

탐색곡선법과 WASP-IV 모형을 이용한 국내 적정 전원구성 분석

Generation Mix Analysis based on the Screening Curve and WASP-IV Techniques

장 세 환* · 박 중 배** · 노 재 형†
(Se-Hwan Jang · Jong-Bae Park · Jae Hyung Roh)

Abstract - This paper tries to elicit an optimal generation mix of Korea. Two approaches, using the screening curve method and taking advantage of a generation expansion planning tool, WASP-IV, are applied in getting the mix. The data used in this study is based on the 5th basic plan for long-term electricity supply and demand. The Load Duration Curve, that is needed for applying Screening Curve Method(SCM), is made based on the load profile in 2010. In our using SCM, the nuclear plant's operation characteristic, carbon emission cost and spinning reserve are considered. In using WASP-IV to get the adequate generation mix, the base and target demand forecasts in the 5th basic plan are used and the carbon emission cost is also considered. In this paper, It introduces the domestic adequacy generation mix in 2024 though SCM and WASP-IV.

Key Words : Generation Mix, Carbon Emission Cost, Screening Curve Method, WASP-IV

1. 서 론

대부분의 에너지 자원을 해외 수입에 의존하고 있는 국내 전력산업의 여건상, 지속적으로 값싸고 안정적인 전력을 공급하기 위해서는 전원간의 적정 구성 비율을 유지하는 것이 무엇보다 중요한 일이다. 국내 전력산업은 1, 2차 오일 쇼크를 겪으면서, 석유에 대한 의존도를 줄이고, 다양한 전원을 확보하기 위한 지속적인 노력을 하고 있다. 국가에너지 정책 수립 과정에서 전원간의 구성 비율을 고려하여 계획을 수립하고 있다. 자원의 수급상황, 발전시설의 특성, 주변여건 등 다양한 요인들에 의해 적정 전원의 구성은 지속적으로 변화하고 있다. 신재생전원, 자원의 불확실성, 시장구조 변화 등과 같은 다양한 영향인자들을 고려한 적정 전원구성을 도출하기 위한 연구들이 국내외적으로 폭넓게 이루어지고 있다. 전원구성문제에 대한 최적의 해를 도출하기 위한 다양한 방법론에 대한 연구[1-4]를 비롯하여, RPS(Renewable Portfolio Standard) 및 풍력전원 등 새로운 영향인자들을 고려한 연구[5-8], 송전망 건설계획 및 산업구조의 변화를 고려한 연구[9-12] 등의 적정 전원구성에 대한 지속적으로 연구가 진행되고 있다.

최근 석유, LNG 등 발전원료들의 높은 가격 상승과 큰 변동성, 그리고 환경문제로 인해, 상대적으로 원료비용이 낮은 원자력과 신재생에너지원에 대한 관심이 증대되고 있지

만, 후쿠시마사태로 대두된 원자력에 대한 위험성과 신재생 에너지원의 높은 출력 변동성과 높은 건설비용은 해결해야 될 문제로 남아있다. 두 자원은 상대적으로 낮은 연료비를 바탕으로 값싼 전기를 공급할 수 있지만, 원자력은 큰 설비용량으로 인해 고장사고시 계통의 안정도에 미치는 영향이 매우 크며, 신재생전원 또한 높은 출력의 변동성으로 인해 안정적으로 전기를 공급하는 데는 부정적인 영향을 미치는 자원이다. 화석연료를 비롯하여 이러한 이율배반적인 성격의 다양한 자원간의 적정 구성을 결정하는 것은 국가의 장기 효율성 증가 및 산업발전에 큰 영향을 미치는 중요한 문제이다.

본 논문에서는 제 5차 전력수급기본계획을 기준으로, 탐색곡선법과 WASP-IV 모형을 활용하여 국내 전원의 적정 전원 구성을 비교분석하고, 적정 전원 구성을 도출하고 있다. 2010년의 부하패턴과 발전설비 후보군의 발전비용(고정비+변동비) 수준을 적용한 탐색곡선법을 이용하여 원전운전 특성, 탄소배출비용, 예비력이 고려된 2024년의 적정 전원구성 비율을 분석한다. 또한, WASP-IV 모형을 이용하여 제 5차 전력수급계획에서 예측한 기준수요와 목표수요 및 탄소배출비용을 고려한 2024년의 적정 전원구성 비율에 대한 분석을 수행한다.

2. 전력수급기본계획 및 전원개발계획

2.1 전력수급기본계획 및 전원구성

전력수급계획은 에너지 정책의 최상위에 있는 국가에너지 정책을 구현하는 직접적인 수단이다. 따라서 합리적이고 효율적인 전력수급계획의 설계 및 구현은 전력산업의 장기 효

* 정 회 원 : 건국대 공대 전기공학과 박사과정

** 정 회 원 : 건국대 공대 전기공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 건국대 전기공학과 교수

E-mail : jhroh@konkuk.ac.kr

접수일자 : 2012년 2월 13일

최종완료 : 2012년 3월 15일

율성 증가 및 산업발전에 지대한 영향을 미친다. 또한 신재생에너지보급계획, LNG수급계획, 전력요급계획 등과도 긴밀한 관계를 가지고 있어, 중요한 국가 계획 중 하나이다. 국내에서는 복합적인 방법으로 수립된 전원개발계획을 전력수급기본계획[13]을 통해 공표하고 있다. 즉, 전기사업법 제 25조 및 동 시행령 제 15조에 의거해 지식경제부에서는 2001년부터 2년마다 향후 15년에 대한 전력수급기본계획을 수립하고 공표하고 있다. 이에 따라 2010년 12월에 제5차 전력수급기본계획(2010년~2024년)을 공표하였다. 전력수급기본계획은 전력수급전망, 전기설비 시설계획 등 중장기 전력수급 안정을 목표로, 전력수급의 기본방향과 장기전망, 전력설비건설계획과 전력수요관리 등에 관한 사항을 포함하고 있다. 제 5차 전력수급기본계획에서 제시한 전원구성 변화를 살펴보면, 원자력 발전원의 비중이 현재(2010년) 약 25%에서 2024년에는 32%로, 신재생 발전원은 약 3%에서 7%까지 증가할 것으로 예상하고 있다. 반면에, 석탄(유연탄, 무연탄) 발전원은 약 33%에서 28%로, LNG 발전원은 약 25%에서 21%로 감소할 것으로 예상하고 있다. 국내 전원 구성을 원자력과 신재생에너지원이 차지하는 비중을 확대하고, 석탄 및 LNG 등 화석연료가 차지하는 비중을 감소시키는 방향으로 계획하고 있다.

2.2 전원개발계획

전통적인 전원개발계획(Generation Expansion Planning)은 미래의 예측 부하와 전력계통의 신뢰도 및 안전도 제약을 만족하면서 최소의 비용으로 신규 발전소를 건설을 계획하는 비용최소화 문제로 정의되었다. 90년대 이후의 전력산업의 시장화 및 탈규제화의 영향으로 전력산업의 구조가 다변화됨으로써, 기존의 수직통합적인 전력산업 구조에서 수행되던 바와 같이 전통적인 비용최소화의 문제로 전원개발계획을 수립하는 것은 한계점을 내포하고 있다. 하지만, 국가 에너지 안보와 전력계통 신뢰도 확보를 위한 가이드라인으로서 활용되고 있다. 다음은 전형적인 비용최소화 문제로 모델링되어진 전원개발계획 문제를 나타내고 있다[8].

$$\text{Min}_{U_1, \dots, U_T} \sum_{t=1}^T [f_t^1(U_t) + f_t^2(X_t) - f_T^3(U_T)] \quad (1)$$

$$\text{s.t. } X_t = X_{t-1} + U_t$$

$$\text{LOLP}(X_t) < \epsilon$$

$$R_{\min} \leq R(X_t) \leq R_{\max}$$

$$M_{t,\min}^j \leq \sum_{i \in \Omega_j} x_t^i \leq M_{t,\min}^j$$

$$0 \leq U_t \leq U_{t,\max}$$

$$t = 1, \dots, T$$

여기서,

- T : 계획기간
- J : 발전소종류(연료타입)
- Ω_j : j -발전소종류의 집합
- X_t : t 년의 총 발전소 설비용량

U_t : t 년의 신규 발전소 설비용량

\bar{U}_t : t 년의 최대 건설 가능용량

$\text{LOLP}(X_t)$: t 년의 LOLP

$R(X_t)$: t 년의 예비력 여유

ϵ : LOLP 신뢰도 기준

\bar{R}, \underline{R} : 예비력 여유 상/하한

$\bar{M}_t^j, \underline{M}_t^j$: t 년의 j 타입 발전소의 상/하한

$f_t^1(U_t)$: 할인된 건설비용

$f_t^2(X_t)$: 할인된 연료 및 유지비용

$f_T^3(U_T)$: 할인된 잔존가치

상기 비용최소화 모델을 해석하기 위해, WASP(Wien automatic system planning package)나 EGEAS(Electric generation expansion analysis system) 등과 같은 소프트웨어 모델들이 이용되고 있다. 세계적으로 각국의 전력산업 구조에 적합한 최적의 전원개발계획 모델들이 개발 및 소개되고 있으며, 국내에서도 다양한 연구가 진행되고 있다.

3. 탐색곡선법을 이용한 적정 전원 구성 분석

본 절에서는 탐색곡선법을 이용하여 적정 전원구성을 분석한다. 탐색곡선법은 전원개발계획 후보전원의 이용률별 발전원가(원/kWh)를 이용하여 적정 운전범위를 작성하고, 이를 이용하여 적정 전원구성을 모색하는 방법이다. 이러한 방법은 어느 한 연도의 최대부하 및 부하지속곡선을 대상으로 하여, 각 전원의 연간발전비용 즉, 연간 고정비 및 변동비의 합계를 최소화하도록 하는 설비구성을 결정하는 것이다. 탐색곡선법은 고정비와 변동비(운전비용 등)를 바탕으로 후보대안들을 단순 명료하게 비교할 수 있어 사전분석에 유용하다.

3.1 탐색곡선법

특정연도의 최대부하와 부하지속곡선(LDC, Load Duration Curve)을 대상으로 하여 연간 발전비용을 최소화하도록 하는 설비구성을 결정하는데 이를 그림으로 나타내면 다음과 같다[15].

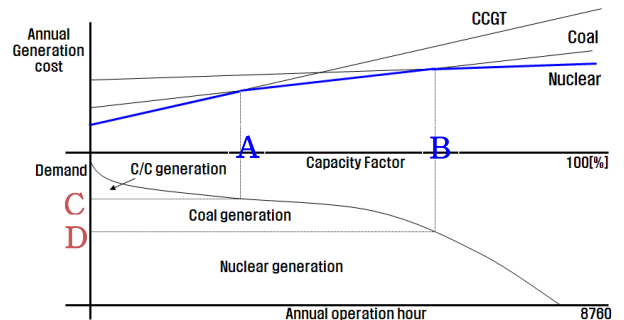


그림 1 탐색곡선법을 이용한 최적 전원구성
Fig. 1 Optimal generation mix using the screening curve

탐색곡선법에 의한 적정 전원구성은 위 그림과 같이 후보 전원을 복합화력(CCGT), 석탄(Coal), 원자력(Nuclear)으로 하고 이들의 연간 발전비용을 이용률별로 도시하면 그림과 같이 경제성 분기점 A, B가 발생한다. 경제성 분기점 지점을 LDC상으로 끌어내리면 그림과 같이 각 전원별 구성비율 C, D가 결정된다. 첫 번째 경제성 분기점(A)은 복합화력과 석탄화력에 의한 것이며, 이 분기점에서의 각각의 년간 총발전비용은 동일하다. 발전소의 이용(가동)시간 또는 이용률별 경제성을 살펴보면, 0~A의 범위에서는 복합화력이 발전비용이 가장 낮고, A 이상에서는 석탄화력이 유리함을 나타낸다. 또한 석탄화력과 원자력의 총발전비용곡선은 이용률 B에서 교차하고 이용률 A~B의 범위에서는 석탄화력의 발전비용이 가장 낮고, B 이상에서는 원자력이 가장 유리하다. 이와 같이 발전원별로 경제적인 이용률 범위가 결정되므로 그 사이의 부하를 가장 경제적인 전원설비로 충당시키도록 전원구성을 할 수 있다. 부하지속곡선에서는 경제적인 이용률 범위에 따라 원자력, 유연탄화력, 복합화력이 각각 기저부하, 중간부하, 첨두부하의 부하를 담당하는 것을 보여준다.

탐색곡선법은 표준부하 패턴과 후보군에 대한 정태적 분석법으로서, 탐색곡선법에 의한 결과로 제시되는 최적구성은 발전설비 구성비율(%)이 어느 정도로 되는 것이 연간 비용 측면에서 경제적인가에 대한 개략적인 정보를 제공한다. 그러나 이 방법은 단일 연도에 대한 전원구성을 제시하기 때문에 발전설비의 투입시기 및 용량에 대한 정보를 제공하지 못한다. 또한 공급신뢰도, 예비력 및 고장 등에 대한 영향인자를 고려하지 않기 때문에 공급신뢰도를 유지하는 예비력

의 크기를 제시하지 못하며, 설비의 고장정지 등 확률적 요소의 반영하지 못하는 한계점이 존재한다.

3.2 적정 전원 구성 분석

본 절에서는 탐색곡선법을 이용하여 국내 신규 전원 후보군을 기준으로 적정 전원구성을 분석한다. 신규전원 후보군은 제 5차 전력수급기본계획의 수립에 활용된 후보군 데이터를 이용하였으며, 다음 표 1에서 간략하게 나타내고 있다. 또한, 탄소배출비용에 따른 영향을 분석하기 위해 분석 시나리오에서 IPCC-NGGIP(2006 Edition) 고위발열량 기준으로 50,000원/CO2톤으로 가정한다.

후보군은 설비용량이 1,000MW, 1,400MW의 원자력 후보 2개, 500MW, 800MW, 1000MW의 석탄(유연탄) 후보 3개, 500MW, 700MW의 LNG 후보 2개 및 각각 40MW 내연과 100MW 유류 후보로 9개의 후보군을 설정한다. 동일 연료를 사용하는 후보간에는 설비용량이 더 크고 최신 발전기 후보가 더 낮은 발전비용(고정비&변동비)를 가지고 있다. 표준부하로는 최근의 새로운 부하패턴을 반영하기 위해 2010년의 부하패턴을 채택하였다.

각 후보의 비용에 따른 탐색곡선법과 2010년의 발전실적에 의한 Load Duration Curve를 다음 그림 2에서 보여주고 있다. 상대적으로 비용측면에서 열등한 후보군의 그래프는 생략하였다. 전원구성탐색곡선법의 경제성 분기점(교차점)에서 LDC에 주사된 빨간 점선의 Y축에 대응하는 값이 전원구성의 경계값 즉, 전원구성비율을 나타낸다.

표 1 전원 후보군 데이터

Table 1 Generator data

구분	세목	단위	후보군								
			PWR 1000	PWR 1400	COAL 500	COAL 800	COAL 1000	LNG 500	LNG 700	내연 40	유류 100
발전기	열소비율	kcal/kWh	2,315	2,357	2,036	2,071	2,036	1,633	1,631	1,952	2,195
	소내소비율	%	4.6%	4.1%	4.45%	4.2%	4.0%	1.1%	1.1%	6.7%	6.7%
	내용연수	Year	40	60	30	30	30	30	30	30	30
고정비	총건설단가	천원/ KW	2,486	2,108	1,338	1,271	1,284	810	793	2,219	1,884
	법인세율		0.47%	0.47%	0.47%	0.47%	0.47%	0.47%	0.47%	0.47%	0.47%
	O&M cost		101	85	45	35	33	46	40	197	131
	소계		288	235	154	139	138	112	104	378	284
변동비	발열량	kcal/k l,kg			5,796	5,796	5,796	13,037	13,037	9,992	9,992
	열량단가	천원/ Gcal	1.29	1.29	19.85	19.85	19.85	60.51	60.51	45.02	45.02
	탄소비용	천원/ Gcal			19.00	19.00	19.00	10.61	10.61	15.30	15.30
	연료비원가	원/K	3.1	3.2	42.3	42.9	42.1	99.9	99.8	94.2	105.9
	연료비원가 (탄소비용고려)	Wh	3.1	3.2	82.8	84.0	82.4	117.5	117.3	126.2	141.9

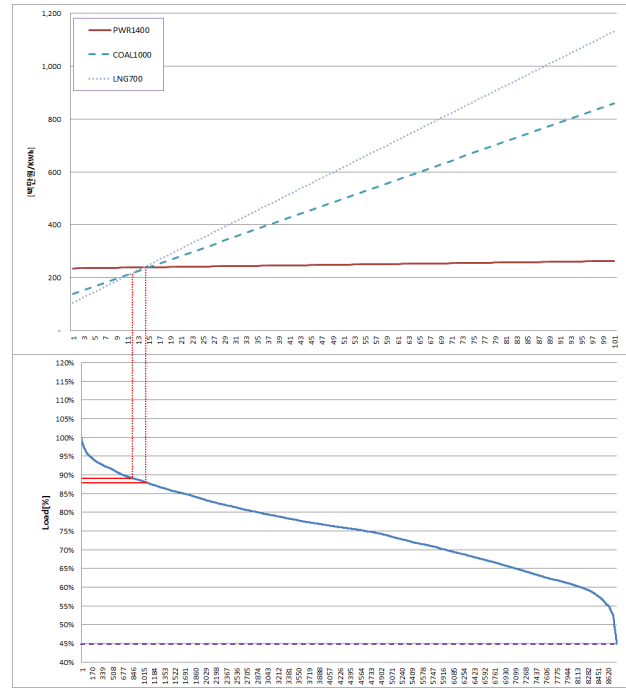
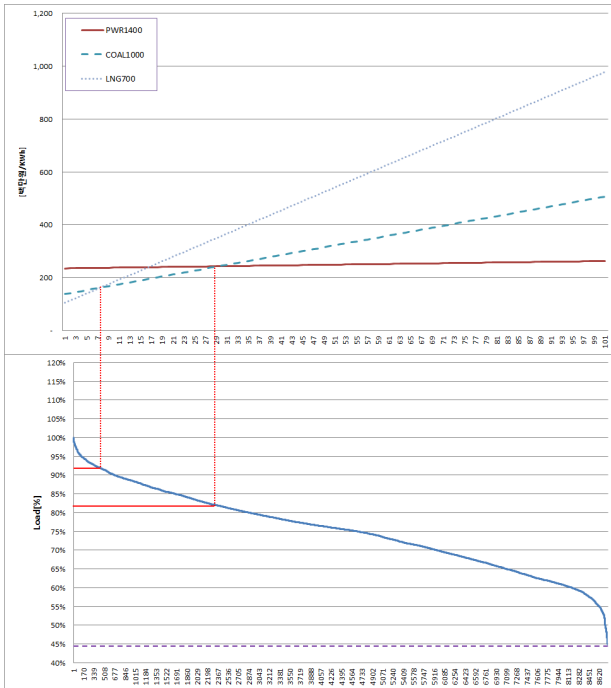


그림 2 탐색곡선 & 부하지속곡선 (좌: 탄소비용 미고려, 우: 탄소비용 고려)

Fig. 2 Screening curve & Load duration curve

탐색곡선법에 의한 2010년 수요패턴에 대한 적정 전원구성 비율은 다음 그림 3과 같다.

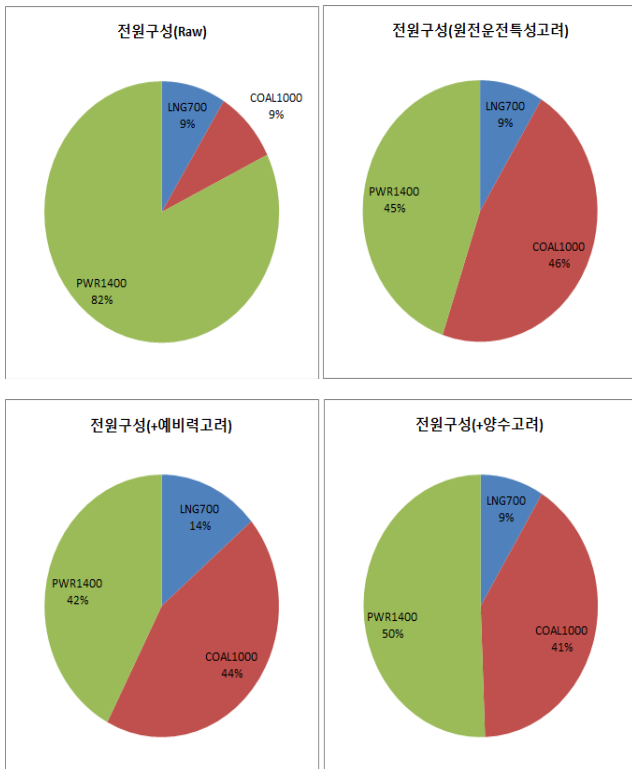


그림 3 적정 전원구성(탄소비용 미고려)

Fig. 3 Generation mix (Consider carbon cost)

탐색곡선법에 의한 위의 첫 번째 파이차트의 결과는 일반적으로 안정적인 운영을 위해 부하중 운전을 하지 않는 원자력발전의 운전특성을 고려하면 현실적으로 무의미한 결과이다. 그렇기 때문에 원자력 발전원의 운전특성을 고려하면 원자력발전의 전원구성의 상한은 항상 일정한 수요가 나타나는 최저부하가 된다. 상기 그림의 LDC에서 확인할 수 있듯이 2010년 수요 기준의 최저 부하율은 45% 수준이다. 따라서 원자력발전의 전원구성 비율은 $\text{Min}(82\%, 45\%) = 45\%$ 가 된다. PWR1000 후보를 고려하여도 $\text{Min}(77\%, 45\%)$ 에 따라 동일한 45%의 구성비율을 점유하게 된다. 이에 따라 두 번째 파이차트와 같이 석탄화력발전의 구성 비율이 9%에서 45%까지 증가하게 된다. 다음으로, 안정적인 전력 시스템의 운영을 위해 국내 전력시장운영규칙에서는 4,000MW를 운영예비력으로 하고 있다. 세 번째 파이차트는 국내 예비력기준 4,000MW를 2010년 수요 기준으로 침두부하 시점에서 LNG 발전원에 적용하였을 경우 적정 전원구성 비율을 제시하고 있다. 최대 수요시점에서 4,000MW의 운영예비력 확보가 이루어져야 되기 때문에, 전원구성 관점에서는 LNG 발전원에 운영예비력 설비를 포함하여 고려한다.

추가적으로, 가변속 양수발전과 같은 주파수 추종이 가능한 양수발전과 원자력발전의 커플링을 통한 운전을 시행할 시 양수발전의 가용능력만큼 원자력발전의 구성비율의 확대를 고려할 수 있다. 2010년 수요기준으로 양수발전의 설비용량(3,900MW)을 100% 고려하면 원자력발전의 구성비율을 50% 수준까지 높일 수 있지만, 능동적인 주파수 추종이 어려운 국내 양수발전설비 특성과 실제 양수발전의 운영실적을 감안하면 100%의 설비용량을 반영하는 것은 현실적이지 못한 결과이다. 또한, 매월 2~3기 원자력 설비의 예방정비계획을 고려하면, 원자력 전원구성 비율을 좀 더 확대될

수 있다.

다음 그림 4는 탄소비용이 고려되었을 경우, 2010년 수요 패턴에 대한 적정 전원 구성의 비율을 나타내고 있다.

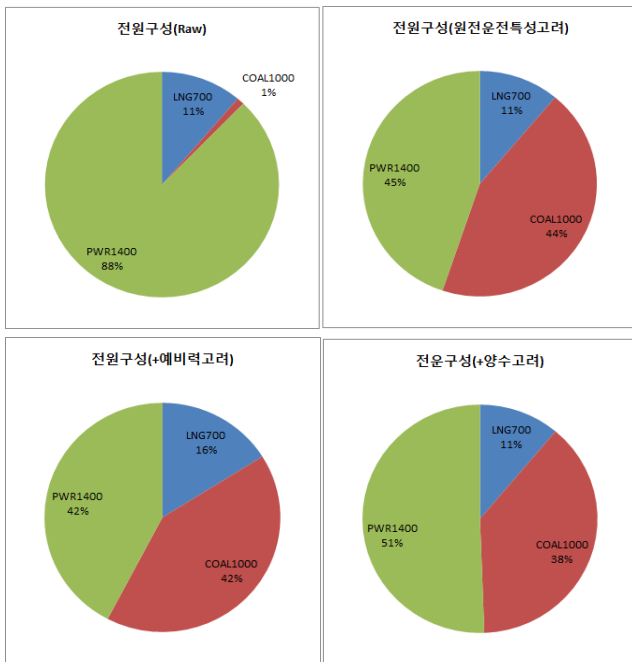


그림 4 적정 전원구성(탄소비용 미고려)
Fig. 4 Generation mix (Not consider carbon cost)

전체적으로, 탄소비용이 고려되지 않은 사례와 비교해서 탄소비용이 높은 석탄화력발전원의 구성 비율이 감소되었으며, 상대적으로 낮은 LNG발전원의 구성 비율이 증가하였음을 알 수 있다.

다시 말하면, 다음 표 2는 2010년의 부하패턴과 발전설비 후보군의 발전비용(고정비+변동비) 수준을 반영한 탐색곡선법에 의한 원전운전특성과 예비력이 고려된 적정 전원구성 비율을 제시하고 있다. 5차 전력수급기본계획의 전원구성과 비교분석을 위해 원자력, 석탄(유연탄&무연탄), LNG의 세 가지 에너지원의 합을 100% 기준으로 환산한 전원구성 비율을 함께 나타내었다.

표 2 탐색곡선법에 의한 적정 전원구성 비율

Table 2 Generator mix using the screening curve method

구분		원자력	석탄	LNG
적정 전원구성	탄소비용 미고려	42%	44%	14%
	탄소비용 고려 (50,000원/CO2톤)	42%	42%	16%
5차 전력수급기본계획 전원구성	2010년	30% (25%)	39% (32%)	31% (26%)
	2024년	40% (32%)	34% (28%)	26% (20%)

※ ()는 5차 전력수급기본계획의 전원구성(원자력, 유·무연탄, LNG, 석유, 양수, 신재생, 집단) 비율

본 절에서 제시한 최적 적정 전원구성의 결과는 탐색곡선법을 이용에 따른 한계점을 내포하고 있다. 탐색곡선법은 단순히 후보발전원의 비용에 의한 상대적인 비교분석 방법으로, 후보발전원의 발전기 특성과 공급시장비용, LOLP(공급시장확률) 등과 같은 계통의 안정적인 운영을 보장하기 위한 신뢰도 기준, 선로계약 등과 같은 계통운영 제약을 고려하지 못한다는 한계를 가지고 있다. 다음 절에서는 세계적으로 전원개발계획 수립에 폭넓게 이용되는 WASP-IV 모형을 통해서 탐색곡선법의 일정부분의 한계점을 보완한 분석을 이행한다.

4. WASP모형을 이용한 적정 전원 구성 분석

본 절에서는 WASP-IV(Wien Automatic System Planning Package) 모형을 이용하여 국내 적정 전원구성을 분석하고 있다. 분석기간에 대한 연간 예측수요, 기존 발전원 데이터와 신규 후보 발전원 데이터, 신뢰도 제약과 같은 전원개발계획의 제약 데이터 등을 고려하여, 분석기간에 걸쳐 제약조건을 만족하며 전체 발전비용 최소화하는 설비구성을 결정한다.

4.1 WASP-IV 모형

WASP(Wien Automatic System Planning Package)은 처음 1972년 국가 또는 지역의 향후 미래 전력 공급을 위한 전원 확장 계획과 원자력 발전의 경제적인 경쟁성을 분석하기 위해 IAEA의 요구에 맞춰 미국의 Tennessee Valley Authority와 Oak Ridge National Laboratory에 의해 개발된 이후, 개선을 거듭하여 현재의 모형에 이르렀다. WASP은 계통 생산 비용, 공급 시장 비용 그리고 신뢰도와 탄소 배출량, 연료 이용성 그리고 몇몇 특수 발전기에 의한 전력생산에 대한 제약 조건을 만족하는 최적 급전 정책을 결정하기 위한 선형 프로그래밍 기법과 계통 확장 정책의 최적 비용을 위한 동적 프로그래밍 방법의 확률적인 평가가 가능한 전 세계적으로 널리 이용되는 대표적인 전원개발계획 모형이다. 이 모델에서는 발전 비용, 공급 시장 비용, 신뢰도를 정의하기 위해 계통의 확률 추정(Probabilistic estimation)을, 그리고 배출권, 연료 이용성과 몇 개의 발전소에 의한 전력 생산에 대한 제약조건을 만족하는 최적 급전 정책의 결정하기 위해 선형프로그래밍법(linear programming technique)을, 그리고 계통 확장 정책의 여러 가지 대안들을 비교하기 위해 동적 최적화 기법(dynamic method of optimization)을 사용한다[16].

현재 WASP 모형을 국내 전원개발계획에 직접적으로 적용하기에는 다소 한계가 존재한다. 모형의 개발배경에 따른 발전기 대수와 같은 입력의 제한으로 국내 계통과 같은 대규모 전력계통에 적용하기에는 제한적이다. 또한 발전소 입지 및 계통망 등을 고려하지 못한다는 한계점을 가지고 있다. 하지만 사용의 편리성과 접근성으로 인해 전 세계적으로 널리 사용되는 대표적인 전원개발 모형이다.

4.2 적정 전원 구성 분석

WASP-IV 모형을 이용하여 사용된 데이터를 기준으로

적정 전원구성을 분석한다. 전력수요, 기존 및 신규전원 데이터는 제 5차 전력수급기본계획을 기반으로 하고 있다. 탄소배출비용은 IPCC-NGGIP(2006 Edition) 고위발열량 기준으로 50,000원/CO2톤으로 가정하여, 발전원의 연료비용에 반영한다. 신규 전원으로는 제 5차 수급기본계획의 확정설비는 모두 추가 신규설비로 적용하였으며, 일반적인 국내 전력 공급신뢰도 기준으로 최소 0.5일/년(0.137%)의 신뢰도 기준을 만족하는 적정 전원개발계획을 도출한다. 또한, 할인율은 6.5%, 순동예비력은 시장운영규칙상의 1,500MW로 가정한다. 적정 전원구성을 도출하기 위해, 5차 수급계획의 기준수요와 목표 수요 및 탄소배출비용 고려 유무에 대한 4가지 시나리오 분석을 진행한다. 발전원의 건설기간을 고려하여 석탄과 LNG는 2014년부터 원자력은 2019년부터 신규설비를 운영할 수 있다고 가정한다. 또한, 2014년 이전에는 건설기간을 고려하면, 현실적으로 신뢰도계약(예비력, LOLP)을 충족시킬 수 없기 때문에 예외로 고려한다. 앞 절에서 살펴본 바와 같이, 전원간의 경제성 측면에서 원전설비가 월등히 우수하여 원전계약이 없을 경우 2019년 이후는 원전의 건설만 계획되는 결과가 나타난다. 과거 국내 원전건설 실적을 고려하여 연간 최대 2기까지 신규원전의 투입을 제약으로 가정한다. 다음은 WASP-IV 모형에 의해 도출된 탄소배출비용 고려 유무에 따른 연도별 기준 수요에 대한 전원 구성 결과를 나타내고 있다.

표 3 기준수요에 대한 연도별 전원 구성 결과
Table 3 Generation mix on the basic demand

구분	탄소배출비용 미고려			탄소배출비용 고려		
	원자력	석탄	LNG	원자력	석탄	LNG
2010	29%	40%	31%	29%	40%	31%
2015	28%	48%	24%	31%	42%	27%
2020	32%	48%	20%	35%	42%	23%
2024	37%	44%	18%	42%	37%	20%

탄소배출비용이 반영되지 않은 시나리오에서 석탄전원의 비중이 반영한 시나리오에 비해 상대적으로 더 높은 비율을 보여주며, 공통적으로 LNG전원의 비율은 계속적으로 감소하는 추세를 보여준다. 또한 신규 원전이 투입되는 2019년 이후에서부터는 석탄전원의 구성비가 감소하고 원전의 구성비가 더 크게 증가하는 결과를 확인할 수 있다.

다음으로, 목표수요에 대해서 상기의 분석과 동일한 분석을 진행하였으며, 그 결과를 다음의 표에서 제시하고 있다. 기준수요의 결과와 유사한 변화양상을 보여준다.

표 4 목표수요에 대한 연도별 전원 구성 결과
Table 4 Generation mix on the target demand

구분	탄소배출비용 미고려			탄소배출비용 고려		
	원자력	석탄	LNG	원자력	석탄	LNG
2010	29%	40%	31%	29%	40%	31%
2015	31%	42%	27%	34%	36%	29%
2020	36%	41%	23%	39%	36%	25%
2024	42%	37%	21%	46%	32%	22%

다음의 그림 5와 표 5는 2024년의 기준수요와 목표수요에서의 발전설비 후보군의 발전비용(고정비+변동비) 수준과 시스템 신뢰도 지수를 반영한 WASP 모형에 의한 적정 전원구성 비율을 나타내고 있다. 5차 전력수급기본계획의 전원구성과 비교분석을 위해 원자력, 석탄, LNG의 세 가지 에너지원의 합을 100% 기준으로 환산한 전원구성 비율을 함께 나타내었다.

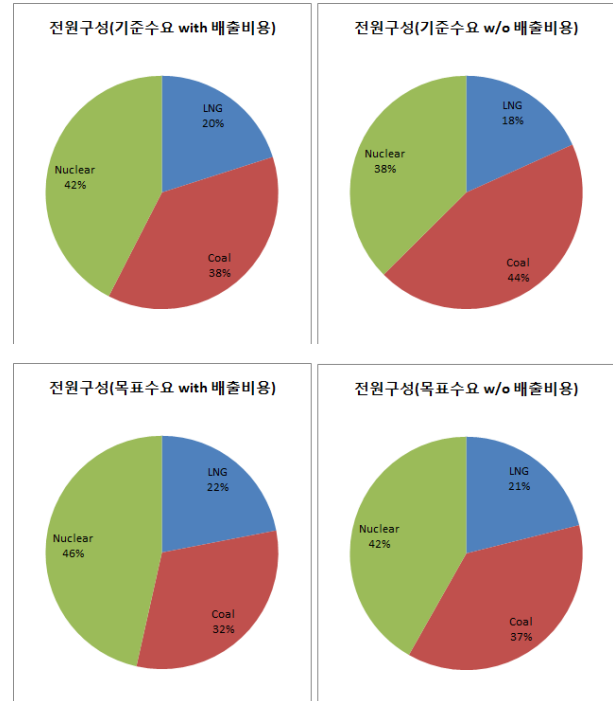


그림 5 기준수요 및 목표수요에 대한 적정 전원구성(2024년)
Fig. 5 Generation mix (demand & target demand)

표 5 WASP-IV 모형에 의한 적정 전원구성 비율
Table 5 Generation mix using the WASP-IV

		구 분		Nuclear	Coal	LNG
적정 전원구성 (2024년)	WASP -IV	탄소비용 미고려	기준수요	38%	44%	18%
			목표수요	42%	37%	21%
		탄소비용 고려	기준수요	42%	38%	20%
			목표수요	46%	32%	22%
	탐색곡 선법	탄소비용 미고려	42%	44%	14%	
		탄소비용 고려	42%	42%	16%	
5차 전력수급기본계 획 전원구성	2010년		30% (25%)	39% (32%)	31% (26%)	
	2024년		40% (32%)	34% (28%)	26% (20%)	

※ ()는 5차 전력수급기본계획의 전원구성(원자력, 유·무연탄, LNG, 석유, 양수, 신재생, 집단) 비율

상기의 WASP모형에 의한 전원 구성 결과는 앞 절의 탐색곡선법에 의한 결과보다 발전비용, 신뢰도지수 등 좀 더 많은 전력계통의 영향인자들을 고려한 결과이지만, 실질적으

로 적용하기에는 반영되지 않은 중요 영향인자들이 존재하기 때문에 적절하지 못하다. 특히, 전력망의 구성 및 운영계약 등이 고려되면 전력생산지에서 수요지로 공급가능한 한계가 존재하여 수요지 인근에 건설이 용이한 LNG전원에 대한 건설 유인이 크게 발생할 수 있지만, 비용과 계통의 신뢰도만을 고려하였기 때문에 LNG전원에 대한 신규건설 유인이 너무 낮아 LNG전원 신규건설에 대한 현실적인 결과를 보여주지 못한다는 한계점이 있다.

다음 그림 6은 탄소배출비용에 따른 민감도 분석 결과이다. 탄소배출비용(50,000원/CO2톤)의 ±50%, +100% 증감에 따른 WASP-IV 모형의 전원구성결과에 대한 민감도 분석 결과를 나타내고 있다. 탄소비용이 증가함에 따라 석탄전원의 건설계획이 감소되며, +100%(100,000원/CO2톤) 사례에서는 LNG 전원의 건설만 계획됨을 확인할 수 있다. -50%(25,000원/CO2톤) 사례에서는 탄소배출비용을 고려하지 않는 사례와 동일한 결과를 보여줌으로써, -50% 수준의 탄소비용은 결과에 영향을 주지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

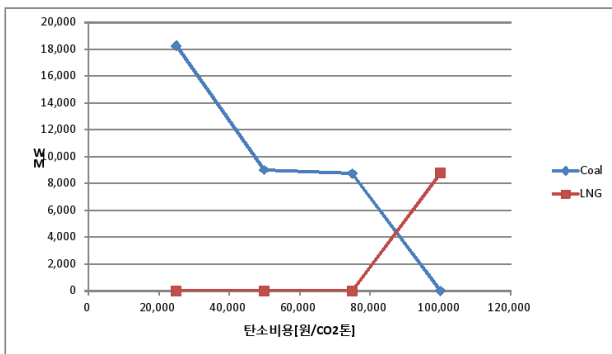


그림 6 WASP-IV 모형에 의한 탄소배출비용에 따른 민감도 분석

Fig. 6 Sensitivity analysis on the carbon emission cost using WASP-IV

5. 결 론

본 논문에서는 제 5차 전력수급기본계획의 기초 데이터를 기준으로 탄소배출비용을 고려하여 탐색곡선법과 WASP-IV 모형을 이용한 국내 전원의 적정 전원구성을 도출하고자 하였다. 그리고 탄소배출비용에 따른 전원개발계획에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 각 방법에 따른 전원구성과 그 한계점을 제시하였다. 또한, 탄소배출비용과 같은 환경문제에 따른 비용이 증가하면, 전원 구성에 상당한 영향 미치게 됨을 확인할 수 있었다. 탐색곡선법과 WASP-IV모형은 비용최소화 관점의 분석을 수행하기 때문에, 국내 LNG전원이 원자력, 석탄전원에 비해 상대적으로 비용이 높아 LNG전원에 대한 신규 건설계획 유인이 낮아 신규 건설 결과가 나타나지 않았다. 하지만, 송전계약과 같은 계통운영계약이 고려되면 LNG전원에 대한 신규 건설계획 또한 나타날 것으로 예상된다. 또한, 제 5차 전력수급기본계획에 따르면 2010년 2GW(3%)에서 2024년 8GW(7%)까지 신재생에너지원의 설비 확대를 계획하고 있다. 신재생에너지원에 대한 출력제한

을 고려하지 않는다면, 최대 8GW수준의 출력에 대한 불확실성이 큰 전원이 계통에 연계되어 부하추종이 어려운 원자력 발전원에 대한 전원구성 비율을 감소시키고, 반대로 석탄 또는 LNG 발전원의 비율을 증가시키는 방향으로 영향을 미칠 것으로 예상된다. 본 논문은 사용된 방법 및 모델의 한계에 의해 신재생전원을 고려하지 못한 한계점을 내포하고 있다. 현재 신재생전원들은 기존의 전원과 비교하여 투자비용이 높기 때문에 LNG 전원 수준으로 투자비가 낮아지지 않는 한, 비용최소화 기반의 모델을 통한 분석에서는 열등자원으로 분류되어 건설계획에 포함되지 않는다. 또한 WASP-IV모형의 경우, 기본적으로는 신재생전원을 고려하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 신재생전원을 고려하기 위해서는, RPS(Renewable Portfolio Standard)와 같은 의무화계약 및 간헐적인 특성을 반영할 수 있는 모델 또한 방법론에 대한 연구가 필요하다. 이러한 방법론에 대한 연구 및 계통운영계약을 고려하지 못한 본 논문의 한계는 향후 연구를 통해 보완해 나갈 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Tanabe, K. Tasuda, R. Yokoyama, "Flexible Generation Mix Under Multi Objectives and Uncertainties", IEEE Trans. Power Syst., vol. 8, no.2, 581-587, 1993
- [2] Young-Moon Park, Jong-Ryul Won, Jong-Bae Park, Dong-Gee Kim, "Generation expansion planning based on an advanced evolutionary programming", IEEE Trans. Power Syst., vol.14, no.1, 299-305, 1999
- [3] Jinxiang Zhu, Mo-yuen Chow, "A review of emerging techniques on generation expansion planning", IEEE Trans. Power Syst., vol.12, no.4, 1722-1728, 1997
- [4] S. Kannan, S.M.R. Slochanal, N.P. Padhy, "Application and comparison of metaheuristic techniques to generation expansion planning problem", IEEE Trans. Power Syst., vol.20, no.1, 466-475, 2005
- [5] Jiraporn Sirikum, Anulark Techanitisawad, and Voratas Kachitvichyanukul, "A New Efficient GA-Benders' Decomposition Method: For Power Generation Expansion Planning With Emission Controls", IEEE Trans. Power Syst., vol.22, no.3, 1092-1100, 2007
- [6] P.J. Luickx, E.D. Delarue, W.D.D'haeseleer, "Effect of the generation mix on wind power introduction", IET Renewable Power Generation, Vol. 3 , no. 3, 267-278, 2009
- [7] 이정인, 한석만, 김발호, "RPS (Renewable Portfolio Standard) 제도 도입에 따른 국내 장기 전원구성 변화에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 58권, 3호, 2009
- [8] Q. Chen, c. Kang, Q. Xia, J. Zhong, "Power Generation Expansion Planning Model Towards Low-Carbon Economy and Its Application in China", IEEE Trans. Power Syst., vol.25, no.2, 1117-1125, 2010

[9] A.S. Chuang, F. Wu, P. Varaiya, "A Game-Theoretic Model for Generation Expansion Planning: Problem Formulation and Numerical Comparisons", IEEE Trans. Power Syst., vol.16, no.4, 885-891, 2001

[10] I.P. Burdon, "Gas and the current generation mix in England and Wales. I", Power Engineering Journal, Vol. 14, no. 2, 61-70, 2000

[11] S. H. Jeong, J. S. Choi, J. U. Kim, Y. S. Lee, A.A. El-Keib and M.Shahidehpour, "Flexible Best Generation Mix for Korea Power System Considering CO2 Constraint: Vision 2030", IEEE PES GM, 2008

[12] Murugan, P., Kannan, S., Baskar, S., "Application of NSGA-II algorithm to single-objective Transmission constrained generation expansion planning", IEEE Trans. Power Syst., vol.24, no.4, 1790-1797, 2009

[13] 지식경제부, "제 5차 전력수급기본계획", 2010

[14] Kwang Y. Lee and Mohamed A. El-Sharkawi, "Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems", IEEE Press, Wiley, 2008

[15] 한국전력공사, "전원개발계획과 경제성 평가", 1999

[16] "Introduction to the WASP IV Model, User's Manual," International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, Nov. 2001.



노재형 (盧載澯)

1969년 11월 10일생. 1993년 서울대 원자핵공학과 졸업. 2002년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 미국 시카고 Illinois Institute of Technology 전기공학과 졸업(박사). 1992년~2001년 한국전력공사 근무. 2001~2010년 한국전력거래소 차장. 2010~현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 조교수.

Tel : 02-450-3934

Fax : 02-444-1418

E-mail : jhroh@konkuk.ac.kr

저 자 소 개



장세환 (張世煥)

1980년 10월 27일생. 2006년 부산대 공대 전자전기통신공학과 졸업. 2008년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-458-4778

Fax : 02-444-1418

E-mail : shjang@konkuk.ac.kr



박종배 (朴宗培)

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

Tel : 02-450-3483

Fax : 02-444-1418

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr