

자동차 방진고무부품의 피로수명 예측 및 평가

우 창 수^{*1)} · 김 완 두¹⁾ · 권 재 도²⁾

한국기계연구원 구조연구부¹⁾ · 영남대학교 기계공학부²⁾

A Study on the Fatigue Life Prediction and Evaluation of Rubber Components for Automobile Vehicle

Changsu Woo^{*1)} · Wandoo Kim¹⁾ · Jaedo Kwon²⁾

¹⁾Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yusong-gu, Daejeon 305-343, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsbuk 712-749, Korea

(Received 14 March 2005 / Accepted 19 July 2005)

Abstract : The fatigue analysis and lifetime evaluation are very important in design procedure to assure the safety and reliability of the rubber components. Fatigue lifetime prediction methodology of the rubber component was proposed by incorporating the finite element analysis and fatigue damage parameter from fatigue test. Finite element analysis of 3D dumbbell specimen and rubber component were performed based on a hyper-elastic material model determined from material test. The Green-Lagrange strain at the critical location determined from the FEM was used for evaluating the fatigue damaged parameter of the natural rubber. Fatigue life of the rubber component are predicted by using the fatigue damage parameter at the critical location. Predicted fatigue lifes of the rubber component agreed fairly well the experimental fatigue lives.

Key words : Rubber material(고무재료), Fatigue life(피로수명), Material test(물성시험), Finite element analysis(유한요소해석), Fatigue test(피로시험), Green-Lagrange strain(그린-라그랑지 변형률)

1. 서론

최근 지구 온난화, 대기오염, 에너지자원 보존에 대한 관심이 증가되고, 환경규제가 강화됨에 따라 대체에너지 개발과 배기저감 기술, 연비향상 기술, 제품 수명 연장 기술 개발이 더욱 절실히 요구되고 있다.

현재 자동차의 사용 환경에 대한 규제가 강화되고 차량 및 부품의 점검기간과 보증기간 연장(10년 10만 마일)에 관한 소비자의 요구가 점차 높아짐에 따라 고무부품 업체에서는 차량 전체 및 부품의 내

구수명을 연장시키고 신뢰성을 향상시키기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다. 특히 방진고무부품은 차량 수명 동안 정숙성 및 승차감을 유지하고 부품의 보증기간을 확보하기 위하여 높은 내구성이 요구되고 있으나,¹⁾ 방진고무부품의 실차 내구 재현기술 부재와 내구수명 예측평가 기술 능력의 낙후로 신뢰성 있는 설계 및 평가가 어려운 실정이다.^{2,3)}

따라서 본 연구에서는 설계 초기단계에서도 정확하게 고무부품의 수명을 예측할 수 있는 피로수명 평가방법을 제안하였다.

Fig. 1은 방진고무부품의 피로수명 예측 절차를 나타낸 것으로, 선정된 고무재료의 물성시험결과를 이용하여 부품의 유한요소해석을 수행하고 취약부

*To whom correspondence should be addressed.
cswoo@kimm.re.kr

위에서의 최대변형률을 구한 다음에 부품과 같은 물성을 갖는 고무시편에 대해 피로시험을 수행하여 최대변형률과 피로수명과의 관계로부터 적절한 피로손상 변수를 규명한다. 마지막으로 유한요소 해석결과와 고무시편의 피로시험결과를 이용하면 고무부품의 피로수명을 예측 평가할 수 있다.

제안된 피로수명 예측 및 평가절차에 따라 방진 고무부품의 피로시험결과와 예측수명은 오차범위 2배 이내에서 비교적 정확하게 예측되어 본 연구에서 제안한 피로수명 예측의 타당성을 검증하였다.

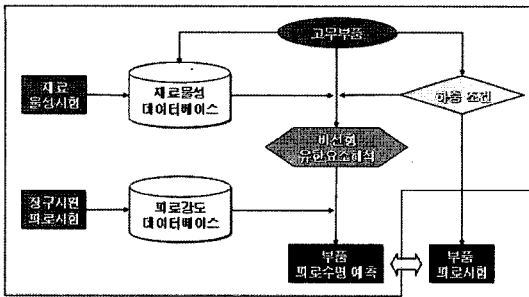


Fig. 1 Procedure of fatigue life prediction

2. 고무재료 물성시험 및 유한요소해석

2.1 고무재료 물성시험

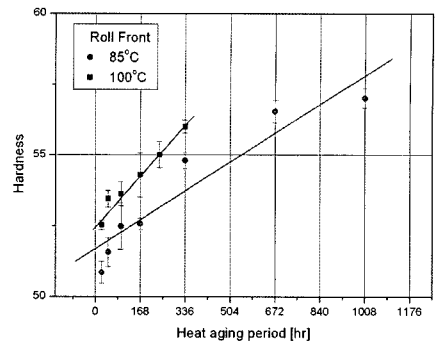
Table 1에서와 같이 방진고무부품에 사용되는 천연고무에 대해 상온 및 노화상태에서 물성시험을 수행하여 Fig. 2에서와 같이 경도, 신율, 인장강도 및 응력-변형률 등을 파악 하였다.

Fig. 2(d)는 단축인장, 순수전단, 이축인장시험⁴⁾을 통한 응력-변형률 선도를 나타낸 것으로 25%, 50%, 100% 변형률 범위에서 10회 반복 후의 곡선으로 낮은 변형률 범위에서는 큰 차이가 없었으나 변형률이 클수록 응력이 완화되는 Mullins 효과⁵⁾가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

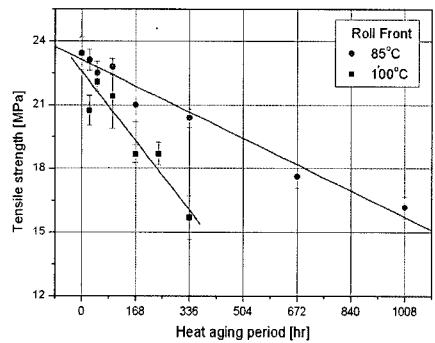
물성시험을 통해 얻어진 응력-변형률 데이터를 이용하여 Mooney-Rivlin과 Ogden 3항의 재료상수를 구하였다.

Table 1 Compound recipes investigated

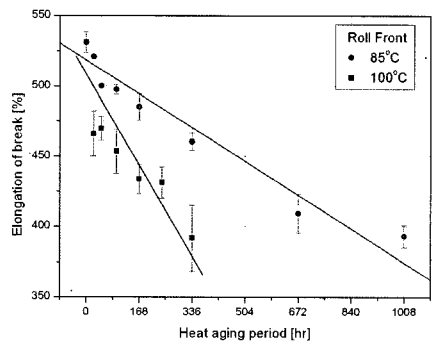
| SMR CV60 | C/B FEF | C/B SRF | S/A | ZnO | S |
|----------|---------|---------|-----|-----|-----|
| 100 | 40 | 20 | 1 | 5 | 1.8 |



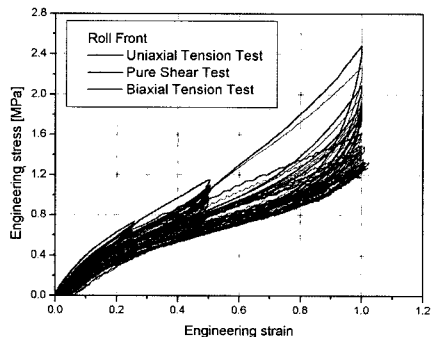
(a) Hardness



(b) Tensile strength



(c) Elongation



(d) Stress-strain curve

Fig. 2 Result of the material test for natural rubber

2.2 고무재료 노화수명

고분자 재료의 수명을 예측하기 위한 방법으로 식 (1)과 같이 온도의 영향이 고려된 아레니우스 관계식의 적용이다.⁶⁾

$$\ln K(T) = -\frac{E}{RT} + C \quad (1)$$

여기서 $K(T)$ 는 프로세스의 반응속도, E 는 반응 에너지, R 은 기체상수, T 는 절대온도, C 는 상수를 나타낸다. 이는 $1/T$ 에 대한 $\ln K(T)$ 의 선도는 기울기가 E/R 인 직선이다.

아레니우스 관계식은 일반적으로 온도의 영향으로 인하여 초기 값에 대해 일정한 비율의 특성 값에 도달하는 시간을 예측하는 데 자주 선택된다.

본 연구에서는 40%의 특성변화가 일어날 때를 수명으로 하여 Fig. 3에서와 같이 신율과 인장강도에 대한 아레니우스 관계식 (2)와 식 (3)을 이용하여 Table 2에 고무재료의 노화수명을 예측하였다.

$$\text{신율} : \ln t = -20.5 + \left(\frac{9942}{273 + T}\right) \quad (2)$$

$$\text{인장강도} : \ln t = -22.4 + \left(\frac{10505}{273 + T}\right) \quad (3)$$

2.3 고무시편의 유한요소해석

고무재료 물성시험 결과를 이용하여 얻어진 재료상수를 이용하여 Fig. 4(a)와 같이 고무시편에 대해 유한요소 해석프로그램인 MRAC을 이용하여 해

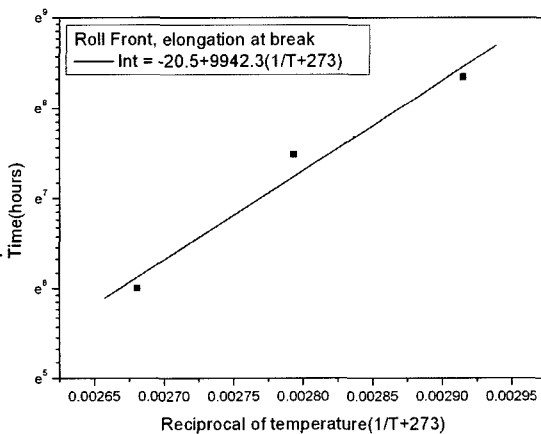
Table 2 Life prediction of rubber material

| Temp.(°C) | Elongation(hr) | Tensile strength(hr) |
|-----------|----------------|----------------------|
| 20 | 682,000 | 697,000 |
| 40 | 78,005 | 70,492 |
| 60 | 11,576 | 9,390 |
| 80 | 2,132 | 1,571 |
| 100 | 471 | 318 |

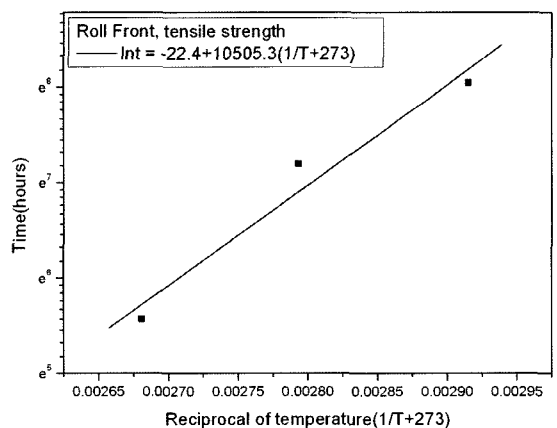
석을 수행하였다. 모델은 10절점 4면체(Herrmann) 요소를 사용하였으며 Fig. 4(b)와 같이 변위와 변형률과의 관계를 구하였다.⁷⁾ 고무와 같이 대 변형이 발생하는 재료의 유한요소 해석에서는 일반 공칭변형률보다 그린-라그랑지(Green-Lagrange) 변형률이 많이 사용되므로 시편의 유한요소해석 결과로부터 G-L 변형률을 구하였다.

2.4 고무부품의 유한요소해석

고무재료 물성시험을 통해 얻어진 재료상수를 이용하여 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 자동차 방진고무부품으로 사용되는 롤 프론트에 대해 10절점 4면체(Herrmann) 요소를 사용하여 해석을 수행하였다. 작용하중은 상하방향으로 -12mm에서 +16mm의 변위를 주었다. Fig. 5(b)에서와 같이 해석과 정적 특성시험결과가 잘 일치함을 알 수 있었으며 또한, 고무부품의 피로수명 예측을 위해 Fig. 5(c)와 같이 취약부위에서의 변위와 G-L 변형률과의 관계를 파악하였다.

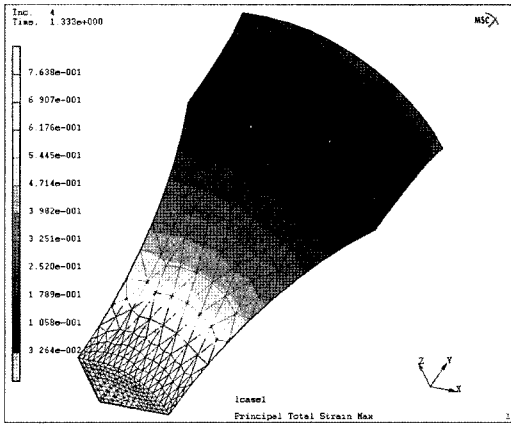


(a) Elongation

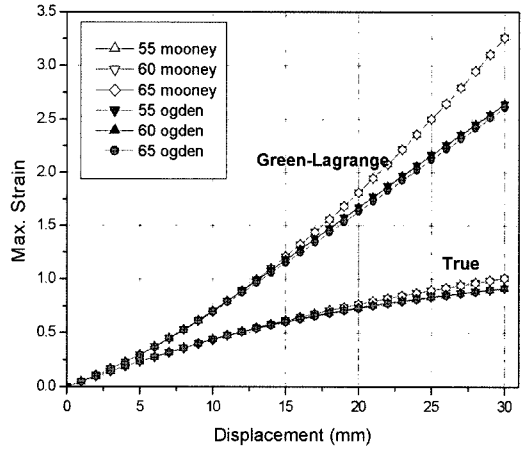


(b) Tensile strength

Fig. 3 Arrhenius curve for natural rubber

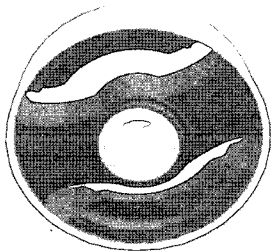


(a) Finite element model

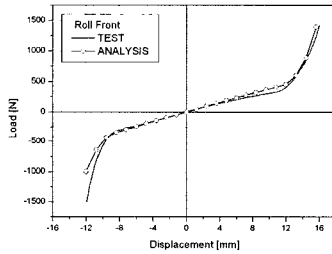


(b) Displacement- max. strain

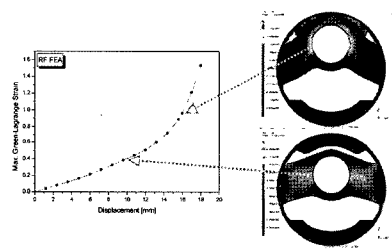
Fig. 4 Finite element analysis of 3D dumbbell specimen



(a) Roll front



(b) Comparison of static test and FEM analysis



(c) Max. G-L strain vs displacement

Fig. 5 Finite element analysis of rubber component

3. 고무시편의 피로시험

3.1 고무시편

고무부품의 피로수명을 예측하기 위해서는 동일한 고무재료에 대한 피로수명선도가 있어야 한다. 본 연구에서는 고무재료의 내구수명을 평가하기 위하여 피로하중에 의한 최대변형률을 재현할 수 있는 Fig. 6과 같은 3차원 덤벨형 피로시편을 이용하

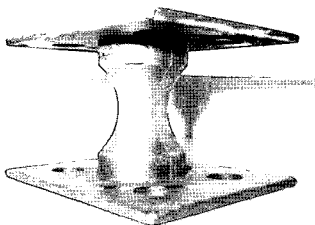


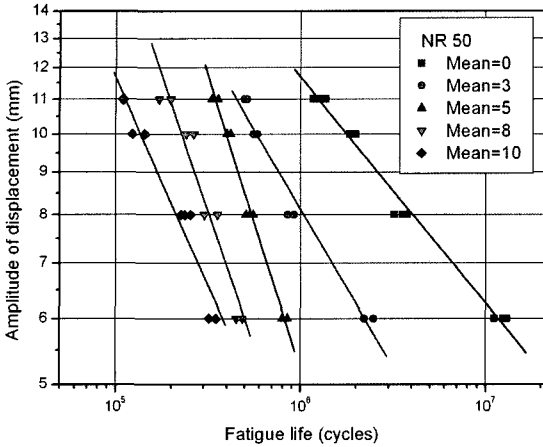
Fig. 6 3-D dumbbell specimen for fatigue test

였다.⁸⁾

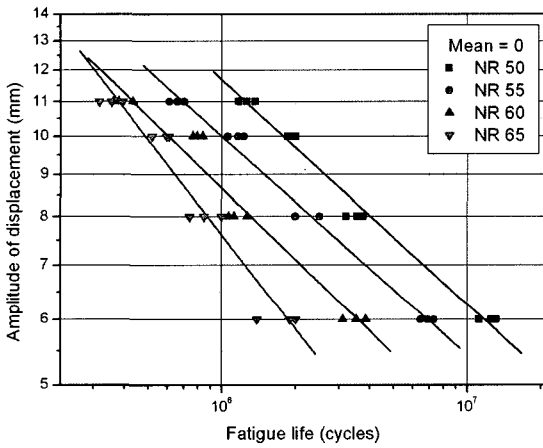
3.2 고무시편의 피로시험

고무시편의 피로수명에 끼치는 영향을 검토하고 적절한 피로 손상변수를 규명하기 위해 최대변위, 진폭, 평균변위 등을 변화하면서 피로시험을 수행하였다. Fig. 7에서와 같이 동일한 진폭에서 평균변위가 클수록 피로수명은 감소하였으며, 또한 경도가 높고 진폭이 증가할수록 피로수명은 감소함을 알 수 있었다.

여러 가지 시험조건에서 얻어진 시험결과를 이용하여 Fig. 8에서와 같이 최대 인장변위와 피로수명과의 관계선도를 나타내면 인장변위가 클수록 피로수명은 감소함을 알 수 있다. 따라서 최대 인장변위를 피로손상 변수로 하면 시험조건에 상관없이 하나의 피로수명 선도로 표현할 수 있었다.



(a) Effect of mean displacement



(b) Effect of hardness

Fig. 7 Fatigue life of 3-D dumbbell specimen

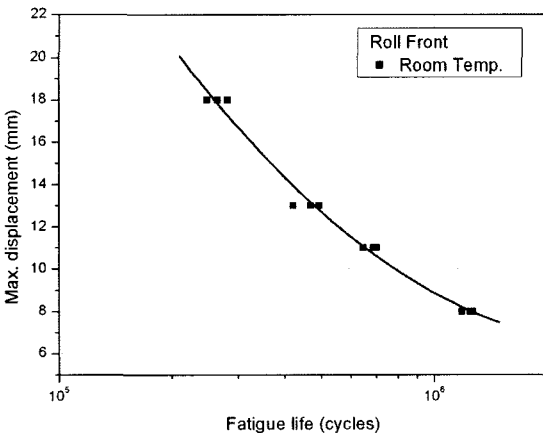


Fig. 8 Max. displacement vs fatigue life

3.3 고무시편의 피로수명 예측

고무 피로시험에서 정확한 응력을 결정하기 어렵기 때문에 응력은 고무에서 피로손상 변수로 좀처럼 사용되지 않고 쉽게 측정할 수 있는 변위로부터 결정되어지는 변형률을 피로 손상변수로 많이 활용되고 있다.^{9,10)} 본 연구에서도 최대 인장변위와 피로수명과의 관계선도를 Fig. 5(b)에서와 같이 유한요소해석에서 구해진 인장변위와 변형률 관계를 이용하여 Fig. 9에서와 같이 G-L 변형률(ϵ_{G-L})과 피로수명선도를 이용하여 식 (4)와 같이 피로수명 예측 식을 도출하였다.

$$N_f = 495,450 \cdot [\epsilon_{G-L}]^{-1.324} \quad (4)$$

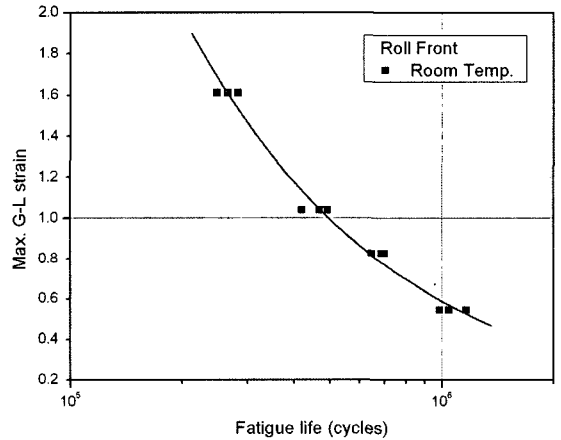


Fig. 9 Fatigue life prediction using the G-L strain

4. 고무부품 피로수명 평가

4.1 고무부품 피로시험

고무부품의 피로수명을 평가하기 위해 2.5톤 유압식 피로 시험기를 이용하여 피로시험을 수행하였다. 피로시험은 상온에서 정현파의 파형을 3Hz로 부가하여 변위제어로 하였으며 인장변위는 10.75 ~ 17mm로 하였다. 피로시험에서 하중변화는 초기 약 1,000 사이클 동안은 초기 연화현상에 의해 하중이 감소하였으며 대부분의 수명에서 안정화 상태를 유지하다가 균열발생 및 진전으로 인하여 하중이 감소하면서 파손되는 양상을 나타내었다.

대부분의 피로균열은 Fig. 10에서와 같이 유한요

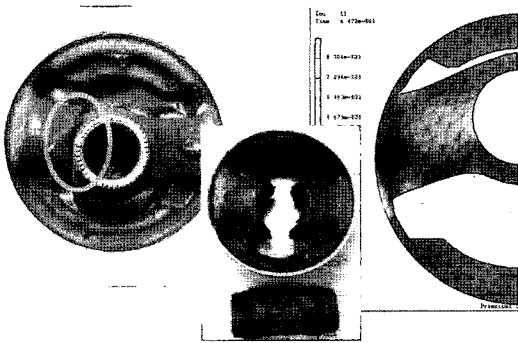


Fig. 10 Fatigue failure of rubber component

소해석에서 최대변형률이 발생하는 중앙 축 부위에서 발생하여 해석과 시험결과가 잘 일치함을 알 수 있어 해석의 타당성을 검증하였다.

4.2 고무부품 피로수명 평가

고무시편에 대한 피로수명 예측 식을 이용하여 예측된 수명과 실제 고무부품에 대한 피로시험을 통해 얻어진 피로수명과의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서와 같이 예측된 피로수명은 실제 수명과 오차범위 2배 이내에서 비교적 정확하게 예측됨을 확인 할 수 있었다.

본 연구를 통해 개발된 고무부품에 대한 피로수명 예측방법을 활용하면 형상 및 노치의 영향 등은 고려되지 않았지만 설계 초기단계에서 부품에 대한 피로시험을 하지 않고도 수명을 예측할 수 있어 개

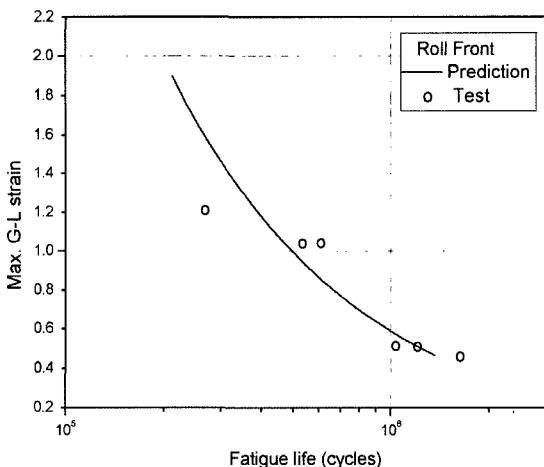


Fig. 11 Fatigue life prediction and evaluation

발에 소요되는 시간과 경비를 절약할 수 있으며, 고무부품의 품질고도화 및 신뢰성을 달성할 수 있을 것이다.

5. 결론

고무부품의 피로수명을 예측하고 평가할 수 있는 방법을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 설계 초기 단계에서 비교적 정확하게 고무부품의 피로수명을 예측할 수 있는 방법을 제안하였다.
- 2) 신율과 인장강도에 대한 아레니우스 관계식을 이용하여 고무재료의 노화수명을 예측하였다.
- 3) 유한요소해석을 통해 고무시편 및 부품에 대한 최대 변형률 파악하였으며 고무부품의 특성시험을 통해 해석과 시험결과가 일치함을 알 수 있었다.
- 4) 최대 인장변위가 피로수명을 잘 표현할 수 있었으며 최대 Green-Lagrange 변형률을 피로손상 변수로 하여 피로수명 예측 식을 도출하였다. 예측된 피로수명은 실제 수명과 오차범위 2배 이내에서 비교적 정확하게 예측됨을 확인 할 수 있었다. 본 연구를 통해 개발된 고무부품 피로수명 예측 방법을 활용하면 신뢰성 확보에 어려움을 겪어왔던 고무부품의 수명평가 및 기술향상에 크게 기여할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 과학기술부에서 시행한 국가 연구개발 사업 연구결과의 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 1) K. Takeuchi and M. Nakagawa, "Fatigue Test Technique of Rubber Materials for Vibration Insulators and Their Evaluation," Int'l Polymer Science & Technology, Vol.20, No.10, pp.64-69, 1993.
- 2) Fatemi, Yang, "Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories," Int'l Journal of Fatigue, Vol.20, No.1, pp.9-34, 1998.
- 3) A. N. Gent, Engineering with Rubber, Hanser Publishers, 1992.

- 4) W. Kim and D. Kim, "A Study on the Equibiaxial Tension Test of Rubber Material," Transactions of KSAE, Vol.11, No.6, pp.95-104, 2003.
- 5) L. Mullins, "Softening of Rubber by Deformation," Rubber Chemistry & Technology, Vol.42, pp.339-362, 1969.
- 6) R. Brown and M. Forrest, "Long-Term and Accelerated Ageing Tests on Rubbers," Rapara Review Report, Vol.10, No.2, pp.3-20, 2000.
- 7) D. Charlton and J. Yang, "A Review of Methods to Characterize Rubber Elastic behavior for use in Finite Element Analysis," Rubber Chem. & Tech., Vol.67, pp.481-503, 1993.
- 8) W. Kim, C. Woo and H. Lee, "Development of Integrated Design System for Mechanical Rubber Components," KIMM Report, 2003.
- 9) W. V. Mars and A. Fatemi, "Factors that Affect the Fatigue Life of Rubber," Rubber Chemistry and Technology, 2003.
- 10) D. Klenke, A. Beste, "Fatigue Life of Metal-Rubber Components," Gummi Kunststoffe, Vol.40, pp.1067-1071, 1987.