

## 배전 케이블의 절연체내 불순물이 전기전도도에 미치는 영향

10-5-5

### Effects of Metal Impurities in Insulation of Distribution Cables on Electrical Conduction of Distribution Cables.

이우선\*, 김남오\*, 정용호\*, 최재곤\*\*, 김형곤\*\*\*, 김상준&

(Woo-Sun Lee, Nam-Oh Kim, Yong-Ho Chung, Jae-Gon Choi, Hyung-Gon Kim, Sang-Joon Kim)

#### Abstract

Effects of metal impurities in insulation of distribution cables on electrical conduction of distribution cables was investigated.

Samples of Al, Cu, Fe are fabricated as metallic impurities, and measured electrical conductivity in the voltage range of 0~10 KV. Temperature dependent effect of hysteresis curves and the relationship between forward and reverse current due to impurity content are discussed.

**Key Word(중요용어)** : Cable(케이블), Impurity(불순물), Electrical Conductivity(전기전도도), Hysteresis(히스테리시스)

#### 1. 서 론

지중배전용 전력케이블은 가교 폴리에틸렌(XLPE)으로 절연되고 있고 반도체층을 사용하고 있으며 외피는 염화비닐수지(PVC)를 사용하고 있다. 이러한 구조는 생산 공정이 간단하여 경제적이거나 주 절연층이 전압, 수분 또는 기타요인에 의하여 열화되어 절연파괴되는 단점이 있다<sup>1,2)</sup>. 최근 확대 시공되고 있는 지중 배전선로는 22.9 kV 급으로 접지는 다중접지로서 CN-CV 케이블을 사용하고 있다. 지중 배전 케이블에 본격적으로 적용한 후 배전 케이블의 절연파괴 사고가 급증하기 시작하여 안정된 전력공급에 많은 문제점을 나타내고 있다.

가교 폴리에틸렌(XLPE) 케이블의 수명 진단방법에 관한 열화의 연구로서 직류누설전류 시험법과 직류전압 감쇠 시험법을 비교하고 현장 측정시

험으로 많이 사용되고 있다<sup>3,4)</sup>. 배전케이블의 절연체 내 불순물이 수명에 미치는 영향에 관한 지금까지의 연구동향을 보면 Al 불순물에 의한 HTPB의 전기 전도의 주파수 의존특성에 대하여 연구하였고<sup>1)</sup>, P-SiO<sub>2</sub> 유전구조의 전기전도도<sup>2)</sup>, MAH XLPE의 전기전도의 공간전하가 연구 되었는데 전압-전류 특성인 전기전도도 특성과 시간경과에 따른 전류변화 특성은 본 연구결과와 유사한 특성을 보였다.

고체절연으로 구성되는 XLPE 전력 케이블에 있어서 절연체질의 약점을 제거해서 노화의 근원이 되는 것을 어떻게 해결하는가가 고성능화의 핵심 해결책이다. XLPE케이블의 절연체중에 약점으로써 케이블의 전기성능을 저하시키는 큰 요인은 절연체와 내,외 반도체층간의 계면의 돌기, 절연체중의 Void, 절연체중의 이물질 등으로 볼 수 있다<sup>5,6)</sup>.

따라서 본 연구에서는 배전케이블의 절연체 내 불순물이 수명에 미치는 영향을 연구하기 위해서 첫째로 XLPE 절연체에 금속성 불순물인 Fe, Cu, Al을 첨가하여 핫 프레스를 이용하여 샘플시료를 제작하고자 하고, 둘째로 시료의 실험특성 측정장치를 이용하여 제작한 샘플의 불순물 함유량에 따른 전압 전류특성을 0kV~10kV 범위에서 측정하였고, 셋째로 전압상승에 따른 순방향과 역방향 전

\* : 조선대학교 공대 전기공학과

\*\* : 조선대학교 공대 고분자공학과

\*\*\* : 조선대학교 공업전문대학 전기과

& : 한국전력공사 전력연구원

접수일자 : 1997년 2월 2일

심사완료 : 1997년 6월 3일

류의 차이로 나타나는 히스테리시스 특성의 불순물 함유량 의존특성에 대하여 실험하고 분석 하고자 하였다.

## 2. 실험 및 실험결과

본 연구에서 사용한 샘플의 제작과정을 그림1에 나타낸다. 전력케이블 제작회사에서 사용하고 있는 전력케이블용 XLPE를 국내의 한 케이블 제작회사로부터 구입하여 금속성 불순물인 순도 99.99%의 Al, Cu, Fe를 XLPE에 대한 무게중량 1wt% (weight percentage)를 첨가 하였다. XLPE에 혼합된 Al, Cu, Fe 불순물의 최적의 혼합을 위해서 믹서 (mixer)를 사용하였는데 130℃에서 시료를 녹인 후 10분동안 100rpm의 저속으로 연속 회전 하여서 XLPE에 불순물 혼합 시료가 잘 혼합되도록 하였다. 2mm 두께의 시료 샘플을 제작하기 위해서 먼

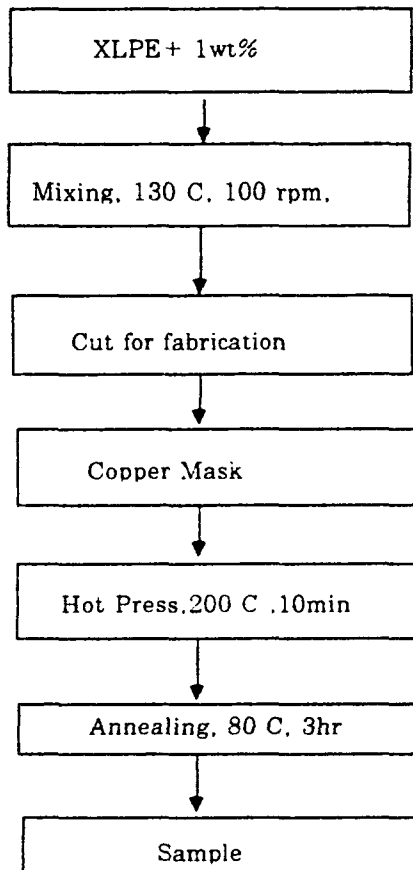


그림 1. 제작과정.

Fig. 1. Sample preparation process.

저 동판을 구입한 다음 펀치 (punch)로 직경 300mm 두께 2mm의 구멍을 뚫어서 200mm 간격으로 6개를 배치한 다음 샘플 제작을 위한 마스크 제작을 완료하였다. 핫 프레스 (Hot press)에 금속성 불순물이 혼합된 시료를 배치하고 마스크 (mask)를 이용하여 200℃에서 20분의 온도를 인가하여 샘플 (sample)을 제작하고 80℃에서 30분의 어닐링 (annealing)한 다음 시료제작을 완성하였다.

특성측정실험 장치의 개략도를 그림 2에 나타낸다. 제작된 직경 300mm 두께 2mm 샘플에 직경

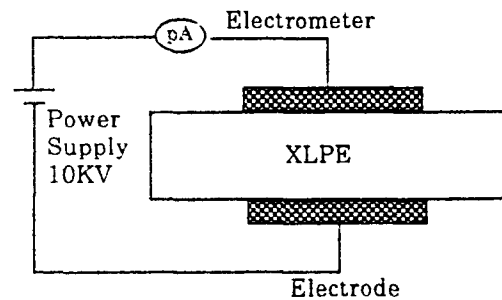


그림 2. 특성실험장치 셋업.

Fig. 2. Experimental set-up.

200mm의 카본블랙 (carbon black)이 들어있는 반도체 재료를 사용하여 Keithly 617 일렉트로미터 (electrometer)를 직렬로 연결하여 10 kV, 1sec/0.5kV의 전압을 인가하여 각 특성을 측정 하였다. 케이블 절연체 내에 금속성 불순물이 1wt% 혼합될 때 변하는 전압 전류 특성을 그림 3에 나타낸다. 인가전압이 0.5 kV~10 kV까지 증가 할 때 전류의 변화는  $1 \times 10^{10}$  (A)에서  $1 \times 10^3$  (A)까지의 변화를 나타냈으며 고압으로 전압이 상승 할수록

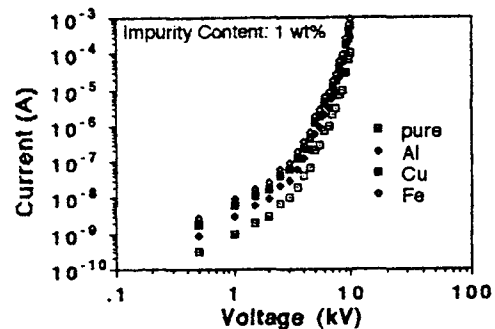


그림 3. 금속성 불순물 함유에 따른 전류의 변화.

Fig. 3. Current comparison by metallic impurities.

전류의 변화도 저압에서 보다 전류의 상승폭이 더 크게 변화 됨을 보여서 전압의 증가가 전류의 제곱에 비례하는 절연체에서 나타나는 전형적인 전압 전류 특성을 보였다. 금속성 불순물 첨가가 없을 때가 전류의 변화가 가장적었고 불순물이 첨가되었을 때는 Al-Cu-Fe의 순으로 전류의 양이 커짐을 보였으며 Fe가 1wt% 첨가 되었을 때가 전류 상승폭이 제일 크게 되었다. 금속성 불순물이 첨가되었을 때가 기존 시료보다 전류의 상승폭이 크게 된 이유는 금속성 불순물이 첨가되므로서 시료내에서 전압이 인가 되었을 때가 활성화 전자가 시료내에서 불순물로 작용하여 더욱더 활성화되기 때문으로 생각된다. 또한 Fe 첨가시 다른 금속성 불순물 보다 전류상승폭이 커지게된 이유는 Fe가 비교되는 다른 금속성 불순물 보다 도전율이 가장 크기 때문인 것으로 생각된다. 고압케이블의 절연체와 도체사이에 부분방전 억제와 전계완화를 위해서 카본블랙이 들어 있는 반도체층을 사용하였다.

따라서 제작된 시료에 카본블랙이 들어 있는 반도체층을 사용 했을 때와 그렇지 않을때의 전압 전류 특성을 그림 4에 나타낸다. 금속성 불순물이 없는 경우 직경 200mm 두께 1mm의 카본블랙이 들어 있는 반도체층을 사용 했을 때 전류는 더 많은 상승을 보였는데 그 이유는 전극을 사용하므로서 전극면적에 해당된 곳에 균등히 전계가 걸리고 전극면적에서 균등한 전류가 흐르게 되기 때문인 것으로 생각된다. Fe 불순물이 있는 경우가 불순물이 없는 경우보다 전압증가에 대한 전류의 상승폭이 적은 것은 불순물 첨가로 인하여 전압증가에 대한 전류의 포화가 발생하여 고압에서 포화가 더 증가되기 때문으로 생각된다. S. H. Lee et al<sup>3)</sup>의 그림6과 비슷한 특성인 전류상승폭의 감소를 보이고 있으나 문헌<sup>3)</sup>의 경우는 온도가 상승함에 따른 전류변화 특성이고 본 연구는 불순물 함유량에 따른 전류변화 특성이기 때문에 고압에서의 포화가 서로 다르게 된다고 생각된다.

카본블랙이 들어 있는 반도체층을 사용 했을 때와 그렇지 않을 때 나타나는 전류의 편차를 전압 0.5kV~10kV 범위에서 불순물이 Fe 1wt% 첨가되었을 때와 그렇지 않았을 때로 구분하여 그림 5에 나타낸다. 전압이 증가됨에 따른 전류의 편차는 고압에 접근 할수록 더 커짐을 보였고 Fe 1wt% 불순물이 첨가 되었을 때가 그림 4에서와 같은 이유로 전류 편차가 더 적게됨을 나타내었다.

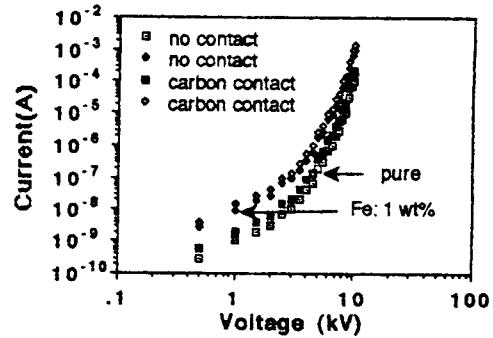


그림 4. 전극접촉에 따른 전류의 비교.  
Fig. 4. Current variation due to the electrode contact.

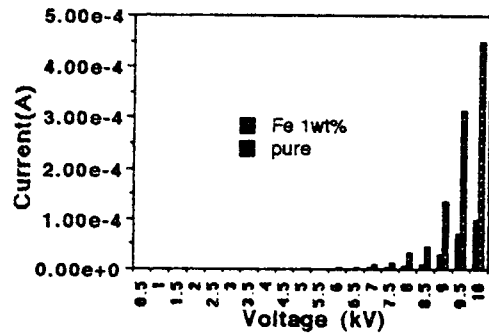


그림 5. 전극접촉에 따른 전류편차 비교.  
Fig. 5. Comparison of current variation by electrode contact.

그림 6 (a)는 불순물이 첨가되지 않은 XLPE에 전압을 상승시켰을 때와 감소 시켰을 때 변화하는 전류의 히스테리시스 특성의 로그-로그 프로트를 나타내고 그림 6 (b)에 선형적인 변화의 그래프를 나타낸다. 전압이 순방향으로 증가하면 전류도 증가하다가 다시 전류를 감소시키면 순방향시 전류보다도 더 증가된 전류가 감소하여 명백한 히스테리시스 현상을 보였다. 히스테리시스의 발생 원인은 전압인가로 인해서 절연체내의 전하가 축적되기 때문으로 생각된다.

Cu 불순물이 포함된 것과 그렇지 않은것의 로그-로그 프로트한 히스테리시스 특성을 그림 7에 나타낸다. 전압이 증가함에 따라서 히스테리시스 발생영역을 Cu 불순물이 포함된 것이 더 적게 나타났고 그렇지 않은 것이 더 크게 나타났는데 그 이유는 불순물이 포함이 되면 절연체내 불순물로 인한 전하 축적이 더 감소되기 때문으로 생각된다.

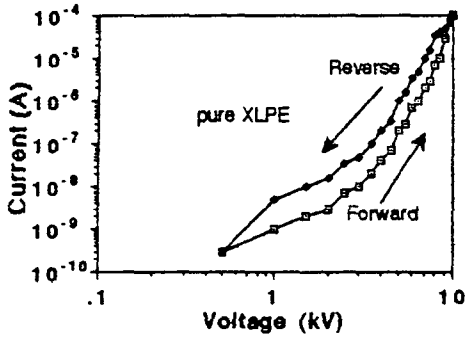


그림 6 (a). 히스테리시스의 발생, 로그-로그 플롯.

Fig. 6 (a). Hysteresis of XLPE, Log-Log plot.

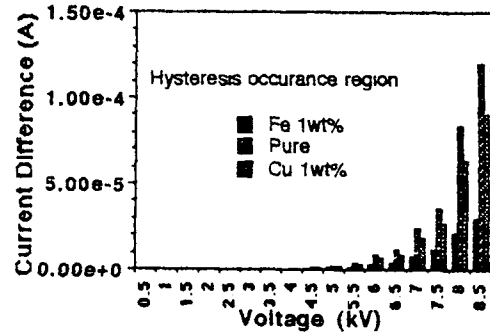


그림 8. 불순물 함유에 따른 히스테리시스 비교.

Fig. 8. Comparison of hysteresis by impurity content.

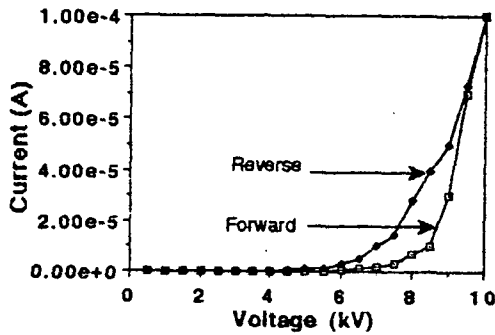


그림 6 (b). 히스테리시스의 발생, 리니어 플롯.

Fig. 6 (b). Hysteresis of XLPE, Linear plot.

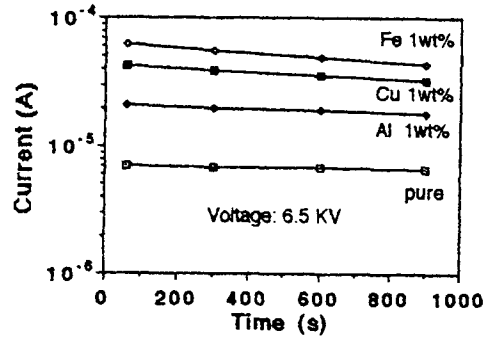


그림 9. XLPE 함유량에 따른 시간 대 전류변화 특성.

Fig. 9. Time vs. current plot for metal impurity-containing XLPE.

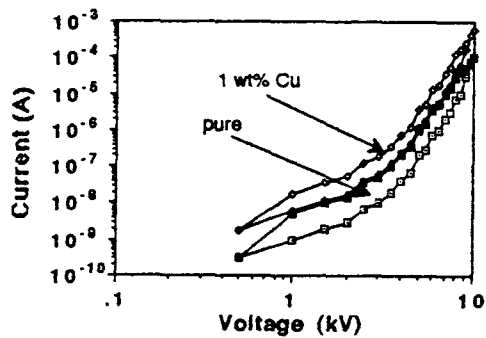


그림 7. 히스테리시스의 발생영역의 비교.

Fig. 7. Comparison of hysteresis area.

제작된 샘플의 전압증가로 인한 순방향 전류와 역방향 전류의 차이인 히스테리시스 발생영역을 Fe, Cu의 불순물을 첨가한 것과 그렇지 않은 것을 선형적으로 비교하여 그림 8에 나타낸다. 선형적인 비교시 7.5 kV 이상의 고압에서 히스테리시스 변화

가 크게 나타났으며 Fe wt1% → Cu 1wt% → pure 순서로 히스테리시스 변화가 크게 되는데 그 이유는 그림 6 (a)에서와 같은 이유인 절연체 전하축적이 많고 적음으로 생각된다.

전압을 6.5 kV로 일정히 인가하고 시간을 900 sec 까지 변화 하였을 때 나타나는 전류의 변화를 그림 9에 나타낸다. 시간의 증가에 따라서 전류는 약간의 감소를 나타냈으며 불순물 첨가 pure → Al → Cu → Fe 순으로 전류의 감소폭이 크게 되었다. 이와 같이 Fe의 경우 전류의 감소폭이 큰 이유는 절연체내에서 작용하는 Fe 불순물의 도전율이 비교하고 있는 Al이나 Cu보다 크기 때문에 전하축적의 감소를 가져 오게되기 때문 이라고 생각된다.

### 3 결 론

배전케이블의 절연체내 불순물이 전기전도도에 미치는 영향을 연구하기 위해서 핫 프레스를 이용하여 샘플시료를 제작하고, 특성 실험장치를 구성하여 특성측정 하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전압이 인가 되었을 때 활성화 전자가 시료내에서 더욱더 활성화되기 때문에 케이블 절연체내에 금속성 불순물이 1wt% 혼입 될 때 변화하는 전류 특성에서 인가전압이 0.5kV~10kV까지 증가 할 때 전류의 변화는  $1 \times 10^{-10}$  (A)에서  $1 \times 10^3$  (A)까지의 변화를 나타내어서 고압으로 전압이 상승 할수록 전류의 변화도 저압에서 보다 전류의 상승폭이 더 크게 변화 됨을 보였다.

2) 전극을 사용하므로써 전극면적에 해당된 곳에 균등히 전계가 걸리고 전극면적에서 균등한 전류가 흐르게 되기 때문에 제작된 시료에 카본블랙이 들어 있는 반도체층을 사용 했을 때와 그렇지 않을 때의 전압 전류 특성은 카본블랙이 들어 있는 반도체층을 사용 했을 때 전류는 더 많은 상승을 보였다.

3) 전압 0.5kV~10kV 범위에서 카본블랙이 들어 있는 반도체층을 사용 했을 때와 그렇지 않을 때 나타나는 전류의 편차는 전압이 증가됨에 따라서 전류의 편차는 고압에 접근 할수록 더 커짐을 보였다.

4) 절연체내의 전하 축적으로 인하여 전압이 순방향으로 증가하면 전류도 증가 하다가 다시 전류를 감소시키면 순방향시 전류 보다도 더 증가된 전류가 감소하여 명백한 히스테리시스 현상을 보였다.

5) Fe불순물이 포함된 것과 그렇지 않은것의 로그-로그 프로트한 히스테리시스 특성발생 영역은 Fe불순물이 포함된 것이 더 적게 나타났고 그렇지 않은 것이 더 크게 나타 났다.

6) 도전율의 차이로 인하여 전압을 6.5kV로 일정히 인가하고 시간을 900 sec 까지 변화 하였을 때 나타나는 전류의 변화는 시간의 증가에 따라서 전류는 약간의 감소를 나타냈다.

※ 본 연구는 1996년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행 되었음. (과제번호 96-지-11)

### 참고문헌

1. W. Yeh and P. Budenstein, "Electrical conduction at low fields of composities sparsely filleded with aluminium particles, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 1, pp. 84-96, 1995.
2. A. Lian, L. Martinu and M. R. Wertheimer, "Electrical conduction in double layer P-SiO<sub>2</sub>/Polymer dielectric structure", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No.1, pp. 62-73, 1995.
3. S. H. Lee, J. K. Park, J. H. Han and K. S. Suh, "Space charge and electrical conduction in maleic anhydride grafted polyethylene", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 6, pp. 1132-1139, 1995.
4. E. J. Kim, T. Takeda and Y. Ohki, "Origins of thermally stimulated current in polyethersulfone", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 3, pp. 386-391, 1996.
5. M. Nagao, M. Kosaki, K. Tohyama and T. Tokoro, " High field dissipation current waveform in e-beam irradiated XLPE film at high temperature" IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 3, pp. 375-379, 1996.
6. F. C. Cheng, "Insulation thickness determination of polymeric power cables", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 4, pp. 624-629, 1994.

저자소개



이우선

1952년 1월 23일생. 1994년 조선대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 중앙대학교 대학원 전기공학과(공학). 1982년-83년 Univ. of Massachusetts 문교부 파견교수. 1989년-90년 Purdue Univ. 과학재단 파견 포스트닥터. 1992년 7월-8월 일본 동경공업대학 객원교수. 현재 조선대학교 공대 전기공학과 교수. 당 학회 평의원. 재무이사.



최재곤

1982년 2월 조선대 공대 화학공학과 졸업. 1989년 2월 조선대 대학원 화학공학과(공학). 1993년 9월-1995년 8월 미국 메사추세츠 주립대학 고분자공학과 박사후과정. 1997년 현재 조선대 고분자공학과 조교수.



김남오

1967년 2월 9일생. 1994년 조선대학교 전기공학과 졸업. 1996년 조선대학교 전기공학과 석사. 1996년 동 대학교 전기공학과 박사과정.



김형곤

1950년 2월 5일생. 1974년 조선대 물리학과 졸업. 1978년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1989년 전남대 대학원 물리학과 졸업(이박). 현재 조선대학교 공업전문대학 전기과 교수.



정용호

1967년 6월 30일생. 1991년 조선대학교 공대 전기공학과 졸업. 1991년-현재 조선대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 서광전문대 전임강사.



김상준

1951년 2월 7일생. 1986년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1987년 발송배전기술사. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1976년-현재 한전 전력연구원 배전자동화그룹장/책임연구원. 관심분야: 전력케이블, 전기재료, 전기화재, 전기안전.