

DECADES 프로그램을 활용한 신재생에너지 의무할당제 효과 분석

論 文

53A-5-4

An Analysis of Renewable Portfolio Standard Impact using DECADES Program

吳 英 進* · 盧 載 溚** · 金 發 鎬*** · 朴 宗 培§
(Young-Jin Oh · Jae-Hyung Noh · Balho H. Kim · Jong-Bae Park)

Abstract - This paper analyzes the environmental impact and economic effect of introducing the Renewable Portfolio Standard (RPS) into Korean electricity market using the DECADES (Database and Methodologies for Comparative Assessment of Different Energy Source for Electricity Generation) model, a comparative assessment tool developed by IAEA. A bottom up approach is adopted for the evaluation of air pollutant emission and its impact of several RPS scenarios. The environmental damage costs of RPS scenarios are evaluated based on the Extern-E results and Thailand externality study carried by EGAT. The results of this study can be applied in determining or analyzing the national electricity policy and energy policy.

Key Words : DECADES, 환경영향평가, 신재생에너지 의무할당제(RPS)

1. 서 론

현재 전 세계적인 전력산업 환경은 시장체제로 급변하고 있다. 전력산업의 경쟁도입은 에너지시장에 막대한 영향을 미칠 것으로 판단되며, 특히, 환경친화적인 대체에너지원 및 신기술의 전력시장 진출에 막대한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이는 경쟁적 전력시장에 상당 수준 접근한 영국, 미국 등의 국가에서 이미 관찰되고 있으며, 이러한 선진국들은 현재 대체에너지기술의 지속적인 도입을 위하여 에너지정책, 경제성 분석 기법 등 새로운 제도의 개발에 관한 적극적인 연구를 수행하고 있다. 따라서 우리나라도 전력산업 구조개편이 대체에너지기술에 미치는 영향에 대하여 체계적인 분석을 수행할 필요가 있으며, 특히, 경쟁적 전력시장에서 대체에너지 기술 도입에 대한 체계적인 분석, 국가의 에너지 정책 및 기후변화협약 대응 차원에서의 적극적인 검토가 필요하다. 본 논문에서는 발전기술의 경제성/환경영향을 종합적으로 비교평가 하는 DECADES 프로그램에 대해 간략히 설명하고, DECADES에서 제공되는 대기오염물질 배출량 자료와 각종 비용자료를 산출한다. 이를 통해 도출된 환경영향 관련 연구 결과를 이용하여 「신재생에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standards, RPS)」를 도입할 경우 환경영향(이산화탄소 배출량의 변화 등)과 경제성에 미치는 영향을 계량적으로 분석하고자 한다.

2. DECADES 프로그램

2.1 DECADES 프로그램의 구성

현재 IAEA에서 개발중인(시제품 완성) DECADES 프로그램은 IAEA에서 개발한 장기발전자원 DB 및 최적화 프로그램으로, 각 발전자원별 국내/국제 DB 구축 및 각 자원별 ENERGY-CHAIN 개념을 활용하고 있다. DECADES는 기존의 전원계획용 프로그램들(WASP, EGEAS)과는 달리 환경에 대한 기능이 대폭적으로 강화된 것으로, 신재생에너지원을 비롯한 신기술의 DATA BASE 구축과 동태적 해석에 유용하게 사용될 수 있는 프로그램이다. 이 프로그램을 기초로 하면, 전력부문의 규제완화 및 환경 규제에 따른 전력신기술의 경제성 분석이 보다 심층적으로 이루어질 수 있다[3].

DECADES에서 각 국가별 데이터 베이스는 CSDB(Country Specified Database)로 구성되며, RTDB(Reference Technology Database)에 있는 자료는 참고자료로 활용한다[2]. 기본 데이터베이스인 에너지원, 구성물질, 에너지기술 등은 CSDB 데이터 베이스의 기본요소이며, 발전설비나 에너지체인을 생성할 때 다양한 조합으로 함께 구성되어진다.

2.2 DECADES를 이용한 경제/환경 영향분석

DECADES 프로그램은 발전설비별 분석, 연료체인 분석, 전체시스템 분석이 가능하다. 발전 설비 대안을 정확하게 분석하기 위해서는 전체 에너지 체인을 고려한 비교평가가 이루어져야하므로, 전력의 확장을 위한 자원후보 설정이 이루어진 후, 연간 에너지 생산비용, 균등화 에너지 생산비용, 공기오염물질 배출, 폐기물 및 토지사용 등의 평가와 대안별 비교가 가능하지만, 발전 설비별 분석만으로는 환경영향에 대한 고려가 불충분하다고 할 수 있다.

에너지체인에서 CO2 배출의 주요인은 화석연료 발전소의

* 正 會 員 : 弘益大學 電氣情報制御工學科 碩士
** 正 會 員 : 弘益大學 電氣情報制御工學科 碩士
*** 正 會 員 : 弘益大學 電氣情報制御工學科 助敎授 · 工博
§ 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 助敎授 · 工博
接受日字 : 2003年 9月 4日
最終完了 : 2004年 1月 6日

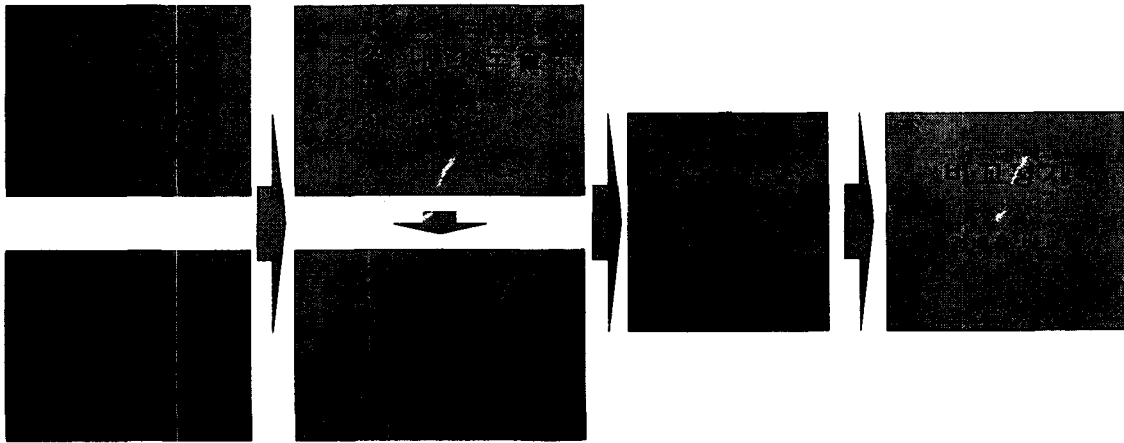


그림 1. 분석 절차
Fig. 1 Analysis Procedure

사용이지만, 건설 또는 폐지단계에서 평가되는 환경배출물도 비교평가를 수행하는 데 있어서 중요성을 가지고 있다. 다양한 발전 대안의 전력 생산에 따른 연료체인의 분석으로, 사용 연료의 채광 및 추출에서부터 사용 후 폐기물 처리까지 발전에 관련된 전체 연료체인을 분석한다. 이 분석에서는 각 단계별 연료와 폐기물의 이동경로, 소요 및 발생량, 전력생산에 따른 균등화비용 등을 산정하며, 공기오염물질 배출량, 온실가스 배출량, 폐수 배출량, 고체폐기물 발생, 토지사용 등과 같은 환경영향물질에 대한 정량적인 분석을 수행한다. 전기, 연료, 건설과 철거에 사용되는 자재 등과 같은 보조물질의 사용에 따른 환경영향도 포함한다.

전체 시스템 분석은 전력생산 시스템의 환경을 고려한 최소비용 확장계획을 수립하거나 견고성이 높은 장기 최소비용 개발계획을 위한 특별한 사업을 분석하기 위해 사용된다. 확장계획 최적화에는 설비투자비, 운전유지비용, 연료비용, 연료 채고비용, 공급지장비용 등이 고려되고, 장기전력수급계획 전략에 대한 탐색분석을 빠르게 수행할 수 있으며, 전체 시스템 수요를 만족하는 발전자원 에너지체인 조합(Mix)의 비교분석이 가능하다.

3. 의무할당제 도입 효과 분석

본 논문에서는 DECADES에서 제공되는 대기오염물질 배출량 자료와 각종 비용자료를 활용하고, 국내의 환경영향 계량화 관련 연구 결과를 이용하여 신재생에너지 의무할당제 (Renewable Portfolio Standards, RPS)를 도입할 경우 환경영향(이산화탄소 배출량의 변화 등)과 경제성에 미치는 영향을 계량적으로 분석할 수 있는 알고리즘을 제시하고 이를 이용하여 RPS비율에 따른 오염물질 배출량, 환경비용, 총비용 변화 등을 검토하여 각 대안별 비교평가를 수행하였다. 분석 절차는 [그림 1]과 같다.

3.1 DB 구축 및 부하처리

DECADES 모형을 이용하여 경제성/환경영향을 분석하기 위해서는 우선 CSDB(Country Specific Data Base)를 구축해

야 한다. CSPDB의 주요 자료는 전력생산에 사용되는 연료(에너지)의 특성자료와 전력생산을 위한 발전기술체인의 특성자료이다. 연료 특성자료는 '제 1차 장기전력수급기본계획 (2002)'에 사용된 자료와 98년 발간된 한국전력공사의 '연료, 연소관리 업무편람' 및 97년 발간된 '97 환경관리 및 화학업무 운영실적'을 참조하였고, 발전기술(에너지)체인 자료로는 한국전력거래소의 '2001 발전설비현황'과 '제 1차 장기전력수급기본계획 시안' 자료를 사용하였다. 완벽한 Life Cycle Analysis를 위해서는 석탄을 예들 들면 정련, 수송, 발전, 배출물 제거, 폐기물처리기술에 대한 자료가 필요하다. 하지만 발전을 제외한 다른 단계(step)에서 발생하는 대기오염물질 배출량이 상대적으로 아주 미약하고 자료의 수집에도 어려움이 있기 때문에 본 연구에서는 발전기술 자료만을 사용하였으며 따라서 발전에 의한 대기오염물질 배출만을 고려하였다. [그림 2]는 석탄화력 발전소의 단계별 CO₂ 배출량을 나타낸 것으로 발전단계인 단계 IV에서의 배출량이 다른 단계에 비해 압도적으로 많음을 보여주고 있다.

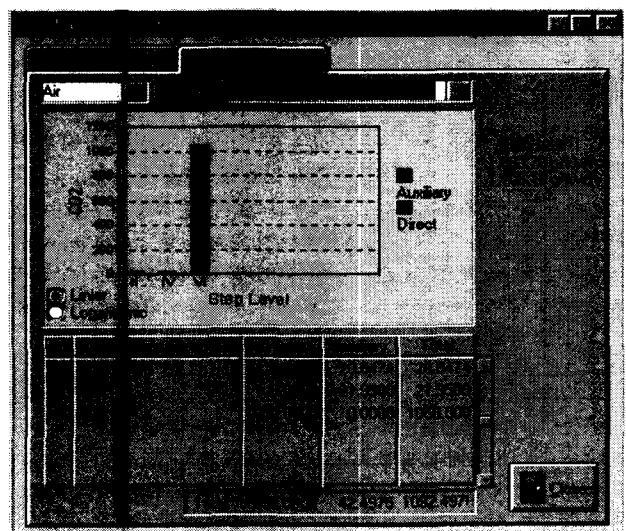


그림 2. 석탄화력 발전소의 단계별 CO₂ 배출량 예
Fig. 2 CO₂ emission of coal plant

표 1. 2015년 신재생에너지 의무할당비율별 최적설비대안의 발전량

Table 1. 2015year Optimal alternative generations of RPS scenarios

(단위 : GWh)

의무비율	수력	원자력	유연탄	무연탄	Oil	LNG	신재생	합계
RPS 0%	130,920	2,012,247	1,564,932	447,298	228,783	863,485	0	5,247,665
RPS 0.1%	130,920	2,012,117	1,562,653	446,240	228,750	861,650	5,250	5,247,580
RPS 0.5%	130,920	2,010,769	1,553,067	445,477	228,166	852,748	26,248	5,247,395
RPS 1%	130,920	2,008,949	1,540,607	444,034	227,589	842,375	52,495	5,246,969
RPS 2%	130,920	2,004,737	1,515,186	442,681	225,937	821,553	104,990	5,246,004
RPS 3%	130,920	2,02,7123	1,484,774	423,883	222,951	797,701	157,485	5,244,837
RPS 5%	130,920	1,990,750	1,446,894	418,125	219,862	772,624	262,475	5,241,650

표 2. 신재생에너지 의무할당 비율별 환경오염물질 배출량

Table 2 Air pollutant emissions of RPS scenarios

(단위 : 천톤)

시나리오	SOx	NOx	Particulate	CO ₂
RPS 0%	9,835	492,642	100,528	1,751,159
RPS 0.1%	9,831	491,640	100,056	1,749,248
RPS 0.5%	9,793	488,425	99,865	1,739,275
RPS 1%	9,743	484,472	99,041	1,727,253
RPS 2%	9,619	477,151	98,041	1,701,979
RPS 3%	9,399	461,860	95,636	1,668,197
RPS 5%	9,159	451,274	93,642	1,630,760

RPS제도는 일반적으로 전력도매 또는 사업자로 하여금 매년 당해 년도의 전력판매량에 정부가 결정한 비율을 곱한 양 (Quota)을 신재생에너지원에 의해 생산된 전력으로 공급하도록 강제함으로써 신재생에너지의 보급을 확대하려는 시도라고 정리할 수 있다. 다만 태양광, 풍력 등 대표적인 신재생에너지 자원은 기술적으로 급전불가능(Non dispatchable)하다는 특성을 갖고 있다. DECADES 모형의 경우 신재생에너지와 같은 급전불능기술들을 모델링하는 기능을 갖고 있지 않기 때문에 신재생에너지의 모델링을 위해서는 외부적으로 부하를 조작하는 방법을 적용해야 한다. 본 논문에서는 시간이 많이 소요되고 필요한 자료를 구하기 어려운 시간별부하정 대신 연도별 에너지량을 변화시키는 방식으로 신재생에너지의 효과를 모델링 하였다. 본 논문에서는 건국대 박종배 교수가 개발한 'LOADSY 자동생성프로그램 킷키지'를 이용하여 신재생에너지가 고려된 부하지속곡선을 도출하였다.

3.2 최적 대안 도출 및 환경배출량 계산

최적설비대안은 신재생에너지를 고려하지 않은 경우와 RPS 비율로 0.1%, 0.5%, 1%, 2%, 3%, 5%가 부과되었을 경우를 고려하였다. 최적설비대안을 구하기 위해 DECADES 모형의 ELECSAM 모듈을 사용하였으며, 이 ELECSAM 모듈은 WASP 모형에서 DECADES DB를 사용할 수 있도록 개

선한 것이다. ELCSAM 모듈은 최적화 기법으로 동적계획법을 사용하며 예비율, LOLP, 순동예비력 등의 제약을 줄 수 있다. DECADES를 이용한 최적설비대안의 발전량이 [표 1]과 같고, 신재생에너지 의무비율의 변화에 따른 황산화물, 질산화물, 분진, 이산화탄소 배출량은 [표 2]와 같다. 이는 신재생에너지 의무비율이 증가할수록 환경오염물질 배출량이 감소되므로 DECADES 모형이 적절하게 작동되고 있음을 알 수 있다.

3.3 RPS 비율별 환경비용 및 총비용 계산

환경배출에 따른 사회적비용을 계산하는 방법에는 Top-down approach와 Bottom-up 방법이 있다. 이 중 보다 이상적인 방법은 Bottom-up 방법인 영향경로법이다. 그러나, 영향경로법은 연구 대상 지역의 대기확산 자료, 인구분포, 지리학적 특성 등 막대한 자료를 필요로 한다. 유럽의 경우, 막대한 예산을 투입해 국가협력사업인 Extern-E 프로젝트를 수행하여 이러한 자료를 데이터베이스화하였다. 우리나라와 같이 아직 환경에 대한 인식이 상대적으로 부족하고, 이러한 연구개발을 위한 자금의 확보가 어려운 상황에서는 외국의 결과를 적용하여 분석하는 방법도 의미가 있다고 할 수 있다. 또한 1997년 한국전력공사에서 수행한 "전력산업의 사회적 비용에 관한 연구"에서도 환경오염물질의 환경영향비용을 산

출한 바 있으나, 그 값들이 태국 연구결과와 Extern-E 프로젝트 결과의 범위 내에 있어 본 연구에서는 이를 이용한 환경영향비용 계산은 별도로 수행하지 않았다[8]. 본 논문에서는 Extern-E 프로젝트의 수행결과와 태국전력청(EGAT)의 환경영향비용 연구결과를 이용하여 톤당 환경비용을 산출하였다. 환경오염물질에 의한 영향이 모든 사람에게 동일하게 적용된다는 가정 하에 외국의 사례연구 결과를 그대로 사용할 수 있지만, 본 논문에서는 나라별로 환경영향에 대한 지불의사금액이 다른 것으로 보고, 오염물질 배출량당 환경비용이 1인당 PPPGDP(Purchasing Power Parity GDP)에 비례하는 것으로 가정하였다. 소득탄력성은 소득의 증가에 따른 환경영향의 비용의 증가 가능성(질병이나 사망에 대한 WTP의 증가) 또는 선진국과 후진국간의 환경영향비용에 지나치게 큰 차이가 나는 것을 방지하기 위한 계수이다. 하지만 실제 이 값을 정하는 것은 매우 어려우므로 본 연구에서는 단순히 PPPGDP에 비례하는, 즉 r이 1인 것으로 가정하였다. 적용된 산식은 다음과 같다.

표 4. Extern-E 상·하한값 적용시 의무비율별 환경영향비용

Table 4 Environmental damage costs of RPS scenarios based on Extern-E

(단위 : 천억원)

의무비율	하한값 적용시			합계	상한값 적용시			합계
	SOx	NOx	Part		Sox	Nox	Part	
RPS 0%	467	27,136	8,285	35,888	800	44,541	16,600	61,941
RPS 0.1%	467	27,080	8,246	35,794	800	44,451	16,522	61,773
RPS 0.5%	465	26,903	8,231	35,599	797	44,160	16,490	61,447
RPS 1%	463	26,686	8,163	35,311	793	43,803	16,354	60,950
RPS 2%	457	26,282	8,080	34,819	783	43,141	16,189	60,112
RPS 3%	446	25,440	7,882	33,768	765	41,758	15,792	58,315
RPS 5%	435	24,857	7,718	33,010	745	40,801	15,463	57,009

표 5. EGAT 연구결과 상·하한값 적용시 의무비율별 환경영향비용

Table 5 Environmental damage costs of RPS scenarios based on EGAT

(단위 : 천억원)

의무비율	하한값 적용시			합계	상한값 적용시			합계
	Sox	Nox	Part		Sox	Nox	Part	
RPS 0%	15	0	1,922	1,937	81	0	14,173	14,254
RPS 0.1%	15	0	1,913	1,928	81	0	14,107	14,188
RPS 0.5%	15	0	1,910	1,925	81	0	14,080	14,160
RPS 1%	15	0	1,894	1,909	80	0	13,964	14,044
RPS 2%	15	0	1,875	1,889	79	0	13,822	13,902
RPS 3%	14	0	1,829	1,843	77	0	13,483	13,561
RPS 5%	14	0	1,791	1,805	75	0	13,202	13,278

표 3. 한국의 환경영향비용

Table 3 Environmental damage costs of Korea

(단위 : 천원/톤)

Extern-E 프로젝트 결과 적용		
	low	high
Sox	4,750	8,136
Nox	5,508	9,041
Part	8,242	16,513
태국 EGAT 연구결과 적용		
Korea	low	high
Sox	153	823
Part	1,912	14,099

표 6. Extern-E 환경영향비용 상·하한값 적용시 의무비율별 총비용

Table 6 Total costs of RPS scenarios based on Extern-E

(단위 : 천억원)

의무비율	하한값 적용시					상한값 적용시				
	전통에너지 비용①	신재생 에너지 비용②	내부비용 ①+②	환경비용③ (외부비용)	총비용 ①+②+③	전통에너지 비용①	신재생 에너지 비용②	내부비용 ①+②	환경비용③ (외부비용)	총비용 ①+②+③
RPS 0%	841	-	841	35,888	36,729	841	-	841	61,941	62,782
RPS 0.1%	842	4	846	35,794	36,640	842	4	846	61,773	62,619
RPS 0.5%	842	21	863	35,599	36,462	842	21	863	61,447	62,310
RPS 1%	846	42	888	35,311	36,199	846	42	888	60,950	61,838
RPS 2%	854	85	939	34,819	35,758	854	85	939	60,112	61,051
RPS 3%	867	127	994	33,768	34,762	867	127	994	58,315	59,309
RPS 5%	841	212	1,054	33,010	34,063	841	212	1,054	57,009	58,063

표 7. 태국 EGAT 환경영향비용 상·하한값 적용시 의무비율별 총비용

Table 7 Total costs of RPS scenarios based on EGAT

(단위 : 천억원)

의무비율	하한값 적용시					상한값 적용시				
	전통에너지 비용①	신재생 에너지 비용②	내부비용 ①+②	환경비용③ (외부비용)	총비용 ①+②+③	전통에너지 비용①	신재생 에너지 비용②	내부비용 ①+②	환경비용③ (외부비용)	총비용 ①+②+③
RPS 0%	841	-	841	1,937	2,778	841	-	841	14,254	15,095
RPS 0.1%	842	4	846	1,928	2,774	842	4	846	14,188	15,034
RPS 0.5%	842	21	863	1,925	2,787	842	21	863	14,160	15,023
RPS 1%	846	42	888	1,909	2,797	846	42	888	14,044	14,932
RPS 2%	854	85	939	1,889	2,828	854	85	939	13,902	14,840
RPS 3%	867	127	994	1,843	2,837	867	127	994	13,561	14,555
RPS 5%	841	212	1,054	1,805	2,858	841	212	1,054	13,278	14,331

$$\frac{DamageCost_{Korea}}{DamageCost_{Europe}} = \left(\frac{PPPGDP_{Korea}}{PPPGDP_{Europe}} \right)^r$$

r : 소득탄력성 (본 연구에서는 1로 가정)

[표 3]은 Extern E 프로젝트 결과와 태국 연구결과를 이용해 산출한 우리나라의 환경영향비용을 보여주고 있다.

[표 3]의 자료와 신재생에너지 의무비율 대안별 환경오염물질 배출량을 이용해 대안별 총 환경비용을 계산하였으며 [표 4], [표 5]에 그 결과를 정리하였다.

그리고, DECADES에서 생성된 신재생에너지 의무비율별 목적함수(시스템 비용)와 외부적으로 계산한 신재생에너지 발전설비 건설 및 운영비용과 환경비용을 합산하여 신재생에너지 의무비율 대안별 총비용을 검토하였다. [표 6]은 Extern-

E의 환경비용 상·하한값을 적용한 경우의 대안별 총비용을 보여주고 있으며, 신재생에너지 비율이 높을수록 비용이 적은 것으로 나타났다. 이는 단위 환경오염물질 배출량당 비용이 매우 높은 수준이기 때문에 나타나는 현상으로 환경비용이 발전설비의 건설과 운영비용에 비해 월등히 큼을 알 수 있다. [표 7]은 태국의 환경비용 연구결과 중 상·하한값을 적용했을 경우이며, 이 결과 중 하한값을 적용했을 경우에는 신재생에너지 의무비율을 0.1%로 한 대안이 가장 적은 비용이 소요됨을 알 수 있다. 다른 경우와 달리 총비용이 증가하는 이유는 RPS 비율 증가에 따른 환경비용의 감소보다 신재생에너지 설비 건설에 소요되는 투자비의 증가가 크기 때문이다.

이러한 결과로부터 단위 환경오염물질 배출량당 비용의 변화에 따라 대안간의 우열이 달라짐을 알 수 있다. 이러한 현상을 보다 정밀하게 분석하기 위해 다음 절에서는 의사결정 지원 모형인 DAM을 사용하여 신재생에너지 의무비율 대안간의 비교평가를 수행하였다.

표 8. 비용편익분석 결과

Tabel 8 Cost benefit analysis results

(단위 : 천억원, %)

의무비율	Extern-E 환경영향비용 적용시					
	하한값 적용			상한값 적용		
	비용	편익	편익/비용	비용	편익	편익/비용
RPS-0.1%	5	94	17.30	5	169	30.98
RPS-0.5%	22	267	12.09	22	494	22.38
RPS-1%	47	530	11.19	47	992	20.94
RPS-2%	98	971	9.93	98	1829	18.70
RPS-3%	153	1966	12.84	153	3626	23.68
RPS-5%	213	2665	12.53	213	4932	23.18
의무비율	태국 EGAT 연구결과 적용시					
	하한값 적용			상한값 적용		
	비용	편익	편익/비용	비용	편익	편익/비용
RPS-0.1%	5	9	1.66	5	67	12.21
RPS-0.5%	22	13	0.58	22	94	4.25
RPS-1%	47	29	0.60	47	210	4.44
RPS-2%	98	48	0.49	98	352	3.60
RPS-3%	153	94	0.62	153	693	4.53
RPS-5%	213	133	0.62	213	976	4.59

[표 6.7] 자료 활용
 비용 = 기준안(RPS 0%) 내부비용 - RPS별 내부비용
 편익 = 기준안(RPS 0%) 환경비용 - RPS별 환경비용

3.4 RPS 대안 비교 평가

재생에너지 의무할당비율에 따라 DECADES 모형으로부터 도출된 전력계통 설비구성과 환경오염물질배출량을 비교 평가하여 적절한 신재생에너지 의무할당비율을 선택하기 위해 각 대안별 비용편익분석과 의사결정지원 모형인 DAM 모형을 이용한 trade-off 분석을 수행하였다. DAM 모형은 구간 의사결정법(interval decision methodology)을 적용하여 다속성 의사결정 문제를 수행하는 프로그램이다. DAM 모형은, Trade-off 분석을 위해 정확한 값을 주어야 하는 일반 모형과는 'Imprecise trade-off' 분석을 할 수 있다. 이러한 'Imprecise trade-off' 분석을 하기 위해서는 전통적인 최적의 개념을 그대로 적용할 수 없기 때문에 최적이라는 개념을 새롭게 정리할 필요가 있다. 다음은 DAM 모형에서 사용하는 용어에 대한 정의이다.

- 정의 1 : 대안 A가 주어진 가중치 범위 내에서 다른 어떤 대안보다 높은 점수를 가질 때 대안 A는 최적대안(Optimal Alternative)이다.
- 정의 2 : 대안 A1은 다음 두 가지 조건을 만족하면 대안 A2를 Pareto Optimal 측면에서 지배(dominate)한다.
 - 모든 속성에서 A1이 A2보다 나쁘지 않다.
 - 최소한 한 가지 속성에서 A1이 분명히 A2보다 우월하다.

- 정의 3 : 다른 어떤 대안도 대안 A를 Pareto측면에서 지배(dominate)하지 못하면 대안 A는 효율적(efficient) 대안이다.
- 정의 4 : 주어진 가중치 범위 내에서 대안 A1의 총점이 대안 A2보다 높다면 대안 A1은 대안 A2를 능가(outperform)한다.
- 정의 5 : 자신을 능가(outperform)하는 대안이 있으면 그 대안은 능가된(outperformed) 대안이라고 한다. 자신을 능가는 대안이 전혀 없는 경우 그 대안은 능가되지 않은 대안이라 한다.
- 정의 6 : 주어진 가중치 조합에서 대안 A1의 총점이 가장 높을 때, 대안 A1은 잠재적 최적해(potentially optimal)이다.

DAM 모형은 다음과 같은 4가지 분석 기능을 갖고 있다.

- ① Pareto Dominance Test : 이 테스트를 위한 정보는 대안들의 각 속성 값만이 필요하다. 이 테스트는 정의 2에 따라 분석을 수행한다. 분석 결과는 세 가지 색으로 표현된다, 행의 대안이 열의 대안을 지배(dominate)하면 해당 셀의 색깔이 붉은 색이 되고, 지배당하면 푸른 색이 된다. 우열을 가릴 수 없을 때는 노란색이 나타난다.
- ② Outperformance Test : 이 테스트는 정의 4와 정의 5에 따라 분석을 수행한다. 이 테스트를 위해서는 사용

자가 trade-off를 위한 가중치를 입력하여야 한다. 분석 결과는 Dominance test와 마찬가지로 색깔로 표현된다. 행의 대안이 열의 대안을 능가(outperform)하면 붉은 색, 능가 당하면 푸른 색, 판단할 수 없을 때는 노란색으로 표현된다.

- ③ What-If Test : 이 테스트는 한 속성의 trade-off 가중치를 변화시키면서 대안간의 능가여부를 판단한다. 예를 들어 SOx의 단위 배출량당 비용 변화에 따른 대안간의 능가여부를 판단할 수 있다. 분석 결과의 표현 방식은 상기 두 가지 분석 기능과 동일하다.
- ④ 잠재적 최적해 분석(Potential Optimality Test) : 이 분석 기능은 정의 6에 따라 분석을 수행한다. 분석 결과는 두 가지로서, 각 대안이 최적해가 될 수 있는지의 여부와 각 대안이 최적해가 될 수 있게 하는 가중치의 조합을 제공한다.

대안간의 비교평가를 위해 우선 Extern-E 상하한 환경오염물질 배출량당 비용과 태국 연구결과의 상하한 환경오염물질 배출량당 비용값에서의 기준안 대비 비용편의 분석을 시행한 결과는 아래 [표 8]과 같다. 환경오염물질 단위 배출량당 비용과 상관없이 신재생에너지 의무비율로 0.1%를 적용하는 대안이 가장 높은 비용편의 비율을 나타내는 것으로 나타났다. 특이한 점은 태국 연구결과의 하한값을 적용하는 경우에는 RPS-0.1% 대안만이 1보다 큰 값을 갖는 다는 것이다. 비용편의 분석으로는 가장 비용효율적인 대안을 찾을 수 있지만 최소의 총비용을 갖는 대안을 찾을 수 없었다. 단위 환경 배출량당 비용의 변화에 따른 비교평가를 위해 DAM 모형을 활용하였다.

의사결정 지원모형 DAM을 이용하여 신재생에너지 의무제도 대안간의 비교평가를 수행하였다. 전술한 바와 같이 DAM 모형은 Pareto Dominance test, Outperformance Test, Optimality test, What-If test의 네 가지 분석 기능을 갖고 있다. 비교평가를 위해 전력계통비용, 신재생에너지 건설 및 운영비용, 황산화물 배출량, 질산화물 배출량, 분진 배출량을 대안의 속성으로 입력하였으며, 각 속성간의 trade-off를 위한 가중치로 단위 오염물질 배출량당 비용의 범위를 입력하였다.

[그림 3]는 Pareto Dominance test 결과이다. Pareto Dominance의 정의는 한 대안이 모든 속성에서 다른 한 대안보다 나쁘지 않고 최소한 한 가지 속성에서 다른 한 대안보다 나은 경우를 말한다. 결과적으로 어느 대안도 Pareto Dominance하지 않다는 결론을 얻었다. 본 논문의 대안은 신재생에너지 의무비율이 증가함에 따라 신재생에너지 설비를 제외한 전력계통의 비용은 감소하고 환경오염물질 배출량은 증가하는 형태를 갖기 때문에 Pareto Dominance한 대안이 나타나지 않는 것을 당연한 결과라고 할 수 있다.

[그림 4]은 Outperformance test 결과이다. Outperformance는 주어진 가중치 범위 내에서 한 대안의 총점이 다른 한 대안보다 높은 경우로 정의된다. 이 그림을 통해 신재생에너지 의무비율 0.1%를 부과하는 대안이 신재생에너지 의무비율을 적용하지 않는 대안을 주어진 가중치 범위 내에서는 항상 능

가(outperform)하는 것을 알 수 있다. 따라서 주어진 가중치 범위가 적절하다면 신재생에너지 의무비율을 적용하지 않는 대안은 항상 바람직하지 않다고 판단할 수 있다.

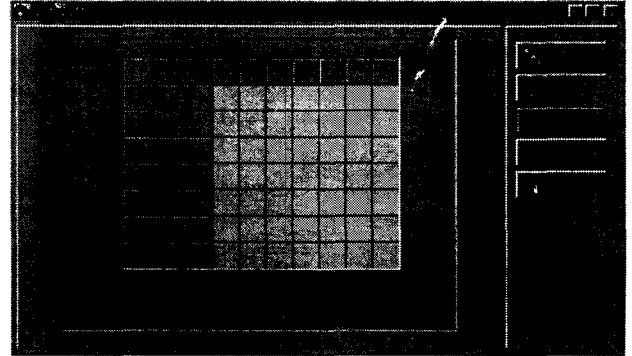


그림 3. Pareto Dominance Test 결과
Fig. 3 Pareto Dominance Test result

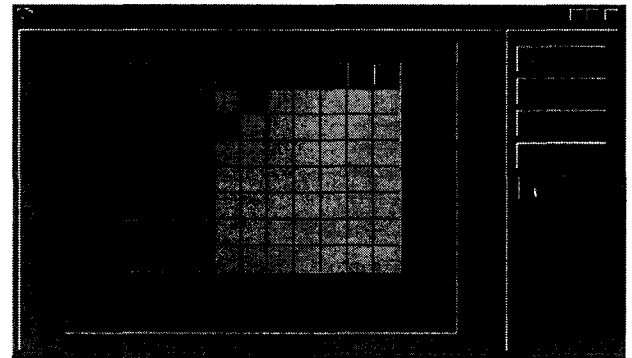


그림 4 Outperformance Test 결과
Fig 4 Outperformance Test result

[그림 5]는 Optimality test 결과를 보여주고 있다. Potentially Optimal의 정의는 주어진 가중치 범위내의 한 점에서 한 대안이 다른 모든 대안보다 높은 점수를 얻는 경우이다. 이들 그림에서 신재생에너지 의무비율이 0.1%인 대안과 5% 대안이 잠재적 최적해인 것을 알 수 있으며, 그림의 오른쪽 표는 각 대안이 최적이 되는 가중치의 값, 즉 단위 환경오염물질 배출량당 비용을 보여주고 있다.

신재생에너지 의무비율 0.1% 대안은 황산화물과 질산화물의 단위 배출량당 비용이 206.4천원/ton이고 분진의 단위 배출량당 비용이 1,912.0천원/ton일 때 최적 대안이 될 수 있음을 보여주고 있다. 반면에 신재생에너지 의무비율이 5%인 대안은 황산화물과 질산화물의 단위 배출비용이 1,000천원/ton인 경우 최적 대안이 된다.

[그림 6,7,8]은 What-If test의 결과를 보여주고 있다. [그림 6]는 황산화물의 단위 배출량당 비용이 변화함에 따른 대안간의 Outperformance를 보여준다. 대안 RPS-0.1%는 황산화물 단위 배출량당 비용에 상관없이 항상 RPS-0% 대안을 능가하며, RPS-3% 대안은 배출량당 비용이 4,304천원/ton 이상인 경우 RPS-2% 대안을 능가한다. 또 배출량당 비용이 6,778천원/ton 이상인 경우에는 RPS-5% 대안이 RPS-2% 대

안을 능가한다. 즉 배출량당 비용이 4,304천원/ton 이상인 경우에는 항상 대안 RPS-3%가 RPS-2% 대안보다 우월한 대안임을 알 수 있다. 황산화물 단위 배출량당 비용이 변화해도 더 이상의 outperformance 관계는 나타나지 않았다.

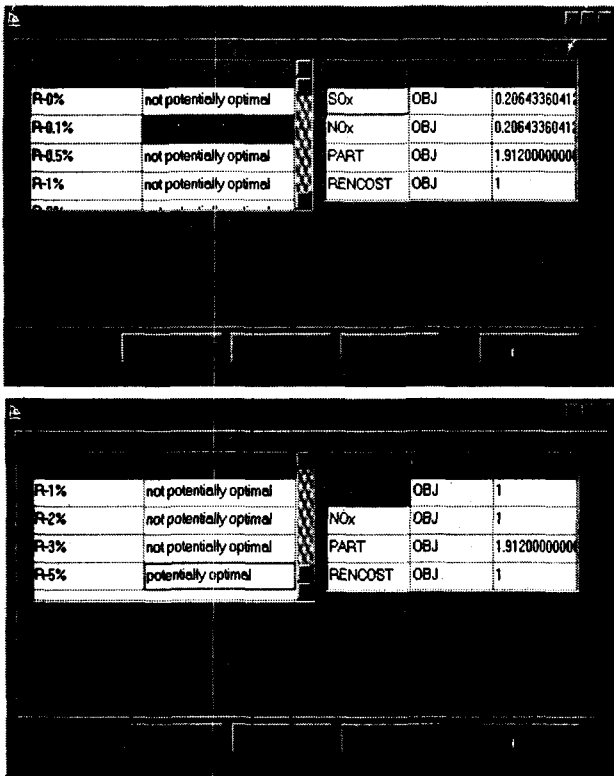


그림 5. Optimality Test 결과
Fig 5 Optimality Test result

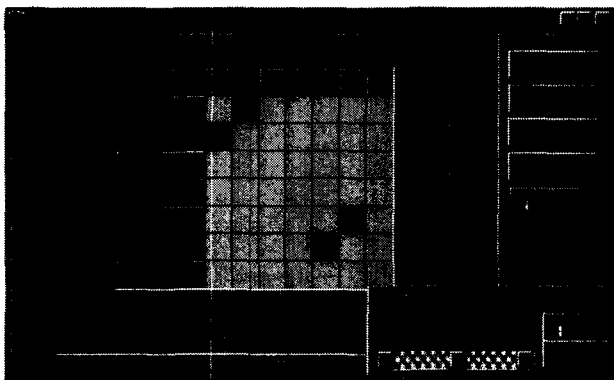


그림 6. SOx 단위 배출량당 비용 변화시 What-If Test 결과
Fig 6 What-If Test result of SOx

[그림 7]은 질산화물의 단위 배출량당 비용을 변화시키면서 Outperformance test를 수행한 결과이다. 질산화물의 단위 배출량당 비용 변화에는 대안간의 우열이 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 이는 질산화물 배출량이 다른 오염물질에 비해 상대적으로 많은 것으로 계산되었기 때문이다.

질산화물의 단위 배출량당 비용이 271.2천원/ton 이상만 되면 항상 신재생에너지 의무비율이 가장 큰 RPS-5% 대안이 최적 대안이 됨을 알 수 있다.

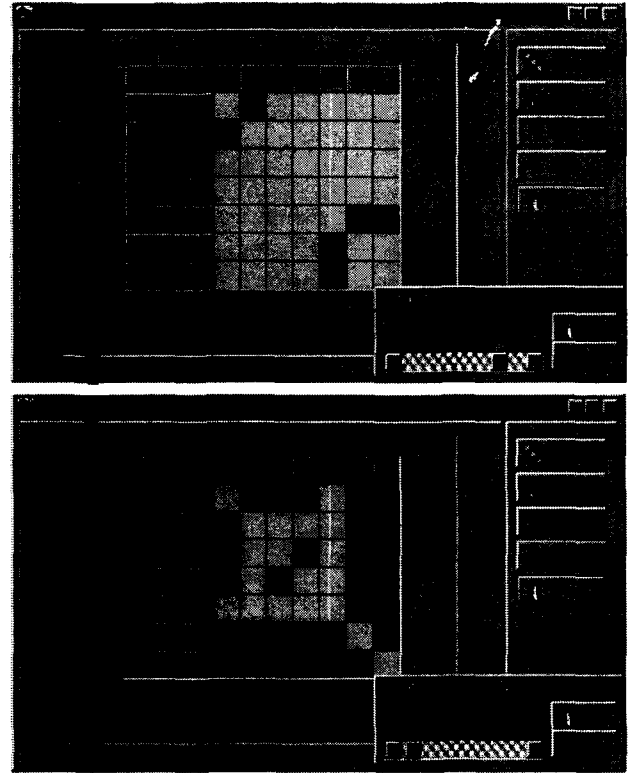


그림 7. NOx 단위 배출량당 비용 변화시 What-If Test 결과
Fig. 7 What-If Test result of NOx

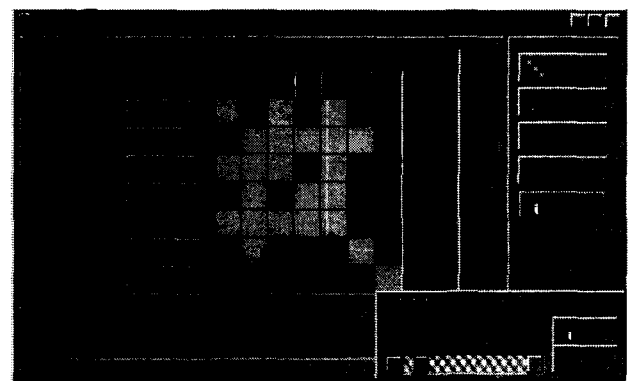


그림 8. 분진 단위 배출량당 비용 변화시 What-If Test 결과
Fig. 8 What-If Test result of Particulate

[그림 8]은 분진의 단위 배출량당 비용을 변화시키면서 Outperformance test를 수행한 결과이다. 단위 비용이 3,226천원/ton 이상일 때 RPS-5% 대안이 다른 모든 대안에 비해 우월함을 할 수 있다.

DECADES에서 제공되는 대기오염물질 배출량 자료와 각종 비용자료를 활용하고, 국내외 환경영향 계량화 관련 연구 결과를 이용하여 신재생에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standards, RPS)를 도입할 경우, 환경영향(이산화탄소 배출량의 변화 등)과 경제성에 미치는 영향을 계량적으로 분석하여 보았다. RPS 비율에 따른 오염물질 배출량 변화, RPS 비율에 따른 환경비용 변화, RPS 비율에 따른 총비용(생산비용과 외부비용의 합)의 변화를 계산하고, 이렇게 계산된 속성들을 이용하여 대안(RPS 비율에 따른 최적 대안)간의 비교평가를 수행하였다. 우선 비용편의 분석 결과 신재생에너지 의무비율로 0.1%를 부과하는 대안(RPS-0.1%)이 가장 비용효율적인 것으로 나타났다. 하지만 비용편의 분석으로는 전체 전력시스템의 비용을 최소로 하는 최적의무비율을 도출할 수 없기 때문에 의사결정모형 DAM을 이용하여 환경오염물질 단위 배출량당 비용을 변화시키면서 대안간의 비교평가를 수행하였다.

Pareto Dominance 테스트를 통해 어느 대안도 Pareto Dominance하지 않음을 확인했다. Outperformance test를 통해서 신재생에너지 의무비율 0.1%를 부과하는 대안이 신재생에너지 의무비율을 적용하지 않는 대안을 주어진 가중치 범위 내에서 항상 능가(outperform)함을 알 수 있다. Optimality test를 통해 신재생에너지 의무비율이 0.1%인 대안과 5%인 대안이 잠재적 최적해인 것을 알 수 있었으며, 신재생에너지 의무비율 0.1% 대안은 황산화물과 질산화물의 단위 배출량당 비용이 206.4천원/ton이고 분진의 단위 배출량당 비용이 1,912.0천원/ton일 때 최적 대안이 되며, 신재생에너지 의무비율이 5%인 대안은 황산화물과 질산화물의 단위 배출비용이 1,000천원/ton인 경우 최적 대안이 됨을 알 수 있었다.

또한 오염물질의 단위 배출량당 비용을 변화시키면서 Outperformance test를 수행한 결과, 질산화물의 단위 배출량당 비용 변화에는 대안간의 우열이 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 이는 질산화물 배출량이 다른 오염물질에 비해 상대적으로 많은 것으로 계산되었기 때문인 것으로 판단된다. 질산화물의 단위 배출량당 비용이 271.2천원/ton 이상만 되면 항상 신재생에너지 의무비율이 가장 큰 RPS-5% 대안이 최적 대안이 됨을 알 수 있었다.

이상의 비교평가 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① RPS-0% 대안은 선택하지 않아야 한다. 주어진 환경오염물질의 단위 배출량당 비용이 합리적인 값이라면 RPS-0% 대안은 항상 RPS-0.1% 대안에 비해 열등하기 때문이다.
- ② RPS-1%, RPS-2%, RPS-3%, RPS-4% 대안은 특정 대안에 항상 열등하지는 않다. 현재 갖고 있는 환경오염물질의 단위 배출량당 비용 정보로는 이들 대안이 RPS-0.1% 대안이나 RPS-5% 대안에 비해 열등하다고 확신할 수 없다. 하지만 환경오염물질의 단위 배출량당 비용 범위 내의 특정 값이 주어진 경우, 이들 대안은 항상 대안 RPS-0.1% 대안이나 RPS-5% 대안에 비해

총비용이 크기 때문에 선택하지 않는 것이 바람직하다.
 ③ 최종 선택은 RPS-0.1% 대안과 RPS-5% 대안 중에서 선택하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 질산화물과 분진의 단위 배출량당 비용 수준이 선택을 위한 주요결정 인자인 것으로 판단되며, 황산화물의 단위 배출량당 비용은 상대적으로 그 중요성이 낮은 것으로 보인다. 질산화물과 분진 가운데에서도 질산화물의 단위 배출량당 비용이 더 민감한 것으로 나타났다. 두 대안 가운데 하나의 대안을 선택하기 위해서는 질산화물의 단위 배출량당 비용이 271.2천원/ton 이상인지, 그리고 분진의 단위 배출량당 비용이 3,226천원/ton 이상인지에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 DECADES 프로그램의 기능과 알고리즘을 소개하고, DECADES 프로그램을 활용해 신재생에너지 보급 확대를 위한 방안으로 국내에 신재생에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standards, RPS)를 도입할 경우 환경영향과 경제성에 미치는 영향을 계량적으로 분석하였다. DECADES에서 생성된 발전기술별 비용자료와 환경 배출량을 계산하여, 오염물질 배출에 의한 환경영향을 도출하였다. 본 논문의 주요 결과는 여러 대안 중 우월한 대안을 선택하여 신재생에너지와 관련된 국가의 에너지정책 및 전력정책의 기본 방향 결정에 활용될 수 있으며, 장기적으로 신재생에너지 지원의 도입 방향(기술적, 경제적 측면) 등에도 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 기후변화협약과 관련하여 RPS 비율결정에도 좋은 자료로 활용할 수 있을 것이다. 그러나 본 논문에서 수행한 연구내용은 발전단계를 제외한 건설 및 폐기단계의 자료 분석이 이루어지지 못하였다. 또한 본 논문에서 환경 및 경제평가를 위한 실험데이터를 적용하지 못하여 Extern-E와 태국 연구결과를 활용하였으나, 향후 이러한 예측값들을 pathway분석, Dose-Response Curve, 환경비용추정 등의 후속 연구를 수행하여 보다 완벽한 분석을 위한 데이터베이스의 정확도 향상과 범위 확대가 필요하며, 본 논문에서 수행하지 못한 영향경로법의 오염물질 이동, 확산, 피폭-반응 함수의 도출에 대한 연구도 활발히 이루어져야 할 것으로 생각된다. 이러한 연구에는 막대한 자원이 소요되기 때문에 동북아 국제협력사업 등을 통해 수행하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문(보고서)은(는) 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원사업(과제번호 : I-2002-0-042-5-00)으로 수행된 논문(보고서)입니다.

참 고 문 헌

- [1] IAEA, "Enhance electricity system analysis for decision making-A reference book, 2000,
- [2] IAEA, "Health and Environmental Impacts of electricity generation systems", 1999
- [3] IAEA, "DECADES Tools User's Manual for Version 1.0", 2000
- [4] 임재규, "국내 GHG 감축을 위한 정책포트폴리오에 대한 연구", 에너지경제연구원, 2001
- [5] 한국전기연구소, "전력기술 및 경제정보 체계화를 위한 DECADES/TAG 구축 연구", 한국전력공사. 1999
- [6] 한국전력공사 환경관리처, "연료, 연소관리 업무편람", 1998
- [7] 김발호, 박종배, "전력산업 구조개편에 따른 대체에너지 기술 도입 정책, 환경 영향 평가 및 경제적 분석에 관한 연구" 에너지관리공단, 2002.
- [8] 한국전력공사 전원계획처, "전력산업의 사회적 비용에 관한 연구", 1997
- [9] <http://externe.jrc.es>

저 자 소 개



오 영 진 (吳 漢 進)

1978년 10월 7일생. 2002년 홍익대 공대 전자전기공학부 졸업. 2004년 동 대학원 졸업(석사).

Tel. 02-350-2238

E-mail : jienie@kepco.co.kr



김 발 호 (金 發 鎭)

1962년 7월 11일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 U. of Texas at Austin 공업경제 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전력경제 졸업(박사). 현재 홍익대학교 공과대학 전자전기공학부 부교수

Tel : 02-320-1462

E-mail : bhkim@hongik.ac.kr



노 재 형 (盧 載 溍)

1969년 11월 10일생. 1993년 서울대 원자핵공학과 졸업. 2002년 8월 홍익대학교 대학원 졸업(석사).

Tel. 02-3456-6616

E-mail : roh@kpx.or.kr



박 종 배 (朴 宗 培)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 건국대학교 전기공학과 조교수.

Tel : 02-450-3483

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr