

# 최근 3년간 수입 유연탄 분석 및 연소열성능 해석을 활용한 석탄화력 발전소 탄종 경제성 평가 연구

백세현\*\* · 박호영\* · 고성호\*\*

## Economic Evaluation of Coals Imported in Last 3 Years for Power Plant Based on Thermal Performance Analysis

Sehyun Baek, Hoyoung Park and SungHo Ko

### ABSTRACT

In this study, the economic evaluation for imported coals was conducted for power plant based on thermo-dynamical performance analysis. The number of coal types considered was 1,755 imported by five power generation companies in Korea during the 2010-2012. The higher heating value (HHV) of the coals ranged 4,000-6,500 kcal/kg, mostly sub-bituminous. The 1D thermo-dynamical performance modeling was performed for a 500 MWe standard power plant using PROATES code. It was founded that the low rank coals had negative effects on the plant efficiency mainly due to the increased heat loss by moisture, hydrogen and flue gas. Based on the performance analysis, the economic performance of the coals was evaluated. The apparent price of low-rank coals tended to be significantly lower than design coal; for example, the unit price of coal with a HHV of 4,000 kcal/kg was 57% of the reference coal having 6,080 kcal/kg. Considering the negative effects leading to a decrease in the thermal performance, heating value compensation, and increased parasite load, the corrected unit cost for the coal with 4,000 kcal/kg was 90.7% of the reference coal. Overall, the cost saving by imported coals was not high as expected.

**Key Words** : Coal, Economics, Thermal performance, Process analysis

### 1. 서론

국내 전력공급시장에서 유연탄 발전소가 차지하는 비중은 Table 1과 같이 2011년 39.6%, 2012년 34.2%였으며, 이들 유연탄 석탄화력 발전소는 총 20호기가 설치된 500 MW 표준화력을 포함하여 500 MW~800 MW급 대용량 발전소로 구성되어 있다. 한편 2001년 전력시장 구조개편 이후 발전회사들은 경쟁 심화에 따라 석탄화력 발전소의 발전원가에서 가장 큰 비중을 차지하는 연료비를 절감하는데 많은 관심과 노력을 집중하고 있다.

특히 '07-'08년 국제 에너지 가격의 급격한 변동은 연료를 전량 수입하는 발전회사들에게 심각한 위기 요인으로 인식되었으며 석탄시장의 단기 변동성에 대한 충격을 완화하고 연료구입비용 절감을 위하여 저급탄의 수입 비중을 크게 증가시키는 추세가 계속되고 있다.

**Table 1.** Recent power generation share rate per power plant type in domestic market[1]

구분	2011		2012		
	발전량	점유율	발전량	점유율	
화력	유연탄	196,855	39.6%	174,263	34.2%
	무연탄	3,269	0.7%	6,489	1.3%
	유류	24,921	5.0%	48,244	9.5%
	가스	101,702	20.5%	113,984	22.4%
수력	7,831	1.6%	7,695	1.5%	
원자력	154,723	31.1%	150,327	29.5%	
대체에너지	7,592	2%	8,571	1.7%	
계	496,893	Gwh	509,573	Gwh	

일반적으로 국내 석탄화력 발전소에서 적용되는 저급탄이란 용어는 Table 2와 같이 보일러 설계탄(성능보증시험 기준연료)과 범위탄(보조기기 용량설계에 적용되는 기준연료) 범위를 벗어난 규격의 탄을 의미하며, 주로 국내에 수입되는 저급탄은 아역청탄

\* 한전 전력연구원

\*\* 충남대학교

† 연락처자, magenta@kepco.co.kr

**Table 2.** General definition of raw rank coal for power generation company in KOREA

구 분	회분(%)	황분(%)	발열량 (kcal/kg)	비고
Design Coal	15	0.7	6,080	
Range Coal	Max 17	Max 1.0	Min 5,700	
저급탄 규격	18 이상	1.1 이상	5,350 미만	송장값

계열이 대부분을 차지하고 있다. 특히 석탄화력 발전소의 주력 기종인 표준화력 발전소는 당초 설계 열량인 6,080 kcal/kg 에서 점차 저열량탄의 소비를 증가시켜 최근에는 평균 5,200 kcal/kg 급까지의 저열량탄 연소를 확대하여 시행하고 있다.

그러나 지금까지는 이렇게 저열량탄 연소의 확대가 현격하게 증가됨에도 불구하고 정량적인 경제성 평가는 이루어지지 못하였다. 그 첫 번째 이유는 그동안 가격이 저렴한 저열량탄의 겉보기 가격만 관심이 집중되고 실제 발전소 성능에 미치는 영향과 부대비용에 대한 관심은 크게 대두되지 못하였기 때문이다. 또한 발전소별 성능시험에는 많은 비용이 수반되기에 1-2년에 1회 정도만 시행이 가능한 상황이고 최근에는 일반적으로 저급탄과 고급탄을 최대 4종까지 동시에 1대의 보일러에 혼탄 연소하기 때문에 개별적인 탄종에 대한 영향성을 평가하기 어려워 체계적인 연구가 시도되지 못하는 실정이었다.

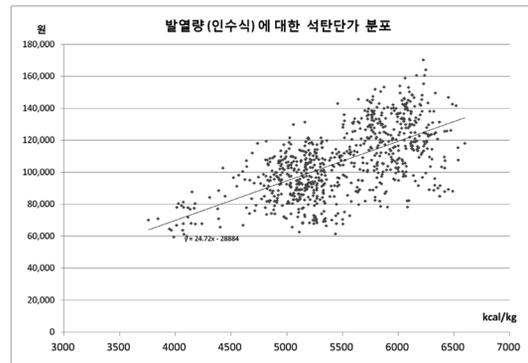
따라서 본 논문에는 탄종별 경제성 분석을 위하여 먼저 최근 3년간(2010-2012년) 국내 5개 발전사에서 수입한 총 1755종의 탄종별 입하탄 자료를 수집하여 열량, 성상, 탄질 및 가격의 분포를 분석하였다. 그리고 분석 자료에서 열량대별 26종의 탄종을 선별하여 이에 대한 연소열성능 해석기법을 적용하여 탄종별 발전효율을 계산하고 열량 및 효율저하에 따른 석탄소요량 증가 및 발전소 소내소비 동력 증가분 등을 고려하여 탄종별 기초 경제성 평가를 수행하였다. 그러나 이번 논문의 범위에서는 탄종별 설비에 수명에 미치는 영향성과 발전소 고장 정비비용 등에 대한 평가는 현시점에서는 정량적인 평가기준이 불확실하기 때문에 제외하였다.

## 2. 최근 국내도입탄종 분석

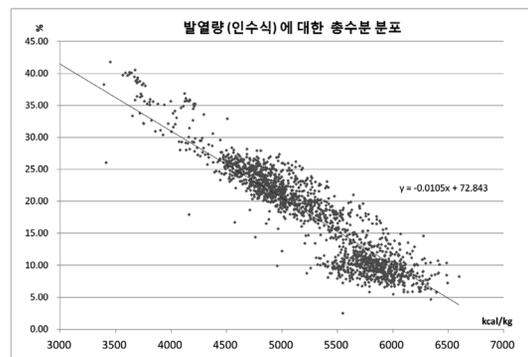
### 2.1. 2010-2012년 국내도입탄종 분석결과

최근 국내에 도입되고 있는 탄종을 분석하기 위하여 2010-2012년 기간중 국내 5개 발전사가수입한 입하탄 자료의 대부분을 확보하였다.

수집된 입하탄 자료는 총 1,755종이며 인수식 고위 발열량 기준으로 약 4,000-6,500 kcal/kg의 범위에 분포되고 있었다. 분석결과 Fig. 1에 나타난 바와 같



**Fig. 1.** Coal purchase cost vs heating value.



**Fig. 2.** Total moisture of coal vs heating value.

이 발열량과 수입가격은 비례관계는 있으나 동일 열량에서도 가격편차의 산포는 다소 나타나고 있는데 이는 석탄 수입시 spot 시장에서의 거래 비중이 증가되었기 때문으로 판단된다.

석탄의 성상분포를 분석한 결과 Fig. 2와 같이 열량과 수분함량이 반비례하고 회분은 비례하는 분포가 나타나므로 국내 수입되는 저 열량탄은 전형적인 아역청탄 계열들로 판단되었다. 아역청탄을 사용할수록 연료비 단가는 절감되나, 열량 및 효율저하에 따른 석탄사용량 증가 및 수송비 증가를 고려해야 됨을 알 수 있었다. 또한 석탄사용량 증가에 따라 송풍기, 미분기등 보조기기 동력 및 하역/석탄이송 설비의 전력소모량 증가를 고려해야 할 것이다.

Fig. 3과 같이 석탄열량이 저하 될수록 회유점이 저하되는 경향이 나타났다. 이에 따라 보일러 설비에 슬랭킹에 의한 장애발생이 예상된다. 또한 수분증가 및 회분감소에 따라 복사열전달은 감소하고 보일러 후부 대류 전열면에서의 열 흡수량이 증가되는 문제점을 고려해야 할 것이다. 한편 수입된 저열량탄은 Fig. 4와 같이 회분저하의 경향이 있어 설비마모, 회저리 및 집진설비에는 양호한 환경이 조성될 것으로 판단되었다.

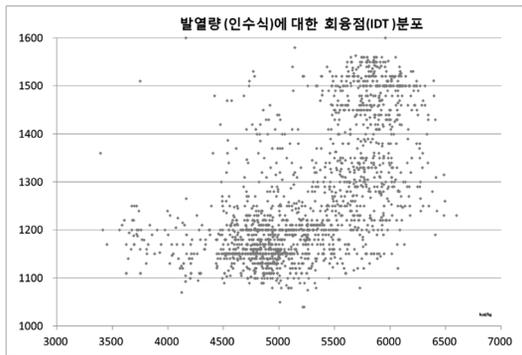


Fig. 3. IDT of ash vs coal heating value.

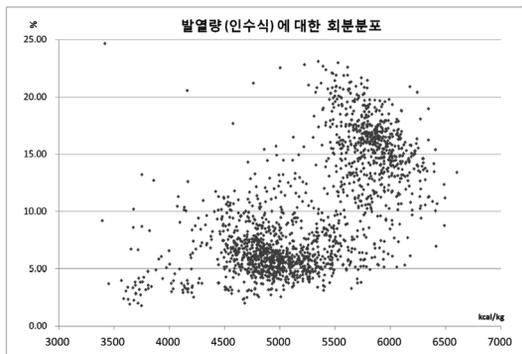


Fig. 4. Ash content of coal vs heating value.

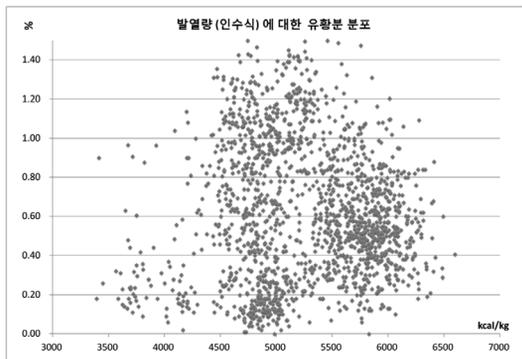


Fig. 5. Sulfur content of coal vs heating value.

유황분은 Fig. 5와 같이 열량대별 별 경향이 없어 그동안 현장에서 우려하던 것과는 달리 부식 및 탈황 설비에 미치는 영향은 적은 것으로 판단되었다.

### 3. 탄종/열량별 연소열성능 시뮬레이션

#### 3.1. 분석대상 및 기준

시뮬레이션에 적용된 석탄 탄종은 Table 3과 같이 2010-2012년 국내 발전사가 수입한 탄종중 열량대별로 26종을 선별하여 발췌하였으며, 기존 국내 500

Table 3. Coal component of power plant

탄종	석탄성상							총수분(%)
	HHV (kcal/kg)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Ash (%)	
WARA	4,011	69.90	5.05	1.17	20.61	0.23	3.04	39.95
L-Lanna	4,112	60.17	5.01	21.47	1.49	0.60	11.25	32.22
ECO	4,236	67.57	4.63	19.39	1.79	0.25	6.37	35.29
ADARO45	4,306	69.80	4.95	0.95	19.20	0.18	4.92	35.14
PEABODY(ID)	4,425	64.80	4.47	1.18	18.34	1.04	10.18	29.35
ROTOSOUTH	4,520	70.40	4.91	1.02	20.20	0.02	3.45	31.50
CARBOFER(ID)	4,624	65.80	4.86	1.00	17.28	0.51	10.55	27.72
APAU	4,705	67.64	4.59	17.69	1.27	0.76	8.06	28.70
MIP	4,811	66.88	4.86	15.28	1.30	0.96	10.72	27.26
MEGAPRIMA	4,909	69.00	4.84	1.36	16.98	0.54	7.28	25.96
Macquarie	5,012	62.65	4.85	17.13	1.85	1.26	12.27	12.75
BERAU	5,111	71.60	4.96	1.64	15.50	0.82	5.48	24.21
SPRING CR	5,202	72.70	5.31	0.92	14.87	0.29	5.91	24.93
KPU	5,305	67.50	4.90	1.27	16.88	0.11	9.34	19.83
MIP	5,408	66.79	4.57	12.07	2.08	0.99	13.50	22.34
Tanito	5,502	79.14	4.37	7.23	1.40	1.24	6.63	19.97
Indominco	5,602	67.94	5.07	16.09	2.07	0.82	8.00	17.43
Rollestone	5,702	70.09	4.78	11.39	2.56	0.61	10.57	18.60
TUGNUISKY	5,805	65.20	4.74	1.01	12.17	0.31	16.58	9.58
Noble(AU)	5,895	65.73	4.78	4.76	2.14	1.16	21.43	9.55
BENGALLA	5,994	69.50	4.32	1.64	8.78	0.54	15.23	10.73
PEABODY(NC)	6,104	69.20	4.25	1.68	6.87	0.53	17.47	9.16
Flame(SA)	6,212	70.70	3.89	7.77	1.96	0.63	15.06	7.30
NOBLE(CO)	6,309	74.59	5.10	1.68	8.08	0.73	9.81	10.62
CET(CO)	6,418	73.31	4.90	1.73	13.44	0.71	5.91	11.97
MOUNTAIN	6,520	76.40	4.20	0.98	6.47	0.31	11.65	10.94
설계기준탄	6,080	69.00	4.30	8.70	1.40	0.80	15.8	10

MW급 석탄화력 발전소의 설계 기준탄과의 비교를 통하여 평가하였다.

### 3.2. 분석방법

#### 3.2.1. 표준화력 모델링

국내에 20 unit가 운전되고 있는 500 MW 표준화력 발전소에 대하여 보일러 화로, 열교환기, 터빈 및 터빈 보조기기를 상용코드인 PROATE[2]를 활용하여 모델링 하고, 탄종별 연소열성능 변화를 비교 분석하였다.

해석 모델은 500 MW 출력기준으로 발전소의 기기상태 열화는 반영되지 않은 조건이므로 실제 발전소별 기기열화 상태와 운전조건 차이에 따라 결과의 절대 값에는 미세한 차이가 있을 수 있으나 비교평가 목적상 문제가 없을 것으로 판단된다.

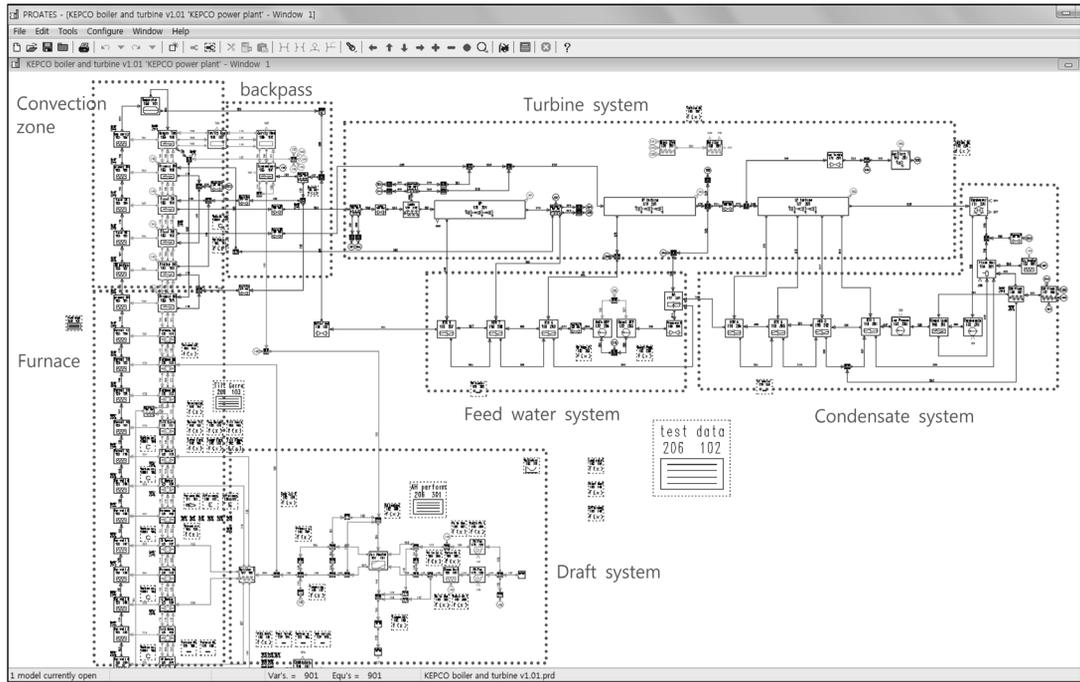


Fig. 6. Thermal performance analysis model of 500 MW standard power plant using PROATES.

표준화력 발전소 계통에 대한 연소열성능 해석 모델은 보일러 및 터빈계통 전체에 대한 해석을 위하여 Fig. 6과 같이 공정모듈(화로, 열교환기, 공기에열기등)은 총 240개, 제어모듈(효율계산, 변수제어, 사용자 연산, 모듈제어 기능 등)은 총 104개가 사용되었으며 각각의 모듈들을 가스, 증기, 파워 및 제어 stream으로 연결하였다.

주요 단위 모듈은 보일러 화로본체, 열교환기, 보일러 보조기기(송풍기, 공기에열기, 과열저감기등), 고/중/저압터빈 및 터빈보조기(복수기, 급수가열기, 탈기, 펌프류등) 등으로 구성하였다.

보일러 화로모델은 화로의 높이별 zone을 나누어 블록화된 다수의 화로 모듈을 연결하여 구성하였으며 각각의 화로 모듈은 가스흐름 입출력, 복사에너지 입출력 값을 서로 주고받는데 화로중 복사열전달 구역은 14개 zone으로 나누었고 대류열전달 구역은 8개 zone으로 나누어 구성하였다.

각각의 화로 모듈에서 흡수된 열에너지는 수냉벽 튜브 모듈로 전달된다. 한편 수냉벽 튜브의 유체온도는 화로모델의 벽면온도로 설정된다. 각각의 화로모델에는 실제 보일러의 해당부위의 형상, 치수, 반응이 입력 모사되며 다른 유틸리티 모듈과(화로 공연비제어, 화로 파울링, 수냉벽 섹션온도, 온도제어 등) 상호 연결되어 계산을 수행한다.

한편 대류전열면의 과열기, 재열기 및 절탄기들은 열교환기 화로 모델로 구성되며 다수의 화로모

듈을 각각 가스측, 및 증기측 스트림으로 연결하며 모듈간 주고받는 복사 에너지도 계산된다. 각각의 모듈에는 실제 보일러 튜브의 형상에 대한 모사 및 가스 방사율, 대류열전달 계수 등에 대한 correlations들이 내장되어 있다.

터빈은 HP, IP 및 LP 각각의 모듈로 구성하였으며 터빈에서 취출된 각각의 추기는 급수가열기, 탈기 및 BFP 터빈으로 공급된다. BPF에서 요구되는 축동력은 보조터빈에 필요한 증기 엔탈피 및 유량으로 환산되어 터빈 추기량이 제어된다. 급수가열기도 설정된 조건을 만족시키는 추기 증기를 터빈에서 받도록 모델링하였다.

표준화력 발전소 연소열성능 해석 모델에 대한 구성요소 각각에 대한 물리적인 모사는 내용이 매우 방대하므로 본 논문의 목적상 생략하고, 이에 대한 예시로서 화로모델의 일부분에 대한 간략한 기술을하고자 한다.

Fig. 7은 복사열전달 구역에 모델링한 총 14개 zone 중 일부분인 1개의 단위섹션 모델을 나타낸 그림이다. 녹색으로 표시한 화로 섹션의 상하부에 연결된 분홍색 stream 117, 119는 각각 해당 블록의 입출력 gas 흐름이고, 황색 stream 126, 128, 129, 131는 단위 섹션에 대한 입 출구 복사에너지로서 각각 상하부의 단위 화로섹션 모델에 연결된다. 화로 벽면에서의 복사와 대류에 의한 열전달량은 stream 130에 의해 스팀측 모듈에 연결되어 water/steam stream에 energy를

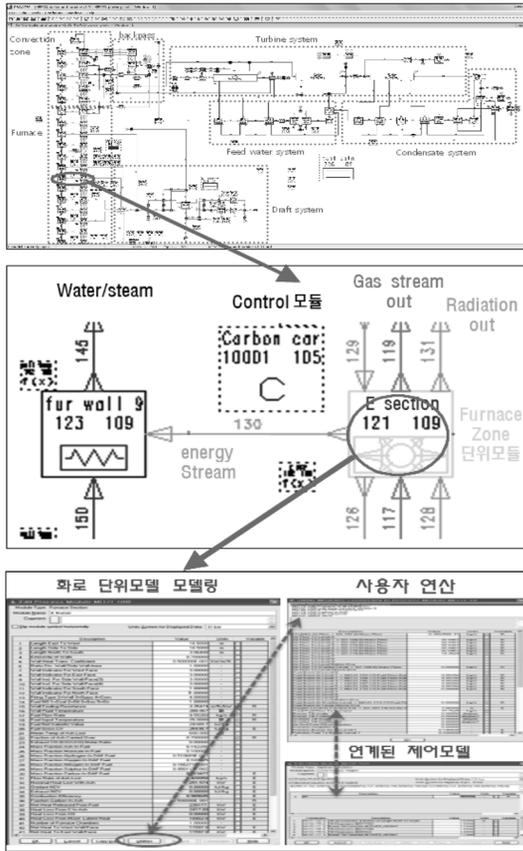


Fig. 7. Example of furnace zone model setup.

부가하게 된다. 화로 단위섹션모델의 입력창에는 각종 형상정보, 벽면조건, 입출력 stream이 정의되며 다른 몇 개의 사용자연산 모듈 및 유틸리티 모듈과 연계되도록 정의하여 반응, 경계조건 설정 및 각종 모듈제어 기능이 구현되도록 처리 하였다.

화로의 단위섹션 모델은 stirred reactor 또는 plugged flow reactor로 모사되는데 버너인근 부위는 stirred reactor로 설정한다. 해당 부위에 적용된 열전달 항목을 간략히 요약하면 아래와 같다.[2]

Face j에 대한 열전달은 식 (1)과 같다.

$$Q_{ij} = Q_{rj} + Q_{cj} \quad (1)$$

where

$Q_{rj}$  : net radiative heat for face j

$Q_{cj}$  : convective heat for face j

Open face의  $Q_{cj}$ 는 0이고 wall face는 식 (2)와 같고 전체 sidewalls 및 boundary wall face의 heat gain은  $\sum_j Q_{ij}$ 가 된다.

$$Q_{cj} = h_g * A * (t_{gmean} - t_{face}) \quad (2)$$

where

$h_g$  : gas side convective heat transfer coefficient

$A$  : heat transfer surface area

$t_{gmean}$  : the mean gas temperature in the cavity

$t_{face}$  : surface temperature of the wall deposits

Source wall zone, i와 sink wall zone, j간의 복사열 전달은 식 (3)과 같고, gas volume과 wall zone j간은 식 (4)로 표현된다.

$$Q_{rij} = SiS_j(E_i - E_j) \quad (3)$$

where

$SiS_j$  : total exchange area which allows for the presence of the absorbing gas as well as multiple wall reflections

$E_i$  : emissive power of the surface  $i = \sigma * T_i^4$

$E_j$  : emissive power of the surface  $j = \sigma * T_j^4$

$$Q_{rgj} = GS_j(E_g - E_j) \quad (4)$$

where

$GS_j$  : total exchange area which allows for gas self-absorption and multiple reflections from any reflecting boundary walls.

$E_g$  : emissive power of the gas

for wall face :  $\sigma * 0.5 * (T_{gin}^4 + T_{gout}^4)$

for open face :  $\sigma * T_{gface}^4$

$E_j$  : emissive power of the surface  $j = \sigma * T_j^4$

따라서 wall zone j의 net radiant energy는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{rj} = \sum_{i=1, NS} SiS_j(E_i - E_j) + GS_j(E_g - E_j) \quad (5)$$

PROATES에서 pressure drop, energy balance, mass balance는 Fig. 8과 같이 residuals 형태로 계산되며,

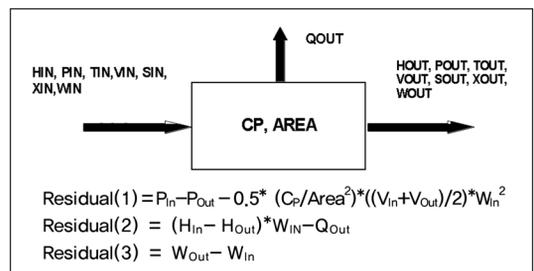


Fig. 8. Residual equations

화로의 단위섹션 모델에서의 gas flows, chemical composition, overall energy equation, open faces로의 복사 에너지 및 absorbed boundary walls에 대한 계산 역시 residual 형식으로 구성되어 결과값이 0에 가깝게 될 때까지 반복계산 된다[2].

전체 모델에 적용된 방정식의 개수와 변수의 개수는 일치해야 하며, 해석 대상의 목적에 따라 상수와 변수를 적절하게 변경지정 할 수 있다. 예를 들면 어떤 특정 전열면의 입 출구에 대한 발전소 실측 운전 data를 받아 상수로 입력하고 기기 모델링 data를 변수로 계산하면 실측성능 분석 및 상태 평가용으로 활용가능하고, 반대로 입구조건과 기기상태를 상수로 지정하면 해당조건에서의 출구측 상태를 예측하는 기능으로 활용할 수 있다.

3.2.2. 모델 신뢰성 검증

개발된 표준화력 모델의 신뢰성 검증을 위하여 먼저 D화력 발전소 3호기의 기술규격에 명시된 performance data sheet와 비교 검증하였으며 적용된 탄종의 성상은 Table 4와 같다.

표준화력 모델에는 다양한 부하에서의 모사를 가능하게 하기 위해서 각각의 단위기기 모듈에 부하별 성능커브를 입력하였으며 실제 발전소의 운전제어 특성을 반영한 모듈제어 기능을 구성하였다. 이에 대한 신뢰성 검증을 위하여 100% 부하는 물론 110% 75% 50% 부하등 다양한 부하조건에서 performance data 값과 해석 값을 비교하였고, 그 결과 Table 5에 나타난 바와 같이 모델의 예측 신뢰도가 양호한 것으로 판단할 수 있었다.

또한 실제 운전중인 발전소의 운전 data를 취득하여 모델의 신뢰도를 검증하는 방법도 시행하였다.

대상발전소는 D화력 1호기이며 준공후 약 14년을 운전한 상태이며 실측 data 취득을 위하여 발전소의 운전정보시스템(PI)에서 자동으로 운전 data를 취득할 수 있는 엑셀 매크로를 구성하여 총 720 set(10분 간격 point별 1분 평균치)를 취득하였다. 다음의 결과는 2013년 1월 11일 오전 10시에 대한신뢰도 검증결과이다. 당시 D화력 1호기는 Table 6과 같이 4종의 석탄을 동시에 혼합 연소하고 있었으며, 각각의 버너 별로 Table 7과 같이 다른 석탄을 할당하여 운전하고 있었다.

Table 4. The properties of design coal for used in performance data sheet

COAL	C %dry	H %dry	O %dry	N %dry	S %dry	Ash %dry	Moist %	GCV kcal/kg
Design	69.00	4.30	8.70	1.40	0.80	15.80	10.00	6,080

Table 5. Comparison result for performance data and model analysis in various load point

Description	100% Load			75% Load		
	기준	해석	편차	기준	해석	편차
<b>Water/Steam Temperature</b>						
Primary SH Outlet	469	468	1	449	459	-10
Platen SH Inlet	448	447	1	433	435	-2
PlatenSHOutlet	507	507	0	503	508	-5
Final SH Inlet	492	492	0	489	491	-2
Final SH outlet	541	541	0	541	541	0
Primary RH Outlet	449	448	1	452	452	0
Final RH Inlet	449	448	1	452	452	0
Final RH out	541	541	0	541	541	0
<b>Gas Temperature</b>						
Furnace Exit	1211	1220	-9	1125	1128	-3
Platen SH Gas Inlet	1126	1127	-1	1039	1032	7
Final RH Gas Inlet	948	943	5	869	853	16
Final SH Gas Inlet	819	821	-2	754	745	9
Primary RH Gas Inlet	688	688	0	643	633	10
Economiser Gas Inlet	446	446	0	423	418	5
Economiser Gas Outlet	347	347	0	322	322	0
Airheater Gas Inlet	347	347	0	322	322	0
Airheater Gas outlet	117	117	0	106	104	2

Table 6. The properties of coals for blending

COAL	C %dry	H %dry	O %dry	N %dry	S %dry	Ash %dry	Moist %	GCV kcal/kg
Suek	67.60	4.62	11.58	1.47	0.47	14.26	10.33	5977
NCA	68.80	4.47	8.38	1.59	0.48	16.28	12.21	5907
PRB	71.50	4.91	16.34	0.95	0.52	5.78	25.22	5170
Arch	70.40	4.89	17.50	0.92	0.40	5.89	29.13	4835

Table 7. Burner operating condition

Furnace Level	Fuel Type 1		Fuel Type 2	
	name	%	name	%
F burner	Suek	40%	PRB	60%
E burner	Suek	40%	PRB	60%
D burner	Suek	40%	PRB	60%
C burner	NCA	50%	Arch	50%
B burner	NCA	50%	Arch	50%
A burner	NCA	50%	Arch	50%

동일한 운전조건을 가정하여 실측된 측정값과 해석모델 결과 값을 비교한 결과 Table 8과 같이 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

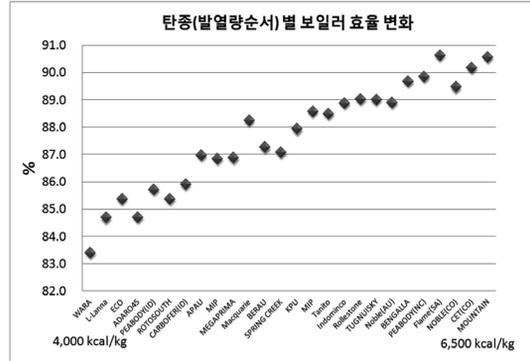
**Table 8.** Comparison result for real time measured data and model analysis

Description	실측값	해석값			
		모델 튜닝전		모델 튜닝후	
		결과	편차	결과	편차
BOILER Efficiency	88.34	86.14	0.2	88.19	0.15
<b>Water/Steam temp.</b>					
Economiser Inlet	281.8	281.8	0.0	281.8	0.0
Economiser Outlet	315.5	311.8	3.8	316.8	-1.3
Primary Superheater Inlet	424.5	420.5	4.0	425.5	-1.0
Platen SH Inlet	453.5	444.0	9.6	453.9	-0.4
Primary SH Outlet	467.9	456.0	12.0	468.4	-0.5
Platen SH Outlet	507.3	501.8	5.6	506.8	0.5
Final SH Inlet	495.4	490.6	4.8	494.9	0.5
Boiler SH Outlet	541.1	541.1	0.0	541.1	0.0
RH Spray	176.4	176.4	0.0	176.4	0.0
Boiler RH Inlet	283.7	278.5	5.2	278.5	5.2
Primary RH Outlet	469.1	446.9	22.2	469.2	-0.2
Final RH Inlet	450.9	429.1	21.8	451.0	-0.1
Boiler RH Outlet	541.2	541.2	0.0	541.2	0.0
<b>Gas temp.</b>					
PA to Furnace	318.1	322.6	-4.5	319.8	-1.6
Air Heater SA Outlet	294.1	297.4	-3.3	294.2	-0.1
Furnace Exit	1230.3	1227.3	3.0	1213.3	17.1
Platen SH Gas Inlet	1131.0	1135.4	-4.4	1119.7	11.3
Final RH Gas Inlet	968.6	952.4	16.3	964.8	3.8
Final SH Gas Inlet	847.1	827.1	20.1	847.4	-0.3
Primary RH Gas Inlet	726.4	693.1	33.3	729.4	-3.0
Economiser Gas Inlet	459.8	449.7	10.1	462.6	-2.8
Economiser Gas Outlet	346.4	351.5	-5.1	348.5	-2.2
AirHeater Gas Inlet	346.4	351.5	-5.1	348.5	-2.2
AirHeater Gas Outlet	127.9	129.2	-1.3	128.5	-0.5

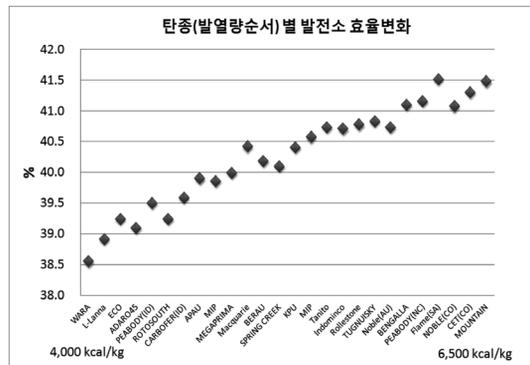
한편 표준 화력에 대한 모델은 신포발전소를 가정한 상태이나, 실제 D 발전소는 오랜 시간 운전되어 기기의 열화가 있는 상태이고 실제운전 조건에 따라 각 전열면 내부 및 외부의 오염상태의 변화에 의해 압력저항 및 열저항이 변화된 상태이다. 따라서 실측 data를 활용한 해석 모델 튜닝 기법을 적용하였다(예: 최종과열기의 전후단 증기압력 실측 data를 활용하여 해석모델 최종과열기 모듈의 압력저항 계수를 튜닝) 상기기법을 적용하여 모델을 튜닝하면 더욱 정확한 모사가 가능한 것으로 나타났다.

**3.3. 탄종별 열성능 시뮬레이션 결과**

국내 발전사의 수입 탄종별(열량순) 보일러효율



**Fig. 9.** Boiler efficiency vs coal heating value.



**Fig. 10.** Plant efficiency vs coal heating value.

및 발전소 효율을 분석결과 Fig. 9 및 10과 같이 저열량탄 일수록 수분손실, 배가스 손실 등의 증가로 인하여 효율감소 경향이 크게 나타났다. 저열량탄은 효율저하 및 낮은 발열량에 의한 영향에 따라 석탄의 소모량이 기준치 대비 증가되며 이에 따라 보조기기 소모동력이 증가된다.

보일러 열효율 계산은 입출력 값을 활용하여 아래와 같이 적용할 수 있다. 그러나 이 경우 효율저하의 원인을 파악하는 데에는 어려움이 있다.

$$\eta_B = \frac{Output}{H_f \times m_f + B} \times 100 [\%] \tag{6}$$

따라서 ASME PTC 4 기호로 손실법[3]을 사용하여 효율저하 원인을 분석하였다.

$$\eta_B = 100 - \frac{(L_t + \Delta L)}{H_f + B} \times 100 [\%] \tag{7}$$

where

$\eta_B$  : Boiler thermal efficiency (%)

$L_t$  : Total heat loss from boiler [kcal/kg]

$$= L_g(\text{건배기가스}) + L_{mf}(\text{연료수분}) + L_h(\text{수소연소}) + L_{ma}(\text{공기수분}) + L_{uc}(\text{미연탄소}) + L_r(\text{방열}) + L_{um}(\text{미측정손실})$$

$\Delta L$  : Heat loss correction [kcal/kg]

$H_f$  : Higher heating value of fuel kcal/kg

B : Total heat credit [kcal/kg]

국내 발전사의 수입 탄종은 Fig. 11과 같이 저열량 탄 일수록 주요 수분 손실이 효율 저하의 주요인으로 파악되었으며, 그 외에 수소손실 및 건 배기가스 손실이 증가 되는 경향이 나타났다.

보일러의 폐열을 회수하는 공기에열기의 출구측 배기가스 온도역시 Fig. 12와 같이 저열량탄 일수록 선형적으로 증가되는 경향을 보였다. 그리고 운전측면에서는 Fig. 13과 같이 저열량탄 일수록 화로에서의 열흡수는 저하되는 반면 화로 후단의 대류열전달 구역에 배치된 재열기에서의 열흡수량이 증가되는 문제점이 예측되었다.

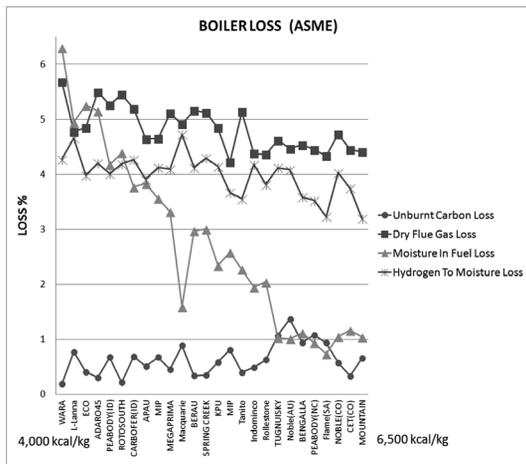


Fig. 11. Boiler heat losses vs coal heating value.

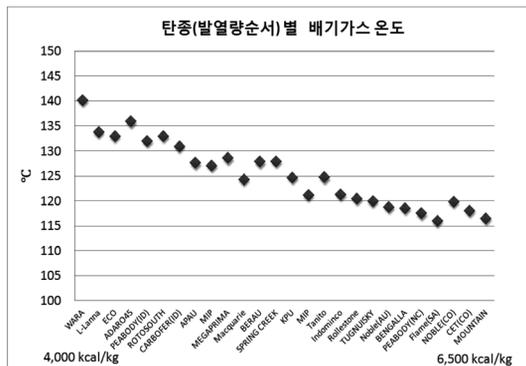


Fig. 12. Exit gas temperature vs coal heating value.

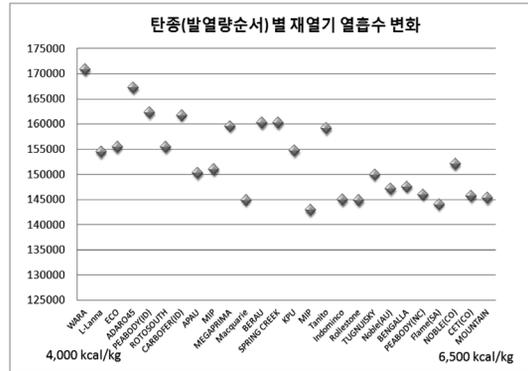


Fig. 13. Reheater heat absorption vs coal heating value.

## 4. 탄종 경제성 평가 결과

### 4.1. 평가기준

탄종별로 정격출력을 내기위한 조건으로 3항 ‘탄종/열량별 연소열성능 시뮬레이션’의 결과를 토대로 설계탄과의 발열량차이 및 발전효율 차이를 고려하여 평가하였으며 소내소비율은 발전소의 운전자료에서 도출한 소내동력소비 추세선 수식을 활용 하였다. 이러한 기준으로 결보기 수입연료비 단가에 다음과 같은 보정지수를 적용하여 실제 비용을 나타내는 보정 연료비 단가를 산출하였다.

- 열량보정지수 : 기존 보일러 설계탄(6,080 kcal/kg)과의 발열량차이에 따른 석탄소모량 보정.
- 효율보정지수 : 열성능 평가 결과를 활용한 발전효율차이에 따른 석탄소모량 보정.
- 소내동력보정지수 : 열량대별 소내소비율 추세에 따른 석탄소모량 보정.

그러나 평가대상에서 발전소 수명 및 정비비용은 운전조건에 따라 산포가 심하고 발전소별 운영여건 및 비용기준이 상이하기 때문에 정량적인 비용평가에서 제외 하였다.

### 4.2. 평가결과

#### 4.2.2. 탄종별 실 수입가격 적용평가결과

26개 탄종에 대한 실 수입단가 적용 평가결과 Fig. 14 및 Table 9와 같이 저열량 탄일수록 가격이 저렴(기준대비 최저 64%) 하였으나, 열량, 효율 및 소내 소비 동력을 고려한 보정단가에서는 탄종별로 가격 경향이 다르게 나왔으며, 전체적으로 열량, 효율 및 소내동력을 고려하면 수입단가의 가격절감 효과가 더욱 감소하는 것으로 예측되었다.

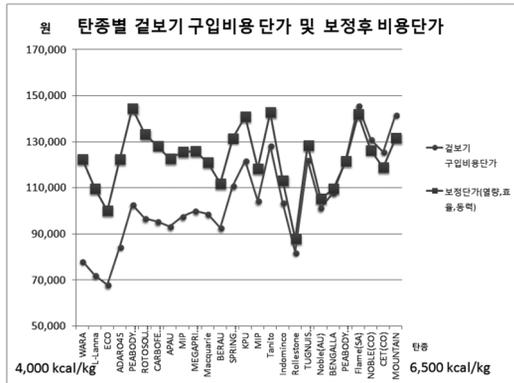


Fig. 14. Coal purchase cost vs revision cost.

Table 9. Apparent cost vs corrected cost for coals

탄종	고위 발열량	수입 연료비 단가	발전효율	열량 보정 지수	효율 보정 지수	소내 동력 보정 지수	보정후 연료비 단가
WARA	4,011	78,148	38.5	1.52	1.03	1.0070	122,480
L-Lanna	4,112	72,028	38.9	1.48	1.02	1.0067	109,701
ECO	4,236	67,921	39.2	1.44	1.02	1.0063	100,046
ADARO45	4,306	84,401	39.1	1.41	1.02	1.0060	122,439
Peabody(ID)	4,425	102,784	39.5	1.37	1.02	1.0056	144,471
Rotosouth	4,520	96,732	39.2	1.35	1.02	1.0053	133,401
CARBOFER	4,624	95,490	39.6	1.31	1.02	1.0050	128,248
APAU	4,705	93,281	39.9	1.29	1.01	1.0047	122,705
MIP	4,811	97,618	39.9	1.26	1.01	1.0043	125,595
Megaprime	4,909	100,009	40.0	1.24	1.01	1.0040	125,890
Macquarie	5,012	98,638	40.4	1.21	1.01	1.0036	121,057
BERAU	5,111	92,748	40.2	1.19	1.01	1.0033	111,849
Springcreek	5,202	110,951	40.1	1.17	1.01	1.0030	131,530
KPU	5,305	121,718	40.4	1.15	1.01	1.0026	141,008
MIP	5,408	104,377	40.6	1.12	1.01	1.0023	118,375
Tanito	5,502	128,304	40.7	1.11	1.00	1.0020	142,761
Indominco	5,602	103,624	40.7	1.09	1.01	1.0016	113,223
Rollestone	5,702	81,963	40.8	1.07	1.00	1.0013	87,899
Tugnusk	5,805	122,068	40.8	1.05	1.00	1.0009	128,480
Noble(AU)	5,895	101,463	40.7	1.03	1.00	1.0006	105,234
BENGALLA	5,994	107,904	41.1	1.01	1.00	1.0003	109,625
Peabody(NC)	6,104	122,017	41.2	1.00	1.00	0.9999	121,610
Flame(SA)	6,212	145,561	41.5	0.98	1.00	0.9996	141,999
Noble(CO)	6,309	131,062	41.1	0.96	1.00	0.9992	126,396
CET(CO)	6,418	125,673	41.3	0.95	1.00	0.9989	118,823
Mountail	6,520	141,732	41.5	0.93	1.00	0.9985	131,634
설계기준탄	6,080	121,414	41.2	1.00	1.00	1.0000	121414

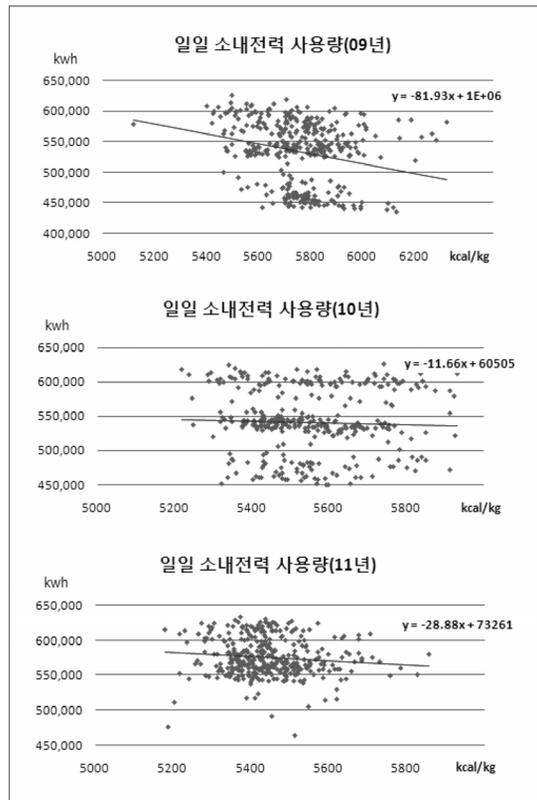


Fig. 15. Internal power consumption vs coal heating value.

소내동력 소비율 보정은 Fig. 15와 같이 표준화력인 국내 H 발전소에서 실측된 석탄 발열량별 소내소비 동력 data[4]를 활용하여 보일러 및 터빈은 물론 탈황, 회처리, 집진설비 등 전체 보조기기를 고려하였다.

#### 4.4.2. 석탄열량별 경제성 분석(열량별 수입추세가 격 적용)

2.1항 ‘2010-2012년 국내도입탄종 분석결과’에서 나타난 바와 같이 탄종, 시점 및 조건별 수입가격의 편차가 심하므로, 일반적인 경향예측을 위하여 26개 탄종에 대한 수입가격을 실제 수입가격이 아닌, Fig. 1에서 도출한 발열량별 수입단가의 추세선 수식을 활용하여 일반적인 예상단가로 적용한 후 평가를 수행하였다.

그 결과 Fig. 16 및 Table 10에 나타난 바와 같이 겉보기 수입가격으로 단순 비교하면 약 4,000 kcal/kg의 저열량탄의 경우 기준 6,080 kcal/kg인 설계탄 대비 약 57.9% 정도로 가격이 저렴한 것으로 예상된다.

그러나 열량저하, 발전효율 및 소내동력 소비증가분을 고려하여 보정후 연료비 단가를 재 평가하면 약 90.7%로 계산되는바, 가격절감 효과는 불과 설계탄 대비 9.3% 정도로서 당초 기대보다 대폭 감소되는

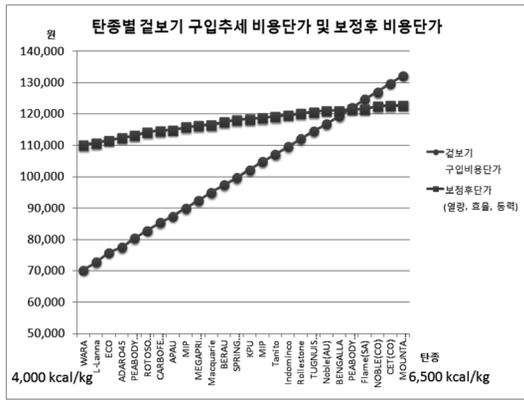


Fig. 16. Coal purchase cost vs revision cost.

Table 10. Apparent cost vs corrected cost for coals

탄종	고위 발열량	수입 예상 단가	발전 효율	열량 보정 지수	효율 보정 지수	소내 동력 보정 지수	보정후 연료비 단가	
WARA	4011	70,268	38.5	1.52	1.03	1.0070	110,129	90.7%
L-Lanna	4112	72,753	38.9	1.48	1.02	1.0067	110,805	91.2%
ECO	4236	75,828	39.2	1.44	1.02	1.0063	111,693	92.0%
ADARO45	4306	77,560	39.1	1.41	1.02	1.0060	112,515	92.7%
Peabody(ID)	4425	80,502	39.5	1.37	1.02	1.0056	113,152	93.2%
Rotosouth	4520	82,850	39.2	1.35	1.02	1.0053	114,257	94.1%
CARBOFER	4624	85,421	39.6	1.31	1.02	1.0050	114,725	94.5%
APAU	4705	87,426	39.9	1.29	1.01	1.0047	115,003	94.7%
MIP	4811	90,045	39.9	1.26	1.01	1.0043	115,851	95.4%
Megaprime	4909	92,466	40.0	1.24	1.01	1.0040	116,395	95.8%
Macquarie	5012	95,013	40.4	1.21	1.01	1.0036	116,608	96.0%
BERAU	5111	97,460	40.2	1.19	1.01	1.0033	117,531	96.8%
Springcreek	5202	99,709	40.1	1.17	1.01	1.0030	118,204	97.3%
KPU	5305	102,256	40.4	1.15	1.01	1.0026	118,461	97.5%
MIP	5408	104,808	40.6	1.12	1.01	1.0023	118,864	97.9%
Tanito	5502	107,127	40.7	1.11	1.00	1.0020	119,197	98.2%
Indominco	5602	109,607	40.7	1.09	1.01	1.0016	119,760	98.6%
Rollestone	5702	112,071	40.8	1.07	1.00	1.0013	120,188	99.0%
Tugnisk	5805	114,616	40.8	1.05	1.00	1.0009	120,636	99.3%
Noble(AU)	5895	116,831	40.7	1.03	1.00	1.0006	121,173	99.8%
BENGALLA	5994	119,288	41.1	1.01	1.00	1.0003	121,190	99.8%
Peabody(NC)	6104	122,007	41.2	1.00	1.00	0.9999	121,600	100.1%
Flame(SA)	6212	124,672	41.5	0.98	1.00	0.9996	121,622	100.2%
Noble(CO)	6309	127,074	41.1	0.96	1.00	0.9992	122,551	100.9%
CET(CO)	6418	129,769	41.3	0.95	1.00	0.9989	122,696	101.0%
Mountail	6520	132,290	41.5	0.93	1.00	0.9985	122,865	101.2%
설계기준탄	6080	121,414	41.2	1.00	1.00	1.0000	121,414	100%

것으로 나타났다. 상기 결과는 발전소 수명감소 및 고장정지 비용의 증가는 고려되지 않은 결과이며, 향후 이를 고려하면 탄종별 가격절감 효과는 더욱 감소되어 평가 될 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

2010-2012년 기간중 국내 5개 발전회사에서 수입한 총 1,755종의 입하탄 자료를 수집하여 분석한 결과 약 4,000-6,500 kcal/kg의 탄종이 주로 수입되었고, 그 중 저열량탄은 주로 전형적인 아역청탄 계열들이며, 발열량과 수입가격에 비례관계는 있으나 동일 열량에서도 가격편차가 다소 나타나고 있었다.

1) 열량대별 탄종 26종에 대한 열성능해석 결과, 저 열량탄일수록 주요 수분 손실이 효율 저하의 주요인으로 파악되었으며, 그 외에 수소손실 및 건 배기가스 손실이 증가 되는 경향이 나타났다.

2) 저 열량탄일수록 결보기 단가는 저렴(기준 설계탄 대비 최저 57.9%, 4,000 kcal/kg급) 하였으나, 열량, 효율 및 소내동력 소비를 고려한 보정단가에서는 기준대비 90.7%로 평가되는 등 가격절감 효과가 대폭 감소되어 설계탄 대비 약 9.3%로 예측되는바 저 열량탄의 경제성이 당초 기대 만큼 크지는 않았다.

3) 석탄 수입 단가 검토시 결보기 단가에 추가하여 발전효율, 발열량, 수송비 및 소내 소비율을 고려한 보정단가 개념을 도입하여 전략적인 계약관리를 시행하는 것이 필요하다. 이를 위하여 탄종별 열성능 해석을 활용한 탄종 경제성 평가기법이 유용한 도구가 될 수 있을 것이다.

#### 후기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KEITEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(2011T100200203)의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

[1] KEPCO in BRIEF 2012.  
 [2] E.on-UK, PROATES User's manual, 2008.  
 [3] 한국발전교육원, 화력발전효율실무, 2010.  
 [4] 년간 운전 data sheet, H 화력 발전소, 2012.