국내 상용 순환유동층 연소로 운전

1999. 6.

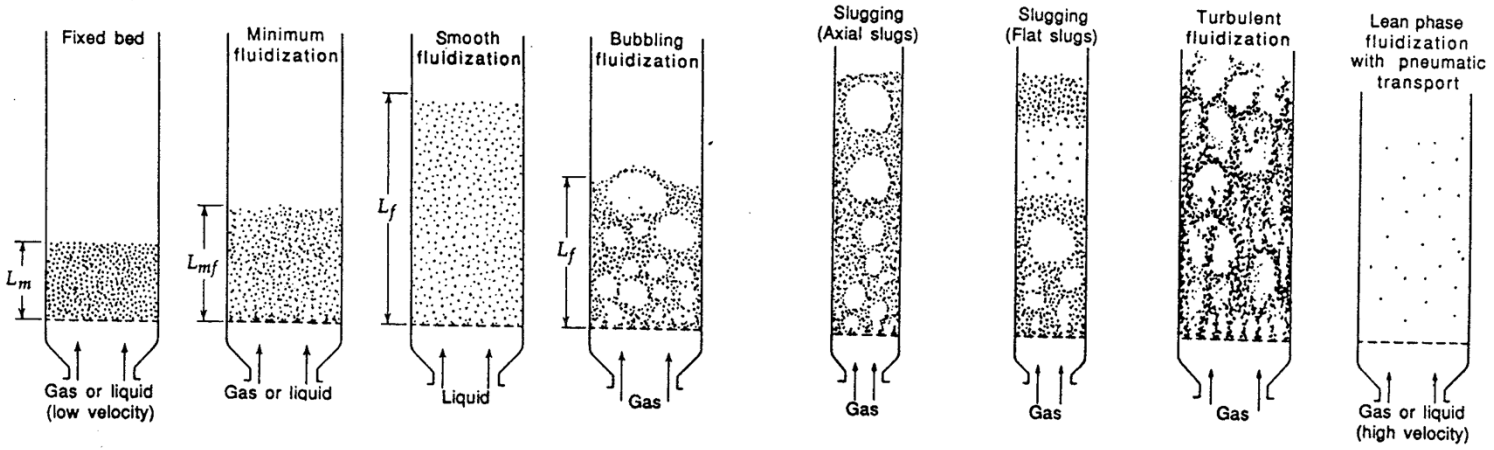
김 상돈
한국과학기술원

유동층의 기본 원리

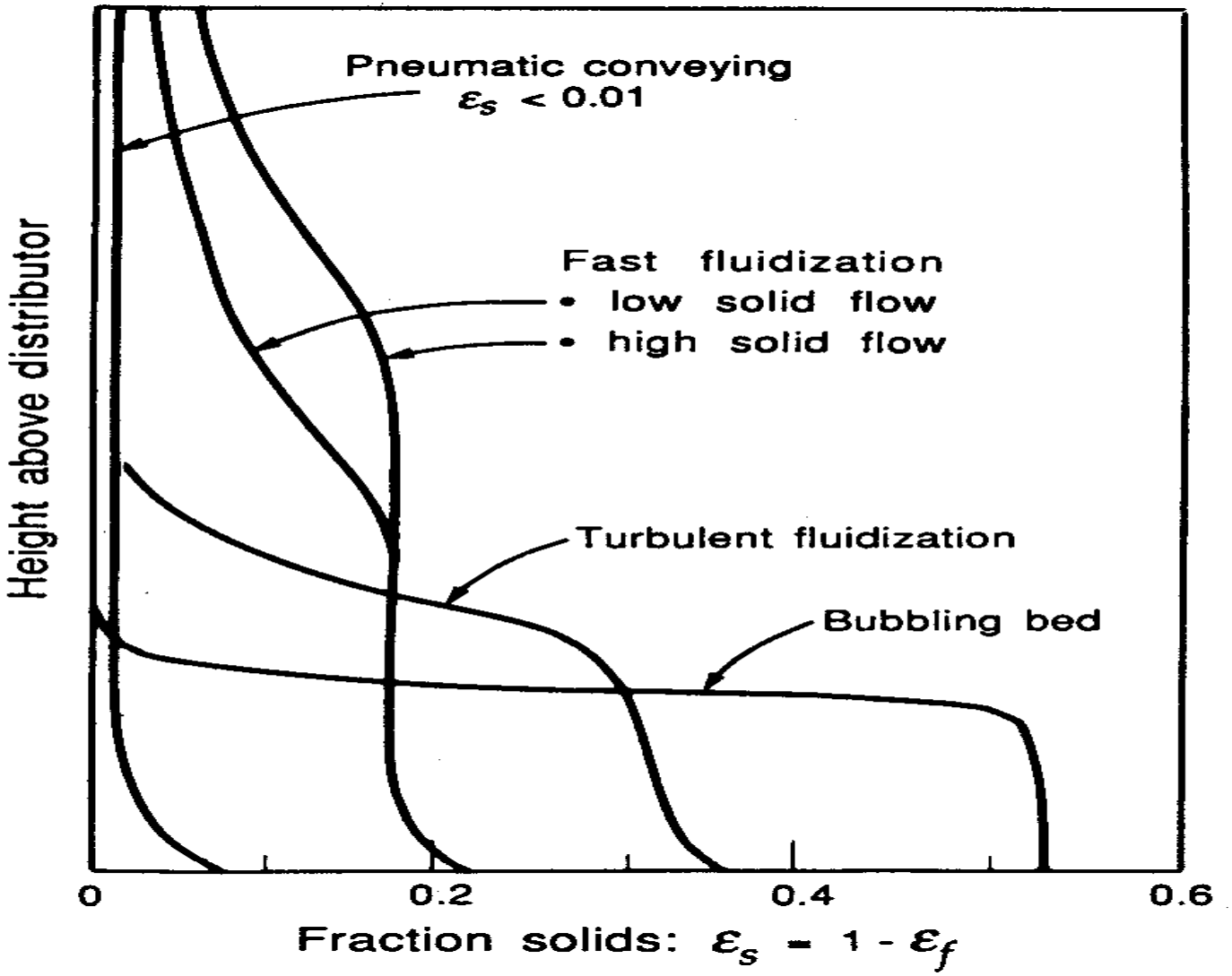
- Fluidization : The operation by which solid particles are transformed into a fluidilike state through suspension in a gas or liquid
- 장점
  - 액체와 같은 입자의 흐름 : 조작이 간편
  - 고체 입자의 빠른 혼합
  - 잘 혼합된 입자의 큰 용량
  - 대규모 조업에 적합
  - 열전달과 물질 전달이 높다
- 유동층 공정의 응용
  - 건조, 흡착, 냉각, 코팅, 열조절
  - 화학반응기 : FCC, Oxychlorination 등
  - 석탄 연소, 석탄 가스화, 소성, 폐기물 소각로, 열교환기

유동화 영역

- 유동층의 수력학적 거동
  - 유동층은 그림과 같이 여러 영역의 수력학적 거동을 띰
  - 영역들 사이의 전이 : 입자와 기체물성, 공탑속도 영향



유동층에서의 고체 체류량



유동층의 조업

- 조업 범위
  - 최소 유동화 속도와 종말속도 사이에서 조업
  - 중간적 범위에서 안정한 유동화가 가능

- 최소 유동화 속도
  - 상승기체에 의해 고체에 가해지는 항력=입자의 무게
  - 미세 입자에 대해 [Wen and Yu (1966)]

    $Re_{p,mf} = [(33.7)^2 + 0.0408Ar]^{1/2} - 33.7$

- 최대 유동화 속도 : 입자의 종말 속도에 의해 제안

기포

- U_{mb} 이상에서 발생 : 과잉 기체는 기포로 층을 통과
- 형상
  - 후류에 고체를 안고 상승, 층 표면에서 파괴, 프리보드에서 기체와 후류의 고체 입자 분리
  - 후류 : 주위의 에멀젼지역보다 늦은 압력, 불안정, 부분적인 붕괴와 난류의 혼합, 고체 입자가 기포를 따라 상승
- 형태변화 : 구형 → 평평하고 비틀려지고 →구형 cap
- 상승속도 : 큰 기포가 빠르게 상승
- 일련의 연속적인 기포 : 합체되고 더 큰 기포 형성
- 기포와 농후상 간의 가스 교환
  - 기포를 제외한 층의 공극은 최소 유동화 조건의 공극

고체 혼합

- 상승하는 기체 기포의 편류 : 고체 입자의 전체적인 순환
- 후류 : 소규모 입자의 혼합
- 넓은 입자 분포나 밀도를 갖는 고체 입자의 유동화
  - 크거나 무거운 입자 : 층 바닥에 가라앉는 경향
- 혼합과 분리 : 층 조건에 따라 평형 과정이 존재
- 반경 방향의 혼합
  - 축 방향의 분산 계수보다 훨씬 작다
  - 층 폭에 따라 증가
  - 프리보드로 흩어진 입자 : 얇은 층에서는 반경 방향의 분산 계수에 큰 영향

입자의 비말 동반과 비산

- 최소 유동화 속도 이상에서 조업
  - 유동층에서 배출되는 기체는 약간의 부유 입자를 운반
- 유동층 설계
  - 비말 동반되는 입자 분포, 비말 동반 속도, 층 형상, 기체 흐름 속도, 기체의 배출 위치 등
- TDH (Transfer Disengaging Height)
  - 프리보드 내의 입자의 밀도 : 높이에 따라 감소
  - 높이가 증가할수록 비말 동반되는 양 감소
  - 프리보드 높이에 따라 비말 동반되는 양이 일정해지는 높이

입자의 비말 동반에 미치는 인자

- 공탑 속도
  - 공탑 속도가 증가할수록 증가
  - 속도가 낮은 경우 : 속도의 증가에 크게 증가
  - 속도가 높은 경우 : 속도의 증가에 대한 영향이 작음
- 층 내의 방해판 (Internal Baffle)
  - 프리보드 내의 방해판의 존재 : 비말 동반을 감소
- 온도와 압력
  - 온도의 증가로 인한 밀도의 감소로 비말동반 감소
  - 압력이 높을수록 비말동반되는 양 증가
- 입자 크기와 밀도
  - 입자 크기가 작을수록 비말동반되는 양은 증가
  - 비말동반은 입자 밀도의 4 승, 입자 크기의 2 승에 반비례
  - 기체 밀도가 증가할수록 직선적으로 증가

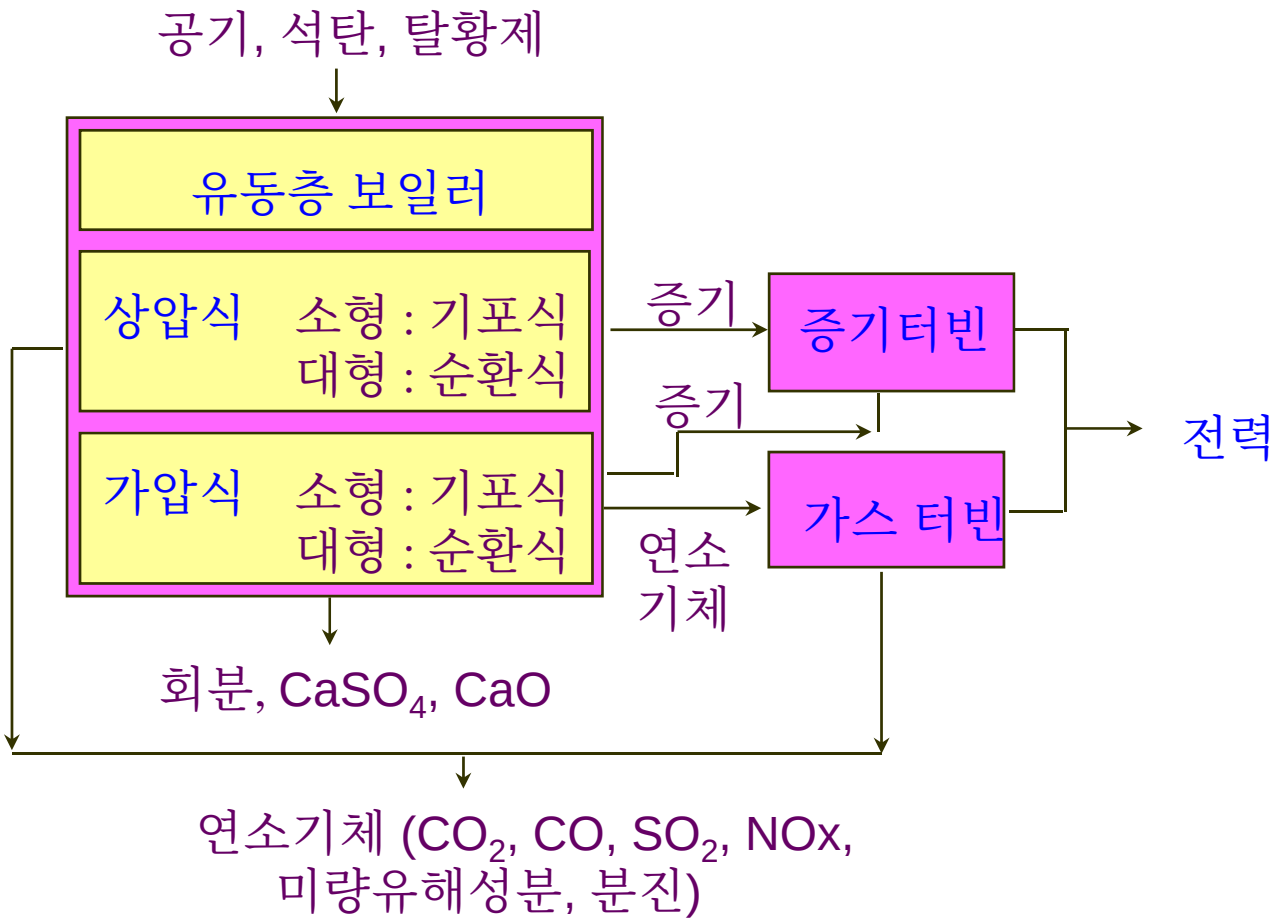
Industrial Application of Fluidized Beds

- 1920's — Winkler Gasifier
- 1940's — Fluid Catalytic Cracking (FCC)
  Phthalic Anhydride
  Drying
- 1050's — Fluid Hydroforming
  Fisher-Tropsch
- 1960's — 3-Phase Biochemical Processes
- 1970's — Circulating Fluidized Beds
  FCC Risers
  Polymer Synthesis
- 1980's — CFB Combustors
  Immobilized Enzymes
- 1990's — PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustor)

유동층 연소로

- 유동층 연소
  - 고온의 불활성 물질로 이루어진 유동층 위에 주입된 연료를 연소시키고 그 연소열을 이용하는 기술
- 유동층 연소로의 장점
  - 연료의 수용폭이 크다 : 저열량 연료, 고유황 함유 연료 등
  - 연료의 미분쇄가 필요하지 않다
  - 별도의 배연 탈황설비가 불필요
  - NOx 생성이 억제 : 낮은 연소온도, 단계적 연소
  - 경막 열전달 계수가 기존의 보일러 보다 크다
  - Slagging 과 fouling 방지
  - 부하 조절과 예열 단계에서 자동화가 가능

Flow Diagram of Fluidized Bed Coal Combustion Process



순환유동층 연소 기술 개요

- 순환유동층 (Circulating Fluidized Bed)
  - 기존의 기포 유동층에 비하여 높은 유속에서 조업되는 반응기로 고속의 기체와 작은 고체 입자간의 긴밀한 접촉을 통하여 비교적 여러가지 화학적, 물리적 작업을 수행하는 유동층 기술의 한 분야
- 순환유동층 연소로의 장점
  - 저급, 저열량의 연료를 포함한 다양한 연료의 연소
  - 우수한 고체 혼합특성에서 오는 높은 연소 효율
  - 우수한 기체-고체 접촉을 통한 높은 탈황효과
  - 낮은 연소온도와 단계 연소방식을 통한 낮은 NOx 배출
  - 격렬한 혼합에 의한 전체적인 연소로내 온도 균일성
  - 장기적인 조업능력의 우수성

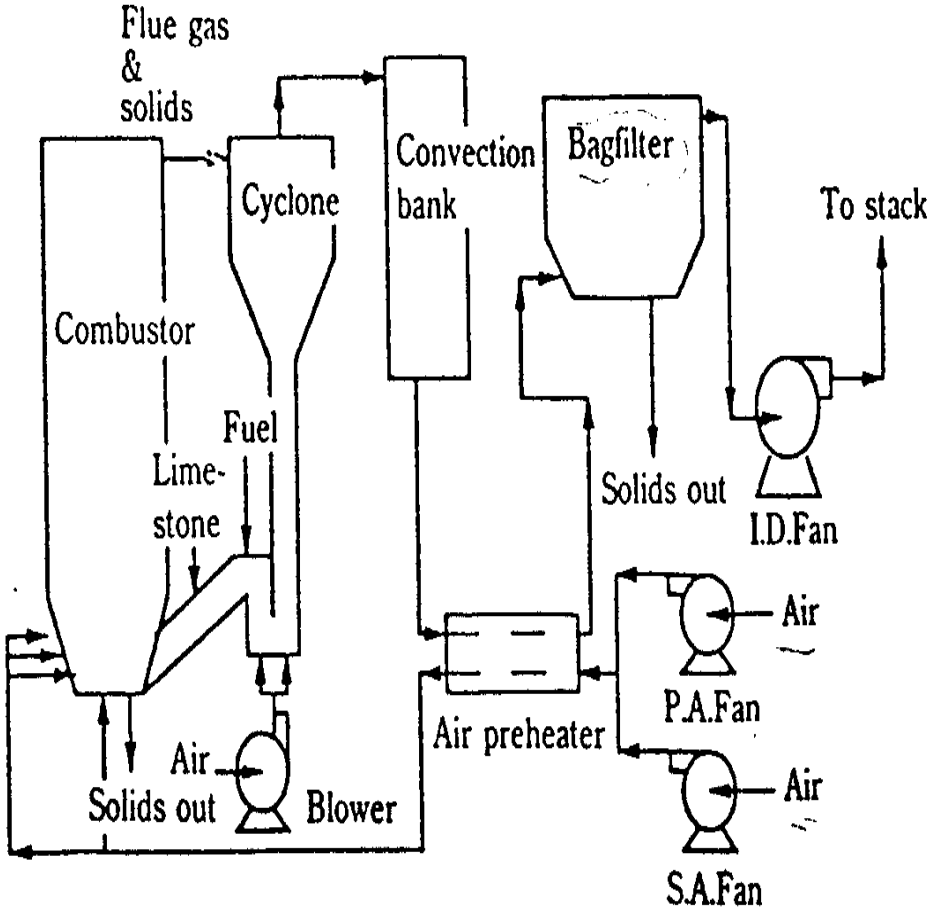
상용 순환유동층 연소로 설치 현황

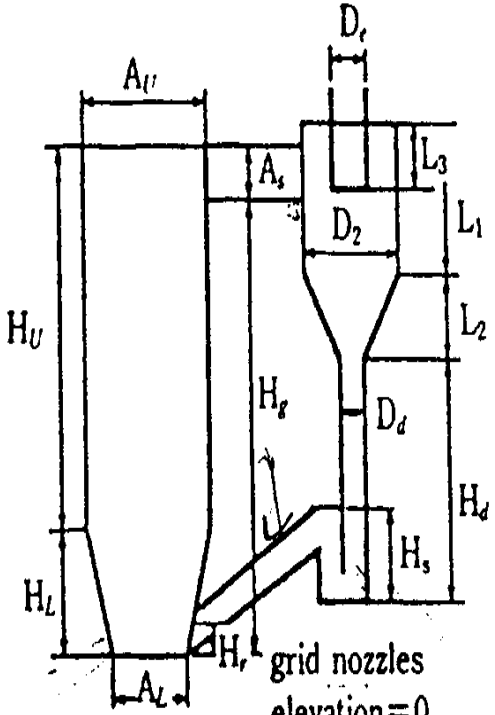
순환유동층 연소로 현황

Firing system	by Number (by Capacity)
BFBC	41 % (23 %)
CFBC	51 % (66 %)
PFBC	2 % (5 %)
Others (Circofluid, Cymic, etc)	6 % (6 %)

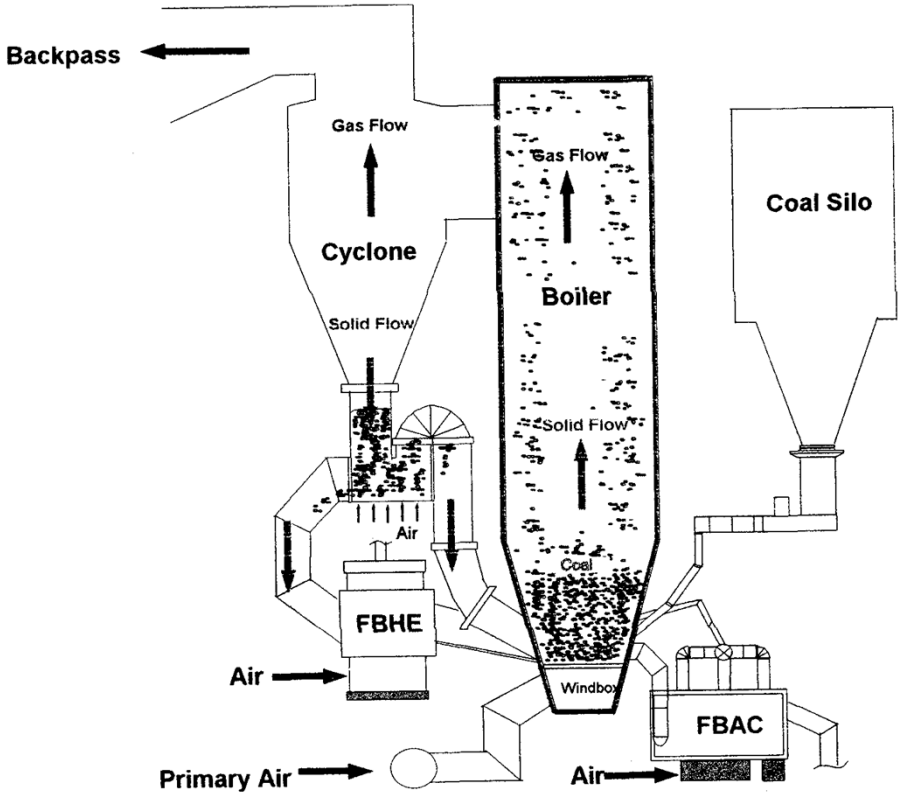
- 유동층 연소로는 전 세계적으로 약 600 여기가 있음
- CFBC 는 전력 생산량으로 전체의 66 % 차지

국내 CFBC 형태 (Ahlstrom 형태)





동해화력 순환유동층 연소로 (Lurgi 형태)



- 동해화력 특징
  - 외부 열교환기 설치
  - 3 개의 싸이클론, 3 개의 FBHE, 1 개의 FBAC 로 구성
  - 6 개의 석탄 주입구

국내 상용 순환유동층 연소로 현황

업체	설치년도	증기용량 (톤/시간)	설계연료	증기용도
동양화학	1984	120	유연탄	열병합발전
선경(수원)	1988	25	유연탄	공정용
선경(울산)	1989	200	유연탄	열병합발전
LG(여천)	1989	210	유연탄	열병합발전
현대정유	1989	120	유연탄	열병합발전
석유화학 지원공단 (울산)	1990	250	유연탄	열병합발전
부산염색 단지	1991	160 (80*2)	유연탄	열병합발전
고려아연 (온산)	1991	175	유연탄	열병합발전
삼양 GENEX	1990	60	유연탄	열병합발전
한국전력	1998	1,300 (660×2)	무연탄	열병합발전

국내 상용 순환유동층 연소로의 크기

Boiler user Steam capacity [t/h]	G 60	P 80	O 120	H 120	K 175	S 200	L 210	Ke 610
Grid Nozzles : orifice dia. [mm] number of tuyeres opening ratio [m2] [%] number of fuel feed number of bed drain	 14 750 0.115 1.84 1 1	 28 453 0.279 2.07 2 2	 7.5 1951 0.345 2.3 3 4	 3.5 954 0.338 2.14 2 2	 6.5 297 0.27 1.80 2 2	 3.5 1508 0.48 7.48 4 3	 3.0 1492 0.393 1.61 4 3	 33 736 2.52 3.94 6 2
Furnace: AL AU HL HU Hg Hr Number of gas exit	 1.8×3.48 3.74×3.7 3.695 17.10 17.4 0.4 1	 4.5×3 4.5×3 2.84 24.3 0.85	 2.18×7.2 3.95×7.2 2.93 15.08 14.95 1.29 2	 2.1×7.5 3.8×7.5 3.9 20.9 19.8 1.28 2	 2×7.52 4.24×7.5 6.93 26 2.11 1	 2.53×2.5 3.5×3.5 3.5 28.2 27.3 0.65 2	 2.5×9.8 4.97×9.8 3.2 25.6 25.0 1.05 2	 3.35×19.1 7.1×19.05 6.97 31.9 28.53 3
Cyclone: Number of cyclone Ac D2 L1 L2 De L3 Dd Hd Hs	 1 2.97×1.2 3.71 3.81 2.54 1.67 2.05 0.71 9.25 2.35	 U-beam separator 	 2 1.25×3.1 3.9 4.15 4.85 1.73 0.3 0.75 6.86 2.5	 2 1.2×2.9 3.7 4.0 4.6 1.7 1.5 0.71 8.5 2.12	 1 1.6×4.7 3.3 6.71 8.98 3.47 1.79 1.1 7.2 4.02	 2 4.4×2.13 5.6 4.41 2.35 2.98 2.39 0.9 10.36 1.5	 2 1.48×3.8 4.95 6.43 6.23 2.33 1.25 0.9 9.76 2.6	 3 6.02×3.05 6.994 7.3 8.813 3.75 1.28 1.31

국내 상용 순환유동층 연소로 규격

- K, Ke 연소로는 Lurgi 형태이며 그 밖의 연소로는 모두 Ahlstrom 형태
- 상용 유동층 연소로는 steam capacity 에 따라 단면적이 8 m^2 부터 25 m^2 까지 설치
- 싸이클론은 1-3 개가 설치
- P 연소로의 경우 싸이클론이 아닌 U-beam separator 이 설치
- K, Ke 연소로의 경우 외부 열교환기가 설치 (Lurgi 형태)

상용 순환유동층 연소로의 연료 주입구

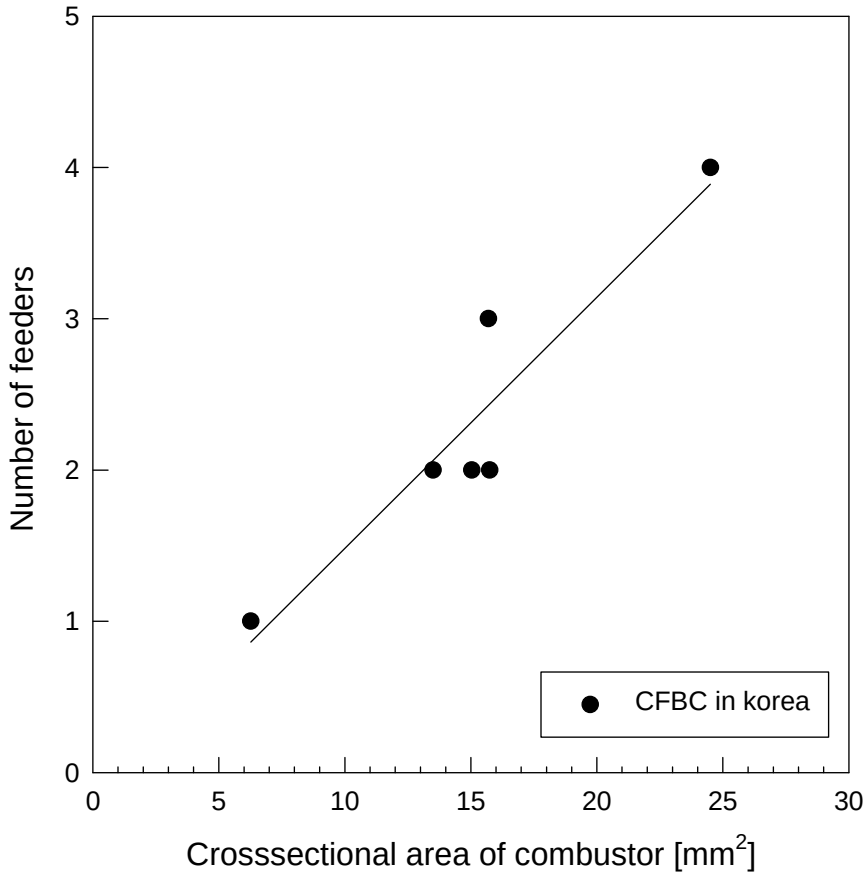


Fig. Number of feed inlets with crosssectional area of the combustor

- 석탄 주입구는 1-6 개로 되어 있음
- 연소로 하부의 단면적이 8 m^2 이상 증가시 석탄 주입구 증가

석탄 및 회재의 성분분석

Sample	G	P	O	H	K	S	L	Ke
High heating value [kcal/kg]	6,580	6,840	6,710	8,343	7,228	6,770	6,592	5,013
Proximate analysis [as dry basis wt %]								
Moisture	8.22	5.83	7.15	5.50	12.8	5.06	3.92	3.88
Volatile	32.51	32.10	34.07	9.11	35.1	31.07	28.17	5.25
Ash	5.63	6.79	4.92	1.64	6.5	5.37	12.29	33.36
Fixed carbon	53.64	55.28	53.86	83.75	45.6	58.5	55.62	57.51
Sulfur [as dry basis wt%]	0.30	0.31	0.27		0.31	0.29	0.90	0.53

Table Sample	G	P	O	H	K	S	U	Ke
Elemental analysis [dry basis wt%]								
SiO2	31.60	44.68	51.0	5.32	9.26	53.96	30-53	53.17
P2O5				0.02	7.75		0.1-0.3	
Al2O3	16.72	18.56	15.0	1.55		16.30	10-27	33.77
Fe2O3	11.18	7.72	7.2	0.45	10.76	10.91	1.3-17	4.43
CaO	23.87	13.12	21.5	51.26		6.55	7-13.6	0.70
MgO	0.96	1.04	2.0	0.53		3.54	0.4-2.3	0.76
K2O	2.45	2.36	1.3	0.09		0.72	0.2-1.3	4.19
Na2O	1.11	1.19	1.1	0.02		1.11	0.1-0.4	0.22
TiO2				0.04			0.3-2	
MnO				0.04				

석탄 및 회재의 성분분석

- Ke 연소로를 제외한 모든 연소로에서 유연탄을 사용하며 Ke 연소로에서는 무연탄을 사용
- 대부분의 유연탄의 항함유량은 0.3 wt% 이하의 탄을 사용하며 Ke 연소로의 경우 0.5 wt% 이상의 국내 무연탄을 사용
- 유연탄을 원료로 사용하는 연소로의 경우 bed material 로 모래를 사용하나 무연탄이 원료인 Ke 연소로의 경우 석탄 회재만을 bed material 로 사용

회재의 입도 분포

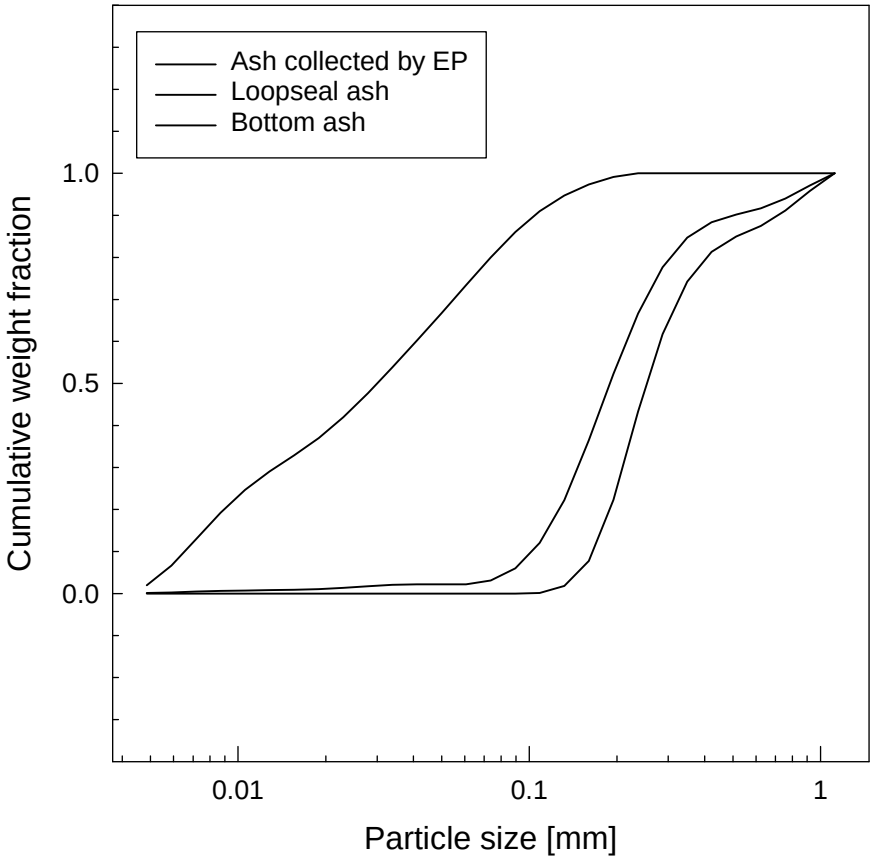


Fig. Particle size distributions of discharged solids in S CFB combustor

- 회재는 bottom, fly ash 로 나오며 loop-seal ash 와 bottom ash 의 경우 입도 분포가 비슷함
- 대부분 연소로에서는 0.1-1 mm 사이의 입자가 순환매체로 이용됨
- Ke 연소로의 경우 무연탄의 입도 분포가 넓어 fly ash 와 bottom ash 의 편차가 큼

사용 물질의 공급량

Sample	G	P	O	K	S	L	U	Ke
Steam [t/h]	54	80	95.1	170	166.2	180	250	620
Coal [t/h]	7.3	8.55	13.13	20	21	20	30	98
Limestone [t/h]	-	-	-	0.8	0.14	0.4	0.4	4.95
Air [Nm3/s]	14.41	21.22	23.95	43.51	52.95	47.23	68.6	149.58
Primary	8.13	10.59	15.94	18.72	32.33	27.78	44.6	87.22
Secondary	4.69	10.59	6.61	17.25	7.7	18.81	23	53.22
Burner	0.57		1.40		8.0			
Others	1.02	0.04		7.54	4.61	0.64	1	9.14

사용물질의 공급량

- Coal 주입은 steam generation 양에 따라 증가하며 Ke 연소로의 경우 100 ton/h 임
- 탈황제로 사용하는 석회석은 Ca/S ratio 로 2.5 이상 주입하며 G, P, O 연소로의 경우 석회석을 사용하지 않고 적정 SOx 규제치를 맞춤 (원료인 유연탄의 황함유량이 적음)
- Primary air 와 secondary air 의 비는 대략 0.5-0.6
- Primary air 와 secondary air 를 제외한 공기주입은 Lurgi 형태로 되어있는 K, Ke 연소로에서 타 연소로보다 많은 양의 공기가 주입됨 (외부열교환기에 유동화 기체로 주입)

배출가스 특성

Sample	G	P	O	K	S	U	Ke
SO2 [ppm]	269	106	412	75.48	107	50	115.3
NOx [ppm]		40	98.2	142.51	156	160	44.9
Dust [mgM]	9.2	24	57.6	12.58	7.38	12	5.96
O2 [%]	7.1	3.5	5.78	6.17	6.1	6	4.24

배출가스 특성

- SO_2 발생량은 탈황제를 사용하는 K, S, U 연소로에서는 100 ppm 이하로 배출되며 Ke 연소로에서는 120 ppm 이하로 배출
- NOx 발생량은 대부분 150 ppm 이하로 배출 (thermal NOx 의 생성이 적음)

온도 분포

- 연소로 하부의 온도는 대략 850 ºC 전후에서 운전이 이루어지고 있으며 석탄의 종류 및 운전의 용이성에 따라 운전 온도가 변함 (S : 800 ºC, O : 890 ºC, Ke : 870 ºC)

- 석탄 중 작은 입자가 비산되는 경우 loop-seal 및 싸이클론의 온도가 연소로 하부보다 높은 경향을 보임 (H, Ke)

Ke CFB combustor 온도분포

Furnace	Lower (0.74 m)	857 861 911 890 886
	Upper (5.64 m)	840 871 912 902 867
Cyclone	1	Inlet : 915 Outlet : 946 944 943
	2	Inlet : 929 Outlet : 991 989 986
	3	Inlet : 941 Outlet : 972 972 968
Sealpot	1	901
	2	948
	3	912
FBHE	1	144 249 185
	2	645 683 723
	3	468 688 749
FBAC	economizer	303 301 272 265
	cooler	262 231

Ke CFB combustor 온도 분포

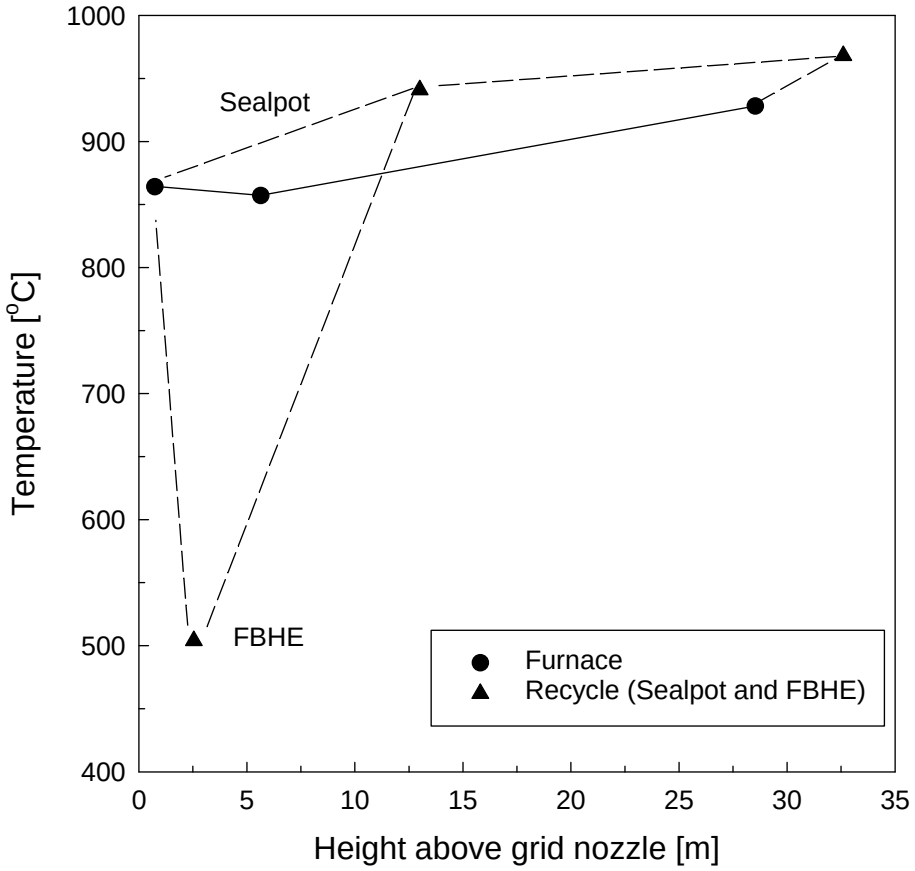


Fig. Temperature profile of Ke CFB Combustor

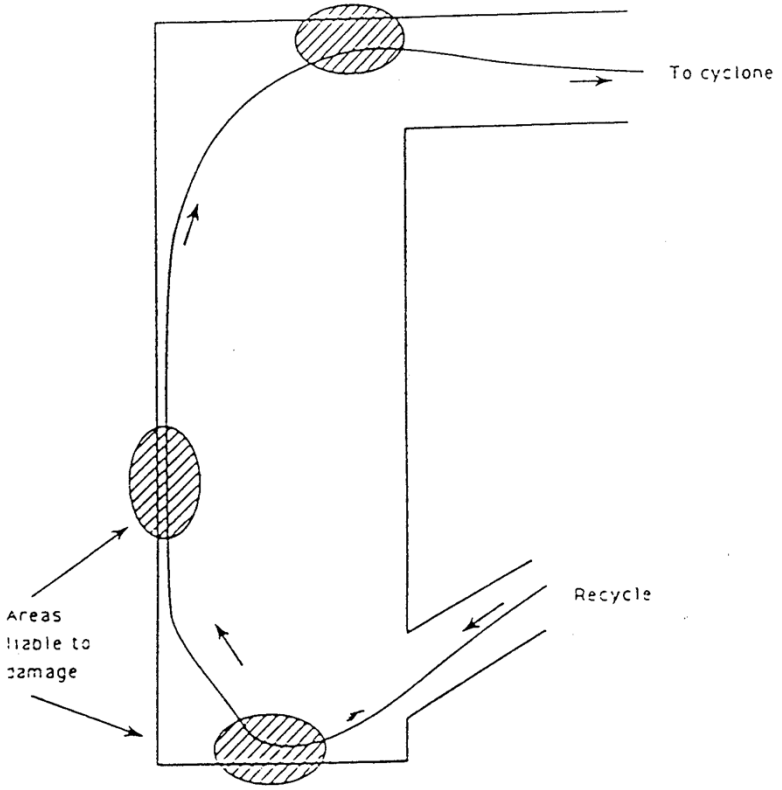
Ke 연소로의 온도 분포

- Ke 연소로는 무연탄을 원료로 사용하고 있어 무연탄의 연소 반응이 느리게 일어나므로 싸이클론 및 loop-seal 에서의 후연소가 발생하여 연소로 하부보다 40-50 ºC 이상 높게 운전됨

- 순환하는 고체는 loop-seal 과 FBHE 의 두가지 흐름이 존재하며 특히 FBHE 에서는 상대적으로 낮은 온도로 조업함

CFB 연소로의 문제점

- 마모의 발생
  - 보일러 하부
  - 분산판
  - 수관벽
  - 2차 공기 노즐
  - 연소로 상부
  - Cyclone 및 Loopseal
- 국내 상용 보일러
  - Economizer (tube)
  - Cyclone (wall, roof)
  - Bed burner



CFB 연소로의 문제점

- Clinker 의 발생
  - 회재 성분의 열적 변화
  - 유동 매질 및 석탄에서의 K_2O, Na_2O_3 의 함량
  - Dead zone 의 발생
- Clinker 의 특성 인자
  - B/A ratio : 0.4-0.7 에서 용융 가능성 최대

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

  - Si/Al ratio : silicate 를 형성하는 정도

$$\frac{Si}{Al} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$$

대처방안

- 마모 방지 대책 (마모에 대한 영향을 고려 설계)
  - 300 mm refractory and Y hook in combustor
  - Thermal spraying of Ni based alloy
  - Sandwich wall structure

- 국내 사용자들의 대처 방안
  - 연소실내 wall 부착물 및 돌출부 제거
  - 정기적인 tube thick 특정으로 마모부 육성 및 부분교체
  - Protector 설치 (Erosion screen 설치)
  - 로내 온도관리 : 온도차이 100 ºC 이하 유지
  - Tube 의 수명예측 및 조직 변화상태 진단

대처 방안

- Clinker 발생 방지 대책
  - 회재 분석을 통한 위험인자 파악
  - Local hot spot 의 파악 및 제거
  - Limestone 의 영향 파악

- 국내 사용자들의 대처방안
  - 유동물질의 미립자 함유량 축소 및 석탄의 미분탄 제거
  - Loopseal clinker : 석탄주입구 변경, 공기유량 증대
  - Startup : 모래는 입도가 작은 것을 사용, 석탄 투입 주의
  - 정상 운전: 연소로의 온도를 낮게 유지 (과잉공기량 증가)
    석탄의 입도분포를 작게 유지