

## 자동차 도어 웨더스트립의 유한요소 모델링 및 해석

김광훈\*(부산대학교 기계설계공학과), 문병영(부산대학교 기계기술연구소),  
김병수(인제대학교 기계자동차공학부)

### Non-linear Analysis for a Weatherstrip of a Vehicle Door with FE Modeling

K. H. Kim(Mech. Design & Eng. Dept. PNU), B. Y. Moon(RIMT PNU),  
S. B. Kim(Mech. & Vehicle Eng. Dept Inje Univ.)

#### ABSTRACT

Weatherstrip seals protect passengers from noise, dust, rain and wind out of the vehicle. The more contact area between a body frame and a weatherstrip, the higher efficiency of sealing. A weatherstrip is a sort of an elastomer. Mechanical properties of the weatherstrip is obtained by uniaxial tension test. In this study, nonlinear finite element(FE) analysis is performed to obtain displacements and contact shapes of the weatherstrip. The FE model is developed by using Ogden-foam formulation. In the results of nonlinear FE analysis, the most valuable deformation of the weatherstrip occurred when displacement control value reaches 7.2mm. Severe deformation is observed as the displacement control value become more increased.

**Key Words** : Weatherstrip (웨더스트립), Nonlinear (비선형), Finite element (유한요소), Ogden model (오그덴모델)

#### 1. 서론

현대사회에서 자동차가 인간의 생활 및 산업 활동을 영위하기 위한 필수품으로 자리 매김 함에 따라 자동차의 성능 향상뿐 아니라 운전자에 대한 편의성과 정숙성을 보다 많이 요구하고 있다. 그러므로 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 자동차의 여러 가지 부품들이 개발/생산되고 있다. 특히, 우수한 탄성복원 특성과 함께 방진, 방음, 완충의 특성을 잘 나타낼 수 있는 고무·포움 재질로 만들어지는 부품은 자동차 내에서 정숙성과 안락함을 최대로 만족시키기므로 현재 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

차량 도어시스템에서 웨더스트립(weatherstrip)은 차량 외부에서 오는 소음, 먼지, 비, 바람 등으로부터 운전자를 보호하는 기능을 가진다. 차체(body frame)와 웨더스트립의 접촉에서 웨더스트립의 접촉효율이 좋을 수록 내구성이 좋아서 그 기능상의 특성을 오래도록 유지시킬 수 있다. 도어의 닫힘 성능을 결정하는데 중요한 인자인 웨더스트립은 차체와의 접촉에서 반력이 너무적으면 실링(sealing)성이 나빠지고, 너무크면 닫힘 성능이 낮아진다. 따라서 차체와의 접촉에서 웨더스트립의 적절한 반력과 변형을 찾아내는 것은 설계에서 중요한 관점이 된다.

본 연구에서는 차체와의 접촉 특성을 고려하여 최적의 닫힘 성능을 얻을 수 있는 웨더스트립을 설계하고자 한다. 웨더스트립의 재료특성을 얻기 위해 1축 인장실험을 통하여 기계적 물성치를 구하고, 대변형 해석 수행을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 마크(MARC)를 사용한다. 1축 인장 실험 결과를 마크의 입력값으로 사용하여 웨더스트립이 차체와 접촉할 때의 변위가 6mm에서 0.1mm씩 증가하여 8mm 까지 변화하는 경우에 대해 해석하였다<sup>1,3</sup>.

#### 2. 웨더스트립의 특성

##### 2.1 초탄성

고무 또는 고무와 비슷한 물리적 성질을 갖는 물질의 가장 큰 특징은 낮은 응력에서도 높은 변형을 갖는다는 것이며, 변형률의 범위가 500~1000%까지도 탄성의 성질을 나타낸다. 하중과 변형의 관계가 비선형이기 때문에 매우 작은 변형률일 때를 제외하면 Young's modulus로 재료의 거동을 표현할 수 없고, Hook's law도 적용할 수 없게된다. 이러한 대변형의 탄성거동에 대하여 다음의 식은 단위 체적 당 변형률 에너지 W의 변형률이 응력에 의한 일과 같

다는 개념을 이용하여, 고무와 같은 비선형 초탄성체의 거동을 기술한다.

$$T = -\frac{\partial W}{\partial \varepsilon} \quad \text{or} \quad T_{ij} = -\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (1)$$

여기서,  $T_{ij}$ 는 2nd Piola-Kirchhoff 응력 텐서(tensor)이고,  $\varepsilon_{ij}$ 는 Green-Lagrange 변형률 텐서이다.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (2)$$

물질의 거동이 탄성이고 등방성이라고 가정하면, 변형률 에너지 포텐셜  $W$ 는 위의 식 (2)와 같이 변형률 불변량의 함수로 표현 될 수 있다.

여기서, 연신률( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ )에 대한 불변량( $I_1, I_2, I_3$ )은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \\ \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 &= 1.0 \quad (\text{비압축성일 경우}) \end{aligned} \quad (3)$$

대부분의 금속 재료들의 재료거동은 미소 변형률 상태에서 파손되기 때문에 탄성범위 내에서는 선형 응력-변형률 관계를 이용하여 묘사된다. 그러나 고무 유사재료는 대변형(Large Deformation), 대변형률(Large Strain)의 거동을 보이므로, 기존의 금속 재료에서는 무시되었던 재료 비선형 및 대변형률에 대한 언급이 필요하게 된다.

## 2.2 비선형 변형특성

고무는 역학적으로 비선형 탄성대변형 거동을 보이며, 자동차 도어 웨더스트립 실링 부품은 고무 폼 재료로 구성된다. 따라서 웨더스트립 부품의 작동은 대개 대변형을 일으키는 범위에 속하며, 웨더스트립의 변형 해석을 위해서는 유한 탄성론에 근거한 비선형 특성 모델화와 대변형론에 의한 구성방정식이 필요하다.

본 연구에서 사용된 상용유한요소 해석 프로그램인 마크는 고무와 같은 초탄성체의 비선형 해석을 위해 무니모델(Mooney model)과 오그덴 모델(Ogden model)의 두 가지 방법을 가지고 있다. 웨더스트립은 고무·폼 재료로 구성되어 있으므로 고무의 압축성을 고려하여 해석이 수행되어야 한다. 위의 두 모델 중 압축성을 고려하는 모델은 오그덴 모델이다. 오그덴공식은 코시그린 변형텐서에 대한 고유치로 구성되어 있으며, 해석 시 체적탄성계수(bulk modulus)가 존재함으로써 물질을 압축성이라고 가정할 수 있다. 오그덴공식에 근거를 둔 고무·폼모델의 변형률

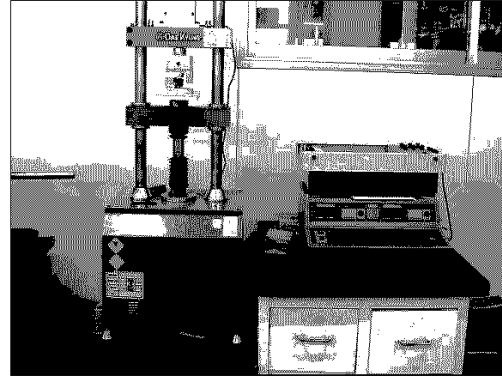


Fig 1 Test machine for uniaxial tension test

에너지식은 다음과 같다<sup>4</sup>.

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

여기서  $\mu_n, \alpha_n, \beta_n$ 은 물질상수이고,  $\beta_n$ 이 0(zero)일 때, 해석모델의 재질은 비압축성 오그덴으로 간주되어진다

따라서 본 연구에서는 오그덴-폼에 대한 변형률 에너지식인 식(4)를 이용하여 마크에서 유한요소 해석을 수행하였다.

## 3. 유한요소 모델링

### 3.1 기계적 특성 실험

고무 부품은 탄성론에 근거한 비선형 특성과 대변형 특성을 가지고 있으므로 일반적으로 초탄성 및 점탄성 이론으로 나타낼 수 있으며, 각각은 비선형 탄성 해석 및 시간의존성을 고려한 동적 해석으로 물성치를 계산한다.

기본적인 물성치의 측정에서 인장시험은 Universal Test Machine(DYU-900 HCM)을 이용하여 50 mm/min의 인장속도와 10 kN의 load cell을 사용하여 일정거리 (10mm) 인장시험을 수행하였으며, 세 번의 실험을 수행하여 평균값으로 인장 강도를 구하였다.

Fig. 1은 실험에 사용된 인장시험기(모델명: DYU-900 HCM)이고, Fig. 2는 시험에 사용된 장구형 시편을 보여주며, 시편은 웨더스트립의 재질과 똑같은 폼 재질이다. 여기서 시편의 규격과 실험 방법은 KS M6518에 따라 수행하였으며, 시편규격은 Figure 5에서 보는바와 같이 길이가 100mm, 센터 폭은 3mm, 두께는 2.2mm의 장구형 시편을 사용하였다.

Table 1은 실험을 3회 수행하여 얻은 결과 및 평

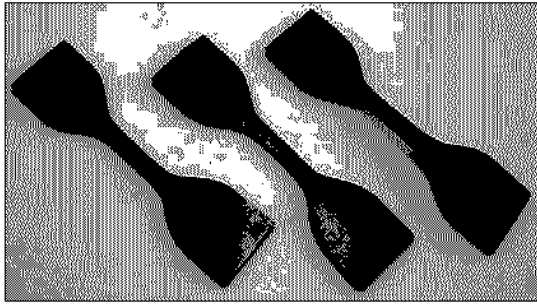


Fig. 2 Specimen for uniaxial tension test-1

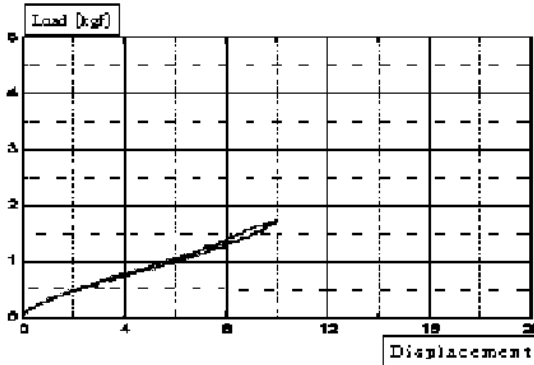


Fig. 3 Results of uniaxial tension test

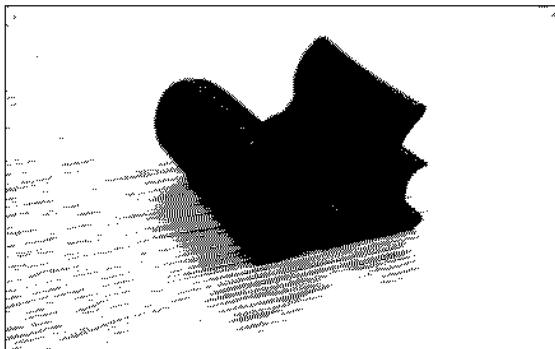


Fig. 4 Specimen of a door weatherstrip

균값을 보여 준다. Table 1의 평균값을 마크 프로그램에 입력하여 비선형 유한요소 해석을 수행하였으며, Fig. 3은 3회의 인장실험 결과를 변위-하중 그래프로 나타낸 것이다.

### 3.2 모델링과 해석조건

웨더스트립의 형상은 동일한 단면 형상으로 길게 늘어져있는 형상이다(Fig. 4). 마크에서 형상 모델링하는 것이 용이하지 않기 때문에 웨더스트립의 형상은 CATIA를 이용하여 모델링한 후, 파일변환과정을 통해 마크에서 2차원 모델을 확보하였다(Fig. 5). 마크에서 구현된 2차원 모델에 요소분할과 경계조건을 적용하여 2차원 유한요소 모델을 얻었다. 이 2차원 웨더스트립 모델은 2358개의 사각요소와 2746개의

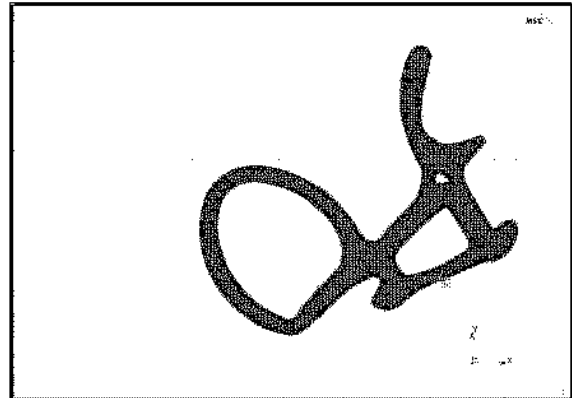


Fig. 5 Finite element model of weatherstrip in MARC

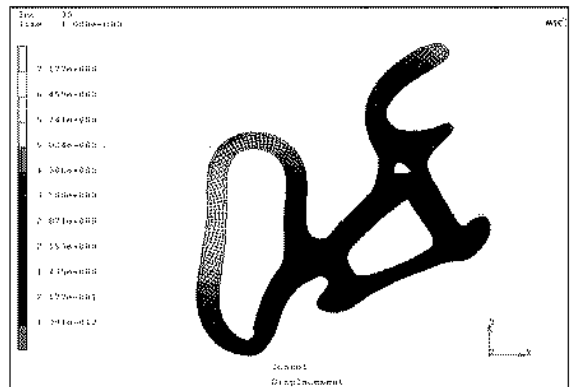


Fig. 6 Deformation result in 7.2mm

노드로 이뤄져 있으며, 평면변형률을 적용하여 해석을 수행하였다.

해석용 상용프로그램인 MARC를 실행하기 위해서 우선적으로 모델에 대하여 경계 조건과 접촉 조건을 부여하여야 한다. 본 연구에서는 유한요소모델의 경계 조건 부여 시, 사이트 도어를 닫거나 열 때 웨더스트립이 빠지는 경우가 발생할 수 있으므로 웨더스트립의 밑 부분을 구속 시켰다. 사이트 도어가 닫힐 때 직접 맞닿는 차체부분은 도어 웨더스트립에 비해 변형이 거의 발생하지 않으므로 도어 웨더스트립만 유연체로 지정하고 나머지 부분은 강체로 간주하였다.

유한요소해석 수행 시 차체의 프레임은 도어 웨더스트립의 수직방향으로 1.87942m/s의 속도로 차체 프레임과 도어 사이의 공차가 3mm 인 상태에서 웨더스트립의 최초 변위를 6mm로 제어한 후 변위량을 0.1mm 씩 증가를 시켜 6mm에서부터 시작하여 8mm까지 웨더스트립을 밀고 들어가게 설정을 하였다.

## 4. 결과

#### 4.1 실링성에 대한 결과

Fig. 6는 변위가 7.2mm일 때의 결과를 보여준다. 여기서 차체 프레임과 웨더스트립의 접촉 변위량이 7.2mm가 될 때, 웨더스트립은 안쪽으로 변형을 일으켜 접촉면 중심부에 차체 프레임과 접촉이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 최대 변형인 8mm 변형에서는 프레임과의 간격이 0.04mm 정도 발생하였다. 따라서 웨더스트립의 변위량이 7.2mm 이상이 될 경우에 웨더스트립은 접촉성 및 실링성이 떨어진다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 반력해석결과

도어의 개폐시 웨더스트립의 접촉반력 상태가 변형 초기에 급격한 증가 후 감소하다가 도어가 완전히 닫히는 지점에서는 반력이 다시 증가하는 것이 이상적이다. Fig. 7은 최대 변형이 발생한 부위에서 나타난 시간에 대한 각 단계별 반력을 보여주며, Fig. 8은 이 과정에서 변위에 대한 반력을 나타낸 것이다. 웨더스트립은 변위량의 변화에 상관없이 유사한 거동을 보였다. 변위량이 6.7mm에서 7.1mm일 때 초기변형에 대한 충분히 큰 반력을 갖는 등 이상적인 거동을 보인다. 특히 변위-반력 선도에서 6.0mm에서 6.6mm까지의 변형량에서는 충분한 접촉면적을 가지지 못했음을 알 수 있다.

#### 4. 결과

본 연구는 상용 비선형 전용 유한요소 해석 프로그램인 마크를 사용하여 자동차 웨더스트립의 접촉 변형에 대한 해석을 차체 프레임을 6mm에서 0.1mm 간격으로 8mm 까지 웨더스트립에 접촉시켜 비선형 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

도어 웨더스트립의 변형이 7.2mm인 경우 최대 변형이 일어나는 지점에서 차체와의 간격이 발생한다. 변형량이 증가할 수록 더 큰 간격이 발생하는데 이는 차체와의 접촉을 불안정하게 함으로 실링성의 저하를 야기시키는 요인이 된다.

접촉면이 틈새와 같은 변형이 없으면서 초기의 반력값은 크게 나타나고, 이후 완만한 반력의 증가를 나타내는 단계인 6.7~7.1mm에서 이상적인 웨더스트립의 거동을 가짐을 알 수 있다. 또한 내구성문제를 고려해볼 때 최고응력이 0.01962~0.02148MPa 정도로 내구성 역시 뛰어난 것을 알 수 있다.

본 연구는 자동차 도어 웨더스트립의 접촉 변형에 대하여 변위량 제어를 통해 최적의 접촉조건을 설계하였다. 웨더스트립에 대해 실험적으로만 수행되었던 10만회 반복 도어 개폐 실험이나, 70. C × 22 시간에 대한 영구변형 실험들이 상용 유한요소 프로그램으로도 해석이 가능할 것으로 사료되며, 이를 바탕으로 지속적인 연구가 추진되어야 할 것이

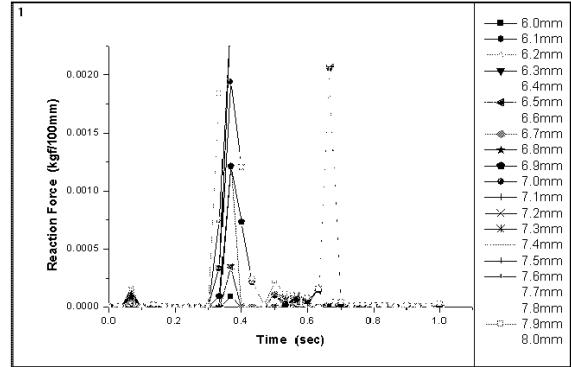


Fig. 7 Reaction force at the most deformed point

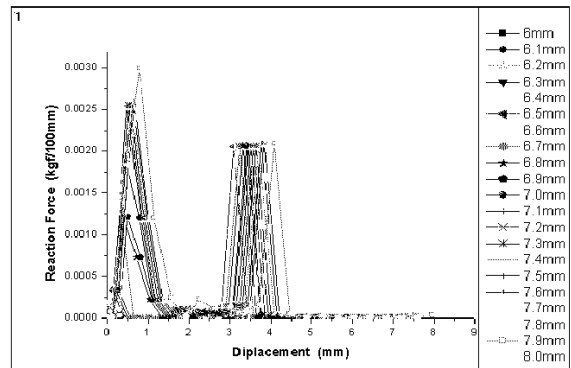


Fig. 8 Reaction force vs. displacement

다.

#### 후기

본 연구는 부산시 자동차부품 기술개발과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. H. Y. Kim, K. J. Jung, H. Kim, "Development of on exclusive non-linear analysis program for the design of Door seal," *Autumn Conference Proceeding*, pp.1009~1015, KSAE, 2001
2. G. J. Han, Y. C. Park, J. J. Shim, "Design of Door Seal Section with Optimal Reaction Force," *Transactions of KSAE*, Vol.8, No.6, pp. 165~172, 2000
3. H. J. Song, "Automotive Weather Strip," *The Korean Institute of Rubber Industry, Rubber Technology*, Vol.1, No.1, pp. 64~71, 2000
4. David A. Wagner, Kenneth N. Morman, Jr. , Yuksel Gur, Madhu R. Koka, "Nonlinear analysis of automotive door weatherstrip seal," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 28, pp.33~50, 1997