열 수송관로 되메움재의 마찰 특성에 관한 연구

A Study on Friction Characteristics of Backfill Material for Heat Transport Pipeline

김유성¹, 박영준², 조대성^{3*}, 방인황⁴

Kim, You-seong¹, Park, Young-jun², Cho, Dae-seong^{3*}, Bhang, In-hwang⁴

¹Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 561-756, Republic of Korea

²Non-Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 561-756, Republic of Korea

³Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 561-756, Republic of Korea

⁴Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 561-756, Republic of Korea

ABSTRACT

The objective of this paper is to minimize installation length of pipeline and to reduce burial depth for construction by increasing the friction coefficient caused by the interface between backfill material and pipeline. And then, the sufficient friction coefficient shortens the length of expansion joint pipe and gives the life extension of expansion joint absorber for efficient procedure regarding maintenance and administration of construction. The backfill material which is developed in this study has larger and smaller friction angle than that of conventional backfill material (river sand). The backfill material with tire powder provides low friction angle at curved section when pipe diameter increases in size (38% reduction at pipe diameter in 900 mm). When using backfill material with river sand and fly-ash, the mixture mixed with 1.5% fly-ash has 30% and that with 3% fly-ash has 50% reduction effect for minimum installation length of expansion joint pipe.

요 지

이 연구에서는 열 수송관로 직선부에서 마찰계수의 증가를 통해 관로의 최소 설치길이를 감소시켜, 현장 시공 시 매설깊이의 증가를 억제하고, 충분한 마찰력을 제공함으로써 신축이음관의 설치를 줄여 효율적인 시공이 가능토록 함과 동시에, 곡선부에서는 마찰계수의 감소를 통해 신축흡수재의 수명 연장을 도모하여 열 수송관로의 유지관리의 효율성을 향상시키고자 하는 목적으로, 현재 주로 사용되고 있는 되메움재인 강모래보다 큰 내부마찰각을 가진 되메움재와 작은 내부마찰각을 가진 되메움재를 개발하였다. 곡관부에 타이어 분말 혼합 되메움재를 사용할 경우, 관경이 커질수록 신축흡수재에 가해지는 마찰력의 감소 경향은 증가하고 있는 것으로 나타났고, 관경 900mm에서의 마찰력은 약 38% 감소를 보였다. 강모래+fly-ash 혼합 되메움재를 사용할 경우, fly-ash 혼합비 1.5%에서 최소 설치길이의 감소효과는 약 30%, fly-ash 혼합비 3%에서 최소 설치길이의 감소효과는 약 50%로 나타나고 있어, 열 수송관로의 효율적인 시공 및 유지관리가 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : Heat transport pipeline, Friction characteristic, Minimize installation length, Backfill material

1. 서 론

지역난방 수송관로를 통한 열 공급 시, 공급온수의 온도 변화에 따라 지역난방 수송관은 팽창과 수축을 반복하게 되는데, 이 때 발생 되는 열 팽창력은 관로의 관경에 따라 수십에서 수백 톤에 이르게 된다(Lee et al., 1999). 이러한

Received 12 Mar. 2013, Revised 25 Mar. 2013, Accepted 25 Mar. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-63-270-2420; Fax: +82-63-270-2421

E-mail address: sculptart@jbnu.ac.kr (D. S. Cho)

Fig. 1. (a) Expansion joint pipe at curved section, (b) Damage of curved section in pipe

Fig. 2. Relation between stress-displacement by two types of expansion joint

열 팽창력에 의한 관로의 신축을 해소시키지 않는다면 구조적으로 취약한 분기점이나 힘의 방향이 바뀌는 Fig. 1과 같은 밴드 등에 팽창력이나 신축에 의한 변위가 집중되어 변형이나 파손이 일어날 수 있다. 열 팽창력에 의한 신축을 해소하는 방법에는 Fig. 2와 같이 신축을 허용하는 방법과 신축을 억제하는 방법 두 가지로 나눌 수 있다. 신축을 허용하는 방법은 신축이음관(Expansion joint)을 설치하여 관로의 팽창과 수축을 자유롭게 함으로써 열 팽창력에 의한 신축을 해소시키고, 신축을 허용하지 않는 방법은

Fig. 3. Various expansion joint absorbers

Fig. 4. Expansion joint absorbers(foam-pad) in field

되메움재와 관로 표면사이의 마찰력을 이용하여 신축을 억제 시키게 된다(Kim, 2004). 현재 한국지역난방공사에서 열 팽창력에 의한 신축을 해소하는 방법은 지중매설을 통해 신축을 허용하지 않는 방법으로써 신축이 허용되지 않기 위해서는 관로표면과 되메움재 사이의 마찰력과 관로의 열 팽창력이 서로 같거나 관로표면과 되메움재 사이의 마찰력이 더 커야 한다. 열 팽창력이 마찰력과 같아지는 일정거리를 최소 설치길이라 하고, 최소 설치길이 이상 매설하여야 한다. 관로의 설치길이가 최소 설치길이 이하일 경우는 신축이 허용되어 앞에서 논하였듯이 구조적으로 취약한 분기점이나 힘의 방향이 바뀌는 밴드 등에 팽창력이나 신축에 의한 변위가 집중되어 변형이나 파손이 일어난다(Kim et al., 2009). 반대로 Fig. 1(b)와 같이 밴드의 곡관부 표면은 온수의 운동에너지로 인한 곡관부 표면과 되메움재 사이의 마찰로 인하여 변형 및 파손에 이르게 되기 때문에 이 부분에 Fig. 3과 같은 신축흡수재(foam-pad)를 Fig. 4와 같이 설치한다. 그러나 신축흡수재 역시 반복적인 온수의 운동에너지와 그에 따른 신축흡수재 표면과 되메움재 사이의 마찰로 인해 탄력을 잃고 본연의 기능을 상실하기 때문에 결국 곡관부 표면이 파손되거나 변형되기 전에 교체해주어야 한다(Kim, 2011). 이러한 이유로 관로표면과 되메움재 사이의 마찰력은 대한 고려가 매우 중

요하고 이러한 관로표면과 되메움재 사이의 마찰력의 고려에 있어서 가장 중요한 것은 마찰계수(μ)이다. 마찰계수는 관로의 최소 설치거리와 곡관부 표면과 되메움재 사이의 마찰력에 중요한 변수로 작용되어 관로의 안정성 및 공사비, 유지비에도 큰 영향을 주게 된다(Namkoong et al., 2003). 본 연구에서는 기존 되메움재로 사용되고 있는 강모래의 마찰계수보다 높은 마찰계수를 가진 되메움재(직선부)와 낮은 마찰계수를 가진 되메움재(곡관부) 총 두 종류의 되메움재 개발을 위하여 강모래와, 혼화재의 종류와 혼합비 등을 달리한 혼합 되메움재에 대한 마찰특성을 분석하였다.

2. 관로 표면과 되메움재 사이의 마찰력

지역난방을 위한 열이 수송관로에 유입하게 되면 열 수송관로는 팽창을 일으키게 되고, 되메움재는 상대적으로 정지되어 있어 열팽창을 구속하게 되므로 이로 인한 관로 표면과 되메움재 사이에 마찰력이 Fig. 5와 같이 발생하게 된다. 또한 열 수송관로 내에 유입된 열이 유출되게 되면 팽창되었던 열 수송관로는 다시 원래의 길이로 수축하게 되어 Fig. 6과 같은 마찰력이 발생하게 된다.

열 수송관로의 열팽창 또는 열수축으로 발생하는 마찰력은 운동 마찰력으로, 통상 정지마찰력의 80~90%를 적용한다. 그러나 지역난방 수송관로의 경우에는 열의 이동

속도가 느리고 관로의 길이변화가 완만하므로 정지마찰력으로 전제하고, 식 (1)과 같은 Coulomb의 마찰법칙을 통해 구할 수 있다.

$$\tau_f = \mu \cdot \sigma_z \quad (1)$$

식에서, τ_f 는 관로 주변에 작용하는 마찰력, σ_z 는 관로 주변에 작용하는 수직력, μ 는 마찰계수이다.

식 (1)에서의 마찰계수는 통상 식 (2)를 사용하여 구하고, 되메움재 및 지역난방 수송관로의 종류에 따라 변하게 된다.

$$\mu = \tan \delta = \tan (0.8 \phi) \quad (2)$$

식에서, δ 는 관로 표면에서의 마찰각이고, ϕ 는 되메움재의 내부마찰각이다.

3. 지역난방 수송관로의 최소 설치길이

지역난방 수송관로의 온도변화에 따른 길이방향의 변형률은 열에 의한 관의 신축변형률과 탄성력, 마찰력, 관 내부의 압력에 의한 변형의 합으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{(x)} = \varepsilon_t + \varepsilon_{el} = \alpha_t \cdot \Delta T + [N_x / (E_s \times A_s)] \quad (3)$$

식 (3)에서, $\varepsilon_{(x)}$ 는 길이방향의 변형률, ε_t 는 열에 의한 관의 신축변형률, ε_{el} 은 탄성력, 마찰력, 관 내부의 압력에 의한 변형률, α_t 는 열팽창 계수($1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$), ΔT 는 온도차(5°C)= $\text{최고사용온도}(120^{\circ}\text{C}) - \text{최소설치온도}(65^{\circ}\text{C})$, N_x 는 관에 축 방향 작용력(N), E_s 는 관의 탄성계수($2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$), A_s 는 관의 단면적(mm^2)이다. 한편 Fig. 7과 같이 한쪽 끝

Fig. 5. Expansion of pipeline by heat in flow

Fig. 6. Contraction of pipeline by heat out flow

Fig. 7. Force applied to elbow of pipe

에 엘보가 결합된 관에 축방향 작용력(N_x)은 힘의 평형으로 식 (4)와 같다.

$$N_{(x)} = F_P - F_{cl} - F_R(l_0 - x) \quad (4)$$

식 (4)에서, F_P 은 내압에 의한 길이방향 팽창력, F_{cl} 은 측면도압으로 인한 축 방향 반력, F_R 은 단위길이당 마찰력이다.

식 (4)를 고려하면 식 (3)은 식 (5)와 같이 정리된다. 식 (5)를 통해서 알 수 있듯이 온도상승과 내부의 압력은 관의 팽창을, 탄성반력과 마찰력은 관의 수축을 유발하며 두 방향으로 작용하는 힘의 크기가 같다면 변형률 $\varepsilon_{(x)}=0$ 이 되고, 식 (5)를 0으로 하여 길이 l_0 을 구하면 식 (6)과 같이 정리된다.

$$\varepsilon_{(x)} = \alpha_t \cdot \Delta T + \left(\frac{F_P - F_{cl} - F_R(l_0 - x)}{E_s \times A_s} \right) \quad (5)$$

$$l_0 = \frac{(E_s \times A_s \times \alpha_t \times \Delta T) + F_P - F_{cl}}{F_R} = \frac{F_s + F_P - F_{cl}}{F_R} \quad (6)$$

식 (6)에서, F_s 는 온도변화에 의한 내부 작용력이다. 식 (6)은 변형률 $\varepsilon_{(x)}=0$ 인 상태이므로, 충분한 마찰력을 확보하여 열 유입, 유출에 따른 열 수송관로의 신축을 해소하고, 관로 보호와 원활한 열 수송을 위해서는 관의 설치길이가 l_0 이상의 되어야 하고, 이를 최소 설치길이라고 한다. 설치길이가 최소설치길이 l_0 이하일 때는 신축이음관(Expansion joint)을 Fig. 8과 같이 설치하거나 매설깊이를 깊게 하여야 한다. 신축이음관을 설치하거나 매설깊이를 깊게 하면, 자재비 및 시공비가 상승하므로 최소 설치길이 l_0 값은 지역난방을 위한 열 수송관로 시공 시 매우 중요하다. 이러한 최소 설치길이 l_0 는 식 (6)에서 나타나듯이 관 길이에 따른 마찰력 F_R 에 반비례하며 관 길이에 따른 마찰력 F_R 은 식 (7)과 같이 정리된다.

Fig. 8. Installation of expansion joint

$$\begin{aligned} F_R &= \mu \cdot (F_N + F_G) \\ &= \mu[\gamma_s \times Z \times \pi \times D_c(1 + K_0)/2 + G - \gamma_s \times \pi \times (D_o/2)^2] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서, F_R 은 단위길이당 마찰력, μ 는 마찰계수, F_N 은 단위길이당 수직력, F_G 은 열 수송관로 단위길이 당 자중이다. γ_s 는 되메움재의 단위체적중량, Z 는 관 중심에서 지표면까지의 거리, D_c 는 외관 직경, K_0 는 정지토압계수, G 는 내부유체를 포함한 이중보온관의 단위길이 당 중량이다. 결국 마찰계수 값의 상승에 따라 되메움재와 열 수송관로 사이의 마찰력 F_R 값이 비례하여 커지고, F_R 값의 상승은 결국 직선부에서의 최소설치길이 l_0 를 감소시키게 된다(AGFW, 1991).

4. 열 수송관로의 최적 되메움재 개발

본 연구에서는 마찰계수의 상승을 통해 지역난방용 열 수송관로의 직선부 최소 설치길이 감소와 마찰계수의 감소를 통한 신축흡수재의 수명 연장의 목적으로 현재 주로 사용되고 있는 되메움재인 강모래의 내부마찰각보다 큰 내부마찰각을 가진 되메움재와 작은 내부마찰각을 가진 되메움재, 두 종류의 되메움재를 개발하기 위해 강모래에 혼화재를 혼합하여 혼화재 종류와 혼합비, 시험조건 등을 달리하여 내부마찰각의 변화를 검토하였다. 다만, 개발되는 되메움재의 사용이 침하 등 향후 유지관리에 악영향을 끼치지 말아야 한다는 전제조건이 있다.

4.1 강모래의 전단특성

이 연구에서 사용된 강모래는 전북 임실군 오수면에서 채취한 것으로, 지역난방 수송관로 되메움재 외에도 시공 현장에서 다양한 목적으로 사용되고 있다. Table 1은 강모래의 물리적 특성이고, Fig. 9에는 강모래의 입도분포곡선, Fig. 10에는 다짐곡선을 나타내었다.

Table 1. Physical properties of river sand

Specific gravity, G_s	2.646	USCS	SW
Liquid limit, LL	N,P	D_{10}	0.140
Plastic limit, PL	N,P	D_{30}	0.375
Uniformity coefficient, C_u	6.28	D_{50}	0.673
Curvature coefficient, C_c	1.14	D_{60}	0.879

Fig. 9. Particle size distribution of river sand

Fig. 10. Compaction test result of river sand

(a)

(b)

Fig. 11. (a) Direct shear test result of river sand, (b) Failure envelop of river sand

Table 2. Types and Conditions for Tests

Backfill material	Admixture	Mixed content(%)	Admixture	Mixed content(%)
River sand	Tire powder	5.0	Fly-ash	1.0
		10.0		1.5
		12.5		2.0
		15.0		2.5
		16.0		3.0
		17.5		
		20.0		

Fig. 11은 강모래의 직접전단시험결과를 나타낸 것이다. 시험에 사용한 강모래 시료는 수정다짐시험을 통하여 구한 최대건조단위중량(γ_{dmax})과 최적함수비(OMC)에 맞추어 제작하였다. 이 시험조건에서의 강모래의 내부마찰각은 40° 로 나타났다. 이하에서는 강모래에 혼화재를 혼합한 혼합재료에의 내부마찰각의 변화추이를 통해 열수송관로의 최적되메움재에 대해 검토한다. Table 2에 대표적으로 사용한 혼화재와 시험조건을 나타내었다.

4.2 강모래 + 타이어분말 시료의 전단특성

Fig. 12는 강모래+타이어분말 혼합시료의 대표적인 직접전단시험결과를 나타낸 것이다. 시험에 사용한 시료는 강모래100%시료의 최대건조단위중량(γ_{dmax})과 최적함수비(OMC)에 맞추어 제작하였고 혼합비 및 시험결과를 Table 3에 정리하였다.

그림에서 타이어 분말을 5%정도 혼합에 의해 내부마찰각이 13%정도 감소하고 있음을 알 수 있다. 이외의 여러 가지 혼화재료를 시도하였으나, 타이어 분말보다 내부마찰각이 감소되는 혼화재료는 없는 것으로 나타났다. 따라서 이하에서는 타이어 분말 혼화재료에 대해 검토한다. Table 3과 Fig. 13에 의하면 타이어 분말의 혼합비가 15%까지 증가함에 따라 내부마찰각은 거의 직선적으로 감소하여 최대 30% 가량 감소하나, 그 이상이 되면 다시 증가한다. 다시 증가하는 이유는 타이어 분말가루 고유의 마찰각의 영향으로 커지는 것으로 판단된다. 곡관부에 타이어 분말 혼합 되메움재를 사용하면 곡관부의 내부응력 증감

(a)

(b)

Fig. 12. (a) Direct shear test result of mixture with river sand 95% + tire powder 5%, (b) Failure envelop of mixture with river sand 95% + tire powder 5%

Table 3. Mechanical properties of backfill materials with tire powder

Backfill material	Admixture	Mixed content (%)	c (kN/m ²)	φ (°)
River sand	Tire powder	5.0	20	38°
		10.0	38	35°
		12.5	22	33°
		15.0	33	28°
		16.0	29	29°
		17.5	21	32°
		20.0	23	33°

에 따른 표면마찰 증가를 대폭 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 14는 곡관부에 타이어 분말 혼합 되메움재를 사용할 경우 마찰력의 감소 경향을 나타낸 것이다. 관경이 커질수록 마찰력의 감소 경향은 증가하고 있는 것으로 나타나고 있고, 관경 900mm에서의 마찰력은 약 38% 감소를 나타내고 있다. 타이어 분말 혼합 되메움재 대신에 내부마

Fig. 13. Variation of friction angle depend on tire powder mixture ratio

Fig. 14. Comparison of friction angle by tire powder

Fig. 15. Comparison of settlements

찰각이 작은 점토를 사용할 경우에는 Fig. 15~Fig. 16에 보이는 바와 같이 침하량이 타 재료에 비해 커져 이에 비례하여 관에 작용하는 축력도 커지게 되어 열수송관에 악영향을 줄 수 있어 점토의 사용은 곤란할 것으로 판단된다. Fig. 15~Fig. 16은 Fig. 17의 해석단면에 Table 4의 물성치를 사용하여 유한요소해석에 의해 얻어진 이론적 결과이다.

Fig. 16. Comparison of settlement & deformation

Table 4. Physical & mechanical properties

Material	Unit weight (kN/m ³)	Deformation modulus (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
Weathered soil	19.0	4.00×10^3	15.0	35.0
River sand	20.7	3.50×10^3	4.1	39.9
Clay	19.0	1.50×10^3	36.0	26.2
R,S 85% +T,P 15%	17.4	2.78×10^3	32.7	28.4
R,S 97.5% +F,A 2.5%	18.3	3.11×10^3	39.2	55.1

Fig. 17. Cross-section in numerical program

Fig. 18. (a) Direct shear test result of mixture with river sand 97% + fly-ash 3%, (b) Failure envelop of mixture with river sand 97% + fly-ash 3%

4.3 강모래 + Fly-ash 시료의 전단특성

Fig. 18은 강모래+Fly-ash 혼합시료의 대표적인 직접전단 시험결과를 나타낸 것이다. 시험에 사용한 시료는 강모래 100%시료의 최대진조단위중량(γ_{dmax})과 최적함수비(OMC)에 맞추어 제작하였고 혼합비 및 시험결과는 Table 5에 정리하였다. 그림에서 Fly-ash를 3%정도 혼합에 의해 내부 마찰각이 25%정도 증가하고 있음을 알 수 있다. 이외의 여러 가지 혼합재료를 시도하였으나, Fly-ash보다 저렴하

Table 5. Mechanical properties of backfill materials with fly-ash

Backfill material	Admixture	Mixed content (%)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
River sand	Fly-ash	1.0	56	44°
		1.5	88	51°
		2.0	63	54°
		2.5	40	55°
		3.0	14	60°

Fig. 19. Variation of friction angle depend on fly-ash mixture ratio

Fig. 20. Unconfined strength by fly-ash mixture ratio

Fig. 21. Minimum installation length by fly-ash mixture ratio and pipe diameter

고 내부마찰각 증가 효과가 Fly-ash만큼 효율적인 혼화재는 없는 것으로 나타났다. 따라서 이하에서는 Fly-ash 혼합재료에 대해 검토한다. Table 5와 Fig. 19에 의하면 Fly-ash의 혼합비가 증가함에 따라 내부마찰각은 선형적으로 증가한다. 직선부에 Fly-ash 혼합 되메움재를 사용하면 최소 설치길이를 대폭 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

지역난방을 위한 열 수송관로의 유지보수를 용이하게 하기 위해서는 일축압축강도(q_u)는 개략적으로 1000kN/m²이 하일 필요가 있다. Fig. 20에 Fly-ash혼합비에 따른 일축압축강도를 나타내었고, 이 그림에서 Fly-ash의 한계혼합비는 14% 정도로 나타나고 있다. Fig. 21에는 Fly-ash 혼합비에 따른 최소 설치길이의 변화를 나타내었다. Fly-ash 혼합비 1.5%에서 최소 설치길이의 감소효과는 약 30%, Fly-ash 혼합비 3%에서 최소 설치길이의 감소효과는 약 50%로 나타나고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 열 수송관로 직선부에서 마찰계수의 증가를 통해 관로의 최소 설치길이를 감소시켜 현장 시공 시 매설깊이의 증가를 억제하고, 충분한 마찰력을 제공함으로써 신축이음관의 설치를 줄여 효율적인 시공이 가능토록 함과 동시에, 곡선부에서는 마찰계수의 감소를 통해 신축흡수재의 수명 연장을 도모하여 열 수송관로의 유지관리의 효율성을 향상시키고자 하는 목적으로 현재 주로 사용되고 있는 되메움재인 강모래보다 큰 내부마찰각을 가진 되메움재와 작은 내부마찰각을 가진 되메움재를 개발하였다. 개발된 두 종류의 되메움재에 대한 일련의 실험 및 실험결과 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 침하 경향 등의 특성이 강모래에 비해 열악하지 않고, 내부마찰각이 강모래에 비해 작게 도출된 되메움재는 강모래+타이어 분말인 것으로 조사되었고, 혼합비가 증가함에 따라 내부마찰각은 선형비례 감소하는 경향을 보이나, 혼합비 15% 이상이 되면 다시 증가하는 경향을 보인다.
- (2) 곡관부에 타이어 분말 혼합 되메움재를 사용할 경우, 관경이 커질수록 신축흡수재에 가해지는 마찰력의 감소 경향은 증가하고 있는 것으로 나타났고, 관경 900mm에서의 마찰력은 약 38% 감소를 보였다.
- (3) 강모래+Fly-ash 혼합 되메움재를 사용할 경우, Fly-

ash 혼합비 1.5%에서 최소 설치길이의 감소효과는 약 30%, Fly-ash 혼합비 3%에서 최소 설치길이의 감소효과는 약 50%로 나타나고 있어, 열 수송관로의 효율적인 시공 및 유지관리가 가능할 것으로 기대된다.

Acknowledgement

This work was supported by the Power Generation and Electricity Delivery of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Knowledge Economy (No. 20101020200330)

References

1. Arbeitsgemeinschaft für Fernwärme e.V. (1991), *The Plastics which It uses from District Heating-The Combination PE Tube*, Korea District Heating Corporation.
2. Kim, J. H. (2004), "The Relief Method of Thermal Stress induced by Temperature Change of District Heating Water in underground Pre-insulated Pipe", *The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol.2004, pp.224.
3. Kim, J. Y., Kim, H. B., Ko, H. I., An, Y. M., Cho, C. D. (2009), "Design Validation and Improvement of District Heating Pipe Using FE Simulation", *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.33, No.4, pp.337-345.
4. Kim, J. Y. (2011) *A Study on the Reinforced Bends with Transverse Load Carrying Capacity for Pre-Insulated Bonded Pipes in District Heating*, Ph.D. Thesis, Inha University Graduate school.
5. Lee, H., Kim, Y. H. (1999), "District Heating Networks Maintenance", *The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol.1999, pp.59-77.
6. Namkoong, C. K., Shin, B. K. (2003) "A Study on the Power of Friction on the Underground Piping for the District Heating", *Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol.2003, pp.68-72.
1. Arbeitsgemeinschaft für Fernwärme e.V. (1991), *The Plastics which It uses from District Heating-The Combination PE*