

전력케이블의 절연재료

유 태 준

1. 서 론

케이블(전선)은 산업, 경제와 우리들의 일상생활에서 신경과 핏줄로 비유될 수 있으며 인간의 삶을 편리하고 윤택하게 하고 산업의 원동력으로서 인류 문명을 밝혀오고 있다. 케이블은 크게 음성, 화상과 데이터 등을 전달하는 통신용 케이블과 전기를 운송하는 전력용 케이블로 나뉘어지며 통신용 케이블의 대표적인 예는 음성을 아날로그 또는 디지털 신호로 보내는 전화선이 있고 최근 빌딩의 자동화 및 정보에 대한 욕구의 급증으로 동 도체를 사용하는 케이블에서 고속으로 대량의 정보를 전달할 수 있는 광케이블로 바뀌어가고 있다. 또한 전력용 케이블은 발전소에서 생산된 전기를 철탑을 설치하여 전선을 매달은 가공 송전선로나 지하에 전력케이블을 매설한 지중(underground) 케이블을 통하여 345, 154 kV 및 66 kV급 변전소로 수송하며 필요한 전압으로 낮추어져 공장, 공공기관, 가정 등으로 공급한다.

전력케이블의 발전사(그림 1 참조)를 보면 초기에는 유침지나 저점도유를 이용한 OF 케이블이 사용되어 1950년대부터 주류를 이루어오고 있으며 이차대전 후 고분자화학의 발전으로 전력케이블도 고무나 플라스틱을

사용하게 되어 EP고무, 부틸 고무와 polyethylene(PE)이 주 절연재료, 크로로프렌과 PVC가 피복체(sheath)로 사용되고 있다. 1950년대 PE의 내열성을 높이는 수단으로 가교기술이 개발되어 현재 전력케이블은 crosslinked polyethylene(XLPE) 절연 PVC피복 케이블(CV케이블로 표기)이 주류를 이루고 있다. 이러한 케이블들의 절연체나 케이블의 보호를 목적으로 하는 피복체의 경우 사용되는 기본 수지에 있어서는 큰 차이가 없으나 요구되는 물리적, 화학적 특성들은 경우에 따라 구조의 개질 또는 다양한 첨가제들을 첨가함으로써 만족할 수 있다.

본 고에서는 여러 종류의 케이블 중에서 전력용 케이블 제조에 사용되고 있는 재료와 기술적 추세에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 전력케이블의 종류¹⁾

전압의 구분은 AC 600 V 이하를 저압, AC 600 V 초과 7 kV 이하를 고압, 7 kV를 초과 154 kV 미만을 특고압, 154 kV 이상을 초고압으로 하며 사용할 전력케

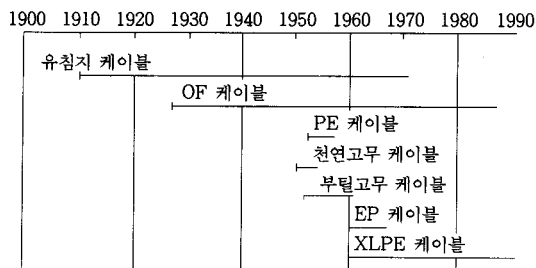


그림 1. Development of power cables.



유태준

1980 인하대학교 고분자공학과(학사)
 1985 인하대학교 고분자공학과(석사)
 1986~ 한국화학 연구소
 1990 University of Akron(박사)
 1994 Rensselaer Polytechnic Institute(Postdoc.)
 1995 회성전선 기술연구소,
 1996~ 현재 책임연구원

Insulation Materials for Power Cables

회성전선 기술연구소(Taejun Yoo, R & D Center, Heesung Cable Ltd., 166 Geum Jeong-Dong, Gunpo City, Gyeonggi-Do 435-050, Korea)

표 1. Cables Classified by Applied Voltages

공칭전압	전압구분	적용 케이블
187 kV 이상	초고압	OF 케이블, POF 케이블, XLPE 케이블
66-154 kV	특고압	OF 케이블, XLPE 케이블
11-33 kV	특고압	XLPE 케이블
3.3-6.6 kV	고압	XLPE 케이블, EP 고무 케이블
600 V	저압	XLPE 케이블, PVC 케이블, PE 케이블, EP 고무 케이블

OF : Oil filled, XLPE : Crosslinked polyethylene.

이들은 송전용량, 부하조건, 포설조건과 경제적 기술적 측면이 고려되어야 한다. 표 1은 사용 전압에 따라 적용되는 케이블의 종류를 나타내고 있다.

184 kV 이상의 초고압 선로는 전력공급의 신뢰도가 특히 중요하여 신뢰성이 높은 OF 케이블이 주로 사용되고 있으며 일부 XLPE 케이블도 사용되고 있고, 66, 154 kV급 선로에서는 종래의 OF 케이블이 주로 사용되어 왔으나 최근에는 재료, 제조, 접속기술의 진보로 XLPE가 주류를 이루고 있다. 또한 33 kV 이하의 선로에는 SL(separately leaded) 케이블, 부틸고무 케이블 등이 사용되었던 시절도 있었으나 현재는 XLPE 케이블이 사용되고 있다.

2.1 OF 케이블

초고압 전력케이블은 도체 및 포설 후 온도의 변화에 의한 팽창수축이 계속되므로 차체에 절연물이나 쉬스에 빈틈이 생겨 케이블이 파괴된다. 따라서 도체 내에 관을 통하여 절연유를 넣고 외부에서 기름 조절 탱크에 의해 일정 유압으로 팽창수축을 조절하며 별도의 유지관리가 필요하다.

2.2 가교 폴리에틸렌(XLPE) 케이블

그림 2는 XLPE 케이블의 대표적인 구조를 보여주고 있으며 절연체는 PE대신 가교 폴리에틸렌을 사용하여 내열성을 대폭 개선한 것으로, 플라스틱 절연재료의 주류를 이루고 있고 특히 154 kV 이상의 전압에서도 종래의 OF 케이블에 대체하여 사용되는 추세이다

3. 절연재료

고분자 재료가 전기재료에 사용되는 것은 주로 절연재료로써 이는 고분자재료가 우수한 전기절연 특성은 물론 그 가공이 쉽기 때문이다.

전기적 특성은 유전율(dielectric constant), 절연파괴장도(dielectric strength) 등으로 정의되며 유전율이란 절연된 도체에는 일정의 축전량이 있는데, 이 축전량은 절연재료가 공기일 경우 가장 낮고 이를 기준으로 한 증가율(공기 : 1, PE, XLPE : 2.2-2.4, 부틸, EPR 고무 : 3-4, 비닐 : 5-8)이며, 절연파괴장도는 절연재료가 arc를 일으키기 전까지 견딜 수 있는 전압이다. 또한 전기회로

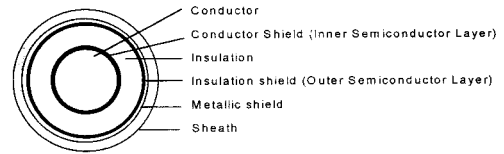


그림 2. Structure of CV cable.

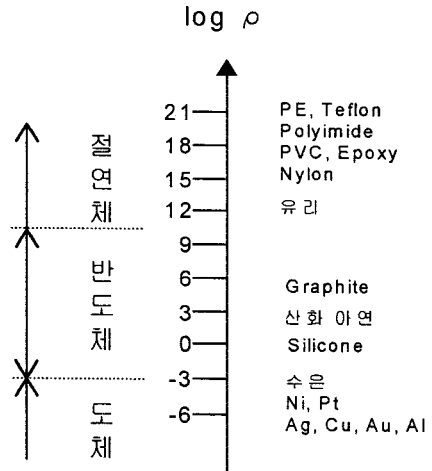


그림 3. Resistivity of materials.

에서 저항(R)을 갖는 물질에 전류(I)를 흘리면 전위차(V)가 발생하며 이들은 Ohm의 법칙에 따라 $I=V/R$ 의 관계를 갖는다. 다시 말해 절연재료에 전압을 가하면 절연재료의 내부와 표면을 통하는 누설전류가 발생하는데 내부 누설전류에 대한 저항을 체적저항률 ρ 라하며 저항이 R , 길이 l , 단면적 A 일 때 $R=\rho l/A$ 의 관계를 갖으며 체적저항률에 의하여 도체, 반도체 또는 절연체가 구분된다. 그림 3은 각종 재료에 대한 저항률을 보여주고 있다.

3.1 Polyethylene(PE)

PE 수지는 1933년 영국 ICI사의² 고압법에 의해 제조된 이래 미국의 Standard Oil사에서³ 개발한 Standard 법과 Phillips Petroleum사에서^{4,5} 개발한 Phillips법에 의한 중압법 및 독일의 Max-Planck 연구소의 Ziegler에^{6,7} 의해 발명된 저압법 등 그 제조법이 발전되어왔으며 이에 따라 저밀도 PE(LDPE), 중밀도 PE(MDPE), 고밀도 PE(HDPE)가 만들어진다. 또한 1977년 UCC에서는⁸ 1-butene과 같은 α -olefin을 사용하여 PE 주쇄에 짧은 가지를 갖는 비중 0.915-0.95 g/cm³의 LLDPE(linear low density polyethylene)를 생산하였다. PE는 우수한 전기적 특성을 갖고있어 초기에는 radar의 절연재료로 사용되었으며 다양한 종류의 PE는 전력 및 통신케이블의 주 절연재료로 사용되어 왔다. LDPE는 무극성의 재료이기 때문에 아주 낮은 유전율을 갖는데, 비중에 따라

표 2. Characteristics of Polyethylene for Insulation

구 분	항 목	단 위	특 성 치	
			LDPE	LLDPE
전기적 특성	Dielectric constant, 1 MHz		2.28	2.29
	Dissipation factor, 1 MHz		2.10^{-4}	1×10^{-4}
	Volume resistivity	ohm-cm	$>1 \times 10^{16}$	$>1 \times 10^{16}$
		Ω -m	$>1 \times 10^{14}$	$>1 \times 10^{14}$
	Dielectric strength, S/T			
물성	3.175 mm	V/mil	550	500
		V/m	2.17×10^7	2×10^7
	Melt index	9×10 min	0.2	0.7
	Density at 23 °C	g/cm ³	0.92	0.92
	Tensile strength	psi	2,200	2,400
절연 용도	Elongation	%	600	700
	Brittleness temp.	°C	-90	<-100
압출 온도			190-218	205-220
절연 용도			일반 전력용 33 kV까지	

약간씩 증가하여 비중이 0.918, 0.951인 경우 2.273, 2.338와 값을 갖고 절연파괴강도는 1-10 MV/cm이다.⁹

일반 절연용 PE는 고순도의 resin에 상화방지제가 배합된 것으로 표 2는 LDPE와 LLDPE의 전기적, 물리적 특성치를 나타내고 있다.

LDPE와 LLDPE를 비교해보면 분자구조상 분지(branch)를 많이 갖는 LDPE가 전기적인 특성 및 기계적 특성이 낮은 것으로 기대되나 큰 차이를 보이지 않으며 장기적 특성을 나타내는 내한성과 내환경특성은 LLDPE가 상대적으로 우수함을 알 수 있다. 비슷한 압출조건에서 서로의 용융지수(MI)를 비교하면 LLDPE의 수치가 더 낮은데 이는 같은 압출 온도를 갖기 위해서는 LDPE에 비하여 LLDPE의 분자량이 적어야 함을 의미하며 이는 같은 분자량을 갖는 고분자라 할지라도 분지의 정도가 클수록 용융점도가 떨어지기 때문이다. 다시 말하면 LLDPE의 용융점도는 온도의존성이 LDPE보다 상대적으로 크기 때문에 압출온도의 설정 시 주의가 필요하다.

3.2 Crosslinked Polyethylene(XLPE)

가교 폴리에틸렌(XLPE)은 다음과 같은 우수한 전기적, 물리적 특성을 갖고있어 중고압의 절연재료로서 이상적이다.

- 1) 전기적 특성이 우수함: 절연내력, 체적 고유저항이 높고 유전정접 및 유전율이 매우 작다.
- 2) 전류용량이 크다: PE보다 연속 최고 허용온도가 높아, 큰 송전량을 얻는다. 또한 단락 허용 전류도 크다.
- 3) 물리적 기계적 특성이 우수함: 내충격성, 내마모성이 좋으며, 열에 의한 노화가 거의 없고 저온 특성도 좋다.
- 4) 내약품성이 우수함.
- 5) 내수성이 우수함: 흡수량이 적어 절연 저하가 거의 없다.
- 6) 경량이므로 취급이 쉽고, 포설이 용이하다.

7) 접속이 간단하다.

열가소성 수지인 PE의 주결점은 110 °C 정도의 용융점으로 이는 케이블의 최고 연속 사용온도를 70 °C로 낮추는 요인이 된다. 따라서 가교반응을 통하여 열가소성 수지인 PE를 XLPE로 바꿔 줌으로써 용융온도가 크게 향상되고 PE의 단점이 극복될 수 있어 케이블의 연속 사용온도를 90 °C로 높일 수 있다. 더욱이 도체의 단락시 허용온도(short-circuit peak temperature)가 250 °C로 중압용으로는 130 °C에서, 고압용으로는 105 °C에서 매년 수시간동안 과부하(over load)를 견딜 수 있다. 발전소에서 수요처까지 전력이 공급되는 과정에서 어느 한 곳에서 이상이 발생하면 과부하가 걸리며 이를 차단하기까지는 일정 시간이 소요되는데 이때 발생한 과전류에 의하여 도체에 순간적인 발열로 인해 절연체가 녹을 수 있다. 이러한 이유로 PE가 XLPE보다 전기적 특성이 우수함에도 고압 전력케이블에 사용되지 못하고 있다(유럽에서는 아직도 고압전력 케이블에 LDPE를 사용하는 예가 있음).

XLPE용 base PE수지를 살펴보면 LLDPE 대신 LDPE가 사용되며 그 이유는 LDPE가 분지가 많아 용융점도가 낮은 반면 상대적으로 분자량이 높아 기계적 강도는 높일 수 있기 때문이다.¹⁰ 압출 온도범위는 가교제인 DCP가 거의 분해하지않는 115-130 °C로서 이는 일반 절연용 수지의 압출온도보다 약 70-80 °C가 낮으며 따라서 일반 절연용 PE보다 분자량이 낮은 (MI : 1.0-2.0) PE가 사용된다.

3.2.1 가교반응

PE를 가교시키는 방법에는

- 1) 유기과산화물(organic peroxide)에 의한 방법¹¹⁻¹³
- 2) Silane 화합물을 이용한 방법¹⁴⁻¹⁶
- 3) 전자선 조사(radiation)에 의한 방법¹⁷ 등의 3가지로 분류되며 표 3은 이들방법의 장단점을 보여준다.

3.2.1.1 유기과산화물에 의한 가교

고분자의 가교반응에 가장 많이 사용되는 방법으로 2-3 phr의 DCP(dicumyl peroxide)가 혼합된 PE compound를 가교제의 분해가 일어나지 않는 온도범위에서 케이블의 도체 위에 압출한 후 가열관(curing tube)을 통과시키며 고압의 증기 또는 가스로 연속 가열시켜 가교

표 3. Comparison of Crosslinking Methods

가교 방법	장 점	단 점	용 도
유기과산화물	균이한 가교	낮은 생산성	고압전력
	높은 가교도	고압 필요	
Silane 화합물	높은 생산성	높은 가공, 투자비	저압 전력 케이블
	적은 가공, 투자비	장기보관이 곤란	
전자선	높은 생산성	가교 두께의 제약	기기선
	상온 가교	높은 투자비	

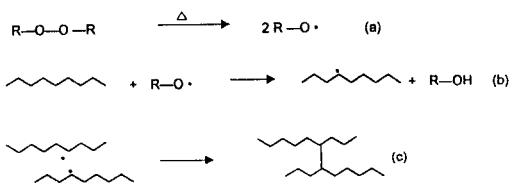


그림 4. Crosslinking scheme of PE.

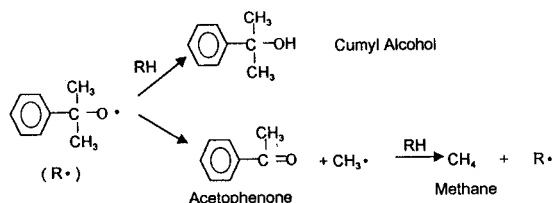


그림 5. Byproducts on the crosslinking reaction.

시킨다.

과산화물은 그림 4의 식 (a)와 같이 열에 의하여 분해되어 라디칼을 생성하며, 이 라디칼은 PE 주쇄(main chain)의 수소분자를 공격하여 식 (b)와 같이 주쇄상에 라디칼을 발생시키고 근접한 라디칼끼리 결합하여 가교반응 (c)을 일으킨다. 여기서 가교반응의 속도는 가교제의 분해온도에 의해 좌우된다.

가교반응 중의 부산물로는 cumyl alcohol, acetophenone과 methane 등이 발생되고(그림 5) methane이 절연체 내에 기포를 형성하게 되는데 이를 방지하기 위하여 높은 압력(5기압 이상)을 외부에서 가해주어야 한다.

CV케이블은 그림 2에서와 같이 도체, 내·외도 반도체층과 절연층으로 이루어져 있으며 이들은 동시에 3중 압출시켜 가교관(curing tube)을 통하여 연속적으로 가교시켜준다. 가교설비에는 가교관이 현수모양을 갖는 CCV(catenary continuous vulcanization)과 수직으로 배열된 VCV(vertical continuous vulcanization)가 있다. 그림 6과 같이 이들의 기본적인 구조는 큰 차이가 없으나 다만 가교관의 배열 형태만이 다르며 케이블의 전압이 높아질수록, 즉 CV케이블의 절연체 두께가 커질수록, 절연체의 편심(도체를 기준으로 동심원으로부터 절연체의 찌그러짐 정도)이 절연특성에 중요한 인자가 된다. 따라서 154 kV이상의 초고압 케이블은 절연체의 용융에 따른 편심을 방지하기 위해 가교관이 수직인 VCV를 사용하고 154 kV이하의 케이블은 주로 CCV를 사용하며 VCV는 CCV보다 가교시간도 길어져야 하기 때문에 케이블의 생산속도가 느리다.

가교방식에는 증기 가교방식(steam curing process)과¹⁸ 건식 가교방식(dry curing process)으로 나뉘는데 증기 가교방식은 열원으로 고온의 수증기를 사용하여 일반적으로 약 200 ℃(약 15기압)에서 가교시키며 수분에

표 4. Comparison of Steam Curing and Dry Curing

구분	열 전달 매체	압력	온도	적용전압
증기 가교식	수증기	20 kg/cm ²	200 ℃	22 kV 이하
건식 가교식	N ₂ 가스	10 kg/cm ²	350 ℃	3.3-500 kV

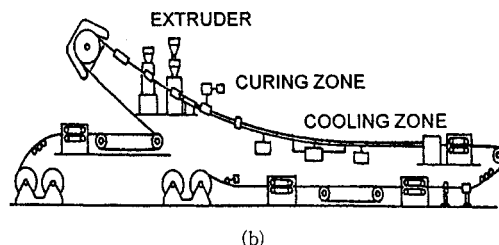
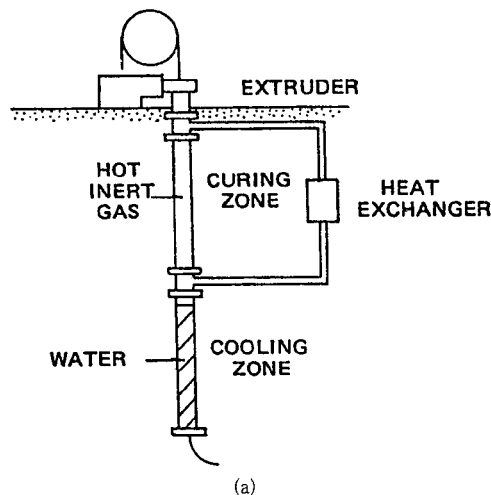


그림 6. Continuous vulcanization methods: (a) VCV and (b) CCV.

의해 고온·고압이 걸리므로 제조과정 중 절연체 내부에 수분이 침투할 수 있어 절연체의 열화의 원인이 되는 수트리(water tree)의 발생요인이 되어 현재로서는 고무 케이블의 가교에만 사용되고 있다. 건식 가교방식은 이러한 단점을 보완하기 위하여 개발되었으며 열원으로 수증기대신 고온의 N₂ 가스를 사용하여 압력과 온도가 독립적으로 조절 가능하여 증기 가교방식보다 가교속도를 높일 수 있다.

외국의 CV케이블 발전 추이를 보면 그림 7과 같이 고압화 되어가는 추세로서 154 kV급은 이미 80년대 초에 실용화가 이루어졌으며 근자에는 500kV급의 실용화에 이르고 있다.

3.2.1.2 Silane 화합물을 이용한 방법

이 방법은 1967년 Dow Corning사에서 개발되었으며 압출 성형된 케이블을 온수나 수증기에 노출시킴으로써 가교를 완성시킬 수 있어 수가교(moisture crosslinking)라고 불려지고 있으며 다른 공정보다 저 비용으로 생산할 수

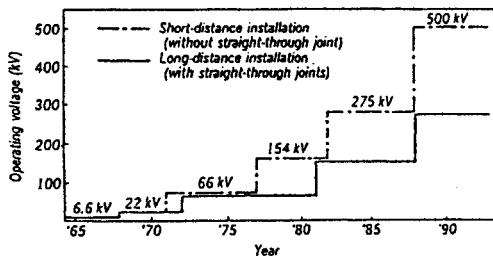


그림 7. History of changes in the highest operating voltage of XLPE cables.

표 5. Composition of Silane Crosslinking

Material	Chemical	Composition (phr)
Polyethylene	LDPE	100
Organic silane	Vinyl trimethoxy silane(VTMOS)	1.5-2.0
Organic Peroxide	Dicumyl Peroxide(DCP)	0.1-0.2
Catalyst	Dibutyl tindilaurate(DBTL)	0.05-0.1
Antioxidant	Irganox	0.1-0.5

Irganox : 2,2'-thiodiethyl bis(3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenyl) propionate.

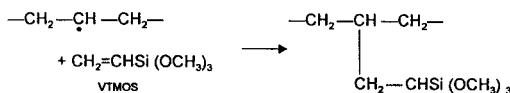


그림 8. Grafting reaction of VTMOs to PE.

있다는 장점을 갖고 있다.

일반적인 수가교의 조성은 표 5와 같다.

수가교의 가교반응은 DCP의 분해에 의한 free radical 생성 반응, 불포화 silane(vinyl trimethoxy silane : VTMOs)의 grafting반응(그림 8)과 가교를 위한 가수 축합반응(그림 9)으로 대별된다.

Free radical 생성반응은 그림 4의 식 (a), (b)와 같으며 grafting 반응에서는 silane 화합물의 이중 결합과 PE 라디칼이 반응하여 graft된 polyethylene을 형성한다.

개시제의 분해에 의하여 생성된 라디칼은 이차 탄소보다 삼차 탄소의 수소를 쉽게 취하여 고분자 라디칼을 형성하므로 grafting의 효율은 LDPE, LLDPE, HDPE순이다.

Graft된 VTMOs의 alkoxy group은 수분 존재 하에 가수분해가 일어나고 가교는 이때 생성된 silane group들간에 축합반응에 의해 이루어지며 DBTL(dibutyl tindilaurate)와 같은 carboxylate type의 촉매에 의하여 촉진된다.

VTMOs는 3개의 alkoxy 기능기를 갖고있어 그림 10과 같은 망상구조를 형성하여 동일한 가교도를 갖을 경우 과산화물에 의해 가교된 XLPE보다 silane에 의해 가교된 XLPE가 더 우수한 가열변형 특성을 나타낸다.

수가교 제조 공법에는 Dow Corning사가 개발한 Sioplas 공법, Maillefer사의 Monosil 공법과 Kabel-

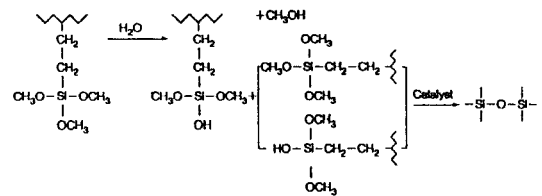


그림 9. Crosslinking reaction of silane grafted PE.

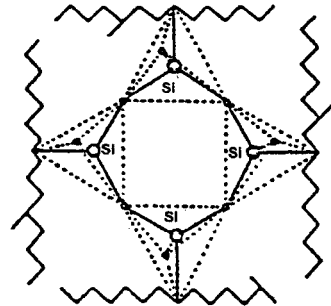


그림 10. Structure of crosslinked silane.

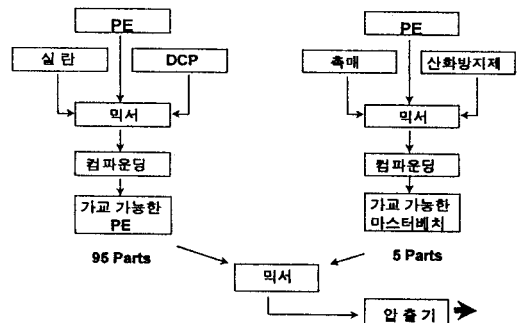


그림 11. Sioplas process.

metal사의 Siloxane공법 등이 있다.

1. Sioplas 공법

Sioplas 공법은 2단계 공법으로 우선 1단계로 PE, VTMOs와 개시제를 혼합한 후 압출기를 이용하여 만든 grafted polyethylene과, 가교촉진제, 산화방지제와 PE를 혼합하여 만든 master batch를 2단계에서 95:5의 비율로 혼합하여 압출기로 케이블을 압출시키는 공법으로 grafted polyethylene은 수분에 노출되면 가교반응이 일어날 수 있기 때문에 취급에 주의하여야 하며 공정이 복잡하고 단가가 높으나 물성이 안정하다는 이점이 있다.

2. Monosil 공법

BICC와 Maillefer사에서 개발한 1단계 공법으로 PE와 모든 첨가제를 혼합하여 압출기에서 혼련과 grafting이 단계적으로 이루어져 케이블을 압출시키는 공법으로 비용이 적게 들고 간단하다는 이점이 있으나 물성의 안정화를 위해선 정기적인 첨가제들의 적량 확인이 필요하다.

표 6. Characteristics of PVC for Insulation

구분	항목	단위	특성치
전기적 특성	Dielectric constant, 1 MHz		2.8-3.1
	Dissipation factor, 1 MHz		0.006-0.019
	Volume resistivity	$\Omega \cdot m$	$>1 \times 10^{16}$
물성	Density at 25 °C	g/cm^3	1.4
	Thermal expansion coefficient	K^{-1}	$5-6 \times 10^{-5}$
	Thermal conductivity	Cal/cm/sec/K	$3-56 \times 10^{-4}$
	Water absorption	%	0.04-0.4

표 7. General Composition of PVC Compound for Insulation

Resin	DP=1,000-1,700
Plasticizer	DOP, DODP, DINP, TOTM
Primary stabilizer	T-S, Pb-St, Ba-St, Ca-St
Secondary stabilizer	Bisphenol-A, Irganox 1035, 1010
Lubricant	PE or paraffin wax, St-Acid
Filler	Clay, $CaCO_3$

3. Siloxane 공법

Kabelmetal에서 개발한 modified two-stage 공법으로 모든 첨가제와 PE를 혼련하여 첨가제들을 PE resin속으로 균일하게 분산시킨 후 grafting과 케이블 피복이 압출기에서 이루어지는 방식으로 원료의 장시간 보관이 어렵다.

3.3 Ethylene Propylene Rubber(EPR)

EPR은 ethylene, propylene과 제3의 단량체(보통 다이엔계통)로 합성한 재료로서 5~35 kV의 전력용 케이블의 우수한 절연재료이다.

EPR 고무절연 케이블의 특징은

- 1) 전기적 파괴강도가 XLPE와 동등
- 2) 내트랙킹성, 내코로나 특성이 우수하다
- 3) 내열성은 XLPE와 같이 연속 사용 시 최고허용 온도가 90 °C이다.

4) XLPE가 결정성이 높은 반면 EPR은 무정형 또는 반 결정성으로 XLPE에 비하여 굴곡 특성이 우수하다.

XLPE는 충전제를 사용하지 않으나 EPR은 clay나 silica와 같은 충전제를 50% 이상 사용하며 용도로는 이동용 전력케이블, 전자현미경 케이블과 자동차 케이블 등이 있다.

3.4 PVC¹⁹⁻²¹

열가소성 수지인 PVC는 1932년 도입된 이래 1 kV이하의 케이블의 절연체로서 사용되어왔다. PVC 자체로는 열적 특성이 취약하고 가공이 힘들어 가소제, 충전제, 안정제와 개질제 등을 혼련하여 사용하며 배합에 따라 내열성, 내한성 및 경도 범위가 크게 변하므로 용도에 맞는 재질의 선정이 용이하다. 내전압 및 절연 저항이 비교적 높아 절연 및 Jacket 재질로 가장 널리 사용되고 있으나 유전율 및 유전정접이 크기 때문에 일반적으로 고주파 및 고전압용 절연 재질로는 사용되지 않는다. 난연성, 내유성, 내오존성 및 내수성이 좋다.

PVC 수지의 합성방법에는 유화중합(emulsion poly-

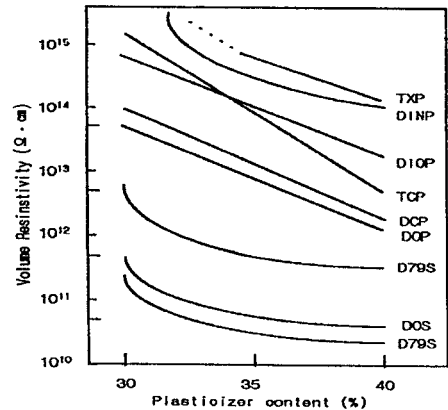


그림 12. Effect of plasticizer on the volume resistivity.

merization), 현탁중합(suspension polymerization)과 괴상중합(bulk polymerization)의 3가지가 있으나 유화중합은 도전성을 갖는 유화제를 사용하고 괴상중합은 중합시 열관리가 힘들고 제품의 품질관리가 어려워 전선용으로는 현탁중합에 의하여 제조된 중합도 1,000 또는 1,700의 PVC가 주로 사용되고 있다. 전선용PVC compound에 주로 사용되는 첨가제는 표 7과 같다.

전기적 성질에 대한 충전제의 영향을 살펴보면 일반적으로 절연체 내에 이온성 불순물이 존재하면 전기적 특성이 떨어진다.^{22,23} 가소제와 안정제의 경우 사용량이 증가할수록 체적저항이 감소하는데 이는 가소제가 이온성 불순물로 작용하기 때문이며 안정제는 free HCl을 포착하여 이온의 발생을 억제하거나 가소제 중에서의 도전성 불순물을 흡착하기 때문으로 생각된다.

4. 반도체용 XLPE

고압 전력케이블에는 도체의 전계 차이 완화와 도체와 절연체간 계면에서 발생하는 부분방전 및 절연체와 도체의 직접 접촉에 따른 열화반응을 방지하기 위해 절연체의 내부와 외부에 반도체층을 둔다(그림 2 참조). 반도체층의 구비조건은 다음과 같다.

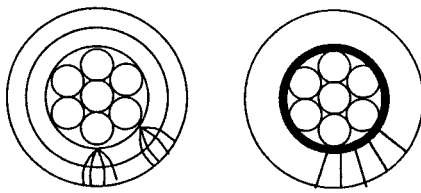
1) 도체, 절연체의 차폐층에 돌출물이 없이 평활해야 한다.

2) 도체, 절연체와의 접착력이 좋아야 한다.

3) 반도체층에 불순물이 적어야 한다

초기의 반도체층은 carbon black이 함유된 tape류가 사용되었으나 tape의 풀린 끝단에서 전계 집중에 의한 절연층 파괴와 같은 문제점이 발생하였으며 이러한 문제점을 해결하기 위하여 열가소성 수지와 XLPE를 사용한 반도체 재료가 개발되었다.

1970년대 케이블의 제조는 반도체층과 절연체를 차례



반도전층이 없는 경우

반도전층이 있는 경우

그림 13. Effect of semiconductor layer on the electric field.

표 8. Characteristics of Semiconductor Materials

구 분	항 목	단 위	특 성 치
전기적 특성	DC volume resistivity	ohm-cm	
	at 23 °C		8
	at 60 °C		25
	at 90 °C		34
	at 110 °C		32
	at 130 °C		31
물성	Density at 23 °C	g/cm ³	1.13
	Brittleness tem.	°C	-55
	Tensile strength	psi	2,800
	Elongation	%	200
압출온도	121-138 °C		

로 압출하는 방식으로 케이블 사고의 원인이 되는 오물의 유입이 많았으나 이중(dual), 삼중(triple)압출 기술의 발달로 오물의 유입은 현저히 줄어들 수 있었다.

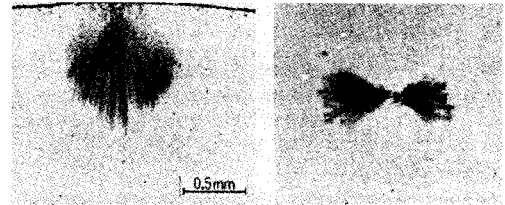
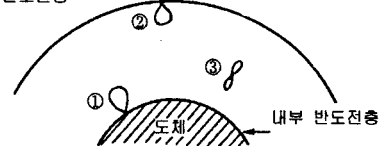
표 8은 반도체층 PE compound의 특성을 나타내고 있다. 반도체층의 base 수지는 절연층 수지와 밀착성이 우수해야 하며 다량의 carbon이 섞여있어 점도가 높아 절연재료와의 압출용융 특성을 맞추기 위해서는 절연층 수지보다 분자량이 적어야 한다. 또한 절연체와 외도가 동시에 압출되어 가교시키기 때문에 이들의 열 전달속도를 고려하여 가교반응속도도 달리하여야 한다

반도전 재료로는 LDPE, EEA(ethylene ethyl acrylate), EVA(ethylene vinyl acetate)와 EP고무 등이 있으나 현재는 EVA가 사용되고 있다. 외도 반도체층의 경우 케이블 포설 시 절연체와의 분리능이 좋아야 하며 이는 EVA의 vinyl acetate 함량을 조절하여 가능하고 vinyl acetate의 함량이 감소하면 분리능이 증가한다.

5. 수트리(Water Tree)²⁴⁻²⁷

수트리는 케이블 사고의 가장 중요한 요인 중 하나로서 1967년 PE의 수중 모터 선을 이용 침수 관전시험을 행한 결과 절연체 중에 다수의 트리가 발생한 사실이 발표된 이래 꾸준히 연구의 대상이 되어왔다. 절연체와 반도체층 계면의 불균일성은 전계 집중을 일으키며 절연체로의 수트리 성장을 촉진 케이블의 조기 열화를 일으켜 전기적 파괴강도 및 전기적 특성의 저하 원인이 되며,

외부 반도체층



수트리

Bow tie

그림 14. Structure of water tree.

궁극적으로는 케이블의 전기적 파괴를 유발한다. 수트리의 발생은 두 단계로 이루어지리라 생각된다: 첫째, 불균형한 전기장 하에서 절연체로 물분자의 침투가 일어나고 둘째, 침투한 물분자의 전기분해로 생성된 반응성 산소가 절연체를 열화시키는 화학적인 산화반응이다.

수트리는 발생기점과 형태에 따라 그림 14와 같이 ① 내도 수트리, ② 외도 수트리와 ③ bow tie 등 3종류로 구분된다. 내·외도 수트리는 반도체층의 돌기부분을 기점으로 발생하고, bow tie는 절연체 중의 이물이나 void 등이 기점에서 발생한다.²⁸ 수트리 발생을 억제하기 위해서는 그 발생원인을 제거하여야 하므로 반도체층의 평활도를 높이거나 절연체의 경우에 있어서는 이물, void와 수분 등의 유입을 최소화하는 것은 물론이며, 현재 진행되고 있는 연구 중에는 절연체에 산소를 함유하는 방향족 화합물, 질소화합물 또는 ferrocene, hydroquinone과 ethoxy-terminated siloxane oligomer의 복합 첨가제를 넣어주거나, 극성을 띠는 EVA와 소량 blend 또는 밀도가 아주 낮은 polyethylene(VLDPE)를 첨가해 주는 방법도 있다.²⁹⁻³¹

6. 난연화

케이블의 절연 및 피복재료는 유기재료이기 때문에 화재 발생 시 쉽게 연소되어 다량의 열을 발생할 뿐 아니라 연기 및 유독 가스를 발생하여 막대한 재산 피해는 물론 인명피해를 초래하기 때문에 난연화는 오래 전부터 관심을 가지고 개발되어온 분야이다.

난연화 방법에는 크게 할로젠계 난연제를 사용하는 경우와 비할로젠계 난연제를 사용하는 경우로 나눌 수 있는데 할로젠계 난연제로 사용되는 bromine과 chlorine이 가공 중이나 연소 시 분해되어 유독성 부식가스를 발생시

켜 사용이 규제되고 있어 비할로겐계 물질을 이용한 무독과 저연(low smoke)의 난연제를 개발하기 위해 많은 노력이 이루어지고 있다.

전선 피복재료의 base 수지로는 EVA와 EEA를 주로 사용하는데 이는 무기 충전제의 양을 높일 수 있기 때문이며 무기계 난연제로는 수산화 알루미늄($\text{Al}(\text{OH})_3$), 수산화 마그네슘($\text{Mg}(\text{OH})_2$) 등을 사용한다.³² 이들은 흡열 반응이며, 열에 의해 분해되어 불연성 기체를 방출하게 되어 연소성 혼합기체를 희석시키고 고분자 표면을 보호하여 산소를 차단시킨다.

수산화 알루미늄은 무기계 난연제 중 가격이 저렴하여 가장 많이 사용되고 있으나 분해온도가 200 °C 정도로 가공온도가 낮은 고분자에만 사용이 가능하며 난연성 부여를 위하여 다량 사용해야 하기 때문에 기계적 강도 및 가공성이 저하된다. 수산화 마그네슘은 300 °C 이상에서 분해되며 가공온도가 높은 열가소성 고분자에도 사용이 가능하고 수산화 알루미늄에 비해 난연 특성, 연기억제 효과, char 생성이 우수하나 고가인 것이 단점이다.

보통 난연 열가소성 고분자는 무기계 난연제의 단독사용보다는 Zinc borate와 같이 난연제의 상승효과를 부여하는 첨가제를 병용해서 사용하기도 한다.

난연 재료로서 요구되는 물성으로는 1) 염소지수와 전기전도도, 2) 산소지수, 3) 연기밀도 등이 있다.

7. 결 언

지금까지 전력케이블에 사용되고 있는 재료에 대하여 살펴보았다. 전력케이블은 전력수요의 급증으로 고압화되어가고 있으며, 절연재료의 성능향상과 가공기술의 발달로 모든 재료가 XLPE로 대체되어 가고 있다. 국내에서는 XLPE를 사용하는 초고압 케이블로서는 아직 154 kV급만이 실제적으로 운영되고 있으나 가까운 일본만 하더라도 1980년대 중반 500 kV급이 이미 시험운전을 마쳐 실용화되고 있다. 따라서 재료적인 측면에서는 절연체의 기능을 저하시키는 요인인 1) 절연체와 내·외도 반도전층간의 돌기, 2) 절연체 내의 void, 3) 절연체 내의 이물질 등을 수 ppm이하로 유지 관리할 수 있는 extra-clean시스템과 반도전층은 돌기의 원인이 되는 수분 등을 최소화시켜 supersmooth surface를 갖을 수 있도록 하는 것이 중요하다. 또한 비할로겐 계통의 무독성, 저난연 케이블은 이미 서구 및 일본 등 선진국에서는 실용화되어 점점 사용량이 증가되는 추세에 있고 국내에서도 그 수요가 확대될 전망이다.

참 고 문 헌

1. T. Hayami, "CV cable", ed. by T. Ushiku, Corona Publishing, Tokyo, 1986.
2. E. W. Fawcett, R. O. Gibson, M. H. Perrin, J. G. Paton, and E. G. Williams, Brit. Patent 471,590 (1937).
3. A. Zletz, U. S. Patent 2,692,257 (1952).
4. J. P. Hogan and R. L. Banks, Belg. Patent 530,617 (1957).
5. J. P. Hogan and R. L. Banks, U. S. Patent 2,824,721 (1958).
6. K. Ziegler, *Kunststoffe*, **45**, 506 (1955).
7. K. Ziegler, Belg. Patent 533,362 (1955).
8. I. J. Levine and F. J. Karol, U. S. Patent 4,011,382 (1979).
9. V. L. Lanta and D. H. Hermann, *J. Polym. Sci.*, **28**, 633 (1958).
10. G. Attalla and F. Bertinotti, *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 3503 (1983).
11. A. Y. Coran, "Science and Technology of Rubber", ed. by F. R. Eirich, chap. 7, Academic Press, New York, 1978.
12. L. O. Amberg, "Vulcanization of Elastomers", eds. by G. Alliger and I. J. Sjöthun, Reinhold, New York, 1964.
13. R. A. Raff and J. B. Allison, "ACS High Polymer Ser. Polyethylene", Interscience, New York, 1956.
14. D. J. Bullen, "The Silane Crosslinking Behavior of Low Density Polyethylene Cable Compounds", ed. By BXL Plastics, Stirlingshire, UK, 1983.
15. A. Currat, "Silane Crosslinked Insulation for Medium Voltage Power Cables", Maillefer S. A Report, Maillefer S. A., Hadley, Mass., 1983.
16. D. Bharat, "Handbook of Elastomers", eds. by A. K. Bhowmick and H. L. Stephens, Marcel Dekker, New York, 1988.
17. M. Dole, C. Gupta, and N. Gvozdic, *Adv. Radiat. Process., Radiat. Phys. Chem.*, **14**, 711 (1979).
18. T. Mizukami, *IEEE Trans. PAS-94*, 468 (1975).
19. F. Rodriguez, "Principles of Polymer Systems", chap. 13, McGraw-Hill, New York, 1970.
20. M. Munzer and E. Trommersdorff, "Polymerizations", ed. by C. E. Schildknecht, chap. 5, Wiley-Interscience, New York, 1977.
21. M. Macoveanu and K. H. Reicher, *Angew. Makromol. Chem.*, **44**, 141 (1975).
22. L. H. Wartman, *SPE J.*, **20**, 254 (1964).
23. R. E. Price, *Polym. Eng. Sci.*, **6**, 75 (1966).
24. T. Tanaka, T. Fukuda, S. Suzuki, Y. Nitta, H. Goto, and K. Kubota, *IEEE Trans. PAS-93(2)*, 693 (1974).
25. T. Miyasita, *IEEE Trans. EI-6*, 129 (1971).
26. T. Tabata, *IEEE Trans. PAS-91*, 1361 (1972).
27. W. Vahlstrom, *IEEE Trans. PAS-91*, 1023 (1972).
28. S. Pelisson, *IEEE Int. Symp. Elect. Insul.*, 339 (1990).
29. T. Kawashima, T. Maki, T. Takahashi, K. Maeda, S. Yoshikawa, and J. Suzuki, *Fujukura Technical Review*, **18**, 59 (1989).
30. H. Kato and Y. Miyashita, *Mitsubishi Cable Industries Review*, **72**, 16 (1986).
31. H. Kato, Y. Miyashita, and Y. Nishioka, *Mitsubishi Cable Industries Review*, **73**, 17 (1987).
32. P. R. Hornsby and C. L. Watson, "Fundamental Aspects of Polymer Flammability", eds. by G. Cox and G. Stevens, p. 17, Gibbons Barford, Wolverhampton, 1977.