



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

냉장고용 압축기의 신뢰성시험 기간 단축을 위한

최대 가혹 온도 조건 탐색

Investigation of Maximum Temperature for Reducing Reliability Life
Test Time for a Compressor in a Refrigerator



2011年 2月

釜慶大學校 大學院

冷凍空調工學科

朱 尤 鎮

工學碩士 學位論文

**냉장고용 압축기의 신뢰성시험 기간 단축을 위한
최대 가혹 온도 조건 탐색**

**Investigation of Maximum Temperature for Reducing
Reliability Life Test Time for a Compressor in a Refrigerator**

指導教授 鄭 碩 權

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2011年 2月

釜慶大學校 大學院

冷凍空調工學科

朱 尤 鎮

朱 尤 鎮의 工學碩士 學位論文을 認准함

2011年 2月 23日

主 審 工學博士 金 鍾 秀 ㉠

委 員 工學博士 尹 政 仁 ㉠

委 員 工學博士 鄭 碩 權 ㉠

목 차

Abstract	iv
List of tables	v
List of figures	vi
Nomenclature	viii
제1장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	4
1.3 연구 내용	5
제2장 신뢰성보증시험	6
2.1 신뢰성보증시험과 시험 기간	6
2.2 가속수명시험	22
2.2.1 가속수명시험의 정의	22
2.2.2 가속수명시험 절차	22
2.2.3 가속수명시험 데이터 분석 방법	25
2.3 가속수명시험을 위한 최대 가혹 조건 탐색	32
2.3.1 고온 조건	32
2.3.2 저온 조건	33
제3장 고온 조건에서의 최대 가혹 조건 탐색	36
3.1 실험 장치	36
3.2 실험 방법	37
3.3 실험 결과 및 고찰	39
3.4 결론	47

목 차

제4장 저온 조건에서의 최대 가속 조건 탐색 -----	48
4.1 실험 장치 -----	48
4.2 실험 방법 -----	49
4.3 실험 결과 및 고찰 -----	51
4.4 결론 -----	55
제5장 결 론 -----	56
참고문헌 -----	58
학술대회 발표 논문 llist -----	61
Appendix -----	63



Reduction of Reliability Life Test Time for a Compressor in a Refrigerator under Temperature Condition

Joo Woo-Jin

Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering
Graduate School, Pukyong National University

Abstract

Compressor is a major component of refrigeration system. Therefore many attempts to improve performances of the compressor have been conducted. The reliability qualification test is essential when a new product of a compressor is developed to guarantee life time of the product under normal operation conditions. General reduction method of reliability qualification test period is known as acceleration life test. This test is conducted in high stress condition than normal stress condition. An acceleration factor should be increased to reduce reliability qualification test period. And an acceleration factor is usually obtained through an acceleration life test.

This paper explained the relationship between the reliability qualification test and test period. Also, This paper deal with acceleration life test method and data analysis for reduction of test period. Through experiments, current was a main factor that affecting condition to highest stress under high temperature. Acceleration factors of two samples were estimated 8 and 7 individually by using the 10°C law. This result shows that we can reduce the reliability qualification test period 12.5% and 14.3% of total test period. Temperature output of evaporator and temperature of freezer were the main factors that affecting condition to the highest stress under low temperature. Acceleration factor of sample was estimated 2 by using Arrhenius relationship and kinematic viscosity. This result shows that we can reduce the reliability qualification test period 50% of total test period.

List of tables

Table 1 Relationship between n and CL -----	14
Table 2 Test time according to n and CL($\beta=1.8$) -----	17
Table 3 Examples of failure mechanism and acceleration stress -----	23
Table 4 Specifications of compressor -----	36
Table 5 Specifications of chamber -----	36
Table 6 Specifications of compressor -----	48
Table 7 Specification of a refrigerator -----	48



List of figures

Fig. 1 Reliability scale -----	6
Fig. 2 Kind of reliability scale -----	7
Fig. 3 Definition of Reliability -----	7
Fig. 4 Process of decreasing the period of reliability qualification test -	10
Fig. 5 Operating characteristic curve -----	12
Fig. 6 Test time versus n -----	20
Fig. 7 Test time versus β -----	20
Fig. 8 Test time versus CL -----	21
Fig. 9 Test time versus p -----	21
Fig. 10 Stress impose method -----	23
Fig. 11 Flow chart of data analysis -----	26
Fig. 12 Life distribution -----	27
Fig. 13 Bath tub curve -----	27
Fig. 14 Weibull distribution -----	28
Fig. 15 Life-stress relationship -----	29
Fig. 16 Process of experiment -----	38
Fig. 17 The sensor location -----	38
Fig. 18 Freezer temperature of samples -----	40

Fig. 19 Temperature of compressor dome -----	41
Fig. 20 Current of compressor -----	42
Fig. 21 Room temperature responses -----	43
Fig. 22 Temperature of compressor dome -----	45
Fig. 23 Current of compressor -----	46
Fig. 24 Process of experiment -----	50
Fig. 25 Room temperature responses -----	51
Fig. 26 Temperature of compressor dome -----	53
Fig. 27 Superheat response -----	53
Fig. 28 Current of compressor -----	54



Nomenclature

AF	가속계수(Acceleration Factor)	
ALT	가속수명시험(Acceleration Life Test)	
CL	신뢰수준(Confidence Level)	
HALT	초가속수명시험(Highly Accelerated Life Test)	
MTBF	평균무고장시간(Mean Time Between Failure)	
MTTF	평균고장시간(Mean Time To Failure)	
RQT	신뢰성보증시험(Reliability Qualification Test)	
RT	환경 챔버 내 온도(Room Temperature)	
E	활성화에너지	
T_a	가속조건에서의 절대온도	[°C]
T_n	사용조건에서의 절대온도	[°C]
$L(T_a)$	T_a 에서의 수명	
$L(T_n)$	T_n 에서의 수명	
$X(T_a)$	가속조건에서의 동점도	[cSt]
$X(T_n)$	사용조건에서의 동점도	[cSt]
n	시료수	
t	시험시간	
k	볼츠만 상수($=8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)	
β	형상모수	
η	척도함수	

제1장 서론

1.1 연구 배경

압축기는 냉장고와 같은 냉동시스템에서 대략에너지의 70~80%를 소모하는 핵심 부품이다. 따라서 이 시스템의 성능 향상과 소비전력 개선 등을 위해 압축기를 대상으로 다양한 신기술 적용 및 이를 통한 신제품 개발이 활발히 이루어지고 있다. 예컨대 압축기 구동장치인 기존의 유도모터를 리니어 모터, BLDC 모터, 릴럭턴스 모터 등으로 대체한 새로운 타입의 압축기 개발 시도가 빈번하다.

한 모델의 수명주기(life cycle)가 점차 짧아지고 있고 이에 따른 신제품 개발 기간 또한 점차 단축되고 있다. 그러나 소비자의 제품 신뢰성에 대한 요구는 오히려 높아지는 추세여서 수명 보증기간은 길어지고 있는 실정이다.

제품의 안정적 사용 기간인 수명을 평가하는 신뢰성 보증시험(Reliability Qualification Test; RQT)은 신제품 개발 시 필수적이며, 이 시험 기간은 신제품 개발 기간에 큰 영향을 미치기 때문에 각 기업들은 이 기간의 단축에 많은 노력을 기울이고 있다. 하지만 수명 보증기간 증가에 따른 긴 시험 기간 또는 샘플 수의 과다로 인해 보증시험 평가에 큰 어려움을 겪고 있다. 특히 냉장고와 같은 부피가 큰 시료의 경우 많은 시료를 사용할 수 없고, 시료가 있다고 해도 많은 시료들을 수용할 수 있는 공간을 확보하기 힘들다. 그래서 보증시험 시, 샘플 수의 증가는 시

험 기간의 증가보다 더 많은 비용 증가를 초래하므로 샘플 수는 제약이 될 수밖에 없어 시험 기간은 증가하게 된다. 예를 들어 어떤 제품의 수명 보증기간을 8년으로 가정하면, 90%의 신뢰수준 하에서 시험 기간 동안 고장이 없는 경우를 합격으로 할 때, 60개의 샘플 수로 4개월의 시험 기간이 이론상 필요하다. 그러나 샘플 수를 20개로 줄일 경우에는 11개월의 긴 시험 기간을 필요로 한다.

그래서 신뢰성보증시험은 신제품 개발 또는 부품교체 시 규정 조건 하에서의 보증기간 동안 제품의 성능을 보장하기 위해 필수적이다. 현장에서 신뢰성 보증을 위해 가장 널리 사용되는 시험방식 중의 하나가 무고장시험(zero-failure test)방식이다. 이 방식은 시험시간 동안 시료수(샘플 수)의 고장이 하나도 없을 경우, 요구되는 수명이 보증되는 시험이다. 이 방식을 선호하는 이유는 시험방식들 중에서 적용하기가 비교적 쉽고, 상대적으로 시험시간이나 시료수를 줄일 수 있다는 장점이 있기 때문이다. 이 무고장시험 방식으로 보증시험을 할 경우라도 시험시간은 보증수명이 늘어남에 따라 길어질 수밖에 없으며, 이러한 제약(샘플수, 비용) 하에서도 시험기간을 줄일 수 있는 방법으로 가속수명시험(Acceleration Life Test; ALT)이 행해지고 있다. 이 시험법은 제품이 운전되는 정상적인 조건보다 더 가혹한 환경 하에서 시험을 실시한다. 시험을 통해 얻어진 정상 사용조건에서의 수명 대비 가속조건에서의 수명인 가속계수(Acceleration Factor; AF)를 통해 신뢰성 보증시험 기간을 단축하게 된다. 즉, 샘플 수가 정해지고 가속계수를 증가시키면 신뢰성 보증시험 기간은

단축된다.

가속수명시험의 궁극적으로 시험시간을 줄이기 위한 방법론이지만 무고장시험 방식의 가속수명 시험시간 산출식은 다양한 형태로 주어진다. 따라서 이용하는 산출식에 따라 시험기간이 다르고 다양한 변수들이 있어 파악하기가 힘들다. 따라서 일반적으로 사용자들은 복잡한 수식보다 직관적 이해가 가능한 간단한 수식을 선호한다. 이 경우, 정밀한 수식을 통해 얻어지는 값과 간이식으로부터 얻어지는 값의 크기 차이와 그 과정에서 전제된 각종 가정들을 명확히 인식할 필요가 있다. 그러므로 정밀한 수식에 대한 변수들이 어떠한 관계가 있는지 파악할 필요가 있다.



1.2 연구 목적

본 연구에서는 신뢰성보증시험과 시험기간의 관계를 명확히 하고 가속계수를 구하기 위해 가속수명시험의 절차 및 분석 방법에 대해 체계화하였다. 가속수명시험에서 스트레스 수준을 결정하게 되는데 스트레스수준은 가장 높게 설정하는 것이 신뢰성보증시험 기간 단축에 유리하므로 실험적으로 동작 한계(operating limit)를 설정하고 스트레스 수준을 한 단계 낮춰서 최대 가혹 조건을 설정하였다. 스트레스 수준이 동작 한계를 초과하게 되면 정상 조건에서 발생하지 않는 고장메커니즘이 발생할 수 있으므로 동작 한계의 설정은 매우 중요하다. 이로 인해 냉장고용 압축기의 가혹조건인 고온과 저온 조건에서 실험을 통해 최대 가혹 조건을 설정하였다. 그리고 실험을 통해 얻어진 압축기 돔 온도의 데이터를 이용하여 고온과 저온 조건에서의 이론적인 가속계수를 산출하여 시험 기간을 구하였다.

따라서 냉장고용 압축기의 신뢰성보증시험 기간 단축을 위해 가속수명시험 절차와 분석 방법을 정리하고 고온과 저온에서의 가속계수 설정하는 방법도 제시하였다. 그리고 가장 문제시 되는 온도 조건에서의 최대 가혹 조건을 설정하고 이론적인 가속계수를 산출하여 단축 가능한 신뢰성보증시험 기간을 검토하는 것에 초점을 맞추었다.

1.3 연구 내용

본 논문에서는 냉장고용 압축기의 신뢰성보증시험 기간 단축을 위한 절차를 확립하였다. 그리고 가속수명시험의 절차와 분석 방법을 설정하였다. 실험을 통해 최대 가혹 조건을 설정하여 이론적인 가속계수를 구하였다. 구해진 가속계수를 통해 신뢰성보증시험 기간이 얼마나 단축가능한지를 확인하였다.

본 논문은 전체 5장으로 구성되어 있으며, 각 장의 개요는 다음과 같다.

제1장에서는 본 연구의 배경, 목적과 내용에 대해 설명하였다.

제2장에서는 신뢰성보증시험과 시험기간에 대해 설명하였다. 무고장시험에서의 상세식에 대한 주요변수에 대해 파악하였다. 또한 가속수명시험의 개념과 그 절차를 설정하고 이에 따른 분석 절차를 설명하였다. 그리고 고온과 저온조건에 따라 가속수명시험을 위한 최대 가혹 조건 탐색에 대해 설명하였다.

제3장에서는 고온 조건에서의 최대 가혹 조건 탐색을 위한 실험과 그 결과에 대해 설명하고 고찰한다. 또한 실험 장치를 소개하고, 실험 순서를 순차적으로 설명한다.

제4장에서는 저온 조건에서의 최대 가혹 조건 탐색을 위한 실험과 그 결과에 대해 설명하고 고찰한다. 또한 실험 장치를 소개하고, 실험 순서를 순차적으로 설명한다.

제5장에서는 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하여 최종 결론을 도출한다.

제2장 신뢰성보증시험

2.1 신뢰성보증시험과 시험 기간

신뢰성보증시험은 설계초기 단계에서 설정된 신뢰성 목표(척도)를 달성하였는지 평가하기 위해 수행하는 시험이다.

신뢰성의 척도는 신뢰성을 정량적인 값으로 표현하는 수치를 말한다. Fig. 1은 일반적으로 사용되는 신뢰성 척도를 일반적인 관계로 나타낸 것이다.



Fig. 1 Reliability scale

Fig. 2는 신뢰성 척도에 대한 함수들을 정리한 것이다. 먼저 확률밀도 함수는 단위 시간당 고장이 나는 제품의 비율을 나타내는 함수로써 $f(t)$ 로 나타낸다. 즉 고장밀도함수(Failure density function)는 고장시간의 상대

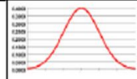
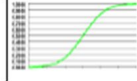
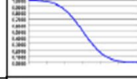
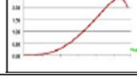
고장밀도함수 $f(t)$	• 시간에 따른 고장발생 확률을 나타내는 함수	
불신뢰도함수 $F(t)$	• 시간 t 까지 고장이 날 확률을 나타내는 함수	
신뢰도함수 $R(t)=1-F(t)$	• 시간 t 까지 고장이 나지 않을 확률을 나타내는 함수	
고장률함수 $\lambda(t) = f(t)/R(t)$	• 시간에서의 순간 고장률을 나타내는 함수	
평균고장시간 MTTF	• 수리 불가능한 제품의 평균 고장시간 $MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$	
평균고장간격 MTBF	• 수리 가능한 제품의 평균 고장시간 $MTBF = \frac{T(t)}{r}$ $T(t)$: 총 사용시간, r : 고장 수	
B 수명	• 특정 비율의 제품이 고장나는 시간으로 백분위수를 달리 표현한 것 B ₁₀ 수명: 아이템의 누적고장확률이 10%가 되는 시점	

Fig. 2 Kind of reliability scale



Fig. 3 Definition of Reliability

도수 히스토그램의 극한 개념으로 정의할 수 있다. 여기서 극한 개념이란 무한히 많은 데이터를 가지고, 히스토그램의 계급간격을 0에 가깝게 잡는 것을 의미한다. 고장밀도함수는 식 (1)과 같은 성질을 갖는다.

$$f(t) \geq 0, \int_0^{\infty} f(t)dt = 1 \quad (1)$$

Fig. 3은 신뢰도의 개념을 나타낸 것이다. 신뢰도는 아이템이 주어진 기간 동안 주어진 조건에서 규정을 수행할 수 있는 확률을 말한다. 즉, 신뢰도함수(reliability function)는 특정시간(t)까지 아이템이 고장이 나지 않을 확률로써 $R(t)$ 로 나타낸다. 신뢰도함수는 수학적으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x)dx \quad (2)$$

신뢰도함수는 시간에 따라 값이 변화하므로 동적 신뢰도(dynamic reliability)라고 한다. 반면 특정 상황에서 일회적으로 동작하거나 아이템의 특성상 시간 개념을 적용하기 어려운 경우를 정해진 시점에서의 신뢰도를 말하며 이것을 정적 신뢰도(static reliability)라고 한다.

누적분포함수(cumulative density function)는 아이템이 특정시간까지 고장날 확률을 나타내는 함수로써 $F(t)$ 로 나타내며, 불신뢰도함수라고도 한다. 불신뢰도함수는 수학적으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx \quad (3)$$

고장률함수(hazard function)는 주어진 구간($t, t + \Delta t$)의 시점까지 고장나지 않은 아이템이 순간적으로 고장이 날 확률이다. 즉, 고장률함수가 증가하면 시간이 지남에 따라 고장이 많이 발생하는 마모고장이 발생한다고 볼 수 있고, 일정한 상수이면 우발적으로 고장이 발생한다고 볼 수 있다. 고장률함수는 수학적으로 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

B 수명은 특정 비율의 제품이 고장이 나는 시간으로 백분위수를 달리 표현해서 나타낸 것이다. B_{10} 수명은 누적고장확률이 10%인 시간, 즉 10% 백분위수로 일반적으로 많이 사용되고 있다.

평균수명은 아이템의 고장시간에 대한 평균값으로, 수리불가능 아이템의 경우 $MTTF$ (Mean Time To Failure), 수리가 가능 아이템의 경우 $MTBF$ (Mean Time Between Failures)라고 한다. 식 (5)는 $MTTF$, 식 (6)은 $MTBF$ 를 수학적으로 나타낸 것이다. 여기서 $T(t)$ 은 총 사용시간이고, r 은 고장수를 나타낸다.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (5)$$

$$MTBF = \frac{T(t)}{r} \quad (6)$$

Fig. 4는 본 논문에서의 신뢰성보증시험 기간 단축 절차를 나타낸다. 먼저 원하는 시험기간을 설정하고 이에 맞게 가속계수를 설정한다. 가속계수는 신뢰성보증시험을 통해 얻어진 정상 사용조건에서의 수명 대비 가속조건에서의 수명이다. 설정된 가속계수에 맞는 새로운 가속인자를 정하여 가속수명시험을 한다. 그리고 가속수명시험 분석을 통해 가속성 성립 여부와 가속조건 타당성 여부를 판단하여 신뢰성보증시험을 실시한다.



Fig. 4 Process of decreasing the period of reliability qualification test

현장에서는 실용성을 고려하여 식 (7)과 같은 간편식을 통해 가속수명 시험에 의한 신뢰성보증 시험 기간을 평가하고 있다.

$$t_1 = \frac{MTTF}{AF} \quad (7)$$

식 (7)은 보증해야할 제품의 수명과 이를 검증할 수단으로써의 가속수명시험으로부터 얻어야 할 가속계수 크기 관계를 단적으로 보여준다. $MTTF = t \times AF$ 이므로 시험 기간과 가속계수는 상호 반비례 관계에 있다. 따라서 시험 기간을 현재보다 단축하고자 할 경우에는 식 (7)로부터 현재의 가속계수를 키워야 할 필요성이 대두된다. 현재의 시험 기간 t 에 만족하지 않고 $t_1 (t_1 < t)$ 을 원한다면 적어도 $AF_1 > AF$ 가 되도록 AF 를 증가시킬 필요가 있다. 따라서 단축하고자 하는 시험 기간 크기에 비례해서 가속수명시험 조건을 보다 가혹하게 강화하거나 소정의 가속계수를 갖는 신규 가속인자의 발굴을 통해 이 문제를 해결할 수 있다.

Fig. 5는 신뢰성 보증시험의 개념을 설명하기 위한 OC곡선(Operating Characteristic curve)이다. 이 곡선은 고장률(failure rate)에 따른 합격률의 관계를 나타낸다. λ_0 는 합격신뢰도수준(Acceptable Reliability Level; ARL)으로서, 이 값은 합격 품질의 최소 수준을 나타낸 것이다. 좋은 품질의 제품에서도 샘플 수에 따른 통계적인 변동 때문에 가끔 나쁘게 판단되어 불합격 되는 위험이 $\alpha \times 100\%$ 만큼 있다. 여기서 α 를 생산자위험이라고 부른다. 한편, λ_1 은 로트허용고장률(Lot Tolerance Failure Rate;

LTFR)이라고 하며, 이 값은 불합격 품질의 최대 수준을 나타낸 것이다. 바라지 않는 제품 로트의 합격 확률은 $\theta \times 100\%$ 이다. θ 를 소비자위험이라고 부르며, $(1 - \theta)$ 을 신뢰수준(confidence level)이라 한다.

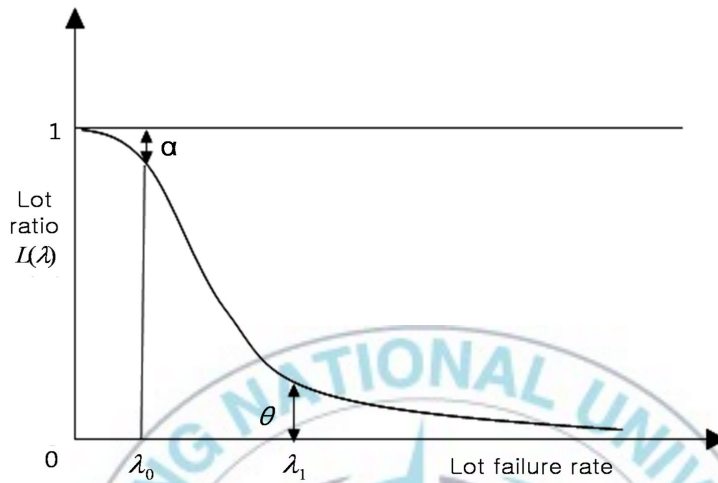


Fig. 5 Operating characteristic curve

무고장 시험방식에서 크기 n 의 샘플로 동시에 시험을 진행할 때 시간 t 에서의 불신뢰도를 $F(t)$, 신뢰도를 $R(t)$ 라 하면, t 까지의 고장갯수는 모수가 n , $F(t)$ 인 이항분포를 따른다. 따라서 신뢰수준 CL 을 만족하는 t 는 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$1 - CL = \sum_{x=0}^n {}_n C_x F(t)^x R(t)^{(n-x)} = R(t)^n \quad (8)$$

식 (8)을 $R(t)$ 로 정리 하면 식 (9)로 정리 할 수 있다.

$$R(t) = (1 - CL)^n \quad (9)$$

가속수명시험으로 신뢰성보증시험을 할 경우, 가속인자의 가속성 검증
을 위해 와이블 분포가 널리 사용되며, 와이블 분포에서는 형상모수
(shape parameter)가 중요한 의미를 갖는다. 와이블 분포에서 형상모수
(β)와 척도모수(η)에 따른 식을 신뢰도로 나타내면 식 (10)으로 나타낼
수 있다.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)을 정리하면, 시료수와 신뢰수준이 포함된 식 (7)보다
정밀한 시험식인 식 (11)을 구할 수 있다. 단, 척도모수인 η 는 $MTTF$ 로
나타내었다.

$$t_2 = \left(\frac{-\ln(1 - CL)}{n} \right)^{\frac{1}{\beta}} \cdot \frac{MTTF}{AF} \quad (11)$$

이 식으로부터 샘플 수 n 과 AF 는 시험시간 t 와 반비례 관계임을 알
수 있다. 또한 주어진 보증수명기간과 신뢰도 하에서는 이 두 변수는 상

보관계에 있음을 알 수 있다. 즉, 소정의 시험시간에 대해 시료수에 제약이 있을 경우에는 가속계수를 키워야 하고, 반대로 가속계수의 증대가 현실적으로 어려울 경우 시료수를 늘려야 함을 알 수 있다.

앞서 정의한 식 (7)은 식 (11)로부터 다음 조건이 만족할 경우에 성립됨을 알 수 있다.

$$\frac{-\ln(1-CL)}{n} = 1 \quad (12)$$

가령, 샘플 수를 2로 할 경우, CL 은 0.86이어야만 식 (12)을 만족하게 되며 결과적으로 식 (7)로서 시험시간의 산출이 가능하게 됨을 알 수 있다.

식 (12)을 만족하는 n 과 CL 의 관계를 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 일반적

이다. 따라서 냉장고용 압축기의 경우에도 70% 이상의 신뢰수준을 가정하면 샘플 수 2~3개의 경우로 실험이 가능하며 식 (7)로써 시험시간의 산출이 가능함을 알 수 있다.

즉, 식 (7)은 직관적으로 이해하기가 쉽고, 식 (11)은 시험 기간에 영향을 미치는 요소가 무엇인지 정확하게 확인할 수 있다는 장점이 있다.

무고장 시험방식에서 더 정밀하고 엄격하게 사용되는 식으로 $MTTF$ 보다는 B_N 수명을 이용한 식 (13)을 더 많이 사용되고 있다.

$$t_3 = \frac{t_p \left\{ \frac{\ln(1-CL)}{n \ln(1-P)} \right\}^{1/\beta}}{AF} \quad (13)$$

여기서 t_p 는 보증수명, β 는 형상모수, P 는 수명측도의 하나인 B_N 의 N (percentile)에 해당하는 값이다. $P=0.1$ 이라면, B_{10} 수명으로서 정해진 보증기간 동안 10%의 고장률을 허용하는 신뢰도를 의미한다.

보증수명(t_p)에 대한 신뢰성 척도로는 B_N 의 N 값 또는 $MTTF$ 가 널리 사용된다. 제품에 요구되는 신뢰성 척도가 엄격할수록 $MTTF$ 보다는 B_N 수명을 사용하게 된다. B_N 수명 사용시에는 N 값이 작을수록 신뢰성 척도가 엄격함을 나타내게 된다. N 값의 결정은 고장에 따른 경제적 손실, 안전성 등을 고려하여 정하게 된다. 항공기, 철도차량 등의 경우에는 B_1 의 높은 신뢰성이 요구되나, 백색가전이나 공작기계의 경우 B_{10} 이 일반

적이다. 따라서 냉장고용 압축기의 경우에도 B_{10} 을 사용하거나 직관적으로 이해하기 쉬운 $MTTF$ 를 사용한다.

형상모수 값 β 는 일반 공기압축기의 경우, 대략 $0.5 \leq \beta \leq 3.0$ 의 비교적 넓은 범위를 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 냉장고용 압축기에 대한 형상모수는 특별히 알려진 값이 없으며, 특정 값으로 규정되어 있지도 않다. 보증시험의 정밀도를 높이기 위해서는 향후 냉장고용 압축기에 대해서 체계화된 가속수명시험 또는 현장의 고장 데이터를 수집하여 이 값을 확립해 둘 필요가 있으며 일부 자료에는 통상적으로 1.8 정도를 사용하는 것으로 소개되어 있다.

식 (13)은 시험시간의 정밀한 평가가 가능하다고는 하지만, 6종류의 변수를 사용하고 있으며 앞서 언급한 바와 같이 변수 β 는 그 값을 확정하기가 용이하지 않다. 또한 변수 t_p 는 그 정의 자체가 복잡한 수식을 통해 얻어지는 값이며 현장의 사용자들에게 직관적 물리적 의미를 부여해 주지도 못한다. t_p 는 와이블 분포의 경우에는 식 (14), 지수 분포일 경우에는 식 (15)과 같이 정의된다. 식 (15)은, 식 (14)에서 $\beta=1$ 의 경우에 해당한다.

$$t_p = \frac{MTTF \times \{-\ln(1-P)\}^{1/\beta}}{\gamma\{1+(1/\beta)\}} \quad (14)$$

$$t_p = MTTF \times \{-\ln(1-P)\} \quad (15)$$

이상의 결과를 종합하면, 직관적 이해가 용이한 시험시간 간이식 (7)은 고장이 와이블 분포를 따를 경우, $\beta=1$ 로 둘 경우, $n=2$ 정도로 가정하면 CL 의 값이 0.86일 때 얻어지는 식임을 알 수 있다. 이처럼 식 (7)로서 시험시간을 평가하고자 한다면 나머지 3종류의 변수들에 대한 고찰이 필수적으로 요구된다.

냉장고용 압축기의 보증시험 시간은 이들 변수 값들의 타당성과 변수들 간의 상관관계를 종합적으로 평가하여 적절한 값으로 정함으로써 산출이 가능하게 된다.

냉장고의 보증수명(B_{10})을 8년으로 가정하고 $AF=1$, $\beta=1.8$ 로 할 경우, 위에서 언급한 CL 그리고 n 에 따른 시험시간(월)의 값들을 산출하여 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Test time according to n and $CL(\beta=1.8)$

$n \backslash CL$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	273	319	371	437	533
2	186	217	253	297	362
3	148	173	202	237	289
4	127	148	172	202	247
5	111	131	152	179	218

Table 2에서 형상모수가 결정될 경우, 냉장고용 압축기의 시험시간은 이들 n 과 CL 에 의해 달라짐을 알 수 있다. $CL=0.7$, $n=5$ 일 경우를 가

정하면, 소요시험시간은 152개월임을 알 수 있다. 따라서 시험시간을 6개월 이내로 단축하고자 한다면 가속계수가 25이상이어야 함을 알 수 있다.

식 (13)을 이용하여 각 파라미터들이 단독으로 변동할 경우, 시험시간에 미치는 영향을 Fig. 6~Fig. 9에 각각 나타내었다.

데이터 산출시에는 한 변수만을 변화시키고 나머지 5종류의 변수에 대해서는 특정값으로 고정하였다.

이 평가를 통해 어떤 변수가 시험시간에 가장 큰 영향을 미치는지, 변수의 어떤 구간에서 변동이 심하게 나타나는지 등을 분석할 수 있다.

Fig. 6에서 시료 수가 1~4일 경우 급격한 기울기를 가지지만 시료수가 5이상일 경우에는 시험시간에 그다지 큰 영향을 미치지 않는다.

Fig. 7에서는 $\beta < 1$ 인 영역에서는 소요시간이 지수함수적으로 급격히 감소하는 경향을 보인다. 그러나 $\beta > 1.5$ 인 영역에서는 완만한 기울기를 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 8에서는 CL의 증가에 따라 소요시간이 거의 1차식으로 완만하게 증가함을 알 수 있다.

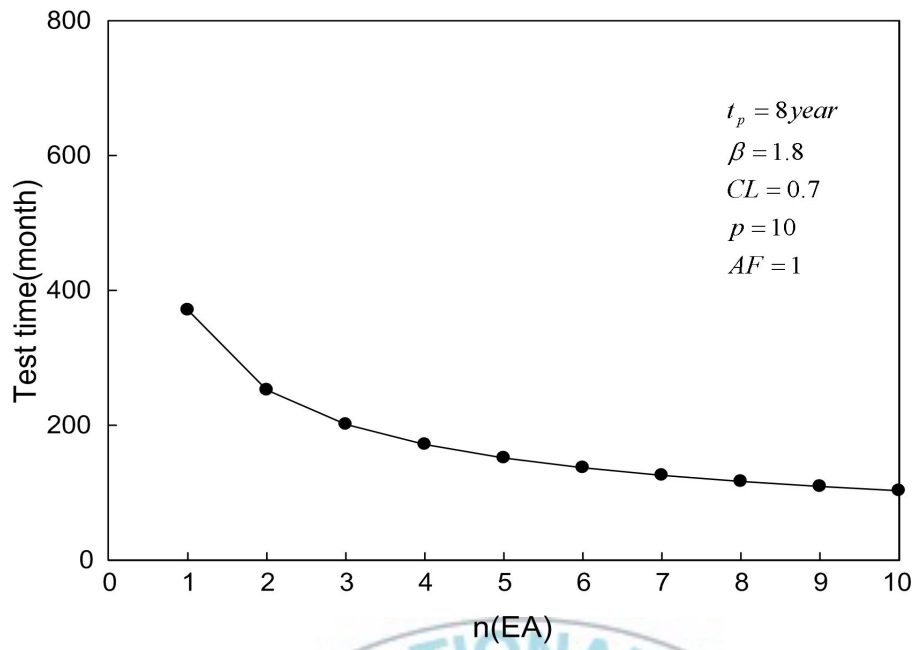
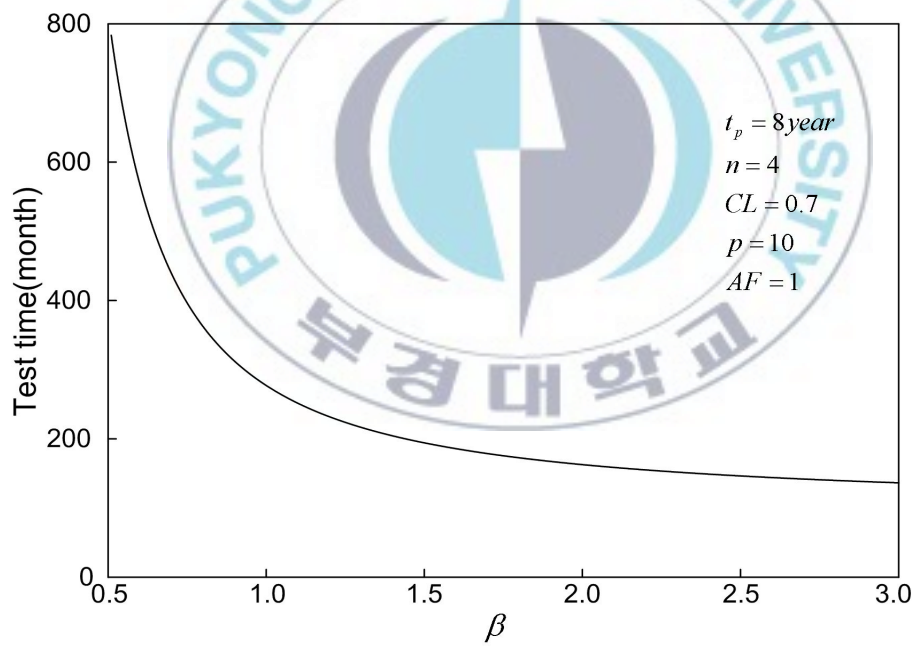
Fig. 9에서 $p < 5$ 인 영역에서는 기울기가 급격하고 $p > 10$ 인 영역에서는 기울기가 완만하게 나타났다.

이상의 결과로부터 시험시간에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 β 이며, 다음으로 p 와 n , CL의 순으로 각각 나타났다.

따라서 가속수명시험에 의한 시험시간을 줄이는 전략으로서는 언급된

4가지 변수에 대해 시험시간에 대한 감도와 영향이 큰 변수 순으로 정밀한 평가가 선행되어야 함을 알 수 있다. 물론 가장 감도가 큰 변수에 대한 정밀한 평가가 어렵다면 차 순위의 중요 변수 순으로 타당성을 평가하여 적정한 값들을 설정함으로써 최소한의 시험시간으로 보증시험평가를 할 수 있다.



Fig. 6 Test time versus n Fig. 7 Test time versus β

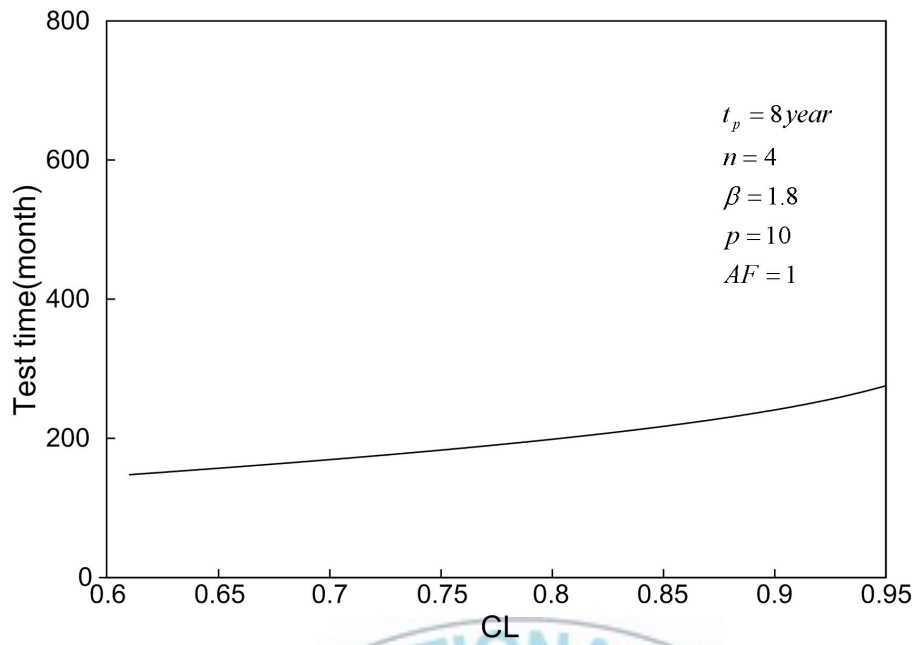
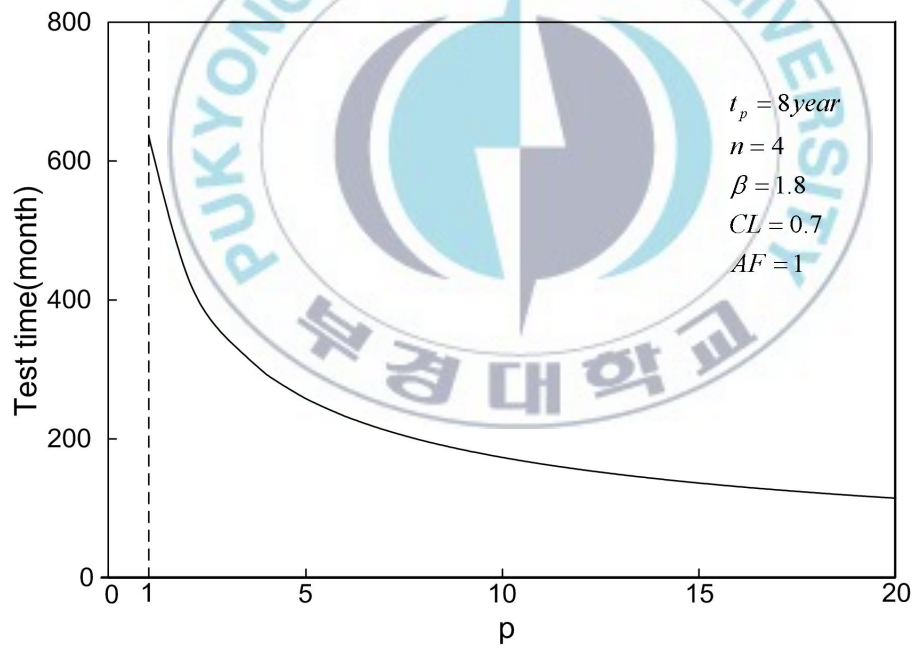


Fig. 8 Test time versus CL

Fig. 9 Test time versus p

2.2 가속수명시험

2.2.1 가속수명시험의 정의

가속수명시험은 정상조건(normal stress)보다 가혹한 조건(high stress) 하에서 제품을 시험하여 고장발생률을 촉진시키고 가속조건에서 관측된 수명데이터를 수명-스트레스 관계식을 이용해서 정상조건에서의 신뢰성을 추정하는 방법이다.

2.2.2 가속수명시험 절차

가속수명시험에서 가장 먼저 해야 할 일은 고장모드 및 고장메커니즘을 파악하는 일이다. 여기서 고장모드란 고장메커니즘의 결과로 나타나는 현상 또는 증상을 말하며, 고장메커니즘이란 스트레스에 따라 고장이르게 되는 물리적·화학적 과정을 말한다. 이 때 하나의 제품에 여러 가지 고장메커니즘이 존재할 수 있으므로 가장 문제가 되는 고장메커니즘을 선정해야 한다.

신제품 개발 과정에서는 고장모드와 고장메커니즘이 명확하지 않기 때문에 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)를 통해 위험우선수(Risk Priority Number; RPN)가 가장 높은 잠재적인 고장메커니즘을 선정하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 고장모드를 압축기 습동부 마모, 고장메커니즘을 오일 회수량 부족으로 각각 가정하였다.

고장메커니즘이 선정되면 이를 가속시킬 수 있는 가속스트레스를 선택

한다. 이 때 고장물리 이론에 근거하거나, 초가속수명시험(Highly Accelerated Life Test; HALT)이나 가속수명시험에 따른 연구결과에 근거하여 가속스트레스를 선정한다. 고장메커니즘을 가속시킬 수 있는 가속스트레스의 예는 Table 3과 같다. 본 논문에서는 가속스트레스를 온도로 설정하였다.

Table 3 Examples of failure mechanism and acceleration stress

failure mechanism	acceleration stress
chemical reaction	temperature
electromigration	current density, temperature
corrosion	temperature, humidity
electricity	voltage
fatigue	vibration
thermal expansion	temperature cycle



Fig. 10 Stress impose method

Fig. 10은 스트레스 인가방법을 나타낸다. 스트레스 인가방법에는 일정 스트레스, 계단식 스트레스, 점진적 스트레스, 주기적 스트레스, 확률적 스트레스 등이 있으며 본 논문에서는 동작 한계(operating limit)를 파악하기 위해서 계단식 스트레스법을 사용하였다.

가속스트레스의 수준은 사용조건에서부터 최악의 가속조건까지 그 범위가 넓다. 스트레스 수준을 가능한 높게 설정하는 것이 시험기간의 단축에 유리하지만 스트레스 수준이 동작 한계를 초과하면 사용조건에서는 발생하지 않는 고장메커니즘이 발생하므로 올바른 시험이 될 수 없다.

따라서 동작 한계 이내에서 가속스트레스 수준을 결정해야 한다. 현재 동작 한계를 모르기 때문에 계단형 스트레스 시험을 실시하여 동작 한계를 확인한다.

하나의 스트레스에 필요한 수준의 수는 2~3개가 일반적이다. 2수준인 경우 동일한 시료 수, 동일한 시험 기간으로 시험을 했을 때 가장 정확한 추정 결과를 얻을 수 있다. 하지만 2수준으로 시험을 하는 경우 가정한 수명-스트레스 관계식에 대한 모델이 적절한지 검정할 수 없고, 어느 한 수준의 시험이 잘못되어 데이터를 이용할 수 없는 경우 수명-스트레스 관계식을 추정할 수가 없으므로 현실적으로 3수준이 널리 사용되고 있다.

가속수명시험 시 시료 수가 많을수록, 시험 기간이 길수록 신뢰할 수 있는 시험이 된다. 하지만 현실적으로 예산 및 시간 관계상 시료 수와 시험 기간에 제약이 있으므로 최소한의 시료 수와 시험 기간을 정해야

한다.

시험 수가 결정되면 각 스트레스 수준별 시험 수를 배분해야 되는데 균등 배분보다 낮은 스트레스 수준 쪽에 많은 시험 수를 배분하는 것이 일반적이다. 그 이유는 낮은 스트레스일수록 고장이 날 확률이 작기 때문이다. 그래서 일반적으로 2수준인 경우 6:4 비율로, 3수준인 경우 4:2:1 비율로 시험 수를 배분한다.

가속수명시험 중에 고장을 판정하기 위해 어떤 항목을 측정하고 어떻게 판정할 것인지 결정해야 한다. 고장 판정을 위한 관측방법으로는 연속적 방법과 단속적 방법이 있다. 연속적 방법은 관측 장치를 설치해야 하므로 비용이 많이 들어 단속적 방법이 널리 사용된다.

2.2.3 가속수명시험 데이터 분석 방법

가속수명시험 데이터 분석 절차는 Fig. 11과 같으며, 가속수명시험 데이터 분석에서 가장 먼저 해야 할 일은 각 수준에서의 수명분포를 결정하는 일이다. Fig. 12는 수명분포들을 나타낸다. 수명분포로는 와이블분포(Weibull distribution), 지수분포(Exponential distribution), 정규분포(Normal distribution), 대수정규분포(Lognormal distribution) 등이 있다.

먼저 와이블분포는 제품수명주기를 욕조곡선(bath tub curve)으로 모두 나타낼 수 있기 때문에 가장 널리 사용된다. Fig. 13은 욕조곡선을 나타낸다. 욕조곡선은 설계나 제조상의 결함, 불량부품으로 인하여 사용개시 후 비교적 초기 스트레스를 견디지 못하고 고장이 발생하는 초기고장

기간, 시간의 경과 더불어 시스템 또는 제품의 사용조건에서 우발적으로 발생하여 안정된 수준의 고장이 나타나는 기간을 우발고장기간, 일정기간이 경과된 이후 마모 또는 노화 등에 기인하여 고장률이 증가하는 기간을 마모고장기간으로 크게 세부분으로 나뉜다. 지수분포는 고장률이 사용기간에 영향을 받지 않는 일정한 수명분포로써 우발고장을 설명하는데 적합하다. 정규분포는 마모 고장 제품의 수명분포로 많이 사용된다. 대수 정규분포는 금속재료의 피로수명, 전기 절연체의 수명분포 등에 널리 사용되는 수명분포이다. 이하에서는 와이블분포에 대해 설명한다. 수명분포를 와이블분포로 가정했다면 시험 데이터가 와이블분포를 따르는지, 즉 적합성(fitness)을 판단한다. 적합성은 시험 데이터들을 와이블 확률지에 타점하여, 회귀선의 선형성을 조사함으로써 쉽게 알 수 있다.

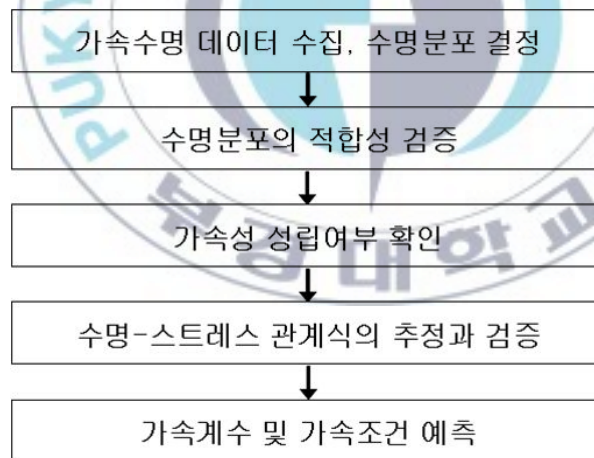


Fig. 11 Flow chart of data analysis

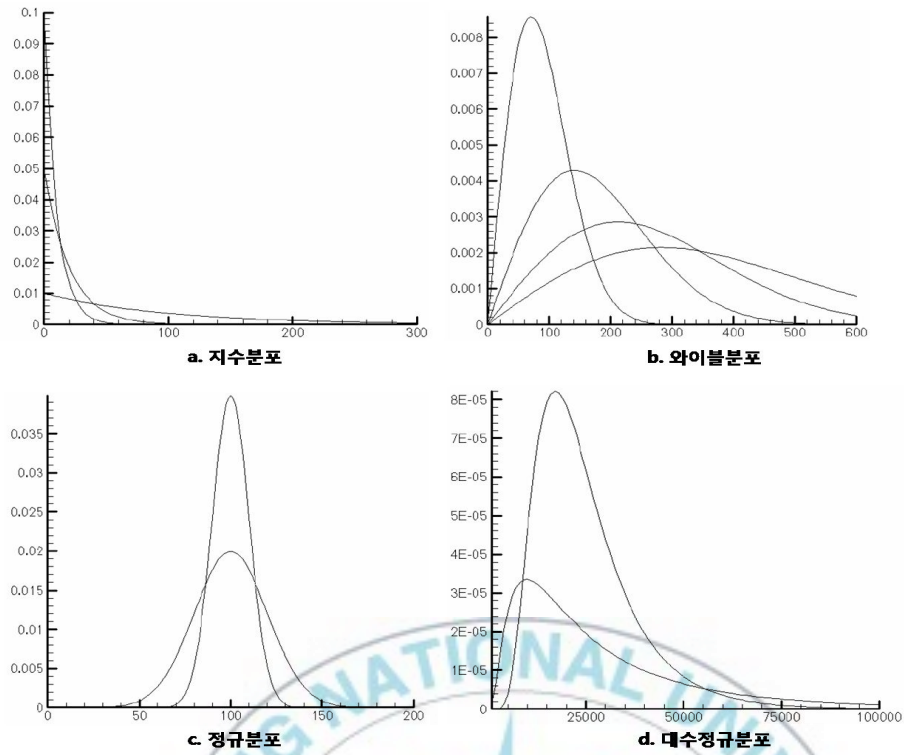


Fig. 12 Life distribution

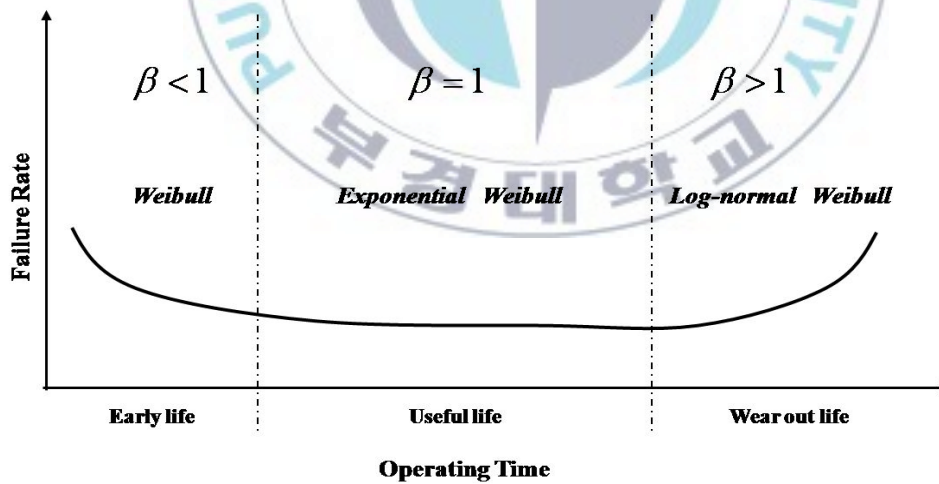


Fig. 13 Bath tub curve

수명분포의 적합성을 확인한 다음, 가속성 성립 여부를 확인한다. 가속성이 성립한다는 것은 스트레스 수준 간 수명을 가속계수로 나타낼 수 있음을 의미한다. 반면, 가속성이 성립하지 않는다는 것은 가속수명시험에서 설정한 가속스트레스가 가속인자가 아님을 의미한다. 가속성 성립 여부는 수명분포의 형상모수(shape parameter)로 판단하는데, 각 수준에서 형상모수가 동일할 경우 가속성이 성립된다.

가속성은 가속수명시험 데이터들을 와이블 확률지에 타점하여 이들을 적합시킨 회귀선의 기울기가 서로 평행한지의 여부로 판단할 수 있다.

Fig. 14은 이들로부터 얻은 회귀선을 나타낸다. 회귀선이 선형이므로 와이블분포로 적합하며, 각 수준의 회귀선의 기울기가 평행하므로 가속성이 성립한다.

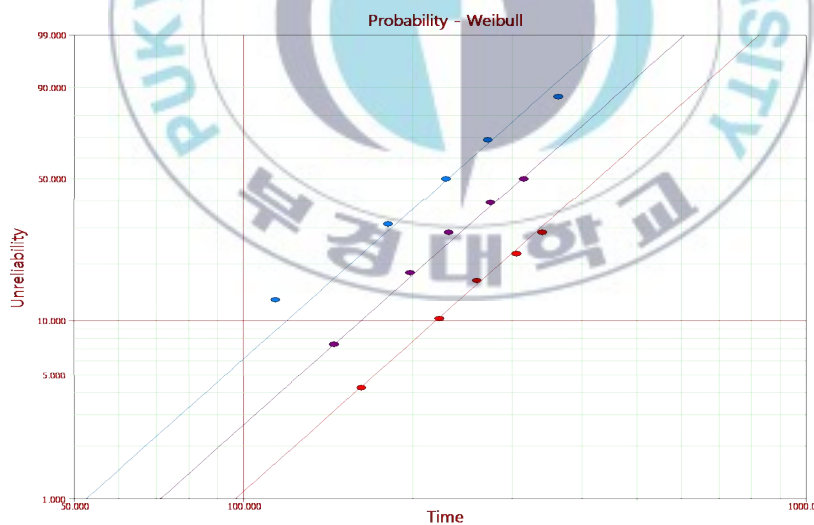


Fig. 14 Weibull distribution

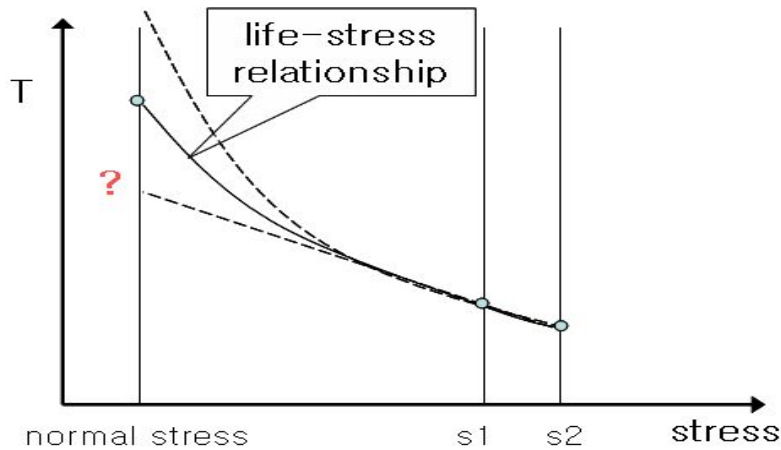


Fig. 15 Life-stress relationship

Fig. 15는 가속계수를 추정하기 위한 수명과 스트레스의 관계를 나타낸다. 가속계수는 가속조건 s_1 과 s_2 에서 관측된 수명과 이들로부터 외삽법(extrapolation)을 통해 얻어진 정상조건에서의 수명 관계로부터 구해진다.

수명-스트레스 관계는 가속수명시험에서 인가하는 스트레스의 종류(가속인자)에 따라 다양한 형태로 나타나게 된다. 가속인자가 온도이면 아레니우스(Arrhenius) 관계, 온도 이외의 인자일 경우는 역누승(Inverse power law) 관계, 온도와 다른 인자가 복합된 경우이면 아이링(Eyring) 관계로 각각 나타난다. 아레니우스 관계는 본 논문에서는 가속인자가 온도이므로 수명-스트레스 관계는 아레니우스 관계로 볼 수 있다. 이하에서는 아레니우스 관계에 대해서 설명한다.

임의의 온도 T_K 에서의 수명 $L(T_K)$ 는 식 (16)과 같은 아레니우스 관계

식으로 표현된다.

$$L(T_K) = A \exp(E/kT_K) \quad (16)$$

여기서, A 는 모형의 상수값, E 는 활성화에너지, k 는 볼츠만 상수 ($=8.617 \times 10^{-5} \text{eV/K}$), T_K 는 절대온도를 각각 나타낸다. 또한 수명이 와이블분포를 따르면 $L(T_K)$ 는 와이블분포의 척도모수(scale parameter) η 와 같다고 본다. 즉, 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(T_K) = \eta \quad (17)$$

가속계수는 식 (16)을 이용하여 식 (18)과 같이 구해진다.

$$AF = \frac{L(T_L)}{L(T_H)} = \frac{A \exp(\frac{E}{kT_L})}{A \exp(\frac{E}{kT_H})} = \exp \frac{E}{k} \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right) \quad (18)$$

여기서, $L(T_L)$ 은 절대온도 T_L 에서의 수명이고, $L(T_H)$ 는 절대온도 T_H (T_L 보다 더 가혹한 온도)에서의 수명이다. 위 식에서 알 수 있듯이, 아래 니우스 관계에서는 활성화에너지 값만 알면 가속수명시험을 거치지 않고도 가속계수를 알 수 있다. 하지만 압축기의 경우, 인용할 수 있는 알려진 값이 없으므로 시험을 하지 않고는 활성화에너지 값을 알 수 없다. 따라서 활성화에너지 값은 시험을 통해 얻어진 각 수준에서의 가속계수로부터 구해진다. 활성화에너지 값은 식 (18)로부터 식 (19)과 같이 표현

된다.

$$E = \frac{k \ln AF \cdot T_L T_H}{T_H - T_L} \quad (19)$$

활성화에너지를 구하기 위해 T_L 과 T_H 사이의 가속계수를 알아야 하는데, AF 는 식 (17)과 식 (18)로부터 식 (20)과 같이 표현된다.

$$AF = \frac{L(T_L)}{L(T_H)} = \frac{\eta_L}{\eta_H} \quad (20)$$

여기서, 스트레스 수준별 척도모수 η 는 Fig. 14의 와이블분포로부터 구할 수 있으므로 가속계수를 구할 수 있고 따라서 식 (19)의 활성화에너지를 구할 수 있다.

이 값을 알면 사용조건(T_n)과 가속조건(T_a)에서의 가속계수를 알 수 있다. 만일 우리가 원하는 가속계수 AF 가 α 라면 궁극적으로 구하고자 하는 가속조건은 식 (19)로부터 식 (21)과 같이 얻어진다.

$$T_a = \frac{T_n E}{E - T_n k \ln \alpha} \quad (21)$$

이 가속조건이 압축기의 동작 한계를 초과하지 않는다면 우리가 구하고자 하는 가속조건을 만족한다. 따라서 T_a 의 가속조건으로 신뢰성보증 시험을 실시하면 시험 기간을 원하는 기간으로 단축할 수 있게 된다.

2.3 가속수명시험을 위한 최대 가혹 조건 탐색

2.3.1 고온 조건

고온 조건에서는 압축기의 고장모드를 습동부 마모로, 고장메커니즘을 오일 회수량 부족과 열화 작용으로 상정하였다. 또한 가속스트레스 인자로 고온을 선택하였다. 고온 시험은 사용온도에 비해 가혹 온도를 높게 하기 어려운 관계로 큰 가속계수를 얻기가 어려우며 결과적으로 신뢰성보증시험 기간이 길어지는 가장 주된 요인이 되고 있기 때문이다. 그리고 스트레스 인가 방법으로는 일정 크기 스트레스를 인가하였다.

다음 단계에서는 가속스트레스의 수준을 결정하게 된다. 스트레스 수준을 가능한 높게 설정하는 것이 시험 기간의 단축에 유리하지만, 이 수준이 동작한계(operating limit)를 초과하면 정상적인 사용 조건에서는 발생하지 않는 별개의 고장메커니즘이 발생하게 된다. 따라서 주어진 가속 인자의 동작한계를 정확히 파악하는 것이 대단히 중요하다. 본 논문에서는 먼저 고온 조건 하에서의 최대 가혹 조건을 탐색하는데 초점을 맞추었다. 이를 위해 계단형 스트레스를 인가하여 동작한계를 탐색하였다. 동작한계 탐색시의 초기 온도 설정값은 정상 조건을 고려하여 냉장고의 기준온도인 30℃로 하였다.

마지막으로 본 실험에서는 비용이 상대적으로 저렴한 단속적 방법을 사용하였으며 관측 주기는 2시간으로 하였다. 최대 가혹 조건의 판정을 위해, 압축기의 돔(dome) 온도, 냉동사이클 내의 각 주요 온도, 냉장고의

입력 전류와 소비전력 등을 측정하였다. 그리고 압축기의 고장 판정은 세 가지 경우를 상정하여, 압축기의 프로텍터(protector) 작동, 압축기의 돔 온도가 140℃ 이상, 냉동사이클에 이상이 발생한 경우로 하였다.

고온조건에서는 최대 가혹 조건과 정상 사용 조건에서의 압축기 돔 온도를 측정하여 10℃법칙을 이용하여 가속계수를 산출 할 수 있다.

식 (22)는 스트레스 수준 간 10℃법칙을 적용할 경우의 사용조건(T_n)과 가속조건(T_a) 간의 AF 를 나타낸다.

$$AF = 2^{(T_a - T_n)/10} \quad (22)$$

2.3.2 저온 조건

저온 조건에서는 압축기의 고장모드를 습동부 마모와 액냉매 유입으로, 고장메커니즘을 suction valve 파손과 열화 작용으로 상정하였다. 또한 가속스트레스 인자로는 저온을 선택하였다. 그리고 스트레스 인가 방법으로는 일정 크기 스트레스를 인가하였다. 스트레스 수준을 가능한 낮게 설정하는 것이 시험 기간의 단축에 유리하지만, 이 수준이 동작한계(operating limit)를 초과하면 정상적인 사용 조건에서는 발생하지 않는 별개의 고장메커니즘이 발생하게 된다. 이를 위해 계단형 스트레스를 인가하여 동작한계를 탐색하였다. 동작한계 탐색시의 초기 온도 설정값은 정상 조건을 고려하여 냉장고의 기준온도인 5℃로 하였다.

마지막으로 본 실험에서는 비용이 상대적으로 저렴한 단속적 방법을

사용하였으며 관측 주기는 2시간으로 하였다. 최대 가혹 조건의 판정을 위해, 압축기의 돔(dome) 온도, 냉동사이클 내의 각 주요 온도, 냉장고의 입력 전류와 소비전력 등을 측정하였다. 그리고 압축기의 고장 판정은 세 가지 경우를 상정하여, 압축기의 프로텍터(protector) 작동, 과열도가 0°C 이하, 냉동사이클에 이상이 발생한 경우로 하였다.

저온조건에서는 최대 가혹 조건과 정상 사용 조건에서의 압축기 돔 온도를 측정하여 이에 따른 동점도를 산출한다. 산출된 동점도를 아레니우스 관계를 이용하여 가속계수를 구할 수 있다.

아레니우스 관계는 가속수명시험에서 가속 스트레스가 열인 경우 즉, 온도인 경우에 주로 사용된다. 아레니우스 관계식은 아이템의 수명이 반응속도에 역비례함을 나타낸다.

식 (23)은 스트레스 수준 간 아레니우스 관계가 성립할 경우의 사용조건(T_n)과 가속조건(T_a) 간의 AF 를 나타낸다.

$$AF = \frac{L(T_n)}{L(T_a)} = \frac{Ce^{B/T_n}}{Ce^{B/T_a}} \quad (23)$$

여기서 $L(T_n)$ 과 $L(T_a)$ 는 각 조건에서의 수명분포의 모수, C 는 물성치(상수)이고, $B = E/k$ 로서 활성화에너지 값(E)을 볼츠만 상수로 나눈 값이다.

식 (23)에서 활성화에너지 값만 알면 AF 를 구할 수 있지만 활성화에너지 값을 구하기 위해서는 많은 시간과 비용이 든다. 그래서 이론적 산

출이 가능한 식 (24)을 통해 AF 를 구할 수 있다.

본 논문에서는 가속스트레스인 저온에 의해 가장 영향을 받는 요소로 윤활유의 동점도로 보았다. 동점도는 반응속도의 확산계수이기 때문에 아레니우스 관계에 의해 윤활유의 수명이 동점도에 역비례함을 알 수 있다. 이를 이용하면 식 (24)로 나타낼 수 있다.

$$AF = \frac{X(T_a)}{X(T_n)} \quad (24)$$

여기서 $X(T_n)$ 과 $X(T_a)$ 는 사용조건과 가속조건에서의 동점도를 나타낸다. 각 점도는 식 (25)을 이용하여 구할 수 있다.

식 (25)은 일반적으로 윤활유와 온도관계에 사용되는 Walther-ASTM의 식을 나타낸다. 윤활유의 기준온도인 40℃와 100℃에서의 동점도를 이용하여 임의의 온도에서의 점도를 식 (24)을 통해 구할 수 있다. X 는 임의의 온도에서의 동점도, D 는 보정값, K 와 M 은 상수를 나타낸다.

$$\log(\log(X + D)) = K - M \cdot \log T \quad (25)$$

본 논문에서는 보정값을 윤활유의 데이터를 참고하여 0.7로 설정하고 용해도를 데이터에서의 중간값인 15%를 기준으로 하여 40℃에서의 동점도가 3.7cSt, 100℃에서는 1.35cSt를 얻었다.

제3장 고온 조건에서의 최대 가혹 조건 탐색

3.1 실험 장치

챔버를 이용하여 일정온도를 유지한 상태에서 시료인 냉장고를 챔버내에서 작동시켜 이에 따른 결과를 열전대(thermo couple)를 이용하여 데이터를 수집하였다.

실험에 사용된 냉장고용 압축기와 챔버의 세부 사양을 Table 4와 Table 5에 각각 나타내었다.

Table 4 Specifications of compressor

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

Table 5 Specifications of chamber

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

가속계수는 정상 조건과 최대 가혹 조건일 때의 압축기의 돔 온도로부터 구하였다. 온도정보는 T-type 열전대(thermocouple)를 설치하여 데이터 로그(MV-2000)를 통해 실시간으로 수집하였다. 압축기의 전류와 전력은 전력측정기(CW-120)를 냉장고 전원부에 설치하여 계측하였다. 환경챔버 온도(Room Temperature; RT)는 환경챔버 내의 히터를 제어함으로써 조절하였다.

3.2 실험 방법

최대 가혹 조건 탐색 실험 방법은 사용 조건 30℃부터 단계적으로 온도를 증가시켜 고장이 발생될 때까지 반복적으로 진행하였다. 실험 종료는 고장 판정의 세 가지 경우 가운데 어느 한 가지에 해당될 때로 하였다. 실험결과를 통해 동작 한계와 최대 가혹 조건을 구하고 압축기의 돔 온도의 변화에 따른 가속계수를 산출하였다. 예비실험을 통해 냉장고 샘플(sample) 두 개의 냉각능력을 파악한 후 본 실험을 행하였다.

Fig. 16은 본 실험 과정을 나타낸다. 우선 환경챔버 온도를 사용조건인 30℃로 일정하게 유지한 상태에서 냉장고를 작동시키고 동시에 온도와 전류, 전력 데이터를 수집하였다. 샘플링 타임은 1분으로, 총 시험 기간은 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. 17은 냉장고 샘플에 부착된 센서 위치를 나타낸다. 온도 정보를 측정하기 위해 8개소에 열전대를 부착하였다. T1은 증발기의 입구, T2는 증발기의 출구, T3은 냉동실, T4는 냉장실, T5는 압축기의 입구, T6은 압축기의 돔, T7은 압축기의 출구, T8은 응축기의 온도를 각각 나타낸다.

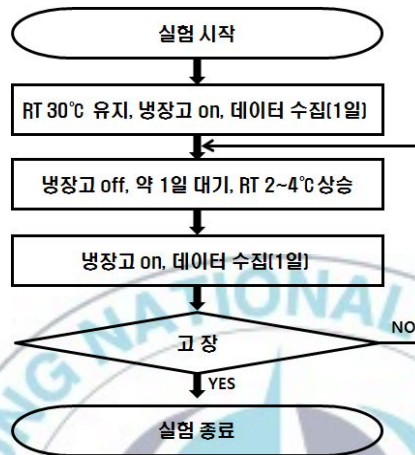


Fig. 16 Process of experiment

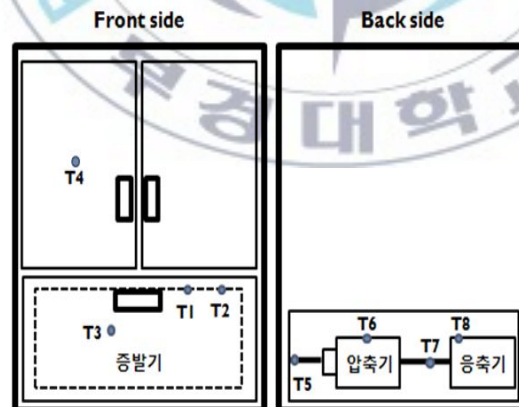


Fig. 17 The sensor location

3.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 18~20는 동작한계와 최대 가혹 조건 설정 및 샘플의 특성을 파악하기 위한 예비실험 결과이다.

Fig. 18은 샘플1(a)과 샘플2(b)의 냉각능력을 파악하기 위해 냉동실의 온도를 측정한 결과이다. (a)가 (b)보다 냉각능력이 더 좋음을 알 수 있다.

Fig. 19는 RT에 따른 압축기의 돔 온도를 나타낸다. 초기 기동으로 인해 온도가 상승하다가 일정시간 후 안정화됨을 확인하였다. Fig. 19(a)는 RT 51℃인 경우, 프로텍터 작동으로 온도가 감소하였다가 다시 증가함을 보였다. Fig. 19(b)는 프로텍터가 작동하지 않았고 RT 51℃까지 일정하게 온도가 증가하였다.

Fig. 20은 RT에 따른 전류 변화가 일정함을 알 수 있고 초기 기동으로 인한 전류의 증가 이후에는 점차 안정화됨을 확인하였다. Fig. 20(a)는 RT 51℃에서 전류값이 2.48A(한계치인 2.6A의 95%)까지 증가하여 프로텍터가 작동함을 보이고 있다. 이로써 고온 동작 한계는 RT 51℃임을 알 수 있었다. 그리고 최대 가혹 조건은 동작한계보다 한 단계 낮은 RT 49℃로 정하였다. Fig. 20(b)에서 S2는 RT 51℃인 경우에도 전류 피크값이 한계치의 88%에 불과하였다. 이러한 결과는 Fig. 20에 보듯이 S2가 S1보다 냉각능력이 상대적으로 작은 것에 그 원인이 있는 것으로 생각된다.

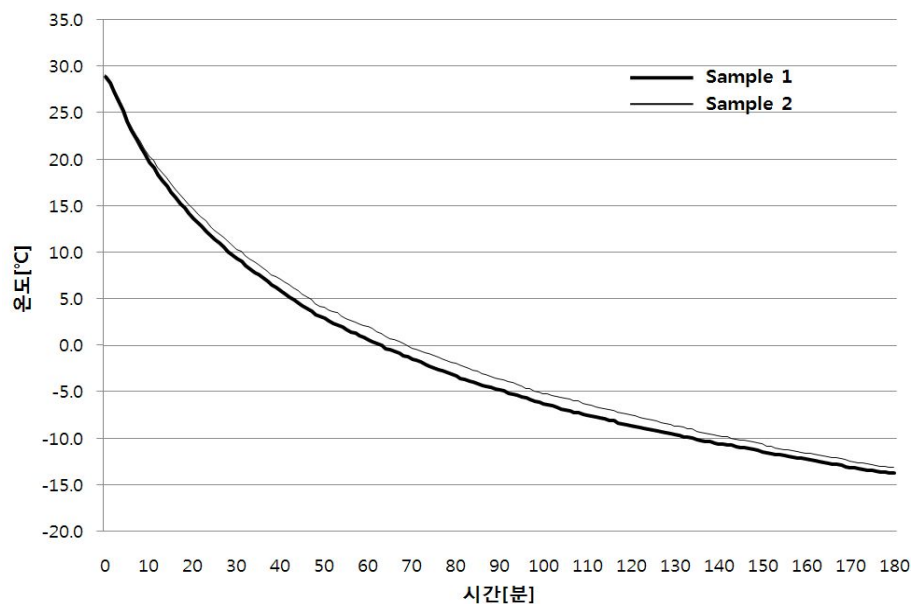
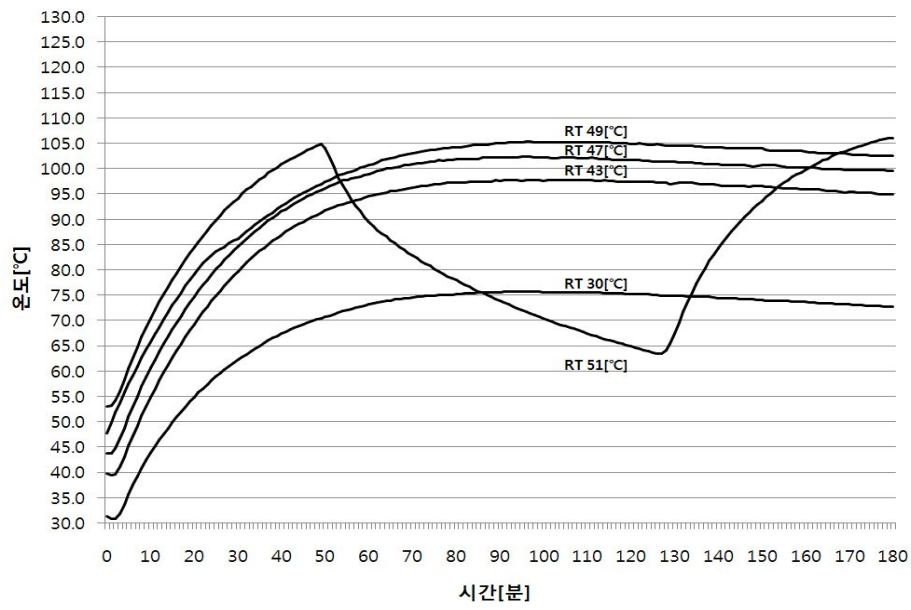
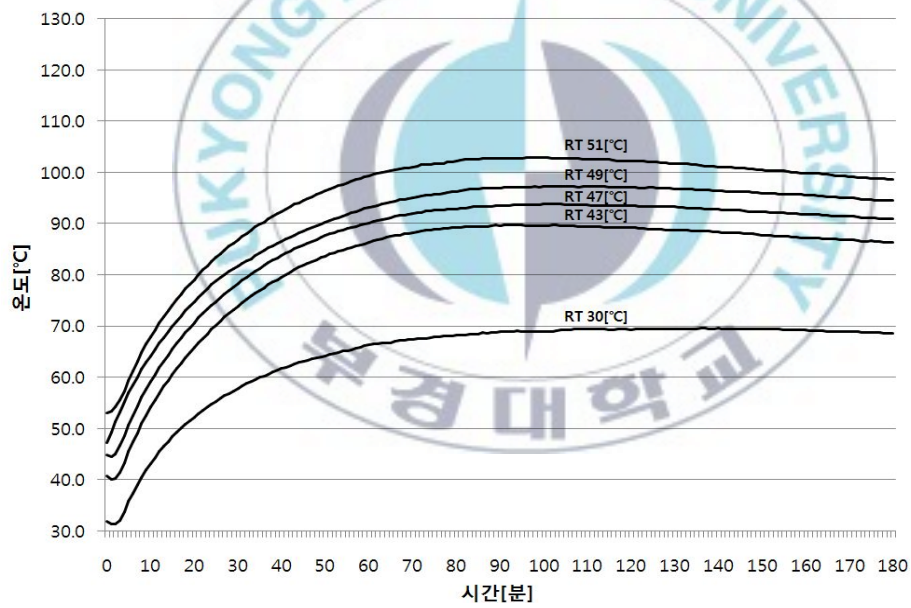


Fig. 18 Freezer temperature of samples



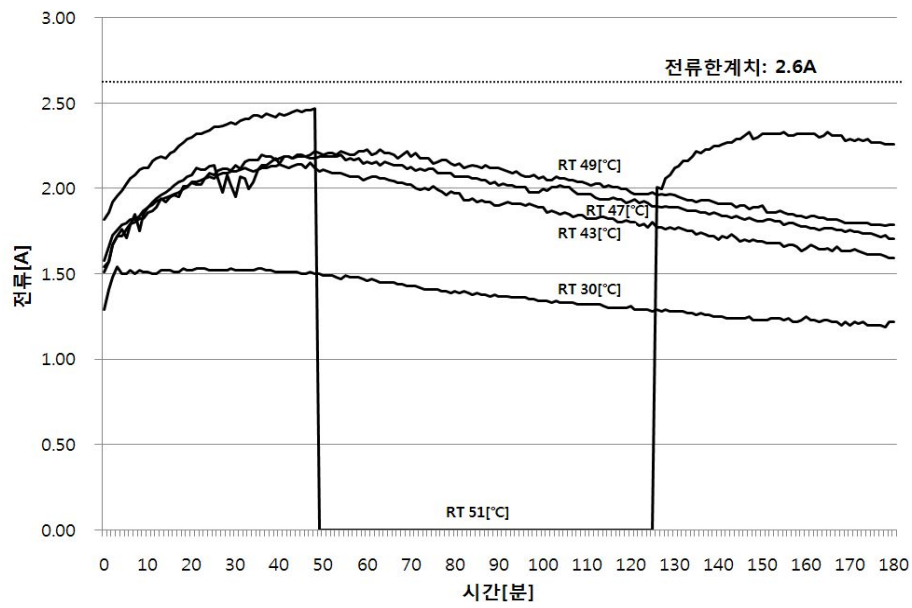


(a)

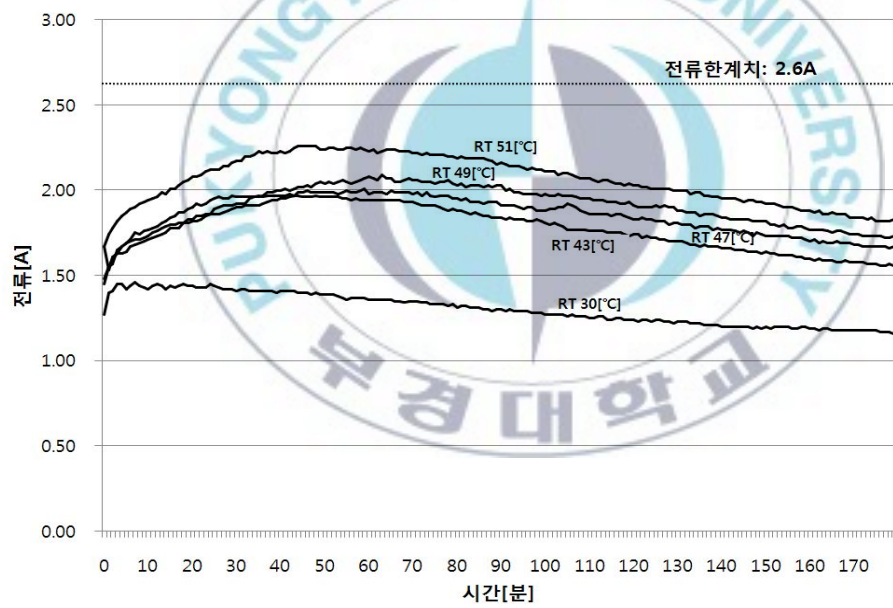


(b)

Fig. 19 Temperature of compressor dome



(a)



(b)

Fig. 20 Current of compressor

Fig. 21은 환경 챔버의 설정온도에 따른 실제 온도 제어 결과를 나타낸다. 온도는 오차 범위가 약 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 이내로 일정하게 제어됨을 보였다.

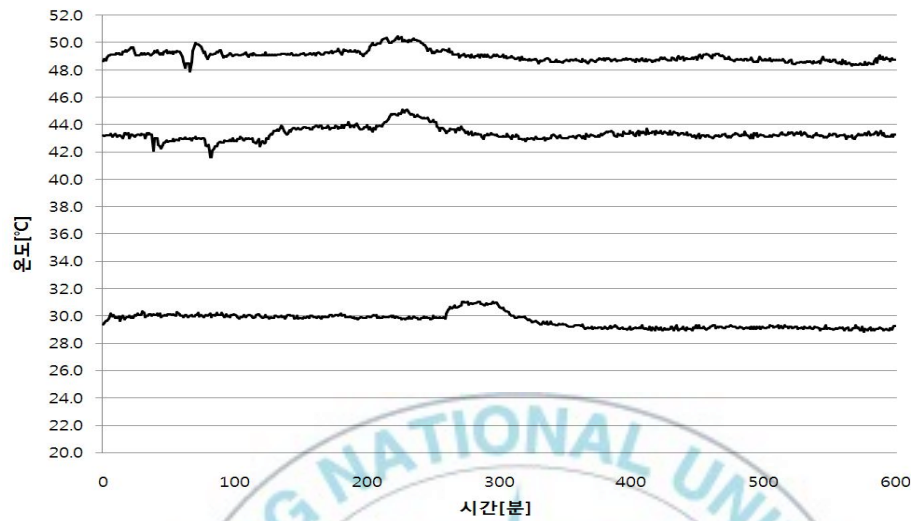
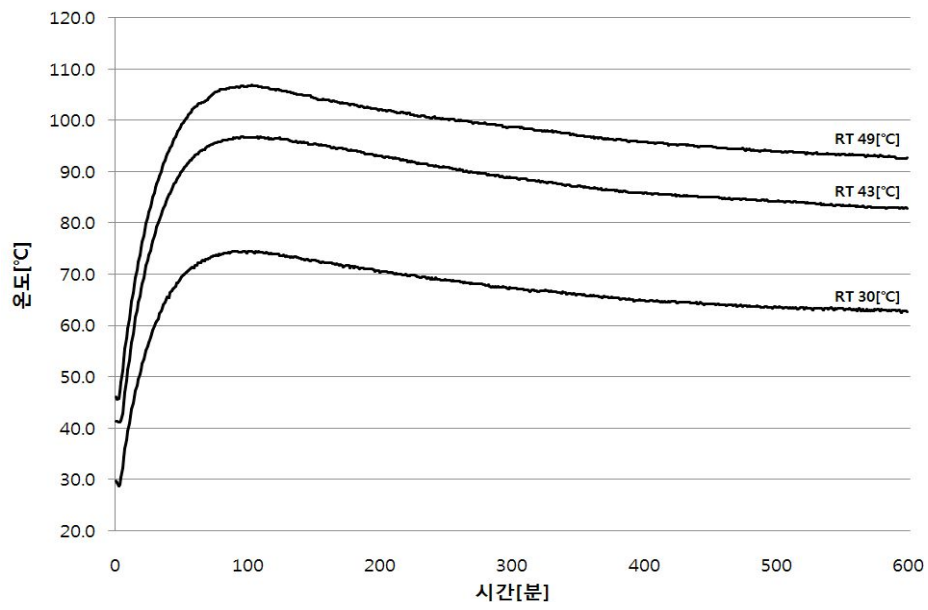


Fig. 21 Room temperature responses

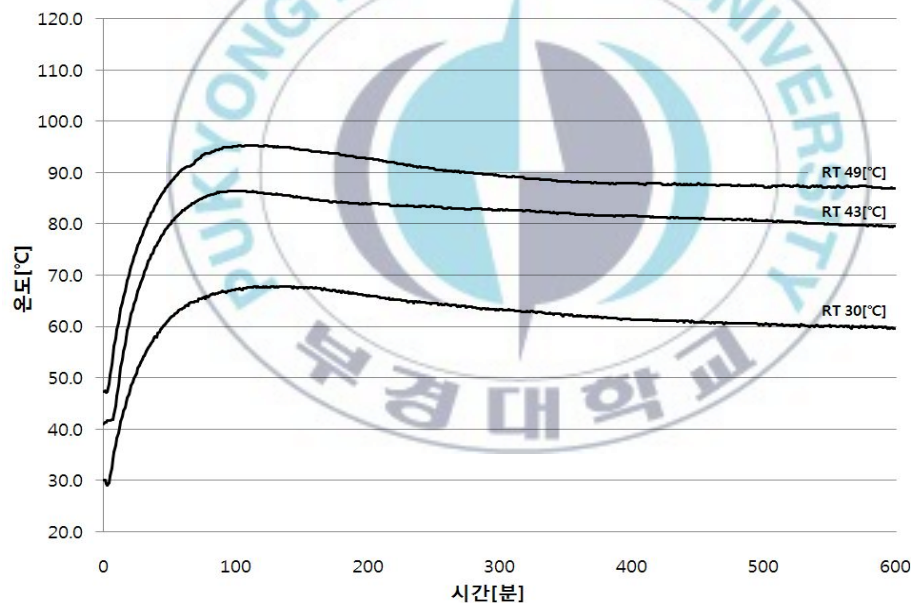
Fig. 22~23은 RT의 온도 변화에 따른 압축기의 돔 온도 및 전류의 변화를 나타낸 실험 결과이다.

Fig. 22는 압축기의 돔 온도 변화를 나타낸다. (a)의 경우, 정상상태인 사용조건과 최대 가속 조건과의 온도 차는 30°C 로 나타났다. 이를 10°C 법칙에 적용시키면 고온가속계수는 약 8이 얻어짐을 알 수 있다. 반면에 (b)의 경우, 온도차는 28°C 이므로 가속계수가 약 7이다. 두 샘플의 *MTTF*는 모두 8년이므로 *AF*와 *MTTF*를 식 (7)에 적용하면, 신뢰성보증 시험 기간은 고온 가속만으로 각각 12개월, 13.7개월이 된다. 이는 가속 조건의 실험을 통해 정상조건에서의 전체 시험 기간을 12.5%, 14.3% 줄일 수 있음을 의미한다.

Fig. 23은 압축기에 인가되는 전류이다. (a)의 경우, 최대 가속 조건에서의 정상상태 전류는 1.39A로 전류 한계치의 54% 정도였다. (b)의 경우는 1.35A로 전류 한계치의 52% 정도로 나타났다.

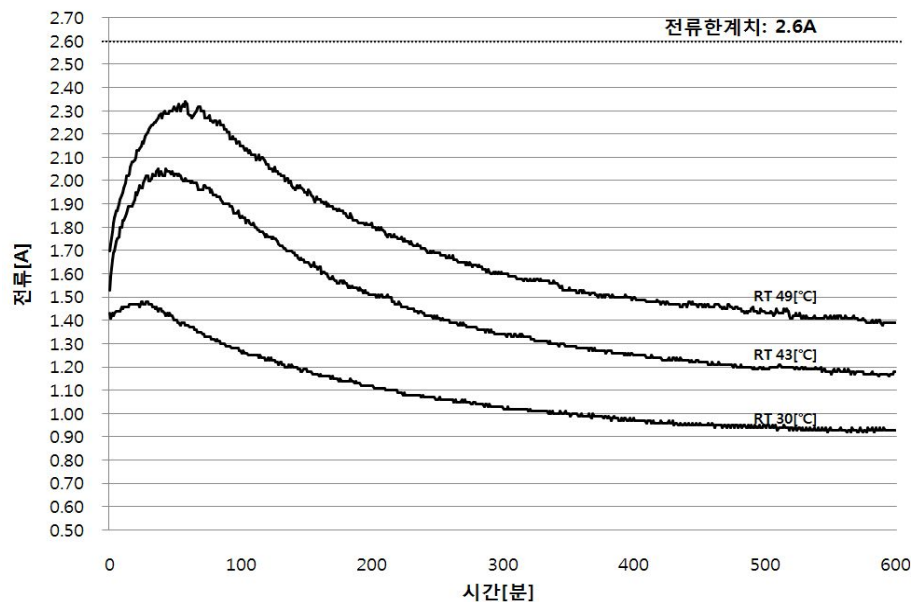


(a)

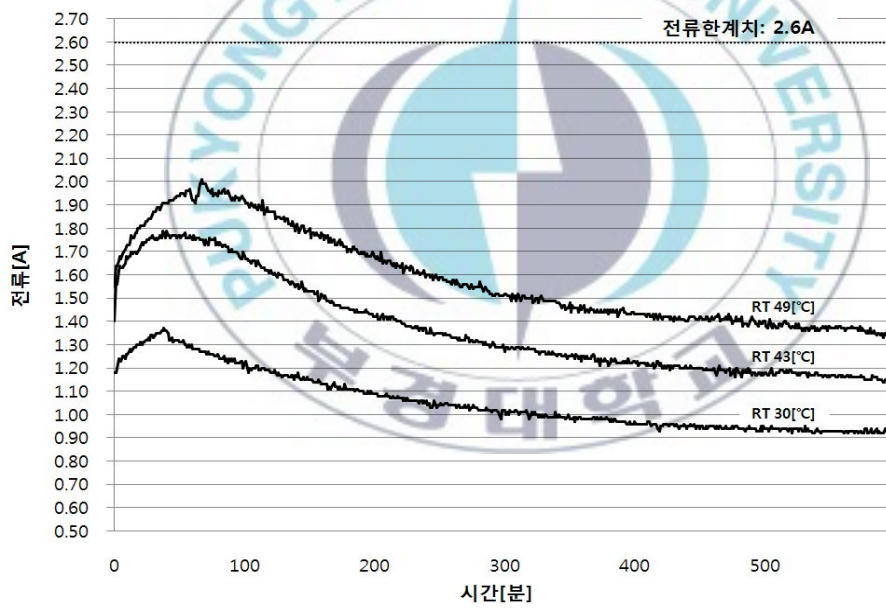


(b)

Fig. 22 Temperature of compressor dome



(a)



(b)

Fig. 23 Current of compressor

3.4 결론

본 실험에서는 냉장고용 압축기의 신뢰성보증시험 기간 단축을 위해 고온조건에서의 동작 한계와 최대 가속 조건을 구하고 실험으로 얻은 데이터들을 기반으로 AF 를 산출하여 단축 가능한 시험 기간을 구해 보았다.

본 실험을 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 고온에서의 최대 가속 조건에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 전류였다. RT 51℃에서 프로텍터가 작동하였고 그 때 전류치는 2.48A로 전류한계치의 95%였다.

(2) 고온조건에서의 시험용 냉장고 압축기의 동작한계 온도와 최대 가속 조건은 각각 RT 51℃, RT 49℃임을 알았다.

(3) 두 샘플에 대한 사용조건과 가속조건 온도 차는 약 30℃, 28℃로 가속계수는 8과 7로 추정되었다.

(4) $MTTF$ 와 가속계수로부터 고온조건만으로 시험할 경우, 시험 기간은 각각 12개월, 13.7개월로 정상 조건 하의 전체 시험 기간을 12.5%, 14.3%로 줄일 수 있음을 알았다.

제4장 저온 조건에서의 최대 가혹 조건 탐색

4.1 실험 장치

실험에 사용된 냉장고용 압축기와 챔버 내부 냉각기의 세부 사양을 Table 6과 Table 7에 각각 나타내었다.

Table 6 Specification of compressor

Unit	Specification
Voltage range	115~127 V
Frequency	60 Hz
Refrigerant	R134A
Ultimate trip current	2.6~3.6 A

Table 7 Specification of a refrigerator

Unit	Specification
Compressor power	3.75 kW
Voltage	220 V
Frequency	60 Hz
Refrigerant	R-22

온도정보는 T-type 열전대를 설치하여 데이터로그(MV-2000)를 통해 실시간으로 수집하였다. 압축기의 전류와 전력은 전력측정기(CW-120)를 냉장고 전원부에 설치하여 계측하였다. 환경 챔버 온도는 환경 챔버 내의 냉각기를 제어함으로써 조절하였다.

4.2 실험 방법

최대 가혹 조건 탐색 실험 방법은 사용 조건 10℃부터 단계적으로 온도를 감소시켜 고장이라고 판단될 때까지 반복적으로 진행하였다. 그리고 압축기의 고장 판정은 세 가지 경우를 상정하여, 압축기의 프로텍터(protector) 작동, 과열도가 0℃ 이하, 냉동사이클에 이상이 발생한 경우로 하였다. 실험 종료는 고장 판정의 세 가지 경우 가운데 어느 한 가지에 해당될 때로 하였다. 실험결과를 통해 동작 한계와 최대 가혹 조건을 구하고 압축기의 돔 온도의 변화에 따른 점도로 AF를 산출하였다. 예비 실험을 통해 증발기 출구 온도와 냉동실 온도가 RT -13℃에서 더 이상 내려가지 않음을 알았다. 그래서 냉장고 샘플(sample)의 냉각능력이 RT 13℃에서 최소라고 판단하여 동작한계를 -13℃로 설정 후 본 실험을 행하였다.

Fig. 24는 본 실험 과정을 나타낸다. 우선 환경 챔버 온도를 사용조건인 10℃로 일정하게 유지한 상태에서 냉장고를 작동시키고 동시에 온도와 전류, 전력 데이터를 수집하였다. 샘플링 타임은 1분, 총 시험 기간은 20시간으로 하였다. 데이터 수집이 끝나면 냉장고를 초기 상태로 안정화시키기 위하여 1일 동안 정지시켰다. 그 다음 -2℃씩 감소시켜 동작한계에 도달할 때까지 반복적으로 실험하였다.

온도 센서는 Fig. 17과 같이 냉장고 각 주요 부위 8개소에 설치하였다.

T1은 증발기의 입구, T2는 증발기의 출구, T3은 냉동실, T4는 냉장실, T5는 압축기의 입구, T6은 압축기의 돔, T7은 압축기의 출구, T8은 응축기의 온도를 각각 나타낸다.

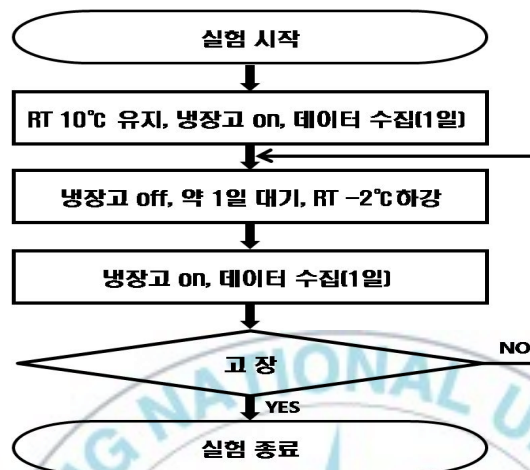


Fig. 24 Process of experiment

4.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 25는 환경 챔버의 설정온도에 따른 실제 온도제어 결과를 나타낸다. 온도는 on/off 제어를 통해 오차 범위가 약 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내로 일정함을 보였다.

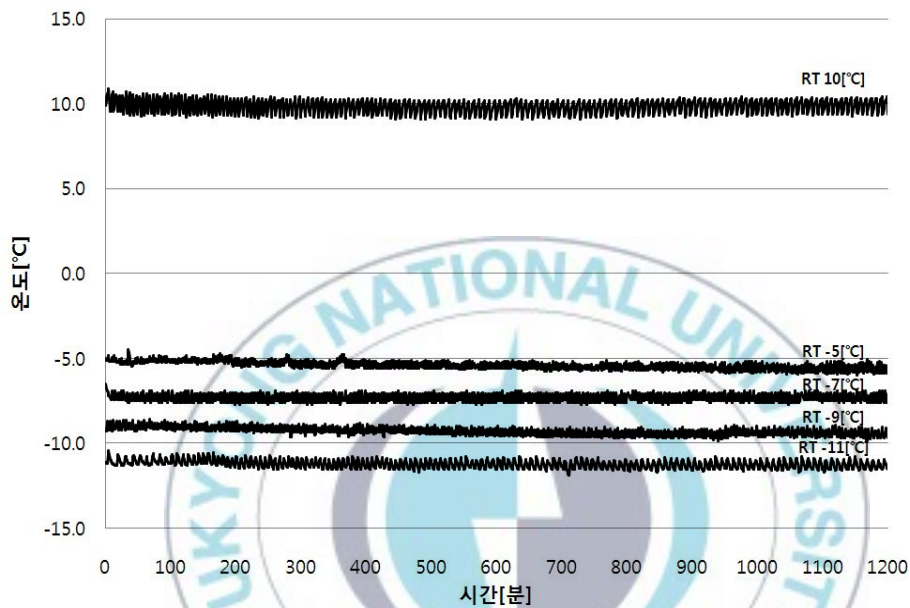


Fig. 25 Room temperature responses

Fig. 26은 T에 따른 압축기 돔 온도를 나타낸다. 초기 기동으로 인해 온도가 상승하다가 일정시간 후 안정화되었다. 사용조건에서의 온도는 36°C 이고, 최대 가혹 조건에서의 온도는 12.6°C 로 나타났다. 용해도를 15%로 가정했을 시, 동점도는 각각 4cSt, 8 cSt였다. 이들을 식 (22)에 적용하여 AF는 2로 산출되었다. MTTF 8년과 AF를 식 (7)에 적용하면,

신뢰성보증시험 기간은 저온 가속만으로 48개월이 된다. 저온에서의 가혹조건 실험을 통해 정상조건에서의 전체 시험 기간을 50% 줄일 수 있음을 의미한다.

Fig. 27 RT에 따른 과열도를 나타내며 액냉매 유입 가능성을 확인하기 위해 측정하였다. 과열도가 일정하게 증가하다가 점차 안정화됨을 알 수 있다. RT에 따라 과열도가 감소하지만 그 값이 크므로 액냉매 유입 가능성은 없었다. 과열도는 압축기 입구 온도와 증발기 입구 온도의 차로 구해졌다. 단, 압력강하는 무시하였다.

Fig. 28 RT에 따른 전류 변화를 나타낸다. 초기 기동으로 인한 전류의 증가 이후에는 점차 안정화됨을 확인하였다. RT가 낮아질수록 전류도 낮아져서 한계치인 2.6A에 전혀 미치지 못해 프로텍터에 영향을 주지 않았다.



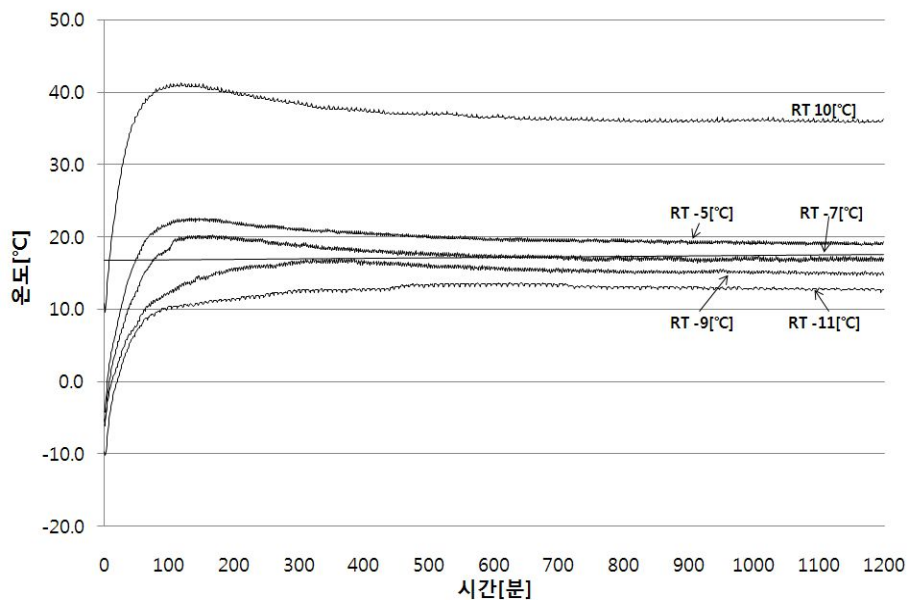


Fig. 26 Temperature of compressor dome

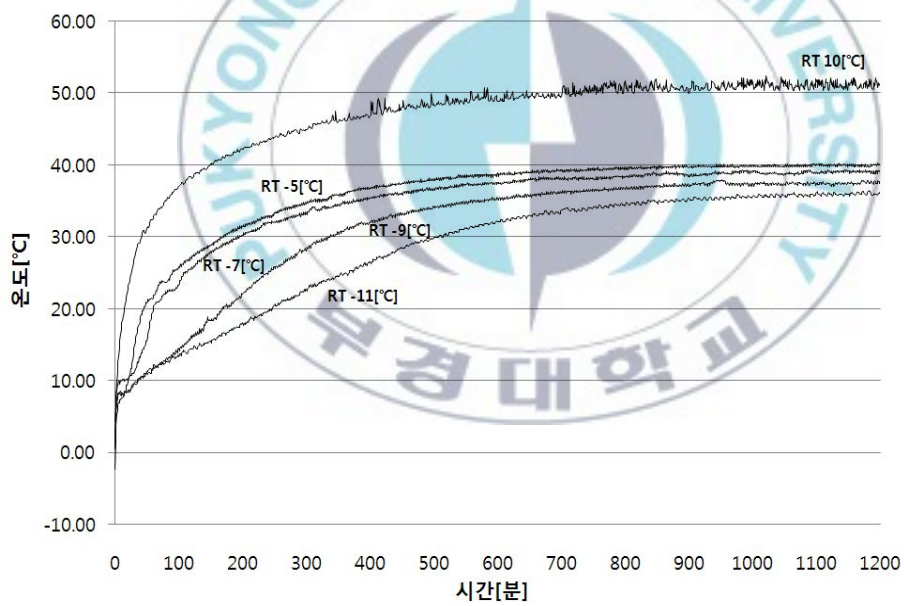


Fig. 27 Superheat response

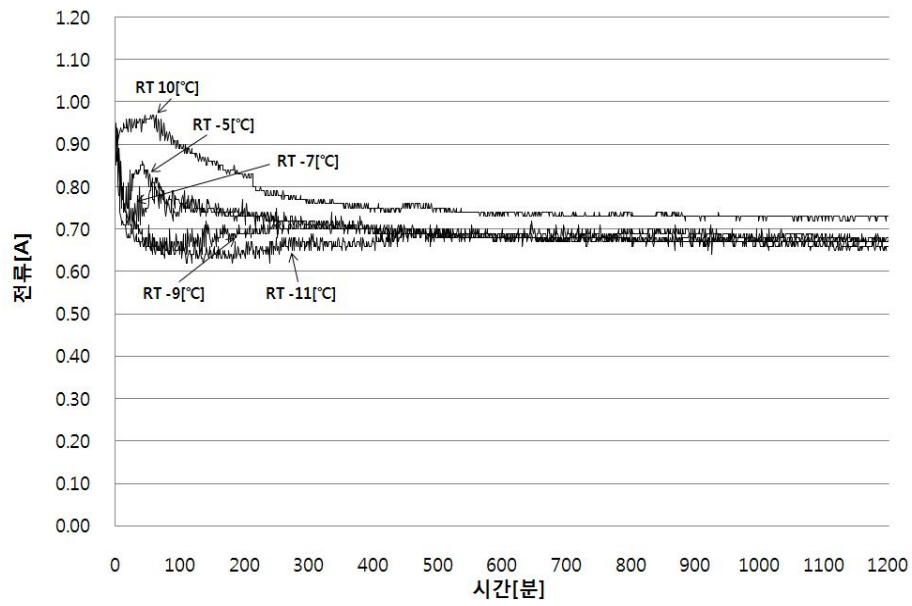


Fig. 28 Current of compressor



4.4 결론

본 실험에서는 냉장고용 압축기의 신뢰성보증시험 기간 단축을 위해 저온조건에서의 동작 한계와 최대 가혹 조건을 구하고 실험으로 얻은 데이터를 기반으로 AF 를 산출하여 단축 가능한 시험 기간을 구해 보았다.

본 실험을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 저온에서의 최대 가혹 조건에 가장 큰 영향을 미치는 요소가 증발기 출구 온도와 냉동실 온도임을 알았다.

(2) 과열도는 RT 가 낮아질수록 점차 감소하지만 0°C 보다 크기 때문에 저온의 가혹조건 하에서 액냉매 유입가능성은 없음을 알았다.

(3) 전류는 한계치보다 많이 낮아 프로텍터에 영향을 끼치지 않음을 알았다.

(4) 저온조건에서의 시험용 냉장고 압축기의 동작한계 온도와 최대 가혹 조건은 각각 $RT -13^{\circ}\text{C}$, $RT -11^{\circ}\text{C}$ 임을 알았다.

(5) 용해도를 15%로 가정했을 시, 동점도는 각각 4cSt, 8cSt로 AF 가 2임을 알았다.

(6) $MTTF$ 와 AF 로부터 저온조건만으로 시험할 경우, 시험 기간은 48개월로 정상 조건 하의 전체 시험 기간을 50% 단축할 수 있음을 알았다.

제5장 결 론

제품의 안정적 사용 기간인 수명을 평가하는 신뢰성보증시험은 신제품 개발 시 필수적이며, 이 시험 기간은 신제품 개발 기간에 큰 영향을 미치고 있다. 하지만 수명 보증기간 증가에 따른 긴 시험 기간 또는 샘플수의 과다로 인해 보증시험 평가에 큰 어려움을 겪고 있다.

샘플수의 제약 하에서도 신뢰성보증시험을 줄일 수 있는 방안으로 가속수명시험이 있으며, 가속수명시험으로 인해 얻어진 가속계수를 통해 시험기간을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 냉장고용 압축기의 신뢰성보증시험 시간을 단축하기 위해 현장에서 엔지니어가 사용 중인 시험시간의 평가에 주목하였다. 대표적으로 사용되고 있는 식들의 상관관계를 규명하고 각 식들 상호간에는 어떠한 가정들이 전제되어 있는지를 명확히 하였다. 특히 주요 변수에 대한 감도분석을 통해 각 변수들이 시험시간에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과 시험시간에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 β 임을 명확히 하였다.

이러한 결과들을 통해, 최소 시간으로 시험을 완료하기 위한 가속수명시험 전략 수립이 가능하게 되었다. 뿐만 아니라 현장의 엔지니어가 직관적 이해가 용이한 간이식으로 시험시간을 평가할 경우, 어느 정도의

오차가 있을 수 있는지에 대해 추정할 수 있는 근거를 제공하였다. 이들 자료들은 향후 실제 가속수명시험 수행시에 시험시간을 평가함에 있어 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대가 된다..

그리고 냉장고용 압축기의 신뢰성보증시험을 줄이기 위해 가속수명시험의 절차와 분석 방법에 대한 체계로 확립하였다. 가속조건을 고온과 저온으로 하여 최대 가속 조건을 탐색하고 이론적인 가속계수를 통해 단축 가능한 시험기간을 추정하는데 초점을 맞추었다.

본 논문에서는 실험을 통해 고온에서 가장 영향을 끼치는 인자는 전류임을 알았고, 저온에서 가장 영향을 끼치는 인자는 증발기 출구 온도와 냉동실 온도임을 알았다. 고온과 저온에서 압축기 돔 온도를 측정하여 최대 가속 조건을 각각 RT 49℃, RT -11℃임을 보였다. 이론적인 가속계수는 각각 7.5와 2를 얻었다. 그 결과 시험기간은 현재보다 각각 13%, 50%로 줄일 수 있음을 보였다.

이 단축 가능한 시험기간을 확인하기 위해서는 가속수명시험이 반드시 필요하다. 가속수명시험을 통해 실제의 가속계수를 추정할 수 있다면 신제품 수명수기와 개발 기간을 크게 단축함으로써 시간적, 경제적 비용을 절감하고 충분한 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다. 실험을 통한 실제 가속계수 측정은 향후의 과제로 남겨둔다.

참고문헌

1. J. Y. Byun, H. Li, T. Y. Jeong, S. K. Jeong, 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
2. J. Y. Byun, W. J. Joo, T. Y. Jeong, Y. M. Jeong, S. K. Jeong, 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
3. J. H. Kim, W. Jeong, 2008, Reliability engineering, Cheongmungak, pp. 178 ~ 211
4. C. W. Lee, J. H. Lim, 2004, New reliability engineering, Boseonggak, pp. 253 ~ 260
5. J. K. Lee, J. W. Kim, J. C. Shin and M. S. Kim, 2004, "An Accelerated Life Test for Burnout of Tungsten Filament of Incandescent Lamp", The Korean Reliability Society, pp. 134~137.
6. 변종영, 이 화, 정태영, 정석권, 2008, “냉동시 스템의 압축기 신뢰성 시험 기간 단축을 위한 가속계수 설정”, 한국동력기계공학회 추계학술대회 논문집, pp. 233 ~ 238.
7. 심윤희, 윤영, 박윤철, 2005, “소형 냉장고용 왕복동식 압축기의 효

- 을향상에 관한 연구”, 설비공학논문집, 제17권, 제5호, pp. 418~426.
8. 남지현, 강민우, 정성균, 2006, “가속수명시험을 이용한 소트피닝가공 알루미늄 합금의 신뢰성 평가에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, 제30권, 제12호, pp. 1534~1542.
9. 김재중, 장석원, 손영갑, 2008, “가속수명시험을 이용한 릴레이의 전기적 수명예측”, 대한기계학회논문집, 제32권, 제5호, pp. 430~436.
10. 이성래, 김형의, 2006, “유압시스템 구성품 수명시험의 무고장 시험시간”, 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 7~12.
11. 권영일, 2005, “신뢰성보증을 위한 2단계 수명시험방식 설계”, 한국신뢰성학회 학술발표대회 논문집, pp. 379~384.
12. 지상원, 강보식, 장지성, 2006, “공기압 실린더의 수명분석 및 형상모수 추정에 관한 연구”, 한국동력기계공학회 추계학술대회논문집, pp. 188~194.
13. 허영순, 유정희, 윤광수, 2008, “광통신용 1.25Gbpa Transceiver 가속수명시험”, 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 1391~1393.
14. 이제석, 곽계달, 김재웅, 장석원, 2006, “레귤레이터 IC의 가속수명시험”, 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 19~24.
15. 주우진, 변종영, 정석권, 2010, “냉장고용 압축기의 고온 신뢰성시험 기간 단축, 대한설비공학회 학술발표대회 논문집, pp 86~91.
16. 김형의, 강보식, 장무성, 2009, “공기압 실린더 가속모형의 유효성 평가에 관한 연구”, 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 112~115.

17. 허진혁 외 5인, 2006, “배연용 축류팬의 내열 신뢰성 향상”, 대한설비공학회논문집, pp. 235 ~ 240.
18. 백재욱, 2007, “가속수명시험”, 에피스테메, pp. 78~168.
19. 이치우, 임진환, 2004, “신편 신뢰성공학”, 보성각, pp. 253~260.
20. 이형국, 2002, “냉장고용 냉매 압축기”, 설비저널, 제31권, 제11호, pp. 15~19.
21. 임우조, 이진열, 1996, “윤회공학”, 형설출판사, pp. 84~95.
22. 이승중, 이성재, 2005, “유변학”, 두양사, pp. 18.
23. 김준홍, 정원, 2008, “신뢰성공학”, 청문각, pp. 178~211.



학술대회 발표 논문 list

- 1) 변종영, 주우진, 정태영, 정영미, 정석권, 냉장고용 압축기의 무고장 시험시간 주요 변수들의 영향 분석, Influence of Variables related to Accelerated Life Test Time for a Compressor in a Refrigerator, Proceed of KSPSE, pp. 296~301, 2009.
- 2) 변종영, 주우진, 최준혁, 문춘근, 윤정인, 정석권, 핫가스 바이패스 제어에 의한 산업용 냉각기의 온도제어, Temperature Control of Oil Cooler with Hot-gas Bypass, proceed of SAREK, pp. 67~73, 2009.
- 3) 주우진, 변종영, 정태영, 정석권, 해수제빙장치의 팽창밸브 개도에 따른 성능 특성, Design of Predictive Controller for Effective Superheat Control of Variable Speed Refrigeration System, Proceed of SAREK, pp. 09~15, 2009.
- 4) Woo-Jin Joo, Young-Mi Jung and Seok-Kwon Jeong, Optimum Operating Conditions of a Seawater Ice Machine with an Electronic Expansion Valve and a Rotating Evaporator, Proceed of ISAMPE, pp. 283~287, 2009.
- 5) 변종영, 주우진, 곽진우, 윤정인, 정석권, 오일쿨러의 고정밀 온도제어를 위한 PI 및 예측제어기 설계, Design of PI and Predictive

- controller for Precise Temperature Control of an Oil Cooler, Proceed of KSPSE, pp. 268~271, 2010.
- 6) 주우진, 변종영, 김상호, 정태영, 정석권, 냉장고용 압축기의 저온 신뢰성시험 기간 단축, Reduction of Reliability Life Test Time for a Compressor in a Refrigerator under Low Temperature Condition, Proceed of KSPSE, pp. 153~158, 2010.
- 7) 김상호, 주우진, 변종영, 정석권, FMVSS 118-S5 규정을 만족하는 스마트 윈도우용 안티핀치 시스템, Anti-Pinch System Satisfying FMVSS 118-S5 Standard for Smart Window, Proceed of KSPSE, pp. 79~86, 2010.
- 8) 변종영, 주우진, 문춘근, 윤정인, 정석권, 압축기의 회전수 제어에 의한 산업용 냉각기의 온도제어, emperature Control of an Oil Cooler Based on Compressor's Speed Control, proceed of SAREK, pp. 1028~1033, 2010.
- 9) 주우진, 변종영, 정석권, 냉장고용 압축기의 고온 신뢰성시험 기간 단축, Reduction of Reliability Life Test Time for a Compressor in a Refrigerator under High Temperature Condition, proceed of SAREK, pp. 86~91, 2010.

Appendix

가속스트레스

제품	성능	가속 스트레스
반도체 - (GaAs FETs, IGFETs) Transistor, LED, MOS, CMOS, RAM	수명, 동작특성	온도(일정, 사이클, 충격), 전류, 전압, 전력, 진동, 기계적 충격, 습도, 압력, 방사선
콘덴서 - electrolytic, polypropylene, thin film, tantalum capacitors	수명	온도, 전압, 진동
저항 - electrolytic, polypropylene, thin film, tantalum capacitors	수명	온도, 전압, 열-전기적 사이클/충격, 진동, 기계적 스트레스, 복사, 습도
전자부품 - optoelectronics, lasers, LCD, electric bonds and connections	수명, 동작특성	반도체와 동일
Electrical Contacts - 스위치, circuit breakers, relays	부식, 수명	High cycling rate, 온도, 전류, 오염물질(습도) 주요 고장 메커니즘: metal fatigue, rupture, welding
전지/배터리 - 충전식, 비충전식, 태양 전지	수명, 자기방전, 전류, depth of discharge	온도, 전류, 충전전류
램프 - 백열, 형광, 수은증기, 플러쉬 램프	수명, 효율, light output	전압, 온도, 진동, 기계적, 전기적 충격
전기장치 - 모터, heating elements, thermoelectric converters	수명	주요 모터, generator의 고장은 항상 insulation 또는 베어링 고장에 기인함. 따라서 수명분포는 이들의 수명분포로부터 유도됨.
베어링 - roller, ball, sliding bearings	수명, 마모	Overspeed, 부하, 오염물질
기계부품 - 자동차 부품, tools, gears, hydraulic component	수명, 마모	기계적 부하, 진동, 온도, 환경요소, 스트레스 등의 조합

<A1> 전자부품의 가속 스트레스

재료	성능	가속 스트레스
금 속 - 금속(시편, 부품), 합금, 용접, 납땜, bonds, joints	피로 수명, 크립, 크립-균열, 크랙, 마모, 부식, 산화, 녹	기계적 스트레스, 온도, 시료의 형상, 표면 처리 상태(물리적 인자), 습도, 염도, 부식제, 산(화학적 인자)
Plastic - 플라스틱(건설, 절연, 단열), 기계부품, 고분자, coating, PVC, 발포체, 폴리에스테르	피로수명, 마모, 물리적 성질, 변색이 되지 않음	기계적 부하(진동, 충격), 온도(사이클, 충격), 기상(자외선, 습도)
유전체/절연체	고장시간, 다른 특성 (내구전압, 신장, 최대 기계 강도)	온도, 전압, 열 전기적 사이클/충격, 진동, 기계적 스트레스, 복사, 습도
세라믹	피로수명, 마모, 기계적 전기적 성질, 열화	
접착제 - 에폭시	수명, 강도	기계적 스트레스, 사이클을 올, loading mode, 습도, 온도
고무/ 탄성체 - 타이어, 벨트	피로수명, 마모	기계적 부하, 온도, pavement texture, 날씨(태양광선, 습도, 오존 등)
식품/의약품 - 식품, 의약품, 조제약품, 및 기타 화학물질	저장수명, 맛, pH, 습기, 미생물 성장, 색, 특정 화학반응	온도, 습도, 화학물, pH, 산소, 태양열에 의한 복사
윤활제 - 고체(흑연, 몰리브덴 이황화물, tefron), 오일, 그리스, 윤활제	산화, 증발건조, 오염	속도, 온도, 불순물(물, 구리, 철, 오물)
코팅재/페인트 - 페인트(액체, 분말), 고분자, 산화 방지제, 산화막 알미늄, 전해도장용 도료	색, 광학, 물리적 보전(마모, 크랙, 링, 물질)	온도, 습도, 태양광선(파장, 밀도), 기계적 부하
콘크리트/시멘트	28 일 후의 강도	여러 시간 동안의 고온
건설재 - 나무, 플라스틱, 복합재료, 유리, 기타 건설재	마모저항, 변색, 강도, 기타 기계적 성질	부하, 날씨(태양열, 온도, 습도)
핵반응 물질 - 연료봉 cladding	강도, 크립, 크립-rupture	온도, 기계적 부하, 불순물, 핵반응 (중성자, 연료, 용매)

<A2> 재료의 가속 스트레스

감사의 글

AMCL에서의 2년 동안의 생활이 지나고 벌써 졸업을 앞두고 있네요. 이른 취업으로 인해 조금 일찍 실험실 생활이 끝났지만 정말 재미도 있었고 고생도 많이 했던 시간들이 참 빠르게 지나갔습니다. 참 아쉬움도 많이 남지만 평생을 기억 할 수 있는 좋은 추억을 남길 수 있었던 시간이었습니다.

먼저 저를 지도해주시고 많은 것들을 가르쳐 주신 정석권 교수님께 정말 감사드립니다. 취업으로 인해 일찍 실험실을 나가게 되었어도 이해해 주신점 정말 감사합니다. 교수님의 배려와 가르침 잊지 않겠습니다.

제가 졸업논문을 마무리 하기까지 많은 분들의 도움을 받아 이렇게 졸업하게 되었습니다. 좋은 환경에서 실험을 할 수 있게 항온항습실 사용을 허락해주신 금중수 교수님, 논문에 관련하여 질문에 대해 좋은 답변해주신 윤정인 교수님께 진심으로 감사드립니다.

그리고 AMCL에서 처음부터 같이 생활하며 같이 고생한 종영이 연구실 좋은 동생들인 상호, YU, SUN, 건봉, 세위, 단비 모두에게 감사합니다. 또한 2년 동안 함께 지낸 동기들에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 항상 저를 믿어준 저희 가족들에게 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

앞으로 인생의 전환점에서 또다시 서있습니다. 대학원생활동안 경험들을 바탕으로 새로운 환경에서 최선을 다할 수 있도록 하겠습니다.

2011년 1월 朱 尤 鎮 拜上