CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol.23, No.6(2024), pp.578~586 pISSN 1598-6462 / eISSN 2288-6524
[Research Paper] DOI: https://doi.org/10.14773/cst.2024.23.6.578

암모니아 환경에서 선박 엔진용 고무 소재의 열화 특성 및 영구압축줄음율 평가

임성진[1] · 박진영[1] · 이승준[2,†]
[1]국립군산대학교 대학원, 전라북도 군산시 대학로 558
[2]국립군산대학교 해양·바이오 특성화 대학 기관공학과, 전라북도 군산시 대학로 558
(2024년 12월 09일 접수, 2024년 12월 11일 수정, 2024년 12월 11일 채택)

Degradation Characteristics and Compression Set of Rubber Materials for Marine Engines in Ammonia Environment

Sung-Jin Lim[1], Jin-Yeong Bak[1], and Seung-Jun Lee[2,†]
[1]Graduate school, Kunsan national university, 558 Daehak-ro, Gunsan-si, Jeonbuk-do, 54150, Korea
[2]Department of ship engine engineering, Kunsan national university, 558 Daehak-ro, Gunsan-si, Jeonbuk-do, 54150, Korea
(Received December 09, 2024; Revised December 11, 2024; Accepted December 11, 2024)

Global climate change is already underway, leading to extreme weather events such as rising sea levels, severe cold snaps, and heat waves. These changes pose significant threats to human civilization, including the emergence of new infectious diseases and disruptions to economic activities. In response, the International Maritime Organization (IMO) has proposed a carbon-neutral policy that aims to prohibit the use of carbon-based fuels by 2050. For future ship fuel compositions, there will be a decline in the use of fossil fuels and a corresponding increase in the adoption of ammonia as a fuel source. This study evaluated durability of O-ring materials known to be as critical as metal components in ship engines and related systems under ammonia-rich environments. Various rubber materials commonly used for O-rings in ship engines and equipment were tested for durability in a 99.5% ammonia environment. Results suggest that some EPDM and FFKM materials might be suitable for such applications. However, the applicability of rubber materials cannot be determined solely based on simple chemical reaction characteristics. Reliable data can only be secured by simulating and replicating actual operating conditions in which such materials are used.

Keywords: *Ammonia, Compression set, Rubber materials, Net Zero, Greenhouse gas*

1. 서론

지구의 기후 변화는 이미 진행 중이며, 이는 혹한, 폭염 및 해수면 상승 등의 기후 변화를 야기하고, 이로 인한 경제적 피해, 신종 전염병 발생으로 인류의 문명 존속에 큰 위협이 되고 있다 [1]. 우리나라는 2017년 스웨덴을 시작으로 세계에서 14번째 탄소중립을 법제화한 국가가 되었으며, 2050년까지 탄소 중립을 달성하기 위한 추진 전략을 수립하였다. 전체 온실 가스 배출 현황을 보면 발전 분야에서 가장 많은 21%를, 그리고 운송 분야에서 두 번째로 많은 12%를 차지하고 있다 [2]. 특히 전체 온실 가스 배출량 중에서는 CO_2가 전체 온실가스 배출량의 75%를 차지하고 있으며 [3], 운송 부문 중에서는 선박이 자동차와 항공기 다음으로 많은 CO_2를 배출하고 있다. CO_2 뿐만 아니라 NOx (질소산화물), SOx (황산화물), PM (Particulate Matter, 미세먼지)의 오염 물질 배출 현황을 분석한 결과, 오염원 배출량의 상당 부분을 선박이 차지하고 있었으며, 특히 SO_X의 경우 절대적으로 높은 수치를 나타냈다. 이와 같이 선박은 온실 가스를 대량으로 배출하는 주원인으로 지목되어 곱지 않은 시선을 받고 있다. 이에 국제해사기구(IMO)에서는 Fig. 1과 같이 2050년부터 탄소가 포함된 연료의 사용을 금지하는 탄소 중립 정책을 제시하였다 [4-10]. 기존에는 2030년까지 탄소 집약도(소비한 에너지에서 발생된 CO_2량을 총 에너지 소비

†Corresponding author: sjlee@ksnu.ac.kr
임성진: 석사과정, 박진영: 석사과정, 이승준: 교수

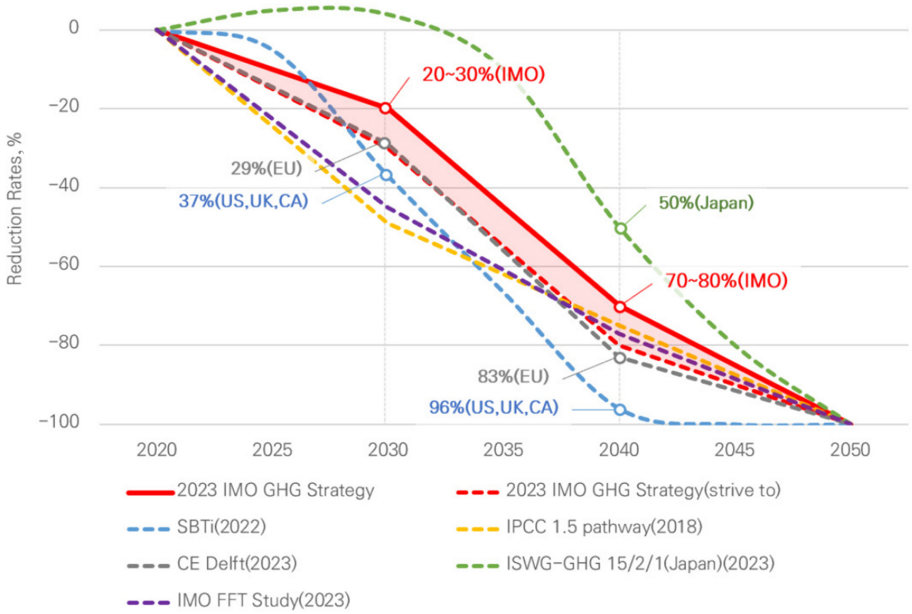


Fig. 1. Three decarbonisation scenarios with targets compared to business as usual GHG emissions [4-10]

량으로 나눈 값)를 40%로 감축하고, 2050년까지는 온실가스 배출량을 50% 감축하여 최종적으로 2100년에 온실가스 배출량을 '0'으로 만들고자 하였다. 그러나 기후 변화로 인한 문제가 심각해지자 이를 수정하여 2050년까지 온실가스 배출량을 '0'으로 하는 'Net Zero'를 선언하였다. 이에 노르웨이-독일 선급(DNV-GL)은 IMO 2050 온실가스 규제에 대응하여 CO_2 배출량을 줄이는 가장 획기적인 방안은 친환경 연료로 선박 연료를 변경하는 것이라는 결론을 내렸다 [11]. 또한 영국 선급(Lloyd's Register)에서는 CO_2를 감축하기 위한 연료 대체 방안으로 수소, 바이오 연료, 암모니아, 메탄올, 전기 등을 선정하였다 [12].

또한 향후 CII (Carbon Intensity Indicator, 탄소 집약도 지수)를 강화하여 온실가스를 많이 배출하는 선박에 대해서는 제재를 가한다. 따라서 에너지 효율이 낮고 많은 탄소를 배출하는 선박은 출력 제한과 함께 최악의 경우 시장에서 퇴출될 전망이다 [13]. 연소 시 탄소를 배출하지 않는 연료는 크게 수소와 암모니아가 있다. 현재 자동차 연료로서 수소를 사용하고 있으나, 선박과 같이 다량의 연료를 필요로 하는 운송 수단에는 부적합하다. 대기 중에서 기체인 수소를 대량으로 보관하기 위해서는 액화를 시켜야 하는데, 여기에 많은 비용이 들어가기 때문이다. 따라서 앞으로 저온 보관 기술이 획기적으로 발달하기 전까지는 현실적으로 암모니아를 대체할 만한 연료는 없을 것으로 판단된다. 이에 향후 선박 연료의 비중을 예측한 결과(Fig. 2), 화석연료의 비중은 감소하고 암모니아의 비중은 확대되

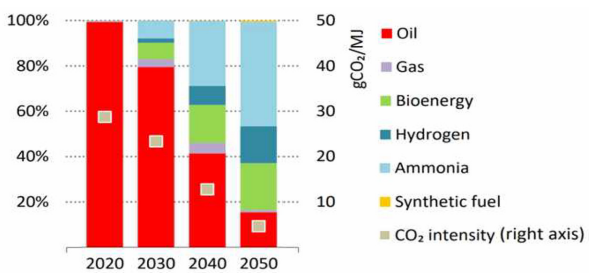


Fig. 2. Projections for ammonia fuel share and CO_2 emission intensity in Maritime Sector [14]

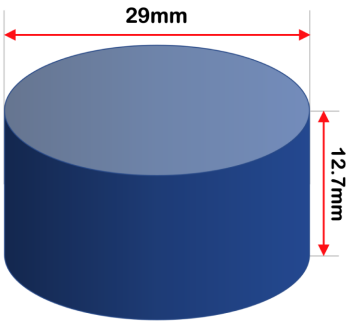
는 것을 알 수 있다 [14]. 그러나 탄소를 배출하지 않는 친환경 에너지임에도 불구하고 암모니아는 강한 부식성으로 구리 합금 및 아연 등 일부 재료에 부식 특성을 나타내어 재료 선정 시 주의가 필요하다. 이에 본 연구에서는 선박의 엔진 등에서 금속소재 못지않게 중요한 O-ring 소재에 대하여 암모니아 환경에서의 내구성을 평가하고자 한다.

2. 실험 방법

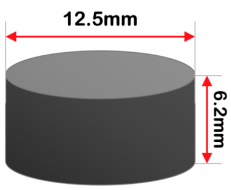
본 연구에서는 선박용 엔진 및 각종 기기류에서 O-ring의 소재로 사용되는 다양한 고무류를 사용하여 99.5% 암모니아 환경에서의 내구성을 평가하였다. 엔진 부품 사이의 기밀 유지를 위해 사용되는 고무 소재는 지속적으로 가해지는 압력으로 인해 영구 변형이 발생한다. 이러한 특성으로 인해 일정 시간 경과시 고무 소재는 기밀 유지 기능을 상실하게 되며, 제 기능

Table 1. Elastomer Compatibility with ammonia and other fuels [15]

Materials	Compatibility			
	Ammonia	LPG	LFO	Natural Gas
FKM/FPM (Fluoroelastomer)	Do not use	Excellent	Excellent	Excellent
EPR/EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer)	Excellent	Do not use	Do not use	Do not use
FFKM/FFPM (Perfluoroelastomer)	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
FEP/PFA (Perfluoroalkoxy)	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
PTFE (Polytetrafluoroethylene)	Excellent	Excellent	Good	Excellent
IIR (Isobutylene Isoprene Rubber)	Excellent	Do not use	Do not use	Do not use
CR (Chloroprene Rubber)	Excellent	Good	Doubtful	Good



(a) immersion test



(b) Compression set test

Fig. 3. Morphology and dimension of test material

을 못할 경우 유류 및 가스 누출로 인한 사고로 이어지므로 정확한 수명 예측을 통해 주기적으로 교체해 주어야 한다. 따라서 오링용 고무 소재를 단순 침지하여 손상 유무를 확인하였다. 본 연구에서는 일반적인 O-ring 소재로 사용되는 FPM과, Table 1에서 나타낸 바와 같이 국제 암모니아 냉동 협회(International Institute of Ammonia Refrigeration, IIAR)에서 제시한 암모니아 및 기타 연료에 사용 가능한 엘라스토머 소재 [15] 중 AFLAS, CHLOROPRENE, EPDM, FFKM 등 4종을 선정하여 실험을 진행하였으며, 시편 형상은 Fig. 3과 같다. 여기서 암모니아와의 격렬한 반응에 의해 파손된 소재는 제외하고 손상이 발생하지 않은 소재는 영구압축줄음율을 측정하여 변형 정도를 확인하였다. 실제 엔진에서 사용되는 만큼 실제 운용 조건과 유사한 환경을 조성하기 위해 80 bar까지 가압 가능한 챔버를 제작하여 실험을 실시하였다. 영구압축줄음율 측정은 일

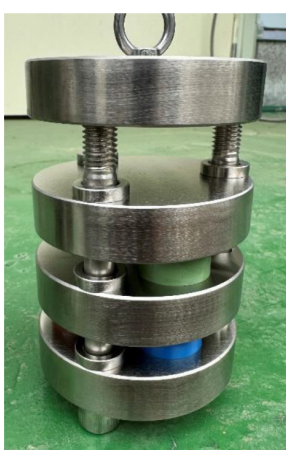


Fig. 4. Compression set jig

정 시간 압축력을 가한 후 이를 제거하여 고무 소재의 두께 감소량을 분석하는 방법으로, KS M 6518 기준을

Table 2. Compression set test condition

Rule	Materials	Temperature	Pressure	Period	Solution
KS M 6518	AFLAS CHLOROPRENE EPDM FFKM	RT	80 bar	1~3 weeks	99.5% NH_3 (liquid)

적용하였다. 이 시험은 압축력을 받는 부분에 사용되는 고무 재질의 압축에 따른 줄음율을 측정하는 방법으로, 압축율은 고무 두께의 25%이며, 이는 금속 스페이서를 장착하여 조절한다. Fig. 4는 이 실험에 사용된 JIG를, 그리고 아래는 영구압축줄음율 계산식을 나타낸 것이며, 기타 실험 조건은 Table 2에 나타냈다.

$$C = \frac{t_0 - t_1}{t_0 - t_2} \times 100$$

C: 영구압축줄음율(%)
t_0: 시험편의 원두께(mm)
t_1: 압축이 완전히 제거된 후 30분 후의 시험편 두께(mm)
t_2: 스페이서의 두께(mm)

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 일반적으로 선박용에 사용되는 고무류인 EPDM과 FPM 소재의 단순 침지실험 결과를 나타낸 것이다. FPM의 경우 형상을 알아볼 수 없을 정도로 손상되었다. FKM (FPM)은 불소가 포함되어 내열성, 내유성, 내화학성, 기계적 특성을 지닌 고무로 차량이나 항공우주 분야에서 널리 사용된다 [16-18]. 그러나 관련 연구에서 FKM (FPM)이 알칼리 환경에서 탈불소화(dehydrofluorination)와 같은 반응이 발생하며, 이는 분자의 결합 구조를 손상시키는 backbone cleavage를 일으킴으로써 물질의 기계적 강도나 화학적 저항성을 크게 저하시키는 것으로 알려져 있다 [19]. 특히 다이아민(Diamine)으로 경화된 FKM (FPM)은 고온의 물과 알칼리가 존재할 때 가수분해에 매우 취약한 것으로 알려져 있다 [20-22]. 따라서 해당 소재는 암모니아 환경에서는 사용이 불가능한 것으로 판단된다.

EPDM ‘A’에서는 클리닝 전에 보이지 않던 표면의 기포가 관찰되었으며, EPDM ‘B’는 비교적 건전한 형상이 관찰되었다. EPDM은 에틸렌(Ethylene), 프로필렌(Propylene), 그리고 디엔(Diene) 등으로 구성된 합성 고무로, 내구성과 내환경성이 뛰어나 다양한 산업 분야에서 폭넓게 사용된다. 다만 기름 및 석유 기반 물질에 약하고 경도와 강도가 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있다 [23].

결과적으로 FPM 소재는 암모니아 환경에 절대 적용할 수 없으며, EPDM 소재도 성분에 따라 선별하여 적용해야 한다. 이후에는 암모니아와의 격렬한 반응에 의

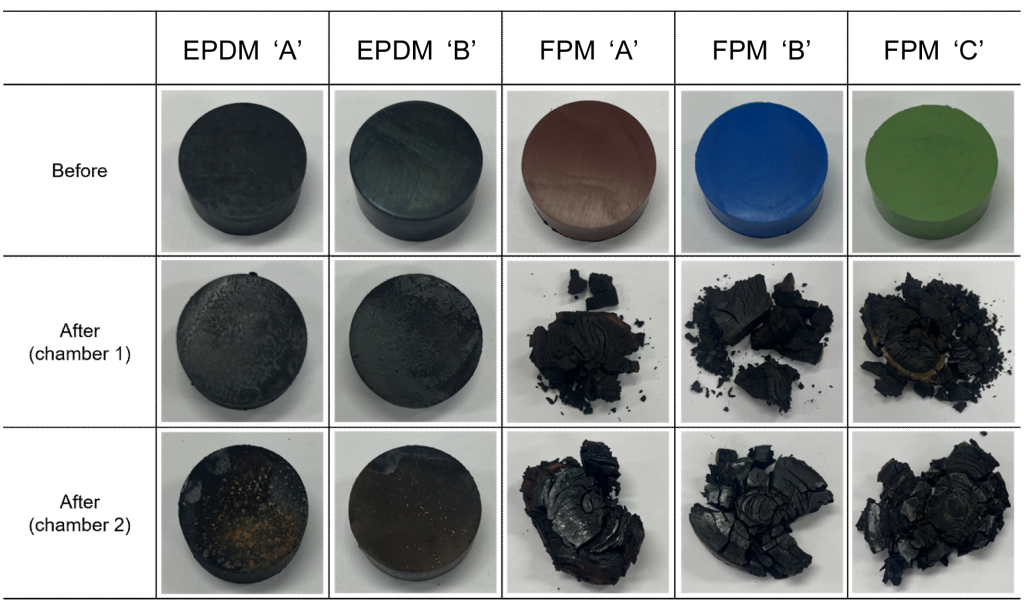
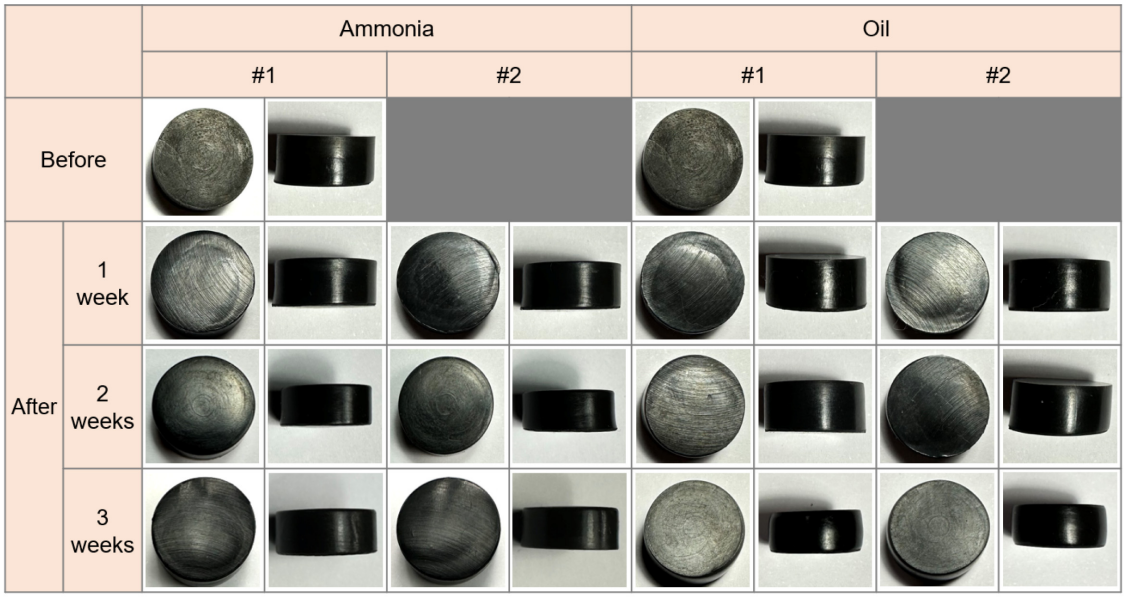
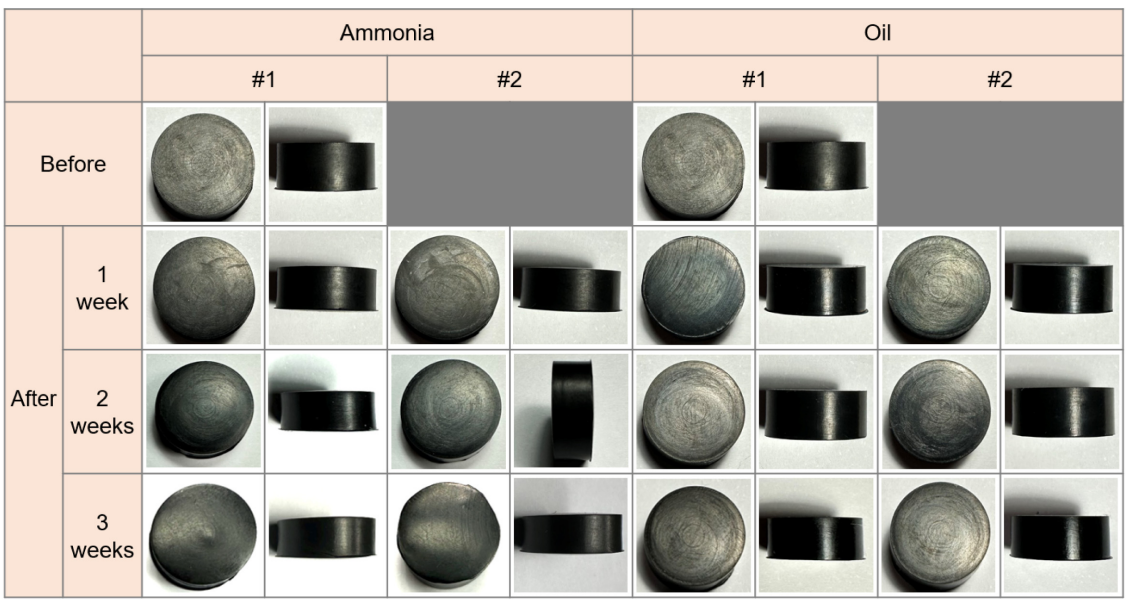


Fig. 5. Specimen morphologies after immersion test in ammonia



(a) AFLAS



(b) CHLOROPRENE

Fig. 6. Results of compression set test for various rubber materials in ammonia and lubrication oil

해 파손된 FPM 소재 이외에 손상이 발생하지 않은 EPDM 소재와 기타 적용 가능할 것으로 예측되는 소재로 영구압축줄음율을 측정하여 변형 정도를 확인하였다.

Fig. 6은 AFLAS, CHLOROPRENE, EPDM, FFKM 소재를 사용하여 암모니아 환경과 선박 엔진용 윤활유 환경에서 영구압축줄음율 실험을 수행한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 6a의 AFLAS 소재는 암모니아와 윤활유 환경에서 모두 부풀음이 발생하였다. 이 손상을 현미경으로 확인한 결과, Fig. 7과 같이 크랙이 관찰되었다. AFLAS는 Asahi Glass에서 개발한 고성능 불소 고무(Fluoroelastomer)로 테트라플루오로에틸렌(TFE)과 프로필렌(Propylene)의 공중합체로 구성되어 있다. 특히 내열성, 내화학성, 내오존성이 뛰어나고, 특정 환경에서 기존 불소 고무(FKM 또는 FPM)보다 우수한 특성을 나타낸다. 이러한 개선된 성능에도 불구하고 고압 환경하에서는 사용이 불가능할 것으로 판단된다.

Fig. 6b CHLOROPRENE 소재 역시 윤활유 환경에

서는 손상이 관찰되지 않았으나, 암모니아 환경의 3주차에 부풀음 현상이 발생하여 파손되었다. Chloroprene Rubber (CR)은 네오프렌(Neoprene)이라는 상표명으로도 알려진 합성 고무로, 내화학성, 내유성이 우수한 것으로 알려져 있으나 암모니아 환경에 적용이 불가능한 것으로 확인되었다. 관련 연구에서 암모니아뿐만 아니라 해수 환경도 CHLOROPRENE 소재의 물성 및 수명에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다 [24]. 이는 AFLAS와 CHLOROPRENE 소재가 암모니아 환경에서 급속 가스 감압(rapid gas decompression, RGD) 이 발생한 것으로 판단된다. RGD 메커니즘은 고압 환경에서 가스가 갑작스럽게 감압되면서 발생하는 현상으로, 특히 탄성체(Elastomer) 소재의 기계적 손상을 초래할 수 있다. 이 현상은 고압가스가 재료 내부로 확산된 후, 급격한 압력 변화가 생길 때 가스가 빠르게 팽창하면서 재료에 균열, 기포, 또는 파괴를 유발하는 현상을 의미한다 [25].

반면 Fig. 6c EPDM과 Fig. 6d FFKM 소재는 실험 종료 후에도 암모니아와 윤활유 환경 모두에서 손상이 관찰되지 않아 상대적으로 양호한 내구성을 보여주었다. 관련 연구에서 EPDM 화합물은 탄화수소 오일(hydrocarbon oils)과 용매(solvents)에 대한 저항성을 가지지 못한다고 하였는데, 본 연구에서는 80bar의 고압 환경임에도 불구하고 육안으로 확인될만한 손상은 관찰되지 않았다 [23]. 또한 EPDM은 에틸렌 함량이 많을수록 높은 강도를 보이나, 경도는 높아지고 탄성 회

Table 3. Results of compression test in liquid ammonia and lubrication oil

Material	immersion period	Ammonia			Oil		
		thickness (mm)		C. set	thickness (mm)		C. set
		before	after		before	after	
AFLAS	1week	6.14	5.96	10.976%	6.17	6.03	8.383%
		6.15	6.00	9.091%	6.15	6.01	8.485%
	2weeks	6.15	5.66	29.697%	6.14	5.56	35.366%
		6.13	5.61	31.902%	6.15	5.56	35.758%
	3weeks	destroyed	destroyed	destroyed	6.15	5.50	39.394%
		destroyed	destroyed	destroyed	6.14	5.45	42.073%
CHLOROPRENE	1week	5.84	5.72	8.955%	5.82	5.78	3.030%
		5.85	5.65	14.815%	5.84	5.81	2.239%
	2weeks	5.85	5.58	20.000%	5.85	5.76	6.667%
		5.84	5.50	25.373%	5.85	5.76	6.667%
	3weeks	destroyed	destroyed	destroyed	5.85	5.73	8.889%
		destroyed	destroyed	destroyed	5.85	5.73	8.889%
EPDM	1week	5.84	5.79	3.731%	5.84	5.8	2.985%
		5.85	5.79	4.444%	5.87	5.81	4.380%
	2weeks	5.86	5.73	9.559%	5.87	5.77	7.299%
		5.84	5.74	7.463%	5.85	5.74	8.148%
	3weeks	5.86	5.81	3.676%	5.84	5.75	6.716%
		5.89	5.83	4.317%	5.87	5.77	7.299%
FFKM	1week	5.71	5.71	0.000%	5.71	5.64	5.785%
		5.72	5.69	2.459%	5.68	5.60	6.780%
	2weeks	5.72	5.69	2.459%	5.71	5.55	13.223%
		5.72	5.69	2.459%	5.71	5.54	14.050%
	3weeks	5.72	5.63	7.377%	5.71	5.42	23.967%
		5.72	5.65	5.738%	5.73	5.44	23.577%

복율이 낮아지는 등의 단점을 가지는 것으로 알려져 있다 [26-28]. FFKM (Perfluoroelastomer)은 완전히 불소화된 고무 소재로, 극한 환경에서도 우수한 성능을 발휘하는 고급 합성 탄성체이다. 높은 수준의 내열성이나 내화학성, 내플라즈마 특성을 필요로 하는 경우는 FFKM을 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 FFKM은 반도체나 부식성 및 독성 등과 같은 사용 환경을 제외하고는 일반적으로 O-ring 소재로 사용하지 않으나, 아세톤이나 벤젠과 같은 유체에 대한 내부식성, 내열성, 내화학성이 대단히 우수하여 화학물질을 취급하는 밀봉 장치 등에 사용한다 [29].

Table 3은 영구압축줄음율 실험 후 시편 측정 결과이다. 앞서 설명한 바와 같이 AFLAS와 CHLOROPRENE은 암모니아 환경에서 파손으로 압축율 측정이 불가능하였다. 또한 AFLAS는 윤활유 환경에서도 최대 40%에 가까운 압축율을 나타내어 기밀 성능이 현저히 저하할 것으로 판단된다. 반면 CHLOROPRENE은 윤활유 환경에서 압축율이 10%를 초과하지 않아 양호한 특성을 나타냈다. EPDM과 FFKM은 파손 없이 실험이 종료되었으나 FFKM의 경우 윤활유 환경에서 상대적으로 높은 압축율을 나타냈다. 다만 앞선 침지 실험에서 일부 EPDM 소재 역시 손상이 관찰된 바 있으므로 주의가 필요해 보인다.

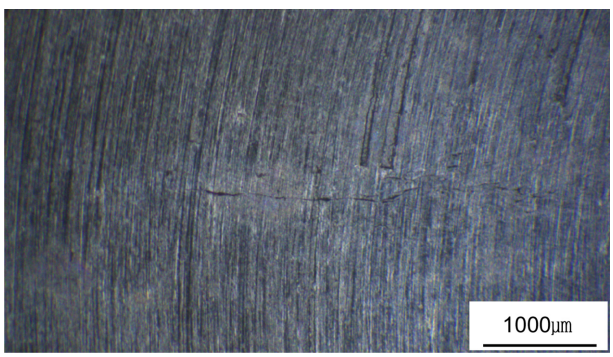


Fig. 7. AFLAS material with cracks in ammonia and oil

Fig. 8은 HNBR 소재로 암모니아 환경에서 영구압축줄음율 실험 결과를 나타낸 것이다. HNBR은 수소화된 니트릴 부타디엔 고무로, NBR (Nitrile Butadiene Rubber)의 내열성과 내화학성을 개선하기 위해 개발된 합성 고무로 고온 환경에서 씰, 가스켓, O-링 및 호스 등의 산업 분야에서 광범위하게 사용되고 있다 [30-34]. 그러나 산소, 산(acid), 알칼리(alkaline)와 접촉할 경우 열화가 발생하며, 알칼리 조건에서는 OH^-의 친핵성(nucleophilicity)에 의해 노화 과정이 진행되는 것으로 알려져 있다 [35-37]. 실험 결과와 같이 암모니아 역시 알칼리 환경으로써 HNBR 소재를 사용할 수 없는 환경으로 판단된다.

4. 결론

실험 결과 FPM (FKM)과 CHLOROPRENE (CR)을 제외한 EPDM과 FFKM은 암모니아 환경에서 손상 없이 양호한 내구성을 나타냈다. 기존 문헌에서는 CHLOROPRENE 소재 역시 암모니아에 강한 특성을 나타낸다고 하였으

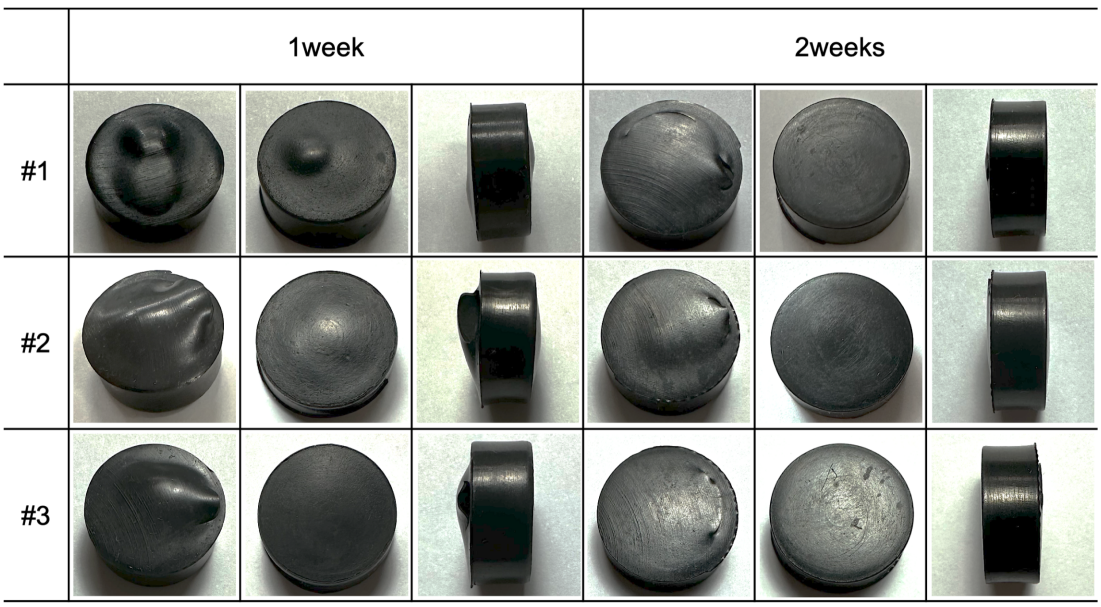


Fig. 8. Damaged HNBR on Compression Set Test

나 이는 단순 침지 실험을 통한 결과로, 본 실험에서는 고압 환경을 가정하여 80 bar로 가압하였기 때문에 다른 결과값이 나타난 것으로 판단된다. 결과적으로 단순 화학 반응 특성만으로는 고무 소재의 적용 가능성을 판단할 수 없으며, 해당 소재가 사용되는 환경을 정확히 모사·구현하여 실험에 임해야 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(2,100마력급 LNG-암모니아 혼소 엔진 개발, 과제번호 20210606).

References

1. Ministry of Economy and Finance, 2050 Carbon Neutrality Promotion Strategy, https://www.moef.go.kr/nw/nes/detailNesDtaView.do?menuNo=4010100&searchNttId1=MOSF_000000000052647&searchBbsId1=MOSFBBS_000000000028 (2020).
2. Statista, Transportation Emissions Worldwide, https://www.statista.com/topics/7476/transportation-emissions-worldwide/#topicOverview (2023).
3. ShiftCarbon, What Are Greenhouse Gases, https://www.shiftcarbon.io/blog/what-are-greenhouse-gasses (2023).
4. A. Angola, Argentina, Bahrain, Bangladesh, Brazil, China, Ecuador, Hashemite Kingdom of Jordan, India, Saudi Arabia, South Africa, and United Arab Emirates, ISWG-GHG 14/2/10 The draft revised IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships (2023).
5. Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czechia, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, and the European Commission, ISWG-GHG 15/2/2 Specification of the levels of ambition in the Revised IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships (2023).
6. Canada, United Kingdom, and United States, ISWG-GHG 15/2/10 Draft text and considerations for the revision of the initial IMO strategy (2023).
7. CE Delft, Maritime decarbonisation scenarios: A comparative review (2023).
8. IMO, MEPC 80/WP.1 Draft report of the Marine Environment Protection Committee on its eightieth session (2023). https://www.imokorea.org/upfiles/board/67.%20MEPC%2080%C2%F7%20%B0%E1%B0%FA%BA%B8%B0%ED%BC%AD%28%BF%B5%B9%AE%29.pdf
9. SBTi, Science-based target setting for the maritime transport sector version 1.0 (2022). https://www.u-mas.co.uk/wp-content/uploads/2022/11/SBTi-2022-Maritime-Guidance.pdf
10. Japan, ISWG-GHG 15/2/1 Revision of the initial strategy on reduction of GHG emissions from ships (2023).
11. DNV, Maritime Forecast to 2050, 2018 ed., https://www.dnv.com/publications/maritime-forecast-2018-edition/ (2018).
12. Lloyd's Register (LR) and UMAS, Zero-Emission Vessels Transition Pathways Study, https://www.lr.org/en/knowledge/press-room/press-listing/press-release/2019/lr-and-umas-release-new-zero-emission-vessels-transition-pathways-study/ (2019).
13. ABH Emden, CII (Carbon Intensity Indicator), https://www.abh-emden.com/cii/ (2024).
14. International Energy Agency (IEA), Net Zero by 2050, https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050 (2021).
15. L. Sariola, Safe use of ammonia as ICE fuel, Master's Thesis, University of Vaasa, Vaasa, Finland, pp. 1–68 (2020). https://osuva.uwasa.fi/handle/10024/11606
16. J. Wilk, R. Smusz, R. Filip, and G. Chmiel, Experimental investigations on graphene oxide/rubber composite thermal conductivity, *Scientific Reports*, **10**, 15533 (2020). Doi: https://doi.org/10.1038/s41598-020-72633-z
17. Z. Zang and B. Lin, The research on the friction and wear properties of ionic liquid treated wood fiber filled PA6 composite, *Surface and Interface Analysis*, 49, 1039 (2017). Doi: https://doi.org/10.1002/sia.6271
18. J. Fan, M. Yan, J. Huang, L. Cao, and Y. Chen, Fabrication of Smart Shape Memory Fluorosilicon Thermoplastic Vulcanizates: The Effect of Interfacial Compatibility and Tiny Crystals, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **58**, 15199 (2019). Doi: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b03028
19. M. S. Mitra, S. Roy, and D. Gupta, Chemical degradation of fluoroelastomer in an alkaline environment, *Polymer Degradation and Stability*, **83**, 195 (2004). Doi: https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00235-0
20. H. J. Harwood, Ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) and fluorocarbon (FKM) elastomers in the geothermal environment, *Journal of Testing and Evaluation*, **11**, 289 (1983). Doi: https://doi.org/10.1520/JTE10292J
21. M. Hudlicky, Cross-linking of polyfluoroolefin copolymers, *Journal of Testing and Evaluation*, **11**, 279 (1983). Doi: https://doi.org/10.1520/JTE10291J

22. K. L. Paciorek, L. C. Mitchell, and C. T. Lenk, Mechanism of amine crosslinking of fluoroelastomers. I. Solution studies, *Journal of Polymer Science*, **45**, 405 (1960). Doi: https://doi.org/10.1002/pol.1960.1204514610
23. R. D. Allen, Fundamentals of compounding EPDM for cost/performance, *Journal of Elastomers & Plastics*, **15**, 19 (1983). Doi: https://doi.org/10.1177/009524438301500103
24. C. K. Lee, J. H. Yun, I. Kim, and S. E. Shim, Life Time Prediction and Physical Properties of Chloroprene Rubber Aged by Seawater, *Elastomers and Composites*, **47**, 9 (2012). Doi: https://doi.org/10.7473/EC.2012.47.1.009
25. Patel, Harshkumar, et al., Review of Elastomer Seal Assemblies in Oil & Gas Wells: Performance Evaluation, Failure Mechanisms, and Gaps in Industry Standards, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **179**, 1046 (2019). Doi: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.05.019
26. K. J. Lee, B. K. Cho, and Y. H. Kim, Studies on the Mechanical Properties of Silane Crosslinked EPDM, *Proc. The Polymer Society of Korean Conf.*, p. 113, The Polymer Society of Korea (1986).
27. Gal, Yeong-Soon, EPDM Rubber and Its Applications, Polymer Science and Technology, 10, 325 (1999).
28. J. K. Kim and H. K. Lee, Study on Manufacturing and Characteristics of Silicone/EPDM Rubber Blend, *Polymer (Korea)*, **25**, 406 (2001). https://koreascience.kr/article/JAKO200111921695952.page
29. B. Richter, Perfluoroelastomer O-Rings Reduce Risk of Failure, *World Pumps*, **1995**, 34 (1995). Doi: https://doi.org/10.1016/S0262-1762(99)80976-6
30. G. Severe and J. L. White, Dynamically Vulcanized Blends of Oil-Resistant Elastomers with HNBR, *Journal of Applied Polymer Science*, **95**, 2 (2005). Doi: https://doi.org/10.1002/app.20813
31. W. Zhao, J. Zhao, M. Yang, and H. Y. Chen, Radiation Vulcanization of Hydrogenated Acrylonitrile Butadiene Rubber (HNBR), *Journal of Applied Polymer Scien*ce, **54**, 1199 (1994). Doi: https://doi.org/10.1002/app.1994.070540902
32. M. Giurginca and T. Zaharescu, Thermal and Radiation Behaviour of HNBR and CSPE Blends, *Polymer*, **41**, 7583 (2000). Doi: https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00121-X
33. K. G. Gatos, E. P. Giannelis, S. H. Anastasiadis, and P. Pissis, Nanocomposite Formation in Hydrogenated Nitrile Rubber (HNBR)/Organo-Montmorillonite as a Function of the Intercalant Type, *Macromolecular Materials and Engineering*, **289**, 1079 (2004). Doi: https://doi.org/10.1002/mame.200400214
34. K. G. Gatos, E. P. Giannelis, S. H. Anastasiadis, and P. Pissis, Controlling the Deintercalation in Hydrogenated Nitrile Rubber (HNBR)/Organo-Montmorillonite Nanocomposites by Curing with Peroxide, Macromolecular Rapid Communications, **26**, 915 (2005). Doi: https://doi.org/10.1002/marc.200500084
35. I. V. Ermakov, et al., Alkaline hydrolysis of polyacrylonitrile, 1. Structure of the reaction products, *Macromolecular Chemistry and Physics*, **201**, 1415 (2000). Doi: https://doi.org/10.1002/1521-3935(20000801)201:13<1415::AID-MACP1415>3.0.CO;2-R
36. A. D. Litmanovich and N. A. Platé, Alkaline hydrolysis of polyacrylonitrile. On the reaction mechanism, *Macromolecular Chemistry and Physics*, **201**, 2176 (2000). Doi: https://doi.org/10.1002/1521-3935(20001101)201:16<2176::AID-MACP2176>3.0.CO;2-5
37. Y. V. Kudryavtsev, L. B. Krentsel, G. N. Bondarenko, A. D. Litmanovich, N. A. Platé, S. Schapowalow, G. Sackmann, Alkaline hydrolysis of polyacrylonitrile, 2. On the product swelling, *Macromolecular Chemistry and Physics*, **201**, 1419 (2000). Doi: https://doi.org/10.1002/1521-3935(200008 01)201:13<1419::AID-MACP1419>3.0.CO;2-3