

# Slagging 연소기의 연소특성

현 주 수\*, 손 응 권, 이 시 훈, 박 철 우, 박 교 식\*  
한국에너지기술연구소  
\*에너지자원기술개발지원센터

## 요 약

Cyclone 원리를 이용한 Slagging 연소기술은 접선방향으로 고속공급되는 연소용 공기에 의해 석탄입자가 연소실 벽면에 체류하면서 벽면연소가 이루어지며, 3중 선회 유동장의 형성으로 연료의 체재시간이 길며, 고온연소시킴으로서 석탄중의 회분을 연소기내에서 용융제거하는 석탄 직접연소의 신기술이다. 실험용으로 제작된 75 kW급 Slagging 연소기에서 Alaska subbituminous 탄으로 성능실험을 수행한 결과 탄소전환율이 95% 이상이며 회분의 용융제거 효율은 약 70%인 것으로 판명되었으며, 연료의 적용범위를 확대하기 위해 Roto탄, Ulan탄 및 Roto탄에 국내 무연탄인 장성탄을 20% 혼합한 혼합탄에 대한 연소실험과 Alaska탄 입자크기의 영향도 알아보았다.

Slagging 연소기의 개발을 위해 소형 연소기 실험결과와 유동장 해석, Cold model test를 거쳐 현재 1MW급 연소기가 설계, 제작되어 실험하는 단계에 있다.

## 1. 서 론

석탄 직접연소의 신기술인 Slagging 연소기술은 IGCC나 유동층 연소등과 함께 유망한 차세대 환경오염저감 기술중의 하나로서, 연소기 내부에서의 회재 제거와 연소과정에서의 탈황, 탈질 제어가 가능하며 설비 규모가 작고, 적은 시설투자비용으로 기존 오일이나 가스용 보일러를 석탄용으로 전환이 용이하다. 에너지원으로서의 석탄이 차지하는 비중을 직시한 기술 선진국에서는 Slagging 연소기술이 이미 상용화 단계에 있으며 다음과 같은 활용분야를 갖는다.

1. 오일이나 가스용의 산업용 혹은 발전용 보일러를 석탄용으로 전환.
2. 강화된 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 배출 한계에 맞도록 기존 석탄 연소용 보일러의 대체
3. NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 저감이 요구되는 새로운 석탄 연소 보일러 설계에 적용
4. 기존 혹은 새로운 석탄 연소 보일러에서 저급 석탄의 경제적인 연소
5. 석탄 연소가스 터빈 발전에 직·간접적인 활용

Slagging 연소기의 기본 유동원리는 fig.1에서 보는 바와 같이, 접선방향으로 고속분사된 연소용 공기에 의해 석탄 입자를 원심력으로 부유시켜서 내부 와류에 작용하는 항력과 평형에 의해 연료에 긴 체재시간을 부여하고, 석탄 입자의

연소는 주로 연소실 비면에 체류하면서 이루어지며, 연소기내에서 석탄중의 회분을 용융제거시킴으로서 청정 연소가스만 열교환기로 보내지게 된다. 또한 Slagging 연소기는 보일러 외부의 기존 버너위치에 설치되어  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  및 회제의 제어가 가능하며, Fly ash를 극소화함으로써 오일이나 가스용 보일러를 석탄용으로 전환시에 용량저하를 피할 수 있다.

미국의 TRW, Coal Tech., TransAlta, AVCO 등에서는 Table 1에서 보는 바와 같이 Slagging 연소기의 개발이 완료되어 상용화 단계에 있으나 국내의 기술 수준은 실험실 규모의 소형 연소기 개발을 시작하는 초보단계에 있다.

## II. 실험

본 연구에서 실험용으로 제작한 75kW급 수직형 Slagging 연소기의 형태는 fig.2에서 보는 바와같이 내경 178mm, 높이 300mm로서 용량에 비해 소형임을 알수있다.

국내 수입되어 사용중인 석탄중에 석탄의 용융연소 실험에 가장 적합하다고 분석된 탄은 용융온도(FT)가 1215℃로 가장 낮은 Alaska Subbituminous탄이며, 사용연료의 다양화를 위해 인도네시아 Roto 미분탄과 호주 Ulan 미분탄도 실험하여 탄종 변화에 따른 연소특성을 알아보았다. 그리고 Alaska탄의 미분탄과 분쇄탄의 연소실험을 수행하여 석탄입자 크기의 영향을 비교 분석하였으며, 회분함량이 적으며 반응성이 높고 연소온도가 높은 Roto탄에 회분함량이 많으며 반응성이 낮은 국내 무연탄 중에 장성탄을 질량비 20%로 혼합한 혼합탄과 Roto탄의 연료특성을 비교함으로써 저열량탄의 적용 가능성 여부도 고찰하였다. 본 연구에 사용된 시료탄의 공업분석과 원소분석, 회분분석 및 용융온도 측정결과는 각각 Table 2,3,4에 나타내었으며, fig.3은 실험장치 개략도이다.

## III. 결과 및 논의

각 탄종별로 탄소전환율과 회분제거율, 미연탄소분을 측정한 결과는 fig.4에서 보는 바와 같다. 탄소전환율은 Alaska탄의 연소시에 96.8%로 가장 높으며 Roto탄의 경우 87.7%이고 Ulan탄 연소시에는 79.2%로 낮았고, 미연탄소분 발생량은 각각 0.6%, 11.2%, 30.9%로서 큰 차이를 보이고 있다. 그러나 회분제거율은 Alaska탄 연소시에 67.2%로 가장 높고 Ulan탄 61.1%, Roto탄 31.3% 순이었는데 이때 Alaska탄과 Roto탄 연소시에는 회분이 완전히 용융된 Slag로 포집된 반면 Ulan탄 연소시에는 회분이 용융되지 못하고 부분용융(sintered) 상태의 입자형태로 포집되었다. Alaska 분쇄탄의 경우 미분탄에 비해 전반적으로 연소성능이 저하되고, slag port에 포집된 회제도 일부는 용융된 slag로 포집되었으나 많은 양

이 미연탄소분이 약 13%인 입자상태로 포집되었다. 혼합탄 연소시에는, 반응속도가 느리며 용융온도가 높은 무연탄의 혼합에 따라 중간부벽과 하부벽의 온도가 크며 연료의 저열량화로 인해 연소분위기 온도가 낮아졌으며 포집된 회재도 용융상태와 sintered 상태가 약 50% 비율이었다.

따라서 Slagging 연소기의 연소성능 향상 및 사용연료의 다양화를 위해서는 석탄 연소시 발생된 열을 이용한 공기에열 시스템 설치가 요구되며 다음단계로 연소효율 향상을 위해 2차연소 시스템을 적용하여야 한다는 결론을 얻었다.

이상의 연구 결과에서 나타난 문제점을 보완하고 실용화를 위한 Slagging 연소기 개발을 위해서는 공급 석탄의 연소열을 이용한 연소용 공기 예열을 위해 다단 연소방식의 연소기 형태가 요구되고 연소기 용량을 scale-up하여야 할 필요가 있었다.

Slagging 연소기 개발 및 기술자립을 위하여 현재 위의 소형 연소기 실험결과와 유동장 해석 및 Cold Model Test를 거쳐 fig.5와 같이 2단 연소식으로 1MW급 Slagging 연소기를 설계, 제작하였으며 Roto탄을 연료로 연소성능 예비 실험이 수행중에 있다. 소형 수직형 Slagging 연소기를 연소용 공기 예열용 Precombustor로 활용하기 위하여 전체 공급석탄의 약 30%와 전체 공급공기의 약 80%를 Precombustor에 공급하고, Precombustor에서 fuel-lean 상태로 연소된 연소가스를 Main Combustor로 보내 나머지 70%의 석탄 연소시 연소기 내부를 고온의 slaging stage로 만들어 2차 연소시킴으로써 회분제거효율 향상 및 NO<sub>x</sub> 저감효과도 얻을수 있도록 하였다. 1MW급 2단 연소식 Slagging 연소기의 연소성능 실험결과는 차후 보고할 예정이다.

#### IV. 결 론

이상의 실험결과를 요약하여 정리 하면

- (1) Slagging 연소기는 기존 미분탄 연소기에 비해 연소기 내부용적이 약 1/25임에도 불구하고 석탄 입자의 긴 체제시간을 부여하며 석탄에 함유된 회분을 연소기내에서 용융제거시킴으로서 회재로 인한 slaging성이나 fouling성을 방지하는 등의 여러가지 장점이 있음이 확인되었다.
- (2) Alaska 미분탄의 연소성능이 가장 우수하여 탄소전환율 96.8%, 회분제거율 67.2%, 미연탄소분 발생량 2% 이내 였다. 현재의 연소시스템에서 연소성능의 향상을 위해서는 연소용 공기의 예열을 위해 연소열을 이용한 열교환 장치의 설치가 필요하다.
- (3) Ulan탄과 혼합탄은 현 시스템에서는 비용융연소방식(non-slagging type)으로 연소시키는 운전방법이 요구된다.

(4) Alaska 분쇄탄은 연소기 재원 및 운전조건 변화로 큰 입자의 체제시간을 늘리면 완벽한 용융연소가 가능할 뿐만아니라 연소성능도 크게 향상될 것으로 기대된다.

## V. 후 기

본 연구과제는 1992년에 과학기술처에서 지원한 특정연구개발사업과 1994년에 통상산업부 산하의 에너지자원기술개발지원센터에서 지원하는 절약과제의 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 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.
2. Field, M.A., Gill, D. W., Morgan, B.B., and Hawksley, P.G.W., "Combustion of Pulverised Coal", The British Coal Utilisation Research Association, 1967, p186-209 p251.
3. Babcock and Wilcox, "Steam:it's Generation and Use" New York (1978)
4. 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).
5. 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).
6. 손용권, 현주수외, "Slagging Combustor에 개발에 관한 연구", 한국에너지기술 연구소(1993).
7. 현주수외, "Clean 연소를 위한 Cyclone 연소기 개발", 한국에너지기술연구소 (1995).

Table 1 Slagging 연소기 기술개발 현황

항 목 기 업		규모 (MMBtu/hr)	실증실험 (hr)	탄소전환율 (%)	회분제거율 (%)	비 고	
						NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
미국	TRW	40	10,000	99.5	82-85	180ppm	70-90%
	Coal Tech.	30	900	-	90	70-80%	90%이상
	TtransAlta	25	-	-	-	-	-
	AVCO	25	-	95	50-70	-	-
한국	KIER	75 kW	-	96.8	67.2	-	-

Table 2 시료탄의 공업분석 및 원소분석 결과 (as received, weight %)

Coal	Proximate Analysis				Ultimate Analysis				
	M.	V.M.	F.C.	Ash	C	H	O	N	S
Alaska	16.7	35.1	35.1	8.7	55.2	5.4	28.1	2.0	0.22
Roto	17.0	40.5	41.1	1.4	66.0	5.7	24.0	1.3	0.27
Ulan	2.4	30.6	51.3	15.8	68.3	4.6	9.1	1.5	0.72
장성	3.0	5.8	55.2	36.0	55.7	1.1	3.5	0.1	0.5

Table 3 시료탄 회분의 화학적 조성 (weight %)

Coal	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	SrO
Alaska	49.23	18.13	6.08	12.17	2.28	0.47	1.32	0.82	0.35	0.56	0.12
Roto	32.58	27.49	21.23	4.11	1.85	0.24	0.87	0.25	0.24	0.17	0
Ulan	74.2	15.78	3.45	1.69	0.5	0.28	0.66	0.8	0.13	0.05	0.03
장성	52.11	31.53	4.41	1.0	0.89	0.17	3.61	1.46	0.23	0.09	0.03

Table 4 시료탄 회분의 용융온도 측정결과 (reducing atmosphere)

Coal	IDT	ST	HT	FT	ΔT
Alaska	1121	1171	1197	1215	94
Roto	1484	1504	1508	1511	27
Ulan	1456	1537	1558	1561	105
장성	1600<	1600<	1600<	1600<	-

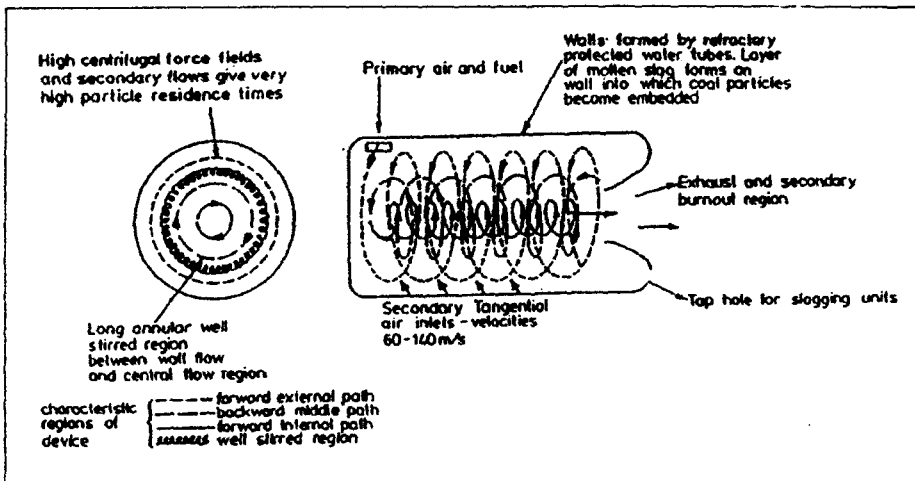


fig.1 Slagging 연소기의 유동특성

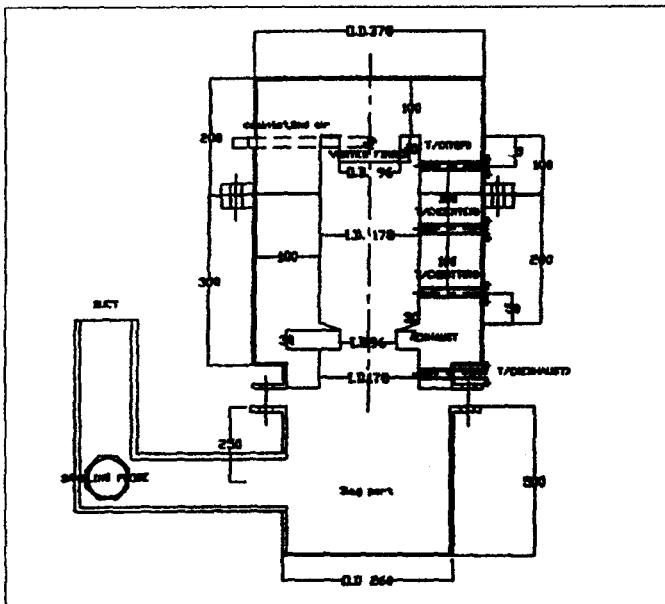


fig.2 75kW급 Slagging 연소기

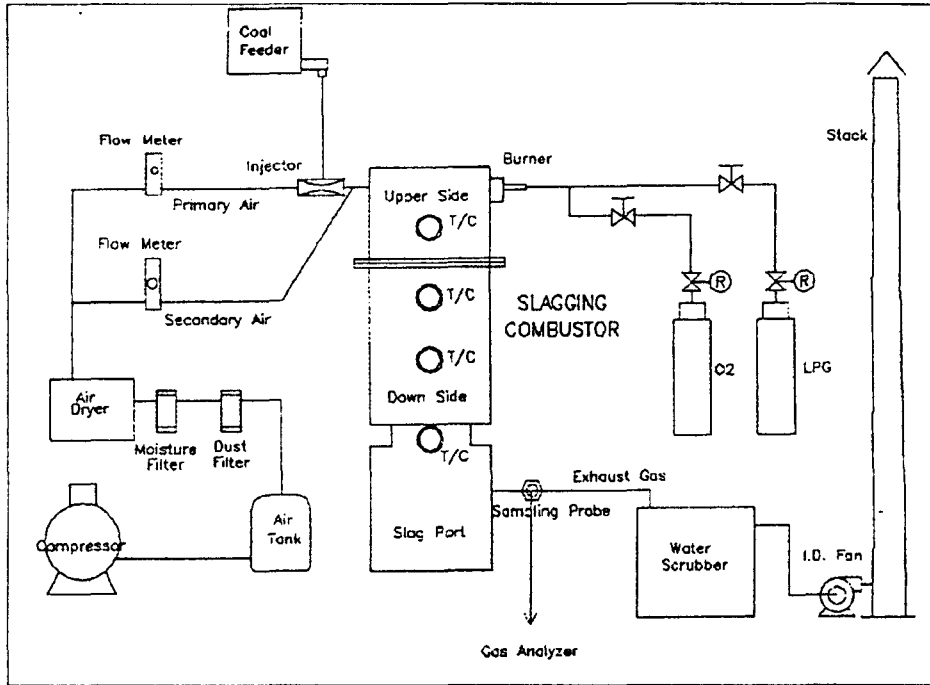


fig.3 실험장치 개략도

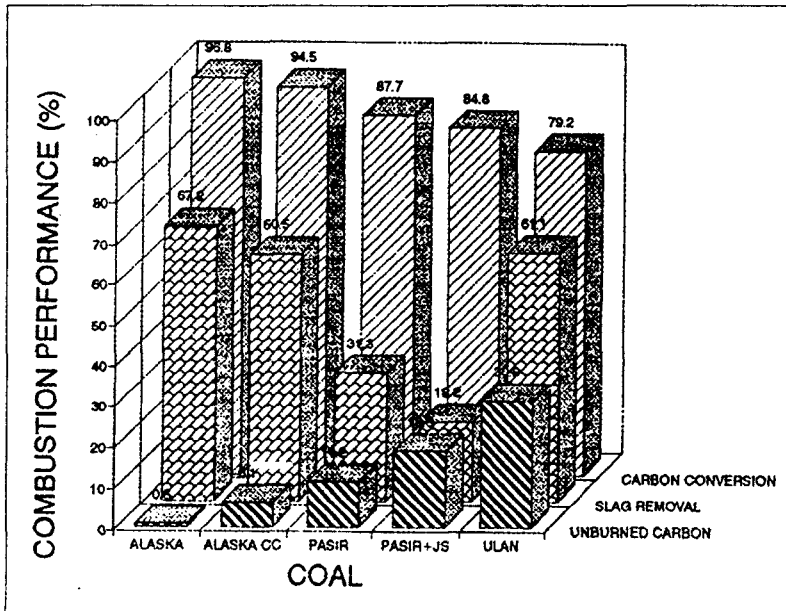


fig.4 75kW급 Slagging 연소기 성능실험 결과

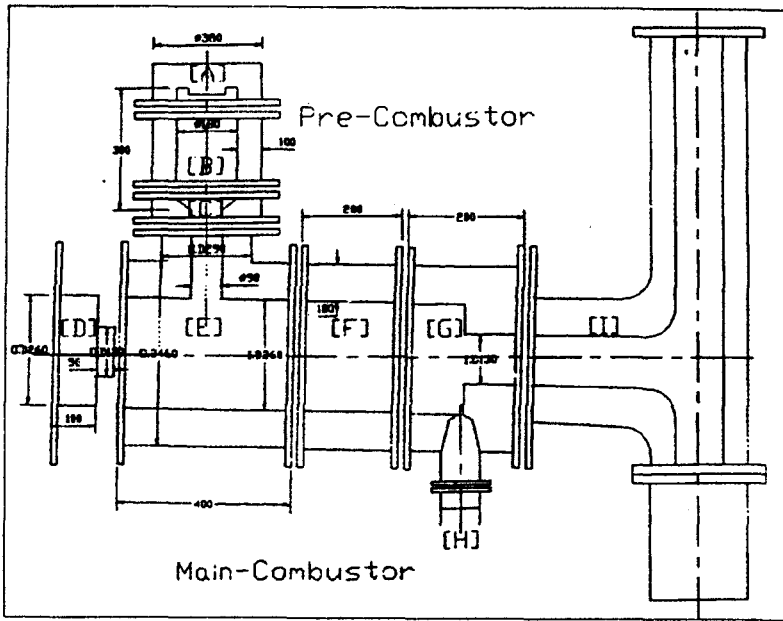


fig.5 2단 연소식 1MW급 Slagging 연소기