



# 함정용 디젤엔진 냉각수 가스켓의 기밀성 향상을 위한 초탄성 모델 기반 형상 최적화 연구

이가향·김용훈·박범식·하성철  
국방기술품질원

## Shape Optimization of Hyperelastic Gaskets for Enhancing Sealing Performance in Naval Diesel Engine Coolant Systems

GaHyang Lee·Younghoon Kim·BeomSik Park·Sungchul Ha  
Defense Agency for Technology and Quality

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.

This study focuses on the shape optimization and performance validation of coolant gaskets to resolve leakage issues at the cylinder head coolant outlets of naval diesel engines. The propulsion systems of the target LOO-II class vessels utilize a structure relying on simple contact pressure without mechanical fastening devices, which has led to chronic coolant leakage and secondary damages such as pitting corrosion on the cylinder heads. To address this, material composition analysis was conducted to obtain nonlinear properties, which were subsequently integrated into a Mooney-Rivlin hyperelastic model using COMSOL Multiphysics. Based on numerical analysis, an optimized gasket shape was developed to homogenize contact stress distribution and maximize sealing integrity. The optimized design was then prototyped and subjected to airtightness performance tests. The experimental results revealed that while the conventional gasket exhibited a pressure drop of 0.2 bar over 1,440 minutes, indicating micro-leakage, the optimized gasket maintained a pressure drop of 0 bar under the same conditions, demonstrating superior sealing performance. These findings are expected to significantly enhance the reliability of cooling systems and improve maintenance efficiency for naval diesel engines.

**Keywords** : Naval Vessel Propulsion(함정 추진 기관), Cylinder Head Gasket(실린더 헤드 가스켓), Hyperelastic Model(초탄성 모델), Coolant Leakage(냉각수 누수), Contact Pressure Analysis(접촉 압력 분석), Leakage Test(기밀시험)

## 1. 서론

함정 CODAD 추진체계의 추진기관인 디젤엔진의 실린더 헤드는 순간적인 폭발 압력과 고온에 직접 노출되는 부분이다(Luo et al., 2020). 따라서 열 부하 관리 및 장비 보호와 연소 효율의 최적화 등을 위해 실린더 헤드 내부에는 냉각 통로를 통해 냉각수를 순환시키며, 냉각수는 열응력에 의한 파손을 억제하는 역할도 한다(Hu et al., 2020; Wang et al., 2007). 최근 LOO-II급 함정에 탑재된 디젤엔진에서 실린더 헤드와 냉각수 다기관 접합부를 중심으로 한 냉각수 누설 결함이 Fig. 1과 같이 발생하였다.

현장 조사 결과, Fig. 2와 같이 누설된 냉각수는 단순히 냉각계통의 유체 손실에 그치지 않고, 인접한 실린더 헤드와 블록 외벽에 침투하여 국부적 점부식(Pitting Corrosion) 및 재질의 열화

를 초래하는 연계 손상을 유발하고 있다(Dubov et al., 2024). 디젤엔진의 주 냉각 계통에서 누수가 발생할 시 열교환 용량이 부족해져 냉각 효율이 저하되거나, 특정 부위의 냉각 흐름이 저해될 경우 실린더 헤드나 라이너에 열응력이 집중되어 균열이 발생할 수도 있다(Zhang et al., 2022).

통상적으로 선박용 디젤엔진에서 실린더 헤드와 실린더 블록을 체결 시 전용 유압잭을 사용하여 실린더 블록에서 헤드를 관통하여 위로 솟아 있는 실린더 스테드 볼트를 배치하고, 헤드 위에서 스테드 볼트와 맞물려 고정하여 기계적으로 체결한다. 가스켓의 밀폐 성능은 이러한 볼트 체결 토크에 크게 의존하며, 체결력이 확보되지 않으면 접촉압력 분포가 불균일해져 기밀 성능이 저하된다(Kandreegula et al., 2015). 그러나 본 연구 대상 함정의 경우 Fig. 3과 같이 디젤엔진의 실린더 블록과 실린더 헤드의



Fig. 1 The part of damage occurred



Fig. 2 The part of leakage

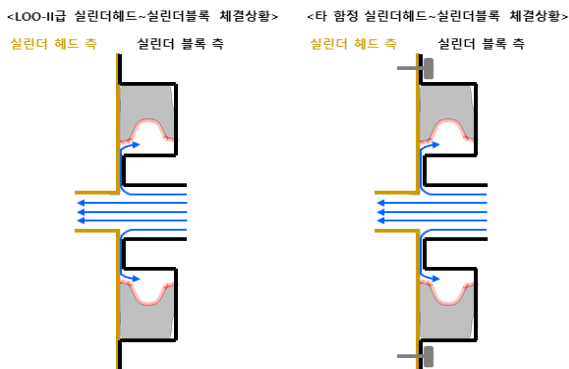


Fig. 3 Comparison on the cylinder head and block fastening part

냉각수 출구변 사이에 기계적 체결을 위한 장치가 존재하지 않아 가스켓의 탄성 복원력과 상하부 구조물의 단순 접촉 압력(Contact Pressure)에만 의존하여 기밀을 유지하는 특수한 구조를 취하고 있다. 고무 씬의 밀폐 조건은 최대 접촉응력이 유체압력을 상회해야 한다는 점에서(Sun et al., 2009), 이러한 체결 장치 부재 구조는 설계 파라미터 변동에 따른 밀폐 성능에 대한 안전 여유가 부족하다. 이러한 구조 하에서 냉각수 누설이 발생할 경우 냉각 효율 저하와 특정 부위의 냉각 흐름 지체로 인해 실린더 헤드나 라이너에 열응력이 집중되어 균열이 발생할 수 있으며 누설된 냉각수가 금속 표면에 장기 접촉할 경우 국부적 점부식을 유발하여 부품의 내구성을 급격히 저하시킬 수도 있다(Dubov et al., 2024).

실제로 LOO-II급 전 함정(총 4척)을 조사한 결과 디젤엔진 냉각수 다기관 출구변 인근의 누설로 인한 연계 손상이 '22년 3건, '23년 3건, '24년 6건, '25년 4건 발생했으며 이로 인해 파생되는 현상(점부식 등)으로 사용 불가한 실린더 헤드가 증가하고 있다.

본 고장은 소요정비부대인 해군 정비창 대형기관정비팀의 협

조를 통해 현장을 방문하여 고장현상 조사 및 시험을 수행하였다. 특히 본 연구에서는 디젤엔진 실린더 헤드 냉각수 다기관 출구변에 직접적으로 맞닿아 있는 고무가스켓의 개선방안에 대해 중점적으로 연구하여 냉각수 누설 방지를 위한 최적의 가스켓 형상을 도출해 향후 동일 계열 엔진의 정비 신뢰성 향상과 함정 운용 효율화에 기여하고자 한다.

## 2. 가스켓 성분 분석

가스켓의 밀폐력 수치 해석에 앞서 재질을 규명하기 위해 FT-IR, 열분해 GC/MS, TGA, SEM-EDX의 4종 분석을 순차적으로 수행하였다. 각 분석은 상호 보완적으로 활용하여 가스켓 주성분의 화학 구조, 열적 특성 및 원소 조성을 종합적으로 확인하였다.

### 2.1 FT-IR 분석

FT-IR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 검사는 분자 내 결합이 갖는 고유진동수에 해당하는 적외선을 선택적으로 흡수하는 특성을 이용하여 화학 구조를 분석하는 분광 분석법이다. 또한, 다양한 파장의 적외선을 동시에 조사하고 푸리에 변환을 통해 스펙트럼을 산출함으로써 시료에 존재하는 작용기가 존재하는지 판단할 수 있다(Meyns et al., 2019).

검사 결과를 바탕으로 FT-IR Library Search와 비교했을 때 가스켓의 성분이 Zetpol2010(HNBR)의 소재와 유사한 것으로 확인되었다.

### 2.2 열분해 GC/MS 분석

열분해 GC/MS (Pyrolysis-Gas Chromatography / Mass Spectrometry) 검사는 복잡한 고분자, 플라스틱, 환경 시료 등 조성 물질을 분해하여 정성/정량화하는 분석 방법이다. 시험 물질을 높은 온도로 가열한 후 열적으로 분해를 하여 열분해라고 하며 GC(Gas Chromatography)는 열분해된 분해 산물을 끓는 점에 따라 분리하는 것이고 MS(Mass Spectrometry)는 GC로 분리된 성분을 질량 분석기를 통해 분자량과 구조를 분석하는 과정이다. 이러한 분석결과를 종합하여 물질의 조성 성분의 종류, 구조 등을 파악할 수 있다(Kusch, 2013).

600°C의 고온에서 시료를 열분해한 결과, 열분해 GC/MS Pyrogram에서 HNBR 고유의 탄화수소 사슬 분해 패턴(C1~C40)이 확인되었다. HNBR은 열분해 시 저온 구간에서는 에틸렌(ethylene), 프로필렌(propylene), 아크릴로니트릴(acrylonitrile)이 주요 생성물로 검출되고, 고온 구간에서는 1-부텐(1-butene)이 추가로 나타나는 특징적인 패턴을 보인다(Saha and Bhowmick, 2019). Mass Spectrometry 결과에서 실제 시료와 표준 HNBR의 질량 스펙트럼 막대 위치 및 높이가 거의 일치함을 확인하였으며, 이를 통해 두 시료의 화학적 구조가 동일함을 확인하였다. 또한

열분해 생성물 및 첨가제의 패턴 분석을 통해 가스켓에 HNBR 특유의 열안정성 관련 첨가제가 포함되어 있음이 확인되었다.

분석 결과를 종합하면, 가스켓의 주성분은 HNBR이며 Middle High Nitrile 타입으로서 일반 유압유 및 엔진 오일에 대한 우수한 내유성과 내열성을 보유하고 있음을 확인하였다.

### 2.3 TGA 분석

TGA(Thermogravimetric Analysis)는 시료를 일정 속도로 가열하면서 온도 변화에 따른 질량 감소를 측정하여 열적 안정성, 분해 개시 온도, 주분해 온도 및 잔류물 함량 등을 파악하는 방법이다. 질소와 공기 두 가지 분위기를 순차적으로 적용하여 산화 및 비산화 환경에서의 열분해 거동을 비교할 수 있다. 일반 고무류는 통상 300~400°C에서 분해가 시작되나, HNBR은 부타디엔 주사슬의 수소화 포화 구조로 인해 450°C 이상에서 주분해가 발생하는 우수한 내열성을 가진다(Saha and Bhowmick, 2019).

질소(N<sub>2</sub>) 환경에서의 TGA 결과, 주 분해 온도는 약 462°C이었으며 총 질량의 68.79%가 감소하였고 잔류물은 약 25.49%로 확인되었다. N<sub>2</sub> 환경에서는 산화 반응이 억제되므로 연소되지 않은 탄소계 잔류물이 상대적으로 많이 남는 경향을 나타낸다. 공기(Air) 환경에서는 최초 분해 시작 온도가 400°C 이상이었으며 총 질량의 75.73%가 감소하였고, 잔류물은 약 15.46%로 측정되었다. 산화 분위기에서 잔류물이 감소하는 것은 탄소 성분이 산화연소되기 때문이며, 잔류물에는 실리카 필러 및 탄산칼슘 등의 무기 강화제가 포함되어 있을 가능성이 있다. 상기 결과를 종합하면, 가스켓은 열에 비교적 안정한 고분자 소재임을 확인하였다.

### 2.4 SEM-EDX 분석

SEM-EDX(Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)는 주사전자현미경(SEM)으로 시료 표면의 미세 구조와 형상을 고해상도로 관찰하고, 전자빔과 시료의 충돌 시 발생하는 특성 X선을 EDX로 분석하여 원소 조성비와 원소별 분포 지도를 동시에 제공하는 방법이다. 이를 통해 재료의 형상·입자 크기·분포 상태와 화학 성분을 동시에 확인할 수 있다.

분석 결과, 탄소(C) 비율이 높아 주성분이 유기계 고분자임이 확인되었다. 또한 일반 범용 고분자와 달리 산소(O)가 검출되었으며 아크릴로 니트릴 계열이 포함되어 있을 가능성이 있다. 그리고 Si와 Ca 원소가 조성되어 있는 것으로 보아 실리카(SiO<sub>2</sub>) 필러 혹은 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>) 필러가 포함된 것으로 판단된다. 이는 HNBR 고무에서 내마모성 및 기계적 강도 향상을 위해 통상적으로 사용되는 필러 조성과 일치한다(Amin et al., 2018). 따라서 가스켓은 HNBR에 무기 필러 또는 황(S) 기반 가황제가 포함된 조성의 소재임을 확인하였다.

## 3. 가스켓 밀폐력 해석

### 3.1 가스켓 밀폐력 해석

합성 디젤엔진용 고무 가스켓은 대변형(Large strain) 발생 시 하중과 변형 사이의 비선형성이 뚜렷하게 나타나는 초탄성(Hyperelastic) 특성을 가진다. 이러한 비선형 거동을 수치적으로 모사하기 위해 COMSOL Multiphysics의 Hyperelastic materials를 이용해 변형 에너지 밀도 함수(Strain energy density function, SED,  $W$ )를 기반으로 해석을 수행하였다.

경계 조건으로는 실린더 헤드와 블록 사이의 설계 접촉 하중을 적용했으며, 가스켓 표면의 최대 접촉 압력(Peak Contact Pressure)을 비교하여 기밀 유지 성능을 분석하였다. 그리고 실제 LOO-급의 디젤엔진 냉각수의 운용 환경에 따라 출구변 압력 0.4 MPa, 온도 75 °C에 맞추어 설정하였다. 또한 건식 조립을 권고하는 가스켓 제작사 매뉴얼에 따라 마찰계수는 0.8을 적용하였다.

본 연구 대상의 가스켓 재질 분석 결과 HNBR 소재로 확인했으나, 해석 단계에서는 NBR 물성치를 기준으로 해석을 수행하였다.

HNBR 고유의 Mooney-Rivlin 물성 상수( $C_{10}$ ,  $C_{01}$ )는 수소화도(degree of hydrogenation), 아크릴로니트릴(ACN) 함유량, 배합제 조성 등 소재 등급에 따라 상이하다. 본 연구에서 분석된 가스켓과 동일 등급에 대해 물성 상수가 공개 문헌에서 확인되지 않았다. 또한 본 연구에서는 분석에 활용된 가스켓 시편의 수량과 형상 제약으로 인해 ASTM D412 기준의 인장 시험을 통한 HNBR 실측 물성 도출이 불가하였다. 이에 따라 NBR의 물성치를 대체 적용하였다.

우선 HNBR은 NBR의 아크릴로니트릴-부타디엔 공중합체 주사슬에서 부타디엔 단위의 불포화 탄소-탄소 이중결합(C=C)에 선택적으로 수소를 첨가하여 포화시킨 소재이다(Hayashi et al., 1991). 수소화 공정은 내열성·내오존성·화학적 안정성을 향상시키지만 고분자 주사슬의 기본 배열 구조 및 아크릴로니트릴 함유량에 의한 극성 특성은 그대로 유지된다(Wang et al., 2013).

또한, HNBR과 NBR은 모두 대변형(large strain) 영역에서 비선형 초탄성(hyperelastic) 거동을 나타내며, Mooney-Rivlin 모델 기반 구성 방정식으로 그 거동을 묘사할 수 있다(Huang et al., 2020). Dhakad et al.(2023)은 HNBR에 대해 Mooney-Rivlin을 포함한 6가지 초탄성 모델을 비교 검토하였으며, 현상론적(phenomenological) 모델들이 HNBR의 비선형 응력-변형률 거동을 유효하게 묘사함을 확인하였다. Dong and Duan(2022)은 HNBR 패커 고무에 대해 Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Yeoh 모델 등을 비교하였으며, 각 모델 간 응력 분포의 경향성이 유사함을 보였다. NBR 가스켓의 Mooney-Rivlin 해석은 접촉압력 분포 및 밀폐 거동 예측에 광범위하게 활용되어 왔으며, Li(2011)는 NBR O-링에 대한 Mooney-Rivlin 모델이 Lindley 반경험식 및 Wendt 실험 데이터와 일치함을 검증하였다. 따라서 NBR 기반의 해석 모델로도 가스켓의 압착 및 밀폐 메커니즘을 충분히 묘사할

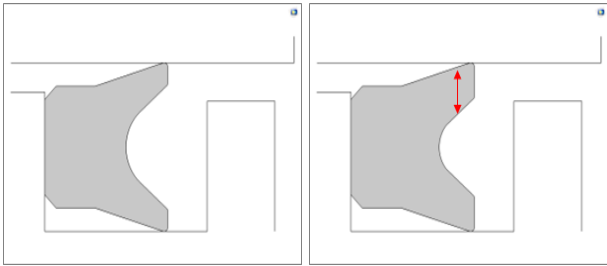


Fig. 4 Conventional Design Fig. 5 Conventional Design + Inner Dia 1 mm ("A Model")

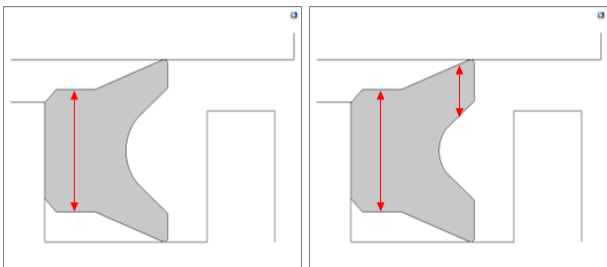


Fig. 6 Conventional Design + Outer Dia 0.5 mm ("B Model") Fig. 7 Conventional Design + Inner Dia 1 mm + Outer Dia 0.5 mm ("C Model")

수 있다고 판단하였다.

본 연구의 주된 목적은 가스켓 소재의 절대적인 파손 한계치를 산출하는 것이 아니라 운용환경에 따른 밀폐력의 상대적 변화를 분석하여 개선안을 도출하는 것이기 때문에 NBR로 상대적인 비교를 수행하였다.

### 3.2 가스켓 모델 형상

가스켓은 ① 기존 가스켓(이하 "기존 모델"), ②기존 형상에서 전체 내경을 1 mm 두껍게 한 형상(이하 "A 모델"), ③전체 외경을 0.5 mm 두껍게 한 형상(이하 "B 모델"), ④ 전체적으로 내경 1 mm와 외경 0.5 mm을 두껍게 한 형상(이하 "C 모델")으로 Fig. 4 ~ Fig. 7과 같이 총 4가지 형상으로 해석을 수행하였다.

### 3.3 가스켓 밀폐력 해석 결과

가스켓의 밀폐 성능을 분석하기 위한 접촉 압력(Contact Pressure,  $P_c$ )은 코시 응력 텐서(Cauchy stress tensor,  $\sigma$ )의 법선 성분으로 도출된다(Holzapfel 2000).

$$\sigma = \text{dev}\left(\frac{2}{J} F \frac{\partial W}{\partial C} F^T\right) - pI$$

$$P_c = -c \cdot (\sigma \cdot n) \tag{2}$$

$n$ 은 접촉면의 법선 벡터이며  $p$ 는 비압축성을 유지하기 위한 정수압이다. 물리적으로  $P_c$ 가 내부 냉각수의 압력( $P_f$ )보다 높게

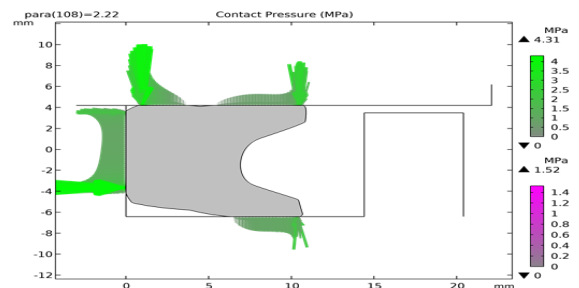


Fig. 8 Contact Pressure of Conventional Design

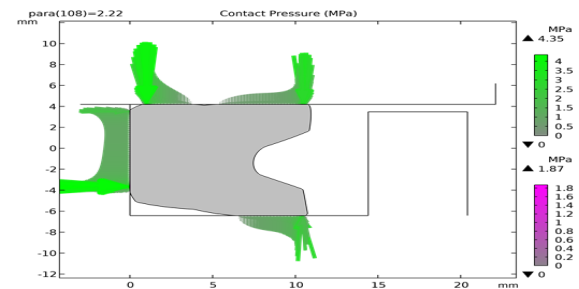


Fig. 9 Contact Pressure of A Model

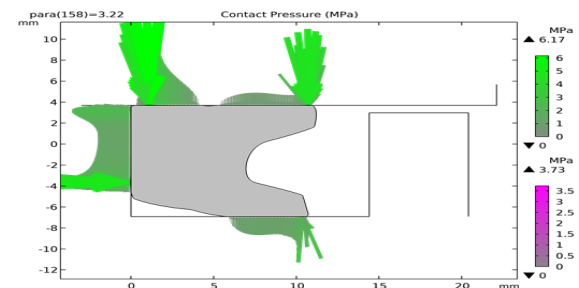


Fig. 10 Contact Pressure of B Model

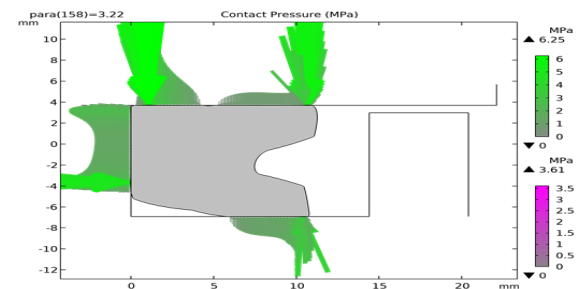


Fig. 11 Contact Pressure of C Model

형성되어야 냉각수의 침투를 저지할 수 있다.

접촉압력분포 해석 결과 Fig. 8 ~ Fig. 11과 같이 건식 환경(= 마찰계수 0.8)에서 기존 모델의 최대 접촉압력은 2.8 MPa, A 모델의 모델의 최대 접촉압력은 3.3 MPa, B모델의 최대 접촉압력은 4.8 MPa, C모델의 최대 접촉압력은 5.6 MPa이다.

밀폐력에 대한 성능을 정량적으로 평가하기 위해 밀폐율(Seal Ratio,  $R_s$ )를 차용하였다. 밀폐율은 식 3 과 같이 가스켓 접촉면의 최대 접촉 압력과 작동 유체의 내압 사이의 비로 정의한다.

$$R_s = \frac{P_c}{P_f} \quad (3)$$

밀폐의 물리적 최소 조건은 접촉압력이 유체압력보다 커야한다는 것이며 이 조건이 성립하지 않으면 유체가 접촉면을 통해 침투하여 누설이 발생한다(Sang et al., 2012). 그러나 실제 밀봉 설계에서는 운용 중 접촉 압력 손실, 열변형, 재료 열화, 표면 불규칙성 등의 불확실성을 고려하여 안전 여유를 포함한 기준값을 적용한다. ASME Boiler & Pressure Vessel Code(Section VIII)는 가스켓 인수 기준으로 잔류 접촉압력 대 내압의 비인 가스켓 인수계수(Gasket Factor,  $m$ )를 규정하고 있으며, 밀봉 구조의 안전성 확보를 위해  $m > 1$  이상을 요구한다. 나선형 와운드 가스켓의 경우  $m = 3$ 이 실용적으로 적용되고 있으며, 소재 및 구조 특성에 따라  $m = 1 \sim 6.5$ 의 범위가 사용된다.

고무 가스켓의 경우, Sang et al. (2012)은 NBR O-링 해석에서 최대 접촉압력이 유체압력보다 높게 유지될 때 누설이 방지됨을 FEM(Finite Element Method)으로 확인하였으며, Jing et al. (2026)은 항공기 액추에이터 O-링 해석에서 실제 운용 불확실성(마모, 표면 조도, 온도 변화 등)을 반영하여 접촉압력이 작동압력의 1.2배 이상을 유지해야 밀폐 안전성이 확보됨을 제시하였다. 본 연구의 대상 합정 디젤엔진은 기계적 체결 장치 없이 가스켓의 탄성 복원력과 단순 접촉압력에만 의존하는 구조적 취약성을 가지므로, 체결 구조가 있는 일반 시스템 대비 더 높은 안전 여유가 요구된다. 이에  $SR = 2$  기준은 단순 접촉 구조에서의 구조적 불확실성과 운용 환경을 고려한 보수적 설계 기준으로 설정해 비교하였다.

분석 결과 Fig. 12 ~ Fig. 15와 같이 1차 접촉지점의 접촉압력이 가장 높은 형상은 C모델이나, 밀폐율로 검토했을 때 충분한 밀폐력을 유지하는 구간이 가장 긴 형상은 A모델인 것으로 확인하였다.

마지막으로 형상 간 탄성 복원 에너지를 상대적으로 비교하기 위해 변형 에너지 밀도(SED)를 보조 지표로 활용하였다. SED가 높고 균일하게 분포될수록 가스켓 전면에 걸쳐 복원력이 고르게 유지되며, SED가 국소적으로 집중되는 형상은 피로 균열 발생의 위험이 증가한다는 연구 결과가 보고된 바 있다(Peng et al., 2016). 따라서 SED 분포의 균일성을 형상 비교의 보조적 지표로 활용하였다.

본 연구에서는 Mooney-Rivlin 2-parameter 모델을 채택했으며, 변형 에너지 밀도 함수는 식 4에 따라 정의한다.

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{2}x(J - 1)^2 \quad (4)$$

$C_{10}, C_{01}$ 은 재료의 강성 및 물리적 특성을 결정하는 Mooney-Rivlin 상수이고  $\bar{I}_1, \bar{I}_2$ 는 편차 변형을 불변량이고,  $J$ 는 탄성 체적비이며 완전 비압축성( $J=1$ )일 경우 체적 탄성 계수  $x$  항은 구속 조건으로 작용한다(Kwon et al., 2014). 초기 전단 탄성 계수

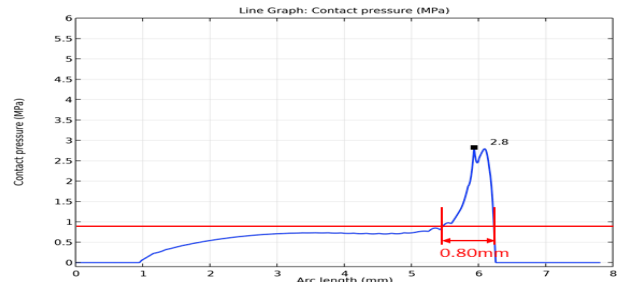


Fig. 12 Seal Ratio of Conventional Design

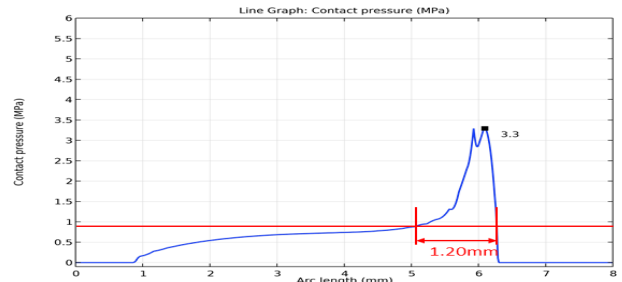


Fig. 13 Seal Ratio of A Model

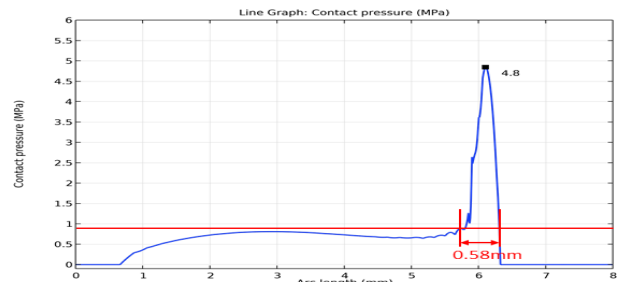


Fig. 14 Seal Ratio of B Model

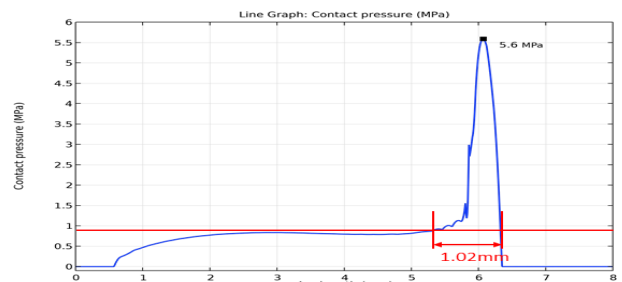


Fig. 15 Seal Ratio of C Model

인  $\mu$ 는 상수와의 관계식  $\mu = 2(C_{10} + C_{01})$ 를 통해 산출되며 가스켓의 초기 압착 강도를 결정하는 요소가 된다.  $C_{10} = 1.0 \text{ MPa}, C_{01} = 0.2 \text{ MPa}$  문헌을 기반으로 사용하였다 (Abubakar et al., 2016).

분석 결과 Fig. 16 ~ Fig. 19에서와 같이 건식 환경에서 최대 변형 에너지 밀도는 기존 모델은  $0.5 \text{ MJ/m}^3$ , A모델의 모델의 최대 변형 에너지 밀도는  $0.7 \text{ MJ/m}^3$ , B모델의 최대 변형 에너지 밀도는  $2.4 \text{ MJ/m}^3$ , C모델의 최대 변형 에너지 밀도는  $2.6 \text{ MJ/m}^3$ 으로 확인하였다.

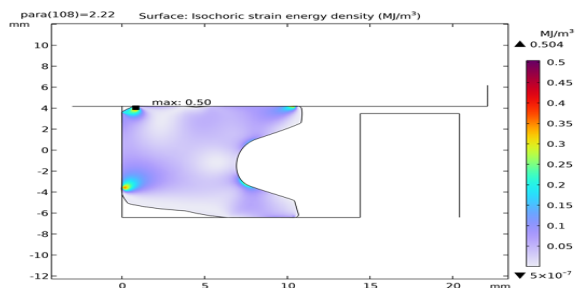


Fig. 16 Strain Energy Density of Conventional Design

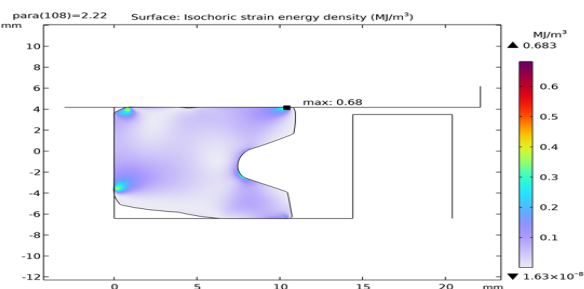


Fig. 17 Strain Energy Density of A Model

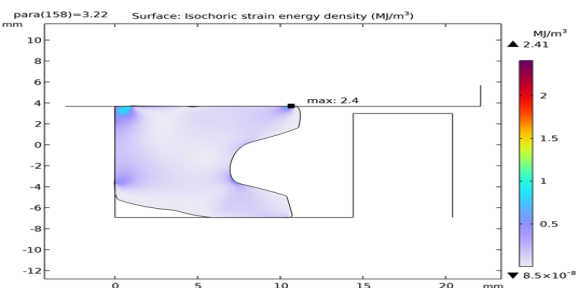


Fig. 18 Strain Energy Density of B Model

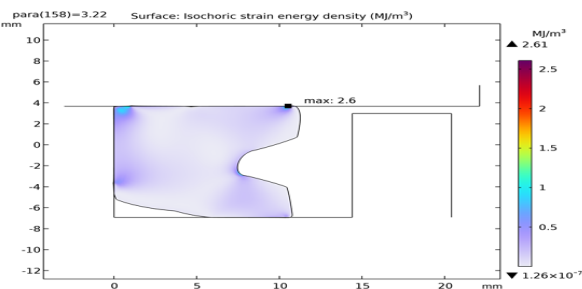


Fig. 19 Strain Energy Density of C Model

형상 선정 시 최대 접촉 압력과 유효 밀폐 구간의 두 지표를 복합적으로 검토하였다. A 모델은  $SR \geq 2.0$ 을 만족하는 구간이 가장 넓으나, 최대 접촉 압력(3.3 MPa)이 낮아 운용 중 압력 변동 및 열팽창에 의한 접촉 압력 손실 발생 시 밀폐 임계 이하로 떨어질 위험이 있다(Ma et al., 2014). C 모델은 최대 접촉 압력(5.6 MPa)이 가장 높으나, 좁은 접촉면에 응력이 집중되어 변형 에너지 밀도(SED) 집중이 심화됨으로써 반복 조립 환경에서 가스켓의 탄성 복원력이 저하되고 피로 파손 위험이 증가한다(Zhang et al., 2019). B 모델은 충분한 접촉 압력(4.8 MPa)과

Table 1 건식(마찰계수=0.8)일 때, 접촉압력 해석 결과

Shape	Original	Longer Wing	Thicker Wing	L & T Wing
Mooney-Rivlin C10 [MPa]	1.0	1.0	1.0	1.0
Mooney-Rivlin C01 [MPa]	0.2	0.2	0.2	0.2
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	920	920	920	920
Bulk Modulus [MPa]	2000	2000	2000	2000
Friction Coefficient	0.8	0.8	0.8	0.8
Contact Pressure [MPa]	2.8	3.3	4.8	5.6

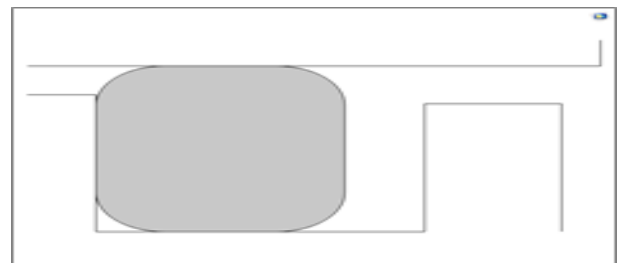


Fig. 20 O-ring Fillet 3 mm

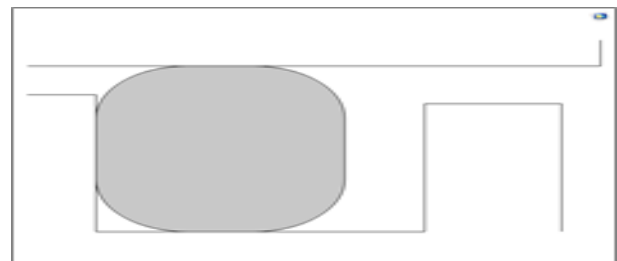


Fig. 21 O-ring Fillet 4 mm

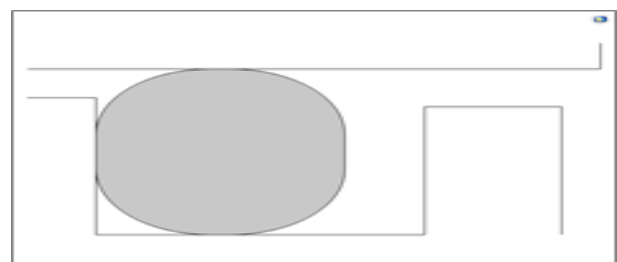


Fig. 22 O-ring Fillet 5 mm

균일한 SED 분포를 동시에 확보함으로써, 밀폐 신뢰성과 내구성의 두 요건을 균형 있게 만족하는 최적 형상으로 선정하였다(Jiao et al., 2021). 접촉압력 해석 결과는 Table 1에서 요약하였다.

또한, 해군 정비창의 의견을 반영하여 기존의 가스켓 형상이 아닌 O-ring 모양으로 Fig. 20 ~ Fig. 22와 같이 가스켓의 형상을 변경하여 추가 해석을 수행하였다.

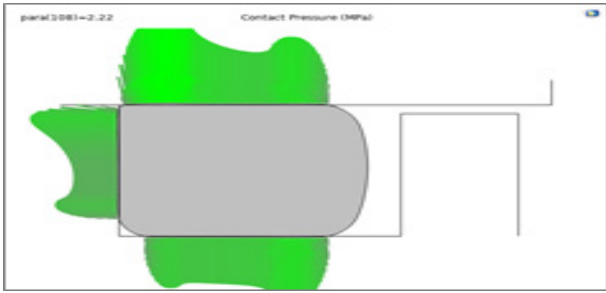


Fig. 23 Contact Pressure of O-ring Fillet 3 mm

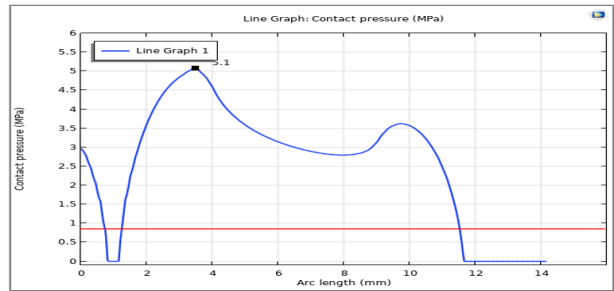


Fig. 26 Seal Ratio of O-ring Fillet 3 mm

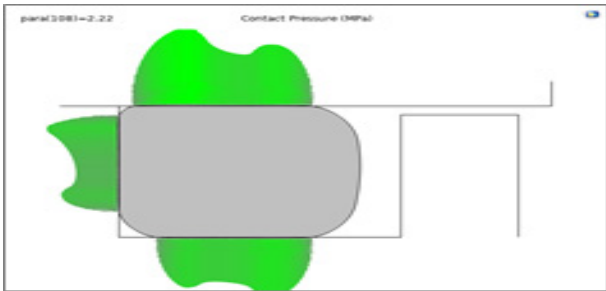


Fig. 24 Contact Pressure of O-ring Fillet 4 mm

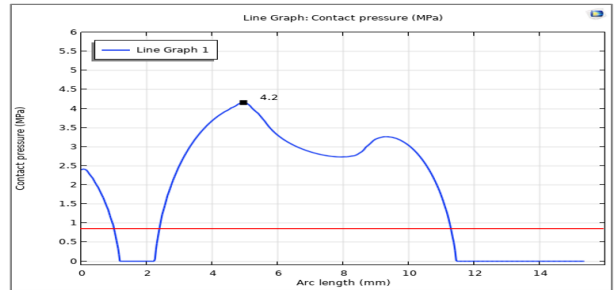


Fig. 27 Seal Ratio of O-ring Fillet 4 mm

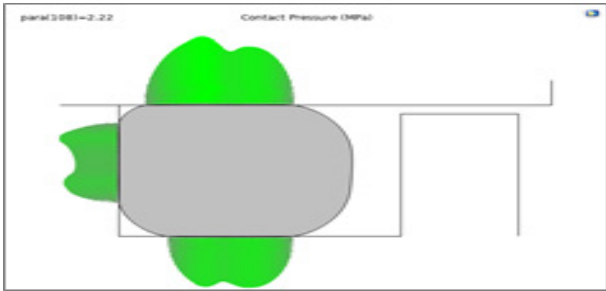


Fig. 25 Contact Pressure of O-ring Fillet 5 mm

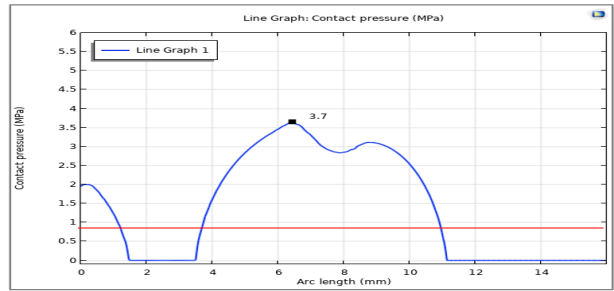


Fig. 28 Seal Ratio of O-ring Fillet 5 mm

접촉압력분포 해석 결과, Fig. 23 ~ Fig. 25와 같이 O-ring 모양의 가스켓에서 Fillet이 3mm 인 형상은 최대 접촉압력분포가 5.1 MPa이고, 4 mm 인 형상은 4.2 MPa, 5 mm 인 형상은 3.7 MPa 이다.

1차 접촉지점의 Seal Ratio(=2) 비교 결과, Fig. 26 ~ Fig. 28 과 같이 O-ring 모양의 가스켓에서 Fillet이 3mm 인 형상은 10.3 이고, 4 mm 인 형상은 8.9, 5 mm 인 형상은 7.3이다.

변형 에너지 밀도 해석 결과, Fig. 29 ~ Fig. 31과 같이 O-ring 모양의 가스켓에서 Fillet이 3mm 인 형상은  $1.5 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 이고, 4 mm 인 형상은  $0.8 \text{ MJ}/\text{m}^3$ , 5 mm 인 형상은  $0.5 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 이다.

상기 해석 결과를 바탕으로 해군 정비창에서 제시한 모델 중에서는 Fillet이 3 mm 인 O-ring 형상을 최적 형상으로 선정하였다.

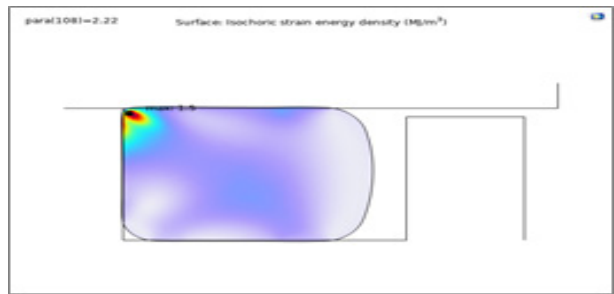


Fig. 29 Strain Energy Density of O-ring Fillet 3 mm

## 4. 가스켓 밀폐력 성능 시험

### 4.1 가스켓 성능 시험 장비, 조건, 결과

3장에서 해석한 결과를 바탕으로 가스켓 밀폐력 성능시험을

수행하였다. 가스켓 밀폐력 성능시험을 수행하기 위해 기존 형상에서 Fig. 32와 같이 전체적인 외경을 0.5 mm 늘린 B 모델(이하 "Case 1")과 Fig. 33 과 같이 O-ring 형상에서 Fillet이 3 mm인 형상(이하 "Case 2")를 제작하였다.

가스켓 밀폐력 성능시험을 위한 장비는 Fig. 34와 같다. 압축 공기를 가스켓 지그로 보내어 가스켓의 입/출구변 입력 차이와 가스켓의 밀봉 부분의 버블 발생 여부를 통해 압축 공기의 누설 여부를 확인하였다. 실제 운용 환경은 수중에서 약 4.5 bar 이지 만 실험실 조건에서 수중 압력 환경을 직접 재현하기 어려워 가

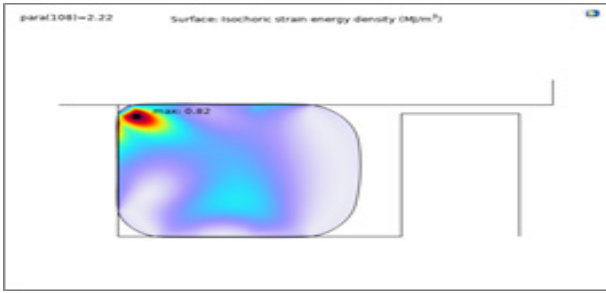


Fig. 30 Strain Energy Density of O-ring Fillet 4 mm

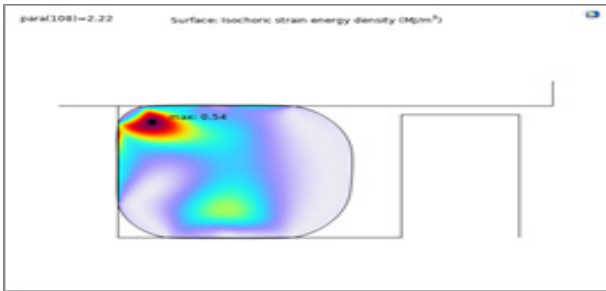


Fig. 31 Strain Energy Density of O-ring Fillet 5 mm



Fig. 32 Case 1

Fig. 33 Case 2

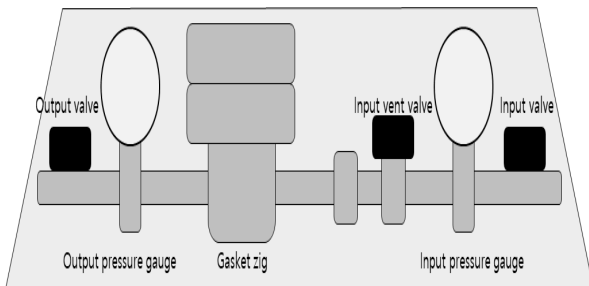


Fig. 34 Gasket Leakage Test Equipment

스켓의 밀폐력 성능 시험을 상대적으로 비교하기 위해 압축 공기를 시험 매체로 활용하였다.

시험은 ① 작동 압력 누설 시험과 ② 최대 압력 누설 시험을 수행하였다. 작동 압력 누설 시험은 압축 공기의 압력을 실제 운용 압력인 4.5 bar로 설정하고 압축 공기의 유지 시간은 10분으로 설정하였다. 최대 압력 누설 시험은 압축 공기의 압력을 10 bar로 설정하고 압축 공기의 유지시간은 10분과 1 440분(24시간)으로 설정하였다. Fig. 37 ~ Fig. 38과 같이 형상 가스켓 Case 1과 Case 2를 총 10개를 제작하여 무작위로 3개씩 선정하여 시험을 수행했으며, 시험 결과의 비교를 위해 Fig. 35 ~ Fig. 36과



Fig. 35 New Conventional Gasket

Fig. 36 Used Conventional Gasket

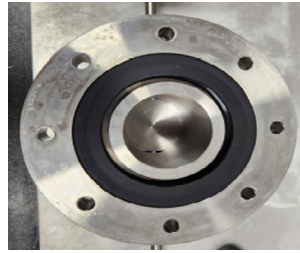


Fig. 37 Case 1

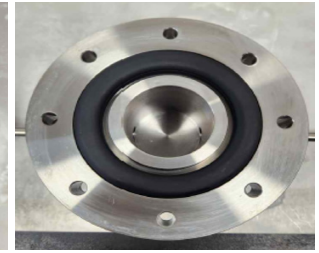


Fig. 38 Case 2

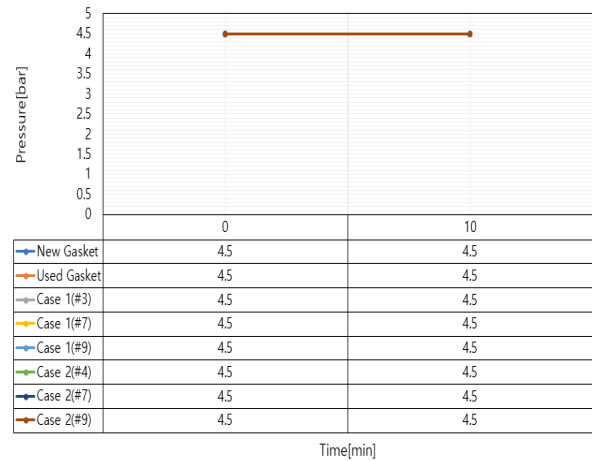


Fig. 39 Result of Operation Pressure Leakage Test

같이 해군 정비장에서 제공한 고품 가스켓과 신품 가스켓도 수행하였다.

시험 결과 Fig. 39 ~ Fig. 40과 같이 기존 가스켓 신품에서 작동 압력 누설 시험과 최대 압력 누설 시험 10분 수행 시 압력강하가 없는 것으로 보아 누설이 발생하지 않았다. 다만, 최대 압력 누설 시험으로 24시간 수행 시 가스켓 전/후단의 압력강하가 약 0.2 bar 정도 발생하였다.

또한, 기존 가스켓 고품에서는 작동 압력 누설 시험에서는 누설이 발생하지 않았으나, 최대 압력 누설 시험에서는 10분 수행 시 가스켓 전/후단의 압력강하가 약 0.9 bar 정도 발생하였다.

Case 1에서는 작동 압력 누설 시험 결과 누설이 발생하지 않았고, 10분간 최대 압력 누설 시험 시 3개의 시험품 중에 2개에서 가스켓 전/후단의 압력강하가 약 0.1 bar 정도 발생하였다. 이 중 무작위로 1개를 선정하여 24시간 시험을 수행했을 때 압력강하가 발생하지 않았다.

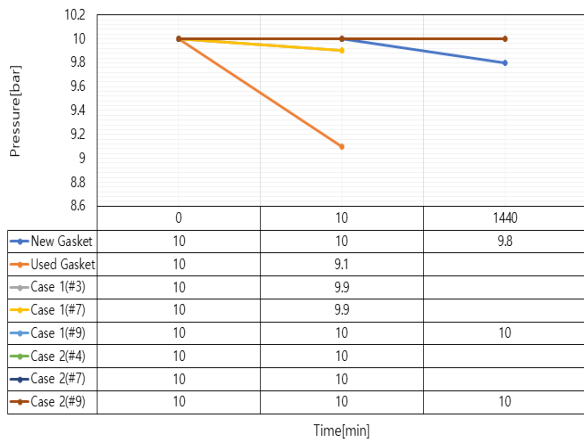


Fig. 40 Max Pressure Leakage Test

Case 2에서는 작동 압력 누설 시험과 최대 압력 누설 시험 결과 누설이 발생하지 않았다.

Fig. 39 ~ Fig. 40에서 시험 결과를 확인할 수 있듯이 전체적으로 기존의 가스켓 대비 Case 1, Case 2 가스켓에서는 압력강하로 인한 뚜렷한 누설 현상을 확인할 수 없어 밀폐력이 상대적으로 우수한 것으로 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 합정용 디젤엔진의 실린더 헤드 냉각수 출구변의 누수 문제를 해결하기 위해 재료 성분 분석과 초탄성 수치해석을 기반으로 가스켓 형상을 최적화하고 제작된 시제품에 대한 기밀 성능을 시험하였다.

1) 가스켓 시편의 성분 분석을 통해 비선형 고무 소재의 특성을 파악하였으며, 이를 바탕으로 COMSOL Multiphysics 내에 Mooney-Rivlin 초탄성 모델을 구축하였다. 이를 통해 가스켓의 접촉 압력 분포 및 변형 에너지 밀도를 수치적으로 구현하였다.

2) 기존 가스켓을 포함한 총 7가지 형상(기존, A, B, C 모델 및 O-ring Fillet 3/4/5 mm)에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석 결과, 기존 모델의 최대 접촉압력은 2.8 MPa이었던 반면, 외경을 0.5 mm 확대한 B 모델은 4.8 MPa, O-ring Fillet 3 mm 형상은 5.1 MPa로 각각 기존 대비 약 71% 및 82% 향상되었다. 밀폐율 (SR) 기준(SR ≥ 2.0)을 적용한 복합 평가에서 B 모델은 충분한 접촉 압력과 균일한 SED 분포(0.5 MJ/m<sup>3</sup> → B 모델 0.8~2.4 MJ/m<sup>3</sup> 범위)를 동시에 확보하여 밀폐 신뢰성과 내구성의 균형이 가장 우수한 형상으로 선정되었다. O-ring 군에서는 Fillet 3 mm 형상이 SR = 10.3으로 가장 높은 밀폐 안전 여유를 확보하여 최적 형상으로 선정되었다.

3) 제작된 시제품을 대상으로 기밀 성능 시험을 수행한 결과, 기존 가스켓 시제품은 최대 압력 24시간 시험에서 0.2 bar의 압력 강하가 발생하였고, 고품(사용품)은 최대 압력 10분 시험에서 0.9 bar의 압력 강하를 보였다. 이에 반해 Case 1(B 모델)은 최대 압력 10분 시험에서 시험품 3개 중 2개에서 소량의 압력차

(0.1 bar)가 관측되었으나, 24시간 장기 시험에서는 압력 강하가 발생하지 않아 기존 대비 우수한 성능을 확인하였다. Case 2 (O-ring)은 작동 압력 및 최대 압력 시험 전 조건에서 압력 강하가 0 bar로 측정되어, 기존 가스켓 대비 완전한 밀폐 성능을 달성하였다. 본 상기 결과를 바탕으로 향후 최적 형상(Case 1, Case 2)에 대해 LOO-II급 함정 탑재 후 실험 환경에서의 운용 성능 검증을 수행하여 정비 사례 데이터의 누적을 통해 개선된 가스켓의 현장 적용 신뢰성을 지속적으로 확인할 예정이다.

본 논문을 통해 LOO-II급 전 함정의 냉각수 누설로 인한 실린더 헤드 점부식 및 열응력 집중에 의한 균열 등 2차 손상을 예방함으로써 함정 추진 기관의 정비 신뢰성 향상과 운용 효율화에 기여하기를 기대한다.

## References

- Abubakar, I., Myler, P. and Zhou, E., 2016. Constitutive modelling of elastomeric seal material under compressive loading. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*, 6, pp.28-40.
- Amin, M., Khattak, A. and Ali, M., 2018. Influence of silica (SiO<sub>2</sub>) loading on the thermal and swelling properties of hydrogenated-nitrile-butadiene-rubber/silica (HNBR/silica) composites. *Open Engineering*, 8(1), pp.226-233.
- American Society of Mechanical Engineers, 2019. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Mandatory Appendix II: Rules for bolted flange connections with ring type gaskets.
- Dhakad, R., Hipparkar, D.R. and Kumar, A., 2023. A hyper-viscoelastic constitutive model for elastomers: A case study of hydrogenated nitrile butadiene rubber and polychloroprene rubber. *Journal of Elastomers and Plastics*, 56(1), pp.3-29.
- Dong, X. and Duan, Z., 2022. Comparative study on the sealing performance of packer rubber based on elastic and hyperelastic analyses using various constitutive models. *Materials Research Express*, 9(7), 075301.
- Dubov, G., Bogomolov, A. and Chernichenko, A., 2024. Research of the corrosive effect of coolant on the internal combustion engines of gas-diesel mining dump trucks. *Technical Physics Letters*, 50(1), pp.30-36.
- Hayashi, S., Sakakida, H., Oyama, M. and Nakagawa, T., 1991. Low-temperature properties of hydrogenated nitrile rubber (HNBR). *Rubber Chemistry and Technology*, 64(4), pp.534-544.
- Holzappel, G.A., 2000. *Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering.*, John Wiley & Sons, Chichester.

- Hu, L., Yang, J., Yu, Y. and Dong, F., 2020. Analysis and optimisation of thermo-mechanical coupling load of cylinder head considering fluid-structure interaction for a marine high-power diesel engine. *Energies*, 13(14), 3597.
- Huang, Y., Li, Y., Zhao, H. and Wen, H., 2020. Research on constitutive models of hydrogenated nitrile butadiene rubber for packer at different temperatures. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(1), pp.155-164.
- Jiao, K., Feihong, Y., Yan, Z., Wang, G. and Jia, P., 2021. Optimization and experimental study of the subsea retractable connector rubber packer based on Mooney-Rivlin constitutive model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12), 1391.
- Jing, Y., Yuan, Z., He, K., Kong, L. and Yang, G., 2026. Sealing performance of O-ring under coupled thermo-mechanical conditions. *Mechanical Sciences*, 17, pp.123-140.
- Kandreegula, S.K., Gupta, U. and Vyas, S., 2015. *Investigation of gasket sealing behavior of cylinder head and block under engine operating conditions and its experimental verification*. SAE Technical Paper 2015-26-0029.
- Kusch, P., 2013. *Identification of organic additives in nitrile rubber materials by pyrolysis-GC-MS*. LCGC North America, 31(9), pp.812-820.
- Kwon, Y.-D., Kwon, S., Lu, X. and Kwon, H.-W., 2014. A finite element procedure with Poisson iteration method adopting pattern approach technique for near-incompressible rubber problems. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 272574.
- Li, J., 2011. Finite element analysis of sealing characteristics of the rubber O-ring for a mechanical seal. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 43(5), pp.234-239.
- Luo, X., Zeng, X., Zou, P., Lin, Y. and Wei, T., 2020. A finite element analysis-computational fluid dynamics coupled analysis on thermal-mechanical fatigue of cylinder head of a turbo-charged diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(4), pp.1138-1151.
- Ma, W., Qu, B. and Guan, F., 2014. Effect of the friction coefficient for contact pressure of packer rubber. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 228(16), pp.2881-2887.
- Meyns, M., Primpke, S. and Gerdt, G., 2019. Library based identification and characterisation of polymers with nano-FTIR and IR-sSNOM imaging. *Analytical Methods*, 11(33), pp.4219-4234.
- Peng, Y., Liu, G., Quan, Y. and Zeng, Q., 2016. Cracking energy density calculation of hyperelastic constitutive model and its application in rubber fatigue life estimations. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(33), 44195.
- Saha, T. and Bhowmick, A.K., 2019. Influence of nanofiller on thermal degradation resistance of hydrogenated nitrile butadiene rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 92(2), pp.263-287.
- Sang, J.B., Sun, L.F., Xing, S.F. and Zhang, D.L., 2012. Computational analysis of stress field and contact pressure for rubber seal based on non-linear finite element. *Applied Mechanics and Materials*, 268-270, pp.1080-1083.
- Sun, F., Yu, T., Cui, W. and Zong, X., 2009. The seal reliability analysis of O-ring seals. *2009 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp.357-362.
- Wang, H., Yang, L. and Rempel, G.L., 2013. *Homogeneous hydrogenation art of nitrile butadiene rubber: A review*. *Polymer Reviews*, 53(2), pp.192-239.
- Wang, Z., Huang, R., Cheng, X., Huang, Y. and Shen, J., 2007. Tests and numerical simulations on the thermal load of the cylinder head in heavy-duty vehicle diesel engines. *ASME 2007 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, pp.361-367.
- Zhang, F., Shui, H. and Yang, J.M., 2019. Sealing performance and fatigue life of the fracturing packer rubber of various materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(1), pp.163-176.
- Zhang, H., Liang, G., Qiao, X., Lyu, Z. and Li, L., 2022. Experimental and numerical study of inelastic behavior based on simulated cylinder head specimen under thermal cycling conditions. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(10), 454.

## Authorship Contribution Statement

**GaHyang Lee:** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Yonghoon Kim:** Conceptualization, Formal analysis, Methodology, Software, Visualization; **BeomSik Park:** Formal analysis, Investigation, Methodology; **Sungchul Ha:** Funding acquisition, Project administration, Supervision.

