

초고층 건물의 수배관 시스템 바이패스 차압 이론

■ 이 상 오 / 한국 스파이렉스 사코, sangolee@kr.spiraxsarco.com

개 요

초고층 건물의 매우 다양한 수압존 구성 및 펌프 존별로의 다양한 압력차이와 시스템의 발생은 냉난방 운전중 최적의 유량 분배와 온도 컨트롤을 요구한다. 또한 컨트롤 밸브(2way temperature control valve)의 부하 상태와 운전 상태에 따른 다양한 개도 변화에 대응한 안정적인 헷더간의 차압 바이패스의 성능 유지 및 변속도 인버터 시스템(Variable pump speed system)의 구축과 연관된 냉동기 운전 성능 효율값 COP(Coefficient of performance)를 필요로 한다. 이러한 다양한 시스템의 구성은 결국 최적화 운전비용을 위한 최적의 초기 설계 개념을 필요로 하며 이와 관련된 이론을 소개 정리 하고자 한다.

아래에서는 실제로 적용되고 있는 건물을 근거로 그 각각의 차압바이패스 구축의 다른 적용 개념을 소개 하고자 한다.

샘플 건물 냉난방 시스템은 FCU 과 외기도입용 AHU 로서 시스템이 적용되었으며, 냉방용 흡수식 냉동기 2대의 정속펌프 1차 펌핑 시스템에 의하여 2차측 각 터미널 유닛에 냉수를 공급 하고 있으며, 온열원은 지역난방 열교환 장치를 통하여 변속도 펌프 시스템 에 의해 2차측 터미널 유닛에 온수를 공급하는 밀폐형 시스템이다. 냉온열원은 각각의 배관 경로를 가진 4-Pipe system 으로 공급되고 있으며, 각각의 터미널 유닛(FCU)은 냉온수 분리된 2way on-off 밸브로 온도조절 시스템을 구축하고 있으며, AHU 장비에는 2way modulating temperature control valve로 제어하고 있다.

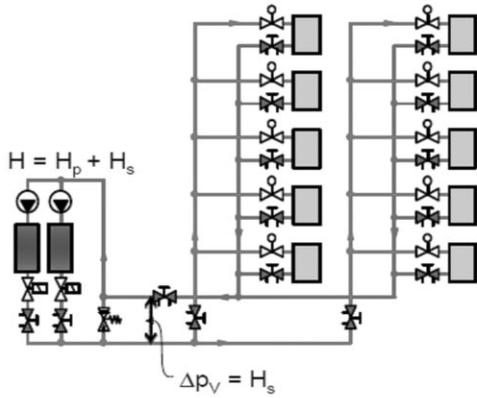
주요 검토 제안 내용

각 시스템 부분의 검토 하여야 할 부분은 아래와 같다.

시스템 부하측(2차측)의 각 터미널 유닛의 유량 분배(밸런싱) 고유의 목적을 만족시켜야 하며, 이는 기본적인 분배의 적절한 시스템 구축을 말한다. (각 FCU의 장비별 자동 밸런싱 시스템이 구축된 상태이고, 각 실별 온도 컨트롤 하고 있는 상태) 각 터미널 유닛별 정유량 밸런싱 시스템 및 각 층별 밸런싱 시스템의 구축 또한 바람직하며 올바른 시스템 적용으로 준비된 상태이다.

추가 설치 적용 시스템 : 기계실로부터 각 입상 배관 별로의 부하 변화에 대응한 차압의 변화로 인한 유량 분배의 불량을 막기 위한 차압 컨트롤 시스템(수동 밸런싱 밸브-공급측, DP Controller 환수측)은 각 입상별로 차압의 변화를 막아서 안정한 유량 분배 역할을 제공 할 수 있으며 일반적으로 아파트 시스템의 동차압 유량 조절 밸브의 성격과 비슷하나 그 작동성능에서 좀 더 진보된 디지털 형식이라는 개념의 각 입상별 차압 안정화 장치가 적용이 된 것이다. 이는 주 기계실 내에 보통 설치가 많이 되는 헷더간의 차압 바이패스 밸브와는 전혀(Differential pressure by-pass valve)적용목적과 운전동작이 다르다.

메인 헷더간의 차압 바이패스 밸브(Differential pressure by-pass valve)적용목적
일반적인 냉동기 1차 정유량 정속 펌프의 2차측



[그림 1] 시스템 Sample.(바이패스 밸브 차압 설정은 2차 측 Hs값과 같아야 한다.)

2WAY 온도조절 컨트롤 밸브를 가진 변유량 시스템의 경우, 헷더간에 설치되는 차압 바이패스 밸브는 냉동기의 최소 증발기 유량(Minimum evaporator flow rate)에 대한 확보를 목적으로 한다. 만약 헷더간의 차압 바이패스 밸브가 적용이 안된다면 부분 부하 운전시 시스템의 각 터미널 유닛의 사용 유량과 관련하여 환수되는 유량의 부족은 냉동기를 정지(Down되는 상태, 자동으로 Off 되는 상태)되게 만든다. 이는 매우 불안정한 시스템 운전 상태를 만들어 내며, 기존 부하의 변화에 대응한 냉동기의 시퀀스 제어(순차기동제어)에도 치명적인 영향을 끼치게 된다. 운전중 부하변화에 대응한 냉동기의 또 다른 추가 운전시 기존 냉동기의 정지, 혹은 관련 2way control valve 의 헤팅등의 현상이 발생한다.

즉 시스템의 구축에서 당연 반드시 적용되어야 할 안전장치이다. 이는 조금전에 소개한 차압 컨트롤 시스템과는 다르다. 즉 2차측의 입상 배관의 존 DP Controller와는 그 작동 기능이 정반대이다. TAB & Commissioning 할 경우 각각의 헷더간의 정상적인 차압(최대 부하에서의 차압값)의 값을 확인하여 압력 설정을 하여야 하며, 펌프의 운전 압력과 연관되는 셋팅 압력이 필요하며, 운전 중 부하가 감소하여 헷더간의 차압이 증가되면 Open 되도록 자동설정 되어야 한다. 이 경우 부하 감소의 의미는 결국 2way 온도 컨트롤 밸브의 개도율이 감소한다는 의미이며, 결국 환수 헷더로 돌아와 냉동기로 들어가는 유량이 감소된다는 의미이고, 차압 바이패스 밸브로 그 최소 유량을 보증해주어야 한다는 의미이다.

- 상기 자료는 프로그램에 의한 차압바이패스 선정 예.

차압바이패스 밸브 최종 선정 결과 max bypass flow = 55.3% 필요(총유량의)

총유량 16000 lpm × 0.55=8800 lpm

밸브 선정 : ocv 110 모델, 8" 적용 필요

현장 설정 차압은 Commissioning 시 현장에서 Hs 값을 근거로 셋팅함.

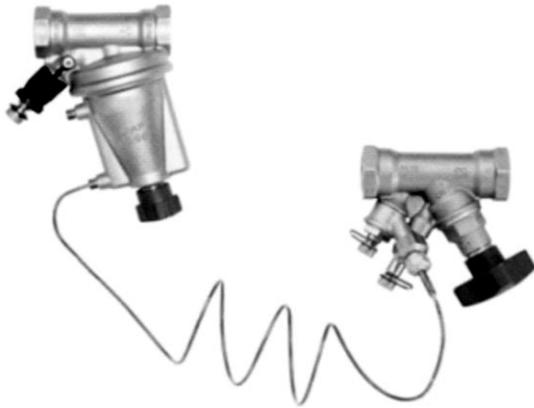
차압 컨트롤러 시스템(수동 밸런싱 밸브-공급측, DP Controller-환수측)적용 목적

차압컨트롤러의 각 입상 배관의 공급-환수 배관간의 설치는 각 입상 배관별 주 기계실 (Main plant 실) 공급측으로부터 각기 다른 공급 압력의 차이로 인한 유량 분배에 대한 정확한 제공으로 입상 배관간의 유량 밸런싱을 하려는 것이며, 또한

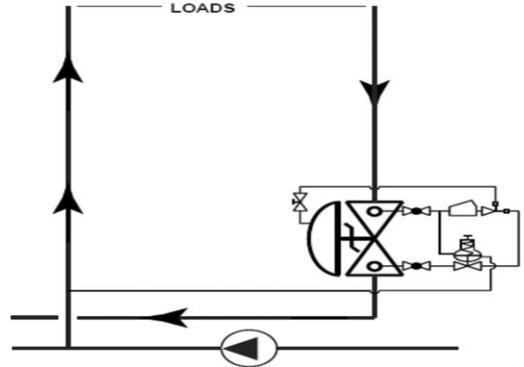
Secondary flow	
Proportional control	
Thermal efficiency calc.	
Supply temp.	7
Return temp.	12
Room temp.	24
Phi	0.294
On-off control	
% in the sec	95%

Primary flow	
Nr of chillers	2
Unload. thr.	90.0%

Bypass flow	
Max - start	50.4%
Max - stop	55.3%



[그림 2] DP Controller 시스템



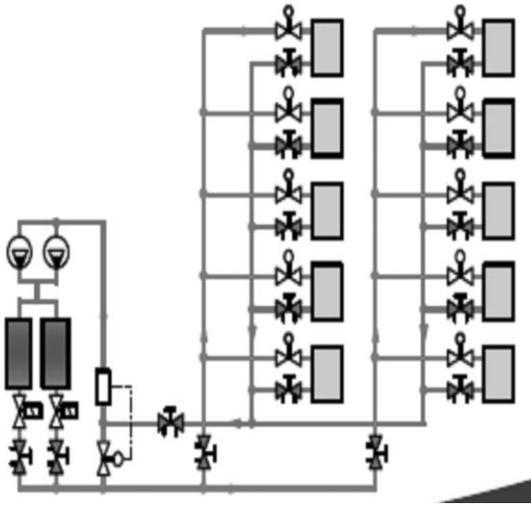
[그림 3] 대용량(150mm이상) DP Controller 시스템

AHU의 2way 비례 온도 조절 밸브의 경우 차압변화를 그냥 방치할 경우 심각한 컨트롤 밸브의 온도 조절 능력 저하(Authority 파괴)로 부분부하의 컨트롤이 불가능 하게 되는 경우가 발생한다. 이러한 목적의 차압 컨트롤러 시스템의 적용은 저부하시에도 해당 차압 독립존(저부하시 차압은 증가, Pressure independent zone)을 구축 함으로서 매우 안정적인 컨트롤 밸브의 온도 보상 기능 및 제어를 보장 받게 된다. 이의 동작은 일반적인 메인 헤드간의 차압 바이패스 밸브와는 정반대로, 차압이 증가하면(공급-환수측의 차압)밸브는 Close되는 운전 성격으로, 설치된 해당존의 정유량 특성을 보상을 받는다. (기존 헤드간의 경우, 차압이 증가하면 밸브가 열리게 된다.)또한 부분부하 특성이 예견되는 컨트롤 유량 분배 불균형을 해소 할 수 있는 안정된 차압을 제공 할 수 있다.(기존 헤드간의 차압바이패스 밸브(헤드간의) 유량중, 온수 순환 펌프 유량의 경우, VSD 시스템 한계 값 40%로 제공 필요로 한다)

온열원 시스템의 열교환기 2차측 존의 차압 바이패스 밸브의 적용(VSD System 에서)

지역난방을 공급받는 열교환 시스템 2차측의 펌프를 VSD(Variable speed drive) 시스템을 구축할 경우 메인 헤드간의 차압바이패스밸브는 냉동기의 메인 헤드간의 차압바이패스밸브와는 그 적용 목적이 다르다. 열교환 장치는 냉동기와 같이 증발

기와 같은 정유량 특성장치가 불필요 하다. 그러나 만약 시스템에 VSD 가 적용된다면, 이러한 시스템에 대한 차압바이패스 밸브의 필요성은 일반적으로 VSD 의 최소 유량 확보의 목적으로 적용된다. 즉 약 30 ~ 40% 수준 이하의 펌프 운전은 VSD 의 한계로 인식하여 그 부분을 수용할 수 있을 차압 바이패스 밸브의 유량 기준으로 선정하게 된다. 우선 펌프의 VSD 시스템의 적절한 부하 추종성 제어는, 부하 변화를 쉽게 인식할 장소의 압력센스의 위치 및 그 정확성을 매우 중요하게 고려 하여야 하며, 이 경우 프로그램 (TA Select 4의 Index 라인)에서 그 위치를 정확히 제공 한다. 일반적으로 ASHRAE(1998년 11월 ASHRAE Journal 기준에서는 가장 먼 코일(말단 터미널 유닛)의 전 후단(공급, 환수 배관 사이)을 말하고 있다. 그 기준의 VSD 시스템의 운용은 펌프의 회전수를 부하의 변화에 맞게 유량,양정을 변화 시키게 되며, 이 경우 펌프의 양정 변화(VSD로 인한)는 헤드간의 일반적인 시스템(VSD가 아닌 정속 펌프, Constant speed pump)의 차압바이패스 밸브와 같을 경우, 변화되는 펌프 양정으로 실제 기준 차압 바이패스 밸브로의 압력설정을 불가능 하게 만든다. 즉 펌프 양정이 저부하에서 축소된다면, 헤드간의 차압바이패스 밸브는 Open 될 방법이 없으며 또한 압력을 셋팅할 기준을 알 수 없다. 이의 적절한 방법은, 시스템의 환수 헤드로 돌아오는 배관에 유량계 (Flow meter)를 설치하여 환수량이 기준 유량 이



[그림 4] Sample 시스템

하일 경우, 이와 연동한 바이패스 밸브의 Open 으로 최저 유량을 확보하는 목적으로 시스템을 구축 하게 된다. 즉 펌프의 최저 공급 유량과 환수되는 유량간의 그 차이값의 유량을 바이패스밸브가 열려서 공급 할 수 있도록 구축하는 것은 VSD 시스템만이 필요로 하는 1차 펌프 시스템의 특징이다. 이는 1차 변속도 냉동기시스템(냉동기의 특성이 증발기 최소 유량에 대한 성격을 규정하고 있음)에

서 동일하게 적용되며, 그림 4는 환수라인의 Flow meter 을 활용한 VSD 시스템의 차압 바이패스 구축 방법을 보여주는 사례이고, 그림 6은 ASHRAE 2010년 자료(Energy efficient building system-기술 서적, ASHRAE) 1차 Variable speed pump와 연계한 Chiller시스템의 Flow meter 에 의한 사례이다. 우선 여기서의 VSD용 차압센스는 말단차압 센스에서 확인되어 있으나, 헷더간의 차압센스로의 최소 유량 확보는 (냉동기용) 차압 센스의 압력설정의 한 계로 센스만으로 불가능 할 것으로 판단되며, 추가로 설정될 유량계를 필요할 것으로 판단된다. ASHARE 의 자료에서의 차압바이패스의 적용에 차압밸브만으로 차압 셋팅이 된다는 것은 아직 모순 이 있는 것으로 보이나, 내용은 기술되어 있다.(냉 동기 최소 유량 확보에 대해서 분명하게 표현하고 있다)

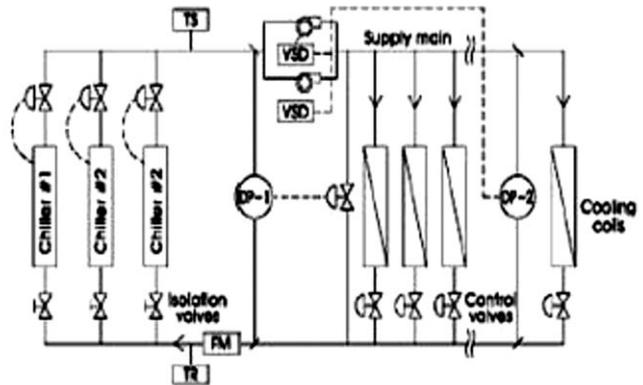
- 유량은 펌프 유량의 40%수준.(열교환기용)
- 온열원 펌프 유량값 × 0.4= 1385 lpm × 2대 × 0.4=1108 lpm

TA SELECT 4(수배관 전용 분석 프로그램)의 결과값.

- (1) 전 배관길이, 전 피팅류(엘보우, 티등), 전 밸런싱 밸브, 전 컨트롤 밸브를 통한 배관의 마찰손실값을 실제 배관경을 기준으로 계산하



[그림 5] 바이패스 밸브+ 컨트롤러



[그림 6] Sample 시스템

여 정확한 펌프 양정 값을 제공 한다.

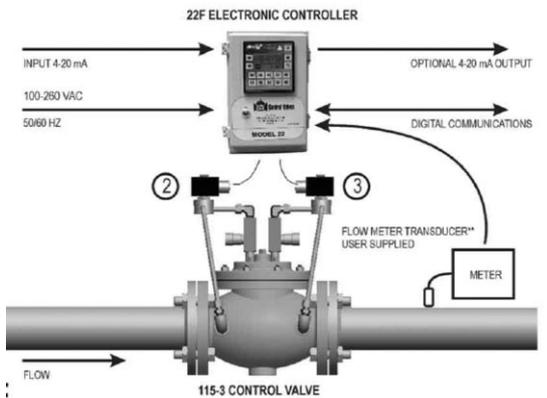
- (2) 모든 차압컨트롤러의 사전 설정(Presetting) 값을 선정하여 시공 완료 후 입주전의 TAB & Commissioning을 용이하게 한다.
- (3) 최적의 펌프 양정과 VSD System의 Index (압력센싱위치 및 그 압력값) 위치를 추적을 하여 표시하며, 배관내의 전체 Expansion tank 계산 기초가 되는 수량계산을 동시에 보여주도록 진행 한다.

주요 시스템 사이징 검토.

- (1) 최적 차압컨트롤러 사이징 값 및 적용 차압값 계산 (TA Select 4 운용 필요)
- (2) 냉동기용 공급 환수 헷드간의 차압 바이패스 밸브 선정 : 메인 헷드간의 차압 바이패스 밸브(Differential pressure by-pass valve) 적용목적 참조
- (3) 온열원 VSD 시스템용 차압바이패스 밸브 선정 : 온열원 시스템의 열교환기 2차측 존의 차압 바이패스 밸브의 적용 참조

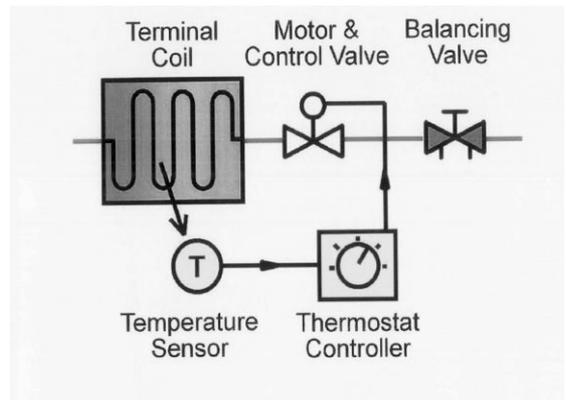
시스템 운용 결과 (목표)

- (1) 유량 분배의 정확성 : 각 장비별, 각 입상 존별 정확한 유량 분배 실현.

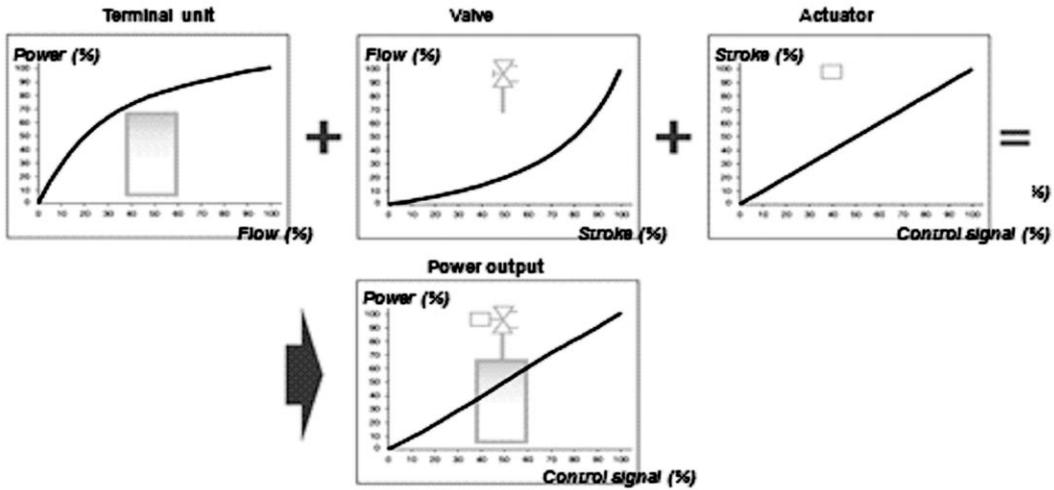


[그림 7] 유량 컨트롤러 및 바이패스 밸브 시스템 구축 (밸브작동은 비례제어 형식)

- (2) 2차측 2way 비례제어 컨트롤 밸브의 영향도 (Authority-저부하에서의 컨트롤 밸브의 성능 안정도로 정도로 이해)최적화 제공 및 제어 대상 실 온도 안정화.
- (3) 냉동기의 입출구온도의 최적화 : 설계 기준의 냉동기 온도를 확보하기 위한 노력은 컨트롤 밸브의 제어 능력과 상관관계가 매우 크며, 이 경우의 냉동기 운전 안정화에 기여하며(없다면 냉동기 운전 중 정지되는 사고 발생 함-사례 많음) 이는 에너지 절감 최적화와 같은 개념이다.
- (4) 각 시스템의 필요로 하는 에너지 최적화에 기여(Index 라인의 압력센싱에 의한 VSD 시스템 운용의 기여)
- (5) VE 모델 : TAS4 프로그램의 운전에 의한 펌프의 양정 최적화 및 추후 TAB & Commissioning 에서 최적의 구현을 할 수 있도록 각 차압 바이패스 밸브의 설정은 최적의 부분부하 대응을 가능하게 한다. 이는 에너지 사용의 최적화와 초기 펌프 양정의 최적화를 구현할 수 있다.(추후 실제 각 코일 압력 손실값을 제공 받아서 보다 정확한 프로그램이 진행될 필요가 있다.)
- (6) 사전 설정(Presetting)에 의한 현장 셋팅 시간의 시간의 최소화



[그림 8] 온도컨트롤 개념



[그림 9] 컨트롤 특성의 다양한 요소(밸브, 터미널유닛, 구동기, 열출력특성)

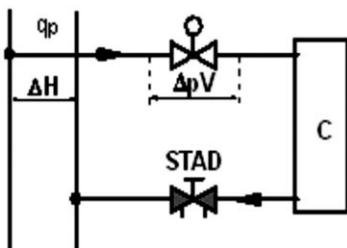
주요 기술 이슈 건

- (1) 온도차이: 컨트롤 밸브의 특성(2way)
- (2) 열전달 컨트롤 특성
- (3) 열전달 특성과 이에 반하는 컨트롤 밸브의 특성이 상호 보완되어 선형의 비례제어를 가능

하게 한다.

- (4) 2-way 비례제어 온도 컨트롤 밸브의 경우 영향도(Authority)를 특성으로 가지는데 그 값의 변화는 변유량 시스템에서 TCV 전후단의 압력 변화는 Authority를 변화 시키게 된다.
- (5) 부하가 50%일 때 유량은 20%가 필요하고,

비례제어 2방 컨트롤 밸브



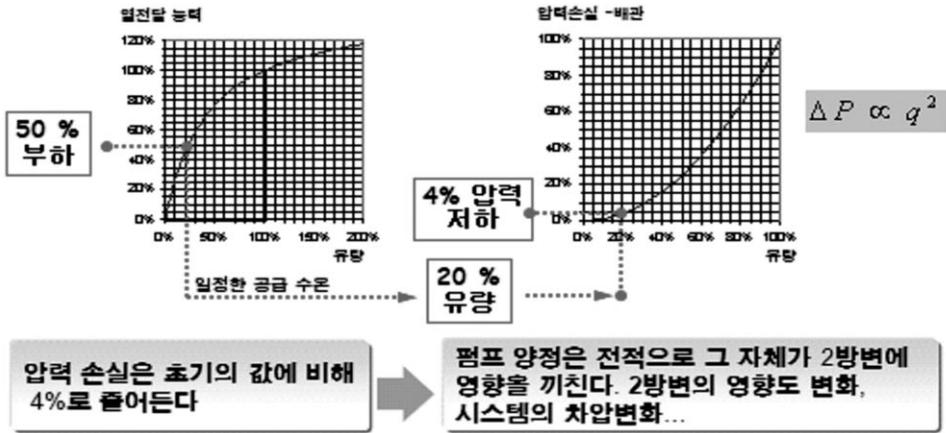
$$\beta = \frac{\Delta P_{\text{Control valve fully open and design flow}}}{\Delta P_{\text{Control valve fully shut}}}$$

영향도(Authority)는 컨트롤 밸브가 닫혔을 때 얼마나 많은 차압 변화가 일어나는지를 표시한다.

영향도(Authority)는 컨트롤 밸브가 닫힐 때 얼마나 효율적으로 유량을 줄일 수 있는지를 나타낸다.

[그림 10] 온도컨트롤 2way 밸브의 Authority 개념

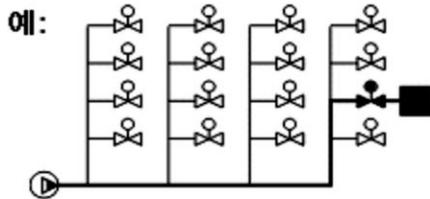
부분 부하가 전체 운전시간의 80%로 운전된다.



[그림 11] 열전달 특성과 반비례한 밸브 특성

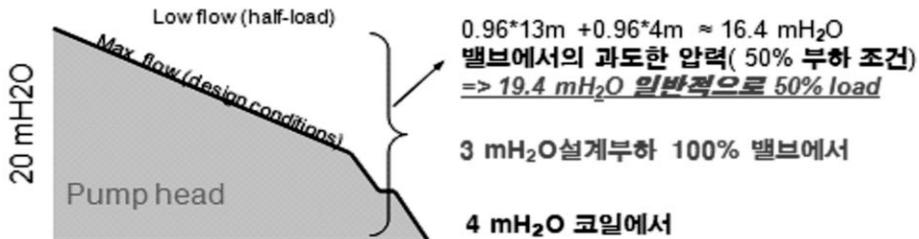
- 그때의 배관의 압력손실은 4% 수준이 사용되고, 이 경우 펌프의 양정은 모두 다 TCV의 전후단에 영향을 끼치는 현상이 발생된다.
- (6) 예를 들어 영향도 설계기준 55%가 저부하시 압력변화로 인하여 10%(0.1)의 영향도로 변한다.

- (7) 이 변화한 영향도는 저 부하로 인한 TCV의 제어기능을 상실하게 만든다.
- (8) 즉 부하 상태 60%이하에서 컨트롤은 더 이상 제어기능을 발휘 할 수 없다.
- (9) 열악한 영향도로 실내 온도조절은 안정되지 않는다.

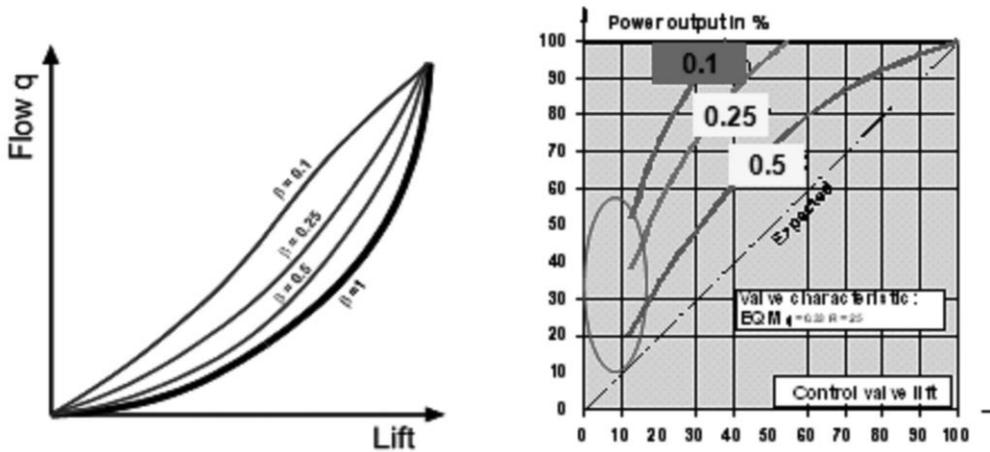


설계조건에서의 Authority :
 $b \approx 3 / (3 + 4) = 0.43$ (최대값)

50%부하에서의 Authority:
 $\beta = 3 / (3 + 4 + 0.96 \times 13) = 0.15$!
 β값은 부하가 더 줄면 더 낮은 값으로



[그림 12] Authority 를 실제 계산 해 본 샘플



[그림 13] Authority 파기에 의한 저부하 영역의 컨트롤 특성 상실

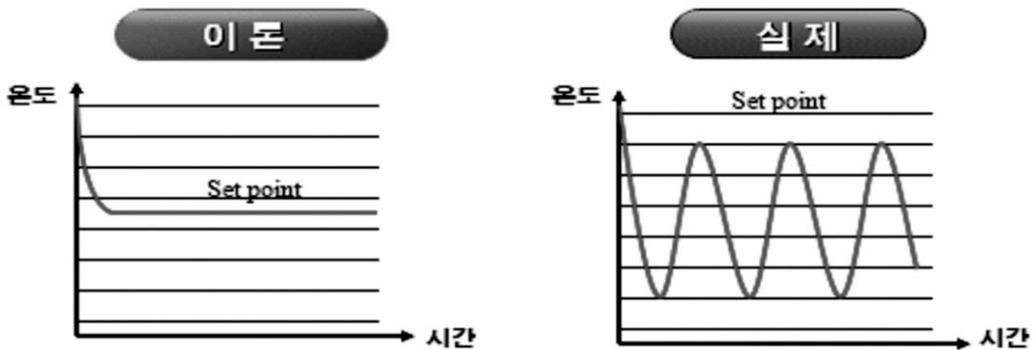
- (10) 각각의 터미널 유닛은 각기 다른 유량과 배관 마찰 손실을 가지고 있으며, 각각의 상황에 맞도록 밸런싱이 되어 주어야 한다.
- (11) 커미셔닝을 위한 장비(TA-CBI Instruments)
- (12) 해결방안은 변화하는 압력을 독립적으로 안정적으로 존으로 구획하는 방안.
- (13) 또한 각 존별로의, 각 공조기별로의 차압 독립 시스템 구축은 컨트롤 밸브(TCV)의 매우 안정된 영향도를 보장 할 수 있으며, 이 결과 바람직한 실내온도 조절 및 에너지 절감 효과를 만들어 낼 수 있다.
- (14) 현장의 커미셔닝은 각 사전 설정된 제품별

로의 TA Scope 에 의해 유량 측정으로 확인이 되고 추후 현장에서의 실내온도 컨트롤에 대한 정확한 추종성을 제공 할 수 있게 된다.

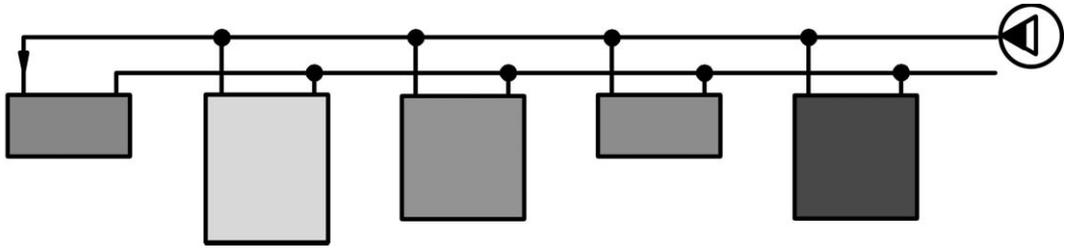
TA Select 4 의 소개

디자인 정보를 입력 한다.

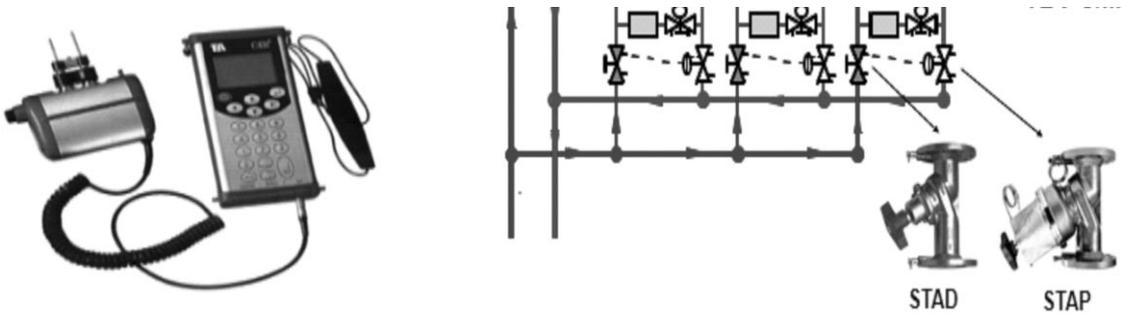
- (1) 배관경 선정기준인 마찰 손실 기준값과 유속 기준값을 기준으로 설정 한다.
- (2) 배관 회로망이 구성이 되고 모든 배관 길이가 입력된다.



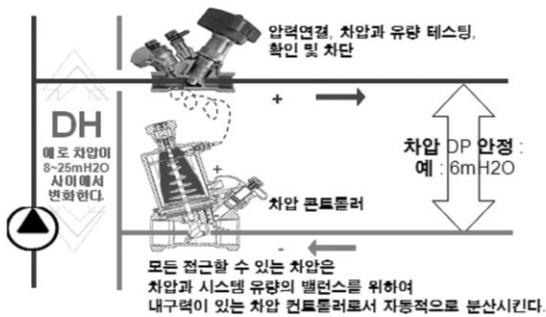
[그림 14] 차압 변화에 의한 모듈레이팅 컨트롤의 온오프 변환 상태



[그림 15] 밸런싱을 위한 모든 대상장비는 다른 용량, 다른 부하특성을 가진다.



[그림 16] 밸런싱을 위한 유량측정 장비 및 입상 배관 설치 예



[그림 17] 해당 차압 존 이후의 안정된 차압은 컨트롤 밸브의 Authority 를 안정화 한다.

프로그램 계산 진행.

- (1) 자동적으로 각각의 섹션별로의 유량을 계산한다.
- (2) 최대유량에서의 마찰손실과 유속을 근거로 최적의 배관경을 선정한다.
- (3) 각각의 배관별로의 배관 손실값을 계산한다.
- (4) 훌륭한 온도차를 보증하고 효율적인 컨트롤 밸브의 운용을 위한 최대부하, 최소부하에서 최적의 컨트롤 밸브의 선정을 계산한다.
- (5) 최소 요구된 차압 사전설정을 위한 차압안정화 밸브를 결정한다.
- (6) 시스템의 밸런싱을 위한 모든 TBV-CM의 사전 설정 위치를 결정하고, 모든 밸브는 현장 반입전 사전 설정이 되어서 배송이 된다.

- (3) FCU 과 AHU 등의 유량값과 압력손실값(추후 실제 현장 입고제품에 대한 조정이 필요)을 적용하여 넣는다
- (4) 차압 컨트롤러의 위치를 선정하고(2단계이상), TBV-CM 등의 사전 설정값등을 확인 합니다. 모든 FCU 존의 배관 길이가 입력되고, 그 결과를 정리한다.

TA Select 4 출력물.

- (1) 총 시스템 상세 네트워크의 모든 배관 밸브, 펌프등을 계산하여 디자인 한다.

Pipe list

Pipe series	Pipe size	Total length (m)	Volume (m3)
** Generic Steel Pipes **	40 (1 1/2")	97.2	0.133
	50 (2")	427	0.942
	65 (2 1/2")	1764	6.56
	80 (3")	755	3.87
	100 (4")	174	1.5
	125 (5")	927	12.3
	150 (6")	105	1.98
	200 (8")	227	7.64
	250 (10")	80.6	4.28
			39.2 m3

[그림 18] 샘플 결과 물량

Total flow: 1012 l/min
 Hmin: 15.2 m H2O
 Havailable: 21 m H2O

Circuit					Distribution Pipe ** Generic Steel Pipes **		
Name	Circuit Type	Flow	H available	Size	Length	Dp	
		l/min	m H2O		m	m H2O	
3 AHU-106,107	Distribution	1012	21	125 (5")	141	1.82	
1 AHU-107	2-way	696	11.5	125 (5")	10	0.129	
2 AHU-106	2-way	316	11.2	80 (3")	17.2	0.269	

Balancing Valve				Dp Controller					
Name	Preset.	Dp	Dp 100 %	Name	Dpl range	Preset.	Dp	Dpl	Dp min
	turns	m H2O	m H2O		m H2O	turns	m H2O	m H2O	m H2O
STAF 125	8.00*	0.418	0.418	STAP 100	[4.08-16.3]	61	8.83	11.6	3.11

[그림 19] 프로그램 출력 자료 샘플.



[그림 20] 두바이 칼리파



[그림 21] 21 싱가포르 마리나 베이샌즈 카지노 호텔 (2010 open) - TBV-CM_+ DP Controller(Zone)



[그림 22] 싱가포르 High riser building



[그림 23] 대만 101 Tower

- (2) 모든 밸브의 사전 설정값을 제공 하며, 설치 배송전에 설정된다.
- (3) 모든 밸브의 물량을 산출 한다.
- (4) 배관 관경 및 총 배관 길이 등을 각 관경별로 제공하고, 총 배관 유량을 제공 한다.
- (5) 유지관리 시간과 비용의 최소화.
- (6) 현장의 시간, 인건비용을 제거할 수 있으며, 사전설정에 의한 구현이 가능.
- (7) 현장의 커미셔닝을 위해서는 모든 공사가 완료되고 시스템이 정상적일 경우 입주 전에 할 수 있으며, 모든 컨트롤 밸브 및 펌프가 최대 부하로 운전되고 있을 때 상기의 표와 같은 양

식의 현장 커미셔닝 리포트를 제공 하게 된다.

주요 적용 현장(초고층 건물 적용 사례를 우선으로)

- (8) 펌프의VSD 운전을 위한 최적의 Index 라인을 제공하며, 그 운전결과를 보증 하게 된다.

모두 적용된 현장이고, 매우 만족스러운 온도차이와 유량 분배 밸런싱을 유지하는 건물이며, 현재 최적의 운전을 보장하고 있다. 