

Design and tests of prototype HTS power transmission cables

조전욱, 하홍수, 조영식*, 오상수, 성기철, 권영길, 류강식
J.W. Cho, H.S. Ha, Y.S. Jo*, S.S. Oh, K.C. Seong, Y.K. Kwon, K.S. Ryu

Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Changwon, Korea

* Changwon National University, Changwon, Korea

Abstract

The prototype high $-T_c$ superconducting (HTS) power transmission cables have been designed and fabricated multi layers of spirally wound HTS tapes. The cables were made Bi-2223 based Ag-sheathed HTS tapes, and tested in LN₂. Critical currents of 700A dc and better were achieved. The magnetic flux density and field direction were analyzed in the cable configuration. In this paper the results of analysis and tests of HTS power transmission cables were described.

Keyword : HTS power transmission cable, high- T_c superconductor, self-field

I. 서론

우리나라의 전력수요는 1998년 35.7 GW에서 2010년 67.4GW로 현재의 1.9 배로 증가할 것으로 예측되고 있으며, 그 중 약 40%가 경인지역에 집중되어 있어 서울에서의 지중전력 케이블의 용량증대가 요구되고 있다[1]. 그러나 도심부에는 지하철, 통신, 가스 등에 의해 지하공간이 점유되어 새로운 지하 전력구나 케이블 관로를 신설하거나, 대용량의 전력케이블을 기존의 전력구에 설치하는 것은 매우 곤란하다. 따라서 이와 같은 문제를 해결할 수 있는 가장 적합한 방법으로 고온초전도 전력케이블을 들 수 있으며, 고온초전도 전력케이블은 기존의 전력케이블과 비교하여 많은 기술적, 경제적 장점을 갖고 있다.

고온초전도 전력케이블은 고온초전도 도체의 전력용량 분야 중 가장 기대되고 있는 분야로서 고온초전도 전력케이블의 개발 및 실용

화를 위하여 세계 각국에서 지속적인 연구개발을 진행하고 있다[2]-[4].

본 논문에서는 기존의 케이블 관로에 설치 가능한 고온초전도 전력케이블의 개념설계 결과와 Ag/Bi-2223 HTS Tape 을 사용하여 고온초전도 케이블코어를 제작, 평가한 결과에 대하여 기술하였다. 또한 전자장 해석 프로그램인 Magnet V 를 이용하여 케이블코어의 초전도도체의 배열에 따른 자기자장을 해석하여 도체 배열방법에 따른 self-field 의 감소구조, 케이블코어의 전류용량의 증가방법 등 고온초전도 전력케이블의 개발을 위한 기초를 확립하고자 하였다.

II. 개념 설계

본 연구에서 개념설계한 고온초전도 케이블의 기본구조는 3상 케이블코어를 하나의 극저온 단열관로에 넣는 구조로서 POF 케이블과 유사한 구조로서, 케이블형상 유지 및 냉매의 통과 역할을 하는 Former, 통전도체층, 전기절연층

¹ Corresponding author. Fax: +82-55-280-1696
e-mail: jwcho@keri.re.kr

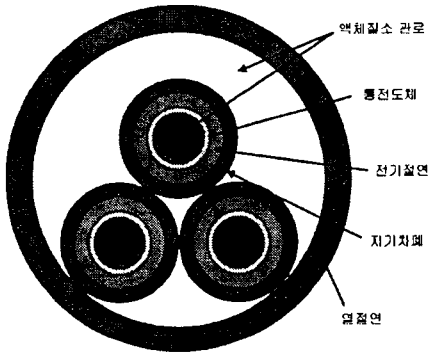


Fig.1. Cross section of HTS power transmission cable

(저온절연), 자기차폐를 위한 차폐도체층 등으로 구성되며 그 기본구조는 그림 1 과 같다.

고온초전도 전력케이블의 설계는 케이블의 구조, 구성방식 등에 따라 차이가 있겠지만, 본 연구에서의 케이블코어는 통전용 및 Shield 용으로 테이프형상의 초전도도체를 나선형으로 감아 유연성을 갖는 구조로 설계하고, 케이블 시스템은 액체질소를 강제 순환시키는 Closed

Loop Type 으로 검토하였으며 설계 Flow Chart 는 그림 2 와 같다.

케이블시스템이 운전되는 온도와 압력에 대해서는 허용최고온도를 T_{max} , 허용최저압력을 P_{min} 이라고 설정하고 냉동시스템에서 나와 케이블시스템을 순환한 액체질소는 도체의 교류손실 및 외부의 열침입 등에 의해 온도상승(ΔT)하며 냉매의 유로길이에 비례하여 ΔP 의 압력손실이 발생한다. 즉 냉동시스템 시작점에서의 온도와 압력을 T_{in} , P_{in} , 냉동시스템으로 돌아온 액체질소의 온도와 압력을 T_{out} , P_{out} 이라고 하면 식(1)이 성립한다.

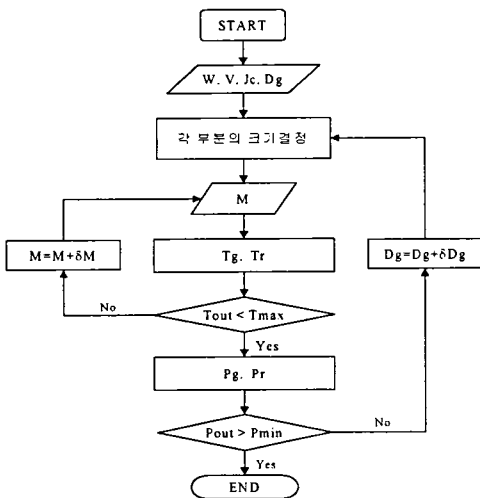
$$T_{out} = T_{in} + \Delta T, P_{out} = P_{in} - \Delta P \quad (1)$$

따라서 액체질소의 상태에 대한 조건은 다음과 같다.

$$T_{out} < T_{max}, P_{out} > P_{min} \quad (2)$$

이상의 액체질소의 조건과 함께 송전전압을 154kV 로 설정하고 국내에 포설된 관로의 직경인 200mm ϕ 내에 설치 가능한 케이블의 사이즈와 용량을 검토하였으며 설계조건을 요약하면 표 1 과 같다.

위와 같은 방법과 조건에 따른 개념설계 결과 현재 우리나라의 전력계통에 사용중인 관로의



W:정격용량, V:정격전압, Jc:임계전류밀도, Dg:go pipe 직경, M:액체질소유량 Tg:go pipe 의 온도, Tr:Return pipe 의 온도, Tmax:허용최고온도, Pg:go pipe 의 압력 Pr:Return pipe 의 압력, Pmin:허용최저압력

Fig.2. Flow chart of HTS power cable design

Table I. 주요 설계 조건

항 목	설 계 조 건
기본구조	3상 일괄형
송전전압	AC 154kV
도체	Ag/Bi-2223 tape, $J_c=10^5$ A/cm ²
설계전류	정격전류 x 1.5
전기절연	저온절연방식 (LN ₂ 함침)
관로열절연	Super-insulation
냉각거리	1.5 km (OF 케이블 기준) ^[5]
최대온도상승	15K (65K → 80K)
허용압력손실	14atm (20atm → 6atm)
단열관로 최대외경	200 mm ϕ (국내포설기준) ^[6]

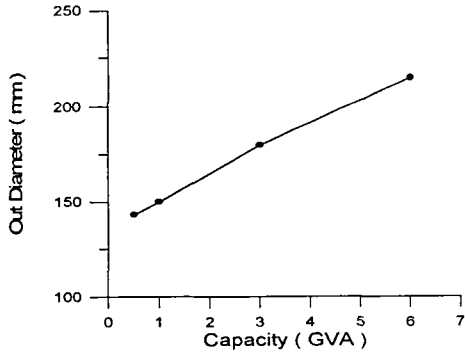


Fig. 3. Results of conceptual design

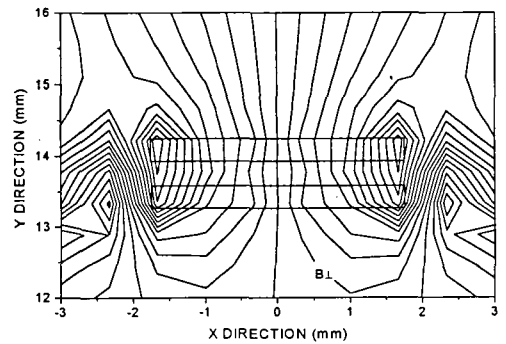
크기인 200mmφ를 기준으로 할 때 적용 가능한 고온초전도 전력케이블은 1~3 GVA 급으로 그림 3 과 같다.

III. 케이블코어 설계 및 제작

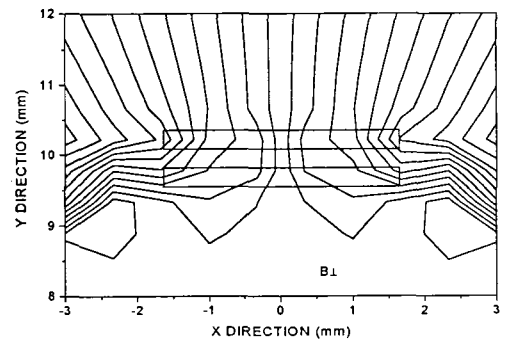
초전도케이블의 설계와 제작을 위하여 케이블코어의 형상에 따른 고온초전도 테이프의 자기자계 분포의 해석은 매우 중요하다[5]. 본 연구에서는 Magnet V를 사용하여 고온초전도 케이블코어의 도체배열에 따른 자계분포해석을 하였으며 그 결과를 그림 4에 나타내었으며, 그림 4의 (a)는 케이블 A에 대한 해석 결과로 도체간의 간격이 존재할 경우 도체에 수직성분의 자계가 크게 존재하여 임계전류의 저하가

Table II. 케이블 코어 규격

항 목		Cable A	Cable B
Former	재 질	STS 304	
	직경[mm]	27.4	18.7
테이핑 각도 ^[0]	1 st layer	16	11.3
	2 nd layer	17	11.9
테이프 수량	1 st layer	20	18
	2 nd layer	21	19
외경 [mmφ]	1 st layer	28.8	19.4
	2 nd layer	29.7	20.9
도체 간격 [mm]		1	No
코어 길이 [mm]		600	500



(a) Flux line for cable A



(b) Flux line for cable B

Fig. 4. Equipotential lines in cable core

큰 것으로 예측되지만, (b)와 같이 도체간격이 없는 케이블 B의 경우는 자기자계의 수직성분이 작음을 알 수 있다[7].

케이블코어는 Ag/Bi-2223 HTS tape 도체를 사용하여 제작하였으며 도체층간에는 polyamide 필름으로 절연하고, former와 도체사이 PE paper(Tyvek)으로 절연하여 제작하였으며 세부적인 사항은 표 2와 같다.

케이블 A와 케이블 B의 테이핑피치는 테이핑후 임계전류가 90%이상을 유지하는 값으로 결정하였으며, 각 층의 끝 부분은 층별로 분리하여 soldering하여 각 층별로 흐르는 전류를 측정할 수 있게 하였다. 그림 5는 제작된 케이블코어의 사진으로 케이블 A는 고온초전도 테이프도체 배열 시 약 1mm의 간격을 주며 제작하였으며, 케이블 B는 테이프도체 사이의 간격이 없이 제작하였다

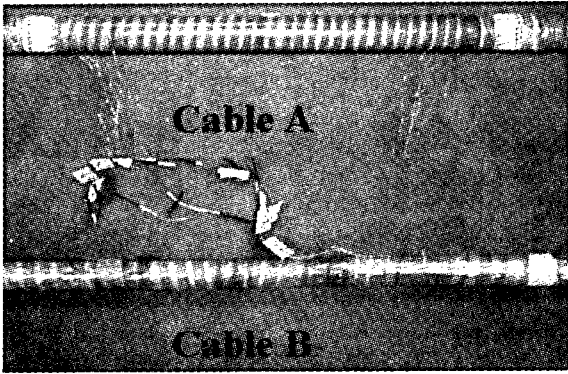
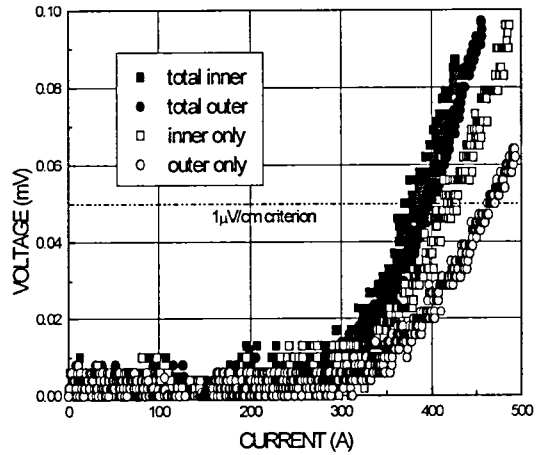
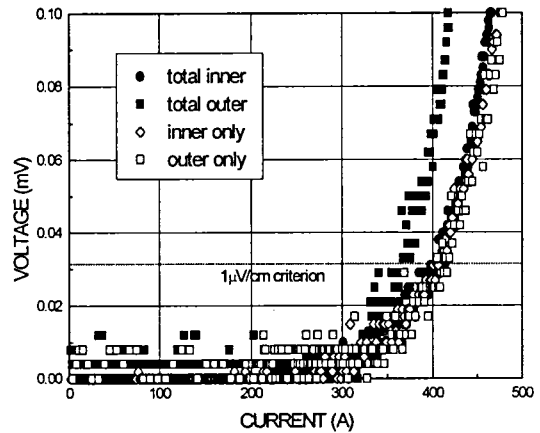


Fig.5. Picture of HTS cable cores



(a) I-V results for cable A



(b) I-V results for cable B

IV. 실험결과

그림 6은 77K에서 고온초전도 케이블코어에 사용된 도체의 외부자계의 방향과 크기에 따른 I_c 의 저하를 측정된 결과로서 I_c 는 수직성분의 자계가 50 Gauss만 되도 70% 수준으로 급격히 저하됨을 알 수 있다.

그림 7은 각각의 경우에서 cableA와 cableB의 V-I 특성을 측정된 결과를 나타낸 것이다.

고온초전도 케이블코어의 임계전류를 측정하기 위하여 내층과 외층을 분리해서 각각 통전하고, 내·외층의 터미널을 묶어 통전하였다.

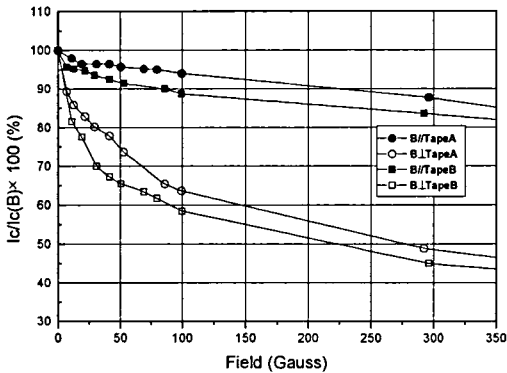


Fig. 6. Magnetic field dependence of the critical current for the HTS tapes at 77K
(TapeA : CableA, TapeB : Cable B)

Fig. 7. DC I-V characteristics for HTS cable cores

그림에서 보는 바와 같이 cableA는 1mm의 도체간격에 의한 수직성분의 자계가 지배적으로 작용하여 도체의 I_c 에 비해 50.4%의 I_c 를 나타내었으며, cableB는 도체간격이 없어 임계전류의 저하가 작게 나타나 도체 I_c 의 86%의 케이블 I_c 를 나타내었으며, 이는 케이블코어의 구성에 따른 자기자계 해석 결과와 유사하다.

따라서 송전용량의 증가, 크기의 감소 등 보다 효율적인 고온초전도 케이블 개발을 위해 도체의 배열에 따른 자기자계의 영향을 고려하여야 한다.

V. 결론

본 연구에서는 고온초전도 전력케이블의 개발을 위한 설계와 고온초전도 케이블코어를 제작, 평가하였다.

그 결과 국내의 전력계통에 적용 가능한 규모의 고온초전도 전력케이블 용량은 154kV 일 때 1~3GVA 급이며, 케이블코어 제작시 도체간격이 존재할 경우 테이프도체에 수직인 자계가 작용하여 케이블코어의 I_c 를 저하시키지만, 도체 간격이 없는 케이블코어의 경우 I_c 의 감소가 작다.

이 결과는 향후 고온초전도 전력케이블의 개발에 활용될 것으로 예상되며 고온초전도 전력케이블의 지속적인 연구개발이 이루어져야 할 것이다.

본 논문은 과학기술부의 지원으로 수행한 연구 결과입니다

참고문헌

- [1] 산업 자원부 전력 심의관실, "전력 분야 통계" (1998)
- [2] Aldo bolza, Piero Metro, Macro Nassi, Mujibar M Rahman, "Recent Developments in HTS Power Cable Applications", IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, 339-344 (1997)
- [3] Paul M. Grant, "Superconductivity and Electric Power: Promises, Promises...Past, Present and Future" Vol.7, No.2, 112-133 (1997)
- [4] T.Shibata, K.Sato, Y.Iwata, et.al., "Development of High Temperature Superconducting Power Cable Prototype System", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.14, No.1, 182-187 (1999)
- [5] 飯塚喜八郎 電力케-ブル技術ハンドブック, 543 (1989)
- [6] 한국전력공사, 지중송전선 설계기준-1610 (1997)
- [7] T.Fukunaga, A.Oota, "AC transport losses under self fields in Ag-sheathed (Bi,Pb) $2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ conductors", Physica C, 291, 201-206 (1997)