

**고온 초전도 케이블 시스템 설치 및 운영을 위한 연구**

최형식, 손송호, 황시돌

한국전력공사 전력연구원

**Research for Installation and Operation of High Temperature Superconducting Cable System**

Choi Hyungsik, Sohn Songho, Hwang Sidole  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - The commercial contract was made firstly in the world for one set of high temperature superconducting(HTS) cable system between buyer, Korea Electric Power Research Institute and seller, Sumitomo Electric Industries, Ltd. in August 2004. After fabrication, test and examination, the HTS cable system will be installed at the KEPRI's test field in Gochang, Jeonbuk province from the time of July 2005. KEPRI is preparing measurement and test facilities for field test of the HTS cable system and carrying out researches into the design and construction of superconducting cable test building, evaluation of cooling performance, measurement of AC loss, analysis of the quench phenomena due to excess current and means of linking the HTS cable system to the existing electric power supplying system. The constitution of, the method to install and the plan of test operation of the HTS cable system will be presented in this paper.

**1. 서 론**

Cryostat(저온용기)에 내장된 22.9kV급 초전도 케이블 3φ 1회선(100m)이 본 연구에서 상정한 1250A, 50MVA를 상시 공급할 수 있음이 실증되면 전력계통 구성에 상당한 변화를 초래할 것이다. 기존의 175mm ELP관에다 지중 배전선로의 간선인 CNCV 케이블 325mm 대신 외경 130mm의 초전도케이블을 삽입함으로써 지하공간을 추가 확보하지 않고도 5배의 전력을 공급할 수 있기 때문이다. 앞으로 초전도케이블의 정격전류를 증가시키고 나아가 본 연구진의 차기 목표인 154kV급 초전도케이블을 개발한다면 22.9-154 - 345 - 765kV로 이루어지는 현 전압계통에서 도시지역의 지중 345kV 계통 확충필요가 상당 부분 감소하리라 예상되며 그에 따라 지난한 지하공간 확보업무가 경감되고 계통 절연비용도 크게 저감될 것이다.

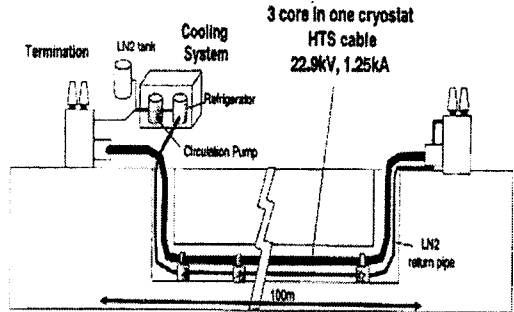
**2. 본 론**

**2.1 고온초전도케이블의 특징**

초전도케이블은 극저온 용기 내부에서 전기저항이 0에 가까워져 저전압 대전류 송전을 할 수 있는 특별한 장점을 지녔다. 따라서 위 서론에서 언급한 바와 같이 절연비용이 큰 고전압 지중계통을 대체할 수 있다는 전망을 가능케 한다. 그러나 액체헬륨이나 액체질소 등의 냉매

를 지속적으로 케이블 내부로 흘려 극저온 환경을 만들어 주어야 초전도 현상이 나타나기 때문에 이를 위하여 냉매 공급, 순환 및 온도유지 설비가 필요하게 되고 그에 따라 적지 않은 비용이 발생한다. 앞으로 초전도케이블 제작비용과 더불어 여하히 냉각비용 및 냉각손실을 감소시키느냐에 고온초전도케이블시스템 현장적용 성공 여부가 달려 있는 것이다.

**2.2 고온초전도케이블시스템 개요**



(그림1. 고온초전도케이블시스템 개략도)

가. 그림1.에서 전력은 전원측 단말장치(좌측 Termination) → 초전도케이블(굵은 선) → 부하측 단말장치(우측 Termination)으로 공급되고 나. 액체질소는 LN<sub>2</sub> 탱크 → Cooling System → 전원측 단말장치 → 초전도케이블 내부 → 부하측 단말장치 → LN<sub>2</sub> return pipe → Cooling System → 전원측 단말장치.....로 순환된다.

**2.3 구성 품목**

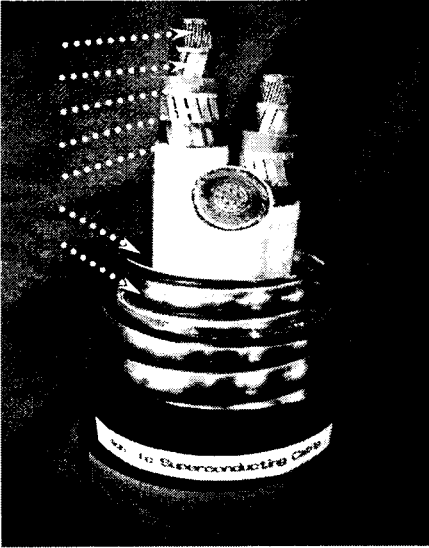
**2.3.1 고온초전도케이블**

**2.3.1.1 정격**

- 가. 송전능력 : (22.9 kV, 1250A) 50MVA
- 나. 허용고장전류 : 25kA, 5cycle
- 다. 허용곡률반경 : 5m
- 라. 제작 길이 : 100m

### 2.3.1.2 구조

그림 2에서 보는 바와 같이 cable core와 스테인레스파이프 사이로 액체 질소가 흘러 냉각을 함으로써 Bi-2223 tape이 초전도현상을 유지하게 된다. 그리고 만약 고장이 발생하여 초전도현상이 깨지는(퀵치현상이라고한다) 경우에는 Former를 통해 고장전류를 흐르게 함으로써 초전도체, 절연체 등을 보호한다.



(그림2. 고온초전도체케이블 구조 및 규격)

- ① Former(동연선, 직경 16mm)
- ② 초전도체(Bi-2223 tape, 2 layer,  
number of tapes : 23)
- ③ PPLP(전기절연체, 두께 4.5mm)
- ④ 초전도 차폐(Bi-2223 tape, 1 layer,  
number of tapes : 19)
- ⑤ 동차폐
- ⑥ LN<sub>2</sub> 통로
- ⑦ Cryostat (파형 스테인레스 파이프,  
thermal insulation)
- ▶ 케이블 외경 : 130mm
- ▶ 1φ 직경 : 35mm

### 2.3.2 단말장치(Termination)

단말장치는 외부의 상온 도체(동, 알루미늄 케이블, 기타)와 내부 극저온 하의 초전도체를 Current Lead로 연결하는 기기로서 상온 도체로부터 joule열과 전도열이 내부 LN<sub>2</sub> chamber 속으로 침투하여 초전도체케이블시스템 중 열손실이 가장 많이 발생하는 부위이기도 하다. 따라서 전기 전도도는 높이고 열 전도도는 낮추는 최적의 Current Lead를 제작하여 열손실을 최소화하도록 하였다. (단말장치 대당 열손실 0.6kW)

### 2.3.3 냉각설비

액체질소 공급, 순환, 기타 저온유지 설비들의 기능에 대하여 아래와 같이 설명하고자 한다.

(그림 3 참조)

#### 2.3.3.1 LN<sub>2</sub> 탱크

당초 LN<sub>2</sub> 탱크 10ton용 1대를 고창시험장에 설치코자 하였으나 고압가스안전관리법 적용 문제와 본 설비가 한시적 연구설비인 점 등을 감안하여 5ton용 1대를 설치하되 LN<sub>2</sub> 주입주기를 주 1회에서 주 2회로 늘리기로 하였다. LN<sub>2</sub> 탱크에서 공급되는 액체질소의 온도는 77K이다.

#### 2.3.3.2 냉동기

당초에 소비전력 11kW의 냉동기 3대를 그림 3의 LN<sub>2</sub> 용기에 연결, 가동하는 closed loop 냉각방식을 채택하려고 하였으나 역시 한시적 연구설비인 점을 감안하여 냉동기 설치를 생략하는 open loop 냉각방식(그림3의 배기펌프(Decompression unit)를 통하여 질소가스를 대기로 방출하는 방식)으로 변경하였다. 본 연구설비 사용기간을 최장 3년으로 간주, open loop방식과 closed loop방식에 대하여 경제성 비교를 한 결과, open loop의 LN<sub>2</sub> 주입비용 305,100,000원, closed loop의 냉동기 구입 및 전력요금 365,325,000원으로 전자가 더 유리하였다.(냉동기 보수비용은 무시하였다) 다만, 이 비용들은 상업운전 고온초전도케이블에 확대 적용할 근거는 되지 못한다. 따라서, 앞으로 본 시스템 시운전 기간 중에 도심지 지중계통에 투입되는 초전도케이블을 모델링하여 건설비용, 냉각비용 및 전기료 수익금액 등을 산출, 종합적인 경제성 분석을 시행할 예정이다.

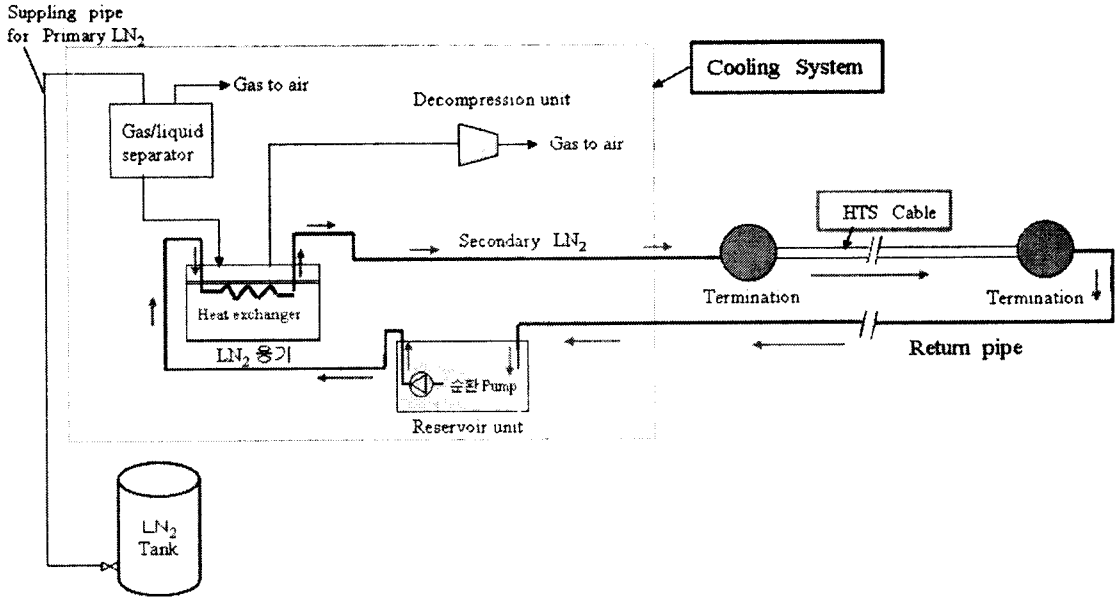
#### 2.3.3.3 기체/액체분리기(Gas/Liquid separator)

LN<sub>2</sub> 탱크에서 77K의 액체질소가 배출되지만 연결된 배관이 상온이기 때문에 액체질소는 배관 내부를 냉각시키면서 기화한다. 그에 따라 기체와 액체가 혼합된 상태가 되면서 온도도 77K보다 높아지고 배관 내부 압력 또한 1기압보다 높아진다. 기체/액체 분리기는 위와 같은 상태의 질소에서 기체와 액체를 분리시키고 압력도 1기압으로 낮추어 77K의 액체질소가 LN<sub>2</sub> 용기로 들어가게 하기 위하여 필요한 것이다.

#### 2.3.3.4 LN<sub>2</sub> 용기(Sub-cooler) 및 배기펌프(Decompression unit)

77K의 액체질소가 LN<sub>2</sub> 용기 내부로 공급이 되면 배기펌프로 감압(Decompression)을 하여 질소가스를 배출함으로써 액체질소의 온도를 70K까지 떨어뜨린다(감압냉각). 그림3의 LN<sub>2</sub> 용기 내부에 들어 있는 액체질소는 이와 같이 과냉각(sub-cooling) 상태를 나타낸다. 그래서 LN<sub>2</sub> 용기를 일명 sub-cooler(과냉각기)라고도 한다.

\*이상의 냉각계통, 즉, LN<sub>2</sub> 탱크 → 기체/액체 분리기 → LN<sub>2</sub> 용기 → 배기펌프를 1차 계통(Primary LN<sub>2</sub>)이라고 한다. 열교환기(Heat exchanger) → 초전도케이블 → Reservoir unit → 순환펌프 → 열교환기의 loop는 2차 계통(Secondary LN<sub>2</sub>)이라고 한다.



(그림 3. Open loop 방식 냉각설비 배치도)

### 2.3.3.5 Reservoir unit (return LN2 저장조)

단말장치와 초전도 케이블 내부를 냉각시킨 후 return pipe를 통해 귀환하는 액체질소는 온도가 약 74K 정도로 높아져서 Reservoir unit로 들어온다.

### 2.3.3.6 순환펌프 (임계기압펌프)

순환펌프는 Reservoir unit로 들어온 액체질소를 5기압으로 가압하여 열교환기로 보낸다.

### 2.3.3.7 열교환기 (Heat exchanger)

5기압의 액체질소는 열교환기를 관통하면서 LN2 용기 내의 70K 액체질소와 열 교환을 한 후 전원측 단말장치로 들어간다. (전원측 단말장치 입구의 액체질소 온도는 71K 정도가 된다)

### 2.3.3.8 기타 배관, 밸브, 냉각설비 운전, 제어, 측정 및 감시 설비 1set

## 2.4 시스템 시험

Sumitomo 오사카 공장에서 2회에 걸쳐 고온초전도 케이블에 대한 검수시험을 한 결과는 아래와 같다.

### 가. 임계전류

1) 임계전류 정의값 : 초전도현상이 유지되는 범위 내에서의 최대전류  $I_c$ 는  $1\mu V/cm$ 를 유지하는 전류(시료의 길이가 5m였으므로  $500\mu V$ 를 유지하는 전류)이다.

2) 설계 : 임계전류 (72K) > 1768A  
(=DC 1250A × 1.414)

3) 측정결과 :  $I_c = 1800A$

나. 교류손실 측정 : 전류 1000A에서 1.18W/m

### 다. 전압시험

- 1) 교류 내전압 시험 : 45kV for 1 hour, 양호
- 2) 뇌임펄스 내전압 시험 : Imp. ±150kV, 10shots, 양호

## 2.5 운반

고온초전도케이블시스템 운반 중 발생할 수 있는 충격을 피하기 위하여 Air Suspension trailer를 사용하고 또한 진동측정장치도 부착토록 하였다. 운반과정은 다음과 같다.

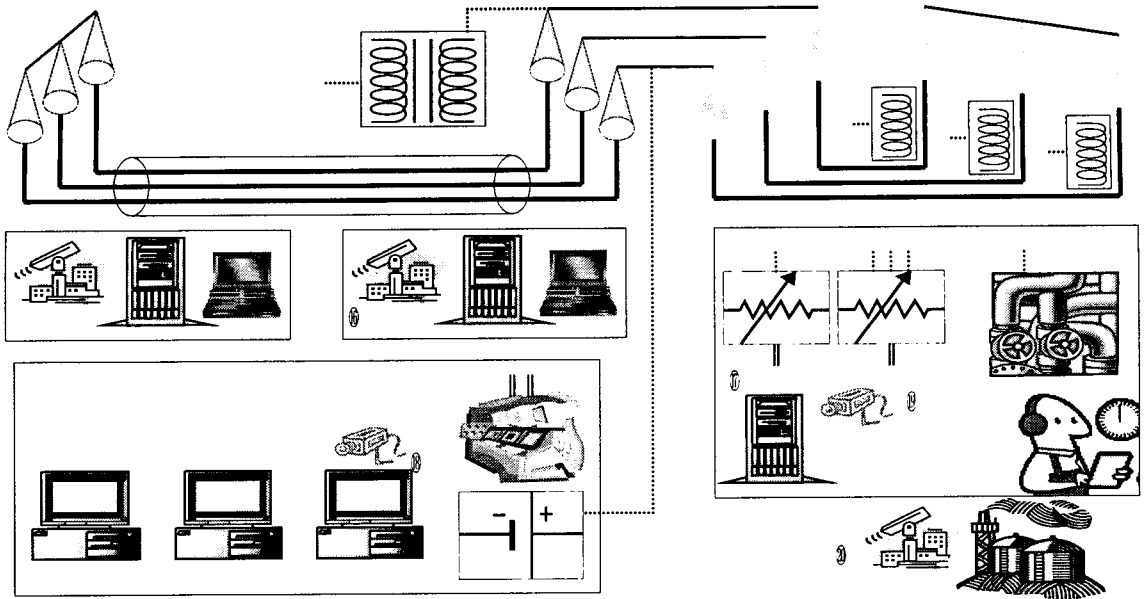
운반회사의 Air suspension trailer 2대(공차) → 부산항 → on car ferry → 일본 오사카항 → SUMITOMO 오사카 공장 → 초전도케이블시스템 1식 load → 오사카항 → on car ferry → 부산항 → 고창 시험장 unload

\* 당초 케이블과 냉각설비를 구분하여 운반코저 하였으나 본 시스템이 연구 설비로서 관세(1.6억원)를 면제받도록 하기 위하여 시스템 일괄 운반으로 계획을 수정하였다.

## 2.6 설치

본 고온초전도케이블시스템을 설치함에 있어 납품자와 구매자 간의 책임 한계는 다음과 같다.

Sumitomo : 초전도 케이블, 단말장치, 냉각설비, 냉각설비 운전, 제어, 계측장치 설치 및 연결  
전력연구원 : 초전도 시험동 건설, LN2 탱크 설치, 냉각설비 수용 가건물 설치, 배관용 덕트 시공, 초전도케이블 관로 매설, 단말장치 기초대 설치, 시스템 제어, 모니터 장치, 시험설비(교류전류원, 교류전압원, 직류전원 등) 설치 및 연결(그림4. 시험, 제어 및 감시설비 배치도 참조)



배전급 초전도전력케이블

제어실

액체질소 탱크

냉각설비실

냉각설비

⑥ AC Current Lead

교류전압원 고전압 변압기

교류전압원 전압조정기

교류전류원 변류기

교류전압원 전류조정기

교류전압원 전류원 제어반

직류전류원

측정제어회로 주제어반

측정제어회로 보조제어반

남측단말 측정제어반

① 북측단말 측정제어반

② 냉각설비실 측정제어반

③ 감시회로 주제어반 및 카메라

④ 냉각설비실 감시용 카메라

⑤ LN<sub>2</sub> 탱크용 감시카메라

(그림4. 시험, 제어 및 감시설비 배치도)

2.6.1 시험동

기존 배전시험동 옆에 초전도 시험동을 건설하였다.(건물 준공일자 2005.5.7) 그 내부에 초전도케이블시스템 운전, 제어, 감시장치 및 시험용 설비들을 위 그림과 같이 배치할 예정이다. 그리고 현재 개발 중인 고온초전도 한류기의 시험실을 본 시험동 안에 마련함으로써 전력계통에 조기 투입을 유도하는 한편 초전도케이블시스템과의 연계운전도 검토하고자 한다. 나아가 향후 초전도 변압기를 개발하여 전 계통을 초전도화함으로써 냉각설비 경제적 활용으로 초전도 전력계통의 장점을 극대화하는 장기계획수립의 산실로 본 시험동을 활용코자 한다.

2.6.2 냉각설비

LN<sub>2</sub> 탱크와 전원측 단말장치 사이에 7.5×5×4m 규모의 냉각설비 수용 공간물을 건설 중에 있으며 그 안에 그림 3의 Cooling System(LN<sub>2</sub> 용기, 열교환기, Reservoir unit, 순환펌프, 기체/액체분리기, 배기펌프 등)을 배치할 예정이다. 그리고 냉각설비들을 연결하는 액체질소 공급 pipe 및 return pipe 설치를 위하여 평균 500×600mm 규모의 덕트 공사를 145m 완료하였다.

(기타사항 2.3.3 냉각설비 참조)

2.6.3 초전도 케이블

신축 초전도 시험동과 기존 배전 시험동 전면부 지하에

길이 55m의 전력구가 있다. 이 전력구 벽면에 22.9kV 시험용 배전선로와 배전시험동 공급 전원이 설치되어 있는데 그 중간 부분에 각 선로와 0.6m의 이격거리가 유지되도록 초전도케이블을 설치할 예정이다. 초전도케이블의 전력구 인입, 인출 및 지상 노출 개소의 케이블 굴곡을 수평각 27° 이내로 유지하기 위하여 PVC관을 제작, 매립하였다. 지상 노출 부분부터 단말장치까지의 초전도케이블 지지를 위하여 현재 특수 지지대를 제작 중에 있다. 그리고 직사광선 차단과 전시를 목적으로 초전도케이블 주변에 지붕을 설치하든가 또는 케이블 상부에 투명판을 덮을 예정이다.

2.6.4 단말장치(Termination)

단말장치는 16×10m 넓이의 기초대 위에 설치하게 되는데 기초대 상면에는 단말장치 하부에 부착된 바퀴를 굴릴 수 있도록 레일을 깔 예정이다. 또한 작업자들이 기초대 위에서 초전도체와 Current Lead 연결, Cryostat과 액체질소 chamber 연결, 기타 단말장치 부품조립 등의 작업들을 안전하고 신속하게 수행할 수 있도록 하기 위하여 12.5×3×3.5m 규모의 비계를 설치하고 비계의 천정 부분에 chain blocks, trolleys와 단말장치 부품들을 걸고 운반할 수 있는 hanging rails를 설치할 예정이다. 그리고 비바람과 먼지등을 막아 청결한 작업환경이 되도록

록 비계 외부를 타르 칠한 방수천으로 씌울 예정이다.

### 2.7 시운전을 위한 준비사항

고온초전도케이블시스템 시운전을 위하여 전원설비와 각종 시험, 측정, 제어, 감시설비들을 구비하여야 한다. 여기에 전원설비와 대표적인 시험설비 및 설치방법을 소개하고 기타 준비사항에 대하여 언급하고자 한다.

#### 2.7.1 전원설비

초전도시험동과 고온초전도 케이블시스템에 전력을 공급할 전원설비를 신축 초전도시험동 옆에 설치 완료하였다. 전원설비(Tr.) 규격 및 용량: 3φ 22.9kV/ 220,380V 950kVA 1대

#### 2.7.2 시험설비

##### 2.7.2.1 교류전류원변류기(그림 4의 ㉑)

가. 규격: 단상 60Hz 110V 3000A 330kVA  
(연속정격)× 3set

(시험 최대전류 > 정격전류 1250A × 2배)  
나. 설치방법: 각 상별로 600mm 이상의 동케이블 2가닥을 전원측 단말장치 도체 인출봉에 연결한 후 부하측 단말 장치 도체 인출봉은 전원측과 동일 규격의 동케이블로 삼상 단락시킨다.

다. 설치 위치: 전원측 단말장치 옆 (기초대 위)

##### 2.7.2.2 교류전압원 고전압변압기(그림4의 ㉒)

가. 규격: 단상 60Hz 100kV 1.5A/ 50kV 3A  
150kVA(연속정격) × 1set  
(장시간 시험전압 > 13.2kV × 3배,  
1시간 시험전압 > 80kV )

나. 설치방법: 변압기 단자와 전원측 단말장치의 피시험 상 도체인출봉을 편조선으로 연결  
다. 설치 위치: 전원측 단말장치 옆 (기초대 위)

##### 2.7.2.3 직류전류원(그림4의 ㉓)

(초전도케이블 임계전류 측정용)  
가. 규격: 단상 12V 3000A 36kVA (연속정격) × 1set  
(시험 최대전류 > 1250A ×  $\sqrt{2}$  × 150%)  
나. 설치방법: 600mm 이상의 동도체 절연 케이블 2가닥을 단말장치 피시험 상 도체인출봉에 연결  
다. 설치 위치: 초전도 시험동 제어실 내

##### 2.7.2.4 제어, 감시설비: 그림 4. 참조

#### 2.7.3 기타 준비사항

안정적으로 액체질소를 공급해 줄 수 있는 시험장 인근 gas회사를 물색하여 계약을 추진하고 있으며 시험기간 중 시험장에 상주할 수 있는 인력을 확보하여 교육을 시행 중에 있다. 그 외에도 SUMITOMO 작업자들에 대한 지원사항, 시스템 설치 완료 후 준공 인수 시 착안사항들에 대하여 면밀히 검토하고 있다.

#### 2.8 진행 중인 연구내용 요약

연구기관별 진행 중인 연구내용을 요약 소개한다.

- 가. 한국전력 전력연구원
- 1) 고온초전도케이블시스템 설치 및 운전을 위한 연구 총괄
- 2) 고온초전도케이블시스템 규격 확정 및 구배
- 3) 초전도 시험동 건설
- 4) 고온초전도케이블시스템 시험설비 및 측정장비 구입

- 5) 초전도케이블의 퀸치현상, 과전류, 과전압 대책
- 6) 고온초전도케이블시스템과 초전도 환류기 연동 방안

#### 나. 한국전기연구원

- 1) 고온초전도케이블시스템 설치 설계 및 감리
- 2) 고온초전도케이블시스템 시험, 측정 및 감시장비 규격 제시
- 3) 고온초전도케이블시스템 설치를 위한 특수 기기 및 공법개발

다. 한국기초과학지원연구원 : 고온초전도케이블시스템 냉각성능 평가기준 확립

라. 전남대학교 : 고온초전도케이블 교류손실 평가기술 개발

마. 전북대학교 : 고온초전도케이블의 과전류현상 분석

바. 충북과학대학 : 고온초전도케이블시스템의 계통연계 기술개발

### 3. 결 론

2.3.3.2(냉동기)에서 언급한대로 고온 초전도케이블 시스템에 대한 경제성 검토 시에 도심지 복잡계통을 모델링하여 종합적인 분석(전기적 안전성, 경제성, 기타)을 시행함으로써 초전도케이블이 대용량 지중배전선로서 적합한가의 여부를 밝히려고 한다. 나아가 차기 과제인 154kV급 초전도케이블의 기존 송전선로(154, 345kV급) 대체방안 연구를 준비하고자 한다. 최근 XLPE 절연성능 향상으로 단면적 2500mm<sup>2</sup> 이상의 345kV급 대전류 송전케이블이 개발되어 최선당 1GW 공급시대를 앞당길 전망이다. 그러나 1GW의 전력을 공급할 케이블로서는 154kV급 3.75kA, 3상 일팔 직경 150mm의 고온초전도케이블이 경제적인 연구보고서가 있다.(참고문헌 3). 서두에서 밝힌 바와 같이 초전도케이블이 지하에서 차지하는 공간이 XLPE케이블의 1/5 수준 이하로까지 축소되기 때문이다. 물론, 도심지 지하공간 효율적 활용과 저전압 대전류 송전 및 송전손실 최소화 관점에서만 초전도케이블의 우수성을 강조하기 전에 여하히 냉각운전비용과 냉각설비 부피를 최소화하느냐가 급선무임을 본 연구담당자들은 잘 인식하고 있다. 따라서 전력계통의 모든 기기들을 초전도화하여 냉각설비를 경제적으로 활용하면서 한편으로 설비가격 및 부피 최소화를 유도하여야 위와 같은 초전도케이블의 장점이 극대화될 수 있을 것으로 앞으로도 계속 초전도 분야 전문가들의 적극적인 협조를 구하고자 한다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 김동락 외, "고온초전도케이블 Termination을 위한 Current Lead 설계를 위한 변수고찰", 한국초전도·저온공학회 논문집, 5권 1호, P107, 2003
- [2] 김종용 외, "전력회사 계통에 22kV급 초전도케이블 도입을 위한 적용개소 고찰", 한국초전도·저온공학회 논문집, 5권 2호, P 28, 2003
- [3] 최상봉 외, "고온초전도케이블의 대도시 계통 적용을 위한 모델링 및 송전용량과 전압계급의 검토", 한국초전도·저온공학회 논문집, 4권 1호, P63, 2002

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 전력산업 기반기금과 한국전력공사의 자금 지원에 의해 수행되었습니다.