

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3008)

Final exam (*Open Books, Notes and Handouts*)

Hour: 10:00 ~ 12:00 am

Date: 19 December 2001

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I cannot do give *any* credit if you do not write *anything that should be concerned with this class*. Be careful with mathematics and units!

(10 pt) 1. Evaporation rates of hydrocarbon liquids from horizontal homogeneous surfaces are estimated to be approximately

$$0.53 \left(\frac{p}{P} \right) \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

in which p is the vapor pressure of the liquid and P is the atmospheric pressure.

- (a) A 0.53-mm layer of lubricating oil on a metal drip pan has been spilled on a metal drip pan, and its density and molecular weight are 1.12 g/cm^3 and 415 g/mol , respectively. Its vapor pressure is ca. $1.2 \times 10^{-7} \text{ Torr}$ at 20°C . How long does it take all of this lubricant to completely evaporate at the temperature. (*Hint: Use Raoult's law.*)
- (b) Repeat the calculation for a 0.53-mm layer of gasoline whose density, molecular weight and vapor pressure at the temperature are 0.75 g/cm^3 , 60 g/mol and 6 psia , respectively.

(10 pt) 2. Selective catalytic reduction (SCR) technology has been widely accepted to be the most promise approach for removing NO_x using reductants, representatively NH_3 and hydrocarbons, over appropriate catalysts. Write a typical catalyst and reactor type being used for this technology.

(30 pt) 3. A flue gas stream contains dust that consists of particles with a diameter (d_p) of 0.1, 0.5, 2, 7, 10, 20 and 30 μm . Its average density (ρ_p) and loading (L_d) in the gas stream at a temperature of 80°C are around 1.70 g/cm³ and 31.64 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$. The gas stream is first introduced into a pencil cyclone, that has the width of $W_i = 12.0$ cm, the circular gas flow velocity of $V_c = 15.0$ m/s and the spiral number of $N = 4$, to be processed. That gas flow would be assumed to be air with its viscosity of $\mu_a = 2.14$ poise at the temperature.

- (a) Calculate the collection efficiency for the 2- μm particle using a mixed flow model.
- (b) Which one is the cut diameter for the cyclone, applying the same model.
- (c) After processing the gas stream in the high performance cyclone with a collecting efficiency of 87%, it flows through a shake-deflate bag filter system to collect smaller particles still remained. The system with 4 units is operated to further clean the flue gas with a flow rate of 1860 m³/min at 80°C. Each unit has 100 bag filters whose dimension is a 70-cm diameter and 7.0-m length. Compute an air-to-cloth ratio for this baghouse system.
- (d) Calculate the total amount of dust removed in the system, assuming a 99.95-% collection and 5.4-h operating and then cleaning for a short period.
- (e) The difference in pressure between the contaminated gas stream and the clean one is about 13.75 cm H₂O after operating the baghouse for 5.4 h. Estimate the permeability of the dust layer on the filter surface as expressed in Darcy. The bulk density of the dust cake formed is measured to be 1.28 g/cm³, and the pressure drop through a fresh baghouse system is shown to be approximately 1.55 cm H₂O.

(10 pt) 4. Give the state-of-the-art technology that is currently the most plausible one for reducing SO_x and NO_x from stationary sources, *i.e.*, power plants and industrial boilers.

(10 pt) 5. There are various fundamental ways of lowering the formation of NO_x in boilers, heaters, and waste combustors: (i) regulating the overall fuel/air ratio supplied - Low Excess Air (LEA), (ii) gross staging of combustion - Low NO_x Burners (LNB), Overfire Air (OFA), Burners Out of Service, Derating, Reburning, (iii) introduction of heat absorbing inerts – Flue Gas Recirculation (FGR), and others –Low Air Preheating, Fluidized-Bed Combustion (FBC), etc. What are the ultimate strategies to accomplish using the above combustion controls?

(10 pt) 6. Describe possible approaches to remove sulfur compounds from: (a) petroleums and natural gases; (b) smelting processes of metal sulfide ores.

(20 pt) 7. A contaminated gas stream from a coal-fired power plant is treated through an electrostatic precipitator (ESP) consisting of 67 parallel plates. The gas with a volumetric flow rate (Q) of 1,800 m³/min at 160°C passes between the plates whose interval is 23 cm. The ESP uses a voltage difference of 45 kV and the average velocity of the gas passing through the ESP is about 0.33 m/s.

- (a) Compute the drifting velocity for a 0.3- μm average diameter of particles. The gas viscosity (μ_g) is $2.48 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ at 160°C , the dielectric constant (ϵ) is 4 for the particle, and the permittivity (ϵ_0) of free space is $8.85 \times 10^{-12} \text{ C/V}\cdot\text{m}$. ($1 \text{ V}\cdot\text{C} = 1 \text{ N}\cdot\text{m} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)
- (b) Determine the length of collecting plates to obtain a 99.9-% efficiency for the particle in the ESP, assuming a mixed flow model. What is your comment(s) on this calculation? (*Hint: Calculate first the collecting area (A) equal to Lh , and the total number of unit plate surface is given by $2(n - 1)$ in which n is the number of total plates.*)

Good luck on all your works to answer the questions.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3274)

Final exam.

Hour: 1:00 ~ 3:00 pm

Date: 18 December 2002

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. ***Show all your work!*** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something you learned in this class, if you do want to get a partial credit although it is just one point. Be careful with mathematics and units!

(20 pt) 1. 어떤 석탄화력발전소(coal-fired power plant)에서 23% 과잉공기로 역청탄(bituminous coal)을 태우고 있다. 이 보일러에서 발생하는 다량의 NO 를 후처리기술(aftertreatment technology)로 제거하기에 앞서서, 적합하고도 적절한 예연제어(precombustion control) 기법을 사용함으로써 배출될 수 있는 NO 를 현저히 낮출 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이러한 예측의 타당성을 검토하기 위한 하나의 유효한 접근방법은 다음에 주어진 NO 생성반응에 대한 열역학적 특성을 고려함으로써 석탄 연소반응 동안에 NO 생성에 절대적인 영향을 미치는 주요 인자들이 무엇인지를 파악하는 것이다:



원하는 반응온도에서 반응 (1)에 대한 평형상수(equilibrium constant)는 식 (2)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서, K 는 1 atm 에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 반응 (1)에 대한 평형상수 값들이 아래의 표에 주어져 있다. 반응온도가 500, 2,000 및 3,000 K 일 때, 반응 (1)의 평형상수 값을 계산하여 주어진 표를

완성하시오. 단, 500, 2,000 및 3,000K 에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 각각 20.095, 15.548 및 12.589 kcal/mol 이다.

Temperature (K)	Equilibrium constant
300	7×10^{-31}
500	
1000	7.5×10^{-9}
1500	1.1×10^{-5}
2000	
2500	0.0035
3000	
4000	0.0888

- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스를 분석한 결과, 아래와 같은 조성을 얻을 수 있었다.

Constituent	Concentration (%)
CO ₂	13.9
H ₂ O	7.6
N ₂	74.7
O ₂	3.7
SO ₂	
NO	

보일러의 운전온도가 2,000 및 3,000 K 일 때, 생성될 수 있는 NO 의 최고농도를 계산하시오.

- (3) 보일러 내의 최고 화염온도인 3,000 K 에서 배기가스가 0.0001 s 동안 머무를 때, 생성 가능한 NO 의 농도를 계산하시오. 단, 보일러 내에서 배기가스의 체류시간에 따른 NO 농도의 변화는 다음 식으로 표현되고,

$$\frac{d[NO]}{dt} = k\{([NO]_e - [NO])([NO]_e + [NO])\},$$

여기서 $k = 2.24 \times 10^{10} / s$ 이다.

- (4) 최고 화염온도인 3,000 K 에서 생성되는 NO 의 농도가 평형농도의 약 95%에 도달하는 데 걸리는 시간을 계산하시오.

(20 pt) 2. 다음 각 항을 간략히 기술하시오.

(1) 열적 NO (Thermal NO)– 연료 NO (Fuel NO)

(2) FGR (Flue Gas Recirculation)

(3) 공기여재비 (Air-to-cloth)

(4) RVP (Reid vapor pressure)

(20 pt) 3. 어떤 배출시설에서 발생하는 배기가스 내에 함유된 구형 입자의 평균직경이 3.2μ 인 입자상 물질의 농도가 50 g/m^3 , 배기가스의 유량이 $4,320 \text{ m}^3/\text{h}$, 배기가스의 점성도 (μ)가 $1.74 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ 일 때, 길이가 5 m 이고 높이가 4.6 m 인 집진판이 24 cm 간격으로 설치된 전기 집진기 (Electrostatic Precipitator, ESP)를 사용하여 배출허용기준 이하로 제진하고자 한다.

(1) 위에 주어진 입자상 물질의 물리적인 특성에 기초할 때, 확산하전 (Diffusion charging)과 전기장 하전 (Electric field charging) 중에 어느 하전 메커니즘이 지배적으로 작용하는지를 서술하시오.

(2) (1)의 결론으로부터, 입자표면에 하전된 전하량은 다음식으로 표현된다:

$$q = 3\pi \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \varepsilon_o d_p^2 E_o$$

여기서, q = 입자의 전하량, ε = 입자의 유전상수, ε_o = 진공에서 유전도 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ C/V.m}$), d_p = 입자직경, E_o = 방전극의 전기장 세기이다. 입자 위에 작용하는 정전기력 (F)은 qE_p 이고, 여기서 E_p 는 집진극의 전기장 세기이다. 이때, 이러한 전기장 내에서 입자의 표류속도 (Drifting velocity), w 를 유도하시오.

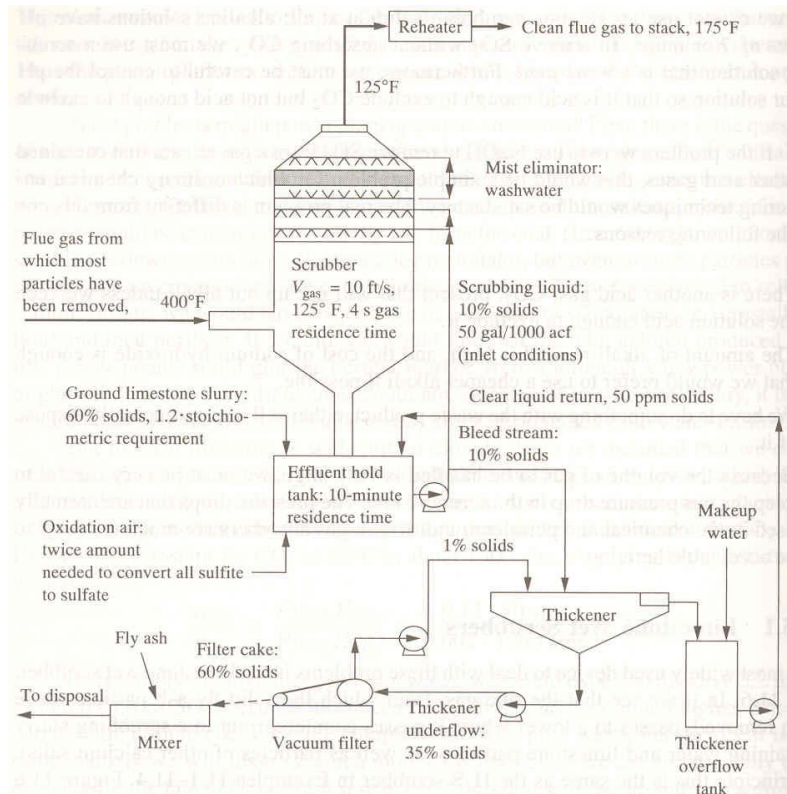
$$(Ans.: w = \frac{\varepsilon_o d_p \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) E_o E_p}{\mu})$$

(3) 이 ESP 의 집진효율을 계산하시오. 단, 집진극과 방전극의 전기장 세기는 $6.0 \times 10^5 \text{ V/m}$ 로 같다고 가정하고, 입자의 유전상수는 4 이다. 참고로, $1 \text{ N.m} = 1 \text{ V.C}$ 이다.

(4) ESP 의 집진효율은 집진판에 집진된 분진의 두께가 증가하면 배기가스 흐름쪽으로 재분산되기 쉬워서 집진율이 떨어지므로, 이를 방지하기 위하여 일정 시간 동안 집진한 후에 집진된 먼지를 제거하여야 한다. 이 ESP 의 경우에 집진판의 먼지층 두께가 1.25 cm 일 때 래퍼 (Rapper)로 제거한다면, 몇 시간마다 래퍼로 제거하여야 하는지를 계산하시오. 단, 분진의 밀도는 2.2 g/cm^3 이다.

(10 pt) 4. 휘발성유기화합물의 배출저감기술들 중에서 흡수 및 촉매연소기술에 대하여 간략히 서술하시오.

(15 pt) 5. 아래의 그림은 석탄화력발전소에서 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되어지는 석회석 세정공정 (Limestone scrubbing process)을 보여주고 있다.



- (1) 주어진 그림의 공정을 중심으로 이 기술을 개략적으로 설명하시오.
- (2) 세정기 내에서 세정액으로 공급되는 석회 슬러리와 배기가스 내에 함유된 SO₂ 간에 일어나는 반응을 쓰시오. 단, 세정기 내에서 양론비로 반응이 일어나고, 저류조에 도달하는 초기에 고상 부산물을 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다.
- (3) 이 석탄화력발전소에서 배출되는 배기가스의 유량은 1,699,000 Nm³/h 이고, 황산화물의 농도는 2,720 ppm 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 6% O₂ 기준으로 150 ppm SO₂ 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO₂ 로 존재한다고 가정하고, Ca 의 분자량은 40.08 이다.

Good luck on all your works.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3265)

Final exam.

Hour: 11:00 ~ 1:00 pm

Date: 9 December 2003

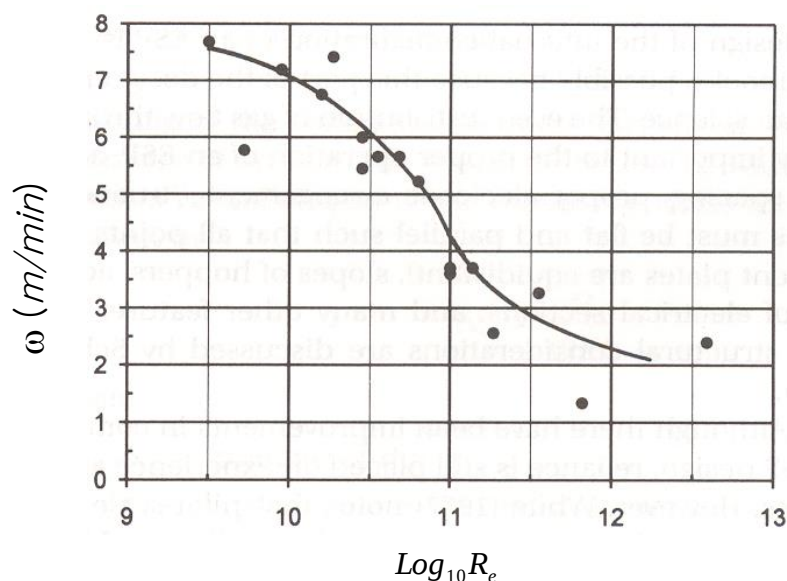
Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something you learned in this class, if you do want to get a partial credit although it is just one point. Be careful with mathematics and units!

(30 pt) 1. 어떤 시멘트 제조공장의 시멘트 킬른으로부터 배출되는 분진을 전기집진기로 제거하여 배출허용기준을 만족시키고자 한다. $5,000 \text{ mg}/\text{Sm}^3$ 의 시멘트 분진이 함유된 배출가스의 유량은 $480,000 \text{ Sm}^3/\text{h}$ 이고, 표준조건에서 산소농도 13% 기준으로 이 산업체의 배출허용기준은 $50 \text{ mg}/\text{Sm}^3$ 이다. 이 시멘트 분진의 전기저항도 (R_e)는 $1.0 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 이며, 이 분진의 전기저항도와 유효 표류속도 (effective drift velocity, ω)간의 관계는 다음 그림으로 나타난다.



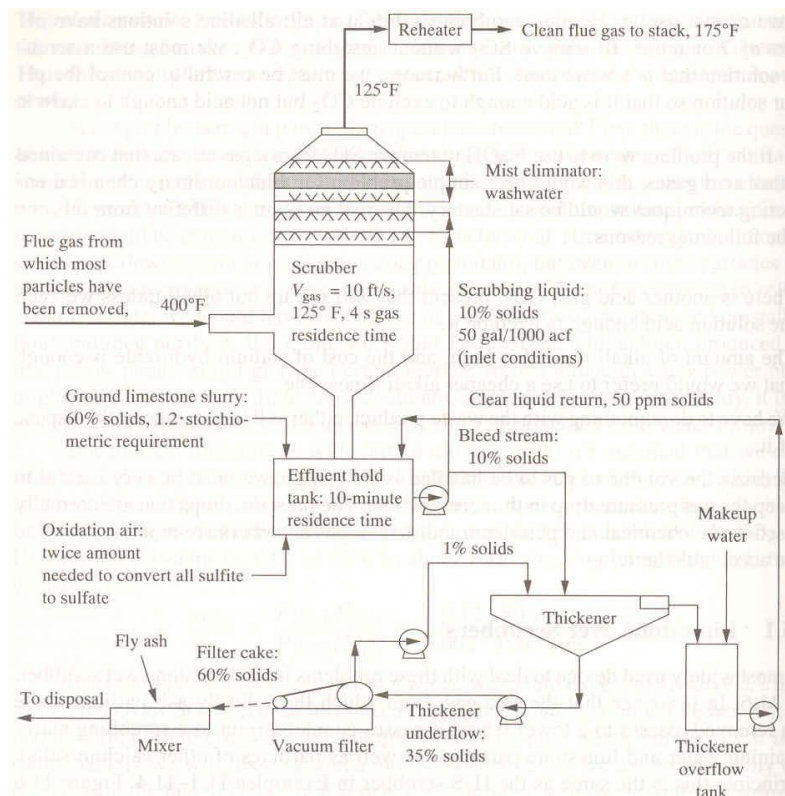
- (5) 설계기준을 만족시키기 위하여 요구되는 집진판의 총 면적을 m^2 단위로 계산하시오. 이때 설계방정식으로는 아래와 같은 식을 일반적으로 사용한다.

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\omega A}{Q}\right)$$

- (6) 집진판 하나의 높이 (h)는 15 m 이고, 배기가스의 흐름방향으로의 길이 (L)는 3 m 일 때, 필요한 총 집진판의 갯수를 구하시오.

- (7) 필요한 갯수만큼의 2 mm 두께를 갖는 집진판을 25 cm 간격으로 설치하였을 때, 전기집진기에 유입되는 배기가스의 속도를 계산하시오.

(30 pt) 2. 아래의 그림은 석탄화력발전소에서 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되어지는 강제 산화식 석회석 세정공정 (Forced-Oxidation Limestone Wet Scrubbing Process)을 보여주고 있다.



- (4) 세정기 내에서 세정액으로 공급되는 석회 슬러리와 배기가스 내에 함유된 SO_2 간에 일어나는 반응을 쓰시오. 단, 세정기 내에서 양론비로 반응이 일어나고, 저류조에 도달하는 초기에 고상 부산물을 $CaSO_3 \cdot \frac{1}{2} H_2O$ 로 가정한다.

- (5) 이 석탄화력발전소에서 배출되는 배기가스의 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 2,720 ppm 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 6% O_2

기준으로 150 ppm SO₂ 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO₂로 존재한다고 가정하고, Ca의 분자량은 40.08이다.

(20 pt) 3. 함진농도 10 g/m³인 배기가스를 벤추리 스크러버로 제진하고자 한다. 일반적으로 이처럼 벤추리 스크러버를 이용하는 경우에는 압력강하가 크게 일어나므로 이에 대한 대비를 하여야 한다. 액체-가스비 (Q_L/Q_G)가 1 L/m³이고, 슬롯부에는 온도가 76°C, 밀도가 1.2 kg/m³인 함진 배기가스가 125 m/s로 지나가고 있다.

- (1) 슬롯부의 단면적은 1 m², 분진밀도는 1.5 × 10³ kg/m³, 분진의 직경은 1 μm라고 할 때, 슬롯부에서 발생하는 압력강하를 계산하시오. 단, 이때의 압력강하 (ΔP)는 아래의 식으로 주어지며, 세정액은 물로 가정한다.

$$\Delta P = V_G^2 \rho_L \frac{Q_L}{Q_G}$$

- (2) 이 벤추리 스크러버를 일일 10 시간 운전할 때, (1)에서 발생하는 압력강하로 인한 가압 송풍설비의 일일 운전비용을 계산하시오. 단, 가압 송풍에 드는 전기료는 1 kWh 당 135 원이고, 송풍설비의 효율을 100%로 가정하고, 소비동력은 아래의 식으로 주어진다. (1 kWh = 3.6 × 10⁶ N·m)

$$P_o = Q_G \Delta P$$

(20 pt) 4. 다음 각 물음에 대하여 간략히 서술하시오.

- (1) 레이드증기압 (RVP)와 휘발성간의 관계
- (2) 연소반응에서 같은 과잉 공연비일 경우에, 연료와 공기간의 완전혼합이 일어난다면 그때의 배기가스 배출측면에서의 장점과 단점
- (3) HDS 공정의 부산물인 H₂S 나 천연가스에 함유된 H₂S를 제거하는 공정기술

Good luck on all your works.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3276)

Final exam.

Hour: 10:00 ~ 12:00 pm

Date: 21 December 2004

Student Name: _____

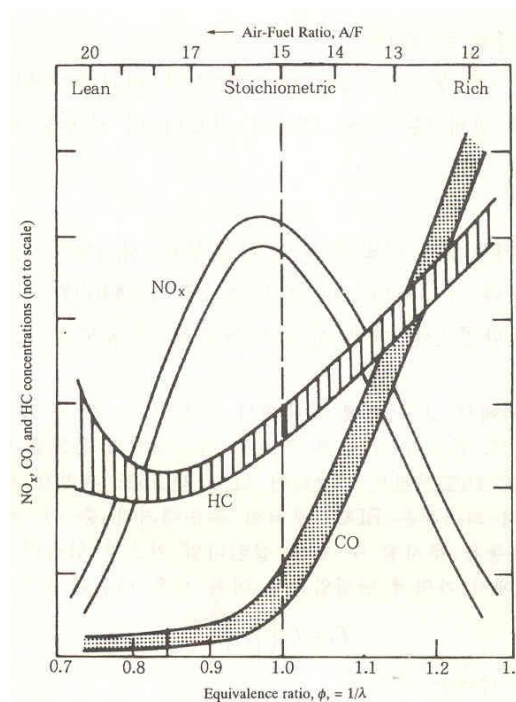
Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something you learned in this class, if you do want to get a partial credit although it is just one point. Be careful with mathematics and units!

(40 pt) 1. 다음 각 물음에 대하여 간략히 서술하시오.

- (1) 아래 그림에서 AFR 값이 15 보다 큰 (등가비가 1 보다 작은) 영역에서 HC와 CO 배출농도가 현저하게 줄어드는 이유



- (2) 이 석탄화력발전소에서 배출되는 배기가스의 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 $2,720 \text{ ppm}$ 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 $6\% \text{ O}_2$ 기준으로 150 ppm SO_2 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO_2 로 존재한다고 가정하고, Ca 의 분자량은 40.08 이다.

(40 pt) 3. 어떤 배출시설에서 발생하는 배기가스 내에 함유된 구형 입자의 평균직경이 3.2μ 인 입자상 물질의 농도가 50 g/m^3 , 배기가스의 유량이 $4,320 \text{ m}^3/\text{h}$, 배기가스의 점성도 (μ)가 $1.74 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ 일 때, 길이가 5 m 이고 높이가 4.6 m 인 집진판이 24 cm 간격으로 설치된 전기 집진기 (Electrostatic Precipitator, ESP)를 사용하여 배출허용기준 이하로 제진하고자 한다.

(1) 위에 주어진 입자상 물질의 물리적인 특성에 기초할 때, 확산하전 (Diffusion charging)과 전기장 하전 (Electric field charging) 중에 어느 하전 메커니즘이 지배적으로 작용하는지를 서술하시오.

(2) (1)의 결론으로부터, 입자표면에 하전된 전하량은 다음식으로 표현된다:

$$q = 3\pi \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \varepsilon_o d_p^2 E_o$$

여기서, q = 입자의 전하량, ε = 입자의 유전상수, ε_o = 진공에서 유전도 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ C/V.m}$), d_p = 입자직경, E_o = 방전극의 전기장 세기이다. 입자 위에 작용하는 정전기력 (F)은 qE_p 이고, 여기서 E_p 는 집진극의 전기장 세기이다. 이때, 이러한 전기장 내에서 입자의 표류속도 (Drifting velocity), w 를 유도하시오.

$$(Ans.: w = \frac{\varepsilon_o d_p \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) E_o E_p}{\mu})$$

(3) 이 ESP 의 집진효율을 계산하시오. 단, 집진극과 방전극의 전기장 세기는 $6.0 \times 10^5 \text{ V/m}$ 로 같다고 가정하고, 입자의 유전상수는 4 이다. 참고로, $1 \text{ N.m} = 1 \text{ V.C}$ 이다.

(4) ESP 의 집진효율은 집진판에 집진된 분진의 두께가 증가하면 배기가스 흐름쪽으로 재분산되기 쉬워서 집진율이 떨어지므로, 이를 방지하기 위하여 일정 시간 동안 집진한 후에 집진된 먼지를 제거하여야 한다. 이 ESP 의 경우에 집진판의 먼지층 두께가 1.25 cm 일 때 래퍼 (Rapper)로 제거한다면, 몇 시간마다 래퍼로 제거하여야 하는지를 계산하시오. 단, 분진의 밀도는 2.2 g/cm^3 이다.

Good luck on all your works.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 2793)

Final Exam.

Open Books, Notes, and all Materials

If someone or you all want to use an internet search, that is okay.

Hour: 3:00 ~ 4:50 pm

Date: 19 December 2005

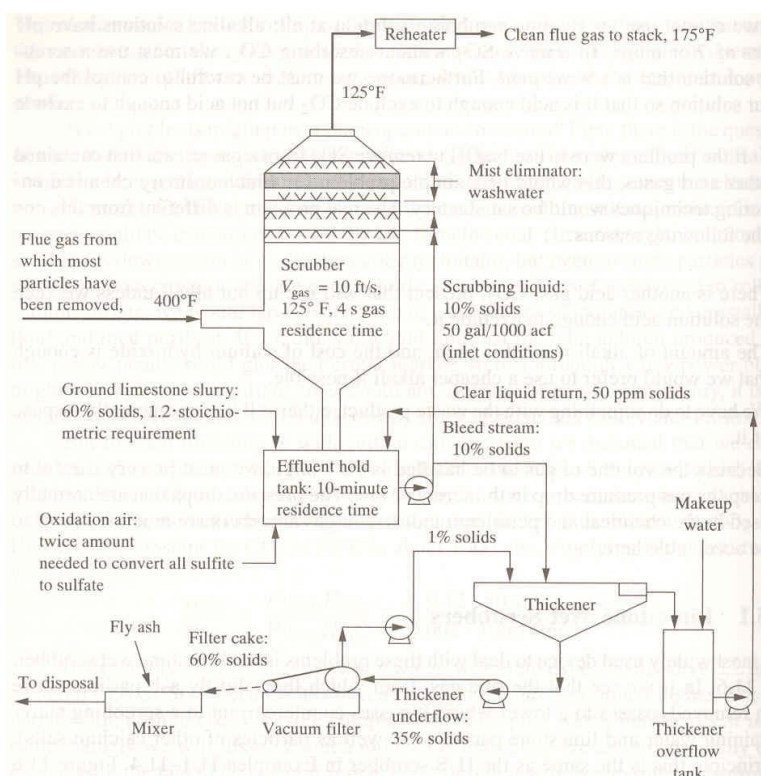
Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

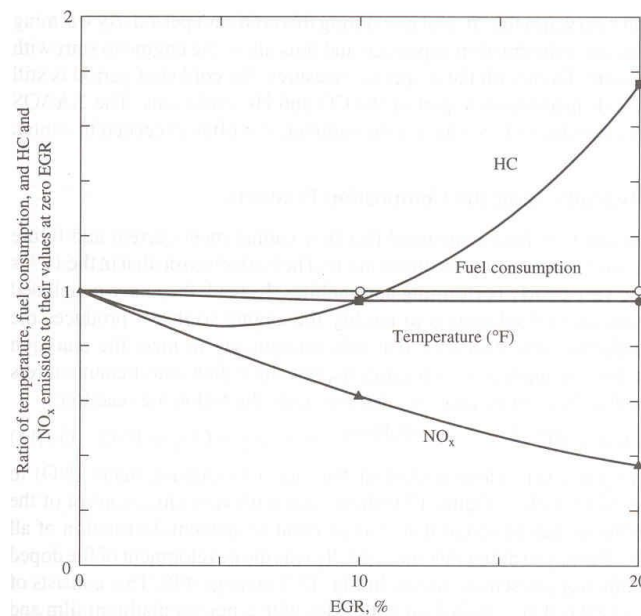
Directions: Please enter your name on this page. Then put your John Hancock on this examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is ca. 2 hours. Answer all questions on a separate sheet provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something you learned in this class, if you do want to get a partial credit although it is just one point. Be careful with mathematics and units!

(30 pt) 1. 아래의 그림은 석탄화력발전소에서 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되어지는 강제 산화식 석회석 세정공정 (Forced-Oxidation Limestone Wet Scrubbing Process)을 보여주고 있다.



- (1) 세정기 내에서 세정액으로 공급되는 석회 슬러리와 배기가스 내에 함유된 SO_2 간에 일어나는 반응을 쓰시오. 단, 세정기 내에서 양론비로 반응이 일어나고, 저류조 (effluent hold tank)에 도달하는 초기에 고상 부산물을 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다.
- (2) 이 석탄화력발전소에서 배출되는 배기가스의 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 $2,720 \text{ ppm}$ 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 $6\% \text{ O}_2$ 기준으로 150 ppm SO_2 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO_2 로 존재한다고 가정하고, Ca 의 분자량은 40.08 이다.
- (3) 위에 주어진 그림의 저류조에서 약 10 분 정도의 추가적인 체류시간에 일어나는 초기 고상 부산물의 변화를 설명하시오.

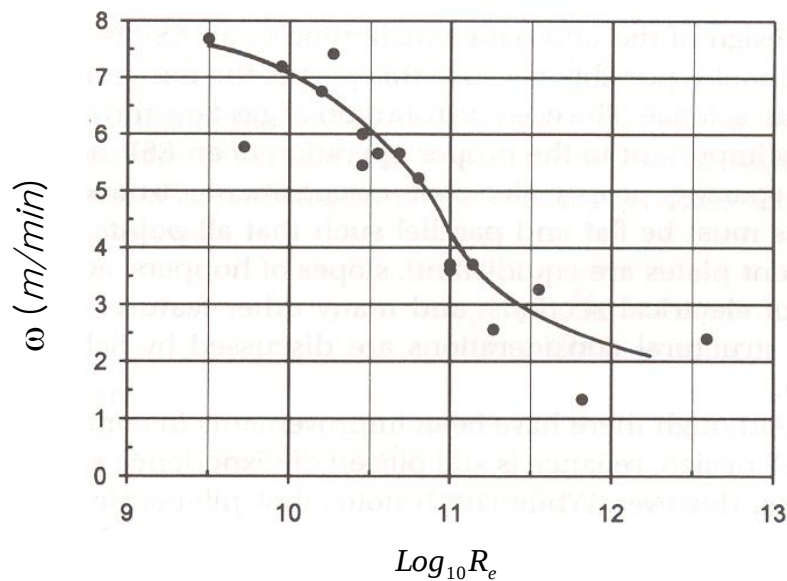
(10 pt) 2. 다음에 주어진 그림은 배기가스재순환 (Exhaust Gas Recirculation, EGR) 기술을 적용할 경우에 내연기관 자동차의 연료소모량 (fuel consumption)의 커다란 변화없이 NO_x 배출량을 줄일 수 있음을 보여주고 있다. EGR % 증가와 함께 NO_x 배출량은 감소하고 HC의 배출량은 증가하는 이유를 설명하시오.



(20 pt) 3. 여과포집진기 (흔히 Bagfilter 라고 칭함)의 표면속도 (superficial velocity) V_s 가 아래의 식으로 주어진다면, 이 식으로부터 여과포집진기를 운전하기 위한 전형적인 파라미터로 ΔP (압력강하)와 t (운전시간)를 어떻게 얻을 수 있는지를 설명하시오.

$$V_s = \frac{P_{inlet} - P_{outlet}}{\mu \left[\left(\frac{dx}{k} \right)_{cake} + \left(\frac{dx}{k} \right)_{filter} \right]}$$

(30 pt) 4. 어떤 시멘트 제조공장의 시멘트 킬른으로부터 배출되는 분진을 전기집진기로 제거하여 배출허용기준을 만족시키고자 한다. $5,000 \text{ mg/Sm}^3$ 의 시멘트 분진이 함유된 배출가스의 유량은 $480,000 \text{ Sm}^3/h$ 이고, 표준조건에서 산소농도 13% 기준으로 이 산업체의 배출허용기준은 50 mg/Sm^3 이다. 이 시멘트 분진의 전기저항도 (R_e)는 $1.0 \times 10^{10} \Omega \cdot cm$ 이며, 이 분진의 전기저항도와 유효 표류속도 (effective drift velocity, ω)간의 관계는 다음 그림으로 나타난다.



- (1) 설계기준을 만족시키기 위하여 요구되는 집진판의 총 면적을 m^2 단위로 계산하시오. 이때 설계방정식으로는 아래와 같은 식을 일반적으로 사용한다.

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\omega A}{Q}\right)$$

- (2) 집진판 하나의 높이 (h)는 15 m 이고, 배기가스의 흐름방향으로의 길이 (L)는 3 m 일 때, 필요한 총 집진판의 갯수를 구하시오.

- (3) 필요한 갯수만큼의 2 mm 두께를 갖는 집진판을 25 cm 간격으로 설치하였을 때, 전기집진기에 유입되는 배기가스의 속도를 계산하시오.

(10 pt) 5. 질소산화물의 생성을 최소화할 수 있는 연소조건 제어방법을 설명하시오.

Good luck on all your works.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 2821)

Final Exam.

Open Books, Notes, and all Materials

Hour: 3:00 ~ 4:50 pm

Date: 14 December 2006

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then put your John Hancock on this examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is ca. 2 hours. Answer all questions on a separate sheet provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something you learned in this class, if you do want to get a partial credit although it is just one point. Be careful with mathematics and units!

(30 pt) 1. 어떤 배출시설에서 발생하는 배기가스 내에 함유된 구형 입자의 평균직경이 $3.2\ \mu$ 인 입자상 물질의 농도가 $50\ \text{g/m}^3$, 배기가스의 유량이 $4,320\ \text{m}^3/\text{h}$, 배기가스의 점성도 (μ)가 $1.74 \times 10^{-5}\ \text{kg/m.s}$ 일 때, 길이가 5 m 이고 높이가 4.6 m 인 집진판이 24 cm 간격으로 설치된 전기 집진기 (Electrostatic Precipitator, ESP)를 사용하여 배출허용기준 이하로 제진하고자 한다.

(1) 위에 주어진 입자상 물질의 물리적인 특성에 기초할 때, 확산하전 (Diffusion charging)과 전기장 하전 (Electric field charging) 중에 어느 하전 메커니즘이 지배적으로 작용하는지를 서술하시오.

(2) (1)의 결론으로부터, 입자표면에 하전된 전하량은 다음식으로 표현된다:

$$q = 3\pi \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \varepsilon_o d_p^2 E_o$$

여기서, q = 입자의 전하량, ε = 입자의 유전상수, ε_o = 진공에서 유전도 ($8.854 \times 10^{-12}\ \text{C/V.m}$), d_p = 입자직경, E_o = 방전극의 전기장 세기이다. 입자 위에 작용하는 정전기력 (F)은 qE_p 이고, 여기서 E_p 는 집진극의 전기장 세기이다. 이때, 이러한 전기장 내에서 입자의 표류속도 (Drifting velocity), w 를 유도하시오.

$$(Ans.: w = \frac{\epsilon_o d_p \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right) E_o E_p}{\mu})$$

- (3) 이 ESP 의 집진효율을 계산하시오. 단, 집진극과 방전극의 전기장 세기는 6.0×10^5 V/m 로 같다고 가정하고, 입자의 유전상수는 4 이다. 참고로, $1 \text{ N.m} = 1 \text{ V.C}$ 이다.

(30 pt) 2. 다음 각 항에 대하여 서술하시오.

- (1) 먼지 비저항도가 매우 클 경우에 ESP 의 공학적 설계 및 운전 방법
- (2) 자동차 등과 같은 이동원으로부터 배출되는 SO_x 의 양을 저감시킬 수 있는 유일한 방법
- (3) 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되어지는 강제 산화식 석회석 세정공정 (Forced-Oxidation Limestone Wet Scrubbing Process)에서 생성물인 황산칼슘에 의한 관의 스케일링, 플러깅 등을 완화시키는 기술적인 방법

(40 pt) 3. 어떤 석탄화력발전소 (Coal-fired power plant)에서 23% 과잉공기로 역청탄 (Bituminous coal)을 태우고 있다. 이 보일러에서 발생하는 다량의 NO 를 후처리기술 (Aftertreatment technology)로 제거하기에 앞서서, 적합하고도 적절한 예연제어 (Precombustion control) 기법을 사용함으로써 배출될 수 있는 NO 를 현저히 낮출 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이러한 예측의 타당성을 검토하기 위한 하나의 유효한 접근방법은 다음에 주어진 NO 생성반응에 대한 열역학적 특성을 고려함으로써 석탄 연소반응 동안에 NO 생성에 절대적인 영향을 미치는 주요 인자들이 무엇인지를 파악하는 것이다:



원하는 반응온도에서 반응 (1)에 대한 평형상수 (Equilibrium constant)는 식 (2)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서, K 는 1 atm 에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 반응 (1)에 대한 평형상수 값들이 아래의 표에 주어져 있다. 반응온도가 500, 2,000 및 3,000 K 일 때, 반응 (1)의 평형상수 값을 계산하여 주어진 표를

완성하시오. 단, 500, 2,000 및 3,000K 에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 각각 20.095, 15.548 및 12.589 kcal/mol 이다.

Temperature (K)	Equilibrium constant
300	7×10^{-31}
500	
1000	7.5×10^{-9}
1500	1.1×10^{-5}
2000	
2500	0.0035
3000	
4000	0.0888

- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스를 분석한 결과, 아래와 같은 조성을 얻을 수 있었다.

Constituent	Concentration (%)
CO ₂	13.9
H ₂ O	7.6
N ₂	74.7
O ₂	3.7
SO ₂	
NO	

보일러의 운전온도가 2,000 및 3,000 K 일 때, 생성될 수 있는 NO 의 최고농도를 계산하시오.

- (3) 보일러 내의 최고 화염온도인 3,000 K 에서 배기가스가 0.0001 s 동안 머무를 때, 생성 가능한 NO 의 농도를 계산하시오. 단, 보일러 내에서 배기가스의 체류시간에 따른 NO 농도의 변화는 다음 식으로 표현되고,

$$\frac{d[NO]}{dt} = k\{([NO]_e - [NO])([NO]_e + [NO])\},$$

여기서 $k = 2.24 \times 10^{10} / s$ 이다.

- (4) 최고 화염온도인 3,000 K 에서 생성되는 NO 의 농도가 평형농도의 약 95%에 도달하는 데 걸리는 시간을 계산하시오.

Good luck on all your works.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 2810)

Final Exam.

Hour: 2:00 ~ 3:50 pm

Date: 13 December 2007

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then put your John Hancock on this examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is ca. 2 hours. Answer all questions on a separate sheet provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something you learned in this class, if you do want to get a partial credit although it is just one point. Be careful with mathematics and units!

(10 pt) 1. 여과포집진기 (흔히 Bagfilter 라고 칭함)의 표면속도 (superficial velocity) V_s 가 아래의 식으로 주어진다면, 이 식으로부터 여과포집진기를 운전하기 위한 전형적인 파라미터로 ΔP (압력강하)와 t (운전시간)를 어떻게 얻을 수 있는지를 설명하십시오.

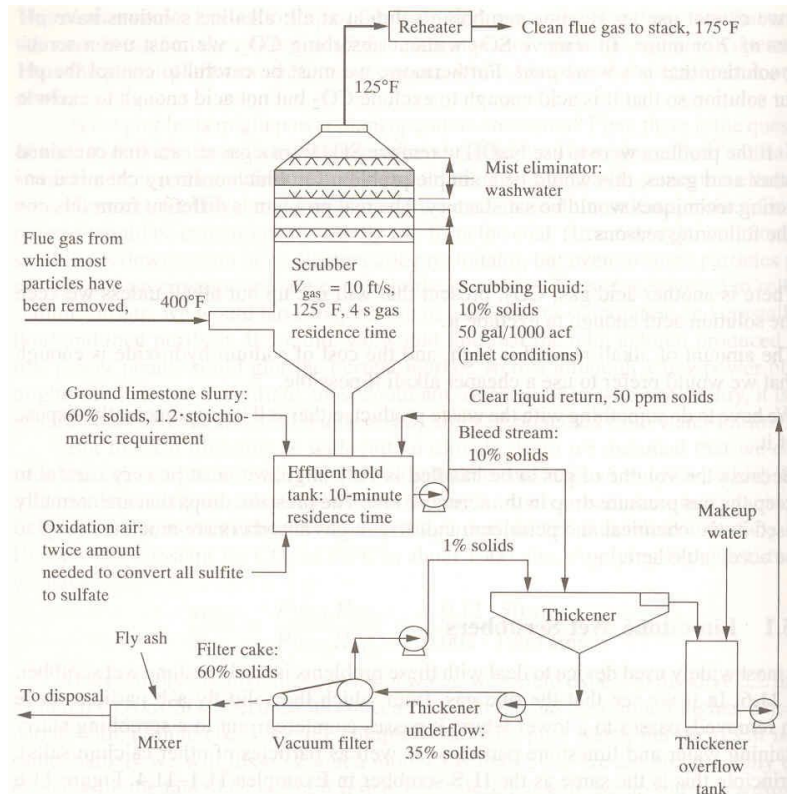
$$V_s = \frac{P_{inlet} - P_{outlet}}{\mu \left[\left(\frac{dx}{k} \right)_{cake} + \left(\frac{dx}{k} \right)_{filter} \right]}$$

(60 pt) 2. 다음 각 항을 간략히 기술하십시오.

- (1) NO_x 의 생성을 최소화할 수 있는 연소제어 (반드시 50 자 이내)
- (2) FGR (Flue Gas Recirculation) (반드시 50 자 이내)
- (3) 벤추리 스크러버의 집진원리 (반드시 50 자 이내)
- (4) NO_x 후처리기술로서 선택적촉매환원법 (SCR) (반드시 50 자 이내)
- (5) 구리제련공장에서 배출되는 SO_2 를 제거하는 방법 (반드시 50 자 이내)

(6) 분진 비저항도가 적정값보다 매우 높을 때의 대처방안 (3 가지)
(반드시 50 자 이내)

(30 pt) 3. 아래의 그림은 석탄화력발전소에서 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되어지는 석회석 세정공정 (Limestone scrubbing process)을 보여주고 있다.



(1) 위의 처리공정을 적용하기에 가장 적합한 배출원의 예를 드시오.

(2) 세정기 내에서 세정액으로 공급되는 석회 슬러리와 배기가스 내에 함유된 SO₂ 간에 일어나는 반응을 쓰시오. 단, 세정기 내에서 양론비로 반응이 일어나고, 저류조에 도달하는 초기에 고상 부산물을 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다.

(3) 이 석탄화력발전소에서 배출되는 배기가스의 유량은 1,699,000 Nm³/h 이고, 황산화물의 농도는 2,720 ppm 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 6% O₂ 기준으로 150 ppm SO₂ 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO₂로 존재한다고 가정하고, Ca의 분자량은 40.08 이다.

Good luck on all your works.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3479)

Final examination

(Closed BOOKS, NOTES and MATERIALS)

Hour: 11:00 ~ 12:50 pm

Date: 19 December 2008

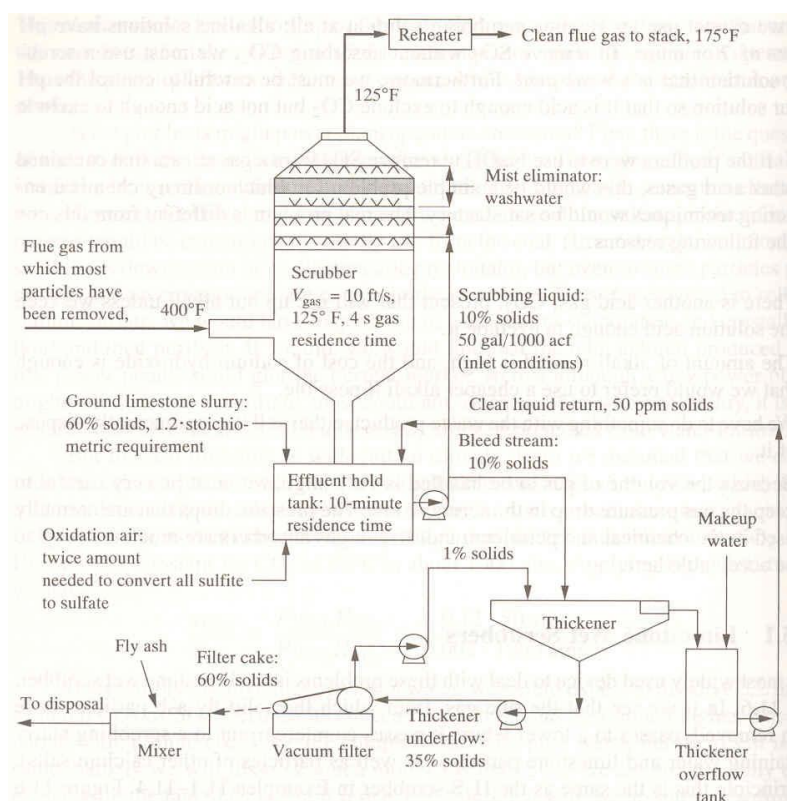
Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____ (It will not be graded for no your own signature.)

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give any credit if you do not write anything – put something. Be careful with mathematics and units!

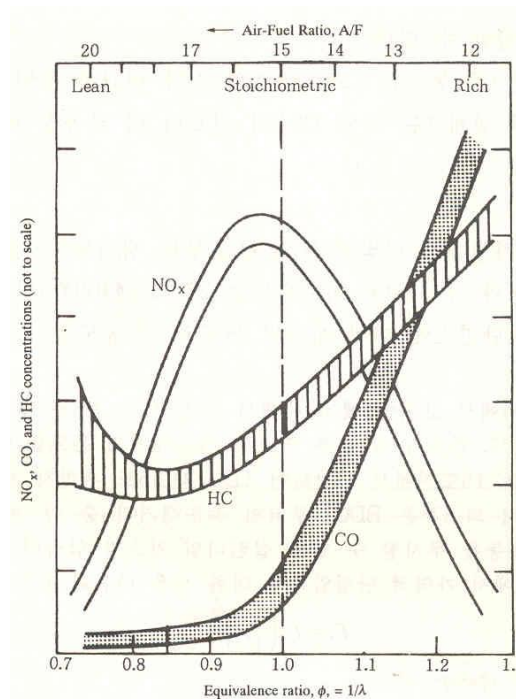
(30 pt) 1. 아래 그림은 석탄화력발전소에서 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되고 있는 강제산화식 석회석 세정공정 (Forced-oxidation limestone scrubbing process)을 보여주고 있다.



- (1) 위 공정도에서 “Effluent hold tank”의 역할을 설명하시오.
- (2) 세정기 내에서 세정액으로 공급되는 석회 슬러리와 배기가스 내에 함유된 SO_2 간에 일어나는 반응을 쓰시오. 단, 세정기 내에서 양론비로 반응이 일어나고, 저류조에 도달하는 초기에 고상 부산물을 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다.
- (3) 이 석탄화력발전소에서 배출되는 배기가스의 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 $2,720 \text{ ppm}$ 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 $6\% \text{ O}_2$ 기준으로 150 ppm SO_2 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO_2 로 존재한다고 가정하고, Ca 의 분자량은 40.08 이다.

(40 pt) 2. 다음 각 물음에 대하여 간략히 서술하시오.

- (1) 아래 그림에서 AFR 값이 15 보다 큰(등가비가 1 보다 작은) 영역에서 NO_x 의 배출농도가 현저하게 줄어드는 이유 (Equivalence ratio = 등가비)



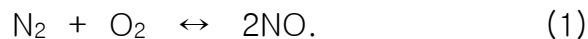
- (2) 다시의 법칙(Dacy's la)으로부터 여과포집진기 (흔히 Bagfilter 라고 칭함)의 운전변수를 얻는 방법

$$\text{(다시의 법칙: } V_s = \frac{P_{inlet} - P_{outlet}}{\mu \left[\left(\frac{dx}{k} \right)_{cake} + \left(\frac{dx}{k} \right)_{filter} \right]})$$

(3) 배가스 내에 SO₂ 농도가 매우 높을 때의 배연탈황법

(4) 3T 와 열적 NOx(Thermal NOx)간의 관계

(30 pt) 3. 어떤 석탄화력발전소 (Coal-fired power plant)에서 23% 과잉공기로 역청탄 (Bituminous coal)을 태우고 있다. 이 보일러에서 발생하는 다량의 NO 를 후처리기술 (Aftreatment technology)로 제거하기에 앞서서, 적합하고도 적절한 예연제어 (Precombustion control) 기법을 사용함으로써 배출될 수 있는 NO 를 현저히 낮출 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이러한 예측의 타당성을 검토하기 위한 하나의 유효한 접근방법은 다음에 주어진 NO 생성반응에 대한 열역학적 특성을 고려함으로써 석탄 연소반응 동안에 NO 생성에 절대적인 영향을 미치는 주요 인자들이 무엇인지를 파악하는 것이다:



원하는 반응온도에서 반응 (1)에 대한 평형상수 (Equilibrium constant)는 식 (2)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서, K 는 1 atm 에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

(1) 반응 (1)에 대한 평형상수 값들이 아래의 표에 주어져 있다. 반응온도가 500, 2,000 및 3,000 K 일 때, 반응 (1)의 평형상수 값을 계산하여 주어진 표를 완성하시오. 단, 500, 2,000 및 3,000K 에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 각각 20.095, 15.548 및 12.589 kcal/mol 이다.

Temperature (K)	Equilibrium constant
300	7×10^{-31}
500	
1000	7.5×10^{-9}
1500	1.1×10^{-5}
2000	
2500	0.0035
3000	
4000	0.0888

- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스를 분석한 결과, 아래와 같은 조성을 얻을 수 있었다.

Constituent	Concentration (%)
CO ₂	13.9
H ₂ O	7.6
N ₂	74.7
O ₂	3.7
SO ₂	
NO	

보일러의 운전온도가 2,000 및 3,000 K 일 때, 생성될 수 있는 NO 의 최고농도를 계산하시오.

- (3) 보일러 내의 최고 화염온도인 3,000 K 에서 배기가스가 0.0001 s 동안 머무를 때, 생성 가능한 NO 의 농도를 계산하시오. 단, 보일러 내에서 배기가스의 체류시간에 따른 NO 농도의 변화는 다음 식으로 표현되고,

$$\frac{d[NO]}{dt} = k\{([NO]_e - [NO])([NO]_e + [NO])\},$$

여기서 $k = 2.24 \times 10^{10} / s$ 이다.

Good luck on all your work.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 7344)

Final examination

(Closed BOOKS, NOTES and MATERIALS)

Hour: 1:00 ~ 2:50 pm

Date: 17 December 2009

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. ***Show all your work!*** I cannot do give *any* credit if you do not write *anything* – put something. Be careful with mathematics and units!

(10 pt) 1. 고온에서 연료를 연소시킬 때, NO 는 주로 아래의 반응으로부터 생성되는 것으로 알려져 있다:



원하는 반응온도에서 반응 (1)에 대한 평형상수 (Equilibrium constant)는 식 (2)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (2)$$

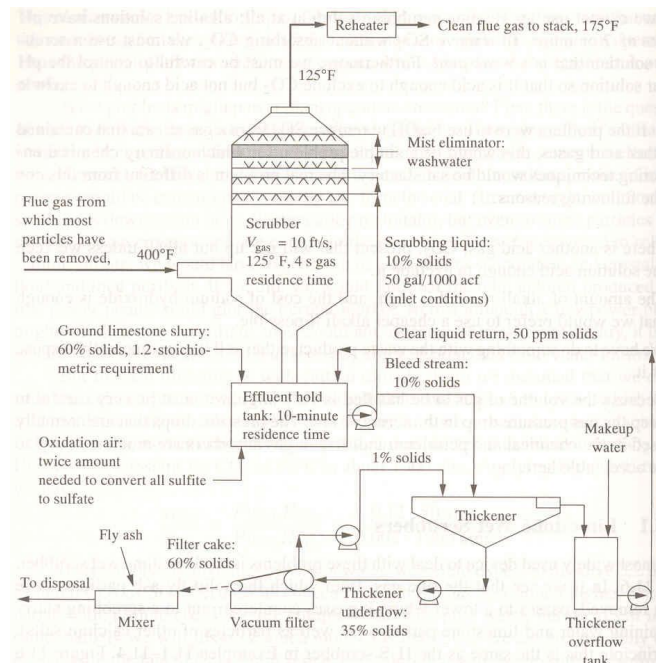
여기서, K 는 1 atm 에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다. 반응 (1)에 대한 평형상수 값들이 아래의 표에 주어져 있다. 반응온도 3,000 K 일 때, 반응 (1)의 평형상수 값을 계산하십시오. 단, 3,000K 에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 각각 12.589 kcal/mol 이다.

Temperature (K)	Equilibrium constant
1500	1.1×10^{-5}
2500	0.0035
3000	
4000	0.0888

(50 pt) 2. 다음 각 물음에 대하여 간략히 서술하시오.

- (1) NO_x 제거를 위한 선택적촉매환원법
- (2) 표면속도와 평균속도의 차이점
- (3) 관성충돌의 원리를 이용할 때의 분리수
- (4) 3T 와 열적 NO_x (Thermal NO_x)간의 관계
- (5) 석탄 IGCC

(40 pt) 3. 아래 그림은 석탄화력발전소에서 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되고 있는 강제산화식 석회석 세정공정 (Forced-oxidation limestone scrubbing process)을 보여주고 있다.



- (1) 위 공정도에 따라 이루어지는 배연탈황공정을 흔히 ‘강제산화식 석회석 슬러리법’이라고 칭하는 이유를 설명하시오.
- (2) 부산물로 얻어진 황산칼슘을 석고보드의 원료로 사용하고자 할 경우, 위의 공정도상에서는 불필요한 단위공정을 설명하시오.
- (3) 이 석탄화력발전소에서 배출되는 배기가스의 유량은 1,699,000 Nm³/h 이고, 황산화물의 농도는 2,720 ppm 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 6% O₂ 기준으로 150 ppm SO₂ 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO₂로 존재한다고 가정하고, Ca의 분자량은

40.08 이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다.

- (4) 이 탈황공정으로부터 발생하는 일일 이산화탄소 배출량을 톤 단위로 계산하시오.

Good luck on all your works.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3658)

Final Examination

(Closed BOOKs, NOTEs and MATERIALs)

Hour: 10:00 ~ 11:50 pm

Date: 16 December 2010

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is approximately 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. ***Show all your work!*** I will not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something you have learned in this class, if you do want to get a partial credit although it is just one point. Be careful with mathematics and units!

(40 pt) 1. 다음 각 항을 간략히 기술하시오. (각 문항 모두 50 자 이내로 기술)

(1) 백필터 집진기의 운전방법

(2) NO_x 생성을 최소화하기 위한 연소제어법

(3) 이동원 중 재래식 가솔린 자동차 배가스 정화용 삼원촉매장치에서 촉매의 주요 성분과 오염물질 제거 방법

(4) 소규모 고정원으로부터 발생하는 저농도의 SO_x 를 제거하는 (반)건식법

(20 pt) 2. 어떤 석탄화력발전소 (Coal-fired power plant)에서 23% 과잉공기로 역청탄 (Bituminous coal)을 태우고 있다. 연소반응 동안에 아래에 주어진 반응에 의해 다량의 NO 가 생성될 수 있다:



원하는 반응온도에서 반응 (1)에 대한 평형상수 (Equilibrium constant)는 식 (2)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (2)$$

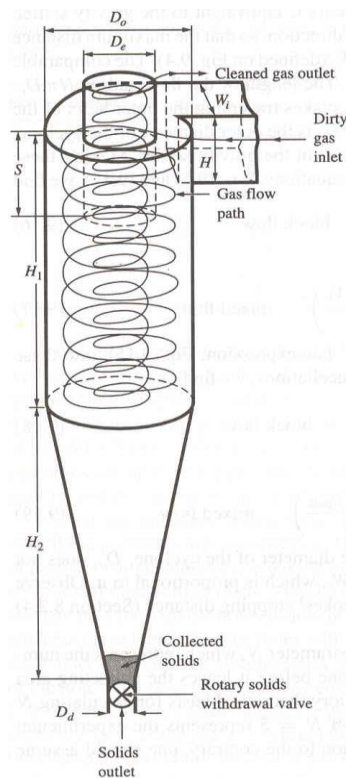
여기서, K 는 1 atm 에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 2,000 K 에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 15.548 kcal/mol 일 때, 반응 (1)의 평형상수 값을 계산하시오.
- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스를 분석한 결과, 아래와 같은 조성을 얻을 수 있었다.

Constituent	Concentration
CO ₂	13.9%
H ₂ O	7.6%
N ₂	74.7%
O ₂	3.7%
SO ₂	1,130 ppm
NO	

보일러의 운전온도가 2,000 K 일 때, NO 의 최고농도를 계산하시오.

(10 pt) 3. 아래의 그림은 전형적인 싸이클론의 한 예를 보여주고 있다. 이러한 싸이클론의 디자인 파라미터는 일반적으로 그림에 주어진 D_o 이다. 싸이클론의 집진성능은 설계 방정식에 나타나는 여러 변수들에 따라 달라진다.



혼합모델을 가정한 이 싸이클론의 설계 방정식은 다음에 주어진 식과 같고 이 설계 방정식에 나타난 기호들은 그 아래에 설명되어 있다.

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\pi N V_c (\rho_p - \rho_g) d_p^2}{9 W_i \mu_g}\right)$$

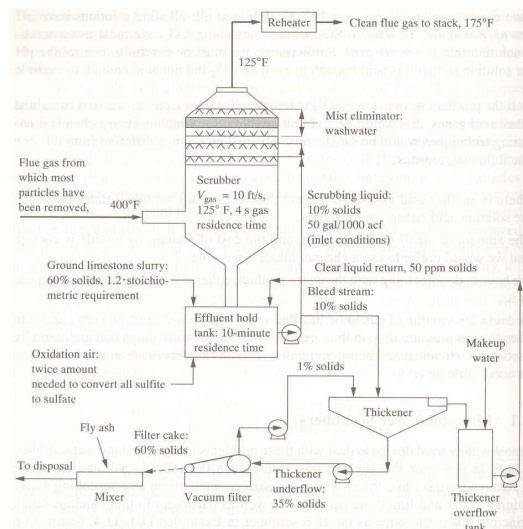
여기서, N = 외부 헬릭스 (outer helix)의 회전수
 V_c = 외부 헬릭스 (outer helix)의 선속도
 ρ_p = 분진 입자밀도
 ρ_g = 배가스 밀도
 d_p = 분진 입자직경
 μ_g = 배가스 점성도이다.

(1) Cut diameter (d_{cut})를 결정하기 위한 식을 유도하라.

$$Ans.: d_{cut} = \sqrt{\frac{9 W_i \mu_g}{\pi N V_c (\rho_p - \rho_g)} \ln 2}$$

(2) $W_i = 0.5$ m, $N = 5$, $\rho_p = 2.0$ g/cm³, $\mu_g = 1.8 \times 10^{-4}$ g/cm·s, $\rho_g = 0.0016$ g/cm³, $V_c = 23$ m/s 일때, d_{cut} 값을 구하라.

(30 pt) 4. 아래 그림은 대규모 고정원으로부터 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되고 있는 강제산화식 석회석 세정공정 (Forced-oxidation limestone scrubbing process)을 보여주고 있다.



(1) 부산물로 얻어진 황산칼슘을 석고보드의 원료로 사용하고자 할 경우, 위의 공정도상에서는 불필요한 단위공정을 설명하시오.

- (2) 이 고정원으로부터 배출되는 배기가스의 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 $2,720 \text{ ppm}$ 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 $6\% \text{ O}_2$ 기준으로 150 ppm SO_2 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO_2 로 존재한다고 가정하고, Ca 의 분자량은 40.08 이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다.
- (3) 이 탈황공정으로부터 발생하는 일일 이산화탄소 배출량을 톤 단위로 계산하시오.

Good luck on all your works.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3339)

(Total 90 pt)

Final exam.

Hour: 11:00 ~ 12:50 am

Date: 15 December 2011

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I cannot give *any* credit if you do not write *anything that should be concerned with this class*. Be careful with mathematics and units!

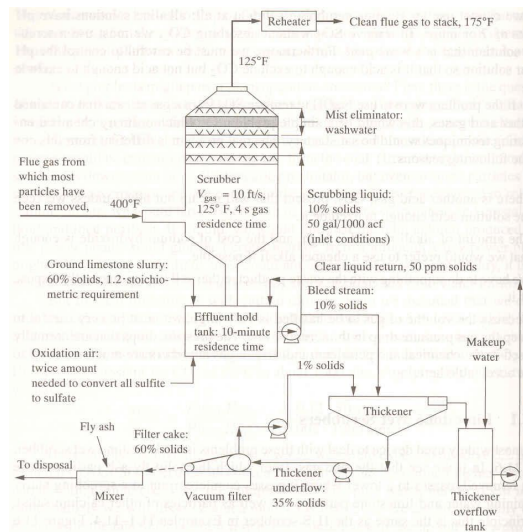
(50 pt) 1. 다음 각 항을 간략히 설명하시오.

- (1) 연소반응에서 질소산화물(NO_x)의 생성을 최소화하기 위한 연소제어방법
(반드시 200 자 이내)
- (2) 분진 비저항도가 적정값보다 매우 높을 때, ESP의 공학적 설계 및 운전 방법
(3 가지)
- (3) 여과포집진기의 표면속도(superficial velocity) V_s 가 아래의 식으로 주어질 때, 여과포집진기를 운전하기 위한 전형적인 파라미터로 ΔP (압력강하)와 t (운전시간)간의 관계를 얻을 수 있는 방법
(반드시 60 자 이내)

$$V_s = \frac{P_{inlet} - P_{outlet}}{\mu \left[\left(\frac{dx}{k} \right)_{cake} + \left(\frac{dx}{k} \right)_{filter} \right]}$$

- (4) 구리 제련공장과 같은 고농도의 아황산가스(SO_2)를 배출하는 고정원에 대한 최적의 배연탈황기술(FGD) (반드시 60 자 이내)
- (5) 화력발전소, 제철소 소결공장, 시멘트 소성로 등과 같이 상대적으로 대규모의 고정원으로부터 발생하는 NO_x 를 제거하기 위해 가장 널리 사용되는 방법
(반드시 100 자 이내)

(20 pt) 2. 아래 그림은 대규모 고정원으로부터 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되고 있는 강제산화식 석회석 세정공정 (Forced-oxidation limestone scrubbing process)을 보여주고 있다.



- (1) 이 고정원으로부터 배출되는 배기가스의 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 $2,720 \text{ ppm}$ 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 $6\% \text{ O}_2$ 기준으로 150 ppm SO_2 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO_2 로 존재한다고 가정하고, Ca 의 분자량은 40.08 이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다.
- (2) 이 탈황공정으로부터 발생하는 일일 이산화탄소 배출량을 톤 단위로 계산하시오.

(20 pt) 3. 어떤 석탄화력발전소 (Coal-fired power plant)에서 23% 과잉공기로 역청탄 (Bituminous coal)을 태우고 있다. 연소반응 동안에 아래에 주어진 반응에 의해 다량의 NO가 생성될 수 있다:



원하는 반응온도에서 반응 (1)에 대한 평형상수 (Equilibrium constant)는 식 (2)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^o}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서, K 는 1 atm 에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 2,000 K 에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 15.548 kcal/mol 일 때, 반응 (1)의 평형상수 값을 계산하시오.
- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스를 분석하여 아래와 같은 조성을 얻었다. 보일러의 운전온도가 2,000 K 일 때, NO 의 최고농도를 계산하시오.

Constituent	Concentration
CO ₂	13.9%
H ₂ O	7.6%
N ₂	74.7%
O ₂	3.7%
SO ₂	1,130 ppm
NO	

Good luck on all your works.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3479)

※ 각 문제(소문제 포함) 번호를 명기 후 답안작성

**Total point =
105**

Final examination

Hour: 10:00 ~ 11:50 am

Date: 17 December 2012

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is ~2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. ***Show all your work!*** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something you have learned in this class, if you do want to get a partial credit although it is just a single point. Be careful with mathematics and units!

(55 pt) 1. 다음 각 항을 간략히 기술하시오.

(1) 고정원과 이동원에 적용가능한 배연탈질기술 (10 pt)

(1)-a) 대규모와 소규모 고정원에 적합한 탈질기술 (5 pt)

(1)-b) 이동원 중에서 가솔린 자동차에 적용되는 탈질기술 (5 pt)

(2) 여과포집진기의 운전방정식 (10 pt)

(3) 석탄 IGCC (25 pt)

(3)-a) 석탄가스화반응과 이로부터 생성되는 가스(들) (5 pt)

Hint: 반응식으로 써서 설명

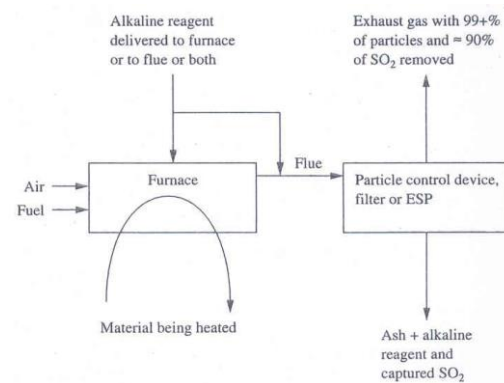
(3)-b) 석탄가스화 후 황화합물 제거방법 (5 pt)

Hint: 반응식과 공정을 같이 설명

(3)-c) 석탄 IGCC 공정 (전체 공정을 그림으로 그려 설명) (10 pt)

(3)-d) 위의 (3)-c) 공정을 사용할 때의 장점 (3 가지 이상) (5 pt)

(4) 아래에 주어진 그림과 같이 알칼리성 건식 흡수제로 분말 CaCO_3 를 연소기 상단 내부나 연소기 후단에 투입하여 황산화물을 제거하고자 한다. (10 pt)



(4)-a) 고온의 연소가스 내에서 CaCO_3 및 CaCO_3 와 SO_2 간에 일어나는 반응(들) (5 pt)

(4)-b) 위의 (4)-a)와 같은 배연탈황기술을 산업현장에 실제 적용할 때 예상되는 문제점들 (3가지 이상) (5 pt)

(10 pt) 2. 어떤 석탄화력발전소 (Coal-fired power plant)에서 23% 과잉공기로 역청탄 (Bituminous coal)을 태우고 있다. 연소반응 동안에 아래에 주어진 반응에 의해 다량의 NO가 생성될 수 있다:



원하는 반응온도에서 반응 (1)에 대한 평형상수 (Equilibrium constant)는 식 (2)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서, K 는 1 atm에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

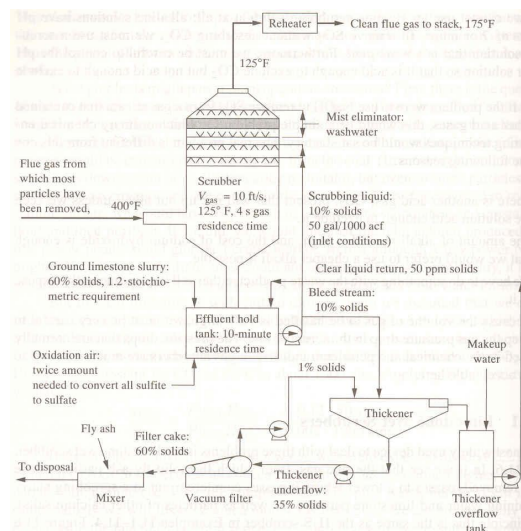
(1) 2,000 K에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 15.548 kcal/mol일 때, 반응 (1)의 평형상수 값을 계산하시오.

- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스를 분석한 결과, 아래와 같은 조성을 얻을 수 있었다.

Constituent	Concentration
CO ₂	13.9%
H ₂ O	7.6%
N ₂	74.7%
O ₂	3.7%
SO ₂	1,130 ppm
NO	

보일러의 운전온도가 2,000 K일 때, NO의 최고농도를 계산하시오.

- (20 pt) 3. 아래 그림은 대규모 고정원으로부터 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되고 있는 강제산화식 석회석 세정공정 (Forced-oxidation limestone scrubbing process)을 보여주고 있다.



- (1) 이 고정원으로부터 배출되는 배기가스의 유량은 1,699,000 Nm³/h이고, 황산화물의 농도는 2,720 ppm이다. 이 사업장의 배출허용기준이 6% O₂ 기준으로 150 ppm SO₂일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO₂로 존재한다고 가정하고, Ca의 분자량은 40.08이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다.
- (2) 이 탈황공정으로부터 발생하는 일일 이산화탄소 배출량을 톤 단위로 계산하시오.

(20 pt) 4. 어떤 배출시설에서 발생하는 배기가스 내에 함유된 구형 입자의 평균직경이 0.1μ 인 입자상 물질의 농도가 50 g/m^3 , 배기가스의 유량이 $4,320 \text{ m}^3/\text{h}$, 배기가스의 점성도 (μ)가 $1.74 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ 일 때, 길이가 5 m 이고 높이가 4.6 m 인 집진판이 24 cm 간격으로 설치된 전기 집진기 (Electrostatic Precipitator, ESP)를 사용하여 배출허용기준 이하로 제진하고자 한다.

(1) 입자표면에 하전된 전하량은 다음식으로 표현된다:

$$q = 3\pi \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \varepsilon_o d_p^2 E_o$$

여기서, q = 입자의 전하량, ε = 입자의 유전상수, ε_o = 진공에서 유전도 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ C/V.m}$), d_p = 입자직경, E_o = 방전극의 전기장 세기이다. 입자 위에 작용하는 정전기력 (F)은 qE_p 이고, 여기서 E_p 는 집진극의 전기장 세기이다. 이때, 이러한 전기장 내에서 입자의 표류속도 (Drifting velocity), w 를 유도하시오.

$$(Ans.: w = \frac{\varepsilon_o d_p \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) E_o E_p}{\mu})$$

(2) 이 ESP 의 집진효율을 계산하시오. 단, 집진극과 방전극의 전기장 세기는 $6.0 \times 10^5 \text{ V/m}$ 로 같다고 가정하고, 입자의 유전상수는 4 이다. 참고로, $1 \text{ N.m} = 1 \text{ V.C}$ 이다.

Good luck on all your work to answer the questions.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3521)

Final exam.

Hour: 1:00 ~ 2:50 pm

Date: 17 December 2014

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something. Be careful with mathematics and units!

(50 pt) 1. 다음 각 물음에 대해 간략히 기술하시오.

(1) 황산화물(SO_x)의 배출억제를 위한 방법으로, (Total 15 pt)

(1)-a) 연료 관점과 배기가스 관점에서의 탈황기술 (60자 이내로 기술)

(1)-b) 배기가스 내의 SO_x 저감기술들을 소용량과 대용량으로 구분한 후 이를 다시 각각 저농도와 고농도의 사례로 구분할 때 각각 적합한 탈황기술과 대표적인 배출원 예 (총 200자 이내로 기술)

(2) 대규모 고정원(화력발전소 등)으로부터 발생하는 질소산화물(NO_x)을 가장 효과적으로 제거할 수 있는 방법 (100자 이내로 기술)

(2)-a) 제거반응의 원리 (5 pt)

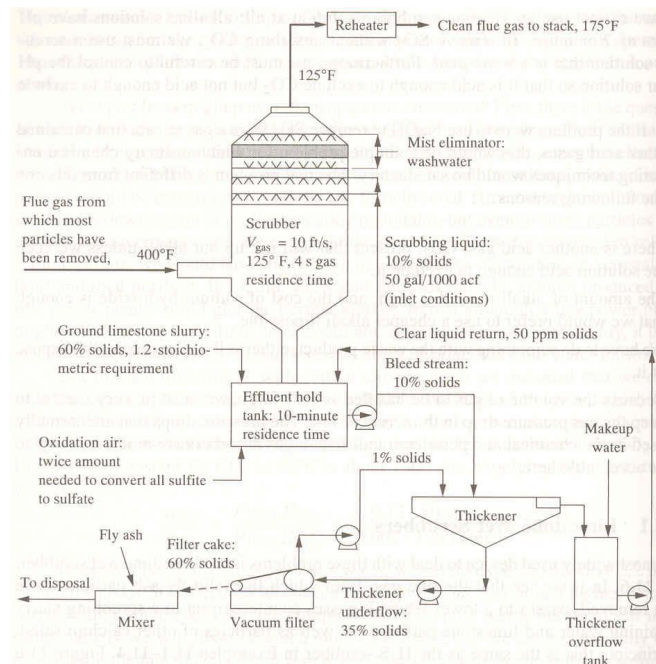
(2)-b) 사용되는 촉매와 반응식 (5 pt)

(3) 소규모 고정원으로부터 SO_x 를 제거할 수 있는 주요 기술 (10 pt)
(100자 이내로 기술)

(4) 관성력집진기와 세정집진기의 운전원리상의 공통점 (5 pt)
(50자 이내로 기술)

(5) NO_x 의 배출저감을 위한 연소제어법과 배출제어법의 차이와 특징 (10 pt)
(100자 이내로 기술)

(30 pt) 2. 아래 그림은 석탄화력발전소에서 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되고 있는 강제산화식 석회석 세정공정 (Forced-oxidation limestone scrubbing process)을 보여주고 있다.



(1) 위 공정을 기준으로 할 때,

(1)-a) ‘강제산화’를 유발시키는 공정과 그 이유를 설명 (5 pt)

(2)-b) 이 공정을 석탄화력발전소와 같은 곳에 적용하려고 할 경우, 일부 공정을 변경하여야 하는데 해당 공정을 적시하고 변경 방안을 설명 (5 pt)

(2) 이 석탄화력발전소에서 배출되는 배기가스의 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 $2,720 \text{ ppm}$ 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 $6\% \text{ O}_2$ 기준으로 150 ppm SO_2 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO_2 로 존재한다고 가정하고, Ca 의 분자량은 40.08 이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다. (20 pt)

(20 pt) 3. (20 pt) 2. 어떤 석탄화력발전소(coal-fired power plant)에서 23% 과잉공기로 역청탄(bituminous coal)을 태우고 있다. 연소반응 동안에 아래에 주어진 반응에 의해 다량의 NO 가 생성될 수 있다:



원하는 반응온도에서 반응 (1)에 대한 평형상수 (equilibrium constant)는 식 (2)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서, K 는 1 atm 에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 2,000 K 에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 15.548 kcal/mol 일 때, 반응 (1)의 평형상수 값을 계산하시오.
- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스를 분석한 결과, 아래와 같은 조성을 얻을 수 있었다.

Constituent	Concentration
CO ₂	13.9%
H ₂ O	7.6%
N ₂	74.7%
O ₂	3.7%
SO ₂	1,130 ppm
NO	

보일러의 운전온도가 2,000 K 일 때, NO 의 최고농도를 계산하시오.

Good luck on all your work.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3590)

Final exam.

Hour: 11:00 ~ 12:50 pm
Date: 19 December 2016

Student Name: _____
Student's SIGNATURE: _____
Student I.D. Number: _____

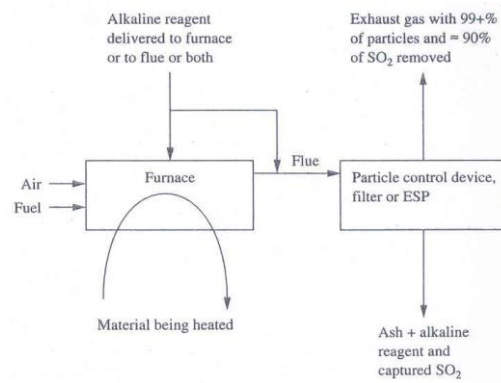
Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. ***Show all your work!*** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something. Be careful with mathematics and units!

(40 pt) 1. 다음 각 물음에 대해 간략히 기술하시오.

- (1) 대규모 고정원(화력발전소 등)으로부터 발생하는 질소산화물(NO_x)을 가장 효과적으로 제거할 수 있는 방법 **(반드시 80자 이내로 기술)**
- (2) 여과포집진기의 표면속도(superficial velocity) V_s 가 아래의 식으로 주어질 때, 여과포집진기를 운전하기 위한 전형적인 파라미터로 ΔP (압력강하)와 t (운전시간)간의 관계를 얻을 수 있는 방법 **(반드시 60 자 이내)**

$$V_s = \frac{P_{inlet} - P_{outlet}}{\mu \left[\left(\frac{dx}{k} \right)_{cake} + \left(\frac{dx}{k} \right)_{filter} \right]}$$

- (3) 벤추리 스크러버의 집진원리 **(반드시 50자 이내)**
- (4) 아래에 주어진 그림과 같이 알칼리성 건식 흡수제로 분말 CaCO_3 를 연소기 상단 내부나 연소기 후단에 투입하여 황산화물을 제거하고자 한다.



(4)-a) 고온의 연소가스 내에서 CaCO_3 및 CaCO_3 와 SO_2 간에 일어나는 반응(들)

(4)-b) 위의 (4)-a)와 같은 배연탈황기술을 산업현장에 실제 적용할 때 예상되는 문제점들 (3가지 이상)

(40 pt) 2. 어떤 석탄화력발전소(coal-fired power plant)에서 23% 과잉공기로 역청탄(bituminous coal)을 태우고 있다. 이 보일러에서 발생하는 다량의 NO 를 후처리기술(aftertreatment technology)로 제거하기에 앞서서, 적합하고도 적절한 예연제어(precombustion control) 기법을 사용함으로써 배출될 수 있는 NO 를 현저히 낮출 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이러한 예측의 타당성을 검토하기 위한 하나의 유효한 접근방법은 다음에 주어진 NO 생성반응에 대한 열역학적 특성을 고려함으로써 석탄 연소반응 동안에 NO 생성에 절대적인 영향을 미치는 주요 인자들이 무엇인지를 파악하는 것이다:



원하는 반응온도에서 반응 (A)에 대한 평형상수(equilibrium constant)는 식 (B)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (\text{B})$$

여기서, K 는 1 atm 에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 반응 (A)에 대한 평형상수 값들이 아래의 표에 주어져 있다. 반응온도가 500, 2,000 및 3,000 K 일 때, 반응 (A)의 평형상수 값을 계산하여 주어진 표를 완성하시오. 단, 500, 2,000 및 3,000K 에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 각각 20.095, 15.548 및 12.589 kcal/mol 이다.

Temperature (K)	Equilibrium constant
300	7×10^{-31}
500	
1000	
1500	
2000	7.5×10^{-9}
2500	
3000	1.1×10^{-5}
4000	
	0.0035
	0.0888

- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스를 분석한 결과, 아래와 같은 조성을 얻을 수 있었다.

Constituent	Concentration (%)
CO ₂	13.9
H ₂ O	7.6
N ₂	74.7
O ₂	3.7
SO ₂	
NO	

보일러의 운전온도가 2,000 및 3,000 K 일 때, 생성될 수 있는 NO 의 최고농도를 계산하시오.

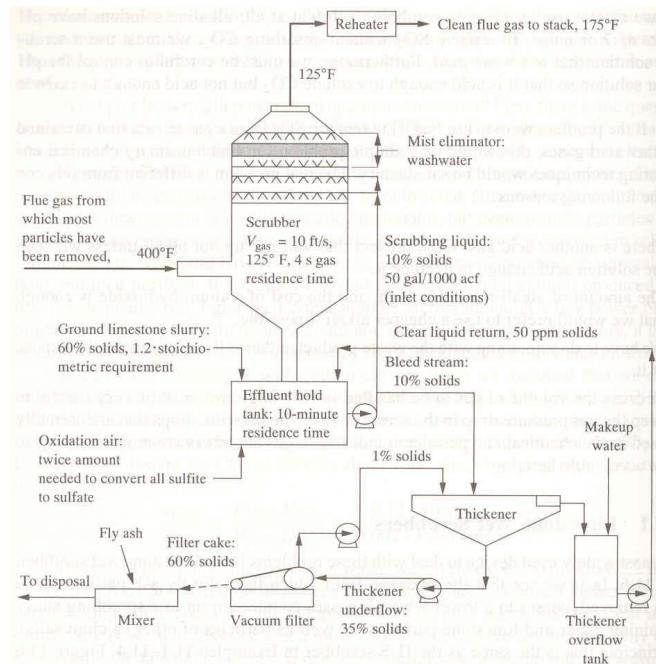
- (3) 보일러 내의 최고 화염온도인 3,000 K 에서 배기가스가 0.0001 s 동안 머무를 때, 생성 가능한 NO 의 농도를 계산하시오. 단, 보일러 내에서 배기가스의 체류시간에 따른 NO 농도의 변화는 다음 식으로 표현되고,

$$\frac{d[NO]}{dt} = k\{([NO]_e - [NO])([NO]_e + [NO])\},$$

여기서 $k = 2.24 \times 10^{10} / s$ 이다.

- (4) 최고 화염온도인 3,000 K 에서 생성되는 NO 의 농도가 평형농도의 약 95%에 도달하는 데 걸리는 시간을 계산하시오.

(20 pt) 2. 아래 그림은 석탄화력발전소에서 배출되는 황산화물을 제거하기 위하여 배연탈황 상용기술로 가장 널리 사용되고 있는 강제산화식 석회석 세정공정 (forced-oxidation limestone scrubbing process)을 보여주고 있다.



- (1) 위 공정을 기준으로 할 때,

(1)-a) '강제산화'를 유발시키는 공정과 그 이유를 설명 (반드시 50 자 이내)

(1)-b) 이 공정을 석탄화력발전소와 같은 곳에 적용하려고 할 경우, 일부 공정을 변경하여야 하는데 해당 공정을 적시하고 변경 방안을 설명 (반드시 50 자 이내)

- (2) 이 석탄화력발전소에서 배출되는 배기가스의 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 2,720 ppm 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 6% O_2

기준으로 150 ppm SO₂ 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO₂로 존재한다고 가정하고, Ca의 분자량은 40.08 이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다.

Good luck on all your work.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3486)

Total point = 75

Final exam.

Hour: 10:30 ~ 11:45 am (75 min)

Date: 21 December 2017

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something. Be careful with mathematics and units!

(40 pt) 1. 다음 각 물음에 대해 간략히 기술하시오. (각각 최대 100자 이내로 기술)

- (1) ESP의 집진성과 밀접한 관련성이 있는 먼지비저항도가 너무 작은 경우와 너무 큰 경우로 구분하고 각각에서 집진이 어려운 이유
- (2) 관성력 충돌 집진기의 집진성을 나타낼 수 있는 방법
- (3) 질소산화물(NO_x) 제어기술 중 선택적촉매환원법(selective catalytic reduction, SCR)의 원리
- (4) 여과포집진기의 운전방정식을 도출하기 위한 과정 (**Hint: 5개 과정으로 구분 기재**)

(15 pt) 2. 고정원에서 배출되는 황산화물을 제거하기 위한 배연탈황기술과 관련한 다음 물음에 답하시오.

- (1) 고농도의 황산화물이 배가스 내에 존재할 때 가장 적합한 탈황기술에 관한 설명 **(5 pt) (반드시 100 자 이내)**

(2) 대규모 고정원 배연탈황에 가장 널리 사용되는 강제산화식 석회석 세정공정(forced-oxidation limestone scrubbing process)을 적용하여 황산화물의 배출허용기술을 충족시키고자 한다. 이 고정원의 배기가스 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 $2,720 \text{ ppm}$ 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 $6\% \text{ O}_2$ 기준으로 150 ppm SO_2 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO_2 로 존재한다고 가정하고, Ca 의 분자량은 40.08 이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다. (10 pt)

(20 pt) 3. 어떤 석탄화력발전소(coal-fired power plant)에서 23% 과잉공기로 역청탄(bituminous coal)을 태우고 있다. 이 보일러에서 발생하는 다량의 NO를 후처리기술(aftertreatment technology)로 제거하기에 앞서서, 적합하고도 적절한 예연제어(precombustion control) 기법을 사용함으로써 배출될 수 있는 NO를 현저히 낮출 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이러한 예측의 타당성을 검토하기 위한 하나의 유효한 접근방법은 다음에 주어진 NO 생성반응에 대한 열역학적 특성을 고려함으로써 석탄 연소반응 동안에 NO 생성에 절대적인 영향을 미치는 주요 인자들이 무엇인지를 파악하는 것이다:



원하는 반응온도에서 반응 (A)에 대한 평형상수(equilibrium constant)는 식 (B)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (\text{B})$$

여기서, K 는 1 atm 에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

(1) 반응 (A)에 대한 평형상수 값들이 아래의 표에 주어져 있다. 반응온도가 500 , $2,000$ 및 $3,000 \text{ K}$ 일 때, 반응 (A)의 평형상수 값을 계산하여 주어진 표를 완성하시오. 단, 500 , $2,000$ 및 $3,000\text{K}$ 에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유

에너지 변화는 각각 20.095, 15.548 및 12.589 kcal/mol이다.

Temperature (K)	Equilibrium constant
300	7×10^{-31}
500	
1000	
1500	
2000	7.5×10^{-9}
2500	
3000	1.1×10^{-5}
4000	
	0.0035
	0.0888

- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스를 분석한 결과, 아래와 같은 조성을 얻을 수 있었다.

Constituent	Concentration (%)
CO ₂	13.9
H ₂ O	7.6
N ₂	74.7
O ₂	3.7
SO ₂	
NO	

보일러의 운전온도가 2,000 및 3,000 K일 때, 생성될 수 있는 NO의 최고농도를 계산하시오.

- (3) 보일러 내의 최고 화염온도인 3,000 K에서 배기가스가 0.0001 s 동안 머무를 때, 생성 가능한 NO의 농도를 계산하시오. 단, 보일러 내에서 배기가스의 체류시간에 따른 NO 농도의 변화는 다음 식으로 표현되고,

$$\frac{d[NO]}{dt} = k\{([NO]_e - [NO])([NO]_e + [NO])\},$$

여기서 $k = 2.24 \times 10^{10} / s$ 이다.

- (4) 최고 화염온도인 3,000 K에서 생성되는 NO의 농도가 평형농도의 약 95%에 도달하는 데 걸리는 시간을 계산하시오.

Good luck on all your work.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3340)

Total point = 80

Final examination

Hour: 9:00 ~ 10:15 am

Date: December 20, 2018

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something. Be careful with mathematics and units!

(40 pt) 1. 다음 각 물음에 대해 간략히 기술하시오. (각각 최대 200자 이내로 기술)

- (1) 전기집진기(electrostatic precipitator, ESP)로 제진하고자 하는 먼지의 비저항도 특성과 제진성능 간의 관계
- (2) 질소산화물(NO_x) 제어기술 중 선택적촉매환원법(selective catalytic reduction, SCR)의 원리
- (3) 황산화물(SO_x)의 농도와 배가스 유량에 따라 정합성이 높은 배연탈황기술
- (4) 어떤 연소보일러에서 최고연소온도와 이 온도에서의 체류시간과 N_2/O_2 농도가 주어질 때, 이 연소보일러에서 생성되는 NO 농도를 예측할 수 있는 방법
※ 5단계로 구분하여 약술

(20 pt) 2. 대규모 고정원으로부터 배출되는 SO_x 를 제거하기 위하여 강제산화식 석회석 세정공정(Forced-oxidation limestone scrubbing process)을 적용하고자 한다. 이 고정원으로부터 배출되는 배기가스의 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 2,720 ppm이다.

- (1) 이 사업장의 배출허용기준이 6% O₂ 기준으로 150 ppm SO₂일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 SO_x는 모두 SO₂로 존재하고, Ca의 분자량은 40.08이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 로 가정한다.
- (2) 이 배연탈황공정으로부터 발생하는 일일 이산화탄소 배출량을 톤 단위로 계산하시오.

(20 pt) 3. 연소보일러 내에서 N₂는 78%이고, O₂는 6%이다. 이때 원하는 온도에서 N₂와 O₂ 간의 반응에 대한 평형상수(equilibrium constant)는 아래 식 (1)과 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right), \quad (1)$$

여기서, K 는 1 atm에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 2,000 K에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화가 15.548 kcal/mol일 때, 평형상수 K 를 계산하시오.
- (2) 최고 NO 농도를 계산하시오.

Good luck on all your work.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3230)

Total point = 80

Final exam. (26)

Hour: 9:00 ~ 10:15 am

Date: December 19, 2019

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. ***Show all your work!*** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something. Be careful with mathematics and units!

(30 pt) 1. 다음 각 물음에 대해 간략히 기술하시오. (각각 최대 150자 이내로 기술)

- (1) 황산화물(SO_x)의 농도와 배가스 유량에 따라 정합성이 높은 배연탈황기술
- (2) 세정집진기의 집진원리와 벤추리형이 가장 널리 산업현장에 적용되는 이유
- (3) 대규모 고정원(화력발전소 등)으로부터 발생하는 질소산화물(NO_x)을 가장 효과적으로 제거할 수 있는 방법
 - (3)-a) 제거반응의 원리
 - (3)-b) 사용되는 촉매와 반응식

(20 pt) 2. 고온에서 생성되는 NO는 다음의 반응으로 나타낼 수 있다:



원하는 반응온도에서 반응 (A)에 대한 평형상수(equilibrium constant)는 식 (B)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (\text{B})$$

여기서, K 는 1 atm에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 반응 (A)에 대한 평형상수 값들이 아래의 표에 주어져 있다. 빈칸의 평형상수 값을 계산하시오. 단, 500, 2,000 및 3,000 K에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 각각 20.095, 15.548 및 12.589 kcal/mol이다.

Temperature (K)	Equilibrium constant
300	7×10^{-31}
500	
1000	7.5×10^{-9}
1500	1.1×10^{-5}
2000	
2500	0.0035
3000	
4000	0.0888

- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스를 분석한 결과, 아래와 같은 조성을 얻을 수 있었다.

Constituent	Concentration (%)
CO ₂	13.9
H ₂ O	7.6
N ₂	74.7
O ₂	3.7
SO ₂	
NO	

보일러의 운전온도가 2,000 및 3,000 K일 때, 생성될 수 있는 NO의 최고농도를 계산하시오.

(20 pt) 3. 어떤 배출시설에서 발생하는 배기가스 내에 함유된 구형 입자의 평균직경이 3.2 μ m인 입자상 물질의 농도가 50 g/m³, 배기가스의 유량이 4,320 m³/h, 배기가스의 점성도 (μ)가 1.74×10^{-5} kg/m·s일 때, 길이가 5 m이고 높이가 4.6 m인

집진판이 24 cm 간격으로 설치된 전기 집진기(electrostatic precipitator, ESP)를 사용하여 배출허용기준 이하로 제진하고자 한다.

(1) 입자표면에 하전된 전하량은 다음식으로 표현된다:

$$q = 3\pi \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \varepsilon_o d_p^2 E_o$$

여기서, q = 입자의 전하량, ε = 입자의 유전상수, ε_o = 진공에서 유전율 (8.854×10^{-12} C/V·m), d_p = 입자직경, E_o = 방전극의 전기장 세기이다. 입자 위에 작용하는 정전기력 (F)은 qE_p 이고, 여기서 E_p 는 집진극의 전기장 세기이다. 이때, 이러한 전기장 내에서 입자의 표류속도(drifting velocity), w 를 유도하시오.

$$(Ans.: w = \frac{\varepsilon_o d_p \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) E_o E_p}{\mu})$$

(2) 이 ESP의 집진효율을 계산하시오. 단, 집진극과 방전극의 전기장 세기는 6.0×10^5 V/m로 같다고 가정하고, 입자의 유전상수는 4이다. 참고로, $1 \text{ N}\cdot\text{m} = 1 \text{ V}\cdot\text{C}$ 이다.

(10 pt) 4. 강제산화식 석회석 세정공정(forced-oxidation limestone scrubbing process)을 적용하여 황산화물의 배출허용기술을 충족시키고자 한다. 이 고정원의 배기가스 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, 황산화물의 농도는 $2,720 \text{ ppm}$ 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 $6\% \text{ O}_2$ 기준으로 150 ppm SO_2 일 때, 황산화물을 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 황산화물은 모두 SO_2 로 존재한다고 가정하고, Ca의 분자량은 40.08이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{ H}_2\text{O}$ 로 가정한다.

Good luck on all your work.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3184)

Total point = 90

Final exam. (31)

Hour: 10:30 ~ 11:45 am

Date: December 15, 2020

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something. Be careful with mathematics and units!

(35 pt) 1. 다음 각 물음에 대해 간략히 기술하십시오. (각각 최대 100자 이내로 기술)

(1) 배연탈황기술과 관련하여 **(10 pt)**

(1)-a) 배가스 내 황산화물(SO_x)의 농도가 % 수준일 때와 ppm 수준일 때 적용할 수 있는 기술

(1)-b) 소규모 배연탈황기술로 적합한 건식(반건식 포함) 탈황법의 종류와 반응 원리

(2) 질소산화물(NO_x) 배출저감을 위한 연소제어(combustion control) 기술의 대표적인 예들(3개)과 각각의 원리 **(10 pt)**

(3) 대규모 고정원(화력발전소 등)으로부터 발생하는 질소산화물(NO_x)을 가장 효과적으로 제거할 수 있는 방법 **(15 pt)**

(3)-a) 제거반응의 원리

(3)-b) 사용되는 촉매와 반응식

(3)-c) NO_x 농도가 330 ppm이고 배출허용기준이 15 ppm일 때 요구되는 환원제의 농도

(20 pt) 2. 고온에서 생성되는 NO는 다음의 반응으로 나타낼 수 있다:



원하는 반응온도에서 반응 (A)에 대한 평형상수(equilibrium constant)는 식 (B)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (B)$$

여기서, K 는 1 atm에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 반응 (A)에 대한 평형상수 값들이 아래의 표에 주어져 있다. 빈칸의 평형상수 값을 계산하시오. 단, 500, 2,000 및 3,000 K에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 각각 20.095, 15.548 및 12.589 kcal/mol이다.

Temperature (K)	Equilibrium constant
300	7×10^{-31}
1000	7.5×10^{-9}
1500	1.1×10^{-5}
2000	
2500	0.0035
3000	
4000	0.0888

- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스의 조성은 다음과 같다.

Constituent	Concentration (%)
CO ₂	13.9
H ₂ O	7.6
N ₂	74.7
O ₂	3.7
SO ₂	
NO	

보일러의 연소온도가 2,000 및 3,000 K일 때, 생성될 수 있는 NO의 최고농도를 계산하시오.

(15 pt) 3. 강제산화식 석회석 세정공정(forced-oxidation limestone scrubbing process)을 적용하여 SO_x 의 배출허용기준을 충족시키고자 한다. 이 고정원의 배기가스 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, SO_x 농도는 $2,720 \text{ ppm}$ 이다. 이 사업장의 배출허용기준이 6% O_2 기준으로 150 ppm SO_2 일 때, SO_x 를 제거하기 위하여 시간당 세정시설에서 필요한 석회석의 양을 kg 단위로 계산하시오. 단, 배기가스 내에 함유된 SO_x 는 모두 SO_2 로 존재한다고 가정하고, Ca 의 분자량은 40.08 이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 이다.

(20 pt) 4. 어떤 배출시설의 배가스 유량(Q)은 $4,320 \text{ m}^3/\text{h}$, 함진농도는 $50 \text{ g}/\text{m}^3$, 먼지의 평균직경(d_p)은 3.2μ , 배가스의 점성도(μ)는 $1.74 \times 10^{-5} \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ 이다. 길이가 5 m 이고 높이가 4.6 m 인 집진판이 24 cm 간격으로 설치된 전기집진기(electrostatic precipitator, ESP)를 사용하여 배출허용기준 이하로 제진하고자 할 때 다음 물음에 답하시오. 단, 집진극과 방전극의 전기장 세기는 $6.0 \times 10^5 \text{ V}/\text{m}$ 로 같다고 가정한다.

- (1) 제진하고자 하는 먼지입자의 표류속도를 계산하시오. 단, 입자의 유전상수(ϵ)는 4 , 진공조건에서 유전율(ϵ_o)은 $8.854 \times 10^{-12} \text{ C}/\text{V}\cdot\text{m}$, $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 는 $1 \text{ V}\cdot\text{C}$ 이다.
- (2) 이 ESP의 집진효율을 계산하시오.

Good luck on all your work.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 3247)

Total point = 100

Final exam. (24)

Hour: 10:30 ~ 11:45 am

Date: December 21, 2021

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 2 hours. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give any credit if you do not write anything – put something. Be careful with mathematics and units!

(50 pt) 1. 다음 각 물음에 대해 간략히 기술하시오. (각각 최대 100자 이내로 기술)

(1) 배연탈황기술과 관련하여 **(10 pt)**

(1)-a) 배연탈황(FGD)과 연료탈황(HDS)

(1)-b) SO_x 농도가 % 수준일 때와 ppm 수준일 때 적용할 수 있는 기술

(2) 여과포집진기(일명 백필터) 설계와 관련하여 **(10 pt)**

(2)-a) 전반적인 설계방법

(2)-b) 운전방법과 운전시간에 따른 집진효율의 변화

(3) 고정원에서 질소산화물(NO_x)을 제거하기 위한 선택적촉매환원(selective catalytic reduction, SCR) 기술 **(10 pt)**

(4) 전기집진기(ESP)와 관련하여, **(20 pt)**

(4)-a) 먼지의 하전량이 $q = 3\pi \frac{\epsilon}{\epsilon+2} \epsilon_0 d_p^2 E_0$ 일 때, 표류속도를 알 수 있는 식
(필요한 변수들을 모두 정의하고 식을 유도)

(4)-b) 먼지 비저항도가 너무 높을 때 ESP 제진성능이 낮은 이유

(4)-c) 배가스에 SO_x가 존재할 때 ESP 집진성능이 향상되는 이유

(4)-d) 전기장세기(E)를 증가시킬 경우 장점과 단점

(20 pt) 2. 고온에서 생성되는 NO는 다음의 반응으로 나타낼 수 있다:



원하는 반응온도에서 반응 (A)에 대한 평형상수(equilibrium constant)는 식 (B)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (B)$$

여기서, K 는 1 atm에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 반응 (A)에 대한 평형상수 값들이 아래의 표에 주어져 있다. 빈칸의 평형상수 값을 계산하시오. 단, 500, 2,000 및 3,000 K에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 각각 20.095, 15.548 및 12.589 kcal/mol이다.

Temperature (K)	Equilibrium constant
300	7×10^{-31}
1000	7.5×10^{-9}
1500	1.1×10^{-5}
2000	
2500	0.0035
3000	
4000	0.0888

- (2) 이 발전소에서 배출되는 배기가스의 조성은 다음과 같다.

Constituent	Concentration (%)
CO ₂	13.9
H ₂ O	7.6
N ₂	74.7
O ₂	3.7
SO ₂	
NO	

보일러의 연소온도가 2,000 및 3,000 K일 때, 생성될 수 있는 NO의 최고농도를 계산하시오.

(20 pt) 3. 강제산화식 석회석 세정공정(forced-oxidation limestone scrubbing process)을 적용하여 SO_x 의 배출허용기준을 충족시키고자 한다. 이 고정원의 배기가스 유량은 $1,699,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이고, SO_x 농도는 $2,720 \text{ ppm}$ 이다. 이 사업장의 배출허용기준은 $6\% \text{ O}_2$ 기준으로 150 ppm SO_2 이다. 단, 배기가스 내에 함유된 SO_x 는 모두 SO_2 로 존재한다고 가정하고, Ca의 분자량은 40.08 이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 이다.

(1) 이 세정법을 “강제산화식”이라고 칭하는 이유를 설명하시오. **(10 pt)**

(2) 스크러버에서 필요한 석회석의 양(kg/h)을 계산하시오. **(10 pt)**

(10 pt) 4. 어떤 배출시설의 배가스 유량(Q)은 $4,320 \text{ m}^3/\text{h}$, 함진농도는 50 g/m^3 , 먼지의 평균직경(d_p)은 3.2μ , 배가스의 점성도(μ)는 $1.74 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 이다. 길이가 5 m 이고 높이가 4.6 m 인 집진판이 24 cm 간격으로 설치된 ESP를 사용하여 배출허용기준 이하로 제진하고자 할 때 다음 물음에 답하시오. 단, 전기장 세기(E)는 $6.0 \times 10^5 \text{ V/m}$ 로 동일하고, 입자의 유전상수(ϵ)는 4 , 진공조건에서 유전율(ϵ_o)은 $8.854 \times 10^{-12} \text{ C/V}\cdot\text{m}$, $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 는 $1 \text{ V}\cdot\text{C}$ 이다.

(1) 제진하고자 하는 먼지입자의 표류속도를 계산하시오. **(5 pt)**

(2) 이 ESP의 집진효율을 계산하시오. **(5 pt)**

Good luck on all your work.

Air Pollution Control Technology

(Class #: 2611)

Total pt: 90

Mid-term examination (48)

Hour: 12:00 ~ 13:15 pm

Date: 4 December 2023

Student Name: _____

Student's SIGNATURE: _____

Student I.D. Number: _____

Directions: Please enter your name on this page. Then sign the examination and enter your student identification number above. Time allowed for this examination is 75 min. Answer all questions on a separate paper provided. Be precise, logical, and ordered in your responses. **Show all your work!** I can not do give *any* credit if you do not write *anything* – put something you learned in this class, if you do want to get a partial credit although it is just one point. Be careful with mathematics and units!

(50 pt) 1. 다음 물음에 대하여 간략히 서술하시오. (각 문항 300자 이내로)

(1) 전기집진기(electrostatic precipitator, ESP)에서 먼지의 하전량이

$q = 3\pi \frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \epsilon_0 d_p^2 E_0$ 일 때, 표류속도를 나타내는 식 **(10 pt)**

(※ 다른 필요한 모든 변수들을 모두 정의하고 식을 유도)

(2) ESP의 제진성과 관련하여, **(10 pt)**

(2)-a) 먼지 비저항도와 제진성능 간의 관계

(2)-b) 전기장세기(E)를 증가시킬 경우 장점과 단점

(3) 질소산화물($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) 제어를 위한 연소제어법(combustion control)와 배출제어법(emission control) **(10 pt)**

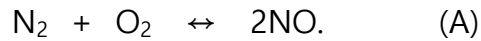
(4) 백필터의 설계방법과 이에 따른 현장에서의 운전방법 **(10 pt)**

(5) 화력발전소 등의 대용량 고정원 NO_x 배출제어와 관련하여, **(10 pt)**

(5)-a) SCR(selective catalytic reduction) 탈질기술

(5)-b) 환원제와 촉매

(20 pt) 2. 고온에서 생성되는 NO는 다음의 반응으로 나타낼 수 있다:



원하는 반응온도에서 반응 (A)에 대한 평형상수(equilibrium constant)는 식 (B)와 문헌에 알려진 표준 Gibbs 자유 에너지 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (\text{B})$$

여기서, K 는 1 atm에서 이상기체로 간주하고 농도를 부분압으로 표현할 때의 평형상수, ΔG° 는 표준 Gibbs 자유 에너지 변화, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

- (1) 반응 (A)에 대한 평형상수 값들이 아래의 표에 주어져 있다. 빈칸의 평형상수 값을 계산하십시오. 단, 500, 2,000 및 3,000 K에서 NO 생성을 위한 표준 Gibbs 자유 에너지 변화는 각각 20.095, 15.548 및 12.589 kcal/mol이다.

Temperature (K)	Equilibrium constant
300	7×10^{-31}
1000	7.5×10^{-9}
1500	1.1×10^{-5}
2000	
2500	0.0035
3000	
4000	0.0888

- (2) 배출되는 배기가스의 조성은 CO₂ 13.9%, H₂O 7.6%, N₂ 74.7%, O₂ 3.7%, SO₂ 430 ppm 이다. 보일러의 연소온도가 2,000 및 3,000 K 일 때, 생성될 수 있는 NO의 최고농도를 ppm 단위로 계산하십시오.

(20 pt) 3. 강제산화식 석회석 세정공정(forced-oxidation limestone scrubbing process)을 적용하여 SO_x의 배출허용기준을 충족시키고자 한다. 이 고정원의 배기가스 유량은 1,699,000 Nm³/h이고, SO_x 농도는 2,720 ppm이다. 이 사업장의

배출허용기준은 6% O₂ 기준으로 150 ppm SO₂이다. 단, 배기가스 내에 함유된 SO_x는 모두 SO₂로 존재한다고 가정하고, Ca의 분자량은 40.08이다. 저류조에 도달하는 초기의 고상 부산물은 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ 이다.

(1) 석회석 슬러리와 SO₂ 간에 일어나는 반응을 쓰고 설명하시오. **(10 pt)**

(2) 스크러버에서 필요로 하는 석회석의 양(kg/h)을 계산하시오. **(10 pt)**

Good luck on all your work to be answered to the questions.