

## 초고압 XLPE 케이블의 국부적 눌림에 대한 파괴강도 고찰

김영호\*, 이상진, 조대희  
LG전선(주) 전력연구소

### Evaluation of Breakdown Strength on the Locally Dented Power Cable

Y.H. Kim, S.J. Lee, D.H. Cho  
Electrical Power Research Lab., LG Cable Ltd.

**Abstract** - Internal and external forces may be applied on the power cable in the both process of transportation and installation. Even though the EHV power cables have the structure of metal sheath and plastic jacket etc. to minimize these negative influences, the unusual forces result in the unexpected deformation of the cable. Compressing moulded XLPE model cable sheets were prepared and locally dented with round-edge and square-edge tools. All data were analyzed employing Weibull distribution. The breakdown strength of dented molded specimens showed lower values than the normal ones by 10-60%.

## 1. 서론

초고압 지중 송전에 중요한 역할을 담당하고 있는 XLPE 케이블은 가공 송전선과 비교했을 때 그 구조가 복잡하고 큰 중량을 가지고 있다. 따라서 케이블의 수송 및 포설 등의 취급과정에서 항상 외부로부터 충격에 의한 외상 가능성에 노출되어 있다. 물론 정상적인 수송이나 포설 과정에서 외부로부터 가해지는 충격은 케이블 설계과정에서 충분히 검토되어 문제가 되지 않는다. 예상되어지는 외부로부터 충격 완화와 보호 역할을 수행하는 것이 AI 시스와 방식층이다.

본 연구에서는 초고압 XLPE 케이블의 비정상적인 취급에 의해 케이블 절연층에 외상이 일어났을 때를 가정하고, 외상에 대한 전기적 성능을 예측하는데 초점을 맞추었다. 그러나, 이러한 외상에 대한 가능 변수는 너무나 다양하기 때문에 그 모든 가능성에 대해 고려하는 것은 한계가 있다. 따라서 이런 다양한 XLPE 케이블 외상 가능성 중에서 외부 및 내부로부터의 충격에 의해 케이블 절연층에 눌림이 발생하였을 경우로 한정하였다.

이제까지는 케이블에 이러한 외상이 발생하였을 경우 그 케이블의 전기적 성능을 확인하거나 예측하기 위해서는 실험케이블 혹은 모델케이블(Miniature Cable)을 이용하여 검증하는 방법을 주로 사용하였다. 그러나, 시험장비 및 시험 단말, 시간의 한계성 때문에 실험 시료의 수 등에 많은 제약이 있었다. 이러한 제약성을 극복하기 위해 압축성형기를 이용하여 실험실에서 실험 가능한 시트 타입의 모델케이블을 제작하였다. 시트타입 모델케이블에 눌림을 모의하였고, 눌림의 형태, 깊이에 대한 전기적 파괴 특성을 고찰하였다.

그리고, 실제로 154kV 2000mm<sup>2</sup> XLPE 케이블에 특정 치구를 사용하여 눌림을 발생시켰다. 이때 순수한 케이블 절연층이 눌림의 정도에 따라 변화되는 전기적 파괴특성도 고찰할 수 있었다.

## 2. 시편제작 및 전기적 실험

### 2.1 XLPE 모델케이블 시트 제작

초고압 XLPE 실험케이블을 대신하여 그림1과 같은 모양의 XLPE 모델케이블 시트를 제작하였다. 압축성형기를 이용하여 그림1의 시료 형상과 같은 금형에서 압력을 가하여 온도 180°C, 가교시간 15분으로 하여 정상적인 XLPE 모델케이블 시트를 제작하였다. 제작된 XLPE 시트 상하부에 올려핀 배열의 반도체 페인트를 칠하여 내·외부 반도체층을 완성하였다.

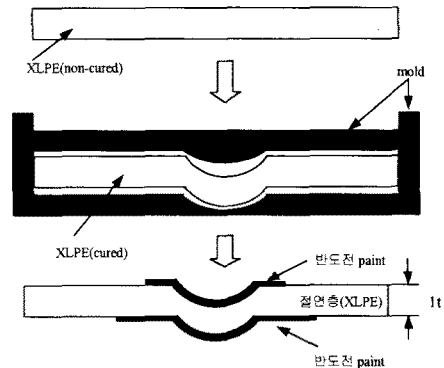


그림1 XLPE 모델케이블 시트 제작

정상적인 시료의 제작이 끝난 다음, 에나멜 와이어 세선(φ0.3mm)을 그림1의 금형에 장착한 다음 일정한 압력을 가하여 그림2와 같이 외부 반도체층에서 절연층으로 눌림을 발생시켰다.

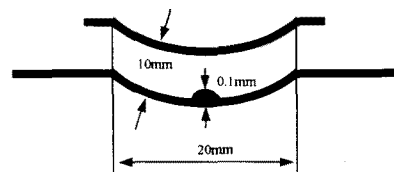


그림2 눌림 발생 XLPE 모델케이블 시트

눌림의 깊이는 XLPE 모델케이블 시트의 절연 두께 1mm의 10%에 해당하는 0.1mm 깊이로 했다. 눌림의 깊이를 고정하고 눌림의 형태를 각눌림, R눌림 두 종류로 대별하였다. 이는 초고압 실험케이블이 수송이나 포설 중에 눌림에 의해 변형되는 형태가 그 케이블 절연층 두께의 10% 범위에서 예각의 유무 상황과 동일함을 의미한다. 이렇게 눌림을 발생시킨 시료를 요약하면 그림3에 나타난 바와 같다.

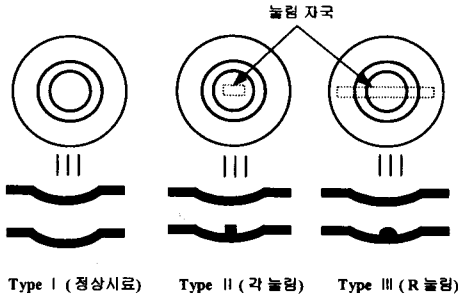


그림3 XLPE 모델케이블 시트 눌림 유형별 시료

Type I 시료는 정상적인 케이블을 Type II 시료는 예를 가지는 눌림자국(상처와 유사한)이 있는 케이블을 모의하였다. 그리고 Type III 시료는 수송이나 운반 중에 이상충격에 의해 케이블 절연층과 AI 시스 사이에서 내외부적 충격으로 발생할 가능성이 있는 R눌림에 대해 모의하였다.

### 2.1 눌림케이블 시트 제작

순수한 케이블에서 눌림을 모의한 시료는 그림4와 같이 일정한 치구를 이용하여 충격량을 변환시키면서 제작하였다. 대상 케이블 시료는 154kV 2000mm<sup>2</sup> XLPE 케이블로 하였다. 눌림 치구는  $\phi 20\text{mm}$ 의 반구에 120mm의 길이를 가진 것을 압축 시험기에 고정하여 1톤, 2톤, 2.5톤, 3톤, 4톤의 중량을 가하여 눌림을 발생시켰다.

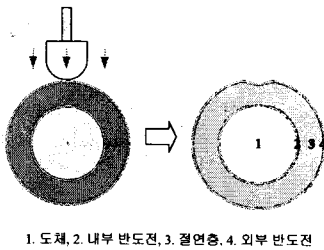


그림4 실케이블 눌림 실험

연속된 중량에 의해 눌림이 발생된 케이블 시료는 그림5와 같이 케이블 radial 방향으로 0.2mm 두께로 마이크로톱을 이용하여 시트로 제작하였다.

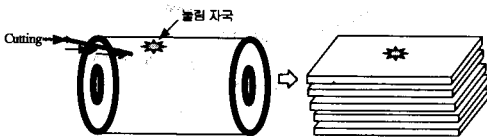


그림5 눌림케이블 시트 제작

### 2.2 전기적 실험

실케이블에서 외부로부터의 눌림을 가한 후 제작된 눌림케이블 시트는 3/4inch 구-평판 전극에서 AC 전압을 가하여 파괴강도를 측정하였다. 전압 승압율은 2.5kV/sec 로 하고, 승압 방식은 ramp로 하여 실험하였다. XLPE 모델케이블 시트는 그림6에 표시한 방법에 의하여 실험을 수행 하였다. 전극 구조와 승압 방식은 눌림케이블 시트와 동일한 방법으로 수행하였다.

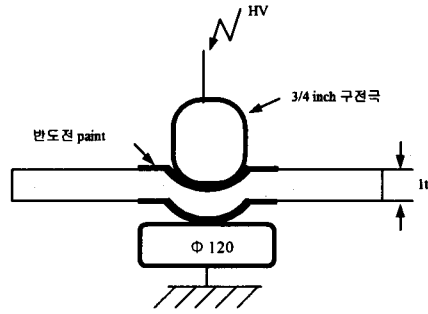


그림6 XLPE 모델케이블 시트 전극 구조

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 눌림케이블 시트의 전기적 특성

눌림케이블 시트는 각 하중별로 케이블 외도에서 내도 방향으로 총20매 즉, 외도에서 내도쪽으로 4mm 지점까지의 절연층을 취하여 AC파괴강도 실험을 수행하였다. 그림7은 슬라이스 된 시트의 하중별 AC 파괴강도를 식(1)에 의한 2 모수 Weibull 통계함수로[1][2] 처리한 결과이다.

$$F(E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

$\eta$  : 척도모수(scale parameter)

$\beta$  : 형 모수(shape parameter)

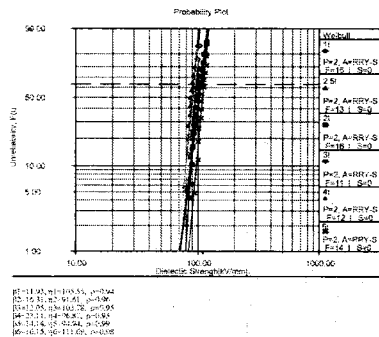


그림7. 2 모수 Weibull 통계함수 처리 결과

그림7의 결과를 요약하면 Table1에 표시한 것과 같이 되고 이는 최대우도법(Maximum likelihood method)에 의해 회귀하여 모두 95% 이상의 신뢰 구간에서 이루어졌다.

Table 1 눌림케이블 시트의 하중별 Weibull 통계함수

하중	척도 모수( $\eta$ )	형상 모수( $\beta$ )
1 ton	105.55	11.93
2 ton	103.78	12.05
2.5 ton	91.61	16.31
3 ton	96.87	23.11
4 ton	94.94	14.14

눌림하중이 전혀 가해지지 않은 정상 케이블에서 슬라 이스 된 케이블 시트의 AC파괴강도는 2 모수 Weibull 통계함수의 63.2%에 해당하는 척도모수 값이 105kV/mm 정도였다. 케이블에 눌림 하중이 증가함에 따라 케이블의 XLPE 자체 절연내력이 약 10~15% 감소함을 알 수 있다. 그리고 형상모수 값이 모두 1보다 크고 고르게 분포하여 초기 우발적 파괴가 아닌 절연층의 정상파괴 특성값으로 사료된다[3].

### 3.2 XLPE 모델케이블 시트의 전기적 특성

앞질의 그림3과 같이 3종류의 XLPE 모델케이블 시트를 대상으로 AC 파괴실험을 수행한 결과 그림8과 같은 결과를 얻었다.

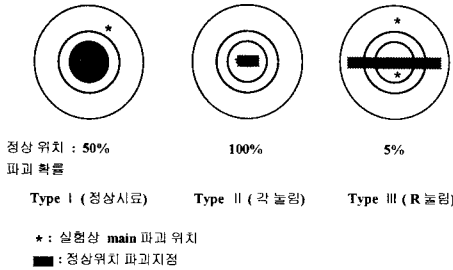


그림8 XLPE 모델케이블 시트의 파괴양상

XLPE 모델케이블 시트 전극 구성에서 정상적인 케이블에 해당되는 Type I 시료의 경우 정상적인 위치 즉 케이블 절연층에서 파괴될 확률은 50%, Type II 시료(각눌림)의 경우 눌림 자국에서 파괴 될 확률은 100%, Type III(R눌림) 시료의 경우 눌림 자국에서 5%의 파괴확률을 보였다. 이는 케이블 절연층에 예각(모서리)을 가지고 눌림 자국이 형성된다면 100% 눌림 위치에서 파괴됨을 의미한다. 반면에 예각이 없는 즉 눌림 부분이 R을 가지고 있을 경우 약 5%의 파괴확률로 파괴 위치적인 측면에서 정상적인 케이블과 유사한 파괴특성을 보여주었다.

3종류 시료의 AC 파괴전압에 따른 데이터를 산술평균으로 처리하면 그림9와 같은 양상을 보여주었다. Type II(각눌림) 시료의 경우 Type I(정상시료)에 비해 약 30%정도 낮은 파괴값을 가졌다. 또한 Type III(R눌림) 시료는 파괴 위치에 대한 확률이 5% 수준으로 정상 시료와 파괴 위치에서 거의 유사한 수준이지만 이 위치에서 파괴가 일어날 경우 정상시료에 비해 약 20% 정도 낮은 파괴값을 보여준다.

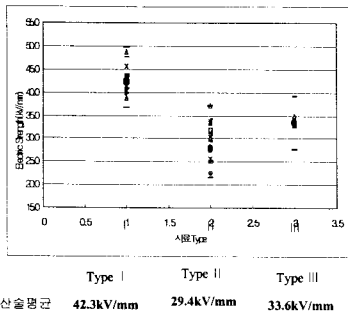


그림8 눌림 형상별 AC 파괴전압의 산술평균

여기까지의 결과로부터 주목할 사실은 초고압 XLPE

케이블 절연층 두께의 약 10% 깊이의 예각을 가진 눌림이 발생했을 경우 그 위치에서 파괴확률은 100%. 파괴값으로는 정상케이블의 70% 수준에서 파괴가 일어날 수 있었다. 여기에 해당되는 데이터를 식(2)에 표시된 3 모수 Weibull 통계함수로 처리해 보면 그림9와 같이 됨을 알 수 있다.

$$F(E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

$\eta$  : 척도모수(scale parameter)  
 $\beta$  : 형 모수(shape parameter)  
 $\gamma$  : 위치모수(location parameter)

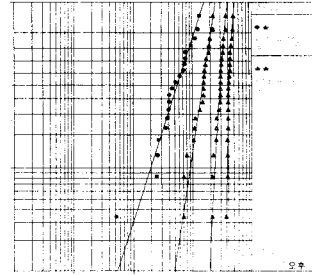


그림9. 각눌림에 대한 3모수 Weibull 통계함수

3 모수 Weibull 통계함수에서의 특징은 전기적 스트레스의 최저한계치를 위치모수(location parameter)로 존재하는 경우에 파괴 확률은 0이 되고, 이때 위치모수 값은 절대로 파괴가 일어나지 않는 전계를 의미한다. 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. 3모수 Weibull 통계함수 처리

시료 \ 함수	척도모수( $\eta$ )	형상모수( $\beta$ )	위치모수( $\gamma$ )
Type I	6.83	1.82	36.17
Type II	16.63	3.76	14.39

그림9와 Table 2에서 알 수 있듯이 각눌림에 의한 시료는 정상시료에 비해 파괴의 최저한계치( $E_L$ )가 약 60% 저하되는 것을 알 수 있다. 이는 초고압 XLPE 케이블 절연층이 외부로부터의 충격에 의해 절연층 두께의 10%에 해당하는 깊이로 각눌림이 발생 할 경우, 파괴될 확률의 값이 정상 케이블의 40% 수준에서 일어날 수 있음을 말해준다. 그러나 Type III 시료의 경우 정상 위치에서 파괴확률이 낮아 Weibull 통계함수 처리를 위한 시료수의 부족으로 처리하지 못하였다.

### 3.3 고찰

눌림케이블 시료에서 외부로부터 눌림 하중이 증가함에 따라 순수한 XLPE 절연층의 절연내력이 감소하는 것은 외부로부터의 기계적 응력이 가해지고 또한 그 응력은 케이블 혹은 케이블 시트의 전계 방향에 대해 수직된 방향으로 작용된 결과로 사료되어진다[4]. 그리고 외부 및 내부로부터의 충격에 의해 상처 등이 없이 R형상으로 눌림 자국이 발생한 케이블 절연층은 일정한 눌림 하중(약 2.5톤)에서 포화되는 것으로 보인다.

그러나, 순수한 절연층이 아닌 케이블에서 눌림에 대

한 전기적 특성은 놀림의 형상에 가장 큰 영향을 받는다. 이는 어느정도 놀림이 발생한 케이블 시료는 더 이상 케이블 절연층 자체의 절연내력 감소에 의해 케이블의 전기적 성능이 감소되는 것이 아니라, 케이블 외부 반도전층의 놀림 형상에 따라 지배되는 것으로 보인다. 즉, 외부반도전층의 형상이 외도의 돌기 역할을 수행하여 케이블의 전기적 성능에 영향을 미치는 것으로 보인다. 3 종류의 XLPE 모델케이블 시트의 AC 파괴시험 결과가 이를 증명해 준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초고압 XLPE 케이블이 수송 및 포설 중에 외부로부터의 이상 충격에 의해 놀림이 발생했을 때 그 케이블의 전기적 특성을 예측하기 위해 행해졌고, 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) R형상 놀림 케이블 절연층의 AC 파괴강도는 놀림 하중에 따라 증가하지만, 일정한 하중에서 포화되고 정상 절연층에 비해 AC 파괴강도 기준으로 약 10~15% 정도 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) XLPE 모델케이블 시트를 통한 AC 파괴시험에서 놀림의 형상에 따라 파괴위치와 파괴강도가 달라지는 것을 확인 할 수 있었다.
- (3) 초고압 XLPE 케이블 절연층에 절연 두께의 10% 깊이로 예각놀림이 발생했을 경우 정상 케이블에 비해 약 60% 정도 전기적 특성이 저하될 것으로 예측되어진다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Mario Cacciari, G. Mazzanti, G. C. Montanari. "Weibull Statistics in Short-term Dielectric Breakdown of Thin Polyethylene Films". IEEE Trans. on DEI, Vol.1 No.1, p153-159, February 1994.
- [2] 한국전력공사 전력연구원, "송전케이블의 절연열화 진단 기법의 정립 및 수명예측에 관한 연구", 전력연구원 연구보고서, 중간보고서, p174-180, 1999.
- [3] Kuniharu IMAI, Takao SUZUKI et al., "Analysis of Tree Initiation with Weibull Distribution and the Influence of Various Factors". T. IEE Japan, Vol.120-A, No.5, p645-650, 2000.
- [4] E. David, J.-L. Parpal, J.-P. Crine, "Influence of Internal Mechanical Stress and Strain on Electrical Performance of Polyethylene", IEEE Trans. on DEI, Vol.3 No.2, p248-257, April 1996.