

# 모델 기반의 화력발전소 발전기 출력 제어 프로그램 개발

논문  
59-3-21

## The Development Of Program Based On Model to Control Generator Output in Power Plant

임 건 표<sup>†</sup> · 김 문 수\* · 최 인 규\* · 박 두 용\*\* · 김 호 열\*\*\*  
(Geon-Pyo Lim · Mun-Soo Kim · In-Kyu Choi · Doo-Yong Park · Ho-Yol Kim)

**Abstract** - The goal of this paper is to develop the control program based on model which can be applied to 1000MW class coal fired thermal power plant. 1000MW class power plant has the higher efficiency and lower cost because the steam conditions of the ultra super-critical process are higher than them of the previous power plants in temperature and pressure. The program includes the state variable controls which have the desired characteristics for the higher temperature and pressure. The program had been developed successfully using advanced process control. The simulation results using the new control program showed the better performance and safer control than them of the previous control program and we could verify the application possibility of the new program for the actual power plant through the load test, comparison, analysis and tuning.

**Key Words** : Advanced process control, Control model, Master, Controller, Unit response optimizer

### 1. 서 론

화력발전소는 그림 1과 같이 전력계통에서 필요로 하는 전력을 생산하여 송전계통으로 보내게 된다. 소요전력은 터빈을 이용하여 발전기를 회전시켜 생산한다. 계통에서 요구하는 전력량이 증가할수록 발전기 회전이 어려워지고 터빈을 회전시키기 위한 증기량이 증가하게 된다. 터빈에서 필요로 하는 증기는 보일러에 연료, 공기, 급수를 공급하여 조절하게 되는 데, 보일러와 터빈에서 제일 중요한 제어 목표는 각각 주증기압력(Main steam pressure)과 발전기 출력(Generator MW)이다. 전력시장에 진입하는 발전소는 전력계통의 갑작스런 불안정 상황이나 전력거래소 요청시 경사변동폭, 출력변동률, 무효전력 출력, 자동발전제어, 주파수조정량 확보 등을 수행할 수 있어야 한다. 정부에서 고시한 경사변동폭과 출력변동률, 설비의 안전운전 및 고장예방을 도모하기 위한 운전조건을 만족시키기 위해서는 발전소의 최종적인 제어요소인 발전기 출력을 안정적으로 조절할 수 있어야 한다. 전력요구신호(Unit load demand)에 따라 보일러 주증기 압력과 발전기 출력을 제어하기 위한 신호를 생성하는 발전소의 최상위 제어를 유닛 마스터(Unit master, 유닛 주제어기)라 한다.[1]

본 논문은 유닛 마스터를 구성하는 보일러 마스터

(Boiler master, 보일러 주제어기) 및 터빈 마스터(Turbine master, 터빈 주제어기)를 기존의 복잡한 제어로직 대신 모델 기반의 간단한 제어로직으로 개발한 내용이다. 사용자가 쉽게 로직을 이해하고, 제어기 조정을 용이하게 수행함으로써 발전소를 효율적으로 운영할 수 있도록 하는데 목적을 두었다.

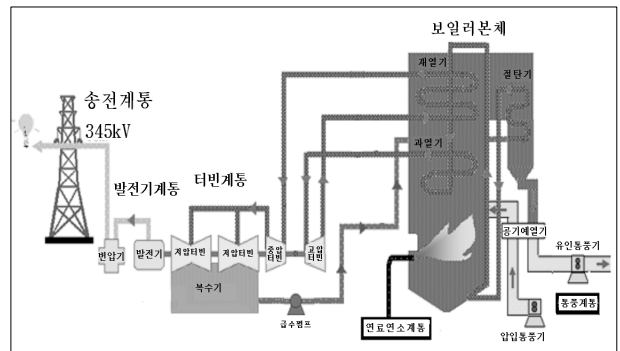


그림 1 발전소 계통도  
Fig. 1 Entire configuration of power plant

유닛 마스터의 각종 공정은 대부분 PID에 의해 제어되어 왔다. 이러한 PID의 최적조정은 발전소가 최고의 효율을 내기 위해 가장 중요한 부분 중 하나이다.

지금까지의 발전소 마스터는 여러 가지 입력신호들을 각종 변수와 기능블록(Function block) 등을 이용하여 이른바 PID 제어를 구현한 프로그램으로 구성되어져 왔다. 이러한 프로그램의 구성은 다양한 입력신호가 서로 얽혀 상호

† 교신저자, 정회원 : 한전전력연구원 선임연구원  
E-mail : kepcolim@kepcoco.kr  
\* 정 회 원 : 한전전력연구원 선임연구원  
\*\* 정 회 원 : 한전전력연구원 책임연구원  
\*\*\* 정 회 원 : 한전전력연구원 수석전문원  
접수일자 : 2009년 10월 14일  
최종완료 : 2010년 1월 19일

영향을 주고 여러 가지 함수와 변수들이 조합되어 최종출력을 내는 구조로 되어 있다.[2] 최적의 출력제어를 위해서는 복잡한 제어 루프를 조정해야 하며 다년간의 현장경험과 전문기술을 겸비한 튜닝전문가의 조정이 필요하다.

기존의 보일러 및 터빈 마스터는 최적 조정시 효율향상을 통하여 연료비를 절감할 수 있다. 이러한 마스터들은 발전소 정비 및 노후화로 인해 적기 최적화를 시행해야 하나 제어프로그램이 매우 복잡하고 민감하므로 경험이 많은 전문가들에 의해서만 조정을 시행하고 있다. 관행적으로 외국 튜닝전문가들에 의지하는 바가 크므로 국내기술자들의 전문기술 향상 및 설비의 적기 최적화가 어려운 실정이다. 이에 상당수의 입력신호와 복잡한 제어루프를 간략하게 구성한 모델기반의 고급공정제어기(Advanced Process Control, APC)를 이용한 프로그램을 개발하였다.

본 논문에서는 고급공정제어기 개발과정을 소개한 후 고급공정제어기를 이용하여 구성된 프로그램으로 운전 변수를 효과적으로 제어하면서 기존의 프로그램보다 전력계통상에서 요구되는 발전기 출력을 신속히 제어하는 과정을 설명하였다. 우선 보일러 마스터와 터빈 마스터로 구성된 프로그램을 설계한 뒤 이들 마스터에 대한 발전기 출력과 주증기 압력의 영향을 모델링하였다. 각각의 모델을 고급공정제어기에 적용하고 조정함으로써 발전기 출력제어에 대하여 기존의 발전소 응답보다 좀 더 효율적인 결과를 얻을 수 있었다. 또한 실제 적용이 가능한 것도 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 고급공정제어기 적용 전의 마스터 프로그램

그림 2는 보일러 및 터빈 마스터 프로그램의 일부를 나타내고 있다. 그림 2는 실제 발전소에서 사용하는 프로그램의 일부이며 마스터 프로그램은 그림 2와 같은 프로그램들의 조합과 수많은 입출력으로 구성되어 있다.

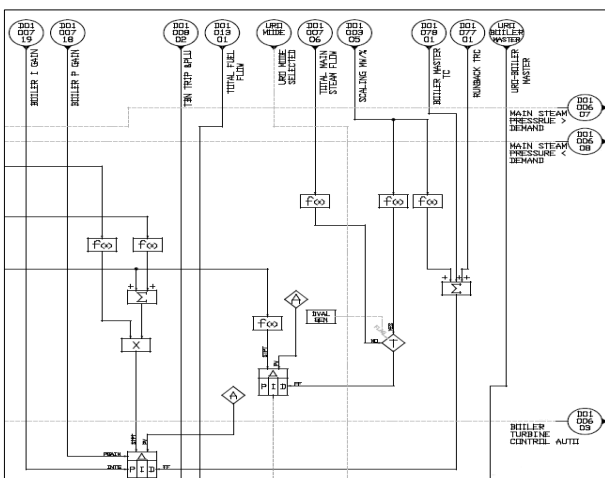


그림 2 고급공정제어기 적용 전의 마스터 프로그램 일부  
 Fig. 2 The part of master program before applying the advanced process control

보일러 마스터 프로그램은 고압터빈을 구동하기 위한 주증기 압력과 전력계통에서 요구되는 소요전력인 전력요구신호 등을 조합하여 프로그램 되어져 있다. 이러한 보일러 마스터의 최종출력은 각각 연소용 공기, 연료, 급수량 제어기의 주신호로 작용한다.

보일러·터빈 협제어 모드일 경우는, 전력요구신호와 실제 발전기 출력과의 오차 및 주증기 압력 설정값과 실제 압력과의 오차를 줄이는 방향으로 제어를 한다. 보일러 추종 모드에서는 터빈마스터가 제어한 발전기 출력에 의해 발생한 보일러 압력 제어오차를 보일러가 보상하도록 제어한다. 터빈 추종 모드에서는 보일러에 의한 주증기 압력변화로 생긴 발전기 출력변화를 터빈이 보상하도록 제어한다.[3][4] 이러한 제어를 하기 위해 그림 2와 같이 수많은 입출력 신호와 각 기능블록에 대한 조정이 필요하여 제어기를 최적화하기 어려운 문제점이 상존한다.

### 2.2 고급공정제어기를 적용할 프로그램 설계[5]

먼저 고급공정제어기를 적용할 프로그램인 발전소 응답 최적기(Unit Response Optimizer, URO)를 설계하였다. 기본적인 개념은 발전기 출력이 변하는 동안 피드포워드 기능이 대부분의 제어를 담당하고, 제어의 오차나 불확실한 외란은 피드백으로 보상하였다.

#### 2.2.1 1차 설계

최초의 설계 개념은 보일러 추종 형태로 보일러 마스터 프로그램 측에 고급공정제어기인 ARX와 퍼지로직을 사용해 비선형의 피드포워드 기능을 주었다. 터빈 마스터가 발전기 출력을 전력요구신호에 따라 제어하는 동안 보일러가 이에 필요한 주증기의 압력변화를 추종하는 형태로 응답속도가 가장 빠르기는 하지만 보일러 압력제어가 불안정해지며 운전제한값을 벗어날 경우 발전소를 정지해야 하는 단점을 가지고 있다. 다음은 터빈 추종 형태로 발전소를 안정적으로 제어하기 위해 보일러 압력을 전력요구신호에 맞게 먼저 조정하고 이에 따라 발생하는 주증기로 발전기 출력을 제어하는 형태인데 보일러 압력은 안정적으로 제어할 수 있으나 주증기 변화가 느리므로 터빈 마스터가 매우 제한적인 발전기 출력 변화를 제어하는 단점을 가지고 있다.

#### 2.2.2 2차 설계

1차 설계에서의 프로그램은 서로 상충되는 단점을 가지고 있다. 따라서 이를 보완하기 위해 그림 3과 같이 다중변수 피드백 제어(Multi-Variable Feedback Control) 형태를 구상해 보았다.

발전기 출력 고급공정제어기 (ARX-MW Model)와 기수분리기 출구온도 고급공정제어기(ARX Separator Outlet Temperature Model) 각각의 입력으로 선택된 변수는 급수 유량과 연료요구량이며, 출력으로 선택된 변수는 발전기 출력과 기수분리기 출구온도이다.

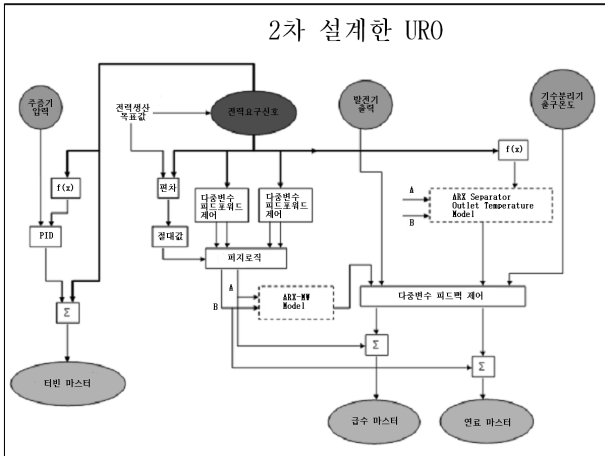


그림 3 2차 설계한 URO  
Fig. 3 Secondly-designed URO

2.2.3 3차 설계

2차에서 설계한 프로그램에서도 조정과정에서 기수분리기 출구 증기온도 고급공정제어기가 안정적인 마스터 제어를 하지 못했다. 이에 최종적으로 그림 4와 같이 저속 키커(저속 고급공정제어기, ARX Slow)와 고속 키커(고속공정제어기, ARX Fast)로 구성된 응답속도 조절신호와 예측제어 고급공정제어기 1~4(ARX 1~4)를 구성했다.

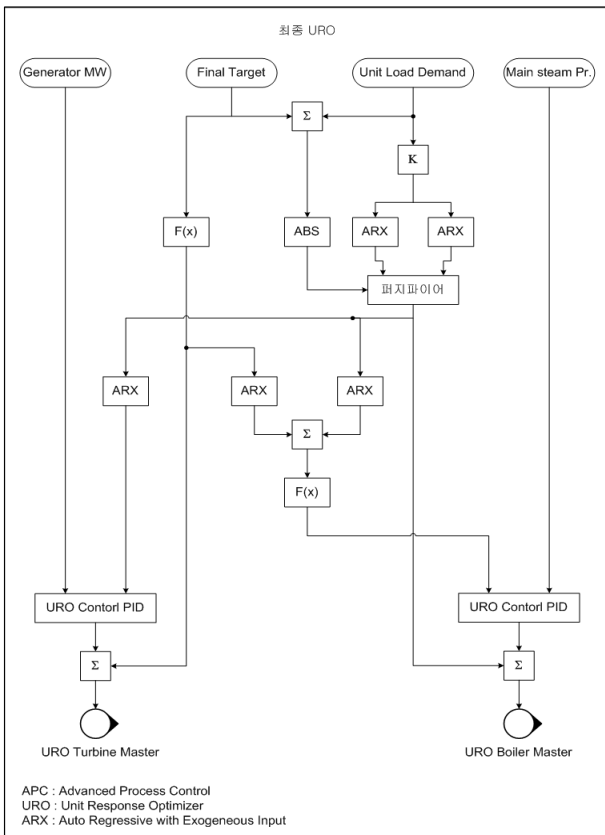


그림 4 최종 설계 프로그램  
Fig. 4 Finally-designed program

처음에 예측제어 고급공정제어기 모델을 제외한 상태로, 응답속도를 조절하기 위한 저속 키커와 고속 키커만을 이용해 조정을 해 보았으나 발전기 출력별로 양호한 응답을 얻을 수 없었다. 이에 예측제어 고급공정제어기를 적용하기로 결정하고 최종프로그램을 확정하여 모델링을 하고 조정을 시행하였다.

최종 URO는 전력요구신호로부터 주증기 압력을 제어하기 위한 피드포워드 신호를 만들어 내기 위해 전력요구신호와 비례 이득(K) 밑에 저속 키커와 고속 키커, 퍼지파이어를 사용한다. 두개의 키커는 전력요구신호를 받아 주증기 압력과 발전기 출력을 제어하기 위한 느린 응답과 빠른 응답을 내보내며 퍼지파이어는 키커의 두 출력을 그림 6과 같이 미리 정해진 비율로 선택해서 내보내게 된다. 퍼지파이어 출력은 예측제어 고급공정제어기로 입력되고 보일러와 터빈 제어측 각각의 예측제어 고급공정제어기 출력은 조정과정에서 비율을 조정하여 PID의 설정값이 된다. 터빈 마스터 측의 PID 공정변수는 발전기 출력이며 PID의 출력은 전력요구신호의 전력생산 목표값(Final Target)을 터빈 마스터 설정값으로 환산한 값(F(x) 출력)과 합산되어 최종 제어신호를 만들어 내게 된다. 반면 보일러 제어측 PID의 공정변수는 주증기 압력이며 PID의 출력은 퍼지파이어의 출력과 합산되어 보일러 마스터의 최종 제어신호를 만들어 내게 된다.[6]

2.3 모델링[7]

고급공정제어기에 사용할 모델은 시험자료에 근거하여 얻었다. 시험은 보일러 마스터와 터빈 마스터를 수동으로 절체하여 시행했다.

2.3.1 키커 모델링

키커는 모델을 기반으로 설계된 피드포워드 기능을 갖는 모듈이다. 그림 5에서 yset은 전력요구신호, yd는 설계한 전력요구신호, Gff는 피드포워드 전달함수, u는 피드포워드 출력, yp는 예측된 공정의 출력이다.

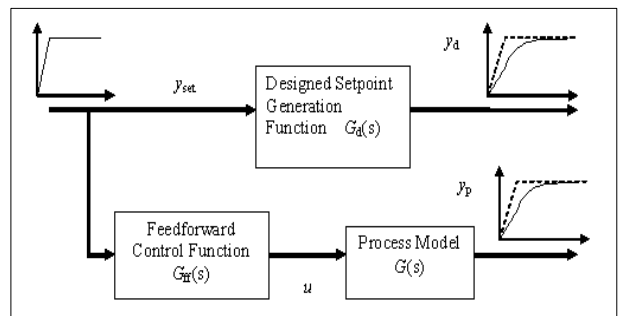


그림 5 키커 모델 설계 개념도  
Fig. 5 Design concept of kicker models

Gd는 예측 설정값이나 응답의 형태가 아닌 선형전달함수 형태의 전력요구신호 설정값 발생기로, 원하는 응답을 얻기 위한 PID의 출력과 같은 설정값을 만들어내도록 설계한다. yp와 yd의 결과가 일치할 경우 식 (1)과 같은 결과를 얻게 된다.

$$Gd(s)=G(s) \times Gff(s) \rightarrow Gff(s)=Gd(s)/G(s) \quad (1)$$

이러한 과정을 거쳐 원하는 속도에 대한 키커의 모델을 얻을 수 있었다. 저속키커 모델의 경우  $G_{slow}(Z)=1$ , 고속키커 모델의 경우 식 (2)와 같다. 이 모델은 발전기 출력이 원하는 출력변동률을 그림 18, 21과 같이 기존 프로그램보다 더 신속하게 제어하면서도 주증기 압력과 온도를 변동허용 설계값 이내로 유지할 수 있도록 조정하는 과정에서 최적값을 얻은 것이며, 퍼지퍼라이어의 경우도 이와 같은 과정을 거쳐 파라미터를 얻었다.

$$Gfast(Z)=\frac{13.195120 - 13.146340Z^{-1}}{1 - 0.951220Z^{-1}} \quad (2)$$

### 2.3.2 퍼지퍼라이어

키커의 응답은 퍼지퍼라이어에 의해 그림 6과 같은 비율로 선택되어 출력된다. 퍼지퍼라이어는 저속키커와 고속키커의 출력을 선택적으로 출력하는 역할을 한다. 포인트 2, 3을 조정하여 저속키커와 고속키커의 출력을 비율적으로 선택하여 내보낸다. 본 논문에서 조정한 값은 각각 1.1과 70이다.

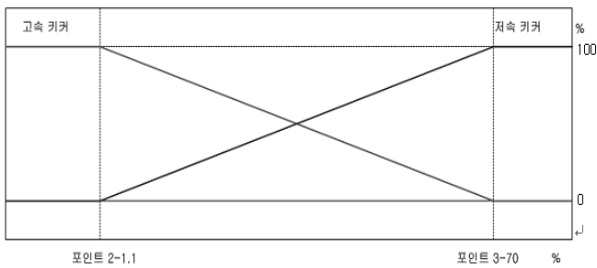


그림 6 퍼지퍼라이어 선택비율

Fig. 6 Selection ratio of fuzzifier

저속키커와 고속키커의 출력을 퍼지퍼라이어로 처리한 결과는 그림 7과 같다.

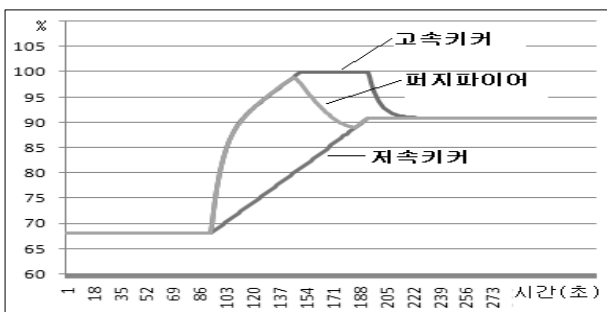


그림 7 키커 및 퍼지퍼라이어 조합 시험결과

Fig. 7 Test result through both kickers and fuzzifier

### 2.3.3 예측제어 고급공정제어기 모델

그림 8, 9는 예측제어 고급공정제어기 모델을 얻기 위해 사용한 그래프이다. 부하시험결과에 대한 트렌드를 얻고, 그 트렌드에 따라 원하는 트렌드를 수정하여 모델을 얻을 수 있다. 부하시험은 1000MW 화력발전 제어로직을 시험하기

위해 제작한 시뮬레이터에서 수행하였다. 시뮬레이터는 발전소에 실제 사용하고 있는 주제어설비와 이미 개발한 발전소 설계 데이터를 입력한 공정모델 컴퓨터로 구성되어 있다.

그림 8의 ARX1, 2는 각각 터빈 마스터 3% 변화시 발전기 출력과 주증기 압력의 변화를 나타내고, 그림 9의 ARX3, 4는 보일러 마스터 3% 변화시 발전기 출력과 주증기 압력의 변화를 나타낸다. 그림 8, 9에서 예측되는 발전기 출력과 주증기 압력은 원하는 그래프로 수정할 수 있다. 이렇게 수정한 그래프로 식 (3)~(6)의 전달함수를 생성한다. 이 전달함수는 그림 4에서 발전기 출력과 주증기 압력 변화시 보일러 및 터빈 마스터의 출력을 만들어 낸다.

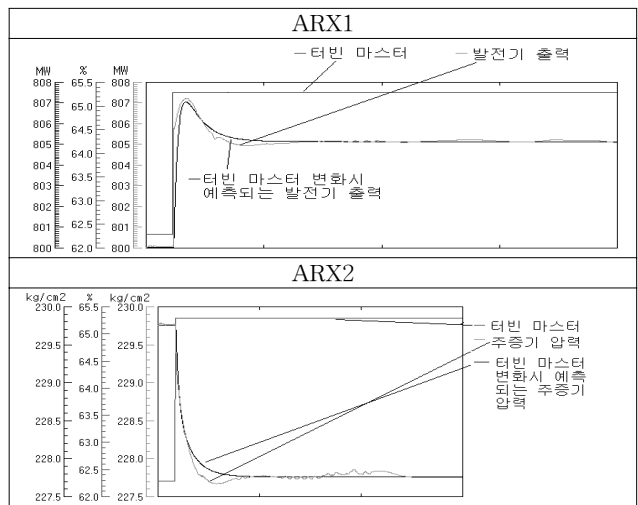


그림 8 터빈 마스터측 예측제어 고급공정제어기 모델 생성 트렌드

Fig. 8 Trends to make model of advanced process controller for Prediction control of turbine master

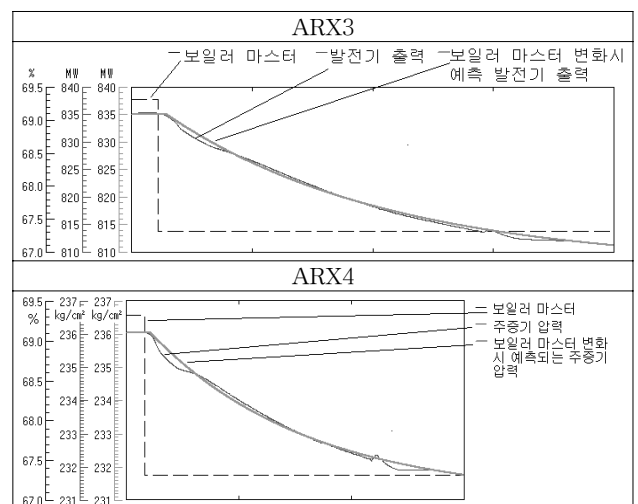


그림 9 보일러 마스터측 예측제어 고급공정제어기 모델 생성 트렌드

Fig. 9 Trends to make model of advanced process controller for Prediction control of boiler master

부하시험 결과를 전달함수 생성 프로그램 또는 시뮬링크를 통해 원하는 트렌드로 수정한 후 얻은 ARX1~4 각각에 대한 모델은 순서대로 식 (3)~(6)과 같다. 식 (3)~(6)을 각각 ARX1~4에 입력하고 조정을 시행했다.

$$G(Z)_{BM-MW} = \frac{4.243663 \times 10^{-4} + 8.487326 \times 10^{-4}Z^{-1} + 4.243663 \times 10^{-4}Z^{-2}}{1 - 1.975155Z^{-1} + 0.9753096Z^{-2}} Z^{-25} \quad (3)$$

$$G(Z)_{BM-PR} = \frac{0.004889118}{1 - 1.820784Z^{-1} + 0.8222052Z^{-2}} Z^{-20} \quad (4)$$

$$G(Z)_{TM-MW} = \frac{0.0300947 - 0.0300947Z^{-2}}{1 - 1.9697684Z^{-1} + 0.9699052Z^{-2}} \quad (5)$$

$$G(Z)_{TM-PR} = \frac{0.004889118}{1 - 1.670247Z^{-1} + 0.9912311Z^{-2} - 0.3144344Z^{-3}} \quad (6)$$

URO는 기존의 마스터 프로그램을 경유하지 않고 기존의 전력 요구신호와 주증기 압력 신호 등을 입력신호로 하여 또 하나의 제어모드인 고급공정제어모드를 형성하도록 했다. 즉 기존의 프로그램을 거치지 않고 URO만으로 제어가 가능하도록 하였다.

### 2.4 부하시험 및 결과분석

그림 10~12는 1000MW 발전소의 발전기 출력 1000MW에서 750MW로의 변동, 분당 출력변동률 5%, URO를 사용하지 않는 협조제어모드에서의 시뮬레이터 부하시험결과를 보여주고 있다. 그림 11, 12는 마스터와 발전기 출력을 나타낸 그림이다.

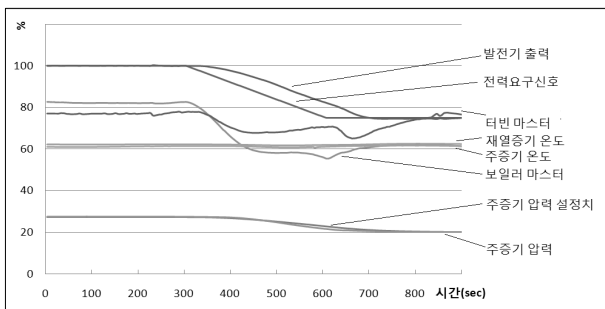


그림 10 협조제어모드시 1000에서 750MW 출력변동 부하시험 결과 전체

Fig. 10 The entire test result while changing generator output from 1000 to 750MW in coordination mode

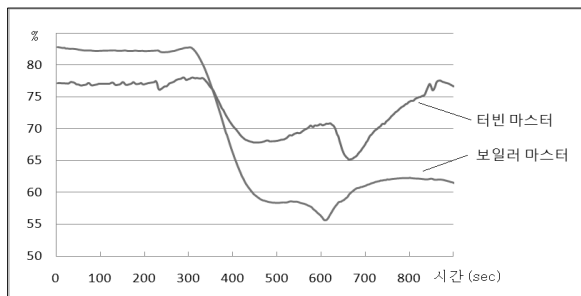


그림 11 협조제어모드 및 출력하강시 보일러 및 터빈 마스터 출력 변화

Fig. 11 The output of boiler and turbine master while decreasing generator output in coordination mode

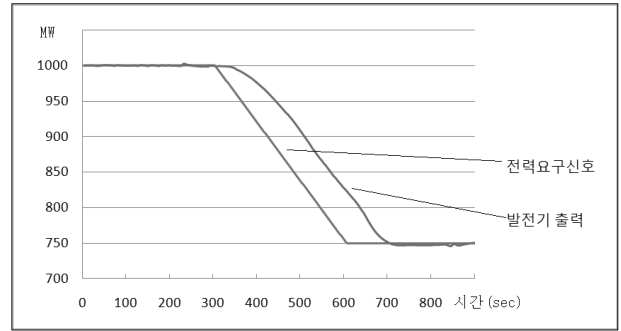


그림 12 협조제어모드 및 출력하강시 전력요구신호에 대한 실제 발전기 출력 변화

Fig. 12 The generator output for MW demand while decreasing generator output in coordination mode

그림 13~15는 1000MW 발전소에서 발전기 출력 750MW에서 1000MW로의 변동, 분당 출력변동률 5%, URO를 사용하지 않는 협조제어모드에서의 시뮬레이터 부하시험결과이다. 그림 14, 15는 마스터 및 발전기 출력을 나타낸 그림이다.

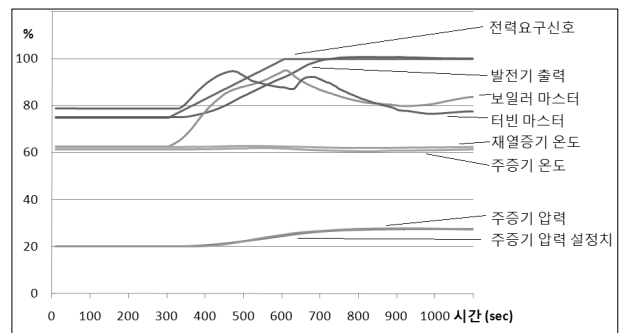


그림 13 협조제어모드시 750에서 1000MW 출력변동 부하시험 결과 전체

Fig. 13 The entire test result while changing generator output from 750 to 1000MW in coordination mode

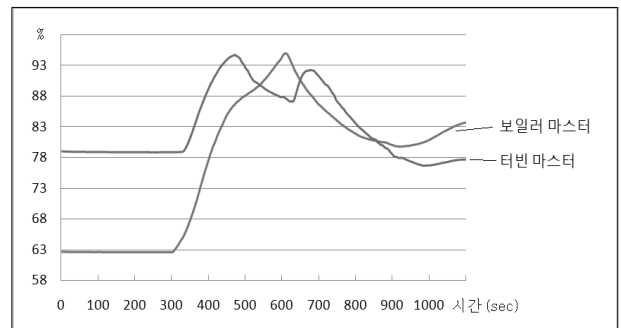


그림 14 협조제어모드 및 출력증발시 보일러 및 터빈 마스터 출력 변화

Fig. 14 The output of boiler and turbine master while increasing generator output in coordination mode

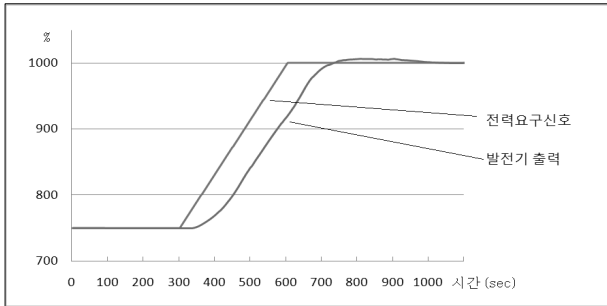


그림 15 협조제어모드 및 출력증발시 전력요구신호에 대한 실제 발전기 출력 변화

Fig. 15 The generator output for MW demand while increasing generator output in coordination mode

협조제어모드에서의 시험에 대한 분석결과를 정리하면 표 1과 같다. 그림 10~15에서의 결과는 발전기 출력 변화에 있어 표 2의 실제 운전 중인 500MW 보령화력 발전소 7호기와 비슷한 결과를 나타냈다.

표 1 1000MW 발전소 협조제어모드 부하시험 결과

Table 1 Load test result of 1000MW power plant in coordination mode

부 하	출력변동률(MW/분)		주증기 압력 제어오차 (kg/cm <sup>2</sup> )	
	설정값	실측값		
1000→750MW (25%)	50 (5%, 4분)	37.8 (3.8%, 6분 36초)	+2.13 ~ -11.84	
750→1000MW (25%)	50 (5%, 4분)	34.9 (3.5%, 7분 9초)	+5.02 ~ -3.52	
부 하	주증기 온도(°C)		재열증기 온도(°C)	
	설정값	제어오차	설정값	제어오차
1000→750MW (25%)	613	3.6 ~ -6.6	624	+3.5 ~ -5.9
750→1000MW (25%)		6.7 ~ -8.6		+5.5 ~ -4.9

표 2 500MW 보령화력 7호기 협조제어모드 부하시험 결과

Table 2 Load test result of 500MW boryoung power plant unit 7 in coordination mode

부 하	출력변동률(MW/분)		주증기 압력 제어오차 (kg/cm <sup>2</sup> )	
	설정값	실측값		
480→550MW (13%)	27(5%, 4분)	18.9(3.5%, 5분 42초)	+8.2 ~ -1.4	
550→480MW (13%)	27(5%, 4분)	16.7(3.1%, 6분 28초)	+1.2 ~ -6.2	
부 하	주증기 온도(°C)		재열증기 온도(°C)	
	설정값	제어오차	설정값	제어오차
480→550MW (13%)	569	2 ~ -8	596	10 ~ -8
550→480MW (13%)		7 ~ -6		+7 ~ -8

주증기 압력은 보일러의 압력변동 제한 설정값인 15kg/cm<sup>2</sup> 이내에서 제어되었다. 또한 주증기, 재열증기 온도가 각각 변동 설계값인 ±10, ±12°C로 잘 유지되었다. 출력변동률은 보령화력 발전소 7호기와 마찬가지로 지연에 의해 설정값과의 제어오차가 약 1.2~1.5%이며, 이러한 출력변동 지연은 전력거래소와 전력거래에 있어 손실을 초래하는 요소로 작용한다. 출력변동률 1~5%에서의 부하시험을 통해 1000MW 화력발전소용 프로그램 검증용 시뮬레이터의 응답상태가 실제 운전 중인 화력발전소와 동일하며, URO 적용의 신뢰성을 검증하는 데 문제가 없음을 확인하였다.

그림 16~18은 1000MW 발전소의 URO를 사용한 고급공정제어모드에서의 시험결과이다. 발전기 출력 1000MW에서 750MW로 분당 출력변동률 5%에서의 시뮬레이터 부하시험 결과이다. 그림 17, 18은 마스터 및 발전기 출력을 나타낸 그림이다.

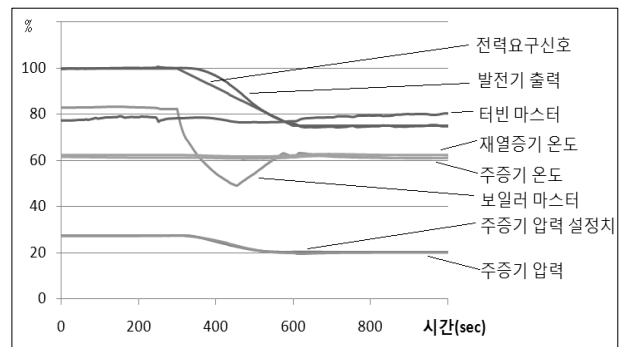


그림 16 고급공정제어모드시 1000에서 750MW 출력변동 부하시험 결과 전체

Fig. 16 The entire test result while changing generator output from 1000 to 750MW in APC mode

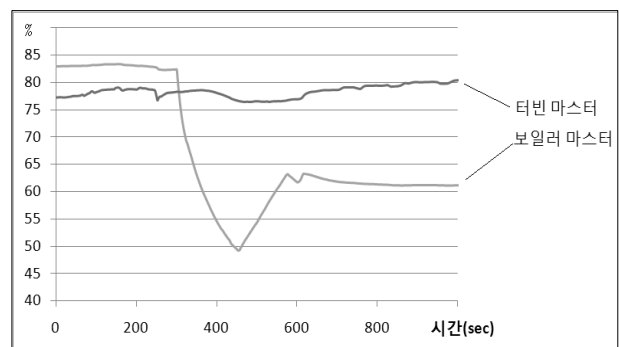


그림 17 고급공정제어모드 및 출력하강시 보일러 및 터빈 마스터 출력

Fig. 17 The output of boiler and turbine master while decreasing generator output in APC mode

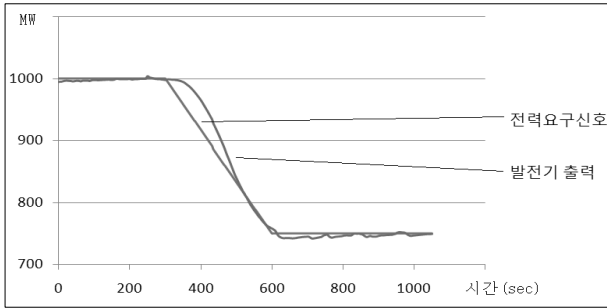


그림 18 고급공정제어모드 및 출력하강시 전력요구신호에 대한 실제 발전기 출력 변화

Fig. 18 The generator output for MW demand while decreasing generator output in APC mode

그림 19~21은 1000MW 발전소의 URO를 사용한 고급공정제어모드에서의 시험결과를 보여주고 있다. 발전기 출력은 750MW에서 1000MW로 분당 출력변동률 5%에서의 시뮬레이터 부하시험결과를 보여주고 있다. 그림 20, 21은 마스터 출력 및 발전기 출력을 나타낸 그림이다.

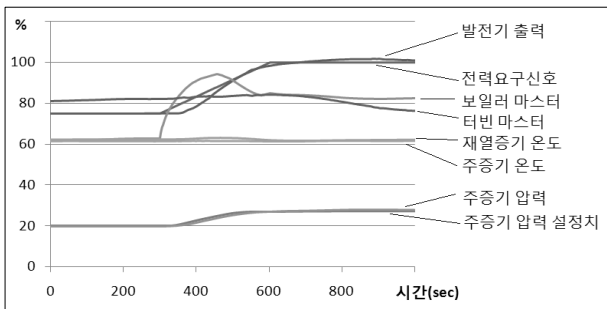


그림 19 고급공정제어모드시 1000에서 750MW 출력변동 부하시험 결과 전체

Fig. 19 The entire test result while changing generator output from 1000 to 750MW in APC mode

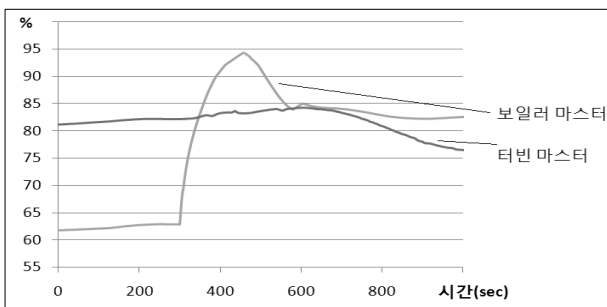


그림 20 고급공정제어모드 및 출력상승시 보일러 및 터빈 마스터 출력

Fig. 20 The output of boiler and turbine master while increasing generator output in APC mode

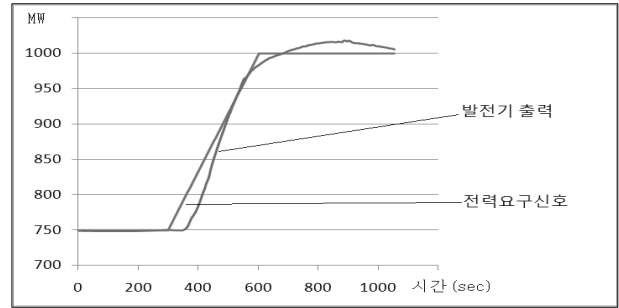


그림 21 고급공정제어모드 및 출력상승시 전력요구신호에 대한 실제 발전기 출력 변화

Fig. 21 The generator output for MW demand while increasing generator output in APC mode

고급공정제어모드에서의 시험에 대한 분석결과를 정리하면 표 3과 같다. 주증기 압력은 보일러의 압력변동 제한 설정값인 15kg/cm<sup>2</sup> 이내에서 제어되고 있다. 또한 주증기, 재열증기 온도가 각각 변동 설계값인 ±10, ±12℃로 잘 유지되고 있음을 알 수 있다. 반면 출력변동률이 협조제어모드보다 훨씬 향상된 결과를 얻었다.

이러한 신속한 출력변동은 전력계통상에서 다른 발전소 급정지 등의 문제 발생시 부족한 전력을 신속히 공급할 수 있는 기능을 확보함으로써 전력거래소와의 전력거래에 있어 수익을 늘릴 수 있는 장점을 가지고 있다.

표 3 1000MW 발전소 고급공정제어 모드 부하시험 결과  
Table 3 Load test result of 1000MW power plant in APC mode

부 하	출력변동률(MW/분)		주증기 압력 제어오차 (kg/cm <sup>2</sup> )	
	설정값	실측값		
1000→750MW (25%)	50 (5%, 4분)	48.08 (4.8%, 5분 12초)	5.8 ~-7.67	
750→1000MW (25%)	50 (5%, 4분)	39.4 (3.9%, 6분 21초)	6.11 ~-10.96	
부 하	주증기 온도(℃)		재열증기 온도(℃)	
	설정값	제어오차	설정값	제어오차
1000→750MW (25%)	613	6.61 ~-7.74	624	4.63 ~-7.82
750→1000MW (25%)		4.03 ~-1.57		8.56 ~-6.01

그림 22, 23은 부하시험 결과를 비교한 그래프이다. 보령 7호기는 현재 상업운전중인 500MW 석탄화력발전소의 시험결과를 나타내고 있으며, 차세대는 1000MW 발전소 협조제어모드 시험결과를 나타낸다. 고급공정제어는 1000MW 발전소 고급공정제어모드 시험결과를 나타낸다.

출력변동시 주증기 압력은 보일러의 압력변동 제한 설정값인 15kg/cm<sup>2</sup> 이내에서 제어되고 있다. 주증기 및 재열증기 온도는 좌측의 설계 기준 범위 내에서 제어되고 있다.

고급공정제어모드로 제어할 경우 출력변동률에 있어서는

현격한 차이를 보이면서 기존설비가 3% 전후인데 비해 4~5%의 우수한 성능을 보여주는 것을 알 수 있다. 이러한 성능을 보이는 데 있어서의 문제는 온도와 압력을 얼마만큼 안정적으로 제어할 수 있는 가이다. 주증기 온도 및 재열증기 온도에 있어서는 기존 500MW 발전소보다 용량이 두 배 정도 되는 발전소를 제어하면서도 500MW 발전소의 운전기준을 만족함으로써 우수한 제어결과를 보여주었다. 압력에 있어서는 고급공정제어 모드에서 더 많은 변화를 보여주고 있으나 압력변동 제한 설정값인 15kg/cm<sup>2</sup> 이내로 제어되고 있기 때문에 발전소 안정운전에 저해가 되지 않아 충분히 좋은 결과를 보여주었다.

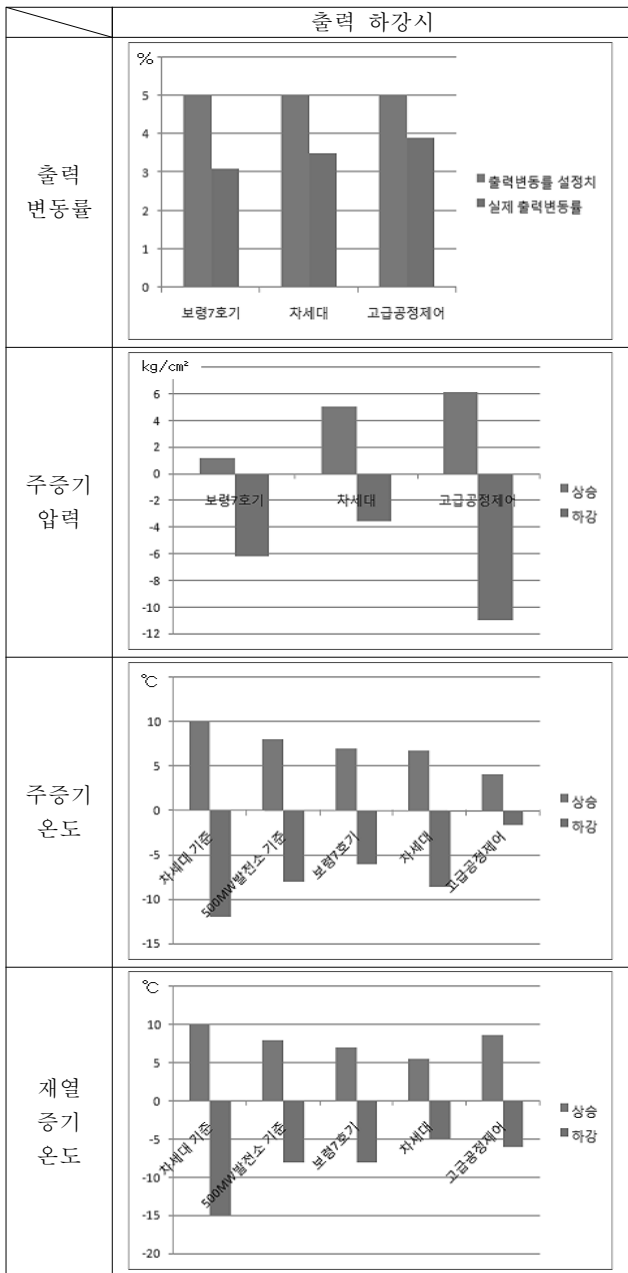


그림 22 출력 하강시 부하시험 비교  
 Fig. 22 Comparison of the load tests while decreasing the generator output

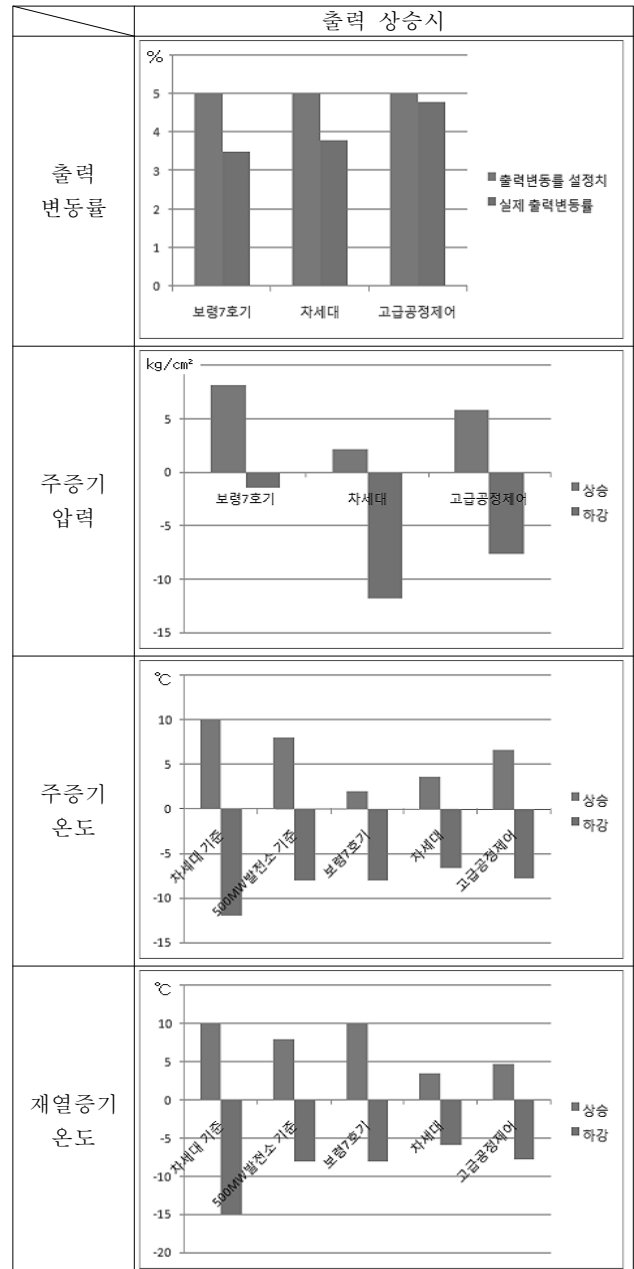


그림 23 출력 상승시 부하시험 비교  
 Fig. 23 Comparison of the load tests while increasing the generator output

### 3. 결론

본 연구수행을 통해 국내에 건설할 1000MW 대용량 화력 발전소를 제어하기 위한 모델 기반의 고급공정제어기를 적용한 프로그램을 성공적으로 개발하였다. 이번 연구결과를 계기로 기존 프로그램의 성능을 유지하면서 보다 신속한 출력변동률을 제어함으로써 발전소의 안정적인 운영뿐만 아니라 프로그램을 쉽게 이해하고 튜닝을 적기에 수행할 수 있게 되어 국내 기술력 향상과 설비 최적화에 기여할 수 있게 되었다.



처음에 설계한 프로그램을 세 번에 걸쳐 수정하고 수십 차례 시험하면서 시행착오를 겪어야 했다. 기존보다 두 배 정도 용량이 증가한 발전소를 제어하기 위해 모델기반의 고급공정제어기를 이용한 URO를 적용했으며, 여러 번에 걸친 조정과 프로그램 수정, 모델 수정 등을 통해 온도와 압력을 기존 500MW급 표준석탄화력발전소만큼 안정적으로 유지하면서 발전소의 최종 출력인 발전기 출력을 효과적으로 제어할 수 있는 프로그램을 구현하게 되었다. 고급공정제어모드로 발전기 출력을 제어하는 데 있어서는 기존 500MW 표준석탄화력발전소와 차세대 화력발전 시뮬레이터의 협조제어 모드보다 더 좋은 결과를 보여주었다. 이로써 기존의 복잡한 프로그램을 모델 기반의 프로그램으로 개발하는 데 성공했으며, 차후 1000MW 대용량 발전소뿐만 아니라 기존의 운영중인 발전소와 신규발전소에 확대·적용하여 설비 신뢰성 향상과 안정적인 운영이 가능할 것으로 기대한다.

**참 고 문 헌**

- [1] 전병욱, “보령 3~6호기 발전소 교안” 보령화력본부, pp. 6, 2006.
- [2] 이주현, “화력발전소 보일러 제어루프의 시뮬레이션에 관한 연구”, 대한전기학회, pp. 868-870, 1999
- [3] 한국전력기술주식회사, 한국중부발전주식회사, “보령화력 7,8호기 시운전지침서”, pp. 2.1-16, 3.1-5, 2007
- [4] 보령훈련원, “보령3~6호기 모의화력 운전실무”, 한국중부발전주식회사, pp. 161~195, 2001
- [5] 김호열, 김병철, 임건표, 김문수, “차세대 화력발전 기술 개발 최종보고서”, 전력연구원, pp. 247-285, 2009
- [6] Astrom, K.J, “Automatic Tuning of PID Controllers”, Instrument Society of America, pp. 1-8, 1988
- [7] Agee, Lance, “Application of the Modular Modeling System to Control System Design and Tuning”, pp. 13-18, EPRI, 1986

**저 자 소 개**



**임 건 표 (林 建 杓)**

1972년 11월 3일생. 1998년 명지대 전기공과 졸업. 2010년 충남대 대학원 졸업. 현재 한전전력연구원 선임연구원.  
Tel : 010-3833-7858  
E-mail : kepcolim@kepcoco.kr



**김 문 수 (金 文 洙)**

1968년 4월 18일생. 1990년 단국대 전기공과 졸업. 현재 한전중부발전 제어전문원 및 한전전력연구원 파견 근무  
Tel : 010-2645-3240  
E-mail : munsoo@komipo.co.kr



**최 인 규 (崔 仁 圭)**

1967년 1월 26일생. 1993년 전북대 전기공과 졸업. 2004년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전전력연구원 선임연구원.  
Tel : 010-6413-5781  
E-mail : choiik@kepcoco.kr



**박 두 용 (朴 斗 用)**

1956년 3월 25일생. 1991년 한밭대 전기공학과 졸업. 현재 한전전력연구원 책임연구원.  
Tel : 042-865-5642  
E-mail : papiyon@kepcoco.kr



**김 호 열 (金 好 烈)**

1958년 2월 7일생. 1990년 인하대 정보공학과 대학원 졸업. 현재 한전전력연구원 수석전문원.  
Tel : 019-9025-3558  
E-mail : kimhoyol@kepcoco.kr