

## 미국 고온초전도 연구개발 현황 및 계통적용

Edwin I. Hahn

New York Power Authority, Power Generation

### 1. 서 론

1911년 Dutch 과학자 Onnes가 액체 헬륨(He) 속에서 Mercury Compound (4K)가 모든 전기저항을 잃어버리는 초전도 현상을 발견했다. 그 후, 75년이 지난 1986에 Swiss IBM 과학자 Muller와 Bednorz가 35K, 고온 초전도 물질을 발견한 후, 급속히 발달하여 이제는 초전도 물질을 이용한 전기 제품이 실용화 단계에 이르렀다.

미국의 고온 초전도(HTS-High Temperature Superconductivity) 연구 개발사업은 한 마디로 말해서 DOE(Department of Energy; 에너지부) 주도 하에 일괄적으로 진행되고 있다. DOE는 1987년 초전도 물질의 우수성을 확신하고 그때부터 국가정책으로 강력하게 연구 개발을 추진하기 시작했다. DOE HTS 연구 개발 목표는 다음 셋으로 요약할 수 있다.

1. 현재 Copper 또는 Aluminum Wire 용량보다 100배 이상의 HTS Wire를 개발한다
2. HTS Wire를 이용하여 현재의 크기가 50% 정도의 전기 기기를 개발한다
3. HTS Wire를 이용하여 현재의 손실이 50% 줄어든 전기 기기를 개발한다

아울러 HTS Wire 가격 목표를 \$10/kA-m로 정했다 이 가격은 그 당시 Copper Wire 값과 대등한 것 이었다.

DOE는 1993년까지 HTS Wire 개발에 집중하였고 Strategic Partnership Initiative(SPI)라는 Program을 시작하면서 본격적으로 전기 기기 개발에 노력하게된다. SPI는 개발비용의 50%를 DOE가 제공하는 것이다. 이때 맺은 계약이 한류기, 모타, 발전기와 송전용 전선이었다. 그 뒤를 이어 1996에 2차 SPI Program

으로 변압기 (Waukesha와 ABB), Power Cable (Southwire와 Pirelli), Motor (Reliance), Flywheel (Boeing)과 Magnetic Separator (DuPont) 이었다. 2000년에는 총 5천7백만불로 3차 SPI Program 으로 다음과 같은 Projects를 선정하였다.

- a. Power Cable -138 kV, 800 m, 600 A, LIPA, NY 개발업체-Nexans와 ASC
- b. Power Cable -13.8 kV, 300 m, 2,500 A, AEP, OH 개발업체-Ultera와 ASC
- c. Power Transformer-30/60 MVA 개발업체-Waukesha와 SuperPower-IGC
- d. HTS Generator-100 MVA, 개발업체-GE, ASC, NYSERDA
- e. HTS Flywheel- Boeing
- f. HTS Magnetic Separator-DuPont
- g. HTS MRI Coil-Oxford

DOE HTS 연구 개발에는 전 미국 국립 연구소와 유명 대학 연구기관들이 다수 참여하는 국가적 과제로 추진되고있다.(Fig.1 참조)

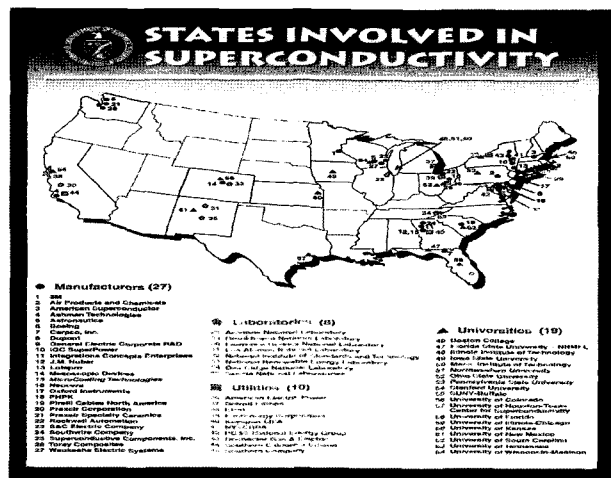


Fig. 1 States involved in superconductivity in US

## 2. 미국의 초전도 선재 개발 현황

초전도 선재는 크게 1세대 선재(Bi-2223 wire)와 2세대 선재(Coated Conductor-YBCO)로 구분할 수 있다.

1세대 선재는 Bi-2223로 Powder-in-Tube(PIT) 공법을 사용하며 현재 상업화되었으며 AMSC 사(American Superconductor)가 대량 생산하고 있다. AMSC 외에 Fujikura, Sumitomo, NST, Vacuumschmoltz에서 생산하고 있다. 특히 AMSC Devens 공장은 년 20,000 km까지 생산할 수 있는 최신 설비를 갖추고 있다 (Fig. 2 참조).

현재 Bi-2223 선재의  $I_c$  는 평균 170 A 이며 현재 HTS Power Cable에 응용되고 있지만 그 가격이 비싼 것이 문제이다. 현재 가격은 대략 \$200/kA-m이다.

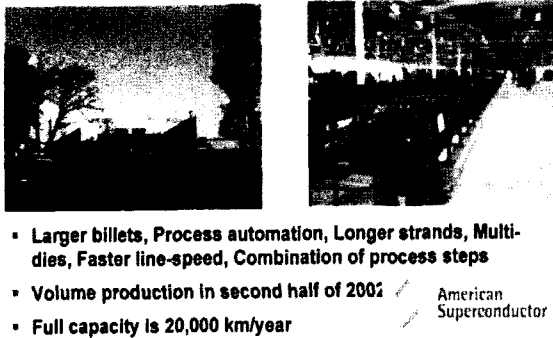


Fig. 2. Devens HTS wire manufacturing plant of AMSC

2세대 선재는 Coated Conductor로 YBCO-123을 재료로 하며 생산 공정에 따라 RABiTS, IBAD, 그리고 ISD로 구분되며 Substrate Preparation 방법에 따라 PLD, MOCVD, MOD, CVD등 여러 방식이 있다. 2세대 선재는 1세대와 달리 가격 면에서 경쟁력이 있으며 완전 개발되면 모든 면에서 1세대보다 우수한 점이 많다. 그래서 지금 미국에서는 2세대 선재 개발에 총력을 기울이고 있다. 그러나, 현재 개발속도로 보아서 2005후에나 실용 가능 할 것으로 기대되고 있다. 그 틈새를 노리고 등장한 것이 2001년에 발견된 Magnesium DiBoride(MgB2)이다 (Fig. 3 참조). 저렴한 가격과 대량 생산이 가능하기 때문이다. 아직까지는 전기 기기에 사용된 예는 없다. 그러나, 가능성은 열려있다.

## 3. 미국의 초전도 전력 케이블 개발 현황

아마도 초전도 전기 기기 중에서 전력 케이블이 제일 먼저 상용화되리라고 생각된다. 환경문제와 토지수용문제로 가공선로를 건설하는데 한계에 도달하였고, 현재 실용화된

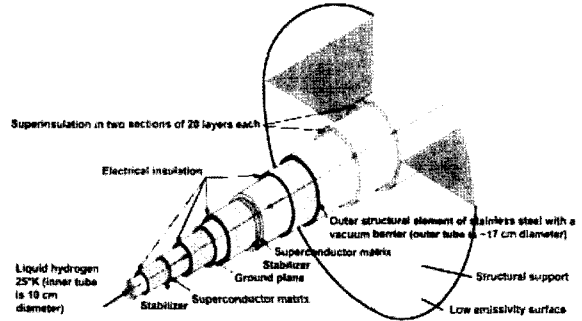
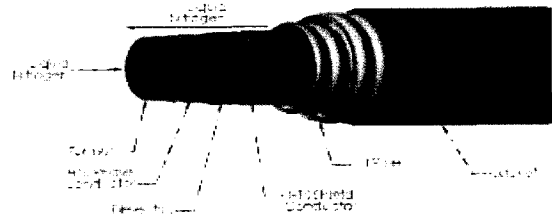


Fig. 3. Design of MgB2 DC superconducting transmission line in evacuated pipe

OF나 XLPE Power Cable로는 송전용량에 한계가 있기 때문이다. 특히 대도시 근처에서는 지중선 외에는 다른 방법이 없기 때문이다. HTS Power Cable은 여러 면에서 우수한 장점을 가지고 있다. 송전 용량을 5배 이상 증가시키며, 손실이 거의 없고, 환경 친화적이고, EMF 문제가 없으며, 주위온도와 환경에 영향 없이 운전 할 수 있다

Southwire와 Pirelli를 중심으로 개발 추진된 미국의 초전도 전력 케이블 연구 개발사업은 비록 Pirelli Cable의 실패 속에서도 상당한 발전을 이루었다.



### COLD Dielectric Design

- Single cryostat
- No external magnetic field
- Lowest ohmic losses
- Return N2 pipe not required
- Higher capacity

Fig. 4. Cold dielectric cable design of Southwire

Southwire는 12.5 kV, 1250 A, 30 m를 2000년 1월부터 시운전하여 지금까지 무사고 운전함으로서 HTS Cable의 가능성을 높이 보여 주고 있다(Fig. 4, 5 참조). 계속하여 Southwire는 3상동축(Fig. 6, 7 참조), 13.8 kV, 2500 A, 300 m를 개발하여 AEP Bixby 변전소에 2005년까지 설치하려고 준비중에 있다. 실험용 1 m Cable에는 2세대 YBCO Coated Conductor가 쓰여질 예정이다.

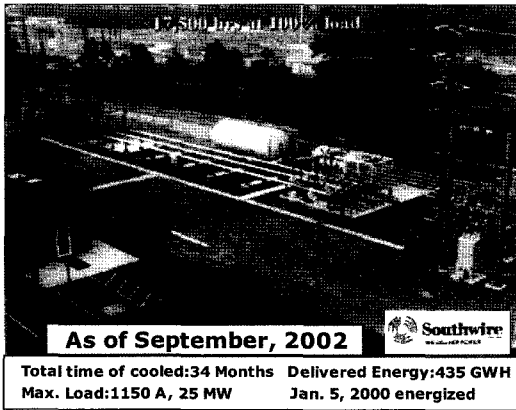
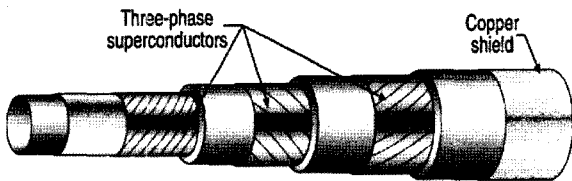


Fig. 5. HTS cable test site of Southwire



- Single or 3-phase cable constructions.
- Tapes wrapped helically around central core (25-36mm former).
- Stress/strain requirements of stranding, installation & cool-down.
- Moderate c-axis compression due to (1) outer cable layers, and (2) side-wall-bearing pressure from installation.
- Cables must be flexible for commercial applications.
- Expect multiple thermal cycles during life (30-40 yrs) of cable.

Fig. 6. HTS cable of ULTERA(South-wire/NKT)

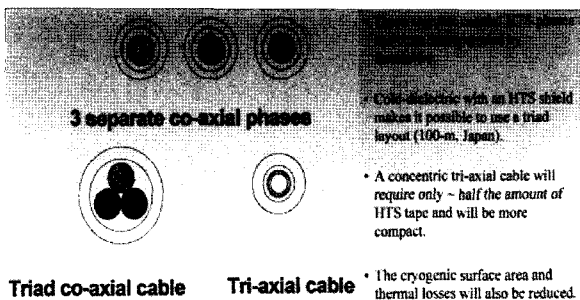


Fig. 7 HTS cable Configurations  
Pirelli는 24 kV, 1200 A, 120 m를 개발하

여(Fig 8, 9 참조), Detroit 시내 Frisbie 변전소에 설치하였지만(Fig. 10, 11 참조), 설치 후 시험중 Cryostat에서 Vacuum Leak가 발견되어 시운전을 포기해야만 했다. 비록 시운전은 못했지만 HTS Power Cable의 가능성을 보여 주었고 많은 것을 배울 수 있었다.

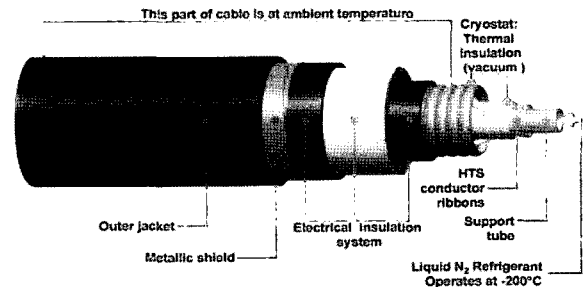


Fig. 8. WD Cable Construction - Pirelli Design

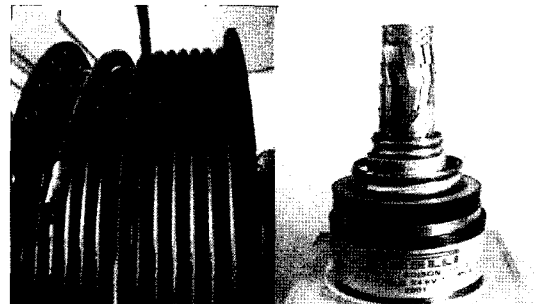


Fig. 9. Pirelli cables

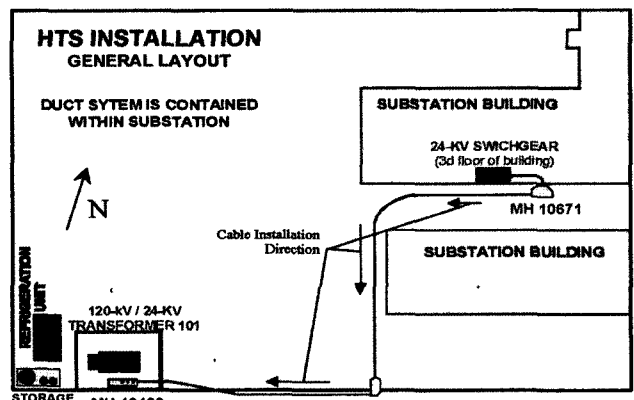


Fig. 10. Cable Site Layout

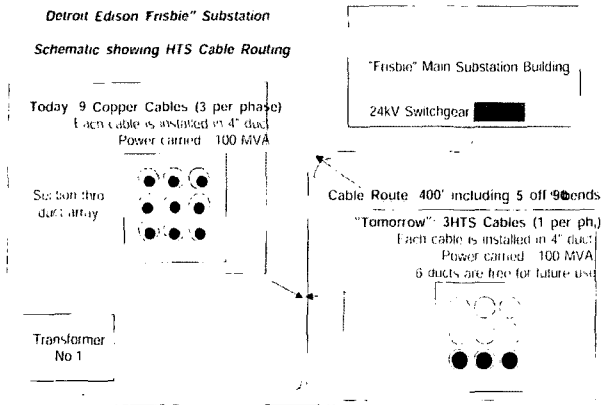


Fig. 11. Schematic showing HTS cable routing at the Detroit Edison Frisbie Substation

IGC-Superpower는 Sumitomo와 함께 34.5 kV, 1200 A, 400 m을 개발하여 2005년까지 Albany, New York에 가공선의 일부로 Highway Crossing에 적용하려고 한다(Fig.12 참조). 지금까지는 가공선과 지중선은 대개 1:4 비율 즉 가공선 하나에, 지중선 4개가 필요했다. 이 Cable에도 2세대 YBCO가 쓰여질 계획이다.

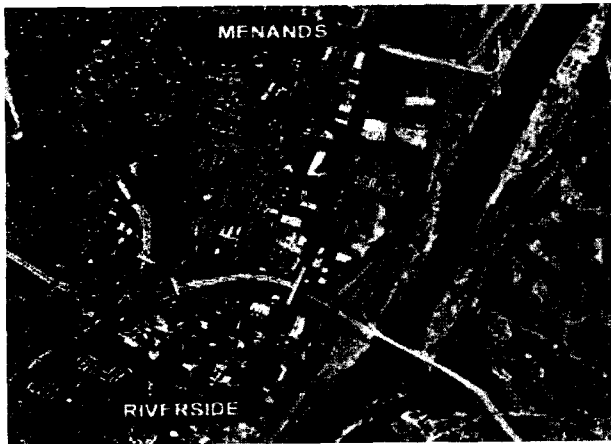


Fig. 12. IGC Albany HTS project

HTS Power Cable Design에는 두 가지 설계방식이 있다(Fig. 13 참조). Warm Dielectric(WD)과 Cold Dielectric(CD) Design이 있다.

WD는 전기 절연 물질이 액체 질소 밖에 있으며, CD는 전기절연 물질이 그 안에 있는 것을 말한다. 전기적 성질로 보아서 WD는 POF Cable을 대체 할 수 있으며, CD는 OF Cable과 대체할 수 있다.

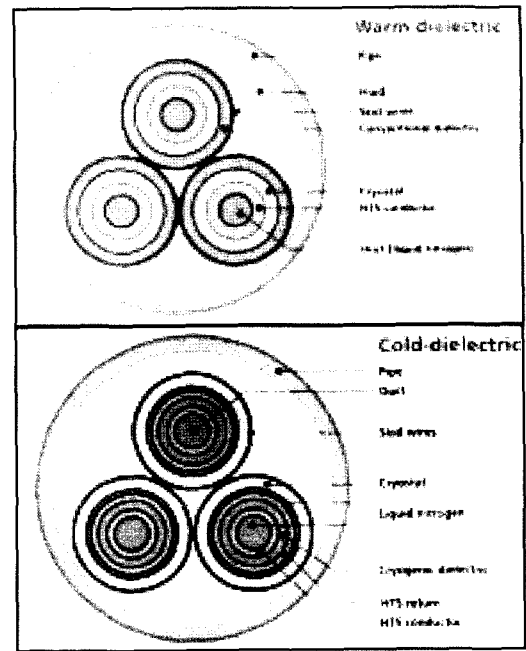


Fig. 13. warm dielectric and cold dielectric cable

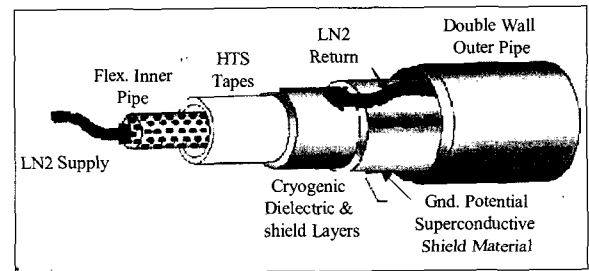


Fig. 14. Cable Cross Sectional View

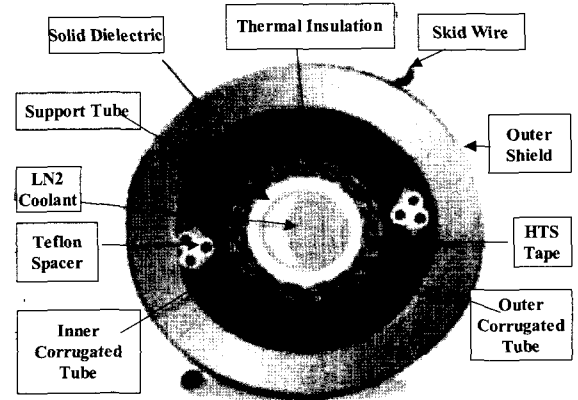


Fig. 15. Warm Dielectric Cable Design - Pirelli

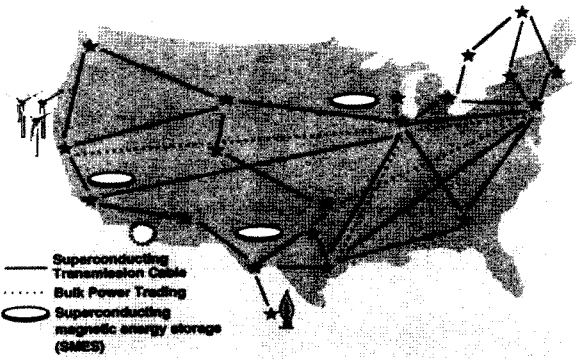


Fig. 16 Superconducting Superhighway

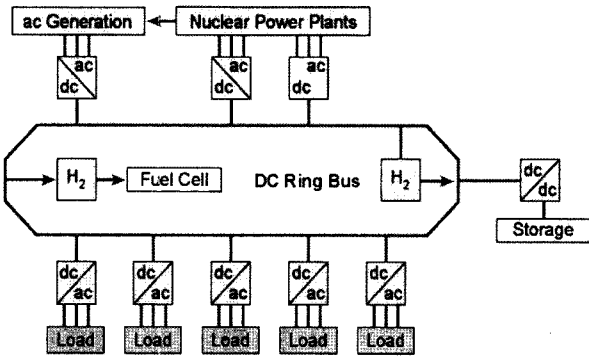
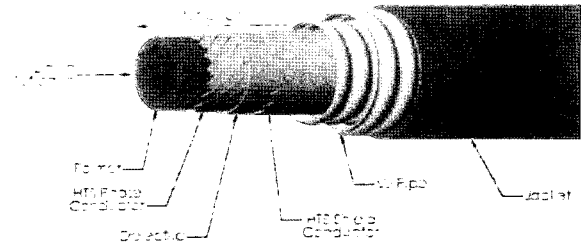
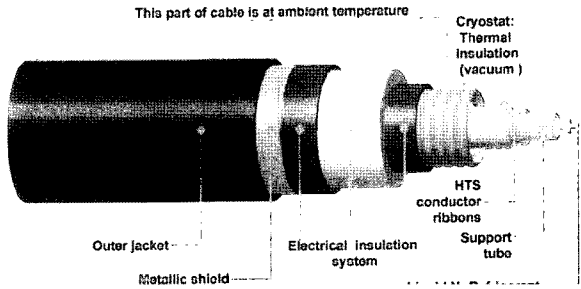


Fig. 17 Continental SuperGrid

Southwire(Fig.14 참조)는 CD를 Pirelli(Fig.15 참조)는 WD를 적용했다. 이외에도 계통적용 연구가 많이 진행되고 있으며, Super-Grid Application이 연구되고 있다. Super-Grid는 HTS DC Cable을 이용하여 미국 전국을 하나의 계통구조로 만드는 것이다. 이론적으로 가능하고 많은 장점과 혜택이 있지만 방대한 사업으로 30-40년 후를 기대해야 한다(Fig. 16, 17 참조)



(b) Southwire Cable, 12.5kV, 1250 A



(c) Pirelli Cable, 24 kV, 1200 A

Fig. 18 Comparison of HTSC cables of KERI-LG, Southwire, and Pirelli

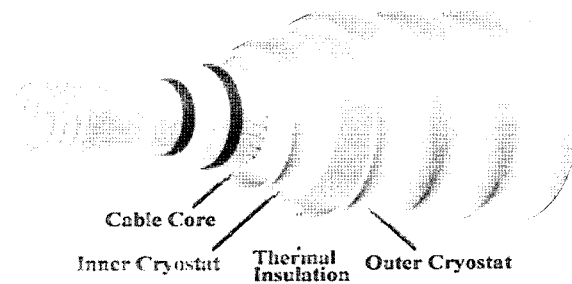
#### 4. 맺음말

현재 미국의 초전도 업계는 2세대 Coated Conductor 개발과 그것을 이용하는 전기 기기 개발로 요약 할 수 있으며, 1세대 Bi-2223 를 이용한 Power Cable 상용화 개발을 중요한 연구과제로 삼고 있다. 일단 2세대 Coated Conductor YBCO 개발이 끝나면 모든 전기 기기 응용 기술의 비약적인 발전이 예상된다. 초전도 기기의 개발 분야에서 한국은 크게 뒤떨어지지 않았다고 생각된다(Fig. 18 참조). 미국을 비롯한 선진국을 충분히 따라 갈 수 있다고 확신한다.

#### 저자이력



**Edwin I. Hahn**  
 1967년 서울대 전기공학과 졸업, 1967년 한영공업 (현 효성 전기), 1970년 New Jersey institute of technology (공학석사), 1971~1976년 AEP Power Plant Engineering, 1976~현재 New York Power Authority



(a) KERI-LG Cable, 22.9 kV, 1300 A