기술해설

고전압 케이블 시스템 진단방법

구 자 윤*, 김 정 태**
(*한양대학교 공학대학 전기공학과 교수, ** 대진대학교 전기공학과 교수)

1. 서 론

지금까지 케이블 시스템에 대한 진단은 확실히 무시될 수 없음에도 불구하고 직접적인 주목을 받지 못했으나, 케이블이나 액세서리의 사고 예방과 잔여수명을 예측하는 데 종합적으로 적용될 수 있으리라 생각된다.

따라서, 운전조건에서 케이블 시스템의 사고 원인이 될 수 있는 열화 현상을 평가하고 열화 지점을 찾아내기 위한 기술과 과정이 적용 가능하도록 하는 것과, 잔여수명 예측이라는 관점에서 케이블이나 액세서리의 운전에 대한 지침을 제시하는 것은 상당히 중요한 과제라 할 수 있다.

본 고에서는 케이블 시스템 진단을 위하여, 열화 현상의 확인, 관련된 성질 변화의 측정과 검출방법의 개발및 운전 지침 등에 대해, 관련 문헌에 대한 조사를 토대로 정리하였으며, 이론적인 접근보다는 실제적인 것을 채택하고 케이블 사용자에 적용될 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 진단 시험에 대해서는, 진단법을 다루었거나, 현장이건 아니건 다양한 시험을 고려할 때 진단 시험으로서 정의 - "운전조건에서 케이블이나 액세서리의 사고에 원인이 될 수 있는 열화 현상을 평가하고 찾아내는 것" - 할 수 있다면 본 고에 포함시켰다. 따라서, 사고가 발생되어 교체된 케이블 샘플에 대한 실험실 시험과 현장에서의 비파괴 시험은 모두 진단시험으로 간주하여 정리하였다.

본 고에서는 고전압 OF 케이블과 사출케이블및 액세서리에 대해 다루었으며, 열화 현상보다는 진단법에 주력하였고 DC 케이블은 제외하였다.

2. 열화 이론

2.1 절연지절연 케이블

OF 케이블에는 변압기와 유사한 재료를 사용하기 때문에, OF 케이블의 장기적인 거동은 변압기 절연과 같은 관점에서 비교되고 있다. 결과적으로, 열화 현상에 대한 실험실에서의 연구는 기름속에 용해된 개스에 대한 분석과 같이 변압기와 동일한 방법으로 수행되고 있지만, 케이블의 운전조건은 변압기와는 다르다. 예를 들면, 운전 온도가 낮으므로 절연지절연의 열화는 매우 느리게 진행되어, 사용수명이 60년 또는 그 이상 되는 케이블로 구성된 전력회사 계통망이 많이 존재하고 있다.

OF 케이블의 절연지(cellulose)의 熱에 의한 열화 모드는 산화 과정에 의한 체인(chain)의 갈라짐(cleavage)의 형성으로 변압기와 유사하다. 그러나, 케이블과 변압기에 같은 기름이 사용되지는 않으므로, 화학적 구성요소가 다르기 때문에 발생된 개스도 다르게 나타난다. 정상적인 건조한 조건에서는 전계 강도 그 자체만으로는 절연유가 열화되지 않지만, 부분방전이 발생되면 개스가 형성되어 기름속에 녹아들게 된다. 알킬(Alkyl : 지방족의 포화탄화수소기) 계통의 절연유 또한 개스와 화학적으로 결합이 가능하고 전계가 인가된다고 해서 그 상태가 변하지 않는다.

매스 함침 절연(mass impregnated insulation)도 유사한 방법으로 열화된다 : 건조한 환경에서 열화되었다는 보고는 없으나, 부분방전, 트래킹(tracking)및 계면에서의 전기화학적 변화에 의하여 절연층 내의 물 그리고/또는 공기/개스 거품이 발생되어 열화되는 것으로 인식되고 있다.

금속 시이즈는 절연층으로 물이 침투하는 것을 방지하고 내부 압력을 유지하는데 아주 중요하므로, 이러한 시이즈의 열화는 일반적으로 OF 케이블 열화의 원인이 된다.

2.2 사출 케이블

부분방전의 영향이나 물의 존재를 제외한다면, 열적, 전기적 또는 화학적 에이징(aging)에 의하여 전력케이블에 사용된 고분자 층의 전기적 성질이 크게 변화하지 않는다는 것을 많은 결과들이 보여주고 있다.

송전용 사출 케이블의 에이징(aging) 메카니즘은 완전히 이해되지는 않고 있으나, 상당히 건조한 조건에서도 에이징

으로 열화되어, 오랜 시간에 걸쳐 열적, 기계적, 전기적 스트레스가 조합되어 가해져 절연내력이 낮아지는 케이블도 있다. 에이징 요인은 외부적(extrinsic), 즉 보이드(void), 불순물, 물리적 결함 또는 화학성분(component)의 불균일한 분산에 의한 것과 내부적(intrinsic), 즉 물리적이나 화학적인 변화 또는 트랩된 전하에 의한 것으로 구분될 수 있다.

사출 케이블에서는 외부적인 에이징이 주된 것으로 여겨지고 있으며, 주된 원인은 다음과 같다.

- 절연층이나 반도전층/절연층 계면에서 개스로 채워진 洞空. 동공에 인가되는 전계 강도가 동공내 개스의 절연파괴 강도를 넘게 되면, 부분방전이 발생하게 되어 점차적으로 화학적 열화가 일어나 절연층을 서서히 파괴한다. 화학적 열화 과정의 부산물중 하나가 수산(oxalic acid)이다.
- 절연층내, 반도전 쉬일드 또는 계면에 있는 불순물.
- 반도전층/절연층 계면의 누락, 돌기, 거침 등과 같은 것에 의한 전계 강도의 강화. 케이블 제조 과정중에서(3중 사출과정(triple extrusion process)이라 할지라도) 계면에서의 조그마한 반도전층 돌기를 완전히 배제한다는 것은 거의 불가능하다. 뇌 써어지나 스위칭 써어지가 가해지게 되면 이러한 돌기에서 전계가 강화되어 고분자 내로 전하가 주입되어 전기트리가 개시될 수 있다.

한편, 내부적 에이징으로 인하여 나타나는 특성은 다음과 같다.

- 산화나 가수분해 메카니즘과 같은 화학적 영향.
- 재결정화(re-crystallization)와 이중결정화(secondary crystallization), 전하 이동과 전하 포획(charge trapping) 등과 같은 물리적 영향.

또한, 고분자 절연 시스템에 불행하게도 영향을 미치는 요소들은 다음과 같으나, 그들이 미치는 영향의 특성과 크기에 대해서는 별로 알려진 바가 없다.

- 첨가제(산화방지제나 충진제(filler))의 불균일한 분산.
- 가교 부산물. 예를 들면, 아세토페논(acetophenone)의 존재로 인하여 화학적으로 복합적인 열화 부산물이 형성되는 것으로 알려지고 있지만, 열화에 미치는 영향은 파악되지 않고 있다. 또한, 짧은 기간 동안에 아세토페논은 절연파괴 강도에 영향을 미치고 전기트리와 수트리의 형성에도 영향을 줄 수 있다는 것을 인식하여야 한다.

사출케이블과 액세서리의 열화요인으로서 수 많은 요소들이 보고되고 있으며, 그것들을 종합해 보면 다음과 같이 요약될 수 있다 : 현재로서는 고전압 케이블 시스템에 사용되는 사출 고분자 절연물의 특성은 큰 변화를 보이지 않고 있다. 이러한 특성값의 변화는 쉽게 측정될 수 있거나 케이블의 수명단축이라는 측면에서 볼 때 중요한 값들이다. 이러한 경우, 물, 기름, 황과 같은 외부적인 요소들에 의한 오염은 배제되어야 한다.

2.3 금속 시이즈의 부식

금속 시이즈 부식의 주된 세 가지 원인은 a) 화학적, b) 전기화학적, c) 披露(fatigue)이다. 대체로 그 원인은 2 가지 이상이 동시에 관여된다.

a) 산, 염기 또는 소금에 의한 화학적인 공격은 균일하게 부식되는 특성이 있다.

b) 전기화학적인 부식 : 이것은 세 가지 유형으로 나뉜다.
- 비전해질(non-electrolytic) : 확산 갈바닉 효과(diffused galvanic effect)로서 같은 영역에 양극(anode)과 음극(cathode) 부분이 존재하는 특성이 있음.
- 전해질(electrolytic) : 전해액 내에서 異種 금속의 접촉에 의해 양극과 음극이 분리되는 특성이 있음.
- 그레인 사이(intergranular) : 전해질 그리고/또는 비전해질 공격으로 그레인 주변(grain boundary)이 부식되는 특성이 있음.

c) 피로 부식은 금속시이즈가 아주 작은 기계적 스트레스를 받고 있을 때 작지만 지속적인 진동(횡적, 종적 또는 비틀림)이나 熱진동에 의해 일어난다. 그레인 주변(grain boundary)으로 깨끗하게 분리되는 특성이 있다.

3. 문헌 고찰

OF 케이블에 대한 열화현상은 비교적 잘 알려져 있으며, 검출방법은 주로 용해된 개스를 분석하는데 기초하고 있다. 금속 외부시이즈(주로 납)에 대한 금속학적 연구는 종종 유용한 정보를 제공하기도 한다.

최근에 개발된 고분자절연 HV 케이블의 열화는 잘 알려지지 않고 있다. 오늘날, 물리적, 화학적 분석방법을 조합하여 사용하는 것이 이 새로운 타입의 절연 상태를 연구하는데 가장 좋은 방법으로 간주되고 있다.

현장 진단기술은 이제 시작단계이며, 그 중 일부는 상당히 희망적이다. 그 예로는, 50 Hz 측정과 상당히 유사한 것으로, 초저주파(VLF) 측정, 진동파(OW) 시험 또는 부분방전 측정을 들 수 있다. 그러나, 이 방법들은 현재 널리 받아들여지지는 않고 있으며, 명확하고 효과적이고 신뢰성있는 방법으로서 인정받을 수 있도록 보다 많은 경험과 비교연구가 필요하다.

3.1. OF 케이블

3.1.1. OF 절연지절연의 열화현상

3.1.1.1. 케이블에 작용하는 스트레스

고전압 케이블에 작용하는 스트레스는 다음과 같이 분류될 수 있다.

열　적 : 정상적이거나 위급한 상황하에서의 운전온도에 의함. 최대 운전온도는 절연물질과 운전조건에 따라 좌우된다. 기존 기름절연지 절연체의 최대 운전온도는 85/90℃ 이다.

전기적 : 정상적이거나 위급한 상황하에서의 운전전압 또는 번개나 스위칭에 의한 임펄스 전압에 의함.

환경적 : 케이블 외부 시이즈에 작용하는 환경적 조건에

의함.(고분자 열화, 금속 부식)

기계적 : 포설작업(구부림), 운전조건(부하 싸이클 또는 해저 케이블에서 외부 원인에 의한 주기적인 움직임), 또는 사고로 인한 손상(damage)

3.1.1.2. 절연층의 열화 요인과 사고 메카니즘

열적 또는 전기적 에이징(부분방전)에 의한 기름절연지 절연체(paper oil dielectric)의 열화는 사고를 유발한다. 물이 없고 잘 함침되어 있는 절연은 전기적 스트레스 하나만을 인가했을 때에는 열화되지 않는다고 보고되고 있다. 물이나 개스 기포의 존재는 전기적 열화의 공통적인 원인이다.

초기에는 완벽한 절연일지라도, 절연지의 열적 열화에 의해 그 특성이 변화하며, 그 과정은 절연지 자체의 고분자화 정도(polymerization degree)가 감소하고 CO와 CO_2가 생성됨으로써 진행된다. 이러한 열화는 절연지의 기계적, 전기적 특성의 감소로 나타난다.

좋은 절연유는 열화 과정에 직접적으로 관여되지는 않는 것으로 인식되고 있으며, 알킬레이트(akylate) 타입과 같은 특별한 합성유는 전기적 스트레스하에서 상당량의 개스를 흡수할 수 있으므로 절연체의 수명에 좋은 효과를 나타낸다.

절연지의 열화에 의한 개스의 발생량이 케이블의 운전압력에서 절연유의 개스 용해도(oil solubility)를 초과하게 될 때 더 이상 용해되지 않아 결국 개스 기포가 형성된다. 절연상태가 미흡한 경우, 유전손실에 영향을 미치는 불순물과 열화부산물의 영향으로 OF 케이블이 열적으로 불안정(thermal instability)하게 될 수 있다.

3.1.1.3. 외부 시이즈의 열화 요인과 사고 메카니즘

케이블의 금속시이즈는 좋은 압력을 유지하고 절연층으로의 물 침입을 방지하는데 중요한 역할을 한다. 일반적으로, 기계적 열화(피로)나 화학적 열화(부식)에 의한 금속덮개의 심각한 손상은 압력이 감소되므로 즉시 감지될 수 있다. 또한, 해저 전력케이블이 사고에 의해 파손되는 경우, 어느 정도의 깊이에서 케이블을 따라 절연층 내로 침입하는 물을 저지할 수 있는 반작용을 하도록 수압 시스템이 설계되어 있다.

3.1.2 열화 현상 모의를 위한 가속화 방법

OF 케이블의 에이징을 인위적으로 모의하기 위하여 다음과 같은 기법이 적용되고 있다.

3.1.2.1. 밀폐된 컨테이너 내에서 절연 구성물이나 모델에 대한 열적 에이징

온도의 함수로서 열화 개스의 발생율과 절연지의 기계적, 물리적 성질의 감쇄율을 산출하는데 사용된다.

3.1.2.2. 밀폐 용기 내에서 절연 구성물이나 모델에 대한 열적/전기적 에이징

열화 생성물에 대한 포착제(scavenger)로서 절연 구성물(주로 기름)의 유효성을 산출하는데 사용된다.

3.1.2.3. 케이블 전체 길이에 대한 전기적/열적 에이징

주어진 전기적 열적 조건하에서 절연 수명을 직접 산출하는데 사용된다. 열적 에이징을 가속화하기 위하여 실제 운전온도보다 더 높은 온도를 적용하며, 완전히 열화된 절연을 모의하기 위해 의도적으로 기름에 열화 개스를 포화시킨다. 가속화 에이징의 최대 시험온도를 올바르게 설정하기 위하여 케이블 절연체의 열적 안정 특성에 대한 지식은 필수적이다.

3.1.2.4. 금속 시이즈에 대한 피로 시험

운전수명 동안에 케이블의 금속 시이즈에 가해지는 변형의 한계를 산출하는데 사용되며, 변형 주파수와 스트레인의 크기를 주로 변화시켜 열화를 가속시킨다.

3.1.3 열화 과정의 물리적 화학적 분석

3.1.3.1. On-line(활선) 분석

3.1.3.1.1. 개스 분석

진단이라는 측면에서 개스 크로마토그래피(GC:gas chromatography)를 이용하여 절연유에 용해된 개스를 분석하는 것이 가장 일반적이며, 여러 열화현상은 분석된 개스 성분과 관련되어 있다.

절연유 분석은 활선 진단방법으로 간주되고 있으나, 절연유를 제한된 통로를 이용하여 채널 그리고/또는 액세서리를 사용해야만 극소량을 채취할 수 있고, 채취된 절연유는 절연 시스템 내부에 존재하는 절연유와는 다를 수 있다는 것을 명심하여야 한다. 따라서, 샘플은 전체 절연유를 대표할 수 있어야 한다.

절연지가 열적으로 열화되면, CO_2, CO및 물이 발생된다. 운전중인 케이블에서 발견되는 이 개스들의 양은 보통 용해도 한계(solubility limit)보다 2 또는 3 승 정도 낮은 크기이다. CO_2/CO 비율은 보통 3 정도이다. 아래의 표는 정상적인 운전온도보다 높은 온도에서 운전되었을 경우를 나타내고 있다.

수소와 탄화수소는 주로 절연유의 전기적 열화에 기인되고, 절연유가 내포하는 이러한 개스들의 양은 수 ppm 이하

Gas	ppm vol/vol
H_2O	9.2
H_2	61.0
CH_4	3.0
C_2H_6	3.0
$C_3H_8 + C_3H_6$	0.0
C_2H_4	0.4
C_2H_2	0.0
CO	202.0
CO_2	551.0
O_2	23.0
N_2	1941.0

의 아주 낮은 값으로 나타나며, 실제로 운전될 때 비정상적으로 열을 받거나 내부에서 방전이 일어날 때 발견된다. 샘플의 내용물을 측정할 때에는, 내용물이 절연열화보다는 다른 요인에 기인될 수 있기 때문에(금속 표면의 脫氣, 기름-기계적인 크랙) 주의가 요구된다.

한가지 예로서, 아래의 기름분석은 이탈리아의 Suvereto에 있는 ENEL 1100kV 시험선로의 OF 케이블 시스템에서 채취된 절연유를 분석한 것이다. 시험선로는 1 년 동안 운전되었으며, 4 day thermal cycle 시험을 위해 온도는 대기온도에서 90℃까지, 650 kV와 750 kV 사이의 전압이 인가되었다.

이러한 값들은 절연이 아주 양호하다는 것을 나타내고 있다. N_2는 포설중에 트랩된 공기의 잔유물이며; H_2는 강력한 펌핑에 의해 발생된 것이고 CO_2/CO 비율은 정상 운전온도라는 것을 말해주고 있다.

3.1.3.1.2. 절연유 분석

액체 크로마토그래피(LC : liquid chromatography)를 이용하여, 절연유에 내포되어 있는 기체가 아니라 절연지가 분해된 부산물(nongasous paper decomposition products)을 찾아내기 위해 절연유를 분석한다. 그렇지만, 이 기술은 아직 널리 사용되지는 않고 있다.

3.1.3.1.3. 전기적 시험

오염된 절연물을 취급할 때, tanδ 측정은 열화 과정의 진행정도를 파악하는데 가장 실용적인 방법이다.

3.1.3.1.4. 금속 시이즈

어떤 경우에는, 저배율 확대경 조사를 통해 현장에서 금속 시이즈의 표면상태에 대한 정보를 얻을 수도 있다. 시이즈 부분은 깨끗해야 하며, 필요하다면 잘 에칭할 필요도 있다. 주로 조사할 것은 초기 크랙 그리고/또는 그레인(grain)의 크기이다. 보다 큰 기계적 손상은 원칙적으로는 방사선 방법으로 검출할 수 있으나, 케이블 루트를 따라서 실제적으로 부딪히는 포설환경에 적용하기가 어렵다.

3.1.3.2. Off-line(사선) 분석

이것은 주로 절연체의 전기적 물리적 성질의 변화를 연구하는데 사용되며, 채취된 절연체의 열화진행정도를 정의하는데 요구되는 파라메터는 다음과 같다 : 절연유의 tanδ 측정, 입자수 분석(particle counting), 절연유와 절연지의 분석, 절연지의 고분자화·정도(degree of polymerization), 절연지의 기계적 성질(장력과 접힘 저항 등) 등

금속 시이즈에 대해서는, 기계적 사고의 원인을 찾기 위해서 철저한 금속학적 분석이 필요하다.

3.2 사출 케이블의 열화 현상

Ramu, Fallou, Simoni, Montanari, Crine와 같은 여러 학자는 멀티스트레스 에이징 모델(multistress aging model)을 제안하였다. 이 모델들은 전계강도에 대한 역누승법칙(inverse power law) 또는 열적 스트레스에 대한 아레니우스(Arrhenius) 법칙, 전기적 열적 기계적 스트레스에 대한 Eyring 이론에 입각하고 있으며, 모두 다음과 같은 형태를 나타내고 있다.

사고까지의 시간 = 함수 [전기적, 열적, 기계적 스트레스]

통계적인 분석으로, 30년 정도 사용한 고전압 고분자절연 케이블의 기본적인 사고 원인은 전기트리 혹은 수트리이다. 트리의 성장은 합성절연층 또는 "반도전층/절연층" 계면에서의 불균일함에 의하거나, 절연층의 불순물(부산물, 첨가제, 물의 포화 또는 산화 생성물 등)에 의해 유기된다. 이러한 이유로 인하여, 제조시의, 운전중의, 또는 포설후의 진단방법이 동공이나 불순물 감지에 기반을 두고 있으며, 이론적인 멀티스트레스 에이징 모델이 적용될 수 없다.

3.2.1 이론적인 멀티스트레스 에이징 모델

a) <u>Ramu 경험적인 수명 모델</u>은 온도 T, 전계 E및 E_0에 좌우된다.

$$L(T,E) = k(T)\ (E/E_0)^{-n(T)}\ \exp(-B\Delta T)$$

여기서, k(T), n(T) = 역누승법칙 파라메타; B = 상수

b) <u>Fallou 수명 방정식</u>은 또한 전기적, 열적 스트레스의 함수이다.

$$L = \exp\ [A(E) + B(E)/T]$$

여기서, A(E), B(E) = 전기적 스트레스와 관련된 상수

b) <u>Simoni 수명 방정식</u>은 역누승 법칙과 아레니우스 법칙으로부터 새롭게 구하고 있다

$$L = L_0\ (E/E_0)^{-n}\ \exp(-B\Delta T)$$

여기서, B, n = 상수

d) <u>Montanari 통계적 모델</u>은 역누승 법칙에 입각한 것으로, 일정한 온도 T에서 전계강도 E 또는 E_S를 구하고 있다.

$$L = t_S\ (E/E_S)^{-n}$$

여기서, t_S는 E = E_S 일 때, 사고까지의 시간임.

e) <u>Crine 모델</u>은 Eyring 이론에 입각하고 있으며 전기적, 열적, 기계적 스트레스가 동시에 가해질 때 사용될 수 있다.

$$L = h/kT\ \exp(\Delta G/kT)\ \mathrm{csch}(e\lambda E/kT)$$

여기서, h, k = 상수, ΔG = 자유에너지
λ = 에너지장벽폭 E = 전계
e = 전하

이론적인 멀티스트레스 에이징 모델은 전기적, 열적, 기계

적 스트레스의 값들을 알고 있는 가운데 케이블에 인위적인 가속 에이징을 가하는 것이기 때문에, 정상적인 운전조건에 대한 외삽(extrapolation)이 필요하다. 그러므로, 역누승법칙, 아레니우스 방정식, Eyring 방정식 또는 Weibull 통계방법에 입각한 이 모든 모델들은 균일한 합성절연체에만 적용되는데, 그 이유는 절연체의 파괴가 체인의 끊어짐(chain scission), 동공 형성 그리고 전기트리 성장과 같은 고분자의 고유한 열화(intrinsic polymer aging)에 기인되기 때문이다.

3.2.2 합성절연 케이블의 에이징을 모의하기 위한 가속화 시험

합성절연물의 에이징을 모의하기 위해, 가속 시험이 실험실에서 샘플 혹은 케이블을 이용하여 다음과 같이 수행되고 있다.

a) 전기적 에이징을 위해 초고압으로 인가할 수도 있다.

b) 열적 에이징은 일반적으로 공기 분위기의 오븐속에서 수행된다.(예를 들면, 110℃에서 145℃까지 온도변화)

c) 해저케이블에 대한 수압시험 또한 연구되고 있다.(예로써, 폴리에틸렌 필름을 70℃의 일정한 온도에서 1 기압에서 300 기압까지 변화시킴)

d) 열화에 미치는 불순물의 효과 :
  - 열적 싸이클과 과전압 써어지가 인가되는 가운데 기상환경 실험실에서 습기 효과를 연구한 결과, 수분은 합성절연층에 직접 또는 확산되어 침투하게 됨을 알게 되었다.
  - 안정제, 산화방지제 또는 가교과정에서 형성되는 분해생성물 등의 여러 내용물이 첨가된 합성절연물을 이용하여 수행된다.

3.2.3 케이블의 합성절연층에 대한 물리적 화학적 분석

3.2.3.1. 전기적 측정

케이블 제조회사들은 절연재료의 청결도를 일정하게 얻기 위하여, 폴리에틸렌과 가교폴리에틸렌 그리고 쉬일딩 재료의 생산에 관련하여 여러가지 기술들을 재검토하고 있으며, 자계, 와전류(eddy current)및 전기광학을 포함하는 검출방법이 그것 들이다.

케이블의 절연층 전체를 지속적이고 완전하게 검사하기 위하여, 중심 도체에 방해받지 않고 생산공정 속에서 생산중인 케이블 주위로 원적외선(FIR) 레이저 빔을 360° 회전시킬 수 있는 고속 광학 스캐너가 개발되었다. 이 장치는 케이블의 운전 수명에 심각한 악영향을 미치는 것으로 알려진 결함(보이드나 불순물)에 의하여 파장이 118.8 μm인 원적외선(FIR) 레이저가 산란되는 것을 감지한다. 적용사례에 의하면, 5 cm/s의 속도로 센서가 지나가면서 직경 2.8 cm의 케이블에서 직경 100 μm 정도로 작은 보이드를 감지한 것이 보고되었다.

EHV XLPE 전력케이블에 대해 X-선 어레이 센서를 이용한 결함 검출방법이 연구되었으며, 케이블 검사시스템에 적용하기 위하여 금속불순물의 센서에 미치는 효과와 불순물의 검출가능한 임계크기에 대한 시험이 시도되었다.

XLPE 케이블에 대하여 절연저항, DC 누설전류, tanδ와 부분방전 방법을 포함하는 절연진단기술이 계속 제시되고 있다. 예를 들면, tanδ와 산화생성물의 밀도에 대한 온도의 존성의 상관관계가 보고되었다.

3.2.3.2. 물리적 화학적 분석

물리적, 화학적 분석은 새로운 분석방법에 따라 적용할 수 있는 새로운 샘플이 요구되고 있으며, 열화된 사출고분자 절연체의 성질을 평가하기 위한 고감도 분석기술은 다음과 같다.

- 적외선 microspectroscopy : 케이블 절연의 부분적인 영역에서 유기 화합물의 존재를 조사
- 파장분산 X-선 조사기(Wave length disperse X-ray spectroscopy) : 트리가 개시되는 부분에 존재하는 무기 성분들을 분석
- 화학발광(Chemiluminescence) : 일반적으로 열화된 케이블에서 관측되는 정도는 열화되지 않은 경우보다 크다.
- TGA(Thermogravimetric analysis), GC(Gas chromatography), FTIR(Fourier transformed infrared spectroscopy), MS(Mass spectroscopy) 등을 포함하는 일련의 분석기술들은 케이블 절연층에서 나오는 휘발성 물질을 분석하는데 사용된다.

절연층의 수분량과 같은 화학적 변화는 수분측정으로 정확히 알아낼 수 있다; 절연층의 열적 이력 또는 산화는 DSC (differential scanning calorimetry)로서 분석된다. PIXE(proton induced X-ray emmision)는 사출 XLPE 절연케이블의 미소영역에 있는 이온성 불순물의 성질과 농도를 정량분석하는데 사용된다; 열화된 케이블은 전기트리와 수트리의 벽에서 이온성 불순물의 농도가 높은 것으로 나타난다.

절연층에서 일어나는 변화는 용매추출(solvent extraction)과 SAXS(small angle X-ray scttering)로서 알아낼 수 있으며, TSDC(thermally stimulated discharge current)와 TTC (thermal transient current) 연구로 XLPE의 전기적 열화의 원인을 분석할 수 있다. 전기트리가 형성되기 전에 반도전층의 팁(tip)에서 전계발광(electroluminescence)이 일어나며, 가시광선과 자외선이 방출된다; 전기적 스트레스가 강화된 점에서 방출되는 자외선은 고분자를 光열화(photodegradation)시킬 수 있다.

열 단계 기술(thermal step technique)은 고전압 케이블에서 공간전하밀도와 전계를 측정하는 새로운 방법이며 비파괴 방법이다.

3.3 현장 진단시험

절연내력시험의 현장 진단방법과 절연저항 또는 부분방전 시험에 근거를 둔 방법들에 대한 검토가 많이 이루어졌

다. 더불어, 절연유분석에 대한 또 다른 진단방법, 케이블의 외부 시이즈에 대한 DC 시험및 케이블 온도의 측정이 문헌상으로 보고되어 다음과 같이 정리하였다.

3.3.1. 절연내력시험

DC 시험은 초기 결함을 검출하는데 뿐 아니라 열화 종류에 따른 사고를 검출하는 데에도 효과적인 것으로 오랫동안 인식되어 왔으나, XLPE 케이블에 대하여 현장과 공장에서의 DC 시험이 미치는 영향을 조사한 결과, 현장에서 DC 절연내력시험으로 인한 문제점과 기존 방법을 대체할 수 있는 새로운 시험방법이 논의되었다. 50 Hz 현장시험방법과 시험이 고전압 XLPE 케이블에 대해 수행되었으며, 초저주파(VLF : 0.1 Hz) 전압을 이용한 현장시험 결과와 VLF 시스템이 연구되었다.

케이블과 GIS의 고전압시험에 대해 50 - 600 kV의 정격전압을 갖는 공진 전력공급 시스템(resonant power supply system)과 시험결과들이 논의되었으며, 공진 전압을 이용한 현장 진단시험의 기타 장비와 결과들이 언급되고 있다.

50 Hz, 진동파(Oscillating wave : OW)및 DC를 사용하여, 케이블 샘플과 고전압 케이블 액세서리에 대한 절연파괴시험이 수행되었다. OW 시험은 종래의 DC 시험을 대체할 수 있는 일반적인 현장 절연내력 시험으로서 추천되고 있다. 적절한 비용과 현장 상황을 고려하여 OW를 얻을 수 있는 여러 회로에 대해서도 연구되었다.

3.3.2. 절연저항의 측정

활선상태에서 XLPE 케이블의 절연저항을 측정하는 방법이 연구되었으며, 활선 케이블에서 외부 시이즈의 절연저항을 측정하는 자동 시스템이 언급되고 있으나, 절연저항측정의 유효성에 대해서도 보고되고 있다.

누설전류의 측정에 의한 HV 케이블의 열화진단이 Japan Railways에 의해 시작되었고, 절연사고, 절연측정방법과 열화평가에 대해서 논의되었다. 현장에서 누설전류의 측정감도를 높이기 위해, 고전압측에서 광섬유 시스템이나 저대역(low-pass) 필터를 사용한 직접측정방법이 제시되었다.

3.3.3. 부분방전측정

현장에서 스위칭 임펄스 전압을 중전압(MV : midium voltage) 케이블에 인가하여 PD를 측정하는 방법이 시도되었고, 이에 따른 실험실에서의 기초적인 조사와 실제적인 시험이 수행되었다.

현장에서 적용가능한 부분방전 측정회로와 그 측정결과가 보고되었다. XLPE 케이블의 hot-line 부분방전 진단을 위한 새로운 방법으로서 컴퓨터 측정시스템을 이용하여 평균 펄스크기에 대한 위상각(phase angle) 분포 양상을 통해 부분방전 특성을 파악할 수 있게 되었으며, 매설된 지중케이블에서 결함의 위치를 파악하는데 유효한 부분방전 위치 검출 시스템에 대해서도 보고되었다.

접속재의 위치에서, PVC-케이블 재킷(jacket)에 부착된 고대역(high-pass) 필터링 센서를 사용한 새로운 부분방전 검출법이 제시되어, 275 kV XLPE 케이블 활선의 표면에서 30 MHz - 60 MHz의 부분방전을 검출할 수 있다. 일본에서는 현장 적용을 목적으로, 와이어 쉬일드 케이블(wire shield cable)에 검출코일을 이용한 부분방전 검출과 같은 또 다른 방법이 개발되고 있으며, sheath interrupter를 갖춘 접속부에서 부분방전 검출, sealing end에서 부분방전 검출및 비전기적 방법으로서 음향방출(acoustic emission)을 이용한 부분방전 검출방법 등이 보고되고 있다.

3.3.4 절연유 분석

OF 케이블의 진단방법으로서, splice와 sealing end로 부터 채취한 절연유를 분석하는 방법이 제시되었다. 특히 상세한 분석을 위해 용해개스분석(DGA:dissolved gas analysis)을 이용하고 있다.

3.3.5 온도측정

호주에서 광섬유를 이용하여 실시간(real-time)으로 광섬유를 사용하여 케이블을 따라 온도분포를 감지및 측정하는 시도가 있었고, 그 결과가 보고되었다.

3.3.6 관 리

코펜하겐에서 OF 케이블 시스템의 감시 시스템이 설치되어, 가교 케이블의 외부 PE 시이즈와 2차 절연에 대한 주기적인 DC 시험에 의해 운전중인 케이블의 종합적인 상황이 기록되었다. 즉, 전반적인 관리 시스템에 의하여 다음과 같은 많은 양의 데이터를 수집 처리한다 : hot-spot 온도측정, cross-bonding 감시, 유압측정과 경보, 기름 순환과 수냉각 시스템

4. 진단방법

절연지절연 케이블과 사출케이블 시스템의 진단방법에 대하여 현장에서 사용되거나 실험실에서 수행된 방법에 대해 정리하였다.

4.1 현장 시험

4.1.1 OF 케이블

4.1.1.1. 비금속 시이즈에 대한 시험

절연지절연 케이블에는 금속 시이즈를 외부 손상(마멸, 부식 등)으로부터 보호하기 위해 그리고 대지로부터 시이즈를 절연시키기 위해 설계된 사출고분자 외부시이즈가 있다. 이 외부 비금속 시이즈의 주된 열화 원인은 다음과 같다.

① 직접적인 기계적 손상 ② 번개에 의한 펀홀
③ 스트레스 균열 ④ 산화 열화

①과 ②의 경우에는 손상된 시이즈에 대해 육안 검사로써 쉽게 판별할 수 있다. ③의 경우에는 시이즈의 균열에

대한 여러가지 양상의 척도가 되는 변형된 상태하에서의 수분노출시험이 있다. ④의 경우에는 적외선 분석기(IR spectroscopy)를 이용하여 카르보닐(carbonyl) 밴드 그리고/또는 카르복실(carboxyl) 밴드의 진전 정도를 살필 수 있다. 어떠한 열화 메카니즘이 작용하겠지만, 일반적으로 최종 결과는 금속시이즈의 일부분이 외부 환경에 노출되는 것이다.

비금속 시이즈에 대한 종합적인 상태를 알아내는데 가장 널리 사용되는 기술은 DC 전압시험이다. 비금속 시이즈는 1 - 15 분 동안에 2 - 10 kV 범위의 전압을 견뎌내야 한다. 이 시험은 포설후 시험(after-laying test)과 시이즈의 상태를 주기적으로 모니터하는데 폭넓게 사용되며, 이 작업은 OF 케이블 시스템에 대한 전반적인 관리및 감시 프로그램의 기본 항목으로 될 수 있다. 외부시이즈가 반도전성 물질로 구성된 케이블 시스템에서는, DC 전압시험은 적용될 수 없다.

4.1.1.2. 압력 모니터링

절연유나 개스가 채워진 케이블의 내부압력 값들의 변화는 케이블 모니터링에 필수적인 정보이다. 압력 모니터링은 금속 시이즈에서 누출이 있다는 즉각적인 경고를 제공하여 피로, 부식 또는 기계적 손상이 있다는 것을 알려준다. 종래의 전기 접촉식 유압계는 불연속적인 데이터 수집, 접촉 산화와 진동에 대한 감도 문제 등의 여러가지 단점이 있으나, 압력 트랜스듀서와 광섬유 데이터전송에 기초한 현대적인 모니터링 시스템은 신뢰성있고 지속적인 데이터 수집을 가능하게 한다.

4.1.1.3. 기름 분석

전력기기에서 추출한 기름의 분석은 두 가지 목적, 즉 사전에 사고에 대한 조기경고를 제공하거나 잔여수명을 평가하는 데 이용된다. 용해 개스분석및 입자나 수분에 의한 오염 분석에 의하여 사고를 사전에 알 수 있으며, 잔여수명을 평가하기 위해서는 변압기에서와 유사한 기술 즉, furfuraldehyde 분석과 같은 기술의 개발이 필요하다.

4.1.1.3.1 절연유 시험

케이블 절연유의 일반적인 시험은 절연유의 현 상태를 나타내주고 과열이나 부분방전과 같은 비정상적인 동작상황에 대한 정보도 제공한다. 샘플은 케이블 절연유에 대한 전반적인 상태를 평가할 수 있도록 채취되어야 하며, 대표적인 측정 요소들은 다음과 같다.

- 90℃에서 유전손각(tanδ)
- 90℃에서 체적저항
- DDB(dodecyl benzene) 함유량
- 전계강도(2.5 mm 구갭)
- 수분함량
- 전체적인 酸度
- 입자 함유량

입자 함유량은 기름의 전반적인 상태를 대표하는 것은 아니지만, 샘플링 위치에서의 국부적인 상태와 관련된다. 酸度는 기름의 산화정도를 나타내며, 수분의 존재는 절연유의 전계강도를 약화시키고 산화와 酸의 생성을 가속화시켜서, 결과적으로 여러가지 酸이 존재하면 절연유의 전기저항을 감소시키고 유전손실을 증가시킨다.

입자들은 전계가 높은 곳에 축적되며, 부분방전이라는 결과를 초래하여 수소개스가 생성된다. 일단 절연유가 수소로 포화되면, 전기적으로 약한 수소 거품이 형성되어 절연파괴로 이어진다. Dodecyl benzene(DDB)과 같은 개스가 추가로 절연유에 흡수되면 수소 거품의 형성을 방해하는 경향이 있으므로, 절연유 샘플에 존재하는 입자수와 DDB 함유량은 절연유의 현 상태를 측정하는데 유용한 것이 된다.

절연유 샘플로서, 케이블 기름의 전반적인 상태가 좋지 않은 것으로 판단되면, 절연유의 고유 특성을 유지하기 위해 케이블에 새로운 절연유를 보충하여야 한다.

4.1.1.3.2. 용해된 개스의 분석

케이블 절연유에 용해된 개스를 정기적으로 분석함으로써 결함이나 부분방전 또는 과열과 같은 비정상적인 운전상태에 대한 정보를 알 수 있다. 결함의 종류에 따라 기름에는 다른 종류의 개스가 생성될 수 있으므로, 용해된 여러 개스에 대한 농도의 비율을 파악하면 결함의 종류를 알 수 있다.

비록 이러한 기술은 원칙적으로 변압기에서 일반적으로 사용되는 것과 유사하지만, 여러가지 중요한 차이가 있다 : 케이블에서는 변압기에서 보다 다양한 종류의 기름이 사용되고 있으며, 변압기에서는 샘플을 채취하기가 쉽다. 어떤 케이블 절연유는 상당히 점도가 높아 샘플링과 분석하기가 어렵다. 질소로 둘러싸인 저장장치(reservoir)나 질소봉입된 송풍기(bellows)를 갖추고 있는 케이블과는 달리, 변압기의 기름은 일반적으로 과다량의 질소에 노출되지는 않는다.

Self-contained OF 케이블의 절연유 샘플은 샘플링 포인트와 분석하고자하는 위치 사이에 해당하는 부피의 기름을 한번에 뽑아내어 채취할 수 있으며, 보통 진공추출을 하게되므로 기름으로부터 개스가 빠져나오게 된다. 개스의 분석은 GC를 사용하여 보통 ppm 단위로서 추출된 개스를 측정하게 된다. GC의 일반적인 조작은 두 개의 검출기 즉, flame ionization과 열전도 검출기를 사용한다.

저에너지 부분방전에 의하여 주로 수소와 미량의 메탄과 아세틸렌이 생성된다. 방전의 크기가 커지면, 아세틸렌과 에틸렌의 농도도 상당히 증가되고, 또한 아-크나 지속적인 스파크에 의해 온도가 1,800℃까지 상승되어 많은 양의 아세틸렌이 생성되게 된다.

그러나, 용해된 개스의 분석(DGA:dissolved gas analysis)으로부터 얻어진 결과는 샘플링 방법과 분석시의 샘플 취급에 따라 크게 좌우된다. Self-contained OF 케이블에서 절연유의 이동도(mobility)는 상당히 낮으므로, 열화부위에서 멀리 떨어진 점에서 채취된 절연유로는 사고의 초기 단계를 예견하기 어렵다. 그렇지만, 샘플은 보통 케이블 접속부위 근처에서 채취되므로, 액세서리의 현 상태에 대해서는

가치있는 정보를 제공하게 된다.

상당량의 개스가 방출되는 사고의 최종 단계는 비교적 빨리 진행되므로 주기적인 시험으로는 검출할 수 없다. 보고에 의하면, 케이블 접속부위에서 사고나기 바로 전날 기름 샘플을 채취하여 DGA를 수행하였고, 어떤 경우는 사고전 2 - 3 주 전에 채취하여 검사해 본 결과, 두 경우 모두 개스 레벨이 증가하였지만 케이블의 운전을 중단할 만큼 충분히 수치가 높이 증가한 것은 아니었다.

파이프-타입(Pipe-type) 케이블내에서 절연유의 이동도는 Self-contained OF 케이블에 비해 상당히 높은 것으로 추정되므로, DGA에 의한 국부적인 결함을 검출할 확률은 파이프-타입 케이블인 경우 상당히 높다. 파이프-타입 케이블에 실질적으로 적용되는 DGA 방법인 EPOSS(EPRI pressurised oil sampling system)에서는 절연유 샘플을 채취하고 개스를 추출하기 위해 진공셀(evacuated cell)을 이용하고 있다. 이 방법은 345 kV급 케이블 시스템의 열화와 손상을 검출하는데 성공적으로 적용되고 있다.

4.1.1.3.3. 기름분석에 의한 절연지절연의 열화판단

변압기 절연지의 열화를 모니터하기 위해 절연유 분석을 이용하는 방법들이 개발중에 있으며, 아마도 케이블의 절연지에도 유사한 기술 개발이 가능한 것으로 보고있다.

운전중에 변압기의 절연지는 열화될 때 furfural가 생성되며, 이 때 주된 생성물은 절연유에 잘 녹는 2-Furfuraldehyde로서 최저 0.1 ppm 정도까지의 농도에서 검출될 수 있다고 보고되고 있다. Furfuraldehyde는 HPLC(high performance liquid chromatogra- phy)를 이용하여 이 정도의 감도로서 검출된다.

변압기유에 사용하는 기술들은 케이블 절연유 분석에 적용될 수 있지만, 두 시스템 간에는 커다란 차이가 있다. 일반적으로, 케이블 시스템의 어떤 부분도 정상적으로는 cellulose가 furfuraldehyde로 열화되는 데 필요한 온도(대체로 > 100℃)에서 동작되지는 않는다. 또한, 케이블내의 산소 농도는 낮기 때문에, 케이블은 변압기 보다 낮은 화학적 반응 환경에 놓여 있다.

케이블의 경우 낮은 온도와 산소 결핍으로 인하여, furfuraldehyde는 케이블의 절연지의 열화에 대한 좋은 척도라고 할 수 없으나, 또 다른 화학성분이 열화의 좋은 척도로 입증될 가능성은 있으므로 앞으로의 연구에서는 케이블 절연지에 대한 점진적인 열화를 모니터할 수 있는 화학성분을 규명하는 것이 필요하다.

4.1.1.4. 케이블 시스템의 온도 모니터링

최근에 포설되는 케이블 선로에서는 케이블에 광섬유 센서를 설치하여 전체 케이블 선로를 따라 케이블 온도를 모니터할 수 있다. 기존의 케이블에서는 일반적으로 케이블 온도를 직접 측정하는 것이 가능하지 않지만, 간접적으로 실시(real-time) 열적 모델링을 이용하여 도체의 온도를 산출하는 것이 보다 실제적인 해결책이다.

4.1.1.4.1. 간접 온도 모니터링

도체온도에 대한 컴퓨터 계산방법이 보고되어 있다. 대기온도와 부하를 실시간(real time)으로 고려하는 이 방법을 적용하면 상당히 강화된 과도상태에서의 정격 뿐아니라 케이블 도체의 열적 이력을 알아낼 수 있기 때문에, 이러한 실시간(real-time) 케이블 시스템 모니터(CSM : cable system monitors)는 Self-contained OF 케이블과 파이프-타입 케이블 모두에 설치되고 있다.

CSM은 고정된 데이터와 실시간 데이터를 조합하여 케이블 도체의 온도를 계산한다. 고정된 데이터는 선택된 임계위치에서 케이블 포설의 기하학적 데이터와 케이블 재료및 국부적인 주변 환경에 대한 열적 특성값들이 포함된다. 케이블 환경의 열적 특성값(예로 backfill)은 계절에 따라 달라진다. 실시간(real-time) 데이터는 케이블의 에너지 충전상태(도체와 유전손실이 포함되어야 하는가를 결정함), 부하및 트러프(trough)의 온도와 냉각수가 존재한다면 그 온도도 포함된다. 또한, CSM은 대기와 냉각수의 온도및 전압, 전류를 기록하기 위한 측정 지소(outstation)를 갖추고 있으며, 예상온도와 측정온도가 잘 일치하도록 몇 개의 떨어진 점에서 시이즈나 파이프의 온도를 측정하고 모델의 일부 파라메터를 수정하게 된다.

실시간 케이블 모니터를 사용하는 것은 포설되어 있는 케이블의 도체온도를 산출하는 최상의 방법으로 고려되고 있으며, 최근에 포설되는 케이블에는 전체 케이블 선로를 따라 지속적으로 온도를 모니터할 수 있도록 광섬유 온도센서를 설치할 수 있다.

4.1.1.4.2. 온도의 직접 측정

광섬유를 이용한 온도 측정은, 열전쌍(thermocouple)이나 저항성 써모메터(resistance thermometer)를 이용하는 금속시스템 보다, 전력 시스템의 사고에 의한 과도 고전압에 의해 손상받지 않는다는 장점을 가지고 있다. 케이블 선로를 따라 전체적인 온도를 측정하는 것(분포온도측정:distributed temperature measurement)은 일정거리나 문제부위에 센서를 설치하는 점센서(point sensor)에 비해 중요한 hot-spot를 모두 감지하고 위치를 파악할 수 있다는 장점이 있다.

실제 선로에 적용이 가능한 분포온도측정(DTS:distributed temperature sensing) 시스템은 일반적으로 광산란법(light scattering method)에 기초를 두고 있으며, 최대 사용영역과 사용하는 광섬유의 종류는 개발된 기술에 따라 약간씩 차이가 있다.

4.1.1.4.3. 설 치

광섬유 케이블은 전기적으로 절연되므로, 광섬유는 고전압 케이블의 도체와 함께 설치할 수 있다. 그러나, 광섬유의 존재로 인해 고전압 케이블 접속부위의 설계와 조립이 상당히 복잡해져 운전중 사고가 증가될 수 있기 때문에, 광섬유를 스크린이나 시이즈에 설치하거나 전력케이블의 외부표면에 부착시키는 것이 더 나은 방법이며, 측정된 온도

로부터 케이블 구성물의 열저항율을 고려하여 도체온도가 산출된다.

스크린이나 시이즈에 삽입된(integrated) 광섬유를 사용할 때에는 splice 간의 광섬유의 길이가 고전압 케이블의 드럼 길이로 제한된다는 단점이 있을 수 있으며, splice 수가 많으면 상당히 감쇄될 수 있으므로 광섬유 측정의 범위가 제한될 수 있다. 이러한 측면과 접속시에 복잡함이 추가되므로, Self-contained OF 케이블의 표면에 광섬유를 부착하는 방법이 더 선호되고 있다. 파이프-타입 케이블의 경우 광섬유는 스텐레스 스틸 시이즈 내에 보호될 수 있고 케이블의 3심 사이에 위치하므로, 케이블 접속위치에서는 파이프라인 안에 광섬유가 남게 된다.

4.1.1.4.4. 적 용

전력케이블 시스템에 DTS를 적용하는 것은 상당한 관심을 불러 일으키고 있다. 그러나, 모니터링 시스템은 비교적 비싸며, 고전압 대전력 송전케이블의 경우에는 경제성이 있다.

많은 나라에서 DTS 설치 경험을 통해 평가하고 있다. 호주의 New South Wales에서는 132 kV AC self-contained OF 케이블에 대해 시험하고 있으며, 캐나다에서는 광섬유 온도센서를 강을 가로지르는 터널 내의 450 kV DC 케이블에 설치하였다. 노르웨이와 덴마크(the Skagerrak cable) 사이의 DC 케이블 링크(link) 중 육지 부분에 있어서 케이블의 표면에 광섬유를 적용하였다.

덴마크에서는 열병합 발전소에서 온수 파이프에 케이블이 근접할 때 국부적인 hot-spot가 발생되므로 많은 수의 DTS를 설치 운영하고 있으며, 영국에서는 275 kV 폴리프로필렌 절연지 라미네이트(polypropylene paper laminate) 케이블을 filled trough 내에 포설하고 케이블에 광섬유를 부착시켜 트러프 사이에 설치하여, 1990 년부터 Manchester 근방에 설치된 132 kV 3심 케이블 두 라인을 이용하여 DTS 측정이 이루어지고 있다.

케이블 표면온도를 측정하는 것과 더불어, 케이블 터널에서 화재의 감지와 위치파악을 위해 터널과 트러프 내 공기의 온도를 측정하는 데에도 광섬유 케이블이 사용되기도 한다.

4.1.1.5. 부분방전 검출

4.1.1.5.1. 전기적 검출방법

부분방전(PD:partial discharge)의 검출과 측정은 고전압 전력설비의 결함을 검출하는데 중요한 기술이다. 그러나, 현장에서는 주변의 노이즈가 심하기 때문에, 케이블의 조그마한 결함에서 발생되는 매우 적은 양의 부분방전을 검출할 만큼 충분한 감도로 부분방전을 측정하는 것은 실질적으로 불가능하다. 일반적인 방전 검출장치에서 사용하는 것보다 더 높은 주파수에서 측정하는 것이 감도를 향상시킬 수 있는 방법이다.

절연지절연 케이블은 연속적인 금속시이즈와 금속슬리브(sleeve)를 갖춘 접속부로 설계되어 있기 때문에, PD 측정은 sealing end와 케이블 시이즈의 불연속점을 포함하는 접속부에서 만이 가능하다. 특별히 접지를 시켜야하는 케이블 시스템의 경우 이러한 불연속점은 이미 일반적으로 존재하여 왔다.

4.1.1.5.2. 초음파 검출방법

4.1.1.5.2.1. 동작 원리

부분방전은 전계방출, 光방출및 음향방출을 일으키므로, 대부분 초음파 주파수 범위에서 쉽게 감지된다. 따라서, 방사되는 초음파를 감지함으로써 부분방전의 위치를 파악할 수 있게 된다. 초음파는 대기와 기름 속에서 상당히 잘 전파되지만, 고체 절연매질내에서는 급속하게 감쇄되므로 부분방전 발생위치의 파악에 주로 적용된다.

4.1.1.5.2.2. 장 치

대부분의 장치에는 음향수집기(acoustic collector)의 끝에 있는 압전세라믹 트랜스듀서(piezo-ceramic transducer)가 갖춰져 방전 발생위치로부터 유전체(절연체)를 거쳐 전파하는 진동에 응답한다. 음향주파수 범위(20 kHz 이하) 내에서의 주변 노이즈는 고대역 필터(high-pass filter)로써 제거되고, 감지되는 주파수 밴드는 보통 25 kHz에서 150 kHz 사이이다. 검출된 신호는 증폭된 후에 부분적으로 설치되어 있는 진동자(oscillator)에 의해 변조되어 초음파 신호에서 가청음으로 바뀌게 된다.

마이크로폰 시스템, 스텐레스 스틸 바늘을 사용한 접촉 프로우브, 포물반사경(parabolic reflector) 또는 절연 튜브(hotstick)에 설치된 트랜스듀서 등이 기본적으로 검출기를 구성하고 있다. 트랜스듀서 신호를 직접 측정하는 방법 외에, 확성기, 아날로그 레벨메터 또는 LED 지시계와 같은 간단한 지시 시스템이 사용될 수 있다.

4.1.1.5.2.3. 적 용

측정 범위가 공간적으로 제한되기 때문에, 초음파 PD 검출기는 모니터링 액세서리와 특별히 조화가 이루어져야 한다. 검출의 종류에 따라 측정 감도가 직접적으로 영향받기 때문에, 일반적으로 가장 흔히 사용되는 것은 스텐레스 스틸 바늘을 사용한 접촉 프로우브와 절연튜브(hotstick) 시스템의 두 가지 검출기이다.

전자는 안전한 접지 조건이 이루어질 때에만(예로, 접속부의 금속하우징) 사용될 수 있으며, 절연 튜브에 설치하는 후자는 안전한 작업거리에서 조작될 수 있지만, 검출기는 항상 코로나 효과를 피하기 위해 단말의 접지부에 위치해야 한다. PD 크기(pC)와 검출기의 지시와의 관계는 사용되는 검출 시스템과 케이블 액세서리의 설계에 따라 달라진다.

운전중인 3개의 70 kV 절연지절연 접속부에서 PD 현상에 상응되는 신호가 검출되어, 이 접속부를 수거해 살펴보니 절연지층 사이에 보이드가 있었고, 접촉 프로우브를 사용하여 발생된 초음파가 이 보이드에서 일어난 높은 레벨의 PD 발생에 의한 것이라는 시험결과가 보고되었다.

4.1.1.5.2.4. 감도와 한계

검출 감도는 액세서리에 사용되는 재료의 종류에 따라 달라진다. 접촉 프로우브를 이용하면, 절연유 속에서 방전이 일어나 액세서리의 금속하우징에 직접 전달될 때에만 50 pC 이하의 감도가 가능하다. Hotstick 시스템은 오직 단말에서만 사용되도록 권장하고 있으며, 300 pC 정도의 감도가 예상된다.

4.1.1.6. 시이즈의 금속학적 조사

납 시이즈의 금속학적 조사는 현장에서 이루어지며, 납 시이즈에 피로현상이 발생되어 있는지를 결정하기 위해서 다음과 같은 절차로 수행되고 있다.

- 시이즈에서 모든 기름기를 제거한다.
- 홈이 형성되도록 납에 접합제(putty)를 두른다.
- 75 %의 초산과 25 %의 과산화수소 용액(3 % w/v 또는 10 volumes 정도)을 붓는다.
- 약 5 분간 기다린다.(납의 종류에 따라 달라짐)
- 순수로 씻어내고 말린다.(닦아내지 말 것)
- 확대경으로 미세구조를 관찰한다.

이러한 방법은 일반적으로 0.5 mm 이하의 그레인 크기에서 적용되고 있으며, 알루미늄 시이즈에 대해서 이와 유사한 현장시험은 사용될 수 없다.

4.1.1.7. 케이블과 액세서리에 대한 X-선 조사

고전압 케이블의 두꺼운 시이즈와 액세서리의 금속 케이스는 절연층의 상세한 정보를 파악하기 힘들거나 불가능하게 한다. 그러나, X-선 또는 γ-선 조사는 금속 부분의 분석, 그리고, 특히 함유물과 납 시이즈의 균열 또는 전체적인 변형, 도체의 손상및 액세서리 구성물의 손상 정도나 구성물 사이의 그릇된 결합에 대한 진단을 할 수 있는 강력한 방법이다.

금속의 실제적인 두께는 기준 금속(reference metal)으로부터 알 수 있다. 알루미늄은 100 keV까지 기준 금속으로 사용되며, 철은 그 이상의 에너지에 대해 사용된다.

일반적인 X-선관(100-350 keV)으로부터의 방사되는 X-선은 고전압 OF 케이블 또는 액세서리의 금속 구성물을 뚫고 지나가 적당한 콘트래스트와 노출시간으로 방사선그래프를 얻기에는 충분치 않다. 이러한 작업에는 방사성 동위원소원이나 전자 가속기가 적합하다.

예를 들면, 500 kV OF 케이블(도체 그림자로부터 2x5.5 mm 두께의 납+절연지-절연유)의 납 시이즈에 대해서 100 Curie의 ^{192}Ir 源을 이용하여 50분 노출시키면 좋은 방사선그래프 영상을 얻을 수 있다. 이 경우에 등가 방사선그래프 두께는 48 mm 정도의 철이다. 납 시이즈에 대해 신뢰성있는 형상의 최소 크기는 반경 0.5 mm의 보이드와 0.2 mm의 두께변화이다.

4.1.2 사출 케이블

4.1.2.1. 비금속 시이즈에 대한 시험

사출절연 케이블의 고분자 외부시이즈는 다음과 같은 기능을 하고 있다.

- 외부적인 영향으로부터 케이블을 보호
- 대지로부터 금속시이즈/스크린을 절연
- 고전압 케이블의 경우 종종 나타나는 경우로서, 절연층으로 수분이 확산되는 것을 방지하는 금속 시이즈를 보호

외부 비금속 시이즈의 열화의 주요 요인은 절연지절연 케이블에서와 같은 것 들이다. (4.1.1 절 (1) 참조) 열화 메카니즘은 다르지만, 금속시이즈나 스크린과 절연층의 일부분이 결과적으로 외부 환경에 노출된다.

비금속시이즈의 종합적인 상태을 파악하는 일반적인 방법으로서, 2 - 10 kV 범위의 DC 전압을 1 - 15분 동안 인가하여 시이즈가 포설 중에 손상되지 않았다는 것을 포설후에 확인하는 시험이 널리 적용된다. 또한, DC 전압시험은 시이즈의 상태를 주기적으로 모니터하는 데 적용되는 표준 진단방법이다.

4.1.2.2. 사출케이블 시스템의 온도 모니터링

절연지절연 케이블에서 온도를 모니터하는 기술을 4.1.1.4 절에 언급하였다. 이와 같은 광섬유 분포온도감지(DTS) 기술이 사출케이블에도 적용될 수 있으며, 가장 큰 차이점은 광섬유를 설치하는 방법에 있다. Self-contained OF 케이블의 접속은 일반적으로 사출케이블 보다 복잡하기 때문에 보통 포설후에 케이블의 표면에 광섬유를 부착시키는 것이 선호되고 있다. 사출케이블의 경우 전력케이블의 스크린이나 시이즈 내에 광섬유를 내재시키기가 좋다. 많은 케이블 생산업체에서는 단심이나 3심 케이블의 스크린에 광섬유를 내재시킨 프로토타입 케이블을 개발하여 시험하고 있다.

4.1.2.3. 부분방전 검출

활선하의 전력케이블이나 액세서리에 대한 부분방전 검출은 HV 사출케이블 시스템에서 가장 중요한 비파괴 기술일 것이다. 그러나, 종래의 검출법으로 현장에서 PD를 측정하는 것은 주변노이즈의 레벨이 높기 때문에 상당히 어렵다. 최근에 외부노이즈가 적은 범위(수 십 MHz 또는 더 높은 주파수 영역)에서 PD 신호가 중요한 고주파 성분을 포함하고 있다는 것이 증명되었다. 이러한 고주파 부분방전(HFPD) 신호를 이용하는 검출방법은 많은 나라에서 개발중에 있으며, 일본과 네덜란드에서 주로 시험하고 있다.

방전펄스의 고주파 성분이 케이블을 따라 전파해 나가면서 빠르게 감쇄되는 점은 전체 케이블 시스템을 측정하는 데에는 단점이 될 수 있지만, 주된 관심사가 액세서리에서 발생되는 부분방전이라면, 고주파 부분방전(HFPD) 신호가 검출될 수 있는 짧은 길이에서는 장점이 될 수 있다. 즉, 접속부위나 단말 근처에서 검출하고 방전이 측정된다면, 이러한 방전은 액세서리에 기인하는 것일 것이다.

현장에서 사용할 때에는 이 기술의 노이즈 레벨은 종래의 PD 검출법으로 관측되는 수 백 pC 정도의 값과 비교하여 보통 40 pC 정도이다.

4.1.2.3.1. 케이블에 대한 측정

Pick-up 코일을 이용하는 HFPD 검출법이 일본에서 구리선 쉬일드가 있는 66-154 kV급 케이블에 적용하기 위해 개발되었다. 77 kV 케이블 선로 2 km에 대한 시험에서 10-20 MHz의 주파수에서의 측정감도는 10-60 pC이며, 또한 측정감도는 검출기와 PD 신호의 근원간의 거리에 따라 달라진다는 것을 보였다.

4.1.2.3.2. 액세서리에 대한 측정

접속부와 단말에서의 PD 측정은 시이즈 장해물 기술(sheath interrupter technique)을 사용하여 수행되었다.

첫번 시험은 일본에서 9 km의 275 kV 가교폴리에틸렌(XLPE) 케이블 선로에 대해 실시되어, 검출기가 케이블 접속부에 직접 연결될 때 10 MHz 근방에서의 측정감도는 1 pC 정도이고, 검출기가 연결된 접속부로부터 600 m 떨어진 접속부에서 발생하는 PD 신호에 대한 3 MHz에서의 측정감도는 15 pC이었다.

150 kV급 단말 100여개에 대한 현장 측정이 네덜란드에서 이루어져, 내부방전이 일어나고 있는 여러 단말이 이 방법으로 확인되었다. 측정의 노이즈레벨은 위치 위치마다 2 pC에서 320 pC까지 변화하였으며, 평균값은 40 pC이었다.

50 kV 단말에 검출코일 기술을 이용한 현장에서 측정한 사례가 보고되었다. 코일은 단말 바로 아래의 플라스틱 케이블 재킷 주위에 장착되었고, 측정 결과 20 pC 정도의 노이즈레벨에서 아무 방전도 나타나지 않은 것으로 보고되었다.

또 다른 HFPD 검출방법으로, 접속부 끝의 PVC 케이블 재킷에 부착된 고주파(high-pass) 필터 센서를 사용하는 방법이 제시되었는데, 이 센서를 통하여 활선 케이블 표면에서 PD 펄스의 30-60 MHz 성분의 검출이 가능하여, 275 kV XLPE 케이블 액세서리에서 결함 검출을 위해 이러한 센서가 적용된 보고가 있었다.

4.1.2.4. 금속시이즈에 대한 금속학적 조사

4.1.1 절 (6) 참조

4.1.2.5. 사출케이블과 액세서리에 대한 X-선 조사

HV 케이블의 금속시이즈와 액세서리의 금속케이스로 인하여 절연층의 상세한 정보는 얻기 어렵거나 불가능하다. (<u>4.1.1</u> 절 (7) 참조)

금속시이즈가 없다면, 저에너지 X-선 조사는 사출케이블과 액세서리에 존재하는 전체적인 절연 결함을 분석할 수 있는 강력한 방법으로서, 금속 불순물 또한 검출할 수 있다. 예를 들면, Be 윈도우 튜브(방사선관)에서 나오는 50-60 keV의 X-선은 일반적인 두께(5-10 mm)의 폴리에틸렌(PE) 절연층을 분석하는데 사용될 수 있으며, 검출될 수 있는 형상은 다음과 같다.

- 금속불순물 > 0.4 mm
- 비금속 불순물 > 0.8 mm
- 절연 두께의 2 % 정도 크기의 보이드

4.2 샘플에 대한 실험실 시험

사고나 선로 교체시에 기존 케이블의 일부분이나 액세서리를 얻게 되면, 실험실에서 케이블이나 액세서리에 대한 조사를 통해 기존 케이블 시스템의 상태에 대한 정보를 얻을 수 있는 중요한 기회가 된다.

4.2.1 절연지절연 케이블

4.2.1.1. 절연유 분석

4.1.1절 (3)에 언급한 분석방법은 일반적으로 실험실에서 운전선로에서 수거한 케이블 샘플로부터 얻은 절연유에 적용할 수 있다. 그러나, 조사를 위해 케이블의 일부를 수거할 때 기름이 오염되거나 휘발성 물질이 유실될 수 있으므로, 샘플채취와 그 검사결과 해석에 있어서 상당한 주의가 요구된다.

4.2.1.2. 절연지 검사

다음과 같은 검사기술이 실험실에서 사용되고 있다.

4.2.1.2.1. 육안 검사

절연층을 해체하면서 가능한 육안검사를 통하여 주름, 찢어짐, 큰 갭(gap)및 '부드러운' 부위의 존재를 알아낼 수 있으며, 이러한 형상들은 모두 케이블을 구부리거나 다룰 때 각도가 틀려져 발생된 것이다. 검은 얼룩은 열적이나 전기적 원인으로 인한 탄화를 의미한다. 가능하다면, 방전채널을 조심스럽게 mapping하여 손상의 원인이나 절연체에서 취약부분이나 취약한 영역의 존재를 밝혀낼 수 있다.

4.2.1.2.2. 화학적 검사

얼룩진 절연지를 적당한 酸으로 처리하고, 염색시키고 용액을 산화시키는 방법은 다음과 같은 여러가지 가능한 오염의 원인을 식별하는데 도움이 된다 : 무기질에 의한 오염, 절연유의 고분자화에 의해 생성되는 밀납(wax)과 절연지의 분해에 의한 부산물과 전기 방전에 의한 탄소질의 잔유물 등. 또한, 적절한 용매(예로 Cupriethylenediamine)에서 절연지섬유가 분산될 때의 점성을 측정하여 절연지의 고분자화 정도(DP:degree of polymerization)를 알아낼 수 있으며, 그 값은 열화 과정에서 분자쇄(molecular chain)의 끊어짐(scission) 정도를 직접 나타내는 것이다. 공장에서 생산된 직후의 케이블은 1,000-1,300 정도의 DP를 나타낸다. 대략적인 판별로서, 원래 값 60% 정도의 DP는 열화되었지만 아직은 유효한 절연지로 판명되며, 40% 정도의 DP 값은 심각한 열화라는 것을 의미한다.

절연체에 수분이 존재한다는 것은 외부적인 오염이 있었다거나 잘못 생산되었다는 것을 의미한다. 수분은 절연지와 기름 모두에서 Karl-Fisher 방법으로 측정될 수 있다. 또한, 뜨거운 액체 파라핀이나 등가 유기액체에서 절연 샘플의 거

동을 관측함으로써 대략적인 판정을 할 수 있다.

4.2.1.2.3. 기계적 검사

열화된 절연지의 기계적 특성을 파악하는 기술은 잘 정립되어 있다. 주된 시험 종류는 인장, 접힘, 파열및 찢어짐 강도의 측정이다. 파열과 찢어짐 강도 측정은 일정치 않은 결과를 나타내는 경향이 있으나, 인장 또는 접힘 강도는 보다 신뢰성있다. 특히 접힘저항은, 실제 케이블에서 대부분 관측되는 바로서, 열화의 초기상태를 민감하게 나타낸다. 결과는 절연지의 종류에 따라 크게 달라지지만, DP에서 10%의 감소는 50-70% 정도로 접힘 강도의 감소에 상응하는 것으로 알려져 있다.

4.2.1.3. 납이나 알루미늄 시이즈의 검사와 강화

4.2.1.3.1. 납 시이즈

납 시이즈의 금속학적 검사에 대해 상세한 것은 4.1.1 절 (6)에 나타내었다.

4.2.1.3.2. 알루미늄 시이즈

알루미늄 시이즈의 금속학적 검사는 다음 순서로 이루어 진다.

- 시이즈로부터 조그만 조각을 잘라내고 모울딩 레진에 넣어 굳힌다.
- 조각을 연마하여 광을 낸다.
- 물에 2 - 5 %의 HF 용액으로 에칭한다
- 순수로 헹그고 잘 말린다.
- 광학적으로 조사한다.

4.2.1.3.3. 부식 부산물

부식 부산물의 성분분석은 부식의 원인에 대한 중요한 정보를 제공하게 된다. 미립자로 이루어진 부식 생성물을 수거하고 검사하는 것은 NACE Standard RP-01-73을 참조하면 된다.

4.2.1.3.4. 시이즈의 균열

부하변화에 의해 함침물의 열적 팽창과 수축이 일어나면 시이즈에 피로 균열이 발생되는데, 부하의 인가시간과 변화에 좌우된다. 시이즈의 어느 부분이 다른 부분보다 얇다면, 이 얇은 부분에서 받는 스트레인이 증가여 피로 저항은 감소된다.

이러한 문제를 조사하기 위해 다음의 방법이 사용된다.

화학적 분석 - 금속의 기계적 성질은 화학성분에 따라 달라지므로, 시이즈가 기계적으로 파괴된 곳을 전자현미경(SEM)으로 분석하면 異物質의 궤적이 나타난다. 납/알루미늄의 화학적 분석에 대해서는 성분에 따라 ASTM E-37/ASTM E-34을 참조한다.

경도와 장력시험 - 열에 노출된 시이즈에서는 경도는 감소하고 연신은 증가한다. 이 성질들을 원래의 사양과 비교해야 한다. 금속의 Vickers 경도는 ASTM E-92에 나타나 있으며, 금속물질의 장력시험은 ASTM E-8에 있다.

4.2.1.3.5. 강화와 피복

상기한 방법들은 스틸 테이프 강화와 관련되어 있다. 상기 방법과 더불어, 아연 코팅의 두께는 BS 443에 따라 측정할 수 있다.

4.2.1.4. 샘플의 전기적 시험

OF 케이블에 대한 샘플의 전기적 시험은 다음과 같다.

- IEC 141-1에 따른 tanδ 시험
- 절연파괴가 일어날 때까지 BIL에서 시작하여 단계적으로 증가시키는 임펄스 시험

4.2.2 사출 케이블

4.2.2.1. 절연층의 물리적 화학적 분석

사출절연에 대한 물리적 화학적 분석을 통해 고분자 구조(polymer morphology)를 결정하거나 불순물을 검출하거나, 절연체의 전기적 기계적 특성을 갖도록 할 수 있기 때문에 물리적 화학적 방법은 사출절연에 폭넓게 적용되고 있다. 예를 들면 DSC(Differential scanning calorimetry) 측정결과는 진단방법에 직접 적용되는 데이터를 제공하며, PIXE(Proton induced X-ray emission) 결과는 절연 특성에 대한 데이터를 제공하지만, 아직은 진단 기술에 적용되는데 어려움이 있다.

4.2.2.1.1. 고분자 구조

절연 밀도, % 결정화도, 융점및 가교도는 DSC(differential scanning calorimetry)로 알 수 있으며, 절연층의 '열 이력'에 대한 정보 즉, 절연층의 운전 온도 혹은 운전중에 과열된 경우 등의 정보를 제공한다.

10 μm에서 1,000 μm까지의 크기의 동공은 보통 광학현미경으로 검출된다. 球晶(spherulite)의 크기는 전자현미경으로 알 수 있다.

산화방지제의 존재는 DSC를 이용한 OIT(oxidation induction time)을 측정함으로써 체크할 수 있고, 고분자 내에 산화방지제가 남아있지 않을 때에는, 케이블의 에이징 동안에 폴리에틸렌이 산화될 수 있다.

4.2.2.1.2. 절연층내의 불순물

고분자의 수분함량은 Karl-Fisher 방법으로 정확히 측정할 수 있으며, 가교 부산물이나 산화된 성분과 같은 유기 불순물은 IR-spectroscopy로 검출할 수 있다.

4.2.2.1.3. 절연층과 반도전 스크린의 전기적 특성

절연층의 전기적 특성은 tanδ, 절연 강도및 공간전하를 측정하여 알아낼 수 있으며, 반도전 스크린의 저항은 IEC 840에 따라 측정할 수 있다.

4.2.2.1.4. 합성 절연의 기계적 특성

장력 계수(tensile modulus)와 최대 연신과 같은 기계적 특성은 새 케이블과 열화된 케이블을 이용하여 절연종류에 따른 온도(LDPE : 100℃, HDPE : 110℃, XLPE : 135℃)에서 240시간 동안 측정된다. 열 연신은 200℃에서 15분간 0.2 Mpa의 스트레스를 인가하면서 측정한다.

4.2.2.2. 케이블과 액세서리에 대한 전기적 시험

사출케이블과 액세서리의 상태는 다음 시험으로 특성을 알 수 있다.

- IEC 840에 따른 PD 측정
- 케이블의 열화와 운전경력에 따라 시험전압(< $2U_0$)을 4 시간 인가하는 AC 내력시험
- 절연파괴가 일어날 때까지 BIL에서 시작하여 단계적으로 증가시키는 IEC 840에 따른 임펄스 시험

4.2.2.3. 납 또는 알루미늄 시이즈의 검사와 강화

4.2.1 절 (3)을 참조할 것.

5. 결 론

주된 결론은 다음과 같다.

1. 열화 메카니즘은, 특히 사출 케이블에서, 아직 완전히 이해되지 않았기 때문에, 열화 메카니즘에 입각한 진단 방법을 개발하는 것은 상당히 어렵다.
2. 현재 활용가능한 많은 진단 방법(4장)은 복잡하고 아직 개발 초기단계에 있다.
3. 케이블의 잔여수명은 진단시험으로부터 정확히 산출될 수 없다.

이러한 결론 때문에, 본 고에서는 운전지침을 제시하는 것 보다는 실제적인 방법에 대한 소개와 아울러 일람표를 만드는 것에 많은 노력을 기울였다. 그렇지만, 이 보고는 현재까지의 경험과 가능성에 대한 가치있는 정보를 제공하였고 장래의 조사에도 도움될 수 있을 것이다.

전기적, 물리-화학적및 열적 시험의 광범위하고도 다양한 진단시험은 현장이나 실험실에서 유용한 것들이다. 시험은 주로 케이블 보다는 액세서리에 더 적합한 것으로 관측되었다. 왜냐하면, 액세서리가 케이블에 비해 사고율이 비교적 높고(아직은 낮은 수준이지만) 효과적인 포설후 시험이 부족하며, 운전중에 시험하게 되기 때문이다.

진단기술은 다음과 같다.

- 현장 부분방전검출
- 온도 모니터링
- 절연유분석에 의한 개스
- 실험실에서의 물리/화학적 분석

장래에는 점점 더 많이 진단시험을 사용하게 될 것이라고 생각된다.

저 자 소 개

구자윤(具滋允)

1951년 2월 7일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 프랑스 ENSEEIHT 대학원 졸업(석사). 1984년 프랑스 ENSIEG 대학원 졸업(공박). 1980년-83년 프랑스 CNRS-LEMD 연구원. 1983년-84년 프랑스 EDF-DER 연구원. 1985년-88년 한국과학기술원 계측소자연구실 선임연구원. 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. CIGRE SC-15, SC-21 Committee Member. JICABEE Committee Member. 당학회 재무이사.

김정태(金正泰)

1960년 1월 1일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1992년~95년 대한주택공사연구소 선임연구원. 현대 대진대 전기공학과 교수.