



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

펠릿연소기 화염안정화와
배기가스 특성에 관한 연구



2014년 8월

부경대학교 대학원

기계공학과

WANG ZHENWEI

공학석사 학위논문

펠릿연소기 화염안정화와
배기가스 특성에 관한 연구



부경대학교 대학원

기계공학과

WANG ZHENWEI

WANG ZHENWEI 의 공학석사
학위논문을 인준함.

2014년 8월



주 심 공학박사 김 정 수 (인)

위 원 공학박사 강 인 구 (인)

위 원 공학박사 이 도 형 (인)

< 목 차 >

Abstract

Nomenclature

제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적	9
제 2 장 펠릿연소와 연소기 특성	10
2.1 펠릿연소 및 연소기 설계이론	10
2.2 펠릿연소기 종류와 특성	17
2.3 펠릿연소기 구성	20
제 3 장 실험장치 및 방법	27
3.1 펠릿연소기 설계	27
3.2 실험장치	29

3.3 실험방법	30
3.4 실험조건	32
제 4 장 실험결과 및 고찰	34
4.1 화염안정화 실험	34
4.2 점화시기 단축 가능성 검토	35
4.3 완전연소시간 및 소염시간 실험	38
4.4 선회공기 주입에 따른 선회효과 검토	39
4.5 연소온도 측정	40
4.6 배기가스 분석	45
4.7 공급공기량 배분에 대한 고찰	50
제 5 장 결론	53
참고문헌	55
감사의 글	57

The Study on the Flame Stability and Flue Gas Characteristics of Cyclone type Pellet Combustor

WANG ZHENWEI

Department of Mechanical Engineering, Graduate School

Pukyong National University

Abstract

The insufficient amount of the earth's fossil energy urges the development of Green Energy. Among them, the wood pellet, which are processed by useless woods, own very high economic efficiency and combustion efficiency during their combustion. According to existing burner, aiming to figure out the problems of the calorific value and low combustion efficiency, the difficulty of dealing with burning ash powder.

The institute has developed cyclonic wood pellet burner. In order to find out what's special about the cyclone particles and its fuel efficiency, this paper would utilize wood pellet as material, using 3D feeding system and gas analyzing system to do the

research. Through the investigation of the pellet burner combustion conditions, we sought out the best way of ignition and the best condition of it. Through the analysis of exhaust gas under different conditions after burning, we were able to conclude that the best conditions of combustion and burning effect. When first air supply is fixed at 2L/min, the fuel material into the combustor of 15g, second air supply at 210L/min air condition, the combustion effect is best; When first air supply at 2L/min is fixed, the fuel into the combustor of 30g, second air supply at 490L/min air condition, the combustion effect is best. And there is few toxic gas such as CO and HC among the exhaust gas.

After numerous experiments, we are able to prove that the cyclonic wood particles burner can make the combustion more efficiently and deal with the burning dust with higher efficiency, according to the first and second air change of gas supply.

Nomenclature

α : 과잉공기비

Q : 난방능력

η : 온수 보일러의 열효율

M_0 : 펠릿투입량

R : 연소실 반경방향거리(mm)

T : 온도($^{\circ}\text{C}$)

H_H : 고위발열량

H_L : 저위발열량

A_0 : 이론공기량

Q_E : 열손실량

η_b : 연소효율

제1장 서론

1.1 연구배경

세계적으로 화석연료의 고갈과 지구온난화 문제가 대두되면서, 그린에너지 분야에 대한 투자를 통한 경기부양과 일자리 창출을 위한 노력을 기울이고 있다. 우리나라는 에너지소비량이 세계 10위인 에너지다소비 국가이며, 2030년까지 그린에너지 기술수준을 세계 최고 수준으로 높이는 것을 목표로 하고 있다. 우리나라 신재생에너지 비율을 보면 폐기물이 67.5%, 바이오매스가 12.7%, 그 외 수력, 태양광, 풍력의 순으로 구성되어 있어, 폐기물 및 바이오에너지 분야가 80%를 넘어서고 있다.

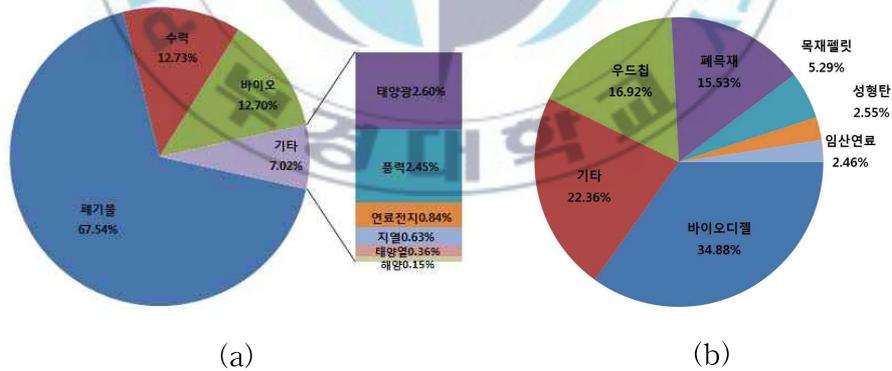


Fig. 1-1 2011년 신재생에너지와 바이오에너지 현황^[1]

이들 폐기물 및 바이오자원을 에너지화하기 위한 방법으로 가장 널리

쓰이는 것이 각 원료를 RDF, RPF, TDF, WCF 및 wood pellet 등으로 고품연료화 하여, 이들을 직접연소하여 에너지를 생산하는 방법이며, 우리나라에서도 환경부 및 산림청에서 고품연료에 대한 크기, 발열량, 수분 및 회분 함량 등을 고려한 품질/등급 기준을 마련하여 그 사용을 장려하고 있다.

본 연구에서 개발하고자 하는 펠릿연소기는 목재 부산물 등을 톱밥으로 파쇄한 후 압축하여, 목재 성분 중의 하나인 리그닌이 접착제 역할을 하여 성형된 지름 6~8mm, 길이 30~50mm의 펠릿형태로 제조한 목재연료를 말하며, 그 경제적 효과는 아래 표에서 알 수 있듯이 매우 크다고 할 수 있다.

Table 1-1 [목재펠릿의 경제성 비교]^[2]

구분	목재펠릿	경유	면세경유	등유	도시가스
가격	280 원/kg	1,649.4 원/l	895.4 원/l	1,179.7 원/l	833.2원/Nm ³
발열량	4.5Mcal/kg	9Mcal/l	9Mcal/l	9Mcal/l	1.05Mcal/Nm ³
동일 발열량(Mcal) 당 가격	62.2원	183.3원	95.5원	131.1원	79.4원
펠릿기준 상대가격	100	295	154	211	128
비고	수입산 대리점 가격	대리점 가격		대리점 가격	산업용(경기)

[2012년 11월 기준]

목재펠릿 연소과정은 건조, 탈휘발화(devolatilization), 가스화, char 연소 및 가스상 산화 등으로 이어지는 복잡한 과정을 거친다. 이 과정 중에 산소공급이 불충분한 경우에는 일산화탄소, 검댕(미분된 탄소), 타르 및 미연 탄화수소(UHC)가 생성되며, 따라서 불완전연소생성물의 배출을 낮추기 위해서는 가스 연소과정에서 최대한 연소가 이루어지도록 해야 한다. 한편, NO_x의 배출량은 연료의 질소함량이 높을수록, 고온연소 시 산소농도가 높을수록 증가한다.

현재의 연소장치에서는 펠릿을 위시한 고형연료를 효율적으로 연소시키기 위하여 아직 해결하여야 할 문제가 많다. 먼저, 연료 자체의 발열량이 상대적으로 낮고 부하변동에 따라 연료 투입량이 바뀌어야 하므로, 연소장치 화염의 안정화와 열부하 변동에 따른 연소조건 변경이 자유로운 연소기 설계가 필요하다. 또한 연료의 특성상 점화 및 소화 시에 시간이 걸리는 문제, 그리고 회분처리, 열응력에 의한 연소기 소재의 내구성 등 해결하여야 할 문제가 많다.

본 연구의 궁극적인 목적은 고형연료의 효율적인 연소를 위한 연소기를 개발하는 것이다. 그러나 고형연료는 폐기물자원(RDF, RPF, TDF) 및 바이오에너지(WCF, wood pellet) 등 연료의 종류가 다양하므로 이 중에서 우선 본 연구에서는 가장 환경 친화적인 바이오에너지 중에 널리 사용되고 있는 wood pellet 연소기를 개발하는 것을 목적으로 한다.

○ 대상기술의 국내외 현황

(1) 세계적 수준

미국은 현재 DOE 신재생에너지 정책 중 바이오에너지는 수송연료분야, 바이오발전 및 바이오 기반 생산물로 나누어져 있으며, 특히 바이오 발전

분야는 2020년까지 5%를 대체하기 위한 전략을 수립하고 있다. 바이오 발전에는 여러 가지 기술을 고려하고 있으며 그 내용은 바이오 연료에 대한 직접연소, 혼합연소와 함께 가스화, 열분해, 발효 등을 포함하고 있다. 바이오매스에 대한 직접연소를 통해 발생된 증기를 사용하여 랭킨사이클을 구동해 전력을 생산한다. 직접연소를 통한 전력생산은 상대적으로 낮은 효율 (~20%)을 가지고 있으나 열병합발전(Combine Heat and Power, CHP)을 통해 거의 90%에 가까운 효율을 얻을 수 있다.

일본은 발생량을 기준으로 소형 연소로와 가스엔진 등의 열기관의 조합, 발전 규모로는 수십~수천 kW 규모의 시설 등이 적합한 것으로 분석하고 있다. 연소 보일러와 증기터빈의 조합의 경우 5,000kW 이상이 경제성을 가질 것으로 보고 있다. 목질계 바이오매스의 열적 이용 방식에서 일본은 직접연소, 석탄과의 혼소, 가스화 메탄을 합성, DME 합성, 에탄올 발효 등 다양한 방식이 연구되고 있으나 목질칩을 직접 연소를 통해 보일러에 활용하는 연구는 상대적으로 많이 보고되지 않고 있다.

독일의 목질계 바이오매스의 1/3 이상이 에너지용으로 사용되며 이 중 절반은 가정에서, 나머지 절반은 열과 전기 생산 시설에서 사용된다. 바이오에너지는 수송 부문 36%, 열 부문 51%, 전기 생산 부문에 2.2%를 기여한다. 바이오매스를 이용한 발전의 원료는 주로 목질계 폐자재와 바이오가스로 생산되었다. 현재 120개의 폐목재를 이용한 열병합발전 플랜트가 가동 중이며 개별 플랜트는 전기 생산용량이 최대 20MW, 연료 사용량은 4백만톤, 전기 생산량은 약 5,000GWh이다.

한편, 중국은 농업 대국 때문에 바이오매스 자원은 아주 풍부하다. 매년 농작물 짚은 6억 톤을 생산하고 바이오에너지 연료로 사용량 약 4억 톤이다. 그리고 전국 임업은 190억을 생산하고 바이오에너지 연료로 사용량은 9억 톤이다.

2003년부터 바이오매스 발전소 87개를 만들고 <재생에너지법>을 반포한다. 전기생산량은 약 220만KWh이다. 중국에서 바이오매스 연소 발전 규모와 기술은 빠른 속도로 발전하고 있다.

(2) 국내 수준

목질계 바이오에너지의 국내 기술 개발 수준을 선진국과 비교하면 기술력이 선진국의 약 41%에 불과[아래 표 참조]한 것으로 조사되었다. 그러므로 목질계 바이오에너지의 국내 도입 활성화를 위해서는 유럽, 미국, 일본 등의 선진기술력 도입을 통한 실증과 생산 가능성을 타진하고 이를 바탕으로 적정 생산 조건을 확립하여 국내 실정에 적합한 최적의 방법을 발굴해야 한다.

목질계 바이오에너지 중 목질 연료의 직접 연소에 의한 열/전력 생산이 가장 빠른 시일 내에 상업화가 가능한 분야이다. 국내 몇몇 기업이 이에 대한 기술을 외국에서 도입하여 상업적으로 운영하고 있으나, 유럽 등의 선진국에서는 이미 보급되어 사용되고 있는 기술이나 국내에서는 체계적인 연구가 전무한 실정으로 이 분야 기술 종속이 우려되고 있다.

Table. 1-2 선진국과의 기술비교 ^[3]

분야	핵심 기술	비중 (%)	국내 수준 (%)	세부기술	비중 (%)	국내 수준 (%)
목질계 바이오매스	목질계 연료 생산 및 가공 기술	30	38.1	원료생산, 수집 설비 및 기술개발	30	38.9
				목질 칩 제조 및 관리기술	15	51.0
				가연성 폐목재의 연료화 기술	20	40.0
				목질계 연료의 규격화	10	33.9
				열분해에 의한 bio oil 제조 및 개질	15	28.6
				목질 가스화 기술 및 개질	10	31.3
	연소 시스템	50	40.3	목질 칩 고효율 연소기술	15	46.1
				목질 펠릿 이용 장치 개발기술	15	49.1
				목질 바이오매스 구역형 에너지 시스템 (CES) 기술	10	36.9
				목질 바이오매스용 열병합 발전기술	25	51.1
				bio oil 이용 설비 및 시스템	20	27.2
				목질 가스화 열병합 발전 시스템	15	27.7

Table. 1-2 선진국과의 기술비교 ^[3]

분야	핵심 기술	비중 (%)	국내 수준 (%)	세부기술	비중 (%)	국내 수준 (%)
목질계 바이오매스	배출가스 제어 기술	20	47.5	연소 배출가스 모니터링 기술	30	46.4
				연소 배출가스 집진 기술	30	49.2
				연소 제어기술	40	47
	전체기술수준	41.1%				

위 표의 3 가지 핵심기술 중에서, ‘연소시스템’의 기술의 비중이 가장 높고(50%), ‘배출가스 제어기술’은 20%인데, 이들 모두 연소에 의해 발생하는 분야이므로 전체의 70%가 연소 관련 기술이라 할 수 있다.

본 개발과 관련된 부분은 ‘목질 칩 고효율 연소기술’, ‘목질펠릿 이용 장치개발 기술’ 등인데, 모두 세계 기술수준의 절반 이하의 기술수준을 나타내고 있다.

한편, 본 개발의 다음 단계로 상정하고 있는 ‘목질바이오매스용 열병합발전 기술’도 비중이 높음에 비하여 기술수준은 유럽 등 선진국의 절반정도에 그치고 있다.

○ 필요성

목질계 바이오매스 분야에서 연소관련 기술은 상당히 높은(70%) 비중을 차지하지만 기술수준은 선진국의 절반에도 미치지 못하므로, 이에 대한 국

내 기술 확보가 시급한 실정이다.

국내 목질계 바이오매스 관련기술 개발은 현재 산림청에서 주관하여 개발이 제한적이라 하겠으나, 산업용 펠릿보일러를 위시한 ‘목질펠릿 이용장치 기술개발’이 더욱 활발해 질 것으로 기대된다.

한편, ‘목질바이오매스용 열병합발전’을 위해서는 고효율, 대용량의 펠릿 연소기 개발 및 설계기술이 필수적이므로, 이에 대한 요구가 급증할 것으로 전망된다.



1.2 연구의 목적

본 연구는 사이클론식 펠릿연소기 개발을 위해, 고형연료 중에서 목질계 바이오매스인 펠릿의 효율적인 연소를 위한 연소기를 개발하는 것이 목적이다. 아래 내용은 기존 연소기 문제점과 본 연구의 개발목표를 정리하였다.

기존 연소기의 문제점

1. 연료의 발열량이 낮고 수분, 회분 등이 많아 완전연소가 어려움
2. 연료 투입량 변동에 따른 화염의 안정화
3. 연료의 특성상 점화 및 소화 시에 시간이 걸리는 문제
4. 열부하 변동에 따른 연소조건 변경이 어려움
5. 회분처리의 어려움
6. 열응력에 의한 연소기 소재의 내구성 문제 등

연구 목적

1. 고형연료의 효율적인 연소를 위한 연소기를 개발하기 위함
2. 화염안정화, 점화시간, 회분처리, 불완전연소 및 역화 등을 개선
3. 공기 내부주입 및 선회류를 이용한 사이클론식 펠릿연소기 개발이 목표
4. 추후 다양한 고형연료 즉, 폐기물자원(RDF, RPF, TDF) 및 바이오에너지(WCF, wood pellet) 등에 적용하고자 함

제2장 펠릿연소와 연소기 특성

2.1 펠릿연소 및 연소기 설계이론

○ 펠릿연소

목재펠릿의 연소는 건조, 탈휘발화(devolatilization), 가스화, char 연소 및 가스상 산화 등으로 이어지는 과정으로, 산고공급이 불충분할 경우 일산화탄소, 검댕, 타르 및 미연소탄화수소(UHC)가 생성된다. 열효율을 높이고, 불완전 연소과정의 산물로 발생하는 각종 오염물질 배출 수준을 낮추기 위해서는 가스연소과정에서 최대한 연소가 이루어져야만 한다. 한편, NO_x 배출량은 연료의 질소함량이 높을수록, 그리고 연소 시 산소 농도가 높을수록 증가하게 된다. 펠릿보일러는 펠릿을 저장 및 공급하는 연료공급장치, 공급된 연료를 연소시키는 연소장치, 연소 가스로부터 열을 회수하여 온수나 스팀 또는 온풍을 발생시키는 열교환장치 및 연소에 의해 발생한 재를 처리하는 재처리장치 등으로 구성된다.

○ 연소기 설계이론

a. 연료펠릿의 구성원소

연료인 펠릿의 구성원소는 산지 및 제조방법 등에 따라 약간의 차이를 보인다. 본 연구에서는 다음 표와 같다[6,7]고 가정하여 진행한다.

Table. 2-1 [연료펠릿의 구성요소]

원소	탄소 (C)	수소 (H)	질소 (N)	산소 (O)	유황 (S)	회분 (Ash)	수분 (water)
함량(%)	48.95	6.53	0.07	33.02	0.0	1.00	10.32

b. 발열량 계산

고위발열량은 구성원소가 산소와 반응하여 완전연소 되었다고 가정하고 구할 수 있으며, 저위발열량은 고위발열량에서 수증기로 배출된 열량을 빼 실제 이용 가능한 열량이다. 위 도표를 참고로 하여 다음의 식으로 구한다. 여기서, C, H, O, S, W는 각각 탄소, 수소, 산소, 황 및 수분의 중량분율을 의미한다.

$$H_H = 8,100C + 34,000(H-O/8) + 2,500S \quad (1)$$

$$H_L = H_H - 600(9H+W) \quad (2)$$

위 식으로 계산하면, 고위발열량은 4,782kcal/kg, 저위발열량은 4,367kcal/kg 이 된다.

c. 이론공기량(A₀) 계산

이론공기량은 펠릿의 구성원소를 산소와 완전연소 시킨다고 가정했을 경우에 필요한 이론적인 공기량으로, 다음과 같이 계산된다.

$$A_0 = 8.89C + 26.7(H-O/8) + 33.3S \quad (3)$$

위 식으로 계산하면 이론공기량은 $4.81 \text{ m}^3/\text{kg}$ 이다.

d. 배기가스발생량 계산

과잉공기비를 α 로 했을 때 실제 공기량 A 는 $A=\alpha A_0 \text{ m}^3/\text{kg}$ 이며, 이때의 배기가스 발생량은 다음과 같이 구해진다.

$$\text{CO}_2 = 1.867C$$

$$\text{O}_2 = 0.21(\alpha-1)A_0$$

$$\text{N}_2 = 0.8N + 0.79\alpha A_0 \quad (4)$$

$$\text{H}_2\text{O} = 11.2H + 1.24W$$

$$\text{SO}_2 = 0.7S$$

e. 배기가스에 의한 열손실 계산

1) 배기가스에 의한 정압비열 C_p 계산

위의 배기가스 발생성분의 각 분율과 이들의 주어진 온도에서의 정압비열의 곱의 합으로 계산한다. 예를 들어, 과잉공기비 $\alpha=1.8$, 배기가스 온도 150°C 인 경우의 정압비열 $C_p=0.332$ 이다.

2) 열손실량 계산

위 경우의 펠릿 1kg 당 배기가스량은 $G=9.71\text{Nm}^3/\text{kg}$ 이며, 배기가스 온도 150°C 인 경우 열손실량(Q_E)은 다음과 같다.

$$Q_E = GC_pT = 484\text{kcal/kg} \quad (5)$$

f. 불완전연소에 의한 열손실 계산

1) 재의 불완전연소에 의한 열손실: 펠릿 1kg 당 발생하는 재의 양이

$m_r=0.021\text{kg}$ 이고, 재의 발열량이 $H_{LA} = 2,220$ 인 경우, 재의 미연소손실 열량은 다음과 같다.

$$Q_R = m_r H_{LA} = 46.6 \text{ kcal/kg} \quad (6)$$

2) 일산화탄소 생성에 의한 열손실 : 배기가스 중 일산화탄소에 의한 탄소의 불완전연소에 의한 열손실 Q_{CO} 는 다음과 같다.

$$Q_{CO} = 2,561CO/CO_2+CO (C-m_r C_A) \quad (7)$$

여기서, C_A 는 재 속의 탄소분율이다. 배기가스 중 CO의 농도가 150ppm이고 C_A 가 23%인 경우, $Q_{CO} = 1.98\text{kcal/kg}$ 이 된다.

g. 연소효율 계산

연소효율(η_b)는 펠릿의 이론적인 발열량 중에서 재의 미연소손실과 탄소의 불완전연소(일산화탄소)에 의한 손실을 제외한 열량이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_b = 1 - (m_r H_{LA} + Q_{CO})/H_L \quad (8)$$

재 발생량이 펠릿 1kg당 $m_r=0.021\text{kg}$ 이고, 과잉공기비 $\alpha=1.8$, 배기가스 중 CO의 농도 150ppm인 경우의 연소효율은 98.9%이다.

h. 최고열효율 계산

최고열효율(η_{max})은 가용열량 중 미연소펠릿에 의한 손실(재의 미연소손실), 탄소의 불완전연소(일산화탄소)에 의한 손실, 그리고 배기가스에 의한

열손실을 제외한 열량이며, 아래와 같다.

$$\eta_{\max} = 1 - (Q_E + Q_R + Q_{CO})/H_L \quad (9)$$

i. 난방능력 계산

온수보일러의 경우 난방능력 Q는 가용열량 중 회수된 열량 즉, 온수의 온도를 높이는데 사용된 열량이며, 아래 식으로 구할 수 있다.

$$Q = G C_p \sum_{i=1}^n (T_{2,i} - T_{1,i}) \quad (10)$$

여기서, Q는 난방능력(kcal/hr), Gw는 급수량(kg/hr), T_{1,i}는 입구에서 물의 온도, T_{2,i}는 출구에서의 물의 온도, n은 측정회수이다. 급수량 Gw=4.85m³/hr, T_{1,i}=22.8℃, T_{2,i}=73.7℃인 경우의 난방능력 Q=1,040MJ/hr이 된다.

j. 온수보일러의 열효율

온수보일러의 열효율 η는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\eta = Q/FH_L \times 100 (\%) \quad (11)$$

여기서 F는 연료소비량(kg/hr)이다. 저위발열량 H_L=18.34MJ/kg인 펠릿의 소비량이 F=63.6kg/hr인 경우의 보일러효율은 89.2%이다.

○ 펠릿연소기 설계

위의 계산을 바탕으로 20,000kcal/hr급 보일러용 연소기를 설계하는 것을 목표로 공급될 제량은 다음과 같다.

(1) 펠릿 투입량(m_0) 계산

연료인 펠릿의 저위발열량(H_L)은 4,367kcal/kg이며, 설계 목표치인 $Q = 20,000\text{kcal/hr}$ 를 얻기 위한 이론적인 펠릿 공급량 m_0 은

$$m_0 = Q/H_L = 20,000/4,367 = 4.58 \text{ kg/hr} = 0.076 \text{ kg/min} \quad (12)$$

이 계산결과로써 펠릿투입구에서 연소기에 단위시간당 공급할 펠릿 공급량을 결정한다.

(2) 이론공기공급량

위 식(3)에 의한 이론공기량 계산값은 4.84 m^3/kg 이다. 본 실험에서 단위시간당 주어진 펠릿의 공급량은 0.076 kg/min 이므로, 단위시간당 공급하여야 할 이론공기량은 다음과 같이 계산된다.

$$4.81[\text{m}^3/\text{kg}] \times 0.076[\text{kg/min}] = 365.6 [\text{l/min}] \quad (13)$$

(3) 공기비 결정 및 실제 공기공급량

일반적으로 펠릿의 연소에 공급하는 공기비 α 는 1.8 정도를 기준으로 하고 있다. 따라서 본 실험에서는 이 값을 기준으로 공급공기량을 1차 및 2차로 구분하여 그 값을 변화시켜 가며 실험하기로 한다. 참고로, 공기비 $\alpha = 1.8$ 인 경우의 공급공기량은 다음과 같이 계산된다.

$$[\text{실제공급공기량}] = 365.56 \times 1.8 = 658 \text{ [l/min]} \quad (14)$$



2.2 펠릿연소기 종류와 특성

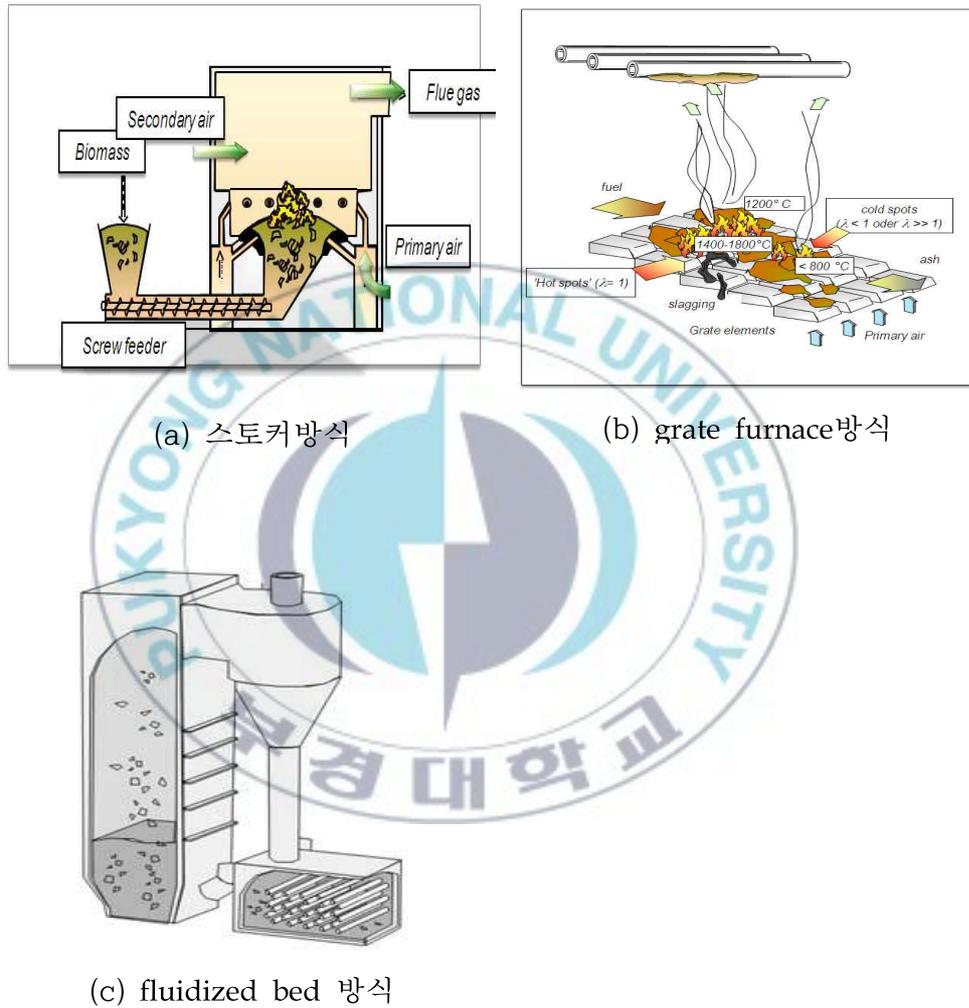
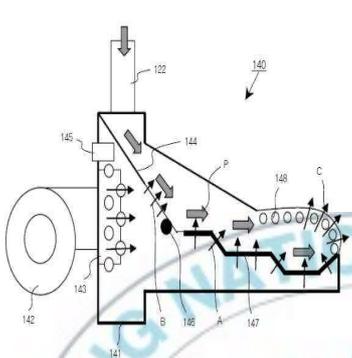
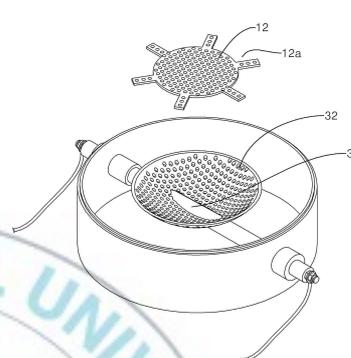


Fig. 2-1 기존의 연소기 종류

위 방식들의 문제점을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 점화/소화 및 열부하 변동에 대하여 속응성이 느림
- 2) 회분 및 분진 제거가 어려워 보일러 내에 slag가 많이 생김
- 3) 대용량에서 안정적인 연소를 위한 공기비 조절이 어려움



발명 명칭	펠릿 보일러 및 그 버너 구조 (Pellet Boiler and Burner Structure thereof)	발명 명칭	목재 펠릿 연소기 (Wood Pellet combustor)
출원 번호	1020110051243	출원 번호	1020100039512
도면		도면	

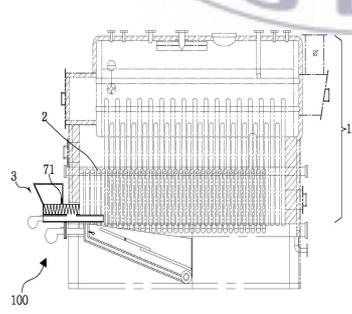
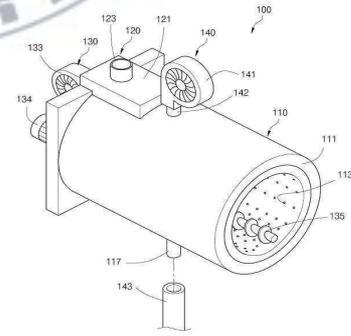
발명 명칭	펠릿보일러의 연소제어장치 (wood pellet combustion control device)	발명 명칭	고체 연료 보일러용 연소 장치 (combustion apparatus for solid fuel boiler)
출원 번호	1020120064835	출원 번호	1020110057304
도면		도면	

Fig. 2-2 국내 특허 현황

2.3 펠릿연소기 구성

일반적인 목재펠릿연소기는 정화시스템, 송풍시스템, 제어시스템, 연소실과 회분처리시스템으로 구성한다. 그리고 연료silow와 연료이송시스템을 같이 조립해서 운전할 수 있다.

1) 연료 이송시스템

연료 이송시스템은 연소기와 연료silow를 연결한다. 일반적인 구성이 정밀하고 운전을 안정한 나선형 이송시스템을 이용한다.

2) 점화시스템

점화시스템은 점화기를 기준으로 구성한다. 점화시스템은 연소기 시동운전을 제어하기 때문에 아주 중요하다. 점화할 때 펠릿연료는 불완전연소상태 때문에 CO, SO등 유독기체를 많이 배출한다. 그래서 점화시간은 펠릿연소기 성능 평가 중 중요한 지표이다.

3) 송풍시스템

송풍시스템은 환풍기와 관련한 제어장치로 구성한다. 송풍기는 실제공급공기량을 따라서 조절해서 최고 연소효율을 받는다.

4) 연소실

연소실은 연소기 핵심 작업부분이다. 연소실 종류에 따라서 모양도 다르다. 일반적인 원통형을 이용한다.

5) 회분처리시스템

짚 등 펠릿연소 연소할 때 회분과 슬래그를 많이 생성되다. 이런 생성물은 연소기 열전달 성능에 영향을 끼치고 연소기 안전운전에도 장애가 있다. 그래서 연소기 작업할 때 회분처리시스템을 이용하여 회분처리를 해야 한다.

6) 제어시스템

일반적인 제어시스템은 PLC 등 제어장치(하드웨어), 화염 센서(하드웨어)와 제어 프로그램(소프트웨어)으로 구성된다. 제어프로그램을 이용하여 각 작업 시스템을 제어한다. 그리고 연소할 때 센서에서 나오는 실시간 신호를 관찰해서 연소기 운전상황을 알 수 있다. 제어시스템의 정밀도는 연소기 작업효율을 결정하게 된다.

2.3.1 점화시스템

1) 연구 상황

유럽과 미국 등 기술 선진국은 펠릿연소기 점화기술을 많이 연구하고 지금까지 상관 기술도 우수하다. Grotkjaer등(20) 목재 펠릿 점화특성을 연구하기 위해서 새 실험 장치를 설계한다. 결과적으로 점화시간은 점화온도에 큰 영향을 받는다. 그리고 저온 조건에서 점화과정은 연소 동력학 법칙과 같지 않다. Bilbao 등은 공기유동속도에 따라 점화시간 다양한 상황을 연구하였다. 평균 열통과량은 $35\text{kw}/\text{m}^2$ 와 공기 유속는 $2\text{m}/\text{s}$ 시 점화효과가 제일 좋다.

최근에 중국에서도 펠릿연소기 점화에 대한 연구를 많이 한다. FANMINGFENG 등은 실험에 통과해서 목재 펠릿 밀도, 휘발성분과 고정

탄함량에 따라 점화시간이 다르다는 것을 밝혔다. 그리고 LIXIJJIN 등은 펠릿연료 점화 보조 설비를 개발해서 연료에 빠른 속도로 점화하기를 실현하였다.

2) 기술현상

펠릿연소기 점화방식은 점화부품과 펠릿연료의 상대위치에 따라 접촉식 점화방식과 비접촉식 점화방식으로 구분한다. 접촉식 점화방식은 점화부품과 연료를 직접 접촉하고 열에너지는 연료에서 직접 전달한다. 그래서 이런 점화방식은 점화 효율이 높고 열에너지 손실은 제일 적다. 자주 보는 접촉식 점화방식은 Rod 저항기 점화이다. 비접촉식 점화방식은 점화부품과 펠릿연료는 공간에서 접촉하지 않는다. 점화부속품에서 생성된 열에너지는 대류방식을 이용하여 연료에 전달한다. 이런 점화방식은 조절 능력을 좋고 간단하다. 자주 보는 비접촉식 점화방식은 저항선 점화방식과 전자점화방식 등이 있다. 세 가지의 점화부속품은 Fig. 2-3에 나타내었다.



(a) Rod 저항기 점화방식



(b) 저항선



(c) 전자 점화기

Fig. 2-3 점화기 종류

1) Rod 저항기 점화방식

Rod 저항기 점화방식의 기술 원리는 Rod 저항기는 전류를 통화한 후 고온을 생성해서 펠릿연료는 직접 열에너지를 받고 점화를 발생한다. 연소기 중 Rod 저항기 일반적인 길이는 커서 일부분은 연소실에 있어서 연료를 직접 접촉한다. 따라서 이런 점화방식은 접촉식 점화방식이다. 이런 점화기술 사용할 때 조절을 쉬고 점화속도를 빠르다. 단점은 전기사용량이 크고 점화과정에서 일정량 smoke오염물을 생성한다.

2) 저항선 점화방식

저항선 점화방식과 Rod 저항기 점화방식도 전기에너지는 열에너지로 전화해서 점화할 수 있다. 이 두 개 점화방식의 차이는 저항선 점화방식은 저항선은 연소실과 송풍기 중간에 설치해서 송풍기에서 생성한 바람을 이용하여 저항선 생성한 열에너지를 연소실 으로 이송한다. 그래서 저항선 점화방식은 비접촉식 점화방식이다. 그리고 이런 점화방식도 열풍 점화방식이라고 한다. 저항선 점화방식 장점은 제어를 하지 않고 모든 펠릿연료 다 점화 할 수 있다. 단점은 점화할 때 에너지 소비가 심하다.

3) 전자점화방식

전자점화방식은 전극 방전할 때 생성되는 전기 불꽃을 이용하여 펠릿 연료를 점화한다. 이런 점화방식은 비접촉식 점화방식이다. 전극 방전할 때 생성되는 열에너지를 부족하기 때문에 점화할 때 인화성연료를 필요하다. 자주 보는 인화성연료는 알코올과 연료유이다. 전자점화방식 장점은 점화속도가 빠르고 점화 효율이 높다. 그리고 smoke배출량을 적다. 단점은 조절할 때 좀 불편하고 다른 연료를 필요로 한다.

2.3.2 제어시스템

1) 연구배경

품질이 높은 연소기는 좋은 제어시스템을 필요로 한다. 각종 신호를 급속 고효율 처리를 할 수 있다. 그리고 상대적인 안전 제어시스템도 포함한다. 그래서 고급 펠릿연소기는 연료가 충분할 때 계속 자동화 운전할 수 있다.

2) 기술현상

지금 전 세계 기술 선진국은 제어시스템 영역에 풍부한 기준과 경험이 있어서 관련한 기술 수준이 높다. 펠릿연소기 제어 자동화는 핵심 제어시스템을 이용하여 점화시스템, 연료이송시스템과 송풍기 등 각 부분을 운전과 열출력을 조절한다. 일반적인 펠릿연소기는 설정한 열출력에 따라 정밀한 연료 공급 속도를 조절하고 설정한 송풍량에 따라 연소과정을 조절한다. 일반적인 펠릿연소기운전도는 Fig. 2-4에 나타낸다.

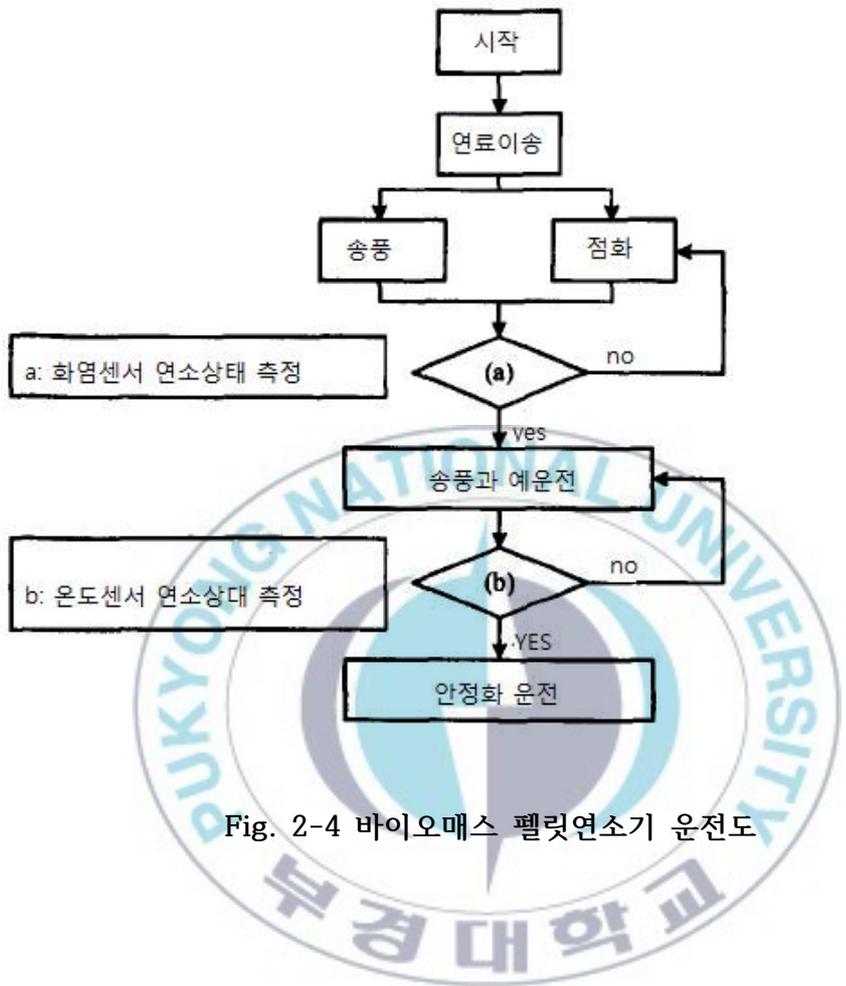


Fig. 2-4 바이오매스 펠릿연소기 운전도

제3장 실험장치 및 방법

3.1 펠릿연소기 설계

(1) 펠릿연소기 개념

대부분의 시판중인 연소기는 4각 구조로 된 화격자 형태로 구성되어 있어, 구조상 완전연소가 상당히 어렵게 되어 있다. 본 연구에 있어서는 구조상 완전연소를 유도하면서 중앙에서 1차 공기를 공급하여 점화 및 연소용 공기로 사용하며, 주 연소는 연소기 하부의 선회기를 통하여 공급되는 2차 공기에 의해 연소되도록 구성되어 있다.

또한 검댕과 회분의 발생 억제와 이들의 원활한 제거를 위하여 내부 사이클론 방식으로 운전되도록 개발하고자 한다.

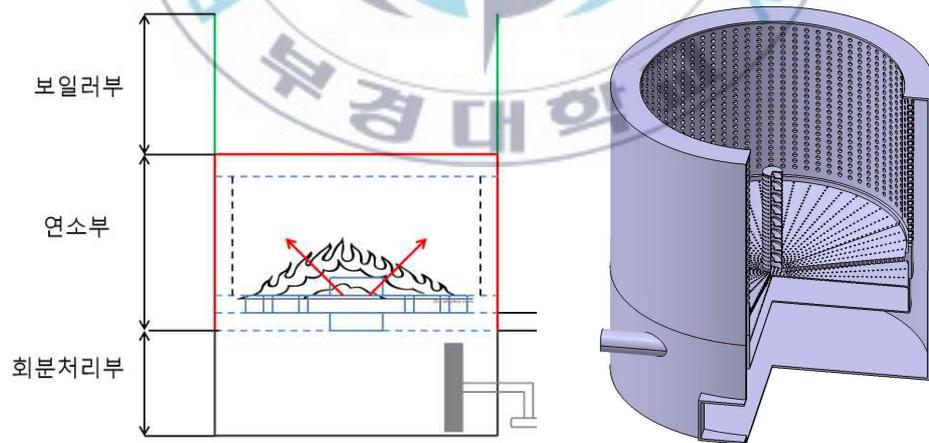


Fig. 3-1 펠릿연소기 개념도

3.2 실험장치

본 실험에서 개발한 사이클론식 펠릿연소기의 연소시스템은 화격자 연소 시스템이다. Fig. 3-1은 본 실험에서 개발한 펠릿연소기 구성도이며, 부품별 내용은 다음과 같다.

screw conveyor를 이용하여 Pellet Silo에서 연소실로 펠릿을 이송한다.

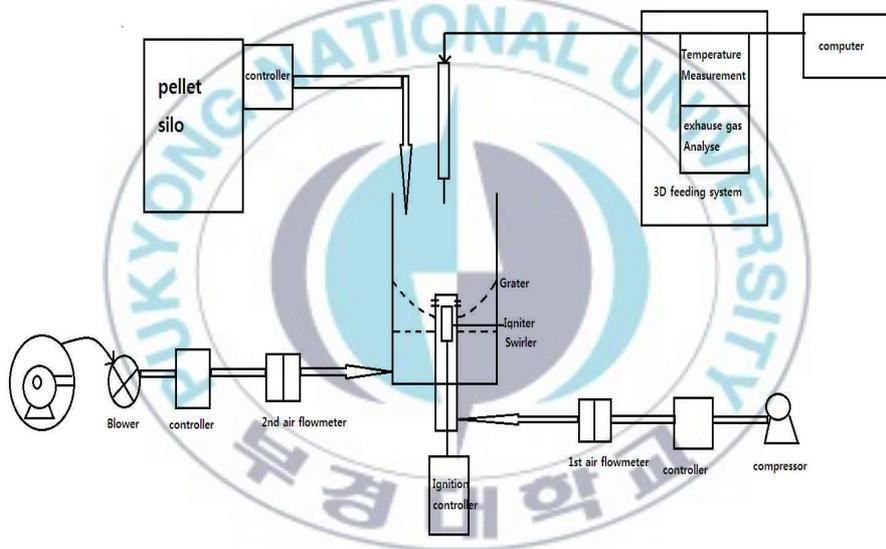


Fig. 3-2 실험장치 구성도

1차 공기와 2차공기를 설정하고 연료이송을 시작한 후 점화시스템을 이용하여 펠릿연소를 시작한다. 연소할 때 온도측정기를 이용하여 각 시간 온도를 측정하고 기록한다. 그리고 3D feeling system를 이용하여 각 위치 배출가스를 채집하고 가스분석기를 이용하여 채집한 가스를 분석하고 기록한다.

실험장치는 연소실과 1차 공기 주입부와 2차 공기 주입부, 펠릿 공급부 그리고 각종 제어장치로 구성되어 있다. 이와는 별도로 온도 및 배기가스 농도측정을 위한 측정장치를 구성해 두었다.



Fig 3-3 실험장치 사진

3.3 실험방법

3.3.1 온도측정

본 연구에서는 연소실 내부의 연소상황을 상세히 조사하기 위해서 연소기 내부 각 위치에서의 연소온도를 측정하여야 하고, 또한 배출되는 배기가스에서도 온도를 측정하여 배출 규제를 만족하는지, 또는 열회수가 가능한지 등을 판단할 필요가 있다.

연소 연구를 위한 온도측정장치는 최근에 레이저나 복사열전달을 이용한 광학적 측정법 등 다양한 장치가 개발되어 있으나, 본 연구에서는 열전대에 의한 방법을 채택한다. 열전대에 의한 온도측정법은 난류화염에서 측정점의 유속과 온도가 시간에 따라 급격히 변화하기 때문에 이에 대응하는 적절한 평균시정수만 결정된다면 온도측정의 오차를 줄일 수 있고, 광학적 측정보다 오히려 시간 및 공간분해능이 좋기 때문에 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 경제적이고 조작성이 간단한 아날로그식 열관성 보상회로를 채택한 직경 0.5mm, Pt/Pt-Rh 13% 합금의 열전대를 표면반응과 내열성을 위한 3중 수냉식관에 넣어 사용하였다. 측정을 위해서는 데이터 레코더에 기록하고, 공간분해능을 높이기 위해서 3차원 이송장치를 이용하였다.

3.3.2 각종 화학종 농도 및 NO_x 농도 측정

연소실 내부의 연소상황을 상세히 알기 위한 또 하나의 물성치는 각종

화학종 농도를 측정하는 것이다. 또한 배출되는 배기가스의 농도를 측정함으로써 연소기의 종합적인 연소효율과 배기오염물질의 농도를 측정하여야 한다.

연소 도중의 연소가스 속에는 연소반응에 관여하는 무수한 중간생성물이 존재하지만 이들을 측정하기는 만만치 않다. 일반적으로 중간생성물은 제외하고라도 펠릿의 연소 시에는 CO_2 , CO , O_2 , N_2 , UHC, soot, NO_x , SO_x , 그 외 회분 등이 포함되어 있으며 이들을 모두 측정하는 일에도 다양한 측정장치가 구비되어야 하며, 때로는 정확도에 대하여 의구심을 가져야 할 물질도 포함되어 있다.

본 연구에서 각종 가스의 농도를 측정하는 목적은, 연소기 내부에서 불완전연소가 발생하는 정도와 산소 과잉의 정도 등을 파악하고, 최종 연소기에서 배출되는 배기가스에서는 펠릿연소에서 발생하는 오염물질의 연소 상황에 따른 상대적인 영향을 고찰하는 것이므로 Gas Chromatography 대신 배기가스분석장치(HORIBA, MEXA-554JK NR)를 이용하여, CO_2 , CO , UHC 및 NO_x 만을 측정하기로 한다. 배기가스 성분중의 각각의 화학종에 따른 농도값을 A/D converter(YOKOGAWA MV-100)의 4개(ch1,ch2,ch3,ch4) 채널을 통해 20초동안 샘플링하여 평균값을 기록하였다. 샘플가스 채취용 프로브의 흡입부 내경은 1mm이며, 흡입도중 흡입가스의 재반응을 막기 위하여 3중수냉식 프로브를 사용하였다. 샘플가스 채취용 프로브를 연소실의 3차원 공간분해가 이송대에 연소기의 축방향으로 설치하여 MF 상단 100mm에서부터 시작하여 Z(축방향)방향으로 100mm 등간격으로 측정을 실시하였다.

3.4 실험조건

연료 투입량 2차 공기주입량과 측정위치에 따른 화염안정화 영역을 선정하였다. 그리고 각각의 연료 투입량 15g와 30g를 선정된 대표조건 측정높이 100mm와 200mm에서 측정하였고, 1차 공기 주입량은 2L/min로 고정하고 2차 공기 주입량 140 L/min, 210 L/min, 280 L/min, 490 L/min, 560 L/min에서의 온도와 CO, HC, CO₂ 및 NO_x의 농도를 측정하였다. 그리고 1차공기주입량은 50 L/min로 고정하고, 2차공기주입량은 50 L/min, 100 L/min, 150 L/min, 200 L/min에서의 CO, HC의 농도를 측정하였다. Table 3-1와 Table 3-2에는 이들 실험 조건을 정리하여 나타내었다.



Table 3-1 Experimental conditions

시료 투입량	2st Air
15g	140 ℓ /min
	210 ℓ /min
	280 ℓ /min
	490 ℓ /min
30g	140 ℓ /min
	210 ℓ /min
	280 ℓ /min
	490 ℓ /min
	560 ℓ /min
30g	280 ℓ /min
	490 ℓ /min
	560 ℓ /min

Table 3-2 Experimental conditions

시료 투입량	2st Air
30g	50 ℓ /min
	100 ℓ /min
	150 ℓ /min
	200 ℓ /min

제4장 실험결과 및 고찰

4.1 화염안정화 실험

본 실험장치는 점화 및 초기 연소용 1차공기와 주 연소용 2차 공기를 별도로 주입하도록 구성하였다. 1차 공기는 연소실 내에 방사형으로 공급하고, 2차 공기는 연소기 하부에서 선회를 주어 공급한다. 1차 공기와 2차 공기의 유량을 각각 별도로 공급하여 이들의 합이 임의의 공기비 α 가 되도록 한다. 따라서, 1차 공기의 공급량과 2차 공기의 공급량을 정확히 알기 위하여 1차 공기에는 공기유량계를 설치하였고, 2차 공기는 송풍기에 인버터를 부착하여 전압변화에 대해 송풍량을 결정하기로 한다. 아래에는 전압변화에 대한 송풍량을 검증한 결과를 나타내었다.

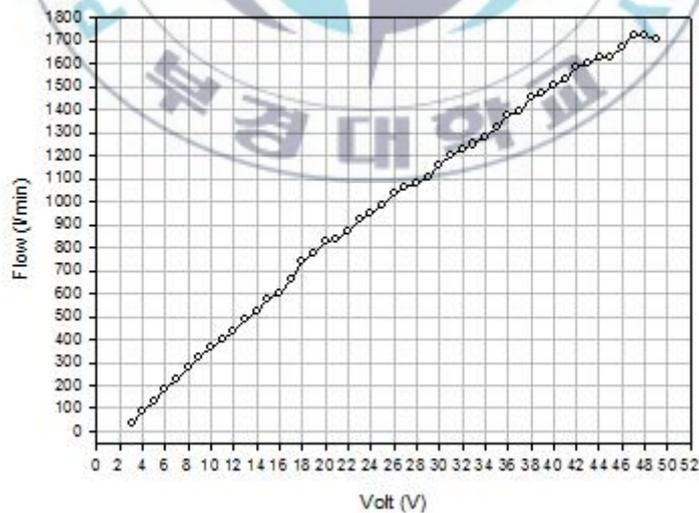
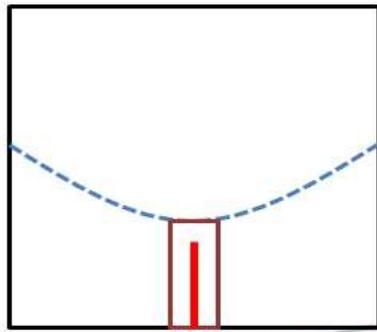


Fig. 4-1 전압변화에 대한 송풍량을 검증한 결과

4.2 점화시기 단축 가능성 검토

펠릿의 점화에는 탄화규소, 파일럿점화, PTC 등 다양한 종류의 점화장치를 설치하는 것이 가능한데, 일반적으로 산업용 및 농업용으로 널리 사용되고 있는 펠릿보일러의 점화에는 탄화규소를 이용하는 방식이다. 그러나 동일한 탄화규소를 이용하더라도, 공급되는 공기의 유속에 따라 대류열 전달계수가 달라서 점화시간이 단축 또는 지연되기도 하고, 2차 공기의 유무에 따라서도 달라지며, 또한 초기 투입되는 펠릿의 양에 따라서도 달라진다.

본 실험에서는 초기 연료의 투입량, 1차공기의 유량, 그리고 2차공기의 유무에 따른 점화시기를 조사하였다. 참고로, 원편의 그림은 초기 펠릿 투입량 15g, 30g, 60g으로 1차 공기의 유량은 2L/min로 고정하고 2차 공기 주입 유속에 따라 점화시간을 표시한 것으로, 1차 공기 2L/min인 경우를 제외하고는 펠릿보일러의 설계기준치인 2분 이내에 점화가 된 것을 나타낸다. 그러나 본 연구의 설계목표치인 점화시기 1분 이내로 단축하기 위해서는 1차 공기 유량 15~25 L/min인 경우를 제외하고는 불안정 상태를 나타낸다. 그러나 오른쪽의 그림에서는 2차 공기 유량 10V(400 l/min) 정도를 흘려주면 1차 공기 유량의 모든 범위에서 1분 이내에 점화가 되었음을 의미한다.



(A)타입

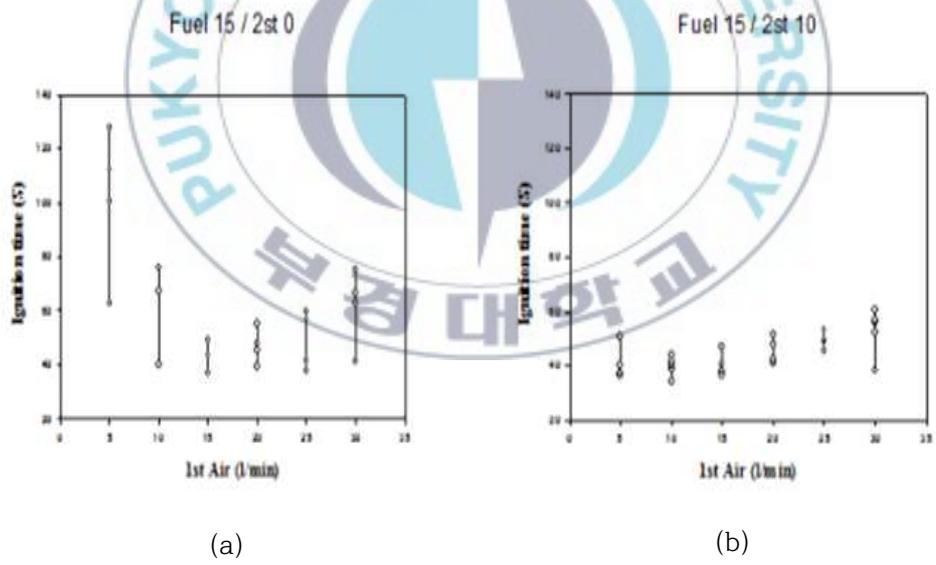
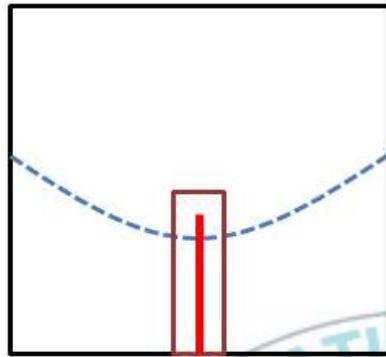
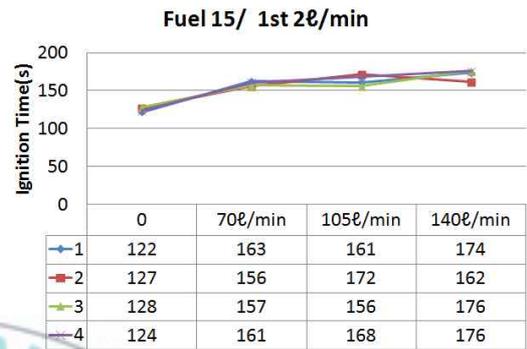


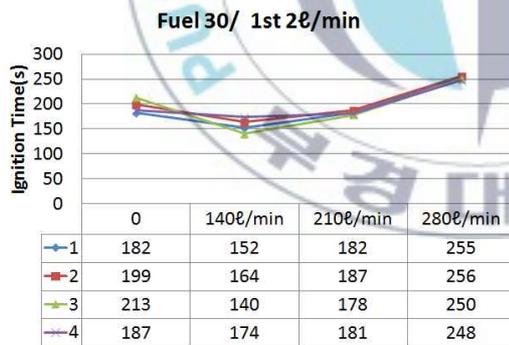
Fig. 4-2 A type의 점화시기



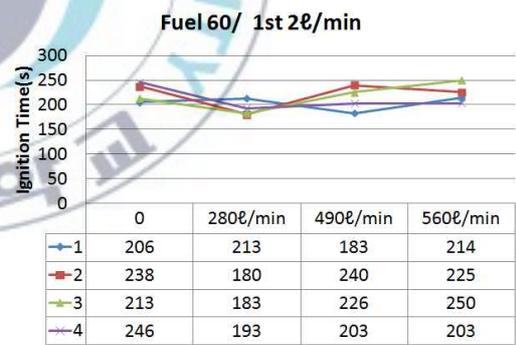
(B) 타입



(a)



(b)



(c)

Fig. 4-2 B type의 점화시기

4.3 완전연소시간 및 소염시간 실험

본 실험 펠릿투입 다시 하는 시간 결정하기 위해서 펠릿을 놓고 완전연소시간과 불이 까지는 소염시간을 측정하였다.

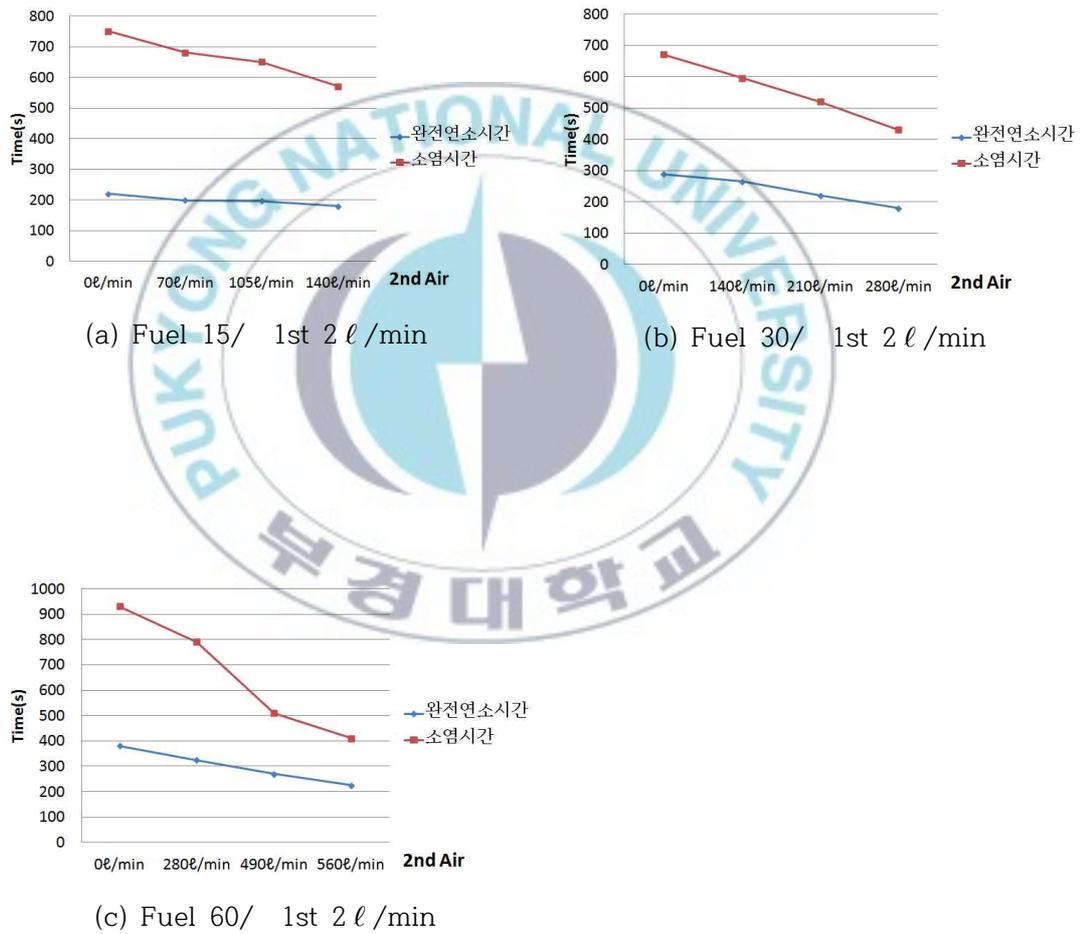


Fig 4-3 완전연소시간 및 소염시간 실험결과

4.4 선회공기 주입에 따른 선회효과 검토

본 실험에서는 1차 공기를 주입하고 점화시킨 후 연소실 하부에 설치된 선회기를 통하여 2차 공기를 선회시켜 주입하도록 한다. Fig. 4-4은 1차 공기 유량을 40 L/min으로 고정하고 2차 공기의 양을 변화시켜 가면서 선회강도에 의한 화염의 구조를 살펴본 것이다. 처음 사진은 2차 공기를 주입하지 않은 상태이며, 다른 그림과 비교하면 알 수 있듯이 불의 길이가 짧다. 그러나 선회효과를 크게 할수록 불의 길이는 길어지고 선회의 효과가 확연하게 나타난다. 또한 일반 확산화염의 특성처럼 선회효과가 어느 범위를 넘어서면 불의 길이는 크게 변화가 없었다.

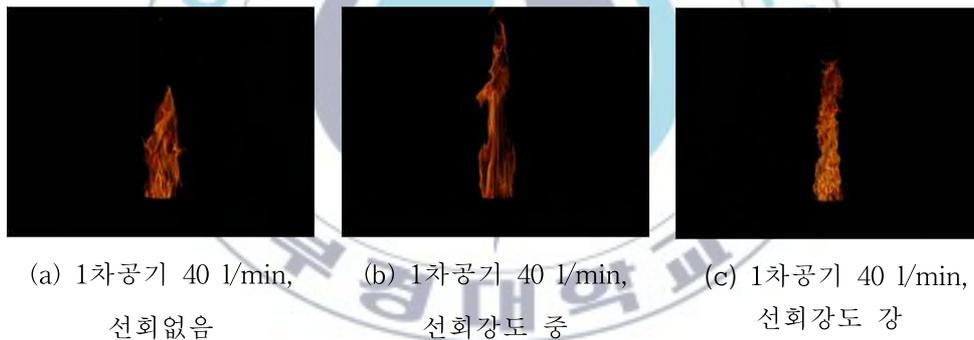


Fig. 4-4 선회공기 주입에 따른 선회효과

4.5 연소온도 측정

연소실험은 Fig. 4-6에 나타낸 바와 같이, 펠릿 1차 투입 후 점화시키고, 점화 후 2분 동안 연소시키고 펠릿 2차 투입한다. 또한 2분 연소시킨 후 다시 펠릿을 3차 투입하였다. 이후 3분 간 완전연소시켜 총 3차례 90g 연소시키는 동안의 반경방향 온도의 시간평균을 측정하였다.

Fig. 4-7~4-8은 연소실험의 재현성과 Fig 4-5에 나타낸 연소기 반경방향 X, Y 측정점에서의 등방성을 확인하기 위해 측정한 결과이다. Z=100mm의 X방향 및 Y방향 각각의 10~40mm 위치에서 측정값이 비교적 유사한 형태를 나타내므로, 이후 모든 측정값은 X방향의 값만을 측정하여 반경방향의 대표 값으로 한다.

Fig. 4-9는 위와 같은 실험방법으로 반경방향의 평균온도를 측정한 결과이다. 본 실험에서는 2차 공기의 선회를 위하여 대량의 2차 공기가 주입되므로 화염온도는 그다지 높지 않다. 또한 측 방향 Z=65mm와 Z=100mm 위치에서 온도분포는 비슷한 경향이며 연소기 상류에서 온도가 약 100℃ 높게 나타났다. 또한 최대온도는 약 800℃ 부근이었다.

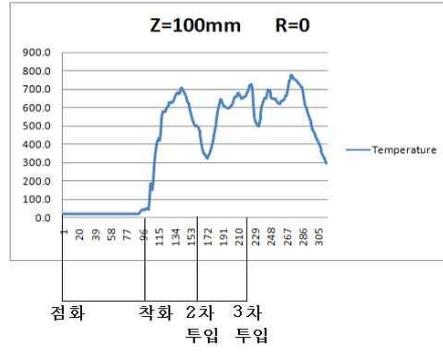
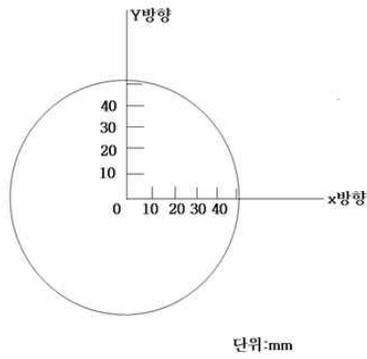
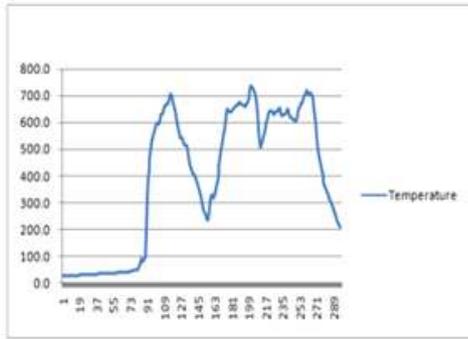


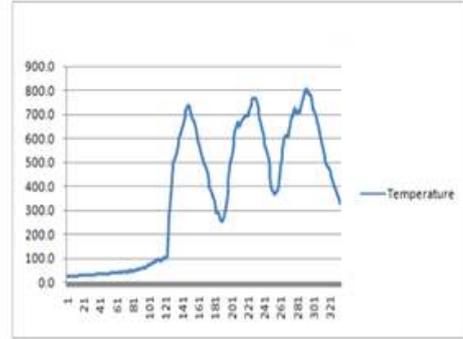
Fig. 4-5 연소실내 온도측정 좌표

Fig. 4-6 온도 측정실험결과(1st
2 l/min, 2nd 490 l/min,
시료 30g)

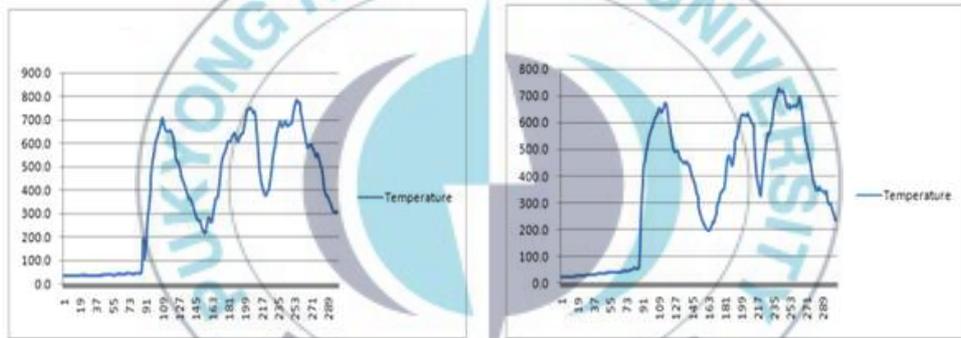




(a) Z=100mm R=10mm(X)



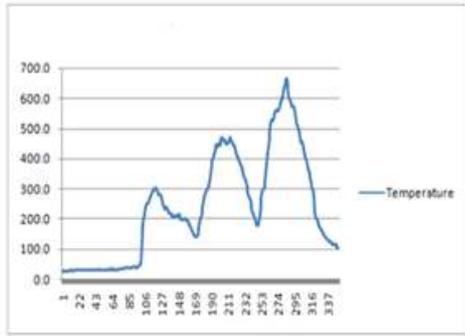
(b) Z=100mm R=10mm(Y)



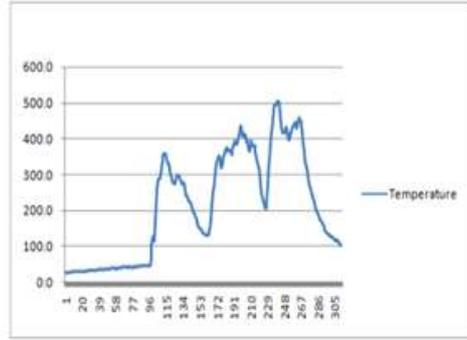
(c) Z=100mm R=100m(X)

(d) Z=100mm R=100m(Y)

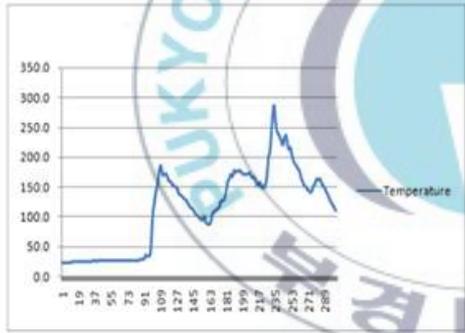
Fig. 4-7 온도측정 실험결과
(1st 2 l/min, 2nd 490 l/min, 시료 30g)



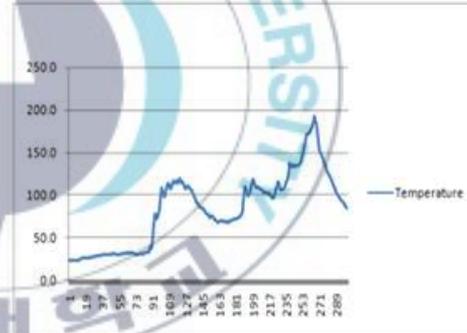
(a) Z=100mm R=30mm(X)



(b) Z=100mm R=30mm(Y)

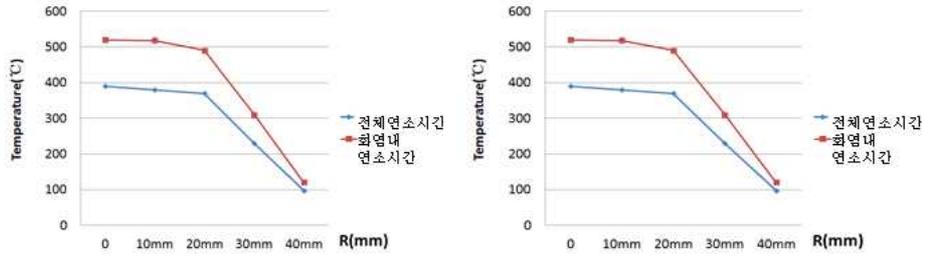


(c) Z=100mm R=40mm(X)



(d) Z=100mm R=40mm(Y)

Fig. 4-8 온도측정 실험결과
(1st 2 l/min, 2nd 490 l/min, 시료 30g)



(a) Z=100mm

(b) Z=65mm

Fig. 4-9 온도측정 실험결과
(1st 2 l/min, 2nd 490 l/min, 시료 30g)



4.6 배기가스 분석

Fig. 4-10~Fig. 4-13은 1차 공기주입속도 2L/min의 일정한 조건에서, 2차 공기주입속도, 연료 투입량과 측정높이 변화에 따른 설정한 실험조건에서의 CO, HC, CO₂ 및 NO_x의 농도 분포 측정결과를 각각 나타낸 것이다.

먼저, Fig. 4-10를 보면 전체평균값, 화염내평균값을 관찰하면 크기는 차이가 있지만 경향은 동일하다. Fig. 4-11를 보면 2차 공기 140L/min 공기주입속도에서 충분히 연소를 못해서 연소상황이 좋지 못하다. 그리고 2차 490L/min 공기주입속도에서 CO, HC 배출량이 적고 연소상태가 가장 좋은 것으로 나타났다.

Fig. 4-12를 보면 2차 공기주입속도 490L/min에서 적게 나올 것을 예상하였으나 CO, HC가 모두 공기량이 증가할수록 많이 나온다. 그러나, 0.05%정도 차이값이었다. 그리고 NO_x는 측정높이 Z=200mm시 모든 조건에서 목표치 100ppm이하에 근접하거나 만족하고 있다.

Fig. 4-13를 보면 시료투입량 15g와 측정 높이 Z=100에서 대체로 양호하게 연소하였다. 490l/min인 경우가 가장 연소상황이 좋고 모든 배기가스 배출량이 적다. 그리고 490l/min에서 CO₂가 낮게 나타난 이유는 1분 이내에 완전연소 하였으므로 평균값이 적게 나타남. 2차 공기주입속도는 210L/min에서 연소 상황이 좋고 배출가스도 적어서 결과적으로 210L/min이 적절한 공기량으로 판단된다.

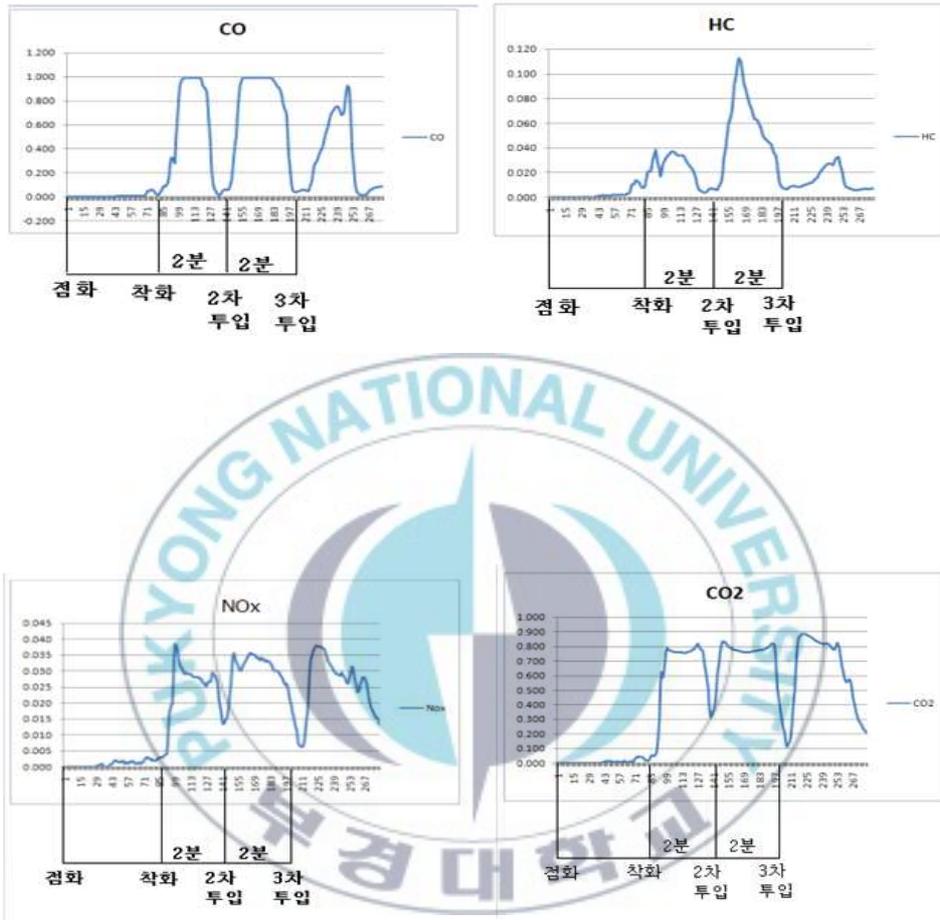
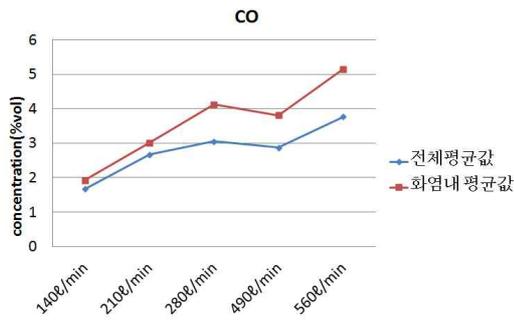
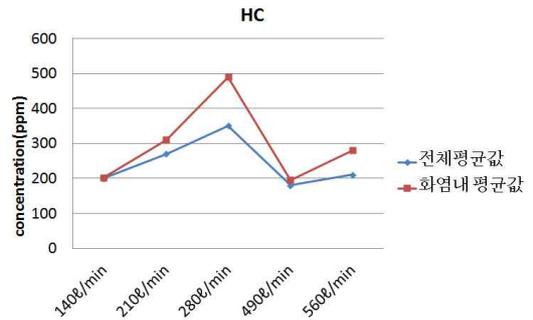


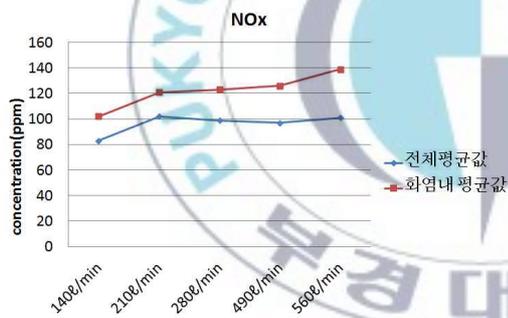
Fig. 4-10 배기가스분석 실험결과
(1st 2 l/min, Z=100mm, 시료 30g)



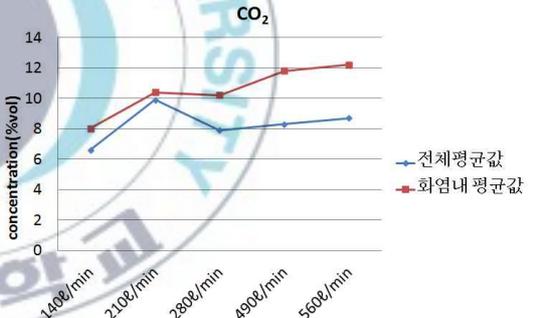
(a)



(b)

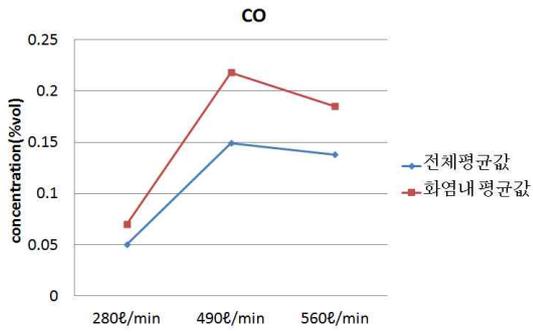


(c)

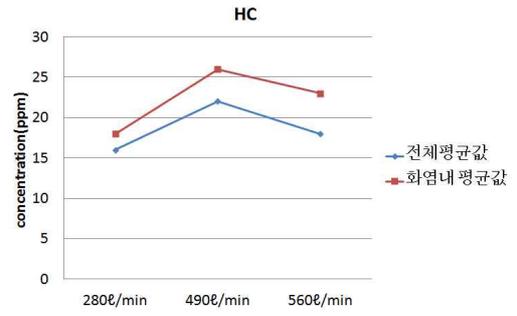


(d)

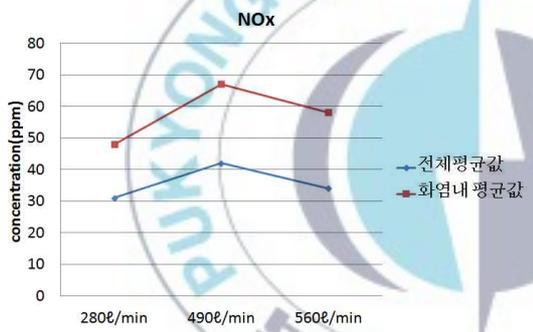
Fig. 4-11 배기가스분석 실험결과
(1st 2 l /min, Z=100mm, 시료 30g)



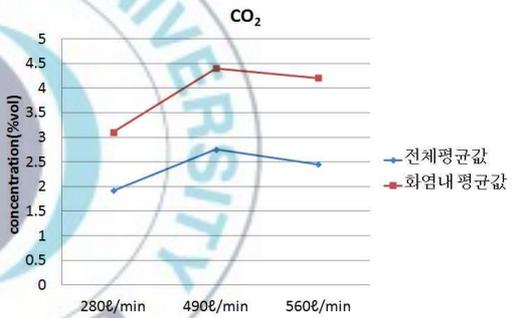
(a)



(b)

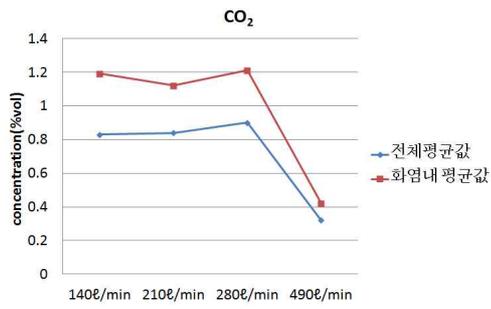


(c)

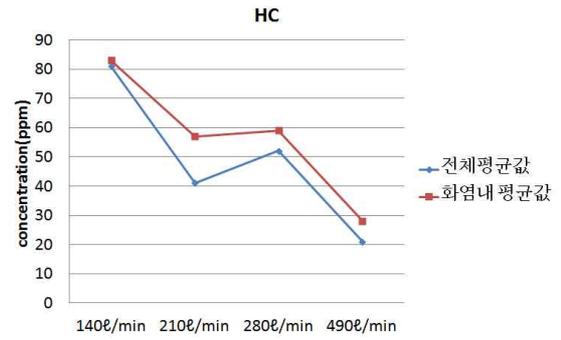


(d)

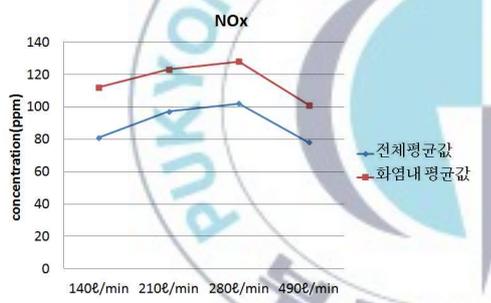
Fig. 4-12 배기가스분석 실험결과
(1st 2 l /min, Z=200mm, 시료 30g)



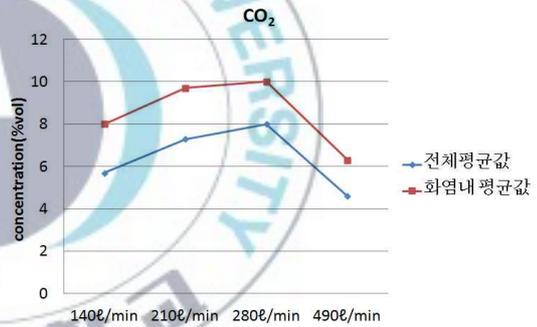
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4-13 배기가스분석 실험결과
(1st 2 l /min, Z=100mm, 시료 15g)

4.7 1, 2차 공급공기량 배분에 대한 고찰

이상의 실험에서는 1차공기량을 고정하고 2차공기량을 변화시켜 가면서 화염의 구조, 온도, 그리고 각종 농도변화를 측정하여, 선회의 영향에 따른 연소상황을 위주로 살펴보았다. 한편, 2.1절의 이론공기량 계산에서, 20,000kcal/hr의 연소기를 상정하였을 때 펠릿 공급량은 0.076kg/min, 이때의 이론공기량은 365.6 L/min이었다. 본 실험조건 중에서 30g의 펠릿 공급으로 2분간 연소시킨 경우 펠릿공급량은 15g/min이므로 이때의 이론공기량은 72.2 L/min이다.

본 실험의 결과에서 알 수 있듯이, 공급연료 30g인 경우 즉, 단위시간당 펠릿공급량 15g/min인 경우의 연소에 필요한 최적의 공기량은 490 L/min로 나타났으므로 이 값은 이론적으로 필요한 공기량에 비하여 상당히 큰 즉, 공기비 $\alpha=6$ 이상의 값에서 작동하게 되어 일반적인 고체연료 및 펠릿 연소에서의 공기비 $\alpha=2$ 전후와 비교하여 공기소모가 상당히 많다. 이는 본 연구의 목적이 2차 공기 선회에 따른 연소상황을 살펴, 완전연소에 도달하는 시간과 선회강도에 의한 회분의 처리 가능성을 파악하는 것이므로 공기비에는 크게 구애받지 않았기 때문이다.

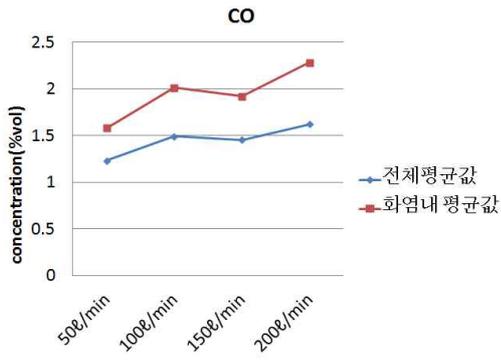
이 절에서는 1차 공기량과 2차 공기량을 변화시켜 가면서 연소시켰을 때 완전연소에 필요한 소요시간 및 각종 화학종 농도 등을 측정하여, 총 공급공기량을 최대한 줄이면서 완전연소시키는 가능성을 검토하고자 한다. 이는 추후 총 공기량을 가능한 한 줄임과 동시에, 2차 공기를 하부 펠릿의 부유를 위해 균일한 유속으로 공급하고 1차 공기에 선회를 주입하는 장치를 설치하여 완전연소와 회분제거를 꾀하는 실험에 기초자료로 활용할 예정이다.

Fig. 4-14는 1차 공기량 50 L/min에서 2차 공기량을 50~200 L/min까지

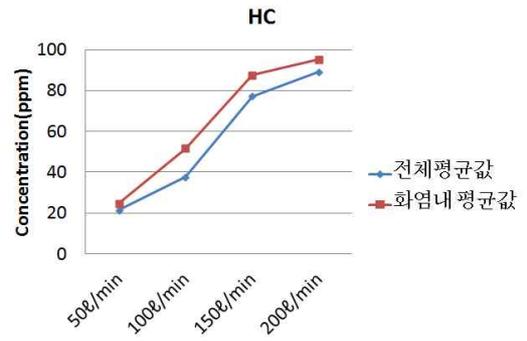
변화시켰을 때 연소기 높이방향 $z=100\text{mm}$ 에서의 CO 및 HC의 평균농도를, Fig. 4-15는 $z=200\text{mm}$ 에서의 각각의 평균농도를 나타낸 것이다. 이 실험의 어느 조건에서나 연소상황은 우수하였으며, 2분 이내에 완전연소하였다. 그러나 선회효과는 대부분 나타나지 않았다.

Fig. 4-14는 연료 30g인 경우와 동일 높이인 연소기 하부 실험결과 Fig. 4-11과 비교하면, 2차 공기 50L/min에서의 CO는, 이전 실험의 최적 조건인 490L/min인 경우와 비교하여 절반 이상 줄었고, 특히 HC는 약 1/10정도로 줄었음을 알 수 있다. 연소기 상부의 실험결과인 Fig. 4-15인 경우에는 Fig. 4-12와 비교하면, CO, HC 모두 약간 줄어들었음을 알 수 있다. 눈으로도 확인하였듯이 불의 길이는 이전의 실험과 비슷하였으므로, 위 실험 조건에서 연소기 하부에서의 연소상황이 아주 좋았음을 알 수 있었다.

따라서 선회효과를 고려하지 않고 연소상황만을 고려하면, 1차 공기 50 L/min, 2차 공기 50 L/min에서도 30g의 펠릿은 2분 내에 완전연소하는 것이 된다. 이때의 공기비 $\alpha=1.4$ 정도가 되어, 기존의 펠릿연소기의 공기비 1.8에 비하여 본 연구에서 개발한 연소기가 훨씬 적은 공기량으로 완전연소 가능하다는 것을 나타낸다.

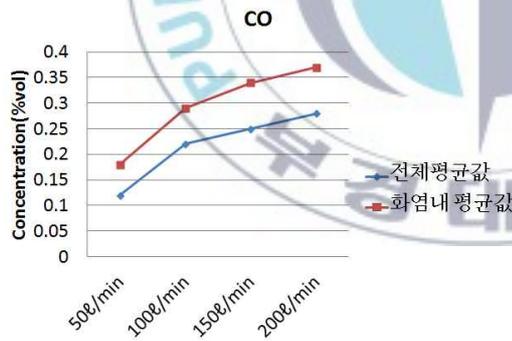


(a)

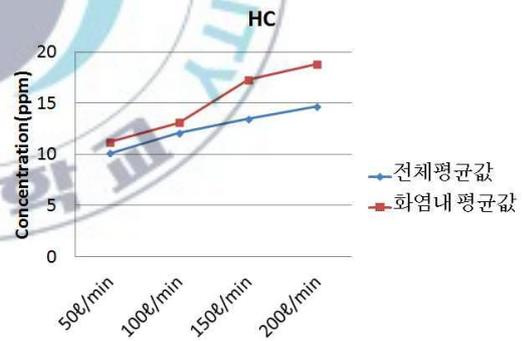


(b)

Fig. 4-14 배기가스분석 실험결과
(1st 50 ℓ /min, Z=100mm, 시료 30g)



(a)



(b)

Fig. 4-145 배기가스분석 실험결과
(1st 50 ℓ /min, Z=200mm, 시료 30g)

제5장 결 론

본 연구는 다양한 고형연료 중에서 목질계 바이오매스인 펠릿의 효율적인 연소를 위한 연소기를 개발하는 것이 목적이다. 기존 연소기의 문제점인 화염안정화, 초기 점화시간, 분의 처리, 그리고 불완전연소와 역화 등을 개선하기 위하여 연소기의 형태를 사이클론으로 고안하였으며, 다양한 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 20,000 kcal/hr급 펠릿 연소기를 설계하였다. 발열량에 필요한 연료투입량과 공급공기량을 계산하고, 연소기 규모 및 1, 2차 공기 공급장치를 설계하였다. 또한 실험의 재현성을 확보하기 위하여 공급공기량의 분배, 펠릿 공급장치 그리고 각종 측정장치 등의 자동화를 꾀하였다.

2. 점화시간 단축의 가능성을 조사하기 위하여 2 종류의 점화장치를 설치하여 실험하였다. 결과적으로 A type은 시간단축이 가능하였으나, B type은 현재로는 단축이 어려웠다. 그러나 이 타입은 점화와 1차 공기 주입을 동시에 달성하기 위해 고안하였으므로 점화시간에 대해서는 추후 더욱 개선하기로 한다.

3. 펠릿이 주어진 공급공기 조건에서 얼마동안 연소하는가는 펠릿이 공급장치를 통하여 간헐적으로 공급하는 시기를 결정하는 인자이다. 본 실험 조건에서는 2분마다 투입하여 실험하였다.

4. 개발한 연소기가 임의 반경방향으로 등방성을 갖추었는지, 또한 펠릿이 실험도중 수시로 투입되므로 실험의 재현성이 있는지를 온도분포를 통하여 확인한 결과, 신뢰할만한 데이터를 얻을 수 있었다.

5. 연소기 내의 온도는 최대 800°C 정도로 낮았는데, 이는 공기비가 과다하기 때문으로 판단되며, 이는 추후 1차 공기 주입을 늘이는 실험으로 보완할 수 있을 것으로 생각된다.

6. 다양한 실험조건에서 배기가스 농도를 측정한 결과, 15g의 연료를 주입한 경우 2차 공기 210 L/min, 30g인 경우에는 490 L/min적정한 공기량으로 판단된다.

본 연구에서는 연소기 설계 및 시제품 제작, 그리고 1, 2차 공기의 유량 변화를 바탕으로 한 점화시간, 공급연료량, 연소온도 및 각종 농도실험을 실행하였다. 추후, 다양한 점화장치 개발, 1차 공기 주입 실험, 선회효과에 의한 회분 처리 등을 추가하여 고효율의 펠릿연소기를 개발할 예정이다.



참고문헌

1. 신재생에너지센터, 신재생에너지보급통계. 2012
2. 신재생에너지 R&D전략로드맵2030. 2012
3. 안준 외 2명, 1kW급 LNG스털링엔진을 위한 예혼합버너의 연소특성, 대한기계학회논문집, pp.3630~3635, 2010.
4. 홍용주 외 3명, 1kW급 스텔링엔진 설계 및 제작, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.344~346, 2011.
5. 최재준 외 3명, 부하변화에 따른 가정용 스텔링엔진 열병합발전시스템의 성능특성에 관한 연구, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp.1262~1265, 2011.
6. 홍성구 등, 농촌지역 바이오매스자원의 최적이용기술 개발, 농림부 보고서, 2005.
7. 이재구 등, 바이오매스 가스화에 의한 분산형 발전기술 개발, 지식경제부 보고서, 2008.
8. 정찬홍 외 1명, 안전성을 고려한 고효율 목재펠릿 보일러 개발, 신뢰성응용연구, 제12권 1호, pp.35~46, 2012.
9. 정찬홍 외 2명, 안전성이 높은 산업용 목재펠릿 보일러 개발, 신뢰성응용연구, 제13권 1호, pp.31~44, 2013
10. 산림청, 목재펠릿의 에너지 활용대책, 2009
11. 한규성, 목재펠릿의 이용실태분석 및 안정적 수급방안, (사)한국펠릿연료협회, 2010.
12. 심봉석 외 5명, 200,000kcal/h급 목재펠릿연소 전용설비의 성능특성, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.276~278, 2012.

13. 장준환 외 2명, 13단 화격자 목재펠릿 보일러 연소실 내부의 연소 및 열전달특성, 한국전산유체공기기술 및 성능평가방법 소개, 강연회 발표자료, 2010.
14. 지식경제부, 펠릿보일러 성학회, pp.73~77, 2012.
15. 김성호 등, 숲가꾸기 산물을 이용한 펠릿의 원료 적성연구, 한국펄프종이공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 171~178, 2011.
16. 강세별, 국내외 펠릿보일러 능, 구조 및 설치기준
17. 산림청, 목재펠릿 품질규격
18. THOMAS G. KIM D. ANKER D J, et al. An experimental study of biomass ignition[J]. Fuel. 2003(82) : 825-833.
19. R. BILBAO,* J. F. MASTRAL, M. E. ALDEA, J. CEAMANOS and M. BETRÁN. Experimental and Theoretical Study of the Ignition and Smoldering of Wood Including Convective Effects. Combustion and Flame. 2001. 126(1) : 1363-1372.

감사의 글

雖然我有許多的不足，但是이도형教授還是給予了我最大的照顧和幫助。在此，我真心的感謝李度衡教授。同時，對於在論文的寫作以及修改上給予了我最大的幫助的 김정수教授以及 강인구教授給予最誠摯的感謝。

對於在我進行學習以及實驗的過程中，給予我很多幫助的 봉식前輩， 수빈前輩， 재민前輩以及 박기득씨等，給予最誠摯的感謝。봉식前輩給我傳輸了許多做人做事的道理，以及在實驗上給予了我最大的幫助； 在수빈前輩的指点下，我熟悉了碩士的生活以及學習到了碩士應有的行為准則； 재민前輩和 박기득씨等都抽出了自己非常珍貴的時間， 幫助我的實驗進程以及論文寫作。在你們的幫助下，我才能順利的完成學業，做好研究項目。在此，再次給予前輩們最誠摯的感謝。

另外，在此對鄭州大學化工學院的張長森教授給予最誠摯的感謝，感謝您在我進行流化床反應器時間期間給予的無私的幫助。

同時，作為外國學生，感謝在韓留學期間給予我幫助的國際交流院 박원주老師，沒有老師的指点以及幫助，我很難如此順利的來到釜慶大學校進行學習，以及拿到碩士學位。

最后，感謝這二十幾年來，給與我最无私付出的父母親，在你們的无私全身心的養育下，我才能如此健康茁壯的成長。

2年的研究室生活真的很開心幸福。

謝謝大家！

王振威

2014. 07. 19