

457.210A.001

## 환경공학 중간고사 - Solutions

2015. 10. 21.

유의사항:

1. 앞뒷면 모두를 사용하여 A4 용지 두 장에 필요한 내용을 적어 시험에 사용할 수 있습니다. 다만, 컴퓨터로 출력하거나 복사한 것은 불가합니다.
2. 계산기를 사용하되, 수업과 관련된 공식이 프로그램되어 있으면 안됩니다.
3. 주지한 바와 같이, 부정행위를 할 경우 학급 최저점수의 80%를 부여합니다. 부정행위는 절대 용납하지 않습니다.
4. 해당사항이 있을 경우, 꼭 단위를 기입하고, 정확한 단위를 사용하십시오. 답은 논리적이고 이해하기 쉽게 기재하십시오.
5. 본 시험은 7문항으로 구성되어 있으며, 총점은 150점입니다.

1. 다음 명제에 대하여 옳고 그름을 O/X로 표시하십시오.

(주의! 답이 맞으면 +2점, 틀리면, -2점, 기입하지 않으면 0점임)

- 1) 페놀이 포함된 원수를 염소소독하여 공급할 경우 수돗물의 안전성을 어느 정도 확보할 수 있다.  
답) X
- 2) 약산의  $pK_a$ 가 pH보다 높을 경우 이 약산은 수소이온( $H^+$ )이 결합된 상태로,  $pK_a$ 가 pH보다 낮을 경우 수소이온이 해리된 상태로 보다 많이 존재한다.  
답) O
- 3) 0.1 M  $CaSO_4$  용액의 이온강도(ionic strength)는 0.3 M NaCl의 이온강도보다 높다.  
답) O
- 4) 지질(lipids)는 일반적으로 높은 소수성(hydrophobicity)을 지니며, 따라서 소수성 유기오염물질(hydrophobic organic contaminants) 생물축적의 주 매개체 역할을 한다.  
답) O
- 5) 박테리아는 BOD를 저감하는 데 탁월한 능력을 보유하고 있으나, 이분법을 통해 생장하므로 진화의 능력이 없어 신규 오염물질을 분해하는 기능을 기대하기는 힘들다.  
답) X
- 6) 광물에서 인(phosphorus)을 효율적으로 추출할 수 있는 Haber-Bosch process가 개발되면서 작물 생산량이 증가한 반면, 부영양화의 문제가 대두되었다.  
답) X
- 7) 기온이 연중  $20^\circ C$ 이상으로 온난한 기후가 유지되는 아열대지방에서는 호수의 turnover가 발생하지 않는다.  
답) O
- 8) 발암물질(carcinogen)의 경우 그 섭취량이 일정 수준 이하이면 독성이 없는 것으로 간주한다.  
답) X

9) Confined aquifer에 지하수 관정을 설치하였을 때 수면의 높이는 aquifer 상단보다 높게 위치한다.

답) O

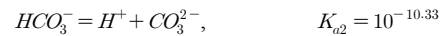
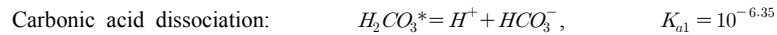
10) 일반적으로 미생물의 BOD 분해속도는 온도가 증가함에 따라 증가하나, 산소의 확산 속도는 온도가 증가함에 따라 감소한다.

답) X

2. 천층의 해수는 대기 중의 CO<sub>2</sub>와 평형을 이루고 있으며, 일반적인 해수의 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도는 140 mg/L 정도로 알려져 있다. 지구 온난화에 의해서 최근 100년 사이 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 약 280 ppm (=2.8×10<sup>-4</sup> atm)에서 400 ppm (=4.0×10<sup>-4</sup> atm)으로 증가하였다. 이 때 다음 물음에 답하시오. (단, 편의상 activity=molarity로 가정)

1) 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 증가로 천층 해수의 pH는 어떻게 변화하는지 계산하시오. 다음의 내용을 참고하시오. (탄소, 산소 및 수소의 원자량은 각각 12, 16, 1을 사용) (12점)

CO<sub>2</sub>의 Henry's law constant,  $K_H = 3.4 \times 10^{-2} \text{ M/atm}$



답)

$$[HCO_3^-] = \frac{140 \text{ mg/L} \cdot 10^{-3} \text{ g/mg}}{61 \text{ g/mole}} = 2.30 \times 10^{-3} \text{ M}$$

i) CO<sub>2</sub> 농도 = 280 ppm

$$[H_2CO_3^*] = K_H \cdot P_{CO_2} = 3.4 \times 10^{-2} \text{ M/atm} \cdot 2.8 \times 10^{-4} \text{ atm} = 9.52 \times 10^{-6} \text{ M}$$

$$\frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3^*]} = K_{a1}, [H^+] = K_{a1} \frac{[H_2CO_3^*]}{[HCO_3^-]} = 10^{-6.35} \cdot \frac{9.52 \times 10^{-6} \text{ M}}{2.30 \times 10^{-3} \text{ M}} = 1.85 \times 10^{-9} \text{ M}$$

$$pH = -\log[H^+] = -\log(1.85 \times 10^{-9} \text{ M}) = 8.73$$

ii) CO<sub>2</sub> 농도 = 400 ppm

$$[H_2CO_3^*] = K_H \cdot P_{CO_2} = 3.4 \times 10^{-2} \text{ M/atm} \cdot 4.0 \times 10^{-4} \text{ atm} = 1.36 \times 10^{-5} \text{ M}$$

$$[H^+] = K_{a1} \frac{[H_2CO_3^*]}{[HCO_3^-]} = 10^{-6.35} \cdot \frac{1.36 \times 10^{-5} \text{ M}}{2.30 \times 10^{-3} \text{ M}} = 2.64 \times 10^{-9} \text{ M}$$

$$pH = -\log[H^+] = -\log(2.64 \times 10^{-9} \text{ M}) = 8.58$$

∴ pH 약 0.15 감소

2) CO<sub>2</sub> 농도가 400 ppm일 때 천층 해수의 carbonate alkalinity를 mg/L as CaCO<sub>3</sub> 단위로 구하시오. (8점)

답)

$$\frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = K_{a2}, [CO_3^{2-}] = K_{a2} \frac{[HCO_3^-]}{[H^+]} = 10^{-10.33} \cdot \frac{2.30 \times 10^{-3} \text{ M}}{2.64 \times 10^{-9} \text{ M}} = 4.09 \times 10^{-5} \text{ M}$$

(또는 pH가 pK<sub>a2</sub>보다 약 2 정도 낮으므로 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>의 존재는 무시)

$$\begin{aligned} \text{Carbonate alkalinity} &= [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] = 2.30 \times 10^{-3} + 2 \times 4.09 \times 10^{-5} = 2.38 \times 10^{-3} \text{ eq/L} \\ &= 2.38 \times 10^{-3} \text{ eq/L} \cdot 5 \times 10^4 \text{ mg CaCO}_3/\text{eq} = 119 \text{ mg/L as CaCO}_3 \end{aligned}$$

3. 하수 내 병원균을 제거하기 위하여 염소 소독을 실시하고자 한다. 실험실에서 completely-mixed batch reactor (CMBR)을 이용, 실험을 실시하였더니 소독 10분만에 90%의 제거 효율을 얻었다. 염소 소독에 의한 병원균 제거가 1차 반응을 따른다고 가정할 때, 다음 물음에 답하시오.

1) 이 반응의 1차반응상수(1st order reaction rate constant)와 반감기를 구하시오. (7점)

답)

$$\frac{C_{final}}{C_{initial}} = e^{-kt_{final}}$$

$$k = -\frac{1}{t_{final}} \ln \frac{C_{final}}{C_{initial}} = -\frac{1}{10 \text{ min}} \ln 0.1 = 0.23 \text{ min}^{-1}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = 3.0 \text{ min}$$

2) 유입수의 유량이  $10^4 \text{ m}^3/\text{hr}$ 일 때, steady-state 상태의 completely-mixed flow reactor (CMFR)에서 병원균 99.9% 제거를 달성하기 위한 반응조의 부피를 구하시오. (7점)

답)

$$\frac{C_{out}}{C_{in}} = \frac{1}{1 + kt_0}$$

$$t_0 = \frac{1}{k} \left( \frac{C_{in}}{C_{out}} - 1 \right) = \frac{1}{0.23 \text{ min}^{-1}} (1000 - 1) = 4340 \text{ min}$$

$$V = Qt_0 = 10^4 \text{ m}^3/\text{hr} \cdot 4340 \text{ min} \cdot \frac{1}{60} \text{ hr}/\text{min} = 7.23 \times 10^5 \text{ m}^3$$

3) 2)의 결과를 통하여 CMFR를 적용하는 것이 현실적으로 불가능하다는 것을 확인하고, 반응조를 plug flow reactor (PFR)로 운영하기로 하였다. PFR의 단면적이  $5 \text{ m}^2$ 일 때, 같은 유량에서 99.9% 제거효율 달성을 위한 PFR의 길이를 구하시오. (6점)

답)

$$\frac{C_{out}}{C_{in}} = e^{-kt_0}$$

$$t_0 = -\frac{1}{k} \ln \frac{C_{out}}{C_{in}} = -\frac{1}{0.23 \text{ min}^{-1}} \ln 0.001 = 30.0 \text{ min}$$

$$V = Qt_0 = 10^4 \text{ m}^3/\text{hr} \cdot 30.0 \text{ min} \cdot \frac{1}{60} \text{ hr}/\text{min} = 5000 \text{ m}^3$$

$$L = \frac{V}{A} = \frac{5000 \text{ m}^3}{5 \text{ m}^2} = 1000 \text{ m}$$

4. 다음 물음에 답하시오.

1) DNA와 RNA의 차이를 그 화학적 구조와 기능의 측면에서 설명하시오. (6점)

답)

화학적 구조의 차이:

DNA: 이중가닥, 당 부분이 2-deoxyribose, 염기가 adenine, thymine, guanine, cytosine

RNA: 단일가닥, 당 부분이 ribose, 염기가 adenine, uracil, guanine, cytosine

기능의 차이:

DNA: 유전정보를 저장, 다음 세대에 전달

RNA: DNA가 가진 유전정보를 ribosome에 전달하여 단백질(효소) 합성

2) 수처리 과정 중 병원균 제거를 기대할 수 있는 공정을 두 개 이상 열거하시오. (5점)

답)

주요 프로세스는 여과(filtration)과 소독(disinfection)임.

그러나 응집(coagulation-flocculation), 침전(sedimentation, settling) 등 다른 프로세스도 병원균 제거에 어느 정도 기여를 하는 것으로 알려져 있음

3) 온대 지방의 여름철 호수에서 층상 구조(stratification)가 만들어지는 원인을 서술하고 층상 구조에 따른 깊이별 온도 변화를 그리시오. (7점)

답)

여름철 호수의 상부는 따뜻한 공기로 말미암아 가열, 비교적 높은 온도를 유지하며 바람의 영향으로 어느 정도 깊이까지 혼합이 일어나므로 깊이에 따라 그 깊이까지 일정한 수온을 갖게 된다. 바람의 영향이 미치지 않는 하부로 내려가면 깊이에 따라 수온이 내려가게 되며, 수온이 내려갈수록 밀도가 증가하므로 이 층에서는 혼합이 거의 발생하지 않는다. 더 하부로 내려가 수온이  $4^\circ\text{C}$ 에 가까이 도달하면 이 때 물의 밀도가 최대가 되며, 수온이 이보다 더 내려간 물은 밀도차에 의하여 상부로 이동, 가열되는 프로세스로 지속

적인 혼합이 일어나므로 이 층에서의 온도는 4°C 가량으로 일정하게 유지된다.

(층상 구조는 강의노트 참조)

4) 지표면에 내린 강수의 이동 양상 중 surface runoff, interflow, infiltration에 대하여 각각 간략히 설명하시오. (6점)

답)

surface runoff: 지표면에 내린 강수가 땅으로 침투하지 않고 표면을 따라 흐르는 것

interflow: 지하로 침투한 강수가 지하수면 아래로 내려가지 않는 상태에서 평행이동하는 것

infiltration: 강수가 지표면에서 지하로 수직 방향으로 이동하는 것

5) 하천 환경에 있어서 hyporheic zone의 중요성에 대하여 간략히 서술하시오. (6점)

답)

지하수와 지표수 간 영양분, 용존산소 등 물질교환

저서 무척추동물, 미생물 등의 서식지 역할

어류의 주요 산란지점

5. 어떤 남성 과학자 A가 실험실에서 벤젠을 이용한 실험을 10년 동안 진행하였다. 만 10년째 실험하던 날 이 과학자는 실험실의 벤젠 농도가 10 µg/m³이라는 것을 알고 즉시 실험실 출입을 중단하고 은퇴를 선언하였다. 이 과학자가 벤젠 농도 10 µg/m³인 실험실에서 10년 동안 하루에 8시간씩 주 5회, 연간 45주를 근무하였다고 가정할 때, 이 과학자의 공기 내 벤젠 흡입으로 인한 발암 독성은 얼마인가? 다음 정보를 활용하시오. (15점)

과학자의 기대수명 = Averaging time = 75 years × 365 days = 27375 days

과학자의 체중 = 75 kg

과학자의 일간 공기 흡입량 = 15.2 m³/day

벤젠의 흡입에 의한 cancer slope factor = 0.029 kg-day/mg

답)

CDI = C [ CR · EFD / BW ] · 1 / AT

C = 10 µg/m³

CR = 15.2 m³/day

EFD = EF × ED = 8 hr/day · 5 days/week · 45 weeks/year × 10 years = 18000 hrs = 750 days

BW = 75 kg

AT = 27375 days

∴ CDI = (10 µg/m³) [ 15.2 m³/day · 750 days / 75 kg ] · 1 / 27375 days = 5.56 × 10⁻² µg/kg-day

Carcinogenic risk = 5.56 × 10⁻² µg/kg-day · 0.029 kg-day/mg · 10⁻³ mg/µg = 1.61 × 10⁻⁶

6. 7월 한 달간 총 면적 20 km²인 팔당호에 300 mm의 비가 내렸으며, 이 한 달 동안 팔당호 수위는 23 cm가 상승하였다. 팔당호에 유입되는 북한강과 남한강의 유량은 각각 평균 45.2 m³/s, 75.5 m³/s이고, 유출되는 한강의 유량은 평균 70.1 m³/s이며, 수도권에 식수 공급을 위해 취수하는 양은 평균 50.0 m³/s이다. 7월의 기상 관측 자료를 통하여 예측한 팔당호의 증발량은 한 달 간 45 mm로 나타났다. 이 때, 7월에 팔당호의 침투를 통한 유실량을 mm 단위로 구하시오. (단, 제시된 항목 이외에 팔당호의 수위에 영향을 미치는 요소는 없다고 가정) (20점)

답)

Input processes:

- inflow: 북한강+남한강 = 120.7 m³/s

- precipitation: 300 mm/month

Output processes:

- outflow: 한강+취수량 = 120.1 m<sup>3</sup>/s
- evaporation: 45 mm/month
- seepage: unknown

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = (Q_{in} + P) - (Q_{out} + E + I_{out})$$

$$I_{out} = (Q_{in} - Q_{out}) + \left( P - E - \frac{\Delta S}{\Delta t} \right)$$

$$= \frac{(120.7 - 120.1) \text{ m}^3/\text{s} \cdot (86400 \times 31) \text{ days/month}}{20 \text{ km}^2 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{km}^2} \cdot 10^3 \text{ mm/m} + (300 - 45 - 230) \text{ mm/month}$$

$$= 105.4 \text{ mm}$$

7. 어떤 하천으로 하수처리장 방류수가 유입되고 있다. 어느 날, 하수처리장에 문제가 발생하여 적절한 처리가 이루어지지 않은 방류수가 유출되었다. 신속히 방류수를 수집하여 분석하였더니, COD 값이 220 mg/L, 20°C에서 BOD<sub>5</sub> 값이 80 mg/L로 나왔다. 이 때, 다음 물음에 답하시오.

1) 최종 BOD (ultimate BOD)는 일반적으로 COD의 약 60% 수준으로 알려져 있다. 이 가정을 적용하여 20°C에서의 1차반응상수 (first-order BOD rate constant)를 구하시오. (10점)

$$BOD_u = L_0 = 0.6 \times COD = 132 \text{ mg/L}$$

$$BOD_t = L_0(1 - e^{-kt})$$

$$k = -\frac{1}{t} \ln\left(1 - \frac{BOD_t}{L_0}\right) = -\frac{1}{5 \text{ days}} \ln\left(1 - \frac{80 \text{ mg/L}}{132 \text{ mg/L}}\right) = 0.19 \text{ day}^{-1}$$

2) 하천은 하수처리장 방류수 유입 지점에서 15 km를 더 흐른 후 바다로 유입된다. 하천과 하수처리장 방류수의 정보가 아래와 같을 때, 하천이 바다로 유입되기 이전 하천의 용존산소량이 2 mg/L 이하로 감소하는지 여부를 판단하시오. (15점)

정보	하수처리장 방류수	하천
Flowrate (m <sup>3</sup> /s)	0.05	1.20
Ultimate BOD (mg/L)	1) 참조	3.5
DO (mg/L)	1.2	7.4
Temperature	20	20

\* 20°C에서 포화 용존산소농도 (saturation DO) = 9.2 mg/L

\* 합류 후 하천의 재폭기 계수 (reaeration coefficient) = 0.48 day<sup>-1</sup>

\* 합류 후 하천의 유속 = 0.15 m/s

답)

$$D_a = DO_s - \frac{Q_w DO_w + Q_r DO_r}{Q_w + Q_r} = 9.2 \text{ mg/L} - \frac{0.05 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1.2 \text{ mg/L} + 1.20 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 7.4 \text{ mg/L}}{(0.05 + 1.20) \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$= 2.05 \text{ mg/L}$$

$$L_a = \frac{Q_w L_w + Q_r L_r}{Q_w + Q_r} = \frac{0.05 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 132 \text{ mg/L} + 1.20 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 3.5 \text{ mg/L}}{(0.05 + 1.20) \text{ m}^3/\text{s}} = 8.64 \text{ mg/L}$$

$$t_c = \frac{1}{k_r - k_d} \ln \left[ \frac{k_r}{k_d} \left( 1 - D_a \frac{k_r - k_d}{k_d L_a} \right) \right] = \frac{1}{0.48 - 0.19} \ln \left[ \frac{0.48}{0.19} \left( 1 - 2.05 \cdot \frac{0.48 - 0.19}{0.19 \cdot 8.64} \right) \right] = 1.65 \text{ days}$$

$$L_c = u \cdot t_c = 0.15 \text{ m/s} \cdot 1.65 \text{ days} \cdot 86400 \text{ s/day} = 2.14 \times 10^4 \text{ m} = 21.4 \text{ km}$$

따라서, 하천이 바다로 유입되기 전 critical point에 도달하지 않음

하천이 바다로 유입되기 직전의 DO를 구하면,

$$t = \frac{L}{u} = \frac{15000 \text{ m}}{0.15 \text{ m/s} \cdot 86400 \text{ s/day}} = 1.16 \text{ days}$$

$$DO = DO_s - D = DO_s - \left[ \frac{k_d L_a}{k_r - k_d} (e^{-k_d t} - e^{-k_r t}) + D_a (e^{-k_r t}) \right]$$

$$= 9.2 \text{ mg/L} - \left[ \frac{0.19 \text{ day}^{-1} \cdot 8.64 \text{ mg/L}}{(0.48 - 0.19) \text{ day}^{-1}} \{ \exp(-0.19 \text{ day}^{-1} \cdot 1.16 \text{ days}) - \exp(-0.48 \text{ day}^{-1} \cdot 1.16 \text{ days}) \} \right]$$

$$- 2.05 \text{ mg/L} \cdot \exp(-0.48 \text{ day}^{-1} \cdot 1.16 \text{ days})$$

$$= 6.7 \text{ mg/L}$$

따라서, 바다로 유입되기 이전에 용존산소농도가 2 mg/L 이하로 떨어지지 않음

또는, 그대로 critical DO를 이용하면,

$$\begin{aligned}
 DO_c &= DO_s - D_c = DO_s - \left[ \frac{k_d L_a}{k_r - k_d} (e^{-k_d t_c} - e^{-k_r t_c}) + D_a (e^{-k_r t_c}) \right] \\
 &= 9.2 \text{ mg/L} - \left[ \frac{0.19 \text{ day}^{-1} \cdot 8.64 \text{ mg/L}}{(0.48 - 0.19) \text{ day}^{-1}} \{ \exp(-0.19 \text{ day}^{-1} \cdot 1.65 \text{ days}) - \exp(-0.48 \text{ day}^{-1} \cdot 1.65 \text{ days}) \} \right. \\
 &\quad \left. - 2.05 \text{ mg/L} \cdot \exp(-0.48 \text{ day}^{-1} \cdot 1.65 \text{ days}) \right] \\
 &= 6.7 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

따라서, 어떤 지점에서든 DO는 2 mg/L 이하로 떨어지지 않음