

産業用 보일러 效率改善을 위한 自動制御

윤 양 균* · 박 귀 태** · 김 석 진***

*동력자원연구소 선임연구원

**고려대 공대 전기공학과 교수

***고려대 공대 전기공학과 박사과정

1. 서 론

1970년대 세차례 석유파동이라 국내 에너지 수급에는 많은 변화가 일어 났으며 그 중 가장 큰 변화는 석유 에너지의 가격상승에 있다고 할 수 있겠다. 일시적인 추세라고 보고있으나 다행하게도 현재는 석유값이 인하되고 있으나 언제 어떻게 석유파동이 재현되리라고는 아무도 예측할 수 없으므로 지속적 에너지 절약정책은 계속 필요하다고 할 수 있다. 그러나 우리의 경제성장 속도에 비추어 볼 때 절대적 에너지 수요는 급성장 할 수 밖에 없으므로 에너지 수급정책과 더불어 에너지 효율개선정책에 대하여서는 필수적으로 함께 수행되어야만 하겠다.

우리나라는 수입석유에너지의 약 60%를 많은 종류의 보일러가 소비하고 있다. 이는 국내 총에너지의 약 25%에 해당되는 양이며 특히 산업용 보일러는 산업체의 필수적인 장치이기는 하나 효율측면에 있어서는 아직도 개선의 여지가 많이 남아 있는 실정이다. 특히 국내 산업용 보일러의 운전효율은 선진국에 비해 약 5~10% 정도가 낮게 운전되고 있는 실정이다. 이는 보일러 사용특성상 부하변동이 심하여 이로 인하여 空燃比 조절의 필요성이 요구되어야 함에도 불구하고 부득이 재래식 방법의 운전을 하는 경우가 일반적이다. 이러한 에

너지 효율개선의 측면에서 운전효율향상뿐만 아니라 안전 및 수명연장에 기여할 수 있는 산업용 보일러의 자동제어장치의 대하여 그 개요 및 동향을 알아보기로 한다.

2. 산업용 보일러 자동제어장치의 개요

2.1 연소제어계

보일러 연소제어장치는 증기수요 및 부하변동에 추종되는 증기압력을 검출하고 규정압력과 서로 일치되도록 연료공급량과 연소공급량을 자동적으로 제어하는 피이드백 시스템으로 이루어져 있다. 즉 보일러로부터 발생되는 증기압력이 허용증기압력 범위내에서 항상 유지되도록 압력요소와 출력요소가 평형을 이루도록 구성되어 있다. 증기압력에 따른 보일러안전을 위하여서는 증기안전밸브 및 인터록장치를 사용하는 것이 바람직하다.

그림 1은 보일러 증기압력을 제어하는 연소제어 시스템의 일례로써 수관식 보일러의 경우 증기압력을 검출하여 보일러 연소실내로 공급되는 연료량을 제어하며 이와 동시에 연료량에 따른 최적 공기량이 공급되도록 제어하고 있다.

2.2 수위제어계

보일러 드럼수위가 규정치보다 높을 경우에는 발생증기의 질이 저하되어 과열관중에 스케일이 형성되는 등

註) 본 원고의 공동저자들의 한사람인 윤양균 연구원께서 숙환으로 지난 4월말 타계하셨습니다. 본 원고를 유고로 남기고 가신 그분께 조의를 표하며 삼가 명복을 빕니다. (편수위원, 편수직원 일동)

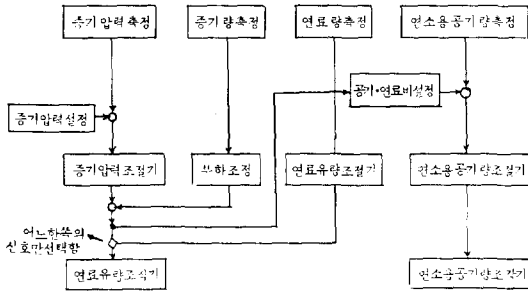


그림 1. 연소제어시스템

의 문제가 발생하며, 규정치보다 낮을 경우에는 보일러 관수의 순환성이 저하되고 전열관의 과열로 인한 부식이나 과열 등의 위험이 발생하기 때문에 보일러 드림 수위를 일정하게 유지시키기 위한 수위제어 시스템이 필요하게 된다. 수위제어방식은 검출요소에 따라 單要素式, 2要素式, 3要素式으로 분류된다. 수위제어는 비교적 간단한 경우가 많지만 실질제어에 있어서는 까다로운 점이 많이 있으므로 제어시스템의 선택은 보일러 용량과 기타 외관조건에 알맞는 것을 선택하는 것이 바람직하다.

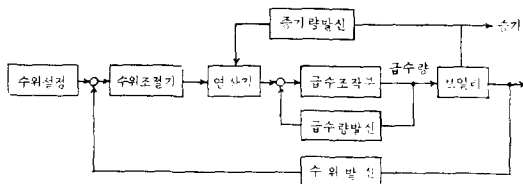


그림 2. 3요소식 수위제어계

그림 2는 3요소식 수위제어계로서 수위, 증발량과 함께 급수량도 검출하는 방식이다. 제어편차가 작은 중용량 보일러에는 이 3요소식이 거의 사용되고 있지 않으나 수위제어편차가 크고 수위시정수가 작은 고압대용량 또는 부하변동이 크고 제어편차가 작은 20t/h 이상의 수관식 보일러에 많이 적용되고 있다.

2.3 보조기기제어

보일러의 主制御시스템인 연소제어계와 수위제어계 이외에 보조기기제어로서 연료공급시스템의 증유압력제어, 증유가열온도제어, 증유탱크 출구온도제어, 증유최소유량제어, 공기예열기 온도제어, 급수펌프 과열방지 최소유량제어, 탈수기 수위제어 및 감압감온제어장치 등이 있다. 이와 같은 제어장치는 보일러 본체 자동제어장치

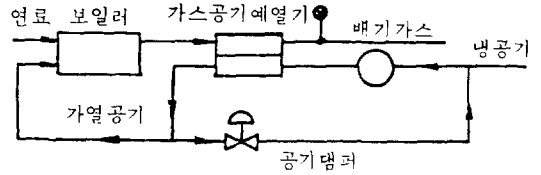


그림 3. 공기예열기 온도제어계

의 보조적인 것으로 필수적인 것은 아니나 보일러 성능 향상 및 효율적 연소를 위하여 보일러 용량과 부하변동 및 사용조건에 따라서 선택부착시키는 것이 바람직하다. 이들 보조기기 제어계의 일반적 특성은 제어계가 제어 대상에 근접설치되어있고 제어계 구성이 단순하므로 제어동작은 P, PI 동작만으로 만족하는 경우가 많다.

그림 3은 보조기기 제어계의 하나인 공기예열기 온도 제어계로써 공기예열기 출구온도가 露點이하로 내려가지 않도록 유지시켜 SO₃의 생성을 억제시키는 역할을 한다.

2.4. 안전제어계

보일러 사고는 크게 나누어 저수위로 인한 과열사고와 증기압력상승으로 인한 과열 및 미연소연료의 축적으로 인한 폭발사고·등을 들 수 있다. 이러한 보일러 사고를 방지하고 안전운전을 위해서는 위험한 상태에서 보일러가 가동 및 운전되지 않도록 하는 안전제어장치가 필요하다. 이러한 장치로는 증기압력을 제한시키는 압력제한기와 저수위상태를 방지하기 위한 저수위 안전장치와 있으며 미연소연료에 의한 사고를 방지하기 위한 저수위 안전장치가 있으며 미연소연료에 의한 사고를 방지하기 위한 화염검출장치 등이 있다. 이 이외에도 증유온도와 압력에 이상이 발생하였을 경우 이를 검출하는 안전장치와 모터과열을 방지하기 위한 과전류 릴레이 등이 있다. 이와 같은 안전장치는 보일러의 자동기동장치와 시퀀스회로에 연결되어 사용되거나 또는 수동 및 별개의 시퀀스로 작동되기도 한다.

그림 4는 안전제어계의 일종인 화염검출장치에 사용되는 Cds 셀의 구조도이다. 화염검출기는 자동점화시 착화가 이루어지지 않거나 운전중 어떠한 원인에 의해 失火되는 경우, 단시간내 화염검출기 신호에 의해 공급연료를 차단시키는 장치이다. 이 경우 연료차단은 빠를수록 좋으며 失火된 후에는 포스트퍼지시키고 송풍기 및 버너모터 등이 정지된 후 리셋시키지 않으면 버너가 재기동하지 못하도록 시퀀스회로를 구성하여야 한다.

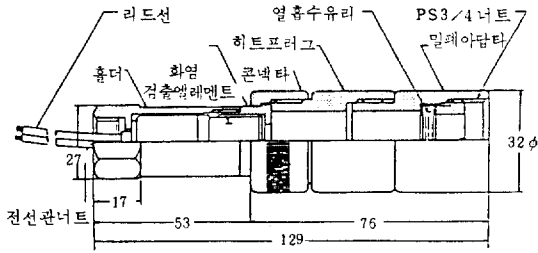


그림 4. CdS셀의 구조

2. 5. 기타 제어계

1) 브로우다운 제어계

브로우다운 제어계는 보일러수를 지속적인 증발로 인하여 증가되는 용해고용물과 수처리기에 의해 생성되는 침전물 및 슬러지를 보일러수와 함께 외부로 배출시키고 새로운 용수를 공급함으로써 보일러 수명과 효율을 향상시키는 장치이다. 브로우다운량의 결정은 보일러 관수의 전기전도도를 이용하여 고형물의 양을 계산하는 방법과 급수중의 염화물농도를 측정함으로써 구하는 방법이 있으며 그림 5는 고형량에 따른 자동연속 브로우다운장치의 일례이다.

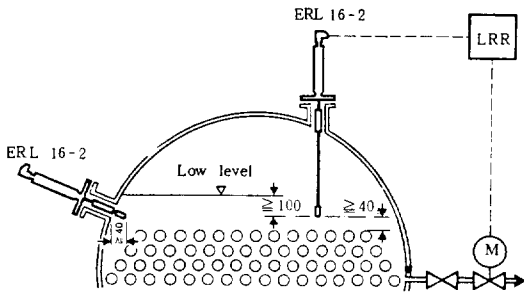


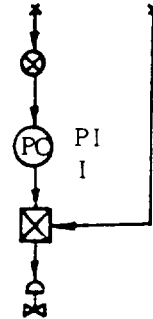
그림 5. 자동연속 브로우다운 장치

2) 노내압 제어계

노내압이 높으면 노내의 연소가스가 외부로 배출되거나 버너화염의 안정화를 방해하며 노내압이 높을 경우, 외부공기가 유입되어 과잉공기에 의한 열손실과 유해배출가스가 증가하게 된다. 따라서 평형통풍을 행하고 있는 보일러는 이러한 현상을 방지하기 위하여 노내압을 대기압보다 조금 낮게 유지시키도록 제어하고 있다.

노내압은 시정수 및 소비시간이 대단히 작으므로 I 및 PI 동작을 많이 사용하고 있다. 그림 6은 노내압 제어계의 하나로써 급격한 외란이 발생하는 경우, 부하보정을 신속히 하기 위하여 공기량, 증발량, 연료공급량의 부하신호를 노내압신호에 가산하도록 구성되어 있다.

노내압 부하신호



IDF 또는 FDF 제 2 종

그림 6. 노내압 제어계

3) 슈우트브로어 제어계

슈우트브로어는 전열면에 부착되어 있는 재, 그을름, 슬러그 등의 오물을 제거시켜 보일러 운전시 열효율을 향상시키는 장치이다. 슈우트브로어의 제어 방식으로는 분무매체의 공급에서 슈우트브로어의 자동기동, 분사, 정지까지 자동적으로 행하여지는 제어방식이 많이 채택되고 있으며 이 경우 안전을 도모하기 위한 각종 인터록장치 등이 조합되어 사용된다.

3. 효율개선을 위한 연소제어장치의 최근동향

3. 1. 저과잉공기 연소제어장치

보일러의 열손실을 분류하면 배기가스에 의한 것, 방열손실에 의한 것, 미연소연료에 의한 것 등으로 나눌 수 있다. 그 중에서도 가장 큰 손실은 배기가스에 의한 것으로서 저과잉공기 연소제어장치는 이러한 배기가스 손실을 저감시키기 위한 방법의 하나이다.

그림7은 공기의 과잉도와 열효율의 상관관계를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 배기가스에 의한 열손실은 연소공기량에 비례하지만 미연소손실은 연소공기량과 반비례하게 된다. 따라서 배기가스에 의한 열손실과 미연소손실의 합이 가장 적은 저과잉공기 연소영역은 보일러 열효율이 가장 높은 최적영역이 됨을 알 수 있다.

저과잉공기 연소제어장치가 필요한 또 하나의 이유는 과잉산소에 의해 발생하는 무수황산과 애시드 스머트(Acid Smut)의 생성을 방지함으로써 보일러의 저온부식을 방지하는 데 있다. 애시드 스머트는 배기가스 露点부근에서 황산화물과 그을름이 흡착됨으로써 유황성분의 검정이 생성되

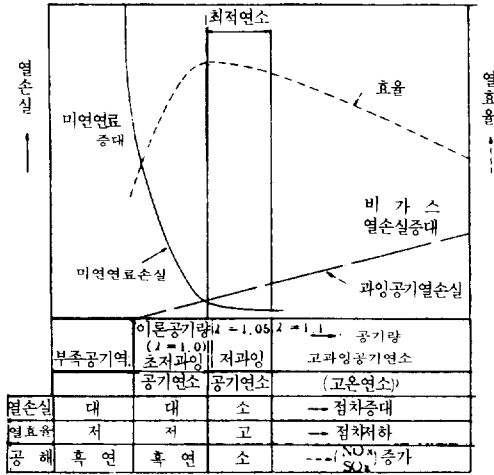


그림 7. 공기과잉도와 열효율

는 것을 말하며 이 생성물이 보일러 열손실을 증가시키는 요인이 되고 있다.

1) 가스센서를 부착한 연소제어장치

공기의 과잉도는 배기가스의 성분을 측정함으로써 알 수 있다. 그림8은 공기 및 연료과잉에 따른 배기가스 성분의 분포를 나타내고 있으며 이 중 가장 많이 이용되고 있는 성분은 O₂이다.

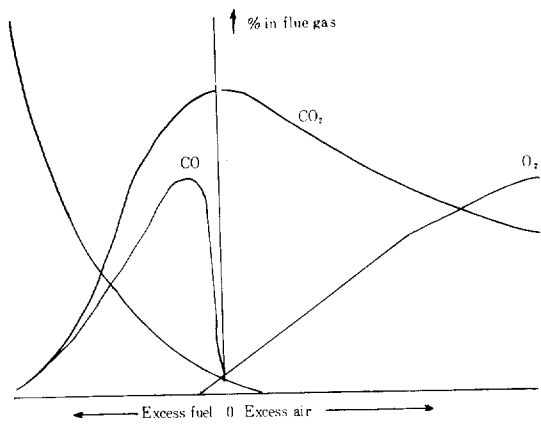


그림 8. 공기 연료 과잉도와 배기가스성분

O₂센서를 이용한 연소제어장치는 그림9와 같이 연속적으로 배기가스 중의 산소농도를 분석측측하고 그 신호에 의해 자동적으로 空燃比를 제어하는 방법이다. O₂센서로는 전기 화학적 센서와 산화집코니움으로 구성된 반도체 센서가 있으나 후자가 정확도 및 내구성에 있어서 더 양호하다.

O₂조절기는 최적연소에 필요한 O₂량과 측정된 O₂값을 비교한 후 그 편차를 PI동작으로 보정해 줌으로써 보일러 부하별로 연료량과 공기량이 항상 일정비율을 유지하도록 구성되어 있다.

이 연소제어장치는 지금까지 사용되고 있는 공연비 제어 방식 중 가장 오차가 작은 방식이기는 하나 장치가 고가이므로 소형보일러의 경우 비경제적이 될 수 있다. 그리고 이 장치만으로는 충분한 저과잉공기 연소제어가 곤란하며 버너 및 火爐의 구조도 병행 개조시켜야 한다는 결점을 갖고 있다. 또한 O₂센서의 반응속도가 느려 부하변동이 급격하고 변동폭이 큰 보일러에는 적용시키기 곤란한 점도 갖고 있다

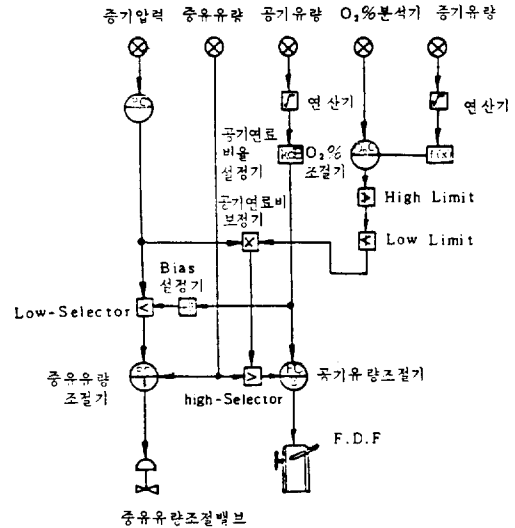


그림 9. O₂센서를 이용한 연소제어계

2) 구동모터 회전수제어에 의한 연소제어장치

지금까지 펌프나 팬 등의 제어에 있어서는 일반적으로 모터를 정속운전시키고 댐퍼나 밸브조절에 의해 필요유량을 제어하였다. 그러나 이러한 방식은 저하부시, 전기에너지 손실이 많고 댐퍼에 의한 소음문제 때문에 최근에는 구동모터의 회전수 제어방식이 많이 채용되고 있다. 회전수 제어방식으로 대표적인 것은 유체카플링이나 와전류카플링에 의한 방식과 가변전압 가변주파수 (VVVF)제어방식이 있으며 일반적으로 VVVF방식을 많이 사용하고 있다. 그러나 VVVF 제어방식만을 단독으로 사용하여 전체풍량을 제어하는 것은 효과적이지 못하므로 공기댐퍼와 함께 병용하는 것이 바람직하다. 또한 VVVF 특성상 전력절감효과는 부분부하 운전시에 현저하며 일반적으로 고부하로 운전되는 보일러에는 효과가 적다.

FDF의 VVVF제어는 과잉공기에 의한 열손실을 줄이고 사용전력을 절감시키기 위하여 그림10과 같이 O₂센서와 V-VVF를 조합사용하는 경우가 많다. 이 때 연소에 필요한 공기량은 開度發信器와 연결된 공기댐퍼에 의해 보정받게 된다.

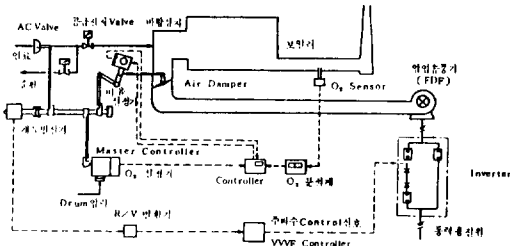


그림10. O₂센서와 VVVF의 결합

3. 2. 마이크로 컴퓨터를 이용한 연소제어장치

최근 컴퓨터산업의 급속한 발달과 함께 마이크로 컴퓨터는 아주싼 값으로 공급되고 있다. 이에 따라 중소형 보일러에의 마이크로 컴퓨터 적용이 가속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 보일러 자동제어기능에 마이크로 컴퓨터를 적용시키면 정확한 제어가 가능하여 운전효율을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 운전인력을 절감시킬 수 있다. 또한 마이크로 컴퓨터에 각종 기능을 첨가시키면 연소효율, 증발량, 연료소비량의 연산 이외에도 급수능력, 보일러수의 농축상태, 보일러의 기동회수, 운전시간등의 계산도 가능하게 되며 이 이외에도 이상부분의 진단 및 경고기능도 가능하게 된다.

1) 제어계의 하이브리드화 방식

소형보일러의 경우 상기와 같은 O₂센서나 VVVF제어 등을 적용시키기에는 비경제적 요소가 많다. 따라서 기존 제어 방식에 마이크로 컴퓨터만 첨가시킨 것이 보일러의 하이브리드화이다.

종래 보일러의 제어계는 연소, 수위, 증기압력 제어부의 센서로서 화염검출기, 액면전극계, 압력스위치와 안전장치로서 모터 열용동릴레이, 배기가스 써모스태트 등으로 구성되어 있다. 여기에 별도 센서를 추가시키지 않고 보다 고도의 판단 및 처리를 수행할 수 있도록 마이크로 컴퓨터만 부착시켜 하이브리드화 시킨다.

그림11은 이러한 종류의 일례로서 각종 기능을 조직화시킨 마이크로 컴퓨터 CPU기판의 블록도이다. CPU기판의 구성은 MPU, ROM, RAM, DI, DO, SIO, 전원회로 등으로 구성되어 있으며 모두 기판상에 모듈화시켰다. 각 블록은 서로 간섭을 일으키지 못하도록 배치시켰으며 특히 버너 정화용 스파크에 의한 고레벨의 고주파 노이즈 영향을 받지 않도록 DI, DO, 전원회로부 설계시 내노이즈성을 강화시켰다. RAM은 충전배터리로 백업시켜 장기 정전시에도 약 2주간 기억된 내용을 유지시키도록 하였다. 또한 CPU자체가 정확한 수정발진기로 작동되므로 정확한 동작타이밍을 얻을 수 있어 신뢰성을 높일 수가 있다.

2) 테이블 데이터 처리방식

보일러 연소조건의 전영역에 걸쳐서 뎀퍼각도와 오일밸브 각도와와의 최적관계를 수량적으로 구한 후, 이 결과에 따라서 전지 (3.6V)

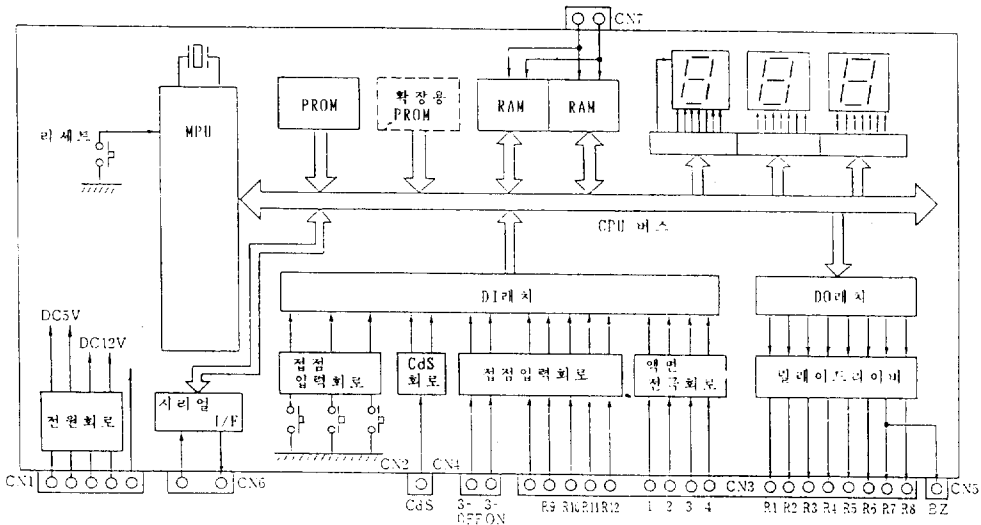


그림 11. CPU기판 블록도

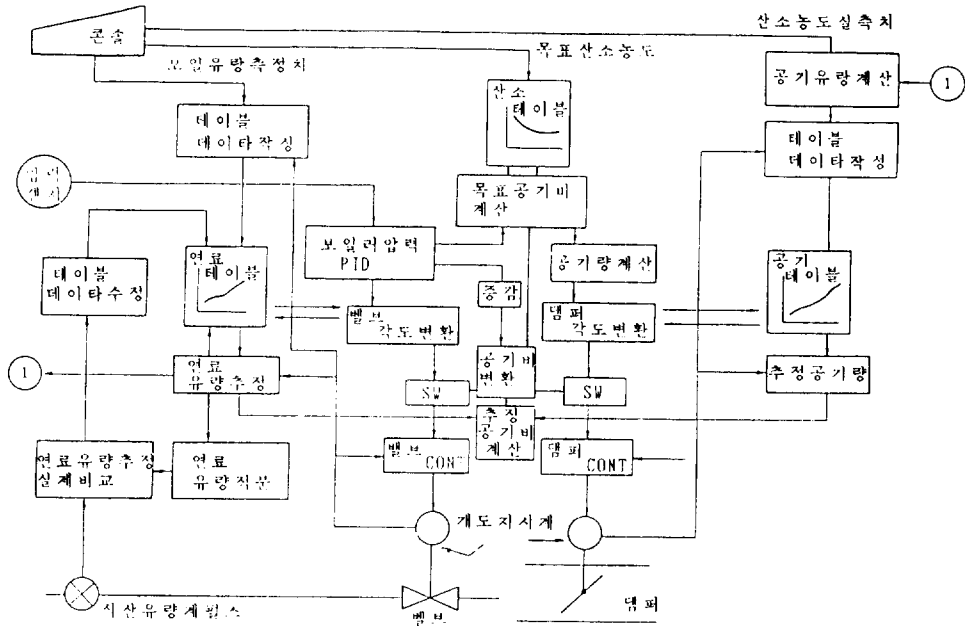


그림 12. 테이블 데이터 처리 방식에 의한 최적연소제어계

보일러 연소상태를 최적으로 제어할 수가 있다.

그림12은 이러한 제어계의 일종으로써 이 제어계는 배기 가스 압력발신기, 연료밸브 제어모터, 댐퍼 제어모터, 적산 유량계로 구성되어 있다. 콘트롤러는 배기가스 압력이 일정하게 유지되도록 연료유량을 제어함과 동시에 배기가스중의 O₂농도가 설정치에 유지되도록 공기유량을 제어함으로써 보일러 연소상태는 항상 최적상태를 유지하게 된다.

이 기능을 발휘하기 위해서는 댐퍼각도와 공기량, 연료밸브 각도, 연료유량과의 관계를 미리 계산 입력시키고 부하에 따른 각각의 角度가 이에 따라 추종되도록 하는 테이블 데이터 처리 방식을 채용하였다. 연료유량과 연료밸브 각도와의 관계를 나타내는 연료테이블, 공기량과 댐퍼각도와의 관계를 나타내는 공기테이블 및 배기가스 O₂농도와 연료유량을 나타내는 O₂테이블은 모니터 프로그램에 의해 작성되도록 구성되어 있다.

이 장치는 기존설비의 대폭적인 개조가 필요없다는 특징이 있으나 댐퍼각도와 공기유량, 연료밸브 각도와 유량사이에 각각 일정한 관계가 있다는 것을 전제로 하였기 때문에 동일각도에 있어서 실질유량이 불안정한 경우에는 이를 보정시켜 주어야 한다.

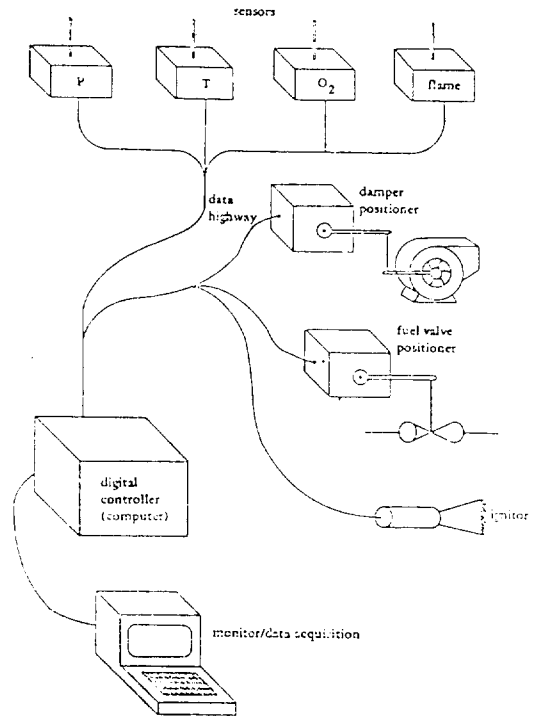


그림 13. 보일러 DDC 시스템

4. DDC에 의한 보일러 자동제어

보일러 자동제어중 가장 최근 개발된 것이 직접디지털제

어(Direct Digital Control)방식이다. DDC는마이크로 컴퓨터기술을 기초로 하여 개발된 장치로서 소프트웨어에 의

해 보일러의 단일루우프 제어제인 연소제어, 수위제어, 보조 기기제어, 안전제어 및 기타 제어 등을 종합적으로 자동제어 할 수 있을 뿐 아니라 모니터링 및 데이터 수집기능까지 가능하다.

그림13은 전형적인 보일러 DDC 제어계로써 디지털 콘트롤러는 각종 센서, 스위치 및 위치신호를 주기적으로 받아들이고 이들 데이터를 컴퓨터에 전송시킨다. 또한 콘트롤러는 컴퓨터에 입력된 프로그램에 의해 각종 조작부를 제어시킨다.

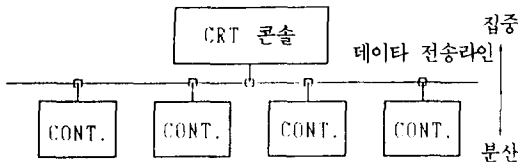


그림 14. 분산제어구조

보일러용 DDC는 대부분 분산제어방식을 채택하고 있다. 분산제어는 간단히 말해서 「제어는 분산, 정보는 집중」시키는 구조로서 그림14와 같이 분산된 각 콘트롤러는 전송로를 거쳐 중앙컴퓨터에 연결되어 있다. 각 콘트롤러는 위험분산, 기능분산등을 위하여 분산되어 있으나 효율적인 집중감시조작을 위하여 중앙컴퓨터에 모든 정보가 집중되도록 구성되어 있다.

또한 신뢰성향상을 위하여 다음과 같은 기능을 대부분 보유하고 있다.

1) 에러검출기능

모든 데이터는 송신측에서 에러코드를 삽입시키고 수신측에서 이 데이터를 반송시켜 에러코드가 정확히 전송되었는지를 체크한다. 이 과정에서 이상이 있는 데이터는 방출시키며 지정치보다 에어울이 높을 경우 통신버스는 자동적으로 백업시스템에 전환되도록 구성되어 있다.

2) 자기진단기능

각 콘트롤러는 자기진단 프로그램이 내장되어 있어 일초에 수회 간격으로 자기구성품을 진단하게 된다. 진단부위는 전원부, A/D 및 D/A 콘버터, CPU, 메모리 등이다. 또한 자체에 연결된 통신버스상태 및 기기에 대해서도 체크하게 된다.

3) 보조메모리

백업용 보조메모리는 불휘발성 메모리소자로 구성되어 있으며 정상상태에도 중요 프로세스 데이터를 수록하고 있다

가 기기 이상발생시 또는 정전시에 주메모리를 백업시켜주는 역할을 수행한다.

4) 점차적인 정지기능

비상사태 발생시 모든 기능이 일시적으로 정지되는 것을 방지하는 프로그램으로써 우선순위에 따라 주요기능을 순차적으로 정지시킨다. 따라서 제어기능을 상실한 상황에서도 보일러의 파괴현상을 방지할 수 있다. 또한 자동과 수동모드 사이의 전환시에도 급격한 과도현상을 방지할 수 있게 된다.

5. 결론

산업용 보일러의 에너지 사용량은 이론적으로 현재보다 약 20% 이상을 절감시킬 수 있으나 이는 보일러 시스템의 완벽한 최적설계를 전제로 한 것이며 실제적으로는 운전상태의 개선만으로도 약 5~10%정도의 효율향상을 이룰 수가 있다. 이러한 운전효율의 향상을 위해서는 자동제어장치의 부차이 절대 필요하며 이를 뒷받침하기 위하여 다음과 같은 점들이 개선되어야 할 것이다.

- (1) 열관리 자동제어장치 부착을 의무화시킬 수 있는 법적 제도 및 기준의 개정.
- (2) 국내 보일러 자동제어장치 생산업체로 하여금 국산화 개발을 촉진시킬 수 있도록 자금 및 기술지원.
- (3) 보일러 자동제어장치의 효과에 대한 지속적 홍보와 교육.

참 고 문 헌

- 1) 보일러 자동장치 국산화 기술개발연구(I), 「동력자원연구소」, 1987. 12
- 2) 보일러의 에너지절약 기술현황, 「산업연구원」, 1985. 3
- 3) User's Guide to Automatic Boiler Control, 「Naval Civil Engineering Lab.」, 1984. 11
- 4) 마이크로 컴퓨터에 의한 보일러의 하이브리드화, 「에하라技報」, No. 127 p51-p56
- 5) 테이블 데이터 처리방식에 의한 소형보일러의 공연비제어, 「計裝」, 1983. 4. p116-p118
- 6) FDF가변속화에 의한 소형보일러의 저O₂제어, 「同上」, p119-p121
- 7) 보일러 자동제어의 최근동향, 「加工技術」, 1983. 3. p13-p17
- 8) 자동제어 핸드북, 「OHM社」p581-p605