

전력 수요 예측 관련 의사결정에 있어서 기온예보의 정보 가치 분석*

한창희** · 이종우*** · †이기광****

Analyzing Information Value of Temperature Forecast for the Electricity Demand Forecasts

Chang-Hee Han** · Joong-Woo Lee*** · †Ki-Kwang Lee****

■ Abstract ■

It is the most important success factor for the electricity generation industry to minimize operations cost of surplus electricity generation through accurate demand forecasts. Temperature forecast is a significant input variable, because power demand is mainly linked to the air temperature. This study estimates the information value of the temperature forecast by analyzing the relationship between electricity load and daily air temperature in Korea. Firstly, several characteristics were analyzed by using a population-weighted temperature index, which was transformed from the daily data of the maximum, minimum and mean temperature for the year of 2005 to 2007. A neural network-based load forecaster was derived on the basis of the temperature index. The neural network then was used to evaluate the performance of load forecasts for various types of temperature forecasts (i.e., persistence forecast and perfect forecast) as well as the actual forecast provided by KMA(Korea Meteorological Administration). Finally, the result of the sensitivity analysis indicates that a 0.1°C improvement in forecast accuracy is worth about \$11 million per year.

Keywords : Information Value, Neural Network Model, Temperature Index, Sensitivity Analysis

논문접수일 : 2008년 12월 18일 논문수정일 : 2009년 01월 08일 논문게재확정일 : 2009년 01월 15일

* 본 연구는 기상지진개발사업단의 지원(CATER2007-3306)에 의해 수행되었음.

** 한양대학교 경영학부

*** 인제대학교 경영학부/산업경영연구원

**** 단국대학교 경영학부

† 교신저자

1. 서론

기후변화에 따라 전세계적으로 가장 이슈가 되고 있는 것은 에너지산업이다. 에너지 중 전력은 우리의 생활뿐만 아니라 국가경제에 가장 중요한 자원이다. 또한, 2008년 2월 대통령직 인수위원회는 국제적인 이슈인 기후변화에 대응하기 위해 앞으로 5년간 신·재생에너지나 원자력 등 기후산업을 집중 육성하여 경제와 환경의 조화를 이루고 국가경쟁력을 강화하겠다는 계획을 밝혔다. 이를 위해 기후산업을 집중적으로 육성해 2010년부터는 매년 25조원 이상의 부가가치와 35만개의 일자리를 창출하겠다고 하였다. 이러한 계획의 핵심은 기후변화에 따른 에너지 효율화, 신·재생에너지 개발, 원자력 경쟁우위를 바탕으로 목표를 달성하는 것으로 에너지 산업분야에 초점을 맞추고 있다.

현재 우리나라의 에너지 수입액은 945억 달러로 GDP의 10%에 해당하므로 에너지 사용의 효율을 높이고, 기후변화 산업을 육성할 경우 매년 GDP의 3% 안팎의 성장 효과를 거둘 수 있을 것으로 전망하고 있다. 또한, 정부의 기후변화대응 종합기본계획은 저탄소 경제·사회 시스템 구축을 하기 위해 노력하고 있다.

전력은 저장과 보관이 불가능해 생산과 동시에 소비가 발생하는 동시성을 가지고 있다. 따라서 전력에서 가장 중요한 것은 전력소비를 예측해 전력공급에 차질이 없도록 하는 것이다. 또한 경쟁급전의 원칙에 따라 가장 원가가 저렴한 가격에 전력을 공급하기 위해 노력하고 있다. 현재 전력을 생산하기 위해 발전기의 원료는 원자력, 석탄, 국내탄, 유류, LNG, 복합, 수력, 양수 등이 있다. 이들 원재료 중 원자력을 제외한 나머지들은 대부분 수입에 의존하고 있는 현실이다.

이러한 환경에 처해 있는 정부가 가질 수 있는 의사결정은 크게 3가지 방향으로 볼 수 있다. 첫째, 현재의 화석연료를 대체할 에너지를 개발하는 것이다. 둘째, 전력사용을 감소시키는 방법이다. 그리고 셋째, 전력생산 및 유통의 효율성과 효과를 극

대화하는 방법으로 볼 수 있다.

이 중 세 번째 의사결정 방향인 전력생산 및 유통의 효율성과 효과를 극대화하기 위한 한 가지 방법으로서 전력 수요예측의 정확도를 향상시켜 전력 생산비용을 감소시키는 방안을 생각해 볼 수 있다. 이 때, 전력 수요예측을 위한 가장 중요한 입력 정보로서 기온예보를 고려해야 한다. 이는 에어컨 및 난방기기의 사용이 보편화되면서 기온이 전력 수요에 미치는 영향이 가장 크기 때문이다(Teisberg et al., 2005). 이에 본 연구는 24시간 앞선 시점에서 전력 생산량을 계획하는 의사결정문제에 있어서 기온예보가 비용절감에 기여하는 정도를 평가 및 분석하고자 한다.

본 논문의 제 2장에서는 전력수요예측의 중요성 및 이를 통한 경제성 분석과 관련된 기존 연구를 기술하고, 제 3장에서는 기온예보를 활용하여 전력수요를 예측할 때 필요한 주요 인자를 도출하고, 도출 과정에서 전력수요의 일반적인 패턴을 분석한다. 제 4장에서는 2005년부터 2007년까지 3년간 한국에서 예보된 실제 기온예보를 바탕으로 신경망 모형을 활용해서 기온예보 및 전력수요예측 간 관계를 도출하고 이를 통해 기온예보 성능향상을 통한 전력산업에서의 비용절감 등 경제성 분석을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 전력 수요예측의 중요성

우리나라는 7,053만 KW의 전력 생산능력을 갖고 있으며, 전국에 발전기 800여대를 보유하고 있다. 그러나 이 모든 발전기를 일시적으로 풀가동하는 것은 가능하지만, 지속적으로 가동하는 것을 불가능하다. 발전기의 정비나 전력생산 비용, 전력의 동시성 등을 고려하여 적정 전력공급량을 계획하는 수요예측과 이에 맞춘 가동계획을 수립하여 운영하고 있다.

전력 수요 예측에서 적정 예비전력은 발전기들

의 정비일정관리와 연계해 계획을 세우는데 원가가 저렴한 설비부터 가동한다는 경쟁급전원칙이 적용되고 있다. 이에 따라 원가가 가장 저렴한 원자력 발전이 먼저 가동되고, 석탄, 중유, 가스 순으로 가동된다. 전력생산을 위해 발전기를 가동하기 위해서는 기동소요시간, 정지시간, 최소운영시간이 필요하다. 기동소요시간은 발전을 위해 준비하는 시간으로 수력, 양수 발전기는 5분, 물을 끓여서 발전하는 기력 발전기는 8시간 정도가 필요하다. 그리고 정지시간은 수요 충족후 발전설비 중단을 위해 필요한 시간이며, 최소운영시간 가동시간 이후 정지 시간까지 반드시 운용되어야 하는 시간이다.

이렇듯 발전기 운용에 대한 여러 가지 제약조건들로 인해 그때그때 전력수요에 따라 실시간으로 대체하는 것은 거의 불가능하며, 따라서 정확한 전력수요예측은 매우 중요하다고 할 수 있다. 예를 들어, 기동소요시간이 짧은 발전기들은 대부분 생산원가가 높은 것이 사실이다. 따라서 만약 전력 수요 예측량이 실제보다 적었다며, 기동소요시간이 긴 발전기들은 준비가 덜 되었을 것이고, 그보다 생산원가가 비싼 짧은 기동소요시간을 가진 발전기들이 예상보다 초과된 수요량을 맞추기 위해 가동되어야 한다. 반대로 전력수요예측이 실제보다 크다면, 기동소요시간이 긴 발전기들이 불필요하게 가동하여 발전을 하게 될 것이며, 이를 통해 결국 불필요한 비용이 발생하게 된다. 단기적으로는 위와 같은 시나리오에 의해 발생하는 높은 비용으로 인해 전력회사의 운영이익이 감소될 것이고, 장기적으로는 전락요금의 인상으로 작용하여 소비자 및 나아가 산업 전반에까지 비용부담을 가중시킬 수 있다.

2.2 전력 수요 예측의 경제적 분석에 관한 기존 연구

기온정보를 통한 전력 수요 예측 방법에 대한 연구는 과거 20년 전부터 활발히 진행되어 왔고, 기온예보에 대한 다양한 산업분야에서의 경제성 분

석 연구도 많이 이루어져 왔으나(Myline, 2002; 이기광, 이종우, 2007; 이기광 등, 2007; Lee and Lee, 2007; Lee et al., 2008), 전력 수요 예측의 정확성 향상에 따른 부가가치 또는 경제성 분석에 대한 연구는 많지 않다. Hobbes et al.(1999) 및 Teisberg et al.(2005)의 연구가 대표적인데, Hobbes et al.(1999)는 미국의 북부 및 남부 두 지역에 대해 두 가지 형태의 발전 시스템을 대상으로 수요예측치와 실제 전력사용량을 조사하였다. 수요예측은 미국내 많은 전력회사들이 사용하고 있는 Electric Power Research Institute사가 개발한 예측모형을 사용하여 수요예측을 하였고(Khotanzad et al., 1995, 1998), 실제 예측 오차를 조정하면서 다양한 수요예측 정확도를 가상으로 발생시켜 분석하였다. 분석결과 전력수요예측의 평균절대오차가 5%일 경우, 예측의 부정확성으로 인한 비용증가는 0.35%에서 0.85% 범위에서 발생하였다. 또한, 1MWh(Megawatt hour) 당 \$20의 생산비용이 드는 전력 시스템을 가정한다면, 전력수요예측의 부정확성으로 인한 연간 추가 발생 비용은 1MW당 \$600에서 \$1,500가 된다고 주장하였다.

Teisberg et al.(2005)은 Hobbes et al.(1999)의 결과를 바탕으로 실제 기온예보가 전력산업에 기여하는 경제적 가치를 분석하였다. 먼저 기온예보 정확도 및 전력수요예측 정확도 간의 관계를 도출하기 위해 신경망 모형을 활용하였다. 이를 기반으로 세 가지 형태의 기온예보에 대해 미국의 6개 지역을 대상으로 전력수요치를 도출하여 이를 실제 전력사용량과 비교함으로써 경제성 분석을 하였다. 또한, 기온예보의 오차 정도에 따라 전력산업에 미치는 비용의 상승 및 절감 정도를 민감도 분석을 통해 제시하기도 하였다.

본 연구에서는 Teisberg et al.(2005)의 연구를 발전시켜 전력수요예측 모형으로 사용되는 신경망에 입력되는 기온예보 관련 정보를 한국 전력시장의 성격에 적합하도록 변형하여 새로운 인자를 개발하고자 한다. 또한, 이를 통해 신경망 기반 수요 예측모형을 도출하여 한국 전력산업에 있어서 현

재 기상청으로부터 제공되고 있는 기온예보의 가치를 평가하고 향후 기온예보 정확도 향상에 따른 전력산업의 비용절감 효과를 분석하게 된다.

3. 연구방법

본 연구는 전력수요의 예측이 24시간 전에 이루어지는데 있어서 다음 날 발전량 및 발전기 운용 계획을 확정하는 의사결정과정에서 24시간 전 제공되는 기온예보가 가지는 경제적 가치를 분석하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 첫 번째 단계로서 기상청에서 제공되는 기본적인 기온예보 즉, 주요 지역별 최고 및 최저 기온을 수요예측을 위해 필요한 형태의 정보로 변형하는 작업을 수행할 것이다. 이 과정에서 한국의 전력 수요 패턴과 관련된 주요 특성을 도출하고 이를 다음 단계인 신경망 모형을 작성하는데 활용하게 될 것이다.

두 번째 단계로서 전 단계에서 획득한 주요 예측 인자를 바탕으로 다음날 전력수요를 예측하기 위한 신경망(neural network) 모형을 도출하게 된다. 이렇게 도출된 신경망 모형은 실제 기상청이 제공한 기온예보 뿐만 아니라 다양한 정확도를 가정한 가상 기온예보 데이터에 적용되어 다음 단계에서 수행될 경제성 분석 및 민감도 분석을 위한 기초 데이터를 생성하게 된다.

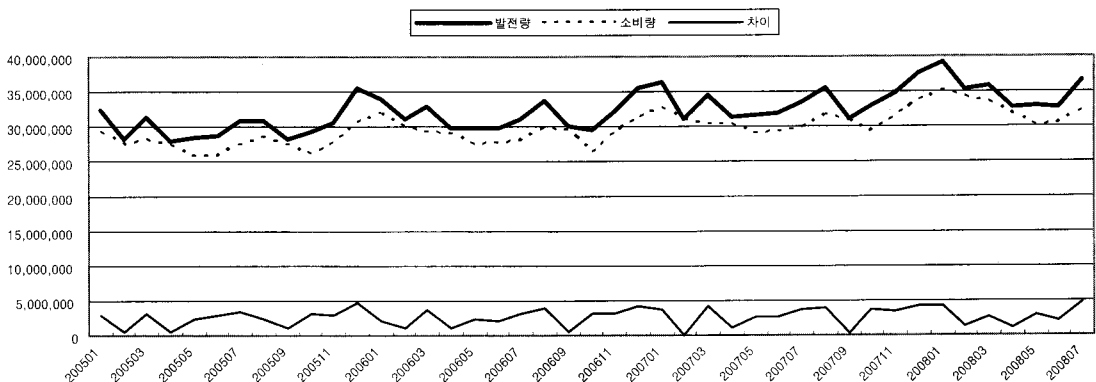
마지막 단계에서는 예보의 정확도의 높고 낮음에 따른 경제적 효과를 분석하기 위해 기상청에 실제 제공한 기온예보와 더불어 두 가지 형태의 추가적인 기상 예보, 즉 단순 예보(persistence forecast) 및 완전 예보(perfect forecast)가 전력수요예측 수행도에 미치는 영향을 비교 분석하게 된다.

본 연구를 수행하기 위해 필요한 자료 수집은 한국전력거래소 및 한국전력공사로부터 2005년부터 2007년까지의 일별 발전량 및 소비량 데이터를 제공받아 사용하였다. 그리고 기상청으로부터 동일 기간의 서울 및 5대 광역시(부산, 인천, 대구, 대전, 광주)의 일별 최고·최저기온의 관측치와 24시간 전 예보 데이터를 제공받아 사용하였다. 광역시 중 울산의 경우는 최고·최저기온에 대한 관측치 자료는 확보했지만 예보자료를 확보하지 못해 제외하였다. 단, 전력 발전량 및 소비량 데이터는 전국 기준이므로 울산도 포함되어 있으나, 울산의 기온 분포가 부산과 크게 다르지 않아 기온 데이터에서 제외되었다고 하더라도 분석 결과에 치명적인 오류는 없다고 판단된다.

4. 한국의 전력수요 패턴 분석

4.1 전력 발전량과 소비량

<그림 1>은 2005년 1월부터 2007년 12월까지



<그림 1> 2005년부터 2007년까지 전력 발전량 및 소비량(단위 : MWh)

전국의 일일 발전량 및 소비량의 추이 및 잉여 발전량을 나타낸다. 이 그림으로부터 계절별 소비 패턴 및 실제 소비량 대비 잉여 발전량을 다음과 같이 분석할 수 있다.

첫째, 전력 소비량이 3년에 걸쳐 점진적으로 증가하고 있다. 실제로 2005년도 월 평균 소비량은 27,620,849MWh에서 2006년도에는 29,068,364MWh 그리고 2007년도에는 30,717,119MWh로서 매년 약 5.4%의 증가율을 보이고 있다.

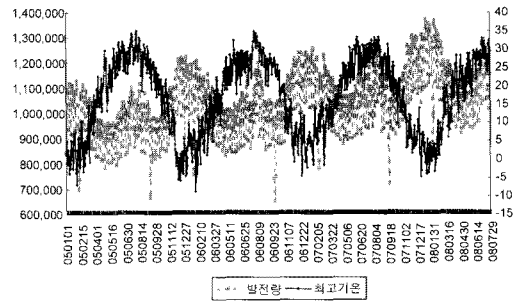
둘째, 계절별 소비량을 살펴보면 봄·가을 보다 여름·겨울 시기에 전력 소비량이 많으며, 특히 겨울철의 소비량이 여름철보다 많음을 확인할 수 있었다. 이는 겨울철 난방 관련 사용량은 특히 추운 저녁부터 새벽까지 꾸준하지만, 여름철의 냉방 수요는 가장 더운 시간대인 오후 1시부터 3시정도까지 상대적으로 짧은 시간에 집중해 있기 때문으로 해석된다.

셋째, 전력 발전량의 약 10%인 300만MWh가 전력의 동시성 특성에 의해 매달 소비되지 않고 매물 비용으로 사라지고 있다는 것이다. 이 10%의 잉여 발전량은 전력의 원활한 수요 공급을 위해 예비전력용으로 간주할 수 있지만, 보다 더 정확한 기온예보를 통해 수요예측의 정확도를 높인다면 적정 예비전력량을 줄일 수 있고 이는 전력 생산비용의 절감을 가져올 수 있다는 점을 시사하고 있다.

4.2 월별/요일별 전력 소비 패턴 분석

2005년 1월부터 2007년 12월까지 3년간 일별 최고·최저기온의 관측치 자료와 전력 소비량 데이터로부터 전력 소비량과 기온과의 상관관계 패턴은 <그림 2>와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 대체적으로 5월부터 11월까지의 기온과 발전량이 양의 관계를 나타내고 있고 12월부터 4월까지의 기온과 음의 관계가 있음을 알 수 있다. 이는 계절적 요인 또는 기타 경제활동 등의 요인이 기온에 의한 전력 소비 패턴에 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사하고 있다.

이에 본 연구에서는 월별 또는 요일별 전력 소비량의 관계를 분석하기 위해 Valor et al.(2001)가 제안한 월별 및 요일별 변동지수를 도입하였다.



<그림 2> 전력소비량 및 기온과의 상관관계

먼저 월별 전력 소비량의 패턴을 분석하기 위해 MSVI(Monthly Seasonal Variation Indices)를 고려해 보면, MSVI는 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$MSVI_{i,j} = E_{ij} / \bar{E}_j \quad (1)$$

위 수식에서 E_{ij} 는 j 년도 i 월의 전력 소비량을 의미하며, \bar{E}_j 는 j 년도의 월평균 전력 소비량을 나타낸다. MSVI 값이 1이상이면 다른 달에 비해 전력 소비량이 많은 달임을 의미하며, 1이하인 경우 전력 소비량이 다른 달보다 적은 월이라고 판단할 수 있다.

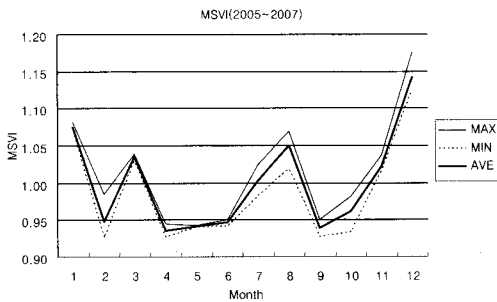
식 (1)에 의해 2005년부터 2007년까지의 3년간 전력 소비량 데이터에 대해 MSVI 값을 산출하고 이를 3년 동안의 평균, 최대 및 최소 값으로 나타내면 <표 1> 및 <그림 3>와 같다.

그 결과 평균적으로 11월부터 3월까지 겨울철과 7월부터 9월까지의 여름철에 전력 소비량이 상대적으로 많음을 알 수 있다. 단, 2월은 예외로서 1보다 작은 MSVI 값을 나타냈는데, 이는 설날 연휴 등 경제활동 일 수가 상대적으로 적기 때문인 것으로 추정된다. 또한, 겨울철의 전력 소비량이 여름철보다 많다는 것도 확인할 수 있다. 마지막으로 4월부터 6월, 9월 및 10월 등 봄철과 가을철에는 냉

난방 수요가 없는 계절로서 전력 소비량이 상대적으로 적음을 알 수 있다.

<표 1> MSVI(2005년~2007년)

월	최대 값	최소 값	평균 값
1	1.08	1.07	1.07
2	0.99	0.93	0.95
3	1.04	1.03	1.04
4	0.94	0.93	0.94
5	0.94	0.94	0.94
6	0.95	0.94	0.95
7	1.02	0.98	1.00
8	1.07	1.02	1.05
9	0.95	0.93	0.94
10	0.98	0.93	0.96
11	1.04	1.01	1.02
12	1.18	1.13	1.14



<그림 3> MSVI(2005년~2007년)

요일 및 전력 소비량의 상관관계를 나타내는 DSVI(Daily Seasonal Variation Indices) 또한 아래 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$DSVI_{ijk} = E_{ijk} / \bar{E}_{jk} \quad (2)$$

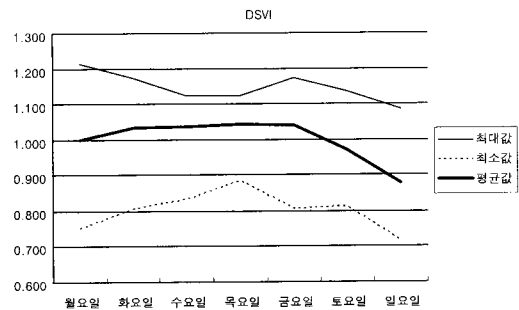
단, E_{ijk} 는 k 년 j 번째주 i 요일의 전력 소비량을 말하며, \bar{E}_{jk} 는 k 년 j 번째주의 일평균 전력 소비량을 말한다. 식 (2)의 정의에 의해 DSVI 값이 1이상이면 다른 요일보다 전력 소비량이 많은 날이며, 1이

하인 경우 전력 소비량이 다른 요일보다 적은 날이라고 판단할 수 있다.

식 (2)에 의해 2005년부터 2007년까지의 3년간 전력 소비량 데이터에 대해 DSVI값을 산출하고 이를 3년 동안의 평균, 최대 및 최소값으로 나타내면 <표 2> 및 <그림 4>와 같다.

<표 2> DSVI(2005년~2007년)

요일	최대값	최소값	평균값
월	1.213	0.751	0.999
화	1.174	0.805	1.033
수	1.123	0.830	1.036
목	1.124	0.882	1.041
금	1.174	0.805	1.041
토	1.136	0.810	0.971
일	1.085	0.715	0.877



<그림 4> DSVI(2005년~2007년)

각 요일별 DSVI 값을 분석해 보면 평균적으로 월요일부터 금요일까지 직장에서 근무하는 날(Working Day)의 전력 소비량이 토요일이나 일요일과 같은 휴일(Holiday)에 비해 많음을 알 수 있다. 또한, 토요일보다 일요일의 전력 소비량이 더욱 급감하는 것도 알 수 있다. 단, 월요일의 평균 전력 소비량이 다른 평일보다는 다소 적었는데, 이는 Valor et al.(2001)의 연구결과와 같았다. 월요일의 다소 적은 전력 소비량 현상에 대해서 주말 이후 위축된 경제활동이 어느 정도 연속선상에서 영향을 미치기 때문이라고 추정된다(Valor et al., 2001). 위와

같은 주말 효과는 공휴일의 경우에도 똑같이 적용되는데, <그림 4>에서 보듯이 월요일에서 금요일까지의 최소 DSVI 값은 일요일의 평균 DSVI 값보다 작다는 사실에서도 알 수 있다.

4.3 기온 지수

과거 많은 연구에서 기온이 전력 수요에 가장 큰 영향을 미치는 요인이라고 증명되어 왔지만, 습도, 바람의 세기 및 구름의 양 등 다른 변수들도 기온의 영향을 보정해 줄 수 있다고 주장하는 연구들도 있다(Engle et al., 1992; Li and Sailor, 1995; Cancelo and Espasa, 1996; Yan, 1998). 하지만, 본 연구에서는 전력 소비량에 미치는 기온의 영향력에 대해서만 분석하고자 하며, 다른 변수들이 미칠 수 있는 영향에 대해서는 추후 연구 범위로 넘기고자 한다.

본 연구에서 사용하게 되는 기온 변수는 크게 세 가지로서 일별 최대, 최소 및 평균 기온이다. 이때 일별 평균 기온은 해당 일 최대 및 최소 기온의 산술 평균값으로 대체하고자 한다. 더욱 정확한 평균 기온을 계산하기 위해서는 높은 빈도로(예를 들면 30분마다) 측정된 기온들의 산술 평균을 구해야 하지만, 현실적으로 이와 같은 빈도의 측정 데이터를 구할 수 없기 때문에 편의상 최대 및 최소 기온만의 산술 평균 값을 계산하였다. 하지만 이와 같은 최대 및 최소 기온의 산술 평균값과 실제 30분마다 측정된 기온들의 산술 평균 값 사이에는 큰 차이가 없다는 연구결과가 발표되기도 했으므로(Valor et al., 2001; World Meteorological Organization, 1983), 최대 및 최소 기온의 산술 평균을 일별 평균 기온으로 채택하였다.

이러한 기온 변수는 전국 지역마다 다르지만, 전력 수요나 공급에 대해서는 지역마다 집계되지 않는 이유로 각 지역의 기온을 하나의 기온으로 변환할 필요가 있다. 이를 위해 각 지역의 일별 최대, 최소 및 평균 기온에 대해서 각각 대표온도인 기온 지수(TI : Temperature Index)를 식 (3)과 같이 정

의한다.

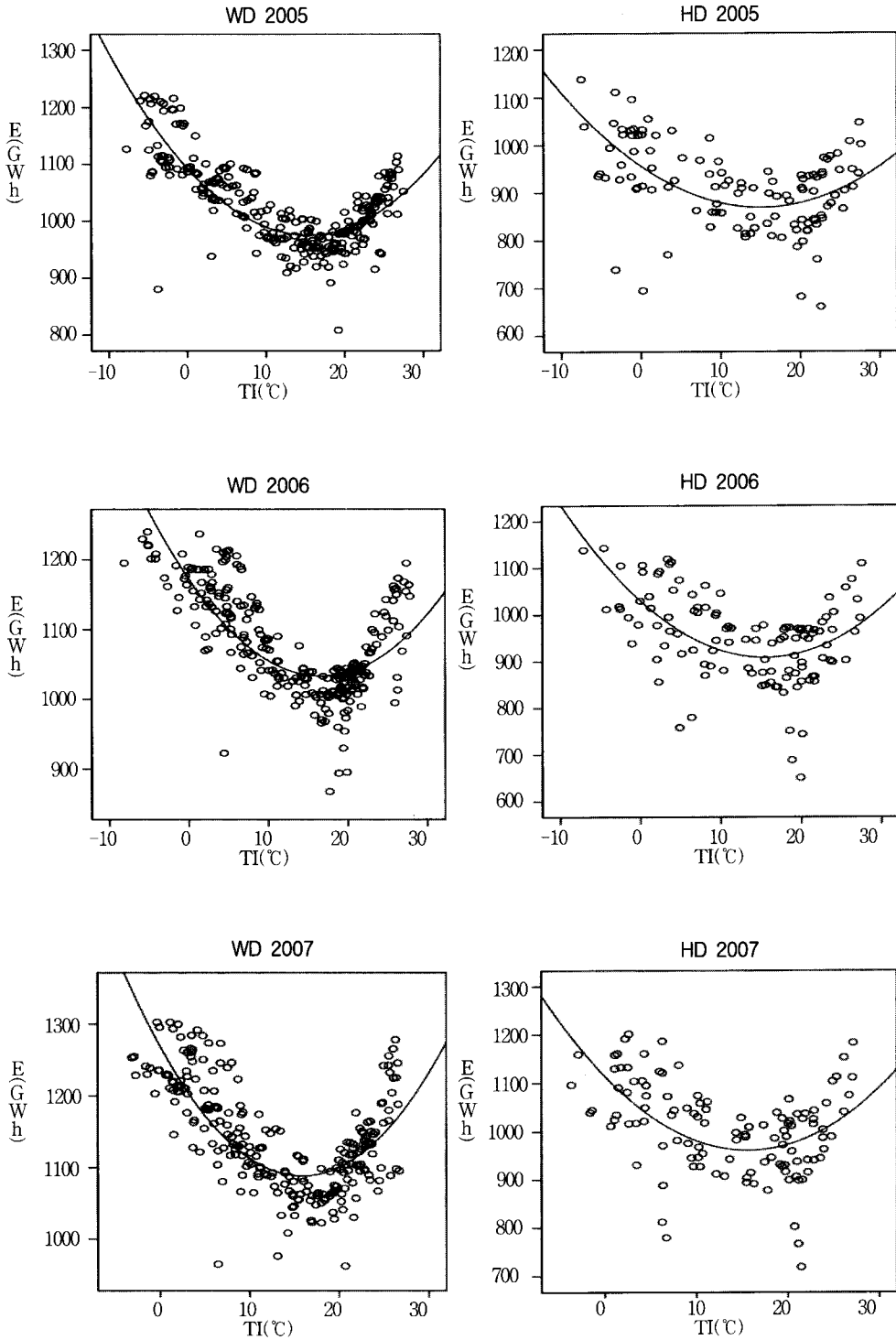
$$TI_i = \sum_{t=1}^n \overline{T}_{ti} w_t, \quad \text{단 } w_t = \frac{P_t}{\sum_{t=1}^n P_t} \quad (3)$$

수식에서 \overline{T}_{ti} 는 지역 i 에서의 t 일에 관측된 기온으로 앞에서 정의한 세 가지 기온 변수인 최고, 최저 및 평균 기온에 해당한다. 따라서 기온 지수 TI 는 세 가지 기온 변수에 따라 역시 세 개의 기온 지수를 가지게 된다. w_t 는 인구비례 가중치로 서울 및 5대 광역시의 인구수를 고려하였다. 즉, 본 연구는 한국의 대표 6개 대도시 지역의 거주 인구수에 비례하여 전력 소비량도 결정된다는 기본 전제를 가정하고 있다. 전력 사용량이 인구수보다는 해당 지역의 전열 또는 냉방기기의 수에 더욱 많은 영향을 받는다는 점에서 위와 같은 가정이 옳을 수도 있고 틀릴 수도 있으나, 이에 대해서는 본 연구의 범위 밖에 있으므로 여기에서는 식 (3)에서 정의된 기온 지수 TI 를 그대로 적용하고자 한다.

TI 값은 2005년, 2006년 및 2007년으로 구분하여, 월요일부터 금요일까지의 Working Day(WD)와 토요일, 일요일 그리고 법정공휴일인 Holiday(HD)로 재분류하였다. 이렇게 분류된 데이터를 가지고 평균 기온에 대한 TI 값과 이에 대한 전력 사용량의 관계로 나타내면 <그림 5>와 같은 패턴을 보인다.

<그림 5>는 2005년부터 2007년까지 각 년도별로 Working Day(WD) 및 Holiday(HD)로 구분하여 TI 및 전력 사용량의 관계를 나타내고 있는데, Working Day의 경우가 Holiday보다 기온 및 전력 사용량 간의 상관관계가 높음을 알 수 있다.

이를 좀 더 자세히 분석해 보면, 대체적으로 2차 함수 형태의 비선형 관계를 보이며, 최소점은 약 17~18°C 부근에 위치하고 년도가 지날수록 최소 값이 조금씩 높아지고 있다. 최소점 17~18°C를 중심으로 기온의 변화에 비해 전력 사용량의 변동이 적은 구간이 존재한다. 해당 구간의 범위는 Working Day보다는 Holiday의 경우 더 넓게 분포하는



〈그림 5〉 평균 기온에 대한 TI 값과 전력 사용량의 관계

데 이는 앞에서 언급한 바와 같이 경제활동이 많을수록 온도 변화에 더 민감하다는 사실을 보여주고 있다. 위 구간을 지나면 기온이 내려감에 따라 또는 기온이 올라감에 따라 모두 전력 사용량이 급격히 증가하게 되는데, 이 또한 전술한 바와 같이 겨울철 또는 여름철에 전열기 또는 냉방기를 사용함에 따른 것으로 해석된다.

이와 같은 TI 값에 따른 전력 소비량의 상관관계는 <그림 6>과 같이 월별 평균 TI 및 전력 소비량과의 관계를 비교해 보아도 알 수 있다. 전력 소비량이 적으면서 기온 변화에 따른 전력 소비의 변동도 적은 달은 4월에서 6월, 그리고 9월 및 10월인데, 해당 월의 평균 TI 값을 살펴보면 약 13°C에서 23°C 사이의 구간을 이루고 있다. 이는 스페인의 전력 소비 패턴을 분석한 Valor et al.(2001)의 연구 결과와 조금 다른데, 스페인의 경우는 평균 TI 값이 15°C~20°C 구간에서 전력 소비 변동이 최소로 나타났는데, 한국의 경우는 13°C~23°C로 해당 구간이 스페인보다 더 길다. 이는 한국인의 기온에 대한 민감도가 스페인 국민들보다 낮으며, 이에 따라 전력의 소비량도 그만큼 상대적으로 적다는 것을 의미한다.

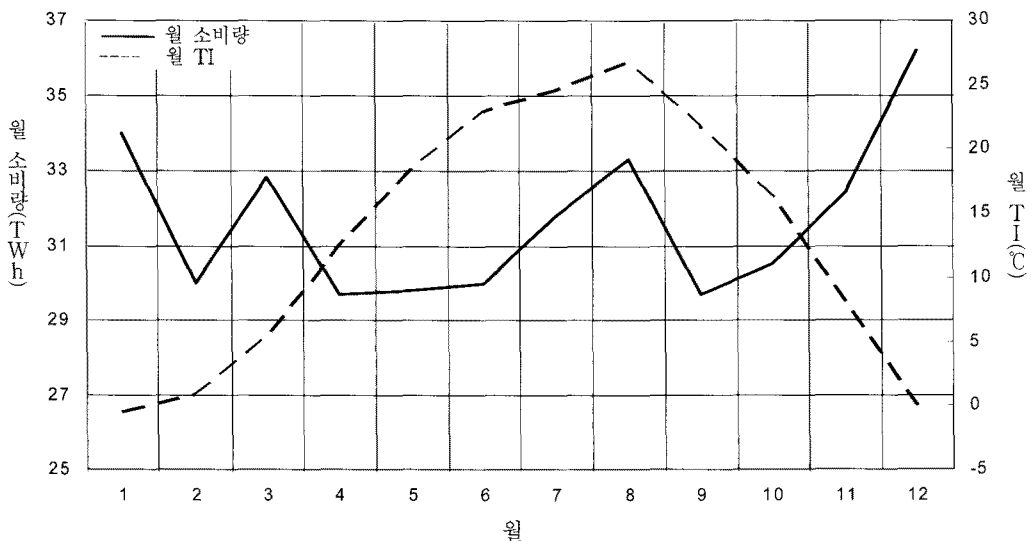
5. 전력 수요 예측 모형

5.1 기온 예보 기반 전력 수요 예측 관련 기존 연구

현재 전력거래소에서는 전력 수요예측을 위해 다양한 변수들을 반영하고 있다. 그 변수로 경제성장률이나 생활수준, 그리고 기상정보가 핵심 변수로 활용하여 전력수요를 예측하고 있다. 특히 그 중에서도 기상정보는 전력수요 예측에 핵심 변수로 최고·최저온도, 습도, 체감온도, 바람 등의 기상정보가 활용되고 있다.

국내 보다는 국외 연구에서는 다중회귀분석을 통해 전력소비량과 인구, 경제성장률, 국내 총생산(GDP), 기후정보, 기상정보 등의 변수와 전력소비량에 관한 연구들이 활발하게 진행되어 왔다(Kinney, 2001; Pezzulli et al., 2004; Mohamed, 2005).

특히 기상정보와 전력 소비량과의 관계에 대한 연구들 중에는 온도, 습도 및 일광시간 등의 기상 요소가 전력 수요에 밀접한 관계를 나타내는 연구 결과가 많이 발표되었다(Johnson, 1969; Valor et al., 2001; Taylora et al., 2003; Ziser et al., 2005).



<그림 6> 월별 TI 값 및 전력 소비량과의 관계(2005년~2007년)

이러한 연구들을 통해 기상정보와 전력 수요량의 기상관련 구성요소를 반영한 51개의 시나리오가 만들어지기도 했다(Leith, 1974; Molteni et al., 1996).

특히 기온정보와 전력 소비량과 관련된 연구들을 살펴보면, 대부분 난방도일(기온하강으로 난방이 필요한 날) 또는 냉방도(기온상승으로 냉방이 필요한 날)와 기온정보의 상관관계를 분석해 기온정보와 전력 소비량 간에 매우 밀접한 관계에 있음을 증명한 것들이 많다(Quayle et al., 1980; Warren et al., 1981; Douglas et al., 1988).

미국의 전력발전소의 경우 24시간 기온정보를 활용한 전력 수요 예측을 통해 발전기의 효율적인 계획을 달성함으로써 연간 2158억 원의 전력생산비용을 절감한 연구결과도 보고된 바 있다.

우리나라의 전력거래소에서도 온도분포와 전력 소비량을 반영한 전력지수를 개발하고 기온분포 함수를 반영한 전력기온지수를 사용하고 있다(한국전력거래소, 2006). 이 지수에서는 기온 1% 상승이 전력소비 1%에 영향을 미치며, 기온 1°C의 오차는 전력 수요 1백만KW의 차이를 나타내는 것으로 파악되고 있다. 또한, 국외 연구결과와 같이 냉방부하의 기준은 15.8°C를 기준으로 기온효과가 나타난다고 보고하고 있다.

5.2 신경망을 활용한 전력 수요 예측 모형

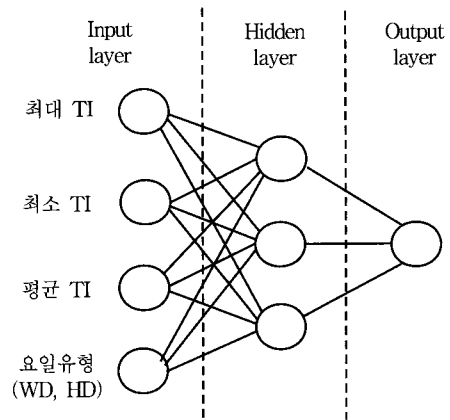
전력 산업에 있어서 기온 예보의 경제적 가치를 분석하기 위해서는 기온 예보의 정확도와 전력 수용 예측의 정확도 간 관계를 규명할 수 있는 모형이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 관계모형을 도출하기 위해 <그림 6>과 같은 신경망(Neural Network)을 활용하였다.

입력변수는 Valor et al.(2001) 및 Teisberg et al.(2005)의 연구결과를 바탕으로 연도별로 서울 및 5대 광역시에서 실제 관측된 최고·최저 기온 및 이의 산술평균인 평균 기온에 대해 각 지역별 인구규모를 고려한 기온 지수(TI) 값으로 변환한 결과치

를 사용하였다. 또한, 월요일부터 금요일까지의 근무일과 휴일간 전력 소비량의 차이가 유의하다는 사전 분석 결과를 반영하기 위해 근무일(Working Day)은 1, 휴일(Holiday)은 2라는 숫자로 변환하여 코딩을 했다.

이렇게 입력된 데이터를 바탕으로 입력값에 따라 예상 전력 소비량을 예측할 수 있도록 신경망을 학습시켰다. 해당 신경망은 과적합(Overfitting)을 피하고 예측치의 보편성을 확보하기 위해 1계층(layer) 구조를 채택하였으며, 신경망 학습 프로그램으로 Alyuda사의 NeuroIntelligence™를 사용하였다.

2005년도 데이터를 기준으로 Hidden layer의 뉴런(Neuron)의 개수를 정하기 위해 10FV(10 fold validation) 방법을 활용하여 예측력을 비교한 결과 <그림 7>과 같은 4×3×1 구조의 신경망을 최종 구조로 채택하였다. 이렇게 해서 결정된 구조의 신경망은 2005년도부터 2007년도까지 각 년도마다 별도로 학습시켰는데, 그 이유는 시간이 지남에 따라 전력 소비량이 연평균 약 5.4%씩 증가하고 있다는 선행 연구결과를 반영하기 위함이다.



<그림 7> 전력 수요예측을 위한 신경망 모형

6. 기온 예보의 경제적 가치 분석

제 5장에서와 같이 기온 예보 및 전력 수요 예측 오차 간의 관계를 나타내는 모형이 구축되었으면,

이를 활용하여 다양한 정확도의 기온 예보 대안들에 대해 전력 생산 비용의 절감 정도를 추정할 수 있다. 이로부터 현재 기상청이 제공하고 있는 기온 예보의 국가적인 이익을 추정할 수 있으며, 또한 현재의 정확도보다 더욱 향상된 예보를 제공하는 경우 창출되는 추가적인 경제적인 이익이 어느 정도인지도 추정할 수 있게 된다. 예를 들어, 현재 기온 예보 수준에서 실제 발전된 전력량과 100% 정확한 기온 예보를 가정하였을 때의 예상 발전량을 비교하면 기온 예보의 정확도 제고를 통해 잉여 발전량의 축소 가능량을 분석하여 잠재적인 경제적 이익을 산출할 수 있게 된다.

이를 위해 먼저 2005년도부터 2007년도까지 각 년도별로 기상청 제공 예보, 단순 예보(persistence forecast) 및 완전 예보(perfect forecast)와 같은 각 예보 유형에 따른 전력 수요 예측량과 실제 전력 사용량을 비교 분석하기로 한다. 여기서 단순 예보란 다음 날의 기온 예측치로서 금일의 실제 기온 관측치를 사용하는 경우를 가정하여 얻어지는 가장 기본적인 가상 예보 형태이다. 즉, 실제 어떤 예보가 주어지지 않는 상황에서도 인간은 주먹구구식으로 의사결정을 하지 않으며, 주어진 상황에서 가장 최선의 정보를 찾으려 하는데, 이 때 얻을 수 있는 최선의 정보는 바로 현재의 기온 정보를 다음 날의 기온 예측치로 활용한다는 가정에 의한 것이

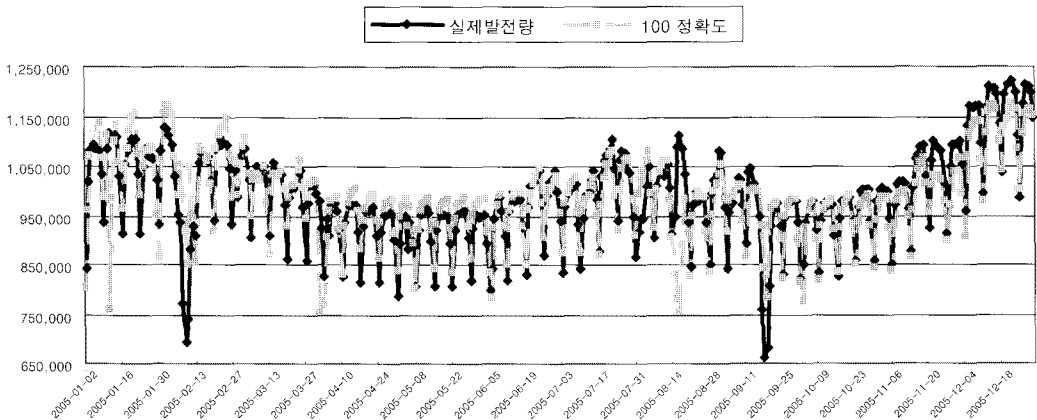
다. 반면에 완전 예보는 다음 날의 실제 기온을 오늘 기온 예보치로 정확하게 사용하는 경우를 가정하여 얻은 또 다른 가상 예보 형태이다. 이는 100% 정확도의 예보를 가정한 것으로서 기온 예보를 통해 창출할 수 있는 최대의 경제적 이익을 산출하고자 도입한 개념이다.

2005년도부터 2006년도까지 기상청에서 제공한 예보의 오차 및 단순 예보의 오차를 평균 기온의 TI 값을 기준으로 분석해 보면 <표 3>과 같다. 기상청 예보의 경우 오차는 약 0.8℃로서 약 6%의 오차율을 가지며 매년 조금씩 정확도가 높아지고 있다는 것을 알 수 있다. 반면에 단순 예보의 경우 오차는 약 1.3℃로서 약 10% 내외의 오차율을 보이고 있다.

<표 3> 기상청 예보 및 단순 예보 오차

년도	단순예보오차		기상청예보오차	
	℃	%	℃	%
2005	1.368	10.27	0.843	6.32
2006	1.479	10.95	0.843	6.24
2007	1.243	9.16	0.772	5.69

위와 같은 세 가지 유형의 기온 예보를 각각 입력 변수로 하여 제 5장에서 학습한 신경망에 적용시키면, 각 기온 예보 형태에 따른 전력 수요 예측



<그림 8> 2005년도 실제 전력 소비량과 완전 예보를 가정한 전력 수요 예측량 비교

량을 구할 수 있으며, 이를 실제 전력 소비량과 비교하여 전력 수요 예측 오차를 구할 수 있다.

예를 들면, <그림 8>은 2005년도의 실제 전력 소비량과 신경망을 활용하여 100% 정확도의 완전 예보를 사용하여 산출한 전력 수요 예측량을 비교하여 도표로 나타난 결과이다. 그 결과 2005년도 실제 전력 소비량은 333,450GWh였지만 100% 정확한 완전 예보를 가정한 전력 발전량은 338,014 GWh로서 4,564GWh 즉, 약 1.98%의 전력 수요 예측 오차가 있음을 알 수 있다.

이와 같이 각 연도별 및 각 예보 형태별 전력 수요 예측치에 대한 오차를 정리를 하면 <표 4>와 같다.

<표 4> 예보 형태별 전력수요 예측오차(%)

년도	단순예보	기상청 예보	완전예보
2005	5.94	4.04	1.98
2006	6.37	3.95	2.21
2007	5.49	3.56	2.16

<표 3>과 <표 4>를 비교해 보면 기온 예보의 오차율과 전력 수요 예측 오차율이 일치하거나 선형 관계는 아니지만 상당한 상관관계가 존재한다는 것은 충분히 파악할 수 있다.

<표 4>에 나타난 각 예보 형태별 전력 수요 예측 오차로부터 실제 전력 소비량보다 초과 생산한 전력의 양을 <표 5>와 같이 계산할 수 있다. 2005년도 및 2006년도 기상청 예보에 의한 초과 생산 전력량을 비교해 보면, 같은 예보 정확도에도 불구하고 2005년도보다 2006년도에 약 388GWh 만큼의 손실이 더 발생한 것을 알 수 있다. 이는 매년 전력 소비량이 증가하는 추세에서 매년 기상청 예보 정확도가 향상되지 않는다면 전력산업에 있어서 추가 비용이 계속 증가한다는 것을 의미한다. 즉, 매년 증가 추세의 전력 소비량을 고려할 경우, 2007년도 처럼 예보 정확도가 일정 수준 이상 향상되어야 전력 손실량을 줄일 수 있다.

<표 5>로부터 현재 기상청이 제공하고 있는 기온 예보로부터 전력산업에서 얻을 수 있는 경제적 이익을 산출할 수 있다. 즉, 단순 예보를 기준으로

<표 5> 예보 형태별 전력 초과 생산량

년도	전력 소비량 (GWh)	단순 예보		기상청 예보		완전 예보	
		수요예측 오차	초과생산 전력(GWh)	수요예측 오차	초과생산 전력(GWh)	수요예측 오차	초과생산 전력(GWh)
2005	331,450	5.94%	19,688	4.04%	13,391	1.98%	6,563
2006	348,820	6.37%	22,220	3.95%	13,778	2.21%	7,709
2007	368,605	5.49%	20,236	3.56%	13,122	2.16%	7,962

<표 6> 예보 형태별 경제적 이익

년도	전력 발전량 (GWh)	단순 예보 vs 기상청 예보			기상청 예보 vs 완전 예보		
		절감 전력(GWh)	절감률	절감액(억\$)	절감 전력(GWh)	절감률	절감액(억\$)
2005	361,441	6,298	1.74%	1.260	6,828	1.89%	1.366
2006	379,213	8,441	2.23%	1.687	6,069	1.60%	1.213
2007	401,566	7,114	1.77%	1.423	5,160	1.29%	1.032
계	1,142,220	21,853	-	4.370	18,057	-	3.611

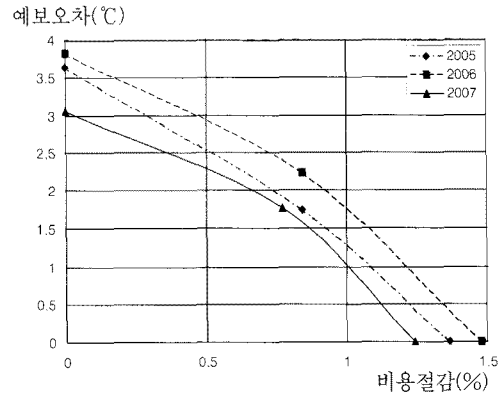
해서 기상청 예보가 어느 정도의 추가 이익을 제공해 왔는지를 분석하고 현재의 기상청 예보 정확도가 향상된다면 향후 얼마만큼의 잠재적인 경제적 이익이 발생할 수 있는지를 분석하고자 한다. 이를 위해 <표 6>과 같이 단순 예보 대비 기상청 예보의 추가 전력 생산량의 절감 정도 및 기상청 예보 대비 완전 예보가 추가적으로 절감할 수 있는 잉여 전력 생산량을 산출하였다. 또한, 추가적인 이익을 금액 단위로 환산하기 위해 Hobbes et al.(1999)에 주장한 바와 같이 전력 1GWh 생산을 위해 평균 20,000달러가 소요된다고 가정하고 계산하였다. 계산 결과 2005년부터 2007년까지 3년간 기상청이 제공한 기온 예보를 통해 단순 예보의 경우보다 총 4억 3천 7백만 달러 금액만큼 전력 생산 비용을 절감할 수 있었다는 것을 알 수 있으며, 2007년 기준으로 예보 정확도 향상을 통해 향후 매년 약 1억 달러 정도의 추가 이익을 잠재적으로 얻을 수 있다고 판단할 수 있다.

기온 예보의 정확도 향상이 전력 발전 산업에 있어 어느 정도의 경제적 이익을 가져올 수 있는지 민감도 분석을 하기 위해, 2005년도부터 2007년도 까지 단순 예보, 실제 기상청 예보 및 완전 예보의 오차 및 단순 예보 대비 비용 절감 정도를 <그림 9>와 같이 나타내었다. <그림 9>에서 보듯이 각 년도별 세 점을 연결하는 함수는 2차 함수임을 알 수 있으며, 년도별 예보 오차에 따른 비용 절감 정도를 나타내는 관계식은 <표 7>과 같이 구할 수 있다. 이와 같은 관계식은 현재보다 0.1℃ 예보 오차를 줄일 경우 얼마만큼의 비용절감을 이룰 수 있는지를 추정하는데 활용될 수 있다. 예를 들어, 2007년도의 예보 오차 0.772℃ 보다 0.1℃의 예보 오차를 감소시킨다면 <표 7>의 2007년도 관계식에 의해 단순 예보 대비 2.04%의 비용 절감을 이룰 수 있다고 판단할 수 있다. 이는 예보 오차 0.772℃의 1.77% 비용 절감보다 0.27% 향상된 결과를 가져온다는 의미이며, 이를 금액으로 환산하면 약 10,840,000달러의 비용 절감을 통한 추가 이익을 얻을 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

<표 7> 예보 오차 및 비용 절감 관계식

년도	관계식
2005	$y = -0.785x^2 - 1.581x + 3.63$
2006	$y = -1.097x^2 - 0.961x + 3.82$
2007	$y = -1.680x^2 - 0.374x + 3.06$

주) y : 비용 절감(%), x : 예보 오차(℃).



<그림 9> 예보 오차 및 비용 절감 관계

7. 시사점 및 한계점

본 연구의 시사점은 첫째, 전력의 수요 예측시 기온정보가 매우 중요한 요소로 작용된다는 것을 여러 측면의 분석을 통해 입증하였다. 월별 또는 요일별 한국의 전력 수요 패턴을 분석하여 겨울철 전력 소비량이 가장 많으며 봄철 및 가을철 전력 소비량이 가장 적다는 사실과 평일 및 휴일 간 전력 소비량도 현저히 차이가 남을 밝혔다. 또한, 기온 지수를 도입하여 각 지역의 인구 분포를 고려한 전력 수요 예측 모형을 도출하였다. 이를 위해 신경망을 활용하였으며, 이는 기온 예보의 경제성 분석을 수행하는데 사용되었다.

둘째, 기온 예보의 경제적 가치를 분석하기 위해 실제 기상청이 제공한 예보와 더불어 단순 예보(persistence forecast) 및 완전 예보(perfect forecast)라는 가상의 예보를 앞서 도출한 신경망 모형에 적용하여 각 예보 형태별 전력 수요 예측 오차

를 산출하였다. 이를 기반으로 현재 기상청에 의해 제공되고 있는 기온 예보의 경제적 가치와 함께 향후 예보 정확도 제고를 통한 추가적인 이익 분석도 수행하였다.

본 연구의 결과는 기온 예보의 정확도 제고의 경제적 중요성을 주장하는 근거로 활용될 수 있다. 즉, 기상청이 제공하는 기상 예보와 같이 정부에 의해 무료로 제공되는 공공재의 경우, 충분한 예산 배정이 이루어지기 위해서는 추가 예산을 통한 기상 예보의 정확도 제고가 국가 경제에 기여하는 경제적 이익을 정확히 분석하여 이를 주장할 필요가 있다(Teisberg et al., 2005). 따라서 전력 산업에서의 기온 예보의 중요성을 경제적 가치로 환산한 본 연구의 결과는 보다 정확한 기온 예보의 중요성을 주장할 수 있는 근거로서 활용될 수 있다.

본 연구의 한계점으로는 기온 정보만으로 전력 사용량의 정확한 수요 예측에 다소 부족한 점을 확인하였다. 따라서 기온 예보 뿐만 아니라 다른 기상 요소 관련 예보의 보다 정확한 경제적 분석을 위해서는 향후 기온 예보 이외에 습도, 바람의 세기, 구름의 양, 강수 유무 및 강수 시간 등과 같은 다양한 기상 요소를 반영한 전력의 수요 예측에 관한 연구를 진행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 이기광, 이중우, “가치스코어 모형을 이용한 기상정보의 기업 의사결정에 미치는 영향 평가”, 『산업경영시스템학회지』, 제30권, 제2호(2007), pp.89-98.
- [2] 이기광, 김인겸, 고광근, “불확실성 정보가 맥주배송게임 기반의 공급사슬 수행도에 미치는 영향 평가”, 『Journal of Information Technology Applications and Management』, 제14권, 제4호(2007), pp.139-158.
- [3] Cancelo, J.R. and A. Espasa, “Modelling and forecasting daily series of electricity demand,” *Invest. Econ.*, Vol.20(1996), pp.359-376.
- [4] Douglas, A.P., A.M. Breipohl, F.N. Lee, and R. Adapa, “The impacts of temperature forecast uncertainty on Bayesian load forecasting,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.13(1998), pp.1507-1513.
- [5] Engle, R.F., C. Mustafa, and J. Rice, “Modelling peak electricity demand,” *Journal of Forecasting*, Vol.11(1992), pp.241-251.
- [6] Hobbes, B.F., S. Jitraprakulsarn, S. Konda, V. Chankong, K.A. Loparo, and D.J. Maratukulam, “Analysis of the value for unit commitment decisions of improved load forecasts,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.14(1999), pp.1342-1348.
- [7] Johnson, S.R., J.D. McQuigg, and T.P. Rothrock, “Temperature Modification and Costs of Electric Power Generation,” *Journal of Applied Meteorology*, Vol.8(1969), pp.919-926.
- [8] Kinney, S., M.A. Piette, L. Gu, and P. Haves, “Demand Relief and Weather Sensitivity in Large California Commercial Office Buildings,” *Proceeding of the International Conference for Enhanced Building Operations*, (2001), pp.1-8.
- [9] Khotanzad, A., R.C. Hwang, A. Abaye, and D.J. Maratukulam, “An adaptive modular artificial neural network hourly load forecaster and its implementation in electric utilities,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.10(1995), pp.1716-1722.
- [10] Khotanzad, A., R. Afkhami-Rohani and D.J. Maratukulam, “ANNSTLF-Artificial neural network short-term load forecaster-generation three,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.13(1998), pp.1413-1422.
- [11] Lee, K.K. and J.W. Lee, “The economic value of weather forecasts for decision-making problems in the profit/loss situation,” *Mete-*

- orological Applications*, Vol.14, No.4(2007), pp.455-463.
- [12] Lee, K.K., I.G. Kim, and C.H. Han, "Decision strategies based on meteorological forecast information in a beer distribution game," *Journal of Information Technology Applications and Management*, Vol.15, No.3(2008), pp.79-90.
- [13] Leith, C.E., "Theoretical skill of Monte Carlo forecasts," *Monthly Weather Review*, Vol.102 (1974), pp.409-418.
- [14] Li, X. and D.J. Sailor, "Electricity use sensitivity to climate and climate change," *World Res. Rev.*, Vol.7(1995), pp.334-346.
- [15] Mohamed, Z. and P. Bodger, "Forecasting electricity consumption in New Zealand using economic and demographic variables," *Energy*, Vol.30(2005), pp.1833-1843.
- [16] Molteni, F., R. Buizza, T.N. Palmer, and T. Petroliagis, "The new ECMWF ensemble prediction system : methodology and validation," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.122(1996), pp.73-119.
- [17] Mylne, K.R., "Decision-making from probability forecasts based on forecast value," *Meteorological Applications*, Vol.9(2002), pp. 307-315.
- [18] Pezzulli, S., P. Frederic, S. Majithia, S. Sabbagh, E. Black, R. Sutton, and D. Stephenson, "The seasonal forecast of electricity demand : a simple Bayesian model with climatological weather generator," *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 2004.
- [19] Quayle, R.G. and H.F. Diaz, "Heating degree day data applied to residential heating energy consumption," *Journal of Applied Meteorology*, Vol.19(1980), pp.241-246.
- [20] Taylor, J.W. and R. Buizza, "Using weather ensemble predictions in electricity demand forecasting," *International Journal of Forecasting*, Vol.19(2003), pp.57-70.
- [21] The 3rd Basic Plan for Long-Term Electricity Supply and Demand(2006~2020), Ministry of Commerce, Industry and Energy Korea Power Exchange, 2006.
- [22] Teisberg, T.J., R.F. Weiher, and A. Khotanzad, "The Economic Value of Temperature Forecasts in Electricity Generation," *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 86(2005), pp.1765-1771.
- [23] Valor, E., V. Meneu, and V. Caselles, "Daily Air Temperature and Electricity Load in Spain," *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 40(2001), pp.1413-1421.
- [24] Warren, H.E. and S.K. LeDuc, "Impact of Climate on Energy Sector in Economic Analysis," *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 20(1981), pp.1431-1439.
- [25] World Meteorological Organization, "Guide to climatological practices," Technical Paper, Vol.100(1983), p.198.
- [26] Yan, Y.Y., "Climate and residential electricity consumption in Hong Kong," *Energy*, Vol.23(1998), pp.17-20.
- [27] Ziser, C.J., Z.Y. Dong, and T.K. Saha, "Investigation of Weather Dependency and Load Diversity on Queensland Electricity Demand," *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2005.