

한계상태 설계법을 이용한 지역난방 열배관의 국부좌굴 연구

김주용* · 이상연* · 고현일** · 조종두*†

* 인하대학교 기계공학과, ** 한국지역난방공사

Study on Local Buckling of District Heating Pipes Using Limit State Design

Jooyong Kim*, Sang-young Lee*, Hyun Il Ko** and Chongdu Cho*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

** District Heating Technology Research Institute, Korea District Heating Corp.

(Received May 10, 2010 ; Revised October 8, 2010 ; Accepted October 12, 2010)

Key Words: District Heating(지역난방), Pre-Insulated Bonded Pipe(이중보온열배관), Pre-Heating(예열), Local Buckling(국부좌굴), Limit State Design(LSD 한계상태 설계법)

초록: 지역난방은 열병합 발전소에서 생산된 열을 온수의 형태로 열배관 네트워크를 통해 넓은 지역에 일괄적으로 공급하는 난방시스템이다. 일반적으로 지역난방 열배관은 지중에 매설되며 내부를 흐르는 온수의 압력과 온도변화, 매설 토사와의 마찰 및 반력에 의한 하중을 받게 되므로 열공급 효율과 함께 기계적인 안전성에 대한 검토가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 강관의 한계상태 설계법을 이용하여 한계판폭두께비와 한계변형률, 두 가지 관점에서 열배관의 국부좌굴 발생여부를 평가하였으며 그 결과 현재 국내에서 사용되고 있는 모든 열배관은 국부좌굴이 발생하지 않음을 확인하였다. 마지막으로 국부좌굴을 피하기 위한 최소 예열온도를 산출함으로써 예열온도에 대한 시공 기준을 제시하였다.

Abstract: The district heating system distributes the heat generated from a cogeneration plant to wider locations. In this process, the district heating pipe (DHP) is subjected to internal and external loadings. The internal loadings are generally caused by the operating conditions such as water temperature and internal pressure. Frictional interactions between the pipes and the soil contribute to the external loadings. Thus, investigation of the mechanisms of failure of DHPs will help to guarantee both mechanical stability and heating efficiency. In this study, we investigate the local buckling of DHPs using limit state design (LSD). Two methods are considered: the use of the limit state for the width-thickness ratio and the use of the limit state for the strain. The results are used to confirm that the DHP is stable under local buckling. Finally, we suggest a minimum preheating temperature for avoiding local buckling.

1. 서론

80년대 초 국내에 처음 도입된 지역난방(district heating)은 아파트나 상업용 건물 등에 사용비용이 개별난방 및 온수공급 시설 대신에 열병합 발전소에서 생산된 열을 온수의 형태로 열배관 네트워크를 통해 넓은 지역에 일괄적으로 공급하는 난방 시스템으로써 비용 뿐 아니라 에너지 및 환경 보존의 관점에서 효율적인 난방시스템이다. 한국지역난방공사에서 시공하는 지중매설용 이중보온열배관(pre-insulated bonded pipe)은 온수가 흐

르는 관 내부로부터 강관(steel carrier pipe)과 보온재역할을 하는 폴리우레탄(polyurethane, PUR) 폼, 고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene, HDPE)으로 구성된 복합관이며 배관 내부를 흐르는 온수의 온도 및 압력, 매설된 토사에 의한 마찰 및 반력 하중을 받게 되므로 시스템의 열공급 특성에 대한 검토와 기계적 안전성에 대한 평가가 동시에 이루어져야 한다.

남궁재관 등⁽¹⁾은 열배관이 매설되는 토사의 종류 및 매설 깊이, 토사의 마찰각, 포피관의 벽면 마찰각에 따라 마찰계수가 달라지며 이에 따른 마찰력을 고려하여 열배관의 최대설치거리를 제안하였다. 공재향 등⁽²⁾은 마찰력의 계산에 있어

† Corresponding Author, cdcho@inha.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

다양한 관경 별 배관의 두께와 토양의 비중량, 매설 깊이에 따른 마찰력을 산출하고 그에 따른 최대설치거리를 산출하는 방법을 제안하였다.

마찰력을 고려한 최대설치거리의 산출 이외에 열배관의 피로수명 문제에 대하여 장윤석 등³⁾은 실제 국내에 매설된 열배관의 10년간 열배관 온도 측정 데이터를 이용하여 공급 온수의 열 사이클(cycle)과 응력, 두 가지 관점을 기반으로 하여 온도변화가 강관의 피로수명에 미치는 영향을 평가하였다.

김주용 등⁴⁾은 최근 논문에서 지역난방열배관의 벤드(bend)와 같은 이형관 부근에서 횡 하중 작용 시 발생하는 반력을 감소시키기 위해 사용하는 신축흡수재의 압착 문제를 해결하기 위해 이를 대체할 수 있는 강화이형관의 개발을 위한 연구로 유한 요소해석을 통하여 강관의 두께 변화 및 전단 고리의 제안 등, 강관의 형상 변경에 따른 강도 개선 효과를 제안하였고, 이에 대한 후속연구로서 최문덕 등⁵⁾은 다구찌 방법을 이용한 전단 고리 형상의 최적화 연구를 수행하였다. 또한 김진만 등⁶⁾은 이중보온열배관의 압축강도 특성 평가 및 되 메움 재료로서 모래의 작용과 역할에 대한 검토 등을 통하여 공학적 특성 및 안전성 평가를 위한 기초 시험을 수행하였다. 그러나 지역난방 사업이 국내에 도입된 후 30년이란 기간이 지났음에도, 현재까지 이중보온열배관 기계적 특성에 대한 연구는 언급한 내용 외에 충분한 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 특히, 토피와 외관의 마찰에 의해 발생하는 축방향하중이 이중보온열배관에 지속적으로 가해질 때 발생할 수 있는 배관의 좌굴발생 가능성에 대한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 이중보온열배관에 작용하는 축방향 하중에 의한 강관의 국부좌굴(local buckling)의 발생 여부에 연구의 초점을 맞추고 이를 판단하기 위해 한계상태 설계법(limit state design, LSD)을 적용하여 두 가지 방법을 통해 그 결과를 평가하였다. 먼저 일반적인 강구조 설계에 있어 강관의 치수에 의해 결정되는 관폭두께비(width-thickness ratio)를 지역난방에 사용되는 각 관경별로 구한 후 한계상태에서의 관폭두께비(limit state for width-thickness ratio)와 비교하여 강관을 콤팩트 단면과 비콤팩트 단면으로 구분하고 이를 통해 국부좌굴 발생여부에 대한 안전성을 평가하였다. 두 번째로는 강관의 평균반경두께비(mean radius-thickness ratio)에 따라 열배관 내

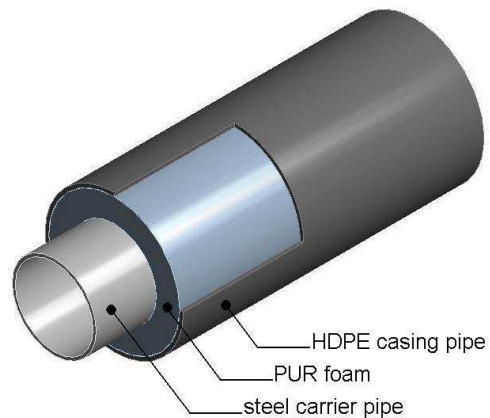


Fig. 1 Pre-insulated bonded pipe

부를 흐르는 온수의 온도차에 의해 결정되는 강관의 변형률을 구하고 이를 한계상태에서의 변형률(limit state for strain)과 비교하여 강관의 국부좌굴 발생여부를 평가하였다. 한계관폭두께비를 이용한 방법이 국부좌굴의 발생여부 평가가 열배관의 작동조건과 무관한 관의 치수에 의해서만 결정되는 반면 한계변형률을 이용한 방법은 강관의 치수와 함께 온도 변화에 의한 영향을 함께 고려함으로써 지중매설 이중보온열배관의 국부좌굴 발생여부를 보다 신뢰성 있게 검토할 수 있다. 특히 현재 국내 지역난방 배관의 매설 시 매설 배관의 열응력을 저감하기 위하여 일반적으로 예열(pre-heating)을 실시하고 있는데, 본 연구에서 이용한 한계변형률 방법을 통해 열배관의 매설 시 예열 온도가 강관의 국부좌굴에 미치는 영향을 평가하여 현장 시공 시 국부좌굴을 피하기 위한 최소 예열온도를 제시하였다.

2. 지중매설 이중보온열배관

2.1 이중보온열배관의 구성 및 특성

이중보온열배관(pre-insulated bonded pipe)은 중공 강관(steel carrier pipe)인 내관을 보온재인 폴리우레탄(polyurethane, PUR)폼이 감싸고 있으며 관의 외곽이 고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene, HDPE) 외관으로 이루어진 복합구조 형태로 구성되어 있다. 일반적인 이중보온열배관의 형태를 Fig. 1에 도시하였다.

강관 내부를 흐르는 온수는 최대 16 kgf/cm²의 압력으로 10~120℃의 온도 변화를 가지며 운송되

기 때문에 내압 뿐 아니라 온도변화에 따른 열팽창력이 형성 된다. 따라서 이중보온열배관에 사용되는 강관의 경우 열팽창력에 따른 내부응력에 견딜 수 있는 재질과 구조로 이루어져 있어야 하며, 보온재인 PUR과 HDPE 외관이 제 기능을 유지하기 위해서는 일체식 거동이 유지되어야 하므로 각 관의 접촉부에서 적절한 기계적 강도(접착 강도, 전단강도)를 가져야 한다.

2.2 대상 관경의 선정

현재 한국지역난방공사에서는 20A부터 900A까지 다양한 크기의 관경을 사용하고 있다. 각 관경별 제원은 ‘한국지역난방공사 열배관처’에서 발간된 ‘지역난방 열배관 시설 건설업무지침서’⁽⁷⁾를 참고하여 Table 1에 나타내었다.

3. 지중매설열배관의 탄성좌굴 평가

임의의 단면을 갖는 부재에 중심압축력 P 가 가해질 때 P 가 충분히 작은 경우에는 부재의 횡방향 변위가 발생하지 않고 길이 방향으로의 압축변위만 존재할 뿐이지만 길이가 길고 두께가 얇은 세장 부재의 경우 한계하중에 도달하면 횡방향으로 큰 처짐이 발생하면서 불안정한 상태가 된다. 부재가 세장비가 커질수록 저항할 수 있는 하중은 작고, 따라서 부재에 생기는 압축응력이 허용치를 넘지 않은 탄성범위 내에서 좌굴이 발생한다. 이러한 현상을 탄성좌굴(elastic buckling)이라 한다.⁽⁸⁾ 이는 구조물의 안전성을 해치는 주요 파괴원인 중 하나이므로 발생 여부에 대한 판단이 매우 중요하다.

탄성좌굴을 일으키는 임계하중은 아래의 식 (1)로부터 결정할 수 있다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{1}$$

여기서 P_{cr} 은 탄성좌굴을 일으키는 임계하중, E 는 부재의 탄성계수, I 는 부재의 관성모멘트이며, K 는 유효좌굴길이계수, L 은 부재의 길이이다. 탄성 좌굴은 부재의 양 끝단이 핀 또는 자유단, 완전 고정 등 어떠한 지지 조건을 가지느냐에 따라 임계하중, 유효길이 및 유효길이 계수가

Table 1 Steel pipe dimensions from KDHC

Nominal diameter A	Outside diameter Do (mm)	Inside diameter Di (mm)	Nominal wall thickness t (mm)
900	914.40	893.80	10.30
850	863.60	843.00	10.30
800	812.80	793.80	9.50
750	762.00	744.60	8.70
700	711.20	693.80	8.70
650	660.40	643.00	8.70
600	609.60	592.20	8.70
550	558.80	541.40	8.70
500	508.00	495.20	6.40
450	457.20	444.40	6.40
400	406.40	393.60	6.40
350	355.60	342.80	6.40
300	318.50	305.70	6.40
250	267.40	254.60	6.40
200	216.30	203.50	6.40
150	165.20	154.20	5.50
125	139.80	129.60	5.10
100	114.30	104.50	4.90
80	89.10	80.10	4.50
65	76.30	67.30	4.50
50	60.50	52.70	3.90
40	48.60	41.20	3.70
32	42.70	35.50	3.60
25	34.00	27.20	3.40
20	27.20	21.40	2.90

변하게 된다. 이중보온열배관의 경우 매설된 토양의 조건을 고려하여 부재의 끝단 조건을 판단하면 회전이 없이 양단이 고정된 고정단-고정단(fixed - fixed) 조건으로 볼 수 있으며 이때의 유효좌굴길이계수는 $K=0.5$ 이므로 식 (1)을 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \tag{2}$$

그러나 일반적인 부재가 양 끝단에서만 압축력을 받고 이 힘이 임계하중에 도달하면 좌굴이 발

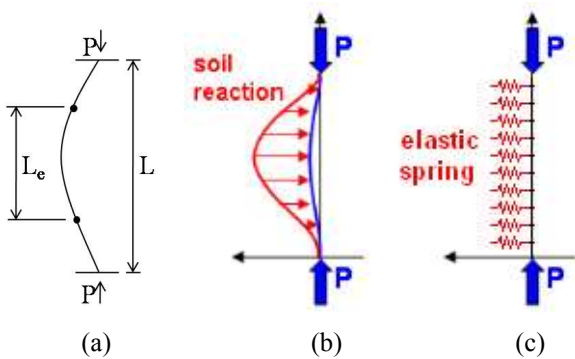


Fig. 2 A schematic view of the load conditions restrained by elastic buckling reaction of the soil

생하는 것(Fig. 2 (a) 참조)과 달리 지중매설열배관은 배관 내부를 흐르는 온수의 압력 및 온도차에 따른 열팽창력과 매설 토사와의 마찰력에 의해 배관 중심방향으로 압축력이 존재함과 동시에 매설된 토사에 의해 열배관의 횡 방향 굽힘 발생을 억제하는 방향으로 배관의 전 구간에서 반력이 발생하게 된다(Fig. 2 (b) 참조). 이는 횡방향으로 탄성부재로 연속 지지되는 축하중의 좌굴해석 문제로 볼 수 있으며(Fig. 2 (c) 참조) 본 연구와 별도로 해석연구를 진행하고 있다.

본 논문에서는 현재까지 매설된 국내 지역난방 이중보온관에서 축하중에 의한 탄성좌굴 발생 보고가 없음을 감안하여 단면에서 발생할 수 있는 국부좌굴로 연구범위를 한정한다.

4. 지중매설열배관의 국부좌굴 평가

3장에서 확인한 바와 같이 지중매설열배관은 그 매설조건에 의거하여 탄성좌굴이 발생할 가능성을 무시할 수 있다. 그러나 일반적으로 압축력을 받는 부재의 두께가 너무 얇아지면 탄성좌굴 이외에 구조물의 일부가 국부적으로 변형을 일으키는 국부좌굴(local buckling)이 발생하여 부재의 압축 내력을 급격히 저하시킬 수 있다. 특히 지중매설 이중보온열배관에서 강관의 국부좌굴은 배관이 지중에 매설되어 있고 강관이 PUR 보온재 및 HDPE 외관으로 감싸인 형태로 가장 안쪽에 위치해 있으며 시공 길이가 매우 길기 때문에 좌굴발생시 그 위치의 발견 및 보수가 어렵기 때문에 국부좌굴을 사전에 방지할 수 있는 설계 및 안전성 검토가 반드시 필요하다.

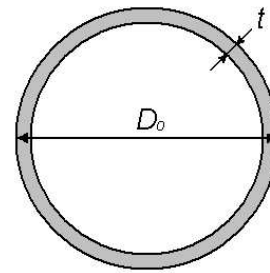


Fig. 3 Symbols for steel pipe

4.1 한계상태 설계법

강구조 설계의 방법 중 하나인 한계상태 설계법(limit state design, LSD)은 기존의 허용응력 설계법이 단순히 항복응력을 안전계수로 나누어 안전율을 결정했던 것과는 달리 하중계수와 저항계수로 구분하여 안전율을 결정하는데 이 과정에서 확률론적 수학적 모델을 사용하여 일관된 신뢰성을 갖도록 유도한 합리적인 강구조 설계법이다.

본 연구에서는 일반적인 강구조의 한계상태 설계법에 근거하여 한계판폭두께비(limit state for width-thickness ratio)와 한계변형률(limit state for strain), 두 가지 방법을 이용, 지중매설 이중보온열배관의 국부좌굴 발생 여부를 평가하였다.

4.2 한계판폭두께비를 고려한 강관의 국부좌굴 평가

일반적으로 강재의 단면은 콤팩트단면, 비콤팩트단면, 세장관요소단면으로 분류할 수 있다. 콤팩트 단면은 탄성좌굴이 생기기 전에 전체 소성응력분포를 받을 수 있고 국부좌굴 발생 전 약 3 정도의 연성비를 갖는다. 비콤팩트단면은 국부좌굴이 발생하기 전에 압축 부재에서 항복응력이 발생 할 수 있으나, 완전소성응력분포를 위해 요구되는 변형값에서, 소성국부좌굴을 저항하지 못한다. 또한 압축세장관부재는 부재가 항복응력에 도달하기 전에 탄성적으로 좌굴한다.⁽⁹⁾ 따라서 지중매설 이중보온열배관의 단면이 콤팩트단면에 속한다면 국부좌굴이 발생할 가능성이 매우 낮다고 판단할 수 있다.

이중보온열배관 강관의 판폭두께비 λ 는 Fig. 3의 단면 형상을 고려하여 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\lambda = D_o/t \tag{3}$$

여기서 D_o 는 강관의 외경, t 는 강관 두께이다.

부재의 단면이 콤팩트나 비콤팩트냐를 구분하는 기준은 한계판폭두께비 λ_p 에 의해 결정된다. 압축을 받는 원형 강관의 한계판폭두께비는 식 (4)와 같이 얻을 수 있다.⁽⁹⁾

$$\lambda_p = 0.07E/\sigma_y \quad (4)$$

여기서 E 는 강관의 탄성계수, σ_y 는 강관의 항복강도이다. 본 연구에서는 현재 지역난방공사에서 사용되는 강관의 재질에 근거하여 $E=210\text{GPa}$, $\sigma_y=154\text{MPa}$ 을 적용하였다. 한계판폭두께비는 부재의 탄성계수 및 허용응력에 의해 결정되므로 모든 관경과 무관하게 동일한 값을 갖는다.

계산된 각 관경별 판폭두께비가 식 (5)를 만족할 경우, 그 관경에서 국부좌굴 발생은 무시할 수 있는 수준이라고 볼 수 있다.

$$\lambda < \lambda_p \quad (5)$$

Table 1에 정리한 지역난방용 이중보온열배관의 각 관경에 대하여 식 (3)을 이용하여 얻은 판폭두께비와 식 (4)를 이용하여 얻은 한계판폭두께비를 Table 2 및 Fig. 4에 도시하였다. 최대 판폭두께비는 관경 900A에서의 87.8, 최소값은 관경 20A에서의 8.4였다. 비교적 큰 관경에서는 판폭두께비가 한계치에 근접하면서 작은 관경에 비하여 상대적으로 국부좌굴에 불리한 조건을 가진다. 이로부터 관경이 커질수록 국부좌굴에 대한 위험성이 커짐을 확인할 수 있다. 그러나 모든 관경에서 부재의 한계판폭두께비인 95.5를 넘지 않으므로 지역난방에 사용하는 모든 관경은 콤팩트단면으로 판단할 수 있으며 이에 따라 압축력에 의한 국부좌굴 발생가능성은 매우 낮다고 판단할 수 있다.

4.3 한계변형률을 고려한 강관의 국부좌굴 평가

한계판폭두께비를 기준으로 할 때 압축력을 받는 부재의 판폭두께비를 산출하여 그 단면형상이 콤팩트단면일 때 부재의 국부좌굴 발생 가능성은 매우 낮다고 판단할 수 있으나 이것만으로는 엄밀히 어느 수준까지 국부좌굴에 대하여 안전성을

Table 2 Width-thickness ratio of DH pipes

Nominal diameter	W-T ratio	limit state for W-T ratio λ_p
A	λ	
900	87.8	95.5
850	82.8	
800	84.6	
750	86.6	
700	80.7	
650	74.9	
600	69.1	
550	63.2	
500	78.4	
450	70.4	
400	62.5	
350	54.6	
300	48.8	
250	40.8	
200	32.8	
150	29.0	
125	26.4	
100	22.3	
80	18.8	
65	16.0	
50	14.5	
40	12.1	
32	10.9	
25	9.0	
20	8.4	

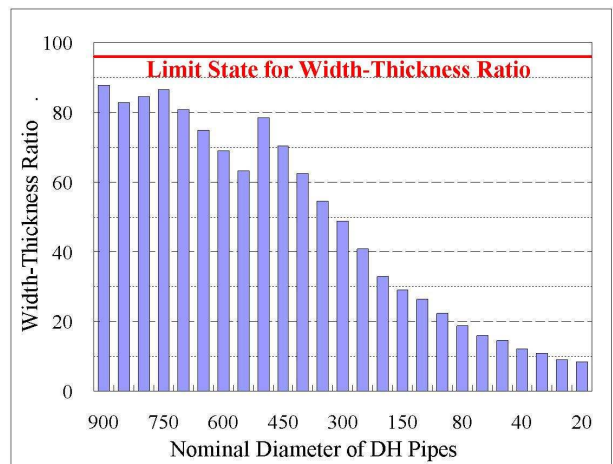


Fig. 4 Width-thickness ratio of pipes

맞는지 결정하기 어렵다. 특히 지중에 매설되는 이중보온열배관의 경우 강관 내부를 흐르는 온수가 공급 여건에 따라 10~120℃의 온도범위를 갖게 되므로 배관의 예열온도와 실제 공급온도에 의해 결정되는 온도차에 의한 열변형이 발생하게 된다.

유럽지역난방배관제작자협회(European District Heating Pipe Manufacturers Association, EuHP)에서는 지중에 매설되는 이중보온관의 국부좌굴 발생 여부를 보다 엄밀히 판단하기 위하여 강관의 형상 정보와 함께 강관 내부를 흐르는 유체의 온도차를 고려한 한계상태에서의 변형률(limit state for strain)을 이용한 평가방법을 제안하고 있다.⁽¹⁰⁾ 이 방법에 따르면 먼저 강관의 평균반경두께비(mean radius-thickness ratio)를 구한 후 현재까지의 보온관 매설 경험을 토대로 대상 평균반경두께비를 두 구간으로 나누어 각각의 구간에서 온도차에 의한 변형률이 한계변형률 이내에 있을 때 그 배관은 국부좌굴이 발생하지 않는다고 판단한다.

식관부에 작용하는 국부좌굴에 있어 변형률을 고려한 한계상태의 식은 평균반경두께비의 구간에 따라 식 (6-1)과 식 (6-2)로 쓸 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$r_m/t \leq 28.7, \Delta\epsilon \leq 0.16\% \quad (6-1)$$

$$r_m > 28.7, \Delta\epsilon \leq (4.58 \frac{t}{r_m} - 0.003)\% \quad (6-2)$$

위 식에서 r_m 은 강관의 평균반경을, ΔT 는 배관 내부를 흐르는 유체의 온도와 예열온도에 의해 발생하는 온도차를 나타내며 $\Delta\epsilon$ 는 온도차에 의한 변형률을 나타낸다. 평균반경 r_m 과 온도차에 의한 열변형률 $\Delta\epsilon$ 는 식 (7) 및 식 (8)에 의해 결정할 수 있다.

$$r_m = (D_o - t)/2 \quad (7)$$

$$\Delta\epsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (8)$$

여기서, α 는 강관의 열팽창계수로 $1.24 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 의 값을 갖는다.

한국지역난방공사에서 이중보온열배관 매설 시 적용하는 예열온도는 65℃이므로 공급온도범위 10~120℃를 고려할 때 최대 온도차 ΔT 는 55℃(120℃-65℃)이므로 산출된 변형률 $\Delta\epsilon$ 는 0.068%

Table 3 Mean radius-thickness ratio and limit state for strain of DH pipes

Nominal diameter A	Mean radius r_m (mm)	Mean radius-thickness ratio r_m/t	Strain (%)	Limit state for strain (%)	
900	452.05	43.89	0.068	$r_m/t > 28.7$	0.104
850	426.65	41.42			0.110
800	401.65	42.28			0.108
750	376.65	43.29			0.105
700	351.25	10.37			0.113
650	325.85	37.45			0.122
600	300.45	34.53			0.132
550	275.05	31.61			0.145
500	250.80	39.19			0.117
450	225.40	35.22			0.130
400	200.00	31.25		0.146	
350	174.60	27.28		$r_m/t \leq 28.7$	0.160
300	156.05	24.38			
250	130.50	20.39			
200	104.95	16.40			
150	79.85	14.52			
125	67.35	13.21			
100	54.70	11.16			
80	42.30	9.40			
65	35.90	7.98			
50	28.30	7.26			
40	22.45	6.07			
32	19.55	5.43			
25	15.30	4.50			
20	12.15	4.19			

이다. 지역난방용 이중보온열배관의 각 환경에 대하여 식 (7)을 이용하여 평균반경두께비를 구하고 이를 식 (6-1) 식(6-2)를 이용하여 한계변형률을 구한 후 비교한 결과를 Table 3에 정리하였다. 예열온도 65℃ 조건을 기준으로 모든 환경의 산출된 변형률은 한계변형률을 넘지 않으므로 국부좌굴이 발생하지 않을 것으로 판단할 수 있다.

5. 예열 온도에 따른 지중매설열배관의 국부좌굴 평가

강관에 작용하는 변형률은 $\Delta\epsilon$ 온도차 ΔT 에 따라 달라진다. 4.3절에서 모든 강관은 국부좌굴의 발생 가능성이 없다고 판단하였으나 이는 예열온도가 65℃일 때의 결과로써 현장에서 매설 환경 및 조건에 따라 예열을 생략하거나 예열온도를 변경하면 한계상태를 만족하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 본 장에서는 예열온도가 4.3절의 한계변형률을 이용한 강관의 국부좌굴 발생 여부에 어떤 변화를 일으키는지 확인하여 지중매설 열배관이 국부좌굴을 일으키지 않기 위해 현장에서 시공 시 필요로 하는 최소 예열온도를 제시하고자 한다.

온도차에 의해 결정되는 강관의 변형률 $\Delta\epsilon$ 가 한계변형률과 같아지면 강관에 국부좌굴이 발생할 수 있으므로 식 (8)로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\Delta T_{max} = \frac{\text{Limit State for Strain}}{\alpha} \quad (9)$$

여기서 ΔT_{max} 는 온수의 최대온도와 강관에 국부좌굴이 일어날 수 있는 최소 예열온도의 차이다. 그러므로 최소 예열온도 $T_{p,min}$ 은 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$T_{p,min} = 120 - \Delta T_{max} \quad (10)$$

Table 3에 열거한 한계변형률과 식 (9) 및 식 (10)을 이용하여 각 관경별 최소 예열온도를 산출하여 Table 4에 정리하였다. 관경이 클수록 최소 예열온도가 높아짐을 알 수 있으며 특히 650A 이상 관경과 500A의 경우 상온 20℃를 기준으로 할 때 적절한 예열 없이 매설할 경우 국부좌굴이 발생할 우려가 있다.

여기서 제시한 최소 예열온도는 지중매설 이중열배관의 직관부에서 강관의 국부좌굴 발생여부만을 고려한 것이다. 예열온도의 변화는 국부좌굴 뿐 아니라 강관의 축응력에도 영향을 끼치며, 특히 벤드(bend)나 티(tee)와 같은 이형관(fitting) 부위의 응력에 큰 영향을 끼치므로⁽⁴⁾ 실제 매설

Table 4 Min. pre-heating temperature of DH pipes

Nominal diameter A	Limit state for strain (%)	Max. temp. variation ΔT_{max} (°C)	Min. pre-heating temp. $T_{p,min}$ (°C)
900	0.104	83.9	36.1
850	0.110	88.9	31.1
800	0.108	87.1	32.9
750	0.105	85.1	34.9
700	0.113	91.2	28.8
650	0.122	98.4	21.6
600	0.132	106.7	13.3
550	0.145	116.6	3.4
500	0.117	94.0	26.0
450	0.130	104.6	15.4
400	0.146	118.0	2.0
350	0.160	129.0	-9
300			
250			
200			
150			
125			
100			
80			
65			
50			
40			
32			
25			
20			

가능 예열온도는 위와 같은 사항을 종합적으로 고려하여 결정할 필요가 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 한국지역난방공사에서 현재 시공 중인 모든 관경의 지중매설 이중보온열배관을 대상으로 직관부의 국부좌굴 발생여부를 분석하

기 위하여 한계상태 설계법을 적용, 한계관폭두께비와 한계변형률을 이용하는 두 가지 방법으로 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 강관의 국부좌굴 발생 가능성을 검토하기 위한 첫 번째 방법으로 일반 압축강관의 한계설계법을 이용, 강관의 관폭두께비를 산출한 결과 모든 관경이 한계상태에서의 관폭두께비 이하의 값을 가지는 콤팩트단면에 해당하여 국부좌굴 발생 가능성이 낮음을 확인하였다.

(2) 지중에 매설되어 관을 통해 온수를 공급하는 지역난방용 열배관의 특성을 고려할 때 강관의 형상특성과 함께 관 내부를 흐르는 온도에 의해 결정되는 열변형을 동시에 고려할 필요가 있으며 이를 위하여 한계상태에서의 열변형률을 고려하여 국부좌굴 발생여부를 평가하였다. 강관의 구조적 특성인 평균반경두께비와 열배관의 사용 온도 범위에 따라 결정되는 열 특성인 열변형률을 동시에 고려하여 한계상태에서의 열변형률과 비교한 결과 현재의 예열온도 65°C 조건에서 전 관경은 국부좌굴이 발생하지 않았다.

(3) 시공 시 열배관의 예열온도에 따라 열배관의 온도변화량이 달라지므로 예열온도가 낮아지면 한계상태 이상의 열변형률이 발생할 우려가 있다. 예열온도에 따른 열변형률을 전 관경에 대하여 산출하여 지중매설 열배관이 국부좌굴을 일으키지 않기 위해 현장에서 시공 시 필요로 하는 최소 예열온도를 제시하였다.

후 기

본 연구는 한국지역난방공사의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Namkoong C.-K. and Shin, B.-K., 2003, "A Study on the Power of Friction on the Underground

Piping for the District Heating," *Proc. of the KSMTE Spring Conference*, pp. 68~72.

(2) Kong, J. H. and Sin, B. K., 2005, "A Study on the Absorption of Thermal Stress on the Underground Piping for the District Heating," *Trans. of the KSMTE*, Vol. 14, No. 1, pp. 81~88.

(3) Chang, Y.-S., Jung, S.-W., Lee, S.-M., Choi, J.-B. and Kim, Y.-J., 2007, "Fatigue Data Acquisition, Evaluation and Optimization of District Heating Pipes," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 2524~2535.

(4) Kim, J., Kim, H., Ko, H. I., An, Y. M. and Cho, C., 2009, "Design Validation and Improvement of District Heating Pipe Using FE Simulation," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 4, pp. 337~345.

(5) Choi, M., Kim, J., Ko, H. I. and Cho, C., 2010, "Shape Design of Bends in District Heating Pipe System by Taguchi Method," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 3, pp. 307~313

(6) Kim, J.-M., Choi, B.-H. and Ko, H.-I., 2009, "The Stability Assessment of Backfill Materials and External Loads in Pre-Insulated District Heating Pipes," *Proc. of the SAREK Summer Conference*, pp. 656~661.

(7) Korea District Heating Corporation, 2003, "A Construction Guidebook of District Heating Pipe Facilities," *KDHC DH Pipe Network Division*, Vol. 2, pp. 225~240.

(8) Gere, J. M., 2001, "Mechanics of Materials," *Brooks/Cole*, CA, pp. 739~814.

(9) Korean Society of Steel Construction, 2009, "KBC 2009 Steel Structure Design," *Goomibook*, Seoul, pp. 128~135.

(10) Randlov, P., 1997, "District Heating Handbook," *European District Heating Pipe Manufacturers Association*, pp. 89~91, 174.