

# 제어시스템 튜닝에 의한 발전소 효율향상에 관한 연구

## A Study on Efficiency Improvement by Fine Tuning of Power Plant Control

김 호 열<sup>†</sup> · 김 병 철\* · 변 승 현\*\*  
(Hoyol Kim · Kim Byoungchul · Byun Seung-hyun)

**Abstract** - A fine tuning on a control system is essential not only for stable operation but also for efficient operation of the power plant. There has been a very few studies on efficiency change by control system tuning. So, it was not clear that if it could be improved or not when the control is stable by fine tuning and how much it could be improved if it works. An accurate algorithm for measurement of the plant efficiency was newly introduced and implemented to measure integrated fuel flow and electricity MW output and to calculate the mean efficiency for given time. As a result, stable operation after fine tuning of control parameters for major controlled variables brought higher efficiency than un-stable operations like a cycling or an oscillation. The plant efficiency has been monitored during various tests and tunings to confirm how much it changes by tuning of the control system on power plant. Now, we can say that the efficiency can be improved in stable operation by fine tuning of the control system.

**Key Words** : Control tuning, Efficiency, PID, Tuning, Stability

### 1. 서 론

화력발전소에서 제어시스템의 튜닝은 발전소의 안전과 설비 보호를 위한 안정 운전에 꼭 필요하지만, 플랜트 효율과의 관계는 잘 알려지지 않았다. 즉, 사이클링이나 헛터 등 불안정한 상태에서 실제 효율이 떨어지는 지 인과관계가 과학적으로 실험되거나 측정된 사례가 별로 없다. 효율은 원자재(연료) 소비량과 밀접한 관계가 있으므로, 발전소 원가 절감을 위해서 제어시스템 튜닝과 효율 변동에 관한 연구를 수행하였다. 제어기 튜닝의 목적은 신속한 제어응답과 프로세스 제어변수의 안정인데, 파라미터 튜닝이 제대로 되어 있지 않은 경우는 제어변수가 불안정하게 되며, 이 때 효율이 어떻게 변화하는지 확인하는 것이 목적이다.

미국 EPRI와 Southern Company에서 튜닝과 효율 변동에 대해 연구한 결과에서는 과열 증기 온도제어와 주증기 압력제어에서 안정 상태와 불안정 상태에서 열소비율(Heat rate, BTU/kWh)을 측정된 결과 0.08%의 개선이 나타났으며, 이보다 선행된 Anderson의 연구에서는 0.5%까지 열소비율이 변한다는 연구 사례를 소개하고 있지만 0.5% 변동에 대해서는 정확한 측정 결과인지 명확하지 않다[1].

대형 화력발전소 발전소는 수천~수만 개의 신호를 다루는 거대한 제어시스템이며 루프간의 상호 작용이 심한 MIMO 시스템이며 비직선성이 강하고 응답 시간 지연이 크며, 프로세스의 특성(전달함수)이 시간과 운전환경에 따라 크게 변동한다. 따라서 메카트로닉스나 SISO 시스템에서 도입되고

있는 모델베이스 제어보다는 PID와 프로그램 제어를 기본으로 한 복잡한 제어로직을 사용되고 있는데 각종 제어 파라미터의 튜닝이 안정 운전의 관건이다.

이 연구의 목적은 제어시스템 튜닝과 안정 상태에 따라 발전소 효율이 실제 변동하는지 여부를 과학적으로 검증하고 변화의 정도를 측정하는 것이다. 이를 위해 발전기 전기 출력과 석탄 연료의 유량을 정확히 측정하여 효율을 계산하는 알고리즘을 독자적으로 구현하였으며, 충실도가 높은 시뮬레이터와 제어시스템에서 불안정 상태 및 안정 상태에서 프로세스 효율 변화를 측정하였다.

발전소에서는 계단응답 시험 등을 통하여 프로세스를 분석하고 튜닝 이론과 과도 특성분석을 통하여 튜닝을 시행하지만, 이번 논문에서는 튜닝 기술보다는 주로 안정과 불안정 상태에서 달라지는 효율 변화에 대하여 논하고자 한다.

### 2. 발전소 효율

발전소 종합효율은 현재 40%를 약간 초과하는 정도이며 [4], 효율은 발전 원가와 직결되기 때문에 무척 중요하게 취급된다. 입출력법에 의하면 발전소 종합 효율은 연료 입력에 대한 전기 출력의 비율로 구하며, 연료에 의한 입열량에 대한 발전 전력량의 비율로 식(1)과 같이 계산한다.

$$\eta = \frac{P \cdot h \cdot R_h}{M_c \cdot H_c} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

여기서,  $\eta$ : 효율(%)

$P$ : 발전기출력(kW)

$h$ : 발전시간(hours)

$R_h$ : 전기-열에너지 변환율(kCal/kWh) = 860kCal/kWh

$M_c$ : 석탄량(kg)

$H_c$ : 석탄발열량(kCal/kg)

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 한국전력공사 전력연구원 수석연구원  
E-mail : hoyolkim@kepeco.co.kr

\* 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

\*\* 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

접수일자 : 2012년 7월 10일

최종완료 : 2012년 9월 5일

발전소에서 사용하는 연료의 단위 발열량  $H_c = 6000\text{kCal/kg}$ 을 적용하면

$$\eta = \frac{1000 \cdot P \cdot h \cdot 860}{1000 \cdot M_c \cdot 6000} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

$$= \frac{P \cdot h}{M_c} \cdot 14.3333 [\%] \quad (3)$$

여기서,  $P$ : 발전기출력(MW)  
 $M_c$ : 석탄유량(ton)  
 $h$ : 시간(hours)

발전소에서는 보일러에서 발생한 증기를 터빈에 공급하고 터빈으로 발전기를 구동하여 전력을 생산하고 있는바, 주증기와 재열증기를 사용하는 보일러 효율은 보일러에 투입되는 연료로 계산되는 열량(칼로리)과 출구 증기 엔탈피와 유량에 의해 계산된 열량을 비교하여 계산한다. 연료 투입량으로 계산된 열량  $C_f$ 는 다음과 같다.

$$C_f = H_c \cdot F_c \cdot h \cdot 10^3 [kCal] \quad (4)$$

여기서,  $H_c$ : 연료 발열량(kCal/kg)  
 $F_c$ : 연료유량(ton/h)  
 $h$ : 시간(hours)

고압 주증기와 저압 재열증기를 사용하는 보일러에서 보일러 출구 발생 열량  $C_b$ 는 다음과 같다.

$$C_b = [F_{hs} \cdot (H_{ho} - H_{hi}) + F_{ls} \cdot (H_{lo} - H_{li})] \cdot h [kCal] \quad (5)$$

여기서,  $F_{hs}$ : 고압증기 유량(kg/h)  
 $F_{ls}$ : 저압증기 유량(kg/h)  
 $H_{ho}$ : 고압증기 출구 엔탈피(kcal/kg)  
 $H_{hi}$ : 고압증기 입구 엔탈피(kcal/kg)  
 $H_{lo}$ : 저압증기 출구 엔탈피(kcal/kg)  
 $H_{li}$ : 저압증기 입구 엔탈피(kcal/kg)

보일러 입열량에 대한 출열량의 비율로 보일러 효율을 구하면

$$\eta_b = \frac{C_b}{C_f} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

여기서,  $C_b$ : 증기에 의한 보일러 발열량(kCal)  
 $C_f$ : 연료에 의한 보일러 입열량(kCal)

예로써 525MW 운전 중인 발전소의 경우, 연료 발열량을 6080kCal, 유량을 185t/h로 하여 계산한 연료에 의한 발열량  $C_f$ 는 다음과 같다.

$$C_f = H_c \cdot F_c \cdot h \cdot 10^3 [kCal] \quad (7)$$

$$= 185 \cdot 6080 \cdot 1 \cdot 1000 = 1,124\text{Gcal}$$

고압 주증기 계통의 열 발생량은 고압출구 증기 엔탈피와 고압급수 엔탈피 차이를 주증기 유량에 적산하여 구하고, 저

압 재열 증기 계통의 열 발생량은 재열증기 출구 엔탈피와 재열기 입구 증기 엔탈피 차이를 재열증기 유량에 적산하여 구하며, 이 두 열량을 합산하여 보일러에서 생산된 총열량을 구한다. 증기 엔탈피와 증기 유량에 의해 계산한 보일러 출구 열량  $C_b$ 는 다음 표와 같다.

표 1 발전소 정격 운전시 증기 조건과 엔탈피  
 Table 1 Steam condition and enthalpy at full load

주증기 온도	569.9	C
주증기 압력	250.07	bar
증기 유량	1,517,689	kg/h
주증기 엔탈피	813.21	kCal/kg
급수 온도	290.99	C
급수 압력	291.87	bar
급수 엔탈피	303.64	kCal/kg
$C_{bh}$	73.4	Gcal

재열증기 온도	595.37	C
재열증기 압력	51.093	bar
재열증기 유량	1,199,760	kg/h
재열증기 Enthalpy	872.67	kCal/kg
재열증기입구 온도	338.03	C
재열증기입구 압력	53.214	bar
재열증기입구 엔탈피	724.33	kCal/kg
$C_{bl}$	178.0	Gcal

발열량( $C_b = C_{bh} + C_{bl}$ )	951.34	Gcal
--------------------------------	--------	------

이 경우 보일러 효율

$$\eta_b = \frac{C_b}{C_f} \cdot 100 = \frac{951.34}{1124.8} \cdot 100 [\%] = 84.58 [\%] \text{가 된다.}$$

반면에 터빈 발전기 효율은 복수기 손실에 의해서 크게 낮아서 50% 이하에 불과한데, 터빈 발전기 효율  $\eta_{tg}$ 를 48%라고 가정하면 플랜트 종합효율은 다음과 같다

$$\eta = \frac{\eta_b \cdot \eta_{tg}}{100} [\%] = \frac{84.5 \cdot 48}{100} = 40.56 [\%]$$

### 3. 발전소 제어 및 효율 측정방법

연소 제어 파라미터 튜닝에 의한 안정과 효율 변화를 정확히 측정하기 위하여 1000MW 초초임계압발전소 시뮬레이터 및 제어시스템이 사용되었는데 주요 규격은 다음과 같다.

표 2 발전소 주요 정격

Table 2 Major specification of plant

항목	출력	증기압	증기온도	증기유량	연료
정격	1000	265	610/621	2942	석탄
단위	MW	kg/cm <sup>2</sup>	℃	t/h	

보일러는 연료, 공기 및 급수(물)가 공급되어 연소 및 열교환이 일어나는 복잡한 다변수 시스템이며 제어의 난이성이 높다. 보일러를 포함하는 프로세스 모델은 운전 환경과 시간에 따라 크게 바뀌기 때문에 모델베이스 제어는 적용이 곤란하며, 선진국에서도 일부 발전소 일부 제어루프에만 채용되고 있다. 보일러 입력에 대한 발전기 출력 응답은 상당히 늦고 비직선적이어서 제어가 용이하지 않다. 그림 1은 석탄발전소에서 750MW 운전시 측정된 사례이며, 표 3과 같이 근사화 모델링할 수 있다.

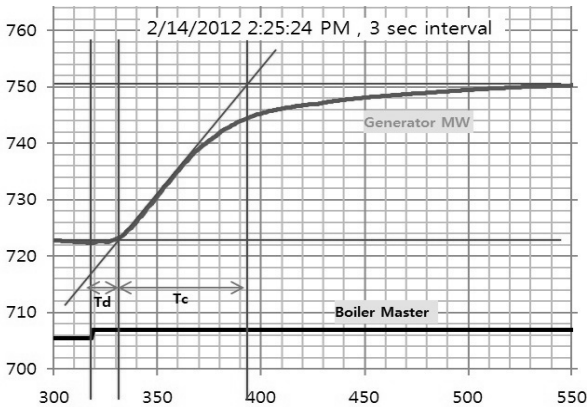


그림 1 발전용 보일러 계단 응답시험 결과  
Fig. 1 Step response test result of utility boiler

표 3 보일러 응답 특성 근사화  
Table 3 Modeling approximation for boiler

1차 지연 응답	3차 모델
Td = 45초	1차 지연 40초 X3
Tc = 183초	

발전소 제어논리(Control logic)는 매우 복잡하지만 중요 부분만 많이 압축하면 그림 2와 같이 표시할 수 있다. 국내의 최신 발전소에서 운영하는 제어시스템은 운전원에 의해 발전출력 목표치를 결정하는 유닛마스터, 증기밸브를 조정하

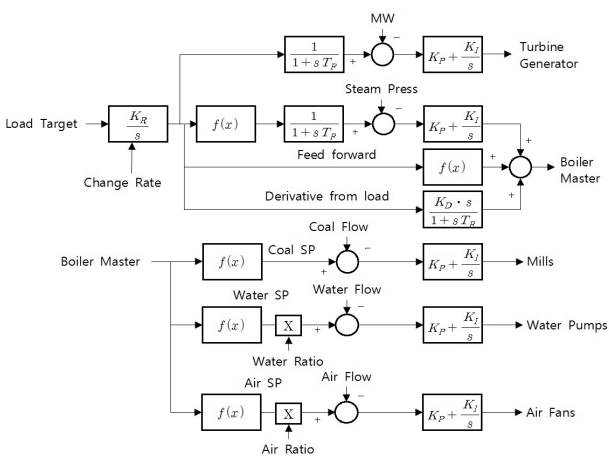


그림 2 발전소 주요 제어 구성도  
Fig. 2 Major control scheme of power plant

여 발전 출력을 제어하는 터빈마스터, 보일러 주요변수를 상위에서 제어하는 보일러마스터, 그리고 그 하위에 있는 급수(물)제어 계통, 연료제어계통, 연소용 공기 제어계통과 주증기 및 재열증기 온도제어계통, 기타 수연비(水煙比), 공기용 제어 계통 등으로 구성되어 있다.

발전소 플랜트 효율을 측정하기 위하여 그림 3과 같이 RESETSUM이라는 적산기를 사용하여 독창적인 연산 알고리즘을 고안하였다[3]. 종합 효율은 전기 생산량과 연료 소비량으로 계산하는데, 매주기마다 연료 유량(TOTAL CORRECTED COAL FLOW) 및 발전 출력(GENERATOR MW)을 측정하여 스케일 K를 통하여 실단위로 변환한다. MW\_TOTAL은 발전기 출력을 MWH 단위가 되도록 누적한 값이며, COAL\_TOTAL은 석탄유량을 톤 단위로 적산한 값인데 RESETSUM에서 각각 적산하며, 제산기(DEVIDE)에서 식(3)에 의하여 효율(EFF\_MEAN)을 연산한다. 두번째 DVALGEN에 의해 적산치를 필요시 리셋할 수 있으며 과거 최종 리셋 시점에서 현재까지의 누적 수치에 의해 평균 종합효율이 연산된다. 운전 상태가 바뀌면 적산기를 리셋한 후 최소 수십분 이상 운전한 뒤 누적된 수치에 의한 평균 효율을 측정한다.

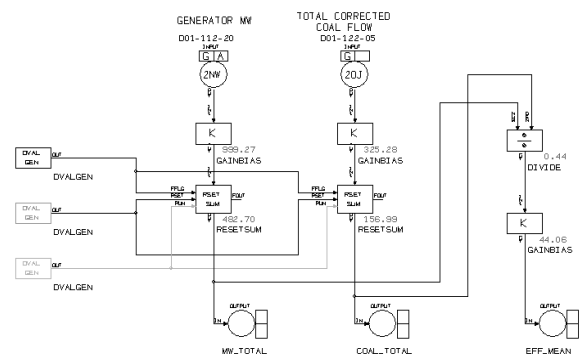


그림 3 누적 효율 계산 프로그램(누적효율 44.06%)  
Fig. 3 Integrated efficiency calculation program

효율을 측정하는 방법으로써 Cyrus W. Taft는 연료유량과 발전기 출력 순시치에 따라 열소비율을 측정하였는데, 보일러에 투입되는 연료량은 현재 발전기 출력에 나타나지 않고 수십초 후에 출력에 나타나므로 순시치에 의한 효율 계산은 무리가 있고, 실제 사이클링이 발생할 때 순시 효율이 크게 변동하였다[1].

본 실험에서는 보다 정확한 측정을 위하여 순시치로 계산하지 않고 0.1초 간격으로 측정하여 누적된 연료 유량과 전기출력으로 장시간 평균 효율을 계산하도록 설계하였다. 이 방법에 의해 수십분 이상의 측정하면 안정된 값으로 효율을 측정할 수 있었다.

#### 4. 제어시스템 튜닝 및 효율 변화

##### 4.1 공기량 제어계통

우선 구현된 측정 알고리즘과 시스템의 효율성을 확인하기 위하여 연소용 공기를 조정하면서 효율 변동을 실험하였다. 발전소에서 연소용 공기율(Air ratio)을 0~100% 범위에

서 설정하면 공기는 기준치의 80~120%로 조정되어 공급된다. 실제로 연소용 공기율을 각각 75%, 50%, 25%로 조정하면서 안정된 상태에서 플랜트 효율을 측정하였다. 결과는 그림 4 운전 트렌드에 나타난 바와 같이 43.74%, 44.08%, 44.28%로 측정되어 0.54% point 즉, 1.23%의 연소효율 개선이 나타났다. 이 실험으로 연소용 공기가 많아질 때에 효율이 저하하는 특성이 실측되어 실험에 사용하는 시뮬레이터와 제어시스템이 충분한 충실도를 가지고 있으며 측정 방법의 적정성이 입증되었다.

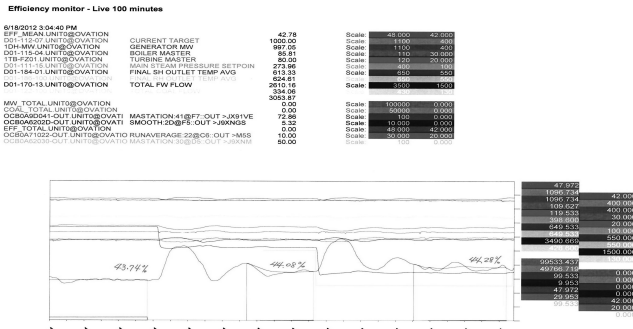


그림 4 공기율 75%, 50%, 25%일 때 효율(43.74, 44.08, 44.28%)  
Fig. 4 Efficiency change by changing of air ratio

### 4.2 수연비 제어계통

보일러 안정 및 불안정 상태에서 효율 변화를 파악하기 위하여 연속 사이클링이 일어나는 불안정 상태와 사이클링이 없는 안정 상태에서 각각 수십분 이상 유지하면서 평균 효율을 측정하였다. 급수(물)와 연료의 비율을 제어하는 수연비(Feed water to coal ratio) 제어에서 사이클링이 일어나 연료인 석탄이 272~276t/h로 변할 때와 274t/h에서 안정되었을 때 누적 평균효율은 그림 6과 같이 각각 43.88% 및 43.95%로 측정되었다. 이 효율 0.07% point의 증가는 0.16%

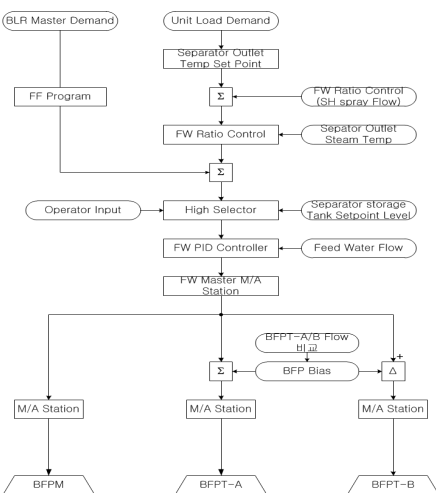


그림 5 급수 및 수연비 제어 구성도  
Fig. 5 Feed water control

의 개선을 의미한다. 모든 조건이 동일한 상태에서 제어시스템 튜닝으로 단지 사이클링을 제거함에 의하여 플랜트 효율이 개선되는 것을 확인하였다.

수연비 제어 로직은 그림 5와 같이 구성되어 있으며, 보일러마스터에서 오는 유량 요구신호를 기수분리기 출구 증기온도에 의해 가감한다. 사이클링이 일어나는 상태에서 안정된 상태로 개선하기 위하여 PID 제어기의 게인  $G=2 \rightarrow 0.5$ 로, 적분상수  $I=10 \rightarrow 60$ 초로 튜닝을 실시하였다.

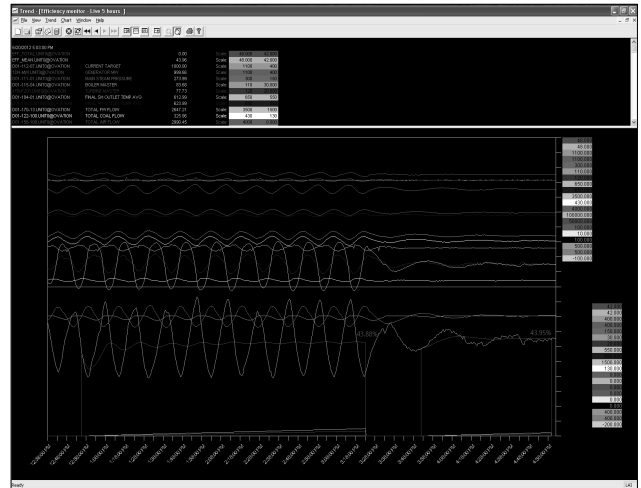


그림 6 수연비 불안정/안정 상태에서 효율(적색 : 43.88 → 43.95%)  
Fig. 6 Efficiency change by tuning of feed water ratio

### 4.3 증기 온도 제어계통

재열증기 온도를 제어하는 수단인 연소가스 분배댐퍼를 사용하여 효율변화를 시험하였다. 이 댐퍼는 증기온도 응답 지연이 매우 커서 제어하기 곤란한 대표적인 것이다. 이런 경우 제어기의 게인을 키우거나 적분 시정수를 빠르게 하면 사이클링이 일어나고 보일러전체가 불안정해 진다. 따라서 제어로직은 그림 7에서 보는 것처럼 발전기 출력지표 (Unit

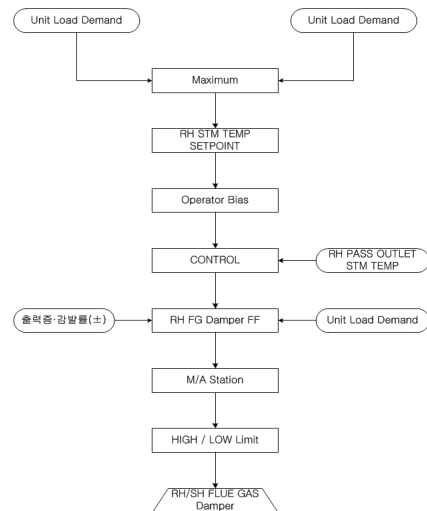


그림 7 재열증기 온도제어 구성도  
Fig. 7 Reheat steam temperature control

load demand)에 따라 미리 프로그램한 수치로 제어하는 선형제어(Feed forward control)를 적용하고 제어기의 게인을 작게 설정하고 있다. 가스 댐퍼에서 사이클링이 일어나는 불안정한 상태와 최적 튜닝으로 사이클링을 제거한 상태에서 누적 평균 효율 변화를 측정된 결과 그림 8 트렌드와 같이 각각 43.95%와 44.03%로 나타나서 0.08% point 또는 0.18%의 증가가 확인되었다. 사이클링이 일어나는 상태에서 안정된 상태로 개선하기 위하여 PID 제어기의 게인  $G=20 \rightarrow 1$ 로, 적분상수  $I=10 \rightarrow 300$ 초로 튜닝을 실시하였다.



그림 8 증기 온도 불안정/안정상태 효율(적색: 43.95 → 44.03%)  
 Fig. 8 Reheat steam temperature control and efficiency

#### 4.4 실험 결과

두 가지 실험 결과를 요약하면, 발전소에서 제어시스템이 불안정하여 1~2%폭으로 사이클링(혹은 Oscillation)이 발생하는 것을 튜닝으로 안정시켰을 측정 결과는 각각 0.16%와 0.18%의 효율 개선으로 나타났다. 이것은 Cyrus W. Taft의 열소비율 개선(측정치 8658 → 8561 BTU/kWH) 수치 0.08% 변화보다 약간 높은 수치로서 보다 정확한 측정 방법에 의한 결과로 판단되며, 운전 환경에 따라 개선되는 정도가 달라질 수 있는 것으로 생각한다[1].

사이클링 발생시 효율이 저하되는 원인은 여러 가지가 있겠지만 운전상태가 변하는 과도기에 보일러에 축적되고 소모되는 에너지의 손실과 최적 효율 포인트에서 주기적으로 벗어나는 운전에 의한 것으로 생각한다[5].

금번 측정의 결과는 튜닝의 효과를 평가하는 자료로 활용할 수 있을 것이며, 튜닝을 통하여 원가 절감이 가능하다는 것이 확인되어 발전소에서 잘 시행되지 않고 있는 튜닝 작업의 필요성을 인식시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

지구 온난화 개선을 위해서는 신재생 에너지 보급이 절실히 필요한데, 아직 신재생 에너지의 코스트가 매우

높기 때문에 당분간은 많은 기존 대형 화력발전소의 효율 개선을 통한 배출저감이 현실적인 대안이 된다. 발전소 효율 개선 대책으로서 안정된 상태로 튜닝하는 것이 효과가 있지만, 발전소 프로세스 안정과 효율변화에 대한 것이 거의 알려지지 않아 효율개선 관점에서는 튜닝의 필요성이 간과되고 있었다.

본 연구에서 프로세스의 대표적인 불안정 사례인 사이클링이 발생하는 상태와 튜닝으로 안정된 상태에서의 운전 효율을 정밀 측정하여 비교한 결과 0.16~0.18% 정도 효율 개선을 확인하였다. 이것은 튜닝에 의해서 단지, 사이클링을 제거한 상태에서 효율 개선이 이루어짐을 확인한 것으로서, 튜닝에 의한 원가절감의 필요성과 중요성을 입증하는 계기가 되었다.

우리나라 40개의 500MW급 석탄발전소에서 종합 효율 40%, 1년간 80%의 이용률로 석탄을 사용한다고 가정하면, 석탄 소비량이 약 20,970,000톤에 이르는데, 튜닝에 의해 사이클링만 제거하여도 44,552톤의 석탄이 절약되며 이에 따른 탄소배출 저감량도 엄청나다.

현재 국내에서도 대용량 기력발전소는 초초임계압 관류형 보일러를 채택하고 있는데 석탄 연료를 사용하기 때문에 제어가 용이하지 않은 편이고 약간의 사이클링이 발생하는 경우가 있다. 이러한 발전소에서 최적 튜닝을 통하여 안정 상태로 개선한다면 발전원가 절감과 지구 온난화 개선을 위한 배출 저감에 크게 기여할 것으로 전망한다.

### 참 고 문 헌

- [1] Cyrus W. Taft, John N. Sorge, "Assessing the Value of Improved Power Plant Dynamic Performance", 2003 Power Industries Conference (POWID), Instrument Society of America, 2003
- [2] John N. Sorge, Cyrus W. Taft, Stephen Idem, "Quantifying the Value of Improved Control System Performance", 2004 Power Industries Conference (POWID), Instrument Society of America, 2004
- [3] "Ovation Algorithms Reference Manual", pp. 351~353, Emerson Process Management, pp. 327-329, 2009
- [4] Chris Nichols, "Reducing CO2 Emissions by Improving the Efficiency of the Existing Coal-fired Power Plant Fleet", National Energy Technology Laboratory, pp. 5-6, 2008
- [5] K. Q. Chang, F. P. de Mello, "Efficiencies of thermal plant during transient duty", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-100, pp. 67-68, 1981

저 자 소 개



**김 호 열 (金 好 烈)**

1990년 인하대학교 대학원졸업(공학석사), 1977년 한국전력공사 입사, 1995년 한국전력공사 본사 선임전문원, 2008년~ 전력연구원 수석연구원  
분야 : 디지털 제어 및 튜닝기술 연구



**김 병 철 (金 炳 喆)**

1979년 한국전력공사 입사, 1999년~ 전력연구원 선임연구원  
분야 : 제어시스템 진단과 튜닝기술 연구



**변 승 현 (邊 昇 炫)**

1992년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1994년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(석사), 1994년~현재 한전전력연구원 선임연구원  
관심분야 : 제어 시뮬레이션, 제어기 튜닝