

## 비선형 대변형 유한요소법을 이용한 열가소성 고무부품의 밀봉성능 예측

박선\* · 이신영\*\* · 강은\*\*

### Sealing Performance Prediction of Thermoplastic Rubber Component using Non-linear Large Deformation F.E.M.

Sun Park, Shin Young Lee and Eun Kang

**Key Words :** Rubber Component (고무부품), Hyperelasticity (초탄성), Viscoelasticity (점탄성), Stress Relaxation (응력이완), Load-Displacement Curve (하중-변위선도), Time-Displacement Curve (시간-변위선도)

#### Abstract

The objective of this paper is to predict and evaluate the sealing performance of the thermoplastic rubber component in the proto-design stage. The large strain and large deformation properties of rubber are modeled by strain energy function and the related material constants are calculated from the test data. The viscoelastic property of the rubber is also considered using the coefficients in a Prony series representation of a viscoelastic modulus from the compression stress relaxation test. The results show that the current design of cap mount system has 2- different stiffness caused by the cap-mount contact and the viscoelastic property of rubber plays an important role in time dependent deformation.

#### 1. 서론

고무 재료는 고도의 신장성과 우수한 탄성 복원 능력 및 에너지 흡수의 진동 감쇄 특성으로 인하여 전자, 기계, 자동차등 다양한 산업분야에서 밀봉 장치, 방진 및 제진 장치의 주요 부품으로 널리 이용되고 있다.

지금까지 이러한 고무 부품의 설계는 실험 및 시행 착오에 의한 경험적인 방법에 의존하여 왔으나, 최근에는 제품의 개발기간 단축 및 성능과 품질 향상의 요구에 부응하기 위해 제품의 설계 검토 단계에서 수치 해석 기법을 이용한 성능 예측을 요구하고 있다.

이에 국내에서도 고무의 실험 및 해석의 다양한 분야에서 연구가 진행되어 왔으며<sup>(1)(2)(3)</sup>, 컴퓨터의 대형화, 고속화에 따라 비선형 유한요소법을

이용하여 고무 부품의 거동을 해석하는 것이 실용화되었고, 체계적이고 분석적인 방법을 이용한 설계가 가능하게 되었다.

고무는 역학적으로 하중과 변형이 비선형 관계를 나타내는 대변형 영역에서도 탄성거동을 하는 초탄성(Hyperelasticity) 특성과 변형이 변형속도에 의존하는 점탄성(Viscoelasticity) 특성을 나타낸다. 따라서 이러한 고무재료의 거동은 비선형, 비압축성, 대변형, 초탄성 및 점탄성 등으로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 잉크젯 프린터의 밀봉용 부품으로 사용되는 열가소성 고무 부품에 대하여 비선형 유한요소해석을 수행하여 시제품을 제작하기 이전에 변형 거동의 특성을 파악하고, 밀봉 성능을 예측하였다.

유한요소해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS (ver. 5.7)을 사용하여 HP Exemplar 에서 수행하였다.

\* 삼성전자 CTO 전략실 E-CIM 센터

\*\* 삼성전자 CTO 전략실 E-CIM 센터

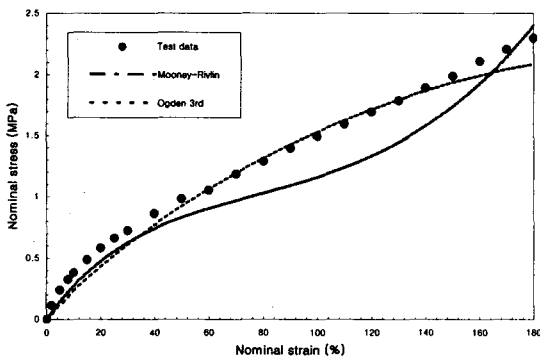
## 2. 재료 상수 결정

### 2.1 정적 재료 시험

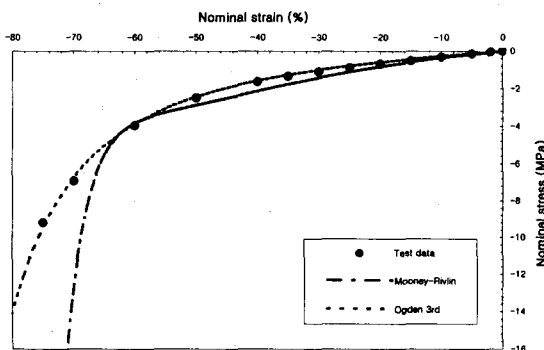
고무의 정적 변형 특성을 지배하는 재료 상수를 결정하기 위해서는 일축 인장시험, 일축 압축 시험, 순수 전단시험 등의 재료 시험을 통해 얻어진 응력-변형률 데이터를 변형률 에너지 함수와 응력-변형률의 관계식에서 계산하여야 한다.

본 연구에 적용된 소재는 경도(Shore A) 45의 열가소성 고무<sup>(4)</sup>이며 원재료 공급처인 미국 AES(Advanced Elastomer Systems)사로부터 입수한 응력-변형률 시험 데이터를 이용하여 고무의 비선형 재료상수를 결정하였다. Fig. 1은 Mooney-Rivlin 모델과 3항 Ogden 모델로 curve-fitting 하여 얻은 재료 상수들로 각 시편을 해석하여 구한 응력-변형률 곡선을 시험 데이터와 비교한 것이다<sup>(5)</sup>.

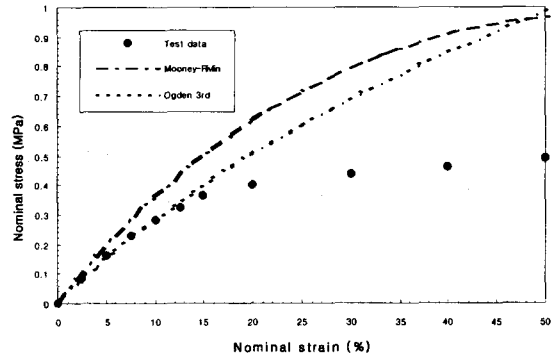
3항 Ogden 모델이 3가지 시험 모드와 비교적 잘 일치하며, 이후 해석에서는 3항 Ogden 모델을 이용하였다.



(a) Uniaxial tension test



(b) Uniaxial compression test



(c) Sheet tensile (pure shear) test

Fig. 1 Static material property test

### 2.2 압축 응력 이완 시험

열가소성 고무의 비선형 점탄성 거동을 모델링하기 위해서 상온에서의 압축 응력 이완 시험<sup>(6)</sup> 결과(하중감쇠-시간)로부터 완화 계수(Relaxation modulus)를 Prony 급수의 항으로 나타내었다.

Fig. 2는 Prony 급수 모델로 curve-fitting 하여 구한 점탄성 물성치로 대상 시편을 해석하여 구한 결과와 시험 데이터를 비교한 것이다.

3항 Prony 급수 모델이 전 시간 영역에서 시험 데이터와 잘 일치하며, 이후 해석에서는 3항 Prony 급수 모델을 이용하였다.

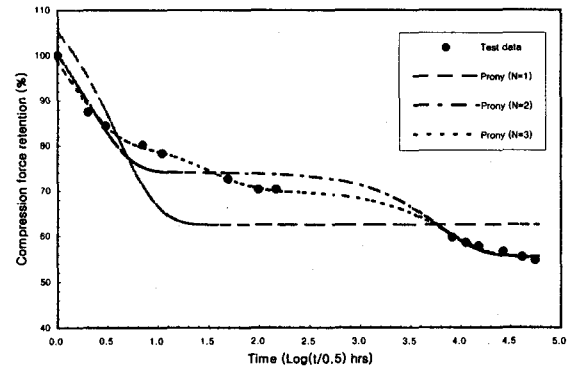


Fig. 2 Compression stress relaxation test

### 3. 잉크젯 프린터 고무부품의 특성해석

#### 3.1 개요

본 연구의 해석 대상인 잉크 밀봉용 고무 캡은 열가소성 고무로 성형되었으며, Fig. 3, 4에 나타난 것처럼 플라스틱(POM) 재질의 마운트에 장착되어 상부의 헤드 플레이트로부터 일정한 하중을 받는 형태로 사용된다. 고무 캡에 작용하는 초기 장착 하중(F)은 마운트 하단의 스프링 하중으로부터 계산할 수 있으며, 그 값은 150 g ( $\cong 1.471$  N)이다.

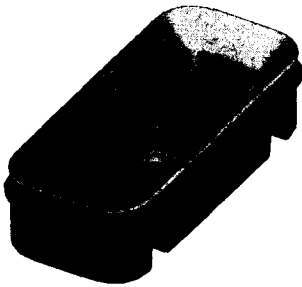


Fig. 3 3D solid model of cap & mount assembly

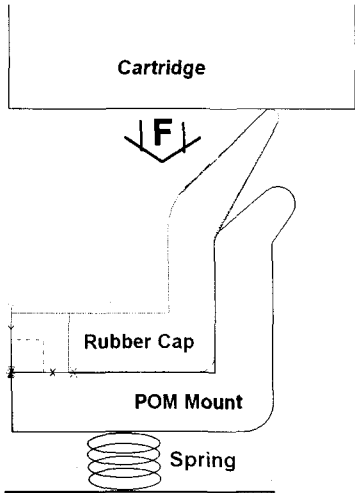


Fig. 4 Schematic of cap mount system

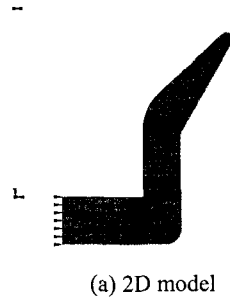
#### 3.2 유한요소 모델링

본 연구에서는 해석 모델의 검증, 해석 시간 단축 및 설계 사양의 정성적 평가를 위한 2차원 모델과 전체 시스템의 특성을 고려한 3차원 모델의 2종류로 해석을 수행하였다.

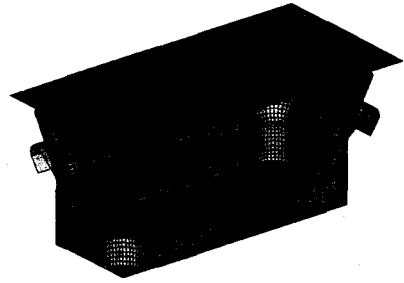
2차원 모델은 해석 대상 시스템을 축대칭 모델로 단순화하여 고무는 1차 hybrid 요소(CAX4H)를

사용하여 모델링하고, 상대적으로 강성이 큰 몰드물(헤드 플레이트, 마운트)은 변형이 없는 강체로 가정하여 강체 셀 요소(RAX2)로 모델링하였다.

3차원 모델에서는 캡 마운트 시스템의 하중 조건 및 기하학적 형상의 대칭조건을 고려하여 전체 시스템의 1/4을 모델링하고, 고무는 1차 hybrid 요소(C3D8H), 몰드물은 강체 셀 요소(R3D4)로 모델링하였다.



(a) 2D model



(b) 3D model

Fig. 5 Finite element mesh of cap mount system

#### 3.3 유한요소 해석 결과

고무 캡이 마운트에 장착되어 상부 헤드 플레이트에 의해 압축하중을 받는 경우에 고무 캡의 변형 및 응력상태와 시스템의 강성 특성에 의한 하중-변위 관계를 파악하고, 고무 캡의 밀봉 영역에서의 접촉 면압 분포 및 고무의 점탄성 거동에 의한 강성 및 접촉 면압의 변화를 예측하였다.

##### 3.3.1 비선형 정적 해석

Fig. 6은 고무 캡에 발생하는 Von Mises 응력분포를 나타낸 것으로 최대응력은 고무 캡 모서리 하단의 마운트 접촉부에서 0.445 MPa, 최대 변형률은 18.6% 발생하였다. 그림에 나타난 것과 같이 모서리 필렛 부위에 국부적으로 응력이 집중하는 현상이 나타나는데 이는 피로 손상의 관점에서

바람직하지 않은 현상으로 판단된다.

Fig. 7의 하중-변위선도에서 알 수 있듯이 현 상양은 하중의 크기에 따라 서로 다른 2 개의 강성 특성을 나타내며, 이는 캡-마운트 시스템의 접촉 거동에 기인한 것으로 판단된다.

하중이 증가함에 따라 고무 캡과 마운트의 접촉이 발생하고(2~3, A~B), 접촉 영역이 점차 증가함에 따라서(B~C) 시스템의 강성도 증가하여 기울기가 급격히 증가한다.(3~4, C~D)

고무 캡과 마운트의 접촉이 일정 시점에서 균일하게 발생하는 2 차원 모델과 달리 3 차원 모델에서는 하중이 증가함에 따라 각 접촉영역에서 순차적으로 이루어지므로 접촉 초기단계에는 최대 면압이 모서리 부분에 발생하지만 하중이 증가함에 따라서 중앙부로 최대 면압 발생위치가 이동하게 된다.

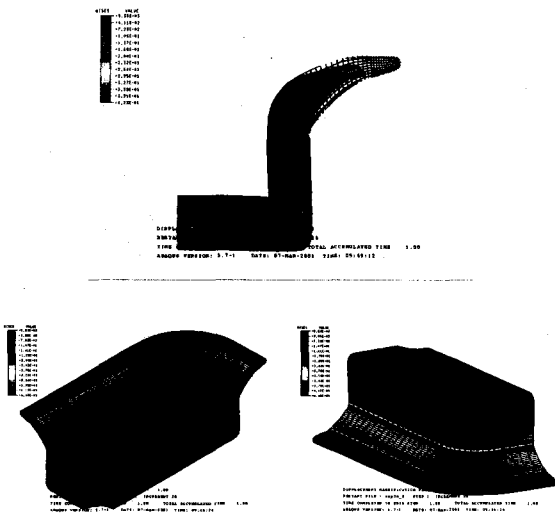


Fig. 6 Von Mises stress distribution under compression

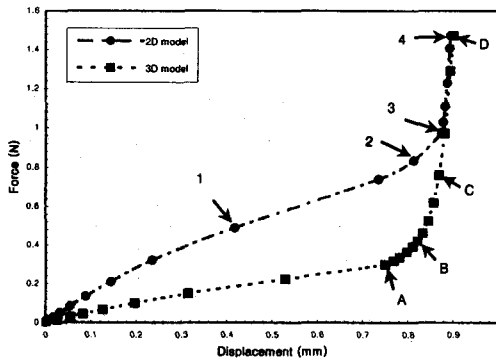


Fig. 7 Load-displacement curve

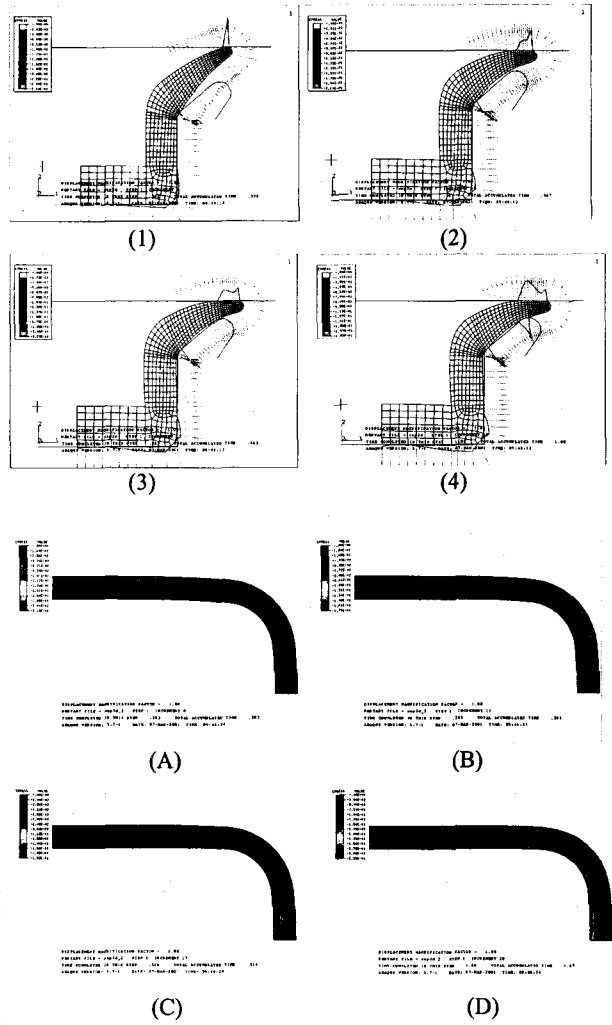


Fig. 8 Contact pressure distribution

### 3.3.2 점탄성 해석

Fig. 9는 고무의 점탄성 거동에 의한 응력완화 현상으로 인해 고무 캡에 발생하는 Von Mises 응력 분포를 나타낸 것이다. 초기 반응(Instant reaction)에 비해 1000 시간 경과시 최대응력이 약 22% 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig. 10의 시간-변위선도는 일정한 하중하에서 고무 캡의 강성 변화(감소)에 의한 헤드 플레이트의 변위를 나타낸 것이다. 2차원 모델과 3차원 모델은 정성적으로 유사한 거동을 나타내며 초기 장착시와 1000 시간 경과후의 변위차이는 2% 미만으로 이는 고무 캡 하부 마운트의 지지 역할에서 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 고무의 점탄성 특성에 의한 접촉 면

압 분포의 변화를 나타낸 것으로 초기 장착시보다 접촉 면적이 증가하여 접촉면의 최고 압력이 감소하고, 상대적으로 균등한 면압 분포를 나타낸다.

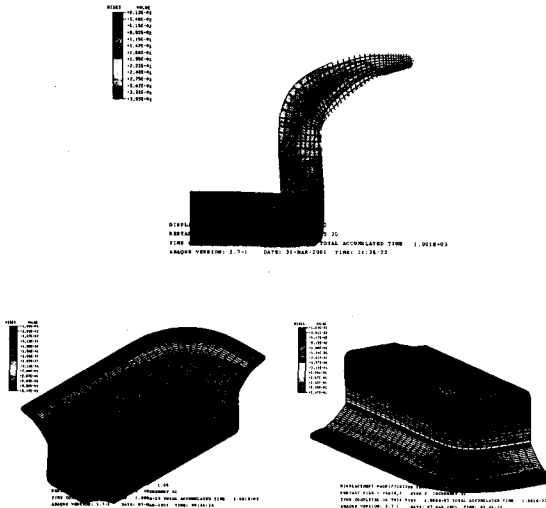


Fig. 9 Von Mises stress distribution under compression (t = 1000 hrs.)

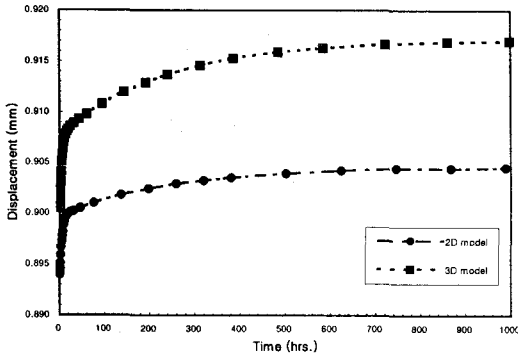


Fig. 10 Time-displacement curve

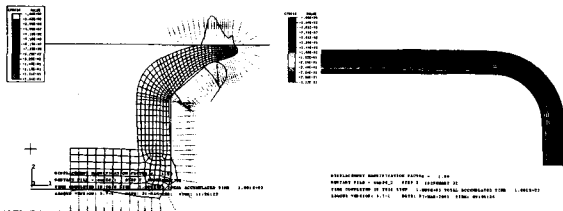


Fig. 11 Contact pressure distribution (t = 1000 hrs.)

#### 4. 결론

본 연구에서는 잉크젯 프린터에 사용되는 누설 방지용 고무 부품에 대하여 비선형 대변형 유한요소법을 이용하여 고무 재료의 점탄성 특성에 의한 변형 거동을 예측하고, 밀봉부의 접촉 면압 분포를 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일축 인장, 일축 압축, 순수 전단 시험 및 압축 응력 이완 시험의 데이터로부터 열가소성 고무의 비선형 재료상수를 결정하였다.
2. 비선형 유한요소해석을 이용하여 고무 부품의 특성을 파악하고, 설계검토 기간 축소 및 향후 설계 개선안의 적용 가능성을 평가할 수 있는 기반을 마련하였다.
3. 이상의 결과로부터 향후 보다 정밀한 설계를 위해서는 고무 재료의 피로 손상을 고려한 해석이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) 우창수, 김완두, 조성도성, 2000, “비선형·대변형 유한요소해석을 이용한 방진고무부품의 특성 예측 및 평가”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 286~291
- (2) 김정엽, 김완두, 한승우, 김춘휴, 2000, “고무시편의 파괴특성 평가”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 395~401
- (3) 이학주, 김완두, 조성도성, 김창욱, 2000, “승용차용 스트러트 고무마운트의 피로수명 예측”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 298~303
- (4) Advanced Elastomer Systems, “Sealing with Santoprene Thermoplastic Rubber”, TCD00598
- (5) Hibbit, Karlson, Sorenson, ABAQUS User's and Theory Manual, Ver. 5.7
- (6) SS ISO 3384 : 1991 Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of stress relaxation in compression at ambient and at elevated temperatures.