

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.337

유한요소 시뮬레이션을 통한 지역난방열배관 특성 평가 및 강화이형관의 제안

김주용* · 김호범* · 고현일** · 안영모** · 조종두†

(2009년 1월 12일 접수, 2009년 2월 6일 수정, 2009년 2월 10일 심사완료)

Design Validation and Improvement of District Heating Pipe Using FE Simulation

Jooyong Kim, Hobum Kim, Hyun Il Ko, Yong Mo An and Chongdu Cho

Key Words: District Heating Pipe(지역난방열배관), Foam Pad(폼패드), Thermal Stress(열응력), FE Simulation(유한요소 시뮬레이션), Reinforced Fitting(강화이형관)

Abstract

This paper investigates the reliability of district heating pipes at thermo-elastic fatigue loading. District heating pipes, subjected to 120°C and 16kg/cm² due to water distributing service through inside the pipes, should endure long term cyclic thermal-mechanical loadings. The heating pipes are the co-centric tubes of steel pipe, poly urethane(PUR) insulator, and high density poly ethylene(HDPE) case. On installation, foam pad is externally wrapped for accommodating stress reduction near the bend sections of pipes. However, there have been frequent reports on the failures of bend sections in the middle of long term service. This study scrutinizes the observed failures near the bend sections through applying the finite element methods. Specially in this study, heating pipes are studied on the influence of foam padding on failures and proposed new designs for reinforced bend without foam pad.

1. 서 론

삼십년 전 국내에 지역난방시스템이 처음 도입된 이후 많은 시공이 이루어졌다. 이 기간 중에는 특히 산업화에 따른 에너지의 효율성이 강조되어 지역난방시스템의 보급은 필수적 이었다. 그러나 지역난방시스템의 열배관 기술 분야는 많이 연구되지 않았으며 국제적으로도 표준화 되어 있지 않다. 국내에서 운용중인 지역난방시스템은 관내의 높은 수온변화 때문에 열팽창력이 발생하며, 이에 따른 열응력을 견딜 수 있는 내하중성

은 시스템의 안전에 있어 매우 중요한 요인이다.

지중매설 열배관에서 열팽창에 대하여 가장 취약한 부위로는 배관의 방향이 전환되는 벤드(bend) 부분이 관찰되고 있다. 벤드 부위에서는 열팽창에 의한 횡방향의 변위가 발생하게 되는데 이에 따른 지반과의 반력을 완화하기 위하여 현재 국내에서는 벤드부위에 신축흡수재인 폼패드(foam pad)를 적용하고 있다. 그러나 반복적인 열팽창력과 지반반력에 의해 일정 시간 경과 시 폼패드가 압착되어 본연의 기능을 상실하게 되며 이에 따라 열배관의 내하중성에 지장을 주는 원인으로 작용하고 있다.

본 연구에서는 지중매설 열배관의 벤드를 중심으로 폼패드 적용 및 배제에 따른 열배관 거동을 유한요소해석을 통해 비교 분석하고 폼패드가 열배관의 내하중성에 미치는 영향을 파악하여 폼패드를 적용하지 않고도 열배관 안정성을 제공할

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 (2008. 5. 29.-30., 충북대) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : cdcho@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7321 FAX : (032)873-9069

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 한국지역난방공사

수 있는 강화이형관을 제안하고자 한다.

2. 매설 열배관 이론

2.1 대상관경의 선정

본 연구에서 대상으로 하는 열배관(이중보온관)의 제원은 '한국지역난방공사 열배관처'에서 출간된 '지역난방 열배관시설 건설업무지침서⁽¹⁾'를 참고 하였으며 해석 모델은 현장에서 시공되는 관경 중 큰 관경에서 두 가지(800A, 400A)와 작은 관경에서 두 가지(200A, 125A)를 선정하였다. 이중보온관의 제원과 각 구성 부품의 재질 및 구조적 특성^(1,2)을 Table 1과 Table 2 에 정리 하였다.

2.2 설치기준에 따른 각종 변수 산출

구조해석의 실행에 앞서 경계조건을 결정하기 위한 사전정보로써 몇 가지 주요변수의 산출이 필요하다.

열배관 벤드 부위의 하중 및 과장된 예상 변형상태를 Fig. 1에 도시 하였다. 열팽창에 의한 토사와의 마찰에 의해 고정되어 열배관의 길이방향 변형이 발생되지 않는 점을 고정점(NFP: Natural Fixed Point)이라하고 고정점에서 벤드 끝단까지 거리를 활동길이이라 할 때 열배관은 열팽창에 의해 점선으로 표시한 것과 같은 변형이 발생하게 되며 벤드 끝단에서 토사에 의한 반력이 발생한다.

2.2.1 단위길이 당 마찰력(F_r)

이중보온관의 단위길이 당 마찰력은 식 (1)로부터 결정된다.

$$F_R = \mu(F'_N + F'_G) \tag{1}$$

$$= \mu[\gamma_s \times 2 \times \pi \times D_C(1 + K_0)/2 + G - \gamma_s \times \pi \times (D_C/2)^2]$$

여기서 F'_N 은 외관에 수직으로 작용하는 단위길이 당 힘, F'_G 는 보온관의 단위길이 당 중량, γ_s 는 토사의 습윤 단취체적중량($\approx 18kN/m^3$), Z 는 관 중심으로부터의 토피까지의 높이($H + D_C/2$), D_C 는 외관의 외경, K_0 는 정지토압계수($= 1 - \sin\phi \approx 0.5$), G 는 내부유체 포함 이중보온관 단위길이 당 중량이다.

Table 1 Dimensions of district heating pipes

		800A	400A	200A	125A
Carrier Pipe	Di (mm)	793.8	393.6	203.5	129.6
	Do (mm)	812.8	406.4	216.3	139.8
PUR thickness (mm)		76.0	67.0	43.75	39.1
Casing Pipe	Di (mm)	964.8	540.4	303.8	218.0
	Do (mm)	1000.0	560.0	315.0	225.0

Table 2 Material properties of pipes

Parts	Material Name	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Thermal exp. Coeff. ($1/^\circ C$)	Allowable Stress (MPa)		
					ten.	comp.	shear
Carrier Pipe	PG38W (SPPS38)	210,000	0.3	1.2×10^{-5}	841	154	-
Insulation	PUR Foam	29	0.31	7.2×10^{-5}	0.42	0.3	0.2
Casing	HDPE	827	0.35	1.8×10^{-4}	17	10.2	-
Soil	soft clay	5~20	0.3	-	-	-	-

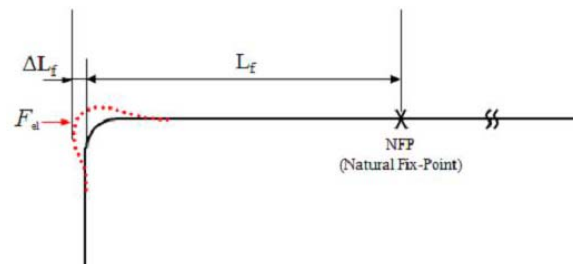


Fig. 1 Pipe characteristics in bend section.

2.2.2 활동길이(L_f)

벤드 끝단에서 고정점까지 거리를 활동길이이라 정의한다. 이중보온관의 활동 길이는 다음의 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.⁽³⁾

$$L_f = \frac{E \cdot A_s \cdot \alpha \cdot \Delta T + F_p(1 - 2\nu) - F_{cl}}{F_R} \tag{2}$$

Table 3 Friction per unit length, friction length, and soil reaction force

	F_r (kN/m)	L_f (m)	F_{cl} (N)
800A	15.095	210	463,330
400A	7.012	148	153,225
200A	3.583	147	78,630
125A	2.437	110	39,327

여기서 E 는 강관의 탄성계수($= 2.1 \times 10^5 N/mm^2$), α 는 강관의 선팽창 계수($= 1.2 \times 10^{-5}/^\circ C$), A_s 는 강관의 단면적($= \pi d \cdot t$), ΔT 는 온도변화량(최대 온도-예열온도: $120^\circ C - 65^\circ C = 55^\circ C$)이다.

일단 단위길이 당 마찰력이 결정되면 지정된 활동길이 L_f 에 따른 토사반력 F_{cl} 을 식 (2)로부터 산출할 수 있다. 상기한 지중매설 열배관의 주요 변수를 본 연구의 주제인 네 가지 관경에 대해 산출하여 Table 3에 정리하였다.

3. 폼패드가 없는 지중매설 열배관의 구조해석

3.1 CAD 작성 및 유한요소 모델 구성

지중매설 열배관의 형상을 구현하기 위하여 열배관 및 열배관이 매설된 토사의 CAD 모델을 제작하였다. 구조해석에는 상용 CAE 툴인 ANSYS Workbench⁽⁴⁾를 사용하였다.

관의 경에 비하여 활동길이가 상대적으로 긴 지중매설관의 특성상 활동길이 전체를 해석에 포함시킬 수 없다. 우선 해석결과의 정확성을 위해서는 유한요소 격자(element)의 크기가 충분히 작아야 하는데, 활동길이 전체를 대상으로 할 경우 이 격자의 수가 무수히 많아져 하드웨어(PC)나 소프트웨어(CAE 툴)가 감당할 수 없고 격자의 수를 줄이기 위해서 격자의 크기를 늘릴 경우, 그 해석 결과의 신뢰도가 낮아지게 된다. 본 해석에서는 이와 같은 제약조건을 고려하여 관심 부위인 밴드 부분을 중심으로 좌우 10m 영역을 대상으로 삼았다. Fig. 2에 본 연구에서 분석할 네 가지 관경의 지중매설 이중보온관의 CAD 모델을, Fig. 3에 유한요소 모델의 구성 예를 도시하였다.

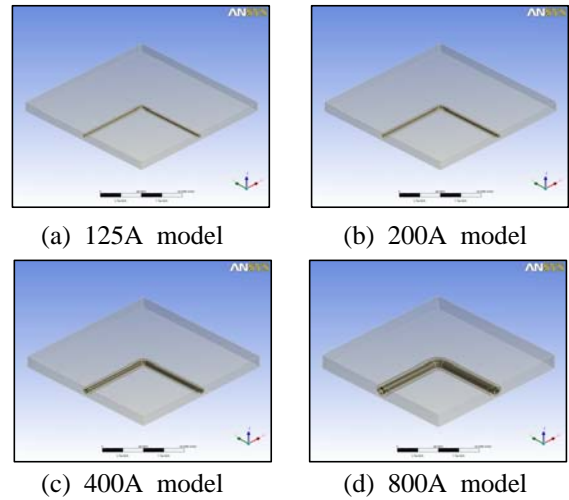


Fig. 2 CAD model (without pad)

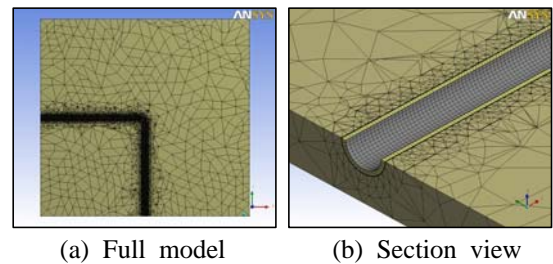


Fig. 3 FE model (without pad)

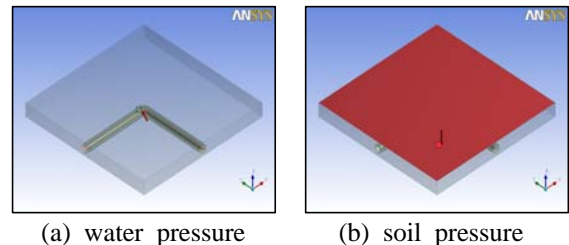


Fig. 4 Applying the water and soil pressure

3.2 경계조건의 결정

지중매설 열배관의 수온 변화에 따른 열팽창 현상을 구현하기 위하여 해석모델에 다음과 같은 하중을 적용하였다.

3.2.1 강관 내압 및 토압

Fig. 4(a)와 같이 강관 내경 표면에 최대 수압 $1.6 kgf/cm^2$ 을 적용하였다. 토압은 관 중심으로부터 토피깊이 Z 에 따라 식 (3)과 같이 결정된다. 토압은 Fig. 4(b)와 같이 토사의 윗면(지면)에서 토사를 누르는 압력의 형태로 적용하였다.

$$\sigma_{soil} = \gamma_s \cdot Z \tag{3}$$

3.2.2 내관 경계면의 축 방향 힘

내관의 경계면에 작용하는 축 방향 힘은 열팽창력, 외관과 토사 간의 마찰력, 그리고 토사 반력에 의하여 산출된다.

활동길이 L_f 를 결정하는 식 (2)를 식 (4)와 같이 변형하여 축 방향 힘을 얻을 수 있다.

$$AE\alpha\Delta T + F_p(1-2\nu) - F_{cl} - \frac{F_r \cdot L_f}{2} = \frac{F_r \cdot L_f}{2} \quad (4)$$

여기서 각 항목은 각기 다른 원인에 의한 힘의 성분으로써 다음과 같이 분류할 수 있다.

- $AE\alpha\Delta T$: 열팽창력
- $F_p(1-2\nu)$: 내압축력
- $-F_{cl}$: 토사반력
- $-\frac{F_r \cdot L_f}{2}$: 마찰력
- $\frac{F_r \cdot L_f}{2}$: 축 방향 신장력

위에 열거한 네 가지 힘 중 내압축력 F_p 는 내압(P)에 의해 발생하는 축력으로서 이미 내압이 적용되었으므로 내관의 경계면에 작용하는 축 방향 힘(N_a)은 이를 보상하여 식 (5)와 같이 변환할 수 있다.

$$N_a = F_{cl} - F_p \quad (5)$$

$$= AE\alpha\Delta T - 2\nu F_p - F_r \cdot L_f$$

$-2\nu F_p$ 항은 내압에 의해 발생하는 반경방향 확장에 따라 발생하는 축 방향 압축력이다. 이것은 벤드에서 먼 고정점(NFP)에 적용되는 내력이므로 그대로 남겨두고 벤드 끝단에서 내압에 의해 발생하는 힘 F_p 를 뺀 값으로 축력 N_a 를 결정하였다. Table 4에 내관 경계면의 환경 별 적용 축력을 정리하였다.

3.3 구조해석 결과

열배관의 안정성 여부를 판단하기 위하여 등가 응력, 주응력, 전단응력 세 가지 관점에서 안전율을 산출하였다. 그 결과 주어진 외력 조건하에서 등가응력과 주응력 기준 내관과 외관에서의 안전율은 모든 환경에서 1.0 이상인 것으로 나왔다.

Table 4 Calculation of axial boundary forces

Size	F_r (kN/m)	$L_f(m)$	$F_p(N)$	$F_{cl}(N)$	$N_a(N)$
800A	15.095	210	775,994	431,956	-344,038
400A	7.012	148	190,786	153,225	-37,561
200A	3.583	147	50,999	78,630	27,631
125A	2.437	110	20,685	39,327	18,642

Table 5 Max. shear stress of without pad model

		800A	400A	200A	125A
Shear Stress of PUR (MPa)	max.	0.38	0.27	0.23	0.21
	allowable	0.20	0.20	0.20	0.20
	F.S	0.53	0.74	0.87	0.95

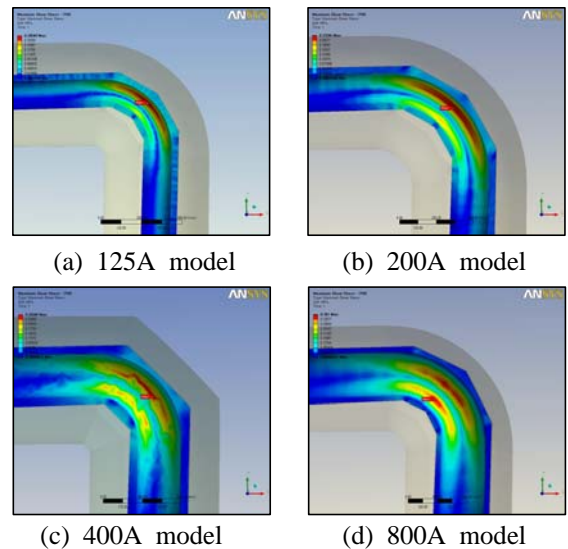


Fig. 5 Shear stress distribution (without pad model)

하지만 전 환경에 걸쳐 전단응력에 의한 PUR 폼의 파손이 예측되었다. Fig. 5는 PUR 폼의 전단응력을 각 환경별로 도시한 것이고 결과 값을 Table 5에 정리하였다.

또한 큰 환경보다 작은 환경일 때 전단응력에 대한 안전율이 올라가는 경향을 보이는데 이는 작은 환경으로 갈수록 전체 열배관에서 내관의 면적 비중이 커지면서 내관의 구조적 역할이 커지기 때문에 나타나는 현상이다.

4. 폼패드를 포함한 지중매설 열배관의 구조해석

4.1 폼패드 특성 분석

폼패드를 포함한 지중매설 이중보온관의 해석에 앞서 실제로 현장에서 이중보온관의 매설에 사용되는 폼패드로 시편을 제작한 후 압축실험을 수행하였다. 폼패드 시편의 압축 전후 모습을 Fig. 6에 도시하였다.

총 5개의 시편으로부터 측정된 평균값을 이용하여 Fig. 7과 같은 폼패드의 응력 변형률 선도를 얻었다, 실험을 통해 얻은 폼패드의 비선형 물성치를 해석 시 폼패드 모델에 적용하여 폼패드의 변형이 실제의 비선형 양상을 잘 반영할 수 있도록 하였다.

4.2 구조해석 결과

3.4절과 마찬가지로 열배관의 안정성 여부를 판단하기 위하여 등가응력, 주응력, 전단응력 세 가지 관점에서 안전율을 산출하였다.

해석 결과 강관과 외관에서는 모든 조건하에 폼패드가 없을 때의 구조해석 결과와 마찬가지로

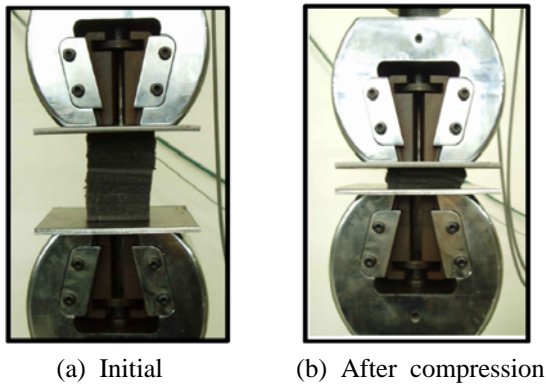


Fig. 6 Compression test of foam pad

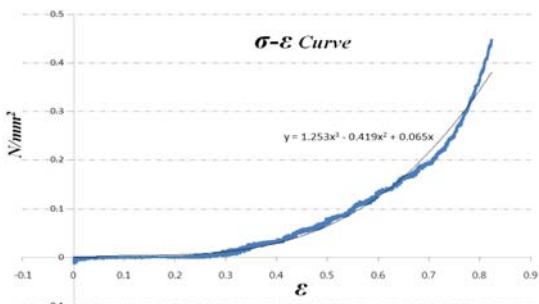


Fig. 7 E-modulus of foam pad

등가응력 및 주응력은 1.0 이상의 안전율이 나왔다. 폼패드 적용의 효과는 PUR 폼의 전단응력 변화로 판단할 수 있다. Fig. 8에 도시한 전단응력 분포와 Table 6에서 정리한 내용에서 알 수 있듯이 폼패드 포함 조건하에 PUR 폼이 받는 전단응력은 폼패드 배제 모델의 해석 결과에 비하여 모든 관경에서 감소하였다.

폼패드가 있는 경우 보온관은 동일 조건 하에서 폼패드를 적용하지 않은 모델보다 말단 변형량이 늘어나게 된다. 비록 변형은 늘어나지만 이에 따른 토사 반력이 감소하기 때문에 보온관이 받는 전체적인 에너지는 감소하게 되고 동시에 보온관의 횡 방향 변형이 시작되는 점이 상대적

Table 6 Max. shear stress comparison between with pad and without pad model

Shear Stress		800A	400A	200A	125A
without pad	max. (MPa)	0.38	0.27	0.23	0.21
	allowable (MPa)	0.20	0.20	0.20	0.20
	F.S.	0.53	0.74	0.87	0.95
with pad	max. (MPa)	0.36	0.22	0.19	0.13
	allowable (MPa)	0.20	0.20	0.20	0.20
	F.S.	0.56	0.91	1.05	1.54
F.S. increasing		5.66%	23.0%	20.7%	62.1%

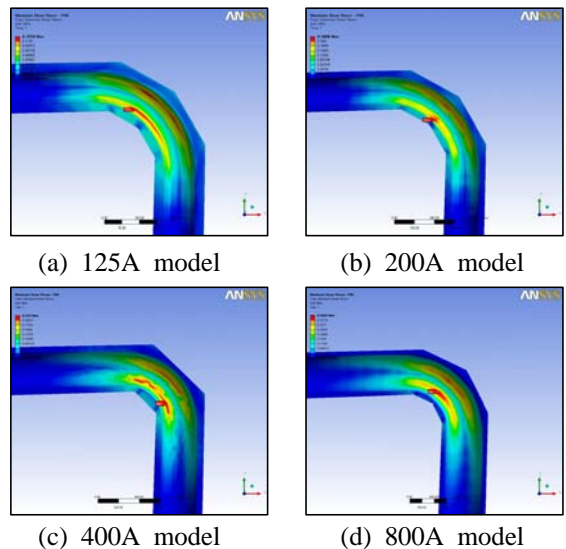


Fig. 8 Shear stress distribution (with pad model)

으로 벤드에서 멀어짐으로써 굴곡의 곡률반경이 커지는 효과를 발휘하여 큰 변형에도 불구하고 벤드부에 발생하는 굽힘 조건이 개선되는 효과를 갖는다. 이로 인해 폼패드를 적용하지 않은 모델에 비해 PUR 폼에 작용하는 전단응력은 감소한다.

5. 강화이형관 개발가능성 검토

벤드나 티와 같은 굴곡부에서 관의 열팽창과 토사와의 반력 사이에서 발생하는 하중을 감소시키기 위한 방법으로 관 주위에 덕트를 시공하는 전통적인 방식으로부터 이중보온관의 외부에 잉여 공간 확보를 위한 또 하나의 관을 추가하는 파이프-인-파이프(pipe-in-pipe)방식, 벤드 등의 굴곡부의 외부를 강관으로 보강하는 방식 그리고 현재의 폼패드 적용 방식 등, 여러 가지 방식의 보강 기법이 활용되어 왔다.⁽⁵⁾

이 장에서는 폼패드를 없애면서도 폼패드 적용 수준 이상의 구조 안정성을 갖는 강화이형관의 개발을 위하여 위에 열거한 기법 이외의 몇 가지 새로운 방안을 제안하고 그 효과를 평가하고자 한다.

5.1 강관 스케줄 변경

PUR 폼의 전단강도 개선을 위하여 강관의 두께를 증가시킨다면 벤드부의 압축응력이 상승되는 대신 이에 따른 효과로 내관 및 외관 사이의 PUR 폼에 작용하는 전단력의 크기가 줄어든다. 이를 감안하여 강관 스케줄 변화를 통한 강화이형관 개발 가능성을 모색할 수 있다.

다수의 KS 규격을 참조하여 배관용 강관의 스케줄에 따른 치수를 조사하고 이 결과를 토대로 Table 7에 본 연구의 대상 환경에 대하여 스케줄에 따른 강관의 치수를 정리하였다.⁽⁶⁾

현재 지역난방공사에서 사용 중인 강관의 모델별 두께는 125A와 200A의 경우 스케줄 20에 해당하며, 400A의 경우 스케줄 10에 해당한다. 800A의 경우 사용 두께는 9.5mm로써 조사한 스케줄 표에서는 찾을 수 없었다. 회색 박스로 표기한 값이 현재 사용 중인 스케줄이다.

기준 스케줄에 대하여 한 단계씩 스케줄을 상승시켜 폼패드를 배제한 3절의 유한요소해석을

Table 7 Thickness due to the pipe schedule

size	thickness (mm)						
	SCH10	SCH20	-	SCH20S	SCH30	SCH40	SCH60
800A	-	-	9.5	12.7	-	17.5	-
400A	6.4	7.9	-	8.0	9.5	12.7	16.7
200A	-	6.4	-	6.5	7.0	8.2	10.3
125A	-	5.1	-	5.0	-	6.6	8.1

Table 8 Factor of safety according to schedule up

	without pad	with pad	without pad + schedule up
800A	0.53	0.56	0.77 (SCH20S)
400A	0.74	0.87	0.91 (SCH20S)
200A	0.87	1.05	1.05 (SCH40)
125A	0.95	1.54	1.43 (SCH60)

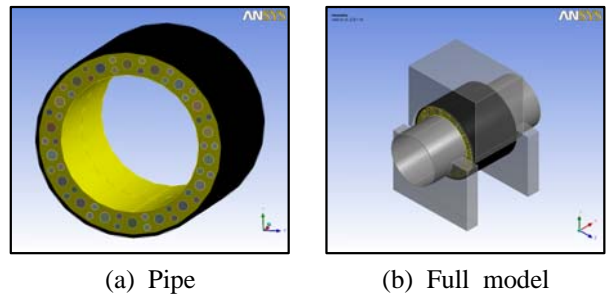


Fig. 9 CAD model of adding sandstone type

반복 수행하고 폼패드를 포함한 현 스케줄 사양의 모델과 유사한 전단강도를 지니는 스케줄을 선정하여 안전율을 비교한 결과를 Table 8에 정리하였다.

5.2 첨가물을 포함한 PUR 폼

PUR 폼의 안정성 강화를 위해 PUR 폼 안에 첨가물을 집어넣어 압축 시물레이션을 수행하여 첨가물이 PUR 에 미치는 영향을 알아보았다. 첨가물이 위치할 보온재의 역할에 가능한 충실하기 위하여 비교적 높은 강성과 낮은 열전도율을 지닌 사암(sandstone)을 선택하였다. 형상은 원기둥 형태로 적용하였으며 Fig. 9에 이를 반영한 CAD

모델을 도시하였다.

동일한 1.0MPa의 압력으로 외관 상단에 압축력을 가했을 때 첨가물 유무에 따른 결과를 비교한 결과, 강관과 외관에 작용하는 응력값은 첨가물에 의해 감소하지만 PUR 폼에 작용하는 최대응력은 오히려 증가하였다. 이는 첨가물 혼입에 따라 PUR폼의 두께가 감소된 부분에서 발생하는 국부적인 응력집중 현상 때문으로 볼 수 있다. 그러나 응력집중이 일어나는 부위를 제외한 위치에서는 강관과 외관의 경우와 마찬가지로 응력이 감소한다. 첨가물에 의한 PUR 폼의 강도 개선 효과는 첨가물의 재질 및 형상 등의 변경에 따라 추가적인 확인이 필요하다. Table 9에 압축하중에 대한 PUR 폼의 최대응력을 정리하였으며 Fig. 10에 PUR 폼의 응력집중 현상을 도시하였다.

5.3 벤드 부 강관 앵커 설치

앞서 Fig. 5에서 본 바와 같이 PUR 폼에 나타나는 전단응력의 흐름을 끊기 위한 직접적인 방법으로써 강관 벤드부 주위에 앵커를 설치하는 방식에 대한 가능성을 검토하였다.

Table 9 Stress comparison between without and with adding sandstone

		PUR		
		WOS	WIS	increasing
max. equivalent stress (MPa)		0.887	1.343	+51.41%
max. principal stress	tensile (MPa)	+0.187	+0.235	+25.66%
	compress. (MPa)	-0.633	-0.696	+9.95%
max. shear stress (MPa)		0.460	0.702	+52.60%

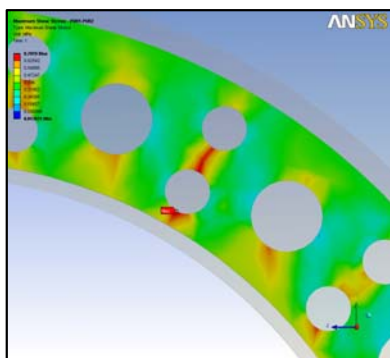


Fig. 10 Shear stress distribution on PUR

앵커 설치는 기존 지역난방 열배관 시설의 내부 강관 벤드부위에만 적용하여 외형상으로는 현사양과 차이가 없으므로 시공방법에 변화가 없다는 장점이 있다. Fig. 11에 제안된 앵커 설치 강관의 개념도를 도시하였다.

해석결과 모든 관경에서 PUR 폼의 전단흐름이 차단됨에 따라 전단안전율 또한 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 800A의 경우 PUR 폼의 최대 전단응력이 0.24MPa로 앵커에 의한 효과가 폼패드를 적용시킨 모델(0.36MPa)보다도 월등히

Table 10 Factor of safety according to anchoring

	without pad	with pad	without pad + anchoring
800A	0.53	0.56	0.83
400A	0.74	0.87	0.95
200A	0.87	1.05	1.11
125A	0.95	1.54	1.43

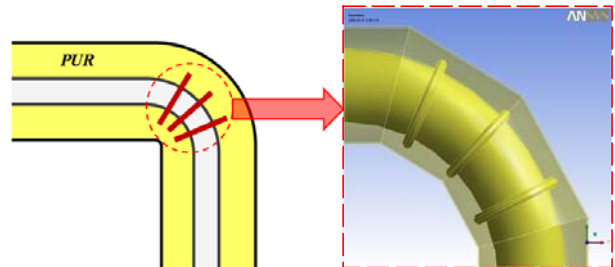
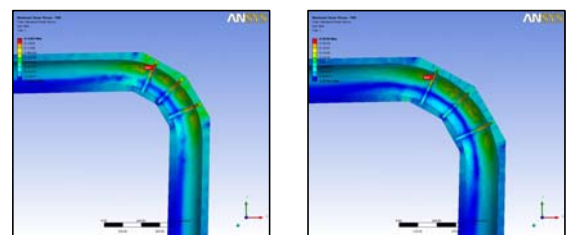
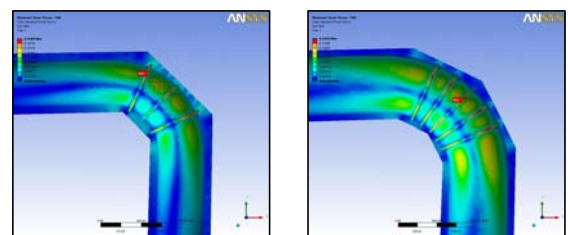


Fig. 11 Conceptual design of anchor model



(a) 125A model

(b) 200A model



(c) 400A model

(d) 800A model

Fig. 12 Shear stress distribution of anchor model

높은 것으로 나타났다.

결과적으로, 폼패드를 배제한 강화이형관의 개발가능성을 검토하는 세 번째 시도로서 열배관 내부 강관에 앵커를 설치하는 기법은 앵커의 직경과 두께, 앵커 개수에 따라 그 절대 값에서 차이를 보이고는 있지만 모든 관경에서 PUR 폼의 전단응력이 낮아지는 성공적인 결과를 보였다. 또한 앵커 설치와 더불어 스케줄 상승을 동시에 적용한다면 전단응력의 감소 효과는 더욱 커질 수 있을 것으로 예상해볼 수 있다.

Fig. 12와 Table 10에 강관 앵커 설치 모델의 결과를 나타내었다.

6. 결과 분석 및 고찰

6.1 폼패드를 배제한 열배관의 구조해석

현 열배관을 폼패드 배제하여 지중매설 할 경우의 해석 결과 가장 취약한 부분은 내관과 외관 사이의 보존재인 PUR 폼이며 모든 관경에서 동일하게 벤드 끝단에서의 전단응력 과다에 의한 파손이 발생할 수 있음을 확인하였다.

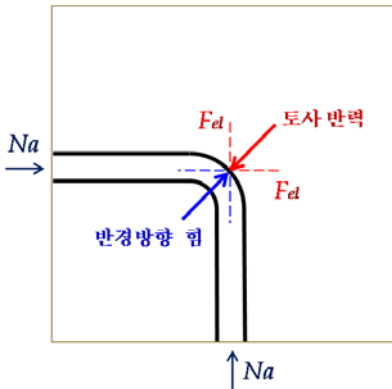


Fig. 13 Acting force in bend zone

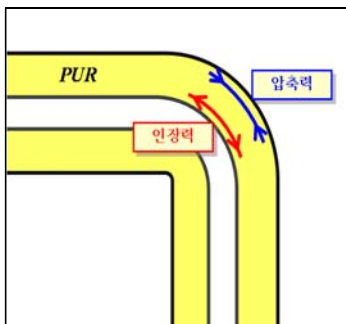


Fig. 14 Operating shear stress in PUR

PUR 폼의 전단응력을 결정하는 힘의 요인은 Fig. 13에 도시한 바와 같이 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 벤드 양 끝단에 작용하는 축 방향 힘의 조합에 의한 반경방향 힘과 벤드 말단에서 토사에 의해 발생하는 토사 반력이다. 이 두 가지 힘에 의해 벤드부에서는 횡방향의 변형이 발생하게 되며 이때 PUR 폼에는 Fig. 14에 도시한 바와 같이 관의 내경부에는 인장력이, 외경부에는 압축력이 작용하여 벤드부에 높은 전단응력이 발생하게 된다.

6.2 폼패드를 포함한 열배관의 구조해석

폼패드의 적용에 따라 PUR 폼의 전단 및 압축 응력은 폼패드를 적용하지 않은 동일 조건에 비하여 현저히 낮아지는 결과를 확인하였다. 이는 토사에 비해 훨씬 낮은 탄성력을 갖는 폼패드의 특성에 의하여 폼패드 적용 시 벤드 말단에 추가적인 변형을 허락함으로써 토양으로부터 전달되는 토사 반력이 낮아지기 때문이다. 결국 폼패드의 적용은 PUR 폼의 전단응력을 상승시키는 주원인인 토사반력을 줄이는 효과를 발휘함으로써 벤드 끝단의 안정성, 특히 PUR 폼의 파손을 방지하기 위한 것으로 판단된다.

6.3 폼패드 배제 강화이형관의 제안

폼패드 없이 폼패드 적용 수준의 안전성을 가지는 지중매설 강화이형관을 개발하기 위하여 다음의 세 가지 기법을 검토하였다.

첫째, 내관의 두께 변화에 따른 강도 개선 효과를 해석을 통하여 분석하였다. 그 결과 내관의 두께 증가에 따라 모든 관경에서 폼패드가 있는 모델 수준의 전단 안전율을 갖는 것을 확인하였다. 다만 큰 관경(400A, 800A)에서는 여전히 PUR 폼의 전단응력이 허용 전단응력을 초과하는 결과를 나타내었다.

둘째, PUR 폼 내부에 첨가물을 삽입하여 압축 강도의 개선 효과를 분석하였다. 그 결과, 동일조건에서 첨가물이 넣었을 경우 내관과 외관에 작용하는 응력을 줄일 수는 있으나 첨가물 부근에서의 국부적 응력집중으로 인하여 오히려 PUR 폼의 파손에 첨가물이 영향을 미칠 수 있다는 결론을 얻었다. 그러나 이는 첨가물의 형태나 종류, 배치 형태, 접촉특성 등에 따라 달라질 수 있으므로 추후 추가적인 검토가 필요하다.

셋째, PUR 폼에 발생하는 전단응력 감소를 위하여 전단흐름을 차단하는 적극적인 방법으로 강관 벤드부 주위에 앵커를 설치하고 이에 의한 효과를 평가하였다. 그 결과 모든 환경에서 PUR 폼의 전단흐름이 앵커에 의해 차단되면서 전단응력이 감소하였다. 이 효과는 앵커의 두께와 직경, 앵커 개수의 변화에 따라 최적화가 가능할 것으로 판단된다. 또한 강관 전체의 두께를 상승시키는 스케줄 변경 기법에 비하여 비용적인 측면에서도 이점을 갖는다.

7. 결 론

본 연구에서는 현재 국내에서 사용 중인 지역난방 열배관의 특성을 파악하고 내하중성이 향상된 강화이형관의 개발 가능성을 검토하기 위하여 CAE를 활용, 다양한 환경을 대상으로 지중매설 이중보온관의 열팽창에 따른 구조해석을 수행하였으며 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지중매설 이중보온관에서 구조적으로 가장 취약한 부위는 벤드부위의 PUR 폼이며 그 주원인은 배관의 열팽창력 및 토사와의 반력에 의해 PUR 폼에 발생하는 전단응력임을 확인하였다.

(2) 폼패드 적용 시 토사 반력을 줄일 수 있고, 이에 따라 PUR 폼에 작용하는 전단응력이 감소됨을 확인하여 폼패드의 역할을 규명하였다.

(3) 장기 사용 시 압착에 의해 원래의 형상을 유지하기 어려운 폼패드의 단점을 보완하기 위하여 폼패드를 배제하면서도 그 이상의 안정성을 보유할 수 있는 대안으로써 ‘강관의 스케줄 변경’, ‘첨가물을 포함한 PUR 폼’, ‘벤드 부 강관 앵커 설치’의 세 가지 기법을 제안하였다.

(4) 제안된 강화이형관은 폼패드가 없이도 PUR 폼에 작용하는 전단응력을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 보임으로써, 폼패드를 배제한 강화이

형관의 개발 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국지역난방공사의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Korea District Heating Corporation, 2003, *A Construction guidebook of District Heating Pipe facilities*, KDHC DH Pipe Network Division, Vol. 2, pp. 225~240.
- (2) Soil Material Property / Young's Soil Modulus <http://www.geotechnicalinfo.com>
- (3) Peter Randlov, 1997, "District Heating Handbook," European District Heating Pipe Manufacturers Association, pp. 131~138.
- (4) ANSYS Workbench Release 11.0, ANSYS Inc., 2007
- (5) Mackenzie-Kennedy, C., 1979, "District Heating Thermal Generation and Distribution," Pergamon Press, pp. 133~154.
- (6) Korean Industrial Standards
 - .KSD 1541: Steel Butt-Welding Pipe Fittings
 - .KSD 1543: Steel Plate Butt-welding Pipe Fittings
 - .KSD 3562: Carbon Steel Pipes for Pressure Service
 - .KSD 3564: Carbon Steel Pipes for High Pressure Service
 - .KSD 3569: Steel Pipes for Low Temperature Service
 - .KSD 3570: Steel Pipes for High Temperature Service
 - .KSD 3573: Alloy Steel Pipes
 - .KSD 3576: Stainless Steel Pipes
 - .KSD 3588: Large Diameter Welded Stainless Steel Pipes