

# Part 2

연소공학

## 연소

- 가연성 물질이 빛과 열을 발하며 급격히 산화하는 현상
- 가연성 물질, 점화원, 산소 공급원의 3가지 요소가 반드시 필요.
- 불완전 연소보다 완전 연소의 열효율이 더 좋음

## 완전연소 VS 불완전 연소

### 완전연소

- 산소가 충분히 공급되어 배기가스 속에는 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O만이 발생하고 그 외의 가연성 물질이 없는 상태
- 충분한 온도 : 연료를 인화점 이상 예열 공급, 연소실 온도는 되도록 착화온도 이상 유지
- 충분한 시간 : 소각로의 부피가 크므로 완전연소를 위한 충분한 체류시간의 제공 필요
- 충분한 용적 : 연소실의 용적은 연료가 완전연소 하는데 필요한 용적 이상.

### 불완전연소

- 산화제의 공급이 불충분할 경우 불완전 연소가 일어나며 배기가스 중에는 가연물이 남아 있는 상태가 됨.

## 연료

- 연소열을 발생시켜 그 열을 경제적으로 이용할 수 있는 물질
- 고체연료 : 석탄, 목탄, 목재, 코크스
- 액체연료 : 석유류, 석탄, 석유분유분, 알코올
- 기체연료 : 천연가스, 석탄가스, 오일가스, 발생로가스, 고로가스, 액화석유가스

## 고체연료

고체 형태로 된 연료

장작이나 석탄 같은 자연적인 고체연료와 인공적으로 연료와 산화물을 섞어 고형화 시킨 연료도 포함

### 고체연료 - 장점

- 저장 및 취급이 용이
- 구입이 쉽고 가격이 저렴
- 노천 야적이 가능
- 연소성이 늦어 특수용도에 사용됨
- 연소장치가 간단
- 설비비 및 인건비가 적음

### 고체연료 - 단점

- 완전 연소가 어려움
- 연소효율이 낮고 고온을 얻기 어려움
- 점화, 소화, 연료조절이 어려움
- 회분이 많아 재가 많이 생기며 후처리가 어려움
- 매연 발생이 많음
- 건조, 분쇄 등의 전처리가 필요

### 매연 발생

- 분해나 산화하기 쉬운 연료는 매연 발생 쉬움
- C/H비가 클수록 매연 발생 쉬움
- 천연가스 < LPG < 제조가스 < 석탄가스 < 코크스
- 탈수소가 쉬운 연료가 매연이 생기기 쉬움
- 반응이 일어나기 쉬운 연료일수록 매연이 생기기 쉬움  
ex)탈수소, 중합 및 고리화합물
- 연소실의 체적이 작을 때 매연이 생기기 쉬움
- 중유연소에서 생기는 매연의 입경은 메탄연소 보다 큼
- 석탄 연소에서는 휘발분이 많을수록 매연이 생기기 쉬움
- 통풍력이 부족할 때 매연이 생기기 쉬움
- 무리하게 연소시키면 매연이 생기기 쉬움

## 고체연료의 특징

- 원소 : C, H, O, N, S, ash, H<sub>2</sub>O
- 성분 : 수분, 회분, 휘발분, 고정탄소
- 천연물 : 목재, 갈탄, 역청탄, 무연탄
- 가공품 : 목탄, 코크스, 연탄

### 연료비

- 탄화도의 정도를 나타내는 지수
- 연료비 = (고정탄소/휘발분)
- 고정탄소 = 100-(휘발분+수분+회분)

## 고체연료의 탄화도에 따른 변화

탄화도가 커질수록 증가하는 것 : 고정탄소(C), 착화온도(안정성), 발열량  
탄화도가 커질수록 감소하는 것 : 매연발생량, 휘발분, 비열, 산소  
탄화도가 가장 큰 석탄 : 무연탄

## 고체연료 - 석탄

- 식물이 장기간에 걸쳐 퇴적되어 생긴, 가연성을 띠는 퇴적암
- 갈탄, 역청탄, 무연탄 순으로 연료비가 높아짐.
- 석탄회분의 용융 시 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등의 산성 산화물량이 많으면 회분의 용융점이 상승.
- 석탄 속의 수분은 착화불량, 열손실을 초래.
- 회분 함량이 높을수록 발열량이 낮고 연소효과가 나쁨.
- 휘발분이 높을수록 매연이 다량 발생.
- 고정탄소가 높을수록 발열량이 높고 연소성이 좋음.

## 고체연료 - 코크스

- 원료탄을 건류하여 얻어지는 2차 연료, 코크스로에서 제작됨.
- 휘발분이 거의 없어 매연이 적음.
- 약 8,000kcal/kg의 발열량, 석탄에 비해 화력이 강함.
- 주 성분이 탄소이며 원료탄보다는 회분의 함량이 많음.

## 액체연료

액체의 형태로 된 연료

석유, 알코올 등

### 액체연료 - 장점

- 발열량이 높고 품질이 일정하며 저장 및 운반이 쉬움
- 저장 중 변질이 적음
- 연소효율과 열효율이 높음
- 석탄연소에 비해 매연발생이 적음
- 계량과 기록이 쉬움
- 점화, 소화, 연소조절이 쉬움

### 액체연료 - 단점

- 연소온도가 높기 때문에 국부가열의 위험
- 황분이 많을 경우 SO<sub>2</sub>를 발생하여 대기오염 유발
- 대부분 수입에 의존
- 화재, 역화의 위험성
- 연소 후에 발생한 금속산화물에 의한 장애 유발
- 사용버너에 따라 소음 발생

## 액체연료 - 석유

- 자연적으로 생성되어 땅에 매몰되어 있는 액체 탄화수소.
- 점도가 높으면 인화점이 높아져서 연소효율 증대
- 증기압이 높으면 인화점이 높아져서 연소효율 증대
- 유동점은 일반적으로 응고점보다 2.5 °C 높은 온도.

## 중유(Heavy oil)

점도에 따라 A, B, C 중유의 3가지로 구분

A 중유는 소형 디젤기관, 소형 버너에 사용.

B 중유는 일반디젤기관 및 보일러용으로 사용.

C 중유는 대정보일러, 대형저속디젤기관에 사용.

이 중 C 중유가 가장 많이 사용

C 중유에는 황(S) 성분이 가장 많은데 이 때문에 SO<sub>2</sub>를 배출하여 대기오염의 주범으로 꼽힘.

비중이 클수록 유동점, 점도, 잔류탄소 증가

비중이 클수록 발열량이 적어지고 연소성이 나빠짐

황이 많은 순서 = 비등점이 높은 순서

중유 > 경유 > 등유 > 휘발유

(중유 중에서도 벙커C유에 가장 황 성분이 많음)

## 기체연료

기체 형태로 이루어진 연료

LPG, LNG, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> 등등

천연가스는 화염전파속도가 작으며 폭발범위가 좁아 1차 공기를 많이 혼합하는 편이 유리

액화천연가스는 메탄을 주 성분으로 하는 천연가스를 1기압, -168°C에서 냉각, 액화시킨 물건

액화석유가스는 액체에서 기체로 될 때 증발열이 있으므로 사용에 주의를 요함

## 기체연료 - 장점

- 회분이나 황분이 없어 공해문제가 거의 없음
- 적은 공기비로도 완전연소 가능
- 연소효율이 높고 연소제어가 용이
- 저발열량의 연료를 써도 고온을 얻을 수 있음
- 부하변동범위가 넓음.

## 기체연료 - 단점

- 가격이 비싸며 시설비가 많이 소모
- 저장과 취급이 어려움
- 누설시 화재, 폭발 위험

## 연료의 특성

매연 발생이 큰 연료 순서 : 고체연료 > 액체연료 > 기체연료

발열량이 큰 연료 순서 : 기체연료 > 액체연료 > 고체연료

공기가 많이 필요한 연료 순서 : 고체연료 > 액체연료 > 기체연료

## 연소형태

### 표면연소

- 휘발분이 없는 고체연료의 연소형태

ex) 목탄, 코크스

### 분해연소

- 휘발분이 있는 고체연료나 증발이 어려운 액체연료의 연소형태
- 증발온도 보다 분해온도가 낮을 경우 가열에 의해 열분해를 일으켜 표면에 가연성 가스가 발생하여 연소
- 연소가 진행되면 연소열로 인해 다시 열분해가 일어나 연소가 지속됨.

ex) 목재, 석탄, 중유

### 증발연소

- 융점이 낮은 고체연료와 휘발유, 등유, 알코올 같은 액체연료가 증발하여 연소하는 형태.
- 증발온도가 열분해 온도보다 낮을 때 발생.

ex) 휘발유, 등유, 경유, 나프탈렌, 양초

### 훈연연소

- 열분해로 발생한 휘발분이 점화되지 않으면 다량의 연기를 수반하는 표면반응이 발생하는데 이를 훈연 연소

ex) 종이, 목재, 면

### 심지연소

- 모세관 현상으로 인해 빨아 올려진 액체연료를 화염이나 대류열, 복사열로 증발시켜 연소하는 것

### 자기연소

- 산화제 없이 자신 속의 산소에 의해 내부 연소하는 형태

ex) 니트로글리세린

### 확산연소

- 공기 중의 가연성가스와 확산에 의해 연소하는 현상

ex) 도시가스, 부생가스

### 연료에 따른 연소형태

고체연료의 연소 : 표면연소, 증발연소, 분해연소

액체연료의 연소 : 증발연소, 분해연소, 심지연소

기체연료의 연소 : 확산연소, 예혼합연소

## 연소장치

### 고체연료의 연소장치

- 화격자 연소장치
- 미분탄 연소장치
- 유동층 연소장치

### 액체연료의 연소장치

- 기화 연소장치
- 무화 연소장치
  - 유압식 버너
  - 회전식 버너
  - 고압 공기식 버너
  - 저압 공기식 버너

### 기체연료의 연소장치

- 확산 연소장치
- 예혼합 연소장치

## 연소장치와 연소방법

### 고체연료의 연소

#### 고체연료의 연소형태

- 표면연소 : 휘발분이 거의 없는 숯이나 코크스 등의 표면이 붉게 연소
- 분해연소 : 증발온도보다 분해온도가 낮은 목재, 연탄 등이 가열에 의해 분해된 휘발분이 연소
- 증발연소 : 양초나 파라핀계 연료가 연소 전 용융하여 기화한 증기가 연소
- 발열연소 : 분해 온도가 낮은 목재, 종이 등이 가열에 의해 발생한 휘발분이 점화하지 않고 발열을 수반하는 연소. 그을음 연소.

#### 고체연료의 투입방식

##### 상부투입방식(상입식)

- 투입 연료와 공기 방향이 향류로 교차.
- 최상층부터 연료층→건류층→환원층→산화층→회층→화격자 순서로 구성.
- 착화기능이 우수하고, 화격자상 고정층이 형성되어야 하므로 분상의 석탄을 그대로 사용하기에는 곤란

##### 하부투입방식(하입식)

- 투입 연료와 공기 방향이 같은 방향으로 이동.
- 최상층부터 환원층→산화층→건류층→연료층→화격자 순서로 구성.
- 저용점 회분을 포함하거나 착화성이 나쁜 연료에는 부적절

#### 각 층별 발생 가스

- 공기 주입 측에서  $O_2$  농도 최대.
- 연료 측에서는 연료 내 휘발분이 방출되며 산소부족상태에서 연소하므로 ( $H_2+CH_4$ ) 농도 최대.
- 산화 측에서  $CO_2$  최대가 되었다가 환원·건류 측에서 일부가 CO로 되며 감소.

### 고체연료의 연소방식

#### 화격자(스토크) 연소

- 화격자라고 하는 금속격자 위에 고체연료의 고정층을 만들고 이곳에 공기를 통과시키는 연소하는 방식.
- 도시폐기물 대부분에 채용되며, 용융·적하(滴下)하는 폐기물에는 곤란.
- 상향연소방식
  - 공기가 화격자 하부에서 공급, 발열량 낮은 생활폐기물 소각에 유리
- 하향연소방식
  - 공기가 피소각물 상부에서 공급, 휘발분이 많고 열분해 속도가 빠른 페플라스틱, 페타이어 등이나 발열량 높은 폐기물 소각에 유리
- 체류시간이 길고 교반력이 상대적으로 약하여 국부가열의 위험성이 있음.

## 화격자의 종류와 특징

### 계단식

- 고정·가동화격자를 교대로 계단모양으로 배치하고 가동화격자는 왕복운동

### 병렬요동식

- 고정·가동화격자를 횡방향으로 나란히 배치.
- 강한 교반력과 이송력이 있으며, 화격자의 메워짐이 적어 낙진량이 많고 냉각기능 부족

### 역동식

- 가동화격자가 계단식의 반대방향으로 왕복
- 건조 - 연소 - 후 연소 단계로 이송·교반·연소가 양호하나, 화격자의 마모가 많음

### 회전롤러식

- 드럼형 가동화격자의 회전에 의해 이송

### 이상식

- 높이차이가 있는 가동화격자로 건조-연소-후연소 단계로 이송

### 부채형 반전식

- 부채형의 가동화격자를 90°로 반전시키며 이송. 교반력이 우수하여 저질의 쓰레기에 적합

## 유동층(fluid bed) 연소

- 연료 입자와 모래를 혼합한 입자 (연료 비율 수 %)를 넣고 밑에서 고속의 공기를 불어 유동화 시킨 후 연소
- 새로운 연료가 계속해서 공급되면 유동층이 갖고 있는 열량에 의해 계속해서 연소가 진행됨.
- 비교적 저온인 700 ~ 900°C에서 연소.
- 장점 : 탈황 및 NO<sub>x</sub> 저감, 장치 소형화, 클링커 장애 없음, 함수율 높은 폐기물 소각에 적합, 건설비와 전열면적이 적고 유지관리에 용이, 저질 연료의 사용 가능, 국부가열의 문제 없음.
- 단점 : 부하변동에 약함, 동력비 소요가 크고 유동매체의 비산. 분진 발생이 많음, 재연소시설 필요.
- 유동사 조건 : 불활성, 높은 용점, 낮은 비중, 미세하고 입도분포 균일, 내열·내마모성

## 미분탄 연소방식

- 고체연료의 미립자(미분탄)를 1차 공기와 혼합해서 버너로부터 분출하여 공간에 부유시킨 후 연소하는 방식
- Clinker trouble이 없으며 연소실의 공간을 효율적으로 이용가능.
- 소형의 미분탄 연소설비는 고가이지만 대형화되는 경우 설비비가 화격자 연소에 비해 낮아짐.
- 부하변동에 대한 응답성이 우수하기 때문에 대형 설비에 적합.
- 상대적으로 낮은 공기비로 높은 연소효율을 얻을 수 있음.
- 석탄을 분쇄하는데 비용이 많이 들고 노벽이나 전열면에 회분의 퇴적이 많아 소형화에는 부적합.

## ※ 촉매연소법

- 주로 오염물질이 적을 때, 저농도의 VOC, 열용량 낮은 물질을 함유한 가스에 적용.
- 배출가스 중 가연성 오염물질을 Pd, Co 등 촉매를 이용하여 연소.
- Cu, Au, Ag, Zn 등은 촉매 수명을 단축시킴.
- 대부분 촉매는 800 ~ 900 °C 이하에서 활발하므로 촉매 연소에서의 온도 상승은 50 ~ 100 °C로 유지.

액체연료의 연소 - 증발연소, 액면연소, 등심연소, 분해연소

액체연료의 연소방식 - 분무연소, 기화연소

### 분무 연소방식

액체연료를 미립화 시키고, 표면적 증가된 유적에 공기를 접촉·혼합하여 연소  
중질유 연소에 주로 사용

### 기화연소방식

연료를 고온의 물체에 접촉시켜 발생하는 증기를 연소  
경질유 연소에 주로 사용

- 포트식 : 증발접시의 액체 표면에서 증발되는 증기 연소
- 심지식 : 심지를 삽입하여 모세관현상으로 올라온 연료 표면에 가열하여 연소. 그을음과 악취가 심함
- 증발식 : 연소실의 방사열을 이용하여 연료를 증발시킨 후 공기 주입하여 연소. 소형, 소용량

### 분무연소장치

#### 유압버너(=유압분무식버너)

- 유체에 직접 압력을 가하여 노즐을 통해 분사
- 유압 5~30kg/cm<sup>2</sup>로 가장 크고, 유량조절비는 1:3으로 작음. 분무각도 40~90°, 연소량 15~2000L/hr
- 구조 간단하고 유지보수 용이. 대형 보일러에 적합. 부하변동에 약하고 고점도 유류에는 곤란

#### 회전식 버너(로터리 버너)

- 분무컵을 고속으로 선회시켜 유체에 원심력을 부여하고 표면장력에 의해 미립화된 액적을 연소.
- 입경이 큰 슬러지나 수분이 많은 폐유 등에 적합
- 유량조절비는 1:5, 분무각도 40~80°
- 직결식은 전동기 회전수와 동일하고 벨트식은 이보다 빠름.
- 연소량은 직결식 1000 L/hr 이하, 벨트식은 2700 L/hr 이하
- 분무매체는 기계적 원심력과 공기,
- 부하변동이 있는 중소형 보일러에 적합, 유압식 버너에 비해 입경이 크고, 연료유 점도가 낮을수록 입경 감소

#### 이류체 분무연소 버너

- 공기나 과열증기를 노즐로 토출시켜 액적을 분산·미립화하여 연소
- 저압공기식 버너 : 소형가열로에 적합, 무화용 공기량은 이론공기량의 30~50%로 많음
- 고압기류식 버너 : 유량조절비는 1:10으로 가장 크고, 연소량은 외부혼합식 3~500L/hr, 내부혼합식 10~1200L/hr. 대형가열로에 적합. 분무각도가 20~30°로 좁고 장염. 무화용 공기량은 이론공기량의 7~12%로 적음. 부하변동에 대응 가능하며 고점도 유류에도 적용 가능

## 건 타입(gun type) 버너

- 유압식과 공기분무식을 조합한 버너. 유압은  $7\text{kg}/\text{cm}^2$  이상
- 소형 보일러에 적합하고 연소 양호, 자동연소 용이

## 충돌분무식 버너

- 적열된 금속관에 연료를 고속으로 충돌시켜 무화하여 연소
- 무화입경은 연료의 점도와 표면장력이 클수록 증가함.
- 입경을 작게 하기 위해서는 연료를  $85\pm 5^\circ\text{C}$ 로 예열할 필요가 있음

## 기체연료의 연소 - 확산연소(Diffusion flame), 예혼합화염(Pre-mixed flame)

### 확산연소

- 버너노즐에서 연료가스를 분사하고 연료와 공기를 일정속도로 혼합하여 연소.
- 탄화수소가 적은 발생로 • 고로 가스에 적용
- 부하에 따른 조작범위가 넓고, 화염이 길고 그을음이 많음
- 역화의 위험이 없음.

### 예혼합연소

- 연소용 공기의 전부를 미리 연료와 혼합하여 버너로 분출시켜 연소
- 높은 연소부하가 가능하므로 고온가열용으로 적합.
- 분출속도가 느릴 경우에는 역화 위험.
- 완전연소가 용이하고 그을음 생성량이 적다
- 고압버너, 저압버너, 송풍버너

## 확산연소 - 연소장치

### 포트형(확산연소)

- 큰 단면적의 화구로부터 공기와 가스를 연소실에 보내는 방식
- 버너가 노벽과 함께 내화벽돌로 조립됨
- 가스와 공기압을 높이지 못한 경우에 사용.
- 밀도가 큰 공기 출구는 상부, 밀도가 작은 가스출구는 하부에 배치.
- 반응로 내부에서 연소가 완료될 수 있도록 유속 결정
- 가스 • 공기를 예열할 수 있는 이점이 있으나, 그 속도를 크게 유지하기엔 어려움
- 포트 입구가 작을 경우 슬래그로 인한 막힘의 우려가 있음.
- 고발열 탄화수소를 이용할 경우에는 가스압을 이용하여 분출시켜 그 힘으로 공기를 흡인.

### 버너형(확산연소)

- 공기와 가스를 가이드베인을 통해 혼합시키는 형태
- 고로가스와 같이 저발열량 연료에 적합한 선회식과 천연가스와 같이 고발열량가스에 적합한 방사식.

### 유압식 버너

- 용량 : 30 ~ 5,000 L/hr
- 유량 조절범위 : 1 : 1.5
- 유압 : 5 ~ 30 atg
- 분무매체 : -
- 특성 : 넓은 각도의 화염으로 조절 범위가 좁음
- 용도 : 대형 보일러용
- 분무각도 : 60~90°

### 회전식 버너

- 용량 : 5 ~ 1,000 L/hr
- 유량 조절범위 : 1 : 5
- 유압 : 0.3 ~ 0.5 atg
- 분무매체 : 기계적 원심력과 공기
- 특성 : 비교적 넓은 각도의 화염
- 용도 : 중소 보일러용
- 분무각도 : 45~90°

### 고압공기식

- 용량 : 2~ 2,000 L/hr
- 유량 조절범위 : 1 : 10
- 유압 : 0.5 ~ 4.0 atg
- 분무매체 : 증기 또는 공기
- 특성 : 가장 좁은 각도의 긴 화염, 유량 조절범위가 넓음
- 용도 : 대형 보일러용, 고온 가열로
- 분무각도 : 30°

### 저압공기식

- 용량 : 2 ~ 300 L/hr
- 유량 조절범위 : 1 : 5
- 유압 : 0.3 ~ 0.5 atg
- 분무매체 : 공기
- 특성 : 비교적 좁은 각도의 짧은 화염
- 용도 : 소형 보일러용
- 분무각도 : 30~60°

## 연소계산

### 고체나 액체연료

#### 연료를 1 kg 연소할 경우

- 중량으로 계산한 이론 산소량(kg/kg)

$$\frac{32}{12}C + \frac{16}{2}\left(H - \frac{O}{8}\right) + \frac{32}{32}S$$
$$= 2.667C + 8\left(H - \frac{O}{8}\right) + S$$

- 부피로 계산한 이론산소량(m<sup>3</sup>/kg)

$$O_o = \frac{22.4}{12}C + \frac{11.2}{2}\left(H - \frac{O}{8}\right) + \frac{22.4}{32}S$$
$$= 1.867C + 5.6\left(H - \frac{O}{8}\right) + 0.7S$$

#### 실제 공기량 계산

- 실제 연소과정에서 필요한 공기량으로서 이론공기량보다 많음.
- 실제 상황에서 가연 성분이 공기 중의 산소와 원만히 접촉이 어렵기 때문에 추가적인 공기 필요.

$$A = mA_o \quad m = \frac{A}{A_o}$$

- 과잉공기는 될 수 있는 대로 적게 하여 연소.
- 과잉공기가 많아질 경우
  - 연소온도가 떨어짐
  - 열손실이 커짐
  - 불꽃이 짧아짐
  - 불완전연소 생성물이 적어짐

#### 공기비 공식

$$m = \frac{A}{A_o}$$
$$= \frac{21}{21 - O_2}$$
$$= 1 + \left( \frac{\text{excess air}}{A_o} \right)$$
$$= \frac{N_2}{N_2 - 3.76O_2}$$

## 가스량 계산

가스량은 4가지로 분류할 수 있음

$G_{od}$  : 이론 건연소 가스량 ( $m^3$ )

$G_{ow}$  : 이론 습연소 가스량( $m^3$ )

$G_d$  : 실제 건연소 가스량( $m^3$ )

$G_w$  : 실제 습연소 가스량( $m^3$ )

기체연료  $1m^3$  연소할 경우

$$G_{od} = (1 - 0.21)A_o + \Sigma product\ gas$$

$$G_{ow} = (1 - 0.21)A_o + \Sigma product\ gas$$

$$G_d = (m - 0.21)A_o + \Sigma product\ gas$$

$$G_w = (m - 0.21)A_o + \Sigma product\ gas$$

$$G_w = G_d + 1.244(9H + W)$$

## 발열량 계산

연료가 완전연소할 때 발생하는 열량을 발열량  
고위발열량( $H_h$ ), 저위발열량( $H_l$ )

고위발열량( $H_h$  : 총 발열량)

- 연료가 연소될 때 생성되는 총 발열량, 연소가스 중의 수증기의 응축잠열을 포함한 열량.
- 고위발열량은 발열량 측정기(Bomb calorimeter)로 측정
- 탄소수와 수소수가 많을수록 고위발열량이 커짐.

저위발열량( $H_l$  : 진발열량, net calorie)

- 총 발열량에서 수증기의 응축잠열을 뺀 값.
- 실제 반응기에서는 수증기가 응축되지 않고 기체로 날아가 버리므로 응축열을 제거해야함.

고위발열량, 저위발열량 계산식

고체나 액체연료의 경우

$$8100C + 34000\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2500S$$

$$H_l = H_h - 600(9H + W)$$

기체연료의 경우

$$H_l = H_h - 480\Sigma H_2O$$

여기서,  $\Sigma H_2O$  : 연료  $1m^3$  당 발생한 수증기량( $m^3$ )

## 공기연료비, 당량비

### 공기연료비(Air Fuel ratio : AFR)

- 연료가 산소와 반응하여 완전연소할 경우 그때 넣은 공기와 연료의 비율을 의미.
- 체적기준

$$\frac{Air(mole)}{Fuel(mole)} = \frac{O_2(mole)/0.21}{Fuel(mole)}$$

- 무게기준

$$\frac{Air(kg)}{Fuel(kg)} = \frac{O_2(kg)/0.233}{Fuel(kg)}$$

- AFR이 커지면 공기가 많아지므로 CO의 양이 적어지고 AFR이 적으면 공기가 적어지므로 CO의 양이 많아짐.
- AFR이 클 경우 과잉공기에 의해 연소온도가 감소되어 열 손실 증가.

$$\text{당량비}(\Phi : \text{Equivalent ratio}) = \frac{1}{m} \quad (m : \text{공기비})$$

$$\Phi = \frac{(A/F)_{ideal}}{(A/F)}$$

= 1 : 완전연소를 의미하며 이상적 연소형태

$\Phi > 1$  : 연료가 과잉인 상태 (CO 증가, NO 감소)

$\Phi < 1$  : 공기가 과잉인 상태 (CO 감소, NO 증가)

## 인화점

- 액체연료를 가열하여 증기가 발생하는 표면에 불씨를 갖다 대면 순간적으로 점화하는데 이때의 최저온도

## 착화점(발화온도, 자연발화온도)

- 연료를 계속해서 가열하였을 경우 점화원 없이도 자신의 연소열로 인하여 연소가 일어나는 최저온도
- 착화점이 낮은 연료일 경우 위험성이 큰 연료

- 분자구조가 복잡할수록
- 화학적으로 발열량이 클수록
- 화학결합의 활성도가 클수록
- 화학 반응성이 높을수록
- 산소 농도가 높을수록

→ 착화온도는 낮아짐.

## 배기가스 분석법 : 오르자트 분석법

- 오르자트 분석계를 이용하면 배기가스 중 CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>의 농도 측정 가능.

[가스]	[흡수액]
CO <sub>2</sub>	(물 + KOH 용액)
↓	
O <sub>2</sub>	(알칼리성 피롤카롤 용액)
↓	
CO	(암모니아성 염화 제1등 용액)
↓	
N <sub>2</sub>	(흡수액에 흡수하지 않고 계산으로 측정)

## 통풍 - 자연통풍

- 공기와 가스의 밀도차에 의해 발생하는 통풍
- 대략 15 mmH<sub>2</sub>O 정도로 적은 편.

$$\begin{aligned}
 & H(r - r_g) \\
 &= 273H \left( \frac{r_a}{273 + t_a} - \frac{r_g}{273 + t_g} \right) \\
 &= 355H \left( \frac{1}{273 + t_a} - \frac{1}{273 + t_g} \right)
 \end{aligned}$$

여기서,

$P$  : 통풍력 (mmH<sub>2</sub>O)

$r_a$  : 공기의 밀도, 외기의 밀도

$r_g$  : 가스의 밀도

$t_a$  : 외기의 온도 (°C)

$t_g$  : 가스의 온도 (°C)

$H$  : 굴뚝의 높이 (m)

- 굴뚝의 높이가 높을수록
- 가스의 온도가 높을수록
- 외기의 온도가 낮을수록(따라서 여름보다는 겨울이 유리)

→ 통풍력이 향상

## 노킹 현상

- 필요하지 않은 순간에 피스톤 엔진 내부에서 연소가 일어나 내부 금속 벽을 노크하는 듯한 소리가 나는 현상
- 불꽃진행거리를 짧게 하여 말단 가스가 고온 고압에 노출되는 시간을 짧게 해야함.
- 혼합기의 자기 착화온도를 높게 하여 자연발화를 방지
- 화염속도를 크게
- 말단 가스의 온도, 압력을 내림.
- 세탄가가 높은 디젤을 사용 = 옥탄가가 높은 연료 사용
- 연료의 분사량을 적게
- 기관의 압축비를 높임
- 급기 온도를 높임.

## 폭굉

- 연소의 전파속도가 음속을 초월하는 현상
- 연소의 진행에 앞서 충격파가 진행되어 심한 파괴작용이 일어남
- 정상적인 연소속도가 큰 혼합가스인 경우 폭굉유도 거리는 짧아짐
- 관 속에 방해물이 없거나 관내경이 굵을수록 폭굉유도 거리는 길어짐

## 저온부식

- 150 °C 이하의 전열면에 응축하는 산성염에 의해 발생
- 방지 대책
  - 내산성이 있는 금속재료의 선정,
  - 금속표면에 피복, 보온시공, 예열공기 사용,
  - 연소가스 온도를 산노점 이상으로 유지

## 폭발성 혼합가스의 연소범위

$$100 \\ p_1 + \frac{p_2}{n_2} + \frac{p_3}{n_3} \dots$$

여기서,

$p_n$  : 각 성분 가스의 체적(%)

$n_n$  : 각 성분 단일의 연소한계(상한 또는 하한)

## 보염기(flame holder)

- 공기 유동에 대해 소용돌이를 발생시켜 화염의 순환영역을 만들어 화염을 안정화.
- 공기유동에 대해 연료를 역방향으로 분사하고 국부공기유속을 화염전파속도보다 작게 함.
  - 원추형 보염기 : 원추의 가장자리에서 말려들게 한 소용돌이에 의해 보염작용
  - 축류 보염기 : 날개 후방에서 생기는 소용돌이와 후류 중심부 부압에 대항한 소용돌이에 의해 보염작용

## Thermal NO<sub>x</sub> 억제 방법

### 희박예혼합연소

- NO<sub>x</sub> 발생 온도를 현저히 낮추어(1800 K 이하) prompt NO<sub>x</sub> 발생을 억제하는 방법.

### 화염형상의 변경

- 화염을 분할하거나 막상으로 얇게 늘려서 열손실을 증대

### 완만혼합

- 연료와 공기의 혼합을 완만하게 하여 연소를 길게 함으로써 화염온도의 상승을 억제

### 배기재순환

- 팬을 써서 굴뚝가스를 로의 상부에 피드백시켜 최고 화염온도와 산소농도를 억제시킴.

### 2단 연소

- 연료를 2단으로 연소(1단에서는 fuel rich하게 태우고 2단에서 나머지 공기로 연소)