

# XLPE 절연체의 트리 채널내 보이드방전에 의한 AE신호로 절연열화 검출 기법 연구

(Fundamental Study of Degradation Diagnosis using AE Signals with Void Discharge  
in XLPE Insulation)

이상우\*

(Sang-Woo Lee)

## 요 약

본 논문은 전력 케이블의 절연체인 XLPE 시료에 상용주파수 교류전압을 인가하였을 때, 절연열화에 의한 보이드방전 펄스신호와 AE신호 및 트리진전 특성을 검출하고 관찰하였다. 또한 XLPE 절연체의 트리 채널내 인가전압에 따라 보이드방전 펄스신호와 AE신호를 각각 관측하였다. 실험 결과 전력 케이블의 절연체인 XLPE 시료의 보이드 존재 유·무에 따른 트리진전 형상은 보이드 존재시에는 수지형으로 성장하였으나, 무보이드시에는 수초형으로 성장하였다. XLPE 절연체내의 트리진전 특성은 보이드 존재시에는 열화시간이 경과함에 따라 급격히 증가하였으나, 무보이드시에는 열화 시간이 경과함에 따라 트리의 성장 형상은 감소되는 것으로 나타났다. 전력 케이블 절연체인 XLPE의 트리 채널내 보이드방전에 의한 AE신호의 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과, AE신호의 크기에 따라 변화되었으며 그 주파수 영역은 대략 1.0[MHz] 이하의 분포인 것으로 관측되었다.

## Abstract

In this paper, to detect and observation the void discharges pulse signal, AE signals and tree growth characteristics in case the high voltage is applied to a XLPE sample for a power cable. We also examined the partial discharge current pulse and AE signals with the increase of the applied voltage in XLPE insulation. The experimental results show that a branch-type tree grows in the presence of the voids, and a bush-type tree grows in the absence of the voids in both samples. A rate of tree growth increases abruptly in proportional to the deterioration time in the presence of the of the voids, but in the absence of the voids, a rate of tree growth decreases as time goes by and finally a breakdown occurs. The frequency band of AE signals that are generated from the partial discharges in a XLPE sample, one of solid dielectric materials, is about 1.0[MHz].

Key Words : Acoustic Emission Sensor, Void, XLPE, branch-type, bush-type

\* 주저자 : 영남대 대학원 전기공학과 에너지 및 환경전자 연구실 박사

Tel : 053-567-9272, Fax : 053-567-9271

E-mail : lesawo77@dreamwiz.com

접수일자 : 2006년 1월 25일

1차심사 : 2006년 2월 1일

심사완료 : 2006년 2월 9일

## 1. 서 론

구내에 건설하는 22.9[kV]급 지중 전선로에 사용되

는 케이블은 거의 CN-CV 케이블을 사용하고 있으며, 케이블의 전기적 절연 성능이 가일층 향상됨에 따라 초초고압급까지 실용화가 되어 가고 있는 현실이다.

케이블의 절연체 중의 공극에 의한 부분방전이나 절연체 내의 국소 고전계부에서 tree 열화가 발생하면 음파가 전파된다. 이러한 음파는 주위 매질에 급격한 압축을 일으켜 진동파로서 전파되므로 이를 검출하여 방전점과 같은 음원의 상태를 조사하는 기법을 음향방출(acoustic emission ; 이하 AE라 함)법이라 한다.

AE법은 구조물이나 저장 탱크 등에서 응력 변형에 의해 발생하는 음향신호를 분석하여 구조물의 안전 감시용으로 이용되어 왔으나, 최근 고체 절연물의 전기적 열화 특성을 조사하는 연구에도 적용되고 있다[1].

AE법은 측정장치가 간단하여 현장 적용에 용이하고, 전기적 측정법과 상호 간섭을 일으키지 않고, 동시에 여러 개의 센서를 설치할 수 있어서 방전점의 위치를 비교적 정확하게 검출할 수 있다는 이점이 있다[2].

전력 케이블에 있어서 전기 tree 열화는 케이블 절연체 내의 국소 고전계부에서 부분파괴가 생기며 이것이 tree로 진전하여 가는 열화의 한 형태이다 [3-4,8].

전력 케이블의 절연열화에 의한 전기 tree나 부분방전 발생으로 인한 절연파괴를 미연에 방지하기 위해 절연체의 비파괴 시험과 절연체의 절연열화 측정이 행하여지고 있지만 아직까지 적절한 진단법이 제시되고 있지 않는 실정이다[5-6].

본 연구에서는 상시 운전중인 전력 케이블의 XLPE 절연체내 미소 보이드방전에 의한 트리열화 진전시 비전기적 진단법인 AE법을 사용하여, 절연열화 진단을 하기 위한 목적으로 우선 케이블 절연체내 XLPE 시료의 트리진전 특성을 조사하였다.

XLPE 절연체내의 트리 발생을 용이하게 하기 위해 침-평판전극으로 구성하였으며, 침전극을 XLPE 시료 내부에 투입하여 임의의 보이드와 무보이드를 만들고 상용주파수의 교류전압을 인가하였을 때, XLPE 절연체의 절연열화에 의한 트리진전 형상과

특성을 관측하였다. 또한 전력 케이블 절연체내의 트리 열화에 따른 직경 수 마이크로미터의 트리 채널내 보이드방전 발생시 보이드방전 펄스와 AE신호 및 AE신호에 의한 주파수 스펙트럼을 분석하기 위하여 전력 케이블 도체를 접지하고 침전극을 XLPE 절연체내에 투입하여 임의의 트리진전을 형성하게 한 후, 인가전압에 따른 보이드방전 펄스와 AE신호를 각각 검출하였다. 그리고 인가전압에 따른 AE신호를 검출하여 주파수 스펙트럼 대역을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 AE 신호의 검출 방법

본 실험에서는 XLPE 시료에서 전기 tree를 용이하게 형성시키기 위해 침-평판전극으로 구성하였으며, 사용교류전압을 인가하면 고전계부인 침전극의 선단으로부터 트리채널(tree channel)이 형성되어 평판전극으로 성장하도록 하였다. 그림 1은 인가전압에 따른 트리의 형상을 검출하기 위한 시료의 형상을 나타낸 것이다.

실험에 사용된 시료는 XLPE를 20×30×8[mm]의 크기로 잘라서 사용하였다. 실험에 사용된 침전극 형상은 직경 1.0[mm], 길이 55[mm], 선단곡률반경 약 20[ $\mu$ m]인 바늘을 사용하였다. 시료의 하부에는 직경 100.0[mm], 두께 2.0[mm]인 황동제의 평판전극을 설치하였다.

고전압 인가시 시료 표면으로 섬락현상이 발생되지 않게 하기 위해 두께 4[mm]인 아크릴판(acrylic plate)으로 유조를 제작하였다.

또한 본 실험에서는 전력케이블에서 절연체내의 tree에 의한 보이드방전을 모의하였다. 길이 50[cm]의 22.9[kV]급 XLPE 전력케이블을 이용해 XLPE에 트리를 형성한 후 AE신호를 검출하였다.

결함을 모의하기 위해 케이블에 삽입한 침전극은 직경이 1.07[mm], 선단곡률 반경은 약 20[ $\mu$ m]의 견침을 사용하였으며, XLPE 시료에 대한 영향을 최소화하기 위해 물성의 변화가 없는 45[ $^{\circ}$ C]로 가열한 후 침전극을 0.5[mm/min]의 속도로 삽입을 하였으며 접

은 마이크로메타를 이용해 조절하였다. 고전압 인가 시 시료 표면으로 침략현상이 발생되지 않게 하기 위해 천연 광유인 1종 2호의 절연유에 함침시켰으며, 이를 위해 사용된 유조는 두께 10[mm]인 아크릴판 (acrylic plate)으로 제작하였으며, 유조의 크기는 650×250×240[mm]이다.

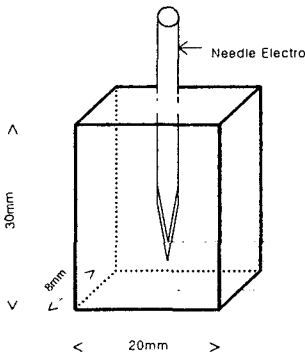


그림 1. 시료의 형상  
Fig. 1. Configuration of sample

2.2 실험장치 및 방법

그림 2는 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 검출된 AE신호는 20[dB]의 프리앰프를 거쳐서 대역통과필터로 저역대의 노이즈 신호 성분을 제거한 후, 26[dB]의 주 앰프로 다시 증폭해서 디지털 오실로스코프로 검출하였다.

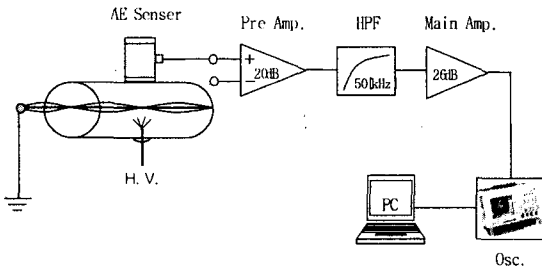


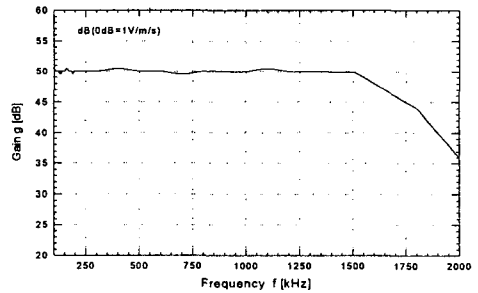
그림 2. 실험장치의 개략도  
Fig. 2. Skeleton of experimental set-up

그림 3 (a) 및 그림 3 (b)는 AE센서(wide-band AE sensor)와 AE-912 증폭기의 이득 특성을 각각 나타낸 것이다.

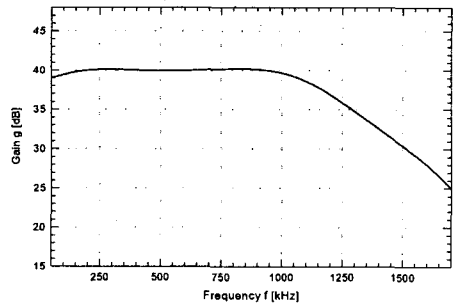
그림 3 (a)에 나타낸 바와 같이 AE센서의 주파수 대역은 약 100[kHz]~2.0[MHz]이며, 그림 3 (b)에 나타낸 바와 같이 AE-912 증폭기의 주파수 대역은 약 100[kHz]~1.5[MHz]인 것을 사용하였다.

케이블의 트리잉 열화에 의해 전파되는 AE신호는 디지털 오실로스코프(LeCroy LT372)를 사용하여 검출하였다. 그리고 검출한 AE신호는 동일 기종의 오실로스코프로 주파수 스펙트럼하여 분석하였다.

고전압 발생장치는 코로나 측정시스템(Corona detecting apparatus system set. 일본 Pultec Electronics Co.)을 사용하였으며, 이 장치의 주파수는 60[Hz], 1차 입력전압은 220[V], 2차 최대 출력전압은 30[kV]이다.



(a) AE센서



(b) AE-912 증폭기

그림 3. AE센서 및 AE-912 증폭기의 주파수 이득  
Fig. 3. Characteristics frequency gain for AE sensor and AE-912 amplifier

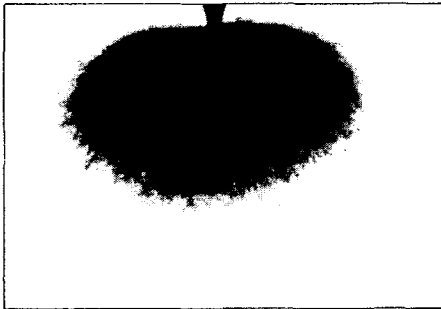
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 XLPE 절연체의 트리 성장에 따른 열화진전 특성

케이블의 일반적인 전기 트리는 트리 선단의 고전계부에서 가속된 전자에 의해 분자 체인이 절단되어 진전, 트리 선단이 트리 관내의 방전으로 침전극 선단과 등전위로 되고 진성파괴 등에 의한 전기 트리의 진전, 산소에 의한 침식을 수반하는 고전계에 의한 절연파괴와 부분방전에 의한 절연열화의 반복으로써 진전되는 것으로 보고되고 있다[7].



(a) 인가전압 16(kV), 시간 10분, 보이드 1.0(mm)



(b) 인가전압 20(kV), 시간 60분, 무보이드

사진 1. XLPE 절연체의 대표적인 트리 성장 특성  
Photo. 1. Characteristics of typical tree growth in XLPE

사진 1 (a) 및 (b)은 제작된 시료에 인가전압을 각각 16[kV] 및 20[kV]을 인가한 경우 열화중기에 대한 XLPE의 대표적인 트리를 나타낸 것이다.

사진 1 (a) 및 (b)에서 나타난 바와 같이 트리의 발생은 보이드 존재시와 무보이드시의 트리 진전 특성

이 각각 달리 나타났다.

사진 1 (a)의 보이드가 존재시에 발생된 트리의 형상은 수지형(branch type)이었으며, 열화가 진전됨에 따라 침전극 선단 및 트리의 주통로로부터 많은 분기(分岐)가 평판전극을 향해 방사상으로 성장되고 있다. 트리의 성장 길이는 보통 침전극의 축 방향에서 가장 크게 나타났으며, 트리의 내부 채널은 지름수[ $\mu\text{m}$ ]의 미세한 관으로 구성되어 있다.

사진 1 (b)의 무보이드시 트리의 형상은 열화초기 영역에서 트리는 수초형 트리로 성장하여, 열화시간이 증가할수록 보이드 존재시에 비해 트리가 완만하게 성장한 것으로 나타났다. 무보이드시 트리의 진전은 열화초기 영역에서는 일정한 비율로 나타났으며, 열화중기 영역부터는 진전 속도가 느려지면서 절연파괴시까지 상당한 시간을 요하는 것으로 나타났다. 또한 트리의 진전은 절연 강도에 따라 다르게 나타나므로 트리의 진전을 예측하기가 곤란한 경우가 많다.

따라서 보이드 존재시 기체 방전에 의한 열적 및 화학적 변형 등에 의해 급속히 절연 파괴에 이르지만, 무보이드시에는 국부적인 고전계를 형성하여 넓은 범위의 보이드를 형성하므로 열적 및 화학적 변형 등이 보이드 존재시 보다는 방전에너지의 분포가 넓게 분산되어 진전 속도가 완만하게 나타나는 것이다.

XLPE 트리의 진전 형태는 인가전압이 증가함에 따라 트리의 진전 특성은 증가하는 것으로 나타났으며, 절연파괴에 이르는 시간도 단축된 것으로 나타났다.

#### 3.2 XLPE 절연체의 트리 채널내 보이드 방전 펄스에 대한 AE신호 특성

그림 4 (a), (b) 및 (c)는 절연체내 트리 채널 존재시 XLPE 시료의 침전극에 상용주파수의 교류전압 21[kV]를 인가하였을 때, 트리 채널내 보이드방전에 의한 대표적인 보이드방전 펄스신호와 AE신호 파형을 각각 나타낸 것이다. 이때 오실로스코프의 시간스케일(time scale)은 1.0[ $\mu\text{s}/\text{div}$ ]이다. AE신호는 방전 에너지가 압전 진동자(PZT)에 작용함으로써 그림과 같이 고주파 밴드의 감쇠진동 형태로 나타났다.

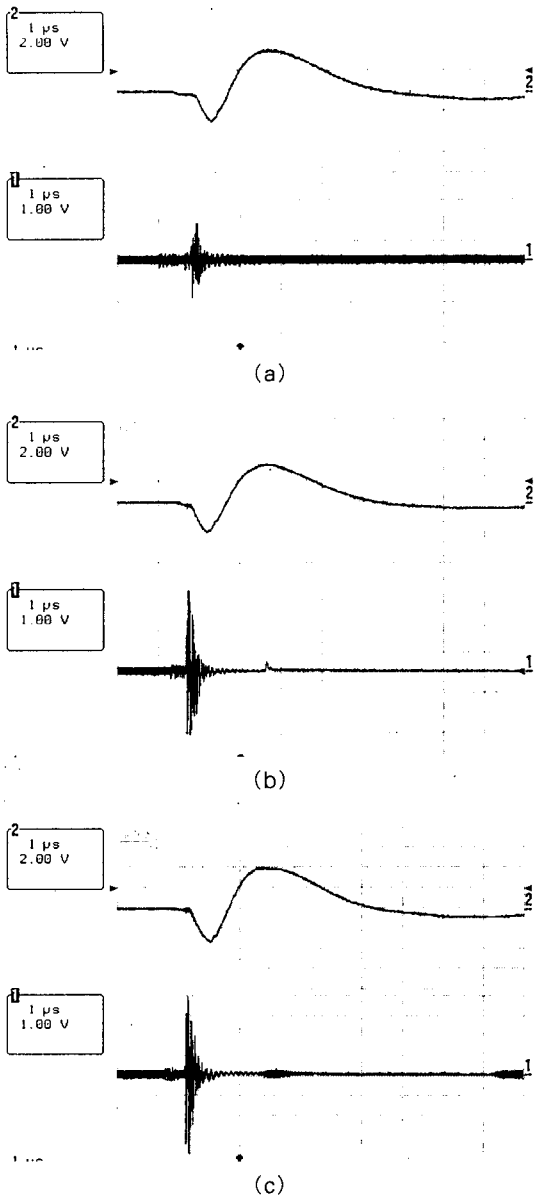


그림 4. 트리 채널내 보이드방전 펄스에 대한 AE신호 파형  
Fig. 4. Waveforms of AE signal and void discharge pulse signal

이는 트리 채널내에서 발생된 보이드방전에 의한 높은 방전 에너지와 국부적인 발열 등이 충격 에너지로서 XLPE 절연체내의 탄성파가 발생하여 외부로 전파됨으로써 AE 센서에서 이를 검출하는 것으로 생각된다.

그림 4 (a) 및 (c)에서 나타난 바와 같이 보이드방전 펄스 신호의 크기가 동일 한 형태에서도 AE신호의 파형은 각각 다른 형태의 신호로 전파되는 것으로 관측되었다. 이는 XLPE 트리 채널내의 도전로를 따라 불균일한 반복 보이드방전이 형성되기 때문이라 사료된다. XLPE 절연체의 트리 채널내에 열화가 지속되어 트리가 진전됨에 따라 AE신호의 크기는 증가되는 것으로 나타났다.

### 3.3 XLPE 절연체의 트리 채널내 보이드방전에 의한 AE신호의 주파수 스펙트럼 특성

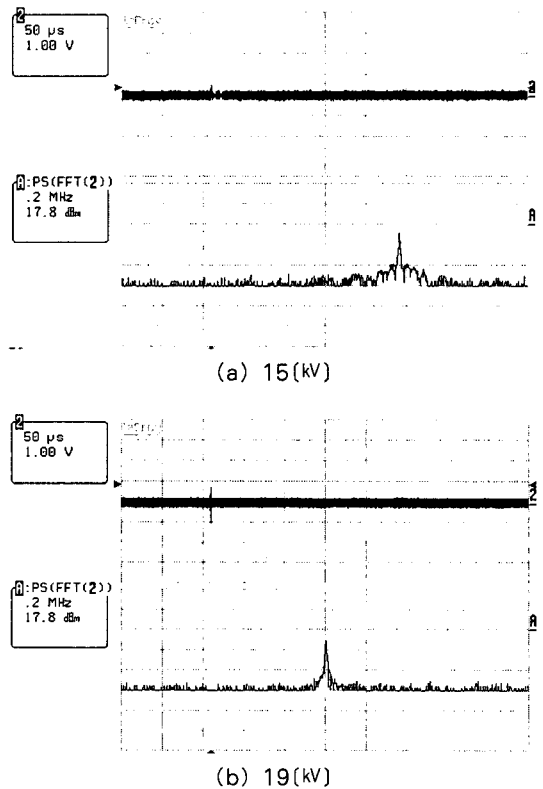


그림 5. 트리 채널내 보이드방전에 의한 AE신호 및 주파수 스펙트럼 특성  
Fig. 5. Characteristics of AE signal and frequency spectrum with void discharge

그림 5 (a) 및 (b)는 XLPE 절연체의 트리 채널내의 침전극에 상용주파수 교류전압을 각각 15[kV]와

19[kV]를 인가하였을 때, 트리 채널내의 보이드방전시 AE신호 파형에 대한 주파수 스펙트럼과 시간 영역의 값을 나타낸 것이다.

XLPE 절연체의 트리 채널내의 침전극에 15[kV]를 인가한 경우, 그림 5 (a)에 나타난 바와 같이 미약한 AE신호와 일정한 노이즈신호 성분을 검출하여 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과, 그 분포 영역은 대략 1.3~1.5[MHz]인 것으로 나타났다.

그림 5 (b)는 트리 채널내의 침전극에 19[kV]를 인가한 경우, 그림에서 나타난 바와 같이 AE신호의 크기가 그림 5 (a)의 경우보다 증가되었으며 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과, 그 분포 영역은 대략 960~1020[kHz]인 것으로 나타났으며, 그 주된 주파수 영역은 1.0[MHz]인 것으로 관측되었다.

XLPE 절연체의 트리 채널내 보이드방전에 의한 AE신호의 주파수 스펙트럼은 인가전압이 증가함에 따라 AE신호의 크기가 증가되어 그 주파수 영역은 점점 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서 트리 채널내의 트리진전에 따른 방전 펄스 크기와 AE신호가 변화됨으로 최적 주파수 대역의 센서를 선정할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전력 케이블의 XLPE 절연체내 트리진전 특성을 조사하기 위해 XLPE 시료에 임의의 보이드 및 무보이드를 형성한 후, 불평등전계에 상용주파수 교류전압을 인가하였을 때, XLPE 절연체내의 트리진전 현상 및 특성을 각각 조사하였다.

또한 전력 케이블 도체를 접지하고 침전극을 XLPE 절연체내에 투입하여 임의의 트리진전을 형성한 후, 인가전압에 따른 보이드방전 펄스와 AE신호를 검출하였다. 그리고 인가전압에 따라 AE신호를 주파수 스펙트럼으로 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) XLPE 절연체내의 트리진전 현상은 보이드 존재시에는 수지형이었으나, 무보이드시에는 수초형이었다.

2) 무보이드의 경우 트리진전 특성은 열화시간이 증가함에 따라 보이드 존재시에 비해 완만한 트리진전으로 성장하였다.

3) XLPE 절연체의 트리 채널내 보이드방전에 의한 AE신호 특성은 방전 에너지가 압전 진동자에 작용함으로써 고주파 밴드의 감쇠진동 형상으로 전파되었다.

4) XLPE 절연체의 트리 채널내 보이드방전에 의한 AE신호 크기는 인가전압이 증가함에 따라 증가되었다.

5) XLPE 절연체의 트리 채널내 보이드방전시 인가전압에 따른 AE신호를 검출하여 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과 AE신호의 크기에 따라 변화되었으며 그 주파수 영역은 대략 1.0[MHz] 이하인 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 전력 케이블의 보이드방전에 의한 비전기적 진단법인 AE법으로 절연열화를 진단할 경우, 절연체내 보이드방전시 AE신호의 특성에 따른 최적의 센서를 선정하는 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### References

- [1] 田傳之 외 2인, “ポリエ스테ル樹脂中の電氣トリ-伸展に伴う超音波と部分放電の對応”, 研究開發, Vol. 58-A5, pp.55 1983.
- [2] 沼野利和 외 2인, “部分放電特性に基づく複合絶縁体の壽命豫測”, 電學論A, 107卷 2号, pp.81-87. 昭和62年.
- [3] 長尾, 伊崎, 藤野, 小崎: 電氣學會研究會資料(絶縁材料研究會 EM-84-70).
- [4] 山田, 匹田, 大橋, 家田: 電氣學會研究會資料(絶縁材料研究會 EM-86-6).
- [5] R. Bartnikas & K. D. Srivastava, Power Cable Technology, Sandford Educational Press, Waterloo, Ontario, 1987.
- [6] 電氣學會: 「特別高壓CV케-ブル設備實態と絶縁熱火 診斷技術の 動向」, 電學技報, II部, No 266, 31 (1988-3).
- [7] “高分子絶縁材料におけるトリ-ング劣化の基礎課程” 電氣學會技術報告書 第674號 pp. 1-70, 1998.
- [8] 김재환, 박재준, “음향방출 계측법에 따른 가교폴리에틸렌 케이블의 트리밍 파괴 예지에 관한 연구”, 조명·전기설비학회지, 第7卷 第4號, pp. 26-33, 1993.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 이상우 (李相雨)

1967년 4월 11일생. 1992년 경일대학교 전기공학과 졸업. 2000년 영남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 현재 영남이공대학 겸임강사.