특집

풍력발전 시스템과 전망

김일환*, 좌종근*, 김건훈**
(* 제주대학교 전기공학과, ** 한국에너지 기술연구소)

1. 머 리 말

1970년대의 유류파동은 전세계적으로 대체에너지개발을 촉진 시켰고 그 중에서 풍력발전에 대한 본격적인 연구는 1973년 6월에 미국의 과학재단과 항공우주국이 공동으로 개최한 풍력발전에 관한 workshop이 시초이다[1]. 그 이후 미국, 독일, 스웨덴, 덴마아크, 네덜란드, 일본등 많은 나라에서 풍력발전 기술개발을 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 특히 최근에 전세계적으로 Green Round 협약에 따라 청정에너지에 대한 중요성이 더욱더 강조되고 있으며 그 중에서도 풍력발전은 중요한 위치를 차지하고 있다. 이미 선진국에서는 풍력발전에 관련된 제반기술들이 상당한 개발되어 이미 상용화되고 있다. 이것은 이미 오래 전부터 풍력발전에 대한 지속적인 투자와 연구가 이루어졌기 때문이다. 우리나라의 경우 1975년 KIST팀에 의해서 처음으로 연구가 시작되었고, 그 후 한국에너지기술연구소, 대학, KIST등을 주축으로 연구가 진행되었다[2]. 그러나 우리나라의 연구는 대개가 1~2년 정도의 단기성 프로젝트로 인하여 기술개발에 대한 지속적인 지원부족과 당장의 경제성이 없다는 이유등으로 인하여 뚜렷한 성과를 올리지 못하고 있는 실정이다.

이러한 문제로 때문에 우수한 연구인력 확보가 어려워지고, 풍력발전에 대한 지속적인 투자환경을 저해하는 요소가 되어버렸으며 이로인하여 우리나라에서는 상용화가 이루어지지 않고 있다. 그러나 최근 한국에너지기술연구소가 외국에서 도입한 중형 풍력발전시스템을 제주도 중문관광단지와 월령단지에 설치하여 성공적인 운영기술개발과 계통연계운전은 풍력발전에 대한 사회의 전반적인 인식을 크게 바뀌게 하고 있다는 사실은 대단히 고무적인 일이다[3]. 이로 인하여 각 지방단체와 대기업에서 풍력발전에 대한 대규모 투자계획을 세우고 있다. 그렇다면 이 시점에서 과연 우리나라의 경우 어떤 풍력발전시스템이 가장 적합한가 하는 문제가 대두된다. 그것은 설치하고자 하는 위치의 장기적인 풍향, 풍속data등 풍력자원 조사를 정확히 하고, 다음에 어떤 용도로 운용될것인가하는 문제를 결정하는 것이다. 이러한 문제들이 해결되면 다음에는 어떤 종류의 풍력발전기를 선택할 것인가 하는 문제이다. 따라서 본고에서는 몇 종류의 풍력발전기에 대해 고찰하고, 국내외의 연구방향을 검토하여, 풍력발전시스템에 대한 전반적인 이해를 하는데 일익을 하고자 한다.

2. 풍력발전기의 종류 및 제어방법

일반적으로 풍력발전 시스템은 크게 두가지 부류로 분류될 수 있다. 첫째는 계통선과 연계된 병렬운전을 하는 것이며, 둘째는 독립전원으로서 단독운전을 하는 경우이다. 따라서 사용목적에 부합되는 발전시스템을 선정하기 위해서는 어떠한 발전기를 선택할 것인가하는 문제는 대단히 중요하다. 왜냐하면 사용하는 발전기의 종류에 따라 출력특성이 달라지기 때문이다. 그래서 발전기 선정시 고려해야할 사항이 대단히 많지만 아래와 같이 크게 4 가지로 나누어볼 수 있다[4].

* 신뢰성과 유지보수성
* 비용의 최소화
* 전정격 출력에 대한 효율과 적용성
* 계통선에 미치는 영향

이러한 점을 기초로하여 사용목적에 가장부합되는 풍력발전기를 선정해야하고, 선정된 발전기를 어떻게 제어할것인가를 결정하여야한다. 일반적으로 풍력발전시스템에 사용되는 발전기는 아래와 같이 크게 4가지의 형태로 사용되어지고 있다.

(1) 동기발전기

평균풍속이 거의 일정하여 풍차의 피치제어를 조금만하여도 일정한 풍차의 회전속도를 유지할 수 있는 곳에서는 일정한 전압과 주파수를 얻기가 쉬운 동기발전기가 유리하다. 이것은 유도발전기에 비해 회전기 본체, 제어장치가 다소 복잡하여 가격이 비싸다는 것과 상용전원의 변동으로 발전기가 과전류로 소손될 우려가 있으므로 자동 역률 조정장치가 필요하다는 단점이 있지만, 계통선과 연계운전시 상용전원이 정전되어도 단독으로 발전이 가능하고 , 자동동기 투입장치로 전압, 주파수 및 위상을 상용전원에 맞추어서 자동 투입하므로 계통선의 전압강하는 거의 없고, 여자전류에 따른 발전기의 역률을 임의로 바꿀수 있으므로 발전장치의 도입에 따른 역률개선 콘덴서 장치는 필요없게 된다는 잇점이 있기 때문이다. 그러나 이 시스템은 풍차의 속도를 일정하게 유지하여야한다는 문제점 때문에 풍속이 일정하지 않는 지역에서 적용하기에는 제한적인 문제점을 가지고 있다.

(2) 유도발전기

유도발전기는 동기발전기에 비해 직류 여자전원이 불필요하고, 브러쉬가 없어 구조가 간단하 여 유지보수면에서 유리하다는 기계적인 특성과 가격이 저렴하다는 경제성을 지니고 있음에도 불구하고 예전에는 실용적인 가치를 얻지 못했다. 왜냐하면 자려식 운전이 불가능하여 계통선과 연계된 운전을 해야하는데 이때 여자전류를 계통에서 공급받기 때문에 역률이 나쁘다는것과, 단독전원으로 사용할 경우에 고정자에 병렬로 여자용 콘덴서를 부착하여 운전해야 하는데 이때 부하, 회전속도, 콘덴서의 용량 및 여자회로의 포화특성에 따라에 출력전압과 주파수가 변동하여 안정된 전원을 얻을 수 없다는 취약점을 가지고 있기 때문이다[5].

그러나 최근 컴퓨터 관련 제반기술과 전력용반도체 기술의 발달로 인하여 그림 1과 같은 자력식 발전시스템과 그림 2와 같은 계통선에 연계된 발전시스템이 실용화가 활발하게 되고 있다. 그림 1은 콘덴서 여자에 의한 유도발전시스템을 나타내고 있으며 이러한 시스템은 낙도같은 소규모 독립전원을 필요로하는데 태양열 및 디이젤발전과 더불어 복합발전시스템을 이루는데 적합한 것으로 여겨지고 있다[3].

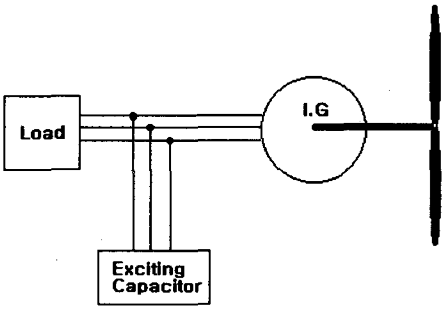


그림 1. 콘덴서 여자에 의한 유도발전시스템
Fig. 1 Wind Power Generating System of Capacitor-excited Induction Generator

그림2는 계통선과 연계된 중대형용량의 유도발전시스템을 나타내고 있다. 그림 2에서 풍속이 시동풍속 이상일 경우 유도기는 발전을 위해 기동을 시작하여야 한다. 이때 풍차의 관성이 크고 또한 유도기는 기동시 과도한 기동전류가 흐르기 때문에 계통선에 악영향을 줄 수 있다. 따라서 기동시는 반드시 소프트 스타팅(Soft starting)을 반드시 수행해야한다.

이를 위해 싸이리스타 T1, T3, T5를 적절히 동작시켜 기동시 과도한 기동전류를 제한할 수 있도록 하여야한다. 그리고 풍속이 강하여 풍차의 속도가 동기속도 이상일 경우, 유도기는 발전기로 동작한다. 이때 싸이리스타 T2, T4, T6를 동작시키면 된다. 만약 풍속이 가변되면 그때마다 풍차의 속도를 측정하여 동기속도 이하이면 전동기 모드로, 동기속도 이상일 경우는 발전기모드로 운전할 수 있도록 추종제어를 하여야한다. 이 시스템은 구조가 간단하고 제어방법이 간단하여 시스템의 하드웨어를 최소화 할 수 있어서 경제적으로 유리하여 최근에 풍력발전시스템에 많이 적용되고 있지만 출력의 역률를 조절할수 없다는 문제점을 내포하고 있다[6].

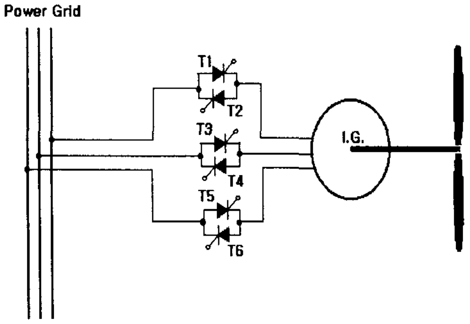


그림 2. 계통연계형 유도발전기 시스템
Fig. 2 Power Grid connected Induction Generatior System

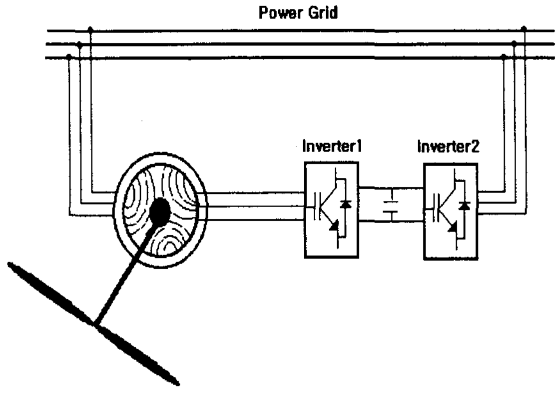


그림 3 브러쉬없는 이중여자 릴럭턴스기의 풍력발전시스템
Fig. 3 Wind Power Generating System of DEBRM

(3) 브러쉬없는 이중여자 릴럭턴스 발전기

제주지형에서와 같이 풍속이 변화가 심한 경우 농형 유도발전시스템에서는 풍속에 따라 항상 전력의 수수가 계통선과 농형유도발전기 사이에서 일어나게 된다. 이것은 결국 풍속의 변화에 따라 발전시스템의 순수한 발전량의 감소를 가져와 효율를 떨어 뜨린다. 이런 단점 때문에 최근에는 회전자를 릴럭턴스기로 대치한 브러쉬없는 이중여자 릴럭턴스기가 개발되어 현장적용에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[7-11]. 이 발전기는 고정자가 이중권선으로 되어 있고, 회전자가 릴럭턴스기로 되어 있어 회전자 코일에 따른 손실을 줄일 수 있고 또한 브러쉬를 갖지않아 유지보수를 할 필요가 없다. 그리고 동작특성은 권선형 유도기와 거의 똑같은 제어특성을 가지고 있는데, 1차 고정자권선은 권선형유도기의 고정자에 해당되고 2차 고정자 권선은 권선형유도기의 회전자에 해당하는 특성을 가지고 있다. 이런 특성 때문에 권선형 유도기의 회전자측의 슬립제어와 같이 2차 고정자 권선에 인버터를 채용하여 풍속의 변화에 추종하여 풍속의 변화에 상관없이 일정한 주파수를 갖는 출력을 내보낼 수 있고 또한 계통선의 유・무효전력을 독립적으로 제어할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다[11]. 그림 3은 이 제어시스템을 간략하게 나타낸 것이다.

그림 3에서 브러쉬없는 이중여자 릴럭턴스기의 1차 고정자 권선에 연결된 계통선의 전기적인 각주파수를 ω_1 이라 하고 2 차 고정자권선의 전기적인 각주파수를 ω_2 라 할때, 회전자의 기계적인 각속도를 ω_{rm} 이면 다음과 같은 수식을 만족한다.

$$\omega_1 = \omega_2 + (p_1 + p_2)\,\omega_{rm} \qquad (3)$$

단, p_1과 p_2는 브러쉬없는 이중여자 릴럭턴스기의 1차 및 2차측 고정자권선의 극수

식(3)에서 알 수 있듯이 ω_1은 계통선의 각 주파수이기 때문에 항상 일정한 값을 갖는다. 그러므로 ω_{rm} 은 풍속에 따라 변하기 때문에 식(3)을 만족하기 위해서는 ω_2 를 제어하여야만 된다. 결국 그림 3에서 인버터 1을 풍속에 따라 식(3)을 만족하게끔 제어하면 계통선에 연결된 고정자측의 출력은 항상 일정한 주파수를 갖는다. 그런데 풍속이 강하여 회전자의 속도가 동기속도 이상일 경우 1차 고정자측에서 뿐만아니라 2차 고정자측에서도 출력이 발생한다. 이 경우에 그림 3의 인버터 2를 통하여 계통선에 발전된 양을 공급하게 된다. 이런 시스템에서 인버터의 용량은 발전용량에 비해서 대단히 작다. 왜냐하면 동기속도를 기준해서 슬립의 변화량 만큼만 인버터의 출력을 내보내기 때문이다. 그림 4는 풍속에 따른 1차측 고정자와 2차측 고정자 사이에서 전력의 수수를 나타내고 있다.

여기서 S_0는 동기속도가 되는 풍속, S_1은 최고 운전풍속, S_2는 시동풍속, P_1은 1차 고정자측의 전력, P_2 는 2차 고정자측의 전력을 뜻하며,

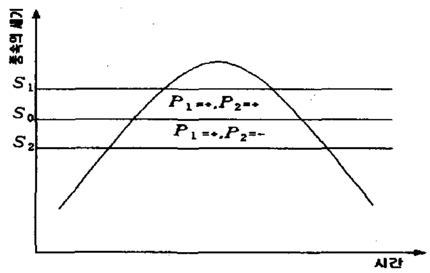


그림 4 풍속에 따른 발전특성
Fig. 4 Chcracteristics of Wind Power Generation with Wind Velocity

+는 전력발생, -는 전력흡수를 의미한다. 그리고 $S_0 \leftrightarrow S_1$ 사이는 동기속도 이상에서의 운전을 뜻하는데 1차 고정자측과 2차 고정자측 모두에서 전력이 발생되고 있음을 나타내고 있으며, $S_0 \leftrightarrow S_2$ 사이는 동기속도이하에서의 운전범위를 뜻하며 1차 고정자측에서는 전력이 발생되고 있지만 2차 고정자측에서는 전력의 흡수를 나타내고 있다. 이때 진정한 전력발생은 P_1- P_2 의 차이다. 그리고 S_1이상에서는 풍속이 강하여 발전하기에는 위험한 경우 운전을 정지시키는 범위를 나타내고, S_2 이하에서는 풍속이 약하여 운전을 정지시키는 것을 나타낸다.

브러쉬없는 이중여자 릴럭턴스기는 권선형 유도전동기와 거의 같은 특성을 가지기 때문에 벡터제어이론을 도입할 수 가 있다. 이 이론을 적용하였을 경우 계통선에 연결된 고정자측의 유효전력과 무효전력의 수식은 다음과 같이 나타낸 수 있다.

$$P_1 = -\frac{3}{2}\frac{L_m}{L_1}\omega_1 \lambda_{d1} i_{q2} \qquad (4)$$

$$Q_1 = \frac{3}{3}\frac{1}{L_1}\omega_1 \lambda_{d1}(\lambda_{d1} - L_m i_{d2}) \qquad (5)$$

단,

L_m :상호인덕턴스 L_1 :1차고정자측 인덕턴스
λ_{d1} :동기좌표계에서의 1차고정자의 d축 자속
ω_1 :1차고정자측의 전기적인 각속도
i_{q2} :동기좌표계에서의 2차고정자측의 q축 전류
i_{d2} :동기좌표계에서의 2차고정자의 d축 전류

식(4)와 식(5)를 보면 2차 고정자측의 q축 전류를 제어하면 1차 고정자측의 유효전력을 제어할 수 있고, 2차 고정자측의 d축 전류를 제어하면 1차 고정자측의 무효전력을 제어할 수 있음을 알 수 있다. 결국 권선형유도기의 회전자측에 해당하는 2차 고정자측의 dq축 전류를 제어하므로써 1차 고정자측의 유 · 무효전력을 자유자재로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 이것은 결국 계통선에 연결된 출력의 역률를 제어할 수 있음을 의미한다. 이상에서와 같이 브러쉬없는 이중여자 릴럭턴스기를 풍력발전기로 채용했을 때 여러 가지의 장점을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 제주지역과 같은 풍속특성을 갖는지역에서는 아주 유리한 발전기로 사료된다.

3. 국내외의 연구동향

3.1. 국외

오일쇼크 이후 본격으로 연구가 시작된 풍력발전은 현재 전세계적으로 총 4,850 MW의 풍력발전기가 미국, 유럽, 인도, 중국 및 아프리카와 남미 등에서 보급되어 운전되고 있다. 특히 1980년대 초반에 수십 kW에 불과하던 풍력발전기의 상용화 기종이 꾸준한 기술개발로 인하여 현재는 750~1,000 kW급과 같은 대형화기종으로 개발되어 보급되고 있다. 미국이 기술개발과 보급을 주도하여 왔으나 1990년대부터 유럽여러국가들이 이에 동참하여 오늘날 유럽국가에서는 널리 이용되고 있는 실정이며 아시아에서는 일본,중국,인도등에서 꾸준한 연구와 보급이 이루어지고 있다. 현재 미국과 덴마크등 선진국에서는 이미 수백 kW급까지의 중대형 풍력발전시스템이 실용화가 완료되어 상용화가 되어있고, 1MW급의 초대형발전기를 개발하여 보급하는데 연구에 박차를 가하고 있다. 다음은 풍력발전시스템에 있어서 선진국인 미국과 덴마크의 연구동향을 간략히 살펴보고자 한다[3].

(1) 미국

· 2000년도까지 계통연계 풍력발전설비 누적용량 10,000MW의 달성
· 최소한 연간 3,000MW의 풍력발전기를 생산해낼수 있는 40억불규모의 미국내 풍력산업기 반조성.
· 주로 생산직 분야의 장기적이며 전문적인 약 70,000개의 고용창출
· 4 cent/kWh 이하의 안정적 발전단가 달성 및 현

재보다 30%정도 싼 제작단가 목표달성
· 풍력발전기술을 지구 기후보전을 위한 국가차원의 주요 수단으로 부각

(2) 덴마아크

· 경제적 효용성의 향상에 계속노력.
· 600-1,500kW풍력발전기의 자연친화력증대.
· 유지관리비용의 절감.

의 변화가 풍력발전에 대한 전망을 밝게 하고 있다. 그러나 하나의 풍력발전시스템을 완성하기 위해서는 크게 기계적인 문제, 재료공학적인 문제, 전기적인 문제등 여러 가지의 요소기술들을 확보해야만 한다. 이것은 결국 풍력발전시스템이 종합적인 하나의 큰 시스템임에도 불구하고 여태까지 우리나라의 연구는 대개가 개별적으로 이루어져왔다.

만일 정부, 연구기관,산업체 및 학교등이 참여하여 각기관의 특성에 맞게 역할을 분담하는 공동기술개발 형태로 개발목표가 설정되어 강력하게 추진

<표 1> 각 단계별 국내 기술개발 목표방향

구분	1 단 계 ('88 ~ '91)	2 단 계 ('92 ~ '96)	3 단 계 ('97 ~ '2001)
풍력발전	- 풍력자원 조사 - 20kW 풍력발전 시설 개발	- 중형 풍력발전시설 실용화 : 50~100kW급 개발 - 풍력발전 시범단지 운영 (200kW이내)	-300kW급 풍력발전시설 상용화 -MW급 풍력발전 단지 건설운영

풍력발전에 대한 선진국의 예를 살펴본것과 같이 연구동향은 다음 2 가지로 요약해볼 수 있다. 첫째는 대형화이고 둘째는 경제성이다. 우리나라에서도 이와같은 점에 주안점을 두어 연구해야할 필요가 있다.

3.2. 국내

1987년 대체에너지기술개발 촉진법이 에너지공급이 취약성 극복과 에너지 자원의 다원화를 도모하여, 장기적으로 에너지기술개발 기본 계획이 수립되었고, 1988년 대체에너지기술개발 기본계획이 수립되었으며, 그 중에서 풍력발전분야에 대해서는 3단계로 계획이 수립되어 2001년도까지 중형급 풍력발전시스템의 상용화와 MW급 풍력발전단지의 건설 및 운영을 목표로 기술개발에 노력하고 있다. 다음의 표<1>에는 각 단계별 국내 기술개발목표를 정리하였다[3].

4. 맺음말

이상에서 살펴본바와 같이 우리나라의 풍력발전에 대한 제반기술은 외국의 풍력발전 선진국에 비해서 아주 빈약한 상태이다. 그것은 정부의 지속적인 연구투자와 사회적인 공감대 형성이 빈약했기 때문이다. 최근 우리나라에서 풍력발전에 대한 인식

된다면 우리나라의 풍력발전의 미래는 크게 낙관할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 전홍석,박경호,"풍력발전",전기학회 Vol. 41, No.6, 1992

2. 이철형,신동렬,조명제,"풍속자료에 의한 국내 풍력가용량산정", Solar Energy Vol.5, No.2, 1985

3. 한국에너지 기술보고서, " 중형급 풍력발전 시스템 운영기술개발",1996

4. "코.제너레이션 발전기의 종류와 문제점", 월간전기, 10월, 1990

5. 박민호,김경서,김진오,정승기, "인버터 여자에 의한 유도발전기의 연구", 대한전기학회논문,Vol. 34, No. 8, 1985

6. 박민호,정승기,이진우,"회전자 교류 여자방식의 자립형 유도발전기의 정상상태 해석",대 한전기학회논문,Vol. 37,No. 1, 1988

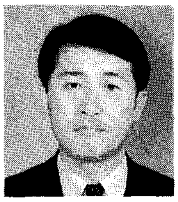
7. F. Liang, L. Xu and T. A. Lipo, "d-q analysis of a variable speed doubly AC excited reluctance motor," Electric Machines and Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 125-138.,1991

8. F. Liang, L. Xu and T. A. Lipo, "Transient Model of a Doubly Excited Reluctance Motor," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 6, No. 1, pp. 126-133.,1991

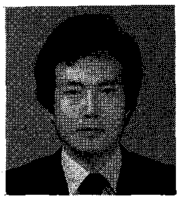
9. L. Xu and Y. Tang, "High effcient wind power generation by the doubly excited brushless reluctance machine", The American Wind power Energy Association WindPower'93 Conference, San Francisco, CA, pp. 266-273. 1993

10. L. Xu, F. Liang, "A Novel Wind Power Generating System Using Field Orientation Controlled Doubly Excited Brushlee Reluctance Machine," Proc. of IEEE Ind. Appl. Society Annual Meeting, Houston, TX, pp. 408-413., 1992

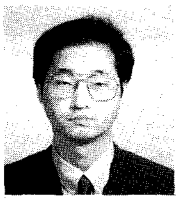
11. L.Xu, L.Zhen, E.H. Kim, 1996, "Field Orientation Control of a Doubly Excited Brushless Reluctance Machine", IEEE-IAS, The 31st Annual Meeting, October 6, 1996



김 일 환 (金 一 煥)
1962년 3월 29일생. 1985년 중앙대학교 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년~현재 제주대 공대 전기공학과 부교수. 1995년~1996년 미국 오하이오 주립대 Post_Doc.



좌 종 근 (左 宗 根)
1947년 6월 19일생. 1970년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975년~1979년 제주전문대 전기과 조교수. 1979년~현재 제주대 공대 전기공학과 교수. 1983년~1984년 미국 퍼듀대 Visiting Scholar.



김 건 훈 (金 建 勳)
1960년 10월 27일생. 1983년 인하대학교 공대 전기공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1993년 한국과학기술원 기계공학과 박사과정수료. 현재 한국에너지 기술연구소 선임연구원.