

전력 케이블 절연체(XLPE)의 설계 및 제조 기술



최명규

LG 전선(주) 전력연구소 소장



이승엽

LG 전선(주) 전력연구소 주임연구원

1. 서론

전력 케이블은 절연 방식에 따라 크게 지 절연 케이블과 고체 절연 케이블로 구분된다.

OF(Oil Filled) 케이블로 대표되는 지 절연 케이블은 절연유에 함침시킨 유침지를 사용하여 절연하는 케이블로서, 진공 함침에 의해 공극을 최소화함으로써 절연체의 열화 방지가 가능하고, 절연체의 전위 경도가 높으므로 절연 두께를 얇게할 수 있으며, 통전중인 케이블 선로에 대한 유압을 유지 및 감시하고, 절연유를 채취하여 금속 피복의 손상 및 케이블의 열화 정도를 진단할 수 있다는 장점 등이 있으므로 신뢰성이 매우 높은 케이블이라고 할 수 있다. 그러나 지절연 케이블은 설치 및 시공시 상당한 주의가 필요하고, 사고시 절연유 유출에 따른 환경적인 문제와 유압을 대기압 이상으로 유지하기 위한 급유 설비가 필요하다는 문제 등의 이유로 점차 고체 절연 케이블로 대체되어 가고 있는 추세이다.

XLPE(Crosslinked Polyethylene) 케이블로 대표되는 고체 절연 케이블은 절연 내력 및 체적 고유

저항이 크고 유전 정접 및 유전율이 작아서 전기적인 특성이 우수하고, 내충격성, 내마모성, 열에 의한 노화 특성, 저온 특성 등의 물리적, 기계적인 특성도 뛰어나며, 경량이기 때문에 포설 및 접속이 용이하고, 특히 고저차가 큰 장소의 포설에 적합하다는 이유 등으로 지 절연 케이블을 대체하여 전세계적으로 활발히 연구, 개발되어 널리 사용되고 있는 케이블이다.

본 고에서는 고체 절연 전력 케이블의 절연체 중, 가교 폴리에틸렌(XLPE)에 대한 기본 개념, 제반 특성, 제조 방법 및 설계 이론 등에 대한 전반적인 기술을 바탕으로, 전력 케이블 절연체(XLPE)의 설계 기술을 포괄적으로 정리하였다.

2. 고체 절연 케이블의 절연체

전력 케이블에 사용되는 절연 재료가 구비해야 할 일반적인 조건은 다음과 같다.

- a) 절연 저항이 양호할 것
- b) 내트리성, 내코로나성이 뛰어날 것
- c) 파괴전압(교류 및 임펄스)이 높을 것
- d) 절연 성능이 장기간에 걸쳐 안정할 것
- e) 굴곡성, 내마모성이 우수할 것

이상과 같은 조건을 구비한 고체 절연 전력 케이블의 절연체로는 부틸 고무, 에틸렌-프로필렌 고무(EPR) 등과 같은 고무계 재료와 비닐(PVC), 폴리에틸렌(PE), 가교 폴리에틸렌(XLPE) 등과 같은 플라스틱계 재료가 있는데, 현재는 전기적인 재특성이 우수하고 안정적 가격으로 대량 공급이 가능한 플라스틱계 재료가 주류를 이루고 있으나, 케이블의 사용 조건 및 용도에 따라 적절한 선택이 필요하다.

일반적으로 초고압 전력 케이블의 절연체로는 전기적, 기계적, 화학적 및 열적 특성이 상대적으로 우수한 XLPE가 전세계적으로 널리 사용되고 있다.

3. 폴리에틸렌(PE)의 특성

폴리에틸렌(PE) 수지는 $-(CH_2-CH_2)_n-$ 구조를 가지는 합성 고분자로서 세계에서 가장 많이 보급된 수지중의 하나이다. PE는 중합 방식에 따라 저밀도 폴리에틸렌(Low Density Polyethylene, LDPE)과 중밀도 폴리에틸렌(Medium Density Polyethylene, MDPE) 및 고밀도 폴리에틸렌(High Density Polyethylene, HDPE) 등으로 나눌 수 있으며, 결정화도에 따라 선형 저밀도 폴리에틸렌(Linear Low Density Polyethylene, LLDPE)과 초저밀도 폴리에틸렌(Very Low Density Polyethylene, VLDPE) 등으로 나눌 수 있다.

LDPE는 1933년 영국의 ICI사 연구진들에 의해 우연히 발견되어 1939년 공업적 생산이 이루어졌는데, 최초의 용도는 전선 피복으로서 주로 레이다용 케이블 절연체와 같은 군수용으로 사용되었다. 미국의 경우에는 1942년에 듀폰사가, 1943년에 UCC등이 각각 LDPE 제품을 생산하였다.

PE는 분자 구조에 따라 물성이 달라지는데 분자 구조를 조절함으로써 일정 용도에 맞는 제품을 제조한다. PE의 물성을 좌우하는 주요 요소로는 결정도(Crystallinity), 평균 분자량, 분자량 분포(Molecular Weight Distribution, MWD), 용융계수(Melt Index, MI), 밀도(Density), 인장 강도, 충격 강도, 강성, 경도, 내약품성, 내크리프성, 왜곡도, 용융점, 연화점, 저온 취화 온도(Brittleness Temperature) 등이 있다.

4. 가교 폴리에틸렌(XLPE)의 특성

XLPE는 저밀도 폴리에틸렌(LDPE)에 가교제를 배합하여 가교 공정을 통해 PE 중합체를 서로 연결시켜 입체 망상 구조로 만든 물질로서, PE의 우수한 전기적 특성은 그대로 유지하면서도 PE의 단점이자 전력 케이블 사용 조건의 최대 관리 포인트인 내열 특성을 개선하여 PE에 비해 고온 특성, 내균열성, 내마모성, 인장 강도, 신율, 산성 및 알칼리성에 대한 저항력 등이 뛰어난 절연 재료이다. XLPE는 특히 열적 물성 특성면에서 열변형성, 열노화 특성 등이 PE에 비해 대항히 우수한 특성을 가지고 있어 현재 전력 케이블의 절연체로 가장 널리 사용된다.

4.1. 열변형성

XLPE의 최대 장점은 열변형 특성이 좋다는 것이다. XLPE의 열변형률이 60~100℃ 구간에서 마이너스로 나오는 것은 열팽창이 변형에 비해 크고 직경이 증가하는 것을 나타낸다. PE의 경우에는 60℃ 부근에서부터 온도의 상승과 함께 변형률이 급격히 증가하여 XLPE와의 격차가 크게 벌어진다.

4.2. 열노화 특성

PE는 포화 탄화 수소이므로 고무 및 플라스틱 재료 중에서도 내열 노화성이 우수한 편인데, XLPE의 경우에는 사용 온도가 훨씬 높기 때문에 열안정화 처리가 필요하게 된다. 일반적으로 XLPE의 열노화 특성을 개선하기 위하여 Irganox, Santanox 등과 같은 산화 방지제를 첨가한다.

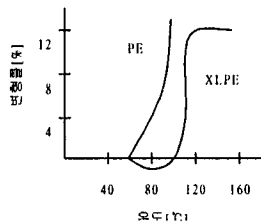


그림 1. 열변형 특성

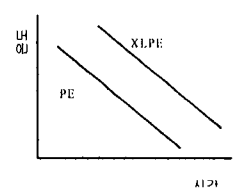


그림 2. 열노화 특성

5. 전력 케이블 절연체(XLPE)의 제조

전력 케이블 절연체의 제조는 크게 압출, 가교 및 냉각 공정 등으로 나눌 수 있는데, 본 고에서는 압

출 및 가교 공정에 대하여 논하기로 한다.

5.1. 압출 공정

전력 케이블 절연 재료의 압출은 다음과 같은 기본 기능을 만족시켜야 한다.

- a) 압출량 변화가 적어야 한다.
- b) 수지 압력이 균일해야 한다.
- c) 수지 온도가 낮아야 한다.
- d) 용융 혼련이 균일해야 한다.
- e) 연속 압출 시간이 길어야 한다.

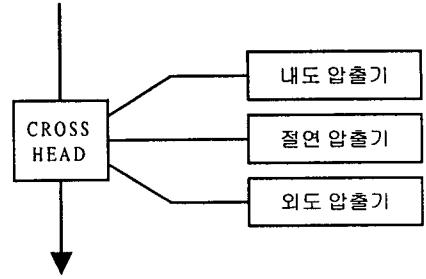


그림 3. 3중 동시 압출 방식

이러한 기능을 만족시키기 위해서는 스크류의 형태 및 실린더 온도의 안정성 유지가 중요하다. XLPE 케이블의 일반적인 구조는 내부 반도전층, 절연층 및 외부 반도전층을 피복한 3층 구조로 되어 있으므로, 압출 장치는 각 층 별로 1대씩 총 3대의 압출기가 필요하게 된다. 과거에는 3대의 압출기가 직렬 형태로 배열되어 각 압출기를 지나며 한 층씩 차례로 피복되는 탄뎀 방식을 사용하였으나, 현재에는 제조 기술의 발전에 따라 이물 흡착 및 미세 공극을 최소화시킬 수 있는 3중 동시 압출(Triple Common Extrusion) 방식이 선진 기술로서 적용되고 있으며, 이 경우 크로스 헤드를 이용하여 3가지 재료의 원료가 동시에 압출 및 피복된다. 3중 동시 압출 방식에 대해 자세히 설명하면, 내층용 압출기로 용융 혼련되어 압출된 수지는 내층용 헤드에서 제일 안쪽으로 유입되고, 원주 방향으로 균일하게 흐르도록 설계된 홀더부를 통과하여 내층용 die nipple 유로 출구의 중심부를 거쳐 도체 위에 얇은 두께로 피복된다. 절연용 수지는 내층 유로의 외측 유로를 따라 원주상 링에 정류후 절연층용 die nipple의 유로를 거쳐 내층 위에 두껍게 피복되며, 외층용 수지는 절연층이 피복된 직후 절연층 위에 얇게 피복되어 3층 구조의 피복이 크로스 헤드내에서 동시에 이루어지게 된다. 각 층은 개별의 편심 조정 볼트로 두께를 균일하게 조정할 수 있으며, 각 유로는 H-Cr 도금 처리 등을 통하여 용융 수지의 정체 및 체류를 최소화시킬 수 있도록 설계되어야 한다.

크로스 헤드에 요구되는 기본 기능은 우선 내부에서의 스크치 발생이 없어야 하고, 편류가 적고, 내도 두께 조정이 용이해야 하며, 온도 편차가 적고, 가류 관부로부터의 열전도를 효과적으로 차단시켜야 한다는 점 등이다.

탄뎀 방식과 비교한 3중 동시 압출 방식의 장점은 다음과 같다.

- a) 반도전층과 절연층의 접착이 좋아 가열-냉각을 반복하여도 계면상의 공극이 생기지 않는다.
- b) 일반적으로 반도전층은 내부의 카본블랙으로 인해 압출후 일시 냉각되면서 주위의 습기를 흡습하게 되나 3중 동시 압출의 경우는 이를 배제할 수 있다.
- c) 기타 외상에 의한 성능 저하를 방지할 수 있다.

그밖에 압출 공정 중에 유의해야 할 기본적인 관리 기준으로는 압출량 변화의 억제, 반도전층의 도전성 불량 및 조기가교 발생의 방지 등이 있다.

5.2. 가교 공정

저밀도 폴리에틸렌은 용융점(110℃~115℃) 및 연화점(80℃~90℃)이 낮기 때문에 고온에서 사용시 열변형이 심하여 고압 전력케이블 혹은 고온용 전자 기기 배선용 전선 등에는 사용할 수 없다. 이러한 열적 불안정성은 PE를 가교시킴으로써 해결될 수 있다. PE의 가교 방법은 크게 Silane가교, 조사가교 및 화학가교로 나눌 수 있다.

5.2.1. 실란 가교(Silane Crosslinking)

실란 가교는 전형적인 화학 가교제인 DCP를 소량 사용하고, 불포화 Vinyl Group으로 가수 분해가 가능한 다기능성 불포화 실란의 화학 반응을 이용하여 가교를 시키는 방법으로서, 압출 성형된 고분자 물질을 온수에 침수시키거나 수증기(스팀)에 노출시킴으로써 비교적 간단하게 가교시킬 수 있기 때문에 수가교 또는 수분 가교(Moisture Crosslinking)라고도 불리우며 주로 저압 전력 케이블에 사용된다. 실란 가교의 장점은 고가의 설비가 요구되지 않는다는 것이다.

5.2.2. 조사가교(Radiation Crosslinking)

조사 가교는 $10^5 \sim 10^7$ Torr의 고진공 상태에서 Filament로부터 발생한 열전자를 가속시켜 얻어진 에너지를 발생시키는 전자선 조사 장치를 사용하여, 압출 피복된 폴리에틸렌 절연체에 전자선 조사 장치로부터 발생된 고속의 전자를 조사시켜 가교시키는 방법으로서, 제조 비용이 많이 들어 주로 절연 두께가 얇고 특수한 목적의 케이블 제조에 사용된다.

전자선 조사 장치의 전자선 전류는 피조사물의 필요 처리량에 의해서 결정되며, 아래와 같은 식에 의해 화학 반응에 필요한 물질의 흡수선량을 구할 수 있다. PE의 가교의 경우 필요 흡수선량은 10~20 Mrad이다.

$$D = \frac{\epsilon EI}{\rho W d} \times 10^{-1} \quad (1)$$

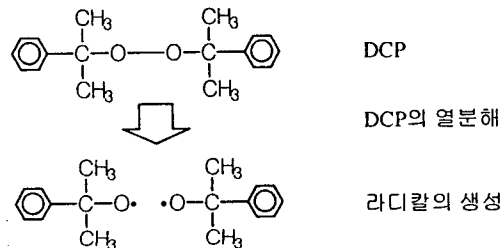
D : 화학 반응에 필요한 물질의 흡수선량, ϵ : 효율, E : 장치의 가속전압[MeV], I : 장치의 평균 전류[μ A], ρ : 피조사물의 비중, W : 주사폭[cm], d : 피조사물의 두께[cm]

5.2.3. 화학가교(Peroxide Crosslinking)

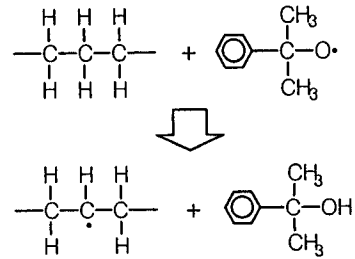
화학 가교는 PE에 유기 과산화물 DCP(Dicumyl Peroxide)를 배합하여 과산화물의 분해가 일어나지 않는 낮은 온도로 압출 피복한 후, 가열관을 통과시키는 동안 고압 가스나 수증기에 의해 가열, 가압하여 가교시키는 방법으로 현재 고압 및 초고압 전력 케이블 절연체(XLPE)의 제조 방법은 주로 이 방법을 사용하며, LG 전선의 경우에는 고압 가스에 의한 가교 방식을 채택함으로써 절연체에 수분이 잔존할 가능성을 근본적으로 방지하고 있다.

화학 가교의 반응 과정은 다음과 같은 단계로 이루어진다.

a) DCP가 열분해되어 라디칼을 생성한다.

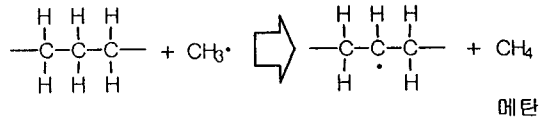
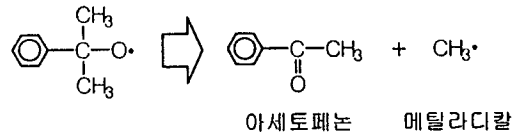


b) 생성된 라디칼이 PE와 반응하여 PE의 체인상에 라디칼을 발생시킨다.

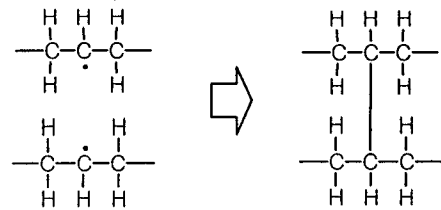


카르보닐

c) 한편 a)에서 생성된 라디칼은 안정한 아세트페논이 되면서 메틸 라디칼을 생성시키며, 이 메틸 라디칼이 다시 PE 체인상에 라디칼을 발생시킨다.



d) 앞서 b)와 c)에서 생성된 PE 체인상의 라디칼이 서로 반응하여 가교 반응을 일으킨다.



위 반응 과정에서 반응의 속도를 지배하는 것은 a)의 DCP가 분해하여 라디칼을 형성하는 과정이며, b), c), d)의 과정은 매우 빨리 진행되므로 거의 무시할 수 있다. 이러한 가교 과정에서 카르비놀, 아세트페논 등의 부산물이 형성되는데, 기포의 발생을 방지하기 위하여 외부에서 높은 압력을 가해준다.

가교관 내의 열전달 방식은 가스 또는 스팀의 순환에 의한 대류 방식과 히터의 가열에 의한 복사 방식 등이 있으며, 가교관의 압력을 높게 유지하는 이유는 열전달 효율의 향상을 비롯하여 절연체 내부에 보이

드 발생 억제, 계면 접착력 향상 및 제품의 형상을 고르게 유지하는 데에 있다. 가교관내의 높은 온도와 압력을 인가하고 유지하기 위한 매체로는 수증기 또는 가스(N₂)가 사용되는데, 가스를 사용하는 경우는 수증기를 사용하는 방식에 비하여 가교관의 온도를 높일 수 있어 선속 및 생산성이 향상되고, 보이드 및 수분의 함량이 적어서 절연 특성이 양호하며, 가교관의 압력을 낮게 인가해도 되므로 설비 구성 및 작업 안전에 유리하다는 등의 장점이 있다.

표 1. 가스 가교와 스팀 가교의 비교

구분	열전달 매체	압력	온도	적용 전압
가스 가교	N ₂	10kg/cm ²	450℃	3.3~500kV
스팀 가교	steam	20kg/cm ²	200℃	22kV급 이하

가스 가교 방식에서 열전달 매체로 N₂ 가스를 사용하는 주된 이유는 N₂ 가스가 불활성 기체이기 때문에 고온, 고압 조건에서 PE를 XLPE로 화학 반응에 의해 분자 구조만 바꾸어 주고, N₂ 가스 자체는 화학 반응에 영향을 주지 않기 때문이다. 또한 가격이 저렴하여 대량 생산에 적합하므로 경제성이 높고, 인체에 무해하여 보관 안정성이 높으며, 고온에서 화재의 위험성 등이 적다는 등의 장점도 가지고 있다.

가교 장치는 형태에 따라 수직식 가교 장치(Vertical Continuous Vulcanization, VCV), 현수식 가교 장치(Catenary Continuous Vulcanization, CCV) 및 수평식 가교 장치(Horizontal Continuous Vulcanization, HCV) 등으로 구분된다.

6. 전력 케이블 절연체(XLPE)의 설계

초고압 전력 케이블의 절연 두께는 케이블의 절연 파괴 강도나 열화 특성을 고려한 목표 성능을 설정하고 이를 만족하도록 설계된다. 목표 성능 결정에는 일반적으로 상용주파 내전압값과 뇌임펄스 내전압값이 함께 고려되어 지는데, 이들의 절연 파괴 강도는 Weibull 분포를 따른다.

XLPE 절연재료가 전계 강도 E[kV/mm]에서 파괴되는 확률 P는 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E - E_L}{E_0}\right)^m\right] \quad (E \geq E_L) \quad (2.1)$$

$$= 0 \quad (E \leq E_L) \quad (2.2)$$

E_L : 위치 파라미터, E₀ : 척도 파라미터, m : 형상 파라미터

위 (2.2) 식은 절연재료가 E_L 이하에서 파괴될 확률이 0인 분포를 나타내는 것을 의미하고, 반복적인 시험 결과에 의한 많은 데이터로부터 E_L 값을 구한 후 이를 기초로 하여 절연 두께를 설계한다. 최근에는 케이블 제조 기술의 개선(3중 동시 압출, 건식 가교 등)과 절연 재료의 성능 향상과 함께 E_L 값이 점점 높아지고 있다.

절연 두께의 산출 기준은 뇌임펄스 전압에 의한 절연 파괴 강도로부터 결정되어지는 두께와 상용주파 전압에 의한 절연파괴 강도로부터 결정되어지는 두께 중에서 큰 쪽의 값을 택한다.

i) 뇌임펄스 전압에 의한 절연 파괴 강도로부터 결정되어지는 절연 두께(t_{imp})

$$t_{imp} = \frac{BIL \times K_1 \times K_2 \times K_3}{E_{Limp}} [mm] \quad (3)$$

BIL : 계통의 뇌임펄스 내전압 레벨[kV]

K₁ : 온도 계수

K₂ : 열화 계수

K₃ : 시료 시험 및 기타의 불확실 요소에 대한 여유도
E_{Limp} : Weibull 분포에 의한 뇌임펄스 파괴 전압 (평균 전위 정도)의 최저치[kV/mm]

ii) 상용주파 전압에 의한 절연 파괴 강도로부터 결정되어지는 절연 두께(t_{ac})

$$t_{ac} = \frac{BU_m/\sqrt{3} \times K_4 \times K_5 \times K_6}{E_{Lac}} [mm] \quad (4)$$

E : 상시 최고 회로 전압[kV]

K₄ : 온도 계수

K₅ : 열화 계수

K₆ : 시료 시험, 기타의 불확실 요소에 대한 여유도
E_{Lac} : Weibull 분포에 의한 상용주파 파괴 전압 (평균 전위 정도)의 최저치[kV/mm]

절연 두께를 결정하는데 중요한 것은 t_{imp}에 대해서는

최저 파괴 전계 강도 $E_{Lim,p}$ 와 온도 계수 K_1 이고, t_{ac} 에 대해서는 최저 파괴 전계 강도 E_{Lac} 와 열화 계수 K_5 이다. 절연 두께가 23mm인 154kV급 전력 케이블의 경우 일반적으로 적용되는 계수값들을 [표 3]에 나타내었다.

표 3. 154kV급 전력 케이블에 적용되는 계수

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
1.25	1.1	1.1	1.1	4.0	1.1

케이블의 V-t 특성도 절연 두께를 결정하는데 중요하다. V-t 특성은 전압 V와 수명 t간의 관계로서 $V^n \cdot t = \text{const}$ 로 나타낼 수 있다. 이때 n은 수명 지수(Life Exponent)라 하고 Weibull 분포의 파라미터와 관계가 있다. 실제 초고압 전력 케이블의 n값은 $n \geq 15$ 으로 예상되어지며, 설계면에서 중요한 지수로서 교류 전압하에서 절연 두께를 결정하는 값이다.

한 예로 일본의 500kV XLPE 케이블의 경우에는 절연 두께의 수준이 27mm급이고, 국내 154kV의 경우에는 LG 전선에 의해 최초로 23mm 수준에서 17mm로의 저감 절연 기술 개발이 이루어져 현재 양산 중에 있다. [표 4]는 일본의 XLPE 절연 케이블에 적용되고 있는 예로 위의 (3), (4)식에 근거하여 각종 정격 전압에 대한 내전압치와 절연 두께를 나타낸 것이다³⁾.

표 4. 일본 XLPE 케이블의 내전압치와 절연두께

정격 전압 [kV]	내전압치 [kV]		절연체 두께 [mm]
	V_{imp} [kV]	V_{ac} [kV]	
66	535	195	11
77	610	225	13
154	1135	400	23
275	1590	805	27

7. 결 론

XLPE 전력 케이블 기술은 고순도의 원료를 사용하여 초청정 상태에서 저감 기술을 적용한 절연체를 제조하는 데에 있다. 절연체내의 보이드와 불순물(반도전 돌기 포함)은 부분 방전 및 트리 등의 현상을 거쳐 케이블을 절연 파괴에 이르게 하므로, 전력 케이블 절연체 제조 기술의 핵심은 결국 '보이드와 불순물을 얼마만큼 배제시킬 수 있는가'에 달려있다고 해도 과언이 아니다. 이를 위하여 절연 재료 물질의 성능 향상을 비롯하여 보이드 및 불순물을 배제할 수 있는 시스템과 검출 장치 등이 활발하게 연구·개발되고 있으며, 일부분은 이미 상용화 단계에 이르렀다. 향후에도 전력 시스템의 안정적인 운용과 전력 서비스의 고품질화를 위해서는 케이블 분야를 비롯한 유관 분야의 전반적인 기술 개발이 다각도로 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 超高壓試驗法 專門研究會 ; “電氣協同研究”, 電氣協同研究會, Vol. 51, No. 1, pp. 26-32, 平成7年.
2. 한기만 ; “초고압 전력케이블의 기술동향”, 大韓電氣學會誌, Vol. 40, No. 8, pp. 38-39, 1991.
3. 이종범, 關井康雄 ; “最新 XLPE 電力케이블의 絶緣設計와 新絶緣材料 技術動向”, 大韓電氣學會誌, Vol. 44, No. 5, p. 34, 1995.