

# 초전도케이블의 개요 및 개발 필요성 검토 <下>

장 중 근  
한국전력공사기술연구원 전력연구실

## 4. 초전도 송전케이블의 국내외 개발 현황

초전도송전은 작은 손실로 고밀도 대전력의 송전이 가능하고 환경문제 해결과 국토의 효율적인 이용 등의 기대효과가 크며, 개발에 따른 다른 산업으로의 파급효과가 크기 때문에 표 4-1에 나타난 바와 같이 1960년대부터 세계의 여러 연구기관에서 개발이 활발하게 진행되었다. 그 후, 1973년에 시작된 석유위기를 지나 전력수요의 동향 등의 관점에서 개발의욕이 일시 정체된 상태에 있었으나 미국, 러시아, 일본 등을 중심으로 개발연구가 계속되어 미국의 BNL(Brookhaven National Laboratory)에서는 상당한 수준의 연구결과를 냈으며 일본에서도 나고야대학과 도요하시과학기술대학과 전선업체와의 공동연구로 꾸준한 연구가 진행되고 있고 최근에는 고온 초전도케이블에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다.

### 가. 국외의 초전도케이블 개발현황

초전도케이블의 개발연구는 오스트리아, 영국,

독일, 프랑스를 중심으로 한 유럽지역과 일본, 미국 등 3개지역으로 구분할 수 있으며 특히 유럽의 오스트리아, 프랑스와 일본, 미국 등에서 활발히 연구개발이 진행되어 왔다. 지금까지 초전도케이블의 연구개발에 착수한 주요국가별 개발현황은 다음과 같다.

#### (1) 오스트리아

1965년에 시작한 Gratz 공과대학 저온연구소의 연구는 세계에서 역사가 가장 오래된 것중의 하나로 1979년 10월에 Arenstein 수력발전소 구내에서 60kV 송전선의 일부중 50m 구간의 1상에 접속된 초전도케이블(60kV, 1kA)에 대하여 실제통부하 150A, 100시간의 통전에 성공하였다. 케이블은 AGE-Kabelmetal에서 제작한 것으로 도체는 Corrugated Gu Pipe에 Nb(60 $\mu$ m 두께)를 피복한 것으로 전기절연에는 절연지에 액체헬륨을 함침하였다.

#### (2) 러시아

러시아에서는 현재까지 오르유니온레닌 전력기술연구소 등에서 초전도케이블의 개발연구가 계속되고 있으며, 최근에는 Flexible형 교류케이블

의 개발에 중점을 두고 있다. Nb<sub>3</sub>Sn 도체를 사용하여 50m의 케이블(110kV, 10kA)이 제작되어 1988년부터 정격전류 이하에서 Quench가 발생하는 등 시험에 어려움을 겪고 있다.

### (3) 미국

미국에서는 LOS ALAMOS 국립연구소와 BNL에서 주로 연구되었는데 특히 BNL에서 추진된 개발 프로젝트는 지금까지 여러 연구기관에서 추진된 연구를 집대성하여 실증시험을 했다고 말할 수 있을 정도로 포괄적인 연구를 수행하였다. BNL에서는 1972년부터 사전 조사연구, 최적설계연구, 요소기술연구를 거쳐 1982년 전부하 통전시험에 성공하였다. 이 케이블은 100m 길이의 단상케이블코어 2가닥으로 회로를 형성하고 대지전압 80kV(선간전압 138kV), 상전류 4100A로 운전하여 333MVA 즉 3φ 1000MVA의 송전용량을 갖는 것이 실증되었다. 그후 30일간에 걸친 장기 연속운전시험, 임펄스내 전압시험, 단시간 과전류시험, Quench 상태의 실험 등을 마쳤다. 이 케이블의 도체는 Nb<sub>3</sub>Sn이 사용되었으며 동축도체구조의 Flexible 케이블 코어를 사용했다. 전기절연은 2축연신 폴리프로필렌을 사용하고 액체헬륨 함침절연방식을 사용하였다.

### (4) 일본

1968년에 시작한 후루카와전공(주)의 초전도케이블 개발과제는 1973년 통전시험을 한 후 중단되었고, 1989년에 시작한 통산성의 “성에너지 기술연구개발제도”의 일환으로 전자기술종합연구소에서 초전도케이블 개발연구를 진행하고 있다. 종래의 2.5m의 교류모델 케이블을 이용하여 통전시험을 했지만 최근에는 장치를 연장하여 10m 길이에서 7000A의 전류를 흘려 교류손실 등의 데이터를 모으고 있다. 도체로는 Nb<sub>3</sub>Sn 테이프를 사용하고, 전기절연으로는 폴리에틸렌에피퍼를 액체헬륨에 함침하는 방식을 채택하였다. 전자종합기술연구소외에 나고야대학과 도요하시 기술과 학대학이 공동으로 BNL과는 다른 방식의 초전도 케이블을 설계, 제작하여 시험중에 있다. 이 케이블은 종래의 가교폴리에틸렌 절연케이블(CV 케이블)과 같은 압출절연방식을 이용한 것으로 Nb 중공도체에 EPR을 압출하여 전기절연을 구성하였다. 이 케이블의 특징은 GVA급 이하의 송전계통의 적용을 목표로 간단한 구조를 채용하여 코스트의 저감과 신뢰성의 향상을 시도한 것이다.

표 4-1은 세계 각국의 초전도케이블 개발현황을 나타낸 것이다.

〈표 4-1〉 국외의 초전도 케이블 개발 현황

國名	美 國	러 시 아	日 本	英 國	獨 逸
機 關	BNL	All Union	ETL	CERL	Siemens
方 式	LHe/AC	LHe/AC	LHe/AC	LHe/AC	LHe/AC
容 量	1 GVA	2 GVA	2 GVA	5 GVA	2 GVA
길 이	100m, 10m	50m	10m	8m	35m
期 間	1972~現在	?~現在	1978~現在	1970~現在	1968~現在
特 記 項	-3km 實系統 投入試驗 計劃과 -106km 實用線路 運轉計劃 (필라델피아電力會社) 資金難 遲延	-實用化 設計值 目標 未達性, Quench 繼續 製作中	-'89年 6.5kA 通電 Test 完了 -東京電力 500m 9kA 급 DC케이블 開發 計劃 推進中	-8m 單心線路 製作, 要素 技術	-試驗 시스템 製作率 要素 技術 研究

## 나. 국내의 초전도케이블 개발현황

현재까지는 초전도케이블 시스템에 대한 연구 과정은 절연기법 및 절연재료의 가공, 공정기술을 개발, 1986년부터 154kV, 800MVA급 극저온 저항케이블 개발연구를 수행하여 1990년에 단상 89kV, 3000A 통과전 시험에 성공한 바 있으며 초전도케이블 시스템의 핵심기술인 냉각기술, 절연기술, 케이블설계 및 극저온 통과전 시험기술 등은 일부 확립되어 있는 실정이나, 본격적인 초전도 송전시스템의 개발 연구가 추진되어야 할 것으로 본다.

## 5. 초전도 송전케이블의 도입효과 및 평가

송전방식의 경제성을 평가하는 지표가 송전손실이며 초전도케이블을 운용하는 경우 냉동기의 소요전력을 고려할 필요가 있다. 이것은 시스템 운용 면에서 보면 일종의 손실로서 재래선로의 저항손실 등의 송전손실과 개념적으로 동일한 것으로 취급할 수가 있다. 이와 같은 초전도케이블의 냉동전력에 재래선로의 송전손실을 합해서 운용에 필요한 전력으로서의 "Operational Power"를 정의한다.

- ① 초전도케이블: 교류손실, 유전체손실 및 침입열의 합에 냉동기 손실을 곱한 것. 이것은 액체헬륨에서 500, 액체질소에서 5로 한다.
- ② 재래 가공송전선: 저항손실만에 의한 것.
- ③ 재래 지중케이블: 저항손실, 유전체손실 및 Sheath 손실의 합.

이들의 손실중 초전도케이블의 교류손실, 재래 송전선의 저항손실 및 재래지중케이블의 Sheath 손실은 전력조류에 의한 손실이다.

초전도케이블의 도입에 의한 경제성평가에는 초전도케이블을 하나의 전력기기로서가 아니라, 기존의 재래 송전시스템에 부가되는 대용량 기간

송전선로로서 복합적으로 다루어야 한다. 즉 대도시 근교의 대용량 화력발전소의 수백만 kW의 출력은 초전도케이블을 송전시스템에 부가되는 대용량 기간 송전선로로서 복합적으로 다루어야 한다. 즉 대도시 근교의 대용량 화력발전소의 수백만 kW의 출력을 초전도케이블을 경유해서 직접 도심부에 송전하는 경우를 상정할 수 있다. 이와 같은 초전도케이블의 도입형태에서는 주로 외륜선을 경유하는 전력조류가 대폭 경감되어, 그 결과로서 송전선로에 있어서 손실이 저감된다.

Operational Power를 전력조류에 의존하는 손실과 의존하지 않는 손실로 분리할 경우 Operational Energy는 액체헬륨 냉각의 초전도케이블을 2회선 설치하는 경우에도 재래송전방식의 85% 정도로 저감된다. 또한 액체질소냉각의 고온 초전도케이블에서는 2회선 도입 뿐만 아니라 4회선 경우는 45%까지 저감 가능하다.

이와 같이 초전도케이블을 기간으로 하는 대도시 전력시스템에서는 재래식과 비교해서 최대부하 뿐만이 아니고 연간의 손실전력량도 대폭 저감됨을 알 수 있다.

### ○전압안정성의 향상

최근의 전력계통에 있어서는 전력설비의 입지 문제나 환경문제 등 때문에 전원은 대용량화함과 동시에 원격지로 편재되는 경향이 있으며 지역발전과 함께 전원으로부터 원격지의 수요가 크게 성장하고 있다. 장래에 이러한 전원과 부하와의 분극화가 진행되면 송전선은 장거리화하며, 1 Root의 송전전력도 크게 되어 고밀도·대용량의 전력전송 시스템이 필요하게 될 것이다.

이와 같은 전원과 부하와의 분극화가 진행되어 장래의 전력계통에 초전도케이블이 도입되면, 대전력을 고밀도로 장거리에 걸쳐 고품질로 송전이 가능하다. 이 특징을 살린 초전도케이블의 도입형태로서 원격지에 편재하는 대용량발전소와 대도시주변의 계통과 연결하는 대용량으로서의 적용이 가능하다. 특히 초전도케이블은 직렬리액턴

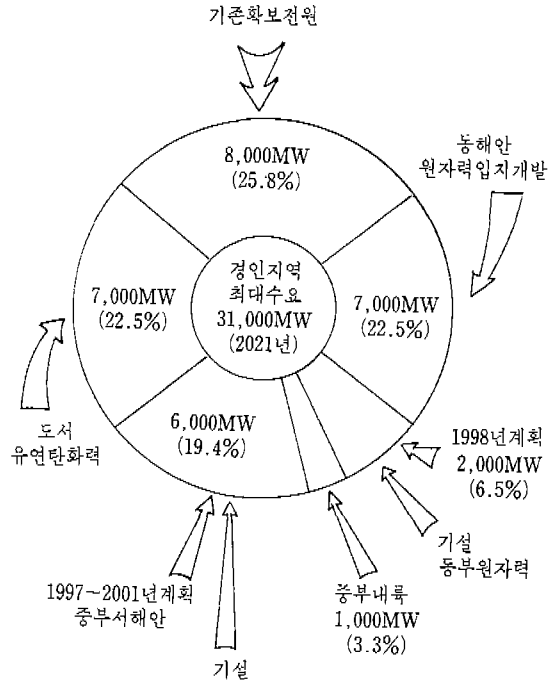
스가 가공송전선과 비교해서 작고 용량성 서셉턴 스가 크며 전류용량을 크게 할 수 있다는 이점이 있으며 무효전력이 적기 때문에 말단 부하모선까지 전송되어, 전력계통의 전압안정성을 향상시킬 수 있다.

## 6. 초전도 송전케이블의 적용시기 및 적용구간 검토

최근의 전력수요 증가 추세를 반영한 발전소 건설 계획안과 개방화 및 지방화 추세에 따른 송전선로 경과지 및 전원입지 확보의 실질적인 문제들이 고려되어 민원유발과 송전요소를 최소화하기 위한 전력수급안이 도출된 바 있다. 따라서 이와 같은 장기 수요예측에 따른 장기 발전소 건설계획과 전원입지안에 의거하여 초전도케이블 적용을 위한 계통구성 및 적용시기의 확립을 목적으로 향후 2021년까지의 기간계통의 조류해석을 통한 계통특성의 기초적 사항을 검토하여 초전도케이블 적용가능성 및 적용방안을 제시하는 것으로 하였다.

계통확장안을 결정하기 위한 계통특성의 검토 방침으로는 정상상태 및 선로 사고시 공급지정없이 정상운전이 가능해야 하고, 사고시 기간계통의 붕괴 또는 전계통의 붕괴에 이르지 않도록 검토되어야 한다. 이를 위한 검토사항으로는 부하에 대한 공급지정이 없이 정상운전이 가능하도록 조류계산(선로과부하)의 검토 기간계통에서의 사고시 안정을 유지하도록 안정도가 검토되어야 한다.

초전도케이블을 계통에 적용하기 위해서는 최소 15~20년이 소요되므로 1996년을 기본계통으로 하여 2006, 2021년의 전력수급전망과 이에 의한 발전 및 지역별 수요배분을 한 후 경인지역내의 선로에 정상운전시 및 상정사고시 선로 과부하가 발생하지 않도록 계통을 구성하여 이 결과와 초전도케이블을 적용할 경우를 상호 비교함으로써 적용 타당성을 검토하는 것으로 하였다.



〈그림 6-1〉 2021년 경인지역 전력수급 계획

### 가. 계통특성 검토범위 및 방법

#### (1) 검토범위

계통특성 검토범위는 앞서 설명한 바와 같이 1996년을 기본계통으로 하여 2021년까지의 장기 전력수급 전망에 의해 2001, 2010, 2021년의 10년 단위로 전원입지 및 장기 발전소 건설계획을 참조하여 적용구간, 시기 및 용량에 대하여 검토하였다(그림 6-1 참조).

#### (2) 검토방법

다음과 같은 계통특성 검토기준, 계통확장기준 및 확장방법에 의해 계통확장 방안을 마련하는 것으로 하였다(표 6-1, 표 6-2 참조).

#### 가) 계통특성 검토기준

##### 1) 조류검사(AC 조류계산)

##### ① 발전배분

○정상조건에서의 원별 발전출력 배분

〈표 6-1〉 경인지역 소요 전원입지  
(단위 : MW)

항 목	연 도 별	1990년	2001년	2010년	2021년
		최 대 수 요 (A)	7,015	16,000	23,470
공급능력 (B)	송 전 선	3,020	8,506	8,506	8,506
	기존발전설비	3,200	3,220	3,220	3,220
	추가발전설비		5,020	5,020	5,020
	소 계	6,740	16,746	6,746	16,746
차 이(C=A-B)		746	6,724	14,134	
경인지역 소요 전원입지(D)			8,770	18,430	

〈표 6-2〉 각 지역별 전원입지 분포  
(단위 : MW)

지역별	원 자 력	석탄화력	Oil, LNG	화력, 양수	합 계
경 인			6,550 (6,550)		6,550 (6,550)
영 해	18,000 (2,000)		1,000 (1,000)	2,400	21,400 (3,000)
해 부		25,000 (10,000)		600 (600)	25,600 (10,600)
화 남	29,600 (4,000)	3,600			33,200 (4,000)
영 남	2,100 (2,100)	4,000 (4,000)	300 (300)	8,100	14,500 (6,400)
합 계	49,700 (8,100)	32,600 (14,000)	6,550 (6,550)	11,100 (600)	101,250 (30,550)

-원자력 : 80% 운전(20% 운전정지), 100% 출력

-화 력 : 80% 운전(20% 운전정지), 100% 출력

-Oil, LNG : 90% 운전(10% 운전정지), 90% 출력

-수 력 : 100% 운전, 80% 출력

② 부하배분

○발전단 부하의 92%를 고려

(8% : 발전소 소내 소비, 도서 및 154kV 이상 손실)

○발전소 소내 소비 전력

(발전소 Full 출력시의 소내 소비 전력임)

-원자력 : 설비 용량의 5%

-화 력 : 설비 용량의 6%

-Oil, LNG : 설비 용량의 4%

-수 력 : 무 시

③ 부하특성(Peak시)

○경인지역을 포함한 기타지역 역률 90%

④ 상정사고 조건

○각 발전소 발전출력 정상조건에서 간선 계통 1 루트사고

(내) 송전계통 확장기준

1) 선로 확장기

○조류가 선로열용량의 100%를 초과할 경우 동종의 선로로 확장한다.

-선로사고(154, 345kV : 1회선 또는 1 Route 사고)시 과부하선로가 없어야 한다.

2) 변압기 확장기준

○1 Bank 사고시에도 건전 Bank에 과부하가 발생하지 않도록 한다.

나. 계통 검토전제

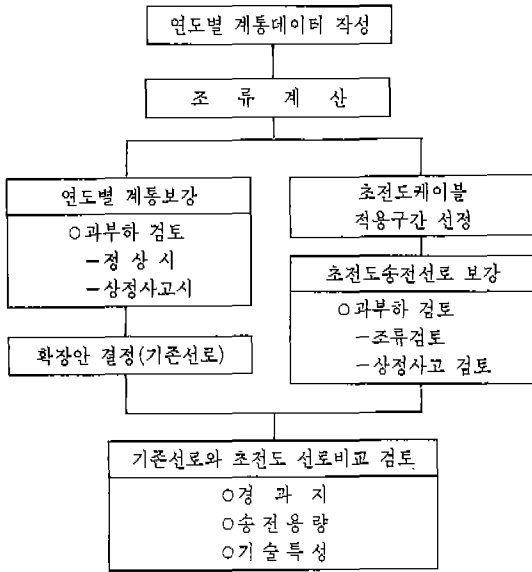
부하배분은 수요전망에 의해 예측된 기준수요를 지역별 부하(22개 소지역)로서 154kV 모선에 배분하였고, 발전배분의 경우는 각 검토년도의 전원설비를 모두 포함한 것으로 하였으며 각 발전기의 발전량은 예비율, 부하 및 손실을 감안하여 평균 배분하였다. 그러나 계통구성이 도심부에 초전도케이블 적용검토가 목적이므로 부하 밀집지역인 경인지역을 대상으로 하였다. 본 원고에서

· 기본계통은

현 계통 및 1996년까지의 154kV 및 345kV 계획을 포함한 안이며

· 확장안은

정상시 조류 및 상정사고시 조류검토를 한 후 선로가 과부하로 될 경우 장기전력 수급전망에



〈그림 6-2〉 초전도케이블 적용가능성 검토수준

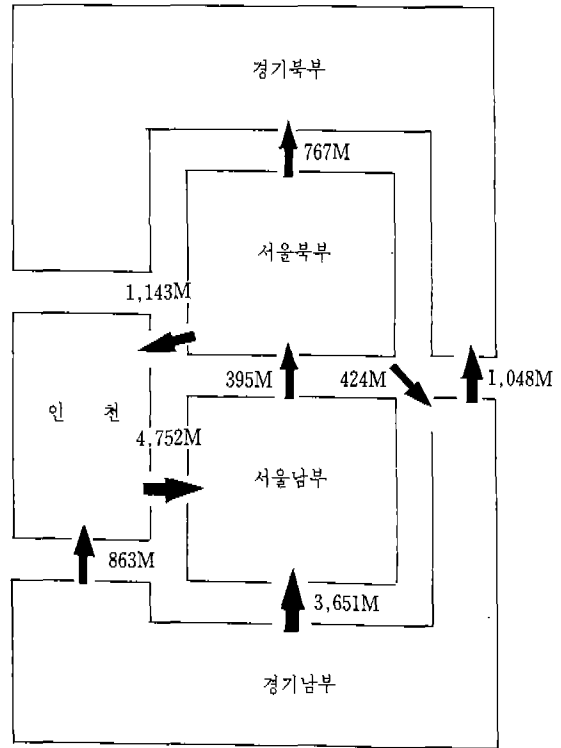
따라 전원입지 및 발전소 건설계획을 참조하여 과부하 선로를 154kV, 345kV 선로로 1차 보강을 마친 안이다. 또한 영동-경인 지역간 765kV 선로계획을 포함하도록 하였다(그림 6-2 참조).

#### 다. 초전도케이블 계통구성 검토

경인지역 중 특히 부하가 밀집되어 있는 경인 지역내에서도 지역특성에 따라 전력수요의 증가 형태도 다를 것이므로 편의상 5개의 소지역(서울북부, 서울남부, 인천, 경기북부 및 경기남부)으로 분류하여 2021년의 초장기 전력수요 및 전원계획을 상정하여 검토한 결과 이들 소지역간의 전력수급은 향후 2021년경에는 그림 6-3 과 같게 될 것이며, 따라서 소지역간 전력유통이 많은 경기남부-서울남부 및 인천-서울남부 지역간을 초전도케이블의 설치가 검토될만하며, 각각의 경우에 대해 자세하게 분석하면 다음과 같다.

##### 1안 경기남부-서울남부 지역간

이 두 지역간은 지역간 조류가 2021년경에는



〈그림 6-3〉 경인지역의 소지역별 전력유통(2021년)

약 360만kW 정도로 생각되며 특히 발전지역인 영동지역으로부터 경인지역간을 765kV 선로로 구성할 것을 고려하면 경인 외곽지역의 765kV 변전소로부터 현재 서울 외곽지역에 위치한 345kV 변전소로 많은 조류가 유입된다. 따라서 이 지역으로부터 도심부까지 대용량 송전이 필요하게 될 것이다.

##### 2안 인천-서울남부 지역간

향후 장기 전원계획에 의하면 서해안지역에 대규모의 발전단지가 건설될 것이며, 따라서 이 지역으로부터 수요중심지까지는 2021년경에는 약 440만kW 정도될 것으로 생각되며 서울지역에 위치한 345kV 변전소로 많은 조류가 유입된다. 따라서 이 지역으로부터 도심부까지 대용량 송전이 필요하게 될 것이다.

각각의 시나리오에 대한 검토결과는 표 6-3에

〈표 6-3〉 시나리오 검토 결과

항 목	종래확장안	1 안	2 안
소요선로수(154kV)	511	459	465
소요선로길이 (km)	5,465	4,980	4,965

서와 같이 초전도케이블을 설치할 경우 약 9%의 송전선로를 절감할 수 있었으며, 이를 거리로 환산하면 약 500km 정도의 선로 및 이에 필요한 선로 경과지가 절감될 수 있음을 알 수 있다.

따라서 경기남부-서울남부 또는 인천-서울남부 간에 대해 초전도케이블의 적용이 가능하며, 이를 위하여 2005년경에는 초전도케이블을 일부 구간에 대하여 시험 선로를 구성토록 함으로써 기술적인 점을 보완, 개발을 통해 2021년에 본격적 용되도록 해야 할 것이다.

## 7. 결론

초전도케이블은 장래 대도시 송전에 적합한 고밀도, 대용량 송전방식으로 기존의 송전계통과의 협조를 도모하는 것이 중요한 문제이다. 본고에

서는 초전도케이블에 대하여 간략하게 설명하여 초전도케이블에 대한 이해를 돕고자 하였으며, 초전도케이블을 도입함으로써 기존 전력케이블의 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 국내의 전력상황과 2000년대의 서울지역 최대전력이 7GW를 넘어설 것으로 예상되어 초전도케이블의 실용화 여건이 충분히 갖춰질 것을 고려할 때 초전도케이블의 연구개발을 수행하여 향후 예상되는 전력계통의 문제점에 대한 기술개발에 착수하여야 할 것이다. 초전도케이블이 가지는 우수한 기술적 속성을 최대한 활용하며 동시에 기존의 송전계통과의 연계에 중점을 두어 초전도케이블의 도입필요성에 대해 다음과 같은 검토결과를 알 수 있다.

(1) 초전도케이블은 대도시 근교의 대용량 변전소와 도심부의 과밀도 수요지역을 연결하도록 한다. 선로사고시를 대비하여 2회선으로 설치하며 대용량 송전과 안정도를 고려한다.

(2) 초전도케이블에 의한 대전력은 도심부의 대수요를 조달하는 한편 기존송전계통을 통하여 도심 주변까지 역송토록 하는 방안이 강구될 수 있다.

## ● 참고문헌

1. 古戸義雄, et al : “極低温 大容量 送電 の可能性” 古河電工時報 No.71, 199-217 1981
2. E.B. Forsyth : “The test result of AC Superconducting cable”. IEEE Trans. on Power apparatus and systems, PAS-101, No. 2, 2049 1982
3. E. Scheffler : International Symposium Hochspannungstechnik, Munchen, 579 1972
4. P. Dubois et al : IEEE No.72, CHO 682-5-TABSC, 173 1972
5. C.N. Carter : Cryogenics No.13 207-1973
6. E.C. Rogers and P.R. Edwards, Electr. Rev., No.181, 348-1967
7. P. Klaudy, et al : IEEE Mag-19, No.3, 656-1983
8. G. Meshchanov, et al : IEEE Mag-19, No.3, 662-1983
9. E.B. Forsyth, R.A. Thomas : “Performance summary of the Brookhaven superconducting power transmission system”, Cryogenics, Vol. 26, 599 1986
10. 小崎正光, et al : “押し出しポリエチレン 絶縁 超電導 チールの 開發”, 전기학회논문지 D, Vol.10, No.11 997 1988
11. 한국전기연구소 : “극저온 저항케이블 개발연구”, (최종보고서) 1988~1990