

에너지 효율 프로그램의 지원금 수준 산정

박종진*, 소철호*, 김진오*, 조중삼**
 한양대학교*, (주)이피아테크**

Estimation of Rebate Level for Energy Efficiency Programs

Jong-Jin Park*, Chol-Ho So*, Jin-O Kim*, Joong-Sam Cho**
 Hanyang University*, e-pia Tech**

Abstract - 고효율기기의 보급량은 지원금 수준에 크게 영향을 받으므로 각 고효율기기 프로그램에 대한 적정 지원금 수준의 결정은 매우 중요하다. 그러나 에너지 효율 프로그램에 대한 수요관리 목표량은 과거 실적 데이터를 이용한 단순 확산 모형으로 산정되고 있으며, 목표량에 따른 지원금 또한 단순히 추정하여 산정되고 있는 실정이다. 본 논문은 이론적 배경을 바탕으로 고효율기기별 적정 지원금 수준을 산정하고자 목적함수와 제약조건을 설정하여 최적화를 수행하였다.

여기서,

- p : 혁신계수
- q : 모방계수
- $f(t)$: 시간 t 에서의 채택 확률
- $F(t)$: 시간 t 에서의 누적 채택 확률

$n(t)$ 을 시간 t 에서의 수요량, $N(t)$ 을 그 때까지의 누적 수요량, m 을 잠재시장보급량이라 두면,

$$f(t) = n(t)/m, F(t) = N(t)/m$$

1. 서 론

최근에 전력산업의 구조개편이 진행되면서 에너지원의 많은 부분을 외국에 의존하고 있는 국내의 실정에서 볼 때, 제한된 에너지 자원의 합리적인 이용을 목적으로 국가적인 관점에서 전력 수요관리의 필요성이 크게 부상되고 있다.

우리나라의 수요관리 프로그램은 70년대 요금제도에 의한 부하관리로 부터 시작하여 90년대부터는 고효율 조명기기, 그리고 2000년대 들어서서 고효율 전동기 및 인버터와 같은 에너지 절약기술에 의한 수요관리 프로그램이 도입되어 그 비중이 높아지고 있다. 그러나 에너지 효율 측면의 프로그램은 도입 이후의 진행 기간이 길지 않아 현재까지 누적된 실적 보급 데이터를 이용한 수요관리 목표량의 산정은, 그 방식에 있어 충분한 이론적인 배경이 결여되어 있는 것으로 판단되어 그 목표량 산정 결과에 신뢰성이 제기되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 기존에 널리 사용되던 Bass 확산 모형의 단점을 극복하고자 새로운 확산 모형을 적용하였다. 또한 지원금을 고려한 확산 모형을 설정하기 위해 가격함수 개념을 모형 비교 분석을 통하여 오차가 적은 확산 모형에 적용하였다. 또한 최적화를 이용하여 최대 절감량을 위한 목적함수와 제약조건을 설정하였다.

와 같이 표현되고 이것을 식 (2.1)에 대입하여 미분 방정식을 풀면, 식 (2.2)과 식 (2.3)를 얻을 수 있다.

$$N(t) = m \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}} \tag{2.2}$$

$$n(t) = m \frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)t}}{(p+q e^{-(p+q)t})^2} \tag{2.3}$$

이상의 식 (2.2) ~ 식 (2.3)를 통하여 수요 $n(t)$ 와 누적수요 $N(t)$ 를 알 수 있다.

2. 확산모형

2.1 Bass Model

고효율기기의 보급량 예측은 일반적으로 Bass 확산 모형을 근간으로 이루어지나 이 모형은 충분한 과거 실적 데이터의 이용이 가능할 때 기기보급의 예측에 대하여 그 우수성이 입증될 수 있다. 하지만 현재 가장 널리 사용되고 있다.

Bass의 확산모형을 사용하기 위해서는 기본적으로 세 가지 모수를 추정하여야 한다. 세 가지 모수 중 p 는 혁신계수, q 는 모방계수를 뜻하며, m 은 잠재시장보급량을 말한다. Bass 모형은 Hazard 함수로부터 식 (2.1)과 같이 되며[1,2], 여기서 p, q 는 수요자의 성향을 대변한다.

$$\frac{f(t)}{1-F(t)} = p + qF(t) \tag{2.1}$$

2.2 Virtual Bass Model

VBM은 프로그램 도입 시점과 실적 데이터의 누적 시점이 데이터의 소실 등으로 인하여 차이가 발생하게 될 때 그 차이를 확산 정도에 고려하는 모형이다. 다음 식 (2.4)은 변수들 사이의 관계를 표현하고 있고[3], τ 는 데이터의 누적 시점과 프로그램 도입 시점의 차를 나타낸다. 만약 $\tau=0$ 이면, 계수의 추정값은 앞의 Bass 모형에서 추정된 값과 같게 된다.

$$M = (1 + p/q)m, U = p + q, z = [1/(p+q)]\ln(p/q) \\ z' = z + \tau, q' = U/(1 + e^{z'U}), p' = U - q', \\ m' = M/(1 + p'/q') \tag{2.4}$$

2.3 모형 적합성 판별

Bass model과 VBM을 이용하여 추정된 순증 보급량과 실적 데이터가 존재하는 부분을 식 (2.5)의 RMSPE (Root Mean Square Percentage Error)를 기준으로 각 모형의 오차를 비교하였다. 또한, 각 모형과 실적 데이터의 누적보급량에 대한 오차 비교는 식 (2.6)의 Theil's 부등관 계수(Inequality coefficient)를 이용하였고, 여기서 Theil's 부등관 계수가 $U=0.55$ 이하이면 예측이 정확한 것으로 판정한다[5].

$$RMSPE = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left[\frac{(y_t - \hat{y}_t)}{y_t} \right]^2} \tag{2.5}$$

$$U = \frac{\sqrt{MSE}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i^2}} \quad (2.6)$$

여기서,

$$MSE(\text{Mean Squared Error}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_i)^2$$

\bar{y}_i : 추정치 y_i : 실적 데이터 N : 비교 기간(년)

2.4 지원금을 고려한 확산 모형

지원금 지급을 통한 고효율기기 가격과 지원금 지원 효과 분석을 위한 가격변수로 도입함으로써 고효율기기에 대한 지원금 지원 효과를 분석할 수 있다. 이때 기기의 가격이 t 시점의 기기 채택자에게 영향을 주는 것으로 가정하고 가격함수를 기기의 상대 가격에 대한 함수로 정의하면 다음 식 (2.7)로 표현되는 가격함수를 상정할 수 있다[6].

$$G(P_i(t)) = \exp\left[-\eta \left(\frac{P_i(t)}{P_i(T)}\right)\right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.7)$$

$$P_i(t) = MP_i(t) - RL_i(t)$$

여기서,

- $G(P_i(t))$: 시간 t 에서 i 고효율기기의 가격함수
- $P_i(t)$: 시간 t 에서 지원금을 고려한 i 고효율기기의 가격
- $MP_i(t)$: 시간 t 에서 i 고효율기기의 시장가격
- $RL_i(t)$: 시간 t 에서 i 고효율기기에 대한 지원금 수준
- $P_i(T)$: 고찰기간동안의 고효율기기의 평균 가격

따라서, 앞 절에서 소개된 식 (2.2)의 보급량과 식 (2.7)의 가격함수를 반영함으로써 지원금 효과를 고려한 확산 모형을 얻을 수 있다.

3. 최적화

각 고효율기기의 적정 지원금 수준을 산정하기 위하여 운영상의 이익을 최대화 하기 위한 각 목적함수를 설정하였다. 또한 도출될 결과값에 대한 현실성을 고려하기 위해 시장 환경을 반영하는 제약조건을 설정하였다.

3.1 최대 운영상의 이득

식 (3.1)는 운영상의 최대 이득을 얻기 위한 목적식을 나타낸다. 여기서 회피비용은 설비회피비용, 에너지 회피비용 그리고 환경 회피비용이 포함된다.

$$\text{Max. Benefit}(t) = \sum_{i=1}^8 (AC_i \times M_i - MC_i - RL_i(t)) \times n_i(t) \quad (3.1)$$

여기서,

- AC_i : i 고효율기기의 대당 회피비용
- MC_i : i 고효율기기의 관리비용
- $P_{in}(t)$: t 년도 i 고효율기기의 지원금 수준

3.2 제약조건 설정

단기간 동안 급격히 변동하는 지원금은 소비자가 고효율기기의 적정 가격 선에 대해 혼란을 가질 수 있다. 본 논문에서는 단기간 동안 급격히 증가된 지원금 산정으로 발생하는 시장 신호방해를 피하기 위하여 전년도 대비 지원금 수준의 150%를 넘지 않는 것으로 가정하여 제약조건을 설정하였다.

고효율기기 지원 프로그램이 진행되고 적합한 지원금 수준의 지원이 이루어지면 지원금의 순효과로 인하여 해당 기기의 시장 전환시점이 앞당겨 지게 될 것이다. 지원금의 순기능이 약화되는 시장 잠재량의 90%를 넘어서면 지원금이 종료되는 것으로 가정하여 제약조건을 설정하였다.

4. 경제성 평가

수요관리사업의 경제성 평가를 시행하는 방법 가운데 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법은 캘리포니아 표준평가방법(California Standard Practice Manual)이다[8].

캘리포니아 표준평가방법은 평가 관점에 따라 참여자 테스트, 수용가 영향도 테스트, 프로그램 관리자 비용 테스트, 총자원비용 테스트 4가지로 구분된다.

표 4.1은 위에서 소개한 네 가지 관점에서 비용효과 테스트를 수행할 경우의 비용과 편익의 구성요소를 나타낸다. 4가지 테스트는 각각의 비용과 편익에 따라 비용 대비 편익의 비율로써 프로그램의 관점에 따른 비용 효과를 분석할 수 있다.

표 4.1 DSM 비용효과 테스트의 편익/비용 요소

구분	PAC	P	RIM	TRC
회피비용(AC)	+		+	+
기기비용(UH)	-		-	-
전력회사 프로그램 관리비용(OC)	-		-	-
지원금(I)	-	+		
요금수입감소(LR)			-	
참여자 기기비용(PH)			-	-
요금지불액감소(LR)		+		

(+ : 편익, - : 비용)

5. 사례연구

본 논문의 연구 목적인 각 고효율기기별 적정 지원금의 산정에 대한 기초 연구로 확산 모형들을 이용하여 각 기기별 확산 보급량을 추정한다. 확산 모형을 이용한 기기별 미래 순증 보급량은 식 (2.3)와 각 계수인 m , p , q 를 바탕으로 추정되며, 확산 모형별 보급량의 추정치는 실적 데이터를 기준으로 적합도 판별을 수행함으로써 모형 선호도를 결정하는데, 순증 보급량은 RMSPE로 누적 보급량은 Theil's Inequality를 이용하여 각각 비교 분석한다. '지원금 조건을 고려한 확산 모형'을 앞에서 설정한 각 목적함수에 적용하여 제약 조건을 만족하는 범위 안에서 최대 운영 이득을 고려하여 이에 대한 적정 지원금 수준과 그에 따른 기기별 보급량을 산정하였다. 표 5.1은 모형적합도 판별에 대한 결과를 말해주고 있다. 표에서 볼수 있듯이 모든 부분에서 VBM이 Bass모형보다 더 좋은 적합도를 갖고 있는것을 알 수 있다.

표 5.1 모형 적합도 판별 결과

고효율기기 분류	RMSPE		U	
	Bass	VBM	Bass	VBM
형광등	38.54	31.88	0.045	0.020
32W 1동용 안정기	38.97	22.40	0.086	0.039
32W 2동용 안정기	47.06	22.49	0.075	0.024
인버터 50Hz	361.1	242.4	0.431	0.285
인버터 55Hz	69.56	22.41	0.194	0.103
자판기	36.53	32.63	0.043	0.031
중대형 전동기	19.70		0.059	
소형 전동기	29.42		0.024	

그림 5.1은 32W 2동용 안정기의 추정 보급량을 표현한 것으로 빨간점선은 기존의 고정 지원금의 경우에 대한 보급량 추정을 나타내고 있으며 파란점선은 본 논문에서 결정된 지원금 수준의 변화에 따른 보급량의 변화 추이를 나타내고 있다.

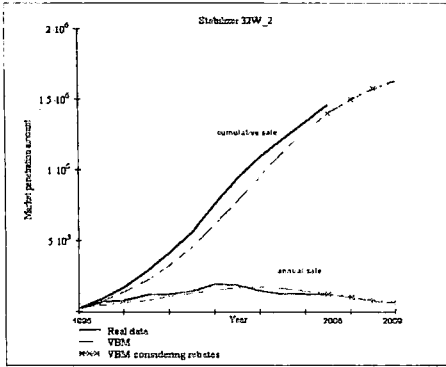


그림 5.1 32W 2등급 안정기의 보급량 추정

최대 운영상의 이득을 표현하는 식 (3.1)의 목적함수를 만족하는 적정 지원금 수준을 산정 하였으며, 이 결과 식 (2.2)와 식(2.7)을 이용한 확산함수에 적용하여 각 해의 기기별 보급량을 추정하였다. 표 5.2는 그 결과를 나타낸다. 2006년을 현재 시점으로, 향후 3년 동안에 대하여 사례연구를 진행하였다.

표 5.2 지원금 및 보급량 산정 결과

고효율기기 분류	지원금 산정 (원)			순증 보급량 (천대)		
	2007	2008	2009	2007	2008	2009
형광등	2,617	1,832	1,282	39.84	47.45	57.65
32W 1등급 안정기	1,960	1,372	960	196.2	152.9	114.4
32W 2등급 안정기	2,940	2,058	1,440	102.8	79.54	58.23
인버터 50Hz	1,143,900	1,266,600	1,292,500	1.124	1.268	1.417
인버터 55Hz	2,240,100	2,449,500	2,706,900	1.389	1.425	1.457
자판기	140,000	98,154	68,608	0.271	0.208	0.163
중대형 전동기	312,930	219,050	153,340	0.724	0.831	0.894
소형 전동기	32,732	22,912	16,038	0.802	0.776	0.707

또한, 산정된 고효율기기별 지원금 수준과 순증 보급량을 이용하여 기기별 당해 투자 범위 및 투자 우선순위를 결정하였다. 본 논문에서는 기존의 경우보다 프로그램을 세분화하여 투자 범위 및 우선순위를 결정하였으며, 다음의 표 5.3은 2007년의 경우에서 지원금 투자 순위 결과를 나타내고 있다.

표 5.3 지원금 투자 우선순위 결정

고효율기기 분류	지원금 투자 우선순위	
	2007 년도	
	Conventional method	Proposed Method
형광등		7
32W 1등급 안정기	2	1
32W 2등급 안정기		2
인버터 50Hz		4
인버터 55Hz	1	3
자판기	4	5
중대형 전동기		8
소형 전동기	3	6

결정된 기기별 순증 보급량과 회피비용, 기기비용, 프로그램 관리비용, 지원금 수준, 요금 수입 감소분과 지출 감소분의 데이터를 이용하여 캘리포니아 표준평가방법을

적용, 경제성 분석을 수행하였다. 표 5.4는 네 가지 관점에서의 편익/비용 비율의 결과이며, 프로그램별 그리고 각 관점별 1 보다 큰 수치의 경우 해당 프로그램은 그 관점에서 이득이 크며, 1 보다 작은 수치는 비용이 크다는 것을 의미한다.

표 5.4 편익/비용 테스트 결과

고효율기기 분류	편익/비용 비율			
	2007 년도			
	PAC	RIM	TRC	P
형광등	3.50	0.81	1.56	1.93
32W 1등급 안정기	1.74	0.74	2.87	3.94
32W 2등급 안정기	2.10	0.78	4.02	5.18
인버터 50Hz	13.9	0.60	2.58	4.62
인버터 55Hz	5.62	0.22	3.79	25.5
자판기	0.38	0.05	0.17	4.08
중대형 전동기	41.7	1.62	0.99	0.61
소형 전동기	2.64	0.81	5.08	10.9

6. 결 론

국내의 경우 에너지 효율 프로그램에 대한 수요관리 목표량은 과거 실적 데이터를 이용한 단순 확산 모형을 이용하여 산정되고 있으며, 결과적으로 합리적인 투자를 위한 투자 우선순위의 부재로 적절한 지원금 수준의 산정에 의문점이 존재하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 에너지 효율 프로그램의 투자량 및 투자 우선순위 선정에 대한 타당한 이론적 배경을 제공하고자 최적화 기법을 토대로 적정 지원금 산정의 방법론을 제안하였다. 이를 이용하여 합리적인 투자 우선순위의 결정과 이에 대한 비용효과 분석으로 프로그램별 투자 효율성의 증진과 프로그램의 투입 및 관리에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1]Bass, F. M., "A New Product Growth Model for Consumer Durables", Management Science, vol. 15, pp. 215-227, 1969.
- [2]Vijay Mahajan, Eitan Muller, Yoram Wind, New Product Diffusion Models, International Series in Quantitative Marketing, 2000.
- [3]Zhengrui Jiang, Frank M. Bass, Portia Isaacson Bass, "Virtual Bass Model and the Left-Hand Data-Truncation Bias in Diffusion of Innovation Studies", Inter. J. of Research in Marketing, vol. 23, pp. 93-106, 2006.
- [4]에너지관리공단, DSM 성과계량 및 비용효과분석 연구 최종보고서, pp. 9-34, 2000.
- [5]Lindberg, B. C., "International Comparison of Growth in Demand for a New Durable Product", Journal of Marketing Research, vol 19, pp. 364-371, 1982.
- [6]Mark W, Speece, Douglas L, MacLachlan, "Application of a Multi-Generation Diffusion Model to Milk Container Technology" Technological Forecasting and Social Change, vol. 49, pp. 281-295, 1995.
- [7]Michel Gibbs and Jeanne C. Townend. "The Role of Rebates in Market Transformation: Friend or Foe?", Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, pp. 6.121-6.132. 2000.
- [8]http://www.energy.ca.gov/greenbuilding/documents/background/07-J_CPUC_STANDARD_PRACTICE_MANUAL.PDF.