

극 초고압 케이블 및 접속함 전기 시험 단말의 개발

김정훈, 오용중, 김화중  
대한전선 주식회사

DEVELOPMENT OF ELECTRICAL TESTING FACILITY  
ABOUT U.H.V CABLE AND ACCESSORY

J. H. KIM, E. J. OH, H. J. KIM  
TAIHAN ELECTRIC WIRE CO., LTD.

**Abstract** - In order to meet recent increasing demand for electric power in large cities, plans are being made to introduce 345kV lines into large urban areas. Up to now, OF cables have been used for 345 kV lines, but nowadays XLPE insulated cables are preferred as they are easier to maintain due to phenomenal advances in plastic insulation technology. therefore cable manufacturing companies are trying to improve the performance and reliability of UHV CV cables and their accessories. For the purpose, our company has developed facilities for testing UHV cables. In this paper, we describes the methodology adopted for the design and development of a test termination, conducted the electrical test of UHV cables. Based on detailed analytical studies for electrical field distribution, the internal electrical design for the testing end has been carried out.

1. 서 론

최근 국내에서는 산업화와 인구 도시 집중화에 따른 전력 수요의 증대에 대처하기 위해 1992년도부터 345kV 급 송전 계통을 대도시권의 지중 선로에 도입하고 있으며, 이들 계통에는 현재까지 OF케이블이 적용되고 있다. OF케이블의 경우, 장기 신뢰성이 우수하다는 것은 알려져 있는 사실이지만 환경 면이나 보수의 어려움 등으로 인해 점차 XLPE케이블로 대체되어가고 있는 것이 세계적인 흐름이다. 국내에서의 XLPE케이블은 154kV급 까지 상용화되어 사용 중에 있고 제조 기술의 개선과 품질 개선 등을 통하여 사용 전압을 보다 고전압 화하려는 노력이 계속 이루어지고 있다. 현재, 당사를 포함한 케이블 제조사에서는 345kV급을 개발하고 있으며 계속해서 보다 높은 UHV급에도 방재성이나 보수의 용이성 등이 우수한 XLPE케이블의 적용이 검토되어지고 있다. 따라서, 케이블 제조사에서는 345kV급을 포함한 그 이상의 UHV급 XLPE케이블 및 접속재를 개발함에 있어서 요구되는 전기적인 신뢰성과 성능 개선을 확인하기 위해서는 UHV급 케이블 전기시험용 단말이 필요하다. 본 보고서는 당사에서 개발하여 설치 완료한 UHV급 케이블 및 접속재의 전기시험 파괴용 시험 단말의 설계와 제작, 시험에 대한 내용을 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 요구 특성

본 시험 단말로 시험하고자 하는 345kV XLPE케이블의 국내 및 국제 규격, 해외의 경쟁 업체의 개발 사례에 따른 AC 및 Impulse 시험 초기 성능 값을 표 1과 같이 검토하여 시험 단말의 요구 성능 값을 AC 1500kV, IMP. ±2800kV으로 결정하였다.[1][2][3]

	AC 장시간 시험치	AC파괴 특성치 (참고치)	IMP. 내전압 시험치	IMP. 파괴 특성치 (참고치)
345kV XLPE 개발시험치(일)	766kV, 12hr (상온)	990kV 비파괴	-1970kV 3회 (상온)	-2390kV 비파괴
KEPCO Spec.	540kV, 3hr (상온)	650kV 파괴 확인	±1300kV 10회 (고온)	-2000kV, 3회 인가후 10kV씩 승압파괴(상온)

표 1. 345kV XLPE케이블 Spec. 및 초기성능치 비교

2.2 설비의 구성

UHV급 시험 단말의 구성은 단말 상부의 시험 전압 인입부인 코로나 쉴드, Input 전압 원을 분배하는 콘덴서 부상, 이를 짧은 구간 내에서 케이블과 연결하기 위해 SF<sub>6</sub> 가스 절연물을 일정하게 유지 시켜주는 챔버, 챔버 내에서 콘덴서 부상 하단 부의 도체 부와 에폭시 에 관 도체 부를 연결시켜주는 내부 쉴드, 챔버 내의 SF<sub>6</sub> 가스와 케이블 단말 부의 절연유를 구분시키며 전기 절연물인 에폭시 에관, 케이블 단말 부의 전계 완화를 위한 절연 부 등으로 구성된 고정 시험 단말과 케이블 단말의 처리는 동일하며 케이블 길이에 따라 이동 가능한 이동 시험 단말로 구성되어 있으며 형상은 그림 1과 같다.

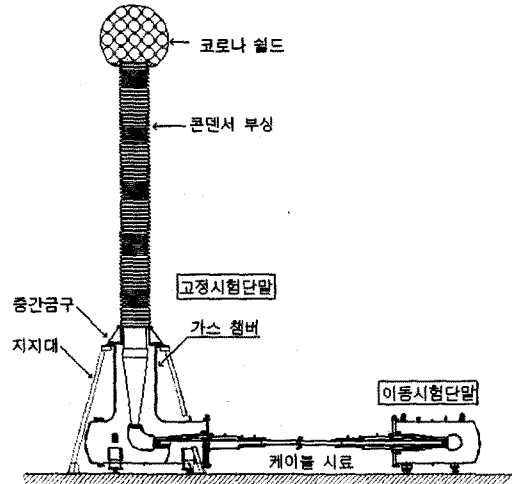


그림 1. UHV 케이블 및 접속재 시험단말 형상

### 2.3 설계

#### 2.3.1 콘덴서 부상

제품 상부의 외부 절연은 Porcelain 재질로서 옥내의 기중에 노출되어 공기 절연되며, 하부 역시 같은 재질로 가스 챔버 내의 SF<sub>6</sub> 가스로 절연되어 케이블 단말의 에폭시 부상과 연결되는 구조로 되어 있다. 이들 내부의 절연은 절연유와 유 함침 된 콘덴서 콘으로서 구성되어 있으며, 제품 상부에는 절연유의 팽창·수축을 조절할 수 있는 Oil Reservoir가 부착되어 있다. 설계 시 공기 중에 노출된 Porcelain 애관의 Creepage Distance는 IEC 137의 pollution level을 light급인 16mm/kV로 설계하여 min. 24,000mm 이상인 25,500mm로 하였으며, [4] 시험용 설비인 관계로 정기적인 세정을 하는 것으로 하였다. 하부 쪽은 가스와의 차단을 위해 2중 seal 구조를 택하였으며, 내부의 콘덴서 콘은 시험 단말이라는 특수성을 고려하여 설계 기준 및 파괴 예상치 보다 상당히 여유 있는 설계를 하였다.

#### 2.3.2 가스 챔버

콘덴서 부상과 케이블 단말 부를 전기적으로 연결하기 위해 도체 전극을 사용하며 전기 절연은 SF<sub>6</sub> 가스로 한다. 이러한 가스는 절연 거리가 멀면 멀수록, 압력이 높으면 높을 수록 전기적 특성에는 도움이 되지만 경제적인지는 못하다. 따라서, 본 챔버 개발에는 단말의 최소화 및 최적화를 위해 경제적, 기계적, 전기적인 측면을 고려하여 설계하였다. 챔버 내경의 설계는 내부 고압 전극의 외경과의 거리와 SF<sub>6</sub> 가스 압력에 의해 결정된다. 내부 전극 외경과 챔버 내경과의 거리는 내부 전극 상의 전기적 Stress가 최적이 되는 값을 택하였다. 또한, 가스 압력은 내부 전극 상의 섭락 전압을 고려하여 5kg/cm<sup>2</sup>·G로 하였다. 챔버의 기계적인 설계에서 재료는 사용압력이 10kg/cm<sup>2</sup> 이하이기 때문에 KS D 3515의 용접구조용 압연 강재를 사용하였으며, 챔버의 내경이 정하여지면 기타 챔버의 구조 설계는 저장될 가스압력을 고려하여 KS B 6231의 압력용기의 구조 중 챔버 본체의 판 두께 계산식을 기준으로 설계하였다. [5]

#### 2.3.3 에폭시 애관

에폭시 애관은 구조 상 Gas와 절연유를 구분하면서 전기적인 절연 및 연면 특성, 기계적, 화학적 특성을 가져야 한다. 기계적인 설계에서는 표 4에서 보는 바와 같이 인장하중, 굽힘 하중, 내압력 강도 등을 고려하였으며, 화학적으로는 내가스성, 내유성, 내트래킹성 등이 좋아야 하기 때문에 기존에 초고압 가스 중 중단접속함 및 GIS 절연물에서 사용하였던 알루미늄 수지를 사용하였다. 특히, 구조적인 설계에서는 그림 3과 같이 상기의 특성 및 제작 여건 등을 고려하여 전계 해석을 통한 최적의 형상을 찾았다. 이렇게 결정된 형상은 제작 여건 등을 감안한 금형 설계를 통하여 국내에서는 최대인 약 2M의 에폭시 애관을 자체 기술로 개발·생산하였다.

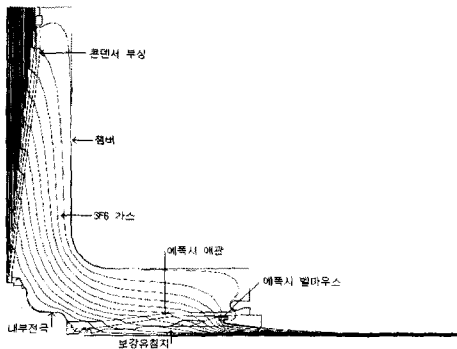


그림 2. 전계 해석 형상

#### 2.3.4 단말부 절연설계

케이블 단말 부의 차폐 층에 집중하는 전계를 완화하기 위한 절연 설계는 OF케이블 중단접속함과 동일한 방법으로 하였으며, 특히, 단말처리 시 가장 취약한 입상부의 흔들림 방지 및 취급의 간편성을 위해 Portable 조립 치구를 설계 제작하여 보완하였다. 실제 차폐 단에 집중되는 전계를 완화시키기 위해 일반적으로 채택하고 있는 에폭시 벨 마우스와 콘덴서 콘 방식을 택하였다. 콘덴서 콘은 OF케이블 중단접속함에 주로 채택되고 있는 비대칭형 방식을 사용하였다. 그리고, 콘덴서 콘의 유함침 보강 절연 층 특성 상 Impulse전압을 기준으로 설계하며 전체 외경, 길이, 콘덴서 수, 위치, 폭, 전극간 간격, 전극간 연면 거리등을 고려한 상세 설계는 표 4와 같다. 또한, 에폭시 벨 마우스의 설계 시, Slope의 각도와 내경은 상시 전압 기준으로 결정하며, 에폭시 연면부의 경우, 전체 전압의 30~40%가 걸릴 수 있도록 길이를 결정하였다. 콘덴서 콘과 에폭시 벨 마우스 사이에 위치하는 보강유침지의 설계는 Impulse 전압을 기준으로 설계하며 연면 방향 Stress가 2.5kV/mm 이하가 되도록 하였다. [6]

구분	구분	설계치 (kV/mm)	설계 기준 (kV/mm)	파괴 예상치 (kV/mm)	비고
콘덴서콘	전극과 전극 사이	14.8 (29.6)	15 (37) 이하	22(60)	AC (Imp.)
	전극과 전극 연면간	1.19 (2.37)	1.2 (2.5) 이하	2.0(4.0)	AC (Imp.)
에폭시 벨마우스	내경 (Radial)	2.06	2.3이하	9.6	AC
	연면 Stress (Longitudinal)	0.29	0.3이하	1.0	AC
보강절연 Slope	연면Stress (Longitudinal)	2.05	2.5이하	4.0	IMP.

표 3. 보강 절연 설계

## 3. 평가

### 3.1 부품 평가

#### 3.3.1 콘덴서 부상

콘덴서 부상에 대한 전기 시험 및 기밀 시험은 IEC 137을 기준으로 평가하였고, 그 결과는 표 5와 같으며, 그림 4는 시험 형상을 나타낸 것이다.

항 목	Spec.	Results		
		C	tan δ	PD level
Electrical Test	Routine Test 100kV→..... →900kV/1min. →.....→100kV	902pF	0.314	<10 pC
	ACWL 1200kV, 3hrs	satisfactory		
	LIWL ±2800kV, 10 times	satisfactory		
Mechanical Test	Routine Test 100kV→..... →900kV/1min. →.....→100kV	902pF	0.358	< 5 pC
	기밀시험 1.5kg/cm <sup>2</sup> , 12hrs →9kg/cm <sup>2</sup> , 1hrs	satisfactory		
Mechanical Test	Cantilever Test 3,200N (31,360kg)	satisfactory		

표 4. 특성 시험 결과

### 3.3.2 가스 챔버

가스 챔버는 압력용기 기준에 의해 제작하였으며 이에 대한 시험으로는 용기의 강도를 확인하기 위해서 행하는 내압시험과 운전상의 안전성을 확인하기 위해서 행하는 누설 검사로 나누어진다. 내압 시험은 용기용 재료의 결합, 용기 각 부의 변형, 용접 이음 부의 내압 강도나 용접 결합 유무에 중점을 두고 조사하지만 누설 검사는 본체 프랜지 연결부, 맨홀, 핸드 홀, 연결부, 계기 부착 부 등의 유체 누설의 염려가 있는 부분에 대해 기밀 성능을 검사한다. 그러나 실제로는 내압 시험과 누설 검사는 특별한 구분이 없기 때문에 본 제품에 대해서는 두 가지 모두 검사하였고, 용접 부에 대한 비파괴 검사인 X-ray검사를 실시하여 안전성을 확인하였다. 그리고, 그 결과는 다음 표 6과 같다.

구분	기준	결과
내압 시험 (수압 시험)	10.2kg/cm <sup>2</sup> , 1시간	변형 부분 없음
기밀 시험 (가스 시험)	7kg/cm <sup>2</sup> , 1시간→ 5kg/cm <sup>2</sup> , 24시간	누설 부분 없음

표 5. 챔버 시험 특성

### 3.3.3 에폭시 애관

에폭시 애관에 대한 기계적 강도는 그림에서 보는 바와 같이 내압력 특성과 굴곡 강도 특성으로 확인하였다. 그 결과는 표 7에서 보는 바와 같이 만족스러운 결과를 얻었으며, 그 시험 형상은 그림 5와 같다.

구분	기준	결과	비고
내압력 특성	30kg/cm <sup>2</sup> , 30분	이상없음	50kg/cm <sup>2</sup> , 3시간 이상 없음
굴곡강도 특성	7000kgf, 10분	이상없음	

표 6. 에폭시 애관 특성

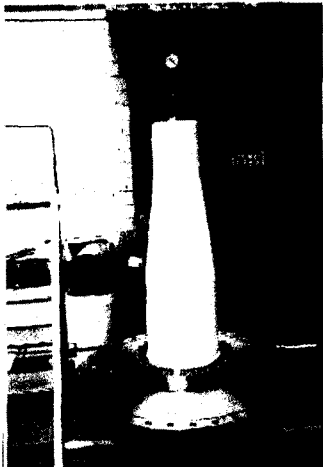


그림 3. 수압시험 모습

### 3.2 조립 시험

상기 부품 특성을 확인 한 후 제품에 대한 최종 평가는 단말조립 후 케이블 시료를 단말 조립하여 AC 내전압과 뇌임펄스 내전압을 실시하였다. 시험 전압은 시험기의 보호와 효율 등을 고려하여 AC 1000kV, IMP. 2800kV로 하였으며 그 결과는 표 9에서 보는 바와 같이 만족스러운 결과를 얻었다. 그림 6은 조립형상, 그림 7은 시

험 광경을 나타낸 것이다.

항 목	기 준	결 과
챔버기밀특성	진공도:0.03torr, Stop치:60torr · ℓ/min	0.03torr ↓ 45torr · ℓ/min
AC내전압시험	AC 1000kV, 1 hrs	이상 없음
Imp.내전압시험	± 2800kV/ 3회	이상 없음

표 7. 조립시험 결과

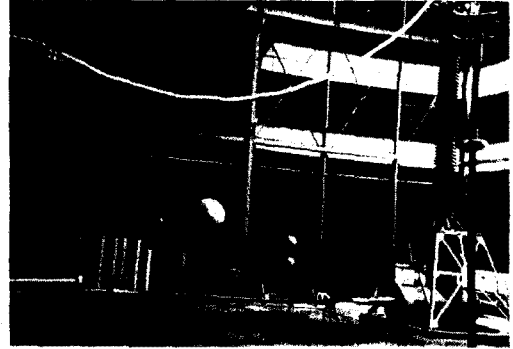


그림 4. 시험 모습

## 4. 결 론

본 논문은 UHV케이블 및 부속재의 성능 평가를 위해 개발된 극 초고압 시험 단말의 주요 설계 기술, 제작, 평가 결과에 대한 내용을 다루었으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 본 시험 단말은 당시의 독자적인 기술로 설계, 제작, 평가하였으며, 케이블 제조사로는 전 세계적으로 인정 되는 매우 높은 수준의 시험 능력을 보유하게 되었다.

둘째, 초초고압 전력 케이블 및 부속재, 관련 전력기기 제품의 품질과 신뢰성을 확보할 수 있는 기틀이 되었다.

셋째, 본 시험 단말 개발로 345kV급을 비롯하여 그 이상의 접속함, 전력기기 절연물 설계, 제조, 평가에 응용할 수 있을 뿐만 아니라 진일보할 수 있는 계기를 마련하게 되었다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 한전 구매 시방서 "345kV/154kV 가교폴리에틸렌 절연 전력 케이블 및 부속재" 1998.4
- [2] IEC 60267 "Power cable systems-cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150kV up to 500kV-Test methods and requirement" 1999.
- [3] IEEE "Successful testing of 345kV XLPE cables and premolded joints at IREQ" 1996
- [4] IEC137 " Bushings for alternating voltages above 1000V" 1984.
- [5] KS B 6231 "압력 용기의 구조" 1982.
- [6] 飯塚喜八郎 監修 "電力 ケーブル技術 핸드ブック" 1994.