

〈 논문 〉

운전이력을 고려한 지역난방 열배관의 피로수명 평가 및 관리 체계 구축

장윤석* · 정성욱* · 김형근* · 최재봉* · 김영진† · 김상호** · 김연홍**

(2005년 3월 11일 접수, 2005년 7월 25일 심사완료)

Establishment of Fatigue Life Evaluation and Management System for District Heating Pipes Considering Operating Temperature Transition Data

Yoon-Suk Chang, Sung-Wook Jung, Hyeong-Keun Kim,
Jae-Boong Choi, Young-Jin Kim, Sang-Ho Kim and Youn-Hong Kim

Key Words : Cumulative Usage Factor(누적손상계수), District Heating Pipe(지역난방 열배관), Equivalent Full Temperature Cycle(상당전온도사이클), Peak/Valley Filtering(최대/최소 필터링), Rainflow Counting(낙수계수법), Relational Database(관계형 데이터베이스)

Abstract

A district heating(DH) system supplies environmentally-friendly heat and is appropriate for reduction of energy consumption and/or air pollutions. The DH transmission pipe, composed of supply and return pipes, has been used to transmit the heat and prevent heat loss during transportation. The two types of pipes are operated at a temperature of 75~115°C and 40~65°C, respectively, with an operating pressure of less than 1.568MPa. The objectives of this paper are to systematize data processing of transition temperature and investigate its effects on fatigue life of DH pipes. For the sake of this, about 5 millions temperature data were measured during one year at ten locations, and then available fatigue life estimation schemes were examined and applied to quantify the specific thermal fatigue life of each pipe. As a result, 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, those 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.

1. 서 론

지역난방 시스템(district heating system)은 많은 국가에서 온실효과(greenhouse effect) 및 에너지 사용으로 발생하는 오염원을 감소시키는데 상당한 공헌을 해오고 있다. 또한 에너지의 효율적 사용과 절약이라는 측면에서도 사회적 수요가 증대되고 있으며, 지역난방 시스템을 구성하는 설비의

복잡화 및 전문화로 인해 고유의 기능을 유지하기 위한 보전비용(maintenance cost)이 증가하는 추세이다. 지역난방 시스템의 주요 기기중 하나인 열배관은 크게 공급관(supply pipe)과 회수관(return pipe)으로 구분할 수 있다. 주배관(main pipeline)에서 시작되는 난방수는 100°C 정도의 온도와 0.980MPa(10kg/cm²) 내외의 압력을 받는 상태에서 공급관을 거쳐 각 지역별 최종 사용자에게 제공된다. 고온의 난방수는 열교환을 통해 60°C 정도의 온도를 갖게 되며, 회수관을 통해 지역난방 열원으로 회수되어 재가열 된다.^(1,2) 그러나 이와 같이 중소규모 도시의 지역난방을 담당하는 열수송 배관에 예측하지 못한 열피로 파손이 발생하게 될 경우, 최종 사용자에게 난방수 공급의 중단이라는

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim50@skku.edu

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

* 성균관대학교 기계공학부

** 한국지역난방공사 연구개발실

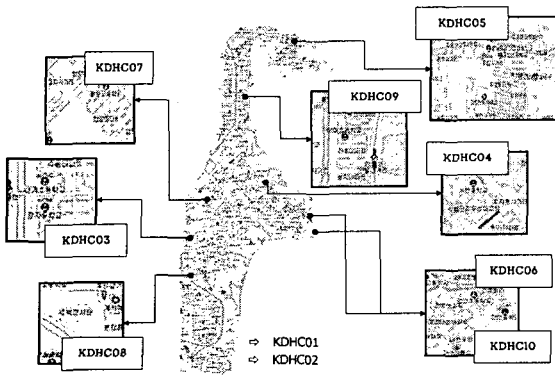


Fig. 1 The locations of data measurement

피해를 주게 되며, 사회적 이미지 추락 및 경제적 손실 등과 같은 부정적 영향을 초래할 수 있다.

IEA(International Energy Agency)는 1990년대 중반 난방수의 온도변화가 지역난방용 배관에 미치는 영향을 평가한 바 있다.⁽³⁾ 이 보고서에 의하면 국가별 지역난방수의 사용형태 및 사용자에 따라 온도변화가 배관에 미치는 영향이 다르다. 따라서 국내에서도 지역별 열배관의 특성 및 사용형태에 따라 난방수의 온도변화가 열배관에 미치는 영향이 다를 수 있으므로, 국내 여건을 반영한 보다 구체적인 연구가 필요한 실정이다. 본 연구의 목적은 지역난방용 열배관에 흐르는 난방수의 온도변화가 강관의 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위한 것이다. 이를 위해 10개 지점에서 측정된 온도 데이터를 분석하여 기초 자료로 사용하고, 활용 가능한 다수의 예측기법을 적용하여 열배관의 피로수명을 정량적으로 평가하고자 한다. 또한 설비관리 분야에 IT 기술을 적극적으로 활용함으로써 보다 체계적인 설비관리 기술을 확보하고, 예측기법 차이에 따른 피로수명 평가결과를 상호 비교함으로써 적용 타당성을 검증하고자 한다.

2. 온도이력 결정 및 데이터베이스 구축

2.1 온도 데이터 측정

지역난방수의 온도변화가 열배관의 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위해 1년간 10개 지점에서 약 2분당 1개의 속도로 공급관 및 회수관의 온도 데이터를 측정하였다. Fig. 1은 10개의 측정위치를 개략적으로 나타낸 것으로서, 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 80,523개의 데이터만을 확보할 수 있었다. Table 1은 각 지점별 데이터의 측정갯수

Table 1 Data acquisition results at each location

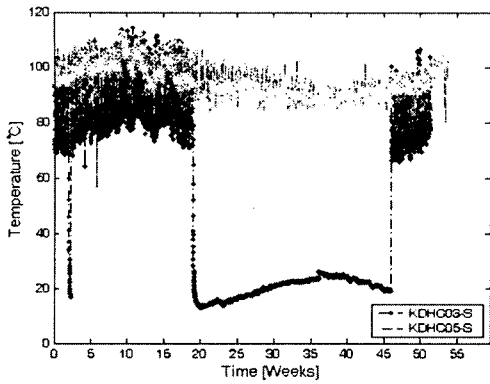
Location	No. of raw data	No. of days	Remark
KDHC01	247,398	343.61	Main pipeline
KDHC02	240,440	333.94	Main pipeline
KDHC03	259,207	360.01	Service connection
KDHC04	271,403	376.95	Service connection
KDHC05	271,372	376.91	Service connection
KDHC06	271,332	376.85	Service connection
KDHC07	271,357	376.88	Service connection
KDHC08	263,844	366.45	Service connection
KDHC09	259,915	360.99	Service connection
KDHC10	80,523	111.84	Service connection

및 관련 특성을 정리하여 나타낸 것이다.

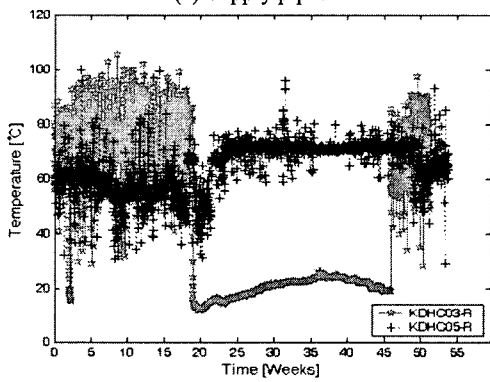
지역별로 측정된 온도 데이터를 크게 주배관과 사용자연결구간 배관으로 구분해 보았을 때, 주배관의 경우 열교환기와 직접 연결되기 때문에 1년 동안 지속적인 온도변화가 발생하였다. 사용자연결구간 배관의 경우 하절기(4월~10월)는 특성상 휴지기에 해당하므로, 이 기간 동안에는 대체적으로 상온(20℃)과 유사한 온도분포를 나타냈다. 그러나 KDHC05와 KDHC06 배관의 경우 1년 내내 온도변화가 지속됨을 확인하였다. Fig. 2는 사용자 연결배관 중 일반적 특성을 보이는 KDHC03 배관과 특이 경향을 보이는 KDHC05 배관의 온도변화를 공급관과 회수관 각각에 대해 비교한 것으로서 평균온도(T_{mean}), 온도차이(ΔT), 휴지기 유무 등이 상이함을 알 수 있으며, 각각의 영향은 이후 피로수명 평가결과와 연계하여 기술할 예정이다. 아울러 10개 지점에서 측정된 온도 데이터는 각각의 위치와 배관형태별로 상당한 차이를 보였다. 즉 Fig. 2의 KDHC05 배관과 같은 사용자 연결구간의 경우 회수관이 공급관에 비해 진폭의 변화량이 클 뿐만 아니라 훨씬 잦은 주기로 온도변화가 발생할 수 있다.

2.2 데이터 필터링

일반적으로 현장에서 측정된 데이터는 장비 및 환경의 영향 등으로 인해 잡음(noise)이 뒤섞인 형태로 기록되므로, 데이터 취득과정 중에 발생하게 되는 잡음 및 이상화에 따른 오차를 제거하기 위한 사전처리 작업이 필요하다. 본 연구에서는 최대/최소 필터링(peak/valley filtering) 및 최적의 임계값(threshold) 적용을 통해 해석에 필요한 적정 온도 데이터를 도출하였다. Fig. 3은 본 연구에서 수행한 최대/최소 필터링 작업 처리 순서도를 나타낸 것으로서, 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.



(a) Supply pipes



(b) Return pipes

Fig. 2 Two types of temperature transition at representative service connections

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	47,983	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

(sliding window)라고 하며 이 값이 클수록, 즉 평균의 계산을 위해 한 번에 취하는 데이터의 구간이 넓을수록 필터링 경향이 더욱 부드럽게 된다. 본 연구에서는 KDHC06 회수관에 한해 시행착오법(trial and error method) 및 현장 전문가의 검토를 거쳐 슬라이딩 윈도우를 15로 설정한 이동 평균 필터를 채택하였으며, 다음과 같은 차분방정식(differential equation)을 적용하였다.

$$y[n] = \frac{1}{15}(x[n] + x[n+1] + \dots + x[n+14]) \quad (1)$$

여기서, $x[n]$ 은 입력신호를, $y[n]$ 은 출력신호를 의미한다.

Table 2는 데이터 필터링 결과를 나타낸 것으로서, 원 데이터 수와 최종 필터링된 데이터 수의 비율(filtering ratio)도 함께 표시하였다. 필터링 비율은 KDHC04-S에서 1.57%를 나타내어 최종 데이터 수가 가장 적었고(4,252개), KDHC05-R에서 29.01%로 필터링 후의 데이터 수가 가장 많았다(78,734개). 이와 같은 차이가 발생한 주요 원인은 측정위치 및 배관형태별로 고유의 온도이력이 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

2.3 온도 데이터베이스 구축

데이터 처리를 위한 기존의 파일 시스템은 응용 프로그램들에 대해 개별적인 형태로 파일을 유지하고 사용하는데, 이로 인해 각 응용프로그램에서 필요한 데이터 파일의 중복현상 및 자료 불일치성(inconsistency) 문제가 발생할 수 있다.⁽⁵⁾ 따라서 데이터의 중복성 문제를 해결하고 데이터 접근에 있어 단일한 인터페이스를 제공하기 위해 전체 10개의 측정지역별로 온도 데이터베이스를 구축하였

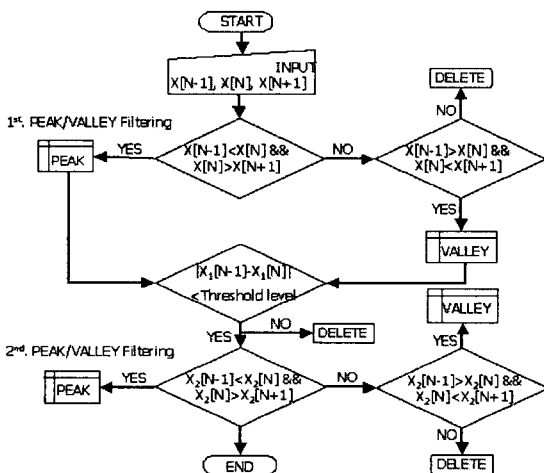


Fig. 3 The flowchart of peak/valley filtering

아울러 측정상의 문제로 인해 데이터의 변화가 매우 심한 경우 대표적 유한 임펄스 응답(Finite Impulse Response; FIR) 시스템인 이동 평균 필터(moving average filter or running average filter)를 사용하였다⁽⁴⁾. 이동 평균 필터에서 평균의 계산을 위해 한 번에 취하는 데이터의 구간을 슬라이딩 윈도우

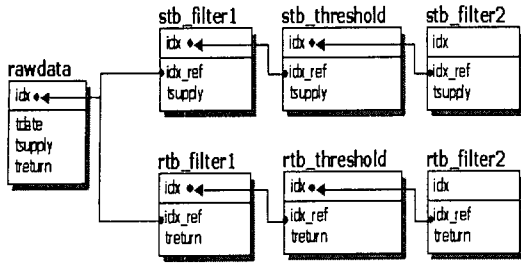


Fig. 4 Entity-relation diagram of the KDHC database

다. 이때 사용자 어플리케이션과 데이터베이스 사이의 인터페이스 역할을 수행하는 관계형 데이터베이스 관리시스템(Relational Database Management System; RDBMS)⁽⁶⁾을 채택하였다. 각 DB명은 머릿문자인 KDHC(Korea District Heating Corporation)에 일련번호를 부여하여 정의하였으며, 공급관은 'S', 회수관은 'R'로 표기하고 DB명과 하이픈(-)으로 연결하여 나타내었다.

한편 개별 온도 데이터베이스의 구조는 Fig. 4에 제시한 바와 같이 총 7개의 테이블로 구성되어 있다. 각각의 테이블은 원 데이터에서 최종 데이터에 이르기까지의 필터링 과정에서 발생하는 데이터들을 저장하고 있으며 측정일자에 대한 정보는 원 데이터를 저장하는 테이블에 한번만 기록하고 테이블간의 관계를 통해 접근하게 함으로써 중복성을 배제하였다. 여기서 rawdata는 측정된 온도 데이터를 저장하는 테이블, stb_filter1은 공급관에서 측정된 온도 데이터에 1차 최대/최소 필터링을 적용한 결과를 저장하는 테이블, stb_threshold는 공급관의 1차 최대/최소 필터링된 온도 데이터에 임계치 0.3℃를 적용한 결과를 저장하는 테이블, stb_filter2는 임계치를 적용한 온도 데이터를 최대/최소값으로 재정리한 온도 데이터가 저장되는 테이블, rtb_filter1은 회수관에서 측정된 온도 데이터에 1차 최대/최소 필터링을 적용한 결과를 저장하는 테이블, rtb_threshold는 회수관의 1차 최대/최소 필터링된 온도 데이터에 임계치 0.3℃를 적용한 결과를 저장하는 테이블, rtb_filter2는 임계치를 적용한 온도 데이터를 최대/최소값으로 재정리한 온도 데이터가 저장되는 테이블을 의미하며, 각 테이블에 저장된 값을 검토함으로써 필터링 과정의 타당성을 단계별로 확인할 수 있도록 하였다.

2.4 온도 사이클 계산

지역난방 열배관의 피로수명 예측은 변동하중 하에서의 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 계수법⁽⁷⁾의 종류는 매우 다양하며 횡단횡수계수법(level-crossing counting method), 극대

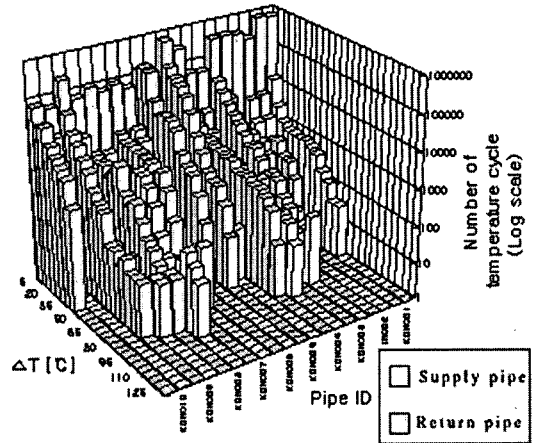


Fig. 5 Number of temperature cycles converted to 30 years

치계수법(peak counting method), 단순범위계수법(simple-range counting method), 낙수계수법(rainflow counting)⁽⁸⁾ 등이 주로 사용된다.

본 연구에서는 필터링 과정을 거쳐 최종적인 최대, 최소값으로 분류된 10개의 측정지점별 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. 5는 여러가지 형태의 사이클 계수결과 중 온도차이 항목으로 정리한 30년 기준 발생횟수를 대표적인 예로 제시한 것으로써, 온도차이의 최대값은 95℃이었다.

3. 사이클 기반 피로수명 평가

3.1 사이클 기반 평가법

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

$$N_0 = \frac{1}{(\Delta T_{ref})^b} \sum n_i (\Delta T_i)^b \tag{2}$$

여기서, ΔT_{ref} 는 기준온도로서(reference temperature) 배관의 온도조건에 따라 서로 다른 값을 가지나 일반적으로 110℃ 또는 최대 온도범위보다

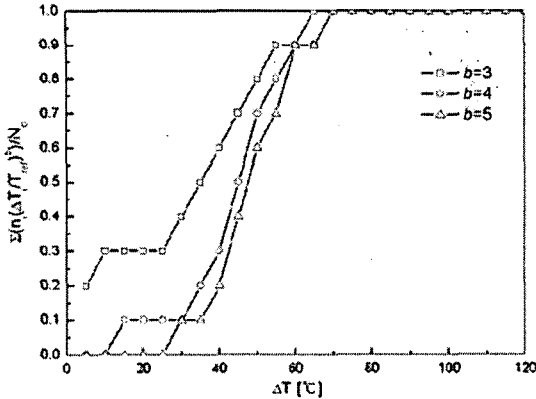


Fig. 6 Normalized cycles in accordance with b variation

10°C 작은 값으로 한다. b 는 log 좌표계로 표현된 피로곡선의 기울기를 나타내는 값으로써, 3 일 때 기울기가 가장 크고 5 일 때 기울기가 가장 작다. 본 연구에서는 ΔT_{ref} 값으로 90, 100 그리고 110°C 의 3 가지 경우를 모두 고려하였다. Fig. 6 은 KDHC01-S 배관을 예로 들어 ΔT_{ref} 가 110°C 일 때, b 값 변화에 따른 각각의 온도변화량이 전체 누적손상에 기여한 정도를 나타내고 있다. 즉, 0 ~ 40°C 의 온도변화가 전체 누적손상에 미친 영향이 $b=3$ 일 때 약 60%인 반면 $b=5$ 일 때에는 20%에 불과함을 알 수 있다.

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 앞서 기술한 바와 같이 약 4개월 동안의 데이터만 확보된 상태이므로 이를 먼저 1년 기준으로 확장한 후 환산하였다. IEA의 기준에 따르면 b 가 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 N_0 값이 크게 계산되었다. N_0 값이 KDHC01-S에서 크게 나타난 이유는 단속적인 발전 공급량 변화에 의해 급격한 온도차이(cold shock)가 불규칙하게 일어났기 때문인 것으로 판단되며, KDHC05-R 및 KDHC06-R에서 크게 나타난 이유는 타 사용자연결구간 배관과 달리 휴지기 없이 심한 온도차이가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 Table 3에 제시한 바와 같이 모든 열배관은 IEA의 기준을 만족하였다. 다만 이동

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)
		$b=3$	$b=4$	$b=5$	
KDHC01	S	243	71	28	250
	R	93	9	2	
KDHC02	S	32	3	0	250
	R	41	4	1	
KDHC03	S	233	92	52	2,500
	R	928	367	173	
KDHC04	S	404	225	137	2,500
	R	907	487	282	
KDHC05	S	58	7	2	2,500
	R	2015	487	140	
KDHC06	S	104	26	7	2,500
	R	2490	728	249	
KDHC07	S	90	27	12	2,500
	R	820	321	134	
KDHC08	S	612	297	164	2,500
	R	345	138	63	
KDHC09	S	49	24	16	2,500
	R	368	106	42	
KDHC10	S	21	2	2	2,500
	R	470	110	29	

평균 필터링을 수행한 KDHC06-R 배관의 경우 IEA의 제한범위에 상당히 근접한 결과를 보여주고 있으므로, 지역난방수 사용실태에 대한 상세분석 및 현장 전문가 검토 등을 통한 추가적인 신뢰성 검증과 측정시의 문제점 발생원인(root cause)을 보다 명확히 규명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 응력 기반 피로수명 평가

4.1 응력 기반 평가법

응력 기반의 수명평가는 온도차이에 의한 응력 변화 데이터와 재료의 피로곡선(S-N curve)을 이용하여 누적손상계수(Cumulative Usage Factor; CUF)를 계산하고 피로수명을 예측하는 기법이다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 잘 알려진 Miner's rule을 이용하여 다음과 같이 피로손상계수를 계산하였다.

$$UF_i = \frac{n_i}{N_i}, \quad CUF = \sum UF_i \quad (3)$$

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

IEA의 기준에 따라 지역난방 열배관에 적용하

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	
KDHC07	SPPS 370	3.9	60.5	3.2	125	29.05	6000
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	

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

는 온도하중 사이클 계수결과로부터 해당 응력을 계산하였다. 이때 온도변화에 따른 재료의 변형량 및 응력과의 관계는 다음의 간단한 선형 관계식을 사용하였다.

$$\sigma = E\varepsilon = E\alpha(\Delta T) \tag{4}$$

여기서, E는 탄성계수, ε는 변형률 그리고 α는 열팽창계수이다. 열팽창계수는 온도에 따라 그 값이 변화하는 값으로, 식 (4)를 적용하는 경우 변화하는 시간 항목에 대한 고려가 어렵기 때문에 평균 값을 취하여 응력을 계산하였다. 해석시 실제 배관의 재료인 A672 A55의 물성치를 적용하였으며, 탄성계수와 열팽창계수 값은 각각 198.17GPa 및 1.186×10⁻⁵°C⁻¹ 이었다.

4.2.2 유한요소법을 이용한 응력해석

배관의 형상 및 온도변화에 따른 재료물성치를 고려하여 보다 정확한 응력을 계산할 수 있는 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 지역난방 열배관은 이중보온관(Pre-Insulated Pipe; PIP)으로 되어 있으나 보온재(Rigid Polyurethane Foam; RPF)와 외관(casing foam)을 제외한 내관(carrier pipe)을 해석대상으로 선정하였다. Table 4는 실제 배관의 재질과 기하학적 형상을 정리한 것이다.

본 연구의 초기단계에 검토한 열배관의 유한요소모델은 Fig. 7과 같이 전체 모델과 대칭성을 고려한 1/4 모델의 2가지 형태이다. 그러나 배관의 형상이 단순하여 1/4 모델을 이용한 응력해석 결과는 전체 모델에 대한 결과와 동일한 반면 해석시간은 1/4 이하이므로 이를 채택하였다. ANSYS⁽¹⁰⁾를 이용한 유한요소망 생성시 I-DEAS 프로그램⁽¹¹⁾을 활용하였으며 요소의 종류로는 3차원 열전도 해석을 위해 8절점 직교성 요소(8-node

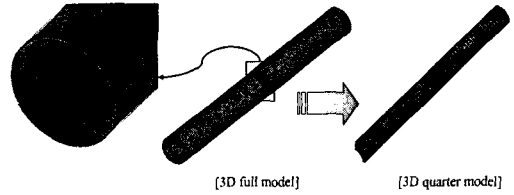


Fig. 7 Typical finite element meshes of DH pipes

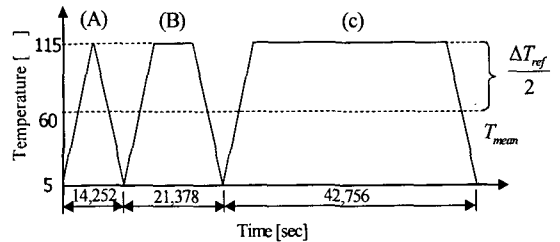


Fig. 8 Idealized typical load types of A, B and C

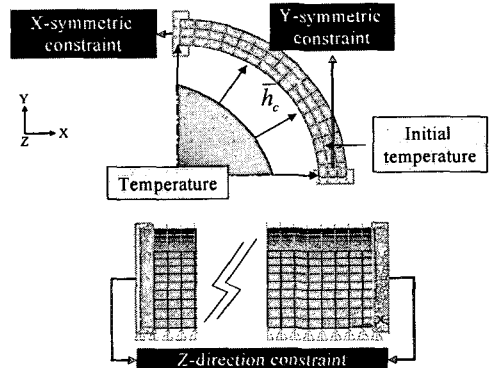


Fig. 9 Initial and boundary conditions of DH pipes

orthotropic element, 1-dof at each node)인 Solid70과 3차원 고체 구조 해석을 위해 8절점 직교성 요소(8-node orthotropic element, 3-dof at each node)인 Solid45를 선정하였다. 또한 배관 길이가 관심부위의 응력에 미치는 영향을 배제하기 위하여 배관의 길이 대 직경의 비율(L/d, L; length, d; diameter)은 10을 채택하였다.

해석에 사용한 지역난방 열배관의 재료물성치는 확보된 측정 데이터를 활용하였으며,⁽¹²⁾ 일부 측정값이 확보되지 못한 경우 문헌 조사를 통하여 결정하였다. 본 연구에서 고려하고 있는 지역난방 열배관의 재질은 Table 4에 나타난 바와 같이 A672 Grade A55와 SPPS 370 2가지이나 두 재료의 물성치는 동일하므로,⁽¹³⁾ 문헌^(14,15)에 제시된 온도변화에 따른 E, k, C_p, α 값을 사용하였다. 또한 유한요소해석시 고려되는 난방수에 대한 열전달계수(\bar{h}_c)는 식 (5)로부터 구하였다.

$$\bar{h}_c = \frac{24k}{11r_s} = \frac{48k}{11D} \tag{5}$$

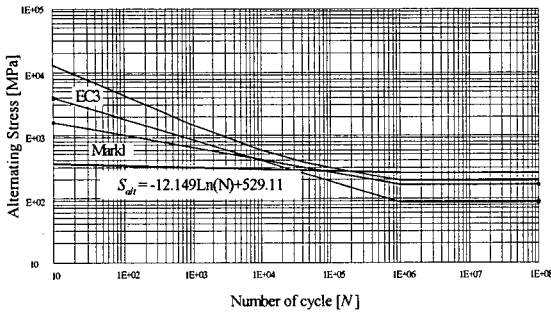


Fig. 10 S-N curve used in fatigue life evaluation

여기서, r_s 는 내관의 반지름, k 는 난방수의 열전도 계수 그리고 D 는 열배관의 내경이다.⁽¹⁶⁾

유한요소해석에 사용될 하중조건은 열배관 난방수의 온도변화 데이터이나, 방대한 측정 데이터의 직접 활용이 사실상 불가능하므로 데이터의 이상화가 요구된다. 본 연구의 초기단계에서는 5°C 간격의 개별온도사이클(each temperature cycle)과 상당전온도사이클(equivalent full temperature cycle)의 2가지 기준으로 과도상태(transient)를 이상화하였으며, Fig. 8과 같이 설정한 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. 또한 개별온도사이클의 경우 온도 간격에 따른 교변응력(alternating stress, S_{alt})이 대부분 내구한도(fatigue endurance limit) 이하로 나타남에 따라 상당전온도사이클을 이용하여 구한 해석값이 더 크게 나타났다. 이는 사이클 발생횟수 보다 절대적인 크기의 영향이 상대적으로 중요함을 의미한다. 따라서 방대한 양의 온도 데이터 이상화에 적합한 과도상태 (A) 및 보수적인 상당전온도사이클을 최종 하중조건으로 선정하였다.

3차원 유한요소해석시 사용기일 때와 휴지기일 때의 배관 초기온도로 각각 80°C와 20°C를 부여하고 내부 벽면에 이상화된 온도하중을 적용하여 과도해석을 수행하였다. 경계조건은 실제 구조물의 설치상태와 하중 작용상태를 최대한 반영할 수 있도록, Fig. 9와 같이 열배관을 축방향으로는 구속시키고 반경방향으로는 자유롭게 수축 및 팽창할 수 있도록 하였다. 이를 통해 계산한 응력강도(stress intensity)는 사용기 및 휴지기 조건에서 각각 236.7MPa와 236.3MPa로 거의 유사하게 나타났다. 따라서 사용기 조건 초기온도를 설정하고 10개 측정위치에서의 공급관 및 회수관에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

4.3 피로수명 평가

4.3.1 피로곡선 결정

정확한 피로수명 평가를 위해서는 피로시험을 통해 특정 재료의 피로곡선을 직접 결정하는 것이

Table 5 Stress-based fatigue life evaluation results

Location	Pipe	$CUF_{30\text{-Years, Equation}}$	$CUF_{30\text{-Years, FEA}}$
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

바람직하나, 이를 위해서는 상당한 비용과 시간이 소요된다. 본 연구에서는 문헌조사^(3,12)를 통해 Fig. 10과 같이 유사재료의 피로곡선을 확보하고 비교하였으며, 이중 열배관에 실제 작용하는 교변응력에 의해 가장 보수적인 결과를 제공하는 EC3을 최종 선정하였다. 또한 유사재료의 피로곡선 사용에 따른 불확실성을 보완하기 위해 피로수명 평가시 10^6 사이클인 EC3의 내구한도를 10^7 사이클까지 보수적으로 외삽하여 적용하였다.

4.3.2 이론식을 이용한 피로수명 평가

측정 온도 데이터를 토대로 식 (4)를 이용하여 열응력을 계산하고, 이 결과를 Miner's rule에 적용하여 응력 기반 피로수명 평가를 수행하였다. Table 5는 전체 배관에 대해 1년간 측정된 데이터로 계산한 누적손상계수를 30년 사용기준으로 환산하여 구한 값($CUF_{30\text{-Years, Equation}}$)을 정리한 것이다. 표에 제시한 바와 같이 모든 열배관에서의 $CUF_{30\text{-Years, Equation}}$ 은 1.0 이하의 값으로써 응력 기반 피로수명 기준을 충분히 만족하였다.

4.3.3 유한요소해석을 통한 피로수명 평가 검증

사이클 기반 및 이론식을 이용한 응력 기반 피로수명 평가 결과의 타당성 검증 차원에서 유한요소해석 결과를 이용한 응력 기반 피로수명 평가를 수행하였다. 이를 위해 먼저 배관의 주응력(principal stress)과 주응력 방향에 따른 교변응력을 결정한 후 EC3 피로곡선을 이용하여 안전성을 평가하였으며, 피로수명 평가결과($CUF_{30\text{-Years, FEA}}$)는 Table 5에 함께 제시하였다. 표에서 확인할 수 있

듯이 사이클 기반 피로수명 평가결과와 유사하게 KDHC05-R 및 KDHC06-R 배관에서의 CUF가 가장 크게 나타났으나, 그 절대값은 무시할 수 있을 정도로 작았다. 따라서 상대적으로 다소 높기는 하나 이론식을 이용한 결과와 마찬가지로 모든 열배관은 피로수명 기준을 충분히 만족하였다. 아울러 이론식을 이용한 피로수명 평가결과와 다소 차이를 보이는 이유는 기하학적 형상변화와 온도 의존적인 재료물성치를 보다 충실히 반영하였기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

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

(1) 2분 당 1개의 샘플링 속도로 측정된 온도 데이터의 효율적 활용을 위하여 필터링 임계치를 비교 분석하였으며, 그 결과 0.3℃를 최적의 값으로 결정하였다.

(2) 필터링한 온도 데이터를 낙수계수법을 적용하여 평균온도(T_{mean})와 온도차이(ΔT)로 재정리한 결과, 연속된 두 데이터의 온도차이는 대부분 5℃ 미만으로 계수되었다. 이는 일반적으로 내구한도 이하의 응력값에 해당하므로 배관의 피로수명에는 큰 영향을 미치지 않는다.

(3) 평가법에 따라 다소의 차이는 있으나 전반적으로 주배관(KDHC01, KDHC02)의 경우 공급관의 피로파손 가능성이 회수관에 비해 다소 큰 반면, 사용자연결구간 배관(KDHC03~KDHC10)의 경우 회수관의 피로파손 가능성이 공급관에 비해 크게 나타났다.

(4) 일부 급격한 온도차이(cold shock)가 발생하는 주배관과 휴지기가 없는 사용자연결구간 배관을 제외하면, 피로손상 측면에서 주배관과 사용자연결구간의 큰 차이점은 없었다. 또한 휴지기 유무에 따른 영향은 열배관 유형 및 평균온도 차이의 영향에 비해 크지만, 피로수명은 온도차이에 의해 가장 크게 좌우되는 것으로 판단된다.

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

(6) 온도 데이터를 효율적으로 관리할 수 있는 관계형 데이터베이스를 구축하였으며, 이는 궁극적으로 운전이력을 고려한 열배관의 체계적 피로수명 관리에 활용될 수 있다.

후 기

본 논문은 한국지역난방공사 및 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들에게 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) International Energy Agency, "http://www.iea.org," accessed on Dec. 15, 2004.
- (2) Korea District Heating Corp., "http://kdhc.co.kr," accessed on Dec. 15, 2004.
- (3) Randlov, P. and Hansen, K.E., 1996, "Temperature Variations in Preinsulated DH Pipes Low Cycle Fatigue," International Energy Agency.
- (4) McClellan, J.H., Schafer, R.W. and Yoder, M.A., 1997, "DSP First: A Multimedia Approach," Prentice Hall, pp. 134~149.
- (5) Silberschatz, A., Korth, H.F. and Sudarshan, S., 2002, "Database System Concepts 4th Edition," McGrawHill, New York, pp. 3~4.
- (6) Kim, Y.H., Woo, S.M. and Kim, T.K., 2003, "Database Modeling," FreeLec, pp. 31~33.
- (7) Bannantine, J.A., Comer, J.J. and Handrock, J.L., 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," 1th Edition, Prentice Hall, pp. 184~196.
- (8) Matsuishi, M. and Endo, T., 1968, "Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress," paper presented to Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan.
- (9) Bannantine, J.A., Comer, J.J. and Handrock, J.L., 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis" Prentice Hall, pp. 178~184.
- (10) I-DEAS, 2000, "I-Deas Assembly Design," SDRC Korea.
- (11) ANSYS, 2004, "Introduction to ANSYS 8.0," ANSYS Inc.
- (12) Kim, J.G., 2002, "A Study on Corrosion Fatigue Crack for District Heating Pipes," Sungkyunkwan Univ.
- (13) ASME, 1998, "Rules for construction of nuclear power plant components," B&PV Code Sec. III, Div. 1, Subsection NB, ASME, New York, pp. 68~92.
- (14) ASME, 1989, "Ferrous Materials," B&PV Code Sec. II Material Specifications Part A, ASME, New York.
- (15) Pipe & tube information and international trade center, "http://www.e-pipe.co.kr," accessed on Dec. 15, 2004.
- (16) ASTM, 1989, "Carbon Steel, Low and Intermediate-Tensile Strength," A 672 and A 285/A 285M Pressure Vessel Plates, pp. 537~541.