

## HVDC (High Voltage Direct Current) 해저케이블의 함침조건 정립

박인선, 김남열, 김정년, 장현만, 김춘동  
LS전선(주)

### The condition of mass-impregnation of HVDC (High Voltage Direct Current) submarine cable

In-son Park, Nam-yul Kim, Jung-nyun Kim, Hyun-man Jang, Choon-dong Kim  
LS Cable Ltd.

**Abstract** - HVDC 해저케이블의 절연은 주로 지절연물(紙絶緣物)에 고점도의 컴파운드를 강제함침(mass-impregnation)하여 제조된다. 이러한 강제함침 작업은 제조 공정 중 가장 긴 시간이 소요되며, 케이블의 절연 특성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 그러나 함침은 복잡한 물리현상이며, 함침이 진행되는 동안 케이블의 내부 상태를 직접 관찰하기 곤란하다. 따라서 기존의 제조 경험을 바탕으로 작업조건에 충분한 안전율을 적용하는 실정이다. 이와 같은 강제함침 작업조건을 합리화하면 공정에 소요되는 시간뿐 아니라 함침조건을 조정하여 케이블 절연 특성의 향상까지 기대할 수 있다. 본 논문에서는 당사가 HVDC 해저케이블 개발과정에서 함침에 관한 이론적 검토와 간이 함침실험을 통해 정립한 함침조건에 대해 기술하였다.

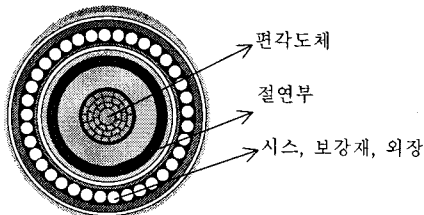
#### 1. 서 론

HVDC 송전기술은 2차 세계대전 이후 전력수요의 증가에 따라 연구가 시작되었으며, 1954년 스웨덴 본토와 발틱해의 Gotland 사이에 처음 포설된 이래 현재까지 송전용량이 지속적으로 증가하고 있다. [1]

HVDC 시스템은 동일 송전용량의 교류에 비하여 선로비용이 낮은 장점이 있다. 특히, 장거리 포설시 전체 비용이 낮아지고 기술적으로도 장거리 송전이 가능하므로 장거리 해저 송전에 적합하다. 또한 동일 송전 용량의 경우 손실이 작으며 주파수가 서로 다른 지역으로 비동기 연계가 가능하다. 그리고 송전선로가 차지하는 공간이 적으며 발생하는 정전자기 수준이 자연적으로 발생하는 전자기파와 비슷하므로 환경에 미치는 영향도 교류송전에 비하여 적다. [2]

현재까지 포설된 대부분의 HVDC 케이블은 고점도의 컴파운드를 강제함침한 지절연 방식(유침지 솔리드 케이블)으로 제조되었다. 다른 종류의 HVDC 케이블로는 반함침성을 채용한 OF 케이블 방식과 XLPE 절연 방식의 케이블 개발이 진행되고 있다. 그러나 기존의 유침지 솔리드 케이블 방식은 100km 이상의 장거리 송전에 대하여 구조상의 제약이 없고 과거로부터 지금까지 많은 HVDC 해저케이블에 이용되어 왔으므로 해저케이블로서 지금도 널리 이용되고 있다 [3, 4]

HVDC 케이블의 함침이란 DC 절연지의 섬유소(Paper Fibers) 내에 들어있는 공기를 전기적 강도가 훨씬 높은 매개물(일반적으로 고점도의 함침 컴파운드 사용)로 바꾸는 작업이다. 또 종이의 흡습성으로 인해 절연지는 수분을 함유하므로 우선 진공건조 과정을 거친 후 함침함으로써 전기적인 절연내력을 높인다. 함침은 HVDC 케이블의 제조 공정 중 가장 긴 시간이 소요되며 케이블의 절연 특성을 결정짓는 중요한 작업이다. [5] 따라서 HVDC 케이블의 개발 단계에서 함침에 대한 이론적인 이해와 실험으로 함침 조건의 검증과 정립이 요구된다. 본 논문에서는 LS전선(주)의 HVDC 케이블 함침 작업을 위하여 수행된 함침에 대한 이론 검토와 함침 모의실험 장치를 이용하여 수행한 실험 및 이를 종합한 함침조건 정립을 기술하였다.



<그림 1> 유침지 솔리드 케이블의 구조

#### 2. 본 론

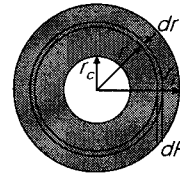
##### 2.1 HVDC 케이블의 구조 및 함침 작업 (유침지 솔리드 케이블)

당사에서 개발하고 있는 HVDC 해저케이블인 유침지 솔리드 케이블 (Mass Impregnated Non Draining Cable)의 대략적인 구조를 그림 1에 나타내었다. 그리고 본 케이블의 구조와 케이블에서 가장 중요한 절연부의 제조, 특히 함침 작업에 대하여 대략적으로 기술하였다.

HVDC 케이블용 도체로는 여러 종류가 있으나 편각도체(Keystone stranded copper conductor) 방식이 많이 적용되고 있다. 편각도체 방식은 교류부하의 경우와는 달리 표피효과를 고려하지 않아도 무방하며 도체밀집성(Compactness)이 우수하여 도체의 부피를 줄일 수 있으므로 케이블을 컴팩트화 시킬 수 있다. 당사에서 이전에 시제조한 HVDC 해저케이블의 도체는 연구 목적을 위하여 일반 연선재(Round wire compact stranded copper conductor)가 적용되었으나 '06년 현재 제작 중인 케이블에는 편각도체가 적용되고 있다.

케이블의 절연부는 건조된 종이를 적당한 폭의 테이프 형태로 절단하여 도체 주위로 겹쳐 감아 시공한다. 이때 절연부의 두께(감김 두께)는 정상운전 전압 및 임펄스 전압 인가 조건 등을 만족하도록 계산하여 결정한다. 케이블 전체 길이에 걸쳐 절연부의 종이테이프를 계산된 두께로 감은 후 강제함침 작업을 실시한다. 강제함침 작업은 구체적으로 다음과 같이 실시된다. 종이테이프가 감긴 케이블 전체를 함침용 탱크에 저장하고 진공 가열하여 종이테이프에 함유된 수분을 건조시킨다. 이후 컴파운드를 함침용 탱크에 주입하여 케이블이 컴파운드에 잠기도록 한 후 가압, 가열하여 함침이 일어나도록 한다. 이때 주입되는 컴파운드의 점성은 함침이 잘 일어나도록 함침용 탱크의 가열 온도범위에서는 일정 정도 이상이 되어야 한다. 그러나 케이블의 정상 사용 온도범위에서는 일정 정도 이상이 되어야 한다. 강제함침 작업 중에는 절연부의 두께, 함침용 탱크의 진공도 및 가열 온도, 컴파운드의 가압 압력 등이 중요한 요소로서 관리되어야 한다.

절연부가 시공된 이후 케이블에는 수밀을 위한 금속 시스 및 부식방지를 위한 함침수지 시스가 시공된다. 그 다음 케이블 보호를 위한 보강재와 기계적 강도의 향상을 위한 외장(Armour)이 시공된다. 외장은 케이블의 육상부분과 해저 매설 및 해저 비매설 부분에 따라 구분하여 사용될 수 있다. 또한 이때 모든 금속 층에는 부식방지를 위한 아스팔트를 입힌다.



<그림 2> 함침 이론식 전개를 위한 케이블 2D 단면 모델링

##### <표 1> 함침 이론식에 사용되는 기호 설명

기호	설명	기호	설명
$P$	가압력(절대압력)	$\mu$	컴파운드 점도
$P_0$	가압직전압력(절대압력)	$A_i$	절연부 고유정수
$r_i$	절연부반경	$A_c$	도체부 고유정수
$r_c$	도체부반경	$a_i$	절연부기공도(반체적/절연지체적)
$t$	시간	$a_c$	도체부기공도(반체적/도체체적)

##### 2.2 HVDC 케이블의 강제함침(mass-impregnation) 이론

케이블의 지절연물로 컴파운드가 함침되는 현상의 물리적 원인은 크게 두 가지가 주요한 것으로 고려된다. 먼저 케이블 내외부의 압력 차이에 의해 컴파운드가 지절연물 내로 점성 유동하는 현상이 함침을 발생시키는 주요원인 중 하나이다. 또한 컴파운드의 표면 장력에 의해 지절연물 표면에 불균일하게 분포돼있는 미세한 구멍으로 들어가는 유동도 함침의 주요 원인으로 고려될 수 있다. 그런데 당사가 개발 중인 HVDC 케이블의 함침 작업에서는 컴파운드를 가압하여 함침시키므로 내외부의 압력 차이에 의한 점성유동을 주원인으로 고려하여 모델링하는 것이 타당하다. [5]

케이블 내외부의 압력 차이에 의한 함침을 고려하는 경우에는 케이블 내부에 잔류하는 기체가 컴파운드로 용해되는 현상, 지절연물의 열분해로 인한 기체의 방출 등이 추가적으로 내외부의 압력 차이에 영향을 준다. 이러한 영향들은 기체 농도의 평형 및 확산에 관한 이론식으로 모델링될 수 있다. 그러나 이러한 주요인들은 실험에 의해 결정된 고유정수에서 포괄적으로 반영되므로 이론적인 고려를 생략한다.

또한 절연부는 엄밀하게 종이테이프와 공기 부분이 구분되어 있지만 전체 절연부에 대한 컴파운드의 점성유동을 고려하는 경우에는 균질한 다공성 물질로 모델링한다. 케이블은 긴 원통으로 보고 반경방향의 단면에 대하여 2차원 원통좌표계로 모델링한다. 모델링된 케이블의 단면을 그림 2에 나타내었다. 표 1에는 이론식에 나타나는 기호들을 설명하였다.

그림 2에서 절연부의 미소구간  $dr$ (미소층)을 미소시간  $dt$ 동안 통과하는 미소체적유량  $dQ$ 는  $dt$  및  $dr$  그리고  $dr$ 구간에서 압력차이  $dP$ 에 비례하며, 유동저항  $A_i \mu dr / 2\pi r$ 에 반비례한다. 여기서, 유동저항은 컴파운드의 점도  $\mu$ 와 유동거리  $dr$ 에 비례하고 유동 단면적에 해당하는  $2\pi r$ 에 반비례한다. 또한  $A_i$ 는 실험에 의해 결정해야 하는 케이블의 고유정수로서 물리적 의미는 다공성 물질에서 단위체적당 유동저항에 비례하는 계수이다.  $A_i$ 는 절연지의 종류와 감김 밀도에 따라 달라지며 압력차이 외에 컴파운드의 점성 유동에 영향을 미치는 요인들이 반영된다. 이상의  $dQ$ 에 대한 관계를 정리하면 아래 식 (1)과 같다. 식 (1)을 다시 정리하고  $dr$ 과  $dP$ 에 관하여 적분하면 식 (2)로 정리할 수 있다.

$$dQ = \frac{2\pi r \cdot dP \cdot dt}{A_i \mu \cdot dr} \quad (1)$$

$$\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{A_i \mu} \frac{(P_0 - P)}{\ln(r/r_i)} \quad (2)$$

또한 함침은 공기부분(빈 공간)이 컴파운드로 채워지는 현상이므로 시간에 대한 공기부분의 변화량은 결국 컴파운드 체적유량의 변화량과 같다. 여기서 미소 구간의 총부피는  $2\pi r dr$ 이고 그 중 공기부분의 미소부피는  $a_2 \pi r dr$  그리고 공기 부분의 부피는 줄어드는 양상이므로 (-)부호를 붙인다. 이상의 관계를 정리하여 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dQ}{dt} = -\alpha_2 2\pi r \frac{dr}{dt} \quad (3)$$

식 (2), (3)을 연립하고  $dr/dt$ 에 관하여 정리한 후 이를 적분하여 함침시간과 함침깊이의 관계를 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{A_i \mu \alpha_2} \cdot \frac{(P - P_0)}{r \ln(r/r_i)} \quad (4)$$

$$t = \frac{A_i \mu \alpha_2}{(P - P_0)} \cdot \left[ \frac{1}{2} r^2 \ln r - \frac{1}{4} r^2 - \frac{1}{2} r^2 \ln r_i \right]_r \\ = \frac{1}{2} \cdot \frac{A_i \mu \alpha_2}{(P - P_0)} \cdot \left( \left( \ln r - \frac{1}{2} - \ln r_i \right) r^2 + \frac{1}{2} r_i^2 \right) \quad (5)$$

절연부의 함침이 완료된 후에는 도체부분의 함침이 시작된다. 이때 경계인  $r_c$ 에서 압력을  $P_0'$ 라고 하고 식 (4)를 유도한 것과 동일하게  $r_c$ 와 함침끝단  $r$ 에 대하여 나타내면 다음과 같은 관계식들을 얻을 수 있다. ( $r \leq r_c$ )

$$\frac{dr}{dt} \left( r \ln \left( \frac{r_c}{r_i} \right) \right) = \frac{(P - P_0)}{A_i \mu \alpha_c}, \quad \frac{dr}{dt} \left( r \ln \left( \frac{r}{r_c} \right) \right) = \frac{(P_0' - P_0)}{A_i \mu \alpha_c}$$

이상의 두 식에서  $P_0'$ 를 소거하고 식 (6)으로 정리한 후 적분하면 도체부분 함침시의 함침시간과 함침깊이의 관계에 대한 식 (7)을 얻는다.

$$\frac{dr}{dt} \left( \frac{A_c}{A_i} r \ln \frac{r}{r_c} + r \ln \frac{r_c}{r_i} \right) = \frac{(P - P_0)}{A_i \mu \alpha_c} \quad (6)$$

$$t - t_{(r=r_c)} = \frac{A_i \mu \alpha_c}{(P - P_0)} \left[ \frac{A_c}{A_i} \frac{1}{2} r^2 \ln r - \frac{A_c}{A_i} \frac{1}{4} r^2 + \frac{1}{2} \left( \ln \frac{r_c}{r_i} - \frac{A_c}{A_i} \ln r_c \right) r^2 \right]_r \\ t = \frac{1}{2} \frac{A_i \mu \alpha_c}{(P - P_0)} \left( \frac{A_c}{A_i} \left( \ln r - \frac{1}{2} - \ln r_c \right) r^2 + \ln \left( \frac{r_c}{r_i} \right) r^2 - \left( \ln \left( \frac{r_c}{r_i} \right) - \frac{1}{2} \frac{A_c}{A_i} \right) r_c^2 \right) + t_{(r=r_c)} \quad (7)$$

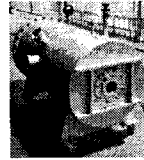
여기서,  $t_{(r=r_c)} = \frac{1}{2} \frac{A_i \mu \alpha_c}{(P - P_0)} \left( \left( \ln \frac{r_c}{r_i} - \frac{1}{2} \right) r_c^2 + \frac{r_i^2}{2} \right)$

이상에서 식 (5)에 의해 절연부에서 함침깊이와 함침시간의 함수가 정의되며, 식 (7)로 도체부분의 함침시간에 관한 함수를 나타내었다.

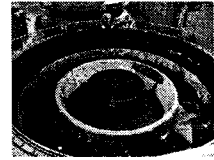
이상의 이론식은 참고문헌 [5]에서 제안된 이론식 전체를 채용하였다. 그러나 참고문헌 [5]에서 중요하게 고려된 함침에 의한 공기부분의 체적축소와 그에 따른 케이블 내부압력의 상승효과라는 관계식 검토와 실험을 통하여 당사 조건의 경우  $0.01 \sim 10$  torr의 초기 진공도 범위에서는 영향이 거의

없는 것으로 나타나 고려하지 않았다. 따라서 유도된 결과식은 보다 간결하게 되었다.

이론식에서 절연부 두께 등 케이블 설계 조건이 함침시간에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그러나 당사 케이블의 설계치는 이론적으로 함침에 미치는 문제가 없었다. 케이블 설계치가 함침에 끼치는 문제가 없고 일정하다면 함침에서 중요 요소는 함침작업시 초기 진공도와 컴파운드의 점도 및 가압압력이다. 여기에서 컴파운드 점도 및 초기 진공도는 적절한 조건에 맞추어져 조절할 수 있는 여지가 크지 않으므로 함침작업에서 가장 중요한 변수는 가압압력이 된다. 이론식에서 케이블의 고유정수인  $A$ 를 실험으로 결정하면 함침조건 변화에 의한 함침시간의 변화를 평가하고 최적의 함침조건을 정립할 수 있다.



(a) 모의실험장치



(b) 함침작업용 건조관

<그림 3> 모의실험 장치와 실제 함침작업용 건조관

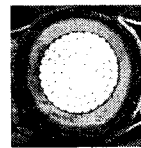
### 2.3 HVDC 케이블의 강제함침 모의실험.

실제 함침용 탱크에서의 함침작업을 실시하기 전에 모의실험을 통해 이론식에 나타난 케이블의 고유정수를 구하고 함침조건, 특히 컴파운드의 가압압력을 정립하고자 하였다. 모의실험에 사용한 실험장치와 실제 함침작업에 사용되는 건조관의 사진을 그림 3에 나타내었다.

모의실험에서 사용할 수 있는 함침 시료는 실제 작업에서 함침되는 케이블에 비하여 길이가 매우 짧으므로 끝단으로 컴파운드가 유입되는 영향을 차단하는 것이 중요하다. 이를 위하여 모의실험용 시료의 끝단에는 수밀용 연피를 이용하는 등의 처리를 하였다.

모의실험 진행은 1)다수의 케이블 시료를 실험 장치에 장착, 2)진공조건을 실시, 3)컴파운드의 주입 및 탈기, 4)일정 가압압력으로 가압, 5)결과 확인의 일련의 과정으로 수행되었다. 컴파운드의 가압이 진행되는 동안 정해진 시간이 경과되면 시료 하나를 실험 장치에서 꺼내 함침 깊이를 측정하였다. 그림 4는 (a), (b), (c) 순으로 함침의 진행 양상을 나타낸다.

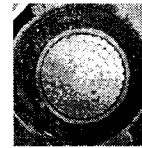
이러한 실험결과를 통해 일정 진공조건 및 가열, 가압 조건에서 함침 시간과 함침 깊이의 관계를 파악할 수 있었고, 이를 이론식과 비교하여 케이블 정수를 구할 수 있었다. 수회의 실험으로 적절한 케이블 정수를 구한 후에는 이론식을 이용하여 몇 가지 함침조건들을 변화시키며 그 영향을 검토할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

<그림 4> 일정 함침조건에서 함침시간 경과에 의한 함침진행 양상

## 3. 결 론

HVDC 해저케이블 제조에 있어서 가장 중요한 고점도 컴파운드의 강제함침(mass-impregnation)을 이론적 접근을 통하여 실제함침 메커니즘과 비교분석하였으며 모의실험을 통해 함침조건들(가압조건/진공조건/건조조건)을 검증, 정립하여 '06년 현재 HVDC 케이블의 함침공정을 완료하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Diego Valenza and Gerri Cipollini, "HVDC submarine power cable systems-state of the art and future developments", IEEE catalogue, No.95T H8130, pp283-287, 1995
- [2] 박승록외, "HVDC 해저 케이블 및 접속기술 개발", LS Cable Technical Review, Vol. 12, pp25-36, 2005
- [3] M.J.P. Jeroense, F. H. Kreuger, "Electrical Conduction in HVDC mass-impregnated Paper Cable", IEEE Trans. on Dielectrics and Insulation, Vol. 2, No. 5, pp718-723, 1995
- [4] N. Yoshifujii, T.Niwa, T.Takahasi, H.Miyata, "Development of the new polymer insulating materials for HVDC cable", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp1053-1059, 1992
- [5] 比企野 泰一, 千葉佐武郎, 小石原進, "電力ケーブルの含浸機構の研究", 日立評論, 第47卷, 第2号, pp79-85, 1965