

## FEM에 의한 자동차부품용 고무커버에 관한 해석

김상우\*(부경대 대학원 기계공학부), 김인관(부경대 대학원 기계공학부),  
강태호(부경대 대학원 기계공학부), 김영수(부경대 기계공학부)

### FEM Analysis of Rubber Cover for Automotive Parts

S. W. Kim(Mech. Eng. Dept., PKNU) I. K. Kim(Mech. Eng. Dept., PKNU),  
T. H. Kang (Mech. Eng. Dept., PKNU), Y. S. Kim (Mech. Eng. Dept., PKNU)

#### ABSTRACT

Durability of rubber dust cover in the ball joint for automotive suspension parts were analyzed by FEM and compared with experimental data. Upper open area of ball joint is sealed by dust cover for preventing outflow of the lubricating oil and intrusion of sand, dust, water, etc. This rubber cover undergoes repeated loadings such as tension and compression while the car is running. Analysis about rubber material needs to consider every kinds of nonlinearities arise in finite element analysis, which are geometric nonlinearity due to large displacement and small strain, materially nonlinearity and nonlinear boundary condition such as contact. So in the study, the deformation behavior of dust cover was analysed by using the commercial finite element program MARC. This program could solve these kinds of nonlinear analysis accurately. Finite element model of dust cover is considered as 3-dimensional half model based on 2-dimensional axisymmetric model. Material property of rubber was modeled by Ogden model and input data for calculation takes form uniaxial tension test of rubber specimen. The final object of the study is obtaining the design specification of dust covers and the result of analysis should be a useful data to design of rubber cover.

**Key Words** : Finite Element Method (유한요소법), Suspension parts (현가장치), Ball joint (볼조인트), Dust cover (더스트커버), Self Contact (자체접촉)

#### 1. 서론

최근 컴퓨터의 대형화와 고속화에 의한 성능향상으로, 대변형(large deformations)과 하중에 대해 비선형적 거동을 하는 재료인 고무제품에도 유한요소법을 적용한 제품설계가 가능하게 되었다. 이러한 현실에 발맞추어 자동차의 여러 시스템에 사용되는 고무제품에 대한 유한요소 해석이 활발히 진행중인 상태이다.

본 연구대상인 고무커버는 주행 중 발생하는 진동이나 충격을 흡수하여 승차감과 자동차의 안정성을 향상시키는 자동차 현가장치 부품의 하나로 컨트롤 암과 조향너클 사이를 연결하는 Ball-joint의 Dust cover이다. 이것은 먼지, 모래, 물 등의 이물질로부터 Ball-joint를 보호하는 것과 윤활유를 유지시키는 역할을 함께 한다.

현재 이러한 Dust cover는 아직 시행착오법과 같은 경험에 의존한 설계를 하고 있다. 그러므로 본 연구는 이러한 Dust cover설계의 스펙화(specification)를 최종 목표로 두고, 먼저 dust cover에 대한 data base 구축을 이번 연구를 통해 수행하려 한다.

유한요소해석을 위해 비선형 해석기능이 우수한 범용 구조해석 프로그램인 MARC를 사용하였다.

#### 2. 유한요소해석

##### 2.1 해석의 개요

고무제품의 파괴는 그 특정부위에 계속적인 응력 집중이 일어나 그 부위에 결함이 발생하고 그것이 성장하여 찢어짐으로 나타난다. 더욱이 요동에 의해 발생하는 self contact은 접촉부위의 마멸을 일으켜 Dust cover과 같은 제품의 수명을 단축시키는 주요한

원인으로 알려져 있다.

Dust cover는 컨트롤 암과 조향너클 사이에 조립되면서 약 12mm정도 압축된다. 그에 따라 Dust cover는 압축에 의한 일정한 내부 응력이 특정부위에 항상 존재한다. 그리고 주행 중에는 자동차 현가장치의 요동에 의해 최대 23도까지 Ball stud가 움직여 그것을 감싸는 Dust cover의 특정 부위에서 인장과 압축, 굽힘의 복합적 거동에 의한 응력이 발생된다.

이번 해석에서는 실제 Dust cover의 거동과 그에 따른 응력집중 및 self contact이 일어나는 지점을 확인하고 그 응력의 크기를 가시화 하는데 그 목적이 있다. 이러한 고무의 거동과 그에 따른 응력을 확인하기 위해 해석은 2개의 Load case로 조립에 의한 압축과 요동에 의한 축의 회전으로 나누어 시행하였다.

## 2.2 3차원 유한요소 모델

본 연구에 사용된 Ball joint의 dust cover는 C사에서 생산하여 실차적용되고 있는 제품이며, 그 모델은 위의 Fig. 1과 같다. Dust cover에는 고무의 형상을 유지하고, 그리스의 유출을 막기 위한 steel 재질의 ring이 상단 부에 삽입되어 있는 상태이다.

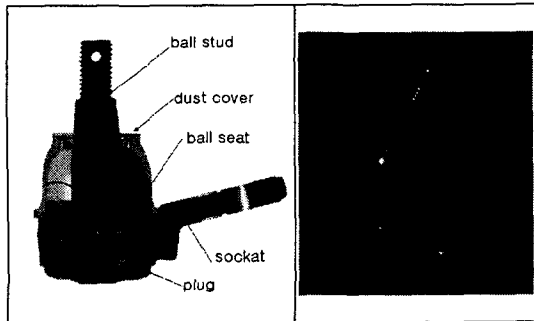


Fig. 1 Assemble of ball joint

Dust cover의 해석을 위해서 언급한 것과 같이 조립에 의한 단순 압축은 2차원 축대칭 모델만으로 충분한 해석이 가능하므로 먼저 2차원으로 모델링하였다. 해석에 표현된 part는 먼저 고무재료인 cover와 그 속에 삽입된 Steel ring을 모델링하여 mesh를 나누고, Ball stud와 Socket부분 그리고 커버를 압축하는 part를 각각 rigid body로 모델링 하였다. 3차원 모델은 2차원 모델을 축의 궤적을 따라 12도씩 15회 반복 확장시켜 실제 모델의 1/2인 3차원 유한요소 모델을 완성시켰다.

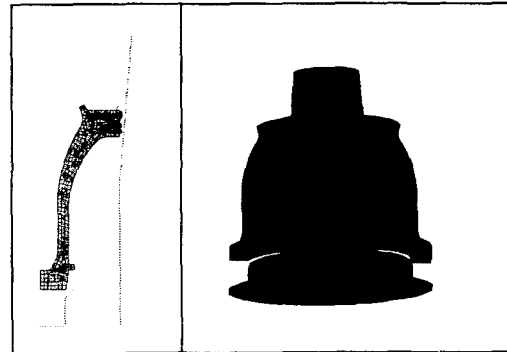


Fig. 2 Finite element model of dust cover

## 2.3 재료의 물성

### 2.3.1 시편의 인장시험

해석에 필요한 재료의 물성을 얻기 위하여, 실제 제품과 같은 성형조건으로 제작한 3호형 시편 18개를 단축(uniaxial) 인장시험 하였다. 인장시험에 사용된 시험장치는 Instron사의 Instron444모델 인장시험기이다. 아래의 Fig. 3은 인장시험기와 3호형으로 제작한 시편의 형상이다.

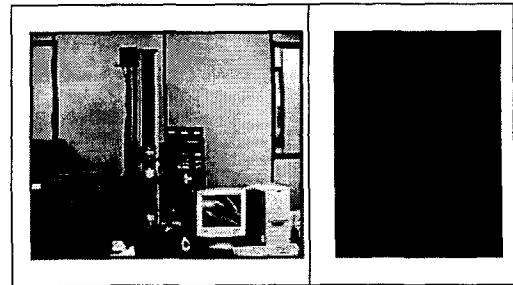


Fig. 3 UTM & Rubber specimen

아래의 그림은 인장시험의 시험 결과이다.

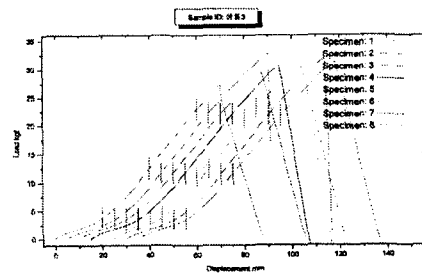


Fig. 4 Result of tensile test

인장시험으로 얻은 18개의 데이터는 오차가 큰 시편 2개를 제외하고 산술평균하였다. 그 결과 최대 신장율은 365%이고, 그때의 최대인장하중은  $7.8\text{kg}/\text{mm}^2$ 이었다.

### 2.3.2 변형률 에너지함수

위의 인장시험으로부터 얻은 시험결과를 해석의 input 데이터로 쓰기 위해서는 재료의 거동을 나타낼 수 있는 함수로 표현해야한다.

Dust cover와 같이 비압축성 재료이며, 매우 큰 비선형적 거동을 보이는 재료의 특성을 잘 묘사하기 위해 변형률과 에너지함수에 근거한 여러 가지 모델들이 개발되어 왔으며, 그 대표적인 모델로는 Neo-Hookean, Mooney Rivlin, Ogden모델 등이 있다.

본 연구에서 사용된 고무재료는 Ogden모델에 의해 구해진 결과가 시편의 인장시험 결과를 가장 잘 표현하였다. 따라서 본 해석은 Ogden 모델을 사용하였으며, Ogden 모델의 변형률 에너지 함수는 다음과 같다.

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left[ J^{\frac{-\alpha_n}{3}} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}) - 3 \right] + 4.5K(J^{1/3} - 1)^2$$

$W$  : Strain energy

$\lambda_i$  : Stretch ratio

$\mu_i, \alpha_i$  : Material constants

$K$  : Initial bulk modulus

$J$  : Volumetric ratio

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$$

위의 Ogden 모델을 사용하여 얻은 응력변형률 곡선은 Fig. 5에 나타내었다.

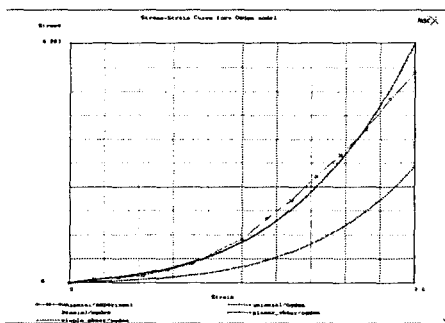


Fig5. Stress-Strain Curve form Ogden model

### 2.4 해석 조건

Dust cover의 조립과 거동에 관한 해석조건은 아

래의 표와 같이 수행하였다.

Table. 1 Boundary conditions of Analysis

part	구분	상태	비고
c_body1	rubber	deformable	socket과 접촉부위에 변위를 방향 별로 구속
c_body2	steel ring	deformable	
c_body3	socket	rigid	총 변위를 x축 방향으로 +6.5로 3Time동안 rubber 하단 부위에 결합
c_body4	press part	rigid	rubber와 socket의 조립 이후 총 변위를 x 축 방향 -12로 1Time 당 1mm씩 압축
c_body5	ball stud	rigid	press part가 12mm를 압축한 후 5Time 동안 23도를 z 축을 기준으로 10스텝으로 나누어 회전

Dust cover와 소켓의 조립에 의한 압축해석은 2차원으로 해석하고, 얻어진 2차원 해석 결과를 ball stud의 회전을 위해 3차원으로 모델링된 것의 Initial condition으로 입력하여, 전체 해석 시간을 단축하였다. 해석에 사용된 Element type은 dust cover의 비압축성, 비선형 재료거동을 해석하기 위하여 Reduced & Hermann Formulation Element를 사용하였다.

### 3. 유한요소 해석 결과

Dust cover의 유한요소해석 결과 조립에 의해 압축된 부위의 응력은 최대 0.21kg/mm<sup>2</sup> 이었다.

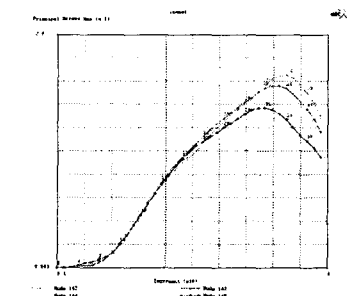


Fig. 6 Stress curve of rubber

self contact은 Ball stud가 Fig. 7과 같이 16도 회전했을 시에 발생하였다.

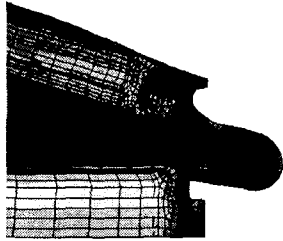


Fig. 7 Occurrence of self contact(16°)

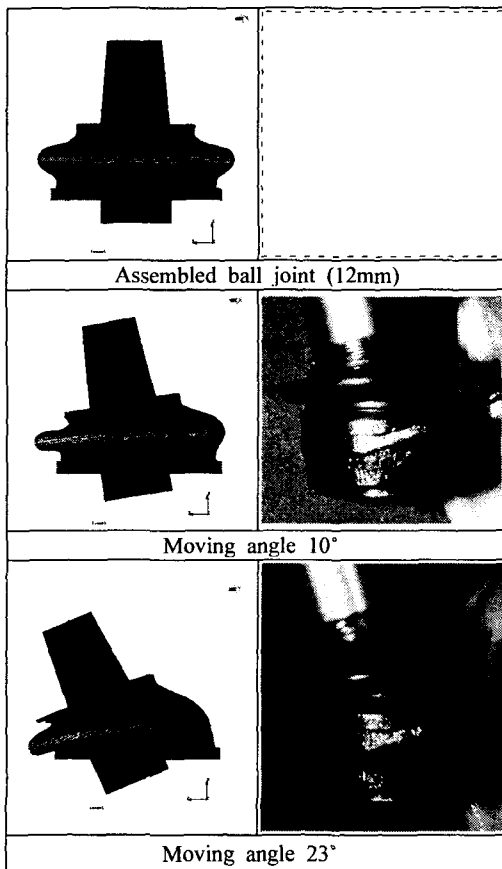


Fig. 7 Comparison of simulation and executive test

#### 4. 결론

Ball joint의 Dust cover의 조립 및 요동에 의한 고무커버의 변형에 관한 해석에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고무 물성에 관한 input data 값은 Ogden model에 의해 구해진 값이 실제 모델의 거동을 가장 잘 표현하였다.

2. 조립에 의한 압축으로 생긴 고무의 인장부위에는 최대  $0.21\text{kg/mm}^2$ 의 응력이 항상 존재한다. 이 응력집중 부위는 Ball stud의 회전에 따른 요동이 생기면 응력이 이완됨을 확인할 수 있었다.

3. self contact은 요동각이 16도에서 발생함을 확인할 수 있었다.

4. 최대 23도로 요동각을 주었을 때의 최대응력은  $0.278\text{kg/mm}^2$ 였고 그때의 Strain 값은 0.518로 나타났다.

#### 참고문헌

1. MARC Analysis Research Co., Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers, 1996
2. J. E. Mark, B. Erman, F. R. Eirich, Science and Technology of Rubber, 2nd ed., Academic Press, 1994
3. B. C. Lee and B. M. Kwak, "A Computational Method for Elasto-plastic Contact Problems", Comput. & Struct., Vol. 18, pp. 757-765 1984.
4. Bathe, K. J. and Chaudhary, A., "A Solution Method for Planar and Axisymmetric Contact Problems", Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 21, pp. 65-88
5. M. A. Crisfield, Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Vol.1, John Wiley & Sons, 1991
6. 김현영, 김중재 "변위-압력 유한요소법을 이용한 고무재료 대변형 해석", 대한기계학회, pp. 135-140, 1999
7. 이형욱, 김세호, 이충호, 허훈, 오승탁, 이종화, "3차원 자체접촉을 위한 유한요소해석에 의한 등속 조인트 고무부트의 변형해석", 대한기계학회논문집, Vol.21, No. 12, pp.2121-2133, 1977
8. 김현영, 심요섭, 김중재, "자동차용 고무부품의 변형거동과 유한요소해석", 한국자동차공학회 1995년 춘계학술대회 논문집, Vol. II, pp.168-176, 1995
9. 김현영, 심요섭, 주연중, 우창수, "자동차용 등속 조인트 부트의 대변형 유한요소해석과 내구성능 예측", 한국자동차공학회 1995년 추계학술대회 논문집" Vol. I, pp.204-211, 1995