

## 화력발전소 탈황설비 설치를 위한 운전모드 개발에 관한 연구

문채주 · 장영학\* · 김의선\*\*

목포대학교 전기공학과, \*제어계측공학과, \*\*서남대학교 전기공학과

### A Study on Operation Mode Development for Construction of Flue Gas Desulfurization System in Thermal Power Plants

Chae-Joo Moon, Young-Hag Chang\* and Eui-Sun Kim\*\*

Department of Electrical Engineering,

\*Department of I&C Engineering, Mokpo National University

\*\*Department of Electrical Engineering, Seonam University

#### 요 약

기존 화력발전소에 탈황설비가 추가되고, 이로 인하여 새로운 계통의 통풍저항을 상쇄시키기 위하여 기존의 유인통풍기와 탈황설비 사이에 승압통풍기가 설치되고 있다. 통풍저항의 증가와 새로운 통풍기의 추가는 기존 통풍특성의 변화를 나타낼 것이고, 빈번한 발전소 정지를 가져오는 심한 노내 압력 변동을 보이게 될 것이다. 따라서, 발전소를 안전하게 운전하기 위해서는 설계된 통풍계통을 기반으로 한 교정된 운전모드에 관한 지식이 요구된다. 본 논문에서는 MMS(Modular Modeling System) 소프트웨어를 사용하여 우회 댐퍼의 개방을 수반하는 유인 및 승압통풍기의 비상정지의 사태에 따른 화력발전소 노내 압력, 통풍기의 압력과 유량, 댐퍼의 개도 등과 같은 해석결과를 제시하고 논의하고 있다.

**Abstract**— Due to the addition of Flue Gas Desulfurization (FGD) system to the already existing thermal power plant, the booster draft fans are to be installed between the existing induced draft fan and a FGD system to offset a new system draft resistance. The raised draft resistance and the addition of a number of draft fans will bring the changed of the previous draft characteristics and the furnace pressure with a large excursions, cause plant trips frequently. Therefore the knowledge for updated operation mode based on the designed draft system to operate the plant safely is required. This paper shows and discusses the analysis results, such as the furnace pressure, pressure and the flow rate of draft fans, the damper opening, etc. in accordance with the cases of emergency shutdown of the induced and the booster draft fans which are associated with the opening of bypass damper using the Modular Modeling System (MMS) software

#### 1. 서 론

국내의 화력발전소는 원자력발전소 증설로 인해 운전 특성이 기저부하(Base Load)에서 주말 또는 일일기동정지로 변경되고 있으며, 심각해지는 환경 문제로 인하여 환경오염물질의 배출 기준이 강화됨에 따라 기존 발전소에 공해방지설비 즉, 분진을 제거하는 전기집진기나 유황성분을 제거하는 탈황설비 등이 새롭게 추가되고 있다. 기존 화력발전소에 전기집진기나 탈황설비를 추가하게 되면 배출되는 연소가스의 압력손실이 발생하게 되어 승압통풍기(Booster Draft Fan)의 신설이나 유인통풍

기(Induced Draft Fan)의 용량증설이 요구되고, 제어시스템 제어기에 대한 제어요소의 재조정 등 전면적인 재설계가 필요하게 된다. 이러한 문제는 발전소 공기연소가스 시스템의 해석으로 최적 설계를 위한 사전검증을 하여야 하고 발전소 운전절차의 개정을 수반하게 되어 사전 분석작업이 중요한 문제로 등장하게 되었다. 특히, 신설되는 승압통풍기의 고장 또는 강제 정지되는 경우에 발전소를 안전하게 보호하기 위해 여러 가지 사고사태에 대한 보호회로가 요구된다. 그러나, 우리나라의 경우 이에 대한 연구실적이 거의 없고 외국의 경우에도 상업용 해석프로그램을 사용하여 설계자료에 대한 적정성

여부를 검증하고 있다<sup>[14][3]</sup>.

한편, 상업용 해석프로그램은 각각의 기기를 모듈화하여 모델링하고 발전시스템 특성에 적합하게 각 모듈을 재구성하면 전체 시스템이 구성되고, 여기서 개별적인 시스템에 대한 동적특성 요소들을 해석할 수 있다. 미국의 전기연구소에서 MMS(Modular Modeling System)를 먼저 개발하여 화력발전소에 대한 다양한 적용실적을 갖고 있으며, 그 후에 개발된 TRAX는 원자력발전소와 화력발전소 모두에 적용되는 MMS와는 달리 화력발전소의 경우만 적용할 수 있다<sup>[4][5]</sup>.

본 연구에서는 프로그램의 해석모델이 이미 검토된 바와 같이 신뢰성이 확보되어 있기 때문에 모델개발 기간을 단축하기 위해 MMS를 이용하였다<sup>[11][2]</sup>. 기존 화력발전소에 탈황설비를 설치할 경우 기존의 유인통풍기 또는 신설되는 승압통풍기가 강제 정지될 때 보일러 노내 압력을 비롯한 기존 시스템의 물성치에 대한 동적특성 영향을 해석하여 발생하는 문제점을 사전에 검증하고, 적절한 운전모드를 확인하고자 한다.

## 2. 통풍시스템

### 2-1. 통풍계통 구성

화력발전소의 통풍시스템은 연소에 필요한 공기를 보일러에 공급하여 완전연소를 기하고 연소 이후 생성가스를 보일러 전열면에 접촉시키면서 연도를 통해 유동시켜 그 보유열을 가능한 효과적으로 이용, 배출하는 일련의 공기 가스 유동을 나타낸다. 적용대상 화력발전소는 석탄 혼소(Mixture Combustion) 발전소로 평형통풍(Balanced Draft) 방식을 채용하고 있다. 연소용 공기를 화로에 공급하는 압입통풍기(Forced Draft Fan)와 연소가스를 연도로 배출하기 위한 유인통풍기가 설치되어 노내 압력을 대기압보다 낮은  $-3 \text{ mmH}_2\text{O}$ 의 부압(negative pressure)으로 자동조절 또는 수동으로 조절할 수 있다. 압입통풍기에서 보내진 연소용 공기를 배기가스의 보유열을 회수, 예열하여 공기온도를 상승시키는 공기예열기와 저부하에서 열적소자의 저온 부식방지 및 연소 효율을 높이기 위한 증기식 공기예열기가 설치되어 있으며, 연소용 공기량 및 연소 배기 가스량을 자동 또는 수동으로 조절할 수 있는 각종 댐퍼가 설치되어 있다.

탈황계통은 유인통풍기와 연돌 사이에 설치되며 탈황계통에서의 압력손실을 보상하기 위하여 유인통풍기와 탈황계통 사이에 승압통풍기가 설치된다. 유인통풍기와 승압통풍기 사이에는 탈황계통을 우회할 수 있는 우회댐퍼가 설치된다. 압입통풍기와 유인통풍기, 승압통풍기는 배기덕트를 기준으로 2개의 배열(2열)로 구분되고 각각 1대씩 설치되며, 같은 계열의 통풍기가 서로 연동되

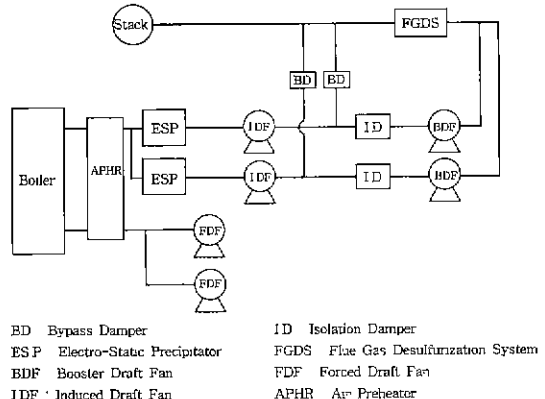


Fig. 1. Schematic diagram for boiler draft system.

어 운전된다. 통풍계통의 개략도는 Fig. 1과 같다.

### 2-2. 통풍계통 운전

보일러의 통풍계통은 크게 기동정지와 정상운전시의 동작특성이 다르나 동작원리는 동일하다. 통풍계통은 보일러의 연소에 필요한 공기를 압입통풍기에서 공급하며, 이는 보일러로 공급되는 연료량 및 과잉공기 설정치에 따른 공기 요구량에 따라 입구 배인 각도를 조정하여 공기량을 조절한다. 보일러의 압력은 유인통풍기 흡입측에 설치된 댐퍼에 의해 조절되며, 승압통풍기는 유인통풍기 출구압력을 일정하게 유지시키면서 연소가스가 탈황설비를 지나 연돌로 공급되도록 한다.

## 3. 통풍계통 동특성 분석

### 3-1. 동특성 분석 절차

통풍계통의 운전 중 가장 흔한 사고는 발전소가 정격출력으로 정상운전 도중에 유인통풍기 또는, 승압통풍기가 강제 정지되는 상황으로, 이때, 평형통풍이 이루어지지 않으면 보일러 노내의 급격한 압력변동을 유발하게 되고 결국에는 발전소가 비상 정지하게 된다. 따라서, 탈황설비를 추가 설치하여 기존 설비를 변경하게 되는 경우 새로운 설비인 승압통풍기 및 제어기를 설계하기 위해 보일러 통풍계통의 동특성을 분석하여야 한다.

#### 3-1-1. 해석시나리오

##### (1) 분석사례 1 - 승압통풍기 2대 강제정지

분석사례 1은 발전소가 정격출력으로 정상운전 도중에 승압통풍기 2대가 강제 정지되는 상황에서의 보일러 통풍계통의 동특성을 분석한다. 발전소가 정격출력에서 정상운전 중 승압통풍기가 강제 정지되면 보일러 노내 압력의 비정상적 상승으로 인한 발전소의 비상정지를 방지하기 위하여, 우회댐퍼를 열어 연소가스가 탈황설비를

지나지 않고 연돌로 바로 배출되도록 한다. 승압통풍기가 강제 정지되면 흡입측 격리댐퍼는 닫히면서 우회 댐퍼가 열리고 통풍계통에는 유동 조건의 변화로 야기되는 순간적인 변화인 천이현상이 발생하게 되는데, 이때 발생하는 천이현상은 우회댐퍼의 작동 시간에 영향을 받게 되므로 우회댐퍼의 작동시간에 대한 통풍계통의 동적특성을 분석한다.

(2) 분석사례 2 - 승압통풍기 1대 강제정지

분석사례 2는 발전소가 정격출력으로 정상운전 도중에 승압통풍기 1대가 강제 정지되는 상황에서의 보일러 통풍계통의 동특성을 분석한다. 사례 2의 분석을 통해 승압통풍기 1대가 강제 정지되는 경우에 우회댐퍼의 개폐여부 및 연동되는 유인통풍기의 강제정지 여부를 분석한다.

(3) 분석사례 3 - 유인 통풍기 1대 및 승압통풍기 1대 강제정지

분석사례 3은 발전소가 정격출력으로 정상운전 도중에 유인통풍기 1대 및 승압통풍기 1대가 강제 정지되는 상황에서의 보일러 통풍계통의 동특성을 분석한다. 유인통풍기 1대가 강제 정지되면 연동된 승압통풍기도 자동 정지되는 경우에 분석을 통해 보일러 노내 압력의 응답 특성을 분석한다.

3-1-2. 통풍계통의 해석모델

통풍계통의 해석모델을 설정하고 분석하고자 하는 목적은 통풍계통의 특성을 해석하기 위한 것으로 탈황설비는 연소가스 유로의 체적, 압력손실 및 열손실 효과를 고려한 덕트로 모델링 하였다. MMS에서 사용되는 통

풍계통의 모델식은 미국의 전기연구소에서 개발된 모델식을 사용하고 있으며, 이 모델에 대한 검증은 이미 확인되어 상용화되었다. 통풍계통의 해석 모델은 문채주, 남해곤<sup>11)</sup>에 의해 상세히 제시되었고, 이 해석 프로그램을 이용한 연구결과 보고서도 다양하게 제시되어 본 논문에서는 생략하였다<sup>11)</sup>. 이 계통은 Fig. 2에서의 같이 보일러, 압입통풍기, 공기에열기, 유인통풍기, 승압통풍기 및 댐퍼 등 공기/연소가스 계통과 절탄기, 과열기 및 재열기 등의 물/증기 계통으로 구성된다. 보일러는 연료를 연소시켜 발생한 열을 이용하여 급수를 가열하여 과열증기를 발생시키고 또한, 고압터빈을 구동시킨 증기를 재차 가열하여 준다. 본 분석은 급수 및 증기조건을 분석하기 위한 것이 아니므로 보일러에서 발생한 열을 제거하기 위한 목적으로 급수제어밸브 전단, 과열증기 출구, 재열기 입구 및 출구를 경계조건으로 처리하였다. 보일러에 내재된 재열기 및 과열기는 여러 개로 분리되어 있으나 본 모델에서는 등가의 전열 특성을 갖는 하나씩의 기기로 간략화 하였다. 보일러 드럼의 수위를 일정하게 유지시키기 위하여 드럼 수위와 수위 설정치의 오차를 비례적분방식을 사용하여 급수제어밸브의 개도 신호로 변환하도록 하였다.

보일러로 공급되는 연료는 석탄과 중유가 중량비로 각각 70% 및 30%씩 공급되므로 이들의 혼합물에 대한 조성 및 발열량을 경계조건으로 입력하였다. 연소용 공기는 2대의 압입통풍기에 의해 2대의 공기에열기를 지나, 일부는 미분기를 거쳐 1차 공기로 나머지는 2차 공기로 보일러에 공급된다.

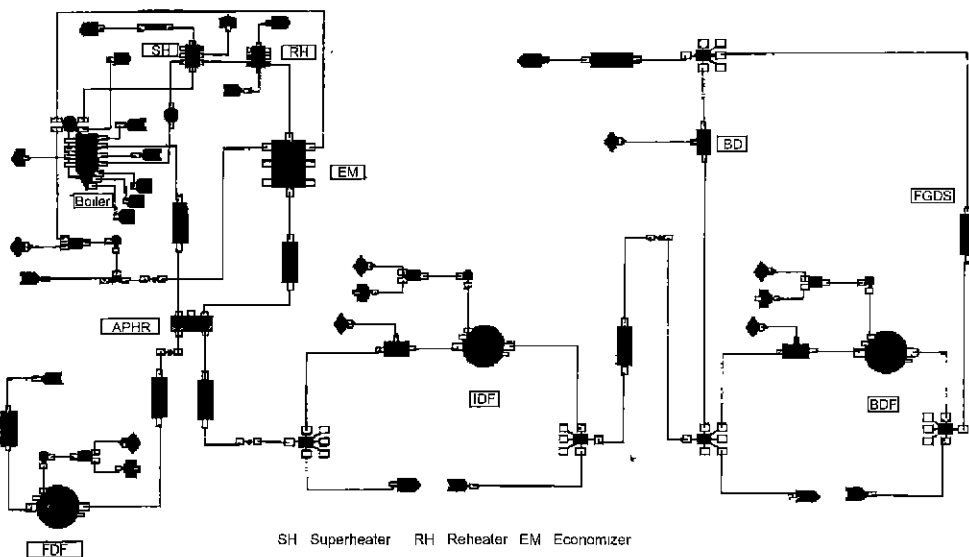


Fig. 2. Boiler draft system model structure.

그러나, 본 모델에서는 1차 공기에 의한 연료의 특성 변화를 연료의 경제조건을 작성할 때, 이를 이미 반영하였으므로 1차 및 2차 공기를 보일러로 직접 공급하도록 하였으며, 2대의 입입통풍기 및 공기예열기를 1대로 간략화 하였다. 입입통풍기의 입구 베인(vane)은 연소공기 유량 설정치와 공급유량의 오차를 비례적분 방식으로 변환하여 제어하도록 하였다.

보일러에서 발생된 연소가스는 2대의 유인통풍기에 의해 공기예열기 및 전기집진기를 지나 유인통풍기로 유입되며, 승압통풍기로 가압되어 탈황계통으로 보내지는데, 전기집진기 모델은 기기의 체적을 덕트에 포함시켜 유량특성을 모델링 하였다. 2대의 유인통풍기는 동일한 특성을 갖고 있으므로 1대로 특성을 모델하고, 1대는 경제조건으로 처리하였다. 보일러 노내 압력을 조절하는 유인통풍기의 입구 베인은 노내 압력 설정치와 노내 압력의 오차를 비례적분 방식으로 변환하여 제어하도록 하였다.

2대의 승압통풍기는 동일한 특성을 갖고 있으므로 1대로 모델 하였으며 1대는 경제조건으로 처리하였다. 승압통풍기의 입구 베인은 유인통풍기 출구 압력 설정치와 출구 압력과의 오차를 비례적분 방식으로 변환하여 제어하도록 하였다. 보일러 통풍시스템의 동특성 분석을 위한 모델은 Fig 2와 같다. 분석 사례 1은 승압통풍기 2대가 강제 정지되는 경우이므로 승압통풍기 및 탈황설비를 생략하고 경제조건으로 처리하였다.

3-1-3. 초기평형상태

작성된 모델에 기기 및 운전 자료를 입력하여 정격출력조건에서의 초기 평형상태를 설정하였으며 초기 평형상태를 이용하여 제어기를 미세 조정하였다.

3-2. 통풍계통의 해석

3-2-1. 분석사례 1 - 승압통풍기 2대 강제정지

(1) 분석조건

승압통풍기가 강제 정지되면서 승압통풍기 흡입측 격리댐퍼가 폐쇄되고, 우회댐퍼가 열리게 된다. 설계시 고려한 격리댐퍼 및 우회댐퍼의 구동시간은 각각 40~45초 및 25~30초이다. 승압통풍기가 정지되더라도 회전속도는 관성효과 및 유인통풍기에 의한 윈드밀(windmill) 효과로 인하여 서서히 저하되기 때문에 탈황설비로 가는 가스의 유량변화는 승압통풍기의 정지보다는 격리댐퍼의 폐쇄에 더 큰 영향을 받게된다.

댐퍼의 개폐로 인한 유량의 변화는 댐퍼의 전폐시간 동안 일정하지 않고 급격하게 변화하는 구간이 있다. 따라서 본 해석에서는 격리댐퍼의 전폐 시간을 가장 짧은 구동 시간인 40초 대신에 이 값의 1/4인 10초를 사용하기로 한다. 이러한 경제조건의 가정은 실제 발생하는 현상에 비해 가혹한 조건이므로 해석결과의 적용에 다소

간의 여유를 제공하여준다.

격리댐퍼에 비해 우회댐퍼는 전폐시간이 길면 길수록 통풍계통의 천이현상이 심하게 일어나므로 가장 긴 전폐시간인 30초를 기본으로 하여 ±5초인 25초 및 35초에 대한 경우를 분석한다.

천이기간 중에 보일러에 공급되는 연료의 양은 일정한 것으로 가정하며 분석시간 0초에서 승압통풍기를 강제 정지시켜 계통의 응답특성을 분석하였다.

(2) 분석 결과

분석시간 0초에 승압통풍기가 강제 정지되면서 승압통풍기 흡입측에 있는 격리댐퍼가 바로 닫히기 시작하여 분석시간 10초에 완전히 닫히게 되고, 우회댐퍼는 승압통풍기 강제정지와 동시에 열리기 시작하여 25초, 30초 및 35초에 각각 완전히 열리게 된다. 격리댐퍼(YIDB로 표기) 및 우회댐퍼(YBYD로 표기)를 시간에 따른 개도각으로 표현하여 Fig. 3에 나타냈다.

댐퍼의 개폐로 인한 댐퍼를 통과하는 유량의 변화는 Figs. 4, 5와 같다. 격리댐퍼 통과 유량은 우회댐퍼 전폐시간에 관계없이 거의 유사한 변화를 보인다. 우회 댐퍼를 통과하는 유량은 격리댐퍼 전폐 후 3~5초 내에 최대량이 되었다가 감소하기 시작하여 우회 댐퍼가 완전히 개방되기 전에 일정하게 수렴되는데 우회댐퍼 전폐시간이 길수록 최대 유량에 도달하는 시간 및 정상상태

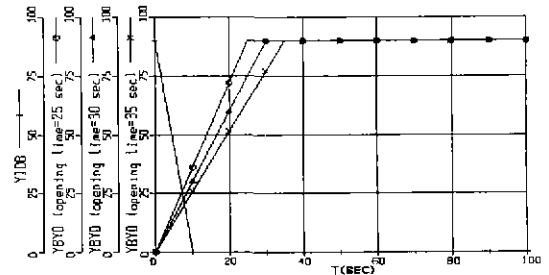


Fig. 3. Positions of isolation and bypass damper (deg.).

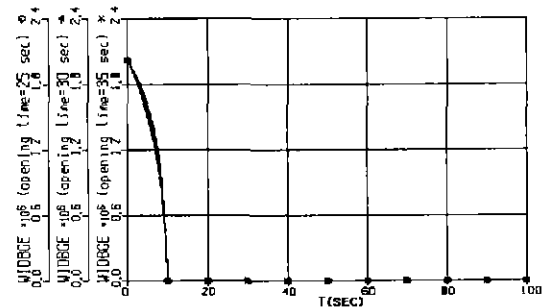


Fig. 4. Mass flow of bypass damper (lb<sub>m</sub>/hr).

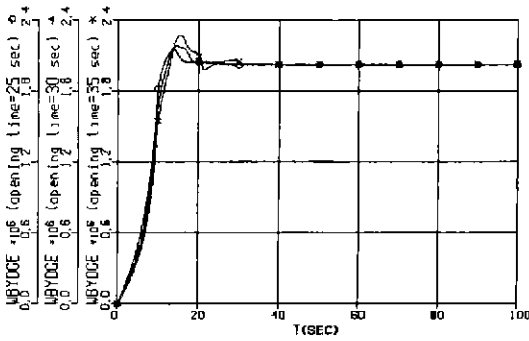


Fig. 5. Mass flow of isolation damper ( $lb_m/hr$ ).

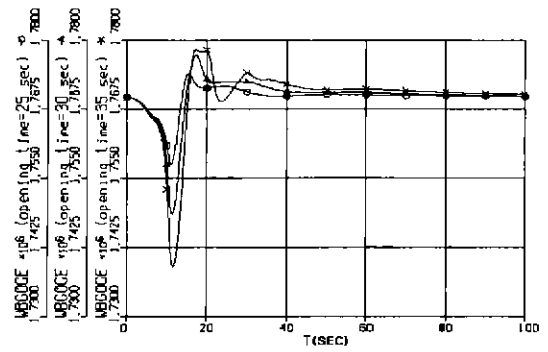


Fig. 8. Boiler flue gas flow ( $lb_m/hr$ ).

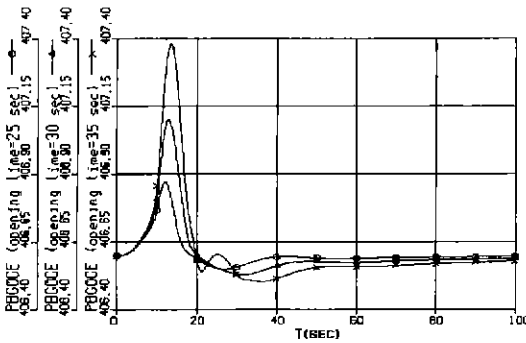


Fig. 6. Boiler furnace pressure ( $in_H_2O$ ).

Table 1. Increased furnace pressure of boiler due to the opening times of bypass damper.

Bypass Damper Full Opening Time (sec)	Increased Boiler Furnace Pressure ( $mmH_2O$ )
25	5.6
30	12.6
35	19.8

회복하면서 노내 압력 및 연소공기 공급량이 정상상태로 수렴하게 된다. 우회댐퍼 전개시간에 따른 보일러의 압력 상승은 Table 1과 같다.

로 도달하는 시간이 늦어진다.

보일러 노의 압력, 연소공기 유량 및 연소가스 유량은 Figs. 6, 7, 8과 같다. 승압통풍기의 강제정지로 인하여 배출되는 연소가스의 유량이 감소하면서 노내 압력이 상승하고 이로 인하여 연소공기의 유입량도 감소하게 된다. 유량 감소 및 압력상승은 격리댐퍼가 완전히 닫히는 분석시간 10초 이후인 12~13초까지 지속되나 우회덕트가 열리고 보일러 압력에 연동된 유인통풍기의 통풍량 증가로 인하여 연소가스 배출량이 원상을

이 때의 유인통풍기 승압량 및 유량의 변화는 Figs. 9, 10과 같다.

승압통풍기가 강제 정지되고 격리댐퍼가 닫히면서 탈황설비로 가는 연소가스의 유량은 급격하게 감소하고, 우회 댐퍼가 열리면서 일부 유량이 우회 댐퍼를 통하여 빠져나가고, 댐퍼의 개폐시간 차이로 인하여 유인통풍기 후단의 압력이 상승하여 유인통풍기의 토출 유량은 감소하고 승압량이 증가하게 된다 이러한 현상은 격리 댐퍼가 완전히 닫히는 분석시간 10초 이후까지 지속된다. 그러나, 우회댐퍼가 계속해서 열려 있고, 보일러 노내 압력 제어시스템이 동작하여 유인통풍기의 통풍량을 증가

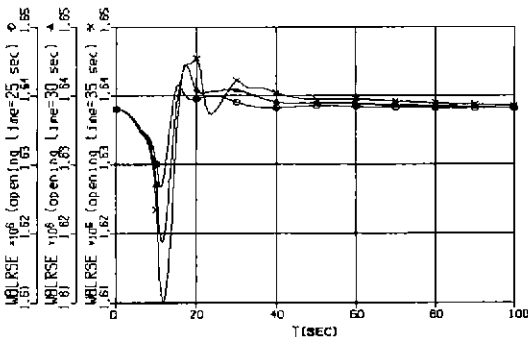


Fig. 7. Boiler combustion air flow ( $lb_m/hr$ ).

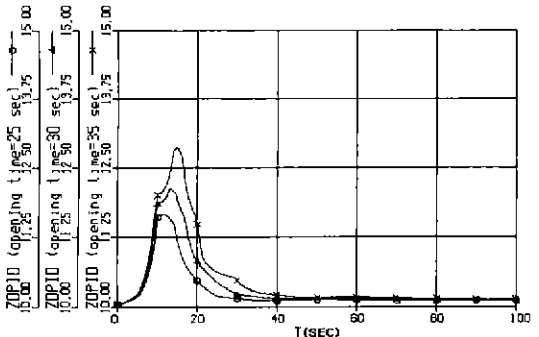


Fig. 9. Flue gas pressure of IDF outlet ( $in_H_2O$ ).

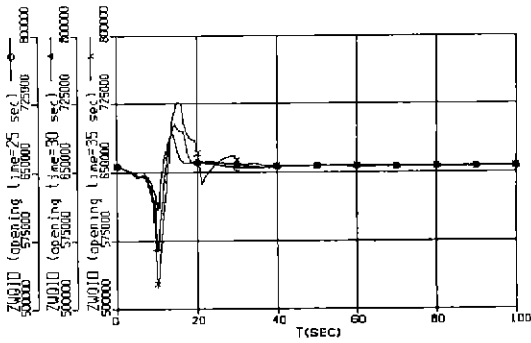


Fig. 10. Flue gas flow of IDF outlet (ft<sup>3</sup>/hr).

하도록 조절한다. 따라서, 유인통풍기 승압량 및 토출유량이 증가하고, 보일러 노내 압력은 감소하면서 통풍계통은 정상 상태로 수렴하게 된다. 압입통풍기의 승압량과 토출 유량은 Figs. 11, 12와 같으며 유인통풍기와 유사한 거동을 보여준다.

승압통풍기 강제정지로 인하여 발생하는 통풍계통의 천이현상을 우회댐퍼 전개시간이 25초, 30초, 35초인 경우에 대하여 분석하였다. 분석 결과, 설계시 고려한 25~30

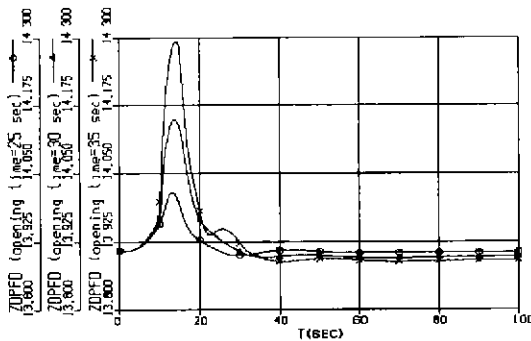


Fig. 11. Combustion air pressure of FDF (inH<sub>2</sub>O).

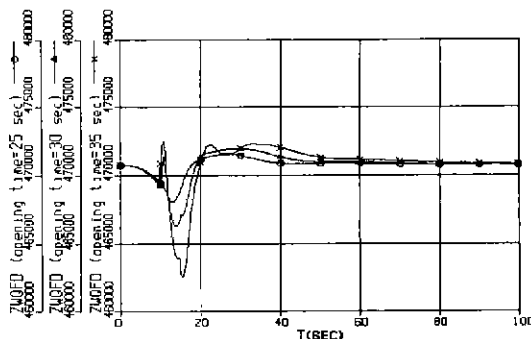


Fig. 12. Combustion air flow of FDF (ft<sup>3</sup>/hr).

초의 우회댐퍼 전개 시간은 승압통풍기가 강제로 정지될 때, 통풍계통의 커다란 동요 없이 정상상태로 수렴함을 알 수 있다. 승압통풍기가 강제로 정지된 이후 12~13초 뒤에 최대의 천이현상을 보이지만 우회댐퍼가 작동하면서 천이현상이 완화되고 50초에서 천이현상이 ±2%로 통풍계통은 안정을 회복한다.

3-2-2. 분석사례 2 - 승압통풍기 1대 강제정지

(1) 분석 조건

정상운전 중 승압통풍기 1대가 강제 정지되면 연동된 유인통풍기가 강제 정지되고 우회댐퍼가 작동하게 되는데, 유인통풍기 2대가 계속 운전되고 우회댐퍼도 열리지 않는 상황에서 보일러 노내 압력 변동 및 연소가스 유량 변화에 대한 특성을 분석한다.

분석을 위한 경계조건으로 앞에서 검토한 사례 1의 격리댐퍼를 통한 유량의 변화를 감안하여 강제 정지되는 승압통풍기 측 유량이 승압통풍기 강제정지 후 10초만에 0으로 선형적으로 변화하도록 하였다. 이 천이기간 중에 보일러에 공급되는 연료의 양은 일정한 것으로 가정하며 분석시간은 0초에서 승압통풍기 1대를 강제 정지시켜 계통의 응답특성을 분석한다.

(2) 분석 결과

분석시간 0초에 승압통풍기 1대가 강제 정지되면서 강제 정지된 승압통풍기 유량은 감소하고 이로 인하여 유인통풍기 토출 압력은 Fig. 13과 같이 증가하게 된다.

유인통풍기의 압력 증가는 승압통풍기의 승압량을 감소시키고 승압펌프의 흡입측 제어댐퍼의 개방위치를 증가시켜 운전되는 승압통풍기의 출구 유량이 증가하게 된다. 따라서, 계속 운전되는 승압통풍기와 강제 정지된 승압통풍기의 유량변화는 Fig. 14와 같다(강제 정지된 승압통풍기의 유량은 설계 경계조건임).

운전되는 승압통풍기 유량 변화를 살펴보면 정상운전 중 9175 m<sup>3</sup>/min(324027 cfm)의 유량에서 강제 정지되는 승압통풍기의 유량이 0이 되는 10초에는 약 17700 m<sup>3</sup>/

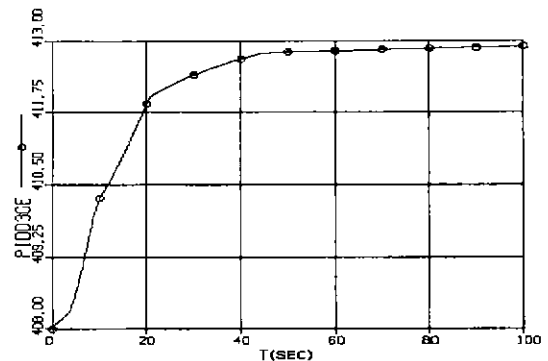


Fig. 13. IDF outlet pressure (inH<sub>2</sub>O).

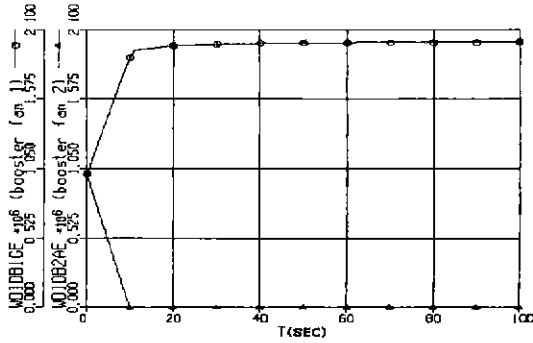


Fig. 14. Mass flow of IDBF outlet (lb<sub>m</sub>/hr).

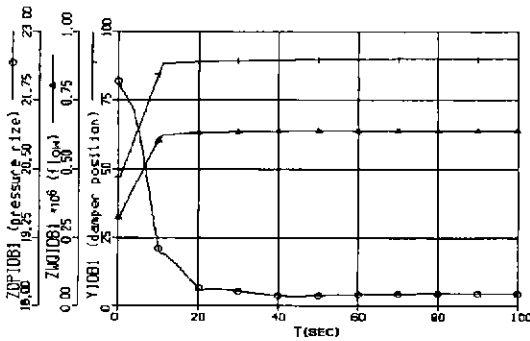


Fig. 15. Outlet pressure (inH<sub>2</sub>O), flue gas flow (cfm) and damper opening (deg.) of IDBF.

min(625000 cfm)으로 증가하게 되며, 이는 Fig. 15에 나타나 있다. 이 유량은 승압통풍기의 테스트 블럭 유량인 12465 m<sup>3</sup>/min(440200 cfm)의 142%에 해당하는 유량으로 승압통풍기 1대가 강제정지 되면 계속 운전되는 승압통풍기는 수 초 내에 정상운전 영역에서 벗어남을 알 수 있다. 따라서 10초 이후의 자료는 의미가 없게 된다.

보일러의 압력변화는 Fig. 16과 같으며, 전체적인 압력 상승량은 15 mmH<sub>2</sub>O 정도이나 계속 운전되는 승압통풍

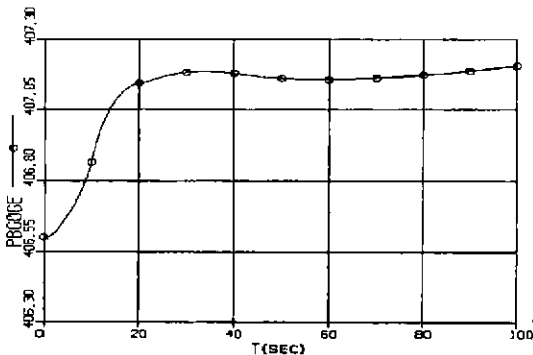


Fig. 16. Boiler furnace pressure (inH<sub>2</sub>O).

기가 운전이 불안정하거나 운전 불능인 영역에서 가동되면 압력 상승량은 더 클 것으로 예측된다. 따라서 승압통풍기가 강제 정지되면 연동되는 유인통풍기를 동시에 강제 정지시켜 보일러 부하를 감소시키는 것이 바람직하다.

3-2-3. 분석사례 3 - 유인 통풍기 1대 및 승압통풍기 1대 강제정지

(1) 분석 조건

정상운전 중 유인통풍기 1대가 강제 정지되면 연동된 승압통풍기도 강제 정지된다. 따라서, 유인통풍기 1대 및 승압통풍기 1대가 동시에 강제 정지되고 우회밸브가 열리지 않는 상황에서 보일러 노내 압력 변동 및 연소가스 유량 변화를 모의하였다.

정계조건으로 앞에서 검토한 분석사례 1의 격리밸브를 통한 유량의 변화를 감안하여 강제 정지되는 유인통풍기 및 승압통풍기 측 유량이 통풍기 강제정지 후 10초만에 0으로 선형적으로 변화하도록 하였다.

천이기간 중에 보일러에 공급되는 연료의 양은 일정한 것으로 가정하며 분석시간 0초에서 유인통풍기 1대 및 승압통풍기 1대를 강제 정지시켜 통풍계통의 응답특성을 분석한다.

(2) 분석 결과

분석시간 0초에 유인 통풍기 1대 및 승압통풍기 1대가 강제 정지되면서 강제 정지된 통풍기 유량은 감소하고 계속 운전되는 통풍기의 유량은 증가하게 된다. Fig. 17은 계속 운전되는 유인통풍기와 강제 정지된 유인통풍기의 유량 변화가 도시되어 있고, Fig. 18은 계속 운전되는 승압통풍기와 강제 정지된 승압통풍기의 유량 변화가 도시되어 있다.

보일러 노내 압력은 유인통풍기 및 승압통풍기 1열이 강제 정지된 후 약 20초 정도까지 가파르게 상승하다가 상승률이 둔화되어 약 30초 이후는 일정한 상승률을 보인다(Figs. 17, 18 참조).

강제정지 후 20초에서의 압력상승량은 약 64 mmH<sub>2</sub>O (Fig. 19에서 약 2.5 inH<sub>2</sub>O)이며 30초에서의 압력상승량

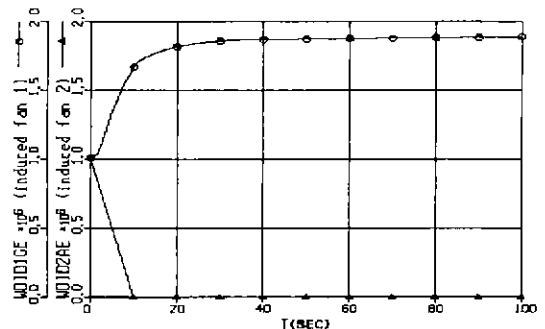


Fig. 17. Mass flow of IDF outlet (lb<sub>m</sub>/hr).

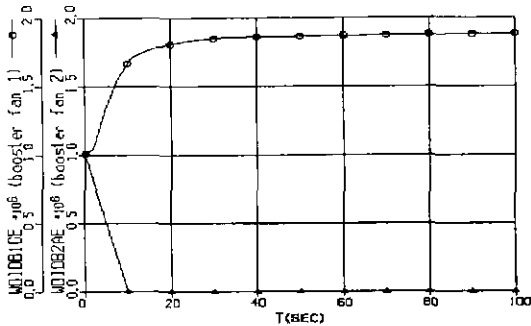


Fig. 18. Mass flow of IDBF outlet (lb<sub>m</sub>/hr).

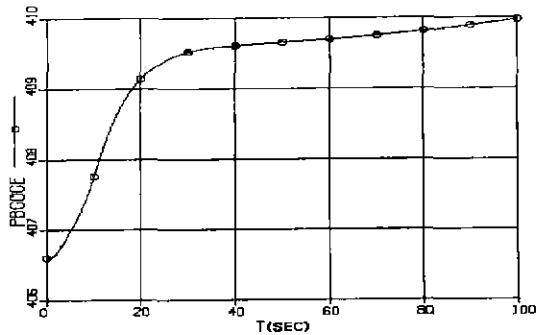


Fig. 19. Boiler furnace pressure (inH<sub>2</sub>O).

은 74 mmH<sub>2</sub>O(Fig. 19에서 약 2.9 inH<sub>2</sub>O) 정도이다. 보일러에 유입되는 연소 공기 및 유출되는 연소 가스의 변화는 Fig. 20과 같다.

Fig. 21에서 유인통풍기의 유량변화를 살펴보면 정상 운전 중 가스온도 135°C 기준으로 9289 m<sup>3</sup>/min(328046 cfm)의 유량에서 유인통풍기 강제 정지 후 약 30초에는 약 17140 m<sup>3</sup>/min(605300 cfm) 된다. 이 유량은 유인통풍기의 정상상태 유량의 185%에 해당하는 유량이다. Fig. 22의 운전되는 유인통풍기 유량 변화를 살펴보면 정상

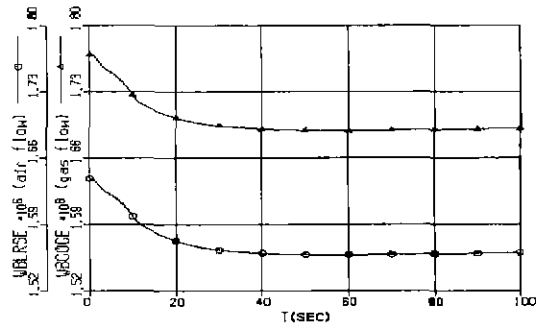


Fig. 20. Mass flow of combustion air and flue gas of boiler (lb<sub>m</sub>/hr).

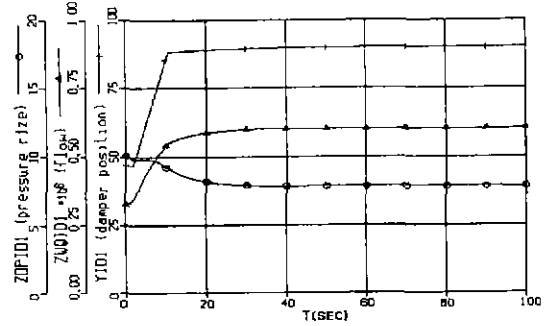


Fig. 21. Outlet pressure (inH<sub>2</sub>O), flue gas flow (cfm) and damper opening of IDF (deg.).

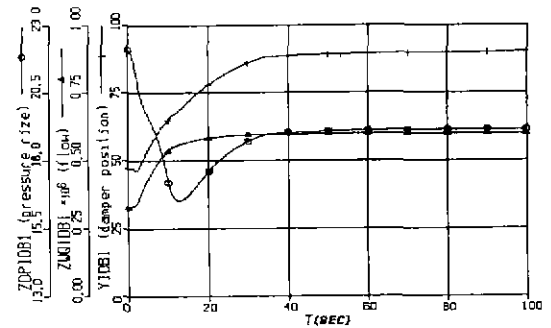


Fig. 22. Outlet pressure (inH<sub>2</sub>O), flue gas flow (cfm) and damper opening of IDBF (deg.).

운전 중 9175 m<sup>3</sup>/min(324027 cfm)의 유량에서 승압통풍기가 강제 정지된 후 약 33초에는 약 25000 m<sup>3</sup>/min(881600 cfm)으로 증가하는데 이 유량은 승압통풍기의 테스트 블럭 유량인 12465 m<sup>3</sup>/min(440200cfm)의 200%에 해당하는 유량으로 계속 운전되는 승압통풍기는 수십 초 내에 정상운전 영역에서 벗어남을 알 수 있다.

유인통풍기 및 승압통풍기 1열이 강제 정지되는 경우 보일러 노 압력이 정상상태를 유지하기 위해서는 유인통풍기 유량이 185%, 승압통풍기 유량이 200%에 도달하여 실제유량을 초과하므로 이 상태로 운전은 불가능하다. 따라서, 발전소가 100% 부하를 유지하는 것은 불가능할 것으로 판단되며, 보일러 노 압력의 과도한 상승 및 통풍기의 불안정한 운전을 막기 위해서는 승압통풍기 유량이 100%를 유지하도록 보일러의 부하를 최소한 약 50% 줄여야 한다.

#### 4. 결 론

최근, 화력발전소의 보일러나 산업용 대형 보일러의 연소가스에 대한 분진이나 유황성분의 배출에 대한 환경



기준이 강화됨에 따라 설비의 개조가 요구되고 있다. 분석사례 1은 승압통풍기 2대가 강제 정지되는 경우로써 승압통풍기가 강제 정지되고 승압통풍기 흡입측 격리밸브가 폐쇄되어, 우회 밸브가 열리게 된다. 분석 결과, 설계시 고려한 25~30초의 우회밸브 전개 시간은 승압통풍기가 강제 정지될 때, 통풍계통의 커다란 동요 없이 새로운 안정상태로 수렴함을 알 수 있었다. 승압통풍기가 강제로 정지된 12~13초 후에 최대의 불안정현상을 보이지만 우회밸브가 작동하면서 불안정현상이 완화되고 50초 전후로 통풍계통은 안정을 회복한다.

분석사례 2는 승압통풍기 1대가 강제 정지되는 경우로써 정상운전 중 승압통풍기 1대가 강제 정지되면 연동된 유인통풍기가 강제 정지되고 우회밸브가 작동하게 되며, 이 경우 유인통풍기 2대가 계속 운전되고 우회밸브도 열리지 않는 상황에서 보일러 노내 압력 변동 및 연소가스 유량 변화에 대한 특성을 분석하였다. 보일러의 전체적인 압력 상승량은 15 mmH<sub>2</sub>O 정도이나 계속 운전되는 승압통풍기가 운전이 불안정하거나 운전 불가능 영역에서 작동되면 압력 상승량은 더 클 것으로 예측된다. 따라서 승압통풍기가 강제 정지되면 연동되는 유인통풍기를 동시에 강제 정지시켜 보일러 부하를 감소시키는 운전이 바람직하다.

분석사례 3은 승압통풍기 1대와 유인통풍기 1대가 강제 정지되는 경우로써 정상운전 중 유인통풍기 1대가 강제 정지되면 연동된 승압통풍기도 강제 정지된다. 따라서, 유인통풍기 1대 및 승압통풍기 1대가 동시에 강제 정지되고 우회밸브가 열리지 않는 상황에서 보일러 노내 압력 변동 및 연소가스 유량 변화에 대한 특성을 분석하였다. 유인통풍기 유량은 정상상태 유량의 185%에 해당하는 유량이 되고, 운전되는 유인통풍기 유량은 승압통풍기가 강제 정지된 후 약 33초 후에 승압통풍기의 테스트 블럭 유량의 200%에 해당하는 유량이 되어 계속 운전되는 승압통풍기는 수 십 초 이내에 정상운전 영역에서 벗어남을 알 수 있다.

유인통풍기 및 승압통풍기 1열이 강제 정지되는 경우 보일러 노 압력이 정상상태를 유지하기 위해서는 유인통풍기 유량이 185%, 승압통풍기 유량이 200%에 도달하여 설계유량을 초과하므로 이 상태로 운전은 불가능하다. 따라서, 발전소가 100% 부하를 유지하는 것은 불가능할 것으로 판단되며, 보일러 노 압력의 과도한 상승 및 통풍기의 불안정한 운전을 막기 위해서는 승압통풍기 유량이 100%를 유지하도록 보일러의 부하를 최소

한 약 50% 줄여야 한다. 이를 구현하기 위해서는 보호회로를 여기에 적합하도록 설계변경 하여야 한다. 즉, 유인통풍기 및 승압통풍기 1열이 정지되는 경우에 보일러 보호회로가 압입통풍기 1열을 정지시키고, 부하가 50%로 유지되도록 자동으로 작동되는 런백(Runback) 회로를 구성하거나, 운전원이 수동으로 운전할 수 있도록 자동/수동 전환회로를 설치하고, 잦은 부하변동이 상존할 때 그 운전방법을 유사시에 즉각 변동할 수 있는 기구나 조직운영이 바람직할 것이다.

## 후 기

본 논문은 1998학년도 목포대학교 기성회 학술(정책)연구비에 의하여 연구되었습니다.

## 참고문헌

1. 문채주, 남해곤· “화력발전소 공기/가스시스템의 성능 개선을 위한 노내압 해석에 관한 연구”, 한국 에너지 공학회 논문지, 제3권, 2호, pp. 207-217 (1994).
2. 홍용표, 권병영, 윤명렬· “발전소 동적 성능분석에 관한 연구”, 한국 에너지공학회 논문지, 제2권, 1호, pp. 28-37 (1993).
3. 박중섭, 고용상, 정장규, 김은기, 노태선· “MMS-RTC 코드를 이용한 영광 5, 6호기 유출계통의 과도현상 해석”, 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집 pp. 363-368 (1998).
4. 남해곤: “전력플랜트 모델링”, 대한전기학회지, 제8권, 3호, pp. 4-11 (1989).
5. Yee, N.S.: “A Modular Approach to Modeling Power Plants”, Proceedings of American Power Conference, pp. 1-4 (1990)
6. Framatome Technologies: “MMS Theory and User Manual”, Framatome Technologies (1993).
7. Framatome Technologies: “MMS Model Builder User Guide”, Framatome Technologies (1993).
8. 한전기술: “발전소 동적성능 분석(MMS 전산프로그램 연구)”, 한국전력기술주식회사 (1990).
9. 한전기술: “DSS 발전소 동적성능 분석(터빈 바이패스 계통)”, 한국전력기술주식회사 (1991).
10. 한전기술: “DSS 발전소 동적성능 분석(500 MW급 DSS 발전소 Modeling)”, 한국전력기술주식회사 (1992)