

지구온난화 가스 배출 감소를 위한 장기 전원개발계획 전략

김광인*, 박종배*, 김교홍*, 이상철*, 박권식**

* 한국전력공사 전력경제처, **한국전력공사 기획관리처

Long-Term Generation Expansion Strategies for the Reduction of CO₂ Emission in Korea

K.I. Kim, J.B. Park, K.H. Kim, S.C. Lee, K.S. Park
Korea Electric Power Corporation(KEPCO).

Abstract - Every effort is now being exerted in industrialized and developing countries to reduce emission of greenhouse gases from electric power sector. In this paper, we provide supply-side resource mix strategies in the long-term generation expansion planning under the expected greenhouse gas regulations. Under the environmental regulations, we explore the least-cost generation expansion plan of Korea and determine the composition of future resource mixes. Our analysis is performed on the basis of the revised WASP package which can evaluate emission of carbon dioxide from each power plant. The evaluation process of carbon dioxide emissions, which can consider the efficiency and operating conditions of each generator simultaneously, has been incorporated into the probabilistic production cost simulation module of WASP.

1. 서 론

최근 전세계적으로 지구온실가스의 배출 감소를 위한 노력이 광범위하게 이루어지고 있다. 대표적인 지구온실가스인 이산화탄소(CO₂)는 주로 석탄, 석유, 신탄 등 화석에너지의 소비에 따라 발생된다. 특히, 발전부문은 전체 1차에너지 소비의 40% 이상을 점유하고 있으며, 이 가운데 전세계적으로 약 63%에 해당하는 전력량이 화석연료로부터 생산되고 있는 실정이다.

우리나라 전력생산을 위한 에너지 소비는 1차에너지 기준으로 약 27.5%이며, 이 가운데 약 60%는 화석연료에 의해 이루어진다. 전력부문의 이산화탄소 배출량은 1994년도에 약 22백만톤으로서 국가 전체 배출량의 약 16%를 점유한다. 또한, 향후 전력소비량의 지속적인 증가에 따라 2010년에는 전력부문이 전체 배출량의 25%까지 높아질 것으로 전망된다. 따라서, 우리나라 온실가스 배출량 억제를 위해서는 전력부문에서의 역할이 매우 중요하다고 할 수 있다. 전력부문에서의 CO₂ 배출 억제 방안으

로서는 전력수요관리, 재생에너지기술의 도입, 배출가스로부터 이산화탄소의 제거, 전원구성의 변경 등의 전략이 있다.

이 논문에서는 지구온실가스 배출규제 및 제약 조건 아래에서의 비용-효과적인 장기 전원개발계획안을 도출할 수 있는 전원구성 전략을 제시하였다. 비용과 환경영향을 동시에 고려한 미래의 전원구성 대안을 마련하기 위하여, 개선된 WASP 모형을 이용하였다. WASP 모형은 장기 전원개발계획 모형으로서, 우리나라에서 과거 15년 이상 사용되어 왔다. 그러나 기존의 WASP 모형으로서는 발전소 오염물질의 배출을 직접 평가하기가 곤란하여, 이 기능을 가지도록 하기 위하여 WASP 모형을 일부 수정 하였다. 이러한 수정된 모형은 WASP의 최적화 모듈에서 환경 제약조건을 고려할 수 있을 뿐만 아니라, 확률적 발전비용 시뮬레이션 모듈에서 환경 오염물질의 배출량을 평가할 수 있도록 이루어졌다.

이 논문에서는 시나리오에 근거한 지구온실가스 배출 억제 전략을 제시하였다. 이를 위하여 다른 나라에서 적용하고 있거나 미래의 CO₂ 억제에 효과가 있다고 판단되는 5개의 시나리오를 작성하였다. 각 시나리오에서 CO₂ 배출을 완화할 수 있거나 규제수준을 만족시킬 수 있는 비용-효과적인 전원구성 전략을 개발하였다. 각각의 시나리오에 대한 내용은 다음과 같다.

- (1) 기준 시나리오 : 1994년부터 2006년까지의 우리나라의 장기 전원개발계획안
- (2) 효율개선 시나리오 : LNG 복합 및 IGCC 플랜트의 효율 개선
- (3) 환경급전 시나리오 : 발전소 기동순서를 경제급전이 아닌 환경우선으로 전환하는 방안
- (4) 탄소세부과 시나리오 : 화석연료의 가격에 탄소세(100\$/C-Ton)를 적용
- (5) CO₂ 규제 시나리오 : 2000년부터 전력부문의 CO₂ 배출수준을 '95년 수준으로 억제하는 방안

2. 본 론

2.1 수학적 모델링

환경제약을 고려한 비용최소화 전원개발계획에 대한 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\text{Min}_{U_1, \dots, U_T} \sum_{t=0}^T (f_1^t(U_t) + f_2^t(X_t, U_t) - f_3^t(X_t, U_t)) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } X_{t+1} = X_t + U_t \text{ for } t=0, \dots, T-1 \quad (2)$$

$$\text{LOLP}(X_t) \leq \epsilon \text{ for } t=1, \dots, T \quad (3)$$

$$0 \leq U_t \leq \overline{U}_t \text{ for } t=1, \dots, T \quad (4)$$

$$E(X_t) \leq \delta \text{ for } t=1, \dots, T \quad (5)$$

여기서,

T : 계획기간

X_t : 전원형식별 누적용량벡터

U_t : t 연도에 추가되는 용량벡터

\overline{U}_t : t 연도의 전원형식별 용량벡터

$\text{LOLP}(X_t)$: 용량 X_t 에서의 공급지장 확률

$E(X_t)$: 용량 X_t 에서의 공해물질 배출량

ϵ : LOLP 신뢰도지수

δ : 공해물질 배출지수

$f_1^t(U_t)$: t 년도 용량 U_t 의 할인된 건설비

$f_2^t(X_t, U_t)$: t 년도 (X_t, U_t) 의 할인된 운전비

$f_3^t(X_t, U_t)$: (X_t, U_t) 의 T 년도에서의 할인된 잔존가치(salvage value)

WASP 모형은 오랫동안 우리나라의 전원개발계획 수립에 사용되어 왔으나, 최근의 환경규제를 고려한 전원개발계획에서의 중요한 고려 요인인 SO_x , NO_x 등과 같은 오염물질이나 CO_2 같은 지구온실가스의 배출량에 대한 평가기능이 없다. 따라서 이 모형에 오염물질 배출량을 평가하는 기능을 추가하는 것이 요구되어 왔다. WASP 모형은 다음과 같이 독립적이고 순차적인 계산이 가능한 6개의 모듈 즉, (1) 전력수요 모듈(LOADSY), (2) 기존설비 모듈(FIXSYS), (3) 후보설비 모듈(VARSYS), (4) 후보설비 조합 모듈(CONGEN), (5) 운전비시뮬레이션 모듈(MERSIM), (6) 동적최적화모듈(DYNPRO) 등으로 구성되어 있다.

그림 1은 각 발전기별로 배출물질을 평가할 수 있도록 개선된 WASP 모형의 구조를 나타낸 것이다. 각 기간별로 최대수요와 수요형태를 지정하는 부분은 기존 모형의 LOADSY와 동일하다. 고정설비와 관련된 부분은 기존의 FIXSYS 모듈에 발전기별 단위발전량에 대한 이산화탄소 배출량 데이터의 추가가 필요하다. 이것은 발전기별 열소비율에 바탕을 둔 것이며, 후보설비모듈인 VARSYS의 경우에도 동일하게 적용된다. 후보설비조합 모듈의 경우에는 기존 모형의 CONGEN과 동일하며, 새로운 운전시뮬레이션 모듈에서는 발전기별 이산화탄소 배

출량을 계산한다. 또한 동적최적화 모듈은 각각의 설비조합에 대한 환경관련 제약조건을 고려할 수 있다는 점을 제외하면 기존의 DYNPRO 모듈과 동일하다. 새로 개정된 모형에서 배출물질의 평가는 이산화탄소 뿐만 아니라 다른 공해물질의 경우에도 동일한 방식으로 적용할 수 있다.

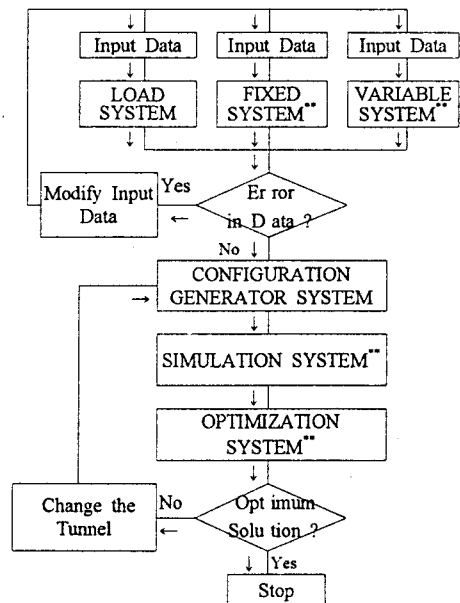
2.2 CO_2 배출 전망 : 시나리오 접근법

여기서는 CO_2 배출규제나 배출량을 감소시키기 위한 시나리오 아래에서의 비용-효과적인 전원구성 전략을 개발하였다.

2.2.1 입력데이터 및 기본 가정

본 연구에서 적용한 최대수요 및 수요형태에 대한 내용은 표 1에 주어져 있다. 또한 이 연구에서의 계획기간은 1994년에서부터 2006년까지이다. 미래의 수요 증가에 대처하기 위해서 후보발전설비로서 LNG 복합화력, 유전소 화력, 가스화 복합발전(IGCC), 기존 석탄화력, 원자력발전소를 대상으로 하였다. 이러한 후보설비들에 대한 기술적, 경제적 및 환경데이터는 표 2에 주어져 있다. 이 표의 마지막 열은 각 후보발전설비의 최초 투입이 가능한 연도를 나타낸 것이다.

한편 본 연구에서는 공급신뢰도지수를 LOLP 0.7 일/년, 할인을 8.5%를 적용하였다. 또한, 수요관리 자원의 용량은 우리나라의 계획값을 모든 시나리오에 대하여 동일하게 적용하였다.



** CO_2 배출 평가를 위하여 개선된 모듈
그림 1. 개선된 WASP 모형의 구조

표 1. 미래의 최대수요 및 에너지

연도	Peak (MW)	Energy (GWh)	연도	Peak (MW)	Energy (GWh)
'94	27,106	333,708.4	'01	43,841	531,072.6
'95	29,261	359,840.6	'02	45,659	552,794.4
'96	32,038	394,889.7	'03	47,540	572,438.1
'97	34,617	425,001.8	'04	49,437	591,901.8
'98	37,231	455,144.2	'05	51,301	610,577.1
'99	39,739	486,045.0	'06	53,344	631,182.8
'00	41,951	510,789.7	-	-	-

Existing Capacity in 1994 : 28,798 MW

표 2. 후보 발전설비 관련 자료

전원형식	용량 (MW)	FOR (%)	건설비 (\$/kW)	연료비 (¢/Gcal)	C-배출 (kg/Gcal)	투입가 (원/도)
LNG C/C	400	8.0	600	1,730	57.5	1997
유전소	500	6.2	840	1,200	80.6	1997
IGCC	500	8.0	1,100	790	99.6	2000
석탄화력 I	500	8.0	1,000	820	99.6	1998
석탄화력 II	800	8.0	960	810	99.6	2000
PWR	1,000	8.1	1,700	200	-	2001
PHWR	700	6.3	2,150	150	-	2001

2.2.2 전원구성 및 CO₂배출: 시나리오 접근

이 연구에서는 다음과 같은 5가지 시나리오를 설정하였다. 또한 각 시나리오별로 비용-효과적인 전원구성 전략과 연간 이산화탄소 배출량을 계산하였다.

기준 시나리오(시나리오 1)

이 시나리오는 우리나라의 1994년부터 2006년까지의 전원개발계획안에 바탕을 두었다. 이 계획은 비용, 전원입지, 에너지 수급안정성, 재무, 환경규제 등을 고려한 것이다. 그러나 지구 온난화 가스 배출 저감 전략은 포함하지 않고 있다.

효율개선 시나리오(시나리오 2)

이 시나리오는 LNG 복합발전의 효율이 49%로부터 53%로 향상되고, 45%의 효율을 갖는 IGCC가 후보설비에 포함된 경우이다. 전원구성 전략으로서 기준 시나리오의 석탄화력을 LNG 복합, IGCC 및 원자력으로 각각 1/3씩 대체한 경우이다.

환경급전 시나리오(시나리오 3)

이 시나리오는 기준 시나리오에 바탕을 두었으나 확률적 운전비 시뮬레이션을 할 때, 발전소 기동순서가 경제순위(economic merit order)가 아닌 환경순위(environmental merit order)로 하는 경우이다. 이 시나리오에서는 기준 시나리오하에서의 CO₂ 배출량의 최소화를 추구하는 것으로서 운전비용의 증

가를 가져온다.

탄소세부과 시나리오(시나리오 4)

이 시나리오는 화석연료를 사용하는 발전설비에 대해 탄소배출량에 대해 100\$/톤의 탄소세를 부과하는 경우이다. 이는 발전소 효율 및 사용연료에 따라 다르기는 하지만 큰 폭의 운전비 증가를 가져온다. 개략적인 운전비 증가 폭은 각각 유전소화력 1.8배, 석탄화력 2.3배, LNG복합 1.3배의 증가가 이루어진다. 결과적으로 경제 기동순위의 변화 및 이에 따른 비용의 증가로 기준 시나리오와는 크게 다른 전원구성 대안이 생성된다.

CO₂ 규제 시나리오(시나리오 5)

이 시나리오는 2000년 이후의 CO₂ 배출량을 1995년 수준으로 감소시킬 수 있는 가능한 대안을 찾는 것이다. 이러한 환경제약 조건은 동적최적화 모델에 의해 반영된다. 따라서 환경 제약조건을 위반하는 상태(state)는 동적최적화 과정에서 자동적으로 제거된다.

표 3에는 각 시나리오별 전원구성과 이산화탄소 배출량을 표시한 것이다. 또한, 표 4에서는 2006년의 시점에서 후보전원설비별 누적점수를 나타내었다.

표 3. 각 시나리오별 전원 구성 및 탄소발생량

시나리오	yr	Plant Mix (MW, %)						탄소배출량(10 ⁶ C-T/년)	
		Nuc.	Coal	Oil	LNG	Hydro	DSM		Total
1	'00	14,016 (27.7)	13,555 (26.7)	7,000 (13.8)	10,720 (21.1)	4,052 (8.0)	1,350 (2.7)	50,693	31.300
	'05	18,429 (29.7)	16,955 (27.4)	4,998 (8.1)	11,932 (19.2)	7,152 (11.5)	2,565 (4.1)	62,031	35.556
2	'00	15,016 (29.4)	11,255 (22.1)	7,000 (13.7)	12,320 (24.3)	4,052 (7.9)	1,350 (2.6)	50,993	28.394
	'05	19,429 (31.8)	12,255 (20.0)	4,998 (8.2)	14,732 (24.1)	7,152 (11.7)	2,565 (4.2)	61,131	30.887
3	'00	14,016 (27.7)	13,555 (26.7)	7,000 (13.8)	10,720 (21.1)	4,052 (8.0)	1,350 (2.7)	50,693	25.674
	'05	18,429 (29.7)	16,955 (27.4)	4,998 (8.1)	11,932 (19.2)	7,152 (11.5)	2,565 (4.1)	62,031	29.629
4	'00	14,016 (28.8)	10,255 (21.2)	7,000 (14.4)	11,920 (24.5)	4,052 (8.3)	1,350 (2.8)	48,593	28.213
	'05	30,929 (45.9)	10,255 (15.2)	4,998 (7.4)	11,532 (17.1)	7,152 (10.6)	2,565 (3.8)	67,431	17.077
5	'00	20,116 (37.6)	10,255 (19.2)	7,000 (13.1)	10,720 (20.0)	4,052 (7.6)	1,350 (2.5)	53,493	25.116
	'05	27,929 (43.9)	10,255 (16.1)	4,998 (7.9)	10,732 (16.9)	7,152 (11.2)	2,565 (4.0)	63,631	22.419

표 4. 2006년 후보 발전설비 누적 용량

시나리오	LNG C/C 400MW	Oil 500MW	IGCC 500MW	COAL 500MW	COAL 800MW	PWR 1,000MW	PHWR 700MW
1	11	1	0	8	4	6	1
2	17	1	6	0	0	8	1
3	11	1	0	8	4	6	1
4	8	1	0	0	0	15	5
5	6	1	0	0	0	13	6

시나리오 1의 경우에 탄소배출량은 1994년에 22백만톤으로부터 출발하여 지속적으로 증가하여 계획기간 말에는 35백만톤 수준으로 증가함을 보여준다. 이 시나리오에서의 전원구성은 원자력 30%, 석탄 30%, LNG복합 20%, 기타 20%로 구성되어 있다.

시나리오 2의 경우는 기준 시나리오에 비하여 1997년부터 2006년까지 탄소배출량이 매년 약 3백만톤 정도 감소하는 것으로 나타난다. 그리고 이 시나리오에서는 효율 개선 및 석탄화력의 대체에 따라 2001년 이후는 30백만톤/년 수준으로 안정화된다. 그림 3에서 보는 바와 같이 시나리오 1과 시나리오 2의 경우에 비용의 차이는 거의 없다. 그러나, 석탄화력의 비중은 7% 감소하고 LNG 복합은 5% 증가함을 보여주고 있다.

시나리오 3의 전원구성은 시나리오 1의 전원구성과 동일하지만, 환경급전을 통하여 연간 약 5.5백만톤의 탄소배출량을 줄일 수 있다는 결과를 도출하였다. 그리고 연간 탄소배출량은 2003년부터 29백만톤의 수준으로 안정화됨을 알 수 있었다. 그러나, 환경급전의 결과 계획기간 동안의 총비용(즉, 운전비)은 기준 시나리오에 비하여 약 13%의 상승을 가져왔다.

탄소세의 도입에 따른 탄소배출량 및 비용의 영향이 그림 2, 3에 주어져 있다. 탄소세의 도입에 따라, 2002년부터 연간 탄소배출량은 17백만톤의 수준으로 급격하게 감소함을 알 수 있다. 이는 1994년의 연간 탄소배출량보다도 낮은 수준이다. 그러나 비용은 엄청나게 상승하는데, 기준 시나리오와 비교하여 보면 약 43%의 상승을 가져온다. 또한, 전원설비 구성은 원자력 설비 중심으로 변화한다.

2000년부터의 연간 탄소발생량을 1995년의 수준으로 줄이기 위한 이 시나리오에서는, 원자력발전소의 과다 도입이외에는 어떠한 대안도 없다. 이 시나리오에서의 원자력설비 구성비는 약 44%를 차지하지만, 비용은 기준 시나리오에 비하여 단지 1.3% 만 상승하였다.

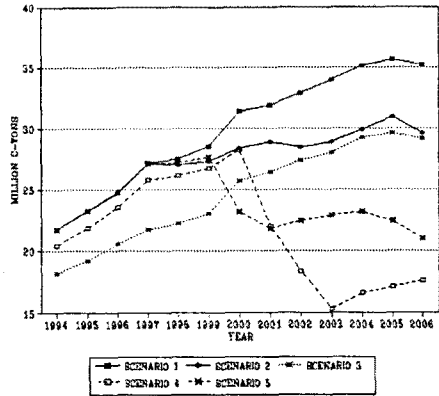


그림 2. 시나리오별 연간 탄소배출량

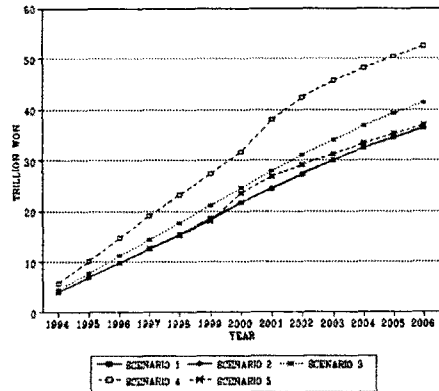


그림 3. 시나리오별 누적 총 비용(현재가치)

사례연구 결과, 전력부문에서 탄소발생량을 줄이기 위한 가장 효과적인 전략은 탄소세의 도입과 원자력설비의 적극적인 도입임을 알 수 있었다. 또한, 환경급전 전략에서도 연간 탄소발생량을 상당히 줄일 수 있었다. 그러나 탄소세의 도입 및 환경급전은 상당한 총비용의 상승을 초래한다. 결론적으로 장기 전원개발계획 측면에서는 환경과 비용사이의 Trade-off가 매우 주의 깊게 이루어 져야 한다.

3. 결 론

이 논문에서는 장기 전원개발계획 대안별 총 이산화탄소 발생량 및 각 발전기별 이산화탄소 발생량을 계산할 수 있도록 하기 위하여, 기존의 WASP 전원계획 전산모형을 개선하였다. 이 모형을 이용하면, 장기 전원개발계획 최적화 시에 환경 제약 조건을 고려할 수 있으므로 비용-효과적이고 환경친화적인 대안을 도출할 수 있다.

이 논문에서는 개선된 WASP 모형을 이용하여,

각 시나리오별로 지구온난화 가스의 발생량을 줄일 수 있는 우리나라의 전원개발계획안을 도출하였다. 즉, 사례연구에서는 향후 예상되는 환경 규제하에서 비용-효과적인 공급측 자원의 적정 믹스를 결정하였다. 이 연구에서는 지구온난화 가스의 발생량을 줄이기 위한 전략을 제시하기 위하여 공급측 발전자원만을 고려하였으나, 향후에는 수요측 자원과 공급측 자원을 동시에 고려할 수 있는 방법론 및 전략의 개발이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Rahman and A. Castro, "Environmental Impacts of Electricity Generation: A Global Perspective", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 2, pp. 307-313, June, 1995
- [2] Y. C. Kim and B. H. Ahn, "Multicriteria Generation-Expansion Planning with Global Environmental Considerations", *IEEE Trans. on Eng. Manage.*, Vol. 40, No. 2, May, 1993
- [3] J. F. Busch, Jr. and F. L. Krause, "Environmental Externality Surcharges in Power System Planning: A Case Study of New England", *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 8, No. 3, pp. 789-795, Aug. 1993
- [4] R. T. Jenkins and D. S. Joy, *Wien Automatic System Planning Package (WASP) - An Electric Utility Optimal Generation Expansion Planning Package Computer Code*, Oak Ridge National Lab., ORNL-4945, 1974
- [5] 한국전력공사, 장기전력수급계획(안), 1993
- [6] 한국전력공사, '94 한국전력통계, 1994
- [7] A. S. Manne and R. G. Richels, "CO₂ Emission Limits: An Economic Cost Analysis for the USA", *Energy Journal*, Vol. II, No. 2, 1990
- [8] T. Wilson, I. Shavel and J. Haydel, "Options for U.S. Electric Utilities to Reduce or Offset Greenhouse Gas Emissions", *International Workshop on Response of Electric Utilities to Global Warming*, pp. 49-74, Seoul, Korea, Oct., 1994