

## 방사선 차폐 절연 재료



이우선

조선대학교 공과대학 전기제어계측공학부

### 1. 서 론

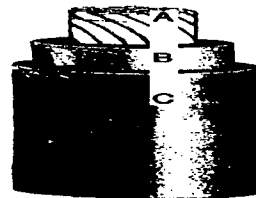
방사선 차폐용 케이블은 열 및 방사선 환경에 노출되는 곳에서 사용되며 설계, 제작, 시공과정에서 발생할 수 있는 오류와 환경에 의해 손상이 일어날 가능성이 높다. 원전에 사용하는 격납용기 내부의 케이블은 미국 전기전자학회(Institute of Electrical and Electronics Engineers : IEEE) 기준에 규정되어 있는 일반적인 전기적, 물리적 특성을 만족하여야 한다. 또한 설계수명을 기준으로 한 정상운전 기간 동안 발생하는 열 및 방사선에 충분히 견딜 수 있어야 하며, 설계기준사고 중 케이블사고가 발생 시에도 원래 기능을 유지하여야 한다.

원전용 방사선 차폐 케이블계통은 케이블, 접속단자 및 격납용기 내부 통로에 설치된다. 케이블과 접속단자는 원자로 제어에 이용되는 센서류 및 전기설비 사이의 신호전달 경로가 되므로 방사선 차폐 케이블 재료의 구조, 종류, 설계기준 및 방사선 차폐특성에 대해 기술하고자 한다[1]~[5].

### 2. 방사선 차폐 케이블재료의 구조 및 종류

방사선 차폐 케이블은 원전의 안전성 유지 및 발전에 필요한 기기에 안정된 전력을 공급하며 각종 제어 기기의 제어 및 계측기에 사용된다. 원전 격납용기 내부 케이블은 사용 전압 및 용도에 따라 다음과 같이 저압 전력 케이블, 제어 케이블, 계측 케이블로 나눌 수 있다[6].

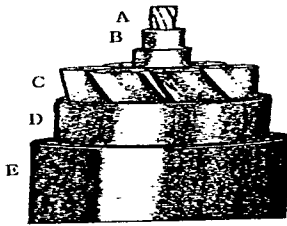
전력 케이블은 2,500V~13,800V, 저압 전력 케이블은 600V~1,000V, 저압 제어 케이블은 600V~1,000V, 저압 계측 케이블은 300V~600V에서 사용된다.



A. Conductor  
B. Insulation  
C. Jacket

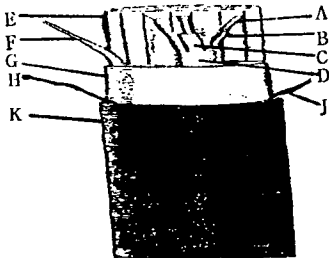
그림 1. 전력 케이블

그림 1~3은 각각 원전에 사용되는 저압 전력 케이블, 제어 케이블 및 계측 케이블을 보여주고 있다. 그림 1은 스위치기어, 전동기, 축전기와 같은 저압 전기기기 와 연결되는 전력 케이블에 사용되고, 그림 2는 전력계 통의 제어기기에 신호를 전달하는데 사용되는 제어 케이블을 나타낸다. 그림 3은 온도 감시기 혹은 진동감시기와 같은 센서류에 사용되는 계측 케이블을 보여준다.



- A. Coated Stranded Conductor
- B. Insulation
- C. Jacket
- D. Extruded Belt or Cable Tape and Fillers
- E. Outer Jacket

그림 2. 제어 케이블



- A. Bare Stranded Copper Conductor
- B. Insulation
- C. Tinned Stranded Copper Group Drain Wire
- D. Aluminum-Polymers Isolated Group Shield
- E. Twisted, Shielded Pairs/Triads
- F. Communication Wire
- G. Aluminum-Polymers Cable Shield
- H. Tinned Stranded Copper Cable Drain Wire
- J. Rip Cord
- K. Jacket

그림 3. 계측 케이블

격납용기 내부 저압 케이블은 냉각재 상실 사고를 포함한 설계기준사고 발생 이후에도 반드시 작동되어

야 하는 케이블이다. 케이블을 지지하고 있는 트레 이로 부터의 이동이 어렵고, 교체 시 과도한 인력과 비용이 소요되기 때문에 케이블의 수명평가와 교체시기 예측은 원전수명관리 측면에서 매우 중요하다.

### 3. 방사선 차폐재료

방사선 차폐 케이블은 일반적으로 도체(Conductor), 절연체(Insulation), 금속차폐층(Metallic Shield) 및 자켓(Jacket)으로 구성되어 있다. 도체 재료는 전기전도도와 열전도도가 우수한 구리를 사용하며, 구리와 절연체 사이의 간섭현상 방지와 내식성 향상을 위해 구리 표면에 주석등을 도금한다. 절연체는 도체에 흐르는 전류를 외부로 흐르지 않도록 하고 전압을 유지시키는 역할을 한다. 절연체 재료는 일반적으로 폴리머를 사용하며 폴리머의 성질은 주로 첨가제에 의해 좌우된다. 폴리머 제작에 사용되는 첨가제는 습분, 고온, 중성자 조사에 의해 절연능력이 저하될 수도 있다. 절연체는 적절한 강도와 연성을 가지고 있어야 하며 일반적인 폴리머의 기계적 성질은 제작공정과 제작시 가해진 첨가제에 따라 다르다. 원전의 케이블 절연체에 사용된 재료는 표 1에 나타내었다. 방사선 차폐 재료는 폴리에틸렌, 폴리염화 비닐, 에틸렌 프로필렌 고무, 실리콘 고무, 하이파론 등이 주로 쓰인다.

표 1. 케이블 절연체 재료

	구분	위치	전압	절연체	자켓
고압전력 케이블	안전관련	격납용기 내부(RC)	5KV	EPR	-
	비안전관련	P전동기)		PVC	
저압전력 케이블	안전관련	격납용기 내부	600V	EPR	Hypalon
	비안전관련	내부		PVC	
제어 케이블	안전관련	격납용기 내부	600V	EPR	Hypalon
	비안전관련	내부		PVC	
계측 케이블	-	-	600V	SR	SR

#### 가) 폴리에틸렌

폴리에틸렌의 제조법으로는 대체로 다음의 두 종류가 대표적인데 고압 법은 에틸렌을 미량의 산소존재 하에서 1000~2000atm으로 200℃전후로 가열하여

얻은 것이며 특징으로는 저밀도이고, 투명하며, 유연성이 좋아 가공하기 쉽다. 일반적으로 저밀도 폴리에틸렌이라 한다. 저압 법은 Ziegler법이라고도 하며, 보통 상압상온(실온, 상압~15atm, 70℃이하)에서  $Al(C_2H_5)_3$ 와  $TiCl_4$ 를 촉매로 사용하여 에틸렌을 중합한 것이다. 고압법에 의한 것보다 밀도가 더 높고 연화점이 높으며, 기계적 강도도 크다. 보통 고 밀도 폴리에틸렌이라 한다. 폴리에틸렌의 분자구조는 대칭으로 되어 있기 때문에 거의 무극성 이어서 고주파에 대한 유전체 손실이 적으며, 또 내습, 내약품성도 우수하여 고주파절연용에 적합하다. 다만 쇠상체로 되어 있어 낮은 용점을 가진 것이 결점이나 여기에 방사선이나 전자 비임을 조사 하든가 또는 과산화제 등을 사용한 화학적 처리방법으로 가교 시켜 망상구조로 하면 용점이 현저히 상승한다. 전력케이블의 절연에 사용하는 가교폴리에틸렌은 저밀도폴리에틸렌에 화학적 처리로 가교시킨 것이다. 또 폴리에틸렌은 가공과정에서 공기 중의 산소와 결합하여 카보닐기가 생성되는데, 이것은 고주파에서 유전체 손실의 원인이 된다. 이 재료를 통신용 케이블에 사용하려고 할 때에는 발포제를 사용하여 작은 기포를 내부에 분산시켜 놓으면 단위체적당 카보닐기의 농도가 줄어들어 비유전율이나 유전손실을 줄어줄 수 있다.

폴리에틸렌(Polyethylene : PE)은 우수한 절연재료로 널리 사용되고 있으며 비교적 양호한 내 방사선성 특성을 지니고 있다. 전력케이블에 사용되는 가교폴리에틸렌(Cross-linked Polyethylene : PE)은 내열성이 특히 우수하나 내 상방선성은 일반적인 폴리에틸렌과 큰 차이가 없다.

#### 나) 폴리염화비닐

염화비닐의 제조법은 아세틸렌과 염산을 적당한 촉매 밑에서 합성하는 소위 아세틸렌법과 에틸렌과 염소로부터 2염화에틸렌을 만들어 이것을 다시 열분해로써 탈 염산 시켜 만드는 에틸렌법이 있다.

폴리염화비닐은 분자식으로부터 알 수 있는 바와 같이 폴리에틸렌에서 수소 하나를 염소로 치환한 것이지만 이 상태에서는 조금 단단하므로 일반적으로는 가소제를 혼합하여 유연성을 가지게 한 것을 많이 이용한다. 분자구조는 비대칭이므로 전기적으로 유극성 이어서 고주파에서의 유전체손이 크므로 고주파절연용으로는 사용되지 않으며, 내열성이 약한 결점이 있다. 그러나 가공성이 좋고 내약품성이 크며 또 상용주파수에서는 극성기에 의한 유전체손은 문제되지 않으므로 이 방면에서 종전의 고무절연 대신 대량으로 사용

되고 있다. 600[V]전선의 절연, 각종 케이블의 외피, 배관용 등에 쓰일 뿐 아니라 쉬이스, 테이프, 튜우브의 형태로 만들어 각종 절연에 사용된다. 폴리염화비닐(Polyvinylchloride : PVC)은 가공성 및 내연성이 우수하며 원전에 사용되는 케이블의 경우 특수한 첨가제를 사용하여 더욱 향상된 성질을 가지고 있다.

100℃~200℃의 천이온도에서 다음에 설명할 에틸렌프로필렌고무보다 절연체로서의 성능은 떨어지나 가공성 및 내화성은 좋다. 그러나 내방사선성은 비교적 좋지 않아 50~100Mrad에서도 노화가 진행된다.

#### 다) 에틸렌프로필렌고무

EPR로 약칭함. 합성고무의 하나로써 에틸렌과 프로필렌과의 혼성중합체. 두 가지의 비는 60:40에서 40:60이 좋고 계열촉매에 의한 혼성중합으로 만들어짐. 이 고무는 주 사슬에 이중결합이 없으므로 내산화성, 내산화성, 내오존성, 내약품성에 우수하고, 가황은 과산화물에 의하여야함 가황성을 좋게 하기 위하여 디엔 화합물을 조금 첨가할 때도 있는데, 이 3성분 혼성중합체를 EPT라고 함. 또 이 고무는 극성기를 가지지 않으므로 내수성이 좋고, 전기적 성질도 좋음. 그러나 디엔계열 고무와의 양립성이 나쁘고 접촉도 어려움. 타이어, 라이닝재료, 절연체, 전선피복, 가스켓등에 쓰임.

에틸렌프로필렌고무(Ethylene Propylene Rubber : EPR)는 유연하면서도 기계적 손상에 잘 견딘다. 또한 내열성, 내 방사선성, 내연성이 우수하여 원전의 케이블에 대다수 사용되고 있다.

#### 라) 실리콘고무

Si-O를 골격으로 하고 여기에 유기기(R)가 붙어 있는 것으로 과산화 배소일로 가교시킨다. H중용의 내열성(250℃)을 가지고 있으며, 또 내산성(-60℃), 내오존성, 내코로나성 등이 우수하다. 결점으로서는 기계적 강도가 일반적으로 낮은 것과 고온의 증기에 접촉되면 분해되기 쉬운 성질이다. 용도로서는 저온에서 고온까지의 넓은 온도변화에 견디는 기밀용 재료, 고온에서 사용되는 각종 케이블의 피복절연물로서 적당하다.

실리콘고무(Silicon Rubber : SR)는 매우 유연하고 내연성이 우수하나 기계적 성질은 떨어진다. 또한 내방사선성은 좋지 않은 반면에 방사선에 의한 노화 후에도 전기 절연성이 크게 감소되지 않는 특징을 갖는다.

마) 클로로프렌고무

클로로프렌고무(Chloroplene Rubber)는 내연성이 우수한 고무로서 절연체를 감싸고 있는 방사형의 자켓재료인 외장(Sheath)용으로 많이 사용되는 재료이다. 그러나 내방사선성이 좋지 않아서 50Mrad 정도의 방사선이 조사되면 노화되기 시작한다.

바) 하이파론

하이파론(Hypalone)의 정확한 명칭은 클로로수화 폴리에틸렌(Chlorosulfonated Polyethylene : CSPE)이다. 내화성, 내열성 및 내방사선성이 모두 우수하나 비교적 가격이 비싸며 주로 케이블 자켓 재료로 사용된다.

3) 금속차폐층

금속 차폐층은 도선에 적당한 주파수를 전달하고 일정한 임피던스를 공급하며 바깥 계면과의 격리를 위해 저압 제어 케이블에 주로 사용한다. 또한 고압 케이블에 사용되는 경우에는 절연체로부터 발생하는 균열 성장을 방지하는 역할을 한다.

4) 자켓

자켓은 폴리머의 압출 공정에 의해 제작되며, 절연체를 외부로부터 차단시키는 역할을 한다. 자켓 재료로는 앞서 언급한 절연체와 같은 폴리머를 사용한다. 특히 기계적 손상과 화재에 대한 난연성이 요구되며 이러한 영향으로부터 케이블 절연체를 보호하기 위해 주로 하이파론을 사용한다.

4. 설계기준

원전의 격납용기 내부온도는 10℃~48℃로 유지하도록 설계되며 사고조건에서는 132℃까지 상승하고 격납용기 내부에 설치된 케이블은 표 2와 같은 조건에 견딜 수 있도록 설계된다.

원전 격납용기내 전력 케이블의 절연체로 사용된 에틸렌프로필렌고무는 아래에 열거한 전기적 및 물리적 요건을 만족시키며, 도체온도가 정상 운전시 90℃, 비상과부하시 132℃를 초과하지 않아야 한다.

케이블의 방사선 노출시험 수행시 40년의 방사선 노출을 가상하여 방사선원(Radiation Source)으로

부터 0.1×10<sup>6</sup> rad 방사선 선량만큼 γ-선을 시료에 노출시킨다. 대부분의 유기물 재료에서 방사선 효과는 선량율과 방사선 유형에 관계없이 단지 흡수된 선량에 의존한다고 가정하여 동등선량/동등손상모델이 사용된다. 그러나 최근의 실험에서 이러한 모델은 방사선 선량에 민감하게 반응하는 재료에 대해서는 보수적이지 못함을 보여주고 있다. 또한 열노화와 마찬가지로 서로 다른 환경에 따라 방사선 노출은 손상정도 및 유형에 영향을 미친다.

표 2. 방사선 차폐 내부 케이블 설계기준

매개변수	주변조건	사고후 상태 (0~2시간)	사고후 상태 (2~26시간)
온도	49℃	131℃	97℃
압력	Atmospheric	43psig	15 psi
습도	0~50%	100%	100%
방사선 선량	100 Mrad/Hr	10 <sup>6</sup> rad(0~30일)	

대부분의 재료는 열노화 및 방사선 노출의 순서에서 큰 영향을 받지 않지만 보수성을 주기 위하여 몇몇 재료는 방사선 노출이 열노화에 앞서 수행된다.

고분자 재료는 산소가 존재하는 환경에서 열 및 방사선에 의해 화학적 변화를 일으킨다. 일반적으로 케이블 절연체와 자켓에 손상을 유발하는 임계온도(Threshold Level)는 35~40℃이고, 임계방사선량은 1×10<sup>4</sup> rad이며, 이러한 임계치 이하에서의 노화효과는 무시한다. 산소가 없는 조건에서는 열 및 방사선에 의한 손상효과는 급격히 감소하나 원자로 격납용기 내부에는 화학작용을 유발시킬 만한 충분한 양의 산소가 존재한다. 케이블을 구성하고 있는 물질 중에서 열에 가장 취약한 것은 폴리머 재료로서 열을 받는 경우 탄소사슬에 변형이 일어나기 때문이다. 이러한 현상은 전기적 또는 기계적 성질을 변화시켜 절연강도, 인장강도 등을 저하시킨다.

케이블의 방사선 조사에 의한 효과는 방사선 종류 및 피폭량에 따라 달라진다. 원전에서 생성되는 주요 방사선으로는 α-선, β-선, γ-선 및 중성자가 있으며, 특히 γ-선은 발전소 정상운전 중에 항상 존재하고, 물질투과 효과가 매우 크기 때문에 가장 큰 관심의 대상이 된다. γ-선에 조사된 물질은 이온화 현상이 일어나며 재료의 물성이 변화한다.

방사선 조사에 의한 폴리머의 물성 변화는 경도, 인장강도, 탄성계수, 전기전도도는 증가하고, 압축성,

연신율, 충격강도, 절연강도는 감소한다.

격납용기 내부의 습분 상승은 일반적으로 기기에서의 액체누설에 의해 나타난다. 습분이 상승하여 물로 응축되면 도선에 축적되어 오랜 시간을 두고 물에 잠긴 상태와 같아지며 물은 자켓을 통하여 확산되는 결과를 초래한다. 이에 따라 도체 혹은 금속차폐층에서 부식과 절연손상이 일어난다.

케이블에 사용된 폴리머 재료는 탄소성이 있으며 장기간 작용하는 비틀림 압력에 의해 소성변형이 일어날 수 있다. 온도가 높아지면 절연체 재료는 연약해지며, 영구 변형량도 증가하게 된다. 그러므로 고온과 높은 비틀림 압력이 동시에 작용하면 그 손상효과는 더욱 증가한다.

금속과 유기재료인 폴리머의 열팽창계수가 서로 다르므로 온도변화에 의해 응력이 유발되며 이에 따라 도체와 절연체 사이에 틈이 생성된다. 격납용기의 주위환경 온도는 핵연료 재 장전시 25℃에서 전출력 가동시 60℃ 이상으로 증가한다. 위에서 언급한 손상요인 이외에도 도체와 절연체 사이에 존재하는 화학물질이나 과부하(Overload)전류 등도 손상요인으로 작용한다.

### 5. 방사선 차폐 특성

그림 4와 그림 5는 방사선 케이블로 주로 쓰이는 EPDM의 방사선량 증가에 따른 방사선 차폐의 정도를 나

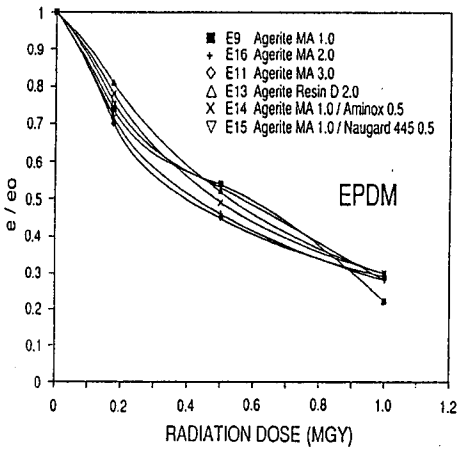


그림 4. 방사선량과 방사선 차폐 특성 : EPDM

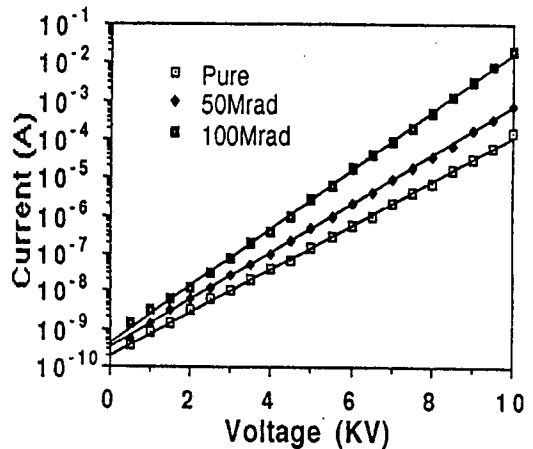


그림 6. 방사선 조사량에 따른 XLPE 누설전류

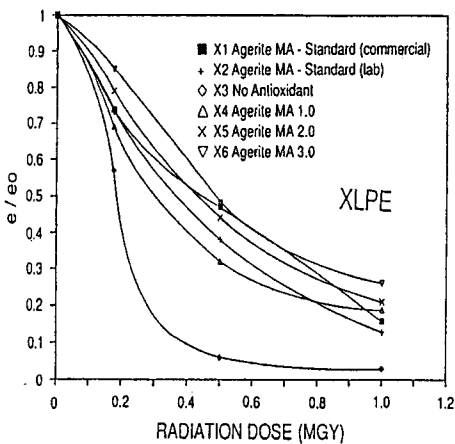


그림 5. 방사선 차폐의 정도 : XPLE

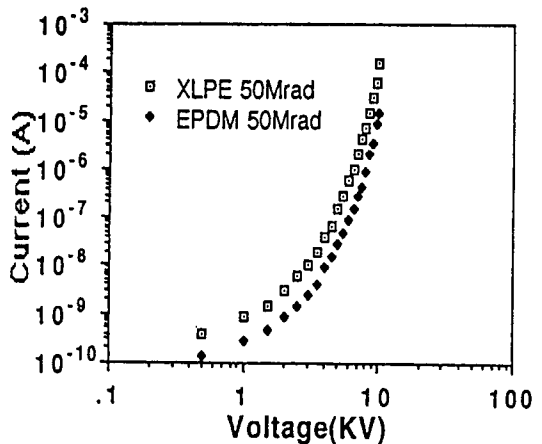


그림 7. XLPE와 EPDM의 전류 비교

타낸다. XLPE의 경우는 그림 5에 나타냈는데 EPDM과 XLPE 모두 방사선량 증가에 따라서 방사선 차폐 정도가 감소함을 나타냄을 알 수 있다. 다만 방사선 차폐 재료에 함유된 산화방지제 등의 물질에 따라서 방사선 차폐의 정도가 많이 달라짐을 알 수 있다[1], [4], [7].

그림 6은 XLPE시료에 50Mrad, 100Mrad의 방사선을 조사하였을 때 전압 0~10kV범위에서 누설전류 변화를 나타내고 그림 7은 감마선 조사 50Mrad 조사하였을 때 XLPE와 EPDM의 누설전류를 측정 한 결과를 나타낸다. 두 경우다 방사선 조사량이 클수록 누설전류가 증가함을 나타내고 있으며 EPDM보다는 XLPE에서 누설전류가 크게됨을 보여서 절연체 재질에 따라서 방사선 차폐 특성이 크게 의존함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

방사선 차폐재료 구조, 종류, 설계기준과 차폐특성에 대해서 살펴보았으며, 방사선을 차폐할 수 있는 재료와 특성들을 기술하였다. 방사선 차폐 케이블 종류는 3가지가 있으며 설계기준은 케이블 사용하는 위치, 사용전압, 절연체 등에 따라서 달라지며 방사선 차폐특성은 방사선 조사량이 증가함에 따라 감소하나 XLPE와 EPDM등 절연체의 종류에 따라서 크게 달라짐을 보였다. 원전 등에서 사용되는 방사선 차폐 케이블은 원전이 늘어남에 따라서 계속 증가될 전망이다. 따라서 차폐재료의 개발의 필요성이 더욱 더 증가되고 있고 완벽한 차폐 재료의 개발은 아직 연구되지 않았으므로 앞으로 이 분야에 연구의 진전이 있어야 할 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이우선, "전기케이블피막의 노화현상 규명을 위한 실험연구, 기초전력공학공동연구소 최종 보고서, 1999년 10월.
- [2] S. H. Lee, J. K. Park, J. H. Han and K. S. Suh, "Space charge and electrical conduction in maleic anhydride grafted polyethylene", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 6, pp. 1132-1139, 1995.
- [3] A · B · Reyholds, "Effect of an antioxidants on aging of nuclear plant cable insulation", EPRI NP-7140 Project 2614-26, 1991 January.
- [4] R · F · Gazdzinski, "Aging management fuidline for electrical cable and termination", EPRI SAND-0344, U::C-523, 1996, September.
- [5] EPRI, "Natural versus artificial aging of Nuclear Power Plant Components", EPRI TR-100245, project 1707-13, 1992 January.
- [6] 고리원전, "격납용기내 전선케이블 노후와 평가기술 개발", 원전수명관리연구 최종보고서 5, 10권 케이블 수명평가, 1998.
- [7] W. Yeh and P Budenstein, "Electrical conduction at low fields of composities sparsely filleded with aluminium particles", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 1, pp. 84-96, 1995.