

열피로 수명을 고려한 지역난방 배관의 최적화

안민용*, 장윤석**, 최재봉**, 김영진#, 김상호***, 김연홍***

Optimization of District Heating Pipes Considering Thermal Fatigue Life

Min Yong Ahn*, Yoon Suk Chang**, Jae Boong Choi**, Young Jin Kim#, Sang Ho Kim*** and Youn Hong Kim***

ABSTRACT

Recently, in proportion to increased demand on environmentally-friendly heat source, efficient management of district heating(DH) system becomes one of important issue. The objectives of this paper are to systematize data processing of transition temperature, investigate the effect of temperature variations on thermal fatigue and find out a way to improve design features of Korean DH pipes. For this purpose, reliable fatigue life evaluation procedures are examined and applied to quantify thermal fatigue lives. Also, as a prototypal optimization analysis results, mean value of original cross sectional area of selected pipes was reduced 18.6% sustaining their sufficient margins against fatigue failure. So, it is anticipated that the output of this research can be used as useful information of optimal design and operation in the future.

Key Words : Cumulative Usage Factor(누적손상계수), District Heating (지역난방), Equivalent Full Temperature Cycle(상당전온도사이클), Optimization(최적화), Rainflow Counting(낙수계수법)

기호설명

A = cross sectional area of pipe
 b = slope of fatigue curve represented log coordinate system
 D_o = outer diameter of pipe
 E = modulus of elasticity
 L = length of pipe
 n_i = number of operating cycles at given alternating stress level

N_0 = equivalent full temperature cycle
 N_i = number of allowable cycles at given alternating stress level
 S_{alt} = alternating stress
 t = thickness of pipe
 ΔT = temperature range
 T_{mean} = mean temperature
 ΔT_{ref} = reference temperature range
 α = coefficient of thermal expansion
 σ = stress

접수일: 2005년 11월 24일; 게재승인일: 2006년 4월 14일

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

교신저자: 성균관대학교 기계공학부

E-mail yjkim50@skku.edu Tel. (031) 290-5274

*** 한국지역난방공사 연구개발실

ε = strain

CUF = cumulative usage factor

1. 서론

다수의 국가에서 채택하고 있는 지역난방(District Heating; DH) 시스템은 온실효과 저감에 활용될 수 있는 환경 친화적 에너지 자원이다. 효율성이 높기 때문에 특히 중소 도시에서 수요가 증대되고 있으나, 시스템 구성 설비의 복잡화 및 진문화로 인해 고유기능 유지에 필요한 보전비용(maintenance cost) 또한 점차 증가하는 추세이다. 지역난방 시스템의 주요 기기 중 하나인 열배관은 크게 공급관(supply pipe)과 회수관(return pipe)으로 구분할 수 있다. 주배관(main pipeline)에서 시작되는 난방수는 약 100℃의 온도와 0.980MPa(10kg/cm²) 내외의 낮은 압력 조건에서 공급관을 거쳐 각 지역별 최종 사용자에게 제공되므로, 발생 가능한 주요 손상원인은 열피로이다.^{1,2}

IEA(International Energy Agency)에서는 1990년대 중반 난방수의 온도변화가 지역난방용 배관에 미치는 영향을 평가한 바 있다.³ 이 연구에 의하면 지역난방수의 사용형태 및 사용자에 따라 온도변화가 각 배관에 미치는 영향이 다른 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 목적은 국내 지역난방용 배관에 흐르는 급수 또는 회수 온도의 변화가 강관의 피로수명에 미치는 영향을 평가하고 최적의 설계 형상을 제안하기 위한 것이다. 이를 위해 10개 지점에서 측정된 온도 데이터를 분석하여 기초 자료로 사용하고, 활용 가능한 예측기법을 적용하여 피로수명을 정량적으로 평가하고자 한다. 최종적으로는, 피로손상 가능성이 낮은 배관을 대상으로 주요 인자에 대한 최적화 해석을 수행하여 적절한 형상 조건을 도출하고자 한다.

2. 사이클 기반 피로수명 평가

2.1 온도 데이터 측정

지역난방수의 온도변화가 배관의 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위해 1년간 10개 지점에서 약 2분당 1개의 속도로 공급관 및 회수관의 온도 데이터를 측정하였다. Table 1은 각 지점별 데이터의 측정갯수 및 관련 특성을 정리하여 나타낸 것으로서, 머릿문자인 KDHC(Korea District

Heating Corporation)에 일련번호를 부여하여 정의하였다. 이중 KDHC01과 KDHC02는 주배관이고 KDHC03~KDHC10은 사용자와 직접적으로 연결되는 배관(Service connections)이다. 대부분의 경우 1년 분에 해당하는 원 데이터(raw data)를 확보하였으나, KDHC10 배관에서 측정된 데이터는 측정장비의 문제로 인하여 약 4개월 분에 해당하는 데이터만을 확보할 수 있었다.

Table 1 Data acquisition results at each location

Location	No. of raw data	No. of days	Remark
KDHC01	247,398	343.6	Main pipeline
KDHC02	240,440	33.9	Main pipeline
KDHC03	259,207	360.0	Service connection
KDHC04	271,403	377.0	Service connection
KDHC05	271,372	376.9	Service connection
KDHC06	271,332	376.9	Service connection
KDHC07	271,357	376.9	Service connection
KDHC08	263,844	366.5	Service connection
KDHC09	259,915	361.0	Service connection
KDHC10	80,523	111.8	Service connection

한편 지역별로 측정된 온도 데이터를 크게 주배관과 사용자연결구간 배관으로 구분해 보았을 때, 주배관의 경우 열교환기와 직접 연결되기 때문에 1년 동안 지속적인 온도변화가 발생하였다. 사용자연결배관 중 일반적 특성을 보이는 KDHC03 배관과 특이 경향을 보이는 KDHC05 배관의 온도변화를 공급관과 회수관 각각에 대해 비교해 보면 평균온도(T_{mean}), 온도차이(ΔT), 휴지기 유무 등이 상이함을 알 수 있다.

2.2 데이터 필터링

현장에서 측정된 데이터는 장비 및 환경의 영향 등으로 인해 잡음이 뒤섞인 형태로 기록되므로, 데이터 취득과정 중에 발생하게 되는 잡음 및 이산화에 따른 오차를 제거하기 위한 사전처리 작업이 필요하다. 본 연구에서는 열피로 평가에 앞서 최대/최소 필터링(peak/valley filtering) 및 최적의 임계값(threshold) 적용을 통해 해석에 필요한 온도 데이터를 산출하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 수행한 최대/최소 필터링

작업 처리 순서도를 나타낸 것이다. 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5℃의 임계값 설정에 따른 데이터 변화율과 전체적인 원 데이터의 경향을 따르는 정도를 분석하여 0.3℃를 최적의 임계값으로 선택하였다. 아울러 데이터의 변화가 매우 심한 KDHC06 회수관에 한해 이동 평균 필터(moving average filter or running average filter)를 사용하였다.⁴ 이동 평균 필터 적용시 평균값 계산을 위해 한 번에 취하는 데이터 구간인 슬라이딩 윈도우(sliding window)는 시행착오법(trial and error method) 및 현장 전문가의 검토를 거쳐 15로 설정하였다.

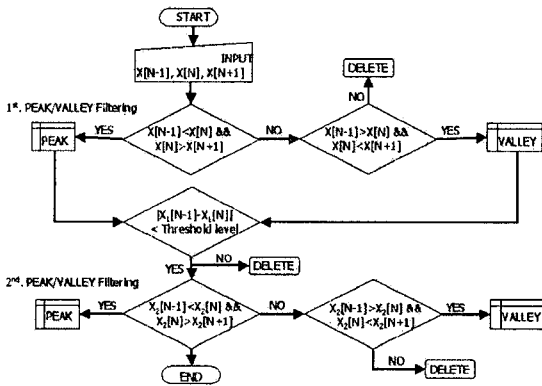


Fig. 1 The flowchart of peak/valley filtering

Table 2는 데이터 필터링 결과를 나타낸 것으로써, 원 데이터의 수와 최종 필터링된 데이터 수의 비율(filtering ratio)도 함께 표시하였다. 표에서 'S'와 'R'은 각각 공급관과 회수관을 나타낸다. 필터링 비율은 KDHC04-S 배관에서 1.6%로 최종 데이터의 수가 가장 적었고(4,252개), KDHC05-R 배관에서 29.0%로 필터링 후의 데이터 수가 가장 많았다(78,734개). 이와 같은 차이가 발생한 주요 원인은 측정위치 및 배관 형태별로 고유의 온도이력이 상이하기 때문이다.

2.3 온도 사이클 계산

지역난방 배관의 피로수명 예측은 변동하중에서의 구조건전성 평가와 최적의 설계 및 운전조건 결정을 위해 중요하며, 복잡한 실제 온도이력을 일정 진폭을 갖는 몇 개의 단순화된 등가 온도이력으로 치환할 필요가 있다. 이러한 과정 즉, 단순화된 등가 온도이력으로 치환할 수 있는 사이클

계수법의 종류는 다양하며 횡단횡수계수법, 극대치계수법, 단순범위계수법, 낙수계수법(rainflow counting) 등이 주로 사용된다.^{5,6}

Table 2 Data filtering results at each location

Location	No. of raw data	No. of filtered data		Filtering ratio[%]	
		S	R	S	R
KDHC01	247,398	44,347	47,938	17.93	19.40
KDHC02	240,440	14,768	22,635	6.14	9.41
KDHC03	259,207	26,179	28,795	10.10	11.11
KDHC04	271,403	4,252	5,159	1.57	1.90
KDHC05	271,372	22,288	78,734	8.21	29.01
KDHC06	271,332	5,986	33,627	2.21	12.39
KDHC07	271,357	5,117	7,832	1.89	2.89
KDHC08	263,844	5,630	8,061	2.13	3.08
KDHC09	259,915	4,992	21,683	1.92	8.34
KDHC10	80,523	1,506	3,272	1.87	4.08

본 연구에서는 필터링 과정을 거친 10개 측정 지점별 최종 데이터를 낙수계수법을 통해 평균온도와 온도차이 항목으로 조합하여 각각에 대한 발생횟수로 정리하였다. 이때 평균온도와 온도차이의 구간은 0℃를 기준으로 5℃씩 증가하도록 동일하게 설정하였으며, 각 구간의 최대온도를 그 구간의 대표온도로 선정하여 보수적인 평가가 이루어지도록 하였다. Fig. 2는 여러가지 형태의 사이클 계수결과 중 하나인 온도차이 항목을 정리한 것이다. 30년 기준 발생횟수를 대표적인 예로 제시하였으며, 온도차이의 최대값은 95℃이었다.

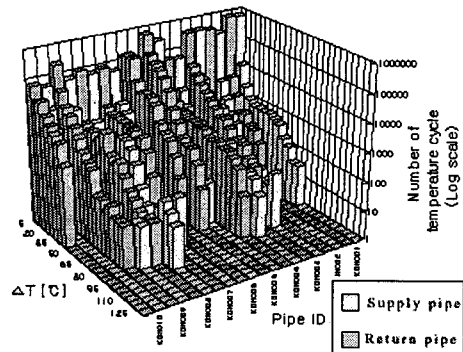


Fig. 2 Number of temperature cycles converted to 30 years

3. 사이클 기반 피로수명 평가

3.1 사이클 기반 평가법

사이클 기반의 수명평가는 실제 온도 데이터를 이상화 시킨 상당전온도사이클(equivalent full temperature cycle; N_0)을 활용하여 사용 적합성을 평가하는 기법이다. 본 연구에서는 다음과 같이 배관의 상당전온도사이클 수를 계산한 후, 30년의 내구연한 동안 주배관 및 사용자 연결구간으로 구분하여 정의된 허용 사이클 수와 비교하여 피로수명을 평가하였다.³

$$N_0 = \frac{1}{(\Delta T_{ref})^b} \sum n_i (\Delta T_i)^b \quad (1)$$

여기서, ΔT_{ref} 는 기준온도(reference temperature)로써 배관의 온도조건에 따라 서로 다른 값을 가지며, 일반적으로 110°C 또는 최대 온도범위보다 10°C 작은 값으로 결정한다. b 는 로그 좌표계로 표현된 피로곡선 기울기를 나타내는 값으로써, 3일 때 기울기가 가장 크고 5일 때 기울기가 가장 작다. 본 연구에서는 ΔT_{ref} 값으로 90, 100 그리고 110°C의 3가지 경우를 모두 고려하였다.

3.2 사이클 기반 평가결과

Table 3은 배관에서 측정된 온도 데이터를 토대로 1년 기준으로 계산하고 30년 기준으로 환산한 N_0 값을 $\Delta T_{ref}=110^\circ\text{C}$ 인 경우에 한해 나타낸 것이다. 단, KDHC10 배관에서 측정된 데이터의 경우 전술한 바와 같이 약 4개월 동안의 데이터만 확보된 상태이므로 이를 1년 기준으로 확장한 후 환산하였다. IEA의 기준에 따르면 $b=3$ 일 때 지역난방 배관의 상당전온도사이클의 30년 기준 범위는 주배관의 경우 100~250 사이클, 분배관의 경우 250~500 사이클, 사용자연결구간의 경우 500~2500 사이클이다.

IEA 기준에 근거하여 사이클 기반 피로수명을 평가한 결과 주배관의 경우 KDHC01-S에서, 사용자연결구간 배관의 경우 KDHC05-R 및 KDHC06-R에서 N_0 값이 크게 계산되었다. N_0 값이 KDHC01-S 배관에서 크게 나타난 이유는 단속적인 발전 공급량 변화에 의한 급격한 온도변화가 불규칙하게 일어났기 때문이며,

KDHC05-R 및 KDHC06-R 배관에서 크게 나타난 이유는 타 사용자연결구간 배관과 달리 휴지기 없이 심한 온도차이가 발생하였기 때문인 것으로 생각된다. Table 3에 제시한 바와 같이 모든 배관은 IEA의 기준을 만족하였으나 이동 평균 필터링을 수행한 KDHC06-R 배관의 경우 IEA의 제한범위에 상당히 근접한 결과를 보여주고 있으므로 추가적인 신뢰성 검증이 필요할 것으로 판단된다.

Table 3 Number of equivalent full temperature cycles converted to 30 years

Location	Pipe	Equivalent full temperature cycle($\Delta T_{ref}=110^\circ\text{C}$)			IEA Criteria (cycles)
		$b=3$	$b=4$	$b=5$	
KDHC 01	S	243	71	28	250
	R	93	9	2	
KDHC 02	S	32	3	0	250
	R	41	4	1	
KDHC 03	S	233	92	52	2,500
	R	928	367	173	
KDHC 04	S	404	225	137	2,500
	R	907	487	282	
KDHC 05	S	58	7	2	2,500
	R	2015	487	140	
KDHC 06	S	104	26	7	2,500
	R	2490	728	249	
KDHC 07	S	90	27	12	2,500
	R	820	321	134	
KDHC 08	S	612	297	164	2,500
	R	345	138	63	
KDHC 09	S	49	24	16	2,500
	R	368	106	42	
KDHC 10	S	21	2	2	2,500
	R	470	110	29	

4. 응력기반 피로수명 평가

4.1 응력 기반 평가법

응력 기반의 수명평가는 온도차이에 의한 응력변화 데이터와 재료의 피로곡선(S-N curve)을 이용하여 누적손상계수(Cumulative Usage Factor; CUF)를 계산하고 피로수명을 예측하는 기법이다.⁵ 본 연구에서는 잘 알려진 Miner's rule을 이용하여 다음과 같이 피로손상계수를 계산하였다.

$$UF_i = \frac{n_i}{N_i}, \quad CUF = \sum UF_i \quad (2)$$

여기서, n_i 는 각 응력범위에 따른 사이클 수, N_i 는 피로곡선으로부터 얻어지는 각 응력기준에 대한 허용 사이클 수이다.

4.2 응력해석

4.2.1 이론식을 이용한 응력해석

지역난방 배관에 작용하는 온도하중 사이클 계수결과로부터 해당 응력을 계산하였다. 이 때 온도변화에 따른 재료의 변형량 및 응력과의 관계는 아래의 간단한 선형 관계식을 사용하였다.

$$\sigma = E\varepsilon = E\alpha(\Delta T) \quad (3)$$

여기서, E 는 탄성계수, ε 은 변형률, α 는 열팽창 계수이다. 해석시 실제 배관 재료인 A672 A55의 물성치를 적용하였으며, 탄성계수 및 열팽창계수 값은 각각 198.17GPa과 $1.186 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 이었다.

4.2.2 유한요소법을 이용한 응력해석

상용 CAE(Computer Aided Engineering) 코드인 ANSYS⁷를 이용하여 1/4 모델에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 이는 배관의 형상 및 온도변화에 따른 재료물성치⁸⁻¹⁰를 고려하여 보다 정확한 응력을 계산하고, 이론식을 이용하여 구한 결과와 비교하기 위한 것이다. 지역난방 배관은 이중 보온관으로 되어 있으나 보온재(Rigid Polyurethane Foam; RPF) 및 외관(casing foam)을 제외한 내관(carrier pipe)을 해석대상으로 선정하였으며, 재질과 기하학적 형상은 Table 4에 정리하였다.

하중조건 결정을 위해 먼저 Fig. 3과 같이 이상화한 과도상태 (A), (B) 그리고 (C)를 부여한 예비해석을 수행하였다. 각 과도상태에 따른 경향의 차이는 있으나 유한요소해석으로 구한 최대 온도 및 응력은 2% 이내에서 일치함을 확인하였다. 따라서 방대한 양의 온도 데이터 이상화에 적합한 과도상태 (A) 및 보수적인 상당전온도사이클을 최종 하중조건으로 선정하였다.

경계조건은 배관을 축방향으로 구속시키고 반경방향으로는 자유롭게 수축 및 팽창할 수 있도록

하였으며, 배관 길이가 관심부위의 응력에 미치는 영향을 배제하기 위하여 길이 대 직경의 비율(L/D_o)은 10 이상이 되도록 설정하였다. Table 5는 각 배관의 대표적 온도차이를 고려하여 유한요소해석으로 구한 응력강도(stress intensity)를 식(3)으로 구한 이론 값과 비교한 것으로써, 해석모델의 타당성을 보여주고 있다. 또한 사용기 및 휴지기 조건에서의 응력강도는 각각 236.7MPa와 236.3MPa로 거의 유사하게 나타났다. 따라서 검증된 모델을 이용하여 사용기 초기온도 조건 하에서 10개 측정위치에서의 공급관 및 회수관에 대한 체계적 유한요소해석을 수행하였다.

Table 4 The material and geometries of each pipe

Pipe ID	Material	Carrier pipe		Casing foam		t_{RPF} [mm]	L [mm]
		t [mm]	D_o [mm]	t [mm]	D_o [mm]		
KDHC01	A672,A55	9.5	812.8	17.6	1000	76	12000
KDHC02	A672,A55	9.5	812.8	17.6	1000	76	
KDHC03	SPPS 370	4.5	76.3	3.2	140	28.65	
KDHC04	SPPS 370	4.5	76.3	3.2	140	28.65	
KDHC05	SPPS 370	4.5	76.3	3.2	140	28.65	
KDHC06	SPPS 370	4.5	89.1	3.2	160	32.25	6000
KDHC07	SPPS 370	3.9	60.5	3.2	125	29.05	
KDHC08	SPPS 370	5.5	165.2	4	250	38.4	
KDHC09	SPPS 370	3.6	42.7	3	110	30.65	
KDHC10	SPPS 370	4.9	114.3	3.5	200	39.35	

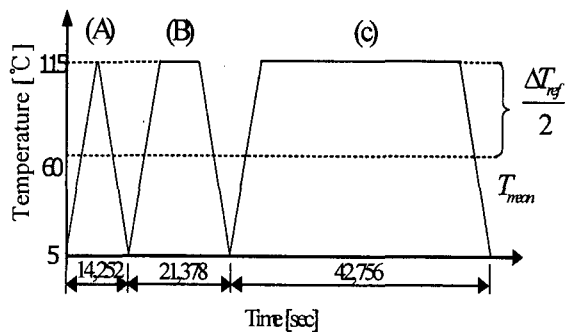


Fig. 3 Idealized typical load type of A, B and C

Table 5 Verification of stress intensity of each pipe

Location	Pipe	$\Delta T(^{\circ}C)$	Stress Intensity [MPa]		
			Eq. (3)	FEA	Diff.[%]
KDHC01	S	65	152.8	151.6	-0.79
	R	40	94.0	92.0	-2.17
KDHC02	S	30	70.6	69.8	-1.15
	R	35	82.2	81.6	-0.74
KDHC03	S	80	188.0	186.2	-0.97
	R	75	176.2	175.2	-0.57
KDHC04	S	80	188.0	187.2	-0.43
	R	75	176.2	179.4	1.78
KDHC05	S	30	70.6	73.6	4.08
	R	60	141.0	140.6	-0.28
KDHC06	S	50	117.6	117.2	-0.34
	R	60	141.0	142.2	0.84
KDHC07	S	75	176.2	176.5	0.15
	R	60	141.0	140.8	-0.14
KDHC08	S	90	211.6	210.2	-0.67
	R	80	188.0	186.4	-0.86
KDHC09	S	85	199.8	198.6	-0.60
	R	75	176.2	174.8	-0.80
KDHC10	S	20	47.0	47.2	0.42
	R	40	94.0	94.6	0.63

4.3 피로수명 평가

피로수명 평가를 위해서는 시험을 통해 특정 재료의 피로곡선을 직접 결정하는 것이 바람직하나, 이를 위해서는 상당한 비용과 시간이 소요된다. 본 연구에서는 문헌조사^{3,11}를 통해 Fig. 4와 같이 유사재료에 대한 부식환경 하에서의 피로곡선을 확보하고 비교하였으며, 이중 배관에 실제 작용하는 교변응력에 의해 가장 보수적인 결과를 제공하는 EC3을 최종 선정하였다. 측정 온도 데이터를 토대로 식 (3) 또는 유한요소해석을 통해 열응력을 계산하고, 이 결과를 Fig. 4 및 식 (2)에 적용하여 응력 기반 피로수명 평가(CUF_{30-years})를 수행하였다.

Table 6은 응력 기반 피로수명 평가결과를 정리한 것으로서, 사이클 기반 피로수명 평가결과와 유사하게 KDHC05-R 및 KDHC06-R 배관에서의 CUF가 가장 크게 나타났으나 그 절대값은 무시할 수 있을 정도로 작았다. 이론식 및 유한요소해석으로 구한 피로수명 평가결과가

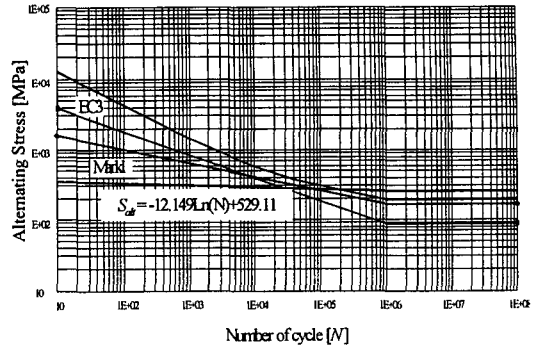


Fig. 4 S-N curve used in fatigue life evaluation

Table 6 Stress-based fatigue life evaluation results

Location	Pipe	CUF _{30-Years, Equation}	CUF _{30-Years, FEA}
KDHC01	S	5.85E-05	3.26E-04
	R	7.46E-07	9.10E-05
KDHC02	S	0	4.49E-05
	R	0	4.51E-05
KDHC03	S	7.82E-05	2.59E-04
	R	2.78E-04	1.36E-03
KDHC04	S	2.33E-04	6.48E-04
	R	4.83E-04	1.36E-03
KDHC05	S	2.60E-06	4.47E-05
	R	1.06E-04	2.94E-03
KDHC06	S	4.01E-06	8.57E-05
	R	4.68E-04	5.11E-03
KDHC07	S	1.68E-05	1.33E-04
	R	2.20E-04	1.14E-03
KDHC08	S	2.80E-04	8.90E-04
	R	9.15E-05	4.06E-04
KDHC09	S	2.62E-05	9.12E-05
	R	5.41E-05	5.18E-04
KDHC10	S	0	4.52E-05
	R	2.61E-06	2.08E-04

다소 차이를 보이는 이유는 기하학적 형상변화와 온도 의존적인 재료물성치의 반영 유무에 따른 것으로 판단된다. 또한 모든 배관에서의 CUF_{30-years}는 1.0 이하의 값으로써 허용 기준을 충분히 만족하였으나, 향후 부식에 의한 피로균열 성장 등을 추가로 반영할 필요가 있다.

5. 최적화

5.1 최적설계

CAD 및 CAE 기술의 혁신적 발전에도 불구하고 최적해를 구하기 위해서는 아직도 상당한 시간과 비용이 요구되고 있다. 이에 따라 CAO(Computer Aided Optimization)에 대한 관심이 높아지고 있으며, 설계 및 해석 과정의 연계를 통해 안전성과 경비절감 효과를 동시에 구현하기 위한 노력 또한 주목을 받고 있다.¹²⁻¹⁴

본 연구에서는 지역난방 배관의 설계 최적화를 위한 기초적인 연구로써 시범적인 CAO 해석을 병행하였다. 배관의 두께(t), 외경(D_o)의 최적 형상을 결정하기 위하여 ANSYS와 상용 최적화 코드인 iSight¹⁵를 연동하여 CAO을 수행하였으며, 개략적인 절차는 Fig. 5와 같다.

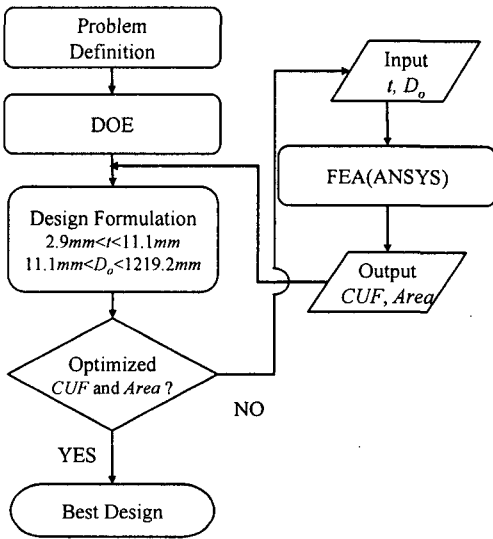


Fig. 5 Optimization Flow

5.2 최적설계 대상 및 조건

최적설계 대상으로 피로파손 가능성이 상대적으로 적은 배관을 선정하고자 하였다. 이를 위해 정량화가 비교적 용이한 사이클 기반 피로평가 결과를 검토하였으며, 최종적으로 Table 3의 b/IEA Criteria 값이 0.3 이하인 13개 배관을 도출하였다.

목적함수(object function)로는 열하중에 의한 CUF와 배관 단면적의 최소화를 선택하였다. 또한 이를 달성하기 위한 제한조건으로 $CUF_{30\text{-Years,FEA}}$ 를

Table 6에 제시된 값의 70~80% 범위로 설정하고, 배관의 두께 및 외경의 범위를 각각 2.9~11.1mm와 11.1~1219.2mm로 규정하였다. 최종적으로는 상용 표준규격을 고려하여 최적의 설계변수(optimum variable) 값을 결정하였다.

5.3 최적화 방법 및 결과

최적화는 전역적 또는 국부적 기법으로 구현할 수 있다. 전역적 기법은 실제 원하는 해를 구할 수 있는 반면 시간이 오래 소요되는 단점이 있으므로, 본 연구에서는 국부적 최적화 기법의 하나인 순차적 2차 프로그래밍(Sequential Quadratic Programming)법을 사용하였다.¹⁶ 이 방법은 목적함수 및 제한조건을 Taylor 급수 전개하여 수렴 속도를 증가시킬 수 있기 때문에 일반적으로 유한요소모델을 최적화할 때 적합하다. 전역해를 찾기 어려운 국부적 최적화 기법의 단점은 실험계획법(Design Of Experiment; DOE)을 활용하여 보완하였다. 즉, 실험계획법을 통해 설계변수가 목적함수에 미치는 영향을 분석하고 이를 유한요소해석을 통하여 검증한 후, 결과 값을 참조하여 최적화를 수행하였다.

Table 7 Optimization results

Location	Pipe	Optimum variable		Optimum object function	
		t [mm]	D_o [mm]	$CUF_{30\text{-Years}}$	A [mm ²]
KDHC02	S	16.2	528.3	3.6E-05	2.6E+04
	R	11.4	536.5	3.3E-05	1.9E+04
KDHC03	S	7.7	48.1	2.0E-04	9.8E+02
KDHC04	S	4.9	31.1	5.2E-04	6.8E+02
KDHC05	S	5.9	45.8	3.3E-05	7.3E+02
KDHC06	S	8.2	53.5	6.5E-05	1.2E+03
KDHC07	S	6.6	39.9	1.0E-04	6.9E+02
KDHC08	S	9.4	109.0	6.6E-04	2.6E+03
	R	7.8	85.9	3.1E-04	1.9E+03
KDHC09	S	6.1	27.5	7.2E-05	4.1E+02
	R	4.3	28.2	3.9E-04	3.2E+02
KDHC10	S	8.4	74.3	3.5E-05	1.6E+03
	R	7.8	89.2	1.6E-04	2.6E+03

Table 7은 최적화 수행결과를 정리한 것으로서, 목적함수인 배관 단면적이 평균 18.6% 감소함에도 불구하고 $CUF_{30-Years}$ 가 평균 23.4% 완화되었음을 알 수 있다. 최적화 수행 결과의 타당성은 ANSYS를 이용한 상세 유한요소해석을 통해 재차 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 지역난방 배관에 흐르는 난방수의 온도변화가 강관의 피로수명에 미치는 영향을 평가하였으며, 피로수명과 배관단면적을 고려한 최적화를 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 2분 당 1개의 샘플링 속도로 측정된 온도 데이터를 0.3°C 의 임계치를 적용하여 필터링하고 낙수계수법을 적용하여 평균온도(T_{mean})와 온도차이(ΔT) 항목으로 재정리한 결과, 연속된 두 데이터의 온도차이는 대부분 5°C 미만으로써 배관의 피로수명에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(2) 평가법에 따라 차이는 있으나 모든 해석대상 배관에서의 사이클 및 응력 기반 피로수명 평가결과는 30년 설계조건을 충족하였다. 다만 IEA의 사이클 기반 평가법은 간편한 대신 지나치게 보수적인 것으로 판단된다.

(3) 피로손상 가능성이 낮은 배관을 대상으로 주요 설계인자를 연계한 최적화 해석을 수행하였으며, 이를 통해 안전성과 경제성을 유지할 수 있는 최적의 형상을 도출하였다.

후 기

본 논문은 한국지역난방공사와 한국과학기술연구원 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원과 인지니어스 코리아(주)의 도움으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. International Energy Agency, "http://www.iea.org,"

accessed on September, 2005.

2. Korea District Heating Corp., "http://kdhc.co.kr," accessed on September, 2005.

3. Randlov, P. and Hansen, K. E., "Temperature Variations in Pre-insulated DH Pipes Low Cycle Fatigue," International Energy Agency, 1996.

4. McClellan, J. H., Schafer, R. W. and Yoder, M. A., "DSP First: A Multimedia Approach," Prentice Hall, pp. 134-149, 1997.

5. Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," 1st Edition, Prentice Hall, 1990.

6. Matsuishi, M. and Endo, T., "Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress," Proc. Of Japan Society of Mechanical Engineers, 1968.

7. ANSYS, "Introduction to ANSYS 8.0," ANSYS Inc., 2004.

8. ASME, "B&PV Code Sec. III, Div. 1 - Rules for construction of nuclear power plant components," 1998.

9. ASME, "B&PV Code Sec. II, Part A - Ferrous Materials," 1989.

10. Pipe & tube information and international trade center, "http://www.e-pipe.co.kr," accessed on December, 2004.

11. Kim, J. G., "A Study on Corrosion Fatigue Crack for District Heating Pipes," Sungkyunkwan Univ., 2002.

12. Park, C. W., "Aircraft Wing Spar Cross-section Area Optimization with Response Surface Method," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 4, pp. 109-116, 2002.

13. Kim, H. S., Ahn, C. W., Choi, K. H. and Park, J. H., "Shape Optimization of a Bogie Frame for the Reduction of Its Weight," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 9, pp. 186-192, 2002.

14. Hong, D. K., Choi, S. C. and Ahn, C. W., "Robust Optimization Design of Overhead Crane with Constraint using the Characteristic Functions," J. of the KSPE, Vol. 21, No. 2, pp. 160-167, 2004.

15. Engineers, "iSight User Manual-Basic Training," Engineers Inc., 2005.

16. Rao, S. S., "Engineering Optimization-Theory and Practice," Wiley Interscience, 1996.