

# 비선형 유한요소법을 이용한 자동차 도어 웨더스트립의 접촉변형에 관한 연구

김 병 수<sup>1)</sup> · 문 병 영<sup>\*2)</sup> · 김 광 훈<sup>3)</sup>

인제대학교 기계자동차공학부<sup>1)</sup> · 부산대학교 동남권부품소재산업협력혁신사업단<sup>2)</sup> · 부산대학교 기계설계공학과<sup>3)</sup>

## A Study on Contact Deformation of Automotive Door Weatherstrip Using Non-Linear Finite Element Method

Byung Soo Kim<sup>1)</sup> · Byung-Young Moon<sup>\*2)</sup> · Kwang-Hoon Kim<sup>3)</sup>

<sup>2)</sup>Industrial Liaison Innovation Cluster, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Design Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical and Vehicle Engineering, Inje University, Gyungnam 621-749, Korea

(Received 31 January 2004 / Accepted 14 April 2005)

**Abstract :** In vehicle door system, weatherstrip seals protect passengers form noise, dust, rain and wind out of the vehicle. The higher efficient a weatherstrip is, the more durable it is in contact between the door and body frame. In this study, nonlinear finite element(FE) analysis is performed to obtain cauchy-stresses, displacements and reaction forces of the weatherstrip. Mechanical properties of the weatherstrip is obtained by uniaxial tension test. The MARC which is a commercial software for the nonlinear analysis of a flexible FE model is used. Twenty-one cases of the FE model are 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. When the weatherstrip is designed, it would be considered that the displacement value of the weatherstrip has to be less than 7.2mm.

**Key words :** Weatherstrip(웨더스트립), Finite element analysis(유한요소해석), Cauchy stress(코시응력), Reaction forces(반력), Ogden(오그덴), Foam(포움)

### Nomenclature

Crs : material property

### Subscripts

P : pressure

V<sub>0</sub> : specific volume

τ : shear stress

γ : shear strain

G : shear modules

### 1. 서론

웨더스트립(weatherstrip)은 자동차의 차체(body)와 도어(차체) 등에 장착되어 차체 내·외부의 누수 방지 및 외부소음으로부터 실링(차체)성을 부여하고, 차체의 진동이나 완충작용 역할을 하여 쾌적성과 안락성을 부여하는 자동차의 기능성 제품이다. 웨더스트립의 요구사항으로는 충분한 실링성을 가져야 하며, 적은 압축영구변형과 함께 도어의 닫힘에 최소한의 영향을 주어야 한다.

차량의 상품성을 나타내는 여러 인자들 중에서 자동차 도어의 닫힘 성능은 사용자에게 큰 인상을

\*To whom correspondence should be addressed.  
moonby@pusan.ac.kr

주는 주요 인자중 하나이다. 웨더스트립은 도어와 차체 사이의 충분한 밀폐성을 가져 외부로부터의 소음을 최소화 할 수 있어야한다. 도어의 닫힘 성능을 결정하는 요소로는 도어를 구성하는 부품의 특성, 레이아웃 조건, 사용개시로부터의 경과시간 등 많은 인자로 구성된다. 특히 도어 실(seal)의 경우 그 반력을 작게 하면 실 성능이 나빠지고, 높게 설정하면 도어 닫힘 성능을 저해하는 특성을 가지고 있다. 이러한 도어실링에 관한 연구는 국외에서는 지속적으로 진행되어왔으나, 국내의 연구는 소수의 자동차전문가들에 의해 진행되어 왔다.<sup>1,3)</sup>

본 연구에서는 이러한 도어 실의 특성을 고려하여 적절한 반력을 유지하고, 실링성을 향상시킴으로 소음차단과 누수방지 등 여러 역할을 충분히 수행할 수 있는 웨더스트립을 설계하고자 한다. 웨더스트립의 최적 반력 해석을 연구하기 위해 비선형 유한요소 해석을 수행한다. 웨더스트립 재료에 대한 1축 인장실험을 통하여 기계적 물성치를 구하고, 대변형 해석 수행을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 마크(mm)를 사용한다. 1축 인장 실험 결과를 마크의 입력 데이터로 사용하여 웨더스트립이 차체와 접촉할 때의 접촉 변위가 6 mm에서 0.1 mm 씩 증가하여 8 mm까지 들어갈 경우에 대한 각각의 반력과 응력, 변형양상에 대한 해석을 수행한다.

## 2. 연구방법

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 구성 방정식이 필요하다. 그러한 구성 방정식에 필요한 계수들은 여러 가지 실험을 통해 얻어지게 되며, 본 연구에서는 일축인장 실험을 통해 계수들을 구하고 비선형 전용 프로그램인 마크를 이용하여 웨더스트립의 최적 접촉변위를 알아낸다.

### 2.1 지배방정식의 결정

본 연구에서 사용된 상용유한요소 해석 프로그램

인 마크는 고무와 같은 초탄성체의 비선형 해석을 위해 다음과 같은 2가지 대표적인 종류의 재료모델을 이용한 해석 기법이 가능하다. 즉, 무늬모델(Mooney model)과 오그덴 모델(Ogden model)의 두 가지 방법을 가지고 있다. 무늬의 경우 유한요소해석에서 코시그린 변형텐서(Cauchy-Green strain tensor)에 대한 주연신률 불변량으로 구성되며 해석시 재질을 비압축성 재질로 자동으로 인식하게 된다. 이 경우 지배방정식은 다음과 같다.

$$\overline{W}(I_1, I_2, I_3) = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} (I_1 - 3)^r (I_2 - 3)^s - (2c_{10} + 4C_{01}) \frac{1}{2} \ln(I_3) \quad (1)$$

여기서  $I_1, I_2, I_3$ 는 연신률에 대한 불변량이고,  $C_{rs}$ 는 재료상수들이다.

하지만 오그덴공식은 코시그린 변형텐서에 대한 고유치로 구성되어 있다. 해석 시 체적탄성계수(bulk modulus)가 존재함으로써 물질을 압축성이라고 가정할 수 있으며 오그덴공식에 근거를 둔 고무·폼모델의 변형률 에너지식은 다음과 같다.<sup>4)</sup>

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (1 - J^{\beta_n}) \quad (2)$$

여기서  $\mu_n, \alpha_n, \beta_n$ 은 물질상수이고,  $J$ 가 1일 때, 해석모델의 재질은 비압축성 오그덴으로 간주되어진다.

사이드 도어 웨더스트립은 고무·폼 재료로 구성되어 있으므로 고무의 압축성을 고려하여 해석이 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 비압축성의 일반화된 무늬-리블린(Mooney-Rivlin) 형태를 쓰지 않고, 오그덴-폼에 대한 변형률 에너지 식인 식(2)를 이용하여 마크에서 유한요소 해석을 수행하였다.<sup>5,6)</sup>

### 2.2 재료상수의 결정

유한요소 해석 코드인 마크에 웨더스트립의 기계적 물성치에 대한 입력 데이터로 사용하기 위하여 1축 인장 실험을 수행하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 실험에

사용된 인장시험기(모델명: DYU-900 HCM)와 장구형 시편을 보여준다. 여기서 시편의 규격과 실험 방법은 KS M6518에 따라 수행하였다. 인장시험 속도는 50 mm/min를 가하였으며, 시편규격은 길이가 100 mm, 센터 폭은 5 mm, 두께는 2.2 mm의 덩벨형 시편을 사용하였다. Table 1은 실험을 3회 수행하여 얻은 결과 및 평균값을 보여 준다.

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

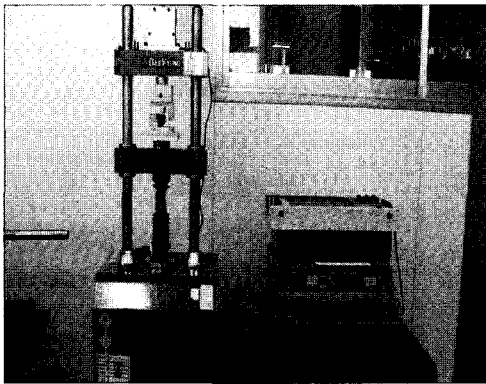


Fig. 1 Test machine for uniaxial tension test (DYU-900 HCM)

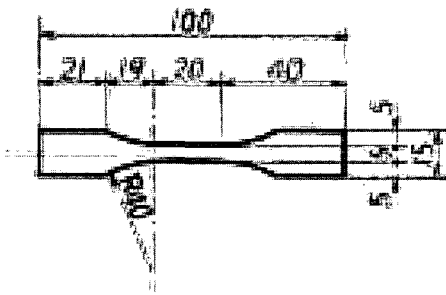


Fig. 2 Specimen for uniaxial tension test

Table 1 Uniaxial tension test results data

번호	최대하중 (kgf)	최대거리 (mm)	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	1.775	10.02	16.14
2	1.750	10.04	15.91
3	1.750	10.02	15.91
평균값	1.758	10.03	15.98

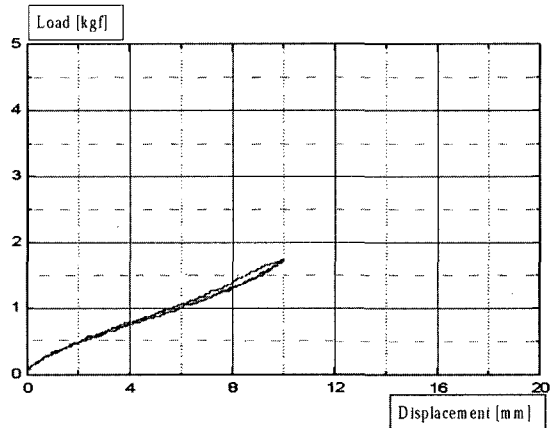


Fig. 3 Results of uniaxial tension test

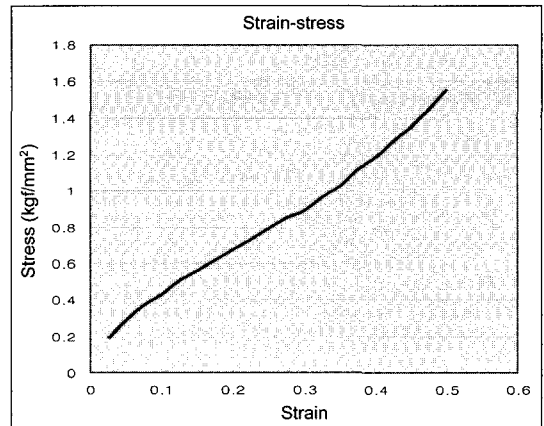


Fig. 4 Strain-stress graph of weatherstrip

다. Fig. 4는 마크상에 입력된 실험값에 대한 웨더스트립의 응력-변형률 거동을 보여준다.<sup>7)</sup>

### 2.3 유한요소 모델링

본 연구에서는 동일 고무 벨트사의 자동차 사이드 도어 웨더스트립 제품을 사용하였으며, CATIA를 이용하여 웨더스트립 기하형상을 2차원과 3차원으로 모델링한 후 2차원 모델을 IGES 파일로 변환하여 마크에 불러들인 후 요소분할을 하여 비선형 유한요소 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 실제 자동차 도어에 사용하는 웨더스트립의 형상을 보여준다. 이 웨더스트립의 형상을 CATIA를 이용하여 3차원으로 모델링한 후 다시 마크를 이용하여 2차원으로 모델링하였다(Fig. 6). 마

크에서 구현된 2차원 모델에 요소분할과 경계조건을 적용하여 2차원 유한요소 모델을 얻었다. 이 2차원 웨더스트립 모델은 약 2400여개의 사각요소로 이뤄져 있으며 평면변형률을 적용하여 해석을 수행하였다.

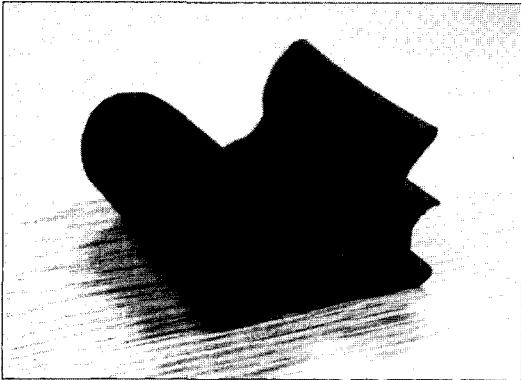


Fig. 5 Door weatherstrip of Dong il Corporation

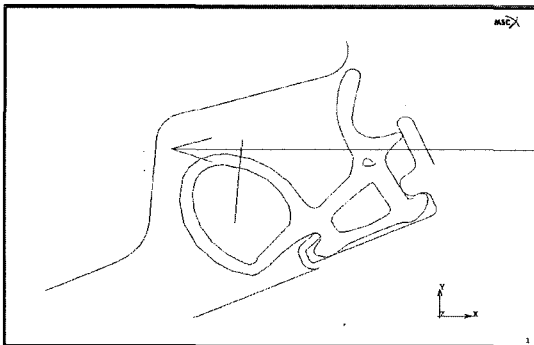


Fig. 6 Two-dimensional modeling of weatherstrip in MARC transformed from CATIA

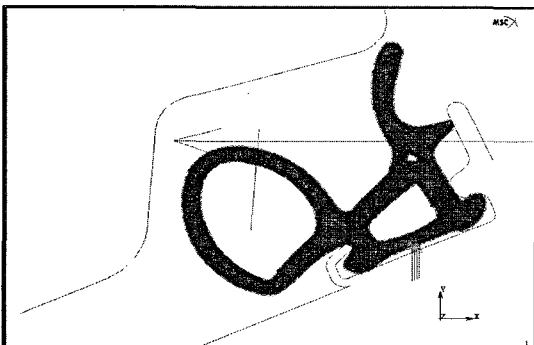


Fig. 7 Finite element model of weatherstrip in MARC

## 2.4 경계조건 및 접촉조건

유한요소 모델의 경계 조건부여 시, 사이드 도어를 닫거나 열 때 웨더스트립이 빠지는 경우가 발생할 수 있으므로 Fig. 8과 같이 웨더스트립의 밑부분을 X-Y 방향으로 구속 시켰다. 도어가 닫힐 경우 차체프레임과 웨더스트립이 접하는 부분에서의 변형을 고려할 때, 웨더스트립의 변형에 비해 차체프레임은 거의 변형이 발생하지 않는다. 따라서 웨더스트립만 유연체로 지정하고 나머지 차체는 강체로 가정한다.

웨더스트립의 대변형을 고려하여 비선형 유한요소 모델로 하여 해석을 수행하였다. 도어와 차체 프레임 사이의 공차는 3 mm이며, 웨더스트립의 최초 변위를 6 mm로 제어를 한 후 변위량을 0.1 mm씩 증가시키면서 해석하였다. 차체 프레임을 웨더스트립에 수직인 방향으로 움직이면서 변위가 최초 6 mm에서 8 mm 될 때까지 해석을 수행하였다.

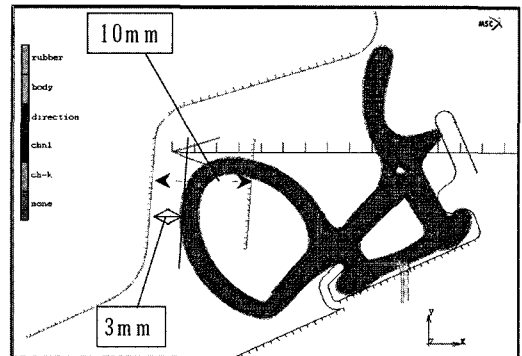


Fig. 8 Contact and boundary condition

유한요소 모델링에 접촉하중을 부가 시 접촉 조건으로 스틱-슬립(Stick-Slip) 마찰 조건을 사용하였으며, 이 경우 마찰계수 값 1.05와 마찰력에 대한 공차 값 0.5를 사용하여 비선형 해석을 수행하였다.

## 3. 해석 결과

먼저 본 연구에서 수행한 웨더스트립의 접촉에 있어서 접촉 형태가 실제의 접촉 형태와 차이가 있는지 비교 하였다. 그리고 총 21가지 경우의 비선형 유한요소 모델링 해석을 수행하였으며, 차체 프레임과 웨더스트립의 접촉하중에 의한 웨더스트립의

변위가 6 mm에서 0.1 mm 씩 증가하여 8 mm가 될 때까지 해석 결과를 코시응력, 변위, 반력에 대해 도출하였다.

### 3.1 단면 변형 형상의 비교

Fig. 9는 실험을 통해 지그가 웨더스트립과 접촉하였을 때의 변형 형상을 보여주며, Fig. 10은 마크를 이용한 해석에서의 접촉된 형상을 보여주는데, Fig. 9와 Fig.10의 변형 형상을 육안으로 비교해 보았을 때 실험시 접촉 형상과 해석시 접촉형상이 거의 비슷함을 볼 수 있었다.

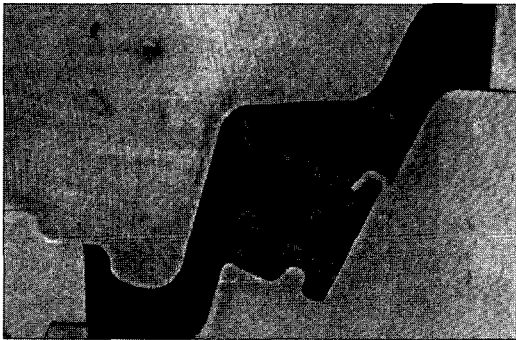


Fig. 9 Specimen of contact shape for test

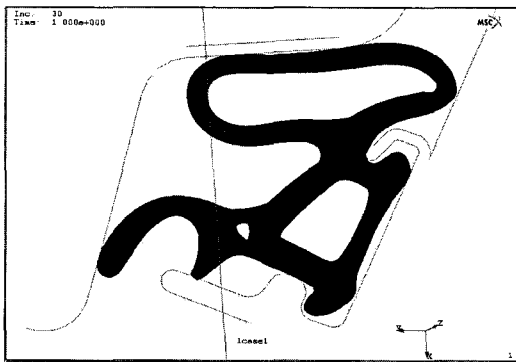


Fig. 10 Deformation of contact shape for MARC

### 3.2 코시응력에 대한 해석 결과

Fig. 11은 변위량이 8 mm가 되었을 때의 최대 코시응력 결과를 보여준다. 여기서 모든 경우 최대 코시응력은 웨더스트립의 아래 부분과 위쪽 부분의 돌기부분 안에서 일괄되게 나타남을 볼 수 있었다. 하지만 각 단계별 경우에 대해 최대 코시응력을 비교하였을 때 웨더스트립의 제어 변위량이 8 mm

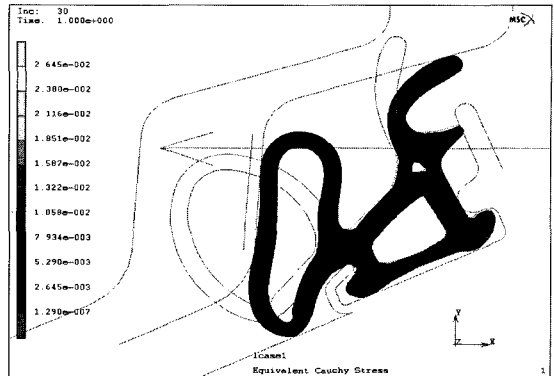


Fig. 11 Result of maximum cauchy stress

가 되었을 때 최대 코시응력이 웨더스트립의 하단 부에서 발생하였다.

### 3.3 변위에 대한 해석 결과

Fig. 12는 최대 변위량 8 mm의 경우에 대한 웨더스트립의 변형상태에 대한 유한요소 해석결과를 보여준다. 7.2 mm의 변위량일 때 차체 프레임과 웨더스트립의 접촉 변위량이 7.2 mm가 될 때 웨더스트립은 안쪽으로 변형을 일으켜 한쪽으로 치우치는 것을 확인할 수 있었고, 8 mm에서는 Fig. 13에서 보여주듯이 프레임과의 간격이 0.04 mm 정도의 갭이 발생함을 확인할 수 있었다. 따라서 웨더스트립의 변위량이 7.2 mm 이상이 될 경우에 웨더스트립은 접촉성 및 밀폐성의 기능이 떨어질 것으로 예상된다.

웨더스트립 부품의 특성을 해석하는 데는 도어가 차체 프레임에 닫히는 순간 차체 프레임과 웨더스트립의 초기 접촉 상태가 중요하다. 특히 이때 웨더

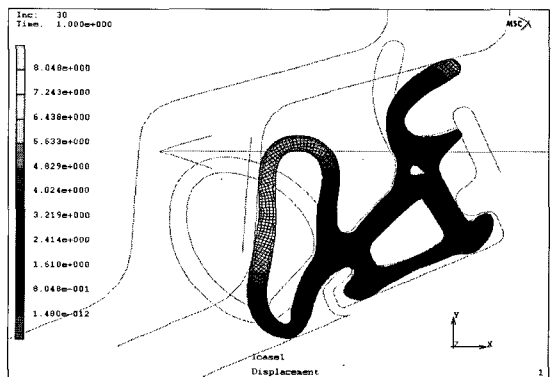


Fig. 12 Result of maximum displacement

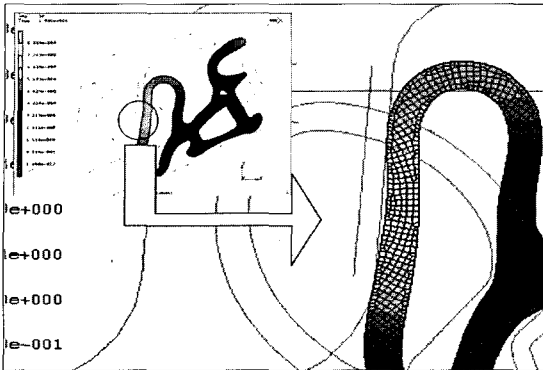


Fig. 13 The gap between the body and the weatherstrip

스트립은 초기 변형을 일으키게 되는데 초기 접촉 시 만족스러운 웨더스트립의 반력상태는 웨더스트립이 초기 변형 시 반력은 급격하게 증가하다가 어느 정도 웨더스트립이 변형 한 후 반력은 완만하게 나타나야 한다. 그리고 도어가 완전히 닫히는 지점에서는 반력이 다시 증가하는 것이 이상적인 웨더스트립 부품의 반력 선도라 할 수 있다.

본 연구에서 나타난 변위-반력 선도를 각 단계별로 해석을 하였을 경우 웨더스트립 부품은 변위량의 변화에 상관없이 유사한 거동을 보였다. 6 mm의 경우와 7.5 mm의 경우에 대해 비교하였을 경우 변위량이 7.5 mm인 경우 초기 반력은 9.24에서 2.70으로 급격하게 감소하는 경향을 보였으며 7.5 mm 이상의 변위량에 대해서 초기 반력은 7.5 mm의 경우와 유사한 값을 나타냈다. 이러한 웨더스트립의 거동은 변위량에서 언급한 내용과 일치한다. 또한 6 mm에서 6.6 mm 까지는 웨더스트립과 차체와의 접

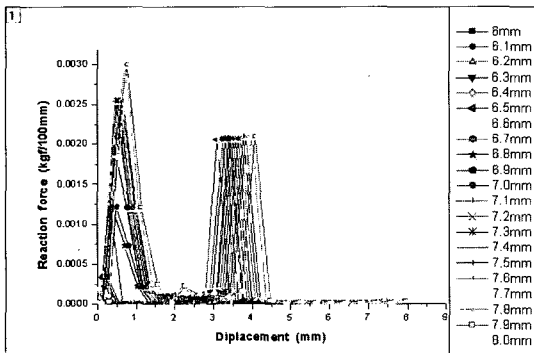


Fig. 14 The displacement-reaction force graph for models of twenty one cases

촉면적이 상대적으로 작게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

### 3.4 반력에 대한 해석 결과

Fig. 14는 각 단계별에 대한 변위와 반력을 나타낸 것이다.

## 4. 결론 및 고찰

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

Fig. 9와 10을 비교해 보았을 때 실제 접촉과 마크를 이용한 해석에서의 접촉된 형태가 거의 똑같이 나타남을 볼 수 있다.

웨더스트립의 최대변형이 일어나는 지점인 7.2 mm에서부터 웨더스트립이 안쪽으로 치우는 현상을 볼 수 있었다. 이는 접촉 면적이 넓으면 웨더스트립 형태의 변화로 인해 접촉이 일정하게 이루어지지 않는다는 것을 확인하였다.

본 연구를 통하여 대변형이 있는 웨더스트립과 같은 비선형 제질에 대한 유한 요소 모델링과 비선형 유한 요소 해석 방법을 제시하였다. 같은 단면을 가진 부품이어서 2차원으로 모델링하였으나, 3차원 모델링과 해석을 한다면 보다 실제적인 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 차량의 부품 중 상품성에 적지 않은 영향을 나타내는 웨더스트립과 같은 부품 개발에 이와 같은 해석법이 사용함으로써 중소기업의 개발과 생산 단계에 드는 시간, 비용, 인력 등을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 논문은 2003년 인제대학교 학술연구구성비 보조에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

## References

1) H. Y. Kim and J. H. Kim, "Development of on

- Exclusive Non-linear Analysis Program for the Design of Door Seal," Autumn Conference Proceeding, KSAE, pp.1009-1015, 2001.
- 2) G. J Han, Y. C. Park and 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) D. A. Wagner, K. N. Morman, Jr., Yuksel Gur and M. R. Koka, "Nonlinear Analysis of Automotive Door Weatherstrip Seal," Finite Element in Analysis and Design, Vol.28, pp.33-50, 1997.
  - 5) MARC Analysis Research Corporation, "MARC VOLUME A Chapter7 Material Library," pp.307-429, 2001.
  - 6) MARC Analysis Research Corporation, MAR103 Chapter3 Material Models Historical Perspective, p.45, 2001.
  - 7) D. H. Kwon and B. S. Kim, "A Study on the Contact Strain of Automotive Door Weatherstrip," Autumn Conference Proceeding, KSAE, pp.139-146, 2003.