

오리멀전의 플래쉬 분무 및 연소특성에 관한 연구

신명철* · 류태우* · 김세원* · 방병열*

A Study on Flash Spray and Combustion Characteristics of Orimulsion

Myung-Chul Shin*, Tae-U Ryu* and Se-Won Kim*

ABSTRACT

This study focused on the use of orimulsion in industrial combustion systems. Orimulsion is a bitumen-in-water emulsified fuel, which contains a thirty percent water. Orimulsion has relatively high levels of sulfur and nitrogen compared to many fuel oils, and has been the subject of much debate regarding the environmental impacts of its use. The goal of this research is to analyze the effect of flash spray combustion characteristics of orimulsion on NOx and particulate material reduction. For the flash spray of orimulsion, it is heated to 150°C. The effects of fuel heating temperatures on NOx and particulate material emissions were investigated experimentally. As the fuel temperature was increased, NOx and particulate material concentrations in flue gas were decreased.

Key Words : Orimulsion, Flash Spray, NOx

기호설명

P_f 노즐 연료압력(kg/cm²)
 P_a 노즐 공기압력(kg/cm²)

λ 과잉공기비
 T_f 연료가열온도(°C)

1. 서론

오리멀전은 베네주엘라 오리노코 강 유역에서 채굴되는 역청탄(bitumen)을 원료로 한 에멀진 상태의 연료이다. 초기에는 사용될 수가 없었지만 열량은 석탄보다 높아 사용방법을 개발하기 위하여 1981년부터 영국과 베네주엘라에서 실험실 규모의 연구를 시작하였으며 이후 INTEVEP, BP, Shell, Babcock, CE, MHI 등 미국, 일본의 회사에서 연구가 계속되었다. 1988년 최초의 상업용 운전이 일본 Chubu 발전소에서 시작되었고 곧이어 영국, 덴마크, 캐나다, 미국에서 상업용으로 사용되어 왔다. 현재 세계적으로 약 660만톤/년의 오리멀전이 소요되고 있으며 오

리멀전의 연료인 베네주엘라 역청탄은 매장량이 중동 지역 원유 매장량의 약 80%에 달하는 것으로 평가되고 있고 연료생산이 OPEC 석유 생산 쿼터에 제한받고 있지 않기 때문에 그 사용량이 매년 점차 증가 할 것으로 예상된다.

이와 같은 추세에 따라 국내에서도 2003년부터 한국전력 영남화력에서 오리멀전을 연료로 사용한 상용운전이 시작되었다. 오리멀전의 연료 특성은 Table 1에서 보는 바와 같이 발열량의 경우 석탄보다 크고 중유보다 작은 발열량 크기를 가지고 있어 발전생산 측면에서 타 연료와 비교해 상당한 경쟁력을 가지고 있으나 연료 중 황성분이 상당히 높은 고 유황 연료이고 특히 질소 성분이 중유보다 0.2에서 0.3% 정도 높아 연료 중 질소성분에 의한 NOx 발생(Fuel NOx)이 문제시 된다.

오리멀전을 발전용 보일러 연소 시스템 등에서

* 한국생산기술연구원

† 연락처, mcshin@kitech.re.kr

Table 1 Fuel characteristics

	Orimulsion	Coal	Fuel Oil
Heating value (kcal/kg)	7050	6300	10600
Sulfur (wt.%)	2.4~2.9	0.5~4.0	0.2~3.0
Nitrogen (wt. %)	0.4~0.55	1.0~2.0	0.2~0.3
Ash (wt. %)	0.04~0.25	10.0~10.7	0.02
Vanadium (ppm)	280~360	-	-

연료로 계속 사용하기 위해서는 강화된 공해 배출 시설물 환경 규제를 만족해야 한다. 국내의 경우 2005년부터 신규 설비에 대한 미세먼지 및 NOx 배출 규제가 강화되었으며 이에 따른 단순한 후처리 설비의 보강은 설비부담 과중과 향후 계속적인 오리멸전 연료의 추가사용 가능성 측면에서 근본적인 해결 방안이 될 수 없다.

이에 따라 본 연구에서는 오리멸전 연료유가 약 30% 정도 물을 함유하고 있는 에멸전 상태의 연료라는 특성을 이용하여 이를 고온 고압 상태에서 분무함에 따른 플래쉬 분무 연소를 통해 연소 상태의 개선에 의한 NOx 및 미세먼지의 저감효과를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 연소 시스템

연소로는 내부 직경 1m, 길이 3m의 800,000kcal/hr 급 원형 연소로로서 내부는 20cm 두께의 내화재로 단열되어 있고, 측면에 화염 관측을 위한 강화유리 관측창이 확보되어 있다. 또한 배기가스 계측을 위해 stack부에 배기가스 계측부가 설치되어 있으며, 배가스 농도 계측은 sampling probe를 통해 가스 분석기에서 NOx, CO, CO₂, O₂, SO₂ 농도와 배기가스 온도가 동시에 계측된다. 또한, 연도 상부에 분진 측정용을 위한 계측부가 설치되어 있고 이를 통해 분진 측정을 위한 sampling probe를 연도내로 삽입하여 분진량이 계측된다.

연료로 사용된 오리멸전은 200 L 급 서비스 탱크에서 밴드 히터에 의해 탱크 외부면을 통해 약 90℃로 가열된 후 모노 펌프의 흡입에 의해

이송되며, 펌프에서 모터의 회전수와 공급 압력 조절 장치에 의해 유량과 압력이 조절된다. 펌프에서 일정한 유량과 압력으로 공급된 오리멸전은 원하는 공급 온도를 일정하게 유지하기 위해 온도 조절이 가능한 전기히터를 지나 버너로 공급되며, 버너로 공급되기 직전 연료의 온도 계측 및 제어가 가능하도록 온도 센서와 컨트롤러가 설치되어 있어 PID 제어에 의해 설정된 온도를 비교적 작은 편차 내에서 유지하도록 설계되었다.

연소 공기의 공급은 송풍기를 사용하여 버너의 1,2,3단 공기 공급부로 각각 나누어져 공급되며, 공기 유량은 볼텍스(Vortex)유량계에 의해 계측된다. 공급 공기의 관내 유동에서 외기 온도와 댐퍼 개도 변화에 따른 압력 변화에 의한 유량을 보정하기 위해 댐퍼 이후 관내에 설치된 온도 센서와 압력 센서에서 현재 공급되고 있는 공기의 온도와 압력을 계측하여 이를 Flow Computer에서 받아들여 실시간으로 보정된 유량을 표시한다.

2.1.2 버너 및 노즐

버너는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 3개의 공기 공급부를 가지는 공기 다단 저 NOx 버너 구조로 설계/제작 되었다. 전체 공기가 각각 1, 2, 3차 공기로 나누어 각 공기 공급부로 공급되며 1차 공기 출구 부분에 45° 각도의 선회기가 설치되어있으며, 2차 및 3차 공기의 Windbox 내에 2, 3차 공기의 선회도를 변화시킬 수 있도록 하기 위해 공급되는 공기 유동의 버너 출구에서의 접선방향 운동량을 가변할 수 있는 Vane이 설치되어 있다. 노즐은 6개의 분무공을 가진 내부혼합식 분무 노즐로서 분무각은 60°이며 연료 미립화를 위한 압축공기 공급부와 연료공급부를 가진 연료 노즐 Lance가 버너 중앙에 설치되어 있으며, 노즐에서의 연료와 미립화공기의 압력을 각각 계측할 수 있는 압력계가 연료노즐 Lance 후단에 설치되어 있는 구조이다.

2.1.3 노즐 분무 특성 계측 시스템

연료유 저장 탱크에서 전기 히터를 통해 적정 온도로 가열된 오리멸전은 중력차로 인해 서비스 탱크로 이송되고 서비스 탱크에서의 질소 가압을 통하여 노즐까지 적절한 압력으로 이송된다. 서비스 탱크 이후로는 유체의 흐름을 제어할 수 있는 관로와 조절 밸브가 있어 유량 및 그에 따른 압력 조절이 가능하다. 서비스 탱크에서 가압된 오리멸전 연료유는 이후 라인히터(Line Heater)를 거치며 운전 조건의 온도에까지 도달하고 이후 단순 감압 압력식 노즐을 통하여 분사된다. 온도 및 압력의 측정용 열전대와 압력 센서를 사용하여 측정하였다. 온도 측정 위치는 탱크 내 2개(설정값), 탱크 출력 후 2개, 서비스 탱크와 라

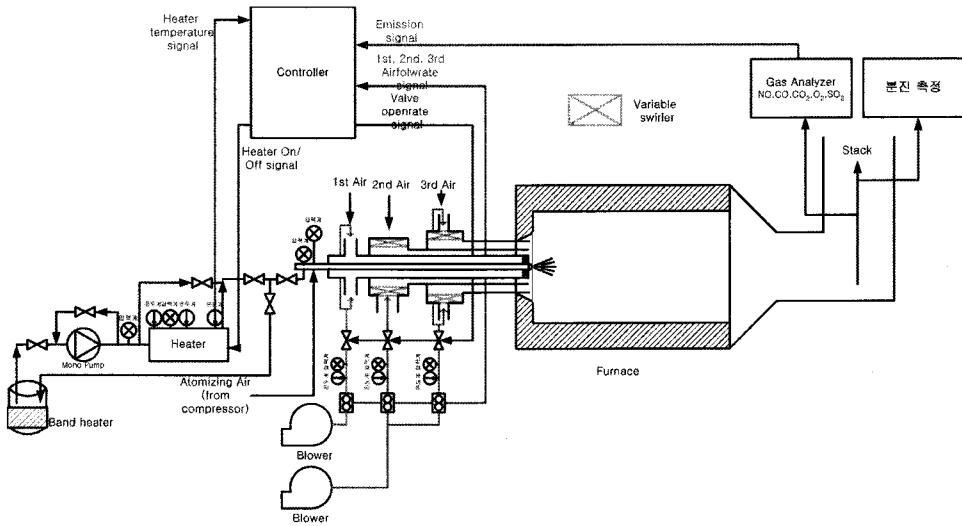


Fig. 1 Schematic diagram of combustion system

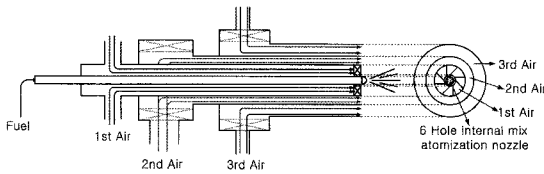


Fig. 2 Schematic diagram of burner

인히터 사이 1개, 노즐 전단부에 1개가 위치하여 있고 압력 측정 위치는 서비스 탱크출구, 노즐입구에 2개가 존재한다. 노즐에서의 분무각 측정은 고속 촬영 카메라를 사용하여 측정하였다.

2.1.4 실험조건 및 방법

노즐 분무 및 연소 실험 시 분무 실험용 압력식 노즐과 버너의 내부혼합식 노즐로 공급되는 오리털전의 유량은 각각 10kg/h와 70kg/h로 연소부하는 500,000kcal/h이다. 분무실험에서 연료의 가열온도는 115℃에서 160℃까지 15℃씩 변화시키면서 분무각을 측정하였으며 연소 실험의 경우 공급되는 공기의 과잉공기비가 1.2로 고정된 연소 조건에서 연료의 가열온도를 110℃, 130℃, 150℃로 20℃씩 변화시키면서 배기가스 및 분진 농도를 측정하였다. 연소로의 예열시간은 약 1시간이며 실험 후 배관에 남아있는 오리털전에 의해 배관이 막히는 현상을 방지하기 위해 경유를 사용하여 약 30분 정도 연소하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료가열 노즐분무 특성

Figure 4는 오리털전 연료유의 가열 온도에 따

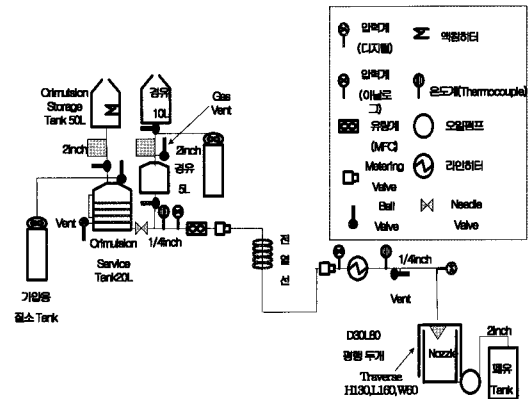


Fig. 3 Schematic diagram of spray system

른 노즐에서의 분무 형태를 고속카메라로 촬영한 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 동일한 유량 및 노즐 분무 압력 조건에서 연료의 가열 온도를 증가시킬 경우 오리털전 연료유에 약 30%정도 포함되어 있는 물 성분의 Flash 분무 효과에 의해 분무 시 물액적이 기화하게 된다. 이로 인해 분무 시 체적 팽창이 일어나고 액적의 밀도가 감소함에 따라 노즐 분사 초기 분무각이 증가하고 분열길이가 감소한다.

Figure 5에서 보는 바와 같이 분사각은 연료 온도 110℃에서 약 54°이고 160℃에서 약 72°로서 18°정도의 분무각 증가를 보였으며 연료가열온도가 증가함에 따라 그 증가율이 점차 감소하는 경향을 보였다.

3.2 화염형상 및 배기가스농도 특성

오리털전 연료의 유량과 분사 압력이 동일한

Table 2 Experimental conditions

(a) Experimental conditions of flash spray

Fuel Flow Rate	10 kg/h
Fuel Pressure at Nozzle(Pf)	10kg/cm ²
Fuel Heating Temperature(Tf)	115°C, 130°C, 145°C, 160°C
Nozzle Type	Pressure

(b) Experimental conditions of combustion

Heat Input	500,000kcal/h
Excess Air Ratio (λ)	1.2
Fuel Pressure at Nozzle(Pf)	6kg/cm ²
Air Pressure at Nozzle(Pa)	3.5kg/cm ²
Fuel Heating Temperature(Tf)	110°C, 130°C, 150°C
Nozzle Type	Internal Mix

상태에서 연료 가열 온도를 증가시킬 경우 플래쉬 분무 효과에 의해 연료 내 물성분의 기화에 따른 체적팽창에 의한 분무각 증대와 분열길이 감소가 일어난다. Fig. 6의 (a)에서 (c)의 화염 사진에서 보는 바와 같이 노즐 분무 실험과 동일하게 연료의 유량과 분사압력조건을 고정시킨 상태에서 연료 가열 온도에 따른 화염 형태를 분석해보면 연료의 가열 온도가 증가함에 따라 노즐 분사초기 화염 영역에서의 연료 분무각이 확대되고 화염의 길이가 점차 짧아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 연료 가열 온도가 110°C와 130°C에서 연료 젯(Jet)의 축방향 운동량이 상대적으로 커서 화염의 선회유동이 명확하게 나타나지 않는 것에 반해 150°C일 경우 화염 내 선회 유동의 형태가 나타나면서 화염영역의 길이가 큰 폭으로 줄어든다. 이는 플래쉬 분무에 의한 효과로서 연료 가열 온도가 증가할 경우 연료의 미립화 및 연료 내 물 성분의 기화가 촉진되어 분무 시 빠른 상변화로 인해 Water Vapor 상태로 존재하게 된다. 따라서, 연소 시 화염 내 연료 액적 중 물 성분함유에 따른 증발 잠열로 인한 열손실이 감소하게 되고 오리멸전 연료를 구성하고 있는 고체입자의 연소 반응 속도가 증가하여 화염 길이가 점차 짧아진다.

이에 따라 화염의 온도가 증가하고 화염 내에서

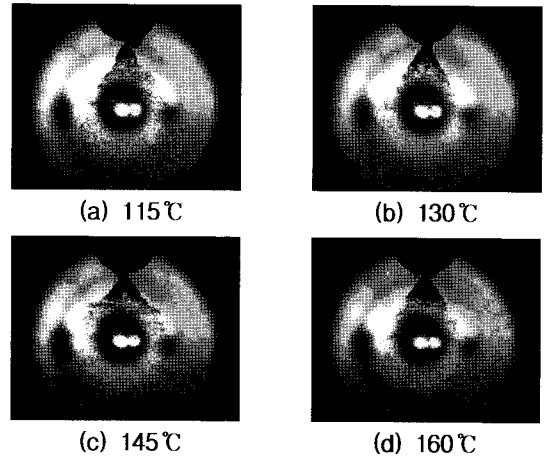


Fig. 4 Pictures of flash spray

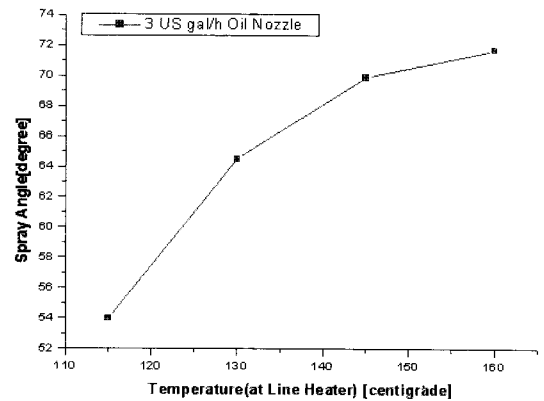


Fig. 5 Spray Angle for Fuel Temperature

복사에 의한 열방출이 감소할 수 있으나 연료 가열 온도증가에 따라 미립화가 촉진되고 플래쉬 분무 효과에 따른 물성분의 기화로 인해 단위 연료 액적의 질량 감소에 따른 연료 젯의 축방향 운동량이 감소하고 분무각이 확대되어 주위 공기의 선회유동에 의한 내부 재순환 영역의 형성이 연료 가열 온도가 증가할수록 보다 뚜렷하고 확대되는 특징을 보였다. 따라서 이와 같은 유동의 물리적인 현상은 연료 가열 온도가 증가할수록 화염 내 연료 농후 영역의 형성이 보다 충분히 확보될 수 있음을 의미하며 이에 따른 sooty flame의 형성으로 벽으로의 복사로 인한 충분한 열 방출이 일어나 전체적인 화염 영역의 온도가 저하되어 Thermal NOx 반응 경로에 의한 NOx생성이 억제되며 연료 중 질소성분에 의해 생성된 Fuel NOx가 연료 농후 영역에서의 체류 시간 증가로 인해 N2로 환원될 수 있는 원인이 제공될 수 있는 것으로 판단된다.

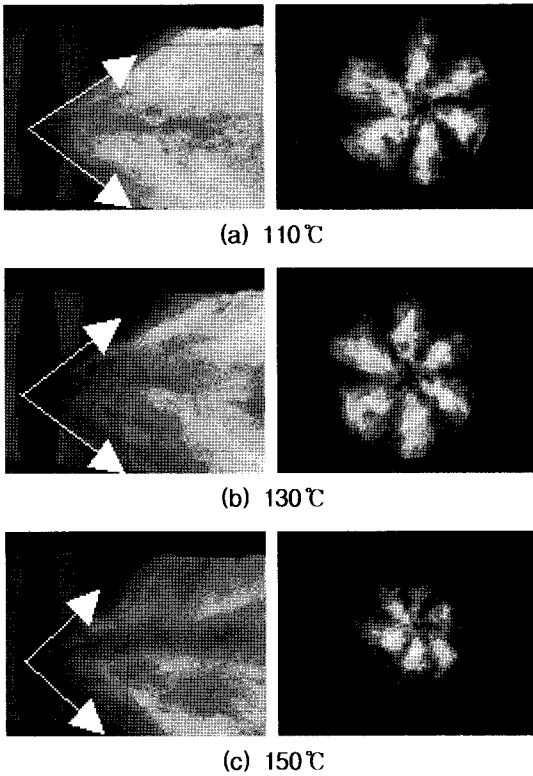


Fig. 6 Pictures of Flames

Figure 7에서 Fig. 9에 보는 바와 같이 연료 가열 온도가 증가함에 따라 연소 반응 속도가 증가하여 배가스 중 O₂ 및 CO 농도가 감소하고 CO₂ 농도가 증가한다. 이는 연소 효율이 증가하는 것을 의미하며, 이에 따라 미세 먼지의 양 또한 감소하는 경향을 나타내었다. NO의 경우 연료 가열 온도가 증가함에 따라 산소 농도가 감소하고 내부 재순환 영역의 형성이 활발해짐에 따라 환원 반응에 의해 점차 감소하는 Fuel NOx 생성의 전형적인 특징을 보여준다. 따라서 오리멸전과 같이 고점성이고 연료 중 질소와 수분함유량이 비교적 큰 연료에서의 가열분무 기술 적용은 미세먼지와 NOx를 동시에 저감할 수 있다고 판단된다.

4. 결론

오리멸전 연료를 사용한 연소시스템에서 연료의 고온 가열 분무를 통한 플래쉬 분무 연소 상태에서의 배기가스 농도 및 미세먼지 발생량을 측정하였으며 그 특성에 관한 결론은 다음과 같다.

(1) 연료의 가열 온도를 증가시킬 경우 오리멸전 연료유에 약 30%정도 포함되어 있는 물 성분의 플래쉬 분무 효과에 의해 분무 시 물 액적이 기

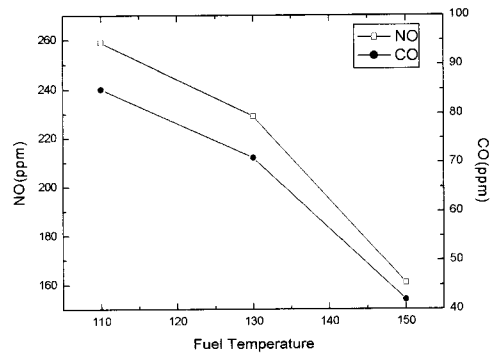


Fig. 7 NO and CO concentrations

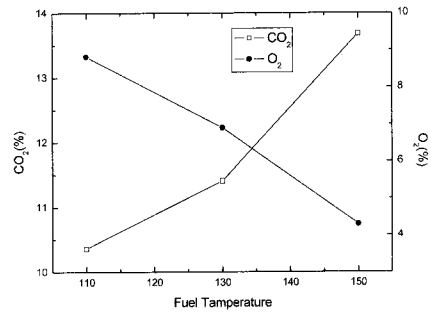


Fig. 8 O₂ and CO₂ concentrations

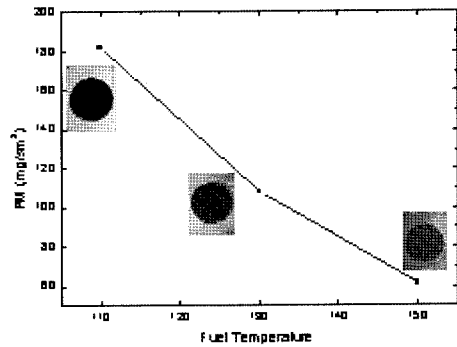


Fig. 9 Characteristics of PM emissions

화하게 되어 분무 시 체적 팽창이 일어나고 이에 따라 노즐 분사 초기 분무각이 증가한다.

(2) 연료의 가열 온도가 증가함에 따라 미립화 촉진 및 플래쉬 분무 효과에 의해 연소 반응 속도가 증가하여 배가스 중 O₂ 및 CO 농도와 미세 먼지가 감소하고 CO₂ 농도가 증가하여 연소 효율이 증가하는 특징을 보였다.

(3) 연료 가열 온도가 증가함에 따라 배가스 중 산소 농도가 감소하고 내부 재순환 영역의 형성

이 활발해짐에 따른 환원 반응에 의해 NO_x가 점차 감소하는 Fuel NO_x 메커니즘의 전형적인 특징을 보여주었다.

(4) 연료가열온도 증가에 따른 오리멀전의 플래쉬 분무 효과에 의해 미세먼지와 NO_x의 동시저감이 가능할 것으로 판단된다.

(5) 본 연구에 적용된 버너는 3단의 공기 공급부를 가지는 다단 연소 버너로서 각 단의 선회도를 조절할 수 있는 구조이며 향후 각 단의 공기 선회도 조절에 따른 효과와 화염 온도 계측을 통해 보다 명확한 NO_x 및 미세먼지의 동시 저감 효과를 규명할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] C. A. Miller, R. K. Srivastava, "The Combustion of Orimulsion and Its Generation of Air Pollutions," *Progress in Energy and Combustion Science*, 26, 2000, pp.131-160.
- [2] Dryer FL, "Water addition to practical combustion systems-concepts and applications," *Proceeding of 16th International Symposium on Combustion*. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1976. pp.279-295.
- [3] Allen JW, Beal PR, "The environmental impact of Orimulsion combustion in large utility boilers," *Proceedings of the 22nd International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems*, Clearwater, FL, 16-19 March 1997, pp.443-450.
- [4] R.W. Telesz, Jose Sanabria, "Orimulsion at Dalhousie," 11th CEPSI Conference, October, 1996, pp.21-25.
- [5] Mark S. Bohn, Charles B. Benham, "A Comparative Study of Alternate Flowsheets Using Orimulsion. as Feedstock," 25th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 6-9, Clearwater, Florida, 2000.
- [6] Bowman CT, "Control of combustion generated nitrogen oxide emissions: technology driven by regulation," 24th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1992, pp.859-878.