

## ENPEP을 이용한 국내 이산화탄소 배출저감 시나리오 분석

### Study on CO<sub>2</sub> Emission Reduction using ENPEP in Korea

문기환, 김승수, 송기동, 임채영  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

우리나라의 장기에너지 전망을 기준으로 전력부문에 대한 이산화탄소 저감방안에 대한 효과를 ENPEP을 이용하여 분석하였다. 본 연구에서 고려한 두 개의 시나리오는 '연료대체안'과 '탄소세안'이다. '연료대체안'은 기후변화협약 1차 공약기간이 시작되는 2008년을 기점으로 '기준안'에서 고려된 우리나라의 전원계획 상에 계획된 신규 원자력발전소 대신에 유연탄화력 발전소로 대체하는 경우를 말한다. '탄소세안'은 '기준안'을 근간으로 하여 2008년부터 유연탄화력발전소에 \$50/CO<sub>2</sub>-ton의 탄소세를 부과하는 경우를 말한다. 분석결과에 의하면 '연료대체안'은 2008년에 187.6백만 C-ton을 배출하여 '기준안'보다 2% 정도 더 배출하는 것으로 분석되었으며, '탄소세안'은 '기준안'에 비해 거의 변화가 없는 0.1%만이 절감된 것으로 분석되었다. 2020년에 이산화탄소 배출 수준은 '기준안'에 비해 '연료대체안'은 11.5% 더 많이 배출하지만 '탄소세안'은 단지 0.8%만이 절감되는 것으로 나타났다. 2000년-2020년 동안 이산화탄소 배출량의 연간 증가율은 '기준안', '연료대체안', '탄소세안' 각각에 대해 1.45%, 2.24%, 1.39%로 나타났는데 이는 원자력에 의한 이산화탄소배출량 증가억제 효과가 큼을 알 수 있게 해준다.

#### Abstract

ENPEP was used to analyze the role of nuclear power in mitigating carbon emission in power generation sector. In this study, base scenario reflects business as usual case in Korea. Additional two scenarios were established. One stands for fuel switch scenario, where nuclear power plants scheduled to be introduced after 2008 were assumed to be replaced by Coal Power Plant, the other one is established to see the impact of carbon tax. In this scenario carbon tax(\$50/ton-CO<sub>2</sub>) is imposed on coal power plants from 2008. It is resulted that fuel switch from nuclear to coal in power generation sector has a great effect on CO<sub>2</sub> emission, while carbon tax imposition makes a slight contribution to the reduction of CO<sub>2</sub> emission. These findings mean that the role of nuclear power in Korea is important in view of the GHG mitigation.

#### 1. ENPEP 개관<sup>1)</sup>

1) IAEA, IAEA Regional(RCA) Training Course on Use of Agency's Methodologies and Tools in

1970년대 두 차례의 석유파동을 겪으면서 에너지 문제는 각 국가는 물론 국제적인 주된 관심 사항이 되었다. 이로 인해 에너지 시스템 평가를 통한 합리적인 에너지계획의 필요성에 대한 공감대가 이루어졌으며, 분석 도구의 개발이 이루어지기 시작했다.

1984년에 미국 에너지청(Department of Energy; DOE)에서는 알곤국립연구소(Argonne National Laboratory; ANL)에 의뢰하여 개발도상국에서 사용할 수 있도록 개인 컴퓨터용 에너지 분석 도구인 ENPEP(ENergy and Power Evaluation Program)을 개발하기 시작하였다. 1987년에는 국제원자력기구(IAEA)의 후원 하에 개발된 DOS용 ENPEP의 현장이용이 시험적으로 이루어지기 시작했으며, 1989년에는 IAEA, 세계은행, DOE에 의해 각 국에 배포되었다. 현재 이용되고 있는 Window용 ENPEP은 사용자가 종합적인 에너지 모형의 이해를 도모하기 위해 그림형태가 지원될 수 있도록 하였기 때문에 DOS용에 비해 상당한 변화가 이루어졌다. 아래의 그림-1은 Window용 ENPEP의 전체 구조<sup>2)</sup>를 나타내는데 BALANCE 모듈만이 현재 이용 가능하다.

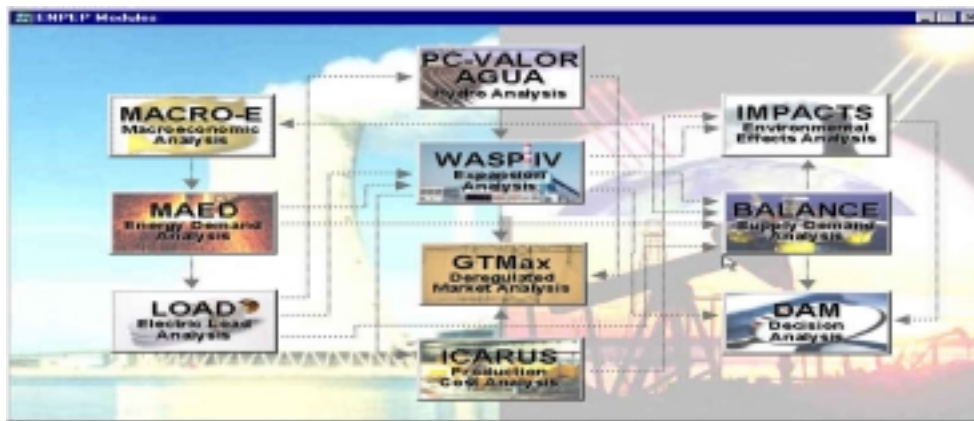


그림-1 Window용 ENPEP의 전체 구조

ENPEP의 BALANCE 모듈을 실행하기 위해서는 먼저 에너지 네트워크를 작성해야 하는데 에너지 네트워크

*Greenhouse Gas Abatement Studies*, 2001의 교육자료 참조.

2) 전체 구조를 구성하는 Module의 기능은 다음과 같으며, 각 Module은 독립적으로 또는 다른 Module과 연계되어 이용될 수 있다.

- MACRO-E 모듈 : MAED에서 이용될 계량경제 예측 자료 생산
- MAED 모듈 : 사회경제 및 기술개발 시나리오별로 에너지 수요 예측. 필요할 경우 WASP IV에서 이용될 수 있도록 전력수요 예측 수행
- LOAD 모듈 : 전력수요의 형태와 같은 전력수요 예측 정보 생산
- PC-VALORAGUA 모듈 : 전력시스템 중에서 수력발전의 비중이 높은 전력시스템에서의 발전원별 최적운용계획 수립
- WASP IV 모듈 : 사용자가 설정한 제약조건(신뢰도 목표, 연간 신규 발전소 투입 기수, 환경오염 물질 배출량, 특정 연료의 연간 이용량, 특정발전소의 연간 에너지 생산량 등) 하에서 전력수요를 충족시키는 최소비용의 전력공급 계획을 수립
- GTMax 모듈 : 탈규제화(Deregulated) 전력시장에서 에너지와 송전 한계 내에서 발전과 송전을 최대로 하는 해의 도출
- ICARUS 모듈 : 전력시스템의 생산비용과 신뢰도 계산
- IMPACTS 모듈 : 에너지시스템의 환경영향 및 환경규제 분석 수행
- BALANCE 모듈 : 연구기간 동안의 에너지 수급의 균형 도출
- DAM 모듈 : 에너지 관련 Module이 아니며, 비용과 환경오염물질 배출량 등과 같은 다기준 의사결정 방법(Multi-criteria decision making)임

는 그림-2와 같은 각 node의 연결을 통해 만들어진다. 이들 각 node에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다. 「수요(Demand) node」는 연료별 최종수요 또는 공정열이나 직접열과 같은 유효에너지 형태의 최종수요를 나타낸다. 「변환공정(Conversion Processes) node」는 연료오일을 열로 변환하는 보일러와 같이 어떤 자원이나 연료 또는 제품을 다른 형태로 변환하는 것을 묘사한다. 이 변환과정에는 하나의 input과 하나의 output으로 구성되는 ‘Single Input/Output’ node, 석유정련과 같이 하나의 input을 통해 2개 이상의 제품이 output으로 나오는 ‘Multiple Output’ node, LPG를 보조연료로 이용하는 태양열 히터와 같이 두 개 이상의 input을 통해 하나의 output인 열을 생산하는 ‘Multiple Input’ node, 그리고 ‘Transport’ node 등으로 구성되어 있다. 「자원공정(Resource Processes) node」는 국내 또는 수입을 통한 원유, 석유, 천연가스 등의 생산을 묘사하는 ‘Depletable Resource node’, 바이오매스와 태양에너지와 같은 신재생 자원의 생산을 묘사하는 ‘Renewable Resource’ node로 구성되어 있다. 「경제공정(Economic Processes) node」는 다양한 공급원에서 연료나 에너지 형태를 선정하는 ‘Decision/Allocation’ node, 그리고 세금, 보조금 등과 같은 정부의 가격 규제와 가격정책을 묘사하는 ‘Pricing’ node로 구성되어 있다. 마지막으로 「전력부문에서 이용되는 node」로서, 전기생산 설비들의 부하와 출력 등을 묘사하는 ‘Electricity Dispatch’ node와 개별 화석연료발전소와 원자력발전소를 묘사하는 ‘Thermal Unit’ node, 그리고 수력발전소를 묘사하는 ‘Hydro Unit’ node 등으로 구성되어 있다.

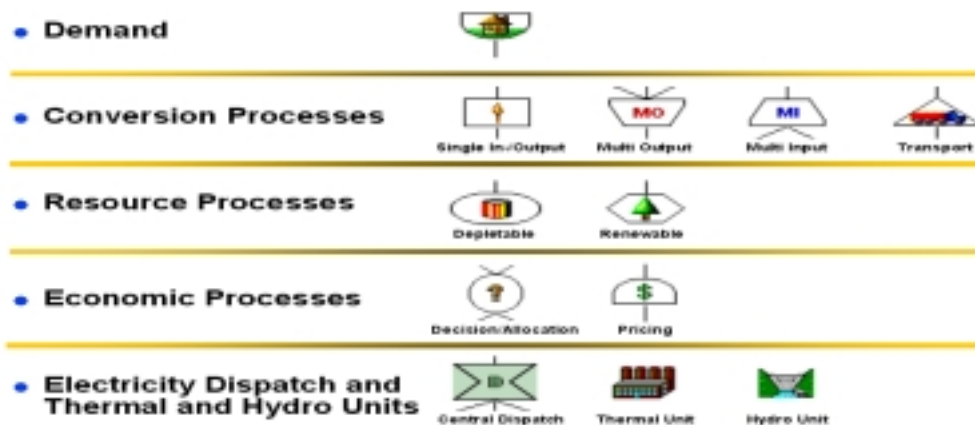


그림-2 BALANCE에 이용되는 Nodes

한편 ENPEP의 BALANCE 모듈은 앞에서 설명한 node들을 이용하여 1차 에너지에서 최종에너지에 이르기까지의 전 과정에 대한 에너지 흐름을 표현한 에너지 네트워크를 구성하게 된다. 그리고 나서 에너지 네트워크에 포함된 모든 에너지 공급원과 에너지 수요 등을 고려하여 그림-3과 같은 수요-공급 곡선의 균형점을 찾게 된다. 모든 관련 방정식과 부등식을 만족하는 가격과 양이 결정이 되면 균형점에 도달하게 된다.



그림-3 BALANCE의 에너지수급 분석 방법

## 2. 국내 에너지 네트워크 구성

ENPEP를 이용하여 에너지 또는 전력부문의 분석을 수행하기 위해서는 먼저 에너지 네트워크를 구성해야 한다. 본 연구에서는 우리나라의 에너지 네트워크를 1차 에너지 부문, 최종에너지 부문, 전환 부문 등 세 부문으로 나누었다.<sup>3)</sup> 먼저 1차 에너지 부문에는 석탄, 석유, 가스, 기타 등이 포함되도록 했으며, 전환 부문에는 전력 부문, 도시가스 생산과정, 석유정제 과정이, 그리고 최종에너지 부문에는 산업, 가정·상업, 수송, 수출 부문이 포함되는 것으로 하였다. 원자력의 경우는 전력부문에 포함되는 것으로 하였다. 이와 같은 국내의 에너지 네트워크는 그림-4와 같다.

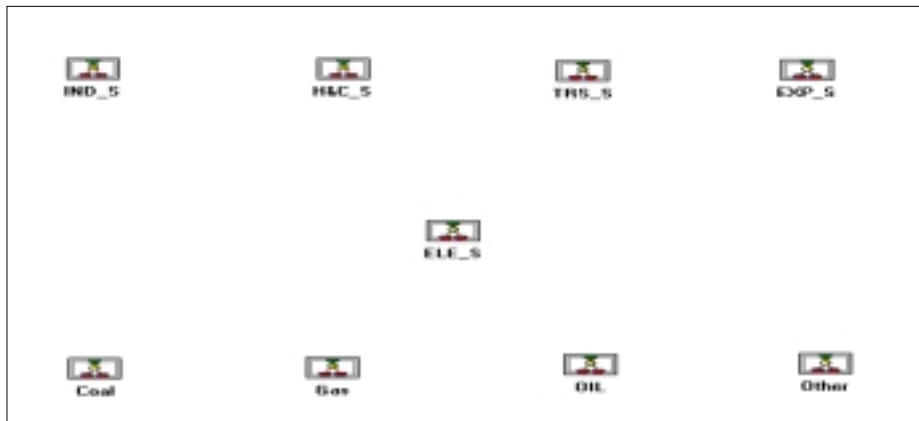


그림-4 국내 에너지 네트워크

## 3. 부문별 에너지 네트워크

### 가. 1차 에너지 부문

#### (1) 석탄부문

석탄 부문의 1차 에너지는 코크(COKE), 국내 및 수입 무연탄(ANTdm, ANTim), 유연탄(SCOAL) 등으로 구성되어 있다. 무연탄과 유연탄은 전력부문과 최종에너지의 산업, 가정·상업 부문에서 이용하고 있고, 코크스는 산업부문에서 이용하는 것으로 단순화하였다. 이와 같은 에너지 흐름은 그림-5에 나타내었다.



그림-5 석탄부문의 에너지 네트워크

3) 본 연구에서의 에너지 네트워크 구성은 1998년 한국에너지기술연구소에서 작성한 “지구환경을 고려한 에너지자원 기술정책 방향(KIER-981344)” 보고서를 참고로 하였으며, 분석을 위해 이용된 자료는 기준년도인 2000년도 자료를 이용하였다.

(2) 석유부문

한국의 정유회사를 포함한 대부분의 정유회사들은 석유 정제과정을 통해 10개 이상의 석유제품을 생산하고 있다. 하지만 ENPEP의 Balance 모듈은 단지 6개의 석유제품까지만 반영할 수 있도록 되어 있기 때문에, 본 연구에서는 그림-6에서 보는 바와 같이 디젤, 가솔린, 등유, 중유(B-C유), LPG, 그리고 비연료유 등 6가지로 재분류하였다. 비연료유에는 나프타, 솔벤트, 아스팔트 등이 포함되어 있다. 석유 부문과 같이 multi-output node(하나의 input, 두 개 이상의 outputs)의 경우에는 모형의 특성상 제일 우선적으로 수요를 충족시켜야 하는 sizing link를 설정해야 하는데 여기에서는 6가지 제품 중 가장 비중이 큰 디젤을 선택하였다.

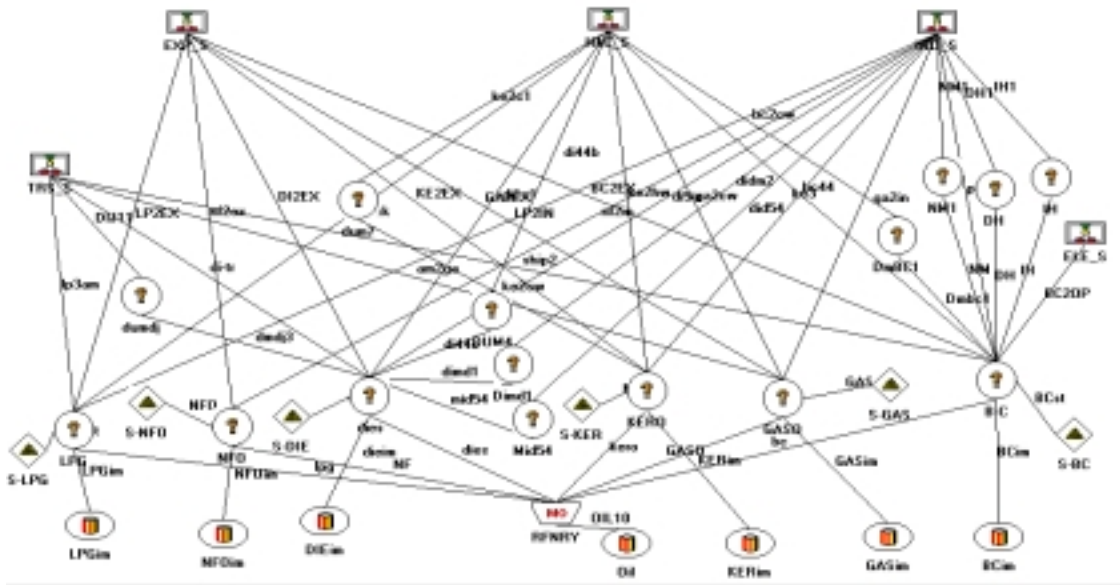


그림-6 석유부문의 에너지 네트워크

(3) LNG 부문

LNG는 그림-7에서 보는 바와 같이 전기생산을 위해서 이용될 뿐만 아니라 산업부문과 가정·상업 부문에서 도시가스 형태로 이용되는 것으로 모형을 구성하였다. 하지만 LNG에 의한 열 생산은 그 양이 적어 모형의 단순화를 위해 고려하지 않았다.



그림-7 LNG 부문의 에너지 네트워크

(4) 기타 부문

신탄 등으로 구성된 기타 부문은 그리 큰 비중을 차지하지 않으며 산업부문과 가정·상업부문에서 이용되는 것으로 하였으며 이는 그림-8과 같다.

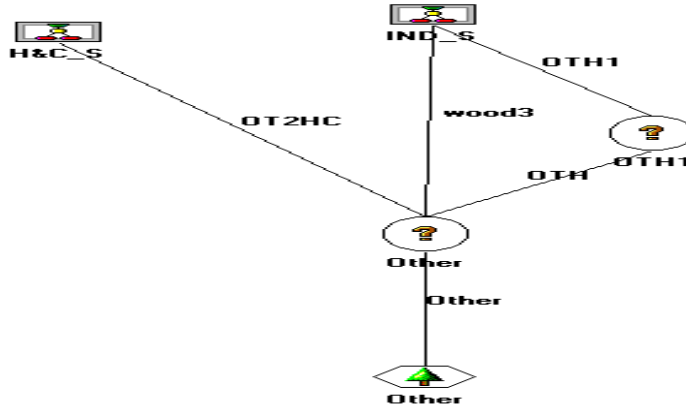


그림-8 기타 부문의 에너지 네트워크

나. 전력(전환)부문

국내 발전소는 그림-9와 같이 무연탄화력, 유연탄화력, 석유화력, 가스화력, 원자력, 그리고 수력(양수 포함) 등 6개 유형으로 분류하였으며, 여기에는 140개 이상의 발전소가 포함되어 있다.

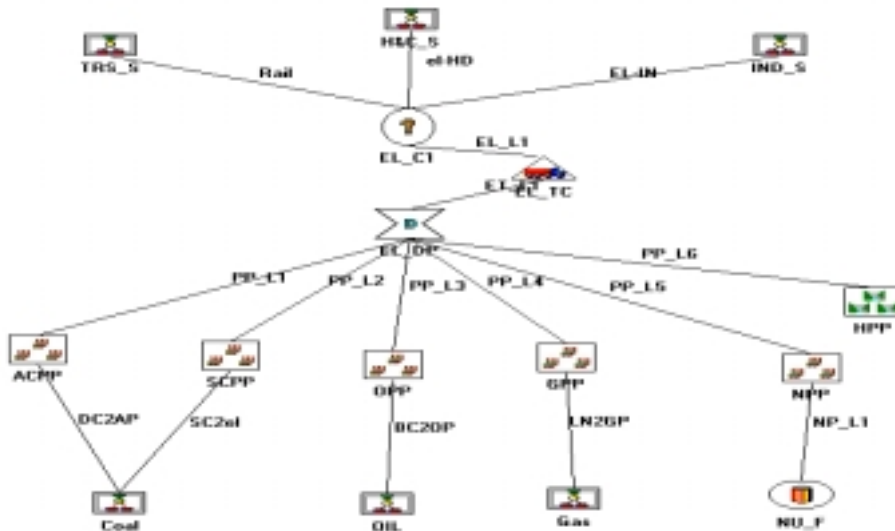


그림-9 전력부문 에너지 네트워크

다. 최종에너지 부문

(1) 산업부문

산업부문은 그림-10과 같이 철광, 비금속, 직접가열, 간접가열, 농기계, 비에너지, 석유화학, 기타 등으로 구성되는 것으로 하였다. 특히 산업부문의 전기에너지는 철광, 직접가열, 동력, 석유화학 부문에서 사용하는 것으로 모형을 구축하였다.



그림-10 산업부문 에너지 네트워크

(2) 가정·상업부문

가정상업 부문은 그림-11에서 보는 바와 같이 가정용 냉난방, 요리, 상업용 냉난방 등 세 부문과 전기를 이용하는 부문으로 구성되어 있다. 이 중에서 가정용 냉난방 수요가 가장 큰 비중을 차지한다.

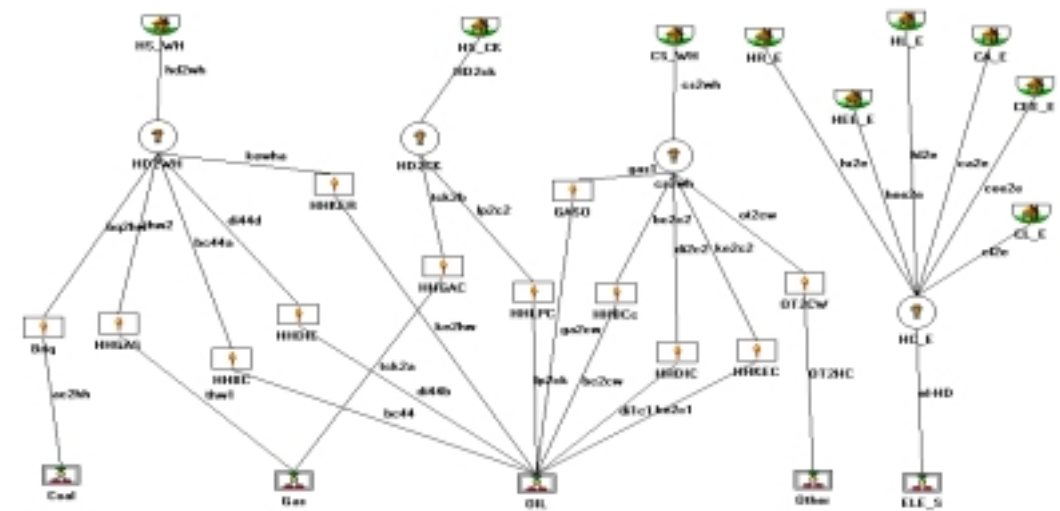


그림-11 가정상업부문 에너지 네트워크

(3) 수송부문

수송부문의 최종에너지는 그림-12와 같이 버스, 자동차, 배, 기차 등 석유를 사용하는 부문과 전기를 이용하는 지하철 수요 부문으로 구성되는 것으로 하였다. 석유는 디젤과 가솔린이 대부분의 공급을 차지한다.



그림-12 수송부문 에너지 네트워크

(4) 수출부문

우리나라는 거의 대부분의 에너지를 수입하고 있으며 석유도 예외는 아니다. 하지만 석유제품의 경우는 매년 일정 부문 수출을 하고 있기 때문에 모형에 반영하였다. 그림-13은 수출부문의 에너지 네트워크이다.

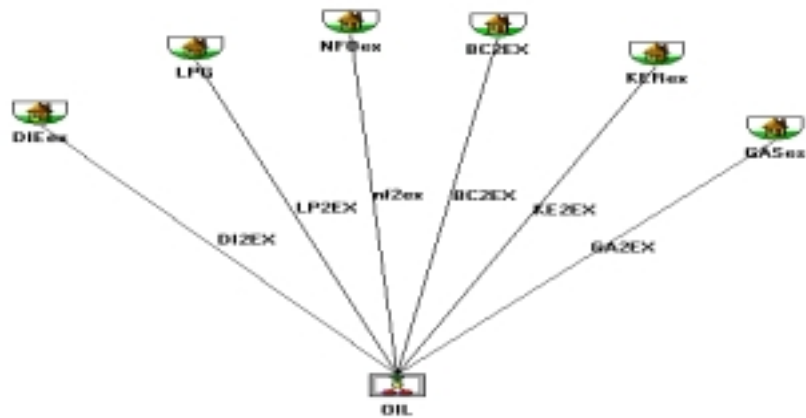


그림-13 수출부문 에너지 네트워크



#### 4. 기준안 분석4)

##### 가. 에너지 수요5)

1차에너지 수요는 표-1에서 보는 바와 같이 2000년 192.1백만TOE에서 2020년 324.4백만 TOE로 연평균 2.7% 증가할 것으로 예상된다. 이와 같은 증가율은 과거 수십년 동안 연평균 7% 이상의 증가율을 기록하여 매 10년마다 2배 이상의 증가를 보인 것에 비하면 상당히 완만한 증가를 기록할 것으로 예상된다. 무엇보다도 이와 같은 현상은 완만한 경제성장과 저에너지 소비형 산업의 꾸준한 증가가 그 주요 원인이다.

표-1 우리나라의 1차에너지 수요 전망

	2000	2005	2010	2015	2020	연간 증가율
1차에너지(백만TOE)	192.1	231.6	296.4	307.1	324.4	2.7%

석유 수요는 2000년 100.3백만TOE에서 2020년 154.4백만TOE로 다른 연료원에 비해 가장 낮은 연평균 2.2%의 증가가 예상된다. 이로 인해 전체에서 차지하는 비중 역시 2000년 52.2%에서 2020년 47.6%로 감소하지만 여전히 가장 큰 비중을 차지하여 중요한 에너지원 역할을 할 전망이다. LNG는 석탄과 석유에 비해 환경 오염물질을 적게 배출하는 특성으로 그 수요가 연평균 3.8%로 상당한 증가가 예상된다. 원자력 역시 지속적으로 상당한 역할을 할 것으로 예상된다. 이는 표-2에 나타내었다.

최종에너지 수요는 표-3과 같이 2000년 150.1백만TOE에서 2020년 258.3백만TOE로 연평균 2.7% 증가할 것으로 예상된다. 산업부문은 2000년 55.9%에서 2020년 48.9%로 그 비중이 감소하지만 가장 에너지 소비를 많이 하는 부문으로 남아 있을 전망이다. 수송부문과 가정, 상업부문은 자동차와 전기수요의 증가 등으로 인해 산업부문에 비해 상대적으로 높은 증가율을 기록할 것으로 전망된다.

---

4) 기준안을 위한 1차에너지와 최종에너지 관련 실적자료는 「에너지 통계연보(2002년)」와 에너지경제 연구원의 DB를 활용하였다. 예측 자료의 경우는 산업자원부의 「제2차 국가에너지기본계획(2002)」을 참고로 하였으나 모형의 특성상 정확하게 미래의 예측치를 반영할 수가 없기 때문에 실제 정부의 계획치와는 차이가 남을 밝혀둔다.

5) 에너지 수요 전망은 2002년에 발표된 “산업자원부의 제2차 국가 에너지 기본계획”을 참고로 하였으나, BALANCE 모듈은 자체적으로 에너지 수급 균형점을 찾아가는 특성 때문에 본 연구에서 도출된 자료는 정부 발표자료와 정확히 일치하지는 않는다.

표-2 우리나라의 연료별 1차에너지 수요 전망

(단위 : 백만 TOE, %)

	2000	2005	2010	2015	2020	연간 증가율
석탄	42.4 (22.1)	46.9 (20.2)	57.7 (21.4)	61.9 (20.8)	67.0 (20.7)	2.3%
석유	100.3 (52.2)	120.4 (52.0)	135.9 (50.0)	146.2 (49.0)	154.4 (47.6)	2.2%
LNG	8.9 (9.9)	29.6 (12.8)	32.9 (12.2)	38.0 (12.7)	39.9 (12.3)	3.8%
원자력	27.2 (14.2)	30.9 (13.3)	38.6 (14.3)	47.3 (15.8)	57.7 (17.8)	3.8%
수력 및 기타	3.2 (1.7)	3.8 (1.6)	4.4 (1.6)	4.9 (1.7)	5.4 (1.7)	2.7%
계	192.1 (100.0)	231.6 (100.0)	269.5 (100.0)	298.4 (100.0)	324.4 (100.0)	2.7%

주) 괄호안은 연도별 비중을 의미한다

표-3 우리나라의 최종에너지 수요 전망

(단위 : 백만 TOE, %)

	2000	2005	2010	2015	2020	연간 증가율
산업부문	83.9 (55.9)	96.6 (52.0)	109.2 (50.1)	117.9 (49.2)	126.4 (48.9)	2.1%
가정, 상업부문	36.4 (24.2)	47.4 (25.5)	58.3 (26.8)	65.5 (27.3)	70.9 (27.5)	3.4%
수송부문	29.9 (19.9)	41.9 (22.5)	50.5 (23.2)	56.3 (23.5)	60.9 (23.6)	3.6%
계	150.1 (100.0)	185.9 (100.0)	218.0 (100.0)	239.7 (100.0)	258.3 (100.0)	2.7%

주) 괄호안은 연도별 비중을 의미한다

에너지 이용에 따른 이산화탄소 배출량은 2020년에 219.4백만 탄소톤으로 2000년의 134백만 탄소톤에 비해 연평균 2.5% 증가할 것으로 예상된다. 이와 같은 전망치는 이산화탄소 배출 저감을 위한 규제요건이 고려되지 않은 것이다. 표-4의 결과<sup>6)</sup>에서도 나타난 바와 같이 수송부문이 가장 큰 증가율을 보일 것으로 예상되며, 가정 및 상업부문은 전기수요가 차지하는 비중의 증가로 인해 상대적으로 낮은 이산화탄소 증가율을 기록할 전망이다.

6) 이산화탄소 배출량은 연료사용량과 IPCC(Inter-Governmental Panel on Climate Change)에서 제시한 연료사용량당 이산화탄소 배출 계수를 이용하여 계산된다.

표-4 우리나라의 부문별 이산화탄소 배출 전망

(단위 : 백만 탄소톤, %)

	2000	2010	2020	연간 증가율
전력부문	30.6 (22.8%)	45.9 (23.9%)	47.1 (21.5%)	2.2%
산업부문	20.9 (15.6%)	31.6 (16.4%)	38.3 (17.5%)	3.1%
가정, 상업부문	59.0 (44.1%)	74.9 (39.0%)	86.1 (39.2%)	1.9%
수송부문	23.5 (17.5%)	39.6 (20.7%)	47.9 (21.8%)	3.6%
계	134.0 (100.0%)	192.0 (100.0%)	219.4 (100.0%)	2.5%

주) 괄호안은 연도별 비중을 의미한다

#### 5. 이산화탄소 배출저감 시나리오 분석

본 연구에서는 앞에서 예측된 장기에너지 전망을 기준으로 전력부문의 이산화탄소 배출저감방안에 대한 효과를 ENPEP을 이용하여 분석하였다. 본 연구에서 고려한 두 개의 시나리오는 ‘연료대체안’과 ‘탄소세안’이다. ‘연료대체안’은 기후변화협약 1차 공약기간이 시작되는 2008년을 기점으로 ‘기준안’에서 우리나라의 전원계획 상에 고려된 신규 원자력발전소 대신에 유연탄화력 발전소로 대체하는 경우를 말한다. ‘탄소세안’은 ‘기준안’을 근간으로 하여 2008년부터 유연탄화력발전소에 IAEA 전문가의 권고치인 50\$/CO<sub>2</sub>-ton의 탄소세를 부과하는 경우를 말한다. 표-5의 분석결과<sup>7)</sup>에 의하면 ‘연료대체안’은 2008년에 187.6백만 C-ton을 배출하여 ‘기준안’보다 2% 정도 더 배출하는 것으로 분석되었으며, ‘탄소세안’은 ‘기준안’에 비해 거의 변화가 없는 0.1%만이 절감된 것으로 분석되었다. 2020년에 이산화탄소배출 수준은 ‘기준안’에 비해 ‘연료대체안’은 11.5% 더 많이 배출하지만 ‘탄소세안’은 단지 0.8%만이 절감되는 것으로 나타났다. 2000년-2020년 동안 이산화탄소 배출량의 연간 증가율은 ‘기준안’, ‘연료대체안’, ‘탄소세안’ 각각에 대해 1.45%, 2.24%, 1.39%로 나타났는데 이는 원자력에 의한 이산화탄소배출량 증가억제 효과가 큼을 알 수 있게 해준다.

7) ‘연료대체안’은 원자력발전소를 석탄발전소로 대체하기 때문에 석탄의 사용량이 증가하게 되고, 이에 따라 이산화탄소 배출량도 증가하게 된다. ‘탄소세안’은 석탄발전소에 탄소세를 부과하기 때문에 석탄의 가격이 상승되는 효과가 있어 연료의 대체가 일어나게 되고, 이에 따라 이산화탄소 배출량은 감소하게 된다.

표-5 우리나라의 시나리오별 이산화탄소 배출 전망

(단위 : 백만 탄소톤)

	2008	2012	2015	2018	2020	연간증가율
기준안	184.7 (100)	199.1 (100)	206.8 (100)	214.7 (100)	219.4 (100)	1.45%
연료대체안	187.6 (101.6)	211.5 (106.2)	223.4 (108.0)	236.5 (110.2)	244.7 (111.5)	2.24%
탄소세안	184.6 (99.9)	197.6 (99.3)	205.6 (99.4)	213.1 (99.3)	217.8 (99.2)	1.39%

주) 괄호안의 수치는 기준안을 100으로 하였을 경우의 상대적인 수치를 의미한다.

## 6. 결론

1997년 교토의정서가 채택된 이후에 지구온실가스 중 가장 큰 영향을 끼치는 이산화탄소를 절감시키기 위한 다양한 방법들이 강구되고 있다. 그 중에서 본 연구에서는 전력부문을 대상으로 원자력을 석탄화력으로 대체하는 방안과 탄소세를 도입하는 방안에 대한 이산화탄소를 절감 정도를 분석하였다. 분석결과에 의하면 탄소세를 도입하는 것보다는 원자력에 의한 이산화탄소 감축효과가 더 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 분석을 통해서 원자력은 향후 기후변화협약에 의해 감축의무를 지게 될 경우 상당한 감축효과로 인해 그 역할이 기대된다. 또한 ENPEP은 이와 같은 분석을 수행할 수 있는 유용한 도구로서 그 활용이 기대된다.

## 참고문헌

IAEA, *IAEA Regional(RCA) Training Course on Use of Agency's Methodologies and Tools in Greenhouse Gas Abatement Studies*, 2001의 교육자료 참조.

산업자원부, “제2차 국가 에너지 기본계획”, 2002

에너지경제연구원, “에너지통계연보”, 2002

한국원자력연구소, “원자력 경제성 분석 연구”, KAERI/RR-2177/2001, 2001

한국에너지기술연구소, “지구환경을 고려한 에너지자원 기술정책 방향”, KIER-981344, 1998