

가속 수명 시험을 이용한 자동차용 배기 벨로우즈의 수명 해석

김형민[†]·위신환^{*}·김태수^{**}·김성현^{**}

Reliability Analysis of Exhaust Bellows Based on ALT

Hyungmin Kim, Shinhwan Wee, Taesoo Kim and Sunghyun Kim

Key Words: Accelerated Life Test(가속 수명 시험), Failure Mechanism(고장 메카니즘), Weibull Distribution(와이블 분포), Exhaust Bellows(배기 벨로우즈)

Abstract

In order to assess the reliability of the exhaust bellows for automobiles, accelerated life test model and procedure are developed. By using this method, failure mechanism and life distribution are analyzed. The main results are as follows; i) the main failure mechanism is crack or breakage of inner flexible tube by shaken displacement at shear direction. ii) temperature is a second factor to affect a failure. iii) the life distribution of exhaust bellows is fitted well to Weibull life distribution and the shape parameter is 13.3 on condition of shaken displacement and 600°C.

기호설명

- N : 배기 벨로우즈의 피로 수명(cycle)
 S : 전단 방향의 가진 진폭(mm)
 m : 배기 벨로우즈의 수명 민감 지수

1. 서론

국내 자동차 산업은 수출국의 다변화에 의한 다양한 필드 사용 환경과 사용자 보증 수준 및 보증 기간의 확대에 의해 그 어느 산업보다 신뢰성 보증이 중요시되는 산업이다. 자동차는 구성 부품의 수가 수 만개에 이르므로 신뢰성 문제가 야기될 확률이 높다. 또한 단일 차종에 대해 수십 만대가 생산되므로 신뢰성 문제가 야기되는 경우 리콜 및 클레임 비용이 수십억에 이른다.

[†] 회원, 자동차부품연구원 신뢰성본부

E-mail : hmkim@katech.re.kr

TEL : (041)559-3319 FAX : (041)559-3165

* 자동차부품연구원 신뢰성본부

** (주)에스디비

이러한 산업 환경의 변화와 더불어 차량개발기간 단축에 따른 신뢰성 평가 및 검증에 소요되는 시간 감소로 가속수명시험법 개발이 절실히 요구되며 신뢰성 보증을 위한 정량적 수명 목표치를 설정·관리하는 것이 더욱더 중요시 되고 있다¹⁾.

자동차용 배기 벨로우즈 어셈블리는 엔진과 배기관 사이에 장착되어 노면으로부터 전달되는 진동을 흡수함으로써 배기계의 피로 내구 수명을 연장시키는 부품이다. 또한 배출 가스의 통로 역할을 함에 따라 가솔린 차량의 경우 최고 약 900°C, 디젤 차량의 경우 약 700°C의 배기가스와 접촉하며 이로 인해 고온하의 열응력 환경 하에 놓이는 부품이다. 상기와 같은 진동과 온도의 가혹 환경은 배기 벨로우즈의 수명을 저하시키는 주요한 요인으로 작용한다. 배기 벨로우즈 개발 제품에 대한 보증기간을 명확히 하고 정량적 수명 목표치를 설정·관리하고자 하면 한계 수명 시험을 통한 고장 메커니즘을 분석하고, 수명 데이터에 대한 분석이 선행되어야 한다. 자동차용 배기 벨로우즈의 수명을 차량 수명과 같은 10년 또는 160,000km로 보증한다고 가정했을 때 한계 수명

시험에 소요되는 시간은 수천 또는 수만 시간에 이른다. 그러므로 자동차 및 부품의 개발 기간 단축에 따른 신뢰성 평가 기간의 단축을 위해서는 가속 수명 시험 기법의 개발 및 수명-스트레스의 상관식의 정립이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 승용차용 배기 벨로우즈를 대상으로 사용자 환경의 스트레스를 고려한 가속 수명 시험 기법을 개발하고 수명데이터에 대한 통계적 분석을 통해 제품의 수명 분석 및 수명-스트레스의 상관 식을 정립한다.

2. 가속 수명 시험의 설계 및 시험 방법

2.1 고장 모드 및 가속 모델의 설계

디젤 승용차용 배기 벨로우즈의 고장 모드는 염분과 수분에 의한 부식, 노면으로부터의 전달되는 진동에 의한 균열 및 고열에 의한 외형 변형 등을 고려할 수 있다. 염분과 수분에 의한 부식 및 고열에 의한 변형은 사용 재료를 엄격히 관리함으로써 어느 정도 해결할 수 있다. 노면으로부터 전달되는 진동은 벨로우즈의 축 방향 인장 및 압축, 반경 방향의 굽힘, 전단 및 비틀림 응력을 발생시킨다. 이중 배기 벨로우즈에 가해지는 최대 스트레스는 단위 길이 당 응력 집중이 가장 큰 전단 방향의 가진이다.

반복 되는 기계적 스트레스인 전단 방향의 가진 진폭(S)에 대한 금속 재료인 배기 벨로우즈의 피로 수명(N)은 Fig. 1의 S-N 선도로부터 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다.

$$\log(S) = b \cdot \log(N) + \log(S_0)$$

$$N = S_0^{-1/b} \cdot S^{1/b} \quad (\text{let } m = -1/b)$$

$$N = S_0^m \cdot S^{-m} \quad (1)$$

상기의 식에서 S_0 는 파괴 한도를 나타내는 가

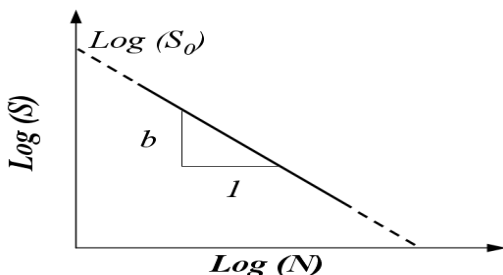


Fig. 1 S-N curve of the metal material.

상의 절편이며, 지수 m 은 각 재료 또는 부품에 따른 수명 민감 지수를 나타낸다.

전술한 바와 같이 디젤 승용차용 배기 벨로우즈의 온도는 최고 700°C의 온도에 이르며 이는 STS 재질의 배기 벨로우즈 외형을 직접적으로 변형시키지 못하지만 내구 수명에는 충분히 영향을 미칠 수 있는 온도이다. 따라서 피로 수명과 가진 진폭의 상관관계가 온도에 의해 어떻게 변화하는지도 해석되어야 한다. 피로 수명과 가진 진폭의 상관식인 S-N 식과 수명과 온도 스트레스의 상관식인 아레니우스 모형(Arrhenius Model)²⁾을 결합함으로써 다음과 같은 단일 식으로 정리될 수 있다.

$$N = (S_0^m \cdot S^{-m}) \cdot (A \cdot \exp \frac{E}{kT}) \quad (2)$$

그러나 상기와 같은 식으로 정리되기 위해서는 S-N 선도 상에서 각기 다른 수준의 온도에서의 수명 선도가 평행해야만 한다. 따라서 피로 수명식을 상기의 식에 근거하여 단일 식으로 재정립할 수 있는지도 평가되어야 한다.

디젤 승용차용 배기 벨로우즈의 피로 수명식을 정립하기 위해서는 피로 수명과 가진 진폭의 상관관계로부터 수명 민감 지수 m , 가상 절편 S_0 가 산출되어야 한다. 또한 분위기 온도 변화에 따라 수명 민감 지수 및 가상 절편이 어떻게 변화하는지가 명확히 파악되어야 한다. 따라서 다음 절에서는 피로 수명과 가진 진폭 및 온도의 상관관계를 파악하기 위한 실험 장치 및 방법에 대해 서술한다.

2.2 가속 수명 시험 장치 및 방법

디젤 승용차용 배기 벨로우즈의 피로 수명과 가진 진폭 및 온도의 상관관계를 파악하기 위한 시험 장치 사진을 Fig. 2에 나타낸다. 시험 장치는 배기 벨로우즈의 전단 방향 가진을 발생시키는 기계식 가진기, 분위기 온도 제어를 위한 가스버너시험기와 측정 및 제어장치부로 구성된다.

상기의 가진기는 최대 6개의 장착된 배기 벨로우즈에 Sine 파형의 기계적 충격이 가해지도록 크랭크 기구 형식으로 제작되었으며 크랭크 반경의 변경으로 가진 진폭이 조절된다. 가진 진폭은 디젤 승용차용 배기 벨로우즈의 실차 시험 결과 측정된 전단 방향의 최대 진폭 ±13mm를 기준으로 S-N 수명 선도를 작성할 수 있도록 ±18, ±15,



Fig. 2 Experimental apparatus for ALT.

±10mm를 추가하여 4개 수준으로 결정되었다.

시험 온도는 피로 수명과 온도의 상관관계를 규명할 수 있도록 (600±20)°C과 (25±10)°C의 2 수준으로 하였으며 시료를 통과하는 배기가스의 온도를 기준으로 하였다. 가진 주파수는 실차량에서의 노면을 통한 진동 주파수 범위 및 시험 소요 시간을 고려하여 10Hz로 하였다. 시험의 형태는 한계 내구 시험의 형태로 상기 가진 조건에서의 각 시료가 균열 또는 파손과 같은 피로 파괴가 발생할 때 까지 시험을 수행하였다. 시험 시료는 시험 조건별 수명 분포를 해석할 수 있도록 각각의 가진 조건별 6개 이상으로 하였다. 온도 조건에 따른 시료는 (25±10)°C 조건에서 29개, (600±20)°C에서 26개로 총 55개이다.

3. 가속 수명 시험 결과 및 해석

3.1 수명 데이터 및 S-N 선도

디젤 승용차용 배기 벨로우즈 어셈블리에 대한 한계 내구 시험을 완료한 이후의 시료 사진을 Fig. 3에 나타낸다. 배기 벨로우즈 어셈블리는 STS 와이어의 그물망으로 제작되어 인장 방향의 과도한 변형을 제한하는 맨 바깥쪽의 outer braid, 배기가스의 기밀을 유지하는 flexible 관인 벨로우즈와 고온의 배기가스와 벨로우즈의 직접적인 접



Fig. 3 Failure mode of exhaust bellows.

Table 1 Life cycle data of exhaust bellows

시험 온도 (°C)	시료수	진폭 (mm)	구간 수명	
			하한 수명 (cycle)	상한 수명 (cycle)
25±10	7 sets	±10	2,482,000 ~3,182,000	2,500,000 ~3,300,000
	10 sets	±13	1,732,000 ~2,282,000	1,750,000 ~2,300,000
	6 sets	±15	982,000 ~1,132,000	1,000,000 ~1,150,000
	6 sets	±18	532,000 ~682,000	550,000 ~700,000
600±20	6 sets	±10	2,232,000 ~2,682,000	2,250,000 ~2,700,000
	8 sets	±13	1,482,000 ~2,082,000	1,500,000 ~2,100,000
	6 sets	±15	732,000 ~902,000	750,000 ~920,000
	6 sets	±18	352,000 ~462,000	370,000 ~480,000

촉을 막고 과도한 압축을 제한하는 inter lock으로 구성된다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 배기 벨로우즈 어셈블리의 고장 모드는 안쪽 flexible 관인 벨로우즈의 균열 또는 파손과 같은 피로 파괴이다. 고장 부위는 벨로우즈의 양단의 첫 번째 또는 두 번째 골이다. 이는 벨로우즈의 양 끝단의 경우 전단 방향의 응력이 집중되고 양 끝단의 용접부와 근접함에 따른 열 영향 때문이다.

디젤 승용차용 배기 벨로우즈 어셈블리에 대한 가속 한계 내구 시험의 결과로 얻어진 수명 사이클 데이터를 Table 1에 나타낸다. Table에서 보는 바와 같이 상온에서는 29개, 고온에서는 26개의 시료에서 고장을 재현하였다. 수명 사이클 수를 비교하면 동일한 온도에서 가진 진폭이 증가함에 따라 수명 사이클 수가 감소함을 알 수 있다. 또한 동일한 가진 진폭 조건에서 온도 증가에 따라

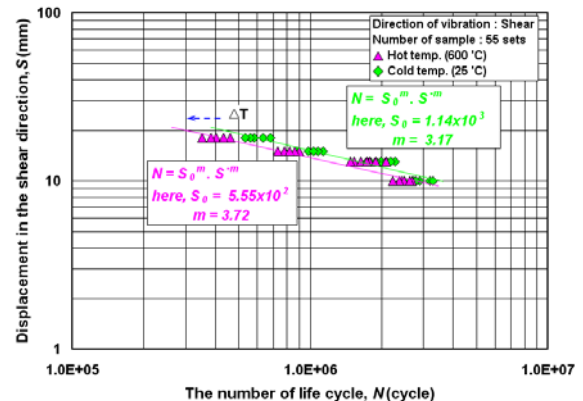


Fig. 4 S-N curve of exhaust bellows.

수명 사이클 수가 감소함을 알 수 있다.

상기의 수명 사이클 데이터에 대해 최소 자승 오차법에 의해 선형 근사한 S-N 선도를 Fig. 4에 나타낸다. 여기서 해석에 사용된 수명 데이터는 Table 1의 구간 수명중 하한 수명이다. 그림에서 보는 바와 같이 피로 수명은 가진 진폭의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 또한 벨로우즈의 피로수명은 온도 스트레스의 증가에 따라 S-N 선도가 자체가 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 온도에 따른 수명 민감 지수 m 은 분위기 온도가 증가함에 따라 3.17에서 3.72로 증가함을 보인다. 이는 분위기 온도의 증가에 따라 가진 진폭 스트레스의 변화에 대해 더욱 민감하게 변화함을 의미한다. 상기와 같이 온도에 따른 두 개의 S-N 선도가 평행하지 않는 것은 벨로우즈의 피로 수명을 아레니우스 모델에 기초한 (2)식으로 단일화하는 경우 수명 민감 지수의 차이에 의해 기대 수명의 오차가 커질 수 있음을 의미한다. 상기의 수명 민감 지수는 통상적인 금속 재료의 수명 민감 지수인 3~11 중 상대적으로 작다. 이는 경도가 큰 STS 재질로 제작됨에도 불구하고 벨로우즈가 얇은 원통형의 주름관 형태로 제작되어 변형에 대한 유연성이 크기 때문이다.

Table 1과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 동일한 온도 조건 및 가진 진폭에서 시료 간 수명 차이가 최고 약 20%의 차이가 발생됨을 알 수 있다. 따라서 디젤 승용차용 배기 벨로우즈의 수명 분포를 수명 편차를 고려하여 다음과 같이 통계적으로 해석하였다.

3.2 수명 분포의 적합성 검토

디젤 승용차용 배기 벨로우즈에 대해 수명 분

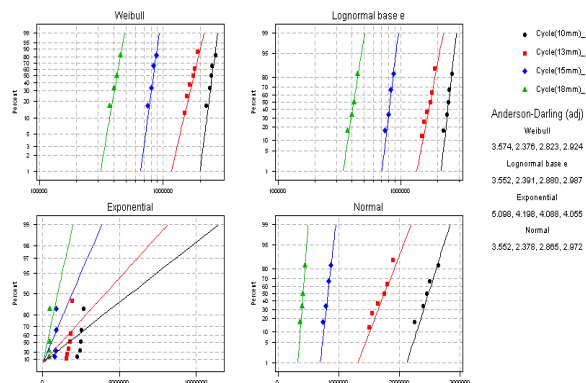
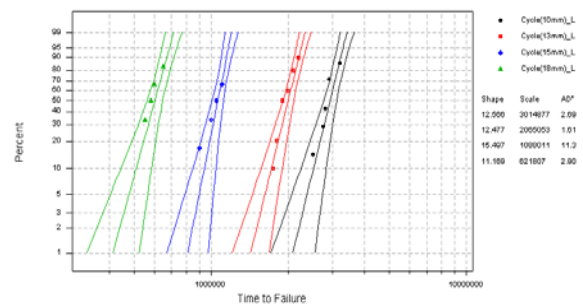


Fig. 5 Suitability analysis of life distribution.

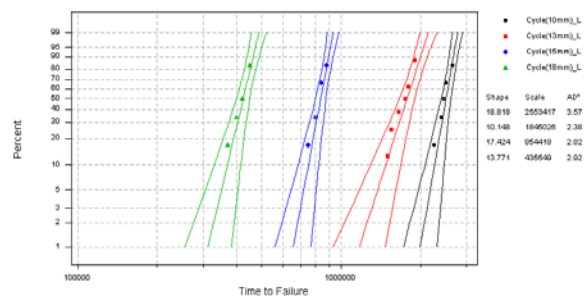
포를 해석하기 위하여 $(600 \pm 20)^\circ\text{C}$ 의 시험 결과로부터 Fig. 5와 같이 수명 분포의 적합성을 검토하였다. 여기서 수명분포의 해석에 사용된 수명 데이터는 Table 1의 하한과 상한의 구간 수명데이터를 사용하였다. 수명 분포의 적합성은 상용 수명 해석 프로그램인 MINITAB을 사용하였으며, 수명 분포로는 Weibull, Lognormal, Exponential, normal 분포에 대해서 검토하였다. 수명 분포의 적합성을 나타내는 척도로는 Anderson Darling (AD) 값을 사용하였다. 이 AD 값은 분석자에게 관측된 자료가 어떤 분포에 가장 잘 적합한지를 판단하는 정보를 제공해주며 동일한 수명 자료를 다수의 분포에 적합시켰을 때 AD 값이 가장 작은 값을 갖는 분포가 가장 적합하다는 것을 의미한다. Fig. 5에서의 그래프 양상 및 AD 값의 크기로부터 디젤 승용차용 배기 벨로우즈의 수명 분포를 해석 하는데 Weibull 분포가 가장 적합함을 알 수 있다. 상기와 같은 결과는 25°C 조건에서의 수명데이터에서도 동일하였다.

3.3 수명 데이터의 가속성 검증

Weibull 분포를 적용하여 최우 추정법으로 각 온도 조건에서 가진 진폭의 가속 조건별 형상 모



(a) at the condition of 25°C temperature



(b) at the condition of 600°C temperature

Fig. 6 Probability plot of each test sample at each shape parameter.

수(Shape parameter)와 척도 모수(Scale parameter)를 추정한 것이 Fig. 6이다. 그림에서 보는 바와 같이 온도 25°C의 조건과 600°C 조건에서의 각 가속 수준의 기울기가 거의 동일함을 볼 수 있으며, 이는 각 수준에서의 형상 모수 값이 동일해야 한다는 가속 시험 모델의 가정을 대체로 만족함을 뜻한다. 형상 모수는 25°C의 조건에서 가진 진폭별 11.1에서 15.5의 범위로 추정되었으며 600°C에서의 형상 모수는 가진 진폭 ±13mm에서의 형상 모수가 약간 차이를 보여 10.1에서 18.8의 범위를 보였다.

가속성 검증을 정량적인 통계 값으로 확인하기 위하여 4 수준 스트레스에서의 형상 모수 β_i 에 대한 동일성 검정을 실시하였다. 공통의 형상모수의 추정치를 β^* , 그리고 각 수준에서의 형상 모수 추정치 및 그 분산을 각각 β_i, V_i 라 할 때 검정통계량은 다음과 같이 표시된다.

$$Q = \sum_{i=1}^4 [(\beta_i - \beta^*)^2 / V_i] \quad (3)$$

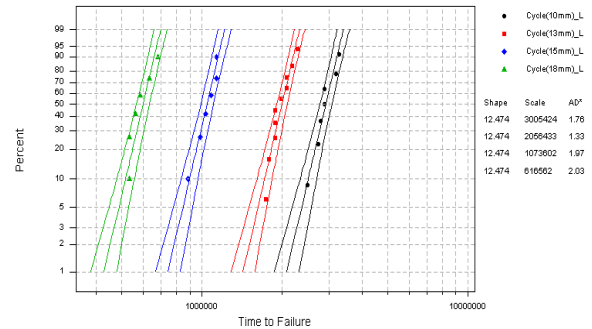
이는 근사적으로 자유도가 3인 카이제곱 분포를 따르며, 상기의 (3)식에 의한 카이제곱 검정 결과를 Table 2에 나타낸다. Table에서 보는 바와 같이 동일성 검정 결과 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 P-value가 0.915와 0.432로 0.05보다 크므로 4 수준의 스트레스에서의 형상 모수가 동일하다고 볼 수 있으며, 승용차용 배기 벨로우즈의 가속 수명 시험은 가속성이 성립한다고 볼 수 있다.

Table 2 Equality verification of shape parameters

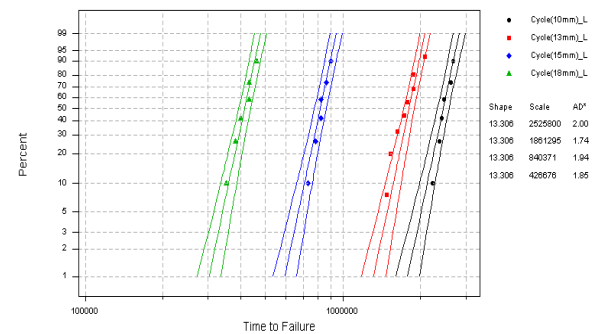
분위기 온도(°C)	Chi-square (검정통계량)	자유도(DF)	P-value
25±10	0.517	3	0.915
600±20	2.749	3	0.432

3.4 보증 수명의 정립

디젤 승용차용 배기 벨로우즈의 수명 데이터에 대한 통계적 분석을 통한 가속성 검증 결과 가속성이 성립함이 파악되었다. 따라서 수명 분포를 동일한 분위기 온도에 대해 Weibull 분포 및 동일한 형상 모수로 가정하여 확률지에 도시하고 각 모수를 추정한 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 형상 모수를 가정



(a) at the condition of 25°C temperature



(b) at the condition of 600°C temperature

Fig. 7 Probability plot of each test sample at equal shape parameter

하여 타점한 수명 데이터가 대체로 양측 신뢰 구간(Confidence interval)내에 있음을 알 수 있다. 각 분위기 온도 조건에 따른 형상 모수는 온도 25°C의 조건에서 12.5이며, 600°C 조건에서 13.3을 보였다. 척도 모수의 값을 비교한 결과를 보면 동일한 형상 모수에 대해 척도 모수가 차이가 남을 알 수 있으며, 이 또한 상기의 4수준 스트레스의 시험 결과가 가속성이 성립하는 것을 증명하는 것이다.

배기 벨로우즈의 수명을 보증하고자 하면 신뢰 구간 내 하한 수명으로 보증하여야 한다. 따라서 Fig. 7의 결과로부터 각각의 가속 수준에서의 B_x 수명(제품의 $x\%$ 가 고장이 발생할 때까지의 수명)의 하한을 신뢰수준 90%에서 구하였다. 배기 벨로우즈의 보증 수명을 산출하고자 각 가속 수준에서의 B_x 수명선을 S-N 선도 상에 나타낸 것이 Fig. 8이다. 여기서 \triangle 와 \diamond 은 각각 600°C와 25°C에서의 수명 데이터를 나타내며, \bullet 은 600°C의 온도 조건에서의 B_x 수명을 나타낸 것이다. 각 수준에서의 B_x 수명은 완전한 직선으로 표시되지 않지만 Fig. 4에서 피로 수명과 가진 진폭의

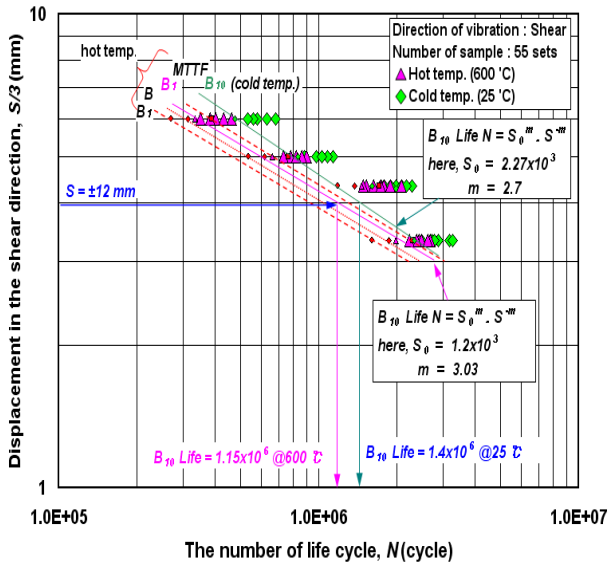


Fig. 8 Warranty life for exhaust bellows assembly.

관계를 선형화 한 것처럼 S-N 선도 상에서 선형화하였다. 보증 수명의 선형화시 각 수준별 하한 수명을 넘지 않도록 선형화 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 B_x 수명은 보증 수준이 높아질수록 S-N 선도 자체가 아래로 이동함에 따라 보증 수명이 짧아지는 것을 볼 수 있다.

디젤 승용차용 배기 벨로우즈는 엔진과 배기관 사이에 장착되며 엔진 마운트나 배기관의 고정 위치 등 적용 차량별 차량 특성에 따라 현저히 달라진다. 따라서 사용자 수준에서의 수명 보증을 위해서는 적용 차량에 대한 실차 시험을 통한 damage 분석 등이 요구된다. 본 연구에서는 상기의 보증 수명에 대해 산업자원부의 ‘승용차용 배기 벨로우즈에 대한 신뢰성 기준인 RS R 0092³⁾의 고 진폭용인 $\pm 12\text{mm}$ 를 적용하여 수명을 해석하였다. 가진 진폭이 $\pm 12\text{mm}$ 일 때의 B_x 수명은 Fig. 8의 y축에서 가진 진폭 $\pm 12\text{mm}$ 의 연장선과 보증 수명선이 교차하는 지점으로 결정된다. 온도 600°C 와 가진 진폭 $\pm 12\text{mm}$ 에서의 B_{10} 수명은 신뢰수준 90%에서의 1.15×10^6 이다. 또한 온도 조건에 따른 보증 수명을 비교하면 온도 스트레스의 증가에 대해 보증 수명선 자체가 아래로 이동하며, 보증 수명의 민감 지수도 증가한다. 동일한 가진 진폭 스트레스에 대해 온도상승에 따른 보증 수명의 영향을 비교하면, B_x 보증 수명은 온도가 25°C 에서 600°C 로 상승함에 따라 13~19% 정도의 수명이 감소됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 디젤 승용차용 배기 벨로우즈 어셈블리에 대해 가진 진폭 및 온도에 따른 가속 시험을 수행하였으며, 수명데이터에 대한 통계적 분석을 통해 보증 수명 분석하였다. 그 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 디젤 승용차용 배기 벨로우즈 어셈블리의 주 고장 모드는 기계적 가진에 의한 벨로우즈의 균열이었으며, 온도 스트레스는 상기의 고장을 직접 유발하지는 않지만 고장 유발을 약 15% 정도 촉진함이 파악되었다.
2. 배기 벨로우즈의 수명 사이클 데이터에 대한 S-N 선도 분석 결과, 수명 민감 지수 m 은 25°C 에서 3.17, 600°C 에서는 3.72임이 파악되었다. 이는 온도 증가에 따라 수명이 진폭 변화에 더욱 민감해짐을 의미한다.
3. 배기 벨로우즈에 대한 수명 분석 결과, 수명 분포는 Weibull 분포가 가장 적합하며, 제품의 형상 모수는 25°C 에서 12.5이며, 600°C 에서는 13.3임이 파악되었다. 이는 상기와 유사한 제품의 가속 시험 설계 시 유용한 정보로 사용될 수 있을 것이다.
4. 사용자 환경에서의 보증 수명을 명확히 하기 위해서는 추후 적용 차량별 사용자 환경에서의 가진 진폭 및 온도의 스트레스 분포와 damage 해석에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- (1) GM, 2005, "General Specification for electrical/Electronic Component," 2004, GMW3172.
- (2) Hyuksang Kyun, Suwoo Nam, Kyungsu Noh, Jungyoung Lee and Byungsu Lim, 2005, "Engineering Materials and Their Applications," pp.169~176.
- (3) Agency for Technology and Standards, 2005, "Exhaust bellows for Automobiles," Reliability Standard, RS R 0092.