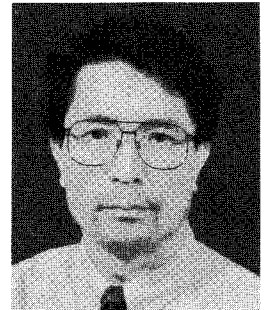


에너지 사용과 환경 보호



박 해 조
한국전력기술(주)
플랜트사업단 차장

1. 제17차 WEC 총회

지난 9월 13일부터 17일까지 미국 휴스턴에서 「21세기의 지속발전을 위한 에너지기술」이라는 주제로 개최된 『제17차 WEC 총회』는 86개 나라의 정부 에너지 담당자와 學界, 産業界의 에너지 전문가 약 5,000명이 참가하여 주제에 대한 발표와 열띤 토론이 있었다.

세계에너지회의는 약 100개 회원국의 에너지 전문가들이 매 3년 마다 모여 現在와 未來의 에너지 이용과 관련한 展望, 問題點과 그 代案에 대하여 발표하고 討議하는 國際 學術大會이다.

언뜻 보고 들기에 따라서는 에너지 이용과 환경보호라는 말 자체가 상호 모순되어 회의 조차 필요없는 것처럼 보이지만 현대 文明의 基礎가 에너지 使用이며, 현재의 기술로는 사용 에너지원의 대부분이 化石燃料을 直·間接으로 活用하는 것이기 때문에 환경보호를 위해서는 化石연

료 사용시에 나오는 각종 環境汚染 物質의 處理에 대한 對策은 必然일 수 밖에 없다.

총회의 주 내용은 에너지의 효과적인 개발과 활용 방안, 그리고 地球 곳곳에서 심각한 문제를 유발시키고 있는 大氣 溫暖化의 문제, 엘리뇨, 라니냐 現象 등의 主犯 중의 하나인 이산화탄소는 化石연료 연소시에 필연적으로 발생하기 때문에 이에 대한 개선책으로 각종 設備의 高效率化 性能改善과 環境保護設備의 設置 등이 討議 勸告되었다.

본 회의에 발표된 논문은 총 241편이었으며, 우리나라에서는 부존 자원의 효과적인 활용과 환경 개선을 목표로 건설되고 있는 유동층 보일러를 사용하는 동해화력발전소의 설계 내용을 발표하였으며, 내용은 本稿 3항에 수록하였다.

세계에너지회의는 누구에게나 논문 발표회가 주어진다든 점을 감안할 때 우리나라의 논문 발표 수(3편)는 너무 적다고 생각되며,

일본과 중국이 각각 10여편 이상의 논문을 발표하는 것을 상기하여 범 정부차원은 아니더라도 에너지협의회 차원에서 다음 회의에 대비하여 정책적으로 논문 발표를 권장하여야 할 것이다. 그리고 에너지 전시관에는 230여 기업이 참가하여 각 나라와 기업의 홍보에 열을 올리고 있었으나, 우리나라에서는 기업이나 정부 모두 불참한 점이 참으로 아쉬웠다.

2. 에너지 이용 실적 및 전망

에너지원(석탄, 가스, 기름, 원자력 등)의 대부분인 약 50% 정도를 선진국(북미, 서유럽, 대양주, 일본 등)에서 사용하고 있다. 주목할 사항은 2020년의 장래 전망을 보면 이들 나라에서의 에너지 사용은 미미한 증가세를 나타내나 남미 및 아시아 개발도상국에서 사용이 급상승하여 전체 사용량의 42%를 차지하며 연평균 증가율은 4%로서 전세계 평균 증가율의 약 1.7배이다.

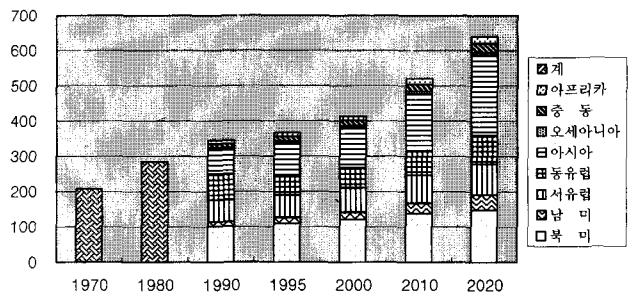
이산화탄소 배출량 역시 이들 나라에서 대부분을 차지하고 있으나 에너지 사용이 급격히 증대될 아시아 및 남미에서의 배출량이 크게 늘어날 전망이다. 한편 WEC선언에서 지구온난화의 방지책으로 원자력이용을 권장함에도 불구하고 선진국에서는 점진적으로 원자력 발전량을 줄이고 있다. 그러나 남미 및 아시아지역 개도국에서는 원자력 이용이 점진적으로 증대될 전망이다.

<표 1~4>는 세계 에너지 사용량 및 전망, 이산화 탄소 배출량 및 전망 등을 나타내고 있다.

<표 1> 에너지 사용량

(단위 : 1,000조 Btu)

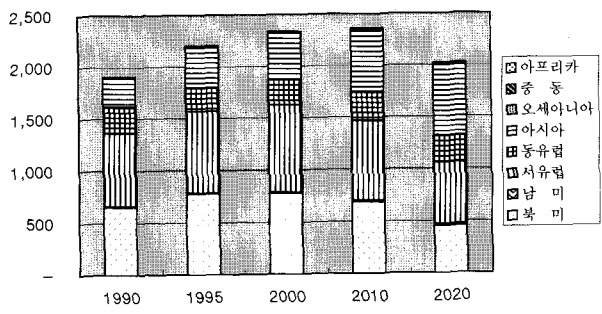
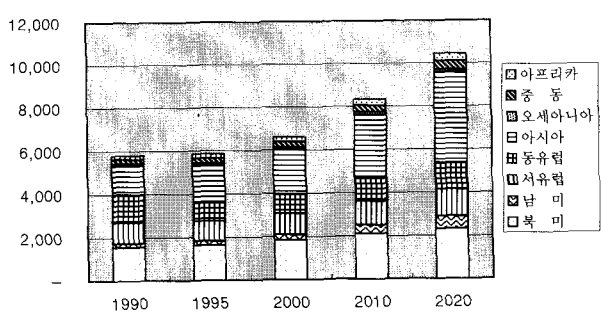
지역	실 적				예 측			연평균 증가율 (%)
	1970	1980	1990	1995	2000	2010	2020	
북미			99.7	108.0	119.8	136.5	147.1	1.2
남미			13.7	16.8	20.3	30.0	42.7	3.8
서유럽			61.9	64.8	69.7	79.0	88.1	1.2
동유럽			73.7	53.2	56.3	69.0	80.4	1.7
아시아			69.5	92.6	113.1	162.5	227.9	4.0
오세아니아			4.9	5.6	6.1	7.0	7.8	1.4
중 동			11.1	13.9	15.5	19.9	25.5	2.5
아프리카			9.2	10.7	12.2	15.7	19.8	2.5
계	207	284	343.7	365.6	413.0	519.6	639.3	2.3



<표 2> 탄산가스 배출량

(단위 : 1,000만 ton)

지역	실 적		예 측			연평균 증가율(%)
	1990	1995	2000	2010	2020	
북미	1,550	1,628	1,829	2,105	2,313	1.4
남미	174	194	250	391	574	4.4
서유럽	971	925	978	1,101	1,239	1.2
동유럽	1,290	866	903	1,072	1,223	1.4
아시아	1,339	1,708	2,061	2,945	4,220	4.0
오세아니아	90	99	107	119	129	1.1
중 동	194	229	253	322	409	2.3
아프리카	178	192	219	276	341	2.3
계	5,786	5,841	6,600	8,331	10,448	2.4



〈표 3〉 전력 사용량

(단위: 10억 kwh)

지역	실 적		예 측			연평균 증가율(%)
	1990	1995	2000	2010	2020	
북 미	3,255	3,759	3,984	4,713	5,354	1.4
남 미	449	575	711	1,088	1,548	4.0
서 유럽	2,115	2,286	2,720	3,419	4,182	2.4
동 유럽	1,908	1,552	1,509	1,881	2,248	1.5
아 시 아	2,018	2,776	3,465	5,322	8,028	4.7
오세아니아	180	204	287	369	450	3.2
중 동	221	295	309	419	554	2.6
아프리카	285	320	378	552	782	3.6
계	10,431	11,767	13,363	17,763	23,146	2.7

3. 순환유동층 보일러 사용 무연탄 발전소

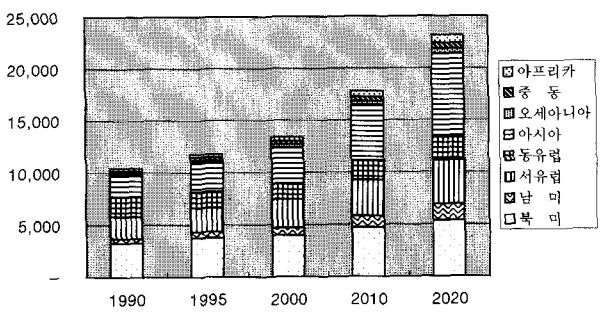
가. 개 요

국내의 유일한 에너지 자원인 무연탄 사용이 〈표 5〉와 같이 1980년대 중반 이후 수요가 급격히 감소하여 1996년말 현재 재고량은 약 910만 톤이다.

국산무연탄은 발열량이 낮고 마모성이 강한 다량의 회분을 함유하는 등 보일러 연료로는 부적합하여 대량사용을 꺼려왔다. '80년대 이후 전력수요의 폭발적인 증가에도 불구하고 무연탄 발전소에 비해 상대적으로 발전소 효율 및 가동률을 제고할 수 있는 수입 유연탄을 사용하는 발전소를 다수 건설하고 있으며, 일반 산업에서의 수요도 다른 연료로 대체되었다.

그러나 국내 석탄산업의 합리화 및 에너지원의 다변화 측면에서 국내무연탄을 사용하는 발전소를 건설하여 운용함으로써 비축물량의 사용 및 신규 채탄량을 증대시켜 수입대체효과는 물론 석탄산업을 활성화 시켜야 할 것이다.

국산무연탄을 사용하는 재래식 미분탄 연소 보일러는 중유를 보조연료로 사용하고 있으며, 발열량 기준으로 석탄 70~80%와 중유 20~30%를 혼소하고 있다. 본 사업을 위한



〈표 4〉 원자력 발전량

(단위: 10억 kwh)

지역	실 적		예 측			연평균 증가율(%)
	1990	1995	2000	2010	2020	
북 미	649	774	773	683	451	-2.1
남 미	9	9	10	17	17	2.4
서 유럽	703	785	841	763	588	-1.2
동 유럽	256	229	248	279	261	0.5
아 시 아	280	394	450	593	683	3.1
오세아니아	-	-	-	-	-	0.0
중 동	-	-	-	10	10	0.0
아프리카	8	11	11	11	11	0.0
계	1,905	2,202	2,333	2,356	2,021	-0.3

타당성조사 결과 기술성 및 경제성이 우월한 것으로 평가된 순환유동층 보일러를 채택하여 정상 운전 중 중유 등의 보조연료 없이 무연탄 전소에 의한 탄 사용량을 증대시키고 가동시를 제외하고는 중유 등의 수입에너지 사용을 절감토록 하는 방안을 권고하여 아래와 같은 구비조건을 만족하도록 설계 제작된 발전소를 건설 중에 있다.

순환유동층 보일러를 사용하는 발전소의 구비조건은

- 석탄산지 부근에 설치하여 석탄공급이 원활할 것
- 발전소의 가동률이 높을 것
- 공해물질 배출치가 낮을 것
- 발전소의 열효율과 성능이 높을 것
- 석탄 사용량을 증대시켜 석탄산업 활성화에 기여할 것 등이다.

〈표 5〉 무연탄 수급 현황

(단위: 천 톤)

연도	공 급	수 요	재 고
1960	5,350	4,823	527
1965	11,846	10,343	1,503
1970	13,498	11,831	1,667
1975	19,274	15,945	3,329
1980	25,905	20,830	5,075
1985	31,765	25,339	6,426
1990	28,992	20,979	8,013
1995	13,977	5,485	8,492
1996	13,439	4,337	9,102

나. 순환유동층 보일러의 국내 사용 현황

순환유동층 보일러가 발전용 및 산업용으로 사용되기 시작한 것은 1980년대부터이며, 국

내에서는 1985년 동양화학에서 처음으로 상업운전을 개시한 이래 공정용 증기생산 또는 전력 및 공정용 증기생산을 목적으로 현재 10여기가 성공적으로 운전되고 있다.

〈표 6〉는 현재 국내에서 운전되고 있는 순환유동층 보일러 현황이며, 사용연료는 수입 유연탄 또는 Petroleum Coke 등이다.

다. 보일러 형식 및 발전소 건설 공정

보일러 형식결정을 위하여 국산무연탄을 사용하는 기존 미분탄 보일러의 열효율, 가동률 등을 조사하고 신기술로 평가되고 있는 유동층 보일러의 운전실적, 용량, 탈황·탈질성능 등의 기술성과 경제성을 비교 분석하여 비교적 열효율이 높고 정상 운전 중 중유 등의 보조연료 없이 석탄을 연소할 뿐만 아니라 별도의 탈황·탈질설비 없이 환경 규제치를 맞출 수 있는 순환유동층 보일러를 국산무연탄을 사용하는 최적의 보일러로 채택하였다.

발전소 건설공정은 순수 발전용으로는 처음 시도되는 기술인 200MW급 순환 유동층 보일러인 점을 고려하여 시운전 기간을 재래식 발전소에 비해 다소 여유를 갖도록 하였으며, 주요 건설공정은 다음과 같다.

- 건설 타당성 조사(한국전력기술) : 1989. 2~1992. 2
- 설계착수(한국전력기술) : 1993. 2
- 주기기(보일러 : 한국중공업/ABB-CE, 터빈 : 한국중공업) 계약 : 1994. 12
- 보일러 철골 입주 : 1995. 10
- 최초 화입 : 1997. 10
- 준 공 : #1 - 1998. 9
#2 - 1999. 9

〈표 6〉 국내 순환유동층 보일러 현황

설비명	용량		연료	상업운전	설비공급자
	증기	전력			
동양화학	120t/h	2.5MW	Coal, Pet. Coke	1985	Hyundai, Ahlstrom
SK(수원)	130t/h	-	Bit. Coal	1988	Hyundai, Ahlstrom
SK(울산)	130t/h	27MW	Coal, Pet. Coke	1989	Hyundai, Ahlstrom
현대정유	120t/h	-	Pet. Coke	1989	Hyundai, Ahlstrom
LG(여천)	210t/h	25MW	Pet. Coke	1990	Hyundai, Ahlstrom
UPSC(울산)	250t/h	-	Bit. Coal, Pet. Coke	1990	Hyundai, Ahlstrom
삼양식품	60t/h	9.2MW	Bit. Coal, Heavy Oil	1991	Hyundai, Ahlstrom
대구염색공단	130t/h	4.1MW	Bit. Coal	1986	Samsung, Babcock
제일제당	40t/h	5.4MW	Ditto	1988	Samsung, Babcock
한솔제지	130t/h	23MW	Ditto	1990	Samsung, Babcock
고려아연	175t/h	3.5MW	Ditto	1991	Hanjung, Lurgi

라. 발전소 특징

동해화력발전소는 무연탄을 사용하는 대형 순환유동층 보일러를 채택한 국내 최초의 발전소로서 운전특성을 고려하여 30%부하에서부터 100%부하까지 부하변동을 할 수 있는 기능을 갖춘 기저 부하용으로 설계·건설되며, 주변의 수려한 해안 등의 위치 특성상 특별히 환경보전에 많은 비중을 고려하였다. 순환유동층 보일러를 사용하기 때문에 별도의 탈황·탈질 설비 없이도 황산화물이나 질소산화물 배출 농도를 규제치 이내로 맞출 수가 있으며, 연소가스 중에 포함된 먼지를 포집할 수 있는 전기 집진기를 설치하고 연소가스의 확산이 원활하도록 굴뚝의 높이는 150m로 하였다.

석탄하역과 운반 중에 발생할 수 있는 먼지를 원천적으로 없애기 위하여 하역 설비와 저탄장은 완전 옥내화 하였으며 상탄설비는 덮개를 씌워 석탄먼지의 유출이 없도록 하였다. 또한 발전소 주위에 해수욕장과 어장이 형성되어 있는 점을 고려하여 냉각순환수 배수관을 심층

배수화 하고 배수관의 배출구가 방파제로부터 약 100m 떨어진 수심 9m 지점에서 온수를 배출토록하여 온배수의 영향을 최소화하도록 하였다.

1) 발전소 성능

국산무연탄의 성상은 〈표 8〉과 같이 실리카 등의 강마모성을 가진 다량의 회분이 함유되어 있고 회용점 또한 낮아 설비의 마모가 심하다.

기존의 미분탄 보일러인 경우 용융회에 의한 클링커 발생 및 낙하에 의해 가동률이 저하되는 등 많은 문제점이 있어왔다. 그러나 유동층 보일러의 연소온도는 회의용융점 이하인 약 950℃ 이하이기 때문에 용융회에 의한 클링커 등의 피해를 줄일 수 있다. 보일러 각 부위에서 회분에 의한 마모를 줄이기 위하여 연소실 내부에는 열전달관의 배치를 없애고 Cyclone Separator에서 입도가 큰 회분을 포집하여 연소실로 재순환시킴으로써 완전연소가 가능하도록 탄의 노내 체류시간을 늘려 열효율을 높

임은 물론 비회의 양을 줄여서 대류전열부에 배치된 열교환기의 마모를 줄이도록 하였다.

또한 FBHE와 FBAC 설비를 설치하여 배출회의 잠열을 회수함으로써 보일러의 효율이 90%이상 유지되어 재래식 보일러인 서천화력의 86%에 비해 4% 포인트가 높으며, 급수계통의 8단 열교환기 배치와 터빈 열소비율 개선 등에 의한 영향으로 발전소 효율(Gross)은 41.1%로서 서천화력의 38.5%에 비해 2.6% 포인트가 높다.

<표 7> 발전소 성능 비교

발전소명	동해화력	서천화력
용량	200 MW	200 MW
주 증기 압력	169 bar	171 bar
주 증기 온도	538°C	538°C
재열 증기 압력	36 bar	32 bar
재열 증기 온도	538°C	538°C
보일러 효율	90%	86%
터빈 효율	45.7%	44.8%
발전소 효율(Gross)	41.1%	38.5%

<표 8> 석탄 성상

Description	Unit	Design Coal	Range Coal	Remark
Moisture	%wt	8	Max. 15	As Fired Base
Ash	%wt	39.0	Max. 45	Air Dry Base
V.M	%wt	4.0	Min. 2.0	Air Dry Base
F.C	%wt	53.7	40~60	Air Dry Base
S	%wt	0.6	Max. 1.5	Air Dry Base
H.H.V	kJ/kg	18,500	Min. 15,500	Air Dry Base
SiO ₂	%wt	54.5	45~65	
Al ₂ O ₃	%wt	31.5	20~40	
Fe ₂ O ₃	%wt	4.7	2~10	
CaO	%wt	1.3	0~5	
MgO	%wt	1.0	0~3	
K ₂ O	%wt	4.0	0.5~8	
Na ₂ O	%wt	0.5	0~2	
Others	%wt	2.5	-	
IDT	°K	1,473	-	
FT	°K	1,623	-	

2) 보일러 설계

국산무연탄의 가장 두드러진 특성은 강마모성을 가진 다량의 회분이며, 회분이 설비의 운용에 끼치는 악영향을 줄이기 위하여 보일러 설계시 고려된 것들은 다음과 같다.

- 연소실 하부 노재(Bed Material)가 쌓이는 호퍼 부분과 노벽 하부에는 내화·내마모성 시멘트를 두께 25~180mm로 바르고,
- 유동화 속도를 통상 적용하고 있는 6m/sec 보다 낮은 4.8m/sec로 하고,
- 연소실 내부에는 열교환기를 설치하지 않고 대류 전열부에 열교환기를 설치하며,
- 각종 열교환기에는 내마모성 특수 Metal Spray Coating을 함으로써 설비의 마모를 줄여 발전소 신뢰도 및 가동률을 높게 하였으며,
- 급수 가열기인 FBAC(Fluidized Bed Ash Cooler)를 설치하여 노 외로 배출되는 회가 가진 잠열을 회수하도록 하였으며,
- Separator 하부에 보일러 외부 열교환기인 FBHE(Fluidized Bed Heat Exchanger)를 설치하여 주증기 및 재열증기의 온도조절을 용이하게 할 뿐만 아니라 보일러 열효율을 개선토록 하였다.

3) 운전비용

기존의 재래식 미분탄 보일러는 정상운전중 약 20~30% 정도의 중유를 연소 안정용 보조 연료로 사용하고 있으며, '97년 한해동안 동해 화력과 동일 용량이며 무연탄을 사용하는 서천 화력발전소(200MW 2기)가 사용한 중유의 양은 148,000kℓ이고, 무연탄을 사용하는 한국 전력의 전체 발전소에서 혼소 사용한 중유의

량은 471,000kl이다.

동해화력 순환유동층 보일러는 보조연료 없이 전부하로 운전되도록 설계되었기 때문에 기동시를 제외하고는 보조연료 사용이 없어 증유 사용으로 발생하는 운전비가 절감된다.

또한 연소실로 공급되는 석탄의 입도가 6mm까지 허용되기 때문에 미분탄 보일러에서 사용되는 미분기가 불필요하므로 그만큼의 동력 소비가 적다.

4) 환경성능

유동층 보일러는 연소온도가 약 950℃로 미분탄 보일러에 비해 비교적 낮은 온도에서 운전되기 때문에 Thermal NOx발생이 억제되어 별도의 탈질설비 없이도 환경규제치를 맞출 수가 있다. 유동층 보일러의 가장 큰 장점으로 는 연소 중 석회석과의 반응에 의한 자체탈황이 가능하다는 것이다. 연소실내에 석회석을 주입하여 석탄과 함께 연소시키면 연소가스중 의 이산화황과 석회석이 반응하여 연소가스 중 의 황은 제거되고 석회석은 석고가 되어 석탄 회와 함께 배출된다.

연료의 유황분 함량에 따라 석회석 주입량 을 조절함으로써 배기 가스의 황산화물 배출농 도를 조절할 수 있다.

보일러의 연소효율이 상대적으로 높기 때문 에 이산화탄소등 배출가스의 발생량을 줄일 수

있는 이점도 있다.

별도의 탈황이나 탈질설비 없이 배출되는 배기가스의 농도는 SOx : 150ppm, NOx : 200ppm이며, 전기집진기를 통과한 배기가스 의 먼지 농도는 50mg/Nm³이다.

5) 회처리

유동층 보일러는 연소중에 탈황을 목적으로 석회석을 투입하기 때문에 보일러에서 배출되 는 비회나 저회 모두 석고를 일부 포함하고 있 다. 배출되는 회의 약 50%를 차지하는 비회 는 인근의 시멘트 공장으로 운반하여 시멘트 원료로 재활용토록 하였다.

저회는 건식으로 처리되며 특수 설계된 회 사장에 저장된다. 저회에 함유될 수 있는 미연 (미반응)석회석에서 발생하는 강알칼리성의 침 출수에 의한 해양오염을 방지하기 위하여 회사 장 바닥면은 투수계수가 10⁻⁷cm/sec이하인 점토를 70cm이상 다짐하고 해안쪽 벽면은 고 밀도 폴리에틸렌 필름을 사용하여 침출수의 누 수를 방지토록 하였다.

4. 결 론

유일한 국내 에너지 자원인 무연탄의 활용 도를 높이고 수입 에너지원을 줄이는 방안으로 범 정부 차원에서 무연탄을 전소하는 발전소 건설이 요구되고 있다.

무연탄 사용량은 1980년대 이후부터 급격 히 감소하였으며, 1996년말 기준으로 공급과 수요의 불균형에 의한 무연탄 재고량은 약 910만 톤에 이르고 있다. 국내 무연탄은 발열

<표 9> 배출가스 농도

항 목	규 제 치	배 출 치
Sox	150ppm	150ppm
Nox	300ppm	200ppm
Dust	50mg/Nm ³	50mg/Nm ³

량이 낮고, 강 마모성의 회분을 다량 함유하고 있어 재래식 미분탄 보일러의 연료로서는 적합하지 못하여 연소 안정용으로 중유를 보조연료로 사용하고 있으며 효율, 성능, 가동률이 낮게 운전되고 있다.

최근 범세계적으로 환경규제가 강화되면서 화석연료를 사용하는 화력발전소에서 배출되는 이산화탄소, 질소산화물, 황산화물의 배출농도 조절이 발전소 운전의 필수조건으로 부각되고 있다. 재래식 미분탄 보일러를 사용할 경우 별도의 탈황·탈질 설비를 설치하지 않고는 개정 강화된 환경규제치를 만족시킬 수가 없다.

이와 같은 사회·환경적인 조건과 기술적인 문제점을 만족시키기 위해서는 저 품질의 국내 무연탄을 보조연료 없이 전소시킬 뿐만 아니라 별도의 탈황이나 탈질 설비없이 환경규정을 만족시킬 수 있는 경제적이고 효율과 성능이 우수한 보일러 채택이 불가피하게 되었다.

유동층 보일러는 연소실내에 석회석을 석탄과 함께 투입하여 연소시키는 보일러로서 연소 중에 황산화물과 석회석이 반응하여 배출가스 중의 황산화물을 제거하며, 연소온도가 낮기 때문에 연소 중에 공기 속의 질소와 산소가 반응하여 발생하는 Thermal NOx의 발생이 억제되어 질소산화물 배출농도가 낮고 탈황이나 탈질설비가 요구되지 않아 다른 형식의 보일러를 채택한 발전소에 비해 투자비가 적다.

또한 유동층 보일러는 보조연료 없이 무연탄 전소가 가능한 점 등의 특성이 있어 운전유지비가 적고, 고효율 운전 등의 장점이 있다.

따라서 국산무연탄을 전소시키며 별도의 환경설비 없이 환경규제치를 만족시킬 수 있는 유동층 보일러를 사용하는 200MW급 2기의

동해화력발전소 건설을 추진하였고, 위치는 강원도 지역의 탄광에서 운송거리가 비교적 짧아 운송이 용이한 동해시 북평공업단지로서 하였으며, 제1호기가 1998년 9월말 준공을 하였고, 제2호기는 1999년 9월말 준공을 목표로 건설공사 중에 있다.

동해화력 1, 2호기가 준공되면 연간 약 120만톤의 강원도지역 무연탄을 소비할 수 있어 국산에너지원에 의한 전력 공급은 물론 석탄산업 활성화에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

우리는 이 경험을 토대로 하여 순환유동층 보일러가 국산무연탄 연소에 적합하도록 설계·제작·설치·시운전 등 전과정에 걸쳐 개선점을 찾아 보다 경제적이고 신뢰성 있는 기술을 축적하여 후속 사업에 적용하도록 하여야 할 것이다.

일본 등 기술선진국에서 용량과 사용연료의 차이는 있으나 발전소용 유동층 보일러의 채택은 상용화되어 있으며, 사업장폐기물 및 생활폐기물 소각로로서도 유동층 보일러를 성공적으로 활용하고 있다. 따라서 동해화력에서 축적된 설계·건설·운전등의 종합기술을 집약 활용하여 발전용 보일러 뿐만 아니라 향후 대량으로 처리하여야 할 각종 폐기물들을 소각처리할 수 있는 기틀을 만들 계기로 삼아야 할 것이다. ☞

