

## 과제 #2

제출일: 10/12 수업시간

\* 과제는 여러분들의 자가학습을 위한 것으로, ABEEK 관련 증빙을 위하여 선별된 6개를 제외하고는 채점하지 않을 계획입니다. 그러나 답안 작성과 컨닝 여부는 점검하니, 반드시 본인이 직접 풀기 바랍니다. 문제풀이를 한 노력이 보이면 감점은 전혀 없습니다. 답안 작성을 하지 않았을 경우 해당 문제는 0점, 컨닝하였을 경우 과제#2에 대하여 수강생 최저점수의 80%를 부여합니다.

1.  $500 \text{ m}^3$ 의 부피를 갖는 반응조가  $250 \text{ m}^3/\text{hr}$ 의 유입수를 받아들여 동일한 유량으로 유출수를 배출하고 있다. 이 때, 다음 물음에 답하시오.
  - 1) 이 반응조의 수리학적 체류시간(hydraulic retention time; HRT)을 구하시오. (4점)
  - 2) 어떤 테러리스트가 시설에 침입하여 반응조에 수용성 독극물  $10 \text{ kg}$ 을 반응조 유입 지점에 살포하였다. 이 독극물의 독성 기준치가  $1 \text{ mg/L}$ 라 할 때, 다음 물음에 답하시오.
    - 2-1) 이 반응조를 ideal PFR이라 가정할 때, 유출수의 농도가 독성 기준치를 초과하는 데 걸리는 시간과 이후 유출수 농도가 다시 독성 기준치 이하로 떨어지는 데 걸리는 시간을 구하시오. (8점)
    - 2-2) 이 반응조를 ideal CMFR이라 가정할 때, 유출수의 농도가 독성 기준치를 초과하는 데 걸리는 시간과 이후 유출수 농도가 다시 독성 기준치 이하로 떨어지는 데 걸리는 시간을 구하시오. (8점)
2. 폐수로부터 어떤 물질 A를 제거하기 위한 반응조를 설계하고자 한다. 이 물질은 폐수에서 2차반응식  $\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^2$ 에 따라 제거된다고 한다. 이 때, 다음 물음에 답하시오.
  - 1) Completely Mixed Flow Reactor(CMFR)에 대하여 물질 A에 대한 반응조 전체의 물질수지식(mass balance equation)을 수립하고, steady state에서 유출수 내 물질 A의 농도  $C_{A,\text{out}}$ 을 반응조의 HRT  $t_0$ 와 유입수 내 물질 A의 농도  $C_{A,\text{in}}$ 으로 표현하시오. (15점)
  - 2) Plug flow reactor(PFR)에서 유출수 내 물질 A의 농도  $C_{A,\text{out}}$ 을 반응조의 HRT  $t_0$ 와 유입수 내 물질 A의 농도  $C_{A,\text{in}}$ 으로 표현하시오. (15점)

- 3) 2차반응 상수  $k$ 가  $1.3 \times 10^{-3}$  L/mg-min, 반응조 체류시간  $t_0$ 가 30 min일 때, 다음의 두 유입수 농도  $C_{A,in}$ 에 대하여 steady-state CMFR 및 PFR의 물질 A에 대한 제거효율  $R = \left(1 - \frac{C_{A,out}}{C_{A,in}}\right) \times 100(\%)$ 을 구하시오. (10점)
- i. 100 mg/L,            ii. 1000 mg/L
- 4) 다음에 대하여 고찰하시오. (답안은 단답형으로 작성해도 무방하며, 그 대신 원리에 대하여 스스로 생각해 봅시다!) (5점)
- i. 어떤 물질의 제거반응이 2차반응식으로 표현될 때, CMFR과 PFR 중 제거효율의 측면에서 유리한 반응조의 형태는?
- ii. 어떤 물질의 제거반응이 2차반응식으로 표현될 때, CMFR과 PFR 각각에서 유입수 농도에 따라 제거효율은 어떻게 나타나는가?
- iii. 어떤 물질의 제거반응이 1차반응식으로 표현될 때, CMFR과 PFR 중 제거효율의 측면에서 유리한 반응조의 형태는?
- iv. 어떤 물질의 제거반응이 1차반응식으로 표현될 때, CMFR과 PFR 각각에서 유입수 농도에 따라 제거효율은 어떻게 나타나는가?
3. 대기 중의 탄소를 해양의 심층부로 이동시키는 기작인 solubility pump와 biological pump에 대하여 조사하여 간단히 설명하시오. (15점)
4. 최용주 교수는 미국에서 5년간 거주한 이후 본 학부에 임용되었다. 어느 날 그는 미국에서 마셨던 음용수에 사염화탄소(carbon tetrachloride) 0.05 mg/L와 클로로포름(chloroform) 0.8 mg/L가 함유된 것으로 밝혀졌다는 뉴스를 보고 화들짝 놀라 그 발암위해도를 계산해 보고자 하였다. 최용주 교수가 미국에 체류하는 동안 매일 이 음용수를 2 L씩 섭취하였고, 매년 365일 중 350일을 미국에 체류하였으며, 체중을 65 kg으로 가정하였을 때, 다음 물음에 답하시오.
- 1) 최용주 교수의 일생 동안 사염화탄소 및 클로로포름의 노출경로가 미국에서의 음용수 섭취에 한정된다고 가정하였을 때, 최용주 교수의 두 물질 각각에 대한 chronic daily intake(CDI) 값을 구하시오. 단, averaging time(AT)는 75년(=27375 일)으로 가정하시오. (12점)
- 2) 미국에서의 사염화탄소 및 클로로포름 음용수 섭취에 따른 최용주 교수의 발암위해도(carcinogenic risk)를 구하시오. 경구 섭취(oral intake)에 의한 slope factor는 사염화탄소가 0.13 kg-day/mg, 클로로포름이 0.0061 kg-day/mg이다. (8점)

## 과제 #2

제출일: 10/12 수업시간

\* 과제는 여러분들의 자가학습을 위한 것으로, ABEEK 관련 증빙을 위하여 선별된 6개를 제외하고는 채점하지 않을 계획입니다. 그러나 답안 작성과 컨닝 여부는 점검하니, 반드시 본인이 직접 풀기 바랍니다. 문제풀이를 한 노력이 보이면 감점은 전혀 없습니다. 답안 작성을 하지 않았을 경우 해당 문제는 0점, 컨닝하였을 경우 과제#2에 대하여 수강생 최저점수의 80%를 부여합니다.

1.  $500 \text{ m}^3$ 의 부피를 갖는 반응조가  $250 \text{ m}^3/\text{hr}$ 의 유입수를 받아들여 동일한 유량으로 유출수를 배출하고 있다. 이 때, 다음 물음에 답하시오.

1) 이 반응조의 수리학적 체류시간(hydraulic retention time; HRT)을 구하시오. (4점)  
답)

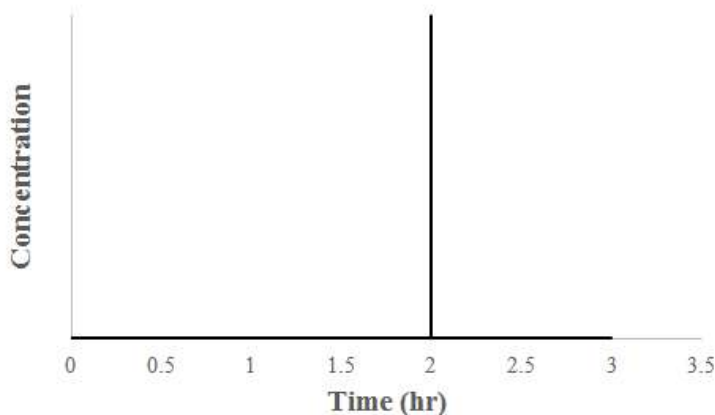
$$t_0 = \frac{V}{Q} = \frac{500 \text{ m}^3}{250 \text{ m}^3/\text{hr}} = 2 \text{ hr}$$

2) 어떤 테러리스트가 시설에 침입하여 반응조에 수용성 독극물  $10 \text{ kg}$ 을 반응조 유입 지점에 살포하였다. 이 독극물의 독성 기준치가  $1 \text{ mg/L}$ 라 할 때, 다음 물음에 답하시오.

2-1) 이 반응조를 ideal PFR이라 가정할 때, 유출수의 농도가 독성 기준치를 초과하는 데 걸리는 시간과 이후 유출수 농도가 다시 독성 기준치 이하로 떨어지는 데 걸리는 시간을 구하시오. (8점)

답)

Ideal PFR의 경우 유입수에 살포된 독극물은 혼합 없이 그대로 흐름 속도를 따라 유출구까지 이동하게 된다. 따라서 체류시간  $2 \text{ hr}$  경과 이후 유출수에서 독성 기준치를 초과하는 농도가 순간적으로 검출되며, 즉각적으로 유출수 농도가 떨어져 0의 값을 갖게 된다. 즉, 유출수는 다음과 같은 농도 변화를 갖는다.



- 2-2) 이 반응조를 ideal CMFR이라 가정할 때, 유출수의 농도가 독성 기준치를 초과하는 데 걸리는 시간과 이후 유출수 농도가 다시 독성 기준치 이하로 떨어지는 데 걸리는 시간을 구하시오. (8점)

답)

Ideal CMFR의 경우, 독극물 살포 직후 반응조의 농도는 유출수의 농도와 동일하며, 이 값은:

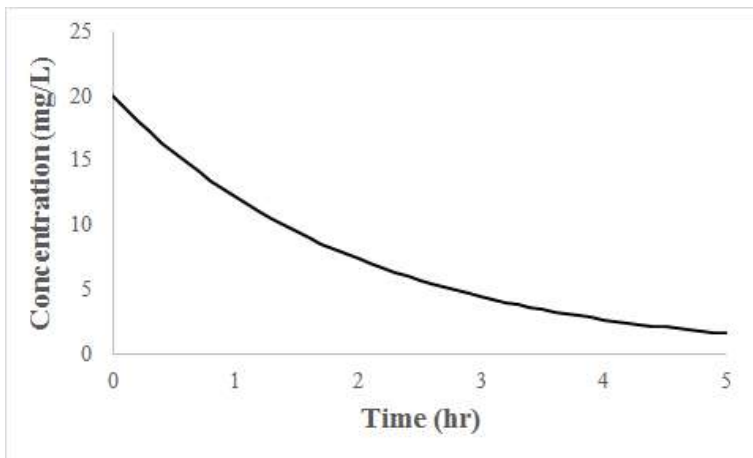
$$\frac{10 \text{ kg} \times 10^6 \text{ mg/kg}}{500 \text{ m}^3 \times 10^3 \text{ L/m}^3} = 20 \text{ mg/L}$$

따라서, 독극물 살포 직후 유출수의 농도가 독성 기준치를 초과한다.

시간에 따른 유출수의 농도는 다음과 같이 표현된다.

$$C_{out,t} = C_0 \exp(-t/t_0)$$

이를 도시하면 다음과 같다.



유출수의 농도가 1 mg/L 이하로 떨어지는 데 걸리는 시간은:

$$t = -t_0 \cdot \ln\left(\frac{C_{out,t}}{C_0}\right) = -2 \text{ hr} \cdot \ln\left(\frac{1 \text{ mg/L}}{20 \text{ mg/L}}\right) = 6.0 \text{ hr}$$

2. 폐수로부터 어떤 물질 A를 제거하기 위한 반응조를 설계하고자 한다. 이 물질은 폐수에서 2차반응식  $\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^2$ 에 따라 제거된다고 한다. 이 때, 다음 물음에 답하시오.

- 1) Completely Mixed Flow Reactor(CMFR)에 대하여 물질 A에 대한 반응조 전체의 물질수지식(mass balance equation)을 수립하고, steady state에서 유출수 내 물질 A의 농도  $C_{A,out}$ 을 반응조의 HRT  $t_0$ 와 유입수 내 물질 A의 농도  $C_{A,in}$ 으로 표현하시오. (15점)

답)

Mass balance equation:

$$V \frac{dC_{A,out}}{dt} = QC_{A,in} - QC_{A,out} - kC_{A,out}^2 V$$

Steady state에서,

$$0 = QC_{A,in} - QC_{A,out} - kC_{A,out}^2 V$$

$$kt_0 C_{A,out}^2 + C_{A,out} - C_{A,in} = 0$$

$$C_{A,out} = \frac{-1 + \sqrt{1^2 + 4kt_0 C_{A,in}}}{2kt_0} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4kt_0 C_{A,in}}}{2kt_0}$$

- 2) Plug flow reactor(PFR)에서 유출수 내 물질 A의 농도  $C_{A,out}$ 을 반응조의 HRT  $t_0$ 와 유입수 내 물질 A의 농도  $C_{A,in}$ 으로 표현하시오. (15점)

답)

Mass balance equation(CV: 흐름을 따라 이동하는 얇은 판의 "moving plug")

$$\Delta V \frac{dC_A}{dt} = 0 - 0 - kC_A^2 \Delta V$$

$\Delta V = CV$ 의 부피;  $C_A = CV$  내 물질 A의 농도

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^2$$

$$\int_{C_{A,in}}^{C_{A,out}} \frac{dC_A}{C_A^2} = -k \int_0^{t_0} dt$$

$$\frac{1}{C_{A,in}} - \frac{1}{C_{A,out}} = -kt_0$$

$$C_{A,out} = \left( \frac{1}{C_{A,in}} + kt_0 \right)^{-1}$$

- 3) 2차반응 상수  $k$ 가  $1.3 \times 10^{-3} \text{ L/mg} \cdot \text{min}$ , 반응조 체류시간  $t_0$ 가 30 min일 때, 다음의 두 유입수 농도  $C_{A,in}$ 에 대하여 steady-state CMFR 및 PFR의 물질 A에 대한 제거효율

$$R = \left( 1 - \frac{C_{A,out}}{C_{A,in}} \right) \times 100(\%) \text{을 구하시오. (10점)}$$

- i. 100 mg/L,      ii. 1000 mg/L

답)

$$kt_0 = 0.039 \text{ L/mg}$$

- i. 100 mg/L

CMFR:

$$C_{A,out} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4kt_0 C_{A,in}}}{2kt_0} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 0.039 \text{ L/mg} \cdot 100 \text{ mg/L}}}{2 \cdot 0.039 \text{ L/mg}} = 39 \text{ mg/L}$$

$$R = \left( 1 - \frac{39 \text{ mg/L}}{100 \text{ mg/L}} \right) \times 100(\%) = 61\%$$

PFR:

$$C_{A,out} = \left( \frac{1}{100 \text{ mg/L}} + 0.039 \text{ L/mg} \right)^{-1} = 20 \text{ mg/L}$$

$$R = \left( 1 - \frac{20 \text{ mg/L}}{100 \text{ mg/L}} \right) \times 100(\%) = 80\%$$

ii. 1000 mg/L

CMFR:

$$C_{A,out} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4kt_0 C_{A,in}}}{2kt_0} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 0.039 \text{ L/mg} \cdot 1000 \text{ mg/L}}}{2 \cdot 0.039 \text{ L/mg}} = 150 \text{ mg/L}$$

$$R = \left( 1 - \frac{150 \text{ mg/L}}{1000 \text{ mg/L}} \right) \times 100(\%) = 85\%$$

PFR:

$$C_{A,out} = \left( \frac{1}{1000 \text{ mg/L}} + 0.039 \text{ L/mg} \right)^{-1} = 25 \text{ mg/L}$$

$$R = \left( 1 - \frac{25 \text{ mg/L}}{1000 \text{ mg/L}} \right) \times 100(\%) = 97.5\%$$

4) 다음에 대하여 고찰하시오. (답안은 단답형으로 작성해도 무방하며, 그 대신 원리에 대하여 스스로 생각해 봅시다!) (5점)

- i. 어떤 물질의 제거반응이 2차반응식으로 표현될 때, CMFR과 PFR 중 제거효율의 측면에서 유리한 반응조의 형태는?
- ii. 어떤 물질의 제거반응이 2차반응식으로 표현될 때, CMFR과 PFR 각각에서 유입수 농도에 따라 제거효율은 어떻게 나타나는가?
- iii. 어떤 물질의 제거반응이 1차반응식으로 표현될 때, CMFR과 PFR 중 제거효율의 측면에서 유리한 반응조의 형태는?
- iv. 어떤 물질의 제거반응이 1차반응식으로 표현될 때, CMFR과 PFR 각각에서 유입수 농도에 따라 제거효율은 어떻게 나타나는가?

3. 대기 중의 탄소를 해양의 심층부로 이동시키는 기작인 solubility pump와 biological pump에 대하여 조사하여 간단히 설명하시오. (15점)

답)

Solubility pump: 해수 표면에서 냉각된 물이 그에 따라 높은 이산화탄소 용해도를 가져 대기 중의 이산화탄소를 용해시키고, 밀도차에 의하여 하부로 이동함으로써 대기 중의 이산화탄소를 심해로 이동

Biological pump: 해수 표면의 식물성 플랑크톤이 대기 중의 이산화탄소를 광합성을 통하여 생체의 유기탄소(바이오매스)로 전환하고, 이 사체가 가라앉으면서 탄소를 심해로 이동

4. 최용주 교수는 미국에서 5년간 거주한 이후 본 학부에 임용되었다. 어느 날 그는 미국에서 마셨던 음용수에 사염화탄소(carbon tetrachloride) 0.05 mg/L와 클로로포름(chloroform) 0.8 mg/L가 함유된 것으로 밝혀졌다는 뉴스를 보고 화들짝 놀라 그 발암위해도를 계산해 보고자 하였다. 최용주 교수가 미국에 체류하는 동안 매일 이 음용수를 2 L씩 섭취하였고, 매년 365일 중 350일을 미국에 체류하였으며, 체중을 65 kg으로 가정하였을 때, 다음 물음에 답하시오.
- 1) 최용주 교수의 일생 동안 사염화탄소 및 클로로포름의 노출경로가 미국에서의 음용수 섭취에 한정된다고 가정하였을 때, 최용주 교수의 두 물질 각각에 대한 chronic daily intake(CDI) 값을 구하시오. 단, averaging time(AT)는 75년(=27375 일)으로 가정하시오. (12점)

답)

$$CDI = C \left[ \frac{(CR)(EFD)}{BW} \right] \left( \frac{1}{AT} \right)$$

$$CR = 2 \text{ L/day}$$

$$EFD = EF \times ED = 350 \text{ days/year} \times 5 \text{ years} = 1750 \text{ days}$$

$$BW = 65 \text{ kg}$$

$$AT = 27375 \text{ days}$$

i) 사염화탄소

$$C = 0.05 \text{ mg/L}$$

$$CDI = (0.05 \text{ mg/L}) \cdot \frac{2 \text{ L/day} \cdot 1750 \text{ days}}{65 \text{ kg}} \cdot \frac{1}{27375 \text{ days}} = 9.83 \times 10^{-5} \text{ mg/kg/day}$$

ii) 클로로포름

$$C = 0.8 \text{ mg/L}$$

$$CDI = (0.8 \text{ mg/L}) \cdot \frac{2 \text{ L/day} \cdot 1750 \text{ days}}{65 \text{ kg}} \cdot \frac{1}{27375 \text{ days}} = 1.57 \times 10^{-3} \text{ mg/kg/day}$$

- 2) 미국에서의 사염화탄소 및 클로로포름 음용수 섭취에 따른 최용주 교수의 발암 위험도(carcinogenic risk)를 구하시오. 경구 섭취(oral intake)에 의한 slope factor는 사염화탄소가 0.13 kg-day/mg, 클로로포름이 0.0061 kg-day/mg이다. (8점)

답)

$$\text{Cancer risk} = (CDI) \times (SF)$$

$$\text{사염화탄소: } 9.83 \times 10^{-5} \text{ mg/kg/day} \times 0.13 \text{ kg-day/mg} = 1.28 \times 10^{-5}$$

$$\text{클로로포름: } 1.57 \times 10^{-3} \text{ mg/kg/day} \times 0.0061 \text{ kg-day/mg} = 9.58 \times 10^{-6}$$

$$\text{따라서, 총 발암위해도는 } 1.28 \times 10^{-5} + 9.58 \times 10^{-6} = 2.24 \times 10^{-5}$$