

디젤 엔진에서 생성된 크랭크케이스 수트의 재활용 가능성 연구

김수양* · 최재혁** · 노범석*** · 김준수*** · 강준****,***** · 이원주****,*****†

* 한국선급 선임연구원, ** 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, *** 한국해양수산연수원 교수,
**** 한국해양대학교 기관공학과 교수, ***** 한국해양대학교 해양인공지능융합전공 교수

Study on the Possibility of Recycling Crankcase Soot from Diesel Engine

Soo-yang Kim* · Jae-Hyuk Choi** · Bum-Seok Rho*** · Junsoo Kim*** · Jun Kang**** · Won-Ju Lee****,*****†

* Deputy Senior Researcher, Korean Register, Busan 46762, Korea

** Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

*** Professor, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

**** Professor, Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

***** Professor, Interdisciplinary Major of Maritime and AI Convergence of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요약 : 본 연구에서는 선박용 디젤 엔진에서 발생하는 크랭크케이스 수트(soot)의 재활용 가능성을 검토하기 위하여, 수트를 배기관에서 발생하는 수트와 크랭크케이스에서 발생한 수트로 분류하고, 열처리에 따른 수트의 구조적 특성을 분석하였다. 열처리는 아르곤 가스 분위기에서 2,000℃와 2,700℃로 열처리를 수행하였고, 샘플의 구조적 특성 분석을 위해 라만분광법(Raman spectroscopy)과 고분해능 전자현미경(HRTEM)을 활용하였다. 또한, 취득한 HRTEM 이미지를 정량적으로 분석하기 위해 디지털 이미지 처리(Digital Image Processing) 기법을 활용하였다. 라만 분석 결과, 배기 수트와 2,700℃로 열처리한 수트에서 상대적으로 높은 G/D ratio가 나타났다. HRTEM 이미지에서는 두 수트 모두 유사한 형태의 흑연화된 나노 구조를 확인할 수 있었으나, 수트의 종류와 열처리 온도차에 따른 흑연화 정도의 차이를 정량적으로 도출할 수 없는 한계가 있었다. 이에 Digital Image Processing을 통해 HRTEM 이미지의 fringe의 길이와 곡률을 정량적으로 분석하였으며, 라만 분석과 일치하는 결과를 도출할 수 있었다. 이는 배기 수트가 크랭크케이스 수트에 비해 더 흑연화 된 구조를 가지는 것을 의미하며, 더 높은 온도에서 열처리 할 경우 흑연의 구조로 더 잘 발달함을 의미한다. 본 연구의 결과로 크랭크케이스 수트 역시 배기 수트와 마찬가지로 흑연계 재료로 재활용이 가능함을 확인하였다.

핵심용어 : 배기 수트, 크랭크케이스 수트, 열처리, 라만분광법, 고분해능 전자현미경, 디지털 이미지 처리

Abstract : In this study, we attempted to comparatively analyze the structural characteristics of soot generated from marine engines to review the possibility of recycling crankcase soot by classifying it as exhaust soot and crankcase soot. The annealing procedure was performed in an argon gas atmosphere at 2,000 °C and 2,700 °C, and Raman spectroscopy and High-Resolution Transmission Electron Microscopy(HRTEM) were used to analyze the structural properties of the samples. Furthermore, digital image processing techniques were utilized to quantitatively analyze the acquired HRTEM images. The Raman analysis demonstrated a relatively high G/D ratio in the exhaust soot and annealing conditions at 2,700 °C. In the HRTEM images, both soot were able to identify similar forms of graphite nanostructures, but there were limitations in that they could not quantitatively derive differences in the degree of graphite depending on the type of soot and annealing temperature. Thus, digital image processing quantitatively analyzed the length and tortuosity of the fringe of the HRTEM image, which is consistent with the Raman analysis. This meant that the exhaust soot had a more graphite structure than the crankcase soot, and that annealing at a higher temperature improved the graphite structure. This study confirmed that both the crankcase soot and exhaust soot can be recycled as a graphite materials.

Key Words : Exhaust soot, Crankcase soot, Annealing, Raman spectroscopy, HRTEM, Digital image processing

* First Author : kimsy@krs.co.kr, 070-8799-8469

† Corresponding Author : skywonju@kmou.ac.kr, 051-410-4262

1. 서론

국제 무역에서 선박에 의해 운송되는 물동량은 전체 교역량에 상당한 비중을 차지하고 있으며, 이로 인해 선박에서 발생하는 대기 유해 물질은 운송 분야 전체에서 발생하는 배출물의 약 80% 이상으로 높은 비율을 차지하고 있다(Eyring et al., 2005). 이와 같은 문제에 대응하기 위하여 국제해사기구(IMO)에서는 선박에서 발생하는 배기가스에 함유하고 있는 SOx, NOx CO₂ 등에 대하여 장기적인 계획을 수립하고 단계적인 규제를 시행하고 있다. 더 나아가 극지방의 온난화 및 해빙에 미치는 영향에 미치는 것으로 확인되어, 향후 예상 규제 물질로 분류되는 입자상 물질(Particulate Matter, PM) 내 블랙카본(Black Carbon, BC)에 대한 관심도 급증하고 있다(IMO MEPC A.1110(30), 2017). 관련 연구의 일환으로 HRTEM과 라만분광법을 활용하여 선박에서 발생하는 PM의 sampling 위치에 따른 구조 특성을 규명하는 연구가 시도되었으며(Choi et al., 2016), 선박 PM의 구조 특성을 기반으로 Economizer에 퇴적된 PM을 이차전지의 음극재료로 재활용하는 연구 결과도 보고되었다(Lee et al., 2018).

선박에 탑재된 디젤 엔진은 저질중유를 주 연료로 사용하며, 연소 시 수트(Soot)로 알려진 PM이 발생한다(Clague et al., 1999). 수트는 주로 탄소성분으로 이루어진 입자상 물질이며(Ess et al., 2016), 연소과정 중 불완전연소에 기인하는 물질이다. 그 입자의 구조는 연소되는 환경(Vander Wal and Tomashek, 2004) 등에 따라 차이를 보이지만 대체적으로 무정형한 나노구조로 보이는 것으로 보고된다(Lee, 2017).

수트는 발생원에 따라 배기 수트(exhaust soot)와 크랭크케이스 수트(crankcase soot)로 구분되며(Kim, 2020), 이 두 가지 수트의 구조 특성을 비교하는 연구는 자동차 엔진분야에서 극히 드물게 찾아볼 수 있으나(Sharma et al., 2016), 선박용 디젤 엔진을 대상으로 두 수트의 특성을 비교하는 연구는 극히 제한적이다.

이에 본 연구에서는 크랭크케이스 수트의 활용 가능성 검토를 목적으로, 선박용 디젤 엔진에서 생성된 배기 수트와 비교하여 크랭크케이스 수트의 구조 특성을 라만분광법, HRTEM 및 Digital Image Processing 기법을 활용하여 구조 특성을 정량적인 데이터로 비교 분석하여 흑연화 진행 정도를 확인하였다. 이를 통해 배기 수트에 이어 크랭크케이스 수트의 흑연재료로 재활용 가능성을 확인하고, 재활용을 위한 연구·개발 등의 기초 자료로 이용하고자 한다.

2. 실험 방법 및 분석 기법

2.1 샘플 채취(Sampling)

실제 운항 중인 선박에서 생성되는 배기 수트와 크랭크케이스 수트의 구조적인 특성을 비교 분석하기 위하여 일반적인 상선과 유사한 구조 및 운항 시스템을 가지고 있는 한국해양대학교 실습선 한바다호를 대상으로 수트 샘플을 채취하였다.

한바다 호는 204명의 학생을 수용 가능한 규모의 실습선으로 2005년 STX 조선소에서 건조 되었으며, 총톤수(G/T) 약 6,600톤, 길이 약 117미터, 상용속도 17.5노트이다. 주기관은 MAN Diesel & Turbo 사의 기관인 6L42MC/ME 엔진이 탑재되어 있으며, 연속최대출력은 176 rpm에서 5,979 kW이다.

Table 1은 한바다호의 주기관 및 보조기관의 제원이며, 실험에서 사용된 연료의 황함유량은 1.76 Weight %, 점도 25.86 mm²/s, 비중 0.9377 @15/4℃의 특성을 가지는 연료를 사용하였다.

Table 1. Ship's particulars of T/S "HANBADA"

Items	Dimensions
Ship's Name	HANBADA
Navigation Area	Ocean Going
Keel Laid	2004. 12. 24.
Gross (ton)	6,686
Deadweight (ton)	2,636
Lbp × B × D × d	104.00 × 17.80 × 10.85 × 5.915
Ship Builder	STX OFFSHORE & SHIPBUILDING CO., LTD
Main Engine	MAN Diesel & Turbo
	6L42MC/ME
	5,979 kW × 176 rpm (MCR)
Generator Engine	HIMSEN
	H621/32
	1,200 kW × 900 rpm (MCR)

배기 수트는 주기관(2-stroke diesel engine)의 배기관과 연결되어 있는 Economizer에 퇴적된 수트를 표본으로 열처리하였고, 크랭크케이스 수트는 동일한 연료를 사용하는 발전기관(4-stroke diesel engine)의 윤활유 원심분리필터에 퇴적된 수트를 샘플로 채취하여 열처리하였다.

2.2 열처리(Annealing procedure)

채취된 두 수트 샘플은 불순물을 제거하고 결정화를 향상시키기 위하여 불활성 기체의 분위기 하에서 고온으로 열처리 하는 과정이 필요하다.

본 연구에서는 초고온 전기로(Thermvac Engineering, Korea)를 활용하여 아르곤 가스(4 l/min)를 흘려주어 2,000℃와

2,700℃까지를 목표로 열처리를 진행하였다. 2,000℃와 2,700℃까지의 승온 속도는 10℃/min로 설정하여 가열하였고, 목표 온도에 도달 후 2시간동안 유지한 후 상온으로 자연 냉각하였다.

2.3 라만분광법(Raman Spectroscopy)

라만 분광법은 산란된 빛의 세기를 주파수에 따라 반복적으로 나타나는 피크를 측정함으로써 물질의 정성 및 정량적 분석에 활용된다. 탄소계 물질에 적용하였을 때는 D peak (1350 cm⁻¹)와 G peak(1580~1600 cm⁻¹)로 알려진 고유의 산란 피크가 나타난다. D peak와 G peak의 비율인 G/D ratio로 탄소 성분의 흑연화 정도를 확인할 수 있고(Lespade et al., 1984) G/D ratio가 클수록 더 흑연화 된 구조를 가지는 것으로 알려져 있다(Ferrari and Robertson, 2004).

본 연구에서는 Thermo Fisher Scientific사의 DXR 장비를 사용하여 분자 진동에너지보다 큰 에너지의 단색광(532 nm, 780 nm)을 조사하여 수트의 분자 진동에너지만큼 에너지를 잃거나 얻은 산란광의 강도(intensity)를 측정하였다. 이를 통해 G peak, D peak 및 G/D ratio를 수치화하여 수트의 흑연화 정도를 정량적으로 파악하였다.

2.4 고분해능 전자현미경(High Resolution Transmission Electron Microscopy)

HRTEM은 전자현미경의 종류 중 한가지로 전자총에서 전자를 발생하여 200 kV로 가속된 전자 빔을 집속렌즈에 모아서 시편에 투과시키고 중간렌즈를 조절하여 저배율과 고배율로 수트 입자를 관찰함으로써 수트 1차 입자의 크기와 형상 및 나노 구조를 분석이 가능하다. 탄소재료 및 2D박막재료(탄소나노튜브 그래핀 탄소섬유 등)에 전자빔에 의한 손상 없이 원자 수준의 정보, 미세구조 및 화학성분 분석이 가능하고 해상력이 광학현미경에 비해 매우 뛰어나므로 수트의 내부구조를 고배율로 확대하여 관찰하기에 효과적이다.

2.5 Digital Image Processing

탄소나노구조의 특성을 보다 객관적으로 분석하기 위하여 Digital Image Processing 기법을 활용하였으며 이를 위해 Integrys Public Safety and Security사의 Matrox Inspector 8.0® 프로그램을 사용하였다.

HRTEM 이미지는 라멜라의 형상을 확인할 수 있으나 추출되는 이미지가 수백만 개로 추출되어 결과값으로 사용하기에는 어려운 점이 있으며, 탄소나노구조의 정량적 데이터를 도출하기에 어려움이 있다.

HRTEM 이미지에서는 탄소 라멜라가 Fringe로 나타나며,

분석된 라멜라의 길이가 길수록, 라멜라의 곡률이 1에 가까울수록 수트의 흑연화가 잘 진행된 것으로 판단하므로 이미지 처리 기술에 기초한 분석이 나노 구조를 해석하는데 있어 매우 중요하다(Park et al., 2011).

신뢰성을 높이고자 전처리 - Fringe 추출 - Skeletonizing - 후처리의 4단계를 거쳤으며 표본으로 삼기에 신뢰성이 저하되는 것들을 Filtering 및 보정작업을 거쳐 약 1000개의 대표적이고 뚜렷한 Fringe를 사용하여 해당 수트의 데이터로 사용하였다.

3. 실험결과

3.1 라만그래프 분석

3.1.1 열처리에 따른 배기 수트 분석

다음 Fig. 1 (a), (b)는 2,000℃와 2,700℃로 열처리 한 후의 배기 수트의 라만그래프이다.

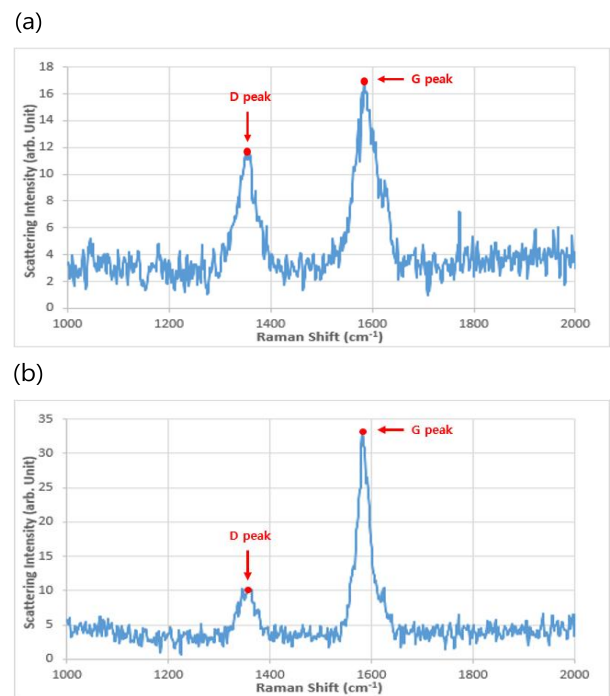


Fig. 1. Raman graph of exhaust soot annealing condition (a) 2,000℃, (b) 2,700℃.

Fig. 1 (a) 그래프에서는 G peak와 D peak의 차이가 약 1.4 배로 크지 않은 반면에 Fig. 1 (b)에서는 G peak와 D peak의 차이가 약 3배 이상 큰 차이가 있음을 확인하였다. 이는 고온의 열처리로 배기 수트에 포함되어 있는 상당량의 불순물들이 제거되고 흑연화가 진행되었음을 나타낸다.

3.1.2 열처리에 따른 크랭크케이스 수트 분석

다음 Fig. 2 (a)와 (b)는 2,000°C와 2,700°C로 열처리 한 후의 크랭크케이스 수트의 라만그래프이다.

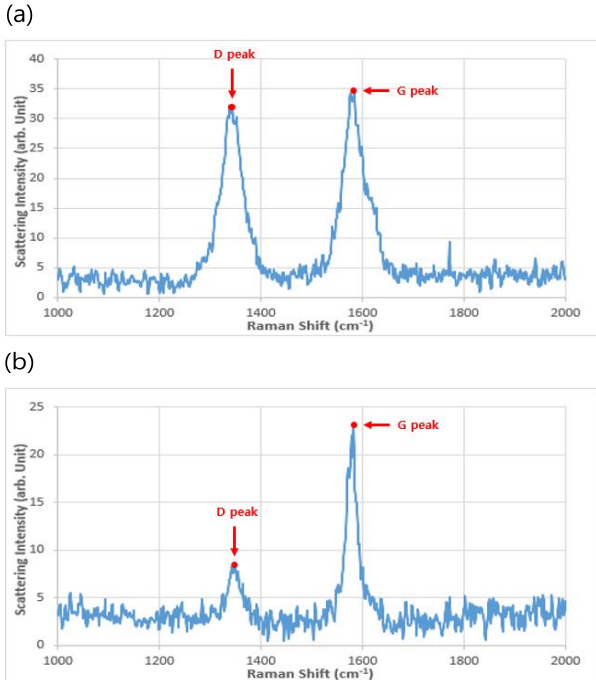


Fig. 2. Raman graph of crankcase soot annealing condition (a) 2,000°C, (b) 2,700°C.

Fig. 2 (a) 그래프에서는 G peak와 D peak의 차이가 미미한 수준으로 나타났다. 반면에 Fig. 2 (b)에서는 G peak와 D peak의 차이가 3배 이상 확연히 드러났으며, 이는 Fig.1과 유사한 형태를 나타낸다. 이를 통해 수트 종류와 무관하게 2,000°C에서는 흑연화 진행이 더디나 2,700°C에서는 흑연화가 상당 수준으로 진행됨을 알 수 있다.

3.1.3 G peak, D peak 및 G/D Ratio 분석

두 수트의 열처리 온도에 따른 G peak, D peak 및 G/D ratio를 다음의 Table 2로 나타내었다.

Table 2. D peak, G peak and G/D Ratio of exhaust soot and crankcase soot on 2,000°C/2,700°C annealing condition

Test items	D peak	G peak	G/D ratio
Crankcase soot on 2,000°C	32.215	34.962	1.085
Crankcase soot on 2,700°C	8.335	22.813	2.737
Exhaust soot on 2,000°C	11.728	17.06	1.455
Exhaust soot on 2,700°C	10.258	33.109	3.228

고온으로 열처리 할수록 D peak는 감소하고 G peak가 증가하여, 흑연화 정도를 나타내는 G/D ratio도 증가하는 것을 확인하였다. G/D ratio가 크랭크케이스 수트는 2,000°C에 비해 2,700°C에서 52%, 배기 수트는 22%가 상향됨을 통해 수트의 종류에 따라 그 차이는 있으나 열처리가 수트의 구조적 특성 변화에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 크랭크케이스 수트가 배기 수트 보다 G/D ratio의 값이 열처리에 따라 상향되는 폭이 커지는 것은 크랭크케이스 수트가 상대적으로 수분, 윤활유 등의 불순물을 많이 포함하고 있고 생성 환경이 비교적 저온임에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 배기 수트가 크랭크케이스 수트에 비해 더 흑연화된 구조를 가지고 있지만 열처리 과정을 통한 고결정화로 배기 수트뿐만 아니라 크랭크케이스 수트 역시 흑연계 물질로의 재활용이 가능한 것으로 나타났다.

3.2 HRTEM 이미지 분석

3.2.1 열처리에 따른 배기 수트 분석

Fig. 3 (a)는 배기 수트를 2,000°C 초고온 전기로로 열처리 한 후의 수트를 관찰한 HRTEM 이미지이며, Fig. 3 (b)는 2,700°C로 열처리한 배기 수트의 HRTEM 이미지이다.

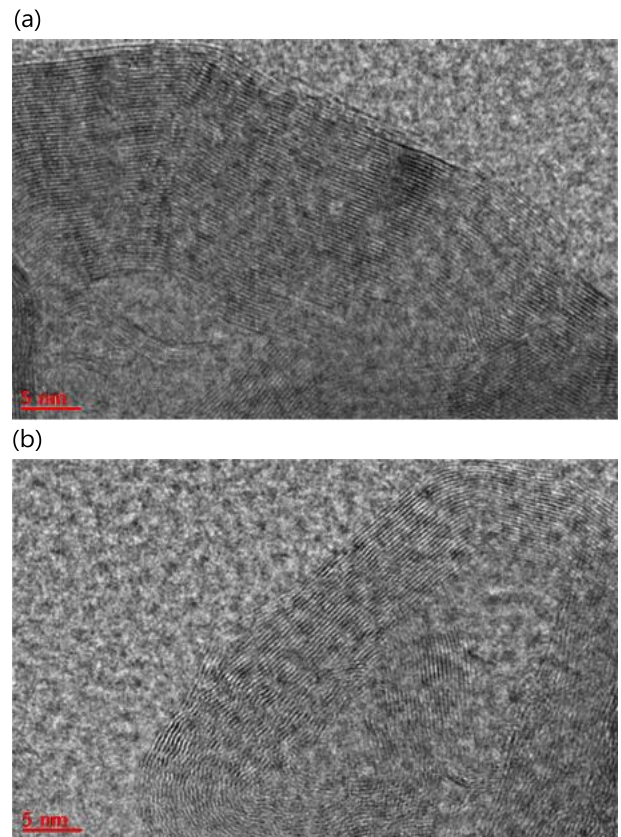


Fig. 3. HRTEM images of exhaust soot annealing condition (a) 2,000°C, (b) 2,700°C.

Fig. 3 (a), (b) 모두에서 열처리에 의해 수트의 나노 구조가 층상의 형태를 보이고 있고 상당한 흑연화의 진행을 확인할 수 있었다. 또한 Fringe는 길이와 방향을 쉽게 관찰할 수 있을 만큼 뚜렷하게 나타났다. 다만, 라만 분석 결과와는 달리 두 수트의 흑연화 정도의 차이를 확연히 구분하기에는 한계가 있었다.

3.2.2 열처리에 따른 크랭크케이스 수트 분석

Fig. 4 (a)는 크랭크케이스 수트를 2,000°C로 초고온 전기로로 열처리 한 후의 수트를 관찰한 HRTEM 이미지이며, Fig. 4 (b)는 2,700°C로 열처리한 크랭크케이스 수트의 HRTEM 이미지이다.

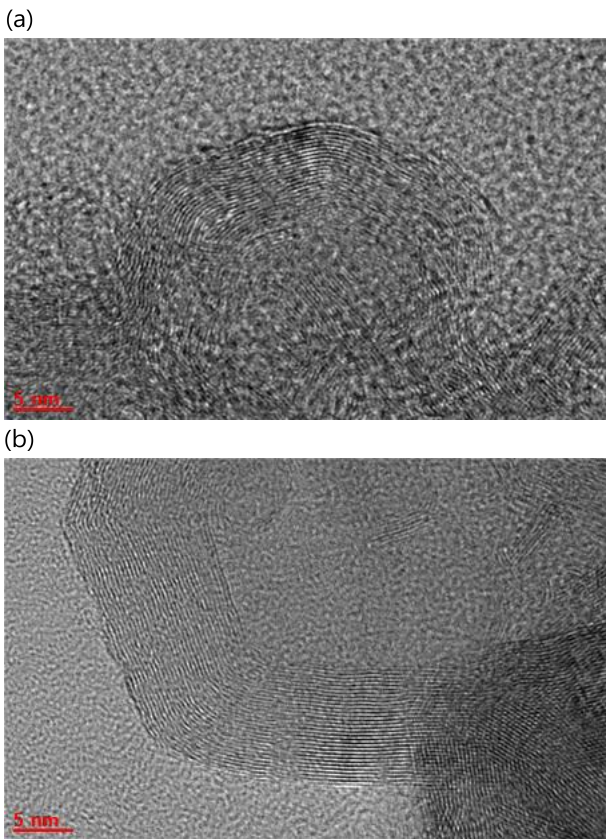


Fig. 4. HRTEM images of crankcase soot annealing condition (a) 2,000°C, (b) 2,700°C.

Fig. 4 (a)를 보면 흑연화가 어느 정도 진행된 것으로 보이지만, 배기 수트에 비해서는 흑연화가 덜 진행된 것을 확인할 수 있었으며, Fringe의 길이, 방향, 분포 등이 불규칙한 것으로 나타났다. 이는 크랭크케이스 수트의 생성 환경이 배기 수트에 비해 상대적으로 저온의 상태에서 생성되기 때문

에 구조가 발달하기 어려울 뿐만 아니라 크랭크케이스 수트는 생성된 후 크랭크케이스 내 윤활유에 섞여 있는 상태로 존재하기 때문에 다량의 불순물을 포함할 수밖에 없음에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 4 (b)의 2,700°C로 열처리한 크랭크케이스 수트의 이미지를 보면, 초고온의 열처리로 인해 Fig. 4 (a)에 비해 더 흑연의 구조로 발달한 것을 확인할 수 있었다.

하지만 Fig. 3과 Fig. 4 (b) 간의 흑연화 정도의 차이를 TEM 이미지만으로 명확히 표현하기에는 역시 한계가 있었으며, 이를 정량적으로 분석하기 위해 Digital Image Processing을 시도해 보았다.

3.3 Digital Image Processing 분석

표본 테이터의 신뢰성을 확보하고자 앞에서 분석한 동일한 이미지를 활용하였고, 본 분석법을 통해 이미지의 차이를 객관적 수치분석할 수 있기에, 연구의 신뢰성 확보가 가능하다. 본 절에서는 흑연계의 탄소가 가지는 Fringe의 길이와 곡률이 본 연구에서 대상으로 하는 배기 수트와 크랭크케이스 수트에는 열처리에 따라 어떤 상관관계가 있는지 확인하였다.

3.3.1 열처리에 따른 배기 수트의 Fringe 곡률 및 길이

Fig. 5와 Fig. 6은 2,000°C와 2,700°C로 열처리한 배기 수트의 HRTEM 이미지를 Digital Image Processing한 표본을 추출하여 1,000개의 Fringe를 곡률과 길이에 대한 분포를 나타낸 그래프이다. 2,000°C의 배기 수트의 평균 곡률은 1.32이며, 2,700°C의 배기 수트의 평균 곡률은 1.03으로 고온으로 열처리 한 후의 Fringe 곡률이 1에 가까워지는 것을 볼 수 있고, 2,000°C의 배기 수트 평균 길이는 1.24 nm이며, 2,700°C의 배기 수트의 평균 길이는 1.42 nm로 고온으로 열처리 한 후의 Fringe 길이가 증가 한 것을 볼 수 있었다.

3.3.2 열처리에 따른 크랭크케이스 수트의 Fringe 곡률 및 길이

Fig. 7과 Fig. 8은 2,000°C와 2,700°C로 열처리한 크랭크케이스 수트의 HRTEM 이미지를 Digital Image Processing한 표본을 추출하여 1,000개의 Fringe를 곡률과 길이에 대한 분포를 나타낸 그래프이다. 2,000°C의 크랭크케이스 수트의 평균 곡률은 1.45이며, 2,700°C의 크랭크케이스 수트의 평균 곡률은 1.28로 고온으로 열처리한 후의 Fringe 곡률이 1에 가까워지는 것을 볼 수 있었고, 2,000°C의 크랭크케이스 수트의 평균 길이는 0.63 nm이며, 2,700°C의 크랭크케이스 수트의 평균 길이는 0.85 nm로 고온으로 열처리한 후의 Fringe 길이가 증가 한 것을 볼 수 있었다.

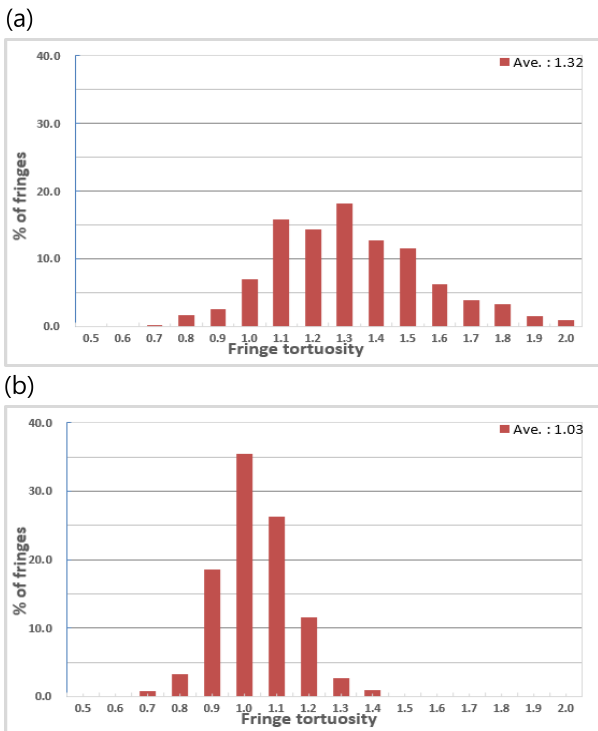


Fig. 5. Fringe tortuosity graph of exhaust soot annealing condition (a) 2,000°C, (b) 2,700°C.

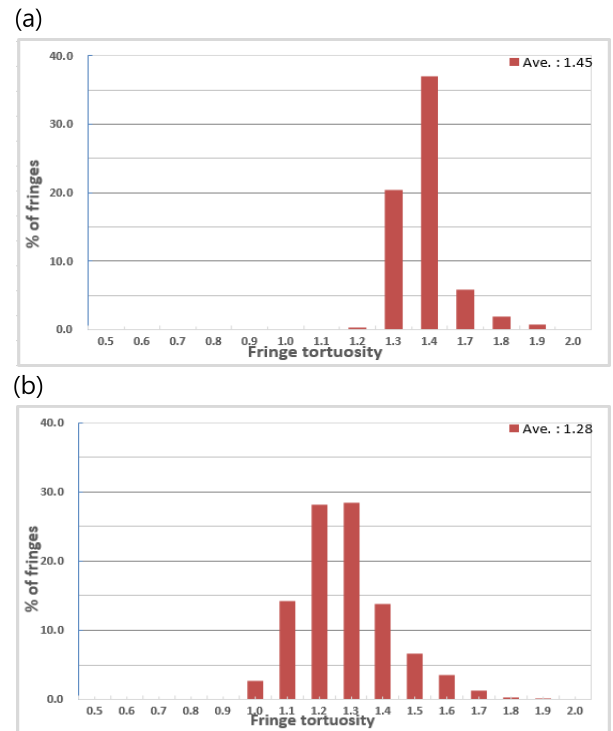


Fig. 7. Fringe tortuosity graph of crankcase soot annealing condition (a) 2,000°C, (b) 2,700°C.

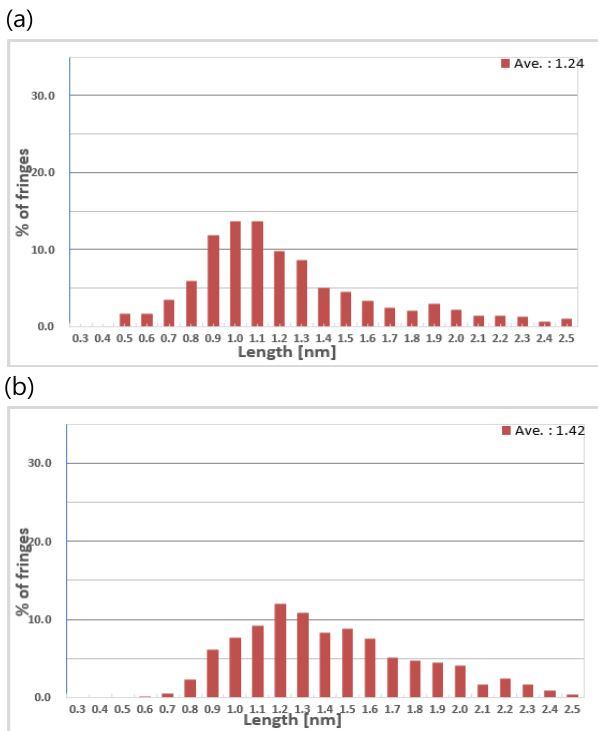


Fig. 6. Fringe length graph of exhaust soot annealing condition (a) 2,000°C, (b) 2,700°C.

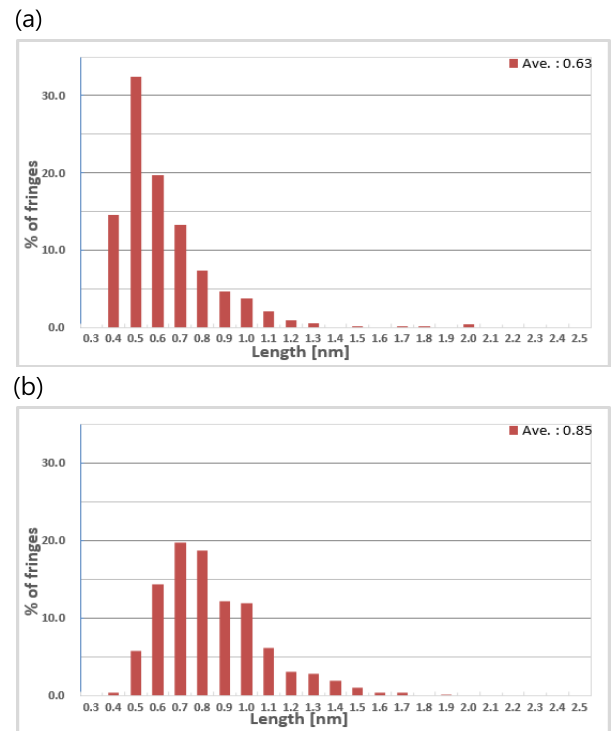


Fig. 8. Fringe length graph of crankcase soot annealing condition (a) 2,000°C, (b) 2,700°C.

3.3.3 열처리에 따른 수트의 평균 곡률 및 평균 길이 비교

다음 Table 3에 2,000℃와 2,700℃일 때 배기 수트와 크랭크케이스 수트의 평균 곡률과 평균 길이를 정리하였다. 2,000℃일 때보다 2,700℃일 때의 평균 곡률은 배기 수트와 크랭크케이스 수트 각각 약 22%, 약 12% 정도 1에 가까워졌으며, Fringe의 길이는 배기 수트와 크랭크케이스 수트 각각 약 15%, 약 35% 길어짐을 확인하였다. 배기 수트가 크랭크케이스 수트에 비해 열처리와 무관하게 평균 곡률 1에 가까우며 평균 길이가 길어 상대적으로 흑연화가 더 잘 진행된 것을 알 수 있다.

Table 3. Fringe tortuosity and length value of exhaust soot and crankcase soot on 2,000℃/2,700℃ annealing condition

Test items	Tortuosity	Length
Crankcase soot on 2,000℃	1.45	0.63
Crankcase soot on 2,700℃	1.28	0.85
Exhaust soot on 2,000℃	1.32	1.24
Exhaust soot on 2,700℃	1.03	1.42

4. 결론

본 연구에서는 실제 운항하는 선박의 Economizer에서 추출한 디젤 엔진의 배기 수트와 발전기의 윤활유 필터에서 추출한 크랭크케이스 수트를 각각 2,000℃와 2,700℃로 열처리 한 후, 라만분광법, HRTEM, Digital Image Processing을 활용하여 비교 분석 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 라만그래프 분석 결과, 크랭크케이스 수트에 비해 배기 수트가 더 흑연화 된 구조를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 2,000℃로 열처리 하는 것 보다 2,700℃로 열처리 할 경우 더욱 흑연의 구조로 발달하는 것으로 나타났다.

2) HRTEM 이미지를 통해 나노 구조를 확인한 결과, 배기 수트와 크랭크케이스 수트 모두 열처리에 의한 흑연화 구조가 잘 나타났다. 다만, 이미지를 육안으로 분석할 경우, 수트의 발생 개소와 열처리 온도 차에 의한 명확한 흑연화 정도의 차이를 구분하는 데는 한계가 있었다.

3) Digital Image Processing을 통해 HRTEM 이미지의 흑연화 정도를 정량적으로 분석한 결과, 배기 수트가 크랭크케이스 수트 보다 Fringe의 평균곡률이 1에 가깝고 평균길이가 긴 것으로 나타났으며, 이를 통해 배기 수트의 흑연화 정도가 높은 것으로 확인되었다. 또한, 상대적으로 고온인 2,700℃로 열처리한 샘플의 흑연화 정도가 정량적으로 높다는 것도 확인할 수 있었다.

4) 본 연구를 통해 기존의 연구결과에서 제시되었던 배기 수트의 재활용뿐만이 아니라, 선박용 디젤 엔진에서 버려지는 크랭크케이스 수트도 흑연계 물질로 충분히 재활용이 가능함을 확인할 수 있었으며, 향후 실제 재활용을 통해 그 성능을 검증할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(NRF-2019 R1G1A1005342), (재)한국해양대학교학술진흥회 재원으로 한국해양대학교의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

[1] Choi, J. H., I. S. Cho, J. S. Lee, S. K. Park, W. J. Lee, H. J. Kim, H. J. Chang, J. Y. Kim, S. C. Jeong, and S. H. Park(2016), Characterization of carbonaceous particulate matter emitted from marine diesel engine, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 30, No. 5, pp. 2011-2017.

[2] Clague, A. D. H., J. B. Donnet, T. K. Wang, and J. C. M. Peng(1999), A comparison of diesel engine soot with carbon black, Carbon, Vol. 37, No. 10, pp. 1553-1565.

[3] Ess, M. N., H. Bladt, W. Muhlbauer, S. I. Seher, C. Zollner, S. Lorenz, D. Bruggenmann, U. Nieken, N. P. Ivleva, and R. Niessner(2016), Reactivity and structure of soot generated at varying biofuel content and engine operating parameters, Combustion and Flame, Vol. 163, pp. 157-169.

[4] Eyring, V., H. W. Kohler, J. Van Aardenne, and A. Lauer(2005), Emissions from international shipping: 1. The last 50 years, Journal of Geophysical Research, Vol. 100, No. D17.

[5] Ferrari, A. C. and J. Robertson(2004), Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond, Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol. 362, No. 1824, pp. 2477-2512.

[6] IMO MEPC. Strategic plan for the organization for the six-year period 2018 to 2023(2017), MEPC Resolution A.1110(30).

[7] Kim, S. Y.(2020), A comparison study on structural characteristic of exhaust soot and crankcase soot for marine diesel engine, Korea maritime & ocean university graduate dissertation.

- [8] Lee, W. J.(2017), A study on recycling the waste soot produced from marine diesel engines, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 41, No. 6, pp. 543-548.
- [9] Lee, W. J., H. V. Kim, J. H. Choi, G. Panomsuwan, Y. C. Lee, B. S. Rho, and J. Kang(2018), Recycling waste soot from merchant ships to produce anode materials for rechargeable lithium-ion batteries, *Scientific Reports*, Vol. 8, p. 5601.
- [10] Lespade, P., A. Marchand, M. Couzi, and F. Cruege(1984), Caracterisation de materiaux carbonés par microspectrometrie raman, *Carbon*, Vol. 22, No. 4-5, pp. 375-385.
- [11] Park, S. H., J. H. Lee, Y. K. Kim, E. S. Sim, and H. D. Yang(2011), HRTEM Image Analysis Technique of Carbon Nanostructure of Soot Collected under Microgravity Conditions, *KOSCO Journal*, 42.
- [12] Sharma, V., D. Uy, A. Gangopadhyay, A. O'Neill, W. A. Paxton, A. Sammut, M. A. Ford, and P. B. Aswath(2016), Structure and chemistry of crankcase and exhaust soot extracted from diesel engines, *Carbon*, Vol. 103, pp. 327-338.
- [13] Vander Wal, R. L. and A. J. Tomashek(2004), Soot nanostructure: Dependence upon synthesis conditions, *Combustion and Flame*, Vol. 136, No. 1-2, pp. 129-140.

Received : 2020. 12. 31.

Revised : 2021. 01. 20.

Accepted : 2021. 02. 25.