

탄소세(炭素稅)를 고려한 화력발전 설비간의 경제성 평가

김지수* · 이병남** · 김태진***

Economic Analysis of Power Plant Utilities Under CO₂ Emission Tax

Ji Soo Kim · Byoung Nam Lee · Tae Jin Kim

〈Abstract〉

The purpose of this study is to make an economic analysis of power plant utilities by examining electricity generating costs with environmental consideration. Economic growth has caused pollutant emission, and subsequent environmental pollution has been identified as a very real limit to sustainable development. Considering the enormous role of electricity in the national economy, it is thus very important to study the effect of environmental regulations on the electricity sector. Because power utilities need large investments during construction, operation and maintenance, and also require much construction lead time. Economic analysis is the very important process in the electric system expansion planning.

In this study, the levelized generation cost method is used in comparing economic analysis of power plant utilities. Among the pollutants discharged of the electricity sector, this study principally deals with the control activities related only to CO₂ and NO_x since the control cost of SO_x and TSP (Total Suspended Particulates) is already included in the construction cost of utilities. The cost of electricity generation in a coal-fired power plant is compared with one in an LNG combined cycle power plant. Moreover this study surveys the sensitivity of fuel price, interest rate and carbon tax. In each case, this sensitivity can help to decide which utility is economically justified in the circumstance of environmental regulations.

1. 서론

경제성장과 더불어 발생하는 환경오염 문제는 현재 및 미래 인류의 생존과 연관된 전세계적인 문제로 등장했으며 환경오염 물질의 배출을 규제하려는 세계적

인 동향이 강화되고 있다. 발전 부문에서 보면 경제가 성장함에 따라 전력 수요가 급증하고 있으며 전력 생산에 따른 환경오염도 심각해지고 있다[1, 2, 3, 12]. 현재 우리나라의 주요발전원은 원자력과 석탄화력 및 LNG발전이며 이 중에서 원자력 발전은 방사성 폐기

* 한국과학기술원 테크노경영대학원 부교수

** 한국과학기술원 산업경영연구소 연수연구원

*** 한국전력기술 주식회사 수화력 사업관리처

물의 처리, 화력발전은 화석연료의 연소로 인한 대기 오염이 대표적인 환경문제라고 할 수 있다[1].

전력설비는 건설 및 운전에 막대한 자금의 투자를 필요로 하는 설비로서 발전설비 투자에 따르는 경제성 평가는 전기에너지의 안정적인 공급 신뢰도를 유지하면서 최소의 비용으로 최대 전력을 생산, 공급하는 수익성 검토를 하는 것이라고 할 수 있다.

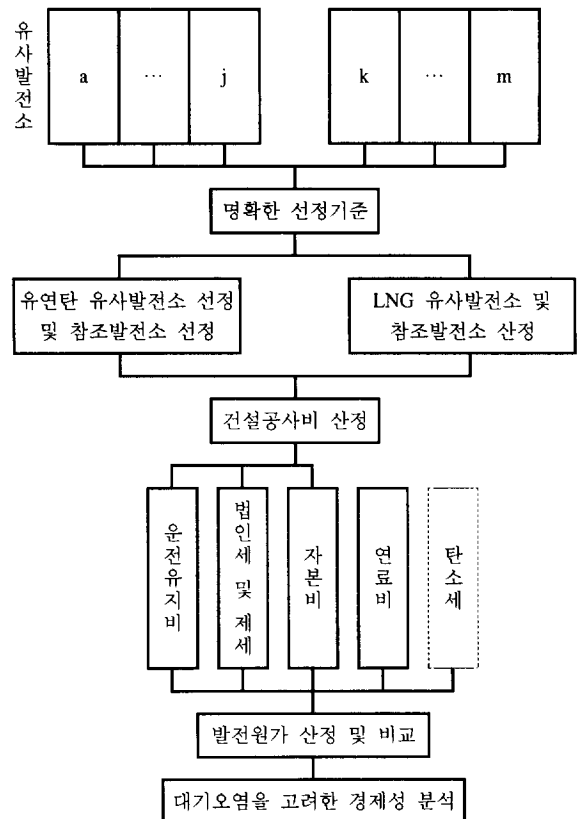
본 연구는 지구온난화 문제의 주범인 이산화탄소 배출 규제에 따른 국제 동향하[6, 9, 16]에서 환경 요소를 고려하여 발전설비의 경제성 평가 문제[13]를 다룬다. 탄소세는 화석연료의 연소시 배출되는 이산화탄소의 양에 비례하여 부과되는 일종의 연료세로서 이산화탄소의 함유량만큼 화석연료의 상대가격을 상승시켜 화석연료 사용량의 감소를 유도하고 따라서 이산화탄소의 배출량을 감소시키는 유인으로 작용한다[6, 15]. 탄소세는 직접규제 수단과 비교할 때 모든 배출자의 한계감축비용이 탄소세 부과 수준과 동일해져 비용 절약적일 뿐만 아니라 세수의 확보가 가능해 이를 환경투자재원으로 활용할 수 있다는 장점이 있다[14].

경제성 평가의 대상발전원을 선정하는데 있어서 우리나라 전력의 주생산원인 원자력, 석탄, LNG발전 중 원자력발전은 이산화탄소가 거의 발생치 않으므로 제외하고 화력발전 설비 중 향후 건설이 예상되는 표준화된 석탄 및 LNG 발전원의 경제성 평가를 본 연구의 주된 내용으로 한다.

본 논문의 구성을 살펴보면 2장에서 비교 분석 대상 발전소 선정과 발전 원가 산정 구성요소 및 탄소세 적용 등이 경제성 평가 과정으로 설명되어 있으며 3장 발전 원가 산정 모형에서는 연속형 시뮬레이션 모형을 이용한 발전 원가 산정 모형을 설명하며, 4장 결과 분석에서는 설비 이용률, 탄소세 변화율 및 연료 가격 변동률에 따른 유연탄 및 LNG 발전 원가의 변화 행태를 비감 분석과 민감도 분석을 통하여 설명한다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향이 토의된다.

2. 경제성 평가 과정

일반적으로 신규 발전원 경제성 평가의 경우 명확한 선택 기준에 의해 유사 발전소를 선정한다. 후 발전소를 건설하여 상업 운전하는데 필요한 건설 기간 중의 모든 자본적 지출인 건설 공사비를 산정하여 운전 유지비, 연료비 등과 함께 발전 원가를 구성하여 경제성을 분석한다[4]. 특히, 본 논문은 환경 비용의 내부화 방안으로 탄소세 및 공해 저감 시설 비용을 발전 원가에 도입하여 경제성 분석을 행한다. 또한 개별 발전설비의 평가에 쓰이는 방법은 균등화 발전원가법[4]으로 본 연구에서도 이러한 방법을 따르고자 한다. 이와 같은 경제성 평가의 절차를 따른 본 연구의 경제성 평가 과정은 <그림 1>과 같이 표시될 수 있다.



〈그림 1〉 경제성 평가 과정

〈표 1〉 유사 발전소 선정 기준

선 정 고 려 항 목	배 점	
	유연탄	LNG
1. 용량의 유사성	20	20
2. 연료원의 유사성	20	20
3. 설비의 유사성	10	10
4. 준공 시기의 유사성	10	10
5. 자료 확보의 용이성	10	10
6. 공사비 산정의 합리성	10	10
7. 신기술 적용 여부	5	10
8. 설계 표준화 적용 여부	5	-
9. 부지의 신규성	10	10

자료원 : [10]

〈표 3〉 LNG 화력 유사 발전소 선정 평가 결과

선 정 항 목	배 점	k발전소	l발전소	m발전소
용량의 유사성	20	10	10	0
연료의 유사성	20	20	20	20
설비의 유사성	10	10	10	10
준공 시기의 유사성	10	5	8	10
자료 확보의 용이성	10	10	10	3
공사비 산정의 합리성	10	10	10	10
신기술 적용 여부	10	0	0	10
부지의 신규성	10	10	5	5
합 계	100	75	73	68
총 합 순 위		1	2	3

자료원 : [10]

2.1 유사 발전소 선정

본 연구에서는 우리나라 전력의 주생산원인 원자력, 석탄, LNG발전 중 원자력발전은 이산화탄소가 거의 발생치 않으므로 제외하고 유연탄 화력과 LNG에 의한 발전을 경제성 분석 대상으로 비교하고자 한다. 이와 같은 비교를 위해서는 신규 발전소의 발전 원가를 산출하기 위한 모델이 될 수 있는 유사 발전소를 선정하여야 하는데 유사 발전소 선정에 관한 고려 항목별 선정 기준은 다음의 〈표 1〉과 같다.

또한 선정 방법은 일차적으로 기존 또는 건설 중인 발전소 중에서 검토 대상 발전소를 선정하고 검토 대상 발전소를 선정 기준에 따라 평가한 결과를 참조한다. 즉, 가장 높은 점수를 획득한 발전소를 기준이 되는 유사 발전소로 선정한다. 또한 유사 발전소가 건설 중이어서 자료 획득이 어려운 경우에는 유사 기준 발전소 외 나머지 발전소를 참조 발전소로 활용한다. 유연탄 화력 및 LNG 복합 화력의 유사 발전소 선정을 위한 검토 대상 발전소에 대한 선정 항목에 따른 평가 결과는 〈표 2〉와 〈표 3〉에 나타난 바와 같다.

〈표 2〉 유연탄 화력 유사 발전소 선정 평가 결과

선 정 항 목	배점	a 발전소	b 발전소	c 발전소	d 발전소	e 발전소	f 발전소	g 발전소	h 발전소	i 발전소	j 발전소
용량의 유사성	20	20	18	18	5	5	20	20	20	20	20
연료의 유사성	20	20	20	20	10	10	10	20	20	20	20
설비의 유사성	10	0	10	10	0	0	6	10	10	10	10
준공 시기의 유사성	10	3	3	3	3	3	8	5	8	8	8
자료 확보의 용이성	10	10	10	10	10	10	8	10	8	8	3
공사비 산정의 합리성	10	0	0	5	0	5	0	10	10	10	10
신기술 적용 여부	5	0	0	0	0	0	0	5	5	5	5
설계표준화 적용 여부	5	0	5	5	0	0	0	5	5	5	5
부지의 신규성	10	10	5	5	10	5	5	10	5	10	10
합 계	100	63	71	76	38	43	57	95	91	96	91
총 합 순 위		7	6	5	10	9	8	2	3	1	3

자료원 : [10]

한전의 평가 결과[10]를 이용하여 유사 발전소로 선정된 본 연구에서의 비교분석 대상 발전소는 아래와 같다.

- 500MW급 유연탄 화력 : i 발전소
- 400MW급 LNG 화력 : k 발전소

2.2 경제성 분석의 적용 변수

경제성 분석에 영향을 미치는 주요 인자로는 평가 대상 발전소의 기술적 인자와 적용경제 변수 같이 인위적 인자로 구분할 수 있으며, 이러한 인자들의 설정 기준 및 적용변수에 따라 평가 결과가 달라질 수 있으므로 변수의 적용을 신중히 고려하여야 한다. 본 연구에서 적용할 경제 변수는 다음과 같다.

1) 가격 기준 시점 : 1995년 1월 1일로 한다.

2) 경제 수명 기간

투자 대안 평가에 사용되는 경제 수명은 발전소가 노후화되어 경제적 이득을 상실할 때까지의 기간으로 한전에서 적용하고 있는 유연탄 화력 25년, LNG발전 20년으로 한다[10].

3) 감가상각 방법

감가상각 방법은 한전에서 적용되고 있는 정액법을 기준으로 한다[10].

4) 할인율

전력 사업에 있어서 할인율의 적용 과정은 한국전력 공사[11]의 연구에서 제시한 바와 같이 13%, 10%, 8%, 8.5% 등으로 다양하게 적용할 수 있다. 할인율의 적용에 주의해야 할 사항은 할인율이 평가 시점의 경제 현황과 향후 경제전망을 반영하여 산정하는 것이므로 경제 여건이 변화할 경우 조정해 줄 필요가 있다.

5) 물가 상승률 및 환율

물가 상승률 및 환율은 <표 4>의 신경제 5개년 계획 총량 지표를 기준으로 한다. 불변 가격 기준환율은 791.8원/\$('95.1 기준환율)을 적용한다.

<표 4> 신경제 5개년 계획 총량 지표

구분	'95	'96	'97	'98	'99이후	
물가 상승률	국내	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4
	국외	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
환율	777원/\$	751원/\$	722원/\$	695원/\$	695원/\$	

자료원 : [7]

본 연구에서 적용할 경제성 분석 평가를 위한 경제 변수를 요약한 결과는 <표 5>와 같다.

<표 5> 경제성 분석 적용 경제 변수

항목	적용 기준	비고
가격 기준 시점	1995.1.1	
경제 수명 기간	유연탄 25년 LNG 20년	한전 내부자료
감가상각 방법	정액법	국내 전력 사업
할인율	8.5%	한전 내부자료
이자율	8.5%	한전의 이자율 실적 및 전망 고려
발전소 출력	유연탄 500 MW LNG 400 MW	
적용 환율	791.8 원/\$	1995.1.1 환율
물가 상승률 및 환율	신경제 5개년 계획 총량지표	신경제 5개년 계획

2.3 건설 공사비 산정 및 발전 원가 구성요소 산정 기준

건설 공사비는 발전소를 건설하여 상업 운전하는데 필요한 건설 기간 중의 모든 자본적 지출을 의미하며 발전 원가에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나이다. 이러한 건설 공사비는 산정 시점의 가능한 모든 정보를 활용하여 발전소의 상업 운전시까지 소요되는 모든 비용을 예측하는 것이다. 건설 공사비 산정 항목 및 절차의 자세한 사항은 참고문헌[10]을 참조하기 바란다.

발전 원가는 전력이 송전 계통에 연결되는 지점까지의 비용으로 보통 건설 공사비, 운전 유지비, 연료비 등이 포함되며 분류 방법에 따라 고정비 원가와 변동비 원가로 구분할 수 있다[8]. 고정비 원가는 자본

비, 법인세 및 제세, 운전 유지비 등으로 구분되며, 변동비는 연료비와 탄소세로 구분된다.

1) 연료비

연료비를 산정하는 방법에는 크게 연료의 사용량을 실측하고 이에 연료 단가를 곱하여 연료비를 산정하는 실측법과 연료량을 계량화하지 않고 열소비율 곡선을 이용하여 구한 평균 열소비율에 열량 단가를 곱하여 산정하는 열소비율 곡선 이용법의 두 가지 방법 [10]으로 구분할 수 있는데 본 연구에서는 열소비율 곡선법을 이용한다. 즉 다음의 수식과 같다.

$$\text{연료비} = \text{열소비율(Kcal/Kwh)} \times \text{발전량(Kwh)} \times \text{열량 단가(원/Kcal)} \quad (1)$$

〈표 6〉 연료비 산출을 위한 자료

	유연탄 화력	LNG 발전	비 고
발열량(Kcal/Kg)	6300	13000	'93 한전 장기 전원계획 입력자료
연료 가격(원/Kg)	38.025원	221.777	
열량 단가(원/Mcal)	6.04	17.01	한전 계약 가
열소비율(Kcal/Kwh)	2174	1740	한전 내부자료

자료원 : [8, 9]

2) 발전 원가 산정

본 연구에서는 발전 원가 산정시 고정비 부분과 변동비 부분으로 나누어서 계산하는데 고정비 부분은 총건설비에 고정비율로 계산하고 운전 유지비는 총건설비에 운전 유지비율로 계산한다. 변동비인 연료비는 발전량에 열소비율 및 열량 단가를 곱하여 산정한다. 또한 발전량은 발전소내 소비율을 제외하고 시설 용량에 이용률 및 연간 발전 시간을 곱해 산정한다. 발전 원가는 탄소세를 고려하지 않은 경우 고정비와 운전 유지비 및 연료비의 합계액을 발전량으로 나눠 구한다. 탄소세를 고려한 경우는 이러한 발전 원가에 탄소세를 더하여 구한다. 탄소세는 소내 소비율을 포함하지 않은 원래 발전량으로 계산한다.

발전 원가 (원/Kwh)

$$= \text{고정비 원가} + \text{운전 유지비 원가} + \text{연료비 원가} + \text{탄소세}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{I \times (Fx + m) + Hr \times fp \times Gn \times H \times Cf \times (1 - Ap) + Ct \times Gn \times H \times Cf}{Gn \times H \times Cf \times (1 - Ap)} \\ &= \frac{I \times (Fx + m)}{Gn \times H \times Cf \times (1 - Ap)} + Hr \times fp + \frac{Ct}{1 - AP} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 I: 총건설비

Fx: 고정비율(%)

m: 운전 유지비율(%)

Gn: 시설용량(KW)

H: 발전 시간(연간 8760 시간)

Cf: 설비 이용률(%)

Ap: 소내소비율(%)

Hr: 평균 열효율(Kcal/Kwh)

fp: 연료비(원/kcal)

Ct: 탄소세(원/Kwh)

2.4 환경 요소 산정 기준

1) 공해 저감 설비

화석연료를 사용하는 발전원에 있어서 심각한 문제가 되고 있는 것은 지구 온난화 현상을 일으키는 CO₂, 산성비의 원인이 되는 SO₂ 및 NO_x, 그리고 분진이 있다. 이 중 분진의 경우에는 전기 집진기 사용으로 대부분 저감이 가능하므로 제외하고 SO₂는 대상 발전원의 설비에 포함되어 있으므로 제외한다. 따라서 본 연구에서 분석 대상으로 하는 대기오염 물질은 CO₂ 및 NO_x만을 채택하기로 한다. 특히 NO_x는 저NO_x배출 버너의 설치나 2000년 이후 배연탈질 설비의 설치 등이 계획되어 있는 정도로 대책수립이 소극적이므로 이에 대한 분석은 시급한 일이라고 할 수 있다. 미국에서의 배연탈질 설비의 균등화 자본비용[5]은 〈표 7〉과 같다.

〈표 7〉 NO_x 저감 설비 비용 적용 기준

	기준 안	원화 환산
유연탄	3.90mills/kwh	3358원/Mwh
LNG	1.04mills/kwh	895원/Mwh

자료원 : [5]

2) 연료별 탄소세 계산

연료별로 탄소세를 계산하기 위해서 톤당 \$100을 기준으로 각 연료의 성분, 발열량, 평균 열소비율 자료로 Kwh당 탄소세를 아래와 같이 계산하였다.

(1) 연료의 성분 조성, 발열량, 평균 열소비율

〈표 8〉 연료의 성분, 발열량 및 평균 열소비율

구분	성분조성					발열량 (Kcal/Kg)	평균 열소비율 (Kcal/Kwh)
	탄소	수소	유황	질소	기타		
LNG	75.6	24.4	-	-	-	13000	1740
유연탄	69.0	4.3	0.8	1.4	15.8	6300	2174

자료원 : [9]

(2) 10000 Kcal당 탄소 발생량

$$\text{LNG} : 0.756\text{Kg-C/Kg-LNG} \times \frac{1000(\text{Kcal})}{1300(\text{Kcal/Kg})}$$

$$= 0.582\text{Kg-C}/10000\text{Kcal}$$

$$\text{유연탄} : 0.69\text{Kg-C/Kg-유연탄} \times \frac{1000(\text{Kcal})}{6300(\text{Kcal/Kg})}$$

$$= 1.095\text{Kg-C}/10000\text{kcal}$$

(3) Kwh당 탄소 발생량

$$\text{LNG} : 0.582\text{Kg-C}/10000\text{Kcal} \times 1740\text{Kcal/Kwh}$$

$$= 0.101268\text{Kg-C}/\text{Kwh}$$

$$\text{유연탄} : 1.095\text{Kg-C}/10000\text{Kcal} \times 2174\text{Kcal/Kwh}$$

$$= 0.238053\text{kg-C}/\text{Kwh}$$

(4) Kwh당 탄소세

탄소세는 톤당 \$100 즉 79.18원/Kg(1\$:791.8원 적용)에 해당되므로 각 경우 다음과 같다.

$$\text{LNG} : 79.18\text{원}/\text{Kg} \times 0.101268\text{Kg-C}/\text{Kwh}$$

$$= 8.0184\text{원}/\text{Kwh}$$

$$\text{유연탄} : 79.18\text{원}/\text{Kg} \times 0.238053\text{Kg-C}/\text{Kwh}$$

$$= 18.849\text{원}/\text{Kwh}$$

3. 발전 원가 산정 모형

발전 원가 산정 모형은 연속적인 범위의 파라미터 값에 대한 분석을 수행해야 하므로 연속형 시뮬레이

션 모형에 의하여 경제성 분석을 수행해야 한다. 본 분석의 내용은 유연탄과 LNG화력의 경제성 비교수단으로 발전 원가를 계산하여 발전원간 경제성을 비교하는 것으로서 발전 원가의 구성요소 및 관련 인자들의 영향도가 〈그림 2〉에 표시되어 있다.

본 연구에서는 주로 시스템 다이내믹스를 분석하는 소프트웨어 iTHINK 3.0을 사용하였다. 연속형 시뮬레이션으로서의 시스템 다이내믹스는 확률 변수 생성에 의한 이산형 시뮬레이션 기법과는 달리 해석적으로 해를 구하기 어려운 미분방정식 시스템의 근사 해법으로서 시간의 연속 구간에서 시스템의 동적인 변화를 계산하는 시뮬레이션 기법이다. 본 논문은 발전 원가 산정의 과정에 있어서 설비 이용률, 탄소세 및 연료 가격 변동률을 시간축 대신 연속 구간으로 응용함으로써 발전 원가 산정 모형의 민감도 분석을 가능하게 하였다.

3.1 모형의 초기 조건 및 외부 변수

발전 원가 산정 모형의 초기 조건값 및 초기 외부 변수값은 아래와 같다.

init a = 1(NO₂처리 기준 비용 대비 비율)

init b = 1.36(LNG발전 원가가 유연탄 발전 원가를 dominate하는 최소 탄소세, 단위 \$100)

init c = 1(연료가격 변동률 기준대비 비율)

init Cf = 0.5(설비 이용률)

init interest = 0.085(할인율)

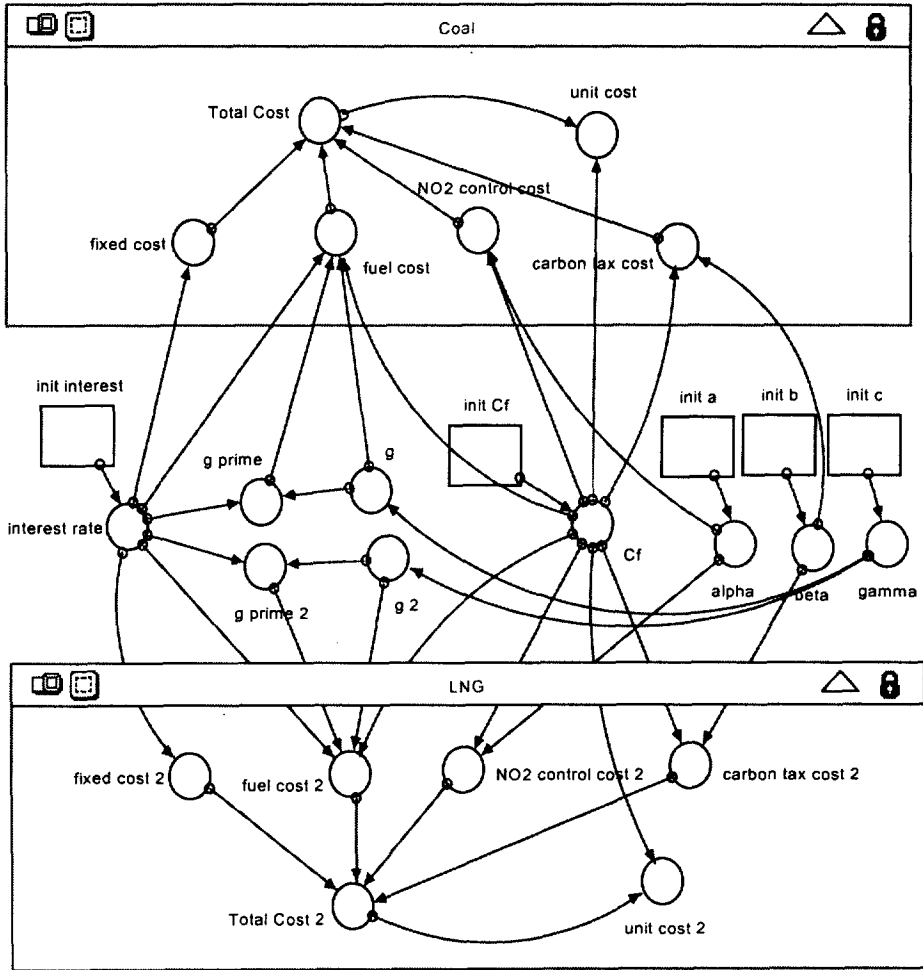
g = 0.01*gamma(유연탄 화력의 연료가격 변동률 1%에 대한 등비급수 변화율)

gamma = init_c

g_2 = 0.03*gamma(LNG화력의 연료가격 변동률 1%에 대한 등비급수 변화율)

g_prime = (1+interest_rate)/(1+g)-1(유연탄 화력의 등비지불계수의 이자율)

g_prime_2 = (1+interest_rate)/(1+g_2)-1(LNG화력의 등비지불계수의 이자율)



〈그림 2〉 발전 원가 산정 모형(1: 유연탄 2: LNG)

unit cost : 발전 원가

Total cost : 발전 비용

fixed cost : 고정비

fuel cost : 연료비

NO₂ control cost : NO₂ 처리 비용

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 처리 기준비용 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%에 대한 등비급수 변화율

g-prime : 유연탄 화력의 등비 지불 계수의 이차율

g-prime2 : LNG 등비 지불 계수의 이차율

interest rate : 할인율

3.2 연간 균등화 발전 원가

비교대상 발전소의 발전 원가를 계산하는 데는 식(2)가 사용된다. 식(2)를 이용하면 특정 연도의 발전 원가를 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 발전 원가 중 특히 연료비는 매년 변화하고 또한 발전량도 설비 이용률에 의해 달라지므로 발전소별 발전 원가의 비교가 용이하지 않다. 이렇게 매년 비용과 발전량이 서로 다른 대안간 비교를 위해서는 연도별로 불규칙하게 발생하는 비용과 발전량을 연도별로 균일하게 증가화할 필요가 있다. 따라서 연료비를 현재 가치로 고쳐 다시 연간 등가로 환산한 후 연 평균 발전량과 함께 식(2)에 대입하여 발전 원가를 구하게 된다. 이러한 방법을 균등화 발전 비용법이라 한다.

4. 결과 분석

설비 이용률은 전력 수요에 따라 변동이 심하며 설비 이용률에 따라 발전원간의 경제성이 달라지며 탄소세는 향후 국제 협약의 결과에 따라 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 탄소세 및 설비 이용률에 따른 시나리오에 따라 신중하게 발전원 선택 과정이 필요할 것이다. 따라서 탄소세의 변화에 따른 발전원간 경제성이 바뀌는 분기점 파악이 발전원 선택 과정에 필요하게 된다. 또한 우리나라와 같은 자원 빈국에서는 연료 가격 변동에 따른 발전원간 경제성 평가가 중요하다.

본 연구에서는 설비 이용률, 탄소세 및 연료가격 변동을별로 각 파라미터의 연속적인 변화구간에 대한 발전 원가의 민감도 분석을 통해 발전원간 경제성을 평가한다.

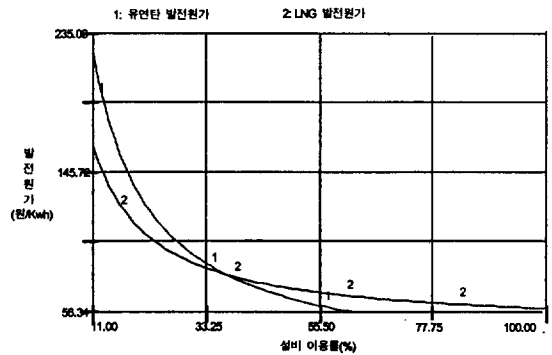
4.1 설비 이용률의 변화에 대한 분석

설비 이용률의 연속 변화구간은 10%에서 100%로 분석 결과는 다음과 같다.

1) 설비 이용률의 연속 변화에 따른 발전 원가의 비교

① 탄소세가 없는 경우

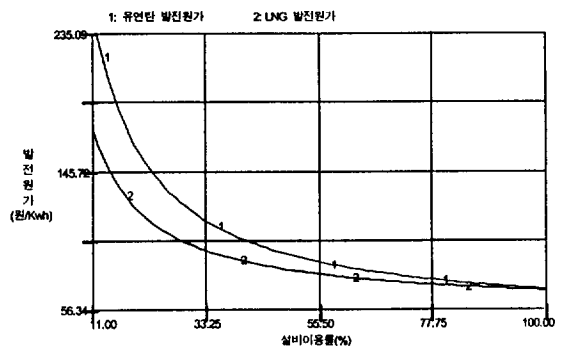
탄소세가 없을 때 설비 이용률이 변함에 따라 유연탄과 LNG 발전 원가를 비교한 결과는 <그림 3>과 같다. <그림 3>에서 설비 이용률이 약 36.1%를 상회하면 유연탄의 경제성이 유리해짐을 알 수 있다.



<그림 3> 설비 이용률 변화에 따른 유연탄과 LNG 발전 원가 비교(탄소세가 없는 경우)

② 탄소세 \$136를 부여한 경우

탄소세를 \$0부터 증가시킨 결과 점차로 주어진 설비 이용률에서 LNG 발전 원가가 유연탄 발전 원가보다 적어지게 됨을 알 수 있었으며 탄소세가 \$136을 넘으면 모든 설비 이용률에서 LNG 발전 원가가 유연탄 발전 원가보다 적어지게 됨을 알 수 있었다. 탄소세



<그림 4> 설비 이용률 변화에 따른 유연탄과 LNG 발전 원가 비교(탄소세 \$136 경우)

가 \$136이 부여된 경우 유연탄과 LNG의 발전 원가 비교는 <그림 4>와 같다.

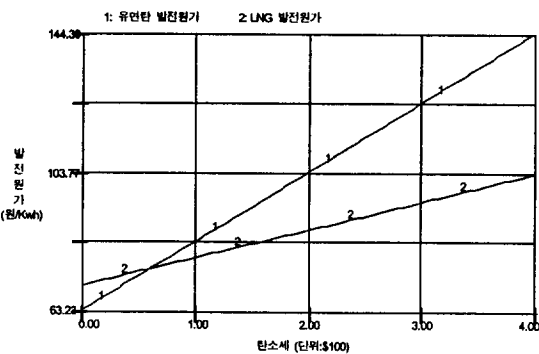
2) LNG화력발전과 유연탄 화력발전의 비김 분석
탄소세가 \$136 이상 부과되면 LNG 발전 원가가 모든 설비 이용률의 수준에서 유연탄보다 우월하므로 \$136보다 적은 탄소세가 부과되었을 때의 분석이 필요하다. 이때 탄소세 변화 범위는 \$0, \$21.4, \$42.9, \$64.3, \$85.7, \$107, \$129로 설정하여 분석하였다. 유연탄 화력과 LNG 발전 원가의 설비 이용률 변화에 따른 발전 원가 차이를 비교하여 알아지는 점이 이용률 분기점으로서 이러한 비김점에 대한 결과가 <표 9>에 제시되어 있다.

<표 9> 탄소세별 비김점

	탄소세별 비김점						
	\$0	\$21.4	\$42.9	\$64.3	\$85.7	\$107	\$129
설비 이용률(%)	35.7	40.2	45.4	52.5	61.8	75.1	95.6

4.2 탄소세의 변화에 대한 분석

1) 탄소세의 연속 변화에 대한 발전 원가의 비교
탄소세는 향후 국제 협약의 결과에 따라 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 탄소세를 \$0에서부터 \$400까지 변화시켜 분석하여 본 결과<그림 5>, 탄소세가 0%인 경우는 유연탄이 유리하나 \$58.3이상 부과된 경우는 LNG가 유리해지는 탄소세 분기점이 발생한다. 즉

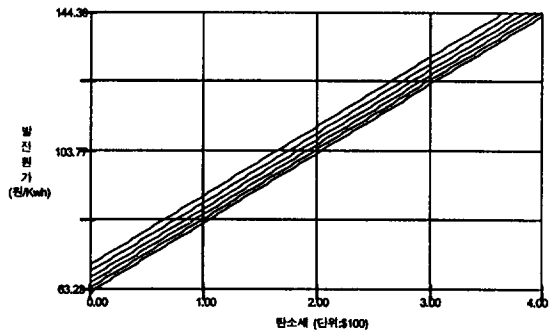


<그림 5> 탄소세 변화에 따른 발전 원가 비교

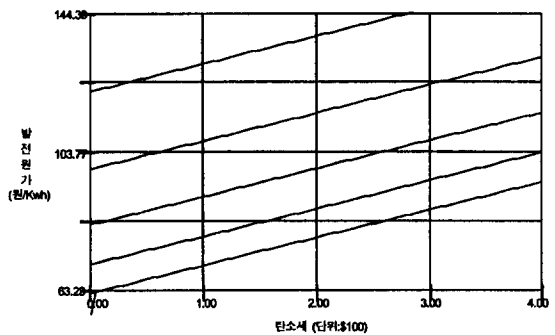
탄소세의 변화에 따른 발전원간 경제성이 바뀌는 분기점 파악이 발전원 선택 과정에 필요하게 된다.

2) 탄소세 연속 변화와 연료비 변동에 따른 발전 원가 민감도 분석

본 연구에서 적용할 유연탄과 LNG의 연료 가격 상승률은 한전의 연료 가격 전망[3]을 기준으로 한다. 즉 탄소세 연속 변화 구간에서 유연탄은 -1%~5% LNG는 -3%~15%로 변동시킴으로써 민감도 분석을 수행한다.



<그림 6> 연료가격 변동에 따른 유연탄 발전 원가 비교



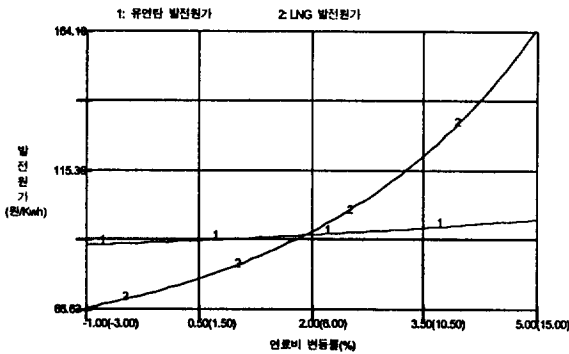
<그림 7> 연료가격 변동에 따른 LNG 발전 원가 비교

<그림 6>과 <그림 7>로부터 탄소세 변화가 연료가격 변동이 발전 원가의 변동에 미치는 영향은 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 탄소세 변화에 따른 발전 원가의 변동 폭은 유연탄이 LNG보다 민감함을 나타낸다.

4.3 연료 가격 변동률의 변화에 대한 분석

탄소세 부과 수준 \$136과 설비 이용률 50%로 주어졌을 때 연료 가격 인상에 따른 발전 원가를 비교하였다. 연료 가격 변동률의 연속 변화구간은 유연탄의 경우 -1%에서 5%까지, LNG 경우 -3%에서 15%까지의 범위에서 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 연료가격 변동률에 따른 발전 원가



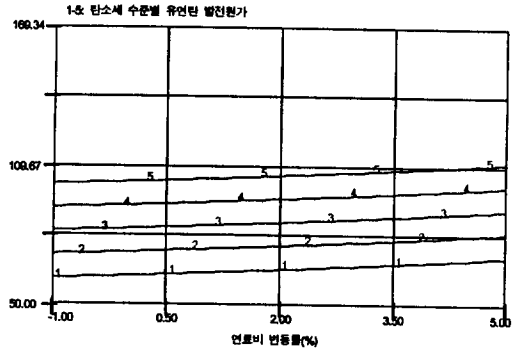
〈그림 8〉 연료가격 변동에 따른 발전 원가의 비교

〈그림 8〉의 분석 결과 연료가격 변동률이 유연탄 1.8%, LNG 5.4% 이상의 수준으로 인상되면 LNG 발전원이 불리해지는 연료 인상률 분기점이 발생한다.

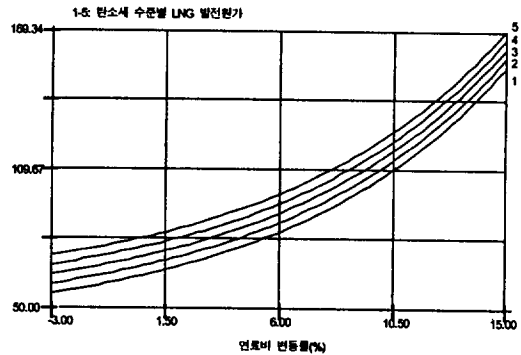
2) 연료가격 변동률에 따른 발전 원가 민감도 분석

탄소세를 \$0, \$50, \$100, \$150, \$200의 범위에서 변화시켜 발전 원가를 분석해본 결과는 유연탄의 경우 〈그림 9〉에, LNG발전원의 경우 〈그림 10〉에 나타난 바와 같다.

〈그림 9〉와 〈그림 10〉으로부터 연료가격 변화가 탄소세 변동이 발전 원가의 변동에 미치는 영향은 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 연료가격 변화에 따른 발전 원가의 변동 폭은 LNG가 유연탄보다 민감함을 나타낸다.



〈그림 9〉 연료가격 및 탄소세 변동에 따른 유연탄 발전 원가



〈그림 10〉 연료가격 및 탄소세 변동에 따른 LNG 발전 원가

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 균등화 발전 원가법으로 유연탄과 LNG화력의 경제성을 분석하였는데 자료의 부정확으로 발생하는 편기를 최대한 줄일 수 있는 선정 기준에 의해 유사 발전소 및 참조 발전소를 선정하여 발전원간 경제성 비교를 하였고, 환경 규제 상황에서 발전원간 평가를 위해 공해 저감 설비 도입 비용, 탄소세, 연료가격 인상에 따른 경제성 비교를 통하여 유연탄 및 LNG 발전의 발전 원가를 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 민감도 분석을 통해 비교하였다.

본 연구에서 얻은 결론은 첫째 설비 이용률은 전력 수요에 따라 변동이 심하므로 설비 이용률 변화에 대한 분석 결과, 탄소세가 없는 경우 설비 이용률이 36.1% 이상일 때 유연탄의 경제성이 유리하나 탄소세

가 \$136 이상 부과되는 경우 모든 설비 이용률 하에서도 LNG가 유리해진다. 따라서 탄소세가 \$136 이하의 경우 설비 이용률에 따라 발전원간의 경제성이 달라지므로 탄소세 및 설비 이용률에 따른 시나리오에 따라 신중하게 발전원 선택 과정이 필요할 것이다.

둘째, 탄소세는 향후 국제 협약의 결과에 따라 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 탄소세를 \$0에서부터 \$200까지 변화시켜 분석(가정: 연료가격 인상 유연탄 1%, LNG 3%, NO₂처리비 포함, 할인율 8.5%, 이용률 50%)하여 본 결과, 탄소세가 0%인 경우는 유연탄이 유리하나 \$58.3이상 부과된 경우는 LNG가 유리해지는 탄소세 분기점이 발생한다. 즉 탄소세의 변화에 따른 발전원간 경제성이 바뀌는 분기점 파악이 발전원 선택 과정에 필요하게 된다.

셋째, 우리나라와 같은 자원 빈국에서는 연료 가격 인상에 따른 발전원간 경제성 평가가 중요하다. 따라서 연료 가격 인상률의 변화에 대한 분석(가정: 연료가격 인상 유연탄 -1%~5%, LNG -3%~15%, NO₂처리비 포함, 할인율 8.5%, 이용률 50%, 탄소세 \$136) 결과 연료가격 인상률이 유연탄 1.8%, LNG 5.4% 이상의 수준으로 인상되면 LNG 발전원이 불리해지는 연료 인상률 분기점이 발생한다. 따라서 LNG 발전원이 경제성을 유지하려면 연료의 안정적인 공급이 필수적이다.

마지막으로 탄소세 변화가 연료가격 변동이 발전원가의 변동에 미치는 영향은 차이가 없으나 탄소세 변화에 따른 발전원가의 변동 폭은 유연탄이 LNG보다 민감함을 나타낸다. 반면 연료가격 변화가 탄소세 변동이 발전원가의 변동에 미치는 영향은 차이가 없으나 연료가격 변화에 따른 발전원가의 변동 폭은 LNG가 유연탄보다 민감함을 나타낸다.

따라서 본 논문의 의의는 이상의 결과로서 향후 환경 규제 상황에서 의사결정자가 발전 설비 투입에 대한 경제성 판단의 참조 기준을 제공하는데 있다고 할 수 있다. 현재는 이산화탄소 제거 기술이 불투명하고 비용도 많이 드는 것으로 추산되는데 이상의 결과를 활용하여 이산화탄소 저감 기술 도입과 탄소세 도입에 따른 비용간의 상충 관계를 고려하여 저감 기술 및 설비의 도입 시기를 결정해야 할 것이다.

본 연구에서는 자료의 한계로 인하여 기존 설비의 경제성 평가만을 수행하였으나 새로운 발전 설비도 포함하여 장기적인 발전원간 경제성 비교가 필요할 것이며, 경제성 분석 수단으로 발전 원가를 비교하였는데 발전 원가 이외의 기술적 요소 및 정책적 고려사항을 포함한 종합적인 발전 설비 평가가 이루어져야 할 것이다. 또한 본 연구에서는 발전 부문의 환경공해 중 대기 부분만을 분석하였는데, 기타 환경오염을 포함한 전반적인 환경영향을 고려한 통합적 발전원간 경제성 평가에 관한 연구가 향후 이루어져야 할 것이다.

본 연구를 수행하는 데 있어서 경제성 평가 모형의 구성과 연속형 시뮬레이션 분석에 많은 도움을 준 한국과학기술원 테크노경영대학원의 정진우씨와 전대욱씨에게 깊은 감사를 드립니다.

【참고문헌】

- [1] 박일천, "발전부문의 환경공해와 적정전원구성에 관한 연구," 에너지경제연구원 연구보고서 91-10, 1991. 5.
- [2] 김승우, 김정인, 윤여창, "환경계정체계 구축방안 연구," (2장, pp. 18-31; 5장, pp. 174-197; 부표, pp. 211-320), 한국환경기술개발원, KETRI/1994/RE-20 연구보고서, 1994.12.
- [3] 김영창, 김광인, 김교홍, 정도영, 김종옥, 오세일, 박종배, "에너지 가격체계 및 수급동향 조사분석," 한국전력공사 전력경제처, 1994. 12.
- [4] 안병훈 외, "원자력과 유연탄발전의 경제성분석 기법수립에 관한 연구," 한국전력공사 기술연구원 KRC-84E-T10, 1986. 7.
- [5] 안병훈 외, "지구환경문제에 대한 국내전력사업의 대처방안 수립에 관한 연구," 한국전력공사 전원계획처 911-T21, 1992. 11.
- [6] 이상희, 최충규, "기후변화협약의 국내산업에 대한 영향과 대책," 산업연구원 연구보고서 326호, 1994. 10.

- [7] 상공부, "선진국의 환경규제가 한국경제에 미치는 영향—CO₂ 규제를 중심으로—", 1993.
- [8] 한국전력공사 전원계획처, "공급능력 및 LOLP를 고려한 발전설비 적정수준에 관한 조사," (5장, pp. 336-360), 한국전력공사 전원계획처94121, 1995. 4.
- [9] 한국전력공사 제2건설처 화공설비부, "GR에 대한 전력부문의 대응방안", 한국전력공사, 1994.4.
- [10] 한국전력기술주식회사, "민자발전 사업추진에 따른 업무처리기준과 절차수립(기술부문)," 한국전력공사 전원계획처, 1994.
- [11] 한국전력공사 전원계획처, "전원개발 투자사업에 있어서의 적정할인을 산정," 한국전력공사, 1993. 8.
- [12] Donaldson, D. M., and G. E. Betteridge, "The relative cost effectiveness of various measures to ameliorate global warming," Energy Policy, July/August 1990, pp. 563-571.
- [13] Komatsuzaki, H., "An analysis on cost structure of Japan's Electric Utilities and Subjects," Energy in Japan, No.135, Sep. 1995, pp. 31-39
- [14] Kudo, H., "Status quo and subjects of commitment to global warming," Energy in Japan, No.130, Nov. 1994, pp. 46-58.
- [15] Manne, A. S., and R. G. Richels, "Global CO₂ emission reductions—the impact of rising energy costs," presented at the EPRI workshop for Cooperative Research on Climate Change, held in Vienna, Austria, 1990.
- [16] Pariente-David, S., "Global warming—European Community response strategies," World Development, Vol.21, No.11, 1993, pp. 1729-1748.



김지수

1972년 서울대학교 섬유공학과 학사
 1975년 서울대학교 산업공학과 석사
 1984년 Stanford Univ. 산업공학과 석사
 1984년 Stanford Univ. 공업경제 박사
 1994년~현재 한국과학재단 전문위원
 1996년~현재 한국과학기술원 테크노 경영대학원 부교수
 1996년~현재 한국과학기술원 테크노 경영대학원 기술경영전공 책임교수
 관심분야 공업경제, 환경문제, 기술인력양성, 연구개발평가

이병남

1986년 연세대학교 경영학과 학사
 1989년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1994년 한국과학기술원 산업공학과 박사
 1995년~현재 Asian Institute of Technology 객원교수
 1994년~현재 한국과학기술원 산업경영연구소 연수연구원
 관심분야 경제성공학

김태진

1988년 한양대학교 산업공학과 학사
 1996년 한국과학기술원 산업경영학과 석사
 1988년~현재 한국 전력 기술 주식회사 근무
 관심분야 경제성공학