

〈논 문〉

## 분류층 건식 석탄가스화기에서의 가스화 특성

유영돈\* · 윤용승\* · 박호영\*\* · 안달홍\*\*

(1997년 6월 2일 접수)

### Gasification Characteristics in an Entrained Flow Coal Gasifier

Young Don Yoo, Yongseung Yun, Ho Young Park and Dal Hong Ahn

**Key Words :** Gasifier(가스화기), Oxygen/Coal Ratio(산소/미분탄 무게비), Carbon Conversion(탄소전환율), Cold Gas Efficiency(냉가스효율)

#### Abstract

Entrained coal gasification tests with Datong coal were performed to assess the influence of oxygen/coal ration and pressure. When gasification condition in oxygen/coal ratio has changed from 0.5 to 1.0, optimal gasification condition from low pressure runs was oxygen/coal ratio of approximately 0.9 where CO was produced about 40% and H<sub>2</sub> about 20%. Under the pressure condition of 12-14 atmospheres, optimal oxygen/coal ratio value was in the region of 0.6 where CO was produced about 55% and H<sub>2</sub> about 25%. From these results, it was found that the oxygen/coal ratio for the maximum production of CO and H<sub>2</sub> was decreasing with the increase in gasifier pressure and also, with increasing oxygen content, carbon conversion was increased. For the Chinese Datong coal, cold gas efficiency was in the range of 40~80%.

#### 1. 서 론

석탄을 이용한 차세대 발전 시스템으로 석탄가스화 복합발전(IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle)이 하나의 대안으로 제시되고 있다.<sup>(1)</sup> 고정정 환경성의 측면에서 석탄가스화 복합발전설비는 기존의 유연탄 화력발전 방식에 비해서 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 및 분진 등의 배출량을 크게 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 재(Ash)를 분진형태가 아닌 용융된 후 잉긴 슬래크형태로 수거하므로 환경적으로 안전하며, 슬래크와 탈황공정에서 만들어지는 황원소를 회수하여 경제성 있는 부산물로 활용할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 이유로 국내에서도 석탄가스화 복합발전 시스템의 상업화를 위한 기초 및 응용

연구개발에 최근 관심이 집중되고 있다.<sup>(2~5)</sup> Fig. 1에 IGCC 공정의 개략도를 나타내었다. 먼저 가스화 시스템은 25기압 이상 고압에서 미분탄과 산화제 등을 반응시켜 석탄가스를 추출하는 가스화기와 1400℃ 이상의 고온 석탄가스를 냉각시키는 가스냉각기로 구성되어있다. 생성가스는 공해 물질인 황화수소, 암모니아 등과 가스터빈 블레이드(Blade)를 손상시킬 수 있는 분진 등을 제거하기 위하여 연료 가스 처리 시스템이 필요하다. 연료 가스 처리 공정은 크게 저온가스 정화 공정과 고온가스 정화 공정으로 나눌 수 있으며 현재 저온 가스 정화 공정은 기술적으로 완성된 단계이다. 가스 정화 공정을 거친 석탄가스는 가스터빈 연소기에서 연소되어 가스터빈을 구동하여 발전하고 또한 가스터빈에서 배출되는 고온의 연소 가스를 열교환기를 통과시켜 증기를 발생시켜 증기 터빈을 구동하여 발전하는 방식인 복합 발전(Combined cycle) 시스

\*고등기술연구원 전력에너지 연구실

\*\*회원, 전력연구원, 수화력 발전연구실

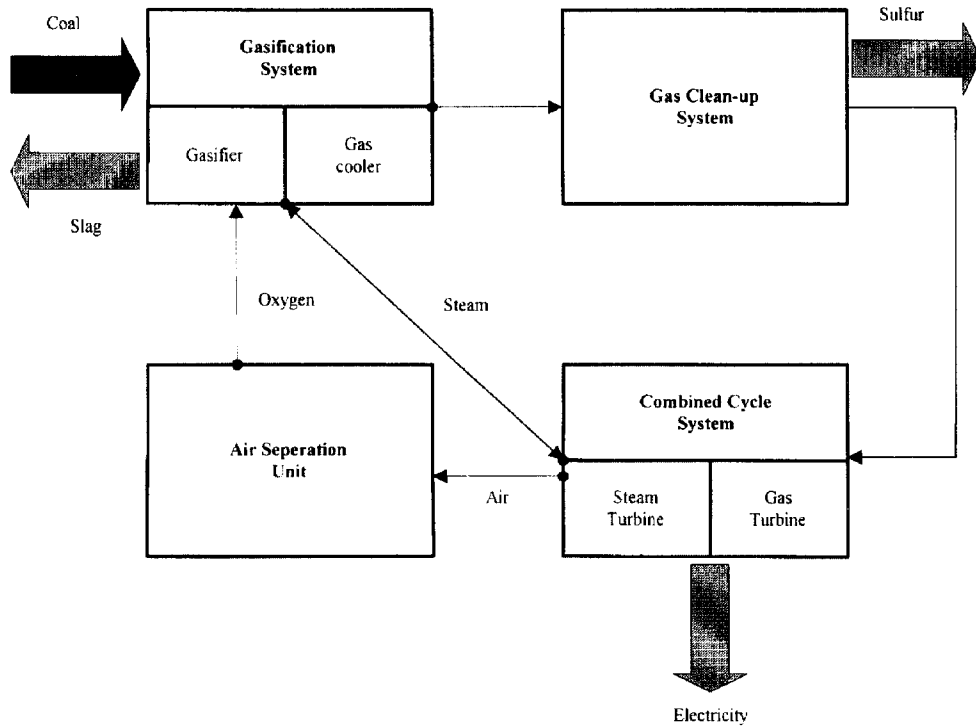


Fig. 1 Schematic diagram of IGCC process

템으로 구성된다. 그리고 생성가스의 발열량 등의 측면에서 이로운 산소를 공급하기 위한 공기 분리 공정을 포함하고 있다.

석탄 가스화 공정은 크게 고정층, 유동층, 분류층 방식으로 나눌 수 있는데 본 연구에서는 대용량에 적합한 분류층 가스화 공정을 채택하였다. 그리고 분류층에서도 미분탄을 물과 함께 슬러리 형태로 공급하는 습식 방식과 미분탄을 기류 상태로 수송하여 산화제와 혼합시킨 후 분사시키는 건식 방식이 있다. 본 연구에서는 반응기 체적에 비하여 높은 처리량을 갖고, 사용되는 탄종에 유연성을 가질 수 있다는 장점이 있는 분류층(Entrained bed) 방식을 택하였다.<sup>(6)</sup>

석탄가스화기의 성능을 평가하는 방법으로는 생성가스의 조성, 미분탄에 함유된 탄소 성분이 가스상의 탄소로 전환되는 정도를 평가하는 탄소전환률(Carbon Conversion), 생성가스의 발열량을 평가하는 냉가스효율(Cold Gas Efficiency) 등을 들 수 있다. 이러한 가스화 특성을 결정하는 요인으로써는 공급되는 미분탄의 등급(rank), 미분탄의 공급량, 산화제 공급량, 증기 공급량, 그리고 가스화기

운전 압력 등일 것이다. 또한 가스화기와 버너의 형태 등에 밀접한 관계가 있다. 이와 같은 실험 변수와 기하학적 형상에 의해 가스화기 내의 온도 분포, 혼합 상태 그리고 체류 시간이 결정되고 최종적으로 생성가스의 조성, 탄소전환률 그리고 냉가스효율 등이 결정된다.

먼저 사용된 탄의 특성에 따라 가스화 성능을 조사하기 위하여 4개의 미분탄 종류에 따라 가스화 특성을 연구한 Brown<sup>(7)</sup> 등에 결과를 보면, 반응기의 온도가 높을수록 수소 및 일산화탄소의 높은 농도를 얻었으며 미분탄 내의 H/C의 비율이 높을수록 수소의 농도가 높게 나왔고 미분탄 내에 많은 휘발분을 함유할 때 또한 높은 CO 농도를 얻을 수 있었다. 그리고 미분탄의 종류에 관계없이 탄소전환률은 산소/미분탄의 비가 증가되면 증가되는 결과를 얻었다. 또한 Cope<sup>(8)</sup> 등은 미분탄의 등급(rank)에 따른 영향을 조사하였는데 등급이 감소하면 고유산소(inherent oxygen)와 반응성이 증가하여 탄소전환률이 증가한다는 것을 발표하였다. 미분탄 입경의 영향으로는 평균 입경이 작아지면 탄소전환률이 증가하고 이 증가는 평균입경의 1/3

승에 역비례한다는 결과를 얻었다. Azuhata<sup>(9)</sup> 등은 미분탄 입자 크기를 50 $\mu\text{m}$ 과 68 $\mu\text{m}$  일 때 동일 조건하에서 실험한 결과 50 $\mu\text{m}$ 일 경우가 10% 증가된 탄소전환율과 1.3배의 CO 농도 증가와 낮은 CO<sub>2</sub> 농도를 얻었다.

가스화기의 실험 압력에 따라 공급되는 최적의 미분탄 양을 결정하기 위해서 Brown<sup>(7)</sup> 등은 대기압에서 미분탄의 공급량이 증가하면서 실험을 실시하였는데 동일한 산소/미분탄 무게비에 대해서 미분탄의 공급량을 단위 체적당 열발생율이 증가하여 상대적인 열손실의 감소에 따른 반응기의 온도 상승으로 인해 탄소전환율이 증가함을 알 수 있다. Azuhata<sup>(9)</sup> 등도 Brown<sup>(7)</sup>과 동일한 결과를 얻었고 그의 결과에서는 가스화기 실험 압력을 일정하게 유지한 상태에서 미분탄의 공급량을 계속 증가시키면 가스화기 온도가 최대점에 도달하고 그 이후로 미분탄 공급량을 계속 증가시키면 체류시간(residence time)이 감소하기 시작하여 탄소전환율이 오히려 감소하기 시작한다는 것을 밝혔다.

탄소전환율에 산소의 양에 따른 결과는 모든 연구결과에서 나타낸 것과 같이 산소/미분탄의 무게비가 증가하면 탄소전환율은 증가하는 일치된 결과를 얻었다.<sup>(7~11)</sup> 산화제인 산소의 양의 변화에 따른 영향은 특히 Azuhata<sup>(9)</sup> 등은 산소/미분탄의 비가 증가하면 CO<sub>2</sub>의 급격한 증가와 수소의 감소를 초래하고 CO 농도는 적절한 산소/미분탄의 무게비에서 최대값을 갖음을 알 수 있다.

Brown<sup>(7)</sup>의 결과에서 보면 증기 공급량의 증가는 수소의 농도 증가는 초래하지 않고 CO/CO<sub>2</sub>의 비는 감소시키는 결과를 얻었고 Cope<sup>(8)</sup> 등은 증기/미분탄의 비가 증가하면 탄소전환율, CO/CO<sub>2</sub> 비의 감소 등의 결과를 얻었다. 이 이유로는 증기를 공급하면 탄소와 증기의 반응은 증가되지만 반응 온도는 뚜렷이 감소하여 낮은 반응율을 갖게되고 전체적인 탄소전환율은 감소한다는 것이다. Azuhata<sup>(9)</sup> 등의 연구 결과에서는 증기/미분탄의 무게비를 0.03에서 0.32로 증가시켜 실험을 하였는데도 탄소전환율에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었고 CO는 감소, CO<sub>2</sub>는 증가시키음을 알 수 있었다. 즉 이러한 결과로부터 증기의 공급은 수소 양의 증가보다는 가스화기 온도 제어에 유용함을 알 수 있다.

동일한 공급 조건에 대해서 압력이 증가하면 반응기 내에서의 체류시간이 증가하여 좌와 이산화탄

소 그리고 수분과의 가스화 반응이 증가하여 CO, H<sub>2</sub> 생성량이 증가한다는 것을 Cope<sup>(8)</sup> 등이 밝혔다. Azuhata<sup>(10)</sup>에서는 예혼합버너는 상압에서 확산버너보다 탄소전환율이 월등히 우수한 결과는 얻었는데 압력이 증가하면 예혼합버너의 탄소전환율은 거의 변화는 없었지만 확산버너의 경우는 압력이 증가하면 탄소전환율이 증가한 결과를 얻었다. 특히 압력이 100kpa에서 500kpa로 상승하면 확산버너의 CO, H<sub>2</sub>의 농도가 증가하는 결과를 얻었다.

또한, 植田昭雄<sup>(11)</sup> 등은 5개의 버너를 사용하여 탄소전환율, 화염길이 등을 조사하여 내부혼합버너(Internal mixing burner)가 가장 우수한 탄소전환율을 얻는 결과를 보고하였다.

위와 같은 기존 연구 결과를 토대로 본 연구에서는 IGCC 공정에서 핵심 부분인 가스화기에 대한 특성을 조사하기 위하여 3톤/일 미분탄 처리 용량을 갖는 가스화기를 이용하여 중국 대동탄에 대한 압력변화에 따른 가스화기 운전 특성과 가스화 특성 실험을 실시하였다. 이들 실험을 통하여 고압 고온 상태에서 반응, 생성되는 석탄 가스의 생성 특성을 조사함으로써 IGCC 플랜트의 설계와 운전 시 활용할 수 있는 가스화 특성자료와 가스화기 운용 자료를 확보하는 것이 이 연구의 최종 목적이다.

## 2. 실험 및 방법

석탄가스화기의 운전 특성에 영향을 미치는 요인 중의 하나가 석탄의 등급과 특성이다. 이 등급과 특성에 따라 석탄의 성분, 회용용 온도 및 용융 슬래크의 점도, 반응성, 발열량 등이 달라진다. 지금까지 연구 결과를 검토하면 국내 IGCC 발전용 가스화 대상탄으로 적합한 탄종으로는 Alaskan Usibel-리탄,<sup>(6)</sup> Datong탄, Drayton탄, Kideco탄<sup>(12)</sup> 등이 제안되고 있다. 따라서 본 연구에서는 회용용점, 탄소함량 등을 고려한 결과 중국 대동(Datong)탄을 실험 대상탄으로 선정하여 가스화 실험을 실시하였다. 사용된 Datong탄에 대한 기초 분석치를 Table 1에 나타내었다.

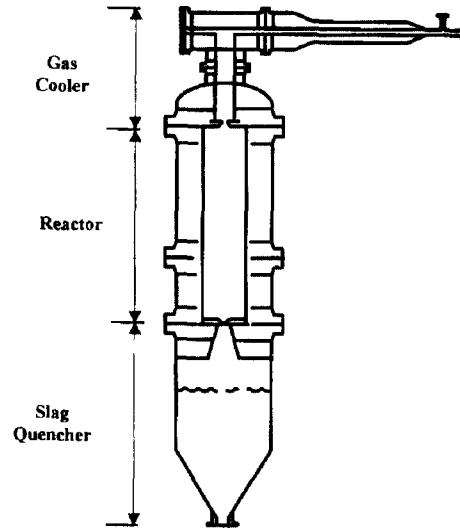
본 실험에서 사용한 석탄가스화 실험 장치의 개략도는 Fig. 2와 같이 가스화기 옆면을 설치된 4개의 노즐을 통하여 공급된 미분탄과 산소 등에 의해 가스화 반응이 일어나는 부분(Reactor), 미분탄에

**Table 1** Basic analysis result for datong coal

Proximate analysis	Volatile matter	29.3
	Fixed carbon	54.65
	Moisture	6.87
Ultimate analysis	Ash	9.18
	Carbon	67.08
	Hydrogen	4.31
	Oxygen	18.168
	Nitrogen	0.66
	Sulfur	0.602
	Chlorine	—
Gross heating value (Kcal/kg)	6510	
Inorganic analysis of ash (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.58
	SiO <sub>2</sub>	56.83
	TiO <sub>2</sub>	1.1
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.59
	CaO	5.32
	Na <sub>2</sub> O	1.39
	K <sub>2</sub> O	0.87
	MgO	1.33
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27
	SO <sub>3</sub>	6.72

함유된 회분을 용융 상태인 슬래크 형태로 가스화기 하단부로 배출하여 슬래크를 냉각, 저장 그리고 배출시키는 슬래크 처리부(Slag quencher), 그리고 생성된 가스를 냉각시키는 가스 냉각부(Gas cooler)로 크게 구성된다. 본 가스화기의 실험은 상압에서부터 30기압, 1400~1600℃ 조건에서 운전되므로 가스화 반응부는 고온/고압에서 사용 가능한 내화벽으로 이루어져있고 미분탄과 산화제를 공급하는 공급노즐, 온도 측정 장치, 농도 샘플링 장치 등이 설치되어있다.

슬래크 처리부는 고온에서 미분탄 내에 포함된 회재들이 녹아 가스화기 벽면을 타고 흐르는 슬래크를 냉각시키고 저장하는 역할을 하는 냉각수 저장 호퍼와 일정량 이상의 슬래크를 주기적으로 실험 중에

**Fig. 2** Schematic diagram of the bench scale gasifier

도 외부로 배출시키는 록 호퍼(Lock hopper) 시스템으로 구성되었다. 본 실험에서 생성된 슬래크에 대한 용출 실험을 실시한 결과<sup>(13)</sup> 중금속이 용출되지 않아 슬래크를 건자재 등으로 활용하였을 때 침출수에 의해 2차 환경 오염 문제가 없음을 알 수 있었다.

가스 냉각부는 고온의 석탄가스를 냉각시켜 외부로 배출시키는 시스템으로 본 실험에서는 생성 가스에 직접 물을 분사 냉각시키는 직접 냉각 방식을 채택하였다. 본 실험에서는 배출되는 배출 가스의 온도를 250℃ 설정하여 자동 온도 조절 시스템을 설치하여 생성되는 석탄가스의 배출 온도를 제어하였다.

본 연구에서 가스화 실험은 다음같이 4단계로 나누어 실험을 진행하였다. 먼저 가스화기 내부를 자발적인 가스화 반응이 진행되도록 예열하는 예열단계(Preheating operation), 실험 압력까지 가압하는 가압단계(Pressurization operation), 미분탄과 산화제를 공급하여 가스화 반응을 진행시키는 가스화 단계(Gasification operation), 그리고 실험이 완료된 후 가스화 실험을 정지하는 정지 단계(Shut-down operation)로 나누어 진행하였다. 먼저 예열단계는 상압에서 LPG와 공기를 사용한 예혼합 버너를 이용하여 가스화기 내부 내화벽의 온도를 1100℃ 이상으로 가열하는 과정으로 일반적으로 15~20 시간 정도 소요된다. 가압 단계는 실험 압력까지 가스화기를 가압 하는 단계로 본 연구에

서는 상압 예열이 끝난 후 고압 질소를 가스화기에 공급하여 실험 압력에 도달하는 방법을 택하였다. 자세한 가압 방법은 실험 결과에서 논의할 예정이다. 실험 압력에 도달되면 미분탄과 산화제를 공급하면서 가스화 반응을 진행시킨다. 가스화기 온도가 주어진 공급 조건에 대하여 정상 상태에 도달되면 생성 가스를 샘플링 및 분석을 실시하였다. 가스화 실험 중에는 용융된 슬래크이 가스화기 벽면을 타고 계속 흘러내리므로 급격히 가스화기 온도가 낮아지면 가스화기 벽면에 슬래크이 응고되고 가스화기 자체는 물론이고 측정 기기 등을 손상시키므로 운전 정지 시에는 미분탄의 공급량을 감소시키고

산소를 공급하여 가스화기 온도를 충분히 높여 벽면에 부착된 슬래크을 완전히 흘러내리게 한 다음 가스화기 실험을 마쳤다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 가스화기를 가압하는 방법으로 3 가지 방법을 제안하였으며 각각의 특성을 비교 검토하여 최적의 방법을 도출하였다. 먼저 첫번째 방법(Fig. 3(a) 참조)은 상압에서 예열(구간 1)이 완료된 후 미분탄과 산화제를 공급(구간 2)하여 가스화 반응을 진행시키면서 가스화기 후단에 설치된

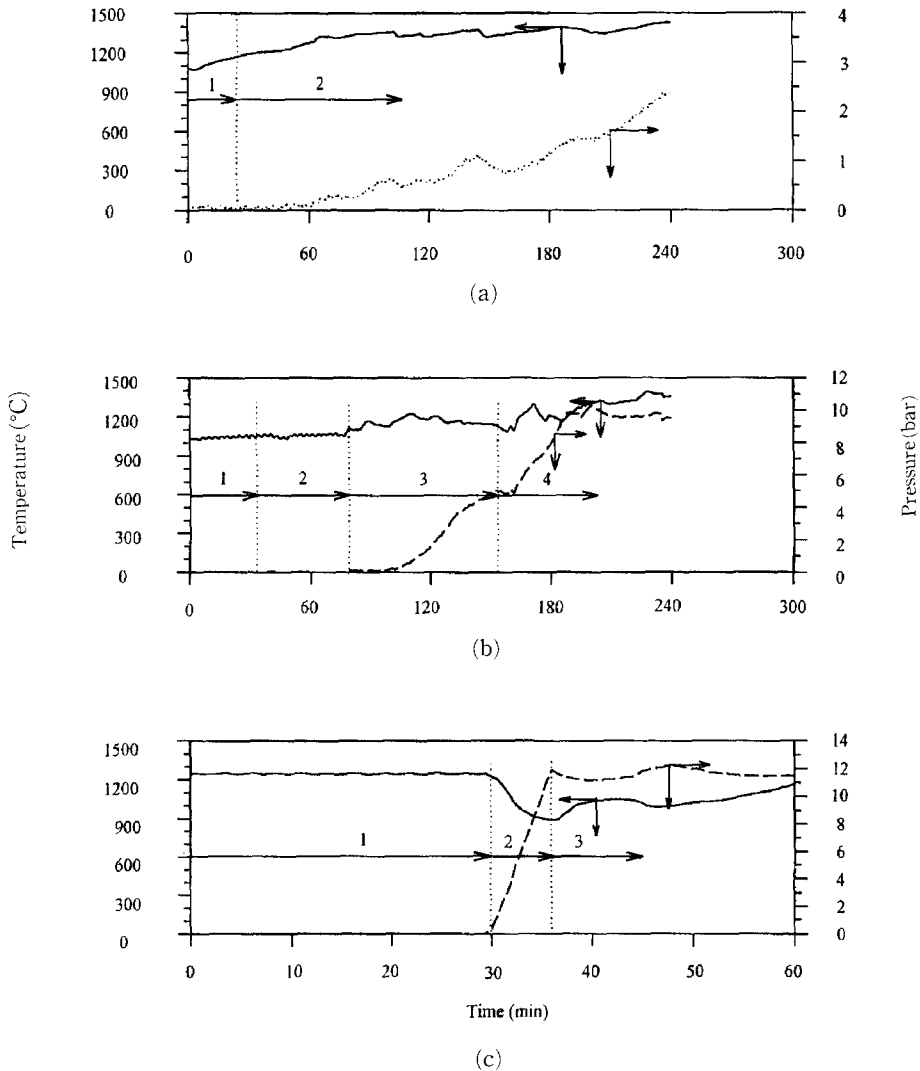


Fig. 3 Characteristics of pressurization methods in this study

압력 조절 밸브를 닫는 방법으로 가스화기를 가압하는 방법이 있고 두번째 방법(Fig. 3(b) 참조)은 가스화기 상압 예열(구간 1)이 완료된 후, 메탄과 산소의 확산버너를 작동시켜(구간 2) 두 개의 버너를 동시에 작동시켜 내화벽을 예열 하면서 LPG 공기의 예혼합 버너의 연소율(firing rate)은 차츰

감소시키고 대신 메탄 산소의 확산 버너의 연소율을 차츰 증가시켜 가스화기의 온도를 계속 고온으로 유지시키는 구간이다. 구간 3은 예혼합 버너를 완전히 끈 상태에서 메탄과 산소의 확산 버너만을 켜 상태에서 가스화기 후단 압력 조절 밸브를 닫아 가스화기를 가압 하는 단계이다. 5기압까지 가압하

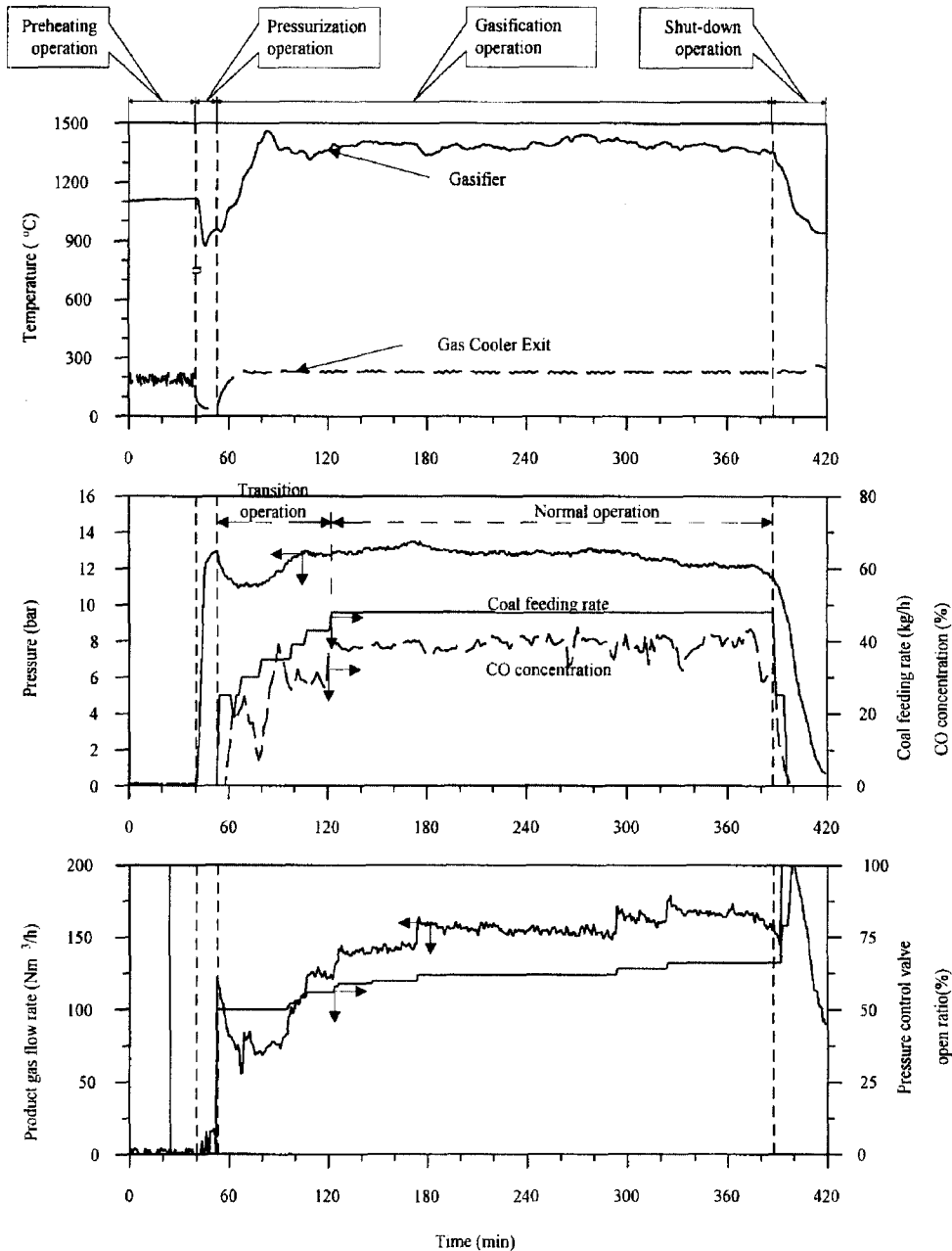


Fig. 4 Operation results for O<sub>2</sub>/coal ratio of 0.9 and pressure of 12 bar

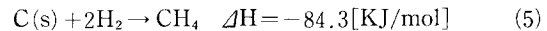
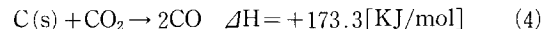
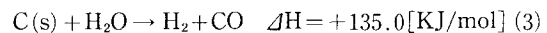
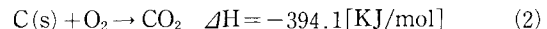
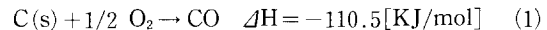
는 데 약 2시간 정도 소요되었다. Fig. 3(c)에 나타낸 세번째 방법은 가스화기를 상압에서 1200°C 이상으로 충분히 예열한 후(구간 1), 고압의 질소 가스를 가스화기에 공급하여 단시간 내에 가스화기를 운전 압력에 도달시킨 다음 미분탄과 산화제를 공급하여 가스화기 반응을 진행시키는 방법이다. 이 방법을 이용하여 가스화기를 12기압까지 가압하는데 약 10여분 정도 소요되었다(구간 2). 본 연구에서는 세번째 방법을 사용하였다. 이 경우 가스화기 온도는 300°C 정도 저하되었지만 미분탄과 산화제가 자발적인 반응을 일으킬 수 있는 온도 이상이므로 지속적인 가스화 반응을 유지할 수 있었다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 Fig. 3(b)의 메탄 버너를 이용한 방법과 Fig. 3(c)의 고압 질소 공급 방법을 혼합한 가압 방법이 실제 가스화기 최적 가압 방법으로 제안할 수 있고 이러한 가압 시스템은 현재 본 연구팀에 의해서 설계가 완료된 상태이다.

석탄가스화기에서 생성된 석탄 가스는 가스 정화 공정을 통하여 황 및 분진을 제거한 다음 가스 터빈 연소기에서 연소시키게 된다. 가스 정화 공정과 가스터빈 연소기가 원활하게 운전되기 위해서는 가스화기의 출구에서 균일한 생성가스 조성과 유량이 필수적이다. Fig. 4에 12기압 실험 조건에서 산소/미분탄의 무게비가 0.9일 때 전형적인 가스화기 온도, 가스 냉각기 출구 온도, 가스화기 압력, 미분탄 공급량, CO 농도, 생성가스 유량, 압력 조절 밸브 열림 비를 나타내었다. 가스화 실험 구간(Gasification operation)은 다시 2구간으로 나눌 수 있다. 실험 압력에 해당되는 미분탄과 산화제의 공급 양까지 미분탄과 산화제를 증가시키는 구간(Transition operation region)과 정상 실험 구간(Normal operation region)으로 나눌 수 있다. 따라서 실험 결과는 정상실험구간에서 온도 및 생성가스 유량, 조성 등의 결과에 대한 해석을 실시한다. 생성가스 유량(Product gas flow rate)이 단계적으로 증가한 이유는 가스화기 압력을 제어하기 위해서 가스화기 출구 압력제어 밸브(Pressure control valve)의 열림 정도를 증가시키기 때문이다. 본 가스화기는 주어진 조건에 대해서 일정한 가스화기 온도, 가스화기 출구 및 가스 냉각기 출구 온도를 얻을 수 있었으며 또한 생성 가스 조성(CO 농도 40% 정도), 주어진 압력 조절 밸브의 열림 비에 대해서 일정한 생성 가스 유량 등을 얻을 수 있어 매우 안정적으로 가스화 실험이 가능함

을 알 수 있다.

석탄가스화의 기본 원리는 석탄이 가스화기 내로 공급된 산화제와의 산화 반응 및 가스화기 내에서 생성된 이산화탄소, 수증기, 수소 등의 기체와의 산화/환원 반응에 의하여 주성분이 수소와 일산화탄소인 석탄가스를 생성시키는 것이다. 공급된 석탄은 건조 및 예열, 휘발분이 분리되는 탈휘발(Devolatilization), 촉(Char)의 가스화 반응, 위의 세가지 반응에 필요한 열을 공급하는 연소 반응 및 생성 가스의 상호 반응 등 매우 복잡한 물리/화학적 반응이 존재한다.

먼저 가스화기에 유입된 석탄은 고온의 가스화기 내부 분위기에 의해 건조 예열되어 수분이 추출된다. 탈휘발하는 석탄 속에 존재하는 탄화수소 계열의 휘발성 물질이 매우 짧은 시간 내에 열분해에 의해 분리되는 과정이다. 석탄 입자의 가열에 의해 거대 분자 결합 구조의 열적붕괴가 일어나며 주로 방향족 계열의 고분자 물질이 방출한다.<sup>(3)</sup> 휘발분이 분리된 후 고정탄소 입자인 촉는 생성가스들과 다음의 반응에 의해서 연료로서의 효용성이 있는 석탄가스를 생성하게 된다.



즉 촉는 불완전 연소 반응에 의해 주로 일산화탄소를 생성한다. 또한 촉와 산소의 반응은 계속 진행되어 이산화탄소를 생성하기도하며 생성된 이산화탄소는 촉와 반응하여 다시 일산화탄소를 생성한다. 또한 생성가스의 온도는 매우 고온이므로 온도 제어를 목적으로 수증기를 공급하기도 하는데 이 수증기는 촉 반응하여 일산화탄소와 수소를 생산하기도 한다. 또한 생성된 수소는 촉 반응하여 소량의 메탄이 형성되기도 한다. 주어진 온도에서 촉의 반응물은 각각의 반응제에 따라 차이가 나며 일반적으로 다음과 같다.<sup>(14)</sup>



본 연구에서는 압력 변화에 따른 가스화 특성을 조사하기 하기 위하여 가스화기 실험 압력을 1~23 기압에 걸쳐 실험을 진행하였다. 가스화기 압력에 따른 연구로는 Cope,<sup>(8)</sup> Azuhata<sup>(10)</sup> 등에 의해서

주로 진행되었는데, 이들의 연구 결과를 보면 5기압이하에서만 실험을 실시하였으며 실제 가스화기가 운전되는 20기압 이상에서는 실험을 실시하지 못하였다. 석탄가스는 CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 등이 주 성분이고 오염물질로 소량의 H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> 등이 발생된다. 이 가운데서 가스터빈 연소기에서 우수한 연소성을 갖기 위해서는 발열량이 높고 연소성이 좋은 연료 성분으로 CO, H<sub>2</sub> 발생량이 가장 중요하다. Fig.5는 압력 변화에 대해서 가스화 반응에 의해 생성된 가스의 조성 중에서 CO, H<sub>2</sub>의 농도를 나타내었다. 실험결과는 산소/미분탄의 무게비와 당량비의 함수로 나타내었다. 저압 운전 조건에서는 산소/미분탄의 무게비가 0.9 전후에서 최대값을 갖음을 알 수 있고 이때 CO는 40% 정도, H<sub>2</sub>는 20% 정도의 농도 값을 갖음을 알 수 있다. 그러나 압력이 증가되면 CO 및 H<sub>2</sub> 농도의 최대값을 얻을 수 있는 산소/미분탄의 무게비는 더 낮은 영역으로 이동함을 알 수 있다. 즉 4~6 기압 실험에서는 산소/미분탄의 무게비가 0.8 주위에서,

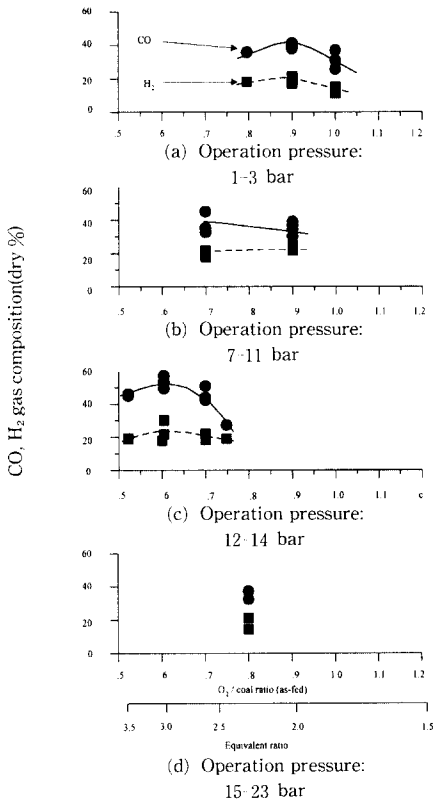


Fig. 5 Effects of O<sub>2</sub>/coal ratio on gas composition at different operation pressures

12~14 기압 실험에서는 산소/미분탄의 무게비가 0.6 주위에서 CO, H<sub>2</sub>의 농도가 가장 높게 나옴을 알 수 있다. 이때 CO는 55%, H<sub>2</sub>는 25% 정도로 저압 운전 조건일 경우보다 생성된 가스에 함유된 CO 및 H<sub>2</sub> 농도가 증가된 결과를 얻을 수 있다. 위의 결과로부터 산소량이 증가하면 CO 발생량은 점차적으로 증가하고 최대값에 도달한 후 CO 생성량이 다시 감소함을 알 수 있다. 이는 산소량이 적을 때는 산소와 미분탄이 반응하여 산소가 완전히 소모되고 미반응 촉가 남게된다. 이 미반응 촉는 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O와 반응하여 CO, H<sub>2</sub> 생성시킨다. 따라서 산소 양을 증가시키면 가스화기 온도가 상승하여 흡열 반응인 반응(3), (4)가 증가하여 CO의 양이 증가한다는 것이다. 그러나 산소 공급 양이 계속 증가시키면 산소가 생성가스인 CO등과 반응하여 CO<sub>2</sub> 물 생성시키므로 CO 발생량은 감소한다는 것이다.

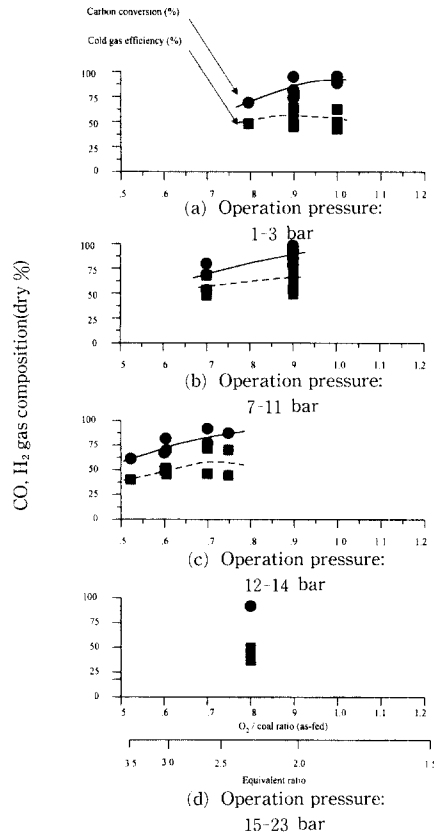


Fig. 6 Effects of O<sub>2</sub>/coal ratio on carbon conversion and cold gas efficiency at different operation pressures



가스화기의 성능을 평가하기 위해서는 탄소전환률(Carbon Conversion), 냉 가스 효율(Cold Gas Efficiency)을 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 본 연구에서 정의된 탄소전환률과 냉가스 효율은 다음과 같이 정의된다.<sup>(13)</sup>

$$\begin{aligned} \text{탄소 전환율(\%)} &= \frac{\text{생성가스 중의 탄소량(kg/h)}}{\text{가스화기로 투입된 석탄 중의 탄소량(kg/h)}} \times 100 \\ \text{냉가스효율(\%)} &= \frac{\text{생성가스량(m}^3\text{/h)} \times \text{생성가스 고위발열량(kcal/m}^3\text{)}}{\text{가스화로 투입 석탄량(kg/h)} \times \text{석탄 고위발열량(kcal/kg)}} \times 100 \end{aligned}$$

탄소전환율은 탈휘발(devolatilization)과정과 화가 CO와 H<sub>2</sub>와 반응하는 화 반응과 관련된 복잡한 결과이다. 이러한 반응은 가스화기 온도와 체류 시간에 대한 함수이다. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O와 화의 반응은 식 (3), (4)에서 알 수 있는 것과 같이 흡열 반응이므로 가스화기 내부 온도가 충분히 높아 위와 같은 화 반응이 지속된다면 체류시간의 증가와 반응류의 증가로 인해 압력의 증가에 대해서는 매우 민감하게 변화할 것이다. 본 실험 결과로부터 알 수 있는 것은 본 실험 조건에 대해서 산소/미분탄의 무게비가 증가하면 탄소전환율은 계속 증가함을 알 수 있다. 이는 낮은 산소/미분탄의 비에서는 주로 가스화 반응에 의해 미분탄에 함유된 탄소가 주로 CO로 전환되며 산소/미분탄의 무게비가 증가하면 상대적으로 많은 산소가 공급되어 연소 반응 생성물인 이산화탄소로 전환되어 미분탄에 함유된 탄소가 가스상태로 전환되는 정도를 나타내는 탄소전환율은 산소/미분탄의 무게비가 증가하면 따라서 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Brown<sup>(7)</sup>의 기존 연구 결과와도 일치함을 알 수 있다.

생성가스의 발열량과 미분탄의 발열량과의 비를 나타내는 냉가스효율은 대략적으로 40~80% 정도의 값을 얻을 수 있었다. 냉가스 효율은 생성 가스 유량과 생성 가스 중에서 연료인 CO, H<sub>2</sub> 농도에 관계된다. 1-3 기압 실험에서는 산소/미분탄의 무게비가 0.9 주위에서 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> 농도가 최대이므로 냉가스 효율도 산소/미분탄의 무게비가 0.9 주위에서 최대임을 알 수 있다. 그러나 12-14기압 실험에서는 산소/미분탄의 무게비가 0.6에서 CO, H<sub>2</sub> 농도가 최대이지만 냉가스효율은 0.7 주위에서 최대가 됨을 알 수 있다. 이는 압력이 증가되면 미분탄의 공급량과 산소량도 증가되어 산소/미분탄의 무

게비가 0.6일 때의 생성 가스 유량(60~69Nm<sup>3</sup>/h) 보다는 0.7일 경우가 생성 가스 유량(85~95Nm<sup>3</sup>/h)이 증가되어 냉가스 효율이 산소/미분탄의 무게비 0.7에서 최대가 됨을 알 수 있다.

가스화 특성(생성가스 조성 및 생성 가스량)은 반응식(3), (4)와 같이 미반응 화가 연소 생성물인 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>와의 반응에 의해 지배되고 이 반응은 충분히 높은 온도와 체류시간을 요한다. 따라서 가스화 특성은 가스화기의 형태(길이, 직경, 형상), 버너의 형태, 미분탄 및 산화제의 공급량 그리고 가스화기 열손실 등과 복잡한 관계가 있게 된다. 상용화급 가스화기에서도 본 bench급 가스화기와 동일한 탄소전환율, 동일한 열손실 등 상사(similarity)가 만족되면 동일한 결과를 얻을 수 있었지만 실제적으로 이러한 상사를 모두 만족하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러나, 고온 고압 조건에서 발생하는 가스화 반응의 생성물은 조성이 열역학적 평형 값과 유사하므로, 가스화기 벽면으로의 열손실이 bench급 가스화기에서 상업용 규모 가스화기에 비해 월등히 크지 않는한 생성물의 조성은 큰 차이가 거의 없을 것으로 추정된다. 현재 bench급 가스화기 운전시 표면 온도는 60~80℃로 유지하고 있어 상업용 규모의 가스화기에 비해 공급 열원 대비 열손실에서 큰 차이는 없는 것으로 파악되고 있어 이 사실을 뒷바침 해 주고 있다. 또한, 본 연구에서 얻은 가스화 특성(예를들면 산소/미분탄의 무게비의 증가는 탄소전환율의 증가 또는 특정 산소/미분탄의 무게비에서 CO의 발생량의 최대)은 가스화기 용량이 변화하더라도 동일한 결과가 나타날 것이다. 그외에, 상용화급 가스화기의 운전 조건과 동일한 고온/고압에서 운전되는 bench급 가스화기 연구를 통하여 실제 상용화급 가스화기에서 예상되는 운전 상의 문제점(예를들면 슬래크 탭의 막힘 문제 등)을 해결함으로써 상용화급 가스화기 운전 및 설계 기술을 확보하는 하나의 방안이 될 것으로 판단된다.

또한 고온/고압의 가스화기 내부 반응 상태를 해석하기 위하여 컴퓨터를 이용한 전산 해석 방법(CFD)을 이용하고 있다. 그러나 가스화기 내부 반응 상태를 엄밀하게 모델링하여 해석하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 상용 유동장 해석 프로그램인 PHOENICS<sup>(16)</sup>와 미분탄 연소기 및 가스화기를 해석할 수 있는 연소장 전용 해석 프로그램인 PCGC(Pulverized Coal Gasification and Com-

bustion)를 이용하여 가스화기 내부 반응장 해석을 실시하고 있다.<sup>(17)</sup> 이러한 전산 해석은 가스화기 특성에 대한 민감도 해석(Sensitivity Analysis)을 통하여 가스화기 설계 시 또는 초기 운전 조건을 결정하는데 도움을 주고 있다. 그러나 이러한 전산 해석 방법은 가스화기 내에서의 미분탄의 증발, 열분해, 산화제와의 기상 연소 반응, 화와 연소 생성물과의 표면 가스화 반응 등 복잡한 반응을 고려한 모델링이 요구된다. 그리고 이러한 모델링에서 필요한 반응 상수 등은 많은 가정과 제한된 미분탄에 대한 자료만 제공되고 있다.<sup>(18)</sup> 따라서 가스화기 내부 반응 상태를 정확하게 모사하기는 불가능하지만 실험 변수의 변화에 따른 현상들(예를들면 온도 분포, 재순환 영역의 변화, 생성가스의 조성 변화 등)을 정성적으로 평가는 가능하여 가스화기 설계 및 운전 기초 자료를 제공해 줄 수 있다.

#### 4. 결 론

Bench Scale급 건식 석탄가스화기를 이용하여 중국 대동탄에 대한 가스화 실험을 실시하였다. 가스화기를 실험 압력까지 도달하는 방법으로 3가지 제안된 방법에 대한 실험을 통하여 본 연구에서는 고압 질소를 이용한 방법을 사용하여 단시간 내에 가스화기 실험 압력에 도달할 수 있었다. 가스화기 실험 압력을 변화하면서 산소/미분탄의 비에 따른 가스화 특성을 조사한 결과 저압 실험 조건에서는 산소/미분탄의 무게비가 0.9 전후에서 CO는 40% 정도, H<sub>2</sub>는 20% 정도의 최고 농도 값을 갖음을 알 수 있다. 압력이 증가하면 즉, 4~6 기압 실험에서는 산소/미분탄의 무게비가 0.8 주위에서, 12~14 기압 실험에서는 산소/미분탄의 무게비가 0.6 주위에서 CO, H<sub>2</sub>의 농도가 가장 높음을 알 수 있다. 이때 CO는 55%, H<sub>2</sub>는 25% 정도로 저압 운전 조건일 경우보다 생성된 가스에 함유된 CO 및 H<sub>2</sub> 농도가 각각 15%, 5% 정도 증가된 결과를 얻을 수 있다. 산소/미분탄의 무게비가 증가하면 탄소전환율도 따라서 증가함을 알 수 있고 냉가스효율은 40~80% 정도의 가스화 특성을 얻을 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한전산하 전력연구원에서 지원하는 “3

톤/일 급 건식 석탄가스화기 운전특성 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) MacGregor, P. R., Oplinger, J. L. and Stoll, H. G., 1992, “Electric utility integrated resource planning in the U. S.,” *36th GE Turbine State-of-the-Art Technology Seminar*.
- (2) 유영돈, 이승중, 김원배, 윤용승, 1996, “3톤/일 석탄가스화기에서의 최적 운전 특성 연구,” 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 49~52.
- (3) 이진욱, 유영돈, 윤용승, 이찬, 김형택, 정근모, 1995, “석탄가스화 복합발전시스템,” 제2회 KOSCO workshop 논문집, pp. 71~89.
- (4) 윤용승, 유영돈, 이계봉, 임동렬, 정석우, 이한구, 유희중, 김원배, 1996, “Bench Scale급 건식 석탄가스화기 운전 특성,” 제1회 석탄가스화 복합발전 기술 workshop, pp. 125~150.
- (5) 이재구, 김재호, 이효진, 박태준, 김상돈, 김종진, 1996, “Drop tube reactor를 이용한 분류층 석탄가스화기 특성 연구,” 한국화학공학회 논문집, Vol. 34, No. 4, pp. 496~501.
- (6) 동력자원부, 1993, “석탄가스화 복합사이클 발전시스템 실용화 개발(Ⅰ),” 연차보고서.
- (7) Brown, B. W., Smoot, L. D. and Hedman, P. O., 1986, “Effect of Coal Type on Entrained Gasification,” *Fuel*, Vol. 65, pp. 673~678.
- (8) Cope, R. F., Smoot, L. D. and Hedman, P. O., 1989, “Effect of Pressure and Coal Rank on Carbon Conversion in an Entrained-Coal Gasifier,” *Fuel*, Vol. 68, pp. 806~808.
- (9) Azuhata, S., Hedman, P. O., Smoot, L. D., 1986, “Carbon Conversion in an Atmospheric Pressure Entrained Coal Gasifier,” *Fuel*, Vol. 65, pp. 212~217.
- (10) Azuhata, S., Hedman, P. O., Smoot, L. D. and Sowa, W. A., 1986, “Effects of Flame Type and Pressure on Entrained Coal Gasification,” *Fuel*, Vol. 65, pp. 1511~1515.
- (11) 植田昭雄 正路一紀, 藤原直機, 小山俊太郎, 1991, “旋回流型氣流層石炭가스화バナ, 日本機械學會論文集 B編, pp. 18~24.
- (12) 안달홍, 김종진, 김종영, 1994, “국내 수입

- 석탄의 가스화 및 석탄가스화 복합 발전 연료 적합성에 관한 연구,” 한국에너지공학회지, Vol. 4, No. 2, pp. 222~231.
- (13) 이계봉, 조성수, 유희중, 윤용승, 1996, “Bench Scale급 전식 석탄가스화기에서 생성된 Slag의 분석,” 한국에너지공학회 추계학술대회 논문집, pp. 123~128.
- (14) Smoot, L. D. and Smith, P. J., 1985, *Coal Combustion and Gasification*, Plenum Press, New York & London, p. 158.
- (15) Ashizawa, M., Inumaru, J., Hara, S., Hamamatsu, T., Takekawa, T. and Koyama, Y., 1991, “Development of High Performance Coal Gasification Technology for High Ash Fusion Temperature Coal by Flux Addition Method,” *CRIEPI report: W90022*. p. 27.
- (16) 이진욱, 나혜령, 윤용승, 1996, “사이클론형 석탄가스화기 내의 2차원 및 3차원 유동장 해석,” 한국에너지공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 32~39.
- (17) 나혜령, 유영돈, 이진욱, 윤용승, 1996, “Bench Scale급 가스화기내 난류 반응장의 수치 해석적 연구,” 한국에너지공학회 추계학술대회 논문집, pp. 145~149.
- (18) PCGC-93 User's Manual, 1993, Advanced Combustion Engineering Research Center, pp. 11~49.