

## 최적 Hydronic 계통 개념 설계

### Conceptual Design of Optimum Hydronic System

이 의 준\*  
Euy Joon Lee

#### 1. 서 론

본 보고서는 저자가 미국 대규모 대학의 공조 계통 전산모사<sup>1)2)</sup>와 Testing, Adjusting, and Balancing (TAB)을 한 경험을 토대로 최근 대형공조계통의 기본이 되며 냉각수(chilled water)를 냉매로 하는 Hydronic 계통의 기본 개념을 살펴봄으로서 최적 Hydronic 계통설계와 TAB 수행에 도움이 될 수 있도록 하였다.

최적 계통설계는 계통의 부분적, 그리고 전체적인 정확한 개념적 이해가 필요하고, 열공학적 이론에 바탕을 두어야 한다. 이에 따른 최적 Hydronic 계통은 부품 및 전체 계통의 정적 시스템 설계<sup>3)</sup>와 시스템 제어의 관점에서 동적 설계를 고려하여야 한다.<sup>4)</sup> 가능하면 이론적 전산 모사와 설치와 운전 경비에 대한 경제성 연구도 바람직하다.

이러한 최적 설계의 한 부분으로, 특히, 이 보고서에서는 대형 빌딩 공조 계통에 에너지 경제면에서 최적의 Hydronic 계통의 개념을 살펴보고 설계해 보도록 한다. 이에 따른 고려 사항들은 다음과 같다.

- 이상적 Hydronic 계통의 설계 요건
- Hydronic 계통의 기본 구조

- 수요(Demand)와 분배(Distribution) 배관 설계
- 분배(Distribution), 공급(Supply) 배관 설계
  - 설계 조건과 비설계조건시 효율적 운전
  - 최적 Hydronic 계통 개념 설계
- 위의 사항들을 각각 살펴봄으로서 최적 Hydronic 계통 개념 설계에 이르고 설계요건에 대한 결론을 도출하도록 한다.

#### 2. 이상적 Hydronic 계통의 기본 요건

에너지 경제면에서 이상적인 Hydronic 계통의 기본요건을 살펴보면 다음과 같다.

- 부하(load)가 변할지라도 부하측에 공급되는 수온은 항상 일정해야 한다.
- 주요 부품(chiller compressor, pump 등)과 보조 부품에 소요되는 동력은 가능한 최소여야 한다.
- 주 냉동에 필요한 동력은 부하 감소시 줄어들어야 한다.
- 설치후 나중에 TAB이 가능하도록 간단한 회로여야 한다.
- 설치, 운전면에서 경제적이어야 한다.
- 축열 시스템 설치가 가능하도록 한다.

• 향후, 부하 증가시 그 추가 설비가 용이해야 한다.

공조 설비에 근간이 되는 Hydronic loop는 수요(load 측), 분배(distribution), 그리고 공급(source 측) 배관으로 구성되고 이 배관들을 연결하는 짧은 공동 배관(common pipe)가 있다. 설계시 수요, 분배, 그리고 냉동기(chiller)를 위한 펌프와 compressor에 동력 소모량을 극소화하는 방안이 모색되어야 한다. 이는 소위 Hydraulic 팬 법칙(Fan Law)으로 설명이 되는데, 즉, 배관의 주 원동기인 펌프와 팬 운전시, 용량, 헤드, 그리고 동력 소모량에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

(1) 원동기의 용량은 그들의 속도에 비례한다.

$$\begin{aligned} \text{용량}(Q) : Q_2/Q_1 &= \text{gpm}_2/\text{gpm}_1 \\ &= (\text{rpm}_2/\text{rpm}_1) \end{aligned}$$

여기서, 1 : 설계치

2 : 비설계치

rpm : 펌프-전동기 회전수

(2) 원동기의 해드는 그들의 속도의 제곱에 비례한다.

$$\begin{aligned} \text{헤드}(H) : H_2/H_1 &= ft_2/ft_1 \\ &= (\text{rpm}_2/\text{rpm}_1)^2 \end{aligned}$$

ft : 원동기 헤드 단위 (1ft = 2.31 ps)

(3) 원동기의 동력 소모는 그들의 속도의 삼승에 비례한다.

$$\begin{aligned} \text{동력}(P) : P_2/P_1 &= \text{HP}_2/\text{HP}_1 \\ &= (\text{rpm}_2/\text{rpm}_1)^3 \end{aligned}$$

HP : 원동기 동력 단위 (1HP = 0.7457 kW)

위의 팬 법칙과 함께 냉동기 등 주 동력 소모 기기의 에너지 모델을 정립해보면, 냉동기에는 가능한 양단에 주어진 설계온도가 공급되도록 운전을 해야 불필요한 사용동력을 절감할 수 있음을 알 수 있다.

### 3. Hydronic 계통의 기본 구조

그림 1은 주로 대형 빌딩 공조계통에 많이

사용되는 Hydronic 계통의 기본 구조를 보여준다. Hydronics는 일종의 열흡수장치(load)와 방출장치(source)를 연결하여 냉각이나 가열 기능을 하는 열유체 계통으로 볼 수 있다. 이 계통의 주요 부품은 역시 펌프와 제어 밸브이다. 그리고 폐쇄회로 배관의 압력을 일정하게 유지하여 효과적인 펌핑을 위한 팽창실이 있다.

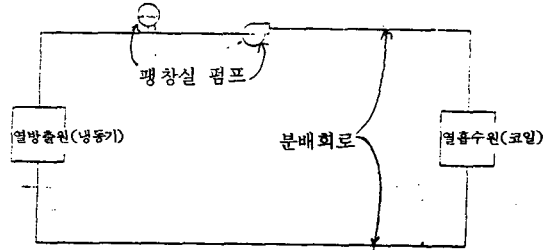


그림 1. Hydronic 계통의 기본 구조

냉각에서의 Hydronic 계통은 냉각 코일이나 물 공기 열교환기는 부하로 보며 냉동기는 열흡수원이다. 문제는 부하측으로부터 많은 요인에 의해 변화가 있게 되는데, 이때 설계자는 부하측 수요측 배관과 분배 배관의 설계시 온도를 조절하여 일정 유량 계통으로 할지, 아니면 유량을 변화시켜 가변 유량 계통(variable flow system)으로 할지 결정을 해야 한다. 일정 유량 계통(constant flow system)은 부분적으로 공기측 댄퍼 조절로 국부적 효과를 얻든지 몰라도 전체적으로 볼 때 열흡수원측인 냉동기로의 설계치 이하의 수온이 가게 되므로 같은 에너지원으로부터 적은 냉동효과를 얻는 비경제적인 부분운전을 야기시킨다. 이 hydronic 계통의 상황은 다음의 간단한 열용량 공식으로 설명될 수 있다.

$$Q = q' (500) / DT$$

여기서 q : 부하 (Btu H)

DT : 가변 유량 계통의 부하측 설계 온도차 (F)

500 : 상수 (Btu H/F/gpm)

즉, 부하가 감소함에 따라, 부하 양단의 DT

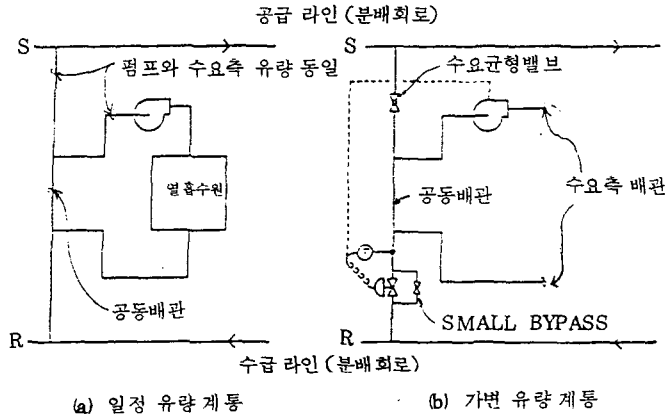


그림 2. 수요와 분배 배관 설계

를 제어 밸브로 유지하고 유량 Q (gpm)를 감소시킨다는 개념이다.

#### 4. 수요 (Demand)와 분배 (Distribution Loop) 배관 설계

공조 설비의 모든 문제는 부하측 배관설계의 실수로부터 온다고 해도 과언이 아니다. 중요한 설계 변수로는 냉방이나 온방 부하의 계산, 부하 회로 (demand loop)의 설계, 그리고 부하 회로와 분배 라인의 연결이다.

냉동부하는 빌딩의 열적 특성과 동적 특성을 사용한 transfer function method를 이용한 PC software "LOADZ"와 같은 프로그램을 사용하여 구한 후 이 부하에 따른 기기들에 대하여 DOE-2나 TRNSYS<sup>5)</sup>와 같은 energy 전산 모사 코드를 이용하여 최적 설계를 선택하는 것이 이상적이다. 그러나 이러한 코드가 없을시에는 ASHRAE 핸드북(Fundamental)이나 문헌<sup>6)</sup>, 그리고 유사한 시설 설비에 대한 경험에 바탕을 두는것이 현명하다.

앞에서 언급한 바와 같이 수요측 배관은 부하를 구성하는 냉각코일 등으로 구성되는데, 기존 대부분의 수요 배관 회로 설계는 그림 2 (a)처럼 일정 유량 계통으로 설계되어, 항상 일정량 혹은 과다한 펌핑이 됨으로서 부하가 감소시 배관 회로의 냉동기측으로의 배관(return line)에 아직도 유효한 저온을 흘림으로서 공급측의 냉동기의 부분운전을 야기, 결과적으로 에너지 경제면에서 비경제적 운전의 원인이된

다. 특히 중요한 것은 수요와 분배회로 사이에 공동 배관을 둠으로서 두 회로를 분리시키는데 이로써 수요측 회로 용량을 줄일 수 있고 그림 2 (b)와 같은 이상적인 가변 유량 계통의 수요측 배관의 설계가 가능하다. 그림 2 (b)는 부하 감소시 냉동기쪽의 배관으로의 수온을 감지함으로써 제어 밸브를 닫고 이때 생기는 헤드로 수요측 배관 펌프 스피드를 줄임으로서, 동력 소모를 줄일 수 있다. 특히 수요측 배관 펌프의 헤드 유량 특성과 최소 유량을 검토하여, 모든 부하에 펌프가 유량을 공급할 수 있는지 주의한다. Balance 밸브는 이러한 최소 부하시 분배회로로부터 적정 최소 유량이 공급되도록 도와준다.

#### 5. 분배 (Distribution)와 공급 (Supply Loop) 배관 설계

Hydronic 계통에서의 분배 배관 회로 세가지로 구분할 수 있는데 ① direct return, ② reversed return, 그리고 ③ circle 형이 있다. Direct return 형은 공급측에 가까운 부하측 배관에는 많은 유량이 허용되는 이른바 "central plant syndrome"이 있으므로 가능한한 ②와 ③과 같은 분배 배관의 설계가 바람직하다.

그림 3 (a)는 hydronic 계통의 공급(S)과 회수 라인(R)이 direct return 형으로 된 배관이다. 앞에서 언급한 바와같이 수요 회로는 가

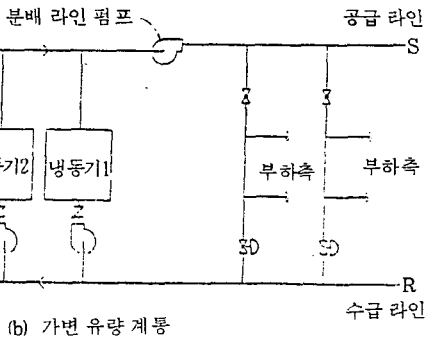
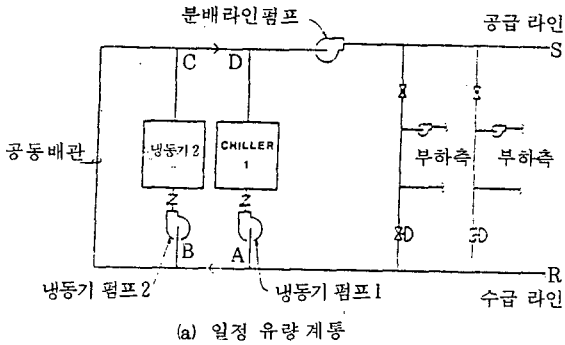


그림 3. 분배와 공급 배관 설계

변 유량 계통으로 설계되면 부하 감소시에도 냉동기가 있는 공급 배관에 일정한 수온이 되 돌아온다. 공급측 배관에 다수의 냉동기가 병렬로 구성되어 있다. 냉동기 선택시에는 주로

냉동기 1은 대부분 기본 부하 (base load) 를 다루는 기기로, 그리고 냉동기 2는 최대 부하 (peak load) 를 처리할 수 있도록 설계한다. 그림 3(a)에서 ABCD는 공급측 배관을 구성 하는데 이와함께 공급 배관과 분배 배관에 같이 공동으로 쓰여지는 공동 배관이 있어, 공급과 수요가 맞지 않을시 공급 배관의 과다량이 이 배관을 통해 지나가고, 이러한 부하 감소시 하나 하나씩 냉동기 2로부터 기기를 정지시키면 많은 에너지가 절약된다.

일예로, 그림 3(a)에 두개의 가변 유량 부하가 존재하여 50 gpm씩 전부 100 gpm을 소모할시 분배 배관의 펌프는 100 gpm을 공급하고, 이때 냉동기 1은 50 gpm 그리고 냉동기 2도 50 gpm을 생산한다. 그런데 만약 한 부하가 50 gpm에서 25 gpm으로 감소시, 분배 배관의 펌프도 100 gpm에서 75 gpm으로 감량되고 tee A에서 50 gpm은 냉동기 1로 50 gpm은 냉동기 2와 공동 배관으로 가게 되는데 이때 냉동기는 대부분 일정 유량 계통으로 설계되므로 공동 배관에서의 유동방향은 B에서 냉동기 2를 통하여 C로 50 gpm이 그리고 C에서 공동 배관을 통하여 B로 25 gpm이 다시 돌아와 혼합되면서 냉동기는 50% 부분 운전을 하게된다.

이를 표로 요약하면 다음과 같다.

표. 두 냉동기의 부분 운전 개념

100 % 설계 운전 조건 : 45 F(S) - 55 F(R)  
75 % 설계 운전 조건 : 45 F(S) - 55 F(R)

	부하 1 유량 (gpm)	부하 2 유량 (gpm)	D-펌프 유량 (gpm)	C1- 펌프 유량 (gpm)	C2-펌프 유량 (gpm)	CP 유량 (gpm)	A 수온 (F)	B 수온 (F)	C 수온 (F)	D 수온 (F)
100 %	50	50	100	50	50	0	55	55	45	45
75 %	50	25	75	50	25	+ 25	55	50	45	45

Note.: 부하 1 수요측 배관 1의 부하 (gpm)  
부하 2 수요측 배관 2의 부하 (gpm)  
D-펌프 분배 배관 펌프의 유량 (gpm)  
C1-펌프 냉동기 펌프 1의 유량 (gpm)  
C2-펌프 냉동기 펌프 2의 유량 (gpm)  
CP 공동 배관에서의 유량 (gpm)  
+ 25 counter clock wise flow (공동 배관에서 A,B,C,D tee 위치)

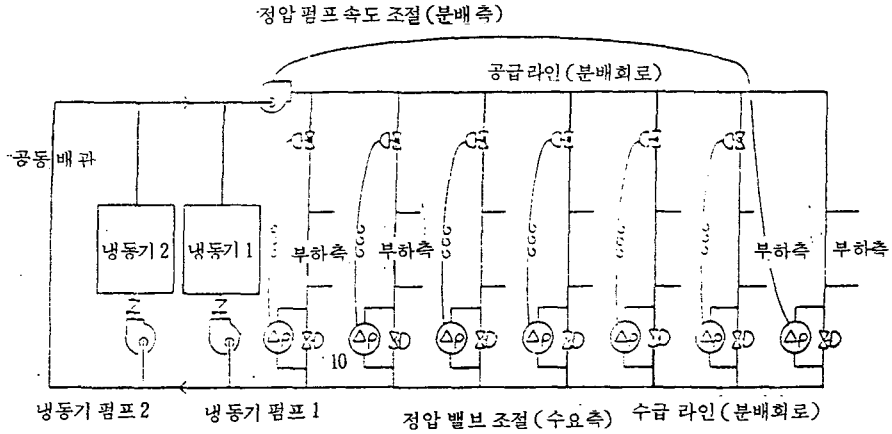


그림 4. 최적 Hydronic 계통 설계

이처럼 75% 부하시 냉동기 2에는 50F가 들어가므로 50% 부분 운전을 하게 되고 더욱 부하가 감소시 냉동기 2를 최적의 계획에 따라 기기들의 작동이 이루어질 수 있다. 최근에는 그림 3(b)처럼 공동 배관에 축열 계통(chilled water storage system)을 설치하여 전력 요금의 낮은 off-peak시에 저장하였다가 on-peak시에 사용하여 에너지 사용 가격을 절약하는 방안도 있다.<sup>7)</sup>

### 6. 최적 Hydronic 계통 개념 설계

그림 4는 총괄적인 가변 유량 계통으로서 앞의 사항들을 고려한 대형 빌딩 공조 계통에 사용될 수 있는 최적 Hydronic 계통을 보여준다. 이 그림에서는 수요측 분배, 그리고 공급측 배관들을 전체적으로 볼 수 있다. 수요측 배관은 그림 2(b)에 있는 바와같이 수요측 배관의 회수 라인에 가변 유량 계통에 필요한 제어 밸브로 자동적으로 balancing 해주는 기능을 포함하고, 공급 라인에서 가장 hydraulic적으로 먼곳의 제어 밸브의 헤드 차에 의해 분배 회로 펌프의 속도(유량)가 조절된다. 이로써, 기본과 최대 부하를 위한 냉동기를 잘 선택하여 최소한 필요한 냉각수만을 공급할 수 있으며, 공급 배관에서 공동 배관으로 흐르는 유량과 방향에 따라 최소의 냉동기를 운전하면

에너지 소모면에서 효율을 높일 수 있다.

### 7. 결 론

위의 그림 4의 가변 유량 계통은 다음과 같은 주요 기능을 만족시킴을 알 수 있다.

- 부하 변동시 일정한 수온이 공급 배관측으로부터 공급된다.
- 부하 감소시 냉동기와 펌프에 동력 소모가 냉동기의 최적 운전과 펌프 유량 조절로 인한 compressor와 모터 동력 소모를 줄일 수 있다.
- 설계나 제어 그리고 부하 증가시 배관설계가 간단하므로 쉽고 또 TAB 수행도 용이하다.
- 설치와 운전에서 경제성이 있다.
- 축열 시스템 설비도 용이하다.
- 향후 다수의 부하를 첨가시 최소의 설비와 수정이 가능하다.

끝으로 가변 유량 계통 설계시 고려해야 할 사항들이 있는데, 이들은

- (1) 제어 밸브는 양질의 equal percent type을 선택토록 한다.<sup>4)</sup>
- (2) Check 밸브는 펌프 discharge line 외에 절대로 사용금지 한다.
- (3) 과부하에 대해 유량 공급을 위한 각 배

관에서의 과 펌핑을 절대 금한다.

이와 함께 HVAC 시스템의 최적 설계를 위한 각 부품의 수학적 모델링과 전산 모사 최근 추세이며, 매우 중요하다. 기회가 있으면 그 방법<sup>8)</sup>을 다음에 소개토록 하면서 최적 Hydronic 계통설계에 대한 독자들의 조금의 도움이 있기를 바라며, 이 글을 마치도록 한다.

### 참 고 문 헌

1. E.J. Lee, "Modeling and Simulation of a Campus Central Chilled Water System," Ph.D. Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University, OK, 1987.
2. E.J. Lee, "Optimization of Chilled Water Storage," South West Conference on Thermal Science at University of Oklahoma, 1985.
3. W.J. Coad, "Variable flow in Hydronic Systems for Improved Stability, Sim-
- licity, and Energy Economics," ASHRAE Technical Data Bulletin, Hydronic Systems: Variable-Speed Pumping and Chiller Optimization, 1985.
4. R.W. Haines, "Control Valve Selection," Heating, Piping, Air Conditioning, Sep 1980, pp.100-102.
5. Warry O. Degelman, "A Bibliography of Available Computer Programs in the Area of Heating, Ventilating, Air Conditioning, and Refrigeration," ASHRAE, 1986.
6. McQuiston, F.C. and J.D. Parker, Heating, Ventilation, and Air Conditioning, New York: John Wiley and Sons, 1982.
7. 이의준, "심야전력을 이용한 축열식 중앙냉방 시스템의 경제성 연구", 공기조화 냉동공학 제 17권 제 3호 (1988), pp.181-190.
8. B.K. Hodge, Analysis and Design of Energy Systems, Prentice Hall, Inc., 1985.