

# 콘덴서 콘 방식의 345KV OF 케이블용 SF<sub>6</sub> 가스중 종단접속함의 절연 설계

김 화 중, 이 상 찬, 오 응 중, 이 희 식  
대한전선주식회사

A INSULATING DESIGN OF SF<sub>6</sub> GAS SEALING END OF CONDENSER CONE TYPE  
USED FOR 345KV OF CABLE

H. J. KIM, S. C. LEE, O. J. OH, H. S. LEE  
THIHAN ELECTRIC WIRE CO., UHV POWER CABLE ACC'Y FACTORY

## ABSTRACT

In this paper, we describes the research in condenser cone of SF<sub>6</sub> gas sealing end for 345KV oil-filled cable.

The designed of condenser cone based on the results electric field analysis by electrostatics theory and FEM.

As a results, we have been designed the condenser cone and the inner insulation part of SF<sub>6</sub> sealing end, the width and length, the number of condenser, the length of stress relief slope, the total length of condenser cone.

## 1. 서 론

최근 도시의 인구 집중 및 산업화에 따른 전력 수요의 급격한 증대로 도심의 대용량 송전화가 추진중에 있으며, 이러한 추세는 앞으로도 확대될 전망이다. 대용량 송전화에 따른 케이블 및 접속재는 선진국의 경우 500KV급, 765KV급, 1,100KV급 등까지 개발되어 실용화에 있으나, 국내에서는 지중 송전용 케이블로써 154KV급까지 상용 운전하여 왔으며, OF케이블의 경우 한국 전력의 345KV급 지중화 계획에 따라 1992년 삼천포 화력발전소에 345KV급 OF케이블이 최초로 포설됨으로써 실용화 단계로 진입하게 되었다. 그러나 이러한 345KV급 케이블의 포설에는 케이블 자체만으로는 불가능하며 각종 접속재가 필수적으로 필요하게 된다. 그런데 국내의 상황은 접속재가 갖는 여러가지 기술적으로 어려운 요인과 개발에 소요되는 비용이 막대하고 신뢰성 시험기간이 필요하기 때문에 실제로 개발이 늦어지고 있으며, 현재로써 필요한 접속재는 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이들 접속함중 SF<sub>6</sub> 가스중 종단접속함의 국산화 개발을 위한 첫단계로써, 케이블 종단부의 전기적 스트레스 집중을 완화시키기 위한 보강절연부 및 콘덴서콘등에 대한 전기적인 설계를 수행한 것을 보고하고자 한다. OF케이블 종단부의 스위스 끝단에 집중되는 전계를 완화시키기 위한 방법으로는 에폭시 수지를 이용한 벨마우스방식, 콘덴서 분압을 이용하는 Condenser Cone방식등이 있는데, 당사에서는 후자의 방식을 택하여 설계하였으며, 콘덴서 콘과 보강절연부와의

긴밀한 밀착과 스위스 끝단의 전계를 보다 완만히 하기 위해 콘덴서 콘 Slope부위에 보강절연을 두어 설계하였다. 이렇게 설계된 콘덴서콘 및 보강절연부는 전계해석을 통한 검증으로 보다 정확성을 기하였다.

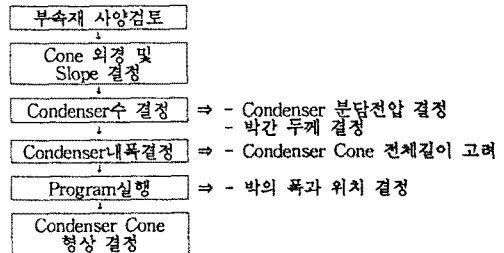
## 2. Condenser Cone의 설계

### 2.1 Condenser cone의 구조

OF케이블의 절연층에 사용되는 것과 동일한 유전율의 절연지를 원통형의 모양으로 감는다. 이때에 전계완화 및 균등분압을 위해 금속박인 알루미늄(Al)박을 원통형 절연지를 감는 중간중간에 삽입하여 콘덴서 역할을 하도록 한다. 콘덴서콘의 내경은 작업시 케이블과 콘과의 밀착을 좋게하기 위해 어느정도 공간을 두어, 작업자가 유침지를 감도록 한다. 콘과 케이블 차폐층과의 연결부위는 전계의 집중을 막기 위해 직선접속함과 같은 방식으로 Slope를 준다.

### 2.2 Condenser cone 설계 Flow Chart

Condenser cone을 설계하기 위한 Flow chart 및 고려사항은 다음과 같다.



### 2.3 콘덴서콘 외경의 결정

Cone의 내·외경을 결정하기 위한 조건으로 케이블 절연체의 외경(≈106mm)보다 커야 하고, 에폭시 Bushing 내경(≈260mm)을 초과해서는 안된다.

Cone외경은 파괴목표 상정전압을 정하여 이때의 도체상 Radial 방향 Stress를 유침지 허용설계치 범위내의 값으로 하여 결정한다. 파괴 목표 상정 전압으로는 상용 주파 전압(AC)을

기준으로 하는 경우와 충격내전압(Impulse)을 기준으로 하는 경우가 있는데, 외경의 경우는 유침지의 Barrier효과와 유압등을 고려해 상용주파전압(AC)을 기준으로 설계한다. 이때의 전압치는 한전(KEPCO) 구매규격<sup>1)</sup>의 종단접속합 내전압시험치인 AC 530kV/6hr에 안전율 20%를 감안하여 AC 636kV으로 하였으며, 설계를 위한 유침지 허용Radial Stress는 AC 15~25 kV/mm내의 적당한 값으로 설계한다<sup>2)</sup>. 이들 허용Radial Stress 값을 식[2]에 대입하여 콘덴서콘 외경(Rj)을 구하면 표[1]과 같다. 식 [2]는 식[1]을 전계에 따른 보강절연층 외경을 구할 수 있도록 변형한 것이다.

$$g_c = \frac{V}{r_c \ln \frac{R_j}{r_c}} \text{ [kV/mm]} \text{ ----- [1]}$$

$$R_j = r_c e^{\frac{V}{g_c r_c}} \text{ [mm]} \text{ ----- [2]}$$

[표1] 허용 전계 Stress 에 따른 Rj 값

g <sub>ac</sub> (kV/mm)	15	16	17	18	19	20	21	22	23
R <sub>j</sub> (mm)	124	114	105	98	92	87	82	79	75

표[1]에 의해 구해진 외경중 상기 조건(53mm<R<sub>j</sub><130mm) 을 만족하는 콘의 외경은 g<sub>ac</sub> =16 kV/mm 일때, R<sub>j</sub> = 113.5 mm로 택하였다. 그리고, 케이블 절연층과의 긴밀한 밀착과 작업성, 스위스 끝단의 전계를 보다 완화 시키기 위해 콘의 내반경을 R<sub>i</sub> = 60mm 으로 하고, 그 사이는 유침지를 감는 것으로 하였다. 표[2]는 콘 외반경을 113.5mm로 했을때의 각 위치에서의 설계 Stress를 나타낸 것이다.

[표2] 콘덴서콘 각부의 전계

위 치	도체상	절연체상	콘덴서콘 내 경	콘덴서콘 외 경
stress				
전계 [kV/mm]	16.01	8.89	7.84	4.15

### 2.4 콘덴서콘 Slope 길이의 결정

콘덴서콘 Slope 부위는 절단된 케이블 차폐층과 연결되므로 스위스단에 집중되는 전계를 완화시킨다는 면에서 직선접속합의 보강절연층에 실시하는 Stress Relief Slope와 동일한 방법으로 설계한다.

이러한 Stress Relief Slope의 길이를 구할때는 실제로 권취시와 접속 작업시 유침지를 감는 작업상의 문제등을 고려하여 결정하여야 하며, 상정전압은 연면의 유층을 고려하여 충격전압(Impulse)을 기준으로 한다. 이때의 상정전압은 한전 구매 규격의 종단접속합 충격전압치인 Imp. ±1,430kV에 안전율 20%를 감안하여 1,716kV으로 하였으며, 설계를 위한 연면 허용 Stress는 2~4 kV/mm내의 적당한 값으로 설계한다<sup>2)</sup>. Stress Relief Slope 구하는 식은 y = Y 인 Stress Relief Cone의 표면에서 연면방향의 Longitudinal Stress가 일정한 값을 갖는다고 가정하여 설계할때 사용하는 식[3]을 사용한다.

$$V = \frac{V}{g_x} \ln \left( \frac{L_n \frac{Y}{r}}{L_n \frac{R}{r}} \right) \text{ [kV/mm]} \text{ ----- [3]}$$

식 [3]에 허용 설계 stress 범위내의 임의의 전계값을 대입하여 구어진 곡선은 log-log곡선이므로 실제 제작상의 어려움이 있다. 따라서, 작업상 용이하도록 곡선을 나누어 log곡선에 가까운 직선으로써 slope를 형성한다. 상기 식으로 구한 Stress Relief slope는 다음 표[3]과 같다. 여기에서 유층이 형성될 수 있는 연면 길이를 길게 하기 위해 콘덴서콘 slope부위에 보강절연층을 형성하였으며, slope 시작 부위의 전기적인 취약성을 보완하기 위해 Slope 길이를 길게 하였다.

[표3] 콘덴서콘의 slope길이

구 분	콘덴서콘 slope [mm]	
	R=53 ⇔ R=60	R=60 ⇔ R=113.5
전계 [kV/mm]	2.2	3.91
slope길이[mm]	150	280

### 2.5 콘덴서의 분압설계

#### 2.5.1 콘덴서수의 결정

콘덴서콘 내의 콘덴서수는 콘덴서사이의 이격거리와 콘덴서콘을 구성하는 유침지의 절연내력으로 결정한다. 일반적으로 콘덴서 사이의 두께는 1~1.25mm 사이에서 결정되는데, 여기서는 절연지 두께에 따른 작업성을 고려하여 1.1125mm로 하였다. 절연지의 충격내전압에 대한 설계 Stress를 37kV/mm로 한다면 실제 콘덴서가 분압할 전압은 41kV, 따라서 전체 상정전압인 1,716kV은 41개의 콘덴서가 필요한 것으로 설계하였다.

#### 2.5.2 콘덴서의 위치 및 폭의 결정

접속합내의 콘덴서콘 내부구조는 그림1과 같다.

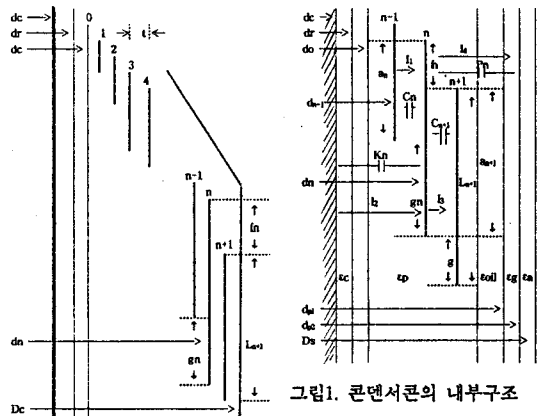


그림1. 콘덴서콘의 내부구조

- dc : 케이블 도체 외경,
- dr : 케이블 절연 외경
- do : "0"번 박의 외경 (콘지의 사각)
- dn : 케이블 도체외경,
- t : 박간의 간격
- Ln : n번째박의 폭,
- gn : n과 n-1박간의 내폭 길이차
- fn : n과 n+1박간의 외폭 길이차,
- Dc : 콘덴서콘 외경
- Kn : n번째박과 도체간의 정전용량(pF/mm)
- Pn : n번째박과 접지간의 정전용량(pF/mm)
- Cn : n번째와 n-1간의 정전용량(pF/mm)

an : Ln-gn의 폭길이(mm), Ds : Case 외경(mm)  
 dp1 : 에폭시 붓싱 내경(mm), dp2 : 에폭시 붓싱 외경(mm)

n번박을 기준으로 흐르는 전류는 I<sub>1</sub> + I<sub>2</sub> (박으로 유입되는 전류) = I<sub>3</sub> + I<sub>4</sub> (박에서 나가는 전류)의 식(KCL)이 성립한다. 일반적으로 Capacitor에 흐르는 충전전류 I=2πfCE 로 표시되며, 각 Condenser 는 똑같이 V / N 의 전압을 분담하므로

$$I_1 = \frac{V}{N} \omega a_n C_n \quad : n-1번 박에서 n번 박으로 흐르는 전류$$

$$I_2 = \frac{V}{N} n \omega g_n K_n \quad : 도체에서 n번 박으로 흐르는 전류$$

$$I_3 = \frac{V}{N} \omega a_{n+1} C_{n+1} \quad : n번 박에서 n+1번 박으로 흐르는 전류$$

$$I_4 = \frac{V}{N} (N-n) \omega f_n P_n \quad : n번 박에서 접지로 흐르는 전류$$

I<sub>1</sub> + I<sub>2</sub> = I<sub>3</sub> + I<sub>4</sub> 이므로

$$\therefore a_n C_n + n g_n K_n = a_{n+1} C_{n+1} + (N-n) f_n P_n$$

여기에서는 박의 내폭(g<sub>n</sub>)을 일정하게 하는 다음 식[4]을 사용한다.

$$L_n = L_{n-1} \frac{C_{n-1} - (N-n+1)P_{n-1}}{C_n - (N-n+1)P_{n-1}} + g \frac{C_n + (n-1)K_{n-1} - C_{n-1} - (N-n+1)P_{n-1}}{C_n - (N-n+1)P_{n-1}} \quad \text{--[4]}$$

박의 내폭을 일정하게 놓고, 각 부의 정전 용량을 program을 통해 실행시킴으로써 콘덴서의 폭과 위치등을 결정할 수 있다. 이렇게 하여 구하여진 콘덴서폭과 위치, 콘의 Slope, 콘 종단과 시단에서의 박과의 여유등을 고려하여 콘덴서콘 전체 크기는 1160mm로 하였다. 그림2는 설계에 의해 구해진 콘덴서콘의 형상을 나타낸 것이다.

### 3. 유한요소법에 의한 설계 검증

#### 3.1 해석조건

콘덴서콘 Type의 EB-G(가스중 종단접속함)는 실제로 도체, 케이블 절연체, 보강절연층, 절연유, 에폭시, SF<sub>6</sub>가스등 여러 종류의 유전율을 가진 복합 절연체로 구성되어 있다.

따라서, 이들의 전기적인 설계에는 유한 요소법에 의한 전계해석이 필수적으로 수행되어 검증이 필요하다.

전계 해석은 전기적인 취약부인 Stress relief slope부위와 콘덴서 사이의 요소를 세분화하여 총 node수는 1,851개, 요소의 수는 3568개로 하여 계산하였다.

#### 3.2 해석결과

콘덴서콘 Type의 경우, 콘덴서 사이에서 고른 전계 분포를 보이며, Stress relief slope 부위에서는 등전위 분포가 조밀하게 나타났다. 전계해석 결과, 전기적으로 취약한 Stress relief slope의 시작점에서의 연면방향 전계는 2.05kV/mm 이므로 상기 2.4함의 경우 여유 있게 설계된 것으로 생각된다. 그림3은 EB-G의 전계해석에 따른 등전위 분포를 나타낸 것이다.

### 4. 결론

이사의 154kV OF 케이블 EB-G에는 Epoxy Bell-Mouth Type이 사용되어져 왔는데, 이는 Condenser Cone Type에 비해

단말부에서의 전계집중을 완전히 완화시키는 데는 어려움이 있다. 따라서, 전압이 격상된 345kV급 가스중 종단접속함에서는 단말부의 전계 집중을 완화시키기 위해 Condenser Cone Type을 적용하였다. 또한, Condenser Cone의 설계에 대한 신뢰성은 전계 해석을 통해 검증할 수 있었다.

차후에는, 설계에 의해 제작된 Condenser Cone을 345kV급 345kV급 가스중 종단접속함에 적용하여 접속시험을 실시함으로써 성능을 인증받을 계획에 있다.

### REFERENCES

1. 한국전력공사 구매 규격, "345KV 알루미늄피 유입케이블 및 부속제", 1991
2. 飯が 喜八郎, "電力ケーブル 技術ハンドブック", 1989
3. 加藤勇次郎, "高電圧 OFケーブル用 接続箱의 研究" 일립평론 제 50권 12호, 1968
4. D. McCallister, "Electric Cables Handbook"

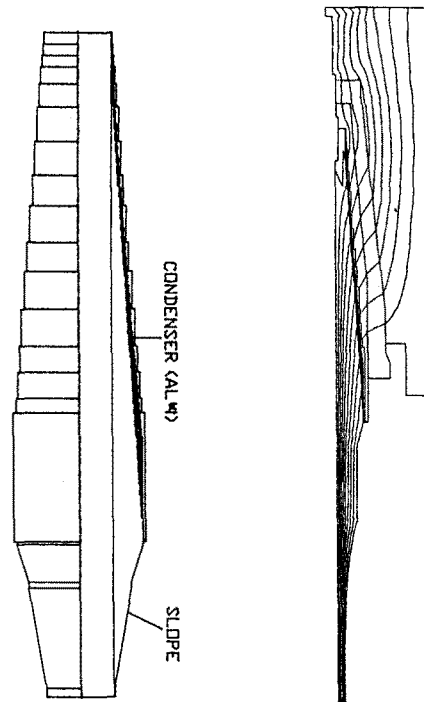


그림2. 콘덴서콘의 형상

그림3. 345KV OF 가스중종단접속함의 등전위 분포