

# DSM 모니터링을 위한 확산 모형의 계수 추정

## Parameter Estimation of the Diffusion Model for Demand Side Management Monitoring System

金 鎮 吾\* · 崔 清 熏\*\* · 金 正 勳\*\*\* · 李 昌 浩<sup>§</sup> · 金 昌 燮<sup>§§</sup>

(Jin-O Kim · Cheong-Hun Choi · Jung-Hoon Kim · Chang-Ho Rhee · Chang-Seob Kim)

**Abstract** -This paper presents the method of parameter estimation of diffusion model for monitoring Demand-Side Management program. Bass diffusion model was applied in this paper, which has different values according to the following parameters; coefficients of innovation, imitation and potential adopters. Though it is very important to estimate three parameters precisely, there has been no empirical way in practice. Thus, this paper presents the method of parameter estimation in case of few data with constraints to reduce the possibility of bad estimation. The constraints can be empirical results or expert's decision. Case studies show the diffusion curves and forecasted values of the peak for the high-efficient lighting. The feedback and nonlinear least-square parameter estimation methods used in this paper enable us to evaluate the status and to predict the effect of DSM program.

**Key Words** : DSM, Monitoring System, Diffusion Model, Diffusion Parameter Estimation

### 1. 서 론

우리 나라는 지속적인 부하의 증가에도 불구하고 투자 자원 및 부지의 확보난과 환경 등의 문제로 인하여 발전소의 건설이 쉽지 않게 되었다. 따라서 지속적인 부하의 증가를 충당하기 위해 발전용량의 증가만으로는 더 이상 전력수급의 평형을 이루기 어렵게 되었고, 대부분의 에너지를 외국에 의존하는 수입국으로서 에너지의 효율적인 이용은 국가 경쟁력을 위해서도 필요한 일이며 지구 온난화 등의 환경 문제까지 고려할 때, 에너지의 절감과 합리적인 이용은 절실히 요구되는 사안이다. 한편, 현재의 조명 기기를 모두 고효율 조명 기기로 대체할 경우 대용량 발전소의 시설 용량 이상의 전기를 절약할 수 있으므로 고효율 기기의 개발과 보급으로 에너지 절약을 유도하는 등의 수요관리(Demand-Side Management : DSM)가 활발히 진행되고 있다. 이러한 수요관리 프로그램을 효과적으로 진행하고 방향을 결정하기 위해서는 현재의 성과를 진단하고 앞으로의 효과를 예측하는 모니터링 시스템이 필요하다. 기존의 외국문헌에서 제안되어진 모니터링 시스템[1]은 프로그램 사후 평가적 의미로써 평가를 수행하기 위한 자료들을 제공하기 위한 부수적인 시스템 즉, DLC(Direct Load Control),

SCADA(Super-visory Control and Data Acquisition), EMS(Energy Management System)등의 세부적 운용방법으로 기술하고 있으며, 이를 위해서는 동일 시간대의 모든 전력 수요관리 대상 기기에 대한 직접적인 미터링을 이용한 방법이 가장 이상적이라 할 수 있지만 이는 비용과 기술적인 측면에서 현실적인 한계가 있는 것이 사실이다. 따라서, 현재의 프로그램의 성과에 대한 의미를 부여하고 앞으로의 정책의 방향을 결정할 수 있도록 하는 모니터링 시스템의 필요성이 대두된다. 현재 진행되고 있는 수요관리 프로그램 중 고효율 기기 보급 프로그램의 경우 현재의 상태와 앞으로의 효과 추정을 위한 모니터링은 기기가 어느 정도 보급되고 있는지, 그리고 앞으로 어느 정도 보급될 것인지에 대한 추정이 이루어져야 한다. 즉, 고효율 기기의 보급의 정도가 수요관리 모니터링(DSM Monitoring)을 위한 중요한 인자가 된다.

본 논문은 이러한 점에 착안하여 보다 합리적인 모니터링을 하기 위해 시간에 따라 보급의 정도를 알 수 있는 확산 모형(Diffusion Model)을 도입하여 보급량을 추정하고 이를 적용하여 시스템 최대 부하시 고효율 기기의 보급에 의한 전력 수요의 감소 효과를 추정한다. 확산 모형에서는 혁신 계수(Coefficient of Innovation)와 모방계수(Coefficient of Imitation), 그리고 잠재량(Market Potential)의 추정이 확산 모형의 함수를 결정짓는 매우 중요한 요소이므로 올바른 계수 추정(Parameter Estimation)은 보급량을 추정하는데 결정적인 역할을 하게 된다. 계수 추정의 방법으로는 자료가 없는 경우, 계수 값이 시간에 따라 변하는 경우, 변하지 않는 경우 등이 있다[2]. 그러나 이러한 계수 추정 방법들은 연속함수를 이산 형태로 변환 시켜서 추정을 하는 방법으로 시간 간격 왜곡 현상이라는 단점을 가지게 된다. 한편, 우리나라의 경우 DSM을 본격적으로 도입하여 시행한 시기가

\* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 副教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 碩士卒業

\*\*\* 正 會 員 : 弘益大 電氣制御工學科 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 韓國電氣研究所 技術政策研究 室長

§§ 正 會 員 : 에너지管理公團 R&D本部 · 工博

接受日字 : 1998年 10月 30日

最終完了 : 1999年 5月 4日

그리 오래 되지 않았고 아직 자료수집체계가 미비하여 축적된 자료가 거의 없으며, 존재하는 자료도 신뢰성이 낮아서 계수 추정이 매우 힘든 상황이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 계수 추정 방법의 단점을 보완하여 우리 나라 실정에서 최소 자료를 가지고 확산 초기의 추정 오류의 확률을 줄일 수 있는 계수 추정 방법을 제시하고, 이를 실제 고효율 조명 기기 보급 프로그램에 적용하여 시스템 최대 부하시 고효율 기기의 보급에 의한 전력 수요 변화를 추정하였다.

## 2. 확산 모형

확산 모형이란 사회체제의 사람들에 의해 새로운 것으로 받아들여지는 생각, 객체, 관습 등이 시간에 따라 어떤 경로를 통해 사회체제에 속한 사람들 사이에 소통되는 것을 함수의 형태로 표현한 것으로 정의된다.

적용되는 상황에 따라 다양한 형태의 확산 모형이 있으나 대체적으로 Bass 모형을 근간으로 하고 있다. Bass 모형은 hazard 함수로부터 식(1)과 같이 되며, 여기서  $p$ ,  $q$ 는 수요자의 성향을 대변한다.

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

$p$  : 혁신계수(Coefficient of Innovation)

$q$  : 모방계수(Coefficient of Imitation)

$f(t)$  : 시간  $t$ 에서의 채택확률

$F(t)$  : 시간  $t$ 에서의 누적채택확률

여기서  $n(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 수요량,  $N(t)$ 는 누적수요량,  $m$ 은 잠재량이라 하면 시간  $t$ 에서의 채택확률과 누적채택확률은 다음의 식(2),(3)과 같이 표현되고

$$f(t) = \frac{n(t)}{m} \quad (2)$$

$$F(t) = \frac{N(t)}{m} \quad (3)$$

이것을 식(1)에 대입하여 정리하면 식(4)처럼 되며 이 식의 미분방정식을 풀면 시간  $t$ 에서의 수요량과 누적수요량은 식(5)와 식(6)처럼 된다.

$$n(t) = \frac{dN(t)}{dt} = p[m - N(t)] + \frac{q}{m} N(t)[m - N(t)] \quad (4)$$

$$N(t) = m \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}} \quad (5)$$

$$n(t) = m \frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)t}}{(p+q e^{-(p+q)t})^2} \quad (6)$$

따라서 Bass 모형의 확산 함수의 값은 세 가지 확산 계수  $p$ ,  $q$ ,  $m$ 의 값에 따라서 결정된다.

## 3. 확산 계수 추정

Bass 모형의 경우 혁신물의 확산을 예측하기 위해서는 3가지 계수  $p$ ,  $q$ ,  $m$  값을 추정해야 한다. 계수 추정은 확산의 시계열 자료에 의해 값을 구하기도 하고 시장 조사, 경영자 판단, 해석적인 방법 등으로 구한다. 한편, Sultan, Farley, Lehmann[3]은 그들의 경험적인 권고치로 혁신계수를 0.03, 모방계수를 0.38로 제시하였다. 또한 그들에 의하면 이러한 계수의 값은 추정 방법에 따라 달라진다고 한다. 계수 추정의 방법에 따라 계수의 값이 달라지게 되므로 유용한 자료의 양과 혁신물의 상황에 따라서 적절한 방법으로 추정을 해야 한다.

### 3.1 자료가 없는 경우

축적된 자료가 없는 경우에는 유사 혁신물 모형을 분석하거나 경영자 판단에 의하는 경우가 있다. 경영자 판단에 의한 방법으로는 대수적 추정 방법(Algebraic Estimation)[4]이 있는데, 이 방법은 잠재량( $m$ ), 최대 수요시기( $T^*$ ) 그리고 그때의 수요량( $n^*$ )을 경영자 판단에 의하여 결정하는 방법으로 이 경우 확산 함수의 주요 산출물인 최대 수요시기가 경영자 판단에 따른 것이므로 확산 함수의 의미가 없어지게 된다.

다른 방법으로는, 잠재량( $m$ )과 초기수요량( $n(0)$ ) 그리고  $p+q$ 의 값을 알게 되면  $p, q$ 의 값을 추정할 수 있게 된다는 것이다. 하지만  $p+q$ 의 추정은 어려운 일이므로 과거의 자료와 유사물을 분석한 결과 Lawrence 와 Lawton은 산업재의 경우  $p+q$ 의 값을 0.66, 소비재의 경우 0.50을 제안하였다. 또한, 그들은 여러 혁신물에서  $p+q$ 의 범위가  $0.3 < p+q < 0.7$  이라는 결과를 도출해 냈다[2]. 적당한  $p+q$ 가 결정되면 식(6)에 의하여 초기수요량  $n(0)$ 가 다음의 식(7)과 같이 표현되고

$$n(0) = \frac{m(1 - e^{-(p+q)})}{[1 + (\frac{q}{p})e^{-(p+q)}]} \quad (7)$$

이로부터  $\frac{q}{p}$ 가 식(8)과 같이 표현되므로

$$\frac{q}{p} = \frac{m(1 - e^{-(p+q)} - n(0))}{(n(0)e^{-(p+q)})} \quad (8)$$

$m, n(0)$ 을 알게 되면 식(9)에 의하여 최대 수요시기를 구할 수 있게 된다.

$$T^* = \left[ \frac{1}{(p+q)} \right] \text{Ln} \left( \frac{q}{p} \right) \quad (9)$$

### 3.2 자료가 있는 경우

측정된 시계열 자료가 있는 경우 확산 모형의 계수 추정에서도 통계학에서 널리 쓰이는 회귀 분석 방법인 최소제곱법이 가장 먼저 제시되었다. 그러나, 최소제곱법은 계속적인 시장 환경의 변화를 신속적으로 반영하지 못한다는 문제가 제기되어 초반자료로 추정된 계수의 값에 대한 보정을 필요로 하게 된다. 이러한 점을 고려하여 확산 초기 이후 새로운 자료가 유용해지면 이를 이용하여 다시 계수를 향상시키는 방법이 제안되었다.[5]

확산 계수를 추정하기 위해 처음으로 제시된 방법은 Bass가 제시한 최소제곱법 (Ordinary Least Square : OLS)이다. OLS 방법은 식(1)을 식(10)과 같은 이산 형태로 변환시켜 계수 추정을 하는 것이다.

$$\begin{aligned} \hat{n}(t) &= pm + (q-p) \cdot N(t-1) - \frac{q}{m} \cdot N^2(t-1) \\ &= a_1 + a_2 \cdot N(t-1) + a_3 \cdot N^2(t-1) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $a_1 = pm$ ,  $a_2 = q-p$ ,  $a_3 = -\frac{q}{m}$  이다.

실적자료  $n_{real}(t)$  와 이산 추정식 (10)의 최소제곱오차에 대한 목적함수 식(11)에서  $a_1, a_2, a_3$ 을 구한 후 식(12)에서  $p, q, m$ 을 구한다.

$$\min Z = \sum_{t=1}^T [n_{real}(t) - \hat{n}(t)]^2 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} p &= \frac{a_1}{m} \\ q &= -a_3 \times m \\ m &= \frac{-a_2 \pm (\frac{a_2^2}{4} - 4a_1a_3)^{1/2}}{2a_3} \end{aligned} \quad (12)$$

최소제곱법은 주어진 자료와의 오차를 최소화하는 방법으로 계수를 추정하는 것인데 물리적으로는 의미가 없는 음의 값이 나올 수도 있는 점과 새로운 시장의 변화를 반영하지 못하는 단점이 있다.

그러한 단점을 세 가지로 요약하면 다음과 같이 된다.

- 1) 독립 변수인  $N(t), N^2(t)$ 의 유사성 때문에 계수 추정 값이 불안정하거나 잘못된 부호의 값이 나올 수 있다.
- 2)  $p, q, m$ 에 대한 직접적인 추정이 아니어서 이에 대한 표준 오차는 통계적 평가의 의미를 상실하게 된다.
- 3) 연속함수에 대하여 이산 형태로의 변환에 의한 방법으로 근사화하여 시간 간격 왜곡 현상이 발생한다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 대상 시장의 환경 변화에 따른 영향을 확산계수의 값이 반영하도록 하는 시변 계수 추정 방법이 제시되었다. 시간에 따라 계수가 변하

는 방법으로는 Bayes Procedure[5], Feedback Filter[6] 등의 방법이 있다.

Feedback 방법은 Bass 모형의 이산 형태로의 변환에 의한 회귀 계수의 값을 Feedback filter에 의해 식(13)처럼  $t-1$ 이전까지의 계수 값으로  $t$ 에서의 값을 추정한 후 새로운 실적 자료와 비교하여 그 오차를 줄이는 방향으로 계수의 값을 개선시키는 것이다. 즉, Feedback 방법은 새로운 자료가 유용하도록 계수 값을 향상시키는 것이며 계수 값이 변한다는 것은 시장환경의 변화를 반영한다는 것이다. 그러나 이 방법은 계속적인 자료의 입력이 요구되어 자료의 양이 부족하거나 계속적인 자료의 획득이 안될 경우는 적용할 수 없게 된다. 또한 이산 유사에 의한 방법이라는 점에서 OLS에서와 같은 단점을 지니게 된다.

Feedback 방법에 의한 보급량의 추정치는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{n}(t) &= \hat{a}_1(t-1) + \hat{a}_2(t-1) \cdot N(t-1) \\ &\quad + \hat{a}_3(t-1) \cdot N^2(t-1) \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)을 실적치와 비교하여 앞의 식(11)처럼 그 오차를 최소화하는 계수 값을 구한다. 그리고 새로운 자료의 입력이 들어오면 계수의 값을 계속적으로 향상시키는 방법에 의해 오차를 줄이는 방법이다. 식(13)에서 시간  $t$ 에서의 추정계수  $a_i(t)$ 는, 식(14)와 같이 표현된다. 여기서  $A_i(e(t))$ 는 한 단계 이전 예측에 의한 오차 함수를,  $u$ 는 학습 상수로써 보정될 오차의 정도를 나타낸다.

$$\hat{a}_i(t) = \hat{a}_i(t-1) + A_i(e(t)) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} A_i(e(t)) &= |\hat{a}_i(t-1)| [e(t)/\hat{n}(t)] u \\ u &: \text{학습상수 } (0 \leq u \leq 1) \end{aligned} \quad (15)$$

### 4. 비선형 최적화 방법

확산 계수의 추정을 위해서 처음으로 제시된 최소제곱법(OLS)은 실적치와의 비교를 위해서 원래의 연속함수를 이산 형태로 변환시켜서 추정을 하는 계수 추정 방법이다. 이러한 이산 형태로의 변환에 의한 계수 추정은 식(10)처럼 추정치를 구하게 되는데 이와 같은 경우 한 단계 이전의 값으로 추정을 하게되므로 시간 간격 왜곡 현상 등이 발생하는 단점이 존재한다. 한편, 확산 모형이 시장 환경의 변화를 반영할 수 있도록 제안된 Feedback 방법은 시장 환경의 변화를 반영하는 장점을 지니고 있으나 계속적인 자료의 입력을 필요로 하여 자료의 입력이 불가능한 경우는 계수 추정을 할 수 없다는 단점과 이 방법 또한 이산 형태로의 변환에 의한 추정 방법이어서 시간 간격 왜곡 현상의 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점들을 극복하기 위하여 본 논문에서는 해석적인 해를 직접적으로 이용하는 비선형 최소제곱법을 적용하여 시간

간격 왜곡 현상의 단점을 보완하고 자료가 적은 상태에서 초반 추정오류의 확률을 줄이기 위해 제약조건을 부여한 비선형 최적화 방법을 제안한다.

기존의 OLS 방법에서는 추정치를 구하기 위하여 연속 함수 식(4)를 이산 형태로 변환시켜서 구한 식(10)을 이용하여 계수 추정을 하였으나 비선형 최소제곱법은 식(4)의 미분 방정식을 풀어서 구한 식(5)의 누적수요량  $N(t)$ 를 직접 이용하여 추정치를 다음의 식(16)에 의해 구하게 된다.

$$\hat{n}(t) = N(t) - N(t-1) \tag{16}$$

$$= \left[ m \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}} \right] - \left[ m \frac{1 - e^{-(p+q)(t-1)}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)(t-1)}} \right]$$

식(16)처럼 직접적으로 구해진 해를 이용하여 앞의 식(11)에서와 같이 추정치를 실적치와 비교하여 이들의 오차를 최소화한다. 또한, 확산 함수의 모양은 초반 자료의 값에 민감하게 반응하므로 우리 나라처럼 지속적인 자료의 획득이 어렵고 축적된 자료의 양이 적은 상태에서 잘못된 추정의 확률을 줄이기 위해 기존문헌[2]에서의 경험치와 권고치를 제약조건으로 하는 비선형 최적화 방법을 제안한다.

즉, 자료가 없는 경우의 권고치  $0.3 < p+q < 0.7$ 와 음의 값이 나올 수 있는 최소제곱법의 단점을 보완하고 물리적인 확산 계수의 의미를 갖도록  $p > 0, q > 0$ , 그리고  $p$ 의 경험적인 결과의 범위와 참고문헌[3]의 결과를 고려하여  $p < 0.1$ 을 식(17)에서 처럼 제약조건으로 하는 비선형 최적화 방법으로 초기 3년치 자료를 가지고 초반 확산의 추이를 추정한다.

$$\min Z = \sum_{t=1}^3 [n_{real}(t) - (N(t) - N(t-1))]^2 \tag{17}$$

subject to  $0.3 < p+q < 0.7$   
 $p > 0, q > 0,$  (18)  
 $p < 0.1$

식(18)과 같은 제약조건을 가진 식(17)의 목적함수를 비선형 최적화 기법 중에서 수렴성과 속도 특성이 우수한 임의 탐색 방법인 Complex 방법을 이용하여 해를 구하였다[7]. 이 방법은 제약조건을 만족시키는 임의의 random number를 발생시킨 후 각각의 random number에 대하여 목적함수의 값을 계산하여 가장 큰 값을 갖는 변수의 값을 찾는다. 그리고 그 값을 나머지 값들의 중앙값으로 끌어 들어가면서 새로운 값으로 변화를 시키되 계속적으로 제약조건을 만족시키는 지의 여부를 판단하는 방법이다. 비선형 최적화 방법으로 초반 확산 추정을 한 이후 조사를 통하여 새로운 자료를 얻으면 식(14)의 Feedback 방법에 의한 추정치와 실적치와의 오차를 줄이는 방향으로 계수의 값을 보정하여 새로운 시장환경의 변화를 반영한다.

## 5. 사례 연구

본 사례 연구에서는 고효율 기기 보급 프로그램 중에서 기존의 자기식 안정기를 가진 40W 2등용 직관식 형광등을 32W 전자식 안정기를 가진 고효율 형광등(Fluorescent Lamp: FL)으로 대체하고 소비전력 60W의 백열등을 소비전력 16W의 전구식 형광등(Compact Fluorescent Lamp: CFL)으로 대체하는 경우의 전력 및 에너지 절감을 기존의 OLS 방법과 제안된 NLS 방법으로 추정하여 그 결과를 비교 검토하였다.

### 5.1 고효율 형광등

제약 조건이 있는 비선형 최적화 방법으로 확산 모형은 Bass 모형을 사용하여 40W 2등용 32 mm 직관식 형광등은 26 mm 고효율 형광등(전자식 안정기를 포함)으로 교체되는 경우의 확산모형의 계수추정을 통해서 최대 수요전력을 추정하였다.

표 1은 여기서 적용한 DSM 기술 즉, 기존 기기를 고효율 기기로 대체할 경우 절전 효과에 대한 내용을 나타낸다 [8]. 대상기간은 94년에서 시작하여 2010년에 끝나는 것으로 하였다.

표 2는 94년 현재 기존 기기 대수와 고효율 기기 대수를 타내며 표 3은 OLS 와 NLS 방법에 의한 결과를 실적 자료와 비교한 것인데 세 가지 계수  $p, q, m$ 의 계수 추정을 위해서는 최소 3년치 자료가 필요하므로 기존문헌을 참고로 수집 가능한 자료와 추정치를 비교한 것이다[9]. 이 표에서 볼 수 있듯이 OLS 방법과 NLS 방법을 비교한 결과 NLS에 의한 방법이 OLS에 비해 상대 오차가 작게 되도록 추정하게 됨을 알 수 있다.

표 4에는 OLS와 NLS에 의한 계수 추정결과를 보여준다. 여기서 혁신계수는 큰 차이가 없으나 모방계수는 NLS에 의

표 1 기존 기기와 DSM 기술의 비교  
 Table 1 Comparison of DSM technology

| 구분  | 세부구성기술                | DSM 기술                | 소비전력 |     | 절전율 |
|-----|-----------------------|-----------------------|------|-----|-----|
|     |                       |                       | 기존   | DSM |     |
| 형광등 | 40W 2등용 형광등 + 자기식 안정기 | 32W 2등용 형광등 + 전자식 안정기 | 94W  | 64W | 32% |
| 백열등 | 백열등                   | 전구식 형광등               | 60W  | 16W | 75% |

표 2 기존기기 대수와 고효율 기기 대수 단위: 천 대  
 Table 2 Data of low and high-efficient FL and CFL

| 구분      | 연도    | 대수     | 구분      | 연도    | 대수     |
|---------|-------|--------|---------|-------|--------|
| 직관식 형광등 | 1994년 | 98,241 | 백열등     | 1994년 | 11,920 |
|         | 1995년 | 191    |         | 1988년 | 44     |
|         | 1996년 | 267    |         | 1989년 | 62     |
| 고효율 형광등 | 1994년 | 191    | 전구식 형광등 | 1988년 | 44     |
|         | 1995년 | 267    |         | 1989년 | 62     |
|         | 1996년 | 440    |         | 1990년 | 104    |

표 3 OLS와 NLS에 의한 추정 결과 비교 단위: 천 대

Table 3 Comparison of estimation by OLS and NLS

| 연도    | 고효율 형광등 |     |     | 상대오차  |        |
|-------|---------|-----|-----|-------|--------|
|       | 실제      | OLS | NLS | OLS   | NLS    |
| 1994년 | 191     | 176 | 179 | -8.5% | -6.70% |
| 1995년 | 267     | 305 | 278 | 12.5% | 4.0%   |
| 1996년 | 440     | 528 | 431 | 16.7% | -2.1%  |

표 4 계수 추정결과

Table 4 Result of parameter estimation

| 대상 기기   | 추정방법 | $p$    | $q$    | $m$        | $T$   |
|---------|------|--------|--------|------------|-------|
| 고효율 형광등 | OLS  | 0.0011 | 0.5530 | 159,880 천대 | 2005년 |
|         | NLS  | 0.0011 | 0.4431 | 162,410 천대 | 2008년 |

한 방법이 OLS에 의한 방법보다 작게 추정되고 잠재량은 더 많게 그리고 최대 수요시점에 이르는 시간은 늦게 되어 전체적으로 NLS에 의한 방법이 OLS에 의한 방법보다 좀 더 완만하게 확산이 진행되어 가는 것으로 추정된다. 이 추정 결과에 의하면 고효율 형광등은 NLS에 의한 경우는 2008년, OLS에 의한 경우는 2005년경에 최대 수요 시점에 도달할 것으로 여겨진다.

그림 1은 OLS와 NLS 두 가지 방법에 의한 확산 곡선의 모양을 비교한 것으로  $n_{nls}$ 와  $N_{nls}$ 는 각각 초기 3년 동안의 자료의 NLS 추정에 의한 당해연도 수요곡선과 누적 수요곡선을,  $n_{ols}$ 와  $N_{ols}$ 는 각각 OLS 추정에 의한 당해연도 수요곡선과 누적 수요곡선을 나타낸다.

그림 2는 고효율 형광등의 보급곡선으로, 우리나라의 경제 현황을 고려하여 2000년에는 확산모형에 의해 추정된 값보다 10% 작은 값을 실측치로 가정하였을 때, 이를 반영하는 보급의 추이를 나타낸다. 그림 2에서  $n_{nls}$ 와  $N_{nls}$ 는 그림 1과 같은 의미이며,  $n_{new}$ 와  $N_{new}$ 는 각각 새로운 자료의 입력을 반영한 당해연도 수요곡선과 누적 수요곡선을 나타낸다. Bass 모형을 기반으로 한 확산 모형의 계수 추정을 통하여 얻어진 보급량을 가지고 피크시 전력 수요 변화를 추정하였고 그림 3은 OLS와 NLS 두 방법에 의한 기존 저효율 형광등과 고효율 형광등의 피크시 전력 수요 변화를 보여준다. 여기서  $Ppk_{ols}$ 는 OLS 추정에 의한 피크시 전력 수요를 나타내고  $Ppk_{nls}$ 는 NLS 추정에 의한 피크시 전력 수요를 나타낸다.

그림 4는 앞에서 추정된 고효율 형광등의 보급대수와 기존 저효율 형광등의 보급추정을 기반으로 하여 피크시 고효율 형광등 보급에 의한 전력감소의 효과를 보여주고 있다. 이 그림에서 고효율 형광등은 확산 모형에 의해 추정된 보급대수에 소비전력과 부동률, 수용률, 일치율을 곱하여 구하였고[9], 확산 모형에 의해 추정된 2010년의 잠재량 값이 94년부터 선형적으로 변한다고 가정하면 연평균 약 3% 성장을 예측할 수 있으므로 매년 전체 기기 보급대수를 알 수 있고 여기에 확산 모형에 의해 추정된 고효율 형광등 보급

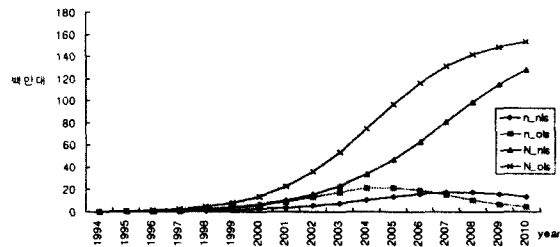


그림 1 고효율 형광등의 보급 추이 곡선

Fig. 1 Comparison of diffusion curves of high-efficient FL

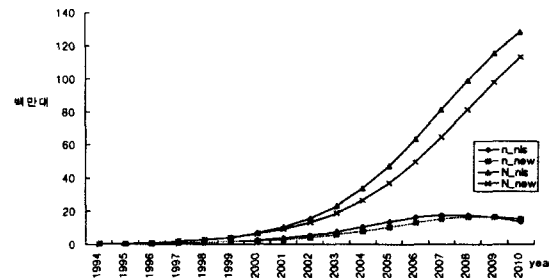


그림 2 새로운 자료를 반영한 고효율 형광등의 보급곡선의 변화

Fig. 2 Change of diffusion curves of high-efficient FL with new input

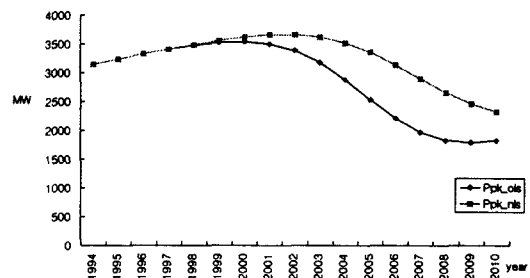


그림 3 OLS와 NLS에 의한 피크시 직관식 형광등과 고효율 형광등의 전력수요 변화

Fig. 3 Comparison of peak demand change of high and low efficient FL by OLS and NLS

대수를 차감 하여 기존 저효율 형광등 보급대수를 추정하였다. 이들에 대한 계수 추정 방법은 제약조건이 있는 비선형 최소제곱법으로 하였다. 그림 4에서  $P_{low}$ 는 기존 저효율 형광등에 의한 전력수요,  $P_{high}$ 는 고효율 형광등에 의한 전력수요,  $Ppk_{nls}$ 는  $P_{low}$ 와  $P_{high}$ 를 합한 것으로 고효율 형광등 확산을 고려한 피크시 전력수요를 보여주며  $Ppk_{old}$ 는 고효율 형광등 보급이 전혀 없을 경우 전력수요를 나타낸다. 그 결과 고효율 형광등의 경우는 확산 초기에는 점차 증가하다가 확산이 본격화되면서 감소하는 것을 볼 수 있다.

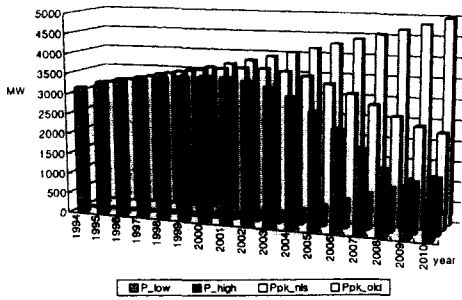


그림 4 고효율 형광등 확산에 따른 피크시 전력 수요 변화  
Fig. 4 Peak demand change with high-efficient FL diffusion

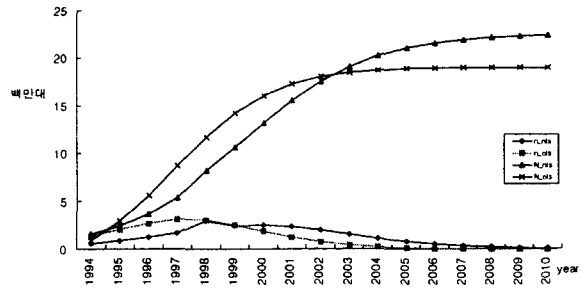


그림 5 전구식 형광등의 보급 추이 곡선  
Fig. 5 Comparison of diffusion curves of high-efficient CFL

5.2 전구식 형광등

고효율 형광등에서와 같은 방법으로 제약 조건이 있는 비선형 최적화 방법으로 확산모형은 Bass 모형을 사용하여 백열등은 전구식 형광등으로 교체되는 경우를 확산 모형의 계수 추정을 통해서 최대 수요전력을 추정하였다. 대상기간은 94년에서 시작하여 2010년에 끝나는 것으로 하였다. 다만 전구식 형광등의 경우는 94년에 조사된 양이 이미 상당히 확산이 진행된 수치여서 확산의 보급원년 시점을 88년으로 가정하였다.

표 5는 OLS 방법과 NLS 방법을 비교한 것을 나타낸 것으로 그 결과 NLS에 의한 방법이 OLS에 비해 실적 자료와의 상대오차가 작게 되도록 추정하게 됨을 알 수 있다.

표 6에는 OLS와 NLS에 의한 계수 추정결과를 보여준다. 전구식 형광등의 경우도 고효율 형광등에서와 마찬가지로 혁신 계수는 큰 차이가 없으나 모방계수는 NLS에 의한 방법이 OLS에 의한 방법보다 작게 추정되고 잠재량은 더 많게 그리고 최대 수요시점에 이르는 시간은 늦게 되어 전체적으로 NLS에 의한 방법이 OLS에 의한 방법보다 좀 더 완만하게 확산이 진행되어 가는 것으로 추정된다. 그림 5는 OLS 와 NLS 두 가지 방법에 의한 확산 곡선의 모양을 비교한 것이다.

표 5 OLS와 NLS에 의한 추정 결과 비교 (단위:천대)  
Table 5 Comparison of estimation by OLS and NLS

| 연 도   | 전구식 형광등 |     |     | 상대오차  |        |
|-------|---------|-----|-----|-------|--------|
|       | 실제      | OLS | NLS | OLS   | NLS    |
| 1988년 | 44      | 41  | 41  | -7.3% | -7.3%  |
| 1989년 | 62      | 73  | 64  | 15.1% | 3.1%   |
| 1990년 | 104     | 129 | 101 | 19.4% | -2.97% |

표 6 계수 추정결과  
Table 6 Result of parameter estimation

| 대상 기기   | 추정 방법 | p      | q      | m         | T      |
|---------|-------|--------|--------|-----------|--------|
| 전구식 형광등 | OLS   | 0.0019 | 0.5781 | 21,598 천대 | 1998 년 |
|         | NLS   | 0.0018 | 0.4600 | 22,539 천대 | 2001 년 |

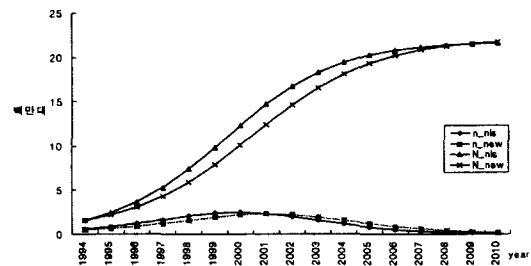


그림 6 새로운 자료를 반영한 전구식 형광등의 보급 곡선의 변화  
Fig. 6 Change of diffusion curves of high-efficient CFL with new input

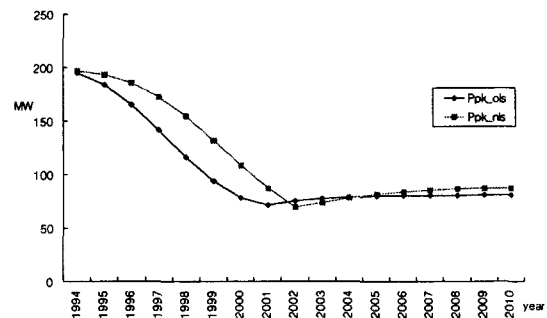


그림 7 OLS 와 NLS 에 의한 피크시 백열등과 전구식 형광등의 전력수요 변화 비교  
Fig. 7 Comparison of peak demand change in high-efficient CFL

그림 6은 1994년의 실적 자료의 값을 새로운 자료의 입력으로 고려한 경우의 보급 곡선을 나타낸다. 전구식 형광등은 보급 확산이 빨라 1998년경에 최대 수요시점에 도달 할것으로 추정되고 2010년경에 포화할 것으로 여겨진다. 이에 비해 고효율 형광등은 확산이 활발히 진행중이고 최대 수요시점은 2001년경으로 추정된다.

고효율 형광등에서와 마찬가지로 방법으로 추정된 보급량을 가지고 피크시 전력 수요 변화를 추정한다. 그림 7은 OLS

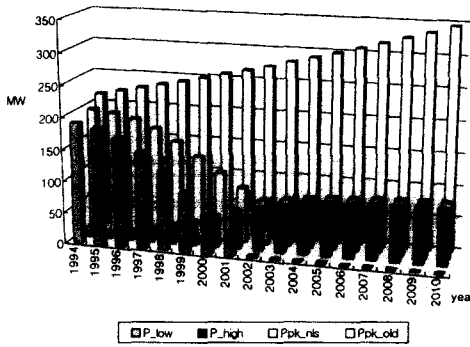


그림 8 전구식 형광등 확산에 따른 피크시 전력 수요 변화  
Fig. 8 Peak demand change with high-efficient CFL diffusion

와 NLS 두 방법에 의한 피크시 전구식 형광등의 전력 수요 변화를 보여주며 그림 8은 추정된 보급대수를 기반으로 하여 피크시 전구식 형광등에 의한 전력감소의 효과를 보여준다. 이 그림에 의하면 고효율 형광등의 경우와는 달리 전구식 형광등의 경우는 확산이 어느 정도 진행된 상태여서 초반부터 감소하다가 기존 기기 모두 고효율로 대체된 이후에는 고효율 기기 자체의 증가에 의해 점차 증가하게 되는 것을 볼 수 있다.

### 6. 결론

본 논문에서는 DSM 프로그램 시행 중의 진단 및 향후 예측이 가능한 모니터링 시스템을 구현하기 위해서 시장 보급 특성을 고려한 확산 모형을 도입하였다. 확산 모형의 실제적인 적용을 위해서는 확산 계수 추정에 대한 연구가 선행되어야 하므로 자료가 없는 경우, 최소제곱법, 피드백 방법 등 기존의 확산 계수 추정 방법들의 특성과 단점을 검토하였으며 이를 보완하고 최소 자료를 가지고 초기 추정 오류의 확률을 줄일 수 있는 방안을 제시하였다. 이러한 방법을 현재 진행중인 고효율 기기 보급 DSM 프로그램에 적용하여 현재의 상태를 파악하였고 앞으로의 효과를 예측할 수 있었다. 향후, 신뢰성 있는 자료가 좀 더 많이 축적되어 각 인자에 대한 효과를 알게 되면 더 나은 방안이 제시될 수 있으리라 여겨진다.

본 논문은 1998년도 전기학회 하계 학술대회에서 추천논문으로 선정된 논문입니다.

본 논문은 1996년도 산업자원부 에너지관리공단 R&D본부의 지원에 의하여 수행되었음.

### 참고 문헌

[1] A.T.Almeida, E.L.Vines, "Advanced Monitoring Technologies for the Evaluation of Demand Side Management Programs," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.9, No.3, pp.1691-1697, Aug., 1981.

[2] K.D.Lawrence, and W.H.Lawton, *Applications of Diffusion Models: Some Empirical Results*, Lexington Books, 1981.  
 [3] F.Sultan, J.U.Farley, and D.R.Lehmann, "A Meta-Analysis of Diffusion Models," *Journal of Marketing Research*, Feb., 1990.  
 [4] V.Mahajan and S.Sharma "Simple Algebraic Estimation procedure for Innovation Diffusion Models of New Product Acceptance," *Technological Forecasting and Social Change*, Vol.30, pp.331-346, Nov., 1986.  
 [5] S.I.Bretschneider and V.Mahajan, "Adaptive Technological Substitution Models," *Technological Forecasting and Social Change*, Vol.18, pp.129-139, Oct., 1980.  
 [6] R.Carbone, and R.L.Longini, "A Feedback Model for Automated Real Assessment," *Management Science*, Vol.24, pp.241-248, Nov., 1977.  
 [7] S.S.RAO, *Optimization: Theory and Applications*, Wiley Eastern Limited, 1977.  
 [8] 통상산업부/에너지자원기술개발지원센터, "고효율 조명 기기 기술개발 성과 발표집", 1996.6.  
 [9] 한국전력공사, "조명 기기 보급실태조사", 1994.8.

## 저 자 소 개

### 김진오 (金 鎭 吾)

전기학회논문지 제48A권 제3호 참조



### 최정훈 (崔 淸 薰)

1973년 6월 5일 생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 6월 동 대학원 전기공학과 석사졸업.



### 김정훈 (金 正 勳)

1955년 9월 13일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988년~1989년 미국 Penn State Univ. 방문교수. 현재 홍익대 공대 전기제어공학과 교수

### 이창호 (李 昌 浩)

전기학회논문지 제48A권 제5호 참조

Tel : (0551) 280-1180

E-mail : chrhee@keri.re.kr

### 김창섭 (金 昌 燮)

전기학회논문지 제48A권 제8호 참조