

最近XLPE電力케이블의 絶緣設計와 新絶緣材料技術動向

박 대 희*, 이 종 범, 關井康雄

(* 원광대학교 공과대학 교수, ** 千葉工業大學 教授)

1. 序 論

저밀도폴리에틸렌(LDPE)은 1940년대부터 전력케이블절연으로 사용되기 시작하여, 주된 절연재료로서 사용되어 왔다. 폴리에틸렌전력케이블은 건식절연으로서 전기적성질이 우수하고 보수가 용이하며, 절연오일은 사용하지 않으므로 방화성이 우수한 장점이 있어서, 현재 전력케이블의 주역을 점유하고 있다. 폴리에틸렌이 전력케이블의 절연체로 사용되어진 것은 1950년대 미국에서 폴리에틸렌의 화학적가교법의 특허가 공개되어져 비약적으로 사용되어져 왔다. 또한 1970년대에 수증기가교법 대신에 건식가교법이 개발되어져 XLPE전력케이블의 성능은 비약적으로 높아져 최근에는 500KV XLPE전력케이블이 실용화 되고 있다[1,2]. XLPE전력케이블은 OF Cable에 비해서 절연오일을 사용하지 않으므로 케이블의 구조가 간단하고 보수, 점검이 용이하여 큰 이점을 가지고 있다[3,4].

LDPE는 많은 기술개선에 의한 성능이 향상되어도 좋이나 고무절연에 비교하여 고온특성에 있어서 열세에 있기 때문에, 내열성 개선의 목적으로 고분자쇄(chain)를 화학적으로 가교결합하여, 전기적특성을 저감시켜 열·기계적특성을 향상시키는 기술이 개발되어지고 있다. 더욱이 현재에는 가교폴리에틸렌(XLPE)의 신뢰성을 극한까지 올리는, 이물 혼입의 가능성을 배제한 superclean급이 주목을 모으고 있다.

한편, 실용XLPE케이블에서 집중전계와 수분의 상호작용에 의한 절연고분자가 장기열화를 일으켜 수트리현상이 발생하여 결국 절연파괴에 이른다. 또, 케이블층간의 전계완화와 균질화를 위하여 도체차폐, 절연차폐로써 반도체층이 설치되어 있으나, 제조공정을 압출형으로 개선하여 내수트리성의 향상에도 기여를 하고 있다. 수트리의 연구결과에 의하면 어떤종류의 원소, 이온성물질의 존재가 수트리현상을 일으키는 것으로 판명되어 있으며[5,6,7] 이와 같은 물질의 함유량은 시판되어지는 카아본블랙의 종류에 따라 상당히 다른 것으로, 불순물을 최소로 억제한 카아본블랙을 반도체층으로 사용하여 케이블신뢰성의 향상을 시키고 있다.

본 내용은 전력케이블의 절연설계의 개념을 소개하고, 최근의 신절연재료의 기술적인 소개와 내수트리절연체의 제특성, 밀착성/박리성 반도체재료의 개선이 어떠한 케이블특성이 향상되어 지는가에 대하여 소개한다.

2. XLPE케이블의 絶緣設計

XLPE케이블의 절연두께는 케이블의 절연과파괴강도나 열화특성을 고려한 목표성능을 정하고, 이것을 만족하도록 한다. 목표성능으로서는 일반적으로 상용주파내전압과 뇌임펄스내전압의 내전압치가 고려되어 진다. 상용주파 및 뇌임펄스전압에 대한 절연과파괴강도의 바라스키는 Weibull분포에 적용되어진다[8].

XLPE절연재료가 전계강도E[kV/mm]에서 파괴하는 확률P는 아래식으로 나타내어진다.

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E - E_L}{E_0}\right)^m\right] \quad (E \geq E_L) \quad (1)$$

$$= 0 \quad (E \leq E_L) \quad (2)$$

여기에서 E_L : 위치파라미터

E_0 : 척도파라미터

m : 형상파라미터

위(2)식은 절연재료가 E_L 이하에서 파괴하는 확률이 0인 분포를 나타내는 것을 의미하고, XLPE재료의 많은 파괴Data로부터 E_L 을 구하여, E_L 을 기초로하여 절연두께의 설계를 한다. 최근에 케이블 제조기술에 개선과 절연재료의 성능향상과 함께 E_L 의 값은 점점 높아지고 있다.

절연두께의 산출기준은 임펄스전압에 의한 절연과파괴강도로 부터 결정되어지는 두께와 상용주파전압에 의한 절연과파괴강도로 부터 결정되어지는 두께중에 가운데 큰 쪽의 값으로부터 결정한다.

(i) 뇌임펄스전압으로 부터 결정되어지는 절연두께 (t_{imp})

$$t_{imp} = \frac{BIL \times I_1 \times I_2 \times I_3}{E_{LimP}} \quad [mm] \quad (3)$$

여기에서 BIL : 계통의 뇌임펄스내전압level [kV]

I_1 : 온도계수 (1.25)

I_2 : 열화계수 (1.1)

I_3 : 시료시험, 기타의 불확실요소에 대한 여유도(1.1)

E_{LimP} : Weibull분포에 의한 뇌임펄스파괴전압 (평균전위경도)의 최저치[kV/mm]

(ii) 상용주파전압으로부터 결정되어지는 절연두께(t_{ac})

$$t_{ac} = \frac{E/\sqrt{3} \times K_1 \times K_2 \times K_3}{E_{Lac}} \quad [mm] \quad (4)$$

여기에서 E : 상시최고회로전압 [kV]

K_1 : 온도계수(1.1)

K_2 : 열화계수(4.0 -- n=9의 경우)

K_3 : 시료시험, 기타의 불확실 요소에 대한 여유도(1.1)

E_{Lac} : Weibull분포에 의한 상용주파파괴전압[평균전위경도]의 최저치[kV/mm]

표1은 일본의 XLPE케이블에 채용되어지고 있는 것으로 위의 (3), (4)식에 근거로 하여 각종 정격전압에 대한 내전압치와 절연두께를 나타낸 것이다. (3),(4)식에서의 뇌임펄스 및 상용주파전압에서의 열화계수 및 최저절연파괴강도는 제조기술의 개선과 절연재료의 성능향상에 직접적인 관계가 있는 것으로 신절연재료의 채택은 궁극적인 절연두께의 저감으로 기대가 된다. 예를들면, 최저절연파괴강도(E_{Lac} , E_{LimP})는 70년대에 20(kV/mm), 50(kV/mm)이었으나, 90년대에는 57(kV/mm), 112(kV/mm)로 상당히 높아져 있다.

표 1. XLPE케이블의 내전압치와 절연두께

정격전압 (kV)	내전압치(kV)		절연체두께 (mm)
	V(ac)	V(imp)	
66	195	535	11
77	225	610	13
154	400	1,135	23
275	805	1,590	27
500	1,050	2,260	32
500*	970	1,960	27

(*) 500kV장조장 CV케이블 개발연구에 기초로한 결론

3. 新絶縁材料의 製造技術

가교폴리에틸렌절연은 폴리에틸렌(PE)과 산화방지제 및

가교제로 구성되어져, 열·기계적특성이 개선된 것으로 주특성은 표 2과 같다.

고압가교폴리에틸렌케이블의 제조에서는 외부로 부터의 이물의 혼입방지에 고도의 주의를 하지않으면 않된다. 많은 연구에 의하면 절연체내의 이물입자는 전기트리나 수트리의 발생원으로 확인되어져 있다. 최근에는 이와같은 이물혼입방지·제거기술의 개선의 많은 연구가 진행되어, 원료LDPE나 첨가제의 제조·출하·운송의 전 단계에 자동적으로 재료에 이물관리가 되어지고 있으며, 케이블제조 전 공정에서도 엄격한 품질관리가 되고 있다. 제조공정에서 사용되어지는 공기, 수증기, 물에 대해서도 이물 혼입방지를 위한 미세필터의 설치하여 이물의 혼입을 방지하고, 케이블 완제품의 품질검사 이상으로 엄격한 연속감시장치에 의한 모니터가 실시되고 있다. 이 검사수준은 제조공정에 사용되어 모 든 첨가제류까지도 적용되어, 그의 품질이 감시되어지고 있다. 폴리에틸렌에 대해서는 gel함유량, 레진의 기계적 특성, 전기적특성도 검사되어 지며, 이 같은 특성의 대부분은 산화방지제의 첨가나 가교에 의해서 더욱이 개선되어진다.

Pellet의 형태·크기 관리를 위하여 mesh를 이용하여 연속적으로 자른후, 전자금속제거 장치를 통한후, 최종적인 제품으로서 콘테이너에 보관된다. 중간제품뒤의 각 단계에서도 clean도는 연속적으로 감시되어지며, 레진의 기계적특성, 전기적특성, 내열노화특성, 가교특성도 검사되어진다.

4. 絶縁材料의 Clean度管理

XLPE Comp'd의 제조에 있어서 clean도 관리를 위하여, 여러가지 방법이 채용되어지고 있다. 현재에는 엄격하게 제어되어진 조건하에서 만들어진 0.5mm의 필름을 시험하는 방법이 넓게 이용되고 있으며, 이 방법은 숙련된 기술자가 압출하여 필름중의 이물을 확대경으로 검사한다. 이때 발견되어진 이물은 크기, 종류, 수량을 기록한다. 그러나, 이 방법에는 한계가 있어서, 확대경을 사용해도 육안으로의 검사는 125 μ m이하의 이물을 검사하는 것은 가능하지 않으며, 기술자의 개인차에도 영향이 있다.

따라서 최근에 개발되어지는 신절연LDPE는 자동연속감시장치로서 연속laser 이물감시장치로 이물검출을 하고있다. 이와 같은 이물에 관한 규격은 미국의 AEIC CS5에서 현실적으로 관리를 요구하고 있으며, 최근의 clean도 기준을 표 3에 나타냈다. 레진maker와 케이블maker는 사용절연재료의 2%를 적어도 검사하는 것을 의무화 하고있다.

아주 작은 이물을 감시하기 위해서는 laser주사장치를 사용하며, 기본적으로 다음 3단계로서 고속Scatter, 수광장치, 품질관리Sector로 구분되어 있다. 품질관리 Sector는 수광장치에서의 신호를 해석하고, 제어하는 것으로, 결합부분의 수량이나 크기, 종류를 검지한다. 이 장치는 oscilloscope를 통하여 신호의 추적, 보정등이 용이하게 되어있고, 필요에 따라서 각 수준의 검지한계를 설정하여 자동적으로 신호와

표 2. Properties of superclean LDPE

Physical properties	Unit	Typical value	Test method
Density at 23°C	g/cm ³	0.92	ASTM S2839 ISO 1872 Annexe B
Ultimate tensile strength	kg/cm ²	180	ASTM D638
	MPa	17.7	ISO R527
After 10 days at 150°C in oven, % retained	%	90	ASTM D638 ISO R527
Elongation at break	%	500	ASTM D638 ISO R527
After 10 days at 150°C in oven % retained	%	90	ASTM D638 ISO R527
Brittleness temperature	°C	-90	ASTM D746 ISO 974
Heat elongation 200°C, 15min, 20N/cm ²	%	80	IEC 540
Degree of crosslinking, solvent extraction	%	12	ASTM 2765
Environmental stress cracking resistance, 100% 'Igepal' F10	hr	>1000	ASTM D1693
10% 'Igepal' F10	hr	>1000	
Electrical properties	Unit	Typical value	Test method
Dielectric constant at 60Hz	-	2.30	ASTM D150
Dissipation factor at 60Hz	-	0.0003	ASTM D150
DC volume resistivity at 23°C	ohm.cm	>10 ¹⁵	ADTM D257
Dielectric strength, short time	kV/mm	>22	ASTM D149

표 3. Cleanliness specifications

Size (mm)	Max number of contaminants per 1kg tape			
	Cables up to 33kV		Cables above 63 kV	
	Old	New	Old	New
<0.100	-	under review	-	under review
0.100-0.200	5	3	3	0
0.200-0.500	3	0	2	0
>0.500	0.5	0	0	0

노이즈를 식별할 수도 있다. 검지되어진 압출된 필름시료중의 이물수준은 크기마다 디지털 counter로 표시되어, printer에 의해서 출력되어진다.

5. 信賴性向上을 위한 絶緣材料

전선·케이블분야에서는 수트리열화에 대한 관심이 높아지고 있으나, 수트리방지 혹은 억제방법으로서, 다음이 제안되어지고 있다.

- 1) 절연재료의 clean화
- 2) 건식가교방식의 채용
- 3) Computer에 의한 생산제어
- 4) 차수급속시이즈의 채용
- 5) 도체의 수밀화
- 6) 반도체층의 평활화

이들이 달성되어져도, 수트리열화의 위험성을 감안하여 안전하게 더욱이 보완하여 방지책이 필요하다, 즉 절연재료 자신을 수트리가 발생하지 않도록 개량할 수 밖에 없으며, 이를 위하여 수트리현상을 충분히 이해할 필요가 있다. 수트리의 발생기구에 대하여 고찰하여 요약하면 다음과 같다. 절연재료중의 수트리의 발생·성장·성질에 관한 연구는 비약적으로 진행되어져, 현재 제안되어지고 있는 기구는 다음 3가지로 분류할 수 있다.

- 1) 전기적요인 : 물이 전기영동에 의해서 강제적으로 절연체내에 침입한다.
- 2) 화학적요인 : 물로부터 산화력을 갖는 물질이 생성한다.
- 3) 기계적요인 : 수트리는 고분자의 기계적 파괴현상이다.

이들의 이론에서의 연구결과 등을 비교검토했한 결과, 기계적요인이 가장 중요하다고 생각되어진다. 수트리현상에서는 고체 절연체중에 침입하는 수분량은 상당한 양으로서 10%의 order이다[9].

또, XLPE는 확실히 기계적으로 열화를 받아서 물로 충만 되어진 작은 보이드집합체가 발생하고 있다[10]. 더욱이 다른요인이 절연체에 인가되어진 경우에 있어서도, 동시에 기계적 응력이 발생하고, 이것이 수트리에 관여하고 있다고 이해된다.

1978~1979년에 걸쳐서 Meyer, Filippini 및 Felici[11,12,13] 더욱이 Sletbak[14]은 지금까지와는 다른 가설을 다음과 같이 제안하고 있다.

- 1) 수트리는 물로 충만 되어진 channel 혹은 cylinder연속체 되어있다.
- 2) 기계적 응력은 수트리 선단부분에서의 정전응력에 의해서 유기되어진다.

Sletbak의 모델은 물의 도전율이나 channel의 기하학적 해석에 의해서 결론되어지며, Meyer씨의 모델에서는 물의 도전율에 관여된다고 보고 있다. Sletbak은 발생한 기계적 응력이 재료역학강도를 상회하면 수트리channel이 성장한다고 하며, fracture이론을 도입하여 설명하고 있다. 또 수트리 선단부분의 전계에너지가 각 물질특유의 임계에너지치 G_c 를 넘을때에 channel이 진전한다고 주장하고 있다. 이 생각은 환경응력균열현상과 비교하여 얻어진 것이다.

이와 같은 현상을 고려한 신절연LDPE는 파로파괴 조건하에 있어서 우수한 crack성장저항성을 나타내는 재료를 선택하고, 이것이 내수트리성에 있어서도 우수하다. 이와 같이 crack특성의 평가에 대하여 다음에서 소개한다.

6. 絶縁材料의 評價方法

Crack성장저항성은 그림 1에 나타난 바와 같이 중앙부분에 장방형의 10mm깊이의 notch를 준 시료를 이용하여 고전적방법으로 평가한다. notch는 시료를 Instron시험기에 설치

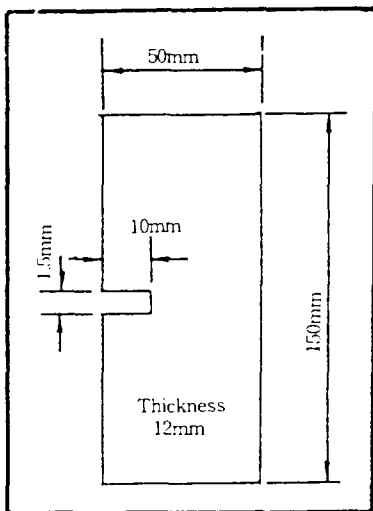


그림 1. 기계적 크랙발생용 시료의 형태

하고, blade로 만들었다. 최대 50kg, 최소 5kg의 7Hz의 cycle 하중을 23°C에서 인가하고, notch에서 성장한 Crack길이를 인가cycle의 함수로서 관찰하였다.

이 시험과 병행하여 수트리시험을 Ashcraft의 침-평판전극[15]의 그림 2와 같이 실시하며, 침단곡률반경: $5\mu\text{m}$, 전극간거리: 3mm, 전압: 5kV, 주파수: 6kHz, 시간: 24hrs, 온도: 23°C의 조건을 채용한다.

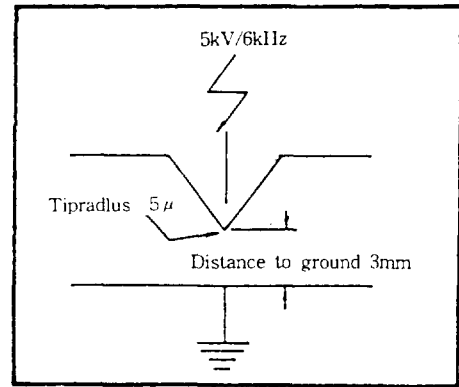


그림 2. 수트리발생용 전극

Crack성장저항시험에서는 그림 3에 나타난 바와 같이 신절연LDPE는 일반LDPE에 비해서 우수한 저항성을 나타내고 동시에 수트리성장도 신절연LDPE는 일반LDPE의 50%에서 멈추고, 높은 내구성을 갖는다. 즉 파괴에 관한 저항성을 갖는 고분자는 물수트리성도 우수하며, 수트리는 기계적응력이 요인으로서 가장 중요하다고 이해된다.

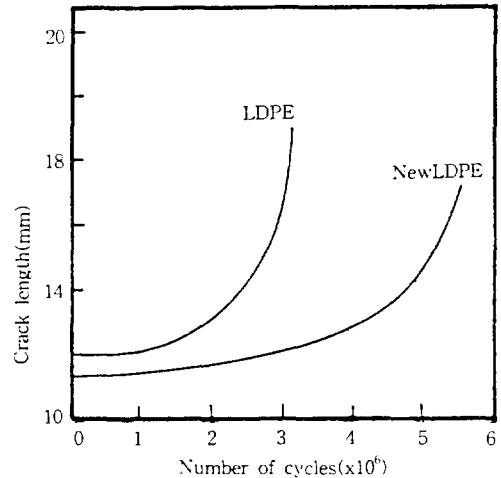


그림 3. Crack진전길이의 인가Cycle의존성

또한 장시간의 내수트리성에 대하여 검토를 하면 신절연 재료 LDPE는 일반 LDPE에 비하여 수트리의 성장도는 25%까지 개선되어지며 절연파괴강도도 그림 4에 나타난 바와 같이 우수하다.

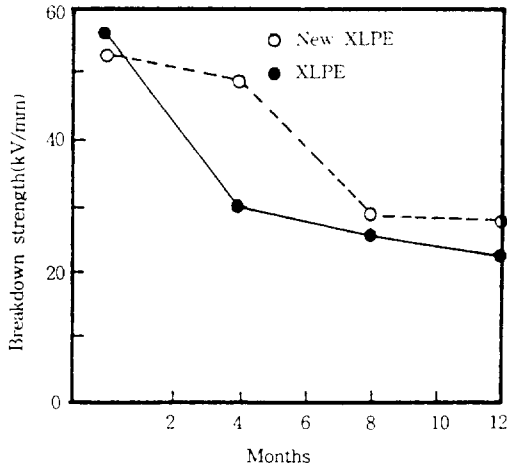


그림 4. 흡수후의 절연파괴강도의존성

이 신절연LDPE는 내수트리성만이 아니고, 첨가제의 분산성도 개선되어 첨가제의 분산성이 개선되었기 때문에 Comp'd의 보관에는 특별히 엄격한 온도관리가 필요하지 않다.

7. 耐水트리添加劑에 의한 改善效果

내수트리성이 개선되었던 신절연LDPE의 성능을 더욱 높이기 위하여 첨가제에 의한 성능향상을 시도하고 있다.

이와 같은 첨가제(Water Treeing Inhibition : WTI)의 개념을 그림 5에 나타냈다.

이 절연체의 기본적인 조건은:

- 1) 기존의 LDPE와 동일한 제조조건에서 생산가능할 것
- 2) 수요가 만족되는 생산용량이 확보될 것
- 3) 품질이 전선·케이블용의 규격에 일치할 것

이 사용에 따라서 내수트리성을 향상시킨 첨가제가 들어간 XLPE가 개발되고 있다.

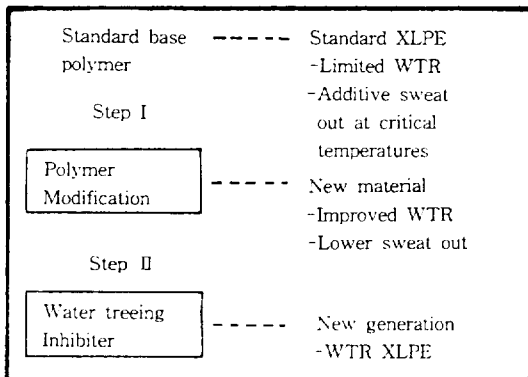


그림 5. 수트리억제 첨가제의 개념도

8. 半導電Comp'd의 改善

이들의 요구성능은 압출성형이 우수하여 표면평활성이 양호할 것. Scotch내구성에 우수할 것, 차폐성이 우수할 것, 흡습성이 낮을 것, 도전성과 그 온도 의존성이 양호할 것, 기계적특성과 내열노화성이 좋을 것, 품질이 안정될 것, 이들의 제특성을 만족하는 신반도전재료의 그 기본특성이 요구된다.

또 반도체 Comp'd로는 밀착성과 박리성의 2종류가 있으며, 후자는 주로서 북미와 구미의 일부에서 사용되고 있다. 이 박리성반도전층은 케이블 단말처리의 간편화를 목적으로 그의 박리강도 요구치는 다음의 2종류가 있다.

- 1) AEIC CS 5 규격 : 20~40 (N/cm)
- 2) France HN 33-S-23 규격 : 5~25 (N/cm)

신반도전재료는 이와 같이 밀착성과 박리성의 만족은 물

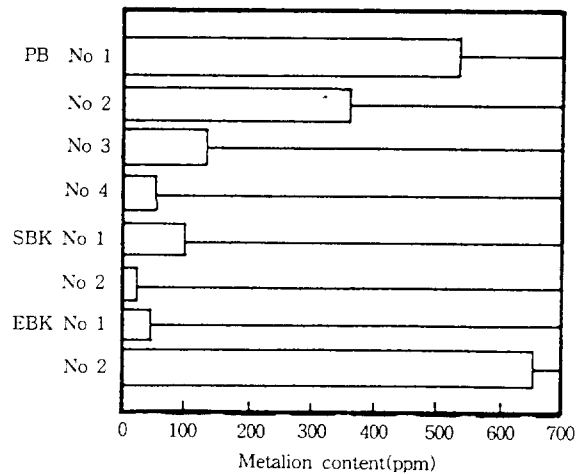


그림 6. 카이본블랙의 금속이온량

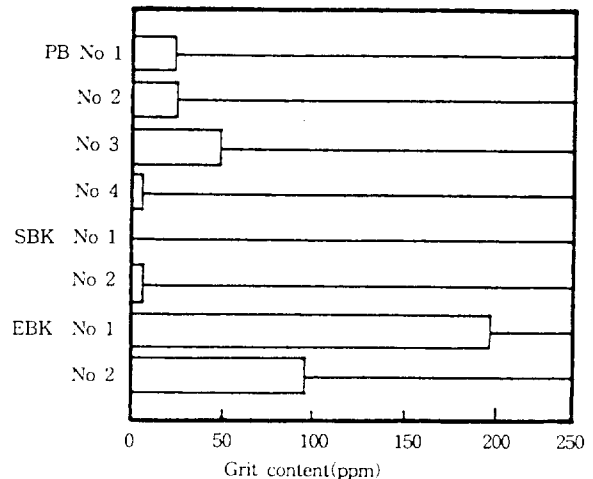


그림 7. 카이본블랙의 Grit량

론 절연체와 마찬가지로 clean반도전재료가 필요하다고 인식되고 있다.

반도전층은 약 100ppm정도의 불순물을 포함하고 있다고 지적되고 있으며, 이와 같은 불순물은 카아본블랙중의 금속성 이온물질의 함유량을 원자흡광분석하면 그림 6과 같은 결과가 얻어진다

또 325mesh clean에 의한 이물입자의 분석결과를 그림 7에 나타냈다. 이와 같은 기초검토를 바탕으로 새로운 반도체재료로서 밀착성과 발리성등이 우수한 특성을 갖는 재료가 개발되어 진다.

9. 結 論

전력케이블에 있어서 신절연은 내수트리성이 우수한 재료와 반도체재료의 개선으로 개발이 요구된다. 이와 같은 재료의 개발에 의한 XLPE전력케이블의 절연두께의 저감책에 대한 기술적 검토도 필요하다. 또한 전력케이블의 초고압화와 함께 절연체내에서의 이물및 보이드등은 물론, 절연층/반도전층간의 계면에 있어서 예상되어 지는 열화진전의 문제점등을 해결하여 절연의 신뢰성을 높여야 할 것으로 본다. 더불어 XLPE전력케이블의 열화진단도 신절연재료의 개발과 함께 더욱더 사회적인 필요성이 높아져 가고 있어 관련분야의 공동연구가 계속적으로 추진되어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] T.Kubota et al "Development of 500kV XLPE Cable and Accessories for Long Distance Underground Transmission Line-par 1: Insulation Design of Cables" IEEE 1994 PES Winter Meeting, 94WM097-67WRD, 1994
- [2] K.Ogawa et al "The World's First Use of 500kV XLPE Insulated Aluminum Sheathed Power Cable at the Shimogo and Imaichi Power Station"IEEE Trans.on Power Delivery,5,1,26, 1990,
- [3] A.Campus and G.Mately, PRI Coference, "Polymer in Cables", Manchester, May 18-18, 1993.
- [4] W.Borne et sl., "Development and trial of EHV XLPE cables in the Netherlands".
- [5] J-P.Crine. S. Pelisson and H. St-Onge : Ji-Cable, 1987, Paris, pp. 203.
- [6] J-P.Crine and J.Lauteigne, IEEE Trans Elect. Insul., 19, 220(1984).
- [7] H.J.Henckel et al., Proc. of 2nd Int. Conf. Cond. Beak Solid Dielectrics, Erlangen, p.276(1986)
- [8] T.Tanaka et al "Advanced Power Cable Technology" CRC Press Vol 1 p118-128, 1983
- [9] S.L. Nuns and M.T.Shaw, IEEE Trans Elect. Vol. El

-15, No.6, Dec. 1980.

- [10] C.T. Meyer. IEEE Trans. Elect. Vol.El-18, 1993.
- [11] J.L. Chen, H-C. Filippini and Y. Poggi, Cof. Rec. 1985 Int. Cof on Prop. and Appl. of Diel. Mat., June 24-29, Xian, China, 1985, pp.366.
- [12] C.T. Meyer, N. Felici and J-C. Filippini, Ann, Rep. CEIDP, 1978, pp. 374.
- [13] C.T. Meyer and J-C. Filippini, Polmer, Vol. 20, 1979, pp. 1186.
- [14] J. Sletbak, IEEE Trans. on Power App. and Syst., Vol. PAS-98, 1979, pp. 1358.
- [15] A.C. Ashcraft, World Electrical Cingress in Moscow, June 22, 1977.

저 자 소 개



박대희(朴大熙)

1954년 11월·10일생. 1979년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985-89년 일본 국립大阪대학 전기전자공학과 졸업(공학박). 1979-91년 금성전선(주)기술연구소 선임연구원. 1991-93년 일본전기학회 절연재료계면조사 전문위원. 1991-현재 원광대 공대 전자재료공학과 조교수. 당 학회 편집위원.



이종범(李鍾範)

1955년 7월 12일생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987-88년 한국 전기연구소 전력계통연구실 선임연구원. 1988-90년 동 연구소 지중송전연구실장. 1993년 독일 Berlin공대 전기공학과 연구교수. 현재 원광대 공대 전기공학과 조교수.



關井康雄

1936년 9월 8일생. 1965년 3월 동경대학 전기공학과 졸업(석사). 1965년 4월-94년 日立電線(주) 전선연구소 제1연구부장(工學博士). 현재 일본 千葉工業大學 전기공학과 교수. 주관심연구분야:고전압 및 전력케이블.