간의 증가에 따라 늦어지다 빨라지는 경향을 보이며, 부분방전 소멸위상의 변화폭은 발생위상 변화 폭보다 좁게 나타났다. 이는 열화시간의 변화에 따른 부분방

지

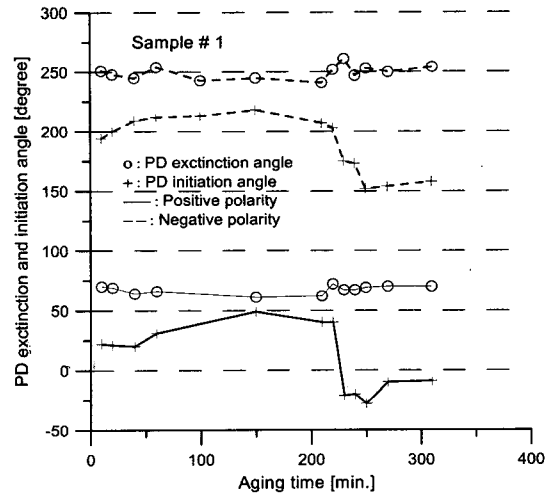
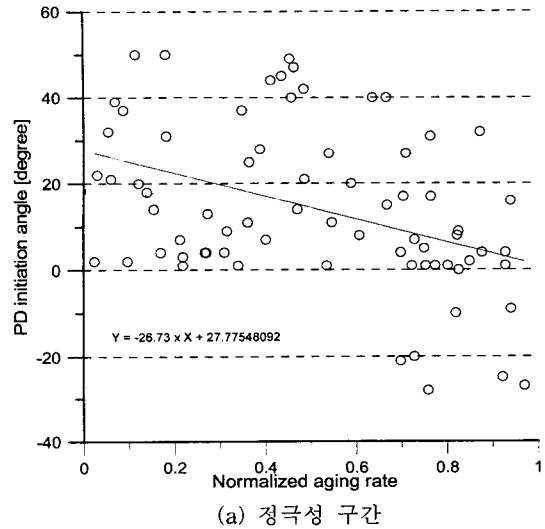
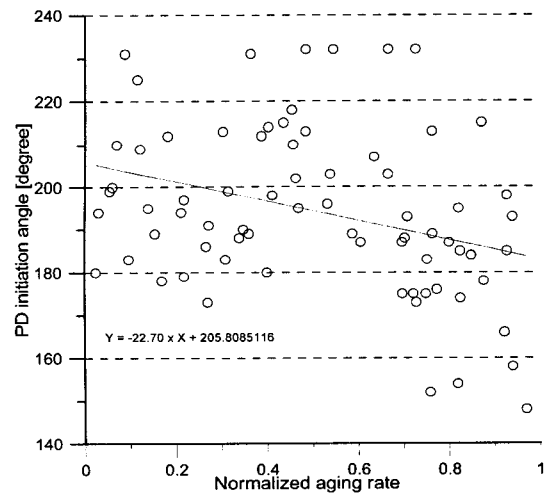


그림 9 열화시간에 따른 방전발생 위상 (시료 #1)
Fig. 9 PD initiation and extinction angle vs. aging time



(a) 정극성 구간



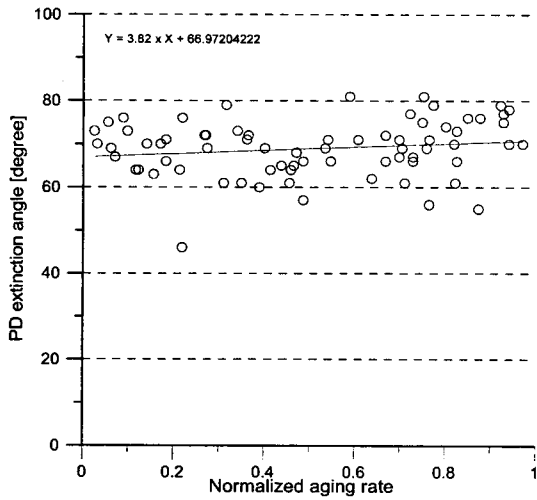
(b) 부극성 구간

그림 10 표준화 열화율에 따른 방전발생 위상
Fig. 10 PD initiation angle vs. normalized aging rate

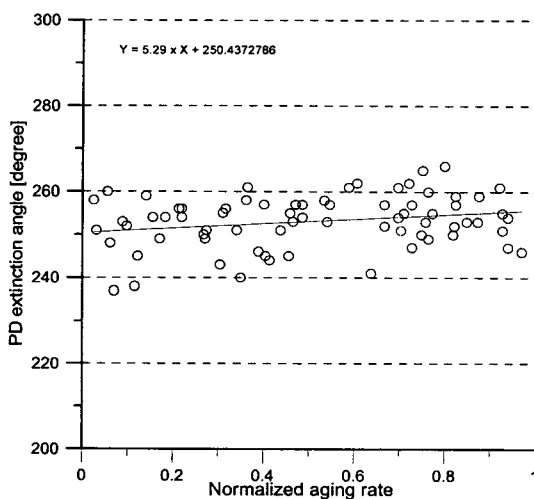
전 발생위상의 변화는 심하나 방전소멸 위상은 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다.

그림 10은 전체 6개 시료에 대한 부분방전 발생위상의 변화를 정극성 및 부극성 구간에 대하여 규준화 열화율로 나타낸 것이다. 부분방전 발생위상은 초기에는 최대 50° (230°)에서 최소 0° (180°)의 영역에서 발생되었으나, 말기에는 최대 20° (200°)에서 최소 -30° (150°)의 영역에서 발생되어 초기상태에 비하여 30° 빨라진 것을 알 수 있다. 규준화 열화율의 경과에 대하여 나타나는 전체분포의 best fitting 특성은 정극성에서 기울기가 -26.73, 부극성에서 기울기가 -22.70으로 나타나 높은 상관성을 보였다.

그림 11은 전체 6개 시료에 대한 부분방전 소멸 위상의 변화를 정극성 및 부극성 구간에 대하여 규준화 열화율로 나타낸 것이다. 부분방전 소멸위상은 최대 80° (265°)에서 최소



(a) 정극성 구간



(b) 부극성 구간

그림 11 규준화 열화율에 따른 방전소멸 위상
Fig. 11 PD extinction angle vs. normalized aging rate

50° (240°)의 영역에서 발생되며, 최대 폭의 차이도 30°로 발생위상의 80°에 비하여 좁게 나타났으며, 초기상태와 말기상태에서의 소멸위상의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 규준화 열화율의 경과에 대하여 나타나는 부분방전 소멸위상의 전체분포 best fitting 특성은 정극성에서 기울기가 3.82, 극성에서 기울기가 5.29로 나타나 부분방전 발생위상보다 상관성이 낮은 것으로 보여진다.

3.4 부분방전 발생 위상폭 분석

부분방전 발생위상 및 소멸위상의 분석결과에 의하면 규준화 열화율의 증가에 따라 발생위상은 빨라지고 소멸위상은 느려지는 경향으로 나타나고 있으므로, 이들의 복합인 부분방전 발생 위상폭(방전 소멸위상 - 방전 발생위상)을 새로운 인자로 분석하였다.

5번 시료에 대한 열화시간에 따른 부분방전 발생 위상폭의 변화를 나타낸 것이 그림 12이다. 부분방전 발생 위상폭은 열화시간의 증가에 따라 좁아지다 넓어지는 경향을 보이며, 정극성 및 부극성에서 동일하게 나타났다.

그림 13은 전체 6개 시료에 대한 부분방전 발생 위상폭의 변화를 정극성 및 부극성 구간에 대하여 규준화 열화율로 나타낸 것이다. 부분방전 발생 위상폭은 최소 10°에서 최대 100°의 영역으로 발생되며, 규준화 열화율의 경과에 대하여 나타나는 전체분포의 best fitting 특성은 정극성에서 기울기가 30.33, 부극성에서 기울기가 28.01로 나타나 부분방전 발생 위상에서의 정극성 기울기 -26.73 및 부극성 기울기 -22.70보다 높게 나타났다. 그러므로 규준화 열화율에 대한 부분방전 발생 위상폭이 발생 위상보다 더 높은 상관관련성을 지니는 것으로 보여진다.

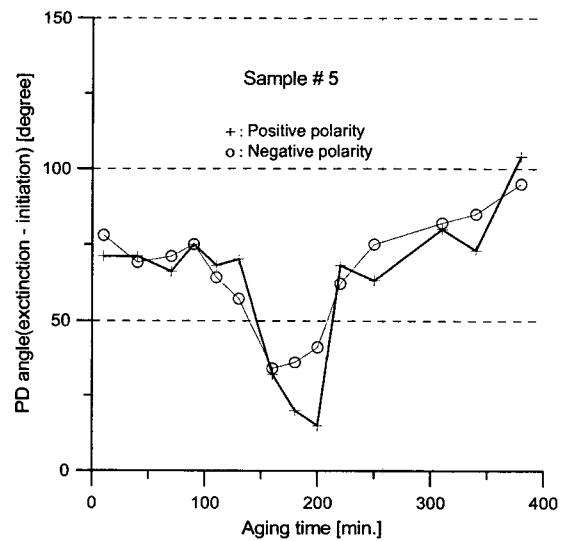
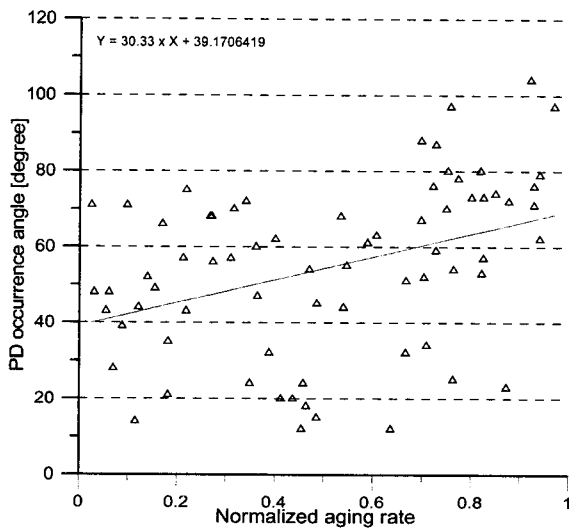


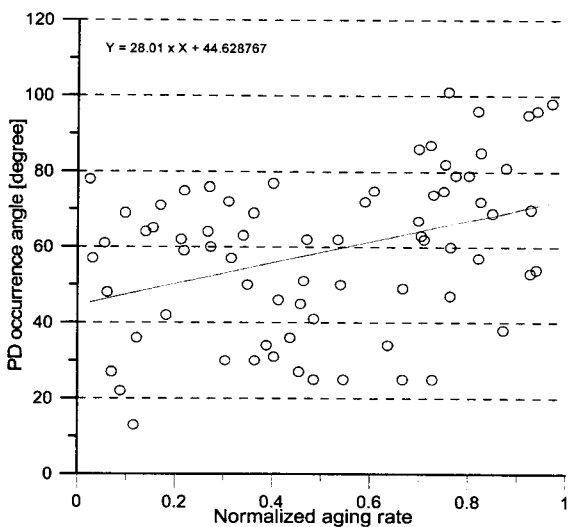
그림 12 열화시간에 따른 방전발생 위상폭
Fig. 12 PD occurrence angle vs. aging time

3.5 부분방전 인자의 상관성 분석

본 실험에서 나타난 열화시간에 따른 부분방전 인자의 선형관련성 정도를 파악하는 상관분석(correlation analysis)을 실시하였으며, 또한 반응변수와 설명변수 사이에 1차함수인 단순회귀모형($Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i$)을 설정하고 변수사이의 상관성을 통계적으로 추정·검정하기 위하여 회귀분석(regression analysis)을 실시하였다. 표준화 열화율에 대한 부분방전 인자들의 상관분석 및 회귀분석을 실시한 결과를 표 3에 나타내었다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 13 표준화 열화율에 따른 방전 발생폭
Fig. 13 PD occurrence angle vs. normalized aging rate

두 변수 X, Y에 대한 실험자료의 선형상관성을 설명하는 통계량인 Person 표본상관계수 r는 아래와 같이 계산하며, 해석은 r이 ±1에서 완전한 상관성을 나타내고 0 부근에서는 상관성이 없는 것을 나타낸다[18].

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

두 변수 사이에 설정한 단순회귀모형에 대한 설명 가능성의 확인은 통계학적으로 가설검정의 유의확률(P-value)이 일반적으로 0.05 이하이면 설정한 모형이 설명력을 지니는 것으로 판정하므로, P-value 검정치가 0.05보다 적을수록 두 변수 사이에 관련성이 있는 것으로 해석된다[18].

표 3의 표준화 열화율에 대한 부분방전 인자들과의 선형관련성이 살펴보면, 표준화 열화율과 정극성 방전발생 위상의 상관계수는 -0.411, 표준화 열화율과 정극성 방전발생 위상폭의 상관계수는 0.395, 표준화 열화율과 부극성 방전발생 위상의 상관계수는 -0.350, 표준화 열화율과 부극성 방전발생 위상폭의 상관계수는 0.390으로 다른인자보다 선형관련성이 높게 나타났다.

표 3 부분방전 인자의 상관 및 회귀 분석 결과
Table 3 Correlation and regression analysis on PD parameters

부분방전 인자(Yi)	(등가)열화 시간(Xi)	Pearson 상관계수	P-value 검정치
방전크기	표준화 열화율	0.3011	0.0096
정극성 방전 발생 위상	표준화 열화율	-0.4111	0.0003
부극성 방전 발생 위상	표준화 열화율	-0.3499	0.0024
정극성 방전 소멸 위상	표준화 열화율	0.1747	0.1394
부극성 방전 소멸 위상	표준화 열화율	0.2219	0.0592
정극성 방전 발생 위상폭	표준화 열화율	0.3948	0.0005
부극성 방전 발생 위상폭	표준화 열화율	0.3896	0.0007

표준화 열화율을 극성에 대한 발생위상으로 설명하는 독립변수로 적합화한 회귀모형이 유의수준 1%에서 모두 유의(P-value는 0.0003 및 0.0024)한 것으로 나타났으므로, 표준화 열화율로 발생위상과의 상관성을 나타내는 것이 유효함을 통계적으로 검정한 것이다. 또한, 표준화 열화율을 위상폭으로 설명하는 독립변수로 적합화한 회귀모형이 유의수준 1%에서

모두 유의(P-value는 0.0005 및 0.0007)한 것으로 나타났으므로, 규준화 열화율로 위상폭과의 상관성을 나타내는 것이 유효함을 통계적으로 검정한 것이다.

이들 4가지 인자는 방전크기와 규준화 열화율의 상관계수(0.301)보다 큰 기울기로 나타났고, P-value 검정치(0.0096)보다 적은 값으로 나타났으므로 최대 부분방전량보다 유효한 인자로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 XLPE 절연체에서 발생하는 가지형 전기트리와 관련된 부분방전 인자들의 상관성을 파악하기 위하여, 실제 사용되는 XLPE 시편에 침전극을 삽입한 모델 전기트리 시료를 제작하고 가속열화 상태에 따른 부분방전의 ϕ -q-n 분포특성을 디지털 시스템을 구성하여 실험하였다. 실험결과 분석을 위하여 규준화 열화율에 따른 부분방전 인자들의 상관관계를 통계적 분석법을 통하여 확인하는 과정에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 파괴시간이 다른 시료들을 동일한 시간축으로 등가화하기 위하여 규준화 열화율을 규정하고, 이를 이용하여 열화정도에 따른 부분방전 인자들의 관련성 분석 및 검정작업을 통계처리방법 중 상관분석 및 회귀분석을 통하여 확인하였다.
2. 가지형 전기트리가 진전되는 경우에 있어서, 규준화 열화율에 따르는 최대 부분방전량의 관련성보다 높은 관련성을 지닌 인자로 판단된 정(부)극성 방전발생 위상 및 정(부)극성 방전발생 위상폭의 규준화 열화율에 따른 관련식은 다음과 같이 도출되었다.
 - (1) 정극성 방전발생 위상 = $-26.73 \times$ 규준화 열화율 + 28
 - (2) 부극성 방전발생 위상 = $-22.70 \times$ 규준화 열화율 + 206
 - (3) 정극성 방전발생 위상폭 = $30.33 \times$ 규준화 열화율 + 39
 - (4) 부극성 방전발생 위상폭 = $28.01 \times$ 규준화 열화율 + 44
3. 가지형 트리가 절연체에서 발생되어 진전하는 경우에는 부분방전 위상정보를 이용하면 열화예측의 가능성이 높게 나타날 것으로 판단되므로, 이를 이용한 수명예측 연구는 매우 유용할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] 速水敏行, "CV케이블", 코로나社, 1986.
 [2] S. Whitehead, "Dielectric Breakdown of Solids", Oxford press, 1951.
 [3] E. J. McMahon, J. R. Perking, "Surface and Volume Phenomena in Dielectric Breakdown of Polyethylene", IEEE Trans., PAS 69, pp. 1128-1136, 1963. 12.

[4] 絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定調査専門委員会, "絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定の實態", 日本電氣學會技術報告 第752号, 2000. 01.
 [5] C. C. Ku, R. Liepins, "Electrical Properties of polymers", Hanser Publishers, pp. 128-129, 1987.
 [6] Eugene J. McMahon, "A Tutorial on Treeing", IEEE Trans. EI., Vol. EI-13 No. 4, pp. 277-288, 1978. 08.
 [7] 강동식 외, "XLPE 케이블의 전기트리 열화에 따른 전기적 특성 검토", 대한전기학회 논문 49C-7-5, pp400-405, 2000.
 [8] Seeding, H.G. et al., "Partial Discharge Characteristics of Electrical Trees in Polymeric Cable Insulation", Conf. record, Conf. on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena, pp91-96, 1994.
 [9] 阿部 他, "ポリエチレン系材料のトリッキング 試料について", タツタ 電線時報, 1970.
 [10] 山北 他, "架橋ポリエチレンの針-平板電極"의 트리-發生電壓と短時間破壊電壓特性", 電氣學會全國大會, 1983.
 [11] 特別高壓回轉機・ケーブルの絶縁劣化診断技術調査委員會, "特別高壓回轉機・ケーブルの絶縁劣化診断技術", 日本電氣學會技術報告 第2部 267号, pp51-103, 1988. 3.
 [12] 木山謙一郎, "特別高壓 ケーブルの 壽命診断", OHM, pp27-33, 1996.10.
 [13] 鈴置保雄 外, "ポリエチレン中の電氣トリーの進展に伴う PDパターンの變化", T.IEEJ, Vol. 115-A, No. 11, 1995.
 [14] N. Hozumi et al., "Discrimination of Partial Discharge patterns using a Neural Network", IEEE Trans. on EI-27, NO. 3, 1992. 6.
 [15] E. Gulski, "Computer-aided Measurement of Partial Discharge in HV Equipment", IEEE Trans. on EI-28, NO. 6, 1993.
 [16] 선중호 외, "장시간 절연체 열화실험을 위한 부분방전 측정기술 연구", 대한전기학회 논문 49C-12-3, pp665-672, 2000.
 [17] S.Kobayashi, K.kudo, "交流トリーの進展に伴う發光現象のカオス性", T. IEE Japan, Vol. 116-A No. 8, 1996.
 [18] 장덕준 외, "PC 통계학", 창원대학교 출판부, 2000. 09.

저 자 소 개

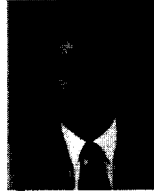


강 동 식 (姜 東 植)

1956년 10월 13일생. 1983년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년~현재 한국전기연구소 신 전력기기그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1573 Fax : 055-280-1589

E-mail : dskang@keri.re.kr



이 흥 식 (李 弘 植)

1953년 9월 13일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국전기연구소 전기물리연구그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1491 Fax : 055-280-1406



선 종 호 (宣 鍾 好)

1962년 10월 10일생. 1986년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1989년~현재 한국전기연구소 신 전력기기그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1578 Fax : 055-280-1589



박 정 후 (朴 正 后)

1945년 4월 8일생. 1968년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년~1983년 일본 구주대학 대학원 졸업(공박). 현재 부산대 공대 전자전기통신공학부 교수.

Tel : 051-510-2369 Fax : 051-513-0212

E-mail : Parkch@hyowon.cc.pusan.ac.kr



김 위 영 (金 緯 泳)

1958년 4월 18일생. 1988년 경남대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 창원대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년~현재 한국전기연구원 고전압시험실 선임기술원.

Tel : 055-280-1515, Fax : 055-280-1588

E-mail : wykim@keri.re.kr