

# 석탄연소 종합관리 시스템 개발 활용

**저유황탄** (KIDECO)과 기존 사용탄의 현격한 연소특성차이로 인한 혼소시 효율저하 개선을 위해, 석탄연소정보 프로그램 개발 및 미연탄소분 자동분석기를 설치하여 연소관리방법을 개선(미연분 감소 3.1%)함으로써 보일러 효율을 개선한다.

\* 글/한국전력공사

## 1. 사례선정 이유

- 가. 삼천포화력은 7개국에서 24개 종류의 석탄을 수입 사용하고 있으나, 탄종별로 성상과 연소특성이 상이하고, 동일 탄종이라도 입하시기에 따라 성상이 약간씩 차이가 있어 연소조건을 수시로 변경하면서 운전해야 하므로 연소관리에 많은 노력과 인력이 필요함.
- 나. 부적절한 운전조건은 연료를 불완전 연소시키며, 이는 보일러 효율 저하 및 연료량을 증가시켜 발전원가의 상승을 초래함은 물론,
- 다. '95년부터 환경오염물질 배출규제치가 1차 강화된 바, 기존설비의 개조없이 강화된 배출규제치 만족을 위해 유황성분이 현저히 적은 저유황탄(KIDECO탄)을 '94. 6월부터 기존 연소탄화하여 기존 사용탄과 혼합연소하여 왔으나, 기존탄과의 현격한 연소특성 차이로 적절한 연소조건 유지가 더욱 어려워짐.
- 라. 기존의 연소관리 방법은 탄종별 연소시험 결과에 의한 운전기준을 자료화하여 운전원에게 제시하고 있으나, 시험 소요기간과 인력소모가 많고 정해진 운전기준도 자주 변경해야 하는 번잡성으로 활용도가 낮을 뿐

만 아니라, 연소결과 분석의 수작업으로 많은 시간이 소요되어 운전원에게 결과가 전달되기 전에 연소탄종이 바뀌는 경우가 많아 효과적인 연소관리가 이루어지지 못함에 착안하여 연소종합관리시스템의 개발을 추진하였으며 그 결과, 과학적 연소관리가 가능해지므로 보일러 효율 상승효과를 거두었기에 이를 소개하고자 사례로 선정함.

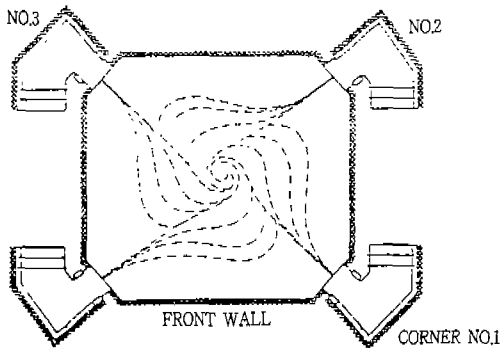
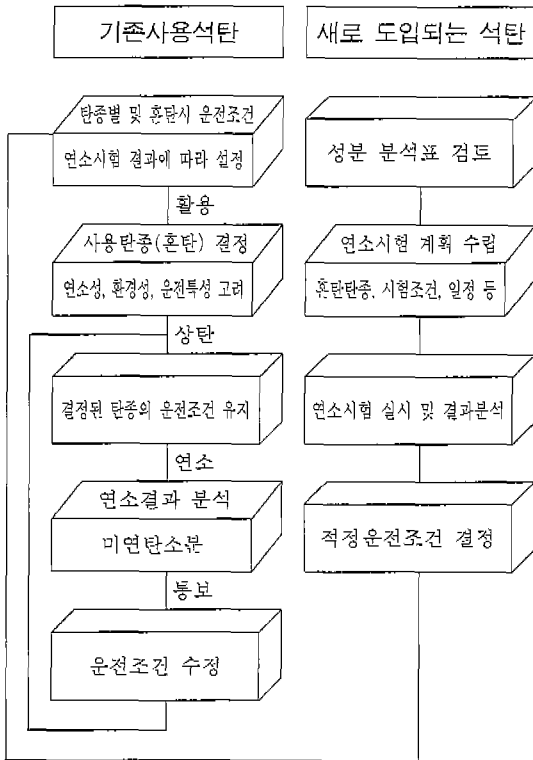
## 2. 현상파악 및 분석

### 가. 연소설비 개요

- 삼천포화력 제1, 2호기 보일러는 전부하에서 유연탄전소가 가능하도록 설계되었으며 보일러의 4개 CORNER에서 연료를 분사하는 절선형(TANGENTIAL), 틸팅(TILTING) 버너를 채택 사용하고 있다.
- 미분탄 버너는 6개층으로 1층에 4개씩 총 24개로 구성되어 있으며, 총 6대의 미분기가 각 미분탄버너 1층씩을 담당하고 있다.
- 연소용 공기는 F.D FAN에서 공급된 공기가 FUEL AIR와 2차 공기로 배분되며, FUEL AIR는 화염길이를 조절하는 한편, 2차 공기는 연료를 완전연소 시키는데 사용된다.

- 미연탄소분 저감을 위한 연소 조정은
  - 연소용 총 공기량의 조정
  - FUEL AIR와 2차 공기의 비율 조정
  - 버너 틸트 상, 하 조정
  - 미분탄의 미분도 조정 등의 방법이 있음.

나. 기존 연소관리업무 흐름



<그림 1> Tangential firing

다. 석탄사용 환경변화

- 석탄종류의 다양
  - 세계 석탄시장의 가격변동에 대응
  - 석탄설비 증가로 적정물량 확보
  - 80년대 초 : 7대 탄종 → '96년 현재 : 26개 탄종

○ 환경 규제치 강화

(단위 : ppm, mg/sm<sup>3</sup>)

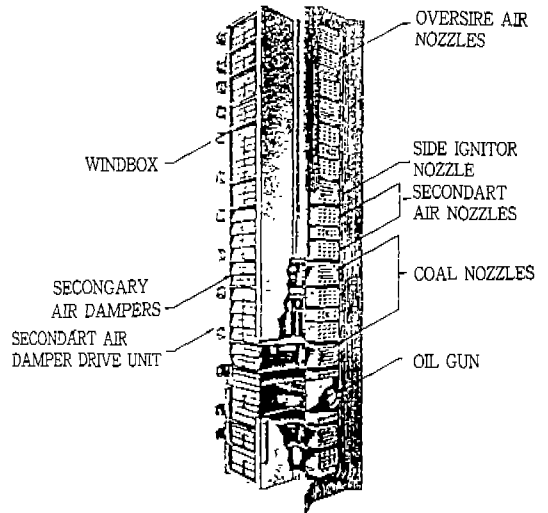
구 분	SOx	NOx	DUST	비 고
1차 강화	500	350	100	'95. 1. 1 부터
2차 강화	270	250	50	'99 시행 입법 예고

○ 저유황탄 연소

- 탈황설비 설치공간 부족으로 저유황탄 연소 불가피함.
- 환경규제치 강화에 대비 저유황탄 혼소 시험 실시('93. 11~12월, KIDECO탄)
- '94. 7월부터 기존탄과 혼합 연소중

※ 연도별 제1, 2호기 저유황탄(KIDECO) 사용현황

(단위 : ton)



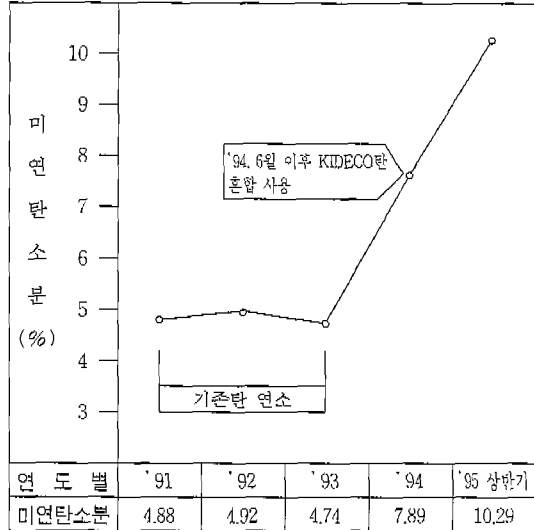
<그림 2> 버너구조도

항 목	연 도	'93년도	'94년도	'95년도
총 사용량		3,151,654	2,793,623	3,055,023
저유황탄 사용량		101,631	534,295	1,028,330
저유황탄 사용비율(%)		3.2	19.1	33.7

라. 석탄의 성분 및 특성비교

- 기존탄은 사용중인 탄종 전체의 범위임.
- 표 1에서 보는 바와 같이 KIDECO탄은 환경물질 측면에서는 매우 양호하나 휘발분이 매우 높고 수분이 많아 발열량이 낮으며, 미연탄소분 지수가 설계치 및 기존탄 보다 약 2배 정도 높아 미연탄소분이 많이 발생되는 요인이 되고 있음.

소분이 크게 증가하였음.



마. 연도별 미연탄소분 발생현황

- '95. 6. 29부터 저유황탄인 KIDECO탄을 기존탄과 혼합 사용중임.
- 기존탄만 사용한 '93년도 까지는 미연탄소분이 평균 5% 이내로 유지되어 왔으나 연소특성이 크게 다른 KIDECO탄을 혼합 사용한 '94년도와 '95년도 상반기에는 미연탄

바. 문제점

- 상찬탄종 결정 곤란
  - 사용 탄종이 많고 연소시 적용해야 할 운전기준이 복잡함.
  - 환경규제치 강화로 상탄시 연소성과 환경성을 함께 고려해야 하므로 탄종 결정

<표 1> 석탄의 성분 및 특성비교

항 목		단 위	설 계 치	기 존 탄	KIDECO탄	
공업분 석	총 수 분	%	10	7~10	20	
	휘 발 분	%	28	23~34	43	
	회 분	%	15	10~17	2	
	발열량	건 식	kcal/kg	6,400	6,402~7,144	6,335
		연소식	kcal/kg	6,080	6,063~6,645	5,578
연소특 성	착화온도	C	—	309~397	274	
	연소완료온도	℃	—	670~807	659	
	가연성분	mg/g	—	83.6~90.5	96.5	
미 연 탄 소 분		%	2.3	1.5~3.8	5.7	
환경 물질	유 황 분	%	0.7	0.24~0.89	0.1	
	질 소 분	%	1.7	1.08~2.00	1.0	
집진성		Mho-cm	4.6×10E10	6.6×10E10~1.3×10E11	1.6×10E11	
분쇄도(HGI)		HGI	48	45~80	54	

이 어려워짐.

- 기존 탄종별 운전자료는 운전특성과 환경측면에서 기술되어 있으나 내용이 복잡하여 상탄시 마다 하나씩 보아야 하는 어려움이 있어 쉽게 결정할 수 없음.

○ 연소분석 결과의 활용 저하

- 석탄의 연소시 정해진 운전기준을 유지 하지만 동일 탄종이라도 생산위치에 따라 성분의 차이가 있어 연소시험에 의해 운전기준이 설정되었다 하여도 반드시 최적의 상태로 보기는 어려우며, 연소결과에 따라 적정조건으로 운전조건이 수정되어야 하나, 연소결과로 나타나는 미연탄소분의 분석을 수작업으로 실시함에 따라 많은 시간이 소요되어 운전원이 이를 통보받기까지는 약 1일이 걸리며 연소결과를 알기까지는 운전조건을 수정할 수 없으므로 보일러 효율손실이 지속적으로 발생된다.
- 또한, 제3, 4호기가 가동되면서 석탄사용량이 증가함에 따라 연소탄종이 빈번하게 변경되므로 연소분석 결과가 통보되는 시점에서 탄종이 이미 바뀌는 경우가 많아 연소조정을 할 수 없는 등 분석결과 활용이 상당히 낮은 실정임.

나. 추진경위

일 정	추진항목	
	석탄연소관리 프로그램 개발	미연탄소분 자동분석기 설치
'95. 11. 15	프로그램 개발계획 수립	—
'95. 11~12	기초자료 확보(1차 연소시험)	—
'95. 1	—	미연탄소분 자동분석기 설치 검토
'95. 2~ 3	기초자료 확보(2차 연소시험)	TASK FORCE 구성 및 활동
'95. 3. 15~ 6. 14	프로그램 설계 및 작성	—
'94. 3. 16	—	기본계획 수립
'94. 3. 20~ 6. 30	—	제작
'95. 6. 25~ 7. 25	시뮬레이션 및 프로그램 수정	—
'95. 7. 26~	운전원 교육 및 환용	—
'95. 9. 20~11. 25	—	설치
'95. 11. 27~12. 2	—	교정 및 시험 사용
'95. 12. 3~	—	연소관리 활용

다. 석탄연소관리 프로그램의 개발

(1) 프로그램의 설계(표 2)

(2) 기초자료 확보를 위한 탄종별 연소시험 실시

○ 프로그램 개발을 위한 기초자료 확보를 위하여 BASE COAL인 KIDECO탄과 기존탄을 5: 5의 비율로 혼소시험 실시

구 분	제1차 연소시험	제2차 연소시험
기 간	'91. 11. 28~12. 31	'95. 2. 13~4. 3
시험탄종	AMCOAL, LCR, MIM, BHP, MACQUARIE, LIDDELL	BHP, LCR, AMCOAL, MIM, MACQUARIE, LIDDELL
시험항목	보일러 연소용 공기량 변동시험(EXCESS O <sub>2</sub> )	• R/H NOZZLE TILT • 미분도 변경시험

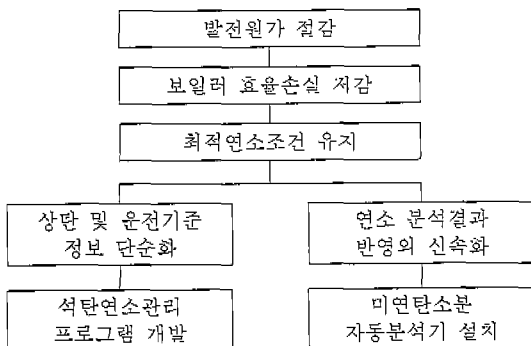
(3) 프로그램 개발 단계적 추진내용

○ 제1단계: 프로그램 분석 및 설계

- 시스템 흐름도, 파일 및 데이터 베이스 설계
- 운전원 편위위주의 Pull-Down Pop-Up 메뉴 방식을 이용하여 시스템 구성

3. 추진내용

가. 목표설정



<표 2> 프로그램의 설계

관리분야	구 성 내 용	비 고
입하탄 정상관리	○ 탄종별 총수분, 휘발분, 고정탄소회분, 질소, 유황, 연료비, 분쇄도	
연소특성관리	○ 연소성 - 연소성지수, 미연탄소분, 분쇄도 ○ 석탄회의 장해 - SLAGGING성, FOULING성, 마모성 ○ 환경성 - 황산화물, 질소산화물, 집진성	○ 상탄탄중 결정 기준
최적운전조건 관리	○ 연소시 특성 ○ 적정운전 조건 - 공기량, 미분도, TILT, OVER FIRE 공기량퍼개도	○ 운전유지 조건

- 제2단계: 프로그램 구현
  - 적용기종: PERSONAL COMPUTER
  - OS: MS-DOS 5.0 이상
  - 처리언어: CLIPPER 5.01, 이태경의 "한글 라이브러리"
- 제3단계: 프로그램 테스트 및 수정·보완
  - 단위 업무별 테스트(입하탄 정상, 환경 오염물질 농도, 연소조건)
  - 프로그램 사용상 문제점 해결
- 제4단계: 프로그램의 활용
  - 중앙 제어실 PC에 프로그램 설치→운전원이 항시 검색 활용

라. 미연분 자동분석기 설치

(1) 미연분 자동분석기 설치 검토

- 미연분 자동분석기는 시료의 분석방법에 따라 세계적으로 2가지 형식(Oven Type, Light Sensor Type)이 개발되어 활용중에 있으며, 활용실태를 검토, 분석한 결과 2가지 형식 모두 연속적으로 미연분을 검출하여 운전원에게 신속, 정확한 정보 제공으로 효과적인 연소관리가 가능한 것으로 나타남.
- 미연분 자동분석 장치별, 장·단점 비교 (표 3)

<표 3> 미연분 자동분석 장치별 장·단점

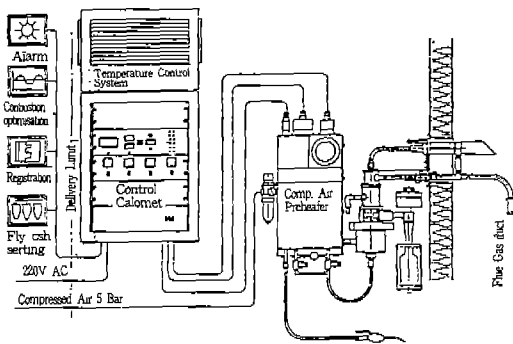
TYPE	장 점	단 점
OVEN	○ 시료를 연소시켜 CO <sub>2</sub> 량을 측정하여 미연분을 산출하므로 정확도가 높다	○ 시료를 흡입하여 Oven에서 태우고 측정이 완료된 후 Blow Off 시키도록 되어있어 구조가 다소 복잡하고 부속 설비가 많다 ○ 설비 구조상 Probe의 막힘 현상이 빈번하여 효용성이 저하된다 ○ 직접 연소시키므로 부식에 취약하며 관련 부품의 수명이 짧다 ○ 측정주기가 다소 길다(약 15분 정도)
LIGHT SENSOR	○ 배기가스 덕트에 시료 흡입구와 배출구가 설치되어 일정량의 가스가 연속적인 흐름을 형성하여 주로 Probe의 막힘 현상이 적다 ○ 구동부가 없어 고장요인이 적다 ○ 광 센서를 이용하므로 정확도가 높고 시료를 연소시키지 않으므로 내부식성이 높다 ○ 측정주기가 짧다(약 5분)	○ 기기설치시 고정작업이 어렵다

<표 4> 미연분 자동분석기 설치후 성능시험 결과

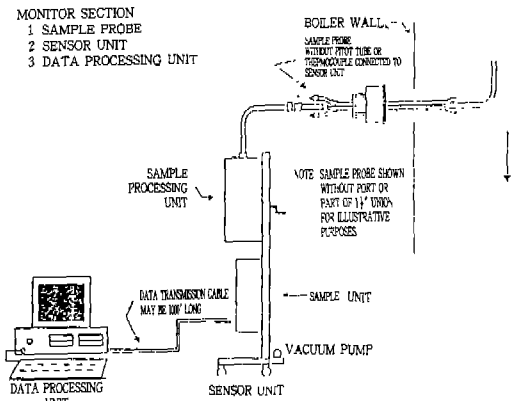
(단위 : %)

구분	시험결과						
	최대		최소		평균		
	자동분석기	화학분석기	자동측정기	화학분석기	자동분석기	화학분석기	편차
제1호기	7.8	8.6	8.2	8.1	8.0	8.35	0.35
제2호기	10.4	9.4	7.5	8.0	8.95	8.7	0.25

※ 미연분 자동측정설비 TYPE별 구성도



<LIGHT SENSOR TYPE>

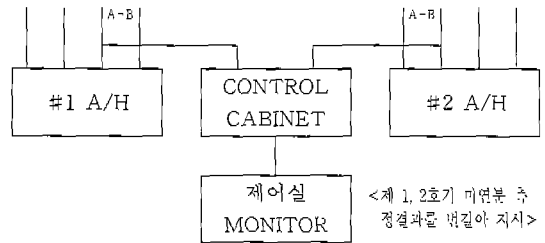


<OVEN TYPE>

- 미연분 자동분석 장치의 비교에서 나타나듯이 검출되는 정확도에서는 비슷하였으나, 간단한 구조로 고장이 적을뿐만 아니라 Prove의 막힘현상이 적은 Light Sensor Type이 더 효과적인 것으로 판단되어 덴마크제 M&W사 제품을 선정함.

(3) 미연분 자동분석기 설치

- 미연분 자동분석기 설치 : 2Channel용 1 Set 설치
- 제작 및 형식
  - 적외선을 응용한 탄소함량 측정기, RCA DII System을 기본으로 탑재하여 제작
- 설치 구성도



(4) 미연분 자동분석기 설치후 성능시험

- 목적 : 미연분 자동분석기 설치후 화학분석치와 비교하여 Analyzer Calibration 및 설비 신뢰성 확인
- 대상 : 제1, 2호기
- 시험일시 : '95. 11. 27~12. 2
- 시험결과(표 4)
- 표 4의 시험결과에서 보는 바와 같이 측정결과 화학분석치와의 편차가 0.5% 이내로 매우 양호하였음.

다. 추진 결과

(1) 연소관리 방법 개선 전·후 보일러 효율손실 변화

(단위 : %)

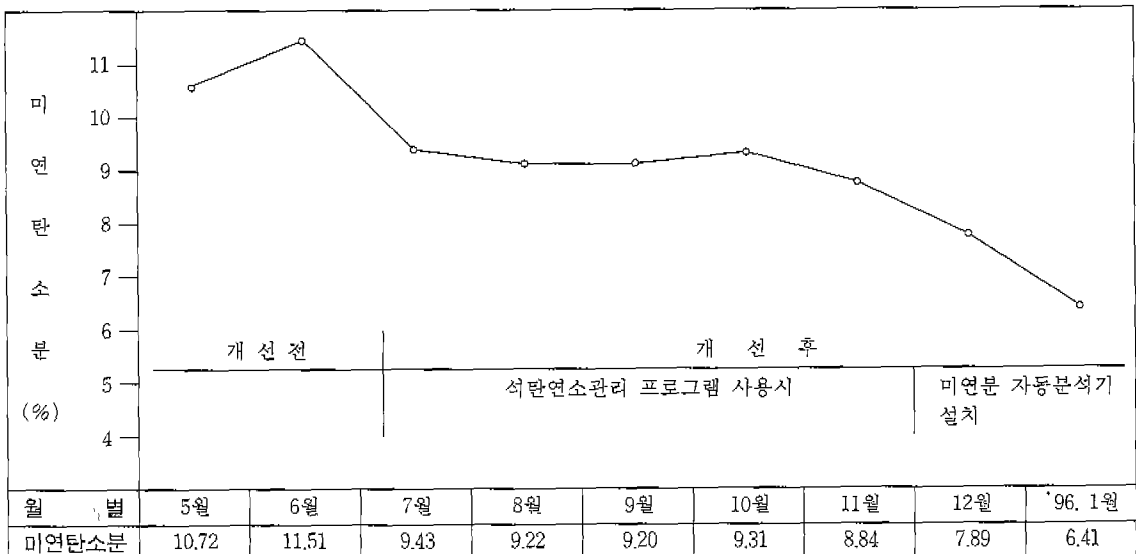
항 목	개선전	개선후	증·감
미연 탄소분	10.29	7.15	-3.14
보일러 효율손실 변화	1.54	1.04	-0.50

(2) 개선 전·후 미연분 발생 추이

- 표 5에서 보는 바와 같이 프로그램 개발 후 연소정보의 신속하고 정확한 제시로 미연분이 개발전보다 약 1.5% 정도 감소함을 나타내고 있다.
- 이는 적절한 Coal Blanding 및 탄종별 운전조건을 운전원에게 제시하여 항시 최적의 운전상태 유지가 가능한데서 비롯됨.
- 12월 미연분 발생은 미연분 자동분석기 설치('95. 12. 2)후 측정된 데이터로 미연분이 설치전 보다 약 2% 정도 감소함.

4. 절감효과 및 투자비

<표 5> 개선 전·후 미연분 발생 추이



가. 직접효과 : 403백만원

항 목	단 위	제1호기	제2호기	계
미연분 저감	%	3.25	3.03	3.14
보일러 효율변화	%	0.52	0.49	0.50
실증절감 효과	백만원	37	36	73
예상절감 효과	백만원	206	197	403

※ 투자비 : 120백만원(회수기간 : 0.4년)

나. 간접효과

- 환경오염물질 배출농도의 사전예측으로 환경오염 방지
- 적절한 Coal Blanding으로 석탄회에 의한 보일러 장해 최소화
- 타사업소 확대적용 가능으로 파급효과가 클 것으로 기대

5. 절감효과 산출근거

가. 실증절감효과

※ 석탄연소관리 프로그램 개발 효과('95. 8 ~12월)+미연탄소 자동분석장치 설치 효

과('95. 12월)

(1) 산출근거 자료

- 개선전 KIDECO탄 혼소시 평균 미연탄소분('95. 1~7월): 10.29%
- 개선후 미연탄소분: 7.15%
  - 석탄연소관리 프로그램 적용후 평균 미연탄소분('95. 8~11월): 9.12%
  - 미연분 자동분석기 설치후 평균 미연탄소분: 7.15%
- KIDECO탄 혼소시 평균 ASH 함량('95 기준): 9.93%
- KIDECO탄 혼소시 평균발열량('95 기준): 5,976kcal/kg.AS FIRED
- 석탄 기준단가(기술기획처 자료): 38,971 원/ton
- '95. 8~12월 석탄 사용량 : 1,112,846ton
- '95. 12월 석탄 사용량 : 279,721ton
- '96년도 석탄 사용계획량(발전처 자료): 3,212,771ton

(2) 효과 산출

(가) 보일러 효율계산

- 개선전 미연분에 의한 보일러 효율 손실
 
$$\left( \frac{\text{ASH함량}}{100 - \text{미연분}} \times \frac{\text{미연분}}{100} \times 8,100 \right) \div \text{발열량}$$

$$= \left( \frac{9.93}{100 - 10.29} \times \frac{10.29}{100} \times 8,100 \right) \div 5,976$$

$$= 1.54\%$$
- 개선후 미연분에 의한 보일러 효율 손실
 
$$\left( \frac{9.93}{100 - 7.15} \times \frac{7.15}{100} \times 8,100 \right) \div 5,976 = 1.04\%$$
- 개선전·후 보일러 효율 손실 변화 : 0.50%
 
$$\text{개선전} - \text{개선후} = 1.54\% - 1.04\% = 0.50\%$$

(나) 실증효과계산

- 석탄연소종합관리 프로그램 개발 활용에 의한 절감금액

$$\left( \frac{\text{ASH 함량}}{100 - (\text{개선전} - \text{개선후 미연분})} \times \frac{(\text{개선전} - \text{개선후 미연분})}{100} \right) \times \text{석탄사용량}$$

$$\times \text{석탄단가} = \left( \frac{9.93}{100 - (10.29 - 9.12)} \times \frac{10.29 - 9.12}{100} \right) \times 1,112,846 \times 38,971 \approx 51 \text{백만원}$$

- 미연분 자동분석기 설치에 의한 절감금액

$$\left( \frac{\text{ASH 함량}}{100 - (\text{설치전} - \text{설치후 미연분})} \times \frac{(\text{설치전} - \text{설치후 미연분})}{100} \right) \times \text{석탄사용량}$$

$$\times \text{석탄단가} = \left( \frac{9.93}{100 - (9.12 - 7.15)} \times \frac{9.12 - 7.15}{100} \right) \times 279,721 \times 38,971 \approx 22 \text{백만원}$$

(다) 종합 실증효과 : 73백만원

- 석탄연소관리 프로그램 개발에 의한 절감액('96. 8~12월) = 51백만원
- 미연탄소분 자동분석기 설치후 절감액('96. 12월) = 22백만원

\* 합계 : 51백만원 + 22백만원 = 73백만원

나. 예상절감 효과 : 403백만원

$$\left( \frac{\text{ASH 함량}}{100 - (\text{개선전} - \text{개선후 미연분})} \times \frac{(\text{개선전} - \text{개선후 미연분})}{100} \right) \times '96 \text{석탄사용량}$$

$$\times \text{석탄단가} = \left( \frac{9.93}{100 - (10.29 - 7.15)} \times \frac{10.29 - 7.15}{100} \right) \times 3,212,771 \times 38,971 \approx 403 \text{백만원}$$