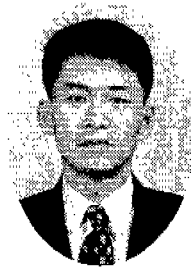


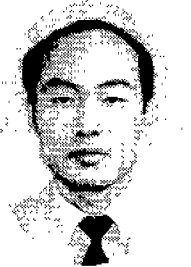
지중 전력케이블용 외피재료 적용 동향



한재홍
(한전전력연구원 선임연구원)



김주용
(한전전력연구원 선임연구원)



김동명
(한전전력연구원 선임연구원)

1. 서론

현재 지중선로에 사용하는 배전용 전력케이블은 대부분 외피를 채택하고 있다. 전력케이블에서 외피를 사용하는 것은 대개 다음과 같은 3가지 이유 때문이다. 첫째는 전력케이블이 땅속에서 운전되기 때문에 외부로부터 유입되는 수분과 이온성 불순물로부터 절연층을 보호하기 위함이다. 둘째로는 케이블 포설시에 발생할 수 있는 외상으로부터 절연층을 보호하기 위해서이며, 셋째로는 수분에 의한 중성선의 부식을 최소화하기 위함이다. 따라서 적절한 외피를 전력케이블에 적용하는 기술은 케이블 수명을 연장시키는 가장 효과적이고 경제적인 방법이라고 할 수 있다.

실제로 북미의 경우 1980년대 초반까지 경제성을 고려하여 외피가 없는 전력케이블을 적용하였으나, 수트리(water tree) 등에 의해 조기고장이 발생하면서 현재는 거의 모든 전력회사가 전력케이블에 외피를 적용하여 운전하고 있다 [1].

국내의 경우에는 전통적으로 PVC (polyvinyl chloride) 재질의 외피를 지중 전력케이블에서 적용하고 있으며, 일부 전력구 케이블에서만 폴리올레핀 (polyolefin) 계열의 재질을 외피로 사용하고 있다. 전력구 케이블에서 PVC를 적용하지 않는 이유는 화재발생시 유출되는 염소가스가 인체에 매우 유해하기 때문이다.

본 고에서는 전력케이블 외피의 이점, 외피 적용방법, 외피용 재료의 종류 및 요구성능 등에 대해 기술하고자 한다.

2. 전력케이블 외피의 이점

전술한 바와 같이 전력케이블 외피는 외부로부터 절연층과 중성선을 보호하여 케이블이 기대수명까지 사용될 수 있도록 도와주는 역할을 한다. 배전용 전력케이블에서 비기계적인 문제로 고장이 발생하는 것은 주로 수트리 발생에 의한 것으로 알려져 있다. 이러한 수트리가 발생하면 유전강도의 손실이 발생하는 것으로 알려져 있으나, 이에 대한 메커니즘이나 절연파괴까지의 과정에 대해서는 아직까지도 완전히 이해되고 있지 않은 실정이다[2]. 하지만 대부분의 연구자들은 수트리가 수분과 전계의 복합적인 작용으로 발생한다는 데 동의하고 있다.

이러한 수트리와 관련된 문제를 해결하는 데에는 금속 laminate를 사용하는 것이 가장 효과적인 것으로 알려지고 있으나, 케이블 원가가 다소 높아지는 문제가 있다. 따라서 배전용 전력케이블에서 수분과 이온성 불순물을 가장 경제성 있게 억제하는 방법은 압출한 고분자 외피를 사용하는 것이다. 표 1에 나타난 것처럼 미국의 Virginia Power에서 실시한 실험에서도 고분자 외피를 사용한 시료가 외피가 없는 시

표 1. Virginia Power에서의 케이블 열화시험.

시험시료	절연두께 (mm)	시험전압 (kV)	시험 시료수	고장발생 시료수
외피 없음	6.6	52	14	14
외피 있음	6.6	52	6	5
외피 없음	8.8	52	14	9
외피 있음	8.8	52	6	1

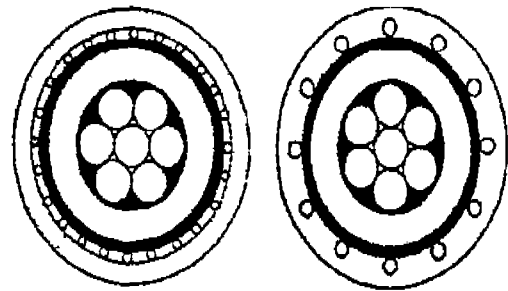
료보다 우수한 성능을 나타내었다. 표에서 가속열화시험은 722일 동안 진행한 것이며, 특히 외피가 있는 시료의 경우에는 고장 발생이 더욱 늦게 나타난 것으로 보고되었다[3].

이와 같이 외피는 절연층으로의 수분 유입을 억제하는 역할을 한다. 또한 외피는 이외에도 다른 장점을 제공한다. 전력케이블을 포설하는 방법은 전력회사마다 다르지만, 일반적으로 직매방식의 경우에 고장의 90%가 외상인 것으로 보고되고 있으며, 직매방식을 거의 사용하지 않는 국내의 경우에도 고장통계에서 외상 고장이 케이블 고장의 20% 이상을 점유하는 것으로 알려져 있다[4, 5]. 따라서 인성이 우수한 재질을 외피로 사용하게 되면 포설이나 굴착작업시에 기계적 손상으로부터 케이블 절연층을 보호할 수 있다.

ICC에서 수행한 케이블 중성선 부식에 대한 설문조사에서도 외피가 있는 전력케이블이 우수한 특성을 나타내었다. 즉, 1988년에 수행된 조사에서 외피없이 직매된 케이블은 100마일당 0.65건의 중성선 부식을 보였지만, 외피가 있는 케이블은 전혀 부식이 보고되지 않았다[6]. EPRI의 연구결과에 따르면 LLDPE (linear low density polyethylene) 재질의 캡슐형 외피를 사용할 경우 5년 이상의 케이블 수명 연장을 얻을 수 있다고 추천하고 있다[7].

3. 외피 적용방법

전력케이블에 외피를 적용하는 방법은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫째는 국내에서 많이 사용하는 방법으로 중성선 위에 압출한 고분자 외피층을 입히는 overlaying 방법이다. 이 방법은 가장 저렴하게 제조할 수 있는 장점을 갖고 있는 반면 수분 등에 노출될 가능성은 가장 높다. 둘째로는 기존의 overlaying 외피에 금속 laminate층을 적용하는 방법으로 수분 및 이온성 불순물을 억제에 탁월한 성능이 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 방법은 유럽 대부분 국가와 북미, 일본의 일부 전력회사에서 채택하고 있는 방법이다. 단점으로는 케이블 원가가 다소 상승한다는 것이다. 셋째는 북미의 대부분 전력회사에서 채택하고 있는 캡슐형 (encapsulat-



(a) overlaying (b) encapsulating

그림 1. 외피 적용방법.

ing) 외피이다. 캡슐형 외피는 외피가 손상되더라도 케이블 방향 (machine direction)으로의 수분침투를 감소할 수 있다는 장점이 있지만, 케이블 접속작업에서 다소 불편한 점이 단점으로 지적되고 있다.

4. 외피용 재료

전력케이블의 외피 재료로서 초기에는 PVC가 주로 사용되었다. PVC가 도입된 이유는 저가이면서도 난연성이 있었기 때문이다. 하지만 1980년 초반부터 폴리에틸렌 (polyethylene) 재료가 PVC를 대체하기 시작하였다. PVC와 비교하여 폴리에틸렌은 두텁게 낮은 수증기 투과율을 가졌고, 물리적 성질이 우수하면서도 경량인 장점을 보유하고 있다. 폴리에틸렌은 인성이 강하기 때문에 케이블 코어를 더욱 잘 보호할 수 있어 케이블 수명을 연장시킨다.

폴리에틸렌 자체로만 수분을 완전하게 차단할 수 없지만 MDPE (medium density polyethylene)와 부풀음 테이프를 적절하게 사용하면 케이블 radial 방향으로의 수분침투를 100년 이상 억제할 수 있다고 보고된 바 있다. 같은 연구에서 PVC와 부풀음 테이프로는 케이블 radial 방향으로의 수분침투를 억제하기 곤란하다고 결론짓고 있다[8]. 최근에는 외피용 재료에 이온 scavenger나 이온 exchanger를 첨가하여 지하수 내의 이온성분 확산을 억제하는 연구도 진행되고 있다 [9].

기존의 PVC 외피는 높은 온도에서 분해되어 케이블 절연에 영향을 미친다고 알려져 있다. 케이블 열부하 특성에 대한 연구에서 PVC 외피는 130℃ 이상의 도체온도에서 장시간 운전되는 경우 적합하지 않다고 보고되고 있다 [10].

4.1 외피용 컴파운드로서의 폴리에틸렌 종류

전력케이블 외피로 사용되는 폴리에틸렌을 제조하는 공정은 2가지로 구분된다. 첫째는 1940년대 개발된 것으로

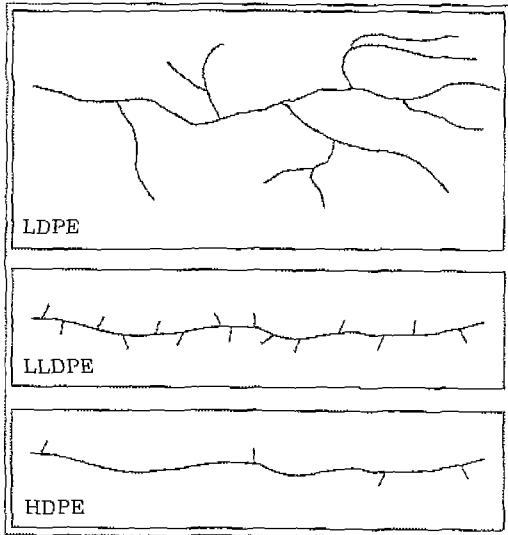


그림 2. LDPE, LLDPE 및 HDPE의 구조.

LDPE (low density polyethylene)를 제조하는데 사용되는 것이다. 여기에서 에틸렌은 고압에서 자유 라디칼 반응으로 고분자화된다. 고압공정 LDPE는 autoclave 반응기를 사용하여 batch로 제조되거나 혹은 tubular 반응기로 연속 제조된다. 각 경우에 반응온도와 압력은 약 300℃와 30,000 psi로 매우 높다. 이렇게 만들어진 LDPE 분자는 특성상 그림 2와 같이 불규칙한 긴 사슬 분지(long chain branching)로 구성된다.

둘째로는 선형 폴리에틸렌인 LLDPE, MDPE, HDPE

(high density polyethylene)를 제조하는데 사용되는 공정이다. 여기에서는 저압에서 유기금속 촉매를 사용한다. 반응온도와 압력은 100℃ 부근과 100~300 psi 정도이다.

그림 2에서 보여지는 것처럼 LLDPE와 HDPE 같은 분자는 일반적으로 선형의 구조를 갖는다. 선형의 수지는 긴 사슬 분지보다는 짧은 사슬 분지를 나타낸다. 이러한 분자구조에서의 근본적 차이는 LDPE와 LLDPE가 유사한 밀도임에도 불구하고 기계적 특성 및 가공성 등에서 차이를 나타내게 한다.

저압공정에서 분자는 고분자화 과정에서 폴리에틸렌에 첨가된 올레핀 공단량체로부터 형성된다. 밀도는 폴리에틸렌 결정화도와 관련이 있으며, 공단량체의 종류와 함량에 따라 쉽게 조절할 수 있다.

이 중에서 LLDPE는 지중 전력케이블의 외피로 가장 널리 사용되고 있는데, 그 이유로는 기계적 성질, 범용성, 수증기 투과 저항성, 내환경 저항성(ESCR: environmental stress cracking) 등이 우수하기 때문이다. 다른 두 선형 폴리에틸렌인 HDPE와 MDPE는 우수한 특성을 갖고는 있지만, 높은 밀도로 인해 딱딱한 것이 단점이다.

일부 전력회사는 여전히 LDPE를 규격에서 명시하고 있는데, 이는 LDPE가 유연하고, 다소 낮은 인성을 갖고 있어서 현장에서 취급하기가 용이하기 때문이다.

4.2 외피용 재료의 요구성능

전력케이블 코어를 잘 보호하기 위해서 외피 재료는 취급이나 포설시 저온에서 취성(embrittlement) 저항성을 가져야 한다. 또한 운전 중의 높은 온도에서 변형이나 열화가 잘 일어나지 않아야 한다. 그리고 외피가 접할 수 있는

표 2. 폴리에틸렌 외피 컴파운드의 대표적 성질.

물리적 성질	ASTM 시험법	단위	LDPE	LLDPE	MDPE	HDPE
MI (190℃, 2.1 kg)	D1238	g/10min	0.25	0.55	0.70	0.15
밀도, 23℃	D1505	g/cm ³	0.93	0.93	0.95	0.96
인장강도	D638	psi	2100	2250	3500	4000
신장율	D638	%	650	650	900	800
DSC 용융점		℃	110	119	125	130
Flexural Modulus	D790	psi	38,000	55,000	90,000	145,000
유전상수 (1 MHz)	D1531		2.60	2.50	2.52	2.56
유전손실 (1 MHz)	D1531	Radians	0.005	0.0003	0.0003	0.0003
유전강도 (S/T)	D149	V/mil	NA	1230	NA	NA

표 3. 폴리에틸렌 외피 컴파운드의 보호 성능.

물리적 성질	시험법	단위	PVC	LDPE	LLDPE	MDPE	HDPE
열변형, 100℃	ICEA	%		0	0	0	0
115℃		%		90	22	7	0
121℃		%	20	NA	NA	NA	NA
125℃		%		Melted	90	40	0
135℃		%		Melted	Melted	Melted	Melted
Notched LTB, F ₅₀ Temp.	D746	℃	-35	-35	-60	-60	-60
마모저항성	D3389	mg/100 rev		29	22	16	14
Shore D 경도	D2240			54	56	61	68
관통 저항성		lb		2600	3000	3600	4000
수증기투과율	E96	g/h/m ²	310.0	1.16	0.74	0.51	0.32

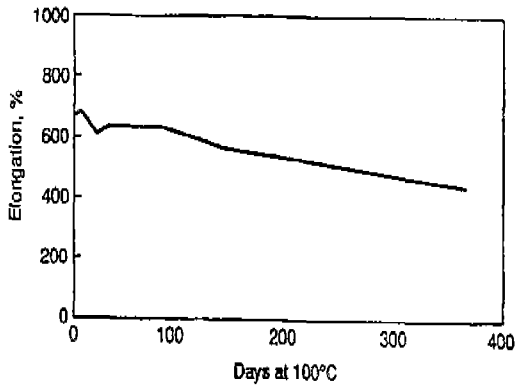


그림 3. LLDPE 외피의 오픈 열화시험.

stress cracking agent (합성세제, 오일, 지방, 유기산 등)에 견디어야 하며, 수분 침투를 억제하고 기계적 보호를 제공해야 한다.

표 2와 3에 나와 있는 모든 폴리에틸렌 외피 컴파운드는 잘 분산된 작은 입자의 카본블랙 첨가에 의해 태양광에 의한 열화로부터 보호된다. 또한 stress cracking에 저항할 수 있도록 배합되어 있어 10%의 "IGEPAL" 시약에서 7일 이후에도 불량이나 나타내지 않는다[11].

표 3에 4가지의 종류의 폴리에틸렌에 대한 열변형 성능이 나와 있다. 시험절차는 ICEA S-66-524에 명시된 것처럼 실시하였지만, 시험온도는 열가소성 폴리에틸렌에 대해 규정된 90℃보다 높은 100~130℃ 범위에서 실시하였다. 표 2

에서 LLDPE가 LDPE보다 9℃ 높은 용융점을 갖고 있기 때문에 성능에서 LDPE보다 우수한 장점을 갖는다.

비상시 운전 도체온도를 130℃로 규정한 전력회사에서는 AEIC-CS5-94의 thermomechanical test를 요구할 수 있다. 이 시험의 목적은 케이블 디자인이 130℃의 도체온도에서 만족하게 운전될 수 있는가를 검증하기 위함이다. 이 시험에서는 시험종료 후 외피에 크랙이 있으면 실패하는 것으로 간주한다. 알려진 바로는 LLDPE 외피를 가진 케이블은 이 시험을 통과하는 것으로 보고되고 있다.

고분자의 열적 안정성을 평가하기 위하여 전통적으로 오븐에서 열화시킨 다음 기계적 특성을 측정한다. LLDPE 외피 컴파운드를 100℃ 순환오븐에서 장기간 열화시킨 다음 얻은 결과가 그림 3에 나와 있다. 그림에서 LLDPE는 열적 열화에 의한 취성 저항성이 우수한 것으로 나타나 있다.

저온 취성 저항성은 ASTM D746에 따라 평가되는데, 시험에서는 notch가 있는 시료를 사용한다. 이것은 취금이나 포설시 발생할 수 있는 결함을 모의하기 위한 것이다. 그러므로 여기에서 얻은 결과는 추운 환경에서의 케이블 성능을 잘 나타내 준다.

마모 저항성 데이터는 Taber 마모시험으로 얻어지는데, 충분한 폴리에틸렌 외피 컴파운드를 회전판에 설치하고 wheel과 마찰시켜 회전수에 따른 중량손실을 측정하는 것이다.

관통 저항성 (cut-through resistance)은 인장시험기의 압축모드로 측정할 수 있다. Wedge 형태의 칼날이 1.9 mm의 시료를 15초내에 관통하는데 걸리는 최대 힘을 구하는 방법이다. 칼날의 폭이 25.4 mm이고, 45도 각도의 wedge 모

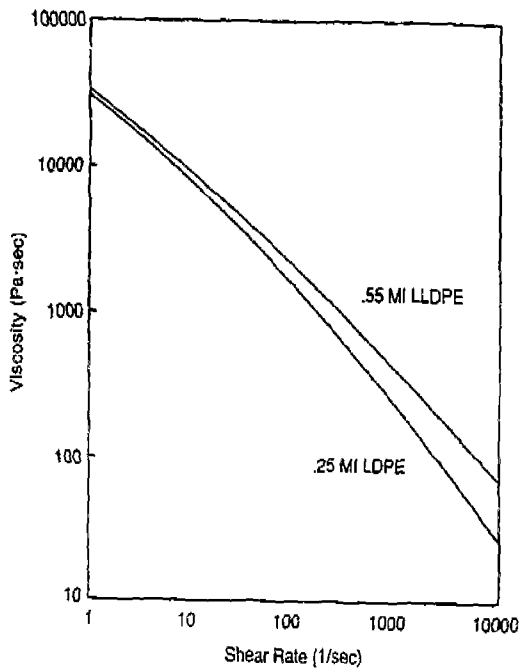


그림 4. LDPE와 LLDPE 외피의 용융점도 (220°C, 2000 psi)

양으로 가공하여 시료와 접촉하는 칼 끝부분 넓이가 0.76 mm가 되도록 제작한다.

표 3에서 LLDPE는 LDPE보다 모든 특성에서 우월한 성능을 보이며, HDPE는 LLDPE보다 밀도 증가에 따라 약간 우수한 특성을 보인다. 하지만 유연성 측면에서는 HDPE가 취약한 특성을 갖는다.

4.3 LDPE와 LLDPE의 유변학적 차이

표 2에서 LLDPE는 LDPE보다 높은 용융지수 (MI; melt index)를 보이지만 일반적으로 말하면 LLDPE는 실제 압출조건에서 높은 용융점도를 갖는다. 그림 4는 대표적인 케이블 압출조건에서 LDPE와 LLDPE의 shear rate에 따른 점도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 LLDPE의 점도는 100~5000 범위의 shear rate에서 LDPE의 점도보다 1.5~2.5배 높다.

이러한 높은 점도로 인해 LLDPE는 높은 온도에서 압출해야 하지만, LDPE를 압출하기 위해 설계된 기기에서 가공할 경우 LDPE보다 rpm당 더 많은 압출물을 얻을 수 있다. 최적의 LLDPE 압출을 위해서는 구형의 기기를 변형할 필요성도 발생한다.

기존의 동력 시스템을 교체하지 않고 구형의 압출기를 개선하기 위해 새로운 screw 설계가 개발되었다. 이러한

screw 설계는 낮은 온도에서 기존의 LDPE screw보다 10~40% 높은 생산율을 가능하게 하였다.

5. 결론

전력케이블에서 외피가 차지하는 역할이 점점 강조되고 있다. 따라서 외피 재료의 적용에서는 원하는 요구성능과 특성간의 면밀한 분석이 요구된다.

전술한 바와 같이 폴리에틸렌 계열의 재료를 외피로 사용하게 되면 수분침투나 외상에 의한 고장을 방지하여 궁극적으로는 케이블의 수명을 연장할 수 있다.

최근 국내에서도 기존의 PVC 외피가 환경적 부담을 주는 물질이고, 또한 전력케이블 외피로서의 성능을 충분히 발휘하지 못한다는 사실을 인지하고 있다. 따라서 PVC를 대체할 수 있는 재료의 실제 적용을 위한 연구가 진행 중에 있다. 또한 수분침투에 의한 고장이 중요한 문제로 부각됨에 따라 케이블 외피구조를 개선하기 위한 작업도 고려되고 있다. 향후 이러한 연구들을 통하여 적절한 재료가 외피에 적용된다면 케이블 품질의 신뢰성이 크게 향상될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] J. H. Dudas, "Technical Trend in Medium Voltage URD Cable Specification", IEEE Electr. Insul. Magazine, Vol. 10, No. 2, pp. 7-16, 1994.
- [2] J. H. Lawson and W. Vahlstrom, "Investigation of Insulation Deterioration in 15 kV and 22 kV Polyethylene Cables Removed from Service", IEEE Trans, PAS, Vol. 92, pp. 824-831, 1973.
- [3] R. Decker, Minutes of ICC, IEEE PES 82nd Meeting, 1988.
- [4] R. M. Eichhorn, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-12, No. 1, pp 2-18, 1977.
- [5] 한국전력공사, "2000년 지중고장 분석 및 대책", 2000.
- [6] J. G. Valdes, Minutes of ICC, IEEE PES 82nd Meeting, 1988.
- [7] EPRI, Distribution Cable Research Digest, Vol. 1, 1989.
- [8] E. F. Steennis, "The Construction of High-Voltage Polymer Insulated Cable with Respect to Radial Watertightness and Partial Discharge Measurements", IEEE/PES T&D,

1994.

- [9] T. P. Arnold, "EPRI Project RP 3522-01 Improved Medium Voltage Cable Manufacturing Ion Scavenging", Minutes of ICC, IEEE PES, 1994.
- [10] C. Katz, "Thermal Overload Characteristics of Extruded Dielectric Cables", Minutes of ICC, IEEE PES, 1994.
- [11] G. Graham and S. Szaniszlo, "Insulating and Semiconductive Jackets for Medium and High Voltage Underground Power Cable Applications, IEEE Electr. Insul. Magazine, Vol. 11, No. 5, pp. 5-12, 1995.

저 자 약 력

성명 : 한 재 흥

❖ 학 력

1990년 단국대 재료공학과 (학사)
1992년 단국대 재료공학과 (석사)
1996년 고려대 재료공학과 (박사)

❖ 경 력

1996년-현재 한전 전력연구원 선임연구원

성명 : 김 주 용

❖ 학 력

1992년 경북대 전기공학과 (학사)
1994년 경북대 전기공학과 (석사)

❖ 경 력

1994년-현재 한전 전력연구원 선임연구원

성명 : 김 동 명

❖ 학 력

1986년 홍익대 전기공학과 (학사)
1999년 고려대 재료공학과 (석사)

❖ 경 력

1986년 한국전력공사 입사
1999년-현재 한전 전력연구원 선임연구원