

## 목질계 바이오매스와 유연탄의 혼합 연소특성에 관한 연구

김성철\*, 이현동\*, 김재관\*

### Combustion Characteristics of Coal and Wood Biomass Co-Firing on the Pulverized Coal Combustion Furnace

Sung-Chul Kim\*\*, Hyun-Dong Lee\*, Jae-Gwan Kim\*

#### ABSTRACT

There are many researches in progress on co-firing of coal and biomass to reduce carbon dioxide produced from the coal consumption. This study carried out 200 Kg/h combustion test furnace by mixing coal with timber. Coal was mixed with domestic and imported-wood around 10% to 20% based on input energy. For the mixed fuel, combustion temperature, unburned carbon and the composition of flue gas were analyzed. In addition, the tendency of slagging and fouling was examined using a probe. According to the result of the experiment, combustion temperature was depended on the kind of wood and mixing ratio. The unburned carbon loss was higher with increase of wood biomass mixing ratio, as a result, the total heat loss of furnace was slightly increased. The emission of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> were decreased by 3~20% and 21~60% respectively. There are no difference of slagging and fouling tendency between biomass co-firing and coal burning only.

**Key Words** : Biomass, Coal- Biomass co-firing

#### 기 호 설 명

$S_f$ & $F_f$	Slag & Fouling factor( $m^2 \cdot K/W$ )
$A_o$	전열면적( $m^2$ )
$\Delta T_{ln}$	대수평균온도(K)
$m$	질량유량(kg/hr)
$C$	냉각수 비열(kcal/kg.K)
$T_i$ & $T_o$	냉각수 입구, 출구 온도(K)

#### 1. 서 론

바이오매스는 석탄과 기름 다음으로 풍부한 에너지원이며, 바이오매스 연료의 가장 큰 장점은 환경친화적이라는 점이며, CO<sub>2</sub>에 관한한 neutral로 인정되고 있으며 황 함량이 낮기 때문에 SO<sub>2</sub> 발생이 적어 특히 고유황 석탄과 혼소하는 경우 효과를 얻을 수 있다[1-3]. 특히 유럽은 바이오매스 연료를 이용한 직접연소 및 유동층 연소에 세

\* 한전전력연구원 수화력발전연구소 연소열공학그룹  
† 김성철, sckim@kepri.re.kr

금감면 지원등을 통하여 다양한 용량의 바이오매스 발전설비가 운전중에 있다[4-5]. 본 연구에서는 목질계 바이오매스 연료와 발전용 연료인 석탄과의 혼합 연소특성을 검토하기 위하여 시간당 200kg의 연소가 가능한 시험 연소설비에서 바이오매스 10%, 20% 혼소 시 연소에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에 사용된 국내 및 수입 목질계 바이오매스와 시험탄의 공업분석 결과는 Table 1에서 보듯이, 바이오매스는 석탄에 비해 휘발분 함량이 최소 20% 이상 높고 회분의 함량이 매우 낮은 특성을 보여 연소속도가 빠를 것으로 예상되었다. 또한 바이오매스의 수분 함량이 매우 높아 연소 시 수분에 의한 증발잠열 손실이 높을 것으로 예상되었다.

**Table 1 Proximate Analysis of coal and biomass**

Fuel type	Proximate Analysis(wt %)				Heating value (kcal/kg)
	Moisture	Volatile Matter	Fixed Carbon	Ash	
Imported timber	38.98	53.28	7.37	0.37	5,480
Domestic timber	27.53	59.92	11.15	1.40	5,640
Coal	5.6	32.20	54.70	7.50	6,844

본 연구에 사용된 시료의 원소분석 결과는 Table 2에서와 같이 목질계 바이오매스는 질소분 및 황분의 함량이 석탄에 비해 매우 낮아 환경성 측면에서는 양호한 특성이 예측 되었으며, 산소의 함량은 석탄에 비해 높은 특성을 나타내었다.

**Table 2 Ultimate Analysis of coal and biomass**

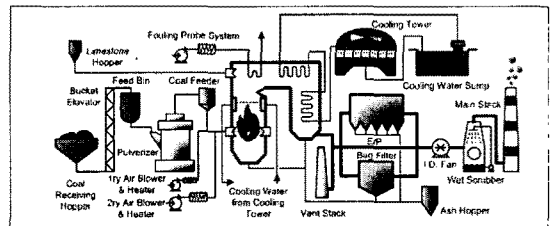
Fuel type	C (wt%)	H (wt %)	O (wt %)	N (wt %)	S (wt %)
Imported timber	51.20	6.29	41.42	0.70	0.019
Domestic timber	50.25	6.05	41.61	0.68	0.014
Coal	73.75	4.37	12.75	1.33	0.30

본 연구에서 석탄은 수입 유연탄을 사용하였고, 바이오매스 연료는 국내 톱밥과 수입 톱밥을 사용하였으며 시험연소 설비를 이용하여 혼소비율에 따른 보일러 내부의 온도변화와 배가스 온도 변화, 환경오염물질 발생정도 및 연소장애타를 일으키는 슬래깅 특성과 파울링 특성을 비교 평가하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 시험연소로 본체(Combustor)

화력발전소 보일러 시스템의 증기발생부인 과열기 및 재열기, 절탄기 대신 각각 Slag panel, Fouling probe, 파이프형 열교환기를 설치하여 연소열을 추출할 수 있는 fig 1과 같은 구조로 되어 있으며, Bottom ash hopper와 Fire box(Flame zone), Radiant section, Nose section, Convection section, Convective ash hopper section 등으로 구성되어 있다. 본 연소로 본체의 외형은 2,568mm Depth× 2,812mm Width, 그리고 Bottom ash hopper에서 Roof까지 7,937mm이며, Fire box(Flame zone)에는 유연탄 전소시나 유연탄과 무연탄 혼합 연소시 시험조건에 따라 수평 연소방식(Horizontal Firing)이나 코너 연소방식(Tangential Firing)으로 선택적으로 전환하여 시험할 수 있도록 Movable Block Swirl Burner 와 Tangential 또는 Corner-fired Burner가 설치 가능한 구조로 설계되어 있다. 수평 연소방식(Horizontal Firing)으로 시험 시 버너를 연소로 벽 전면 또는 후면의 한 면에만 설치하는 Single Wall Firing(Front Wall Firing 또는 Rear Wall Firing)과 버너를 연소로 벽 전면과 후면에 모두 설치하는 Opposed Wall Firing 방식을 각각 선택하여 시험할 수 있도록 되어 있다.



**Fig. 1 Schematic diagram of combustion furnace(200kg/hr)**

연소로 예열 시 사용되는 가스버너는 2개의 반대편 코너에 각각 위치하며, 각각 최대 3,000,000 Btu/hr의 연소용량을 지니고 있고 연소로(Combustor) 내부의 화염상태를 감지하기 위해 두 개의 자외선 화염감지기가 설치되어 있으며 이들 Detector는 시험조건에 따른 연소방식의 전환에 상관없이 항상 화염에 초점을 맞추도록 되어 있다. 기타 주요 부대설비로는 각종 송풍기 및 펌프와 노내 압력 조절용 유인 통풍팬(Induced draft fan: IDF)과 배기가스 재순환용 팬 Gas Recirculation fan: GRF), 냉각탑 등이 설치되어 있으며, 시험연소로의 정상운전을 위하여 각종의 단위기기 전 후단에는 온도 및 압력, 유

량, 레벨 등의 계측을 위한 계측제어장치와 분산 제어 시스템(DCS)으로 구성되어 있다.

### 2.2 온도측정

시험연소로에는 연소로 내부의 온도측정을 위해 여러 개의 열전대(Thermocouple)가 설치되어 있다. 이러한 열전대의 신호를 실시간으로 수집하여 연소시험 수행중의 노내 온도를 비교분석하게 된다. 본 시험에서는 3개의 열전대가 위치별로 설치되어 온도를 측정하였다. 연소로 수직방향 위치별로의 온도 분포를 비교하기 위해 대표적인 3개 열전대(R1, R2, B1)의 온도 값을 비교 분석하였다. 연소로 본체에 설치된 주요한 열전대의 설치위치는 아래 Fig 2와 같다.

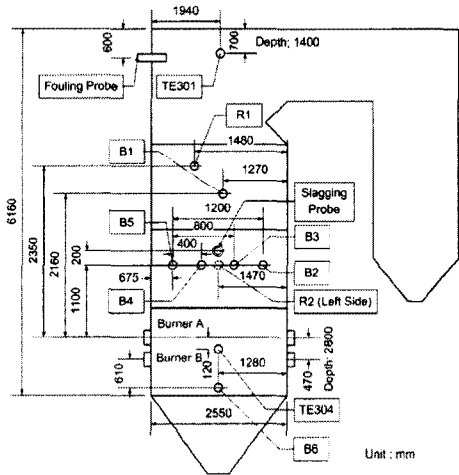


Fig. 2 Location of thermocouples on combustor

### 2.3 Slagging & Fouling 측정

노내 상부버너 0.2m 상부지점의 슬래그 및 노 최상단 0.6m 하부지점의 화올링 발생정도를 비교분석하기 위해 자체 제작한 슬래그 및 화올링 측정장치를 이용하여 실험하였다. 각 측정 장치의 구조는 동일하며, 일정량의 냉각수를 측정장치에 공급하면서 노 내부로 약 0.4m 삽입된 측정장치 표면에 부착되는 회분의 부착량 증가에 따른 열전달 감소량을 냉각수 입출구 온도차를 통해 간접적으로 모니터링 하여 슬래그 및 화올링 발생정도를 평가하는 원리이다.

$$S_f \text{ \& } F_f = \frac{A_o \cdot \Delta T_{fb}}{m \cdot C \cdot (T_o - T_i)} \Big|_{Ash} - \frac{A_o \cdot \Delta T_{fb}}{m \cdot C \cdot (T_o - T_i)} \Big|_{Ash/free}$$

위식에서 Slagging & Fouling Factor 값은 회

분 부착시의 Factor(Ash) 값에서 초기 LNG 전소시 회분이 부착되지 않은 상태의 Factor(Ash free)값을 뺀 값이다.

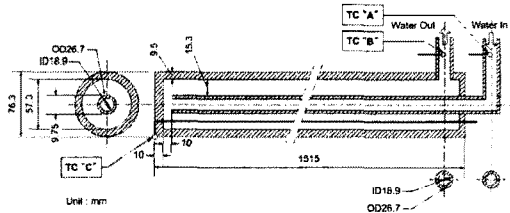


Fig. 3 Diagram of Slagging & Fouling Probe

### 2.4 실험 방법

연소실험을 위한 시험연소로는 천연가스 버너 2개를 사용하여 노내 온도를 900℃까지 예열 한 후 미분탄과 바이오매스를 혼합하여 주입하기 시작하며, 가스와 석탄을 약 30분 동안 함께 연소 시키면서 연소조건을 안정화한 후 천연가스 공급을 중단하고 미분탄 단독 연소과 바이오매스 혼소시험을 수행하면서 연소 안정화를 확인하면서 연소시험을 수행한다.

연소로 내부온도는 열전대 표면에 수냉식 보호관을 설치한 열전대를 버너영역 상부 약 70cm에 7개를 설치하여 1분 간격으로 온도를 자동으로 측정하여 기록하며, 배가스 중의 SOx, NOx, CO2, CO, O2 농도측정을 위해 각종 분석기가 현장에 설치되어 있으며, 측정값은 1분 간격으로 기록, 저장되어 시험탄의 환경오염 배출특성을 파악하기 위한 자료로 활용된다. 바이오매스 연소에 의한 회분이 보일러 내 수 냉벽에 부착하는 특성을 파악하기 위해 소형 Slag Panel과 Fouling probe를 별도로 제작하여 연소조건에 따른 회분의 부착 특성을 평가하며, Panel의 표면은 노 벽면과 일치되게 하고, 실 보일러 수냉벽을 모사하기 위해 약 400℃를 유지하였다. Slagging Factor의 측정 원리는 Slag Panel에 공급되는 냉각수의 입,출구 온도를 지속적으로 측정하여, 연소시험 진행에 따라 Slag Panel 표면에 부착된 회분의 단열작용으로 인해 발생한 열전달량 감소를 통해 회분의 부착정도를 계수화 하였다.

연소실험 시 시험연소로 내 과잉공기비 조정은 연소로 후단에 설치된 ID Fan과 2차 공기 유량 조절을 통해 연소가스 중 산소농도를 약 3%로 일정하게 유지시키는 방법으로 시행하였으며, 시험탄의 미분도는 200mesh(75μm) 통과분을 약 75%로 유지하였고 석탄 및 바이오매스 혼합물

등 시험연료 공급량은 본 시험에 사용된 기준탄인 중국산 신화탄 200kg/hr 연소시의 총 입열량(1,368,800kcal/hr)을 기준으로 동일한 총 열량을 공급하며 연소시험을 수행하였다. 세부적인 시험 조건은 Table 3과 같다.

**Table 3 Experimental conditions of coal-biomass co-firing**

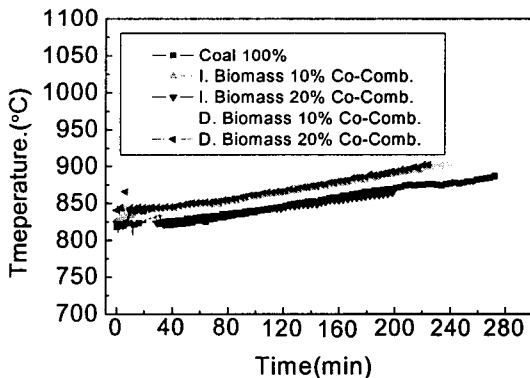
Combustion Condition	Type of biomass	Fuel feed (kg/hr)	Excess air (%)	Fine-ness (75 $\mu$ m under)	Measure items
Coal Firing	-	200	3.0	75%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Slagging</li> <li>• Fouling</li> <li>• Temperature</li> <li>• CO/CO<sub>2</sub></li> <li>• SOx/NOx</li> <li>• Unburned Carbon</li> </ul>
Biomass 10% co-firing	Imported timber	204			
Biomass 20% co-firing		208			
Biomass 10% co-firing	Domestic timber	204			
Biomass 20% co-firing		207			

※ Fuel feeding rate: coal firing calories base (200kg/hr × 6,844kcal/kg=1,368,800kcal/hr)

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 노내 온도분포 측정결과

시험탄에 바이오매스 혼소 시 노내 온도분포 변화를 비교하였다. 수입목재와 국내목재를 10%, 20% 혼소할 때의 보일러 상부지점(R1지점: Fig 2 참조)의 온도변화를 분석한 결과 석탄 전소 조건에 비해 바이오매스 혼소 시 보일러 내 온도가 낮아지는 현상을 볼 수 있었다(Fig 4).

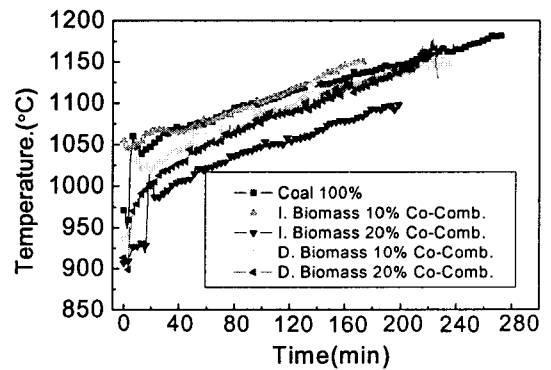


**Fig. 5 Temperature profiles of B1(Middle) position**

이것은 바이오매스의 공업분석 상 수분함량이 석탄에 비해 약 5~7배로 매우 높은 수준으로서 수분의 증발 잠열 손실로 인해 온도조건이 낮아지는 것으로 사료된다. 특히 수분함량이 국내 목재에 비해 더 높은 수입 목재 바이오매스 20%

혼소시에 가장 낮은 온도분포를 나타냈으며, 국내목 바이오매스의 경우는 혼소율 증가에 따른 온도변화가 적었다. 또한 바이오매스 혼소율이 10%에서 20% 증가에 따라 온도가 다소 낮아지는 경향을 보였으며, 혼소율 증가에 따른 온도 하락폭은 역시 수입목 혼합 연소시에 두드러지게 나타났다.

노내 중간지점(B1 지점: Fig 2 참조)의 온도변화 비교결과는 Fig 5와 같이 바이오매스 혼소시 대부분의 온도분포가 약 825~850°C 범위를 나타냈으며, 조건별 온도차이가 상대적으로 적은 결과를 나타냈다.



**Fig. 6 Temperature profiles of R2(Bottom) position**

노내 버너영역 부근 지점(R2 : 상부 버너 위 1.1m 지점)의 온도분포 비교결과는 그림 6에서 보는바와 같이 노내 상부지점(R1 지점) 온도분포 비교결과와 마찬가지로 석탄 전소시 가장 높은 온도를 나타냈으며, 수입목 20% 혼소 조건에서 가장 낮은 온도조건을 나타냈다. 또한 온도하락폭은 수입목 바이오매스 혼소시 혼소율 증가에 따른 온도하락폭이 국내목재에 비해 더욱 크게 나타났다. 이는 수입목재의 수분함량이 국내목재에 비해 높고 휘발분 함량이 떨어짐에 따라 연소 측면에서 국내목재에 비해 다소 불리한 것으로 사료되며, 또한 수입목재의 열량자체도 국내목에 비해 다소 떨어져 국내목재에 비해 연료로서 불리할 것으로 사료된다.

#### 3.2 Fouling 측정결과

Slagging 및 Fouling 측정은 Probe 내 냉각수 온도와 주변의 분위기 온도측정을 통해 계산되므로 측정값의 분포가 주변의 온도변화에 따라 민감하게 반응하여 상당히 넓은 범위에 존재하는 형태로 나타났다. 또한 Slagging 및 Fouling 생

성 자체가 상당히 장시간의 시험과정을 통해야만 발생 경향을 파악할 수 있는데 본 실험에서는 연료량의 한계 및 노내 회분의 퇴적량 증가 등에 따라 시험시간을 길게 하지 못하였다. 그러나 이러한 상황에서도 전체적인 경향성 측면에서 상호 비교가 가능하므로 실험 조건에 따라 이러한 값들을 상호 비교하여 바이오매스 혼소 따른 Slagging 및 Fouling 특성 변화를 비교하였다.

시험결과 Fig 7과 같이 국내 목재와 수입목재의 바이오매스 혼소에 따른 Fouling Factor의 차이는 발생하지 않았다. 이는 공업분석 결과에서 알 수 있듯이 바이오매스의 회분함량이 약 1% 전후로써 Slagging 및 Fouling을 생성시킬 수 있는 원인물질의 함량이 절대적으로 적은 결과에 기인하는 것으로 사료된다. Fouling Factor의 절대값은 약  $0.018m^2 \cdot K/W$  정도를 나타냈다.

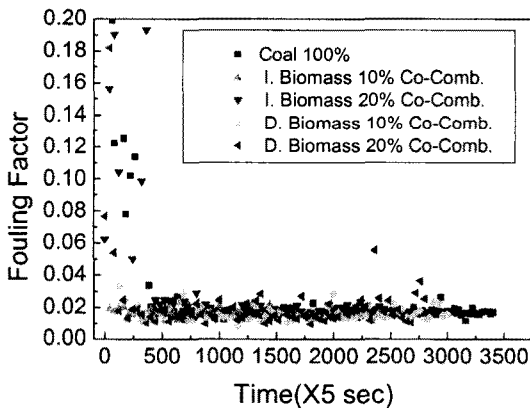


Fig. 7 Fouling histories of various co-firing condition

### 3.3 Slagging 측정결과

Slagging Factor의 경우 상대적으로 Fouling Factor에 비해 높은 값을 나타냈다. 이는 Slagging Probe가 Fouling Probe에 비해 버너 영역에 가깝고 회분의 부착확률이 높음에 따른 원인으로 사료된다. 또한 Slagging Factor의 분포가 Fouling Factor에 비해 분산되어 나타나는 것은 버너 영역 부근의 가스 상태가 노 상부에 비해 난류가 심해 slag의 부착 및 탈착이 심하고 온도변화가 상부에 비해 심한 것이 원인으로 사료된다. Slagging Factor는 Fig 8과 같이 약  $0.05 \sim 0.08m^2 \cdot K/W$  정도를 나타냈으며, Fouling Factor와 마찬가지로 바이오매스 혼소율 증가에 따라 Slagging 증가현상은 나타나지 않았다.

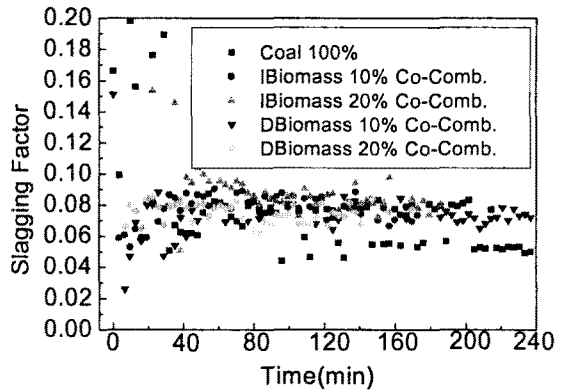


Fig. 8 Slagging histories of various co-firing condition

### 3.4 환경오염물질 배출 특성

바이오매스는 황분 및 질소분 함량이 석탄에 비해 매우 낮아 바이오매스 혼소량 증가에 따라 황산화물 및 질소산화물의 발생량이 크게 감소할 수 있을 것으로 예상되며, 특히 바이오매스 자체의 수분함량이 매우 높기 때문에 바이오매스 혼소율 증가에 따른 로 내 온도 저하로 thermal NOx 생성이 감소할 것으로 예측되었다.

Table 4 Emission characteristics of various co-firing conditions

Combustion Condition	Source	Sulfur Content (wt%)	Nitrogen Content (wt%)	SOx NOx CO			CO <sub>2</sub> (%)
				(ppm, O <sub>2</sub> 6%base)			
Coal firing	-	0.30	1.33	128	269	47	17.3
IB10 (10% co-firing)	Imported Timber	0.27	1.27	101	260	40	16.1
IB20 (20% co-firing)		0.24	1.20	54	214	42	16.6
DB10 (10% co-firing)	Domestic Timber	0.28	1.27	95	228	35	16.2
DB20 (20% co-firing)		0.24	1.20	51	219	34	15.4

실험결과는 Table 4와 같이 바이오매스 혼소량 증가에 따라 바이오매스 종류와 무관하게 황산화물 발생이 약 50% 정도 감소하는 결과를 보였으며, 질소산화물의 배출량은 석탄 전소에 비해 바이오매스 혼소율 20%에서 약 20% 감소하는 결과를 나타냄으로써 바이오매스 혼소 시 황

산화물 및 질소산화물 배출량 감소효과가 우수한 것으로 사료된다. 또한 CO<sub>2</sub>의 발생도 석탄 전소 시에는 17.3%를 나타냈으나 국내 수입목 바이오매스 10% 및 20% 혼소에 따라 15.4~16.6%를 나타내어 최소 0.7%에서 최대 1.9%의 배출감소 효과가 있었다. CO의 경우는 대체적으로 바이오매스 혼소를 증가에 따라 발생량이 다소 감소하는 경향을 나타냈으나, CO 특성상 상당히 변화의 폭이 크므로 감소량이 전체적인 연소상태의 변화를 설명할 수 있는 범위는 아닌 것으로 사료된다.

### 3.5 미연탄소 발생량 비교

석탄 단독연소 조건에 비해 바이오매스 혼소시 미연탄소 발생이 증가하는 특성을 나타냈다. 이는 바이오매스 혼소시 연료의 수분량 증가에 따라 보일러 내 온도가 저하되고 석탄 전소조건에 비해 상대적으로 낮은 온도조건에 따라 석탄의 연소에 부정적인 영향을 미치는 것에 기인한 것으로 사료된다. 국내산 및 수입산 바이오매스 종류에 따른 미연탄소 발생량 차이는 거의 없었다.

**Table 5 Unburned Carbon formation of various co-firing conditions**

Combustion Condition	Source	Unburned Carbon (wt%)
Coal firing	-	2.12
IB10 (10% co-firing)	Imported Timber	3.05
IB20 (20% co-firing)		4.00
DB10 (10% co-firing)	Domestic Timber	3.30
DB20 (20% co-firing)		3.90

## 4. 결론

이산화탄소 저감을 위한 신재생에너지 연료로 바이오매스는 각광받고 있고 유럽을 중심으로 많은 분야에서 활용되고 있으며, 본 시험 연소설비에서 국내목재와 수입목재를 대상으로 석탄에 10%와 20% 혼합연소 실험한 결과는 다음과 같다.

(1) 보일러 내부 온도 변화는 상부지점 및 버너 영역에서 모두 수입목재 20% 혼소 시 가장 낮은 온도를 나타냈으나, 보일러 중간지점에서는 약 825~850℃ 범위로 비교적 온도 차이의 변화가 적었다.

(2) 석탄 전소와 비교하여 바이오매스 혼합 연소 시에 NO<sub>x</sub> 저감율은 최소 3.3%에서 최대 20.4% 범위였다. 이는 비록 연료중의 질소분 함량은 유사하나 보일러 내 온도 저하에 따라 Thermal NO<sub>x</sub> 형성이 감소한 것에 기인한 것으로 사료된다

(3) SO<sub>x</sub> 생성은 바이오매스를 10%에서 20%로 혼합율을 증가함에 따라 최소 21%에서 최대 60%가 감소하였으며, 이는 바이오매스 원료 자체의 낮은 유황분에 기인 한다

(4) Slagging경향성은 국내목재와 수입목재의 경우 석탄 전소 시와 비교하여 큰 증가현상은 보이지 않았다. 이 원인은 바이오매스의 낮은 회분 함량에 기인한 것으로 사료 된다

(5) 미연탄소분 발생은 바이오매스의 수분함량이 높을수록 증가하는 경향을 나타내었고 이는 수분 증가가 보일러 내 온도 저하를 일으키기 때문이었다.

## 참고문헌

[1] Sami, M., Annamalai, K. and Wooldridge, M., 2001, Progress in Energy and Combustion Science, 27, 171-214  
 [2] Williams, A., Pourkashanian, M. and Jones, J.M. 2001, Progress in Energy and Combustion Science, 27, 587-610  
 [3] Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, Twente University Press, Handbook of Biomass Combustion and CO- Firing, 25-55  
 [4] Hughes, E., Biomass cofiring: economics, policy and opportunities" Biomass , 19, 457-465(2000).  
 [5] EIA, Annual Energy Outlook 1999: With projections to 2020 DOE/EIA-0383 (99); Office of Integrated Analysis and Forecasting: Washington, DC, Dec(1998).