

냉동기의 최적운전제어

Chiller Optimization Control

류 해 성*
Hae Seong Ryu

1. 序 論

냉동기 최적운전제어란 냉동기가 운전되는 모든 출력(냉동능력)상태에서 냉동기의 입력(소비전력)을 최소화하기 위한 제어방법을 말하는 것으로 이를 달성하기 위해서는 1) 냉수 온도제어, 2) 냉각수 온도제어, 3) 운전개시부하억제(Soft Loading), 4) 냉동기대수제어, 등 네가지 제어방식을 최적상태로 유지하여야 한다. 여기서는 이 네가지 제어방식에 대한 기초적 관련사항을 살펴봄으로써, 최근에 보급되고 있는 냉동기의 최적운전제어기기 또는 최적제어기기가 부착된 냉동기 등의 적용에 도움을 주고자 한다.

우선, 냉수·냉각수 온도재설정 제어방식을 이해하기 위해 냉동압축기의 일(INPUT)에 관한 공식을 살펴보면 다음과 같이 여러가지 요인이 관련되어 있음을 알 수 있다.

$$W = M \times (P_d - P_s) \times K \div (E_v \times E_m)$$

여기서, W = 압축기의 입력일(work input)

M = 냉매유량

P_d = 압축기의 토출압력

P_s = 압축기의 흡입압력

K = 상수(constant)

E_v = 체적효율

E_m = 기계 효율

냉동기 제조설계의 관점에서 보면, 증발기나 응축기의 열전달면적, 모터·동력전달장치의 효율, 압축기의 체적효율 및 기계효율 등은 사용자에게 의해 변경되거나 제어될 수 없는 사항이다. 따라서 위의 공식에서 사용자나 제어시스템에 의해 변경 또는 제어될 수 있는 사항(factor)은 M , P_d , P_s 등 세가지 뿐이다. 여기서 냉매유량 M 의 조절은 냉동기의 용량조절(capacity control)의 수단으로 사용되는데, 원심형 압축기에서는 흡입베인(inlet vane)을 또 왕복동식 압축기에서는 실린더 언로딩(cylinder unloading)을 이용하는 것이 일반적이다. 나머지 두 변수 P_d , P_s 는 사용자나 제어방식에 의해 변경가능한 요소인데 증발기나 응축기의 열전달에 미치는 요인들을 변경함으로써 P_d , P_s 를 어느 정도의 범위내에서 제어할 수 있다. 증발기와 응축기의 열전달에 관한 관계식은 다음과 같다.

$$Q = K \times A \times (MTD)$$

여기서, Q = 열전달(교환)량, 전열량

K = 총괄열전달계수

A = 열전달면적

MTD = 평균온도차

여기서 A 는 냉동기 제작시 결정되어 있고,

K는 유체의 유동특성이나 유속에 따라 변화하지만 냉동기의 운전범위내에서는 그 변화폭이 크지 않다. 그러나 MTD는 상대적으로 크게 변화한다. 평균온도차(MTD) 또는 대수평균온도차(LMTD)는 냉매온도와 냉수 및 냉각수의 입구·출구수온에 의해 결정되며, 냉매온도는 냉매의 압력에 직접 관련되어 있다. 따라서 압축기의 입력(소비전력)을 최소화하기 위해서는 냉수·냉각수온도를 재설정(reset)하여 $(P_d - P_s)$ 를 가능한한 작게 유지하여야 하는 것이다.

2. 냉수온도 재설정제어

일정한 열교환량(부하조건)에 대해서 냉수출구온도를 상승시키면, MTD를 일정하게 유지하기 위해서 냉매온도가 올라간다. 냉매온도가 올라가기 위해서는 냉매흡입압력(P_s)은 당연히 상승하여야 하며, 그림 1에서 직선 1-2는 직선 1'-2'로 변화하게 된다. 이 결과 냉동효과가 커지고 냉동기 효율이 높아지게 된다. 일반적인 냉동기제어에서는 냉수출구온도를 일정하게 제어하는 경우가 대부분이며, 이 냉수출구온도를 감지하여 비례제어에 의해 냉수출구온도가 일정하게 되도록 냉동기의 용량 조절을 하는것이 보통이다. 이러한 제어방법에서는 시스템의 냉방부하가 감소함에 따라 냉수환수(chilled water return)온도가 낮아지고 이와 함께 냉수출구온도도 따라서 내려간다. 이렇게 되면 냉수출구온도 감지기에 의해 편차를 감지하여 비례조절기를 통해 냉동기 용량 조절을 행하게 되고 시스템의 냉방부하와 균형을 이루도록 되어있다.

그 결과 부분부하시 평균냉수온도는 전부하시의 평균냉수온도보다 낮고 RT(냉동톤)당 소비전력은 높아지게 된다. 그러나 이와 반대로 부분부하시 냉수입구온도를 일정하게 유지하도록 냉수출구온도를 부하에 따라 재설정하면 RT당 냉동기 소비전력을 감소시킬 수 있다. 이러한 냉수출구온도의 재설정에는 세가지 방법이 있는데, 첫째 냉수출구온도 설정점을 외기온도에 따라 재설정하는 것이다. 이것

은 건물의 냉방부하가 주로 외기온도에 비례한다는 가정하에서 유효하다. 이 방법은 단열이 되어있지 않고 침입외기나 환기량이 많은 건물에서 비용을 많이 들이지 않고 에너지절약을 하고자 할 때 적절한 방법이 될 수 있을 것이다. 둘째, 냉수출구온도의 설정점을 가장 조건이 나쁜(더운)방의 상태에 따라 재설정하는 방법이다. 이것은 부하가 가장 큰 방의 최고온도를 지정해두고 이 방이 지정된 최고온도로 유지될 때까지 냉수출구온도를 올리는 방법이다. 그러나 어느 방을 기준으로 냉수출구온도 재설정제어를 할 것인가 결정하는 일이 곤란한 경우도 많다. 셋째, 냉수환수온도로부터 냉수출구온도를 재설정하는 방법인데, 이 방법의 원리는 어떤 주어진 냉수출구온도조건에서 냉수환수온도가 정확히 건물의 냉방부하를 반영하고 있다는 사실에 근거를 두고 있다. 그러나 시스템의 부하변동에 따라 각 부하기의 밸브제어특성이 달라지므로 이들과의 관계를 검토하여야 할 필요가 있다.

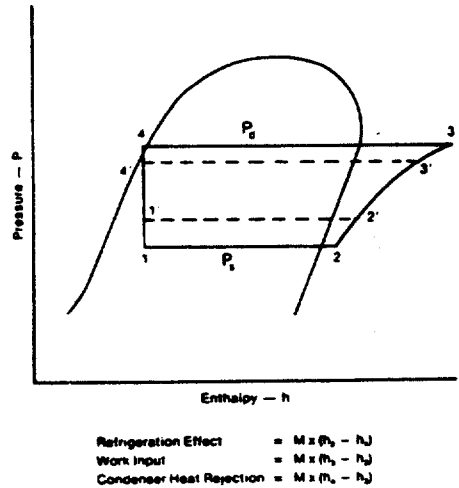


그림 1. 냉동사이클

3. 냉각수 온도재설정 제어

냉각수온도 재설정제어는 냉동기 최적운전의 두번째 요소인데, 냉동기소비전력은 응축기에 있어서 냉매로부터 냉각수로 열을 방출시키는 과정에서도 영향을 받게 된다. 냉각수출구온

도를 낮게 유지하면 냉매의 응축온도도 낮아지며 *MTD*는 일정하게 유지된다. 응축온도가 낮으면 압축기의 토출압력은 그림 1에서 보는 바와 같이 직선 3-4로부터 3'-4'로 변화하게 되고 압축기 입력은 감소하게 된다. 응축기에서의 열전달량은 다음 공식과 같이 표현된다.

$$Q_c = 60 \times LPM \times (LCWT - ECWT)$$

여기서, Q_c = 응축기에서의 제거열량
(kcal/hr)

LPM = 냉각수유량(ℓ/min)

$LCWT$ = 냉각수출구온도($^{\circ}\text{C}$)

$ECWT$ = 냉각수입구온도($^{\circ}\text{C}$)

냉각수유량과 응축기에서의 제거열량이 정해져 있으면 냉각수 입출구온도차($LCWT - ECWT$)는 고정되어 있다. 그러므로 냉각수 출구온도를 낮게 유지하기 위해서는 냉각수 입구온도를 낮추어야 한다. 일반적으로 냉각수로 河川水나 井水를 사용하는 경우에는 냉각수 입구온도를 임의로 낮추기는 어려운 때가 많으나 냉각수의 방열을 위해 냉각탑을 사용하는 경우에는 냉각수 입구온도제어가 가능하다.

냉각수입구온도에 관련되는 요인으로는 냉각탑 입구공기의 습기온도, 냉각탑의 공기유량, 냉각탑 입구수온, 냉각탑의 냉각수유량 등 네 가지를 들 수 있다. 일반적인 냉각탑 수온제어에 있어서는 냉각탑 출구수온을 감지하여 비례조절기에 의해 냉각탑으로 가는 냉각수량과 바이패스(by-pass)하는 냉각수량을 조절함으로써 냉각탑 출구수온을 일정하게 유지하고 있다. 그러나 외기습기온도의 변화에 따라 냉각탑 출구수온을 재설정하면 냉동기에서 냉각수 입구온도를 낮게 얻을 수 있고 냉동기소비전력을 감소시키게 된다. 그러나 외기습기온도를 직접 측정하여 제어신호를 보내는 것이 일반 아날로그(analog)제어기기로서는 복잡하게 되기 때문에 DDC(Direct Digital Control)방식이나 중앙관제용 컴퓨터의 EMCS(Energy Management Control System)소프트웨어에 의해 연산하는 것이 간단하고 보다 편리하다. 이때 습기온도계산을 위해서는 건구온도와 노점온도(또는 상대습도)가 필요하다.

냉수온도 및 냉각수온도 재설정제어를 고려하는 경우 주목해야 할 점은 냉수온도의 변화가 냉각수온도 변화보다 냉동기 효율향상에 미치는 영향이 더 크다는 사실이다.

냉수온도를 1°C 상승시키면 냉동기소비전력은 2~4% 정도 감소하게 되고 냉각수온도를 1°C 낮추면 냉동기소비전력은 1~3% 정도 감소하게 된다. 그러나 특히 주의해야 할 것은 모든 압축기에 있어서 어느 정도 흡입압력과 토출압력의 차이가 있어야 냉동기를 안정적으로 운전할 수 있다는 점이다. 이러한 이유 때문에 냉수·냉각수 온도재설정에는 어떤 한계가 있으며 냉동기 운전전에 필요한 최소양정(토출압력과 흡입압력의 차이)은 유지하도록 해주어야 한다.

4. 냉동기 대수제어

하나의 시스템에 냉동기를 여러 대 병렬로 설치한 경우에는 시스템 전체의 효율을 최적으로 유지하기 위해 냉동기 운전대수를 제어하는 일이 매우 중요하게 된다. 냉동기 최적대수제어 결정에 있어서는 각 냉동기의 부분부하특성, 펌프 및 배관시스템의 특성이 시스템 전체의 효율에 중요한 영향을 미치게 된다. 그림 2에 대표적인 터보냉동기의 부하-소비전력 특성곡선을 나타낸다. *RT*당 소비전력이 가장 낮은 구간은 냉동기부하가 전부하의 50~90% 사이일 때이며, 부하율이 35% 이하로 되면 *RT*당 소비전력은 급격히 증가하게 된다. 이러한 특성은 냉동기 제조회사에 따라서 약간씩 달라지므로 정확한 데이터는 냉동기 카탈로그를 참조하면 좋다. 보통의 경우 냉동기 대수제어는 운전자의 경험적 판단에 의존하고 있으나 EMCS나 냉동기 대수제어 전용컨트롤러에 의하면 보다 합리적인 운전제어를 기대할 수 있을 것이다. 냉동기 대수제어의 자동화는 냉수유량과 냉수공급·환수온도를 측정하여 시스템의 냉방부하를 계산하고, 계산된 부하에 맞도록 미리 설정된 운전(대수제어) 스케줄에 따라 어느 냉동기와 어느 냉동기를 운전할 것인가를 컴퓨터 소프트웨어에 의해 판

단하여 ON/OFF시키는 제어이다. 이러한 제어방법은 아직 널리 보급되어 있지는 않으나 점차 늘어날 것으로 기대된다. 이와 관련하여 제어 Logic을 미리 결정하기 위한 검토기법으로는 필자가 번역·전재한 본 학회지 Vol. 15, No. 4(1986. 12) pp. 345를 참조하기 바란다.

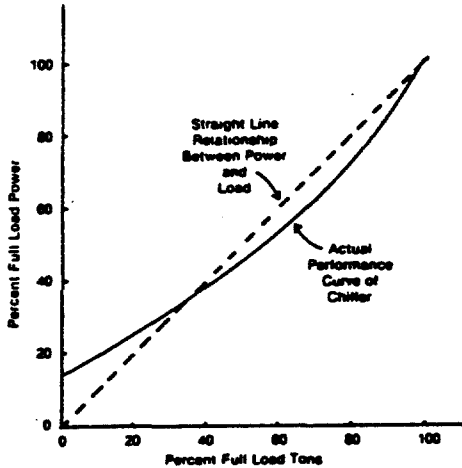


그림 2. 터보냉동기의 부하 대 소비전력곡선(예)

5. 운전개시(運轉開始)부하의 조절(Soft Loading)

냉동기를 운전정지하였다가 다시 운전하려 할때 배관수의 온도가 건물내의 온도 또는 외기온도에 가까이 상승해 있으면, 냉수온도가 설정온도보다 훨씬 높기 때문에 냉동기 여러대가 전부하(full load)운전을 하게되고 따라서 시스템의 냉방부하가 별로 없는데도 불구하고 빌딩의 전기수요가 피크(peak)로 되기도 한다. 이러한 상황은 주로 아침에 냉동기를 운전개시할 때 발생하는 경우가 많은데, 이를 방지하기 위해서는 냉동기를 가동(start)할때 우선 최저부하 상태로 기동하여 일정시간 운전하고 점차 부하를 증가시켜 나가면서 전부하 상태로 돌입하게 하여야 한다. 이러한 관리를 운전자가 수작업으로 하게 되면 냉동기 운전개시에 인력낭비를 초래하게 되고 번거로운 작업이므로 운전자가 소홀히 취급하는 경향이 있는데, EMCS컴퓨터 소프트웨어로 처리하면 효율적이다. 그림 3에 soft loading의

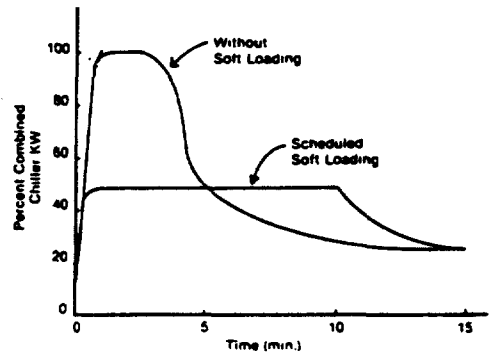


그림 3. Soft Loading 운전의 개념

개념을 나타내는데 냉동기를 45% 정도의 부하로 운전개시하여 어느정도 시간이 지난 뒤 이를 해제하고 본격적인 운전제어를 하도록 하고 있다.

6. 結 言

최근 냉동기의 최적제어를 위한 제어기기 또는 EMCS 소프트웨어에 대한 관심이 높아지고 있는데, 아직 그 보급실적이나 적용결과에 대한 보고는 활발하지 않다. 건물의 에너지비용중 냉동기가 차지하고 있는 비중은 매우 크다. 따라서 냉동기 에너지소비의 절감을 위한 냉동기의 최적운전제어는 에너지절약에 매우 중요하고 효과적인 수단이 될 것으로 믿으며, 이러한 제어 및 관리는 비교적 간단히 자동화할 수 있다. 그럼에도 불구하고 여태까지 우리 주변에서는 흔히 보일러, 냉동기 등의 대형 열원기기는 안전상의 이유를 들어 자동제어에 의한 ON/OFF를 잘 하지 않으려는 경향이 있어왔다. 최근 자동제어기기나 시스템의 신뢰성은 크게 향상되어 왔으며 더구나 DDC 제어방식의 등장과 컴퓨터기술의 발달로 인해 복잡하고 까다로운 제어논리(control logic)도 값싸고 정확하게 구사할 수 있게 되었으며 제어논리를 바꾸는 것도 소프트웨어의 변경에 의해 쉽게 가능하여 제어시스템의 융통성도 확대되었다. 이러한 신기술을 도입 활용함으로써 보다 효율적인 에너지절약과 운전관리가 이루어질 것으로 확신하며 냉동기 최적운전제어에 관련된 기초적 사항을 살펴보았다. 실무에 조금이라도 도움이 되기를 바란다.