

반도전층내 불순물이 전력케이블의 신뢰도에 미치는 영향

원재용, 김상준, 권오현, 강희태, 서광석
(*전력연구원 선임연구원, **전력연구원 책임연구원, ***한국전력 연구원 배전주임교수, 한국전력 중남지사 배전계획부장, §§고려대 재료공학과 교수)

요약문

본 고는 전력연구원 연구과제인 “배전케이블 수명에측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축”의 연구 수행 중 전력케이블의 반도전층내에 들어 있는 불순물 또는 외부로부터 침투된 불순물이 전력케이블의 수명에 미치는 영향에 관한 총설로서, 그 동안 문헌조사 및 해외출장을 통하여 수집한 자료를 정리한 원고이다.

본 총설은 전력케이블에 사용되는 반도전층 재료의 변천, 반도전층의 역할 및 반도전층내에 들어 있는 불순물의 역할 등에 관한 내용이 정리되어 있다. 본 고를 통하여 반도전층내에 들어 있는 불순물은 전력케이블의 수명에 심각한 영향을 미칠 수 있다는 점을 강조하여 국내 지중배전 케이블에서도 불순물이 제거된 반도전 컴파운드를 사용해야 한다는 점을 강조하였다.

최근 반도전 재료의 개선을 통하여 전력케이블의 성능을 크게 개선시킬 수 있다는 연구결과 및 실용화 연구가 이루어지고 있는데, 이 새로운 개선방법은 반도전층으로부터 불순물을 제거한다는 단순한 방법이 아니라 반도전층을 이루는 반도전 컴파운드의 조성을 변화시키는 방법이다. 이는 단순히 전도성 카본블랙의 종류만을 바꾸는 것이 아니라 반도전 컴파운드에 사용하는 고분자 수지를 개질하거나 또는 일정 종류의 첨가제를 첨가하는 방법으로서, 본 고에서는 이들 방법에 대하여 간략하게 소개하였다.

이와 같은 고찰을 통하여 본 고에서는 전력케이블에 있어서 절연재료에 관한 연구도 물론 중요하지만 반도전층도 매우 중요한 역할을 하며, 나아가서 전력케이블의 성능을 현저히 향상시키기 위해서는 절연재료 뿐만 아니라 반도전층 재료에 관한 연구도 필요하다는 점을 강조하고자 한다.

본 고를 통하여 전력케이블에서의 반도전층의 역할 및 중요성에 관하여 좀 더 정확하게 인식되었으면 한다.

* 전반부 학회지 1월호에 이어 후반부가 게재되었습니다. *

4. 이온성 불순물과 케이블의 성능

4.1 서론

원하는 목적에 의해서 첨가된 첨가제가 아닌 경우 거의 모든 불순물은 케이블의 성능에 나쁜 영향을 미친다. 원하는 목적에 의해 첨가된 경우에도 일정 함량을 넘으면 해를 끼칠수 있다는 보고는 여러 군데에서 볼 수 있다. 마찬가지로 불순물은 이온성 여부에 상관없이 케이블의 수명에 나쁜 영향을 미친다. 이온성 불순물의 경우 이온이 전기장 내에서 더욱 가속될 수 있기 때문에 중성의 불순물보다 더 나쁜 영향을 미칠 수 있다.

그림 7에 지중케이블에 존재할 수 있는 금속성의 이온 불순물과 그들이 열화에 미치는 영향을 개략적으로 나타내었다. 그림에 보인 바와 같이 금속성 불순물이 케이블의 절연성능에 미치는 영향은 다음과 같이 분류될 수 있다.

- (1) 영향받는 지점별 분류:
 - 차폐층/절연층간 계면성질
 - 절연체 내부 성질
- (2) 영향받는 대상 성질별 분류:
 - 트리특성 (수트리/전기트리)
 - 절연과피 특성
 - 절연체의 산화열화

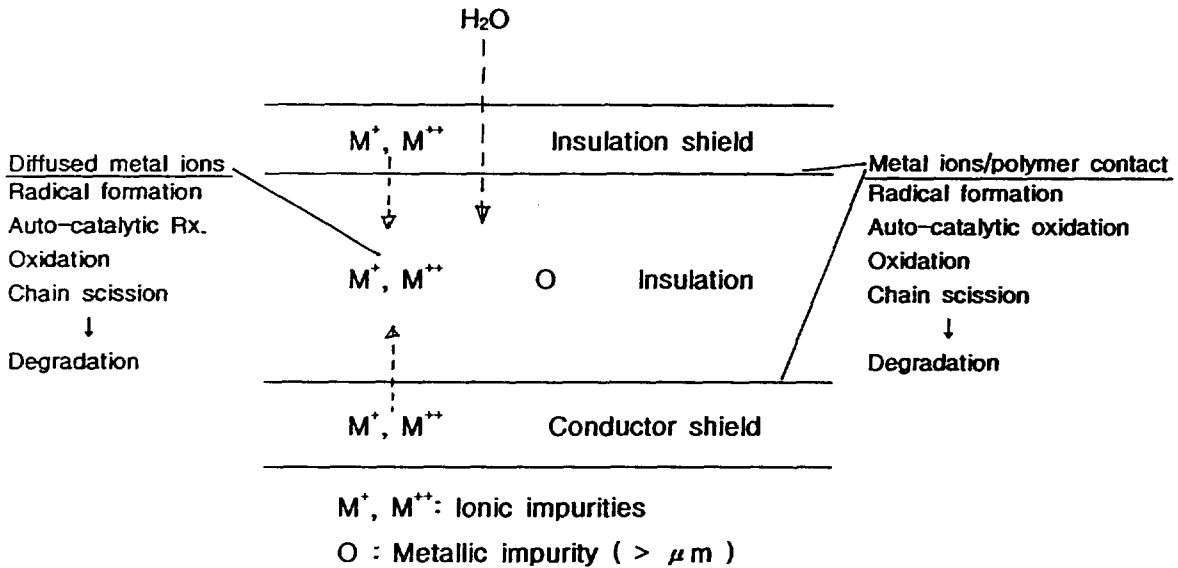


Fig 7. Schematic representation of the effect of metallic impurities on power cables

이들 중에서 금속성 불순물이 트리특성 및 절연과괴 특성에 미치는 영향은 비교적 많은 연구가 이루어졌으나 산화반응에 의한 절연체의 약화는 잘 안 알려져 있다.

4.2 수트리 특성

금속성 또는 이온성 불순물이 XLPE의 수트리 밀도와 길이에 큰 영향을 미친다는 연구결과는 많이 있는데, 대부분의 결과는 불순물의 함량이 많을수록 반도체/절연층 계면에서 발생하는 vented tree의 밀도와 길이가 크다는 것을 보여 준다.

불순물의 함량과 수트리 특성간의 관계를 보여 주는 결과가 표 7과 그림 8에 나와 있다 [25, 33]. 먼저 표 7은 카본 블랙에 들어 있는 불순물의 종류와 함량을 보여 주고 그림 8은 이들 카본 블랙을 사용하여 제조한 시료의 반도체/절연층 계면에서 발생한 수트리 특성을 조사한 결과이다. 여기에서 카본블랙 A는 불순물 함량이 다르도록 제조된 furnace black이고 B는 acetylene black을 말한다.

그림 8은 불순물 함량이 높은 A 시료와 불순물 함량이 적은 B 시료를 사용한 시료에 대하여 3,500 및 7,000 시간 가속 열화 후 반도체/절연층 계면에서 측정된 vented tree의 길이별 분포를 보여 준다. 그림에서 보듯이 불순물 함량이 낮은 B 시료는 불순물 함량이 높은 A 시료보다 수트리 밀도와 길이가 월등히 낮다.

표 7에 이들 시료에 대한 3,500 및 7,000 시간 가속열화후 측정된 수트리 특성 결과가 나와 있다. 이들 결과를 비교하면 다음과 같은 특징을 알 수 있다.

Table 7. Test results on water treeing characteristics in various carbon blacks

Ionic impurities in test carbon blacks							
	Ions (ppm)						
	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
A	2234	330	119	333	78	965	150
B	25	8	66	8	4	20	6
C	75	23	15	34	17	121	26

Tree characteristics in aged samples

	Aging time, h	Total trees	Max tree length, mm	Max predicted length, mm
A	3,500	668	0.17	-
B		11	0.07	-
C		297	0.11	-
A	7,000	621	0.25	0.37
B		23	0.31	0.33
C		418	0.20	0.22

(1) 3,500 시간 가속시험 결과를 보면 불순물 함량과 수트리 특성 (밀도/길이)과의 연관성이 작으나, 7,000 시간 가속시험시 불순물 함량이 높으면 수트리 밀도가 높은 것으로 관찰된 반면 최대 수트리 길이는 이들 불순물 함량과는 상관없다.

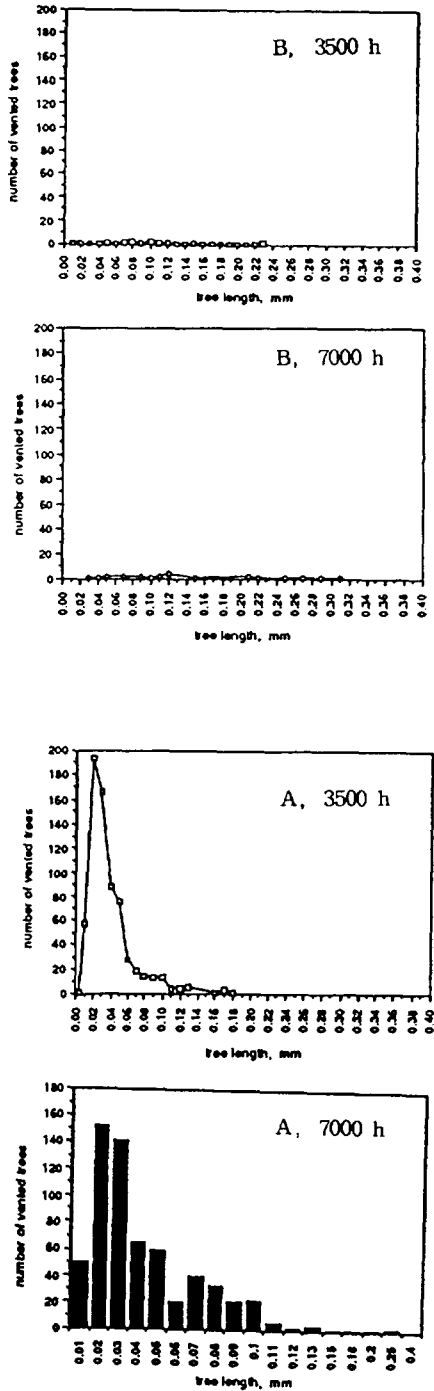


Fig 8. Vented water tree length distribution of compound B and A at 3500 and 7000 h aging: Concentration of contamination is in Table 7

(2) Acetylene black이 furnace black에 비하여 불순물 함량이 월등히 낮고 또한 수트리 밀도 및 길이가 작다. 그러

나 acetylene black도 종류에 따라 불순물 함량이 상대적으로 높은 종류도 있으며 수트리 밀도가 clean furnace black 보다 많을수도 있다.

그림 9에 silicon, sodium, sulfate 및 calcium 성분의 함량에 따른 수트리 밀도가 나와 있는데, 모든 성분에 있어서 함량이 200 ppm 이상인 경우 수트리 밀도가 급증하는 것으로 나타났다 [33]. 이 연구결과를 보면 반도체 재료내에 들어 있는 불순물의 최대 함량을 약 200 ppm 이하로 억제하면 절연재료의 수트리 특성에 미치는 불순물의 영향을 상당량 억제할 수 있을 것으로 생각 된다.

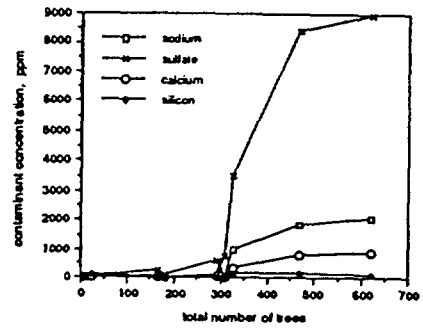


Fig 9. Relationship between contamination versus total number of trees

반도체 컴파운드에 사용되는 계면활성제도 수트리 특성에 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있는데, 그 결과가 그림 10에 나와 있다 [34]. 이 그림은 이온성 계면활성제가 비이온성 계면활성제에 비하여 월등히 많은 vented tree를 발생시킴을 보여 준다.

위 결과에서 acetylene black과 furnace black의 성능비교는 매우 흥미로운 결과인데, 일반적으로는 furnace black은 불순물 함량이 acetylene black에 비하여 월등히 높은 것으로 알려져 있고 실제로 송전급 전력케이블의 반도체 컴파운드는 acetylene black을 사용한다. 최근 furnace black에 들어 있는 불순물을 제거하기 위한 노력이 많이 진행되어 현재는 acetylene black에 근접하는 함량의 불순물만을 포함하는 furnace black이 개발되어 시판되고 있다. 이들 두 카본 블랙의 효과에 대한 연구결과가 표 8과 9에 나와 있다 [35].

표 8과 9를 보면 최근 개발된 깨끗한 furnace black의 경우 acetylene black과 비슷한 수준의 수트리 특성을 보임을 알 수 있다. 가공성 면에서 보면 깨끗한 furnace black의 경우 acetylene black에 비하여 용융점도가 낮는데, 이로부터 가공성 면에서 보면 furnace black이 acetylene black 보다 낮은 점성을 보여 가공성이 우수함을 알 수 있다. 앞서서도 언급한 바와 같이 가공성의 용이함은 결국 압출이 쉽다는 것을 의미하고 이는 결국 케이블의 결합발생 가능성이 적다는 것을 의미하기도 한다.

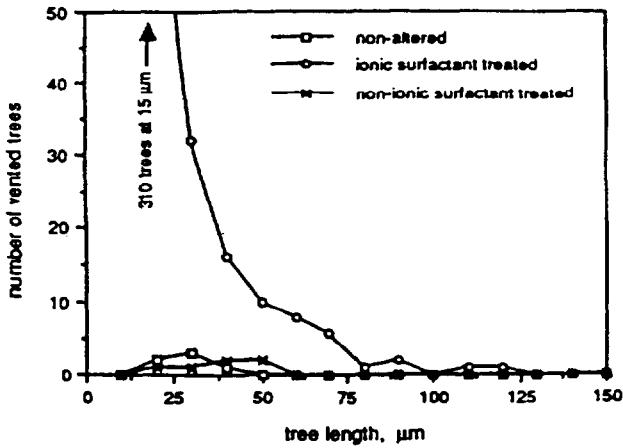


Fig 10. Influence of ionic and non-ionic surfactants on the number of vented water tree after 7000 h of aging

Table 8. Processability with various carbon blacks

Carbon Black Type	Loading g (%)	Volume Resistivity ¹		MPT ² Viscosity ³ y	Tape Quality	
		RT	90°C		Rate ⁴ 8 → 1	B, G ⁴ a → g
Clean furnace black						
A1	41.0	12.7	2724	3764	6	a
A2	42.2	5.9	117.5	4109	8	a
A3	41.6	6.4	224.5	4074	8	a
A4	43.3	4.7	400.9	4838	6	a
Conventional furnace black						
B1	36.1	20.4	2383.7	2978	3	c
B2	36.2	23.3	1806.1	2917	3	b
B3	36.5	31.6	6667.1	2803	4	c
Acetylene Black						
C1	37.3	65.1	4262.3	4934	8	a
C2	37.9	72.2	1718.1	4873	8	a
C3	34.4	198.1	67184.0	3886	7	c

¹ ohm · cm, ² Pa.R
³ tape rating: 8=excellent/1=mediocre dispersion @45X
⁴ Background: a=very smooth/g=very rough surface @ 45X

반도전 재료에 들어 있는 불순물의 영향 고찰시 중요한 것은 반도전 재료, 즉 카본블랙에 들어 있는 불순물들은 불순물 자체로서도 중요하지만 이들 불순물들이 가공성에 영향을 미친다는 사실이다. 즉 불순물이 많을 경우 카본블랙의 분산을 해치는데 이럴 경우 반도전/절연층 계면에 돌출물을 만들 가능성이 매우 높다. 카본블랙의 분산을 돕기 위하여 가공조제를 첨가할 수 있으나 이 가공조제가 또 다시 영향

Table 9. Treeing characteristics with various carbon blacks

Carbon black type	Aging time (h)	Total tree 0.75 cu. inch	Longest vented water tree (mm)
Conventional furnace black	3500	214	0.20
Clean furnace black		11	0.10
Acetylene black		9	0.07
Conventional furnace black	7000	310	0.33
Clean furnace black		23	0.18
Acetylene black		40	0.14

을 미치므로 되도록 가공조제를 사용하지 않으면서 가공성을 높일 수 있는 방법을 모색해야 한다.

전술한 결과들을 종합하면 반도전 컴파운드에 들어 있는 불순물들은 케이블 절연재료에서 수트리 밀도를 증가시키는 역할을 하는데, 이때 이온성 불순물이 더욱 심각한 영향

Table 10. Suggested contamination levels for super smooth and extra clean semi-conductive shields

Contaminant	(ppm)
Sulfur	<20
Cations	
Aluminum	<1
Calcium	<1
Copper	<1
Iron	<2
Magnesium	<1
Phosphorous	<1
Potassium	<1
Sodium	<5
Silicon	<5
Zinc	<1
Cations measured with ICP-AES on ashed materials	

를 미친다. 이러한 결과들은 결국 케이블의 반도전층 내에 이온성 불순물이 있을 경우 케이블의 수명을 단축시키는 역할을 할 것이다. 참고로 표 10과 11은 IEEE의 ICC WG 6-24가 제안한 반도전층의 불순물 및 표면결함에 대한 제한치이다 [15].

Table 11. Suggested requirements for super smooth and extra clean semiconductive shields: surface imperfections

Measure imperfection diameter with a microscope at 200x Inspect 1/2 m ² of extruded tape.	
Suggested quality limits:	
> 500 micron diameter	0 per m ²
250-500 micron diameter	3 max. per m ²
125-250 micron diameter	200 max. per m ²
Surface Excellence Evaluation Device (SEED):	
Measure protrusion height on 1 m ² of extruded tape at the high sensitivity setting	
Suggested quality limits:	
40 micron height or greater	0 per m ²
30 micron height	8 max. per m ²
20 micron height	200 max. per m ²

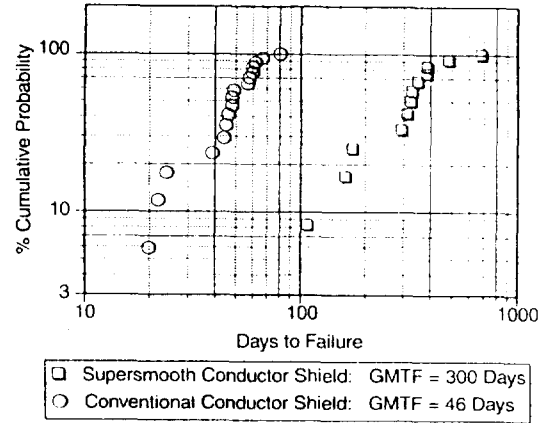


Fig 11. Accelerated cable life time (ACLT) test results for XLPE cables with super smooth/extra clean versus conventional conductor shields.

4.3 절연과피 특성

전력케이블의 절연과피 특성에 미치는 반도체층 내에 있는 이온성 불순물만의 영향에 관한 연구결과는 거의 없다. 반도체 재료의 영향에 관한 대부분의 연구결과는 계면평활도 (interface smoothness)와 불순물 함량 (cleanness)를 동시에 고려한 연구결과는 어느 정도 있다. 비록 제한적이기는 하지만 기존에 발표된 연구결과를 비교하면, 이온성 불순물은 케이블 절연재료의 절연과피강도를 저하시키는 것으로 보인다.

Super-smooth/super-clean 반도체 재료와 기존에 사용하던 반도체 재료와의 성능이 표 12와 그림 11에 나와 있다 [15, 18, 36, 37]. 먼저 표 12를 보면 super-smooth/super-clean 반도체 컴파운드를 사용할 경우 기존 반도체 컴파운드를 사용한 경우보다 충격과피전압이 높다는 것을 알 수 있다.

Table 12. Impulse breakdown strength (kV): super smooth versus conventional conductor shields

	Super smooth	Conventional
Unaged:		
Test at 130°C	540, 565	385, 385
Aged 14 Cycles, Dry:		
Test at 130°C	465, 540	275, 275
TR XLPE Insulation		

그림 11은 위 두 반도체 재료의 과피특성을 비교한 결과인데, 이 결과에서도 super-smooth/super-clean 반도체 재료를

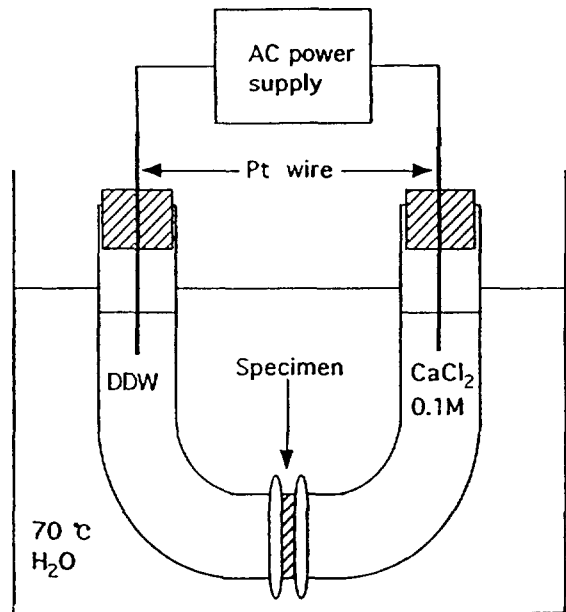


Fig 12. Experimental apparatus for the effect of ions on AC breakdown strength

사용할 경우 과피특성이 더 좋다는 것을 알 수 있다. 이들 결과는 도체차폐층 재료로서의 성능을 비교한 결과이다.

위 두 연구는 평활도와 불순물을 동시에 고려한 연구이므로 불순물만의 영향이라고 하기에는 무리가 있다. 따라서 현재 본 연구팀에서는 순수한 불순물만의 영향을 알아보기 위하여 XLPE 필름을 제작한 후 이를 두 개의 유리관 사이에 놓고 밀봉한 다음 양쪽에 수전극을 형성하여 절연과피 시험을 실시하고 있다 [38, 그림 12]. 현재 사고난 케이블의 내·외부가 모두 물로 가득 차 있는 국내의 현실을 감안할

때 단순히 금속전극을 사용하거나 반도체 전극만을 사용했을 때 얻은 실험결과 보다는 실제 케이블의 상황을 보다 정확하게 모사한 방법이라고 할 수 있다.

지금까지 얻은 실험결과가 표 13에 정리되어 있다. 증류수와 탈이온 증류수를 비교하면 증류수를 사용할 때의 파괴강도가 탈이온 증류수를 사용할 때의 절연파괴강도보다 높으며 0.1M CaCl₂ 수용액을 사용할 경우 절연파괴강도가 가장 낮은 것으로 밝혀 졌다. 또한 시료가 두꺼워지면 절연 파괴전압은 증가하지만 절연파괴강도는 감소하는데, 이는 일반적으로 관찰되는 현상이다. 지금까지의 결과를 보면 이온이 있는 경우 XLPE 시료의 절연파괴강도는 급격히 저하된다. 이 실험은 수전극을 사용한 연구결과이지만 반도체층을 사용할 경우 반도체층 내에 불순물이 많으면 마찬가지로의 결과를 얻을 수 있을 것으로 예측 된다. 이들 결과로부터 다음과 같은 사실을 유추할 수 있다.

Table 13. Effects of ions on AC breakdown strength of XLPE

	Thickness (μm)	BDV (kV)	BDS (kV/cm)
Distilled water	100	7	70
	130	7.5	57.7
	180	8	44.4
Deionized distilled water (DDW)	110	6.5	59.1
	120	8	67
	180	9.5	52.7
	200	8.5	42.5
	290	9	31
	320	9.5	29.9
0.1 M CaCl ₂ in DDW	130	4	30.8
	140	4	28.6
	180	4.5	25
	200	4.5	22.5
	270	5	18.5
	320	5.5	17.2

(1) 증류수와 탈이온 증류수를 사용할 때의 절연파괴강도가 XLPE의 진성파괴강도인 100-200 kV/mm 보다 월등히 낮다는 것은 수분이 절연파괴강도에 큰 영향을 미쳤음을 의미하며,

(2) 0.1M CaCl₂ 수용액을 사용할 경우 증류수나 탈이온 증류수 보다 절연파괴강도가 낮다는 것은 이온이 XLPE의

절연과피 특성을 저하시키는 요인으로 작용함을 의미하고,

(3) 증류수와 탈이온 증류수를 사용할 경우의 절연과피전압이 거의 비슷하다는 것은 이온의 농도가 어느 정도 함량 이하면 절연과피 특성에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 의미한다. 이는 불순물 함량이 약 200 ppm 이상일 때 수트리 밀도가 급증한다는 연구결과와 매우 일치한다.

이상에서 언급한 바와 같이 반도체층에 포함되어 있는 불순물은 절연체의 절연과피 특성을 저하시키는 주요한 요인 중의 하나임을 알 수 있다.

4.4 절연체 산화열화

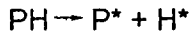
금속성 불순물 또는 이온성 불순물에 의하여 절연체 또는 반도체층/절연층 계면이 극심하게 산화될 가능성이 높다는 것은 앞서서도 언급한 바 있다.

전력케이블의 절연층에 사용되는 폴리에틸렌에서 산화가 일어나려면 높은 온도와 주변 산소 또는 molecular level 산소가 있어야 하며, 산화가 일어나면 카보닐기 (carbonyl group)가 도입된다 [39]. 폴리에틸렌내에서 약간의 산화는 케이블 특성에 큰 영향을 주지 못하며, 실제로 약간의 산화는 폴리에틸렌 사슬에 극성기 (polar group)를 제공하여 낮은 온도에서는 저밀도 폴리에틸렌의 절연파괴강도를 증가시킬 수 있으며, 상황에 따라 전하의 호핑자리로 작용하거나 또는 트랩자리로 작용하는 것으로 알려져 있다 [36-39]. 그러나 산화반응의 정도가 심할 경우에는 고분자의 사슬절단 (chain scission)이 일어나 고분자의 분자량이 감소되고 이 중절합과 수분이 생성되어 열화가 촉진된다 [40].

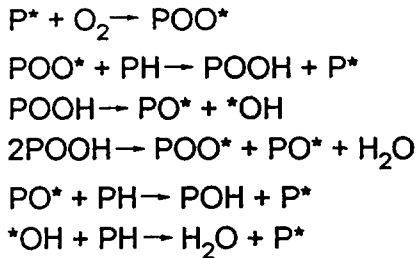
그림 13은 올레핀계 고분자에서 생기는 일반적인 산화반응을 보여준다 [6]. 이 그림을 보면 알 수 있듯이 고분자를 산화시키는 직접적인 요인은 산소, 라디칼 (radicals) 및 과산화물 (peroxides)의 존재 유무이다. 산화반응은 일반적인 경우에 열적 산화만을 고려하지만 재료가 사용되는 환경에 따라 복합적인 요인이 작용하는 것이 대부분이다. 전술한 바와 같이, 라디칼과 과산화물을 발생시킬 수 있는 모든 요인은 산화반응을 유발한다. 예를 들면 단순한 열적 요인에 의한 산화 외에 고분자가 금속표면, 특히 구리나 철 등과 접촉하면 산화가 급속히 가속된다. 또한 태양광에 장시간 노출되면 자외선 등의 영향으로 인하여 산화가 일어나기도 한다. 이외에도 electron beam 또는 microwave 등의 전자기과도 고분자 내에서 라디칼을 발생하므로 산화반응을 유발한다. 비록 이와 같은 산화과정 외에도 가공중 산화가 발생할 수도 있으므로 고분자의 경우 예외없이 산화방지제를 사용한다.

고분자의 산화반응에 의한 열화를 억제하기 위하여 산화방지제 (antioxidant)를 사용한다. 산화방지는 산화반응에 의하여 발생하는 각종의 라디칼과 과산화물 (hydroperoxide)을 반응성이 없거나 또는 반응성이 매우 약한 상태로 만들어 주고 산화방지제 자신은 안정화되는 과정을 말한다. 산화방지제는 1차 (primary) 산화방지제와 2차 (secondary) 산화방지제로 구분된다[6]. 1차 산화방지제는 외적 요인 또는

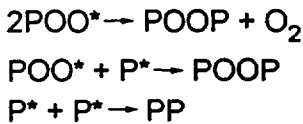
Initiation



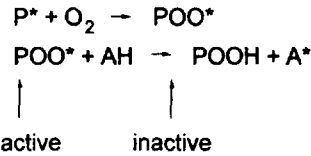
Propagation



Termination



Primary A/O: chain terminating radical scavenger



A: stabilization by resonance structure

Secondary A/O: hydroperoxide decomposer

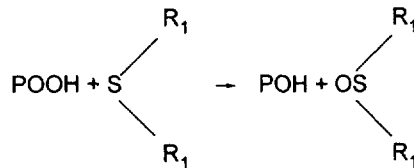
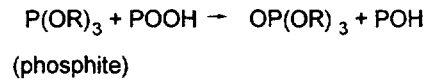


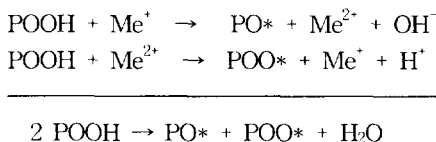
Fig 14. Role of antioxidants

Fig 13. Mechanism of oxidative degradation in polyolefins

사슬절단으로 생긴 반응성이 강한 라디칼을 비활성화시키는, 즉 라디칼을 제거하는 역할을 하며, 2차 산화방지제는 과산화물 (hydroperoxide)를 분해하여 비활성의 다른 화합물로 만드는 역할을 한다. 2차 산화방지제는 주로 상승효과 (synergistic effect)를 위하여 1차 산화방지제와 함께 사용하는 것이 일반적이다.

대표적인 산화방지 반응이 그림 14에 나와 있으며 표 14는 XLPE에 많이 사용되는 산화방지제의 종류이다 [6]. 산화방지제 사용할 때 주의할 사항은 고분자와의 상용성, blooming 현상, 전기적 특성에의 영향을 고려하여 사용해야 한다.

무엇보다도 중요한 사실은 고분자 절연체인 폴리에틸렌 내에 금속성 불순물이 존재하면 아래의 화학식처럼 산화과정의 하나인 hydroperoxide의 분해를 급속히 촉진시킨다는 것이다[6].



금속이온이 고분자와 반응하면서 전자상태가 변하게 되므로 전자의 이동이 생겨 고분자사슬을 취약하게 하고 열화를 가속시킨다. 이와 같이 2가 또는 3가의 이온상태로 전

이를 할 수 있는 Fe, Co, Mn, Cu 등이 문제가 되는 금속성 불순물이다.

금속성 불순물에 의한 산화를 억제하기 위하여 metal deactivator를 사용하기도 하는데 산화방지제와는 달리 반응성이 강한 금속이온을 반응성이 없는 소위 complex의 형태로 만들어 주는 작용을 한다. Metal complex가 형성되는 과정이 고분자에서 chelating하는 과정과 매우 유사한데, 이렇게 만들어진 complex는 열안정성이 매우 높다. 그림 15는 구리원자가 metal deactivator에 의해 complex를 형성한 예이다. 표 15는 저밀도 폴리에틸렌의 열산화에 대한 구리의 영향을 시험한 결과로서, 알루미늄보다는 구리가 산화반응을 더욱 크게 영향을 미치며 metal deactivator의 종류에 따라 산화방지 효과가 다를 수 있다.

5. 기능성 반도체 재료

전술한 바와 같이, 반도체층 재료에 들어 있는 불순물의 함량을 줄이고 고분자 수지와와의 가공성을 향상시킴으로서 계면평활도를 높이고 불순물의 영향을 줄임으로서 결국 전력케이블의 신뢰도를 높인다는 것은 매우 중요한 일이다. 그러나 이는 지금까지 밝혀진 단점을 보완하는 정도로서 적극적인 성능개선 방법이라고는 할 수 없을 것이다.

그러나 기존의 방법과는 달리 보다 적극적인 방법으로 반도체 재료를 개량하여 전력케이블의 성능개선을 위한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구는 주로 반도체 재료의 성분을 변화시킴으로서 전체적으로는 전력케이블의

Table 14. Antioxidants for XLPE-insulated power cables

Name	Structure
Santnox R (2,2' thioldiethyl-bis-(3-3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenol) propionate)	
Irganox 1035 (2,2' thioldiethyl-bis-(3-(3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenol) propionate)	
DSTD (distearyl thiodipropionate)	$[\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_{17} - \text{O} - \text{C}(=\text{O}) - (\text{CH}_2)_2]_2 \text{S}$
DLDP (dilauryl thiodipropionate)	$[(\text{C}_{12}\text{H}_{25}) - \text{O} - \text{C}(=\text{O}) - (\text{CH}_2)_2]_2 \text{S}$

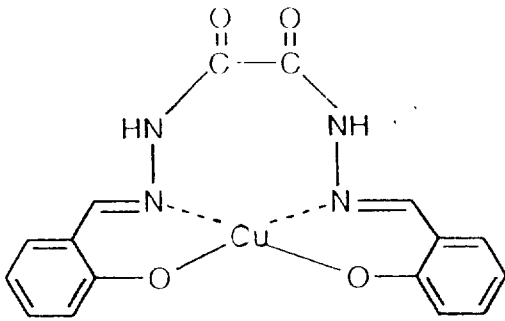


Fig 15. Metal complex formed by metal deactivator

성능을 개선한다는 개념이다. 이는 반도체층이 단순히 전극 역할만을 수행한다는 기존의 개념을 깨뜨리는 것으로 이 방법을 잘 이용하면 기존 케이블 보다 성능이 월등히 우수한 케이블 개발이 가능할 것으로 기대 된다. 따라서 본 절에서는 지금까지 이루어진 반도체층 또는 반도체 재료에 관한 연구결과를 소개하고자 한다.

반도체 재료에 일정 첨가제를 혼합하여 케이블의 성능을 개선시킨다는 원리는 다음과 같다. 일반적으로 절연층 내에 첨가제가 있으면 이들 첨가제가 대부분 저분자량 분자이기 때문에 사용도중 발생하는 열과 첨가제의 부분압 때문에 절연층 표면을 통하여 소모된다. 이를 소위 blooming 현상이라고 하는데, 이 blooming 현상에 의하여 절연층에서의 첨가제의 분포는 그림 16에 나와 있는 바와 같이 반도체층/절연층 계면에서의 농도가 절연층 내부에서의 농도보다 월등히 낮다. 이와 같이 계면에서 첨가제가 소모되어 농도가 낮아진다는 것은 첨가제를 혼합한 목적이 달성되지 못하며 결국 그 지점으로부터 문제가 발생한다. 절연층 내에 들어 있는 첨가제는 종류를 막론하고 동일한 현상을 보이므로 절연층 내에 혼합되는 첨가제의 함량조절로는 이러

Table 15. Influence of copper on thermal oxidative degradation of LDPE. Effect of copper deactivators in LDPE

Influence of copper on thermal oxidative degradation of LDPE

Test method	Oven aging life at 150°C (hours)
copper dish method	150
Aluminum dish method	540

Antioxidant: 0.1 phr

Effect of copper deactivator in LDPE

Copper deactivator	Chemical structure	Oven aging life at 150°C (hours)
Phthalyl dihydrazide		230
Isophthalyl dihydrazide		460
Terephthalyl dihydrazide		170

Antioxidant: 0.1 phr, Copper deactivator: 0.1 phr

한 현상을 억제할수 없다.

반면에 반도체층에 들어 있는 첨가제 또는 성분은 시간이 지남에 따라 절연층으로 확산되는데, 반도체층 내에 첨가제가 혼합될 경우 시간이 지남에 따라 보이는 첨가제 농도의 변화는 그림 16에 있는 바와 같이 반도체층/절연층 계면에서 높고 절연층 내부로 갈수록 낮아지는 특징을 보인다. 따라서 반도체층/절연층 계면에서 첨가제의 농도가 낮은 것을 어느 정도 보완할 수 있다. 이러한 현상을 잘 이용하여 원하는 성분이 반도체층으로부터 절연층으로 천천히 확산되도록 하면 케이블에서 가장 취약지역인 계면에서의 문제점을 상당량 완화시킬 수 있다.

이러한 원리를 이용한 연구결과를 다음과 같다. 먼저, 일본의 Showa Cable Co.의 연구결과에 따르면 기존의 반도체 재료에 carbazole계 첨가제를 첨가하면 전력케이블의 충격전압 파괴강도는 약간 증가하는데 비해 교류전압 파괴강도는 현저히 증가한다 [11]. 또한 모델 케이블에 대한 열자격전류 측정용을 통하여 반도체층에 carbazole계 첨가제가 있는 경우 절연층내에 형성되는 열자격전류치가 감소하는 현상을 발견하였으며, 이를 통하여 반도체층에 있는 첨가제가 절연층내에 형성되는 공간전하 형태를 바꾸기 때문으로 해석하였다.

동일한 원리, 즉 첨가제의 계면확산법을 이용하여 반도체

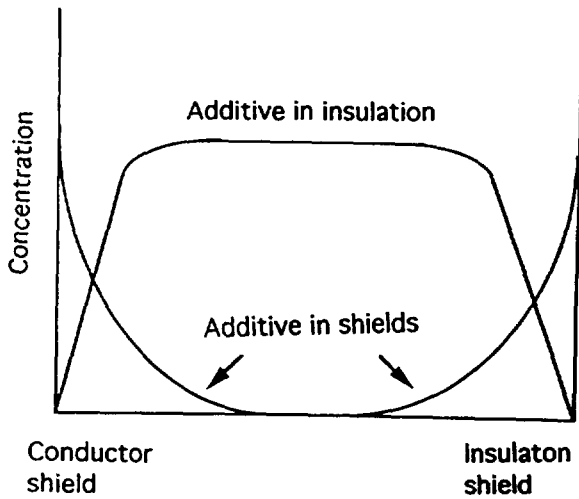


Fig 16. Concentration profile of additives in insulation and shields

재료를 개량한 후 이를 통하여 전력케이블의 절연과피강도를 개선시킨 연구가 일본과 중국에서 수행되었다. 먼저, 일본의 전력중앙연구소 (CRIEPI)에서는 여러 종류의 계면활성제를 평가한 결과 일부분의 계면활성제를 반도체 재료에 첨가하면 케이블의 절연과피강도를 약 30% 정도까지 향상시킬 수 있다고 발표하였다 [12, 44]. 연구결과가 그림 17에 나와 있는데, (a)는 첨가제가 계면으로부터 절연층으로 확산되는 개략도이며, (b) 첨가제의 확산에 의하여 케이블 제조시 절연층의 lamella가 일정 방향으로 배향하는데 이때 lamella 배향각을 측정하기 위한 모델을 보여 주며, (c)는 lamella 배향각과 절연과피강도와의 관계를 보여 준다. 이들 결과로부터 반도체층에 있는 계면활성제가 케이블 제조시 절연층인 XLPE 결정을 일정 방향으로 배향시킨다는 것을 알 수 있는데, 이때 lamella 각이 작을수록, 즉 반도체층과 직각방향으로 배향할수록 절연과피강도가 증가한다. 또한 위 성분이 반도체층에 있으면 절연층과의 접촉시 표면에너지를 변화시키는데, 주로 표면에너지를 증가시킴으로서 계면접착을 향상시킴으로서 케이블의 절연과피 특성을 향상시킨다고 하였다 [45].

비슷한 연구 결과가 중국 Xi'an Jiaotong University의 연구자들에 의하여 발표되었는데, 이들은 계면활성제 외에 ionomer 또는 coupling agent를 사용하면 계면활성제만 사용할 때 보다 더 좋은 절연과피강도를 얻을 수 있다고 발표하였다 [13, 46]. 이때 반도체층에 있던 계면활성제가 절연체쪽으로 확산된 것을 FTIR-ATR 방법으로 확인하였다.

이상에서와 같이 계면을 이루는 반도체 재료에 일정 성분의 첨가제 또는 화학물질을 첨가하면 이들이 반도체층/절연층 계면으로 확산되어 계면문제점을 완화시키고 나아가서 전력케이블의 절연과피 특성을 향상시킬 수 있다.

이러한 연구는 반도체 재료의 성분을 바꿈으로서 케이블의 절연성능을 향상시키는 대표적인 연구이다. 그러나 이런 방법들은 반도체층에 존재하는 불순물의 영향을 배제할 수

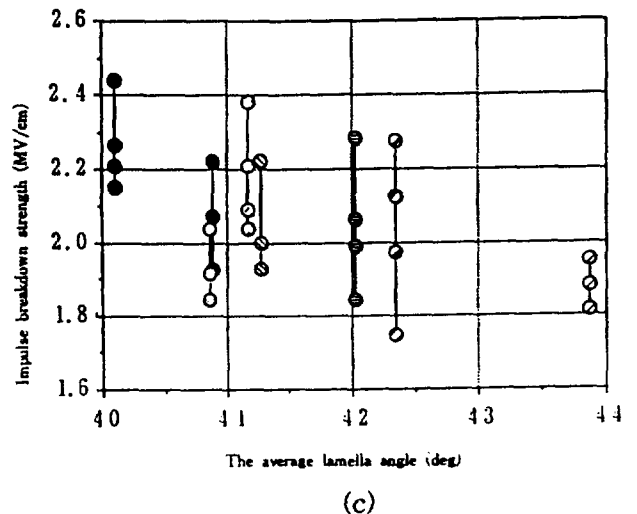
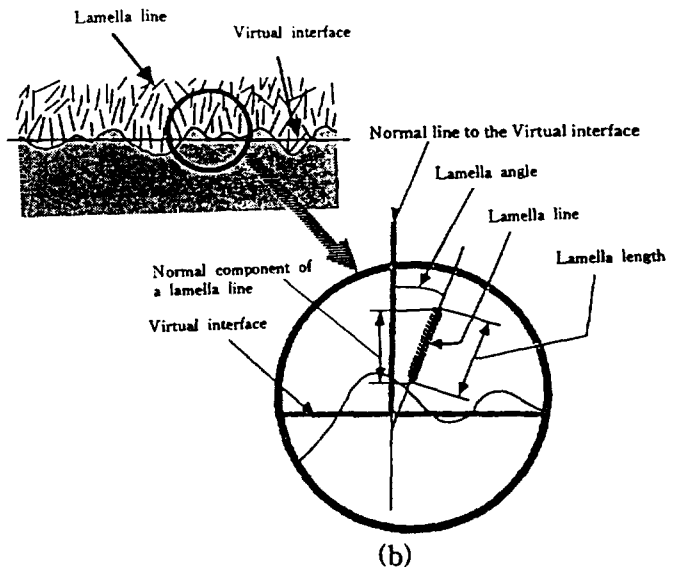
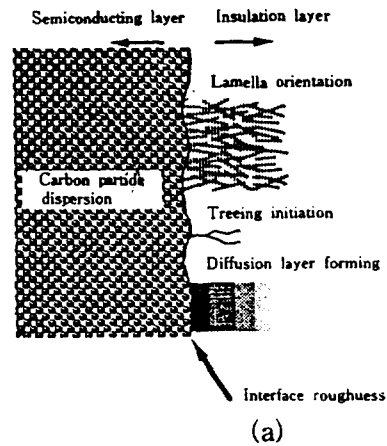


Fig 17. Principles of modification by interface diffusion method : (a) Interface between semocon layer and insulation, (b) Virtual interface and definition of the lamellar angle, (c) Breakdown strength as a function of lamellar angle

있는 방법이 아니다. 따라서 최종적으로 케이블의 성능을 현저히 향상시키기 위해서는 반도체층 재료의 성분을 변화시킬 때 불순물의 이행도 억제할 수 있는 방법으로 개선해야 한다.

최근 본 연구팀에서는 반도체 재료의 성분 변화에 의한 케이블 성능개선은 물론 반도체층에 들어 있거나 또는 반도체층을 통한 이온유입을 억제할 수 있는 방법에 관한 연구를 수행하고 있다. 이 연구의 기본 개념은 반도체 재료의 기본 원료인 에틸렌 비닐아세테이트 (Ethylene Vinyl Acetate; EVA)를 화학적으로 개질하여 반도체층에서 불순물을 트랩하여 절연층으로의 이행을 억제하는 방법이다. 이때 불순물을 트랩할 수 있는 성분의 선택시 위에서 진술한 바 있는 절연과피 특성을 향상시킬 수 있는 성분을 선택함으로써 한 성분으로서 두 가지 효과를 얻으려는 방법이다.

Acrylic acid 계 고분자는 pendant group으로서 $-COOH$ 를 가지고 있는데, $-COOH$ 의 $-H$ 는 결합력이 약하여 쉽게 떨어져 나갈 수 있으며 주변에 금속양이온이 있으며 이 금속양이온과 결합하여 carboxylate salt ($-COO^-M^+$)를 만든다. 이를 중화반응 (neutralization reaction)이라고 하며, 이때 가장 많이 사용되는 금속양이온은 Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} 이다. 아크릴계 고분자가 금속양이온과 반응하여 만들어진 고분자를 ionomer라고 부르는데, ionomer 내에 형성된 ion pair는 소위 ionic cluster를 형성하여 이들이 고분자 사슬의 움직임을 방해하므로 ionomer의 인성 (toughness)은 증가하는 것이 일반적이다 [47].

주지하는 바와 같이, 이들 이온들은 물 속에 가장 많이 섞여 있는 금속이온들로서 전력케이블용 반도체층에 가장 많이 들어 있는 성분들이기도 하다. 이러한 원리를 이용하여 지하수에 들어 있는 금속성 불순물이 고분자와 결합하도록 하면 금속성 불순물들이 반도체층을 통과하는 동안 또는 반도체층에 들어 있던 금속성 불순물들이 이들 $-COOH$ 와 결합하게 되므로 금속성 불순물이 자유롭게 절연층으로 이동하는 현상을 억제할 수 있으며 이때 일종의 ionomer를 형성하므로 반도체층 재료의 인성이 증가되는 부수적인 효과까지 얻을 수 있다.

이러한 원리를 바탕으로 반도체 재료의 기본 수지인 EVA를 에틸렌 아크릴산 공중합체 (Ethylene Acrylic Acid Copolymer; EAA)로 개질한 EVA/EAA 블렌드의 이온투과 시험을 실시하였으며 그 결과가 그림 18에 나와 있다 [14, 48]. 이 그림을 보면 EAA의 함량이 증가할수록, 보다 엄밀히 말하면 EVA/EAA 블렌드에 들어 있는 acrylic acid (AA)의 함량이 증가할수록 이온의 확산계수가 증가함을 알 수 있다. 표 16에 비슷한 효과를 보일 수 있는 ionomer와 ethylene n-butyl acrylate (EnBA)에 대한 실험결과가 나와 있는데, 예상대로 이들 고분자의 이온 확산계수가 감소한다. 이온의 확산계수 감소란 결국 이온투과율의 감소, 즉 이온유입의 감소를 의미하므로 이런 재료가 반도체 컴퍼온드의 기본수지로 사용될 경우 외부로부터의 이온의 유입이 억제될 것으로 기대된다. 현재 본 재료에 관한 연구가 이루어지고 있으므로 추후 다시 언급하기로 한다.

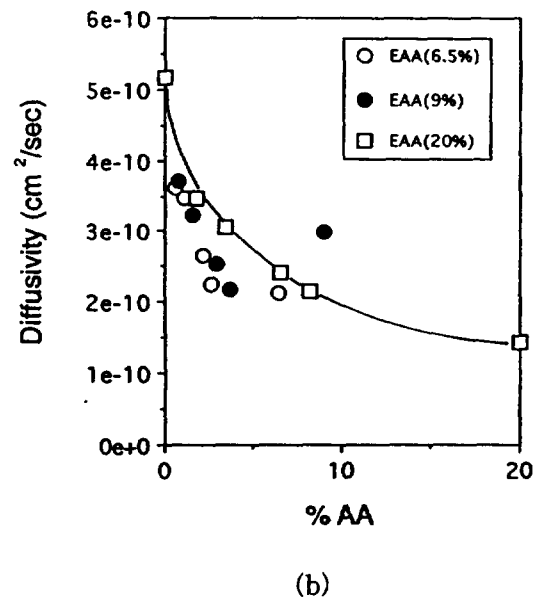
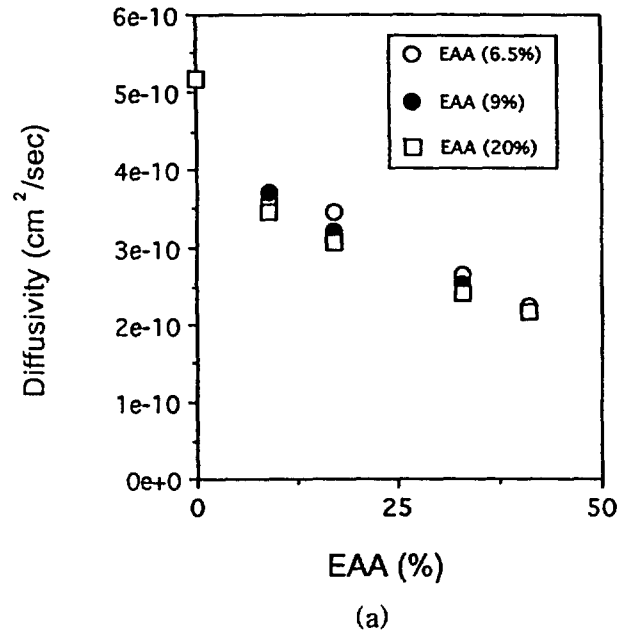


Fig 18. Diffusion constants in EVA/EAA blends as a function of (a) EAA and (b) AA

지금까지 언급한 사항을 종합하면 현재 사용하고 있는 전력케이블의 절연성능의 향상에 있어서 반도체층과 관련된 사항은 아래와 같다. 첫째, 반도체층에 불순물이 많이 들어 있으면 이 불순물들이 반도체층/절연층 계면에서 수트리를 발생을 촉진하고 절연재료의 절연과피강도를 저하시키므로 불순물 함량이 매우 낮은 카본블랙을 사용하여 반

Table 16. Diffusion constants in ethylene co-polymers

Specimen	Diffusivity ($\times 10^{-10}$ cm ² /s)	
	Uncrosslinked	Crosslinked
LDPE	5.61	3.41
EVA 33	-	5.16
EAA		
EAA 6	3.02	2.13
EAA 9	2.98	1.99
EAA 20	1.52	1.43
Ionomer		
Ionomer 1	1.74	2.69
Ionomer 2	2.19	3.39
Ionomer 3	2.92	-
EnBA		
EnBA 5	3.14	2.85
EnBA 19	2.90	2.76
EnBA 20	2.76	2.37

-: Not tested

도전 재료를 만들어야 한다. 둘째, 반도체 컴파운드의 성분을 변화시켜 반도체층/절연층 계면성질을 향상시켜 전력케이블의 절연과피 특성을 향상시켜야 한다. 두 번째 방법은 첫째 방법보다는 적극적인 방법으로서 이 방법을 이용하면 전력케이블의 성능을 현저히 향상시킬 수 있고 나아가서 절연층 두께 감소화가 가능할 것이다.

위 두 가지 방법은 비록 전력케이블의 특성을 향상시키는 하지만 반도체층 내에 미량 존재하는 불순물 또는 지하수에 녹아 있던 금속양이온들이 반도체층을 통하여 절연층으로 유입되는 현상을 근본적으로 억제할 수 없다. 따라서 불순물이 절연층으로 유입되는 현상을 억제하면서 케이블의 절연성능을 향상시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 있어야 한다. 어떤 경우에 있어서도 전력케이블에 사용되는 반도체 컴파운드는 불순물 함량이 낮은 깨끗한 카본블랙을 사용하고 가공과정 중 불순물이 유입되지 않도록 노력해야 한다.

전술한 바와 같이 간혹 반도체층 내에 탄화덩어리가 발견되고 또한 도체 차폐층의 체적고유저항이 규정치를 벗어나는 경우가 있는데, 이러한 현상들도 결국 케이블을 파괴시키는 요인으로 작용하므로 주의해야 한다. 이상에서 언급한 바와 같이 국내 배전케이블에서 발견되는 대부분의 문제점들은 조금만 주의하면 봉쇄될 수 있는 문제점들이며, 이러한 문제점들을 개선하면 국내 배전케이블의 성능도 상당히 향상될 수 있을 것으로 생각 된다.

6. 결 론

본 고에서는 전력케이블의 수명에 영향을 미칠 수 있는 요인 중에서 반도체층이 들어 있거나 반도체층을 통하여 절연층으로 유입될 수 있는 불순물의 영향에 대하여 비교적 자세히 기술하였다. 먼저 전력케이블의 반도체층은 컴파운드 제조시 사용된 카본블랙의 종류에 따라 컴파운드에 섞여 있는 불순물의 함량이 큰 차이를 갖는다는 것을 알았다. 국내 지중배전케이블의 반도체층에는 높은 함량의 불순물이 있으며 특히 절연차폐용 반도체 컴파운드에는 상당히 높은 함량의 금속성 불순물이 혼합되어 있음을 언급하였다. 또한 절연차폐층/절연층 계면에 탄화된 고분자 덩어리가 있는 것을 발견한 바 있다. 최근 국내에서 많은 사고케이블을 조사하면 절연차폐층으로부터 성장한 수트리가 케이블의 전체를 뒤덮을 정도로 많은 것을 알 수 있는데, 이러한 불순물들이 한 원인으로 작용했을 가능성이 매우 높다. 이러한 사실들은 카본 블랙에 있는 불순물이 단순히 금속성 불순물의 함량만을 높이는 역할 이외에 탄화 덩어리를 형성할 가능성이 높다는 것을 의미한다. 여하한 경우에도 국내 케이블의 사고를 줄이기 위해서는 반도체층에 들어 있는 불순물의 함량을 줄이고 가공성을 높여야 할 필요가 있다.

중요한 것은 불순물의 영향은 특별한 기술이 필요한 것이 아니라 원재료 제조시 또는 케이블의 제조시 불순물이 들어 가지 않도록 주의하고 원재료의 불순물 함량을 엄격하게 검사하거나 또는 불순물의 함량을 규제하는 방법을 이용하면 현재 국내에서 문제가 되고 있는 불순물의 영향이 크게 감소할 것으로 기대된다. 이러한 노력과 더불어 반도체층 내에 탄화덩어리가 들어 가지 않도록 노력하고 수거된 케이블의 도체차폐층의 체적고유저항이 규정치 내에 들도록하면 국내 배전케이블의 성능도 크게 향상될 수 있을 것으로 기대 된다.

반도체층에 들어 있는 불순물의 영향 이외에 본 고에서는 반도체층의 성능개량을 통하여 전력케이블의 절연성능을 높일 수 있는 방법에 대하여 언급하였다. 이러한 적극적인 방법을 통하여 케이블의 절연성능을 높이면 절연두께의 감소화까지도 가능하다는 것을 언급한 바 있다. 또한 전력케이블의 절연성능을 높이면서 불순물의 영향을 최소화시키는 방법에 대하여도 기술한 바 있는데, 향후 전력케이블의 절연성능을 향상시키는 방법에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] T. Tanaka and A. Greenwood, *Advanced Power Cable Technology*, CRC Press, Florida, 1983.
- [2] R. Bartnikas and K. D. Srivastava, *Power Cable Engineering*, Sandford Educational Press, Waterloo, Ontario, 1987.
- [3] M. T. Shaw and S. H. Shaw, "Water Treeing in Solid Dielectrics", *IEEE Trans. Elec. Ins.*, Vol. 19, pp. 419-452, 1993

- [4] P. H. F. Morshuis, F. H. Kreuger and P. P. Leufkens, "The Effect of Different Types of Inclusion on PE Cable Life", *IEEE Trans. Elec. Ins.*, Vol. 23, No. 6, pp. 1051-1055, 1988.
- [5] S. S. Bamji, A. T. Bulinski, R. J. Densley and M. Matsuki, "Degradation Mechanism at XLPE/ Semicon Interface Subjected to High Electrical Stress", *IEEE Trans. Elec. Ins.*, Vol. 26, pp. 278-284, 1989.
- [6] P. R. Paolino, *Antioxidants*, in *Thermoplastic Polymer Additives*, Edt. J. T. Lutz, Jr, Marcel Dekker, New York, 1889.
- [7] M. J. Given, R. A. Fouracre and B. H. Crichton, "The Role of Ions in the Mechanism of Water Tree Growth", *IEEE Trans. Elec. Ins.*, Vol. 22, pp. 151-156, 1987.
- [8] J. J. Xu and S. Boggs, "The Chemical Nature of Water Treeing: Theories and Evidence", *IEEE Insulation Magazine*, Vol. 10, pp. 29-37, 1994.
- [9] EPRI Report EL-6207, 1989.
- [10] C. G. Richardson, G. Matey, L. J. Rose, R. W. Finney, "Ion Migration in Aged Power Cables", *Proc. Jicable91, A101*, pp. 259-266, 1991.
- [11] T. Shiono, T. Shahrzad, F. Aida and E. Hosokawa, "Improvement of Voltage Endurance by Additives in Semiconductive Shield of XLPE Cable", *Technical Bulletin*, Showa Wire and Cable Co., Vol. 34, pp. 59-63, 1984.
- [12] T. Okamoto, N. Hozumi, M. Ishida and T. Imazo, *Development of EHV XLPE Power Cables with half Insulation Thickness*, CRIEPI Report W90042, CRIEPI, Japan, 1990.
- [13] L. Gao, W. Guo, X. Qiu and H. Wang, "Study of Improvement of Withstand Strength of Poly-ethylene in Cables using Special Additives", *Proc. Int. Symp. Elec. Ins. Mats*, Nagoya, Japan, pp. 369-372, 1993.
- [14] J. H. Han, *Ion Permeation in EVA/Ethylene-based Copolymers/Carbon Black Semiconductive Compounds*, PhD Dissertation, Korea University, 1996.
- [15] N. M. Burns, R. M. Eichhorn and C. G. Reid, "Stress Controlling Semiconductive Shields in Medium Voltage Power Distribution Cables", *IEEE Insulation Magazine*, Vol. 8, pp. 8-24, 1992.
- [16] H. C. Anderson, B. T. McKenzie Jr., M. Prober and N. Singh, U.S. Patent No. 4,132,858, "Graded Insulation Cable Construction and Methods of Overcoming Stresses Therein", 1979.
- [17] G. Bahder, T. W. Dakin and J. H. Lawson, "Analysis of Treeing Type Breakdown", *CIGRE 15-05*, 1974.
- [18] N. M. Burns, "Performance of Supersmooth, Extra Clean Semiconductive Shields in XLPE Insulated Power Cables", *IEEE Int. Symp. on Elec. Ins.*, pp. 272-276, 1990.
- [19] N. M. Burns, "An Improved Strippable Insulation Shield for Triple Process Power Cable", *Kabelitems No. 156*, Union Carbide Corporation, 1981.
- [20] R. M. Eichhorn and R. J. Turbett, "Permanent inhibition of Water Tree Growth in Poly-ethylene", *IEEE Trans. PAS*, Vol. 98, pp. 2215-2222, 1979.
- [21] E. J. McMahon, "A Tree Growth Inhibiting Insulation for Power Cable", *IEEE Trans. Elec. Ins.*, Vol. 16, pp. 304-318, 1981.
- [22] R. J. Turbett, "New Long Life Insulation Compounds", *Kabelitems No. 158*, Union Carbide Corporation, 1984.
- [23] "New Semiconductive Compounding Facility Producing Advanced Materials for Tomorrow's Power Cables", *Powergram*, Union Carbide Corporation, Vol. 2, No. 2, September, 1991.
- [24] S. Greene, Private Communication, Cabot Corporation.
- [25] S. L. Greens, "Smoothness Evaluation of Clean Furnace Black", *IEEE Insulation Magazine*, Vol. 10, pp. 23-29, 1994.
- [26] G. Akemark and L. Isaksson, "Semiconductive Compounds Based on Carbon Black", *Neste Polyethylene Co. Catalog*.
- [27] ESB Specification, (126-650-657), "22.9 kV CN/CV-W Water-Tight Power Cable", KEPCO, Korea.
- [28] L. E. Nelson, *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, Marcel Dekker, New York, 1974.
- [29] *Conductive Carbon Black in Plastics*, Technical Report S-39, Cabot Corporation.
- [30] *Pigment Blacks for Plastics*, Technical Bulletin Pigments, No. 40, Degussa Corporation.
- [31] M. C. Yu, J. Menashi and D. J. Kaul, "Carbon-black Morphology: Its Effect on Viscosity and Performance", *Plastic Compounding*, 1994.
- [32] Test result Carried out at Korea University.
- [33] S. Lefebvre, J. H. Groeger, M. Tomme and W. L. Sifleet, "Wet Electrical Ageing Characteristics of Semi-Conducting Shields Incorporating Various Furnace Blacks", *Proc. Jicable*, Versailles, 1-7, 1989.
- [34] M. S. Mashikian and J. H. Groeger, "Ageing Phenomena at Cable-Shield Interfaces Affecting the Propensity of the Insulation to Develop Water Trees", *Proc. Jicable*, 1991.
- [35] S. Greene and C. Richardson, "Processing of High Smoothness Furnace Blacks for Semi-Conducting Shields", Private Communication, Cabot Corporation.
- [36] N. M. Burns, "Developments in Semiconductive Products for Medium Voltage XLPE Cables", *Proc. Jicable*, B.5.2, 1987.
- [37] N. M. Burns, "Properties of Supersmooth, Extra Clean, Semiconductive Shields for Medium Voltage Power Cable", *IEEE Mexico Section Meeting*, July pp. 21-25, 1991.
- [38] "Search for Methods to Evaluate the Effects of Impurities in Insulation of Distribution Cable on Its Lifetime", Research Project sponsored by EESRI and KEPCO, Korea.
- [39] B. Baum, "The Mechanism of Polyethylene Oxidation", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. II, pp. 281-288, 1959.
- [40] K. Kircher, *Chemical Reactions in Plastic Processing*, Hanser, Munich, 207-210, 1987.
- [41] K. Amakawa and Y. Inuishi, "Electrical Breakdown of Oxidized Polyethylene in Low-Temperature Region", *Jap. J. Appl. Phys.*, Vol. 12, pp. 755-756, 1973.
- [42] K. Ieda, J. S. Kim, S. Nakamura and G. Sawa, "Effects of Molecular Structure on Electrical Conduction in Low-density Polyethylene above Its Melting Point", *IEEE Trans. Elec. Ins.*, Vol. 27, pp. 391-398, 1992.
- [43] Y. Suzuoki, T. Furuta, H. Yamada, S. O. Han, T. Mizutani, M. Ieda and N. Yoshifuji, "Study of Space Charge in Polyethylene by Direct Probing: Effects of Oxidation", *IEEE Trans. Elec. Ins.*, Vol. 26, pp. 1073-1079, 1991.
- [44] T. Okamoto, M. Ishida and N. Hozumi, "Dielectric Breakdown Strength Affected by the Lamellar Configuration in XLPE Insulation at a Semiconducting Interface", *IEEE Trans.*

Elec. Ins., Vol. 24, pp. 599-607, 1989.

[45] Y. Miyashita, A. Someya and H. Kato, "Influence of Surface Energy of Carbon Black-Filled Semi-conducting Layer upon Properties of Solid Insulating Materials", *Proc. 1993 IWEI*, Nagoya, Japan, pp. 453-456, 1993.

[46] X. Qiu and L. Gao, "Study on Improvement of Polyethylene Interfacial Properties", *Proc. CEIDP*, pp. 83-88, 1994.

[47] R. Longworth, *Thermoplastic Ionic Polymers: Ionomers, Ionic Polymers*, Edt. by L. Holliday, Wiley, New York, 1975.

[48] J. H. Han, K. S. Suh and S. J. Kim, "Ion Permeability and Physical Properties of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer/Ethylene Acrylic Acid Copolymer Blends", *Trans. KIEE*, Vol. 45, pp. 1282-1287, 1996.

저 자 소 개



한재홍(韓在鴻)

1967년 10월 5일생. 1990년 단국대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사). 1996년 고려대 대학원 재료공학과 졸업(공박). 현재 한국전력 전력연구원 연구원.



김상준(金相俊)

1951년 2월 7일생. 1986년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1987년 발송배전 전기기술사. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1976년~현재 한전 전력연구원 배전자동화 그룹장/책임연구원. 관심분야는 전력케이블, 전기재료, 전기화재, 전기안전.



권오형(權五炯)

1950년 12월 15일. 1975년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 연세대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년~1987년 국제배전기술교육수료(영국). 현재 한국전력 연수원 배전주임교수.



강희대(姜熙泰)

1953년 2월 9일생. 1986년 연세대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1978년 12월 한국전력입사. 1983년~1985년 지중선사업처 설계·공사 과장. 1987년~1993년 배전처 지중선 부장대리. 현재 한전 충남지사

배전계획부장.



서광석(徐光錫)

1954년 3월 6일생. 1980년 고려대 공대 재료공학과 졸업. 1982년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사). 1987년 미국 코네티컷 주립대학 고분자 전공(공박). 1987년~1988년 미국 MIT 고전압연구실(Post-Doc). 현재 고려대 공대 재료공학과 부교수. 당 학회 편집위원.