

냉장고용 압축기의 가속수명시험을 위한 가혹조건 탐색
- 고온 가혹조건에서의 가속계수와 단축 시험기간 -
Investigation into the Worst Stress Condition for an Accelerated
Life Test of a Compressor in Refrigerators
- Acceleration Factor and the Reducible Test Time under High Temperature -

정영미* · 주우진** · 정석권*[†]
 Y. M. Jung*, W. J. Joo** and S. K. Jeong*

(접수일 : 2011년 12월 07일, 수정일 : 2012년 01월 18일, 채택확정 : 2012년 01월 30일)

Key Words : Reliability qualification test(신뢰성보증시험), Accelerated life test(가속수명시험), Refrigerator's compressor(냉장고 압축기), Worst stress condition(가혹조건), Acceleration factor(가속계수), 10°C law(10°C 법칙), High temperature condition(고온조건)

Abstract : The reliability qualification test is essential in order to ensure the life time of the product under the normal operation conditions when a new product is developed. The reliability qualification test period has an important impact on the development time of new product. Therefore, some researches to reduce the test time of reliability qualification test have been actively studied. Generally, accelerated life test is well known as one method that can save the test time of the reliability qualification test. This test is conducted under the higher stress condition than normal condition. So we need to investigate what factor affects to the higher stress condition. This paper shows the relationship between the acceleration factor and reliability qualification test period. Especially, we focused on the method to obtain effective acceleration factors under the high temperature condition. Through some experiments for a refrigerator's compressor, we were able to confirm how to increase acceleration factors and how to reduce the reliability qualification test period with minimum samples.

1. 서 론

최근 과학기술이 눈부시게 진보함에 따라 다방면에서 새로운 제품이 개발, 출시되고 있다. 다양한 제품의 개발이 활발하게 진행되면서, 개발된 제품의 신뢰성에 대한 관심도 함께 높아지고 있다. 개발된 제품이 안정적으로 얼마동안 사용할 수 있는지를 평가하는 신뢰성보증시험(reliability qualification test)은 신제품 개발에 필수적이며, 이 시험기간이 신제품 개발기간에 큰 영향을 미치기 때문에 이 기간을 단축하기 위한 많은 연구가 행해지고 있다.^{1,2)} 하지만 신

뢰성보증시험 시, 요구되는 수명 보증기간이 증가함에 따라 긴 시험기간 또는 많은 시료수를 필요로 하게 되며 이로 인해 신뢰성보증시험 평가에 큰 어려움이 있다. 특히, 대형시스템의 경우 시료수를 증가시키는 것은 시험기간의 증가보다 더 많은 비용을 초래하므로 시료수를 제약할 수밖에 없다. 즉, 이것은 시험기간의 증가를 의미하게 된다.

신뢰성보증시험 시, 시험기간을 줄일 수 있는 방법으로 가속수명시험(accelerated life test)이 널리 행해지고 있다.³⁾ 이 시험법은 제품이 운전되는 정상 사용조건(이하 사용조건)보다 가혹조건 하에서 시험을

*정석권(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과
 E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6181
 *정영미 : 부경대학교 냉동공조공학과
 **주우진 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

*S. K. Jeong(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
 E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6181
 *Y. M. Jung, **W. J. Joo : Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

실시한다. 시험을 통해 얻어진 사용조건에서의 제품 수명 대비 가속조건에서의 제품 수명인 가속계수 (Acceleration Factor; AF)를 이용하여 신뢰성보증시험 기간을 단축하게 된다.

본 논문에서는 냉장고용 압축기를 대상으로 신뢰성보증시험 기간을 단축시킬 수 있는 방안에 대해 검토한다. 냉장고는 압축기뿐만 아니라 여러 부품들로 구성된 하나의 복합대형시스템이다. 이 가운데 압축기는 냉장고의 핵심 부품으로 냉장고 전체 에너지의 80~90%를 소비한다. 그러므로 이 시스템의 성능 향상과 소비전력 개선을 위해 압축기를 대상으로 다양한 신기술의 적용 및 신제품 개발이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 냉장고용 압축기의 가속수명시험을 위한 가속인자, 가속조건 설정 방법 등에 관한 구체적인 자료는 거의 알려져 있지 않다. 이는 현재까지의 가속수명시험의 대다수가 소형 단품 위주로 시행되어졌으며^{4, 7)} 대형시스템의 실험 곤란도 한 이유로 생각된다. 또한 관련 메이커들의 자사 기밀 보호 차원에서 정보 공개를 꺼리는 부분도 작용하고 있는 것으로 생각된다. 특히, 압축기를 단독 성능시험이 아닌 냉장고의 한 부분품으로서 가속수명시험을 할 경우, 시료수의 제약 요건이 매우 크므로 가능한 가속조건을 높일 필요가 있다. 그렇지만, 가속조건 설정 방법과 설정된 가속조건을 어떤 기준으로 평가할지에 대한 방안 등에 대해서는 잘 알려져 있지 않다.

냉장고용 압축기의 가속수명시험 시 가속조건으로 적용할 수 있는 주된 가속 스트레스(stress) 인자는 저온이나 고온과 같은 온도 조건이다. 냉장고의 사용 온도 기준이 일반적으로 30℃이므로 고온의 가속조건을 높이는 것이 용이하지 않다. 이런 까닭에 현장에서의 가속수명시험의 기간은 고온단속 또는 고온연속 시험기간에 의해 전적으로 지배되고 있다. 시험기간을 단축하기 위해서는 고온의 최대 가속조건을 구하는 것이 가장 중요한 문제로 인식되고 있다. 따라서 본 논문에서는 고온조건에 초점을 맞추어 가속수명시험을 위한 최대 가속조건에 대해 중점적으로 검토하였다.

가속수명시험에서는 고장 메커니즘의 일치가 필연적으로 요구되므로 현장에서 축적된 데이터베이스를 통해 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)와 FTA(Fault Tree Analysis)의 분석에 기초하여 압축기의 주요 고장 모드 및 고장 메커니즘을 파악하였다. 냉장고의 두 시료에 대한 실험 환경을 제어하기

위해 사용된 챔버(이하 환경챔버)에서의 다양한 실험을 통해 최대 가속조건에 영향을 미치는 인자를 파악하고, 최대 동작한계(operating limit) 온도를 구하였다. 이로부터 최대 가속조건 온도와 사용조건에서의 온도 차를 이용하여 가속계수를 산출하였다. 산출된 가속계수를 적용하여 단축 가능한 시험기간에 대해서도 검토하였다.

2. 신뢰성 보증을 위한 가속수명시험

2.1 가속계수와 시험기간

산업현장에서는 실용성을 고려하여 가속수명시험에 의한 보증시험기간 t 를 식 (1)을 통해 평가하고 있다.

$$t = \frac{MTTF}{AF} \quad (1)$$

여기서 AF 는 가속계수, $MTTF$ 는 평균고장시간 (Mean Time To Failure)으로서 보증수명기간을 나타내며 냉장고용 압축기인 경우, 현재 8년(96개월)에 상당하는 시간이다.

식 (1)은 보증해야 할 제품의 수명과 이를 검증할 수단으로써의 가속수명시험으로부터 얻어야 할 가속계수와 시험기간의 관계를 단적으로 보여준다. $MTTF = t \times AF$ 이므로 시험기간과 가속계수는 상호 반비례 관계에 있다. 따라서 시험기간을 현재보다 단축하고자 할 경우에는 식 (1)로부터 현재의 가속계수를 키워야 할 필요성이 대두된다. 현재의 시험기간 t 에 만족하지 않고 단축된 시험기간 t_1 ($t_1 < t$)을 원한다면 적어도 $AF_1 > AF$ 가 되도록 AF 를 증가시킬 필요가 있다. 따라서 단축하고자 하는 시험기간에 비례해서 가속수명시험 조건을 보다 가속하게 강화시키거나 소정의 가속계수를 갖는 신규 가속인자의 발굴을 통해 이 문제를 해결할 수 있다.^{8,9)}

2.2 시료수와 신뢰수준을 고려한 시험기간

식 (1)은 시험기간과 가속계수와 관계를 직관적으로 이해하기 쉬운 반면, 시료수 n , 신뢰수준 CL (Confidence Level) 등이 산출식에 포함되어 있지 않아 이들이 시험기간에 미치는 영향을 파악하기가 어렵다. 시료수와 신뢰수준 등이 포함된 정밀한 시험기간은 식 (2)로부터 구해진다.

$$t = \left(\frac{-\ln(1-CL)}{n} \right)^{\frac{1}{\beta}} \cdot \frac{MTTF}{AF} \quad (2)$$

여기서 형상모수(shape parameter) β 는 압축기인 경우, $0.5 \leq \beta \leq 3.0$ 의 범위에 있으므로 시료수 n 과 AF 는 시험기간 t 와 반비례 관계임을 알 수 있다. 또한 주어진 보증수명기간과 신뢰수준 하에서는 이 두 변수는 상충관계에 있음을 알 수 있다. 즉, 소정의 시험기간에 대해 시료수에 제약이 있을 경우 가속계수를 키워야 하고, 반대로 가속계수의 증대가 현실적으로 어려울 경우 시료수를 늘려야 함을 알 수 있다. 그러나 냉장고와 같은 대형시스템의 경우, 시료수의 증가는 실험 공간의 부족 및 비용적인 면에서 현실적으로 용이하지 않으므로 가속계수를 증대시키는 것이 더욱 바람직하다.

2.3 고온조건에서의 가속계수 산출

일반적으로 온도를 높이는 가속수명시험 시 가속계수를 산출하는 방법으로 10°C 법칙이 널리 사용되고 있다.³⁾ 이는 가혹조건을 정상적인 사용온도보다 10°C 를 증가시키면 그 수명은 반으로 감소한다는 법칙으로 다음 식으로 표현된다.

$$AF = 2^{(T_n - T_a)/10} \quad (3)$$

고온조건에서 스트레스 수준 간 10°C 법칙을 적용할 경우 사용조건(T_n)과 가혹조건(T_a) 간의 온도차를 이용하면 AF 를 산출할 수 있다.

본 논문에서는 실험을 통해 정상 사용조건과 가속조건에서의 압축기 돔(dome)의 온도차를 측정하고 10°C 법칙에 이를 적용하여 가속계수를 산출하였다.

3. 최대 가혹조건 탐색 및 방법

효과적인 가속수명시험을 위해서는 먼저 신뢰성 시험을 통해 보증하고자 하는 목표 즉, 제품에서 요구되어지는 보증수명이 설정되어야 한다.

다음으로 사용조건에서 문제가 되는 고장 모드와 고장 메커니즘을 도출하고, 고장발생률을 가속시킬

수 있는 가혹조건을 설정하는 것이 필요하다. 가혹조건을 설정한다는 것은 가속수명시험 시, 규정 사용조건보다 가혹한 시험 환경 즉, 제품의 고장 발생률을 촉진시키는 스트레스 인자가 높은 시험 환경을 구현한다는 것을 의미한다. 그러므로 가혹조건에 영향을 미치는 가속 스트레스 인자를 파악할 필요가 있다.

고장 메커니즘과 가속 스트레스 인자의 예는 Table 1과 같다.

가속수명시험 시, 스트레스 인가 방법으로는 일정 크기형, 계단형, 램프형 등이 있다.

본 논문에서는 백색가전이나 공작기계의 경우 신뢰수준이 60~70%인 점을 감안하여 냉장고용 압축기의 신뢰수준을 70% 이상 $MTTF$ 를 8년으로 설정하였다. 게다가 고장 모드와 고장 메커니즘에 대한 정보를 지금까지 출하된 제품의 고장 데이터와 A/S 데이터를 분석하여 압축기의 고장모드를 습동부 마모로, 고장 메커니즘을 오일의 회수량 부족과 열화작용으로 상정하였다. 또한 가속 스트레스 인자로는 고온을 선택하였다. 고온 시험은 사용온도에 비해 가혹온도를 높게 하기 어려운 관계로 큰 가속계수를 얻기가 어려워, 결과적으로 신뢰성보증시험 기간이 길어지는 가장 주된 요인이 되고 있기 때문이다. 그리고 스트레스 인가 방법으로는 일정 크기 스트레스를 인가하였다.

다음 단계에서는 가속 스트레스의 수준을 결정하게 된다. 스트레스 수준을 가능한 높게 설정하는 것이 시험기간의 단축에 유리하지만, 이 수준이 동작한계를 초과하면 정상적인 사용조건에서는 발생하지 않는 별개의 고장 메커니즘이 작동하게 된다. 따라서 주어진 가속인자의 동작한계를 정확히 파악하는 것이 대단히 중요하다. 본 논문에서는 고온조건 하에서의 최대 가혹조건을 탐색하는데 초점을 맞추었다. 이를 위해 계단형 스트레스를 인가하여 동작한계를 탐색하였다. 동작한계 탐색시의 초기 온도 설정값은 사용조건을 고려하여 냉장고 사용 시의 기준온도인 30°C 로 하였다.

마지막으로 가속수명시험에서 고장 판정을 위한 관측 방법으로는 연속적 방법과 단속적 방법이 있다. 연속적 방법은 관측 장치의 설치로 인해 비용이 많이 들어 일반적으로 단속적 방법이 널리 사용된다. 본 실험에서는 비용이 상대적으로 저렴한 단속적 방법을 사용하였으며 관측 주기는 2시간으로 하였다. 최대 가혹조건 판정을 위해, 압축기의 돔 온도, 냉동사이클 내의 각 주요 구성 부품의 온도, 냉장고의 입력 전류와 소비전력 등을 측정하였다. 그리고 압축

Table 1 Examples of failure mechanism and acceleration stress

Failure mechanism	Acceleration stress
Chemical reaction	temperature
Electromigration	current density
Corrosion	temperature, humidity
Electricity	voltage
Fatigue	vibration
Thermal expansion	temperature cycle

기의 고장 판정은 압축기의 프로텍터(protector)가 작동하는 경우, 압축기의 뚝 온도가 한계값인 140℃ 이상인 경우, 냉동사이클에 이상이 발생한 경우의 세 가지 유형으로 상정하였다.

4. 실험장치 및 실험방법

4.1 실험장치

실험에 사용된 냉장고용 압축기와 환경챔버의 세부 사양을 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다.

Table 2 Specifications of a compressor

Voltage range	115~127 V
Frequency	60 Hz
Refrigerant	R134a
Ultimate trip current	2.6~3.6 A

Table 3 Specifications of environmental chamber

Compressor power	3.75 kW
Voltage	380 V
Frequency	60 Hz
Temperature range	5~60 ℃
Heating capacity	17,200 kcal/h
Cooling capacity	13,200 kcal/h
Refrigerant	R-22

가속계수는 사용조건과 최대 가속조건일 때의 압축기의 뚝 온도로부터 구하였다. 온도정보는 T-type 열전대(thermocouple)를 설치하여 데이터로거를 통해 실시간으로 수집하고, 압축기의 전류와 전력은 전력측정기를 냉장고 전원부에 설치하여 계측하였다. 환경챔버 온도(Room Temperature; RT)는 챔버 내의 히터를 제어함으로써 조절하였다.

4.2 실험방법

최대 가속조건 탐색 실험은 사용조건 30℃부터 단계적으로 온도를 증가시키며 고장이 발생할 때까지 반복적으로 진행하였다. 실험 종료 시점은 고장 판정의 세 가지 경우 가운데 어느 한 가지에 해당되는 경우로 하였다. 실험결과를 통해 동작한계와 최대 가속조건을 구하고 압축기의 뚝 온도의 변화에 따른 가속계수를 산출하였다. 예비실험을 통해 냉장고 시료 두 개의 냉각능력을 파악한 후 본 실험을 행하였다.

Fig. 1은 본 실험 과정을 나타낸다. 우선 환경챔버 온도를 사용조건인 30℃로 일정하게 유지한 상태에서 냉장고를 작동시키고 동시에 온도와 전류, 전력

데이터를 수집하였다. 샘플링 시간은 1분으로, 총 시험기간은 10시간으로 하였다. 데이터 수집이 끝나면 냉장고를 초기 상태로 안정화시키기 위하여 1일 동안 정지시켰다. 그 다음 2~4℃씩 증가시켜 동작한계에 도달할 때까지 반복적으로 실험하였다. Fig. 2는 냉장고 시료에 부착된 온도센서 위치를 나타낸다. 온도 정보를 측정하기 위해 8개소에 열전대를 부착하였다. T1은 증발기의 입구, T2는 증발기의 출구, T3은 냉동실, T4는 냉장실, T5는 압축기의 입구, T6은 압축기의 뚝, T7은 압축기의 출구, T8은 응축기의 온도를 각각 나타낸다.

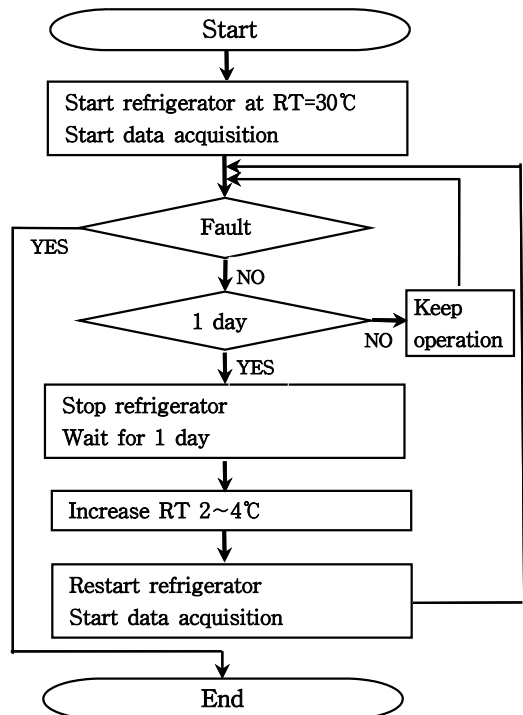


Fig. 1 Flow chart of experiments

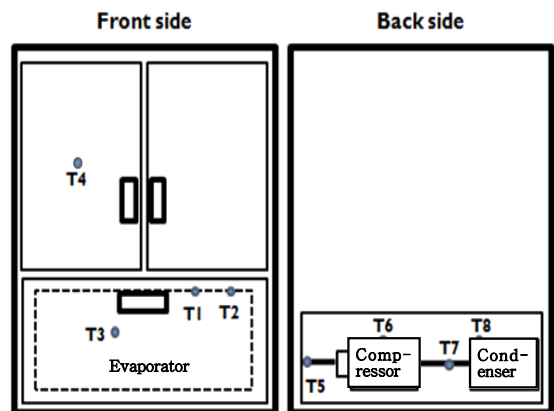


Fig. 2 The locations of thermocouples in a refrigerator

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 3~Fig. 5는 동작한계와 최대 가혹조건 설정 및 시료의 특성을 파악하기 위한 예비실험 결과이다.

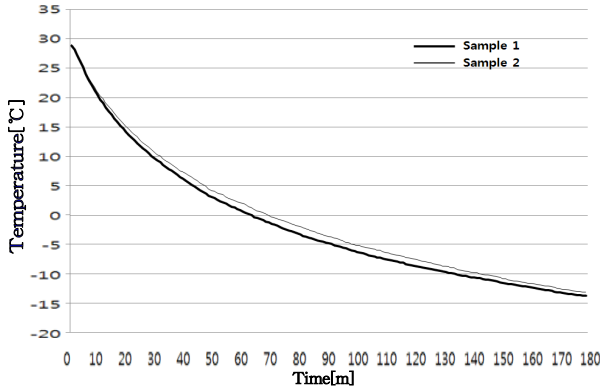
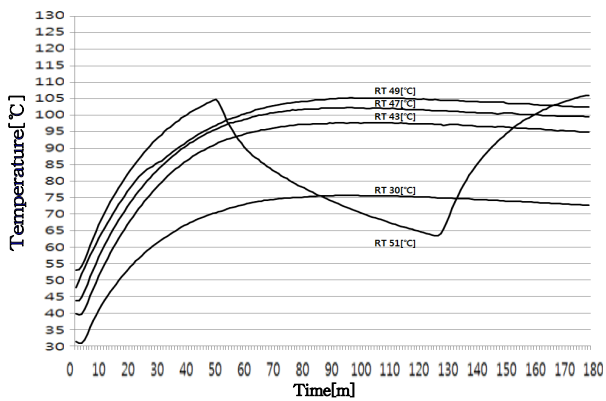
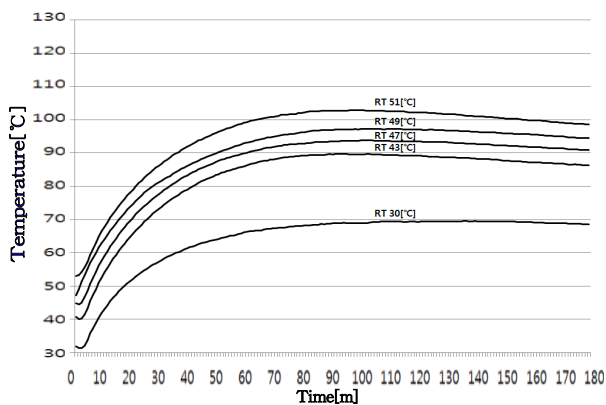


Fig. 3 Temperature change of samples in the freezer



(a) Sample 1



(b) Sample 2

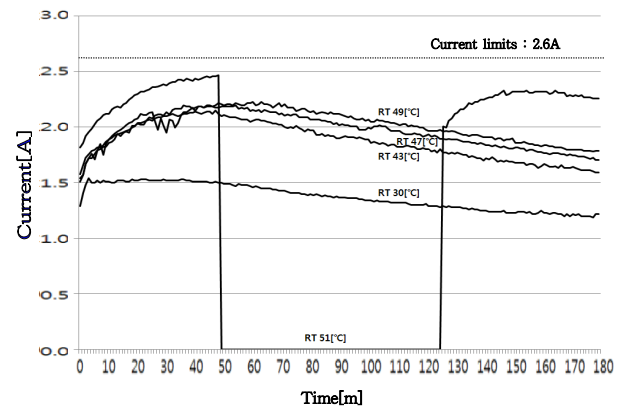
Fig. 4 Temperature of compressor dome in the two samples

Fig. 3은 실험에 사용한 냉장고 시료1(S1)과 시료

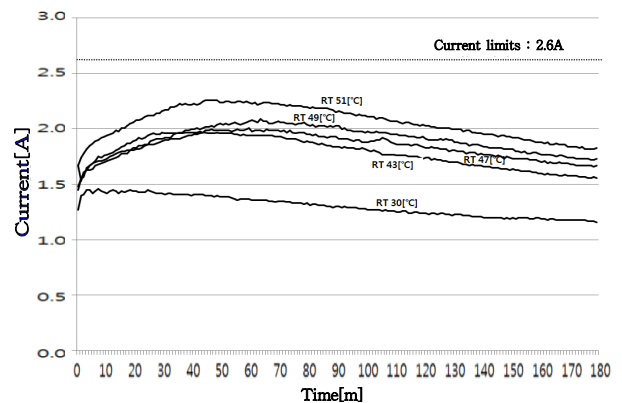
2(S2)의 냉각능력을 파악하기 위해 냉동실의 온도를 측정 한 결과이다. Fig. 3으로부터 시료마다 성능에 미소한 차이가 발생함을 알 수 있다. 실험결과에서는 S1이 S2보다 냉각능력이 더 좋음을 알 수 있다.

Fig. 4는 RT의 변화에 따른 압축기의 돔 온도를 나타낸다. 초기 기동으로 인해 온도가 상승하다가 일정 시간이 지난 후에는 안정화됨을 확인하였다. Fig. 4(a)는 RT 51°C인 경우, 전류 프로텍터의 작동으로 온도가 감소하다가 다시 증가함을 보였다. Fig. 4(b)는 프로텍터가 작동하지 않았고 RT 51°C까지 일정하게 온도가 증가함을 보인다.

Fig. 5는 RT의 변화에 따른 전류 변화가 일정함을 알 수 있고 초기 기동으로 인한 전류의 증가 이후에는 점차 안정화됨을 확인하였다. Fig. 5(a)는 RT 51°C에서 전류값이 2.48A(한계값인 2.6A의 95%)까지 증가하여 프로텍터가 작동함을 보이고 있다. 이로써 고온 동작한계 온도가 RT 51°C임을 확인할 수 있었다. 그리고 최대 가혹조건은 동작한계 온도보다 낮은



(a) Sample 1



(b) Sample 2

Fig. 5 Current of compressor in the two samples

RT 49°C로 정하였다. Fig. 5(b)에서 S2는 RT 51°C인 경우에도 전류 최대값이 한계값의 88%에 불과하였다. 이러한 결과는 Fig. 5에서 알 수 있듯이 S2가 S1보다 냉각능력이 상대적으로 작은 것에 그 원인이 있는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 환경챔버의 설정 온도에 따른 실제 온도 제어 결과를 나타낸다. 온도는 오차 범위가 약 ±2°C 이내로 일정하게 제어됨을 보였다.

Fig. 7은 RT의 변화에 따른 압축기의 돔 온도 변화를 나타낸다. S1의 경우, 정상 사용조건 30°C에서 압축기 돔 온도는 63°C, 최대 가속조건 49°C에서 압축기 돔 온도는 93°C임을 알 수 있다. 이를 식 (3)에 적용시키면 S1의 경우 압축기 돔의 온도차가 약 30°C이므로 고온가속계수는 약 8이 얻어진다. 반면에 S2의 경우, 정상 사용조건 30°C에서 압축기 돔 온도는 60°C, 최대 가속조건 49°C에서 압축기 돔 온도는 88°C로 압축기 돔의 온도차는 약 28°C이므로

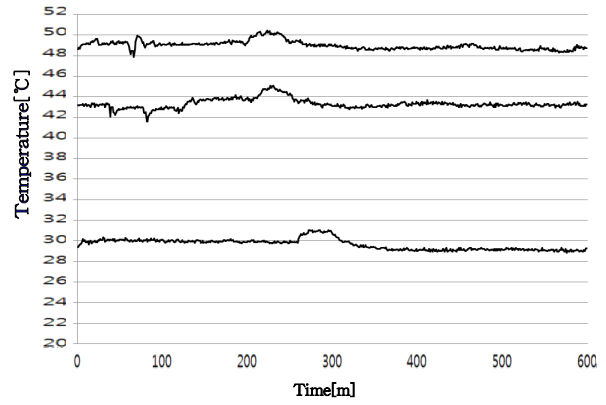
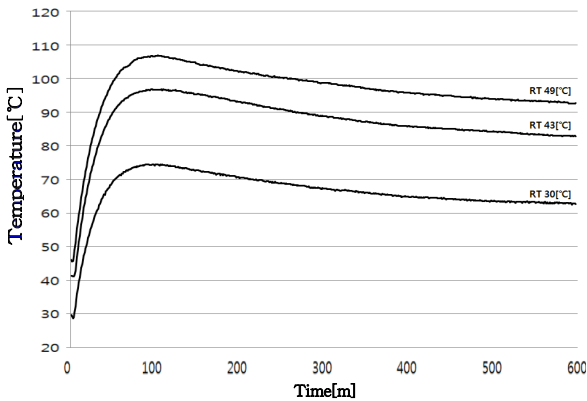
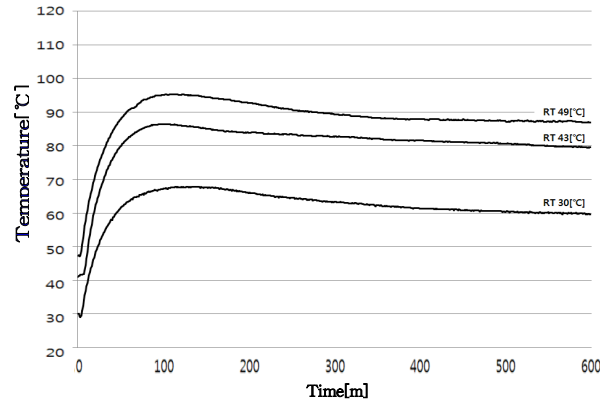


Fig. 6 Response of temperature in the environmental chamber

가속계수가 약 7임을 알 수 있다. 두 시료의 *MTTF*는 모두 8년이므로 *AF*와 *MTTF*를 식 (1)에 적용하면, 시료 S1, S2의 신뢰성보증시험 기간은 고온 가속만으로 산출하였을 때 각각 12개월, 13.7개월이 됨을

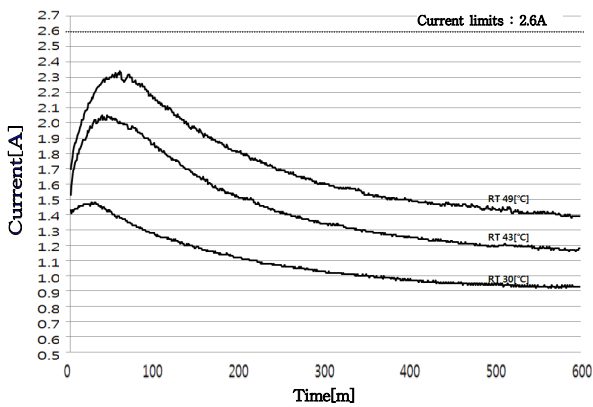


(a) Sample 1

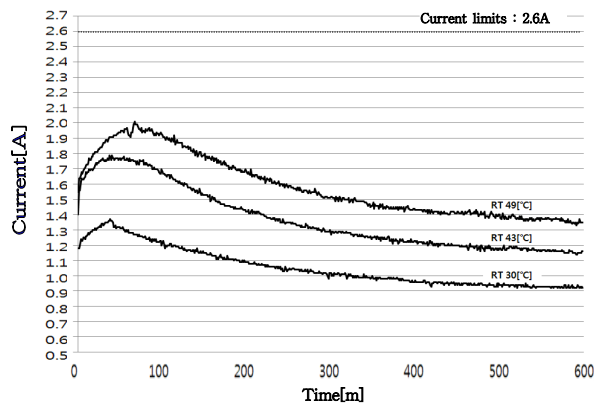


(b) Sample 2

Fig. 7 Temperature of compressor dome in the two samples



(a) Sample 1



(b) Sample 2

Fig. 8 Current of compressor in the two samples

알 수 있다. 이는 가속조건의 실험을 통해 정상 사용 조건에서의 전체 시험기간을 각각 87.5%, 85.7% 줄일 수 있음을 의미한다.

Fig. 8은 RT의 변화에 따른 압축기 인가 전류를 나타낸다. S1의 경우, 최대 가속조건에서의 정상상태 (steady state) 전류는 1.39A로 전류 한계값의 54% 정도가 인가되고 있음을 보인다. S2의 경우는 1.35A로 전류 한계값의 52% 정도임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 냉장고용 압축기의 가속수명시험 기간을 단축하기 위해 고온에서의 최대 가속조건을 설정하는 방법과 단축시킬 수 있는 시험기간에 대해 실험을 통해 검토하고 이를 확인하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 고온에서의 최대 가속조건에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 전류였다. RT 51°C에서 전류 프로텍터가 작동하였고 그 때 전류값은 2.48A로 전류 한계값의 95%였다.

(2) 시험용 냉장고 압축기의 고온 동작한계 온도는 RT 51°C였고, 최대 가속조건은 안전율을 고려하여 RT 49°C로 정하였다.

(3) 두 시험시료에 대한 사용조건과 가속조건의 온도 차는 각각 30°C, 28°C로 나타났으며, 이를 이용하여 가속계수를 산출한 결과, 가속계수는 8과 7로 각각 추정되었다.

(4) *MTTF*와 추정된 가속계수로부터 고온조건만으로 가속수명시험을 할 경우, 시험기간은 각각 12개월, 13.7개월로 나타났다. 이를 통해 고온 가속조건에서의 시험기간은 사용조건에서의 시험기간 대비 87.5%, 85.7%로 각각 단축될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업(해양 LED 융합기술지원 기반구축 및 상용화 기술 개발, 과제번호 : 10037416)으로 지원된 연구임.

참고 문헌

1. J. H. Kim and W. Jeong, 2008, "Reliability Engineering", Cheongmungak, pp. 178-211.
2. C. W. Lee and J. H. Lim, 2004, "New Reliability

- Engineering", Boseonggak, pp. 253-260.
3. J. U. Baek, 2007, "Accelerated Life Test", Episteme, pp. 78-168.
4. D. S. Ryu et al., 2005, "Accelerated Life Test on the Failure Mode of Helix Ice Dispenser in Side by Side Refrigerator", The Korean Society for Power System Engineering, pp. 144-149.
5. T. G. Lee et al., 2005, "Thermal Reliability Analysis of BLDC Motor in a High Speed Axial Fan by the Accelerated Life Test", The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineering of Korea, Vol. 17, No. 12, pp. 1169-1176.
6. S. Wei et al., 2007, "Development of Accelerated Life Test Method for TCU Life Analysis", The Society of Automotive Engineers, Vol. 7, pp. 2195-2200.
7. S. W. Woo and J. K. Lee, 2008, "Reliability Design of the Hinge Kit System in Common Refrigerator under Repetitive Load", Korean Institute of Industrial Educators, Vol. 33, No. 2, pp. 312-324.
8. J. Y. Byun et al., 2008, "Establishment of the Acceleration Factor to Reduce the Period of Reliability Life Test of a Compressor in a Refrigeration System", The Korean Society for Power System Engineering(fall), pp. 233-238.
9. J. Y. Byun et al., 2009, "Influence of Variables Related to Accelerated Life Test Time for a Compressor in a Refrigerator", The Korean Society for Power System Engineering(spring), pp. 343-347.