

환경요소를 고려한 발전설비의 경제성 평가*

정석재**, 김경섭**, 박진원***

Economic Analysis of Plant Utilities Under Environment Factor

Jeong Suk jae, Kim Kyung Sup, Park Jin Won

Abstract

The purpose of this study is an economic analysis of power plant utilities by comparing electricity generating cost including environmental costs. Considering the enormous role of electricity in the national economy, it is very important to study the effect of environmental regulation on the electricity sector. Because power utilities need for large investment during construction, operation and maintenance, and also require much construction lead time. Economic analysis is the important process in the electric system expansion planning. This paper compares the costs of electricity generation including environmental costs between a coal-fired power plant and an LNG combined cycle power plants. With the simulation, this study surveys the sensitivity of fuel prices, interest rate and carbon tax. In each case, this sensitivity can help to decide which utility is economically better in environmental regulation circumstance.

Key Words: Economic Analysis, Plant Utilities Estimation, Simulation Modeling

* 본 연구는 「기후변화 원인물질 저감기술 평가시스템」 과제로 수행되었음

** 연세대학교 산업시스템공학과

*** 연세대학교 화학공학과

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

경제가 성장함에 따라 전력수요가 급증하고 있으며, 국민복지 향상이라는 측면에서도 발전 부문의 역할이 점차 증대되고 있다. 반면에 경제성장과 더불어 발생하는 환경오염물질의 배출이 증가되어 지구환경은 점차 악화되어 환경오염문제는 현재 및 미래 인류의 생존과 연관된 전 세계적인 문제로 등장했으며, 환경오염물질의 배출을 규제하려는 세계적인 동향의 강화에 따라 환경문제를 경제 내적인 문제로 발전하고 있다. 따라서 환경오염을 일으키는 상품 생산의 비용을 계산할 때, 환경비용을 고려치 않은 사적비용에 근거한 가격은 경제활동의 정확한 기회비용을 나타내는 지표가 될 수 없다. 발전설비의 경우에도 여러 가지 투자대안들이 환경에 미치는 영향을 고려할 경우, 각 대안들이 전력을 생산하기 위해 필요한 비용은 사회적 비용을 고려치 않은 사적비용과 커다란 차이를 나타낼 수 있다. 이러한 관점에서 발전 부문의 생산비용의 개념도 기존의 발전원가 부분에 환경비용을 포함한 사회적 비용을 확대할 필요성이 요구되어진다. 현재 우리나라의 주요 발전원인 석탄화력 및 LNG 발전의 경우 전력 생산에 있어서 발생하는 환경오염 물질의 배출이 증가되어 지구환경은 심각하게 오염되고 있다. 특히 기후변화협약의 체결로 지구온난화 문제가 대두되면서 CO₂규제가 강화되면서 환경에 대한 영향을 고려한 발전원가 계산으로 발전원별 경제성을 평가하는 것이 필요하다.

1.2 연구 방법 및 내용

본 연구에서는 발전설비의 경제성 평가에 있어서 환경요소를 고려하는데 특히 지구온난화 문제의 주범인 CO₂ 배출규제에 따른 국제 동향 하에서 발전설비의 경제성 평가를 한다. 경제성 평가의 대상 발전을 선정하는데 있어서

우리나라 전력의 주생산원인 화력발전설비 중 표준화된 석탄 및 LNG 발전소의 경제성 평가를 수행한다. 경제성 평가를 하는 수단으로써는 개별 발전원가를 산정하는 균등화 발전원가법을 사용하는데 발전소 건설과 관련된 자본비, 임금 및 보수비, 수선비 등의 운전유지비, 전기생산에 소요되는 연료비를 비롯하여, 전력생산과 관련된 전력부문의 사회적 비용으로 CO₂ 온난화가스 배출로 인한 지구 온난화, 분진 등의 대한 보건상의 피해와 SO₂와 NO₂로 인한 산성비에 의한 피해 등이 포함된다. 이러한 사회적 비용을 고려하지 않은 채, 의사결정자 입장에서 전력의 생산과 소비에 관련된 정책결정을 할 경우, 전력생산과 관련된 자원의 효율적 배분이 달성될 수 없을 것이다. 본 연구에서는 탄소세 부과를 통한 방식으로 환경요소를 경제적 가치로 전환해서 경제성 분석을 수행하고 NO₂의 경우 공해 저감설비 비용을 포함하여 경제성 분석을 수행한다. 또한 시물레이션 모델을 이용한 민감도 분석을 통해 연료가격과 할인율의 변동에 따른 발전원간의 경제성을 비교해 보고자 한다.

1.3 기존 연구

환경투자정책의 경제성 분석은 환경정책평가 연구원을 중심으로 장 기복(1996), 김 홍균 · 남 준우 · 조장욱(1997), 차승환 · 강광규 · 노길영(1999), 박창원 · 한원희 · 김경식(1999), 김 현 · 정경수(2000) 등에 의하여 진행되었다. 장기복(1996)은 폐가전제품을 중심으로 폐자원 재활용의 경제성을 분석하였다. 그 이듬해 김 홍균 · 남 준우 · 조 장욱(1997)은 국제일반균형모형을 이용하여 GREEN ROUND의 효과를 분석하고 환경세의 도입이 우리경제에 미치는 효과를 살펴보았다. 그들의 연구에 의하면 GNP 대비 1%의 환경세는 총 산출량 성장률은 0.435%의 감소를 초래하고 5.15%의 후생손실을 초래하게 될 것이라고 하였다. 1999년에 차승환 · 강광규 · 노길영(1999)은 비용-편익분석(Benefit

- Cost Analysis)을 사용하여 매연여과장치 보급의 경제성을 분석하였으며, 같은 해 박 창원 ·한 원희 ·김경식(1999)은 CGE모형을 이용하여 천연가스 가격 및 투자의 경제적 파급효과를 분석하였다. 또한 김 현 ·정 경수(2000)는 탄소배출계수를 통해 에너지 수요에 따른 이산화탄소 배출량을 추정하고 이를 이용하여 에너지 절약투자가 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하였다.

이에 본 연구는 원가 산정에 따른 경제성 분석에 거치는 것이 아니라, 환경적인 측면을 고려한 경제성 분석을 수행함에 그 의의가 있다고 하겠다.

2. 경제성 평가 과정

경제성 평가를 수행하는 전체 절차를 다음과 같다.

- 1) 대상 전원의 선택
- 2) 명확한 선정기준에 의한 유사발전소 선정
- 3) 고정비 및 변동비 등을 통한 발전원가 산정 및 비교
- 4) 대기오염을 고려한 경제성 분석(탄소세 부과방식)

2.1 대상 전원의 선택

현재 우리나라 주력전원은 원자력, 유연탄, LNG 발전이며, 이중 원자력은 이산화탄소 배출이 없으므로, 경제성 평가의 대상에서 제외하고 유연탄과 LNG 발전을 대상전원으로 선택하여 경제성 분석을 수행한다.

2.2 유사발전소 선정

경제성 분석대상으로 유연탄과 LNG 발전을 비교하는데 기존발전소간의 용량, 설비, 연료 및 운영방식이 다르기 때문에 정확한 경제성 비교가 가능하도록 유사발전소를 선정하는 게

중요하다. 아래의 표는 한전에서 사용하는 유사발전소 선정기준이다.

<표 1> 유사발전소 선정기준

선정고려항목	배 점	
	유연탄	LNG
1. 용량의 유사성	20	20
2. 연료원의 유사성	20	20
3. 설비의 유사성	10	10
4. 준공시기의 유사성	10	10
5. 자료 확보의 용이성	10	10
6. 공사비 산정의 합리성	10	10
7. 신기술 적용여부	5	10
8. 설계 표준화 적용여부	5	-
9. 공사비 산정의 합리성	10	10

자료원 : 한전 “민자발전 사업추진에 따른 업무처리 기준과 절차수립(기술부문) 1998

3. 발전원가 구성요소 산정기준

발전원가는 전력이 송전계통에 연결되는 지점까지의 비용으로 보통 건설비, 운전유지비, 연료비 등이 포함되며, 고정비원가와 변동비원가로 구분되어진다.

3.1 고정비 산정기준

고정비 원가는 발전량의 증감에 관계없이 발전설비에 대한 총투자비에 따라 항상 고정적으로 발생하는 비용으로, 자본비 감가상각비, 보험료, 제세금등으로 구성된다.

자본비는 자본회수계수와 감가상각비에 의해 구할 수 있다.

$$CRF = \frac{(1+i)^N \times i}{(1+i)^N - 1}$$

$$D = 1 / N$$

$$COM = CRF - D$$

i: 할인율 *N*: 발전소 수명주기 *CRF*: 자본회수계수 *D*: 감가상각율 *COM*: 자본비용

3.2 운전유지비 산정기준

본 연구에서는 실험대상 발전소를 기준으로 운전유지비에 물가지수를 적용 산출한 금액을 초기 투자비로 나누어 운전유지비를 구한다.

$$\text{운전유지비율} = \frac{m}{I} \times 100 (\%)$$

m : 운전유지비율 *I* : 초기투자비

3.3 연료비 산정기준

본 연구에서는 열소비율 곡선법을 이용하여 계산하였는데 다음의 수식과 같다.

$$\text{연료비} = \text{열소비율} \times \text{발전량} \times \text{열량단가}$$

3.4 발전원가 산정기준

매년 비용이 변화하고 발전량이 서로 다른 대안간 비교를 위해서 년도별 불규칙하게 발생하는 비용과 발전량을 균등하게 증가화할 필요가 있는데 이렇게 산출된 비용과 발전량을 이용하여 발전원가를 산출하는 방법을 균등화 발전비용법이라고 한다.

균등화발전원가 =

$$\frac{\sum_{n=1}^N (c + m + f) \times (1 + e)^n \times CRF}{\sum_{n=1}^N \{Gn \times (1 - Ap) \times Cf \times H\} \times (1 + r)^n}$$

c : 고정비 *m* : 운전유지비 *f* : 연료비
Gn : 시설용량 *Ap* : 발전소내 소비율
Cf : 설비이용률 *H* : 발전시간 *n* : 가동년도
N : 수명기간 *e* : 물가상승률 *f* : 할인율(%)

본 연구에서는 발전원가 산정비 고정비 부분과 변동비 부분으로 나누어서 계산하였다. 다음의 수식은 발전원가 산정식이다.

$$\text{발전원가} = \text{고정비} + \text{변동비}$$

$$= \frac{I \times Fx}{Gn \times H \times Cf \times (1 - Ap)} + Hr \times fp \times G$$

I : 총건설비 *Fx* : 고정비율
Gn : 시설용량 *H* : 발전시간
Cf : 설비이용률 *Ap* : 발전소내 소비율
Hr : 평균열효율 *fp* : 연료비 *G* : 발전량

3.5 환경요소 산정

3.5.1 NO₂ 저감비용

NO₂ 저감비용은 기본적으로 OECD/IEA의 "Emission Contorls"에 의한 값을 인용하였다.

3.5.2 탄소세 적용

<표 1> 연료의 성분

구분	성분 조성			발열량 (kcal/kg)	열소비율 (kcal/k조)
	탄소	수소	기타		
LNG	75.6	24.4	0.1	13000	1740
유연탄	69.0	4.3	26.7	6300	2174

자료원 : 한국전력공사 "GR에 대한 전력대응방안"

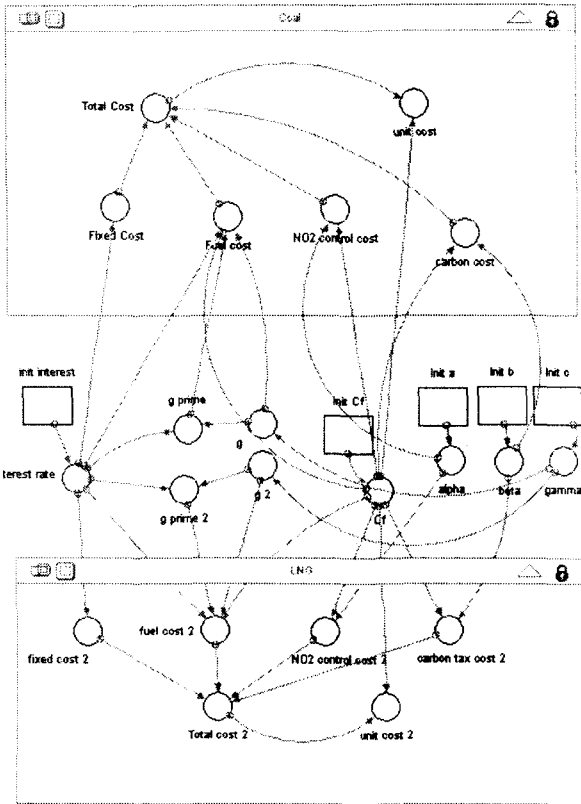
위의 표는 탄소세를 계산하기 위한 각 연료별 성분, 발열량, 열소비율 자료를 보여주고 있다. 각 연료별 탄소세 계산은 단위당 탄소세 × 발열량 × 열소비율로 계산되어진다.

4. 발전 비용 산정 모형 및 분석

4.1 모형의 구성

시스템 다이내믹스 툴로 잘 알려진 Stella 5.0을 이용하여 아래의 모형을 구성하고 유연탄과 LNG의 경제성 분석을 수행하였다. 유연탄과 LNG 화력의 경제성 분석을 위한 구성요소와 관련 인자들의 다이어그램을 그림 1에서 표현하였다.

발전원가는 발전비용을 전력량으로 나누어 계산하게 되며, 고정비, 연료비, 변동비, NO₂ 처리비용, 탄소세로 구성되어진다.



<그림 1> 발전원가 산정모형

- unit cost : 발전원가
- Total cost : 발전비용
- Fixed cost : 고정비
- fuel cost : 연료비
- NO₂ control cost : NO₂ 처리비용
- carbon tax cost : 탄소세
- init interest : 초기 할인율 부여
- init Cf : 초기 설비 이용률
- init a : 초기 NO₂ 처리 기준 비용
- init b : 초기 탄소세 기준 비용
- init c : 초기 연료비 기준
- alpha : NO₂ 처리기준비용 대비 비율
- beta : 탄소세 대비 비율
- gamma : 연료가격 변동률 대비 비율

Cf : 설비 이용률

g : 유연탄 변동률 3%에 대한 등비급수 변화율

g2 : LNG 연료가격 변동률 3%dp 대한 등비급수 변화율

g_prime : 유연탄 화력의 등비 지불 계수의 이자율

g_prime2 : LNG등비 지불계수의 이자율

interest rate : 할인율

- 1) 고정비는 할인율과 초기투자비로 계산한다.
- 2) 연료비는 연료비 상승이 등비급수로 변하므로, 등비급수 변화율과 등비자본계수의 이자율이 필요하며, 할인율과 이용율로 계산한다.
- 3) NO₂ 처리비용은 NO₂처리기준 대비 비율과 가동율로 계산한다.
- 4) 탄소세는 이용율과 탄소세 기준비용대비 비율로 계산한다.

4.2 모형의 수식

4.2.1 고정비

초기투자비 × (고정비율+운전유지비율)로 계산되며, 고정비율은 자본회수 계수와 법인세 고정비율의 합으로 표현되므로,

고정비용 = 초기투자비 × (자본회수계수+법인세 고정비율+운전유지비율)로 표현된다.

4.2.2 발전량

연간 발전량은 발전소내 사용한 양을 제외한 나머지로 계산되므로, 다음과 같이 표현될 수 있다.

발전량 = 연간 가동시간 × 시설용량 × (1-자체 소비율) × 이용률

4.2.3 연료비

기본적으로 연료비는 열량단가 × 열소비율 × 발전량으로 계산되어진다. 하지만 연료비는 매년 인상되므로, 매년 다른 연료비가 책정된다. 하지만 본 연구에서의 균등화 발전원가는 매년 똑같이 비용이 발생한다고 가정하므로,

현재 가격을 연가로 환산해야 한다.

따라서, 열량단가/(1·+인상률) × 등비지불 계수 × 자본회수계수 × 열소비율 × 발전량으로 계산한다.

4.2.4 NO₂ 저감설비 비용

NO₂ 처리비용 × 발전량 × (1-자체 소비율)로 간단하게 계산할 수 있다.

4.2.5 탄소세 비용

탄소세 비용도 NO₂ 저감기술 비용과 마찬가지로, 자체 소비율을 포함하지 않은 원래 발전량으로 계산하여야 한다. 그 식은 아래와 같다. 탄소세 비용 = 단위당 탄소세 × 발전량 / (1-자체 소비율)

4.2.6 전체 발전비용

발전비용은 고정비, 연료비, NO₂ 저감비, 탄소세로 구성되어진다. 또한 발전원가는 발전비용을 발전량으로 나누어 계산한다.

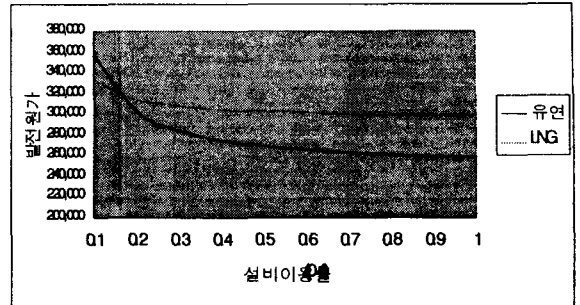
5. 결과 분석

설비이용률이 전력 수요에 따라 변동이 심하며, 탄소세는 향후 톤당 비용의 가치가 변한다고 가정하고 탄소세 및 설비이용률에 따른 시나리오 분석을 실시하였다.

5.1 설비이용률의 변화에 대한 분석

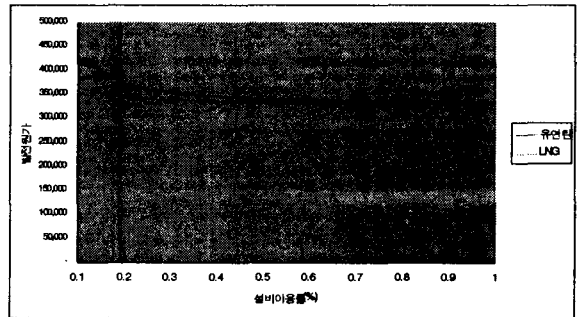
5.1.1 탄소세를 제외한 경우

탄소세가 없는 경우에 대해서 유연탄과 LNG 발전소의 각 설비 이용률에 대한 발전원가 분석을 수행하였다. 그림 2에서와 같이 설비 이용률이 약 17%를 상회하면서, LNG보다 유연탄의 발전원가가 경제적임을 확인할 수 있다. 설비 이용률이 높아짐에 따라 원가의 차이는 더욱 커짐도 확인할 수 있다.



<그림 2> 설비이용률 따른 분석(탄소세제외)

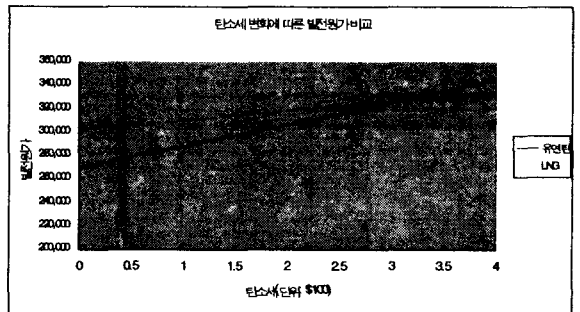
2) 탄소세를 \$117로 부여한 경우



<그림 3> 설비이용률에 따른 분석(탄소세증가)

탄소세가 점차 강화되면, 점차로 LNG발전원가가 유연탄 발전원가를 완전 dominate됨을 알 수 있다.

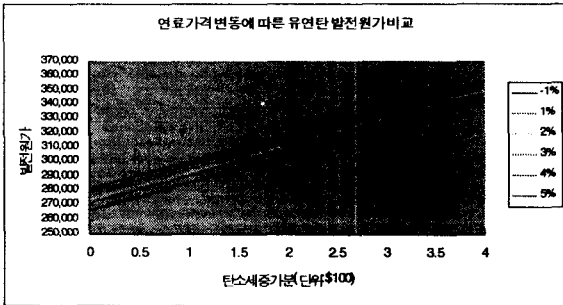
3) 탄소세 변화에 따른 민감도 분석



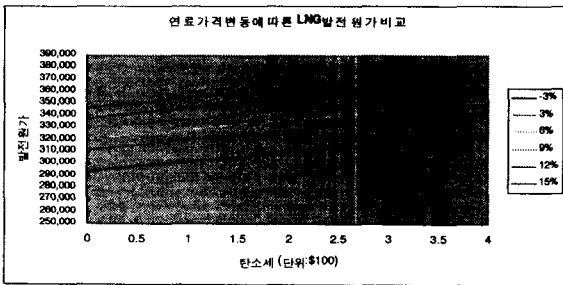
<그림 4> 탄소세 변화에 따른 분석

탄소세를 \$0에서 \$400까지 변화시켜 분석한 결과 약 \$300이상 부과한 경우 LNG가 유리해지는 탄소세 분기점이 발생함을 알 수 있다.

4) 연료비 변동에 따른 민감도 분석



<그림 5> 유연탄화력의 연료비 인상

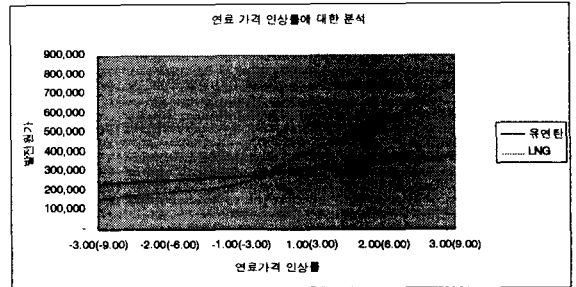


<그림 6 > LNG화력의 연료비 인상

<그림 5>와 <그림 6>은 연료가격이 변동함에 따라 각 발전원가의 민감도를 분석한 결과이다. 연료비 변동에 대해 유연탄보다 LNG 화력의 경우 더욱 민감한 반응을 보임을 알 수 있다.

5) 연료가격 인상을 변화에 따른 분석

탄소세를 \$117, 이용률을 50%에서 연료가격 인상에 따른 발전원가 비교에서는 연료가격이 인상되면 LNG가 불리하게 나타났다.

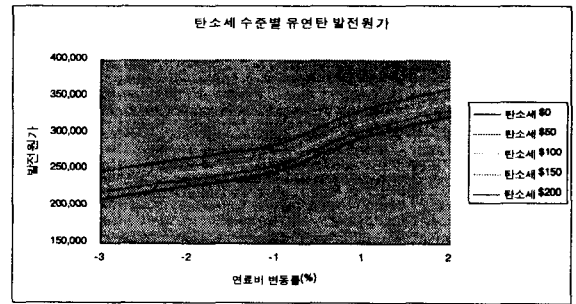


<그림 7> 연료가격 인상을 변화에 따른 분석

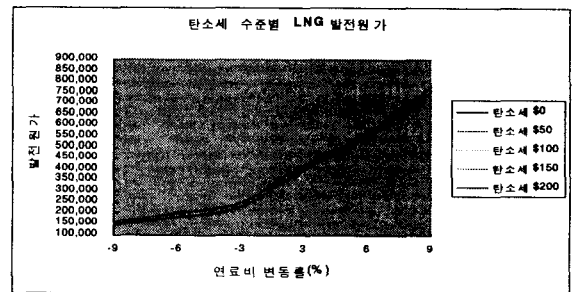
6) 연료가격 변동에 따른 발전원가 민감도 분석(탄소세 0-200 범위)

탄소세를 \$0에서 \$200까지 범위에서 연료가격을 인상률에 따른 발전원가 민감도 분석을 수행한 결과이다.

탄소세의 변화에 LNG 발전원가가 더욱 민감한 반응을 보이고 있으며, 향후, 적정 탄소세의 산정에 영향을 미칠 것으로 본다.



<그림 8> 탄소세 수준별 유연탄 발전원가



<그림 9> 탄소세 수준별 LNG 발전원가

6. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 균등화 발전원가법을 이용하여 유연탄과 LNG 화력 발전간의 경제성을 분석하였다. 환경요소를 고려하여 기존의 발전설비 경제성 평가에서 이산화탄소 배출량을 규제하는 탄소세를 도입하여, 저감기술 도입비용, 탄소세, 연료비, 할인을 변동에 따른 경제성 비교를 통해 유연탄과 LNG 발전원가를 시뮬레이션에 의한 민감도 분석을 수행하였다. 이는 향후 의사결정자가 적절한 발전설비 도입시기를 결정하는데 있어서 판단 기준을 제공할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 김지수 외, “탄소세를 고려한 화력발전 설비간의 경제성 평가”, 산업공학회지 10권 1호, 1997.
- [2] 마용선, “에너지원간 대체가 탄소 배출에 미치는 효과 분석”, 연세대학교 석사논문, 2000.
- [3] 신희성 외, “이산화탄소 배출량 저감을 고려한 국내 에너지공급시스템 분석: 시장분배모형의 응용”, 산업공학회지 18권 1호, 1993.
- [4] 김태현, “21세기를 대비한 supply Chain Management: 개념 사례”, 박영사, 서울, 1999.
- [5] John D. Sterman, “Business Dynamics”, Irwin, 2000
- [6] 김도훈 외 2인, “시스템 다이내믹스”, 도서출판 대영문화사, 1999.
- [7] Donaldson, D. M and Betteridge, G. E., “The relative cost effectiveness of various measures to ameliorate global warming”, Energy Policy, pp 563-571, 1990
- [8] Komatsuzaki, H., “An Analysis on Cost Structure of Japan’s Electric Utilities and Subjects”, Energy in Japan, NO. 135, pp 31-39, 1995.
- [9] Varian, H. R., “Microeconomic Analysis”, 3rd ed. WW. Norton and Company, New York, 1994
- [10] G. M. Martinsons, “A Starategic Partership with Risks”, Long Range Planning, Vol.26, No.3, 1993

주 작 성 자 : 정 석 재

논문투고일 : 2003. 12. 04

논문심사일 : 2003. 12. 22(1차), 2003. 12. 22(2차),
2004. 05. 11(3차)

심사판정일 : 2004. 05. 11

● 저자소개 ●



정석재

2002 한국해양대학교 물류시스템공학과 학사
2004 연세대학교 컴퓨터과학산업시스템공학과 석사
현재 연세대학교 컴퓨터과학산업시스템공학과 박사과정
관심분야 SCM, Meta Heuristic



김경섭

1982 연세대학교 기계공학과 학사
1986 Univ. of Nebraska-Lincoln, Industrial & Management
Systems Engineering, M.S.
1993 North Carolina State University, Industrial Engineering, Ph.D.
현재 연세대학교 컴퓨터과학산업시스템공학과 부교수
관심분야 물류시스템 시뮬레이션 모델링 및 분석, SCM



박진원

1983 연세대학교 화학공학과 학사
1985 연세대학교 화학공학과 석사
1990 연세대학교 화학공학과 박사
1994 동경공업대학교 박사
관심분야 Landfill Gas Separation, Waste Cellulose Utilization,
Domestic Wastewater Treatment