

## 스마트그리드 실시간요금과 연동되는 수요반응을 유도하기 위한 HEMS 설계에 관한 연구

(A Study on Design of Home Energy Management System to Induce Price Responsive Demand Response to Real Time Pricing of Smart Grid)

강동주\* · 박선주 · 최수정 · 한승재

(Dong-Joo Kang · Sun-Joo Park · Soo-Jung Choi · Seong-Jae Han)

### Abstract

Smart Grid has two main objectives on both supply and demand aspects which are to distribute the renewable energy sources on supply side and to develop realtime price responses on demand side. Renewable energy does not consume fossil fuels, therefore it improves the eco-friendliness and saves the cost of power system operation at the same time. Demand response increases the flexibility of the power system by mitigating the fluctuation from renewable energies, and reduces the capacity investment cost by shedding the peak load to off-peak periods. Currently Smart Grid technologies mainly focus on energy monitoring and display services but it has been proved that enabling technologies can induce the higher demand responses through many pilot projects in USA. On this context, this paper provides a price responsive algorithm for HEMS (home energy management system) on the real time pricing environment. This paper identifies the demand response as a core function of HEMS and classifies the demand into 3 categories of fixed, transferable, and realtime responsive loads which are coordinated and operated for the utility maximization or cost minimization with the optimal usage combination of three kinds of demand.

Key Words : Smart Grid, Real Time Pricing, Home Energy Management System, Demand Response

### 1. 서론 및 기존 연구동향

스마트그리드 구축의 목적인 에너지 효율 증가 및 배출가스 감축, 그리고 그러한 사업 환경이 운영되기 위한 핵심 메카니즘 중의 하나가 실시간요금제(이하 RTP: Real-Time Pricing)라고 볼 수 있다. 실시간요금제는 시장 환경에서 수급현황이 어떻게 되는지를 실시간으로 보여주는 신호로서, 수직통합 환경에서 계

---

\* 주저자 : 연세대학교 경영학과 박사과정  
Tel : 031-420-6181, Fax : 031-420-6139  
E-mail : dj kang@keri.re.kr  
접수일자 : 2011년 6월 29일  
1차심사 : 2011년 7월 2일, 2차심사 : 2011년 10월 2일  
심사완료 : 2011년 10월 6일

통운영자가 맡았던 공급과 수요의 조절 기능을 대신 하게 된다. 소비자 입장에서는 이러한 신호에 반응하여 자신의 소비패턴을 조절함으로써 에너지비용을 최소화할 수 있고, 공급자 입장에서는 전체적인 부하수준을 평탄화 함으로써 예비력 확보 및 여유설비용량에 필요한 투입비용을 줄일 수 있다. 현재의 수요반응은 에너지 모니터링 시스템을 통해 시장가격과 전력사용량을 확인하고 사람이 수동으로 반응하는 형태(가격 및 사용량을 보고 직접 on-off)가 주를 이루고 있다. 이러한 방식은 산업용 수용가와 같이 대규모 소비자의 경우는 담당자를 두고 대응할 수 있으나, 일반 가정에서 일상생활 중에 전기수요를 지속적으로 모니터링하며 대응한다는 것은 한계가 있다. 따라서 주택용 수용가에 있어서 수요반응이 활성화되기 위해서는 각 가전기거나 홈 차원에서 자동적으로 모니터링하고 반응할 수 있는 기술적 지원이 필요하다고 할 수 있다. 이러한 맥락에서 최근에 홈에너지관리시스템(이하 HEMS: Home Energy Management System)에 대한 관심이 증가하고 있는데, 아직까지는 지그비(Zigbee)나 전력선 통신(PLC : Power Line Communication) 기반으로 가정 내 통신 네트워크를 구축하는 측면에서의 주로 연구가 진행되고 있다[1-4]. HEMS의 수요관리에 대한 내용을 다루고 있는 연구도 있지만, 주로 전력소비량 데이터를 계측·처리하고 예측하는 하드웨어 및 소프트웨어 시스템 구현에 초점을 맞추고 있다[5-7]. 기타 HEMS 내 태양광 기반의 분산전원과 저장장치, 각종 가전기기들에 운전패턴을 최적화 문제 기반으로 모델링하는 방법을 제안한 연구가 있다[8]. 따라서 본 논문에서는 보다 운영적인 측면에 초점을 맞추어서 실시간요금제에 대한 수요반응을 통해 편익을 극대화할 수 있는 운영 알고리즘에 대해 제안하고자 한다.

## 2. 실시간요금제(RTP)와 수요반응

실시간요금제는 전형적으로 ‘하루전(day-ahead)’이나 ‘실시간(real-time)’의 형태를 취하게 된다. 하루전 시장가격 형성 차원에서 소매 공급자는 해당 거래일의 24시간에 대한 시장가격을 하루전날에 공표하게

된다. 실시간 시장가격 형성 차원에서는, 소매공급자는 지속적으로 해당 시간에 대한 가격을 15~90분 전에 미리 공표하는 형태를 취하게 된다. 미국에서 가장 규모가 큰 실시간요금제 프로그램인 조지아 파워(Georgia Power)의 실시간요금제(RTP) 프로그램은 실시간요금제를 적용하는 과정에서 소비자(대규모 산업 및 상업수용가)로 하여금 하루전으로 할 것인지, 실시간으로 할 것인지를 선택하게끔 하고 있고, 대부분의 소비자가 하루전 요금을 선택하고 있다. 경제적 유인과 효율성 측면에서 볼 때는, 실시간 공표 요금을 사용하는 실시간요금제(RTP)가 가장 큰 가치를 창출할 수 있다.

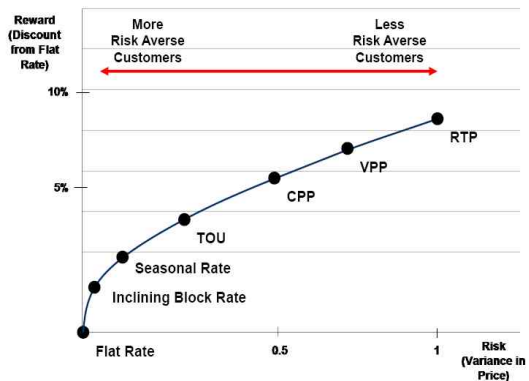


그림 1. 스마트 요금제의 다양한 형태  
Fig. 1. Various types of time-variant pricing

그러한 실시간 가격에 직면하는 소비자의 한계유인이 시장에서의 실제 수급 상황을 가장 근접하게 반영할 수 있기 때문이다. 이러한 매력에도 불구하고 대부분의 실시간요금제(RTP)는 시간별 가격에 대해 하루전 가격공표를 채용하고 있는데, 이는 잦은 변동성에 대한 위험을 회피하고 사전에 대응할 수 있기 때문이다. 현재 미국에서는 회사별로 다양한 실시간요금제(RTP)가 시행 중인데, 회사별로 요금제가 조금씩 다르기 때문에 전체적인 에너지절감효과를 정확하게 추정하기는 힘들지만 대략 그림 1과 같은 분포를 보이고 있는 것으로 판단된다[2]. 이는 현재 상황에 대한 실시간요금제(RTP)의 편익효과를 보인 것으로 계시별요금제(TOU: Time-of-Use)와 중대첨두부하요금제(CPP: Critical Peak Pricing)의 경우는 5[%] 내외, 실

시간요금제(RTP)의 경우는 10[%] 이내로 추정되고 있다. 즉 요금의 변동주기는 짧고 변동폭이 클수록 에너지 절감율이 높아지게 되고, 이는 잘 대응할 경우를 가정한 것으로 이 과정에서 소비자가 직면하는 위험도 증가하게 된다.

미국에서는 향후 스마트그리드 체제에서 에너지 모니터링 및 기술적 지원이 확산될 경우의 수요반응 효과를 실증하기 위해 다양한 파일럿 프로젝트가 운영 중에 있다. 그림 2는 일부 파일럿 프로젝트들에서의 수요반응 정도를 보인 것으로, 계시별요금제(TOU)와 중대침두부하요금제(CPP) 적용시의 수요 반응을 나타낸다. 기술적 지원이 없을 경우는 10~15[%] 정도의 반응을 보였고, 실시간요금제(RTP)에 대한 자동반응 기술이 적용되었을 경우는 20~30[%]의 수요반응을 보였다. 가장 많은 반응을 보인 경우 35[%]까지 나타나고 있으며, 각종 연구에 따르면 현재 시스템 상황에서도 최대 50[%]까지 절감이 가능할 것으로 분석되고 있다.

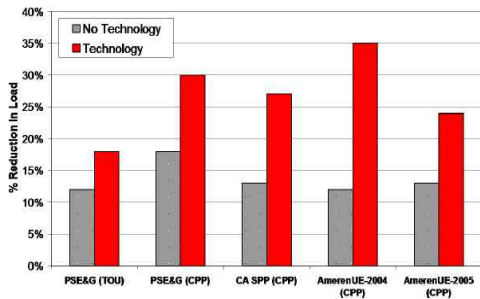


그림 2. SG 기술에 의한 부하반응 증대효과  
Fig. 2. Enabling technology effects on demand responses in pilot projects

그림 1과 2를 종합해보면 침두부하 기준으로 현재의 수요반응 정도는 10~15[%](전체 구간 평균은 다소 하락) 내외 수준이며, 편익효과로는 5[%] 정도 수준인 것으로 추정된다. 그러나 향후 SG 기술이 보급되면 수요반응의 폭과 편익효과는 더욱 증가할 수 있을 것으로 전망되며 HEMS는 스마트 가전기기들이 보급되고 인프라가 구축된 후 실시간요금제에 대한 최적 대응을 통해 이러한 효과를 극대화할 수 있는 역할을 수행할 것으로 전망된다.

### 3. HEMS의 기본구조 및 기능

#### 3.1 가전기기별 운전모드

HEMS의 관리대상은 기본적으로 가전기기 및 설비이다. 부하의 운전모드를 다음과 같이 크게 3가지 모드로 구분한다. 안락모드는 시장가격에 상관없이 소비자가 쓰고 싶은 만큼 쓰는 것이고, 경제운전모드는 시장가격에 반응하여 효용과 절전 사이에서 어느 정도 균형을 맞추는 것이며, 절전모드는 높은 시장가격에 대해 효용보다는 절전에 초점을 두고 꼭 필요한 에너지만을 사용하는 형태이다.

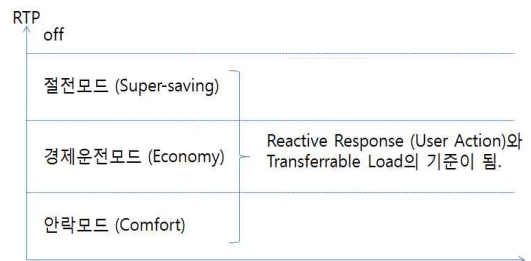


그림 3. 가전기기의 3가지 운전모드  
Fig. 3. 3 operation modes of home appliances

입력되는 실시간요금제(RTP) 신호에 따라 기기별로 입력된 프로토콜에 따라, 그림 3의 3가지 기본적인 운전모드가 결정되고 그러한 운전모드가 결정되면 개별 운전모드에 따른 에너지사용량이 결정되는 구조이다. 그림 4의 시간 축에 대한 최적화 문제는 이러한 하위 최적화 문제들을 의미한다.



그림 4. 문제에 대한 접근 개념도  
Fig. 4. Conceptual approach to problem

대용량 시스템에서 기본적으로 기동정지계획을 결정하고, 그 다음 경제급전계획을 수립하는 것과 마찬가지로, 가전기기 운용계획에서도 기본적으로 운전모드를 결정하고 그에 근거하여 에너지 사용패턴을 결정하는 구조이다. 이러한 접근법은 일종의 2단계(2-stage) 접근법으로 볼 수 있는데, 2문제의 결과가 상호작용하는 만큼 그로 인한 재귀적 속성을 방지하고 문제의 복잡성을 가급적 단순화하기 위한 것이다. 가전기기별 운영사례를 생각해보면, 기기의 용도에 따라 시간축에 따른 기본적 스케줄링이 결정된다. 조명기기는 주로 야간에 동작하며, 냉방기는 주로 하계 시즌에 난방기는 동계시즌에 주로 사용될 것이다. 세탁기 혹은 식기세척기는 비교적 시간 축에 대한 제약이 적고, 배터리 및 각종 저장장치는 소비와 발전이 동시에 가능하므로 가장 복잡한 스케줄링 전략이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2 운전모드 별 에너지 사용량

실시간요금제(RTP)에 따른 운전모드가 결정되면, 개별 운전모드 별로 에너지사용량을 결정한다. 예를 들어, 그림 5에서와 같이 절전모드로 운전모드가 결정되면 절전모드 내에서 에너지 사용량에 대한 선택범위가 있을 경우 해당 시간동안 효율을 극대화할 수 있는 최적의 에너지 사용량을 결정하게 된다. 비용 최소화의 경우에는 에너지를 가장 적게 사용하는 것이 해가 되므로 논의의 대상이 아니다.

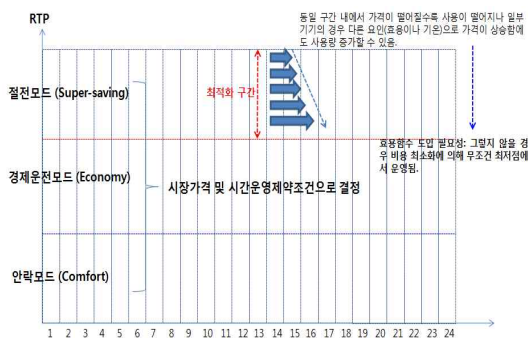


그림 5. 개별 운전모드에서의 에너지 사용계획  
Fig. 5. Energy usage plan on each operation mode

그림 4의 2단계 접근법을 구체화하면 그림 6과 같다. 사전적으로 하루전가격(Day-ahead price)을 공식받으면 이에 근거하여 주요가전기기들의 운전모드를 결정하고, 각 운전모드별로 세부적인 운전패턴을 결정하게 된다.

수요 반응에서 효용함수의 정의는 필수적이다. 수요 반응이란 결국, 비용과 소비자 효용사이의 교환비율이라고 간주할 수 있기 때문이다. 효용은 안락모드에서 가장 높고, 경제운전 모드일 때 중간정도, 절전모드일 때 가장 낮은 수준을 보인다. 이러한 효용에서 비용을 차감한 순효용 부분을 극대화하는 것이 HEMS의 목적함수로 정의할 수 있다.

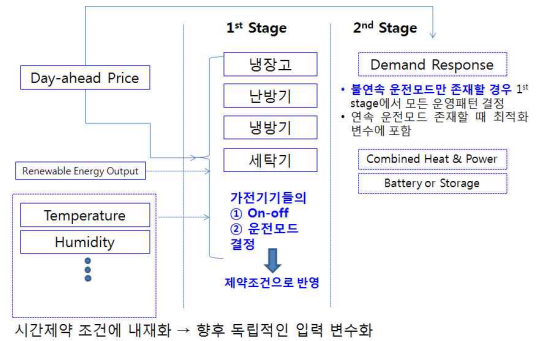


그림 6. 수요반응에 대한 2단계 접근법  
Fig. 6. Two-stage problem approach to DR

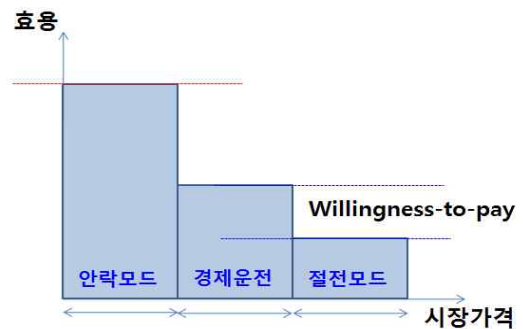


그림 7. 시장가격과 효용함수  
Fig. 7. Market Price & Utility Function

효용은 공급-수요 곡선에서 수요측 입찰 곡선으로 이해할 수 있다. 그림 7의 수요곡선은 운전모드를 결정하기 위한 것으로 각 운전모드 별 지불가격용의(willingness-to-pay)의 수준이 사전적으로 정해지면,

해당 수준과 시장가격(RTP)의 수준이 비교되어 운전 여부가 결정되는 원리이다.

운전모드가 결정되면 그림 8과 같이 부하사용절감이나 전력시장가격이 높은 시간대에서 낮은 시간대로의 부하이전에 의해 비용절감효과를 누릴 수 있고, 이 과정에서의 효용감소를 고려하여 수요반응의 정도를 결정하게 된다.

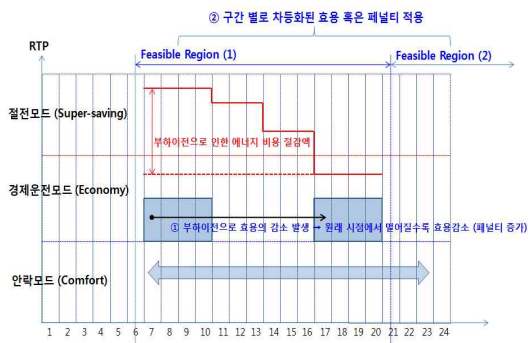


그림 8. 부하이전에 의한 비용절감  
Fig. 8. Cost saving effect by load shifting

그림 9는 이러한 의사결정 사례의 예를 든 것이다. 부하이전과 관련하여 원래 t1 시점에 사용할 예정이었던 부하를 t2 시점으로 이동할 경우는 그림의 효용함수 분포도에 따라 효용감소를 경험하게 되고, 그만큼 비용감소효과를 반대급부로 얻게 된다.

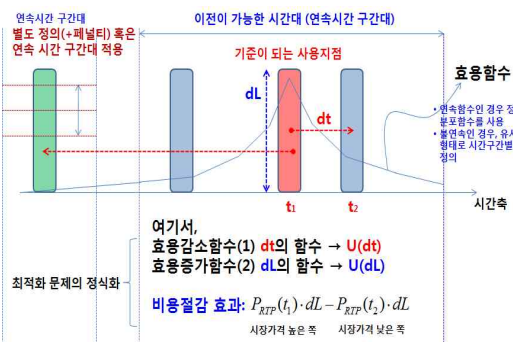


그림 9. 부하이전에 의한 효용감소  
Fig. 9. Utility reduction by load shifting

그림 10은 부하감축 및 이전에 의한 효용감소와 그로 인한 비용절감효과를 수식으로 정식화한 것이다.

순효용을 순이득(Net Benefit)으로 정의하면 첫 번

째 항은 부하감축으로 인한 효용감소, 둘째 항은 부하 이전에 의한 효용감소, 세 번째 항은 두 가지의 수요반응으로 인한 비용절감분을 의미한다. 이러한 정식화에 기초하여 이러한 수요반응 결정과정을 도식화해보면 그림 11과 같다. 가전기기의 종류에 따라 on-off 모드만 가능한 경우, 불연속적인 다중운전모드가 존재하는 경우, 연속 다중운전모드가 존재하는 경우 등이 있을 수 있다. 이러한 운전모드는 기기별 특성을 고려하여, 개별적으로 설정해주는 과정이 필요하다.

$$\begin{aligned}
 \text{Net Benefit} &= -U_i(dL) - U_i(dt) + C_i(dL) \\
 &= -\{U_i(L_1) - U_i(L_2)\} - \{U_i(t_1) - U_i(t_2)\} + \{P_{RTP}(t_1) \cdot dL - P_{RTP}(t_2) \cdot dL\} \\
 &= -\{U_i(L_1, t_1) - U_i(L_2, t_1)\} - U_i^p(dt) + \{P_{RTP}(t_1) \cdot (L_1 - L_2) - P_{RTP}(t_2) \cdot (L_1 - L_2)\} \\
 &= -\{U_i(L_1, t_1) - U_i(L_2, t_1)\} - U_i^p(dt) + \{P_{RTP}(t_1) - P_{RTP}(t_2)\} \cdot (L_1 - L_2)
 \end{aligned}$$

$T_1$ : 시점에서 감축 전 부하량  
 $T_2$ : 시점에서 감축 후 부하량

그림 10. 수요반응에 의한 순효용의 정식화  
Fig. 10. Net benefit formulation of DR

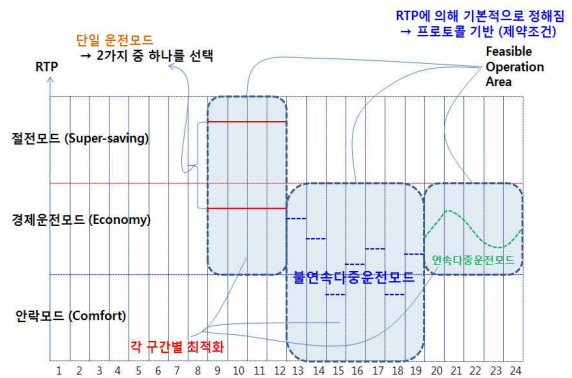


그림 11. 운전모드 및 에너지 스케줄링  
Fig. 11. Operation mode & energy scheduling

다음의 4절에서는 이러한 가전기기별 부하운전 특성과 효용함수를 모델링하는 방법에 대해 제한한다.

#### 4. 가전기기별 운전특성과 효용함수

가전기기들은 개별적으로 개개의 운전특성을 가진

다. 냉·난방기의 경우는 하계와 동계 시즌은 한낮과 밤에 사용정도가 높게 나타나고, 냉장고의 경우는 냉장 및 냉동강도에 따라 냉각과 정지 모드를 오가며 일정한 온도를 유지하게 된다. 세탁기의 경우는 급한 세탁물이 아닌 경우에는 비교적 가동시간이 자유롭다고 볼 수 있다. 이외에도 전자레인지, 식기세척기 등 다양한 가전기기가 존재하는데 본 논문에서는 비교적 개별 운전패턴을 대변하는 냉·난방기, 냉장고, 세탁기의 경우에 대해서만 구체적으로 살펴보기로 하고, 기타의 기기들에 대해서는 평균적인 값을 반영하는 것으로 한다.

### 4.1 냉·난방기

냉·난방기는 구체적으로 에어컨이나 히터 같은 기기들을 의미하는 것으로, 순간적으로 가동을 중지하더라도 냉방이나 난방 효과에 큰 영향을 미치지 않는다. 그리고 일정시간 정지할 경우 약간의 효용감소만 감내하면 부하를 상당부분 감축할 수 있다. 즉 그림 12에서 보는 바와 같이 일반적인 효용함수의 형태와 마찬가지로 일정 수준이 넘어가게 되면 냉난방의 강도로 인한 효용의 증가는 체감상태로 넘어가게 되는데 이는 경험적으로 인식이 가능하다. 이러한 효용함수는 로그함수를 도입하여 수식적으로 모델링이 가능하고, 세부적인 파라미터는 소비자별 차등적인 경험기반으로 구현될 수 있다.

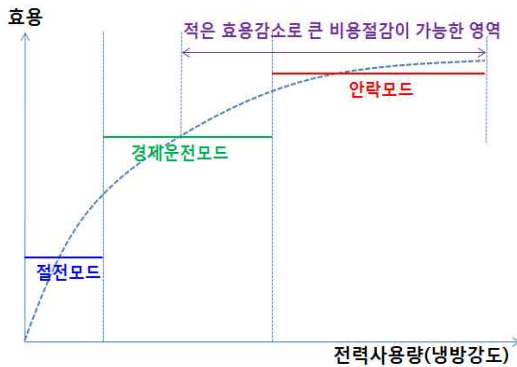


그림 12. 냉난방강도와 효용함수  
Fig. 12. Cooling & heating intensity & Utility function

이를 수식으로 표현하면 다음과 같다. 여기서 NB는 순이익(Net Benefit)을 의미하고, A(t)는 로그함수(효용)의 시간대별 변화를 모델링할 수 있는 계수이다. 냉방기(air conditioner)의 경우를 예로 들어 정식화해보면 다음과 같다. 이는 연속함수를 가정했을 때이고, 불연속함수를 가정할 경우 그림 12와 같은 형태로 모델링할 수 있다.

$$NB_{\text{냉방기}} = \sum_{t=1}^n [A(t) \ln Q_a(t) - P_{RTP}(t) Q_a(t)] \quad (1)$$

$P_{RTP}$  역시 시간(t)에 대한 함수로서 하루를 n주기로 나눌 경우, 해당 주기별로 가격이 변하게 된다. 24주기일 경우는 1시간 단위, 48주기인 경우에는 30분, 96주기인 경우에는 15분 단위로 시장가격이 구분된다. Q(t)는 전력사용량으로 시장가격 주기별 사용전력([kW])을 의미한다. 이러한 개념에 근거하여 식 (1)의 순이익을 극대화하는 최적화 문제를 구성하고, 시간별 Q(t)를 결정하면 된다.

혹은 그림 7의 입찰함수의 직접적인 형태로 표현할 수 있다. 입찰함수는 사용자의 한계효용을 표현한 함수라고 볼 수 있고, 결과적으로 이러한 입찰함수(한계효용)를 적분한 것이 그림 12의 효용함수가 된다.

### 4.2 냉장고(refrigerator)

냉장고의 경우는 크게 그림 13과 같은 형태의 에너지 사용구조를 가진다. 냉장고가 전력소모를 많이 하는 용도로는 성에제거(defrost)작업과 냉각에 사용되는 에너지인데, 연구보고서별로 그 결과는 상이하지만 성에제거의 경우 통상 하루 중 1~2회 20분~1시간 동안 10~15%의 에너지를 소비하며, 냉각의 경우는 하루 6~10시간 동안의 시간에 20~30% 정도를 차지하는 것으로 보고되고 있다[9]. 이러한 기능별 에너지사용구조와 효율은 냉장고 용량 및 기기의 종류별, 또한 동일기기에 있어서도 사용습관별로 다르고, 시간이 갈수록 고효율 기기들이 출시되고 있기 때문에 명확히 규정하기 힘든 측면이 있다. 본 논문에서는 상기와 같은 기준을 적용하여 사례연구에서 수요

반응의 정도와 에너지 비용 절감을 테스트해보는 것으로 한다.

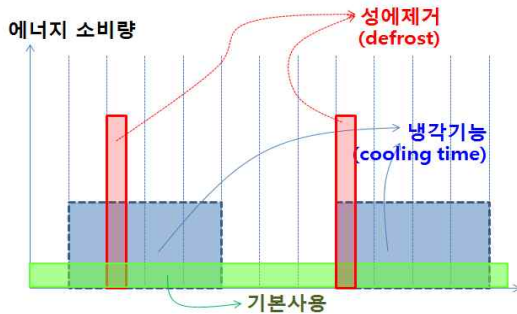


그림 13. 냉장고 에너지 사용패턴  
Fig. 13. Energy Usage Pattern of Refrigerator

문제 정식화 측면에서 24시간 중 6~10시간의 냉각 시간을 어떻게 배치할 것인가 하는 것과, 성예제거 시간을 24시간 중 2시간대에 어느 정도(고른 분포)의 시간간격을 두고 배치할 것인가에 대한 문제로 가정해보았다. 기본사용 부분은 냉장고가 on되어 있는 이상 항상 켜진 상태에서 소비되는 기본 에너지이고, 냉각기능 부분은 하루 중 최소운전시간을 하루 24시간에 대해서 어떻게 골고루 배치할 것인가에 대한 문제이다. 즉 하루에 8시간을 냉각에 할애해야 한다고 보면, 단위 시간당의 냉각비용은 단위 전력사용량에 해당 시간대의 실시간요금제(RTP)를 곱한 값으로 정의할 수 있다. 식 (2)는 냉장고 에너지 비용 중 냉각 부분에 소비되는 에너지 비용을 정식화한 것으로  $Q_c$ 는 시간당 단위 에너지 사용량,  $U_t(o_c)$ 는 냉각기능의 사용여부(가동/휴지)를 의미한다.

$$EC_{\text{냉장고(냉각)}} = \sum_{t=1}^{24} [Q_c \cdot U_t(o_c) \cdot P_{RTP}(t)] \quad (2)$$

성예제거의 경우는 하루 24시간 중 가격 시간대가 가장 낮은 2시간을 선택하는 형태로 접근할 수 있다. 이를 식 (2)에 반영하면 식 (4)와 같은 형태로 정식화된다.  $Q_d$ 는 성예제거(defrost)에 소비되는 전력이다.

$$EC_{\text{냉장고}} = \sum_{t=1}^{24} [\{Q_c U_t(o_c) P_{RTP}(t)\} + \{Q_d U_t(o_d)\}] \quad (3)$$

이 때 냉각기능 가동시간이 최소 8시간 이상, 성예제거 시간이 2시간 이상 필요하다면 다음과 같은 제약 조건이 적용된다.

$$\sum_{t=1}^{24} U_t(o_c) \geq 8, \quad \sum_{t=1}^{24} U_t(o_d) \geq 2 \quad (4)$$

### 4.3 세탁기(washing machine)

세탁기의 경우도 냉장고와 마찬가지로 전형적인 이 전부하(transferable load)로 볼 수 있는데, 단 냉장고와는 달리 부하이전 시와는 달리 사용자의 효용감소를 불러일으킬 수 있다. 즉 낮시간대에 세탁을 하려했으나 높은 요금으로 밤 시간대로 지연한다면 급한 경우가 아니면 상관없겠지만 원래 하려던 시간에 하지 못했기 때문에 어느 정도의 효용감소는 불가피하다고 볼 수 있다. 단 세탁의 선호시간대가 사용자별로 천차만별일 수 있기 때문에 본 연구에서는 크게 밤 시간대와 낮 시간대로 구분하고 2가지 시간대에 대한 효용차이를 적용하기로 한다. 단 빨래는 통상적으로 낮에 하는 경우가 많으므로 낮 시간대가 밤 시간대에 비해 약간 효용이 높은 것으로 적용하였다. 그림 14는 이러한 맥락을 나타낸 것으로 총 세탁시간을 하루에 걸쳐 분배하는 것이다. 단 지연시간에 대해서는 어느 정도 제

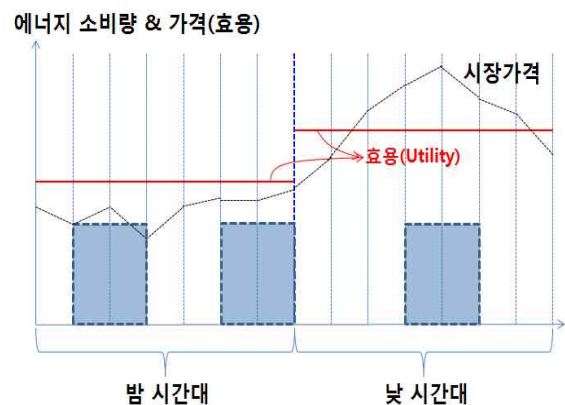


그림 14. 효용과 시장가격을 고려한 세탁시간 결정  
Fig. 14. Scheduling of washing machine considering utility & RTP

약을 걸어줄 필요가 있는데, 지연시간이 너무 길어질 경우 세탁과정 및 결과 자체에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 예를 들어, 세탁과정 중에 멈추는 시간이 1시간 내지 2시간을 넘지 않도록 하는 제약조건을 걸어줄 수 있다.

세탁기의 경우도 세탁, 행굼, 탈수, 건조 등 기능별로 에너지 소모량이 다르지만, 본 논문에서는 단순화를 위해 전체 과정이 2시간 정도 소요된다고 가정하고 이 경우 효용과 실시간요금제(RTP)를 고려한 최적 시간대를 선택하는 문제로 구성한다.

$$NB_{\text{세탁기}} = \sum_{t=1}^{24} [B(t) - \{Q_w U_t(o_w) P_{RTP}(t)\}] \quad (5)$$

식 (5)에서  $B(t)$ 는 시간대별 효용,  $Q_w$ 는 세탁기의 단위 소비전력,  $U_t(o_w)$ 는 세탁기의 세탁기능 가동 여부를 의미한다. 여기에 최저 세탁시간과 최대 지연시간에 대한 제약조건을 걸어주면 다음과 같다. 즉, 세탁 시간은 2시간이며, 각 시간대가 4시간 이상 벌어져서는 안된다는 것을 의미하는데, 시간지연이 너무 길어질 경우 세탁과정 자체에 영향을 줄 수 있기 때문이다.

$$U_t(o_w) = 2, t_2 - t_1 \leq 4 \quad (6)$$

### 5. 사례연구

본 절에서는 3~4절의 내용을 바탕으로 임의의 시변 동 가격에 대한 HEMS 기반의 수요반응으로 절감가능한 에너지비용의 가능성을 검토해보기로 한다. 계시별요금제(TOU)와 실시간요금제(1시간 단위)를 적용하기로 하고, 다음과 같은 샘플을 적용하였다. 계시별요금제는 3가지 시간대로 구분하였고, 각 시간대의 적용요금은 해당구간 시간대 실시간 요금의 평균값과 동일하다.

사람들의 에어컨을 켜는 상황은 개인차가 있을 수 있지만, 여기서는 기온이 섭씨 25[°C]를 넘길 때 평균적으로 에어컨을 켜다고 가정하고 다음과 같은 작동 패턴의 적용이 가능하다.

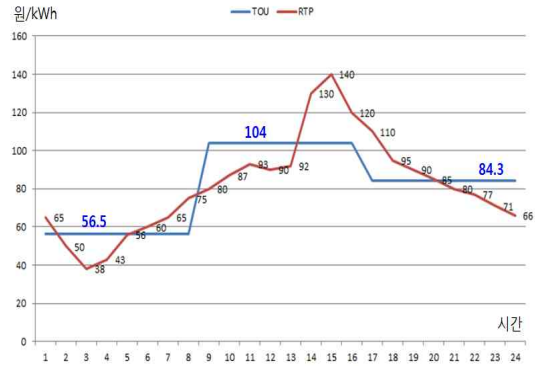


그림 15. TOU and RTP 적용 사례  
Fig. 15. Time-of-use & real-time pricing

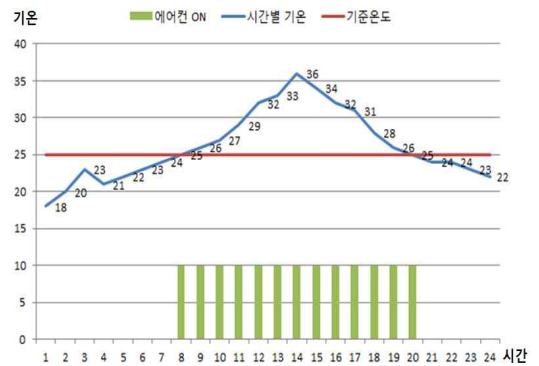


그림 16. 에어컨 수동 온오프 운전모드  
Fig. 16. Manual on & off of air-conditioner

에어컨 용량이 30[kW]일 때 수요반응이 없는 경우와 있는 경우의 전력사용을 비교하면 다음과 같다. 수요반응은 기온에 따른 운전모드(절전모드, 경제운전모드, 안락모드) 결정으로 이루어지며, 이러한 운전모드의 세분화된 반응만으로도 상당량의 부하(34.8%)를 줄일 수 있다. 물론 이러한 수요반응은 개인의 효용에 따라 변할 수 있고, 효용을 보다 많이 반영할 경우 부하반응 정도는 줄어들 수 있다. 그러나 동시에 보다 다양한 변수를 에어컨 운전에 반영할 수 있게 되면, 그에 상응하는 에너지 절감이 가능하다는 것을 보여주는 사례라고 할 수 있다. 이러한 수치는 실제 그림 2 다양한 파일럿 프로젝트에서의 수요반응 효과와도 부합하는 수준으로 이해할 수 있다.

냉장고의 경우는 직접적인 효용함수가 개입되지 않



기 때문에, 식 (2)~(4)에 근거하여, 정해진 제약조건 (최소 8시간 이상의 냉각 시간)을 적용하여 계시별요금제(TOU)와 실시간 요금신호에 대한 비용 최소화 최적화문제로 구성할 수 있다. 이러한 개념에 근거하여 냉장고의 그림 15의 계시별요금제(TOU)와 실시간요금제(RTP) 요금제를 냉장고 운영에 적용시켜 보면 그림 19와 같은 결과를 얻는다. 그림 19는 고정요금제(Flat Rate), 계시별요금제(TOU), 실시간요금제(RTP)의 3가지 요금제를 적용했을 때를 비교한 것으로 평균은 81.6[원/kWh]로 동일하다. 단 3가지 요금제 사이의 변동성을 얼마나 주는가가 차이점이라고 할 수 있다.

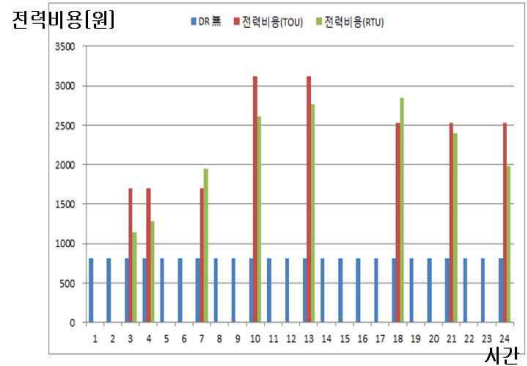


그림 19. 냉장고의 요금제별 수요반응  
Fig. 19. DR results of refrigerator from different pricing

계시별요금제(TOU)의 경우는 3.6[%]의 비용절감, 실시간요금제(RTP) 하에서는 약 13.3[%]에 달하는 전력비용 절감 효과를 보였다. 이로부터 요금제의 변동성이 증가할수록 수요반응으로 인한 전기요금 절감 효과를 큰 것을 확인할 수 있다.

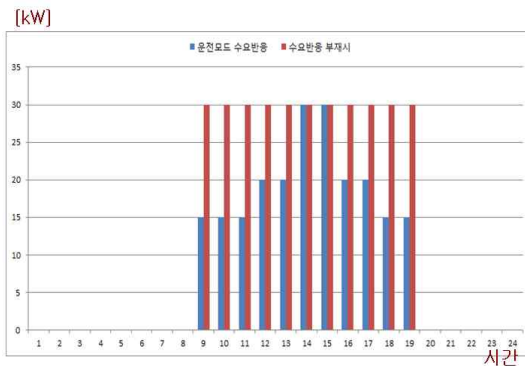


그림 17. 수요반응에 의한 에어컨의 전력소비 절감  
Fig. 17. Reduction of energy consumption of air-conditioner with demand response

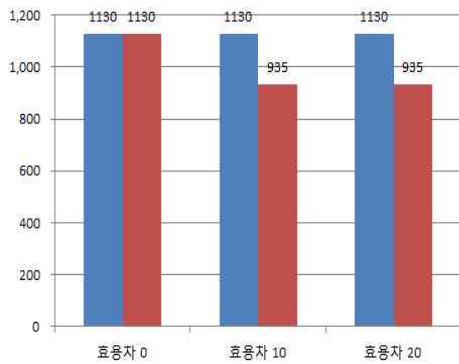


그림 20. 세탁기의 요금제별 수요반응효과  
Fig. 20. DR effects of washing machine

세탁기의 경우는 그림 14의 효용차가 존재하지 않을 경우는 계시별요금제(TOU)와 실시간요금제(RTP) 간에 별 차이가 없었는데, 이는 세탁기의 가동 시간이 하루 중 4시간 정도로 짧기 때문에 가격변동성으로 인한 차이가 크지 않기 때문이다. 그러나, 효용차가 생길 경우 변동성이 상대적으로 큰 실시간요금제(RTP)에 의해 수요반응에 의한 에너지 비용의 절감차액이 발생하게 된다. 그림 20은 이를 표현한 것

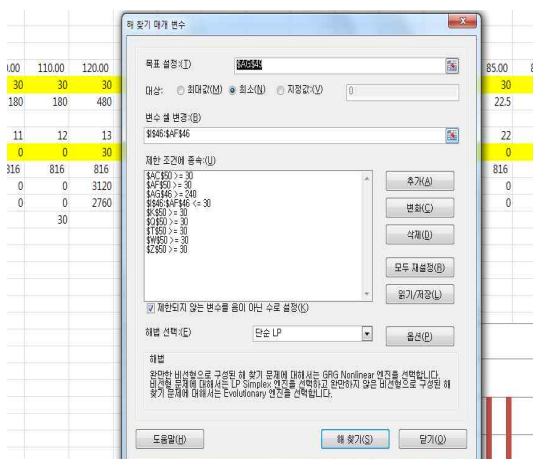


그림 18. 최적화 문제 구성(Excel Solver)  
Fig. 18. Optimization Problem Formulation

으로 세로축 금액의 단위는 ‘원/일’이다. 세탁기의 이러한 수요반응 효과는 통상적으로 낮 시간대에 세탁기를 운용할 경우 대비 30[%] 이상, 미세한 시간대별 세탁시간 조절을 통해(TOU 대비 RTP) 17[%] 이상(그림 20의 사례연구 결과)의 전력비용 절감효과를 보이고 있다. 세탁시간을 낮에 경우 낮과 밤의 실시간 요금 편차가 크기 때문에 최소 30[%]까지 비용차가 날 수 있다.

이상의 사례연구에서 볼 때, 가장 기본적인 운용시간대 조절이나 소비량 조절을 통해서 15~30[%]에 달하는 전기요금 절감을 관찰할 수 있었다. 이는 그림 1~2의 미국에서 다양한 과일 프로젝트를 통해 실측된 효과와 거의 유사한 수준이다. 요즘 출시되고 있는 스마트가전기기들의 경우는 보다 다양한 에너지절감 기능이 제공되고, 그로 인해 보다 정밀한 운전이 가능한 만큼 이러한 기능에 기반하여 테스트가 이루어질 경우 보다 큰 범위의 수요반응을 관측할 수 있을 것으로 예상된다.

## 6. 결론 및 향후 연구이슈

본 연구에서는 아직까지 수요반응의 주요 대상이 아닌 개별 가정에 대해, HEMS를 기반으로 하는 수요반응 기능을 선도적으로 설계하였다는 그 의의가 있으며, 향후 본격적인 스마트그리드 시대가 도래할 경우 주거용 부하 측면에서의 에너지 절감 효과를 극대화할 수 있는 초석이 될 수 있으리라 기대한다. 목적함수를 구현함에 있어서, 효용함수의 경우 주관성이 개입될 여지가 크고 정량화하기 어려운 측면이 있기 때문에 기존의 최적화 방법과 더불어 프로토콜(원칙) 기반의 접근도 혼용하였다. 주거용 수용가 하나하나의 적은 전력을 소비하는 단위이지만, 이러한 수용가들이 군집을 이루었을 경우에는 산업용 수용가나 상업용 수용가 못지않게 대규모 수요군을 형성할 수 있다. 특히, 주거용 부하의 경우는 전력소비가 일시적으로 제한되더라도 산업용 부하나 상업용 부하에 비해 피해 규모나 효용의 상실이 상대적으로 크지 않기 때문에 장기적으로 수요 반응량을 증가시킬 수 있는 큰 원천이기도 하다.

본 논문에서는 그러한 주거용 부하의 수요 반응량을 확대할 수 있는 이론적 근거를 제공하고 있으며, 이를 홈 단위의 구체적인 솔루션을 구축할 수 있는 설계안을 수립하였다. 이러한 솔루션에 대해서는, 향후 스마트 가전기기가 보급됨에 따라 보다 구체적인 수요를 창출할 수 있을 것으로 생각되며, 스마트 홈 내 다양한 부가서비스와 맞물려 새로운 가치와 시장을 창출할 수 있을 것으로 기대한다. 이와 더불어, 향후 연구에서는 본 연구의 설계안을 바탕으로 실제 시스템 기반의 모델을 구현해봄으로써 실질적인 솔루션 개발을 목표로 하고 있다.

## References

- [1] Dae-Man Han; Jae-Hyun Lim, "Design and implementation of smart home energy management systems based on zigbee", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.56, Issue 3, Page(s): 1417~1425, 2010.
- [2] Dae-Man Han; Jae-Hyun Lim, "Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee", IEEE Transactions on Consumer Electronics Vol.56, Issue 3, Page(s): 1403~1410, 2010.
- [3] Jinsoo Han; Chang-Sic Choi; Ilwoo Lee, "More Efficient home energy management system based on Zigbee communication and infrared remote controls", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.57, Issue 1, Page(s): 85~89, 2011.
- [4] Young-sung Son; Pulkkinen, T.; Kyeong-Deok Moon; Chaekyu Kim, "Home Energy Management System based on Power Line Communication", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.56, Issue 3, Page(s): 1380~1386, 2010.
- [5] Suhara, Y.; Nakabe, T.; Mine, G.; Nishi, H., "Distributed demand side management system for home energy management", IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Page(s): 2430~2435.
- [6] Hsueh-Hsien Chang; Ching-Lung Lin, "A New Method for Load Identification of Nonintrusive Energy Management System in Smart Home", 2010 IEEE 7th International Conference on e-Business Engineering (ICEBE), Page(s): 351~357.
- [7] Sawyer, R.L.; Anderson, J.M.; Foulks, E.L.; Troxler, J.O.; Cox, R.W., "Creating low-cost energy-management systems for homes using non-intrusive energy monitoring devices", Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009, Page(s): 3239~3246.
- [8] Ikegami, T.; Iwafune, Y.; Ogimoto, K., "Optimum operation scheduling model of domestic electric appliances for balancing power supply and demand", 2010 International Conference on Power System Technology

(POWERCON), Page(s): 1~8.

- [9] J. D. Miller, R. G. Pratt, Estimates of Refrigerator Loads in Public Housing Based on Metered Consumption Data, Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC06-76RLO 1830, 1998.

◆ 저자소개 ◆



**강동주 (姜東周)**

1975년 9월 9일생. 1999년 홍익대학교 공대 전자전기제어공학과 졸업. 2001년 동대학원 전기정보제어공학과 졸업(석사). 2001년~현재 한국전기연구원 선임연구원. 2010년~현재 연세대학교 경영학과 박사과정 재학. 관심분야는 스마트그리드 운영 솔루션 및 사이버보안, 전력시장 시뮬레이션 등.



**박선주 (朴宣柱)**

1967년 8월 22일생. 1989년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업. 1991년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사). 1999년 University of Michigan 컴퓨터 졸업(박사). 1999~2005년 Rutgers University 경영학과 조교수. 2005년~현재 연세대학교 경영학과 부교수.



**최수정 (崔水晶)**

1984년 2월 8일생. 2008년 연세대학교 경영학 졸업. 2010년~현재 연세대학교 경영학과 석사과정 재학. 관심분야는 OR, 최적화, 마이크로그리드 운영 솔루션, 멀티에이전트 등.



**한승재 (韓承在)**

1966년 9월 10일생. 1989년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업. 1991년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업(석사). 1998년 Univ. of Michigan, Ann Arbor, CSE (Ph.D.). 1999~2005년 Bell Laboratories, Wireless Research Lab(연구원). 2005년~현재 연세대학교 컴퓨터과학과(부교수). 관심분야는 차세대 이동통신망, 내장형시스템, 멀티미디어 네트워킹, 센서 네트워크.