

복합화력발전기의 운전조합별 비용함수에 관한 연구

A Study on the Cost Function Based on Operating Modes for Combined Cycle Power Plant

이 재 희* · 윤 혁 준** · 오 창 진** · 노 유 림** · 주 성 관*** · 유 상 민*** · 위 영 민†
(Jaehee Lee · Hyeok-Jun Yoon · Chang-Jin Oh · Yu-Rim Noh · Sung-Kwan Joo · Sangmin Ryu · Young-Min Wi)

Abstract - In this study, the theoretical methodology is presented for estimating cost function based on operating modes for Combined Cycle Power Plant. The proposed method has estimated cost functions using the relationship between the gas turbine heat input and the output ratio of the steam turbine. In order to verify the proposed method, a regression analysis was performed using the single cost function estimated by the existing performance test method and the cost function for each operating mode estimated by the proposed method. The results of case studies using the 2016 generator input and output data are presented to show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Cost function, Operating mode, Combined cycle power plant

1. 서 론

국내 전력시장은 비용기반으로 전력거래가 이뤄지고 있다. 따라서 발전기 비용함수가 발전기 출력을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 현행 전력시장운영규칙에 따르면 중앙급전지시를 받는 모든 화력발전기는 비용평가 성능시험을 통해 도출된 비용함수를 이용하여 연료비를 보상받는다.

국내에서 운영 중인 복합화력발전기는 다수의 GT와 ST 조합으로 구성되어 있으며, 다른 화력발전기와 달리 GT와 ST에 조합에 따라 다양한 발전 조합이 가능하다. 현행 전력시장운영규칙에서는 복합화력발전기를 한 대의 발전 설비로 간주하여 단일 비용함수를 적용하고 있으며, 국내 전력시장 개설 당시 양방향 입찰제를 준비하는 과정에서 거래기준, IT기술 한계 및 성능시험 단순화를 고려하여 현행 방식을 불가피하게 선택하게 되었다. 따라서 현행 전력시장운영규칙에서는 다조합 복합화력발전기의 운전 조합에 따른 정확한 연료비 보상이 어려운 구조를 갖고 있으며, 동시에 복합화력발전기 기술적 특성 신고치와 운전치의 정합성 부재로 인한 전력계통 운영의 어려움을 전력계통 운영자에게 부과하게 된다.

북미 전력시장의 몇몇 ISO(Independent System Operator)와 RTO(Regional Transmission Organization)에서는 이미 복합화력발전기의 조합별 발전기 특성을 구분하여 전력시장에서 조합별 발전기를 등록하는 모델을 사용하고 있거나 도입을 준비 중이며 이를 통해 계통운영의 안정성과 효율성을 높이고 있다[1]-[5]. 국내에서도 복합화력발전기 비용함수 도출 방식 개선 방안으로 연구된 사례가 있다[6].

복합화력발전기의 조합별 비용함수를 구분하여 사용하게 된다면 복합화력발전기의 연료비 보상이 보다 정확해질 것이며, 또한 복합화력발전기의 기술적 특성을 현실화할 수 있기 때문에 전력계통운영의 안정성을 확보할 수 있다. 또한 복합화력발전기의 조합별 비용함수 도입을 위해서는 기존의 발전기 비용평가성능시험의 개선이 뒤따라야 한다. 하지만 국내의 경우 복합화력발전기의 비용평가성능시험이 평균적으로 4~5년 주기로 진행되고 있으며 성능시험 인원의 절대적 인력 부족으로 모든 복합화력발전기의 조합별 비용함수 추정은 물리적으로 오랜 시간이 필요하다. 따라서 매일 개설되고 운영되는 전력시장에 복합화력발전기의 조합별 비용함수 도입을 위해서는 기존 성능시험 환경에서 동시 적용이 가능한 방법이 필요하다.

본 논문에서는 복합화력발전기의 운전조합별 비용함수 도입을 위해 필요한 개선된 성능시험이 모든 복합화력발전기에 도입되기 전에 전력시장에서 운전조합별 비용함수를 과도기적으로 도입하기 위한 이론적 방법론과 실적 데이터를 이용한 통계적 검증 내용을 포함하고 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 운전조합별 비용함수 도입의 필요성을 설명하며 3 장에서는 기존 비용평가성능시험의 데이터를 활용한 운전조합별 비용함수 추정 모델을 소개한다. 사례연구에서는 국내 복합화력발전기 실적 데

† Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Gwangju University, Korea.

E-mail : ymwi@gwangju.ac.kr

* Dept. of Information and Electronic Engineering, Mokpo National University, Korea..

** Korea Power Exchange, Korea

***Dept. of Electrical Engineering, Korea University, Korea.

.Received : January 2, 2018; Accepted : January 12, 2018

이터를 이용하여 3장에서 제안된 운전조합별 비용함수 추정 방법을 적용하여 통계적 검증을 진행한다.

2. 복합화력발전기의 운전조합별 비용함수의 필요성

현행 성능시험 방법에서 복합화력발전기는 ST와 GT의 조합과 관계없이 복합사이클모드(CC모드)를 하나의 발전기모만 모델링하여 일반화력발전기와 동일하게 시험을 진행한다. 그러나 복합화력발전기는 GT의 기동 대수에 따라 비용의 불연속성이 발생하는데 이를 연속적인 단일 함수로 모델링하기 때문에 실제 비용을 정확히 반영하지 못하는 현상이 발생한다. 이러한 시험 방법은 비용 기반의 전력거래가 이뤄지는 국내 전력시장에서는 정확한 발전기 연료비 보상을 어렵게 만든다.

최근 국내 전력계통 환경에서는 복합화력발전기의 이용률이 수급상황이 어려웠던 시기에 비해 낮기 때문에 복합화력발전기를 운영하는 발전사의 어려움이 증대하고 있다. 또한 예비력 확보를 위한 첨두발전기의 중간출력구간(최대출력의 60%~80%) 운전시간이 전체 운전시간의 큰 부분을 차지함에 따라 전력계통에 기여한 다조합 복합화력발전기들의 손실이 커지고 있다. 그림 1은 2016년 1월 1일부터 10월 31일까지 국내 53개 복합화력발전기의 중간출력구간 운전 비율을 계산한 것이다. 중간출력 구간 운전 비율 수식은 아래와 같으며 총 운전 시간과 중간출력 운전 시간의 비로 계산된다.

$$\text{중간출력 구간 운전 비율} = \frac{\text{해당기간 중간출력 운전 시간의 합}}{\text{해당기간 발전기 운전 총시간의 합}} \quad (1)$$

중간출력 운전 시간을 계산하기 위해 본 연구에서는 분기별 발전기의 최대출력을 고려하였다. 53개 발전기의 중간출력 구간 운전 비율 평균은 35.1%이며 가장 높은 발전기는 72.1%로 나타났다. 연도별 중간출력 운전 시간 비율을 확인하면 표 1과 그림 2와 같다. 조사된 복합화력발전기들을 대상으로 운전시간을 확인해 보면 2013년부터 2016년까지 연도가 증가할수록 전체 발전 시간은 줄어들고 있으며 중간출력 운전시간의 비율도 따라서 감소하고 있다. 하지만 2016년 전체 운전시간은 179,309 시간으로 2013년 300,568 대비 약 40% 이용시간이 줄어들었음에도 불구하고 중간출력 이용률은 40.87%에서 35.10%로 낙폭이 크지 않다. 전체 운전시간의 경우 국내 전력계통 수급이 안정됨에 따라

표 1 연도별 중간출력 이용률

Table 1 Yearly medium load operation ratio

연도	중간출력 이용률 (%)	해당 발전기 대수
2013	40.87	43
2014	41.65	51
2015	36.21	53
2016	35.10	53

중앙급전발전기의 수가 증가하였고 그에 따라 기존 복합화력발전기의 전체 이용률이 감소함을 의미한다. 또한 앞서 언급한 것처럼 복합화력발전기의 빠른 응답 특성으로 인해 예비력 자원으로 많이 활용되고 있는데 이러한 부분은 간헐적 발전 특성을 보이는 신재생에너지원의 계통연계 비율이 높아질수록 강화될 수 있다.

그림 3에서는 현행 비용평가성능시험에 따른 복합화력발전기 비용함수 추정 방법을 적용한 발전기 효율함수를 실적과 비교하고 있다. 그림들에서 확인할 수 있듯이 발전기 성능시험을 통해 추정된 비용함수가 실적치와 비교 시 차이가 있으며, 특히 중간 부하 출력 구간에서 그 차이가 더 큼을 확인할 수 있다. 실적 데이터 확인 시 같은 발전기 출력에서 다양한 열입력량을 보이는 것은 복합화력발전기 운전 조합에 따른 차이와 복합화력발전기 운영 환경적 차이에 기인한 것으로 판단된다. 두 가지 요인이 복

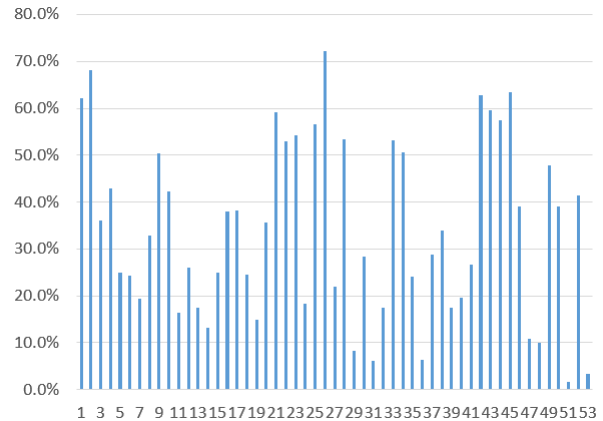


그림 1 복합화력발전기 중간출력 운전 비율

Fig. 1 Medium load operation time ratio for Combined Cycle Power Generator

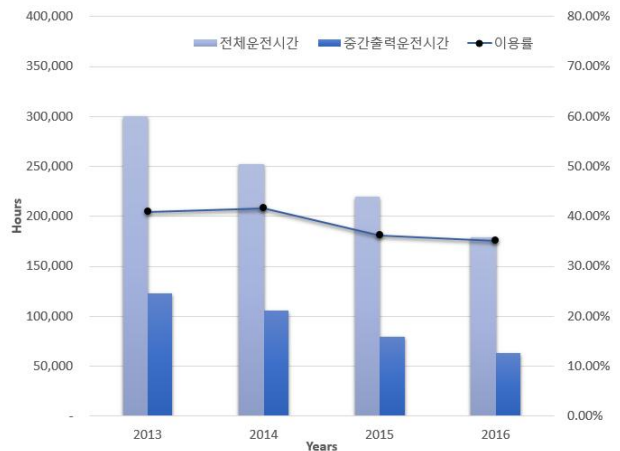


그림 2 복합화력발전기 중간출력 운전 비율

Fig. 2 Yearly operation time for Combined Cycle Power Generator

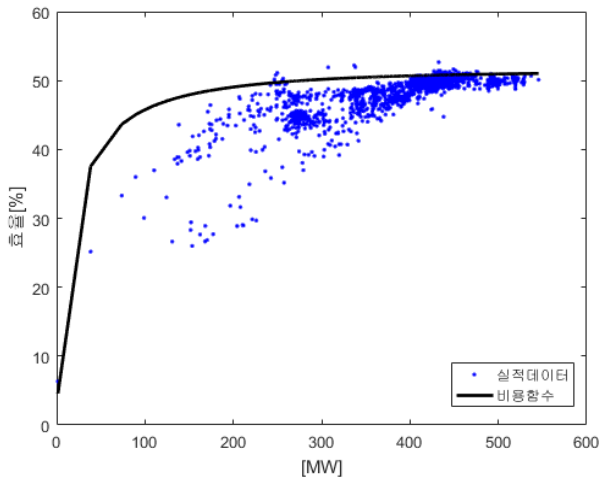


그림 3 복합화력발전기 효율함수 및 실적데이터 예시
Fig. 3 Example of efficiency curve and data for Combined Cycle Power Generator

합적으로 나타나기 때문에 하나의 발전기 비용함수로 복합화력발전기 출력 전 구간을 대표하기에는 한계점이 있다.

복합화력발전기의 조합별 비용함수를 구분하게 되면 전력시장 내의 복합화력발전기의 연료비 보상이 보다 정확해질 것이며, 복합화력발전기의 기술적 특성을 현실화할 수 있기 때문에 전력계통운영의 안정성을 개선할 수 있다. 추가적으로 복합화력발전기의 조합별 비용함수 도입을 위해서는 기존의 발전기 비용평가성능시험의 개선이 필요하다.

현재 발전기 비용평가성능시험에서는 복합화력발전기의 운전 조합에 대한 구분 없이 전체 출력을 기준으로 성능시험 구간을 결정하고 있다. 만약 복합화력발전기의 운전조합별 비용함수 도입을 위해 개선된 성능시험이 도입된다 하여도 전력시장에서 운영 중인 모든 복합화력발전기에 새로운 성능시험을 적용하는 것만 해도 수년이 예상된다. 따라서 기존의 비용평가성능시험 데이터를 이용하여 전체 복합화력발전기의 비용함수를 현실화할 수 있는 합리적인 방안의 도출이 필요하며 이를 통해 전체 복합화력발전기 비용함수를 동시에 개선할 수 있을 것이다.

또한 복합화력발전기의 발전기 비용평가성능시험을 개선하여 기존 성능시험 데이터를 이용하여 도출된 비용함수 계수를 검증하고 대체하여 실제 복합화력발전기 비용함수의 정확성을 개선함으로써 비용자료의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 운전조합별 비용함수 도입을 위한 이론적 방법론과 실적 데이터를 이용한 검증 내용을 포함하고 있다.

3. 복합화력발전기 운전조합별 비용함수 추정 방법

복합화력발전기 비용함수 도출 방식 개선을 위해서는 근본적으로 성능시험 방법의 개선이 필요하며 개선된 방법을 반영할 수 있는 전력시장 시스템이 필요하다. 모든 요소를 동시에 개선하는

것은 물리적으로 어렵기 때문에 본 연구에서는 기존의 성능시험의 결과를 이용하여 복합화력발전기 비용함수 추정 방법을 개선할 수 있는 방안을 제안한다. 개선된 비용함수계수 도출 개선 방안이 기존 성능시험의 결과를 활용할 수 있다면 성능시험 방법의 개선 없이 모든 복합화력발전기에 동시에 적용할 수 있다는 장점이 있으며 이는 현 전력시장에 바로 적용이 가능하다.

본 연구에서 복합화력발전기 비용함수 도출 방식 개선 방안으로 기존 전력거래소에서 기 진행된 연구과제 결과물[6]을 기반으로 GT와 ST의 출력에 대한 비율을 조정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 기존 성능시험 자료에서 GT 1대의 열입력량과 ST의 출력비를 활용하여 운전조합별 비용함수를 도출한다. 예를 들어 A 복합화력발전기의 성능시험 결과는 표 2와 같다.

표 2 A 복합화력발전기 성능시험 결과

Table 2 Performance test results for the generator A

부하 구간 [%]	GT 운전대 수	전기출력(MW)			열입력량 [Gcal]	열효율 [%]	출력 비율 (ST/GT)
		CC	GT	ST			
50	1	180	113	67	329	47.1	0.59
67	1	276	179	97	478	49.6	0.54
84	2	464	289	175	802	49.7	0.60
100	2	558	354	204	953	50.3	0.57
추정된 비용함수 : $y = 0.000083x^2 + 1.606223x + 34.273201$							

표 3 A 복합화력발전기 1:1 조합에 따른 결과

Table 3 1:1 mode results for the generator A

부하 구간 [%]	GT 운전대 수	전기출력(MW)			열입력량 [Gcal]	열효율 [%]	출력 비율 (ST/GT)
		CC	GT	ST			
64	1	178	113	65	329	46.6	0.57
82	1	228	144	83	401	48.8	0.57
100	1	279	177	102	477	50.3	0.57
추정된 비용함수 : $y = 0.000089x^2 + 1.428549x + 71.323051$							

표 4 A 복합화력발전기 2:1 조합에 따른 결과

Table 4 2:1 mode results for the generator A

부하 구간 [%]	GT 운전대 수	전기출력(MW)			열입력량 [Gcal]	열효율 [%]	출력 비율 (ST/GT)
		CC	GT	ST			
64	2	357	227	130	658	46.6	0.57
82	2	455	289	166	802	48.8	0.57
100	2	558	354	204	953	50.3	0.57
추정된 비용함수 : $y = 0.000044x^2 + 1.428549x + 142.646102$							

A 복합화력발전기 성능시험 결과 확인 시 4개의 부하구간에 서 발전기 출력(MW)과 열입력량(Gcal)이 측정되었으며 부하구 간에 따라 GT와 ST 조합이 1:1과 2:1로 구분되어 진다. GT에 대한 ST의 출력 비율은 부하구간별로 0.54~0.60까지 차이를 보 인다.

복합화력발전기 비용함수 도출 방식 개선 방안은 다조합 복합 모드에서 전기출력과 열입력량은 투입된 GT가 공평히 기여한다 고 가정한다. 이러한 가정을 하는 이유는 발전사별로 복합화력발 전기의 전기출력과 열입력량을 측정하는 지점이 차이가 나기 때 문이다. 전기출력과 열입력량이 각 GT 별로 측정된다면 위와 같 은 가정이 필요 없지만 많은 수의 복합화력발전기에서는 통합해 서 측정하는 경우가 존재한다.

위의 가정을 받아들여서 2:1 운전의 결과를 1:1 조합으로 변 경하게 되면 표3과 같다. GT출력과 열입력량은 표2에서 총 GT 의 대수로 나눈값이며 ST의 출력은 성능시험 시 측정된 4개의 포인트의 ST/GT의 평균을 사용하였다. GT에 대한 ST 출력 비율 은 본 연구에서는 4가지 방법을 제안하였다.

복합화력발전기의 1:1 운전 조합에 대한 비용함수 추정이 완 료되면 2:1, 3:1, ..., n:1 조합으로의 확장은 단순히 GT의 출력 량과 열입력량을 n배함으로써 추정이 가능하다. 예를 들어 A 복 합화력발전기의 2:1 운전 조합에 대한 비용함수 추정은 표4와 같다.

제안된 방안에 대한 A 복합화력발전기의 운전조합별 비용함수 추정 사례를 일반화하여 기존의 성능시험 계측값을 이용한 운전 조합별 비용함수 추정 방법으로 정리하면, 우선 1:1 운전 조합 비용함수를 추정한 후 n:1의 형태로 확장한다. 제안된 방법의 1:1 운전조합 비용함수의 계수(α, β, γ) 추정 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \min \sum_i (H_i^{1:1} - \alpha(CC_i^{1:1})^2 - \beta(C_i^{1:1}) - \gamma)^2 \\ & CC_i^{1:1} = GT_i^{1:1} + ST_i^{1:1} \\ & GT_i^{1:1} = \frac{GT_i}{n_i} \\ & ST_i^{1:1} = GT_i^{1:1} \times \frac{ST_i}{GT_i} \\ & H_i^{1:1} = \frac{H_i}{n_i} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $CC_i^{1:1}$ 와 $H_i^{1:1}$ 는 각각 1:1 운전조합에서의 복합화력발전 기 출력(MW)과 열입력량(Gcal)을 의미한다. $GT_i^{1:1}$ 와 $ST_i^{1:1}$ 는 각각 1:1 운전조합에서의 복합화력발전기의 i 번째 측정값이며, GT_i 와 ST_i 는 각각 i 번째 기존 성능시험 측정값을 나타낸다. n_i 는 기존 성능시험에서 i 번째 계측값을 측정할 때 사용된 GT 발 전기의 개수이다.

제안된 방법에서는 1:1 운전조합 비용함수를 기본으로 하여 n:1 운전조합 비용함수로 확대시킬 수 있다. 1:1일 때의 $GT_i^{1:1}$ 와 $H_i^{1:1}$ 를 n:1 운전조합으로 확장은 아래 수식과 같이 이뤄지며 1:1 운전조합의 비용함수 추정과 같은 과정으로 n:1 운전조합 비 용함수 계수를 추정할 수 있다.

$$GT_i^{n:1} = n \times GT_i^{1:1} \quad (3)$$

$$H_i^{n:1} = n \times H_i^{1:1}$$

추가적으로 수식 (2)에서 사용된 ST 출력 추정을 위한 ST와 GT의 비율은 앞 서 서술한 것처럼 본 연구에서는 4가지 방법을 제안하였으며 그 방법은 표5와 같으며 수식은 (4)~(7)과 같다.

표 5 ST 출력 추정을 위한 ST와 GT의 비율 산정 방법

Table 5 Options for estimating ST output

방법	설명
Option1	기존 비용평가 성능시험 4번째(100%) 부하구간의 비율을 대표값으로 사용하여 운전조합별 데이터 생 성 시 적용
Option2	기존 비용평가 성능시험의 3번째와 4번째(100%) 부 하구간의 비율을 평균한 값을 사용하여 운전조합별 데이터 생성 시 적용
Option3	기존 비용평가 성능시험의 3번째 부하구간의 비율을 운전조합별 데이터 생성 시 운전조합별 첫 번째와 두 번째 데이터 생성 시 적용하며, 기존 비용평가 성능시험의 4번째 부하구간의 비율을 운전조합별 세 번째 데이터 생성 시 적용
Option4	기존 비용평가 성능시험의 모든 부하 구간의 데이터를 가중 평균하여 운전조합별 데이터 생성 시 적용

$$Option1: \frac{ST_1^{n:1}}{GT_1^{n:1}} = \frac{ST_3^{n:1}}{GT_3^{n:1}} = \frac{ST_4^{n:1}}{GT_4^{n:1}} = \frac{ST_4}{GT_4} \quad (4)$$

$$Option2: \frac{ST_1^{n:1}}{GT_1^{n:1}} = \frac{ST_3^{n:1}}{GT_3^{n:1}} = \frac{ST_4^{n:1}}{GT_4^{n:1}} = \frac{1}{2} \left(\frac{ST_3}{GT_3} + \frac{ST_4}{GT_4} \right) \quad (5)$$

$$Option3: \frac{ST_1^{n:1}}{GT_1^{n:1}} = \frac{ST_3}{GT_3}, \frac{ST_3^{n:1}}{GT_3^{n:1}} = \frac{ST_3}{GT_3}, \frac{ST_4^{n:1}}{GT_4^{n:1}} = \frac{ST_4}{GT_4} \quad (6)$$

$$Option4: \frac{ST_1^{n:1}}{GT_1^{n:1}} = \frac{ST_3^{n:1}}{GT_3^{n:1}} = \frac{ST_4^{n:1}}{GT_4^{n:1}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{ST_i}{GT_i} \right) \quad (7)$$

4. 사례연구

비용기반의 전력시장을 운영하는 국내 전력시장에서는 발전기 비용함수 추정을 위해 발전기 출력량(MW)과 열입력량(Gcal)을 각각 독립변수와 종속변수로 사용한 다항회귀분석을 이용한다. 회귀분석이란 독립변수가 종속변수에 미치는 영향력의 크기를 파 악하여 독립변수의 특정한 값에 대응하는 종속변수 값을 예측하 는 모형을 선출하는 방법이다. 따라서 회귀분석을 통해 도출된 모형과 실제 측정된 값의 차이(잔차, residual)가 작을수록 모형 이 대표성을 갖으며 종속변수에 대한 독립변수의 설명력이 높다

고 할 수 있다.

제안된 운전조합별 비용함수 추정의 적합성을 검토하기 위해서 통계학적으로 회귀 모형의 적합도 평가를 위해 사용되는 분산분석의 F검정과 결정계수를 사용하여 모형의 유효성을 검증한다. 두 가지 모두 앞서 언급한 회귀모형과 실제값의 차이인 잔차를 기반으로 회귀모형의 정확도를 평가하는 통계값이다.

결정계수(coefficient of determinant)란 회귀모형의 데이터에 대한 설명력을 나타내는 척도이다. 회귀모형은 데이터를 설명할 수 있는 부분과 설명할 수 없는 부분으로 나뉘지며, 이를 각각 제곱함으로 표현한다. 여기서 회귀 제곱함을 전체 제곱함으로 나뉘주면 전체 모형이 차지하는 부분에서 설명가능한 부분의 비중을 알 수 있게 되며 이를 결정계수라 한다. 아래 수식은 결정계수(R^2)를 계산하는 수식이다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (8)$$

$$SST(\text{총변동}) = SSE(\text{잔차변동}) + SSR(\text{회귀변동})$$

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$SSR = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

위의 수식에서 SSE (잔차변동)이 '0'이면 이상적인 값이며 그렇게 되면 $SST = SSR$ 이 성립하게 된다. SSR (회귀변동)은 회귀모형에 의한 값이고 이 값이 SST (총변동)와 일치한다는 것은 추정된 회귀모형이 측정값과 완벽히 일치함을 나타낸다. 일반적으로 결정계수가 '1'에 가까울수록 회귀모형의 설명력이 좋음을 뜻한다.

분산분석의 F검정의 경우 앞서 결정계수를 계산하는 과정에서 잔차변동과 회귀변동을 이용해서 계산되며 수식은 다음과 같다.

$$F = \frac{\frac{\sum_i SSR}{k}}{\frac{\sum_i SSE}{n-k}} \quad (9)$$

여기서 k 와 n 은 각각 독립변수의 개수와 관측된 데이터의 총 개수를 의미한다.

계산된 F 값은 유의수준과 자유도에 따라 F 분포표에서 기각역을 찾아 기각역보다 크게 되면 귀무가설(회귀모형이 유용하지 않다)을 기각하게 된다. 즉 추정된 회귀모형이 유용하다는 것을 확인할 수 있다.

예를 들어 B-복합화력발전기의 실적데이터(전기출력과 열입력량으로 2016년에 2:1조합으로 운전된 데이터임)를 이용하여 기존의 성능시험 결과를 이용한 단일 비용함수와 제안된 조합별 비용함수(ST출력비율 Option4 적용)의 회귀모형을 비교하면 그림 4와 같다. 그림 4는 2:1 운전조합 비용함수의 발전기 효율함수를

보여 주고 있으면 그림에서 확인할 수 있듯이 비용함수가 발전기 출력이 높을수록 실적데이터와 유사하다는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 실제 B-복합화력발전기가 중앙급전에 의해 운영되는 구간에서 제안된 방법으로 추정된 비용함수가 발전기 연료비 보상이 기존 방법 대비 더 정확할 수 있음을 보여주는 사례라 볼 수 있다.

통계적 검증을 위해 B-복합화력발전기의 데이터를 이용하여 앞서 설명한 F검정과 결정계수를 기존함수와 제안된 방법으로 추정된 함수와 비교해 보면 다음 표와 같다. 표 6에서 확인할 수 있듯이 결정계수의 경우 제안된 2:1 조합 비용함수의 값이 기존함수대비 '1'에 더 가깝다는 것을 알 수 있다. 또한 F검정의 경우에도 기각역인 3보다 클 뿐만 아니라 기존함수 대비해서도 더 큰 값을 갖기 때문에 F분포함수에서 더 극한에 가까운 값을 가짐을 확인할 수 있으며 이는 곧 회귀모형의 설명력이 더 높다고 판단할 수 있다.

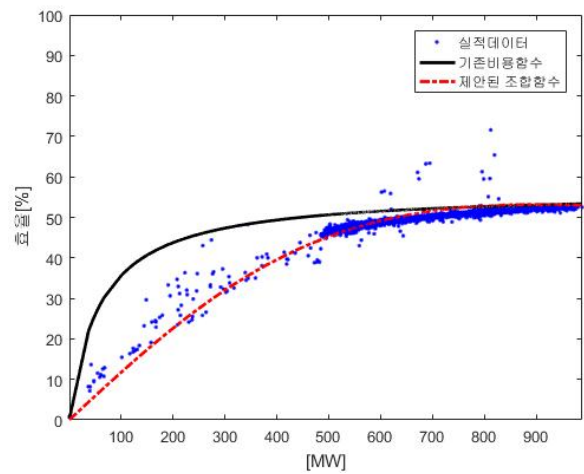


그림 4 2:1 조합에서의 효율함수 비교

Fig. 4 Comparison of efficiency curves between the existing method and the proposed method in 2:1 operating mode

표 6 통계검증 비교

Table 6 Comparison of statistical verification

	기존함수	제안된 2:1 조합함수	비고
결정계수	0.9399	0.9633	-
F검증	57,089	96,103	기각역 3

*F검증의 기각역은 분석대상의 자유도에 따라 F분포표를 참고한다.

앞서 진행한 통계적 검증은 발전기 출력 전 구간 데이터를 활용하여 진행한 내용이다. 실제 중앙급전발전기 경우 비용함수를 적용하여 입찰하는 발전기 출력 구간은 최소발전량과 최대발전량 사이이다. 따라서 비용함수 계수 추정에 대한 검증도 이와 같은

발전기 출력구간으로 제한한다면 더 명확한 검증이 가능할 것으로 판단된다. 발전기 최소출력 이상의 데이터만으로 F검증과 결정계수를 분석해 보면 전체 발전기 출력 범위에서 분석한 것 보다 회귀모형의 설명력이 높아짐을 표 7에서 확인할 수 있다. 기존함수와 제안된 조합별 비용함수 모두에서 설명력이 높아짐을 확인할 수 있으며, 결정계수의 경우 '1'에 더 가까워진 값으로 분석되며, F검증에서도 기각역보다 보다 큰 값으로 귀무가설을 기각하게 된다.

표 8은 본 자문에서 사례 연구한 10개 복합화력발전기의 통계적 분석(결정계수) 결과를 정리한 것이다. 표8에서 확인할 수 있듯이 기존 성능시험을 통해 추정된 단일 비용함수보다 제안된 조합별 비용함수 추정방법에 따라 추정된 비용함수의 결정계수가 더 높게 나타났다. 또한 F검증을 확인 시에도 모든 경우 기각역보다 큰 통계값을 가짐을 확인하였다.

표 7 최소출력 이상 데이터를 사용한 통계 검증 비교

Table 7 Comparison of statistical verification using data from normal operating conditions

	기존함수	제안된 2:1 조합함수	비고
결정계수	0.9464	0.9738	-
F검증	62,128	131,220	기각역 3

*F검증의 기각역은 분석대상의 자유도에 따라 F분포표를 참고한다.

표 8 2:1 운전조합에 대한 비용함수 추정 방법에 따른 결정계수 비교

Table 8 Comparisons with coefficients of determination in 2:1 operating mode

발전기	최소출력 이상 구간(2016년1월 기준)				
	기존	4구간	3,4구간	복수구간	가중평균
		Option1	Option2	Option3	Option4
가	0.9054	0.8872	0.8714	0.9200	0.8740
나	0.8980	0.8651	0.8575	0.9264	0.8658
다	0.8346	0.9191	0.9390	0.9598	0.9214
라	0.9780	0.9518	0.9456	0.9868	0.9490
마	0.9464	0.9511	0.9372	0.9738	0.9546
바	0.8692	0.9081	0.8641	0.8839	0.9240
사	0.9519	0.9313	0.9228	0.9532	0.9239
아	0.8888	0.9536	0.9226	0.9249	0.9613
자	0.8924	0.9036	0.9061	0.9156	0.9063
차	0.8453	0.8886	0.8849	0.8897	0.8862

기존 단일함수의 결정계수 대비 개선된 결과를 보이는 옵션값에 대해서 표 8에서는 음영으로 표시하였다. 제안된 4가지 옵션 중 3번째 옵션인 복수구간으로 ST 출력 비율을 정하는 방법이 가장 개선 효과가 좋은 것으로 나타났다. 기존 성능시험을 통해

추정된 비용함수와 제안된 옵션3을 적용한 조합별 비용함수 간의 결정계수를 비교 시 10개 발전기 모두 결정계수가 개선됨을 볼 수 있다. 즉, 2:1 운전조합의 복합화력발전기 비용함수 추정을 위해서 기존 성능시험에서 계측하는 부하구간 중 80%와 100%에서의 GT에 대한 ST의 출력비만을 고려할 때 통계적으로 더 우수한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

복합화력발전기는 GT의 기동 대수에 따라 비용의 불연속성이 발생하는데 현행 성능시험에서는 이를 연속적인 단일 함수로 모델링하기 때문에 실제 비용을 정확히 반영하지 못하는 현상이 발생한다. 이러한 시험 방법은 비용 기반의 전력거래가 이뤄지는 국내 전력시장에서는 정확한 발전기 연료비 보상을 어렵게 만든다. 본 연구에서는 복합화력발전기의 운전조합별 비용함수 도입을 위한 이론적 방법론과 실적 데이터를 이용한 통계적 검증 내용을 포함하고 있다. 제안된 방법은 기존 성능시험 자료에서 GT 1대의 열입력량과 ST의 출력비를 활용하여 운전조합별 비용함수를 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 제안된 방법을 검증하기 위해 기존 성능시험 방법을 통해 추정된 단일 비용함수와 제안된 방법으로 추정된 운전조합별 비용함수를 2016년 발전기 입·출력 데이터를 이용하여 회귀분석을 진행하였다. 통계지표인 결정계수와 F검증을 통해 제안된 모형으로 추정된 비용함수 계수와 기존 성능시험을 통해 추정된 비용함수 계수를 통계적으로 검증하였으며, 분석 결과 제안된 방법이 기존 방법보다 통계적으로 더 개선되었음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2018년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

References

- [1] PJM, "Combined Cycle Modeling", 2016.
- [2] ERCOT, "Overview of Combined Cycle Modeling", 2017.
- [3] CAISO, "Multi-stage generation (MSG) model overview", 2012.
- [4] CEATI, "Commitment Techniques for Combined-Cycle Generating Units", 2005.
- [5] MISO, "Combined Cycle Modeling Update", 2015.
- [6] KPX, A Study on the Influence Analysis of Cost Function on Power Generation Plan and Improvement and Application of Function Calculation, 2010.

저 자 소 개



이 재 희 (Jaehee Lee)

1981년 12월 12일생. 2014년 고려대학교 전기전자공학과 졸업(박사). 2013~2015년 한전경제경영연구원 선임연구원. 현재 목포대학교 정보전자공학과 조교수.

E-mail : jaehee@mokpo.ac.kr



윤 혁 준 (Hyeok-Jun Yoon)

1979년 11월 3일생. 2016년 숭실대학교 경제학과 졸업(석사). 현재 전력거래소 시장개발처 차장.

E-mail : junism@kpx.or.kr



오 창 진 (Chang-Jin Oh)

1984년 1월 28일생. 2009년 인하대학교 전기공학과 졸업(학사). 2013년~현재 한국전력거래소 중앙전력관제센터.

E-mail : ckd1423@kpx.or.kr



노 유 림 (Yu-Rim Noh)

1988년 5월 17일생. 2013년 이화여자대학교 경제학과 졸업(학사). 2014년~현재 한국전력거래소 시장개발처.

E-mail : yrnoh@kpx.or.kr



주 성 관 (Sung-Kwan Joo)

1971년 7월 6일생. 2004년 University of Washington, Seattle 전기공학과 졸업(박사), 2006년~현재 고려대학교 전기전자공학부 교수.

E-mail : skjoo@korea.ac.kr



유 상 민 (Sangmin Ryu)

1991년 9월 30일생. 2017년 세종대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사), 2017년~현재 고려대학교 전기전자공학과 석사과정.

E-mail : sangmin0930@korea.ac.kr



위 영 민 (Young-Min Wi)

1980년 4월 7일생. 2013년 고려대학교 전기전자공학과 졸업(박사). 2013~2014년 한국전기연구원 근무. 2014년~현재 광주대학교 전기공학부 조교수.

E-mail : ymwi@gwangju.ac.kr