

## 확산모형을 이용한 LED 조명기기의 최적보조금 산정에 관한 연구

(A Study on the Calculation of Optimal Subsidy for LED Appliance using Diffusion Model)

손학식\*

(Hag-Sig Son)

### Abstract

Korea's electricity supply and demand policy has focusing on electricity demand side management instead of the expanding supply and a lot of effort for LED(Light Emitting Diode) at the time. This paper calculated the optimal subsidy for LED spread.

For this purpose, it analyzed the impact on spread of the lighting appliances each subsidy level from BDM(Bass Diffusion Model) and predicted the number of lighting appliances according to subsidy level in the future.

The case study is calculated susidy for satisfaction of LED target using the suggested model in the future and verified availability.

Key Words : Light Emitting Diode, Bass Diffusion Model, Avoided Costs, Dynamic Programming

### 1. 서 론

우리나라의 전력수급은 그 어느 때보다도 심각한 도전에 직면하고 있으며, 과도한 전력을 소비하는 공급 확대 중심의 에너지정책에서 전력효율화를 중심으로 하는 수요관리정책으로 방향전환이 시급한 실정이다. 이에 정부에서는 “ICT와 과학기술을 활용한 에너지 수요관리 방안”을 발표하였으며, 그 일환으로 LED 조명보급을 위해 많은 노력을 하고 있다[1].

이에 2013년 6월 “공공기관 에너지이용 합리화 추진

규정”을 개정하여 2020년까지 공공건축물에 대하여는 100% LED 조명으로 교체할 계획이다[2]. LED 램프에 대한 지원금 등의 투자가 점점 증가하는 추세에 지원금은 고효율기기 보급의 빠른 시장 전환시점을 위해 지원된다. 이에 LED 보급활성화를 위해 2008년 14,500백만원을 시작으로 2012년 28,900백만원을 지원하여 2012년 LED 램프 보급률은 약 4.5% 내외로 보급되었다. 그러나 형광램프 대체용 LED조명(직관형, 매입형 및 고정형 LED)이 KS기준에는 명시되어 있으나, 아직은 보조금 지원이 없는 상태이다. LED 조명의 보급량은 보조금 수준에 크게 영향을 받으며, 설치수량이 가장 많은 형광등의 경우에 대한 적정 지원금 수준의 결정은 국가적 입장에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

이에 본 논문에서는 LED 보급활성화를 위한 최적

\* Main author : Professor, Department of Architectural Energy, Yong in Song dam college  
Tel : 031-330-9358, Fax :  
E-mail : hsson@ysc.ac.kr  
Received : 2014. 10. 13  
Accepted : 2014. 12. 26

지원금 수준을 결정하기 위하여 가격함수를 고려한 새로운 확산 모형을 이용하여 기기별 보급량을 산정하고 결정된 지원금 수준을 고려하였다. 또한 고효율 조명기기의 보급에 따른 회피비용이나 정책적인 사항을 편익으로 계산하고, 최적지원금 수준을 결정하기 위해 수리모형 중 비용최소화 문제해결 알고리즘인 동적계획법(DP ; Dynamic Programming)으로 최적 지원금 수준을 결정하도록 하였다.

## 2. LED 조명기기의 최적보조금 산정

### 2.1 개요

본 논문에서는 LED 조명기기 보급확산을 위한 최적 보조금 산정을 위하여, 먼저 신제품에 대한 도입부터 성숙기까지 수요예측을 할 때 사용되는 예측기법인 BDM(Bass Diffusion Model)로 조명기기별 자연 발생 잠재량을 계산하였다. 그리고 LED 조명기기에 따른 보조금을 지원하여 단위당 구매비용의 감소를 가져오며 이는 가격인하와 유사한 효과를 가지는 가격함수를 BDM에 적용함으로써 보조금지원이 조명기기보급에 영향을 미치도록하여 보조금지원 수준에 따른 달성가능 잠재량을 산정하였다.

또한 상기의 보조금지원에 따른 비용 및 편익을 계산하고 동적계획법을 이용하여 LED 보급을 위한 최적보조금을 산정하였다. LED 조명기기 최적보조금 산정절차는 표 1과 같다.

표 1. LED 조명기기 최적보조금 산정절차  
Table.1. Procedure of calculating optimal subsidy for LED lighting equipment

단계 1 : 연도별 조명기기 보급대수의 계산
단계 2 : 조명기기 특성 입력
단계 3 : 조명기기 연도별 기준조명기기 대수 계산
단계 4 : BASS DIFFUSION MODEL에 의한 조명기기별 미래확산 대수의 계산
단계 5 : 보조금 고려시 미래년도 LED 보급대수 산정
단계 6 : 보조금 고려여부에 따른 미래년도 조명기기 보급대수 재산정
단계 7 : 조명기기(LED 제외)의 현단위 감소시의 설비비용 산정
단계 8 : 신규 및 교체 조명기기의 미래년도 보급량
단계 9 : 신규 및 교체 조명기기 보급에 의한 편익/비용분석
단계 10 : 동적계획법에 의한 최적보조금 산정

### 2.2 BDM에 의한 조명기기 보급량 계산

조명기기의 보급으로 인한 잠재량은 결국 그 기기가 얼마나 보급되는지에 따라 결정되는 요소이므로 본 절에는 BDM을 통하여 조명기기의 t년도 보급량을 식 (1)과 같이 추정토록 하였다[3-5].

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

단,  $N(t)$  : t년도 조명기기 누적보급 대수

$m$  : 조명기기 보급의 잠재적 수(potential number of ultimate adopters)

$p$  : 혁신계수(coefficient of innovation)

$q$  : 모방계수(coefficient of imitation)

여기서  $m$ 은 보급 가능한 예측된 잠재 대수를 나타낸다.  $p$ 는 스스로 자각을 받아 조명기기를 구매할 의사가 있는 혁신자 집단을 나타내며,  $q$ 는 다른 사용자에 의해 영향을 받아 구매를 하는 모방자 집단을 나타낸다. 따라서 t년도 조명기기 신규보급대수는 식 (1)을 이용하여 전년도의 누적보급 대수를 빼줌으로서 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$ND(t) = N(t) - N(t-1) \quad (2)$$

단  $ND(t)$  : t년도 조명기기 신규 보급대수

BDM 적용을 위해서 예측은 혁신계수  $p$ , 모방계수  $q$ , 그리고 보급 잠재적 수  $m$ 의 세 가지 모수추정을 필요로 하며, 최소자승법을 사용하여  $ND(t)$ 는 시구간(time interval)  $(t_{i-1}, t_i)$ 을 식 (3)과 추정할 수 있다[5].

$$ND(t) = \frac{dN(t_{i-1})}{dt} = pm + (q-p)N(t_{i-1}) - \frac{q}{m} [N(t_{i-1})]^2 + \epsilon(i) = a + bN(t_{i-1}) + cN(t_{i-1})^2 + \epsilon(i) \quad (3)$$

단  $a = pm, b = (q-p), c = -\frac{q}{m}$

식 (3)으로 부터 p, q, m을 식 (4)와 같이 미래년도 조명기기별 보급량 예측치를 도출하였다[6].

$$p = \frac{a}{m}, q = p + b, m = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c} \quad (4)$$

### 2.3 수용가 입장을 고려한 조명기기보급량 및 보조금 산정

수용가 입장의 조명기기의 보급량 산정을 위해 우선 보조금 지원을 통한 LED 조명기기 대수를 식 (5)와 같이 정의하고, 2.2절에서 계산된 m에서 보조금지원을 통해 변화된 잠재량  $m_i^{mod}$ 을 재산정하였다.

$$m_i^{mod} = \frac{m_i}{G(P_i(t))} \quad (5)$$

단  $G(P_i(t))$  : 시간 t 에서의 i LED의 가격함수

$G(P_i(t))$ 는 가격변동에 대한 판매량을 말하며,  $G(P_i(t)) \propto \frac{1}{m}$ 로 회귀분석의 결과인 m과는 반비례 형태를 갖는다. 이때, t 연도의 LED 조명기기의 가격함수인  $G(P_i(t))$ 는 식 (6) 및 식 (7)과 같다[7].

$$G(P_i(t)) = \exp\left[\eta_i \left(\frac{P_i(t)}{P_i(T)}\right)\right], i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$P_i(t) = MP_i(t) - SC_i(t) \quad (7)$$

- 단  $P_i(t)$  : t년도 i타입 LED 가격
- $MP_i(t)$  : t년도 i타입 LED 시장가격
- $SC_i(t)$  : t년도 i타입 LED 보조금 수준
- $\eta_i$  : i타입 LED 가격탄력성
- $P_i(T)$  : 고찰기간동안의 i타입 LED의 평균 가격
- n : LED 수

식 (5)로부터 재산정된  $m^{mod}$ 과 회귀분석으로 도출된 p, q값을 이용하여 t시점의 보조금 지원을 통한 LED조명기기의 보급량을 재산정하였다.

그러나 조명기기 보급대수는 일정하므로 보조금 지급에 의한 LED 조명기기의 보급확산에 의해 증가한 기기대수만큼을 기존조명기기에서 상쇄시켜주어 기존조명기기의 대수를 감소시키기 위한 계산이 추가로 필요하다. 이에 기존조명의 잠재량 m을 한 단위 감소(m-1)시킨 후 조명기기의 보급대수를 산정하고 식 (8)과 같이 조명기기의 단위감소비율을 도출하였다.

$$DR(t)_i = \frac{N(t)_i - N(t)_i^{dec}}{\sum_{i \notin LED} N(t)_i} \quad (8)$$

- 단  $DR(t)_i$  : t년도 i타입 조명기기의 단위감소비율
- $N(t)_i^{dec}$  : t년도 한 단위 감소(m-1)에 의한 조명기기 누적보급 대수

보조금지급에 의한 LED 조명기기 증가분을 식 (8)에 적용하여 기존조명기기별로 감소량을 산정하였다.

이로부터 수용가 입장을 고려한 조명기기보급량을 산정하기 위해 식 (9)와 같이 ROI(Return on Investment)를 계산하였다.

$$ROI = \sum_{i=1} \frac{P_t \times (1+d)^{t-1}}{ES_t} \quad (9)$$

- 단  $ES_t$  : t년도 전력절감비용[원]
- d : 할인율

### 2.4 국가적 입장을 고려한 조명기기보급량 및 최적보조금 산정

국가적 입장에서 조명기기 보급량을 도출하기 위해 2.3절의 조명기기보급량에 식 (10)과 같이 조명기기의 편익을 계산하였다.

$$B_i(t) = AC_i(t) + DLC_i(t) \quad (10)$$

단  $AC_i(t)$  : 회피비용[원]

$DLC_i(t)$  : 기기가격하락[원]

식 (10)으로부터 도출된 편익은 2.3절의 식 (7)에 추가되어 LED조명기기의 보급량을 재산정하고 이에 따른 기존조명기기별의 감소량을 산정하였다.

상기의 과정은 DP를 이용하여 계산하였으며, 목표 보급률을 위한 최적보조금 산정을 위한 목적함수는 식 (11)과 같다.

$$\text{Min } \sum MP_i - B_i \quad (11)$$

Subject to  $SC_t^{\min} \leq SC_t \leq SC_t^{\max}$

단  $B_i$  :  $i$ 타입 조명기기 편익

$SC$  : LED 조명기기 보조금지원

$SC^{\max, \min}$  : LED 조명기기 보조금지원 상·하한치

LED 조명기기에 대한 최적보조금을 산정하기 위하여 동적계획법을 사용하였다. 이를 위해 Stage는 년도(t)로 하였으며, State는 보조금지원에 따른 순편익로 하였다. 우선 초기년도( $t=1$ )의 상태인 (1,S)로부터 보조금 지원에 따라 천이되는 순편익을 계산한다. 이중 총 순현가가 가장 큰 Stage값만을 기억하면 식 (12)과 같이 표현할 수 있다.

$$TR(k,j) = DC(i,j) + DPC(i-1,k) \quad (12)$$

단  $TR$  : 현재년도까지 계산된 누적 순편익

$DC$  : 현재년도 Stage에서 State에 계산된 순편익

$DPC$  : 전년도 Stage에서 State까지 계산된 누적 순편익

DP에 의해서 식 (12)로부터 stage와 stage에 대한 포인트별 최종년도까지 보조금지원에 의한 순현가를 계산하고 그림 1과 같이 최종적으로 계산된 순편익 중 가장 최대화되는 경로를 Backword로 탐색하고, 이로부터 최적보조금을 지원하는 LED 보급대수를 도출하도록 하였다.

### 3. 사례연구

본 논문에서는 LED 조명보급을 위한 최적 보조금을 산정하기 위해서 현재 보조금을 지원하는 백열램프와 할로겐램프의 대체인 컨버터 내장형 LED와 컨버터 외장형 LED의 경우는 제외하고, 현재보조금 제도가 없는 형광등의 대체조명인 직관형 LED램프(컨버터외장형) 및 매입형 및 고정형 LED에 대하여 보조금을 산정하도록 하였다. 단 2020년까지 LED 조명 보급률인 60%를 달성하는 것을 목적으로 계산하였다.

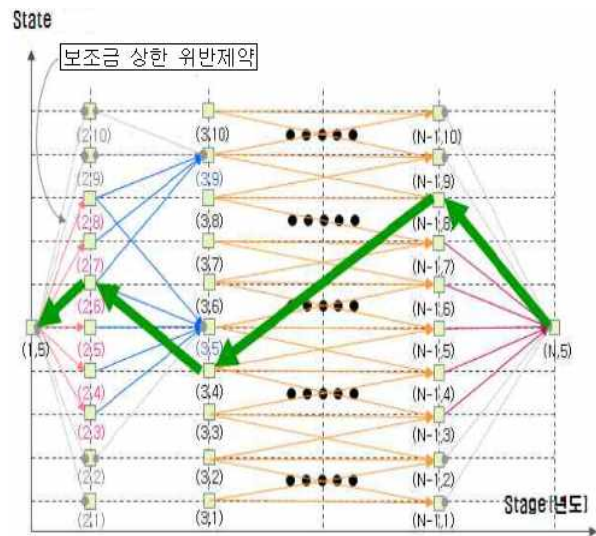


그림 1. DP에 의한 최적보조금 산정  
Fig. 1. Computation of optimal subsidy by DP

본 논문에서는 확산모형을 이용한 LED 조명기기의 최적보조금 산정을 위해서 표 2와 3은 DBM의 입력데이터로 사용되었으며, 도출된 조명기기 대수에 표 4와 5의 입력데이터로 부터 조명기기의 경제성을 분석하고 DP로부터 국가적 입장에서 비용편익을 분석하여 최적 보조금 지원방안을 도출하였다.

#### 3.1 입력데이터

고효율에너지기자재에 포함되는 형광램프 및 LED

(직관형, 매입형 및 고정형)의 데이터는 표 2 및 표 3과 같이 현재 가장 신뢰도가 높은 생산판매실적 데이터를 사용하였다[8-9].

또한 보조금지원을 통한 조명기기보급량 산정을 위한 회피비용 및 가격, 절감율, 조명시간, 피크기여율은 표 4 및 표 5와 같다[10].

표 2. 형광램프의 판매실적(개)  
Table 2. Sales of fluorescent lamp by year

연도	직관형	등근형	컴팩트형	합계
2004	28,516,000	1,653,928	26,919,104	57,089,032
2005	29,153,500	1,690,903	27,520,904	58,365,307
2006	35,134,500	2,037,801	33,166,968	70,339,269
2007	36,737,000	2,130,746	34,679,728	73,547,474
2008	34,363,937	1,931,054	32,344,699	68,639,690
2009	27,870,223	1,620,552	33,793,317	63,284,092
2010	31,117,639	1,344,782	35,746,761	68,209,182
2011	32,746,266	1,391,122	41,422,608	75,559,996
2012	23,327,368	1,072,263	39,205,113	63,604,744

표 3. LED의 판매실적(개)  
Table 3. Sales of LED by year

연도	직관형LED	매입형 및 고정형LED	합계
2010	-	597,692	597,692
2011	-	753,660	753,660
2012	168,388	1,662,503	1,830,891

표 4. 회피비용 입력데이터  
Table 4. Input data of avoided costs

회피실비비용(원/kW)			회피 에너지 비용 (원/kWh)	회피 환경 비용 (원/kWh)
발전	송전	배전		
132,954	60,935	37,449	141.1	9.9

표 5. 기타 입력자료  
Table 5. Other input data

조명별	가격 (원)	절감율 (%)	조명 시간 (h)	피크 기여율 (%)	물가 상승율 (%)
직관형	6,000	-	2,788	73.7	2.8
등근형	5,000	-			
컴팩트형	3,000	-			
직관형LED	60,000	37.5			
매입형 및 고정형LED	120,000				

### 3.2 BDM에 의한 미래년도 조명기기 보급 량 계산

표 2 및 표 3의 입력데이터를 이용하여 BDM에 의해 결과로 도출된 2020년까지의 조명기기 보급량은 그림 2와 같다.

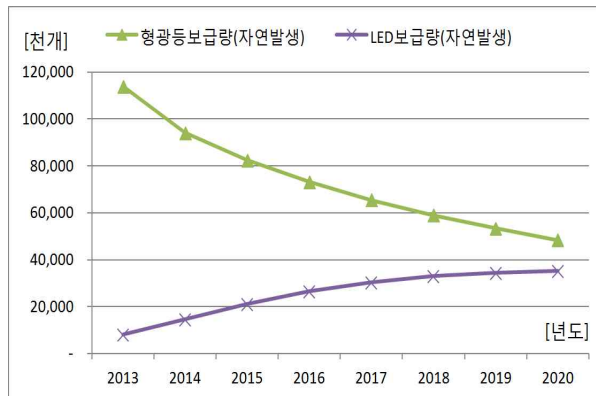


그림 2. 미래년도 조명기기 보급량  
Fig. 2. Total number of lighting equipment in the future year

2013년 형광램프 113,882천개(93%), LED 8,218천개(6.7%)가 보급되었으나, 2020년에는 형광램프 48,397천개(58%), LED 35,334천개(42%)로 까지 분석 가능한 것으로 분석되었다. 이에 2020년의 보급 목표 60%에 14,904천개가 추가적으로 보급되어야 한다.

### 3.3 DP를 이용한 조명기기보급량 계산

#### 3.3.1 수용가 입장을 고려한 조명기기보급량 및 보조금 산정

3.2절의 보조금 지원은 LED 조명기기에 대한 보조금지급을 소비가격의 하한 5%~95%까지로 구성하여 계산하였으며, 표 5의 입력을 추가하여 2.3절에 의해 도출된 ROI는 7년(국가적 입장)을 기준으로 조명기기 보급량을 산정하였다.

표 6과 같이 개당 37,265원/개~80,551원/개의 보조금을 지원하면 LED는 51.71% 정도가 보급된다.

표 6. 수용가 입장을 고려한 조명기기보급량  
Table 6. Total number of lighting equipment based on demand

년도	형광등 보급량 (천개)	LED 보급량 (천개)	LED 보급비율 (%)	RIO (년)	보조금 (원/개)
2013	110,569	11,530	9.44	7.0	37,265
2014	89,104	19,527	17.98	6.7	57,079
2015	75,861	27,693	26.74	6.4	62,562
2016	65,238	34,513	34.60	6.1	61,799
2017	57,962	38,056	39.63	6.8	80,551
2018	51,111	40,899	44.45	6.5	65,039
2019	45,386	42,458	48.33	6.3	68,026
2020	40,434	43,297	51.71	6.0	63,189

#### 3.3.2 국가적 입장을 고려한 조명기기보급량 및 최적보조금 산정

3.3.1절로는 2020년 LED 보급률을 달성이 불가능하기 때문에 표 4의 입력데이터와 2.4절의 DP를 이용하여 산정된 국가적 입장의 조명기기보급량 결과는 표 7 및 그림 3과 같이 도출되었다.

최종적으로 도출된 결과 국가적 입장을 고려하면 31,500원/개~59,368원/개 보조금을 지급하면 2020년까지 LED목표 보급률인 61.4%가 달성가능한 것으로 분석되었다.(단 기술개발에 의한 조명단가는 2013년 기준으로 2020년까지 20% 감소)

또한 LED 보급으로 560원/개~694원/개를 지원하

면 국가적 입장에서 LED 보조금의 회피비용효과가 발생하는 것으로 분석되었다.

표 7. 국가적 입장을 고려한 조명기기보급량  
Table 7. Total number of lighting equipment based on country

년도	형광등 보급량 (천개)	LED 보급량 (천개)	LED 보급비율 (%)	보조금 (원/개)	회피비용 (원/개)
2013	108,460	13,640	11.17	31,500	689
2014	85,857	22,774	20.96	48,975	602
2015	71,454	32,100	31.00	52,041	633
2016	59,864	39,886	39.99	49,801	694
2017	50,673	45,345	47.23	46,528	586
2018	43,325	48,685	52.91	47,610	629
2019	37,328	50,516	57.51	48,074	601
2020	32,322	51,409	61.40	47,494	560

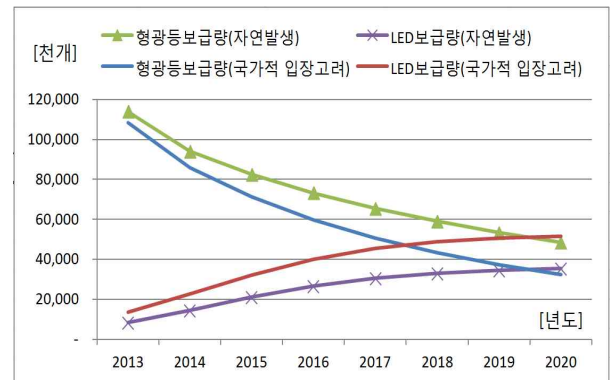


그림 3. 보조금지급에 따른 미래년도 조명기기 보급량  
Fig. 3. Total number of lighting equipment in the future year by support of subsidy

## 4. 결론

본 연구에서는 미래년도 조명기기의 보급량을 예측하기 위해 BDM 확산모형을 이용하였다.

또한 조명기기확산의 보급목표 달성을 위한 수단을 수용가 입장과 국가적 입장을 고려하여 보조금 및 정책적 방안을 고려하고 이를 동적계획법에 적용하여 정량적인 최적보조금을 산정하였으며, 사례연구로서 결과의 유용성을 검증하였다.



사례연구로는 현재보조금 제도가 없는 형광등을 기본으로 2020년까지 LED 조명 보급률인 60%를 달성하는 것을 목적으로 LED 조명의 보조금을 산정하도록 하였다. 본 논문에 의해 조명 보급률을 산정한 결과 2020년까지 LED 보급률 목표인 61.4%가 달성가능하다. 그러나 2014년 전력효율향상사업(고효율기기보급 7.1십억/년, 저소득층 18.3십억/년, 사회복지시설 17.3십억/년) 및 지역에너지절약사업(LED 8.9십억/년)의 LED 보조금 총액이 516억원임을 감안할 1,053천개만 보급가능하기 때문에 현재의 보조금으로는 2020년까지 LED설치 60%는 어려운 일이다.

본 논문의 결과와 같이 국가적으로 LED보급 목표가 가능함에도 불구하고 재정적 뒷받침이 부족한 상황에서 국가적 입장에서 정책적으로 초반기에 기술개발에 집중할 기술력과 전기요금인상 및 LED 가격인하 등으로 LED의 경제성을 확보하고, 이를 통해 조성된 산업기반을 토대로 후반기에는 기업이 시장에서 자력으로 성장할 수 있도록 ESCO 사업 혹은 민간자본금(정책금융공사) 등의 융자사업이 활성화해야 할 것으로 판단된다.

### References

[1] MOTIE, "Energy DSM Measures Using ICT & Science Technology" 2013.8.  
 [2] MOTIE, "Energy Rational Promotion Regulation for Public Institution" 2013.8.  
 [3] Sung-Ook Whang, Bal-Ho Kim, Jung-Hoon Kim, Sung-Chan Jang, Chang-Sub Kim, "Methodology Development of Electric DSM Monitoring System Considered Dissemination of High Efficiency Equipment", KIEE, 1999. 8.

[4] Jong-Jin Park, Chul-Ho So, Jin-O Kim, "A Study on Forecast Dissemination of High Efficiency Equipment Using Diffusion Model", KSEE, VOL. 17, No 1, 2008.  
 [5] FRANK M. BASS, "A New Product Growth for Model Consumer Durables", Management Science, Vol. 15, No 5, January, 1969.  
 [6] Whe-Chul Kim, Jung-Gyoo Lee, Jung-Lin Shin, Jong-Bae Park, "A Study on Diffusion Model of High Efficiency Equipment Considered Condition of Subsidy Support for Electric DSM", KIEE, VOL 51, NO 12, 2002. 10.  
 [7] Mark W. speece and Douglas L. Maclachlan, "Application of a Multi-Generation Diffusion Model to Milk Container Technology", Elsevier Science, 1995.  
 [8] KEMCO, "2012 Annual Statistics for Production(Import) · Sale of Energy Efficiency Equipment", 2013.  
 [9] KEMCO, "2012 Annual Sales Record Report for Energy High Efficiency Equipment", 2013.  
 [10] ETEP, "2012 Assessment Service of Electricity DSM Business", 2013.

### ◇ 저자소개 ◇



**손학식(孫學植)**

1955년 5월 5일생. 2003년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년 발송배전기술사. 1995년 건축전기설비기술사. 1998년 소방설비기술사. 1980~2012년 에너지관리공단 부이사장(온실가스감축본부장, 열병합발전소장, 효율실장). 2012년~현재 용인송담대 건축에너지과 교수.