

지중 전력 케이블 금속보호관의 열적용량

안미경\*, 김정년\*, 김지환\*\*  
 \*LS전선 기술개발본부, \*\*LS전선 전력사업부

The Thermal Rating of Metallic Case in Under Ground Cable System

M. K. Ahn\*, J. N. Kim\*, J. H. Kim\*\*  
 \*R&D Center LS Cable Ltd., \*\*Electric Power Division, LS Cable Ltd.

**Abstract** - 지중 전력케이블의 접속함은 금속보호관(Casing or Protective Tube)의 전기적 검토를 통해서 적정 단면적을 산정하여 고장시 고장전류를 흘려주어야 한다. 현재 국내의 금속보호관은 그 재료로서 Copper를 사용하고 있으나 현장에서의 시공성 및 취급 용이성 때문에 알루미늄 보호관으로 재질 변경이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 기존의 Copper보호관과 Aluminium보호관에서의 비교검토를 통해서 Aluminium보호관의 유효성을 검토하고 구리에서 알루미늄으로 재질 변경이 이루어졌을 때 열적 제약조건을 고려하여 적정단면적을 재 산정한다. 또한 산정된 단면적은 단락시험을 통해서 그 유효성을 입증하였다.

1. 서 론

전력 케이블 선로의 초고압화 및 지중화의 경향에 따라 전력케이블의 신뢰성에 대한 관심이 점차로 증가하고 있다. 특히 전력송전을 위하여 지중 케이블과 가공선로간, 지중 케이블과 차단기간 또는 변압기간, 지중 케이블 상호간을 전기적으로 서로 연결하여 주는 접속장치인 지중송전 케이블의 접속함에 관한 관심 또한 증가하고 있다. 현재까지 국내 지중송전선로에서는 154kV급이 주로 사용되고 있으며 직선 접속함의 경우 TMJ(Tape mold Joint)가 주종을 이루고 있다. TMJ는 컴팩트한 크기와 현장에서 절연 tape를 감은 후 성형하는 공법을 통해 케이블과 동등한 전기적 특성을 확보할 수 있는 장점이 있으나 현장조립 시 장시간이 소요되어 교통장애 등의 환경적 문제를 불러오게 된다. 이에 따라 설치시간이 짧고 작업이 쉬운 접속함으로 공장에서 만들어지고 출하 전 공장에서 사전 품질이 확인된 부품을 사용하는 PJB(Prefabricated Joint Box)가 개발되어 사용되어 오다가 현재에는 고무일체형 접속함인 PMJ(Promold Joint)가 주종을 이루고 있다.

이러한 접속함은 금속보호관(Casing or Protective Tube)에 의해서 외력으로부터 내부의 절연체 및 구성부품들은 보호된다. 또한, 보호관은 지중케이블 운전 시 유도되는 전압을 상쇄시키기 위해서 접지점의 역할을 하며 사고 시 고장전류의 경로(path)로서 대지귀로의 역할을 한다. 따라서 금속보호관은 고장시 발생하는 고장전류를 흘리기 위해서 적정 단면적을 확보해야 한다. 현재 국내의 금속보호관은 그 재료로서 동(Copper)을 사용하고 있으나 가공의 용이성 및 현장에서의 시공성, 취급 용이성 때문에 알루미늄 보호관으로 재질 변경이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 동 보호관과 알루미늄 보호관을 전기적인 측면에서 비교를 통해 알루미늄 보호관의 유효성을 검

토하였다. 또한 재질변경 시 열적제약조건을 고려해서 적정단면적을 산정하였으며 그 유효성을 입증하기 위해서 단락시험을 통해서 그 유효성을 입증하였다.

2. 본 론

일반적으로 케이블 고장발생시 전류를 운반하는 도체 및 차폐층의 단락전류는 단열조건하라는 가정하에 IEC 60949와 ICEA P-45-482에 따라 계산된다. 그러나 실제 상황에서는 인접 매질로의 열전달이 발생하며 이러한 상황을 고려하여 IEC 60949에 단열조건 및 비단열 조건하에서의 계산방법을 제공하고 있다.

- 도체 및 차폐의 단락전류는 다음과 순으로 계산된다.  
 (1) 단열조건하에서 단락전류계산 : IEC 60949, ICEA P-45-482  
 (2) 열전달을 고려한 비단열 계수 계산 : IEC 60949  
 (3) 비단열 조건하에서의 단락전류 계산 : 식 (1)×(3)

2.1 단열 상태를 고려한 단락전류

IEC 60949에 따라 전류를 운반하는 매체의 단락전류는 식(1)에 의해서 결정된다.

$$I_{AD}^2 t = K^2 S^2 \ln \left[ \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta} \right] \quad (식 1)$$

- 여기서,  $I_{AD}$  : 단열 조건하에서의 단락전류 [A]  
 $t$  : 고장지속 시간 [sec]  
 $K$  : 금속차폐의 재료상수 [ $AS^{1/2}/mm^2$ ]  
 $S$  : 금속차폐층의 유효단면적 [ $m^2$ ]  
 $\theta_f$  : 최종온도 [ $^{\circ}C$ ]  
 $\theta_i$  : 초기온도 [ $^{\circ}C$ ]  
 $\beta$  :  $0^{\circ}C$ 에서 금속차폐의 저항계수의 역수 [K]

단락전류는 계산 대상이 되는 도체 또는 금속차폐의 초기 온도, 최종온도, 단면적, 지속시간 및 재료상수 K에 의해서 결정된다. 여기서 초기온도는 일반적으로 차폐도체의 연속허용온도를, 최종온도는 고장발생시 수초 동안 주변 절연체의 절연내력을 저하시키지 않는 허용온도를 일반적으로 적용한다

ICEA P-45-482에 따른 전류를 운반하는 매체의 단락전류는 식(2)에 의해서 결정된다.

$$\frac{I_0^2 t}{A^2} = 247.0 \times 10^{-6} \times SG \times SH \times \left[ \frac{T_0 + \lambda}{P_0} \right] \times \text{Log}_{10} \left[ \frac{T_2 + \lambda}{T_1 + \lambda} \right]$$

(식 2)

여기서,  $I_0$  : 단열 조건하에서의 단락전류 [A]  
 $A$  : 금속차폐의 단면적 [circular mils]  
 $t$  : 고장 지속 시간 [sec]  
 $SG$  : 금속 차폐의 비중  
 $SH$  : 금속 차폐의 비열  
 $T_0$ : arbitrary 온도 [usually 20°C]  
 $P_0$ : 20°C에서의 금속의 고유 저항값  
 $\lambda$  : 0°C이하의 금속의 저항  
 $T_2$ : 최종 온도 [°C]  
 $T_1$ : 초기 온도 [°C]

## 2.2 비 단열 상태를 고려한 단락전류

비 단열 조건에서의 단락전류는 식(3)와 같이 식(1)에서 계산된 결과에 비 단열 계수인  $\epsilon$ 를 곱함으로써 얻어질 수 있다.  
 단열 상태에서  $\epsilon$ 값을 1로 본다.

$$I = \epsilon \times I_{AD} \quad (\text{식 3})$$

여기서,  $\epsilon$  : 비 단열 계수  
 $I_{AD}$ : 단열조건하에서의 단락전류

여기서, 비 단열 계수인  $\epsilon$ 는 식(3)과 같이 결정된다.

$$\epsilon = 1 + 0.61M\sqrt{t} - 0.069(M\sqrt{t})^2 + 0.0043(M\sqrt{t})^3$$

(식 4)

여기서  $t$ 는 고장지속 시간이며 상수  $M$ 은 식(4)와 같이 인접매질의 비열 및 열저항에 의해서 실험적으로 결정되어진다

$$M = \frac{\left( \sqrt{\frac{\sigma_2}{\rho_2}} + \sqrt{\frac{\sigma_3}{\rho_3}} \right)}{2\sigma_1 \delta \times 10^{-3}} F \quad (\text{식 5})$$

$\sigma_2$ : PVC테이프의 비열 [J/K.m<sup>3</sup>]  
 $\rho_2$ : PVC테이프의 열저항 [K.m/W]  
 $\sigma_3$ : 아스팔트의 비열 [J/K.m<sup>3</sup>]  
 $\rho_3$ : 아스팔트의 열저항 [K.m/W]  
 $\sigma_1$ : 금속차폐의 비열 [J/K.m<sup>3</sup>]  
 $\delta$ : 금속차폐층의 두께 [mm]  
 $F$ : 불완전한 접촉을 고려한 상수

일반적으로  $F$ 는 인접매질과 금속차폐층과의 불완전한 접촉으로 고려한 상수로서 완전 접촉이 된 경우에는 0.9를 적용하며 그 외에는 일반적으로 0.7을 적용한다.

## 2.3 재질/두께 변경에 따른 단락용량 산정

### 2.3.1 계산조건

식1, 식2에 의거해서 단락전류를 계산할 때 아래의 파라미터를 사용한다.

표 1. 구리 및 알루미늄의 재료상수

상수	단위	동	알루미늄
K	AS <sup>1/2</sup> /mm <sup>2</sup>	226	148
$\beta$	K	234.5	228
$\sigma_1$	J/K.m <sup>3</sup>	3.45x10 <sup>6</sup>	2.5x10 <sup>6</sup>
t	sec	1	1
$\theta_f$	°C	200	200
$\theta_i$	°C	90	90
$\sigma_2$	J/K.m <sup>3</sup>	1.7x10 <sup>6</sup>	1.7x10 <sup>6</sup>
$\sigma_3$	J/K.m <sup>3</sup>	2.34x10 <sup>6</sup>	2.34x10 <sup>6</sup>
$\rho_2$	K.m/W	6	6
$\rho_3$	K.m/W	6.16	6.16

### 2.3.2 단열 조건하에서의 단락전류

알루미늄 보호관의 두께에 따라 고장지속 시간이 1sec 일 때 IEC 60949 와 ICEA P-45-482의 계산 결과를 단열 조건하에서의 단락전류는 그림 1과 같다

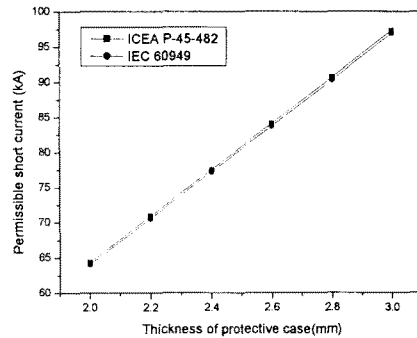


그림 1. 단열 조건 하에서의 단락전류 비교

단열조건 하에서 IEC 60949와 ICEA P-45-482의 계산 결과는 오차 0.5% 이하로 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

### 2.3.3 단열/비단열 조건하에서의 단락전류

알루미늄 보호관의 두께에 따라 고장지속 시간이 1 sec 일 때 단열/비단열 조건하에서 단락전류는 그림 1과 같다.

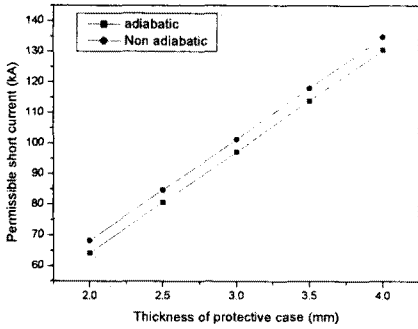


그림 2. 단열/비단열 조건하에서 단락전류

실제 케이블 및 접속이 운전되는 상황을 고려할 때 비단열(Non-adiabatic)인 경우를 상정하는 것이 바람직하지만 실제시에는 인접매질로의 열전달이 전혀 이루어지지 않는다는 가정하에 단열(Adiabatic)을 고려하여 설계를 하였다. 비단열 조건인 경우와 단열조건인 경우 대략 5% 정도의 차이를 보이며 두께가 증가에 따른 차이는 없음을 알 수 있었다.

### 2.3.4 보호관 재질에 따른 단락전류

그림 3은 보호관의 두께를 2.5mm로 고정된 뒤, 고장 지속 시간(sec)에 따른 단락용량의 비교는 아래와 같다.

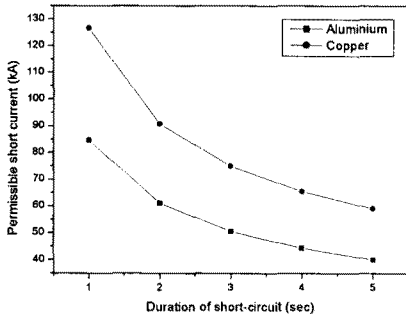


그림 3. 재질변경에 따른 단락전류

보호관의 재질을 구리에서 알루미늄으로 변경시킬 경우 단락전류 측면에서는 35%정도 단락전류가 감소한다. 그 차이는 금속차폐재질의 재료상수인 K값에 의해서 결정되며 고장지속시간이 길어져도 차이는 차이폭은 작아짐을 알 수 있었다.

### 2.3.5 두께변화에 따른 단락전류

그림 3은 고정지속 시간을 1(sec)로 고정 시켜 놓은 후, 알루미늄 보호관의 두께를 변경시켜 단락전류를 비교한 그래프이다.

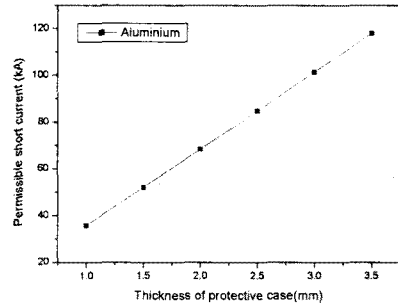


그림 4. 적정단면적 산정

해의의 경우 220kV 케이블계통의 경우 63kA/1sec가 최대 단락전류이며 이 계통을 포함한 모든 계통에 적용하기 위한 보호관의 적정단면적을 두께 2mm로 선정하였으며 IEC 60949의 계산식에 따르면 68.4kA까지 견딜 수 있음을 알 수 있다.

## 3. 알루미늄 보호관의 전기적 평가

시험시료로 사용된 제품은 220kV 800SQ의 중단 접속함(Termination)용 보호관은 재질은 알루미늄이며 그림 4 과 같이 단자 및 4-5개의 편조선이 취부 되어 있다. 접지용 단자는 케이블 금속 시스를 접지시키기 위한 접지 리드선과의 연결부며 편조선은 보호관과 금속시스를 전기적으로 연결하기 위한 리드선이다.

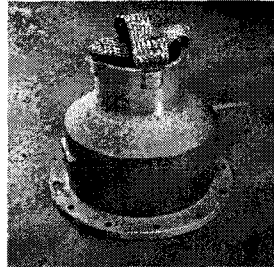


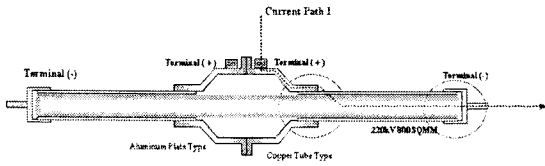
그림 5. 편조선을 알루미늄으로 용접한 시료

### 3.1 평가방법

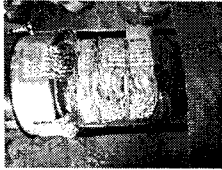
제작된 보호관을 전기적으로 평가하기 위해 단락시험을 수행하여 고장발생시 고장전류를 흘릴 수 있는지에 대해 확인하였다. 또한 단락시험 전후에 있어서 편조선과 보호관과의 접촉부의 접촉저항의 저항의 변화를 통해서 지중 전력케이블의 적용가능성을 검증하였다.

### 3.2 단락시험

아래 그림 5는 보호관을 포함하여 케이블 차폐층에 대해서 단락시험을 하기위한 구성도이다. 단락발전기를 통한 전류는 보호관의 단자를 통해서 편조선, 케이블 금속시스를 통해서 귀로하도록 구성하였다.



(a) 시료구성도



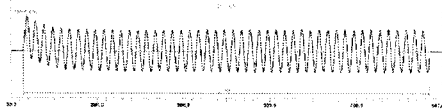
(b) 동관-케이블차폐 연결



(c) 단락발전기 연결

그림 6. 보호관 단락시험 시료의 구성

단락시험 결과 그림 7에서 보는 바와 같이 시료에는 파손이 없었다.



(a) 단락전류 파형



(b) 단락시험 전 시료상태



(c) 단락시험 후 시료상태

그림 7. 보호관 단락시험 전/후 전경

### 3.3 접촉저항 시험

접촉저항은 도체의 종류, 압력, 산화막의 유무, 전류밀도에 따라 달라지며 달라진다. 이처럼 도체의 기계적 접촉부에 존재하는 저항을 접촉저항이라 하며 접촉부 표면의 요철, 더러움, 흡착 기체, 접촉 면적의 크기 등으로 결정되므로 측정이 필요하다. 또한 단락전류에 의한 산화피막의 형성, 흡착기체 등 단락시험 전후에 보호관과 케이블 시스템을 연결하는 부위의 접촉저항을 측정함으로써 장기사용에 있어서 문제가 없는가를 평가하였다.

접촉저항 측정은 그림 8과 접촉부에 기저의 DC 전류(100A)를 흘려주어 접촉부에서 발생하는 전압 강하를 측정함으로써 환산함으로써 접촉저항을 얻을 수 있었다.

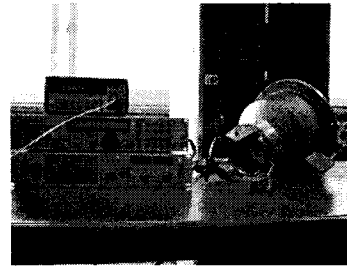


그림 8. 접촉저항 측정

지중케이블 시스템에서 접지계통의 접촉저항은 Electra 75에 의해  $20\mu\Omega$ 이하로 규정이 되어 있으며 이를 판단기준으로 선정하였다.

표 2에서는 보호관에 단락전류는 3회를 흘린 후 접촉저항을 측정하였으며 결과는 양호함으로 판정되었다.

표 2. 단락시험 전후 접촉저항변화

단락시험 전	단락시험 후	결과
5.6	7.2	양호

## 4. 결 론

본 논문에서는 지중 전력케이블 접속함용 보호관의 재질을 구리에서 알루미늄으로 변경하였을 경우 전기적인 측면에서 검토를 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 알루미늄 보호관의 단락전류검토를 통한 용량을 규격 IEC60949와 ICEA P-45-482에 따라 계산을 하여 단면적을 산정하였으며, 산정된 단면적으로 알루미늄 보호관을 제작하였으며 단락시험을 통해서 단락전류용량의 적정성을 검증하였다.

(2) 단락시험 전, 후 보호관과 케이블 시스템의 접촉저항을 측정함으로써 장기사용시의 접촉부의 열화특성에 문제에 없음을 검증하였다.

(3) 보호관 재질을 구리에서 알루미늄으로 변경함에 따라 중량을 약 65%까지 줄일 수 있었으며 현장에서의 시공성을 향상시킬 수 있었다.

## [참 고 문 헌]

- [1] International standard, "Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects", IEC 60949, 1988
- [2] Insulated cable engineers association, Inc, "Short circuit characteristics of metallic shields and sheaths on insulated cable", ICEA Publication #P-45-482-1992, Fourth edition, April 1999.