

원자력설비 HVAC SYSTEM 설계개요

■ 이 총 상 / (주)대우건설 JRTR팀, cslee@dwconst.co.kr

HVAC System 정의 및 목적

HVAC System은 Heating, Ventilation and Air Conditioning의 약어로서 냉난방 및 환기계통을 의미하며 정해진 공간 내 온도, 습도, 공기의 이동 및 품질을 동시에 조절하는 것을 뜻한다.

냉난방 및 환기계통의 일반적인 목적은 주어진 공간 내 설치된 기기, 계측장비 및 종사자들에게 쾌적한 열적 환경을 조성하는데 있으며 특히 원자력설비의 경우에는 방사성 물질을 함유한 기체가 원자로 건물 외부로 방출되는 것을 방지하기 위하여 다음과 같은 요건을 만족시켜야 한다.

- 1) 원자로 건물은 항상 부압상태로 유지되어야 한다.
- 2) 건물 밖으로 배출되는 공기는 여과처리 되어 원자로 건물 주변의 방사능에 의한 영향이 항상 허용치 이하로 통제되어야 한다.
- 3) 원자로 건물 내의 각 지역은 적절히 외기와 환기시켜 방사성물질의 누적을 방지하고 발생 열량을 제거하여야 한다.

냉난방 기본원리

열전달

온도가 서로 다른 두 개의 물체를 서로 가까이 놓았을 때 서로의 온도가 같아 질 때까지 뜨거운 쪽의 열은 차가운 쪽으로 흡수된다.

이때 차가운 쪽에 의해 흡수되는 열량은 두 물체의 온도차에 비례한다, 즉, 온도차가 클수록 열 흡수율은 커진다.

열의 이동방법은 다음 중 한가지로 이루어 진다.

- 1) 복사 (Radiation)
- 2) 전도 (Conduction)
- 3) 대류 (Convection)

복사(Radiation)는 열이 선형으로 직선적으로 방출되는 것으로써 어떤 열원으로부터 복사되는 열의 강도는 열원으로부터 거리가 멀어질수록 약해진다.

제한된 방이나 건물 내에 있는 열원으로부터의 복사에 의한 열손실은 바닥, 천장 및 벽체의 온도에 따라 다르다.

주변 구조물의 표면온도가 낮을수록 구조물 내 기기나 종사자로부터의 열손실은 크고 빨라 진다.

반대로, 주변 구조물의 표면온도가 높으면 구조물의 열이 구조물 내 기기나 종사자에게 복사되어 인체나 기기에 영향을 주게 된다.

복사에 의한 열손실 취급 시 구조물 표면의 가중치를 고려한 평균복사온도(MRT : Mean Radiation Temperature)를 사용 한다.

전도(Conduction)는 물체를 통한 열전달로써 예를 들면 보일러의 열판으로부터 열판과 접촉하고 있는 다른 물질로의 열전달을 생각할 수 있다.

전도도는 기준치에 대한 해당물질의 내, 외부를 통과하는 열의 상대적인 값으로 정의되는데 전도도가 낮은 물체로는 각종 절연체를 들 수 있고 전도성이 양호한 물질로는 구리를 들 수 있으며 전기 전도도가 좋으면 열전도도도 좋다.

대류(Convection)는 가열된 물질 자체의 움직임으로 인한 열전달 현상이며 물질의 움직임이 필수적이기 때문에 대류현상은 액체와 기체상태에서만 발생한다.

복사, 전도, 대류현상의 상관관계를 보일러를 예로 들어 보면, 연료의 연소에 의해 발생한 열은 복사에 의해 피 가열체 표면으로 전달되고, 전도에 의해 피 가열체의 각 부분으로 전달되고 대류에 의해 물로 전달되는 순환계를 형성한다.

순환(Circulation)은 온도차에 의한 물의 중량변화에 의하는 것으로 열원 표면의 물은 열을 받아



팽창하여 주변의 온도가 낮고 무거운 물을 이동시키게 된다.

적절한 순환은 보일러가 과열되는 것을 막기 위해 매우 중요하다.

열역학

• 열역학 제1법칙

열역학 제1법칙은 흔히 에너지보존의법칙 이라 불리며 핵적 또는 화학적 반응이 없는 한 하나의 계통(system)내에서는 입력에너지-출력에너지-증가에너지 간 밸런스가 유지된다.

하나의 계통 내에서 다중의 질량의 흐름이 있는 경우의 에너지밸런스는 다음과 같이 표시할 수 있다(i : 초기상태, f : 종료상태).

$$\begin{aligned} & \Sigma m_{in} (u + pv + \frac{V^2}{2} + gz)_{in} \\ & - \Sigma m_{out} (u + pv + \frac{V^2}{2} + gz)_{out} + Q - W \\ & = [m_f (u + \frac{V^2}{2} + gz)_f - m_i (u + \frac{V^2}{2} + gz)_i]_{system} \end{aligned}$$

정상흐름(steady flow) 공정은 엔지니어링 적용 시 중요한 부분으로 결과적으로 정상 흐름상태에서는 계통에 관련된 물량은 시간에 따라 변하지 않음을 시사 한다.

• 열역학 제2법칙

열역학 제2법칙은 가역성 공정으로부터 비가역성 공정을 구별하고 정량화 한다.

열역학 제2법칙은 여러 방법으로 설명할 수 있는데 그중 하나가 개방계통내 엔트로피 흐름과 그와 관련한 비가역성 개념이다.

비가역성 개념은 계통 사이클 운영형태를 제공하는데 예를 들어 두 개의 온도차에 의해 주어진 냉동부하로 운전되는 냉동사이클 상에서 비가역성이 커질수록 사이클을 운전하기 위한 일량이 커진다는 것이다.

비가역성은 배관라인과 열교환기에서의 압력강하, 서로 온도가 다른 유체 간 열전달 및 기계적 마찰 등을 포함 한다.

개방계통 내 엔트로피 관점에서 열역학 제2법칙은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$dS_{system} = \frac{\delta Q}{T} + \delta m_i s_i - \delta m_e s_e + dI$$

where

dS_{system} = total change within system in time during process

$\delta m_i s_i$ = entropy increase caused by mass entering (incoming)

$\delta m_e s_e$ = entropy decrease caused by mass leaving (exiting)

$\delta Q/T$ = entropy change caused by reversible heat transfer between system and surroundings

dI = entropy caused by irreversibilities (always positive)

HVAC 계통 설계 개요

일반사항

HVAC 계통은 공기의 냉각, 예열, 습도조절 및 기체 방사성폐기물 제거의 기능을 갖추며 특수한 경우를 제외하고는 별도의 냉각이나 습도조절장치는 필요하지 않으나 난방을 위해서는 별도의 히터를 종종 사용한다.

계통의 기본 설계개념은 주어진 공간 내를 통과하는 공기에 의해 흡수된 현열(sensible heat) 및 잠열(latent heat)과 기체 방사성물질을 설계사양에 맞게 조절하는데 있다.

지역에서 발생하는 열은 시간에 따라 변화하므로 급기를 통해 지역으로부터 제거해야 할 에너지를 변화시키는 장치가 필요하며 공간 내 기체방사성 폐기물의 종류와 양에 따라 적절한 필터를 선정해야 한다.

공간 내 열에너지 관리는 급기량을 조절하거나 급기의 온도를 조절함으로써 가능하다.

계통은 다음과 같이 두 가지로 분류할 수 있다.

- 단일 덕트 계통

단일 덕트 계통에서는 난방 및 냉각코일을 공

기흐름방향에 직렬로 설치하며 환기 대상 지역에 공동 덕트를 통해 같은 온도의 공기를 공급하며 급기온도를 변화시키거나 혹은 급기량을 변화시킬 수 있는 장치를 사용 한다.

- 이중 덕트 계통
이중 덕트 계통에서는 가열 및 냉각코일을 공기흐름방향에 병렬 또는 직/병렬로 배치하여 찬 공기와 더운 공기를 각각의 방에 설치된 장치에서 혼합하여 공급하거나 뎀퍼를 사용하여 혼합된 공기를 별도의 덕트를 통해 여러 지역에 공급 한다.

HVAC 계통설계 시 다음과 같은 사항이 고려 된다.

- 계통을 구성하는 주기기의 유지보수가 용이하도록 배치
- 여과장치의 선택폭 극대화
- 기기 진동 및 소음 극소화
- 종사자, 주요 기기로부터 배관, 전선 및 전기자재, 여과기 등 격리
- 계절적 변화에 쉽게 대응하도록 자동제어
- 어떠한 운전조건하에서도 냉난방이 동시에 수행되어 지역구획이나 습도조절이 용이
- 최적의 급기, 배기조절 및 주변 요건의 변화에 대처할 수 있는 설계 여유도
- 비정상적인 운전상황 고려(양압 또는 부압)
- 구역별 적정 환기회수
- 적정 여과기(Moderate Filter, HEPA Filter, Charcoal Filter 등)
- 내진설계 요건
- 안전설계 요건
- 품질보증 요건
- 온도, 습도, 압력, 풍속, 방사선량 등 환경 요건
- 구역별 방사선량에 따른 공기흐름 방향(방사선 준위가 낮은 지역에서 높은 지역으로)
- 사용자재 선정(원자력설비의 경우 Stainless Steel 사용)

부하계산

• 복사열

복사에너지는 우선적으로 공간을 형성하고 있는 물질(벽, 바닥, 천정)의 표면과 공간 내 설치된 기기에서 흡수된다.

물질의 표면과 기기의 온도가 주변공기 온도보다 높아질 경우 일부 열은 대류현상에 의해 내부공기에 전달된다.

공간 구성 물질과 기기 각각의 열 축적 용량이 복사열로 인한 온도상승률을 결정 지으며 냉각부하 산정에 사용 된다.

축열 효과는 주어진 공간 내에서 순간적으로 얻어지는 열과 그 순간의 냉각부하를 나타내는 중요한 요소가 된다.

특수한 환경조건의 조합과정에서 실제 냉각부하를 산정하기 위해 이러한 현상의 형태와 물량을 예측하는 일이 설계기술자의 관심사이다.

• 표면 열 제거율

주어진 공간에서의 열 제거율은 실내 공기온도가 일정하게 유지될 때 표면 냉각부하와 일치한다.

냉각기의 간헐적인 운전에 따라 제어시스템의 특성상 사소한 순환계의 변화 혹은 실내 온도의 변화는 허용된다.

제어시스템의 적절한 모사를 통해 안정적인, 정해진 기간 내 제거되는 에너지양이 표면 냉각부하 값을 사용하는 것보다 좀 더 실질적인 에너지 제거 값을 얻을 수 있다.

그러나, 이러한 개념은 시간에 따른 에너지 량을 산정하는데 중요한 것으로 기기 선정을 위한 최대 설계 냉각부하를 계산 하는 데는 사용되지 않는다.

• 냉각코일 부하

한 개 이상의 공간에서 냉각코일에 의한 에너지 제거율은 전체 공간의 일시적인 표면 냉각부하(또는 표면온도의 변화가 없다고 가정할 경우 표면 열 제거율)의 합에 외부 하중을 합산한 값과 같다.

이 경우 외부 하중은 환기 요건을 만족시키기 위해 냉각기에 유입되는 웬 및 덕트열과 외기 열 및 습도를 포함 한다.

• 실질적인 냉각부하 산정

종종, 냉각하중은 주어진 공간에 대한 모든 변

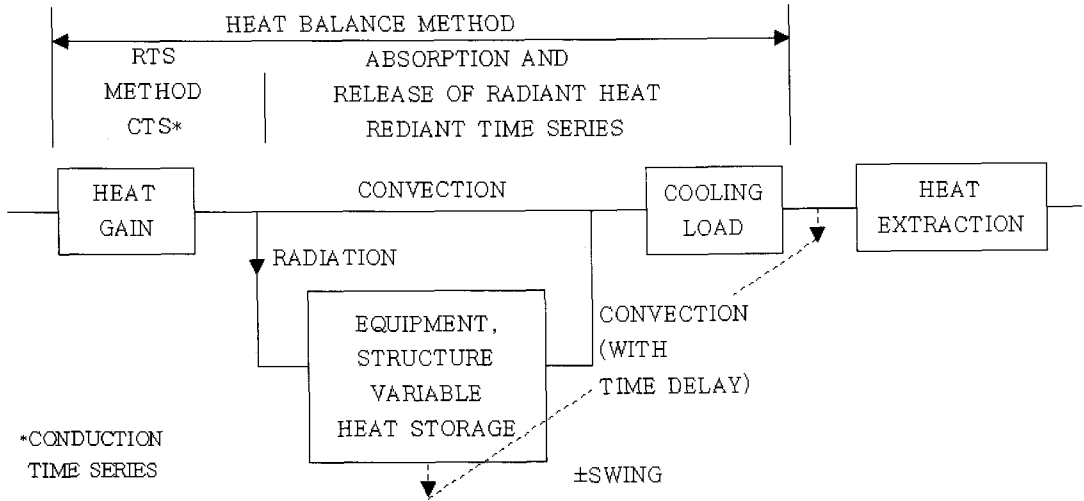
수가 적절히 또는 완전하게 정의 되기 전에 계산되어야 한다.

예를 들면, 새로운 건물 내 층별 구획 및 기기 배치가 되지 않은 상태에서도 냉각부하를 산정하는 것이다.

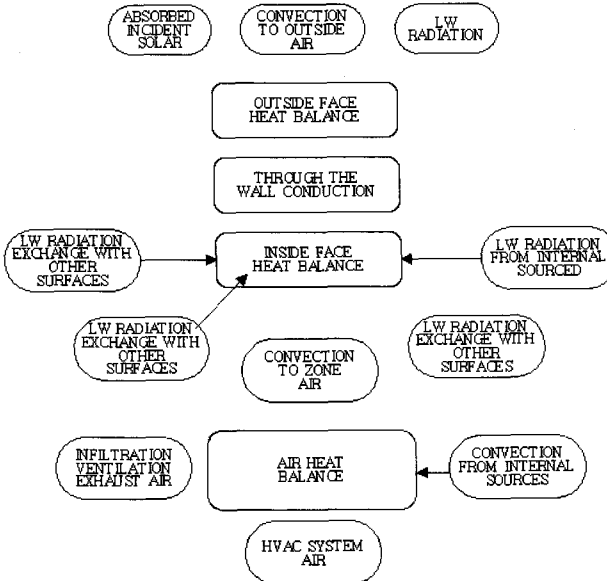
부하 추정 과정에서 열 평형 기초의 이해를 통

한 기술적 판단이 요구된다.

- 기타 열 부하
 - 1) 침투 공기
 - 2) 종사자
 - 3) 보조기기



[그림 1] 일시적인 습득 열과 일시적인 냉각부하 값간 차이 요인



[그림 2] 구역 내 열평형 공정도

주 냉·난방부하 계산 시 고려사항

- 1) 벽체 및 지붕으로부터의 발열량
- 2) 외기 침투량
- 3) 종사자 수
- 4) 기기, 배관, 전기자재로부터의 부하

필터 선정

방사성물질 선원항(Source Term)에 따라 필터 사양 및 크기 결정

- **Moderate efficiency filter**
40% to 60% efficiency by ASHRAE atmospheric dust spot efficiency test.
- **HEPA Filter**
The DOP efficiency of HEPA filter will be of 99.97% minimum at 100% and 20% air flow.
- **Charcoal filter**
A 10cm bed charcoal filled adsorber with at least 0.5 second resistance time.
99.0% minimum attenuation of organic radioactive iodine and 99.9% minimum attenuation of radioactive elemental iodine at 70% relative humidity.

적용 코드 및 표준

- ANSI/ASME N-509 : 여과기 및 댐퍼 설계, 제작 및 설치 요건
- ASHRAE : American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers
- SMACNA : Sheet Metal and Air-conditioning Contractors National Association
- AMCA : Air Moving and Conditioning Association
- ASTM : American Standard for Test Material

기타설계요건(환기시스템의 기능에 따라 기술)

- 내진요건
- 안전요건

- 품질보증 요건
- 신뢰도 요건

덕트 설계

기본 계산식

$$\Delta p_{t,1-2} = (p_{s,1} + \frac{\rho V_1^2}{2}) - (p_{s,2} + \frac{\rho V_2^2}{2}) + g(\rho_a - \rho)(z_2 - z_1)$$

$$\Delta p_{t,1-2} = \Delta p_t + \Delta p_{se}$$

$$\Delta p_t = \Delta p_{t,1-2} + \Delta p_{se}$$

where

$p_{s,1}$ = static pressure, gage at elevation z_1 , Pa

$p_{s,2}$ = static pressure, gage at elevation , Pa

V_1 = average velocity at section 1, m/s

V_2 = average velocity at section 2, m/s

ρ_a = density of ambient air, kg/m³

ρ = density of air or gas within duct, kg/m³

Δp_{se} = thermal gravity effect, Pa

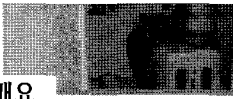
Δp_t = total pressure change between sections 1 and 2, Pa

$\Delta p_{t,1-2}$ = total pressure loss due to friction and dynamic losses between sections 1 and 2, Pa

설계절차

일반적인 환기시스템의 덕트 설계 절차는 다음과 같다.

- ① 각각의 공간에 적절한 공기를 공급하기 위해 건물배치도를 검토하고 급기구 및 배기구를 배치 한다. 덕트 취득열 또는 손실열 및 덕트 누설을 고려하여 계산된 공기량을 조절하며 공간 내 압력조건을 만족하도록 급/배기량을 조절 한다.
- ② 덕트 제작자 자료를 이용하여 배출구 크기를 선정 한다.
- ③ 덕트 시스템의 스케치
- ④ 덕트 배치는 플랜트 전체 배치와 덕트 모양에



영향을 주며 가능한 한 환형 덕트를 사용한다.

- ⑤ 계통을 구획으로 나누어 각각의 구획에 번호를 부여한다. 덕트 계통을 분할할 때 공기흐름 방향, 덕트 크기 및 모양이 바뀌는 곳을 기준으로 한다.
- ⑥ 선정된 설계방법에 따라 덕트 크기를 산정하고 계통 내 전체 압력강하를 계산하여 환을 선택 한다.
- ⑦ 덕트 세부배치를 한다. 덕트 배치와 연결구 형태가 크게 바뀌는 경우, 손실수두를 재계산하고 필요시 환을 재선정 한다.
- ⑧ 모든 급배기 연결부에서의 압력평형을 고려하여 덕트 단면적을 재계산 한다.
- ⑨ 객관적인 소음정도를 분석 한다.
- ⑩ 방사선 차폐벽을 통과하는 덕트에는 차폐스 크류를 설치 한다.
- ⑪ 방화 댐퍼 설치위치를 선정 한다.

덕트의 분류

• 분류기준

- 1) 환기계통의 기능
- 2) 계통 압력

덕트내를 흐르는 공기의 공기압과 속도수두가 덕트 구조물에 부하를 주며 덕트를 통과 하는 평균정압차가 주 분류기준이 된다.

각각의 덕트에 대한 실제 정압은 환의 정압율과 일치하지는 않음으로 계산에 의해 결정 된다.

따라서 설계자는 계통의 모든 운전모드를 감안하여 계통 내 덕트에 대해 압력을 구분하여야 한다.

덕트 세정

덕트 내에는 먼지 및 방사성물질이 침적될 수 있으므로, 이를 최소화 할 수 있도록 설계, 설치 및 보수해야한다.

이를 위해 세정을 위한 접근성을 고려하고 적절한 여과장치, 습기방지 및 먼지의 침적 방지 대책을 수립해야 한다.

덕트 누설

덕트 사양서에 허용 덕트 누설량, 누설시험 요건, 설치후 누설시험 요건을 명기 한다.

덕트의 누설등급은 ASHRAE Handbook Chapter 32 Table 6에 따라 분류한다.

누설시험은 SMACNA에 기술된 절차에 의해 수행 한다.

설치후 과도한 누설이 발생할 경우 보수비용 및 시간이 많이 소모됨으로 덕트 설치 시 절차를 준수하고 철저한 품질검사를 실시해야 한다.

덕트 내 공기유량 및 지역별 압력 확인

TAB(Test, Adjusting and Balancing)를 통한 수동 댐퍼의 조정으로 설계 공기유량 및 지역별 설계 압력을 조절 한다. (2)