

운전전류에 의한 도체온도 상승이 케이블 수명에 미치는 영향

윤제훈, 임성호  
한국전력기술(주)

Effect of conductor temperature rise generated by load current on the cable life

Jea-Hun Yun, Seong-Ho Lim  
KOPEC

**Abstract** - 산업공장에서 저압케이블이 지중에 집중 매설되어 있는 경우 운전전류에 의한 케이블 도체온도가 도체허용온도를 초과할 수 있다. 또한 절연체질의 활성화 에너지와 환경온도로 표현되는 아레니우스 모델의 환경온도 대신 운전전류에 의해 계산된 도체온도를 사용하여 케이블의 수명을 예측하여 보았다.

1. 서 론

전기 종사자는 고압계통에 대하여 설계부터 시공, 관리를 저압계통에 비해 비교적 철저히 이루어지고 있는 실정이다. 그 이유는 장비가 고가이며, 고압계통 사고 시 저압계통까지 모두 정전이 발생하여 경제적인 손실을 가져오기 때문이라고 생각된다. 그러한 사유로 대부분의 사고는 관심을 덜 가지는 쪽에서 일어나곤 한다. 우리나라 대부분 산업공장에서는 저압케이블이 지중에 집중적으로 매설되어 있는 경우가 있다. 실제 시 포설조건과 부하량에 따라 케이블 단면적을 선정하였을 지라도 증설하는 과정에서 추가로 매설하여 케이블 단면적이 부족한 경우가 있다. 또는 부적절한 설계로 케이블 단면적이 부족할 수 도 있다. 이렇게 과도하게 매설되어 있는 케이블은 운전전류에 의해 도체허용온도를 초과하게 된다. 초과된 허용온도는 케이블 수명을 급격히 줄게 만든다. 본 논문에서는 케이블 100회선이 지중에 집중매설되어 있는 경우 운전전류를 변화시켜 각각 도체온도를 계산하여, 각 온도별로 케이블 수명을 예측하여 보았다.

2. 본 론

2.1 도체온도 분석

케이블에 전류가 흐를때 발생하는 도체손 및 유전체손에 의한 발생열은 케이블의 절연체, 시스를 통해서 외부로 방사된다. 이 현상은 그림 1과 같이 마치 전기회로에서의 전기저항, 정전용량의 분포정수회로에 전류를 통한 경우와 흡사하며 정상상태에서의 온도분포는 열저항의 값만으로 결정된다.

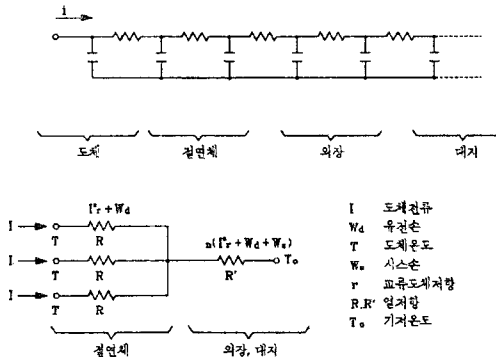


그림 1. 열방산회로와 전기회로의 유사성

2.1.1 케이블 데이터

케이블 사양은 600V, 3C, 22mm<sup>2</sup>이며 절연체는 가교폴리에틸렌(XLPE)이다. 케이블 구조는 그림 2와 같고 도체 직류저항은 25°C 기준으로 866 ohm/m이며, 도체허용온도는 90°C이다.

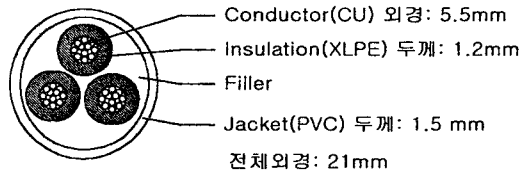


그림 2. 케이블 구조

2.1.2 매설 데이터

포설조건은 그림 3과 같이 같은 종류의 케이블을 100회선을 집중 포설하였다.

- 매설 깊이: 50Cm
- 도체 중심점과 중심점 거리: 10Cm
- 도체열 중심점과 중심점 거리: 10Cm
- 토양온도: 25 °C
- 토양열저항: 90 °C-Cm/Watt
- 모래열저항: 90 °C-Cm/Watt
- 원숫자: 케이블 번호
- S1~S10: 열 번호
- 기타 열원: 없음

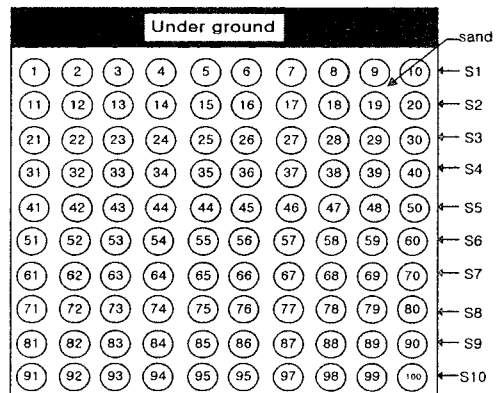


그림 3. 매설도면

2.1.2 도체온도 계산

도체온도 계산은 전산프로그램(ETAP-Power Station 4.0)을 사용하였다, 도체 운전전류는 26A,

28A, 30A, 32A 4가지 경우를 가정하였다. 대상 케이블은 지하에 단독 매설할 경우 약 140A의 허용전류를 가지기 때문에 검토 부하전류는 허용전류기준으로 19~23%정도이다. 그림 4는 도체에 26A 전류가 흐를 때 도체온도 값을 보여준다. S1 열은 케이블 1~10번 까지이며, S1 열의 맨 왼쪽이 케이블 1번 온도에 해당된다. 케이블 10개씩 1개열을 나타내며 총 10개열로 구성되어 있다. 결과에서 보듯이 케이블 온도는 열마다 중앙에 배치한 케이블이 온도가 높으며, 매설깊이가 깊을수록 온도가 상승하다가 S8번째 열부터 온도가 내려가기 시작한다. 운전전류가 26A일 때는 도체온도는 90°C이내로 모두 도체허용온도를 만족한다.

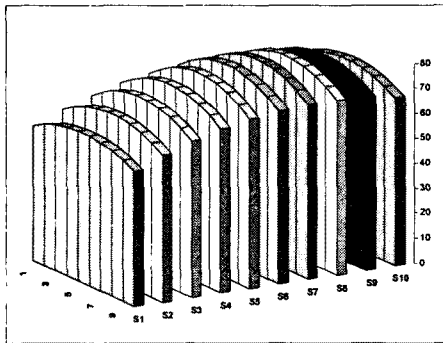


그림 4. 도체전류 26A일 때 도체온도 분포(입체)

그림 5,6,7,8은 그림 4와 같이 입체형을 정면에서 본 모양이며 열별로 최고온도와 최저온도를 음영의 차이로 보여주고 있다.

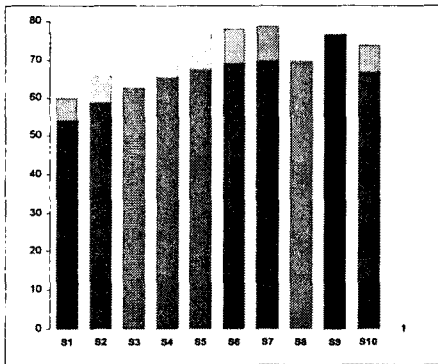


그림 5. 도체전류 26A일 때 도체온도 분포

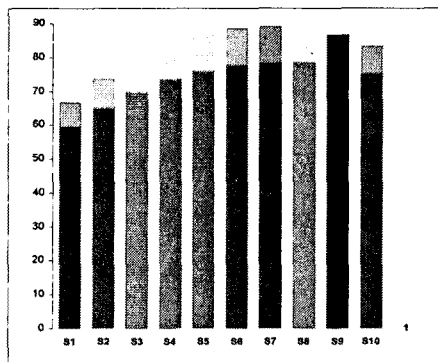


그림 6. 도체전류 28A일 때 도체온도 분포

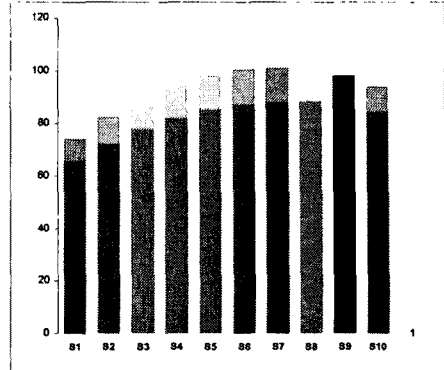


그림 7. 도체전류 30A일 때 도체온도 분포

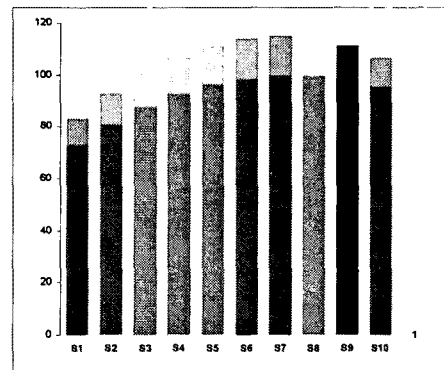


그림 8. 도체전류 32A일 때 도체온도 분포

가장 도체온도가 높은 케이블은 65, 66번 케이블이다. 운전전류별로 최고/최저 온도를 표시하면 그림 9와 같다. 도체전류 증가율보다 온도 상승률이 더 높음을 알 수 있다.

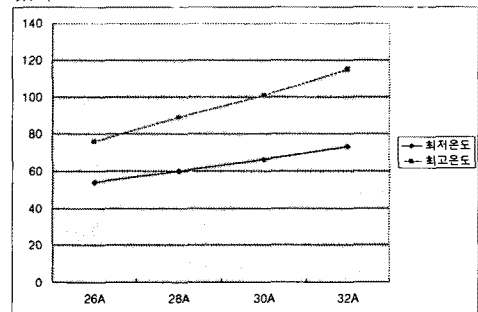


그림 9. 운전전류별 최고/최저 온도

## 2.2 케이블의 수명예측

### 2.2.1 아레니우스 모델<sup>1),3),4)</sup>

열은 기기 재료의 전기적 및 기계적 특성을 변화시킨다. 즉 온도의 증가는 온도의 함수인 분자 운동에너지를 증가시킨다. 이 운동에너지는 재료의 분자구조내에서 화학반응을 유발하고, 그 이후에는 재료의 분자구조를 약해하고 노화를 진행시킨다. 이 반응은 재질의 특성을 약화시키고 결국 기기의 고장을 유발하게 된다. 시간-온도 노화를 가속하는 기법으로 적용되고 있는 아레니우스 방정식은 다음과 같이 유기물질의 화학반응 속도 즉 손상 속도를 나타내 줄 수 있다.

$$\frac{dR}{dt} = A' \exp\left(\frac{-Ea}{KbT}\right) \quad (1)$$

유기물질의 수명은 화학적 반응속도에 반비례 관계이므로, 식 (1)을 수명(Life)측면에서 대수식으로 변환하면

$$\ln(\text{life}) = \text{Constant} + \left(\frac{Ea}{KbT}\right) \quad (2)$$

아레니우스 방정식 (2)의 화학반응 속도의 변환은 선형 관계식의 일정 두 점 사이의 차이를 취함으로써 가능하게 되므로 방정식 (2)의 Life 대신 t로 교체하여 정리하면 다음과 같다.

$$t_{ser} = t_{age} \cdot \exp\left(\frac{Ea}{Kb} \cdot \left(\frac{1}{T_{ser}} - \frac{1}{T_{age}}\right)\right) \quad (3)$$

여기서,

- tser : Tser에서 사용수명(hours)
- tage : Tage에서의 가속노화시간(hours)
- Tser : 환경(정상운전)온도(K)
- Tage : 가속노화온도(K)
- Ea : 활성화 에너지(eV)
- Kb : Boltzmann 상수

식 (3)은 열노화 시간 및 온도가 주어지고 임의 운전온도에서의 수명을 검증하고자 할 때 사용할 수가 있다.

### 2.2.2 활성화 에너지<sup>3,5)</sup>

아레니우스 방정식에 포함되어 있는 활성화 에너지는 열노화에 의하여 물성을 변화시키는 값으로서, 일반적으로 초기유연성의 50%, 인장강도의 20%, 또는 절연강도의 50%등의 물성이 변화하는 정도별로 구분하여 표시한다. 따라서 고려되는 열노화 효과와 물성변화에 따라 서로 다른 값을 가지며, 정확한 활성화 에너지를 사용하는 것이 열노화 평가시 매우 중요한 요소가 된다. 열노화에 취약한 절연체 재료는 대부분 1.0~1.4eV의 활성화 에너지를 가지며, 정확한 값을 위해서는 실측데이터를 이용한 IEEE Std-101<sup>2)</sup>에서 제시하고 있다.

즉 활성화 에너지를 구하는 방법으로는 절연체의 경우 환경조건 하에서 시간에 대한 함수로서 열에 의한 절연체의 휘발성분을 측정하여 계산하는 방법과 노화에 소오되는 표준시간 보다 훨씬 짧은 시간 내에 새로운 물질의 열적 특성을 알아내기 위하여 시험시편과 열 공급된 사의 온도차를 측정하여 계산하는 방법이 있다.

### 2.2.3 수명예측<sup>3)</sup>

아레니우스 식 (3)을 이용하기 위해서는 사용된 케이블에 대해서 제작사에서 실시한 가속열화시험 결과를 이용해야 하지만, 본 논문에서는 다음과 같이 XLPE절연체질에 대하여 Rockbestors 제작사에서 실시한 열노화 가속시험결과를 이용하였다.<sup>3)</sup>

- Ea : 1.33eV
- Kb : 8.617 x 10<sup>-5</sup> eV/K
- tage : 850hours
- Tage : 423K (=150+273)
- Tser : 계산된 도체온도(Kelvin)

Tser은 케이블 사용환경온도 이지만 본 논문에서는 2.1항에서 계산된 케이블 도체온도를 적용하였다. Tage 및 Tser의 단위인 Kelvin온도는 °C 온도에 절대온도인 273°C를 더한 값이다.

수명예측 결과는 그림 10과 같으며, 그래프 스케일은 log 이다. 케이블 수명은 부하전류 증가율에 비하여 수명이 급격히 감소함을 알 수 있다. 부하전류 30A에서는 수명이 11.6년밖에 되지 않기 때문에, 현재 케이블 사용기간이 10년 이라면 1년 이내에 대책을 세우지 않으면 케이블은 절연능력을 상실하게 되는데, 이때 화재가 나면 인접 케이블까지 소손 우려가 있다.

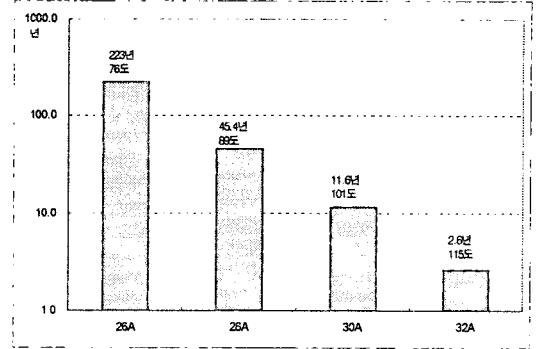


그림 10. 도체 운전 전류별 케이블 수명

그림 11은 도체온도별로 케이블 수명을 예측하였다. 도체허용온도인 90°C에서는 케이블 수명이 40년임으로 도체허용온도 이하에서 운전하면 케이블 수명은 약 40년 이상 보장됨을 알 수 있다.

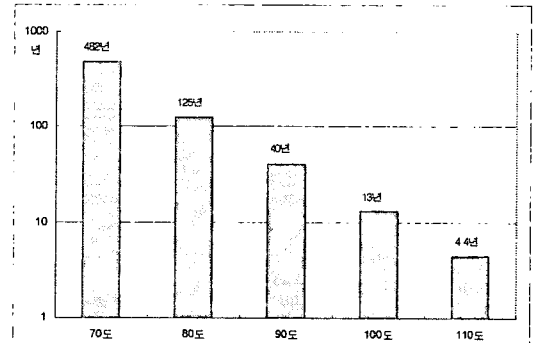


그림 11. 도체온도별 케이블 수명

## 3. 결 론

케이블 도체온도와 절연체의 노화시험 데이터(활성화 에너지 등)를 알면 아레니우스 모델에 의해서 케이블 수명을 예측할 수가 있었다. 도체허용온도 이상에서는 케이블 수명이 급격히 떨어져 불과 10여년 이하가 될 수도 있다. 지하에 집중 매설하는 경우 케이블 허용전류가 대단히 떨어지므로, 설계시 도체온도 계산을 하여 도체허용온도 이내에서 운전이 가능하도록 케이블 단면적을 선택해야 할 것이다.

또한, 현재 운전 중인 케이블에 대해서 잔존수명을 예측함으로써, 전력설비 종사자들에게 년차 보수계획 수립시 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] EPRI, "Review of Equipment Aging Theory and Technology", EPRI NP-1588 Project 890 1, 1980
- [2] IEEE Std 101 1972, "IEEE Guide for the Statistical Analysis of Thermal Life Test Data"
- [3] 전력연구원, "원전수명관리연구(I)(최종보고서4)", 1996
- [4] 안상필, 강윤식, 김철환, 구철수, 김복렬, "아레니우스 식을 이용한 원자력 발전소 케이블의 등가수명 예측방법", 한국 원자력학회 2001 추계학술발표회 논문집
- [5] LG Cable, "Long Term Thermal Aging Test Report", 1995