

제 7 장 히트펌프

제 7 장 히트펌프

7.1 개 요

히트펌프(heat pump)는 낮은 온도의 저급열을 사용가능한 높은 온도의 열로 끌어올리는 재생열 시스템으로 작동방식에 따라 압축식과 흡수식으로 구분된다. 압축식은 기존 에어컨에 냉·난방 및 급탕을 겸하도록 개발되어 가정, 빌딩, 호텔 등에 주로 이용되어 왔고, 보일러와 에어컨의 기능을 겸할 수 있다. 흡수식은 온수제조를 목적으로 하는 제1종 및 증기발생을 목적으로 하는 제2종으로 구분되며, 제1종은 구동력으로 고온의 증기가 필요하므로 기존 보일러가 있는곳에 적합하다. 본 하수처리장과 같이 기존 보일러를 소화조에 사용하고 있고, 폐열중 이용이 어려운 저온(20℃ 정도)의 하수폐열 사용을 고려시 흡수식 제1종이 적합한 것으로 판단된다. 이때, 사무실 난방용으로는 적용이 어렵고, 소화조에 적용을 하수처리장별 검토하였다.

7.2 히트펌프 검토

7.2.1 검토조건 및 분석

흡수식 제1종 히트펌프의 소화조 적용을 위한 기존 온수보일러 온도조건, 소화조 소화가스 발열량은 다음과 같고, 소화조에 필요한 하절기/동절기의 소요가온열량은 <표 7.2-1>과 같다.

하수처리장별로 <그림 7.2-1~2>와 같이 히트펌프 시스템을 계획하여 분석하였다.

○ 소화조 온수보일러 온도조건 (입구온도 : 80℃, 출구온도 : 60℃)

○ 소화조 최대가온온도 : 35℃

○ 하절기 슬러지 투입온도 : 25℃

○ 동절기 슬러지 투입온도 : 6℃

○ 하수 폐열온도 : 하절기(6~10월 : 21~25℃)

동절기(12~3월 : 6~10℃)

○ 소화조 소화가스 이용량

- 소화가스 발생량 : 난지(341.7m³/시), 가양(989.4m³/시)

- 소화가스 발열량

난지 : $45.1 \times 10^6 \text{ kcal/일}$ ($341.7 \times 5,500 \times 24$)

가양 : $130.6 \times 10^6 \text{ kcal/일}$ ($989.4 \times 5,500 \times 24$)

<표 7.2-1>

소화조 소요가온열량

구 분	단위	난지	가양	비 고
1. 계획Sludge량	m ³ /일	1,247	3,711	* $Q = Q_1 + (Q_2 + Q_3)$ $\times 4 \sim 8 \text{조} \times 24 \text{시/일}$ * 난지/가양 하수처리장 실시설계 보고서 참조
2. 소화조 소요가온열량(Q)	Kcal /일			
- 투입슬러지를 소요온도 까지 올리는 열량(Q_1)	Kcal /일	12.5×10^6	37.1×10^6	
- 소화조 방산열량(Q_2)	Kcal /시	8,445	8,907	
- 슬러지 순환배관 방산열량(Q_3)	Kcal /시	2,183	1,292	
3. 하절기 소요가온열량(Q)	Kcal /일	13.5×10^6	39.1×10^6	
4. 동절기 소요가온열량(Q)	Kcal /일	40.1×10^6	179.6×10^6	

가. 난지

<그림 7.2-1>과 같이 2대의 히트펌프를 직렬로 연결하는 것으로 검토하였다.

- 1) 온수사용조건(소화조 가열용) : $60 \rightarrow 80^\circ\text{C}$, 유량 : $126\text{m}^3/\text{시}$

여기서 온수 유량은 $0.7\text{m}^3/\text{min} \times 60\text{min}/\text{시} \times 3\text{대} = 126\text{m}^3/\text{시}$

$$\therefore \text{온수열량은 } (80-60) \times 126\text{m}^3/\text{시} \times 1,000\text{kcal}/\text{m}^3\text{C (물의 비열)}$$

$$= 2.52 \times 10^6\text{kcal}/\text{시} = 60.48 \times 10^6\text{kcal}/\text{일}$$

- 2) 폐수조건 : 21°C (하절기 조건중 가장 낮은 조건) $\rightarrow 13^\circ\text{C}$, 유량 : $50.4\text{m}^3/\text{시}$

$$\therefore \text{폐열회수열량은 } (21-13) \times 50.4 \times 1,000 = 4.03 \times 10^5\text{kcal}/\text{시} = 9.672 \times 10^6\text{kcal}/\text{일}$$

- 3) 필요한 보조 가열열량(스팀) : $2.52 \times 10^6 - 4.03 \times 10^5 = 2.117 \times 10^6\text{kcal}/\text{시}$ 로 히트펌프 구동
식에도 84%의 보조열원이 필요함

- 4) 히트펌프1 운용조건

- (1) 온수사용조건(히트펌프2의 폐수로 사용) : $34 \rightarrow 45^\circ\text{C}$, 유량 : $91.6\text{m}^3/\text{시}$

$$\therefore \text{온수 열량은 } (45-34) \times 91.6\text{m}^3/\text{시} \times 1,000\text{kcal}/\text{m}^3\text{C}$$

$$= 1.007 \times 10^6\text{kcal}/\text{시}$$

- (2) 폐수조건 : 21°C (하절기 조건중 가장 낮은 조건) $\rightarrow 13^\circ\text{C}$, 유량 : $50.4\text{m}^3/\text{시}$

$$\therefore \text{폐열회수 열량은 } (21-13) \times 50.4 \times 1,000 = 4.03 \times 10^5\text{kcal}/\text{시}$$

- (3) 보조가열열량(스팀) : $1.007 \times 10^6 - 4.03 \times 10^5 = 6.04 \times 10^5\text{kcal}/\text{시}$

5) 히트펌프2 운용조건

(1) 온수사용조건(소화조 가열용) : $60 \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$, 유량 : $126\text{m}^3/\text{시}$ \therefore 온수 열량은 $(80-60) \times 126\text{m}^3/\text{시} \times 1,000\text{kcal}/\text{m}^3\text{C}$

$$= 2.52 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시}$$

(2) 폐수사용조건(히트펌프1의 온수를 이용) : $45 \rightarrow 34^{\circ}\text{C}$, 유량 : $91.6\text{m}^3/\text{시}$ \therefore 폐수 열량은 $(45-34) \times 91.6\text{m}^3/\text{시} \times 1,000\text{kcal}/\text{m}^3\text{C}$

$$= 1.01 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시}$$

(3) 보조가열열량(스팀) : $2.52 \times 10^6 - 1.01 \times 10^6 = 1.51 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시}$

나. 기양

<그림 7.2-2>와 같이 2대의 히트펌프를 직렬로 연결하고, 히트펌프2에서 2대를 병렬로 연결하는 것으로 검토하였다.

1) 온수사용조건(소화조 가열용) : $60 \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$, 유량 : $480\text{m}^3/\text{시}$ \therefore 온수열량은 $(80-60) \times 480\text{m}^3/\text{시} \times 1,000\text{kcal}/\text{m}^3\text{C}$

$$= 9.6 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시} = 230.4 \times 10^6 \text{kcal}/\text{일}$$

여기서 온수 유량은 $1.0\text{m}^3/\text{min} \times 60\text{min}/\text{시} \times 8\text{대} = 480\text{m}^3/\text{시}$ 2) 폐수조건 : 21°C (하절기 조건중 가장 낮은 조건) $\rightarrow 13^{\circ}\text{C}$, 유량 : $192\text{m}^3/\text{시}$ \therefore 폐열회수 열량은 $(21-13) \times 192 \times 1,000 = 1.536 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시} = 36.864 \times 10^6 \text{kcal}/\text{일}$ 3) 필요한 보조 가열열량(스팀) : $9.6 \times 10^6 - 1.536 \times 10^6 = 8.064 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시}$ 로 히트펌프 구동시에도 84%의 보조열원을 가동해야함

4) 히트펌프1 운용조건

(1) 온수사용조건(히트펌프2의 폐수로 사용) : $34 \rightarrow 45^{\circ}\text{C}$, 유량 : $349\text{m}^3/\text{시}$ \therefore 온수 열량은 $(45-34) \times 349\text{m}^3/\text{시} \times 1,000\text{kcal}/\text{m}^3\text{C}$

$$= 3.84 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시}$$

(2) 폐수조건 : 21°C (하절기 조건중 가장 낮은 조건) $\rightarrow 13^{\circ}\text{C}$, 유량 : $192\text{m}^3/\text{시}$ \therefore 폐열회수 열량은 $(21-13) \times 192 \times 1,000 = 1.536 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시}$ (3) 보조가열열량(스팀) : $3.84 \times 10^6 - 1.536 \times 10^6 = 2.304 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시}$

5) 히트펌프2 운용조건

(1) 온수사용조건(소화조 가열용) : $60 \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$, 유량 : $480\text{m}^3/\text{시}$ \therefore 온수 열량은 $(80-60) \times 480\text{m}^3/\text{시} \times 1,000\text{kcal}/\text{m}^3\text{C}$

$$= 9.6 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시}$$

(2) 폐수사용조건(히트펌프1의 온수를 이용) : $45 \rightarrow 34^{\circ}\text{C}$, 유량 : $349\text{m}^3/\text{시}$ \therefore 폐수 열량은 $(45-34) \times 349\text{m}^3/\text{시} \times 1,000\text{kcal}/\text{m}^3\text{C}$ (물의 비열)

$$= 3.839 \times 10^6 \text{kcal}/\text{시}$$

16~

(3) 보조가열열량(스팀) : $9.6 \times 10^6 - 3.839 \times 10^6 = 5.761 \times 10^6 \text{kcal/시}$

6) 가양 하수처리장의 경우 히트펌프 2의 열량이 커서 히트펌프 2에서 2대를 병렬로 사용하는 것으로 검토하였다.

다. 경제성검토

1) 난지

(1) 연간수익

소화조 온수가열 열량은 $60.48 \times 10^6 \text{kcal/일}$ 이고, 히트펌프 계획시 폐열회수 열량은 $4.03 \times 10^5 \text{kcal/시} \times 24\text{시} = 9.672 \times 10^6 \text{kcal/일}$ 이나, <표 7.2-1>에서 하절기에 필요한 실제 소화조 소요가온열량은 $13.5 \times 10^6 \text{kcal/일}$ 이므로, 실제 가능한 폐열회수 열량은 $9.672 \times 10^6 \times 13.5 \times 10^6 / 60.48 \times 10^6 = 2.159 \times 10^6 \text{kcal/일}$ 이 된다.

이 경우의 에너지 절감 비용은, 회수열량/(경유의 저위발열량×보일러 효율)×경유의 단가가 되므로 다음과 같다.

$$\therefore 2.159 \times 10^6 / (10,200 \text{kcal/kg} \times 0.92) \times 485 \text{원/kg} = 111,585 \text{원/일}$$

\therefore 하절기 운영기간중의 에너지 절감액은

$$111,585 \text{원/일} \times 30 \text{일/월} \times 6 \text{개월} = 20,085,300 \text{원/년}$$

(2) 연간비용

◦ 사업비 산정

- 흡수식 히트펌프 : $2.5\text{억} \times 2\text{대} = 5\text{억}$

배관등 시스템 : 1억

계 : 6억

◦ 히트펌프 소요전력비

- 시스템 소요전력량 : $15\text{kW} \times 2\text{대} = 30\text{kW}$

$$\therefore 30 \times 24\text{시/일} \times 30\text{일/월} \times 6\text{개월} \times 48\text{원/kW} = 6,220,800 \text{원/년}$$

* 전기요금의 경우 여름철과 봄, 가을철을 평균한 산업용전력을 기준

◦ 자본비 및 감가상각비(총 투자비×고정비율) : $6\text{억} \times 0.0888 = 53,280,000 \text{원}$

◦ 연간변동비 : $6\text{억} \times 0.0150 = 9,000,000 \text{원}$

◦ 히트펌프 소요전력비 : 6,220,800원

계 : 68,500,800원

따라서, 연간수익 20,085,300원에 비해 비용이 68,500,800원으로 과대하므로 경제성이 없는 것으로 판단된다.

2) 가양

(1) 연간수익

소화조 온수가열 열량은 $230.4 \times 10^6 \text{kcal/일}$ 이고, 히트펌프 계획시 폐열회수 열량은 $1.536 \times 10^6 \text{kcal/시} \times 24\text{시} = 36.864 \times 10^6 \text{kcal/일}$ 이나, <표 7.2-1>에서 하절기에 필요한 소화조 소요가온열량은 $39.1 \times 10^6 \text{kcal/일}$ 이므로, 실제 가능한 폐열회수 열량은 $36.864 \times 10^6 \times 39.1 \times 10^6 / 230.4 \times 10^6 = 6.256 \times 10^6 \text{kcal/일}$ 이 된다.

이 경우의 에너지 절감 비용은 다음과 같다.

$$\therefore 6.256 \times 10^6 / (10,200 \text{kcal/kg} \times 0.92) \times 485 \text{원/kg} = 323,333 \text{원/일}$$

\therefore 하절기 운영기간중의 에너지 절감액은

$$323,333 \text{원/일} \times 30 \text{일/월} \times 6 \text{개월} = 58,199,940 \text{원/년}$$

(2) 연간비용

◦ 사업비 산정

- 흡수식 히트펌프 : $2.5 \text{억} \times 3 \text{대} = 7.5 \text{억}$

배관등 시스템 : 1.5억

계 : 9.0억

◦ 히트펌프 소요전력비

- 시스템 소요전력량 : $15 \text{kW} \times 3 \text{대} = 45 \text{kW}$

$$\therefore 45 \times 24 \text{시/일} \times 30 \text{일/월} \times 6 \text{개월} \times 48 \text{원/kW} = 9,331,200 \text{원/년}$$

* 전기요금의 경우 여름철과 봄, 가을철을 평균한 산업용전력을 기준

◦ 자본비 및 감가상각비(총 투자비 \times 고정비율) : $9 \text{억} \times 0.0888 = 79,920,000 \text{원}$

◦ 연간변동비 : $9 \text{억} \times 0.0150 = 13,500,000 \text{원}$

◦ 히트펌프 소요전력비 : = 9,331,200원

계 : 102,751,200원

따라서, 연간수익 58,199,940원에 비해 비용이 102,751,200원으로 과대하므로 경제성이 없는 것으로 판단된다.

7.2.2 검토결과 요약

- 검토결과, 현재 소화조 소화가스에서 발생하는 발열량으로도 하절기의 소요가온열량을 얻을수 있는 것으로 검토되었다.

아울러, 동절기에는 하수 폐열온도가 너무 낮아 요구되는 온수온도 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 조건을 만드는 것은 불가하고, 약 5월~10월(6개월)에 적용이 가능한 것으로 판단된다.

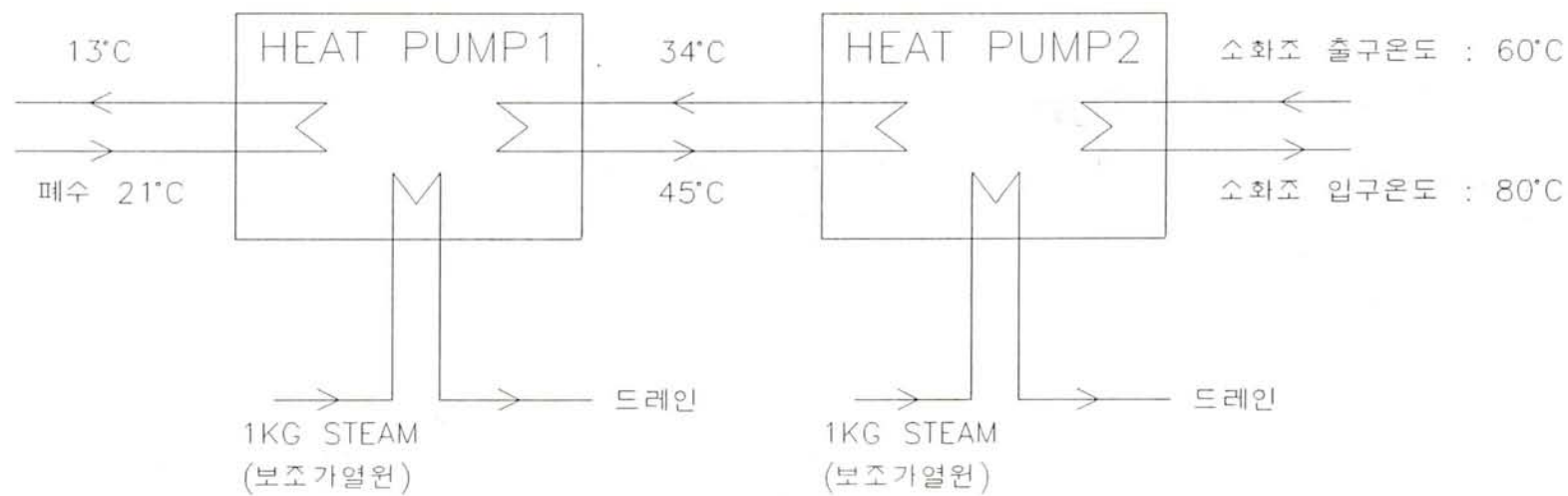
104

- 하수처리장별 소화조에 적용을 검토한 바, 온수와 폐수간 열낙차가 너무 큰 관계로 히트펌프 1대의 사용은 불가능하며, 난지는 2대를 직렬로 연결하여 적용이 가능하다. 히트펌프1에서 나온 온수는 히트펌프2의 폐수로 사용되며, 버려지지 않고 히트펌프1과 2 사이를 폐회로(배관)로 연결, 순환하게 된다.

가양은 히트펌프2의 열량이 커서 2대를 병렬로 연결한 총 3대의 히트펌프가 소요된다. 또한, 히트펌프 계획시에도 난지/가양 모두 보조열원(스팀)이 필요하고, 이 때 히트펌프로 분담하는 열량은 소요 열량의 약 16%로 효율이 낮다.

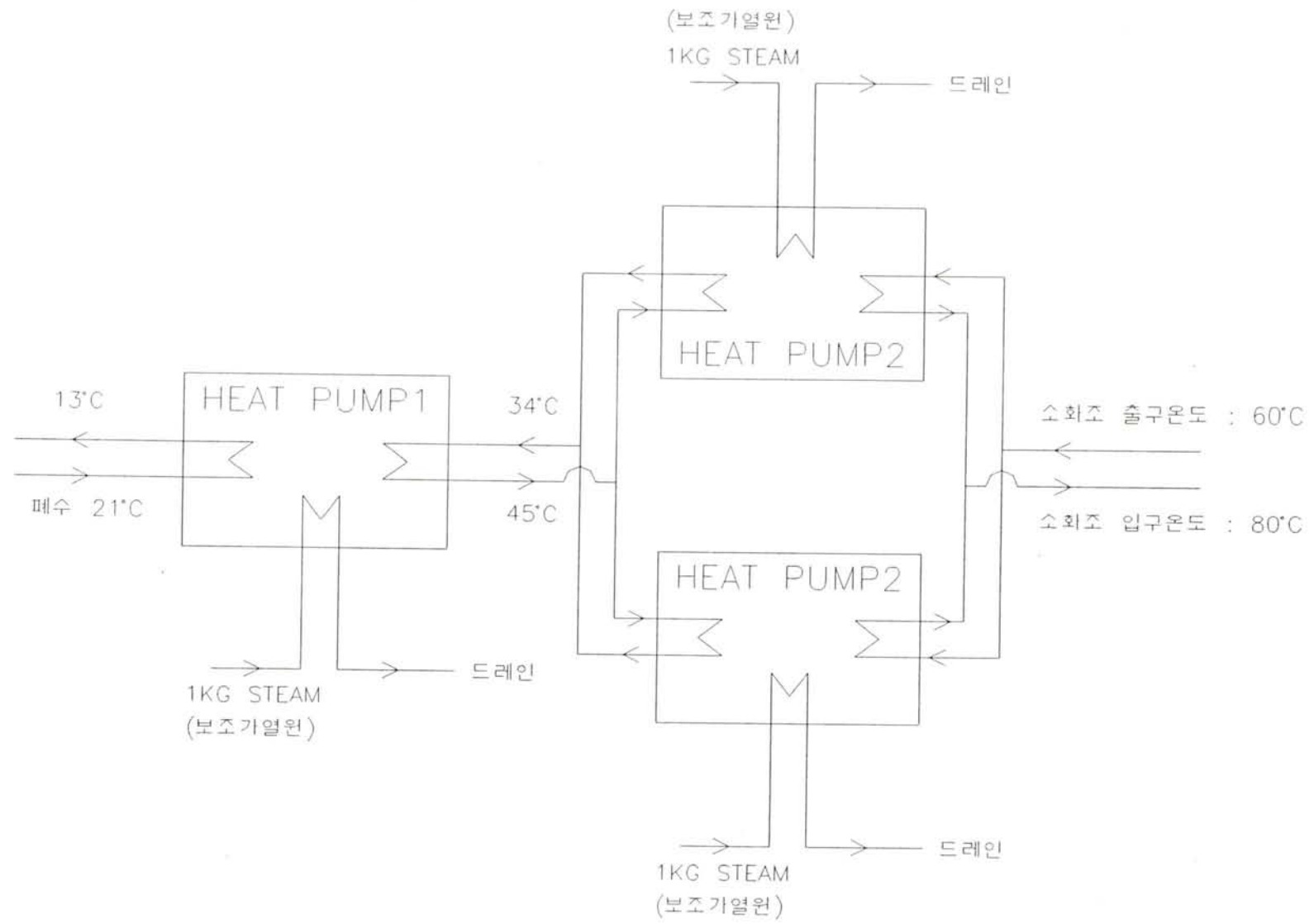
- 위와 같은 시스템에서의 성적계수인 C.O.P(Coefficient of Performance)는 많이 저하된다. 보통 1대 적용시 C.O.P는 1.6~1.7 정도이나, 본 시스템의 경우는 약 1.19 정도로 입력으로 들어가는 스팀의 열량이 100일 경우 온수로 나오는 열량은 약 119가 된다.
- 결론적으로, 하수 폐열온도가 너무 낮아 동절기에는 요구되는 보일러 온수온도(60~80℃) 조건을 만드는 것은 불가하고, 연간 약 5월~10월(6개월)인 하절기에 적용이 가능한 것으로 판단되며, 이 기간중 히트펌프로 분담하는 열량은 소요 열량의 약 16%로 효율이 저조하다. 히트펌프 계획은 위의 경제성검토 결과와 같이 경제성이 없는 것으로 판단된다.

* 주) <그림 7.2-1~2>와 같이 히트펌프에 공급되는 보조 가열원(스팀)이 히트펌프 1, 2 각각에 1kg의 포화증기를 필요로 함



<그림 7.2-1>

난지 하수처리장 HEAT PUMP SYSTEM



<그림 7.2-2> 기양 하수처리장 HEAT PUMP SYSTEM