



자동계류시스템 고무 씰 유한요소해석을 위한 고무 소재의 온도별 기계적 특성 연구

손연홍¹·김명성¹·장화섭²·김송길^{3,†}·김용진^{1,†}
한국기계연구원 신뢰성평가연구실¹
(사)한국선급 디지털라이제이션팀²
부산대학교 기계공학부³

Study on Temperature-Dependent Mechanical Properties of Chloroprene Rubber for Finite Element Analysis of Rubber Seal in an Automatic Mooring System

Yeonhong Son¹·Myung-Sung Kim¹·Hwasup Jang²·Songkil Kim^{3,†}·Yongjin Kim^{1,†}
Department of Reliability Assessment, Korea Institute of Machinery & Materials¹
Team of Digitalization, Korean Register²
School of Mechanical Engineering, Pusan National University³

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.

An automatic mooring system for a ship consists of a vacuum suction pad and a mechanical part, enabling quick and safe mooring of a ship. In the development of a mooring system, the design of a vacuum suction pad is a key to secure enough mooring forces and achieve stable operation of a mooring system. In the vacuum suction pad, properly designing its rubber seal determines the performance of the suction pad. Therefore, it is necessary to appropriately design the rubber seal for maintaining a high-vacuum condition inside the pad as well as achieving its mechanical robustness for long-time use. Finite element analysis for the design of the rubber seal requires the use of an appropriate strain energy function model to accurately simulate mechanical behavior of the rubber seal material. In this study, we conducted simple uniaxial tensile testing of Chloroprene Rubber (CR) to explore the strain energy function model best-fitted to its experimentally measured engineering strain-stress curves depending on various temperature environments. This study elucidates the temperature-dependent mechanical behaviors of CR and will be foundational to design rubber seal for an automatic mooring system under various temperature conditions.

Keywords : Chloroprene rubber(클로로프렌 고무), Hyperelastic behavior(초탄성 거동), Uniaxial tensile test(단축인장시험), Strain energy function(변형률에너지함수), Nonlinear material constant(비선형 재료 정수)

1. 서 론

IMO의 환경 규제와 세계 흐름에 맞추어 국내에서도 스마트 항만 구축의 연구개발을 추진 중에 있다. 스마트 항만은 최적화된 IoT 플랫폼을 중심으로 한 지능형 항만으로 자율운항선박과 연계한다면 해상물류의 단가를 낮추고 항만 안전성을 제고할 수 있을 것으로 예상된다. 자율운항선박이 항만에 안전하고 효율적으로 입항이나 출항을 하기 위해서 육상과 연계되는 다양한

자동화 및 지능화 기술이 필요하며 4차 산업혁명 기술인 인공지능 (artificial intelligence, AI)과 빅데이터 등을 토대로 활발히 연구되고 있다.

자율운항선박의 안전한 입출항을 위해 선박의 계류 방식에 대해 고려해야 할 필요가 있다. 선박을 항구에 접안하기 위해서는 무어링 로프, 앵커 케이블과 로프를 감기 위한 계류 시설이 필요하다. 선박 계류는 인력에 의한 수동 시스템으로 구성되어 있기 때문에 안전사고와 작업의 능률면에서 문제가 되어 왔다. 최근 조사에 따르면 2016년부터 5년간 계류 줄 사고로 인해

200 여명의 부상, 실종, 사망 등의 인명피해가 발생하였음을 확인할 수 있다 (Korea Maritime Safety Tribunal (KMST), 2020). 따라서 선박 계류 작업 자동화를 통해 안전성과 신속성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

국외에서는 이미 유럽을 중심으로 로프를 이용하는 계류방식에서 벗어나 새로운 계류 장치들이 개발되고 있다. 개발된 자동 계류 장치는 주로 진공식이나 자기식을 이용한 흡착 패드와 패드를 제어하는 기구부로 구성되어 있으며, 여러 기의 자동계류 장치로 이루어진 자동계류시스템이 부두에 설치되어 있다. 기존의 로프 방식에 비해 선박의 움직임 제어가 용이하고 인간의 개입 없이 자동화가 가능하기 때문에 자율운항선박의 AIS시스템과 쉽게 연동될 수 있을 것으로 보인다 (Kim et al., 2019).

자동계류장치에서 흡착패드는 주로 진공 방식을 이용한다. 진공 흡착패드에서 고무 씰 (rubber seal)은 가장 먼저 선박에 맞닿는 부품이기 때문에 선박 접촉 시 안정적인 진공을 형성함과 동시에 충격 완충효과를 얻을 수 있는 고분자 소재가 필요하다. 고무 씰에 사용되는 고분자 소재는 고무를 주로 사용하고 있으며, 고무 소재는 고도의 신장성과 탁월한 복원 능력 및 진동 감쇠 특성을 갖고 있다. 따라서 고무는 진공흡착 패드뿐만 아니라 엔진 마운트, 타이어 등의 자동차 방진고무 부품을 비롯하여 토목, 건설, 등 다양한 산업 분야에 폭넓게 사용되고 있는 공업 소재이다 (Suh et al., 2009).

일반적으로 금속 소재는 탄성 범위 내에서 하중과 변형과의 관계가 선형적이지만 (Kim et al., 1999), 고무 소재는 대변형 (large deformation) 상태에서도 탄성을 나타내며 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 초탄성 (hyperelastic) 소재이다 (Lee et al., 2018). 또한, 일정한 변형 유지 시 시간에 따라 응력이 감소하는 응력 완화 (stress relaxation) 현상과 외력을 일정하게 유지하면 시간에 따라 변형이 증가하는 크리프 (creep) 현상을 가지는 시간 의존적인 점탄성 (viscoelasticity)도 가지고 있다 (Choi et al., 2017; Nho et al., 2008). 특히 제조과정에서 기본원료 및 첨가물에 따라 다양한 기계적 물성을 가지는 특성을 갖고 있어 고무는 표준화된 물성이 존재하지 않는다. 따라서 설계단계에서부터 고무의 특성을 고려하여 고무 소재가 사용된 부품의 성능을 예측할 수 있어야 한다.

유한요소법 (Finite Element Method, FEM)은 주어진 하중 조건에 대해서 기계부품에 발생하는 응력 및 변형 상태를 예측할 수 있는 수치 해석 방법으로, 유한요소법 기반 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 기계부품 설계가 가능하다 (U and Kim, 1998). 유한요소법을 이용하여 고무 부품이 외부 하중 조건에 대해서 적절한 강성을 유지하고 있는지를 확인할 수 있다. 고무 부품의 해석적 설계에 있어 신뢰도 높은 시험과 대상 소재의 거동 특성을 설명할 수 있는 적절한 비선형 소재 모델을 선택해야 하므로 이를 위해서는 해당 고무 소재의 특성을 실험적으로 측정하는 것이 필요하다 (Lee et al., 2018).

기존의 고무 부품에 대한 연구는 상온에 대해 물성 실험을 수행하여 비선형 재료 정수를 구해서 구조해석 및 설계가 진행

되고 있다. 고무는 고분자 소재 중에서도 온도에 민감한 소재이며 제조과정에 따라라도 물성에 큰 변화를 보인다. 따라서 온도별 물성 실험을 통해 기계적 거동을 파악하고, 구조해석에 온도에 따른 비선형 재료 정수를 적용하여 고무 부품의 거동을 파악한다면 신뢰성 있는 부품 설계가 가능할 것으로 판단되었다.

본 연구는 자동계류시스템 진공흡착 패드의 고무 씰 소재가 되는 고무 소재에 대해 온도별로 기계적 물성 변화를 파악하고, 실험을 통해 측정된 응력-변형을 곡선과 변형을 에너지 함수 모델을 적용하여 상용프로그램인 Simulia사의 ABAQUS/CAE를 통해 예측된 변형결과를 비교하고자 한다. 이를 통해, 온도에 따라 초탄성 소재의 거동을 가장 잘 예측할 수 있는 변형률 에너지 함수 모델을 제시하고 고무 재료 정수를 결정하고자 한다.

2. 고무 소재 기계적 물성 측정

2.1 소재 선정 및 시편 제작

클로로프렌 고무 (Chloroprene Rubber, CR)는 열가소성 탄성체 (elastomer)로써 우수한 내오존성, 내후성, 난연성을 가지고 있으며 금속, 플라스틱 등 점착성이 뛰어나며 기체 투과성이 낮은 특성을 지니고 있는 소재이다. 기계적 특성은 천연고무에 비해 낮을 수 있지만 내오존성이 우수해 다양한 산업 군에서 사용되고 있다. 특히, 해양사업이 증가하면서 건축물 및 구조물에 대한 안정성 및 수명이 중요해져 건축 소재 및 부품으로 고무 부품의 사용량은 점점 증가하고 있는 추세이다. 이에 해양 건축용 고무제품으로 CR이 많이 사용되고 있다 (Lee et al., 2012; Ahn and Park, 2011).

고무제품은 사용되는 환경과 외부 영향, 내부의 화학적, 물리적 성질을 고려하여 설계해야 한다. 따라서 본 연구에서는 사용 환경인 해양에서 우수한 기계적 물성과 내오존성을 가지고 있는 CR을 온도별 물성 시험을 수행하였다. Table 1은 시행된 CR의 화학적 성분을 나타낸다.

고무 소재의 기계적 물성 측정을 위한 단순 인장 시험 시편은 KS M 6518 아령형 3호 시편으로 금형을 이용하여 두께 2 mm가 되도록 압축성형 제작된 고무 소재를 커터를 이용하여 단축인장시험 시편으로 제작하였다. Fig. 1은 제작된 시편과 시편의 주요 치수를 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of chloroprene rubber

Ingredients	Contents(%)
CR	53.9
Carbon black & oil	28.3
Antioxidant	17.8
Accelerator	
Others	

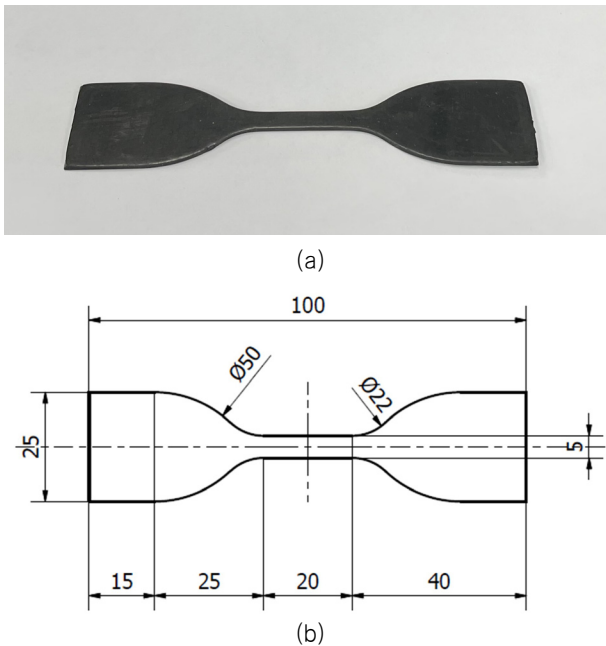


Fig. 1 (a) Specimen for uniaxial tensile testing and (b) dimension of chloroprene specimen

2.2 시험 온도 선정

자동계류시스템은 사계절 내내 항구에서 사용되는 장치이므로 겨울이나 여름과 같은 저온 및 고온에서도 진공흡착 패드의 고무 씰이 적절한 기계적 성능을 가져야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 온도 조건을 KS M ISO 23529 (Korean Standard (KS), 2016) 를 참고하여 저온 (-25°C, 0°C), 상온 (23°C), 고온 (55°C) 로 4개 온도를 선정하고 시험 전 환경 챔버에서 목표 온도 도달 후 10분간 유지시간을 가져 온도 평형에 도달하도록 하였다.

2.3 시험 장비 및 시나리오

CR의 기계적 물성을 파악하기 위해 단축인장시험을 수행하였다. 각 시험은 상온(23°C), 저온(-25°C, 0°C) 및 고온(55°C) 순으로 시험을 진행하였으며 재현성을 위해 동일한 조건에서 3개의 시편을 시험하였다.

고무 소재는 반복 하중을 받으면 고무 가교 (cross linking) 구조의 파손과 고무 분자 표면의 보강재(filler) 이탈 등으로 강성이 감소하는 물린스 효과 (mullins effect)가 나타난다 (Kim et al., 2004). 또한, 하중을 가했다가 제거했을 때의 응력-변형률 곡선이 달라지는 히스테리시스 (hysteresis) 곡선을 가지는 특징도 가지고 있다. 따라서 고무는 일정 변형률 범위 내에서 반복 하중을 받으면 첫 번째 사이클에서의 응력보다 그 이후 사이클에서의 응력이 점점 완화하는 현상이 나타나기 때문에 5~10회 이상의 반복 하중 사이클을 통해 곡선 안정화가 필요하다.

본 연구에서는 25%, 50%, 75%, 100% 연신율 구간에서 5회 부하-제하 (loading-unloading) 반복시험을 통해 단축인장



Fig. 2 Experimental set-up for uniaxial tensile testing

시험에서 얻어진 응력-변형률 선도를 비교하고자 한다. KS M 6518 아령형 3호 시편을 이용하여 Fig. 2와 같이 Galdabini社의 25 kN UTM으로 수행하였고, 온도 변화를 위한 환경 챔버와 연신을 측정하기 위해 비디오 신장계 (video extensometer)를 사용하였다. 시편의 표점거리는 20 mm로 설정하였고, crosshead 시험 속도는 KS M 6518 (KS, 2018) 에서는 500 mm/min으로 규정했지만 Ministry of Science & Technology (MST) (2004)에서 50~500 mm/min 범위 내에서의 응력-변형률 곡선 차이가 거의 없음을 참고하여 편의상 100 mm/min의 속도로 인장 실험을 수행하였다.

2.4 시험 결과 분석 방법

Kim et al. (1999)에 따르면 고무 시편을 안정화하기 위한 반복시험을 하면 시편의 단면적과 표점거리가 달라지기 때문에 응력-변형률 곡선을 원점으로 이동시키는 데이터 보정 과정이 필요하다. 시편 초기 변형과 반복 부하-제하 과정으로 인한 소성 변형률을 고려해서 곡선을 보정한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 상온에서 각 연신율의 5번째 부하했을 때의 응력-변형률 곡선으로 연신율이 클수록 응력이 완화되는 물린스 효과를 확인할 수 있다. 각 온도 환경에 대해서 동일한 방법으로 측정된 응력-변형률 곡선을 보정하여 온도에 따른 영향을 분석하였다.

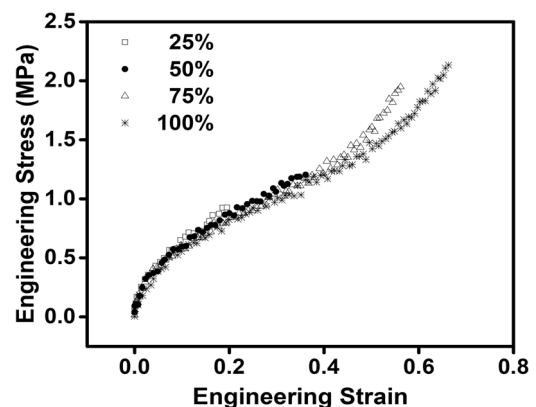


Fig. 3 Engineering strain-stress relation of CR specimen for different maximum elongations

3. 초탄성 소재 유한요소해석

3.1 변형률 에너지 함수

고무와 같은 초탄성 소재는 대변형, 비선형 특성을 가지고 있다. 고무 소재의 이러한 거동은 유한요소해석에서 변형률 에너지 함수 (strain energy function)의 계수 값으로 표현할 수 있다. 대표적인 변형률 에너지 함수로는 연신을 불변량 함수로 표시되는 Rivlin 모델과 주 연신을 함수로 표시되는 Ogden 모델이 있다. 그 외에 Neo-Hookean 모델과 Yeoh 모델이 있다. 4가지 변형률 에너지 함수 모델 중, 고무 물성 시험으로부터 얻은 응력-변형률 결과를 가장 잘 나타낼 수 있는 함수를 수치적으로 구하고자 한다.

Neo-Hookean 모델은 후크의 법칙을 대변형에 적용할 수 있도록 확장한 것으로, 변형에너지는 제 1불변량으로 표현되며 식은 아래와 같다.

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

여기서, W 는 변형률에너지 함수, C_1 은 비선형 재료 정수, I_1 은 주변형률 불변량 (principal strain invariant)이다.

Mooney-Rivlin 모델은 Neo-Hookean 모델에서 제2 불변량을 포함하는 것으로 표현되는 식은 다음과 같다 (Rivlin and Saunders, 1951).

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (2)$$

여기서, C_{10} 과 C_{01} 은 비선형 재료 정수, I_1 과 I_2 는 주변형률 불변량이다.

Yeoh 모델은 Neo-Hookean 모델의 1차 불변량 (I_1)을 3차까지 늘려서 표현한 모델로 다음 식으로 표현된다.

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

여기서, C_{i0} 은 비선형 재료 정수, I_1 은 주변형률 불변량이다.

Ogden 모델은 변형에너지가 주 연신을 함수로 표현되며 본 연구에서는 3차식을 사용하였다 (Ogden et al., 2004).

$$W = \sum_{i=1}^3 \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (4)$$

여기서, μ_i 와 α_i 는 비선형 재료 정수이며, λ_1 , λ_2 , λ_3 는 주연신을 (principal stretch ratio)이다. (Lee et al., 2018; Cheon et al., 2021)

3.2 비선형 재료 정수 결정

본 연구에서는 시험한 CR의 기계적 거동을 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/CAE (Simulia, 2019)를 이용하여 4가

지 변형률 에너지 함수 (Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Yeoh, Ogden)에 대해 해석적으로 예측하였다. 각 모델의 비선형 재료 정수를 도출하기 위해 온도별 100% 연신율의 단축인장 시험 결과를 활용하였다.

단축인장 시험 결과를 검증하기 위해 단축인장 시험 시편을 모델링하였다. Fig. 4는 단축인장 시편의 유한요소모델 (FE model)이며 전체 유한요소모델 (full FE model)을 사용하였다. 해석 모델을 구성하기 위해 고무와 같은 비압축성, 초탄성 거동 구현이 가능한 C3D8H(8-node linear triangular prism, Hybrid, Constant pressure)를 적용하였으며, 요소 수는 4624개, 절점 수는 7398개이다. 경계 및 하중 조건은 모델 한쪽 면의 그리프를 고정하고 반대 면 그리프 부에 변위를 주어 해석을 진행하였다.

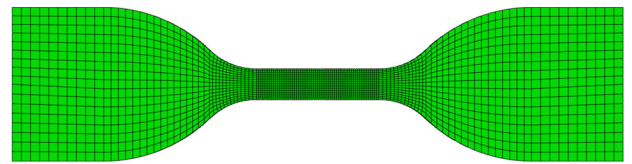


Fig. 4 FE model to simulate the uniaxial tensile testing

4. 결과 및 검토

4.1 온도 변화에 따른 단축 인장 시험 결과

Fig. 5는 온도별 히스테리시스 곡선으로 온도가 감소할수록 응력 완화가 심화되는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 온도별 100% 연신율의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 그래프를 보면 온도가 낮을수록 물성치 변화가 급격하게 보이며 강성이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 온도 변화에 따라 고무의 강성과 히스테리시스 곡선이 변화되는 이유는 고무의 유리전이온도 (glass transition temperature, TG)와 관계가 있다. 유리전이온도는 고무와 같은 고분자 소재가 유리 상태 (glassy state)에서 고무와 같은 질기고 탄성을 가지는 상태로 변화하는 온도로 CR의 TG는 약 -50°C 이다 (Gent, 2012). 유리전이온도에 가까워질수록 비결정화가 되려는 경향이 강해져 딱딱하고 깨지기 쉬운 거동을 나타낸다. 따라서 온도가 감소하면 할수록 강성이 증가하고 응력 완화가 두드러지게 되는 것이다. 마찬가지로 온도가 증가할수록 응력완화 현상은 거의 보이지 않게 되고 강성이 감소한다 (Jin et al., 2007).

강성을 수치적으로 나타내기 위해 온도별 탄성률 (100% modulus)을 Table 2에 나타내었다. 탄성률은 고무와 같은 비선형 응력-변형률 곡선에서 100% 연신율에서의 응력 값을 말하며, 연신율 100%는 인장시편 초기 표점거리에 대해서 부하제하 과정의 안정화 이후 총 늘어난 길이로 정의 된다. 그래프에서 확인할 수 있는 것과 같이 -25°C 에서 55°C 로 온도가 증가할수록 100% 탄성률은 감소하고 대략 3.2배의 차이가 나는 것을 확인하였다.

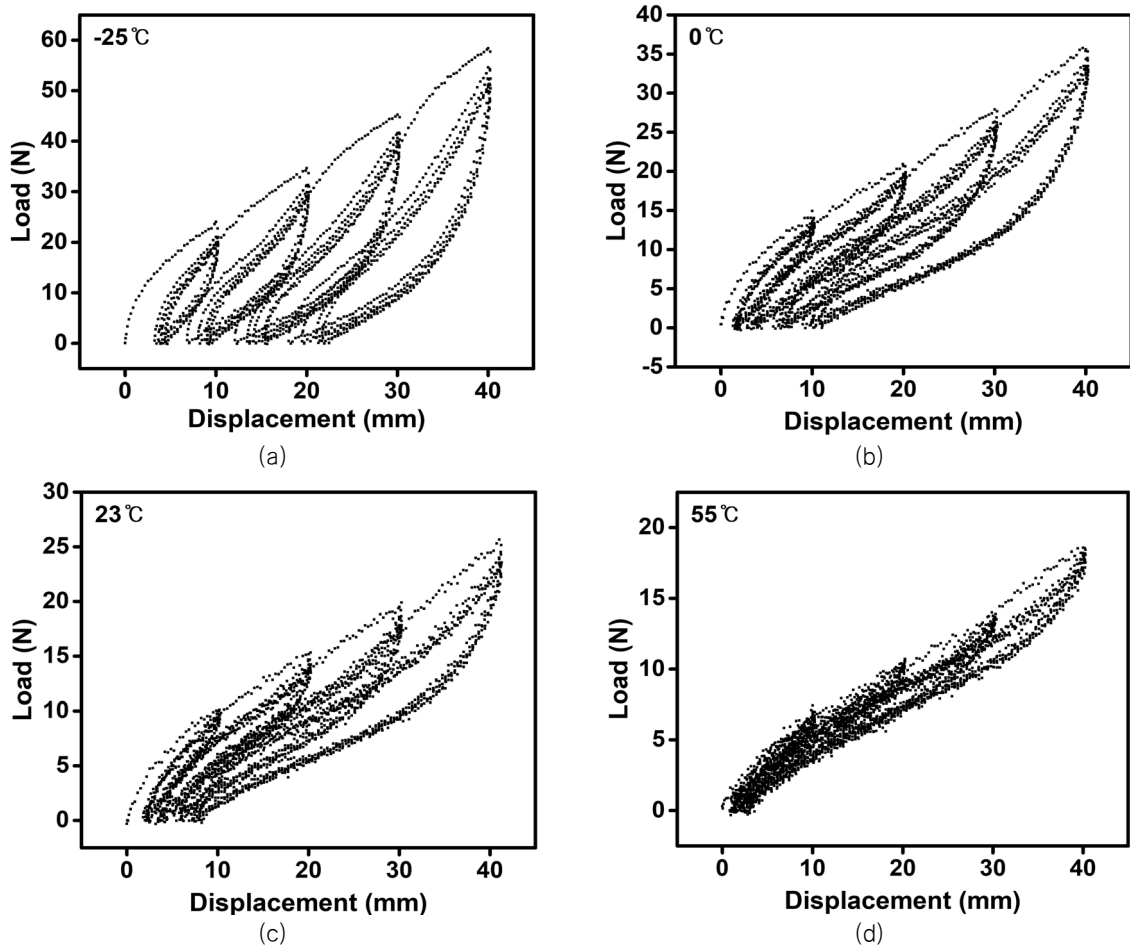


Fig. 5 Hysteresis in engineering strain-stress curves of CR at various temperatures: (a) -25 °C (b) 0 °C (c) 23 °C (d) 55 °C

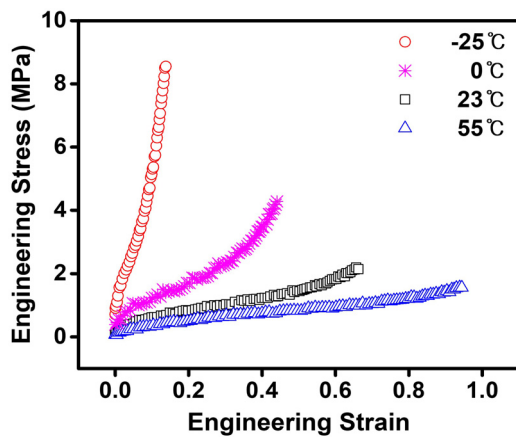


Fig. 6 Stress-strain curves at various temperature conditions

Table 2 100% modulus at various temperature conditions

Temperature (°C)	E_{100} (MPa)
-25	4.8
0	3.1
23	1.8
55	1.5

4.2 시험과 해석 결과 비교

Fig. 7은 변형률 에너지 함수 (Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Yeoh, and Ogden 3rd model)와 인장 시험 결과를 나타낸 것이다. -25 °C에서는 강성의 급격한 변화로 Ogden 3차 모델과 Yeoh 모델이 실험결과와 유사한 경향을 보인다. -25 °C를 제외하고 0 °C, 23 °C, 55 °C에서는 Ogden 3차 모델이 실험결과와 가장 근접하게 예측하는 것을 확인할 수 있다. 변형률 에너지 함수를 이용하여 온도별 단축 인장 시험 결과를 예측해 보니 Ogden 3차 모델이 온도와 상관없이 인장 시험 결과와 가장 비슷한 것을 확인할 수 있었다. Ogden 3차 모델은 고무 해석에서 가장 많이 사용되고 있는 모델이며 다른 함수들과 달리 응력-변형률 관계에서 연신율 지수가 실수 값을 가져 곡선 대응에 유연성을 가지기 때문에 실험 결과를 가장 잘 예측할 수 있는 것으로 알려져 있다. (Woo et al., 2010). 따라서 단축 인장 시험의 경우에는 온도 변화와 관계없이 Ogden 3차 모델을 적용하여 고무 부품의 특성을 해석하는 것이 적절한 것으로 보인다.

Table 3은 온도별 Ogden 3차 모델의 비선형 재료 정수를 나타낸 것이다. 고무 썬에 대한 유한요소해석에서 시험한 것과 같은 소재를 사용한다면 응력-변형률 데이터 입력 대신 비선형

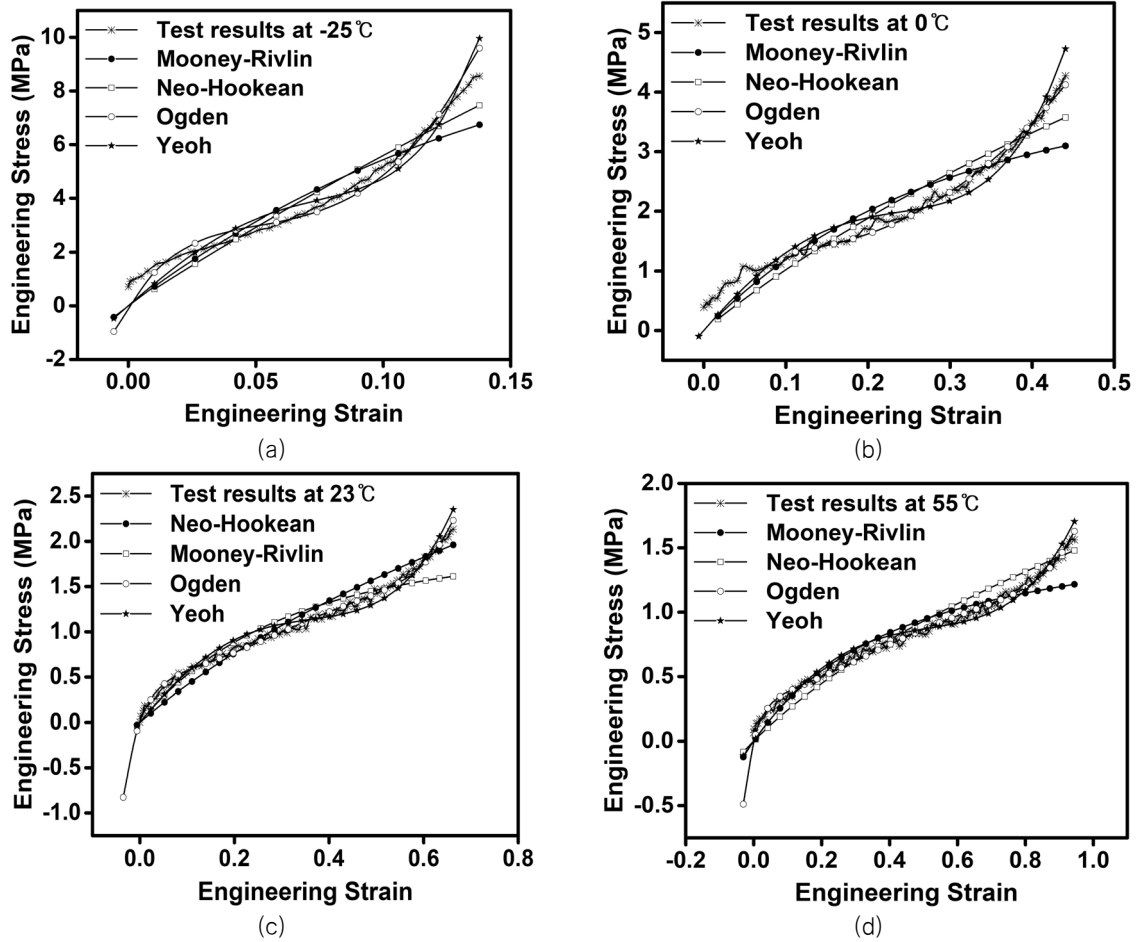


Fig. 7 Strain energy function models to the uniaxial tensile testing data: (a) -25 °C (b) 0 °C (c) 23 °C (d) 55 °C

재료 정수를 적용해도 같은 해석 결과를 나타내기 때문에 추후 고무 씰의 유한요소해석 시에 활용할 수 있다.

Table 3 Material constants for Ogden 3rd model

Temperature (°C)	Ogden 3rd					
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3
-25	-4354	-7.682	2477	-7.315	1926	-9.876
0	-76.85	11.78	65.93	11.57	24.66	-25.00
23	-10.64	10.65	7.678	9.653	7.769	-23.05
55	0.7428	3.306	-2.658	12.49	5.280	-25.00

5. 결론

본 연구에서는 자동계류시스템 진공흡착 패드의 고무 씰 소재로 적합한 CR에 대해 다양한 온도 환경에서 단축 인장 시험을 수행하여 온도에 따른 기계적 물성 변화를 측정 및 분석하였다. 측정된 온도별 응력-변형률 곡선을 가장 잘 모사할 수 있는 변형률 에너지 함수 모델을 제안하고 제안된 모델의 비선형 재료 정수를 구하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하자면 다음과 같다.

- (1) 고무 소재 물성 시험은 고무의 기계적 특성을 파악하기 위함으로 본 연구에서는 단축 인장 시험을 상온, 고온 및

저온의 환경 조건에서 시험을 통해 온도별 기계적 특성을 파악하였다.

- (2) 단축 인장 시험 시 고무의 물린스 효과(mullins effect)를 고려하여 반복 하중 부여를 통해 물성을 안정화하고 변형률에 대한 시험 데이터 보정 과정이 필요함을 알 수 있었다.
- (3) 초탄성 소재 중 해양에서 가장 많이 사용되는 CR에 대해 온도별 시험 결과를 고찰해 보면 CR의 유리전이온도의 영향으로 온도가 낮아질수록 응력 완화가 두드러지며 강성이 증가하였다. 100% 연신율에서의 응력인 탄성률을 비교했을 때, 55 °C에서 -25 °C까지 탄성률이 3.2배 증가하였다.
- (4) 온도별 단축인장시험의 응력-변형률 데이터를 변형률 에너지 함수들과 비교해 보았을 때 Ogden 3차 모델이 온도와 관계없이 가장 근접한 시험 결과를 예측하는 것으로 결론을 지을 수 있다.

본 연구의 고무 물성 시험은 재료의 인장을 통해 고무 씰의 초탄성 특성을 위한 선행 연구이며 온도별 재료 정수를 유한요소해석에 적용하여 부품의 취약 부위를 예측할 수 있으리라 기대된다. 추후 점탄성 특성을 파악하는 추가 실험을 통해 고무 씰의 정적 및 동적 해석에 대한 신뢰성을 향상시킬 예정이다.

후 기

이 논문은 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (스마트항만-자율운항선박 연계기술 개발)

References

- Ahn, W.S. and Park, D.R., 2011. Effects of CR contents on rubber vulcanization and mechanical properties of NR/CR blends. *Elastomers and Composites*, 46(2), pp.152–157.
- Cheon, K.M., Jang, J.H. and Hur, J.W., 2021. Finite element analysis of gaskets for hydrogen fuel cells. *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 20(10), pp.95–101.
- Choi, B.G., Heo, M.H., Seo, C.M., Kwon, H.R., Kim, K.H. and Park, S.H., 2017. Hyperelastic and viscoelastic responses of automotive weatherstrip rubber. *2017 Conference of The Korean Society of Machine Engineers*, pp.3120–3124.
- Gent, A.N., 2012. *Engineering with rubber: how to design rubber components*. 3rd Ed. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Jin, H.H., Chang, K.H., Cho, D.L. and Kang, S.Y., 2007. Effects of temperature on hardness and stiffness of NR and SBR vulcanizates. *Elastomers and Composites*, 42(3), pp.143–150.
- Kim, Y.D., Kiim, W.S. and Kim, C.H., 1999. Determination of rubber material model and the deformation behaviors of rubber component considering Mullins effect. *Korea Institute of Machinery & Materials*.
- Kim, H.H., Kim, J.M. and Nam, T.K., 2019. Design of sliding mode control system for automatic mooring device for vessels. *Journal of Korea Society of Marine Engineering*, 43(9), pp. 717–726.
- Korean Maritime Safety Tribunal (KMST) 2020. *Maritime safety accident statistics in 2019*, URL: <https://www.kmst.go.kr> [Accessed 03 January 2022].
- KS, 2016. Korean Standards KS M ISO 23529, Rubber – General procedures for preparing and conditioning test pieces for physical test methods, Seoul, Republic of Korea.
- KS, 2018. Korean Standards KS M 6518, Physical test methods for vulcanized rubber, Seoul, Republic of Korea.
- Lee, C.K., Yun, J.H. and Shim, S.E., 2012. Life time prediction and physical properties of chloroprene rubber aged by seawater. *Elastomer and Composites*, 47(1), pp.9–17.
- Lee, K.S., Ki, M.S. and Park, B.J., 2018. Comparative study on the nonlinear material model of hyperelastic material due to variation in the stretch ratio. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 32(4), pp.253–260.
- Ministry of Science & Technology (MST) 2004. *Development of integrated design system for mechanical rubber components*, KIMM Report No. M1-9911-00-0014.
- Nho, I.S., Kim, J.M. and Kwak, J.S., 2008. Non-linear large deformation analysis of elastic rubber mount. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(2), pp.186–191.
- Ogden, R.W., Saccomandi, G. and Sgura, I., 2004. Fitting hyperelastic models to experimental data. *Computational Mechanics*, 34(6), pp.484–502.
- Rivlin, R.S. and 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), pp.251–288.
- Simulia, 2019. ABAQUS user manual, Dassault Systemes Simulia Corp, Providence, RI, USA.
- Suh, C.M., Oh, S.Y., Park, D.K. and Jang, J.H., 2009. Fatigue characteristics of engine rubber mount for automotive. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(5), pp.45–53.
- U, C.S. and K, W.D., 1998. Finite element analysis of metal bonded rubber spring. *1998 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, pp.437–442.
- Woo, C.S., Park, H.S., Kim, Y.G., Shin, W.G. and Joe, D.H., 2010. Finite element analysis and evaluation of automotive rubber components. *Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers*, Seoul, Korea, 1 August 2010.



손 연 홍



김 명 성



장 화 섭



김 송 길



김 용 진