

운전이력을 고려한 지역난방 열배관의 피로수명 평가 및 최적화

안민용*, 정성욱, 이상민, 장윤석, 최재봉, 김영진(성균관대학교),
김상호, 김연홍(한국지역난방공사)

Fatigue Life Evaluation and Optimization for District Heating Pipes Considering Operating Temperature Transition Data

M. Y. Ahn, S. W. Jung, S. M. Lee, Y. S. Chang, J. B. Choi, Y. J. Kim(Mechanical Eng. Dept., SKKU)
S. H. Kim, Y. H. Kim(KDHC)

ABSTRACT

A district heating(DH) system supplies environmentally-friendly heat and is appropriate for reduction of energy consumption and/or air pollutions. The objectives of this paper are to systematize data processing of transition temperature, investigate its effects on fatigue life of DH pipes and optimization for size of DH pipes. A relational database management system as well as reliable fatigue life evaluation procedures is established for Korean DH pipes. Also, since the prototypal evaluation results satisfied both cycle-based and stress-based fatigue criteria. Through the optimum design process, the cross section diminished 18.64% and the CUF diminished 23.35%. So, it can be used as useful information in the future for optimal design, operation and energy saving via setting of efficient condition and stabilization of water temperature.

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

1. 서론

지역난방 시스템(district heating system)은 많은 국가에서 온실효과(greenhouse effect) 및 에너지 사용으로 발생하는 오염원을 감소시키는데 상당한 공헌을 해오고 있다. 지역난방 시스템의 주요 기기중 하나인 열배관은 크게 공급관(supply pipe)과 회수관(main pipeline)에서 시작되는 난방수는 100℃ 정도의 온도와 0.980Mpa(10 kg/cm²) 내외의 압력을 받는 상태에서 공급관을 거쳐 각 지역별 최종 사용자에게 제공된다. 고온의 난방수는 열교환을 통해 60℃ 정도의 온도를 갖게 되며, 회수관을 통해 지역난방 열원으로 회수되어 재가열된다^{1,2}.

IEA(International Energy Agency)는 1990년대 중반 난방수의 온도변화가 지역난방용 배관에 미치는 영향을 평가한 바 있다³. 이 보고서에 의하면 국가별 지역난방수의 사용형태 및 사용자에 따라 온도변화가 배관에 미치는 영향이 다르다. 본 연구의 목적은 지역난방용 열배관에 흐르는 난방수의 온도변화가 강관의 피로수명에 미치는 영향을 평가하고 최적의 강관단면치수를 제한하기 위한 것이다. 이를 위

해 10개 지점에서 측정된 온도 데이터를 분석하여 기초 자료로 사용하고, 활용 가능한 다수의 예측기법을 적용하여 열배관의 피로수명을 정량적으로 평가하고자 한다. 또한, 예측기법 차이에 따른 피로수명 평가결과를 상호 비교함으로써 적용 타당성을 검증하고자 한다. 최종적으로 피로수명 평가 결과 및 각 배관의 주요 설계인자를 연계한 최적화 해석을 수행하여 최적 열배관의 크기를 제안하고자 한다.

2. 사이클 기반 피로수명 평가

2.1 온도사이클 계산

지역난방 열배관의 피로수명 예측은 변동하중하에서의 구조건전성 평가와 최적의 설계 및 운전 조건 결정을 위해 중요하며, 이를 위해 복잡한 실제 온도이력을 일정 진폭을 갖는 몇 개의 단순화된 등가 온도이력으로 치환할 필요가 있다. 이러한 과정 즉, 단순화된 등가 온도이력으로 치환할 수 있는 사이클 계수법이 필요하다⁴. 본 연구에서는 필터링 과정을 거쳐 최종적인 최대, 최소값으로 분류된 10개의 측정지점별 데이터를 낙수계수법(rainflow counting)을 통해

평균온도와 온도차이 항목으로 조합하여 각각에 대한 발생 횟수로 정리하였다. Fig. 1은 여러가지 형태의 사이클 계수 결과 중 온도차이 항목으로 정리한 30년 기준 발생횟수를 대표적인 예로 제시한 것으로써, 온도차이의 최대값은 95°C 이었다.

2.2 사이클 기반 평가결과

Table 3은 배관에서 측정된 온도 데이터를 토대로 1년 기준으로 계산하고 30년 기준으로 환산한 NO 값을 $\Delta T_{ref}=110^\circ\text{C}$ 인 경우에 한해 나타낸 것이다. 단, KDHC10 배관에서 측정된 데이터의 경우 앞서 기술한 바와 같이 약 4개월 동안의 데이터만 확보된 상태이므로 이를 먼저 1년 기준으로 확장한 후 환산하였다. IEA의 기준에 따르면 b가 3일 때 지역난방 열배관의 상당전온도사이클의 내구연한 30년 기준 범위는 주배관의 경우 100~250 사이클, 분배관의 경우 250~500 사이클, 사용자연결구간의 경우 500~2,500 사이클이다. 전술한 IEA 기준에 근거하여 사이클 기반 피로수명을 평가한 결과 주배관의 경우 KDHC01-S에서, 사용자연결구간 배관의 경우 KDHC05-R 및 KDHC06-R에서 NO 값이 크게 계산되었다. 그러나 Table 1에 제시한 바와 같이 모든 열배관은 IEA의 기준을 만족하였다.

3. 응력 기반 피로수명 평가

3.1 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 기법이다⁴⁾. 본 연구에서는 잘 알려진 Miner's rule을 이용하여 다음과 같이 피로손상계수를 계산하였다.

$$UF_i = \frac{n_i}{N_i}, \quad CUF = \sum UF_i \quad (1)$$

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

3.2 응력해석

3.2.1 식을 이용한 응력해석

IEA의 기준에 따라 지역난방 열배관에 작용하는 온도 하중 사이클 계수결과로부터 해당 응력을 계산하였다. 이때 온도변화에 따른 재료의 변형량 및 응력과의 관계는 다음의 간단한 선형 관계식을 사용하였다.

$$\sigma = E\varepsilon = E\alpha(\Delta T) \quad (2)$$

해석에 사용한 E(탄성계수)와 α (열팽창계수) 값은 각각

198.17GPa 및 $1.186 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$ 이었다.

3.2.2 유한요소법을 이용한 응력해석

배관의 형상 및 온도변화에 따른 재료물성치를 고려하여 보다 정확한 응력을 계산할 수 있는 3차원 유한요소해석을 수행하였다. Table 2는 실제 배관의 재질과 기하학적 형상을 정리한 것으로 배관의 내관을 해석대상으로 선정하였다.

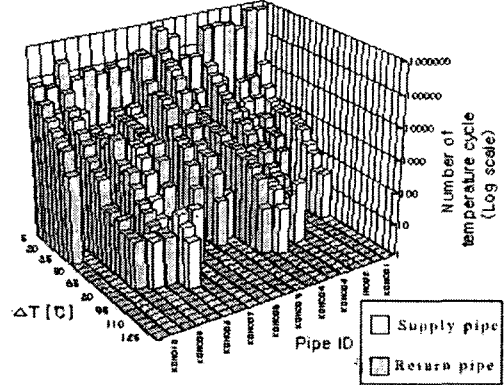


Fig 1. Number of temperature cycles converted to 30 years

Table 1 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	

본 연구에서 사용한 유한요소모델은 3차원 전체모델을 사용하였으며 ANSYS⁵⁾를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 지역난방 열배관의 재료물성치는 확보된 측정데이터를 활용하였다⁶⁾. 하중조건은 Fig. 2와 같이 이상화한 과도상태 (A), (B) 그리고 (C)에 대한 온도 및

응력 해석을 수행하여 결과를 비교하였다. 비교 결과 각 과도상태에 따른 경향의 차이는 있으나 최대 온도 및 응력은 2% 이내에서 동일한 값을 보였다. 따라서 방대한 양의 온도 데이터 이상화에 적합한 과도상태 (A) 및 보수적인 상당 전온도사이클을 최종 하중조건으로 선정하였다. 경계조건은 실제 구조물의 설치상태와 하중 작용상태를 최대한 반영할 수 있도록, 열배관을 축방향으로는 구속시키고 반경방향으로는 자유롭게 수축 및 팽창할 수 있도록 하였다. 사용기 조건 초기온도를 설정하고 10 개 측정위치에서의 공급관 및 회수관에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

3.3 피로수명평가

본 연구에서는 문헌조사⁷⁾를 통해 Fig. 3 과 같이 유사재료의 피로곡선을 확보하고 비교하였으며, 이중 열배관에 실제 작용하는 교반응력에 의해 가장 보수적인 결과를 제공하는 EC3 을 최종 선정하였다. 측정 온도 데이터를 토대로 식(2)를 이용하여 열응력을 계산하고, 이결과를 Miner법칙에 적용하여 응력 기반 피로수명 평가(CUF_{30-Years,Equation})를 수행하였으며, 사이클 기반 및 이론식을 이용한 중력기반 피로수명 평가 결과의 타당성을 검증 차원에서 유한요소해석 결과를 이용한 응력 기반 피로수명 평가(CUF_{30-Years,FEA})를 수행하였다.

Table 3 에서 확인할 수 있듯이 사이클 기반 피로수명 평가결과와 유사하게 KDHC05-R 및 KDHC06-R 배관에서의 CUF 가 가장 크게 나타났으나, 그 절대값은 무시할 수 있을 정도로 작았다. 따라서 상대적으로 다소 높기는 하나 이론식을 이용한 결과와 마찬가지로 모든 열배관은 피로수명 기준

Table 2 The material and geometries of each pipe

Pipe ID	Material	Carrier pipe		Casing foam		t _{RPF} [mm]	[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		
KDHC07	SPPS 370	3.9	60.5	3.2	125	29.05		
KDHC08	SPPS 370	5.5	165.2	4	250	38.4		6000
KDHC09	SPPS 370	3.6	42.7	3	110	30.65		
KDHC10	SPPS 370	4.9	114.3	3.5	200	39.35		

[Note] t: thickness, D_o: outer diameter, L: length

을 충분히 만족하였다. 아울러 이론식을 이용한 피로수명 평가결과와 다소 차이를 보이는 이유는 기하학적 형상변화와 온도 의존적인 재료물성치를 보다 충실히 반영하였기 때문인 것으로 판단된다.

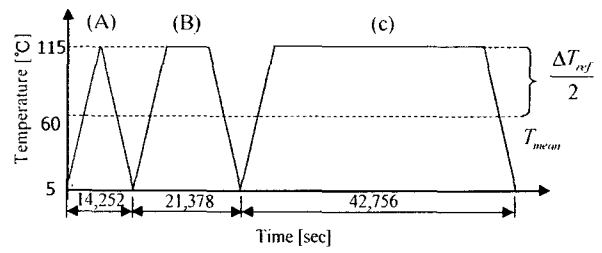


Fig. 2. Idealized typical load type of A,B and C

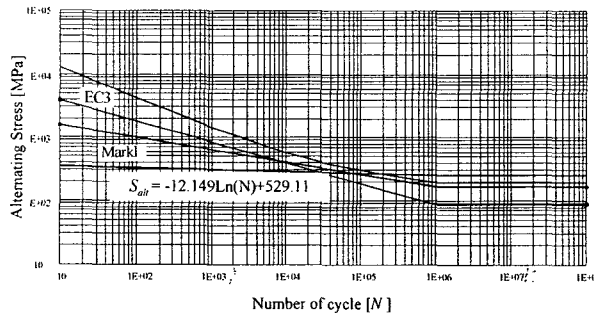


Fig. 3 S-N curve used in fatigue life evaluation

Table 3 Stress-based fatigue life evaluation results

Location	Pipe	CUF _{30-Years,Equation}	CUF _{30-Years,FEA}
KDHC01	S	5.848E-05	3.26E-04
	R	7.464E-07	9.10E-05
KDHC02	S	0	4.49E-05
	R	0	4.51E-05
KDHC03	S	7.819E-05	2.59E-04
	R	2.778E-04	1.36E-03
KDHC04	S	2.333E-04	6.48E-04
	R	4.830E-04	1.36E-03
KDHC05	S	2.602E-06	4.47E-05
	R	1.063E-04	2.94E-03
KDHC06	S	4.006E-06	8.57E-05
	R	4.680E-04	5.11E-03
KDHC07	S	1.684E-05	1.33E-04
	R	2.201E-04	1.14E-03
KDHC08	S	2.798E-04	8.90E-04
	R	9.153E-05	4.06E-04
KDHC09	S	2.620E-05	9.12E-05
	R	5.405E-05	5.18E-04
KDHC10	S	0	4.52E-05
	R	2.613E-06	2.08E-04

4. 최적화

4.1 최적설계조건

각 열수송배관의 단면적을 줄이고 적정 CUF 를 유지하는 것을 목적으로 최적화를 수행하였다. 최적화 수행은 ANSYS

를 이용한 응력기반 피로해석결과와 iSight[®]의 최적화 모듈을 사용하였다. 해석대상은 Table 1 에 제시한 배관 중 b / IEACriteria 값이 0.3 이하인 배관을 대상으로 하였다.

최적설계를 수행하기 위하여 최적화에 관한 목적함수와 제한조건을 다음과 같이 수식화 하였다.

- 목적함수 $CUF_{min}, Area_{min}$
 제한조건 $2.9mm < thickness < 11.1mm$
 $11.1mm < D_{out} < 1219.2mm$
 $0.7CUF_{FEM} < CUF < 0.8CUF_{FEM}$
 $221.28mm^2 < Area$
 설계변수 $thickness, D_{out}$

4.2 최적화수행

최적화 수행은 Fig. 4 와 같다. 실험계획법(DOE)를 통해 설계변수가 목적함수에 미치는 영향을 분석하고 이를 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 통하여 검증한 후 이 결과값을 참고하여 최적화를 수행하여 최적에 배관 형상을 찾아내었다. 최적화 기법은 iSight 에서 지원하는 최적화 기법 중 수리적 기법 중 하나인 순차적 2 차 프로그래밍법(Sequential Quadratic Programming)을 사용하였다. 수리적 기법은 전역적인 기법에 비하여 해석 시간이 짧다는 장점이 있지만 전역해를 찾기 어렵다는 단점이 있다⁹⁾. 하지만, 본 연구에서 수행한 최적화 방안은 최적화를 수행하기 전에 실험계획법(DOE)를 충분히 활용하였으므로 수리적 기법을 사용해도 무방하다고 판단되어 수리적 기법중 하나인 순차적 2 차 프로그래밍법(Sequential Quadratic Programming)을 사용하였다. 최적화 수행으로 나온 최적화 값은 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 최종 검증하였다.

최적화결과는 Table 4 에 정리하였다. 최적화결과 열수송 배관(DH)의 단면적은 평균 18.64% 감소하며 응력기반 피로수명평가(CUF_{30-Years})는 평균 23.35% 감소하였다.

5. 결론

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

(1) 모든 열배관에 대한 사이클 기반 및 응력 기반 피로수명 평가결과는 30년 설계조건을 충족하였으나, IEA 의 사이클 기반 평가법은 간편한 대신 지나치게 보수적인 것으로 판단된다.

(2) 열배관의 피로수명 평가결과 및 각 배관의 주요설계인자를 연계한 최적화 해석을 수행한결과 단면적이 감소하면서도 적정피로 수명을 유지하는 열배관을 찾았다. 이를 통해 향후 열배관 가설시 경제적인 열배관 가설이 가능하다고 판단된다.

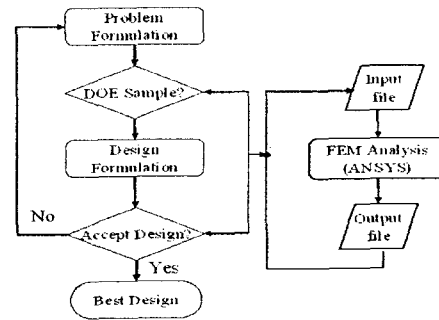


Fig. 4 Optimization Strategy

Table 4 Optimization results

Location	Pipe	Optimum variable		Optimum object function	
		t [mm]	D _o [mm]	CUF _{30-Years}	Area [mm ²]
KDHC02	S	16.15	528.32	3.62E-05	2.60E+04
	R	11.40	536.45	3.33E-05	1.88E+04
KDHC03	S	7.74	48.07	1.97E-04	9.81E+02
KDHC04	S	4.90	31.10	5.18E-04	6.78E+02
KDHC05	S	5.85	45.78	3.26E-05	7.34E+02
KDHC06	S	8.19	53.46	6.51E-05	1.16E+03
KDHC07	S	6.59	39.93	1.03E-04	6.90E+02
KDHC08	S	9.41	109.03	6.56E-04	2.58E+03
	R	7.81	85.90	3.09E-04	1.92E+03
KDHC09	S	6.08	27.54	7.23E-05	4.09E+02
	R	4.29	28.21	3.87E-04	3.22E+02
KDHC10	S	8.43	74.30	3.48E-05	1.60E+03
	R	7.84	89.15	1.64E-04	2.57E+03

참고문헌

1. International Energy Agency, <http://www.iea.org>? accessed on Dec. 15, 2004
2. Korea Direct Heating Corp., <http://kdhc.co.kr>? Accessed on Dec. 15, 2004
3. J.A. Bannantine, J.J. Comer, J.L. Handrock, *fundamentals of Metal Fatigue Analysis*? 1st Edition, Prentice Hall, pp. 184-196, 1990.
4. J.A. Bandnantine, JJ Comer and J.L. Handrock, *fundamentals of Metal Fatigue Analysis*? Prentice Hall, pp. 178-184, 1990.
5. ANSYS, *introduction to ANSYS 8.0*? ANSYS Inc, 2004.
6. J.G Kim, *Study on Corrosion Fatigue Crack for District Heating Pipes*? Sungkyunkwan Univ, 2002.
7. J.G Kim, *Study on Corrosion Fatigue Crack for District Heating Pipes*? Sungkyunkwan Univ, 2002.
8. Engineers, *iSight User Manual ? Basic Training*? Engineers Inc, 2005.
9. Singiresu S. Rao, *Engineering Optimization ? Theory and Practice(Third Edition)*? Wiley Interscience, 1996.