

## 154kV, 3GVA급 초전도 송전케이블의 개념설계

오 봉환<sup>○</sup>, 조 전욱, 오 상수, 권 영길, 하 동우, 류 강식, 장 증근\*, 남궁도\*  
(한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, \* 한국전력 기술연구원)

### Conceptual Design of 154kV, 3GVA Class Superconducting Power Cable

B.H.Oh, J.W.Cho, S.S.Oh, Y.K.Kwon, D.W.Ha, K.S.Ryu, J.K.Jang\*, D.Namkung\*  
(Applied Superconductivity Lab, KERI, \* Research Center, KEPCO)

**Abstract** A superconducting power cable is one of the promising ways for transmitting huge electric power efficiently in the future. We performed a conceptual design of 154kV, 3GVA class superconducting power cable. The AC loss of superconductor was estimated by using the Bean model. The cross sectional area of stabilizer was calculated under the adiabatic condition. In this paper, the results of the conceptual design of superconducting power cable is described.

#### 1. 서론

경제성장에 따라 대도시 지역에 있어서는 전력수요가 대용량화·고밀도화되는 경향이 강해지고 있다. 서울지역의 최대 전력수요<sup>(1)</sup>는 매년 다소 둔화되는 경향이 있으나, 2010년경에는 11,472MW로 현재에 비해 약 2배 성장하여 전국 전력수요의 21.7%에 달할 것으로 전망되고 있다. 특히, 부하밀도가 높은 지역은 시정근방으로 현재보다 약 1.6배 성장한 157MW/km<sup>2</sup>에 이르리라 예측된다. 또한, 고도 정보화 사회로의 진전에 따라 전력공급에는 양적인 문제만이 아니고 높은 안정성과 신뢰성이 요구되고 있다. 이와 같은 요구에 대한 대처 방안으로 초전도 송전케이블을 들 수 있다.

초전도케이블의 장점으로 극히 적은 손실로 대전류를 장거리 송전할 수 있다는 것이다. 이러한 장점으로 인해 구·미·일 선진국에서는 1960년대 부터 1980년대 중반까지 급속히 초전도체를 대상으로 연구가 활발히 행해졌다<sup>(2)</sup>. 그 결과 현재의 상전도 케이블(예를들어 OF cable)과 경제적으로 결합해서 유리한 영역으로는 송전용량 3~5GVA, 송전거리 수십km 이상으로 전망되고 있다<sup>(3)</sup>. 또한 적용대상으로서는 대도시에 전력을 공급하는 지중케이블이 고려되고 있다.

이상과 같은 관점에서 KERI의 초전도응용연구사업팀과 한국전력기술연구원이 공동으로 154kV, 3GVA급 초전도 송전케이블의 연구를 행하고 있다. 본 논문에서는 이 초전도케이블의 개념설계에 대해서 기술한다.

#### 2. 초전도 케이블의 구성요소 검토

**2.1 케이블의 기본구조 :** 초전도 케이블의 구조는, 3상의 케이블 코어를 하나의 단열관로중에 넣는 형태로 rigid type, semiflexible type, flexible type이 있다. Rigid type은 코어 및 단열관로가 rigid한 것으로, 공장으로부터 케이블 포설장소의 수송을 위해 길이가 20m로 제한되어, 접속 부분이 많아지므로 냉각시의 열수축 또는 열침입등의 문제가 발생한다. Semiflexible type은 케이블 코어는 flexible, 단열관로는 rigid한 것으로, 비교적 긴 길이의 것을 제작할 수 있어 접속부가

적고 포설방법도 기존의 OF 또는 POF 케이블과 유사하다. Flexible type은 코어 및 단열관로가 모두 flexible한 것으로, 대전력용의 단심케이블 밖에 제작할 수 없는 단점이 있다<sup>(4)</sup>.

본 개념설계의 대상인 초전도 케이블의 구조는 semiflexible type으로 정삼각형으로 배치한 3상의 케이블 코어, 내측 열절연층, 액체질소 실드층 및 외부 열절연층으로 한다. 3상의 케이블 코어는 각각 냉매의 통로인 former, 안정화재, 초전도층(통전도체), 전기절연층, 초전도층(실드도체), 안정화재 및 skid wire로 구성된다. 케이블의 구조를 그림1에 표시한다.

초전도 케이블 코어의 각 상도체는 전기절연층을 개재해서 전자실드층이 쌍으로 배치된다. 이것은 상전류에 의한 교류자계를 차폐해, 도체 이외의 부분에 있어서의 와전류 손실을 억제하기 위한 것으로 통전도체와 같은 종류의 초전도체를 이용한다. 이것은 상전도 케이블에서는 없는 것으로 초전도 케이블 특유의 설계이다.

**2.2 초전도체 :** 초전도 송전케이블용 도체에 요구되는 점으로 ①임계전류밀도 및 임계자계가 크고 임계온도가 높을 것, ②제조방법이 간단하고 유연성이 커야하며 기계적 특성이 양호할 것, ③전기적, 열적, 화학적으로 안정할 것 등이다. 이들중 가장 중요한 점은 ①로서, 즉 초전도체에서 발생하는 교류손실이 극히 적어야 한다는 것이다. 교류손실은 초전도체에 침입하는 자장과 함께 급격히 증가한다. 따라서 이 자장을 작게하기 위해, 케이블의 통전도체로서 원통형의 former에 테이프 형상의 초전도체를 감는 방법을 취하고 있다. 현재 초전도 송전케이블용 초전도체로는 Nb 및 Nb<sub>3</sub>Sn이 이용되고 있다.

초전도 케이블의 운전에 있어서, 발생하는 열로서는 위의 교류손실 이외에 전기절연층에서 발생하는 유전체 손실과 단열관로를 통해 침입하는 침입열이 있다. 이 세가지 열에 의해 케이블의 온도가 상승하므로 냉매를 이용해서 케이블의 온도가 허용온도 이하가 되도록 냉각하여야 한다. 이들의 열중에서 유전체 손실과 침입열은 케이블이 제작되면 일정하게 발생하지만, 교류손실은 부하에 의해서 즉 운전전류에 의해 변한다. 그러므로 이 교류손실이 작은 초전도체가 유리하다.

초전도체에서의 교류손실은, 도체에 전류를 흘렸을때 발생하는 교번자계가 초전도체의 내부에 침투하여 pinning 기구에 기인하는 자화이력현상에 의한 히스테리시스손실로서, 실험치와 이론치가 잘 일치하는 Bean model을 이용하면 다음식으로 계산할 수 있다<sup>(5)</sup>. 식(1)로부터 임계전류밀도 J<sub>c</sub>가 큰 초전도체가 교류손실이 적어 유리함을 알 수 있다.

$$W = \frac{4\sqrt{2} \mu_0 I^3 f}{3 P_e^2 J_c} \quad [W/m] \quad (1)$$

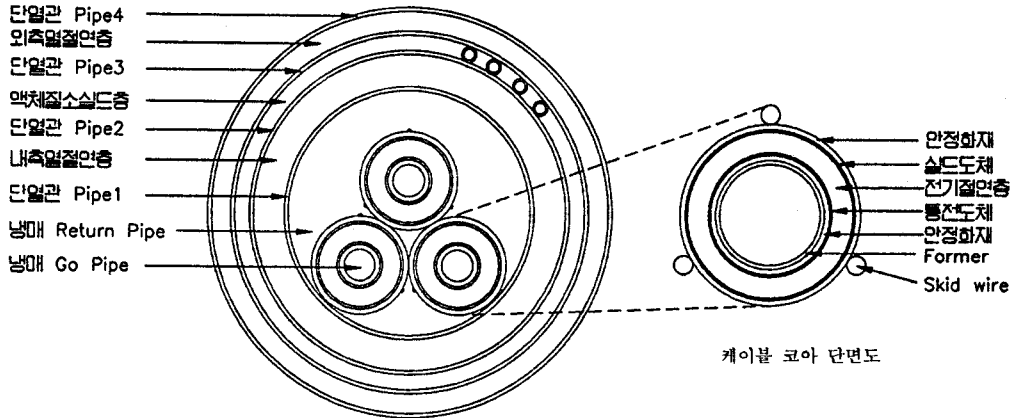


그림1. 초전도 케이블의 단면도

여기에서, I: 통전전류[A], f: 계통주파수[Hz],  $P_c$ : 도체 주위길이 [m],  $J_c$ : 임계전류밀도[A/m<sup>2</sup>]이다.

또한, 케이블의 온도를 극저온으로 유지하기 위해 이용하는 냉동기의 효율이 케이블의 경제성 평가에 중요한 요인으로 작용한다. 냉동기의 효율을 논할때 penalty를 이용한다. Penalty 라는 것은 저온의 운전온도에서 발생하는 손실(열)과 이것을 제거하는데 필요한 동력과의 비  $\eta$ 를 말한다. 즉 냉동기 동력 =  $\eta \times$  (케이블에서 발생하는 열)로 된다. 이 penalty는 온도의존성이 크서, 4.2K에서는 400~700에 비해 10K에서는 100~200으로 효율이 현저하게 증가한다. 따라서 초전도 케이블에서는 임계온도가 높아 운전온도를 높게 할 수 있는 초전도체가 유리하다. 표1에 Nb 및 Nb<sub>3</sub>Sn의 임계온도, 운전온도 및 penalty를 표시한다.

표1. 케이블용 초전도체의 임계온도 및 penalty

초전도체의 종류	Nb	Nb <sub>3</sub> Sn
임계온도 [K]	9.25	18
운전온도 [K]	6	6~10
Penalty	400~700 at 4.2K	100~200 at 10K

2.3 안정화대책 : 송전계통에 지락등의 사고가 발생하는 경우, 초전도 케이블에 정격전류의 수배에서 수십배의 대전류가 흐를 가능성이 있다. 이러한 대전류에 대해서도 초전도케이블이 송전기능을 안정하게 유지할 수 있는 안정화 대책이 필요하다.

사고전류가 흘렀을때 초전도 케이블이 상전도로 천이되는 것은 피할 수 없고, 초전도 케이블은 정상시 보다 훨씬 큰 발열이 생겨 케이블 온도가 급격히 상승한다. 이 온도가 너무 급격히 상승하면 냉매가 순식간에 기화하고, 이것에 의한 압력으로 인해 케이블이 파괴될 위험이 있다. 따라서 케이블의 온도상승이 냉매의 사용 압력하에서 비등점 이하, 또는 초전도체의 임계온도 이하가 되도록 사고전류를 제어할 필요가 있다. 이 대책으로서 동 또는 알루미늄과 같이 극저온에 있어서 전기전도율과 열전도율이 좋은 금속을 안정화제로서 초전도체의 주위에 배치하여 사고전류가 흘러 초전도체가 상전도로 천이했을때 이들 금속을 전기적인 shunt로 이용해 발열을 감소시키고, 초전도체의 냉각효과를 높여 사고전류가 제거된후 빠른 시간내에 초전도상태로 천이시키는 방법이 채용되고 있다.

사고전류 I<sub>g</sub>가 Δt초 동안 흘렀을때 케이블의 온도상승을 사용 압력하에서의 냉매의 비등점 이하 또는 초전도체의 임계온도 이하로 억제하기 위한 안정화재의 단면적은 단열조건에서 다음식으로 계산할 수 있다.

$$A = \left( \frac{\rho_{cu} I_g^2 \Delta t}{C_{cu} \Delta T} \right)^2 \quad (2)$$

여기에서, A: 안정화재의 단면적[m<sup>2</sup>],  $\rho_{cu}$ : 안정화재의 비저항 [Ωm],  $C_{cu}$ : 안정화재의 비열[J/m<sup>3</sup>K], ΔT: 온도상승 값[K] 이다.

2.4 전기절연층의 두께 : 초전도 케이블의 전기절연 설계는, 현재의 상전도 케이블인 OF 케이블과 마찬가지로, 통전도체의 외경이 정해지면 내전압레벨과 그에 상응하는 설계스트레스와의 비 「V/E」에 의해 결정된다. 절연물로서 액체헬륨 함침 고분자테이프를 사용하면 액체헬륨의 절연내력은 OF 케이블의 절연유에 비해 2/3정도 이다<sup>(6)</sup>. 이때 액체헬륨의 정격전압 154kV에 있어서의 내전압레벨과 그에 대한 설계스트레스 및 양자의 비를 표2에 표시한다<sup>(7)</sup>.

표2. OF 케이블의 내전압 시험치

전압의 종류	기준충격 전압	개폐임펄스 전압	상용주파 장시간전압	상시최고 대전전압
내전압레벨 V[kV]	750	434	300	93
설계스트레스 E[kV/mm]	55	50	27	10
V/E	13.6	8.7	11.1	9.3

이때 절연층의 두께 t는 통전도체의 외경 D<sub>T</sub>을 이용해 다음 식으로 구할 수 있다.

$$t = D_T [ \exp(2V/ED_T) - 1 ] / 2 \quad (3)$$

2.5 열절연 : 상온으로부터 열절연층을 통해 냉매로 침입하는 열은 냉동기의 부하로 작용하므로, 침입열을 최소한으로 작게 할 필요가 있다. 단열법으로는 일반적으로 중간에 액체질소 실드층을 채용하는 다중단열(superinsulation)방식이 이용되고 있다. 이 방식은 열전도율이 아주 작다는 장점이 있으나, 진공도를 10<sup>-4</sup> torr 이상으로 유지하여야 한다.

초전도 케이블의 설계에 있어서 열절연층을 통해 침입하는 침입열로서는 상온에서 액체질소 실드층으로는 1W/m<sup>2</sup>, 액체질소 실드층으로부터 냉매로는 0.1W/m<sup>2</sup> 정도가 허용되고 있다.

### 3. 초전도 케이블의 개념설계

3.1 개념설계 조건 : 초전도 케이블의 운전온도 영역은 기본적으로 사용되는 초전도체에 의해서 결정되지만, 교류용 케이블에서는 교류손실에 의해 결정된다. 초전도체가 Nb인 경우에는 6K 이하의 영역에서, Nb<sub>3</sub>Sn인 경우에는 6~10K의 영역에서 운전하지 않으면 안된다<sup>(4)</sup>. 사용압력의 범위는 Nb인 경우에는 4~6atm, Nb<sub>3</sub>Sn인 경우에는 9~15atm의 범위에서 사용한다<sup>(4)</sup>. 따라서 go pipe의 입구 온도와 압력은 6K 및 15atm, return

pipe의 출구 온도와 압력은 10K 및 9atm으로 하고, 케이블 전체에 있어서의 온도상승은 4K, 압력손실은 6atm으로 한다. 이때 냉매, 초전도체 및 안정화계의 물성치는 go pipe에서는 7K 및 12atm, return pipe에서는 9K 및 10atm에 있어서의 값을 이용한다.

케이블의 적용장소로서 대도시의 외곽에서 시내 중심부까지 지중으로 대전력을 송전하는 루트를 가정하여 길이는 30km로 하고, 양단에 냉동기를 1대씩 설치하여 냉각구간은 15km한다.

3.2 154kV, 3GV급 초전도 케이블의 상세설계 : 초전도 케이블의 설계에 있어서 초전도체의 종류 및 형태, 케이블의 구조, 전기 및 열전달 방식등 여러가지 요인에 의해 설계법에 약간의 차이가 있으리라 생각된다. 본 논문에서는 초전도 케이블의 최적설계를 하기 위한 하나의 단계로서, 개념설계를 위한 flow chart와 수식에 대해서 고찰한다.

케이블 설계를 위한 flow chart를 그림2에 표시한다.

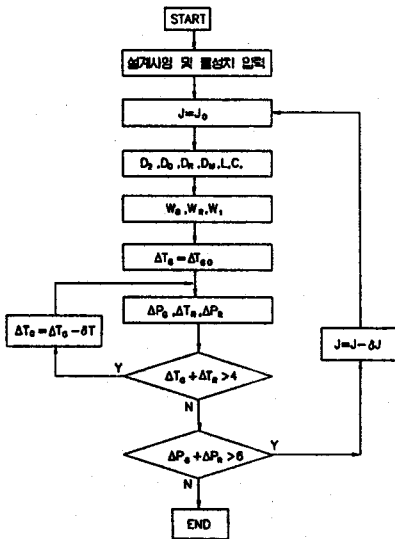


그림2. 초전도 케이블 설계 flow chart

3.2.1 케이블코어 설계 : 케이블의 정격용량  $P_B$ , 정격전압  $V_B$ 을 정하면 정격전류  $I_B (= P_B / \sqrt{3} V_B)$ 가 정해진다. 통전도체의 외경  $D_1$ 은 전류밀도를  $J$ 로 하면,  $D_1 = I_B / \pi J$ 로 주어진다. 이때, 냉매의 통로인 go pipe의 직경  $D_2$ 는  $D_1$ 에서 안정화계의 두께 및 former의 두께를 뺀 값이다. 다음에, 실드도체의 내경  $D_2$ 는 절연설계에 의해 정해진다. 즉 통전도체의 외경  $D_1$ 에 식(3)에서 계산한 절연층의 두께를 더한 값이다. 여기에, 실드도체, 안정화계 및 skid wire의 값을 합한것이 케이블코어 외경  $D_0$ 가 된다. Go pipe에서 나온 냉매가 되돌아 가는 return pipe의 내경  $D_3$ 은 참고문헌 (8)에 의하면  $D_3 = D_0 \times 2.16 + 30$ 이 된다.

3.2.2 케이블의 인덕턴스 및 캐패시턴스 : 초전도 케이블에서는 도체전류가 만드는 자계는 외부로 누설되지 않도록 되어 있으므로, 각 상간의 상호인덕턴스는 고려하지 않아도 된다. 따라서 인덕턴스는 통전도체와 실드도체와의 상호인덕턴스로서 주어진다. 또한 캐패시턴스는 OF 케이블과 동일한 식으로 주어진다. 이때 케이블의 인덕턴스 및 캐패시턴스는 다음식으로 구할 수 있다.

$$L = 0.2 \times \ln(D_2/D_1) \quad [\mu H/m] \quad (4)$$

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln(D_2/D_1)} \times 10^6 \quad [\mu F/m] \quad (5)$$

여기에서,  $\epsilon_r$ :유전체의 비유전율로 2.3으로 한다.

3.2.3 초전도 케이블의 열부하 : 초전도 케이블에서 발생하는 열은, 각 상에서의 교류손실과 유전체손실 및 단열관로를 통해 침입하는 침입열로 이루어 진다. 이들중에서 교류손실은 식(1)에 의해 계산할 수 있다. 식(1)에서  $P_e$ 는 통전도체 및 실드도체의 perimeter이다.  $J_c$ 는 초전도체의 임계전류밀도로 다음과 같은 온도의존성을 갖고 있다.

$$J_c = J_{c0} [1 - (T/T_c)^2] \quad (6)$$

여기에서,  $J_{c0}$ 는 0[K]의 임계전류밀도로  $7 \times 10^{10} [A/m^2]$ 이다<sup>(9)</sup>.

전기절연층에서 발생하는 유전손은 상전도 케이블의 유전손 계산식을 적용할 수 있으며, 다음식으로 표현된다.

$$W_{DI} = 2\pi f C \frac{V_B^2}{3} \tan \delta \quad (7)$$

여기에서,  $V_B$ :정격전압[kV],  $\tan \delta$ :유전체의 유전정점으로  $10^{-5}$ 으로 한다.

단열관로를 통한 침입열은, 상온공간으로부터 외측단열층을 통해 침입한 열이 액체질소 실드층에 의해 77K로 냉각된 후, 내측단열층을 통해 return pipe의 냉매로 침입하는 것으로, 이 양을 적극적으로 작계하여야 한다. 침입열을 일정량 이하로 하기 위한 열전달층의 열전도율은 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\lambda_N = \frac{W_N \ln(D_6/D_5)}{2\pi \Delta T_1}, \quad \lambda_H = \frac{W_H \ln(D_4/D_3)}{2\pi \Delta T_2} \quad (8)$$

여기에서,  $\lambda_N$ :외측 단열층의 열전도율[W/mK],  $W_N$ :외측 단열층을 통한 침입열[W/m],  $D_6$ :외측 열전달층의 외경[m],  $D_5$ :외측 열전달층의 내경[m],  $\Delta T_1$ :상온과 액체질소와의 온도차[K],  $\lambda_H$ :내측 열전달층의 열전도율[W/mK],  $W_H$ :내측 열전달층을 통한 침입열[W/m],  $D_4$ :내측 열전달층의 외경[m],  $D_3$ :return pipe 외경[m],  $\Delta T_2$ :액체질소와 return pipe와의 온도차[K]이다.

3.2.4 Go pipe의 열부하, 온도상승 및 압력손실 : 해석을 간단하게 하기 위해 go pipe와 return pipe 사이의 열교환은 없는것으로 하고, 유전체손실은 go pipe와 return pipe에서 1/2씩 냉각 되는 것으로 한다. 이때 go pipe에서 발생하는 열은 통전도체에서의 교류손실과 유전체손실의 1/2과의 합  $W_g$ 가 된다. 또한 냉매의 물성치는 냉각구간  $L_c$ 에서 일정한 것으로 가정하면, 냉매의 유량  $M_g$ 와 냉각구간에서의 온도상승  $\Delta T_g$ , 냉매의 비열  $C_g$ 와의 관계는 케이블의 한상당 다음식으로 주어진다.

$$M_g = \frac{W_g L}{C_g \Delta T_g} \quad [kg/sec] \quad (9)$$

냉매의 평균유속  $V_g$ 는  $M_g$ 를 이용하면 다음과 같다.

$$V_g = \frac{M_g}{\rho_g A_g} \quad [m/sec] \quad (10)$$

여기에서,  $\rho_g$ :냉매밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $A_g$ :go pipe 단면적[m<sup>2</sup>]이다.

이때, go pipe에서의 냉매의 압력손실  $\Delta P_g$ 는 다음과 같다.

$$\Delta P_g = \frac{k_g L_x \rho_g V_g^2}{2 D_g} \quad [Pa] \quad (11)$$

여기에서,  $k_g$ :냉매의 마찰계수로 매끄러운 관로에 있어서 난류에 관한 마찰계수는 Reynold's number  $Re$ 와 다음과 같은 관계가 있다<sup>(10)</sup>.

$$k_g = 0.3164 \times Re^{-0.25}, \quad Re = \frac{V_g D_g \rho_g}{\eta} \quad (12)$$

3.2.5 Return pipe의 열부하, 온도상승 및 압력손실 : Return pipe에서 발생하는 열부하는 각 상의 실드도체에서 발생하는 교류손실과 유전체손실의 1/2 및 단열층을 통해 침입하는 열과의

합  $W_r$ 이다. Go pipe에서 발생한 열에 의해 온도가 상승한 냉매를 그대로 return pipe의 입구로 순환시키는 것으로 할때, return pipe의 온도상승  $\Delta T_r$ 은 다음식으로 표현된다.

$$\Delta T_r = \frac{W_r L_x}{C_r 3M_g} \quad [K] \quad (13)$$

여기에서,  $C_r$ :return pipe의 냉매비열[J/kgK] 이다.  
압력손실은 다음식으로 구할 수 있다.

$$\Delta P_r = \frac{k_r \rho_r L_x V_r^2}{2D_e} \quad , \quad V_r = \frac{3M_g}{\rho_r A_r} \quad (14)$$

$$A_r = \frac{\pi}{4} \cdot (D_r^2 - 3D_0^2) \quad , \quad D_e = \frac{D_r^2 - 3D_0^2}{D_r + 3D_0}$$

#### 4. 개념설계 결과 및 검토

그림1에 표시한 구조를 대상으로, 154kV, 3GVA급 초전도 케이블의 개념설계를 하였다. 예비계산을 통해 냉각구간이 15km인 경우에 취할수 있는 최대 표면전류밀도는 780A/cm임을 알았다. 그래서, 개념설계에 있어서 표면전류밀도는 500과 750을 이용하였다. 이때의 개념설계 결과를 표3에 표시한다.

표3. 개념설계 결과

정격용량	[GVA]	3	
정격전압	[kV]	154	
표면전류밀도	[A/cm]	500	750
통전도체외경	[mm]	72	48
실드도체내경	[mm]	105	85
케이블코어의경	[mm]	114	94
Go pipe 직경	[mm]	67	42
Return pipe 직경	[mm]	276	233
단열관 최외경	[mm]	496	453
인덕턴스	[ $\mu$ H/km]	76.2	114.3
캐패시턴스	[ $\mu$ F/km]	0.335	0.224
Go pipe 교류손실	[W/m]	0.071	0.16
Return pipe 교류손실	[W/m]	0.131	0.2
Go pipe 유전손실	[W/m]	0.005	0.0033
Return pipe 유전손실	[W/m]	0.015	0.01
냉매로의 열침입	[W/m]	0.09	0.076
Go pipe 열부하	[W/m]	0.076	0.1633
Return pipe 열부하	[W/m]	0.236	0.286
Go pipe 온도상승	[K]	2.0	2.0
Return pipe 온도상승	[K]	1.4	0.8
Go pipe 압력손실	[atm]	0.09	2.95
Return pipe 압력손실	[atm]	0.03	0.19
냉매유량	[kg/sec]	0.1	0.216
Go pipe 유속	[m/sec]	0.232	1.25
Return pipe 유속	[m/sec]	0.138	0.4
냉동기동력	[kW/15km]	936.8	1354.5

표3에서 알 수 있는 바와 같이, 표면전류밀도가 크면 케이블의 사이즈가 작아져서 제작비의 경감을 가져올 수 있다. 반면에 각종 손실이 커져서 약 1.4배의 냉동기 동력이 필요함을 알 수 있다. 따라서, 케이블의 사이즈와 손실과의 관계를 어떻게 최적화 하느냐 하는 것이, 초전도 케이블의 설계에 있어서 가장 중요한 요점이 되리라 생각한다. 또한 단열관 최외경은 표면전류밀도 500A/cm일때 496mm로 현재의 2100mm 정도에 2ct이상 포설이 가능하리라 생각된다.

#### [참고문헌]

- [1]성기철, Private communication at KERI
- [2]E.B.Forsyth : 「Test Result of AC Superconducting Cables」, IEEE Transactions on Power and Systems, Vol.PAS-101, No.7, pp.2049-2055 (1982)
- [3]N.Itoh, N.Natori & N.Higuchi : 「Superconducting Power Cables and Time Current Tests」, JIEE, Vol.101, No.8, pp.443-450 (1981)
- [4]저온공학協會 : 「저온공학 핸드북」, 内田老鶴保新社, p.510-529 (1982)
- [5]T.Hara, K.Okaniwa, N.Ichivanagi & S.Tanaka : 「Feasibility Study of Compact High-Tc Superconducting Cables」, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No.4 (1992)
- [6]T.Hoshino, I.Ishii, N.Higuchi, S.Fuchino : 「1 to 3GVA Class Superconducting Power Transmission Cables with Nb3Sn or Oxide Superconductor」, JIEE, Vol.108, No.9, pp.431-438 (1988)
- [7]電氣協同研究會, 絶縁設計合理化専門委員會 : 「絶縁設計の合理化」, 電氣協同研究, 第44卷 第3號, pp.225-258 (1988)
- [8]飯塚喜八郎:新版 電力ケーブル技術 핸드북, p.273 (1989)
- [9]ETL Report : "Survey Toward Environment-friendly energy Technology", Vol.224, p.173 (1993)
- [10]社団法人 低溫工学會 : 「超傳導・低溫工学 핸드북」, オム社, p.128 (1994)