

에너지기술평가모형을 이용한 이산화탄소 배출 감소 대안 분석에 관한 연구

김중욱, 홍종철, 최기련*

한국에너지기술연구소, 아주대학교*

A Study on Analysis of the CO₂ Emission Reduction Options using Energy Technology Assessment Model

Jongwook Kim, Jongchul Hong, Giryun Choi*

Korea Institute of Energy Research, Ajou University*

1. 서론

지구온난화 방지를 위한 온실가스 배출 감축 문제는 이제 선진국을 시작으로 국가별로 강제적인 감축 의무가 부과되는 단계에 이르렀다. 이에 따라 세계적으로 이산화탄소를 주축으로하는 온실가스 배출량 감축 목표 달성과 감소 비용의 최소화에 많은 관심이 집중되고 있다. 단순한 온실가스 배출량 감소 정책은 에너지 사용의 감소 제약으로 이어질 수 있으며, 이는 복지의 후퇴나 경제성장의 감소와 같은 부정적인 결과를 나타낼 수 있다. 따라서 복지와 경제성장에 대한 영향을 최소화하고 에너지시스템 비용 역시 최소화 할 수 있는 온실가스 감소 대안에 대한 다양한 검토가 필요하며, 현재 에너지 사용기술의 효율개선, 에너지절약기술의 채택과 온실가스를 많이 배출하는 연료로부터 신재생, 가스와 같은 저배출 연료로의 대체 등이 검토되고 있다.

본 논문은 국제에너지기구(IEA)에서 개발하여, 현재 세계적으로 온실가스 배출 감축을 위한 기술 및 정책 대안 분석에 널리 활용되고 있는 에너지기술평가모형인 MARKAL(MARKet ALlocation)모형의 이산화탄소 감축 대안 분석에의 적용 사례를 다루고 있으며, 이를 통하여 동 분석 방법의 다양한 온실가스 배출 감축 대안 수립에 있어서 유용성을 검토해 보고자 한다.

2. 에너지기술평가모형

본 연구에서는 우리나라의 이산화탄소 배출 감축 대안 분석을 위하여 1995년을 기준으로 우리나라 에너지시스템을 분석하고, 이를 토대로 에너지기술평가모형(K-MARKAL)을 설계 정의 하였다. K-MARKAL은 기존의 MARKAL 모형에 우리나라 에너지시스템을 적용하여 개발한 것이다. 일반적으로 MARKAL모형의 가장 두드러진 특징은 모형이 일정하게 설계된 구조와 단순한 데이터 입력 형식을 제공하고 있지 않다는 점이다. 평가하고자 하는 모든 시스템은 사용자에게 의해 설계 되어야하며, 기술과 비용에 관한 입력 자료의 작성 역시 사용자의 영역에 속한다. 이러한 특징에 따라 각 적용분야 및 방법에 따라 고유의 응용모형이 생성되며, K-MARKAL 역시 우리나라의 경우를 적용한 MARKAL의 응용 모형 중의 하나이다.

K-MARKAL은 또한 기존의 타 에너지모형은 물론 전통적인 MARKAL모형의 적용방법과는 달리 부분적으로 재료흐름분석(Material Flow Analysis, MFA)에 기초를 둔 에너지-재료 통합 분석 기법을 채택 하였다. 이는 재료의 전체 생명주

기(Life Cycle)를 고려하기 위한 것이며, 에너지와 기술은 제품(재료)를 생산하기 위한 중간 투입 요소로 고려되는 개념이다. 이 방법은 산업의 부가가치, 경제성장 등의 변수를 고려하여 전망된 특정부문의 에너지수요를 바탕으로 기술의 경쟁력과 연료의 구성등을 평가하는 전통적인 기술평가 방법이 갖고있는 불확실성을 줄이기 위한 것으로써, 철강, 석유화학, 시멘트와 같이 대규모 재료의 흐름을 포함하고 있는 부문의 에너지 및 재료 흐름 분석, 기술평가에 아주 적절하다고 판단된다.

K-MARKAL의 구조는 크게 전환 및 가공, 수요부문으로 구분할 수 있으며, 수요부문은 산업, 가정.상업, 수송부문, 그리고 각 부문은 기술용도별로 다시 분류 된다(<표 1>). K-MARKAL은 1995년을 기준으로한 기존기술과 미래에 사용가능한 기술을 포함하고 있으며, 구체적으로는 33개의 발전기술, 100개의 공정기술, 160개의 수요기술 등 총 290여개의 에너지기술로 구성되어 있다.

<표 1> 기술평가모형의 구조

전환기술 분야	발전 유기 도시가스 연탄	
수요기술 분야	산업부문	철강 석유화학 금속 비금속 기계 직접 동력 가열
	가정.상업부문	가정- 난방, 급탕 - 냉방, 조명 - 조경 가정.상업- 취사 상업- 난방, 급탕 - 냉방, 조명 - 사무
	수송부문	항공 버스 승용차 트럭 선박

평가모형의 입력자료는 기술의 효율, 수명, 이용가능시기, 투자비, 사용에너지원의 종류 등으로 구성된다. 시스템으로부터의 이산화탄소 배출은 각 기술에 의해 사용되는 에너지 및 재료에 배출계수를 적용하여 산출하는 방법을 사용 하였으며, 재활용 및 재료에 의한 이산화탄소의 물입 역시 고려되도록 설계 하였다.

평가 기간은 1995년부터 2035년까지를 대상으로 하였으며, 5년을 하나의 주기로 하여 9개 시간주기(Time Period)를 분석하였다. 사용자에게 의해 외생적으로 주어지는 수요는 제품 및 에너지수요로 구성되었으며, 철강, 석유화학, 시멘트는 최종 제품 생산량을 수요로 하고, 기타는 각 기술용도별로 유효에너지(Useful Energy)를 산출하여 적용하였다. 유효에너지수요의 산출은 기준년도(1995년)의 최종에너지 사용과 기술의 효율을 고려하여 계산하였다. 기준년도 이후의 자료는 관련 에

너지수요 예측의 증가율을 참고하여 전망하였으며 부문별 기술용도에 따른 유효 에너지수요전망을 <표 2>에 나타내었다.

평가모형의 에너지 및 재료가격은 1995년 실적치를 기준으로 하였으며, 할인율은 10%를 적용 하였다. 에너지 및 재료의 이산화탄소 배출계수는 IPCC 환산계수를 사용하였다.

<표2> 유효에너지수요 전망

(단위:PJ)

부문	기술용도	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035
산업	동력	214.78	345.91	485.15	619.19	775.33	952.41	1136.64	1330.51	1542.43
	기타	55.02	78.99	98.43	118.04	138.85	160.96	182.11	201.07	216.61
	기계	13.04	13.71	14.26	14.62	14.48	14.19	13.91	13.56	12.90
	직접가열	258.38	388.52	544.92	712.19	866.48	1029.11	1193.02	1349.79	1527.17
	간접가열	260.35	365.16	500.30	638.52	776.85	922.66	1043.90	1152.55	1253.91
	비금속	108.82	156.23	214.05	279.75	353.65	430.27	515.99	606.93	703.60
	비에너지	55.40	61.17	65.89	69.25	72.79	76.50	80.40	84.50	88.81
가정	난방급탕	509.95	599.83	678.65	745.62	807.21	869.60	932.20	994.38	1045.11
	냉방	3.30	6.63	12.22	20.59	31.68	46.55	65.29	87.37	114.19
	냉장	14.97	17.35	19.16	20.64	21.69	22.80	23.96	25.19	26.47
	가전기기	61.66	88.52	121.28	158.51	200.38	249.71	306.75	369.63	428.50
공통 상업	조명	58.02	87.25	119.53	160.72	210.06	268.09	334.09	410.39	487.42
	취사	82.07	95.14	105.04	114.84	121.90	128.12	134.65	139.43	142.95
	난방급탕	117.36	151.22	185.76	220.62	249.61	275.59	301.30	327.80	353.13
	냉방	64.80	99.70	143.13	200.74	268.64	342.86	433.43	540.13	657.15
	상업기기	25.50	38.34	53.78	73.68	98.60	125.84	156.82	190.80	232.14
	조명	371.27	571.25	820.10	1123.61	1503.64	1919.07	2391.51	2909.64	3455.73
	항공	11.10	15.57	21.34	27.23	33.13	39.35	47.07	53.40	60.42
수송	버스	6.17	8.25	9.57	10.57	10.57	10.57	10.57	10.57	10.57
	승용차	67.44	108.61	145.34	185.49	185.49	182.73	179.10	175.55	172.07
	기타	2.35	2.86	3.31	3.75	3.94	4.14	4.29	4.40	4.40
	선박	16.41	19.03	22.16	26.07	30.22	34.53	39.45	45.07	50.99
	경트럭	28.54	38.19	44.27	48.88	51.37	52.67	53.73	54.27	54.81
	중트럭	1.70	2.27	2.63	2.93	3.08	3.16	3.22	3.26	3.29
	철도	7.00	8.52	9.87	11.17	12.46	13.75	14.82	15.96	16.77
	병커링	237.40	275.21	303.86	319.36	324.17	329.07	334.03	337.39	340.77
총계		2652.8	3643.4	4744.0	5926.6	7166.3	8504.3	9932.3	11433.5	13002.3

3. 이산화탄소 배출 감소 대안 평가

본 연구에서는 이산화탄소 배출 감소 대안으로써 기술 대안을 고려 하였다. 이는 새로운 기술의 채택에 의한 배출 감소 잠재력을 분석은 물론, 이를 통하여 다양한 기술 및 정책 대안의 분석에 본 평가 방법의 적절한 적용 가능성을 평가해 보기 위한 것이다. 평가를 위하여 기준이 되는 기준시나리오와 기술대안으로써 기술투입시나리오를 설정하여 사용 하였다.

3-1. 기준시나리오

1995년을 기준으로 한 에너지시스템(기술, 에너지수요 및 공급)의 추세가 미래에도 계속되며 새로운 에너지원 및 재료, 기술의 투입이 없음을 전제하고 있다. 현재의 추세를 반영하기 위하여 에너지 및 재료의 공급량, 기술의 이용에 대한 제약(발전소 입지를 고려한 수력, 원자력의 용량계약 등)이 고려되었다.

또한 기술개발에 의한 뚜렷한 효율상승은 포함되지 않았으나, 전환 및 가공기술은 2010년 이후, 수요기술은 2005년부터 시스템 비용최소화를 위하여 같은 기술 용도에 속하는 기술들 사이에서는 경쟁을 허용하여 연료의 대체등이 발생할 수 있도록 하였다. (대부분의 에너지 계획등이 2010년을 목표로 수립되어 이들 계획을 추종하고 이후 경쟁을 통하여 효율적이고 비용최소화를 이룰 수 있는 시스템을 구성)

3-2. 기술투입시나리오

기술투입시나리오는 발전부문과 산업부문, 가정상업부문 등에 기존기술 보급 확대 및 신기술을 투입하는 것으로서, 세부내용은 다음과 같다

- 총 12개의 발전기술을 특정 시기부터 이용가능 할 수 있다는 가정하에 새로 투입
 - 수력(양수 포함)발전은 2010년 5.8GW에서 2035년 11.5GW까지 투입가능
 - 기존 유연탄 화력은 2010년 21GW를 기점으로 이후에는 신규 건설을 제한(단, 국내무연탄 발전은 타 발전에 비해 우위를 확보할 수 있는 경우 1995년 수준(1.02GW)이 유지)
 - 원자력은 기준시나리오에서는 2010년 26GW에서 2035년에 65GW까지 증설을 허용 하였으나, 본 시나리오에서는 2035년에 70GW 까지 허용
 - 석유발전은 2010년 10GW를 최고로 2035년에는 7.3GW 정도로 감소하는 것으로 제약
 - 가스발전은 2010년 17GW에서 2035년 45GW까지 증설을 허용
 - 2015년에 AFBC, PFBC, IGCC, CFBC, Methanol Fuel Cell, Gas Fuel Cell을 투입되고, 2020에 CFBC-Nucla가 투입 되었음. 또한 2025년에는 2단계 IGCC, PFBC-Modified를 투입하였으며, 2030년에 PFBC - Advanced, IG Fuel Cell, 2035년에 PFBC-Supper를 투입
 - 허용된 최대 투입 가능 용량은 PFBC 3GW, PFBC 15GW, IGCC 15GW, CFBC 2GW, Methanol Fuel Cell 3 GW, Gas Fuel Cell 3GW, CFBC-Nucla 1.5GW, 2단계 IGCC 2GW, PFBC-Modified 2 GW, PFBC-Advanced 1GW, IG Fuel Cell 1GW, PFBC-Supper 0.5GW로 정의
- 산업부문에서는 1995년 현재 우리나라에서 이용되지 않는고 있으나, 현재 또는 미래에 이용 가능한 주요 공정기술 총 14개(철강부문 6개, 석유화학에 8개)를 투입
 - Blast Furnace with Plasma Injection
 - Direct Reduction(Coal)
 - Direct Reduction(Gas)
 - EAF(Coal-based DRI)
 - EAF(Gas-based DRI)
 - Near Net Shape Casting

- Gasoil Steam Cracking
 - LPG Steam Cracking
 - Natural Gas Oxydative Coupling
 - Dehydrogen Ethanol
 - Methanol to Olefin
 - Methanol from Natural Gas
 - Ethanol from Biomass
 - (Flash) Pyrolysis Biomass
 - 철강부문 고로의 미분탄 투입량을 2035년에 200kg/T.S까지 확대
 - 현재 사용되고 있는 전동기를 2010년까지 모두 고효율 전동기로 대체
- 가정.상업부문의 기술투입은 다음과 같다.
 - 지역난방 공급의 확대 : 1995년 현재 0.8PJ인 지역난방 공급량을 2030년까지 220PJ을 공급
 - 조명
 - 백열등과 형광등은 2005년까지 컴팩트 형광등과 전자식 안정기를 부착한 형광등으로 교체
 - 2005년부터 고효율 Lamp를 본격적으로 도입하여 2015년까지는 기존 백열등과 형광등의 수요를 대체토록 함
 - 단, 산업과 상업부문의 특수용도인 고풍도 방전등은 일정 비율을 계속 유지토록 함

4. 대안 평가 결과 분석

기준시나리오를 이용한 평가 결과 1995년도의 우리나라 이산화탄소 배출량은 104.2백만톤으로 산출 되었으며, 2035년에는 372.11백만톤으로 증가할 것으로 분석 되었다(<표 3>)

기술투입시나리오에 의한 평가는 각 부문별 대안을 각 각 적용한 경우와 모든 대안을 통합 적용하는 방법을 채택하여, 각 부문별 대안과 통합할 경우 전체 시스템적인 측면에서의 결과 차이를 분석 하였다. <표 4>는 기술투입시나리오 적용시 각 대안별 효과를 분석한 것이다.

기술투입시나리오에 의한 감소 대안 평가 결과 각 부문별 기술 대안을 별도로 투입할 경우의 총 이산화탄소 배출 감소 효과는 2000년에 2.2백만톤(1.6%)에서 2035년 42.1백만톤(12.3%)까지의 감소 효과가 있는 것으로 분석되었으며, 모든 대안을 통합하여 평가 분석한 결과 2000년 2.2백만톤(1.6%)에서 2035년 32.1백만톤(9.4%)으로 나타나 배출 감소 효과가 각 대안별 적용 누계 보다 낮은 것으로 나타났다

<표 3> 기준시나리오에 의한 부문별 이산화탄소 배출 (단위:백만TC)

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035
발전	22.3	30.1	40.3	46.9	57.9	71.6	91.9	118.3	137.3
산업	37.9	50.5	64.4	78.9	92.8	108.5	122.8	136.7	151.6
가정.상업	19.1	22.7	25.2	26.8	27.3	29.1	29.9	28.9	30.4
수송	24.9	33.0	39.6	45.9	47.2	48.5	49.8	51.2	52.8
계	104.2	136.3	169.5	198.5	225.2	257.8	294.4	335.0	372.1

<표 4> 배출감소 대안별 이산화탄소 배출 및 감소 효과 (단위:백만TC)

용도	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035
기 준	104.2	136.3	169.5	198.5	225.2	257.8	294.4	335.0	372.1
발전부문 기술투입	104.2	136.0 (0.5)	169.3 (0.5)	198.5 (0.4)	221.6 (4.0)	252.0 (6.5)	284.7 (8.6)	314.5 (22.2)	348.8 (23.8)
산업부문 기술투입	104.2	135.8 (0.7)	168.5 (1.3)	197.2 (1.8)	222.9 (2.9)	255.5 (3.0)	291.8 (1.5)	332.0 (4.7)	365.7 (6.9)
가정.상업 기술투입	104.2	135.5 (1.0)	167.4 (2.4)	195.1 (3.8)	221.3 (4.5)	252.8 (5.7)	286.9 (6.4)	322.5 (14.2)	361.2 (11.4)
통합기술 투입	104.2	134.1 (2.2)	167.1 (2.7)	194.3 (4.6)	216.7 (9.1)	245.8 (12.7)	276.3 (17.0)	306.0 (30.7)	340.5 (32.1)

주) ()는 기준 시나리오와 비교한 배출 저감량 임

5. 결론

K-MARKAL모형을 이용하여 기술대안에 의한 이산화탄소 배출 감소 잠재력을 평가 하였다. 평가 결과 선택된 기술투입 대안들이 이산화탄소 배출 감소에 상당한 효과가 있는 것으로 판단되었다. 또한 대안의 통합 평가를 통하여 어느 특정부문의 감소가 전체 시스템의 배출 감소로 그대로 이어지지 않는다는 점을 파악 하였으며, 이는 이산화탄소 배출 감소 대책 수립시 종합적이고 시스템적인 부문간 상호 영향 분석이 매우 중요하다는 것을 의미하고 있다.

본 연구를 통하여 우리나라의 이산화탄소를 비롯한 온실가스 저감 기술 및 정책대안 평가에 우리나라 에너지기술시스템을 토대로 구축된 기술 및 정책 대안 평가 도구로써, 수시로 변화하는 국내외 정책 상황과 기술의 변동 요인을 빠르고 다양하게 반영하여 평가할 수 있다는 특징을 갖고 있는 K-MARKAL모형이 적절한 도구로 활용될 수 있는 것으로 판단 되었다.

참고문헌

1. Leslie G.Fishbone, etc.: "Users Guide for MARKAL(BNL/KFA Version 2.0) : A Multi-period, Linear-programming Model for Energy System Analysis", IEA/ETSAP(1983)
2. 김종욱, 신희성, 최기련 외: "비용최소화와 환경영향을 고려한 철강기술 평가에 관한 연구: MARKAK모형의 응용", 에너지공학, 18(2), pp188-197(1997)
3. "지구환경을 고려한 에너지자원 기술정책 방향", 한국에너지기술연구소 (1997-1998)
4. "기후변화협약 관련 국가보고서 작성 및 대응방안 연구", 통상산업부, 에너지경제연구원(1995.12)
5. "에너지총조사보고서", 통상산업부, 에너지경제연구원(1996)