

10 MW급 풍력터빈 발전기용 2세대 고온초전도 무절연/무저항 계자코일 시스템 제작 기술 개발 (한국에너지기술평가원 지원 에너지국제공동연구사업)

이 해 근
고려대학교 신소재공학부 초전도재료 및 응용 연구실

1. 서 론

전 세계적으로 직면하고 있는 화석 연료 고갈 및 최근 일본에서 발생한 후쿠시마 원전 사고 등으로 인하여 현재 전 세계적으로 대체 에너지 개발에 관심이 고조되고 있는 상황이다. 특히 초전도 응용 기술이 적용된 초전도 풍력발전 시스템은 기존의 상전도 풍력발전에 비하여 크기와 무게가 1/3로 감소될 뿐만 아니라, 고효율/저부하 특성이 우수하다는 장점을 가지고 있기 때문에 건설비용을 60% 이상 감소할 수 있으며, 시스템의 운영, 유지 및 보수를 위한 비용의 절감이 가능하여 최근 신재생 대체 에너지 방안으로 주목의 대상이 되고 있다 (그림 1). 이와 같이 다양한 장점을 보유한 초전도 풍력터빈 발전 시스템에 대한 연구/개발은 선진국을 중심으로 시작 되었으며, 특히 2000년대 이후부터 미국, 독일을 중심으로 2세대 고온초전도 선재를 이용한 풍력터빈 발전기 기술 개발에 많은 투자가 이루어지고 있으며, 관련 원천기술 확보에 박차를 가하고 있다.

그러나 현재까지는 상전도 풍력 발전기 기술과 비교하여 보았을 때 원천 기술 특히 출원 수도 적을 뿐만 아니라, 초전도 풍력터빈 발전 시스템이 현재 개발단계에 있다는 것을 감안한다면, 활발한 연구/개발을 통해 세계시장에서의 국가경쟁력을 충분히 획득할 수 있을 것으로 본다. 이에 따라 우리나라에서도 초전도 풍력터빈 발전기 개발이라는 목표 아래 국내외 다양한 연구기관과의 지속적인 교류를 통한 연구가 필수적이라 사료된다.

고려대학교 초전도재료 및 응용연구실에서는 MIT, 제주대학교, (주)두산중공업, (주)케이조인스, (주)지노이드와의 산/학/연 국제공동연구사업으로 “10 MW급 풍력터빈 발전기용 2세대 고온초전도 무절연/무저항 계자코일시스템 제작 기술 개발” (한국에너지기술

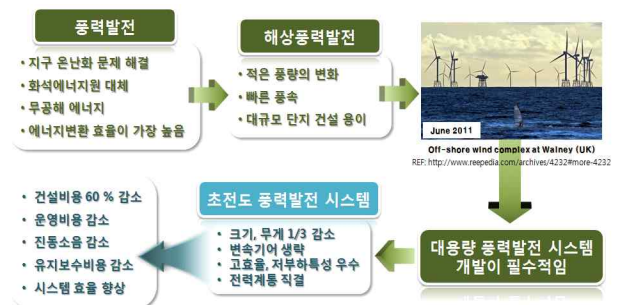


그림 1. 해상용 초전도 풍력터빈 발전시스템 기술개발 배경 및 필요성.



그림 2. 에너지국제공동연구사업의 참여기관.

평가원 지원) 연구를 2011년 12월부터 수행하고 있으며, 본 원고에서는 해당 연구 사업에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

2. 과제 개요

본 연구실이 주관기관으로 하는 국제공동연구사업 (한국에너지기술평가원)은 3년간 약 18.3억원 (2011.12 - 2013.11년) 규모의 사업이며, 2개의 국내대학, 1개의 해외대학, 그리고 대기업 및 중소기업 등 총 6개 기관이 참여하고 있다 (그림 2). 참여기관 상호간의 기술 교류 및 적절한 역할 분배를 통하여 수행하고 있는 10 MW급 초전도 풍력터빈 발전기를 위한 핵심기술 개발은 다음과 같다 (그림 3).



그림 3. 본 사업의 핵심기술 및 수행과제.



그림 4. 초전도 풍력터빈 발전기용 계자코일의 핵심기술.

- 초전도 계자코일 설계 및 제작 기술
 - Insulation-free 기술을 2세대 고온초전도 계자코일에 적용하여 기존 초전도 계자코일과 비교하여 소형화 및 안정성 향상이 가능.
- 초전도 계자코일 냉각 기술
 - 큰 열용량을 갖는 고체냉매를 기초로 한 하이브리드 냉매 냉각시스템을 개발/적용하여 대용량 초전도 풍력 발전기의 유지·보수 시 계자코일의 온도를 특정 운전온도 범위 내로 유지할 수 있기 때문에 시스템의 안정성이 크게 향상.
 - 이동형 시스템의 제작 및 소형화를 달성할 수 있어, 해외 선진사와의 기술 경쟁력 확보 가능.
- 초전도 계자코일간의 접합 기술
 - 초전도체층의 직접용융확산을 이용한 접합기술을 개발하여 2세대 고온초전도 선재의 무저항을 접합기술을 통한 영구전류 모드 시스템 구축 및 이에 따른 이동형 시스템으로 전환 가능.
- 초전도 계자코일의 보호 기술
 - Acoustic Emission (AE) 센서를 이용하여

2세대 고온초전도 계자코일의 손상을 조기 진단하며, 이를 통한 상시 감시 기술 확보.

3. 핵심기술 연구내용

앞서 언급한 바와 같이 초전도 풍력터빈 발전 시스템 중에서 가장 핵심이 되는 부분은 초전도 계자 코일의 설계 및 제작과 코일의 운전온도를 유지해 줄 수 있는 냉각시스템이며, 계자 코일의 보호를 위한 안정성 진단 기술 역시 초전도 풍력터빈 발전기의 성공적인 운전을 위해 필수적으로 사전에 고려되어야 할 사항이다. 또한 계자코일의 접합부에 상존하는 접합저항에 의해 초전도 계자코일 운전 시 시스템의 예기치 못한 손상이 발생할 수 있기 때문에 초전도 선재간의 접합저항을 최소화 만드는 초전도 접합기술은 반드시 개발되어야 할 기술이다.

본 사업에 참여한 연구기관들은 이와 같이 다양한 초전도 풍력터빈 발전기의 핵심기술에 대한 다년간의 정부 및 산학과제 수행 경험을 통해 쌓은 관련 정보 및 경험과 독자적인 노하우를 보유하고 있으며, 과제 목표의 성공적인 달성을 꾀함과 동시에 전 세계 최초로 기존 대비 우수한 특성을 갖는 2세대 고온초전도 계자코일 개발을 위한 핵심기술 확보에 부단한 노력을 기울이고 있다.

3.1. 초전도 계자코일 설계 및 제작 기술

초전도 계자코일의 제작에 앞서 10 MW급 초전도 발전기 개발을 위한 2세대 고온초전도 선재의 물성치 조사 및 이를 통한 선재별 성능 및 경제성을 평가한다. 또한 93 - 96 %의 효율을 갖는 2세대 고온초전도 발전기의 기초 설계를 수행하여 적합성 판단 연구를 수행한다.

국제공동연구기관인 MIT, FBML에서 처음 제안한 insulation-free 기술은 별도의 절연물을 삽입하지 않기 때문에 기존에 전기적 절연 물질을 삽입하여 제작되고 있는 초전도계자코일과 비교하여 부피를 매우 작게 만들 수 있다. 또한 코일의 매 턴마다 안정화재 층을 직접적으로 맞닿게 하기 때문에 국소적으로 발생된 과도한 열과 전류는 바로 층간 접촉을 통하여 쉽게 우회시킬 수 있어 퀵치 발생을 억제할 수 있음은 물론 초전도 코일의 안정성이 크게 향상된다는 장점이 있다.

초전도 풍력터빈 발전기용 계자코일에는

racetrack형 코일(그림 5)을 사용하는데, 이는 코일형상의 특성상 직선 부분과 곡선 부분으로 나눌 수 있으며, 권선을 할 경우 곡선 부분은 높은 압력으로 턴 간의 접촉이 강화되는 반면에 직선 부분은 낮은 압력이 걸려 턴 간의 접촉이 미흡해지는 현상이 발생한다. 앞서 언급한바와 같이 insulation-free 기술은 코일에서 퀀치가 발생할 경우 코일의 턴 간 접촉을 이용하여 자동적으로 퀀치 전류 및 열을 우회시키는 원리를 이용하는 것이기 때문에 선재의 인장강도를 조사하여 권선 시 최적화된 높은 장력을 확립하고, 별도의 장치를 이용하여 직선 부분의 턴 간 접촉률 향상을 위한 연구를 수행한다.

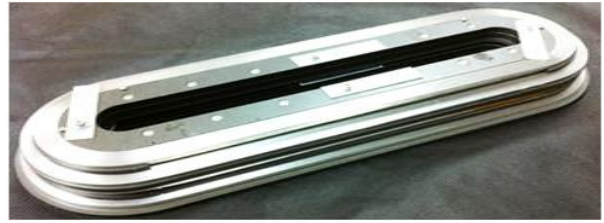


그림 5. 본 사업을 위해 제작된 Insulation-free racetrack형 테스트 코일.

3.2. 초전도 게지코일 냉각 기술

고체냉매는 냉각대상의 열을 흡수하고 온도를 유지시켜주는 역할을 하는 극저온의 고체상 물질로 액체냉매나 기체냉매를 주입한 뒤 냉동기나 감압장치 등을 이용하여 이들을 고화시킴으로써 얻을 수 있다. 고체상은 동일한 물질의 기체와 액체상에 비하여 밀도가 월등히 높고 열용량이 큰 것을 그 특징으로 하기 때문에 원하는 동작온도에서 장시간의 전원공급 없이도 온도를 유지할 수 있어 냉각 비용의 절감, 시스템의 소형화 및 안전성 향상을 가져 올 수 있다 (그림 6 참조).

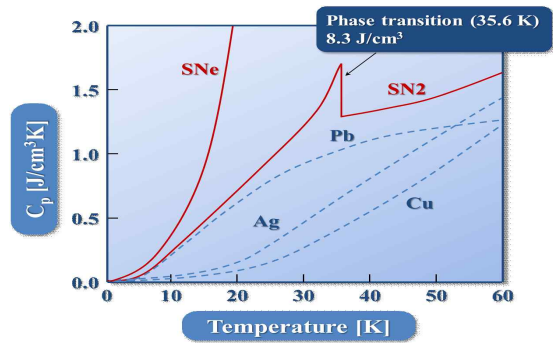


그림 6. 고체냉매 및 금속재료의 온도에 따른 열용량.

이와 같이 여러 장점에도 불구하고 고체냉매는 고체라는 상의 특성상 냉각대상과의 열접촉에 문제가 발생할 수 있으며, 또한 열확산 속도 역시 늦기 때문에 이를 개선하는 연구가 선행되어야 한다. 본 연구실에서 이미 수행한 연구를 통해 제시하는 방법으로 2가지 냉매를 혼합하여 사용하는 하이브리드 냉각방식과 단일 냉매를 사용하는 혼합상 (액체-고체)으로 제작하는 방식으로, 이 두 방법은 모두 액체-고체 하이브리드타입의 냉매에서 소량의 슬러쉬 상태의 액체 냉매가 초전도 마그넷과 고체냉매 사이의 열교환기 역할을 하여 열접촉 및 열확산 속도가 향상된다는 원리를 이용하고 있다 (그림 7 참조). 또한 하이브리드냉매는 기본적으로 고체냉매가 대부분을 차지하고 있기 때문에 고체상의 homogeneity가 매우 중요하며, 따라서 그림 8과 같이 4가지의 고체냉매 생성 방법을 통하여 2세대 고온초전도 선재 혹은 코일의 열·전기적 안정성을 분석한다.

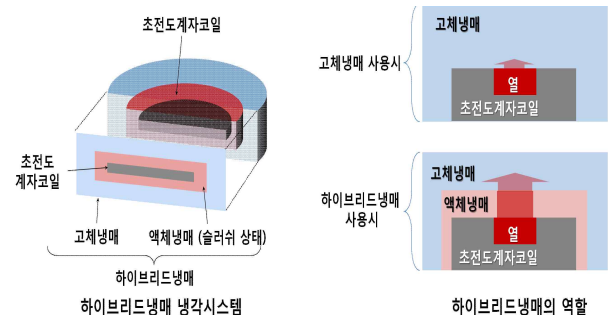


그림 7. 하이브리드 냉매의 원리 개념도.

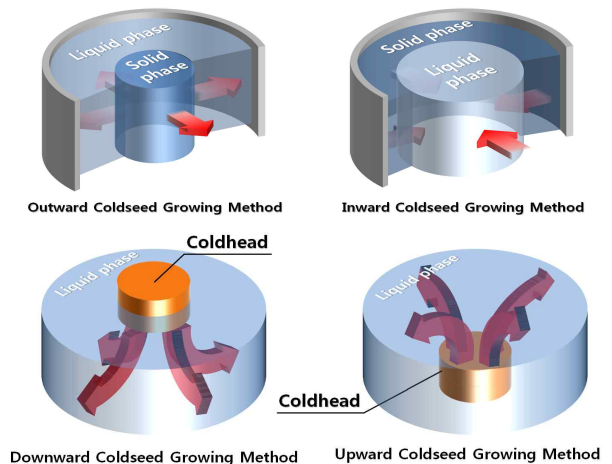


그림 8. 다양한 고체냉매 제작법의 예시.

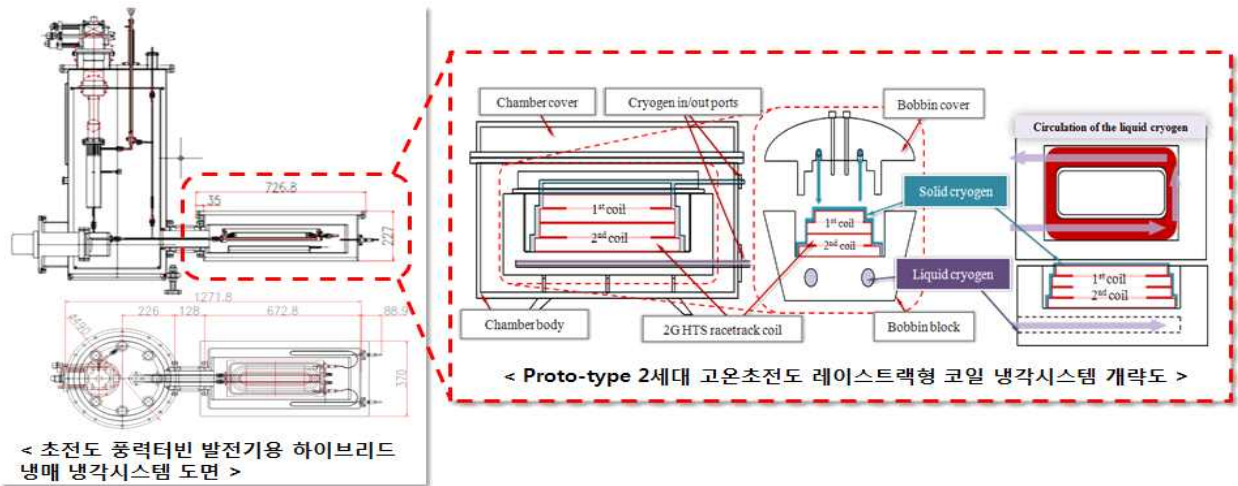


그림 9. 10 MW 급 풍력터빈 발전기용 하이브리드 냉각시스템의 개념도.

3.3. 초전도 계자코일간의 접합 기술

현재 개발되고 있는 2세대 고온초전도 풍력발전기는 제작 시 다수의 초전도 racetrack형 코일을 적층하여 단위 회전극을 제작하게 되며 이 단위 회전극을 주축에 원통형으로 배열하여 초전도 회전자를 제작하기 때문에 계자코일간 및 회전극간의 접합이 필수적으로 수행되어야 한다. 따라서 초전도 풍력발전기를 연구하는 기업 및 연구기관들은 이러한 초전도 계자코일간의 접합을 위한 연구를 수행하고 있으나, 대부분의 연구가 접합부위에 별도의 용가재(solder)를 삽입하는 상전도 접합 방법이며, 이는 용가재 물질의 저항으로 인한 접합저항이 상존하게 되며 이로 인한 줄열을 발생시켜 시스템의 온도가 지속적으로 증가된다. 따라서 안정적인 초전도 계자코일의 냉각을 어렵게 할 뿐만 아니라, 높은 접합저항의 발생으로 인한 초전도 계자코일의 온도증가는 켄치를 유발하여 계자코일의 훼손을 가져오는 심각한 결과를 초래할 수 있는 요인이 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하고 개선하기 위하여 본 사업에서는 2세대 고온초전도 계자코일 및 극간 접합을 실시할 때 접합부위의 별도의 용가재를 삽입하지 않고, 초전도층간의 직접용융확산만을 이용하는 2세대 고온초전도 접합 기술을 세계 최초로 개발, 실제 영구전류 모드 운전 및 이동형이 가능한 초전도 풍력터빈 발전기 제작이 가능하게 한다 (그림 10).

특히 본 기술은 초전도 층의 용융확산 접합 방법의 핵심은 안정화재 층을 제거하여 초전도 층끼리 직접 맞댄 후 조절된 산소분압 하

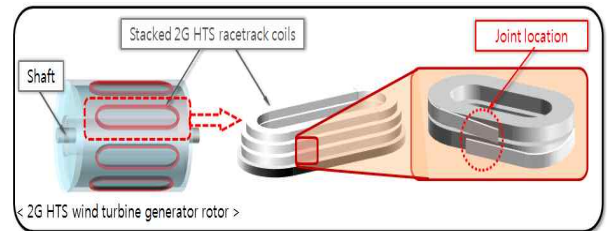


그림 10. 초전도 접합 기술이 적용된 풍력발전용 계자코일 개념도.

에서 용융확산을 통해 초전도층간의 접합을 이루는 것이기 때문에 용융확산접합 시 열처리 온도, 시간 및 산소분압 조건과 같은 변수들에 의해 초전도 층의 morphology는 다양하게 나타나며, 이것은 접합저항, index값, 임계전류 값 등에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 최적의 열처리 조건을 확립하기 위한 감압/가압이 동시에 가능한 특수 열처리로 개발이 필수적이다 (그림 11).

3.4. 초전도 계자코일의 보호 기술

초전도 발전기와 같은 회전기기 시스템일수록 초전도 계자코일의 이상 및 냉매에 의한 냉각이 불균일해지기 때문에 시스템 전반 및 초전도 회전자에 치명적인 이상 및 고장을 유발할 수 있으므로 이를 사전에 진단 및 검출하는 기술개발은 안정적인 초전도 풍력터빈 발전기를 개발하는 데에 있어서 매우 중요한 역할을 담당한다. 따라서 본 연구에서는 10 MW급 풍력터빈 발전기용 2세대 고온초전도 계자코일의 안정성 조기 진단을 위하여 초전



그림 11. 2세대 고온초전도 선재의 접합공정 절차 및 공정별 특수열처리로.

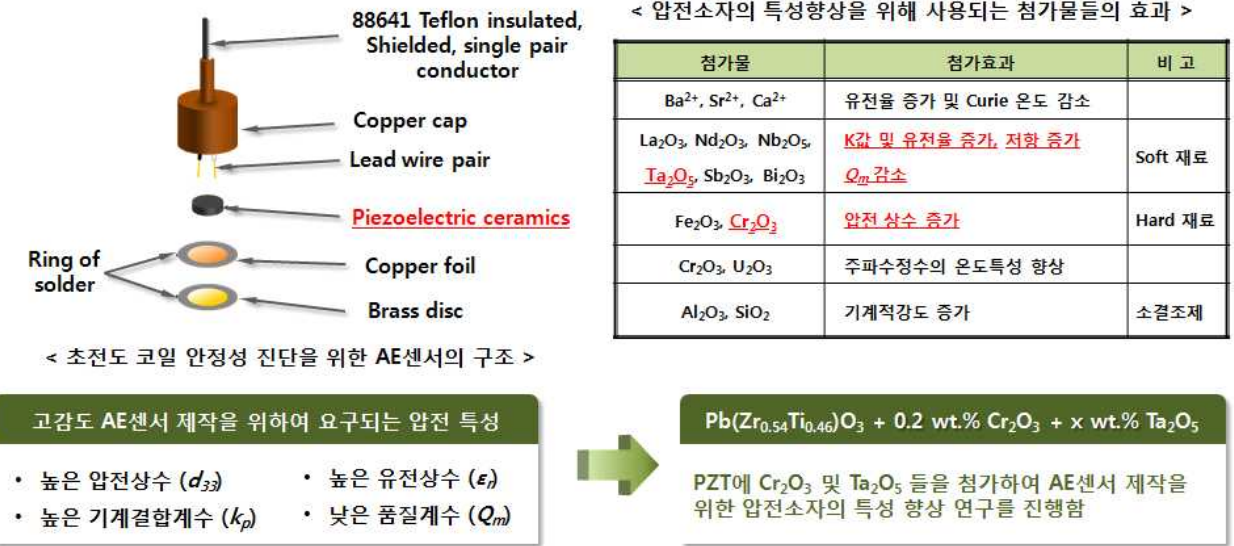


그림 12. 초전도 계자코일의 안정성 진단을 위한 AE 센서의 구조 및 세라믹 압전소자 물성 및 압전 특성 요약.

도 재료 내부에 미세 균열에 의한 변형이나 손상이 생길 때 발생하는 기계적인 진동을 고감도 압전소자를 통해 전기적인 신호로 변환해주는 Acoustic Emission(AE) 센서를 이용하는 보호기술 연구를 수행한다(그림 12 참조).

또한 고성능의 AE 센서개발을 위하여 AE 센서용 압전체로 타재료에 비하여 사용 빈도가 높고 변성이 크며 안정성이 우수한 PZT(PbZrO₃와 PbTiO₃의 고용체) 고감도 세라믹 압전소자의 성능 향상 연구를 통하여 고성능

압전소자를 제작, 이를 이용하여 검출감도와 특성이 매우 우수한 AE 센서를 제작한다.

4. 연구 개발 성과 및 향후 계획

본 사업을 수행함에 따라 2세대 고온초전도 무절연/무지항 계자코일 및 하이브리드냉매 냉각시스템 제작을 위한 기초연구, insulation-free (무절연) 기술을 2세대 고온초전도 계자코일에 적용하기 위한 기초 연구, 2세대 고온

초전도 선재의 용융확산 접합법 개발, 초전도 발전기를 위한 AE 센서용 세라믹 압전소자 개발, 10 MW급 초전도발전기 기초설계 및 초전도 계자코일용 2세대 선재의 물성특성 연구를 실시하였으며, 연구과제 수행을 통해 초전도 풍력발전기를 개발하는데 있어 필요한 기초 기술 및 지식을 획득하였다.

또한 본 연구 과제를 수행한 1차년도 기간에는 각각 1건의 국내 및 해외특허를 등록했고, 각각 5건 및 2건의 국내, 해외특허를 출원하여 초전도 풍력 발전 관련 원천기술을 확보하였다. 이와 더불어 총 8편의 SCI 논문을 발표하였고 (게재 완료 5편, 예정 3편), 2편의 국내논문 게재 및 총 22건의 해외학술회의 발표, 총 18건의 국내학술대회 발표를 실시하는 등 활발한 학술활동을 수행하였으며 논문과 학술회의에서 발표한 우수한 연구 사례로 인정받은 바 있다 (표 1).

1차년도 연구과제 수행을 통해 얻은 우수한 연구 성과를 바탕으로 2차년도 역시 기 계획되어진 계획에 맞춰 연구를 진행할 것이며, 이를 통한 심화 연구 수행 및 관련 시장으로의 사업화를 모색할 계획이다.

5. 결 언

최근에 미국의 GE사가 Converteam을 인수하면서 기존에 독일의 Siemens사가 절대적인 우위를 점하고 있던 풍력 발전 시장에서 점차적으로 영향력을 키워가고 있으며, Vestas, Repower, Bard 등의 후발기업들의 시장 진입으로 업체 간 경쟁이 본격화되어 가는 분위기이다. 또한 GE사는 미국에너지부의 대규모 지원 아래 극저온 냉각 기반의 15 MW급 초전도 풍력발전기 개발 프로젝트를 진행하고 있으며, 아울러 지난 2012년 미국 오레건주 포틀랜드에서 개최된 ASC에서 초전도 풍력발전 관련 10개의 세션에서 100여 편의 논문이 발표되는 등 초전도 풍력 발전에 대한 전 세계적인 관심이 집중되고 있으며, 이에 따른 기술개발에 더욱 박차를 가하고 있는 실정이다.

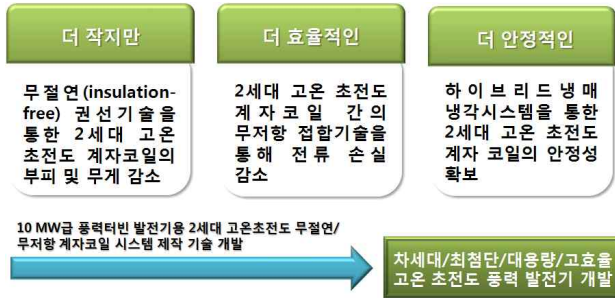
본 연구 과제를 통해 현재 까지 개발된 다양한 기술들은 추후 실제 초전도 풍력터빈 발전기에 사용될 국내의 독자적인 핵심기술이며, 국내·외 학술활동 및 발표를 통한 관련 연구의 우수성을 인정받고 있을 뿐만 아니라,

표 1. 1차년도 연구 개발 성과 (특허 및 논문).

항목	성과	비고
해외 특허	등록	1 ●Melting Diffusion Welding Method for Second Generation High Temperature Superconducting Wire (등록번호 : ZL20098016223.3)
	출원	2 ●Superconducting Joint Method for First Generation High-temperature Superconducting Tape (국제출원번호 : US13/635,754) ●고온 초전도체층의 직접 접촉에 의한 부분 미세 용융확산 압접을 이용한 2세대 REBCO 고온 초전도체의 접합 및 산소 공급 어닐링 열처리에 의한 초전도 회복 방법 (국제출원번호 : PCT/KR2012/008953)
국내 특허	등록	1 ●자기 부상력을 이용한 극저온 물질 저장 용기 (등록번호 : 10-1187191)
	출원	5 ●2세대 고온 초전도 선재의 은 보호층 확산에 의한 접합방법 (출원번호 : 10-2010-0061381) ●레이스트랙형 초전도 코일의 에폭시 함침장치 (출원번호 : 10-2010-0073376) ●초전도 발전기와 논 커플링 구조식 냉각 시스템을 갖는 풍력 발전기 (출원번호 : 10-2012-0115775) ●고온 초전도체층의 직접 접촉에 의한 부분 미세 용융 확산압접을 2세대 ReBCO 고온 초전도체의 접합 및 산소 공급 어닐링 열처리에 의한 초전도 회복 방법(출원번호 : 10-2012-0113047) ●Mg 및 B를 포함하는 초전도 와이어의 접합 방법 (출원번호 : 10-2012-0124334)
SCI 논문	게재	5 ●Investigation of HTS Racetrack Coil Without Turn-to-Turn Insulation for Superconducting Rotating Machines ●Normal Zone Initiation and Propagation Characteristics of a Solid Nitrogen Cooled GdBCO Racetrack Pancake Coil ●The Effects of External Pressure on the Thermal and Electrical Properties of Stacked GdBCO Coated Conductor Tapes ●The Effects of Partial Insulation Winding on the Charge-discharge Rate and Magnetic Field Loss Phenomena of GdBCO Coated Conductor Coils ●Conceptual Design of a Field Coil for 5 MW HTS Synchronous Machine
	게재 예정	3 ●Thermal and Electrical Characteristics of Non-Insulated GdBCO CC Racetrack Coil Under Various External Pressures ●Turn-to-turn Contact Characteristics for Equivalent Circuit Model of No-insulation ReBCO Pancake Coil ●Effects of Impregnating Materials on Thermal and Electrical Stabilities of the HTS Racetrack Pancake Coils Without Turn-to-turn Insulation
국내 논문	2	●무절연 레이스트랙형 코일의 직선구간 압력변화에 따른 열적 안정성 연구 ●Magnetic Field Analysis of the Field coil for 10 MW Class Superconducting Wind Turbines

개발기술은 그 적용의 범위가 대부분의 고온 초전도 응용기기를 포함할 수 있기 때문에, 해당 기술이 갖는 의미는 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 현재까지 개발된 기술을 바탕으로 본 연구실을 비롯한 연구과제 참여기관들은 핵심기술력을 향상시키고, 국내·외 기술

경쟁력을 확보하여 근 시일 안에 차세대/최첨단/대용량/고효율 2세대 고온초전도 풍력 발전기 개발 및 시장진입을 위해 온 힘을 기울일 예정이다.



저자이력



이해근(李海根)

1963년 9월 26일 생, 1987년 고려대 공대재료공학과 졸업, 1990년 미 일리노이대 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 1995~1997년 MIT, FBML 박사후과정, 1997~2006년 MIT, FBML 연구교수, 2006~현재 고려대학교 신소재공학부 교수.

감사의 글

본 연구는 2012년도 에너지국제공동연구기술개발사업인 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(No.20118520020020)의 지원에 의해 수행되었습니다.