



Comparative Study on the Nonlinear Material Model of HyperElastic Material Due to Variations in the Stretch Ratio

Kangsu Lee*, Minsuk Ki* and Byoungjae Park^{id}*

*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO, Daejeon, Korea

신장률 변화에 따른 초탄성 재료의 비선형 재료모델 비교 연구

이강수* · 기민석* · 박병재^{id}*

*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

KEY WORDS: Elastomer 탄성체, Hyperelastic material 초탄성 재료, Stretch ratio 신장률, Nonlinear material model 비선형 재료모델, Curve Fitting 곡선보정

ABSTRACT: Recently, the application of non-steel materials in ships and offshore plants is increasing because of the development of various nonlinear materials and the improvement of performance. Especially, hyper-elastic materials, which have a nonlinear stress-strain relationship, are used mainly in marine plant structures or ships where impact relaxation, vibration suppression, and elasticity are required, while elasticity must be maintained, even under high strain conditions. In order to simulate and evaluate the behavior of the hyperelastic material, it is very important to select an appropriate material model according to the strain of the material. This study focused on the selection of material models for hyperelastic materials, such as rubber used in the marine and offshore fields. Tension and compression tests and finite element simulations were conducted to compare the accuracy of the nonlinear material models due to variations in the stretch ratio of hyper-elastic material. Material coefficients of nonlinear material models are determined based on the curve fitting of experimental data. The results of this study can be used to improve the reliability of nonlinear material models according to stretch ratio variation.

1. 서 론

최근 해양공학 분야에서 다양한 목적으로 비강재 재료의 사용이 증가하고 있다. 해양구조물의 주구조물에 복합재료인 콘크리트의 적용이나 극한해양환경에 놓이는 해양플랜트 구조물에 적용되는 방한재료, 계류선에 적용되는 와이어 로프 등 다양한 부위에 강재가 아닌 재료들의 사용이 늘어나는 추세에 있다. 해양플랜트의 생애주기(Life cycle)는 20년으로 설계되는 것이 일반적이며 특정해역에 설치/운영되어 고장 및 사고 시, 유지보수가 용이하지 않으므로 구조적 안전성 및 신뢰성 확보를 위한 노력들이 다수 이루어지고 있다. 특히 최근 수명연장(25년~30년)을 위하여 구조적 안전성이 더욱 중시되고 있는 상황이다.

해양플랜트 구조물이나 선박에서 충격 완화나 진동억제 등 탄성이 필요한 부위에는 대변형 상태에서도 탄성을 유지하며 응력-변형률이 비선형 관계를 보이는 초탄성 재료(Hyperelastic material)가 주로 사용된다. 탄성체의 주요성능 평가를 위한 중

요인자 중 하나는 반력을 얼마나 확보할 수 있느냐 하는 것이며, 실제 초탄성 재료를 적용하고자 하는 부위에 적절한 강성을 확보하고 반력성능을 보장하는 설계를 위해서는 ASTM(American Society for Testing and Materials)이나 ISO(International Organization for Standardization) 등 국제규격에 따른 구조재료의 실험을 통한 재료특성을 파악하여 해석을 통해 예측하는 것이 매우 중요하다. 특히, 초탄성 재료는 기본원료 및 첨가물에 따라 다양한 특성을 갖기 때문에 규격화된 물질이 존재하지 않으므로 신뢰도 높은 실험과 대상재료의 거동특성을 모사할 수 있는 적절한 비선형 재료모델을 선택하는 것이 매우 중요하다.

초탄성 재료에 대한 실험과 해석에 대한 국외 연구는 50년대에 Rivlin, 70년대에 Ogden 등이 변형률 에너지 함수를 기반으로 비선형 대변형 재료모델을 제시하였으며 90년대에는 Arruda와 Boyce 등이 8-체인(Eight-chain) 분자구조를 이용한 재료모델을 제안하는 등 재료모델에 대한 지속적인 연구가 수행되고 있다. 또한 초탄성 재료의 실험과 관련하여 시편의 형상에 따른

Received 25 June 2018, revised 1 August 2018, accepted 14 August 2018

Corresponding author Byoungjae Park : +82-42-866-3736, byoungjae@kriso.re.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8943-1477

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

영향(Wada et al., 2002)에 대한 연구가 진행되었다.

반면, 국내에서는 한국기계연구원에서 수행된 “기계시스템 원천기술개발 - 초탄성체 고무류 기계부품의 변형해석 및 설계 기술 개발(KIMM, 1999)”을 통하여 초탄성 재료의 실험 및 해석과 관련하여 기존의 연구를 정리하였으며 초탄성 재료의 운용환경 (온도, 노화등)에 대한 연구도 수행되었으나 실험에 의한 물성 평가에 한정되어 수행되었다(Woo and Park, 2007). 다만, 국내의 초탄성 재료의 실험 및 해석 관련 연구는 주로 고무 제품의 설계를 위한 과정으로서 수행되고 있으며 수치 해석 분야 및 해석 기술과 설계기술과의 연계 등 비선형 재료모델의 정확도에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다.

본 연구에서는 미국재료시험협회 규격(ASTM), 국제표준화기구 규격(ISO), 한국공업규격(KS, Korean Industrial Standards)을 상세히 조사 및 분석하고 ISO규격에 따라 인장 및 압축실험을 수행하였다. 또한 대표적인 5종의 비선형 재료모델을 적용하여 유한요소 해석을 수행하고 실험결과와의 비교를 통하여 대상 시편 특성에 부합되는 재료모델을 선정하고자 하였다.

2. 초탄성 재료의 특성 실험

2.1 실험 규격 및 절차

초탄성 재료 (탄성중합체) 실험 관련 규격은 Table 1과 같으며 각각의 규격은 탄성체의 종류, 실험 종류에 따라 세부적으로

Table 1 Classification of nonlinear material tests for offshore structure application (ASTM, 2015; ISO, 2005; ISO, 2008)

Tensile test	ASTM D412, ISO (KS) 37
Tear test	ASTM D624, ISO (KS) 34
Compression test	ASTM D575, ISO (KS) 7743
Compression set test	ASTM D395, ISO (KS) 815
Abrasion resistance test	ASTM D5963, ISO (KS) 4649
Rebound resilience test	ASTM D2632, ISO (KS) 4662

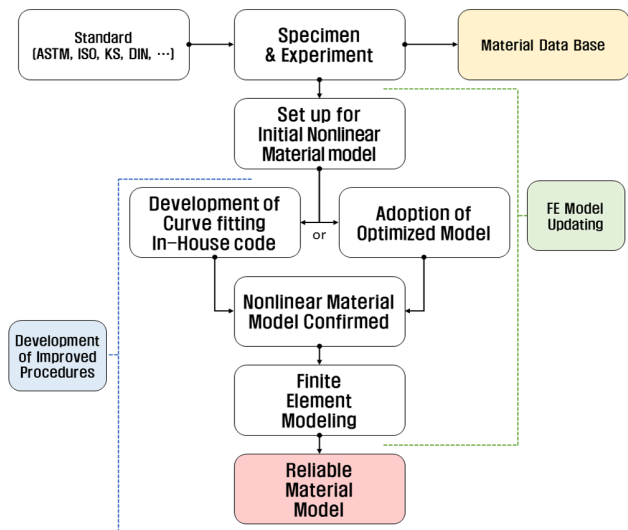


Fig. 1 Correlation procedure of experiment and FE analysis for hyperelastic material

분리되어 있으므로 실험 신뢰성을 높이기 위해서는 대상재료 및 실험에 따라 규격을 선택해야 한다. 단, KS규격은 KS-ISO규격으로 통합되어 ISO규격과 동일하다.

Fig. 1은 신뢰성이 높은 재료모델을 선택하기 위하여 본 연구에서 적용된 일련의 과정을 보여주고 있다. 우선, 정해진 규격에 따라 인장 및 압축 시편을 제작하고 실험을 수행하여 하중-변위 및 응력-변형률 선도를 확보한다. 다음단계에서 확보된 선도를 기반으로 곡선 적합(Curve-fitting)을 통하여 비선형 재료모델의 재료상수값을 도출하고 모델 업데이트 등이 적용된 유한요소해석을 수행하여 실험결과와 비교를 통하여 최적의 모델을 선정하였다. 본 연구에서는 유한요소모델의 생성과 비선형 재료모델을 적용한 구조해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus를 사용하였다.

2.2 인장 및 압축실험

일반적으로 고무재료는 기본재료와 첨가물에 따라 다양한 특성을 가질 수 있으며 본 연구에서는 천연고무에 황을 첨가한 신장률이 약 400%인 재료를 대상으로 실험을 수행하였으며 실제 사용된 인장 및 압축 실험 시편은 Fig. 2와 같다.

Fig. 3은 Instron 5982 장비와 영상 신율계(Video extensometer)를 사용하여 변형률을 측정하고 있는 인장 및 압축실험을 보여주고 있다.

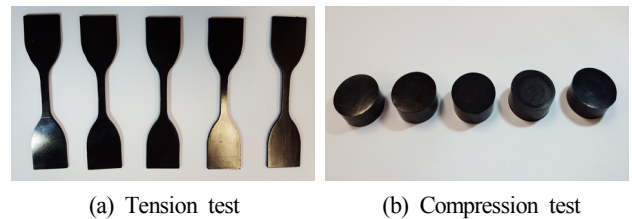


Fig. 2 Specimen of Tension and Compression test

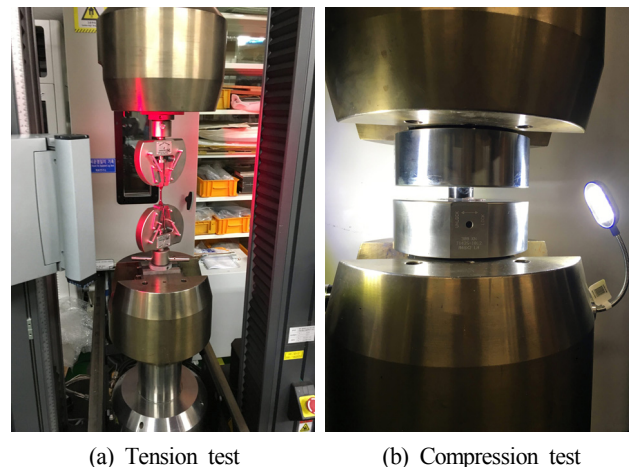


Fig. 3 Material property test for hyperelastic material

2.3 데이터의 보정

인장 실험의 경우, 실험장비 특성상 500mm/min의 빠른 속도로 수행되어 실험 초기 구간에서 Peak point가 발생하므로 비선형 재료 상수의 정확도 및 신뢰성 향상을 위하여 실험데이터의 보정이

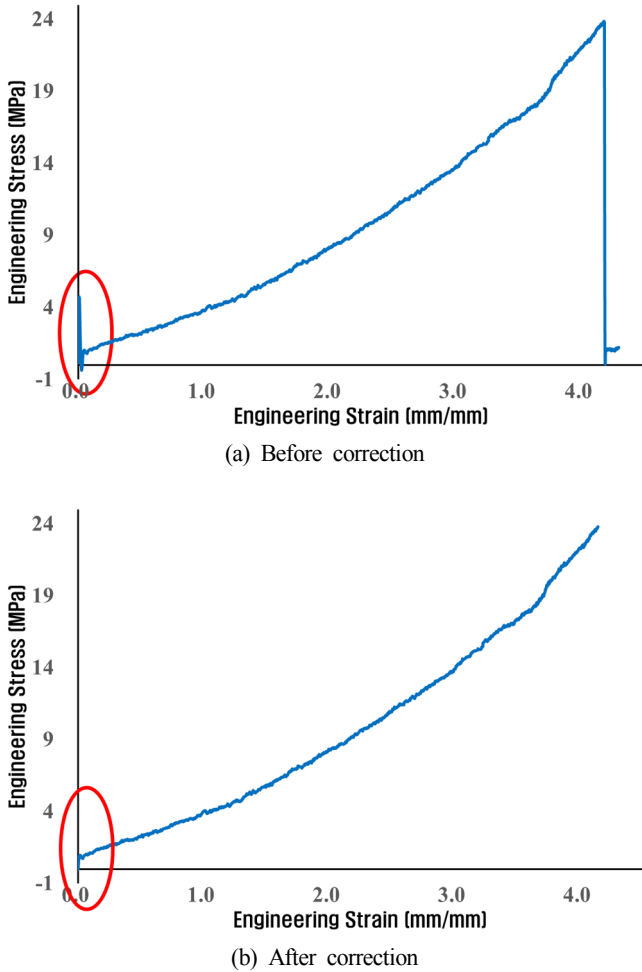


Fig. 4 Data correction of tension test

필요하다. Fig. 4(a)는 인장 실험 데이터의 원시 데이터(Raw data)로 수평축은 변형률(Strain), 수직축은 응력(Stress)이다.

Fig. 4(a)와 같이 인장실험의 경우, 빠른 실험 구동 속도로 인하여 초기 하중-변형률 구간에서 외란(Disturbance)에 의한 오버슈트(Overshoot) 현상이 발생 할 수 있다. 이는 실제 하중 및 변형률 측정이 불안정하게 기록 될 수 있으므로 데이터를 보정하는 과정이 필요하다. 만약 오버슈트 구간을 단순히 삭제할 경우에는 보정이 되지 않거나 또는 오차 발생 가능성이 커지므로 초기 데이터 상태에 따른 보정 여부 판단을 하여 수행하여야 한다. 초기 하중의 오버슈트 구간은 전체 변형률에 있어 1% 미만으로 매우 짧으므로 단순 영점 보정으로 초기 오버슈트 구간을 제거하고 제거된 구간만큼을 오프셋 하는 절차로 진행하였으며 보정된 결과는 Fig. 4(b)와 같다.

일반적으로 초탄성 재료는 초기 가해진 하중보다 더 큰 하중을 받을 경우 응력 연화(Softening)가 발생하며 이를 Mullins 효과라 한다. 압축실험의 경우, Mullins 효과에 의하여 동일한 변형률에서도 응력이 낮게 측정될 수 있으므로 반복 실험(부하-제하)을 통한 물질 안정화 과정이 필요하다(Kim et al., 2004). 따라서 본 연구에서는 반복 실험을 통하여 시편의 안정화 과정을 거친 후 실험을 수행하였으며 실험데이터는 식 (1)을 적용하여 보정을 수행하였다.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{A_p} = \frac{F}{A'_0 \frac{l'_0}{l_0}} = \frac{\sigma}{\frac{1}{1+\epsilon_p}} = \sigma'(1+\epsilon_p) \quad (1)$$

여기서, σ 는 단면적 변화를 고려한 응력, F 는 실험 시 기록된 최대 하중, A'_0 는 실험 전 시편의 공칭 단면적, A_0 는 안정화 과정에서 발생한 변형을 고려한 단면적, l'_0 는 실험 전 표점거리, ϵ_p 는 소성 거동에 의한 소성변형률, σ' 는 실험에 의한 공칭응력이다.

2.4 실험데이터

Fig. 5는 데이터의 보정을 통하여 도출된 인장 및 압축실험의 응력-변형률 선도를 보여주고 있으며 해석과의 비교를 위하여

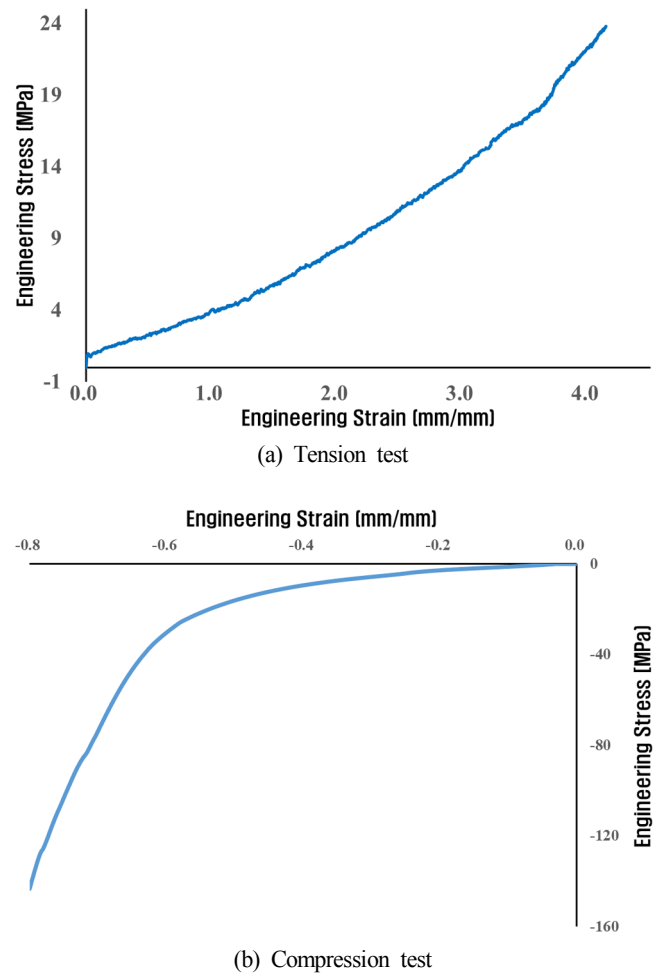


Fig. 5 Stress-strain curve of material property test

Table 2 Tension test data for FE analysis

Load step [s]	Extension [mm]	Load (Fx) [N]	Engineering strain	Engineering stress [MPa]
4.74	39.153	31.815	1.0	3.182
10.68	88.653	72.598	2.0	7.260
16.72	138.987	126.644	3.0	12.664
24.16	200.987	194.181	3.90	19.418

Table 3 Compression test data for FE analysis

Load step [s]	Compression [mm]	Load (F_x) [N]	Engineering strain	Engineering stress [MPa]
-127.51	-2.56	-1770.00	-0.20	-2.83
-142.51	-5.12	-5915.17	-0.40	-9.47
-157.51	-7.68	-18984.24	-0.60	-30.40
-172.51	-10.24	-89631.55	-0.80	-143.51

인장실험은 1.0, 2.0, 3.0, 3.9, 압축실험은 -0.2, -0.4, -0.6, -0.8로 변형률을 분할 설정하였다. Table 2-3은 각각 분할 설정된 변형률에 따른 각 지점에서의 변위, 하중, 응력값을 보여주고 있다.

3. 탄성체의 기하학적 비선형 해석

3.1 비선형 재료모델

초탄성 재료의 거동 모사를 위한 다양한 비선형 재료모델이 존재하며 본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 사용되는 5종의 비선형 재료모델을 대상으로 하였으며 관련 이론식은 다음과 같다.

(1) Neo-Hookean model

Neo-Hookean 모델은 탄성고체에 대한 후크의 법칙을 대변형에 적용할 수 있도록 확장한 것이며, 1948년 Rivlin에 의해 제안되었다. 변형에너지는 제 1 불변량으로 표현되어 다음과 같다.

$$W_{NH} = C_1(I_1 - 3) \quad (2)$$

여기서, C_1 는 실험데이터의 곡선 적합을 통하여 결정되는 모델 상수이며 I_1 은 주변형률 불변량(Principal strain invariant)이다.

(2) Mooney-Rivlin model

Mooney-Rivlin 모델은 Neo-Hookean 모델에서 제 2 불변량을 포함하는 것으로 다음 식과 같이 확장할 수 있다. 본 연구에서는 2차식을 적용하였다(Rivlin and Saunders, 1951).

$$W_{MR} = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (3)$$

여기서, C_{10} 과 C_{01} 는 실험데이터의 곡선 적합을 통하여 결정되는 모델 상수이며 I_i 는 주변형률 불변량이다.

(3) Ogden model

Ogden 모델은 변형에너지를 변형률의 다항식으로 표현된다. 본 연구에서는 3차식을 적용하였다(Ogden et al., 2004).

$$W_{OG} = \sum_p \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (4)$$

여기서, α_p 와 μ_p 는 실험데이터의 곡선 적합을 통하여 결정되는 모델 상수이며 λ_i 는 주연신율(Principal stretch ratio)이다.

(4) Yeoh model

대변형으로 인한 변형률이 큰 경우에 높은 정확도를 보이는 모델로 3차 다항식으로 구성되어 있으며 일반적으로 초기 Modulus와 Stretch가 제한된 실험데이터일 경우에 권장되는 모델로 알려져 있다.

$$W_{YE} = \sum_{i=0}^3 C_{i0}(I_1 - 3)^i \quad (5)$$

여기서, C_{i0} 는 실험데이터의 곡선 적합을 통하여 결정되는 모델 상수이며 I_1 은 주변형률 불변량이다.

(5) Arruda-Boyce model

Arruda-Boyce 모델은 대표적인 체인분자모델에 의한 구성방정식으로 8개의 체인이 단위 입방체의 대각선에 걸쳐 존재한다고 보고 변형을 고려하여 변형에너지가 유도되면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$W_{AB} = \mu_0 \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (6)$$

여기서, μ_0 와 λ_m 은 실험데이터의 곡선 적합을 통하여 결정되는 모델 상수이며 I_1^i 는 주변형률 불변량이다.

3.2 해석모델의 구성

구조해석과 전후처리는 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus를 사용하였다. 초탄성 재료의 유한요소모델링을 위한 요소의 특성을 검토한 결과 솔리드, 트러스, 빔, 셸 요소의 적용이 가능하나 대변형률(Large strain) 구현이 가능한 하이브리드 요소를 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 이는 고무와 같은 초탄성 재료는 대변형이 발생하기 때문에 유한요소모델의 구성 시, 일반적으로 구조해석에서 사용되는 소변형률 요소의 사용은 정확성을 크게 낮출 수 있으므로 비압축성 거동 구현이 가능한 복합솔리드 요소(6-node linear triangular prism, Hybrid, Constant pressure, C3D6H와 8-node linear brick, Hybrid, Constant pressure, Hourglass control, C3D8RH)를 적용하였다. Fig. 6은 초탄성 재료의 인장 및 압축실험을 모사하기 위한 각각의 유한요소모델을 보여주고 있다. 유한요소모델의 요소망 크기를 조밀하게 적용하면 해석결과 of 정확도는 올라가지만 증가하는 절점과 요소에 대한 자유도가 증가하여 해석시간이 크게 증가할 수 있다.

다만, 변형이 발생하지 않는 지그로 고정되는 그림부와 변형이 크게 발생하는 중앙부의 요소 크기의 변화를 크게 두면 세장비로 인한 오차가 발생하여 해의 수렴성을 저해할 수 있으므로 요소의 밀도를 높이고 형상의 건전성을 확보하고자 하였다. 인장실험의 경우, 중앙부위의 변형이 가장 크기 때문에 조밀한 요소를 적용하였으며 지그에 고정된 그림부등 변형이 작은 구간은 요소밀도를 낮추어 구성하였다. 실제 구현된 인장실험에 대한 유한요소모델의 요소 크기는 그림구간은 1.50mm, R1 part는 0.65mm, R2 part는 1.20mm, GL part는 0.35mm이며 압축모델의 경우는 전체적으로 압축변형에 관한 거동이 잘 표현될 수

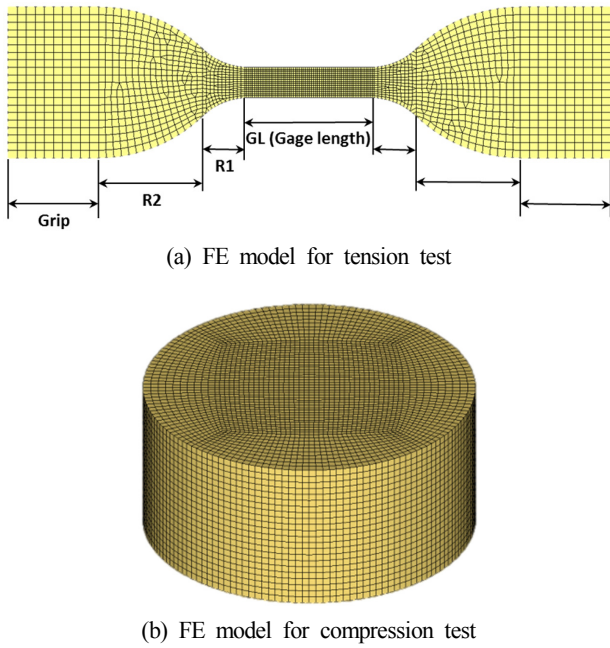


Fig. 6 Finite element model for tests

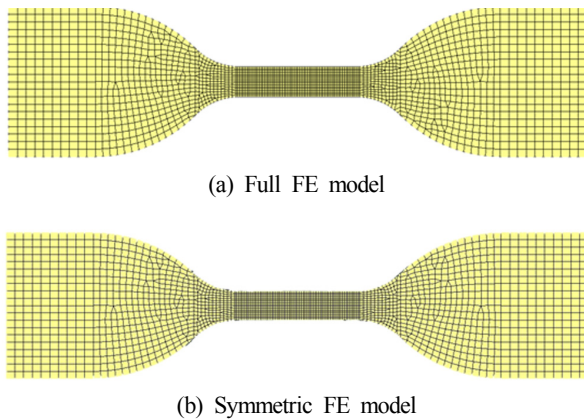


Fig. 7 Comparison of Full FE Model and Symmetric FE Model

있도록 0.65mm로 모델을 구성하였다.

특히, 인장실험 모사를 위한 유한요소해석 모델은 경계조건이 비대칭으로 주어지므로 전체 유한요소모델(Full FE model)을 사용하는 것이 적절하다. 다만 요소의 대칭성에 대한 검토를 위하여 대칭모델(Symmetric FE model)에 대한 비교를 수행하였다. Fig. 7는 전체 유한요소 모델과 대칭모델을 보여주고 있다. Table 4는 Neo-Hookean 모델을 적용하여 해석한 결과로 특정 변형지점에서의 변위가 전체 유한요소모델과 대칭모델이 동일함을 확인하였으며 인장실험 모사를 위한 유한요소해석은 전체 유한요소모델을 사용하였다.

Table 4 FE Analysis Comparison of Full FE Model and Symmetric FE Model

	$\epsilon = 0.5$	$\epsilon = 1.0$	$\epsilon = 1.5$	$\epsilon = 2.0$
Symmetric FE-model	18.47	39.18	59.45	83.92
Non-symmetric FE-model	18.47	39.18	59.45	83.92

3.3 비선형 재료모델 상수 추출

실험을 통하여 획득한 시편의 응력-변형률 선도로부터 곡선 적합(Curve-Fitting)을 통하여 5종의 비선형 재료모델(Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, Arruda-Boyce)의 모델상수를 도출하였으며 이를 해석에 적용하였다. 단, 본 연구에서는 시편을 비압축성으로 가정하여 체적계수(Volumetric modulus)를 0으로 설정하였으며 Abaqus에서 대변형을 허용하도록 옵션을 지정하고 계산을 수행하였다. 도출된 각각의 모델 상수를 Table 5와 Table 6에 나타내었다.

Table 5 Model Coefficient of tension test

	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Ogden	Yeoh	Arruda-Boyce
C_1	1.457	C_{10} 2.526	μ_1 -18.837	C_{10} 1.094	μ 2.218
d	0.000	C_{01} -2.710	α_1 -0.841	C_{20} 0.021	μ_0 2.341
		d 0.000	μ_2 0.002	C_{30} 0.000136	λ_m 3.430
			α_2 6.688	d_1 0.000	d
			μ_3 23.907	d_2 0.000	
			α_3 -2.696	d_3 0.000	
			d_1 0.000		
			d_2 0.000		
			d_3 0.000		

Table 6 Model Coefficient from Compression test

	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Ogden	Yeoh	Arruda-Boyce
C_1	0.000	C_{10} 0.273	μ_1 20.701	C_{10} 0.059	μ 0.115
d	0.089	C_{01} 0.046	α_1 2.027	C_{20} 0.082	μ_0 0.160
		d 0.000	μ_2 -21.827	C_{30} -0.004	λ_m 1.566
			α_2 2.409	d_1 0.000	d 0.000
			μ_3 1.060	d_2 0.000	
			α_3 -2.003	d_3 0.000	
			d_1 0.000		
			d_2 0.000		
			d_3 0.000		

3.4 경계조건

인장실험 해석모델은 수평방향을 x축, 수직방향을 y축, 시편의 두께 방향을 z축으로 설정하였다. 시편의 한쪽면을 고정하고 반대편에서 하중을 부여하는 실험조건을 모사하기 위하여 해석모델의 좌측 그림부는 완전고정조건을 부여하였으며 우측 그림부는 y, z방향을 고정하고 x방향으로 하중을 부여하였다. Fig. 8은 인장해석모델에 적용된 하중과 경계조건을 보여주고 있다.

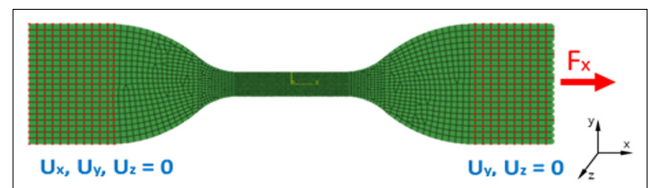


Fig. 8 Loading and boundary condition of FE analysis model for Tension test

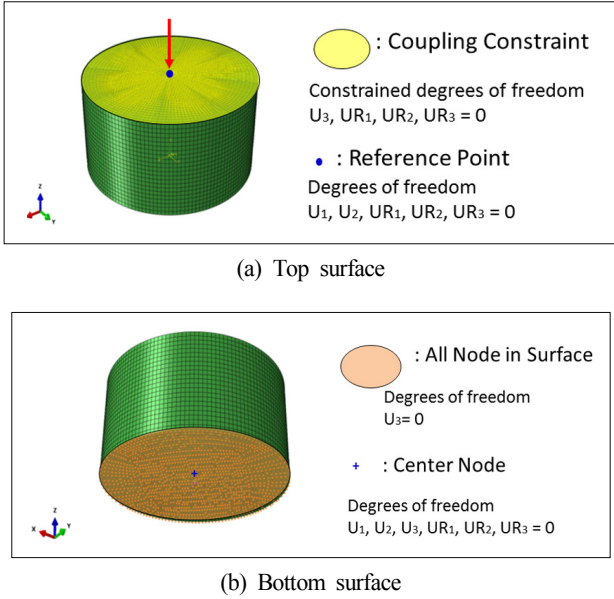


Fig. 9 Loading and boundary condition of FE analysis model for compression test

또한 압축실험 모사를 위한 해석모델의 경계조건은 배불림 현상 방지등의 여러 실험조건을 고려하여 상부면에 커플링을 통하여 하중을 부여하였으며 바닥면은 z방향 자유도를 제외하고 모두 구속조건을 부가하였다. 단, 강제 운동을 방지하기 위하여 바닥면의 중앙노드에 완전고정조건을 부여하였다. Fig. 9는 압축해석모델에 적용된 하중과 경계조건을 보여주고 있다.

4. 실험-해석 연계 결과 분석

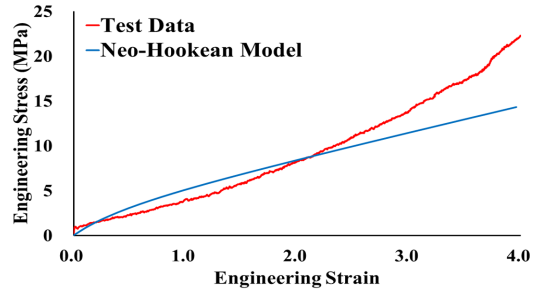
4.1 인장실험-해석

인장실험에 대하여 유한요소해석 결과와 실험 결과와의 연계 분석을 위하여 5종의 비선형 재료모델을 적용하여 해석을 수행하였으며 분할된 4개의 변형률 구간(λ : 1.0, 2.0, 3.0, 3.9)에서의 변형에너지 오차 비교를 통하여 정확도를 분석하였다.

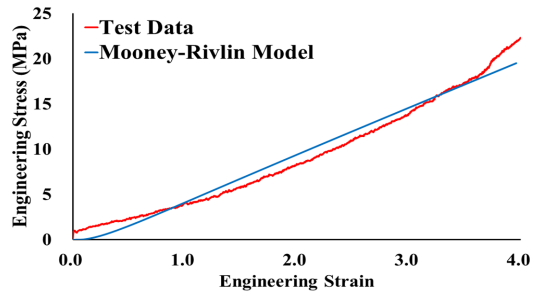
Table 7은 인장실험에 대하여 분할된 변형률 구간에서 해석과 실험결과에 대하여 변형 에너지 오차를 보여주고 있다. Neo-Hookean 모델의 각 분할된 변형률 구간에서의 변형 에너지 오차는 32.02%, 20.39%, 14.16%, 19.88%이다. 일반적으로 알려진 바와 같이 선형 특성을 갖고 있는 Neo-Hookean 모델은 신장률이 큰 변형을 충분히 모사하고 있지 못한 것을 확인 할 수 있다. Mooney-Rivlin의 경우, 각 구간별 29.49%, 19.01%, 13.32%, 8.93%의 오차를 보였다. 본 연구에서는 2차식의 Mooney-Rivlin 모델을 사용하

Table 7 Comparison of analysis result for curve fitting

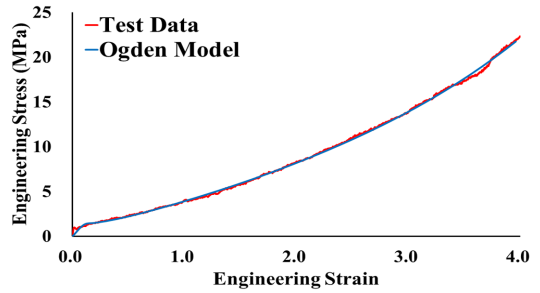
λ	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Ogden ($N = 3$)	Yeoh	Arruda-Boyce
1.0	32.02%	29.49%	3.38%	6.79%	13.77%
2.0	20.39%	19.01%	2.19%	5.60%	7.27%
3.0	14.16%	13.32%	1.52%	3.84%	7.12%
3.9	19.88%	8.93%	1.37%	2.66%	5.21%



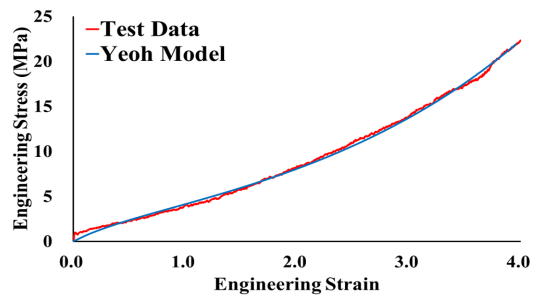
(a) Neo-Hookean



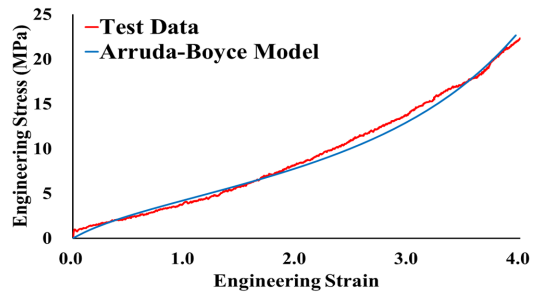
(b) Mooney-Rivlin



(c) Ogden



(d) Yeoh



(e) Arruda-Boyce

Fig. 10 Comparison of analysis and test of various nonlinear material model for tension test

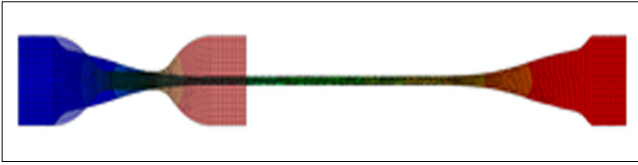


Fig. 11 Deformed shape of Ogden material model for tension test

였으며 고차식을 사용할 경우에는 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. Ogden 모델의 경우, 각 구간별 3.38%, 2.19%, 1.52%, 1.37%의 오차를 보여주고 대변형을 잘 반영하는 것으로 알려진 것과 같이 400%의 연신률을 갖는 시편의 거동을 잘 묘사하고 있음을 확인하였다. Yeoh 모델의 경우, 각 구간별 6.79%, 5.60%, 3.84%, 2.66%의 오차를 보여주고 있으며 Arruda-Boyce 모델의 경우 각 구간별 13.37%, 7.27%, 7.12%, 5.21%의 오차를 보여주고 있다. Fig. 10는 각각의 비선형 재료모델의 실험-해석 결과를 보여주고 있으며 Fig. 11은 Ogden 모델의 유한요소 해석 결과이다. 인장시험의 경우, 시편으로 사용된 초탄성 재료가 갖는 변곡점의 특성을 잘 표현해 주는 재료모델은 Ogden 모델이며 이를 통하여 약 400%의 연신률을 갖는 초탄성 재료의 경우 Ogden 모델이 적절함을 확인하였다.

4.2 압축실험-해석

압축실험 해석과 실험결과의 연계분석도 인장실험 분석과 동일하게 5종의 비선형 재료모델을 적용하여 해석을 수행하여 분할된 4개의 변형률 구간(λ : -0.2, -0.4, -0.6, -0.8)에서의 변형에너지 오차를 비교하였다. 분할된 4개의 변형률 구간에서의 변형에너지 오차는 Table 8과 같으며 Mooney-Rivlin 모델의 유한요소해석 결과는 Fig. 12와 같다. 각각의 비선형 재료모델에 관한 실험-해석 결과는 Fig. 13에 나타내었다.

Table 8 Comparison of analysis result for curve fitting

λ	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Ogden ($N = 3$)	Yeoh	Arruda-Boyce
-0.2	0.19%	29.34%	49.83%	88.96%	91.44%
-0.4	92.40%	23.97%	0.19%	74.95%	91.28%
-0.6	92.02%	12.35%	8.21%	38.70%	85.82%
-0.8	93.01%	5.30%	7.99%	11.86%	49.25%

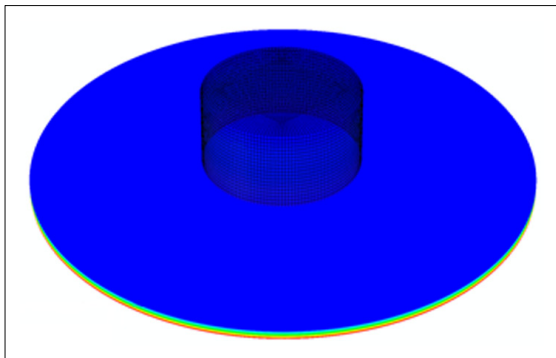
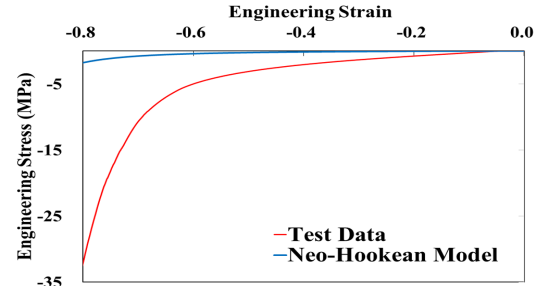
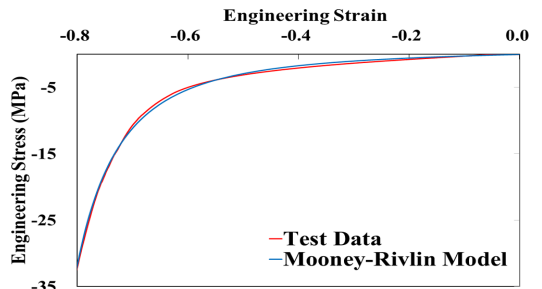


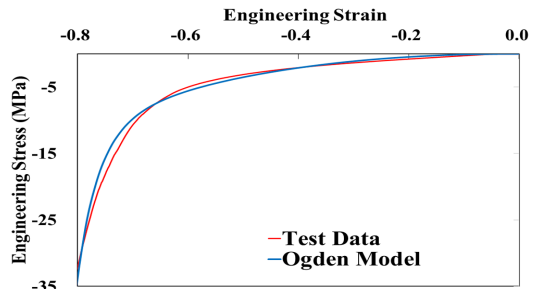
Fig. 12 Deformed shape of Mooney-Rivlin model for compression test



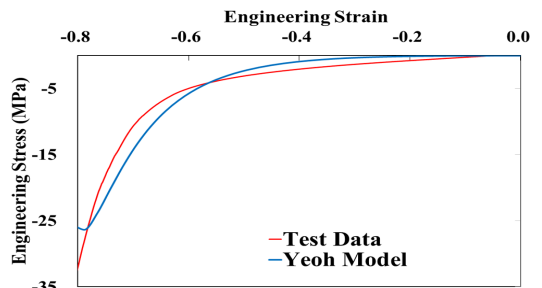
(a) Neo-Hookean



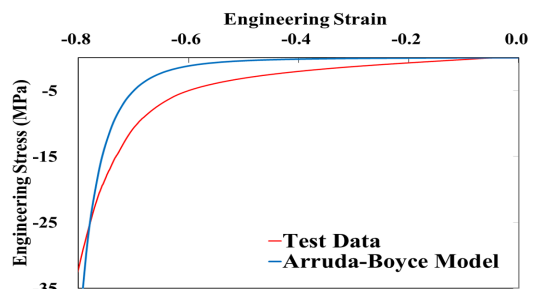
(b) Mooney-Rivlin



(c) Ogden



(d) Yeoh



(e) Arruda-Boyce

Fig. 13 Comparison of analysis and test of various nonlinear material model for compression test

Neo-Hookean 모델의 경우, -2.0, -4.0, -6.0, -8.0의 각 구간에서의 오차는 0.19%, 92.40%, 92.02%, 93.01%였으며 인장실험-해석 비교 결과와 유사하게 큰 오차를 보여주고 있다. Mooney-Rivlin 모델의 경우는 각 구간별 29.34%, 23.97%, 12.35%, 5.30%의 오차를 보여주고 있다. Ogden 모델의 경우, 각 구간별 49.83%, 0.19%, 8.21%, 7.99%의 오차를 보여주고 있으며 Yeoh 모델의 경우 88.96%, 74.95%, 38.70%, 11.86%의 오차를 보여주고 있다. 마지막으로 Arruda-Boyce 모델의 경우, 각 구간별 91.44%, 91.28%, 85.82%, 49.25%의 오차를 보여주고 있으며 전체 구간($\lambda = -0.8$)에서 실험결과를 잘 모사하는 모델은 Mooney-Rivlin 모델임을 확인할 수 있다. 하지만, λ 가 -0.4와 -0.6일 경우에는 Ogden 모델이 더욱 잘 모사하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 초탄성 재료의 운용 조건에 따라, 즉, 하중조건에 따라 해석에 사용되는 모델이 달라야 함을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 초탄성 재료의 해양플랜트 구조물 적용을 위하여 재료 특성실험에 관한 실험을 수행하였고, 인장 및 압축 실험결과를 비선형 재료모델을 적용한 유한요소해석 결과와 비교하여 해석의 정확성 향상을 위한 연구를 수행하였다. 또한, 신장률에 따라 적합한 재료모델을 제안하였으며 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 본 연구의 대상인 신장률 0~400%사이의 천연고무 기반의 탄성체는 인장실험의 경우에는 Ogden 모델이, 압축실험의 경우에는 Mooney-Rivlin 모델이 하중-변위응답, 응력-변형률응답에 가장 부합됨을 알 수 있었다.

(2) 비선형 재료모델은 하중조건(인장 또는 압축) 및 변형량에 따라 적합한 모델이 다름을 확인할 수 있었으며 정확한 해석 및 설계를 위해서는 재료의 운용조건에 대한 분석을 통하여 적합한 모델을 선택하여야 한다.

(3) 압축실험의 경우, 응력 연화 현상(Mullins effect)를 고려하여 반복 하중 부여를 통한 물성 안정화 과정이 필요하며 실험 데이터는 보정 과정이 반드시 필요함을 알 수 있었다.

향후 해양플랜트 구조물의 운용환경을 고려하여 속도변화 및 온도조건 변화에 관한 효과를 반영하는 개선된 비선형 재료모델을 개발하는 것이 필요하며 요소망을 최적화하여 실험결과와 해석결과가 데이터베이스 형태로 연계된 정확도 향상 기법의 개발이 요구된다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양플랜트의 사고한계상태기반 구조손상도평가 핵심기술 개발(2/3)”에 의해 수행되었습니다(PES9470).

References

- American Society for Testing and Materials(ASTM), 2015. E8M-15a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- International Organization for Standardization(ISO), 2005. Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Determination of Tensile Stress-strain Properties.
- International Organization for Standardization(ISO), 2008. Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Determination of Compression Stress-strain Properties.
- Kim, W.D., Kim, W.S., Kim, D.J., Woo, C.S., Lee, H.J., 2004. Mechanical Testing and Nonlinear Material Properties for Finite Element Analysis of Rubber Components. Transactions of the KSME A, 28(6), 848-859.
- Korea Institute of Machinery & Materials, 1999. Design and Analysis of the Hyperelastic Rubber Components, Ministry of Science and Technology.
- Ogden, R.W., Saccomandi, G., Sgura, I., 2004. Fitting Hyperelastic Models to Experimental Data. Computational Mechanics, 34(6), 484-502.
- Rivlin, R.S., Saunders, D.W., 1951. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials - VII. Experiments on the deformation of Rubber. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 243(865), 251-288.
- Wada, N., Takahima, M., Kondo, T., Mitsuhashi, K., 2002. Effect of Precision of Types of Test Pieces on Tensile Data of Vulcanized Rubbers. International Rubber Conference.
- Woo, C.S., Park, H.S., 2007. Mechanical Properties Evaluation Synthetic Rubber, Elastomer, 42(1), 32-46.