

# 대체냉매 R436B를 적용한 정수기 냉각수 시스템 신뢰성 평가에 관한 연구

## A Study on the Reliability of Cooling Water Systems Using R436B

남현규(Hyun-Kyu Nam)<sup>1</sup>, 배상은(Sangeun Bai)<sup>1</sup>, 배철호(Cheol-Ho Bai)<sup>1†</sup>,  
고정수(Jung-Su Ko)<sup>2</sup>, 진병주(Byung-Joo Jin)<sup>2</sup>, 오주철(Ju-Chul Oh)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>영남대학교 기계공학부, <sup>2</sup>코웨이

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Republic of Korea

<sup>2</sup>Coway, Ugu, Kongju, Chungnam, Republic of Korea

(Received February 26, 2013; revision received May 15, 2013)

**Abstract** The alternative refrigerant R436B is applied, to assess the application feasibility for a commercial cooling water system. The characteristic stability was verified by Sealed glass tube test and Autoclave test. R436B is chemically stable with the compressor material. The Oil miscibility test shows the usual compressor oil mixed well with R436B. Through the life acceleration test, the cooling performance is maintained. Though slight changes in oil and capillary tube diameter were found, they were within the permitted range. R436B should be applied to commercial cooling water systems as a simple replacement for the usual refrigerant.

**Key words** Autoclave Test(오토클레이브 시험), Life Acceleration Test(가속수명 시험), Oil Miscibility Test(유희유 혼합성 시험), R436B, Reliability(신뢰성 평가), Sealed Glass Tube Test(실드글라스 튜브 시험)

† Corresponding author, E-mail: [chbai@yu.ac.kr](mailto:chbai@yu.ac.kr)

### 기호설명

$AF$  : 가속계수  
 $B_x$  : 신뢰도 시험 백분위 수  
 $E_a$  : 활성화에너지  
 $h_{fg}$  : 증발잠열  
 $MTTF$  : 평균수명  
 $\dot{Q}_{cooling}$  : 냉각열량  
 $t$  : 시간  
 $\dot{V}$  : 체적유량  
 $\rho_g$  : 증기 비체적

## 1. 서 론

냉동기의 냉매로 사용되는 프레온류는 오존층의 파괴와 지구온난화에 대한 주요 요인으로 분류되어 친환경냉매로의 전환이 요구되고 있다. 친환경 냉매는 대체냉매로써 성능도 우수해야 하며, 경제성 문제도 확보되어야 함은 물론이다. 특히 기존 냉동기의 각 구성 요소를 변하지 않고 사용할 수 있다면

기존 제작라인을 바꾸지 않고도 사용할 수가 있어 매우 기대되는 사항이다. 현재는 이런 요구사항을 맞추주기 위하여 2개 또는 3개의 냉매를 혼합한 혼합냉매의 개발이 활발히 이루어지고 있으나 고장 및 냉매 누설 시 냉매를 재충전할 때에 많은 문제를 안고 있다. 그러나 최근 개발된 R436B는 프로판을 주성분으로 하여 개발된 근공비 냉매로서 R134a 냉매와 R1234yf를 대체할 냉매로 주목되고 있다.

본 연구에서는 새로운 냉매 R436B를 기존의 상용 정수기 냉각수 시스템에 drop-in 형태로 적용하여 화학적인 안정성 및 기계적 안정성과 장시간 사용에 대한신뢰성 평가를 수행하였다. 유희유와 냉매의 혼합성을 확인하기 위한 확인하기 위한 Miscibility 시험, 사용되는 금속 재료와의 화학적 안정성을 확인하기 위한 Sealed Glass Tube Test, 필름 등 냉동기 부품과 오일의 안정성을 확인하기 위한 Autoclave test를 수행하였으며, 또한 화학적 안정성뿐만 아니라 기계적 안정성과 장시간 사용에 대한 수명 확보 시험을 위하여 가속 수명 시험을 수행하였다.

Table 1 Physical and chemical properties of R436B

Property	Blend
Formulation	R290/R600a
Color	Colorless
Molecular mass as formulated	49.87 g/mol
Boiling point (at atmospheric pressure)	-33.4°C
Freezing point(calculated)	-174.1°C
Flash point	-105°C
Autoignition temperature	450°C
Lower flammability limit (at 23°C, in air)	1.7 vol.%
Vapor pressure(at 20°C)	488.74 kPa
Liquid density(at 20°C)	527.2 kg/m <sup>3</sup>
Latent heat of vapor(at 60°C)	280.37 kJ/kg
Temperature at the critical point	117.44°C
Pressure at the critical point	4,251.6 kPa

## 2. 근공비 혼합냉매 R436B

R436B는 R290/R600a를 질량 비율 52 대 48로 혼합하여 개발된 근공비냉매로서 Autoignition temperature는 450°C, 대기압에서 Boiling point는 -33.4°C이며 냉매의 특성(1)은 Table 1에 정리하였다. R436B는 가연성이 있지만 (safety group : A3)(2), Table 1의 Lower flammability limit 값이 비교적 크기 때문에 정수기 냉각수 시스템과 같이소량의 냉매를 사용하는 경우에는 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

물성치를 이용한 냉매의 이론적인 냉각 성능은 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다. 냉동 시스템에서 동일한 압축기를 사용할 경우, 압축기를 통과하는 체적유량 ( $\dot{V}$ )이 일정하다고 가정하면 냉각 성능은 밀도와 잠열의 곱으로 정해진다. 냉매 온도 0°C에서 R134a와 R436B의 물성치를 Table 2에 나타내었다. R436B는 R134a에 비하여 잠열은 크지만 밀도가 상당히 작아 냉각 성능이 20% 정도 낮게 나타난다.

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{m}h_{fg} = \rho_g \dot{V}h_{fg} \quad (1)$$

## 3. 화학적 안정성

### 3.1 Oil Miscibility Test

냉매와 오일의 혼합성 시험은 냉매와 혼합된 오일을 JIS-K-2211 부속서1<sup>(3)</sup> Flocc Point 시험방법에 따라 50°C 및 -50°C에서 혼합이 잘 이루어지는지 확인하였다. 시



Fig. 1 Oil miscibility test chamber.



At 50°C                      At -50°C

Fig. 2 Oil miscibility test results.

험은 튜브를 잘 세척한 후 오일 200 mg을 튜브에 주입하고 공기를 제거한다. 냉매 200 mg을 주입한 후 항온 챔버의 온도를 50°C 및 -50°C에서(표준은 -18°C) 약 1 시간 동안 유지한다. 시험 종료 후 테스트 튜브를 항온 챔버에서 꺼내 10초 이내에 육안 검사를 통해 침전물이 있는 지 확인한다. Fig. 1은 Oil Miscibility 시험 장치이며 시험 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 50°C 및 -50°C에서 침전물이 생성되지 않았으며 R-436B 냉매와 SUNISO사의 SL-10SC Oil(POE)이 잘 혼합되어 있었다.

### 3.2 Sealed Glass Tube test

Sealed glass tube test는 냉동시스템 내부에 사용되는 금속 부품의 화학적 안정성을 검증하기 위한 시험으로 ASHRAE-97-2007 4.2<sup>(4)</sup>의 규정에 따라 수행하였다. 촉매를 규정에 따라 Steel  $\phi 3 \times 19$  mm 1개, Aluminum  $\phi 1.6 \times 19$  mm 1개, Copper  $\phi 1.6 \times 19$  mm 1개를 넣은 Sealed glass tube를 20개 준비하고 SUNISO사의 SL-10SC Oil(POE) 1cc를 주입한 다음, 냉매 R436B를 1cc만큼 sealed glass tube주입한다. 튜브를 175°C의 오븐에 14일 동안 유지시킨 다음, 오일의 색상 변화, 사용된 물질의 화학적/물리적 변화를 관찰한다.

Fig. 3은 시험 후 가열 챔버에서 Sealed Glass Tube를 수거한 사진이며, Fig. 4는 시험 후 냉매의 색상 변화를 KS M 0202 : 2010(5) 가드너 색수 표준액을 이용하여 나타낸 사진이다. 가드너 색수 표준액의 2과 3사이에

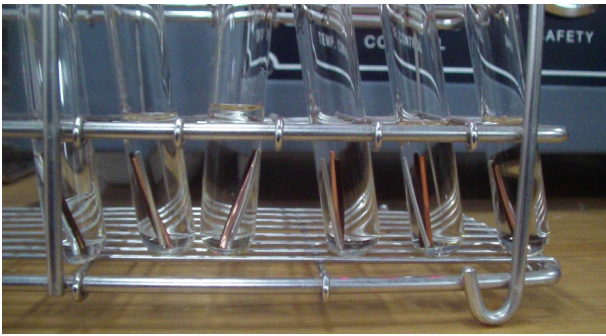


Fig. 3 Test sample after sealed glass tube test.

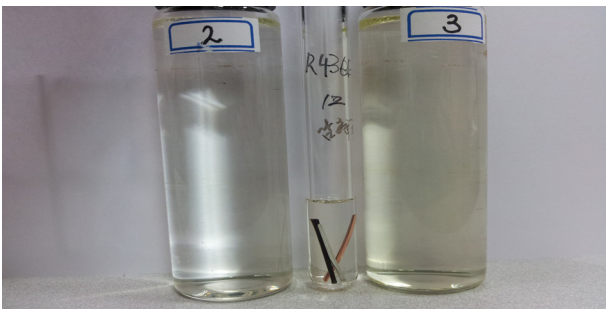


Fig. 4 Oil color by KS M 0202 : 2010 Gardner standard color sample after sealed glass tube test.

R436B가 위치하고 있으며 시험 전과 큰 변화가 없었다. 냉매의 KOH 함유량은 한국기계전기전자시험연구원에 의뢰하여 분석하였으며, 시험 전 T.A.N(total acid value)이 0.03 mgKOH/g에서 시험 후 0.07 mgKOH/g으로 변화하였다. 또한 침전물, 축매의 상태는 육안으로 검사하였는데, 침전물의 생성, 축매의 변색 및 부식 등은 발생하지 않았다. 위의 결과로부터 R436B는 금속 부품과 화학적 안정성을 나타내고 있다고 판단된다.

### 3.3 Autoclave test

Autoclave test는 Oil이 고온에서 압축기 사용 플라스틱 부품과의 화학적 안정성에 대한 검사이다. 시험 조건은 JAPAN ENERGY의 SUNOIL CO. SPEC.을 따르며, JIS-K-2211 부속서3<sup>(6)</sup> Autoclave 시험 방법에 따라 수행하였다. 먼저 압축기에 사용되는 부품(필름 등)을 Autoclave Test용 밀폐용기에 넣고, 밀폐용기에 Oil를 200mg 넣는다. 이후 Autoclave Test용 용기를 밀폐시키고 진공 후 냉매(R436B)를 200mg 충전한 후 밀폐용기를 봉인하여 125°C 챔버에서 14일간 넣어둔다.

Fig. 5는 시험 후 오일의 색상을 KS M 0202 : 2010 가드너 색수 표준액과 비교한 사진이며, 냉매의 KOH 함유량은 한국기계전기전자시험 연구원에 의뢰하여 분석하였다. 또한 침전물은 유리용기 하단에 침전물 생성

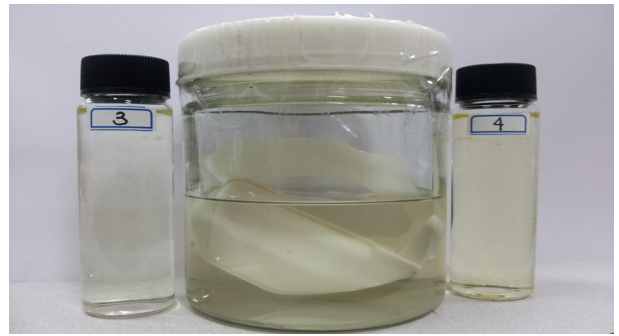


Fig. 5 Oil color by KS M 0202 : 2010 Gardner standard color sample after autoclave test.

여부를 육안으로 판단하였고, 압축기에 사용되는 부품(필름 등)의 상태는 변색 및 부식 등을 육안으로 검사하였다. 적용 냉매 R436B에 대하여 고온고압에서 신뢰성 평가를 수행한 결과 오일의 색상이 옅은 황색으로 변화하였으나 압축기에 사용되는 부품(필름 등)의 변색 및 부식과 시료 내 침전물은 발생하지 않았다.

### 4. 기계적 안정성

제품의 기계적 안전성은 가속 수명 시험<sup>(7)</sup>을 통하여 확인할 수 있다. 가속 수명 시험은 기계적 부하나 온도, 습도, 전압 등 사용조건을 강화(stress)하여 고장 발생 시간을 단축시키는 시험이다. 본 연구에서 사용한 스트레스는 온도이며 일정 스트레스 부과 방식을 사용하였다.

베어링 류, 피스톤, 모터, 밸브류, 콤프레서, 윤활유 등을 포함한 많은 기계류 부품의 수명은 와이블 분포를 따르는 것으로 알려져 있으며, 가속변수와 수명분포와의 관계는 아레니우스 관계를 사용하였다. 아레니우스 모형은 온도가 높아질수록 고장이 가속되는 형태의 고장 모델이며, 이 모형의 핵심은 가속계수(AF)이고 다음과 같이 나타난다.

$$AF = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i}\right)\right] \quad (2)$$

여기서  $E_a$ 는 시험 제품의 활성화 에너지,  $k$ 는 Boltzmann 상수,  $T_o$ 와  $T_i$ 는 각각 사용 온도 및 가속 온도이다. 가속계수를 결정하기 위해서는 활성화에너지 값을 알아야하는데, 본 연구와 같이 시험 대상이 개별 부품이 아닌 복합 제품일 때 가속계수를 결정해주는 것은 이론적으로 불가능하다. 정수기 냉각수 시스템의 경우 개별 부품은 이미 안정성이 확보되었다고 가정하고, 새로운 냉매에 따른 냉동기의 정상 가동 여부를 확인하는 시험이므로 활성화에너지 값 1.0을 사용하였다. 일반적

으로 개별 부품의 경우 활성화에너지 값은 0.5~1.0정도의 값을 경험적으로 사용하고 있다. 정수기 냉각수 시스템의 표준 작동조건은  $T_0 = 300\text{ K}(27^\circ\text{C})$ 이다. 가속 온도조건을 올릴수록 가속수명 시험의 시험 시간이 줄어들지만, 냉동기의 경우 외기 조건이 과도하게 올라갈 경우 압축기 출구 온도 상승으로 인해 압축기 작동이 중단될 수 있으므로  $316\text{ K}(43^\circ\text{C})$ 로 하였다. 주어진 값으로부터 가속계수는 7.09이다.

가속계수가 결정되면 이 값을 이용하여 가속 시험 시간을 산정한다. 기계부품류 신뢰성인증시험 규격<sup>(7)</sup>에 따라 가속수명시험 시간을 결정하였다. 와이블 분포를 따른다고 가정하였으며 목표 수명 시간을 10년으로 하였을 때, 하루 정수기 냉각수 시스템의 가동시간이 4.2시간이므로 목표 수명 시간 MTTF(Mean Time to Failure)는 15,330시간이 된다. 신뢰도 시험에서 백분위수는  $B_x\text{ life}^{(8)}$ 로 표현되는데, 예를 들어  $B_{10} = 10\text{년}$ 이라고 하면, 10년 수명 제품의 불량률이 10%임을 나타낸다. 본 연구에서는 10개의 제품을 사용하여 가속 수명 시험을 수행하였으며, 불량률 10%를 적용하였다. 신뢰수준(CL)은 60%로 하였으며 와이블 분포 형태모수  $\beta$ 는 일반적으로 사용하는 1.5를 사용하였다.

보증 MTTF는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$MTTF = \frac{(\text{예측수명}) \cdot \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}{(-\ln(1-x))^{1/\beta}}$$

$$= \frac{(15,330) \cdot \Gamma(1 + \frac{1}{1.5})}{(-\ln(1-0.1))^{1/1.5}} = 62,037.4\text{ hr} \quad (3)$$

여기서  $\Gamma$ 는 Gamma 함수이며,  $x$ 는 불량률이다. 와이블 분포 샘플링 검사표로부터  $n = 10$ ,  $CL = 0.6$ 에 해당되는 무고장 시험시간  $t$  값은 0.225142이므로, 정상적인 운전 조건에서  $B_{10} = 10\text{년}$ 을 보장하기 위한 정상적인 운전조건에서의 운전시간  $t_n$ 을 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$t_n = MTTF \cdot t = 13,967.2\text{ hr} \quad (4)$$

가속 운전인 경우 정상작동 운전시간을 가속계수로 나누어 가속운전수명시험에서의 시험 시간  $MTTF_a$ 를 구할 수 있다.

$$MTTF_a = \frac{t_n}{AF} = \frac{13,967.2}{7.09} = 1,970\text{ hr} \quad (5)$$

즉 시험하는 정수기 냉각수 시스템의  $B_{10} = 10\text{년}$ 을 만족하기 위한 가속수명시험 시간은 1,970시간(82일)

이다.

가속 수명 시험을 통해 새로운 제품의 신뢰성을 판단할 때에는 시험 기간 동안 고장이 발생하지 않아야 하며, 또한 시험 전후의 성능에도 큰 차이가 없어야 한다.

#### 4.1 가속 수명 시험

가속수명시험은 Fig. 6과 같이 Air-calorimeter에서 온도 조건을  $316\text{ K}(43^\circ\text{C})$ 로 하고, R134a 냉매, POE 냉각오일을 사용하는 상용 정수기 냉각수 시스템(압축기 정격 소비전력 : 142W) 10대에 동일 냉각오일을 사용하고 냉매만 R436B 냉매를 24 g 충전하고 90일(2,160 시간) 동안 24시간 연속 운전하였다.

응축기 및 증발기 입출구 냉매 라인에 T형 열전대 설치하여 YOKIOWA사의 데이터로거 MX100를 이용하여 온도를 측정하고, 전원 공급 측에 YOKIOWA사의 WT230 전력계를 설치하여 시험 기간 중 소비 전력의 변화를 측정하였다. 온도 측정 정밀도는  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이고, 전력 측정 정밀도는  $\pm 0.1\%$ 이다.

Fig. 7은 정수기 냉각수 시스템 시험결과의 일례를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 400시간 및 2,100시간 지점에서의 온도변화는 일시적인 Air calorimeter 점검으로 인해 발생한 것이다.

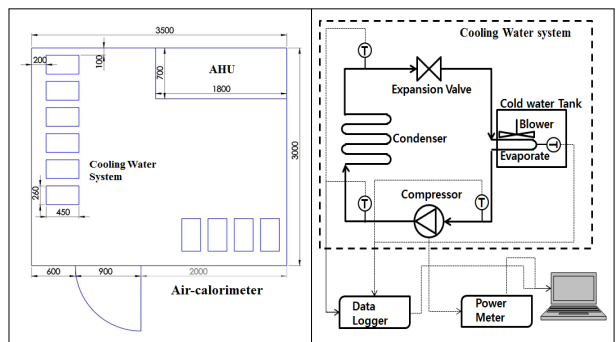


Fig. 6 Schematic diagram(Life acceleration test).

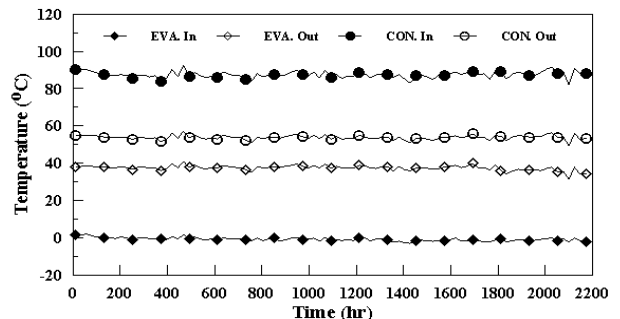


Fig. 7 Temperature behavior during life acceleration test.



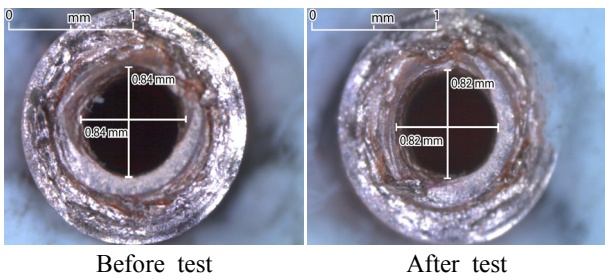


Fig. 8 Diameter variation of capillary tube during life acceleration test.

가속 수명 시험 기간 중 10대의 정수기 냉각수 시스템의 고장은 없었다. 과부하 조건에서 증발기 및 압축기 입출구의 온도 변화가 크지 않았고 전력도 일정하였으며, 시험기간 동안 특이 현상은 발견되지 않았다. 가속 수명 시험 후 사용된 압축기를 분해하여 부품 상태 및 Oil의 변색 등을 확인하였는데 압축기 내부 부품 손상 및 Oil의 변색은 발견되지 않았다. 이 결과는 앞에서 수행한 Sealed glass tube test와 Autoclave test와 동일한 결과를 나타내고 있다. 또한 시험 후 모세관을 분리하여 모세관 내부를 현미경을 사용하여 관찰하였는데, 이물질은 발견되지 않았고 모세관의 직경 변화는 최초 대비 평균 1.5% 감소하였으며 정수기 냉각수 시스템의 성능에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다. Fig. 8은 모세관 직경의 변화에 대한 결과의 일례를 나타낸다.

#### 4.2 성능 시험

가속수명시험 전후의 정수기 냉각수 시스템의 성능은 정수기를 35°C의 air calorimeter 내부에 설치하고 정수기 냉각수 시스템을 가동한 후 정수기 냉각수 시스템이 정지될 때 까지 가동하고, 이 상태에서 10°C 미만의 냉각수 공급량을 측정하여 수행하였다. 냉각시스템이 가동될 때 소비전력은 가속 수명 시험 전 평균 150.5 W에서 시험 후 156 W로 약간 증가하였다. 냉각수는

평균 2.76 L를 생산하였으며, 시험 전후 차이는 0.06 L로서 성능 변화가 거의 없었다.

#### 5. 결 론

기존의 상용 정수기 냉각수 시스템에 새로운 냉매 R436B 적용하여 화학적 안정성 및 기계적 안정성을 확인하기 위한 시험을 수행하였다.

Sealed glass tube test와 autoclave test 결과 사용 부품과 R436B의 화학적 안정성을 확인할 수 있었으며, Oil miscibility test를 통하여 oil과 냉매의 혼합성에 문제가 없음을 확인하였다. 또한 가속수명시험을 통해 시험 전후 성능 변화나 oil 및 모세관 직경 변화 역시 적용 가능한 범위에서 변화가 관찰되었다.

이상의 결과로부터 새로운 냉매 R436B를 기존의 정수기 냉각수 시스템에 drop-in 방식으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Material safety data sheet, 2012, LEMY Corp.
2. ANSI/ASHRAE Standard 34-2007, 2007, Designation and Safety Classification of Refrigerants, ASHRAE.
3. JIS K 2211 Annex A, 2009, Testing method for low temperature precipitation property, JIS.
4. ANSI/ASHRAE Standard 97-2007, 2007, Sealed glass tube method to test the chemical stability of materials for use within refrigerant systems, ASHRAE.
5. KS M 0202, 2010, Testing method for colour of chemical products-Part2 : Gardner colour scale, KS.
6. JIS K 2211 Annex C, 2009, Testing method for chemical stability to refrigerant(autoclave test), JIS.
7. Reliability sampling plans for mechanical parts, 2004, KIMM.
8. Handbook of reliability term, 2005, KATS.