

〈기술논문〉

고속충돌노즐을 이용한 분류층 가스화기내의 유동특성에 관한 연구

이효진* · 박태준** · 김재호** · 이재구** · 안달홍***

(1995년 5월 4일 접수)

Study on Flow Characteristics in Entrained Flow Gasifier with High Speed Impinging Jet

Hyo-Jin Lee, Tae-Jun Park, Jae-ho Kim, Jae-Goo Lee and Dal-Hong Ahn

Key Words: Coal Gasification(석탄가스화), Entrained Flow(분류층), Coal Slurry Burner(석탄 슬러리버너), Atomization(분무), Impinging Jet Nozzle (충돌노즐)

Abstract

An entrained flow gasifier simulating the cold mode was tested to estimate its performance for coal gasification and flow characteristics with a developed high speed impinging jet nozzle. The burner was designed for high temperature and high pressure(HTHP) conditions, especially for IGCC(Integrated Coal Gasification Combined Cycle). In order to get proper sizes of droplets for high viscous liquid such as coal slurry, atomization was achieved by impacting slurry with high speed (over 150 m/sec) secondary gas (oxygen/or air). Formed water droplets were ranged between 100 μ m to 20 μ m in their sizes. The flow characteristics in the gasifier was well understood in mixing between fuel and oxidizer. Both external and internal recirculation zones were closely investigated through experimentation with visualization and numerical solutions from FLUENT CODE.

1. 서 론

석탄은 인류가 이용 가능한 화석에너지 중에서 가장 풍부한 에너지로서 세계적으로 널리 분포되어 있어, 타 에너지에 비해 안정적인 연료공급이 가능하다는 이점을 지니고 있는 반면 고체이므로 수송 및 처리 공정이 복잡하고 연소후 회재처리에 어려움이 있고, 보일러 튜브에 파울링(Fouling)을 일으키며, NO_x, SO_x 등 공해문제를 일으키고 있으므로, 종래와 같은 석탄직접연소 방식으로는 세계 석

탄 매장량의 대부분을 차지하고 있는 유연탄의 이용기술 확대에 많은 문제점이 있다. 세계 각국은 1-2차 석유파동 이후 계속적인 석탄가스화 연구에 총력을 기울여 왔으며, 최근 석유가격의 하락에도 불구하고 새로운 에너지 위기에 대처하고 석탄 연소에 따른 공해저감을 위해 석탄가스화기술 개발에 많은 연구 개발비를 투자해 왔다.

석탄가스화 복합발전(IGCC)의 개발에 있어서 버너는 가스화기의 성능을 좌우하는 핵심적인 역할을 하고 있는 관계로 집중적으로 연구가 진행되고 있으며, 노즐의 형태에 따라 가스화의 결과에 많은 영향을 미치고 있음을 연구결과에 의해 입증되고 있다.⁽¹⁾ 석탄가스화는 고온(1500-2000K), 고압(30~40 기압)하에서 산소 혹은 공기를 산화제로

*회원, 한국에너지기술연구소(KIER)

**한국에너지기술연구소(KIER)

***한전기술연구원(KEPCO RC)

이용한 급속반응공정으로서 고정층이나 유동층과는 달리 상대적으로 반응이 짧은 시간동안(1~10초 이내) 진행되기 때문에 산화제와 연료의 혼합을 잘 시켜주어야만 화염 안정성 및 필요한 조성을 갖춘 생성가스를 생산할 수 있게 된다.^(2,3) 이를 위한 기초 연구단계로서, 고속으로 분무되는 연료와 산화제의 혼합과 분무된 가스의 가스화기 내부에서의 유동현상을 파악하고 이해함으로써 향후 장치의 설계 및 수정시 중요한 자료로서 활용될 수 있다. 일반적으로 가스나 기체를 이용한 가스터빈이나 보일러 내에서의 수치모사⁽⁴⁾ 및 실험⁽⁵⁾을 통한 결과가 무수히 발표되고 있으나 석탄가스화와 관련된 유동장의 해석이나 실험은 상대적으로 저조한 실정이다.

석탄가스화를 위한 노즐 설계시 고려되어야 할 사항으로는 석탄슬러리가 막힘(Plugging) 현상이 자주 발생되며, 또한 산화제로서 99.9%의 산소를 이용한 하향공급(Down-Flow Reaction)을 이용하고 있기 때문에 역화현상(Back Fire)에 각별한 주의가 필요하다.⁽⁶⁾ 이에 대한 방지를 위하여 화산화염의 외부혼합식 노즐이 요구되며, 연료와의 원활한 혼합을 위하여 2차가스(산소)의 고속 충돌을 필요로 한다. 여기서 이용된 노즐의 특성 때문에 고속 분무에 의한 충돌로 발생될 내화벽에 대한 침식(Erosion)을 줄이기 위하여 분무각의 조정이 필요하고 또한 초기의 고속분무가스에 의한 반응기내 유동현상의 변화에 대한 이해가 요구된다. 상기에 언급된 이 외에도 고온·고압에 견딜 수 있는 재질이라든지 열 충격을 최소화하는 구조적 연구가 추가적으로 요구된다.

본 연구는 석탄가스화를 위해 개발된 노즐에 의한 분무특성 및 실제 가스화기와 같은 크기의 아크릴로 제작된 실험장치를 이용한 상온·상압상태에서의 가스의 속도를 측정하여 반응기내의 유동특성에 관한 실험을 실시하였다. 이와 더불어 반응기내부의 흐름을 가시화하기 위한 실험을 수행하였다. 또한 실험에서와 같은 조건하에서 FLUENT CODE⁽⁹⁾를 이용한 수치해석결과를 실험 결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 노즐설계 및 분무실험

석탄가스화 반응기 설계시 가장 많은 문제를 야기하고 있는 부분이 노즐로서, 설계시 고려되어야

할 사항으로서 고온하에서 장시간 견딜 수 있는 적절한 재질의 선정과, 분무후 슬러리가 산화제(산소 혹은 공기)와 잘 혼합되어지도록 해야하며, 석탄의 특성상 일정온도 이상에서 점도가 급격히 상승되므로 석탄 슬러리의 응고에 의한 노즐 구멍이 막히지 않게 하기 위하여 노즐 내에서 급격한 압력강하가 발생하지 않도록 해야 한다. 여기서 이용된 노즐은 고온·고압용으로 사용될 것을 고려하여 가급적 응점부위를 최소화하고 전체를 한 물체의 형태로 설계되었다. 이는 내부에 선회기 설치가 불가능하게 된 원인이고, 이를 보완하기 위하여 노즐에서 분사되는 2차가스를 고속(200 m/sec-300 m/sec)으로 연료에 충돌시켜 분무하도록 하였다. 또한 일반적으로 화염의 안정을 주기 위해 노즐에 부착하는 보임기는 가스화기의 내부온도가 1500-2000 K를 유지하고, 또한 초기 노즐입구에서의 유속이 고속으로 분무되는 관계로 마찰에 의한 침식을 가속시키므로 석탄가스화 시스템에서는 설치가 불가능하다.

실험을 위한 노즐의 개략도를 Fig. 1에서 보여주고 있다. 슬러리는 중앙에서 공급되며, 2차가스는 일정한 각을 갖고 분사되도록 하였다. 보임기가 존재하지 않은 상태에서 고속분무시 일반적으로 야기되는 화염의 리프트(Lift)현상을 우려할 필요가 없는 것은 석탄가스화기의 특성상 1200K 이상으로 예열을 하며, 실제 가스화 반응시에는 반응기 내부의 온도가 1500K 이상을 유지하고 있기 때문이다.

노즐의 분무특성을 실험하기 위하여 Fig. 2에 보는 바와 같이 MALVERN INSTRUMENT사의 He-Ne 입자측정장치(Particle Sizer)를 이용하여 분무입자를 측정하였다. 본 연구는 정량적인 실험보다는 정성적 분석을 목적으로 하고 있기 때문에 실험에 어려움이 있는 석탄 슬러리 보다는 물을 실험에 이용하였다.

실험에 이용된 조건은 Table 1에 나타난 바와

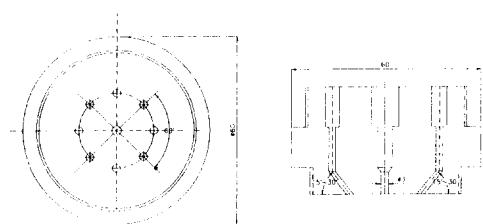


Fig. 1 Schematic Drawing for the Coal Slurry Nozzle

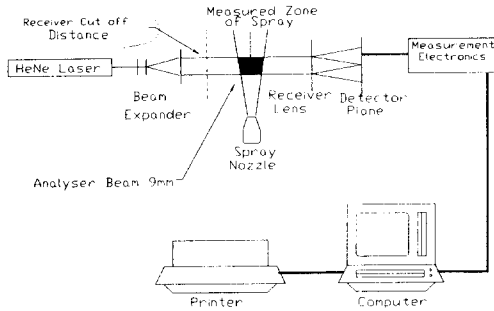


Fig. 2 Schematic Measurement Drawing for He-Ne Particle Size Analyzer

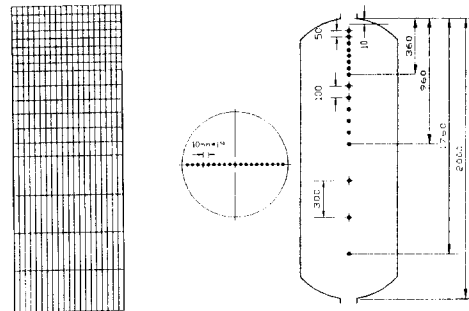


Fig. 3 Digitization for Velocity Measurements during Cold Test

Table 1 Experimental Parameters for Nozzle Characteristic Test

Tested fuel	Water
Mass flow rate (g/s)	4.18, 8.06
Secondary air pressure (kg/cm ²)	1, 2, 3, 4
Impinging angle (°)	15, 30

같다. 유량의 변화에 따른 특징을 보기 위하여 4.18 & 8.06 g/s를 선정하였는데 이는 가스화장치의 용량인 0.5 T/D를 70%의 석탄 슬러리로 환산된 값에 해당된다. 또한 공급된 2차 공기의 유속에 따른 영향을 평가하고 충돌되는 각에 따른 변화를 보기 위하여 각각의 실험변수로 선정하였다.

2.2 모사용 실험장치

분류층 석탄가스화기용으로 개발된 노즐을 이용한 원통형 반응기의 유동특성을 이해하기 위하여 상온에서 모사용 실험을 실시하였다. 모사용 실험장치의 크기는 실물 크기와 같은 길이가 2m 이고 내경이 20cm가 되도록 아크릴로 제작하였다.

속도측정은 축 방향만을 측정할 수 있는 길이가 12인치이고 크기가 1/8인치인 피토판을 이용하였다. 속도로의 환원은 고속에서도 읽을 수 있도록 되어 있는 FURNES CONTROL사 제품의 디지털 마노미터를 이용하였다. 속도측정을 위하여 세분된 측정격자는 Fig. 3에 보는 바와 같다. 즉 반경방향으로 20cm의 내경에 1cm 간격으로 19개의 측정 위치를 선정하고 축 방향으로는 처음 노즐에서 56cm까지는 매 5cm 간격으로 나누고, 이후 1m까지는

10cm 간격으로 세분하였다. 이후부터는 30cm 간격으로 총 323개의 측정 위치를 설정하였다.

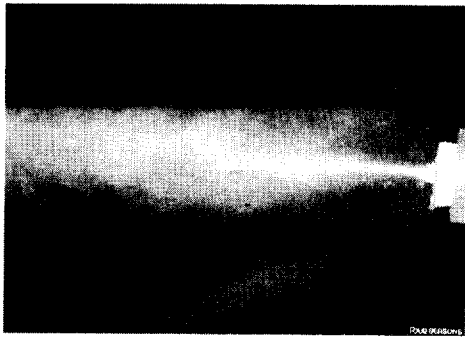
3. 결과 및 토의

3.1 분무특성 실험

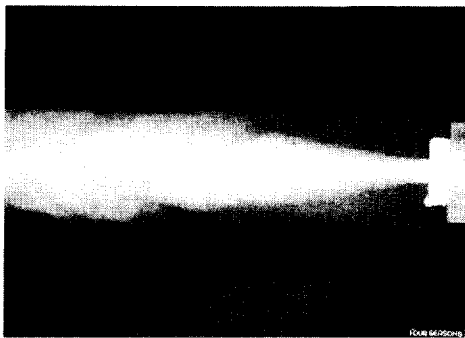
Fig. 4는 고속충돌노즐에 대한 분무실험을 보여 주고 있다. 실험에 이용된 조건은 Table 1에 나타난 바와 같이 2차 공기의 분무압력(P=1, 2, 3, 4 Kg/cm²)을 변화하면서 유량과 충돌각에 변화를 주었다.

Fig. 5는 MALVERN 입자측정기를 이용한 2차 공기의 분무압에 따른 입자의 크기를 SMD로 나타 낸 것이다. 이때 4.18 g/sec와 8.06 g/sec의 공급유량에 대하여 충돌각을 각각 15°와 30°로 실험을 실시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 압력이 증가할 수록 입자의 크기가 작아짐을 볼 수 있다. 이는 2차 공기가 액주에 충돌할 때 압력이 높을수록 높은 운동에너지가 액적에 전달되어 액적의 분산이 쉽게 이루어진다. 또한 실험에 이용된 두 가지의 유량중 같은 분무압에 대하여 유량이 적을수록 입자가 쉽게 분무되는 것을 볼 수 있으며, 충돌각이 클수록 분무가 잘되는 것을 알 수 있다. 그러나 충돌각에 대한 분무화의 정도는 노즐에서 멀어질수록 분무각에 큰 영향을 받지 않음을 본 실험결과에 의하여 관찰되었다.

본 연구는 길이가 2m인 반응기내의 온도분포를 고르게 유지하는 것이 가장 중요한 과제로서, 이를 위하여 가급적 분사되는 화염의 형태를 길게 하고 분사된 액적들로 형성된 분사콘(Spray Cone)내부까지 산화제가 쉽게 침투되어 연료와 혼합이 잘 이루어져 반응이 안정적으로 이루어질 수 있도록 해



(a) $\dot{m} = 4.18\text{g/sec}$, $P = 3\text{kg}_f/\text{cm}^2$



(b) $\dot{m} = 8.06\text{g/sec}$, $P = 3\text{kg}_f/\text{cm}^2$

Fig. 4 Photographs for the Impinging Jet Spray with Water

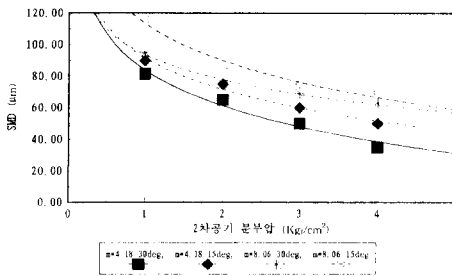


Fig. 5 Particle Size Measurements on the Various Secondary Air Pressures at 35cm from the Nozzle Tip. (Secondary Air Pressure)

야만 한다. 고온의 반응기내에서 가스화를 위한 부분인소는 분무후 체류시간이 1초 이내에서 이루어지게 되는데, 이는 반응기의 1m내의 도달거리에 해당된다.⁽⁷⁾ 이러한 이유로 분무초기의 거리에 대한 입자의 분포도는 화염의 안정을 유지하는 중요한 요소이다.

Fig. 6은 각각의 분무압력이 변할 때 노즐로부터 거리에 따른 SMD를 측정하는 것이다. 입자의 크기

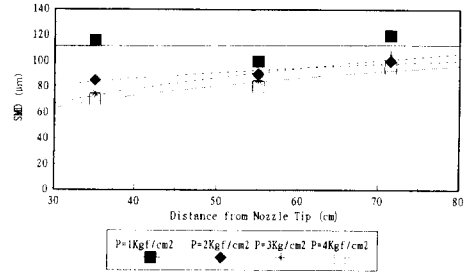


Fig. 6 Influences for the particle size on changing distance from the nozzle at various secondary air pressures.



Fig. 7 Photographs for visualization of entrained flow by high speed impinging Jet

가 분사후 약 55cm 이후에서는 입자의 크기에 있어서 큰 차이가 나지 않음을 관찰할 수 있었다. 이는 초기의 2차공기의 분사속도가 1 Kg_f/cm²에서 약 120 m/sec이며 4 Kg_f/cm²에서는 임계속도에 도달되는 고속의 분부로 내부의 혼합이 잘 이루어지고, 추후에 설명하겠지만 분무가 진행되는 방향과 반대되는 방향으로 액적이 역류하며 액적간의 응집 현상이 발생되는 것으로 추정된다. 노즐의 입구에

서는 압력이 낮을수록 입자의 크기가 커지나 고속의 분무인 $2 \text{ Kg}_t/\text{cm}^2$ ($180\text{m}/\text{sec}$) 이후에서는 약 35 cm 되는 위치에서도 큰 차이를 보이지 않고 있다. 실험결과 액적의 평균 크기는 약 $100\mu\text{m}$ 정도로 형성되었으며, 액적의 크기는 점도에 영향을 받으나,⁽¹⁰⁾ 물에 의한 실험결과를 이용하여 석탄슬러리의 액적의 크기를 대략 유추할 수 있다.

3.2 유동가시화 실험

고속 노즐분무시 유체의 흐름이 외부에서 내부로 역류하는 현상이 발생한다. 이는 선회기를 버너에 부착하지 않더라도 연료와 산화제가 충분한 혼합을

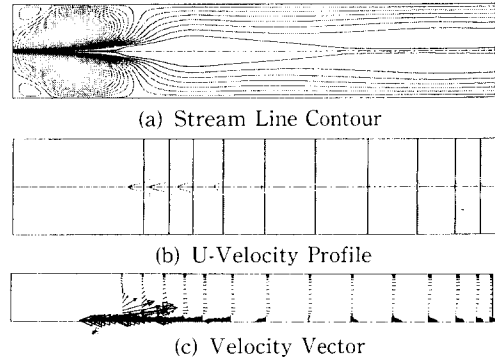


Fig. 8 Computational Results by FLUENT at the condition of $Q=24\text{Nm}^3/\text{h}$, $V_0=265\text{m}/\text{sec}$ at 25°C .

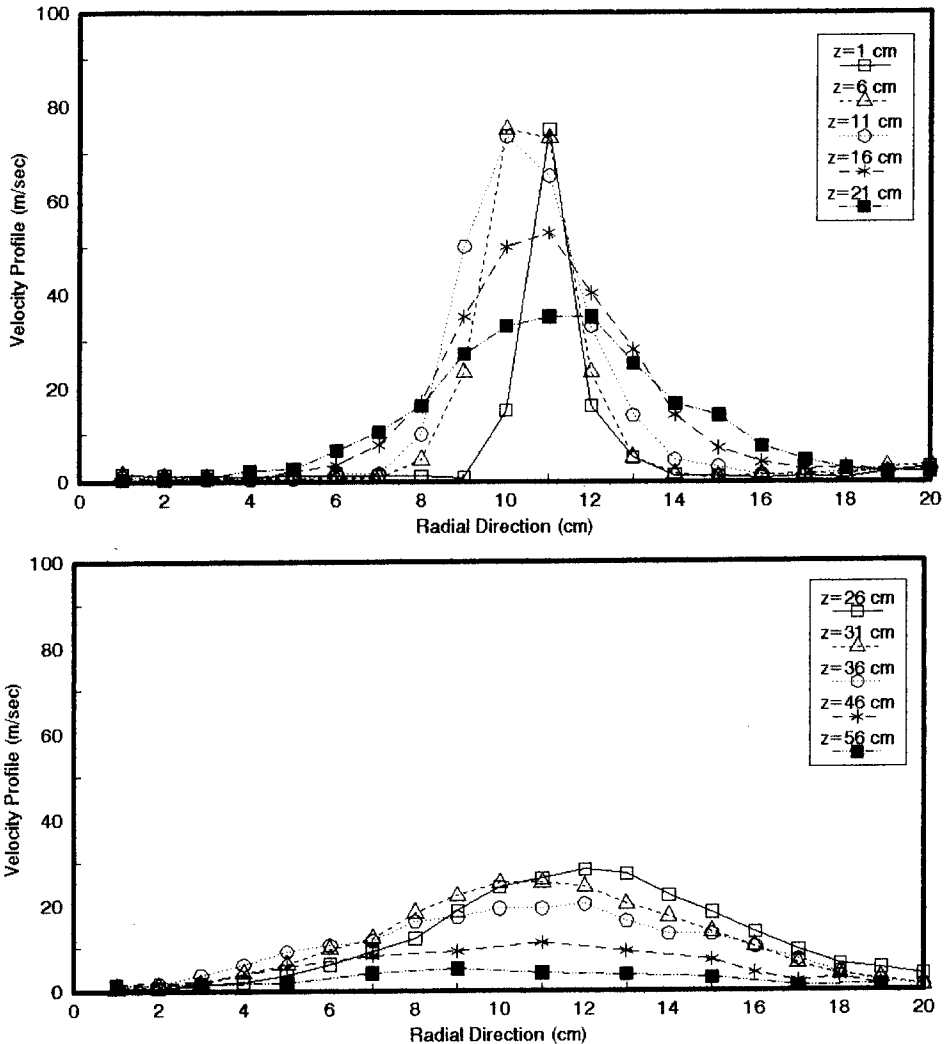


Fig. 9 Velocity profiles along the radial direction at fixed axial direction

할 수 있음을 입증하는 것이다. 이를 입증하기 위하여 스티로폴을 이용한 가시화 실험결과를 Fig. 7에 보여주고 있다. 실험장치는 앞에서 설명한 모사용 아크릴 관을 이용하였고 가시화를 위한 재료로는 직경이 1mm의 고른 크기를 갖고 있는 스티로폴을 이용하였다. 이는 실제 분무액적의 크기분포가 0.1 - 0.2 mm인 것에 비하면 약 10배의 크기이나 고속의 난류현상을 가시화할 수 있는 최적의 재

료로서 간주되었다. 반응기내의 공급은 버너가 설치된 위치의 바로 옆에 구멍을 만들어 주입되도록 하여 직접 분사되는 효과를 얻을 수 있었다. 이를 가시화하기 위해서 사진기의 노출시간과 2000 rpm 용 스트로보스코프를 이용하여 영상에 노출시간동안 움직인 입자의 흔적이 생기도록 하였다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 30 cm까지는 강한 난류의 외부 재순환영역(External Recirculation

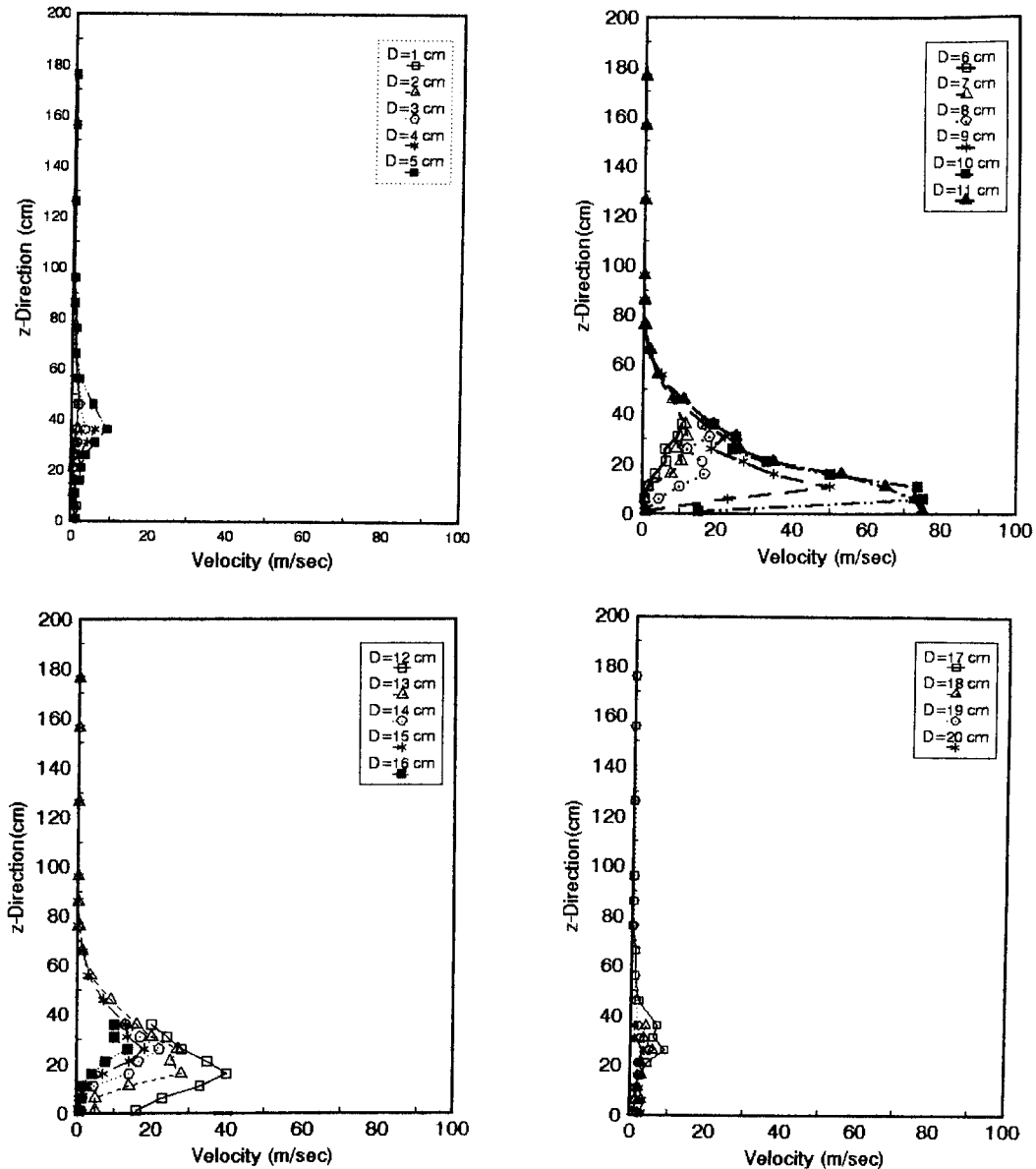


Fig. 10 Velocity profiles along axial direction at each fixed radial direction

Zone)이 형성되고 있음을 보여주고 있다. 이는 고온의(2000K) 석탄가스화 반응기내의 버너 주위의 온도를 상승시키는 역할을 하는데, 주변 내화재 벽의 침식현상 및 노즐이 용융되는 현상을 가속시키는 요소로 작용되는데, 이러한 현상들이 파일럿 프랜트의 반응기내에서 관찰되고 있다.⁽⁶⁾ 이것을 방지하기 위하여 내화재 및 노즐의 재질에 대한 개발과 분무방법에 있어서 노즐의 충돌각을 작게 하여 화염 및 외부 재순환영역의 범위를 축소시킬 수 있을 것으로 여겨진다.

분무후 30 cm 이후에서는 Fig. 7의 하부에서 보여주듯이 반응기의 중심부에서 스티로폴의 머리가 위로 향하는 내부 재순환영역(Internal Recirculation Zone)을 형성하고 있음을 관찰할 수 있다. 이는 고속의 흐름에 의한 내부의 압력저하로 재순환영역이 형성되며, 연료와 산화재가 효과적으로 혼합되는 중요한 역할을 한다.

상기 실험에 대한 난류 모델을 이용한 수치해석의 결과가 이를 입증해 주고 있다.⁽⁶⁾ Fig. 8은 FLUENT^(TM)를 이용하여 수치해석한 결과를 보여주고 있다. 난류 모델로서 Reynolds Stress Model을 적용하였으며, 실험결과와 일치하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 8에서는 실제 Cold Test와 같은 조건에서 계산이 이루어졌으며, Fig. 7의 가시화실험 결과와 일치하고 있음을 보여주고 있다. 즉, 30 cm 이내에서 외부 재순환영역(ERZ)이 뚜렷이 나타나고 있으며, 이후에서는 내부 재순환영역(IRZ)이 반응기의 중심을 따라 이루어지고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9은 축 방향의 속도(U-Velocity)를 피토 관을 이용하여 측정한 결과이다. 노즐에서 1 cm 떨어진 위치로부터 축 방향으로 처음 46 cm까지는 매 5cm 간격으로 측정을 하고, 이후에는 10 cm와 30 cm 간격으로 측정을 하였다. 본 실험은 단지 1 차원의 측정만을 가능하게 함으로써 반응기내의 재순환영역에 대한 속도를 알 수가 없었다.

실험결과 노즐에서 265 m/sec의 초기분사속도가 급격한 압력강하로 1cm 떨어진 위치에서 약 80 m/sec로 감소되고 50 cm 되는 위치에 이르러서는 10 m/sec의 안정된 흐름으로 변하는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 대부분의 연소가 50 cm 이 전에서 이루어짐이 입증되었으며,⁽¹¹⁾ 이후부터는 가스화물 위한 화학반응이 행하여짐을 예측할 수 있다.

Fig. 10은 반경방향(r-direction)을 고정시키고

축 방향(z-direction)을 따라 속도분포를 보여주고 있다. 그림에서 벽면에 가까운 위치일수록 즉, $D=1\sim 5$ cm 와 $D=17\sim 20$ cm에서의 속도는 거의 축 방향으로 크게 변하지 않음을 볼 수 있는데, 노즐의 분사각이 15° 를 유지함으로써 고속차탈에 의한 내화벽의 마모를 줄일 수 있음을 입증한 것이다. 또한 벽면 가까이에서의 속도가 약하게 흔들림을 보이는 것은 이 위치에서 난류현상 및 외부 재순환이 이루어지고 있기 때문인 것으로 여겨진다.

노즐의 중심부인 $D=9\sim 11$ cm의 위치에서는 축 방향으로 약 $z=30\sim 40$ cm 부근에서 급격히 감소하고 있음을 보여주고 있는데, 이는 내부 재순환영역으로 역류되는 흐름에 의한 속도의 감소로 추정된다.

4. 결 론

석탄가스화는 고온(2000K)·고압(30-40기압)에서 석탄 슬러리/혹은 미분탄을 산소와 부분 연소시켜서 CO, H₂, CH₄를 일정한 비율로 생산된 가스를 이용하여 가스터빈을 돌리고, 이때 발생된 열을 회수하여 스팀터빈으로부터 전기를 생산하는 복합발전시스템이다. 적절한 조성의 가스를 생산하기 위해서는 가스화기의 내부의 온도를 일정하게 유지하면서 가스전환반응이 일어날 수 있는 최적의 체류시간이 필요하다. 이러한 조건을 만족시켜 주기 위해서는 반응기의 적절한 설계와 더불어 버너의 최적설계에 의하여 좌우된다. 특히 버너는 반응의 초기조건을 만족시켜 주는 요소로서 전체 시스템 중 가장 중요한 요소로 여겨지고 있다.

본 연구는 고온·고압에서 이용될 수 있도록 개발된 고속충돌노즐을 이용한 분류층 가스화 반응기내에서의 유동특성을 이해하고 가스화 반응을 위하여 적절히 설계되었는지를 상온·상압에서 실험 및 수치적 모사를 통하여 조사하였다.

실험적인 결과에 의하면 물에 의한 분무실험결과 액적의 크기가 대부분 100 μ m 미만으로 나타났다.

고속분사시 외부의 재순환영역과 내부 재순환 영역이 발생하여 연료와 산화재의 효과적인 혼합을 하고 있음이 실험 및 수치모사에 의해 나타났다. 재순환영역은 분사된 후 주 연소반응영역인 반응기의 30cm 이전에서 거의 완료되어 효율적인 혼합과 부분연소가 완료되고, 이후 영역에서 진행될 가스 전환반응이 주어진 범위내에서 안정적으로 진행된다.

수 있음을 보여주었다. 이에 대한 가스화 실험결과 앞에서 예측한 대로 반응기내의 일정한 온도분포와 안정적인 가스의 생성이 이루어졌다.⁽¹¹⁾

참고문헌

- (1) Sowa, W. A., 1987, "The Effect of Injector Design on the Performance of the Brigham Young University," Ph. D. Thesis, Brigham Young University.
- (2) Sowa, W. A., Hedman, P. O. and Smoot, L. D., 1987, "The Sensitivity of Entrained Flow Coal Gasification Burners to Changes in Inlet Boundary Conditions," *Western States Conference*.
- (3) Sowa, W. A., Hedman, P. O. and Smoot, L. D., 1988, "The Sensitivity of Entrained-Flow Coal Gasification Diffusion Burners to Changes in Geometry," *Western States Conference*.
- (4) Lilley, D. G. and Rhode, D. L., 1982, "A Computer Code for Swirling Turbulent Axisymmetric Recirculating Flows in Practical Isothermal Combustor Geometries," *NASA Contract Report* 3442.
- (5) Rhode, D. L. and Lilley, D. G., 1985, "Predictions and Measurements of Isothermal Flowfields in Axisymmetric Combustor Geometries," *NASA Contract Report* 174916.
- (6) Larry, A. Bisset, 1978, "An Engineering Assessment of Entrainment Gasification," *MERC/RI-78/2*.
- (7) Smoot, L. D. and Smith, P. J., 1985, *Coal Combustion and Gasification*, Plenum Press, New York
- (8) 안달홍, 김종진, 박호영, 이효진, 1995, "난류 모델에 따른 분류층 가스화기내 유동장해석 연구," 대한기계학회 '95 춘계학술대회 논문집 2 권.
- (9) Fluent Inc., 1990, *Fluent User's Manual*, Version 3. 02, Lebanon, NH.
- (10) Lefebvre, A. H., 1989, *Atomization and Sprays*, Hemisphere, New York.
- (11) 박태준, 김재호, 이효진 외 다수, 1995, "석탄가스화 운전특성 실험 및 오리 멀전 가스화 연구," KRC-93G-J13, 분기보고서.