

자동차용 방진고무의 찢김시험 및 찢김에너지 정식화[§]

문형일* · 김헌영**† · 김민건** · 김 호***

* 현대모비스 공학해석팀, ** 강원대학교 기계의용공학과, *** 송도테크노파크

Tearing Test for Automotive Vibroisolating Rubber and Formulation of Tearing Energy

Hyung-il Moon*, Heon Young Kim**†, Min Gun Kim** and Ho Kim***

* CAE team, Hyundai Mobis

** Dept. of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National Univ.

*** Korea Production Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology

(Received May 22, 2012 ; Revised July 11, 2012 ; Accepted October 17, 2012)

Key Words: Vibroisolating Rubber(방진고무), Fatigue Life(내구 수명), Tearing Energy(찢김에너지), Crack Propagation(균열 전파), Virtual Crack(가상 균열), Formulation Of Tearing Energy(찢김에너지 정식화), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

초록: 일반적인 고무 부품의 해석적 피로 수명 예측은 다양한 피로시험 결과를 바탕으로 정의되는 피로 수명식이 사용된다. 그러나, 이와 같은 방식은 피로 시험에 사용되는 비용적, 시간적인 문제로 인해 설계과정에서 매우 제한적으로 사용된다. 더욱이, 고무재료의 비규격화 및 임의적인 특성변화가 피로시험 결과의 데이터베이스화를 어렵게 만든다. 본 논문에서는 찢김에너지를 이용한 또다른 피로수명 예측 방식을 제안하였다. 자동차용 방진고무들에 대한 동적, 정적 찢김시험 및 복잡한 형상을 갖는 고무 부품의 찢김에너지를 계산하기 위하여 가상 결함을 고려한 유한요소 정식화를 수행하였다. 제안된 방법을 사용하여, 자동차용 모터 마운트의 피로 수명을 예측해 보았고, 실제 수명과 예측된 수명을 비교하여 신뢰성을 검증해 보았다.

Abstract: A commonly analytical estimation of fatigue life on rubber components is using fatigue life equation based on various fatigue test results. However, such method has very restricted applicability in actual designing processes because performing fatigue tests requires a lot of time and money. In addition, non-standard rubber materials and their randomness make it hard to make databases. In this paper, the other fatigue life estimation method using tearing energy was suggested. We performed static and dynamic tearing test about automotive vibration rubber materials and a finite element formulation using a virtual crack to calculate the tearing energy of rubber components with complicated shapes. To using the suggested method, fatigue life of an automotive motor mount has been estimated and verified the reliability of this method by using comparison between the estimated values and the actual fatigue life.

1. 서론

유한요소해석을 통한 고무 부품의 내구성능 예측 관련 연구는 1950년대부터 꾸준히 연구되었다. 지금까지의 연구들은 크게, 결함(crack)의 결정화(nucleation) 시기를 예측하여 내구수명을 평가하는 방법과 결함의 성장(crack growth) 속도를

이용하여 내구수명을 예측하는 방식의 연구로 구분될 수 있다.^(1,2)

결함 결정화적 접근 방식은 기존에 널리 사용되고 있는 금속 재료 부품의 내구수명 예측 방식과 매우 유사하다. 시편을 사용한 피로시험(fatigue test) 결과로부터 특정 값(변형률, 응력, 에너지)과 수명과의 관계식(fatigue life equation)을 정의한 후, 해당 부품의 변형해석 결과로부터 예측된 특정 값(strain, stress, energy 등)을 정의된 식에 대입하여 수명을 예측하는 방법이다. 이러한 방식은 비교적 쉽게 내구수명을 예측할 수 있

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계 학술대회(2012. 5. 10.-12., 제주 휘닉스아일랜드) 발표논문임

† Corresponding Author, khy@kangwon.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

지만, 신뢰성 있는 수명식을 정의하기 위해서는 다양한 조건(평균변위, 변위진폭 등)에서 충분한 횟수의 피로시험이 실시되어야 한다. 따라서, 시간적 또는 비용적인 문제를 해결해야만 한다. 더욱이, 고무재료는 금속재료와 달리, 제법 및 제조 과정이 비 규격화 되어있고, 배합조건 및 생산 환경에 따른 특성 변화가 크게 발생하기 때문에 선행 연구 자료 및 기존 데이터베이스의 활용이 제한적일 수밖에 없다.⁽²⁻⁵⁾

피로시험 수행에 따른 문제를 해결하기 위해 2002년 김호 등은 결합 성장 속도를 이용한 내구 수명 예측 방안을 제안하였다. 이 방법은 고무의 찢김에너지(tearing energy)와 수명과의 관계로부터 수명식을 정의하기 때문에, 비교적 간단하게 얻을 수 있는 시험 데이터만이 사용된다.⁽⁶⁾

본 논문은 찢김에너지를 사용한 수명 예측 방법을 활용하기 위해 필요한 찢김 시험 결과에 대하여 기술하였다. 자동차용 방진고무(vibroisolating rubber) 재료에 대한 정적 및 동적 찢김 시험을 실시하였고, 얻어진 데이터를 바탕으로 피로 수명식을 정의하였다. 이를 사용하여 자동차용 모터 마운트의 수명을 해석적으로 예측하였고, 시험 결과와 비교하여 신뢰성을 평가해 보았다.

2. 고무 재료의 찢김 시험

2.1 찢김에너지

찢김에너지(T)는 고무 재료의 피로 파괴 현상을 설명하기 위해, 1952년 Rivlin 등 의해 정의되었다. 이들은 Griffith가 제안한 에너지 해방률 이론을 고무 재료에 적용하여, 결합의 생성 및 성장으로 인한 에너지 변화를 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$T = - \left. \frac{\partial W}{\partial A} \right|_l \quad (1)$$

식 (1)에서 W 는 변형률 에너지, A 는 크랙 표면, 아래 첨자(suffix) l 은 하중이 가해질 때 발생하는 일정한 변위에 대한 미분을 의미한다. 찢김 에너지는 대변형에서도 유효하며, 결합의 성장으로 인한 비가역적(irreversible) 에너지의 변화가 오직 균열 선단(tip)에서만 발생되기 때문에 시험의 형상, 하중 방향 및 크기에 대하여 독립적(independent)인 특성을 갖는다.^(1,7-9)

일반적으로 찢김에너지는 시험적인 방법을 통

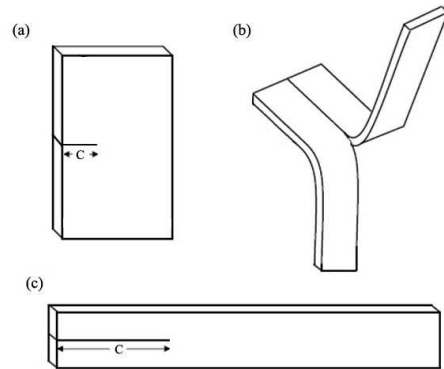


Fig. 1 Three types specimen for the tearing test. (a) Single edge specimen, (b) Trouser specimen, (c) Pure shear specimen)

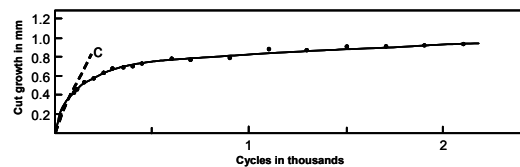


Fig. 2 Dynamic cut growth curve obtained from Thomas' data

해 계산된다. 찢김 시험은 주로 Fig. 1과 같은 시편들을 사용하여 정적 및 동적 상태에서 측정된다. Thomas의 논문에서는 정적 상태에서 성장된 균열 크기는 찢김에너지와 식 (2)과 같은 관계를 가지며, 이때 사용된 G_s 는 정적 찢김 상수(static tearing constant)라 정의된다.

$$T^2 = G_s \Delta c \quad (2)$$

또한, 동일한 변위가 반복적으로 가해질 때 일정 시간 이후 균열의 성장 속도가 Fig. 2와 같이 일정해 지는 현상을 발견하였다. 이를 거친 찢김(rough tearing) 영역이라 정의하였고, 이 구간에서 측정된 반복 횟수(N)와 균열(c)의 성장을 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$T^2 = G_d \frac{dc}{dN} \quad (3)$$

이때, G_d 는 동적 찢김 상수(dynamic tearing constant)라 정의하고, G_d 가 G_s 에 비해 약 10배 큰 값을 가지는 것을 시험데이터를 바탕으로 발표하였다.^(6,10)

2.2 정적 찢김 시험

본 논문에서는 40~54의 경도를 가지는 자동차용 방진고무에 대하여 찢김 시험을 실시하였다.

각각의 재료는 Table 1과 같은 성분과 그 비율을 가진다.

정적 찢김 시험은 Single edge 와 Trouser 시편을 사용하였다. 2.3~2.5mm의 두께(t)를 가진 평판(sheet)에서 날카로운 칼날을 이용하여 각각의 형상으로 가공하였고, UTM(INSTRON 5882)를 사용하여 상온상태에서의 찢김 시험을 실시하였다. 이때 인장 속도는 20mm/min를 사용하였다. 시험시 발생하는 균열의 길이 변화는 현미경(OLYMPUS STM-MJ52)을 이용하여 관찰하였다.

Single edge 시편은 폭 20mm, 길이 80mm의 형상으로 제작한 후, 양쪽 끝단 부로부터 20mm의 길이를 지그에 장착(clamping)하여 시험을 실시하였다. 이때 사용한 초기 결함(c_0)의 길이는 2, 3, 4mm로 가공하여 사용하였다. Trouser 시편은 폭 20mm, 길이 60mm로 제작하였고, 각 다리의 폭(b)은 10mm, 초기 결함의 길이는 약 30mm로 가공하였다. 또한, 다리 부분의 장착길이는 10mm가 되도록 하였다.

각각의 시편에 대한 찢김에너지는 다음과 같이 식에 의해 계산할 수 있다. Single edge 시편을 사용한 시험은 식 (4)와 같이 찢김에너지를 계산할 수 있다.

$$T = 2kWa \tag{4}$$

Table 1 Componential analysis results of natural rubbers(NR) for the tearing test (unit: %)

	C	O	S	Ca	Zn
NR40	85.2	13.89	0.22	0.07	0.62
NR43	89.28	8.94	0.88	0.25	0.64
NR45	88.58	9.84	0.74	0.2	0.64
NR50	91.19	6.53	1.1	0.41	0.77
NR54	91.55	5.86	1.36	0.51	0.72

Table 2 Calculation results of the static tearing energy using the single edge specimen (tearing energy's unit: N/mm)

	c_0	NR40	NR43	NR45	NR50	NR54
Test 1	2	19.44	29.89	86.96	63.10	77.73
Test 2	2	17.65	27.15	58.45	54.94	89.11
Test 3	2	23.86	22.92	92.83	67.56	74.01
Test 4	3	37.68	24.90	56.15	66.56	77.29
Test 5	3	16.33	26.88	57.29	54.93	84.28
Test 6	3	20.34	28.16	39.64	77.83	104.14
Test 7	4	11.84	20.56	46.35	25.52	62.46
Test 8	4	15.25	27.79	29.68	58.28	63.24
Test 9	4	15.50	28.85	54.84	47.93	59.25
Mean		19.76	26.35	56.93	57.64	76.25

식 (4)에서 a 는 증가된 결함의 길이, k 는 변형률(ϵ)과 관계된 변수이다. k 는 여러 연구자들에 의해 다양한 식으로 제안되었으나, 본 연구에서는 Greensmith 등의 연구 결과를 사용하였다. 이들이 제안한 k 의 계산 방법은 식 (5)와 같다.^(1,11)

$$k = \frac{2.95 - 0.08\epsilon}{(1 + \epsilon)^{0.5}} \tag{5}$$

Trouser 시편의 경우, 시편에 가해진 힘을 F , 인장률은 λ , 다리부분의 폭을 b 라고 하면 찢김에너지 식 (6)과 같이 계산 할 수 있다.^(1,12-14)

$$T = \frac{2F\lambda}{t} - bW \tag{6}$$

Table 2와 3은 Single edge 시편과 Trouser 시편의 찢김 시험을 수행하여 계산된 최대 찢김에너지를 나타낸 표이다. 크랙 선단의 상태, 시편의 불균일성, 시험 및 측정 오차 등을 감안할 때, 찢김에너지는 c_0 에 독립적이라고 가정할 수 있다. 또한, Fig. 3과 같이 Single edge 시편의 찢김에너지 평균값들과 Trouser 시편의 찢김에너지를 비교할 때, Single edge 시편의 평균값이 Trouser 시편의 값들 사이에 위치하고 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 정적 찢김 시험은 시편의 형상에

Table 3 Calculation results of the static tearing energy using the trouser specimen(tearing energy's unit: N/mm)

	NR40	NR43	NR45	NR50	NR54
Test 1	9.65	29.73	70.85	70.19	65.49
Test 2	13.19	36.65	58.23	68.49	80.12
Test 3	19.11	15.91	71.16	50.35	66.61
Mean	13.98	27.43	66.75	63.01	70.74

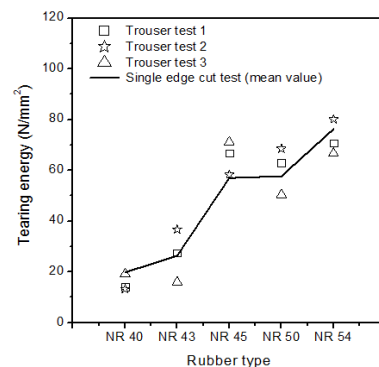


Fig. 3 Comparison result of static tearing energy using the different specimens

독립적이며, 복잡한 하중 상태가 아닐 경우 하중의 크기와 방향에 대하여서도 독립적인 특성을 가진다는 것을 확인할 수 있었다.

2.3 동적 찢김 시험

동적 찢김 시험은 Single edge 시편을 사용하여, 경도 40, 50, 54의 방진고무에 대하여 실시하였다. 사용된 시편은 피로 시험기의 특성을 감안하여 정적 찢김 시험용 시편보다 길이를 1/4, 폭은 3/4로 축소하여 제작하였고, c_0 의 길이는 2mm로 가공하였다. 피로 시험용 인장(압축) 시험기를 사용하여, 0~4mm(약 40%)의 변형이 4Hz로 가해질 때의 최대 찢김에너지를 계산하고 성장한 균열의 크기를 측정하였다. 균열길이는 뚜렷하고 연속적으로 성장하는 균열들만을 관찰하여 측정하였다. Fig. 4와 같은 경우에는 약 20,000회까지는 한 방향으로 균열이 전파되었으나, 이후 두 방향으로 균열이 전파되었다. 이와 같은 경우, 각각의 균열 길이를 합산하여 계산하였다. 또한, Fig. 6과 같이 일정한 시험 횟수 이후에는 균열의 성장이 선형적임을 확인할 수 있었다.

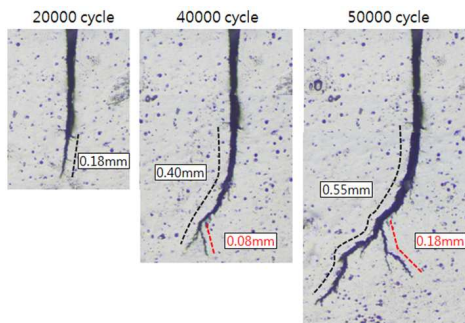


Fig. 5 Example of the crack propagations

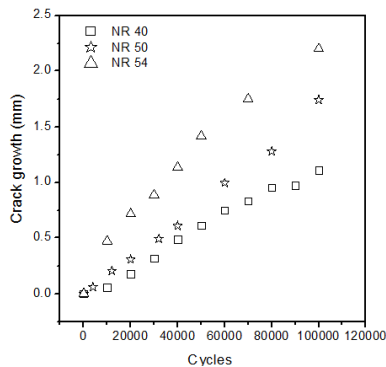


Fig. 6 Measured crack growth length in the various rubber materials

3. 찢김에너지의 정식화

3.1 가상 균열을 이용한 찢김에너지 정식화

찢김 시편과 같은 단순한 형상 및 하중 조건을 사용한 경우, 찢김에너지는 간단한 수식으로 통해 계산될 수 있다. 하지만 실제 고무 부품은 복잡한 형상과 하중 조건을 가지고 있기 때문에 수식을 이용한 계산 방법을 사용하여 계산하는 것은 매우 어려운 일이다.^(1,6) 이를 해결하기 위해, 유한요소해석 결과로부터 찢김에너지를 계산할 수 있는 방법이 제안되었다.

고무 부품은 제조 과정에서 임계(critical) 크기 이상의 균열이 광범위하게 발생된다. 고무 재료에 내재된 임계 균열은 보통 끝이 둥근 형상으로 가정할 수 있으며 크기는 약 0.01mm이상의 크기라고 추측되고 있다.^(8,14) 만약, 임계 균열이 광범위하고 지배적으로 분포되어 있다면, 유한요소 모델링 시 모든 요소들에 가상의 임계 균열이 포함되어 있다고 정의할 수 있다.

고무 재료의 에너지 포텐셜(Π)이 변위와 가상 균열의 길이의 함수라고 가정하면, 균열 성장에 의한 에너지 감소율(G)은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$G = -d\Pi/dc \tag{7}$$

이를 유한요소의 형태로 표현한 후, 모델 내부에서의 임의의 점 j 에서의 변형률 에너지를 W_j 를 사용하여 식 (9)와 같이 정리할 수 있다.

$$\Pi = \sum_j W_j - \mathbf{u}^T \mathbf{F} \tag{9}$$

Π 는 $\delta\Pi$ 의 형태로 변환하여 변위에 대한 압력에 대한 항으로 구분할 수 있다. 만약, 에너지 평형 조건과 균열 발생 주변의 하중이 일정하다고 가정한다면 식 (9)는 식 (10)과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{\delta\Pi}{\delta c_0} = \sum_j \frac{\partial W_j}{\partial c} \tag{10}$$

식 (10)을 증분 형태로 변환한 후, j 를 유한요소의 적분점으로 대신한다면 식 (11)과 같이 정리될 수 있다.

$$T = \sum_j \frac{v_j w_j}{\Delta A_j} \tag{11}$$

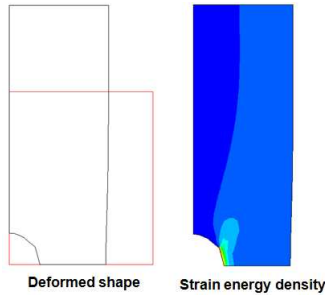


Fig. 8 F.E analysis results using the Rivlin's test conditions

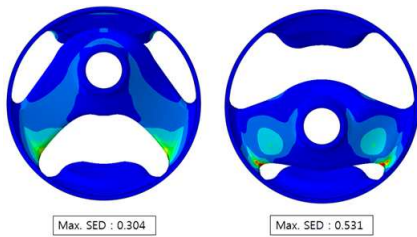


Fig. 9 Strain energy density distribution of the automotive motor mount (Left: at the +Z load, Right: at the -Z load)

이때 v_j , w_j , ΔA_j 는 각각 가상 균열의 체적, 체적 당 변형률에너지, 그리고 균열 표면적의 증분을 의미한다. 위 식에서 v_j 와 A_j 는 가상 균열의 성장량 Δc 의 함수이므로 식 (12)와 같이 표현될 수 있다.

$$T = \sum_j f(\Delta c)w_j \quad (12)$$

식 (12)를 가장 단순한 함수의 형태로 바꾸어 생각한다면, 식 (13)과 같이 찢김에너지는 w_j 와 Δc 의 곱의 형태로 표현될 수 있다.

$$T = \alpha \sum_j \Delta c w_j \quad (13)$$

위 식에서 α 는 찢김 영역의 면적과 부피의 비를 나타내는 상수이다. 만약 미소 찢김과 찢김 면적 사이의 공간이 매우 미세하다고 가정한다면 무시할 수 있다. 따라서 아래와 찢김에너지는 식 (14)와 같이 정의할 수 있다.^(6,15)

$$T = \sum_j \Delta c w_j \quad (14)$$

3.2 검증 해석

찢김에너지 정식화의 신뢰성을 검증하기 위해 Rivlin 시험 결과를 사용하였다. 그는 두께 1.5mm, 폭

10mm, 길이 6mm, 시편 중앙에 2.7mm의 초기 균열을 가진 천연고무 시편을 준정적 상태로 6mm 인장시켰다. 이때 약 5mm의 균열이 발생되었고, 계산된 찢김에너지는 13N/mm로 기록되어있다.⁽¹⁶⁾ Fig. 7은 Rivlin 시험과 동일한 경계 조건을 사용하여 해석한 결과 중 w_j 의 분포를 나타낸 그림이다. 이 중 균열 끝단 부 요소에서의 최대 w_j 는 0.276N/mm로 예측되었다. 예측 결과를 식 (14)에 대입한 결과 최대 찢김에너지는 13.8N/mm로 계산되었다. 찢김 시험 데이터의 산포를 고려할 때, 가상 균열을 이용한 정식화 방법의 신뢰성을 간접적으로 확인할 수 있었다.

4. 자동차용 모터 마운트의 내구수명 예측

동적인 찢김 상태에서 급격한 찢김이 발생하는 구간은 상대적으로 매우 작은 횡수동안 발생된다.⁽⁸⁾ 즉, 고무 부품의 피로 수명의 대부분은 결합 전과 속도가 일정한 거친 찢김 영역에서 발생한다고 가정할 수 있다. 또한, 고무 부품의 접촉 부에서의 찢김이나 임계크기의 균열이 부품 내/외부에 일정하게 분포되어 있다고 가정하면, 찢김에너지와 결합 성장 속도와의 관계로부터 식 (15)와 같은 수명 예측식을 사용할 수 있다.⁽⁶⁾

$$N_f = \frac{G_d}{c_0 (\sum_j w_{j,max})^2} \quad (15)$$

위 식을 사용하여 NR 43을 사용한 자동차용 모터 마운트의 피로 수명을 해석적으로 예측해 보았다. 해석에 사용된 마운트의 피로시험 결과는 다음과 같다. +Z 방향으로 230Kgf, -Z방향으로 100kgf의 하중을 3.3Hz로 반복하였을 때, 초기 측정 하중에서 약 20% 하중이 저하된 시점에서의 수명은 각각 78만회, 98만회, 102만회였다.

동일한 조건에 대하여 변형해석을 수행한 결과는 Fig. 8과 같다. -Z 방향의 하중일 때 총 4곳에서 0.531N/mm²의 최대 변형률 에너지 밀도 값이 나타남을 확인하였다. 또한, 수명식에서 필요로 되는 NR 43의 G_d 값은 정적 찢김 시험을 통해 얻어진 G_s 평균값에 10배하여 사용하였다. 예측된 마운트의 내구수명은 다음과 같이 약 90만회로 예측되었다.

$$N_f = \frac{40,737}{0.01(4 \times 0.531)^2} = 902,984 \quad (16)$$

피로 시험 결과로부터 모터부 마운트의 내구수명을 약 100만회라 가정했을 때, 약 90% 정도 근사적인 수명을 예측할 수 있었다. 10% 정도의 오차는 초기 찢김 과정에서의 수명을 무시한 것과 고무 재료의 랜덤성 등의 영향일 것으로 추정된다.

5. 결 론

본 논문은 자동차용 방진고무에 대해 경도별 정적 및 동적 찢김 시험을 수행하여 선행 연구자들의 연구 결과들을 검증 해 보았다. 또한, 가상 균열을 포함한 유한요소 정식화를 통해 계산된 값을 사용하여 자동차용 모터 마운트의 피로수명을 계산해 보았고, 실제 피로 시험 결과와 근사적인 수명을 예측할 수 있었다. 비교적 간단한 찢김 시험 데이터만을 가지고 고무 부품의 근사적인 수명을 예측할 수 있다는 점에서 본 논문이 사용한 방법은 내구성 기반의 고무부품 설계 과정에서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 앞으로 더욱 많은 부품들에 적용하여 신뢰성을 검증 받아야 할 것이다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2011-0026236).

참고문헌

- (1) Mars, W. V. and Fatemi, A., 2002, "A Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 24, No. 9, pp. 949-961.
- (2) Verrona, E. and Andriyana, A., 2008, "Definition of a New Predictor for Multiaxial Fatigue Crack Nucleation in Rubber," *J. of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 56, No. 2, pp. 417-443.
- (3) Oh, H. L., 1980, "A Fatigue-Life Model of a Rubber Bushing," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 53, pp.1226-123.
- (4) Kim, W. D., Lee, H. J., Kim, J. Y. and Koh, S. K., 2004, "Fatigue Life Estimation of an Engine Rubber Mount," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 26, No.5, pp. 553-560.
- (5) Lia, Q., Zhao, J. and Zhao, B., 2009 "Fatigue life Prediction of a Rubber Mount Based on Test of Material Properties and Finite Element Analysis," *Engineering Failure Analysis*, Vol.16, No.7, pp. 2304-2310.
- (6) Kim, H. and Kim, H. Y., 2006, "Numerical Life Prediction Method for Fatigue Failure of Rubber-Like Material Under Repeated Loading Condition," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol.20, No.4, pp. 437-582.
- (7) James, A. G., Green, A. and Simpson, G. M., 1975 "Strain Energy Functions of Rubber I," *J. of Applied Polymer Science*, Vol. 19, pp. 2033-2058.
- (8) Thomas, A. G., 1958, "Rupture of Rubber. V. Cut Growth in Natural Rubber Vulcanizates," *J. of Polymer Science*, Vol. 31, pp. 467-480.
- (9) Kadir A. and Thomas, A. G., 1981, "Tear Behavior of Rubbers over a Wide Range of Rates," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol.54, pp.15-23.
- (10) Thomas, A. G., 1958, "Rupture of Rubber. V. Cut Growth in Natural Rubber Vulcanizates," *J. of Polymer Science*, Vol. 31, pp. 467-480.
- (11) Lindley, P. B., 1973, "Relation Between Hysteresis and the Dynamic Crack Growth Resistance of Natural Rubber," *Int. J. of Fracture*, Vol. 9, No. 4, pp. 449-460.
- (12) Young, D. G., 1990, "Application of Fatigue Methods Based on Fracture Mechanics for Tire Compound Development," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 63, pp.567-581.
- (13) Choudhury, N. R. and Bhowmick, A. K., 1990, "Strength of Thermoplastic Elastomers from Rubber Polyolefin," *J. of Materials Science*, Vol.25, pp. 161-167.
- (14) Sakulkaew, K., Thomas, A. G. and Busfield, J. J. C., 2011, "The Effect of the Rate of Strain on Tearing in Rubber," *Polymer Testing*, Vol. 30, pp.163-172.
- (15) Kim H. and Kim, H. Y., 2005, "Formulation of Tearing Energy for Fatigue Life Evaluation of Rubber Material," *Trans. of KSME*, Vol. 29, No. 8, pp. 1043-1160.
- (16) Rivlin, R. S. and Thomas, A. G., 1952, "Rupture of Rubber. I. Characteristic Energy for Tearing," *J. of Polymer Science*, Vol. 10, No. 3, pp. 291-318.