한국에너지공학회(2000년도)
추계 학술발표회 논문집 P185~191

산업용 천연가스 수요관리 방안에 대한 동태적 효과 분석

장한수, 홍정석, 박찬국, 김상준, 최기련
아주대학교 에너지학과

A Study on the Analysis of Dynamic Effect on the DSM of Industrial Natural Gas

H.S. Chang, J.S. Hong, C.G. Park, S.J. Kim, K.R. Choi
Dept. of Energy Study, Graduate School, Ajou Univ.

1. 서론

1986년 우리나라에 천연가스(LNG ; Liquefied Natural Gas)가 공급된 이래로 LNG 소비는 1986년 544천 톤에서 1998년 10644.5천 톤으로 급속히 증가하여 동기간 연평균 55.2%의 증가율을 나타냈다. 더욱이 급격한 수요증가와 함께 난방용 수요 위주의 동고하저형 LNG 소비패턴으로 인하여 공급시설의 효율적 운영과 공급의 안정성에 어려움이 발생되고 있다.

현재까지는 이러한 문제를 항차패턴을 통한 공급물량조절이나 한전의 swing consumer 역할에 의한 발전물량 조절을 통하여 해결하여 왔다. 그러나 정부 추진안대로 2003년 LNG 도입부문이 민영화되고 2002년 전력산업 구조조정을 통한 발전부문 민영화가 이루어진다면 민간사업자들에게 기존의 역할을 요구하기는 어려워질 것으로 전망된다. 이러한 현실 상황에서 LNG 수요 패턴 향상을 위한 대안으로 제시될 수 있는 것이 천연가스에 대한 수요관리(DSM ; Demand Side Management)이다. LNG 수요에 대한 DSM을 실시하는 목적은 LNG 소비 패턴 변화를 유도하여 부하형태를 바람직한 방향으로 개선함으로써 LNG 공급설비 투자 지연과 기존 설비의 이용효율 향상시키기 위함이다.

현재 산업용 LNG는 다음과 같은 이유로 DSM의 주력 대상으로 주목을 받고 있다. 즉, 산업용 수요는 동하절기의 수요격차가 비교적 작은 대단위 수요처로 1998년 도시가스 소비(발전물량 제외)에 의한 TDR[1]은 3.91인데 비해 산업용 소비에 의한 TDR은 1.82로써 비교적 안정적인 소비패턴을 보이고 있다. 또한, 삶의 질에 대한 욕구가 증대되고 기후변화협약과 관련하여 배출저감의무 이행이 요구됨에 따라 청정연료인 LNG로의 산업용 연료 대체가 예상된다. 따라서 산업용 DSM 방안 및 그에 따른 효과분석에 대한 연구가 선행되어야 할 필요성이 제기된다. 이에 본 연구에서는 특정 DSM 목표달성을 위한 DSM 프로그램 시행에 따른 B-C유의 LNG 대체 효과와 그에 의한 수요 패턴 및 환경측면의 개선효과를 시스템 다이나믹스(SD ; System Dynamics) 모델링 방법론을 통하여 검증하고자 한다. 특히, 시스템 다이나믹스 방법론의 특징인 시스템 내부의 피드백을 고려한 모델을 구성함으로써 수요패턴과 DSM 정책의 상호작용에 의한 동태적 변화를 살펴볼 것이다.

2. 이론적 고찰

1) TDR(Turn-Down Ratio) : 최대 소비월 물량 / 최소 소비월 물량

2.1 선행연구 분석 및 시사점

'계절별 도시가스 수요관리와 적정 LNG 저장시설산정 연구[3]'에서는 항차조절과 발전용 LNG 수요 조절을 통한 저장시설의 변화를 분석하였다. 그러나 전술한 바와 같이 항차조절과 발전용 물량 조정은 더 이상 DSM 정책도구의 역할을 담당할 수 없다. 따라서 보다 현실적인 DSM 방안에 대한 효과 분석이 필요하다.

'산업용 천연가스 수요증대 방안 연구[5]'에서는 연료대체 기법을 분석하여 산업용 LNG 수요증대 방안을 제도적 · 경제적 · 기술적 방안으로 분류하여 제시하고 제도적 방안과 경제적 방안에 대한 효과를 분석하였다. 그러나 개별 DSM 프로그램에 대한 효과만을 분석함으로써 DSM 프로그램이 동시에 시행되었을 경우 에너지 시스템 차원의 변화를 간과하였다. DSM 프로그램은 단일 프로그램만으로는 의도한 효과를 얻을 수 없으며 다양한 프로그램이 동시에 시행되었을 경우에 시너지 효과에 의한 에너지 시스템 전반의 변화를 유도할 수 있다. 따라서 다양한 DSM 프로그램이 동시에 시행되었을 경우에 대한 효과분석이 요구된다.

2.2 시스템 다이나믹스

1961년 산업동태론(Industrial Dynamics)을 시작으로 출발한 SD의 고유한 방법론적 특성은 시스템의 동태적 거동(dynamic behavior) 변화 즉, 시간의 경과에 따른 시스템의 거동 변화에 관심을 둔다는 점이다. 시스템의 동태성을 강조함으로써 시스템의 진화 · 발전 · 쇠퇴라는 실천적 측면을 중요시함으로써 현실의 정책문제, 기업경영상의 문제를 해결하는 응용학문이다. SD는 동태적 변화의 원인을 시스템의 피드백(feed-back) 구조에서 찾으며, 순환적 인과관계에 의해 구성되는 피드백 구조는 시스템을 구성하는 다양한 변수들의 인과관계가 상호 연결되어 하나의 닫힌 회로(closed loop)를 구성하게 된다. 피드백 구조를 강조함으로써 시스템의 변화요인을 외부보다는 내부에서 설명하려고 하며 정책의 성공조건이나 실패조건과 관련된 피드백구조를 발견해냄으로써 시스템의 구조적인 측면에서 원인을 이해하고 정책 대안을 도출하는데 이용된다. 또한 정책결정이나 어떠한 거동의 인식 과정상에 반드시 나타나는 지연(delay)이 모델링에 포함되어 현실을 충실히 반영할 수 있는 방법론이다.

이러한 SD 방법론을 이용함으로써 DSM 정책의 동태적 변화를 모델링하며 DSM 정책 변화가 수요패턴에 피드백되어 수요패턴은 다시 DSM 정책에 영향을 미침으로써 수요패턴과 DSM이라는 두 개의 요소가 닫힌 회로를 구성하여 시스템을 이루게 된다. 더욱이 이러한 피드백 과정상의 지연을 모델에 반영시킴으로써 현실을 반영하려는 노력을 하였다.

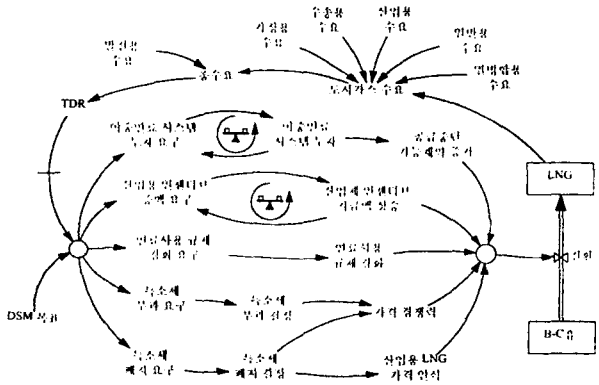
3. 산업용 천연가스 수요관리 모델의 구조

3.1 산업용 수요관리 모델의 인과구조

산업용 천연가스 수요관리 모델의 시뮬레이션 기간은 2000년 1월부터 2015년 12월까지이며 모델 구성은 시스템 다이나믹스 모델 구현 프로그램인 Vensim 이용하였다. Vensim으로 구현한 모델의 인과구조는 <그림 1>과 같다. 제도적 · 경제적 측면의 DSM 프로그램 시행에 따른 B-C유의 LNG 대체 효과를 파악하기 위한 모델을 구성하였으며 DSM 프로그램은 LNG 총수요의 피드백에 의해 결정되는 개별 DSM 프로그램 시행 요구에 따라 시작되도록 모델을 구성하였다.

제도적 측면의 DSM 프로그램은 공급중단 가능계약제도(이하 가), 연료사용 규제 강화(이하 다), 특별소비세제 개편(이하 라)을 모델에 반영하였으며 경제적 측면에서는 산업용 인센티브 지급제도(이하 나)를 고려대상으로 하였다. (가), (나)는 LNG 공급업자에 의해서 시행되는 DSM 프로그램이며 (다), (라)는 LNG 공급업자의 요청에 의해 행정부에서 시행하는 DSM 프로그램이다. 행정부에 의해서 시행되는 프로그램의 경우 가스산업뿐만 아니라 국가

경제 전반의 변화를 촉발시킬 수 있으나 본 연구에서는 가스 산업에 미치는 영향에 한해서만 관심의 대상으로 하고 모델을 구성하였다.



<그림 1> 산업용 천연가스 수요관리 모델의 인과구조

(가)는 이중연료 시스템에 대한 투자가 선행되어야만 운영이 가능한 DSM 프로그램이다. 즉, TDR의 피드백에 의해 이중연료 시스템 투자가 이루어져서 공급중단 가능계약이 실효를 거두는 것으로 가정하고 시스템을 구성하였다. 특히, 투자요구에 의해서 투자가 이루어지고 난 후에는 투자된 금액이 투자요구에 피드백 되어 투자액에 상응하는 수준으로 투자요구가 감소하도록 모델을 구성하였다. 따라서 투자액은 TDR이 어느 수준에 이르면 일정한 수준으로 안정된다. (나)는 현재 시행중인 산업·열병합 장려금 제도에 피드백을 추가하여 모델을 구성한 것으로 TDR의 피드백에 의해 LNG 단위량당 인센티브 지급액이 변화되도록 모델을 구성하였다. 특히, 변화된 지급액이 인센티브 증액요구에 피드백 되어 증액된 액수만큼 인센티브 증액 요구가 감소하도록 하였다. (다)는 가스공급업자가 TDR의 피드백에 의해 현재 540ppm으로 정해져 있는 황산화물의 배출규제기준에 대한 강화 요청이 이루어지는 시스템에 대해 모델링 하였다. (가), (나)와는 달리 환경규제의 특성상 규제가 시행되고 난 후에는 규제가 완화되는 사례가 없는 점을 감안하여 강화된 규제치에 의한 피드백과정이 없도록 모델을 구성하였다. (라)는 가스공급업자가 TDR의 피드백에 의해서 행정부를 상대로 특별소비세제 개편 요청을 하는 시스템에 대해 반영한 것이다. B-C유에 대한 특소세 부과와 LNG에 대한 특소세 폐지 모두에 대한 고려가 가능하도록 구성하였으며 본 연구에서는 LNG 특소세 폐지보다는 B-C유 특소세 부과에 비중을 두어 B-C유 특소세 부과가 먼저 시행되도록 모델을 구성하였다. 또한, 특소세와 같은 조세제도는 세제 폐지 또는 부과 이후 다시 정책이 바뀌어 세제가 개편되는 경우가 없다고 가정하여 세제 개편에 따른 피드백 과정이 없도록 모델을 구성하였다. 산업용 이외의 수요는 LNG 전환이 전체 소비 패턴에 미치는 영향 파악을 위해 가정용, 일반용, 열병합용, 산업용 수요는 산업연구원의 추정치[7]를 이용하였으며 발전용 수요는 한전의 연료소요량 전망치[4]를 이용하였다. 또한, 수송용 수요는 환경부의 추진안을 그대로 반영하였다.

<그림 1>에서 각각의 DSM 프로그램에 대한 요구는 LNG 수요패턴의 피드백에 따른 가스산업의 대내외적 DSM 요구의 변화 양상을 모델링 한 것이다. LNG 수요패턴을 나타내는 지표로써 TDR을 사용하였으며 이 값이 피드백 되어 DSM 요구가 변화하는 것으로 가정하였다. TDR이 피드백 되는 과정에는 SD의 특징적 고려요소인 지연이 따르며 그러한 과정은

<그림 1>의 화살표에 직교하여 그어진 선분으로써 나타내어진다. 피드백 지연은 의사결정에 의한 외생변수인 DSM 목표에 따라 결정되며 지연에 따라 프로그램 시행의 우선 순위가 정해져서 각각의 DSM 프로그램이 시차를 두고 시행되도록 모델을 구성하였다. 이는 정책 목표에 따라 DSM 프로그램 시행 순서가 변동될 수 있는 현실에 대한 반영에서 비롯된 것이다. 지연은 실제로 피드백 지연 인자(feedback delay factor)로써 모델에 입력되며 DSM 요구에 대한 정책 반영 정도를 나타낸다. 즉, 같은 DSM 요구라도 DSM 목표에 의해서 DSM 요구의 반영 정도가 달라지는 것을 의미하며 그 내용은 <표 1>과 같다. (라)는 별도의 기준에 의해 설정되었으며 이에 대해서는 추후에 논의하겠다.

<표 1> DSM 목표별 피드백 지연 인자(feedback delay factor)

DSM 프로그램	피드백 입력 변수	BAU	국내 LNG 수요 패턴 향상[A]		산업용 LNG 수요 개발[B]		환경친화적 에너지 이용 체계 구축[C]	
		지연인자	우선순위	지연인자	우선순위	지연인자	우선순위	지연인자
공급중단 가능제약(가)	이중연료 시스템 투자압력 수용지연	0.1	1	0.2	4	0.06666	4	0.06666
산업체 인센티브 지급(나)	인센티브 중액 압력 해소 지연	0.1	2	0.1	3	0.1	3	0.06666
연료사용 규제 강화(다)	규제치 변화 (규제치 강화 추가)	250 ppm	4	250 ppm	2	150 ppm	1	50 ppm
특별소비 세제 개편(라)	특별소비세 부과 요구 수용 지연	0.1	3	0.04	1	0.2	2	0.1

DSM 목표는 국내 LNG 수요 패턴 향상(이하 A), 산업용 LNG 수요 개발(이하 B), 환경친화적 에너지 이용 체계 구축(이하 C)의 세 가지로 설정하였다. [A]는 가스산업 전반의 문제인 수요 패턴 향상을 위해 비교적 안정된 수요패턴을 보이는 산업용 수요를 전략적으로 활용하여 전체 LNG 수요 패턴을 향상시키려는 것이다. 따라서 동절기 수요는 억제하고 하절기 수요를 개발하는 시책인 (가), (나) 위주로 DSM 프로그램이 시행되며 (다), (라)는 부가적인 프로그램으로 시행된다. [B]는 산업부문의 총에너지 소비에서 2.38%의 비율을 차지하는 LNG의 수요개발을 위한 목표를 설정한 경우로써 가스공급업자의 입장을 비교적 우선적으로 반영한 것이다. 즉, 수요패턴 개선에 대한 문제는 이차적인 것으로 보고 (다), (라)를 통한 산업용 수요개발을 적극 추진하며 (가), (나)는 추가적인 프로그램으로 실행되도록 모델을 구성하였다. [C]는 전술했던 삶의 질에 대한 욕구와 기후변화협약과 관련하여 산업부문의 환경친화성을 강화하려는 목표를 설정한 경우로써 청정연료인 LNG 전환을 위해 (다), (라)가 우선적으로 시행되고 (가), (나)가 추후에 실시되도록 모델을 구성하였다. (다)의 경우 250ppm으로 강화되는 첫 번째 규제는 BAU, [A], [B], [C] 공통적으로 시행되며 그 이후에 DSM 목표에 따라 추가적인 규제 강화가 이루어지도록 하였다. 즉, [B], [C]로 정책 목표가 결정되었을 경우 각각 150ppm, 50ppm의 추가적 조치가 시행되도록 모델을 구성하였다. BAU(Business As Usual)에서는 지연인자를 모두 동일하게 0.1로 설정하여 각각의 목표와 비교가 가능하도록 하였다.

3.2 수요관리 목표별 평가지표

DSM을 통한 경제적 편익 증가에 대해서는 Hill[8] 등이 이미 증명한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 경제적 편익 이외의 지표를 통하여 DSM 프로그램의 효과를 평가하고자 한다.

즉, DSM에 의한 B-C유의 LNG 전환에 따른 기초적인 결과로써 LNG 전환량을 모델 안에서 산출하고 그에 따른 국내 LNG 수요패턴 향상의 지표로써 TDR 값을 모델 내에서 계산하였다. 또한, [C]의 환경 측면을 고려하여 B-C유의 LNG 대체에 따른 오염물질별 배출량을 환경지수(EI ; Environmental Indices)로 산출하여 평가지표로 사용하였다. 배출량에 따른 EI 산출작업은 모델 내에서 이루어지도록 하여 EI의 동태적 변화 파악이 가능하도록 하였으며 EI 산출에 필요한 오염물질별 영향지수의 내용은 <표 2>와 같다.

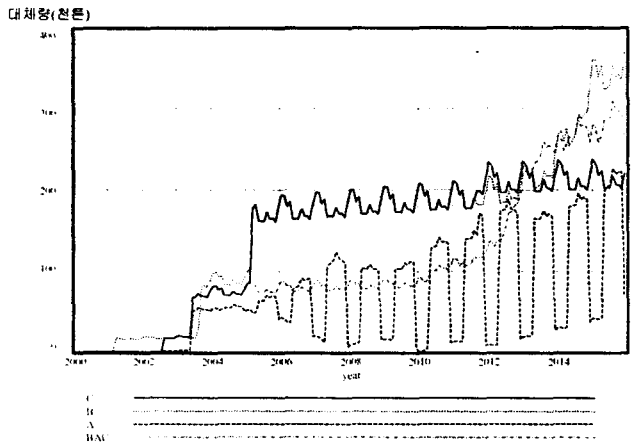
<표 2> 오염물질별 영향지수

오염물질	SO_2	NO_2	CO	TSP
영향지수(/kg)	1.06	1.72	1.41×10^{-2}	2.13

자료 : PRé Consultants, The Eco-indicator 99, 2000

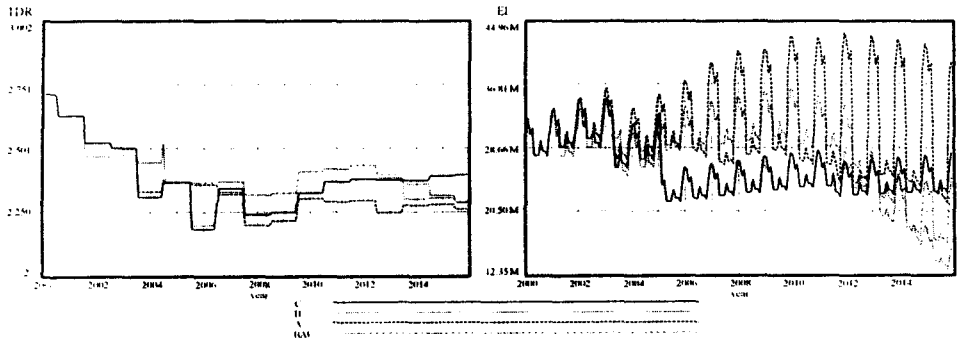
4. DSM 목표별 결과 및 분석

구성된 모델을 BAU와 각각의 DSM 목표별로 시뮬레이션한 결과는 LNG 대체량, TDR, EI의 평가지표에 의하여 나타냈으며 <그림 2>, <그림 3>은 Vensim의 전형적인 시뮬레이션 결과로써 각 평가지표의 동태적 거동을 보여준다.



<그림 2> DSM 목표별 LNG 대체량

<그림 2>는 DSM 목표별 LNG 대체량의 동태적 거동을 나타낸 것이다. 확연한 신장세를 보이는 것은 [B]와 [C]로써 급격한 신장세는 연료사용 규제가 강화되면서 LNG 대체물량 증가에 따른 것이다. [B]는 정책목표인 산업용 LNG 수요개발을 위해 산업용 LNG 대체가 가장 많이 이루어지며 2014년을 전후한 시점에는 인센티브 지급액의 증가로 인해 [C]를 상회하는 증가세를 나타낸다. [C]의 정책목표인 환경친화적 에너지 이용체계 구축 달성을 위해서는 산업부문의 청정연료로의 대체가 필수적임을 보이는 것으로써 2005년부터 2013년에 이르는 동안은 최대의 대체량을 나타내고 있다. [A]의 경우 LNG 수요 패턴 향상을 위해 (가)가 최우선순위로 수행됨에 따라 동절기 대체 물량이 하절기 대체물량보다 오히려 줄어드는 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.



<그림 3> DSM 목표별 TDR 및 EI

<그림 3>은 DSM 목표별 TDR과 EI의 동태적 거동을 나타낸 것이다. [C]는 시뮬레이션 중반 시간 가장 낮은 EI 값을 나타내 정책목표가 제대로 수행되고 있음을 보여준다. 또한 환경규제가 강화될 때마다 그에 상응하는 수준의 EI가 향상됨을 보여주고 있다. [A]의 경우 LNG 수요 패턴만을 고려한 연료 대체로 인해 동절기에는 LNG 사용이 줄어들게 되고 그에 따라 동절기 EI 값이 악화되는 것을 볼 수 있다. [B]는 [A]와 [C]의 중간수준의 EI 값을 유지하다가 2013년 이후에 인센티브 지급액 증가로 인한 연료대체가 증가하여 EI 값이 향상되는 것을 볼 수 있다.

TDR의 거동은 2006년까지는 [A]와 [C]간의 뚜렷한 우열을 가릴 수 없는 거동을 보이다가 (가)의 효과가 점점 증폭되는 2007년을 전후하여 [A]는 비교적 안정된 TDR 값을 보인다. [B]와 [C]는 2002년부터 2004년에 이르는 기간을 제외하고는 유사한 거동을 보이는데 DSM 프로그램 시행의 유사성에서 그 원인을 찾을 수 있으며 2000년대 초반에 거동이 다른 이유는 [B]의 경우 2002년을 전후로 DSM 프로그램이 가장 먼저 실행되어 TDR 값이 향상되기 때문에 환경규제조치가 뒤늦게 시행되며 이에 따라 2004년이 지나서야 추가적 TDR 향상이 이루어지게 되는 것이다.

<표 3>은 [A], [B], [C]의 각 목표별 효과를 LNG 대체 총량, 평균 TDR, 총 EI 값으로 나타낸 것이다.

<표 3> DSM 목표별 평가지표의 결과

	BAU	A	B	C
LNG 대체 총량(천톤)	20,314	12,806	29,408	26,817
평균 TDR	2.405	2.351	2.377	2.382
총 EI	5.49×10^{9}	6.05×10^{9}	4.82×10^{9}	5.02×10^{9}

[A]는 TDR만을 고려하면 정책목표가 비교적 성공적으로 달성되었다고 볼 수 있다. 그러나 수요패턴 향상을 위해 하절기에만 LNG 대체가 이루어짐에 따라서 EI 값이 악화된다. [B]와 [C]는 유사한 프로그램이 시차를 달리하여 시행됨에 따라 시뮬레이션 중반에 이르러서는 그 효과가 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 산업용 천연가스 수요관리 방안에 의한 동태적 효과분석을 시행하였다. 산업용 LNG 수요관리는 세 가지의 목표 하에 이루어지는데 국내 LNG 수요 패턴 향상, 산업용 LNG 수요 개발, 환경친화적 에너지 이용 체계 구축 등이 그것이다. LNG 수요패턴의 피드백에 따라 각각의 DSM 목표 별로 DSM 프로그램 믹스가 결정되며 DSM 프로그램 믹스에 의한 LNG 대체 효과를 알아보았다.

산업용 수요개발을 목표로 DSM이 이루어진 경우와 환경친화적 에너지 이용체계 구축을 위해 DSM을 시행한 경우 시뮬레이션 중반기에 이르러 유사한 결과를 나타내는데 이는 DSM 프로그램 시행의 유사성에 일차적 원인이 있으나 환경친화적 산업 육성을 위해서는 에너지 이용과 관련한 문제를 간과할 수 없음을 극명히 드러내는 사례이다.

DSM 프로그램 시행 초기보다는 중기 이후로 갈수록 DSM 효과가 증폭되는데 이는 단일 DSM 프로그램에 의해서는 의도한 정책목표를 달성할 수 없으며 다양한 DSM 프로그램의 믹스를 통해서만 의도한 정책목표를 달성할 수 있음을 나타낸다. 또한 DSM 시행 후 단기간 내에 효과를 측정하기보다는 중장기적인 안목에서 DSM 정책을 운용해야 함이 시뮬레이션을 통한 DSM 평가지표의 거동을 통해 밝혀졌다.

산업용 천연가스 수요관리 모델은 DSM에 의한 LNG 전환에 대해서만 모델링 하였으나 DSM에 따른 산업용 천연가스 잠재량의 동태적 거동 파악을 위해 모델 확장과 보완이 필요하며 나아가 LNG 수요 전체에 대한 동태적 거동 구현을 위한 모델링 작업이 필요하다.

참고문헌

[1] 에너지경제연구원, "에너지 수요관리 강화를 위한 중·장기 정책방안 연구", 1994

[2] _____, "미시적 접근에 의한 산업용 천연가스 수요잠재력 평가", 1995

[3] _____, 계절별 도시가스 수요관리와 적정 LNG 저장시설산정 연구, 1997

[4] 산업자원부, "제5차 장기천연가스 수급계획 검토서", 2000

[5] 한국가스공사, "산업용 천연가스 수요증대 방안 연구", 1998

[6] _____, "천연가스의 적적 이용을 위한 수요관리 연구", 1997

[7] _____, "장기천연가스 수요전망", 1999

[8] Hill, L. and Brown, M., "Issue in assessing the cost effectiveness of coordinated DSM programs", Utilities Policy, Vol. 5, No. 1, pp. 47~53, 1995

[9] Forrester, J.W., "Urban Dynamics", Cambridge, MIT Press, 1969

[10] Randers, J., "Elements of the System Dynamic Method", Cambridge, Productivity Press, 1976

[11] Pykh, Y.A., et al., "An overview of systems analysis methods in delineating environmental quality indices", Ecological Modelling, Vol. 130, No. 1-3, pp 25~38, 2000

[12] Pré Consultants, "The Eco-indicator 99", 2000