

## 배전급 고온초전도 전력케이블 개발

조 전 욱, \*김 동 욱  
한국전기연구원, \*LG전선(주)전력연구소

### 1. 서 론

고온초전도 전력케이블은 기존 케이블의 구리 도체 대신 고온초전도 도체를 사용한 저손실·대용량 전력 수송이 가능한 전력케이블로서 대도시의 전력공급문제를 해결할 수 있는 신 개념의 전력케이블이다.

초전도케이블은 765kV나 345kV의 초고압이 아닌 154kV 또는 22.9kV의 전압으로 대용량 송전이 가능하기 때문에 종래 변전소의 고전압송전을 위한 주변기기를 간략화 시킬 수 있다. 초전도 전력케이블은 송전손실이 극히 작고 단위 면적당 송전 용량을 3~8 배 정도 증가시킬 수 있으므로 구리케이블로 구성된 노후 지중케이블을 제거하고 초전도 케이블로 대체하면 매우 높은 송전용량을 보장할 수 있어 추가의 건설공사 없이 이미 설치되어 있는 도심의 전력구(케이블용 지하터널) 또는 관로를 사용할 수 있어 매우 경제적이다. 도심의 부지, 전력공급 문제 등을 해결할 수 있다. 초전도기기의 전력응용 분야 중에서도 초전도 전력케이블은 가장 기대되

는 기술 중 하나로서 다른 초전도기기 보다 가장 빠른 시일 내 실계통 적용이 이루어 질 것으로 예상되고 있다.

따라서 미국, 일본, 유럽, 중국 등 세계 각국에서 실증시험운전 및 실계통 투입 중이거나 투입 준비가 진행되고 있다. 그림 1은 전 세계에서 진행 중에 있는 초전도 전력케이블 프로젝트의 요약도이다. 특히 미국에는 현재 3대 초전도 전력케이블 프로젝트가 진행 중에 있다. 모두 미국 DOE의 지원을 받은 SPI (Superconductivity Partnership with Industries) 프로그램의 일환으로 진행 중에 있다. 즉, LIPA project, AEP Ohio project, 및 Albany project이다. 그리고 일본은 스미토모전공과 동경전력이 공동으로 개발한 100m급 초전도 전력케이블 실증시험이 끝나고, Sumitomo 전공은 미국 Albany project로 진출하였다. 이후, 일본 내에서는 Super-ACE project를 중심으로 후루카와 전공에서 500m급 단상 초전도 전력케이블을 개발 중에 있다. 그 외에 중국은 InnoST와 InnoPower 공동으로 2004년 5월부터 운남전력의 Puji 변전소에 35kV, 30m급 상온절연형의 초전도케이블의 운전을 시작하였다.

우리나라에서는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 “차세대 초전도 응용 기술 개발사업 (DAPAS program)”의 세부과제로 22.9kV, 50MVA, 3상, 30m 초전도케이블 시스템 개발을 목표로 “배전급 초전도 전력케이블 개발”을 주관기관인 한국전기연구원과 LG전선(주)전력연구소, LG전선(주)기계연구소, 한국기계연구원, 한국기초과학지원연구원, 한전전력연구원과 미국의 ORNL (Oak Ridge National Lab.) 이 공동연구로 2001년부터 시작하여 2004년 6월까지 개발하였으며, 본 글에서는 표 1과 같은 1단계 개발목표로 개발한 배전급 고온초전도 전력케이블 시스템 개발과정과 성과에 대하여 설명하고자 한다.

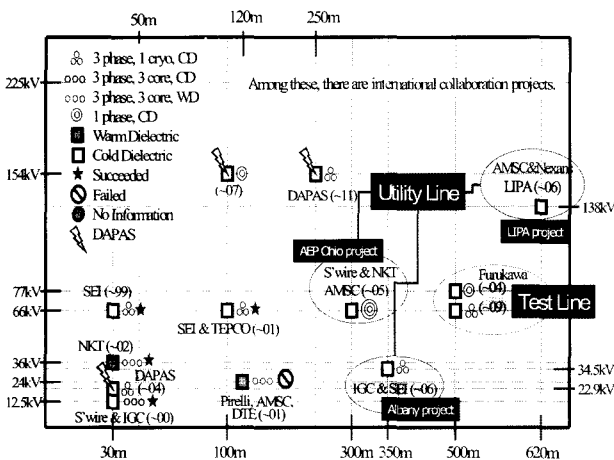


그림 1. 국제 초전도 전력케이블 프로젝트 요약도

표 1. 1단계 배전급 초전도 전력케이블 개발 연구계획

기간	연구 목표
1차년도 2001.9 ~ 2002.7	코아설계 및 제작기술 개발
2차년도 2002.8 ~ 2003.7	22.9kV, 50MVA 30m 단상케이블 개발
3차년도 2003.8 ~ 2004.6	22.9kV, 50MVA 30m 3상케이블 개발

## 2. 배전급 초전도케이블 개발 과정

고온초전도 전력케이블은 그림 2와 같이 케이블의 형태를 유지하는 former, 초전도도체, 전기절연 등으로 구성된 케이블 코아와 열절연을 위한 cryostat와 냉각시스템, Termination 등으로 구성되어 있다.

케이블 코아의 Former는 초전도 도체를 감기위한 기계적 지지와 액체질소의 경로역할을 하며 케이블의 수송과 포설을 위해 유연한 구조의 스테인레스 스틸 등의 금속재질이 사용된다. 현재 초전도도체는 다심선의 Ag sheath/Bi-2223 테이프가 사용되고 있지만, AC Loss의 저감을 위한 노력과 함께 경제성 확보를 위하여 2세대 도체인 Coated conductor의 적용을 준비 하고 있다.

초전도케이블에서 신뢰성에 영향을 주는 가장 중요한 부분 중의 하나가 전기절연이다. 전기절연은 초전도케이블의 형태에 따라 케이블 cryostat 표면에 PE, XLPE 등의 프라스틱 압출을 이용한 상온절연방식과 Kraft

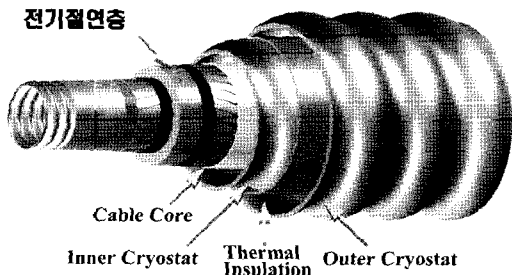


그림 2. 초전도케이블의 구조 (저온절연형, 1core-1cryostat)

Paper, PP Laminated paper를 이용한 극저온 냉매복합절연의 저온절연방식이 있으나, 대용량화, 유지보수의 용이성 등의 이유로 세계적으로 현재 추진 중인 대부분의 초전도 케이블 프로젝트에서는 저온절연방식을 채택하고 있다.

케이블 cryostat는 케이블의 온도유지와 열손실의 저감을 위하여 진공과 MLI를 적용한 Super-insulation 방식이 적용되지만, 케이블이 장거리로 사용되기 때문에 고진공유지를 위한 감시, 제어 등 신뢰성 확보가 필수적이다. 초전도케이블에서 cryostat를 포함한 냉각시스템은 액체질소를 강제 순환시키기 위한 cryocooler, 극저온용 순환 펌프, transfer line, 제어 판넬 등으로 구성되며 케이블을 최적 상태에서 운용하기 위하여 액체질소의 온도 및 압력을 적절한 조건으로 순환시키며 또한 열부하변동 등에 대하여 안정적으로 냉각할 수 있고 케이블 상태를 감시 및 자동제어가 가능하며 신뢰성 있는 냉각시스템을 구축하여야 한다.

### 2.1 고온초전도 케이블코아 개발

초전도 전력케이블은 절연방식에 따라 상온 절연형 초전도 케이블(WD, Warm Dielectric)과 저온 절연형 고온초전도케이블(CD, Cold Dielectric)로 구분할 수 있다.

상온절연 고온초전도케이블은 그림 3과 같이 초전도 도체위에 전기절연층이 없으며, 냉각을 위한 cryostat위에 전기절연을 한 구조의 초전도케이블로서 이 케이블의 전기절연재료는 상온에서 사용되기 때문에 기존의 절연재료를 그대로 쓸 수 있는 장점이 있다. 그러나 상온절연 고온초전도케이블은 교류자계를 차폐해 극저온관로와 같은 도체 이외의 부분에 있어서의 eddy current loss를 억제하기 위한 고온초전도 shield층을 설치할 수 없기 때문에 cryostat의 eddy current에 의한 온도상승으로 시스템의 손실이 증가하기 때문에 대용량의 시스템에 적용은 곤란하다.

그러나 저온절연방식 고온초전도케이블은 그림 4와 같이 전기절연층이 극저온관로내에 있는 구조의 케이블로서 고온초전도 도체위에 전기절연층을 놓고 그 위에 다시 HTS shield층을 설치한 케이블코아를 극저온관로내에 설치하는 구조의 초전도케이블로서

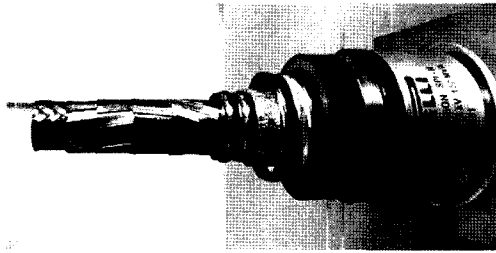


그림 3. 상온절연형 초전도케이블

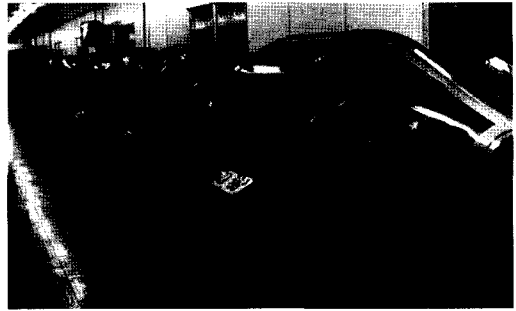


그림 5. OF 케이블 제조설비

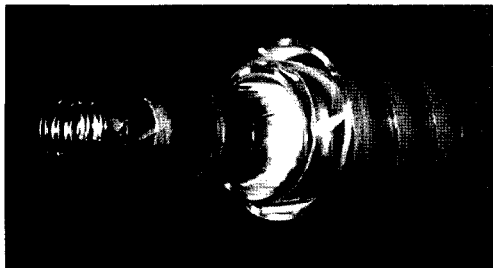


그림 4. 저온절연형 초전도케이블  
(2차년도에 개발된 케이블 사진)



그림 6. Aluminium 압출기

도체층의 적용이 가능하여 cryostat에서 eddy current의 발생을 억제할 수 있으며, 특히 배전급 전압에서는 하나의 cryostat에 3상 케이블 코어를 모두 설치할 수 있어 각 상 마다 cryostat를 설치하는 상온절연방식과 비교해서 단위길이당의 열절연층의 표면적이 작게 되기 때문에 외부로부터의 침입열이 적고 compact하다는 장점이 있다.

또한 고온초전도 전력케이블의 설계시 AC Loss의 최소화와 도체 사용량의 최소화 등을 위한 설계가 이루어져야 하며 이를 위하여 다층 구조의 초전도도체의 taping pitch를 조절하여 층간의 임피던스를 조절하여야 한다.

본 연구에서는 154kV급 대용량의 초전도 케이블 개발과 케이블 cryostat의 유지보수가 유리한 저온절연형의 초전도케이블을 목표로 하였다. 케이블 코어의 설계를 위하여 전용 설계 및 해석 프로그램을 개발하였으며, 1차년도는 초전도케이블 코어설계 및 코어제작기술 연구와 2차년도에는 단상 케이블 코어 설계 및 제작, 3차년도는 본 사업의 최종 목표인 22.9kV, 50MVA, 3상, 30m 케이블 코어를 개발하였다. 케이블 코어의 구조는 1개의 cryostat에 3상 케이블을 설치하는 3 core - 1 cryostat 구조이다. LG전선(주)는

초전도케이블 제조를 위하여 그림 5와 같이 기존의 OF 케이블 (Oil Filled) 제조설비와 그림 6과 같이 케이블 cryostat 개발을 위하여 알루미늄 압출기를 개조하였다. 이 기술은 초전도 케이블cryostat에서 치명적인 진공 leak의 문제를 해결할 수 있는 세계적 수준의 기술이다. 그림 4는 2차년도에 개발된 22.9kV, 50MVA 단상 30m 초전도 케이블의 사진이며, 그림 7은 3차년도에 개발된 22.9kV, 50MVA 3상 30m 케이블 사진이다.

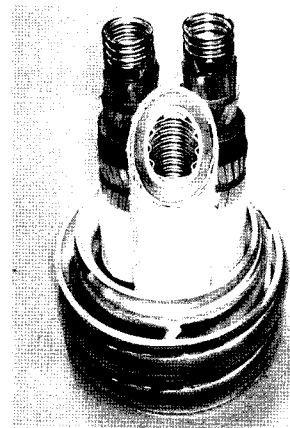


그림 7. 22.9kV, 50MVA 3상 30m 케이블

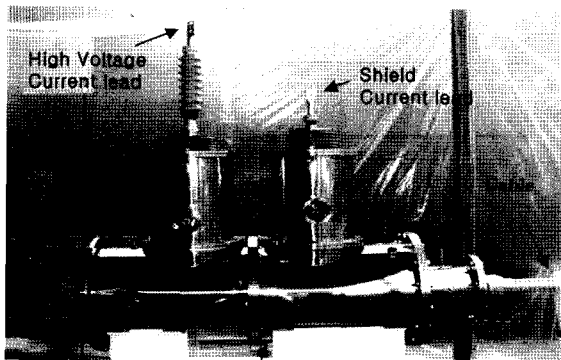
## 2.2 Termination 개발

일반적으로 지중송전 케이블의 접속함은 전력송전을 위하여 지중 케이블과 가공선로 간, 지중 케이블과 차단기간 또는 변압기간, 지중 케이블 상호간을 전기적으로 서로 연결하여 주는 접속장치를 말하며, 종단 접속함(단말)과 직선 접속함(중간접속함)으로 구분된다. 접속함의 일반적인 성능은 케이블과 동등 이상의 특성을 유지하여야 하며, 케이블 구성재료에 악영향을 미치지 않아야 하므로, 전기적, 기계적, 열적 요구 특성을 만족하여야 한다.

초전도 케이블용 Termination 설계에 있어서는 초전도 케이블에 유입되는 열량을 최소화 하기 위해 액체질소 냉각방식의 단말 구조를 채택하였으며, 그 구조를 바탕으로 열설계와 전기적 설계를 병행하여 단말을 설계 및 제작하였다. 표 2와 같은 Termination 설계, 제작을 위한 전기적 특성을 기준으로 2차년도는 단상 초전도 케이블 시스템을 개발하였기 때문에 그림 8과 같이 통전용 전류리드와 함께 shield용 전류리드가 필요한 구조의 Termination을 개발하였다.

표 2. Termination 개발 기준

Item	Spec.	Content
Impulse	240kV	BIL 150kV 22.9kV KEPCO Spec
AC ( 1hr )	70kV	Target Performance
Current	1260A	22.9kV 50MVA
Pressure	10bar	Input, Output Pressure



Termination for 1 Phase

그림 8. 단상 초전도케이블용 Termination

2차년도의 연구결과를 바탕으로 3차년도는 3상 케이블 시스템용 Termination을 개발하였다. 단상 시스템과 달리 3상 케이블은 한개의 cryostat에 3상 케이블이 설치되어 있어 termination과 연결하기 위해서는 케이블을 분기하고 초전도 도체들을 접속하기 위한 케이블 splitter가 필요하다. 그림 9는 3차년도에 개발한 3상 초전도 케이블용 splitter 및 termination이다.

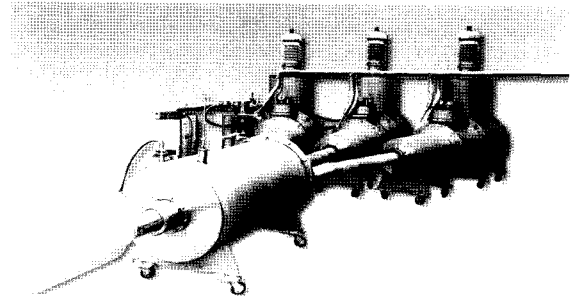


그림 9. 3상 케이블용 Termination 및 Splitter

## 2.3 냉각시스템 개발

초전도 케이블 냉각시스템은 냉각 구동 방법에 의해서 극저온 냉동기를 사용하는 시스템과 액체질소를 진공상태로 증발시켜 포화증발온도에서 열 교환기를 사용하는 방법이 있으며 케이블 냉각에 사용되는 액체질소는 시스템 내에서 액체질소 기포 발생을 억제하기 위해서 포화온도보다 낮게 유지되어 과냉상태가 된다. 또한 액체질소 순환 경로에 따로 One-Path, Go-Return (Parallel, Countflow) 냉각시스템으로 구분되어질 수 있다.

본 연구에서는 30m, 22.9kV/50MVA 케이블 냉각시스템을 개발하기 위하여 1차년도에 10m 냉각시스템을 제작하여 기본 data를 확보한 후, 2차년도는 단상용 시스템 개발을 하였다. 3차년도는 그림10, 그림11과 같이 케이블과 termination의 냉각을 분리하여 케이블의 냉각은 냉동기를 이용하고, 액체질소의 잠열을 이용하여 Termination 냉각을 하였다. 냉각시스템의 cooling load는 3kW, LN2 압력은 3~10 bar, 온도는 70~80K 운전조건으로 설계, 제작하였다.

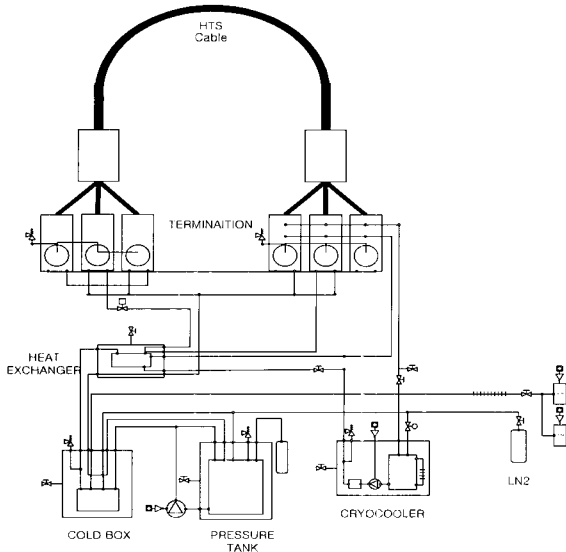


그림 10. 초전도케이블용 냉각시스템 구성도



그림 11. 3상 초전도 케이블용 냉각시스템

2.4 초전도케이블 시스템 조립 및 평가

전 절에서 설명한 케이블코아, Termination, 냉각시스템 등을 하나의 초전도케이블 시스템으로 통합하여 운전 및 평가를 실시하였다.



그림 12. 실증시험 중인 단상 고온초전도 전력케이블 시스템 (2차년 개발)

2차년도에 개발된 단상 시스템은 그림 12와 같이 LG전선(주) 구미 공장 내의 초전도케이블 실증시험장에서 통·과전 특성 시험과 손실측정을 하였으며 그 결과는 표 3과 같다.

표 3. 단상 초전도케이블 평가 결과

	Position	Design	Test
Termination	Cryostat for Main C. L	73.0W	75.0W
	Cryostat for Shield C. L	61.2W	55.0W
	Cryostat for Cable Return	7.3W	12.3W
	<b>Total</b>	<b>141.5W</b>	<b>142.3W</b>
Cable	Cable Cryostat	45.0W	99.5W
	AC Loss	30.0W	28.8W
	<b>Total</b>	<b>75.0W</b>	<b>128.3W</b>
<b>Total (Termination 2EA+Cable)</b>		<b>358.0W</b>	<b>412.9W</b>

그림 13은 단상 초전도케이블의 DC Ic를 측정 한 결과로 통전층의 임계전류는 3070A, shield층은 2500A이며, AC loss는 약 1W/m로 개발 목표를 만족하였다.

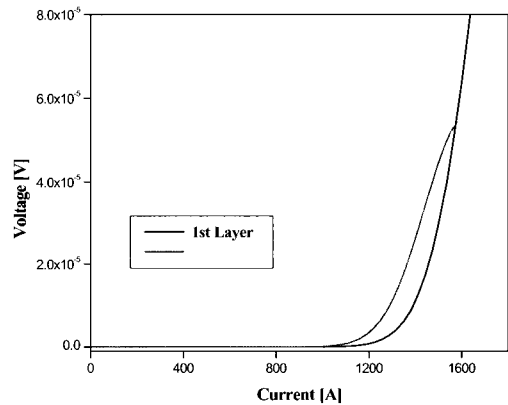


그림 13. 단상 초전도케이블의 V-I 특성

1단계의 최종 목표인 22.9kV, 50MVA, 3상 30m 초전도케이블 시스템은 그림 14와 같이 LG전선(주) 구미공장의 초전도케이블 실증시험장에 설치하였으며 기본적인 특성 시험과 함께 장기 실증시험을 진행하고 있다. 그림 15는 3상 초전도케이블의 77K에서의 DC Ic 측정 결과로 통전층의 임계전류는 4370A이며, shield층은 4400A이다. 케이블 코아의 AC loss를 측정한 결과 1260Arms, 60Hz에서 그림 16과 같이 0.78W/m이며 이 값은

Monoblock 이론과 잘 일치함을 알 수 있다. 이와 같은 연구결과는 세계적 수준의 결과로서 이번에 획득한 핵심 기술은 국내 기술진이 독자적으로 개발한 기술로, 향후 초전도 케이블 개발에서 세계적 기술개발 우위를 확보할 수 있는 발판을 마련하였다. 2년 6개월 여 간의 연구개발 과정동안 국내 특허 14건, 국제(미국, 일본) 특허 2건 출원, 프로그램 5건 등록을 비롯하여 IEEE 등 세계적 권위의 학술지에 20 여편의 우수 논문을 발표하여 세계적으로 기술수준을 인정받고 있다.

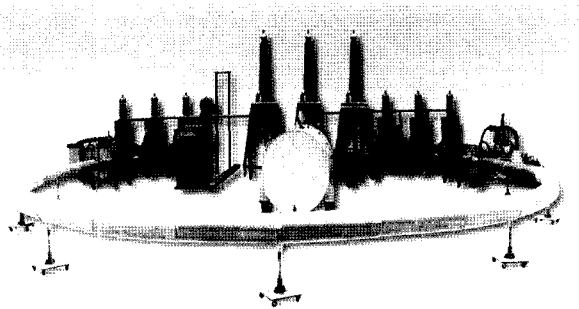


그림 14. 22.9kV, 50MVA, 3상 30m 초전도케이블 시스템

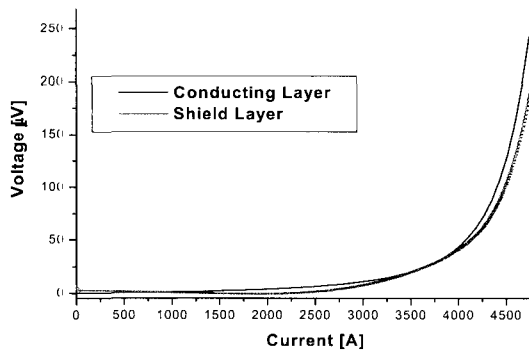


그림 15. 3상 초전도케이블의  $I_c$  @77K

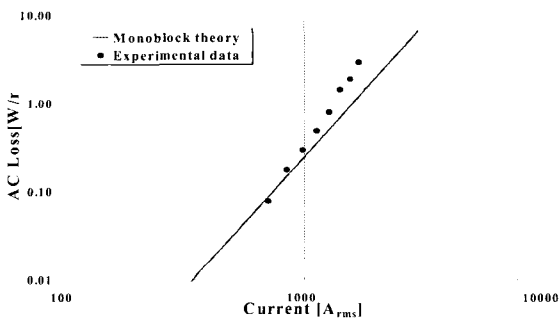


그림 16. 3상 초전도케이블의 AC Loss

### 3. 결론 및 향후 계획

비록 외국보다 늦게 초전도케이블 개발을 시작하였지만 개발에 참여한 모든 연구원들이 노력한 결과 2년 6개월의 짧은 기간동안 세계적 수준에 도달하였다. 이러한 연구결과를 기반으로 차세대 초전도응용기술개발사업 2단계인 2007년까지 154kV급 개발과 배전급의 제품화 추진, 2G wire를 적용한 케이블 개발 및 2011년까지 154kV, 1GVA급 개발과 초전도케이블의 상용화를 추진할 계획이다.

현재 세계 각국에서는 케이블 개발뿐 만 아니라 조기 상용화를 위하여 장기 평가시험 등 신뢰성 확보에 많은 시간과 노력을 기울이고 있다. 이와 같이 초전도 전력케이블은 먼 미래기술이 아닌 우리 바로 앞에 와 있는 기술로서 우리에게 다가오고 있는 여러 난제들을 해결할 수 있는 기술이다.

마지막으로 본 연구개발을 위하여 불심양면으로 지원해 주신 류강식 차세대 초전도응용기술개발 사업단장님께 진심으로 감사드립니다.

### 저자이력



**조전욱(趙全旭)**  
1960년 3월 2일생  
1983년 한양대학교 전기 공학과 졸업, 2001년 연세대학교 대학원 졸업 (공학박사), 현재 한국전기연구원 팀장



**김동욱(金東郁)**  
1961년 12월 11일생, 1984년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1999년 오사카 대학 전자공학과 졸업(공학박사), 현재 LG 전선 전력연구소 책임연구원/그룹장