

탄소세 부과에 따른 환경 비용을 고려한 발전 설비의 경제성 분석

정석재, 김경섭, 박진원^{1,*}
 연세대학교 정보산업공학과, ¹연세대학교 화학공학과
 (jwpark@yonsei.ac.kr*)

The Effect of the Carbon Tax on Steel Industry using System Dynamics

Suk Jae Jeong, Kyung Sup Kim, Jin Won Park^{1,*}
 Department of Industrial & Information Engineering, Yonsei University,
¹Department of Chemical Engineering, Yonsei University
 (jwpark@yonsei.ac.kr*)

서론

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 화력 발전설비 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 시뮬레이션 모델을 이용한 민감도 분석을 통해 연료 가격과 할인율의 변동에 따른 발전원간의 경제성을 비교해 보고자 한다.

경제성 평가 과정

본 연구에서 발전설비의 경제성을 분석하는 과정은 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)의 순으로 진행한다.

(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.

<표 1> 유사발전소 선정기준

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

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

(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.

(3) 발전원가 산정

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

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.

$$CRF = \frac{(1+i)^N \times i}{(1+i)^N - 1} \quad D = 1 / N, \quad COM = CRF - D$$

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

운전 유지비의 경우, 실험대상 발전소를 기준으로 운전유지비에 물가지수를 적용 산출한 금액을 초기 투자비로 나누어 운전유지비를 구한다.

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

연료비는 열소비율 곡선법을 이용하여 계산하였는데, 다음의 수식과 같다.

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

위의 비용들을 근거로, 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.

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

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

한편, 환경 비용으로, 먼저 NO2 저감비용은 기본적으로 OECD/IEA의 "Emission Contorls"에 의한 값을 인용하였다. 탄소세의 경우, 각 연료별 성분, 발열량, 열소비율 자료를 보여주고 있다. 연료별 탄소세 비용은 "단위당 탄소세 × 발열량 × 열소비율"로 계산하였다.

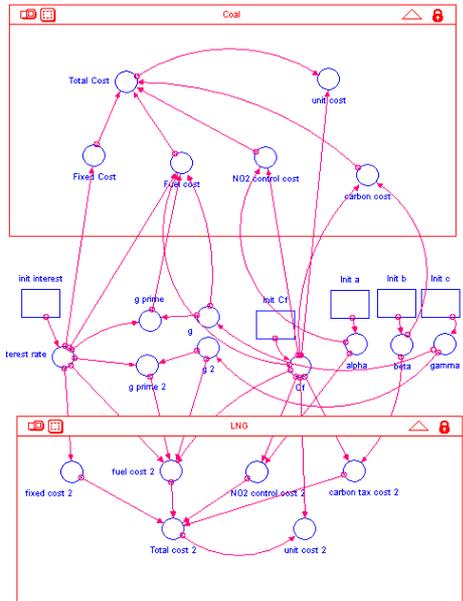
<표 2> 연료의 성분

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"

발전 비용 산정 모형 및 분석

시스템 다이내믹스 툴로 잘 알려진 Stella 5.0을 이용하여 아래의 모형을 구성하고 유연탄과 LNG의 경제성 분석을 수행하였다. 유연탄과 LNG 화력의 경제성 분석을 위한 구성 요소와 관련 인자들의 다이어그램을 <그림 1>과 같이 모델링하였다. 발전원가는 발전비용을 전력량으로 나누어 계산하게 되며, 고정비, 연료비, 변동비, NO2 처리비용, 탄소세로 구성되어진다.



- unit cost : 발전원가
- Total cost : 발전비용
- Fixed cost : 고정비
- fuel cost : 연료비
- NO₂ control cost : NO₂ 처리비용
- carbon tax cost : 탄소세
- init interest : 초기 할인을 부여
- init Cf : 초기 설비 이용률
- init a : 초기 NO₂ 처리 기준 비용
- init b : 초기 탄소세 기준 비용
- init c : 초기연료비 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 이차율
- g_prime2 : LNG등비 지불계수의 이차율
- interest rate : 할인율

<그림 1> 발전원가 산정모형

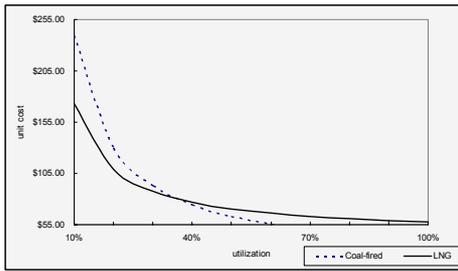
모형에서 고정비용은 “초기투자비 × (고정비율+운전유지비율)”로 계산되며, 고정비율은 자본회수 계수와 법인세 고정비율의 합으로 표현되므로, “고정비용 = 초기투자비 × (자본회수계수+법인세 고정비율+운전유지비율)” 로 표현된다.

연간 발전량은 발전소내 사용한 양을 제외한 나머지로 계산되므로, 발전량은 “연간 가동시간 × 시설용량 × (1-자체 소비율) × 이용률” 로 계산되어진다.

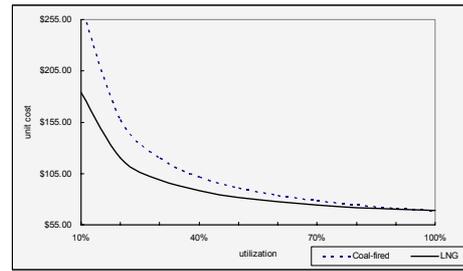
연료비는 열량단가 × 열소비율 × 발전량으로 계산되며, 본 연구에서의 균등화 발전원가는 매년 똑같이 비용이 발생한다고 가정하므로, 현재 가격을 연가로 환산하여 “열량단가/(1+인상률) × 등비지불계수 × 자본회수계수 × 열소비율 × 발전량” 식으로 계산한다. 한편, NO2 저감설비 비용은 “NO2 처리비용 × 발전량 × (1-자체 소비율)” 로 간단하게 계산할 수 있으며, 탄소세 비용은 NO2 저감기술 비용과 마찬가지로, 자체 소비율을 포함하지 않은 원래 발전량으로 계산하므로, “탄소세 비용 = 단위당 탄소세 × 발전량 / (1-자체 소비율)” 과 같이 계산된다.

결과 분석

설비이용률이 전력 수요에 따라 변동이 심하며, 탄소세는 향후 톤당 비용의 가치가 변한다고 가정하고 탄소세 및 설비이용률에 따른 시나리오 분석을 실시하였다. 탄소세가 없는 경우에 대해서 유연탄과 LNG 발전소의 각 설비 이용률에 대한 발전원가 분석을 수행하였다. <그림 2>에서와 같이 설비 이용률이 약 36%를 상회하면서, LNG보다 유연탄의 발전원가가 경제적임을 확인할 수 있다. 설비 이용률이 높아짐에 따라 원가의 차이는 더욱 커짐도 확인할 수 있다. <그림 3 참고>

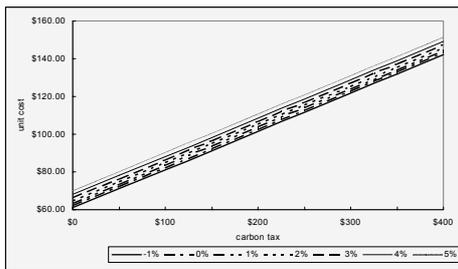


<그림 2> 설비이용률에 따른 분석(탄소세 제외)

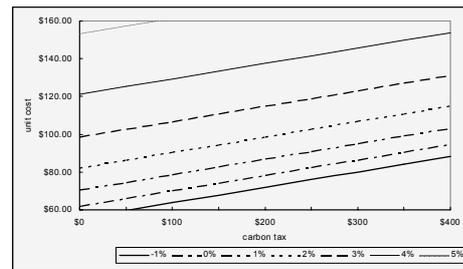


<그림 3> 설비이용률에 따른 분석(탄소세 \$136)

한편, 탄소세를 \$0에서 \$400까지 변화시켜 분석한 결과 약 \$60이상 부과한 경우 LNG가 유리해지는 탄소세 분기점이 발생함을 알 수 있다. 한편, <그림 4-5>에서와 같이 연료가격이 변동함에 따라 각 발전원가의 민감도를 분석한 결과에서는 연료비 변동에 대해 유연탄 보다 LNG 화력의 경우 더욱 민감한 반응을 보임을 알 수 있다. 또한, 탄소세를 \$0에서 \$200까지 범위에서 연료가격 인상률에 따른 발전원가 민감도 분석을 수행한 결과 탄소세의 변화에 LNG 발전원가 더욱 민감한 반응을 보이며 향후, 적정 탄소세 산정에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.



<그림 4> 연료가격 변동에 따른 무연탄 발전원가



<그림 5> 연료가격 변동에 따른 LNG 발전원가

결론

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 LNG발전원가를 시뮬레이션에 의한 민감도 분석을 수행하였다. 이는 향후 의사결정자가 적절한 발전설비 도입 시기를 결정하는데 있어서 판단 기준을 제공할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김도훈 외, *시스템 다이내믹스*, 대영문화사(1999).
2. John D. Sterman., *Business Dynamics*, McGraw-Hill, New York, NY(2000)
3. Donaldson, D. M., and Betteridge, G. E., "The relative cost effectiveness of various measures to ameliorate global warming", *Energy Policy* 563-571(1990)
4. Komatsuzaki, H., "An Analysis on Cost Structure of Japan's Electric Utilities and Subjects", *Energy in Japan*, 135, 31-39(1995)
5. Varian, H. R., *Microeconomic Analysis*, 3rd ed. WW. Norton and Company, New York, NY(1994)
6. Martinsons, G. M., "A Strategic Partnership with Risks", *Long Range Planning*, 26(3), 1993