

동결농축법을 이용한 폐수처리시스템의 에너지 효율 향상에 관한 연구

김정식¹ · 임승택² · 오 철[†]

(원고접수일 : 2013년 4월 9일, 원고수정일 : 2013년 6월 5일, 심사완료일 : 2013년 7월 5일)

A study on energy efficiency improvement of waste-water treatment system by freeze concentration method

Jung-Sik, Kim¹ · Seung-Taek Lim² · Cheol Oh[†]

요약: 동결농축법은 열역학적 효율이 높고 에너지 소비량이 작으며 처리수를 재활용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 중소규모로 상용화 가능한 동결농축폐수처리시스템을 설계하고, 각 시스템의 에너지 소비효율과 일일처리량을 비교하여 시스템 개발방향을 제안하고자 하였다. 시스템을 완속운전시스템과 급속운전시스템으로 각각 모델링하고 해석을 통해 소비동력과 운전시간을 계산하여 비교한 다음 설계처리량에 따른 변화를 추가 검토하였다. 연구결과 급속운전시스템의 소비전력량비가 0.6 Wh/kg 만큼 다소 높으나 일일처리량은 19 % 증가하였으며, 설계처리량이 큰 시스템일수록 소비전력량비가 작아지고 일일처리량이 큰 결과를 얻었다.

주제어: 동결농축, 완속운전, 급속운전, 설계처리량, 폐수처리

Abstract: Freeze concentration method has advantages of high thermodynamic efficiency, low energy consumption and purified water re-use. In this study, freeze concentration waste-water system which was designed as the small and medium sized capacity was analyzed about the rate of electric power consumption and the daily treatment capacity to suggest the direction of system development. At first, power consumption and operation time of the system with fresh water pre-cooler or without it was calculated by computer modeling and analysis. Subsequently, the change of design treatment capacity was applied to the system with fresh water cooler. As a result, the rate of electric power consumption was higher as 0.6 Wh/kg but daily treatment capacity increased in quantity as 19 % in the system with fresh water pre-cooler. As design treatment capacity increased, the rate of electric power consumption was lower and daily treatment capacity was larger in quantity.

Keywords: Freeze concentration, Non-precooling, Precooling, Design capacity, Waste-water treatment

1. 서 론

산업의 발달로 산업폐수의 처리는 수질오염을 방지하기 위한 중요한 요소로 작용하고 있다. 최근에는 중소규모로 용수 재이용, 자원 및 에너지의

회수 등 저비용 고효율이 가능한 경제적이고 친환경적인 방법들이 연구되고 있다[1].

동결농축법을 이용한 폐수처리방법은 에너지 소비가 적고 중소규모로 발생하는 폐수를 정화하여 재이용하는 기술에 응용성이 뛰어난 것으로 알려

†Corresponding Author: Division of Engineering, College of Maritime Sciences, Korea Maritime University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: ohcheol@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4268

1 Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: kjsk2@komeri.re.kr, Tel: 051-400-5141

2 Graduate School of Korea Maritime University, E-mail: dhdfj@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4268

져 있다[2][3]. 종래에는 작은 빙결정을 생성하여 성장 분리한 후에 추출하는 결정화법을 이용하였으나, 장시간이 소요되고 재사용할 수 있을 정도의 순도 높은 얼음을 추출하기 곤란한 단점을 가지고 있다[4]. 이에 비해 전진동결농축법(progressive freeze concentration)은 열교환기 표면에 단일 빙층을 형성, 성장시키는 방법으로 결정화 방법에 비해 시스템이 간단해지며 쉽게 원하는 크기의 얼음으로 추출 가능한 장점을 가지고 있어 중소규모의 폐수처리시설로 상용화가 시도되고 있다.

본 연구에서는 경제적 시스템 설계안을 제시하고자 전진동결농축법에 근간한 시스템의 설계 조건을 정의하고, 상용프로그램인 HYSYS를 이용하여 시스템 소비동력을 계산하였다. 시스템은 초기 빙층용 청수를 예냉하는 급속운전시스템(precooling system, S_{pc})과 예냉 하지 않는 완속운전 시스템(non-precooling system, S_{npc})을 각각 비교하였다. 또, 설계처리량의 변화에 따른 시스템 효율을 검토하기 위해 유입량의 50 ~ 90 %를 처리하는 각각의 시스템을 검토하였다.

시스템의 에너지 효율은 폐수처리량에 대한 운전소비전력의 비인 소비전력량비(rate of electric power consumption, η_e)로 평가하고, 폐수 처리시설 규모의 선택 기준인 일일처리량을 계산하여 제시하므로 상용시스템의 개발방향을 제시하고자 한다 [5].

2. 시스템 설계 조건 및 해석

2.1 시스템 설계

2.1.1 시스템 개요

다음 Figure 1은 상용화가 연구되고 있는 대표적 전진동결농축폐수처리장치이다[6]. 시스템은 동결 초기에 과냉각으로 발생하는 수지(樹枝)상의 빙층에 오염물질이 몰입되는 것을 방지하기 위해 초기 빙층(ice-lining)을 형성시키도록 하고 폐수 중 오염 물질을 분리해 내는 처리효율을 향상시키기 위해 동결층의 성장속도를 조절하고 동결계면의 고농도 수용액을 주위로 확산시키는 기포분사법을 적용하였다[7][8].

2.1.2 주요 설계조건

시스템 해석을 위한 기본 설계데이터와 운전절차를 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 폐수처리부에는 원통 다관의 제빙관이 설치되고 동결층이 원관 외부에 착빙된 후 성장하는 형태를 기준으로, 설계처리량에 따른 제빙관 수를 구하였다. 제빙관의 제빙 유효치수는 외경 $\phi 100$ mm \times 길이 1,500 mm 관을 사용하고 동결층의 두께는 초기빙층 1 mm를 제외하고 상용화가 가능하다고 제안된 두께인 15 mm가 성장하는 것으로 하였다. Figure 2는 제빙관에 착빙된 동결층을 나타낸 것이다. 제빙기에 설치된 원관의 수(N_{tube})와 초기빙층(ice-lining) 착빙량(M_{lin})은 Table 3과 같다[9].

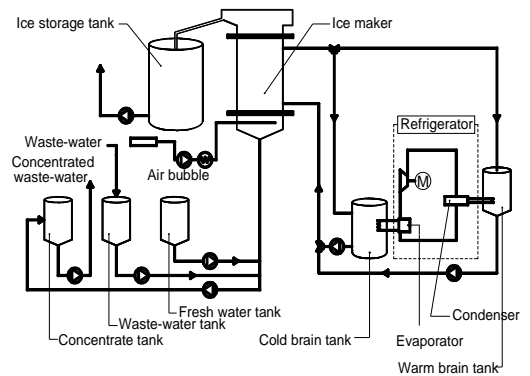


Figure 1: Waste-water freeze concentration system

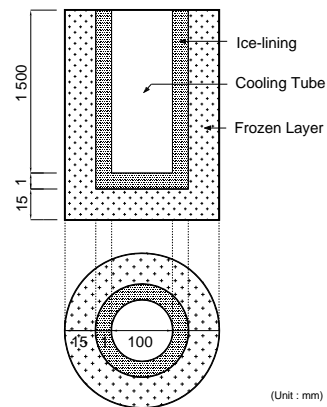


Figure 2: Ice layer along cooling tube

Table 1: Data of system basic design

| | | |
|--------------------|----------------------------------|------------------|
| Waste-water inflow | | 250 kg/batch |
| Treatment capacity | | Design capacity |
| Ice | Specific heat | 2.0934 kJ/kg · K |
| | Temp. | -10 °C |
| Waste-water | Inflow temp. | 25 °C |
| | Discharge temp. | 1 °C |
| | Specific heat | 4.1868 kJ/kg · K |
| Cold brain | Supply temp. | -20 °C |
| | Return temp. | -17 °C |
| Warm brain | Supply temp. | 50 °C |
| | Return temp. | 45 °C |
| Injection air | Supply temp. | 25 °C |
| | Cooling temp. | 1 °C |
| | Injection rate | 5 l/min |
| Brain | Ethylene glycol aqueous solution | |
| | Concentration | 50 % |
| | Specific heat | 2.9308 kJ/kg · K |
| | Specific gravity | 1.085 |
| Ice-lining | | 1 mm |

Table 2: Operation procedure and time

| | |
|-----------------------|--------|
| Fresh water supply | 2 min |
| Ice-lining making | - |
| Fresh water discharge | 2 min |
| Waste-water supply | 2 min |
| Freeze concentration | 60 min |
| Waste-water discharge | 1 min |
| De-ice | 3 min |

Table 3: Number of cooling tube at design capacity

| Treatment capacity(kg) | N_{tube} (ea) | M_{lining} (kg) |
|------------------------|-----------------|-------------------|
| 125 | 16 | 7.14 |
| 150 | 19 | 8.56 |
| 175 | 22 | 9.99 |
| 200 | 26 | 11.42 |
| 225 | 29 | 12.84 |

2.1.3 시스템 열량 계산

초기빙층을 착빙하는데 필요한 열량(Q_{ilf})은 청수의 배출온도를 1 °C라 할 때, 유입 청수온도를 배출온도로 냉각하는 열량(Q_{fwc}), 착빙되는 양 만큼의 청수가 동결온도로 냉각되는 열량(Q_{fwf}), 동결온도로 냉각된 청수가 얼음으로 상변화하는 총 잠열(Q_{lh}) 및 동결된 얼음이 -10 °C까지 냉각되는 열량(Q_{ic})이 모두 제거되어야하며 식 (1)에서 계산하였다. Table 4는 유입량 중 70 % (175 kg)를 처리하는 완속운전시스템 및 급속운전시스템의 열량이며, Table 5는 설계처리량별 급속운전시스템의 열량이다.

$$Q_{ilf} = Q_{fwc} + Q_{fwf} + Q_{lh} + Q_{ic} \quad (1)$$

Table 4: Ice-lining freezing heat(Q_{ilf}) at each system

| System | Q_{fwc} | Q_{fwf} | $Q_{lh} + Q_{ic}$ | Q_{ilf} |
|-----------|-----------|-----------|-------------------|-----------|
| S_{npc} | 25,120.8 | 41.83 | 3,541.66 | 28,704.29 |
| S_{pc} | 4,186.8 | 41.83 | 3,541.66 | 7,770.29 |

Table 5: Ice-lining freezing heat(Q_{ilf}) at design capacity

| Treatment capacity(kg) | Q_{fwc} | Q_{fwf} | $Q_{lh} + Q_{ic}$ | Q_{ilf} |
|------------------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|
| 125 | 4,186.8 | 29.85 | 2,527.86 | 6,744.51 |
| 150 | 4,186.8 | 35.84 | 3,034.84 | 7,257.48 |
| 175 | 4,186.8 | 41.83 | 3,541.66 | 7,770.29 |
| 200 | 4,186.8 | 47.77 | 4,045.29 | 8,279.86 |
| 225 | 4,186.8 | 53.76 | 4,552.27 | 8,792.83 |

폐수 동결농축열량(Q_{wwf})도 초기빙층과 같은 방법으로 다음 식 (2)로 Table 6과 같이 설계처리량별로 계산하였다. 실제 폐수의 비열은 종류에 따라 다르나 청수와 같다고 가정하였다.

$$Q_{wwf} = Q_{wvc} + Q_{fww} + Q_{lh} + Q_{ic} \quad (2)$$

여기서, Q_{wvc} 는 폐수 냉각열량, Q_{fww} 는 폐수가 동결온도로 냉각되는 열량이다.

Table 6: Waste-water freezing heat(Q_{wwf}) at design capacity

| (unit : kJ) | | | | |
|------------------------|-----------|-----------|-------------------|------------|
| Treatment capacity(kg) | Q_{wwc} | Q_{fww} | $Q_{lh} + Q_{ic}$ | Q_{wwf} |
| 125 | 25,120.8 | 523.35 | 44317.28 | 69,961.43 |
| 150 | 25,120.8 | 628.02 | 53180.73 | 78,929.55 |
| 175 | 25,120.8 | 732.69 | 62044.19 | 87,897.68 |
| 200 | 25,120.8 | 837.36 | 70907.64 | 96,865.80 |
| 225 | 25,120.8 | 942.03 | 79771.10 | 105,833.93 |

동결계면에서 배제된 오염물질의 확산과, 동결층의 성장속도를 조절하기 위해 각 제빙관에 5 ℓ/min의 유량으로 폐수 동결농축과정 60분 동안 연속해서 기포를 분사한다. 이때 분사된 기포로 인한 열손실을 최소화하기 위해 공기분사펌프 출구에서 설계온도로 공기를 냉각시켜 분사하는데 필요한 냉각열량(Q_{air})은 식 (3)으로 계산하였으며, 그 결과는 Table 7과 같다.

$$Q_{air} = c_{air} \times M_{air} \times \Delta T \quad (3)$$

여기서, c_{air} 는 공기의 비열 1.0048 kJ/kg · K, M_{air} 는 기포분사량(kg)이다.

Table 7: Injection air cooling heat(Q_{air})

| Treatment capacity(kg) | M_{air} (kg) | Q_{air} (kJ) |
|------------------------|----------------|----------------|
| 125 | 5.70 | 194.73 |
| 150 | 6.84 | 233.67 |
| 175 | 7.99 | 272.64 |
| 200 | 9.13 | 311.92 |
| 225 | 10.27 | 350.85 |

2.2 완속운전시스템 및 급속운전시스템 해석

2.2.1 설계부하 및 냉브라인 순환량 계산

상용화 가능한 처리량 70 % (175 kg)를 기준으로 폐수 동결농축과정에서 100 % 부하로 시스템이 운전되도록 설계부하를 결정하였다. 폐수가 동결농축처리되는 과정에서 냉각된 기포가 분사되므로, 설계부하(Q_{design})는 완속운전시스템의 경우는 식

(4)로 급속운전의 경우에는 청수 예냉열량(Q_{fwpc})을 포함한 식 (5)로 계산하였다.

$$Q_{design} = Q_{wwf} + Q_{air} \quad (4)$$

$$Q_{design} = Q_{wwf} + Q_{air} + Q_{fwpc} \quad (5)$$

각 시스템에 필요한 냉브라인 순환량(F_{design})도 설계부하에 맞게 식 (6)으로 계산하여 Table 8에 정리하였다.

$$F_{design} = \frac{Q_{design}}{c_b \times \Delta T} \quad (6)$$

여기서, ΔT 는 브라인 입출구온도차, c_b 는 브라인 비열이다.

Table 8: Design load and cold brain flow rate

| System | Q_{design} (kJ/h) | F_{design} (kg/h) |
|------------------|---------------------|---------------------|
| S _{npc} | 88,170.32 | 10,028.15 |
| S _{pc} | 109,104.32 | 12,409.10 |

2.2.2 HYSYS를 이용한 시스템 해석

설계의 100 % 부하로 운전 중인 시스템을 Figure 3 및 Figure 4와 같이 모델링하였다. 해석은 상용 공정모사 프로그램인 Aspen HYSYS 7.3v로 수행했으며 적용된 모델 식은 냉동시스템에 널리 이용되는 Peng-Robinson 상태방정식(PR EOS)을 적용하였다[10]. 모델링은 운전과정 중 폐수를 동결농축하는 과정으로 해석을 통해 구성기기의 소비동력을 구하였다. 시스템은 냉동사이클로 구성된 냉동부, 냉브라인 순환회로, 동결과 냉각과정으로 표현된 폐수처리부의 제빙기, 그리고 공기냉각기 및 청수 냉각기 등으로 모델링하였다.

냉동부는 크게 냉동사이클과 응축기 냉각회로로 구성된다. -30 °C의 낮은 증발온도에서 유리한 다단압축 냉동사이클로 2단 압축 1단 팽창식 냉동기를 적용하였다. 냉동기의 사용 냉매는 R-134a를 적용하였으며, 냉동기 성적계수(COP)는 냉동기의 효율이 동일한 조건에서 시스템 간 에너지 소모량을

비교하기 위해 시스템에 상관없이 2.14로 동일하게 유지하였다. 냉동부의 해석조건은 **Table 9**에 나타내었다.

폐수처리부는 원래 저온의 냉매와 고온의 폐수 간 온도차로 전열현상이 발생하는 열교환기의 일종이다. 동결농축과정을 동결전의 폐수 냉각과 폐수 상변화 및 동결층의 추가냉각으로 단순화한 과정으로 모사하였다. 폐수 냉각열량은 동결농축 전의 손실현열이며, 잠열과 동결층 냉각열량은 실제 동결농축에 이용되는 제빙처리열로 구분할 수 있다. 기타 상세 해석조건은 **Table 10**에 나타내었다.

Table 9: Condition of refrigeration system

| | | | |
|-------------------------|--|-------------------|-----------------|
| Refrigeration cycle | Two-stage compression refrigeration cycle with intercooler | | |
| Refrigerant | R-134a | | |
| Refrigerant temperature | | Outlet temp. (°C) | Vapour fraction |
| | Condenser | 40 | 0 |
| | Evaporator | -30 | 1 |
| | Intercooler | 5 | - |
| Intermediate pressure | | 293.9 kPa | |
| Refrigerant flow rate | S_{npc} | 684.9 kg/h | |
| | S_{pc} | 852.7 kg/h | |
| Compressor | Adiabatic efficiency | 75 % | |
| Warm brain supply pump | ΔP | 100 kPa | |
| | Adiabatic efficiency | 75 % | |

Table 10: Detail Condition for system analysis

| | | |
|------------------------|----------------------|-------------|
| Cold brain | S_{npc} | 10,030 kg/h |
| | S_{pc} | 12,410 kg/h |
| Cold brain supply pump | ΔP | 100 kPa |
| | Adiabatic efficiency | 75 % |
| Air cooler | Flow rate | 8.18 kg/h |
| Fresh water cooler | Inlet temp. | 25 °C |
| | Outlet temp. | 5 °C |
| | Flow rate | 250 kg/h |

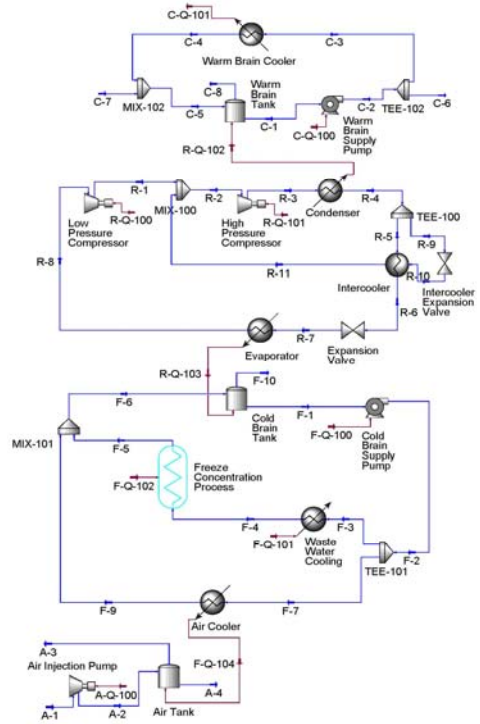


Figure 3: System modeling without fresh water pre-cooler

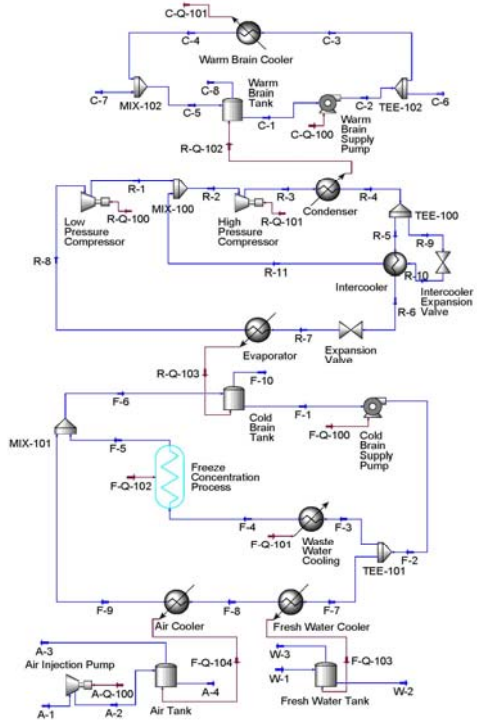


Figure 4: System modeling with fresh water pre-cooler

2.2.3 단기운전 펌프의 해석

시스템은 폐수동결농축과정 이외의 운전에서는 대부분 펌프들의 단기운전이 이루어진다. 단기운전하는 펌프는 청수 급수펌프(P_{fs}), 청수 배수펌프(P_{fd}), 폐수 급수펌프(P_{ws}), 농축폐수 배출펌프(P_{wd}), 탈빙운전 온브라인 펌프(P_{wb})이다. 이들 펌프는 1분에서 3분 사이의 짧은 시간동안 사용되지만, 펌프의 일은 시스템 전체의 효율에 영향을 미치므로 **Figure 5**로 별도 모델링하여 소비동력을 구하였다. 단기운전 펌프들은 시스템과 상관없이 같은 조건으로 운전하며 사용 에너지도 동일하다. **Table 11**은 각 펌프의 해석조건이다. 산업용 폐수는 성상과 밀도가 다양하나 여기서는 청수와 같은 밀도로 가정하였다. 온브라인 냉각회로의 순환펌프가 탈빙운전 시에 온브라인을 제빙관에 공급하는 단기운전을 하므로 운전시간에 해당하는 소비동력을 별도 계산하였다.

Table 11: Condition of short-term operation pump

| Pump | Flow temp. (°C) | Flow rate (kg/min) | Operation time (min) |
|----------|-----------------|--------------------|----------------------|
| P_{fs} | 25 | 125 | 2 |
| P_{fd} | 1 | 120 | 2 |
| P_{ws} | 25 | 125 | 2 |
| P_{wd} | 1 | 75 | 1 |

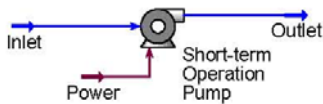


Figure 5: Modeling of short-term operation pump

2.2.4 운전시간 분석

운전과정 중 폐수 동결농축시간은 동결층의 성장속도와 관련되어 오염물질의 처리효율에 영향을 준다. 이 시간을 시스템 해석에서는 60분으로 동일하게 적용하였다. 폐수 동결농축과정과 초기빙층 착빙시간을 제외하고 다른 과정들은 시간이 같아 가장 중요한 영향인자는 초기빙층의 착빙에 소요되는 시간이다. 초기빙층 착빙시간 τ_{il} (min)은 초기

빙층 착빙열량 Q_{ilf} 와 시스템 설계부하 Q_{design} 에 따라 다음 식 (7)로 구하여 운전시간을 **Table 12**에 정리하였다.

$$\tau_{il} = \frac{Q_{ilf} \times 60}{Q_{design}} \quad (7)$$

Table 12: Operating time at each system

| Treatment procedure | S_{npc} | S_{pc} |
|-----------------------|-----------|----------|
| Fresh water supply | 2 | 2 |
| Ice-lining making | 19 | 4 |
| Fresh water discharge | 2 | 2 |
| Waste-water supply | 2 | 2 |
| Freeze concentration | 60 | 60 |
| Waste-water discharge | 1 | 1 |
| De-ice | 3 | 3 |
| Total | 86 | 71 |

2.3 설계처리량에 따른 시스템 해석

다음으로 시스템이 처리할 수 있는 폐수량의 변화에 따른 시스템 효율을 분석하기 위해 유입 폐수를 50 ~ 90 % 양까지 처리하는 경우를 각각 비교하였다. 기존 시스템은 소비전력량의 비에 큰 차이가 없고 일일처리량이 큰 급속운전시스템을 대상으로 하였으며 이미 구성된 해석모델에 설계처리량이 변경되므로 반영할 변수들을 입력하여 시스템을 해석하였다.

2.3.1 설계부하 및 냉브라인 순환량

설계부하는 폐수 동결농축처리과정에서 설계부하 100 %로 운전하도록 하였다. 급속운전시스템의 설계부하 Q_{design} 은 식 (5)에서 구하였으며 냉브라인량도 설계부하에 따라 식 (6)에서 구하였다. 처리량에 따른 설계부하 및 냉브라인 순환량은 **Table 13**에 나타내었다.

2.3.2 HYSYS를 이용한 시스템 해석

설계의 100 % 부하로 운전 중인 폐수 동결농축 과정을 급속운전시스템인 **Figure 4**와 동일하게 모

델팅하였다. 냉동기 성적계수는 냉동기의 효율이 동일한 조건에서 시스템 간 에너지 소모량을 비교하기 위해 처리량과 상관없이 2.14로 유지시키고, **Table 13**의 설계부하와 냉브라인 순환량을 반영하였다. 기타 설계열량의 변화에 따라 시스템 해석에 적용된 변수는 **Table 14**에 나타내었다.

Table 13: Design load and cold brain flow rate

| Treatment capacity(%) | Q_{design} (kJ/h) | F_{design} (kg/h) |
|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 50(125 kg) | 91,090.16 | 10,360.24 |
| 60(150 kg) | 100,097.22 | 11,387.62 |
| 70(175 kg) | 109,104.32 | 12,412.32 |
| 80(200 kg) | 118,111.72 | 13,437.06 |
| 90(225 kg) | 127,118.78 | 14,461.75 |

Table 14: Parameters of system analysis

| Treatment capacity(%) | Refrigerant flow (kg/h) | Air flow (kg/h) |
|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| 50(125 kg) | 712.7 | 5.651 |
| 60(150 kg) | 782.6 | 6.781 |
| 70(175 kg) | 852.7 | 7.912 |
| 80(200 kg) | 922.5 | 9.042 |
| 90(225 kg) | 992.5 | 10.170 |

2.3.3 단기운전 펌프의 해석

청수 급수펌프, 폐수 급수펌프는 유입량이 250 kg으로 일정하고 **Table 11**과 같은 조건으로 운전하므로 별도의 해석이 필요하지 않다. 그러나 청수 배수펌프는 초기빙층의 양이 달라지며, 농축폐수 배출펌프도 농축된 잔류 폐수의 양이 달라 소비동력을 별도로 구하여야 한다. 온브라인 펌프는 냉동부 온브라인 냉각회로의 펌프와 공용으로 사용하고 있어 응축기의 열량에 따라 펌프용량이 설계되므로 펌프유량을 기준으로 운전시간에 대한 소모동력을 구하였다. **Table 15**에 펌프유량 조건을 나타내었다.

2.3.4 운전시간 분석

설계처리량에 따른 운전시간을 계산하여 **Table 16**에 나타내었다. 초기빙층의 착빙량이 증가하여도

운전시간이 거의 같은 이유는 시스템의 설계부하가 동반 상승하여 초기빙층을 빠르게 착빙시킬 수 있기 때문으로 생각된다.

Table 15: Flow rate of short-term operation pump

| Treatment capacity(%) | P_{fd} (kg/min) | P_{wd} (kg/min) | P_{wb} (kg/min) |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 50(125 kg) | 121.4 | 125 | 155.45 |
| 60(150 kg) | 120.7 | 100 | 170.66 |
| 70(175 kg) | 120.0 | 75 | 186.0 |
| 80(200 kg) | 119.3 | 50 | 201.16 |
| 90(225 kg) | 118.6 | 25 | 216.50 |

Table 16: Operation time at design capacity

| Treatment procedure | Design capacity(%) (unit : min) | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
| | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| Fresh water supply | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Ice-lining making | 4.4 | 4.4 | 4.3 | 4.2 | 4.2 |
| Fresh water discharge | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Waste-water supply | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Freeze concentration | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Waste-water discharge | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| De-ice | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Total | 74.4 | 74.4 | 74.3 | 74.2 | 74.2 |

3. 결과 및 고찰

3.1 완속운전 및 급속운전시스템의 해석결과

완속운전시스템 및 급속운전시스템의 해석결과 설계량을 처리하는데 소비되는 전력량과 처리량간의 소비전력량비는 **Table 17**과 같다. 작은 차이나 완속운전시스템이 급속운전시스템에 비해 전력 소비량이 작은 것은 시스템 설계부하가 큰 급속운전시스템에서 냉브라인 및 온브라인 유량이 상대적으로 증가하여 펌프의 일이 소폭 증가하기 때문이다. 그러나 운전조건과 상관없이 전체 소비전력량 중 압축기의 비중이 약 95 % 이상으로 냉동기의 성능계수가 시스템의 효율을 크게 지배하는 것으로 나타나 실제 설계에 있어 냉동기의 선정이

Table 17: Rate of electric power consumption for the application of pre-cooling

| System | Treatment capacity(kg) | Electric power consumption(kWh) | | | | | | | | | | η_e (kWh/kg) |
|-----------|------------------------|---------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|-------------------|
| | | Ice-Lining | Compressor | P_{cb} | P_{wb} | P_{ab} | P_{fs} | P_{fd} | P_{ws} | P_{wd} | total | |
| S_{npc} | 175 | 3.98 | 11.55 | 0.33 | 0.32 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.003 | 16.233 | 0.0927 |
| S_{pc} | 175 | 1.08 | 14.38 | 0.41 | 0.40 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.003 | 16.323 | 0.0933 |

매우 중요한 것을 알 수 있다. 결국 소비전력량비의 차이가 미미한 것은 시스템 효율의 지배력이 월등한 냉동기의 효율이 두 시스템에서 2.14로 동일하다고 가정하였기 때문이다.

Table 18은 완속운전시스템 및 급속운전시스템의 일일처리량을 정리한 결과를 나타낸 것이다. 급속운전시스템에서 초기빙층 착빙에 소요되는 시간이 완속운전시스템 대비 약 22 % 까지 줄어들어 운전시간을 15분 정도 절감할 수 있고 일일 운전횟수가 3회 더 많아진다. 결국 급속운전시스템의 일일처리량이 약 19 % 증가하여 525 kg의 폐수를 더 처리할 수 있게 된다.

Table 18: Daily operation times and treatment capacity

| Item | S_{npc} | S_{pc} |
|----------------------------------|-----------|----------|
| Operation time(min) | 90 | 75 |
| Number of daily operation(times) | 16 | 19 |
| Daily treatment capacity(kg) | 2,800 | 3,325 |

3.2 설계처리량에 따른 시스템 해석결과

설계처리량에 따른 시스템 해석결과 얻어진 각 구성 기기들의 소비전력량과 처리량에 대한 소비전력량비를 구하여 **Table 19**에 나타내었다.

Figure 6은 설계처리량에 따른 소비전력량비(η_e) 및 냉동기의 증발기 열량 중 동결잠열 및 동결층 냉각열량의 비를 나타낸 것으로, 처리량이 커질수록 소비전력량비는 낮아지고 공급 열량 중 폐수 동결에 직접 이용되는 열량 비가 상승하는 경향을 알 수 있다. 이는 시스템 부하가 증가하여 소비되는 에너지는 많아지지만 상대적으로 동결량의 증가폭이 커지고, 냉동기에서 공급되는 열이 상변화

의 잠열과 동결층의 냉각열로 이용되는 비율이 상승하여 시스템 에너지 효율이 향상되는 것으로 분석되었다. 또, 처리량과 상관없이 전체 소비전력량 중 냉동기 압축기의 비중이 약 95 % 이상으로 냉동기의 성능계수가 시스템의 효율을 크게 지배하는 것으로 나타났다.

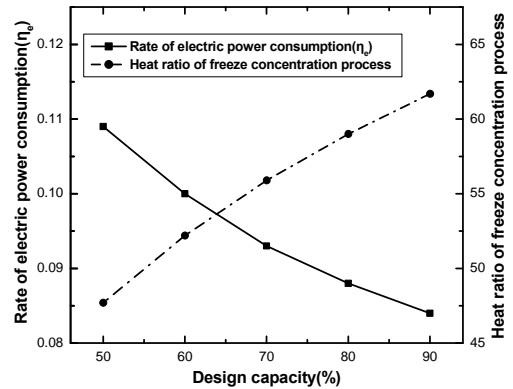


Figure 6: Energy efficiency of system at design capacity

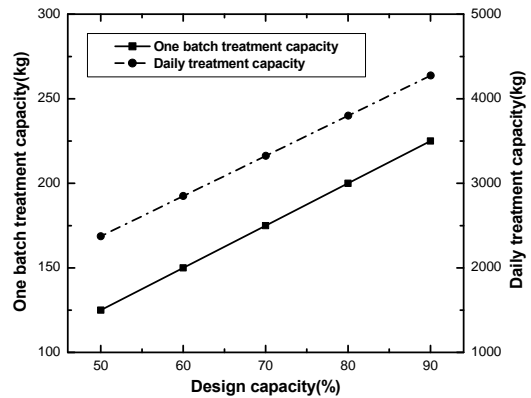


Figure 7: One batch and daily treatment capacity

Table 19: Rate of electric power consumption at design treatment capacity

| Treatment capacity(kg) | Electric power consumption(kWh) | | | | | | | | | | η_e (kWh/kg) |
|------------------------|---------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|-------------------|
| | Ice-Lining | Compressor | P_{cb} | P_{wb} | P_{ab} | P_{fs} | P_{fd} | P_{ws} | P_{wd} | total | |
| 125 | 0.939 | 12.02 | 0.340 | 0.337 | 0.016 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.005 | 13.684 | 0.109 |
| 150 | 1.010 | 13.2 | 0.373 | 0.370 | 0.019 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.004 | 15.003 | 0.1 |
| 175 | 1.080 | 14.38 | 0.407 | 0.403 | 0.022 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.003 | 16.322 | 0.093 |
| 200 | 1.151 | 15.56 | 0.440 | 0.436 | 0.025 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.002 | 17.641 | 0.088 |
| 225 | 1.222 | 16.74 | 0.473 | 0.470 | 0.028 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.001 | 18.961 | 0.084 |

설계처리량별 운전시간은 약 75분으로 거의 동일한 것으로 나타나 설계처리량과 상관없이 일일 운전회수가 같아 일일처리량은 설계처리량이 클수록 많아진다. **Figure 7**은 설계처리량별 일일처리량으로 회당 처리량이 큰 조건이 일일처리량도 많은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 에너지 소비가 적고 중소규모의 폐수 배출시설에 유리한 동결농축법을 이용한 폐수처리 시스템을 상용화하기 위해 시스템을 설계하고, 해석을 통해 소비전력을 계산한 후 시스템의 에너지 효율과 일일처리량을 비교 분석하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초기빙층 착빙 용 청수를 미리 예냉하기 위해 청수냉각기를 갖는 급속운전시스템이 완속운전 시스템에 비해 소비전력량비가 0.6 Wh/kg 정도 높지만, 운전시간을 15분 정도 절감할 수 있어서 일일 처리량은 약 19 % 증가하였다.

(2) 설계처리량이 증가할수록 시스템의 부하가 커져 소비전력량은 증가하지만, 냉동기에서 공급되는 열이 상변화의 잠열과 동결층의 냉각열로 이용되는 비율이 상승하여, 소비전력량비는 작아지고 시스템 효율은 향상되었으며 일일처리량은 증가하였다.

(3) 시스템의 종류나 설계처리량과 상관없이 압축기의 소비전력량이 전체의 95 % 이상으로 냉동기의 성적계수가 시스템의 효율을 크게 지배하는 것으로 나타나 효율이 높은 냉동기의 선정이 매우 중요한 것으로 나타났다.

위의 연구결과는 에너지 효율이 높은 시스템의

설계와 상용화에 활용 가능성이 기대되며, 추가적으로 향후 폐수를 처리하고 발생하는 얼음을 공조에 활용하고, 용해된 물을 재활용하는 환경 친화형 유틸리티로써 동결농축폐수처리시스템이 갖는 장점이 연구되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 국토해양부의 지원으로 수행한 해양 에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] J. -O. Kim, "Future promising green environment technology : about water treatment technology", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, vol. 10, no. 1, pp. 6-10, 2010 (in Korean).
- [2] H. -D. Jeong, Influence of Operational Factors on the Falling Film Freeze Concentration System for Wastewater Treatment, Master Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Korea, pp. 1-2, 2005 (in Korean).
- [3] Y. -C. Song and E. -G. Lee, "Effect of components on the freeze concentration of live stock wastewater treatment", Korea Society of Environmental Engineers, Autumn Conference, 1998 (in Korean).
- [4] Sakasita Sigeru, "Air conditioning utility using thermal storage type refrigerating system", Monthly Publication Chemical Engineering,

pp. 44-48, 2000 (in Korean).

- [5] J. -C. Kim, Study on Construction of Infrastructure of Promotional Spreading of High Efficiency Equipment and Appliances by Improvement of Energy Efficiency Policy and International Standardization, Soongsil University, Korea, pp. 141-142, 2006 (in Korean).
- [6] Hiroshi Sato, "Water treatment technology using freezing separation method", Refrigeration, vol. 74, no. 857, pp. 196-200, 1999.
- [7] J. -S. Kim, An Experimental Study on Waste Water Concentration by Separating Method of Freezing, Master thesis, Department of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Korea, 2006 (in Korean).
- [8] Ling Liu, Tomoyuki Fujii, Kiro Hayakawa and Osato Miyawaki, "Prevention of initial super-cooling in progressive freeze-concentration", Bioscience, Biotechnology and Biochemistry. vol. 62, no. 12, pp. 2467 -2469, 1998.
- [9] E. -T. Lee, Development and Practical Application of Freeze Concentration Technology for Wastewater Treatment, Jeiotech, Korea, 2005 (in Korean).
- [10] Aspen Technology, Aspen HYSYS Simulation Basis Guide, Aspen Technology Inc., USA, pp. A1-A95, 2011.