

고무 제품 유한요소해석 결과의 신뢰 향상을 위한 물성치 연구

백운철* · 조맹효** · 황재석***†

* 평화오일셀공업주식회사, ** 서울대학교 기계항공공학부, *** 영남대학교 기계공학부

Material Properties for Reliability Improvement in the FEA Results for Rubber Parts

Un-cheol Baek*, Maeng-Hyo Cho** and Jai-Sug Hawong***†

* Pyung Hwa Oil Seal Industry Co., LTD,

** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.,

*** School of Mechanical Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received April 20, 2011 ; Revised August 8, 2011 ; Accepted September 3, 2011)

Key Words : Carbon Filled Rubber(카본 충전 고무), Nitrile-Butadiene Rubber(니트릴 부타디엔 고무), Pure Shear(순수전단), Poisson's Ratio(푸아송의 비), Transformation Data(변환 데이터), Stretch Ratio(연신률), Hub Bearing Seal(허브 베어링 씰)

초록: 자동차용 고무부품에 대한 유한요소 해석의 신뢰 향상을 위하여 고무소재 물성치에 대한 연구를 수행하였다. 마운트 설계를 위하여 수백 종의 고무 물성치를 모두 측정하는 것은 현실적으로 어렵다. 그래서 시험 값을 대신하는 순수전단 시험 데이터의 변환 방법을 제시하여 유효성을 확인하였다. 순수전단시험의 응력-변형 관계의 변환은 단순인장시험 데이터와 주 연신률의 함수로 정의한 푸아송의 비를 사용하였다. 카본 충전 고무의 변환 순수전단시험 데이터는 100%변형까지 시험 데이터와 상당히 유사하다. 단순인장시험 데이터와 함께, 순수전단시험의 변환 데이터와 시험 데이터를 각각 사용한 허브 베어링 씰의 접촉력에 대한 유한요소해석 결과들은 시험 데이터와 거의 일치하였다. 해석에 사용된 재료상수는 Ogden 상수이다.

Abstract: We studied the material properties for reliability improvement in finite element analysis results for a nitrile butadiene rubber hub-bearing seal and for a carbon-filled rubber mount used in a vehicle. It was difficult to measure the material properties of hundreds of types of rubber for the mount design. Thus, we suggested that the engineering stress-strain relations from pure shear test data could be synthesized by using simple tension data and Poisson's ratio. We defined Poisson's ratio by using a function of principal stretches to synthesize the stress-strain relations for a pure shear test. A transformation of the pure shear data was applied to the experimental values to obtain the predicted results when the strain approaches 100%. In the finite element analysis for the contact force of a hub-bearing seal, the strain results that used the transformation of the pure shear data and simple tension data almost corresponded to the experimental values. Ogden constants were used to analyze.

1. 서 론

자동차의 엔진마운트와 허브베어링의 씰(seal)의 설계에 사용되는 고무는 진동절연과 하중지지, 밀봉기능 등으로 다양하게 사용된다. 방진고무는 작은 하중에서 거의 비압축성(nearly incompressible)

이고, 큰 하중-연신을 받으면 경화되면서 응력-변형률 선도는 비선형이 된다. 그래서 고무의 물성치의 측정은 쉽지 않다. 고무부품에 사용되는 소재 종류에 따라 기계적 물성치가 다르다. 마운트 설계에 사용되는 카본 충전 고무의 응력-변형률 관계는 약 50%의 변형률에서 뚜렷한 변곡이 발생하고⁽¹⁻³⁾ 베어링 씰 재료인 니트릴 부타디엔 고무는 명확하지 않다.

카본 충전 고무의 또 다른 주요 특징은 뚜렷한 Mullins 효과의 발생이다. 그래서 카본 충전 고무

† Corresponding Author, jshawong@ynu.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

부품의 신뢰성 있는 유한요소 해석 결과를 구하려면, 해석 대상의 변형 범위를 포함하는 2 가지 이상의 시험 데이터가 필요하다.^(4,5) 자동차의 엔진마운트나 부싱의 변형범위는 약 100%이하 이므로 최소 100% 변형 물성치 시험 데이터가 필요하다.

한편, 고무의 응력-변형률 관계는 변환이 가능하다.⁽⁶⁻⁸⁾ 변환이란 어떤 시험의 응력-변형률 선도로 부터 다른 변형(mode)의 응력-변형률 관계 데이터를 구하는 것이다. 데이터 변환의 주요 인자는 푸아송의 비이다. 탄성체의 작은 변형에서 상수인 푸아송의 비를 사용하여 대변형의 물성치를 구하는 것은 좋은 방법이 아니다. 그러나 연속적인 변형의 증분에서 각 변형은 다음 단계 변형의 기저가 된다. 이것은 푸아송의 비를 연신률의 함수로 나타내는 것을 가능하게 한다. Beatty 와 Stalnaker 는 푸아송의 비를 연신률 함수로 정의하여 보편적 푸아송 함수(universal Poisson function)라 하였다.⁽⁶⁾ Turner 와 Brennan⁽⁷⁾은 푸아송의 비를 주 연신률의 함수로 정의하고, Mooney-Rivlin 식을 사용하여 단순인장시험 데이터로부터 변환된 순수 전단 및 등 2 축 인장시험의 진응력 데이터는 약 80% 변형까지 시험 데이터와 선형 관계라는 것을 확인하였다. 그러나 이들이 제시한 푸아송의 비는 복잡한 식이다. Charlton 등⁽⁸⁾은 실제의 시험 데이터 대신 변환한 응력-변형률 관계를 사용하여 유효한 유한요소해석 결과를 얻었다.

순수전단시험(pure shear test)은 시험 치구에 의하여 시편의 폭-방향 변형이 억제되는 인장시험이다. 등방성체 물성치는 탄성계수와 푸아송의 비의 2 가지이고, 푸아송의 비는 변형과 관계된 값이다. 즉, 단순인장시험 데이터와 적절한 푸아송의 비를 사용하면 순수전단시험 데이터를 구할 수 있다. 이상적인 고무 물성치는 많은 시간, 노력과 함께 많은 독립 시험들로부터 구해야 된다.

한편, 본 연구자들은 썬 등의 고무부품의 소재마다 단순인장시험과 순수전단시험 물성치를 함께 측정하여 유한요소해석한 경험으로부터, 실제의 시험 대신 신뢰성 있는 데이터를 확보하는 방법을 확인하게 되었다. 그리고 고무부품 소재에 대하여, 어떤 응력-변형률 관계의 시험 데이터로부터 다른 변형상태의 공칭응력-변형률의 변환 데이터(transformation data)의 유효성을 평가한 연구는 아직 국내에 없다. 그러므로 본 연구는, 산업현장의 고무제품의 설계를 위한 유한요소해석 신뢰 향상을 위하여, 단순인장시험 데이터와 푸아송의 비를 사용하여 순수전단시험의 공칭응력-변형률 관계

데이터를 변환하는 방법을 제시하고, 변환 물성치 데이터(transformation material properties)의 유효성을 평가하는 것이 이 연구의 목적이다.

2. 고무역학 구성방정식

2.1 비선형 응력-변형률

선형 탄성체의 물성치는 단순인장시험으로 구한 탄성계수와 푸아송의 비이다. 비선형 등방성체 재료의 반응은 주 연신률의 함수인 변형에너지 포텐셜이 된다. 푸아송의 비는, Fig. 1 과 같은 단순인장시험에서, 종방향 연신률($\lambda_1 = \lambda \geq 1$)과 횡방향 수축 연신률($\lambda_2 = \lambda_3 \leq 1$) 비이고, 인장 변형률이 측정되면 푸아송의 비는 구하여 진다. 즉, $\lambda_2 = \lambda_1^{-1/2}$ 이므로 푸아송의 비는 식 (1)과 같이 주 방향 연신률($\lambda_i = 1 + \epsilon_i, i = 1, 2, 3$) 함수이다.⁽⁶⁾

$$\nu(\lambda) = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{1 - \lambda_2}{\lambda_1 - 1} = \frac{1 - \lambda\alpha(\lambda)}{\lambda - 1} \quad (1)$$

여기서 연신률 비 $\alpha(\lambda) = \lambda_2(\lambda) / \lambda$ 이다. 비압축성 조건($\lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1$)으로부터 $\alpha(\lambda) = \lambda^{-3/2}$ 이다.

비압축성조건과 식 (1)로부터, 푸아송의 비는 주 방향 연신률 함수로서 식 (2)와 같고, Beatty 등⁽⁶⁾의 식과 비교하면 아주 간단하다.

$$\nu(\lambda) = \frac{1}{\lambda + \lambda^{1/2}} \quad (2)$$

선형탄성 재료의 푸아송의 비 ν_0 는 $\lambda = 1$ 일 때, 뒤틀림이 없는 자연상태에서, 식 (3) 함수의 값으로 정의 된다.

$$\nu_0 = \lim_{\lambda \rightarrow 1} \nu(\lambda) \quad (3)$$

식 (2)와 (3)으로부터 변형 초기에 비압축성 재료의 푸아송의 비 $\nu_0 = 1/2$ 이 된다.

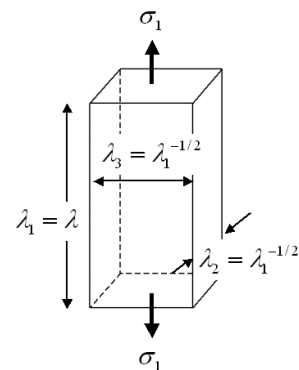


Fig. 1 Uniaxial extension configurations

한편, 고무의 변형해석을 위하여 사용되는 Ogden 변형에너지 밀도 함수는 식 (4)와 같다.⁽⁹⁾

$$U = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (4)$$

여기서 $\lambda_i (=1 + \varepsilon_i, i=1,2,3)$ 는 주 변형 방향의 주 연신률, N 은 양의 정수이고, 방진고무는 $N=3$, 니트릴 부타디엔 고무는 $N=2$ 을 취한다. α_n 과 μ_n 은 실험으로 결정되는 재료상수이고, 단 순인장, 압축, 순수전단 등의 시험으로 구한 응력-변형률 관계와 변형률 에너지함수의 정의를 이용하여 계산된 응력-변형률 값과의 차를 최소화 하여 구한다.⁽⁹⁾ 상수들은 식 (5)를 만족해야 한다.

$$\sum_{n=1}^N \mu_n \alpha_n = 2G \quad (5)$$

여기서 G 는 전단탄성계수이다. 식 (4)를 사용하여 주응력 차를 주변형률 차로 나타내면, 식 (6) 이 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda_1^{\alpha_n} - \lambda_2^{\alpha_n}) \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda_2^{\alpha_n} - \lambda_3^{\alpha_n}) \\ \sigma_3 - \sigma_1 &= \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda_3^{\alpha_n} - \lambda_1^{\alpha_n}) \end{aligned} \quad (6)$$

단순인장 조건 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^{-1/2}$) 과 식 (6)으로부터, 주방향 진응력은 식 (7)이 된다.

$$\sigma_1 = \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda_1^{\alpha_n} - \lambda_1^{-\alpha_n/2}) \quad (7)$$

공칭응력은 식 (7)을 λ_1 으로 나누면 ($\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 / \lambda_1$) 된다. 탄성계수는 식 (8)로부터 구한다.

$$E = \left. \frac{d\bar{\sigma}_1}{d\lambda_1} \right|_{\lambda_1 \rightarrow 1} = \frac{3}{2} \sum_{n=1}^N \mu_n \alpha_n \quad (8)$$

식 (5)와 (8)로부터, 변형초기에 $E = 3G$ 가 된다.

2.2 순수전단 응력-변형률 관계

탄성체의 일반화된 Hook 의 법칙 식 (9)와 순수 전단시험 조건으로부터 순수전단시험의 응력-변형률 관계를 변환하고자 한다. ε_i 와 $\sigma_i (i=1,2,3)$ 는 주변형률과 주응력이다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_1 + \nu(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)] \\ \sigma_2 &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_2 + \nu(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)] \\ \sigma_3 &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_3 + \nu(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] \end{aligned} \quad (9)$$

Fig. 2 는 평면응력 조건의 순수전단에 상당하는 주응력 상태의 인장하중을 받는 순수전단시험의 변형을 나타낸다. 하중방향에 수직인 시험편의 폭의 변형이 치구에 의하여 구속되고, 두께 방향은 $\varepsilon_3 = \lambda_3 - 1 = \lambda_1^{-1}$ 의 변형을 갖는다. 따라서 $\varepsilon_2 = \lambda_2 - 1 = 0$ 와 $\sigma_3 = 0$ 를 식 (9)에 대입하면, 순수전단 시험 조건 응력-변형률 관계는 식 (10)과 같고, Turner 와 Brennan⁽⁷⁾의 이론보다 간단하다.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\lambda_1 - 1) \quad (10)$$

여기서 탄성계수 E 는 식 (8)이나 변형초기의 응력-변형률 관계 선도의 기울기 이다.⁽¹⁰⁾ 즉, 식 (10)을 사용하면, 단순인장 시험으로부터 구한 탄성계수와 푸아송의 비를 사용하여 변환 순수전단 시험 데이터를 구할 수 있다. 푸아송의 비는 식 (2)로부터 주방향 연신률의 함수이므로, 식 (10)의 응력-변형률 관계는 연신률의 함수가 된다.

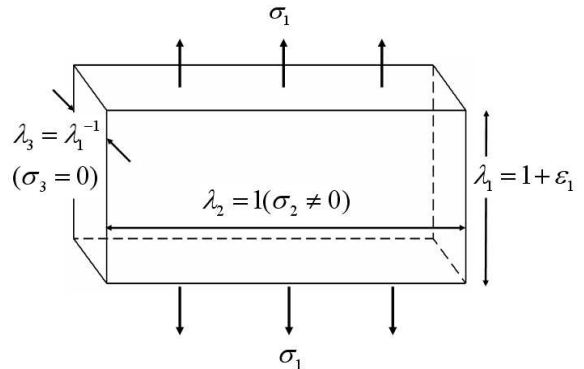


Fig. 2 Pure shear extension configurations

3. 실험 및 고찰

3.1 시편제작 및 실험

물성치 측정을 위하여 카본 충전 고무와 니트릴 부타디엔 고무가 사용되었다. 카본 충전 고무 시편은 천연고무에 대한 카본블랙의 무게가 각각 13%, 19%, 24%, 29%를 사용하였다. 니트릴 부타디엔 고무는 경도가 75 이다. 카본 충전 고무는 인장시험과 순수전단시험 시편을 제작하였고, 니트릴 부타디엔 고무는 인장시험 시편과 실제의 허브베어링 씰을 제작하여 실험을 하였다.

인장시험은, ASTM D 412 를 기준으로, Fig. 3(a)와 같이 게이지 길이 20mm, 폭 5mm, 두께 2mm 의 시편을 제작하였고, 데이터 측정을 위하여 Fig. 3(b)와 같이 마킹하였다. 순수전단시험은 ASTM 규정시험은 아니지만 Fig. 4(a)의 치구와 Fig. 4(b)와 같이 폭 100mm, 높이 10mm, 두께 2mm 의 시편을 제작하여, 상온(23°C)에서 Instron 4505 를 사용하였다. 크로스헤드 이동속도는 200mm/min 로 하였다. 단순인장시험의 변형 측정은 옵티컬 레이저 익스텐션미터를 사용하였고, 순수전단시험의 변형 측정은 크로스헤드의 이동 거리를 사용하였다.

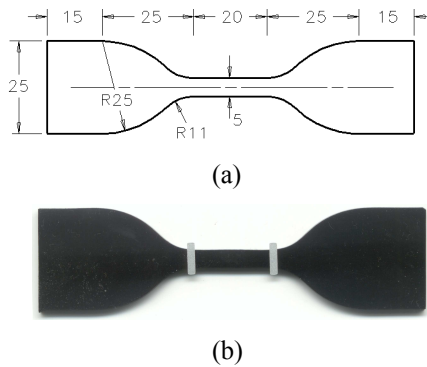


Fig. 3 (a)Dimensions and (b)Laser marking for uniaxial tension speciems

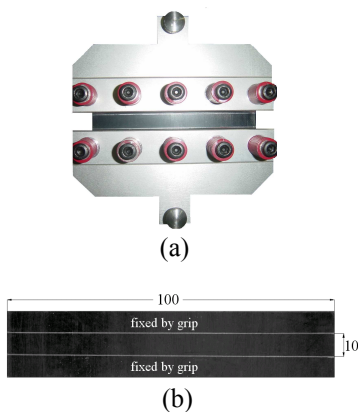


Fig. 4 (a)Apparatus and (b)Dimension for pure shear

Fig. 5, Fig. 6 그리고 Table 1 은 카본 충전 고무의 물성치 측정시험 결과이다. 물성치를 측정할 때 Mullins effect 를 고려하기 위하여 단순인장시험은 100% 인장변형을 4 회 반복하고 15 분 정지한 후 300%이상 응력-변형률 데이터를 측정하였다.

Fig. 3 의 인장시편 시험 데이터와 Ogden 모델 변형률에너지 함수를 이용하여 응력-변형률 값과의 차이를 최소화하여, Table 1 의 카본 충전 고무 Ogden 상수를 구하였다.

Fig. 5(a)는 단순인장 시험의 공칭응력-변형률 데이터이고, 약 50% 전후의 변형률에서 변곡이 발생하는 것을 보여준다. 이것은 Bechir 등⁽¹⁾과 Penn⁽³⁾의 결과와 유사하다. 초기 5% 변형의 응력-변형률 데이터로 구한 탄성계수를 Table 1 에 카본블랙 각각의 무게에 대하여 나타내었다. Fig. 5(b)는 순수전단시험의 공칭응력-변형률 관계이고 약 40% 변형률에서 변곡이 발생한다. 인장시험은 약 200%, 순수전단시험은 약 125%의 변형에서 제 2의 비선형이 발생하고 있다.

Fig. 6 은 식 (2)와 단순인장시험 데이터로 구한 푸아송의 비를 변형률에 대하여 나타낸 것이다. 카본블랙 무게비의 구분없이 하나의 그래프로 겹친다. 변형이 0.15%, 50%, 100%일 때, 푸아송의 비는 각각 0.4994, 0.3667, 그리고 0.2925 이다.

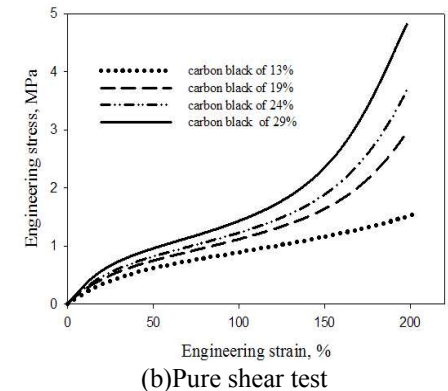
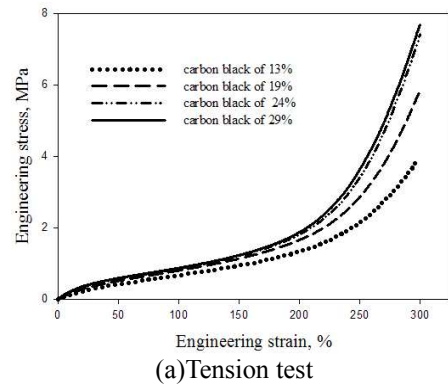


Fig.5 Stress-strain curves for carbon-filled rubber

Table 1 Material properties by simple tension test of carbon-filled rubber

Carbon weight ratio	Elastic modulus	Ogden constant			
		μ_1	α_1	μ_2	α_2
13%	1.267	μ_1	10.4882	α_1	1.82004
		μ_2	0.000276	α_2	7.66813
		μ_3	-9.9372	α_3	1.83365
19%	1.710	μ_1	-0.26969	α_1	-5.3217
		μ_2	-45.4972	α_2	7.75196
		μ_3	45.4961	α_3	7.75198
24%	2.201	μ_1	9.5365	α_1	5.88441
		μ_2	-9.61385	α_2	5.87914
		μ_3	-0.31096	α_3	-7.5445
29%	2.547	μ_1	-0.57490	α_1	-2.9949
		μ_2	0.012806	α_2	3.68922
		μ_3	0.000342	α_3	8.2243

*. μ_i unit is MPa

Table 2 Material properties by simple tension test of nitrile-butadiene rubber

Hs (JIS B 7727)	Elastic modulus	Ogden constant			
		μ_1	α_1	μ_2	α_2
75	12.362	μ_1	-2.019	α_1	-3.2308
		μ_2	0.2013	α_2	3.7151

Table 3 Material stress for strain 100%

Carbon weight ratio	Tension	Pure shear	
	Experimental value(MPa)	Experimental value(MPa)	Transformation value(MPa)
13%	0.673	0.896	0.714
19%	0.804	1.127	0.936
24%	0.856	1.242	1.204
29%	0.874	1.441	1.396

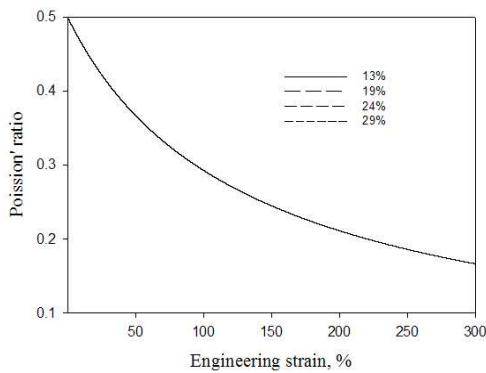


Fig. 6 Poisson's ratio curves for engineering strain of carbon-filled rubber

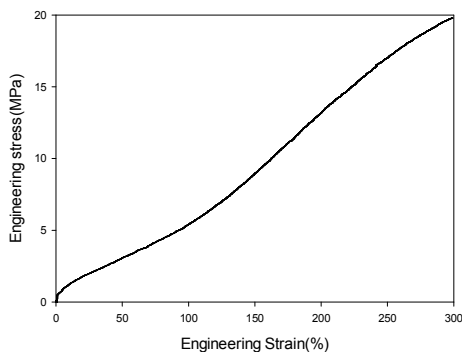
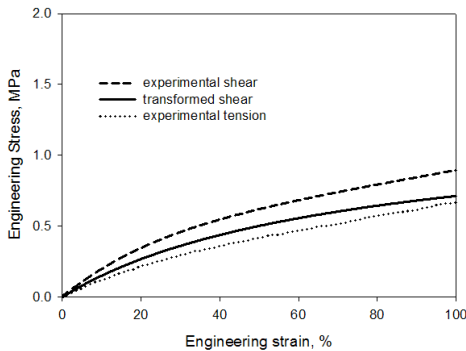


Fig. 7 Stress - strain of nitrile-butadiene rubber by simple tension test

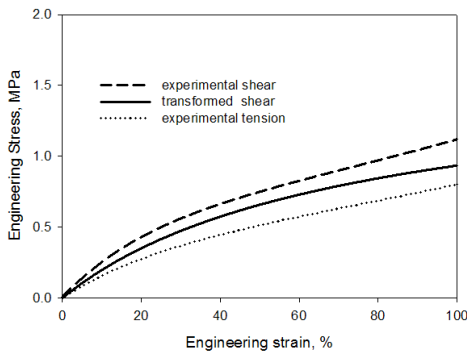
Fig. 7 과 Table 2 는 니트릴 부타디엔 고무의 단순인장시험으로부터 구한 결과이다. Fig. 7 의 응력변형률 결과를 이용하여 Table 2 의 2 항 Ogden 상수를 구하였다. Table 2 의 탄성계수(Elastic modulus)는 Fig. 7 응력-변형 선도의 초기변형의 기울기이다. 니트릴 부타디엔 고무의 단순인장시험 결과는 Fig. 7 에서 보듯이 직선에 가까운 형상이다. 이것은 허브 베어링 씰은 하중흡수 기능이 필요 없기 때문이다.

Table 3 은 카본 충전 고무의 물성치 측정시험 결과(Fig. 5)로 부터 구하였다. 변형률 100%에 대한 인장 및 순수전단에 대한 시험값과 인장시험 데이터로부터 변환된 순수전단시험의 응력을 나타내고 있다.

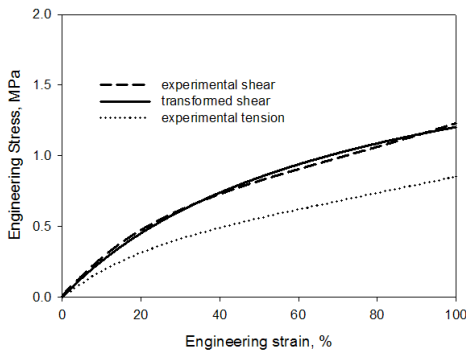
카본블랙의 무게비가 24% 및 29%일 때는 순수전단시험의 실험값과 변환된 값의 차이는 약 3%로 거의 일치하지만, 카본블랙의 무게비가 13% 및 19%일 때는 각각 20%, 16.9%의 차이를 갖고 있다. 이 현상은, 같은 하중에 대하여, 카본블랙의 무게비가 클 수록 하중에 대한 변형량이 적고 카본블랙의 무게비가 작을 수록 하중에 대한 변형량이 크게 발생하기 때문이다. 참고로, 카본블랙의 무게비가 13%, 19%, 24%, 그리고 29%인 재료의 경도는 각각 45 도, 50 도, 55 도, 그리고 60 도이다.



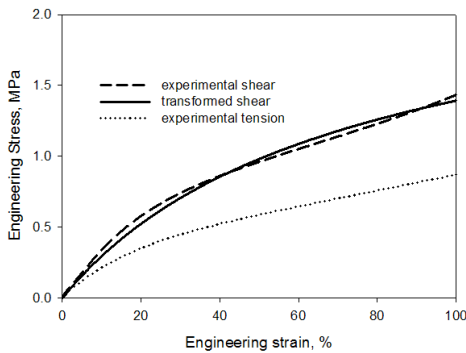
(a) Weight ratio:13%



(b) Weight ratio:19%



(c) Weight ratio:24%



(d) Weight ratio: 29%

Fig. 8 Stress-strain curves for carbon black component

Fig. 8(a)와 (b)로 부터 카본블랙의 무게비가 13% 및 19%이면 변형률 100%까지 변환된 데이터는 실제의 시험 데이터와 편차를 갖지만 실제 시험 데이터와 유사한 경향을 따르고, 순수전단시험 응력이 단순인장시험 결과보다 커야 된다는 일반조건을 만족시키고 있다.

Fig. 8(c)와 (d)와 같이 카본블랙의 무게비가 24% 및 29%일 때, 변환 데이터는 실제 시험 데이터와 거의 일치하는 것을 보여 주고 있다.

그러므로 식 (10)과 같이 간단한 응력-변형관계식을 사용하여 변환한 전단시험 데이터가 실제의 전단시험 데이터와 유사하기 때문에, 단순인장시험 데이터에 의한 순수전단시험 데이터의 변환은 약 100% 변형까지 변환 가능한 것을 알 수 있다. 이 결과는 Turner 와 Brennan⁽⁷⁾이 제시한 방법보다 더 나은 결과이다. 이들의 방법은 변환 데이터가 80% 변형까지 실제 시험 데이터와 선형이기 때문이다. 따라서 자동차의 엔진 마운트나 부싱 설계시 나타나는 변형률은 약 100%이하 이므로, 변환된 순수전단 응력-변형률 데이터는 자동차 고무 마운트의 유한요소해석에 적용하면,^(11~13) 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 9 는 유한요소해석 소프트웨어인 MSC MARC 를 사용하여 엔진마운트의 단면을 대칭 및 평면변형률 조건으로 해석하였다. 하중은 마운트의 중심에서 $y=7\text{mm}$ 의 변위를 적용 하였다. 최대 변형률 및 응력은 고무가 접히는 곳 즉, \square 이 지시하는 곳에 발생한다. 유한요소 해석에 사용된 고무 재료 상수는 Ogden 상수이고, Table 4 에 재료의 물성치(material properties)를 표시하였다. 해석에 사용된 물성치는 3 항 Ogden 상수가 사용하였고, 비교를 위하여 3 종류의 물성치 조합을 사용하였다. 물성치 조합은 각각의 카본블랙 무게 비에 대하여 (1) 인장시험에 의한 물성치(T_{exp}), (2)인장시험과 순수 전단시험 물성치($T_{exp} + S_{exp}$),

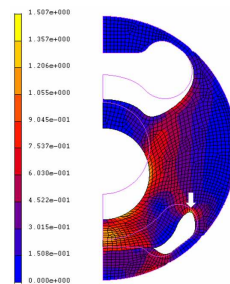


Fig. 9 Deformed shape of engine mount by finite element analysis

Table 4 Maximum stress and strain for materials

Carbon weight ratio(%)	Material properties	Stres (MPa)	Strain (%)
13	T_{exp}	0.90	58.4
	$T_{exp} + S_{exp}$	1.09	58.93
	$T_{exp} + S_{syn}$	1.09	58.9
19	T_{exp}	3.15	49.0
	$T_{exp} + S_{exp}$	1.5	58.18
	$T_{exp} + S_{syn}$	1.23	58.8
24	T_{exp}	7.1	46.5
	$T_{exp} + S_{exp}$	1.54	59.5
	$T_{exp} + S_{syn}$	1.6	58.8
29	T_{exp}	2.5	54.7
	$T_{exp} + S_{exp}$	1.85	59.23
	$T_{exp} + S_{syn}$	1.9	58.9

T_{exp} is tension properties

S_{exp} is planar shear properties

S_{syn} is planar shear properties synthesized by tension data

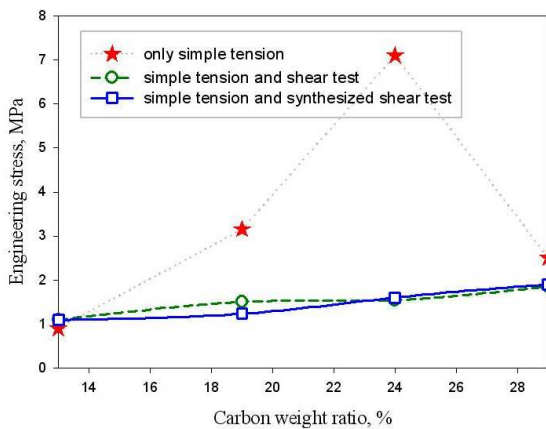





Fig. 10 Engineering stress by FEA for carbon weight

(3)인장시험과 변환된 순수전단시험 물성치 ($T_{exp} + S_{syn}$)를 사용하였다. 이렇게 구한 Ogden 상수를 Fig. 9 와 같은 마운트의 해석에 사용한 유한요소해석 결과를 Table 4 와 Fig. 10 에 나타내었다.

Table 4 와 Fig. 10 에서, 인장시험데이터(T_{exp})만 사용한 유한요소해석 결과는 응력과 변형률 모두 일관성이 없다. 그러나 인장과 순수전단시험 물성치($T_{exp} + S_{exp}$), 인장과 변환된 순수전단시험 물성치($T_{exp} + S_{syn}$)를 적용하여 유한요소해석한 결과는 응력이나 변형률 모두 어떤 경향을 갖는다. 즉, Fig. 9 와 같은 마운트에 대하여, 카본블랙 무게 비가 증가할 때, 같은 변형에 대하여 실제의 순수전

Table 5 Lip contact reaction force of hub bearing seal

		Lip contact reaction force(MPa)				
		Experi-mental Value	FEM analysis			
			Tension Prop.		Tension+Shear (Transformation)	
		Analysis Value	Error (%)	Analysis Value	Error (%)	
	Side Lip	30	33	10	30.4	1.3
	Main Lip	4.9	6	22.4	5	2
	Side Lip	4.4	6	36.3	5	13.6
	Main Lip	12.3	15	21.9	12	-2.4
	Side Lip	40	47	17.5	42	5
	Main Lip	8	11	37.5	10	25

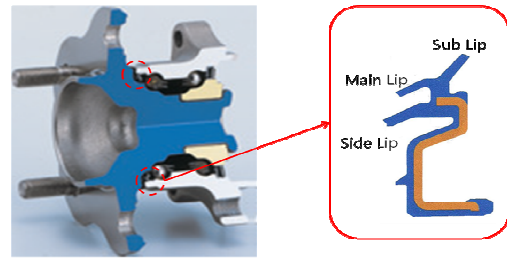


Fig. 11 Section of hub bearing seal

순수전단시험 물성치를 사용하지 않고, 인장시험 데이터로 변환한 순수전단시험 물성치를 인장시험 물성치와 함께 사용하여 유한요소 해석을 하여도 충분히 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

한편 허브 베어링 씰은 Fig. 11 과 같이 차동차의 허브에 장착되어 이물질이 허브 베어링으로 침입하는 것을 방지하는 기능을 한다. Table 5 는 니트릴 부타디엔 고무를 사용하는 허브 베어링 씰의 접촉반력의 해석 및 시험결과를 비교한 것이다. Table 5 에는 허브 베어링 씰의 3 가지 형상의 단면이 나타나 있다. 씰의 기능은 접촉 간섭에 의한 밀봉이지만 이것은 접촉에 의하여 마찰저항 토크를 발생시킨다. 이 저항은 차량의 연비를 악화시키기 때문에 씰 설계의 주요 개선 대상이 된다.

토크는 마찰력에 관계되고, 마찰력은 씰의 수직반력에 관련된다. 그래서 본 연구에서는 씰의 접촉반력의 해석과 시험을 비교하였다. Table 5 에서 보듯이 단순인장 물성치만 적용하면 시험값에 대한 해석값의 오차는 10~37.5%의 오차를 갖지만 단순인장과 변환한 순수전단물성치를 함께 사용하면 시험 대비 해석의 오차는 1.3~25%이다. 이것은 허브베어링 씰의 해석에서도 변환한 순수전단물성치가 유효함을 나타낸다.

4. 결 론

고무제품의 설계를 위한 유한요소해석 신뢰성 향상을 위하여, 단순인장시험 데이터와 푸아송의 비를 사용하여 순수전단시험의 공칭응력-변형을 관계 데이터를 변환하는 방법을 제시하였고, 변환물성치 데이터의 유효성 평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 카본 충전 고무와 니트릴 부타디엔 고무를 푸아송의 비를 연신률 함수로 나타낸 것은 유효하다.

(2) 단순인장 시험 데이터와 푸아송의 비를 사용한 순수전단시험 데이터의 변환은 100%의 공칭 변형률까지 유효하다.

(3) 카본 충전 고무 마운트의 유한요소해석에서, 단순인장시험 데이터와 함께 실제의 순수전단시험 데이터를 사용한 경우와 변환된 순수전단시험 데이터를 사용한 경우의 응력값은 거의 유사하다.

(4) 허브 베어링 쉘의 접촉력을 구할 때 유한요소해석을 사용할 때, 단순인장 물성치를 이용한 것 보다는 단순인장과 변환된 순수전단물성치를 적용한 해석 결과가, 시험값과 비교하여, 약 10% 정도 정확성이 향상 되는 것을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Bechir, H., Chevalier, M. and Boufala, K., 2006, "Hyperelastic Constitutive Model for Rubber-Like Materials Based on the First Seth Strain Measures Invariant," *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 25, No. 1, pp. 110~124.
- (2) Attard, M. M. and Hunt, G. W., 2004, "Hyperelastic Constitutive Modeling Under Finite Strain," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, No. 18-19, pp. 5327~5350.
- (3) Penn, R. W., 1970, "Volume Changes Accompanying the Extension of Rubber," *Journal of Rheology*, Vol. 14, No. 4, pp. 509~517.
- (4) Kim, W. D., Kim, W. S., Kim, D. J., Woo, C. S. and Lee, H.J., 2004, "Mechanical Testing and Nonlinear Material Properties for Finite Element Analysis of Rubber Components," *Transactions of the KSME A*, Vol. 28, No. 6, pp. 848~859.
- (5) Kim, H. Y., Kim, J. J., and Lee, N. K., 1999, "Deformation Analysis and Shape Optimization for Automotive Engine Mounting Rubber," *Transactions of the KSAE*, Vol. 7, No. 4, pp. 347~360.
- (6) Beatty, M.F. and Stalnaker, D.O., 1986, "The Poisson Function of Finite Elasticity," *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 53, pp. 807~813.
- (7) Turner, D. M. and Brennan, M., 1990, "The Multiaxial Elastic Behaviour of Rubber," *Plastics and Rubber Processing and Applications*, Vol.14, pp. 183~188.
- (8) Charlton, D. J. and Yang, J., 1994, "A Review of Methods to Characterize Rubber Elastic Behavior for Use in Finite Element Analysis," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 67, No. 3, pp. 481~503.
- (9) Ogden, R. W., Saccomandi, G. and Sgura, I., 2004, "Fitting hyperelastic Models to Experimental Data," *Computational Mechanics*, Vol. 34, No. 6, pp. 484~502.
- (10) James, A. G. and Green, A., 1975, "Strain Energy Functions of Rubber. II. Characterization of Field Vulcanizates," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 19, pp. 2319~2330.
- (11) Obata, Y., Kawabata, S. and Kawai, H., 1970, "Mechanical Properties of Natural Rubber Vulcanizates in Finite Deformation," *Journal of Polymer Science, Part A-2: Polymer Physics*, Vol. 8, pp. 903~919.
- (12) Tsuge, K., Arenz, R. and Landel, S. J., R., 1978, "Finite Deformation Behaviour of Elastomer: Dependence of Strain Energy Density on Degree of Cross," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 51, No. 5, pp. 948~958.
- (13) Meinecke, E. and Taftaf, M., 1988, "Effect of Carbon Black on the Mechanical Properties of Elastomers," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 61, No. 3, pp. 534~547.