

천연고무 컴파운딩의 초탄성 재료 모델링 및 차량용 부싱 성능의 유한요소해석 연구

조종근* · 김라성* · 박인경*[†] · 김예찬** · 황민주** · 서종환*** · 정현섭*** · 강재욱*** · 남재도***[†]

*성균관대학교 화학공학/고분자공학부 고분자공학과, **성균관대학교 에너지과학과
***현대자동차 고무마찰재료개발팀

(2018년 4월 10일 접수, 2018년 6월 12일 수정, 2018년 6월 19일 채택)

Hyperelastic Material Modeling of Natural Rubber Compounds and Finite Element Analysis of Bushing Performance in Automobile

Jung Keun Cho*, Ra Sung Kim*, In-Kyung Park*[†], Ye Chan Kim**, Min Ju Hwang**, Jonghwan Suhr***,
Heon Seob Jung***, Jae Wook Kang***, and Jae-Do Nam***[†]

*School of Chemical Engineering, Department of Polymer Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

***Elastomer & Tribology Materials Development Team, Hyundai Motor Company, Hwa-Sung 18280, Korea

(Received April 10, 2018; Revised June 12, 2018; Accepted June 19, 2018)

초록: 본 연구에서는 차량용 고무 부싱의 설계기준이 되는 강성(stiffness)을 정확히 예측하기 위해 천연고무 컴파운드의 응력-인장 특성을 반영한 Ogden 3차 초탄성 모델이 고무 재료의 거동을 가장 정확하게 예측한다는 것을 규명하였다. 스웨이징 공정에 의한 4.6%의 변형 결과를 재료의 응력-변형률에 보정(calibration)하여 초탄성 모델에 적용한 결과, 스웨이징 효과를 고려하지 않은 예측 대비 약 45% 정확도가 향상되었으며, 실제 시험 결과와 99.6%의 정확도를 보였다. 본 연구는 정확한 고무소재 물성의 모델링을 통하여 부싱의 특성을 성공적으로 예측할 수 있다는 것을 확인하였고, 이를 통해 차량용 부싱의 설계, 공정 및 성능 평가 단계를 획기적으로 단축할 수 있는 방법을 제안하였다.

Abstract: The design process in automobile industry requires to predict the stiffness of rubber bushing materials. The behavior of rubber compound can be simulated using the strain energy density function. It is needed to consider the change of the material properties because the compression deformation caused by the swaging process of the bushing. In this study, numerical simulations of the stress-strain curve including the swaging process were carried out using the finite element method and compared with experimental data. The Ogden 3rd model of strain energy density functions predicted the behavior of the bushing with natural rubber compound. The stress-strain curves of the rubber bushing was calibrated using that the initial compression of the swaging process was the 4.6% strain. Compared to the stiffness of the bushing without swaging effect, the stiffness was improved by 45% and had 99.6% accuracy with the actual test results.

Keywords: rubber bushing, finite element method, hyperelastic model, strain energy density function, swaging.

서 론

차량 주행감성에 영향을 주는 NVH(noise, vibration, harshness) 특성은 최근 소비자 요구가 점차 다양화, 고급화되면서 차량 성능을 결정하는 가장 큰 요인 중의 하나가 되었다.¹ 특히, 차량 내부에 모바일 기기, 멀티미디어 시스템 등이 확대 적용되면서 조종안정성과 더불어 내부 소음 방지 기

술은 소비자의 차량 구매에 큰 영향을 미치는 이슈가 되고 있다.² 차량의 NVH 특성을 결정하는 부싱의 핵심재료인 고무는 충격 감쇄(damping) 및 방진(anti-vibration) 특성을³ 결정하는 중요한 부품이며, 일반적으로 하중에 대한 변형의 범위가 커서 하중-변형 관계가 비선형적인 초탄성 거동(hyperelastic behavior)을 보인다고 알려져 있다.⁴ 부싱의 NVH 특성을 제어하는 고무재료의 응력-변형률 특성은 부싱 설계의 기준이 된다.⁵ CAE 프로그램을 활용한 유한요소해석으로 많은 차량의 새시(chassis) 부품이 설계되고 있으나, 고무 부품설계 분야에서는 여전히 경험적인 지식과 차체실험 결과에 의존하고 있다.⁶ 부싱은 핵심 재료인 고무의 초탄성 거동을 표현할 수

[†]To whom correspondence should be addressed.
jdnam@skku.edu, ORCID[®] 0000-0001-7682-7926
innh@skku.edu, ORCID[®] 0000-0003-4503-571X
©2018 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

있는 초탄성 모델의 정확한 개발과 이를 통해 제작 공정에 따른 응력-변형을 변화를 설계에 반영하는 것이 매우 중요하다.

초탄성 거동하는 고무의 응력-변형을 관계는 변형을 에너지 밀도함수(strain energy density function)로 표현된다.⁷ 변형을 에너지 밀도함수는 외부에서 가한 일이 물체의 변형에 따른 변형을 에너지로 축적되고, 이를 단위 체적당 변형을 에너지로 나타낸 것으로 정의된다.⁸ 고무 재료의 물성을 정확히 예측하기 위해서는 시험의 인장시험을 통해 응력-변형률 관계를 정확히 표현할 수 있는 변형률 에너지 밀도 함수의 선정과 재료 상수를 도출하는 것이 매우 중요하다.⁹ 변형률 에너지 함수는 몇 가지 대표적인 초탄성 모델로 표현될 수 있다.¹⁰ Mooney와¹¹ Rivlin이¹² 제시한 초탄성 모델을 시작으로, Ogden,¹³ Gent¹⁴ 그리고 Boyce and Arruda에¹⁵ 이르기까지 많은 연구가 진행됐다. 최근에는 CAE(computer-aided engineering) 프로그램을 이용하여 다양한 재료 물성시험의 결과를 통해 초탄성 모델을 예측하는 연구들이 진행되어 오고 있다. Sasso 등은¹⁶ 단축 인장과 이축 인장시험의 결과로 변형률 에너지 밀도 함수들을 비교하였고, FEM(finite element method)을 이용하여 실험값과 예측값의 정확도를 전단시험을 통해 검증하는 연구를 하였다. Kim 등은¹⁷ 인장시험의 종류에 따른 시험결과를 변형률 에너지 밀도 함수에 적용하여 예측하였고, 단축인장과 이축인장 시험을 모두 적용했을 때, 고무재료의 거동을 가장 정확히 예측한다는 결과를 보였다. 부싱의 핵심재료인 천연고무에 대한 초탄성 거동을 정확히 예측하기 위해서는 최적의 모델을 선정하고 부싱의 사용범위에 해당하는 10% 변형률 영역에서 부싱의 강성을 예측해야 한다. 현가장치 내 부싱의 강성 예측은 고무재료의 초탄성 모델 선정 외에 부싱 제작 공정 중에 발생하는 여러 요인에 의해 시험값과 예측값이 차이를 보이게 된다. 그 중 고무재료의 물성변화에 큰 영향을 미치는 스웨이징 공정은 고무의 가황 이후, 원통형 다이(die)를 통해 외부 금속 슬리브(sleeve)를 압축하는 공정을 일컫는다. 이는 부싱의 내구 강도를 확보하고 고무와의 접합을 용이하게 한다.¹⁸ 이러한 압축공정은 부싱의 물성에 영향을 미치게 되고, 차량 부품에 적용되는 부싱의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 스웨이징 공정에 의한 압축 변형이 해석에 포함되는 것이 타당하다고 사료된다. Adkins 등은¹⁹ 선형탄성(linear elasticity)이론을 적용하여 부싱의 길이에 따른 강성 변화를 연구하였다. Morman 등은²⁰ FEM 기법을 이용해 스웨이징이 적용되지 않은 부싱을 예측하여 연구의 한계를 드러냈다. Gough는¹⁸ 기존 연구에서 밝혀진 닫힌 형태 방정식(closed-form equation)을 이용하여 스웨이징 효과에 따른 부싱의 강성을 축, 비틀림 등의 조건에서 예측한 바 있다. 하지만, 고무 재료의 인장 시험과 변형률 에너지 밀도 함수의 연관성에 대한 논의가 제외되었고, 강성의 예측값과 시험값이 일치하지 않는 한계가 있었다. 따라서 스웨이징에 의한 응력-변형률 관계를 명확히 정의하고 이를

반영한 초탄성 모델을 이용하여 부싱의 강성을 예측할 필요가 있다.

본 연구에서는 기존 연구의 한계점을 극복하고자, ABAQUS를 이용한 유한요소 해석(FEM)을 통해 인장시험과 초탄성 모델과의 관계를 통해 최적의 초탄성 모델을 도출하였고, 스웨이징에 의한 물성변화를 재료물성 데이터에 적용하여 초탄성 모델의 계수를 보정(calibration) 하였다. 또한 스웨이징 유무에 따른 부싱의 강성 변화를 비교 분석하였다.

실 험

시험 제작 및 재료 물성 시험. 본 연구에 사용된 천연고무는 HB chemical사에서 제조한 SVR-CV60을 사용하였다. 충전제로는 Orion Engineered Carbons사의 카본블랙(N330, HAF)을 사용했다. 첨가제로는 한일케미칼(주)에서 제조한 산화아연(zinc oxide, ZnO), 단석산업(주)에서 제조한 스테아르산(stearic acid, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$)을 사용하였다. 가교제인 고무용 황(sulfur)은 미원상사(주)에서 제조한 MIDAS SP 325를 사용하였다. 가황 촉진제는 QINGDAO DUOTE사의 설펜아마이드(sulfenamide) 계열의 촉진제인 cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide(CBS)를 사용했다. 각 재료의 조성은 Table 1과 같다.

ISO 1795를 참고하여 Table 1의 조성에 따라 배합하였다. Master batch(MB) 컴파운드 혼합은 회전수 40 rpm, 혼합 중의 온도 80°C, 300 cc 용량의 밀폐식 혼합기(남양주, kneader)를 이용하였다. Final master batch(FMB) 컴파운드 혼합은 8인치 투-롤밀(인텍시스템(주), two-roll mill, rotor speed ratio; 1:1.4)에서 진행하였다. FMB 혼합이 완료된 컴파운드는 고온 압축기(대양유압(사), hot press)를 이용하여 5분 동안 160 °C에서 가교하여 최종 가황물을 제조하였다.

가황 공정이 완료된 시험편은 단축 인장 시험을 위해 ASTM D 412 규격에 따라 100.0 mm(길이)×25.0 mm(너비)×2.0 mm(두께)의 아령형 시험편으로 제작하였다. 이축 인장시험 시험편은 지름 75 mm의 원형 커터를 이용해 절단하여 제작하였다. Figure 1에 단축 인장과 이축 인장 시험편의 형상과 치수를 나

Table 1. A Standard Formulation of Rubber Compounding for Bushing Parts Used Ratio in Study

Ingredients	Composition (phr*)
Natural rubber	100
Carbon black (N330)	50
ZnO	3
Steric acid	1
Sulfur	2
CBS	1

*phr: parts per hundred of rubber.

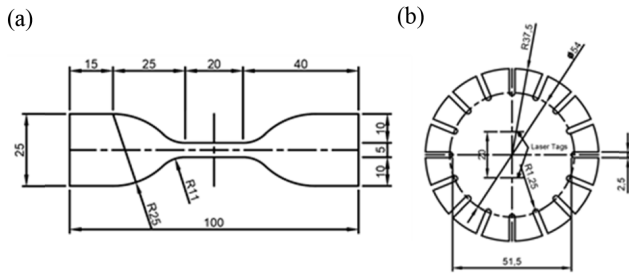


Figure 1. Shape and dimensions of specimens for (a) uniaxial tensile test; (b) biaxial tensile test.

타내었다. 인장 시험은 변형률 100% 구간에서 하중-제하 (loading-unloading)를 5회 반복하여 응력완화 효과(mullins effect)를 적용한 데이터를 사용하였다.

초탄성 모델(Hyperelastic Model). 단축 인장과 이축 인장 시험을 통해 얻은 응력-변형률 관계를 통해 대표적인 변형률 에너지 밀도 함수인 초탄성 모델들의 계수(coefficient)를 도출했다. 현상학적인 원리에 기초한 Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Ogden 3차, Yeoh 3차 모델을 FEM 프로그램인 ABAQUS를 이용해 단축 인장과 이축 인장 시험을 비교 분석하였다. 각 변형률 에너지 밀도함수는 다음과 같이 정의된다.

Neo-Hookean Model: Neo-Hookean 모델은 단순 모델 중 하나이며 비압축성 소재의 변형 에너지 밀도 함수는 다음과 같다.²¹

$$W = C_1(I_1 - 3) \quad (1)$$

여기서, C_1 는 실험 등에 의해 결정되는 재료상수이다. I_1 는 Cauchy-Green 변형 텐서(deformation tensor)의 1차 불변량(Invariant)이다. Neo-Hookean 모델은 가교된 고분자 사슬의 통계적 열역학을 기반으로 하며, 초기 선형 범위에서 고무와 같은 재료에 사용될 수 있다. 그러나 특정 지점에서 급격한 비선형 현상이 발생하여 큰 변형에서 정확한 현상을 예측하지 못하는 것이 일반적으로 알려져 있다.²²

Mooney-Rivlin Model. 1951년에 발표된 Mooney-Rivlin 모델은 단축인장과 전단시험에 적합한 초탄성 모델이다.²³ 비압축성 변형 에너지 밀도 함수는 다음과 같다.

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (2)$$

여기서, C_1 과 C_2 는 실험에 의해 결정되는 재료상수이다. I_1 과 I_2 는 Cauchy-Green 변형 텐서의 1차, 2차 불변량이다. Mooney-Rivlin 모델은 최대 200%까지의 변형률에서 현상 예측이 정확한 것으로 알려져 있지만, 압축상태의 예측에는 적합하지 않은 모델이다.²⁴

Ogden Model: Ogden 모델은 고무와 같은 재료의 비선형 응력-변형 거동을 예측하는 데 가장 널리 사용되는 초탄성 소재 모델이다.²⁵ Ogden 모델은 1972년 Ogden에 의해 연신율에 기초한 현상학적인 모델로 도입되었으며,²⁶ Ogden 소재의 변형 에너지 밀도 함수는 다음과 같다.

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (3)$$

여기서, μ_i 와 α_i 는 실험에 의해 결정되는 재료상수이며, λ_1 , λ_2 , λ_3 는 주변형률(principle stretch ratio)이다. Ogden 모델은 인장시험의 최대 700%까지의 시험결과와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.²⁷ 다양한 변형 모드의 시험결과를 활용해야 해석 시, 큰 오차를 줄일 수 있으며 특히, Ogden 3차 모델이 고무의 물성을 적절하게 구현한다.

Yeoh Model: Yeoh 모델은 1990년 Mooney-Rivlin 모델의 1차 불변량을 3차 다항식 형태의 현상학적인 모델을 발표했다.²⁸

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0}(I_1 - 3)^i \quad (4)$$

여기서, C_{i0} 는 실험에 의해 결정되는 재료상수이며, I_1 은 Cauchy-Green 변형 텐서의 1차 불변량이다. 큰 변형률 범위에서 시험 결과와의 정확도가 높고, 제한된 데이터로 다양한 변형모드에 적용될 수 있다.²⁵

스웨이징 효과(Swaging Effect). 부상은 Figure 2(a)와 같

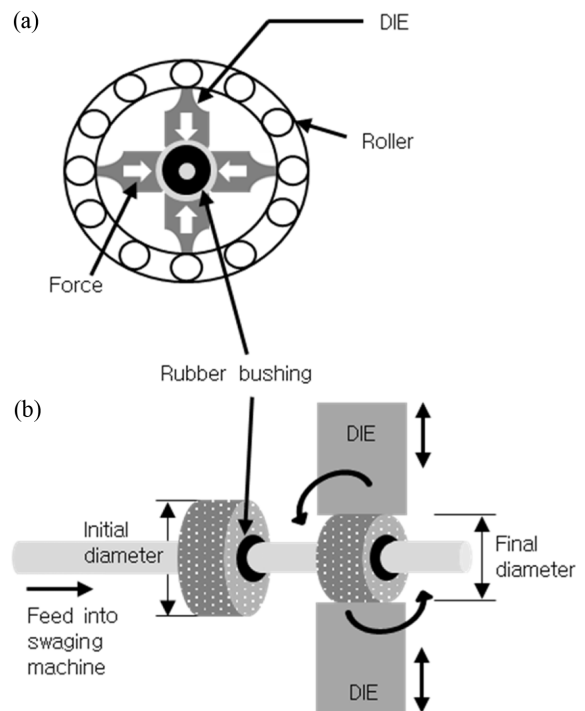


Figure 2. Schematics of (a) swaging machine for bushing; (b) compression of bushing by swaging process.

이 원통형(cylinder) 형태의 고무와 외부, 내부의 금속 슬리브(sleeve)와 결합한 형태로 구성되어 있다. 부싱은 외부, 내부의 금속 슬리브가 위치된 몰드에 고무를 사출 후, 가황 공정을 거치게 된다. 이때, 고무는 외부, 내부의 금속 슬리브와 고온 접착되면서 금속대비 상대적으로 열 수축(thermal shrinkage)이 더 많이 일어나게 된다. 부싱이 냉각됨에 따라 금속과 접합된 표면에서 응력이 발생하여 내부 금속 슬리브로부터 고무가 분리되게 되고 잔류응력을 발생시킨다. 이러한 이유로 몰딩 공정 이후, Figure 2(b)와 같이 가황된 부싱이 원통형의 다이를 통해 외부 슬리브가 축소되는 스웨이징 공정을 거치게 된다. 이는 금속 슬리브와 고무와의 접착력을 증가시키고 고무 내부에 발생한 잔류 응력을 제거하는 역할을 한다. 또한 사출 공정에서 발생하는 고무의 흐름속도 불균일, 금속 슬리브와의 온도 차이에 의한 고무의 응력 변형을 균일하게 하여 내구성을 향상시킨다.

결과 및 토론

재료 인장시험. 보강재가 함유된 고무 재료는 반복 하중에 의해 응력 완화 현상인 Mullins 효과(Mullins effect)가 나타난다. Figure 3에서와 같이 고무 시편의 첫 번째 하중 이후, 같은 변형을 만큼 반복 인장이 적용될 때 응력이 감소하다가 점차 안정화된다. 이러한 현상은 카본블랙 등과 같은 필러와 고무 분자 사슬간의 내부마찰(internal friction), 미끄러짐(sliding of molecular chains)과 연관이 있다.²⁹ 고무에 하중이 적용될 때, 분자 사이의 반데르발스 힘과 같은 약한 2차 결합에너지를 순간적으로 초과하여 필러 입자들과 연결된 분자 사슬들이 서로 미끄러지며 마찰을 일으키기 때문이다. 이를 위해서 단축 인장과 이축 인장 시험 시, 응력-변형률이 안정화될 때까지 일정 변형률 구간에서 하중(load), 제하(unloading)의

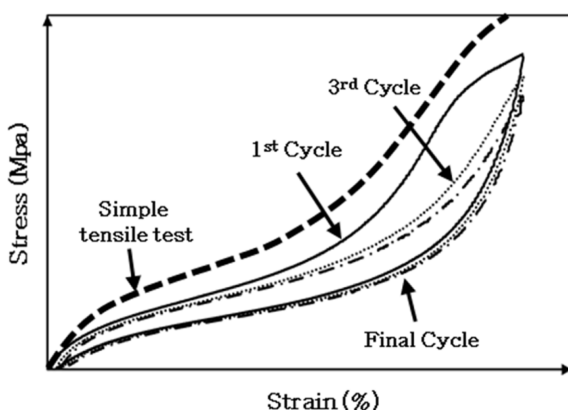


Figure 3. Comparison of stress-strain curves due to stress softening (Mullins effect) by five cycles of simple tensile test and physical interactions between rubber particles and rubber chain molecules in carbon black filled rubber.

반복 과정이 필요하다. 부싱의 압축거동을 예측하기 위해서는 이축 인장시험이 필요하다. 압축시험을 적용하지 않는 이유는 시편을 고정하는 지그(Jig)와 고무 사이에 발생하는 마찰, 미끄러짐으로 정확한 압축 응력-변형률의 관계를 파악하기 어렵기 때문이다. 따라서 원형의 이축 인장 시편을 원주 방향으로 균일하게 인장시켜 재료의 응력-변형률을 측정하였다.

FEM Process와 모델 생성. Figure 4(a)와 같이 부싱 형상(geometry)을 CAD(computer-aided design)로 제작하였고, FEM 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 전처리 과정(pre-processing)을 수행하여 Figure 4(b)와 같이 FE 모델을 생성하였다. Mesh는 3차원 tetrahedron(C3D4H)으로 요소를 구성했다. 요소 수는 43763개, 절점 수는 10970개이다. 최종적인 FEM 해석은 Figure 4(c)에 나타난 바와 같이 고무와 접하는 외부, 내부 금속 슬리브 경계면을 고정한 후, x축 방향의 2 mm 변위에서의 강성을 도출하였다. 외부, 내부의 금속 슬리브는 고무와의 마찰에 영향을 주지 않으므로 해석의 편의를 위해 생략하였다. 스웨이징 효과에 의한 부싱 직경은 변형률 4.6%에 해당하는 74에서 70.6 mm로 압축되었다.

초탄성 모델의 비교 분석. 고무 부품의 유한요소 해석을 위해서는 재료 물성에 대한 정확한 모델링이 필요하다. 대표적인 초탄성 모델을 이용하여 고무 재료의 단축 인장 시험과 이축 인장 시험의 예측 결과를 Figure 5와 같이 나타냈다. 단축 인장과 이축 인장 시험 데이터를 이용하여 초탄성 모델의 재료상수를 도출한 결과, Figure 5(a)의 Ogden 3차 모델이 인장 시험값과 가장 유사한 결과를 나타내었다. Ogden 3차와 같은 고차항의 모델은 두 가지 이상의 기계적 물성 실험을 통해 초탄성 모델의 재료상수를 결정하는 것이 재료의 물성 실험값을 가장 정확하게 예측할 수 있다는 결론을 얻었다. 부싱은 현가장치에서 변형률 약 10% 구간 내에서 거동하기 때문에 초탄성 모델의 재료 상수를 도출하기 위한 인장시험 데이터는 부싱 거동 범위를 약간 초과하는 변형률 50% 구간의 응력-변형률 결과가 적용되었다. 이는 재료의 물성 시험 범위가 실사용 범위보다 작거나 동일할 때 변형률 에너지 밀도 함수의 불안정한 구간이 발생하기 때문이다.

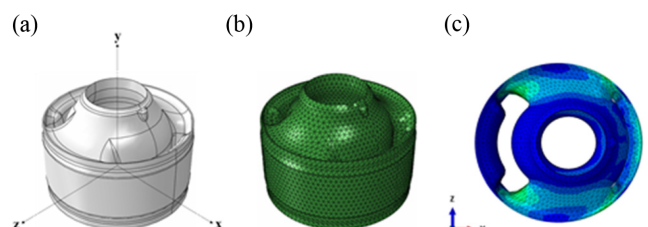


Figure 4. (a) CAD design of rubber bushing; (b) FE modeling of bushing with ABAQUS; (c) FEA of analysis of bushing at 2 mm displacement in x-axis direction.

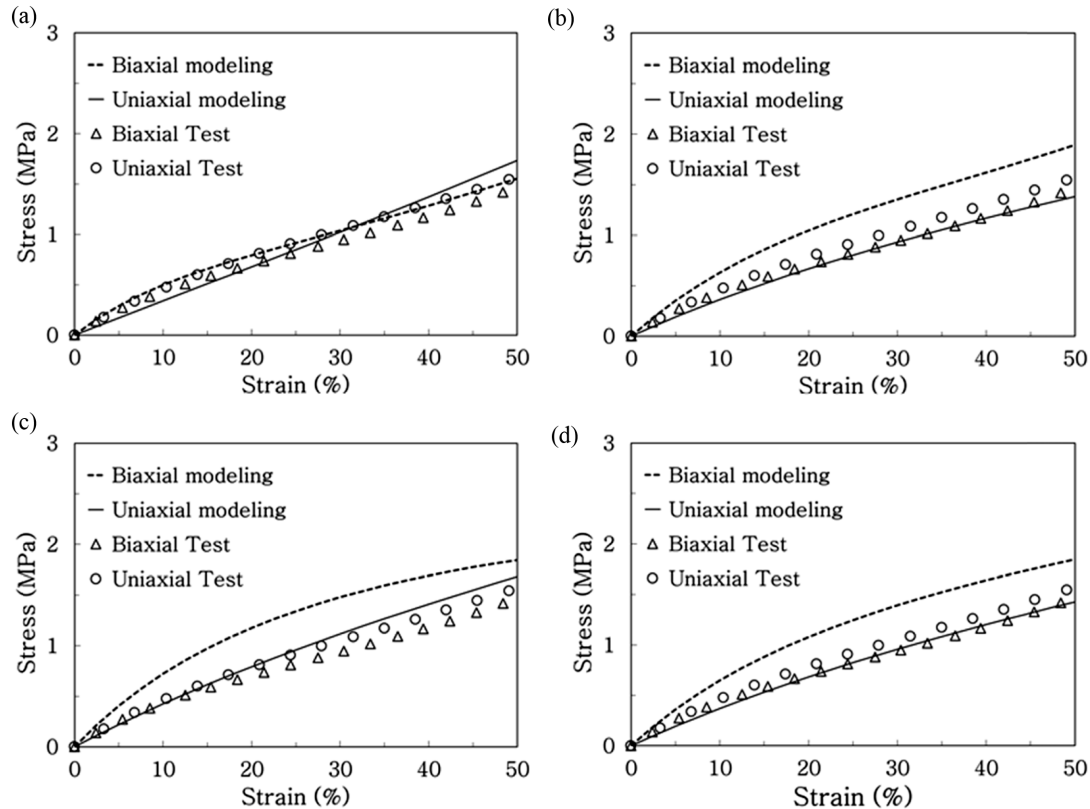


Figure 5. Stress-strain curve of hyperelastic model predicted using tensile test data: (a) Ogden 3rd model; (b) Yeoh 3rd model; (c) Mooney-Rivlin; (d) Neo-Hookean.

스웨이징 효과에 따른 응력-변형률 모델링. 스웨이징 효과에 의한 인장시험의 응력-변형률 변화를 Figure 6과 같이 보정(calibration)하였다. 부싱의 압축 변형률 4.6%를 보정하기 위해 고무 시편의 응력-변형률 곡선에서 4.6%의 응력-변형률을 영점으로 오프셋(offset) 보정하였다. 스웨이징으로 인한 압축 변형률 4.6%에 따른 재료의 응력-변형률 관계를 보정한 식은 다음과 같다.

$$\varepsilon_s - \varepsilon_0 = \varepsilon_s' \quad (5)$$

$$\sigma_s - \sigma_0 = \sigma_s' \quad (6)$$

여기서, ε_0 는 스웨이징 압축효과에 상응하는 초기 4.6% 변형률, ε_s 는 초기 4.6% 변형률 이후의 변형률, ε_s' 는 스웨이징 효과가 보정 적용된 변형률, σ_s 는 초기 4.6% 변형률에 따른 응력, σ_s' 는 초기 4.6% 변형률 이후의 응력, σ_s' 는 스웨이징 효과가 보정 적용된 응력이다. 위의 식을 통해 보정된 응력-변형률은 Table 2의 계수를 적용하여 다음과 같은 Ogden 3차 모델에 적용하였다.

$$W = \sum_{i=1}^3 \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (7)$$

Table 2. Strain Energy Density Function Coefficients of Ogden 3rd Model by Material Stress-Strain of Data Calibration of Swaging Effect Applied to Bushing

Material coefficients				
i	μ_i		α_i	
1	8.16	[17.93]*	1.87	[0.91]*
2	3.32	[0.00]*	1.87	[15.61]*
3	-10.31	[-16.21]*	1.54	[0.73]*

[*]: The Strain energy density function coefficients of the Ogden 3rd model before data calibration of swaging effect.

이는 스웨이징 효과에 의한 고무의 잔류응력이 제거된 응력-변형률 변화를 반영한 것이다.

부싱의 설계 기준인 x축 방향으로 2 mm 변위에서의 강성 예측값을 시험값과 비교하여 Figure 7(a)에 나타내었다. 부싱 강성의 시험값은 x축 방향 2 mm 변위에서 320.4 N/mm로 측정되었고, 예측값의 정확도를 정량적으로 분석하기 위해 100%로 설정하였다. 스웨이징 효과를 적용하지 않은 부싱의 강성 예측값은 470.6 N/mm로 실험값 대비 145.2%의 정확도를 보였다. 반면에, 스웨이징 효과를 적용한 예측값은 322.7 N/mm로 실험값 대비 99.6%의 정확도를 나타내었다. 스웨이징 유

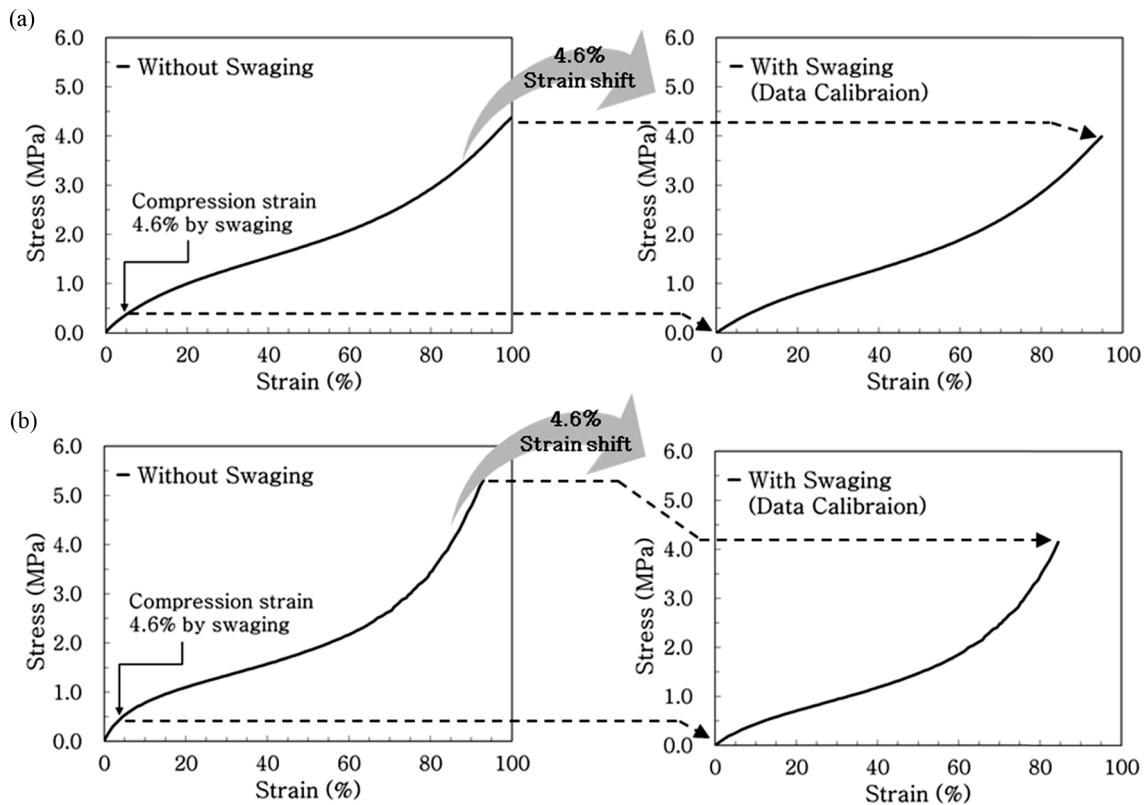


Figure 6. Stress-strain curve of uniaxial tensile test (a); biaxial tensile test (b) as a function of strain for rubber material by swaging process according to data calibration.

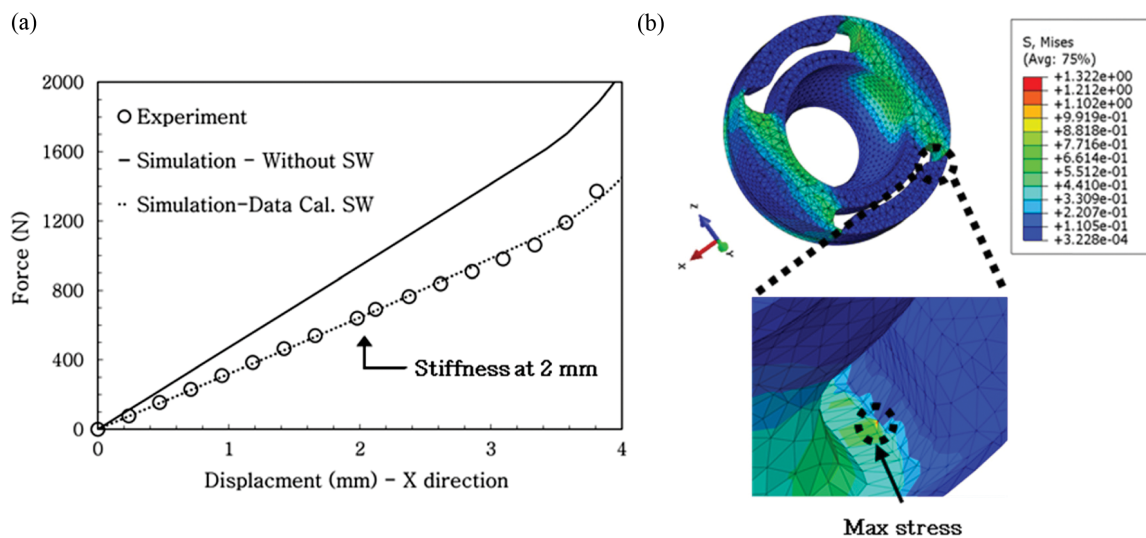


Figure 7. Force-displacement curves of axial stiffness with swaging effect of rubber bushing in x-direction: comparison of simulations data with experimental stiffness (a); von-Mises stress distribution of rubber bushing at 2mm in x-direction: stress distribution in the x-z plane of rubber bushing in the global region and maximum stress in the local region (b).

무에 따른 예측 결과, 부싱의 강성은 147.9 N/mm 만큼 차이가 발생하고 정확도는 45.6% 만큼 편차가 발생했다. 이는 스웨이징에 의한 고무 내 잔류응력과 스웨이징에 의한 압축 외

력이 더해져 항복 응력 이상의 소성 변형을 일으키게 되고 이로 인한, 응력 이완(stress relaxation) 효과로 잔류 응력이 제거되기 때문이다. 이를 토대로, 잔류응력 제거 효과를 응력

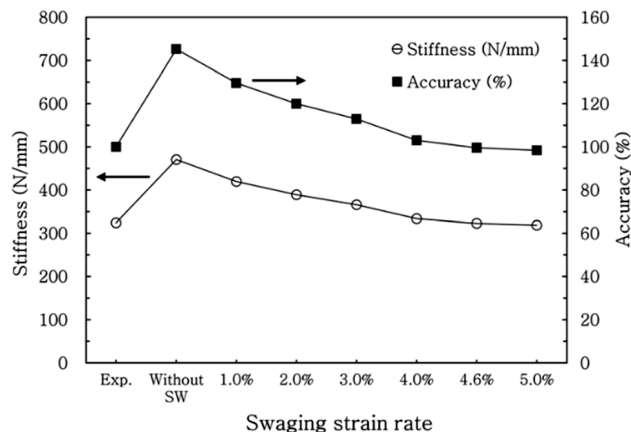


Figure 8. Stiffness predictions and accuracy with swaging strain rate of bushing at 2mm in x-direction.

Table 3. Simulation Axial Stiffness Values and Accuracy as a Function of Swaging Strain Rate of Bushing at 2 mm in X-Direction

Swaging (%) for strain rate	Prediction of stiffness (N/mm)*	Deviation for experimental (%)
0.0	470.6	145.2
1.0	388.8	129.6
2.0	366.0	120.0
3.0	333.6	112.9
4.0	322.7	103.0
4.6	318.8	99.6
5.0	98.4	98.4

*Experimental stiffness value for reference = 320.4 N/mm.

변형률 관계에 보정하게 되면 부싱 강성의 정확한 예측이 가능하다고 사료된다. Figure 7(b)는 x축 방향 2 mm 변위에서 부싱의 von-Mises 응력 분포 결과를 나타낸다. 부싱의 고무 부분(unvoid) 방향으로의 이동 시, 빈 공간에 해당하는 보이드(void) 부분에서 가장 큰 응력을 나타낸다. 이를 통해 부싱은 주행 중에 보이드 방향으로 인장 응력을 가장 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

Figure 8과 Table 3은 부싱의 스웨이징 압축 변형률에 따른 강성변화를 나타낸다. 스웨이징에 의한 압축 변화율이 증가할수록 고무 내부의 응력이 점차 제거되어 강성이 감소하는 경향을 보인다. 압축 변형률 1%가 증가함에 따라 강성은 약 4.7% 감소하게 된다. 이러한 관계는 스웨이징 변형률에 따른 부싱의 강성예측을 통해 차량에 적합한 최적화된 부품 설계가 가능하다는 것을 의미한다. 또한 스웨이징에 대한 정보가 부족할 경우, 시험값에 일치하는 압축 변형률을 역으로 추정할 수 있다. 본 연구의 분석 결과를 통해 부싱이 적용되는 현 가장치 내 다른 부품의 성능 예측에도 매우 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 고무 재료 물성과 유사한 거동을 보이는 초탄성 모델 선정과 스웨이징 공정에 의한 응력-변형률 변화를 보정하여 부싱 강성을 정확히 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. Ogden 3차, Yeoh 3차, Mooney-Rivlin, Neo-Hookean 초탄성 모델을 이용하여 인장시험 조건에 따라 예측 결과를 평가하였다. 재료의 압축과 인장 특성을 정확히 예측하기 위해서는 단축 인장과 이축 인장시험을 모두 고려한 Ogden 3차 모델이 고무재료 실험값과 가장 유사한 결과를 보였다. 스웨이징 효과에 의한 고무의 응력-변형률 변화를 고무재료 인장시험 결과에 보정하였고, 그 결과를 Ogden 3차 모델에 적용하여 새로운 변형률 에너지 함수 계수를 도출하였다. 부싱의 x축 방향 2 mm 변위에서 강성 예측값은 322.7 N/mm로 실험값 대비 99.6%의 정확도를 나타내었다. 부싱의 축 방향 이동 시 인장 응력이 발생하는 보이드 부분에서 가장 큰 von-Mises 응력을 보였다. 스웨이징 공정에서 부싱 압축에 따른 강성은 압축 변형률 1%가 증가함에 따라 강성이 약 4.7% 감소하였다. 스웨이징 변형률에 따른 부싱 강성의 예측 결과를 통해 차량에 최적화된 부싱 설계와 스웨이징 변형률을 추정하는 것이 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다. 본 연구를 바탕으로 시간과 비용을 절감할 수 있는 부싱의 강성 예측 기술이 산업에서 매우 유용하게 활용될 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 강성 예측 기법은 부싱의 동적 특성을 해석하기 앞서 필요한 고무 재료의 응력-인장 특성에 기반한 초탄성 모델링을 위한 선행적 연구로서, 추후 연구를 통해 온도, 주파수 등의 다양한 실험으로 도출되는 점탄성 모델링을 고무 재료에 도입하여 부싱의 동적 특성에 관한 해석의 신뢰성을 향상시킬 예정이다.

감사의 글: 본 연구는 한국기술정보통신부의 한국연구재단 (과제번호: NRF-2014M3C1B2048175, 2016R1A2B1007134, 2017R1A2B4006091) 및 산업통상자원부(과제번호: 10067690, 10080545)의 지원을 받았으며, 또한 성균관대학교 내 경기도 지역협력연구센터(GRRC)를 통한 연구 및 장비 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. D. W. Kang and Y. N. Yin, *Appl. Chem. Eng.*, **21**, 46 (2000).
2. H. Douville, P. Masson, and A. Berry, *Appl. Acoust.*, **67**, 358 (2006).
3. R. Martin and L. Alexander, *Int. J. Solids Struct.*, **47**, 2918 (2010).
4. R. W. Ogden, *Non-Linear Elastic Deformations*, Ellis Horwood Limited, UK, 1984.
5. J. Sohn, K. Kim, and W. Yoo, *Trans. KSAE*, **7**, 186 (1999).

6. J. J. Kim and H. Y. Kim, *Comput. Struct.*, **65**, 725 (1997).
7. R. W. Ogden, *Non-Linear Elastic Deformations*, Courier Corporation, Massachusetts, 1997.
8. A. Ali, M. Hosseini, and B. Sahari, *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, **3**, 232 (2010).
9. B. Duncan, *Test Methods for Determining Hyperelastic Properties of Flexible Adhesive*, Centre for Materials Measurement and Technology, UK, 1999.
10. H. Bechir, *Eur. J. Mech. A Solids*, **25**, 110 (2006).
11. M. Mooney, *J. Appl. Phys.*, **11**, 582 (1940).
12. R. S. Rivlin, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **241**, 379 (1948).
13. R. W. Ogden, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **326**, 565 (1972).
14. R. Campion and A. Gent, *Engineering with Rubber*, Oxford University Press, UK, 1992.
15. E. M. Arruda and M. C. Boyce, *J. Mech. Phys. Solids*, **41**, 389 (1993).
16. M. Sasso, G. Palmieri, and G. Chiappini, *Polym. Test.*, **27**, 995 (2008).
17. W. D. Kim, W. S. Kim, and D. J. Kim, *Trans. KSAE*, **28**, 848 (2004).
18. J. Gough, *J. Rubber Research*, **10**, 131 (2007).
19. J. Adkins, *Br. J. Appl. Phys.*, **5**, 354 (1954).
20. K. N. Morman Jr. and T. Y. Pan, *Rubber Chem. Technol.*, **61**, 503 (1988).
21. L. Treloar, *Trans. Faraday Soc.*, **39**, 36 (1943).
22. B. Kim and S. B. Lee, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, **13**, 759 (2012).
23. R. Tobajas and E. Ibartz, *Proc. Int. Electron. Conf. Mater.*, **2**, 1 (2016).
24. R. Rivlin, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **241**, 379 (1948).
25. M. Shahzad and A. Kamran, *Mater. Res.*, **18**, 918 (2015).
26. R. W. Ogden, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **326**, 565 (1972).
27. L. Treloar, *The Physics of Rubber Elasticity*, Oxford University Press, UK, 1958.
28. O. Yeoh, *Rubber Chem. Technol.*, **63**, 792 (1990).
29. S. Cantournet, R. Desmorat, and J. Besson, *Int. J. Solids Struct.*, **46**, 2255 (2009).