

고무류 기계부품 통합설계시스템 개발[§]

우창수^{*†} · 김완두^{*} · 김영길^{**} · 신외기^{***} · 이성훈^{****}
* 한국기계연구원, ** (주)대흥알엔티, *** (주)파브코, **** 현대-기아자동차

Development of Integrated Design System for Mechanical Rubber Components

Chang Su Woo^{*}, Wan Doo Kim^{*}, Young Gil Kim^{**}, Wae Gi Shin^{***} and Seong Hoon Lee^{****}

^{*} Dept. of Nano Mechanics, Korea Institute of Machinery & Materials,

^{**} Daeheung R&T Ltd., ^{***} PAVCO Ltd., ^{****} Hyundai-Kia Motors

(Received March 9, 2010 ; Revised May 11, 2010 ; Accepted May 12, 2010)

Key Words : Rubber Component(고무부품), Mechanical Property(기계물성), Finite Element Analysis(유한요소해석), Fatigue test(피로시험), Integrated Design(통합설계), Database(데이터베이스)

초록: 고무부품의 신뢰성을 확보하기 위해서는 피로수명예측 및 평가기술 개발이 중요하다 하겠다. 최근에 고무부품에 대한 고성능, 고신뢰성을 위해 설계, 해석 및 평가기술이 요구되고 있으나, 지금까지는 경험과 시행착오적인 방법으로 개발되고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 고무소재에 대해 배합조건, 기계적 특성, 열화 및 피로수명 등을 포함하는 고무소재 물성 데이터베이스를 구축하고, 고무부품의 특성해석 결과를 데이터베이스와 연계하여 고무부품의 피로해석 모델을 개발하였으며, 실제 피로시험 결과를 통하여 개발된 모델의 타당성을 검증하였다.

Abstract: Fatigue analysis and lifetime evaluation are very important in design procedure for assuring the safety and reliability of rubber components for mechanical systems. Till recently, the technology for the design, analysis, and evaluation of rubber products was required to manufacture rubber products with high quality, fidelity, and reliability. However, in the rubber-manufacturing companies in Korea, the processes of compound mixing, manufacturing of rubber products, and improvement of rubber properties are based on the trial-and-error method and experience. The objectives of this study are to establish methods for testing rubber materials, to develop a database of the properties of rubber materials, to evaluate the performance of rubber components, and to develop a system for predicting fatigue life. A method to predict fatigue-life of rubber components was proposed; in this method, the finite-element analysis and fatigue damage parameter as determined from a fatigue test are incorporated.

1. 서 론

최근 일류화를 지향하는 선진제품의 경우, 기본적인 기능 외에 저 진동, 저 소음화 및 작동감 향상 등을 통한 고 품질, 고 신뢰성 달성을 위해 자동차를 비롯한 대부분 기계제품에 고무류 부품의 사용이 날로 증가하고 있는 추세이며, 고무부품에 대한 해석 및 설계기술이 요구되고 있다.⁽¹⁾ 또한, 자동차의 품질 및 내구성 보증에 대한 관심이 높아짐에 따라 자동차 각 기능의 요소부품으로 가장 중요한 방진고무부품의 내구성 및 신뢰성

향상을 위한 기술개발이 요구되고 있다.⁽²⁾ 그러나 지금까지 고무부품 개발은 소재의 특수한 성질로 인해 경험과 시행착오적인 방법으로 개발되고 있어 설계 및 해석기술을 비롯하여 성능평가의 모든 면에서 매우 취약한 상태이다. 특히, 고무소재의 기계적 물성데이터들은 고무 컴파운드 구성 성분이 너무 많아 실험을 통해서만 가능하기 때문에 물성 데이터베이스를 구축하는 것은 매우 어려운 실정이며, 피로수명예측 및 평가기술은 인력 및 기술부족으로 큰 애로를 겪고 있다.⁽³⁾

따라서, 본 논문에서는 자동차용 방진고무소재에 대해 배합조건, 기계적 특성, 열화, 피로수명 등을 포함한 고무소재 물성 데이터베이스를 구축하고 고무부품의 특성해석 결과를 데이터베이스와 연계하여 고무부품의 피로 해석 모델을 개발하고 피로수명시험 결과를 통하여 개발된 모델을 검증

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2010. 3. 4.-5., 서울대) 발표논문임.

† Corresponding Author, cswoo@kimm.re.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

하였다. 이상의 모든 사항을 통합한 고무부품 설계, 해석시스템을 개발하였으며, 이를 이용하면 고무부품 개발에 소요되는 시간과 경비를 절감하고 제품의 신뢰성을 향상시키리라 기대된다.

2. 고무부품 통합설계시스템

2.1 시스템 구성

고무소재는 제조과정에서 배합성분 및 함량조건이 다양하고 재현성이 확보되지 못하기 때문에 아직까지 표준화된 물성이 자리 잡지 못하고 있다. 고무류 기계부품은 자동차, 철도차량뿐 만 아니라 미래산업 분야인 반도체, 정보통신 등 전 산업분야에 널리 활용되며, 동 부품의 특성평가 및 설계기술 확보를 통한 성능향상은 곧 전체 기계 및 시스템의 기술 고도화에 꼭 필요한 핵심 기술이라 할 수 있겠다.

최근 들어, 컴퓨터의 대형화 및 고속화에 따라 유한요소법을 이용한 비선형 해석을 통하여 고무부품의 거동을 해석하는 것이 가능해짐에 따라 고무부품의 설계에 체계적이고 분석적인 방법을 이용할 수 있게 되었다.⁽⁴⁾

본 논문에서는 Fig. 1 에서와 같이 배합조건에 따른 고무소재 물성 데이터베이스(Database)를 구축하고, 고무부품의 특성해석 결과를 데이터베이스와 연계하여 고무부품의 피로해석모델을 개발하고 피로수명시험 결과를 통하여 개발된 모델의 타당성을 검증하였다. 이상의 모든 사항을 통합한 설계시스템(RubDAS ; Rubber components Design & Analysis System)을 개발하였으며, 이를 이용하면 고무류 기계부품 개발에 소요되는 시간과 경비를 절감하고 개발된 제품의 품질 고도화를 꾀 하리라 기대된다.

고무류 기계부품 통합설계시스템은 고무부품의 체계적인 설계, 해석을 수행하기 위해 개발된 시스템으로 Fig. 2 에서와 같이 고무 배합설계 프로그램(RubCOM : Rubber Compound), 물성 데이터베이스 프로그램(RubPRO : Rubber Property), 고무부품 피로수명평가 프로그램(RubFAT: Rubber Fatigue)으로 구성되어있다. 본 시스템은 구성에서 알 수 있듯이 고무 배합설계, 고무 물성시험에 의한 재료상수 결정, 고무부품의 강성 및 치수설계, 유한요소 해석을 통한 부품설계와 고무부품의 내구성능평가 등 고무소재의 배합에서부터 고무 부품의 수명평가에 이르기까지 고무부품 설계에 필요한 전 과정을 포함한 통합적인 고무부품의 설계, 해석시스템이다.



Fig. 1 Integrated design system for rubber components



Fig. 2 Rubber component design and analysis system

2.2 고무 배합설계 프로그램

고무소재에 대한 배합설계 및 물성데이터베이스 구축은 각 업체마다 요구되는 물성이 다양하고, 고무 컴파운드(compound)의 구성 성분이 너무 많아서 많은 실험을 통해서만 가능하기 때문에 아직 공개된 바가 없다. 또한 고무제품을 사용하는 업체들도 명확히 표준화된 물성에 근거하여 고무제품을 선택하기보다는 고무부품 제조회사의 실험평가 결과에 의존하는 실정이다.

외국에서는 영국의 MRPR(Malaysian Rubber Producers Association) 소프트웨어(software)를 시판하고 있으나 지극히 제한적인 물성에 국한되어 있고, 고가이기 때문에 국내의 고무업체가 이용하기는 어려움이 많다. 따라서 고무소재 물성 데이터베이스가 구축된다면 국내의 독자적인 물성 예측 소프트웨어 개발과 물성 표준화가 이루어질 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 3 의 고무 배합설계 프로그램(RubCOM)은 고무배합의 주요인자를 선정하고 인자들간의 교호

작용이 고무 물성에 미치는 영향을 파악하여 여러 가지 물성을 나타내는 특성 식을 도출하였다.

본 논문에서는 천연고무 폴리머 베이스(natural rubber polymer base)에서 카본 블랙(carbon black), 황(sulfur), 가황촉진제(NS)와 활성제인 산화아연(ZnO)과 스테아린산(stearic acid) 등의 양을 변화시키며 실험을 하여 이 재료들이 고무 컴파운드의 물성에 어떤 영향을 미치는가를 파악하고 통계적 데이터 분석을 통하여 각 인자에 따른 물성변화를 정량적으로 예측할 수 있는 관계 식을 유도하였다. 관계식 유도를 위하여 5 인자(카본 블랙, 황, 가황촉진제, 산화아연, 스테아린산)의 함량을 5 수준으로 고무물성을 구하였고, 이를 근거로 통계분석을 통한 회귀계수와 각 인자의 영향을 검토하였다.

구해진 특성 회귀식은 R-square 에 의해 모형의 타당성을 검토하였으며, R-square 값이 1 에 가까울수록 정도가 좋은 회귀식이 된다.

실험과의 재현성 및 신뢰성을 향상시키기 위해 반복적으로 시험하였으며, 주요 인자 외에 기타 원인들의 영향을 배제하기 위하여 실험 순서를 임의로 정하였다. 이러한 데이터와 특성 회귀식을 기반으로 배합설계 프로그램을 개발하였다.

2.3 고무물성 데이터베이스 프로그램

고무와 같은 초 탄성체 모델의 유한요소해석을 위해서는 정확한 물성을 찾아내는 것이 매우 중요하다. 이 때 필요한 시험은 정 특성시험, 동 특성시험, 마찰시험 등이 있다. 정 특성시험으로는 단순인장, 단순압축, 순수전단시험 등이 주로 수행

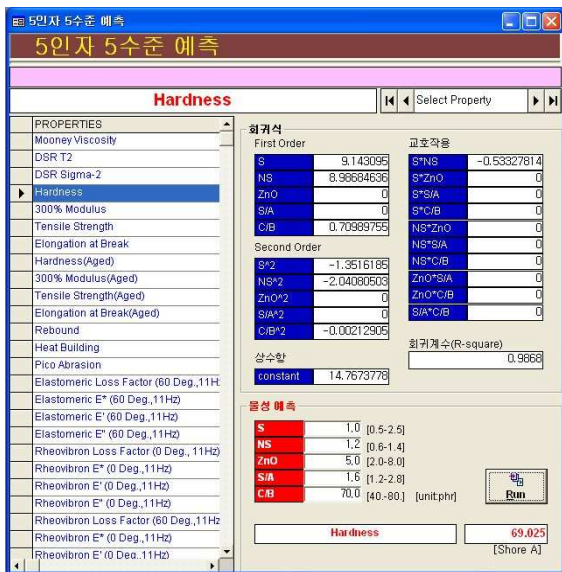


Fig. 3 Rubber compound design program

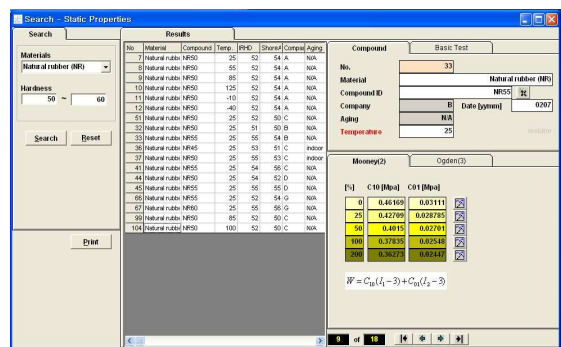
되고 있다. 기존의 단순인장시험만으로 고무재료의 물성을 구하게 되면 유한요소해석에 있어 자칫 오류를 범할 수 있다. 또한, 고무는 환경에 따라 물성이 변하기 때문에 상온뿐만 아니라 고온 및 저온에서도 시험을 수행할 필요가 있다. 특히 고온에서는 긴 시간 노출될 경우 노화에 의한 경도 증가도 물성시험에서는 중요한 문제가 되며 또한, 기계적 환경 즉, 최대변형률 수준과 반복하중을 고려하여 실험하여야 한다.

고무물성 데이터베이스 프로그램(RubPRO)은 유한요소해석에 앞서 다양한 환경에서 고무물성을 구하는 프로그램으로, 본 프로그램에서는 상온, 고온, 저온 환경에서뿐 만 아니라 기계적 환경변화에 따른 정 특성시험 결과와 동 특성시험 결과, 마찰시험 결과가 데이터베이스로 구축되어 있으며 이를 이용하여 새로운 고무부품을 설계할 때 필요한 재료의 물성을 쉽게 구할 수 있다.

Fig. 4(a)는 고무물성 프로그램의 초기 화면으로 정 특성(static), 동 특성(dynamic), 마찰특성(friction), 노화특성(aging), 피로특성(fatigue)에 대한 데이터베이스로 구성되어 있으며, 정 특성에는 비선형 재료상수 커브 피팅(curve fitting) 프로그램을 포함



(a) RubCOM program



(b) Database of static properties

Fig. 4 Rubber properties program and database

하고 있다. Fig. 4(b)는 정 특성 데이터베이스 화면을 나타낸 것으로 시편 및 시험조건과 기본물성인 경도, 인장강도, 신율, 모듈러스 등이 있으며, 비선형 재료상수로는 무니-리블린(Mooney-Rivlin) 2 항 상수와 오그덴(Ogden) 3 항 상수가 포함되어 있다. 동 특성 데이터베이스에는 시편형상과 기본물성인 경도와 동 특성시험 조건 및 동 특성계수인 저장 스프링상수, 손실계수 데이터가 있으며, 이를 바탕으로 저장 탄성계수와 손실 탄성계수를 구할 수 있다. 마찰 특성 데이터베이스는 고무종류, 경도, 윤활조건, 회전속도, 마찰 구 직경, 고무판 두께, 수직하중 변화에 따른 마찰계수(최소-최대값)를 측정하여 마찰 특성 데이터베이스를 구축하였으며 사용자는 고무종류, 경도, 윤활조건에 따라 원하는 데이터를 검색할 수 있게 되어 있으며, 현재 약 100 여개의 마찰 특성 데이터가 구축되어 있다.

2.4 고무부품 피로수명예측 프로그램

Fig. 5 는 고무부품의 피로수명예측 절차를 나타낸 것으로, 개발하려는 고무부품의 재료 물성시험 결과를 이용하여 부품의 유한요소해석을 수행하고 취약부위에서의 최대변형률을 구한 다음에 부품과 같은 물성을 갖는 고무시편에 대해 피로시험을 수행하여 최대변형률과 피로수명과의 관계로부터 적절한 피로손상변수를 규명한 후, 고무부품의 해석결과와 고무시편의 피로시험결과를 이용하면 고무부품의 피로수명을 예측, 평가할 수 있다.

고무부품의 피로수명을 예측하기 위해서는 동일한 고무소재에 대한 피로수명선도가 있어야 하기 때문에 고무소재의 피로수명을 평가하기 위해 본 논문에서는 Fig. 6(a)와 같이 고무부품의 피로하중에 의한 최대인장 변형률을 재현할 수 있는 3 차원 피로시편을 제작하여 피로시험을 수행하였다.

Fig. 6(b)는 시편의 최대변형률 발생부위에서의 그린-라그랑지(Green-Lagrange) 변형률을 나타낸 것으로 피로시편 및 고무부품의 피로수명을 예측하고 평가하는데 활용하였다.

다양한 조건에서의 피로시험 결과를 이용하여 진폭, 평균변위, 최대인장변위를 변수로 하여 피로수명과의 상관관계를 검토한 결과, 최대인장변위가 같으면 평균변위와 진폭에 상관없이 피로수명은 비슷하게 나타났으며, Fig. 7(a)에서와 같이 최대인장변위가 클수록 피로수명은 감소하였다. 따라서, 최대 인장변위를 피로 손상변수로 하면 시험조건에 상관없이 피로수명을 잘 표현 할 수 있음

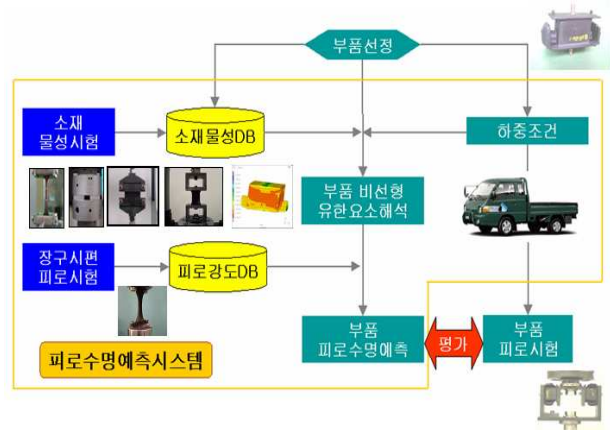
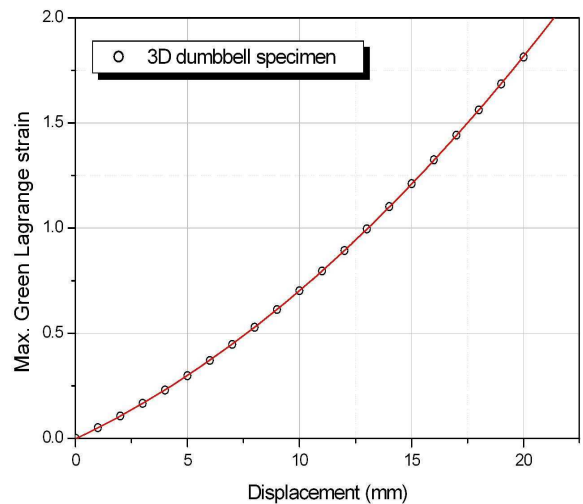


Fig. 5 Fatigue lifetime prediction system



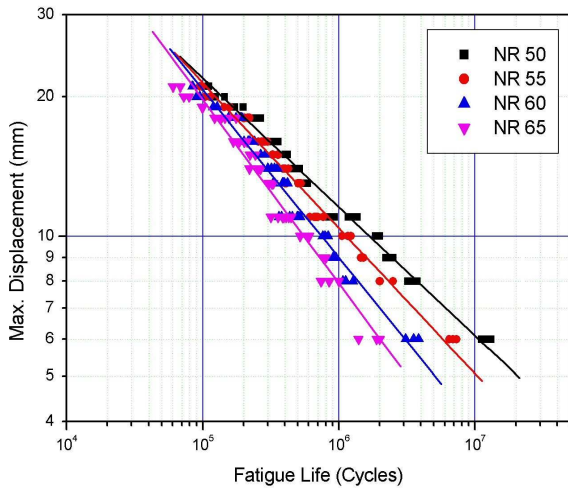
(a) 3 dimensional dumbbell specimen



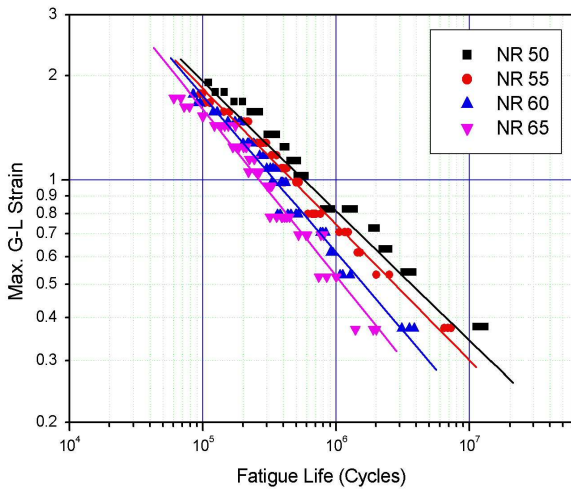
(b) Displacement and strain curve of specimen

Fig. 6 Specimen of fatigue test

을 알았다. 또한 시편에 대한 해석결과인 최대인장변위와 그린-라그랑지 변형률과의 관계를 이용하여 Fig. 7(b)에서와 같이 그린-라그랑지 변형률과 피로수명과의 관계선도를 얻을 수 있었다.



(a) Displacement and fatigue life



(b) Green-Lagrange strain and fatigue life

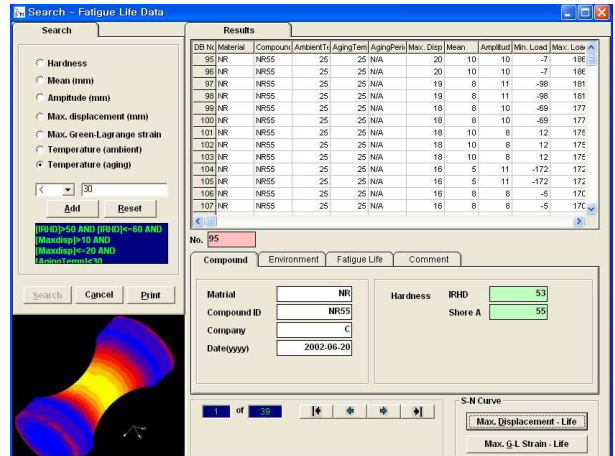
Fig. 7 Fatigue life curves of 3D dumbbell specimen

그림에서와 같이 최대인장변위를 최대 그린-라그랑지 변형률로 잘 표현할 수 있음을 알았으며 변형률에 따른 피로수명을 예측할 수 있었다.

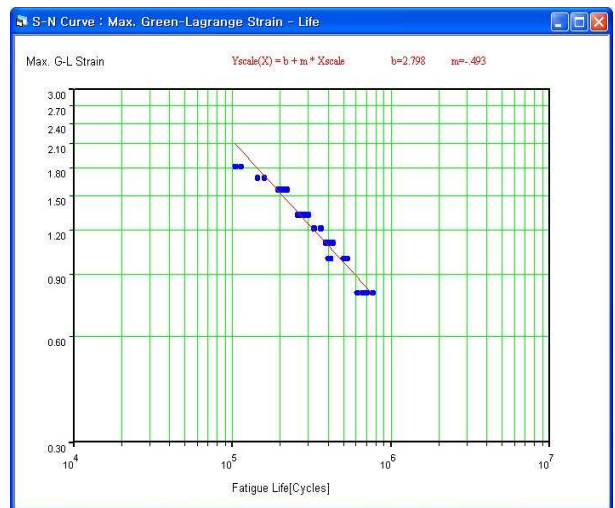
피로특성 데이터베이스는 Fig. 8(a)에서와 같이 경도, 피로시험조건, 피로수명, 노화조건 등이 포함 되어 있으며 사용자는 경도, 평균변위, 진폭, 최대변위, 최대 그린-라그랑지 변형률 범위를 지정하여 다중 검색조건을 설정한 후 원하는 데이터를 찾을 수 있다. 검색된 데이터에 대해서는 Fig. 8(b)와 같이 최대변위 및 최대 그린-라그랑지 변형률에 대한 피로수명선도를 구할 수 있다.

2.5 고무부품 피로수명평가

본 논문에서 제안한 고무부품의 피로수명예측 방법의 타당성을 검증하기 위해 자동차 엔진마운

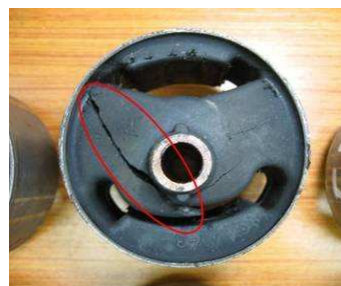


(a) Fatigue program

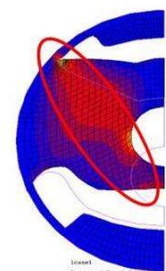


(b) Green-Lagrange strain and fatigue life

Fig. 8 Rubber fatigue program and fatigue life curve



(a) Fatigue test



(b) FEM analysis

Fig. 9 Fatigue failure and FEM analysis of rubber mount

트에 사용되는 방진고무부품에 대해 피로수명을 평가하였다. 대부분의 피로균열은 Fig. 9 에서와 같이 해석에서 최대변형률이 발생하는 부위에서 발생하여 해석과 시험결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

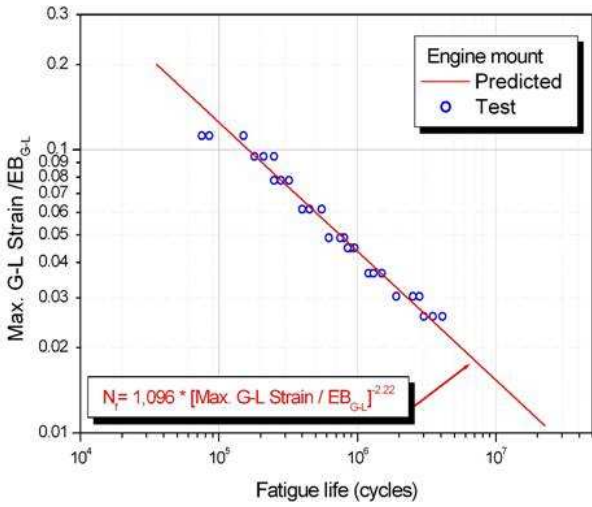


Fig. 10 Fatigue lifetime evaluation of rubber mount

고무시편에 대한 피로수명 예측 식을 이용하여 예측된 수명과 실제 고무부품에 대한 피로시험을 통해 얻어진 피로수명과의 관계를 Fig. 10 에 나타내었다. 그림에서와 같이 엔진마운트용 고무부품에 대한 예측된 피로수명은 실제 수명과 비교적 정확하게 예측됨을 확인할 수 있어 본 연구에서 제안한 고무부품 수명평가방법의 타당성을 검증하였다.

3. 결론

자동차용 방진고무부품 통합설계시스템 개발을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 설계 초기단계에서 짧은 기간에 비교적 정확하게 고무부품의 피로수명을 예측하고 평가할 수 있는 방법을 제안하였다.
- (2) 방진고무소재에 대해 배합조건, 기계적 특성, 열화, 피로수명 등을 포함한 고무소재물성 데이터 베이스를 구축하였다.

(3) 다양한 시험조건에서 3 차원 시편에 대해 피로 시험을 수행하여 고무소재, 평균변위, 진폭변화에 따른 피로수명을 파악하였으며, 최대인장 변위와 최대변형률을 피로손상변수로 하여 피로 수명예측식을 도출하였다.

(4) 개발된 방법을 통해 자동차 방진고무부품에 대해 피로수명을 평가한 결과, 비교적 정확하게 예측되어 피로수명평가 방법의 타당성을 검증하였다.

(5) 개발된 고무부품 통합설계시스템을 이용하면 고무부품 개발에 소요되는 시간과 경비를 절감하고 제품의 신뢰성을 향상시키리라 기대된다.

후 기

본 논문은 지식경제부에서 시행한 “부품소재기술개발사업” 연구결과의 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Charlton, D. J. and Yang, J., 1993, "A Review of Methods to Characterize Rubber Elastic Behavior for Use in Finite Element Analysis," *Rubber Chemistry & Technology*, Vol. 67, pp. 481~503.
- (2) Fatemi, and Yang, 1998, "Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories," *Int'l Journal of fatigue*, Vol. 20, No. 1, pp. 9~34.
- (3) Takeuchi, K. and Nakagawa, M., 1993, "Fatigue Test Technique of Rubber Materials for Vibration insulators and their evaluation," *Int'l Polymer Science & Technology*, Vol. 20, No. 10, pp. 64~69.
- (4) Kim, W. D. and Kim, D. J., 2003, "A Study on the Equibiaxial Tension Test of Rubber Material," *KSAE*, Vol. 11, No. 65, pp. 95~104.
- (5) Mullins, L., 1969, "Softening of Rubber by Deformation," *Rubber Chemistry & Technology*, Vol. 42, pp. 339~362.