

22.9kV 고온초전도 케이블의 설계

이인호, 김도운, 김수연, 김도형, 김동욱
LG전선(주)

Design of high temperature superconducting 22.9kV power cable

In-Ho Lee, Do-woon Kim, Soo-Yeon Kim, Do-Hyung Kim, Dong-Wook Kim
LG Cable Ltd.

Abstract - 1911년 네덜란드의 물리학자 Kamerlingh Onnes에 의해 초전도 현상이 발견된 이래, 완전 도전성 (직류저항 zero), 완전 반자성 (Meissner 효과) 및 Josephson 효과를 이용한 응용 연구가 다양한 분야에서 진행되어 왔다. 특히, 제한된 공간에서의 저전압 대전류 송전, 작은 송전손실을 통하여 추가 발전에 따른 CO₂ 배출을 저감시킬 수 있는 환경 친화적인 수단으로서, 초전도 케이블이 주목받고 있다. 본 논문에서는 당사가 참여중인 과학기술부 주관 21C Frontier 연구개발사업의 초전도 케이블 시스템 개발과 관련하여, 세계 각국의 케이블 개발 현황의 검토를 통하여 케이블 개발 타입의 선정배경을 기술하고 22.9kV급 모델 케이블에 대한 설계안을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 고온 초전도 선재의 전망

초전도 케이블 시스템의 경우, 현 단계에서 실용화에 가장 큰 장애물로서 케이블 재료비의 90%이상을 점하고 있는 BSCCO 선재의 가격을 들 수 있다. 현재는 AMSC社(미국), InnoST社(중국), NST社(덴마크)와 같은 몇몇 선재회사에 의해서만 대외 판매가 이루어지고 있으며, 특히 AMSC가 세계 최대 생산 능력(년간 20,000km)을 보유하면서 시장 가격을 주도하고 있다.

통신선이 과거 지절연 또는 플라스틱 절연 케이블에서 광케이블로 추세가 바뀐 패턴과 같이 구리를 주도체로 이용하고 있는 전력 케이블도 초전도 케이블로 대체됨에 있어, 유사한 패턴을 따를 것으로 전망하고 있다. 표 1은 광섬유와 고온 초전도 선재의 중요한 역사적 전기(milestone)로 비교한 것이다[2].

표 1. 광섬유와 초전도 선재의 가격 추이

광섬유(Optical fiber)		초전도 선재(HTS tape)	
1967	발견	1986	발견
1976	최초 케이블 설치 (NASA)	1993	BSCCO(10m)
1977	\$1.80/m	1997	\$100/m($t_c=20A$, \$5000/kA·m)
1984	대량생산	2002	\$380/kA·m
1997	\$0.04/m	2005	\$50/kA·m
	20년 후 단가: 2%	2017	\$23/m($t_c=1000A$, \$23/kA·m)
			20년 후 단가: 0.46%

1. 서 론

초기의 초전도체는 금속 니오븀(Nb)을 근간으로 하여 액체헬륨 온도에서 초전도 현상이 구현되는 저온 초전도체(low temperature superconductor, LTS)로서, 극저온을 유지시키기 위한 냉각 시스템의 기술적 난이도와 비용상의 문제로 인하여 높은 자장을 요하는 자기공명영상장치(MRI system), 핵자기공명 장치(NMR), 자기부상장치(magnetic levitation system)등에 제한적으로 실용화되어 있다.

그러나, 1986년 Müller에 의해 고온초전도체(high temperature superconductor, HTS)가 발견되고, 1987년에 Paul Chu등에 의해 저온 초전도체보다 임계 온도가 훨씬 높은 액체질소(기화온도 77.4K) 온도에서 초전도 현상을 구현할 수 있는 산화물계 초전도체가 잇달아 발견되면서, LTS에 있어 초전도현상을 응용하는데 있어 제약이 되어 왔던 기술·비용면에서의 장예를 줄이는데 크게 기여를 하였다.

세계적으로 1980년대 말부터 집중적으로 그 실용화 연구가 이루어지고 있으며, 현재는 HTS 선재 측면에서 선재의 기계적 특성 개량, 장선화(1km이상) 및 염가화(low cost)에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한, 전력 응용 분야의 개발중에서는 고온초전도 전력 케이블이 상용화 가능성 및 시장 진입 시기가 가장 큰 분야로 대두되고 있다[1]. 이러한 추세에 맞추어 과학 기술부 주관의 21C Frontier 연구개발사업의 일환으로 「초전도 실용화연구 (Dream of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies, DAPAS program)」 프로젝트가 케이블 시스템(냉각시스템 포함), 변압기, 전동기, 환류기를 중심으로 하여 2001년 9월부터 진행되고 있으며, 당사는 초전도 케이블 시스템(접속함 및 냉각시스템 포함)연구에 전선업체로는 유일하게 참여하여 수행하고 있다.

본 논문에서는 21C Frontier 연구 개발 사업의 1단계(2004년 7월 완료) 목표인 22.9kV급 고온초전도 케이블 설계에 대하여 연구 검토된 내용을 중점적으로 기술하고자 한다.

2.2 케이블의 개발 타입과 그 선정

초전도 케이블의 절연은 크게 전기절연(electrical insulation)과 열절연(thermal insulation)으로 구성되어 있으며, 케이블의 종류는 전기절연의 냉각방식에 따라 상온절연(RTD=Room Temperature Dielectric, 또는 WD = Warm Dielectric)과 저온절연(CD, Cold Dielectric)으로 구분되고 있다. 표 2는 국가별·전선 업체별에 따른 초전도 케이블 시험 선로의 구축 사례를 나타낸 것이다[3]. 표 2에서 알 수 있듯이 초전도 케이블의 type, 전기절연 방식은 각각의 환경에 따라 선호하는 방식이 다름을 알 수 있다. 현재 전력 케이블에서 채택되고 있는 전기절연 방식은 사용되는 재료에 따라 polymeric insulation (rubber, XLPE, PE, PVC등)과 paper insulation (kraft paper, synthetic laminated paper 등)으로 대별할 수 있다.

한편, 전기절연의 냉각방식(RTD 또는 CD) 선정에 있어서는 초전도 케이블 시스템의 기술적, 경제적인 면

표 2. 세계 각국의 시험 선로 구축 현황

전선업체 (국가)	전압 [kV]/전류 [A]	케이블 type	선로 [m]	현황
Southwire (미국)	12.5/1250 × 1cct	1core/CD (polymeric paper)	30	운전 중
Pirelli (미국)	24/2400 × 1cct	1core/RTD (EPR)	120	설치 후, 케이블 2개 상의 cryostat 문제로 대가중
NKT (덴마크)	36/2000 × 1cct	1core/RTD (XLPE)	30	운전 중
Pirelli (이태리)	132/3000 × 1cct	1core/CD (?)	30	제작 중
Pirelli (프랑스)	225/2600 × 1cct	3core/CD (synthetic laminated paper)	30~50	제작 중
住友 (일본)	66/1000 × 1cct	3core/CD (synthetic laminated paper)	100	운전 중

을 고려해야 하는데(feasibility study), 특히 경제성 검토에 있어서는 반드시 전선업체가 아닌 초전도 시스템을 사용하는 고객인 전력회사의 입장에서 검토해야 할 것이다. 즉, 케이블 시스템에 소요되는 자재가격뿐만 아니라 설계 목표 수명(예, 30년)까지의 운전비용까지 반드시 고려해야 하는데, 지중선로의 특성상 여기에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 “송전손실”이 된다.

한국의 경우, 서울을 비롯한 대도시를 중심으로 송배전선로에 부하가 60 ~ 70% 이상 집중되어 운영되므로, 대도시 용지난과 도시계획을 고려했을 때 이러한 부하 운전 pattern(대용량/저손실)에 대응되는 형태로서는 CD 방식이 보다 적합할 것으로 보여진다. 표 3은 전기절연의 냉각방식별 차이를 비교한 결과이다.

또한, polymeric insulation보다 paper insulation이 저온에서의 신뢰도가 높고, 특히 유전 손실 감소 및 절연두께 감소에 의한 compact한 케이블을 얻는 것이 가능하기 때문에 synthetic laminated paper를 저온에서의 절연체로 선정하였다. 당사의 경우에는 이러한 synthetic laminated paper에 관련된 설계, 제조 및 평가기술을 345kV OF 케이블의 개발을 위한 한국전력공사(KEPCO) 인정시험과정을 통하여 기본 기술을 확보한 상태이다.

이상과 같은 검토결과를 토대로, 21C Frontier 연구 개발사업에서 목표로 하는 22.9kV 초전도 케이블 type

은 synthetic laminated paper를 전기절연체로 하고 액체질소(LN₂)를 이용하여, 코어의 내/외부를 극저온 상태로 유지시키는CD(저온절연) 방식으로 선정하였다. 그리고, synthetic laminated paper로서는 당사의 제작경험이 있고, 세계적으로도 상전도 케이블로서 AC 765kV 및 DC 500kV까지 상용화 실적을 보유하고 있는 polypropylene laminated paper(일본에서는 PPLP, 유럽에서는 PPL, 미국에서는 PPP)를 하였다.



또한, 케이블 선심수는 22.9kV라는 배전전압과 송전 용량 및 설치작업 용이성을 배려하여 compact한 삼심 케이블(three core cable)로 하였다.

2.3 설계 검토를 위한 계통 조건

22.9kV 초전도 케이블 시스템이 실용화될 경우에도 이 새로운 시스템은 기존의 상전도 케이블 시스템과 연계되어 운전되어야 하기 때문에, 기본적인 전압조건을 기존 시스템과 동일하게 하여 다음과 같이 산출하였다.

- 공칭전압, U₀/U(U_m) : 13.2/22.9(25.8)kV
- BIL : 150kV_P
- 송전용량 : 50MVA(1260A)
- 상도체 600mm² 케이블 용량의 2배에 해당
- 선로길장 : 250m(초기 상용화 형태)

표 3. 전기절연의 냉각방식별 비교

구분	RTD	CD
Ampacity (기존케이블대비)	2배 이상	5배 이상
Electrical loss (기존케이블대비)	동등 수준	30%이상 저감
사용상의 제한	기존 관로 선로 개체용에 적합 (retrofitting existing duct systems)	도체와 차폐에 초전도체 사용하므로, 도체에만 사용하는 RTD에 비해 전체 사용량이 많아 cost 면에서 불리
Inductance (22.9kV 50MVA, trefoil배치)와 운전전압과의 관계	L1 = (μ ₀ /2π) × I ₁ ln(2S/d) = 3.4 × 10 ⁻⁷ [H/m] S : phase conductor 중심간 거리 d : “ 외경	L2 = (μ ₀ /2π) × I ₁ ln(D/d) = 0.64 × 10 ⁻⁷ [H/m] D : shield conductor 내경 d : phase conductor 외경
	L1 > L2이므로, voltage stability면에서 RTD의 capacitance를 낮춰야 함. 결국, RTD의 절연두께를 키우게 되어 CD보다 운전전압이 높게 운영되게 됨. (1GVA기준 : CD는 66kV/9kA/1cct, RTD는 115kV/2.5kA/2cct)▶	
케이블 모형도		

- 케이블 최대외경 : 150mm(175φ 관로기준)
- LN₂ 상시최대압력 : 15kg·f/cm²·G

그러나, 고장시 초전도 케이블 시스템에서 상정될 수 있는 단락용량에 대해서는 21C Frontier 연구개발사업 내에서 연구 중인 다른 중전기기분야와의 절연협조를 고려하여 별도 검토 중에 있다.

2.4 케이블 코어 설계

2.4.1 포머(Former)

포머는 초전도 선재를 감기 위한 지지대 역할을 수행함과 동시에 저온 상태의 유지를 위한 LN₂의 순환통로 역할을 수행하는 것으로, 마치 OF 케이블의 유통로와 같은 역할을 한다. 때문에, 포머의 재질은 brittle한 초전도 도체를 지지하고 높은 LN₂ 압력을 견딜 수 있는 충분한 기계적 강도를 가지며, 동전선 발생할 수 있는 와류 손실(eddy current loss)을 줄일 수 있도록 고정형체이고, 저온 유지를 위하여 열교환이 잘 이루어지는 고전도체인 것이 바람직하다. 여기에는 알루미늄(Al), 스테인레스 스틸(STS), 구리(Cu) 등이 고려대상이 될 수 있으며, 전기전도도만을 상대적인 값으로 비교하면, 위의 재질은 각61%, 13%, 100%이 되며, 열전도도의 경우는 32%, 0.5%, 100%이다.

위와 같은 상황을 고려하여 최종 재질로는 STS를 선택하였으며, 포머 외경의 목표 외경으로서 16.2φ ~ 36.7φ를 선정하여 압력손실과 열전달 특성에 대하여 검토하였다. 그림 2는 이 중에서 압력손실에 대한 결과를 나타내는 예로서, 가령 포머 내부로 LN₂가 10kg.f/cm².G로 인입 되었을 때 냉각 가능한 출구(outlet)에서의 최소허용치를 0.5kg.f/cm².G로 한다면, 포머 외경 16.2φ에서의 LN₂의 순환량은 0.07kg/s이고 이 때의 한계냉각거리는 약 500m가 된다. 외경 25.5φ(내경 21.5φ, 두께 0.3mm) STS로 된 주름관(corrugated pipe)을 대상으로 해석한 결과, 한계냉각거리는 1km 이상을 얻어 선로공장 250m를 훨씬 상회하는 결과를 얻을 수 있었다. 한편, 선정된 외경 25.5φ 주름관이 유압을 견딜 수 있는지를 검토하기 위해 후프 스트레스

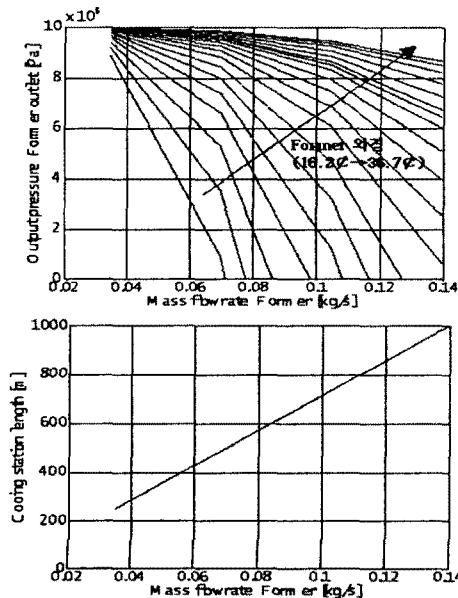


그림 1. Former 외경별 압력손실 해석예

를 사용한 이론적인 검증 및 내압력시험을 시행하였으며, 0.3mm두께로 충분한 내압력 특성을 나타냄을 확인하였다.

2.4.2 초전도 도체

초전도 케이블에서의 도체 설계는 구리나 알루미늄을 사용한 상전도 케이블에서는 고려하지 않는 몇 가지 특징이 있는데, 대표적인 현상이 대전류 통전에 따른 “偏流現象”이다. 복수층으로 선재가 권선된 초전도 도체에 있어 각층의 피치 및 연방향이 동일하다면 중심에서 외층으로 갈수록 인덕턴스가 작아지게 된다. 초전도체의 저항을 거의 “0”이라고 생각하면 인덕턴스를 각 층의 임피던스로 생각할 수 있으며, 이 경우 외층은 전류가 내층보다 많이 흐르는 편류 현상이 발생하여 전류 용량을 감소시키게 된다. 따라서, 층별 인덕턴스를 동일하게 하여 층당 전류 용량을 균일하게 유지시켜주는 설계 조건이 필요하며, 자속(magnetic flux)방향, 층별 pitch와 연방향을 고려하여 동등하게 설계할 수 있다. 22.9kV 설계에 있어 대상으로 한 BSCCO 2223 선재의 주요 물성치는 다음과 같다.

표 4. BSCCO 2223선재의 주요 사항

두께 × 폭[mm]	0.26 × 4.04
Ic[A], DC, 77K, Self-field	65
Max. stress[MPa], 77K, 5% Ic degradation	100
Max. strain[%], 77K, 3% Ic degradation	0.2
Min. bend dia.[mm], 77K	60

송전용량(22.9kV경우 1260A)을 얻기 위한 초전도 도체에 필요한 총매수(Σn)는 다음과 같은 개략식을 먼저 사용한다.

$$\Sigma n = I_{total} / (I_c \times a) \quad (1)$$

(a:저감율(DC → AC))

층별 초전도 도체가 기하학적으로 안정되게 배열되도록 도체의 층수를 고려, 표 4에 표시된 선재 사양을 사용하여 상기식으로 계산하여 총매수는 70 ~ 80매, 층수는 4층 구조를 선택하였다. 한편, 층별 초전도 선재는 기하학적으로 pitch 및 연방향을 가지게 되어 다음과 같은 인덕턴스 계산식이 성립한다[4].

$$M_{ij} = M_{ij,z} + M_{ij,\theta}, \quad i \leq j \quad (2.1)$$

(M_{ij,z}와 M_{ij,θ}는 각각 축방향 전류와 원주방향 전류에 의한 inductance로서, i≠j이면 mutual inductance, i=j이면 self-inductance)

$$M_{ij,z} = \frac{\mu_0}{2\pi} (\ln \frac{2l_{total}}{r_j} - 1) \quad (2.2)$$

$$- \ln r_j = \frac{a^2 \ln a - b^2 \ln b}{a^2 - b^2} - 0.5$$

(self-inductance 계산식)

$$- \ln r_j = \ln a - \frac{b^4}{(a^2 - b^2)^2} \ln \frac{a}{b} + \frac{(3b^2 - a^2)}{4(a^2 - b^2)}$$

(mutual-inductance 계산식)

$$M_{ij,\theta} = \frac{\mu_0 i}{4\pi j} \tan \alpha_i \cdot \tan \alpha_j \quad (2.3)$$

이와 같은 계산은 상당히 복잡한 반복과정을 필요로 하므로, 별도의 S/W를 제작하여 수행하고 있으며, 그림 2는 S/W를 사용한 계산 결과를 보여주고 있다. 도체 층별 pitch, 연방향 및 전류분류비(4개층으로 각 25%)를 조정하면서 층별 전류의 balance가 최적일 때

층	방향	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분
1	S	1	1	20	20	20	20	20	20
2	S	1	1	20	20	20	20	20	20
3	Z	1	1	20	20	20	20	20	20
4	Z	1	1	20	20	20	20	20	20

그림 2. 도체/차폐 층별 pitch와 연방향 해석 S/W

의 값을 구한다.

이상의 검토결과를 정리하면, 22.9kV 1260A 초전도 도체는 표 5와 같이 총 76매로 구성된다. 한편, 초전도 도체에서 발생하는 교류 손실은 전기저항을 무시할 수 있으므로, 결국 magnetic loss만 남게되며 이것은 자기 자계에 의한 성분(Norris model)과 외부자계에 의한 성분(Beam model)로 분리할 수 있다.

운전 중에 온도 또는 선재 등의 이상에 의해 초전도 현상이 깨어지는 이른 바, Quench상태 및 단락시 과도한 전류가 초전도 도체에 흐르게 되는 경우 선재에 심한 손상을 가져올 수 있으므로, 층간에는 서로 kraft paper등으로 절연을 행하는 것(층간절연)이 안전한 방법이다.

표 5. 초전도 도체의 층별 pitch 및 연방향

층	pitch(mm)	연방향
1	140~180	S
2	285~325	S
3	415~455	Z
4	285~325	Z

2.4.3 전기 절연체

케이블에 있어서 절연두께는 다음과 같은 기준으로 설정하였다.

- i) 기준 AC 내전압치를 인가했을 때, PD(부분방전)가 발생하지 않을 것(실험적으로 24kV/mm).
- ii) 기준 Imp.에 대해 절연파괴가 일어나지 않을 것

절연지는 OF 케이블의 전반적인 수요감소에 의해 세계적으로도 3~4개 업체에서만 생산되고 있으며, 표 6은 초전도 케이블용 PP laminated paper 주요특성을 나타낸 것으로서, 일반적인 kraft paper에 비해 그 특성이 월등함을 알 수 있다. 최적의 절연 설계를 파악하기 위하여 PP laminated paper를 여러 겹으로 적층한 sheet sample과 케이블과 같은 형상의 cylindrical sample로 전극형상을 달리하면서, 실제 케이블에서의 절연시간 gap을 모의하기 위해 gap의 개수를 달리하면서 LN₂내에서 AC 파피시험 및 PD 개시/소멸시험, tanδ, ε시험을 실시하였다.

이상과 같은 결과를 통해 22.9kV 초전도 케이블의 절연두께를 선정하였고, 이 때의 AC 전계는 20.4kV/mm(80kV 기준), Imp. 전계는 79kV/mm(~310kVp 기준)이 된다

표 6. PP laminated paper

두께[mm]	0.119
밀도[g/cm]	0.89
PP ratio(%), PP층 두께 비	57
인장강도[kN/m ²], MD/CD	7.4/4.4
신율(%), MD/CD	2.8/6.5
Dry tanδ(%), 100°C	0.055
유전율(ε)	2.7

2.4.4 초전도 차폐

저온 절연(CD) 초전도 케이블에서는 도체로부터 발생되는 상당한 크기의 자속(magnetic flux)이 외부로 주회하므로, 이를 케이블 바깥으로 확산되지 않게 하기 위해서는 차폐를 사용, 상쇄시켜야 한다. 따라서, 차폐 역시 초전도 선재를 사용하며 필요한 단면적은 도체와 기본적으로 같아야 하나, Ic degradation이 없도록 기하학적으로 빈틈없이 배열되도록 그 매수를 증감시킬 필요가 있다. 앞서 기술한 도체에서의 이론과 같은 개념으로 차폐를 설계한 결과 2층 구조에 표 7과 같은 연방향, pitch의 결과를 얻을 수 있었다.

표 7. 초전도 차폐의 pitch 및 연방향

층	pitch(mm)	연방향
1	345~385	S
2	515~555	S

2.4.5 보호층과 삼심 연합

초전도 케이블의 각심에는 기계적으로 취약한 세라믹 계열의 초전도 선재가 있어, 삼심 연합시 손상을 받을 수 있으므로 각심에는 최외층에 동선직입테이프와 같은 보호테이프를 감는다.

2.5 케이블 코어 제조

이상과 같은 설계를 통해 얻어진 초전도 케이블을 제조하기 위해서는 초전도 도체, 전기절연층(반도전층 포함), 초전도 차폐, 보호층을 기계적 손상 없이 안전하게 제조하기 위해서는 1개의 공정으로 연속작업이 가능해야 한다. 그림 3은 시험제조가 완료된 케이블 코어의 실물사진으로서 현재 제작 완료 후 평가 중에 있다.



그림 3. 완성된 초전도 케이블 코어

2.6 케이블 열절연 및 cryostat의 설계

초전도 케이블의 cryostat로서는 열, 기계적 특성을 고려하였을 경우 Al과 STS가 대상이 될 수 있으며, 본 논문에서는 Al만을 대상으로 계산을 진행하였다. Cryostat의 설계에는 LN₂ 순환을 고려한 압력 손실, 내압력 및 외부 하중에 대한 기계적 특성, 재료의 진공 특성과 열손실 등이 복합적으로 고려되어야 한다. 현재까지의 연구 단계로는 각각의 요소들이 단계적으로 검토되고 있으며, 실험을 통한 데이터 확보 작업이 진행되고 있다.

초전도 케이블에서의 cryostat의 설계는 반경반향에 비하여 무한히 긴 길이 방향의 특성으로 재료의 열전도율은 크게 문제되지 않는다. 케이블 코어와 내부 cryostat 사이 공간에서의 LN₂ 순환의 경우 포머 부분에 비하여 무시할 수 있을 만큼 작은 압력 손실을 가지기 때문에, 현 단계에서는 주로 진공 특성과 기계적 하중에 대한 지지를 고려하여 설계를 진행하였다.

코어 설계에서 최종적으로 도출된 코어의 치수를 기준으로 내부 cryostat의 두께를 계산하였다. 자사 설비의 제작 기준을 만족하는 내경 및 주름 조건을 선택한 뒤, 최대 내압력을 유지할 수 있도록 자사 OF 케이블의 설계 기준과 cryostat의 설계 기준(Eqn.3)(5)을 동시에 비교하였으며, 이 중 두꺼운 두께를 선택 적용하였다.

$$t = \frac{pD_e}{2S_a e_w - 1.2p} \quad (3)$$

(S_a : 허용하중, e_w : 용접 효율, D_e : 유효직경)

외부 cryostat의 경우 내부 cryostat의 외경을 기준으로 MLI(multi-layer insulation)와 스페이서의 배치를 고려한 공간을 확보한 뒤 설계를 진행하였다. 외부 대기압에 의해 버클링이나 우그리짐을 예방할 수 있도록 아래의 Eqn. 4를 사용하여 구한 두께와, 자사의 케이블 설계기준으로 구한 두께를 비교하여 더 큰 값을 선택 적용하였다.

$$P_c = \frac{2E(t/D_e)^3}{1-\nu^3} \quad (4)$$

(E : 탄성계수, P_c : 외부 압력, D_e : 유효 외경)

현재까지는 포머 및 내부 cryostat의 양쪽 모두에 LN₂ 최대 압력이 적용되는 최악 조건으로 설계하였으며, 순환 시스템의 설계와 연계하여 cryostat을 return path로 사용하게 되면, 보다 작은 두께를 선택할 수 있을 것으로 예상된다.

열전달의 설계는 진공 단열 및 MLI에서 발생할 수 있는 내, 외부 cryostat간 복사 열전달, 가스 전도 열전달, MLI를 통한 고체 전도 열전달을 고려하여 계산을 진행하였다. 진공도 7.5×10⁻⁵ torr, MLI의 재질은 Al/Mylar 테이프를 선택하였으며, cryostat간의 진원 유지를 위한 스페이서까지 고려하여 열해석을 진행하였다. 10~15매의 Al/Mylar 테이프를 사용했을 경우 1.5W/m 미만의 열손실이 계산되었으며, 이 때 방식층까지 포함된 케이블의 최종 외경은 약 140mm로 설계되었다.

현재 진행중인 순환 시스템의 실증 시험과 유동 해석 및 각 재질별 주름판의 강도 시험을 통한 데이터를 확보하게 되면 보다 정밀한 열전달 설계가 가능할 것이다.

3. 결 론

전세계적으로 차세대의 환경친화적인 대용량 전력전송 수단의 하나로써 그 실용화 연구가 진행 중인 초전도 케이블 시스템에 대해 개발현황과 논의의 쟁점에 대해 살펴해보았다. 또한, 국내 최초의 model로서 22.9kV 케이블에 대해 설계를 진행한 결과, 다음과 같은 기술적 결과를 얻었다.

- (1) 초전도 도체와 차폐의 재료로서는 HTS 선재로 유일하게 케이블에 적용 중인 BSCCO 2223를 적용하였고, 전기적 해석결과 도체와 차폐는 각각 4층과 2층으로 구성되며 전류의 偏流現象을 억제하기 위한 조건으로서 최적의 pitch와 연방향을 제시하였다.
- (2) 전기절연체로서는 향후의 실용화단계에서 주도적인 model로 예견되어지는 PP laminated paper를 적용하였고, 극저온에서의 특성 평가를 통해 22.9kV 계통에 적합한 절연두께를 선정하였다.
- (3) 케이블의 열절연에 해당하는 cryostat으로서는 단열 특성과 기계적 특성을 고려하였을 때 Al과 STS가 적합하며, 본 논문에서는 Al에 대한 계산을 진행하였다.
- (4) 국내 KEPCO 22.9kV 선로의 다수를 점하고 있는 관로식 포설을 감안하여 초전도 케이블을 既설치된 관로에 사용될 수 있도록 하여 전체 지중선로 건설비의 60%이상을 절감하는 토목 공사비를 증가시키지 않는 조건으로 검토하였고, 그 대상을 현재의 주종인 175mm ELP pipe로 하였다. 이를 만족시키는 케이블 설계를 행한 결과, 향후에 구체적으로 검토될 cryostat 열절연 설계에 따라 변경의 소지가 있겠으나 그 외경은 약 140mm로 계산되었다.

현재의 지중 선로용 케이블(상전도)은 송전선로로 인해 초전도 케이블 시스템과 비교할 때 상대적으로 훨씬 많은 에너지를 소모시키는 한편 지구환경에 많은 부담을 안기고 있는 것이 사실이다. 따라서, 차세대 전력전송의 수단으로서 초전도 케이블 시스템은 마치 통신에서의 광케이블의 역할과 같은 중추적 역할을 담당할 것이며, 당사에서도 실용화 연구에 적극적으로 노력하여 그 시기를 앞당길 수 있도록 매진할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Haruhito Taniguchi, "Expectation of Superconductivity Application to Power system",平成 11년 電氣學生全國大會, 1999
- [2] Joseph Mulholland, Thomas P. Sheahan, Ben McConell, "Analysis of future prices and markets for high temperature superconductors" DOE report draft, 2002
- [3] Superconducting cables impact on network structure and control - CIGRE Task Force 38.01.11, 2002
- [4] 주진홍, 김석환 외 7인, "균일 전류분포 및 교류손실을 고려한 다층 고온초전도 전력 케이블 설계", Proceedings of the KIEE Summer Annual Conference 2002.
- [5] Randall F. Brron, "Cryogeni systems 2nd Edition, Chapter 7 Cryogenic-fluid storage and transfer systems", 1985