

지역난방용 매설배관의 열응력 흡수에 관한 연구

남궁재관*, 신병국**

A Study on the Absorption of Thermal Stress on the Underground piping for the District heating
Chai-Kwan Namkoong, Byoung-Kook Shin

1. 서론

열병합 발전을 이용한 지역난방은 1896년 독일의 함부르크시에서 최초로 시작되어 북유럽 여러 나라에 보급되었으며 우리나라는 1983년 목동 신도시가 개발되면서 최초로 도입되었다.^[1] 1983년 목동 신시가지에서의 배관 방식은 공동구에 설치하는 노출방식으로 일반 플랜트 배관의 설치 방법과 동일하게 적용되었으며 그 후 여의도지역에 지역 난방이 공급되면서 매설방식이 처음으로 시행되었으며 이는 시공전이나 시공시 일정한 크기의 반대방향의 응력(Prestress)을 발생시킨 후 배관의 온도 상승에 따른 응력의 절대치를 감소시키고 정지 시 온도가 일정온도 이하로 내려가지 않게 함으로써 열응력의 범위(Thermal Stress Range)를 작게 하여 재료의 허용치 이내로 되게 하는 방법인 무보상 방법(Non-Compensated Method)을 사용하였다.^[2] 또 열 팽창에 의한 변위를 허용하여 열응력의 발생을 줄이는 방법으로 신축흡수계수에서 팽창량을 흡수토록 하고 고정점(Anchor)등을 설치하여 열팽창의 방향성을 통제하는 열팽창을 허용하는 방법(Compensated Method)을 사용하기 시작한 것은 1991년 강서 지역 지역난방이^[3] 시행되면서부터이며 그후 1993년 노원지구^[4] 및 방화, 등촌지구^[4], 1994년 대전3,4공단^[6], 등에 이 방법이 사용되었으며 지금까지 노원 및 강서지역에는 이 방법이 사용되어지고 있다.

그러나 1999년 8월 Com방식에서 가장 중요한 역할을 하는 Expansion Joint에서 누수 및 파손사고가 일어나면서 Com방식에 대해 여러 가지 검토가 이루어 졌다. 그 결과가 2000년8월 덴마크의 EKON사에서 제출한 보고서^[7]에 나타나 있는데 그 내용은 Expansion Joint의 사용중지 및 자체를 권장하고 있다. 이는 Expansion Joint에만

* 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

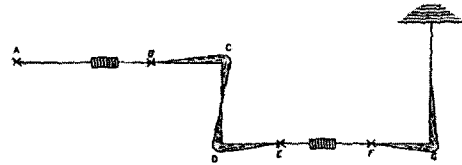
** 서울산업대학교 산업대학원 기계설계학과

국한된 신뢰도에 대한 문제 때문만이 아니라 전체 배관망의 수명에 대한 문제 때문임을 지적하고 있다.

본 연구는 기존의 Com방식의 설계에 적용되었던 여러 가지 작용력을 검토 연구하여 문제점으로 지적되었던 Expansion Joint 및 배관망의 신뢰도를 향상시키고 지역난방용 매설배관의 설계에 기여함으로써 안정된 열공급 망을 구축함에 그 목적을 두었다.

2. 열팽창을 허용하는 방법의 기본원리

관의 온도가 상승하거나 하강하면 관의 길이가 변화하는데 그 신축의 크기는 관의 길이와 온도 변화에 직접 관계되는 것이다. 한번 팽창한 관은 영구변형을 일으킬 정도의 강도로 압축되거나 크리프가 생길 정도로 노출되지 않는 한 냉각하면 본래의 길이로 복귀한다. 또 관 길이의 팽창은 관의 길이에만 관계되고 직경에는 관계가 없다.



<Fig.1> Expansion absorption Method in pipe line

위 <Fig.1>에서 배관이 가압 가열되면 곡관부위 C,D,G가 움직이기 시작한다. 움직임은 토양과의 마찰을 일으키며 이 마찰의 크기는 관의 움직이는 부분의 길이에 비례한다. CD의 길이가 열팽창을 흡수할 수 있는 범위내의 직관이라면 길이 방향 B와 E에 Anchor Block을 설치하여 열수송관 자체의 Flexibility를 이용한 신축 흡수 방법이며, 직관 길이가 길 경우 신축계수를 이용

하여 신축량을 흡수할 수 있는 범위내에서 Anchor A와 F를 설치한다.

3. 열팽창 및 수축에 따른 하중과 변형

가. 신축량

매설배관에서 온도변화량이 ΔT 라면 이 온도변화에 의해 배관이 신축할 때 매설토압과 외관사이에서 발생하는 마찰력에 의해 지상 배관의 신축량에서 마찰력에 의한 신축량이 감소하게 되며 또 매설 배관은 운동 영역과 정지 영역으로 나누어지는데 운동 영역에서는 매설 배관이 토양에서 움직일 수 있으나 정지 영역에서는 변형이 일어나지 않는다. 매설 배관의 온도 변화에 따른 길이 방향의 팽창량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot \frac{L}{2} - \frac{F_R (L/2)^2}{2EA_s}$$

따라서, 전체 길이 (L)의 팽창량은

$$\Delta L = 2 \times \Delta l \text{ 이다.}$$

α : 선팽창계수 (mm/mm °C)

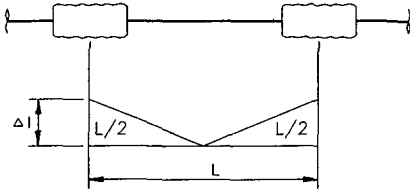
ΔT : 온도차 (°C)

L : 배관길이 (mm)

E : 강관의 탄성계수 (kg/m²)

A_s : 강관의 단면적 (mm²)

F_R : 흙과 배관관의 단위길이당 마찰력



<Fig.2> Layout of heat expansion in pipe line

나. 열팽창력

지관의 양단을 고정해 놓고 가열한다는 것은 양끝을 자유롭게 해 놓고 가열 팽창시킨 후 본래의 길이까지 압축하는 것과 같은 것이므로 양끝을 고정한 관을 가열하면 관에는 압축 응력이 생긴다. 여기서 팽창량이 크면 거기에 따른 응력도

역시 커지며 온도변화에 따른 열팽창력 Q는 다음과 같다.

$$Q = E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

E : 배관재의 탄성계수

A : 배관재의 단면적

α : 배관재의 선 팽창계수

ΔT : 온도차

Q : 열팽창력

다. 마찰력

열 배관 설치 후 온수가 관내에 유입되어 배관이 신축하면 흙과 마찰력을 일으키게 되며 그 팽창 운동 속도는 느린 관계로 정지마찰력으로 본다. 마찰력은 지중에 매설된 배관에서는 운동방향의 반대방향으로 발생하며 마찰력은 상부 수직력과 마찰계수에 비례한다. 매설배관에 작용되는 마찰력은 다음과 같이 표현되며 마찰을 발생시키는 관과 온수의 중량도 고려하여야 한다.

$$F_R = \mu (F_N + F_W)$$

F_N : 외관 (Pe-Jacket)과 토양간의 단위 길이당 마찰력(배관 상부의 흙의 무게)

$$= D_o \cdot \gamma \cdot \pi \left(\frac{D_o}{2} + H \right) \text{ (kg/mm)}$$

F_W : 단위 길이당 자중

$$= \pi \left[\gamma_p \frac{d_o^2 - d_i^2}{4} + \gamma_w \frac{d_o^2}{4} \right] \text{ (kg/mm)}$$

D_o : 외경 (mm)

d_i : 강관의 내경 (mm)

γ : 흙의 비중량(kg/m³)

γ_p : 강관의 비중량 ($\gamma_p = 7850 \text{ kg/m}^3$)

H : 매설깊이 (mm)

γ_w : 물의 비중량 ($\gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3$)

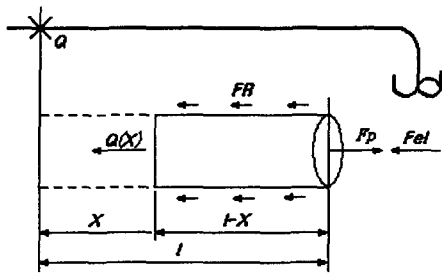
d : 강관의 외경 (mm)

라. 변형율, 변위

배관의 온도변화에 따른 길이방향의 변형율 및 변위는 열신축에 의한 변형과 탄성력, 마찰력, 내압에 의한 변형의 합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon(x) = \epsilon T + \epsilon \ell = \alpha \Delta T + \frac{Q(x)}{EA}$$

- $\epsilon(x)$: 고정점으로부터 x 위치점에서의 변형을
- ϵT : 열신축에 의한 변형을
- eel : 탄성반력, 흡과의 마찰력 및 내압에 의한 변형을
- a : 배관의 선 팽창계수
- ΔT : 온도차
- E : 배관의 탄성계수
- A : 배관의 단면적
- $Q(x)$: 합성력



<Fig.3> Diagram for the axial pipe line

<Fig.3>에서와 같이 양단이 고정점과 Bend로 이루어진 배관에서 다음과 같은 평형 방정식이 성립된다.

$$Q(x) = Fp - Fel - FR(l-x)$$

- Fp : 배관의 내압에 의한 Force
 - Fel : 배관 곡관부의 탄성반력
 - FR : 흡과 배관과의 단위길이당 마찰력
- 위 식을 변형을 식에 대입하면

$$\epsilon(x) = a \Delta T + \frac{Fp - Fel - ER(l-x)}{EA}$$

여기서 배관의 변형을 ϵ 는 배관길이 x 와 비례관계가 있음을 알 수 있다.

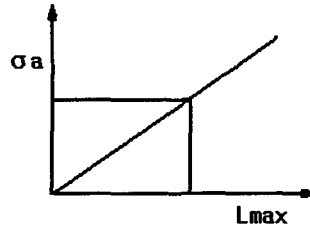
마. 최대마찰길이(LMAX)

열 배관에 발생하는 마찰력은 배관의 설치길이에 따라 선형적으로 비례하므로 배관의 설치길이가 길수록 선형적으로 증가한다. 이 마찰력이 이중 보온관의 내관에 전달되므로 어떤 배관 설치 길이가 이상에서는 마찰력이 배관재의 허용응력보다 커진다. 따라서 마찰력이 배관재의 허용 응력과 같아지는 배관 설치길이를 최대마찰길이로

하며 다음과 같이 표시된다.

$$L_{MAX} = \frac{\sigma_a \cdot A_s}{F_R}$$

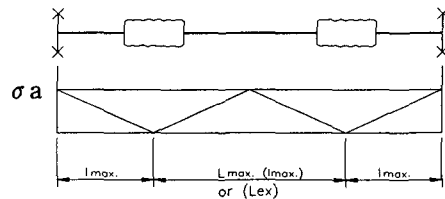
- L_{MAX} : 최대 마찰 길이 (mm)
- F_R : 단위 길이당 마찰력 (kg/mm)
- σ_a : 배관 허용 응력 (kg/mm²)
- A_s : 강관의 단면적 (mm²)



<Fig.4> Comparison of maximum friction length and allowable stress

그러므로 열팽창의 해소방안으로 최대 마찰 길이가 이전에 팽창 흡수장치를 설치하여야 하며 허용응력에 따른 최대설치 길이(고정점-고정점 또는 Expan. Joint- Expan. Joint)는

$$L_{MAX} = 2 l_{MAX} \text{ 이다.}$$



<Fig.5> Comparison of maximum friction length, maximum set length and allowable stress

바. 반복하중

지역난방에 사용하는 강관은 압력배관용 탄소강관(SPPS38)으로 온도에 의한 한계반복횟수가 <Fig.6>에서 보는바와 같이 $N=10^6 \sim 10^7$ 로 반복에 의한 응력을 고려할 필요가 없으나^[12] Expansion Joint의 경우는 반복하중에 대한 고려가 불가피 한 실정으로 정상운전조건에서 7000

Cycle 이상을 갖도록 설계에서 요구하고 있으나^[11] 열수송관의 파손사고 발생 시 가장 취약 부위가 Expansion Joint인 점을 감안하면 설계조건 강화나 재료의 변경 등 반복하중을 고려한 연구와 검토는 더 이루어져야 하는 실정이다.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$$

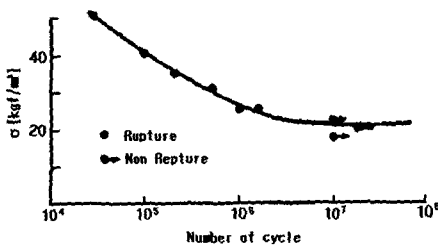
R : 응력비

σ_a : 응력 진폭

σ_m : 평균응력

σ_{\max} : 반복응력의 최댓값

σ_{\min} : 반복응력의 최솟값



<Fig.6> S-N curve of Carbon steel for machine structural use

사. 열팽창에 의한 굽힘모멘트와 응력

매설배관에서의 굽힘모멘트 또한 탄소강관에서는 탄성한계 이내라 할 수 있으나 Expansion Joint의 경우 이에 대한 고려가 필수적이어서 설계에는 축방향 변위 외에 Angular Moment 및 Lateral Moment에도 강도 유지 및 열팽창의 기능을 충분히 수행하도록 요구하고 있으나^[11] 매설배관에서는 전방향에서 토압에 의해 유지되고 있으므로 종종 무시되는 경우가 발생되고 있어 Support 설치 등 비틀림 및 휨에 대한 배려가 필요하다.

직관의 경우 $\sigma = \frac{M \cdot r}{I}$

곡관의 경우 $\sigma = \frac{\beta \cdot M \cdot r}{I}$

I : 관성모멘트

M : 굽힘모멘트

β : 응력 계수

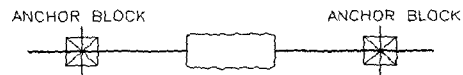
r : 관의 반경

4. 열팽창의 처리방법

관이 열을 받으면 팽창을 하는데 이 팽창을 억제 하면 위에서 설명한것과 같이 압축응력이 생겨서 드디어는 관이 파손에 이르게 된다 따라서 열받은 배관에는 관이 가열되었을 때 신축을 자유롭게 해서 관에 생기는 응력을 최소화하는 방법을 강구해야 한다.

가. 직관부 신축흡수 방법

열팽창을 허용하는 방법(Compensated Method)에서 매설배관에 대한 열팽창력은 매설토압의 마찰력만큼 감소하며, 열팽창량 또한 감소한다. 직선거리에서 신축흡수 장치(Expansion Joint) 및 배관 탄성(Loop)의 허용 신축 흡수량에 상당하는 직관거리에 토압에 의한 마찰력 및 Expansion Joint의 반력을 받아들일 수 있는 Anchor Block를 설치하여 열팽창을 흡수한다.



<Fig.7> Expansion absorption Method in the straight line

또 직선부에 설치한 Anchor Block에는 신축에 따른 반력이 작용하는데 그 힘은 아래와 같이 3가지 힘의 합으로 표현 할 수 있다.

$$F = F_P + F_R + F_E$$

F : Anchor Block의 반력

F_P : 배관의 내압에 의한 Force

F_R : 흙과 배관과의 마찰력

F_E : Expansion Bellows의 반력

나. 곡관부의 신축흡수 방법

배관내 열응력은 직관부에서 허용치 이내라

할지라도 곡관부에서 과도하게 발생될 수 있다. 그 이유는 축력외의 모멘트력의 발생과 변이합성으로 큰 변이가 발생할 수 있기 때문이다. 이때 발생하는 변이는 허용응력내에서 탄성적으로 작용해야 안전하므로 신축 흡수재(Foam Pad)를 사용하여 작용공간을 확보해 주어야 한다.

1) 모멘트력

배관재 OB가 팽창되는 길이가 충분히 클 경우 OA 배관재에 발생시키는 모멘트력의 크기는 다음과 같다.

$$M = (Q_2 - Q_1 \cos\theta) \cdot \ell t \sin\theta$$

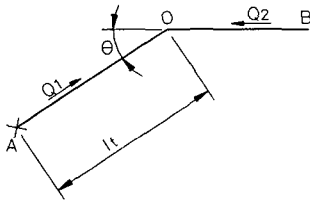
M : A점에 발생하는 Moment

Q₂ : OB 배관재의 열응력

ℓ t : 배관재의 길이

θ : 곡부 각도

Q₁ Cos θ : OA 배관재가 반발하는 힘



<Fig.8> Moment and repulsion

2) 반발력

Q₁이 작용하면 OA 배관길이가 짧은 경우 Q₂에 의해 반발력 Fr이 발생한다.

$$F_r = Q_1 \cos\theta$$

Fr : 반발력, Q : 열응력

$$Q_1 = Q_2 \text{ 이면 } \cos\theta = \frac{F_r}{Q_2} = \frac{F_r}{Q_1} \text{ 이 되므로}$$

$F_r = Q \cos\theta$ 로 표현할 수 있다.

그러나 AB에 작용하는 실제 작용력 Rf는 Fr보다 훨씬 작은 값을 갖게 된다. 그 이유는 배관재 AB에 작용하는 힘은 Q₁-Fr=Q₁(1-Cos θ)이지만 이 힘이 작용하기 위해서는 지점 A에서 Fr이 발생할 수 있는 모멘트력이 발생되어야 하는

데 A점은 허용 모멘트 응력을 초과할 수 없기 때문이다. 따라서 실제 반발력 Rf의 크기는 다음과 같다.

$$R_f = \frac{\sigma_a \cdot Z}{\ell t \cdot \sin\theta}$$

ℓ t : 배관길이

Rf : 반발력

σ_a : 허용휨응력

Z : 강관 단면계수

θ : 곡관부 각도

$$\sigma_a = \frac{M_a}{Z}, \text{ 에서 } M_a = \sigma_a \cdot Z$$

$$M = R_f \cdot \ell t \cdot \sin\theta$$

$$M_a = M \text{ 에서}$$

$$\sigma_a \cdot Z = R_f \cdot \ell t \cdot \sin\theta$$

$$\therefore R_f = \frac{\sigma_a \cdot Z}{\ell t \cdot \sin\theta}$$

3) 반발력으로 인한 신축 변화량

반발력 Rf로 인한 배관 OA의 신축량 감소는 아래와 같다.

$$dL_{rf} = \frac{\sigma_a \cdot Z}{AE \cdot \ell t \cdot \sin\theta} \times \ell$$

ℓ : 배관 OA의 길이

A : 강관 단면적

E : 강관 탄성계수

$$\sigma = \frac{Pl}{AE} \text{ 에서 (축방향 변이)}$$

$$dL_{rf} = \frac{R_f \cdot \ell}{AE} = \frac{\ell}{AE} \cdot \frac{\sigma_a \cdot Z}{\ell t \cdot \sin\theta}$$

$$= \frac{\sigma_a \cdot Z}{AE \cdot \ell t \cdot \sin\theta} \times \ell$$

4) 변위 계산법

각도 θ의 곡부에 길이 ℓ₁, ℓ₂의 Pipe 팽창에 의해 일어나는 실제 변위를 구함.

$$\Delta^2 = \Delta_1^2 + Y^2 = \Delta_2^2 + X^2$$

$$X^2 - Y^2 = \Delta_1^2 - \Delta_2^2$$

$$X = m(DF) + m(FA), Y = \{m(BE) + m(EF)\} / \sin\theta$$

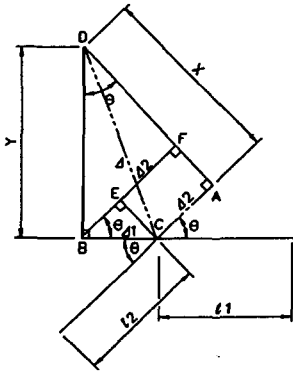
$$m(FA) = \Delta_1 \sin\theta, m(BE) = \Delta_1 \cos\theta$$

$$\begin{aligned}
m(DF) &= \{m(BE) + m(EF)\} / \tan \theta \\
\therefore X &= (\Delta_1 \cos \theta + \Delta_2) / \tan \theta + \Delta_1 \sin \theta \\
&= \Delta_1 \sin \theta + \Delta_2 / \tan \theta + \Delta_1 \sin \theta \\
&= 2\Delta_1 \sin \theta + \Delta_2 / \tan \theta \\
Y &= (\Delta_1 \cos \theta + \Delta_2) / \sin \theta \\
&= \Delta_1 \frac{\cos \theta}{\sin \theta} + \Delta_2 \frac{1}{\sin \theta} \\
X &= 2\Delta_1 \sin \theta + \Delta_2 / \tan \theta \\
Y &= \Delta_1 / \tan \theta + \Delta_2 / \sin \theta \quad \text{이므로}
\end{aligned}$$

실제변위

$$\begin{aligned}
\Delta^2 &= \Delta_1^2 + \frac{(\Delta_1 \cos \theta + \Delta_2)^2}{\sin^2 \theta} \\
&= \frac{\Delta_1^2 \sin^2 \theta}{\sin^2 \theta} + \frac{(\Delta_1 \cos \theta + \Delta_2)^2}{\sin^2 \theta} \\
&= \frac{\Delta_1^2 (1 - \cos^2 \theta)}{\sin^2 \theta} + \frac{(\Delta_1 \cos \theta + \Delta_2)^2}{\sin^2 \theta} \\
&= \frac{1}{\sin^2 \theta} (\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + 2\Delta_1 \Delta_2 \cos \theta) \\
\therefore \Delta &= \frac{1}{\sin^2 \theta} \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + 2\Delta_1 \Delta_2 \cos \theta}
\end{aligned}$$

Δ : 실제 합성 변이
 $\Delta_1 \Delta_2$: 각관의 자유단 팽창길이
 θ : 두관이 이루는 각도



<Fig.9> A method of computation on Bending line

다. L, Z, 오형 배관법

배관내 발생하는 열응력을 배관자체의 탄성을 이용하여 흡수하는 방법으로 곡관을 이용하고 곡관 부위에 배관이 활동할 수 있도록 신축 흡수재를 사용한다.

1) L형 배관법 (L-Bend 법)

$$\begin{aligned}
L_{reg} &= \sqrt{4\sigma_a \cdot R_{min}} \\
&= \sqrt{\frac{2E \cdot d \cdot \delta_a}{\sigma_a}}
\end{aligned}$$

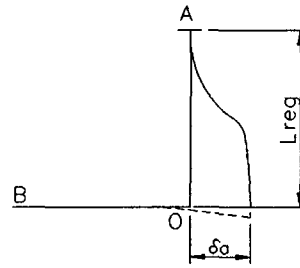
Lreg : 필요한 Moment 팔 길이(Arm Length)

δ_a : 작용부재의 팽창길이(cm)

E : 탄성계수(2.1×10^9 kg/cm²)

d : 강관 외경(cm)

σ_a : 강관 허용응력(900kg/cm²)

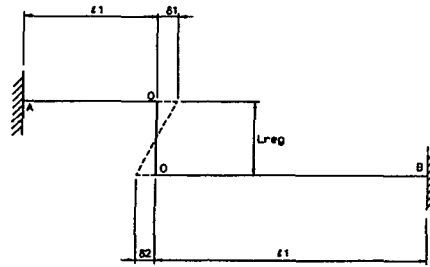


<Fig.10> L type Piping method

2) Z형 배관법 (Z-Bend)

L형 배관법과 동일하지만 작용하는 변이 σ_t 가 각관 OA 와 OB의 신축량의 합이다.

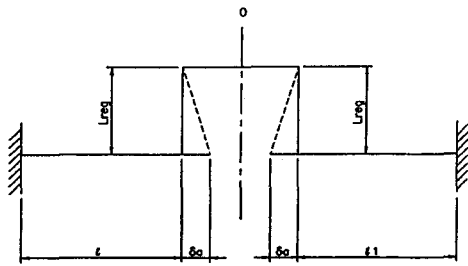
$$\begin{aligned}
L_{reg} &= \sqrt{\frac{2E \cdot d \cdot \delta_t}{\sigma_a}} \\
\delta_t &= \delta_1 + \delta_2
\end{aligned}$$



<Fig.11> Z type Piping method

3) 오형 배관법

L형의 중심선을 경계로 분리하여 L-Bend와 동일하게 적용하되 Moment팔의 길이가 긴쪽을 선택하여 적용한다



<Fig.12> Ω type Piping method

라. 신축 흡수재 (Foam Pad)

신축 흡수재는 곡관부에서 배관이 움직일 수 있는 공간을 마련해 주며 위의 배관법에 따라 계산된 변위량에 따라 신축 흡수재의 사용두께 및 길이를 결정한다

1) 두께

곡부의 변위량을 합성 변위식 또는 도표에 의해 구한 뒤 영구 압축 변형률을 25%로 하여 역수인 4배를 곱함으로써 구한다.

2) 길이

Moment 팔 길이는 곡부 한쪽에 의한 것으로 대표적인 형태는 L형 Bend이다. 만일 Z형 Bend, Ω형 Bend인 경우는 팔 길이가 경우에 따라 2배 또는 4배가 될 수도 있다.

5. 결론

이상에서 알 수 있듯이 지역난방용 매설배관은 지상노출 배관과 달리 토압에 의한 고려가 필요하며 또한 같은 매설배관이라 할지라도 도시가스나 상수도 관과 달리 온도 변화에 따른 배관의 활동 공간을 마련해 주어야 한다. 지역난방용 매설배관(Compensated Method)의 설계시 아래의 사항을 고려함으로써 배관을 파손으로부터 방지할 수 있다.

- 가. 열팽창 및 수축에 따른 팽창량을 설계에 반영하여야 하며 팽창량은 흙의 종류 및 매설 깊이에 따라 발생하는 마찰력에 의해 감소된다.
- 나. 매설위치에 따라 직선배관 혹은 곡선배관을

선택하여야 하며 계산된 팽창량에 따라 그에 합당한 신축흡수 계수 및 곡선배관의 팔 길이를 선정한다.

- 다. 곡선구간에는 신축흡수재를 사용하여 배관이 활동할 수 있는 공간을 마련해 주어야 한다.
- 라. 배관의 팽창량 및 배관법에 따라 그 힘을 받아줄 수 있는 Anchor를 적절한 위치에 설치하여야 한다.
- 마. 탄소강에서의 반복하중과 매설배관에서의 굽힘 모멘트는 무시할 수 있으나 Expansion Joint는 반복하중 견딜 수 있는 강도를 가져야 하며 굽힘 모멘트 및 비틀림에 대한 특별한 장치가 필요하다.

6. 참고 문헌

- 1)小河内美男 “배관공학”, 기전연구사, pp.53~110, 1999
- 2) 한국지역난방공사 “지역난방기술자료 I”, pp.231~243, pp.296~317, 1990
- 3) 에너지관리공단, (주)대우엔지니어링 “강서지역 집단에너지 공급 시설 설치공사 기본 설계서”, pp.222~225, 1991
- 4) 에너지관리공단, 동아엔지니어링(주) “방화2 및 등촌지구 열수송관 설치공사 설계 계산서”, pp.2-3장 1~5, 1993
- 5) 에너지관리공단, 현대엔지니어링(주) “노원지구 집단에너지시설중 열수송배관설비 설치공사 기본 설계서”, pp.6-20~6-41, 1993
- 6) 에너지관리공단, 동아엔지니어링(주) “대전 3,4공단 열수송시설 기본 설계서”, pp.8장 1~11, 1994
- 7) ELECTROWATT-EKONO YO “에너지 운영개선 검토 프로젝트”, 2000
- 8) 광일케미스틸(주)(www.kipe.co.kr) “이중보온관 설계 기술 자료”, pp.5-16, 2001
- 9) 서울시도시개발공사 “집단에너지”, pp.10, 2002
- 10) 에너지관리공단, 벽산엔지니어링(주) “자재시방서”, pp.26, 1999
- 11) 에너지관리공단, 벽산엔지니어링(주) “설계계산서”, pp.22~29, 1999
- 12) 김부동 “응력해석학” 숭례출판사, pp.13-17, 1998