

# 그린 원자력 에너지 기술 및 정책 동향

이재영 (한동대학교 기계제어공학부 교수/한동대학교 글로벌녹색성장연구원 부원장)

## 1. 서론

2009년 한국형 원자력 발전소가 UAE에 수출된다는 소식은 세계적 경제 불황의 그늘에서 고통 받던 상황에서 큰 희망을 던져주었다. 일본과 프랑스 등의 원자력 선진국을 제치고 수출 길을 열어간 것과 더불어 산유국에서 원자력을 수입하는 현상에 대한 궁금증을 더해주었다. 석유자원의 생산자가 느끼는 자원의 가치에 대한 감각은 석유자원의 수입자가 느끼는 것과 차이가 날 것이다. 그런 관점에서 보면 산유국의 석유에 대한 절약의지를 읽을 수 있다. 이제 원자력은 과거 체르노빌 사고 등으로 얼룩진 위험하고 더러운 에너지 기술이 아니라, 녹색 성장의 성장 동력으로 자리하게 되었다. 그린피스와 같은 환경단체도 원자력에 너지의 녹색기여도를 재평가함으로써 바야흐로 원자력 르네상스가 도래했다. 여기서는 이러한 원자력 기술의 동향을 살펴보고 발전을 위한 전략을 세워보고자 한다(1).

## 2. 기술개발 및 정책동향

### 2.1 국제동향

#### 2.1.1 핵분열 원자로 기술

우라늄 235와 같은 핵종을 중성자가 흡수될 경우,

무거운 핵은 두 개로 쪼개지면서 질량변화를 만드는 데, 이 변화에 빛의 속도의 제곱을 곱한 값에 해당하는 에너지가 생성된다. 이 에너지는 핵연료집합체에서 열에너지의 형태로 전달되는데, 이것을 이용하여 전기를 생성하는 것이 원자력 발전의 원리이다. 통상 중성자가 두 개에서 세 개 나와 연쇄반응을 일으키는 데, 원자핵 폭탄과 달리 원자로로는 이러한 잉여 중성자를 흡수하는 제어봉을 이용하여 원자로의 임계상태를 유지한다. UAE에 수출하는 원자로로는 핵분열을 이용하는 원자로이다. 우리나라는 원자로설계 및 제작 기술을 갖고 있는 세계에서 몇 안 되는 나라 중에 하나이다. 이는 반핵 등의 이유로 장기간 원자로 건설을 하지 않은 원자력 선진 국가들이 기술 인력을 지속 확보하는 것에 실패함으로 인해, 원전건설을 지속해온 후발주자들에게 시장을 빼앗긴 경우로 기술발달의 사이클과 관련하여 좋은 본보기가 된다. 그런 이유로 그동안 지속적으로 원자력 발전소 건립을 증가시켜온 나라인 대한민국, 프랑스, 일본 등이 핵분열 원자로의 설계 시공 능력을 갖고 있다. 또한 안전성을 대폭 증대시킨 차세대 원자로 GEN-IV의 경우도 전 세계적으로 공조체계를 이루며 연구를 진행하고 있으나, 해당국의 정책결정자의 변화에 따라 부침이 있다. 유럽의 경우 독일과 프랑스는 비슷한 규모의 경제를 갖고 있으나, 에너지 정책에서 매우 편이하다. 독일은 원자력 기술을 적극 억제하고 대체에너지를 통해 녹색

도를 달성하고자 하고 있으며, 태양에너지와 풍력에너지 분야에서 기술력을 갖고 있다. 그러나 프랑스는 현재 60기의 원자로를 가동하면서 남는 전력을 이웃 나라에 수출하는 상황이다. 그러나 독일은 현재 20기의 원자로가 가동되고 있어, 원자력 없는 에너지 국가가 아니라는 점에 주목해야 한다.

### 2.1.2 핵융합 원자로

태양을 비롯한 별이 핵융합 원자로란 것이 알려진 것은 인류 역사를 통해 살펴 볼 때 비교적 최근이다. 음향학의 대가인 레일리 경(Lord Reyleigh)과 같은 석학도 태양이 석탄으로 이루어져 있고, 이곳이 연소한다고 가정하여 태양의 수명을 계산할 정도로 인류는 화학적 연소의 관점에서 태양을 이해해왔다. 그러나 태양은 막강한 중력과 고온의 환경으로 핵융합을 일으킨다. 최소한 섭씨 1억 도의 온도를 주어야 중수소와 삼중수소가 융합반응을 일으킨다. 거의 인공적인 동위원소인 삼중수소를 고려한다면, 현재 가장 청정한 꿈의 원자로라는 설명은 다소 과장되어있다. 바다에 비교적 많이 존재하는 중수소와 수소 반응을 일으키려면 100억도 이상의 고온이 필요하고 이렇게 될 때, 우리는 인류의 에너지 문제를 거의 해결했다고 생각해 볼 수 있을 것이다. 그러므로 이분야는 현재 1억도의 핵융합 환경을 달성하는 것을 일차적인 목표로 놓고 노력하고 있다. 이중 연조가 길고 많은 사람들이 참여하는 방식은 소련의 핵물리학자인 사하로프가 제안한 자기장폐쇄 방식이고 우리나라도 K-STAR에 불을 지피며 국제적인 리더그룹으로 부상하고 있다. 그러나 최근 미국을 중심으로 레이저 관성 핵융합 장치도 매우 밝은 전망을 던져주고 있음이 보고되고 있다. 상온 핵융합의 경우, 재현실험의 실패로 많은 관심은 사라졌지만, 일본을 중심으로 끊임없이 연구가 진행 중이며, 최근 기포핵융합의 경우 퍼듀 대학교의 텔리아칸 팀이 지속적으로 연구를 하고 있으나, 국제적

으로 연구의 진실성에 대한 의혹이 증폭되고 있어 귀추가 주목된다.

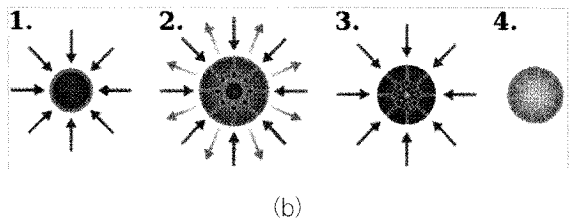
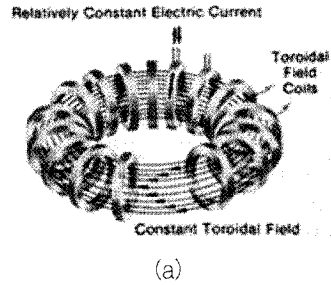


그림 1. (a) 자기장구속 핵융합원자로 구조(Tokamak)  
(b) 핵융합 pellet에 가해진 레이저 에너지로 인한 관성력으로 축퇴된 공간에서의 핵융합 반응에 대한 개념도

## 2.2 국내동향

### 2.2.1 핵분열 원자로 기술

우리나라는 표준형 원전의 설계를 시작으로 피동형 안전(Passive Safety)을 갖춘 원자로의 설계에 이르는 기술을 개발했다. 이는 수요자 중심의 원자력 시장에서 구매자로서 기술 확보가 용이했던 점도 한몫했으나, 기술을 확실히 확보하겠다는 이 분야 연구자들의 남다른 사명감이 크게 작용했다. 우리나라는 1978년 고리1호기를 시작으로 하여 총 20기의 원자로가 가동 중이고, 8기가 건설 중에 있으며, 이제 원전의 수출국가가 되었다. 우리나라의 원자로로는 가압경수로와 가압중수로의 두 종류가 있었으나, 현재 가압경수로가

압도적으로 많고 비등수로는 전무하다. 현재 APRI400 4기를 수출하게 됨으로써 우리는 NF소나타 자동차 100만대와 맞먹고, 30만 톤급 유조선 180척의 수출효과를 얻게 되었으며, 연인원 11만 명의 고용창출이 예상된다. 세계6번째의 원전 수출국으로서 우리는 에너지 절대 수입국에서 산유국에 버금가는 에너지 수출국가가 되었다. 이러한 수출의 배경에는 세계 평균 79.4(%)를 훨씬 상향하는 93.3(%)의 원전 이용률을 자랑하는 유리 운전기술과 최저의 건설단가에서

비롯되었다. 뿐만 아니라 건설공기 역시 프랑스가 60개월인 반면 우리는 52개월로 세계최고로 단기간 건설이 가능하다.

우리가 수출할 수 있는 원자로로는 이 뿐 아니라, SMART로 명명된 중소형 다목적 원자로도 있다. 이는 전력생산 뿐만 아니라, 용수, 수소 등의 녹색 에너지를 필요에 따라 생산해 낼 수 있는 원자로이다. 이러한 원자로의 수출을 위해 실증실험이 절대 필요하여 현재 원자력연구원의 분원 설립을 추진 중에 있다.

### 2.2.2 핵융합 원자로 기술

핵융합 원자로 기술 중에 자기장에 의한 폐쇄 장치 (Magnetic Confinement) 기술관련 하여, 국가 핵융합 연구소는 K-STAR를 개발하여 부분적인 성공을 보고하였다. 이로써 한국은 세계적인 핵융합 원자로 기술의 컨소시엄에 매우 중요한 회원국으로 자리하게 되었다.

그러나 국내에는 레이저를 이용한 관성핵융합 (Laser Inertial Nuclear Fusion)에 대한 연구가 매우 빈약하다. 이는 고출력 레이저기술의 확보와 더불어 이에 펠렛 제조 기술 등의 핵심기술이외에 많은 정밀 제어기술이 요청되는 상황에서, 가장 핵심이 되는 고출력 레이저 기술의 확보가 전 세계적으로 지지부진한 것에도 부분적으로 기인한다. KAIST에서 Stimulated Brillouin Scattering(SBS)을 이용한 공역 위상거울을 활용한 고출력 레이저를 만들어 내는 방법이 진행되고 있는데 기대가 된다[2]. 고출력을 위한 브릴루앙 산란기의 개선이 요청되고 있다[3]. 저온핵융합 관련한 연구는 1994년 유타대학의 연구가 재현 불가능함이 보고되면서 미미하지만, 최근 수 마이크로미터의 작은 기포에 초음파를 가진할 때 발생하는 기포의 팽창과 순간 수축 시에 방출되는 피코초 이내의 자외선 발생을 놓고, 수축기포의 내부의 압력과 온도가 매우 높을 것으로 추정되는 점을 감안한 기포음

Reactor	Type	Net capacity	Commercial Operation	Planned Close
Kori 1	PWR - Westinghouse	587 MWe	4/78	2017
Kori 2	PWR - Westinghouse	650 MWe	7/83	
Wolsong 1	PHWR - Candu	679 MWe	4/83	
Kori 3	PWR - Westinghouse	950 MWe	9/85	
Kori 4	PWR - Westinghouse	950 MWe	4/86	
Yonggwang 1	PWR - Westinghouse	950 MWe	8/86	
Yonggwang 2	PWR - Westinghouse	950 MWe	6/87	
Uchin 1	PWR - Framatome	950 MWe	9/88	
Uchin 2	PWR - Framatome	950 MWe	9/89	
Yonggwang 3	PWR (Syst 80)	1000 MWe	12/95	
Yonggwang 4	PWR (Syst 80)	1000 MWe	3/96	
Wolsong 2	PHWR - Candu	700 MWe	7/97	
Wolsong 3	PHWR - Candu	700 MWe	7/98	
Wolsong 4	PHWR - Candu	700 MWe	10/99	
Uchin 3	OPR-1000	1000 MWe	8/98	
Uchin 4	OPR-1000	1000 MWe	12/99	
Yonggwang 5	OPR-1000	1000 MWe	5/02	
Yonggwang 6	OPR-1000	1000 MWe	12/02	
Uchin 5	OPR-1000	1000 MWe	7/04	
Uchin 6	OPR-1000	1000 MWe	8/05	
Total: 20		17,716 MWe		

(a)

South Korean reactors under construction, on order or planned

Reactor	Type	Net capacity	Start construction	Commercial operation
Shin Kori 1	OPR-1000	1000 MWe	June 2006	12/2010
Shin Kori 2	OPR-1000	1000 MWe	June 2007	12/2011
Shin Wolsong 1	OPR-1000	1000 MWe	November 2007	3/2012
Shin Wolsong 2	OPR-1000	1000 MWe	September 2008	1/2013
Shin Kori 3	APR-1400	1350 MWe	October 2008	9/2013
Shin Kori 4	APR-1400	1350 MWe	September 2009	9/2014
Shin Uchin 1	APR-1400	1350 MWe	March 2011	12/2015
Shin Uchin 2	APR-1400	1350 MWe	March 2012	12/2016
Shin Kori 5	APR-1400	1350 MWe	8/2014	12/2018
Shin Kori 6	APR-1400	1350 MWe	8/2015	12/2019
Shin Wolsong 3	APR-1400	1350 MWe		8/2020
Shin Wolsong 4	APR-1400	1350 MWe		8/2021
Total: 12		14,800 MWe		

Those not under construction are listed as planned in the IAEA reactor table. Bold dates = under construction.

(b)

그림 2. (a) 대한민국에 가동 중인 원자로 20기  
(b) 대한민국에 계획 중인 원자로

향발광 현상을 이용한 상온핵융합에 대한 연구가 있다(4). 이러한 핵융합 연구는 매우 큰 산업적 영향을 끼쳐왔다. 특히 자기장 폐쇄 핵융합 장치를 개발하는 과정에 등장한 플라즈마 물리기술은 반도체 제조의 스퍼터 기기를 비롯한 수많은 생산기술을 제공했고, 플라즈마 발광을 이용한 디스플레이는 이 분야의 산업화에 크게 기여하였다. 마찬가지로 레이저 관성 핵융합기술의 핵심인 고출력 레이저 기술도 산업적 파급 효과가 매우 큰 것으로 기대된다. 고출력 레이저는 군사용 방어기기를 개발하는데도 유용하지만, 3차원 형상 제조를 순간적으로 할 수 있을 뿐만 아니라, 원격 용접과 같은 새로운 산업 기술을 창출해 낼 것이다.

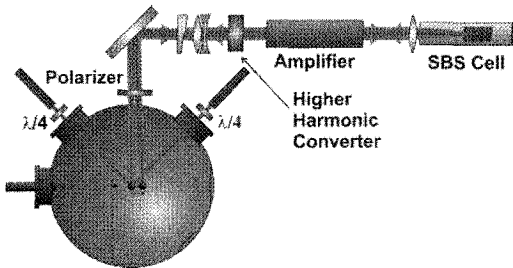


그림 3. 핵융합을 위한 고출력 레이저 집중 방식의 실증 실험(Kong et al)

### 3. 산업육성 방향

#### 3.1 수출용 원자로기술

수출용 원자로의 설계 시공, 운전의 전 과정에 필요한 요소기술의 개발에 있어, 하드웨어와 소프트웨어의 전 영역에서 국산화율을 높여야 한다. 특히 현재 인허가 관련하여 코드 국산화가 상당히 진척되고 있는 점에 주목할 필요가 있다. 코드 국산화에 있어서, 기존의 관계식들을 사용하는 것 이외에, 최신의 과학적 발전을 반영할 필요가 있다. 이를 위해 각종 현상에 대한 개별실증 실험도 병행해야 한다. 수출용원자

로의 안전 해석을 위한 실증 실험을 체계적으로 수행하는 한편, 핵심 부품의 설계 및 제작 능력을 강화할 필요가 있다. 계장 제어 시스템의 경우에도 저 유량 고 정밀 측정을 위한 초대형 초음파 유량계 등의 국산화가 절실하다. 현대제어기법과 인공지능을 활용한 운전자 지원 시스템 등의 개발 설치는 원자로 수출에 있어 우리나라 원전의 고성능 운전 관련한 장점을 더욱 증대시켜줄 것이다. 수출용 원자로의 요소부품 및 기술개발을 위한 원자력 산업단지를 개발할 필요가 있으며, 이는 임해이며 과학기술의 인프라가 잘 갖추어진 지역을 선정하여 개발해야 한다.

#### 3.2 고유한 안전성과 다양한 응용을 위한 미래형원자로 기술 개발

미래형 원자로 기술 개발의 경우 국제협력연구를 더욱 증진하고, 국내 연구에 대한 지속적인 지원이 필요하다. 원자력연구원 중심의 연구가 진행 중이나, 일부 중규모의 연구들은 관련 전문 인력양성의 차원에서 대학에 임무를 주는 방식이 효과적이다. 일례로 미국의 경우, 피동원자로의 안전성 분석을 위해, 웨스팅하우스의 AP-600의 경우에는 Oregon State University에 축소화 실증 실험 장치를 설치 운영하고 있으며, 비동수로의 경우는 Purdue University에 PUMA라는 축소화 실증 실험 장치를 설치 운영하고 있다. 이는 현재 원자력연구원이 실증실험 장치로 제작 가동하고 있는 ATLAS보다 먼저 추진된 것으로, 이에 사용된 축소화 규칙의 기법이 ATLAS의 경우에도 적용되었다. 이런 면에서 살펴보면, 이러한 실증 실험 장치를 대학에 설치 운영하게 하면서 동시에 전문 인력을 양성하는 전략을 수립하는 것을 추천한다. 미래형 원자로는 안전성 측면에서 고유안전성(inherent safety)을 지향한다. 이를 위해 다양한 개념이 제시되고 있다. 뿐만 아니라, 고온 가스로의 경우와 같이 고온의 열을 이용하여 수소를 생산하는 방식으로 현재

산업체의 연소과정을 이용한 프로세스를 청정하게 바꾸게 한다. 이는 자동차의 엔진, 철강 산업에서 탄소연소과정을 제거할 수 있도록 할 수 있다. 물의 열분해 방식으로 현재 연구되는 것은 요오드-황 반응으로 황산을 고온에서 열분해 하여 물과 반응하여 수소와 산소를 분리하는 것이다.

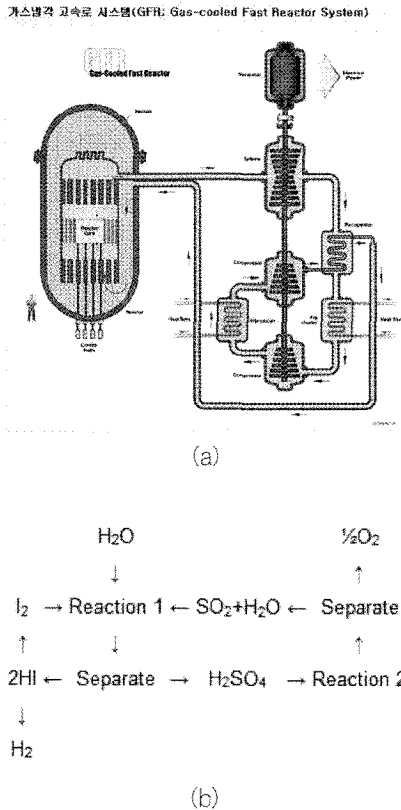


그림 4. (a) 고온가스로 개념도  
(b) 요오드-황 반응 개념도

요오드-황 반응은 황산을 열분해 하는데 섭씨 1000도 이상의 고온이 요청되므로, 고온 가스로의 높은 온도가 절대 필요한 상황이다. 이러한 수소 생산은 제철공정에 사용되는 가열공정을 탄화수소 에너지에서 수소로 전환 할 경우 저탄소 녹색성장의 핵심 기술

이 될 것으로 기대를 모으고 있다.

### 3.3 핵연료주기 기술

핵연료주식회사를 통해 한국원전의 핵연료를 자체 제작함으로써 핵연료 어셈블리를 매년 수출원자로에 공급하고 인허가에 참여하는 것은 매우 부가가치가 높은 일이다. 이와 관련하여 사용 후 핵연료의 핵 비확산 정신을 유지하면서 새로운 핵연료로 재탄생 시키는 핵주기 기술을 완성해야 한다. 현재 건식 기법이 한국원자력연구원에서 개발되었고, 이는 핵 비확산 정신을 만족시킨다. 국가적으로 이 기술에 집중 투자하여 이후 한국형원자로의 폐기물 처리에 대한 각종 우려를 감소시키고, 안정적인 핵연료 공급을 가능하도록 해야 한다.

### 3.4 녹색성장과의 연동

독일이 대체에너지에 중점을 두고 있으나 프랑스는 원자력에 중점을 두는 것처럼, 국가마다 녹색에너지 정책은 전략적 차이를 갖는다. 우리나라의 경우 원자력 발전소는 저탄소 사회를 구현할 수 있는 에너지 기술로, 현재 대체에너지 기술의 수준 상 현대과학기술 사회를 지탱할 수 있는 실제적인 녹색기술이다. 녹색 성장에 대한 대국민적 이해증진과 더불어 녹색성장이 핵심 전략으로서의 원자력 기술의 위치를 계량하고 이를 통해 국가적 에너지특성화를 이루어야 한다. 뿐만 아니라 거대과학과 국민적 이해에 관련한 문화적 접근도 강화할 필요가 있다.

### 3.5 핵융합 에너지에 대한 접근

핵융합에너지가 우리의 실생활에 사용되기 위해서는 아직도 많은 연구가 필요하다. 따라서 이 연구에는 인내심과 지속적 지원이 필수적이다. 자기장 패쇄 핵융합장치의 경우 플라즈마 물리학이 반도체 기술에

기여한 바가 지대한 것과 마찬가지로 플라즈마의 응용기술을 동시에 지원할 필요가 있다. 마찬가지로 레이저 관성핵융합 기술에 관련 하여는 레이저 기술에 대한 응용기술을 동시에 지원하는 방식으로 하여, 목표기술에 대한 기술들과와 더불어 파생기술로 인한 신 성장 동력을 찾아가는 전략이 주효하다.

### 3.6 인력양성 전략

원자력 기술은 원자핵 물리학에서부터 기계공학, 전자제어공학, 전기공학, 재료공학, 화학공학, 생명공학 등 현대의 기술이 대부분 망라되는 다 학제적 성격을 갖는다. 그러한 까닭에 무분별한 원자핵공학과를 늘리는 것은 지혜롭지 않다. 오히려 대학원과정에 다 학제적 요소를 갖도록 하면서 원자핵공학을 타 전공 출신에게 가르쳐 전체적인 시각을 갖도록 유도하는 것이 바람직하다. 원자력공학은 거대 과학기술의 특성상 국제 공동연구가 활발하다. 현재 원자력공학과는 대부분의 학과가 핵분열 원자로에 집중되어 있다. 핵융합관련 인재양성 정책을 새로이 수립할 필요가 있다. 수출용원자로, 차세대 원자로, 핵융합 원자로 관련한 축소규모 실증 장치를 두고 인재 양성을 동시에 하는 방향으로 시너지를 높일 필요가 있다.

## 4. 결 론

이상을 통해 원자핵의 반응을 통해 거대한 에너지를 확보할 수 있는 핵분열기술과 핵융합 기술에 관련한 기술동향과 전략을 논의하였다. 핵분열 원자로의 경우 수출형 원자로의 인허가를 위한 코드의 국산화가 핵심적인 과제가 될 것이며, 중장기적으로는 웨스팅하우스에 의존하고 있는 냉각수 펌프의 국산화도 필요하다. 그러나 우리가 갖고 있는 탁월한 원자로 가동기술, 즉 운전, 유지보수, 관리의 기술은 원전 마케팅의 핵심가치였던 만큼 더욱 국제적으로 압도적인

우월성을 유지하고 증가시켜야 할 것이다. 핵연료의 처리와 관련한 중 저준위 폐기물의 처분과 더불어 고준위 폐기물의 자원화와 변환을 이용한 방사선 위험도 감소기술에 관련한 기 개발된 국내 고유 기술을 실제로 사용할 수 있도록 하는 것은 매우 중요한 현안이 아닐 수 없다. 더욱이 원자력이 갖는 국제적 협력 연구 시스템을 잘 활용하여 4세대 원자로 연구 중에 고온 수소 생산원자로 기술과 액체 금속로 기술 등에 핵심적인 기술혁신을 달성해야하며, 이를 위한 제2원자력연구원을 조속히 건설해야 한다. 실증실험 연구를 대학과 연구소가 협력하도록 하여 연구와 인력양성을 동시에 수행함이 바람직하다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이재영 외, 에너지포커스그룹 연구결과보고서, 원자력 분과, 경상북도, (재)경북테크노파크 전략산업기획단, 2010.
- (2) Milan Kalal, Ondrej Slezak, Michaela Martinkova, Hong Jin Kong and Jin Woo Yoon, SBS PCM Technique Applied for Aiming at IFE Pellets: \linebreak First Tests with Amplifiers and Harmonic Conversion J., Korean Phys.Soc. 56, 184HJ.Kong, et al.
- (3) J.Y.Lee “고출력 레이저의 안정적 브릴루앙 산란을 위한 phonon 충격파 안정화 기술” 녹색성장연구원 내부 보고서, 특허 출원 중 2010.
- (4) T.G. Leighton, Acoustic Bubble, Academic Press, 1992.

## ◇ 저 자 소 개 ◇



이재영(李在永)

1984년 한양대학교 원자력공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 원자 및 양자공학과 졸업(석사). 1990년 한국과학기술원 원자 및 양자공학과 졸업(박사). Purdue University, School of Nuclear Engineering, 객원교수. McMaster University, Department of Engineering physics, 객원 과학자. Global Green Research Institute, Director(2008년~현재). 이공계 융합교육연구센터 센터장(2006년~현재). 한동대학교 기계제어공학부 교수. 주요 저서, 포스트모던 시대의공학의 새로운 패러다임(2006), 탁월함에 이르는 노트의 비밀(2008).