

**특집 : 에너지 저장기술**

# 초전도 플라이휠 에너지 저장기술

한 상 철, 성 태 현  
(전력연구원 신에너지그룹)

## 1. 기술의 개요

고온초전도 플라이휠 에너지 저장기술은 『초전도 기술 분야』에 해당하는 기술로, 고온초전도체의 발견 이후 새롭게 떠오른 기술이다. 이 기술은, 고온초전도체의 독특한 현상인 자기 공중부양 및 자기 고정을 이용한 베어링을 사용하여, 전기 에너지를 플라이휠의 회전 운동에너지로 저장하고, 이 에너지를 마찰에 의한 손실이 없도록 유지하였다가, 발전하여 사용하는 방법이다. 고온초전도 플라이휠 에너지 저장기술의 장점은 에너지 저장효율이 90% 이상으로 타 저장방식에 비하여 매우 높고, 에너지 저장밀도도 높다는 것이다. 또, 양수 발전기술이나 배터리 등 대부분의 에너지 저장기술들이 환경을 파괴하는 반면에, 고온초전도 플라이휠 에너지 저장기술은 환경 친화적이라는 특징을 가지고 있어, 세계 선진 각국에서도 활발히 연구가 수행되고 있다.

이 고온초전도 플라이휠 에너지저장 기술은 고온초전도 베어링 기술과 무접촉 전동/발전기 기술, 진공시스템 기술, 냉각시스템 기술 등으로 구성되어 있다. 이중 가장 핵심이 되는 고온초전도 베어링 기술은 영구자석 배열기술, 강한 부상을 위한 고온초전도 단결정 제조기술과 고온 초전도 선재를 사용하여 강력한 자장을 낼 수 있는 초전도 자석 기술을 근간으로 하고 있다. 이러한 기술들은 초전도 분야 전반에 걸쳐 가장 기본이 되는 것이므로, 고온초전도 플라이휠 에너지저장 기술의 발전은 다른 초전도 응용 기술의 발전을 유도할 수 있고 전력, 의료, 산업기기 및 전자산업 등에 기술적 파급효과가 크다고 할 수 있다. 예를 들면 저온 초전도 자석은 자기공명영상(MRI), 뇌자측정장치 등 의료기기산업에 활용되고 있지만 고가인 것이 문제여서 경제성을 따지는 타 기술분야에는 적용되지 못하고 있지만, 고온초전도 자석 기술이 개발되면 광범위한 적용이 가능하다.

현재 개발되고 있는 방식은 그림 1에서 보는바와 같이 크게 두 가지로 수직축 플라이휠 방식과 수평축 플라이휠 방식이

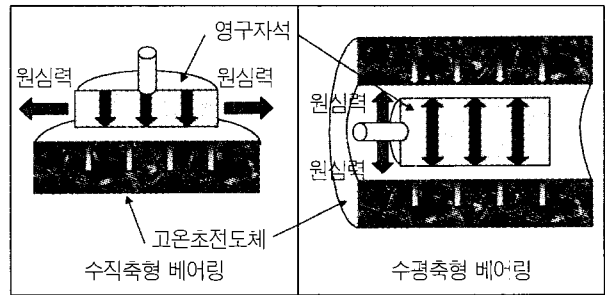


그림 1. 수직축형과 수평축형 초전도 베어링의 도식적 그림

있다. 수직축 플라이휠 방식은 고온초전도체 판 위에 영구자석이 달린 회전판을 올려놓아 자기력으로 회전체를 들어올리고 회전판을 수직축으로 회전시킴으로써 에너지를 저장하는 방식이다. 수평축 플라이휠은 회전체를 고온초전도 저어널 베어링으로 지지하고, 이 회전체를 회전시켜 에너지를 저장하는 방식이다.

고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치에서 에너지 저장용량을 늘리기 위해서는 휠의 크기를 크게 하는 방법, 회전속도를 증가 시키는 방법 그리고 다수의 회전체를 직렬 연결하는 방법이 있다. 이중 휠의 크기를 크게 하는 방법과 회전속도를 증가시키는 방법에는 재료적인 한계가 있어, 기술적으로는 다수의 회전체를 직렬로 연결하는 방법이 가장 적합한 것으로 고려되고 있다. 수직축 플라이휠 장치를 이와 같이 대응량화할 경우 베어링의 특성상 회전축 반경 방향으로의 안정성이 약하게 되어 안정성 확보를 위한 추가 비용이 많이 들고, 설비의 구조물 상·하단간의 길이가 길어짐으로써 설비의 안전성 확보가 어렵고 설치 공정이 어려워 건설 비용이 많이 들게 된다. 그러나 여기서 제안하는 수평축 플라이휠 에너지 저장장치는 다수의 회전축을 안정적으로 연결하기에 용이한 장점이 있어, 대용량의 에너지 저장에 적합한 방식이다.

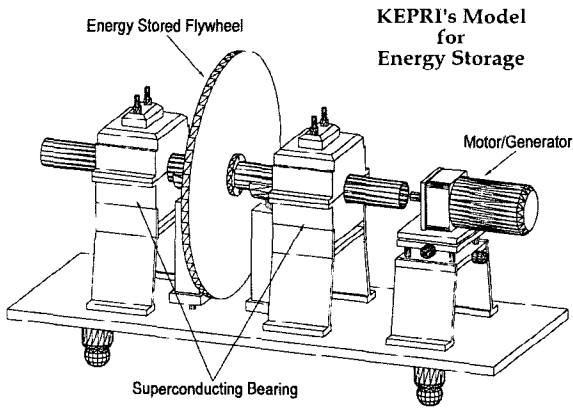


그림 2. 수평축 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 도식적 모양

수평축 플라이휠 에너지 저장장치는 크게 나누어, 회전체 지지를 위한 저어널 베어링과 큰 회전 관성을 갖는 회전체, 에너지 변환을 위한 전동/발전기로 구성되어 있고, 여기에 진공 시스템, 냉각 시스템, 전력변환시스템이 부착되어 있다(그림 2). 이 중 저어널 베어링은 원통형의 고온초전도체가 영구 자석이 들어있는 회전체 축을 둘러싸도록 구성되어 있으며 회전체를 지지하는 핵심 부품이다. 그러므로, 이 기술이 실현되기 위해서는 영구자석과 고온초전도체의 배열의 설계를 최적화하여 강한 부상력을 갖는 저어널 베어링의 개발이 필수적인데, 이미 국내에서 세계 최초로 개발된 바 있다. 이 기술을 대용량 에너지 저장장치에 적용하기 위해서, 저어널 베어링이 더 강한 부상력을 갖도록 하는 연구가 진행 중이다.

이러한 수평축 방식의 플라이휠 에너지 저장장치를 개발하여 대용량화한다면, 종래의 방식에 비해 안정성 및 경제성 면에서 탁월한 향상을 이룰 수 있으며, 이는 곧 세계를 선도하는 기술이 될 것이다.

## 2. 국내외 기술동향 및 수준

### 2.1 국외의 기술동향 및 수준

고온초전도 베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치의 개발은, 전력에너지 저장 등 그 파급효과의 막대함에 힘입어, 미국, 일본, 유럽의 각 나라에서 경쟁적으로 이루어지고 있다.

현재 가장 활발한 연구를 진행하고 있는 곳은 NEDO를 중심으로 하여 국가적으로 지원을 아끼지 않는 일본으로, 몇몇 전력회사와 중전기 제작업체가 1 kWh급의 전력 저장 장치용 고온초전도 플라이휠을 제작하여 시험 중에 있다. '99년 3월호 일본 "전기현장기술"지에 의하면 중부전력과 미쓰비시 중공업이 공동으로 외경 60 cm, 반경방향 두께 7.5 cm의

CFRP(탄소섬유강화플라스틱)휠을 사용한 1 kWh급 수직축 플라이휠 전력저장장치의 시험기를 제작, 회전수 27,000 rpm을 실현하여 이 회전수 영역에서 사용 가능한 세계 최대, 최고 성능의 회전체로서의 기록을 세웠다. 일본 신에너지 산업기술 총합연구기구는 1999년까지 10 kWh 급의 플라이휠 제작을 완료하고 2000년 이후에는 상용화 규모인 10 MWh 급 전력저장장치를 제작하여 기존의 납축전지 등의 전력저장장치를 대체할 예정이다.

미국에서는 많은 연구 기관이 고온초전도 베어링의 개발에 참여하고 있으나, 플라이휠에 관한 프로젝트는 주로 Argonne 국립연구소와 Houston 대학에서 행하여지고 있다. Argonne 국립연구소는 1997부터 1 - 5 MWh 용량의 에너지 저장장치를 개발하고 있으며, 현재 500 kg의 회전자가 사용될 수 있는 진공 회전실을 건설 중에 있다. Houston 대학에서는 학내에 초전도 연구 거점인 Texas Center for Superconductivity를 설치하여 플라이휠의 자기부상력과 안정성(stiffness)을 향상시키기 위해 2개의 초전도 베어링을 회전체의 상하단부에 설치한 hybrid형 방식의 플라이휠을 개발하고 있다. 이 방식을 이용하여 무게 14 kg의 플라이휠을 6,000 rpm으로 회전시키는데 성공하였으며 현재 EPRI로부터 연구비 지원을 받고 있다. 또한 Houston 대학은 NASA와 공동으로 천체 관측용 망원경(lunar telescope)을 초전도베어링을 이용해서 제작하는 연구를 수행중이다.

독일은 중규모 고온초전도 플라이휠의 개발을 목표로 Karlsruhe 연구소가 중심이 되어 프로젝트를 수행하여, 무게 2.8 kg의 회전체를 12,000 rpm으로 회전시키는데 성공하였으며, 직경 20 cm, 무게 10 kg의 회전체를 50,000 rpm의 속도로 회전시켜 총 에너지 용량 300 Wh, 출력 10 kVA의 2차 시제품을 제작하였다.

앞에서 설명한 세계 주요국의 고온초전도 플라이휠 개발 현황을 아래 표 1에 요약하였다. 거의 모든 연구가 대용량의 에너지 저장에 어려움이 있는 수직축 방식을 채택하고 있는데

표 1. 세계 주요국의 고온초전도 플라이휠 에너지저장장치 개발현황

국가	기관	규모	비고
일본	중부전력, 미쓰비시 등	직경60 cm, 180 kg, 27,000 rpm, 1 kWh,	수직축
	ISTEC	직경30 cm, 3,600 rpm, 100 Wh	"
미국	Argonne 국립연구소	300 Wh,	"
	Houston 대학	14 kg, 6,000 rpm	"
독일	Karlsruhe 연구소	직경20 cm, 10 kg, 5,000 rpm, 300 Wh	"

이것은 강력한 부상력의 고온초전도 저어널 베어링을 개발하지 못했기 때문이다.

### 2.2 국내의 기술동향 및 수준

국내의 한국원자력연구소는 직경 3.5 cm, 두께 2.5 cm의 고온초전도 단결정을 제작하여 수 kg의 디스크 형 알루미늄 회전체를 부상시킨 수직축 초전도 베어링을 제작하는데 성공하였고, 이를 이용한 소형 고온초전도 플라이휠을 제작하여 공기 중에서 일만 rpm의 회전속도를 기록하였다. 현재, 설계기준으로 20,000 rpm에서 저장용량이 300 Wh급인 직경 30 cm, 20 kg 중량의 알루미늄 회전 디스크를 진공에서 3,000 rpm 회전시키는 데 성공하였고 무접촉 구동 및 전력 저장 시스템을 시험 중이다.

또한 한국전력공사 전력연구원은 특수한 자석배열과 Y계 고온초전도 단결정들을 원통형으로 배열한 수평축 초전도 저어널 베어링을 개발하고, 이 베어링에 직경 40cm, 중량 16kg의 휠을 장착하여 설계기준(진공, 10,000 rpm)으로 1 kWh 이고 상용기준(무진공, 3,000 rpm)으로 7 Wh급 프로토타입의 플라이휠 에너지 저장장치를 제작하여 성능 시험을 수행하였다<sup>1)</sup>. 현재 30kg의 휠을 부양할 수 있는 초전도 베어링과 액체질소 자동공급 시스템, 1 mtorr 진공 그리고 40,000 rpm까지 구동하고 1 kW의 부하를 사용할 수 있는 무접촉 모터/발전기를 장착한 300 Wh급의 초전도 플라이휠 에너지 저장장치를 개발하여 성능시험 중이다<sup>2)</sup>.

## 3. 전력연구원 모델의 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치

### 3.1 무접촉 고온초전도 저어널베어링의 구조 설계

회전자의 구조는 다수의 원통형 자석을 동일 극이 이웃하도록 N-S S-N N-S S-N 극의 순서로 소정 간격을 두고 비자성체의 원통 안에 강제 배열하여 자속의 방향이 회전자의 반경 방향으로 형성되도록 하였다(그림 3). 고정자의 구조는 종래의 고온초전도 저어널베어링 고정자에 포함된 고온초전도체 원통의 외주면에 대하여 자석을 설치하여 회전자 자석에 미치는 인력과 척력을 보강하여 부상력을 증가시킬 수 있도록 하였으며, 또 다른 예로 고정자의 상하 면으로는 자석들을 대향 설치하여 회전자와 고정자 간에 인력과 척력을 발생시키고 좌우 측면으로는 고온초전도체를 설치하여 회전자에 대한 고정력을 발생시키도록 하여 부상력을 더욱 증가시켰다.

고정자로는 자속고정용 고온초전도체를 상기 회전자의 외측으로 간극을 두어 상부와 하부에 각각 설치하였다. 회전체에 작용하는 중력 등의 힘을 자기압력(magnetic pressure)으로 상쇄시키기 위해 반원통형의 자속고정용 고온초전도체가 간극을 두고 계란형으로 떨어져 있다. 베어링을 자기장 하 냉각

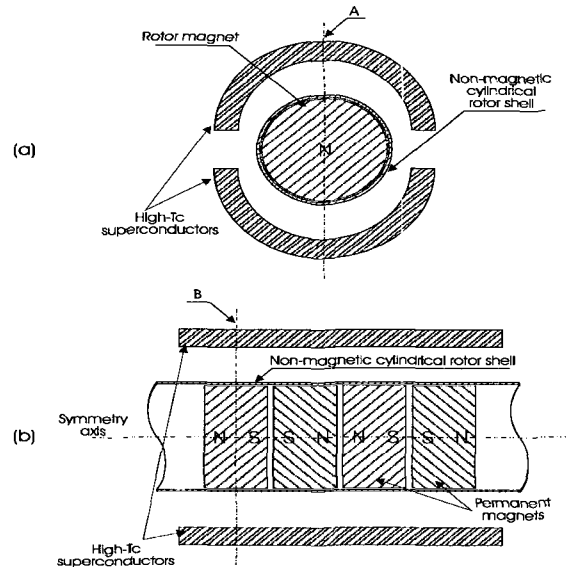


그림 3. 고온초전도 저어널베어링의 단면 모식도

(field cooling)시킬 때 회전체를 힘 방향의 반대쪽에 두고, 냉각 후 힘을 받아 설계시 예정한 위치에 올 수 있도록 한다.

### 3.2 플라이휠 장치의 구성 설계

종래 기술로서 고온초전도 쓰러스트베어링을 이용한 수직축 플라이휠 에너지 저장장치는 플라이휠과 고온초전도 쓰러스트베어링, 전동/발전기는 중력 방향과 평행한 회전축에 부착되어 진공/안전용기 내부에 설치된다. 쓰러스트베어링은 고온초전도체로 이루어진 베어링 고정자와 영구자석 회전자로 구성되어 축 방향으로의 부상력을 주로 제공하고, 축 반경 방향으로의 고정력도 제공한다. 플라이휠은 높은 에너지 저장밀도를 위한 고속회전에 견딜 수 있는 재료와 형태로 제작되며, 진공/안전용기는 내부 진공을 유지해 공기 저항 손실을 줄이고 만일의 사고 발생시 내부 구성물 이탈을 방지하기 위해 제작된다. 전동/발전기는 내부의 접촉식 베어링을 없애 마찰을 없애고 회전시 전자기적 손실을 줄일 수 있도록 설계 제작되어 외부의 전력 변환설비와 제어설비에 연결된다.

상기한 바와 같은 고온초전도 쓰러스트베어링을 이용한 수직축 플라이휠 에너지 저장장치는, 그 회전축이 중력 방향과 평행함으로써 몇 가지 문제점을 가지게 된다. 그 문제점을 크게 나누어 설명하면 다음과 같다.

첫째, 안정성의 문제이다. 종래 기술에 의한 수직축 플라이휠 구성에서 회전체가 평형 위치에서 축의 반경 방향으로 이탈하는 경우, 축 방향으로 이탈하는 경우에 비해 영구자석에 의해 발생된 자장의 변화가 비교적 적음으로써 베어링이 회전체에 작용하는 복원력이 약하게 된다.

둘째, 확장성의 문제이다. 플라이휠 에너지 저장설비의 대용량화를 위해서는 플라이휠의 회전속도를 증가시키거나 회전관성을 증가시켜야 한다. 회전속도는 플라이휠 소재의 재료적인 한계에 의해 결정되므로, 플라이휠 설비의 대용량화는 플라이휠의 회전관성을 증가시켜 용이하게 이루어질 수 있어야 한다. 플라이휠의 회전관성을 증가시키기 위해 휠의 반경을 증가시키는 방법 또한 휠 소재의 인장강도라는 한계에 부딪히므로, 플라이휠 에너지 저장장치의 대용량화는 축 방향으로 휠과 베어링들을 길게 직렬 연결하는 방법이나 여러 개의 플라이휠 장치들을 병렬로 연결하는 방법으로 구현해야 함을 알 수 있다.

이와 같이, 종래 기술의 고온초전도 쓰러스트베어링을 이용한 수직축 플라이휠 에너지 저장장치의 경우 회전축 반경 방향으로의 안정성이 비교적 약하고, 확장에 의한 설비의 대용량화가 용이하지 않다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 종래 기술에 의한 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치가 가지는 문제점들을 개선한 새로운 방식의 플라이휠 에너지 저장장치를 개발하였다. 새로운 방식의 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치 구성은, 회전축을 중력 방향에 수직인 수평축으로 하여 고온초전도 저어널베어링과 플라이휠, 전동/발전기를 설치하는 구조를 채택함으로써, 상기 에너지 저장장치의 안정성을 향상시킴과 동시에, 다수의 플라이휠과 베어링들의 직렬 연결에 의한 대용량화를 용이하게 하여 이루어진다.<sup>3)</sup>

그림 4는 본 연구에서 제안한 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 구성 예로서, 하나의 플라이휠로 구성된 고온초전도 저어널베어링을 이용한 수평축 플라이휠 에너지 저장장치의 단면을 개략적으로 도시한 것이다.

결론적으로, 본 연구에서 제시한 바 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 구성 개념은, 플라이휠 에너지 저장장치를 구성함에 있어 중력 방향과 직각인 수평축과 고온초전도 저어널베어링을 채용하여, 종래 기술에 비해 그 안정성과 확

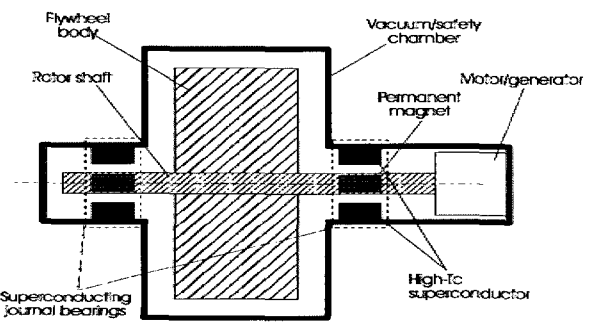


그림 4. 고온초전도 저어널베어링을 이용한 수평축 플라이휠 에너지 저장장치 개념도

장성을 향상시키고 제작·건설비용을 줄인 것으로, 종래의 플라이휠 에너지 저장장치에 안전성 경제성 측면에서 큰 향상을 가져다줄 수 있다.

3.3 시작품 제작

본 연구에서는 앞에서 기술한 자석배열을 포함한 베어링 기술 그리고 플라이휠 장치의 구성 설계를 시현하기 위해 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 시작품을 제작하였다.

현재 제작이 완료되어 시운전 중인 플라이휠 에너지 저장장치 시작품은 약 28.7 kg의 회전체가 20,000~40,000 rpm의 회전속도로 운전되도록 설계되었고, 이 때 가용에너지(usable energy)는 372 Wh 정도이다. 이 구성으로 회전체를 공기중에서 10,000 rpm 이상의 속도로 안정적으로 회전시킬 수 있었다. 구동 초기 강체모드 공진 영역에서는 설치된 가이드베어링이 정상적으로 충격을 흡수하였고, 약 2000 rpm 이상에서는 바람소리만이 들리는 완전한 무접촉 부양 회전을 볼 수 있었다. 회전 초기에 약간의 평형 위치 이동이 있었으나, 이러한 현상은 사전 연구를 통해 충분히 예측된 바 있고, 그 이후 지속적으로 회전체가 회전하는 동안에는 초전도베어링의 평형 위치 이동을 관측할 수 없었다. 그림 5는 조립이 완료된 시작품의 모습으로 뚜껑을 덮지 않은 상태이다.

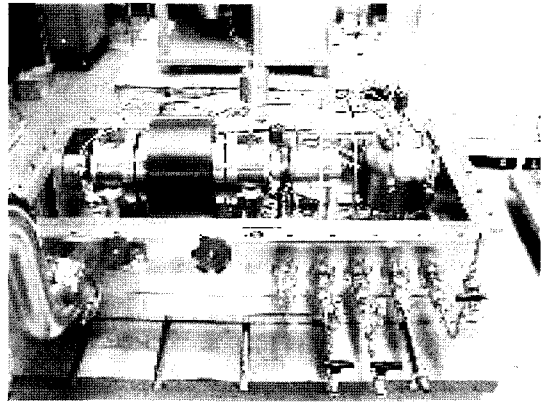



그림 5. 전력연구원에서 개발한 300Wh급 수평축형 초전도 플라이휠 에너지 저장장치

4. 맺음말

플라이휠 에너지 저장장치에 필수적인 기술로는 무접촉 베어링 기술 이외에도 냉각기술, 전동발전기 기술, 전력변환기술, 휠 제작기술 등이 있다. 이 중 가장 핵심이 되는 분야는 고에너지저장밀도를 가지는 휠 제작기술이라고 볼 수 있다. 휠이 큰 회전관성을 가지면서 고속 회전시의 응력을 견딜 수

있으려면 재료의 중량 대비 인장강도가 커야 한다. 일반적인 강철이 이론적으로 약 30 Wh/kg의 에너지저장밀도를 가질 수 있음에 비해, Graphite T-1000 등 최근의 섬유복합재들은 최대 수백 Wh/kg의 이론적인 에너지저장밀도를 가질 수 있다고 알려져 있다. 근래에는 이중의 원통형 섬유복합재를 압축응력하에서 조립하여 휠의 에너지 저장밀도를 높이는 연구가 진행되고 있고, 이러한 휠을 이용하여 제작한 플라이휠 장치도 보고되고 있다.

플라이휠 에너지 저장기술의 가장 중요한 기술적 성공 요건을 들라면, 낮은 에너지 손실률과 높은 에너지 저장밀도를 구현하는 것이라 할 수 있을 것이다. 고온초전도 베어링 기술이 야말로 복합재 휠 기술과 함께 이 두 요건을 만족시키기 위한 최적의 기술이라고 보여지며, 인류의 새로운 에너지 저장방식을 구현하는 열쇠가 될 것으로 믿는다. 

### 참고문헌

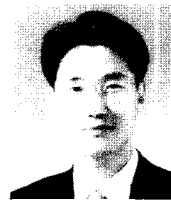
- [1] T.H. Sung, J.S. Lee, Y.W. Yi, Y.H. Han, S.C. Han, C.J. Kim and S.J. Kim, Int. J.Soc. Mater. Eng. Resour., 8 (2000) 27.
- [2] Tae-Hyun Sung, Young-Hee Han, Sang-Chul Han, Jun-Sung Lee, Sang-Joon Kim, Young-Chul Kim, Physica C, accepted.
- [3] T-H Sung, S-C Han, Y-H Han, J-S Lee, N.H. Jeong, S.D Hwang, S.K. Choi, Cryogenics, accepted.

## 〈저 자 소 개〉



### 한상철

1966년 3월 26일생. 1987년 고려대학교 공대 금속공학과 졸업. 1990년 KAIST 재료공학과 졸업(공학석사). 1995년 KAIST 재료공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 선임 연구원.



### 성태현

1959년 10월 9일생. 1982년 한양대학교 공대 무기재료공학과 졸업. 1987년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사). 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(공학박사). 1991년-1992년 ISTEK 근무. 1992년-1995년 MIT Post-Doc.

현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원.