

논문 2014-09-17

## 최대수요전력 관리 장치의 부하 예측에 관한 연구

(A Study on the Load Forecasting Methods of Peak Electricity Demand Controller)

공인엽\*

(In-Yeup Kong)

Abstract : Demand Controller is a load control device that monitor the current power consumption and calculate the forecast power to not exceed the power set by consumer. Accurate demand forecasting is important because of controlling the load use the way that sound a warning and then blocking the load when if forecasted demand exceed the power set by consumer. When if consumer with fluctuating power consumption use the existing forecasting method, management of demand control has the disadvantage of not stable. In this paper, load forecasting of the unit of seconds using the Exponential Smoothing Methods, ARIMA model, Kalman Filter is proposed. Also simulation of load forecasting of the unit of the seconds methods and existing forecasting methods is performed and analyzed the accuracy. As a result of simulation, the accuracy of load forecasting methods in seconds is higher

Keywords : Peak electricity demand controller, Exponential smoothing methods, ARIMA, Kalman filter, Load forecasting

### 1. 서론

산업의 발달과 인류의 생활이 윤택해 지면서 에너지 자원의 소모도 증가하게 되었다. 때문에 전 세계적으로 자원의 고갈 및 에너지 부족에 대한 문제가 대두되고 있다. 국내에서도 미래의 에너지 고갈을 대비하여 정부에서 저탄소 녹색 성장 정책을 추진하고 있다. 저탄소 녹색 성장은 기존의 화석 연료 소모를 최소화하고 에너지의 효율적 사용을 통해 에너지 사용량의 절감 및 신재생 에너지 개발, 온실가스 및 폐기물 배출을 억제하는 것을 주요 내용으로 하고 있다[1].

국내에서는 여름 폭염으로 인해 전력사용량이 급증하면서 전력 비상경보가 주의단계까지 발령되

었다[2]. 이처럼 현재 국내 전력 수급 문제가 심각한 상황이며 전력의 효율적인 사용이 더욱 중요시되고 있다.

이러한 상황을 배경으로 전력거래소에서는 전력 사용 절감을 위해 계약전력 500kW 이상의 일반, 교육, 산업체를 대상으로 최대수요전력 관리 장치의 설치비의 일부를 지원하는 제도를 실행하고 있다 [3]. 최대수요전력 관리 장치는 현재 사용전력을 모니터링하여 수요시한 15분 동안 예측 전력을 계산해 수용가에서 설정한 목표전력을 초과하지 않게 부하를 제어하는 장치이다. 수요시한 내에서 부하가 순간적으로 많은 전력을 소비하여도 그 수요시한의 나머지 시간 동안에 미리 선정된 부하의 전력을 차단하게 되면 부하의 소비전력을 목표전력 값에 맞출 수가 있게 된다[4]. 이러한 최대수요전력 관리 장치 사용 시 사전에 설정된 목표전력 값을 넘지 않도록 자동으로 관리되어 에너지 절감효과와 수용가 입장에서는 경제적인 효과도 얻을 수 있다.

현재 최대수요전력 관리 장치에서는 목표전력을 기준으로 현재 사용 전력을 모니터링하여 정해진 수요시한의 종료시점에서 얼마만큼의 전력을 사용할 것인지를 예측하는 방식을 사용하고 있다. 이러

\*Corresponding Author(iykong@kumoh.ac.kr)

Received: 15 Jan. 2014, Revised: 12 Feb. 2014,

Accepted: 31 Mar. 2014.

In-Yeup Kong; Kumoh National Institute of Technology

※ 본 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 연구된 논문임(과제번호 2012-104-083).

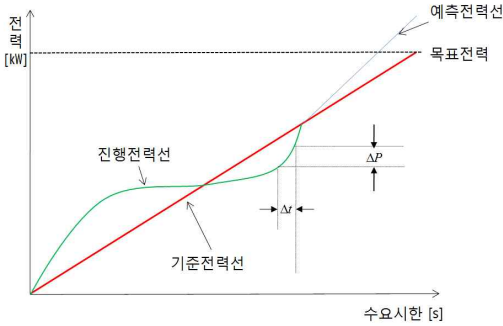


그림 1. 기존의 최대수요전력 예측 방법  
 Fig. 1 Existing forecasting methods of peak electricity demand

한 예측 방식은 간단하다는 장점이 있지만 부하의 변동이 심한 곳에서는 예측의 정확도가 떨어진다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 수요예측 방법인 지수평활방법, ARIMA 모형, 칼만 필터를 사용한 초 단위 부하 예측을 제안하고 기존의 예측 방법과 예측 정확도를 비교 분석한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 최대수요 전력 예측 방법에 대해 설명하고 3장에서는 각 예측 방법별로 초 단위 예측을 수행하고 기존의 예측 방법과 비교하고 결과를 분석한다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 향후과제를 제시한다.

## II. 부하 예측 방법

### 1. 기존의 최대수요전력 예측 방법

기존의 예측 방법은 샘플링 시간동안의 전력량 증가로부터 시한종료시의 수요전력을 예측하는 방법이다[5]. 샘플링 시간 동안 얻은 현재의 부하전력이 계속 유지 될 경우 현시점까지의 소비전력량과 앞으로 시한이 종료되기까지 소비할 전력량을 계산하여 더하는 원리이며 이를 그래프로 나타내면 그림 1과 같다. 또한 예측전력의 계산은 식 (1)과 식 (2)와 같다.

$$Q_f = Q_t + P_a(T-t)$$

$$= Q_t + \frac{\Delta Q}{\Delta t}(T-t) \quad [kWh] \quad (1)$$

$$P_f = \frac{Q_t}{T} \quad [kW] \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서  $Q_f$  는 예측전력량을 나타내고  $Q_t$  는 현재까지의 소비전력량,  $T$  는 수요시한,  $P_a$  는 샘플링 시간  $\Delta t$  동안의 부하 전력을 나타낸다.

이러한 기존의 예측 방법은 간단하다는 장점이 있다. 하지만 단순히 현재 사용 전력량만을 가지고 수요시한이 종료될 때의 예측전력을 계산하는 것이므로 전력의 변동이 심한 곳에서는 안정적이지 못한 예측값을 유도해낼 수 있다는 단점이 있다[6].

그리고 초 단위의 정밀한 수요예측을 할 수 없기 때문에 본 논문에서는 초 단위의 수요예측에 적용할만한 3가지 방식인 지수평활방법, ARIMA 모형, 칼만 필터에 대해 분석하였다.

### 2. 지수평활방법[7]

지수평활방법은 이미 얻어진 측정값들에 대해 지수적으로 감소하는 가중치를 부여하는 방법이다. 즉 오래된 측정치 일수록 작은 가중치를 가지게 된다. 지수평활방법은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{t+1} = \alpha y_t + (1-\alpha)f_t, \quad (0 < \alpha < 1) \quad (3)$$

위 식에서 예측시점  $t$ 에서의 실제 측정값은  $y_t$ , 예측값은  $f_t$ 이며  $f_{t+1}$  은 시점  $t+1$  에서의 예측값이다.  $\alpha$  는 평활계수를 나타낸다. 식 (3)을 전개하면 다음과 같다.

$$f_{t+1} = \alpha y_t + (1-\alpha)[\alpha y_{t-1} + (1-\alpha)f_{t-1}]$$

$$= \alpha y_t + \alpha(1-\alpha)y_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 y_{t-2}$$

$$+ (1-\alpha)^3 f_{t-2}$$

$$\vdots$$

$$= \alpha y_t + \alpha((1-\alpha)y_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 y_{t-2}$$

$$+ \dots + (1-\alpha)^n f_{t-n+1} \quad (4)$$

평활계수  $\alpha$  는 0과 1사이의 값이므로 식 (4)에서 예측시점  $t$  에서의 가중치보다 과거 값들에 대해 지수적으로 감소하는 가중치를 부여하게 됨을 알 수 있다. 또한 식 (3)을 식 (5)와 같이 나타내었을 때 평활계수의 값이 1에 가까울수록 시점  $t$  에서의 실제 측정값과 예측값의 차이인 예측오차가 많이 반영되는 예측값을 얻게 되고 평활계수가 0에 가까운 값이면 이전 시점의 예측값과 비슷한 예측값을 가지게 됨을 알 수 있다.

$$f_{t+1} = f_t + \alpha(y_t - f_t) \quad (5)$$

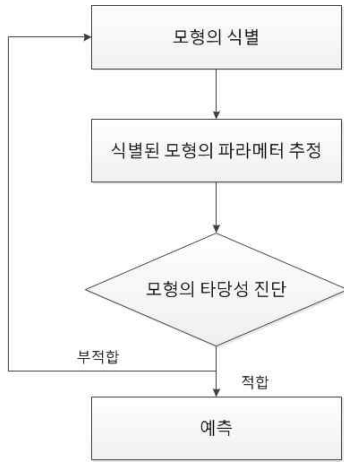


그림 2. ARIMA 모형을 사용한 예측 절차  
Fig. 2 Forecasting procedures of ARIMA model

지수평활방법은 기존 예측 방법과는 달리 과거의 데이터를 포함하며 데이터에 가중치를 부여한다. 하지만 여러 가지 정확도 척도를 만족하는 적절한 평활계수 값을 결정하기가 쉽지 않으며 예측 오차는 반영되지만 가중치는 고정되어 있다는 단점이 있다.

본 논문에서는 예측시점  $t$ 에서의 실제 전력 측정값을  $y_t$ , 전력 예측값을  $f_t$ , 그리고 평활계수  $\alpha$ 는 0.5로 고정하여 적용해보았다.

### 3. ARIMA 모형

ARIMA(Auto-Regressive Integrated Moving Average) 모형은 시계열자료를 분석하고 예측을 수행하는 대표적인 모형이며 Box-Jenkins 방법이라고도 불린다[8]. Box-Jenkins 방법은 주어진 시계열자료가 어떤 모형에 맞을 것인가를 판단하고 시계열자료를 그 모형에 적용시켜 나가는 방법이라 할 수 있다 [7]. Box-Jenkins 방법을 사용한 예측 절차는 그림 2와 같다.

본 논문에서는 모형을 식별하기 위해 자기상관함수(ACF: Autocorrelation Function)을 이용하였고, 모형의 파라미터를 판단하는 기준으로는 AIC(Akaike Information Criterion)을 사용하였다.

### 4. 칼만 필터[8-10]

칼만 필터는 제어분야 및 시계열 데이터를 다루는 여러 분야에서 활용되어 온 기법으로 시계열 데이터를 상태 공간 모델로 표현한 후 측정값을 통해

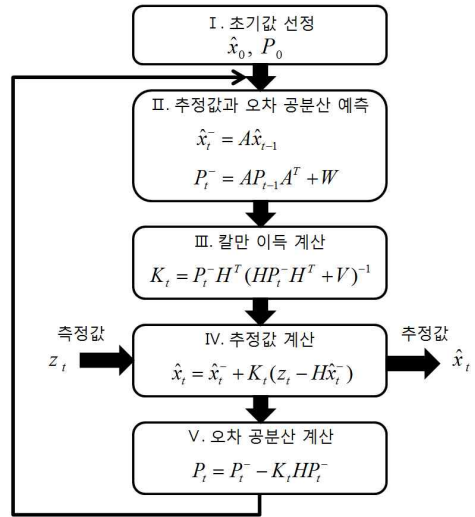


그림 3. 칼만 필터 알고리즘  
Fig. 3 Kalman Filter algorithm

표 1. 칼만 필터 알고리즘의 변수  
Table 1. Variables of Kalman Filter

$\hat{x}_0$	사전예측 초기값	$z_t$	측정값
$P_0$	초기오차 공분산	$P_t$	오차 공분산
$\hat{x}_t^-$	예측된 추정값	$A$	상태 전이 행렬
$P_t^-$	예측된 오차 공분산	$H$	출력 행렬
$K_t$	칼만 이득	$W$	시스템 잡음의 공분산 행렬
$\hat{x}_t$	추정값	$V$	측정 잡음의 공분산 행렬

우리가 원하는 최상의 추정량을 얻는데 사용된다. 칼만 필터는 반복적으로 새로운 측정값을 즉시 수용하며 대부분의 경우 초기치에 상관없이 참값으로 빠르게 수렴한다는 장점이 있다. 또한 과거의 데이터를 모두 기억할 필요가 없어 계산에 소요되는 시간이 짧으며 알고리즘이 반복될 때 마다 측정값과 예측값의 오차에 따라 매번 갱신된 가중치를 부여하여 오차를 점점 줄여나가는 효과를 얻게 된다.

상태 공간 모델은 식 (6) 상태방정식과 식 (7) 측정방정식(관측방정식)으로 표현된다.

$$x_{t+1} = Ax_t + w_t \tag{6}$$

$$z_t = Hx_t + v_t \tag{7}$$

식 (6)과 식 (7)에서  $x_t$  는 상태 변수,  $z_t$  는 측

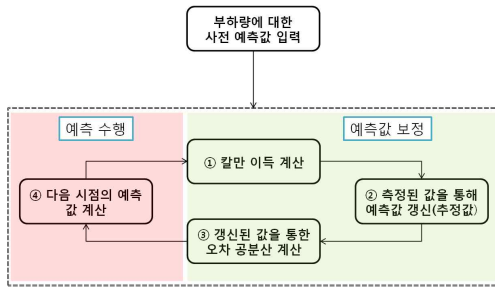


그림 4. 칼만 필터를 사용한 부하 예측 동작과정  
Fig. 4 Process operation of load forecasting using Kalman Filter

정값을 나타내며 시스템 잡음  $w_t$  는 개별적으로 값을 구하거나 지정할 수 없으며 오랜 관측 및 제작할 때부터 알고 있는 참값에 대한 표준편차로 공분산행렬  $W$  를 가지는 정규분포 잡음 변수이다. 또한  $v_t$  는 측정 시 포함되는 잡음을 나타내며 공분산행렬  $V$  를 가지는 잡음 변수이다. 이러한 상태 공간 모델을 이용하여 수행되는 칼만 필터 알고리즘은 그림 3과 같이 수행되며 알고리즘에 사용된 변수들을 정리하여 표 1에 나타내었다.

또한 칼만 필터를 사용하여 초 단위 부하 예측을 수행할 때의 동작과정은 그림 4와 같다. 먼저 초기 부하량 입력값을 바탕으로 칼만 이득을 계산하고 다음 단계로 현재시점에서 측정된 부하량과 예측된 부하량 값의 오차를 반영한 추정값을 계산한다. 이 추정값은 다음시점의 부하량을 예측할 때 사용된다. 그 다음 단계에서는 이전 단계에서의 오차를 반영한 오차 공분산을 계산하며 마지막으로 다음 시점의 예측값을 계산한다.

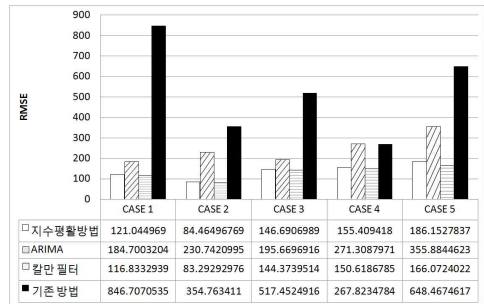
### III. 시뮬레이션 및 비교 분석

#### 1. 시뮬레이션 환경

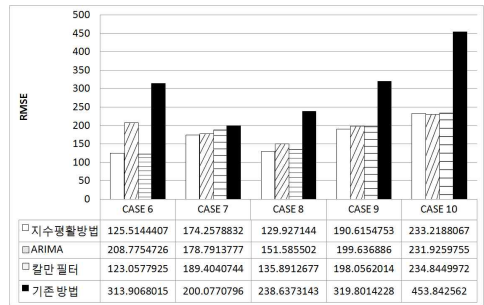
본 논문에서 사용된 부하 데이터는 실제 산업현장의 데이터 측정의 제약 때문에 모의실험을 통해 임의적으로 부하의 변동이 심한 경우를 측정하여 사용하였다. 그리고 시뮬레이션의 신뢰성을 높이기 위하여 수요시한 15분 동안에 900개의 부하 데이터를 랜덤하게 10회(CASE1 ~ CASE10) 생성하였고 각각 예측 시뮬레이션을 10회 진행하였다. 10개의 부하 데이터는 임의로 생성되는데, 그 결과로 표 2와 같은 특성을 보이도록 생성되었다.

표 2. 부하 데이터 특성  
Table 2. Characteristics of load data

	상승/하강 복합 구간	부하의 급상승 구간	부하의 급하강 구간
CASE 1	600~700초		
CASE 2		480~620초	
CASE 3	520~660초		
CASE 4		550초, 700초	
CASE 5	340~480초		
CASE 6	부하의 변동이 다른 경우들과 비교해 매우 작은 데이터 (최대와 최소의 차이가 3000kW를 넘지 않음)		
CASE 7			300~400초
CASE 8	350~600초		
CASE 9	400~600초		
CASE 10	부하의 변동 빈도가 다른 CASE에 비해 더 높은 데이터		



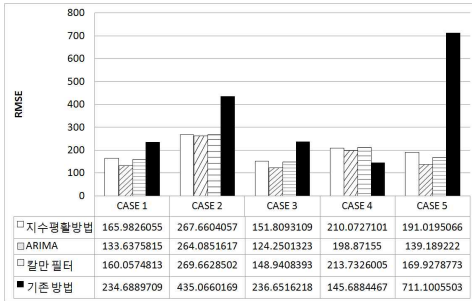
(a) CASE 1 ~ CASE 5



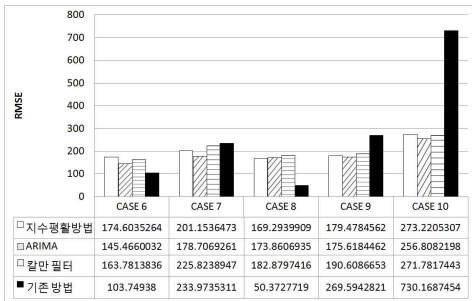
(b) CASE 6 ~ CASE 10

그림 5. 전체 수요시한에 대한 RMSE 값 비교  
Fig. 5 Comparison of the RMSE values during total demand hours

예측 시뮬레이션은 지수평활방법 및 ARIMA 모형의 예측은 SPSS 프로그램을 사용하였으며 칼만 필터를 사용한 예측은 MATLAB 프로그램을 사용하여 수행하였다.



(a) CASE 1 ~ CASE 5



(b) CASE 6 ~ CASE 10

그림 6. 오차가 큰 구간에서의 RMSE 값 비교  
Fig. 6 Comparison of the RMSE values in the region of large error

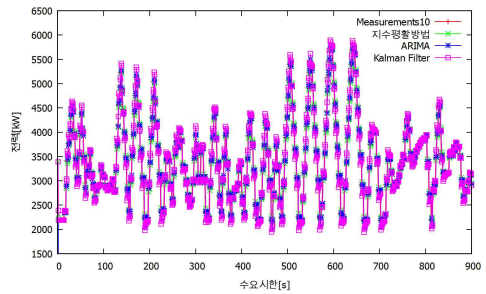
2. 예측 성능 비교 및 분석

그림 5와 그림 6은 각각 전체 수요시한에 대한 RMSE(Root Mean Square Error) 값과 오차가 큰 구간의 RMSE 값을 예측 방법에 따라 비교한 그림이다.

그림 5에서 CASE 1 ~ CASE 6까지의 정확도는 칼만 필터를 사용한 예측 방법의 정확도가 가장 높게 나타났다. 그리고 CASE 7 ~ CASE 9에서는 지수평활방법, CASE 10에서는 ARIMA 모델을 사용한 예측 방법의 정확도가 가장 높게 나타났다.

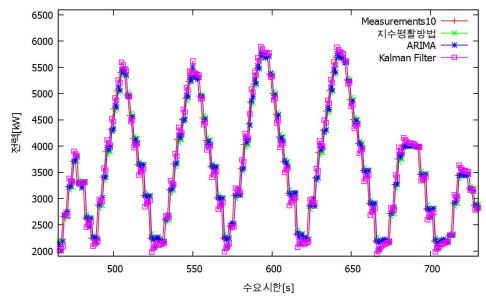
기존 예측 방법의 예측 오차는 모두 수요시한에 가까워질수록 수요전력과 비슷한 값을 가진다. 이것은 예측전력을 계산할 때 현재까지의 진행전력이 포함되기 때문이다. 2.1절의 예측전력을 계산하는 식 (2)를 아래의 식 (8)과 같이 나타내었을 때 현재까지의 소비전력량  $Q_t$  를 수요시한으로 나눈 값은 현재까지 누적된 진행전력 값이 된다.

$$P_f = \frac{Q_f}{T} = \frac{Q_t}{T} + \frac{P_a}{T}(T-t) \quad (8)$$



(a) 전체 수요시한에 대한 그래프

(a) Load prediction for total demand



(b) 오차가 큰 구간 확대 그래프

(b) Expanded graph of large error section

그림 7. CASE 10의 초 단위 부하 예측 결과  
Fig. 7 The result of the load forecasting of the unit of the seconds at CASE 10

때문에 그림 6에서 예측 방법의 오차가 큰 구간이 수요시한에 가까운 CASE 4, CASE 6, CASE 8에서는 정확도가 기존 예측 방법이 더 높은 것으로 나타난다. 전체적으로는 기존의 예측 방법의 정확도가 다른 예측 방법들에 비해 낮으며 CASE 8을 제외하고는 ARIMA 모델을 사용한 예측 방법의 정확도가 가장 높은 것으로 나타났다.

지수평활방법, ARIMA, 칼만 필터를 사용한 초 단위 부하 예측의 오차가 다른 CASE에 비해 큰 CASE 10의 예측 그래프를 나타내면 그림 7과 같다. 또한 기존 예측 방법에 대한 그래프는 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서는 계산되는 예측전력이 전체적으로 불안정한 모습을 보이며 수요전력과의 오차도 상당히 크게 나타난다. 또한 수요시한에 가까운 700~900초 구간에서는 수요전력과의 오차가 작은 것을 확인할 수 있다. 반면 그림 7의 초 단위 부하 예측은 기존 방법에 비해 오차가 크지 않음을 확인할 수 있다. 초 단위 부하 예측 방법에 대한 오차와

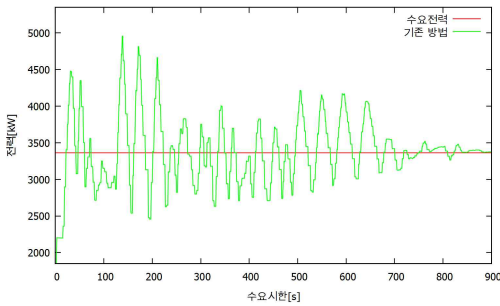
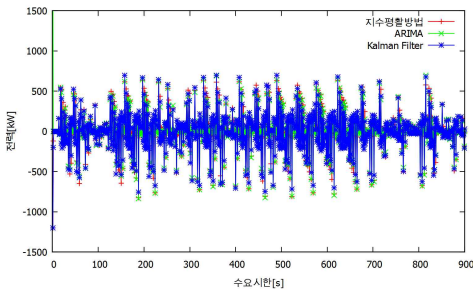
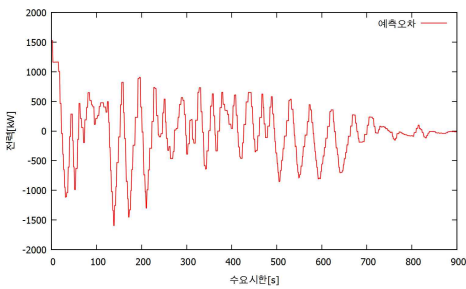


그림 8. CASE 10의 기존 예측 방법 그래프  
 Fig. 8 The graph of the existing forecasting methods at CASE 10



(a) 초 단위 부하 예측 방법의 오차 그래프  
 (a) Errors by the proposed prediction of the unit of seconds



(b) 기존 예측 방법의 오차 그래프  
 (b) Errors by the conventional prediction

그림 9. CASE 10의 오차 그래프  
 Fig. 9 Error graph of the CASE 10

기존 방법의 오차를 그림 9에 그래프로 나타내었다.

표 3은 각 CASE별 전체 수요시한에 대한 RMSE 값을 비교하여 보여준다. CASE 4를 제외하고는 기존의 예측 방법의 정확도가 부하 예측 방법의 정확도보다 낮은 것으로 나타났다. 이것은 부하

표 3. 전체 수요시한에 대한 RMSE 값  
 Table 3. RMSE value for overall period

	지수평활	ARIMA	칼만 필터	기존방법
1	121.0449	184.7003	116.8332	846.7070
2	84.46496	230.7420	83.29292	354.7634
3	146.6906	195.6696	144.3739	517.4524
4	155.4094	271.3087	150.6186	267.8234
5	186.1527	355.8844	166.0724	648.4674
6	125.5144	208.7754	123.0577	313.9068
7	174.2578	178.7913	189.4040	200.0770
8	129.9271	151.5855	135.8912	238.6373
9	190.6154	199.6368	198.0562	319.8014
10	233.2188	231.9259	234.8449	453.8425

의 크기가 전체적으로 상당히 큰 값이며 변동 폭도 비교적 작아 기존 예측 방법에서 예측전력 계산 시 수요전력과 오차도 작아지기 때문인 것으로 생각된다. 또한 ARIMA 모델을 사용한 예측 방법의 경우 차분에 의해서 초기값이 손실되는데 이것으로 인한 오차도 크게 작용하였을 것으로 생각된다.

CASE 1 ~ CASE 6까지의 정확도는 칼만 필터를 사용한 예측 방법의 정확도가 가장 높게 나타났다. 그리고 CASE 7 ~ CASE 8에서는 지수평활방법, CASE 10에서는 ARIMA 모델을 사용한 예측 방법의 정확도가 가장 높게 나타났다.

#### IV. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 지수평활방법, ARIMA 모형, 칼만 필터를 사용하여 초 단위 부하 예측을 수행하고 현재 최대수요전력 관리 장치에서 사용되는 예측전력을 계산하는 방식과 예측 결과를 비교 분석하였다. 비교 분석 결과 수요시한이 끝나는 시점의 수요전력을 예측하는 기존 예측 방법은 전체적으로 부하의 변동이 심할 경우 계산되는 예측전력 값과 실제 수요전력과의 오차가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 반면 부하 예측 방법을 사용한 초 단위 부하 예측에서는 전체적으로 기존의 예측 방법보다 예측 정확도가 높음을 확인할 수 있다. 또한 초 단위 부하 예측 방법은 수용가의 부하 사용 패턴을 적용하여 설계되면 정확도가 향상될 가능성이 있다. 때문에 정확도가 낮은 기존 예측 방법을 사용하는 것 보다 효율적인 전력관리가 가능하게 된다.

이에 대한 향후 과제로는 실제 산업 현장에서 사용되는 부하의 사용 패턴을 분석하고 분석된 사

용 패턴의 적용이 필요하다. 또한 현장에 맞는 다양한 요소들을 고려한 부하 예측 방법의 설계가 필요할 것이다. 그리고 초 단위 부하 예측을 통한 효율적인 전력 사용을 위해 부하의 제어 방법에 대한 부분도 함께 고려하여 최대수요전력 관리 장치에 적용하는 방안도 연구되어야 할 것이다.

**References**

[1] I.H. Choi, J.H. Lee, S.H. Hong, "Development and Experimental Evaluation of the Wireless Illumination Controller with Demand Response for the Smart Grid," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 60, No. 6, pp.1215-1224, 2011 (in Korean).

[2] G.D. Lee, "For 2 Days 'Caution' Stage ... Emergency Warning of Power Supply and Demand , " K y u n g B u k I l b o , [http://www.kyongbuk.co.kr/main/news/news\\_content.php?id=592439&news\\_area=010&news\\_divide=&news\\_local=20&effect=4#](http://www.kyongbuk.co.kr/main/news/news_content.php?id=592439&news_area=010&news_divide=&news_local=20&effect=4#), 2012 (in Korean).

[3] Korea Power Exchange, <http://www.kpx.or.kr/>.

[4] B.J. Kim, E.K. Jung, U.D. Han, H.J. Cheon, "Development of Intelligent Demand Controller," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 14, No. 5, pp.50-55, 2000 (in Korean).

[5] C.I. Kim, K.C. Sung, I.K. Yoo, "A Study on the Demand Forecasting Control using A Composite Fuzzy Model," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 51, No. 9, pp.417-424, 2002 (in Korean).

[6] S.W. Cho, "A Study on the Control System of Maximum Demand Power Using Neural Network and Fuzzy Logic," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 9, No. 4, pp.420-420, 1999 (in Korean).

[7] W.W. Lee, Statistical Technique for Prediction, Jayu Academy Books, pp.35-176, 2011 (in Korean).

[8] J.D. Lee, "A Study on Path Travel Time Prediction using Kalman Filter," Master's Thesis, Pusan National University, 2004 (in Korean).

[9] H.J. Kim, H.W. Choi, S.P. Hong, "A Study on Travel Time Prediction of the Interrupted Traffic Flow using Kalman Filter Algorithm," Journal of Yooshin Engineering Corporation, No. 18, pp.78-89, 2012 (in Korean).

[10] S.P. Kim, Essential Kalman Filter, A-Jin Publishing Company, pp.39-112, 2010 (in Korean).

**저 자 소 개**

**공 인 업**



2000년, 부산대 컴퓨터 공학과 학사.  
 2002년, 부산대 컴퓨터 공학과 석사.  
 2007년, 부산대 컴퓨터 공학과 박사. (컴퓨터 네트워크 분야)

현재, 금오공과대학교 전자공학부 조교수.  
 관심분야: 임베디드시스템, 차세대인터넷  
 Email: iykong@kumoh.ac.kr