

차량내구시험과 시장 사용환경에서의 브레이크 패드 마찰재 마모수명에 대한 통계적 평가

The Statistical Evaluation for the Wear Life of Brake Pad Linings in Vehicle Durability Test and Customer Usage Environment

서 경 원*, 정 관 영**
Kyung-Won Suh, Koan-Young Jung

ABSTRACT

The life data analysis of the system and component are useful to describe the result of reliability test in product validation area. In vehicle development procedure, various reliability test evaluate product life to satisfy customer's growing needs and to change test specifications or design criteria by life data analysis. And vehicle durability test occurred at the final development stage ascertains product reliability in the proving ground resembled market environment.

In this study, a statistical analysis for the wear life of brake pad linings helped perform correlation procedure between vehicle durability test and market. B-life values of the brake pad wear life data from both vehicle durability test and market usage were compared to determine acceleration of the test by the Weibull, normal and log-normal distribution. The acceleration coefficient of the vehicle durability test can access to evaluate design criteria of product and test specification.

1. 서 론

자동차의 개발과정에서 고객의 다양한 사용조건을 일일이 적용하여 검증하기란 매우 힘들며 특히 내구신뢰성분야에서 차량이 받는 부하로 정

의되는 사용조건은 시장의 환경과 고객의 성향에 따라 그 분포가 넓게 산재해 적정수준을 찾아 내구신뢰성시험을 수행하는 데에 어려움이 있다. 그러므로 내구신뢰성시험 과정을 재질, 부품, 컴포넌트, 시스템의 형태로 나누어 다양한 시험을 마친 후 마지막으로 시장의 사용환경에 가장 근접한 차량상태로 차량내구시험을 수행하는데, 이러한 차량내구시험은 개발과정에서 시장의 사용환경을 대면해야 하면서도 이를 빠른 기간 내에 수행해야 하므로 일반 시장 환경에서 차량의 수

* 정회원, 기아자동차 중앙기술연구소

** 기아자동차 중앙기술연구소

명만큼 테스트하기는 불가능하여 보통 일반 도로에 대해 대표성을 갖은 도로와 환경으로 구성된 주행시험장(proving ground)에서 실시한다. 주행시험장에서의 차량내구시험은 기간이나 거리로 1~10배 정도 빨리 시장의 사용조건을 재현하므로 시장상황의 변화에 대처하기 위해서는 수시로 시장과 내구시험의 상관관계를 확인하고 시험기준을 변경해야 하는데, 이러한 신뢰성시험의 기준 설정과 검증은 통계적 분석을 통한 정량적 해석과정을 통해야 한다.

차량의 신뢰성에 대한 통계적 해석은 보증수리를 정량적으로 예측하는 데에 먼저 사용되었는데 Simpson의 보증수리 데이터로부터 신뢰도를 예측하는 시스템¹⁾ 이후 신뢰도 예측 방법을 이용한 차량의 신뢰도 분석이 이루어졌다^{2,3)}. 그러나 판매단계에서 신뢰도가 떨어지는 부품이나 시스템을 빠른 시간에 예측하여 대응하는 방법으로 시장에서의 문제 수집, 예측과 개선단계를 거치는 데에 많은 시간이 걸리므로 자동차 업체에서는 시장에 가장 근접하게 예측할 수 있는 개발과정에서의 신뢰성분석 방법으로 부품의 수명시험을 해석하였는데, 복잡한 시장을 대변하는 내구신뢰성시험 중 부품의 수명분포로 구체품과 신제품의 수명을 비교한 Ahmed는 개선된 설계에 의해 부품을 개발할 때 충분한 샘플 수로 수명 시험을 실시하였다⁴⁾.

또 차량의 신뢰성 해석의 다른 방법으로 시장에서 빠른 시간 내에 마일리지를 누적하는 차량의 고장 데이터를 수집하여 단기간 내에 수만 마일에서의 신뢰도를 예측하는 방법을 사용하였으나⁵⁾, 그러나 이러한 방법들은 하나의 부품이나 시스템을 대상으로 수행되어 전체 차량을 평가하는 데에는 어려움이 있다. 이에 반해 시장의 사용환경을 통계적으로 분석하여 주행시험장 내에서 재현하는 방법이 진행되었는데, 1970년대에 Ford는 시장의 일반도로에서 수행하던 차량내구시험을 주행시험장에서 실시하기 위한 시험 도로를 건설하는 방법으로 샤시 계통의 시장, 내구의 부하를 피로 피해(fatigue damage)의 분포를 통하

여 비교하는 데에 확률분포와 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation)을 사용하였다^{6,7,8)}.

자동차 제조업체의 경우 2, 3개의 샘플로 시장환경을 닮은 차량내구시험을 수행해야 하는데 차량내구의 시험기준과 시장간의 상관관계를 지속적으로 검증해야만 시장환경을 반영하는 신뢰성 시험을 실시할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는, 변화하는 시장의 사용환경과 차량내구 시험조건 간의 상관관계 및 가속관계를 설정, 검증하는 방법의 하나로 브레이크 패드 마찰재 수명데이터를 통계적으로 분석하였다. 시장의 모니터 차량에서 얻어진 브레이크 패드 마찰재의 수명데이터와 주행시험장내에서 실시한 차량내구시험의 수명데이터를 통계적으로 분석하는 과정에서 브레이크 계에 시장의 사용환경과 차량내구의 시험기준이 미치는 영향을 검토하고, 시장환경과 차량내구시험 간의 가속관계를 정하는 계수를 찾아내었다.

이러한 과정을 수행하는 단계로 2장에서는 수명데이터를 통계적으로 해석하는 방법 중 수명해석을 위한 확률분포이론과 모수의 추정에 대해 정리하고, 3장에서는 브레이크 패드 마찰재의 마모수명 데이터를 얻는 방법으로 마모결과로부터의 브레이크 패드 수명 계산식과 중단된 시험에 대해 고찰하였다. 4장에서는 내구시험과 시장의 수명데이터를 해석하고 확률분포를 적용하여 적합한 분포를 찾아내고, 결정된 분포에서 차량내구시험과 시장 사용환경의 B 수명을 비교하여 시장에 대한 차량내구시험의 가속계수를 결정하였다.

2. 통계적 해석

2.1 확률분포함수

브레이크 패드 마찰재의 마모수명에 대한 통계적 해석을 위해 확률분포함수로 와이불 분포, 정규분포, 대수정규분포를 적용하였다⁹⁾. 와이불(Weibull) 분포는 피로수명 분포에 사용되면서 공학자 사이에서 가장 많이 쓰이는 수명분포이고, 정규분포(normal distribution)는 중심극한정

리에 의해 큰 샘플수의 랜덤한 분포에 주로 쓰이나 해저드 함수(hazard function)가 증가하는 형상이므로 마모 고장과 같은 수명분포에도 쓰인다. 대수정규분포(log normal distribution)는 다양한 형상으로 와이블 분포와 함께 금속의 피로수명해석에 많이 쓰이는 분포이다.

세 가지 분포에서 내구시험과 시장의 수명해석에 적합한 분포를 찾기 위한 비교대상으로는 비모수적 추정(nonparametric estimation)으로 Kaplan-Meier의 PL 추정(product-limit estimation)을 사용하였다. 일반적인 중단데이터에 대해 PL 추정에 의한 신뢰도 함수(reliability function, survival function) $\hat{S}(t)$ 는 다음과 같다. (고장이 발생한 시간은 a_j , d_j 는 a_j 시점에서의 고장 갯수, n_j 는 a_j 까지 고장나거나 중단되지 않은 샘플 수이고, $R(t)'$ 는 t 시점보다 먼저 발생한 고장 시점의 집합이다.)

$$\hat{S}(t) = \prod_{j \in R(t)} (1 - \frac{d_j}{n_j}) \quad (1)$$

그에 따른 a_j 시점에서의 고장률(failure rate) p_j 는 다음과 같다.

$$p_j = 1 - \frac{1}{2} \{ \hat{S}(a_j) + \hat{S}(a_j + 0) \} \quad (2)$$

$$\hat{S}(a_j + 0) = \hat{S}(a_{j+1})$$

$$\text{for } j = 1, 2, \dots, k-1 \quad (3)$$

3장에서 수명분포의 적합도 검정을 할 때, PL 추정에 의한 고장률과 누적분포함수와의 형상을 비교하였다.

2.2 확률분포의 모수추정(parameter estimation)

수명데이터로부터 분포를 얻기 위해 통계량인 최대가능성 추정(maximum likelihood estimation)을 사용하여 모수 추정을 한다. 일반적인 중단 데이터가 있는 경우의 가능성 함수(likelihood function)는 다음과 같다. (t_k 는 시험이

중단된 시점, $f(a_j)$ 는 확률밀도함수, $F(t_k)$ 는 누적분포함수이다.)

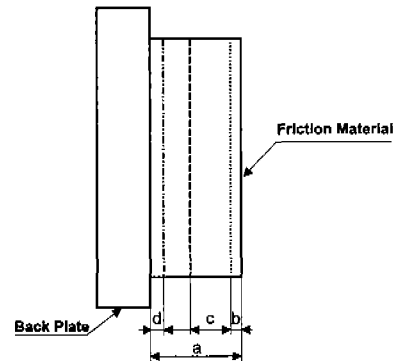
$$L = \prod_j f(a_j) \prod_k (1 - F(t_k)) \quad (4)$$

보통 계산의 편의를 위해 로그값을 많이 사용하며 로그 가능성함수를 최대로 하는 모수를 추정한다. (θ 는 수명분포의 모수)

$$\frac{d \log L}{d \theta} = 0 \quad (5)$$

3. 브레이크 패드 마찰재의 마모수명

차량의 내구신뢰성시험은 정해진 기간동안 수행하기 때문에 대부분의 부품은 수명이 다하거나 고장을 일으키지 않는다. 브레이크 패드 마찰재의 경우도 개발육성과정의 시험 중 수명이 다하는 경우도 있으나 수명이 다하지 않고 종료할 수도 있는데, 차량내구시험에서는 시험 결과로부터 시장에서의 수명까지 확인해야 하므로 다음과 같은 방식으로 마찰재의 마모수명을 계산한다.



- a : Thickness of pad lining
- b : Thickness of brake bedding
- c : Thickness of wear
- d : Minimum permissible thickness
- a - (b + d) : Effective thickness of lining

Fig. 1 Life equation of brake pad lining

3.1 브레이크 패드 마찰재의 마모수명공식

차량내구시험에서 브레이크 패드 마찰재의 마모수명은 일정 수준 이상의 마모량으로부터 전체 마찰재를 사용할 때까지의 기간을 예측하여 결정하는데 이를 유효수명이라 한다.(Fig. 1 참조)

$$\text{유효수명} = \frac{\text{유효두께}}{\text{마모량}} \times \text{주행거리}$$

$$\forall \text{ 마모량} \geq \frac{1}{4} \times \text{유효두께} \quad (6)$$

식 (6)에서 유효수명이란 패드 마찰재의 마모가 주행거리와 선형적이라고 가정하여 유효두께 (effective thickness)만큼 마모하는데 걸리는 주행거리를 말한다. 유효두께란 실제 마찰재의 두께 중 기능을 수행할 수 있는 일정 두께를 말하며 길들이기(bedding) 단계의 마모량과 보통 인디케이터가 장착되어있는 사용 한계를 제외한 양을 말한다. 마찰재의 마모경향은 패드의 재질 특성이나 제조공정에 따라 주행거리에 선형적으로 비례하지는 않으나, 일정수준의 마모 - 보통 유효두께의 1/4 이상 - 이후에는 측정한 마모량으로부터 선형적으로 가정하여 유효수명을 구할 수 있다

3.2 중단된 데이터

내구시험에서 브레이크 패드 마찰재는 대부분 유효두께의 1/4 이상 마모하기 때문에 유효수명을 구하는데 어려움이 없으나, 시장 모니터의 경우 샘플에 따라 마모량이 적어 (6)식을 적용할 수 없더라도 그 데이터를 사용해야 할 때가 있다. 이러한 경우 만약 동일 시험차량에서 유효두께의 1/4 이상 마모한 패드가 있다면 최소한 그 패드의 마찰재보다는 큰 마모수명을 갖는다고 가정할 수 있으므로 마모량이 부족하여 마모수명을 알 수 없는 경우에는 동일 시험차량에서 가장 큰 수명을 갖는 패드의 마찰재 이상의 수명을 가진 것으로 판단한다.

이를 신뢰성 공학의 측면에서 보면, 마모량이

부족하여 수명 계산식에 적용할 수 없는 경우 동일차량에서 동시에 진행한 가장 큰 유효 데이터에서 시험이 종결된 것으로 볼 수 있다.(정수중단 데이터, type II censored data) 예를 들어 한 차량에 장착된 4개의 샘플에서 하나의 수명 데이터로 84000km을 얻었고 나머지 3개는 유효두께의 1/4 이상 되지 않아 유효수명을 구할 수 없을 때에도 나머지 샘플의 마모수명은 최소 84000km 이상은 될 것이므로 84000km에서 종료된 시험으로 볼 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

차량내구시험과 시장 사용환경에서의 브레이크 패드 마찰재의 마모수명 데이터는 각각 기아 자동차의 아산종합주행시험장에서 수행한 내구시험의 결과와 서울과 경기지역에 거주하는 기아자동차 직원의 자가차량 모니터 결과로부터 얻었다¹⁰⁾. 시장 모니터에 사용한 브레이크 패드 및 주변 부품은 개발 당시와 동일한 사양으로 양산 시판 차량에도 적용되는 정식부품을 사용하였다. 이렇게 취득한 수명 데이터에서 적합도 검정을 통해 마모수명의 확률분포를 구하였다.

4.1 적합도 검정(goodness-of-fit test)

내구와 시장의 수명 데이터를 각각 와이블 분포, 정규분포, 대수정규분포에 적용하여 누적분포 (Fig. 2, 3) 및 확률분포(Fig. 4, 5) 그래프로 나타내었다. 그 결과, 차량내구시험의 수명은 와이블 분포와 정규분포에 근사하게 나타나고, 시장 사용조건은 세 가지 분포에 모두 비슷하게 보임을 알 수 있다.

내구시험과 시장의 패드수명 누적확률분포와 확률분포가 각 분포별로 큰 차이를 보이지 않으므로 누적분포를 선형화하여 그런 확률지(probability plot)에서 누적분포함수와 PL 추정에 의한 신뢰도 값의 상관계수 r^2 이 가장 크게 나오는 분포를 선택하였다¹¹⁾. 각각의 확률지에서 직선 맞춤 결과에 의한 상관계수는 Table 1로 내

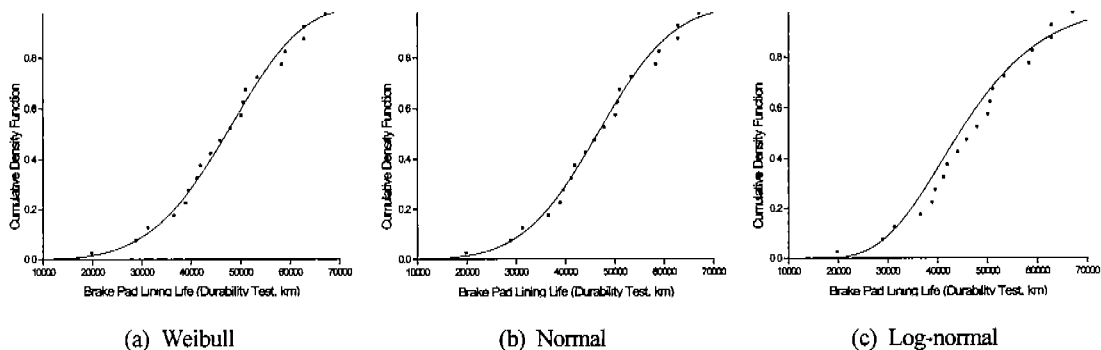


Fig. 2 Comparison of the cumulative distribution of pad life in vehicle durability test

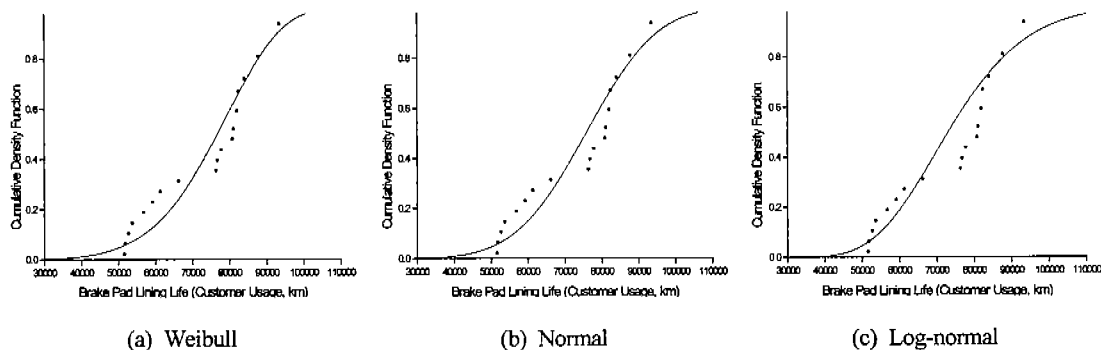


Fig. 3 Comparison of the cumulative distribution of pad life in customer usage

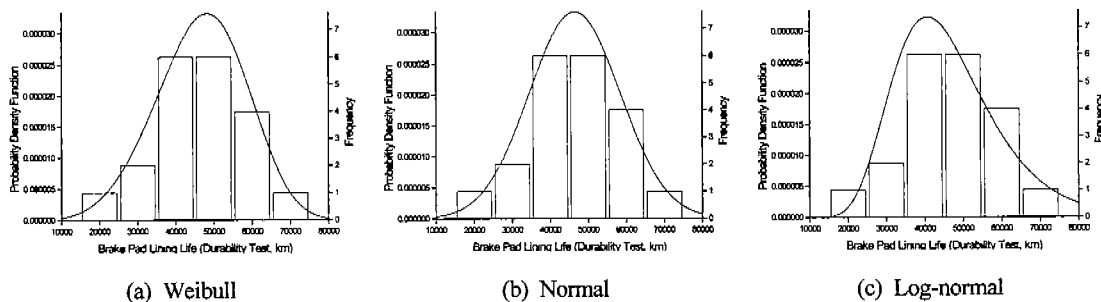


Fig. 4 Comparison of the probability distribution of pad life in vehicle durability test

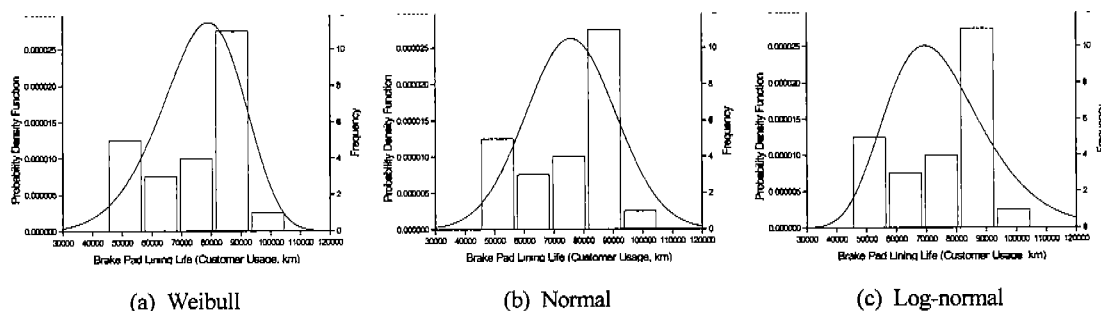


Fig. 5 Comparison of the probability distribution of pad life in customer usage

구시험에서는 와이בל 분포, 시장에서는 정규분포의 r^2 이 가장 크게 나타났다.

Table 1 Determination the coefficient of life distribution at probability plot (r^2)

	Weibull	Normal	Log-normal
Durability test	0.989	0.985	0.927
Customer usage	0.865	0.890	0.875

이와 같은 적합도 검정의 결과, 브레이크 패드 마찰재의 수명분포는 차량내구시험의 경우 와이בל 분포에, 시장 사용환경은 정규분포에 근접함을 알았는데, 도로, 조작 패턴 등이 동일한 조건에서 실시하는 차량내구시험과 각기 사용환경에 따라 조작패턴과 도로가 다른 시장 사용환경의 특성과 일치함으로써 분포의 결정이 물리적 현상의 해석에 적합함을 알 수 있다.

4.2 모수의 추정

모수의 추정은 적합도 검정에서와 같은 확률지에서의 직선맞춤에 의한 방법과 최대가능성 추정 방법을 사용할 수 있다. 이미 적합도 검정 과정에서 직선맞춤을 실시하였으나 여기에서는 최대가능성 추정에 의한 정확한 수명분포를 찾았다.

그 결과, 차량내구시험의 브레이크 패드 마모

수명의 분포는 위치 모수(scale parameter)가 $\eta = 51100$, 형상 모수(shape parameter)가 $\beta = 4.49$ 인 와이בל 분포로, 시장 사용환경에서의 수명분포는 평균(mean)이 $\mu = 75800$, 표준편차(standard deviation) $\sigma = 15200$ 인 정규분포로 나타났다. 확률지에 그런 결과는 Fig. 6, 7과 같다. 이렇게 구한 수명분포로부터 내구시험과 시장의 브레이크 패드 마찰재의 마모수명에 대한 정량적 분석을 실시할 수 있다.

4.3 가속계수의 결정

차량내구시험과 시장 사용환경에서의 수명분포가 결정되면 그로부터 내구시험이 시장환경을 짧은 기간 내에 얼마나 빨리 재현하는가를 판단할 수 있는데, 이를 시장에 대한 내구시험의 가속계수¹²⁾로 표현한다. 시장에 대한 내구시험의 가속계수는 Fig. 8의 내구시험과 시장의 패드수명 분포로부터 비교하여 구할 수 있다.

수명시험에서 대상에 대한 수명 예측 결과를 제시하는 방법으로 일정 비율이 고장(failure)을 일으키는 시점을 말하는 B 수명을 사용하는데, 예를 들어 B50 수명은 전체 시험대상의 50%가 고장이 발생하는 시점을 말한다. 자동차의 내구 신뢰성분야에서는 통상 B10 수명을 사용하는데 이는 판매차량의 90%는 제품의 신뢰성규격을 만

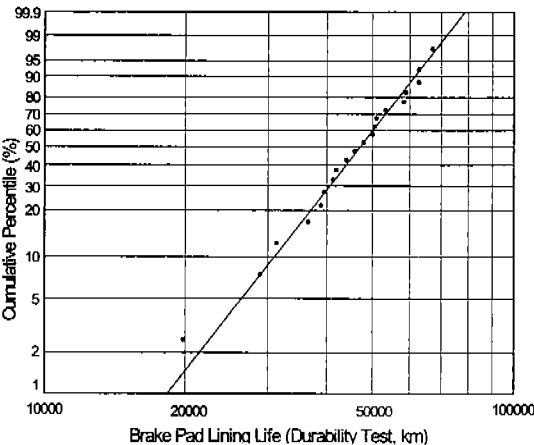


Fig. 6 Weibull probability plot of durability test

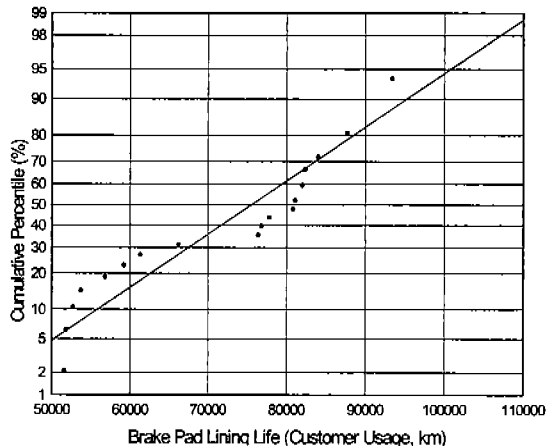


Fig. 7 Normal probability plot of customer usage

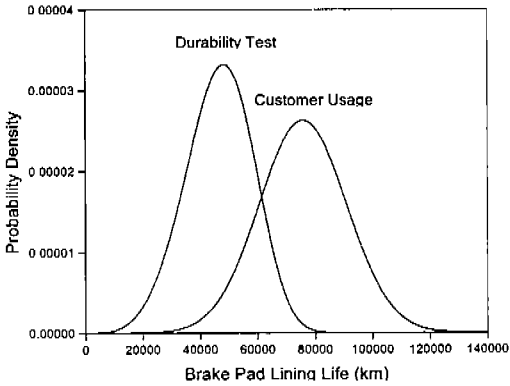


Fig. 8 Comparison of pad life between durability test and customer usage

축시킨다는 의미다. 차량내구시험과 시장환경의 수명분포 비교 중 가속내구와 시장의 부하조건 상관화⁸⁾의 경우 시장 B10 수명과 내구시험의 B50 수명을 비교하였으나 여기서는 시장의 B10 수명과 내구시험의 B10 수명을 비교하였다.

가속내구는 시장의 누적부하와 등가인 부하를 주행시험장 내의 가혹한 도로로 환산하여 재현함으로써 바디 및 샤시의 구조부품들의 내구신뢰성을 평가하므로 시장조건의 B10 수명과 주행시험장에서 일정한 입력부하에 대한 피로수명의 중앙값인 B50 수명을 비교한다. 그러나 브레이크 등 차량 전 부품의 내구신뢰성을 평가하는 경우에는 시장과 동등한 입력 부하와 사용패턴을 단지 단기간에 반복적으로 재현하여 시장을 시뮬레이션하므로 내구시험의 B50 수명보다 시장과 마찬가지로 B10 수명이 의미를 갖는다.

그러므로 내구와 시장의 브레이크 패드 마찰재의 마모수명 비교에 각기 분포의 B10 수명을 사용하여 앞의 모수 추정 결과에서 내구의 B10 수명은 30900km, 시장의 B10 수명은 56200km로 이로부터 시장에 대한 내구시험의 가속계수는 약 1.8배로 나타났다. 신제품의 개발단계에서 설계, 시험기준을 설정할 때 시장을 대변하는 차량내구시험의 가속계수를 기준으로 함으로써 시장의 브레이크 패드의 마모수명의 요구수준에 적합한 제품기준을 제시할 수 있다¹³⁾.

4. 결 론

차량내구시험은 시장의 사용환경에 가장 근접한 신뢰성시험이고 시장에 대한 예측 기능이 있어야 하는데, 본 연구에서는 이에 대한 검증방법으로 브레이크 패드 마찰재의 사용환경에 대한 통계적 분석을 실시하였다. 시장 사용환경과 차량내구 시험조건의 상관관계를 파악하는 방법으로 브레이크 패드 마찰재의 마모수명을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 시장과 내구시험에서의 브레이크 패드 마찰재의 수명분포로 시장은 정규분포를 내구시험은 와이블 분포를 따르는 것으로 나타나, 시장의 다양한 사용조건에 의한 마모는 정규분포로 나타나고 내구시험의 일정한 시험기준의 결과는 와이블 분포의 성향임을 알았다.

둘째, 적합도 검정으로 결정된 확률분포에서 추정된 모수로부터 각각 차량내구시험과 시장 사용조건에서의 브레이크 패드 마찰재 마모수명을 대표할 수 있는 수명분포를 찾아내었다.

셋째, 시장의 브레이크 패드 마찰재의 수명분포에서 B10 수명을 예측할 수 있는 내구시험 수명분포가 시장 대비 약 1.8배의 가속을 보임을 알았다. 이렇게 구한 가속계수로부터 시장의 요구수준을 만족하는 시험기준의 설정 및 검증, 또 설계기준을 설정이 가능하였다. 내구시험과 시장의 브레이크 계의 사용조건은 작동빈도, 시간, 답력, 감속도 등의 면에서 상이한 점이 있으나 내구 시험조건이 시장을 충실히 재현한다고 한다면, 패드 마모수명의 가속계수로부터 내구시험의 브레이크 계의 전반적인 가속관계를 유추할 수 있어 개발단계의 시험기준을 선정하기 위해 시장과 내구시험간의 관계를 간접적으로 확인할 수 있을 것이다.

본 연구에서 수행한 차량내구시험과 시장 사용환경의 비교는 브레이크 계뿐만 아니라 차량의 전 시스템의 신뢰성 평가에 적용할 수 있고, 자동차의 개발과정에서 시장을 정확히 대변하는 내구

시험을 수행하기 위해서는 차량 전반에 이르는 사용조건에 대한 통계적 분석을 지속적으로 진행해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. B. H. Simpson, "Reliability Prediction from Warranty Data", SAE Paper 660060.
2. M. A. Vasan, "Reliability Estimation and Failure Prediction of Highway Tractor Components", SAE Paper 820979.
3. R. W. Schneider and D. R. Tibberts, "Assessing Product Reliability from Warranty Data", SAE Paper 831200.
4. M. Ahmed, "Determination of Prototype Test Requirements to Meet Performance Specification and Reliability Target", SAE Paper 901742.
5. P. I. Hsieh and M. W. Lu, "Reliability Estimation and Failure Prediction of Vehicle Systems and Components", SAE Paper 901740.
6. K. V. Smith and R. F. Stornant, "Cumulative Damage Approach to Durability Route Design", SAE Paper 791033.
7. R. S. Beamgard, K. P. Snodgrass and R. F. Stornant, "A Field Performance Prediction Technique for Light Truck Structural Components", SAE Paper 791034.
8. J. E. Birchmeier and K. V. Smith, "Optimization of a Light Truck Rough Road Durability Procedure Using Fatigue Analysis Methodology", SAE Paper 820693.
9. W. Nelson, Applied Life Data Analysis, John Wiley and Sons, 1972.
10. 서경원, 전옥, 정관영, 아펠라 Frt. Pad Lining 마모수명거리 분석, 기아자동차 차량실험부, 1997.
11. M. J. Crowder, A. C. Kimber, R. L. Smith and T. J. Sweeting, Statistical Analysis of Reliability Data, Chapman & Hall, New York, pp. 37-49, 1991.
12. 정관영, Brake Pad, Lining Monitor 결과보고, 기아자동차 차량실험부, 1993.
13. 서경원, 정관영, "실차 내구시험과 시장 사용조건 조사의 상관화를 통한 브레이크 패드의 수명결정", 한국자동차공학회 '98 춘계학술대회 Vol. II, pp. 775-780, 1998.