

cold flow model을 이용한 가스화기 내에서의 2상유동에 관한 연구

전영신*, 김형택*, 유영돈**

*: 아주대학교 에너지학과 ** : 고등기술연구원

1. 서론

석탄자원은 세계적으로 매장량이 풍부하고, 고루 분포되어 있어서 공급의 안정성 및 경제성면에서도 다른 에너지자원에 비해 유리한 조건을 갖추고 있다. 그러나, 석탄 연소시 많은 환경오염물질이 배출되므로 OECD에 가입한 우리나라로서는 기존의 석탄화력발전소로는 앞으로 강화될 배출기준에 맞출 수 없게 된 실정이다.

이에 선진국들은 청정에너지 활용기술인 석탄가스화 복합발전(IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle)을 발전시켜 왔다. 이 IGCC는 기존의 유연탄 화력발전 방식에 비하여 열 효율면이나 환경면에서 월등히 뛰어나다. 예를 들면, SOx는 기존의 유연탄 화력발전방식에 비해 95% 이상, 마찬가지로 분진도 95% 이상, NOx는 75% 이상 감소시킬 수 있다.

석탄가스화 복합발전 시스템은 석탄가스화기, 탈황설비, 가스터빈사이클 및 스팀사이클 등 크게 4가지의 부속 공정으로 분류할 수 있는 시스템이다. 여기서 이 논문이 다루는 시스템은 석탄가스화기이다. 석탄가스화기의 종류는 석탄의 주입방법에 따라 고정층, 유동층, 분류층으로 나누어 진다. 아주대와 고등기술연구원이 함께 연구를 수행하고 있는 가스화기의 종류는 분류층이다. 이 분류층은 석탄을 분쇄시켜서 200mesh로 만든 다음, 축방향으로 1차공기와 2차공기를 노즐을 통해 불어넣어 주어서 선회(swirl)가 발생하도록 하면서 가스화시키는 방식이다.

가스화기에서 선회를 발생시켜서 얻게되는 이득은 다음의 두가지를 크게 들 수 있다.

첫째, 선회연소기의 특유의 특성으로 급작스런 기체/고체 분리현상으로 인해 벽을 타고 흐르는 슬래그(slag)의 회수(trapping)을 원활히 할수 있다.

둘째, 석탄입자를 벽쪽으로 보냄으로써 연소와 가스화에 필요한 체류시간이 늘어나게 되어, 단위시간당 처리할 수 있는 석탄의 양이 많아 진다는 것이다. 다시 말하면, 플랜트의 크기를 줄일 수 있다는 예이다.

일반적으로, 선회연소는 화염을 안정화시키며, 분사되는 제트의 난류흐름을 증가시키고, 노즐 근처에서 혼합을 향상시켜서 재순환영역을 만든다.

분류층 가스화기에서 미연탄소분(未燃炭素粉)의 양을 줄이기 위해서는 체류시간이 길어야 한다. 이 논문에서는 미들섹션, 노즐형상, O₂/coal ratio, 1차 가스유량, 2차 가스유량을 변화시키면서 미연탄소분을 최소화 하는 최적의 연소조건을 찾는 것이 이 논문의 목적이다.

2. 실험방법

앞에서 언급했듯이 독립변수를 미들섹션, 노즐형상, O₂/coal ratio, 1차 가스유량, 2차 가스유량의 변화로 놓고, 종속변수를 가스화기 하단으로 떨어지는 석탄입자와 성장, 특성이 비슷한 FCC(Fluidized Cracking Catalyst)의 양을 측정한다. 밑으로 떨어지는 양만으로는 가스화기 내부의 현상을 규명하기 힘들기 때문에 5공튜브를 이용하여 가스화기 내부의 유동장분포를 분석해 보려고 한다.

연구 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다.

1) 현재 아주대학교 내에 설치되어 운전중인 BSU gasifier와 1:1 scale로 제작한 아르셀 cold flow model에서 노즐을 변화시키면서 1차가스 유량을 고정시키고 2차가스 유량을 변화시키고, 또 2차가스 유량을 고정시키고 1차가스 유량을 변화시키면서 가스화기 하단으로 떨어지는 양을 측정하였다.

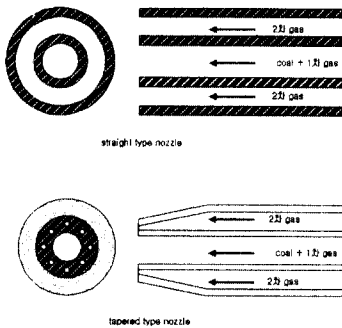
- 2) O₂/coal ratio를 0.6, 0.8, 1.0, 1.2로 변화시키면서 가스화기 하단으로 떨어지는 양을 측정하였다.
- 3) 미들섹션의 주입각을 변화시키고 O₂/coal ratio를 변화시키면서 가스화기 하단으로 떨어지는 양을 측정하였다.
- 4) swirl의 정도를 알기 위해 target circle의 크기를 다르게 한 미들섹션을 교체하면서 5공튜브를 이용하여 3차 원속도를 측정하였다.

위의 실험을 기초로 기체/고체 2상의 유동특성을 파악하여 최적연소조건을 찾아내고자 한다.

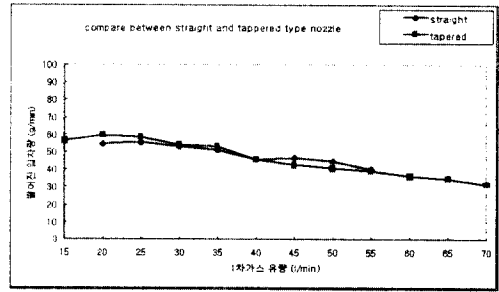
3. 결과

1) 노즐 타입 변경 실험

본 실험에서는 [그림 1]과 같이 노즐의 형태를 straight type과 tapered type으로 변화시키며 1차가스와 2차가스의 유량을 변경시킬 경우 투입 석탄중 떨어지는 중량을 측정하였다. 두 가지 노즐 type에 대하여 각각 2계통의 실험을 행하였다. 첫 번째는 2차가스의 유량을 고정시키고 1차가스의 유량을 변화시켰으며 두 번째는 그 반대로 실험을 행하였다. [그림 2]는 2차가스의 유량을 31.3 l/min으로 고정시키고 1차가스의 유량을 변경시킨 실험결과로 1차가스의 유량이 40 l/min보다 적으면 straight type nozzle이 떨어지는 중량이 적으나 40 l/min보다 많으면 tapered type이 우수한 결과를 가져왔다.

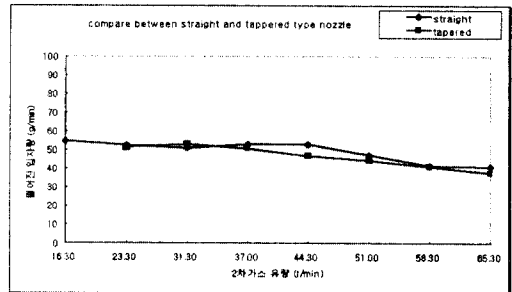


[그림 1-1] straight type nozzle과 tapered type nozzle



[그림 2] 1차가스 유량 변화에 따라 떨어지는 입자량 (2차가스 유량 = 31.3 l/min)

[그림 3]은 1차가스 유량을 30.0 l/min을 고정시키고, 2차가스 유량을 변화시키며 떨어지는 입자량을 측정된 결과로 비슷한 경향을 보이나 2차가스 유량이 35-58 l/min 범위에서는 tapered nozzle이 우수한 결과를 보여주었다.

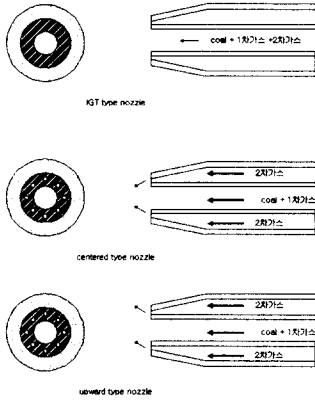


[그림 3] 2차가스 유량에 따라 떨어지는 입자량 (1차가스 유량 = 30.0 l/min)

2) 노즐의 끝단 분사 방향 변경 실험

본 실험에서는 실제 상황과의 재현성을 위하여 입자를 석탄으로 바꾸고, supplementary 가스를 주입하였다. 가스/coal ratio의 변화, 노즐 타입을 변화시키면서 입자의 떨어진 양을 측정하였다. 노즐 타입은 [그림 4]에 있는 바와 같이 2차가스는 8°의 각도로 가운데로 모이거나 상방향으로 분사된다. 또한 가스/coal ratio에 따라 1차가스, 2차가스 및 supplementary 가스의 유량을 <표 1>과 같이 선정하여 실험을 수행하였다. supplementary 가

스는 실제 가스화기 석탄이 가스화되어 전체가스 volume 이 늘어나고 또한 고온에 의해 가스가 팽창되므로 가스 화기 내부에서 입자들이 buoyancy 영향이 있으므로 이를 보정하기 위하여 유입되는 가스를 의미한다.

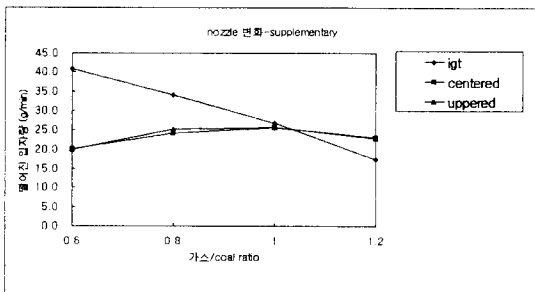


[그림 4] 노즐타입

[그림 5]는 실험 결과로 centered type과 upward type 노즐은 가스/coal 비에 따라 비슷한 경향을 보였으나, IGT type nozzle은 가스/coal ratio가 증가할수록 떨어지는 입자량이 점점 감소하였다. 본 실험과 관련하여서 향후 검증실험이 필요하다고 사료된다.

<표 1> 주입조건

가스/coal ratio	0.6	0.8	1.0	1.2
1차가스 (l/min)	27.7	31.1	34.5	37.9
2차가스 (l/min)	34.0	45.3	56.7	68.0
supplementary (l/min)	117.0	113.4	109.7	106.0



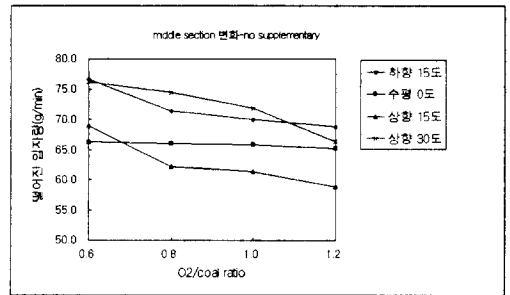
[그림 1-5] 가스/coal ratio 변화에 따라 떨어지는 입자량 (supplementary는 표 2 참조)

3) 노즐 축방향 주입각 변경 실험

실제 가스화기 운전시 가스화기 내부에 flow 평형이 안 맞으며 particle들이 서로 부딪혀 떨어지는 경향이 있고, 또 flux로 첨가되는 석회석은 비중이 높아 가스화기 하단부로 떨어지는 경향이 있다. 따라서 본 실험은 노즐 타입을 IGT type으로 고정시키고, 가스/coal ratio를 변화시키며 미들섹션의 축방향 주입각을 변화시켜면서 입자의 떨어진 양을 측정하였다. 주입조건은 <표 2>에 있는 바와 같이 가스/coal ratio에 따라 1차가스 및 2차가스 유량을 점점 증가시켰다.

<표 2> 노즐 축방향 주입각 변경실험의 주입조건

O2/coal ratio	0.6	0.8	1.0	1.2
1차공기 (l/min)	28.9	32.3	35.7	39.1
2차공기 (l/min)	34.0	45.3	56.7	68.0



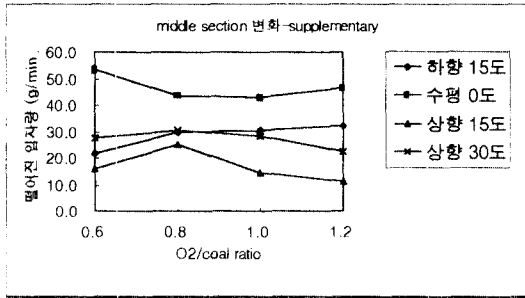
[그림 6] middle section의 축방향 주입각 변화시 떨어지는 입자량

[그림 6]에 있는 바와 같이 본 실험은 상향 15, 30도, 수평, 하향 15도의 축방향주입각 조건에서 수행되었으며 대체적으로 상향 15도가 제일 우수한 조건으로 나타났다. 상향 15도의 축방향 주입각이 제일 적은 떨어지는 입자량을 갖는다는 사실을 검증하고자 거의 동일한 시험을 실제 가스화 상황(supplementary 가스 흘려주는 조건)에서 수행하였다. 이 실험은 노즐은 IGT에 고정시키고, 가스화 현상이 일어난다는 가정하에 그만큼 가스를 주입시켜주고, 가스/coal ratio를 변화시키면서, middle section의 축방향주입각을 변화시키면서 떨어진 입자의 양을 측

정한 것이다. 주입조건을 가스/coal ratio에 따라 <표 3>과 같다.

<표 3> 실제가스화 상환시 주입각 변경실험의 주입조건

O ₂ /coal ratio	0.6	0.8	1.0	1.2
premix (l/min)	28.9	32.3	35.7	39.1
annular (l/min)	34.0	45.3	56.7	68.0
supplementary (l/min)	169.7	166.1	162.4	158.7



[그림 7] middle section의 축방향주입각 변화시 떨어지는 입자량 (supplementary 가스 주입으로 실제가스화 상환모사)

실험결과 [그림 7]과 같이 역시 상향 15도의 축방향 주입각이 가장 적은 떨어지는 입자량을 나타내는 것으로 확인되었다.

4. 결론

3장의 실험결과로부터 middle section은 축방향으로 상향 15도의 각도로 분사시켜주는 것이 입자가 가장 적게 떨어지고, 노즐 타입은 가스/coal ratio에 따라 IGT type과 다른 타입과는 틀려지지만 upward type과 centered type은 차이가 없음을 발견할 수 있다. 실제로 가스화상환에서는 cold model과는 다른 결과를 보일 수 있다. 왜냐하면 화학반응이 발생하면서 온도가 올라가고 석탄입자는 점점 줄어들게 되는 비선형성이 발생하고, 또 부피가 팽창하면서 압력이 증가하게 되면 유속이 빨라지게 되어 난류가 발생하게 되는데, supplementary 가스를 주입하는 것으로는 이 상황을 정확하게 나타낼 수 없기 때문이다. 따라서 본 실험결과로부터 얻어진 middle section과 nozzle의 최적조건을 실제 가스화기에 적용시켜 보아야 한다.

5. 참고문헌

- [1] J. M. Beer, N. A. Chigier, 'Combustion Aerodynamics', Robert E. Krieger Publishing Company, 1983
- [2] A. K. Gupta, D. G. Lilley, N. Syred, 'Swirl Flows', Abacus Press, 1984
- [3] Stephen R. Turns, 'An Introduction to Combustion', McGraw-Hill, 1996
- [4] A. Murty Kanury, 'Introduction to Combustion Phenomena', Gordon and Breach Science Publishers, 1975
- [5] Kenneth K. Kuo, 'Principles of Combustion', Wiley, 1986
- [6] Richard C. Flagan, John H. Seinfeld, 'Fundamentals of Air Pollution Engineering', Prentice Hall, 1988
- [7] G. Rudinger, 'Fundamentals of Gas-Particle Flow', Elsevier Publishing Company, 1980
- [8] Frank M. White, 'Viscous Fluid Flow', McGraw-Hill, 1991
- [9] 손병진, 맹주성, 이상환, '상설유체역학', 회중당, 1992
- [10] 이상남, '고부하 연소기의 유동장 특성에 관한 연구', 석사학위 논문, 1996
- [11] 임영환, 'Cold Flow Model을 이용한 석탄가스화기 내 2상(기체/고체) 유동혼합 특성연구', 1997
- [12] 통산산업부, 'Bench Scale급 석탄가스화기 운전 및 모사기술 개발(I)', 1997
- [13] IGT, BSU Plant Design Package, 1994
- [14] N. Syred, J. M. Beer, 'Combustion in Swirling Flow: a Review', Combustion and Flame Vol 23, 143-201, 1974
- [15] Dehong Zhang, Philip G. Hill, 'Effect of Swirl on Combustion in a Short Cylindrical Chamber', Combustion and Flame Vol 106, 318-332, 1996
- [16] Jonathan W. Naughton, Louis S. N. Cattafesta III, Gary S. Settles, 'An Experimental Study of Compressible Turbulent Mixing Enhancement in Swirling Jets', Journal of Fluid Mech. Vol 330, 271-305, 1997