

Cyclone 연소기의 연소특성

*현주수¹, 최상일¹, 박주식¹, 김성완¹, 하경용²
¹한국에너지기술연구소, ²에너지자원기술개발지원센터

요 약

석탄 직접연소의 신기술인 Cyclone 연소기술은 환경오염저감 기술중의 하나로서, 고온 연소로 인해 회분이 연소실 내부에서 용융, 제거된 후 고온의 청정연소가스만 보일러로 유입된다. 또한 연소기의 fuel-rich 연소조건하에서 생성된 고온의 불완전연소가스는 보일러 입구에서 충분한 재연소공기를 공급함으로써 완전연소시킬 수 있으므로 적은 시설투자 비용으로 기존 오일이나 가스용 보일러를 석탄용으로 전환이 용이할 뿐만 아니라 이러한 다단 연소방식을 채택하여 NO_x 제어도 가능하다는 이점이 있다. Cyclone 연소기술의 개발은 석탄의 청정연소 뿐만 아니라 그 기술을 토대로 석탄가스화, MHD 발전, 가연성 폐기물 소각등에도 활용할 수 있다.

따라서 국내 기술자립을 위해 실험용 Cyclone 연소기를 설계, 제작 및 연소실험을 수행한 결과, Peco-semi탄을 연료로 공급량 약 30 kg/hr, 공기비 약 1.0 일때 탄소전환율은 약 95 % 이며 회분제거율은 약 70 % 임을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

Cyclone 연소기에서는 접선방향으로 고속분사된 연소용 공기에 의해 연료 입자를 원심력으로 부유시켜서 내부 와류에 작용하는 항력과 평형에 의해 긴 체재시간을 부여하므로 주로 연소실 벽면에서 연소가 이루어지며, 고온의 연소분위기 온도로 인해 용융된 회분은 연소기내에서 포집, 제거된후 고온의 청정 연소가스만 열교환기로 보내지게 된다. 따라서 slagging, fouling성의 문제점 때문에 연소시키기 어려운 석탄 즉 회분함량이 많고 용융온도가 낮은 석탄의 연소도 가능하며, NO_x 와 SO₂ 제어가 가능하므로 Cyclone 연소기를 오일이나 가스용으로 제작된 보일러의 버너위치에 설치하여 용량 저하 없이 석탄용으로 전환할 수 있다.

실험용으로 개발된 2단 연소식 Cyclone 연소기의 연소성능실험은 Peco-semi탄을 연료로 하였으며 공기비와 석탄공급량 변화에 따른 연소특성을 알아보았다. 실험변수는 Precombustor와 Main Combustor에 공급하는 석탄공급량과 공기공급량, 연소용 공기유입구 위치등이며, 각 실험조건에서 연소실 내부온도, 연소가스 조성을 비교측정하고 실험종료후 포집된 용융 slag와 slag층 형성상태도 확인하였다.

2. 실험

실험용으로 제작된 Cyclone 연소기는 Fig 1.에서 보는 바와 같이, 회분 용융 온도 이상의 연소실 내부온도 부여 및 다단연소에 의한 thermal NO_x 저감을

위하여 Precombustor와 Main Combustor로 구성되었다.

수직형인 Precombustor의 제원은 내경 180mm 높이 300mm이며, 상단벽에는 직경 90mm 높이 30mm의 vortex finder를 설치하여 화염의 분산을 방지하고 선회효과를 높였으며, 수평형으로 설치된 Main Combustor는 용융 slag의 유동 및 포집을 용이하게 하기 위해 5° 경사진 형태이며, 내경 260mm 길이 600mm 그리고 vortex finder는 직경 130mm 높이 60mm 이다.

실험에 사용된 시료탄은 포항제철에서 제선용으로 수입하여 사용중인 호주의 Peco-semi탄으로서 분석결과 발열량 7299kcal/kg, 회분 9.99%, SiO₂ 47.44%, Al₂O₃ 26.22%, 용융온도(FT) 1388°C 이며 용융 slag의 흐름성 기준이 되는 점도 250 poise가 되기 위해서는 운전온도가 1450°C 이상이 되어야 함을 알수 있었다.

table 1.은 실험내용을 실험변수 및 조건별로 구분하여 정리한 것이며, table 2.는 각 실험조건에서 시료탄 공급량 30 kg/hr, 공기비 1.0인 경우의 연소실 내벽온도와 연소가스 조성 등의 실험결과를 나타낸 것이다.

실험조건II에서만 slag port에 냉각수가 없는 상태로 운전하여 64.2%의 포집효율을 기록하였다. 기술 선진국의 회재 포집제거율 80% 이상에 비교해 낮게 나타났으나, 실험초기 LPG 혼소시나 정상운전 상태에 도달하기 전의 효율도 포함한 수치이므로 이를 감안하면 실제 포집효율은 최소 70% 이상일 것으로 추측된다.

미연탄소분 측정치는 연소기내에서 회재가 포집되지 않고 연소가스에 실려 배출되는 미세입자를 포집하여 측정한 것으로서, 용융 포집된 전체의 약 70% 이상인 회재는 연소효율이 100% 이므로 전체 회재의 연소효율로 평가해서는 안된다.

그러나 배출되는 회재의 양과 미연탄소분 함량은 연소온도와 선회도, 체류시간에 민감하므로 측정항목에 포함시켰다.

실험조건I에서는 Precombustor의 내부온도가 시료탄으로 사용한 Peco-semi탄의 IDT 1,300°C와 유사한 온도 범위를 유지함으로써 회재가 sintered 상태로 연소실 내벽에 녹아 붙은 현상을 볼수 있으나, 실험조건II에서는 1,000°C 이하로 운전하고 실험조건III,IV에서는 FT 1,390°C 이상으로 운전함으로써 깨끗한 slag층이

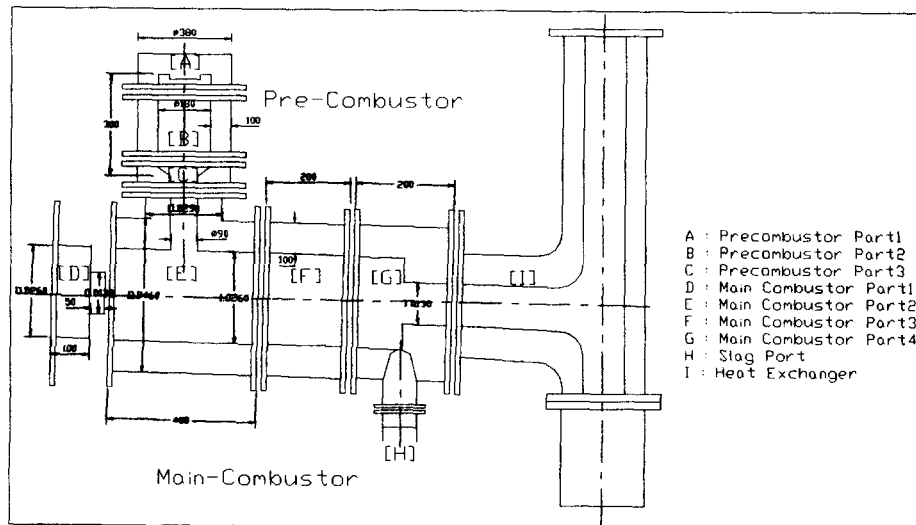


Fig 1. 2단 연소식 Cyclone 연소기

형성됨을 확인할수 있었다. 그러나 실험조건II에서 탄종이나 석탄 공급량의 증가 등 운전조건에 변화가 있을시에는 Precombustor 운전온도를 1,000°C 이하로 유지가 어려워 내벽에 sintered 상태의 회재입자가 용착될 우려가 있다.

실험조건III에서는 fuel-rich 조건으로 Precombustor를 고온 운전 함으로서 NO_x 발생량이 증가하나, 실험조건IV에서 Precombustor의 석탄공급율을 70%까지 높이고 공기공급율도 60%로 늘린 결과 연소온도가 더욱 높아짐에도 불구하고 NO_x 발생량이 격감되었다. 반면에 불완전연소로 인해 CO 농도가 급증하나, 이는 Main Combustor에서의 선화도 부족으로 불완전 연소가스와 공기와의 충분한 혼합접촉(mixing)이 부족하였기 때문이라 생각된다. 또한 연소기에서 회재가 제거된 후 배출되는 고온의 청정 연소가스는 보일러로 보내져 보일러 입구에서의 3차공기 공급에 의해 재연소시키는 시스템으로 구성되어야 하므로 연소기에서 측정된 탄소전환율을 기준으로 실험조건IV를 부적당한 운전조건이라고 규정짓기는 곤란하며 오히려 다단연소에 의한 NO_x 저감효과가 가시적으로 나타남이 주목된다.

table 1. 실험변수 및 실험조건

condition	coal (Pre:Main)	air (Pre:Main)	inlet(개)		velocity(m/sec)		비고
			Pre	Main	Pre	Main	
I	P30:M70	P60:M40	3	3	23	12	예열된 2차공기 공급
II	P30:M70	P50:M50	3	2	23	22	석탄공급량 변화
III	P50:M50	P40:M60	2	3	31	16	석탄공급량, 공기비 변화
IV	P70:M30	P60:M40	2	3	46	12	석탄공급량, 공기비 변화

table 2. 실험결과 (시료탄 공급량 : 30 kg/hr, 공기비 : 1.0)

측정항목		실험조건I	실험조건II	실험조건III	실험조건IV
연소실 내벽온도 (oC)	Pre1	1264	679	1362	1162
	Pre2	1307	848	1480	1502
	Pre3	1339	996	1628	1617
	Main1	1602	1452	1373	1600
	Main2	1686	1591	1550	1619
	Main3	1642	1613	1524	1556
연소가스 조성	O2(%)	0	0.71	0.48	0.76
	CO2(%)	17.66	17.68	17.64	13.90
	CO(%)	3.48	1.42	0.30	6.30
	NOx(ppm)	744	749	1016	301
석탄공급량(kg/hr)		30	30	30	30
공기비		1.0	1.0	1.0	1.0
미연탄소분(%)		3.4	9.5	3.1	2.2
포집효율(%)		-	64.2	-	-
탄소전환율(%)		95.2	97.2	95.5	73.8

실험조건II와 실험조건III에서 연소용 공기공급량은 일정하게 유지하면서 석탄 공급량을 20kg/hr, 30kg/hr, 40kg/hr로 변화시켰을 때 공기비는 약 1.4, 1.0, 0.8에 해당된다. 이때 연소실 내벽온도, 연소가스 조성 및 탄소전환율 측정결과는 table 3.과 같다.

전체적으로 실험조건II보다 실험조건III에서 연소분위기온도가 높으며, 석탄공급량이 증가할수록 온도가 높아짐을 알수 있다. 실험조건II에서 Precombustor는

약 1,000°C 내외의 온도로 non-slugging 으로 운전 되었으며, 실험조건III에서는 Precombustor도 1,450°C 이상의 고온에서 slugging 운전이 이루어지고 온도분포도 일정하다. 그러나 연소실 상단(Pre1, Main1)에서는 찬 연소용 공기의 유입으로 인해 온도가 낮은 현상을 보인다. 또한 석탄공급량을 증가시 공기비는 약 1.4에서 0.8까지 낮아져 fuel-rich 상태에서 불완전연소되므로 CO 농도가 급증하며, NO_x 농도는 연소온도의 상승에도 불구하고 오히려 감소되는 경향을 보이는데, 이는 Precombustor에서의 30-50% 석탄의 1차 연소후 Main Combustor에서 불완전 연소가스의 2차 재연소가 이루어지는 다단연소의 효과 때문이다.

그러나 연소온도가 높은 실험조건III에서는 NO_x 농도도 높으며 공기비 1.0인 석탄공급량 30 kg/hr 일 때 최고인 1,062 ppm을 기록했다.

table 3. 석탄공급량 변화실험 결과

측정 항목		실험변수	석탄공급량(kg/hr, 실험조건II)			석탄공급량(kg/hr, 실험조건III)		
			20	30	40	20	30	40
연소실 내벽온도 (oC)	Pre1		666	679	700	1269	1362	1236
	Pre2		703	848	912	1326	1480	1484
	Pre3		756	996	1291	1512	1628	1624
	Main1		1372	1452	1611	1178	1373	1327
	Main2		1416	1591	1686	1325	1550	1605
	Main3		1482	1613	1615	1351	1524	1620
연소가스 조성	O2(%)		6.29	0.71	0.1	8.23	0.48	0.02
	CO2(%)		14.06	17.68	9.17	11.52	17.64	16.92
	CO(%)		0.06	1.42	12.65	0.03	0.42	1.87
	NOx(ppm)		801	749	133	752	1062	690
공기비			1.46	1	0.77	1.44	1	0.82
탄소전환율(%)			77.3	97.2	50.4	62.3	95.5	91.6

다음으로 table 4.에 나타낸 바와 같이 실험조건III과 실험조건IV에서 석탄공급량은 30 kg/hr로 일정하게 유지하면서 연소용 공기공급량만 변화시키면서 공기비 변화의 영향을 알아보았다. 이때 공기비는 실험조건III에서 각각 0.81, 0.90, 0.95 이며, 실험조건IV에서는 0.87, 0.98, 1.06 이다. Precombustor에서 fuel-rich 상태로 운전하는 방법은 동일하나 실험조건III에 비해 실험조건IV에서는 Precombustor의 석탄공급율을 50%에서 70%로 증가시키고 공기공급율도 40%에

table 4. 공기비 변화실험 결과

측정 항목		실험변수	공기비(실험조건III)			공기비(실험조건IV)		
			0.81	0.9	0.95	0.87	0.98	1.06
연소실 내벽온도 (oC)	Pre1		1384	1362	1320	1119	1162	1187
	Pre2		1453	1480	1491	1474	1502	1507
	Pre3		1609	1628	1624	1596	1617	1604
	Main1		1407	1373	1323	1598	1600	1586
	Main2		1497	1550	1561	1606	1619	1631
	Main3		1420	1524	1557	1536	1556	1590
연소가스 조성	O2(%)		0	0.48	0.96	0.74	0.76	1.59
	CO2(%)		17.51	17.64	17.77	13.78	13.89	13.96
	CO(%)		1.78	0.42	0.13	6.86	6.3	3.34
	NOx(ppm)		841	1062	1052	281	301	404
탄소전환율(%)			92.7	93.4	94.1	72.9	73.6	73.9

서 60%로 늘려 가능한 많은 양의 연료를 Precombustor에서 1차연소시켜 연료입자의 체류시간을 늘리고자 하였다.

전체적으로 공기비 약 0.8-1.1 범위에서는 온도의 변화폭은 크지 않으며, 출구부근의 온도인 Main3이 Main2보다 낮아 연소기내에서 연료입자의 연소가 충분히 이루어진 후 연소가스가 배출되고 있음을 보여준다. 각 실험조건에서는 공기비가 커짐에 따라 미약하나마 CO 농도 감소, NO_x 농도 증가 추세를 보이고 있다. 그러나 연료 및 공기의 공급율을 변화시킨 실험조건IV에서는 연소온도가 높음에도 CO 농도가 급증하여 탄소전환율이 낮아진 반면에 NO_x 발생량은 약 35% 수준으로 감소되었다.

3. 결 론

석탄을 연료로한 Cyclone 연소기의 실용화나 경제성 확보를 위해서는 탄종이나 운전조건 등에 큰 영향을 받지 않으면서 범용으로 활용이 가능하여야 하며 운전방법이 간단한 최적의 운전조건이 규명되어야 한다. 따라서 최적 운전조건을 도출하기 위한 여러가지 실험조건 및 실험변수에 따른 연소성능실험을 수행하였으며 그 결과를 종합적으로 요약하면 아래와 같다.

(1) carbon conversion ratio가 95% 이상이며, 전체 회재의 약 70% 이상을 연소기내에서 용융 제거가 가능하다.

(2) 석탄 연소시 발생하는 회재를 연소기내에서 용융 제거하기 위해서는 Precombustor의 운전온도도 회재 용융온도 이상이 되어야 한다.

(3) 고온연소시 발생하는 thermal NO_x 저감을 위해서는 다단연소방식을 채택하여야 하며 Precombustor에서 fuel-rich 조건으로 불완전연소된 생성가스를 Main Combustor나 혹은 보일러 입구에서 재연소시킴으로서 NO_x 발생량을 저감시킬수 있다.

(4) 연소기 성능 향상을 위해서는 Precombustor에서 전체 석탄공급량의 50% 이상을 연소시키며, Main Combustor에서는 나머지 공급석탄 연소와 Precombustor에서 유입된 불완전연소가스의 재연소를 위해서는 선회도를 강화하여 체류시간뿐만 아니라 연소용 공기와 연료와의 충분한 혼합이 이루어지도록 하여야 한다.

4. 후 기

본 연구는 '94년부터 '96년까지 2년에 걸쳐 통상산업부, 에너지자원기술개발지원센터에서 지원한 절약과제 수행결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 현주수외, "Clean 연소를 위한 Cyclone 연소기 개발", 한국에너지기술연구소(1996)
2. 손용권, 현주수외, "Slagging Combustor에 개발에 관한 연구(III)", 한국에너지기술연구소(1993).
3. 현주수, "스래깅 연소기" 한국에너지기술연구소 에너지 R&D, 1992년/여름
4. 노수영, "석탄연소용 슬래깅 연소기내 거동해석", 충북대학교(1992).

5. Lewellen, W.S., Segur, H., and Varma, A. K., "Modeling Two-Phase Flow in a Swirl Combustor, COO-4062-5, 1977, Prepared for U.S. Energy Research and Development Administration, Aeronautical Research Associates of Princeton, Inc., Princeton, NJ.
6. Babcock and Wilcox, "Steam : it's Generation and Use" New York (1978)
7. Jang,Dong-Soon, Park,Ji-Young, Lee,Sun-Kyung, Na,Hye-Ryung, Song, Woo-Young, "Numerical Simulation Using Patankar's SIMPLE Method on several Energy and Environmental Problems: Clarifier, Pulverized Coal-fired Combustor, Axial-Vane Type Cyclone, Atmospheric Pollutant Dispersion, and lake turnover, '94 Materials and technology, BUCT-CNU, Beijing China, Oct 10-11 (1994).
8. Ohtake,K and Y.Naktake, "Cold Model Study of Flow Field and Slag Rejection "Efficiency in Cyclone Slagging Combustor", ASME/JSME Thermal Engineering Proceedings Vol.5,pp.239-244 (1991).
9. Patankar,S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flows," Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C.(1980).
10. Syred,N., T.C.Claypole and S.A.MacGregor,"Principled of combustion Engineering for Boiler, Ch.5 Cyclone Combustors" edited by C.J.Lawn, Academic Press (1987).