

자동차용 웨더스트립의 영구변형 예측

박 준 철¹⁾ · 민 병 권¹⁾ · 오 정 석¹⁾ · 문 형 일²⁾ · 김 현 영^{*2)}

현대자동차 고분자재료연구팀¹⁾ · 강원대학교 기계메카트로닉스공학과²⁾

Numerical Prediction of Permanent Deformation of Automotive Weather Strip

Joon Chul Park¹⁾ · Byung-Kwon Min¹⁾ · Jeong Seok Oh¹⁾ · Hyung-il Moon²⁾ · Heon Young Kim^{*2)}

¹⁾*Polymeric Materials Research Team, Advanced Technology Center R&D Division for Hyundai Kia Motors Department of Mechanical Engineering, 772-1 Jangduck-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-010, Korea*

²⁾*Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea*

(Received 22 October 2009/ Accepted 14 December 2009)

Abstract : The automotive weather strip has functions of isolating of water, dust, noise and vibration from outside. To achieve good sealing performance, weather strip should be designed to have the high contact force and wide contact area. However, these design causes excessive permanent deformation of weather strip. The causes of permanent deformation is generally explained to be the chemical material deterioration and physical variation and cyclic loading, etc. This paper introduces a numerical method to predict the permanent deformation using the time dependent viscoelastic model which is represented by Prony series in ABAQUS. Uniaxial tension and creep tests were conducted to obtain the material data. And the lab. test for the permanent deformation was accelerated during shorter time, 300 hours. The permanent deformation of weather strip was successfully predicted under the different loading conditions and different section shapes using the suggested numerical process.

Key words : Permanent deformation(영구 변형), Weather strip(웨더스트립), Viscoelastic(점탄성), Creep(크리프), Prony series(프로니 시리즈), Finite element analysis(유한 요소 해석)

1. 서 론

자동차용 웨더스트립(weatherstrip)은 도어 프레임(door frame)과 바디 프레임(body frame) 사이에 장착되며, 외부로부터의 이물질(물, 먼지 등)의 침입을 막고, 소음 및 진동을 차단하는 역할을 한다. 주로 탄성력이 강한 고무 재료 또는 발포 고무(foam) 형태로 압출하여 제조된다.^{1,2)}

위와 같은 사용상의 요구 성능을 만족하기 위하여 일정 수준 이상의 접촉력과 접촉 면적을 갖도록 설계한다. 그러나 제품을 장시간 사용하게 되면 고

무재료의 노화가 발생하여 초기 성능에서 점차 저하된 성능이 나타나게 된다. 이러한 성능 저하의 가장 뚜렷한 현상의 하나가 영구변형(permanent deformation) 발생이라 할 수 있다. 영구변형이란 고무 재료에 가해진 변형이 제거된 후에도 재료에 남아 있는 변형을 의미하는 것으로 어느 정도 회복할 수 있는가를 평가하는 지표가 되는 중요한 물성인자이다.

영구변형은 고무 재료의 물리적인 변화와 화학적인 변화가 원인으로 발생되며, 한 가지 원인이 특정적으로 작용하여 발생할 수도 있고, 두 원인이 동시에 작용하여 발생되기도 한다. 대표적인 물리적인 변화는 점탄성(viscoelastic)이 있으며, 화학적인 변

*Corresponding author, E-mail: khy@kangwon.ac.kr

화는 재료의 노화(degradation), 산화(oxidation)등의 원인으로 인한 분자구조의 변화를 들 수 있다.³⁾

이러한 물리적, 화학적 변화로 발생하는 영구변형을 예측하기 위해서는 실 제품에서의 변형량 데이터를 확보한 후, 가혹한 조건과 상응하는 조건(lab test condition)에서 비교적 짧은 시간 동안의 변화량 데이터와의 상호 연관 관계를 통하여 장시간의 영구변형을 예측할 수 있다. 그러나 실 제품의 사용을 효과적으로 구현할 수 있는 조건 설정이 어려우며, 장시간 동안의 시험에서 발생하는 문제들로 인해 재현성 있는 결과를 얻기가 비교적 힘들어, 모든 시험 조건을 반영하는 시험평가를 진행하는데 많은 시간과 비용이 소모되는 단점이 있다. 이러한 이유로 인해 해석을 통한 영구변형 예측을 위해 많은 연구와 노력이 기울여 지고 있다. 하지만 고무 제품의 영구변형의 예측 및 평가에 관련된 연구는 최근까지 크게 발표되지 않았고, 영구변형의 요인들의 분석에 대한 연구가 주로 발표되고 있다.^{4,9)}

본 논문에서는 웨더스트립 중 하나인 도어사이드 웨더스트립(doorside weatherstrip or door seal)의 영구변형을 유한요소 해석기법을 사용하여 예측하고 실제 시험 결과와 비교해 보았다. 또한 재료적 물성 차이가 웨더스트립의 영구변형에 미치는 영향도를 확인해 보았다.

2. 기초 이론 - 초탄성 및 점탄성

2.1 초탄성

고무 재료는 낮은 응력에서도 높은 변형성을 가지며, 변형률 범위가 1000% 까지 에서도 탄성의 성질을 나타낸다. 또한 하중과 변형과의 관계가 비선형적으로 나타나기 때문에 매우 작은 변형률일 때를 제외하면 탄성 계수(Young's modulus)로 재료의 거동을 표현할 수 없고 훅크의 법칙(Hook's law)도 적용할 수 없게 된다. 이러한 대변형 탄성 거동에 대하여, 단위 체적당 변형률 에너지 포텐셜(strain energy potential) W 의 변화율이 응력에 의한 일률과 같다는 개념을 이용하여 고무와 같은 비선형 초탄성체의 거동을 기술하면 식 (1)과 같다.

$$T = \frac{\partial W}{\partial \epsilon}, \quad T_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \epsilon_{ij}} \quad (1)$$

여기서 T_{ij} 는 2nd Piola-Kirchhoff 응력 텐서(tensor)이며 ϵ_{ij} 는 Green-Lagrange 변형률 텐서이다.

물질의 거동을 탄성이고 등방성이라고 가정하면 W 는 변형률 불변량(strain invariants)의 함수로 표현될 수 있다.

$$W = W(I_1, I_2, J) \quad (2)$$

또한 식 (2)는 변형률 불변량을 주 신장률(principal stretch) λ 로 정의된다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ J &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

고무 재료의 비압축성을 고려하면 J 가 1이 되어, W 는 I_1, I_2 만의 함수가 된다. W 를 표현하는 물질 모델은 많은 연구자들에 의해 여러 가지가 제시되었으며, 본 논문에서는 식 (4)와 같은 오그덴(Ogden) 모델(n=3)을 사용하였다.^{1,2,9-11)}

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

2.2 점탄성

시간 의존성을 고려한 탄성이론을 점탄성 이론이라 한다. 점탄성 재료의 기계적 성질은 탄성 스프링(spring)과 댐퍼(damper)를 사용하여 나타낼 수 있고, 대표적인 모델은 Maxwell 모델과 Voigt 모델이 있다. 본 논문에서는 스프링과 댐퍼를 직렬로 결합한 Maxwell 모델을 사용하여 고무 재료의 점탄성 거동을 해석적으로 표현하였다. 점탄성 재료의 중요한 역학적 특성으로는 크리프 현상과 응력완화 현상이 있다. 물체에 일정한 변형률을 가해 유지할 때 응력이 시간과 더불어 감소하는 현상을 응력완화 현상이라 하며, 반대로 일정한 응력을 작용시킬 때 변형률이 증가하는 현상을 크리프 현상이라 한다.^{12,13)}

점탄성체에 대한 미소 변형률의 전단시험의 경우, 시간에 따라 변화하는 전단변형률 $\gamma(t)$ 가 재료에 가해지면 전단응력 $\tau(t)$ 이 발생된다고 할 때 점탄성 모델은 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$\tau(t) = \int_0^t G_R(t-s) \dot{\gamma}(s) ds \quad (5)$$

이때 $G_R(t)$ 는 t 에 따른 전단 완화 계수(Shear relaxation modulus)이다. 만약 응력 완화 시험에서 응력을 가한 시간 t 를 0이라고 하면, 식 (5)는 $\tau(t) = G_R(t)\gamma$, $\dot{\gamma} = 0, t > 0$ 로 간단하게 정리할 수 있다. 또한 매우 오랜 시간(t_{∞}) 동안 일정한 변형률이 가해지면 변형률이 일정하게 되어 $G_R(t)$ 를 G_{∞} 로 표현할 수 있다. 이를 사용하여 전단 완화 계수를 무차원 형태로 변화시키면 식 (6)과 같이 쓸 수 있다. 여기서 $G_0 = G_R(0)$ 이다.

$$g_R(t) = G_R(t)/G_0 \quad (6)$$

이를 사용하여 식 (6)을 다시 표현하면

$$\tau(t) = G_0 \int_0^t g_R(t-s) \dot{\gamma}(s) ds \quad (7)$$

이 되며, $g_R(0) = 1, g_R(\infty) = G_{\infty}/G_0$ 로 정의할 수 있다. 식 (7)을 대변형률 조건에 적용하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있다. 이때 $\tau_0(t)$ 는 t 에 따른 순간 전단 응력(instantaneous shear stress)을 나타내며, 응력 완화 함수가 변형의 크기에 독립적이라면 $\tau_0 = G_0\gamma$ 인 선형 점탄성 모델을 얻을 수 있다.^{10,12-13)}

$$\tau(t) = \tau_0(t) - \int_0^t g_R(s) \tau_0(t-s) ds \quad (8)$$

점탄성 모델을 수치적으로 풀기 위하여 식 (9)와 같은 Prony series의 형태로 변환할 수 있다. 식 (9)에서 \bar{g}_i^P, τ_i^G 는 재료 상수이며, N 은 Prony series의 차수를 나타낸다.¹⁰⁾

$$g_R(t) = 1 - \sum_{i=1}^N \bar{g}_i^P (1 - e^{-t/\tau_i^G}) \quad (9)$$

3. 재료 시험

재료 시험은 UTM(INSTRON 5882)을 사용하여 70°C에서의 단축 인장 시험(uniaxial tension test)과 크리프 시험을 수행하였다. 사용된 시편은 실제 웨더스트립에서 Fig. 1과 같은 형태로 가공하여 사용하였다. 해석 모델인 웨더스트립이 발포 공정을 통해 만들어지는데, 특정한 시편 형태의 가공이 난해해서 100mm × 150mm의 스트립(strip)으로 시편을 제작하여 재료시험을 수행하였다. 시험 조건은 표

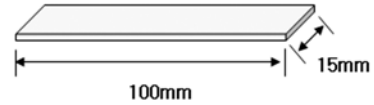


Fig. 1 Shape of specimen for uniaxial tension and creep test

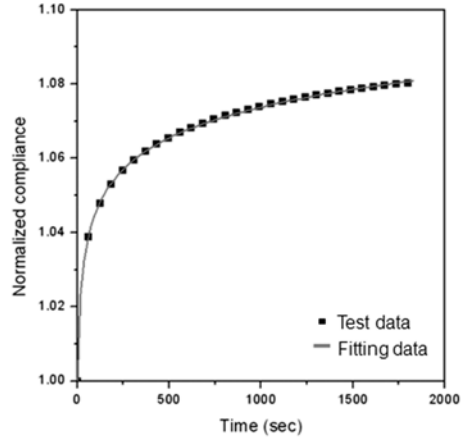


Fig. 2 Creep test data vs. fitting data using the Langmuir Eq.

선거리 20mm, 인장속도(cross head speed) 20mm/min을 사용하였다.²⁾

크리프 시험의 경우 인장시험 결과로부터 얻어진 파단 응력의 30%, 40%에 해당하는 하중을 사용하였다. 고정된 하중으로부터 발생되는 변위 변화를 약 40분간 측정하였다. 이후의 변형률의 변화는 선형적인 것이라 가정하고, 식 (10)과 같은 멱급수(Langmuir EXT2 Eq.)로 장시간에서의 결과를 보외(extrapolation)하였다. 식 (10)에서 Y 는 x 시간에서의 컴플라이언스(normalized compliance)이며, a, b, c 는 크리프 시험 결과로부터 얻어낼 수 있는 상수이다. 두 시험으로부터 얻어진 값들을 통해 해석 모델의 재료모델을 구성하였다.^{8,13)}

Fig. 2는 위와 같은 보외법을 사용하여 예측한 재료 데이터와(line) 실제 크리프 시험 결과(dot)를 비교한 그래프이다.

$$Y = \frac{1}{a + bx^{c-1}} \quad (10)$$

4. 영구변형 해석

4.1 영구변형 및 압축하중

영구변형 예측 해석은 상용 유한요소 해석 프로

그램인 ABAQUS 6.7를 사용하였고, 영구변형 시험 조건을 반영하여 예측 해석을 수행하였다.

영구변형 시험의 경우, 70°C의 열 챔버(chamber)에서 100mm 길이의 웨더스트립을 차체 프레임과 동일한 형상으로 제작된 지그에 장착시키고, 차체 프레임에 해당되는 지그를 설계도면 상의 단함 조건 위치로 이동한 후 고정시켜, 300시간 후 웨더스트립 형상 변화를 측정하는 것이다. 시험 후의 튜브 높이를 L_f , 시험 전 튜브 높이를 L_0 일 때 $1 - (L_f/L_0)$ 의 값을 영구변형률(permanent deformation ratio)이라 정의하면, 본 논문에서 Fig. 3과 같은 모델을 사용하였고, 시험 결과 약 9.0%의 영구변형률이 발생하였다.

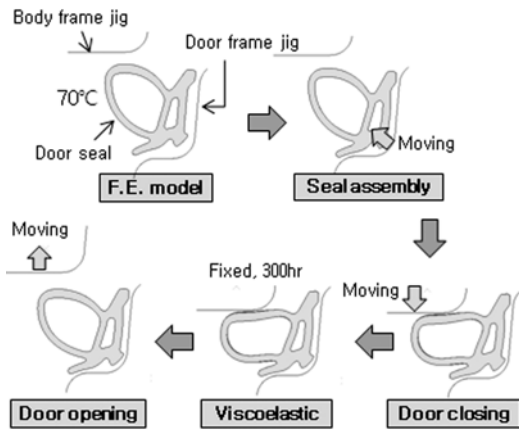


Fig. 3 A process of permanent deformation analysis

영구변형 해석은 Fig. 5와 같은 과정으로 진행되었다. 또한 해석의 효율성을 높이기 위해 도어 시일의 경우 평면 변형(plane strain)조건을 사용하였고, 각각의 프레임들은 강체(rigid body)로 모델링 하였다.¹¹⁾ 해석 결과 약 8.83%의 영구 변형률이 계산되어 신뢰성 높은 결과를 구할 수 있었다.

또한 노화 시간에 따른 영구 변형률과 압축하중 변화를 분석해 본 결과, 시험 결과와 비슷한 경향으로, 초기 30시간 동안 급격한 변화가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 4와 같이 도어 시일과 도어 프레임 간 압축하중이, 300시간 후 약 29% 저하됨을 확인할 수 있었고, 초기 약 1시간 동안 10% 정도의 급격한 변화를 확인할 수 있었다.

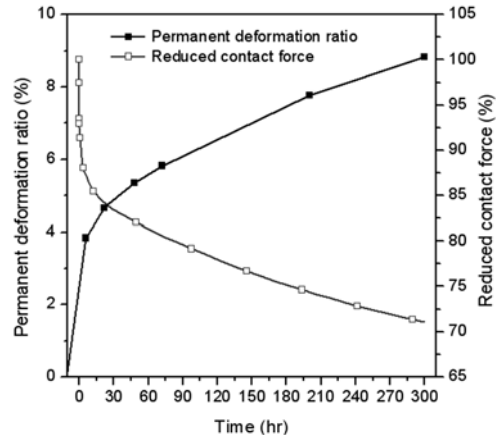


Fig. 4 Change of the contact force between door seal and frame during the viscoelastic analysis step

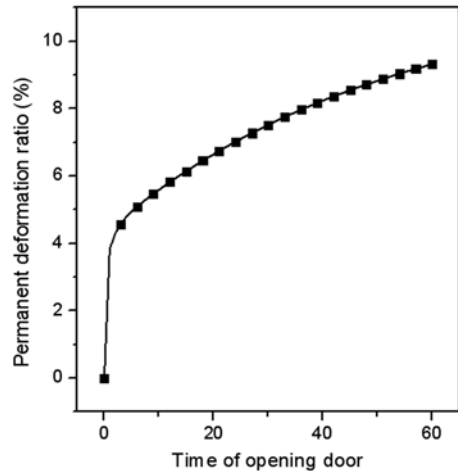


Fig. 5 Change of the permanent deformation considering cycle effects

마지막으로 짧은 시간동안 반복적인 단함 조건에서의 영구변형을 해석적으로 예측하여 보았다. 해석 시나리오는 상온에서 도어를 닫고 6시간동안 유지하다 여는 일련의 과정을 총 60번 반복하는 조건을 사용하였다. 해석 결과 Fig. 5와 같이, 300시간 동안 50번 여닫는 조건에서 영구변형률이 8.84%로 예측되어, 도어가 닫힌 채 유지되는 조건과 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 이는 짧은 시간동안의 도어의 열림은 영구변형률에 있어 큰 영향성을 가지지 못함을 유추할 수 있었다. 추후 장시간의 열림 효과까지 고려한 예측 방안을 보완할 예정이다.

4.2 재료에 따른 영구변형

제시된 영구변형 예측 해석 프로세스를 사용하여 재료 물성에 따른 영구변형 정도를 비교해 보았다. 이를 위해 Fig. 2의 형상을 동일하게 사용하고 서로 다른 3가지 재료에 대한 영구변형량을 예측하였다.

Fig. 6은 재료별 단축인장 시험 결과를 나타내는 그래프이다. Material A는 두 재료에 비해 약 80% 정도 작은 강성값을 가지며, Material B와 Material C는 서로 유사한 강성을 가짐을 알 수 있다.

또한 Fig. 7과 같이 각 재료에 대한 크리프 시험 결과는 Material B, Material A, Material C의 순으로 Normalized creep compliance가 크게 나타났다.

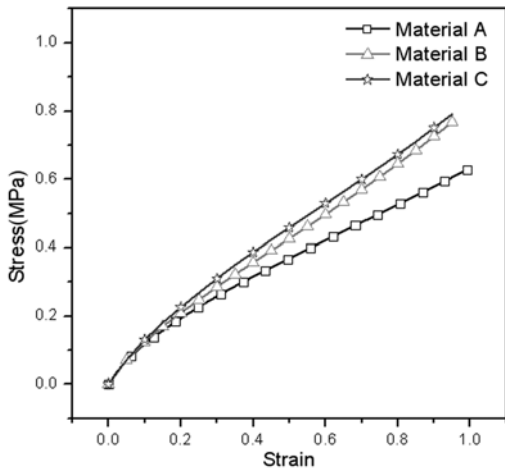


Fig. 6 Uniaxial tension test result of three materials

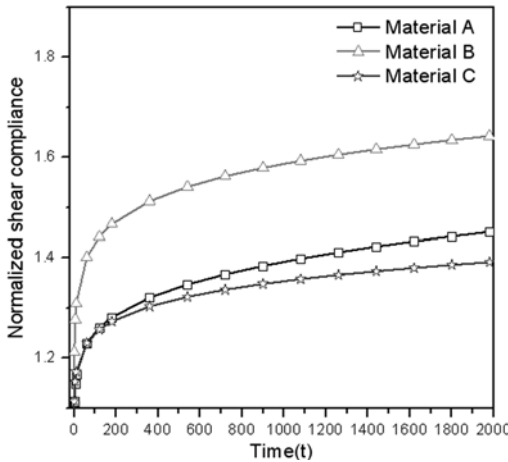


Fig. 7 Creep test result of three materials

Table 1 Analysis results using 3 materials

	Material A	Material B	Material C
Permanent deformation ratio	7.39%	10.55%	7.09%
Reduced ratio of contact force	23.76%	33.27%	22.71%

각 재료에 대한 영구변형 해석 결과는 Table 1과 같다. 재료 강성보다는 크리프가 작을수록 영구변형이 적게 발생함을 알 수 있다.

해석 결과로 유추하여 볼 때, 재료의 강성이나 초기 접촉력이 가지는 영향성 보다는 시간에 따른 재료의 물성 저하가 영구변형 발생에 더욱 중요한 인자임을 확인 할 수 있었다.

5. 결론

본 영구변형 예측 프로세스는 웨더스트립의 씰링(sealing) 성능 향상에 일조할 재료개발의 방향을 제시하였으며, 영구변형 최소화를 위해 크리프 현상(점탄성 효과)이 적게 나타나는 재료를 개발하고 있다. 그러나 장시간의 크리프 시험 결과 예측에 사용된 보외적 예측 방법의 신뢰성 검증 및 반복 효과 구현 방안 등과 같은 내용은 추후 보완되어야 할 것이다. 본 논문의 결과는 다음과 같이 요약 할 수 있다.

- 1) 웨더스트립의 영구변형 해석을 위해 70°C에서의 단축인장 시험과 크리프 시험을 UTM을 사용하여 실시하였다.
- 2) 크리프 시험의 효율성을 높이기 위하여 단시간의 시험 결과를 사용한 장시간의 시험 결과 예측 방안을 제시하였다.
- 3) ABAQUS의 오그덴(3차)모델과 Prony series를 사용하여 영구변형 해석을 수행하였고, 300시간 동안의 해석 결과와 영구 변형 시험 결과가 유사하게 나타남을 확인하였다.
- 4) 300시간동안 단함 상태로 있을 때의 영구변형과 6시간 마다 여닫는 상태에서의 영구변형의 해석 결과가 동일하게 예측되었다.
- 5) 강성이 다른 3가지 고무 재료에 대한 단축인장 시험 및 크리프 시험을 실시하였고, 시험 결과를 사용한 영구변형 해석 결과를 통해 초기 강성보

다는 시간에 따른 물성 저하가 영구변형량에 주요한 인자임을 확인 할 수 있었다.

References

- 1) H. Y. Kim, J. Y. Choi and J. C. Shim, "Nonlinear Finite Element Analysis for the Shape Design of Automotive Weather Strips," Autumn Conference of KSME, pp.448-455, 1997.
- 2) H. I. Moon, B. K. Min, J. S. Oh, J. C. Park, S. H. Lee and H. Y. Kim, "Prediction of Door Closing Performance," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.1678-1683, 2008.
- 3) S. B. Seo, "Introduction of Rubber Behavior for structure analysis," Transaction of KSR, Vol.8, No.2, pp.50-62, 2005.
- 4) S. Park, S. Y. Lee and E. Kang, "Sealing Performance Prediction of Thermoplastic Rubber Component using Non-Linear Large Deformation F.E.M.," Autumn Conference of KSME, Vol.A, pp.669-673, 2001.
- 5) K. Y. Lee, S. Shin, K. H. Chung, T. H. Yoon and S. Kang, "Elastic Response of Filled and Unfilled Green Rubbers," Elastomer, Vol.38, No.3, pp.273-280, 2003.
- 6) C. S. Woo, W. D. Kim and S. S. Choi, "Material Characteries Evaluation and Useful Life Prediction by Heating Aging of Rubber Materials for Electronic Component," Spring Conference of KSME, pp.130-135, 2005.
- 7) A. Dorfmann and R. W. Ogden, "A Constitutive Model for the Mullins Effect with Permanent Set in Particle-reinforced Rubber," IJSS, Vol.41 pp.1855-1878, 2004.
- 8) A. Mostafa, A. Abouel-Kasem, M. R. Bayoumi and M. G. El-Sebaie, "On the Influence of CB Loading on the Creep and Relaxation Behavior of SBR and NBR Rubber Vulcanizaters," Materials & Design, Vol.30, Issue 7, pp.2721-2725, 2009.
- 9) D. A. Wagner, H. N. Morman Jr, Y. Gur and M. R. Koka, "Nonlinear Analysis of Automotive Door Weatherstrip Seals," Finite Element in Analysis and Design, Vol.28, pp.33-55, 1997.
- 10) ABAQUS 6.7 Theory Manual.
- 11) H. Y. Kim, J. J. Kim and N. K. Lee, "Deformation Analysis and Shape Optimization for Automotive Engine Mounting Rubber," Transactions of KSAE, Vol.7, No.4, pp.347-360, 1999.
- 12) K. H. Yoon and B. K. Yu, "An Experimental Study on the Viscoelastic Coefficient of Polystyrene," Autumn Conference of KSME, Vol.1, No.1, pp.751-754, 2000.
- 13) J. D. Ferry, Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- 14) OriginLab, Origin Reference V8, OriginLab Corporation, Miami, 2007.