

## 불소 고무복합체의 저온과 고온축진노화 특성에 대한 비교 연구

박정배\* · 이범철\*\* · 정윤석\*\* · 박성한\*\*\*  
국방과학연구소\* · 이스캠(주)\*\* · ㈜한화/기계 항공우주연구소\*\*\*

### A Comparative Study on the Characteristics of Accelerated aging at Low and High Temperatures of the Fluorocarbon Rubber Composites

JeongBae Park\* · BeomCheol Lee\*\* · YoonSeok Jeong\*\* · SungHan Park\*\*\*

#### ABSTRACT

The study on the thermal and oil resistance rubber composite, 2016. [6] predicted the lifetime of Fluorocarbon Rubber by accelerating aging at high temperature (150 ℃, 175 ℃, 200 ℃). general rubber products are likely to exhibit different properties depending on the degradation factors such as temperature, humidity, ozone, light, emulsion, mechanical and electrical stress. To solve these problems, We compared the rate of change about tensile strength, elongation rate, volume change rate, weight change rate, thickness change rate, thermal conductivity in low temperature promoting aging on the basis of predictive lifetime of high temperature promoting aging. As a result of the review, the required life expectancy was satisfied, but there was a slight difference in the rate of change between the high-temperature promoted aging life result and the low temperature promoted aging life result. The cause was a reduction in "tensile strength / elongation" and an increase in "volume / weight / thickness" caused by the main chain decomposition of fluorine rubber due to aging at high temperature promoting aging. However, the low temperature promoting aging was caused by the curing reaction of fluorine rubber at 80 ° C. The tensile strength / elongation and volume / weight / thickness changes were small.

#### 초 록

내열 및 내유성 고무복합체 특성연구(The study on the thermal and oil resistance rubber composite), 2016.[6] 연구에서는 고온(150℃, 175℃, 200℃) 조건의 고온축진노화를 통하여 불소고무 복합체의 수명을 예측하였다. 일반적인 고무제품은 온도, 습도, 오존, 빛, 유제, 기계 및 전기적 응력 등의 특성저하 인자에 따라 다른 특성을 나타낼 가능성이 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 "내열 및 내유성 고무복합체 특성연구"[6] 연구에서 얻어진 고온축진노화에 의한 수명 예측값과 저온축진노화간의 인장강도 변화율 및 신장률 변화율 그리고 부피 변화율, 무게 변화율, 두께 변화율 및 열전도도를 비교 검토하였다. 검토 결과, 요구 한계수명은 모두 만족하였지만 고온축진노화 결과와 저온축진노화 결과 간 변화율에서 약간의 격차를 보였다. 이러한 변화율 격차가 일어나는 원인은 고온축진노화에서는 노화 시 불소고무의 주사슬 분해로 인하여 인장강도, 신장률 감소 및 부피, 무게, 두께 증가가 일어나는데 비해 저온축진노화에서는 80℃에서 불소고무의 지속적 경화반응으로 인하여 인장강도, 신장률 및 부피, 무게, 두께 변화가 적게 나타났을 것으로 판단된다.

Key Words: Thermal Conductivity(열전도도), Rubber Composite(고무복합체), Oil Resistance(내유성), Rubber(고무), Thermal Resistance(내열성), 가속수명(Accelerated life)

## 1. 서 론

고무복합체의 물성변화를 판단하는 방법에는 크게 세 가지가 있다. 첫째, 동일한 환경에 적용하여 수명을 직접 판단하는 것으로 시간이 너무 많이 소요되는 단점이 있다. 둘째, 경험에 의한 방법으로 이는 오랜 시간동안 숙련된 기술자가 필요하다. 마지막으로, 실제 사용 환경이나 조건보다 가혹하게 실험을 수행하는 가속수명시험 방법(Accelerated Life Testing : ALT)으로 비교적 빠른 시간에 제품의 수명을 판단할 수 있지만, 측정 온도조건이 높아지거나 시간이 짧아질수록 예측 오차가 커질 수 있다. "내열 및 내유성 고무복합체 특성연구"[6] 연구에서 기체와 연료 사이에 장착되어 단열 및 내열, 내유성이 탁월하고 고온에 의한 기체의 팽창을 견딜 수 있어 연료쪽으로 전달되는 열을 최소화 할 수 있는 경량의 불소 고무복합체 연구 개발을 진행하였고, 고온(150℃, 175℃, 200℃) 조건에서 고온축진노화를 통하여 불소 고무복합체의 수명을 예측하였으며, 일반적인 고무제품의 온도, 습도, 오존, 빛, 유제, 기계 및 전기적 응력 등의 특성저하 인자에 따라 다른 특성이 나타날 가능성이 있음을 감안하여 본 연구에서는 "내열 및 내유성 고무복합체 특성연구"[6] 연구에서의 고무복합체 시편의 고온축진노화를 통한 수명예측 대비 유사 환경에서의 저온축진노화(80℃) 비교 분석을 실시하였다.

## 2. 가속수명시험

### 2.1 개요

소비자의 생활 패턴이 급격히 빨라짐에 따라 제품의 개발 및 생산기간이 단축되고 있다. 이러한 기간 단축으로 인해 소비자의 만족도는 높일 수 있으나, 최근 제품의 사용 시간에 따른 불안정한 요소는 늘어나게 되어 소비자 제품의 신뢰성에 대한 검증 필요성이 커지고 있는 상황이다. 이런 불안정요소에 대한 해결책을 제시하지 못하면 시간이 지남에 따라 소비자의 불만은 높아져 가고 기업에 큰 피해를 입히게

된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 신뢰성시험을 실시하게 된다.

미국방부규격 MIL-STD-721C에 따르면 신뢰성이란 어떤 아이템이 규정된 조건에서 정해진 기간 동안 의도한 기능을 만족할 수 있는 확률로 규정하고 있다. 이러한 신뢰성 시험은 시험의 목적에 따라 다른 시험방법을 적용하며, 신뢰성 시험 종류는 Table 1과 같다[1].

Table 1 The Type of Test for Reliability

Purpose	The type of test for reliability
Reliability	- Reliability Growth Test
Improvement	- HALT(Highly Accelerated Lift Test)
	- Reliability Qualification Test
Reliability	- DVT/MVT
Assurance	- Production Reliability Acceptable Test
	- Accelerated Life Test
Initial Failure Prevention	- Burn-in/ESS/HASS

신뢰성시험에서 신뢰성 보증을 위한 가속시험방법인 KS규격 중 KS A 3004 부표 191-14-07에 따르면 시간을 단축할 목적으로 기준보다 가혹한 조건에서 실시하는 시험으로 규정하고 있다. 가속시험을 통해 고장시간까지의 시간을 예측하는 방법으로 시험 제품에 대한 성능규격은 제품초기부터 제품고장시점까지의 시간으로 규정할 수 있다.

가속수명시험은 사용조건보다 가혹한 환경(온도, 습도, 진동, 전압 등) 에서 고장을 가속시키는 시험으로 가속조건에서 관측된 데이터로부터 수명과 스트레스와의 관계식을 추정하게 된다. 또한 수명과 스트레스 관계식을 사용조건(온도, 압력 등)으로 외삽(extrapolation)하여 원하는 사용조건에서의 수명을 추정하게 된다. Fig. 1은 가속수명-스트레스 관계를 이용한 수명예측 방법에 대하여 방법 상 처리형태를 나타낸 것이다[2].

\* 국방과학연구소

\*\* 이스퀘(주)

\*\*\* ㈜한화/기계 항공우주연구소

† 교신저자, E-mail: parkjb@add.re.kr

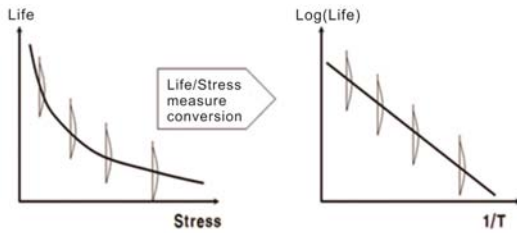


Fig. 1. The Method for Life Estimate Using Accelerated Life-Stress Relation

가속수명시험을 통해 얻어진 시험데이터는 가속수명시험 모형으로 분석이 가능하며, 가속 수명시험 모형은 수명분포와 수명-스트레스 관계로 이루어져 있다. 수명분포는 지수분포, 와이블분포, 대수정규 분포 등이 있으며, 수명-스트레스 관계는 아레니우스(Arrhenius), 역거듭제곱, Eyring 방식으로 분석이 가능하다[3].

본 연구에서는 "내열 및 내유성 고무복합체 특성연구"[6] 연구에서의 고무복합체 시편의 고온축진노화 시험을 통하여 예측된 수명데이터를 토대로 실제 환경에서의 고무복합체의 30년 이후 물성변화를 저온축진노화를 통하여 확인 하였다. 또한 고무의 물성에 영향을 주는 특성저하 요인 중 가장 주요한 인자인 온도를 가속스트레스 조건으로 설정하고, 실제 제품이 저장되는 곳의 온도보다 높은 온도조건에서 열 노화시키는 가속수명시험을 선택하였다.

## 2.2 가속노화수명 예측 모델

일반적으로 가속노화수명 모델로 많이 이용되고 있는 아레니우스 모델은 유기재료의 장기간 내열성을 예측하기 위한 아레니우스 방식과 내열온도지수 등이 잘 알려져 있으며, 실제로 여러 연구자들의 실험식이 식이 잘 맞는다는 것이 확인되고 있다[4].

아레니우스 모델은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = -kt \quad (1)$$

여기서, P는 고무의 특성값(인장강도, 신장률 등), P<sub>0</sub>는 초기 값, t는 시간, k는 반응속도 상수(Reaction rate constant)이다.

식 (1)에서 반응속도 상수 k는 특성값 P의 노화반

응을 나타내는 정수이며, Arrhenius는 반응속도 상수 k와 활성화 에너지 E간에 식 (2), (3)과 같은 실험적 관계가 성립하고 있음을 발표하였다.

$$k = A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2)$$

여기서, A는 반응상수, R은 기체상수(Gas constant, 1.987kcal·J/mol), T는 절대온도(Absolute temperature, K), E는 활성화 에너지(Activation energy, kcal/mol)이다.

식 (2)의 양변에 자연로그를 취하면,

$$\ln k = -\frac{E}{RT} + \ln A \quad (3)$$

식 (3)에서 ln k는 -E/R의 기울기를 갖는 1/T와의 선형적인 관계를 얻을 수 있다. 실험을 통해 활성화 에너지(E)와 반응상수(A)를 구하게 되면 각 온도에 대한 k값을 구할 수 있으며, 식 (1)에서 반응속도 상수 k값을 이용하여 원하는 온도에서의 성능유지 시간 t를 예측할 수 있게 된다. 본 연구대상인 고무복합체는 대개 열화현상에 의하여 노화가 촉진됨에 따라 가속변수를 온도로 설정하고 아레니우스 관계식에 적용하여 불소 고무복합체의 수명을 예측하였다. 가속수명시험을 진행하기 위하여 실제와 동일한 환경의 시험용 치구 및 고무복합체로 제작된 제품 및 관련 시편, 그리고 실제 사용하는 연료유를 사용하였으며, 가속수명시험 평가 항목은 실제 적용하는 구조물의 환경조건 및 고무복합체의 인장강도, 고무복합체의 부피 및 치수변화, 고무복합체의 열전도도를 평가하였다. 또한 30년 후 물성변화 예측방법은 가속조건 80℃에서 시간(일)에 따른 연료유 침지시편의 값을 측정하고 설계온도 20℃에서의 시간(년) 대비 측정변화량으로 환산하여 예측하였다. 예측 모델은 "내열 및 내유성 고무복합체 특성연구"[6] 연구에서 고무복합체 시편의 가속수명시험을 통한 수명데이터 중 가장 보편적으로 사용되는 기본물성인 인장강도 수명식을 적용하여 수명예측을 실시하면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\ln(\text{수명}) = 8774.89/T - 11.2393 \quad (4)$$

식 (4)에 따르면 80℃에서 1일은 20℃에서 약 162

일에 해당되는 것으로 예측되고 80℃에서의 70일은 20℃에서 30년에 해당되는 것으로 추정된다. 이 데이터를 기준으로 연료유 침지 상태의 부피, 무게, 두께 변화율, 인장강도/신장률 변화율, 열전도도 분석을 실시하였다. 특히 저온축진노화에 사용된 시료는 "내열 및 내유성 고무복합체 특성연구"[6] 연구에서 적용된 형태 중 코팅형 시료를 기준으로 제작하였고, 열전도도 측정 시 사용된 장비는 LFA447로 측정 온도 범위는 -25℃~1100℃이고, 레이저플래시법(LF)으로 측정 하였다.

각 분석항목별 한계수명 예측 규격 값의 정의는 Fuel and Fuel System Materials Compatibility Test Program For A JP-8+100 Fuel Additive, page 18 "I.G.6.,7., Gaskets, O-Rings Fluoro-carbon"을 참고하여 Table 2와 같이 작성하였다 [5].

Table 2 Limit Lifetime Applied to Life Test of Fluororubber Composites

시험항목	분석방법	한계수명
부피/무게/치수	KS M6518	10% 증가
인장강도/신장률	KS M6518	20% 감소
체결강도	KS M6518	20% 감소
열전도도	열확산 계수 :	0.2w/(m*k) 이하
	ASTM E 1461	
	비열 : ASTM E 1269	

### 2.3 시험방법

불소 고무복합체의 저온축진노화 시험에 사용되는 시편은 실제 환경에 사용되는 불소 고무복합체(Fig. 2) 및 인장강도/신장률 및 부피축정용 시편(Fig. 3)이 있다. 불소 고무복합체는 Fig. 2와 같이 수명검증탱크 중앙 체결홈에 체결하였다. Fig. 3의 시편을 별도로 제작된 수납용기에 수납하여 수명검증용 탱크 하부에 체결하였다(Fig. 4). 불소 고무복합체가 체결된 수명검증용 탱크 상단부와 하단부를 체결한 후 (Fig. 5) 연료유를 투입하여 챔버에 넣은 후 80℃조건으로 70일간 노화를 진행하였다(Fig. 6).

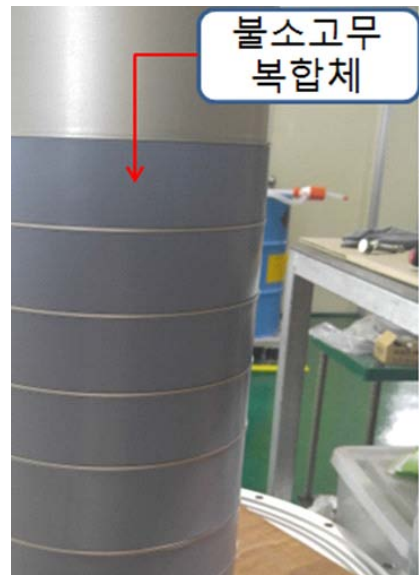


Fig. 2 Assembled Fluorocarbon Rubber Composites



Fig. 3 Specimen for Accelerated Lifetime Test, Left (tensile strength, elongation), right (volume / weight / thickness)



Fig. 4 Tightening Sequence of Specimen And Storage Container for Lifetime Test

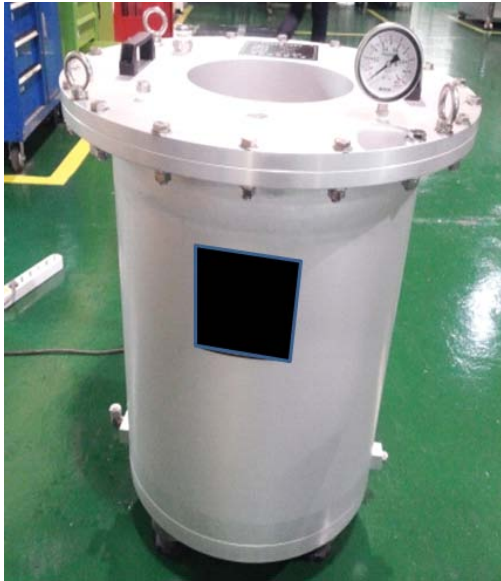


Fig. 5 Accelerated Aging Tank

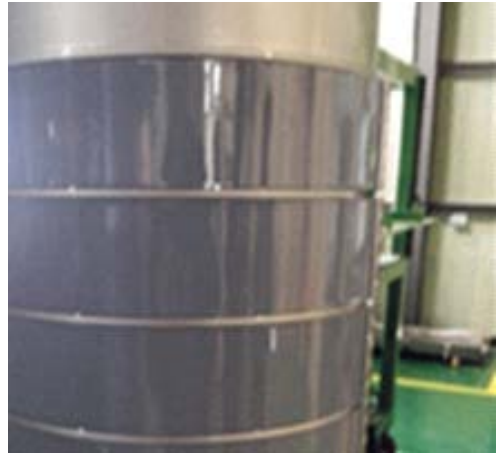


Fig. 7 Inside of the Tank after Accelerated Life Test on 80 °C / 70 days



Fig. 6 Accelerated Aging in Chamber at 80°C



Fig. 8 Disassembled Fluororubber Composite

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분석결과

80°C 기준 70일간의 노화가 종료 되면 수명검증용 탱크를 챔버에서 꺼내어(Fig. 7) 탱크 해체 및 불소 고무복합체를 해체하고 시편을 세척한 후(Fig. 8) 인장강도/신장률, 부피/무게/두께/길이, 열전도도를 측정하였다.

“내열 및 내유성 고무복합체 특성연구”[6] 연구 결과에 따르면 고무복합체 시편의 고온축진노화 시험을 통한 인장강도 수명식은 식 (4)와 같다. 이 식에 따르면 Table 2에서 정의된 인장강도 한계수명인 20% 감소에 도달하는 20°C에서의 시간은 약 15,200년으로 추정되며 20°C에서 30년 후 인장강도 변화율을 예측해보면 약 0.04%로 거의 변화가 없을 것으로 추정된다. 또한 20°C 에서 30년과 동일한 조건으로 예측되는 80°C에서 70일간의 저온축진노화 후 인장강도 변화는 2.4% 증가로 나타났다. 고온축진노화를 통해

예측된 인장강도 변화가동이 저온축진노화 후 인장강도보다 감소하는 거동을 보이는 이유는 고온에서 노화 시 불소고무의 주사슬 분해보다 80℃에서 불소고무의 지속적 경화반응이 지배적으로 나타났기 때문으로 판단된다. Fig. 9는 고온축진노화로 부터 얻어진 20℃에서 30년 동안의 인장강도 변화 예측값과 저온축진노화로 부터 얻어진 20℃에서 30년 시점의 인장강도 변화를 비교한 것이다.

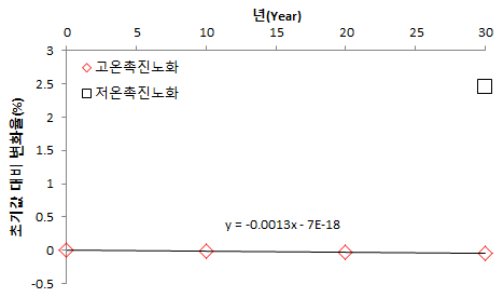


Fig. 9 Comparison of tensile strength changes at 20°C for 30 years predicted from Accelerated aging at high temperature and low temperature

“내열 및 내유성 고무복합체 특성연구”[6] 연구 결과에 따르면 고무복합체 시편의 가속수명시험을 통한 신장률 수명식은 식 (5)와 같이 표현 된다.

$$\ln(\text{수명}) = 6428.17/T - 7.4756 \quad (5)$$

이 식에 따르면 Table 2에서 정의된 신장률 한계 수명인 20% 감소에 도달하는 20℃에서의 시간은 약 218년으로 추정되며 20℃에서 30년 후 신장률 변화율을 예측해보면 약 2.8% 감소가 나타날 것으로 추정된다. 20℃에서 30년과 동일한 조건으로 예측되는 80℃, 70일간의 저온축진노화 후 신장률 변화는 0.3% 증가로 거의 변화가 없었다. 고온축진노화를 통해 예측된 신장률 감소폭이 저온축진노화 후 신장률 감소폭에 비해 큰 이유는 고온축진노화에서 노화 시 불소고무의 주사슬 분해가 저온축진 노화에 비하여 활발하게 일어나고 있음을 나타냈기 때문으로 추정된다. 반대로 80℃에서의 저온축진 노화에서는 불소고무의 경화반응이 추가적으로 일어나 열에 의한 노화를 일

부 상쇄시켜 고온축진노화에 비하여 신장율의 감소폭이 상대적으로 적었다고 판단된다. 따라서 20℃에서 자연 노화가 진행될 경우 불소 고무복합체의 실질적인 신장율 저하는 보다 감소할 것이라 예측된다. Fig. 10은 고온축진노화로 부터 얻어진 20℃에서 30년간 신장률 변화 예측값과 저온축진노화로 부터 얻어진 20℃에서 30년 시점의 신장률 변화를 비교한 것이다.

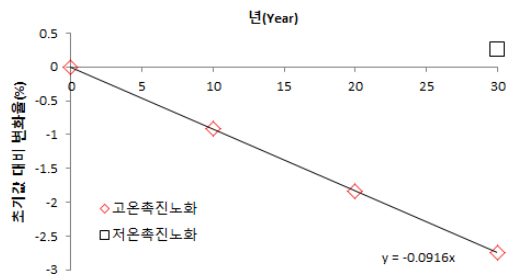


Fig. 10 Comparison of Elongation changes at 20°C for 30 years predicted from Accelerated aging at high temperature and low temperature

“내열 및 내유성 고무복합체 특성연구”[6] 연구 결과, 100℃에서 불소 고무복합체 시편의 시간에 따른 부피, 무게 및 두께에 대한 변화율은 식 (6) ~ (8)과 같다.

$$\text{부피변화율}(\%) = 0.0006 \times (\text{시간}(\text{hr})) + 2.0901 \quad \text{식 (6)}$$

$$\text{무게변화율}(\%) = 0.0006 \times (\text{시간}(\text{hr})) + 0.4584 \quad \text{식 (7)}$$

$$\text{두께변화율}(\%) = 0.001 \times (\text{시간}(\text{hr})) + 1.0998 \quad \text{식 (8)}$$

고무복합체 시편의 고온축진노화 시험을 통한 인장강도 수명식은 앞서 언급하대로 식 (4)와 같은데 이 수명식에 의해 20℃에서 30년에 해당하는 100℃에서의 기간을 추정해보면 약 18일에 해당된다. 따라서 100℃에서 시간에 따라 측정된 부피 변화율을 20℃에서 부피 변화율로 환산하여 나타내면 Fig. 11과 같다. 식 (6)에 따르면 Table 2에서 규정한 부피 한계

수명 10% 증가에 도달하는 20℃에서의 시간은 약 13,000년으로 추정된다. 또한 20℃에서 30년 후 부피 변화율을 예측해보면 약 2.1%의 부피 증가가 나타날 것으로 추정된다. 20℃에서의 30년과 동일한 조건으로 예측되는 80℃에서 70일간의 저온축진노화 후 부피 변화는 1.6% 증가로 나타났다. Fig. 11은 100℃ 축진노화로 부터 얻어진 부피 변화율을 20℃에서의 부피 변화율로 추정하여 예측한 값과 80℃ 저온축진노화로 부터 얻어진 20℃에서 30년 시점의 부피 변화를 비교한 것이다. 비교결과 100℃ 축진노화로 부터 추정된 20℃에서의 부피 변화율과 80℃ 저온축진노화로 부터 얻은 20℃에서 30년 시점의 부피 변화율 차이가 크지 않음을 알 수 있었다.

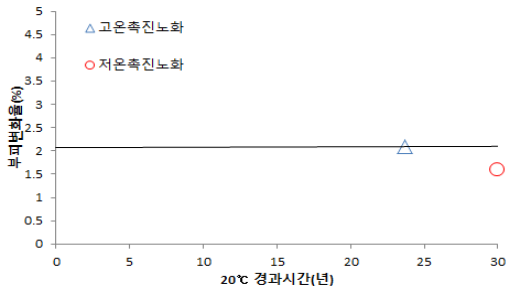


Fig. 11 Comparison of Volume changes at 20°C for 30 years predicted from Accelerated aging at high temperature and low temperature

식 (7)에 따른 무게 변화율 역시 고무복합체 시편의 고온축진노화 시험을 통한 인장강도 수명식을 토대로 20℃에서 30년에 해당하는 100℃에서의 기간을 추정해보면 부피 변화율과 동일하게 약 18일에 해당된다. 따라서 100℃에서 시간에 따라 측정된 무게 변화율을 20℃에서의 무게 변화율로 환산하여 나타내면 Fig. 12와 같다. 식 (7) 따르면 Table 2에서 규정한 무게 한계수명 10% 증가에 도달하는 20℃에서의 시간은 약 17,000년으로 추정된다. 또한 20℃에서 30년 후 부피 변화율을 예측해보면 약 0.5%의 부피 증가가 나타날 것으로 추정된다. 20℃에서 30년과 동일한 조건으로 예측되는 80℃에서 70일간의 저온축진노화 후 부피 변화는 0.4% 증가로 나타났다. Fig. 12는 100℃ 축진노화로 부터 얻어진 무게 변화율을 20℃에서의 무게 변화율로 추정하여 예측한 값과 80℃ 저온

축진노화로 부터 얻어진 20℃에서 30년 시점의 무게 변화를 비교한 것이다. 비교결과 100℃ 축진노화로 부터 추정된 20℃에서의 무게 변화율과 80℃ 저온축진노화로 부터 얻은 20℃에서 30년 시점의 무게 변화율 차이가 크지 않음을 알 수 있었다.

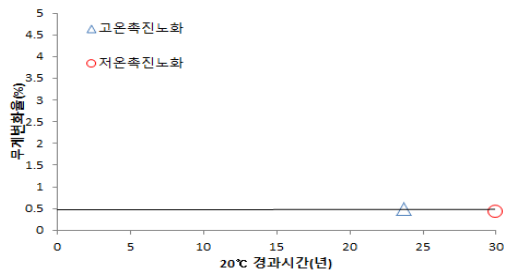


Fig. 12 Comparison of Weight changes at 20°C for 30 years predicted from Accelerated aging at high temperature and low temperature

식 (8)에 따른 두께 변화율 역시 고무복합체 시편의 고온축진노화 시험을 통한 인장강도 수명식을 토대로 20℃에서 30년에 해당하는 100℃에서의 기간을 추정해보면 부피 및 무게 변화율과 동일하게 약 18일에 해당된다. 따라서 100℃에서 시간에 따라 측정된 두께 변화율을 20℃에서의 두께 변화율로 환산하여 나타내면 Fig. 13과 같다. 식 (8) 따르면 Table 2에서 규정한 두께 한계수명 10% 증가에 도달하는 20℃에서의 시간은 약 9,300년으로 추정된다. 또한 20℃에서 30년 후 두께 변화율을 예측해보면 약 1.1%의 두께 증가가 나타날 것으로 추정된다. 20℃에서 30년과 동일한 조건으로 예측되는 80℃, 70일간의 저온축진노화 후 두께 변화는 0.8% 증가로 나타났다. Fig. 13은 100℃ 축진노화로 부터 얻어진 두께 변화율을 20℃에서의 두께 변화율로 추정하여 예측한 값과 80℃ 저온축진노화로 부터 얻어진 20℃에서 30년 시점의 두께 변화를 비교한 것이다. 비교결과 100℃ 축진노화로 부터 추정된 20℃에서의 두께 변화율과 80℃ 저온축진노화로 부터 얻은 20℃에서 30년 시점의 두께 변화율 차이가 부피 및 무게 변화율과 마찬가지로 크지 않음을 알 수 있었다.

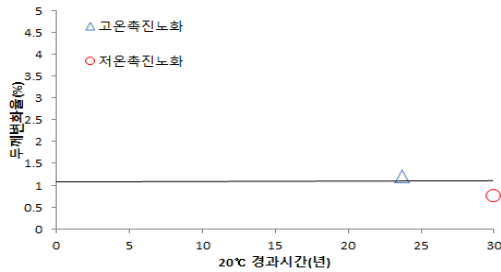


Fig. 13 Comparison of Thickness changes at 20°C for 30 years predicted from Accelerated aging at high temperature and low temperature

식 (4)에 따르면 80°C에서 1일은 20°C에서 약 162일에 해당되는 것으로 예측되고 80°C에서의 70일은 20°C에서 30년에 해당되는 것으로 추정된다. 따라서 20°C에서 30년과 동일한 조건으로 예측되는 80°C, 70일간 저온축진노화 후 열전도도를 측정하여 초기 상태의 열전도도와 비교하였다. 저온축진노화 후 열전도도 측정 결과 0.122 W/(m·k)로 나타났으며 열확산계수는 0.068mm<sup>2</sup>/s 로 측정되었다. 불소 고무복합체 시편의 초기 열전도도와 열확산계수가 각각 0.126W/(m·k)과 0.071mm<sup>2</sup>/s 이었던 점에 비추어 20°C에서 30년 경과후 열전도도와 열확산계수의 변화는 크지 않을 것으로 예측된다. Table 3은 고온축진노화로 부터 예측한 20°C에서 30년 후 각 시험항목에 대한 변화율과 20°C에서 30년에 해당될 것으로 추정되는 80°C에서 70일간 저온축진노화 후 변화율을 한계수명과 함께 나타낸 것이다.

Table 3 Comparison of change of physical predictions over 30 years at 20°C predicted from accelerated aging at high temperature and low temperature

항목	한계수명	30년 후 변화율(%)	
		고온 축진노화	저온 축진노화
인장강도 변화율	-20% 감소	-0.04	2.6
신장률 변화율		-2.75	0.25
부피 변화율	+10%	2.1	1.6
무게 변화율	증가	0.5	0.42
두께 변화율		1.1	0.75
열전도도	0.2W/m·K 이하	-	0.122

초기 열전도도: 0.126W/m·K

#### 4. 결론

고온축진노화 수명 결과로부터 추정되는 20°C에서 30년의 인장강도와 신장율 변화율에 비하여 본 연구의 저온축진노화에 의한 20°C에서 30년의 인장강도와 신장율 변화율이 증가하는 경향을 나타내었는데 이는 저온에서 불소고무의 지속적 경화반응이 지배적으로 나타났기 때문으로 판단된다. 20°C에서 30년에 해당되는 시점에서의 고온축진노화(100°C)와 저온축진노화(80°C)에 따른 부피, 무게 및 두께 변화율은 거의 유사하게 나타났다.

초기상태의 열전도도와 80°C에서 70일간 저온축진노화 후 열전도도는 각각 0.126W/(m·k)와 0.122W/(m·k)로 거의 유사함을 알 수 있었다. 고온과 저온축진노화 비교 연구를 통해 불소 고무복합체는 20°C에서 30년 동안 인장강도와 신장율, 부피, 무게, 두께, 열전도도 항목의 한계수명을 만족시킬 수 있음을 확인 하였다.

#### 참 고 문 헌

1. R. P. Brown, "Aging of Rubber: Accelerated Heat Aging Test Results", pp. 37~41, pp. 69~73, Rapra Technology, 2001.
2. D. K. Park, "A Study for Life Prediction of the NR Rubber Railpad Based on Degradation Mechanism", Doctorate Thesis, Korea University Graduate school, Seoul, 2010
3. R. P. Brown, "Physical Testing of Rubber", 3rd, pp. 287~316, Chapman & Hall, 1996.
4. R. P. Brown, "Practical Guide to the Assessment of the Useful life of Rubbers", pp. 70~72, Rapra Technology, 2001.
5. D. Kalt(2001),"Fuel and Fuel System Materials Compatibility Test Program For A JP-8+100 Fuel Additive", page 18 "I.G.6.,7., Gaskets, O-Rings Fluoro carbon"
6. 박정배, 이범철, 박성한, 내열 및 내유성 고무복합체 특성연구(The study on the thermal and oil resistance rubber composite), 2016.