

초전도 케이블 기술동향

경 상 대 학 교
전 기 공 학 과
교 수 金 相 賢

1. 서 론

최근의 지속적인 경제성장과 생활수준의 향상으로 전력수요는 급증하고 있으며, 특히 도심지역의 인구과밀화에 따른 왕성한 전력수요의 증대에 대처하기 위하여 고밀도, 대용량 전력송전의 필요성이 강하게 요구되고 있다. 이에 따라 전력회사는 800kV급의 송전전압의 격상에 의한 전력송전 고전압화 방식과 기존 케이블의 송전 1회선당의 대용량화에 의한 대전류방식이 검토되고 있다. 그러나 이들의 기존방식은 환경문제와 더불어 전기 절연설계에, 대전류방식은 기존 케이블의 작은 송전용량으로 인한 간선로의 개수의 제한적인 어려움이 있다. 또한 철탑설치곤란, 유도장해, 전파장해, 대도시의 환경조화 등의 해결하기 어려운 여러 가지 문제점이 있어 새로운 원리인 초전도 케이블에 의한 지중송전 방식이 유력한 후보로 고려되고 있다. 향후 2000년경에는 서울 지역의 최대전력이 7GW를 넘어설 것으로 예상되므로 초전도 케이블의 실용화 연구개발을 조속히 서둘러야 한다.

초전도 케이블(superconducting cable)은 극저온에서 도전율이 무한대가 되는 초전도 현상을 이용하여 대전류를 흘릴 수 있는 케이블로서 대용량화는 물론 저손실화, 콤팩트화, 송전코스트 절감 등에서도 기존의 OF 케이블(oil filled cable)이나 판로기중 케이블과는 비교가 안될 우수한 특징을 갖고 있다.

이와같은 초전도 케이블의 기술개발 연구는 경제성장이 활발했던 1960년 후반부터 미국, 영국, 프랑스, 독일, 러시아, 오스트리아, 일본 등 세계의 여러 연구기관에서 본격적인 연구를 진행하였으나 2회에 걸친 석유파동을 계기로 유럽제국에서의 개발연구는 거의 중지되고 현재는 미국, 일본, 러시아에서 꾸준한 연구가 진행되고 있다. 그러나 최근 1986년부터는 Nb-Ti, Nb₃Sn으로 대표되는 금속계 초전도체 대신에 Perovskite 산화물계 고온 초전도체가 액체 N₂(비등점:77K)의 이용만으로도 초전도 특성을 얻을 수 있는 획기적인 결과가 발견되면서 고온 초전도 케이블 개발이 가속화 되고 있다. 액체 N₂ 냉각형 고온 초전도 케이블은 저온 초전도 케이블보다도 경제성이 더욱 우

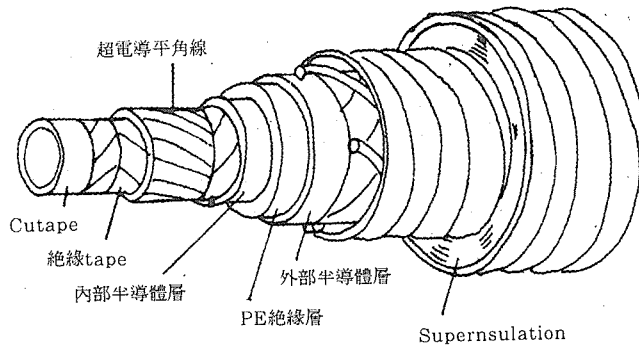
수하므로 세계적인 기술경쟁을 하고 있으며 특히 미국, 일본, 영국등이 실현 가능성을 전제로 한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

본 보고에서는 이와같은 점을 감안하여 국내외 초전도 케이블의 개발 동향, 구조 및 경제성등에 대하여 소개하고자 한다.

2. 초전도 케이블의 구조 및 재료

초전도 케이블의 일반적 구조를 (그림 1)에 나

타낸다. 초전도 케이블의 일반적 구조는 기존의 OF 케이블과 유사하며 구성요소는 크게 나누어 도체부, 절연체부, 냉각부(단열부)로 구성된다. 먼저 도체부는 안정화재와 초전도체로 구성된다. 케이블에 전류변동이 생기면 온도상승이 생기지 않도록 안정화가 필요하며 안정화재로서는 Cu, Al등 도전율이 높은 것이 사용되나 경량화, 고도전율이 요구되는 경우에는 고순도 Al이 바람직하다. 초전도체는 저온 초전도 케이블인 경우 Nb, Nb-Ti, Nb₃Sn등과 같은 금속계 초전도선재를,



(그림 1) 초전도 케이블 구조

그리고 고온 초전도 케이블인 경우는 Bi-2223와 같은 산화물 초전도선재를 사용한다. 금속계 초전도선재는 표면확산법, Bronze법등 각종 제조법이 개발되어 이미 상용화되고 있으나, 산화물계 초전도 선재의 경우는 아직 초보적인 연구단계이다. 산화물계 초전도선재는 세라믹 원소이므로 원자간의 약결합과 더불어 이에따른 기계적강도의 문제로 인하여 초전도 자체만의 선재화는 불가능하여 Ag등의 피복재로 보완하는 방식을 취하고 있다. 물론 최근들어 sol-gel법, laser 용융용고법등 각종

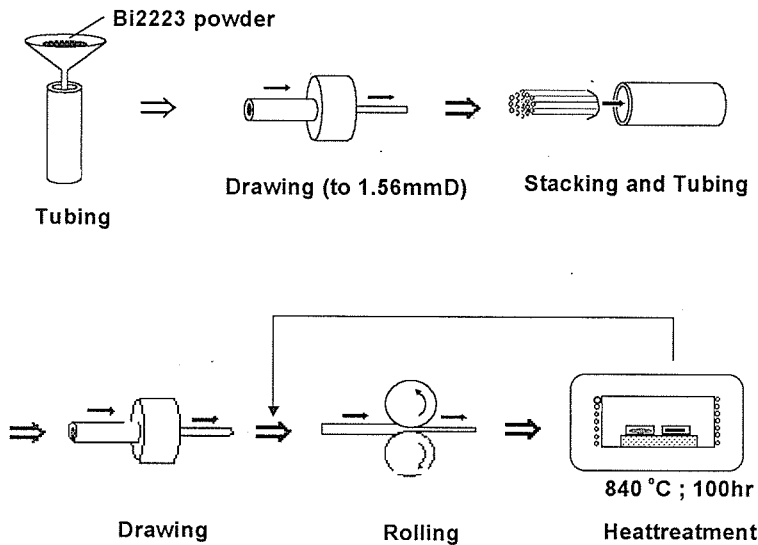
제작방식이 개발되고는 있지만 아직까지 선재의 주종을 이루는 것은 PIT(powder-in-tube)법이며 American Superconductor사, Intermagnetics General사 등의 회사에서 생산되고 있으나 초기단계이다. (그림 2)에 PIT법에 의한 다심선재 제조과정의 일예를 나타낸다. 다심선재의 제조는 먼저 하소된 Bi계 초전도 분말을 Ag 튜브에 넣고 인발(drawing)하여 가늘게 단심 선재를 성형한 후, 이들 단심 선재를 절단하고 다시 Ag 튜브에 집단으로 넣어 인발과 롤링(rolling)의 가공공정을 거

쳐 전기로에서 열처리하는 방식이다.

절연체는 극저온 액체, 기체 및 고분자 고체가 사용되고 있으나 전기절연과 결부하여 다음의 3절

에서 설명하기로 한다.

종래의 케이블 시스템에서는 도체손실에 의한



(그림 2) PIT법에 의한 다심선재 제조

발열을 절연체를 통하여 외부로 방출시키는 것이 중요하나 초전도 케이블의 경우는 외부로부터의 열침입을 차단하는 단열이 아주 심각하다. 단열은 진공을 이용하는 방식과 하지 않는 방식으로 분류된다. 진공을 이용하는 방식에는 적층진공단열, 고진공단열, 분말진공단열이 있으며 일반적으로 뛰어난 단열성능을 갖는다. 적층진공단열은 Al박, Al증착 폴리에스터등의 복사판을 다층적층하고 10^{-5} torr 이하의 진공으로 유지하는 것으로 가장 뛰어난 단열방식이다. 따라서 초전도 케이블용으로라도 활발히 연구되고 있지만 그때 하중지지법이 문제가 된다. 적층체로 지지하면 면압이 크게 되어 단열특성이 나빠게 되고 또한 하중 지지용 spacer를 따로 설치하면 열유입이 증가한다. 그 외 진공을 사용하면 어느 단열방법에 대해서도 장

척진공배기와 진공유지가 큰 문제이고 새로운 고안이 필요할 것이다. 진공을 사용하지 않는 단열에는 발포단열, 미분단열이 있으며 일반적으로 그 단열특성은 좋지 않다. 그러나 진공 배기에 따르는 문제가 없으며 신뢰성이 풍부하다. 초전도 케이블은 종래의 케이블에 비해 송전용량이 크기 때문에 크기가 대폭 감소하며 더욱이 액체 N_2 를 사용하는 고온 초전도 케이블의 경우는 냉각부(단열부)가 적게 되어 크기가 대략 1/3수준으로 경제적이다.

3. 전기절연

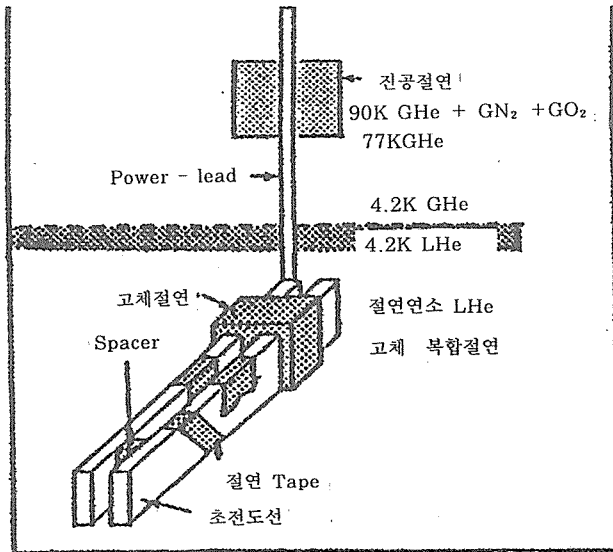
초전도 케이블의 전기절연은 보통 100kV이상의 고전압에 견뎌야 하며 더구나 유전손이 낮은

물질이 필요하다. 진공은 10^7V/cm 정도로 파괴전압은 높지만 실제에는 음극표면상의 돌기로 파괴전압이 저하한다. 액체 He은 초임계가 되면 절연 파괴강도가 증가하여 200kV/cm 이상이 된다. 또한 상온 기체 He은 절연파괴강도가 대단히 낮기 때문에 일반적으로는 액체 He은 전기절연에는 적당하지 않다. 공업적으로 가능한 절연방식은 (그림 3)과 같다.

즉

- (1) spacer방식 : 극저온 액체, 기체 또는 진공을 주 절연으로 하고 epoxy와 같은 고체 spacer로 지지하는 방식이다.
- (2) tape방식 : 도체에 테이프상의 고분자 또는 종이를 감고 여기에 극저온 액체나 기체를 함침하든가 아니면 진공으로 하는 방식이다.
- (3) 고체절연방식 : 도체를 epoxy나 FRP로 절연하는 방식이다.

이들 방식들은 각기 장단점이 있어 이중 어느 방식이 좋은가는 아직 연구가 진행중이므로 결론을 지을 수는 없다. spacer방식은 냉각체와 절연체 그리고 열 절연과 전기절연을 결합 수가 있다는 장점은 있으나 spacer의 연면방전 발생전압이 낮고 구성 각부의 열수축 차이 등에 따른 spacer설계에 큰 어려움이 따른다. 내전압, 유연성의 관점에서는 극저온 액체를 함침한 tape권 방식이 현재 연구개발의 가장 일반적인 경향이 되고 있으나 극저온에서의 기계적 특성이나 유전손의 측면에서 확실한 재료가 없다는 문제점을 갖고 있고 그리고 절연체가 구조체를 결합 수 있는 고체 절연방식은 초전도 케이블의 단말부에 이용될 수 있다. 이들의 절연방식에는 구성재료로서 액체, 기체 및 고체절연체가 사용되고 있다. 냉각체인 극저온 액체를 전기절연체로 동시에 이용할 수 있다는 것은 절연설계에 매우 바람직하고 흥미 있는 일이기도 하다. 초전도 케이블에 사용되는 액체는 현재 초전도체의 임계온도 때문에 액체 He(4.2K)



(그림 3) 절연 방식

만이 사용 가능하지만 장래 고온 초전도체가 개발 되면 1차단계로 액체 N₂(77K)가 가능토록 될 것이다. 극저온 액체의 대기압, 비등점에서의 절연 파괴특성은 액체He은 절연유보다 낮지만 액체 N₂는 매우 높은 특성을 나타낸다. 극저온 액체는 냉각계로서의 요구로부터 과냉각 또는 초임계의 가압 상태로 사용되지만 가압에 의해 파괴전압은 상승한다. 액체 N₂에서는 압력의 거의 평방 근에 비례하여 상승하며 이를 기포파괴의 억제효과로 생각한다. 유전특성의 유전율은 절연유에 비해 작아 케이블의 저장전용량화가 기대되지만 고체와의 복합절연구조에서는 액체중의 전위분담이 커져 주의

해야 한다. 한편 극저온액체는 열 침입에 의해 기화하고, 특히 대량으로 기화하면 전기특성의 변화가 문제된다. 극저온 기체의 절연파괴전압은 액체의 경우의 1/2-1/3으로 저하하며 절연파괴전압 $V=f(1/T)$ 의 관계이므로 설계시에는 절연거리를 충분히 고려해야 하는 것이 중요하다. 극저온 액체 및 기체재료의 대상은 불과 수가지 뿐인데 반해 고체는 그 종류가 아주 다양하나 최근 주목을 끌고있는 것은 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 카프톤, 에폭시, 테프론 등의 고분자이다. 고체의 극저온 하에서의 절연성능은 <표 1>에 표시한 바와 같이 상온보다 높다. 그러나 진공중이 가장 높고 기체

<표 1> 각종 고분자의 파괴전압

절연파괴전압과 매질 시료 각 두께(μm)	교류파괴전압 (波高 MV/cm)					직류파괴전압 MV/cm				
	공기	N ₂ 액체	N ₂ 가스	He 액체	He 가스	진공	N ₂ 액체	N ₂ 액체	He 액체	He 가스
	293K	77K	77K	4.2K	4.2K	10K	77K	77K	4.2K	4.2K
폴리에스테르 필름 100	1.19	1.71	0.99	1.20	0.85	2.12	2.1	1.6	2.1	1.5
테프론 100	1.13	1.41	0.97	1.34	0.99	3.02	2.0	1.7	2.3	1.4
폴리에틸렌 100	1.27	1.37	1.12	1.44	1.145	25.4	2.1	1.7	2.2	1.6
나일론 100	1.02	1.55	1.06	0.92	0.70	1.45	1.8	1.2	1.8	1.1
폴리염화비닐 100	1.10	1.27	0.99	1.11	0.73	2.0	2	1.8	2.4	1.6
폴리아미드 필름 100	1.12	1.09	0.97	1.05	0.75	1.82	1	-	2	1.5
크라프트 지 100	1.40	1.98	1.27	1.63	1.27	3.17	2.4	1.8	2.6	1.9

중보다도 액체중, He중보다도 N₂ 중에서 높아 매질의 절연성능에 의존한다. 플라스틱은 상온에서는 코로나 방전을 동반하는 과전을 장시간 계속하면 수분과 산소 때문에 열화하기도 하고 트래킹(tracking) 생기지만 저온에서는 수분, 산소의 고체화에 의해 이들의 손상은 적게 된다. 그러나 절연두께가 두꺼워지면 크랙(crack), 열수축등의 문

제가 있으므로 초고전압절연을 고체만으로 할 때는 대책이 필요하다.

4. 국내외 기술개발 동향

초전도 케이블의 개발연구는 경제성장이 활발하던 1961년 R.McFee에 의해 최초로 구상되고

1969년 영국 CERL의 2m 모델선로를 발단으로 미국, 오스트리아, 독일, 일본 등 세계의 연구기관에서 본격적인 연구를 진행하였으나 경제성의 문제와 석유파동으로 현재는 미국, 일본, 러시아에서 꾸준한 연구가 진행되고 있다. 특히 최근 일본의 경우는 통상성 주도하에 New Sunshine계획의 일환으로 고온 초전도 케이블 연구개발을 본격적으로 진행하고 있다.

영국의 전력중앙연구소, 일본의 고하전공이 1960년대 rigid형 모델 케이블을 시작으로, 독일의 지멘스, 미국의 브르크해븐 국립연구소, 로스알라모스과학연구소, 일본의 전자총합연구소가 semi-flexible형 케이블을 그리고 오스트리아의 그라츠 공과대학, 러시아의 오르유니온 레닌 전력연구소가 flexible형 케이블을 개발하였다. <표 2>에 세계 각국의 초전도 케이블 개발현황을 나타낸다.

<표 2> 초전도 케이블의 개발현황

국명	미 국		일 본		오스트리아	러 시 아		영 국	독 일
기관명	로스알라모스과학연구소	브레크헤븐국립연구소	고하전공	전자기술종합연구소	그라츠공과대학	그루자노프스키전력연구소	오르유니온레닌전력기술연구소	전력중앙연구소	지멘스
송전용량(MVA)	5000	1000	1000	-	100	600	2000	1400	2000
도체	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Sn	Nb	Nb, Nb ₃ Sn	Nb	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Sn	Nb	Nb
전기절연	SCHe 함침PE 테이프	SCHe 함침 2축연신P 테이프	LHe 함침 PE지	LHe 함침 고분자 테이프	SCHe 함침 크라프트 지	SCHe 함침 고분자 테이프	SCHe 함침 절연지	LHe 함침 PE 테이프	LHe 함침 PE 테이프
냉각재	SCHe	SCHe	LHe+ LN ₂	LHe	SCHe+ LN ₂	SCHe+ LN ₂	SCHe+ LN ₂	LHe+ LN ₂	LHe+ LN ₂
길이(m)	30	100	7	10	50	8	50	8	35

대표적인 연구기관은 미국의 브르크해븐 국립연구소로 1972년부터 사전조사연구, 최적설계연구, 요소기술연구를 거쳐 1982년 세계 최대의 장거리 통전시험에 성공했다. 이 케이블은 115m길이의 단상 케이블 코아 2개로 회로를 형성하고 대지 전압 80kV(선간전압 138kV), 상전류 4100A로

운전되어 333MVA 즉 3상으로 1000MVA의 송전용량을 갖는 것이 실증되었다. 그후 30일간에 걸친 장기연속운전 시험, 임펄스 전압시험, 단시간 과전류 시험, quench상태의 실험등을 마쳤다. 사용된 초전도 케이블은 도체는 Nb₃Sn이며, flexible형 케이블 코아를 채용했다. 전기절연재료는 2

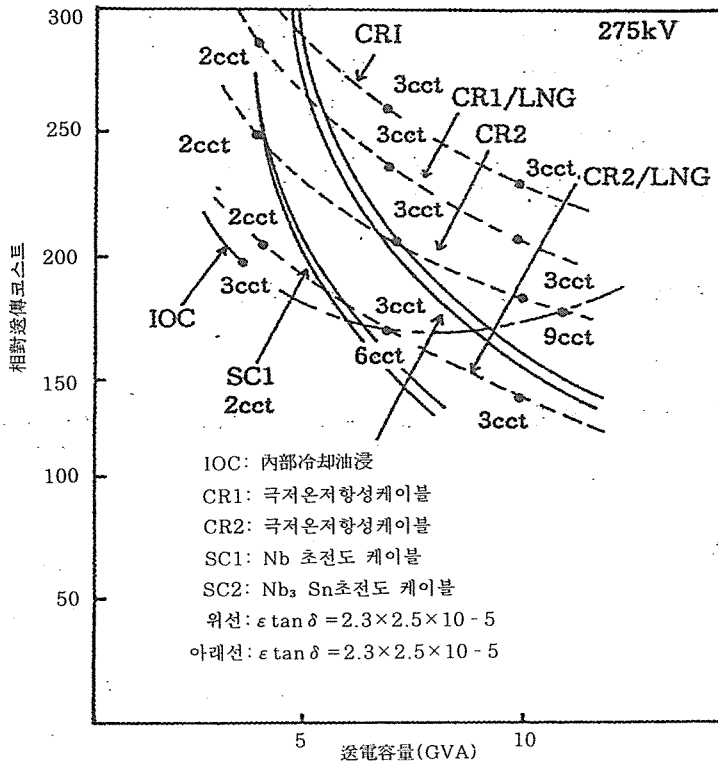
축연신 폴리프로필렌 테이프가 최적재료로 선정되어 액체 He 함침 절연으로 구성했다.

최근에는 Bi계 고온초전도선재의 장척화와 고임계전류밀도가 이루어지면서 초전도 케이블의 실용화를 목표로 경제성이 있는 고온초전도 케이블이 미국, 일본, 영국, 독일, 이태리 등지에서 본격화되고 있어 2050년에 700~1000km정도가 포설될 것으로 예상되고 있다. 일례로 일본 동경전력과 주우전공이 공동으로 개발중인 용량 66kV, 1kA 고온초전도 케이블의 경우 7m 시험 케이블에서 3상 교류통전시험에 성공하였으며 교류 66kV, 1000MVA, 길이 300m 외경 130mm의 케이블 시스템 개발을 목표로 진행중이다. 초전도 케이블의 도체는 Bi2223 다층 spiral 적층이며 폴리프로필렌지로 액체 N₂ 함침 절연구성을 했다.

한편, 국내의 경우는 한국전기연구소가 1986년부터 도체, 절연기술등 초전도 케이블의 요소기술을 개발하여 왔으며, 특히 1988년부터는 초전도 케이블의 전 단계인 극저온 저항 케이블 개발을 연구했다. 154kV, 800MVA급 극저온 저항 케이블을 진행하여 5m의 극저온 모의 시스템의 개발과 89kV, 3000A 통전시험에 성공했다. 또한 1994년부터는 Nb₃Sn를 사용하여 154kV, 3GVA급 초전도 케이블 개발을 진행중에 있으며 이와 병행하여 최근의 고온초전도 케이블에 대한 개념설계와 계통적용 방안 등을 연구하고 있다.

5. 경제성 분석

(그림 4)에 송전방식에 따른 송전용량과 송전



(그림 4) 송전코스트 비교

코스트의 비를 나타낸다. 교류 초전도 케이블에서는 Nb를 사용하는 경우가 Nb₃Sn의 경우보다 비용이 적게 든다. 이것은 재료비의 차이에 의한 것이나 Nb₃Sn의 경우가 교류손실이 작기 때문에 기술의 진보에 의해 Nb₃Sn의 비용이 Nb 수준이 되면 Nb₃Sn 케이블의 경우가 경제성이 높을 가능성이 있다. 종래의 대용량 OF 케이블인 내부 유압 케이블에 비해 초전도 케이블이 유리하게 되는 것은 500kv에서는 9GW 이상, 275kv에서는 6GW 이상이다. 직류 초전도 케이블이 가장 싸지만 AC-DC 컨버터의 비용을 고려하면 100km 이상의 긴 선로의 경우가 경제적이다. 초전도 케이블의 경제성을 개선하는 방법은 극저온에서 절연기술의 확립 및 이것을 지지하는 재료 개발이 요구되고 있다. 특히 고온 초전도체 케이블이 개발되면 액체 N₂를 사용하기 때문에 냉동기의 효율이 50배 정도 상승하여 냉각시의 손실이 경감되고 냉각 시스템이 간략화 되며 단열구조가 간단하고 설계가 용이하여 제작비용이 저감된다. 또한 액체 N₂의 열 용량이 액체 He의 약 3배이므로 냉각효과가 크기 때문에 동일한 송전용량을 송전하는 경우 냉각구간 길이를 크게 할 수 있고 저전압, 대전류화

에 의해 절연레벨의 저감 및 중간변전소가 생략될 수 있으며, 액체 N₂의 절연과괴강도가 액체 He의 약 2배 정도이므로 절연설계가 용이하여 경제적이다.

6. 결론

지금까지 초전도 케이블의 기본개념 및 기술동향에 대하여 간단히 서술하였다. 초전도 케이블은 성 에너지, 송전비용, 점유공간, 환경문제 등 여러 가지 면을 고려해 볼 때 대단히 획기적이고 매력 있는 송전방식인 것은 확실하다. 실용화에 대한 최대의 문제점은 초전도 재료에 따른 냉각문제일 것이다. 그러나 액체 N₂에서 초전도체가 발견됨에 따라 초전도 케이블의 개발은 가속화되어 2050년 경에는 실용화가 가능하리라 예상되고 있다.

이와 같은 점을 감안할 때 우리는 세계의 기술동향을 주시하면서 고온초전도체의 재료개발에 박차를 가하면서 기존의 금속계 초전도체로 가능한 초전도 케이블을 성공적으로 개발하여 경제성 있고 안정된 초전도 전력송전의 실현을 위해 지속적으로 최선을 다해야 할 것이다.

