

## 선박용 잔사유의 품질에 대한 기초연구

박희우<sup>1</sup> · 천강우<sup>2</sup> · 김진희<sup>†</sup>

(Received December 9, 2015 ; Revised February 2, 2016 ; Accepted March 16, 2016)

### Basic study of residual marine fuels quality

Hee-Woo Park<sup>1</sup> · Kang-Woo Chun<sup>2</sup> · Jin-Hee Kim<sup>†</sup>

**요약:** 최근 국제해사기구(International Maritime Organization, 이하 IMO) 해사안전위원회(Maritime Safety Committee, 이하 MSC) 제 93차 회의에서 ICS(International Chamber of Shipping) 및 IPTA(International Parcel Tankers Association)는 저유황유 수요 증가에 따른 연료유내 회석제의 사용량 증가 문제, 저인화점 연료유 사용 시 기관실내 연료유 기화에 의한 점화 문제, 선박 엔진 손상을 일으키는 연료유 등에 대해 보고하였다. 연료유 품질 문제와 관련하여 IMO 사무국에서는 전 세계에 공급되는 선박용 연료유 품질 모니터링 기관을 지정하였고 공급된 연료유가 MARPOL Annex VI regulation 14.8 (황분함유량이 0.5 % 이하)에 만족하는지 결정하기 위한 통신작업반 (Correspondence group)을 구성하여 연료유 품질 문제에 대응하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 선박용 연료유의 품질 문제 제기 및 이에 대한 대응을 위해 국내외에서 이루어지는 연구에 도움을 줄 수 있는 기초연구를 수행하였다. 기초연구를 위해 싱가포르 항구에서 수급되는 실제 선박용 연료유(잔사유)의 기본품질 데이터를 수집하였으며, 기본품질 데이터를 통해 연료유의 품질기준 (ISO 8217:2012) 미달 비율, 밀도분포 경향, 총발열량 및 연료유 내 성분 간 상관관계 등을 포함한 분석들을 수행하였다.

**주제어 :** 국제해사기구, 연료유 품질, 품질기준, 총발열량, 상관관계

**Abstract:** In the recent International Maritime Organization's (IMOs) Maritime Safety Committee's 93rd session, the International Chamber of Shipping and International Parcel Tankers Association addressed marine fuel oil quality problems: increasing diluents in marine fuel oil, ignition in engine rooms due to the low flash point of fuel oil, and marine fuel oils that can damage marine engines. To deal with these marine fuel oil quality problems, the International Maritime Organization secretariat appointed the worlds marine fuel oil monitoring institute and constituted a correspondence group to determine the fuel oil quality required by MARPOL Annex VI regulation 14.8 (sulfur content less than 0.5%). In this study, basic research that can help with responding to marine fuel quality issues and the IMO's work is conducted. In order to perform this basic research, the off-spec ratio related to the fuel oil quality standard (ISO 8217:2012), density distribution tendency, gross specific energy, and correlation between components in the fuel oil are analyzed through actual marine fuel oil (residual marine fuel) data from the Port of Singapore.

**Keywords:** International maritime organization, Fuel oil quality standard, Gross specific energy, Correlation

## 1. 서론

국제해사기구(International Maritime Organization, 이하 IMO) 해사안전위원회(Maritime Safety Committee, 이하 MSC) 제 93차 회의에서 ICS(International Chamber of Shipping)와 IPTA (International Parcel Tankers Association)는 선박기관의 정상운영에 악 영향을 미치는 저유황유 수요 증가에 따른 연료유내 회석제의 사용량 증가 문제, 저인화점 연료유 사용 시 기관실내 연료유 기화에 의한 점화 문제, 선

박 엔진 손상을 일으키는 연료유 등을 의제문서를 통해 보고한바 있다[1].

선박기관 정상운영과 더불어 연료유내 금속분오염 관련 문제도 보고되고 있다. 특히, 선박용 중유로서 부적합한 물리적 성상 및 금속분 등에 의한 오염은 저유황 연료와 같은 고급 유분을 생산하기 위한 정제과정(Refinery Process), 육상 폐유(Used Oil)의 회석 및 슬러지 오일(Slurry Oil)의 사용에 기인한다.

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8644-8646>): Machinery Technology Research Team, Korean Register of Shipping, 396-6, Jayu-ro, Gunsan-si, Jeollabuk-do, 573-540, Rep. of KOREA, E-mail: jhkim12@krs.co.kr, Tel: 070-8799-8366

1 Machinery Technology Research Team, Korean Register of Shipping, E-mail: phw10111@krs.co.kr, Tel: 070-8799-8915

2 Machinery Technology Research Team, Korean Register of Shipping, E-mail: kwchun@krs.co.kr, Tel: 070-8799-8745

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.

2015년 1월 1일 이후 배출통제지역(ECA, Emission Control Area)에 적용되는 연료유 황 함유량 제한[2]에 따라 선박용 중유의 기본품질에 대한 관심이 더욱 높아질 것으로 예측된다. 한편, MSC회기 중 주요항만을 운영하는 IMO 회원국들은 연료유 선적 전에 육상기반 샘플링과 품질시험에 대한 IMO 통합 지침을 개발하자는 제안을 한 바 있다.

위와 같이 연료유 품질과 관련하여 수많은 논의가 이어지고 있으며, IMO 사무국은 전 세계에 공급되는 연료유의 품질을 모니터링하기 위한 테스트 서비스 지정기관의 추가 지정과 함께 관련 내용의 위임사항(TOR, Terms Of Reference)을 갖는 통신작업법을 구성하여 저 품질, 고 위험군의 연료유에 대해 적극대응하고 있다[3]-[5].

MARPOL ANNEX VI에서 규정하는 배출통제지역은 당사국에 의해 요청되고 IMO에 의해 지정되며 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 등 대기오염물질의 배출방지, 저감 및 통제를 위한 해역을 말한다. 배출통제지역 외부를 운항하고 고유황 연료유를 사용하는 선박들은 배출통제지역 통과 시 0.1 m/m% 이하의 황을 함유한 연료유의 전환(Fuel Change-over)이 요구된다. 연료유 전환 운영이 필요한 선박은 두 종류의 연료유가 갖는 기본물성에 따른 기본시설을 갖춰줘야 하며, 시스템 보호를 위해 연료유의 점도와 온도에 대한 제어 방침이 마련되어야 한다[6]-[7]. 이 과정에서 온도차가 큰 이종의 연료유가 희석되면서 발생하는 왁스 결정화(Wax Crystallization), 저온상태에서의 저유황 연료유를 사용한 선박 시동 및 저 출력에 대한 문제가 해사산업계에 보고되고 있다[8]-[9].

위와 같이 연료유 품질에 대한 논의와 관심이 증대되고 있는 실정이나 국내 해운선사는 자사 선박에 선적되는 연료유 품질 현황, 저품질 연료유에 기인한 선박기관의 문제 그리고 규제에 기반을 둔 현실적인 선박 운영 방안들에 대한 대책이 미진한 상태이다.

본 연구는 선박 기관의 정상 운영과 깊은 관련이 있는 연료유(잔사유) 품질의 기초연구로서, 싱가포르 항구에서 선적된 선박 잔사유의 기본품질 데이터를 수집 및 분석하였다. 먼저 2.1장에서는 선적된 잔사유의 품질기준 미달에 대한 비율을 선박용 연료유의 기본품질 기준인 ISO 8217:2012를 토대로 분석하였다. 2.2장에서는 싱가포르항구 선박용 잔사유의 밀도분포 경향을 확인하였으며, 싱가포르항구 선박용 잔사유의 기본품질데이터를 이용하여 ISO 8217:2012 Annex E의 잔사유 총발열량 관계식을 통해 계산된 총발열량(Calculated Gross Specific Energy) 데이터와 ISO 18455에 명시되어 있는 잔사유의 측정된(Measured) 총발열량 데이터를 비교 분석하였다. 2.3장에서는 잔사유내 잔류 탄소분과 황분, 바나듐과 회분, 니켈과 회분 등 3가지 성분 간의 상관관계에 대해서 언급하였다. 마지막으로 3장에서는 분석된 결과로 본 연구의 요약을 제시하였다.

## 2. 선박용 잔사유 품질 분석

본 연구에서는 2006년부터 2013년까지 싱가포르 항구에서 선적된 선박용 잔사유(Residual Marine Fuel) RMG 380 등급에 대한 샘플 3,012개의 기본품질 데이터를 확보하여 품질경향을 분석하였다. 잔사유의 품질데이터는 Platts Bunkerworld (www.bunkerworld.com) 사이트에서 제공하는 Bunker Index (380cst)이며 본 연구에 활용된 Bunker Index는 Lloyd's Register FOBAS 및 Guardian Marine Ltd에 의해 시험된 데이터이다.

품질기준 미달(이하 Off-spec.)의 분석을 위한 국제기준은 ISO 8217:2012이다. 시험 데이터를 활용하여 Cragoe의 경험식을 통해 에너지 밀도(Energy Density)의 척도가 되는 총 발열량(Gross Specific Energy)을 계산하였으며, 이를 ISO/TR 18455에서 보고된 측정 데이터와 비교 분석하였다. 총발열량 데이터 비교에 사용된 싱가포르항구 선박용 잔사유의 계산된 총발열량은 RMG 380 및 RME 180 등급 잔사유 샘플들의 밀도, 수분, 회분, 황분 데이터를 통해 계산하였다. 또한, 본 절에서는 선박 기관 고장 사례의 분석에 활용할 수 있고 원유의 정제과정과 관련이 깊은 분석 항목들에 대한 데이터의 상관관계에 대해 보고한다.

### 2.1 Off-spec. 발생 비율 분석

선박 디젤 기관용 잔사유의 품질분석을 위한 시험항목을 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서 활용된 품질분석 대상연료의 시험 항목과 Off-spec. 기준은 ISO 8217:2012 표 2의 14개 항목이며, 다만 폐 윤활유(Used Lubricating Oil)의 연료유 희석 사용 여부를 판단할 수 있는 칼슘(Calcium), 인(Phosphorus), 아연(Zinc) 함유의 Off-spec. 기준은 ISO 8217:2005를 따른다. 황(Sulfur) 함유량은 당사국의 법적요건과 배출통제지역의 규제조건으로서 Off-spec. 검토대상은 아니며, 본 연구에서는 품질시험 항목 간의 상관관계를 분석하기 위한 기초 자료로 활용한다.

Table 1: Characteristics and test methods for residual fuel oil

Characteristics	Unit	Test method reference
Density @15°C	kg/m <sup>3</sup>	ISO 12185
Kinematic Viscosity @50°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104
Flash Point	°C	ISO 2719
Pour Point	°C	ISO 3016
Water	v/v%	ISO 3733
Sulfur	m/m%	ISO 8745
Al+Si	mg/kg	IP 501
Total Sediment Aged	m/m%	ISO 10307-2
Ash	m/m%	ISO 6245
Carbon Residue ; micro method	m/m%	ISO 10370
Vanadium	mg/kg	IP 501
Calcium		
Phosphorus		
Zinc		

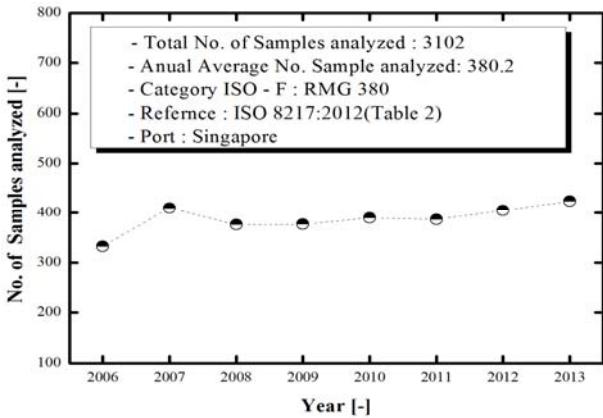


Figure 1: Sample number for Off-spec. analysis

Figure 1은 본 연구에서 분석된 잔사유 샘플들에 대한 수급 현황을 나타내고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 연도별 품질 경향분석에 사용된 잔사유 샘플 개수는 8년간 총 3,102개로서 연평균 약 380개의 데이터가 수집되었다. 이 잔사유 샘플은 연료유 취급 및 수급 시 비교적 일정한 온도와 습도의 아열대성 기후를 보이는 싱가포르 항구에서 수급되기 때문에 ISO 8217 기준 RMG 380 등급 선박용 잔사유의 연도별 대표성을 갖는데 충분한 데이터 개수로 판단된다.

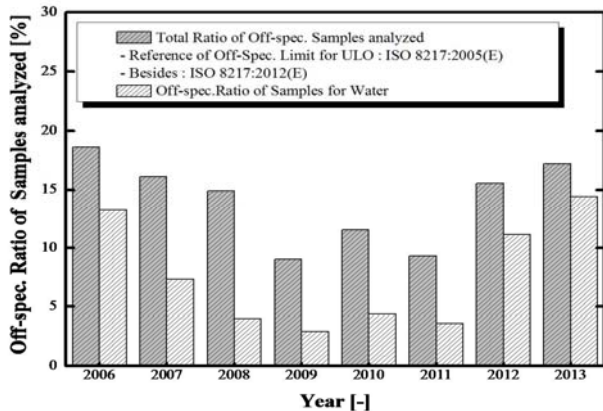


Figure 2: Ratio of Off-spec. samples for total test method (ISO 8217:2012) and water content

Figure 2는 수집된 샘플데이터의 시험항목 전체에 대한 Off-spec. 비율, 그리고 단일 수분함유량에 대한 Off-spec. 비율을 연도별로 나타내는 그림이다. 아래의 식 (1), (2)는 그림에 나타낸 Ratio of Off-spec. Samples와 Off-spec Ratio of Samples for Water 계산 방법이다.

$$\text{Ratio of Off-spec.} = \tag{1}$$

$$\frac{\text{No. of Off-spec. Samples by year}}{\text{No. of Samples by year}} \times 100 \text{ [%]}$$

$$\text{Off-spec Ratio of Sample for Water} \tag{2}$$

$$\frac{\text{No. of Off-spec. Samples for Water by year}}{\text{No. of Samples by year}} \times 100 \text{ [%]}$$

식 (1)에서 규제 대상인 황 함유량을 제외한 Table 1의 13개 시험 항목 중 품질기준 미달(Off-spec.)이 1개 이상 있는 경우 Off-spec. Sample로 계수된다. 식 (2)는 전체 샘플 개수에서 수분 함유량이 0.5 v/v%를 초과하는 샘플들의 연도별 비율을 나타낸다. 연도별 Ratio of Off-spec. Samples은 2009년까지 감소하고 있으며, 이후 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 선박 디젤기관 운용에 위험요소가 되는 품질기준 미달 연료유의 분석과 대책이 필요함을 의미한다. 잔사유의 수분 함유량 기준 초과에 의한 연도별 Off-spec. 비율도 연도별 Ratio of Off-spec. Samples와 비슷한 경향성을 보이고 있다. 비록 다수의 시험항목에 의해 기준미달이 중복되어도 1개의 품질기준 미달 샘플로 계수되는 Ratio of Off-spec. Samples와 직접 비교가 어렵지만, 2013년도에는 Ratio of Off-spec. Samples에 기여하는 수분 함유량 기준 초과 샘플 개수가 최소 80% 이상을 차지하는 것을 알 수 있다.

위와 같이 가장 높은 Off-spec. 비율을 나타낸 수분함유량은 경제적 손실에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단되어, 수분함유량에 따른 경제적 손실을 분석하였다. 아래의 Table 2는 계산에 사용된 데이터를 나타내고 아래 식 (3)은 수분 함유량에 따른 경제적 손실비용을 계산하는 식이다[10]. 계산에 사용된 잔사유의 평균 밀도는 수분이 포함된 상태에서 측정된 잔사유의 밀도이다.

Table 2: Economic loss index according to water content of fuel oil (Fuel grade: RMG 380, Year: 2013)

Characteristic	value	Unit
Annual mean density (@ 15 °C)	988.95	kg/m <sup>3</sup>
Annual mean content of water	0.38	v/v%
Water density (@ 15 °C, 1atm)	999.10	kg/m <sup>3</sup>
Average fuel price @ 2013 (RMG 380)	641.3	US\$

$$A = \frac{B \times C \times D \times 10}{E} \tag{3}$$

A : Economic loss due to water content (US\$)

B : Annual mean water content (v/v%)

C : Water density (kg/m<sup>3</sup>)

D : Average fuel price (US\$)

E : Annual mean density (kg/m<sup>3</sup>)

2013년 잔사유의 평균 수분 함유량은 0.38 v/v%이며 가장 높은 수분 함유량은 7.25 v/v%에 이른다. 수분 함유량에 따른 경제적 손실을 분석하기 위해 2013년 잔사유의 평균 밀도, 1기압 15 °C 액체 상태에서 수분의 밀도[20], 평균 유가(Bunker Index)를 기반으로 계산해 보면, 잔사유 손실비용은 100 metric tonne 당 약 246.1 US\$가 된다.

상기 계산은 수분함유량에 따른 연료유 손실의 단순 지표이며, 배출수(Bilge Water)처리 관련 IMO 규제에 대응하여 빌지 분리장치(Bilge Separator)의 운용에 따른 추가적인 경제적

비용이 수반된다[12]. 이는 선박용 잔사유의 수분 함유량과 관련된 선박용 잔사유의 생산, 유통 및 공급과정에서의 경제적 손실을 줄이기 위한 품질관리의 지속적인 연구와 관리가 필요함을 보여주고 있다.

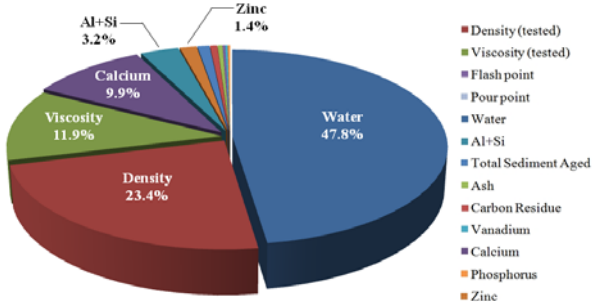


Figure 3: Off-spec. distribution for total test method (ISO 8217:12)

앞서 언급하였듯이 1개의 샘플에 적용되는 13개의 시험항목 중 1개 이상의 기준품질 미달이 있을 경우 Off-spec. Sample로 계수된다. 전체 샘플의 품질기준 만족 여부만으로는 상세분석에 어려움이 있어, 계수된 품질기준미달 시험항목 전체에 대한 분포를 Figure 3에 나타내었다. Figure 2에서 보인바와 같이 수분 함유량에 의해 기준 미달된 비율이 가장 높게 나타나고 있으며 선상에서의 연료유 취급 및 관리 그리고 기본 품질과 품명을 결정하는 점도와 밀도의 Off-spec.이 그 뒤를 이었다.

선박 연료유를 생산하는 일부 지역에서는 자동차의 크랭크실(Crankcase)에 사용된 폐윤활유(Used Lubricating Oil)를 선박 연료유에 희석하여 사용하고 있다[13]. 폐윤활유의 희석 여부에 대한 기준이 되는 칼슘(Calcium)의 함유량은 30 mg/kg 으로서 기준미달은 전체 시험 샘플 중 약 10 %에 달한다. 칼슘(Calcium)은 자동차 윤활유의 세제 첨가물(Detergent Additive)로 사용되며[14], 2행정 기관장치의 실린더 라이너 산화부식 방지를 위한 실린더 오일(Cylinder Oil)의 첨가제로도 사용된다[15]. 아연(Zinc)과 인(Phosphorus)은 칼슘과 함께 폐윤활유의 희석여부를 판단할 수 있는 성분으로 각각 1.4 %와 0.2 %의 기준미달 비율을 나타내고 있다.

Al과 Si(Al+Si)에 대한 함유량 시험은 정제과정에서 유동점 측정해 방식에 의해 발생하는 촉매 미세입자의 연료유 내 유입을 측정할 수 있는 방법이다. ISO 8217:2012에서는 연료유 내 Al+Si 함유량이 60 mg/kg 이상일 경우 기준미달에 해당한다. 정제과정에서의 품질관리와 직접적인 관련 있는 Al+Si은 전체 시험 항목 중 약 3.2 %의 Off-spec. 비율을 보이고 있다. IMO 규제에 의해 저유황·고급 유분의 수요가 늘어날 것으로 예측되며, 고도화된 정제시설에 의해 Al+Si 함유량 기준미달의 비율이 더 증가할 것으로 예측된다.

원유정제 과정에서 사용된 유동점측분해(Fluidic Catalytic Cracking) 장치의 촉매 담체는 균열과 침식에 의해 미분화된 입자성 물질이 생성되어 선박연료유에 포함되게 되며 이는 산화알루미늄(Oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)과 산화규소(Silicon

Oxide, SiO<sub>2</sub>)의 형태로 존재한다[16]. 이는 최대 수십 마이크론 정도의 크기이며, 다이아몬드 수준의 경도(Hardness)를 가지고 있어 연료유 공급을 위한 펌프, 피스톤 링 그리고 실린더 라이너를 마모시킨다[17]. Rolsted 등은 선박 226척에 대한 기관장치 손상사례를 조사하여 단위면적당 촉매 미세입자(No. of Catalyst Fine per Unit Area, CF/cm<sup>2</sup>)를 기준으로 실린더 라이너에 대한 허용한계를 연구하였고, 손상된 라이너 표면의 사진을 Figure 4와 같이 보고한바 있다[18].



Figure 4: Cat fines embedded into a cylinder liner surface

## 2.2 잔사유의 총발열량 비교

총발열량은 정상상태인 연료와 공기를 연소시켰을 때, 연료의 단위질량당 발생하는 열량을 의미하며, 증발잠열도 열량에 포함시킨다. 이러한 총발열량에 대해, 싱가포르 항구에서 선적된 선박용 잔사유의 계산된 총발열량 데이터와 ISO 18455에 명시되어 있는 잔사유의 측정된 총발열량 데이터를 비교하기 앞서, 총발열량에 주된 영향을 주는 인자로서의 밀도에 대하여, 밀도 데이터가 주로 분포하는 범위들에 대한 경향을 분석하였다. 다만 밀도에 따른 총발열량 데이터를 비교하였을 때, 싱가포르항구 RMG 380등급 잔사유의 계산된 총발열량 데이터만을 나타낼 경우, ISO 18455에 명시된 잔사유의 측정된 총발열량에 비해 밀도의 분포가 좁아서, 총발열량을 비교하는데 어려움이 있다. 이러한 한계점을 보완하고자, 싱가포르 항구에서 선적된 선박용 잔사유 중에서 RME 180 등급 샘플 86개에 대한 시험데이터도 추가적으로 나타내었다.

싱가포르 항구에서 선적된 선박용 잔사유 RMG 380 및 RME 180의 밀도범위 분포경향을 Figure 5에 나타내었다. Figure 5에서 잔사유 RMG 380의 밀도는 Range 1(980-985 kg/m<sup>3</sup>), Range 2(985-990 kg/m<sup>3</sup>), Range 3(990-995 kg/m<sup>3</sup>)의 범위 내에서 높게 분포하며, Range 2에서 가장 높은 분포를 나타낸다. 이러한 분포경향은 대부분의 싱가포르 항구 연료가 ISO 8217:2012 국제 기준에 명시된 잔사유 RMG 380의 밀도 최대 허용치(991 kg/m<sup>3</sup>)를 만족하고 있다는 것을 나타낸다. 다만, Range 3의 경우 ISO 8217:2012 국제 기준의 밀도 최대 허용치를 상회한다. 잔사유 RME 180은 965-970 kg/m<sup>3</sup> 밀도 범위에서 분포가 가장 높게 나타났으며, RMG 380과 마찬가지로 ISO 8217:2012 국제 기준에 명시된 밀도 최대 허용치(991 kg/m<sup>3</sup>)를 만족하였다.

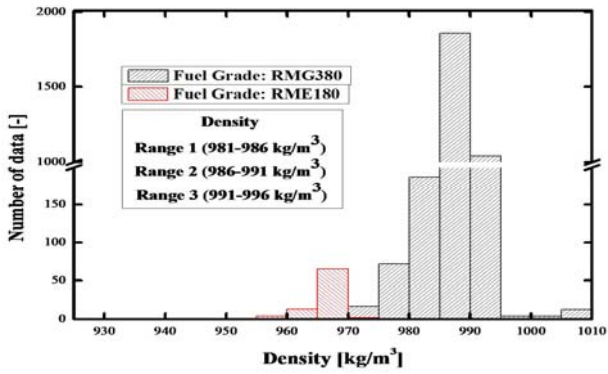


Figure 5: Distribution trend for density ranges

실제 선박용 잔사유의 시험데이터를 통해 계산된 총발열량 및 실제 측정데이터를 비교하기 위해, 싱가포르 항구 선박용 잔사유의 계산된 총발열량 데이터와 ISO 8217:2012 국제기준에 의하여 계산되고 측정된 총발열량 데이터를 비교하였다. ISO 8217:2012 Annex E에서 언급하는 잔사유의 총발열량 관계식을 통해 총발열량을 계산하였으며, 수식은 아래와 같다.

$$Q_{Rgv} = (52.190 - 8.802\rho_{15}^2 \cdot 10^{-6}) \cdot [1 - 0.01(w_w + w_a + w_s)] + 0.0942w_s \quad (4)$$

- $Q_{Rgv}$  : Gross specific energy (MJ/kg)
- $\rho_{15}$  : Density at 15°C (kg/m<sup>3</sup>)
- $w_w$  : Water content (m/m%)
- $w_a$  : Ash content (m/m%)
- $w_s$  : Sulfur content (m/m%)

다만, 싱가포르항구 선박용 잔사유의 수분 함유량 데이터 단위가 v/v%이기 때문에 식 (4)에 바로 적용하는데 어려움이 있다. 따라서 REFPROP Ver.9 프로그램 상에서 유체의 종류, 일반대기압 및 온도 데이터를 입력함으로써 연료유 밀도 측정 온도 (15 °C)와 동일한 온도조건에서 수분의 밀도 (999.1 kg/m<sup>3</sup>)를 구하였고, 식 (5)와 같이 수분 함유량 단위를 v/v%에서 m/m%로 변환해 계산을 수행하였다.

$$\frac{Water\ Density\ (15^\circ C)}{Fuel\ Density\ (15^\circ C)} \times Water\ Content\ (v/v\%) = Water\ Content\ (m/m\%) \quad (5)$$

ISO 8217:2012 Annex E에서 언급하는 잔사유의 총발열량 관계식을 통해 계산된 총발열량 데이터는 ISO/TR 18455 Annex A의 측정된 총발열량 (측정 장비명: Bomb calorimeter) 과 비교하였다. 싱가포르 항구 선박용 잔사유 총발열량과 비교하기 위해 사용된 ISO/TR 18455 Annex A의 잔사유 샘플 정보는 Table 3에 나타내었다.

싱가포르 항구에서 얻은 선박용 잔사유 RMG 380의 밀도 범위는 약 955~1,010 kg/m<sup>3</sup>이며, 선박용 잔사유 RME 180은 약 930~970 kg/m<sup>3</sup>이다. 이는 Table 3에 명시된 ISO/TR 18455 Annex A의 잔사유 밀도 범위를 벗어나지 않기 때문에, 위 계산된 총발열량 데이터와 비교하는데 무리가 없는 것으로 판단하였다.

Table 3: Specification of residual fuel oil (ISO/TR 18455 Annex A)

Characteristic	Value	Unit
Number of samples	258	-
Water Content	0.05 ~ 0.1 이하	m/m%
Density (@15 °C, 1atm)	912 ~ 1,032	kg/m <sup>3</sup>

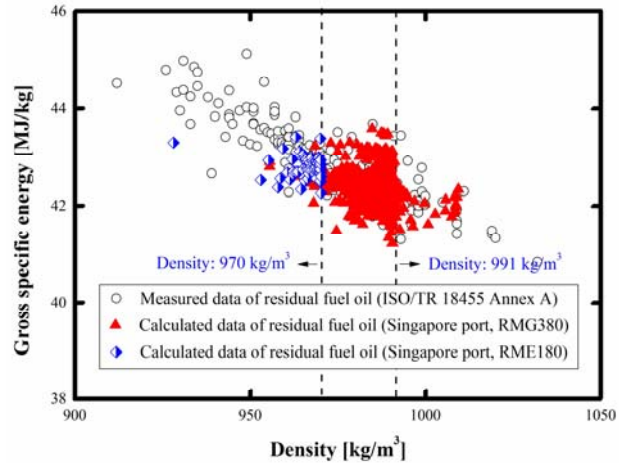


Figure 6: Variation of specific energy according to the change of density

Figure 6에는 밀도에 따른 싱가포르 항구 선박용 잔사유의 계산된 총발열량 데이터와 ISO/TR 18455 국제기준에 명시된 측정된 총발열량 데이터를 나타낸다.

싱가포르 항구 선박용 잔사유의 계산된 총발열량은 밀도가 높아짐에 따라 감소하는 경향을 보인다. 마찬가지로 ISO/TR 18455에 명시된 측정 결과도 밀도 범위 (kg/m<sup>3</sup>)는 다르지만 동일한 경향을 보였다.

밀도는 식 (4)에서 보듯이 총발열량을 결정짓는 변수임은 ABS에서 보고한바 있다. 밀도가 높은 연료는 탄소 고리가 길고 탄소간의 2중 3중 결합을 갖는 에텐계, 아세틸렌계 등 강한 탄소결합으로 인해 연소가 어려운 물질을 포함한다. 또한 열에 매우 안정적인 aromatic hydrocarbons (CNH(2N-6))를 다량 함유하고 있으므로, 높은 밀도의 연료유는 연소에 어려움이 있고 연소의 불안정과 함께 총발열량의 감소를 가져온다고 보고된 바 있다[19].

Figure 6의 총발열량 데이터는 상기 보고된 사례들과 실제로 일치하였다. 이는 연료유의 총발열량을 제어하기 위하여 밀도에 대한 연료유 품질 관리가 중요하다는 것을 의미한다.

### 2.3 잔사유의 성분별 상관관계 분석

잔사유 내 성분 간의 상관관계를 분석하기 위해, 선박기관 고장사례 분석에 활용 가능한 분석항목들을 선별하여 Figure 7 ~ 9에 나타내었다.

Figure 7은 연료 내 황분에 따른 잔류 탄소분 상관관계를 나타내며, 황분이 증가하면 잔류 탄소분이 선형적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 황분과 잔류 탄소분의 생성 메커니즘과의 상관관계에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

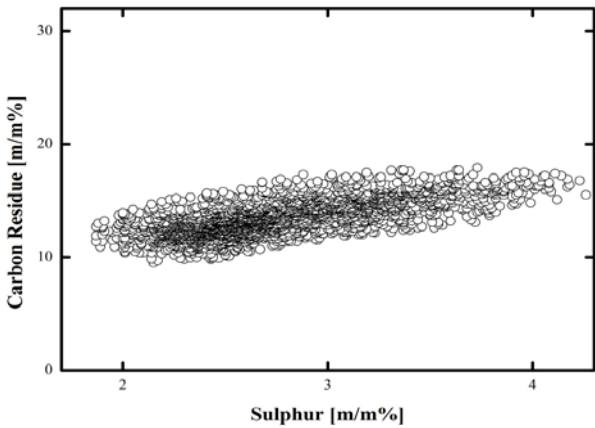


Figure 7: Correlation between sulphur and carbon residue content in marine fuel

회분(Ash)은 연소 이후 수분을 함유하지 않는 모든 잔류물로 정의되며 대부분 금속분에 의해서 형성된다. 이러한 회분은 바나듐(Vanadium)과 니켈(Nickel)의 함유량에 따라 Figure 8 및 Figure 9와 같은 상관관계를 나타낸다. 바나듐 및 니켈이 증가하면 회분이 함유량도 증가하는 경향을 보이는데, 이는 회분의 분석 방법(ISO 6245) 및 Table 4에 명시된 싱가포르항구의 선박용 잔사유 내 금속성분들의 특성과 관련이 있다.

Table 4는 본 연구에 사용된 잔사유 품질 분석 데이터에서 2006년부터 2013년까지 각 금속성분의 평균함유량과 금속 성분의 물리적 특성에 대해 조사한 결과[20]를 나타낸다. 회분 분석방법 (ISO 6245)에서 연료유는 775±25℃로 가열 과정을 거치면서 점화되어 태워지게 된다. 이 과정에서 높은 주변 온도 때문에 전기로에 가해진 온도보다 높은 연소열이 발생하고 연료유에 포함된 Na, Pb 등 끓는점이 상대적으로 낮은 금속들은 증발이 일어나면서 회분 형성에 관계되지 않을 것으로 판단된다. 회분이 주로 불연성 물질에 의해 형성되고 이 불연성 물질은 금속 산화물과 금속 황산염을 포함한다는 점을 감안하였을 때[17], 끓는 점이 상대적으로 높은 바나듐과 니켈이 회분 형성에 관계가 있으며 이 금속성분들의 함유량이 연소 후 회분의 잔류량과 관련 있을 것으로 판단된다.

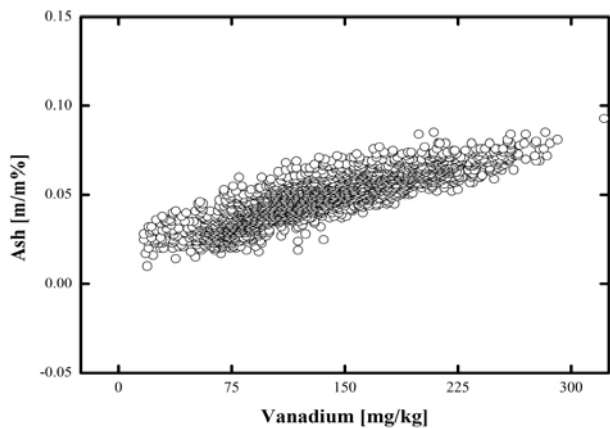


Figure 8: Correlation between vanadium and ash content in marine fuel

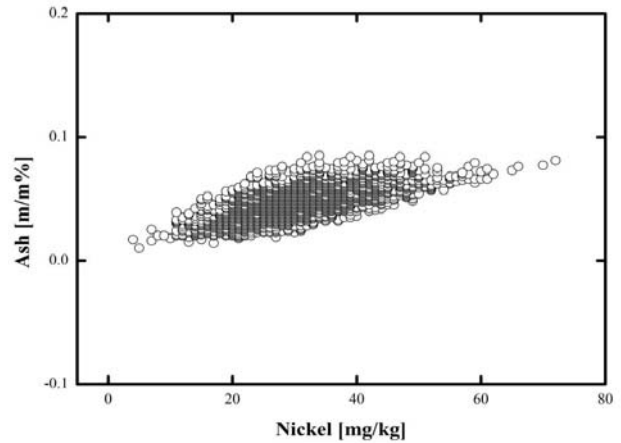


Figure 9: Correlation between nickel and ash content in marine fuel

Table 4: Characteristics of metal contents in marine fuel oil (Singapore port)

Metallic element	Na	Pb	V	Ni
Average content (mg/kg)	21.3	1이하	131.8	30.5
Boiling point (°C)	882.9	1,749	3,407	2,913

### 3. 요약

본 연구에서는 싱가포르 항구의 선박용 잔사유 품질 데이터를 수집하여 선박용 잔사유 품질 분석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 실선 선적 잔사유의 품질 데이터로 잔사유 전체 시험항목 및 수분함유량에 따른 Off-spec. 비율을 검토한 결과; 2009년부터 기준미달 잔사유 샘플이 증가하였고, 수분함유량에 따른 잔사유 손실의 경제적 비용은 100 metric tonne당 약 246.1 US\$가 되었으며, 전체 시험항목 중에서 수분함유량 기준미달에 대한 분포가 가장 높았고 밀도, 점도, 칼슘, 알루미늄+실리콘, 아연 등이 그 뒤를 이었다.

2) 싱가포르 항구에서 제공된 실제 선박용 잔사유의 밀도; 잔사유 RMG 380은 Range 2(985-990 kg/m<sup>3</sup>), 잔사유 RME 180은 965-970 kg/m<sup>3</sup>에서 가장 높은 분포를 나타냈으며, 이는 본 항구에서 제공된 잔사유 대부분이 ISO 8217:2012 국제기준의 최대 밀도 허용치(991 kg/m<sup>3</sup>)를 만족하고 있다는 것을 의미한다. 다만, 일부 허용치를 초과하는 데이터가 확인된다.

3) 실선 선적 잔사유의 계산된 총발열량과 ISO/TR 18455 국제기준에 명시된 측정된 총발열량의 비교; 밀도의 분포 범위는 달랐지만 동일한 경향이 확인된다.

4) 잔사유 내 함유량에 따른 성분 간의 상관성을 분석한 결과; 황분과 잔류 탄소분, 바나듐과 회분, 니켈과 회분의 잔사유 내 함유량은 서로 상관관계가 있음을 확인하였다. 황분과 잔류 탄소분의 상관관계에 대해서는 추가적인 연구가 필요하며, 회분에 대한 바나듐 및 니켈의 상관관계는 회분의 분석방법 및 연료유 내 금속성분 및 특성과 관련이 있는 것으로 판단된다.

본 연구결과는 선박용 잔사유 품질분석에 대한 국내외적 연구방향 모색에 도움을 줄 수 있는 기초연구자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 후속연구로 선박용 잔사유에 함유된 성분 간의 상관관계 및 해당 성분들이 엔진과 보조기기에 미치는 영향에 대한 상세한 분석이 요구된다.

## 후 기

“이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (친환경선박 TCS 시스템 구축, 선박배출 대기오염원(PM,BC) 기후변화 영향평가 및 저감기술 개발)”

## References

- [1] International Chamber of Shipping, “Safety Implications arising from the supply of Out of Specification Marine Fuels,” U.K, IMO MSC 93/INF.8, 2014.
- [2] MARPOL 73/78, “Regulations for the Prevention of Air Pollution from ship,” Annex VI Ch. III Reg. 14,
- [3] IMO Secretariat, “Application to be a provider of sampling and testing services for the IMO monitoring programme of the worldwide average sulphur content of fuel oils supplied for use on board ships,” U.K, IMO MEPC 67/4/2, 2014.
- [4] United States, “Progress report of the Correspondence Group on Assessment of Availability of Fuel Oil under MARPOL Annex VI,” IMO MEPC 67/4/5, 2014.
- [5] United States, “Progress report of the Correspondence Group on Assessment of Availability of Fuel Oil under MARPOL Annex VI-Comments submitted to the Correspondence Group,” IMO MEPC 67/INF.11, 2014.
- [6] MAN Diesel, MC/MC-C Engines, Edition 2010, Denmark: MAN Diesel, 2010.
- [7] EPA United States Environmental Protection Agency, “Global Trade and Fuels Assessment Future Trends and Effects of Requiring Clean Fuels in the Marine Sector,” U.S, EPA420-R-08-021, 2008.
- [8] USCG SECTOR NEW ORLEANS, “North American Emission Control Area(NA-ECA) Low Sulfur Fuel Oil Changeover Concerns,” U.S, MARINE SAFETY INFORMATION BULLETIN, vol. 15, no. 011, 2015.
- [9] USCG Inspections and Compliance Directorate, “Ultra Low Sulfur Fuel Oil & Compliance with MARPOL Requirements,” U.S, Safety Alert 2-15, 2015.
- [10] Exxon Mobil Marine Fuels & Lubricants, “ExxonMobil Issues Top-Tips to help Marine Operators Achieve Optimal Value From Fuel Purchases,” 2014.
- [11] NIST, “REFPRO - NIST Standard Reference Database 23,” U.S, version 9.0, 2010.
- [12] IMO, “REVISED GUIDELINES AND SPECIFICATIONS FOR POLLUTION PREVENTION EQUIPMENT FOR MACHINERY SPACE BILGES OF SHIPS,” U.K, RESOLUTION MEPC.107(49), 2003.
- [13] CIMAC, “RECOMMENDATIONS REGARDING FUEL QUALITY FOR DIESEL ENGINE,” Germany, CIMAC Recommendation Number 21, 2003.
- [14] ISO, “Petroleum products - Fuels (Class F) - Specifications of marine fuels,” ISO 8217:2012, 2012.
- [15] MAN Diesel & Turbo, Operation on Low-Sulphur Fuels - MAN B&W Two-stroke Engines, Denmark: MAN Diesel.
- [16] S. K. Jeon, J. G. Yang, J. H. Kim, and S. S. Lee, “Separation and recovery of Ce, Nd and V from spent FCC catalyst,” Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 8, no. 4, pp. 679-684, 1997 (in Korean).
- [17] CIMAC, “RECOMMENDATIONS CONCERNING THE DESIGN OF HEAVY FUEL TREATMENT PLANT FOR DIESEL ENGINES,” Germany, CIMAC Recommendation Number 25, 2006.
- [18] H. Rolsted, R. Charlotte, J. Ole, and E. Mats, “Onboard fuel oil cleaning, the ever neglected process how to restrain increasing cat-fine damages in two-stroke marine engines,” Denmark, CIMAC Congress 2013 PAPER no. 51, 2013.
- [19] American Bureau of Shipping, Notes on Heavy Fuel Oil, American Bureau of Shipping, USA, 1984. Available : [https://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/31\\_HeavyFuelOil/Pub31\\_HeavyFuelOil](https://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/31_HeavyFuelOil/Pub31_HeavyFuelOil), Accessed December 8, 2015
- [20] David R. Lide, CRC Handbook of Chemistry and Physics 88th edition, Taylor & Francis, 2008.
- [21] ISO, “Petroleum product - Calculation of specific energy of residual fuels from physical and compositional properties - Basic data,” U.K, ISO/TR 18445:1999 (E), 1999.
- [22] Bunker Index 380CST, [http://www.bunkerindex.com/prices/bixfree.php?priceindex\\_id=2](http://www.bunkerindex.com/prices/bixfree.php?priceindex_id=2), Accessed November 2, 2015.