

기술/설

# 등온완화전류기법에 의한 전력케이블의 열화진단기술

김 일 권 <한우테크(주)>

## 1. 서 론

지중배전선로는 건설비가 가공선로에 비해 월등히 높아 지중설비를 확대하는데 장애요인이 되고 있으나 도시화의 증가와 환경문제의 대두로 인해 전력설비의 지중화가 급속히 진행되고 있다. 지중선로는 고신뢰도를 요구하는 도심지에 대부분 시설되어 있으므로 지중선로에서 고장이 발생하는 경우 고장의 규모에 비해 그 파급영향은 매우 심각한 것이 대부분의 경우이며, 특히 근간에 Cable에 의한 사고발생 빈도가 증가되고 있는 추세이고, 이로 인한 화재발생 등 대형사고로 진전되고 있는 실정이다.

따라서 지중선로는 건설당시부터 고신뢰성을 보장할 수 있도록 시설하는 것이 필수적이며, 아울러 시설후에도 지속적인 유지관리를 통해 설비의 안정성을 확보하여야 한다. 현재까지 우리나라는 케이블 및 접속재 등의 기자재 개발, 지중설비 시공방법 등 설비시설 측면에 주안점을 두어 기술개발을 추진한 결과 우리나라 전력케이블 제조회사의 케이블 제조 및 시공기술은 일정 수준에 올라있으나, 시설후 일정기간이 경과한 설비에 대한 체계적인 유지보수 또는 유지관리 기법에 대한 기술개발은 상대적으로 등한시되어 왔다.

케이블열화진단은 케이블의 초기상태, 시설조건, 열화추정 및 각종 유지보수 자료 등을 체계적으로

관리하는 유지보수기술과 새 Cable로 대체 해야할 시기를 도출할 수 있는 기술개발이 필요하며, 이러한 측정결과와 상태변화 추이(Trend)를 바탕으로 적기에 보수시점을 제시할 수 있고, 케이블의 잔존수명을 제시함으로써 지중설비가 최적의 상태로 운전하여 사고를 미연에 방지함으로써 양질의 전력이 공급되도록 하고자 함이 케이블 유지보수의 최종 목적이라 할 수 있다.

따라서, 본 고에서는 전력케이블의 열화진단기술 중에 주로 등온완화전류법 (Isothermal Relaxation Current) 등을 이용한 사선진단장치에 대하여 기술하였다.

## 2. 등온완화전류기법에 의한 케이블 열화진단시험

등온완화전류(IRC) 분석법은 전혀 다른 접근방법으로써 절연체의 특성변화를 이용하여 전력케이블의 중합절연체 상태를 측정하는 것으로 중합성체 구조 중의 특정에너지 수준에서 전하의 흐름이 "트랩" 된다는 사실에 기초한다.

저전압의 DC전압(1kV)를 사용해서 전극화 시키는 과정동안 절연체 내에 다른 "트랩" 들이 상존하게 되거나 충전된 상태가 된다. 케이블이 약한 전류로

방전되면 트랩된 전하가 다시 자유롭게 방전저항을 통해 작은 전류로 관찰될 수 있다. 그러한 트랩의 다른 에너지 수준에 따라 방전기간 동안 다른 시간 계수를 갖게된다. 특히 기능이 저하된 중합체는(수트리가 있는 경우가 전형적인 예임) 구별된 에너지 수준을 갖고, 따라서 정상적인 절연체의 전류와는 구분되어 진다.

아래 표 1은 전형적인 에너지 수준과 XLPE 케이블에 있어서 문제의 완화시간 계수가 서로 연관되어 있음을 나타낸다.

완화시간계수  $\tau$  과 에너지 수준과의 상관관계는 다음 식(1)로 나타낸다.

$$\tau = \text{const} * e^{w/kT} \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

여기서 k = 볼츠만 상수

T = 온도

중합체 폴리머의 열화는 완화전류에 “흔적”을 남기고 다른 정상 중합체와는 구분되어 질 수 있으며 노화정도를 분명하게 나타내 준다.

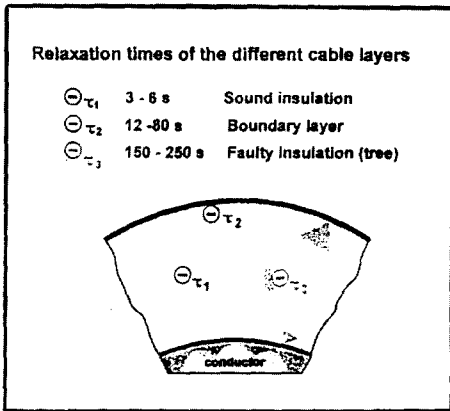


그림 2. XLPE 케이블의 완화시간

## 2.1. 측정과 모델링

“흔적”을 감지해 내는 것은 그리 간단치 않다. 원하는 결과를 얻기 위해서는 올바른 연속적인 시험과 민감한 전자기기와 복잡 다양한 수학적 모델링이 이루어져야 한다.

측정의 시작단계에서 케이블은 1kV의 전압으로 저항을 통하여 충전된다. 이 과정을 소위 “형성” 과정이라 하며 약 30분간 지속된다. 이 시간이 필요한 것은 의도한 대로 확실히 트랩이 상존되도록 하기 위함이다.

그 이후에 수초동안 케이블을 방전시킨다. 이는 케이블 전기용량에 부하되는 전기가 케이블 진단에 있어서는 관련사항이 아니므로 이를 방전시키는 것이다. 다음 과정으로 케이블의 완화전류가 고감도 증폭기를 통해 기록되고 디지털화 하여 기록치가 컴퓨터로 전송된다. 전형의 표준화된 연속적 시험에서 데이터 취합에 또 30분이 소요된다. 그림 2는 완화전류와 시간의 전형적인 기록을 나타낸다.

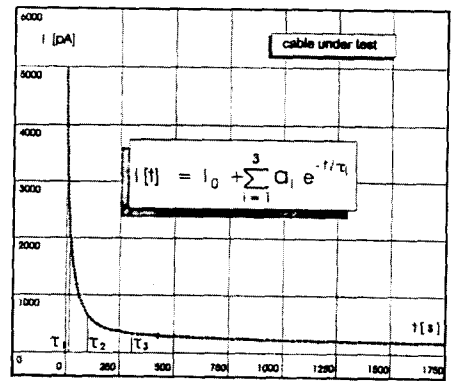


그림 2. XLPE 케이블의 완화전류

표 1. 대기온도에서 XLPE 의 완화시간계수

| 구 분      | 완화시간( $\tau/2$ ) [ $\tau/s$ ] | 트랩수준 [ $w/eV$ ] |
|----------|-------------------------------|-----------------|
| 대부분의 절연체 | 3 ~ 6                         | 0.66 ~ 0.68     |
| 절연체 접촉면  | 12 ~ 80                       | 0.70 ~ 0.70     |
| 절연체 결함점  | 150 ~ 250                     | 0.77 ~ 0.80     |

앞의 그래프에서 열화분석에 필요한 다른 시간계수들을 구분해 내는 것은 사실 불가능하다. 따라서 등온완화전류 분석의 주요부분은 PC Software로 이루어 진다.

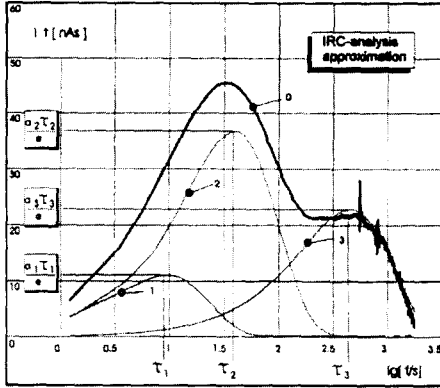


그림 3. Charge Over 로그형(t) 표시

우선적으로 모든 데이터는 다른 형태로 변화되어 제시된다. 그림 3의 y축에 전류대신 전하가 표시되고 시간눈금은 로그대수형으로 나타난다. 그림 3은 IRC 분석법의 주요원리를 나타내 주기도 한다. 상단부분에 있는 진한색의 곡선이 시험대상 케이블의 측정된 방전전류이다. 그 외에도 세 개의 다른 그래프가 나타나 있다. 이 경우는 파괴된 중합체에 의한 변화를 분리하기 위해 방전전류 그래프가 세 개의 함수로 전개되어진 것이다. Software가 최상의 근사값을 찾아내고 계산들이 한점으로 수렴되는 것을 확실히 하기 위해서는 복잡한 수학적 계산이 요구된다.

표 1의 물리적 효과에 따라 시간상수의 초기값이 선택된다. 그리고 프로그램은 가장 적합한 시간상수와 조합된 진폭 즉, 7개의 변수를 계산해 낸다. 근사치를 성공적으로 얻어낸 후 3개의 다른 시간상수들에 속하는 Charge들이 별도로 계산된다. 여러연령의 케이블에 대한 시험평가는 연령에 따라 시간상수  $\tau$ 의 Charge가 감소하고 증가하는 것을 보여준다.

그림 4는 케이블의 연령에 대한 시험 결과치를 나타낸다.

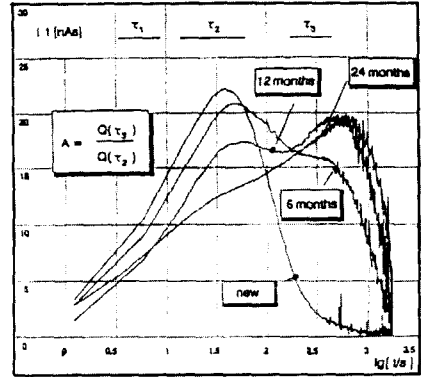


그림 4. 다른 연령의 케이블 시험 결과치

그림 4는 새로운 케이블, 6개월, 12개월, 24개월된 케이블로 VDE 0273A1에 따른 가속시간 측정법에 의한 시험 결과치이다. 짧은 시간에 케이블의 오래된 상태를 얻도록 가속하기 위해 40°C 수조에서  $4xU_0$ 로 케이블 중심선이 물에 젖도록 하고 스크린을 사용하여 측정되었다. 시간상수  $\tau$ 의 효과를 높이는 것은 상기한 바와같이 명확하게 나타난다.

다른 연령상태에서 수많은 케이블 시험에 기초해서 경험적 인수 A(Aging Factor)가 정의되었고 이는 중합체의 열화상태를 파악하게 해준다.

$$A = \frac{Q(\tau_3)}{Q(\tau_2)} \dots \dots \dots \text{식 (2)}$$

가속시간시험을 거친 케이블들은 AC Breakdown 시험을 통해 잔여강도(Residual Strength)가 조사되었고 6개월 간격으로 시험중인 케이블에 대해 잔여강도를 측정하였다. 이들 AC Breakdown시험과 IRC 측정을 병행하여 각각의 연령인자가 계산되었다. 케이블은 모두 Triple 사출 XLPE 이다. 그림 5는 시험 시간에 대해 잔여강도가 감소되는 것을 나타내 주며 IRC연령인수 A로 부터의 결과치와 대응한다.

두 인자가 서로 잘 대칭되고 있음을 알 수 있으며, 이는 IRC 분석이 전력케이블의 열화판정을 위한 전기적 특성과의 관련성을 나타내는 것으로 케이블의

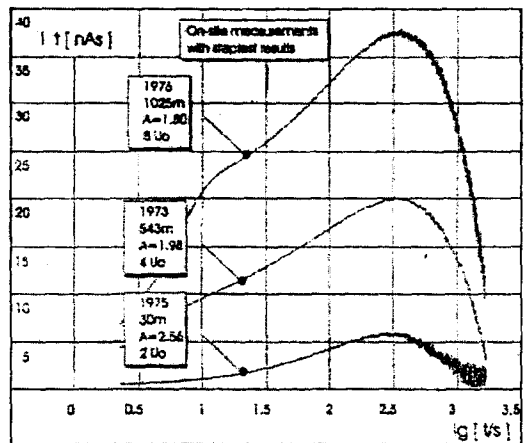
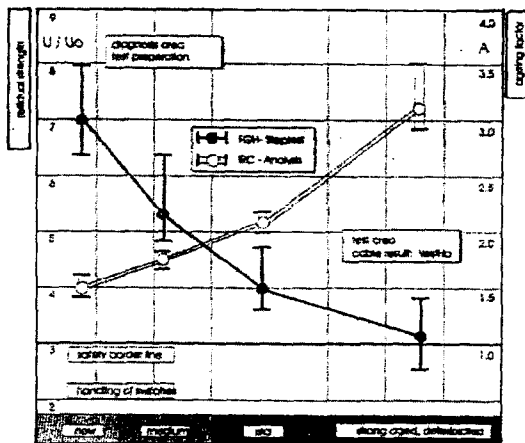


그림 5. 절연강도(웨이블 63%)와 열화인자 A

중합절연체의 상태를 판정하는 새로운 좋은 방법임을 확신시켜 준다.

등온완화전류분석은 케이블 열화진단 문제에 대한 새로운 접근방법으로 시험기기가 작고 경량이며 소프트웨어가 사용자 편의를 제공하여 쉽게 작동되도록 되어 있어 사용에 편리하다. 케이블이 보수할 가치가 있는지 혹은 교체할 시기가 되었는지 하는 어려운 결정을 IRC 분석기기가 케이블의 열화상태를 명확히 나타내 줌으로써 용이하게 만들어 준다.

IRC가 새로운 방법이지만 그 논리를 확인시켜 주는 수 많은 성공적인 결과치가 여러 다른 형태 및 다른 연령치의 케이블에 대해 이미 얻어졌다.

## 2.2 등온완화전류측정

### 가. 측정방법

#### (1) 측정

케이블의 측정시간은 한상 당 약 1시간이 걸리며, 측정시스템에 의해 자동으로 진행된다.

처음 단계는 Forming 단계로 시스템이 DC 1,000[V]로 피시폼 케이블에 30분간 가압되며 자동으로 다음 단계인 방전단계로 넘어가는데 이는 5초간 케이블의 Capacitance분의 전류를 방전시킨 후 30분간 방전되는 PA 단위의 미세 방전전류치를 측정시스템 내의 증폭기

를 통해 증폭하여 그 커브를 PC에 나타내도록 되어 있는 방전커브와 가로축은 시간(1800초), 세로축은 방전전류치(PA)를 나타내는 IRC 커브, 그리고 Aging Factor 수치를 나타낸다.

#### (가) DATA 분석 (LOG Discharge Curve 분석)

시간에 따른 전류치 변화를 보다 확실하게 해주는 것이 LOG형 방전커브로써 가로축은 시간을 상용로그(예 : 100초 →  $\text{Log}_{10}100 = 2$ )로 표시하고 세로축은 시간(Sec)과 전류치(PA)의 곱을 1/1000 단위(nA.sec)로 표시한 그래프이다.

그래프가 오른쪽으로 치우칠수록, 오른쪽의 기울기가 가파를수록 Aging Factor 수치가 커지며 케이블의 절연체 열화정도가 심한 것을 의미한다.

#### (나) 정량적 분석 (열화수치 : Ageing Factor)

| Aging Factor | 판 정 구 분  |      |
|--------------|----------|------|
| ~ 1.6        | New      | 아주양호 |
| 1.6 ~ 1.85   | Middle   | 양 호  |
| 1.85 ~ 2.30  | Old      | 요 주의 |
| 2.30 ~       | Critical | 불 량  |

#### (다) Aging Factor와 AC Break-Down과의 관계

표 2. 실제통의 측정 사례

| Data File Name | Data        | Cable Type                | Cable ID               | Length | 진단결과         |
|----------------|-------------|---------------------------|------------------------|--------|--------------|
|                |             |                           |                        |        | Aging Factor |
| KOR<br>00001   | '97. 11. 27 | CNCV<br>325mm<br>' 82 **사 | PAD# 6H1-2<br>→ 6-2 φA | 330M   | 요주의(OLD)     |
|                |             |                           |                        |        | 1.959        |
| KOR<br>00006   | '97. 11. 28 | CNCV<br>325mm             | PAD# 5-4<br>→ 6H1-1 φC | 273M   | 양호(Middle)   |
|                |             |                           |                        |        | 1.846        |

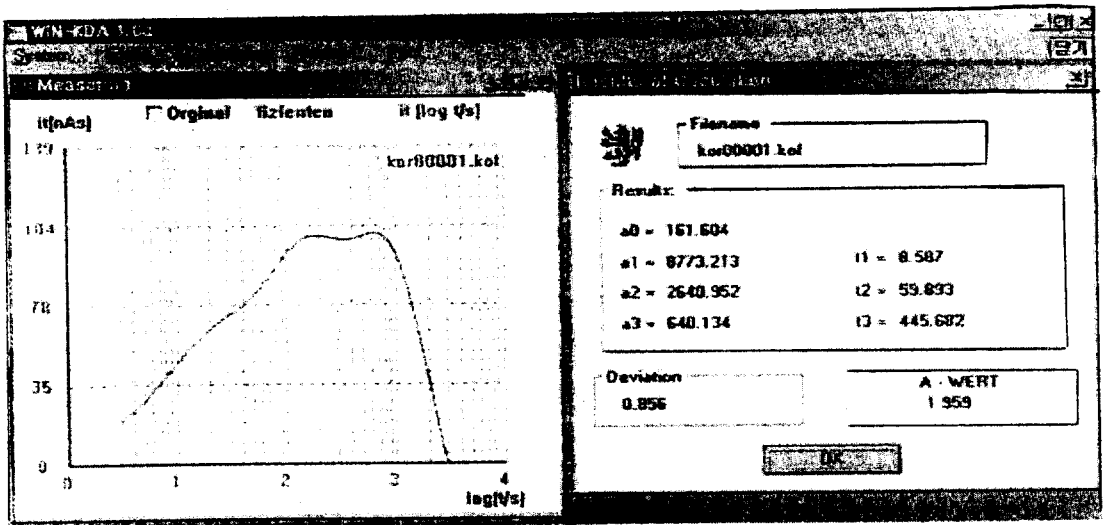


그림 6. IRC CURVE 와 AGING FACTOR (사례)

KDA-1에 의한 등온완화전류분석 진단 결과치를 AC Break-Down 시험치와 비교하여 측정치의 신뢰성을 확인한 결과 AC Break-Down과 Aging Factor 결과는 대칭을 이루고 있다.

이는 현재 케이블 잔여수명 측정이나 열화측정을 판정하는데 신뢰성 높은 AC Break-Down 측정이 현장에서의 케이블에는 사용할 수 없고 시험실에서만 적용되는 단점이 있으나 현장에서 적용할 수 있는 등온완화전류분석 진단을 하는 것으로 AC Break-Down 측정을 대신할 수 있는 것이다. 이는 케이블을 파괴하지 않고 KDA-1으로 정확한 케이블 진단이 이루어 짐을 확인해 주는 것임을 알 수 있다.

(2) 현장측정 사례

국내의 배전선로나 변전소, 대동력 수용가 구내에 설치된 23[kV]급 전력케이블에 대한 KDA-1에 의한 절연열화진단은 1997년부터 1999년까지 한전의 배전선로나 POSCO 등 대형공장 구내의 전력용 Cable 약 1,600회선에 대한 Cable열화측정이 있었다.

다음의 그림 6은 IRC CURVE 와 AGING FACTOR (사례)이다.

KDA-1 측정기기에 의한 측정결과 판리는 주기적으로 측정된 Data에 의하여 각각의 Cable에 대한 열화추이를 파악 할 수 있어 불량 케이블의 도래 시점과 불량케이블을 구분할 수 있어 적기에 Cable보수

로 투자의 효율성을 재고 시킬뿐만 아니라 투자의 시점을 설정 할 수 있어 Cable 사고 발생 예방을 할 수 있을 것으로 판단된다.

등온완화전류 측정(KDA-1)결과 조치는 “요주의(Oid)” 판정 케이블은 절연체의 절연성능이 저하된 상태로 계획보수가 필요하며, “불량(Critical)” 판정 케이블은 절연체의 일부 미세구간에 절연열화에 의한 절연과괴의 가능성이 높으므로 긴급보수가 필요하다.

### 3. 결 론

고분자 절연체 또는 배전케이블의 열화판정을 위하여 여러 가지 전기적인 방법이 제안되었으며, 이들 전기적 방법은 그동안 케이블의 열화판정에 있어서 많은 공헌을 하였다. 그러나 다중 접지 방식을 채택하는 경우에는 간단하게 사용할 수 없다는 단점이 있다.

전력케이블의 열화판정을 위한 케이블 특성분석은 분석 자체도 물론 중요하지만, 특성분석 자체보다는 분석된 특성과 전기적 성질, 특히 케이블의 열화판정에 관련된 전기적 특성과의 연관성을 찾는 것이 매우 중요하다. 이러한 측면에서 이미 선진외국에서 개발되어 사용하고 있는 등온완화전류 측정에 의한 케이블의 열화진단시험 방법이 일부 실계통에서 채택되어 국내 전력용 케이블에 적용, 시험해 본 결과 만족할만한 결과치를 얻어 이를 근거로 케이블의 유지, 보수업무에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또 이러한 새로운 첨단기술방법을 채택 사용함으로써 전력케이블의 절연열화상태의 변화추이를 추적하여 불량분을 선별이 가능하고, 보수의 대상을 과학적으로 선별할 수 있으며 적기에 유지, 보수함으로써 사고를 사전에 예방하여 양질의 전력공급에 만전을 기할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- (1) 송일근외 3, “직류전압감쇄법을 이용한 전력케이블의 절연열화진단”, 전기학회학술대회, '97.7.
- (2) 지중배전선로의 준공시험기술 및 접속재진단기술 개발, 전력연구원, '98.1.
- (3) 배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축, 전력연구원, '97.10.'

### ◇ 著 者 紹 介 ◇

#### 김 일 권(金一權)

1990년 한양대학교 대학원 전기과 졸업. 1970년~1996년 한국전력공사 근무. 1996년~ 한우테크(주) 대표이사.