

## 선박용 calorifier의 고장모드에 대한 근본원인분석

이덕보\* · 김정현\* · 강수근\* · 강영복\*\* · 김형삼\*\*

\*한국표준협회 신뢰성기술경영센터 · \*\*(주)해인산업

### Root Cause Analysis on Failure Mode of Calorifier for Vessel

D. B. LEE · J. H. KIM · S. K. KANG · Y. B. KANG · H. S. KIM

#### Abstract

Basic function of calorifier system is to supply warm water to the vessel. The heater used in the calorifier system plays a very important role in its reliability. The failure mechanism of heater are compared with accelerated life test. The main cause of failed heater is pitting corrosion occurred between the surface of heater and spacer. To prevent the corrosion failure from heater, material of spacer replaces metal(SUS 304) with polymer(Acryl). The life of redesigned heater can guarantee 2.47years of B10 life under the worst condition.

Key Words : Accelerated Life Test(가속수명시험), Failure Analysis(고장분석), Reliability(신뢰성), Calorifier(온수공급 장치), Product liability(제조물 책임)

## 1. 서론

선박은 지구상의 운송 수단 중에서 운송물량이 가장 많은 운송수단이며 인류가 존재하는 한 선박은 없어서는 안 될 중요한 운송수단이다. 선박이 출항하면 수주 또는 수개월 동안 육지와 고립되어 항해 중 선박의 부품이나 소재가 파손에 의한 기기의 고장이 발생할 경우, 항해 중 선박 자체 내에서 부품의 교환 또는 수리하며 교체와 수리가 불가능할 경우 응급조치만 하고 귀항한 후 수리한다. 또한 선박자체 내에서 수리 및 부품교환이 불가능한 경우 선박의 안전에 막대한 영향을 주며, 특히 선박 항해에 관련된 주요한 기기의 고장은 해난사고 및 인사사고와 연결되어 급히 회항하거나 근처에 있는 외국 항구에 정박하는 사례도 발생한다. 선박이 회항이나 인근국 항구에 정박할 경우, 운송기간, 항구 사용료 등의 비용이 발생하기 때문에 주요기기의 고장이 발생한 경우에도 무리하게 항해하여 해난사고를 일으키는 경우도 종종 발생한다. 따라서 선박기에 사용되는 부품이나 소재에 대한 신뢰성은 다른 육상기기보다 고 신뢰성을 요구되기 때문에 주요기에 사용되는 부품이나 소재에 대해서는 대부분이 수입품에 의존하는 실정이다.

온수공급기기(Calorifier)는 선박에 사용되는 온수를 공급하는 장치로서 선원들의 복지시설(목욕, 샤워용 온수공급) 및 주방(식기세척, 취사용 온수공급)에 사용되는 주요기기이다. Calorifier의 주요 부품으로는 크게 히터부, 히터제어부, 전원부로 나눌 수 있다. 히터 제어부의 고장은 응급조치로서 온도조절을 수동으로 하는 비상수단으로 사용할 수 있고, 물 공급장치부의 경우는 비상펌프로 대체가 가능하다. 하지만, 히터부의 고장은 히터부품을 교체하지 않고서는 인위적으로 해결할 수 있는 방법이 없다.

국내에서 제작하는 Calorifier의 히터 부품의 평균수명은 10개월 내외이며, 연간A/S율은 7%(1.75억원)로 Calorifier를 선박에 납품 할 때는 히터부품이 보증기간(1년)내에 고장이 일어나기 때문에 A/S차원에서 2개의 히터를 공급하는 실정이다. 또한 수입히터 제품의 가격은 국산품에 비해 2배이며, 소량은 판매하지 않기 때문에 국내선박에서는 신뢰성이 떨어지지만 국산제품을 사용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 Calorifier의 주요 부품인 히터의 신뢰성 향상을 위해 고장품에 대한 고장분석과 대책안을 제시하고 새롭게 설계된 히터부품의 수명예측에 관한 결과를 보고하고자 한다.

## 2. 고장률과 Bx수명의 이론적 배경

### 2.1 고장률과 Bx수명의 새로운 정의

신뢰성 척도에서 말하는 고장률<sup>1)</sup>에 대한 정의는 고장난 샘플수를 총 시험 시간으로 나눈 값으로 정의 된다.

$$\lambda(t) \equiv \frac{r}{\sum t_i} \cong \frac{r}{n \cdot h} \quad (1)$$

여기에서  $\lambda$ 는 고장율,  $r$ 은 고장수,  $t_i$ 는 각 샘플에 걸린 총시간,  $n$ 은 시험 샘플 수,  $h$ 는 시험 시간을 나타낸다.

또한 지수분포와 와이블 분포에서 누적 고장률이 63.2%인 특성수명은 최우추정법에 의한 와이블 분포로 계산이 가능하다.

$$n^\beta = \frac{\sum t_i^\beta}{r} \cong \frac{n \cdot h^\beta}{r} \quad (2)$$

여기에서  $\eta$ 는 특성수명,  $\beta$ 는 와이블 분포의 형상 파라미터를 나타낸다. 형상 파라미터( $\beta$ )는 동일한 부품일 경우 그 값은 변하지 않지만, 특성수명( $\eta$ )은 동일한 부품일지라도 부품의 사용조건이나 재료의 상태에 따라 변하는 특징을 갖고 있다.

한편, 최근의 전기·전자 또는 기계류 부품들은 신뢰성이 향상되어 신뢰성 시험 중에 고장이 잘 발생하지 않는 경우가 많다. 고장이 발생하지 않은 경우, 식 (1)을 이용한 고장에 대한 평가는 고장수가 0이기 때문에 불가능하게 된다. 또한 식 (2)의 특성수명에 있어서도 고장이 0이면 무한대로 되어 제품수명에 대한 평가가 불가능하게 된다.

따라서 본 연구에 있어서는 유 동수2) 등이 제안한 고장수가 0이라도 고장률과 수명을 예측할 수 있는 새로운 개념을 도입하였다. 유 동수 등이 제안한 고장률과 수명의 새로운 정의는 식 (1)과 (2)의 고장수  $r$  대신에 고장수 1을 더한  $(r+1)$ 을 대입하여 고장수가 0이어도 제품의 고장률과 수명을 예측할 수 있게 한 것이다.

$$\lambda \cong (r+1) \cdot \frac{1}{n \cdot h} \quad (3)$$

$$n^\beta \cong \frac{1}{(r+1)} \cdot n \cdot h^\beta \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 이용한 고장률과 수명예측에 있어서의 신뢰수준은 약 60%이다. 즉, 앞에서 기술한 바와 같이 최근 개발제품에 있어서는 PL(제조물 책임)법의 강화와 신뢰도가 높은 제품 요구가 급증하여 제품제조회사들은 개발단계에서부터 신뢰성시험에 의한 고 신뢰성 제품을 출시한다. 따라서 신뢰성시험에서 일어나는 고장수는 대부분 4이하의 때문에 Poission 분포를 적용이 가능하다. 모수가  $r+1$ ( $r=0$ 을 포함한 자연수)일 때  $r+1$ 의 사상이 나타나는 확률은 약 60%이다. 즉,  $r$ 건의 고장이 일어났을 때 고장수 하나를 더 추가해서 더한  $r+1$ 로 추정된 고장률의 신뢰수준은 약 60%가 된다. 따라서 식 (3)과 식 (4)의  $(r+1)$ 항은

$$\lambda \cong \frac{\chi_a^2(2r+2)}{2} \cdot \frac{1}{n \cdot h} \cong (r+1) \cdot \frac{1}{n \cdot h} \quad (5)$$

$$n^\beta \cong \frac{2}{\chi_a^2(2r+2)} \cdot n \cdot h^\beta \cong \frac{1}{(r+1)} \cdot n \cdot h^\beta \quad (6)$$

여기서  $\chi_a^2$ 은 카이제곱분포에 대한  $100(1-\alpha)$ 백분위를 나타낸다.

한편, 와이블 분포에 있어서 특성수명은 Bx수명으로 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$L_B^\beta = \ln(1-x)^{-1} \cdot \eta^\beta = \left(x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \dots\right) \cdot \eta^\beta \quad (7)$$

$$\cong x \cdot \eta^\beta$$

여기에서 LB는 Bx수명, x는  $x \leq 0.2$ 의 조건(테일러 급수전개)에서  $x = 0.01 \cdot X$  나타낸다. 따라서 Bx수명은 식 (6)으로 부터

$$L_B^\beta = x \cdot \frac{1}{r+1} \cdot n \cdot h^\beta \quad (8)$$

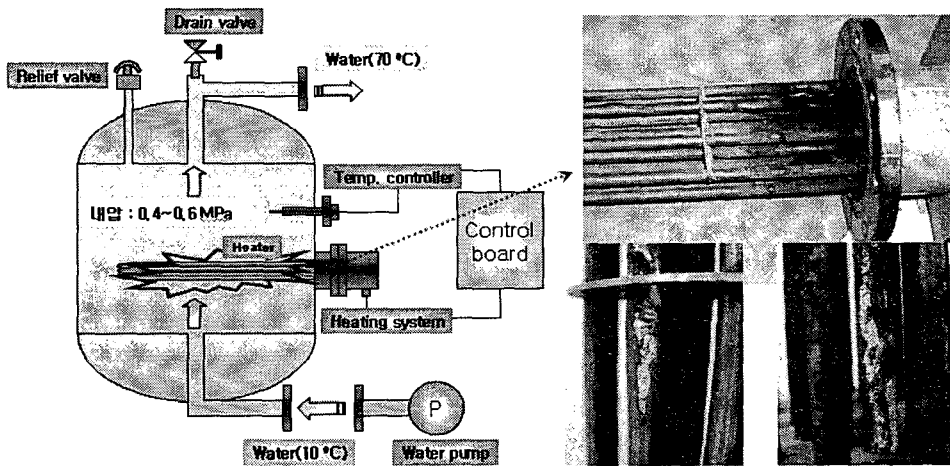
이다. 또한 식(8)의 x를  $x = \bar{\lambda} \cdot L_B$  라고 하면, 평균고장을  $\bar{\lambda}$ 은

$$\bar{\lambda} \cong \frac{1}{L_B} \cdot (r+1) \cdot \frac{L_B^\beta}{n \cdot h^\beta} \quad (9)$$

가 된다.

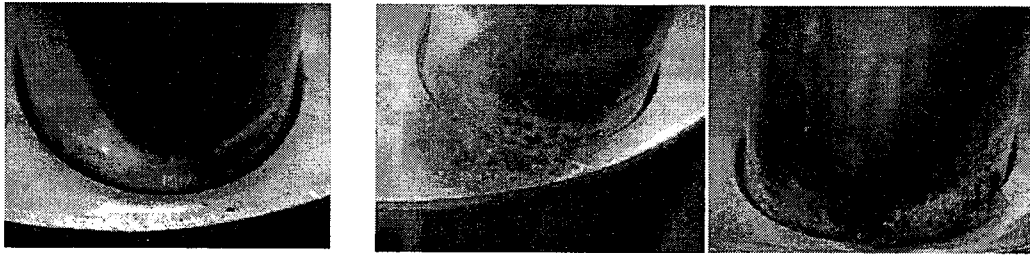
## 2.2 Calorifier의 필더(field) 고장분석

Calorifier는 청수탱크로부터 물을 공급받아 물을 히팅하는 히터부, 히터에 전원을 공급하는 전원부, 온도조절을 담당하는 제어부로 크게 3부분으로 나눌 수 있다.



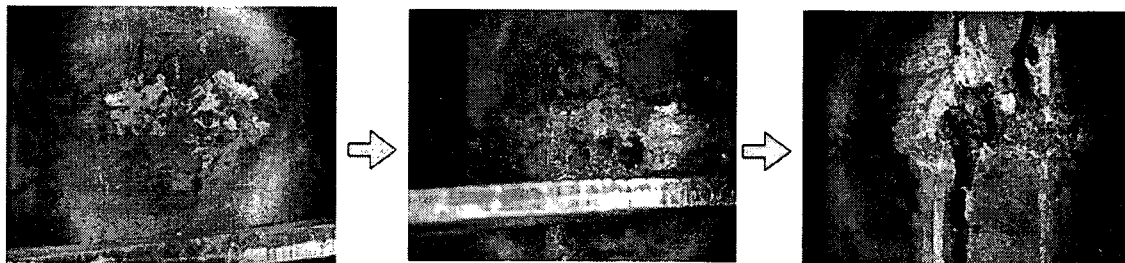
(a) Operational fundamentals in calorifier (b) Field data of failed heater

Fig. 1 Operational fundamentals and field data in calorifier



(a) No corrosion (b) Occurrence corrosion at contact portion between heater surface and spacer

Fig. 2 Occurrence portion of pitting corrosion in calorifier



(a) Occurrence of pitting corrosion (b) Pitting corrosion growth (c) Crack propagation

Fig. 3 Failure analysis of failed heater occurred by field

그림 1은 Calorifier의 내부구조를 나타내었다. 청수탱크에 있는 청수를 급수 펌프에 의해 펌핑 되어 온수공급 탱크로 청수가 공급되면 파이프 히터에서 히팅 된다. 이때 온수공급 탱크의 내압은 0.4~0.6Mpa이 되고 탱크의 내압이 한계압 보다 크게 되면 안전변이 작동하여 온수공급 탱크압을 일정하게 유지하게 된다. 또한 드레인 밸브에 의해 파이프나 탱크내부의 공기 등을 드레인하며 수온은 약 70℃로 일정히 유지되고, 온수는 출구 밸브를 통하여 주방이나 샤워실 및 목욕탕으로 공급된다.

Calorifier의 주요고장은 그림 1(b)에 나타난 것과같이 히터 부품에 의한 고장이 대부분을 차지하였다. 제어부와 온도조절부의 고장인 경우는 스페어 부품으로 교환하면 해결되지만, 히터부의 열선의 단선은 쉽게 수리가 불가능하다.

그림 2은 필드고장품의 히터 부식부를 관찰한 결과를 나타내었다. Calorifier에 사용되는 히터는 인접하는 히터 파이프사이의 복사열에 의해 파이프 내부에 장착된 열선이 용해되는 현상을 방지하기 위하여 히터 파이프사이의 일정한 각격을 유지해야 한다. 따라서 히터 파이프사이에는 간격자를 설치하여 복사열에 의한 열선의 용해 현상을 방지한다. Calorifier에 사용되는 히터파이프의 재질은 SUS304를 사용하고 간격자 재질도 SUS304계열의 강을 사용하고 있다. 그림 3에 나타난 것과 같이 Calorifier의 부식은 히터와 간격자가 접촉하는 부분에서 부식이 발생하는것을 알았다.

그림 3는 필드 고장품을 고장분석한 결과를 나타내었다. Calorifier의 히터 파이프 고장 메커니즘은 히터 표면과 히터 파이프 사이의 간격을 유지하기 위한 간격자(Spacer)와 히터 파이프 표면 사이에 점부식이 발생하고, 발생한 점부식 부분이 선체의 진동이나 히터의 열 피로에 의해 합체와 성장을 함으로서 결국 크랙으로 발전하고 생성된 크랙으로 부터 수분이 침투하여 히터부 고장이 발생하는 것 이였다.

### 3. 실험

#### 3.1 Calorifier 사용환경

Table 1은 Calorifier의 사용환경을 나타내었다. Calorifier의 사용환경은 Table에 나타낸 것과 같이 청수탱크로부터 공급된 물을 70℃로 히팅 하고 항상 히터 파이프는 Calorifier물탱크에 잠겨져있어 습도는 100%이며, Calorifier의 설치 장소는 기관실이므로 주기관의 기동, 발전기 병렬운전 및 기타 부속장치들의 작동시 평균 2g정도의 진동을 받는다. 또한 Calorifier의 사용조건은 Table 2에 나타낸 것과 같이 normal 한 경우 시간당 3회로 사용시간은 12시간이지만, worst한 경우는 24시간 사용하는 경우로 하였다.

한편 신뢰성 시험에 있어서는 보통 worst한 조건으로 설정하고 목표 수명에 대해서도 worst한 조건으로 한다. 이것은 worst한 조건으로 설정하면 normal한 조건을 모두 만족할 수 있기 때문이다3).

본 연구에 있어서 Calorifier의 목표수명은 B10수명 2년으로 하였다. 따라서 Table 2에 나타낸 사용조건을 가장 worst한 조건으로 목표수명 2년을 하였기 때문에 52,560사이클을 고장없이 만족하도록 설계하면 된다.

#### 3.2 가속수명시험

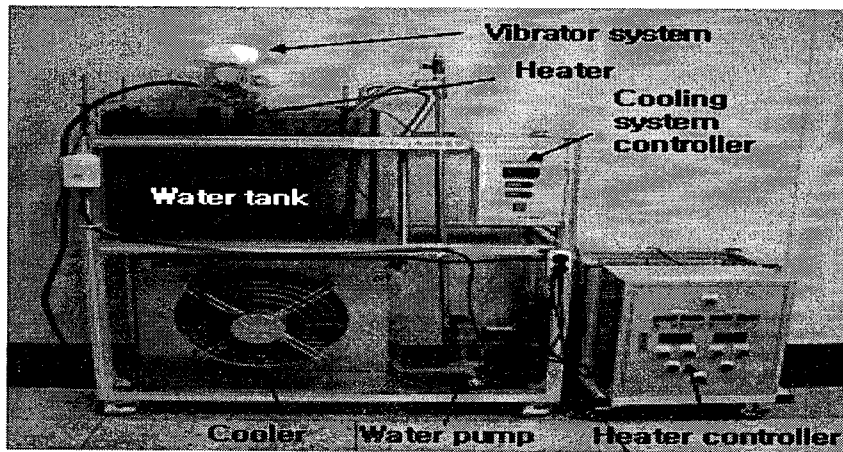
그림 4는 Calorifier의 필더고장을 재현하기 위한 가속수명시험 장치를 나타내었다. 가속 시험에 앞서 시료수 계산은 식 (8)을 이용하여 계산하였다.

Table 1 Operating condition in calorifier

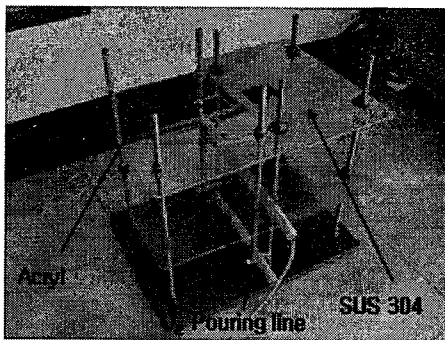
Item	Operating condition		
	Temperature	Humidity	vibration
Calorifier	< 70℃	100%	2g(Avg.)

Table 2 Operating cycle in calorifier

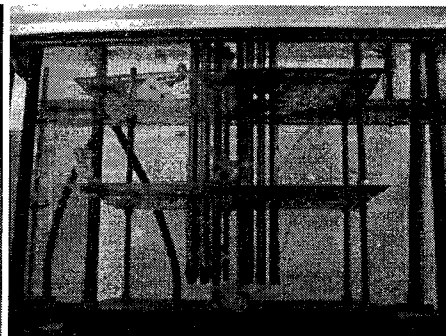
Issues		Operating cycle			
		1 day		2 years	
		Normal	Worst	Normal	Worst
Calori-fier	cycle/ hour	3	3	3	3
	hour	12	24	8,760	17,520
	cycle	36	72	26,280	52,560



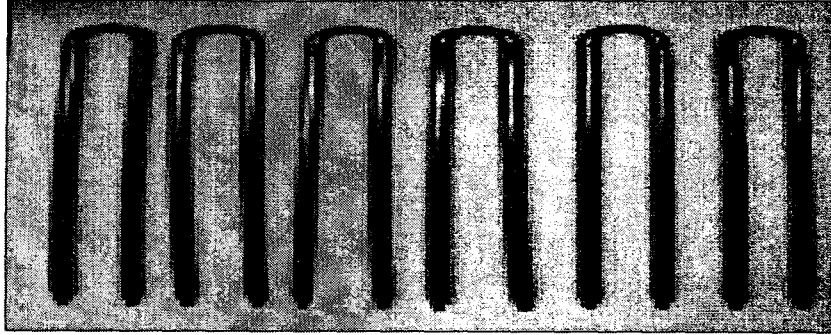
(a) Accelerated life test(ALT) system



(b) Spacer



(c) Water Tank



(d) Specimens

Fig. 4 Specimens and accelerated life test system

$$n \geq (r+1) \cdot \frac{1}{x} \cdot \left( \frac{L_B}{AF \cdot h} \right)^\beta \quad (10)$$

여기에서  $n$ 은 시료수,  $r$ 은 고장수,  $x$ 는  $B_x$ 수명에서의  $x$ 백분율,  $L_B$ 는 보증수명,  $AF$ 는 가속계수,  $h$ 는 시험시간,  $\beta$ 는 형상계수를 나타낸다.

식(10)에 내포되어 있는 시료수( $n$ )의 의미는  $n$ 개의 시료수를 이용하여 시험 한 경우 목표로 하는 보증수명( $L_B$ )까지 시험해서 고장수( $r$ )가 1개 이하이면 신뢰수준 60%에서 목표수명( $B_x$ 수명)까지 보증 할 수 있다는 것이다. 즉 본 연구에서 산출된 시료수는 6개이고, 시료수 6개를 52,560회 시험해서 고장수 1개 이하 이면, 신뢰수준 60%에서  $B_{10}$ 수명 2년을 보증할 수 있다.

식 (10)을 이용한 시료수 계산에 있어서  $L_B$ 의 경우 Table 2에서 나타낸 목표수명( $B_{10}$ ) 2년에 맞추어 52,560회로 하였고 가속계수( $AF$ )와 형상계수( $\beta$ )는 시장 데이터로부터 각각 18.3와 2로 추정된 추정치를 이용하였다. 가속시험에 있어서 간격자는 그림 4(b)에 나타낸 것과 같이 아크릴과 SUS304를 사용하였다. 또한 부식을 가속시키기 위해 수조내부로 산소를 공급하는 장치를 설정하였고, 산소량은 공기중에 산소가 20%로 일정하게 존재하는 사실을 이용하여 대기중의 공기를 공기펌프로 공급하도록 하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 가속수명시험의 타당성

Calorifier 필더 고장품의 고장 메커니즘은 2.2절에서 기술한바와 같이 히터 파이프 표면에 점부식이 발생하여 성장과 합체에 의한 크랙으로 규정하였다. 따라서 본 연구의 가속수명시험



에 있어서 고장은 시간을 단축하는 목적으로 히터 파이프의 점 부식이 발생하는 시점을 고장이라고 정의하였다. 또한 가속수명시험의 타당성 검토에 있어서는 고장의 현상이 동일하게 발생하는 것과 2.1절에서 기술한 동일 부품일 경우 형상계수인  $\beta$  값이 변하지 않는다는 점을 착안하여 가속수명시험에서 고장데이터와 필더 고장품의 데이터의 형상계수값을 비교하여 가속수명시험의 타당성을 검증하였다.

그림 5는 가속수명시험에서의 발생한 고장품을 나타내었다. 필더 데이터의 고장품(Fig. 2(a))과 동일하게 가속수명시험에서도 점부식이 발생하였다. 또한 그림 6에 나타난 와이בל 해석에 있어서 형상계수의 값이 필더 데이터의 경우 3.2이고 가속수명시험 데이터는 3.05로 거의 동일하다. 따라서 본 연구에 있어서의 가속수명시험은 Calorifier의 고장재현시험으로서의 타당성이 있다는 것을 알았다. 또한 가속계수(AF)의 경우, 추정치는 18.3이었지만, 실제 시험으로부터 구한 AF(특성수명의 비)값은 7.09로 나타났다.

#### 4.2 간격자 변경에 따른 수명예측

필더 데이터와 가속수명시험 데이터 분석결과 Calorifier의 주요고장모드는 히터 파이프와 각격자 사이의 점부식에 의한 것이라는 것을 알았다. 따라서 점부식 방지책으로서 본 연구에서는 간격자의 재질을 SUS304에서 아크릴 변경하고 다시 가속수명시험을 실시하였다. 간격자를 아크릴로 채택한 이유는 본 연구에서 사용되는 Calorifier의 가열온도는 70°C내외이고 히터 표면온도를 측정된 결과 약 85°C정도이므로 아크릴의 내열온도는 82~93°C로 내열성에서도 충분하고 또한 제조단가를 고려하여 보다 내열성이 높은 고분자를 채택하지 않았다. 가속수명시험에 앞서 시료수 계산은 2.1절에서 기술한 식(10)를 이용하였고 가속계수(AF)와 형상계수( $\beta$ )는 1차 가속수명시험에서 구한 값으로 7.09와 3.05를 사용하여 시료수를 계산하여 3개의 시료를 사용하였다.

그림 7은 아크릴 간격자를 사용한 가속시험 결과를 나타내었다. 아크릴 간격자를 사용한 경우 히터파이프의 표면은 전혀 점부식이 발생하지 않았다.

한편, 아크릴 간격자를 사용한 Calorifier의 수명예측에 있어서 Table 3에 나타난 가속수명시험 결과를 식(8)과 (9)에 대입하여 B10수명과 MTTF를 계산한 결과를 Table 4에 나타내었다. SUS304 간격자를 사용한 경우 B10수명은 0.18년(약 66일)이었지만, 아크릴로 변경한 경우 B10수명 2.47년으로 목표수명을 초과하였다.

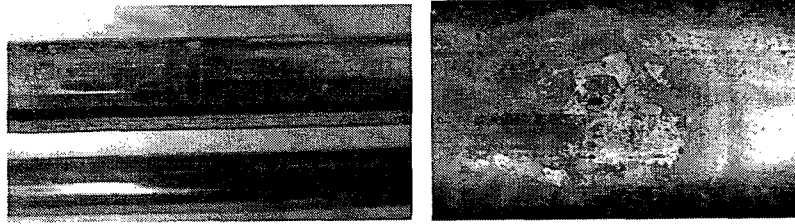


Fig. 5 Result of accelerated life test

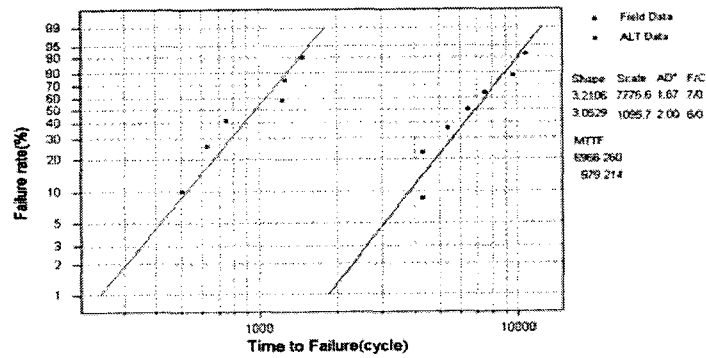


Fig. 6 Weibull analysis of Field and ALT data

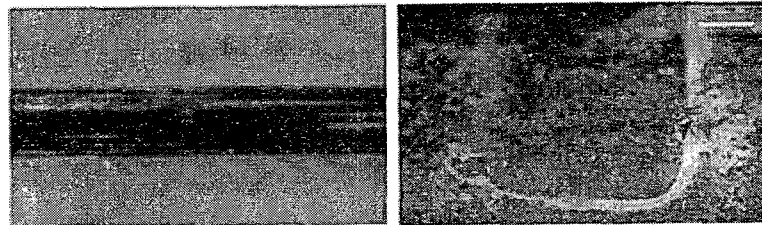


Fig. 7 Surface of heater pipe used by acryl spacer

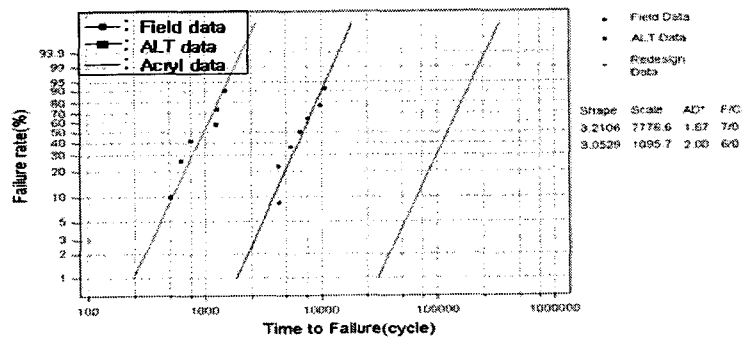


Fig. 8 Weibull analysis of acryl spacer ALT data

## 4. 결 론

Calorifier의 주요 부품인 히터의 신뢰성 향상을 위해 고장품에 대한 고장분석과 새롭게 설계된 히터부품의 수명예측에 관한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Calorifier의 주요고장모드는 히트파이프 표면과 간격자 표면사이의 점부식에 의한 것이었다.
- (2) 히트 파이프의 고장메커니즘은 열피로와 진동에 의한 점부식의 성장과 합체가 크랙으로 성장하여 크랙을 통한 수분침투이다.
- (3) 간격자를 SUS304에서 아크릴로 변경한 경우 B10 수명이 2.47년으로 목표수명을 초과하였다.

Table 3 Field and ALT data

Items		$AF$	$\beta$	$n$	$r$	$h$
Field data		—	3.21	7	7	3,600
ALT	SUS304	7.09	3.05	6	6	490
	Acryl	7.09	3.05	3	0	4,520

Table 4 B10 life obtained by Field and ALT data

		Object life ( $B_{10}$ , year)	$B_{10}$ life (year)	MTTF (month)
Field data		2	0.17	6.45
ALT	SUS304	2	0.18	0.91
	Acryl	2	2.47	—

## 참고문헌

- [1] Lee, S.Y., 2003, "Reliability Engineering" Seoul, hyung seol, pp 9-15
- [2] Ryu, D. S. and Chang, S. W., 2005, "Novel Concepts for Reliability Technology," Microelectronics Reliability, Vol.45, pp. 611-622.
- [3] Ryu, D. S., 1999, " Technology Innovation," Seoul, Hanseung, Appendix 5.