

에너지수급 최적화모형을 이용한 장기 에너지수요 및 환경제약에 따른 원자력의 역할 분석

채규남*, 이병휘
한국과학기술원

요 약

한국의 장기 에너지공급 전략에서 에너지수요 및 환경제약에 따른 원자력에너지의 역할을 평가하기 위해 에너지수급 최적화모형인 MESSAGE를 이용하였다. 에너지수급 네트워크의 입력자료로 필요한 유효에너지 수요를 예측하기 위해 새로운 프로그램을 개발하였고, 이 결과를 이용하여 1993년부터 2040년까지 원자력계통을 포함한 전체 에너지계통에 대한 최적화를 수행하였으며, 노형전략 및 핵연료주기전략, 원자력에너지의 확대이용 방안 등을 제시하였다. 한국에서 원자력 확대이용에 대한 핵심 요인은 경제성장 규모, 화석연료의 이용가능성, 이산화탄소 배출규제, 부지 및 대중수용성에 의해 제한받는 원자력 자체의 공급능력이 될 것이다.

1. 서론

한국은 급속한 산업화와 경제성장으로 인해 장기적인 에너지수급에 대한 체계적인 분석의 필요성이 대두되어 왔다. 원자로형 및 핵연료주기 전략도 전체 에너지계통의 일부분으로서 유기적으로 평가하는 것이 합리적이다.

한국 원자력정책에 대한 의사결정지원시스템으로 사용할 수 있도록 하기 위해 유효에너지 수요 예측모형을 개발하고 공급최적화 모형인 MESSAGE를 개선하였다[1]. 모형 사용의 주목적은 한국의 지속가능한 장기 에너지공급 전략에서 원자력에너지의 확대사용 가능성을 평가하려는 것이다. 여기에서 사용된 모형의 구조가 그림 1에 나와 있다. 모형에서는 경제성을 기본으로 하여 에너지자원의 한계, 환경규제를 주요 평가인자로 사용하였다.

분석대상기간은 석유 및 가스를 비롯한 일부 중요 에너지자원의 고갈이 예상되는 시점을 포

* 현재 한국원자력연구소 근무

합시키기 위해 1993년부터 2040년까지로 선택하였고, 향후 에너지공급체계로서의 석탄-원자력 체
계에 중점을 두었다. 결과로서 여러가지 시나리오에 대한 원자력의 전망을 제시하였다.

원자력에너지 정책을 위한 의사결정지원 시스템

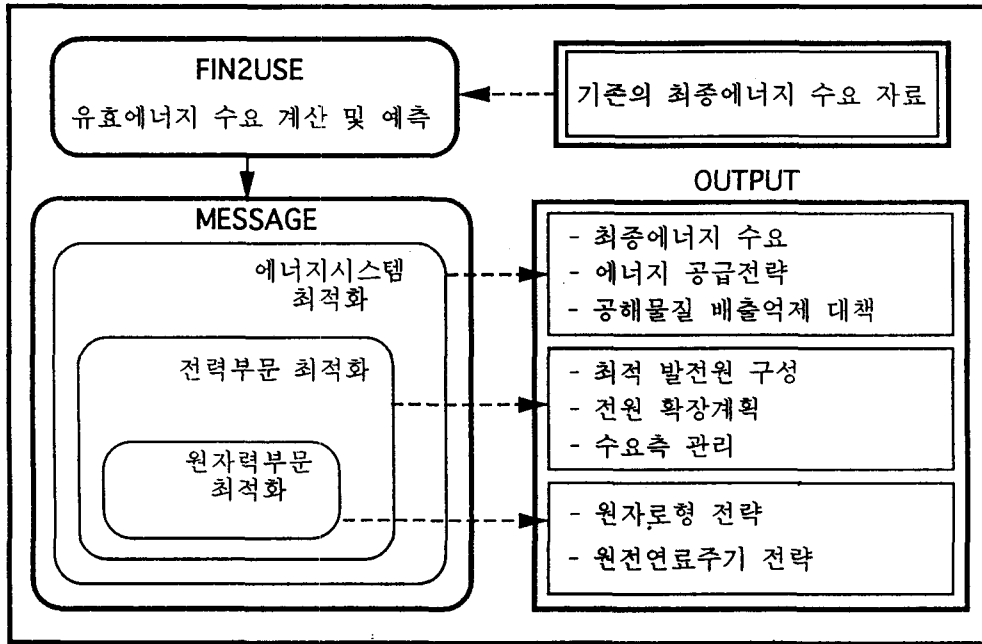


그림 1. 에너지계통 분석모형의 구조

2. 유효에너지 수요예측

MESSAGE와 같은 에너지계통 분석모형은 최종에너지 수요보다는 유효에너지 수요를 필요로 하는데, 이것은 연료간의 치환 및 에너지기술의 효율개선 효과 등을 반영할 수 있기 때문이다[2]. 최적화모형에 온라인으로 입력자료를 공급할 목적으로, 기존의 에너지소비자료와 사회경제 분석기법을 이용하는 한국의 유효에너지 수요예측 프로그램을 개발하였다[3]. 에너지소비 유형의 최근 경향을 반영하기 위해 1981년부터 1993년까지 3년마다 실시된 에너지총조사 결과를 데이터베이스로 활용하였다[3]. 산업구조의 전망은 외부의 연구결과를 반영하였으며[4], 세부부문별 유효에너지 원 단위 예측자료는 프로그램 내부에서 생산하였다.

장기 사회경제적 변수의 불확실성에 대처하기 위해 기준, 하한 및 상한 수요 시나리오를 선정하였다. 표 1에 나타나 있는 것과 같이, 전체 에너지수요는 하한수요의 경우에서도 2040년까지 상당히 증가하게 될 것이며, 전기관련 수요가 증가를 주도할 것으로 보인다.

표 1. 한국의 장기 유효에너지수요 시나리오 (1992=100)

유효에너지	시나리오	1992	2010	2040	유효에너지	시나리오	1992	2010	2040
비치환성전기	상한		329	845	냉방동력	상한		538	1,661
	기준	100	266	498		기준	100	462	1,031
	하한		256	419		하한		443	850
난방열	상한		172	278	산업용간접열	상한		234	607
	기준	100	157	212		기준	100	198	365
	하한		146	174		하한		167	255
산업용직접열	상한		261	677	동력	상한		312	853
	기준	100	231	432		기준	100	247	478
	하한		213	338		하한		235	386

3. 한국 에너지계통의 모형화

3.1 MESSAGE 모형의 개요

MESSAGE는 1978년 IIASA가 처음 개발한 후 계속 보완되어 온 동적선형계획 모형이다[1]. 목적함수는 총할인계통비용이며, 주요 변수는 에너지변환기술의 용량 및 사용량이다. 유연한 프로그램 구조를 갖고 있기 때문에 변수들의 조합에 의한 새로운 변수를 목적함수에 추가할 수 있다.

3.2 한국의 에너지계통

한국 에너지계통의 구조는 최종에너지 수요분석에서 도출되었다[3]. 15 종류의 유효에너지 수요와 100여개의 에너지변환기술로서 계통을 구성하였다. 분석대상기간이 장기이므로 석탄 액·기화, 태양열 및 조력 발전소, 고속증식로 등 신규로 도입될 가능성이 있는 기술들을 포함시켰다.

원자력은 전력, 고온열, 난방열의 생산에 이용될 수 있는 것으로 보았다. 또한 핵연료주기에서는 우라늄자원의 한계를 고려하여 플루토늄 재순환주기, DUPIC 및 토륨 연료주기를 포함시켰다.

3.3 시나리오 선정

에너지계통 모형의 결과에 영향을 주는 많은 인자들 중 유효에너지 수요, 원자력의 연간 신규가 능용량, 이산화탄소 제약, 석탄액화 및 고속증식로 기술의 조기도입 여부를 시나리오의 결정인자로 선택하였다. 결정인자들의 조합을 통해 6개 시나리오를 선정한 결과가 표 2에 나와 있다.

3.4 주요 제약조건

본 연구에서는 1980년부터 현재까지의 에너지소비 경향이 2000년까지 지속된다고 가정하고 그 후에는 연간 5% 범위 내에서 시장점유율이 변동되는 것으로 설정하였다. 주요 분석대상인 전력부문에서 각 발전원의 최대 연간 도입가능용량은 발전소 및 연료의 공급상황을 고려하여 결정하였는데, 석탄화력 2,000 MWe, LNG화력 2,000 MWe, 원자력 2,000 MWe 등이다. 미래 발전원의 연간 도입가능용량 및 시기는 재생에너지원(태양열 및 조력)의 경우 2010년부터 500 MWe, 고속증식로의 경우 2025년부터 1,000 MWe로 정하였다[5].

화석연료자원의 한계를 다루기 위해, 한국이 사용할 수 있는 자원의 양을 세계 확인 및 추정 매장량의 2.1%로 정하였는데, 이 값은 1992년 세계 무역에서 한국의 점유율에 해당한다. 각 자원별 사용 제한량은 1992년 국내 소비량 대비, 국내 무연탄은 125 배, 유연탄은 7,400 배, 석유는 130 배, 천연가스는 1,400 배, 우라늄은 140 배이다[6]. 석탄의 액·기화는 2010년부터, MOX 핵연료주기는 2000년, DUPIC 핵연료주기는 2010년, 토륨 핵연료주기는 2020년부터 도입될 수 있는 것으로 가정하였다. 지역난방용 원자로는 2020년부터 상용화 가능한 것으로 가정하였다.

표 2. 시나리오 정의

시나리오	유효에너지 수요	연간 신규도입 원자력용량	이산화탄소 제약 (탄소세 또는 배출량)	기타 조건
BASE	기준수요	약 2,000 MWe	제약 없음	없음
LOW	하한수요	약 2,000 MWe	제약 없음	없음
HIGH	상한수요	약 3,000 MWe	제약 없음	석탄액·기화 조기도입
CT100	기준수요	약 2,000 MWe	2000년부터 탄소톤당 100불	없음
CL10	기준수요	약 3,000 MWe	BASE의 2010년 배출수준 유지	고속로 조기도입
CL15	기준수요	약 2,000 MWe	BASE의 2015년 배출수준 유지	없음

4. 결과 및 토의

4.1 전체 에너지부문

한국의 미래 에너지수요 유형은 전기와 연료유가 주도하게 되며, 석유 및 천연가스의 고갈로 인해 석탄 액·기화가 2035년부터 이들의 역할을 대신하게 될 것으로 나타났다. 시나리오별 모형의 일부 결과를 표 3에 나타내었다.

달성가능한 이산화탄소 배출제약의 한계는 기준시나리오의 2008년 배출수준(연간 1억2900만 탄소톤)인 것으로 나타났는데, 이는 현재 배출수준의 약 1.7배에 해당한다. 하한수요의 경우에서도, 이산화탄소 배출을 2005년 이전 수준으로 억제하는 것은 불가능하다. 탄소세의 부과는 이산화탄소 배출제약의 설정과 유사한 결과를 낳고 있다(표 3 참조). 시나리오별 이산화탄소 배출추이가 그림

2에 나와 있다. 그림 3은 시나리오별 총에너지계통 비용을 보여주고 있다. CL10과 CL15 시나리오의 비교를 통해, 추가적인 배출량 감축에 탄소톤당 160불의 비용이 소요되는 것으로 나타났다.

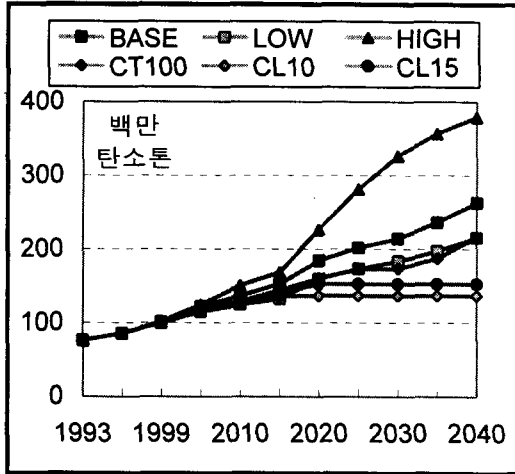


그림 2. 시나리오별 이산화탄소 배출

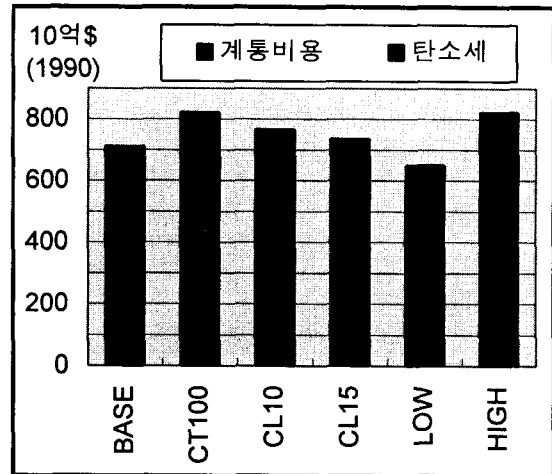


그림 3. 총 할인 에너지계통비용

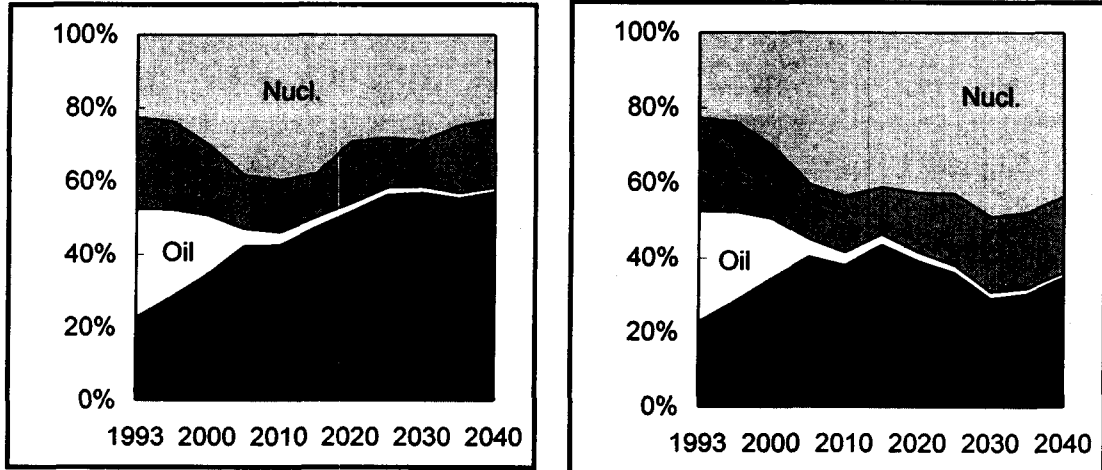
표 3. 시나리오별 전력 및 원자력 관련 결과

시나리오	최종에너지 소비에 서의 전기 점유율(%)			발전용량에서 원자력 점유율(%)			발전량에서 원자력 점유율(%)			총 이산화탄소 배출량 (백만탄소톤)		
	1993	2010	2040	1993	2010	2040	1993	2010	2040	1993	2010	2040
BASE	13.5	15.3	17.6	22.7	40.0	27.6	39.5	62.7	44.8	76.	137.	282.
LOW	13.5	16.3	20.8	22.7	41.0	28.8	39.5	63.8	44.6	76.	124.	216.
HIGH	13.5	15.2	15.6	22.7	38.2	30.7	39.1	61.1	54.3	76.	151.	379.
CT100	13.6	15.6	19.1	22.7	39.8	34.1	39.5	62.4	49.4	76.	129.	234.
CL10	13.5	15.7	20.7	22.7	36.6	44.9	35.2	48.9	78.4	76.	126.	137.
CL15	13.5	15.7	19.6	22.7	39.9	39.9	39.5	62.6	69.8	76.	129.	152.

4.2 발전부문

PWR과 PHWR 발전소는 거의 상한계약치로 최대한 도입된다. 석탄화력발전소와 LNG화력발전소는 잔여용량을 놓고 경쟁하게 되는데, 그 상대적 점유율은 환경계약 시나리오에 따라 달라진다. CT100 시나리오와 같은 이산화탄소 제약 하에서는 태양열과 조력 같은 재생발전원이 2010년부터 도입되기 시작한다. 에너지원별 발전량 점유율이 그림 4에 나와 있다. 2020년에 원자력, 석탄, 석유(가스 포함), 재생에너지의 발전용량비는 BASE 시나리오의 경우 약 30:40:20:10, CT100 시나리

오의 경우 40:20:20:20인 것으로 나타났다.



(a) BASE 시나리오

(b) CT100 시나리오

그림 4. BASE 및 CT100 시나리오의 발전용량 점유율

4.3 원자력부문

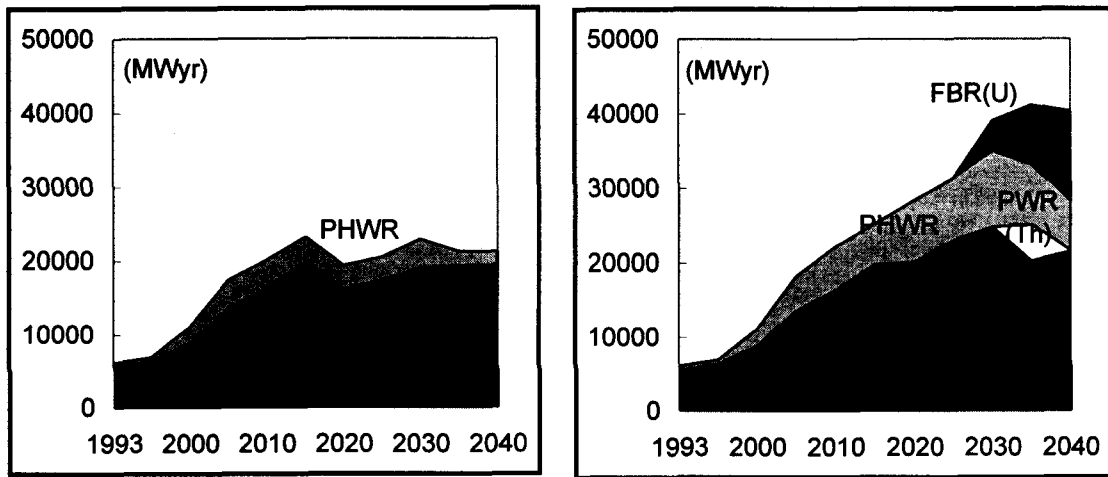
BASE 시나리오에서는 현재의 경향이 2030년까지 유지되고 그 후 우라늄 부족을 보충하기 위해 MOX 연료주기가 도입된다. 고속중식로는 2030년 이후 핵연료의 재생산에 기여할 수 있게 된다.

CL10, CL15, CT100 시나리오에서는 환경제약으로 인해 원자력발전이 최대화된다. 고속중식로와 토륨 연료주기의 역할이 더 중요해지며 이들의 도입시기가 앞당겨진다. 동시에, 공정열 공급과 같은 원자력에너지의 비발전분야 이용도 2015년 이후 시작된다. 한국에서 원자력의 확대에 대한 현실적인 제약은 대중수용성으로 인한 부지문제라고 보여진다. BASE 시나리오에서는 2040년까지 약 55기의 원전이 건설되며 CT100 시나리오에서는 90기 이상이 건설되는 것으로 나타났다.

5. 결론

전체적인 에너지계통 최적화의 일부로 한국 원자력계통의 최적화를 수행하였다. 한국의 에너지계통 구조는 에너지자원의 고갈로 인해 2020년경 큰 변화를 겪게 될 것이다. 석탄의 액·기화는 석유 및 가스의 대체자원으로서 대규모로 도입될 것이 확실하다. 재생에너지원은 환경제약이 존재하는 경우 이용이 확대되기 시작할 것이다.

원자력에너지는 모든 시나리오에 있어 전력의 40% 이상을 공급함으로써 한국 에너지계통에 기여할 것이다. 원자력의 확대이용 없이는 한국은 온실기체 배출 감축과 같이 예상되는 세계적인 제약을 이행하는데 어려움을 겪을 것이다. 고속증식로, 고온로, 플루토늄 재순환 및 토륨 연료주기 등은 장기적으로 원자력부문에서 핵심 역할을 할 것이다. 원자력이 한국 에너지부문에 기여하는 정도는 화석연료의 이용가능도, 이산화탄소 배출규제, 원자력산업 자체의 공급능력에 달려 있다. 본 분석방법은 원자력정책을 위한 의사결정지원 시스템으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.



(a) BASE 시나리오

(b) CT100 시나리오

그림 5. BASE 및 CT100 시나리오의 원자력발전량

참고문헌

- 1 M. Agnew, L. Schrattenholzer, and A. Voss, User's Guide for the MESSAGE Computer Program, IIASA RM-78-21, Laxenburg, Austria, 1978.
- 2 International Atomic Energy Agency, Energy and Electricity Demand Forecasting for Nuclear Power Planning in Developing Countries, IAEA-TECDOC-470, Vienna, 1988.
- 3 상공자원부, 에너지 총조사 보고서, 1993, 1990, 1987, 1984, 1981.
- 4 에너지경제연구원, 21세기 에너지수요 및 에너지정책 전망, 1992.
- 5 과학기술처, 장기 원자력정책 방향 설정연구, 1994.
- 6 British Petroleum, BP Statistical Review of World Energy '93, U.K., 1993.