2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

난연성 동심중성선 전력 케이블의 재료에 대한 평가 기술

소진중, 심대섭,
한국전기연구원

Assessment of material analysis for Halogen free flame retardant concentric neutral type Power cable

Jin Joong Soh, Dae Sub Shim
KERI

Abstract - The test methods on materials of electrical power cable are used in accordance with 25 specifications of IEC, ASTM, ICEA, KS and KEPCO Spec.

The validation of test methods were checked and stablished by solving the problems occurred during the test. These tests are flammability, degree of acidity of gases, amount of halogen acid gas, smoke density, oxygen index, amount of ion in semiconductor, void, amber, contaminant and water tree, crosslinked density. Then the performance of power cable made by A, B, C and D company were evaluated and compared.

1. 서론

동심중성선 전력케이블은 다중접지 계통의 지중 배전선로용으로, 수밀형 압축도체 위에 가교 폴리에틸렌을 절연하여, 연동선을 감아 붙인 중성선을 갖고, 중성선 상하에는 부풀음 테이프를 감아, 그 위에 무독성 난연수지로 피복한 무독·난연성 수밀형의 동심중성선 전력케이블을 말한다.

현재 사용중인 전력케이블의 재료에 대한 평가 항목은 25여 종류로 IEC, ASTM, ICEA, KS 및 한전규격 등의 규격을 기본으로 평가를 하게 되어 있다.

따라서 본 평가 기술에서는 난연성, 연소가스 부식성, 무독성, 연기밀도, 산소지수, 반도전층내 이온불순물 함량, 보이드, 이물질 및 수트리 검사, 가교도 등의 주재료시험에 대한 시험방법을 검토하고 시험에 적용하여, 시험 시 문제점 등을 도출하고 시험방법을 정립하여 주요업체인 A, B, C, D사의 제품을 비교 평가하였다.

2. 시 험

2.1 난연성시험 (수직불꽃시험)

전력용 케이블의 외피는 외부로부터 유입되는 수분 및 이온성 불순물, 절연층의 보호, 수분에 의한 중성선 부식의 최소화를 위하여 사용하고 있다. 주로 PVC를 사용하고 있으나 난연성 전력케이블에는 화재 발생 시 유출되는 인체에 해로운 염소가스 때문에 폴리올레핀 계열을 사용하고 있다. 수직불꽃시험은 절연체 및 시스가 연소되더라도 화재를 파급시키지 않는다는 것을 입증하는 시험으로서 케이블 설치조건과 비슷한 상태에서 시행을 하여야 한다.

시험은 자연통풍이 되는 실내 혹은 과도한 통풍 및 기류가 없는 차폐된 곳에서 행하며, 깊이 7.5㎝, 너비 30㎝, 길이 2.4m 수직형 금속제 사다리 형태의 tray에 중심부분에 케이블을 단층으로 배열하고 케이블 직경의 1/2 정도 이격하여 나머지 부분에 시험시료를 배열하고, 리본개스 버너는 38㎝ 길이의 불꽃을 tray 격자 사이의 시료중심에 가해지도록 하며, 버너면은 시료 표면으로부터 7.5㎝ 간격으로 수직 tray 바닥에서 약 60㎝ 높이에 수평으로 장치한다. 불꽃온도는 열전대를 불꽃에 근접하여 시료의 표면에 접촉하지 않도록 약 3㎜ 이격하여 측정하였을 때 약 816℃ 이어야 한다. 시험은 20분간 행한다. 버너의 불을 끈 후 계속해서 타는 케이블은 계속 타게 방치한 후 연소길이와 연소시간을 측정한다.

2.2 연소가스 부식성시험

연소가스에 의한 주변 물질의 부식도를 나타내는 시험으로 pH와 전도도를 측정한다. IEC 60754-2에서 정한 장치에 케이블 시스를 0.1㎎의 정확도로 측량하여 연소보트에 넣고 연소튜브 속으로 밀어 넣는다. 연소보트 위치의 온도는 935℃ 이상이 되고, 공기 유입구쪽은 900℃ 이상 되게 하며, 연소시간은 30분 정도로 한다. pH와 전도도를 측정하기 위하여, 연소 후 증류수에 포집된 용액과 세척액의 양을 1000㎖로 만든다.

2.3 무독성 시험

케이블에 사용되는 할로겐 첨가제를 포함하는 컴파운드 및 할로겐화된 폴리마의 연소 시 배출되는 할로겐 가스의 함량을 측정하는 것으로서 IEC 60754-1에서 정한 장치에 케이블 시스를 0.1㎎의 정확도로 측량하여 연소보트에 넣고 연소튜브 속으로 밀어 넣는다. 800±10℃에서 20분간 연소시킨다. 0.1M NaOH 용액에 포집하고 세척하여 1000㎖로 만든다. 냉각 후 200㎖를 분취하여 4㎖의 HNO_3, 0.1M의 $AgNO_3$용액 20㎖, 3㎖의 니트로벤젠을 넣은 후 잘 흔들어 섞는다. 40% 산화제2철 황화암모늄용액 1㎖에 6M의 HNO_3 몇 방울 섞은 후 앞의 용액에 넣는다. 용액을 마그네틱 분산장치를 이용하여 잘 저으면서 0.1M의 NH_4SCN 용액으로 적정한다. 같은 방법으로 blank 시험을 하며 다음 식에 따라 계산한다.

$$\text{할로겐산 함량} = \frac{36.5\ x\ (B-A)M\ x\ (1000/200)}{m}$$

A : 측정에 사용된 0.1M NH_4SCN 용액의 양(㎖)
B : blank에 사용된 0.1M NH_4SCN 용액의 양(㎖)
M : NH_4SCN의 Mol 수
m : 시료의 중량(g)

2.4 연기밀도 시험

케이블 연소 시 연기에 대한 밀도를 측정하는 시험으로서 ASTM E 662에 따른다. 가로, 세로가 76.2 +0, -0.8㎜인 시편 3개에 대하여 시험한다. 시편은 60℃에서 24시간동안 건조시킨 후 항온 항습 상태로 보관을 한다. 3개의 시험중 한 개라도 50% 정도의 최소결과값을 초과가 발생할 시에는 3개의 시편에 대하여 추가로 실시 후 6개의 결과를 평균한다. 연기밀도 시험은 flame과 non-flame mode가 있으나 본 시험은 flame mode만을 실시하였다. 시험에 앞서 각 시편의 무게를

기록하여 측정값의 변수를 확인한다.

시험은 20분 또는 최소 투과율에 도달하여 3분간 지속될 때까지 하며, 20분 동안 최소 값에 도달하지 않으면 시험을 계속 하여 최소 값이 3분간 지속될 때까지 하며 다음 식에 따라 계산한다.

$$\text{연기밀도}(D_s) = [G\log_{10}(100/T) + F]$$

G=V/AL
V=밀폐된 방의 체적, m^3
A=시험편의 노출면적, m^2
L=연기를 통과하는 빛의 길이, m
T=광감지기로부터의 빛투과도(%)
F=다음에 의한다:
(1) 만일 옮길 수 있는 필터가 빛 경로에 있다면, T (실제투과도)는 측정되어지고 'F=0'이다.
(2) 필터가 빛 경로 밖에 있다면, T(겉보기투과도)는 측정되고 'F=필터의 알려진 광학밀도'이다.
(3) 만일 옮길 수 있는 필터로 갖추어지지 않았다면, F=0이고 T는 실제 투과도이다

2.5 산소지수 시험

산소지수법에 의해 연소성을 측정하는 방법으로서 KS M 3032에 따른다. 길이 70~150㎜, 나비 6.5±0.5㎜, 두께 3.0±0.5㎜의 시편에 대하여 시험한다. 시편의 추정 산소농도부터 시험을 시작한다. 점화기의 앞 끝을 위로 향하게 했을 때의 불꽃 길이를 15~20㎜로 조절한 후 30초 동안 가스를 방출한 다음 시편 상단에 점화한다. 이때 시편 상단 전체에 불이 붙어 불꽃 모양으로 연소하는 것을 확인한 후 불꽃을 제거하고 즉시 연소시간과 동시에 연소길이 측정을 시작한다. 시편의 연소시간이 3분 이상 계속해서 연소하든지 또는 불이 붙은 후의 연소 길이가 50㎜ 이상 계속해서 연소하는데 필요한 최저의 산소 유량과 질소 유량을 확인하며 다음 식에 따라 계산한다.

$$\text{산소 지수} = \frac{O_2}{O_2 + N_2} \times 100$$

O_2 : 산소의 유량 (L/min)
N_2 : 질소의 유량 (L/min)

2.6 반도전층내 이온성 불순물 함량 시험

내부 외부 반도전층에 포함된 이온성 불순물의 양을 측정하는 시험으로서 완성품에서 반도전층을 채취하기가 어려우므로 동일한 원료에서 시료를 채취하여 2g 정도의 무게를 정확히 측정한 후 깨끗한 도가니에 넣는다. 시료가 담긴 도가니와 빈 도가니 2개를 전기로에 넣어 유기물질을 태워서 날려보낸다. 이때 400℃에서 4시간, 800℃에서 6시간동안 회화시킨다. 5% 질산용액으로 회화된 시료를 녹여 100㎖의 매스 플라스크에 채운 다음(침전물이 생길 경우 filter하여 사용) ICP(유도결합 플라즈마 분석기)를 이용하여 농도를 측정하여 다음 식에 따라 계산한다. 이온성 불순물은 Ca, Si, Fe, Al, Zn, Cu, Mg, Na, Ni, K등 10종으로 한다.

$$\text{이온농도(ppm)} = \frac{100\text{㎖} \times D}{W_s}$$

D : 측정된 이온의 농도(ppm) - 블랭크 농도(ppm)
W_s : 시료의 무게(g)

2.7 보이드, 이물질 및 수트리 검색

케이블 제조는 여러 개의 압출기를 사용하여 연속적으로 이루어져 내부반도전층의 압출과 절연층의 압출이 거의 동시에 이루어진다. 이 때 반도전층과 절연층이 만나는 계면에 그리고 절연층 내부에는 여러 종류의 결함들이 존재한다. 보이드의 경우 일반적으로 공기가 채워져 있으며, 불순물로는 가공 중에 압출기의 마모로부터 유입된 금속입자 또는 먼지 등 여러 종류가 있을 수 있다. 수분의 경우 화학가교제의 분해에 의하여 존재하는 것이 일반적인데 초기에는 분자정도의 수분형태로 존재하다가 결국에는 물방울 형태로 존재하게 된다. 절연체 내에는 여러 개의 보이드가 존재하는데, 주로 화학가교제가 분해될 때 부산물로서 메탄 가스가 발생하여 이것이 미쳐 빠져나가지 못했을 경우 또는 가공 공정 중에 유입되는 경우에 대부분의 보이드가 생성된다. 이들 보이드는 절연수명에 심각한 영향을 미치며 주로 부분방전의 요인이 된다. 부분방전은 절연체내에 보이드가 존재할 때 이들 보이드에 차있는 기체가 파괴되는 것을 말하는 것으로서 이 과정에서 전기트리가 발생되고 진전된다. 돌기는 일반적으로 반도전층에 혼합된 카본블랙의 분산상태가 좋지 않아 생기는 경우가 대부분인데 경우에 따라서는 압축다이에 붙어있던 불순물이 우연히 혼합되는 경우도 있다. 절연체내의 이물질은 amber와 금속입자 등이 있다. amber는 XLPE가 국부적으로 가열되었을 때 발생하는 다갈색의 반투명 물질이며, 금속입자는 amber 이외의 이물질을 뜻한다. 케이블의 도체와 절연체 사이에 있는 반도전층과의 접촉면이 매끄럽지 못하거나 절연층 내부에 이물질이 있을 때 그곳에 높은 전계가 가해져서 그곳에서 트리가 시작되어 서서히 성장하기 시작한다. 트리현상은 주로 교류전압에 의한 주기적인 부분방전에 의해서 생성되는 전기트리와 케이블 내부에 물이 침투하거나 습기의 존재로 인하여 전계가 가해져 오랜 시간이 흐르면 전기 트리가 생성되는 전압보다도 더 나은 전압에서 부분방전이 없이 발생되는 수트리가 있다. 트리의 모양에는 bow-tie와 vented가 있다.

보이드 시편은 케이블 양단에서 길이 약 20㎝의 시료를 취하여 두께 0.5±0.25㎜의 나선형 또는 slice형의 시편을 연속 20매를 준비하여 알콜 등으로 시편 표면을 깨끗이 한 후 검색이 용이하게 염색을 하여, 육안 또는 5~20배 정도로 확대하여 관찰한 다음 이상이 발견 시 100배정도의 현미경으로 관찰하여 크기를 측정한다. 트리 시편은 교류내전압 시험 후 두께가 0.65㎜되는 wafer를 최소한 30개, 0.13㎜되는 water 1개 이상을 파괴가 일어난 지점에서 자른 후 염색하여 관찰한다.

2.8 가교도 시험

절연체의 가교정도를 측정하는 시험으로서 절연체의 중간부위(절연층 두께중 3.0~5.0㎜위치), 내도부근의 절연층 및 외도부근의 절연층(반도전층에서 1.0㎜내 위치)에서 시료를 채취하여 ㎎ 단위까지 무게를 측정한다. xylene 용제 속에 넣고 110±2℃에서 24시간 유지한다. 시료를 용제에서 꺼내어 진공 데시케이터 속에 넣고 온도 110±2℃에서 24시간 이상 건조시킨 후 무게를 측정하고 다음 식에 따라 계산한다.

$$\text{가교도}(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

m_1 : 시험 전의 질량(㎎)
m_2 : 시험 후의 질량(㎎)

3. 결 과 및 고 찰

3.1 난연성시험 (수직불꽃시험)

60㎟ 케이블은 시료의 수를 5개, 200, 325, 600㎟는 3개씩 하였으며, 325㎟의 케이블에 대한 시험으로서 표와 같이 연소길이는 550~800㎜, 연소시간은 5~11분의 분포를 나타내고 있다. A사의 연소시간은 절연체 내부까지 불꽃의 영향을 받아 연소가 지속되었으며, 난

연성의 시스가 발포하여 공기를 차단하므로 불꽃은 더 이상 확산되지는 않았다

시 험 기 준	시 험 결 과				
	구분	A 사	B 사	C 사	D 사
불꽃 위 상부 케이블의 tray 전체 높이까지 연소하지 않을 것	연소길이	800 ㎜	700 ㎜	550 ㎜	900 ㎜
	연소시간	11분	20초	5 초	60 초

3.2 연소가스 부식성시험

325㎟의 케이블에 대한 시험으로서 표와 같이 pH는 4.95~5.86, 전도도는 0.75~1.9의 분포를 나타내고 있다.

시 험 기 준	시 험 결 과			
	A 사	B 사	C 사	D 사
pH : 4.3 이상	5.28	5.00	4.95	5.86
전도도 : 10㎲/㎜ 이하	0.753	1.90	1.41	1.67

3.3 무독성 시험

무독성 시험의 적정 시 침전물이 생기므로 교반을 지속적으로 하여야 하며 갈색으로 변할 때를 최종점으로 한다. 325㎟의 케이블에 대한 시험으로서 표와 같이 HCl 함량은 0.18~0.47의 분포를 나타내고 있다.

시 험 기 준	시 험 결 과			
	A 사	B 사	C 사	D 사
HCl 함량 0.5% 이하	0.32	0.18	0.47	0.18

3.4 연기밀도 시험

325㎟의 케이블에 대한 시험으로서 표와 같이 연기밀도는 41~110의 분포를 나타내고 있다. 이는 각 회사마다 시스의 두께와 무게의 차이에 의해 다소 차이가 있는 것으로 생각된다.

시 험 기 준	시 험 결 과			
	A 사	B 사	C 사	D 사
150 이하 (flame mode)	110	59	41	105

3.5 산소지수 시험

추정 산소농도는 경험상 28부터 시작하였다. 325㎟의 케이블에 대한 시험으로서 표와 같이 산소지수는 30.4~32.5의 분포를 나타내고 있다.

시 험 기 준	시 험 결 과			
	A 사	B 사	C 사	D 사
30 이상	30.7	32.5	30.5	30.4

3.6 반도전층내 이온성 불순물 함량 시험

시 험 기 준		시 험 결 과			
		A 사	B 사	C 사	D 사
내도	500ppm 이하	226.1	238.7	36.6	30.4
외도	1500ppm 이하	731.5	947.7	913.3	81.6

일부 분해가 덜된 시료는 800℃에서 2시간정도 더 회화 시켰으며, 유기물을 태워서 날려보낸 질산용액에 충분히 용해시키기 위하여 약간 가열을 하고 filter 하였으며, 325㎟의 케이블에 대한 시험은 표와 같다.
반도전층의 시료는 완제품에서 채취가 불가능하여 제품과 동일한 컴파운드에서 채취하였으나 ppm 단위의 성분분석이므로 채취 시 오염에 주위 하여야 한다.

3.7 보이드, 이물질 및 수트리 검색

325㎟의 케이블의 시료를 채취하여 Methylene blue/aqueous ammonia 방법으로 염색하여 보이드, 이물질 및 수트리를 관찰하였다.

시 험 기 준			시 험 결 과			
			A 사	B 사	C 사	D 사
보이드	70㎛ 이하		-	2	8.7	-
이물질	반투명	250㎛ 이하	-	없음	없음	-
	투명	100㎛ 이하	-	없음	없음	-
수트리	0.65㎜	254~508㎛	-	1.10	없음	-
		509~762㎛	-	없음	없음	-
		763㎛ 이상	-	없음	없음	-
	0.13㎜	50.8~508㎛	-	없음	없음	-
		128~254㎛	-	없음	없음	-

3.8 가교도 시험

325㎟의 케이블에 대한 시험으로서 표와 같은 분포를 나타내고 있다.

시 험 기 준		시 험 결 과			
		A 사	B 사	C 사	D 사
중간부위	80% 이상	-	87.5	85.1	-
내도부위	70% 이상	-	85.5	86.3	-
외도부위	70% 이상	-	87.2	88.7	-

4. 결 론

지중에서 사용되는 배전케이블은 절연을 목적으로 고분자 재료를 사용한다. 본 시험평가의 케이블에는 절연을 목적으로하는 절연체로서 가교폴리에틸렌(XLPE)를 사용하였고, 케이블을 보호하는 시스로는 할로겐이 없는 폴리올레핀을 사용하였다. 난연시험은 자연통풍이 되는 실내 혹은 과도한 통풍 및 기류가 없는 차폐된 곳에서 행한다고 규격에 명시되어 있으므로 각 제조회사별 시험환경에 따라 공기의 흐름 및 산소 농도에 따라 연소길이 및 연소시간의 차이가 발생할 수 있으며, 특히 반도전층 이온성 불순물함량 시험은 극미량의 성분분석이므로 제품에서 채취 시 오염이 되므로 사실상 제품에서 채취가 불가능하다. 또한 업체에서 제시하는 동일한 컴파운드의 확인이 어렵기 때문에 제조공정에서 이 시험을 행하는 것이 바람직하다. A, B, C, D 사 제품의 재료에 대한 성능평가 시험결과 우수한 재료의 사용으로 시험기준에 모두 만족을 하였다.

[참고 문헌]

[1] "Determination of the amount of halogen acid gas", IEC 60754-1, 1994
[2] "Determination of degree of acidity of gases evolved during the combustion of materials taken from electric cables by measuring pH and conductivity", IEC 60754-2, 1997
[3] "Specific optical density of smoke generated by solid materials", ASTM E 662-97
[4] "Specifications for XLPE insulated shielded power cable rated 5 through 46kV", AEIC CS5-94
[5] "고무 플라스틱 절연전선 시험방법", KS C 3004, 1998
[6] "산소지수법에 의한 고분자 재료의 연소시험방법", KS M 3032, 1995
[7] "22.9kV 동심중성선 전력케이블", ES 126-650~664, 2000