



## 발전부문 온실가스배출과 가스발전의 역할 분석

†강희정

건국대학교 산업공학과

(2006년 9월 25일 접수, 2006년 10월 17일 채택)

## An Analysis of Greenhouse Gas Emission and Role of Gas Generation in Electric Sector

†Kang Hee-Jung

Department of Industrial Engineering, Konkuk University

(Received 25 September 2006, Accepted 17 October 2006)

### 요약

본 논문에서는 현재 국제에너지기구에서 국가 에너지시스템분석에 공식적으로 사용되고 있는 시장분배모형(MARKAL: MARKet ALlocation) 모형을 이용하여 국내 발전부문의 온실가스 배출감축 잠재량을 위한 분석을 실시하였다. 모형 운영에 필요한 입력자료를 구축하고 4개의 시나리오를 설계하여 2040년까지의 발전기술의 구성, 특히 가스발전의 온실가스 감축에 대한 역할을 다양하게 분석하였다.

**Abstract** – The purposes of this study is to develop a domestic MARKAL(MARKet ALlocation) model with construction of database system to find the technology mix for the electricity generation market in Korea. The MARKAL model is officially used for national energy system optimization in the International Energy Agency(IEA), and the role is becoming more important in relation to analyze the greenhouse gas mitigation potential and to evaluate the technologies. Four scenarios specially emphasized on the greenhouse gas reduction and technology mix of electric generation were applied, each of them covering the analysis periods between 2004 and 2040.

**Key words** : MARKAL model, Greenhouse gas, Technology evaluation, Electricity generation

### I. 서론

국내 장기 온실가스 배출전망에 따르면 지속적인 소득수준의 증가에 따라 전력소비가 타 에너지원에 비해 상대적으로 빨리 증가하여, 전력부문을 포함한 전환부문의 온실가스 배출비중은 2000년의 29%에서 2020년에는 산업부문보다 높은 34% 수준에 이를 것으로 전망되고 있다[2]. 따라서 전환부문에서의 온실가스 감축은 국내 온실가스 감축에 있어 매우 중요한 역할을 하게 될 것이다. 특히 전력부문에서의 온실가스 감축은 공급측면에서는 단기적으로 발전효율의 향상, 원자력 및 LNG 등 저탄소형 발전원의 확대, 청정석탄 발전기술, 신재생에너지를 이용한 발전원 확대의 형태로 장기적으로는 연료전지, 이산화탄소 포집·저장기술 도입 등 새로운 신기술 도입을 통해 이루어질 것으로 전망

되고 있다. 또한 수요측면에서는 고효율기기의 도입, 전력저소비형 건물 보급 확대 등 주로 효율향상 및 에너지절약의 형태로 이루어질 것으로 예측되고 있다.

현재 우리나라는 교토의정서 이행 기간 이후인 2013년부터의 Post-Kyoto 체제하에서의 온실가스 감축과 관련한 협상에 대비하기 위한 기초 자료로써 국내 온실가스 저감잠재량 분석결과가 절실히 필요하며, 향후 감축량을 할당받아 이를 시행할 시에도 특정기술의 저감잠재량을 평가하는 것은 반드시 필요한 부분이다[1,5]. 이러한 저감잠재량 평가에 있어 에너지시스템 분석모형의 운용은 필수적이며 해외 여러 국가들에서 이를 사용하고 있다.

본 연구의 목적은 현재 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 대표적 에너지시스템 분석모형인 MARKAL 모형을 이용하여 중장기적으로 국내 온실가스를 감축하는데 있어 전력부문의 전력공급 기술 및 정책을 시나리오 분석을 통해 그 영향을 분석하는데 있다.

†주저자:kanghi@konkuk.ac.kr

## II. 전력시스템 특성 및 분석모형 비교

### 2.1. 전력시스템 특성

전력시스템은 타 에너지시스템과 달리 생산과 소비가 동시에 일어나며 저장이 불가능한 특성을 가지고 있다. 이러한 특성으로 인해 전력부문을 에너지 분석모형인 MARKAL로 분석할 경우 가장 경쟁력 있는 기술(설비) 하나만이 독점적으로 투입되는 것이 아니라 여러 기술의 조합 형태로 투입된다.

여름철 비교적 짧은 시간동안 발생하는 냉방부하의 수요를 감당하기 위하여 대규모 발전원을 이용하거나 가동/정지에 많은 시간이 소요되는 발전설비의 이용은 경제적이지 못하다. 이러한 기술들의 조합을 구성하는 가장 중요한 요소는 기술 각각의 경제성 및 기술적 특성뿐만 아니라, 분석지역의 부하패턴이 가장 중요한 역할을 하게 된다. Fig. 1은 2003년의 우리나라 전체의 전력 부하패턴을 나타내는 부하지속곡선(Load Duration Curve)이다[6]. 이러한 부하패턴은 국가의 경제적, 지리적, 문화적 상황에 따라 달라지며 각 국가의 전력소비 행태를 직접적으로 나타내고 있다. 현재 우리나라의 전력수급계획 수립 시에도 이러한 부하패턴을 중요한 모델의 입력요소로 고려하고 있다.

앞서 살펴본 것과 같이 전력부문에 있어 부하영역의 특성이 최적전원구성(Optimal Mix)에 주요한 변수로 작용하고 있으므로, 전력부문을 MARKAL과 같은 에너지분석 모형을 통해 분석할 경우에도 이러한 부하영역의 특성을 잘 표현하는 것이 저감량 분석에 있어 중요하게 고려되어야 할 것이다.

### 2.2. 분석모형

MARKAL 모형은 선형계획(LP) 모형으로 에너지비용 최소화를 위한 시스템 최적화모형이다. 세부적인 기술 특성자료나 제화의 생산공정에 관련되는 기초 자료로부터 출발하여 주어진 문제해결을 시도하는 상향식

(bottom-up) 분석모형이다. 국가나 특정지역에 대한 에너지시스템을 분석함에 주 목적이 있으며 특히 시스템을 구성하는 기술평가에 활용되고 있다. 1980년 국제에너지기구(International Energy Agency)의 주관 하에 개발되었으며 그 동안 유럽, 미국 등을 중심으로 꾸준히 개발작업이 진행되어 왔다. MARKAL 모형을 이용, 지구 온난화를 유발하는 온실가스 감축 정책을 논의하기 위한 공식적인 국제적 논의 기구가 현재 국제에너지기구의 주관하에 운영 중에 있다[8-10,12].

MARKAL 모형에서 전력부문의 부하영역 구분은 계절 3개, 각 계절 당 낮/밤 각 2개로 6개 영역, 열공급 부문은 계절 3개, 나머지 부문은 단 하나의 부하패턴으로 나타낼 수 있다. 즉 시간에 따른 부하의 변동이 없는 것으로 본다. 또한 온실가스 발생과 같은 환경제약에 있어서도 환경변수(Emission Variable)를 활용, 이를 통해 목적함수에 탄소세 등 환경비용을 직접 반영하고 있다. 이는 환경제약을 직접 적용하는 환경변수가 없으며, 환경제약은 모델 운용자가 설정한 제약식 또는 변동비용에 탄소세를 반영하는 형태로 간접적으로만 적용할 수 있는 다른 모형과 비교되는 부분이다.

MARKAL 모형의 경우 오랜 기간 동안의 운용 및 보안을 통해 사용자 인터페이스는 매우 우수한 것으로 평가되고 있다. MARKAL 모형은 기본적으로 GAMS (General Algebraic Modeling System)를 통해 구축한 모델이기 때문에 GAMS 내부의 상용 Solver를 사용하므로 실행시간이 수초 이내로 매우 우수한 능력을 갖고 있다.

## III. 기본전제 및 시나리오 설정

### 3.1. 기본 전제의 설정

분석에서 사용하는 기본 자료는 우리나라의 2017년까지의 전력수요 등을 예측한 정부의 『제2차 전력수급기본계획』 수립 시 활용된 입력 자료와 국내에

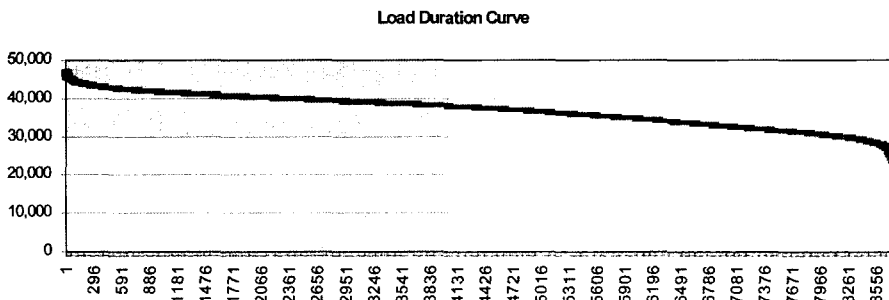


Fig. 1. 부하지속곡선(2003년 기준).

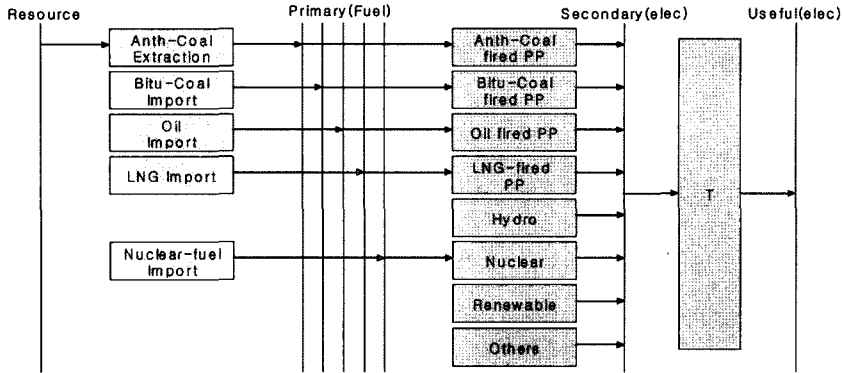


Fig. 2. 우리나라 전력시스템의 Reference Energy System.

서 입수가 곤란한 자료는 일부 해외자료를 이용하였다[3,4,6,7,11]. 본 연구에서는 분석기간을 2040년까지의 장기간으로 설정하였으므로 2017년 이후의 전력수요는 선진국인 미국, 유럽국가의 전력수요 변화추이를 고려하여 매년 1% 성장하는 것으로 가정하였다. 우리나라 전력시스템 흐름(연료원별 투입에서 기술별 전력 생산까지의 흐름 : Reference Energy System)은 Fig. 2와 같이 구성된다.

기본가정은 다음과 같이 설정하였다.

- 1) 분석 기간: 2004~2040년, 2년 주기, 19개의 Periods
- 2) 단위 : 에너지단위는 PJ(Peta joule), 전력은 MW, MWh로 표시. 환율은 1\$를 1,000원으로 가정
- 3) 할인율 : 7% (『제2차 전력수급기본계획』의 적용 할인율과 동일)
- 4) 에너지 자원 : 국내자원(무연탄, 신재생에너지), 수입자원(우라늄, 유연탄, 석유, 천연가스)
- 5) 기존 발전기술 및 설비 : 실제 전력시스템은 다양한 에너지원을 사용하는 발전기술로 구성되어 있고 같은 에너지를 사용하는 설비일지라도, 건설년도 및 해당 세부기술에 따라 그 특성(경제성자료 및 특성자료)이 다르다. 따라서 『전력수급 기본계획』에서는 특정 발전설비 각각을 하나의 기술로 보고 분석하나, 본 분석은 에너지원별로 기술을 하나로 통합하였다. 에너지원별 대표 기술은 각 에너지를 사용하는 설비 중 최신 설비의 특성자료를 이용하였으며 2003년 말의 각 에너지원별 발전설비 용량은 Table 1과 같다[6].

Table 1. 2003년말 발전설비 용량.

MW	원자력	유연탄	무연탄	석유	천연가스	양수	수력	소규모수력	DG	풍력	Biomass	소각로
용량	15715	14740	1191	4631	14518	2300	1531	45	1296	14	26	42
비율	28%	26%	2%	8%	26%	4%	3%	0.1%	2%	0.03%	0.05%	0.01%

6) 신규 발전기술(Candidate) : 분석에서 사용한 미래 신규 발전기술(Candidate, Option)은 『제2차 전력수급 기본계획』 수립시 신규설비로 적용한 원자력 1000 MW와 1400 MW, 유연탄 500 MW와 800 MW, 무연탄 200 MW, 석유 500 MW, 가스 450 MW, 양수 300 MW이며 기술적, 경제적 특성자료 또한 동일한 자료를 입력하였다. 그 외 지속가능 발전을 위한 대안기술(Option)로 풍력과 태양광을 신규 발전기술에 포함하였다.

7) 부하영역 : 전력생산과 소비의 특성(저장불가로 인하여 생산과 소비가 동시에 일어남)

상 부하를 정확하게 표현하는 것이 매우 중요하며 이는 적용한 부하패턴에 따라 설비구성 결과가 달라질 수 있음을 의미한다. 전원계획을 위한 모형인 WASP, EGEAS 등에서는 시간대별로 8,760개의 값을 입력하여 매우 정확한 부하패턴을 묘사하나, MARKAL의 경우 전체 에너지시스템 분석을 위한 모형이므로, 부하를 세분화하여 표현하지는 않는다. 그러나 본 연구에서는 전

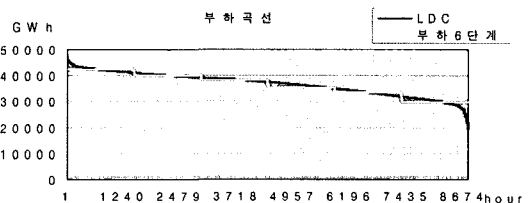


Fig. 3. MARKAL의 부하 패턴 표현.

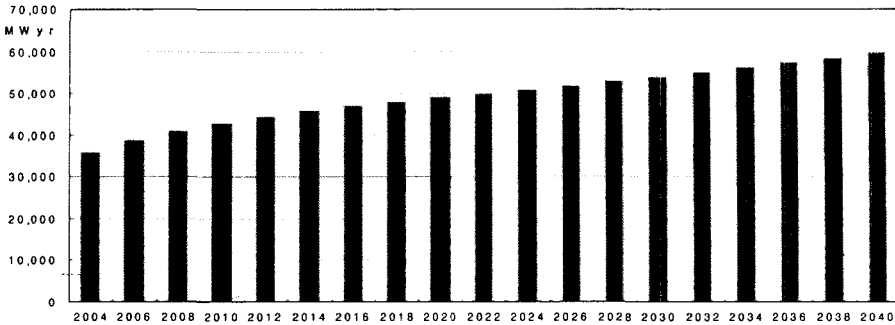


Fig. 4. 2040년까지의 전력수요.

력시스템만을 분석하므로 입력한 부하패턴이 결과에 영향을 미칠 수 있기 때문에 분석모형에서 요구하는 부하영역을 최대한 세분화하여 6개 구간으로 설정하였다. 각 모형에서의 부하표현은 Fig. 3과 같다.

8) 전력수요 : 2004년부터 2040년까지의 예측 수요는 Fig. 4와 같다. 2004년에서 2017년까지는 『제2차 전력수급기본계획』 시 사용한 수요예측 값을 사용하였으며, 2017년 이후에는 선진국인 미국/유럽의 부하성장 추이를 고려하여 매년 1% 성장하는 것으로 가정하였다.

**3.2. 시나리오의 설정**

분석모형에서 목적함수를 최적화 하는데 아무런 제약조건을 주지 않은 시나리오를 ‘Baseline’으로 여러 가지 현실적인 제약조건을 반영한 시나리오를 ‘S\_Baseline’으로 설정하였다. 이 ‘S\_Baseline’은 이산화탄소 저감잠재량 분석을 위한 기준시나리오(Reference Scenario)이다. 즉, ‘S\_Baseline’을 기준 시나리오로 하여 4개의 시나리오를 추가 구성함으로써 온실가스 배출과 관련한 각 시나리오별 영향을 분석하였다.

1) Baseline : 『제2차 전력수급기본 계획』을 반영

한 시나리오로써 어떠한 제약도 고려치 않은 시나리오(제약조건 無), 반영설비는 2003년말 기준 설비, 신규와 건설중 설비는 연료원별로 통합, 기존 설비는 발전소 발전기별로 반영.

2) S\_Baseline : 에너지안보 제약(특정설비의 발전 비중이 전체의 40% 이하)과 재무제약(유연탄, LNG 발전소는 1년 최대 4기 건설 가능, 원자력 발전소는 최대 2기 건설 가능)을 가한 현실적인 베이스라인 시나리오 임.

3) 온실가스 감축 시나리오(C\_011, C\_010, C\_009 : S\_Baseline에 각각 0.11 kg-C/ kWh, 0.10 kg-C/kWh, 0.09 kg-C/kWh의 CO<sub>2</sub> 배출량을 제약

4) CO2TAX30 : S\_Baseline에 CO<sub>2</sub> 가격 적용(CO<sub>2</sub> 톤당 US\$30 적용)

**3.3. 주요 입력자료**

2040년까지의 전력수요 및 필요 입력자료는 Table 2 및 Table 3과 같은 추정자료 및 실적자료를 사용하였다. 각 발전원(기술)의 건설비, 운영비와 같은 경제성 자료와 고장정지율, 소내소비율 등의 기술적 특성치 역시 국내 발전 현황자료를 이용하였다[3,5,6].

Table 2. 전력수요 예측.

구분	2004	2010	2016	2020	2028	2034	2040
PJ	1,123	1,348	1,484	1,545	1,673	1,776	1,885
MWyr	35,624	42,746	47,068	48,985	53,043	56,307	59,771

Table 3. 각 발전기술의 온실가스 배출계수.

구분	단위	원자력		유연탄		무연탄	석유	LNG	부생가스
	kw	100만	140만	50만	80만	20만	50만	45만	-
배출 계수	kg-C/kWh	-	-	0.221	0.209	0.232	0.183	0.101	0.101
	kt-C/PJ	-	-	61.3889	58.0556	64.4444	50.8333	28.0556	28.0556

#### IV. 분석 결과

##### 4.1. 발전기술별 발전량

Baseline 시나리오의 경우 두 모형 모두 신규 발전기술 중 유연탄 800 MW가 가장 경쟁력 있는 기술로 나타나고 있다. 한편 Baseline 시나리오에서 현실성을 갖춘 시나리오를 만들기 위해 에너지안보계약(특정 설비의 발전량이 전체 발전량의 40%를 넘지 못하게 하는 제약)과 재무계약(현실적으로 원자력발전소의 경우 한 해 최대 2기 건설가능, 유연탄, LNG, 석유발전소의 경우 한 해 최대 4기 건설가능)을 가한 S\_Baseline의 발전량 구성은 Fig. 5와 같다. Baseline과 같이 가장 경제성이 있는 유연탄 800 MW만 집중적으로 투입되는 것이 아니라 어느 정도 발전원간의 구성이 현실적인 결과로 도출되고 있음을 알 수 있다. 즉, 유연탄과 원자력이 주로 투입되고 LNG 발전도 증가함을 알 수 있다.

온실가스 감축 시나리오의 경우 전체 발전량은 원자력과 유연탄이 여전히 각각 40%를 차지하고 있으며 S\_Baseline과의 차이로는 이산화탄소배출이 상대적으로 많은 석유발전 대신 LNG 발전의 도입이 증가되고 있다. 이산화탄소배출이 없는 원자력이 추가 투입이 이루어지지 않는 이유는 에너지안보계약 때문이며 0.11 kg-C/kWh 제약 하에서 유연탄은 여전히 경쟁력 있는 발전원으로 전체발전량의 40%를 차지하고 있다. 전체 설비용량에서도 원자력과 유연탄의 설비용량은 S\_Baseline과 차이가 없으며 단지 석유설비가 상대적으로 이산화탄소 배출이 작은 LNG설비로 교체되고 있음을 알 수 있다(Fig. 6 참조).

0.09 kg-C/kWh 시나리오에서는 발전량 순위가 바뀌었으며, 원자력, LNG, 유연탄 순으로 발전을 하고 유연탄 발전량이 많이 감소한 것을 볼 수 있다. 전체 설비 구성에서도 0.09 kg-C/kWh 시나리오의 경우 분석기간 후반에는 두 모형 모두에서 유연탄 발전설비보다 LNG

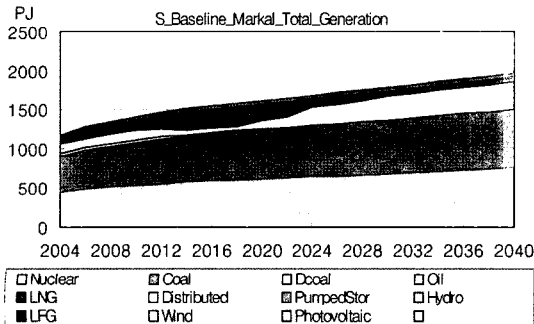


Fig. 5. S\_Baseline의 발전량구성.

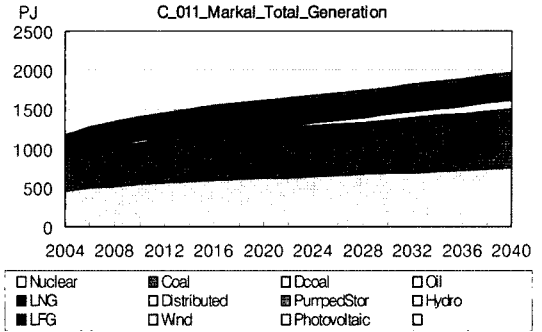


Fig. 6. C\_011 시나리오의 발전량.

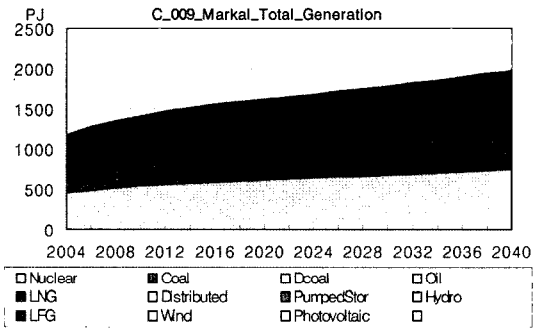


Fig. 7. C\_009 시나리오의 발전량.

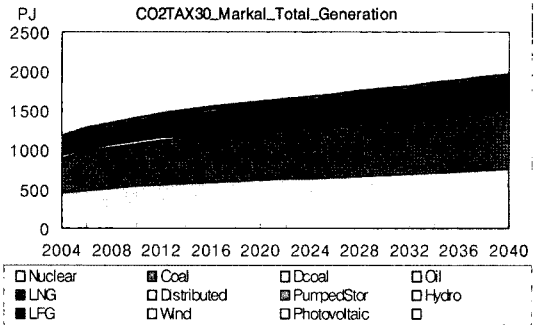


Fig. 8. CO2TAX30 시나리오의 발전량.

발전설비가 훨씬 많이 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. CO2TAX30 시나리오는 대체적으로 C\_011 시나리오와 C\_010 시나리오의 중간에 해당하는 결과를 보여주고 있다.

##### 4.2. 이산화탄소 배출량 비교

Baseline과 S\_Baseline의 이산화탄소배출량을 살펴보면 Baseline은 가장 경쟁력 있는 유연탄 800 MW의 많은 투입으로 인해 분석기간 후반으로 갈수록 이산화탄

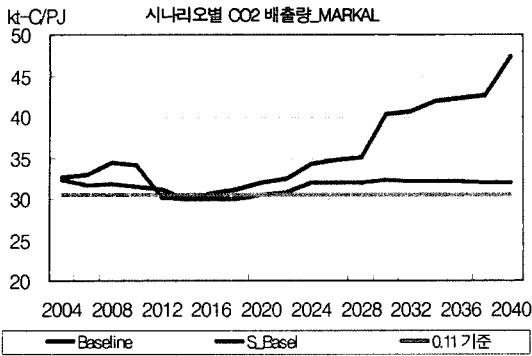


Fig. 9. Baseline과 S\_Baseline의 이산화탄소 배출량.

소배출량이 늘어나고 있는 추세를 보이고 있다.

『제2차 전력수급기본계획』의 자료를 기초로 작성한 S\_Baseline은 기본계획에서 기준으로 하고 있는 0.11 kg-C/kWh 기준선에 근사하게 접근하고 있다. 이는 두 모형의 결과 모두 『제2차 전력수급기본계획』의 이산화탄소 배출기준을 어느 정도 만족시키고 있다는 것을 보여주고 있다.

각 탄소시나리오의 이산화탄소 배출량을 비교하면 Fig. 9와 같다. 점선으로 표시한 부분이 각각 0.11, 0.10, 0.09 kg-C/kWh의 기준선인데 두 모형 모두 세 가지 제약조건을 적절히 반영한 결과를 나타내고 있다. 기준선과 실 배출량선의 차이는 기준선의 경우 최종수요당 단위배출량을 기준으로 한 선인데 반해, 실 배출량선은 송배전 손실을 고려치 않은 발전단을 기준으로 한 것이다. 30%의 탄소세 제약조건을 가한 CO2TAX30 시나리오의 이산화탄소 배출량은 0.11 kg-C/kWh 기준선과 0.10 kg-C/kWh 기준선 사이의 배출량을 나타내고 있으며, 후반부로 갈수록 배출원의 신규증설이 감소되어 단위당 배출량이 점차 감소하고 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 우리나라 전력산업 부문에서의 LNG 발전을 비롯한 전원(발전기술)의 조합에 따른 온실가스 감축효과를 살펴보았다. 이를 위하여 우선 이산화탄소 감축량 산정에 필수적인 기준시나리오의 설정과 향후 적용될 것으로 보이는 현실적 온실가스 감축 정책들을 시나리오에 반영, 그 영향을 도출하였다. 전력산업에 온실가스 감축 목표가 설정된다면 다양한 노력과 수단을 동원될 수 있다. 이 가운데 가장 핵심적 내용은 발전기술의 조합에 있다. 본 연구는 이러한 의미에서 그동안 이 부분에 대한 연구와 평가작업이 이루어지지 못

한 점을 감안, 전 세계적으로 온실가스 감축효과 분석에 대한 논의의 주요한 분석도구인 MARKAL 모형을 적용해 보았다는데 의미가 있다고 보겠다.

LNG 발전이 기후변화협약에 대비하기 위한 발전부문의 온실가스 감축효과는 분석결과에성화 같이 명백하게 나타나고 있다. 우리의 LNG 발전 비중은 EU, 일본과 같이 온실가스 감축 의무부담을 갖는 국가에 비해 상대적으로 낮다. 아직은 전체 발전설비 구성에서 첨두부하용으로 이용되고 있으나 앞으로 지구온실가스 배출에 대한 규제가 강화되는 경우 그 중요성은 점차 증가될 것이 분명하다. 사실 일본 등의 국가에서는 이미 LNG 발전이 중간부하용으로 확대되고 있다. 향후 본 연구의 보완 방향은 우선 입력자료의 확대 및 개선이다. 발전 신기술을 보다 광범위하게 적용시킬 필요도 있다. 또한 전력부문 온실가스 감축잠재량 산정을 위한 세부 시나리오 개발도 필요한 부분이다.

## 참고문헌

- [1] 건국대학교, “온실가스 저감분석모형 의 생변수 조사”, (2005)
- [2] 대한민국정부, “기후변화협약 제2차 국가보고서”, (2002)
- [3] 산업자원부, “에너지기술 DB”, (2005)
- [4] 산업자원부, “제2차 전력수급기본계획”, (2004)
- [5] 에너지관리공단, “에너지부문 온실가스 배출 감축잠재력 시범분석”, (2005)
- [6] 한국전력거래소, “2005년 발전설비현황”, (2005)
- [7] Barreto, L., “Technological Learning in Energy Optimisation Models and the Deployment of Emerging Technologies”. Ph.D. Thesis No 14151, Swiss Federal University, (2001)
- [8] ETSAP, “Documentation for the MARKAL Family of Models”, (2004)
- [9] International Energy Agency, “An Initial View on Methodologies for Emission Baselines : Electricity Generation Case Study”, (2000)
- [10] International Energy Agency, “Practical Baseline Recommendations for Greenhouse Gas Mitigation Projects in the Electricity Power Sector”, (2002)
- [11] Jussi Makela, “Development of an Energy System Model of the Nordic Electricity Production System”, Master Thesis. Helsinki University of Technology, (2000)
- [12] Noble-Soft Systems Pty Ltd., “User Manual Answer MARKAL, an Energy Policy Optimization Tool”, Version 5, (2003)