

# 선형계획법에 의한 수요관리 프로그램의 최적 지원금 결정에 관한 연구

논 문
60-3-8

## A Study on Determination of Optimal Incentives of DSM Programs by Linear Programming

이 병 하<sup>†</sup> · 김 정 훈<sup>\*</sup>  
(Byung Ha Lee · Jung-Hoon Kim)

**Abstract** - A lot of DSM (Demand Side Management) programs have been implemented to promote the effective utilization of resources and the rational development of power industry, and various economic analyses and policy-based studies on DSM have been executed to determine effective subsidy budget. In this paper, a new objective function for deciding an optimal incentive allocation among various programs is presented by introducing the maximization of the total saving power of the programs. For simplicity, the objective function and the constraints is linearized to apply LP(Linear Programming) method. LP program based on Simplex Method was developed by MATLAB. An optimal incentive allocation of 4 DSM programs is presented by the use of the developed MATLAB program.

**Key Words** : DSM, Optimal incentive, Linear programming, Objective function, Simplex method

### 1. 서 론

에너지절감과 환경편익 등을 고려하여 지속적인 편익이 있는 고효율기술을 개발하여 사업화하는 시도를 하고 있고, 수요관리 사업에 매년 막대한 재원이 투자되어 왔다. 에너지의 합리적인 사용을 통해서 전력수요를 절감하고 전력수요의 평준화를 실행함으로써 전력공급설비의 투자를 회피시키고 기존설비의 이용률향상을 도모하고 전력공급 비용을 절감시키는 전력수요관리의 필요성이 점차 증대하여감에 따라 수요관리에 대한 연구가 다방면에서 많이 수행되어 왔다. 그 중에서도 수요관리가 전력 시스템에 미치는 영향이나 신뢰도나 경제성 등에 미치는 효과 등에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다[1-8]. 국내에서도 에너지절감을 위하여 수요관리 분야에 많은 관심과 지원을 하고 있는데, 2010년 현재 시행하고 있는 국내의 수요관리 프로그램을 정리하면 부하관리기기와 부하관리요금과 고효율기기로 나눌 수 있다. 부하관리기기는 최대전력관리장치와 같이 첨두부하가 걸리는 시간대에 부하를 조정하여 줄이는 기기이고 이 기기를 설치시 지원금을 지급하며, 부하관리요금은 계약에 의하여 시행기간을 정하고 이 기간동안 전력을 줄이면 지원금을 지급하는 프로그램이다. 고효율기기는 기기의 효율을 높여서 전력을 절감하는 기기를 설치하면 지원금을 지급하는 프로그램이다. 이러한 수요관리 프로그램들이 시행되고 있지만, 체계적인 평가 기준과 운영계획이 마련되어 있지 않고, 프로그램별 지원금의 금액에 대한 분석은 정밀하지 못하다. 특히 프로그램별 배분이 어떻게 되는 것이 최적인지에 대한 연구는 모델링이 난해하고 해의 산출이 어려우므로 수행된 적이 없다.

본 논문에서는 먼저 특성이 비슷한 고효율기기인 인버터, 변

압기, 안정기와 LED조명의 프로그램들에 대하여 프로그램별 최적 지원금을 산출하는 연구를 수행한다. 개별 프로그램의 전력 절감효과를 지원금의 함수로 표현하고, 개별 프로그램의 전력 절감효과의 합을 최대로 하는 것을 목적함수로서 정하여, 전체적인 절감효과가 최대가 되는 지원금을 찾도록 모델링을 수행하였다. 이 문제는 단순화하지 않으면 너무 복잡하고 난해한 문제로 되므로, 복잡한 문제를 단순화하여 확실한 해를 쉽게 구할 수 있는 선형계획법으로 풀기 위하여 목적함수와 제약조건식들을 선형화하였다. LP 문제의 최적해를 구하는 최적화 기법으로 가장 널리 사용되고 있는 Simplex 알고리즘을 적용하고, MATLAB 언어를 사용하여 Simplex 알고리즘에 기반을 둔 LP 프로그램을 개발하였다. 이 개발된 LP 프로그램을 사용하여, 주어진 조건하에서의 수요관리 프로그램의 최적의 지원금 배분 해를 구하였다.

### 2. 수요관리 프로그램의 절감전력에 대한 선형 모델링

#### 2.1 목적함수의 모델링

제안하는 알고리즘의 목적함수는 고려 대상 기간 동안 개별 프로그램의 전력 절감 효과의 모든 합을 최대로 하는 지원금을 찾는 것이다. 전력 절감 효과는 보급대수가 많아지면 보급대수에 비례하여 늘어나게 되며, 이 보급대수는 지원금 수준의 영향을 받게 된다. 따라서, 개별 프로그램의 전력절감효과의 합을 최대로 하는 것을 목적함수로서 정하면, 목적함수를 개별 프로그램의 지원금을 제어변수로 갖는 함수로 표현할 수 있다.

전력 절감 효과는 고효율기기와 같이 한 번 보급되면 그 효과가 보급된 기기의 수명까지 매년 누적되어 전력 절감 효과가 나타난다. 누적 절감전력은 절감률, 정격부하율이 반영된다. T년도의 누적 절감전력  $SP_{t1,i}^T$ 는 분석기준년도  $t_1$ 부터 시작하여 누적효과가 있는 고려누적년도  $T$  까지의 절감전력을 합해준 것이 절감전력이 될 것이다. 따라서 누적 절감전력  $SP_{t1,i}^T$ 와 t년

<sup>†</sup> 교신저자, 시니어회원 : 인천대 공대 전기공학과 교수 · 공박  
E-mail : bhlee@incheon.ac.kr

<sup>\*</sup> 펠로우회원 : 홍익대 공대 전자전기공학부 교수 · 공박  
접수일자 : 2010년 12월 23일  
최종완료 : 2011년 2월 15일

도의 i프로그램의 절감전력  $UP_i^t$ 은 아래의 식(1), (2)와 같이 표현될 수 있다. 그리고, 이 기기들의 보급대수는 각 프로그램에서 지급하는 지원금의 영향을 받으므로, 각 프로그램에 의하여 지원되는 기기들의 보급대수는 지원금의 변수로 표현되는 Bass 확산곡선으로 표현될 수 있다[9],[10]. 이 연구결과를 활용하여 각 프로그램에 의하여 지원되는 기기들의 보급대수를 지원금의 함수로 표현한다[9],[10]. 그러나, 이 함수는 지원금의 선형화 함수가 아니고 Bass 확산곡선으로 예측되는 비선형함수이므로, LP를 적용하기 위하여 해당기기들의 보급대수의 식을 지원금의 1차함수로 근사화시키며, 각 프로그램에 의하여 지원되는 기기들의 보급대수  $DC_i^t$ 를 1차함수로 근사화 시킨 식은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$SP_{i,t}^T = \sum_{t=t_1}^T UP_i^t \quad (1)$$

$$UP_i^t = \eta_i \cdot DC_i^t(I_i) \cdot RC_i \cdot RLF_i \geq 0, \quad (2)$$

$$DC_i^t(I_i) = a_i \times \left( \frac{I_i}{I_{i,0}} \right) t + c_i \quad (3)$$

$SP_{i,t}^T$  : 분석 기준년도  $t_1$ 부터 고려누적년도 T년도까지의 i프로그램의 누적 절감전력 (Saving Power)

$t$  : 연(Year)

$UP_i^t$  : t년도의 i프로그램의 절감전력(Unit Saving Power)

$t_1$  : 분석기준년도

$T$  : 고려누적년도

$DC_i^t$  : t년도의 i프로그램의 기기보급대수(Diffusion Capacity)

$\eta_i$  : i프로그램의 기기의 절감률

$RC_i$  : i프로그램의 기기의 정격용량(Rated Capacity)

$RLF_i$  : i프로그램의 기기의 정격부하율(Rated Load Factor)

$I_i$  : i프로그램의 지원금

$I_{i,0}$  : i프로그램의 현재의 지원금 수준

$a_i$  : i프로그램 기기의 단순보급모형의 비례계수

$c_i$  : i프로그램 기기의 단순보급모형의 상수항

절감전력은 전력절감 효과가 있는 기기들의 보급대수와 상관관계가 크다. 이 기기들의 보급대수는 각 프로그램에서 지급하는 지원금의 영향을 받으므로, 각 수요관리 프로그램에 의하여 지원되는 기기들의 보급대수  $DC_i^t$ 는 지원금의 함수로 표현할 수 있고, 동일하게 수요관리 프로그램 지원에 따르는 절감전력도 각 수요관리 프로그램에서 지급하는 지원금의 함수로 표현할 수 있다. 따라서, 개별 수요관리 프로그램의 전력절감효과를 합을 최대로 하는 것을 목적함수로서 정하면, 목적함수는 (4)와 같이 각 수요관리 프로그램에 의하여 절감되는 절감전력의 합으로 표현될 수 있고, 결과적으로 목적함수는 지원금을 제어변수로 갖는 함수로 표현할 수 있다.

$$\max_{I_i} \sum_{i=1}^n SP_{i,t}^T(DC_i^T(I_i), I_i) \quad (4)$$

여기서  $n$ 은 수요관리 프로그램의 수이다.

## 2. 제약조건 도출

전력절감효과를 최대화시키는 것을 목적으로 하여 수요관리 프로그램을 시행하되, 관련된 산업을 보호하면서 다른 문제점들

이 발생되지 않는 범위 내에서 적용되어야 한다. 그러므로 실제의 문제는 '주어진 예산 내에서 수요관리 프로그램과 관련된 산업을 보호하면서 절감 효과를 최대화할 수 있는 지원금 수준을 찾는 것이다.' 여기에서, 주어진 예산과 산업보호가 주요한 제약조건이 된다.

가. 주어진 예산 조건

당해 연도에 지급되는 모든 지원금의 합은 수요관리의 총 예산보다 같거나 작다는 조건이다. 지급된 지원금의 합이 딱 떨어지지 않을 수는 있으므로 같거나 작다는 제약조건을 준다.

$$\sum_{i=1}^n I_i^{iter-1} \times DC_i^t(I_i) \leq BG^t \quad (5)$$

$I_i^{iter-1}$  : 반복계산 시 현단계 직전의 i프로그램 기기의 지원금

$BG^t$  : t년도의 예산

나. 개별 산업보호 조건(기존기기의 신규기기로의 연간 교체 수 최대 제약)

수요관리 프로그램과 관련된 산업의 입장에서는 기존의 생산설비와 신규 생산설비 사이에서 경제성을 따지게 되는데, 기존 생산설비의 가치가 아직까지 많이 남아 있는데도 새로운 설비를 도입하는 것은 비용 측면에서 큰 부담이 된다. 따라서, 기존 생산설비를 한꺼번에 폐지하기보다는 점진적으로 폐지하기를 원하며, 본 제약조건에서는 이를 생산설비의 생산능력과 수명을 고려하여 식 (6)과 같은 식을 도출하였다. 기존 설비의 생산능력에서 초기년도 신규 기기의 보급대수를 뺀 수량을 설비의 수명기간 동안에 점진적으로 줄여가는 개념이다. 즉, 이는 기존 기기를 신규 기기로 교체할 수 있는 최대수량에 제약을 걸어서 해당 산업을 보호할 수 있도록 하는 것이다.

$$DC_{i,s,\max}^t \geq \frac{FC_i^0 - DC_{i,s}^0}{LF_i} t + DC_{i,s}^0 \quad (6)$$

$DC_{i,s,\max}^t$  : 기존 기기 연간 최대 보급대수

$FC_i^0$  : 기존 설비의 생산 능력

$LF_i$  : 기존 설비 수명

다. 산업간 형평성 조건(신규기기 연간 도입수 최대 제약)

이 제약조건은 절감 효과가 좋은 일부 프로그램에만 지원이 집중되어 해당 산업은 활성화되고 타 산업은 상대적인 차별을 받는 것을 방지하기 위한 조건이다. 이는 해당 프로그램의 연간 최대 신규 보급에 제약을 두므로써 가능하며, 기기의 수명기간을 기준으로 잠재량으로부터 기존기기의 최대보급대수와 신규기기의 초기 보급대수를 뺀 나머지 수량에 대하여 기기 수명기간 동안 점진적으로 보급하는 개념이다. 이는 초기의 급속한 보급은 제조업체 입장에서 빠른 이익 창출은 가능하지만, 향후의 지속적인 이익을 기대할 수 없어 장기적으로 바람직하지 않기 때문에, 꾸준히 점진적으로 이익을 얻을 수 있도록 하기 위하여 식 (7)과 같이 연간 최대 신규 보급에 제약을 둔다.

$$DC_{i,n,\max}^t \leq \frac{m_i - DC_{i,s,\max} - DC_{i,n}^0}{LG_i} t + DC_{i,n}^0 \quad (7)$$

$DC_{i,n,\max}^t$  : 신규기기 연간 최대 보급대수

$m_i$  : i프로그램 기기의 잠재량

$DC_{i,s,max}$  : 기존 기기 연간 최대 보급대수  
 $DC_{i,n}^0$  : 신규기기 초기 보급대수  
 $LG_i$  : 기기 수명

라. 기기 최소생산대수의 제약 및 기기의 최대 지원금 제약  
 기기 최소생산대수의 제약 조건은 해당 제품을 생산하는 공장이 도산하여 문을 닫지 않기 위한 최소한의 생산을 유지하는 제약조건이다. 그리고 기기의 최대 지원금 제약은 현재까지 기기가격의 50%이상의 지원금은 지원된 적이 없었고, 기기가격의 50%이상의 지원금은 시장을 지나치게 왜곡하여 좋은 결과를 내기가 어려우므로, 지원금이 기기가격의 50% 이하이어야 한다는 제약을 추가하였다.

### 3. LP 최적화기법 적용 및 관련 모델 데이터

#### 3.1 Simplex 법

최적화문제는 목적함수와 제약조건식을 포함하는 모든 식들이 어떤 변수들에 의하여 수식으로 표현될 수 있어야 한다. 어떠한 목적함수를 주어진 제약조건식을 만족하면서 최적화시키는 변수들의 값을 구하는 최적화 기법으로 선형계획법, 비선형계획법, 정수계획법, 동적계획법 등이 있으며, 이 중에서 선형계획법이 모형이 명확하고 정확한 최적해를 확실하게 구하는 해법이 잘 개발되어 있고 다루기가 비교적 편리하므로 가장 널리 사용되고 있다. 선형계획법은 목적함수와 제약조건식을 포함하는 모든 식들을 다 선형식으로 표현하여 해를 구하는 기법이며, 가능해 영역의 경계면에서 최적점이 존재하게 된다. 일반적으로는 가능해 영역의 꼭지점 중의 하나가 최적해이며, 문제가 잘 정의되면 즉 가능해 영역이 존재한다면 비선형계획법과 달리 선형계획법에서는 반드시 최적해가 구하여진다는 장점이 있다. 선형계획법으로 Simplex 법이 가장 널리 활용되고 있는데, 꼭지점들을 찾아 이동해 가며 최적해를 구하는 절차가 명확하게 잘 제시되어 있기 때문이다. Simplex 법의 기본적인 개념은 선형프로그램의 최적해는 가능해 영역의 꼭지점이라는 가정하에 전개된다. 그러므로 풀이 과정 중에 꼭지점을 구할 수 있어야 하며, 슬랙(slack) 변수를 도입하여 부등식 제약 조건들을 등식형태로 바꾸어 꼭지점들을 구한다.

LP 문제는 수학적으로 다음과 같이 정의 될 수 있다[11].

$$\text{Maximize } F(x) : \text{목적함수의 최대화} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \text{subject to } & g(x)=0 : \text{등식 제약 조건식} \tag{9} \\ & h(x) \leq 0 : \text{부등식 제약 조건식} \\ & i(x) \geq 0 : \text{부등식 제약 조건식} \\ & x \geq 0 : \text{양의 변수 제약} \end{aligned}$$

여기서  $x$ 는 변수 벡터  
 $F(x)$ 는 목적함수

위의 식에서 목적함수와 제약조건식을 포함하는 모든 식들은 다 선형식으로 표현된다. 위의 제약 조건식들 중에서 부등식 제약 조건식들은 영보다 같거나 큰 슬랙(slack) 변수를 도입하여 등식인 선형방정식으로 만들어 주며, 아래의 식으로 변환된다.

$$\text{Maximize } F(x) : \text{목적함수의 최대화} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \text{subject to } & g(x)=0 : \text{등식 제약 조건식} \tag{11} \\ & h(x,s)=0 : \text{등식 제약 조건식으로 변환} \\ & i(x,s)=0 : \text{등식 제약 조건식으로 변환} \\ & x \geq 0, s \geq 0 : \text{양의 변수 제약} \end{aligned}$$

여기서  $s$ 는 슬랙변수 벡터

위의 식으로부터 표를 만들고 조건식을 만족하는 많은 해 중의 하나의 특정해로부터 시작하여, Simplex 알고리즘을 적용하여 목적함수의 값을 증가시키는 이웃 꼭지점을 찾는 과정을 거쳐서, 구한 해가 최적조건을 만족할 때까지 반복 수행하여 최적해를 구하게 된다[11].

#### 3.2 수요관리 프로그램별 지원금의 최적배분 결정 절차

각 프로그램으로 절약되는 절감전력은 전력절감 효과가 있는 기기들의 보급대수에 비례하게 되고 이 기기들의 보급대수는 각 프로그램에서 지급하는 지원금의 영향을 받는다. 지원금이 목적함수의 제어변수가 되므로 이를 어떻게 결정하는가가 중요한 문제인데, 각 프로그램별로 최적 값을 도출하는 문제는 난해한 문제로서 아직 까지 시도된 적이 없다. 본 논문에서는 이러한 복잡한 문제를 가능한 단순화 시키고 해를 구할 수 있도록 하기 위하여 선형계획법을 적용하여 최적해를 구하는 연구를 수행하였다.

선형계획법으로 지원금들의 최적값을 구하기 위하여 목적함수와 제약조건식들의 모델을 선형화하여야 하므로, 목적함수 내의 각 프로그램으로 보급되는 기기들의 연도별 보급대수의 합수도 선형화하였다. 수요관리 프로그램별 지원금 최적 배분 절차를 설명하면 아래와 같다.

##### 1) 프로그램 관련 기기들의 보급대수 추정

각 프로그램의 초기 지원금과 보급계수 등을 구하고, 이를 근거로 프로그램 관련 기기들의 보급대수를 추정한다. 지원금에 따라 각 프로그램으로 보급되는 기기들의 연도별 보급대수의 합수는 일반적으로 S자를 편 것과 같은 어느 정도의 시간이 지나면 포화에 도달하는 비선형 모형을 이루게 된다. 이러한 확산되어가는 모형을 추정하는데 Bass 확산곡선이 많이 활용되므로, 본 연구에서도 보급계수와 지원금에 따라 각 프로그램으로 보급되는 기기들의 연도별 보급대수를 Bass 확산곡선을 사용하여 추정한다[9]. 이렇게 추정한 Bass 확산곡선은 지원금의 선형화 함수가 아니고 비선형함수이다. 따라서 LP를 적용하기 위하여 프로그램 관련 기기들의 보급대수의 식을 오차가 최소가 되도록 하여 지원금의 1차함수로 근사화시킨다.

##### 2) 절감전력 결정

지원금에 따라 각 프로그램으로 보급되는 기기들의 연도별 보급대수가 추정되면, 이에 따라 각 프로그램으로 절약되는 절감전력을 구한다. 절감전력을 구할 때는 프로그램의 기기의 정격용량, 절감률, 정격부하율 등이 고려되어 계산된다.

##### 3) LP 프로그램의 모델링 결정

LP 프로그램을 적용하기 위하여 목적함수는 각 프로그램에서 지급하는 지원금의 변수로 선형화된 식으로 표현되어야 한다. 앞에서 설명한 바와 같이 절감전력의 누적효과가 있는 고효율기기의 절감효과를 반영하는 목적함수를 1차 선형식으로 모델링한다. 또한 예산 제약조건식과 기기별 산업보호 제약조건식 등의 여러 가지의 제약조건식들도 각 프로그램에서 지급하

는 지원금 변수의 1차식으로 선형화하여 표현한다. 이렇게 표현되면 Linear Programming(LP, 선형계획법)을 적용할 수 있는 LP 프로그램 모델링이 결정되며, 이 LP 프로그램 모델링에 LP 프로그램 기법을 적용하여 최적의 지원금 배분 조건을 구할 수 있다. 이러한 과정을 거치면, LP 프로그램을 적용하기 위한 LP 프로그램 모델링의 결정이 완료된다.

4) Simplex 법의 적용에 의한 최적해 결정

최종적인 LP 프로그램 모델링이 결정되면, 선형계획법에 가장 널리 사용되고 있는 Simplex 알고리즘을 적용하여 최적해를 구할 수 있다. Simplex 법을 적용하여 최적해를 구하기 위하여 먼저 Simplex 법의 적용을 위한 문제의 정형화를 수행한다.

Simplex 법의 첫 단계로 가능해 영역의 꼭지점인 초기해를 구하고, 초기 정규형 표를 결정한다. 두번째 단계로 현 단계에서의 값이 최적해인지 아닌지를 판정한다. 최적해가 구하여지면 단계의 반복은 종료되고, 최적해를 출력한다. 현 단계에서의 값이 최적해가 아니라면 다음 단계로 넘어간다. 3번째, 4번째 단계로 비기저변수가 기저변수로 되는 변수인 들어오는 변수(entering variable)를 선택하고, 이어서 기저변수가 비기저변수로 되는 변수인 나가는 변수(leaving variable)를 선택한다. 5번째 단계는 들어오는 변수를 기저변수에 포함시키고 나가는 변수를 비기저변수에 포함시키는 물을 적용하여 기저변수들을 수정한다. 6번째 단계로 새로운 기저변수들의 값을 결정하여 구성된 정규형 표에서 피버팅 연산을 수행하여 새로운 해를 구한다. 이 구한 값에 대하여 최적조건을 만족하는지를 판정하여, 만족되지 않으면 위의 2번째-6번째의 단계를 반복한다. 최종적으로 단계 2의 최적해 판정에서 최적해로 판정되면 모든 최적해 구하는 과정을 종료한다[11].

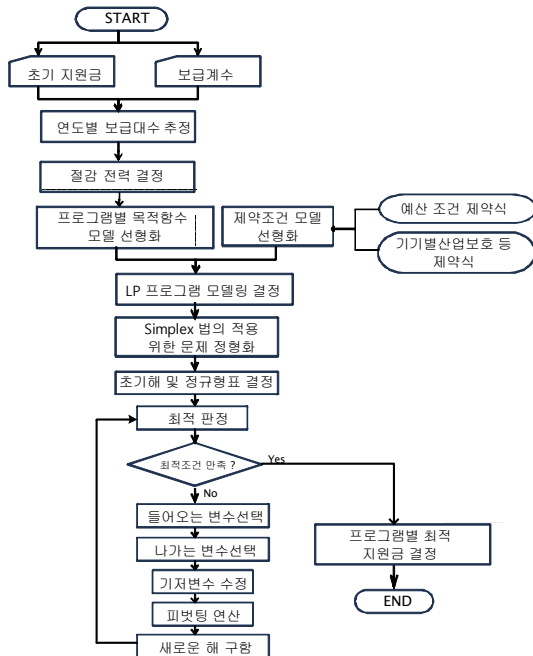


그림 1 수요관리 프로그램별 지원금의 최적배분 결정 절차의 흐름도

Fig. 1 The flow-chart for optimal incentive allocation among various programs

위의 과정을 그림으로 표시한 흐름도가 그림 1에 제시되어 있다. 이러한 절차에 따라 수요관리 프로그램들의 최적 지원금을 결정하기 위한 LP 프로그램을 MATLAB 언어를 사용하여 개발하고, 이 개발 프로그램을 사용하여 주어진 조건하에서의 최적의 지원금 배분 해를 구하였다.

4. 사례 연구

4.1 수요관리 프로그램 기기 및 LP 모델링과 관련된 데이터

본 연구에서 사례연구로 분석하는 수요관리 프로그램으로 고효율기기의 인버터, 변압기, 안정기, LED조명의 프로그램을 고려한다.

선형계획법을 적용하여 최적의 지원금 배분 해를 구하기 위해서는 목적함수와 제약조건들의 모델링이 선형식으로 적합하게 결정되어야 하고, 목적함수와 제약조건들과 관련된 데이터들의 값이 주어져야 한다. 하지만, 인버터, 변압기, 안정기, LED조명의 보급대수가 아주 많고, 각 기기별로 다양한 용량이 있기 때문에 일일이 개별적으로 데이터를 입력시키는 것은 너무나 많은 시간과 노력이 소요되므로 현명한 방법이 될 수 없다. 따라서 여기서는 각 프로그램 별로 가장 대표적인 용량의 기기로 환산하여 적용한다. 인버터는 75kW, 변압기는 1000kVA, 안정기는 T-5 28W, LED조명은 8W의 용량의 기기를 대표적인 기기로 적용하였다. 수요관리프로그램 관련 입력 데이터를 알아보기 쉽게 아래의 표 1에 제시한다.

표 1 고효율기기 관련 입력 데이터

Table 1 Input data concerning high-efficiency appliances

항목	인버터 (75kW)	변압기 (1000kVA)	안정기 (T-5 28W)	LED조명 (8W)
$\eta_i$ (절감률)	0.34	0.0057	0.28	0.87
$RLF_i$ (정격부하율)	0.65	0.7	0.42	0.42
$HP_i$ (기기 가격)	8,228,000원	33,130,000원	12,000원	64,000원
$a_i$ (보급모형의 비례계수)	1,386.39	384.78	375,463.2	254,332.96
$c_i$ (보급모형의 상수)	1,174.0	62.5	723,236.0	3,437.0
$FC_i^0$ (생산능력)	22,441대	81,301대	4,002천대	31,200천대
$LF_i$ (생산설비 수명)	15년	20년	10년	10년
$LG_i$ (기기 수명)	15년	20년	6년	7년
$DC_{i,s}^0$ (초기년도 교체보급)	6548	0	492,136	104,891
$DC_{i,n}^0$ (초기년도 신규보급)	1740	10	578,657	11,655
$I_i^0$ (현재 지원금 수준)	1,913천원	2,550천원	2,175원	26,000원
$DC_{i,min}$ (최소생산대수)	1,740대	380대	1,033,236대	216,400대

4.2 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서 고려하는 수요관리 프로그램들은 1) 인버터, 2) 변압기, 3) 안정기, 4) LED 등의 4개 이다. 고려한 제약조건으로는 아래의 5가지를 고려하였다.

- 1) '예산 제약'
- 2) '기존기기의 신규기기로의 연간 교체수 최대 제약'
- 3) '신규기기 연간 도입수의 최대 제약'
- 4) '기기 최소생산대수의 제약'
- 5) '지원금이 기기가격의 50% 이하이어야 한다는 제약'

시뮬레이션을 보다 더 단순화하고 명확한 분석을 하기 위하

여, 수요관리 예산은 2010년에 배정된 실제 시행예산을 기준으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 2010년 시행예산은 인버터가 63억원, 변압기가 15억원, 안정기가 40억원, LED조명이 107억원으로 4가지의 수요관리 프로그램 시행예산의 합계는 225억원이다. 그리고 주어진 데이터의 변화에 따라 결과가 크게 달라지게 되므로 제약조건이 변경되는 여러 가지 경우들에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 그 결과들을 함께 제시한다. 이와 같이 함으로써 상황이 변경될 때에 최적 값이 어떻게 변하는지 그 경향을 체크해 볼 수 있는 의미도 있다.

주어진 데이터와 제약 조건의 값이 변경되지 않는 기본 경우에 대한 시뮬레이션 결과로서 기본 경우의 각 프로그램별 기기들의 하한과 상한 및 최적 지원금이 표 2에 제시되어 있다. 각 기기들의 하한 지원금은 모두 제약조건 4인 '기기 최소생산대수의 제약'에 걸려있음을 알 수 있고, 상한 지원금은 인버터, 변압기, LED조명이 제약조건 5인 '지원금이 기기가격의 50% 이하이어야 한다는 제약'에 의하여 제약을 받고, 안정기가 제약조건 2인 '기존기기의 신규기기로의 연간 교체수 최대 제약'에 의하여 제약을 받음을 보여준다. 오른 편이 최적 지원금을 보면, 인버터가 효과가 가장 높은 것으로 분석되어 인버터의 지원금이 상한의 값이고, 변압기의 지원금이 다음으로 변압기 지원금의 하한과 상한의 값 사이의 중간의 값을 보여주고 있다. 지원금이 하한이나 상한에 걸려있는 경우에는 비교란에 이를 표시하여 두었다. 안정기와 LED조명은 순위가 낮아 지원금이 하한값임을 보여준다. 이 경우의 각 수요관리 프로그램별 연간 예산도 표에 제시되어 있다. 표 2에 제시되어 있는 수요관리 프로그램별 지원금을 각 기기 가격에 대한 퍼센트로서 그림에 나타내어 보면 그림 2와 같다.

이어서 제약조건이 변경되는 여러 가지 경우들에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 제약조건 1의 변경의 경우에 대한 각 프로그램별 최적 지원금이 표 3에 제시되어 있다. 예산이 증가하면 효과가 높은 기기부터 하한 지원금에서 상한 지원금까지 증가해 감을 보여 주고 있다. 이 시뮬레이션 결과들을 비교 분석해서 전력절감 효과면에서의 수요관리 프로그램별 기기들의 순위를 매기면, 효과가 높은 순위로 인버터-변압기-안정기-LED의 순서임을 알 수 있다. 인버터가 가장 효과적이고, LED가 가장 낮은 결과로 나타났다.

제약조건 2, 3의 변경의 경우에 대한 각 프로그램별 최적 지원금이 표 4에 제시되어 있다. 현재의 상황에서는 '제약조건 2: 기존기기의 신규기기로의 연간 교체수 최대 제약'과 '제약조건 3: 신규기기 연간 도입수의 최대 제약'은 제약 조건을 20% 강화시와 20% 약화시에 대하여 분석하여도 최적 지원금이 동일한 값으로 나오는 시뮬레이션 결과를 통하여 이 조건들은 결과에 큰 영향을 미치지 못함을 확인할 수 있다.

제약조건 4, 5의 변경의 경우에 대한 각 프로그램별 최적 지원금이 표 5에 제시되어 있다. 이 표의 결과를 보면, '제약조건 4: 기기 최소생산대수의 제약'과 '제약조건 5: 지원금이 기기가격의 50% 이하이어야 한다는 제약'은 지원금 결정에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

주어진 데이터들의 값에 따라서 모든 시뮬레이션의 결과가 달려있으므로 조건이 달라진다면 다른 결과가 나올 수 있지만, 현재의 주어진 데이터들의 값에 변화가 없다고 가정한다면, 제약조건식의 민감도 측면에서 '제약조건 4: 기기 최소생산대수의 제약'이 하한에 큰 영향을 미치고, '제약조건 5: 지원금이 기기가격의 50% 이하이어야 한다는 제약'은 지원금의 상한에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. '제약조건 1: 예산 제약'은 항상 지원금 결정에 영향을 미치지, 예산에 따라 전력절감 효과에

맞추어 기기들의 지원금이 상한이나 하한 또는 상한과 하한 사이의 어떤 값으로 배분되도록 영향을 미친다.

표 2 기본 경우의 각 프로그램별 기기들의 하한과 상한 및 최적 지원금

Table 2 The lower and upper limit of incentive and the optimal incentive of the programs in base case

항목	하한(단위: 원)		상한(단위: 원)		최적지원금		비고
	하한지원금	제한 제약	상한지원금	제한 제약	지원금 (단위:원)	연간예산(단위: 백만원)	
인버터	780,887	제약4	4,114,000	제약5	4,114,000	10,970	상한
변압기	2,104,124	제약4	16,565,000	제약5	2,508,001	1,526	
안정기	1,796	제약4	3,590	제약2	1,796	1,661	하한
LED	21,771	제약4	32,000	제약5	21,771	8,343	하한

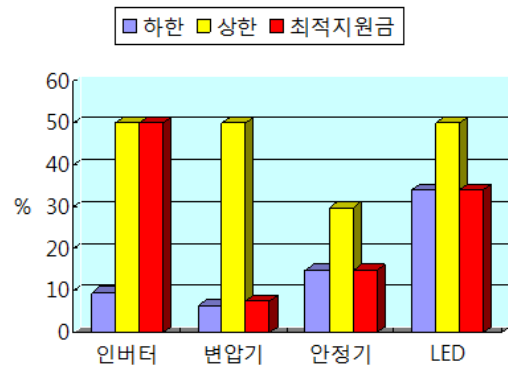


그림 2 기본 경우의 각 프로그램별 하한과 상한 및 최적 지원금

Fig. 2 The lower and upper limit of incentive and the optimal incentive of the programs in base case

표 3 제약조건 1의 변경의 경우에 대한 각 프로그램별 최적 지원금 (단위:원)

Table 3 The optimal incentive of the programs in the case of changing constraint 1 (unit: Won)

항목	예산20%증액		예산40%증액		예산60%증액		예산-20%감액	
	지원금	비고	지원금	비고	지원금	비고	지원금	비고
인버터	4,114,000	상한	4,114,000	상한	4,114,000	상한	2,518,599	
변압기	9,904,207		16,565,000	상한	16,565,000	상한	2,104,124	하한
안정기	1,796	하한	2,280		3,590	상한	1,796	하한
LED	21,771	하한	21,771	하한	30,352		21,771	하한

표 4 제약조건 2, 3의 변경의 경우에 대한 각 프로그램별 최적 지원금 (단위:원)

Table 4 The optimal incentive of the programs in the case of changing constraints 2 and 3 (unit: Won)

항목	제약조건2의 20% 조건강화		제약조건2의 20%조건약화		제약조건3의 20%조건강화		제약조건3의 20%조건약화	
	지원금	비고	지원금	비고	지원금	비고	지원금	비고
인버터	4,114,000	상한	4,114,000	상한	4,114,000	상한	4,114,000	상한
변압기	2,508,001		2,508,001		2,508,001		2,508,001	
안정기	1,796	하한	1,796	하한	1,796	하한	1,796	하한
LED	21,771	하한	21,771	하한	21,771	하한	21,771	하한

**표 5** 제약조건 4, 5의 변경의 경우에 대한 각 프로그램별 최적 지원금 (단위:원)

**Table 5** The optimal incentive of the programs in the case of changing constraints 4 and 5 (unit: Won)

항목	제약조건4의 20%조건강화		제약조건4의 20%조건약화		제약5 기기가격 45%이하로 제한		제약5 기기가격 40%이하로 제한	
	지원금	비고	지원금	비고	지원금	비고	지원금	비고
인버터	3,359,829		4,114,000	상한	3,702,600	상한	3,291,200	상한
변압기	2,524,949	하한	5,796,437		4,311,086		6,114,171	
안정기	2,155	하한	1,437	하한	1,796	하한	1,796	하한
LED	26,125	하한	17,417	하한	21,771	하한	21,771	하한

본 시뮬레이션 결과에서 제시된 전력절감 효과면에서의 수요관리 프로그램별 기기들의 순위와 제약조건식들이 지원금 결정에 미치는 영향은 목적함수와 제약조건식에서 사용된 데이터의 값들이 신뢰성이 있다는 전제하에서 정확한 것이다. 그러므로 주어진 데이터들의 오차를 감안하여 실적용 시에는 이 시뮬레이션 결과에 어느 정도의 여유를 부여하는 것이 타당하다고 생각된다. 더 구체적이고 실제적인 지원금 적용을 확정하기 위해서는 수요관리 프로그램별 지원금의 최적배분 결정을 위한 보다 심도 깊은 추후 연구가 더 필요하며, 시뮬레이션의 결과의 정확도를 높이기 위한 관련된 데이터 확보 및 데이터 정확성 분석을 위한 연구도 추가로 수행될 필요가 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 인버터, 변압기, 안정기와 LED조명 등의 고효율기기의 프로그램들에 대하여 프로그램별 최적 지원금을 산출하는 연구를 수행하였다. 개별 프로그램의 전력절감효과를 지원금의 함수로 표현하고, 개별 프로그램의 전력절감효과의 합을 최대로 하는 것을 목적함수로서 정하여, 전체적인 절감효과가 최대가 되는 지원금을 찾도록 모델링을 수행하였다. 이 문제는 단순화하지 않으면 너무 복잡하고 난해한 문제로 되므로, 복잡한 문제를 단순화하여 확실한 해를 쉽게 구할 수 있는 선형계획법으로 풀기 위하여 목적함수와 제약조건식들을 선형화하였다. LP 문제의 최적해를 구하는 최적화 기법으로 가장 널리 사용되고 있는 Simplex 알고리즘을 적용하고, MATLAB 언어를 사용하여 Simplex 알고리즘에 기반을 둔 LP 프로그램을 개발하였다. 이 개발된 LP 프로그램을 사용하여, 주어진 조건하에서의 최적의 지원금 배분 해를 구하였다.

본 논문의 시뮬레이션 결과는 목적함수와 제약조건식에서 사용된 데이터의 값들이 신뢰성이 있다는 전제하에서 정확한 것이지만, 주어진 데이터들의 정확성 분석은 수행되지 못하였다. 그러므로 더 구체적이고 실제적인 지원금 적용을 확정하기 위해서는 관련된 데이터의 정확성 분석을 위한 연구가 더 필요하며, 소비자 위주의 양방향의 시장 친화적 수요반응 프로그램들을 반영하는 연구와 수요관리 프로그램별 지원금의 최적배분 결정을 위한 보다 심도 깊은 추후 연구가 수행될 필요가 있다. 그러나, 본 논문에서 처음으로 여러 프로그램들의 최적 지원금을 결정하기 위한 연구를 시도하였다는 점은 이 분야의 새로운 시도로서 큰 의의를 갖는다고 할 수 있다.

### 감사의 글

이 논문은 부분적으로 인천대학교 2010년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] T. S. Yau, R. G. Huff and H. Lee Willis, "Demand-side Management Impact on the Transmission and Distribution System" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 506-512, May 1990.
- [2] R. Billinton, D. Lakhapal, "Impacts of Demand Side Management on Reliability Cost/Reliability Worth Analysis" IEE Proceedings on Generations, Transmission and Distribution, Vol. 143, Issue 3, pp. 225-231, May 1995.
- [3] M. Fotuhi-Firuzabad and R. Billinton, "Impacts of Load Management on Composite System Reliability Evaluation Short-Term Operating Benefits" IEEE Transactions on Power System, Vol. 15, No. 2, pp. 858-864, May 2000.
- [4] Gab aldonA, MolinaA, Roldan C et al, "Assessment and simulation of demand-side management potential in urban power distribution networks," IEEE Power Tech Conference Proceedings, vpl.4, pp. 571-575, 2003.
- [5] Kirschen S, "Demand-side view of electricity markets," IEEE Transaction on Power Systems, vol.18, pp. 520-527, 2003.
- [6] Ming Zhou, Gengyin Li and Peng Zhang, "Impact of Demand Side Management on Composite Generation and Transmission System Reliability" Power System Conference and Exposition, PSCE '06, IEEE-PES, pp. 819-824, 2006.
- [7] R. Azaml, A. F. Fard, "Impact of Demand Response Programs on System and Nodal Reliability of a Deregulated Power System" IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2008, ICSET, pp. 1262-1266, 2008.
- [8] D. Huang, R. Billinton, W. Wangdee, "Effects of demand side management on bulk system adequacy evaluation" 2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), pp.593-598, 2010.
- [9] 김정훈 외, 고효율기기 지원 실태조사 및 합리적 개선 방안 연구, 산업자원부, 2007.
- [10] 황성욱, 이병하, 김정훈, "수요관리 프로그램 운영자의 합리적 의사결정을 위한 단순보급모형 개발" 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp.501-502, 2010.7.14-16.
- [11] J.P. Ignizio and T.M. Cavalier, Linear Programming, Prentice-Hall, NJ, 1994.

저 자 소 개



**이 병 하 (李 丙 河)**

1954년 7월 12일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 The Pennsylvania State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1979년~1994년 한전 기술연구원 선임연구원. 1994년~현재 인천대학교 전기공학과 교수.

Tel : 032-835-8437

E-mail : bhlee@incheon.ac.kr



**김 정 훈 (金 正 勳)**

1955년 9월 13일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 1981년~ 현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수.

Tel : 02-320-1621

E-mail : kimjh@hongik.ac.kr