

# 지역난방용 매설배관의 마찰력에 관한 연구

남궁재관\*, 신병국\*\*

## A Study on the Power of Friction on the Underground piping for the District heating

Chai-Kwan Namkoong, Byoung-Kook Shin

### 1. 서론

지하에 매설된 지역난방용 이중보온관은 포피관과 토양사이에서 관이 축방향으로 작용하는 운동에 의하여 마찰력을 일으키며 이 마찰력은 노출배관의 경우에는 구속 없이 자유로운 움직임 가질 수 있으나 매설 배관의 경우 토양에 의한 마찰력으로 인하여 자유로운 운동을 할 수 없으며 길이방향의 신축에 장애를 주게 되므로 배관내에는 압축응력이 작용되고 길이가 길어질 경우 파손에까지 이르게 될 수 있으므로 마찰력에 대한 고려는 아주 중요한 역할을 한다

이와 같은 마찰력 고려에 있어서 중요한 점은 토양의 종류와 구조에 대한 배려로 그에 따른 마찰계수의 적용여부에 따라 마찰력은 변하며 또 배관의 설치거리가 변하게 되므로 배관의 안정성문제 뿐만 아니라 공사비에까지 영향을 미치게 된다.

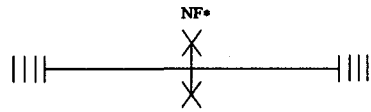
1983년 국내에 지역난방이 처음 도입되면서 수원대학교에서 번역한 독일지역난방협회 AGFA의 “지역난방의 합성수지-결합포피관(Kunststoff-Verbundmantelrohre fuer Fernwarmeleitungen)”<sup>[11]</sup>에서는 마찰계수  $\mu = 0.5$ <sup>[14]</sup>를 적용하고있으나 노원지구 열수송관공사에서는 토양의 종류 및 구조에 관계없이  $\mu = 0.45$ <sup>[9]</sup>를 일괄적으로 적용하고 있어 이에 대한 검토를 통하여 현장여건에 따른 적절한 마찰계수를 적용하고 나아가서 공사를 절감할 수 있는 방안을 검토하는데 목적을 두었다.

### 2. 온도상승에 따른 길이의 변동과 응력

지역난방용 매설배관에서는 배관내 증온수의 온도변화에 따라 배관이 신축을 하게 되며 이배관은 매설 토압과 외관사이에서 발생하는 마찰력에 의해 지상 배관의 신축량에서 마찰력에 의한 신축량이 감소하게 된다. 이러한 마찰력은 매설 배관을 운동 영역과 정지

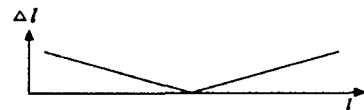
영역으로 나누는데 운동 영역에서는 매설 배관이 토양에서 움직일 수 있으나 정지 영역에서는 온도변화에 따른 변형이 마찰력에 의해 구속됨으로서 변형이 일어나지 않는영역이 발생한다. 다음은 매설 배관에서의 온도 변화에 따른 길이 방향의 변화를 나타낸다.

<Fig.1>은 자연상태의 배관설치도로 온도변화에도 불구하고 그 위치가 변하지 않는 관의 장소를 자연적 고정점(NF)으로 표시한다.



<Fig.1> Piping establishment of natural condition

<Fig.2>는 이론적으로 장애물이 전혀 없을 경우 온도변화에 따른 관길이의 변화를 나타내고 있으며 마찰력이 없으므로 이론적으로 가능한 신장이며 강철관은 축방향의 응력을 받지 않는다.

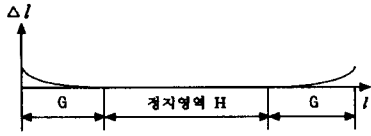


<Fig.2> Length change of the case where the movement of the combination tube will be possible

<Fig.3>은 같은 조건하에서 직접 지중매설된 결합관의 운동상태를 나타내며 관이 움직일 수 있는 운동 부분에서는 길이가 길어짐에 따라 상대적으로 마찰력이 증가한다. 관길이 G 에서의 마찰력은 강철관을 움직일 수 있는 힘과 같아지므로 이 부분부터는 관의 운동이 저항을 받게 된다. 그 이유는 관의 운동을 유발시키는 힘과 운동을 저지하려는 힘이 균형을 이루기 때문이다.

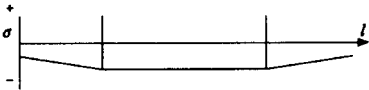
\* 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

\*\* 서울산업대학교 산업대학원 기계설계학과



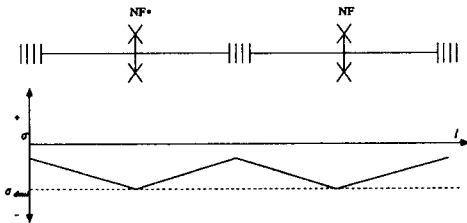
<Fig.3> Directness length change of the condition which is laid in underground

<Fig.4>는 저지된 운동의 결과로 강철편에 발생하는 축방향의 압축응력을 나타낸다.



<Fig.4> Axis direction compressive stress of the steel tube due to rubbing of the PE-tube from in underground

일반적인 경우(T=130℃, St 37-2)에는 축방향의 압축응력에 대한 내구성이 없으므로 발생하는 응력을 충분히 억제하기 위하여 팽창이음간의 관 길이를 축소하여 마찰력이 너무 높아지지 않도록 한다. 이와 같은 경우에는 관에 정지영역이 형성되지 않으므로 운동영역 중 일부만 이용된다. <Fig.5>는 팽창이음간의 관 길이를 축소하여 압축응력을 저하시키는 방법이다.



<Fig.5> Expansion the method which compressive stress abridges the tube length of the for it connects and decreases

### 3. 마찰계수

마찰계수는 서로 접촉하는 표면 상태의 거칠기에 따라 결정되는 상수 값으로 (식1)과 같으며 Moser-Wieland의 실험결과 모래의 경우  $\delta=15^\circ \sim 22^\circ$ , 즉  $\mu = 0.27 \sim 0.40$  이다.

$$\mu = \tan \delta \quad (식1)$$

여기서  $\delta$  : 관벽 마찰각(PE-포피관의 구조와 주변 토양의 조도에 따라 변한다)

$\phi$  : 토양의 내면 마찰각을 나타낸다.

또 관이 늘어나면 토양이 압축되므로 토양역학적 으로 “토양저항문제”로 보고 벽면마찰각을 토양의 내면마찰각과 같다고 보아 강철편의 경우  $\delta = \phi$ 를 적용 하지만 경질 PE관의 경우 강철편 보다 표면이 더 매끄러운 관계로 벽면 마찰각  $\delta = 0.8 \phi$ 를 적용한다. <표.1>은 DIN1055에 의해 산출된 마찰각으로 보통구조의 모래에서  $\mu=0.5$ 를 적용하여 계산함으로써 안전을 기하도록 검토되어 있으나 노원지구 열수송관 공사에서는 보통구조의 모래에서  $\mu=0.45$ 를 적용하도록 계산함으로써 독일규격과의 차이를 나타내고 있다.

Table1. The weight due to DIN1055 and angle of friction production ground.

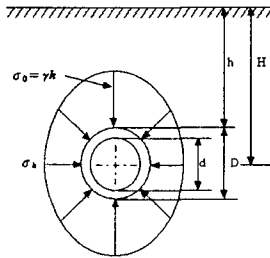
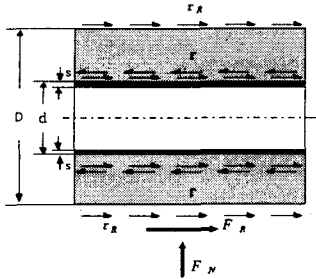
토양종류	성층	산출 중량 습한 토양	PE-포피관의 벽면마찰각 $\delta$ 와 마찰계수 $\mu$		
			마찰각 $\phi$	$\delta=0.8 \phi$	$\mu = \tan \delta$
약간 流砂 좁은간격의 모래, 자갈모래	경조	17.0	30	24	0.45
	보통	18.0	32.5	26	0.49
	조밀	19.0	35	28	0.53
넓은간격의 모래, 자갈모래, 자갈 또는 간헐적 $U < 15$	경조	18.0	30	24	0.45
	보통	19.0	32.5	26	0.49
	조밀	20.0	35	28	0.53
모래, 자갈모래, 자갈, 약간 유력(流砂) 또는 간헐적 $U > 15$	경조	18.0	30	24	0.45
	보통	20.0	32.5	26	0.49
	조밀	22.0	35	28	0.53
무기질 점토 약 소성(適性) $W_L = 35\%$	경조	20.0	27.5	22	0.40
	보통	20.5	27.5	22	0.40
	조밀	21.0	27.5	22	0.40
무기질 점토 약 소성(適性) $35\% < W_L < 50\%$	경조	19.0	22.5	18	0.33
	보통	19.5	22.5	18	0.33
	조밀	20.5	22.5	18	0.33

\*) 상황에 따라 응집력을 고려 할 것

### 4. 마찰력

열 배관 설치 후 온수가 관내에 유입되어 배관이 신축하면 흠과 마찰력을 일으키며 운동을 하게 된다. 이때 발생하는 운동마찰은 통상 정지마찰의 80~90%를 적용하나 지역난방의 경우 대부분 가온 속도가 느리고 길이변화가 완만하므로 정지마찰로 전제한다. 마찰력은 지중에 매설된 배관에서 운동방향의 반대방향으로 발생하며 포피관 둘레에 작용하는 마찰력은 상부 수직력(방사상 압축력)과 마찰계수에 비례한다.

<Fig.6>은 매설배관에 작용하는 각종 힘에 대해 표시하였다.

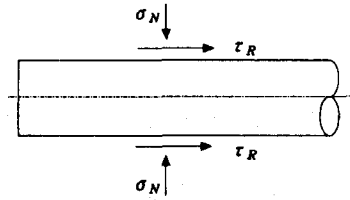


<Fig.6 > The force which operates to the PE-tube

- $F_N$  = 관 1m당 작용하는 수직력
- $F_R$  = 관 1m당 작용하는 마찰력
- $\tau_R$  = 포피관 마찰응력 N/mm<sup>2</sup>
- $\tau$  = 포말과 강철관 사이의 전단응력 N/mm<sup>2</sup>
- H = 배관 중심까지의 깊이
- h = 표피관 외경까지의 깊이
- s = 강철관의 두께
- d = 강철관의 외경
- $\sigma_0$  = 수직응력
- $\sigma_h$  = 수평응력
- D = 표피관 외경

### 5. 포피관의 마찰력

포피관과 토양간의 마찰응력은 Coulomb의 마찰법에 의해 (식2)와 같으며 실질적으로 PE-포피관의 외부와 내부의 방사상 응력은 같으므로 포피관 둘레에 작용하는 수직력  $\sigma_N$ 은 PU-포말 외부의 방사상응력과 동일하다. 또 포피관에 작용하는 고통하중은 짧은 시간에 작용되므로 마찰 계산시 무시할 수 있으며 장시간 작용하는 복토 하중만 고려하여 마찰력을 계산한다.



<Fig.7> Friction force and the vertical force which operate to the PE-tube

$$\tau_R = \mu \cdot \sigma_N \quad (식2)$$

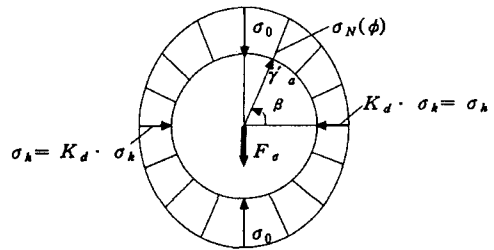
$\mu$  = 마찰계수

$\sigma_N$  = 포피관 둘레에 작용하는 수직력

또한 측면에는 (식3) 및 (식4)와 같은 압력이 작용하며 일반적으로 압축이 충분치 못한 경우에 대비 정압계수율 (표1)의  $\phi=32.5^\circ$  를 적용하면 토양압축율  $K_d = 1 - \sin \phi = 0.463$ 이 되며 일반적인 건설조건에서 0.3~0.5의 값을 가진다.

$$\sigma_h \approx K_d \cdot \sigma_K \quad (식3)$$

$$\sigma_K \approx \gamma \cdot H \quad (식4)$$



<Fig.8> The normal stress distribution which occurs rubbing

$\sigma_k$  = 토압

$\gamma$  = 흙의 비중량

H = 배관 중심까지의 깊이

$K_d$  = 토양의 압축율(0.3~0.5)

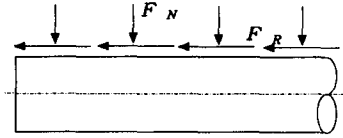
$\sigma_h$  = 수평응력

위의 내용들을 정리하면 <Fig.8>과 같이 간소화시킬 수 있으며 <Fig.8>에서 포피관 둘레에 작용하는 힘  $\sigma_N(\beta)$ 는 (식5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_N(\beta) = \sigma_h + (\sigma_0 - \sigma_h) \cdot \sin \beta \quad (식5)$$

$$0 \leq \beta \leq \pi$$

또 이식을 원주를 따라 적분하면 마찰을 발생시키는 복토타중  $F_N$ 은 (식6)과 같이 관 길이에 따라 산출된다.



<Fig.9> The normal stress distribution which occurs rubbing

$$F_N = 2 \int_0^\pi \sigma_N(\beta) \cdot r_a \cdot d\beta$$

$$= 2 \sigma_h \cdot r_a \cdot \pi + 2 \cdot (\sigma_0 - \sigma_h) \cdot r_a \cdot (-\cos \beta) \Big|_0^\pi$$

$$= 2 \cdot r_a \cdot [\pi \cdot \sigma_h + 2(\sigma_0 - \sigma_h)]$$

$$= 2 \cdot r_a \cdot \gamma \cdot [2h + K_d \cdot H(\pi - 2)] \quad (\text{식6})$$

다시 말해서  $F_N$ 은 배관과 접촉하여 마찰을 일으키는 복토타중이므로 간단히 계산하면 (식7)과 같이 배관과 접촉하는 면적 상부의 흙의 무게로 계산할 수 있다.

$$F_N = D \cdot \gamma \cdot \pi \left( \frac{D}{2} + h \right) (\text{kg/mm}) \quad (\text{식7})$$

또 마찰을 발생시키는 관과 물의 중량을 고려하면  $F_G$ 는 (식8)과 같이 표시할 수 있으며 PUR-포말과 PE-포피관의 중량은 미세하므로 무시하고 (식8)을 관과 물의 중량을 고려한 식으로 간단하게 표현하면 (식9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_G = \pi \left[ (d-s) \cdot s \cdot g \cdot \rho_s + \frac{(d-2s)^2}{4} \cdot g \cdot \rho_w \right] \quad (\text{식8})$$

$$F_G = \pi \left[ \gamma_p \frac{d^2 - d_i^2}{4} + \gamma_w \frac{d_i^2}{4} \right] (\text{kg/mm}) \quad (\text{식9})$$

- $r_a$  = 포피관의 외부 반경
- $d$  = 강철관의 외경
- $s$  = 강철관의 벽 두께
- $g$  = 중력(9.81 m/sec<sup>2</sup>)
- $\rho_s$  = 강철 밀도(  $\rho_s = 7850\text{kg/m}^3$  )
- $\rho_w$  = 물의 밀도(  $\rho_w = 1000\text{kg/m}^3$  )

위 식들을 정리하여 계산하면 관 길이에 따른 마찰력은 (식10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_R = \mu \cdot (F_N + F_G) \quad (\text{식10})$$

- $F_N$  = 외관 (Pe-Jacket)과 토양간의 단위 길이당 마찰력

- $F_G$  = 단위 길이당 자중
- $D$  = 외경 (mm)
- $d_i$  = 강관의 내경 (mm)
- $\gamma$  = 흙의 비중량(kg/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_p$  = 강관의 비중량(  $\gamma_p = 7850\text{kg/m}^3$  )
- $h$  = 매설깊이 (mm)
- $\gamma_w$  = 물의 비중량(  $\gamma_w = 1000\text{kg/m}^3$  )
- $d$  = 강관의 외경 (mm)

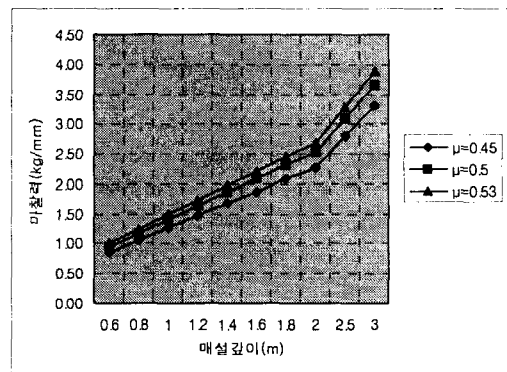
## 6. 데이터 분석

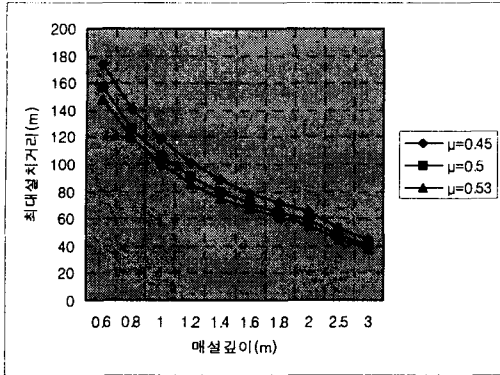
$\mu=0.53$ ,  $\mu=0.5$  및  $\mu=0.45$ 를 적용하여 DN250에 대한 마찰력을 산출해 보고 그에 따른 최대 설치거리를 비교해보면 (Table2) 및 <Fig.10>과 같이 나타남을 알 수 있다.

Table2 The  $F_R$  price which it follows in covering with soil thickness and the maximum establishment distance

$D=400\text{mm}$ ,  $d=267.4\text{mm}$ ,  $\gamma=1.8 \times 10^{-6}\text{kg/mm}^3$ ,  $s=6.5\text{mm}$ ,  $\phi=32.5^\circ$ ,  $A_s=5247.71\text{mm}^2$ ,  $\sigma_a=14.25\text{kg/mm}^2$

h (m)	H (m)	$F_R(\text{kg/mm})$			Lmax(m)		
		$\mu =$			$\mu =$		
		0.45	0.5	0.53	0.45	0.5	0.53
0.6	0.8	0.86	0.95	1.01	173	157	148
0.8	1.0	1.06	1.18	1.25	141	126	119
1.0	1.2	1.26	1.40	1.49	118	106	100
1.2	1.4	1.47	1.63	1.73	101	91	86
1.4	1.6	1.67	1.85	1.97	89	80	75
1.6	1.8	1.87	2.08	2.21	79	71	67
1.8	2.0	2.08	2.31	2.45	71	64	61
2.0	2.2	2.28	2.53	2.68	65	59	55
2.5	2.7	2.79	3.10	3.28	53	48	45
3.0	3.2	3.30	3.66	3.88	45	40	38





<Fig.10> The  $F_R$  price which it follows in covering with soil thickness and the maximum establishment distance

## 7. 결론

이상에서 알 수 있듯이 마찰력은 배관의 설치거리와 안전성에 영향을 주고 또 공사비에 영향을 미치므로 마찰계수의 선정은 안전성과 공사비 절약측면에서 검토 되어져야한다.

1. 배관을 둘러싸고 있는 토양은 배관에 마찰력을 줌으로서 배관의 운동을 억제하고 토양의 종류 및 성상에 따라 마찰력은 변하므로 토양의 종류 및 성상에 따라 적절한 마찰계수를 적용하여야 한다.
2. 중량천과 같은 하천 고수부지는 하천수로인하여 수분을 많이 포함하고 있으므로  $\mu=0.45$ 를 적용함으로써 최대 설치거리를 증가시키고 신축이음관의 설치수량을 줄임으로써 공사비를 절감할 수 있다.
3. 일반적인 도로에서는 배관주위에 모래를 포설한다 하더라도 주변의 토양에 영향을 받을 수밖에 없으므로  $\mu=0.5$ 를 적용함으로써 배관의 안정성을 기할 수 있다.

## 8. 참고 문헌

- 1)小河内美男 1999, Piping engineering, Electromotive research company, pp.53~110
- 2) Korea District Heating Corporation, 1990, District heating technical data I, pp.231~243, pp.296~317,
- 3) Korea Energy Management Corporation, Daewoo Engineering, 1991, Gangseo District massenergy Supply facility Establishment construction basic plan, pp.222~225
- 4) Korea Energy Management Corporation, Dong-A Engineering, 1993, Banghwa2 and Deungchon

District Heating transportation tube establishment constructions Plan bill, Chapter2-3, pp.1~5

- 5) Korea Energy Management Corporation, Hyundai Engineering, 1993, Heating transportation piping equipment establishment construction basic plans while Nowon district massenergy supply facility, pp.6-20~6-41
- 6) Korea Energy Management Corporation, Dong-A Engineering, 1994, Daejeon 3,4 industrial complexes Heating transportation facility basic plans, Chapter8, pp.1~11
- 7) Kwang Il Chemisteel(www.kipe.co.kr), 2001, HDPE-Pipe plan technical data, pp.5-16
- 8) Korea Energy Management Corporation, Byucksan Engineering, 1998, Plan bill, pp.57~77
- 9) Kim Bu Dong, 1998, Stress analytics, Sungrye Publishing company, pp.13~17
- 10) Lee Song, Kim Jong Su, Kang Mounghak, 2002, Theory ground quality, Yeamoon Publishing company, pp.275~277, 451~452
- 11) Korea Energy Management Corporation, Suwon University, 1983, The plastics which it uses from district heating - the combination PE tube, pp1~13