Elastomers and Composites
Vol. 55, No. 2, pp. 81~87 (June 2020)

Print ISSN 2092-9676/Online ISSN 2288-7725
DOI: https://doi.org/10.7473/EC.2020.55.2.81

# Service Life Prediction of Rubber Bushing for Tracked Vehicles

**Chang-Su Woo†, In-Sug Kang*, and Kang-Suk Lee***

*Department of Nano Applied Mechanics, Korea Institute of Machinery & Materials 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34103, Republic of Korea*
**Polymer Part/Manufacturing Technology Center R&D Division, LS Mtron Ltd. 124 Gongdanno, Gunpo-Si, Gyeonggi-do 15847, Republic of Korea*

(Received March 24, 2020, Revised April 28, 2020, Accepted May 6, 2020)

**Abstract:** Service life prediction and evaluation of rubber components is the foundational technology necessary for securing the safety and reliability of the product and to ensure an optimum design. Even though the domestic industry has recognized the importance thereof, technology for a systematic design and analysis of the same has not yet been established. In order to develop this technology, identifying the fatigue damage parameters that affect service life is imperative. Most anti-vibration rubber components had been damaged by repeated load and aging. Hence, the evaluation of the fatigue characteristics is indispensable. Therefore, in this paper, we propose a method that can predict the service life of rubber components relatively accurately in a short period of time. This method works even in the initial designing stage. We followed the service life prediction procedure of the proposed rubber components. The weak part of the rubber and the maximum strain were analyzed using finite element analysis of the rubber bushing for the tracked vehicles. In order to predict the service life of the rubber components that were in storage for a certain period of time, the fatigue test was performed on the three-dimensional dumbbell specimen, based on the results obtained by the rubber material acceleration test. The service life formula of the rubber bushing for tracked vehicles was derived using both finite element analysis and the fatigue test. The service life of the rubber bushing for tracked vehicles was estimated to be about 1.7 million cycles at room temperature (initial stage) and about 400,000 cycles when kept in storage for 3 years. Through this paper, the service life for various rubber parts is expected be predicted and evaluated. This will contribute to improving the durability and reliability of rubber components.

**Keywords:** rubber bushing, tracked vehicles, finite element analysis, maximum strain, fatigue test, service life

## Introduction

최근, 국내외적으로 각종 제품에 대한 품질 및 내구성 보증에 대한 요구가 높아짐에 따라 신뢰성 확보에 어려움을 겪어왔던 고무부품에 대한 내구성 및 사용수명에 대한 높은 관심을 보이고 있다.[1,2] 특히, 자동차 및 무한궤도차량용 고무부품들은 주행 중 반복하중에 의한 피로손상이 발생될 수 있는 부품으로 장기 운용에 따른 사용 보증에 대한 판단 근거가 미흡하기 때문에 안전성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 개발 초기에 피로 내구수명을 예측하고 평가할 수 있는 기술 개발이 요구되고 있다.[3,4]

고무부품에 대한 피로 내구수명평가기술은 제품의 신뢰성을 확보하고 최적설계를 하기 위한 기반 기술로, 국내 관련 산업계에서는 이의 중요성을 인식하고는 있으나 아직까지 체계적인 피로 내구수명예측 및 평가기술이 확립되어 있지 못한 실정이다. 이를 위해서는 무엇보다도 피로수명에 영향을 주는 피로손상변수의 규명이 시급하다 하겠다.

대부분의 방진고무부품은 반복하중과 노화에 의한 손상을 받는 대표적인 부품이므로 피로 내구특성 평가가 반드시 요구된다. 따라서 본 연구에서는 설계 초기단계에서 짧은 기간에 비교적 정확하게 고무부품의 피로수명을 예측할 수 있는 방법을 통하여 Figure 1과 같은 무한궤도차량용 고무 부시의 사용수명을 예측하고 평가하였다.

제안된 고무부품 피로수명예측 절차에 따라 무한궤도차량용 고무 부시에 대한 유한요소 해석과 피로시험을 통해 취약 및 파손부위를 파악한 결과, 해석에서 최대 변형률이 발생하는 부위와 실제 파손부위가 일치하는 것으로 해석결과의 정확성을 확인하였다. 또한, 사용하지 않고 일정기간 보관한 상태에서의 고무 부시의 피로수명을 예측하기 위해 고무소재 가속시험을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 3차원 덤벨형 시편[5]에 대해 피로시험을 수행하여 최대 변형률과 피로수명과의 관계식을 도출하였다. 도출된 피로수명예측식과 해석에서 얻어진 최대 변형률을 이용하면 무한궤도차량용 고무 부시의 사

†Corresponding author E-mail: cswoo@kimm.re.kr

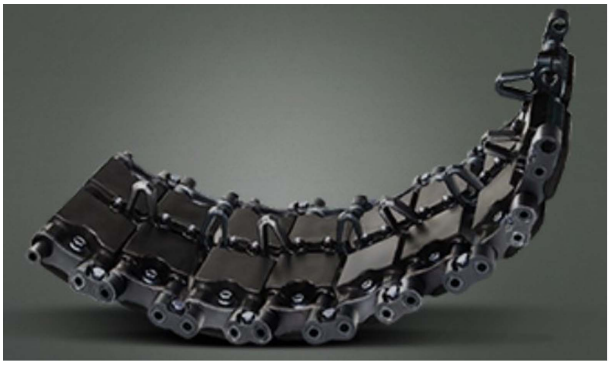


**Figure 1.** Rubber bushing for tracked vehicles.

용수명은 상온상태(초기상태)에서는 약 170만회, 3년 보관상태에서는 약 40만회, 5년 보관한 상태에서는 약 22만회로 예측되었다.

본 연구를 통해 제안된 고무부품 사용수명예측 및 평가방법을 이용하면 반복하중을 받는 다양한 고무부품에 대한 사용수명이 개발초기에 예측 가능하여 고무부품의 사용기간에 대한 판단기준 및 신뢰성 확보에 크게 기여하리라 기대된다.

## Experimental

### 1. 고무소재 물성시험

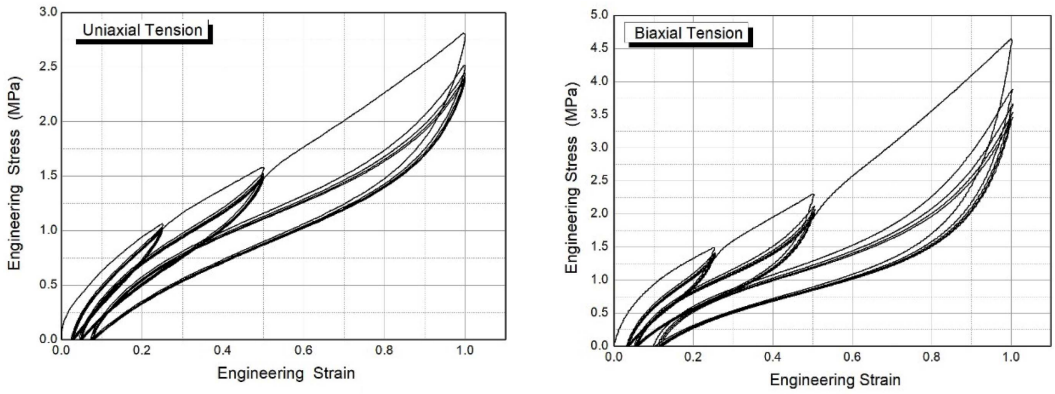
대부분의 고무부품들은 반복하중과 환경적인 노화[6]에 의한 피로손상 누적으로 수명을 다하게 되므로 고무소재의 물성을 정확하게 파악하기 위해서는 여러 가지 하중상태 및 다양한 환경조건에서 물성시험이 수행되어야 한다. 또한, 고무부품의 유한요소 해석에 필수적인 물성은 그 값의 변화에 따라 해석결과에 큰 차이를 나타내게 되어 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 제품과 동일한 성분 및 조건으로 제작된 시편에 대한 물성시험을 통한 물성확보가 필수적이다 하겠다. 고무소재의 물성은 변형률 에너지함수(Strain energy function)의 계수로 표현되는데 이 계수들은 여러 가지 다른 하중 상태에서의 물성시험을 통하여 구해진 응력과 변형률 데이터를 변형률 에너지함수로부터 유도된 응력-변형률 곡선으로 피팅하여 시험값과 계산 값의 차이를 최소화하여 결정된다.[7]

고무소재의 물성을 보다 정확하게 구하기 위해서는 단축 인장, 단축 압축, 순수 전단 또는 단순 전단, 등 이축 인장시험 등 다양한 하중 상태에서의 시험을 통하여 물성을 확보하는 것이 필요하나, 본 연구에서는 무한궤도차량용 고무 부시에 사용되는 고무소재에 대해 Figure 2와 같이 단축 인장시험과 원형 타입의 등 이축 인장시편을 방사방향으로 신장시켜 이축 응력과 이축 변형률을 측정할 수 있는 시험장치를 이용하여 시험속도 100 mm/min로 변형률 25%, 50%, 100% 범위에서 5회 반복시험한 결과를 Figure 3에 나타내었다. Figure 3에서와 같이 시험 반복횟수와 변형률이 증가할수록 응력이 완화되는 뮬린스 효과(Mullins effect)와 히스테리시스(Hysteresis) 특성[8]이 나타났으며, 시험을 통해 얻어진 응력과 변형률 데이터를 각 변형률에서 안정화된 마지막 응력-변형률 선도를 탄성이론을 통해 원점으로 이동시킨 결과를 Figure 4에 나타내었다.

단축 인장시험과 등 이축 인장시험을 통해 얻어진 응력-변형률 데이터를 변형률 에너지함수로 구해진 응력-변형률의 관계식을 이용하여 Table 1과 같이 변형률 범위에 따른 무니-리블린(Mooney-Rivlin) 2항과 오그덴(Ogden) 3항의 재료상수를 결정하여 무한궤도차량용 고무 부시의 특성해석 물성으로 활용하였다. 일반적으로 오그덴 3항을 이용한 커브 피팅이 시험결과를 잘 표현함을 알 수 있었는데 이는 오그덴 모델의 응력-변형률 관계에서 연신율의 지수가 실수 값이므로 그 지수가 정수 값을 가지는 무니-리블린 모델에 비해 곡선 묘사에 유연성을 갖고 있기 때문이다.[9] 이러한 이유 때문에 오그덴 모

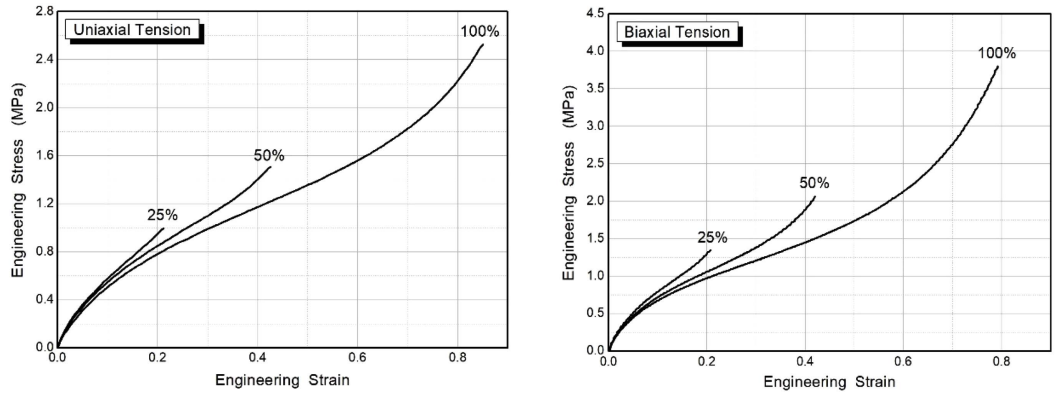
(a) Uniaxial tension test (b) Equi- biaxial tension test

**Figure 2.** Mechanical test of rubber material.




(b) Uniaxial tension (b) Equi-biaxial tension

**Figure 3.** Stress-strain curves of rubber material.




(b) Uniaxial tension (b) Equi-biaxial tension

**Figure 4.** Stress-strain curves moved to origin.

델은 고무부품 해석물성으로 많이 사용되고 있으며 단순 인장의 경우 500%의 변형률까지도 잘 맞으며 미소한 압축성 재료에 대해서도 비교적 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

Table 1에서와 같이 변형률 범위에 따라 비선형 재료상수 값이 달라짐을 알 수 있었으며 재료상수 값들의 정량적 비교를 위해 식 (1)과 식 (2)의 전단계수(Shear modulus, G)를 이용하여 무니-리블린과 오그덴의 강성을 비교 하였다. 표에서 보는 바와 같이 변형률에 따른 무니-리블린과 오그덴으로 구한 전단계수는 거의 유사하게 나타났으며 또한, 변형률 범위가 클수록 강성이 낮아짐을 알 수 있었다.

$$G_{Mooney}=2(C_{01}+C_{10}) \quad (1)$$

$$G_{ogden}=\Sigma_{i=1}^{n}\frac{\mu_i\alpha_i}{2} \quad (2)$$

## 2. 고무소재 피로시험

고무부품의 피로수명을 예측하고 평가하기 위해서는 부품과 동일한 고무소재의 피로수명 선도가 있어야 하므로 본 연구에서는 반복하중에 의한 인장과 압축 변형을 재현할 수 있는 피로시편을 제작하여 무한궤도차량용 고무 부시의 내구 피로수명을 예측하고 평가하는데 이용하였다. 피로시편의 형상은 Figure 5(a)에서와 같이 양단에 금속편을 가황하여 접착시킨 3차원 덤벨형으로 반복하중에 의한 이완이 발생되지 않고

**Table 1.** Non-linear coefficient of rubber material

| Stain | Mooney-Rivlin | | | Ogden | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C10 | C01 | Gmooney | μ1 | α1 | μ2 | α2 | μ3 | α3 | Gogden |
| 25% | 0.859 | 0.0 | 1.718 | 0.0001 | 2.285 | 0.905 | 3.867 | 0.0002 | 0.289 | 1.749 |
| 50% | 0.733 | 0.0 | 1.466 | 4.0530 | 3.2E-6 | 1.335 | 7.9E-7 | 1.012 | 2.885 | 1.459 |
| 100% | 0.664 | 0.0 | 1.352 | 11.724 | 0.009 | 6.7E-5 | 0.482 | 1.005 | 2.531 | 1.324 |

(a) 3-dimensional dumbbell specimen

(b) Displacement-strain curve

**Figure 5.** 3-dimensional dumbbell specimen.

인장과 압축변형이 가능하며 변형에 의한 변형률 분포가 비교적 완만하게 설계되었으며 최대 인장변형률 발생부위가 어떠한 변형에도 일정하게 발생되도록 중심부 형상은 타원형 단면으로 하였다. 피로 시편의 곡률반경은 시험 데이터의 산포를 줄이기 위해서는 치수가 큰 쪽이 바람직하지만 고무의 변형량과 변형률 범위를 고려하여 20 mm로 하였으며 장축의 지름은 14 mm, 단축의 지름은 10 mm의 타원 단면으로 제작하였다. 또한 피로시편은 프레스 금형에 의해 성형 제작되므로 금형 면에 파팅 라인이 있어 균열 발생의 원인이 된다. 따라서 파팅 라인과 최대 변형률 발생부위가 일치하지 않도록 단축에 파팅 라인이 위치하도록 하였다.

피로 시편에 발생하는 최대 변형률을 구하기 위해 유한요소 해석을 수행하였는데 3차원 모델로 유한요소 모형화 하였으며, 고무물성은 변형률 범위에 따른 물성시험을 통해 얻어진 비선형 재료상수를 이용하였다. Figure 5(b)는 피로시편에 최대 변형률이 발생하는 부위에서의 변위와 그린-라그랑지 변형률(Green-Lagrange strain)과의 관계를 나타낸 것으로 고무소재의 피로수명을 예측하는데 활용하였다.

## Results and Discussion

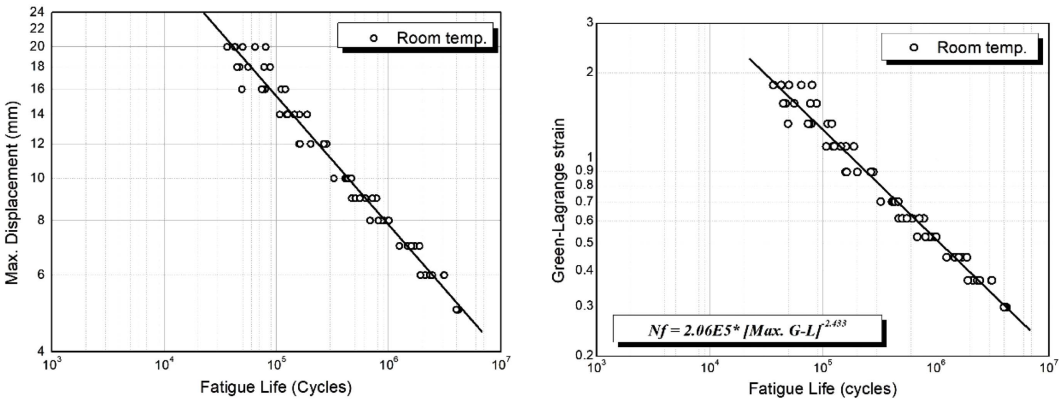
### 1. 고무소재 피로수명 예측

무한궤도차량용 고무 부시의 사용수명을 예측하기 위해 Figure 6(a)과 같이 변위제어 피로시험기를 이용하여 평균 변위와 진폭 등이 피로수명에 미치는 영향을 파악하고 적절한 피로손상변수를 규명하기 위해 3차원 덤벨형 시편에 대해 피로시험을 수행하였다. 변위제어 피로시험에는 유압이 아닌 전기모터를 이용하여 하중을 부여하도록 하였으며 수직운동을 전달하는 연결봉에 3개의 시편을 장착하여 각기 다른 평균 변위와 진폭을 손쉽게 부여하여 다양한 변위 조건에서 피로시험이 가능하도록 하였으며 Figure 6(b)에서와 같이 3차원 덤

(a) Displacement control fatigue tester

(b) Fatigue crack of 3-D dumbbell specimen

**Figure 6.** Fatigue test of 3-dimensional dumbbell specimen.




(a) Maximum displacement and fatigue life (b) Green-Lagrange strain and fatigue life

**Figure 7.** Fatigue life predict curves of rubber material.

벨형 시편에 균열이 발생하여 최대하중이 초기 하중의 80% 까지 감소하는 경우를 파손으로 간주하여 이때의 사이클 수를 피로수명으로 정의하였다. 시편에 대한 상온 피로시험은 평균 변위를 0, 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm로 다양하게 하였으며 인장 변위는 5 mm에서 20 mm로 다양하게 시험하여 인장 변위에 따른 피로수명을 검토하였다.

3차원 덤벨형 시편에 대한 피로시험 결과를 이용하여 Figure 7(a)과 같이 인장 변위와 피로수명과의 관계선도를 나타내면 진폭과 평균 변위에 상관없이 인장 변위가 클수록 피로수명은 감소함을 알 수 있었다. 또한, Figure 5(b)에서와 같이 3차원 덤벨형 시편에 대한 유한요소 해석을 통해 구해진 인장 변위와 그린-라그랑지 변형률 관계선도를 이용하면 Figure 7(b)와 같이 그린-라그랑지 변형률과 피로수명과의 관계선도로 잘 표현할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 고무 피로시험에서 정확한 응력을 결정하기 매우 어렵기 때문에 응력은 고무에서 피로손상 변수로 좀처럼 사용되지 않고 쉽게 측정될 수 있는 변위로부터 결정되어지는 변형률을 피로손상 변수로 활용하고 있는 일반적인 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 고무부품의 취약부위에서 발생되는 최대 변형률을 피로손상 변수로 하여 무한궤도차량용 부시 고무소재에 대해 식 (3)과 같이 피로수명 예측식을 도출하였다.

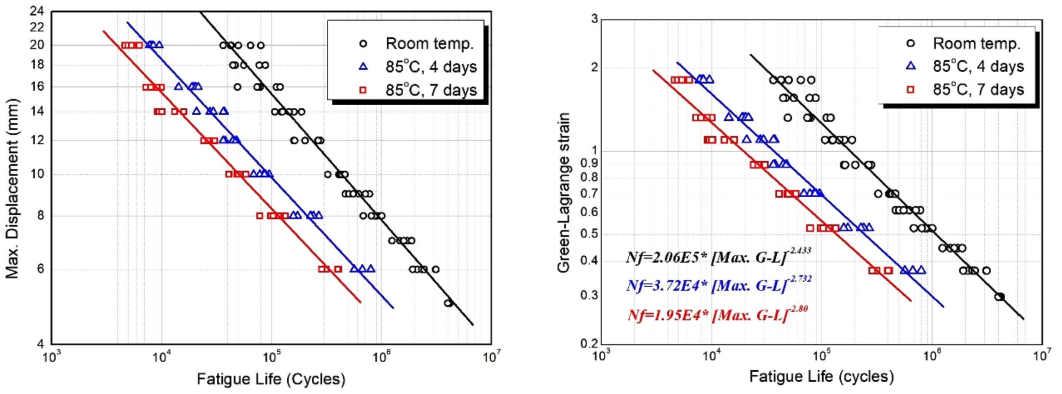
다음은 사용하지 않고 일정기간 보관한 상태에서의 무한궤도차량용 고무 부시의 피로수명을 예측하기 위해 고무소재 가속시험을 통한 얻은 결과를 바탕으로 상온에서 3년 보관한 상태와 같은 조건인 85°C에서 4.05일, 5년 보관한 상태는 85°C에서 6.75일 노화시키면 되기 때문에 3차원 덤벨형 시편을 환경챔버에 열 노화시킨 후 상온에서와 같은 조건으로 피로시험을 수행하였다. 시험결과는 Figure 8에서와 같이 상온보다 85°C에서 노화일수가 길수록 피로수명은 급격히 감소됨을 알 수 있었으며, 식 (4)와 식 (5)에서와 같이 그린-라그랑지 변형률과 피로수명과의 관계식으로 노화조건에 따른 무한궤도차량용 고무 부시의 피로수명예측 식을 도출하였다.

$$Nf\ (room) = 206{,}062\ [\varepsilon_{G\text{-}L.\ Strain}]^{-2.433} \quad (3)$$

$$Nf\ (3년) = 37{,}239\ [\varepsilon_{G\text{-}L.\ Strain}]^{-2.732} \quad (4)$$

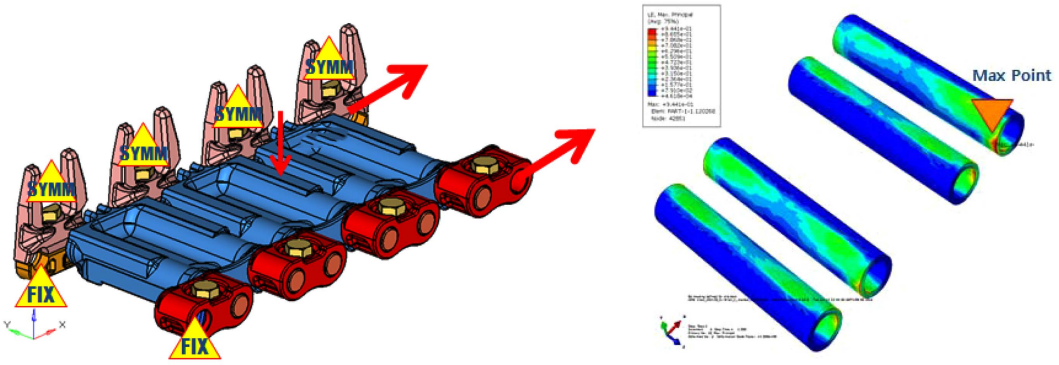
$$Nf\ (5년) = 19{,}498\ [\varepsilon_{G\text{-}L.\ Strain}]^{-2.800} \quad (5)$$

여기서, $\varepsilon_{G\text{-}L\ Strain}$ : Green-Lagrange strain




(a) Maximum displacement and fatigue life (b) Green-Lagrange strain and fatigue life

**Figure 8.** Fatigue life predict curves of rubber material.




(a) Finite element model of rubber bush (b) Green-Lagrange strain distribution

**Figure 9.** Finite element analysis of rubber bush for tracked vehicles.

**Figure 10.** Fatigue failure of rubber bush.

### 2. 무한궤도차량용 고무 부시 사용수명예측 및 평가

무한궤도차량용 고무 부시의 사용수명을 예측하고 평가하기 위해 고무 부시에 대한 유한요소해석을 수행하여 작용하중에 따른 최대 변형률을 파악하였다.[10] Figure 9(a)는 궤도 핀 고무 부시의 해석모델을 나타낸 것으로 수직하중 및 인장하중이 동시에 작용하는 것으로 하중을 부가하였으며, Figure 9(b)는 고무 부시의 변형률 분포를 나타낸 것으로 최대 그린-라그랑지 변형률은 끝단 부위에서 0.421이 발생하였다. Figure 10은 궤도 핀 고무 부시의 파손사례를 나타낸 것으로 유한요소 해석에서 최대 변형률이 발생하는 부위와 파손 부위가 일치하는 것으로 해석결과의 정확성을 확인하였다.

3차원 덤벨형 시편에 대한 피로시험을 통해 도출된 부시 고무소재의 피로수명예측식에 해석에서 얻어진 최대 그린-라그랑지 변형률을 대입하면 Table 2와 같이 상온에서의 피로수명은 약 170만회로 예측되었으며, 3년 보관한 상태에서는 약 40만회, 5년 보관한 상태에서는 약 22만회로 사용수명이 급격히 감소됨을 알 수 있었다.

무한궤도차량의 로드 프로파일(Load-profile)을 분석한 결과로 약 20~30 km/h의 야지주행으로 3,000 km 주행 시 소요되는 시간은 약 120시간으로, 2.5Hz를 기준으로 하면 3,000 km 주행 시 소요되는 사이클은 약 1,080,000회로 예상된다. 따라서, 고무 부시를 보관하지 않고 바로 적용하여 사용하면 약 4,000 km, 3년 보관 후 적용하면 약 1,000 km, 5년 보관 후 적용하면 약 550 km 정도 주행할 수 있음을 알 수 있었다.

## Conclusions

본 연구에서는 무한궤도차량용 고무 부시에 적용되는 고무소재에 대해 유한요소 해석에 필요한 비선형 재료상수를 결정하기 위해 단축 인장시험과 등 이축 인장시험을 수행하여 해석물성을 확보하였으며 3차원 덤벨형 시편에 대한 반복 피

**Table 2.** Service life of rubber bush for tracked vehicles

| Conditions | Fatigue life prediction | Service life (Cycles) | Driving distance (Km) |
|---|---|---|---|
| Room temp. | $Nf = 206{,}062\ [G\text{-}L.\ Strain]^{-2.433}$ | 1,690,397 | 4,000 |
| 3 years | $Nf = 37{,}239\ [G\text{-}L.\ Strain]^{-2.732}$ | 395,370 | 1,000 |
| 5 years | $Nf = 19{,}498\ [G\text{-}L.\ Strain]^{-2.800}$ | 219,808 | 550 |

로 내구시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 무한궤도차량용 고무 부시에 사용되는 고무소재에 대해 단축 인장시험과 등 이축 인장시험을 통해 얻어진 응력-변형률 데이터를 이용하여 변형률 25%, 50%, 100% 범위에 대한 무니-리블린(Mooney-Rivlin) 2항과 오그덴(Ogden) 3항의 비선형 재료상수를 도출하였다.

(2) 도출된 비선형 재료상수를 이용하여 고무 부시에 대한 유한요소 해석을 통해 특성과 취약부위에서의 최대 변형률 발생을 미리 파악할 수 있어 고무 부시의 설계 및 신뢰성 평가에 유용하게 활용될 수 있으리라 기대된다.

(3) 무한궤도차량용 고무 부시에 대해 설계 초기단계에서 사용수명을 예측할 수 있는 방법을 정립하였으며, 3차원 덤벨형 시편에 대한 피로시험을 통해 상온상태 및 3년 및 5년 보관된 상태에서의 피로수명예측 식을 도출하였다.

(4) 도출된 피로수명예측 식을 이용하여 궤도 핀 부시의 사용수명은 상온상태에서는 약 170 만회(약 4,000 km), 3년보관 상태에서는 약 40만회(1,000 km), 5년 보관된 상태에서는 약 22만회(550 km)로 예측되었다.

(5) 본 연구를 통해 무한궤도차량용 고무 부시에 대한 사용수명 예측 및 평가가 가능하여 장기운용 시의 내구연한에 대한 판단 근거와 평가기준 및 품질 신뢰성 확보에 크게 기여하리라 기대된다.

## Acknowledgments

본 연구는 LS엠트론 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

1. J. R. Beatty, “Fatigue of Rubber”, *Rubber Chemistry and Technology*, **37**, 5 (1964).
2. A. Samuel, Failure of Rubber Components under Fatigue, Ph. D thesis, Queen Mary University of London (2013).
3. C. S. Woo, H. S. Park, I. K. Sung, S. H. Yun and J. M. Lee, “Service Life Prediction of Marine Rubber Fender”, *Elastomer & Composites*, **54**, 1 (2019).
4. T. W. Kim, Y. J. Choi, N. Y. Kim and K. H. Chung, “A Study on the Fatigue Property of Magneto-Rheological Elastomers”, *Elastomer & Composites*, **53**, 3 (2018).
5. K. Takeuchi, M. Nakagawa, H. Yamaguchi and T. Okumoto, “Fatigue Test Technique of Rubber Materials for Vibration Insulators and Their Evaluation”, *Int. Polymer Science and Technology*, **20**, 10 (1993).
6. R. P. Brown, M. J. Forrest and G. Soulagent, “Long-Term and Accelerated Aging Tests on Rubbers”, John Wiley & Sons (1961).
7. O. H. Yeoh, “On the Ogedn Strain Energy Function,” *Rubber Chemistry and Technology*, 70 (1996).
8. L. Mullins, “Softening of Rubber by Deformation”, *Rubber Chemistry and Technology*, 42 (1969).
9. R. W. Ogden, “Non-Linear Elastic Deformation”, Dover Publications, INC., Mineola, New York (1984).
10. S. Hur and C. S. Woo, “FEA Simulation and Tests of Rubber Insulator for Truck Suspension,” *Elastomer and Composites*, **52**, 4 (2017).