

# 발전소 효율 향상 이론개발을 위한 조사 연구 (4)

김중보·김진·김종현  
한국중공업주식회사

## 2. 본론

### 다. 효율 향상을 위한 개선요인 분석

#### (2) 제어 및 프로세스 개선

화력발전소 효율 향상을 위한 중요한 방법 중의 다른 하나로 보다 나은 프로세서의 개선을 들 수 있다. 그림 8은 효율 개선을 위한 프로세서의 개선 방안을 나타냈다.

이러한 프로세서 개선을 위해서는 아주 잘 설계되고 최적화된 제어 시스템이 필요하며, 현대 제어이론에 근거한 진보된 제어 시스템의 적용이 필수적이라 할 수 있다.

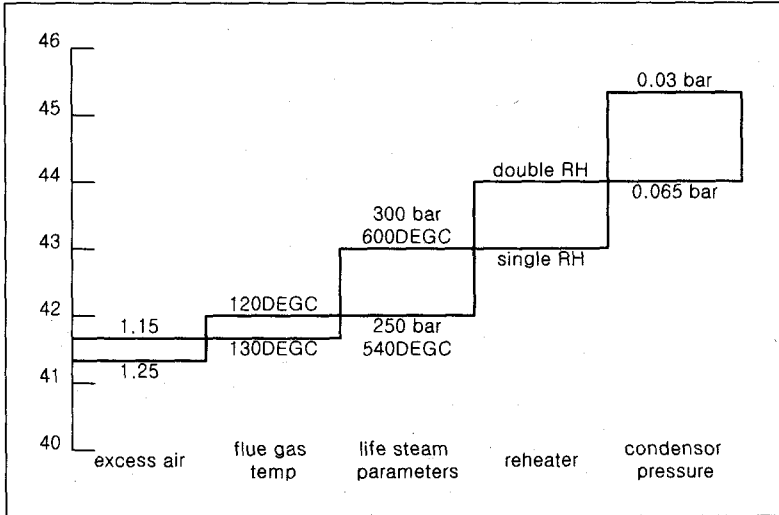
#### (가) 응축 정지(Condensate Stop) 이론 도입

계통에 병입된 발전소에 갑작스런 정지사고가 일어나는 등 전체 계통주파수에 변화를 초래하는 상황이 발생하면 이로 인해 계통주파수 조절에 연결되어 있는 발전

소들의 출력이 증가되는 수가 있다. 독일의 전력공급자 연합체인 DVG에서는 이러한 상황 발생시 우선 조치 사항으로 연료투입을 증가하여 발전소 출력을 올리기보다는 가능한 저장된 에너지를 사용하여 순시적인 과도상태를 조절하도록 권고하고 있으며, 상황 발생 5초에 2.5%, 그 후 25초 내에 2.5%의 부하를 증가시킬 것을 규정하고 있다. 이러한 DVG의 요구사항에 일반적으로 터빈 조절 밸브를 신속하게 열어서 보일러 내에 저장된 증기를 이용하여 순시적으로 발전출력을 증가시킬 수 있다. 그러나 이러한 조절(Throttling)은 항상 에너지 손실을 수반하므로 터빈 조절밸브의 조절을 최소화하고 주파수변화에 능동적으로 대처하여 순시적인 발전출력을 증가시키는 방법으로 응축정지(Condensate Stop)이론이 개발되었으며 수차례의 시험을 통해 증명되었다.

응축정지 이론은 순시적으로 발전출력을 증가시키는 방법으로서 저압 가열기 쪽으로 추가되는 증기량을 줄여 저압 터빈 내의 전체 증기량을 증가시키는 방법을 이용

◆◆ 발전소 효율 향상 이론개발을 위한 조사연구(4) ◆◆



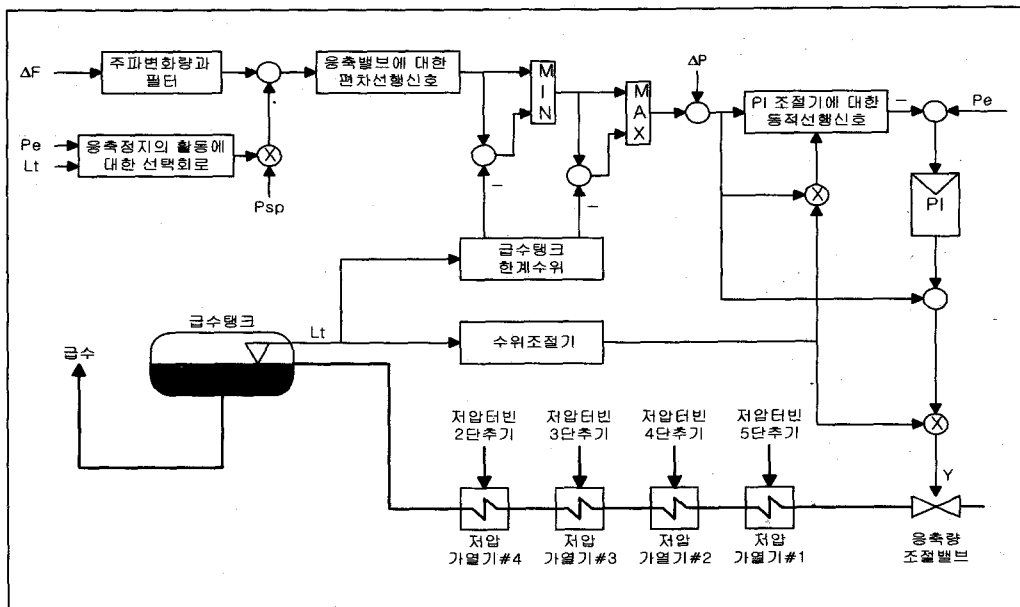
〈그림 8〉 프로세서 개선 효과

의 급수가 중단되므로 전체 열평형은 그대로 유지되며 보일러는 현재의 부하를 유지하게 되어 급수탱크의 수위는 줄어들고 수위 조절의 한계 범위내에서 순시적인 발전출력의 증가 상태를 유지할 수 있다. 이러한 응축정지 이론은 주파수 조절 뿐만 아니라 점차 부하 조절에도 응용되고 있다.

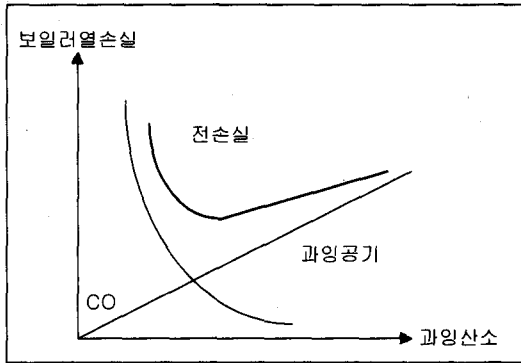
현재 이러한 응축정지 이론을 국내 발전소에 적용하기 위해서는 그림 9와 같이 기계적으로 응축량 조절밸브를 추가로 설치하고 응축정지 이론 구현을 위한 제어회로

하고 있다. 그림 9와 같이 응축량 조절밸브를 닫으면 각 저압 가열기에서는 급수와 추기 증기 사이에 열교환이 발생하지 않으므로 응축이 정지되며 포화상태가 되어 저압 터빈으로부터의 추기가 중단된다. 그러면 급수탱크로

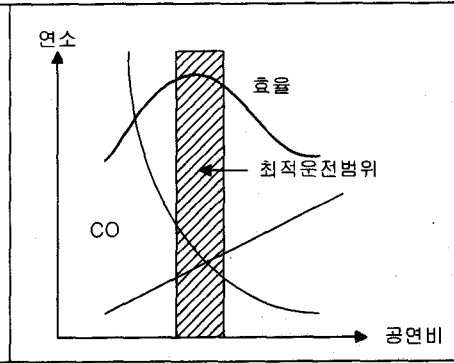
를 삼입하는 것만으로 가능하다. 독일에서는 이러한 응축정지 이론을 실제 550MW급 발전소에 적용하여 GJ의 에너지 당 약 9,000원 기준으로 연간 발전소당 4억 5천만원의 연료 절감 효과가 있음을 보고하고 있다. 현



〈그림 9〉 응축정지(Condensate Stop) 제어회로 개념도



〈그림 10〉 과잉 공기와 CO비에 따른 손실



〈그림 11〉 최적운전범위

재는 이러한 이론을 보다 광범위한 부하 조절에 이용하기 위하여 600MW급 초임계압 관류 보일러형 화력발전소에서 실행중이다.

이러한 응축정지 이론은 발전소의 운전 효율을 높이는 데 기계적인 변경이 아닌 새로운 제어 아이디어를 도입함으로써 적은 비용으로 개선효과를 기대할 수 있다는 데 의의가 있다. 국내 500MW급 초임계압 화력발전소에서 대부분의 경우 자체 제어회로에 주파수 조절 기능을 가지고 있으므로 이러한 이론의 도입 전망이 밝으며 적용가능성의 심도있는 검토가 필요하다.

(나) 연소 최적화

과잉 공기는 연소에 있어서 보일러를 폭발로부터 보호하고 불완전연소를 방지하는 측면에서 필요한 요소이지만 에너지 운용 측면에서는 손실로 작용한다. 과잉 공기를 최소화하여 운전하게 되면 보일러 효율을 향상시킬 수는 있지만 이로 인하여 불완전 연소시 발생하는 CO (일산화 탄소)의 증가로 인한 손실을 유발시킬 수 있으므로 최적의 운전점에서 연소가 이루어지기 위해서는 과잉공기와 CO량의 적절한 조율이 필요하다. 그림 10과 11에서는 연소시 발생하는 과잉 공기와 CO의 상관관계를 전손실과 효율을 기준으로 보여주고 있다. 현재 국내 화력발전소에서는 산소량 분석기의 측정 신호를 제어하여 과잉공기량을 조절하고 있는 상태이며 아직까지 CO

분석기의 사용은 실용화되어 있지 않다.

다만 현재 시운전중인 하동 #1, 2호기와 삼천포 #5, 6호기에서 CO 분석기의 사용을 시도하고 있으며 태안 #1, 2에서는 계기의 정밀도 및 측정위치, 제어회로의 적정성 등의 이유로 사용되지 않고 있다. CO 측정을 제어에 이용하는 방법으로는 CO Monitoring에 의한 수동 조절과 제어회로에 삽입한 자동조절이 있으며 0.1%~1%의 효율개선 효과가 있음이 증명되고 있다. 과잉공기량과 CO를 줄임으로써 얻어지는 잉여 에너지(절약가능)는 대략 다음 식으로 구할 수 있다.

- 과잉 공기량 감소시 잉여 에너지량

$$E_a = W_a * C_p * (t_2 - t_1)$$

W<sub>a</sub> : 감소 과잉 공기량(kg/h)

C<sub>p</sub> : 비열(kcal/°C)

t<sub>1</sub> : 인입통풍기 입구측 공기 온도

t<sub>2</sub> : 집진기 출구측 공기 온도

- 연소가스 중(공기에열기출구측) CO 감소시 잉여 에너지량

$$E_f = W_f * CO_{\text{감소량}} * 1(\text{kmol}) / 28(\text{kg}) * 67,700(\text{kcal/kmol})$$

W<sub>f</sub> : 연소가스량(kg/h)

CO 감소량 : [PPM]

(Note)  $CO + O_2 \rightarrow CO_2 + 67,700(\text{kcal/kmol})$

◆..발전소 효율 향상 이론개발을 위한 조사연구(4)◆

예) 500MW 부하에서 CO 500 PPM 감소시 잉여 에너지량

$$E_f = 2,019,304 \text{kg/h} * 500 / 1,000,000 * 1 \text{kmol} / 28 \text{kg} * 67,700 \text{kcal/kmol} = 2.825 \text{MW} (\text{약 } 0.23\% \text{의 연료량})$$

석탄 화력발전은 중유나 가스를 연료로 사용하는 발전소에 비해 과잉CO 배출로 인한 손실이 발생할 가능성이 크며 운전부하 조절 등 과도적인 상태보다 오래도록 일정부하를 지속할 때 CO량을 줄일 수 있어 효율 개선의 효과가 크다(표 6 참조).

〈표 6〉 500MW급 관류 보일러형 화력발전소 연소 프로세스 데이터

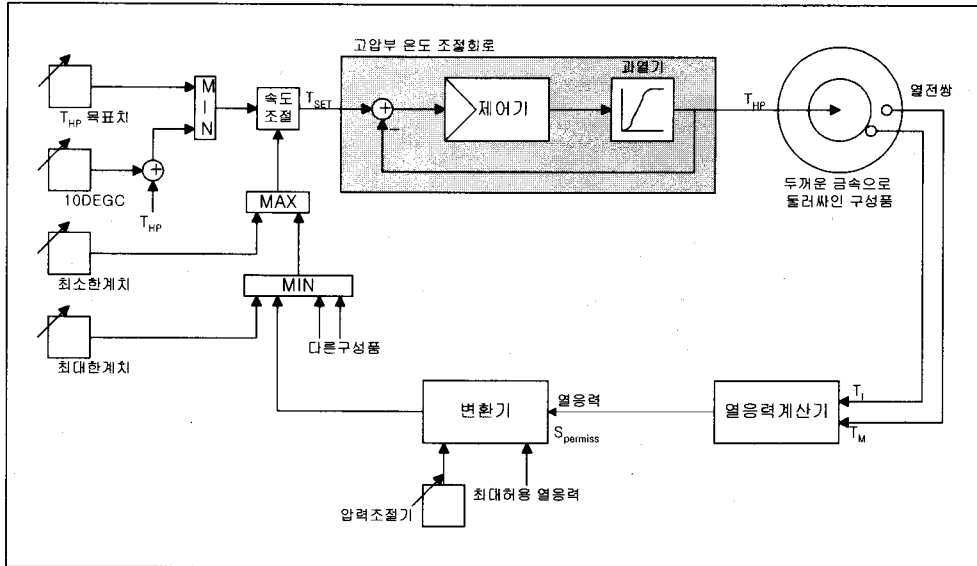
부하(MW)	550	500	375	250	150
일차공기량(kg/s)	99.14	95.58	88.14	67.78	36.06
이차공기량(kg/s)	407.86	359.08	281.78	198.97	129.86
노내누출(kg/s)	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11
전공기량(kg/s)	521.11	468.77	384.03	280.86	180.03
과잉공기량(%)	20	20	20	20	20
화학적공기요구량(kg/s)	434.26	390.64	297.70	205.01	134.41
연료량(MW)	1353.73	1218.18	927.96	639.10	409.61
λ(kg.air/MJ)	0.3208	0.3207	0.3208	0.3208	0.3208

현재 국내 석탄화력 발전소에서 미연소탄으로 버려지는 연료는 전체 석탄량의 약 1% 내외로 분석되고 있다. 이를 개선하기 위한 방안으로 동적 분리기 적용을 통한 미분기 성능 개선이 삼천포 #2호기 중 1대의 미분기를 교체하여 성공리에 입증되었으며 앞으로 다른 발전소로 계속 파급될 전망이다. 이는 미연소탄으로 손실을 유발시키는 가장 큰 요인으로 작용하는 미분도 50mesh 이하의 입자량을 0.7% 이상 줄임으로써 전체를 교체할 경우 0.5% 이상의 연소효율 개선이 기대된다. 그밖에 국내 발전설비 공급을 주도해온 한국중공업에서도 최근 1MW급의 실험 연소로를 사내에 건설하여 100PPM 이하의 NOx 및 0.5% 연소 효율의 개선을 목표로 저공해

고효율 석탄 연소장치(ALFS-Advanced Low NOx Firing System) 개발을 진행중이며 한국에너지 기술연구소에서도 2단 연소 기술에 의한 저공해 미분탄 연소기 개발이 연구 진행중이다.

(다) 예측 잉여부하 계산기 (Predictive Load Margin Computer)

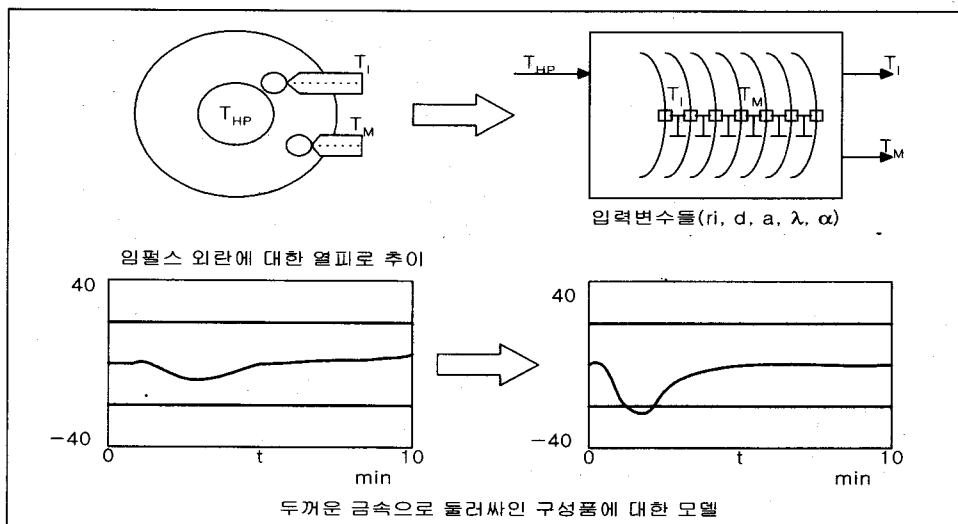
발전소에서 보일러와 같이 대류, 전도, 복사의 열전달 현상이 복합적으로 발생하는 두께가 있는 금속으로 만들어진 구성품에는 신속한 기동, 정지 및 부하 변화시 열응력(Thermal Stresses) 현상으로 조절의 한계를 경험하게 되며 또한 열손실을 최소화하기 위해서 가능한 피로 한계점에 접근해서 발전소를 운전한다. 열응력 한계점의 범위를 초과하여 운전하게 되면 발전소 수명에 심각한 영향을 미치며 기계에 손상을 초래할 수 있으므로 열응력은 부하조절에 있어서 주요한 요인으로 고려되고 있다. 현재 국내 500MW급 초임계압 관류보일러형 화력 발전소에 적용된 열응력감시시스템(Thermal Stress Monitoring System)과 열응력이 부하조절에 미치는 영향을 살펴보면 열응력이 발생할수 있는 구성품의 각 요소에 안쪽과 중간에 열전쌍을 설치해서 온도편차를 측정하고 측정된 온도가 제어 및 감시 시스템으로 전달되어 설정된 한계치와 비교 계산되어 부하 조절에 이용된다. 또한 열응력 현상이 허용 한계치를 벗어나면 전체 발전소 부하 증감이 피로한계치 내로 들어올 때까지 보류된다. 이에 1994년 독일 지멘스사에서 개발되어 각종 발전소에 적용되고 있는 예측 잉여부하 계산기의 원리와 발전소 효율 및 연료질감에 기여하는 요소를 분석하고 국내 화력발전소에 도입 가능성을 검토해 보았다. 먼저 현재 국내에 공급된 열응력 감시 및 제어회로는 아래 그림 12와 같은 구조로 회로가 구성되어 있다. 이로 인한 문제점을 살펴보면, 첫째, 열전달 관성의 시간지연으로 인한 손실을 들 수 있겠고 둘째, 기동, 정지 및 신속한 부하 증감시 열응력에 따른 보류 시간지연으로 인한 열손실이 있으며 셋째, 각 구성품에 대한 온도편차 측정용



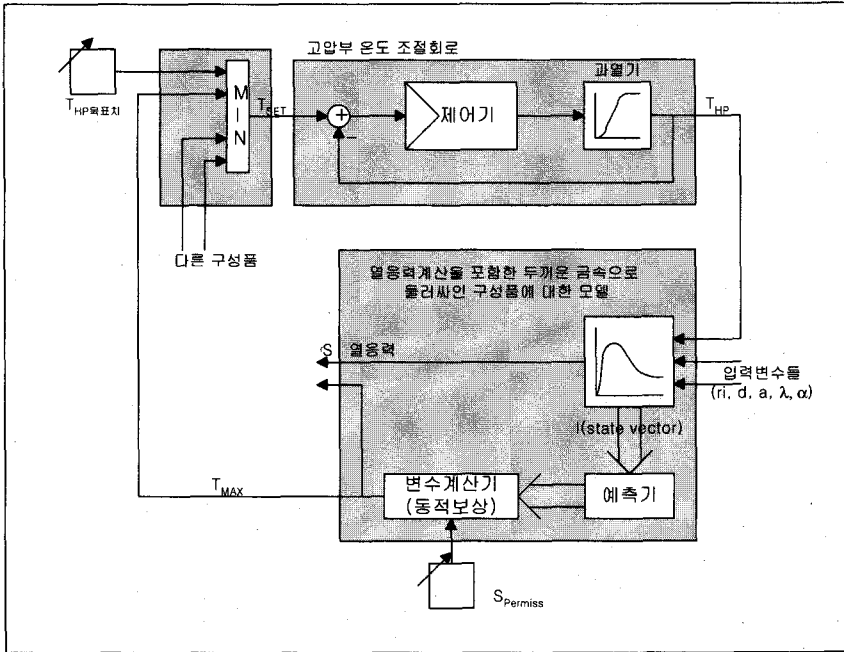
〈그림 12〉 열응력 계산회로 개념도

열전쌍 설치로 인한 손실(구매 및 설치비용) 그리고 네 번째로 냉간(Cold) 및 열간(Hot), 온간(Warm), 기동, 정지 등 복잡한 기동 및 정지 절차가 필요하다는 점 등이다. 상기의 손실을 개선하기 위해서 독일 지멘스사에서 개발되어 새로운 해결책으로 적용되고 있는 열응력

감시 및 제어 회로를 그림 13 및 14에 나타내었다. 경제적인 관점에서 그림 14에서 제시되고 있는 시스템의 장점을 살펴보면 고전적인 해결책에 비해 열전쌍을 쓰지 않으며, 다양한 기동정지 모드(열간, 냉간, 온간) 등을 하나로 통합할 수 있고 기동정지의 시운전 및 커미



〈그림 13〉 열응력 전달에 대한 모델



〈그림 14〉 개선된 열응력 제어회로 개념도

셔닝(Commissioning) 시간을 단축할 수 있고 실험을 통해 기동정지 비용을 20%~60% 절약할 수 있음을 보고하고 있다. 개선된 회로의 개념은 열피로 계산 입력신호로 열전쌍을 통한 온도편차를 쓰지 않고 운전데이터를 이용하며(온도, 압력, 증기량 등) 모델을 통해 열응력을 계산하여 연속적으로 허용 가능한 부하 증감의 범위를 설정하는데 있다.

그림13에 표현되어 있듯이 기존의 열응력 측정 방법은 온도 편차 측정용 열전대 두 개를 각종 헤더(Header)의 안쪽과 중간에 설치하여 온도 편차를 측정하며, 이로 인한 내부의 온도 변화에 대하여 시간지연을 갖고 편차를 측정한다. 그러나 새로운 방법은 직접 온도 편차 측정용 열전대를 설치하여 측정하는 것이 아니라 헤더 전후의 각종 프로세서 데이터(온도, 압력, 증기량 등) 및 헤더의 재질, 밀도, 형상, 열전달 계수 등의 여러 가지 각종 데이터를 기본으로 직접 헤더의 모든 지점에 온도 측정용 계기를 설치한 것과 같이 모델링하므로 그림13에서 보

듯이 내부 온도 변화에 대한 지연 시간 없이 편차를 측정할 수 있다. 열응력 측정에서의 시간 지연은 기동, 정지 및 부하 변화시 과도 현상 최대 한계치를 벗어나게 하는 원인이 되며, 열응력의 발생으로 플랜트 전체에 시간 지연이 발생되어 효율 저하의 원인이 된다.

그림14와 같은 개선된 열응력 제어 회로에서 보듯이 모델링→예측기→변수계산기를 통해서 예측 계산된 값이 고압부 온도 조절회로 목표치 최소 선택값으로 작용하여 기동, 정지 및 부하 변동시 열응력이 발생되지 않는 범위에서 원활한 운전을 할 수 있도록 만들어 준다.

현재 국내 적용된 열응력 감시

및 제어회로에서는 부하에 따라 고정된 부하증감율(Ex. 5%/Min>250MW, 3%/Min<250MW)로 운전하며 열응력 발생시 부하증감을 제한하는 회로로 구성되어 있으나, 개선된 회로에서는 현재의 운전상태에 따라 항상 허용이 되는 부하증감율을 계산하여 줌으로써 열응력으로 인한 보류시간(Holding Time)을 없애고 운전할 수 있게 구성되어 있을 뿐 아니라, 모델을 이용한 열응력 계산을 통해 다양한 기동정지 모드를 하나로 통합하는 방법을 제시하고 있다. 이러한 개선된 해결책은 기존의 발전소에 제어회로의 개선을 통해 간단히 삽입할 수 있으므로 국내 발전소에 적용 가능성이 상당히 크며 아울러 개선효과를 기대할 수 있다. 개선된 열응력 감시 및 제어회로는 발전소 기동정지가 빈번하고 전체 계통 부하중 중간 또는 첨두부하를 담당하는 발전소에 적용시 그 효과가 크다. 이는 빈번한 기동정지 및 신속한 부하증감을 요구하는 초임계압 화력발전소의 특성상 열응력 발생 가능성이 상대적으로 많기 때문이다. ■