〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.3.307

다구찌 방법을 이용한 지역난방시스템의 벤드형상 설계

최문덕* · 김주용* · 고현일** · 조종두*†
* 인하대학교 기계공학과, ** 한국지역난방공사 지역난방기술연구소

Shape Design of Bends in District Heating Pipe System by Taguchi Method

Moondeok Choi*, Jooyong Kim*, Hyun Il Ko** and Chongdu Cho*†
* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.
** District Heating Technology Research Institute, Korea District Heating Corp.

(Received September 15, 2009 ; Revised January 20, 2010 ; Accepted January 27, 2010)

Key Words: Taguchi Method(다구찌 방법), District Heating Pipe(지역난방열배관), Reinforced Fitting(강화이형관), Shear Ring(전단 고리), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: **본 논문에서는 지역난방에 사용되는 이형관인 벤드(bend)의 형상설계에 대한 연구를 수행하였다. 지역난방관은 강관(내부)과 폴리우레탄 보온재(중앙부) 그리고 고밀도폴리에틸렌 외관(외부)의 3개의 중공관으로 구성되며 일반적으로 10~120℃ 온도범위의 물이 16kgf/cm^2 의 내압을 가지면서 수송된다. 이에 따라 작동 중 발생하는 반복적인 열적-기계적 하중을 지탱할 수 있어야 한다. 보통 지역난방관의 벤드부에는 폼패드라고 부르는 신축흡수재가 덧씌워지는데 이 폼패드의 노후에 따른 문제가 종종 발생한다. 본 논문에서는 벤드부에서의 폼패드 노후 문제를 경감시키기 위한 대안으로 폼패드를 없앤 이중보온관의 형상 설계를 제안하였다. 제안된 설계는 벤드부 강관에 전단고리(shear ring)를 적용하는 방법으로 이때 전단고리의 최적치수는 다구찌 방법과 유한요소법을 적용하여 접근하였다. 그 결과로 전단고리의 두께와 높이, 개수 순으로 최적화 효과가 있음을 확인하였다.**

Abstract: In this study, alternative designs for the bends used in district heating pipes are investigated. The district heating pipes, which are subjected to temperatures of 10 to 120°C and a water pressure of 16 kgf/cm^2, have to withstand thermomechanical cyclic loads when in use. These pipes comprise three concentric tubes: a steel pipe (internal), polyurethane (PUR) insulator (middle), and a high-density polyethylene (HDPE) case (external). In addition, the bends in the district heating pipe system are covered with foam pads that cause aging. In this study, an alternative bend design that does not involve the use of a foam pad is proposed to overcome the aging problem in the bends.. In the proposed design, "shear rings" are added to the surface of a bend, and its dimensions are determined by a combination of the statistical (Taguchi) method and FEM. The geometrical parameters such as thickness, height, and number of the rings significantly affect the design optimization, and hence, they affect the results of the FEM.

1. 서 론

지역난방은 아파트나 상업용 건물 등에 사용비용이 비싼 개별난방 및 온수공급 시설을 설치하는 대신에 저렴한 비용으로 열을 공급할 수 있는 방식이다. 또한 지역난방은 열에너지를 열병합발전소로부터 열배관 네트워크를 통해 공급하므로 에너지와 환경보존의 관점에서 효율적인 난방시스템이다. 국내에서는 1980년 초반 아파트와 같은 집단주거시설이 국내에 본격적으로 보급되기 시작하면서 지역난방시스템이 도입되어 현재까지 많은 지역에 시공되고 있다.

† Corresponding Author, cdcho@inha.ac.kr

한국지역난방공사에서 시공하는 지중매설 열배관은 삼중동심관으로써 중심으로부터 철재 내관(steel carrier pipe), 폴리우레탄 보온용 폼(polyurethane insulation foam), 고밀도 폴리에틸렌 외관(high density polyethylene casing pipe)의 순서로 제작된 다중이종재료 파이프이다.

땅속에 설치된 열배관의 내부에는 계절에 따라 10~120°C 온도의 물이 16kgf/cm^2의 고압으로 공급된다. 사용 시 열배관에는 관을 통하여 흐르는 물의 온도와 매설시 관의 온도(55°C) 간의 차이로 열배관의 길이변화가 생기고 지중의 구속환경으로 인하여 열응력이 분포된다. 따라서 열배관의 장단기 안전성을 검토하기 위하여 내압에 의한 응력과 함께 열응

Table 1 Dimensions of district heating pipe

Size	Carrier Pipe		PUR thickness (mm)	Casing Pipe	
	di (mm)	do (mm)		Di (mm)	Do (mm)
125A	129.6	139.8	39.1	218.0	225.0

력분포를 고려하는 것은 매우 중요하다.

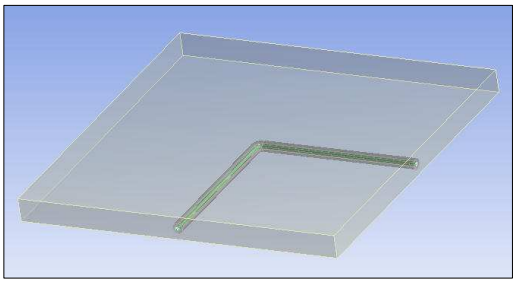
열응력의 분포는 파이프 시스템의 매설형상이 변화되는 벤드(bend)와 같은 부위의 역학적 조건을 악화시킨다. 벤드는 배관을 90° 위상차로 이어서 매립할 때 사용된다. 이러한 벤드부위에서는 직선 배관 구간과는 달리 온도차에 따른 열변형의 횡 방향 변위가 발생하기 때문에 지반과의 반력을 완화시키기 위하여 신축흡수재인 폼패드(foam pad)가 추가적으로 시공되고 있다. 그러나 폼패드는 반복적인 열하중과 지반반력에 의해 시간이 지나면 탄력을 잃고 기능을 상실하므로 결과적으로 열배관의 내하중성에 지장을 주는 원인으로 지적되고 있다.

Kim 등[1]은 최근 논문에서 지중매설 열배관시스템의 벤드부위 폼패드를 시공하지 않는 경우 PUR(polyurethane) 폼 부위에 과도한 전단응력으로 인한 파손발생 가능성을 해석하였고 대안으로 벤드 부위에 발생하는 전단응력을 완화시키기 위하여 관의 진행방향으로 길게 분포하는 전단흐름을 끊는 적극적인 방안으로써 전단 고리(shear ring)의 설치를 제안하였다.

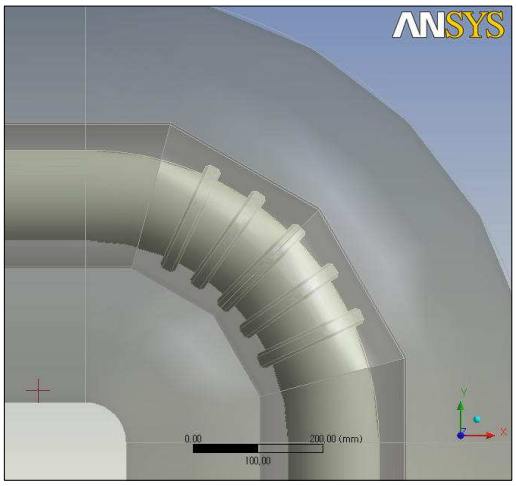
본 연구의 목적은 PUR 폼에 작용하는 전단응력을 가장 작게 형성시키는 최적의 전단 고리 형상 및 크기를 결정하는 것이다. 연구방법으로 다구찌 방법(Taguchi method)을 응용하여 실험계획 모델을 도출하고 각 모델에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

2. 다구찌 방법을 이용한 지중매설 이중 보온관의 실험계획

본 연구에서 다구찌 방법의 목적함수는 손실의 최소화이다. 첫째 다구찌 방법을 이용하여 제품이나 공정의 최적 조건을 결정 하는데 있어서 손실을 줄일 수 있는 여러 인자를 선택하였다. 둘째 각 인자를 직교표(orthogonal table)에 배치하여 각 수준을 계산하고 이를 SN비(Signal-to-Noise ratio)로 표현하여 분석하였다. 결과적으로 손실을



(a) Full model



(b) Bend shape

Fig. 1 CAD model for district heating pipe

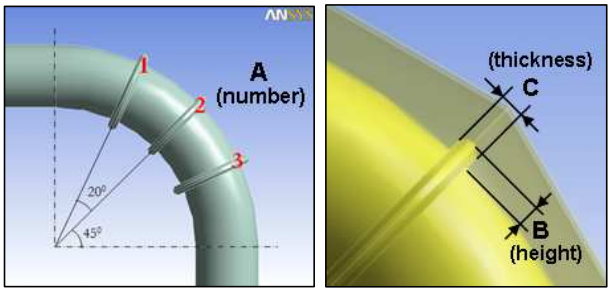
줄이기 위한 각 인자의 영향력이 어느 정도 인지를 분석할 수 있으므로 최종적으로 선택되는 수준이 최적조건이 된다.[2,3] 구체적으로는 현재 시공되고 있는 대표적인 관경 중 표준명칭으로 125A 관경을 선정하여 분석하였고 관의 제원은 '한국지역난공사 열배관처'에서 출간된 '지역난방 열배관시설 건설업무지침서'[4]를 참고하였으며 상세 값은 Table 1에 정리하였다.

Table 1에 정리된 제원을 참고하여 Fig. 1(a)와 같이 3차원 CAD 모델을 구성하였으며 이 중 전단 고리를 포함한 벤드부위의 상세모델링은 Fig. 1(b)와 같다. 다구찌 방법을 이용한 전단 고리의 최적 형상을 찾기 위하여 전단 고리의 개수(A), 높이(B), 두께(C)를 인자로 선정하고 3개의 수준(level)으로 분석을 수행 하였다. Table 2에 선정된 인자의 정의와 수준에 따른 적용 값을 정리하였으며 적용된 형상의 예를 Fig. 2에 도시하였다.

이때 각 인자의 수준에 따른 수치는 기존의 이중보온관의 치수조건 내에서 설치 가능한 값을 고려하여 선정하였다. 따라서 모든 가능한 수준의 조합은 27개이며 필요한 자유도가 2이고 다구

Table 2 Design factors and levels

Factors	Description	Levels		
		1	2	3
A	Number	1	3	5
B	Height(mm)	10.5	14.0	17.5
C	Thickness(mm)	15.0	20.0	25.0



(a) Number (b) Height and thickness

Fig. 2 Factor descriptions

찌 방법에서 가용한 직교좌표가 한정적이므로 4개 인자까지 배열할 수 있는 $L_9(3^4)$ 직교표를 선택하여 3개의 인자(A, B, C)를 배열하고 나머지는 e(empty)로 처리하여 인자를 배열하였다.

Table 3에 배열된 실험조건에 따라 유한요소 해석을 진행하였다. 본 연구에서는 단일인자에 관한 영향만을 고려하므로 각 인자간의 교호작용은 고려하지 않았다.

3. 실험계획에 따른 지중매설 열배관의 구조해석

3.1 해석모델 구성 및 적용물성

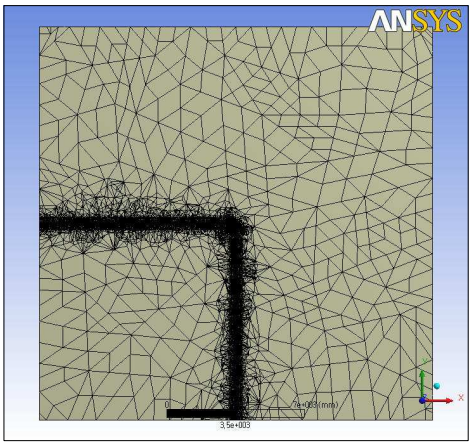
유한요소 해석을 위한 해석모델 및 경계조건은 Kim 등[1]에서 사용된 모델을 기준으로 Fig. 3와 같이 구성하였다. 구조해석을 수행하기 위하여 ANSYS Workbench[5]가 사용되었다. 지중매설 열배관을 구성하는 각 재료의 해석에 적용한 물성[4,6,7]은 Table 4와 5에 정리하였다.

3.2 직교표에 따른 구조해석 결과

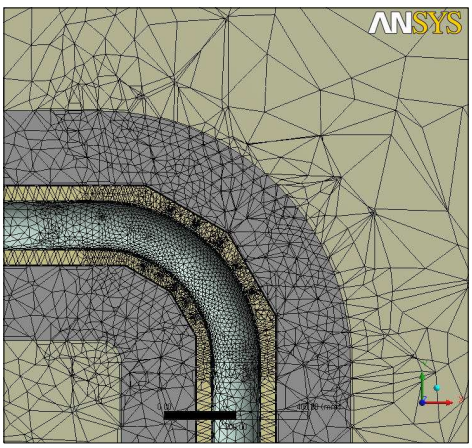
Table 3의 직교표의 조건에 따라 유한요소 해석을 수행하여 등가응력, 주응력, 전단응력을 얻

Table 3 Orthogonal table $L_9(3^4)$ of 125A

No.	A	B	e	C	Experiment Condition
	1	2	3	4	
1	1	1	1	1	A1B1C1
2	1	2	2	2	A1B2C2
3	1	3	3	3	A1B3C3
4	2	1	2	3	A2B1C3
5	2	2	3	1	A2B2C1
6	2	3	1	2	A2B3C2
7	3	1	3	2	A3B1C2
8	3	2	1	3	A3B2C3
9	3	3	2	1	A3B3C1



(a) Full model



(b) Bend shape

Fig. 3 FE model for district heating pipe

Table 4 Material properties of each part

Part	Material Name	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Thermal Expansion Coefficient (1/°C)
Carrier Pipe	PG38W (SPPS38)	210,000	0.3	1.2×10^{-5}
Insulation	PUR	29	0.31	7.2×10^{-5}
Casing	HDPE	827	0.35	1.8×10^{-4}
Soil	soft clay	5~20	0.3	-

Table 5 Allowable stress of each part

Part	Allowable Stress (MPa)		
	tensile	compressive	shear
Carrier Pipe	841	154	-
Insulation	0.42	0.3	0.2
Casing	17	10.2	-

었다. 결과와 재료의 허용응력을 비교하여 각각의 안전율을 계산하면 내관 및 외관의 안전율은 모든 모델에서 고려 대상 응력에 대한 안전율이 충분히 구조적으로 안정된 것으로 판단되었으나 보온재인 PUR 폼의 경우 전단응력이 각 모델에 따라 큰 차이를 보이고 있으며 일부 모델의 경우에는 허용치를 넘어서는 경우가 확인되었다.

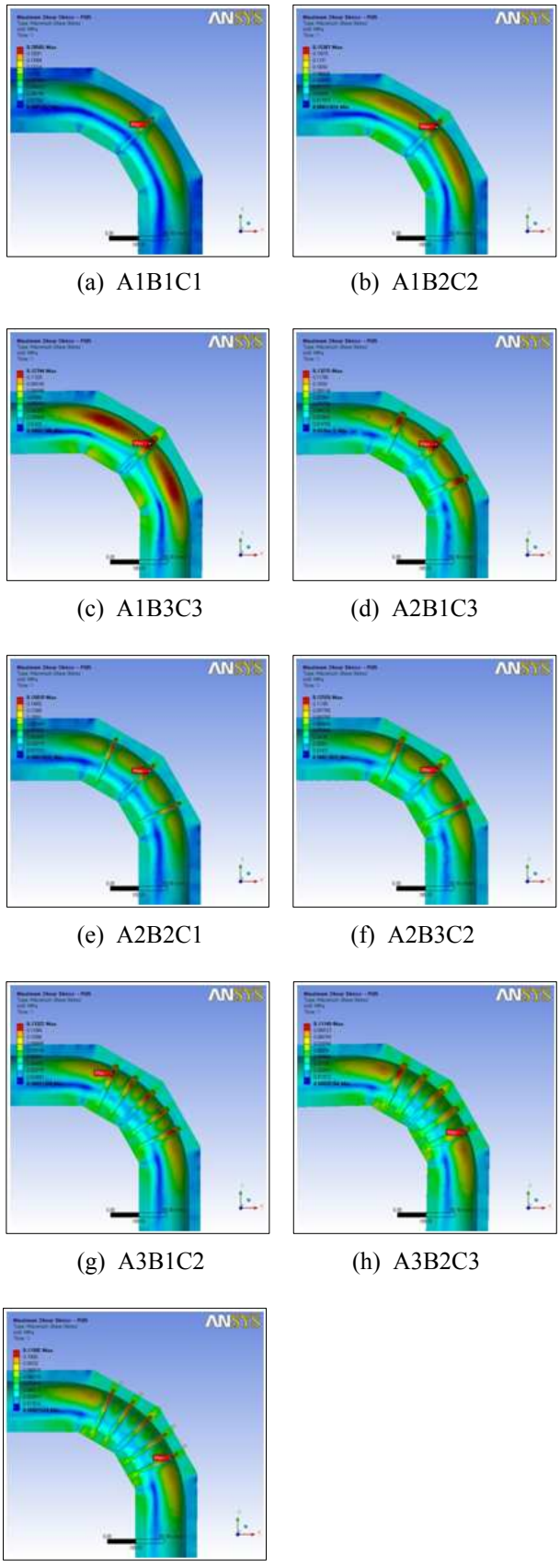
Table 3의 여러 모델에 대한 해석결과로 부터 전단 고리의 개수가 하나이고 그 높이와 두께가 가장 낮은 A1B1C1 모델이 안전율 0.97로 가장 높은 전단응력이 발생하였으며, 전단 고리의 개수가 5개이고 고리의 높이가 가장 크고 두께가 가장 넓은 경우인 A3B2C3이 안전율 1.79로 가장 낮은 전단응력 발생의 결과를 나타내었다.

Fig. 4에는 각 모델 별 PUR 폼의 전단응력을 도시하였으며 Table 6에 PUR 폼의 최대전단응력 및 허용전단응력인 0.2 MPa에 대한 안전율을 정리하였다.

4. 전단 고리 형상 최적화

4.1 SN비를 활용한 전단 고리의 파리미터설계

다구찌 방법에서는 직교표를 이용하여 얻은 데



(a) A1B1C1 (b) A1B2C2

(c) A1B3C3 (d) A2B1C3

(e) A2B2C1 (f) A2B3C2

(g) A3B1C2 (h) A3B2C3

(i) A3B3C1

Fig. 4 Shear stress distribution of PUR foam

Table 6 Experimental layout $L_9(3^4)$ and data collection of 125A

No.	Experiment condition	Max. shear stress of PUR foam (MPa)	Factor of safety	SN ratio
1	A1B1C1	0.20565	0.97	13.74
2	A1B2C2	0.15387	1.30	16.26
3	A1B3C3	0.12744	1.57	17.89
4	A2B1C3	0.13215	1.51	17.58
5	A2B2C1	0.15818	1.26	16.02
6	A2B3C2	0.12559	1.59	18.02
7	A3B1C2	0.13322	1.50	17.51
8	A3B2C3	0.11149	1.79	19.06
9	A3B3C1	0.11992	1.67	18.42

이터를 통하여 SN비로 환산한 후 목표값이 작으면 좋은 망소특성, 목표값이 커질수록 좋은 망대특성, 목표 값이 특정 값에 가까이 접근할수록 좋은 망목특성을 활용하여 분산 분석을 수행하고 최적의 경우를 산출한다.[2,3]

본 연구에서는 지중매설 이중보온관의 구조적 안전성에 큰 영향을 미치는 PUR 폼의 전단응력 최소화가 목적이므로 망소특성을 활용하였다.

4.1.1 SN비의 계산 및 분산분석

망소특성의 경우 SN비를 구하는 과정은 식 (1)과 같이 결정되며 이때 Y_{ij}는 설계변수 행렬의 i번째 실험에서의 j번째 특성 PUR의 최대전단응력 값이고, n은 실험의 반복수이다.

$$\text{SN ratio} = -10\log_{10}[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\overline{Y_{ij}^2}] \qquad (1)$$

본 연구에서는 유한요소 해석을 통한 실험이므로 실험의 반복이 무의미하여 n=1로 놓았다. 식 (1)을 통하여 각각의 인자와 수준에 따른 SN비를 계산하여 Table 7에 정리한 후 인자의 수준별 합계와 변동(sum of squares)을 계산하였다. 식(2)를 통하여 얻을 수 있는 기여율(ρ)은 총 변동(St)에 대한 각 인자의 변동(Sa)이며 이를 이용하여 구한 기여율을 구하여 Table 7에 정리하였으며 각 인자의 레벨에

Table 7 Factors and SN ratio response table

Placement factor		A (number)	B (height)	C (thickness)	Sum.
SN ratio	Level 1	15.96	16.27	16.06	154.5
	Level 2	17.21	17.11	17.26	
	Level 3	18.33	18.11	18.18	
Sum of squares		0.9337	0.5642	0.7517	2,250
Contribution		41.51	25.08	33.41	100

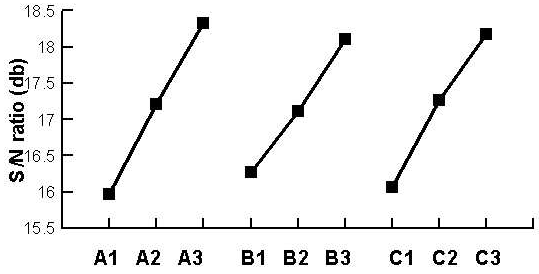


Fig. 5 Influential factors Vs. SN ratio

따른 주 효과 분석 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

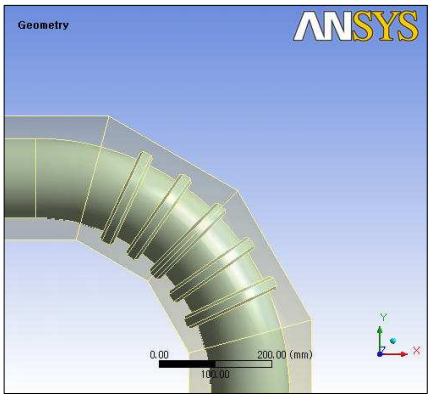
$$\rho = \frac{S_A}{S_T} \times 100 \qquad (2)$$

각 인자에 대한 기여율을 살펴보면 A(개수)가 41.5%, B(높이)가 25.1%, C(두께)가 33.4%의 기여율을 나타내었다. 고려한 모든 인자가 개수 및 크기가 커짐에 따라 효과가 증대하는 방향으로 나타났지만 세 가지 인자 중에서 PUR 폼의 최대전단응력을 줄이는데 있어 가장 큰 영향을 끼치는 요인은 전단 고리의 개수임을 알 수 있었고 개수, 두께, 높이의 순으로 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

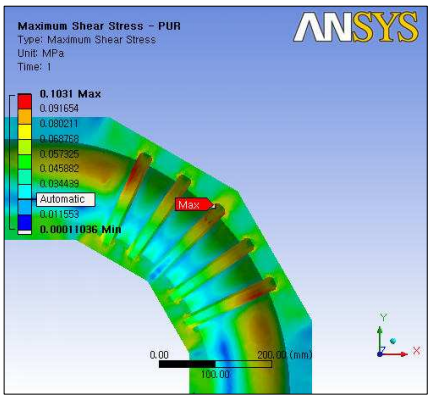
4.1.2 분산 분석을 통한 최적 모델의 SN비

SN비를 토대로 한 분산분석을 통해 전단 고리의 개수(A), 높이(B) 및 두께(C) 모두 PUR 폼의 최대전단응력을 줄이는 데 있어 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었으며, 전단응력이 최대로 줄어드는 조건은 Table 2에 제시된 각 인자들이 모두 레벨3 수준이 되는 A3B3C3 조건(개수 5개, 높이 17.5mm, 두께 25.0mm)임을 확인하였다.

최적 조건하의 SN비에 대한 예측 값을 식 (3)



(a) Shear ring shape



(b) Shear stress

Fig. 6 Shear stress distribution of PUR foam of the optimum design(A3B3C3)

을 통하여 구할 수 있다.

$$\widehat{\mu_{SN_0}} = \overline{A_3} + \overline{B_3} + \overline{C_3} - 2\overline{T} \quad (3)$$

식 (3)에서 A3와 B3, C3는 각각 Table 7에 나타낸 각 인자의 최적수준 시 SN비이며 T는 Table 6에 나타낸 각 실험조건들의 SN비의 산술평균값이다. 이를 통하여 구한 최적 모델의 예측 SN비는 약 20.29가 되어 이를 전단응력의 값으로 환산하면 최적 모델의 예상 전단응력은 96.76 kPa이 된다.

4.2 최적 모델의 구조해석 및 결과 비교

다구찌 방법을 이용하여 얻은 최적의 전단 고리 형상 모델의 적용 결과를 확인하기 위하여 최적 조건인 A3B3C3에 대한 모델링 및 구조해석을 추가로 수행하였으며 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다.

최적 모델의 구조해석 결과로 산출된 PUR 폼의 최대전단응력은 103.1 kPa이며 SN비는 19.73으로 앞서 수행한 9가지 실험모델에 비하여 추가적인 전단응력 저감이 이루어졌으며 예측치인 96.76 kPa에 대하여 약 6.6%의 오차율을 가지는 것으로 나타나 다구찌 방법을 통한 최적화 및 구조해석 모델의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

Table 8 Comparison of maximum shear stress of PUR foam in bend

Bend type	Max. shear stress of PUR foam (MPa)	Imp. ratio (%)
In-use bend with foam pad	0.13	-
Proposed bend of shear ring without foam pad	0.10	-23.1

4.3 기존 벤드와의 안정성 비교

기존의 지중매설 이중보온관은 벤드부의 열팽창에 의한 횡 방향 하중을 저감시키기 위하여 벤드부에 신축흡수재인 폼패드(foam pad)를 겹쳐 감아 열팽창 발생 시 토사와의 반력을 저감시키는 원리를 사용하고 있다. 그러나 시공 후 관에 공급되는 중온수의 온도변화에 따라 벤드부에서의 팽창과 압축이 반복적으로 일어나면서 폼패드가 압착되어 원래의 길이로 회복되지 못하는 현상이 발생하며 이에 따라 팽창 시 지반 반력이 크게 전달되어 배관의 구조적 안정성에 영향을 끼칠 우려가 있다.

본 연구를 통해 제안된 최적 형상의 전단 고리를 적용한 신규 벤드는 그 자체로 열응력에 대한 내하중성을 가질 수 있도록 고려한 것으로 압착에 의해 기능을 상실 할 우려가 있는 폼패드를 애초에 시공하지 않으면서도 취약부위인 PUR 폼의 최대전단응력을 기존 사양의 0.13 MPa[1]에서 0.10 MPa로 낮춤으로써 현 사양 대비23.1%의 강도개선 효과를 얻을 수 있다. Table 8에 현재의 폼패드 적용 양산 벤드와 본 연구를 통하여 제안된 최적 형상의 전단 고리를 적용하고 외관에 폼패드를 적용하지 않은 신규 벤드의 최대전단응력 및 개선율을 정리하였다.

5. 결 론

본 논문은 지역난방시스템에 사용되는 이중보

온관이 반복적인 열하중을 받을 때 벤드 부의 PUR 폼에 발생되는 높은 전단응력의 완화를 목적으로 제안된 전단 고리의 최적형상을 결정하기 위한 연구로써 다구찌 방법과 유한요소법을 이용하였다. 한국지역난방공사에서 시공하는 지중매설 열배관 중 관경 125A를 대상으로 선정하고 연구를 수행한 결과 최적의 전단 고리 형상 및 치수를 결정하기 위한 방법으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전단 고리의 형상 최적화를 위하여 고리의 개수, 높이 및 두께를 설계인자로 하여 다구찌 방법으로 결정한 9개의 실험모델을 선정하였다.

(2) 각 실험모델을 대상으로 유한요소 구조해석을 수행하여 PUR 폼의 전단응력 저감에 대한 각 인자의 기여율을 검토한 결과 제안된 벤드에서는 전단 고리 개수, 두께, 높이의 순으로 높은 영향을 주는 것을 확인하였다.

(3) 최적의 전단 고리 적용을 통해 폼패드를 함께 시공하지 않으면서도 기존의 사양에 비하여 PUR 폼에 작용하는 전단응력을 20% 이상 감소시킬 수 있었다.

(4) 본 연구에서 다룬 125A 이외의 다른 관경에 대하여도 동일한 기법을 이용하여 전단 고리 형상의 최적화할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국지역난방공사의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Jooyong Kim, Hobum Kim, Hyun Il Ko, Yong Mo An and Chongdu Cho, 2009, "Design Validation and Improvement of District Heating Pipe Using FE Simulation," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 4, pp. 337~345.

(2) Sangbok Lee, 2003, "The Taguchi Technique from the Field to Apply," *Sangjosa*, pp. 15~268.

(3) Sangbok Lee, 2006, "Taguchi Techniques for Use with Minitab," *Eretec inc.*, pp. 18~70.

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

(5) ANSYS Workbench Release 11.0, 2007, *ANSYS Inc.*

(6) Soil Material Property / Young's Soil Modulus http://www.geotechnicalinfo.com

(7) Peter Randlov, 1997, "District Heating Handbook," *European District Heating Pipe Manufacturers Association*, pp. 131~138.