# 가스켓용 고무소재의 특성수명 예측

박준형\*·이세희\*\*·장현덕\*\*·김광섭\*\*·양정삼\*\*

한국화학융합시험연구원\*·아주대학교\*\*

## Prediction of Characteristics Life of the Rubber Gasket

Joon-hyung Park<sup>\*</sup> Se-hee Lee<sup>\*\*</sup> Hyun-duck Jang<sup>\*\*</sup> Gwang-sub Kim<sup>\*\*</sup> Jeong-sam Yang<sup>\*\*</sup>

Korea Testing & Research Institute<sup>\*</sup> Ajou University<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

In this paper, we carried out an accelerated degradation test that is commonly used to predict characteristics life of rubber gaskets for a pole transformer. The potential failure mode applied for the test is rubber elongation and the corresponding failure mechanism is heat. From the result, we found that Weibull distribution is the fatigue life distribution in NBR and H-NBR. After estimating characteristics life in commonly used temperature, the average life span of  $B_{50}$  in NBR is 7.7 years under 50 °C and the life span in H-NBR is 28 years.

Keywords : Characteristics Life, Elongation, Lifetime Distribution, Rubber Gasket

# 1. 서론

교류 배전선의 고압을 저압으로 낮추기 위해 사용되는 주상 변압기에는 적지 않은 양의 고무 가스켓이 사용된다. 모든 부성의 취부개소에 밀봉이나 기밀 유지를 위한 용도로 사용되며 변압기 뚜껑에도 고무 가스켓이 사용된다. 하지만 현재까지의 관리는 절연유에 의한 변형 및 저온 또는 고온에서의 온도변화에 대한 특성의 변화가 없어야 한다는 광범위한 관리만 되어 왔다. 주상 변압기에 대한 한전표준규격에서는 고무 가스켓에 대해 NBR 또는 동등 이상의 재질을 사용하라고 권장하고 있으나 수명보증에 대한 규정은 전무한 실정이다. 본 논문은 주상 변압기에 사용되는 고무 가스켓 소재의 수명 보증에 대한 데이터를 확보하여 고무 가스켓의 재질을 선정하는 기준을 제시하였다.



<그림 2> 주상 변압기내 고무 가스켓

# 2. 평가 방법

## 2.1 시험 및 분석 방법

#### 2.1.1 고장 모드 및 고장 메커니즘

고분자 재료나 고무와 같은 화학소재의 경우의 고장은 서서히 열화가 진행되면서 발생하므로 화학소재의 고장판정 기준을 명확히 규정할 필요가 있다. 본 논문에서는 ISO 11346 : 2004에 의한 고무 특성의 초기 물성 값의 50 %저하 지점을 관측하였다. 또한 한전 내부적인 검토 및 문헌조사 결과를 토대로 고장 모드를 신장률로 정하였다. 따라서 물리적 특성시험은 인장강도, 신장률, 경도를 모두 시험하고 수명을 예측하기 위한 고장 모드는 신장률로 정하였다. 고장 메커니즘은 주상변압기의 사용 환경 등을 검토하여 열(heat)적 요인으로 선택하였다.

#### 2.1.2 가속수명시험 방법

KS M ISO 37:2007(가황 또는 열가소성 고무-인장응력 특성 측정 방법)에 따라 인장강도와 신장률을 측정하였으며 KS M ISO 48:2008(가황 또는 열가소성 고무-경도 측정(10 IRHD와 100 IRHD 사이의 경도))에 의해 국제고무경도를 측정하였다. 그리고 측정된 데이터로 ISO 11346 : 2004(Rubber, vulcanized or thermoplastic - Estimation of life-time and maximum temperature of use)에 근거한 수명시험법으로 실제 사용온도보다 높은 온도로 KS M ISO 188 :2009(가황 또는 열가소성 고무-촉진 노화 및 내열 시험)에 근거하여 가속 열 노화 시험을 수행하였다.

가속모델은 화학소재에서 일반적으로 많이 적용하고 있는 아레니우스 모델(Arrhenius Model)을 적용하였으며 이는 ISO 11346:2004(Rubber, vulcanized or thermoplastic - Estimation of life-time and maximum temperature of use)의 관련문헌에 근거하였다.

#### 2.2 시험 개요

## 2.2.1 시험 시료

시험시료는 고무 가스켓용 소재로 NBR과 H-NBR, FKM 등 3종의 고무 Sheet를 Random 하게 아령형 시험편을 채취하였다.

시험 시료	특성	사용
NBR	아크릴로니트릴과 부타디엔의	
(Nitrile Butadiene Rubber)	에멀젼 공중합체	에파성, 데필경에 가장
H-NBR	니트리고무에 스스처가르 치어	비여서고 비우서이 피아하
(Hydrogenated Nitrile	니트럴고구에 구도잡기를 아여	- 대표 이 제품 이 물고 인
Butadiene Rubber)	물포와기를 세거	· 고두 루둠
EKM	비여서 비야서 비아프서제	국방병기, 고도의 산업기계,
	내달성, 대표성, 대략품성에	인공위성 등 특수하게 사용
(Fluoro rubber)	/ / 상	되는 합성고무

<표 1> 시험 시료



<그림 2> 고무 sheet 및 아령형 시험편 - NBR



<그림 3> 고무 sheet 및 아령형 시험편 - H-NBR



<그림 4> 고무 sheet 및 아령형 시험편 - FKM

#### 2.2.2 시험 조건

<표 2> 시험 조건

	시험 조건		
	NBR : 100 °C, 120 °C, 140 °C		
가속온도	H-NBR : 130 °C, 150 °C, 170 °C		
	FKM : 210 °C, 230 °C, 250 °C		
측정방식	정시중단방식		
관측 수	574		
관측중단시점	초기 물성 값의 50% 저하 지점		
고무 물성측정 항목	인장강도, 신장률, 국제고무경도		
인장 시험기	만능재료시험기 (INSTRON 5565, USA)		
거드 지청기	국제고무경도 시험기(Hildebrand, Germany) 및		
~~ 시험기	듀로미터경도(A type) 시험기(ASKER, JAPAN)		

각 온도별로 300개의 시험편을 동시에 열 노화시험을 진행하였으며 가속열화시험 방식으로 시험을 진행하는 관계로 관측방식은 정시중단방식으로 일정 시간대에 5개의 Sample을 관측하여 물성변화를 관측하였다. 관측중단 시간이 되면 시험편을 노화시험기에서 꺼내어 상온에서 16시간이상 방치하였다가 16시간에서 96시간 이내에 인장시험 및 경도시험을 측정하였다.

# 3. 가속열화시험 데이터 분석

## 3.1 균질성 시험 결과

고분자 물질은 소재 및 제품의 특성상 물리적 특성값의 편차가 다른 소재보다 큰 것이 일반적이라 할 수 있다. 따라서 소재 및 제품의 균질성이 확보되지 않으면 신뢰성 시험과 같이 장기적으로 시험을 하는 것에 대해서는 차후에 데이터 해석에 큰 영향을 줄 수 있다.

## 3.1.1 NBR

가스켓용 NBR 소재의 Sheet에서 총 15개의 아령형을 채취하였다. 병내(한 Sheet내)와 병간 (Sheet 간)의 균질성을 모두 확인하기 위하여 제공된 Sheet에서 Random하게 3장의 Sheet를 선택하여 한 Sheet에서 5개씩 아령형 시험편을 채취하였다.



<그림 5> 데이터의 잔차 분석 그래프 (인장강도(좌), 신장률(우))

	Two-way ANOVA : TS versus TS_row, TS_column					
Source DF SS MS F P						
TS_row	2	0.31425	0.157127	0.54	0.601	
TS_column	4	1.16417	0.291043	1.01	0.458	
Error	8	2.31195	0.288993			
Total	14	3.79037				

<표 3> 분산분석 결과 (NBR\_인장강도)

분산분석 결과 신뢰수준 95 %에서 P-value가 유의수준인 0.05 이상이므로 인장강도와 신장률 모두 균질함을 알 수 있다. 또한, 병내와 병간 모두 균질성이 있는 것으로 분석되었다.

Two-way ANOVA : EB versus EB_row, EB_column							
Source	Source DF SS MS F P						
EB_row	2	684.57	342.285	2.41	0.152		
EB_column	4	860.77	215.192	1.51	0.286		
Error	8	1136.72	142.090				
Total	14	2682.05					

<표 4> 분산분석 결과 (NBR\_신장률)

## 3.1.2 H-NBR

Residual Plots for TS Residual Plots for EB Normal Probability Plot of the Residuals ls Versus the Fitted Valu al Probability Plot of the Residuals Resid Residuals Versus the Fitted Value 0.5 Residual 0.0 Percent Dercent Residual -0.5 -1.0 0 Resid 0 Rerij 25.5 380 390 Fitted Value 23.5 24.0 24.5 Fitted Value 25.0 -10 Histogram of the Residuals Residuals Versus the Order of the Data Histogram of the Residuals esiduals Versus the Order of the Data 1.0 6.0 4.5 3.0 0.5 Frequency Residual 0.0 Residual -0.5 13 -1.0 0.0 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 -0.5 0.0 Pesidual 1.0 1 2 3 -15 -10 -5 0 5 10 15 Pecidual

NBR과 동일한 방법으로 아령형 시험편을 채취하여 균질성 시험을 시행하였다.

<그림 6> 데이터의 잔차 분석 그래프 (인장강도(좌), 신장률(우))

Two-way ANOVA : TS versus TS_row, TS_column						
Source	Source DF SS MS F F					
TS_row	2	1.2299	0.61494	1.05	0.392	
TS_column	4	5.6466	1.41166	2.42	0.134	
Error	8	4.6649	0.58311			
Total	14	11.5414				

<표 5> 분산분석 결과 (H-NBR\_인장강도)

<표 6> 분산분석 결과 (H-NBR\_신장률)

Two-way ANOVA : EB versus EB_row, EB_column						
Source	Source DF SS MS F F					
EB_row	2	185.2	92.60	1.02	0.402	
EB_column	4	701.6	175.40	1.94	0.197	
Error	8	722.8	90.35			
Total	14	1609.6				

분산분석 결과 신뢰수준 95 %에서 P-value가 유의수준인 0.05 이상이므로 인장강도, 신장률 에서의 병내 및 병간의 균질성이 있음을 확인하였다.

## 3.1.3 FKM

NBR과 동일한 방법으로 아령형 시험편을 채취하여 균질성 시험을 시행하였다.



<그림 7> 데이터의 잔차 분석 그래프 (인장강도(좌), 신장률(우))

Two-way ANOVA : TS versus TS_row, TS_column							
Source	Source DF SS MS F P						
TS_row	2	4.7435	2.37173	2.64	0.132		
TS_column	4	6.5497	1.63743	1.82	0.218		
Error	8	7.1811	0.89764				
Total	14	18.4743					

<표 7> 분산분석 결과 (FKM\_인장강도)

<표 8> 분산분석 결과 (FKM\_신장률)

Two-way ANOVA : EB versus EB_row, EB_column						
Source	ce DF SS MS F					
EB_row	2	190.53	95.267	0.60	0.572	
EB_column	4	1506.93	376.733	2.37	0.139	
Error	8	1269.47	158.683			
Total	14	2966.93				

분산분석 결과 신뢰수준 95 %에서 P-value가 유의수준인 0.05 이상이므로 인장강도, 신장률 에서의 병내 및 병간의 균질성이 있음을 확인하였다.

# 3.2 열 노화시험 결과

## 3.2.1 고무 재질별 물리적 특성시험 결과



<그림 8> 물리적 특성 변화 그래프 (NBR)



<그림 9> 물리적 특성 변화 그래프 (H-NBR)



<그림 10> 물리적 특성 변화 그래프 (FKM)

가속 열노화시험의 관측 진행방식은 정시중단방식으로 진행을 하였다. 고장 모드를 신장률로 선정하였기 때문에 신장률의 변화가 초기값의 50%이하로 변화하는 것에 초점을 두었으며 일부 온도에서는 50%까지 변화하지 않아도 546h이 되면 모든 관측을 중단하였다.

NBR과 H-NBR의 경우는 시간에 따라 물리적 특성값이 변화하는 것을 확인할 수 있으나 FKM의 경우는 특성값의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 FKM은 열화분석 및 가속수명시험 데이터 분석을 하지 못하며, 물리적 특성값이 초기값의 50 %까지 저하되지도 않고 시간에 따른 열화의 진행이 없는 것을 볼 때 내열성에서는 NBR이나 H-NBR보다 뛰어난 재질로 사료된다. 이후 수명분석에서는 FKM은 고려하지 않았다.

#### 3.2.2 고무 재질별 열 특성 분석 결과

고무소재의 열 특성 분석을 확인하기 위하여 NETZSCH 사의 시차주사열량분석기 (Differential Scanning Calorimetry)를 사용하여 열 특성 분석을 수행하였다. 분석 조건은 질소 분위기 하에서 -80 ℃에서 10 ℃까지 3 ℃/min의 승온 속도로 측정하여, 유리전이온도 등 열적 전이현상을 관찰하였다.



시료	유리전이 온도 (℃)	비열 (J/(g <sup>*</sup> K))
FKM	-19.5	0.176
FKM 2hr	-19.4	0.158
FKM 264hr	-18.2	0.161
FKM 498hr	-18.3	0.134
*Reference(FKM)	-13~-7	_

<그림 11> FKM DSC 열곡선과 열특성



시료	유리전이 온도 (℃)	비열 (J/(g <sup>*</sup> K))
NBR	-24.0	0.336
NBR 9hr	-23.2	0.374
NBR 33hr	-23.2	0.342
NBR 48hr	-23.2	0.305
*Reference(NBR)	-44~5	_

<그림 12> NBR DSC 열곡선과 열특성



시료	유리전이 온도 (℃)	비열 (J/(g <sup>*</sup> K))
HNBR	-28.2	0.440
HNBR 12hr	-28.0	0.421
HNBR 33hr	-27.5	0.419
HNBR 57hr	-27.2	0.459
*Reference(HNBR)	-20	-

<그림 13> H-NBR DSC 열곡선과 열특성

<그림 11>, <그림 12>, <그림 13>은 각 고무소재의 시차 주사 열량 분석을 나타내고 있다. 전체적으로 유리전이온도의 변화를 통한 열화의 징후는 관찰되지 않는다. 참고로 NETZSCH 사의 기술 자료\*(TA for Polymer Engineering, NETZSCH Annual for Science and Industry Volume 2)를 통해 해당 고무의 유리전이온도와 비교한 결과 측정 시료와 소폭의 차이는 있는 것으로 나타나는데, 이는 용도별로 고무 배합비가 상이해지기에 이런 차이를 보이는 것으로 판단되어진다.

## 3.3 가속열화시험 및 가속수명시험 데이터 분석

#### 3.3.1 NBR

가속 열 노화시험을 실시한 신장률에 대한 데이터로 가속열화분석을 실시하였다. 가속열화 데이터가 시간이 경과함에 따라 성능의 저하를 나타내는데 이 관계가 어떠한 관계식에 따라서 열화과정을 나타내는지를 분석하여 보았다. 대표적으로 알려져 있는 열화모델이외에 가속열화 시험 분석프로그램인 ALTA software의 Degradation model wizard에서 제시하는 모델식을 모두 분석하여 보았다.



<그림 14> Degradation Model의 적합성 분석 (NBR)

<그림 14>에서 보는바와 같이 열화과정을 나타내는 관계식으로 지수 관계식이 적합함을 알 수 있다. 따라서 지수 관계식에 의해 열화되는 시간을 X축으로 하고 열화량 즉, 신장률이 저하 되는 량을 Y축으로 하여 열화모델을 plot 해 보았다.



<그림 15> 시간에 따른 신장률의 열화량 그래프 (NBR)

<그림 15>에서 보면 고장 판정 기준(신장률 50% 저하되는 지점)을 표시하였으며 critical point까지 열화가 진행되지 않은 것은 외삽을 하여 고장시간을 추정하였다. 예측되는 고장시간은 <표 9>와 같다.

Temperature	Sample No	Time
(℃)	Sample No.	to failure (h)
	1	708.52
	2	727.50
100	3	772.73
	4	841.93
	5	787.46
	1	171.12
	2	164.61
120	3	187.41
	4	181.55
	5	169.88
	1	47.32
140	2	48.97
	3	49.44
	4	46.72
	5	47.70

<표 9> 고장시간 예측 결과 (NBR)

예측된 고장시간 데이터를 사용하여 가속수명시험 데이터 분석을 수행하였다. 온도가 가속 스트레스인 경우에 적합한 아레니우스 관계식을 적용하여 분석하였다. ALTA software를



이용하여 수명분포의 적합도를 검토한 결과 <그림 16>과 같다.

<그림 16> 분포의 적합성 검토 (NBR)

분포의 적합성을 검토한 결과가 와이블 분포가 가장 적합하다고 판단되며 와이블 분포의 기울기가 동일하고 절편의 온도가 높아짐에 따라 특성값이 감소하므로 온도에 대한 가속성이 잘 성립하는 것으로 추측된다.



<그림 17> 고장률 plot 및 스트레스에 따른 가속계수 plot (NBR)

수명 분포가 와이블 분포를 따르는 것을 확인한 후 온도와 수명의 관계를 아레니우스 plot 하여 보았다.



## 3.3.2 H-NBR

가속 열 노화시험을 실시한 데이터로 가속열화분석을 실시하였다. NBR과 동일한 조건에서 분석하였으며 우선 적합한 열화 모델식을 분석하여 보았다.

Models and R	lankings	Analysis is complete. The results and
Linear     Exponential     Power     Logarithmic     Gompertz     Lloyd-Lipow	2 1 Discard Discard 3 Discard	detailed rankings are displayed on th Analysis tab. Click Implement to use the model with the best rank.
Select All	Clear All	

<그림 19> Degradation Model의 적합성 분석 (H-NBR)

<그림 19>에서 보는바와 같이 열화과정을 나타내는 관계식으로 지수 관계식이 적합함을 알 수 있다. 지수 관계식에 의해 열화되는 시간을 X축으로 하고 신장률이 저하되는 량을 Y축으로 하여 열화모델을 plot해 보았다.



<그림 20> 시간에 따른 신장률의 열화량 그래프 (H-NBR)

<그림 20>에서 보면 고장 판정 기준(신장률 50% 저하되는 지점)을 표시하였으며 critical point까지 열화가 진행되지 않은 것은 외삽을 하여 고장시간을 추정하였다. 예측되는 고장시간은 <표 10>과 같다.

Temperature (℃)	Sample No.	Time to failure (h)
	1	554.06
	2	548.55
130	3	588.16
	4	582.54
	5	647.95
	1	237.35
	2	249.42
150	3	255.72
	4	244.54
	5	254.26
	1	66.63
	2	66.89
170	3	67.26
	4	65.09
	5	61.98

<표 10> 고장시간 예측 결과 (H-NBR)

예측된 고장시간 데이터를 이용하여 가속수명시험 데이터를 분석을 수행하였다. 온도가 가속 스트레스인 경우에 적합한 아레니우스 관계식을 적용하여 분석하였다. ALTA software를



이용하여 수명분포의 적합도를 검토한 결과 <그림 21>과 같다.

분포의 적합성을 검토한 결과 NBR과 마찬가지로 와이블 분포가 가장 적합하다고 판단되었으며 와이블 분포의 기울기가 동일하고 절편의 온도가 높아짐에 따라 특성값이 감소하므로 온도에 대한 가속성이 잘 성립하는 것으로 추측된다.



<그림 22> 고장률 plot 및 스트레스에 따른 가속계수 plot (H-NBR)

수명 분포가 와이블 분포를 따르는 것을 확인한 후 온도와 수명의 관계를 아레니우스 plot 하여 보았다.

<sup>&</sup>lt;그림 21> 분포의 적합성 검토 (H-NBR)



<그림 23> 온도와 수명의 관계 : 아레니우스 plot (H-NBR)

### 3.3.3 특성 parameter 및 활성화 에너지 산출

아레니우스 모델을 적용하여 구한 분포의 형상모수는 NBR 고무소재의 경우 23.1임을 알 수 있었고 H-NBR 고무소재의 경우는 7.1임을 알 수 있었다. 형상모수의 값이 1보다 큰 값을 가짐으로 고장이 시간의 경과함으로 인해 증가하는 증가고장률 함수의 형태이며 각 소재별 특성 parameter 및 활성화 에너지를 정리해 보면 <표 11>과 같다.

<표 11> 고무 소재별 추정된 특성 parameter 및 활성화 에너지

Material Item	NBR	H-NBR	
Acceleration Model	Arrhenius		
Life Distribution	Weibull Distribution		
Analysis	Maximum Likelihood Estimation (MLE)		
Shape parameter $(\beta)$	23.1	7.1	
Activation Energy	$0.93 \ eV$	$0.83 \ eV$	

# 4. 시험 결과 및 해석

주상 변압기에 사용되는 고무 가스켓용 고무소재로 가속열화시험을 실시하였다. 가속열화시험을 선택한 이유는 관측방식이 정시중단 방식이어서 일정 기간만 가속시험을 실시하고 고장판정 기준까지 열화가 진행되지 않았을 시는 외삽을 통하여 열화시간을 추정하기 위함이었다. 고장 모드는 신장률이며 고장 메커니즘은 열이다. 가속 열 노화시험 후 고무의 물리적 특성 값인 인장강도, 신장률, 국제고무경도, 듀로미터 경도를 측정하고 수명평가는 고장 모드인 신장률로 수명평가 분석을 실시하였다. 가속열화시험 데이터의 신뢰도를 높이기 위하여 수명분석 시 적합한 수명분포 및 수명분포의 모수 등을 추정하였으며 수명분포와의 관계로 아레니우스 관계식에 적용하여 신뢰수준을 고려한 사용수명을 예측하였다.

최종 546시간 동안 관측하였으며 최종 관측시간 이내에 고장 판정 기준까지 도달하지 않았어도 관측을 중단하고 외삽을 통하여 고장시간을 추정하였다. 관측 및 예측된 고장 시간으로 가속수명시험 데이터 분석을 실시하였다. NBR과 H-NBR 모두 수명특성 분포의 적합성 검정을 한 결과 와이블 분포가 가장 적합함을 알 수 있었으며 와이블 분포의 기울기가 동일하고 절편의 온도가 높아짐에 따라 감소하므로 온도에 대한 가속성이 성립한다. 분포의 특성 parameter를 추정한 결과 형상모수가 NBR 고무 소재의 경우 23.1, H-NBR 고무 소재의 경우는 7.1임을 알 수 있었다. 수명분포와의 관계로 아레니우스 관계식에 적용하여 각 고무 소재별 활성화 에너지를 구하여 보면 NBR의 경우 0.93*eV*, H-NBR의 경우는 0.83*eV*임을 알 수 있으며 사용수명을 예측한 결과는 <표 12>에 나타내었다.

신뢰수준(Confidence Level) : 95 %					
Material	Demoentile	NBR		H-NBR	
Temp.	Percentile	hour	year	hour	year
30 °C	50	616,070	70.3	1,769,000	201.9
35 °C	50	345,610	39.4	1,054,000	120.3
40 °C	50	197,490	22.5	638,490	72.8
45 °C	50	114,850	13.1	392,920	44.8
50 °C	50	67,926	7.7	245,460	28.0
55 °C	50	40,820	4.6	155,550	17.7
60 °C	50	24,909	2.8	99,934	11.4

<표 12> 고무 소재별 사용 수명 예측



<표 12>에서 보는바와 같이 수명분포를 고려하여 신뢰수준 95 %에서 계산되었으며 percentile 50에서의 수명이다. percentile 50은  $t_{p50}$  또는  $B_{50}$ 으로 표기되며 이는 신뢰도가 50% 라는 것과 마찬가지이다. 전체적으로 NBR 보다는 H-NBR의 사용수명이 더 긴 것으로 예측되었으며 이론적으로 H-NBR이 NBR보다 내열성이 더 우수하기 때문에 고장 메커니즘이 열(heat)인 요인에서는 당연한 결과라 할 수 있겠다.

사용수준에서 예측된 특성수명으로 가속계수를 계산 할 수 있다. 가속계수는 사용수준과 가속수준에서의 특성수명으로 계산할 수 있으며 계산식은 다음과 같다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{accelerated}} = \frac{A \exp^{(\frac{E_a}{kT_u})}}{A \exp^{(\frac{E_a}{kT_a})}} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right)\right]$$

여기에서, AF: 가속계수

 $L_{use}$ : 사용수준에서의 특성수명

  $L_{accelerated}$ : 가속수준에서의 특성수명

  $E_a$ : 활성화 에너지 (eV)

 k: 볼츠만 상수 (eV/k)

  $T_u$ : 사용 온도 (절대 온도:K)

  $T_a$ : 가속시험 온도 (절대 온도:K)

위 식을 이용하여 NBR 고무 소재와 H-NBR 고무 소재의 가속계수를 계산하면 <표 13>과 같다.

Material	Service Temp. (°C)	Acceleration Temp. (°C)	가속계수 (AF)
NBR	30	100	798.8
	40	100	256.1
	50	100	88.1
	60	100	32.3
H-NBR	30	150	8517.3
	40	150	3074.2
	50	150	1181.8
	60	150	481.2

<표 13> 가속계수(Acceleration factor) 산출

<표 13>에서 제시한 가속계수를 근거로 하여 가속온도에서 일정시간을 시험함으로써 보증 하고자 하는 시간을 단축하고 보증기간만큼의 시험을 재현할 수 있다. 예를 들면 NBR 고무 소재의 경우 사용온도가 50 ℃일 경우 특성수명이 7.7년이므로 7.7년에 상응하는 노화시험을 하고 싶다면 100 ℃에서 가속계수(AF<sub>(100)</sub>)가 88.1이므로 AF<sub>(100)</sub> = 88.1 = 67,926 시간/t<sub>(100)</sub> 이므로 t<sub>(100)</sub>=약 771시간이 된다. 따라서 가속 열 노화시험 100 ℃에서 771시간 동안 실시 하면 7.7년에 상응하는 노화시험이 되는 것이다. H-NBR 고무 소재의 경우도 사용온도가 50 ℃일 경우 특성수명이 28년이고 150 ℃에서 가속계수(AF<sub>(150)</sub>)가 1181.8 이므로 AF<sub>(150)</sub> = 1181.8 = 245,460 시간/t<sub>(150)</sub> 이므로 t<sub>(150)</sub>=약 208시간이 된다. 즉, 가속 열 노화시험을 150 ℃에서 208시간 동안 실시하면 28년에 상응하는 노화시험이 된다.

# 5. 결론

본 연구에서는 주상 변압기에 사용되는 고무 가스켓 제품의 고무 소재로 가속 열 열화시험을 실시하여 가속열화시험 데이터를 분석하고 가속수명시험 데이터 분석을 통하여 수명분포와 분포의 parameter를 추정하여 특성수명( $B_{50}$ )을 예측하였다. 그러나 가속열화시험 설계를 통하여 정시중단 관측방식을 채택하다 보니 소재의 특성 열화가 미처 고장 판정 기준까지 도달하지 못하고 시험이 종료되어 외삽을 이용하여 고장 시간을 예측하였다. 향후 충분한 시간을 갖고 가속수명시험 설계를 통해 임의관측중단 방식의 관측방식을 택하여 시험을 수행하면 좀 더 정확한 소재의 수명이 예측될 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] Accelerated Life Testing Analysis, www.weibull.com
- [2] D.H. Stamatis, (1995), Failure Mode and Effect Analysis : FMEA from theory to execution, ASQC Quality Press
- [3] Handy Tools & Information : Weibull Failure Database, Barringer & Associates. Inc.
- [4] Jay L. Devore, Probability and Statistic for Engineering and the Sciences, Fourth Edition, Duxbury Press
- [5] L.M. Klyatis et al., Accelerated Quality and Reliability Solutions, ELSEVIER
- [6] William Q. Meeker & Luis A. Escobar, Statistical Methods for Reliability Data, Wiley Interscience.
- [7] O'Connor, Patrick D.T.(1995), Practical Reliability Engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons Inc.

- [8] ReliaSoft, Accelerated Life Testing Reference : ALTA version 7, ReliaSoft corporation
- [9] WAYNE B. NELSON, Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis, Wiley Interscience.
- [10] 정해성, 권영일, 박동호, 신뢰성 시험 분석 평가, 영지문화사
- [11] Minitab 신뢰성 분석, 이레테크