

457.210A.001

환경공학 기말고사

2016. 12. 19.

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 100점입니다.

1. 다음 명제에 대하여 옳고 그름을 O/X로 표시하시오.

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

- 1) 재폭기(reaeration) 속도는 강의 유속이 빠를수록 증가한다.
- 2) 드라이클리닝 용매 등으로 사용되는 트리클로로에틸렌(trichloroethylene; TCE)은 물에 대한 용해도가 비교적 낮으며, TCE로 오염된 지하환경에서 TCE는 주로 대수층 상부에 물에 용해되지 않은 액상의 형태(nonaqueous phase liquid; NAPL)로 존재한다.
- 3) 총 대장균군(total coliforms)은 인간의 대장에 존재하는 박테리아 중 병원성을 가지고 있는 것들의 총칭이다.
- 4) 자외선(UV) 소독의 효율을 충분히 확보하기 위하여서는 소독 공정 이전에 원수의 탁도(turbidity)를 최대한 제거하는 것이 필요하다.
- 5) 하수처리에서 1차처리(primary treatment)는 중력식 침전을 활용하는 공정이므로 원수로부터의 BOD 제거 효과를 기대하기는 힘들다.
- 6) 활성 슬러지 공정(activated sludge process)이 반송 슬러지 유량(return sludge flowrate)이 0인 상태로 운영되었을 경우 이 공정의 hydraulic retention time(HRT)과 solids retention time(SRT)은 동일하다.
- 7) Polychlorinated biphenyls(PCBs)는 과거에 냉각제, 윤활제 등으로 널리 사용되었으나, 선진국에서는 1970년대 이후 생산이 중지되었으므로 현재 선진국에서는 PCBs에 의한 오염부지 사례를 찾아보기 힘들다.
- 8) Soil vapor extraction(SVE)은 휘발성 유기화합물로 오염된 불포화대의 정화에 적용 가능한 토양정화 공법이다.
- 9) 국내 위생 매립지 설계기준에 따르면, 매립지 차수층(landfill liner)으로 사용하는 점토층은 투수계수가 10^{-7} cm/s 이상이어야 한다.
- 10) Sound pressure level이 70 dB인 두 소리가 결합되었을 경우의 sound pressure level은 약 73 dB이다.

2. Coagulation-flocculation을 통하여 콜로이드 입자를 침전시킬 때 작용하는 네 가지 기작을 열거하고, 각 기작을 간단히 설명하시오. (10점)
3. 폐기물을 소각할 때 발생할 수 있는 대기오염물질을 세 가지 열거하고, 각각을 선택한 근거에 대하여 설명하시오. (10점)
4. 구름이 거의 없고 10 m 상공의 풍속이 2.5 m/s인 평온한 어느 날 밤에 화력발전소 굴뚝으로부터 SO₂ 가스가 배출되고 있다. 굴뚝의 Effective stack height이 45 m이고 Total reflection을 가정할 경우 다음 중 지상의 SO₂ 농도가 보다 높은 지점은 어디인가? (풀이과정을 반드시 보일 것)
- A. 굴뚝에서 바람방향으로 1.5 km 지점
 - B. 굴뚝에서 바람방향으로 4.0 km 지점

(15점)

※ 문제지 맨 마지막 페이지 자료를 참조하기 바랍니다.

5. 반포대교 앞에 나가 한강의 물을 채취하여 분석하였더니 최종 BOD(ultimate BOD) 값이 6.0 mg/L, 용존산소량(DO) 값이 5.5 mg/L로 나왔다. 한강의 유속이 0.8 m/s, 수온이 25°C, 이 때 포화용존산소량(saturation DO) 값이 8.2 mg/L, first-order deoxygenation rate constant k_d 가 0.16 day⁻¹, reaeration coefficient k_r 이 0.18 day⁻¹일 때, 반포대교에서 서해에 도달하기까지 70 km 동안 한강의 물은 3급수 기준인 DO 5.0 mg/L 이하로 떨어지겠는가? (풀이과정을 반드시 보일 것) (15점)

6. 활성슬러지 공정을 통하여 용존 BOD₅가 150 mg/L인 1차처리수 유량 4000 m³/day을 처리하고자 한다. 폭기조의 유효부피가 10000 m³이고, 공정의 solids retention time(SRT)을 3.0 day로 유지하였을 때, 아래의 미생물 성장 인자를 사용하여 다음 물음에 답하시오.

$$K_s = 30 \text{ mg/L BOD}_5$$

$$\mu_m = 2.5 \text{ day}^{-1}$$

$$k_d = 0.05 \text{ day}^{-1}$$

$$Y = 0.50 \text{ mg VSS/mg BOD}_5$$

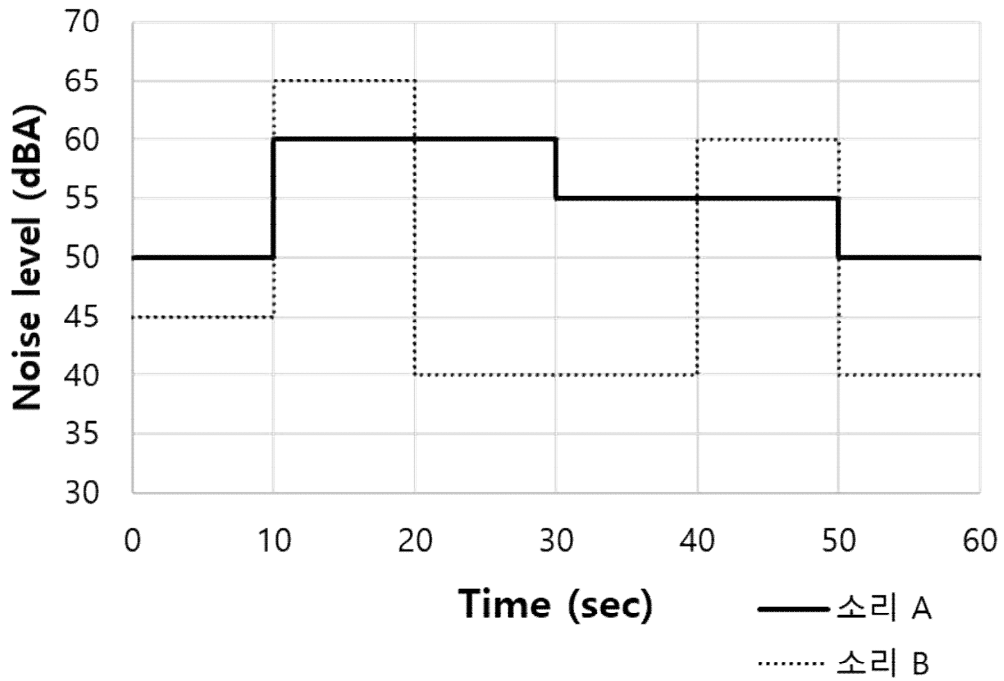
단, 1차처리수(활성슬러지 공정의 유입수) 및 2차처리수(활성슬러지 공정의 유출수) 내의 MLVSS 농도는 무시할 만큼 작다고 가정하시오.

- 1) 이 활성슬러지 공정의 유출수 내 용존 BOD₅ 농도와 폭기조 내 MLVSS 농도를 구하시오. (7점)

- 2) 이 공정에서 waste sludge 형태로 배출되는 MLVSS의 양을 kg/day 단위로 구하시오. (8점)

- 3) 활성슬러지 공정으로 유입되는 1차처리수의 용존 BOD₅ 농도가 300 mg/L로 높아졌을 경우, 동일한 조건에서 유출수 내 BOD₅ 농도, 폭기조 내 MLVSS 농도, waste sludge 형태로 배출되는 MLVSS의 양은 각각 어떻게 변화하는가? 값을 제시할 필요는 없으며, 증가, 감소, 유지 중 하나를 선택하시오. (3점)

7. 다음의 두 소리 A와 B 중 1분 동안의 L_{eq} 가 보다 큰 것을 고르시오. (풀이과정을 반드시 보일 것) (12점)



[참고]

| Key to stability categories | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------|----------|--------|--------------------|-------------|
| Surface wind speed (at 10 m) (m/s) | Day ^a | | | Night ^a | |
| | Incoming solar radiation | | | Thinly overcast or | |
| | Strong | Moderate | Slight | ≥ 1/2 Low cloud | ≤ 3/8 Cloud |
| <2 | A | A-B | B | — | — |
| 2-3 | A-B | B | C | E | F |
| 3-5 | B | B-C | C | D | E |
| 5-6 | C | C-D | D | D | D |
| >6 | C | D | D | D | D |

^aThe neutral class, D, should be assumed for overcast conditions during day or night. Note that “thinly overcast” is not equivalent to “overcast.”

Notes: Class A is the most unstable and class F is the most stable class considered here. Night refers to the period from one hour before sunset to one hour after sunrise. Note that the neutral class, D, can be assumed for overcast conditions during day or night, regardless of wind speed.

“Strong” incoming solar radiation corresponds to a solar altitude greater than 60° with clear skies; “slight” insolation corresponds to a solar altitude from 15° to 35° with clear skies. Table 170, Solar Altitude and Azimuth, in the Smithsonian Meteorological Tables, can be used in determining solar radiation. Incoming radiation that would be strong with clear skies can be expected to be reduced to moderate with broken (5/8 to 7/8 cloud cover) middle clouds and to slight with broken low clouds.

(Source: Turner, 1967.)

$$s_y(\text{or } \sigma_y) = ax^{0.894}, \quad s_z(\text{or } \sigma_z) = cx^d + f$$

| Values of <i>a</i> , <i>c</i> , <i>d</i> , and <i>f</i> for calculating <i>s_y</i> and <i>s_z</i> | | | | | | | |
|---|----------|-----------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|
| Stability class | <i>a</i> | <i>x</i> ≤ 1 km | | | <i>x</i> > 1 km | | |
| | | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>f</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>f</i> |
| A | 213 | 440.8 | 1.941 | 9.27 | 459.7 | 2.094 | -9.6 |
| B | 156 | 100.6 | 1.149 | 3.3 | 108.2 | 1.098 | 2 |
| C | 104 | 61 | 0.911 | 0 | 61 | 0.911 | 0 |
| D | 68 | 33.2 | 0.725 | -1.7 | 44.5 | 0.516 | -13.0 |
| E | 50.5 | 22.8 | 0.678 | -1.3 | 55.4 | 0.305 | -34.0 |
| F | 34 | 14.35 | 0.74.0 | -0.35 | 62.6 | 0.18 | -48.6 |

(Source: Martin, 1976.)

457.210A.001

환경공학 기말고사 - Solutions

2016. 12. 19.

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 100점입니다.

1. 다음 명제에 대하여 옳고 그름을 O/X로 표시하시오.

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

1) 재폭기(re-aeration) 속도는 강의 유속이 빠를수록 증가한다.

답) O

2) 드라이클리닝 용매 등으로 사용되는 트리클로로에틸렌(trichloroethylene; TCE)은 물에 대한 용해도가 비교적 낮으며, TCE로 오염된 지하환경에서 TCE는 주로 대수층 상부에 물에 용해되지 않은 액상의 형태(nonaqueous phase liquid; NAPL)로 존재한다.

답) X

3) 총 대장균군(total coliforms)은 인간의 대장에 존재하는 박테리아 중 병원성을 가지고 있는 것들의 총칭이다.

답) X

4) 자외선(UV) 소독의 효율을 충분히 확보하기 위하여서는 소독 공정 이전에 원수의 탁도(turbidity)를 최대한 제거하는 것이 필요하다.

답) O

5) 하수처리에서 1차처리(primary treatment)는 중력식 침전을 활용하는 공정이므로 원수로부터의 BOD 제거 효과를 기대하기는 힘들다.

답) X

6) 활성 슬러지 공정(activated sludge process)이 반송 슬러지 유량(return sludge flowrate)이 0인 상태로 운영되었을 경우 이 공정의 hydraulic retention time(HRT)과 solids retention time(SRT)은 동일하다.

답) O

7) Polychlorinated biphenyls(PCBs)는 과거에 냉각제, 윤활제 등으로 널리 사용되었으나, 선진국에서는 1970년대 이후 생산이 중지되었으므로 현재 선진국에서는 PCBs에 의한 오염부지 사례를 찾아보기 힘들다.

답) X

8) Soil vapor extraction(SVE)은 휘발성 유기화합물로 오염된 불포화대의 정화에 적용 가

능한 토양정화 공법이다.

답) O

9) 국내 위생 매립지 설계기준에 따르면, 매립지 차수층(landfill liner)으로 사용하는 점토층은 투수계수가 10^{-7} cm/s 이상이어야 한다.

답) X

10) Sound pressure level이 70 dB인 두 소리가 결합되었을 경우의 sound pressure level은 약 73 dB이다.

답) O

2. Coagulation-flocculation을 통하여 콜로이드 입자를 침전시킬 때 작용하는 네 가지 기작을 열거하고, 각 기작을 간단히 설명하시오. (10점)

답)

Charge neutralization: 주로 음전하로 하전되어 있는 콜로이드 입자에 양이온을 결합시켜 전하를 중성화, 콜로이드 간의 척력을 감소 또는 제거함

Compression of electric double layer: 이온강도의 증가로 인하여 전기이중층을 압축시켜 콜로이드 간 결합이 보다 용이하도록 함

Inter-particle bridging: 투여한 응집제가 콜로이드 입자 간 연결자(풀) 역할을 하여 콜로이드를 상호 결합

Enmeshment: 어느 정도 크기로 형성되어 침전하는 floc이 하부의 다른 floc 또는 콜로이드 입자를 sweeping하면서 침전함

3. 폐기물을 소각할 때 발생할 수 있는 대기오염물질을 세 가지 열거하고, 각각을 선택한 근거에 대하여 설명하시오. (10점)

답)

일산화탄소: 폐기물 내 유기물질의 불완전연소로 인하여 발생

SO_x: 황이 포함된 폐기물의 연소로 발생

NO_x: 폐기물이 고온에서 소각될 때 발생

Particulate matter: 폐기물 소각 시 비산재나 검댕 등 발생, 폐기물 소각 시 발생하는 NO_x, hydrocarbon 등이 대기 중에서 광화학 반응을 일으키면서 응결, 이차 오염물질로 발생

dioxin: 염소가 포함된 폐기물이 소각되면서 복합 반응을 일으켜 발생

등등등

4. 구름이 거의 없고 10 m 상공의 풍속이 2.5 m/s인 평온한 어느 날 밤에 화력발전소 굴뚝으로부터 SO₂ 가스가 배출되고 있다. 굴뚝의 Effective stack height이 45 m이고 Total reflection을 가정할 경우 다음 중 지상의 SO₂ 농도가 보다 높은 지점은 어디인가? (풀이과정을 반드시 보일 것)

- A. 굴뚝에서 바람방향으로 1.5 km 지점
- B. 굴뚝에서 바람방향으로 4.0 km 지점

(15점)

답)

Total reflection, 지상 조건에서

$$C = \left(\frac{E}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \right) \left[\exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] \left[\exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2} \right) \right]$$

모두 바람방향이므로, 농도는 $\frac{\exp(-H^2/2\sigma_z^2)}{\sigma_y \sigma_z}$ 에 비례함

$$\sigma_y = ax^{0.894}$$

$$\sigma_z = cx^d + f$$

조건으로부터 Stability class는 F이고, 이 때 $x > 1$ km 조건의 계수 값은

$a=34, c=62.6, d=0.18, f=-48.6$ 임.

$$A: \sigma_y = 34 \cdot 1.5^{0.894} = 48.85 \text{ m}, \quad \sigma_z = 62.6 \cdot 1.5^{0.18} - 48.6 = 18.74 \text{ m}$$

$$\rightarrow \frac{\exp(-H^2/2\sigma_z^2)}{\sigma_y\sigma_z} = 6.11 \times 10^{-5} \text{ m}^{-2}$$

$$B: \sigma_y = 34 \cdot 4.0^{0.894} = 117.41, \quad \sigma_z = 62.6 \cdot 4.0^{0.18} - 48.6 = 31.74$$

$$\rightarrow \frac{\exp(-H^2/2\sigma_z^2)}{\sigma_y\sigma_z} = 9.82 \times 10^{-5} \text{ m}^{-2}$$

따라서, B의 농도가 더 높음

5. 반포대교 앞에 나가 한강의 물을 채취하여 분석하였더니 최종 BOD(ultimate BOD) 값이 6.0 mg/L, 용존산소량(DO) 값이 5.5 mg/L로 나왔다. 한강의 유속이 0.8 m/s, 수온이 25°C, 이 때 포화용존산소량(saturation DO) 값이 8.2 mg/L, first-order deoxygenation rate constant k_d 가 0.16 day⁻¹, reaeration coefficient k_r 이 0.18 day⁻¹일 때, 반포대교에서 서해에 도달하기까지 70 km 동안 한강의 물은 3급수 기준인 DO 5.0 mg/L 이하로 떨어지겠는가? (풀이과정을 반드시 보일 것) (15점)

답)

서해에 도달할 때까지 걸리는 시간은

$$t = \frac{70000 \text{ m}}{0.8 \text{ m/s} \cdot 86400 \text{ s/day}} = 1.01 \text{ day}$$

Critical time을 구하면

$$D_a = 8.2 - 5.5 = 2.7 \text{ mg/L}$$

$$t_c = \frac{1}{k_r - k_d} \ln \left[\frac{k_r}{k_d} \left(1 - D_a \frac{k_r - k_d}{k_d L_a} \right) \right]$$

$$= \frac{1}{(0.18 - 0.16) \text{ day}^{-1}} \ln \left[\frac{0.18 \text{ day}^{-1}}{0.16 \text{ day}^{-1}} \left(1 - 2.7 \text{ mg/L} \frac{(0.18 - 0.16) \text{ day}^{-1}}{0.16 \text{ day}^{-1} \cdot 6.0 \text{ mg/L}} \right) \right]$$

$$= 3.0 \text{ day}$$

따라서, 서해에 도달할 때까지 critical time에 다다르지 않으며, DO는 계속 감소추세임.

즉, 서해에 도달하는 지점에서 DO는 최소가 됨. 이 때의 DO를 구하면,

$$\begin{aligned}
 D_t &= \frac{k_d L_a}{k_r - k_d} (e^{-k_d t} - e^{-k_r t}) + D_a (e^{-k_r t}) \\
 &= \frac{0.18 \text{ day}^{-1} \cdot 6.0 \text{ mg/L}}{(0.18 - 0.16) \text{ mg/L}} [\exp(-0.16 \text{ day}^{-1} \cdot 1.01 \text{ day}) - \exp(-0.18 \text{ day}^{-1} \cdot 1.01 \text{ day})] \\
 &\quad + 2.7 \text{ mg/L} \cdot \exp(-0.18 \text{ day}^{-1} \cdot 1.01 \text{ day}) \\
 &= 3.1 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

$$DO_t = 8.2 - 3.1 = 5.2 \text{ mg/L}$$

따라서, DO는 3급수 기준인 5.0 mg/L 이하로 떨어지지 않음.

6. 활성슬러지 공정을 통하여 용존 BOD₅가 150 mg/L인 1차처리수 유량 4000 m³/day을 처리하고자 한다. 폭기조의 유효부피가 10000 m³이고, 공정의 solids retention time(SRT)을 3.0 day로 유지하였을 때, 아래의 미생물 성장 인자를 사용하여 다음 물음에 답하시오.

$$K_s = 30 \text{ mg/L BOD}_5$$

$$\mu_m = 2.5 \text{ day}^{-1}$$

$$k_d = 0.05 \text{ day}^{-1}$$

$$Y = 0.50 \text{ mg VSS/mg BOD}_5$$

단, 1차처리수(활성슬러지 공정의 유입수) 및 2차처리수(활성슬러지 공정의 유출수) 내의 MLVSS 농도는 무시할 만큼 작다고 가정하시오.

- 1) 이 활성슬러지 공정의 유출수 내 용존 BOD₅ 농도와 폭기조 내 MLVSS 농도를 구하시오. (7점)

답)

$$S = \frac{K_s(1 + k_d \theta_c)}{\theta_c(\mu_m - k_d) - 1} = \frac{30 \text{ mg/L} \cdot (1 + 0.05 \text{ day}^{-1} \cdot 3.0 \text{ day})}{3.0 \text{ day} \cdot (2.5 \text{ day}^{-1} - 0.05 \text{ day}^{-1}) - 1} = 5.43 \text{ mg BOD}_5/\text{L}$$

$$X = \frac{\theta_c}{t_0} \frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d \theta_c}$$

$$t_0 = \frac{V}{Q} = \frac{10000 \text{ m}^3}{4000 \text{ m}^3/\text{day}} = 2.5 \text{ day}$$

$$X = \frac{3.0 \text{ day}}{2.5 \text{ day}} \frac{0.5 \cdot (150 - 5.43) \text{ mg BOD}_5/L}{1 + 0.05 \text{ day}^{-1} \cdot 3.0 \text{ day}} = 75.4 \text{ mg VSS/L}$$

- 2) 이 공정에서 waste sludge 형태로 배출되는 MLVSS의 양을 kg/day 단위로 구하시오. (8점)

답)

Waste sludge 형태로 공정으로부터 배출되는 MLVSS는 waste sludge 유량이 Q_w , sludge 내 MLVSS 농도가 X_r 이라고 하면 $Q_w X_r$ 로 표현 가능하다. 그런데,

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_w X_r} \text{ 이므로,}$$

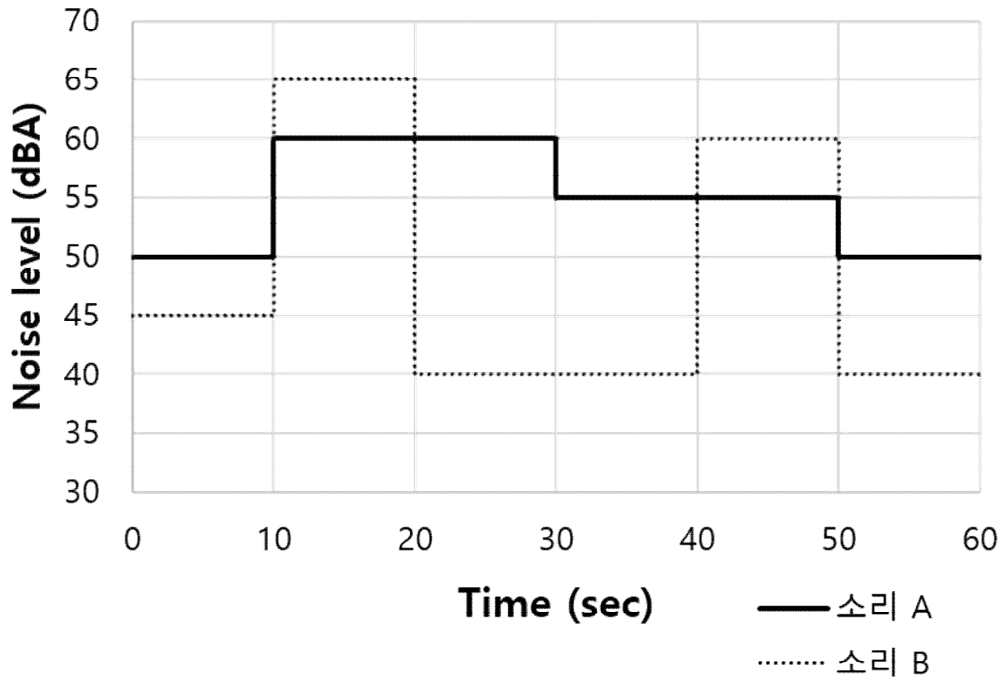
$$Q_w X_r = \frac{VX}{\theta_c} = \frac{10000 \text{ m}^3 \cdot 75.4 \text{ mg VSS/L} \cdot 10^3 \text{ L/m}^3 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mg}}{3.0 \text{ day}} = 251 \text{ kg/day}$$

- 3) 활성슬러지 공정으로 유입되는 1차처리수의 용존 BOD₅ 농도가 300 mg/L로 높아졌을 경우, 동일한 조건에서 유출수 내 BOD₅ 농도, 폭기조 내 MLVSS 농도, waste sludge 형태로 배출되는 MLVSS의 양은 각각 어떻게 변화하는가? 값을 제시할 필요는 없으며, 증가, 감소, 유지 중 하나를 선택하시오. (3점)

답)

BOD₅ 농도: 유지, MLVSS 농도: 증가, 배출 MLVSS 양: 증가

7. 다음의 두 소리 A와 B 중 1분 동안의 L_{eq}가 보다 큰 것을 고르시오. (풀이과정을 반드시 보일 것) (12점)



답)

$$\text{소리 A: } L_{eq} = 10 \log_{10} \left[10^{50/10} \cdot \frac{1}{6} + 10^{60/10} \cdot \frac{2}{6} + 10^{55/10} \cdot \frac{2}{6} + 10^{50/10} \cdot \frac{1}{6} \right] = 56.74 \text{ dBA}$$

$$\text{소리 B: } L_{eq} = 10 \log_{10} \left[10^{45/10} \cdot \frac{1}{6} + 10^{65/10} \cdot \frac{1}{6} + 10^{40/10} \cdot \frac{3}{6} + 10^{60/10} \cdot \frac{1}{6} \right] = 58.48 \text{ dBA}$$

소리 B가 소리 A보다 L_{eq} 가 크다.

[참고]

| Key to stability categories | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------|----------|--------|--------------------|-------------|
| Surface wind speed (at 10 m) (m/s) | Day ^a | | | Night ^a | |
| | Incoming solar radiation | | | Thinly overcast or | |
| | Strong | Moderate | Slight | ≥ 1/2 Low cloud | ≤ 3/8 Cloud |
| <2 | A | A-B | B | — | — |
| 2-3 | A-B | B | C | E | F |
| 3-5 | B | B-C | C | D | E |
| 5-6 | C | C-D | D | D | D |
| >6 | C | D | D | D | D |

^aThe neutral class, D, should be assumed for overcast conditions during day or night. Note that “thinly overcast” is not equivalent to “overcast.”

Notes: Class A is the most unstable and class F is the most stable class considered here. Night refers to the period from one hour before sunset to one hour after sunrise. Note that the neutral class, D, can be assumed for overcast conditions during day or night, regardless of wind speed.

“Strong” incoming solar radiation corresponds to a solar altitude greater than 60° with clear skies; “slight” insolation corresponds to a solar altitude from 15° to 35° with clear skies. Table 170, Solar Altitude and Azimuth, in the Smithsonian Meteorological Tables, can be used in determining solar radiation. Incoming radiation that would be strong with clear skies can be expected to be reduced to moderate with broken (5/8 to 7/8 cloud cover) middle clouds and to slight with broken low clouds.

(Source: Turner, 1967.)

$$s_y(\text{or } \sigma_y) = ax^{0.894}, \quad s_z(\text{or } \sigma_z) = cx^d + f$$

| Values of <i>a</i> , <i>c</i> , <i>d</i> , and <i>f</i> for calculating <i>s_y</i> and <i>s_z</i> | | | | | | | |
|---|----------|-----------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|
| Stability class | <i>a</i> | <i>x</i> ≤ 1 km | | | <i>x</i> > 1 km | | |
| | | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>f</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>f</i> |
| A | 213 | 440.8 | 1.941 | 9.27 | 459.7 | 2.094 | -9.6 |
| B | 156 | 100.6 | 1.149 | 3.3 | 108.2 | 1.098 | 2 |
| C | 104 | 61 | 0.911 | 0 | 61 | 0.911 | 0 |
| D | 68 | 33.2 | 0.725 | -1.7 | 44.5 | 0.516 | -13.0 |
| E | 50.5 | 22.8 | 0.678 | -1.3 | 55.4 | 0.305 | -34.0 |
| F | 34 | 14.35 | 0.74.0 | -0.35 | 62.6 | 0.18 | -48.6 |

(Source: Martin, 1976.)