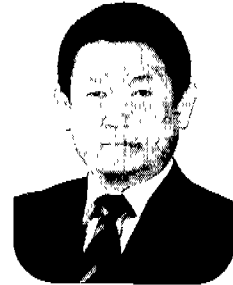


수트리(Water Tree) 열화된

전력케이블의 성능회복을 위한 신기술 (하)



글/김 일 권(한우테크)

5. 지중케이블의 절연보강 신기술 : Cable Cure

5-1. Cable Cure의 개요

Cable Cure는 케이블의 불량률이 확인되었거나 예상되는 케이블을 지중에 설치된 상태에서 특허품인 Silicone Fluid를 케이블의 소선사이나 중성선사이에 적정압력으로 주입함으로써 내부의 물을 제거하고 절연물내의 수트리, Bow-Tie Tree, Water Halo 등과 미세공간을 메워 주어 절연파괴의 가능성을 제거하며 케이블의 절연강도를 350%까지 향상시키고 향후의 수분침투를 예방함으로써 수명을 20년정도 연장할 수 있는 새로운 기술로 이는 케이블 교체비용의 약 1/2~1/4 정도의 비용(직매 케이블의 경우)으로 케이블을 보수할 수 있는 신기술이다. 이 기술은 1992년 미국 R&D Magazine에 의해 가장 우수한 세계 100대 발명품중 하나로 선정되었으며 미국의 Florida & Light사 등 여러 전력회사와 캐나다, 오스트리아, 독일 등 선진외국에서는 이미 기존 케이블의 보수방안으로 적용하고 있고, 국내에서도 한국전력의 변전소 구내 전력 케이블이나 도심지 지하의 배전용 지중 전력

케이블에도 기적용 사용되고 있으며 화학공장 등 대형공장에서도 적용이 검토되고 있는 실정이다.

5-2. Cable Cure 소개

과거 10년동안 북미와 유럽지역에서 4백만 피트 이상의 케이블에 실리콘 절연강도 보강기술이 시행되고 왔으며 대부분이 10~25kV 케이블이 적용되었다.

초기의 피더 케이블에 대한 이러한 절연보강기술 적용은 그렇게 호응을 얻지 못하였으나 새로 개발된 실리콘 Fluid는 초기 시행상의 문제점을 보강하였을 뿐만 아니라 절연보강 능력 기술면에서도 2~3배 정도의 향상효과를 가져와 사실상 운전중에 발생된 사고 케이블을 새로운 케이블 정도의 절연강도 상태로 보강할 수 있게 되었다.

이러한 유지보수 기술로 절연보강을 한 케이블은 수명이 20년이상 연장될 수 있으며 또한 절연보강 케이블은 XLPE 케이블보다 Tree 발생이 1/10정도로 감소된다.

지중케이블의 고장에 대한 대책수립은 RE 케이블의 수트리 문제 인식과 함께 출발되었다고 볼 수 있다.

Orange & Rockland Utilities사의 케이블 실험실에서는 이 절연보강 기술에 대하여 선구자적으로

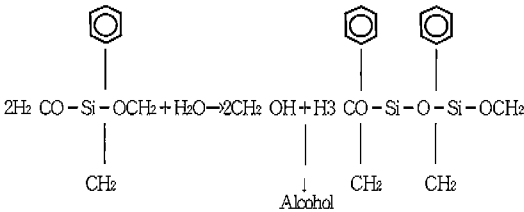
연구하였으며 처음 시도는 XLPE케이블의 가교과정(Cross-linking Process)에서의 부산물인 Acetophenone을 건조된 질소가스로 케이블을 건조시킨후 주입시킨 결과 트리발생이 억제되는 것을 알게 되었다. 이러한 케이블 보강기술은 10년전에 사용되기 시작하여 지금도 일부 사용하고 있으나 Acetophenone 보강은 케이블에서 서서히 빠져 나가는 양을 케이블에 다시 채워야 하므로 이를 공급하는 저장탱크를 설치하여야 하는 문제가 있다.

실리콘분자는 물과 반응하는 화학적인 기능조각으로 되어 있어 이 물과의 반응으로 케이블을 건조시키고 자체는 고분자화 되므로 공기를 건조시킬 장비나 저장탱크가 필요없다.



실리콘 Fluid와 불분자의 반응

- (1) 물분자와 실리콘 Fluid 분자의 화학작용으로 물 분자가 메탈알콜로 변화
- (2) 지속적으로 불분자와 실리콘 Fluid 분자가 화학 반응
- (3) 과정이 각분자가 결합되는 6단계까지 반복
- (4) 실리콘 Fluid가 케이블 절연체로 서서히 움직이고 절연체내의 불분자라도 반응함으로써 절연체 내에서 Cable Cure가 고착된다.



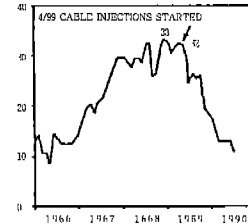
실리콘 Fluid의 케이블 Cure작용

- (1) 케이블 소선내에 있는 수분을 제거한다.
- (2) 절연체의 분자사이의 공간을 통하여 확산한다.
- (3) 물분자와 반응하여 수분을 제거하며, 절연체를 건조시킨다.
- (4) 수트리나 다른 결합부분의 미세공극을 메꾼다.
- (5) 새로운 수트리의 성장을 억제한다.

이러한 실리콘 Fluid의 기술은 미국의 플로리다 Power & Light사 자체만으로도 '96까지 2,000,000 피트 이상을 적용, 처리하여 케이블 사고 발생억제에 매우 만족할 만한 결과를 가져왔다.

그림 1에서와 같이 26개 루프선로에서의 고장은 매년 증가되어 1988년에는 33건의 고장이 발생되었다(지중케이블 : 15~20년 사용, 전압 : 15~25kV,

FPL Southern Division
26 Loop Pilot Area Cable Failures



<그림 1> F&L Failure History Graph

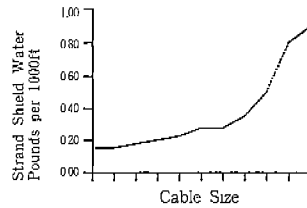
거리 : 43 miles).

1989년 4월 이후 이 선로에 실리콘 Fluid를 주입하기 시작하여 1990년 8월까지 계획량의 51.4%를 처리한 결과 고장건수가 11건으로 감소되는 성과를 보였다.

작은 케이블은 큰 케이블 보다 도체 부근에서의 전기적 스트레스가 실질적으로 보다 높다.

큰 케이블에서의 절연강도는 균일된 전개로 절

Strand Shield Water



<그림 2> Strand Shield Water

연체의 거리에 비례하여 균일하게 감소된다. 이는 큰 케이블에서는 Outside-in(외부→내부)방향으로 Vented Water Tree(방향성 수트리)가 성장하는 것을 보더라도 쉽게 이해할 수 있다.

Outside-in Tree 성장은 작은 외경의 케이블에서 흔하지 않다.

전력공급용 케이블에 있어서 부하변동은 전류변동을 의미하며 이로 인해 케이블에 온도변화가 발생하여 케이블 외피쪽에 Water-Rich Halo가 나타난다.

이러한 모든 요소가 케이블내에 물의 양을 증가시키고 절연층내로 수분이 침투됨으로써 절연을 약화시킨다. 높은 전압일수록 절연층의 두께도 커

<표 1> 각 전력회사별 케이블에 대한 실리콘 Fluid 처리전·후 비교분석

UTILITY	Conductor	Insulation	Rated Voltage	Intall& Service	AC Break Down (kV/mm) [Untreated/Treated]
CPS San Antonio	54mm AL	8.8mm XLPE	35kV		4.7~6.8/32.0
EDON/EGD Netherlands	240mm AL	5.3mm XLPE	20kV	1978 Failed	3.1~7.4/23.0
OG & E Elec Service	380mm AL	4.4mm XLPE	15kV	1978	2.8~6.0/17.0
Virginia Power	507mm AL	6.6mm XLPE	35kV	1974	2.1~8.4/17.5
Anonymous	507mm AL	4.8mm XLPE	15kV	1973 Failed	2.3~6.0/14.0
Duke Power	507mm AL	23.4mm XLPE	115kV	1978 Failed	268,288/348

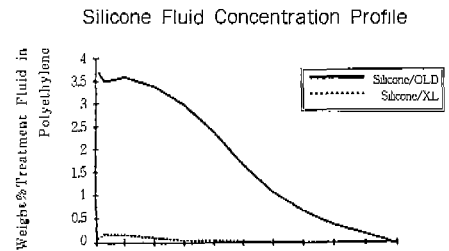
- * CTL, KEMA에서 시험
- * Duke Power 시험치는 Terminal Flash Over로 전압상승을 중단함.
- * '95 JiCable 발표자료 (Fourth International Conference On Insulated Power Cable : 25~26 June 1995 - VERSAILLES - FRANCE)

지고 아울러 도체 Shield내에 수분함량이 많아지며 오래된 케이블일수록 절연층에 수분이 상당히 증가한다<그림 2>.

절연층이 두꺼우면 두꺼울수록 절연체로 실리콘 Fluid가 효과적으로 침투하는데는 오랜시간이 걸리며 서서히 침투된 실리콘 Fluid는 절연체내의 수분과 반응하여 Fluid의 연결고리가 증가되어 고분자화되고 이과정에서 형성된 알콜가스는 외부로 빠져 나간다<그림 3>.

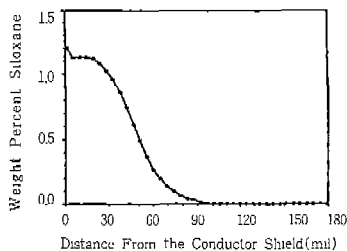
그림에서와 같이 초기에 사용된 실리콘 Fluid는 절연층 두께의 반정도까지만 침투된 것을 알 수 있다. 이는 초기 Fluid가 도체내의 밀집된 소선으

새로 발명된 실리콘 Fluid(XL)은 Old Material 보다 길게 그리고 방사상으로 골고루 침투된다. 이 새로운 물질은 City Public Service of San



<그림 4> New Silicone fluid penetration versus the old (Silicone fluid concentration profile)

Siloxane Profile of a Partially Restored Cable

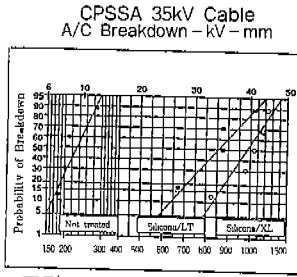


<그림 3> Siloxane Profile of a Paritally Restored Cable, single line reduction

로의 침투가 용이하지 않아 소중합체로 합성되기 때문이었다. 그러나 이후 3년의 연구노력으로 초기 실리콘 Fluid의 문제점인 침투의 어려움과 불균일 분포를 해결하는 새로운 Fluid를 발명하였다.

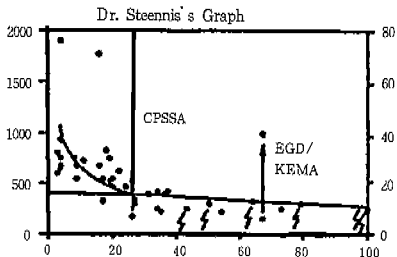
Antonio 등 6개 전력회사의 지중케이블에 적용되었으며 각 전력회사에서는 성능을 분석하기 위하여 일반 케이블과 실리콘 Fluid(XL)로 보강, 처리된 케이블과의 AC Break Down을 시험기관인 KEMA와 CTL에서 비교하였으며 그 결과를 '95 JiCable 국제회의에서 발표하였으며 그 내용은 표 1 과 같다.

CPSSA(The City Public Service of San Antonio)에서는 20년 사용한 케이블(1/0 35kV XLPE)을 파내어 같은 길이로 3등분하여 1개는 보강하지 않은 상태로, 다른 2개는 새로운 실리콘 Fluid(XL, LT)로 처리한 후 케이블을 가압하고, 110일동안 온도를 올린후 다섯조각으로 나누어 시험한 결과가 그림 5에 나타나 있다.



<그림 5> CPSSA 35kV 1/0 Cable

실리콘 Fluid(XL)로 절연보강한 케이블은 344% 까지 절연강도가 보강되었으며 실리콘 Fluid(LT)로 절연보강한 케이블은 261%까지 보강되었음을 알 수 있다. 이는 20년 사용된 케이블을 절연보강하면 새로운 케이블과 같은 절연내력(40kV/mm)으로 유지되었음을 알 수 있다.

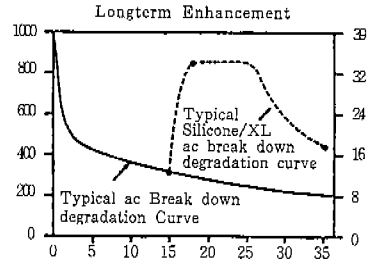


* Cable studied by KEMA Breakdown during service performance
<그림 6> Dr. Steennis's Graph with CPSSA and EGD annotations

KEMA의 Dr.E.F.Steenis의 시험치에 의하면 CPSSA나 EGD의 실리콘 Fluid(XL)로 절연보강된 케이블의 절연강도가 도표와 같이 개선된 것을 알 수 있다. (EGD의 절연보강된 Sample Cable은 20년 사용된 field cable 상태와 같도록 하기 위해서 전압과 온도를 조정하였음) 또한 그림 7에서와 같이 새로운 케이블을 15년간 사용후에 절연보강 처리한 케이블은 다시 20년을 사용하였어도 AC Break Down강도에 있어서 보강처리 하지 않은 케이블의 강도보다 200%정도 높은 것을 알 수 있다.

5-3. Cable Cure/XL의 장점

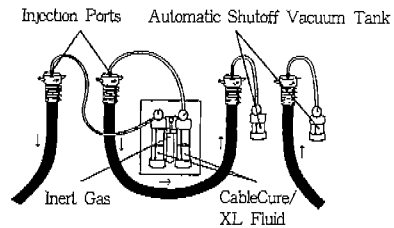
- (1) 최소의 가격으로 최대의 신뢰성 확대가능
 - 케이블 대체비용의 1/2-1/4 소요(작대 케이블의 경우)
- (2) 케이블 신뢰도 향상에 최소시간 소요
 - 도로굴착허가 불필요



<그림 7> Longterm Enhancement Profile

- 교통난 증가 및 작업시간의 제한 등에 영향이 없음
- (3) 전력공급중단(휴전시간)의 최소화
 - 공사소요기간 최소화
 - 일부 활선작업 기능(실리콘 Fluid 주입 : 활선상태에서 가능)
- (4) 도로 및 공사복구비용 최소화
 - 케이블 대체공사에 따른 도로복구공사비 불필요
 - Splice대체 등 일부구간 복구비용 발생

피더 케이블



<그림 8> Cable Cure Process 개략도

5-4. Cable Cure 작업방법

- (1) 케이블을 선로에서 분리한다.
- (2) 각각의 단자나 직선접속재를 분리하고 CIA (Cable Injection Adapter)에 설치한다.
- (3) 케이블 한쪽 단말 끝에 진공을 걸고 다른 한쪽에서는 실리콘 Fluid를 적절한 압력으로 케이블내로 주입한다.
- (4) 실리콘 Fluid가 케이블에 완전히 채워져 주입이 끝난후에는 양쪽 단말을 Damming Compound로 케이블 양쪽 단말에서 1m정도씩 Damming 한다.
- (5) 케이블 termination과 splices를 재조립하고 케이블은 즉시 선로에 연결하여 전력을 공급한다.

5-4-1 케이블 관통시험

- 가공 pothead와 케이블 단자를 선로에서 분리한 후 케이블 크기나 길이에 따라 특별한 압력 flange를 취부한다.
- 케이블의 절연체를 깨끗이 청소한다.
- 관통시험기(flow meter)를 케이블에 설치한다.
- 선로의 폐쇄를 시험하기 위하여 선로에 20~30 PSI압력의 N₂ gas를 봉입한다.
- 선로가 폐쇄되어 있으면 injection end 부위의 관통시험기가 급격히 최대치를 나타낸다.
- 케이블이나 splice에서 leak되지 않은 것을 확인하기 위하여 압력 테스트를 시행한다(질소를 20PSI로 공급하고 관통시험기가 전 케이블 구간에 걸쳐 압력이 같아질 때까지 관찰한다).

5-4-2 실리콘 Fluid 주입

- 관통과 압력시험이 성공한 후에는 Cable Cure에 필요한 양을 산출하고 실리콘 Fluid를 주입할 준비를 한다.
- 주입완료 확인이 용이하도록 청색염료의 촉매제가 첨가되어있다.
- 촉매제는 Fluid를 1~2일 동안에 고체화 시키고 (온도나 기타요인에 의하여 고체화 기간 변화) 이러한 케이블의 sealing은 장치의 수분침투를 방지한다.
- 케이블내의 물을 없애고 건조하기 위하여 건조재를 주입한다(receiving end 에 25inch(Hg)의 진공을 걸고 전선 건조재를 주입한다).
- 건조재를 케이블에 넣고서 Injection tank의 S.W를 넣어 Cable Cure 주입을 시작한다.
- receiving 단말에서는 Fluid로 인하여 수분이 나온다.
- Cable Cure 보강공사의 마지막 단계는 실리콘 Fluid의 청색의 End Terminal에 나타나는 것으로 알 수 있다.

5-4-3 실리콘 Injection 대상케이블 선택방법

- 케이블을 보수하기 위하여는 사용중인 케이블의 절연열화 상태를 우선적으로 판단하여야 한다. 지금까지의 케이블 절연열화 측정은 한국 전력 22.9kV 배전선로 경우에는 D.C 30kV를 가압하여 누설전류가 51 μ A/km 초과할 경우 케이블 절연상태가 불량한 것으로 판단하는 직류

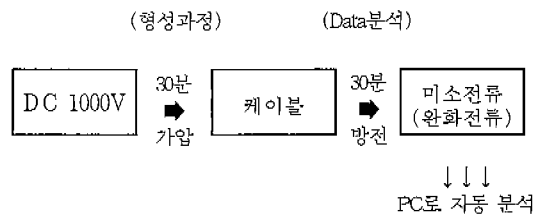
고전압을 인가 직류 누설전류를 측정하는 방법으로 하였으나 이러한 방법은 스트리가 발생된 케이블에 있어서는 직류인가 전압이 사고를 유발하는 요인이 되어 이러한 시험방법은 중단된 실정이다.

- 이러한 문제점을 해결하기 위한 시험방법으로 연구된 것이 비파괴 절연측정 이론인 등은 완화전류(Isothermal Relaxation Current)분석법이다. I.R.C 분석법을 이용 학계, 케이블 제조업체, 측정기기 제조업체가 공동으로 개발한 측정장비가 독일 Seba dynatronic사의 KDA-1 System이다. 이 System의 측정방법은 아래와 같다.

- 측정원리

- 등은완화전류(IRC) 분석법으로 종합절연체의 절연상태를 측정한다.
- 종합체의 여러구조중에 특정 에너지 수준(수트리등 절연기능 저하부분 존재 경우)에서 전하의 흐름이 "트랩"된다는 사실에 기초하며
- "트랩"된 전하가 방전될 때 절연체의 상태에 따라 방전되는 시간계수가 다르게 나타나므로
- 시간계수가 서로 다른 방전전류(완화전류)를 컴퓨터로 기록하고 자동분석하여 절연체의 절연열화 상태를 분석하는 것이다.

- 측정 흐름도



* DC 1kV 가압이므로 케이블 절연체에 영향이 거의 없음.

5-5. Cable Cure의 적용

실리콘 Fluid 보강은 현재 XLPE 케이블에만 적용이 가능한 것으로써 주로 사용되는 배전 피더용 지중케이블에의 적용뿐만 아니라

- 수용가 인입용 지중케이블

- 케이블 열화판정 방법

Ageing Factor	1.6 미만	1.6~1.85	1.86~2.3	2.4 이상
판 정	new	middle	old	critical
	양 호		요주의	불 량

(주) log 시간함수에 따른 건전상태와 불량상태 완화전류의 분포면적으로 Ageing Factor를 산출함.

- * 요주의 : 계획보수 필요(절연체의 절연성능이 저하된 상태)
 - * 불 량 : 긴급보수 필요(일부 미세구간에 절연파괴 진행중으로 사고발생 예상)
- 이와같이 측정된 케이블이 “요주의”나 “불량”으로 판정되었을때 Cable Cure의 대상 선로로 선택되는 것임.

- 해저케이블
- 송전용 지중케이블에 수밀 및 절연내력 강화용으로 사용되고 있으며
- 화학공장 및 방직공장 등 공장내 배선 케이블에 사용하여 전기 절연강도를 보강함으로써 사고를 예방. 정전발생을 없애고, 전기누전에 의한 화재예방이 가능해져 많은 공장들이 채택하고 있고
- 통신용 케이블 (Air-Core Cable)에도 적용하여 잡음 및 혼선을 방지한다. (기존 Air-Core Cable의 Gelly Cable화)
- 미국내 Alabama Power Company 등 36개 전력회사와 Pacific Bell, Us West 등 통신회사에서도 적용되고 있으며 캐나다, 유럽에서의 적용도 확대되고 있는 추세이다.

6. 결 론

인구의 도시밀집과 고도의 산업화에 따라 대용량 전력 전송설비가 요구되며 생활수준과 문화향상됨에 따라 쾌적한 환경과 안정된 설비를 추구하려는 관심이 고조되어 가고 있다. 따라서 대도시에서는 지중선이 필수적으로 필요하며 배전선로뿐만 아니라 154kV 송전계통 등 초고압 설비도 운영중에 있으며 그 설비는 점차 확대될 전망이다.

이와 같이 송배전 계통의 지중화계획에 부응하여 인구가 밀집된 도시에서는 지중선로가 계속 증가하고 있으며 지중선로의 비중이 커짐에 따라 사고예방을 위한 진보된 점검방법 및 경제적인 유지보수기술이 절실히 요구되고 있다.

지중케이블은 케이블내 절연체의 적은 간격사이에 상시전압과 이상전압이 인가되므로 절연비용이 고가이며 공사비도 커서 가공선로보다 약 20배 정도 더 드는 설비이며 전기적 특성과 열적 요구조건이 가공선로보다 엄격하게 제한된다.

이러한 고가의 지중케이블도 10년이상 경과하여 노후되었거나 특히 지중에 직매되어 있는 경우나 케이블의 운전조건이 열악한 경우(물속에 설치된 경우, 과열개소 통과 경우 등)에는 수트리에 의한 절연파괴로 대형사고의 가능성을 충분히 예측할 수 있다.

이는 서울시내 중심가에 설치된 지중케이블의 사고발생이 계속 급격히 증가되고 있고 대형공장에서의 케이블사고로 인한 화재 및 정전으로 막대한 손실이 발생되고 있는바 이는 사고의 대부분이 상기와 같은 원인에서 비롯된다는 한전연구원의 연구결과를 보더라도 알 수 있다.

그러나 대도시 중심부에서의 지중케이블은 교통이 혼잡한 도로나 인도에 매설되어 있어 케이블 대체공사 시공의 어려움 뿐만 아니라 케이블이 다량 설치되어 있는 대형공장 등에서도 케이블 대체에 어려움이 있어 새로운 케이블을 누적되게 포설하고 있는 실정이어서 사고발생 우려가 있는 케이블에 대한 대책의 수립이 절실히 필요하다 하겠다.

이에 대한 대책으로 한국전력에서는 전력케이블에 수분의 침투를 근본적으로 방지하기 위한 수밀형 케이블과 난연성 전력케이블의 사양이 새로 제정되어 신설이나 대체되는 케이블에 대하여는 수트리에 대한 고장을 어느 정도 예방할 수 있을 것으로 사료되나 기존의 지중케이블 특히 대도시 중심부에서의 직매 케이블이나 대형공장의 케이블에 대하여는 공사시공의 어려움, 교통난 증대, 경제성, 효율성 등을 감안하여 이러한 케이블사고의 문제점을 우리보다 먼저 경험하여 선진외국에서 기 채택되어 사용하고 있는 Cable Cure 적용방안을 검토, 적기에 보강함으로써 향후 예상되는 지중케이블의 사고를 예방하고 양질의 전력공급과 정전에 따른 피해발생을 사전에 예방할 수 있을 것이라고 판단된다.