

냉장고용 압축기의 가속수명시험을 위한 가혹조건 탐색
- 저온 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 Low Temperature -

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

(접수일 : 2011년 12월 15일, 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), Arrhenius relationship(아레니우스 관계), Low temperature condition (저온조건), Kinematic viscosity(동점도)

Abstract : Generally accelerated life test is well known as one method to reduce reliability qualification test period. This test is conducted under the higher stress condition than normal condition. So it can save the test time by calculating the acceleration factor from the relationship between the worst stress condition and normal condition. This paper investigates the worst stress condition for the accelerated life test to increase the acceleration factor. Especially, we focused on the method to obtain effective acceleration factors under the worst stress condition. Moreover, we considered how to decide the worst stress condition by looking for the operating limit of this system. The acceleration factor can be estimated from the ratio of the kinematic viscosity in the normal condition and the worst stress condition, the lowest temperature, by using Arrhenius relationship. 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

시스템의 고성능화 고효율화와 더불어 신뢰성에 대한 관심도 점점 높아지고 있다. 신뢰성보증시험(reliability qualification test)은 신제품 개발 또는 부품 교체 시 규정 조건 하에서의 보증기간 동안 제품의 성능을 보장하기 위해 필수적이다. 신뢰성의 보증에 대한 관심과 요구가 증대됨에 따라 제품의 보증기간은 점점 늘어나고 있는 추세이며, 이러한 높은 신뢰성을 갖는 제품을 사용조건 하에서 시험할 경우

에 장시간 동안 고장이 발생하지 않아 과다한 시험기간과 많은 시료수가 요구되기 때문에 시간적, 경제적으로 많은 문제점들이 야기된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 가속수명시험(accelerated life test)이 가장 널리 사용되고 있다.^{1~3)} 이 시험법은 신뢰성보증시험 방식 중의 하나로, 제한된 시료수 안에서 제품의 규정된 사용조건보다 가혹한 환경 하에서 시험을 실시하여 정상 사용조건 하에서의 수명 대비 가혹조건 하에서의 수명인 가속계수(Acceleration Factor; AF)를 통해 보증시험기간을 단축할 수 있는 방법이다. 즉, 시료수가 정해지고 가속계수를 증가시키면 시험기간은 단축되어진다.

냉장고와 같이 여러 부품들로 구성된 복합대형시스템에 가속수명시험을 적용한 사례는 거의 없는 실정이다.^{4~7)} 이는 지금까지 가속수명시험에 대한 연구의 대부분이 소형 단품 위주로 진행되어져 왔으며,

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.

대형시스템의 실험 곤란도 그 한 이유로 생각된다. 복합대형시스템의 경우, 많은 시료를 수용할 수 있는 공간을 확보하기 힘든 문제뿐만 아니라 비용적인 면에서의 어려움으로 인해 많은 시료를 이용하여 시험하는 것은 쉽지 않다. 특히, 압축기의 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 평가할 것인지에 대한 방안 등에 대해서는 잘 알려져 있지 않다.

본 논문에서는 냉장고용 압축기를 시험대상으로 하여, 제한된 수의 시료를 이용하면서 신뢰성보증시험기간을 단축시킬 수 있는 가속수명시험의 가속계수 산출 방안에 대해 검토하고자 한다.

냉장고용 압축기의 가속수명시험 시 가속조건으로 적용할 수 있는 가장 일반적인 시험조건으로 고온조건과 저온조건을 들 수 있다. 하지만 냉장고와 같은 복합대형시스템은 사용 환경의 온도 기준에 적합하도록 설계되어져 있다. 이러한 시스템에서의 온도시험 시, 주변 환경의 온도를 사용온도에 비해 너무 높이거나 낮추어 가속한 온도로 설정하는 것은 압축기 뿐만 아니라 다른 부분품에 악영향을 미치게 되어 고장 메커니즘의 일치를 구현하기 어려운 문제점이 있다. 그러므로 다른 부분품에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 최대 가속계수를 구할 필요가 있다. 즉, 가속계수를 증가시키는 것은 시험기간의 단축을 의미하므로 최대 가속계수를 구하기 위해서는 먼저 고온과 저온의 최대 가속조건에서의 동작한계(operating limit)를 구하는 것이 가장 중요한 문제로 인식된다.

특히 본 논문에서는 저온조건에 초점을 맞추어 가속수명시험을 위한 최대 가속조건에 대해 중점적으로 검토하고자 한다.

가속수명시험에서는 고장 메커니즘의 일치가 필연적이므로 고장 모드 및 고장 메커니즘을 파악하는 것은 중요하다. 현장에서 수집된 고장 데이터베이스에 기반한 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)와 FTA(Fault Tree Analysis)를 통해 저온에서의 압축기의 주요 고장 모드를 흡입밸브(suction valve)의 파손과 윤활유의 열화 작용에 의한 압축기 습동부의 마모, 고장 메커니즘을 윤활유의 동점도 증가로 인한 오일 회수량의 부족으로 선정하였다. 그러므로 가속인자인 저온에 의해 가장 영향을 많이 받

는 요소를 윤활유의 동점도(kinematic viscosity)로 보았다. 냉장고의 두 시료에 대한 환경챔버에서의 다양한 실험을 통해 저온에서의 최대 가속조건에 영향을 미치는 인자를 파악하고, 최대 동작한계를 구하였다. 이를 적용하여 저온조건에서의 최대 가속조건을 설정하고 실험을 통해 얻어진 데이터를 이용하여 온도와 동점도간의 관계를 아레니우스 관계식에 적용하고 이론적인 가속계수를 산출하였다. 마지막으로 구해진 가속계수를 이용하여 단축 가능한 시험기간에 대해서도 검토하였다.

2. 신뢰성 보증을 위한 가속수명시험기간

2.1 가속계수를 고려한 시험기간

가속수명시험에 의한 시험기간 t 를 평가하기 위해 산업현장에서는 실용성을 고려하여 직관적으로 이해하기 쉬운 간이화된 식 (1)을 이용하고 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 8년에 상당하는 시간이다.

식 (1)은 보증해야할 수명과 이를 검증할 수단으로써의 가속수명시험으로부터 얻어야 할 가속계수 크기 관계를 단적으로 보여준다. 식 (1)에서 시험기간과 가속계수는 상호 반비례 관계에 있으므로 시험기간을 현재보다 단축하고자 할 경우에는 현재의 가속계수를 키워야 함을 알 수 있다. 하지만 이 수식을 사용할 경우, 시료수 n , 신뢰수준 CL (Confidence Leve) 등이 산출식에 포함되어 있지 않으므로 이들이 시험기간에 미치는 영향을 파악하기 어렵다.

식 (2)는 시료수 n , 신뢰수준 CL , 형상모수(shape parameter) β 를 고려한 보다 엄밀한 시험기간 산출식을 나타낸다.

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

여기서 형상모수 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. 그러므로 주어진 보증수명기간과 신뢰수준 하에서 시료수의 제약이 있을 경우에는 가속계수를 키워야 하고, 반대로 가속계

수의 증대가 현실적으로 어려울 경우 시료수를 늘려야 함을 알 수 있다.

앞서 정의한 식 (1)은 식 (2)로부터 형상모수 β 에 관계없이 다음 조건이 만족할 경우에 성립됨을 알 수 있다.

$$\frac{-\ln(1-CL)}{n} = 1 \quad (3)$$

가령, 시료수를 2로 할 경우, CL 은 0.86이어야만 식 (3)을 만족하게 되며 결과적으로 식 (1)을 적용하여 시험기간을 산출하는 것이 가능함을 알 수 있다.

식 (3)을 만족하는 n 과 CL 의 관계에 관한 예를 Table 1에 간단히 정리하였다.

Table 1 Relationship between n and CL

n	1	2	3	4	5
CL	0.63	0.86	0.95	0.98	0.99

신뢰수준 CL 에 대한 요구는 제품의 종류와 제조업체에 따라 각기 다르다. 항공기, 철도차량 등의 경우에는 95% 이상의 높은 신뢰수준이 요구되지만, 백색가전이나 공작기계의 경우 60~70% 이상의 수준이 일반적이다. 따라서 냉장고용 압축기의 경우에도 70% 이상의 신뢰수준을 가정하면 시료수 2~3개의 경우로 실험이 가능하며 식 (1)으로써 시험기간의 산출이 가능함을 확인할 수 있다.^{8,9)}

2.2 아레니우스 관계식

아레니우스 관계는 가속수명시험에서 가속 스트레스 인자가 열인 경우 즉, 온도인 경우에 주로 사용된다. 온도의 변화에 따라 고장이 가속화 되는 형태의 고장모델을 아레니우스 모델이라 한다. 고장은 누적된 화학반응에 의해 일어난다고 볼 수 있는데 온도가 높아질수록 화학반응이 빨라지기 때문에 고장이 가속화 되는 것이다. 이러한 관계를 아레니우스 관계식으로 다음과 같이 정의되어 있다.¹⁰⁾

$$k = A \cdot e^{-E/RT} \quad (4)$$

여기서 k 는 반응속도 정수, A 는 상수, E 는 활성화 에너지(activation energy), R 은 볼츠만 상수(Boltzmann constant), T 는 절대온도(absolute temperature)를 나타낸다. 아이템의 수명은 화학반응 속도에 역비례하므로 식 (4)를 이용하여 다음과 같이

나타낸다.

$$t = C \cdot e^{E/RT} \quad (5)$$

여기서 t 는 수명, C 는 상수를 나타낸다. 식 (5)로부터 임의의 온도 T_K 에서의 수명 $L(T_K)$ 는 식 (6)과 같은 아레니우스 관계식으로 표현된다.¹⁰⁾

$$L(T_K) = C \cdot e^{E/RT_K} \quad (6)$$

식 (7)은 스트레스 수준 간 아레니우스 관계가 성립할 경우의 정상사용 온도조건(T_n)과 가혹 온도조건(T_a) 간의 AF 를 나타낸다.

$$AF = \frac{L(T_n)}{L(T_a)} = \frac{C e^{B/T_n}}{C e^{B/T_a}} = e^{\left(\frac{B}{T_n} - \frac{B}{T_a}\right)} \quad (7)$$

여기서 $L(T_n)$ 과 $L(T_a)$ 는 각 온도조건에서의 수명, C 는 상수이고, $B = E/R$ 로서 활성화 에너지 값(E)을 볼츠만 상수 R 로 나눈 값이다.

본 논문에서는 가속 스트레스인 저온에 의해 가장 영향을 많이 받는 요소를 윤활유의 동점도로 보았다. 윤활유의 동점도는 반응속도의 확산계수이기 때문에 아레니우스 관계에 의해 윤활유의 수명이 동점도에 역비례함을 알 수 있다. 이를 이용하면 가속계수는 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$AF = \frac{X(T_a)}{X(T_n)} \quad (8)$$

여기서 $X(T_n)$ 과 $X(T_a)$ 는 정상 사용조건과 가혹 조건에서의 동점도를 각각 나타낸다. 식 (7)에서 활성화 에너지 값만 알면 AF 를 구할 수 있지만 활성화 에너지 값을 구하기 위해서는 많은 시간과 비용이 든다. 그래서 이론적 산출이 가능한 식 (8)을 통해 AF 를 구할 수 있다. 각 동점도는 식 (9)를 이용하여 구한다. 식 (9)는 일반적으로 윤활유와 온도 관계에 사용되는 Walther-ASTM의 식을 나타낸다. 여기서, X 는 임의의 온도에서의 동점도, D 는 보정값, K 와 M 은 상수를 각각 나타낸다.

$$\log(\log(X+D)) = K - M \cdot \log T \quad (9)$$

Fig. 1은 윤활유의 동점도 데이터를 나타낸다. Fig. 1을 참고하여 윤활유 용해도의 중간값인 15%를 기준으로 하면, 윤활유 온도가 40°C와 100°C인 경우의 동점도는 각각 3.7cSt와 1.35cSt임을 알 수 있다.

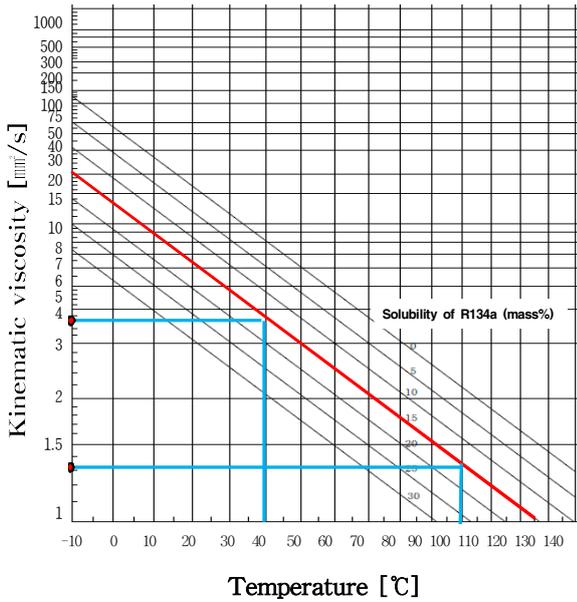


Fig. 1 Kinematic viscosity versus blending ratio of lubricant according to temperature

보정값 D 를 0.7로 설정하면, 식 (9)를 이용하여 미지의 상수값 K 와 M 이 구해진다. 이들을 이용하여 임의의 온도에서의 동점도를 식 (9)를 통해 구할 수 있다. 실험을 통해 최대 가혹조건과 정상 사용조건에서의 압축기 돔(dome) 온도를 측정하고 이를 식 (9)에 적용하여 각각의 동점도를 산출할 수 있다. 또한 산출된 동점도를 아레니우스 관계식에 적용하여 가속계수를 구할 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

외부 환경에 의한 온도 변화와 외부 온도 변화에 따른 실험 오차를 줄이기 위해 온도 조절이 가능한 환경챔버 내에 냉장고를 설치하고, 챔버 내의 온도는 일정 온도로 유지한 상태에서 냉장고를 작동시켰다.

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

Table 2 Specification of compressor

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

Table 3 Specification of an environmental chamber

Compressor power	3.75 kW
Voltage	380 V
Frequency	60 Hz
Refrigerant	R-22

온도정보는 T-type 열전대(thermocouple)를 설치하여 데이터로거(MV-2000)를 통해 실시간으로 수집하였다. 압축기의 전류와 전력은 전력 측정기를 냉장고 전원부에 설치하여 계측하였다. 환경챔버 온도(Room Temperature; RT)는 환경챔버 내의 냉각기를 제어함으로써 조절하였다.

3.2 실험방법

저온에 대한 최대 가혹조건 탐색 실험은 사용조건을 우선 10°C부터 단계적으로 온도를 감소시켜 고장이라고 판단될 때까지 반복적으로 진행하였다. 압축기의 고장 판정은 다음 세 가지 경우를 상정하여, 압축기의 프로텍터(protector) 작동, 과열도가 0°C 이하, 냉동사이클에 이상 발생의 경우로 하였다. 실험 종료는 고장 판정의 세 가지 경우 가운데 어느 한 가지에 해당될 때로 하였다. 실험결과를 통해 동작한계와 최대 가혹조건을 구하고 이 조건에서의 압축기의 돔 온도의 변화에 따른 동점도를 식 (9)로부터 구하고 식 (8)을 이용하여 AF 를 산출하였다.

예비실험을 통해 증발기 출구 온도와 냉장고의 냉동실 온도가 RT -13°C에서 더 이상 내려가지 않음을 알았다. 그래서 시료인 냉장고의 냉각능력이 RT -13°C에서 최소라고 판단하고 동작한계를 이 값으로 설정하고 본 실험을 행하였다.

본 실험 과정은 우선 환경챔버 온도를 일정하게 유지한 상태에서 냉장고를 작동시키고 동시에 압축기 돔 온도와 압축기에 흐르는 전류, 전력 데이터를 수집하였다. 샘플링 타임은 1분, 총 시험기간은 20시간으로 하였다. 데이터 수집이 끝나면 냉장고를 초기 상태로 안정화시키기 위하여 1일 동안 정지시켰다. 단계적으로 -2°C씩 온도를 감소시켜 동작한계에 도달할 때까지 반복적으로 실험을 진행하였다.

온도 센서를 증발기의 입구, 증발기의 출구, 냉동실, 냉장실, 압축기의 입구, 압축기의 돔, 압축기의 출구, 응축기로 냉장고 각 주요 부위 8개소에 설치하여 온도를 각각 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 RT의 변화에 따른 실제 온도제어 결과를 나타낸다. RT는 챔버 외부의 on/off 제어를 통해 오차 범위가 약 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내로 일정함을 보였다.

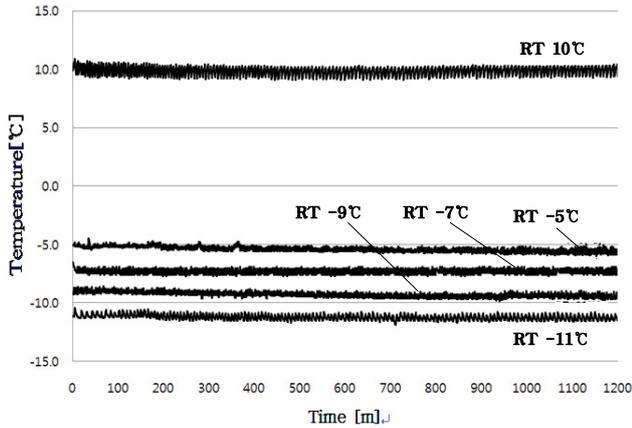


Fig. 2 Response of temperature in the environmental chamber

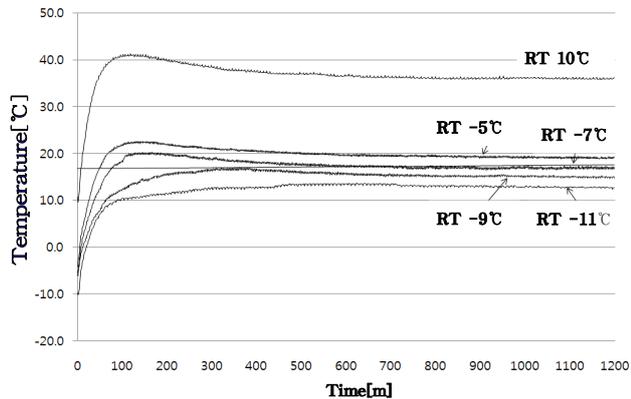


Fig. 3 Temperature of compressor dome

Fig. 3은 RT의 변화에 따른 압축기 돔 온도를 나타낸다. 초기 기동으로 인해 온도가 상승하다가 일정 시간 후 안정화 되었다. 사용조건(10°C)에서의 돔 온도는 36°C , 최대 가속조건(-11°C)에서의 돔 온도는 12.6°C 로 나타났다. Fig. 1에서 용해도를 15%로 가정하고 동점도를 구하면 사용조건에서의 돔 온도인 36°C 에 해당하는 동점도가 4cSt, 최대 가속조건에서의 돔 온도인 12.6°C 에서의 동점도는 8cSt였다. 이들을 식 (8)에 적용하면 AF는 2로 산출된다. MTTF 8년과 산출된 AF를 식 (1)에 적용하면, 신뢰성보증시험

기간은 저온 가속만으로 48개월이 된다. 즉, 저온에 서구해진 가속조건으로 가속수명시험을 할 경우 정상조건에서의 전체 시험기간을 50% 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

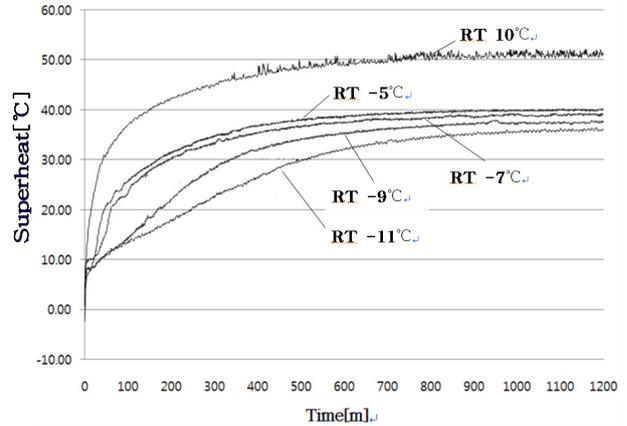


Fig. 4 Response of superheat

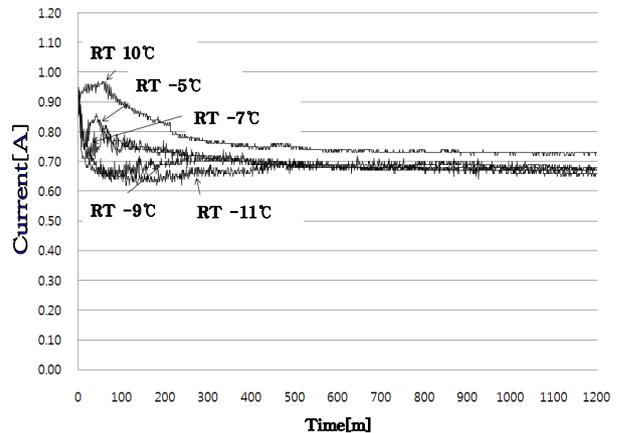


Fig. 5 Current of compressor

Fig. 4는 RT의 변화에 따른 과열도(superheat)를 나타내며 압축기로의 액냉매 유입 가능성을 확인하기 위해 측정하였다. 과열도가 일정하게 증가하다가 점차 안정화됨을 알 수 있다. RT의 감소에 따라 과열도가 감소하지만 그 값이 0°C 이상이므로 액냉매 유입 가능성은 없음을 확인하였다. 과열도는 압축기 입구 온도와 증발기 입구 온도의 차로 구해졌다.

Fig. 5는 RT의 변화에 따른 전류 변화를 나타낸다. 초기 기동 시 전류가 일시적으로 증가하지만 점차 안정화됨을 확인하였다. RT가 낮아질수록 전류값도 낮아져서 한계값인 2.6A에 전혀 미치지 못해 전류 프로텍터에는 영향을 주지 않았다.

5. 결 론

본 논문에서는 냉장고용 압축기의 신뢰성보증시험 기간 단축을 위해 문제시되는 저온조건에서의 가속수명시험을 위한 최대 가속조건에 대해 검토하였다. 또한 최대 가속조건과 정상 사용조건에서의 압축기 동 온도를 측정하여 이에 따른 동점도를 산출하였다. 사용조건과 가속조건에서 산출된 각각의 동점도를 아레니우스 관계를 이용하여 이론적인 가속계수를 구하고, 구해진 AF 를 이용하여 단축 가능한 시험기간에 대해서도 검토하였다.

본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 저온의 가속조건 하에서 액냉매의 유입 가능성 여부를 과열도를 통하여 확인하였다. RT가 낮아질수록 과열도는 점차 감소하지만 최대 가속조건 하에서도 과열도가 0°C 보다 크기 때문에 액냉매 유입 가능성은 없음을 확인하였다.

(2) 저온의 가속조건이 압축기의 전류값에 미치는 영향을 확인하였다. 실험을 통해 최대 저온 가속조건에서 전류 한계값인 2.6A의 40%에도 미치지 못함을 확인하였다. 이는 전류 프로텍터에 영향을 끼치지 않으므로 저온 가속조건에서는 전류값에 의한 동작한계의 문제는 발생하지 않음을 알 수 있다.

(3) 가속계수를 산출하기 위해 저온조건에서의 시험용 냉장고 압축기의 동작한계 온도가 RT -13°C 임을 확인하였다. 확인된 동작한계에 의해 최대 가속조건을 RT -11°C 로 구하였다.

(4) 윤희유의 동점도 데이터로부터 용해도를 15%로 가정했을 시, 동점도를 산출하고 가속계수를 구하였다. 사용온도 조건에서의 동점도는 4cSt, 최대 가속온도 조건에서의 동점도는 8cSt이므로 가속계수는 2로 구해졌다.

(5) 저온조건만으로 시험할 경우 시험기간의 단축 가능성을 검토하였다. 구해진 가속계수를 적용한 총 시험기간은 48개월로 정상 사용조건 하의 전체 시험기간을 50% 단축할 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.
10. W. Nelson, 2004, "Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses", John Wiley & Sons, Inc.