



Organic Waste Treatment and Composting

Chapter 7. 폐기물의 연소 (2)

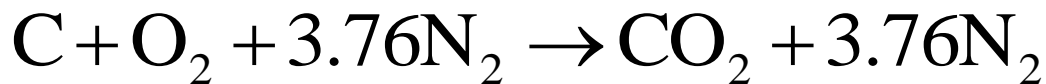
박 성 직



1. 연소계산

- 최대 탄산가스량 $(\text{CO}_2)_{\max}$

- 공기를 충분히 송입하여 연소가 양호해지면 $(\text{CO}_2)\%$ 상승.
- 유입되는 공기가 이론량을 초과하면 연소가스 중에 과잉공기가 들어가기 때문에 $(\text{CO}_2)\%$ 는 감소
- 연료에 부여하는 공기량이 부족에서 최적량에 과잉되는 단계로 진행됨에 따라 $(\text{CO}_2)\%$ 는 상승, 최대, 하강
- 이상적인 연소를 위해서는 $(\text{CO}_2)\%$ 가 최대가 되도록 연소를 조절



$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{(\text{CO}_2)}{(\text{CO}_2) + (\text{N}_2)} \times 100 \%$$

- 연료가 이론공기량으로 완전연소한다고 가정할 경우, **이론건조 연소가스 중 CO_2 의 부피분율**(용량%)을 최대 탄산가스량이라고 하고 $(\text{CO}_2)_{\max} \%$ 로 표시



1. 연소계산

① 고체 및 액체 연료의 경우

$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{1.867C}{G_o'} \times 100 \div \frac{187C}{G_o'}$$

보통의 분석법으로는 (SO₂)도 KOH 용액에 흡수되므로

$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{1.867C + 0.7S}{G_o'} \times 100$$

② 기체 연료의 경우

$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{(\text{CO}) + (\text{CO}_2) + (\text{CH}_4) + 2(\text{C}_2\text{H}_4) + x(\text{C}_x\text{H}_y)}{G_o'} \times 100\%$$

③ 완전 연소일 경우

$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{(\text{CO}_2) \times 100}{100 - \frac{(\text{O}_2)}{0.21}} = \frac{21(\text{CO}_2)}{21 - (\text{O}_2)}$$



1. 연소계산

④ 불완전 연소일 경우

$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{21[(\text{CO}_2) + (\text{CO})]}{21 - (\text{O}_2) + 0.395(\text{CO})}$$

⑤ 공기비와 $(\text{CO}_2)_{\max}$ %의 관계

- 완전연소시 : $\frac{21}{21 - (\text{O}_2)} \doteq m, \quad m \doteq \frac{(\text{CO}_2)_{\max} \%}{(\text{CO}_2) \%}$

- 불완전연소시 : $m = \frac{21(\text{N}_2)}{21(\text{N}_2) - 79[\text{O}_2 - 0.5(\text{CO})]} \doteq \frac{(\text{N}_2)}{(\text{N}_2) - 3.76(\text{O}_2)}$



1. 연소계산

- 예16) 일산화탄소의 최대 탄산가스량은 얼마인가?



1. 연소계산

- 예17) 공기를 사용하여 C_3H_8 를 연소시킬 때 건조가스 중의 $CO_{2max}\%$ 를 구하라.



1. 연소계산

- 발열량이란?

- 연료의 단위량 (기체 연료에서는 1Sm^3 , 고체 연료와 액체 연료는 1kg)이 완전 연소 할때 발생하는 열량(kcal)
- 쓰레기 발열량은 소각로를 설계할 때 가장 기본이 되는 쓰레기의 질적 특성으로, 쓰레기 1kg 을 완전히 연소할 때 발생하는 열량(kcal)
- 단위: 고체 및 액체 연료일 경우 kcal/kg 이고, 기체 연료인 경우는 kcal/Sm^3 을 사용



1. 연소계산

- 고위발열량

- 열량계로 측정되는 열량. 총발열량이라고 하고 H_h 로 표시.
- 이것은 연료 중의 수분 및 연소에 의해 생성된 수분의 응축열 (일명 증발잠열: H_s)을 포함한 열량

- 저위발열량

- 실제 연소에서는 연소 배출가스 중의 수분은 보통 수증기(과열) 상태로 배출되기 때문에 응축열은 이용 불가능한 경우가 많으므로 고위발열량에서 응축열을 공제한 잔여 열량이 유효하게 이용되는데 이것을 저위발열량(H_l)이라고 지칭
- 진발열량 또는 순발열량이라고도 함

$$H_h = H_l + H_s$$



1. 연소계산

— 증발잠열

- H_s 는 수증기의 증발잠열로 0°C 기준으로 하면,
- $H_s = 597 \div 600 \text{ kcal/kg}$ (물)
- $H_s = 597 \times 18 / 22.4 \div 480 \text{ kcal/Sm}^3$ (수증기)

표 5-8 물의 증발잠열(응축열) [kcal/kg]

0°C	$597 \div 600$
10°C	592
15°C	589
20°C	586
25°C	583
100°C	539



1. 연소계산

- 발열량의 산정 방식

- ① 단열 열량계에 의한 방법
- ② 추정식에 의한 방법 (물리적 조성에 의한 방법 포함)
- ③ 물리적 조성에 의한 방법
- ④ 원소분석에 의한 방법



1. 연소계산

① 단열 열량계에 의한 방법

- 고체 및 액체 연료의 경우에는 봄브식 열량계(bomb calorimeter)를 이용하고, 기체연료의 경우는 용겔스식 열량계를 이용하여 측정
- 폐기물은 주로 봄브식 열량계를 사용하는데 용기 내의 연소열에 의한 반응용기를 감싸고 있는 수조의 수온이 상승하는 것을 측정하여 발열량 결정
- 결정 방법: 건조된 쓰레기를 2mm 이하로 분쇄한 후 일정량을 취하여 단일 열량계로써 발열량을 측정. 이때 분쇄하는 과정에서 약간의 수분이 다시 흡수, 함유(약1~4%)되므로 측정된 발열량은 기건식이 됨. 따라서 측정할 시료의 수분함량을 다시 측정하여 보정하여 줌으로써 정확한 건식의 발열량을 얻음



1. 연소계산

$$\text{건조쓰레기의 발열량(kcal/kg)} = \frac{\sum C_i E_i}{\sum C_i}$$

C_i : 조성 i 의 가연분 조성 (%)

E_i : 조성 i 의 열량계 발열량(kcal/kg)

$$\text{생쓰레기의 발열량(kcal/kg)} = \frac{\sum A_i F_i}{\sum A_i}$$

A_i : 조성 i 의 회분 조성 (%)

F_i : 조성 i 의 습식 발열량(kcal/kg)

$= (\text{건조쓰레기 발열량}) \times (100 - \text{수분함량 } \%) / 100$



1. 연소계산

- 발열량 계산 (기체, 기준 1 Sm³)

$$H_l = H_h - 480[(H_2) + 2(CH_4) + \Lambda \Lambda + \frac{y}{2}(C_xH_y)] \text{kcal/Sm}^3$$

수증기 1Sm³당 응축열
= 597 × 18 / 22.4
= 480 [kcal/m³]



1 부피

1 부피



1 부피

2 부피



1 부피

2 부피



1 부피

$\frac{y}{2}$ 부피



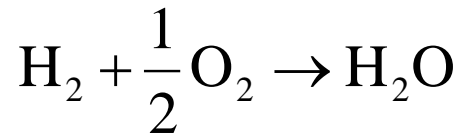
1. 연소계산

- 예) 메탄의 고위발열량이 $9,500 \text{ [kcal/Sm}^3\text{]}$ 이면 저위발열량은?



1. 연소계산

– 발열량 계산 (액체 및 고체, 기준 1Sm³)



$$2\text{kg} \rightarrow 18\text{kg} = \frac{18}{2}\text{H} = 9\text{H}$$

- 연료 중 수소와 수분의 중량분을 각각 H, W로 하면 연료 1kg 당 9H+W (kg)의 H₂O가 생성
- 물 1kg의 증발잠열(=응축열)은 약 600kcal이기 때문에 다음 식이 성립

$$H_1 = H_h - 600(9H + W) \text{ [kcal/kg]}$$



1. 연소계산

- 예) 수소 12.0%, 수분 0.3%인 중유의 고위발열량이 10,600 [kcal/kg]일 때, 저위발열량을 구하라.



1. 연소계산

② 추정식에 의한 방법

- 쓰레기의 저위발열량은 소위 **쓰레기의 3성분(가연분, 수분, 회분)의 조성비**를 바탕으로 다음 식에 의하여 추정

$$H_h = 4,500 \times V$$

$$H_l = 4,500 \times V - 600 \times W$$

- V: 쓰레기 중 가연분의 조성비 (%)
- W: 쓰레기 중 수분함량의 조성비 (%)
- 저위발열량의 간이식으로 가연분, 수분 및 회분의 분석치를 이용함으로써 시간이나 인력을 절약할 수 있는 방식
- 쓰레기 자체가 불균일성 물질이고 수분을 50% 이상 함유하고 있는 경우에는 상당한 오차가 발생할 수 있는 문제점 발생



1. 연소계산

③ 물리적 조성에 의한 방법

– 폐기물 중의 물리적 조성(종이, 플라스틱, 진개 등)으로부터 열량을 산출하는 방법

$$H_h = (4500V_1 + 8000V_2) \text{ [kcal/kg]}$$

$$H_1 = (4500V_1 + 8000V_2) - 600W \text{ [kcal/kg]}$$

- V_1 : 플라스틱 이외의 가연분 중량비 (건조기준, %)
- V_2 : 팔르스틱류의 중량비 (건조기준, %)
- W : 수분함량 (%)



1. 연소계산

– 폐기물 중의 플라스틱, 부엌쓰레기 함량에 따른 추정 방법

$$H_h = 8820R + 4050(G + P)[kcal / kg]$$

$$H_l = 8820R + 4050(G + P) - 600W[kcal / kg]$$

- R: 플라스틱 함량 (건조기준, %)
- G: 부엌쓰레기 함량 (건조기준, %)
- W: 수분함량(%)



1. 연소계산

④ 원소분석에 의한 방법

– **듀롱(Dulong)**의 식: 전체 수소 중 유효발열수소($H - O/8$)을 고려한 식

$$H_h = 8100C + 34250 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2250S [kcal / kg]$$

$$H_l = H_h - 600(9H + W) [kcal / kg]$$

- 여기서, C: 탄소(%), H: 수소(%), O: 산소(%), S: 황(%), W: 수분(%)



1. 연소계산

- 스투어(Steuer)의 식: 산소의 1/2이 CO, 나머지 1/2가 H₂O로 존재하는 것으로 가정

$$H_l = 8100 \left(C - \frac{3}{8} O \right) + 5700 \left(\frac{3}{8} O \right) + 34250 \left(H - \frac{1}{2} \cdot \frac{O}{8} \right) + 2500S - 600(9H + W) [kcal / kg]$$

- 쉴레-케스트너(Scheurer-Kestner)의 식: 산소가 CO로 존재한다고 가정한 경우

$$H_l = 8100 \left(C - \frac{3}{4} O \right) + 5700 \left(\frac{3}{4} O \right) + 34250H + 2250S - 600(9H + W) [kcal / kg]$$



1. 연소계산

– 기타 원소 조성에 의한 저위발열량 추정식

- Kunle

$$8100C + 34000(H - O + N/8) + 2250S - 600(9H + W)$$

- Mahler

$$8140C + 34500H - 3000(O + N)$$

- Gumz

$$8130C + 2970H + 1500N + 450S - 2350D(\text{가연분의 함량}) - 600(9H + W)$$



1. 연소계산

• 타는 성분의 발열량 (완전연소의 경우)

타는 성분	화학식	발열량(kcal/kg)		발열량(kcal/Sm ³)	
		H _h	H _l	H _h	H _l
탄 소 수 소 황	C	8,100	8,100	-	-
	H	3,400	2,860	3,050	2,570
	S	2,500	2,500	-	-
일산화탄소 메 탄	CO	2,430	2,430	3,035	3,035
	CH ₄	13,320	11,970	9,530	8,570
에 탄	C ₂ H ₆	12,410	11,330	16,820	15,380
프로판	C ₃ H ₈	12,040	11,070	24,370	22,350
부 탄	C ₄ H ₁₀	11,840	10,920	32,010	29,610
아세틸렌	C ₂ H ₂	12,030	11,620	14,080	13,600
에틸렌	C ₂ H ₄	12,130	11,360	15,280	14,320
프로필렌	C ₃ H ₆	11,770	11,000	22,540	21,070
부틸렌	C ₄ H ₈	11,630	10,860	29,110	27,190
벤졸증기	C ₆ H ₆	10,030	9,620	34,960	33,520



1. 연소계산

- 예) 폐기물의 함수율이 25%이고, 건조기준으로 연소 성분 및 열량계를 이용한 열량은 다음과 같다. 이 폐기물의 저위 발열량을 구하면? (단, C:55%, H: 18%, 발열량: 2,800Kcal/Kg이다)



1. 연소계산

- 예) 폐기물의 분석한 결과 수분 20%, 회분 15%, 고정탄소 25 %, 휘발분 40 %이고, 휘발분을 운소 분석한 결과 수소 20 %, 황 5 %, 산소 25 %, 탄소 50 %이었다. 이 때 이 폐기물의 고위 발열량은 얼마인가?

(단, 고위 발열량 = $8,100C + 34,000(H - \frac{O}{8}) + 2,500S$)



1. 연소계산

- 예) 어느 폐기물을 연소 처리하고자 한다. 함유성분이 다음과 같을때 폐기물의 고위 발열량은? (단, 함유율:29%, 불활성분:14 %, 탄소:26 %, 수소:6 %, 산소:24 %, 유황:1 %, Dulong식 사용)



1. 연소계산

- 예) 가연분 함량 30%(무게기준)인 어떤 폐기물의 현재 저위 발열량이 990kcal/kg 이다. 수분함량(무게기준)은? (단, 삼성분의 조성비를 통한 발열량 계산 기준)



1. 연소계산

- 최고 연소 속도

- 기벽의 영향이 없는 상태에서 대량의 가연 혼합물 중 화염전파속도를 지칭. 기체 연료의 연소속도는 1차 공기의 혼합비에 따라서 다름
- 이론 혼합비 정도일 때 최고 연소 속도
 - H_2 : 292cm/sec, CH_4 : 37cm/sec, C_2H_6 : 44cm/sec, CO : 43cm/sec, C_3H_8 : 43cm/sec



1. 연소계산

- 이론연소온도

- 단위량의 연료 (1kg, 1 Sm³)를 이론공기량으로 연소시킬 때, 연소가스가 도달하는 이론상 최고 온도

$$H_l = G_0 C_P (t_2 - t_1)$$

$$t_2 = \frac{H_l}{G_0 C_P} + t_1$$

H_l : 저위 발열량 [kcal/Sm³]

G_0 : 이론 연소가스량 [m³/Sm³]

C_p : 연소가스량의 평균 정압 비열 [kcal/Sm³°C]

t_1 : 실제 온도 [°C]

t_2 : 이론온도 [°C]



1. 연소계산

- 예22) 저위발열량이 $7,000 \text{ kcal/Sm}^3$ 의 가스연료의 이론연소 온도는 몇 $^{\circ}\text{C}$ 인가?



1. 연소계산

- 예23) 메탄의 이론연소온도를 구하여라. 단, 메탄과 공기도 18°C 에서 공급되는 것으로 한다. 또한, CO_2 , $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$, N_2 의 평균정압 몰비열(상온 ~ $2,100^{\circ}\text{C}$)은 각각 13.1, 10.5, 8.0 [$\text{kcal}/\text{kmol}^{\circ}\text{C}$]이다. 단, 메탄의 저위발열량 $H_1 \doteq 8,600[\text{kcal}/\text{Sm}^3]$



1. 연소계산

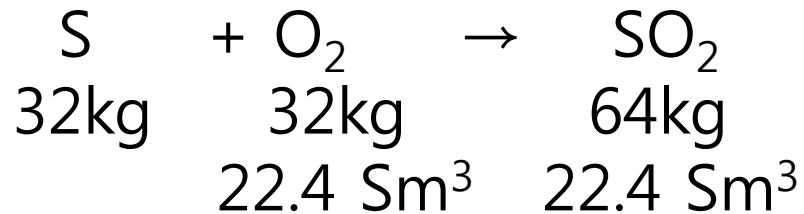
- 완전 연소와 불완전 연소의 생성물
 - 완전 연소: 탄소와 수소가 완전 연소하면 각각 CO_2 와 H_2O 생성
 - 불완전 연소: 검댕, CO , H_2 , 또는 CH_4
- 배출가스 분석
 - 보통 CO_2 , SO_2 , CO , O , N_2 등으로 구성
 - 배출 가스 분석에 사용되는 오르자트 분석 장치는 CO_2 를 흡수할 때에 SO_2 도 동시에 흡수하기 때문에 겉보기에 의한 CO_2 로 간주.
 - 보통의 측정은 CO_2 , CO , O_2 를 실측하고 나머지는 N_2 로 간주
 - SO_2 농도는 보통의 가스 분석 장치로서는 실측하지 못하고, 연료의 원소 조성을 통하여 그 양을 구할 수 있음



1. 연소계산

- 연소가스 중 오염성분의 농도계산

- 황화물의 생성량을 구하는 계산



- SO₂ 생성량

- 무게비: $64/32 \text{ S}=2\text{S}$ (kg/kg연료)

- 부피비: $22.4/32 \text{ S}=0.7 \text{ S}$ (Sm³/kg연료)



1. 연소계산

- 예24) 탄소, 수소, 황의 중량%가 각각 85%, 12%, 3%인 중유를 과잉공기계수 1.2로 완전연소시킬 때 습윤연소가스 중 SO_2 의 부피 %는 얼마인가?



1. 연소계산

- 예25) 탄소 84 %, 수소 13.0 %, 황 2.0 %, 질소 1.0 %의 중유 1 kg당 15 Sm³의 공기로 완전 연소시킬 경우, 습윤배기가스 중의 황산화물은 부피 분율로 몇 ppm인가?



1. 연소계산

- 예26) 황화수소 0.5 %를 포함하는 메탄가스를 과잉공기계수 1.05로 연소하면 건조연소 가스 중 이산화황은 몇ppm인가?



1. 연소계산

- 중유연소시 SO_2 의 농도계산

- Rosin 식 사용: 액체 연료에 있어서 이론공기량 A_o , 이론 연소 가스량 G_o 를 구하는 근사식

$$A_o = \frac{0.85H_l}{1,000} + 2 \quad [\text{Sm}^3/\text{kg}],$$

$$G_o = \frac{1.11H_l}{1,000} \quad [\text{Sm}^3/\text{kg}]$$

- H_l 은 저위 발열량 [kca/kg]이며, 중유의 경우는 $H_l \doteq 10,000$ [kcal/kg]



1. 연소계산

- 예27) 황 2 %를 포함하는 저위발열량 $10,000 \text{ kcal/kg}$ 의 액체연료를 과잉공기계수 1.2로 완전연소시킬 때 습윤연소 가스 중의 황산화물의 농도는 얼마인가?



1. 연소계산

- 예28) 탄소 85 %, 수소 13 %, 황 2 %의 중유를 과잉공기계수 1.2로 연소시킬 때 건조 배기가스 중의 이산화황의 부피분율은 얼마인가?



1. 연소계산

– 보상계-사툰식에 의한 황 배출량의 표시법

- 황산화물의 허용배출량(보상계 사툰의 식)

$$q = K \times 10^{-3} H_e^2 \text{ [Sm}^3/\text{h]}$$

q : 황산화물의 허용배출량[Sm³/h]

K : 지역에 따라 정해지는 값(황산화물의 배출기준)

H_e : 유효 굴뚝의 높이, 굴뚝의 부상효과에 의한 보정을 한 배출구의 높이(m)

- 황산화물의 배출량

$$Q = 0.0067 \times S \times W \text{ [Sm}^3/\text{h]}$$

Q : 황산화물의 배출량 [Sm³/h]

S : 중유 중 황함유율 [%]

W : 연료 사용량 [L/h]



1. 연소계산

- 예29) 서울의 황산화물의 배출기준 K 값은 3.5로 정해져 있다. 지금 $H_e=100[m]$ 의 굴뚝을 가진 시설에서 중유가 5 kL/h의 윗으로 연소될 경우, 연료 중의 황분의 함유율은 몇 %이하의 것을 사용하지 않으면 안 되겠는가?



1. 연소계산

- 예30) 황산화물 배출의 K의 값이 11.7의 지역에서 다음 시설 중 개선을 필요로 하는 것은 어느 것인가?



1. 연소계산

- 예31) K값이 6.42의 지역에서 황분 2%의 중유를 매시 1kL 사용하는 보일러의 유효굴뚝높이는 몇 m가 되지 않으면 안 되겠는가?



1. 연소계산

- 연소실 열발생율 [$\text{kcal}/\text{m}^3/\text{h}$]
 - 연소실의 단위 부피당 단위시간에 발생하는 열량
 - 연소실 열부하 또는 단순히 열부하라고도 함
 - 연소 속도, 로의 크기, 로재의 내열도, 연료의 종류, 버너의 형식 등에 따라 다름.
- 화격자 연소율 [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$]
 - 석탄연소로에서 화격자의 단위 넓이당 단위시간에 연소하는 석탄의 중량



1. 연소계산

- 예32) 가로 1.2 m, 세로 2.0 m, 높이 11.5 m의 연소실에서 저위발열량 10000[kcal/kg]의 중유를 1시간에 100 kg 연소한다. 연소실 열발생률은 얼마인가?



1. 연소계산

- 예33) 중유 300 kg/h를 과잉공기계수 1.2로 연소시키는 연소실이 있다. 이 연소실의 공기의 온도를 220℃로 올리면 연소실 열발생률은 상온의 공기(20℃)의 경우보다도 몇% 증가하겠는가? 단, 중유의 저위발열량은 10,000 kcal/kg, 이론공기량은 10 Sm³/kg, 공기의 평균비열은 0.31 kcal/Sm³이라 한다.