<기술논문> DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.11.1022

비선형 유한요소해석을 이용한 웨더스트립의 특성예측

장왕진† · 한창용* · 우창수** · 이성범***

(2008 년 8 월 4 일 접수, 2008 년 10 월 16 일 수정, 2008 년 10 월 19 일 심사완료)

Prediction for Weather Strip Using Nonlinear Finite Element Analysis

Wang Jin Jang, Chang Yong Han, Chang Su Woo and Seong Beom Lee

Key Words : Weather Strip(웨더스트립), Material Property Test(재료물성시험), Nonlinear Material Constant(비선형 재료상수), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

TPE is used as alternative for rubber, the best example is the weather strip for automobile. The nonlinear material properties of weather strip were important to predict the behaviors of weather strip. Uniaxial tension and equi-biaxial tension tests were performed to achieve the nonlinear material constant and stress-strain curves. The nonlinear material constant of weather strip is evaluated by using the nonlinear finite element analysis. In this paper, the prediction for weather strip is analyzed by using commercial finite element program, ANSYS. The nonlinear finite element analysis of weather strip is executed to predict the behavior of weather strip for automobile.

1. 서 론

고무는 플라스틱이나 다른 재료와는 다른 여러 가지 특성을 가지고 있지만, 가공하기 위해서는 가황가교(vulcanization)등의 복잡한 공정을 거쳐야 하며, 한번 가교되면 더 이상 재생할 수 없는 단점이 있다.(1) 이러한 단점을 개선하기 위해 열가소성 엘라스토머(thermoplastic elastomer, TPE)가 개발되었다. 그 중에서 고무를 대신하기 위하여 사용되는 부품 중에서 대표적인 것은 자동차의 웨더스트립(weather strip)이다.

웨더스트립은 자동차의 종류 및 구조에 따라서 부품의 형상과 재료, 기능이 달라지므로 설계상의 치수 및 상대 부품에 의한 영향이 완성 차의 기능과 내구성에 많은 영향을 주기 때문에 제품의 형상과 구조적인 특성이 아주 세밀하게 검토되어야 한다.(2)

따라서, 본 논문에서는 낮은 성형 에너지 소비, 재활용 가능, 고품질 등의 장점을 바탕으로 산업과 일상생활에 광범위하고, 빠르게 적용되고 있는 TPE 를 이용하여 만들어진 웨더스트립의 유한요소해석을 위해서 기본적인 물성시험을 수행한다. 또한 물성시험으로 얻어진 응력-변형률 데이터를 이용하여 비선형 재료상수를 구하고, 비선형 재료상수에 따른 해석결과를 알아보고 분석하여 특성을 예측하고자 한다.

2. 재료 물성 시험

2.1 시험 종류 및 시편

Weather strip 의 소재인 TPE 는 고무와 같이 반복되는 하중을 받으면 초기 상태의 분자구조가 재배치되는 Mullins 효과가 나타난다.

일반적으로 유한요소해석을 위해서는 응력-변형률 곡선의 안정화된 데이터를 이용하여야 한다.

이에 따라 본 논문에서는 자동차용 weather strip 의 소재에 대해 단축 인장, 이축 인장 시험을 수행하여 안정화된 응력-변형률 데이터를 획득한

† 책임저자, 회원, 인제대학교 대학원
E-mail : mechjwj10@hanmail.net
TEL : (055)320-3667 FAX : (055)324-1723
* 인제대학교 대학원
** 한국기계연구원 나노역학팀
*** 회원, 인제대학교 고안전차량핵심기술연구소
E-mail : mechjwj10@hanmail.net
TEL : (055)320-3667 FAX : (055)324-1723

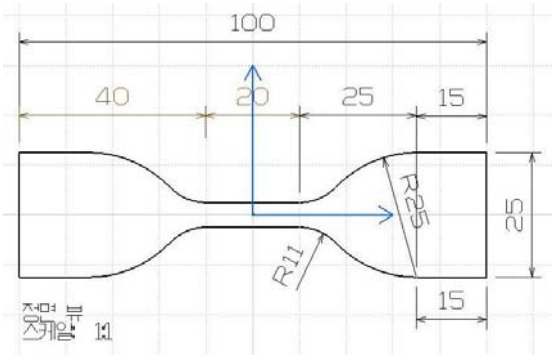
후 유한요소해석에 필요한 비선형 재료상수를 결정하였다.

2.1.1 단축 인장 시험

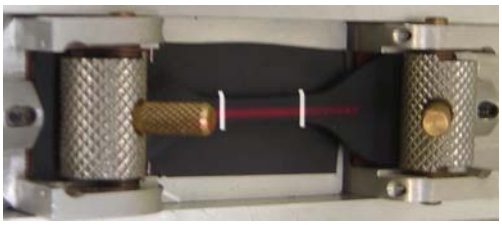
단축 인장 시험은 Fig. 1(a)와 같이 KS 규격 아령형 3 호를 단축 인장 시편으로 사용하였고 Fig. 1(b)와 같이 시편을 장착하여 10, 20, 30%의 변형률 구간에서 각 5 회의 반복하중을 가하였다.

Fig. 2 는 각 변형률 범위에 따른 결과를 나타낸 것이고 변형률 구간이 증가할수록 응력은 감소하는 것을 알 수 있다.

.



(a)



(b)

Fig. 1 Uniaxial tension

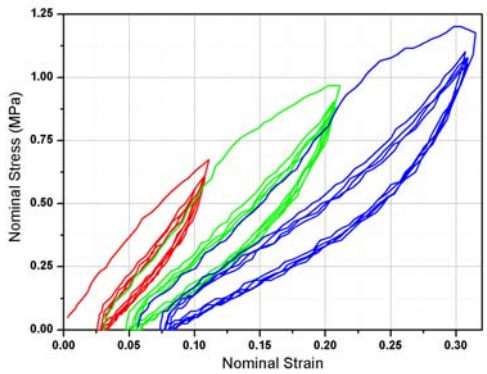
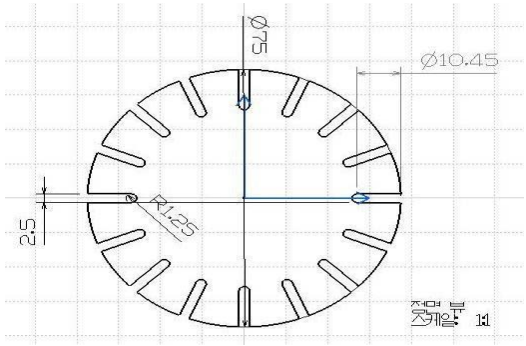


Fig. 2 Experimental stress-strain curve for uniaxial tension test

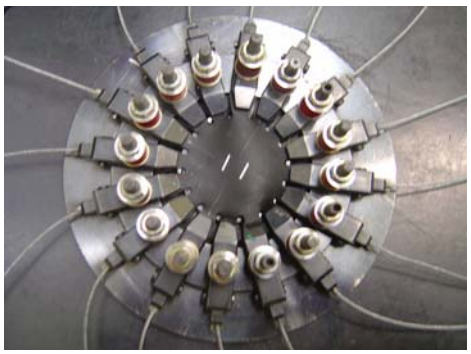
2.1.2 이축 인장 시험

이축 인장 시험은 Fig. 3(a)와 같은 원형 시편을 원주 방향으로 균일하게 인장시켜 응력-변형률 관계를 측정한다. 이축 인장 시험은 단축 압축시험에서 발생하는 문제점을 보완하기 위해 나타난 시험 방법이다.[3]

Fig. 3(b)와 같이 시편을 장착하여 10, 20, 30%의 변형률 구간에서 각 5 회의 반복하중을 가하였고 이러한 과정을 통하여 얻어진 응력-변형률 관계를 Fig. 4 와 같이 나타내었다. 단축 인장 시험과 비슷한 거동을 보이고 응력 또한 감소하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 Equi-biaxial tension test

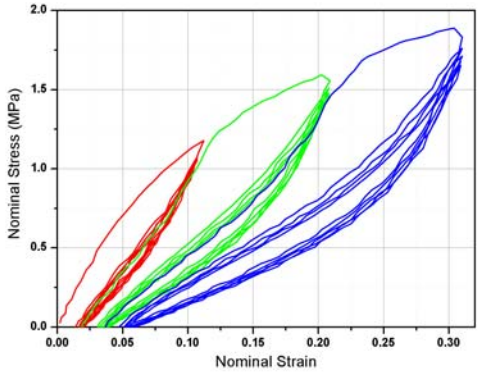
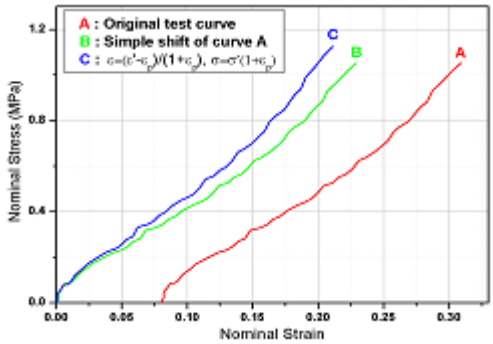
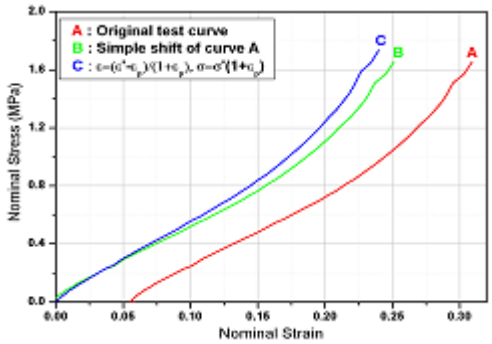


Fig. 4 Experimental stress-strain curve for equi-biaxial tension test



(a) Uniaxial tension test



(b) Equi-biaxial tension test

Fig. 5 Stable stress-strain curves for material test

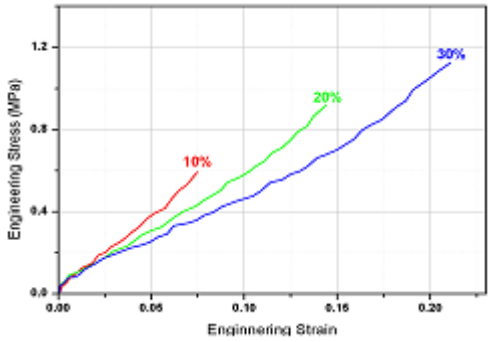
3. 비선형 재료상수

3.1 응력-변형률 데이터 정리

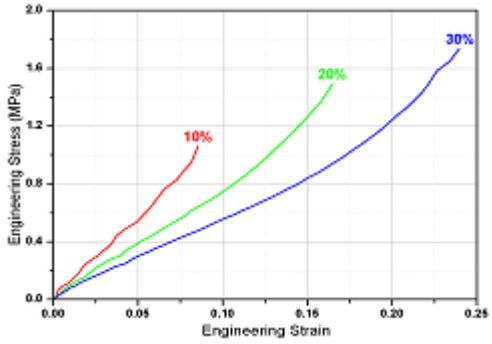
고무의 특성을 가지고 있는 재료들은 이전에 받았던 변형률 보다 더 큰 수준의 변형률을 받으면 일정한 영구변형이 발생하여 응력이 0인데도 불구하고 변형률은 0으로 되지 않는 특성을 가지고 있다.[4] 실험으로 얻어진 응력-변형률 데이터를 유한 요소 해석에 사용하기 위해서는 데이터를 영점으로 이동시키고 반복하중 과정에서 발생하는 단면적의 감소를 고려 해야 한다.[5]

Fig. 5는 이러한 과정을 나타낸 응력-변형률 곡선이다. Fig. 5(a)는 단축 인장 시험에서 변형률 범위 30%에서의 응력-변형률 곡선을 나타내었고 Fig. 5(b)는 이축 인장 시험에서 단축 인장 시험과 동일한 변형률 범위에서의 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 그래프에서 C의 곡선이 실험을 통해 알아보고자 한 최종적인 응력-변형률 곡선이다.

그리고 Fig. 6에서는 각 변형률 범위에 따른 최종적인 응력-변형률 곡선을 나타내었다.

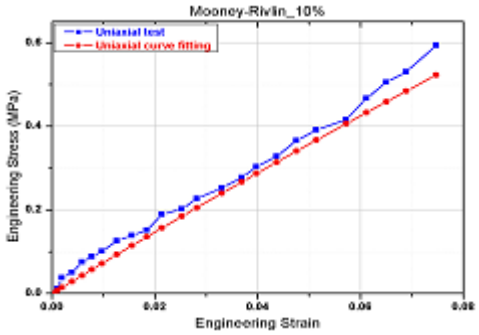


(a) Uniaxial tension test

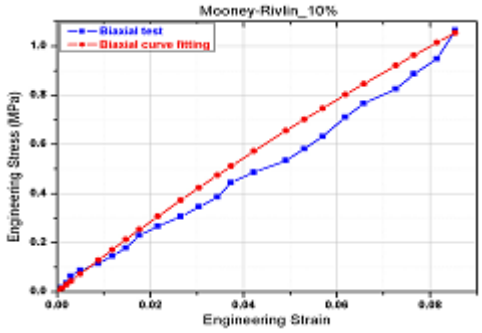


(b) Equi-biaxial tension test

Fig. 6 Stable stress-strain curves for each strain range

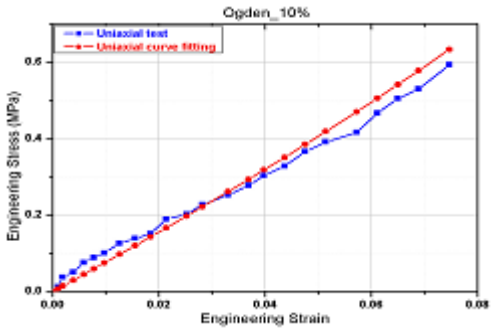


(a) Uniaxial tension

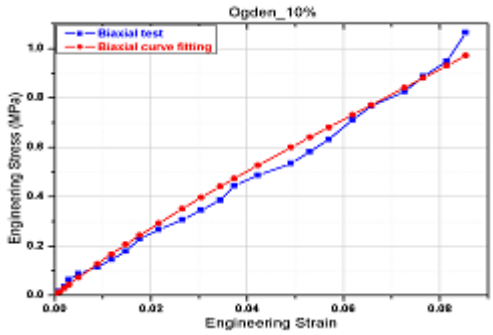


(b) Equi-biaxial tension

Fig. 7 Fitting results for Mooney function



(a) Uniaxial tension



(b) Equi-biaxial tension

Fig. 8 Fitting results for Ogden function

3.2 응력-변형률 데이터 정리

단축 인장 시험 및 이축 인장 시험을 통해 얻어진 응력-변형률 데이터는 커브피팅(curve fitting)을 통하여 재료상수를 구하게 된다. Fitting 시 Mooney-Rivlin 함수의 경우 함수의 선형적 특성으로 인하여 최소 자승법을 사용하였으며, Ogden 함수의 경우 비선형 커브 피팅법을 사용하였다.

Fig. 7은 변형률 구간 중 10%에서의 Mooney-Rivlin 함수로 피팅한 결과이고, Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 변형률 구간에서 Ogden 함수로 피팅한 결과이다. 커브피팅은 상용프로그램인 MARC를 통해 이루어졌다.

Table 1은 Fig. 7의 Mooney-Rivlin 함수로 나타낸 curve fitting 그래프를 바탕으로 획득한 비선형 재료상수이고, Table 2는 Fig. 8의 Ogden 함수로 나타낸 curve fitting 그래프를 바탕으로 획득한 비선형 재료상수이다. 이렇게 재료물성시험을 통해 구해진 비선형 재료상수들은 weather strip의 유한요소해석에 활용될 것이다.

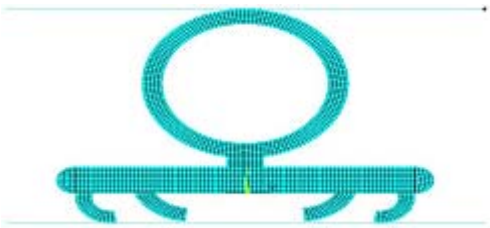
Table 1 Nonlinear material constant for Mooney model

Strain range	C_{10}	C_{01}
10%	1.25096	0
20%	0.915271	0
30%	0.731648	0

Table 2 Nonlinear material constant for Ogden model

Strain range	μ_i	α_i
10%	μ_1 =1.66215	α_1 =2.20739e-5
	μ_2 =2.6217	α_2 =5.97193e-5
	μ_3 =0.537257	α_3 =9.4774
20%	μ_1 =6.95646e-5	α_1 =0.45007
	μ_2 =1.8146	α_2 =1.56852e-5
	μ_3 =0.413546	α_3 =8.74945
30%	μ_1 =0.704225	α_1 =1.11705e-5
	μ_2 =0.355619	α_2 =7.85484
	μ_3 =1.3971e-5	α_3 =4.92596

(a)



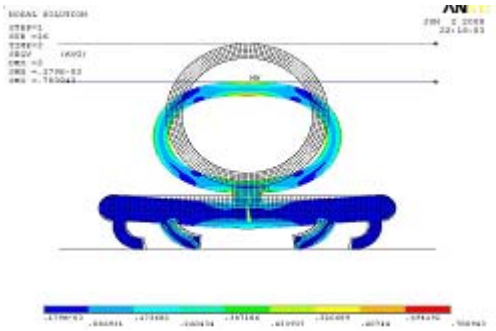
(b)

Fig. 9 Weather strip and FE model

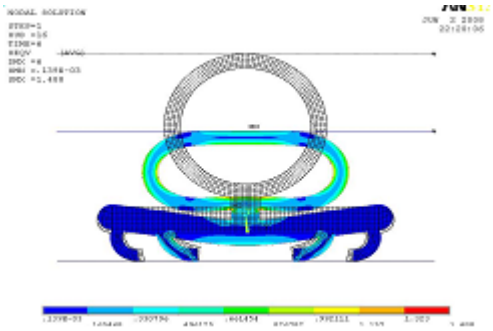
4. Weather strip 의 유한요소해석

본 논문에서는 자동차의 기능성 제품인 weather strip을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다.

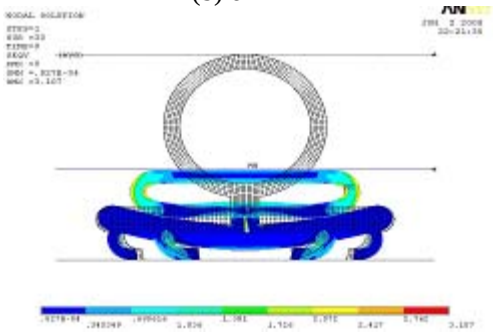
해석을 수행하고자 하는 자동차용 weather strip은 Fig. 9(a)와 같고 유한요소해석은 상용



(a) 3 mm

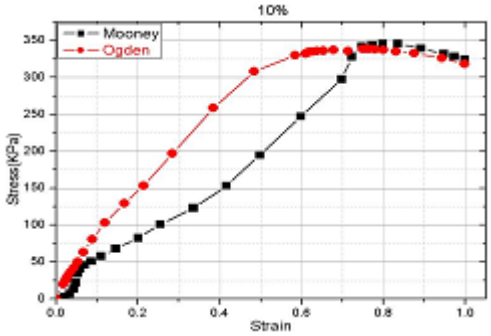


(b) 6 mm

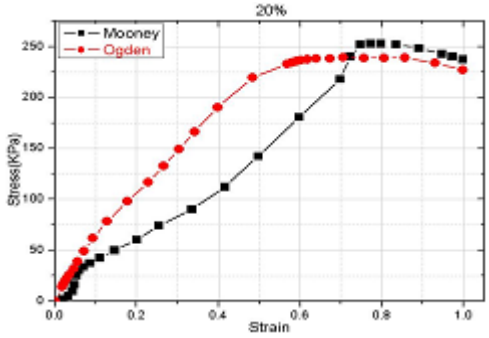


(c) 9 mm

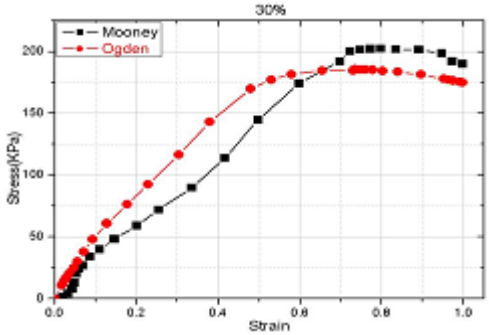
Fig. 10 Analysis results for weather strip



(a) 10%



(b) 20%



(c) 30%

Fig. 11 Stress-strain curves for strain range

프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, Fig. 9(b)와 같이 2차원 평면 변형률모델을 사용하였고 물성은 Mooney 모델과 Ogden 모델을 이용하였다.

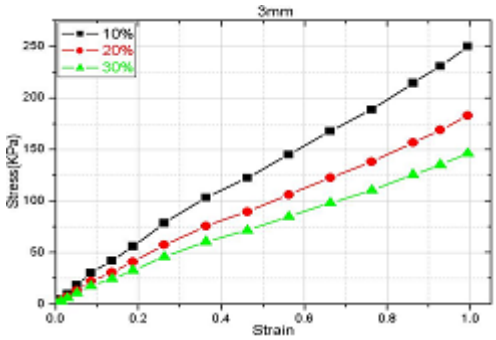
구속조건으로는 weather strip의 변화를 보고자 상하를 강체로 설정하였으며, 상단의 강체를 (-)Y 방향으로 2~9 mm까지 1 mm단위로 이동시켜 변형을 가하였다.

Fig. 10은 (-)Y 방향으로 각 변형 단계에서 weather strip의 변형된 형상 및 변형률 분포를 나타낸 것이다.

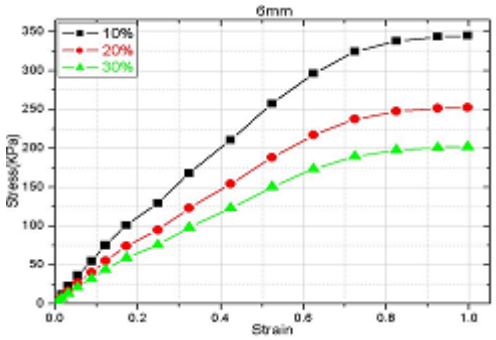
또한, Fig. 11 과 Fig. 12 는 앞장에서 획득한 비선형 재료상수와 변형률의 범위에 따라 각 변형 단계에서의 응력-변형률 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 weather strip의 가장 상단의 부분에서 발생하는 응력과 해석을 수행하였을 때 각각의 이동범위까지를 변형률로 나타내었다.

Fig. 11은 9 mm 변형했을 때 발생하는 응력-변형률 관계를 변형률 범위에 따라 나타내었고, Fig. 12는 3, 6, 9 mm씩 변형을 하였을 때의 Mooney 함수에 대한 응력-변형률을 비교하였다.

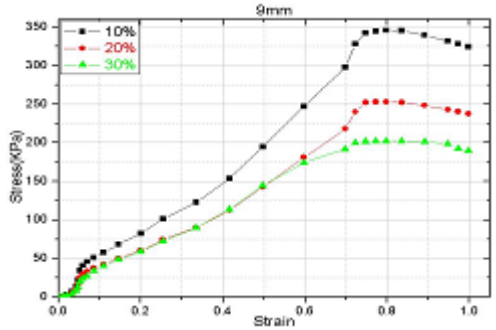
그림을 살펴보면 각 변형 단계에서 함수의 특성으로 최소자승법을 사용한 Mooney 함수의



(a) 3 mm



(b) 6 mm



(c) 9 mm

Fig. 12 Stress-strain curves for deformation step

해석 결과 그래프보다 비선형 커브 피팅법을 사용한 Ogden 함수의 해석 결과 그래프가 완만하다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 10%의 변형률 범위에서 얻어진 비선형 재료상수로 해석을 수행한 응력의 값이 20, 30%의 비선형 재료상수로 해석을 수행한 응력 값보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

이것은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 이전의 변형률 범위보다 더 높은 변형률을 가하게 되면 소재의 강성이 감소하여 응력의 값이 낮아진다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 자동차용 weather strip의 유한요소해석을 수행하여 특성을 예측하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 자동차용 weather strip의 소재인 TPE의 비선형 재료상수는 필수적인 값으로서 해석결과에 영향을 미치게 된다.

(2) 단축 인장, 이축 인장시험을 통하여 비선형 재료상수의 데이터를 획득하였다.

(3) Weather strip의 유한요소해석에서 변형률의 범위에 따른 비선형 재료상수를 다르게 적용하여 응력-변형률 곡선을 획득하였고 해석결과를 비교하였으며, weather strip의 응력-변형률 관계를 예측하기 위해서는 weather strip에 가해지는 변형률 수준에 따라 비선형 재료상수를 다르게 적용해야 함을 알 수 있었다.

(4) Weather strip의 작동 변동 정도에 따른 적절한 재료상수를 정하기 위한 변형률 범위는 weather strip을 이용한 시험을 통하여 차후 변형률의 범위를 정하고자 한다.

참고문헌

(1) Ghoreishy, M. H. R., Razavi-nouri, M. and Naderi, G., 2005, "Finite Element Analysis of a Thermoplastic Elastomer Melt Flow in the Metering Region of a Single Screw Extruder," *Computational Material Sci.*, Vol. 34, pp. 389~396.

(2) Kim, H. Y., Jung, K. J. and Kim, H., 2001, "Development of on Exclusive Non-Linear Analysis Program for the Design of Door Seal," *Autumn Conference Proceeding KSAE*, pp. 1009~1015.

(3) Kim, D. J., Kim, W. D., Kim, W. S. and Lee, Y. S., 2003, "A Study on the Equi-biaxial Tension Test of Rubber Material," *KSME*, pp. 425~430.

(4) Woo, C. S., Park, H. S. and Lee, G. A., 2007, "Material Test and Forming Analysis of Urethane Rubber," *KSME*, pp. 2654~2659.

(5) 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," *KSME*, Vol. 28, No. 6, pp. 848~859.er," *Computational Material Sci.*, Vol. 34, pp. 389~396.