



캐슈넛 기반 바이오중유가 선박 연료공급 시스템에 미치는 영향에 관한 실험적 연구: 청정기 및 연료필터

박민석* · 송호영 · 오선경 · 정진아 · 전철환

Experimental Investigation of Marine Fuel Supply System Performance Using Cashew Nut-Based Bio-fuel Oil: Purifier and Fuel Auto Filter

Minseok Park* · Hoyoung Song · Seon-gyeong Oh · Jin-a Jeong · Cheol-hwan Jeon

Received 22 July 2026 Revised 1 September 2026 Accepted 8 September 2026 Published online 21 September 2026

ABSTRACT Marine biofuels have attracted considerable attention as promising alternatives for reducing greenhouse gas emissions in the maritime sector; however, their operational reliability has not yet been fully established. This study investigated the effects of a cashew nut shell liquid (CNSL)-containing bio-fuel oil on a marine fuel supply system using a medium-speed diesel engine. A blend of 70% very low sulfur fuel oil (VLSFO) and 30% bio-fuel oil was tested under simulated marine operating conditions. Severe fuel filter clogging occurred repeatedly, and the blockage persisted even after the fuel was switched to diesel, indicating that deposits remained within the fuel supply system. Sludge deposits collected from the fuel filters was analyzed using ATR-FTIR spectroscopy. The spectra showed characteristic O-H and aromatic C=C absorption bands consistent with those reported for polymerized cardanol (polycardanol). Combined with previous studies, the results suggest that the deposits originated from the oxidative polymerization of cardanol, the major component of commercial CNSL. These findings demonstrate that even a relatively low CNSL concentration can adversely affect the operability of marine fuel supply systems and provide fundamental information for fuel quality management and stability assessment.

Key words Net-zero(탄소중립), Greenhouse gas(온실가스), Bio-fuel oil(바이오 중유), Marine fuel(선박연료), Cashew nut(캐슈넛), Fuel filter(연료필터), Clogging(막힘), Polymerization(중합)

Subscript

IMO : international maritime organization

CNSL: cashew nut shell liquid

FT-IR : fourier transform infrared spectroscopy

ATR : attenuated total reflectance

DP : differential press

1. 서론

Researcher, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority

*Corresponding author: mspark2107@kpetro.or.kr

Tel: +82-43-240-7923

국제해사기구(IMO)는 해운 산업에서 발생하는 온실가스 배출을 감축하기 위해 “2050 탄소중립” 목표를 수립하

고 다양한 규제를 도입하고 있으며, 이에 따라 해양 연료의 저탄소화 및 대체 연료 도입이 활발히 추진되고 있다.

대체 연료 중 바이오연료는 기존 화석연료 대비 탄소배출 저감 가능성이 있어 해양 연료 전환의 주요 후보로 고려되고 있다. 바이오연료는 설비의 큰 개조 없이 즉시 사용 가능한 드롭-인(Drop-in) 연료로 해양 연료의 탄소중립 전환을 위한 가교 역할을 할 것으로 보인다. 특히 글로벌 바이오 원료의 다변화 및 공급망 확보가 중요해짐에 따라, 상대적으로 경제성이 높은 원료들이 주목받고 있다.^[1,2]

바이오연료의 원료 중 하나인 CNSL은 캐슈넛 껍질에서 추출되는 천연 페놀계 오일로서 cardanol, cardol, anacardic acid의 주요 화합물을 포함한다. 이러한 화합물은 방향족 고리와 긴 알킬 사슬이 결합되어 있는 특징을 가지며, 윤활성 향상 등의 목적으로도 연료에 첨가될 수 있다.

그러나, CNSL 유래 페놀 화합물은 높은 반응성을 가지며 산소 및 금속 이온이 존재하는 조건에서 산화 중합 반응을 일으킬 가능성이 높다. 이러한 반응은 고분자 물질을 형성하여 연료 시스템 내 침전물을 생성할 수 있으며, 특히 연료필터 막힘 등의 문제로 이어질 가능성이 높다.

실제 일부 선박에서 바이오 원료 중 CNSL이 포함된 연료를 사용한 결과 연료시스템 내 부식 및 기계적 마모, 필터막힘, 인젝터 고장 등의 문제 발생이 보고되고 있다.^[3,4]

선박에서 CNSL이 포함된 연료를 사용하게 되면 연료공급 시스템 내 모든 라인으로 전달되며 이는 추후 연료를 전환하더라도 연료 계통 내에서 잔류물질이 제거되는 데 상당한 시간이 소요될 것이다.

따라서 본 연구에서는 CNSL이 포함된 바이오중유를 선박 연료공급 시스템에 적용하였을 때 발생하는 문제를 실험적으로 평가하고, 그 원인을 화학적 분석과 연계하여 규명하고자 하였다. 이에 본 연구 결과는 향후 선박에서 유사한 장애 발생 시 원인 규명 및 품질 관리의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 연료

국제 해운분야는 30% 미만의 바이오연료를 혼합하여 사

용 시, 추가적인 질소산화물의 측정 및 검증 없이 사용할 수 있도록 허용하고 있다. 이에 저유황유, CNSL 혼합유(저유황유 70% + 바이오중유 30%), 경유를 실험 연료로 선정하였으며, 혼합물은 바이오탄소 함량 분석 결과로 검증하였다. 사용된 바이오중유의 원료는 CNSL이 20% 함유되었으며 CNSL 혼합유 기준 CNSL 함량은 약 6% 수준이다.

실험에 사용한 연료와 실험 순서는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Experimental sequence and test fuels

Test Fuel	
1	LSFO (MF 380)
2	CNSL Blended fuel (LSFO 70% + Bio-fuel oil 30%)
3	Diesel

2.2 실험 장치 및 절차

본 연구에서는 선박에서의 연료 사용 환경을 모사하였으며, Fig. 1과 같이 선박용 연료공급 시스템과 선박용 디젤 엔진(6H21/32P, 1.2 MW)으로 CNSL이 연료공급계통에 미치는 영향을 평가하였다. 실험에 사용된 연료공급 시스템 중 청정기와 오토필터의 제원은 Table 2에 나타내었다.

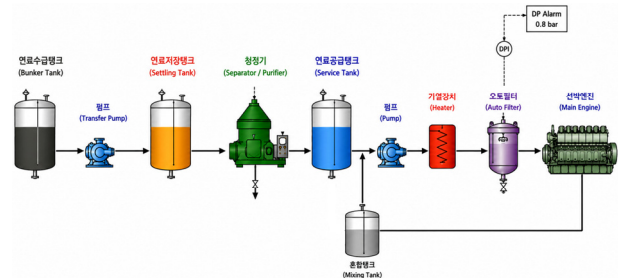


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental fuel supply system

Table 2. Specification of separator and auto filter

Auto Filter	
Type	FM-152-DE 16/8
Mesh size	10 μ m
Separator	
Type	P605
Feed Pump	ALP0015
Bowl	561123 04

선박에서의 조건과 동일하게 맞추기 위해 실험용 연료는 연료 수급 탱크에서 연료 저장 탱크(Settling tank)로 이송

한 후 원심분리 청정기를 통해 연료 공급 탱크(Service tank)로 옮겨 사용했다. 청정기는 실험 연료의 밀도를 고려하여 비중판을 변경하여 사용했으며, 청정온도는 저유황유와 CNSL 혼합유 98°C, 경유 40°C로 유지했다. 엔진에 공급하기 전 저유황유와 CNSL 혼합유의 경우 적정 점도를 유지하기 위해 가열했고, 경유의 경우 가열장치를 사용하지 않았다.

실험은 저유황유, CNSL 혼합유, 경유 순서로 선박 엔진에 공급하였으며, 선박 엔진 운전 중 필터 막힘 여부와 청정기의 정상 작동 여부를 평가하고 발생 원인이 CNSL인지에 대한 화학적 분석을 진행했다. 연료필터의 막힘 여부는 제조사에서 권장하는 차압(DP) 알람 기준(0.8 bar)을 적용하여 판단하였으며, 알람 발생 시 필터 내부에 이물질이 축적되어 정상적인 연료 유량 확보가 어려운 상태로 정의하였다. 연료 청정기의 정상 작동 여부도 제조사에서 설정한 알람 발생 여부를 기준으로 판단하였다.

FT-IR 분석은 유기물의 기능기를 비파괴적으로 분석할 수 있는 대표적인 화학적 분석기법으로, 산화 생성물 및 고분자 물질의 구조 분석에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서 사용한 장비의 제원은 Table 3에 나타내었다.

실험은 Miracle ATR 액세스리를 이용하고 슬러지(필터에서 채취한 왁스형 이물질)를 별도의 전처리 작업 없이 직접 분석하였으며, 슬러지와 바이오중유 및 경유의 스펙트럼을 비교하여 이물질의 화학적 기원을 확인하였다.

Table 3. Specification of FT-IR

Maker	Thermo Fisher scientific
Model	Nicolet iS5
Measurement mode	ATR-FTIR
Spectral range	4000–650 cm^{-1}
Number of scans	16
Resolution	4 cm^{-1}
Final format	Absorbance

3. 실험결과 및 고찰

실험 결과 저유황유 사용 시 이상 없이 정상 운전 가능하였으나, CNSL 혼합유를 사용하자 이물질로 인한 필터 막힘 현상이 즉시 발생했다. 연료필터를 분해하여 내부 디스

크를 세척한 후에도 10분 이내에 차압 알람이 반복적으로 발생하였으며, 동일 현상이 반복되어 정상적인 연속 운전이 불가능하였다. 이러한 결과는 단순한 일회성 오염이 아니라 연료공급계통 내부에서 지속적으로 이물질이 생성되고 있음을 시사한다.

특히 연료공급 시스템 내부를 CNSL 혼합유에서 경유로 전환한 이후에도 필터 막힘 현상은 지속적으로 발생하였다. 일반적으로 경유는 산화 안정성이 우수하고 점도가 낮아 필터에 이물질이 축적될 가능성이 매우 낮다. 따라서 본 연구에서 관찰된 필터 막힘 현상은 CNSL 혼합유 사용 과정에서 생성된 침전물이 연료공급계통 내에 잔존하였다가 연료의 흐름에 의해 반복적으로 탈락되었기 때문으로 판단된다. 이는 이물질 성분이 연료공급계통 내부에 남아 지속적으로 영향을 미칠 수 있음을 시사하며 선행된 연구 결과들을 바탕으로 해당 이물질은 CNSL에 기반된 것으로 추정하였다.

Fig. 2는 연료공급계통을 경유로 전환한 후 필터에 걸려진 이물질 사진이며, 해당 이물질은 점착성이 높은 왁스 형태를 나타냈으며, 짙은 갈색을 띠었다. 이는 상업용 CNSL의 주요 성분인 cardanol 기반의 고분자 물질이 짙은 갈색 또는 붉은색을 띤다는 보고 내용과 유사한 경향을 나타내었다.^[5]



(a) Auto filter element (b) Manual filter element

Fig. 2. Sludge collected by fuel filter element



(a) Bowl disk (b) Bowl maintenance

Fig. 3. Inspection of separator bowl components

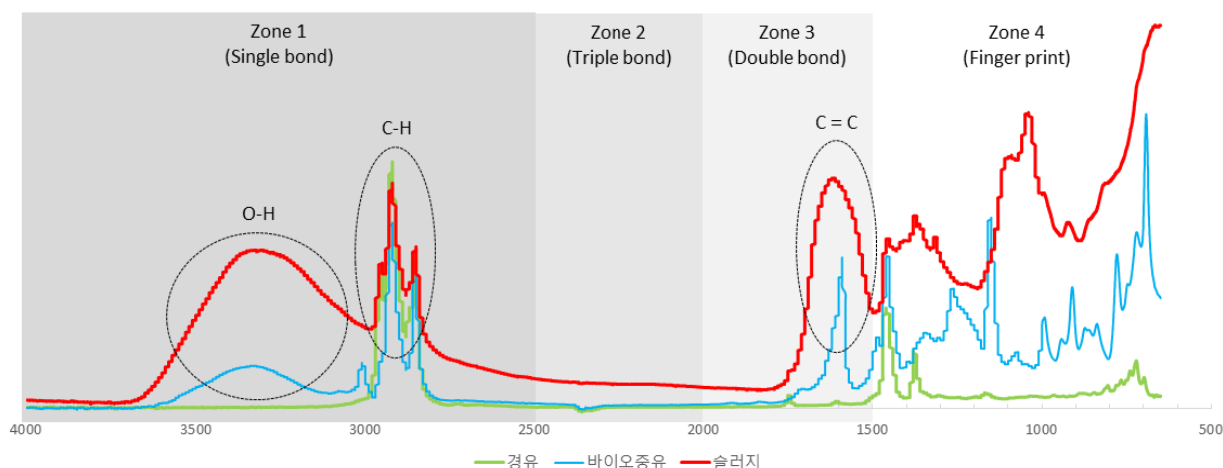


Fig. 4. FT-IR Spectra of Diesel, Bio heavy oil, Sludge

반면 동일한 조건에서 운전한 청정기의 운전 이상은 확인되지 않았다. 추가적인 분해 점검에도 축적된 슬러지량, O-ring 상태 등에서 이상 여부는 확인되지 않았다. Fig. 3은 연료 청정기의 주요 부품인 Bowl을 분해, 점검한 사진이다. 이는 CNSL 유래 침전물이 연료공급 시스템 전체에 균일하게 생성되는 것이 아니라, 부분적으로 특정 문제를 일으킬 수 있음을 보여준다.

Fig. 4는 경유, CNSL 혼합유에 사용한 바이오중유, 슬러지(경유로 전환 후 필터에 걸려진 이물질)를 채취하여 FT-IR 비교 분석한 결과이다. FT-IR 분석 결과, 회수된 이물질에서는 $3,200\sim 3,500\text{ cm}^{-1}$ 에서 넓은 O-H stretching band가 관찰되었으며, $1,600\text{ cm}^{-1}$ 에서는 방향족 고리(Aromatic C=C)에 해당하는 피크가 확인되었다. 이러한 피크들은 페놀계 화합물의 대표적인 구조적 특징이며, 상업용 CNSL의 주요 성분과 화학적 특성이 유사하였다.

강한 O-H 흡수 피크는 산소를 포함하는 화합물의 존재를 의미하며, 뚜렷한 Aromatic C=C 피크는 벤젠고리를 포함한 구조를 의미한다. 경유의 분석 결과에서 해당 피크가 관찰되지 않았으며, 이는 회수된 이물질이 CNSL 유래 성분과 관련되어 있음을 시사한다.

또한 Fig. 4 슬러지의 FT-IR 분석 결과가 선행연구에서 보고된 polycardanol의 스펙트럼 특성과 전체 영역에서 잘 부합하는 것으로 확인되었다. 이에 본 연구에서 관찰된 이물질은 CNSL 유래 cardanol의 산화중합반응에 의해 생성된 polycardanol에 기인한 물질일 가능성이 높은 것으로

판단된다.^[5,6]

경유로 전환 후에도 필터 막힘 현상이 지속되는 것은 고온의 조건에서 cardanol이 지속적으로 고분자화되고 있으며, 고분자 물질이 바니쉬 또는 래커 형태로 연료 시스템 내 배관, 열교환기 등의 표면에 부착되어 영향을 미치고 있음을 시사한다. 특히 이물질이 왁스의 형상을 띠는 점과 cardanol의 산화, 중합반응으로 생성되는 polycardanol이 산업용 코팅제, 접착제로 널리 사용되는 점이 상기 내용을 뒷받침한다.^[7]

CNSL 성분이 이러한 문제를 발생시키는 이유는 분자의 구조적 원인에 있으며, CNSL의 주요성분인 cardanol, cardol, anacardic acid 분자 구조는 Fig. 5에 나타내었다. 천연 CNSL은 anacardic acid(64.9%), cardol(11.3%), polymer(20.3%)로 구성되어 있지만, 상업용은 cardanol(62.8%), cardol(11.3%), polymer(23.8%)로 구성되어 있다. 이는 CNSL의 추출 또는 정제과정에서 약 65%를 차지하던 anacardic acid가 탈카르복실화 되어 cardanol로 전환되었음을 의미한다.^[8]

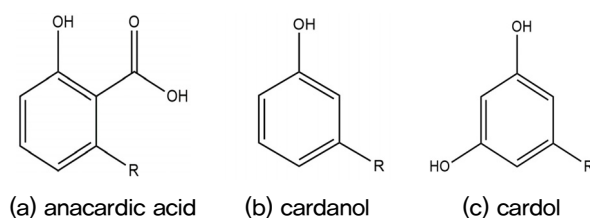


Fig. 5. Main components of CNSL

상업용 CNSL에서 대부분의 조성을 차지하는 cardanol은 반응 부위로 페놀성 하이드록실기, 방향족 고리, 알킬 측쇄 불포화기를 가짐으로써 반응성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 가열은 CNSL을 중합하는 가장 간단한 방법이며, CNSL 내에 존재하는 염이 촉매 역할을 하여 반응이 가속화된다.^[3,8] 더불어 선박의 연료공급계통은 산소가 존재하며 고온으로 가열 및 압축되고, 금속과 접촉하는 부분이 많아 산화 중합 반응이 촉진될 수 있는 환경이다.

Cardanol의 페놀성 하이드록실기는 산화(Oxidation) 조건 하에서 라디칼(radical)을 형성하며, 중합(Polymerization) 반응을 일으켜 polycardanol을 형성한다.^[7] 또한 생성된 polycardanol은 cardanol과 이중결합 부위에서 서로 추가적인 중합, 가교 반응(crosslinking)을 일으키게 되고 3차원의 네트워크 구조를 형성하며 고분자화된다.

그 외에도 cardanol은 Fe-salen 촉매 산화 중합, Friedel-Crafts 중합, 에스테르화 반응, 에폭시 화합물 합성, 방향족 고리에서의 치환반응 등 다양한 반응을 통해 다양한 고분자 물질로 변환될 수 있음이 보고되고 있다. Fig. 6은 cardanol의 중합 매커니즘 일부를 예시로 표현한 도식이다.^[3,5,6]

특히, FT-IR 분석 결과 지문 영역(Fingerprint region)인 600~1500 cm^{-1} 범위에서는 고분자 물질에서 일반적으로 나타나는 broadening 현상이 확인되었다. 고분자화된 물질은 분자 구조가 비정질(Amorphous)이고 복잡한 구조를 띠기 때문에 원 물질의 선명했던 피크들이 뭉개지거나(Broadening) 서로 겹쳐 복잡하고 넓은 형태로 나타난다. 이는 cardanol이 고분자 물질로 변화하는 선행 연구 결과와 잘 부합한다.

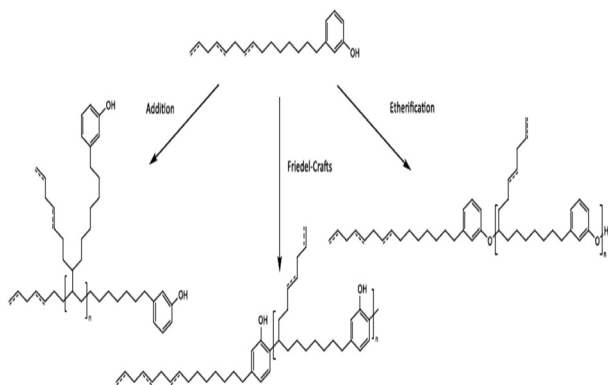


Fig. 6. Polymerisation mechanisms of cardanol

이와 같이 여러 선행 연구들의 결과들은 본 연구 결과와 CNSL 간의 인과관계를 더욱 명확히 뒷받침하여 본 연구 결과의 신뢰성을 더욱 높여준다.

4. 결론

기존 연구에서는 중유에 바이오중유를 혼합하여 연소 특성과 배출가스 특성을 분석한 결과를 보고하고 있다. 이에 반해 본 연구는 실제 선박용 연료공급 시스템에서 CNSL 기반 바이오연료 사용 시 발생 가능한 연료공급 장애를 실험적으로 재현하고 그 원인을 화학적 특성과 연계하여 분석하였다는 점에서 의의가 있으며, 차별성을 가진다.^[2]

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

선박용 엔진 연료로 저유황유에 CNSL 성분이 포함된 바이오연료를 혼합하여 사용하자 진갈색 계열의 왁스 형상 이물질이 연료필터에 부착되면서 연료의 공급압력이 저하되었다. 연료를 경유로 전환하였음에도 동일한 현상은 지속적으로 발생하였으며, 화학 분석 결과 해당 이물질은 바이오중유로부터 유래되었다.

이물질의 특성과 화학분석 결과는 선행 연구 결과와 잘 부합한다. 특히 선박의 연료공급 계통은 산소가 존재하며 가열 및 압축이 일어나고, 금속과 접촉하는 부분이 많으므로 cardanol이 산화 중합하기 최적의 조건이다.

Cardanol은 분자 내 페놀성 하이드록실기와 불포화 알킬사슬을 동시에 포함하고 있어 산화 개시에 용이하며, 라디칼을 생성한다. 라디칼은 인접 분자와 추가반응을 반복하며 polycardanol을 형성하고 고분자화 된다. 이러한 고분자 생성물은 높은 점도와 접착성을 가지므로 연료 배관 및 필터 표면에 쉽게 부착될 수 있으며, 연료가 경유로 전환된 이후에도 시스템 내부에 잔존하며 문제를 유발할 가능성이 있다.

연구에 사용된 혼합유에는 CNSL 성분이 6% 수준으로 소량 혼합되었음에도 단기간에 필터 막힘 현상이 발생하며 전체 연료공급계통에 영향을 미쳤다. 이는 소량의 CNSL 성분도 연료공급 계통에 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

본 연구에서는 FT-IR 분석을 기반으로 이물질의 화학적 특성을 분석하였다. 향후 GC-MS, SEM-EDS 등의 추

가 분석을 수행한다면 이물질의 조성 및 형성 메커니즘을 보다 명확히 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 CNSL 기반 바이오연료 사용 시 발생할 수 있는 연료 시스템 문제의 화학적 원인을 제시하며, 향후 CNSL 기반 바이오연료의 품질 및 성능평가 기준 설정, 연료 안정성 확보 및 첨가제 기술 개발 등에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Korean Register(KR), 2023, "Biofuel as marine fuel", https://decarbonization.krs.co.kr/kor/Knowledge/KN_TotalList.aspx?MRID=944&F_MENU=944.
- [2] Song, H.Y., Park, M.S., Oh, S.G., Kong, J.S., Jeong, J.A., and Jeon, C.H., 2025, "An Experimental Study on Blended Bio-Fuel Oil as an Alternative to Marine Fuel Oil: Emissions and Fuel Consumption", *New. Renew. Energy*, **21**(4), 40-45.
- [3] Bates, A., and Marsden, T., 2025, "Cashew nutshell liquid as a biofuel: use of additives to improve engine operability", *Proc. 31st CIMAC World Congress 2025, Zurich, Switzerland*, https://papers2025.cimaccongress.com/pdf/CIMAC_paper_167.pdf.
- [4] IIMS News, "Cashew nutshell marine biofuel warning sent out", 2024.11.22., <https://www.iims.org.uk/cashew-nutshell-marine-biofuel-warning-sent-out/>.
- [5] Bai, W., Xiao, X., Chen, Q., Xu, Y., Zheng, S., and Lin, J., 2012, "Synthesis and characterization of cross-linked polymer from cardanol by solvent-free grinding polymerization", *Prog. Org. Coat.*, **75**(3), 184-189.
- [6] Fouquet, T., Fetzter, L., Mertz, G., Puchot, L., and Verge, P., 2015, "Photoageing of cardanol: characterization, circumvention by side chain methoxylation and application for photocrosslinkable polymers", *Royal society of chemistry (RSC Advances)*, **5**, 54899-54912.
- [7] Kim, Y.H., An, E.S., Song, B.K., Kim, D.S., and Chelikani, R., 2003, "Polymerization of cardanol using soybean peroxidase and its potential application as anti-biofilm coating material", *Biotechnol. Lett.*, **25**(18), 1521-1524, <https://doi.org/10.1023/A:1025486617312>.
- [8] Voirin, C., Caillol, S., Sadavarte, N.V., Tawade, B.V., Boutevin, B., and Wadgaonkar, P.P., 2014, "Functionalization of cardanol: towards biobased polymers and additives", *Polym. Chem.*, **5**(9), 3142-3162.